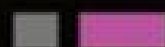




制造业先进技术系列

输变电设备物联网

关键技术



曹敏 等编著

随时、随地、随心阅读



制造业先进技术系列

输变电设备物联网 关键技术

曹敏 等编著

 机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS

版权信息

书名：输变电设备物联网关键技术

作者：曹敏;黄星;周年荣;等

排版：Clementine

出版社：机械工业出版社

出版时间：2019-11-21

ISBN：9787111636212

本书由机械工业出版社授权北京当当科文电子商务有限公司制作与发行。

— · 版权所有 侵权必究 · —

前言

本书的内容提炼于国家高科技研究发展计划（863计划）“基于物联网技术的输变电设备智能监测与全寿命周期管理（编号：2011AA05A120）”、国家自然科学基金项目“架空输电线覆冰预警与除冰决策优化的数据驱动方法研究（编号：61364024）”。

在国民经济高速发展和人民生活高度依赖电力的现代社会中，电力是现代城市群及全社会经济运行的基础。随着超、特高压输电工程的建设和发展，互联电网的覆盖区域逐步扩大，输变电设备运行安全对电网安全可靠运行的影响更为突出。根据近10年的电网事故统计数据，输变电设备自身故障以及自然灾害造成的电网事故占电网事故的比例超过50%，对电网安全可靠运行带来了重大影响。对输变电设备的运行状态进行监测、故障诊断、状态评估及全寿命周期管理，对提高输变电设备的运行可靠性与利用率，实现设备的优化管理具有重要的科学意义和应用价值。

提高输变电设备的运行可靠性与利用率，是智能电网发展的内在动力之一。智能电网作为重要的基础设施，具有广泛互联的特征。输变电设备信息的深度互联，是智能电网的重要目标之一，是实现电网资源优化配置的基础。输变电设备信息的互联，是智能电网中物与物互联最为朴素的表征，因而智能电网被普遍认为是物联网应用的最为重要的领域之一。输变电设备物联网是智能电网的网络属性的丰富和拓展，是实现输变电设备智能化的重要技术支撑，对于提升输变电设备与电网安全稳定运行性能以及电网运行风险的管控，具有非常重大的科学和现实意义。

输变电设备物联网是智能电网与物联网技术的有机结合，基于物联网技术特点及优势，结合电力生产现状，将物联网技术应用于输变电设备智能监测与全寿命周期管理，创新性地建立输变电设备物联网，可有效实现智能电网中输变电设备信息的广泛互联互通。建立覆盖输变电设备的基本资产信息、状态信息、环境信息和地理信息的全景信息平台，实现基于全景信息的输变电站设备智能监测，进而实现基于输变电设备智能监测的设备全寿命周期成本、寿命可靠分析，面向对象应用功能智能推送，提高输变电设备的检修水平和管理水平，将对智能电网发展起到重要促进作用。

本书围绕输变电设备物联网关键技术，以构建信息感知、自治高效和安全可信的输变电设备物联网，实现智能电网中输变电设备深度互联和智能管控为目标，重点阐述了以下关键技术问题的解决方法：①输变电设备物联网体系架构与具备本体属性、资源属性和环境属性的输变电设备全景信息规范体系；②输变电设备物联网的监测体系及优化；③输变电设备高级应用的统一与融合。重点介绍了前沿技术中的物联网技术与输变电设备管理的融合、输变电设备物联网架构技术、输变电设备状态监测与感知网络、输变电设备物联网全景信息集成技术、输变电设备物联网智能应用技术、输变电设备物联网验证与示范应用等方面的研究。书中提出了多种具有创新性的方法、算法及策略，介绍了新型传感器、设备物联感知装置、信息处理平台、智能应用系统，以及在国内首次构建的省网级的输变电设备物联网的关键技术特征，详细阐述了如何实现输变电设备身份标识、全景信息集成、状态动态评估、风险评估、寿命预测、全寿命周期闭环管理与面向对象的智能应用。另外，本书还详细介绍了示范工程中输变电设备可靠性、寿命评估等物联网试验方法，归纳了设备测试规范以及输变电设备物联网设备、系统测试方案，解释了关键技术并对应用效果进行了验证分析。书中介绍的这些成果，为今后物联网技术在输变电设备领域广泛应用打下了坚实基础。

本书的研究内容不仅将提升电力行业的信息化水平和设备管控能力，而且会带动RFID、智能传感与监测装置、网络通信、软件及信息服务等领域的产业发展，可帮助培育电力物联网领域的企业，推动物

联网技术的产业化进程。随着输变电物联网示范作用及影响力的扩大，本书内容形成了《电力物联网体系架构规范》等4项电力行业标准，预计在几年内将形成电力物联网完整的产业链条和产业体系，进一步推动电力物联网的产业化发展。

由于编者水平有限，书中难免有疏漏和不足之处，恳请广大读者批评、指正。

编者

第1章 绪论

在国民经济高速发展和人民生活高度依赖电力的现代社会中，电力是现代城市群及全社会经济运行的基础。随着超、特高压输电工程的建设和发展，互联电网的覆盖区域逐步扩大，输变电设备运行安全对电网安全可靠运行的影响更为突出。根据近10年的电网事故统计数据，输变电设备自身故障以及自然灾害造成的电网事故占全部电网事故的比例超过50%，给电网安全可靠运行带来了重大影响。对输变电设备的运行状态进行监测、故障诊断、状态评估及全寿命周期管理，对提高输变电设备的运行可靠性与利用率、实现设备的优化管理具有重要的科学意义和应用价值。

提高输变电设备的运行可靠性与利用率，是智能电网发展的内在动力之一。智能电网作为重要的基础设施，具有广泛互联的特征。输变电设备信息的深度互联，是智能电网的重要目标之一，是实现电网资源优化配置的基础。输变电设备信息的互联，是智能电网中物与物互联最为朴素的表征，因而智能电网被普遍认为是物联网应用的最为重要的领域之一。输变电设备物联网是智能电网的网络属性的丰富和拓展，是实现输变电设备智能化的重要技术支撑，对于提升输变电设备与电网安全稳定运行性能以及电网运行风险的管控，具有非常重大的科学和现实意义。

建立输变电设备物联网的目标之一，是实现对输变电设备信息的智能感知与状态的智能评估。输变电设备状态在线监测与故障诊断技术是输变电设备物联网的技术基础，国内外在变电站高电压设备在线监测方面已有30余年的研究历史，包括电力变压器、高压开关设备、高压互感器及避雷器等设备的绝缘及机械状态在线监测技术已在电网中获得广泛应用，我国部分地区电网公司已建立了全站设备多参数、多功能在线监测系统。输电线路在线监测技术包括线路覆冰、污秽、过电压、雷电流、线路舞动、铁塔机械性能以及线路视频监测等方面技术，在我国经历了2008年的南方冰冻雨雪灾害以后，输电线路在线监测技术得到了更多的重视和应用。随着我国电力系统的飞速发展以

及智能电网概念的提出，在发电、输电、配电、用电的各个环节应用智能一次设备和现代在线监测技术已成为未来电网发展研究的热点。

建立输变电设备物联网的最终目标，是通过输变电设备信息的广泛互联，实现输变电设备的全寿命周期管理。输变电设备是电网的核心资产，在满足技术可靠性的前提下追求资产全寿命周期管理成本最优，实现资产经营效益最大化，是建设现代化、先进型电力企业的需要。输变电设备状态监测由于可实时反映设备运行状态，是输变电设备状态评价及全寿命周期管理的重要手段。目前我国各级电网公司已全面开展输变电设备状态检修工作，包括对设备状态监测、评估、风险及资产全寿命周期管理等相关探索实践。但与智能电网下的设备监测智能化、检修状态化、运维高效化目标相比，仍然存在许多问题，主要表现在以下几方面：

1) 输变电设备状态监测性能水平不高，信息不能共享，时常出现数据不可靠、数据不能真实反映设备状态的问题，甚至会发生误报、拒报等无法正常运行的情况，难以满足智能电网对设备状态信息的准确获取与网络化交互的需要。

2) 由于输变电设备类型及监测参数多，信息来源及信息构成复杂，设备信息不完善，评估决策技术水平参差不齐，而国内外在输变电设备的信息体系、状态监测与综合评估体系等方面都缺乏统一的技术规范与标准。

3) 对用于设备检修的资产管理，尚未有有效的方法，检修资产的领用、归还、定期检验等工作依然以纸质文档管理为主，效率低下，且不能实现资产信息的数据共享，超期未检、漏检等现象难以有效控制，缺乏基于输变电设备智能监测的设备全寿命周期成本、寿命分析精益化管理，给设备运行、检修、维护工作造成安全隐患。

输变电设备物联网是智能电网与物联网技术的有机结合。基于物联网技术的特点及优势，结合电力生产现状，研究基于物联网的输变电设备智能监测与全寿命管理技术，将物联网技术应用于输变电设备智能监测与全寿命周期管理，创新性地建立输变电设备物联网，可有效实现智能电网中输变电设备信息的广泛互联互通。建立覆盖输变电设备的基本资产信息、状态信息、环境信息和地理信息的全景信息平台，实现基于全景信息的输变电站设备智能监测，进而实现基于输变电设备智能监测的设备全寿命周期成本、寿命可靠分析，面向对象应

用功能智能推送，提高输变电设备的检修水平和管理水平，将对智能电网发展起到重要促进作用。

1.1 应用基础与关键技术

（1）输变电设备状态监测技术

经过前期对输变电设备状态监测技术进行深入研究，研制出变压器油中溶解气体、局部放电、油中微水、铁心接地电流、内部油温、套管介损等参数的监测传感器及综合监测系统；研制出变电站互感器及避雷器介损监测系统、断路器及全封闭组合电器局部放电监测系统；研制出10~500kV输电线路监测系统，实现了输电线路温度、覆冰、污秽、舞动以及铁塔腐蚀、位移与倾斜程度等参量的监测。

（2）输变电设备状态评估、检修决策与全寿命周期管理技术

深入研究了输变电设备状态评估、风险评估和检修决策技术，建立了变压器的状态评估指标体系，提出了基于可拓物元理论的分级状态评估方法，实现了对变压器整体及部件状态的分级评估；对电力设备资产进行全寿命周期成本分析，在此基础上提出了基于设备全寿命周期成本（LCC）和可靠性水平的电网关键设备运维策略，兼顾可靠性和经济性，确定电网关键设备的检修顺序、检修时间和检修方式，实现设备的个性化检修。已研制出输变电设备综合评估与检修辅助决策系统，具备输变电设备故障诊断、状态评估、可靠性评估、寿命预测、状态检修决策等功能。

（3）物联网关键技术

“基于RFID技术的湖南省区域性汽车道路交通信息资源平台”，采用射频识别技术、专用短程通信技术、网络技术、自动控制技术、计算机技术等实现了车辆行驶状态下的自动识别、数据采集、数据传输与数据加工处理功能；建立了“汽车数字化标准信源”体系，开发了“汽车数字化标准信源”的相关配套设备；在EPC编码方面，建立了车辆自动识别管理系统的数据字典；深入研究了无线传感网体系架构和通信规约，研制出无线传感网实验平台以及管理软件。

（4）网络通信关键技术

通过对智能电网需求和传感器网络、无线自组网、NGN、4G在内的通信网络技术进行深入研究，在无线通信网络架构、电力通信标准等实现方面积累了关键技术，包括：IEEE802.11和IEEE802.16、IEEE802.15、IEC60870-5-101、IEC60870-5-104协议栈；在无线Mesh网络架构研究中提出了“虚拟层次化规则网络”结构、设计了网络拓扑结构、无线信道分配算法；掌握了目前的电力通信网络结构设计、设备选型、参数配置，重点包括实现可靠传输、保障传输业务QoS、提升网络资源利用率等方面关键技术。并研制出电力230MHz无线专网，具有远距离、点对多点、网络拓扑自组织能力的大容量宽带无线通信设备。

(5) 智能变电站的信息集成平台关键技术

基于IEC61850标准，对智能变电站内的信息进行了分类，分析了其通信网络中的数据信息流；通过对变电站内所有对象进行统一建模，在站控层构建信息一体化平台，完成信息汇总、处理、上传以及展示等功能，实现了变电站内部各层之间以及变电站与上级控制中心之间的实时高效通信。这对物联网背景下的输变电设备分层分布式体系架构的建立，理清变电站内各种设备的种类、属性、运行状况等信息，全景信息的建模等打下了坚实的基础。

1.2 平台建设

云南电网公司已建立了完善的通信网络核心网络平台，采用光纤网络覆盖了所有变电站，支撑了调度数据业务以及部分在线监测业务的通信传输。同时，采用GPRS方式对部分重点输电线路实行了在线监测，建设了线路在线监测与电信公网的通信前置机等通信装置，为进一步完善通信网络创造了基础平台。另外，云南电力科学研究院建设了通信网络测试平台，也为通信测试验证提供了条件。

该平台已建成了仿真型变电设备故障模拟实验平台，可在仿真型的变压器和GIS断路器上进行多种故障的模拟实验，为故障机理研究、确定故障诊断方法与状态评估策略等提供有力的数据支撑。

输变电设备状态监测、预警、故障分析诊断的一体化平台整合了生产管理系统、输电线路在线监测系统、变电站在线监测系统、雷电定位系统、气象监测系统等的的基础数据，实现了输变电设备状态统一

监测和故障预警。同时，以输变电设备为对象，整合了各个子系统的数据，实现了设备台账信息、技术参数、缺陷信息、试验报告信息、在线监测信息、气象信息和环境信息的关联分析和诊断，为项目顺利实施奠定了坚实的基础。

1.3 工程应用基础

云南电网建立的技术监督数据分析中心系统是云南电网输变电设备状态监测、预警、分析和诊断的一体化集成平台。该系统在云南电网公司得到广泛应用，在变电站在线监测系统方面，接入了云南电网20个变电站中69台油色谱在线监测装置和96台容性设备在线监测装置的数据，并整合了35kV及以上电压等级的变电设备台账、缺陷信息，将设备运行风险与运行年限、历史缺陷、家族缺陷、试验报告信息进行了关联分析与预警；在输电线路在线监测系统方面，建立了统一的通信标准和接口规范，实现了覆冰、山火、大风、雷电、极端天气、防盗的预警与关联分析。目前在滇东北、滇西、滇南等气候恶劣或高风险的输电线路路上安装覆冰、山火、大风、防盗监测点100多个，接入云南省气象台1190个监测站、120个县级气象台的气象监测、预报数据，实现气象数据与电网设备的关联。

2005年，云南电网公司开始进行基于电网状态评估的风险防范管理体系研究，并开发出相应的系统。目前已经完成70多个变电站的变压器、断路器、互感器、避雷器、电抗器的风险评估，完成20条输电线路的风险评估，并将风险评估与电网运维联动，建立了风险台账和分层分级的风险管控体系，制定了《输变电设备主要风险与重点维护策略》技术规范，实现了输变电设备风险的管控。

开展了数字化变电站和智能变电站的研究与开发。2006年，云南电网研究并建设了国内第一个数字化变电站——翠峰变电站。2009年开始建设4个智能变电站，实现了变电站的测控、保护、录波、监测信息的共享和功能整合。

1.4 技术线路

本书的目的在于将物联网技术应用于输变电设备智能监测与全生命周期管理，开发基于物联网的设备全景状态监测评估与全生命周期

智能化管理技术支撑平台，在示范工程涉及的变电站和输电线路建成具有全面感知、物物互联、人机互动、可靠传递，以及分布式与智能处理功能等物联网特征的输变电设备物联网，实现输变电设备智能监测与设备全寿命周期成本、寿命分析精益化管理。

紧密结合上述研究目标，从六个方面开展相关关键技术研究开发。研究的总体技术路线如图1-1所示。

1) 通过任务1构建输变电设备物联网体系，建立输变电设备身份标识及输变电设备的全景信息模型。

2) 在任务1基础上，开展任务2研究，建立融合电力光纤、电力线载波、无线宽/窄带网络、卫星通信的输变电设备物联网信息传输通信网络，通过基于应用的新型通信模型和通信接口的开发，实现了异构通信网络间的无缝连接和各类传感器、监测设备、移动终端等的无缝接入。

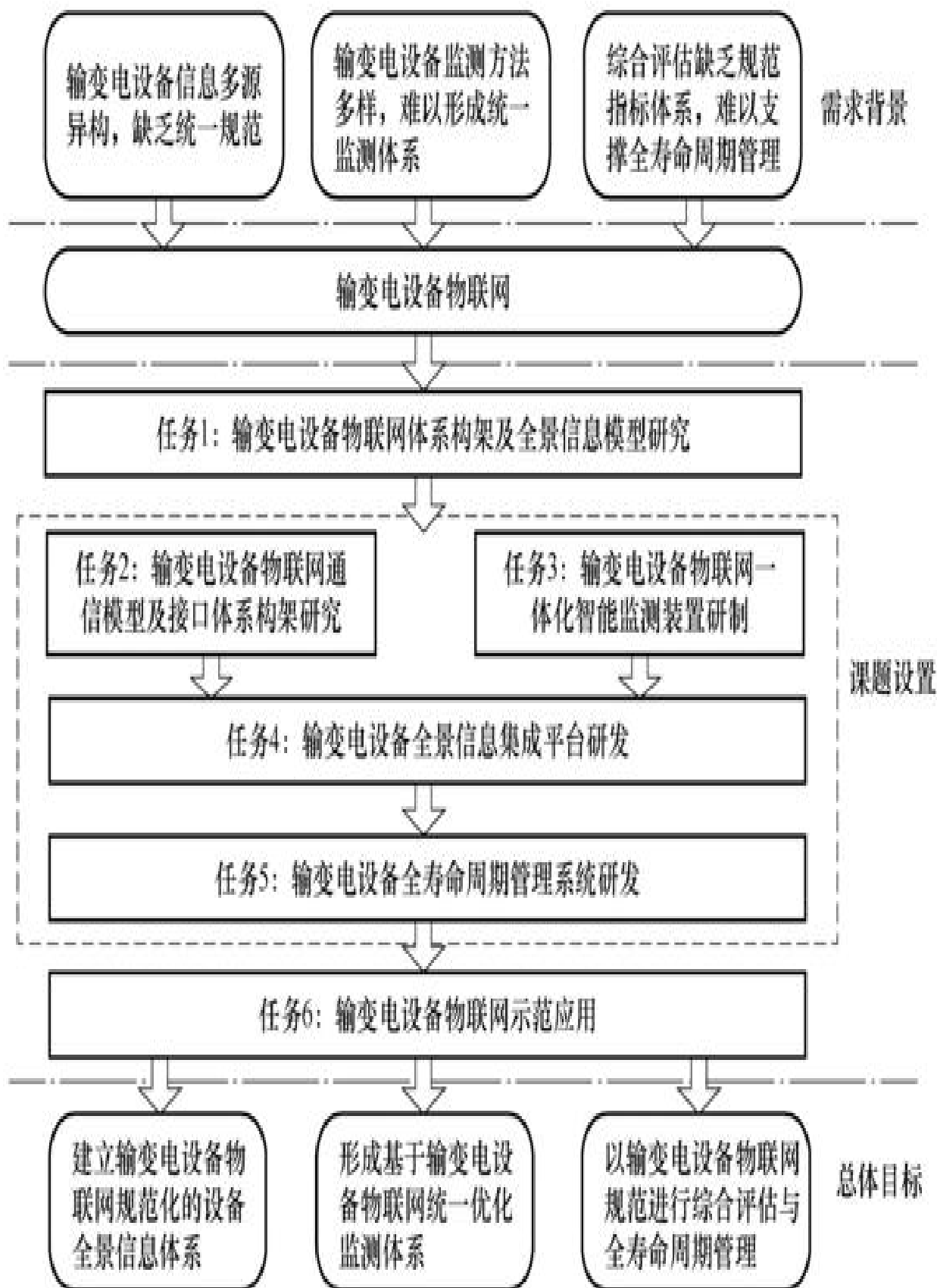


图1-1 研究总体方案

3) 在任务2研究基础上,开展任务3的研究,研究输变电设备之间的信息感知与分布式处理策略,开发具有多类型接口的输变电设备物联网一体化智能监测装置,实现多特征量的关联分析处理,实现输变电设备监测信息感知。

4) 任务4研发输变电设备物联网全景信息集成平台,为任务5提供全景信息源。

5) 在任务5数据平台支撑下,开发基于物联网技术的设备全景状态监测评估与全寿命周期智能化管理技术支撑平台,整合多源异构数据,研究基于物联网信息感知的智能综合诊断模型与方法、输变电设备动态预警策略、设备可靠性动态评价模型以及设备全寿命周期成本及寿命分析模型,实现对输变电设备状态及可靠性的动态评价,实现了设备动态预警、可靠性动态评价,为输变电设备的智能化管理提供了有效手段。

6) 在上述任务基础上,实现输变电设备物联网在云南电网公司±800kV楚雄换流站、110~500kV电压等级的12个变电站及3条输电线路的示范应用,提升输变电设备全寿命周期精益化管理水平。

1.5 研究范围

围绕输变电设备物联网关键技术问题,以构建信息感知、自治高效和安全可信的输变电设备物联网为目标,重点解决三方面关键技术问题:①输变电设备物联网体系架构与具备本体属性、资源属性和环境属性的输变电设备全景信息规范体系;②输变电设备物联网的监测体系及优化;③输变电设备高级应用的统一与融合。围绕上述三方面关键技术问题,分六个方面对输变电设备物联网开展研究。

(1) 输变电设备物联网体系架构及全景信息模型研究

建立输变电设备物联网的设备全景信息模型及其标识体系,提出相对完备的、面向演进的,包含智能感知层、数据通信层、信息整合层以及智能应用层的输变电设备物联网分层分布体系架构及其技术规

范，解决多源异构输变电设备信息的规范与扩展问题，即：输变电设备物联网“全面感知”特征的规范与扩展问题。

（2）输变电设备物联网的通信模型与接口体系构架研究

针对输变电设备物联网的传输需求，研制“输电线路监测无线路由器”以及“在线网络监测管理平台”，研究并制定全景信息的通信模型与接口体系构架，制定满足所要求的输变电设备物联网通信技术规范及信息安全规范。解决输变电设备物联网的异构网络自治协同问题，即：输变电设备物联网“可靠传递”特征的实现问题。

（3）输变电设备物联网一体化智能监测装置研究

建立统一规范的输变电设备物联网分布自治的监测体系，研制具备一体化、智能化、通用化及分布式处理特征的输变电设备一体化智能监测装置，开展电源管理策略及智能化监测策略研究，制定输变电设备物联网一体化智能监测装置的技术规范。解决输变电设备物联网分布自治监测与一体化标准问题，即：输变电设备物联网“分布式处理与物物互联”特征的技术实现及标准问题。

（4）输变电设备全景信息集成平台研究

针对输变电设备全景信息的多源、海量、异构、实时等特征，研究全景信息的集成、聚合、数据挖掘、公共安全、接入与交互等技术，提出满足输变电设备物联网技术要求的全景信息集成平台体系结构，搭建面向智能应用的全景信息集成验证与示范平台，并制定相关技术规范。解决输变电设备多源异构全景信息的融合及无缝集成问题，即：输变电设备物联网“全面感知”的信息融合及平台集成技术实现问题。

（5）输变电设备全寿命周期管理系统研发

建立基于运行工况、环境信息、地理信息和设备状态的多维综合评估方法；完成基于输变电设备物联网的实时状态评估、预警模型，设备检修资源的智能调配和安全防护策略的建模；制定输变电设备全寿命周期管理流程规范及评价指标体系；开发涉及输变电设备采购、交接、运行、维护和退役处置等多个环节的全寿命周期管理系统。解决输变电设备物联网系统中的全寿命周期管理指标体系与评估策略问

题，即：输变电设备物联网“全景信息智能处理与闭环决策”特征的技术实现问题。

(6) 输变电设备物联网验证与示范应用研究

选取典型的变电站及输电线路，完成示范工程建设，展现以“全面感知、物物互联、可靠传递，以及强大的智能和分布式处理功能”为特征的输变电设备物联网系统，创新输变电设备的运维管理模式。

1.6 研究目标

1) 建立输变电设备物联网的设备全景信息模型，建立可扩展的输变电设备物联网的标识体系，形成相对完备的、面向演进的异构输变电设备物联网分层分布体系架构，制定输变电设备的全景信息标准规范。

2) 建立统一规范的输变电设备物联网分布自治的监测体系，实现输变电设备状态监测的一体化、智能化和通用化，降低监测装置成本，制定输变电设备物联网一体化智能监测装置的标准规范。

3) 建立统一规范的输变电设备物联网的智能应用系统，实现输变电设备物联网的应用目标，即输变电设备的全寿命周期管理，覆盖输变电设备故障诊断、状态评估、事故预警、状态维修、故障处置、资产管理等的智能应用功能。

4) 建立满足输变电设备物联网的试验与测试方法及评估指标体系，为输变电设备物联网在智能电网中的大规模应用提供技术保障。

2.1 输变电设备物联网体系架构及全景信息模型

输变电设备物联网体系架构与全景信息模型任务的目标为：建立输变电设备物联网的设备全景信息模型，设计相对完备的、面向演进的异构输变电设备物联网分层分布体系架构，建立可扩展的输变电设备物联网的标识体系。

输变电设备物联网体系架构是设计与实现输变电设备物联网的基础。输变电全景信息是多源异构信息，面向输变电设备全景信息的感知、汇聚与应用，输变电设备物联网应具有对多源异构的全景信息的分层分布式处理以及聚合能力。同时，输变电设备物联网的通信网络可以是电力行业通信专网，也可采用移动公用通信网，这要求输变电设备物联网的通信网络具有异构网络的自治协同能力。

IEC61968与IEC61970虽然提供了输变电设备的公共信息模型，但无法满足输变电设备物联网全景信息建模的需要。输变电设备物联网不同来源信息的数据格式及数据流量具有显著差异，具有多源与高度异构的特征。由于多源数据分散在不同的系统中，彼此之间缺乏联系，信息共享不足，没有进行有效的整合、集成，更没有对在线监测数据和基础数据进行深度的挖掘以形成指导输变电设备管理的知识。因此，需要建立输变电设备全景信息模型，提供一种用对象类和属性及它们之间关系来标识电力系统对象的标准方法，使得输变电物联网全景信息的交互与共享具有统一的参考模型。

根据上述目标及要求，完成的主要工作有：

- 1) 设计了输变电设备物联网体系架构，定义了输变电设备物联网感知层、网络层和应用层的功能及要求，体现了输变电设备物联网全面感知、可靠传输、分层分布式异构数据处理及智能应用的特点。

2) 提出了输变电设备全景信息的建模原则与方法,在已有标准CIM(Common Information Model,公用信息模型)的基础上,实现了对资产基本信息模型、在线监测信息模型、资产工作信息模型(运维信息模型)、公共安全信息模型的扩展,建立了具有良好通用性的输变电设备全景信息模型,为输变电设备多源异构信息的共享与集成以及输变电设备全寿命周期管理高级应用提供了支撑。

3) 结合电网企业输变电设备编码标准与EPC(Electronic Product Code,产品电子代码)编码标准,建立了输变电设备EPC-96编码规则,实现了对输变电设备的唯一标识以及EPC标签与输变电设备全景信息集成平台数据库中动态数据的链接。

2.1.1 输变电设备物联网体系架构

根据通用物联网架构,分层分布式输变电设备物联网体系架构如图2-1所示。整个架构由感知层、网络层及应用层构成,其中网络层包括通信层和信息整合层。

1. 感知层的功能及要求

感知层为输变电设备全寿命周期管理提供信息来源。输变电设备全景信息包括设备采购、工程建设、运行维护、技改报废四个阶段所涉及的信息。

感知层的全景信息包含设备状态信息、基本信息、资产信息和公共安全信息四类,其中设备状态信息分为在线监测信息和运维信息。在线监测信息包含输电线路状态监测信息和变电设备状态监测信息;运维信息包含巡检信息、试验信息、消缺信息等;基本信息包含厂家信息、型号、安装位置等基本信息;资产信息包含在全寿命周期管理的各个阶段,包括成本信息、建设费用、物资管理、承包商等信息;公共安全信息包括气象信息(如温度、湿度、风等)、灾害信息(如地震、泥石流、火山等)和极端天气信息(如雷击、冰灾等)等。

2. 网络层的功能与要求

输变电设备物联网的网络层包括通信层和信息整合层。

通信层支撑多源异构全景信息的数据传输、数据接入与数据流协同交互管理。通信层涵盖两个层面：①输变电设备传感网络要求支持异构网络以及移动终端的接入，通信方式包括有线通信、无线通信、移动通信等；②在输变电设备物联网整体层面上，传感网络传输的输变电设备在线监测信息及其他信息系统信息一起构成的全景信息，通过电力系统局域网（光纤网络以及其他有线通信网络）接入信息整合层，并完成存储、分发功能。

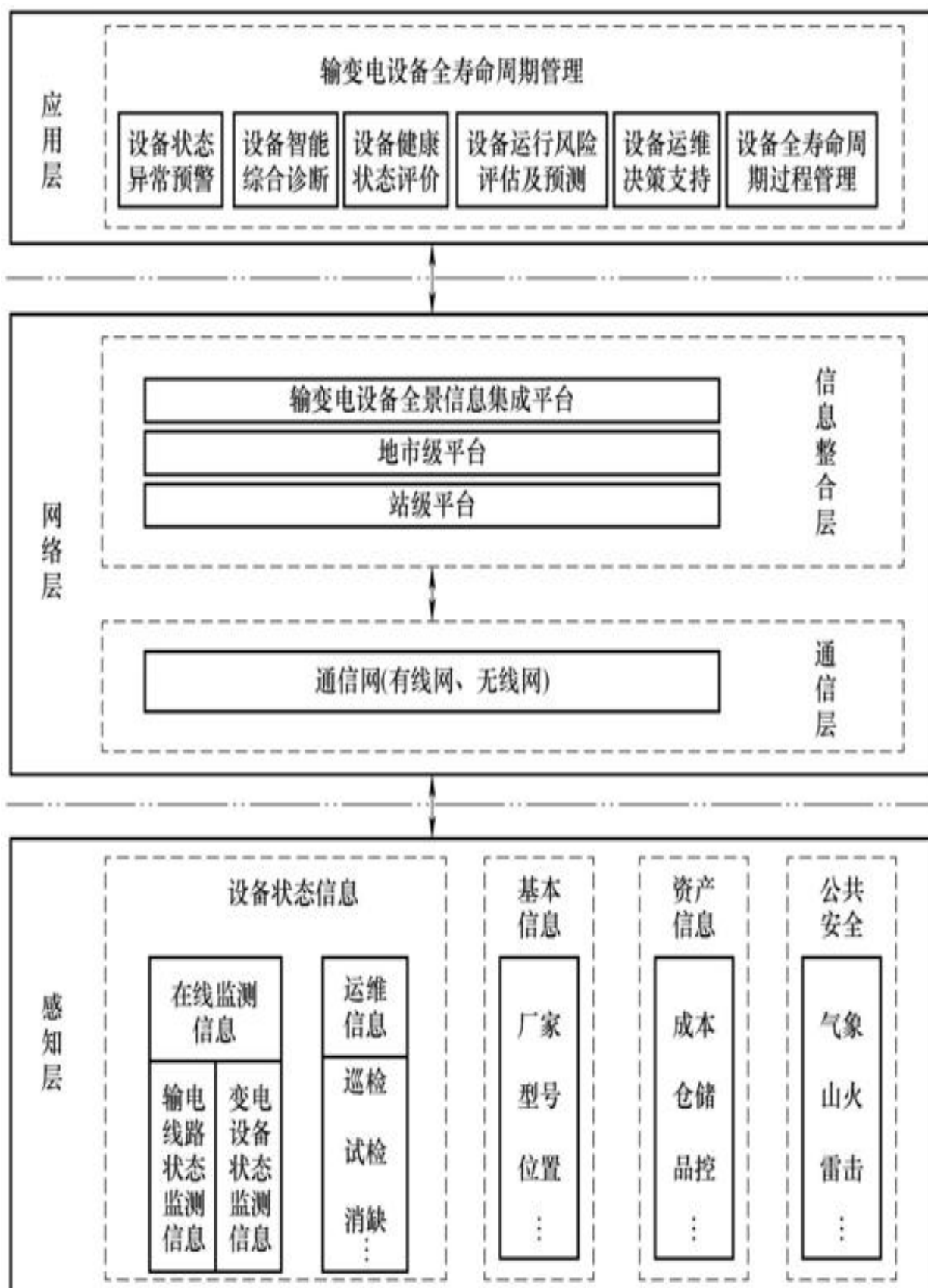


图2-1 输变电设备物联网体系架构

信息整合层的功能与要求包括：①实现全景信息的汇聚、存储、处理、融合和发布等功能，根据地理位置分布，信息整合层划分为站级、地市级、省级（输变电设备全景信息集成平台）三级，输变电设备全景信息集成平台支撑全部高级应用功能的实现；②全景信息集成平台采用SOA（Service-Oriented Architecture，面向服务的体系结构）及ESB（Enterprise Service Bus，企业服务总线），实现多源异构数据的处理、统一建模、标准化接入、验证和数据聚合，为输变电设备全寿命周期管理中的高级应用提供数据服务。

3. 应用层的功能与要求

要求实现输变电设备的全寿命周期管理，包括设备状态异常预警、设备智能综合诊断、设备健康状态评价、设备运行风险评估及预测、设备运维决策支持、设备全寿命周期过程管理等功能。具体功能要求为：①设备状态异常预警：对历史上重复出现的不正确的报警点和报警范围进行自动校正，对超出阈值范围的监测数据和出现变化率异常的监测数据点进行二次告警，过滤不合理的告警数据，实现设备状态异常预警；②智能综合诊断：根据感知层的四类信息对设备可能发生的故障进行全方位综合诊断，为故障定位及设备检修提供决策依据；③健康状态评价：对反映设备健康状态的各项指标进行分析评价，得出设备总体健康状态等级；④风险评估及预测：通过风险评估模型得出设备的风险等级，并综合分析设备故障造成的各方面后果，形成对设备的风险评估值，作为输变电设备状态检修的决策依据；⑤运维决策支持：通过综合考虑设备状态评价和风险评估的结果，优化输变电设备维修次序、维修时间和维修等级安排，为生技、调度等业务部门提供决策支持；⑥全寿命周期过程管理：实现输变电设备全寿命周期管理过程各个环节的相关管理，同时强化全过程的成本和绩效管理，实现成本管理精细化、定额化和标准化，建立能够持续改进的设备管理过程。

2.1.2 输变电设备全景信息模型

1. 输变电设备全景信息模型分类

为了分析全寿命周期管理的需求，先将各类信息的需求进行调研，信息需求结果如附录1～附录7所示，再将这些全景信息按建模分

类，见表2-1。

表2-1 输变电设备全景信息分类

信息类别	信息内容
基本信息	地理位置、设备台账、EPC……
在线监测信息	输电线路状态监测信息、变电/换流设备监测信息
运维过程信息	巡检信息、试验信息、消缺信息……
公共安全信息	气象信息、山火信息、雷电信息……

在建模过程中，将表2-1中输变电设备全生命周期管理各阶段所需的信息分为基本信息模型、在线监测信息模型、工作信息模型（运维过程信息模型）、公共安全信息模型四大类进行建模。

2. 输变电设备全景信息模型建模方法

基于国际通用的CIM元数据模型，使用Rational Rose工具进行建模。采用元模式技术，明确了建模的类、属性、方法、关联和模式等。通过建立CIM类图，描述各种受管对象以及各对象之间的静态关系。

（1）输变电设备全景信息模型的建模原则

扩展原则如下：

1) 根据需建设备模型在IEC61970、IEC61968标准中是否存在决定是否进行属性扩展。若存在，则进行属性扩展。若不存在，则新建一个包，在包内建立类图，针对这些设备扩展新类、建立关联以及描述类与类之间的关联关系；添加新包时，扩展的模型都应放置在此包内或者其包的子包内，以免和原有模型中的类相混淆。

2) 尽量保持模型原有结构不变, 采用继承的方法从原有类产生新子类, 并关联扩充部分与新子类。在需要添加新类时, 明确新类的继承、聚合及关联关系, 避免修改原来的标准模型, 并结合业务实际确定最后的关系。

命名原则: 在模型统一的情况下, 类和属性命名方式可按英文单词的组合或中文表达, 已有类的新属性名称前添加EX_, 使名称表达更加清晰。

(2) 输变电设备全景信息模型的建模方法

根据本任务提出的建模原则, 在建模过程中, 采用统一建模语言(UML), 通过建立各种类、类之间的关联、类和对象之间的相互配合来完成全景信息建模。其中CIM扩展要考虑三个问题: ①是否要建立新的包; ②要扩展哪些新类; ③要扩展哪些已有类的属性和属性值。建模具体方法如图2-2所示。

1) 确定建模对象, 判断标准中是否有关于此设备的模型包。

2) 判断待扩展新类在模型包内是否存在。若存在, 则考虑进行属性扩展; 若不存在, 则新建关于此类的属性。

3) 描述待扩展新类与已有类之间的关系, 包括聚合、继承和关联关系。

4) 判断新建类属性与扩展类属性的数据类型是否存在。若存在, 则选用相关数据类型; 若不存在, 则新建数据类型。

5) 规范化抽象模型, 使之更精简、准确。规范模型时应主要根据三个原则: ①将属性较多的类解构为多个具有少量属性的类; ②消除冗余数据; ③尽量选取实例中的名词作为类的名称, 并规范类定义的所有关键词。

(3) 输变电设备全景信息模型的建立

基本信息建模。根据CIM的可扩展性特征, 主要针对两类基本信息扩展建模: 全部设备的EPC编码信息以及标准中部分未建模设备和部件的基本信息。

1) 基于EPC编码的资产基础信息建模。

资产基础信息管理需运用到设备的EPC编码，而原有CIM模型中是不存在EPC编码信息的，因此设备的全景信息模型中要对其进行扩展。EPC编码主要包括标头、设备归属、设备分类以及序列号等内容，结合EPC编码信息，根据全寿命周期管理的信息选取原则，在资产基础模型中扩展了EPC Tech类，用于描述该编码的EPC标识主要基本信息，包括采用EPC的位数、标头、获取EPC的RFID类型，以及具体某个设备的EPC编码序列号，EPC Tech类关联到资产类上。

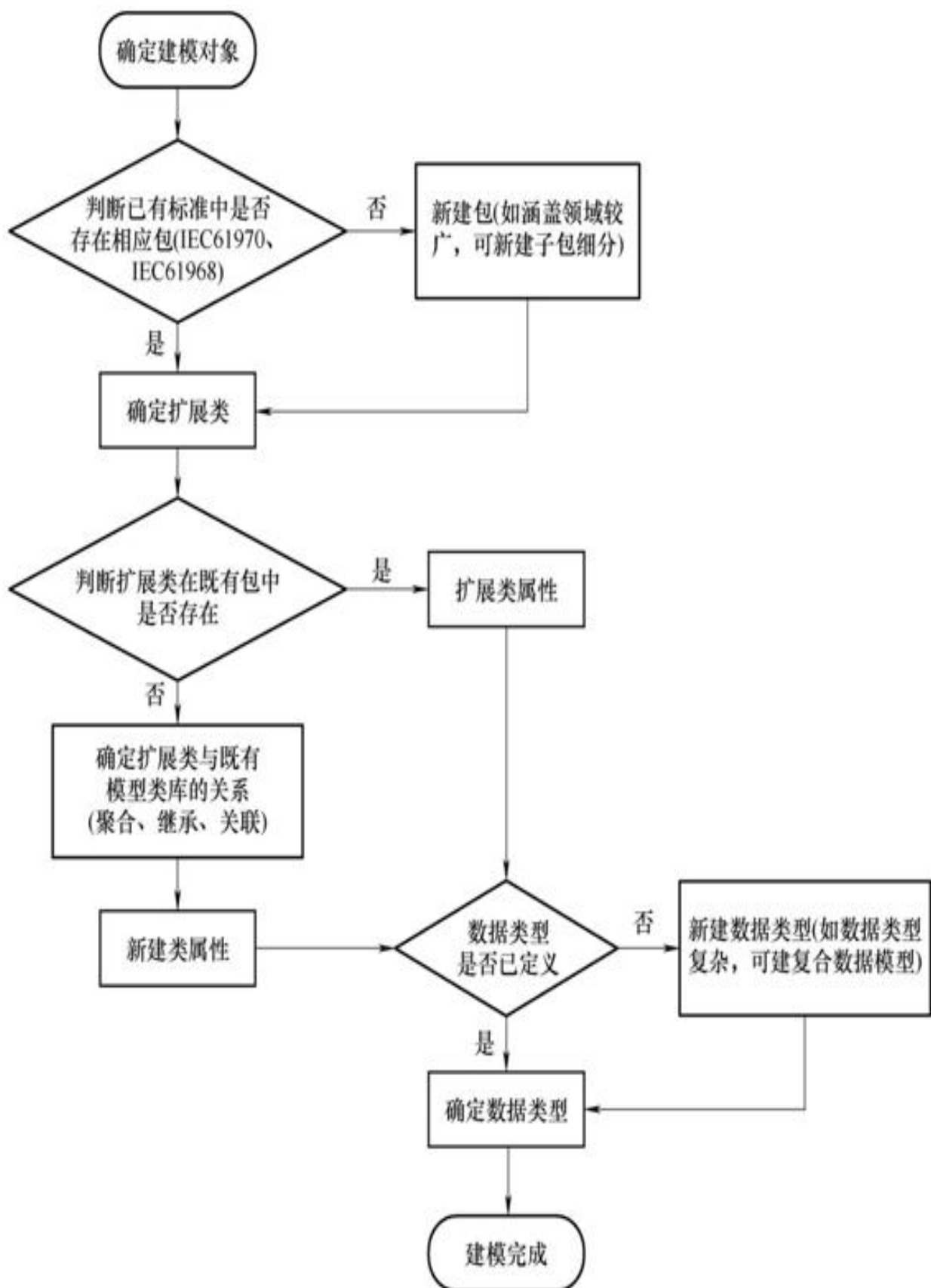


图2-2 全景信息模型建模方法

针对设备的每个全寿命周期阶段，对Asset类进行了属性扩展，添加了“全寿命周期管理节点（PLMC Node）”属性，定义该类型为枚举类，由计划、招标、选型、签约、付款、预验收、到货、安调、验收、报账、办固定资产、后期维护、报废等构成，用于标记每个资产所处于的周期节点位置，便于资产管理。

2) 输变电设备基本信息的扩展建模。

为了支持标准化和集成的需求，对CIM中未涉及的设备基本信息扩展需要在继承原有输变电数据模型的基础上，新增一些设备类的描述，分为以下三种情况：

①面向CIM未建模设备的扩展。某些设备在CIM中根本没有模型与之匹配，需要重新建模，如避雷器、绝缘子、直流电流（电压）互感器。新建立的基础模型的框架包括五方面内容：Electrical Asset（电气资产类）、Electrical Type Asset（电气类型资产类）、Electrical Asset Model（电气资产模型类）、Electrical Properties（电气属性类）和Mechanical Properties（机械属性类）。前三个属性分别继承了Asset、Type Asset、Asset Model三个根类，且聚合于第四个属性类Electrical Properties。前四个类组成电气资产模型框架，电气设备的模型新建都需继承上述框架的四个父类。对于没有可继承的类，可加入自身属性扩展一个新类。

以绝缘子为例，需要扩展的类见表2-2。依据图2-2所示的全景信息模型建模方法进行扩展：i）首先新建Insulator Asset（绝缘子资产类）、Insulator Asset Model（绝缘子资产模型类）以及Insulator Type Asset（绝缘子类型资产类）；ii）查询手册和相关规定扩展各个类的属性，将每个设备的特有属性，如安装地点、生产日期等参数存放在Insulator Asset；将不同类型绝缘子相同的属性信息抽象出来，存放在Insulator Type Asset里，如绝缘子可分为悬式绝缘子、针式绝缘子、棒形绝缘子等多个类型；iii）扩展一个描述同一型号绝缘子共有属性的类Insulator Asset Model，如同种型号绝缘子的分布电压、直流绝缘电阻、电晕脉冲比值等信息，并新建绝缘子的电气参数属性类Insulator Properties，用于存放绝缘子的公共属性，电气参数属性类与其他三者是聚合的关系。建成后的绝缘子基本信息模型见表2-2，扩展模型如图2-3所示。

表2-2 扩展的绝缘子扩展类

新 类	父 类	描述对象
绝缘子资产类	电气资产类	绝缘子资产
电气资产模型类	电气资产类	电气资产模型
电气类型资产类	类型资产类	电气类型资产

②面向设备附属部件的扩展。在某些重要设备中，设备自带了保护装置来判断设备故障情况，通常CIM建模并未涉及此类附属部件。如架空线路资产和电力电缆模型中，因此需要对其附属部件进行扩展。在架空线路资产和电力电缆模型中，现有的CIM模型分别对应架空线资产类（OH Conductor Asset）及电缆资产类（Cable Asset），它们都继承于其父类线型导体资产类（Linear Conductor Asset）。分别新建架空线资产模型类（OH Conductor Asset Model）和电缆资产模型类（Cable Asset Model）继承于线型导体资产模型类（Linear Conductor Asset Model），新建OH Conductor Type Asset（架空线类型资产类）和Cable Type Asset（电缆类型资产类）继承于Linear Conductor Type Asset（线型导体类型资产类），这样就构成了线路资产属性模型的基本框架，然后再将所需要的属性分别放入对应的类即可。扩展后的类与已有类之间的关系及描述见表2-3。

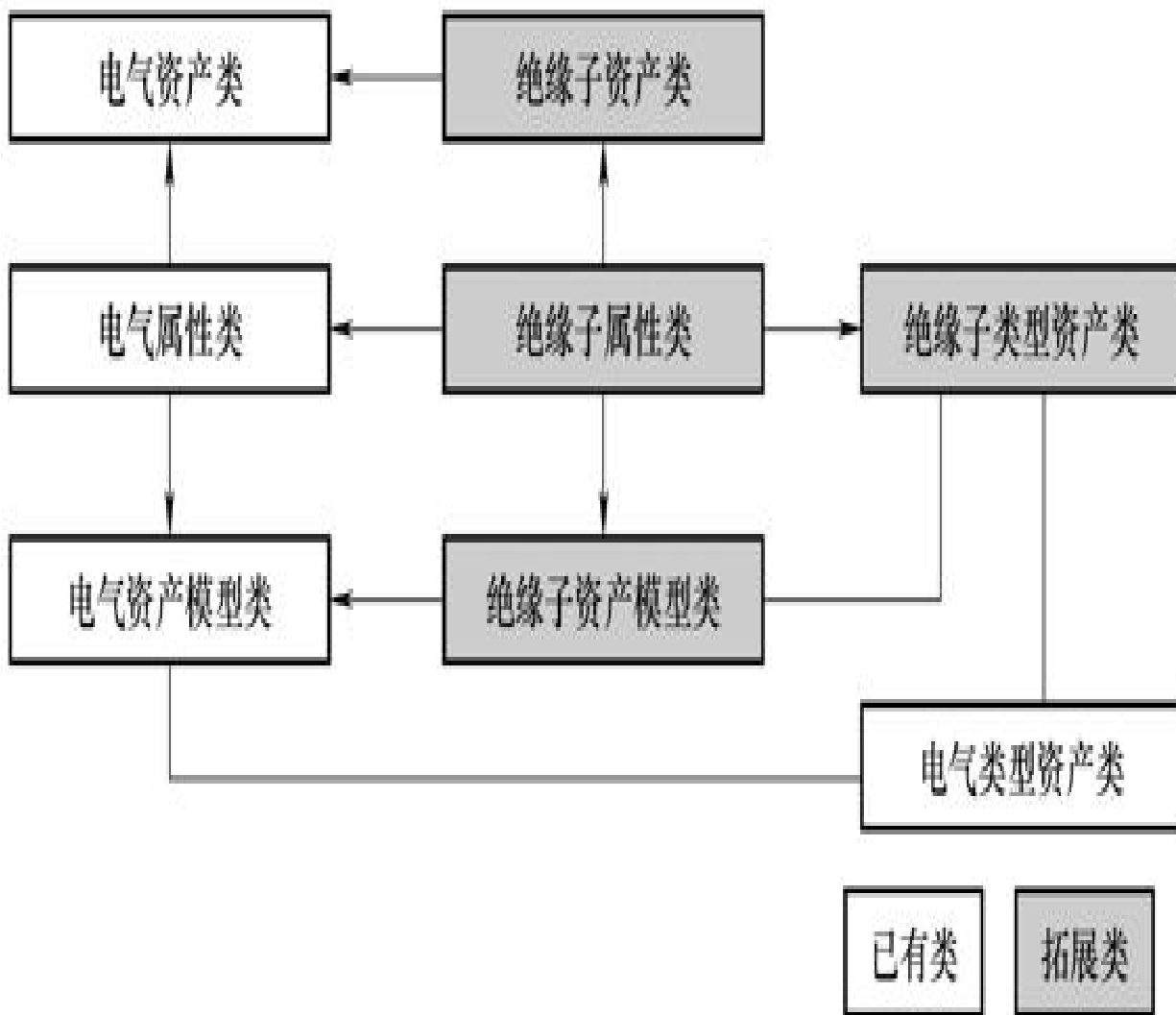


图2-3 绝缘子基本信息模型

表2-3 架空线路资产和电力电缆扩展类

新 类	父 类	描 述 对 象
架空线资产模型类	线型导体资产模型类	架空线资产模型
电缆资产模型类	线型导体资产模型类	电缆资产模型
架空线类型资产类	线型导体类型资产类	架空线类型资产
电缆类型资产类	线型导体类型资产类	电缆类型资产

③面向设备容器类的扩展。仿照IEC61970的电厂、变电站间隔等设备容器，建立相应设备容器的子类。输电线路的在线监测信息是针对两根杆塔以及杆塔之间的架空线路的，包括架空线路参数，如导线的基础拉力、覆冰重量等，架空线路资产类、杆类、塔类分别继承于线型导体资产类和结构类。引入设备资产容器“线段”的概念，线段包括两根杆塔及之间的设备，将架空线路资产类、杆类、塔类、避雷器资产类和绝缘子聚合成线段类，继承于设备容器类，针对避雷线、接地装置、监测装置等附属装置，建立附属装置类，直接继承于资产类。扩展后的类与已有类之间的关系及描述见表2-4，建成后的设备容器类扩展模型如图2-4所示。

表2-4 设备容器扩展类

新 类	父 类	描 述 对 象
线段		线段
避雷器资产类	资产类	避雷器资产
绝缘子资产类	资产类	绝缘子
监测装置类	资产类	监测装置
附属装置类		附属装置

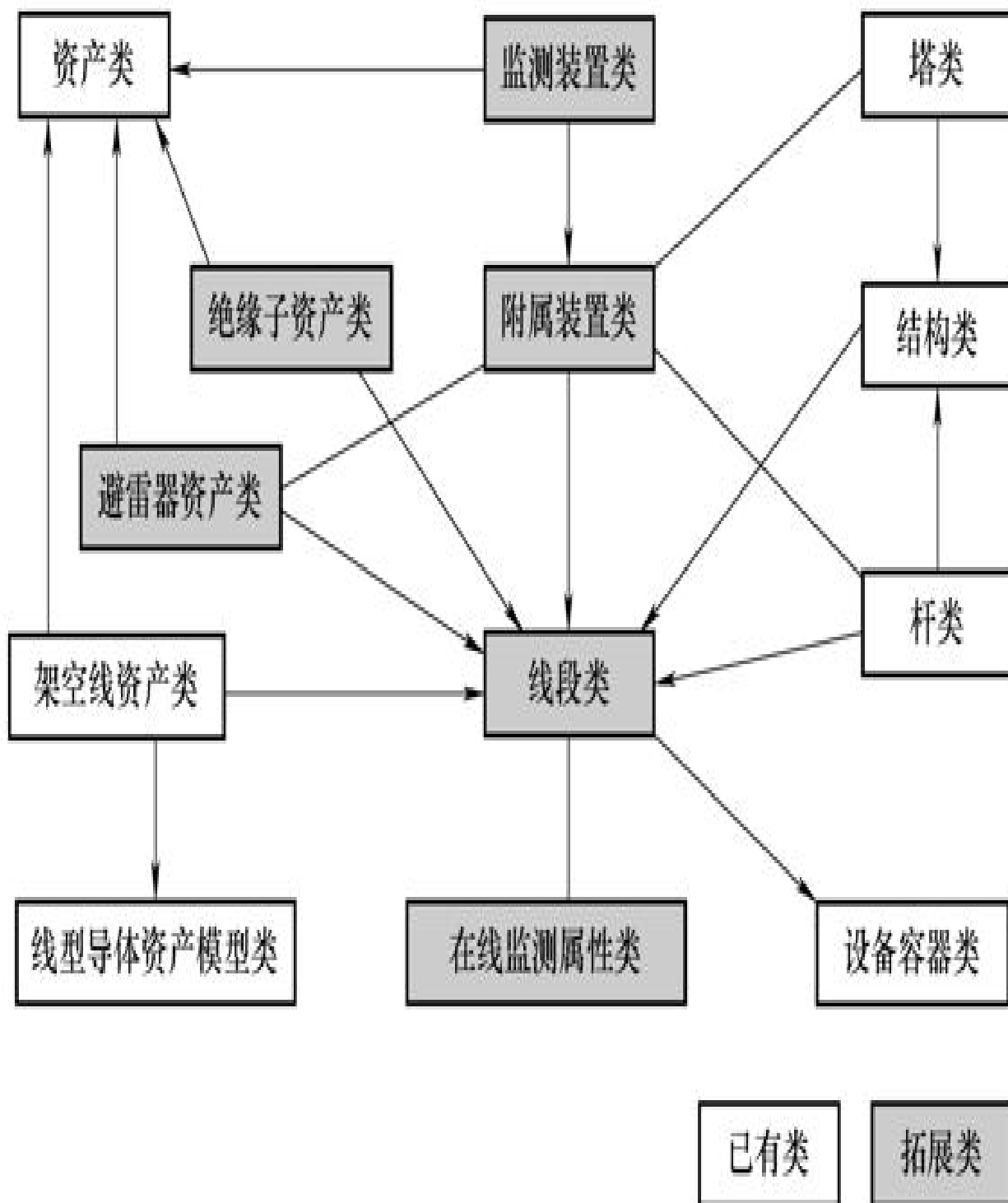


图2-4 设备容器类的扩展模型

3. 在线监测信息建模

对输变电设备在线监测信息建模进行的是在线监测量测模型的扩展建立。该模型新建在线监测量测类（Online Monitoring Measurement）和在线监测资产参数类（Asset Online Monitoring Properties）两类描述，且前者继承量测类（Measurement），后者关联资产类（Asset）。又由于量测类关联资产类，使得模型覆盖量测全过程。

在线监测量测类几乎包含了IEC61970量测包的所有类。量测类（Measurement）描述了量测发生的时间、原因和时间间隔等基本信息；量测类型类（Measurement Type）描述了各种实用的量测类型；量测技术类（Measurement Tech）包含了量测过程用到的具体量测技术，可对各种不同的在线监测技术扩展建模；量测值类（Measurement Value）记录了不同量测获得的结果，由在线监测量测类与其关联建模，且与文档类（Document）关联，形成记录文档。限制集类（Limit Set）、警报集类（Alarm Group）、单位类（Unit）、控制类（Control）和派生类（Value Alias Set）等类起到辅助作用。限制集类和警报集类实现预警功能，当量测值超过设定的限制值时将产生有效报警，单位类规范了量测数据值的单位名称和具体格式。

在线监测资产参数类首先新建在线监测量测类，详细描述资产的在线监测参数，它与资产类关联。然后，再将IEC61970量测包中量测类关联到资产类，从而实现了与量测包中几乎所有类的关联，可以准确描述量测发生的时间、时间间隔、采用的技术、量测原因和结果等信息。扩展后的类与已有类之间的关系及描述见表2-5，建成后的在线监测量测模型如图2-5所示。

表2-5 在线监测量测信息扩展类

新 类	父 类	描 述 对 象
在线监测量测类		在线监测量测
在线监测资产参数类	标识对象	在线监测资产参数
量测技术	—	量测技术
警报集类	—	报警组类

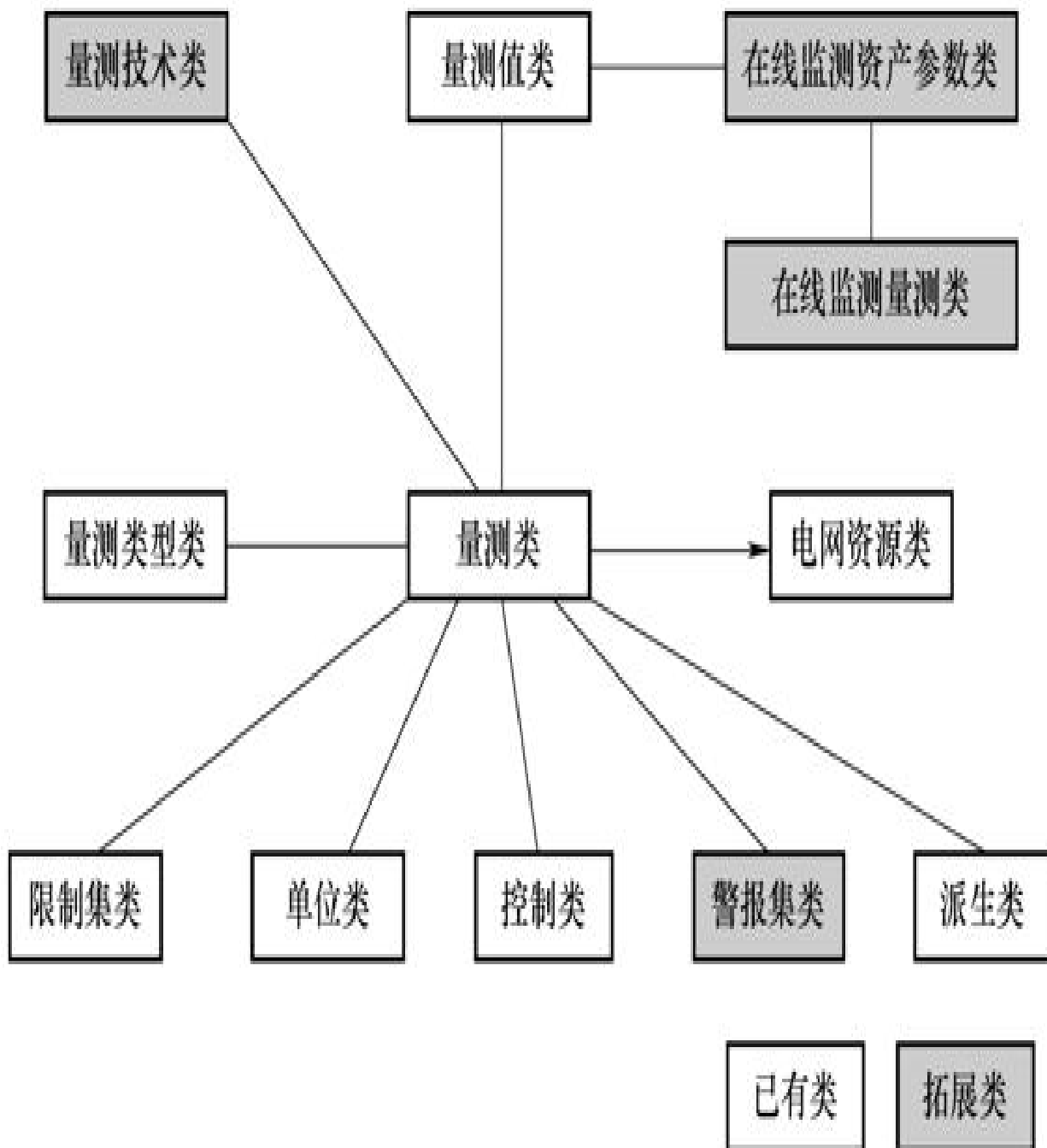


图2-5 在线监测量测模型

(1) 运维过程信息建模

运维过程信息即资产工作信息，通过新建工作类（Work）的子包资产工作模型（Work Model）对运维过程信息建模。资产工作模型通过工作类（Work）、工作任务类（Work Task）描述工作任务，用程序

类（Procedure）和程序值类（Procedure Value）的值说明工作的步骤和各步骤产生的数据值。

以一项设备维护任务为例，首先确定活动的种类，再由工作类和工作任务类具体来描述。一项活动由多件工作任务类聚集而成。工作任务类关联资产列表（Asset List）、工作人员（Crew）、执行效率（Capability）及条件（Condition）等类。当确定了某项维护任务时，需按工作规范来进行，工作规范中的步骤由程序值类和程序类共同定义：程序类说明这项活动任务的基本步骤内容，而程序值类描述这些步骤中的相关限值，如加压值等。同时程序类与测量值类（Measurement Value）关联，以记录测量值。当活动完成后，由数据集类（Data Set）来记录活动结果。扩展后的类与已有类之间的关系及描述见表2-6，建成后的设备运维过程信息模型如图2-6所示。

表2-6 设备运维过程信息扩展类

新 类	父 类	描 述 对 象
巡检数据集类	数据集类	巡检数据集
试验数据集类	数据集类	试验数据集
诊断数据集类	数据集类	诊断数据集
检修数据集类	数据集类	检修数据集
缺陷事件类	活动记录类	缺陷事件
诊断事件类	活动记录类	诊断事件

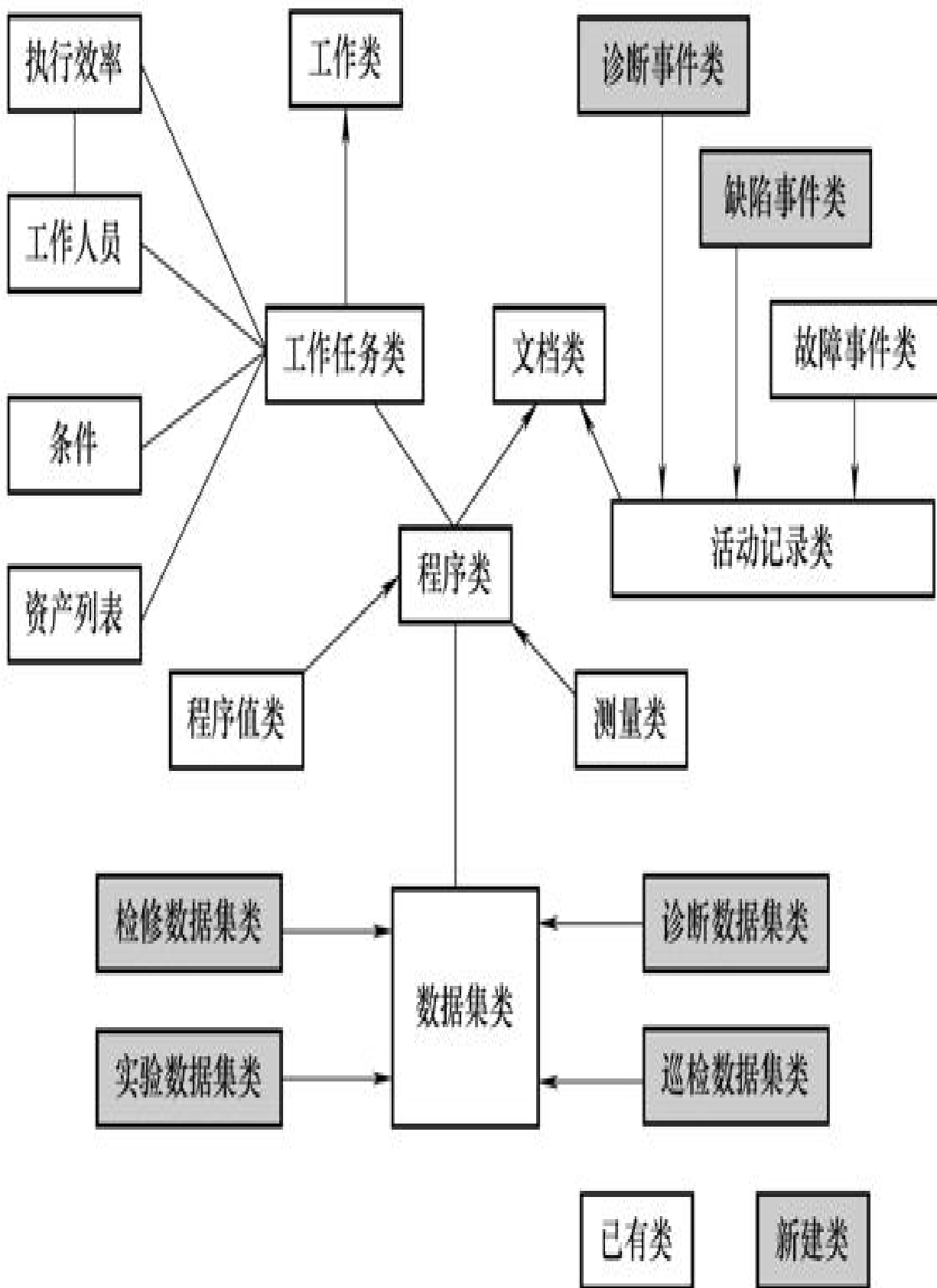


图2-6 设备运维过程信息模型

各类设备的巡检、试验、诊断以及检修等活动具有信息模型的基本类和属性，活动结束后，巡检数据集类（Inspection DataSet）、试验数据集类（Test Data Set）、诊断数据集类（Diagnosis DataSet）、检修数据集类（Maintenance DataSet）继承于数据集类（Data Set），分别记录四项活动的数据。

巡检、试验、检修或诊断活动发现的设备缺陷，或是设备运行故障需要记录下来，因此需要缺陷事件类（Defect Event）、故障事件类（Failure E-vent）。故障事件类CIM中已有定义，只需要新建缺陷事件类，同时使其继承于活动记录类（Activity Record）。如在缺陷事件类中，扩充缺陷部位、缺陷内容、缺陷程度、缺陷等级、缺陷分类、消缺结论等属性，对一些有固定取值的属性，还应枚举各项可能情况以便于实例化。扩展的缺陷事件类如附录8所示。

诊断模型是对设备进行故障诊断，然后制订出正确的检修计划。需要新建诊断事件类（Diagnosis Event），用于记录诊断事件发生的时间、对象、技术、方法等信息，继承于活动记录类。诊断事件类同样使用枚举类型，记录诊断设备种类、诊断方法、诊断仪器、诊断结果（原因）、对设备性能影响等信息。如附录9所示。

(2) 公共安全信息建模

输变电设备的公共安全信息模型需要扩展的类包括气象预警信息类（Weather Alert）、微气象信息类（Micro Climate）、天气预报类（Weather Fore-cast）、不可预测信息类（Unpredictable Event），它们关联于资产类（Asset）、位置类（Location）、区域类（Zone）。扩展后的类与已有类之间的关系及描述见表2-7，建成后的公共安全信息模型如图2-7所示。

表2-7 公共安全信息扩展类

新 类	父 类	描 述 对 象
微气象信息类	标识对象	预警信息
气象预警信息类	标识对象	微气象信息
天气预报类	标识对象	天气预报
不可预测信息类	标识对象	不可预测信息

根据本任务提出的输变电设备全景信息模型建立的原则及步骤，完成了对资产基本信息模型、资产在线监测信息模型、资产工作信息模型（运维过程信息模型）、公共安全信息模型的扩展建立。所建模型具有较好的通用性，具体的输变电设备能够根据本建模过程建立完备的全景信息模型，为输变电设备全寿命周期管理高级应用提供了支撑和保障。

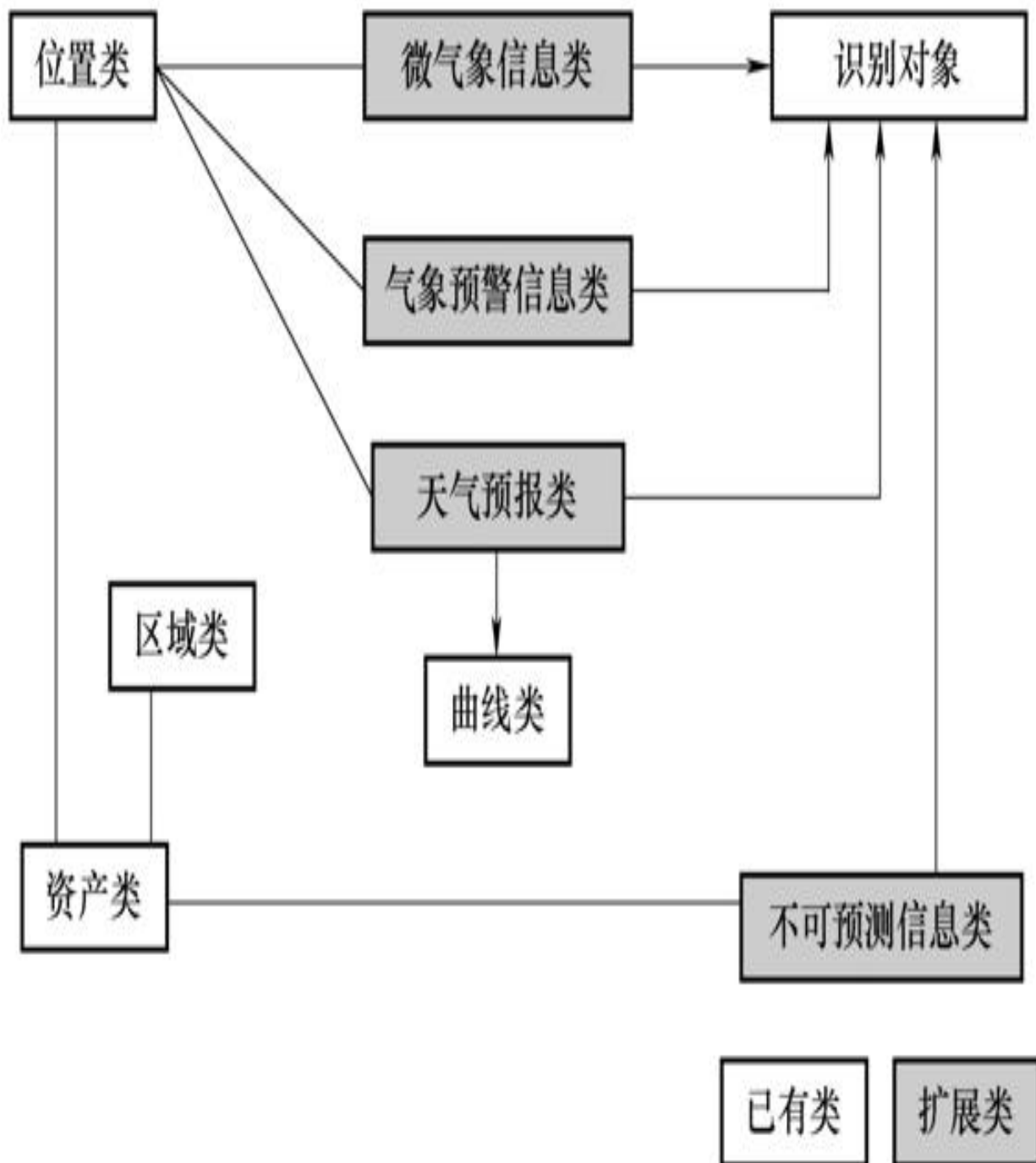


图2-7 公共安全信息模型

2.1.3 输变电设备EPC编码

结合电网企业输变电设备编码标准与EPC编码标准，建立了输变电设备EPC-96编码规则。

1. 编码方案选择

目前EPC代码有64位、96位和256位三种编码方案，EPC-64编码主要应用在物流行业，而EPC-256是面向未来设计的，具体技术要求和定位暂不明确。为了确保输变电设备都拥有一个EPC代码并使其载体——标签成本尽可能降低，考虑到设备的生命周期比物流行业的生命周期长、设备分类简单、设备信息多、归属复杂等因素，本研究选择EPC-96方案。该编码方案是定义为96位的通用标识符，不依赖于任何已知的、现有的规范或标识方案，既保证后期应用时标签的低成本，又能满足未来设备编码扩展需求。

作为EPC的信息载体，EPC标签是RFID识别应用的重要组成部分，它包括TID（Tag ID）区和DATA区。TID（Tag ID）区表示标签自身的唯一标识，包含标签制造厂商代码、标签硬件类型码、存储器规划码等信息，在电子标签生产时写入，出厂后锁定。DATA区是用户数据区，供用户存放数据，可以进行读写、覆盖等操作。依据EPC标签的数据格式，基于EPC-96的输变电设备编码储存在EPC标签的DATA区。

2. 编码原则

鉴于输变电设备物联网中信息的特点，考虑成本、扩展等因素，全面展开信息编码缺乏经济性。同时考虑到标签容量和读写器的性能，大量的信息编码会降低读写和查询的速度，因此提出EPC编制原则如下：

- 1）符合EPC编码标准与电网企业输变电设备编码标准及编码原则，使编码符合系统性、规范性、唯一性。
- 2）反映设备的分类信息，如设备的归属、类别等。
- 3）保证编码的简单性、经济性、可靠性且同时具备可扩展性等。

3. 编码规则

EPC编码的通用结构包括4个部分：标头、域名管理者代码、对象分类代码和序列号。标头定义了总长，识别类型和EPC标签编码结构，本研究采用的EPC-96的标头值是00110101（二进制），为固定值；域名管理者代码标识一个组织实体（本质上一个公司、管理者或者其他组织机构），EPC global分配通用管理者代码给实体，确保每一个通

用管理者代码是唯一的；对象分类代码用来识别一个物品的种类或“类型”，其在每一个通用管理者代码之下是唯一的；序列号也称序列代码，在每一个对象分类代码之内是唯一的（组织实体负责为每一个对象分类代码分配唯一的、不重复的序列代码）。为了突出显示编码对象和电力设备的属性，本研究将“管理者”和“对象分类”做了名称变换，标头和序列代码不变，变换结果如图2-8所示。

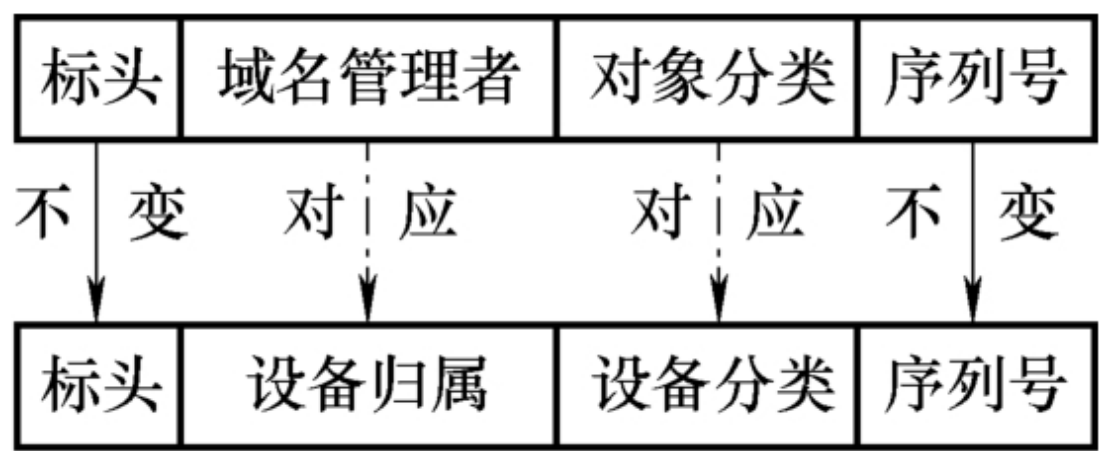


图2-8 编码结构中字段名称的变换

根据图2-8中的编码结构，展开设备编码工作，规定了各部分所包含的信息和所占代码区段。

(1) 设备归属

设备归属层分为大电网-（省）电网公司-供电局-厂站，此部分共28位，码段代码分配区间见表2-8。每个部分的代码空间是在考虑扩展的前提下确定的，其详细信息均存储在后台数据库中，所编制的代码作为检索索引使用。

表2-8 设备归属的码段分配

设备归属	大 电 网	省 网	供电局-厂站
码 段 分 配	1~5	6~11	12~28

(2) 设备分类

分类是具有相同特点物品的集合，而不是物品的固有属性。兼顾EPC中该部分的代码空间和中国南方电网（简称南网）中已有的设备分类方式和结构，本研究规定采用“设备类属+设备类别+电压等级”来标识设备分类，此部分码段共24位。

根据电网的《电网设备信息分类和编码》标准，可知设备属性共有7项；设备类别包含输电设施、变电设施和配电设施，其中输电设施中架空线路包含125项、电缆线路包含97项，变电设施中一次设备有359项、二次设备有342项；电压等级中交流有44项、直流有38项。基于上述各项的数量和扩展性需求，采用分区段的方式编码标识设备属性、设备类别和电压等级。因此在考虑扩展的情况下，分配代码空间，具体的细化方案见表2-9。

表2-9 设备分类的码段分配

设备分类	设备类属	设备类别	电压等级
码段分配	1-3	4-16	17-24

(3) 序列代码

序列代码的编制原则按照设备归属的最小单位（供电局-厂站）内设备数量顺序进行编制，此部分码段共36位。对于本体设备的部件无设备类别代码的，与本体设备一起进行顺序编码。基于以上原则，基于EPC-96的输变电设备编码规范的具体编码结构见表2-10。

表2-10 基于EPC-96的输变电设备编码

标 头	设备归属			设备分类			序 列 代 码
固定	大电网	省网	供电局-厂站	设备类属	设备类别	电压等级	
1~8	9~13	14~19	20~36	37~39	40~52	53~60	61~96

以云南电网大理供电局下关变电站的设备“220kV大下Ⅱ回线2631隔离开关”为例进行说明，根据设备编码的结构和编码方案中各项对应的代码，可得该隔离开关的设备编码，见表2-11。

表2-11 基于EPC-96的隔离开关编码示范

编码层次	Ⅰ				Ⅱ		Ⅲ
编码名称	设备归属				设备分类		序列代码
码段	9~13	14~19	20~36	37~39	40~52	53~60	61~96
说明	大电网	省网	供电局-厂站	设备类属	设备类别	电压等级	
示例	00010	000101	00000101- 000001011	010	00010101 10000	00001101	0000000000 0000000000 0000000000 011110
	南网	云网	大理供电局- 下关变电站	变电	隔离开关	220kV	

对于“设备归属”和“设备分类”相同的设备，序列代码的编制分为只有本体、既有本体又有部件两种情况。前者的序列代码按顺序编制；后者的序列代码编制又分为两种情况：部件拥有自身设备类别代码的，不参与其本体设备的序列代码编制，只参与其同类设备类别的序列代码编制；部件无设备类别代码的，则按照顺延本体的序列代码编制。对于“设备归属”和“设备分类”相同的第二个部件无设备类别代码的设备，其序列号顺延上一个同类设备最后一个部件的序列代码顺序编制。可见，EPC编码中的序列代码是在实际编码过程中确定的，以下举例说明。

对于该隔离开关A相、B相、C相的代码，则是按照顺延其本体序列号编制；而对于该隔离开关的部件-电动操动机构和真空辅助开关，则

是按照与其本体相同的代码编制方式编制。对于“220kV大下Ⅱ回线2632隔离开关”，其代码延续“220kV大下Ⅱ回线2631隔离开关C相”的代码，其A相、B相、C相的代码的编制方法同“220kV大下Ⅱ回线2631隔离开关”的三相，而其部件-电动操动机构和真空辅助开关的代码编制方法同“220kV大下Ⅱ回线2631隔离开关”的部件。具体代码见表2-12。

表2-12 本体及其部件的具体代码表

设 备	具体代码（十六进制）
220kV 大下Ⅱ回线 2631 隔离开关	3510A0A0B42B00D000000001E
220kV 大下Ⅱ回线 2631 隔离开关 A 相	3510A0A0B42B00D000000001F
220kV 大下Ⅱ回线 2631 隔离开关 B 相	3510A0A0B42B00D0000000020
220kV 大下Ⅱ回线 2631 隔离开关 C 相	3510A0A0B42B00D0000000021
220kV 大下Ⅱ回线 2631 隔离开关电动操动机构	3510A0A0B42B10D0000000024
220kV 大下Ⅱ回线 2631 隔离开关真空辅助开关	3510A0A0B42B10D0000000025
220kV 大下Ⅱ回线 2632 隔离开关	3510A0A0B42B00D0000000022
220kV 大下Ⅱ回线 2632 隔离开关 A 相	3510A0A0B42B00D0000000023
220kV 大下Ⅱ回线 2632 隔离开关 B 相	3510A0A0B42B00D0000000024
220kV 大下Ⅱ回线 2632 隔离开关 C 相	3510A0A0B42B00D0000000025
220kV 大下Ⅱ回线 2632 隔离开关电动操动机构	3510A0A0B42B10D0000000027
220kV 大下Ⅱ回线 2632 隔离开关真空辅助开关	3510A0A0B42B10D0000000028

依据基于EPC-96的输变电设备编码方案，已对示范变电站的一、二次变电及输电线路设备进行了EPC编码。

2.2 输变电设备物联网的通信模型与体系架构

信息通信网络是支撑输变电设备物联网信息可靠传输的基础平台。现有的输变电设备在线监测网络主要是采用传感器网络现场采集与简单透传到在线监测主站方式，存在的问题主要有三个方面：①在线监测采集信息仅限于（前端的）现场采集点与（后端的）主站，无法在采集现场充分共享和预处理，也造成后端信息集中存储和传输困难；②在线监测设备信息通信模型构建方式与监测信息种类、被监测设备位置等因素紧密相关，从而限制了在线监测设备的通用性，造成了在线监测设备数量和种类过多的问题；③通信网络作为简单的信息连接接口，未考虑通信网络功能差异以及通信技术差异，容易造成通信网络 congestion 的问题。

建立基于IEC标准的全站设备状态信息通信模型和体系构架的目标是：解决物联网与输变电设备相结合的架构问题，以及解决如何采用通信交换设备实现物联网化的设备在线监测和资产巡检的网络设计问题。

针对本项任务的目标和要求，总体工作完成情况如下：

- 1) 建立基于IEC标准的全站设备状态信息通信模型和体系构架，为关键设备开发提供了设计模型参考。
- 2) 提供了变电站和输电线路的通信网络设计方法，指导了变电站与输电线路的通信网络示范工程建设。
- 3) 开发了无线路由器及其网络管理平台，为输变电设备物联网的通信网络建设提供了通信验证手段。

在关键技术方面开展的研究工作和取得的成果主要有以下几方面：

- 1) 信息通信体系构架方面，提出了在线监测设备功能分层化的信息通信模型构建策略，为变电站物联网的分布式处理提供了设计方

法。

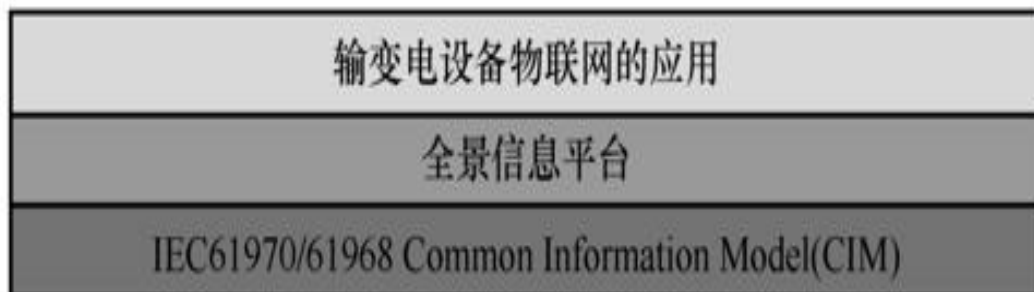
2) 在变电站和输电线路的通信网络设计方面,采用接入网与汇聚网的两级通信网络结构,通过汇聚网络的流量控制与通信流重定向解决通信网络拥塞;提出了异构双网双通道设计方法,提高了通信网络容错能力并实现了设备在线监测与资产巡检应用的紧密结合;提出了在输电线路采用无线Mesh +OPGW光纤的设计方案,为偏远地区输电线路在线监测信号的远距离传输提供了一种有效的手段。

3) 完成了适应于输变电设备物联网的WiFi无线路由器及其网络管理平台的样机研制。结合定向天线技术实现了点对点远距离通信,单跳中继距离不少于3km,稳定带宽大于30Mbit/s,比特误码率不超过 10^{-6} ;在Mesh组网方式下5跳的点对点无线中继通信时延不大于500ms,路径容错最短倒换时间不大于200s;网络管理平台实现了对无线路由器的远程配置和故障管理。

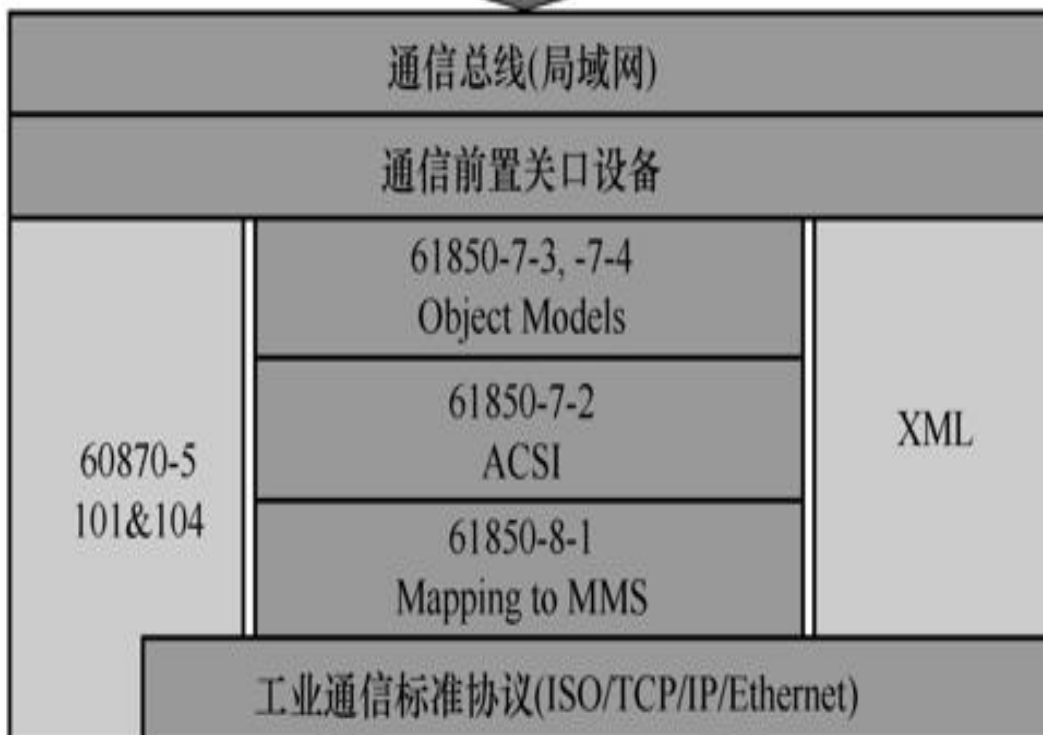
2.2.1 输变电设备物联网的通信体系架构

输变电设备物联网与通信网络结构关系如图2-9所示,通信网络服务于物联网感知层、网络层和应用层,实现信息传递、路由和控制。输变电设备物联网各层通信网络的功能要求如下:

应用层



网络层



远程通道



感知层



图2-9 输变电设备物联网信息通信结构

1) 全景信息平台支持输变电设备全寿命周期管理的高级应用，由交换机和路由器构成的企业通信总线支持全景信息平台的应用服务器、数据中心之间的通信，通信前置关口设备实现与远端的感知层的内外网通信，并完成通信协议转换功能。

2) 感知层由变电站和输电线路上的设备状态信息传感网、电力公司内部的运行和运维信息系统、外部的气象和灾害等组成。感知层信息来源和种类复杂，需要解决复杂的通信流控制以及异构通信网络之间的协调技术问题。

3) 网络层实现全景信息平台与传感网之间的远程通信连接，需要解决多种通信协议接口和远程通信信号传输问题。由通信前置关口设备完成与不同传感网之间的协议转换，主要采用光纤网络解决远程通道问题。

(1) 输变电设备传感网信息通信结构

现场传感网络面临复杂的状态信息以及异构网络协同技术难点。任务设计的变电站的信息通信网络接口如图2-10所示。

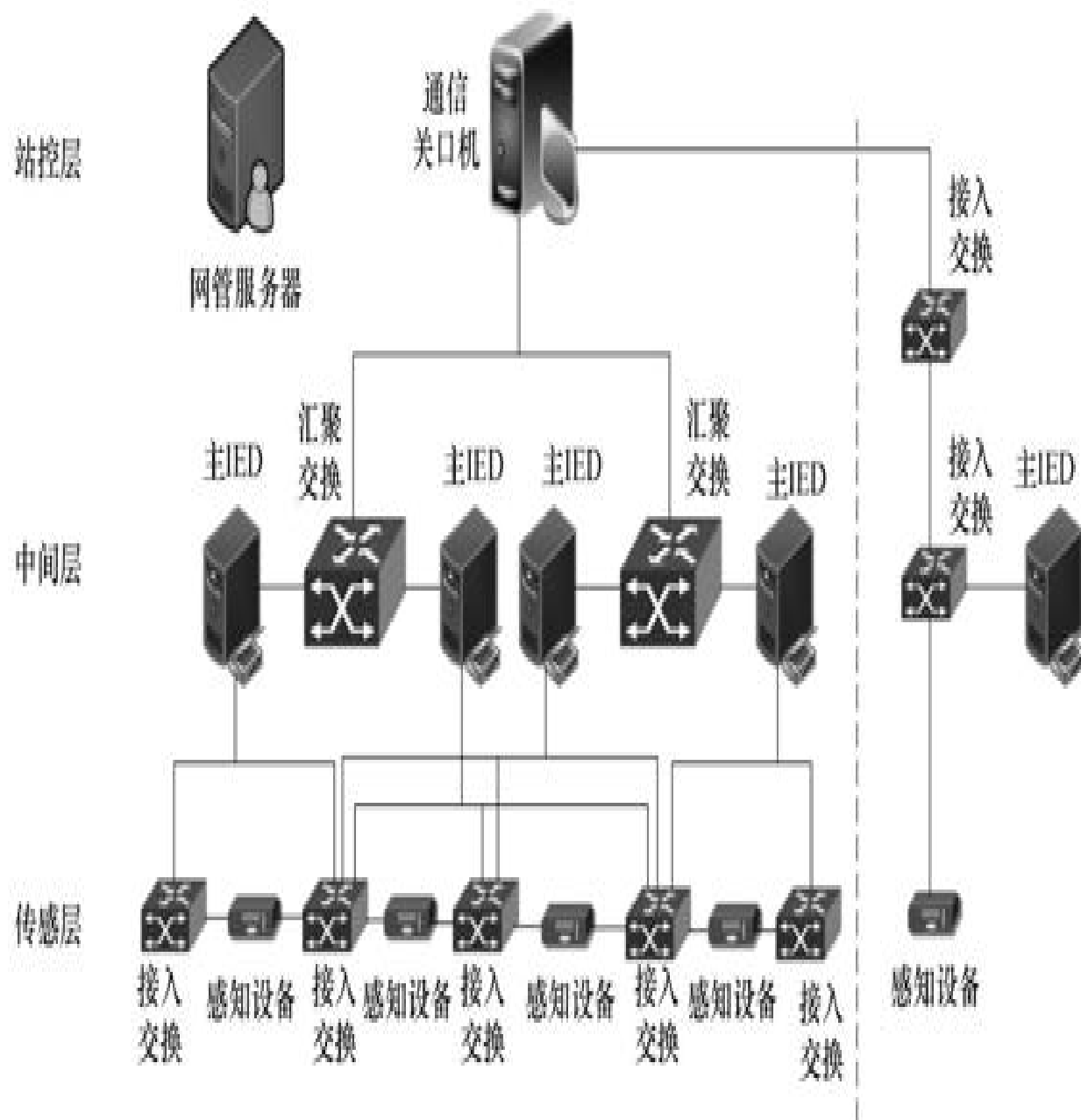


图2-10 输变电设备传感网信息通信结构

图2-10所示的通信网络实现了与传感网络内设备之间的互联互通，主要感知设备为：①主站通信关口服务器，连接主站服务器与站内监测主IED设备的通信关口服务器；②监测主IED，具有标准的IEC61850通信接口，具备在线监测信息的采集、汇聚、预处理功能，具备分布式计算、存储能力；③感知设备，包括传感器和智能传感器，具备在线监测数据采集、多样化的下行在线监测数据采集通信接口，接收或发送监测数据及控制指令，并执行控制指令，二者的区别

在于普通传感器需将采集信息发送到主IED进行61850化处理，而智能传感器可直接将信息转化为61850格式。构成通信网络的主要设备为：①汇聚网络设备，实现主站通信关口服务器与监测主IED之间、监控主IED之间的互联；②接入网络设备，实现传感器与监测主IED之间的互联；③网络管理服务器，实现对通信设备的协同控制。

为了适应输变电设备传感网信息网络结构改变，本任务提出在变电站采用“接入+汇聚”的结构以实现物联网通信的可管、可控。在输变电信息设备与通信设备构成的网络结构中，通信网络由站外核心网与站内汇聚网和接入网组成。智能传感设备感知信息（生数据）接入中间层的主IED设备，通过该设备处理加工为熟数据后，再将信息流汇聚交换至本地主站，或者再经过核心网与远端主站相连。通信网络的功能层次定义如下：接入网实现传感层设备之间、中间层与传感层设备之间的互通；汇聚网不仅实现中间层设备之间互通、站控层与中间层设备之间互通，而且引入通信流的控制监管功能。另外，主IED也可作为通信关口设备隔离通信网络的汇聚网与接入网，从而降低传感层装置对通信网络的冲击。全景信息中的部分信息（如视频监控）不通过主IED直接向上汇聚。

汇聚层功能模块主要实现通信流综合管控及监视，接入层模块实现接入控制功能并通过接入子网实现网络各类划分，各模块间接口主要实现信息数据的交换与保护限制功能。通信设备实体功能见表2-13。

表2-13 通信设备实体功能

设 备	功 能
汇聚层设备	汇聚接入层的用户流量，进行数据分组传输的汇聚、转发和交换 根据接入层的用户流量，进行本地路由、过滤、流量均衡、QoS 优先级管理，以及安全机制、IP 地址转换、流量整形、组播管理等处理 根据处理结果将用户流量转发到核心层设备或在本地进行路由处理 完成各种协议的转换，以保证核心层连接运行不同的协议的区域
接入层设备	汇聚下级设备流量，进行数据转发和交换 实现用户安全及接入认证 管理用户流量、控制用户数据流向 实现用户不同服务级别的分类和处理 实现对端口、VLAN 或 IP 的流量统计 数据帧过滤 网络管理功能

(2) 输变电设备传感网的通信网络拓扑结构

通信网络一层设备不具备突发处理能力，数据处理能力差，动态性能不佳，且业务通道分配不够细；三层设备网络协议复杂，协议穿透能力差，容易滤掉二层网络信息，同类业务不在同一网段内，大量

有用信息容易被滤掉；二层设备具有MAC地址，广播等信息的传输方便，易于管理。因此输变电设备传感网的通信网络宜采用简单、可靠的二层网络，并要防止广播域过大造成广播泛滥等不可控后果。

输变电设备传感网的汇聚网络采用汇聚交换机支持主IED设备之间互通。针对双主IED互联场景，汇聚交换机直接提供主IED之间的通信链路；而针对多主IED场景，汇聚交换机应采用星形或环形拓扑结构。

①双星形（也可以是单星形）汇聚网络结构如图2-11所示，整个网络由两个中心汇聚节点构成，且整个网络由两个中心节点执行集中式通行控制管理，各主IED间的通信都要通过中心节点转发。在单星形结构中，信息节点之间只有一条MMS连接，而双星形为任两个节点之间提供两个MMS连接。若中心节点与 N 节点相连接，平均时延均为 t 。单星形结构中网络的可靠性为

$$\delta_{\text{single}} = p^N \quad (2-1)$$

双星形结构中网络的可靠性为

$$\delta_{\text{double}} = 1 - (1 - p^N)^2 \quad (2-2)$$

由于冗余机制其可靠性得到大幅提高。

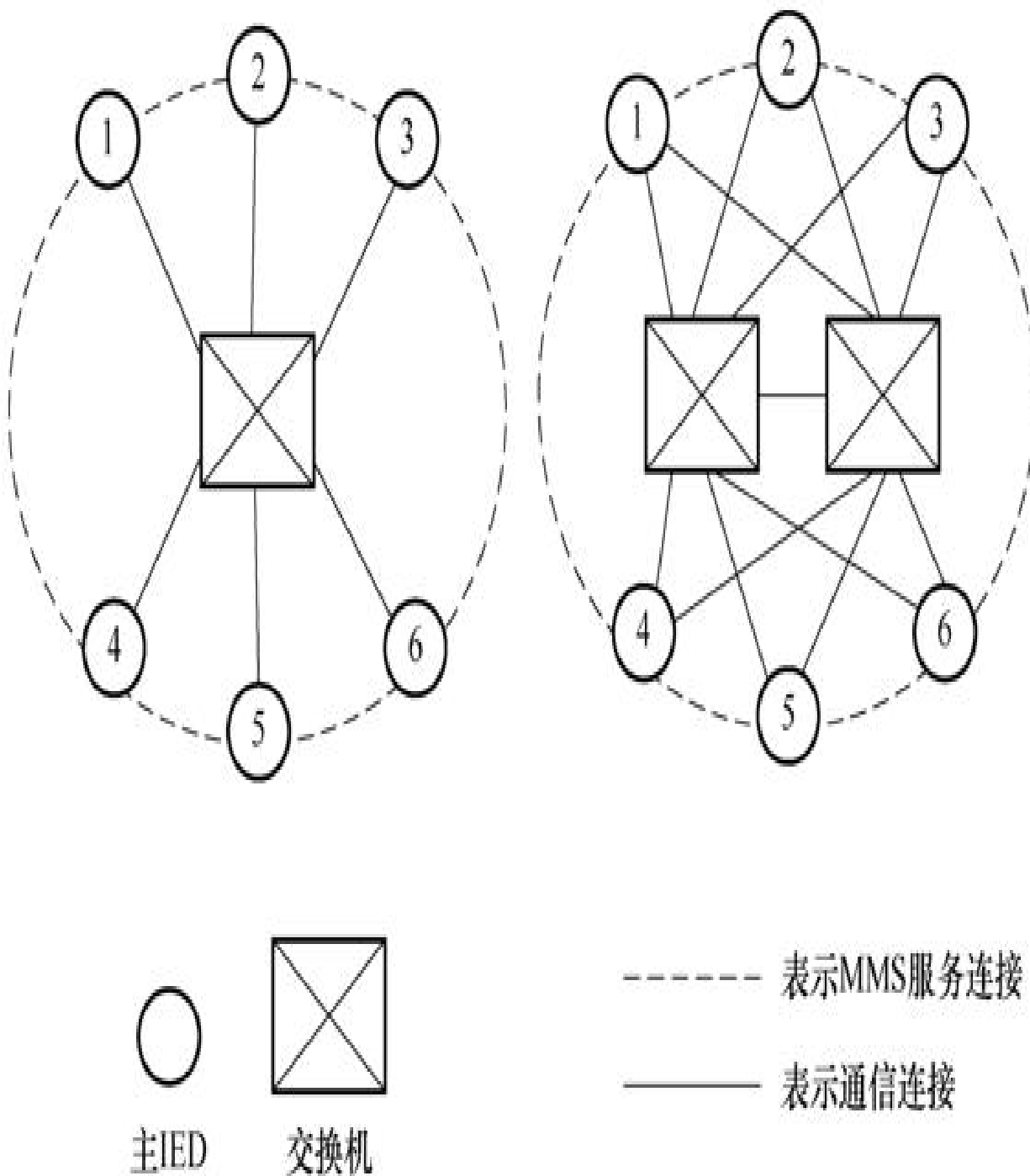


图2-11 单星形和双星形拓扑

②环形汇聚网络拓扑结构如图2-12所示，主IED之间的信息流沿交换机之间的固定方向流动，两个主IED之间仅有一条工作逻辑链路（当且仅当一条物理链路出现故障时，交换机RSTP协议才重新计算路径），交换机1和交换机6是绕回物理线路进行通信（如图中虚线箭头

所示)。若交换机的个数为 N ，设汇聚交换机之间的时延为 t ，链路共有 $N-1$ 跳，则最大时延为 $(N-1) \cdot t$ ，平均时延为

$$t_{\text{delay}} = \frac{\sum_{i=1}^{N-1} it}{N-1} = \frac{N}{2} \quad (2-3)$$

若主IED和交换机之间链路的可靠性为 p ，交换机之间的可靠性为 q ，则整个网络的可靠性为

$$\delta_{\text{ring}} = p^N q^{N-1} \quad (2-4)$$

在环形网络中，由于信息源在环路中是串行地穿过各个节点，当环中节点过多时，会影响信息传输速率，使网络的响应时间延长；环路是封闭的，不便于扩充；对分支节点故障定位较难，施工方便但成本高，对交换机性能要求不高。在星形网络中，每一个要发送数据的主IED都将要发送的数据发送到中心节点，再由中心节点负责将数据送到其他IED节点，施工较复杂，适用于对中心节点交换机性能要求较高且带宽的场合。

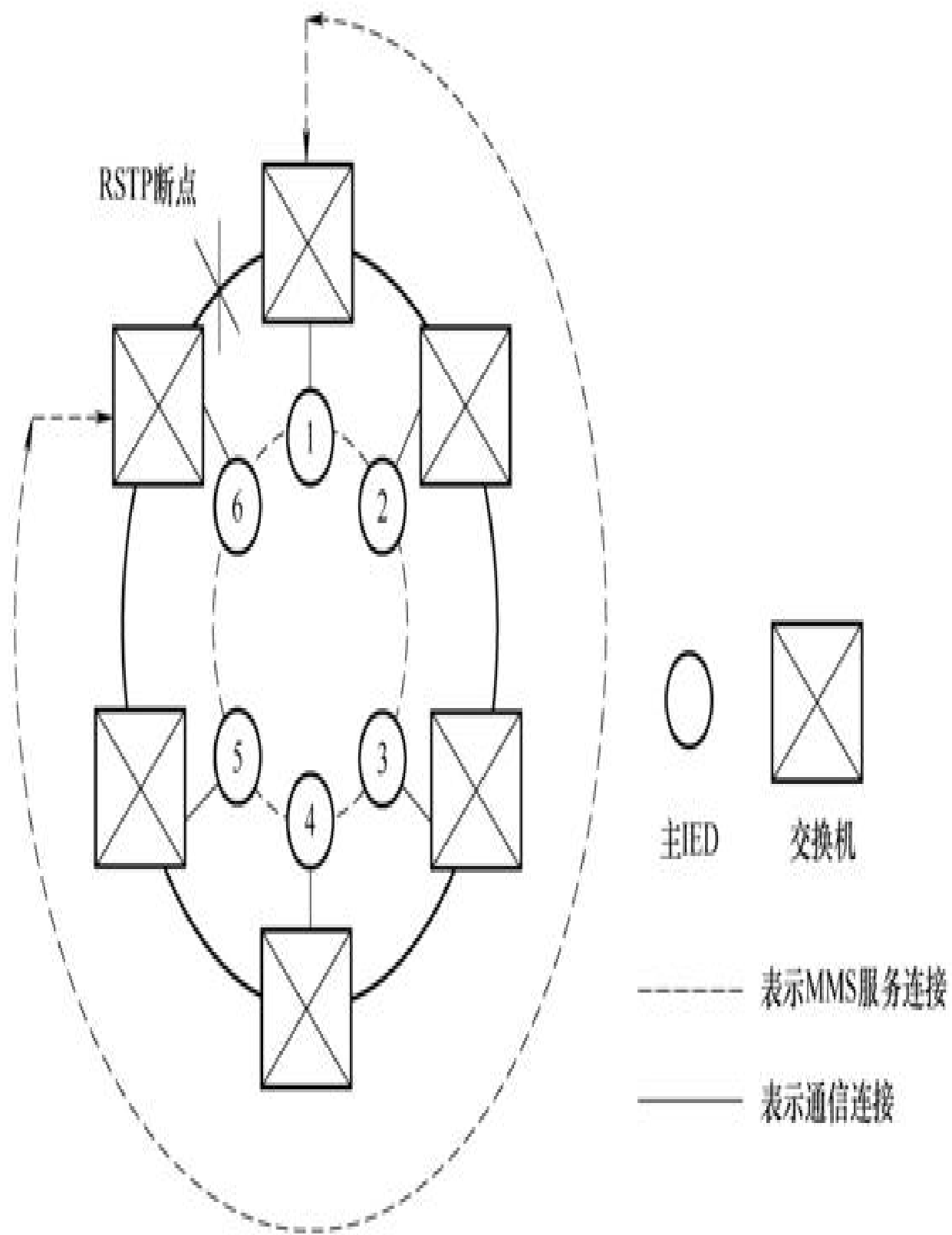


图2-12 环形拓扑

当 N 大于2时，环形、单星形、双星形拓扑结构的可靠性有如下关系：

$$\delta_{\text{ring}} < \delta_{\text{single}} < \delta_{\text{double}} \quad (2-5)$$

故选择基于冗余机制的双星形网络结构作为汇聚层的组网方案。

由上述分析可知：通信网络在汇聚网层构成的双星形拓扑结构具有可靠性高、通信节点设备少的优点，但链路通道需要多；相对来说环形拓扑结构则在可靠性和通信节点数量方面较差，但光纤通道铺设容易。

2.2.2 输变电设备物联网通信技术

1. 复杂通信流控制

物联网异构信息以及分布式的信息处理，使得通信网络中的IP/MAC通信流种类增加、带宽和QoS（Quality of Servers，服务质量）要求高、流向从纵向树形发展成纵横网状流。通信流量控制是解决物联网复杂性的关键技术：①为此采用DPI（Deep Packet Inspection，深度包检测）、DFI（Deep Flow Inspection，深度流检测）流控技术，具体是采用BAS（Broadband Access Server，宽带接入服务器）交换机，对进入该交换机的通信流进行“限制带宽”“过滤通信包”“流向控制”；②通信设备网络结构中间增加汇聚层，构成接入+汇聚的两层结构，不同智能采集设备之间通过汇聚层的BAS交换机实现信息交换，经过重定向的两跳通信连接以规范信息流向，在网络设备大负载（包括由于设备及其接口故障，如ARP攻击构成的广播风暴）条件下具有优良的通信效果，所增加的时延完全可以控制在技术规范要求之内。

流量控制技术通过设置不同类型的网络接口队列，从而改变数据包发送的速率和优先级，达到流量控制的目的。流量控制框架主要由队列规则、分类和过滤器组成。当业务流传输到通信网络时，交换机中的分类和过滤器对到达的数据流处理后，存入不同优先级队列，并根据设置的规则（如带宽、转发接口、优先级等）转发数据包。若

IEC61850交换机可以直接解析应用层信息，从而保证关键数据的无延迟传输，其流程如图2-13所示。

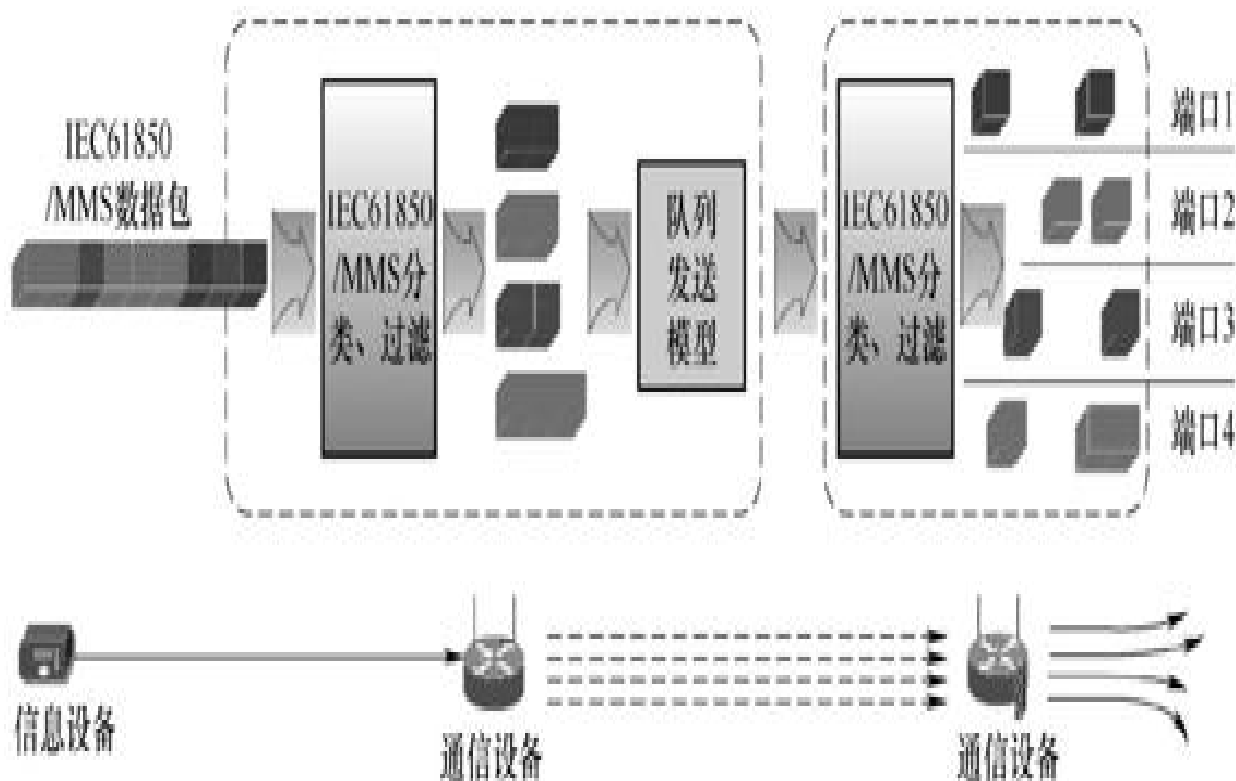


图2-13 多源信息流的流控机制

实际网络中并非所有交换机都具备流控功能，即使有流控功能也难以实现统一策略配置，为此采用数据流重定向技术，通过汇聚网络的高端交换机实现全变电站统一的控制策略，如图2-14所示：综合监测单元之间和主IED之间的数据流均通过汇聚网交换机过滤。

业务流控流程如图2-15所示，终端业务流分类，以VLAN标识提供其通信网络管理通信流量和设备。对于智能终端传感器在设备内部进行数据流量标识，直接上行到接入交换机，对于普通传感器，接入交换机根据接入端口对上行数据流打上标识。其次，接入控制规则应用，包括随机接入（参见IEEE802.11E定义）或轮询Polling接入方式。IEEE802.11E和IEEE802.11协议均采用载波监听多址接入/避免碰撞（CSMA/CA）的退避原理，两者最明显的区别是前者通过提供对业务的区分服务实现对不同优先级业务的服务质量保证。如图2-16所示为IEEE802.11E数据帧格式，在地址4/序列号控制字段后增加了2字节QoS控制字段，用来表示数据流的QoS信息。在轮询机制中，接入点首先通

知各个节点屏蔽各自的分布式协作模式，并在自己的节点列表里选择一个节点发送数据。最后接入点发送CF. End信号来结束非竞争期，进入竞争期周期。而业务流重定向是把流量定向到具备BAS功能的汇聚层交换机，进行流量控制。

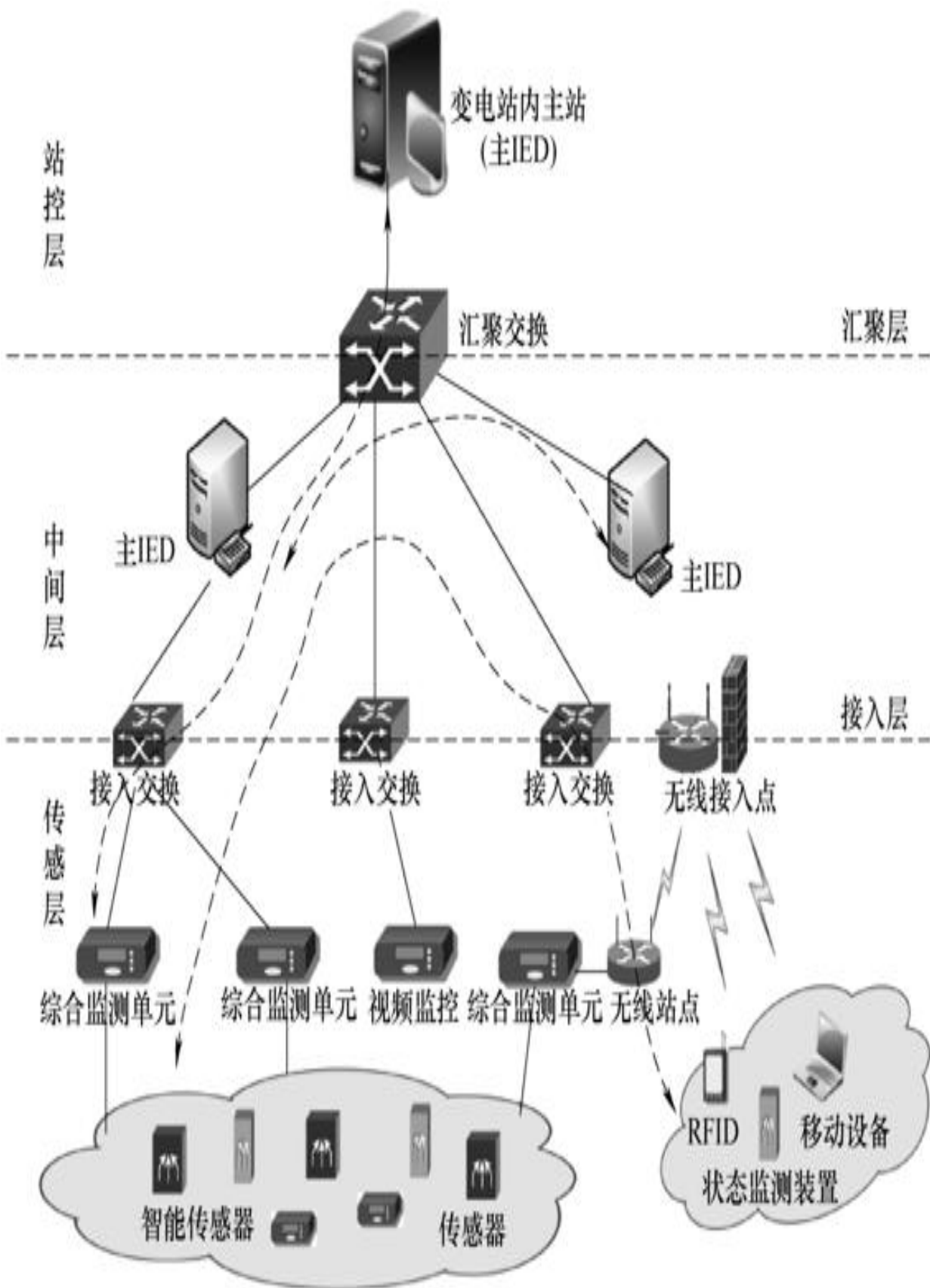
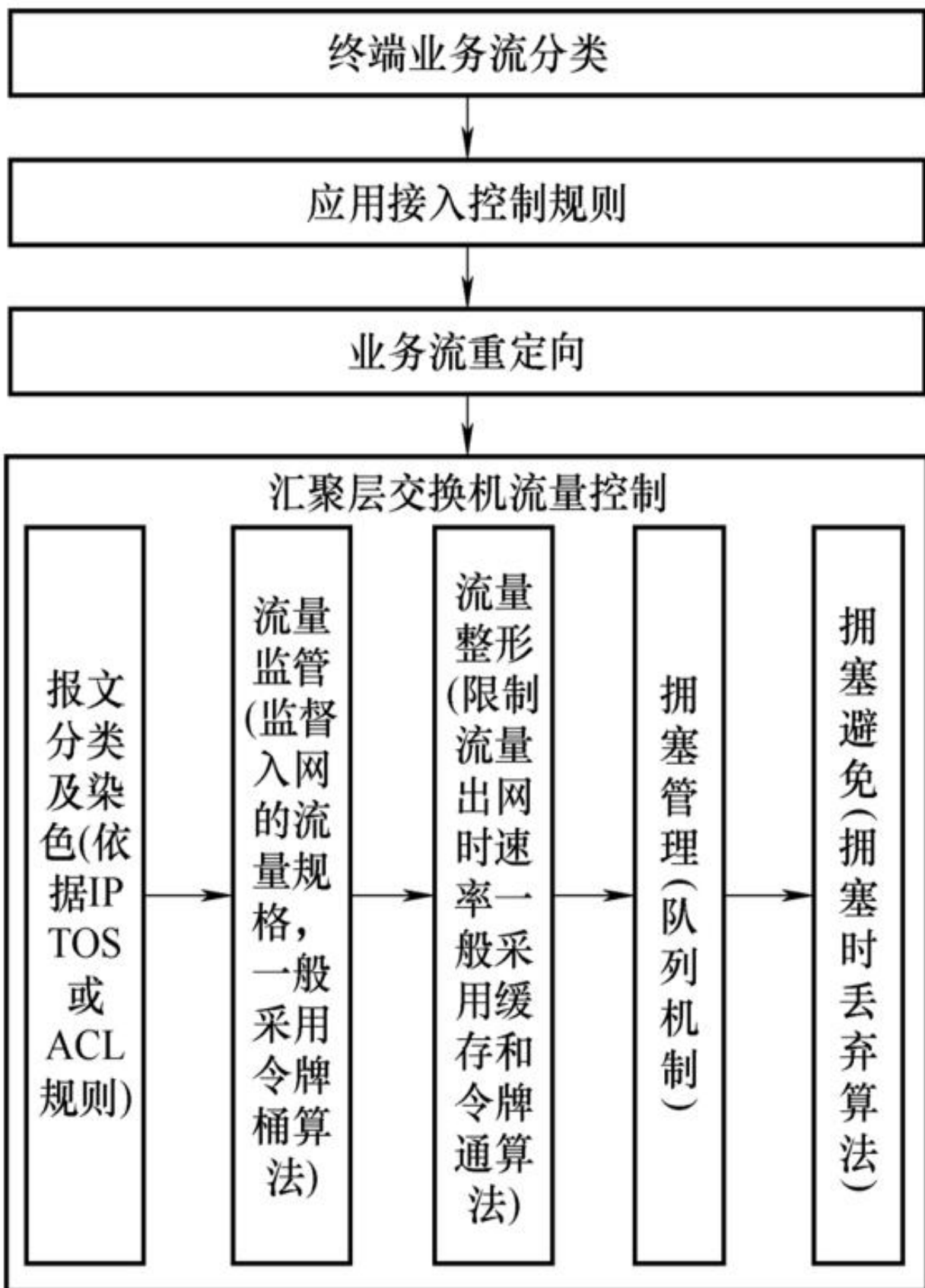


图2-14 信息流重定向图



占字节: 2	2	6	6	6	2	6	2	0~23124	4
帧控制	持续时间/ID	地址1	地址2	地址3	序列控制	地址4	QoS控制	帧主体	帧检验序列

MAC Header

具备BAS功能的交换机对汇聚层流量进行流量控制。包括报文分类和染色、流量监管、流量整形、拥塞管理和拥塞避免等。其中流量监管和流量整形主要采用令牌桶算法。典型情况下，令牌桶算法用来控制发送到网络上的数据的数目，并允许突发数据的发送。该机制基于令牌桶中是否存在令牌来决定何时可以发送流量。令牌桶中的每一个令牌都代表一个字节，如果令牌桶中存在令牌，则允许发送流量；如果令牌桶中不存在令牌，则不允许发送流量。因此，如果突发门限被合理地配置并且令牌桶中有足够的令牌，那么流量就可以以峰值速率发送。令牌桶算法的基本工作流程如图2-17所示，该算法允许最长字节的突发，但从长期运行结果看，数据包的速率被限制成常量。对于在流量限制外的数据包可以以不同的方式处理：丢弃；排放在队列中以便当令牌桶中累积了足够多的令牌时再传输；继续发送，但需要做特殊标记，网络过载的时候将这些特殊标记的包丢弃。

按规定的速率向桶内添加令牌

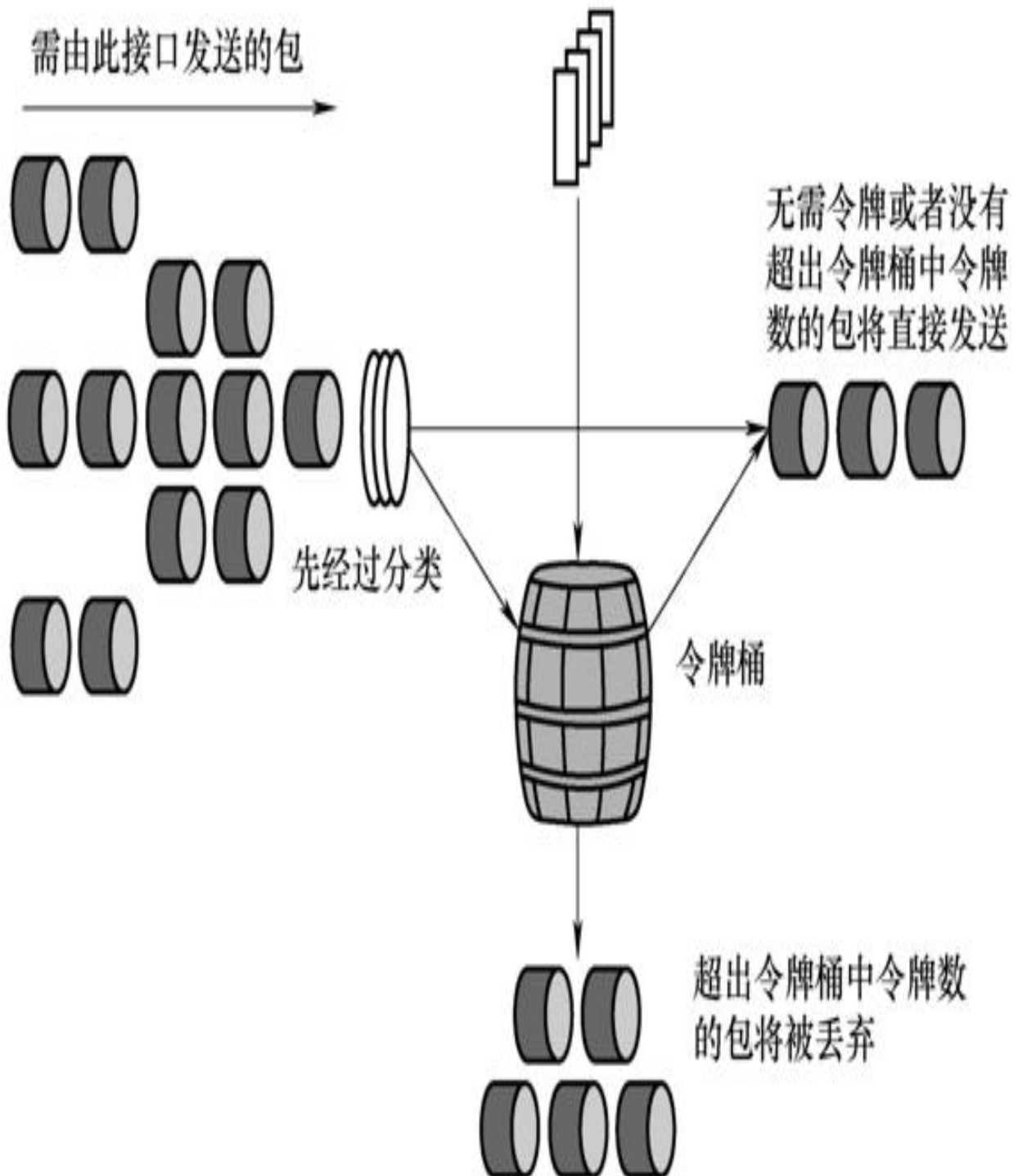


图2-17 令牌桶算法

2. 分布式处理网络

参考IEC61850设计传感网络设备模型，该通信网络协议将设备模型描述为物理设备（PhD）、逻辑设备（LD）以及功能逻辑节点（LN）。本任务首先确定了传感网络中通信和信息感知设备与IEC61850模型之间的关系，如图2-18所示：主站通信关口、主IED和IED等物理设备（PhD）与协议中逻辑设备（LD）对应，由于逻辑设备可以配置不同功能逻辑节点（LN），使得物理设备具有了不同的功能组合。IEC61850逻辑设备需要传输信息映射到通用性高的制造报文（MMS），该报文通过TCP/IP接口承载在通信网络中。

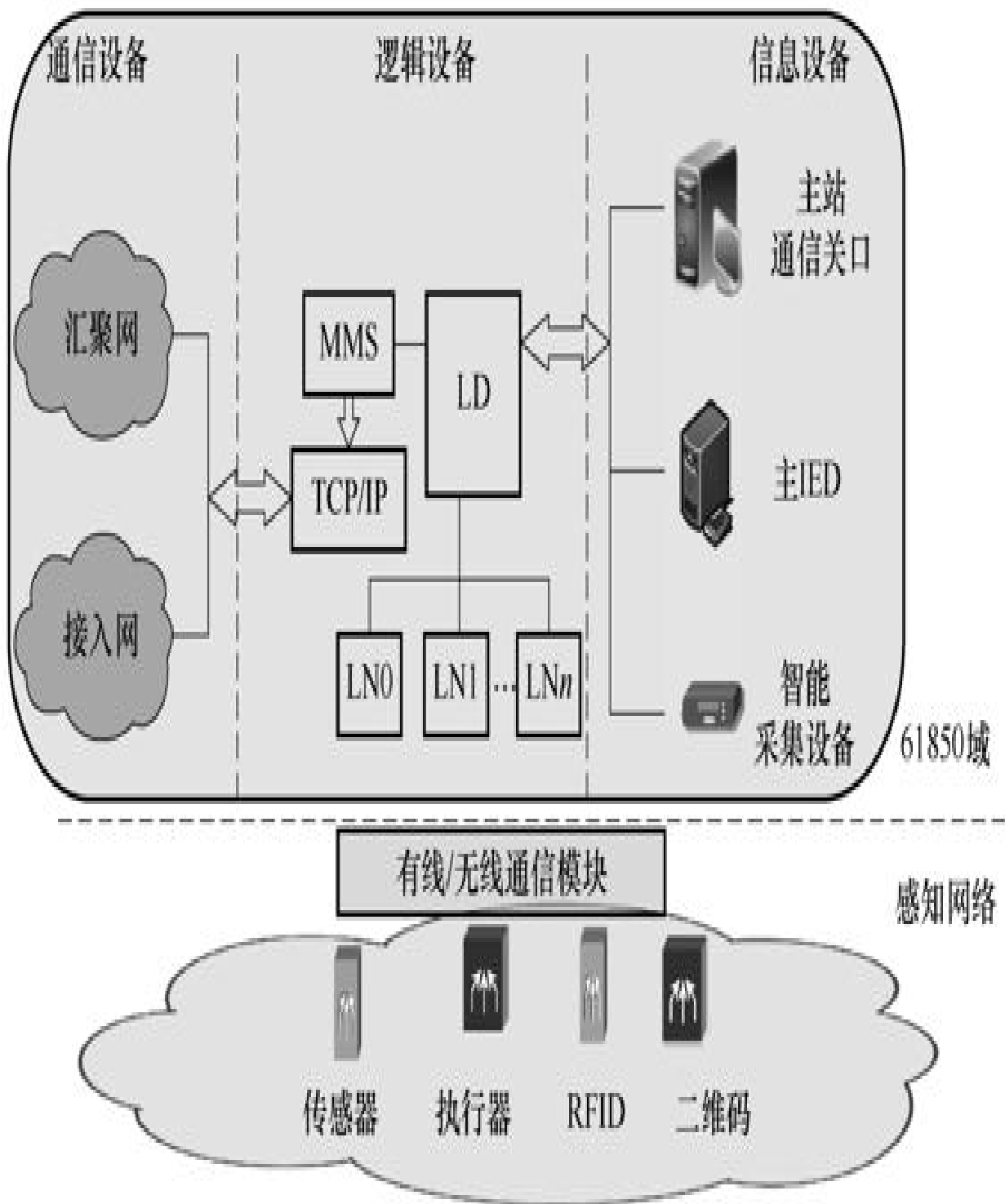


图2-18 输变电设备传感网通信信息建模

依据上述模型确定了感知设备建模方法，物理设备通过逻辑设备之间的映射配置不同功能。功能节点配置原则是：①主站通信关口服

务器依据与全景信息平台交互信息种类确定功能节点LN种类；②监测主IED依据数据处理和存储要求选择功能节点LN；③IED依据方便状态信息现场采集选择功能节点LN。

进一步建立了物理设备与逻辑设备之间的动态映射关系，支持物理设备之间的协同工作：①一个物理设备包含多个逻辑设备，从而减少了物理设备数量；②一个逻辑设备同时出现在多个物理设备中，从而在其中某个物理设备故障后仍然保障逻辑设备的功能服务持续性。

上述信息设备建模方法实现了信息在传感网络内的分布式处理，同时也将增加传感网内的通信复杂度，需要根据其处理方式提供TCP/IP通信接口。监控主IED之间的分布式处理方法为：①IED直接将在线检测状态信息发往多个监控主IED，监控主IED建立多个IED设备的功能节点，通信网络提供IED与主IED之间的多归属通信链路；②主IED之间间接交互IED状态信息构成分布式处理网络，通信网络提供主IED直接互联通道。第一种方法实现简单，但处理能力较弱。

为了配置传感网络信息处理，TCP/IP通信网络分别采用汇聚网络设备和接入网络设备：①高性能的汇聚网络设备依据主站通信关口服务器与监测主IED之间、监测主IED之间的TCP/IP接口需求配置网络拓扑、路由和流控规则；②简单的接入网络设备实现监测主IED与IED之间的直接互联。

最后，从工程方面考虑：①逻辑设备主要限制在一个变电站间隔，而主IED物理设备可以完成多个间隔的逻辑设备功能；②根据主IED设备接口的通信需求，采用星形或环形的通信网络设备拓扑结构。

2.2.3 输变电设备通信网设计

1. 输变电设备传感网信息通信模型

物联网技术带来了多样化的信息与分布式处理等新的信息结构，也需要建立新的通信网络结构。

采用IEC61850通信协议栈描述通信模型输变电设备传感网，考虑IEC61850应用协议与其信息传输报文MMS（制造报文规范）、TCP（传输控制协议）之间的映射、封装关系。IEC61850数据包协议栈和映射过程分别如图2-19、图2-20所示，首先将IEC61850信息映射为MMS报

文，再将封装为MMS格式的PDU报文承载到IP网络的TCP包中传输。由此可知：输变电设备传感网信息网络接口传输的是MMS报文，而通信网络接口传输的是TCP/IP报文（或者是MAC帧）。

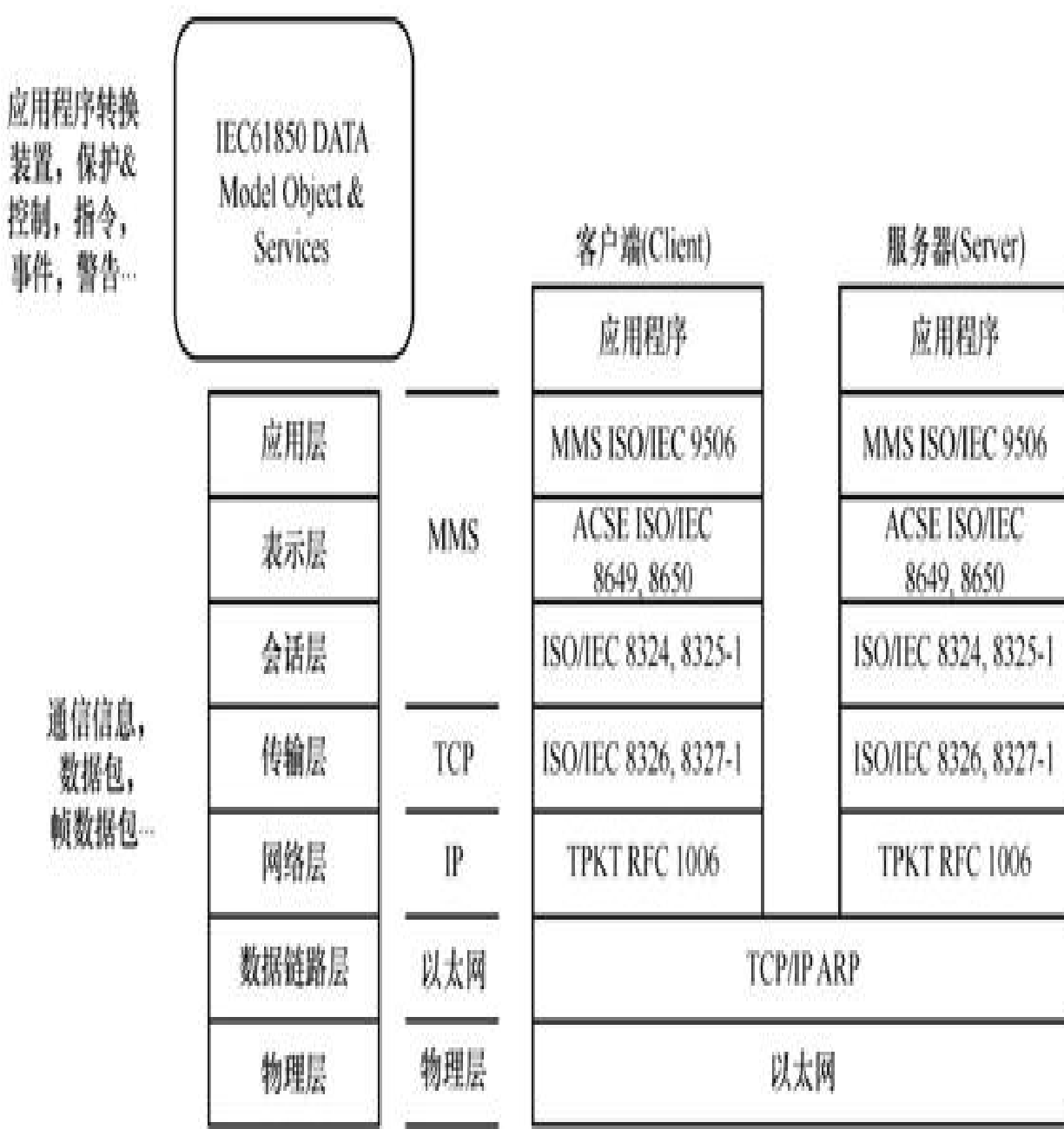


图2-19 IEC61850与MMS协议栈

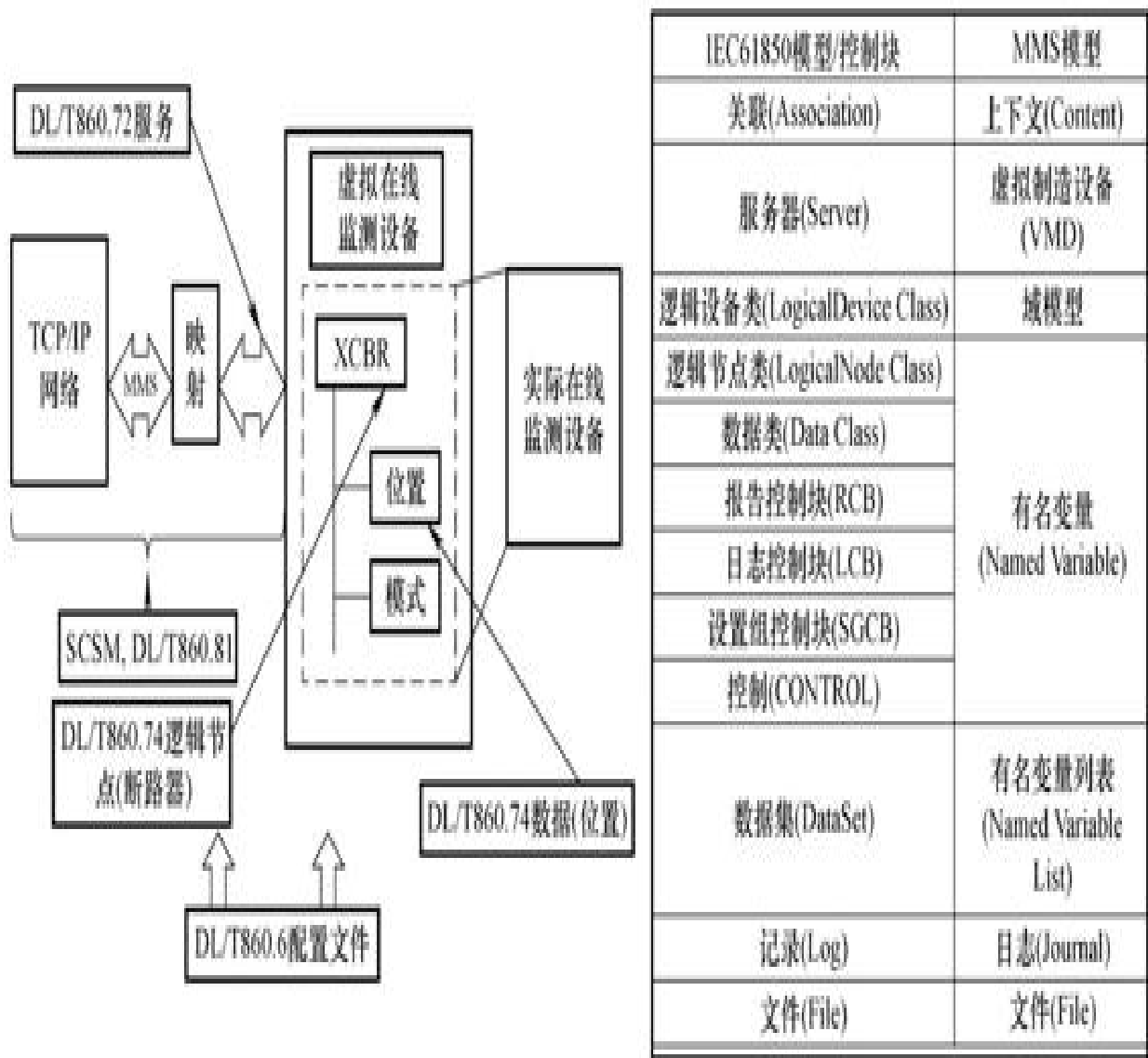


图2-20 IEC61850协议栈与MMS通信连接映射

2. 变电站传感网设计方法

(1) 通信设备选择

通信网络设备可以选择传输设备、交换设备和路由设备。传输设备如SDH (Synchronous Digital Hierarchy, 同步数字体系网络)、MSTP (Multi-Service Transfer Platform, 基于SDH的多业务传送平台), 具有时延低、带宽高、可靠性好、安全性高、资源利用率低、网络灵活性差等特点, 因此不适合物联网环境下的本地接入网。交换设备如二层或三层交换机的数据转发效率高、通信协议简单、带宽利

用率高，但是由交换设备构成的二层协议网络需要依靠ARP（Address Resolution Protocol，地址解析协议）广播进行寻址，容易产生广播风暴，网络的可控性差，需运行STP（Spanning Tree Protocol，生成树协议）或RSTP（Rapid Spanning Tree Protocol，快速生成树协议）、IEEE802.1P（LAN Layer 2QoS/CoS Protocol for Traffic Prioritization）补充协议。路由设备如路由器可靠性及稳定性好，但其网络协议复杂，数据转发效率低，网络配置不灵活，需要DHCP（Dynamic Host Configuration Protocol Relay，DHCP中继）或DHCP Server（DHCP服务器）等辅助功能实体。

结合输变电设备传感网的业务特性构建输变电设备传感网通信组网方案，其传感层和中间层采用简单的交换设备构成基于接入和汇聚功能的二级网络；变电站控制中心到远端调度或控制中心采用由路由设备构成的三层协议网络。

本地通信接入网完成传感层数据的广泛接入及相关的接入控制功能，实现终端传感器、主IED等节点的汇聚、通信协议的转换、地址的映射、不同业务逻辑通道的划分和隔离等功能。汇聚网除了实现对纵向数据流的汇聚和分发、流量监管、终端设备的识别和认证外，还实现中间层不同主IED之间、传感层关联传感器之间的网状互联及相关的网络控制功能。核心网路由器通过数据网络连接到远端变电站控制中心和公司资产管理中心，其传输通道也可以是SDH/MSTP，或者是管道划分能力更强的PTN（Packet Transport Network，分组传送网）网络。在满足输变电设备传感网业务之间（如变电站监控、输电线路监控、视频、语音等）安全隔离的基础上，实现对信息采集、处理及对存储设备进行标识，以进行区分服务和网络管理。

本地网络采用接入交换机加汇聚交换机组成的二级网络结构，变电站传感层综合监测单元以有线网络作为主，连接到接入交换机，实现在线监测数据采集、汇聚和上传，中间层多个主IED通过点对多点的拓扑连接至汇聚交换机；备用网络是无线AP（Wireless Access Point，无线接入访问点）和Station（无线站点）组成的无线网络，网络拓扑为点对多点，当有线网络发生故障时，可以自动切换到无线网络，实现可靠性的增加及流量分担。资产管理终端移动设备与AP之间采用无线链路进行连接，同时，置于AP中的可配置防火墙将对非法无线设备的接入请求进行过滤拦截。在设备参数选择上，汇聚交换机采用具备BAS功能的三层交换机（一般在1000Mbit/s级别，能够实现对三层IP甚至四层TCP地址信息的解析），接入交换机采用

(10/100Mbit/s) 以太网交换机, 无线接入点和无线站点采用2.4GHz或5.8GHz频段的WiFi无线路由器(54Mbit/s)。

(2) 复杂网络的通信流管控设计

通信网络中的物联网数据流方向复杂, 中间层的主IED之间、主IED与站控层的主站之间、主IED与传感层设备之间、传感层关联设备之间等都有数据流传输。本任务以中间层主IED为关口节点构成独立的二层的逻辑子网, 从而限制了传感层设备的ARP广播、时钟同步报文、组播等流量, 传感设备归属于有限几个主IED关口节点(一般采用双归属方式); 同时主IED也可作为一层或二层通信设备, 实现对纵向数据流的中继或者转发功能, 满足实时性要求高的业务快速透传; 对于一些不需要中间层设备预处理的业务, 如视频监控业务, 可直接通过接入交换机连接至汇聚交换机, 上传到主站系统, 简化通信业务处理流程。具体配置方案就是规划不同的VLAN网段满足业务安全隔离, 接入交换机根据端口对业务流打上VLAN标签, 透传到汇聚交换机上行接口、解标签, 进入主站系统。汇聚交换机通过学习上行数据流, 得到源MAC地址和其对应的VLAN之间的绑定关系(或使用静态MAC地址与VLAN绑定)。定义ACL(Access Control List, 访问控制列表)规则, 当有下行数据时, 根据不同的目的MAC, 添加相应的VLAN标签。另外, 主IED之间、传感层关联传感器之间互访数据流必须先上行到汇聚交换机再回环下来, 增加了网络对本地业务交换的管控能力。

随着输变电物联网智能终端数量增加, 通信设备及其接口的故障概率随之增大, 为此需要检测故障情况下通信网络在处理业务流量时的稳定性。在利用ARP包模拟广播风暴故障产生的场景中进行数据连通性测试时, 传统网络近于瘫痪, 而在本节所提出的组网环境中, 网络最大时延小于100ms, 依然满足在线监测系统的实时性要求。

(3) 变电站网络安全设计

1) 采用802.1X身份认证和授权, 如图2-21所示, 可以配合企业已有的身份认证服务器来进行身份认证和密钥分发。

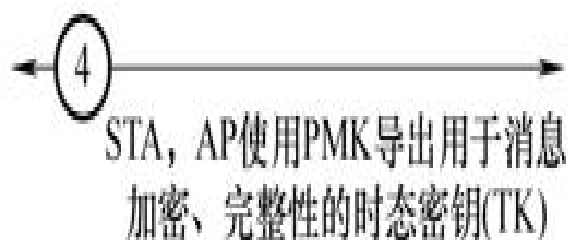
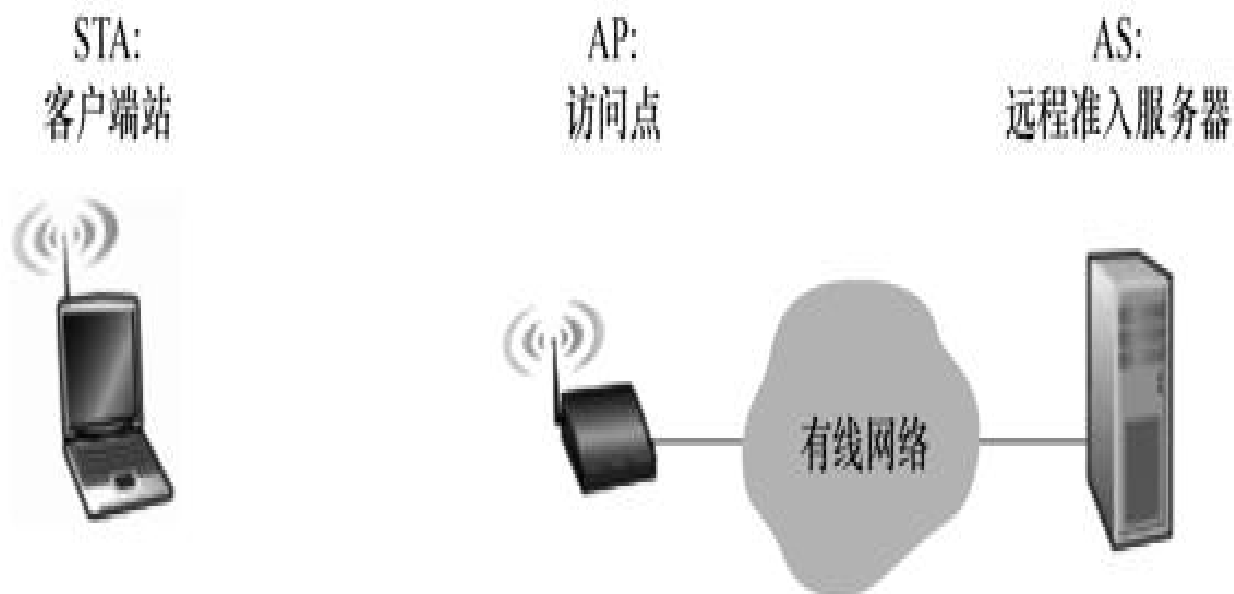


图2-21 802.1X身份认证流程

2) 地址过滤技术作为平台安全性保障之一，必须严格地区分授权设备和非授权设备，应用MAC、IP地址过滤功能，如图2-22所示，平台可以控制链路层上网络的无线设备及有线设备，允许授权的设备进入，并拒绝未授权的设备接入，例如：对设备的授权由MAC List控制，从而为整个平台提供更好的安全保障。变电站内汇聚网采用具备BAS功能的交换机可以实现数据过滤功能。

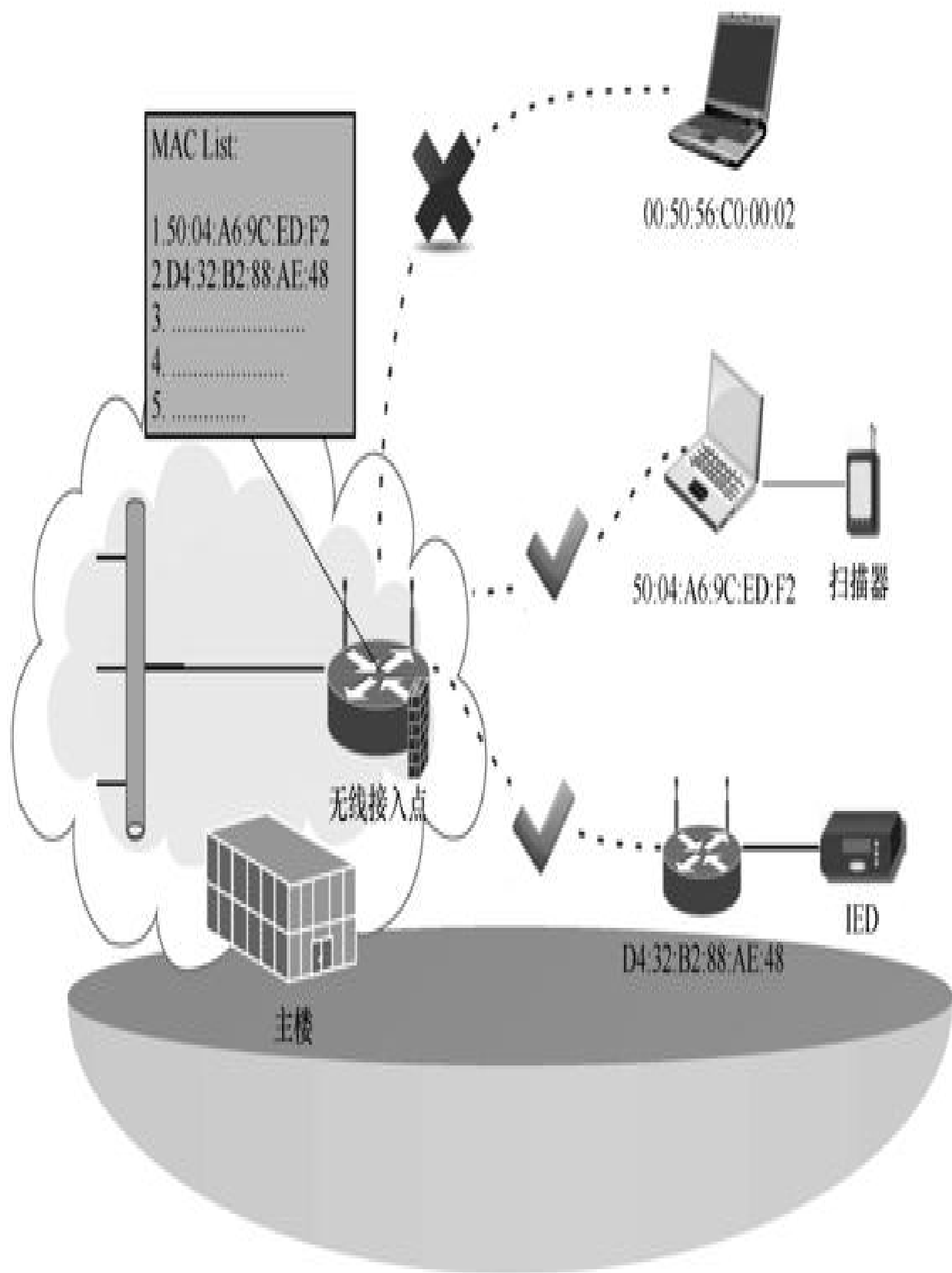


图2-22 变电站内部地址过滤示意图

3) 信息隔离技术, 输变电设备传感网位于电力系统的管理信息大区, 在变电站内部也存在不同的信息子系统(主站服务器、主IED等), 因此, 需要在这些信息子系统中接入电力设备的防火墙, 过滤通过网络的数据信息, 仅允许符合特定规则的数据包通过。另一方面, 变电站内多样化的输变电设备传感网信息流在相同通信物理网络上流动, 需要将物理网络划分出不同的逻辑子网, 以实现数据传输之间的相互隔离, 以保证信息安全。综合考虑实现复杂度、性能指标因素, 选择二层VLAN隔离。

4) 异构双网双通道融合技术, 电站的通信网络主要应该解决网络覆盖能力和通道可靠性问题, 为此在变电站设计了有线与无线结合的异构双网双通道结构, 如图2-23所示: ①配合物联网信息采集与信息处理之间的深度互联, 智能采集设备与主IED设备之间构成了“手拉手”的双通信链路, 主IED设备之间构成了多通道互联; ②采用无线与有线通信网络异构组网, 因异构网络具有不同链路故障模式(有线带宽高、传输稳定、但线缆故障排查困难, 无线信道容量低、但没有线缆故障问题), 从而提高了连接可靠性; ③异构网络解决了在线监测与资产管理巡检信息互联之间的网络建设问题, 无线网络获得资产设备现场标识(RFID)、有线网络推送巡检设备状态信息和历史数据。

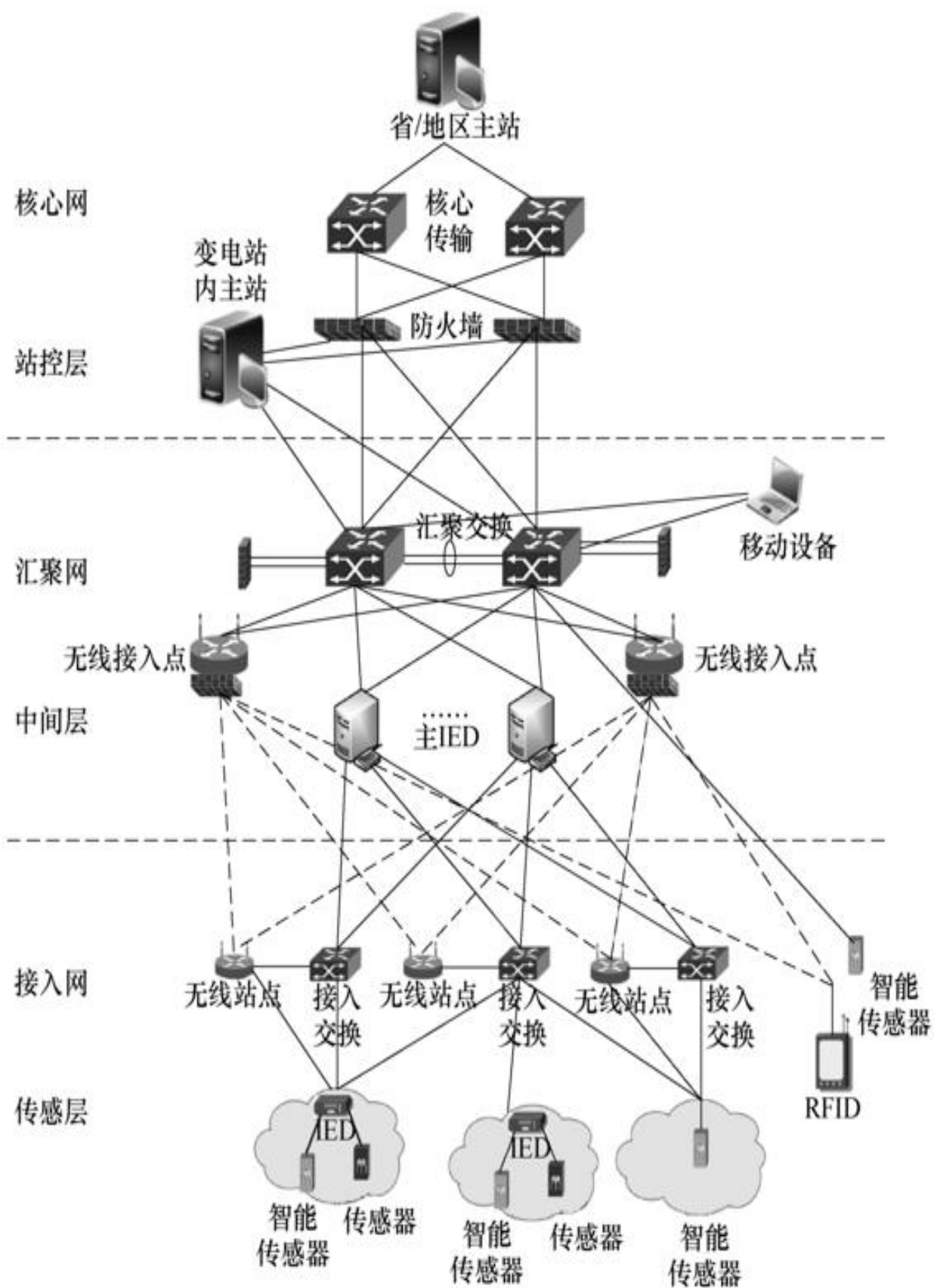


图2-23 异构双网双通道通信网络结构

(4) 参数配置实现

本任务采用了网络管理实现上述异构双网控制协同，在通信设备中对网络设备的网络接口带宽、无线加密、路由增加删减等重要参数进行远程控制，网络控制模块的主要功能包括以下几个：

1) 路由控制，添加和删减网络设备的路由，支持的路由配置参数见表2-14。

表2-14 路由配置参数

功 能 模 块	功 能 子 项	功 能 说 明
静态路由配置	操作方法（添加/删除）	用于添加/删除路由器的静态路由器
	目的 IP 段	
	子网掩码	
	路由网关	

2) 组网控制，输变电设备传感网内部的每一台网络设备都是整个网络的一个节点，管理平台应能对每一台设备的组网进行控制，组网的控制主要通过网络接口的参数配置实现，对网络接口的配置需包含如表2-15所示的参数。

表2-15 组网控制参数

功 能 模 块	功 能 子 项	功 能 说 明
组网控制	MAC 地址	对系统中的虚拟 bridge 进行配置
	IP 地址	
	子网掩码	
	DHCP	

3) 无线网络设备工作于与普通无线网络不同的环境之中，在变电设备繁多的变电站环境中，通常多台无线设备一块运行，减少无线设备之间的干扰，降低误码率显得尤为重要。为提高数据传输效率、减少传输的干扰，管理平台对无线的特性进行详细的设置。同时，为防止监测数据被窃取和整个网络被入侵，对SSID广播和MAC过滤，无线控制模块实现如表2-16所示的参数配置。

表2-16 无线控制参数

功 能 模 块	功 能 子 项	功 能 说 明
无线控制	SSID 广播/隐藏开关	设置是否广播无线接口的 SSID
	MAC 过滤规则	对接入网络的主机 MAC 过滤功能进行设置
	发射功率调整	WiFi 的无线特性，达到适应不同应用场合的目的
	CTS 开关	
	Beacon 帧间隔	
	无线频道选择	

4) 网络接口带宽控制，如表2-17所示，连接于物联网网络内部的网络设备，每一个接口所需要承担的网络流量各不相同。为实现网络性能的最优化，管理平台对网络设备的接口的带宽进行配置。

表2-17 网络接口带宽控制

功 能 模 块	功 能 子 项	功 能 说 明
以太网接口带宽设置	以太网接口带宽	配置以太网接口的带宽

3. 输电线路传感网设计方法

输电线路上的数据采集，是通过安装在输电杆塔上的传感器设备完成的。一般是依据电力通信IEC60870-5-101规约和IEC60875-5-104规约封装数据，并通过通信网络传回到信息中心，通信网络拓扑结构主要为点对点、多点对点。

(1) 输电线路在线监测信息远传通信技术选择

采用无线通信支持物联网感知和信息远传是输电线路的通常方法，一般采用电信运营商的无线公网进行业务数据传输。运营商网络的无线通信方式采用2G、3G、4G网络，但都是采用蜂窝网络。以GPRS为例，终端数据依次经过运营商无线接入网、IP承载网、企业接入网到电力信息网络，如图2-24所示。

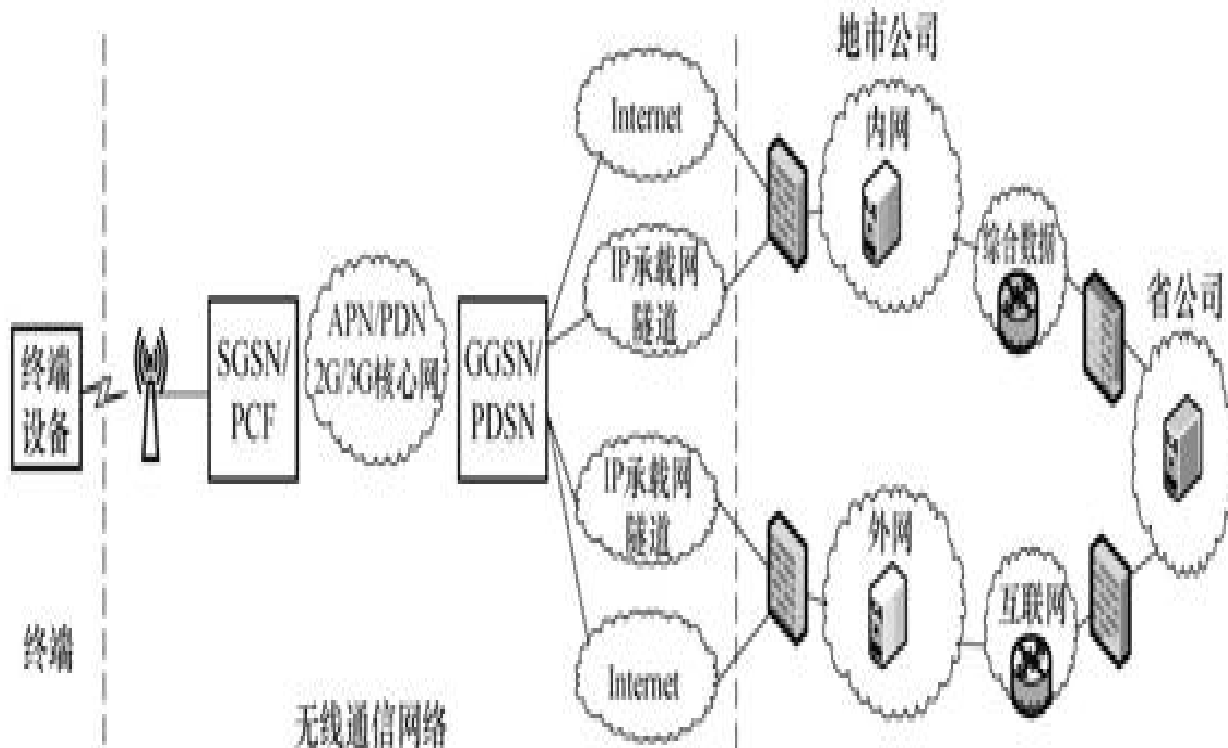


图2-24 无线应用网络架构

无线公网运营商提供的服务种类和数据速率受限，也难以满足监测的可靠性要求，运行维护成本高也是现实问题。无线公网在偏远地区往往没有充分的网络覆盖，尤其是不能满足电力输电线路的环境要求。另外，GPRS支持节点GGSN（Gateway GPRS Support Node，GPRS支持节点）要对传送的数据包进行过滤，因此存在TCP的虚假连接。电信公网在输电线路在线监测应用上存在先天缺陷。因此，针对电力通信专网应用，如图2-25所示，采用TD-LTE核心技术开发了基于230MHz频点的TD-LTE 230无线宽带通信系统。TD-LTE230电力无线通信专网的作用就是在远端监控模块与后台主站之间提供安全、可靠的数据传输通道，并提供对网络设备和远端通信模块的配置和管理功能。TD-LTE230

采用全IP网络构建，组网灵活，采用OFDM、MIMO等技术，使系统性能上有很大提升（20MHz带宽下，峰值速率下行100Mbit/s、上行50Mbit/s）。但是LTE230仍然属于面覆盖的蜂窝组网体制，而输电线路属于线状拓扑，蜂窝移动网络在建设和运维成本方面有较多困难。

本任务提出了采用无线Mesh网络与电力OPGW光传输相结合的网络解决方案，输电线路上的OPGW光纤为电力远程调度提供了可靠的通信，同时也为输电线路上的在线监控设备提供了信息传输的骨干通信网络。无线Mesh网络将输电线路上的多级杆塔信息采用无线中继方式汇聚到OPGW的信息汇聚点，从而减少OPGW光纤的开口次数。在每一个杆塔处布置一个无线传输节点，节点通过使用高增益的定向天线，配合适当的发送功率控制，满足不同传输距离下的远距离通信。该节点实现以下功能：①收集线路杆塔上传感器采集到的信息，并传递到变电站；②信息的中继传输，实现临近杆塔之间通信。

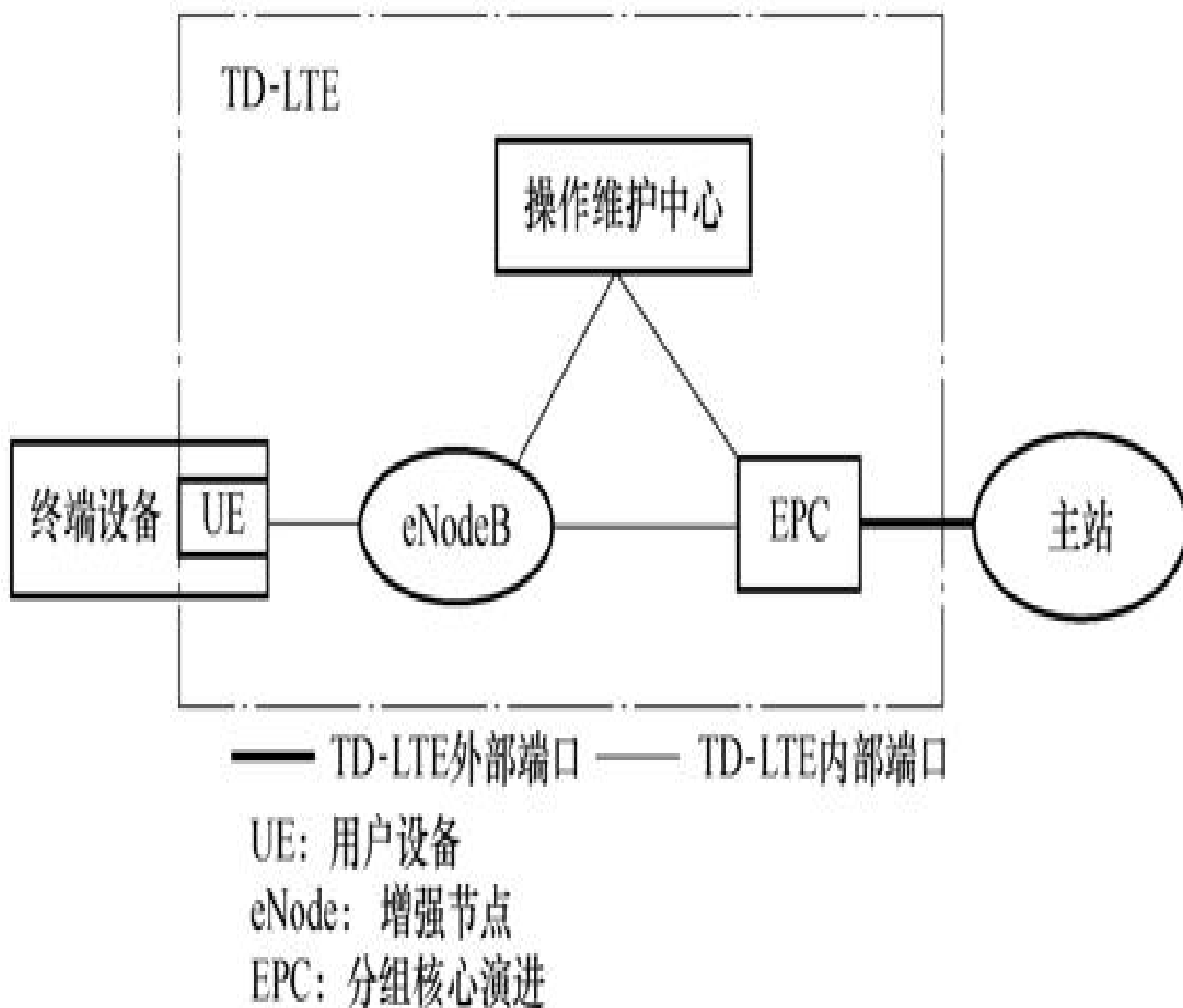


图2-25 TD-LTE230 网络架构图

无线Mesh网络可以选择WiFi、ZigBee或者是WiMAX技术，由于ZigBee只能达到200kbit/s带宽，WiMAX是国家禁止使用的技术。综合考虑通道带宽和技术成熟度，本任务以无线WiFi技术为基础，采用2.4GHz或5.8GHz开放频段的无线Mesh技术作为工程实现捷径，实际测得偏远地区一般没有无线干扰，如图2-26所示。

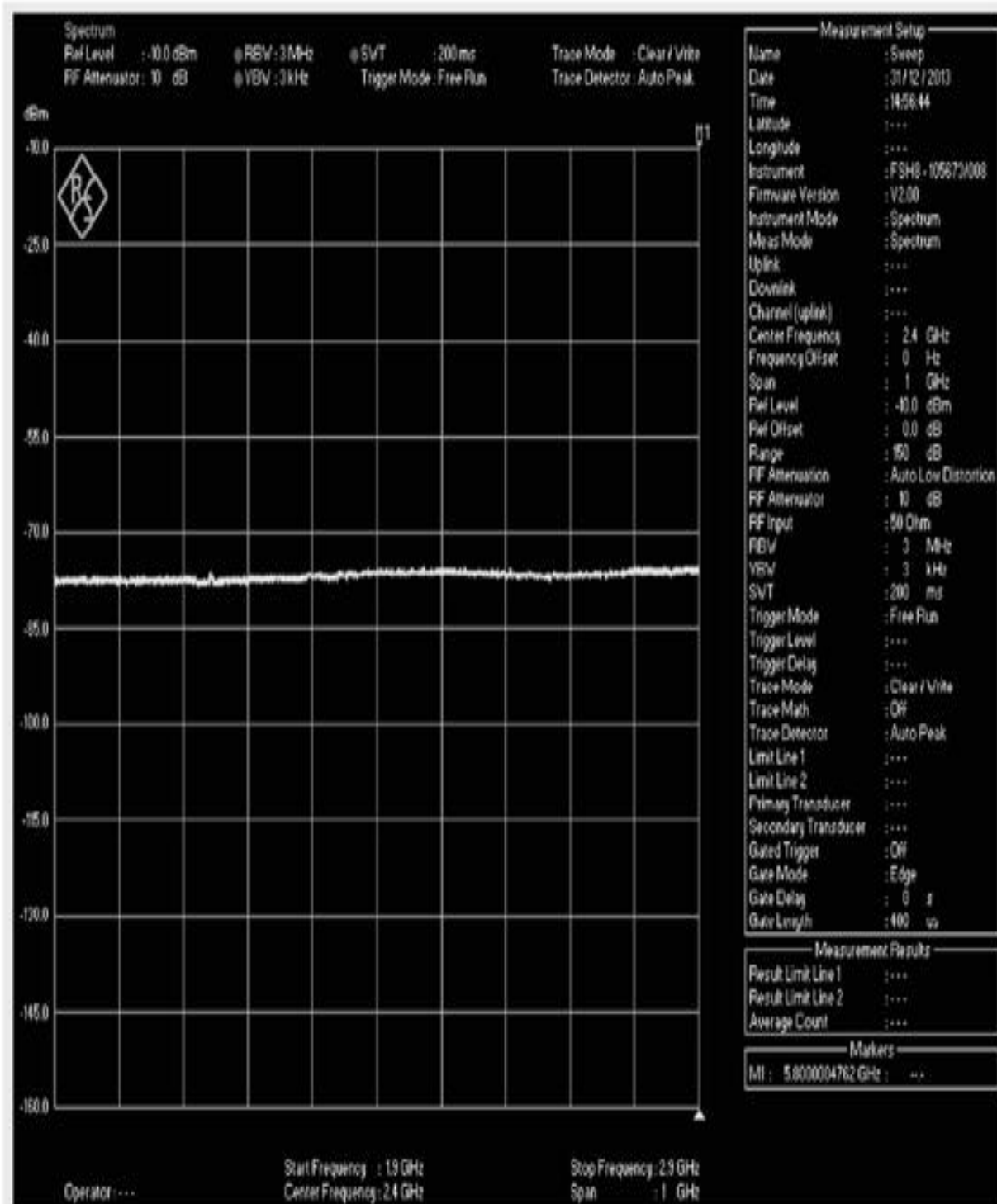


图2-26 220kV变电站线路2.4GHz噪声测试

(2) 无线Mesh网络的远程通信能力

无线Mesh网络的技术基础是IEEE802.11协议簇的WiFi，其通信节点之间需要实现数公里的远程通信。为此，需要考虑功率、无线资源、协议等限制条件。输电走廊信息节点沿杆塔呈线性分布，使用高天线增益，可以在满足无线电管理委员会的规定条件下提高通信传输距离。例如：若收发侧均采用增益为20dBi，接收灵敏度为-75dBm的定向天线时，设置发射功率为500mW便可以提供5km通信距离。传输距离不仅与发射、接收功率相关，也受到其链路层的接入控制协议影响。WiFi采用了CSMA/CA为基础的随机接入控制协议。综合可以获得距离与吞吐量之间的关系，见表2-18，采用802.11g，实现最高54Mbit/s的物理层传输速率。随着距离的增加，WiFi节点之间发送数据产生碰撞的概率也增加，其通信带宽呈阶梯形减小，时延增加呈阶梯形上升，通信距离在3km以内环境，可以直接使用点对点的拓扑实现。

表2-18 不同传输距离的时延和吞吐量

距离/m	时延/ μ s	吞吐量/Mbit/s
100	452	23.9
2000	633	22.2
4000	757	18.2
6000	834	17.1
8000	945	15.3

（3）无线Mesh拓扑结构

无线Mesh主要可以采用级联拓扑和环状拓扑结构，其中级联拓扑结构如图2-27所示，通过位于无线Mesh网络上的多个远端WiFi中继接口级联通信方式，实现OPGW光纤上的交换机或者是位于无线公网覆盖区的无线通信节点的接口互联。

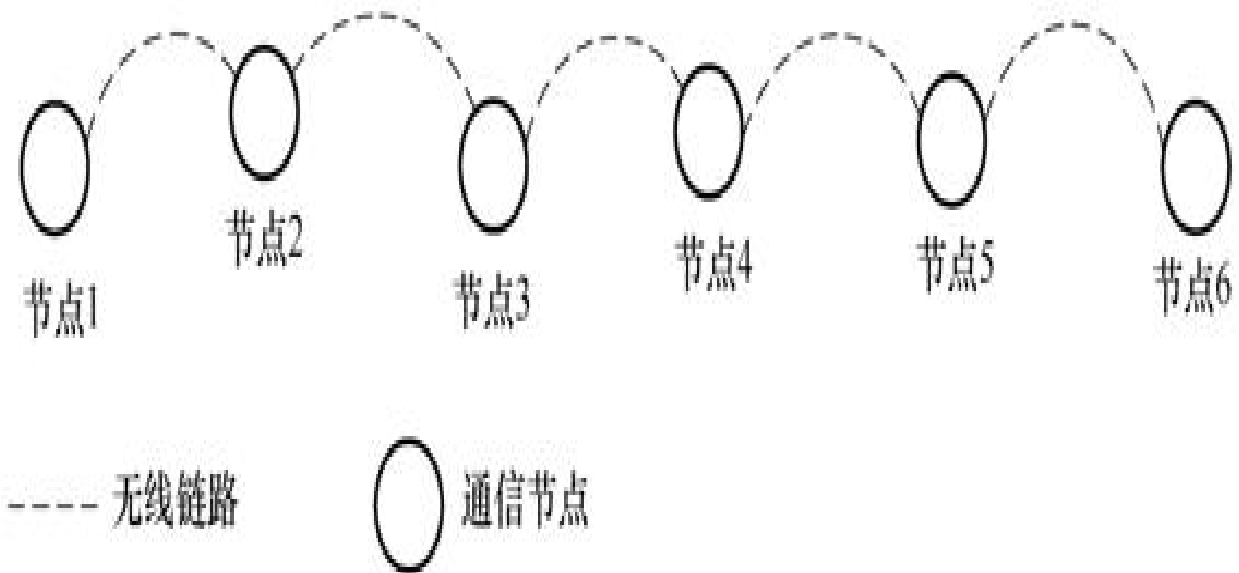


图2-27 级联多跳结构

环状拓扑结构通过位于无线Mesh网络上的多个WiFi中继接口组成如图2-28所示的环状拓扑通信方式，并实现与OPGW光纤上的交换机接口互联。环状拓扑结构各节点通过通信线路组成闭合回路，增加了环中数据链路，提高了传输带宽，但增加了网络复杂度，占用了无线频点资源。

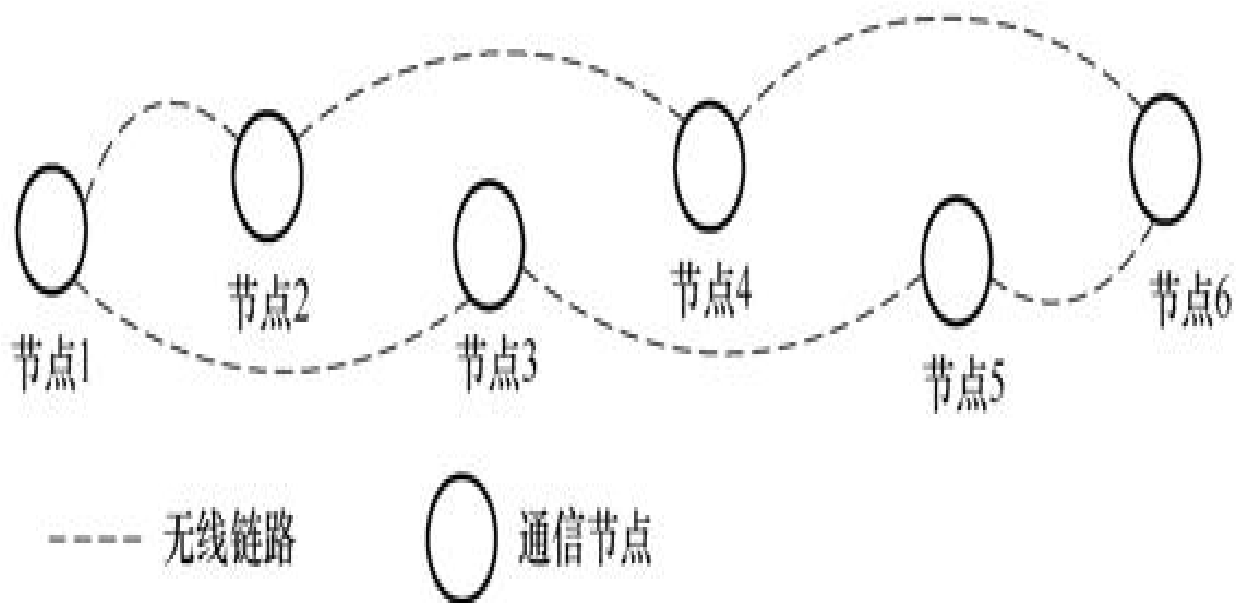


图2-28 环状结构

环状结构的时延与级联结构的时延类似，只与最远两端跳转次数有关，带宽是级联结构的2倍。在跳转次数不同的情况下，不同跳转次数对应的时延见表2-19。

表2-19 不同跳转次数对应的时延

跳 转 次 数	时延/ms
1	15.24
2	33.75
3	50.12
4	66.27
5	83.56

（4）输电线路信息安全技术

无线网络使用开放无线频段作为传输媒介，相对于传统的有线网络，更容易遭遇攻击。应采用多种技术为平台中信息安全提供保障，这些技术包括：

- 1) 接入与认证技术，WPA2依照IEEE 802.11i标准对安全性做了进一步的加强，特别是采用CCMP（计数器模式密码块链消息完整码协议）信息认证码和AES加密算法。WPA中还包含了802.1X身份认证，可以配合企业已有的身份认证服务器来进行身份认证和密钥分发。
- 2) 应用MAC地址过滤功能，可以控制链路层上网络的无线设备及有线设备，允许授权的设备进入，并拒绝未授权的设备接入，从而为整个平台提供更好的安全保障。

3) 除了在接入网络中链路层上设置安全防范措施外，还需要更高的层次设置一系列的规则，过滤整个通过该网络的数据。现场无线路由器内置防火墙，自定义网络过滤的规则（包括端口转发、DMZ、远程接入控制）。

4) 由于线路上存在不同种类的物联网信息都共用相同的无线Mesh网络的物理通道，同时部署在外面的输电线路更应考虑安全问题。为此需要采用VPN技术实现数据传输的逻辑隔离，若同时考虑信道加密，则可以采用IPSec技术，如图2-29所示。

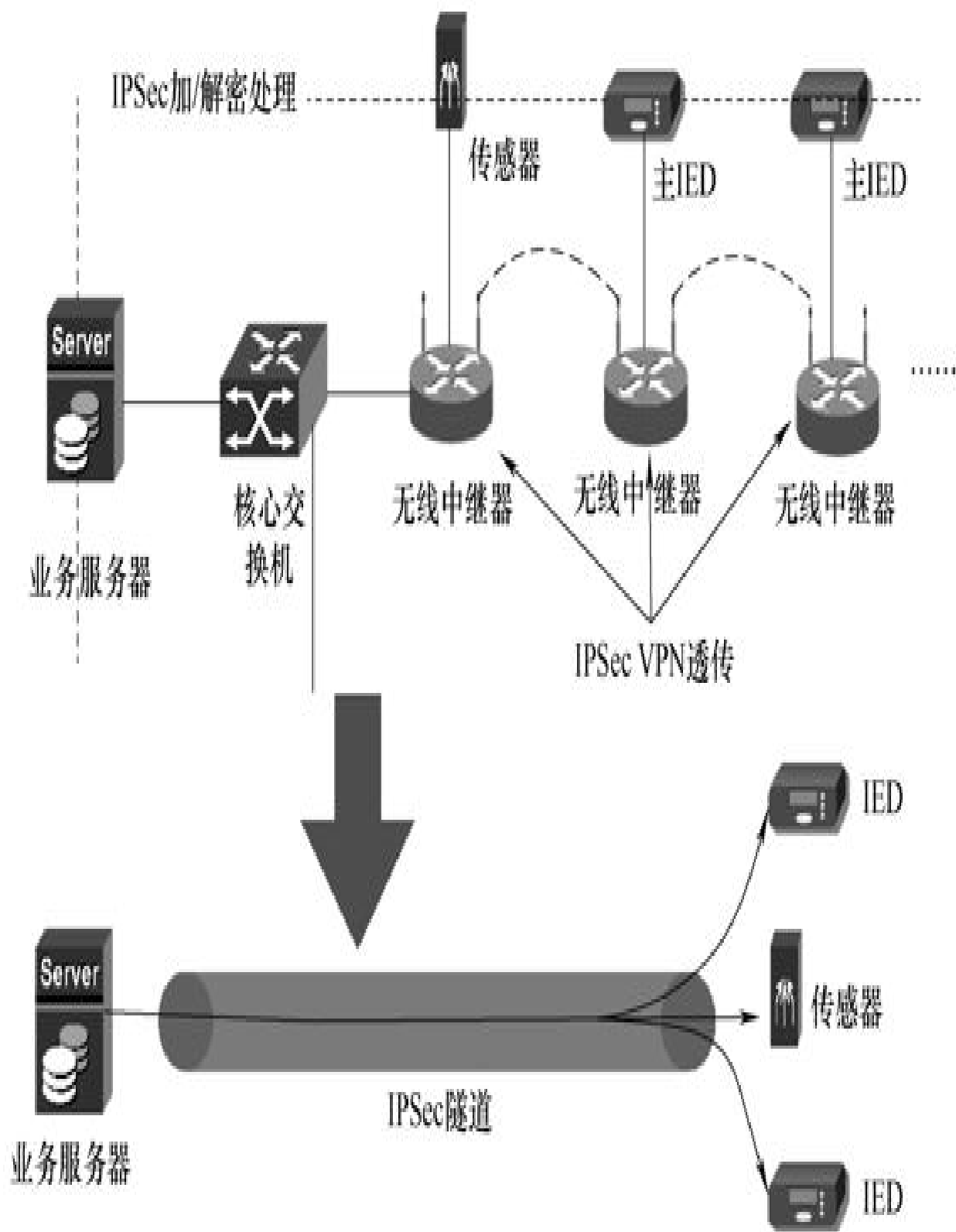


图2-29 输电线路无线传输通道中进行VPN透传

物联网引入输变电设备在线监测与资产管理中引发了信息结构改进，促进了信息在不同层面之间以及同层之间的流动。为此，本任务定义了新的信息结构以及相应的通信架构，在传统的变电站通信网络中增加了通信汇聚层，并为此设计了信息网络拓扑结构以及对应的通信网络拓扑结构。针对变电站内的在线监测与资产管理，确定了相应的通信技术以及通信组网设计方案。最后，针对输电线路探索了以WiFi无线通信与OPGW光纤通信方式结合，解决偏远地区输电线路信号长距离传输的技术，提供相应的通信组网方案。

2.2.4 路由器开发及验证实现

1. 无线路由器及管理平台开发

(1) 无线路由器平台研发需求

为满足输电线路和变电站无线信号全覆盖、输电线路远距离传输的需求。在支持“无线点对点”长距离传输的基础上，该路由器支持无线Mesh组网。具体可以基于无线中继模式（WDS），也可采用背靠背的有线中继模式。在区域覆盖中为了解决移动设备业务连续性问题，要求多个无线基站实现业务跨区切换；其次，为了保障通信设备以及无线通道的可靠性，该路由器应具备可管理、可控制特点；该路由器需要支持无线链路加密、设备信息隐藏。另外，为满足输电线路对电源供应的苛刻需求，路由器应采用定时休眠与主动唤醒、被动唤醒的省电机制。最后，为实现对输变电物联网通信网络设备运行状态的远程监测和远程控制，进一步实行与在线监测设备的统一管理，应该采用集中的设备管理系统。

(2) 无线路由器硬件

硬件是支持路由器性能的基础条件，路由器选择高性能处理器（CPU：1GHz）以及大缓存资源（64MB RAM，128MB Flash）。无线网卡支持802.11a、802.11b、802.11g、802.11n，同时支持AP与STA两种工作模式。对于输电线路，远距离传输是基本要求，因此使用的定向天线增益适应不同的传输距离：在进行3km的远距离通信时，收发端均适用增益为24dBi的定向天线；而对于距离为1km及以内的场景，收发端均可以使用18dBi的天线。这样在保障接收端有足够的信号增益条件下，避免了主瓣宽带过窄引起的天线对准困难。无线路由器的系统硬件如图2-30所示。

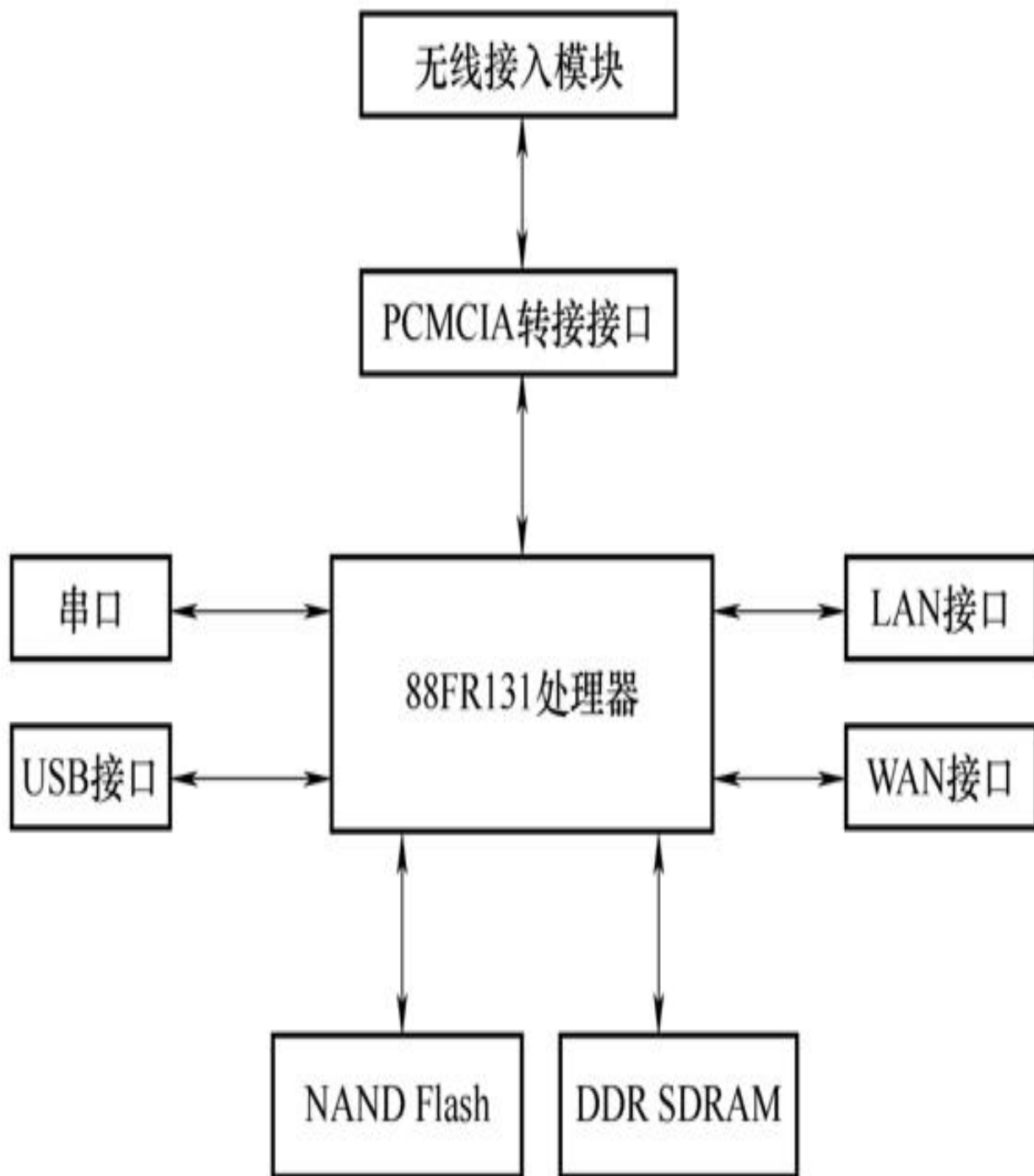


图2-30 系统整体硬件结构图

图2-30中包括如下硬件模块：

- 1) 核心处理器具备500Mbit/s以上的处理速度，以保证路由处理能力。

2) 系统内存DDR SDRAM的容量需达到32MB以上。

3) 外存储器NAND Flash, 存放操作系统映像文件、文件系统、应用程序和Bootloader。

4) WAN接口提供接入有线网络的接口。

5) LAN接口提供有线局域网接口。

6) PCMCIA接口提供与无线接入模块连接的接口。

(3) 路由器软件平台

操作系统Linux 2.6.30版本及以上, 以OpenWrt为基础平台。设计的主要功能模块有如下两个:

1) 功耗控制模块。

采用“上行同步唤醒和下行异步唤醒模式”关闭功耗较高的通信模块。利用时间同步机制, 可以准确地唤醒上行传输链路上的所有通信设备。其次, 异步唤醒模式使通信设备即使在休眠状态下也能够立即检测到该控制指令。

2) 无线子系统。

它是实现无线链路信号广播、接入控制、数据无线传输的核心模块, 主要功能特性有: ①安全控制: 支持多种无线网络加密方式, 能充分保证用户数据的安全传输, 包括:

WEP64/WEP128/TKIP/CCMP (AES) WEP/WPA-PSK/WPA2-PSK。②可以直接指定模块的工作信道, 从而达到加快联网速度以及防止信道之间干扰的目的。③根据802.11协议规定, 不同的无线网络可以具有相同的网络名称(也就是SSID/ESSID), 但是必须对应一个唯一的BSSID地址。非法入侵者可以通过建立具有相同的SSID/ESSID的无线网络的方法, 从而造成网络的泄密。通过BSSID地址绑定的方式, 可以防止STA接入到非法的网络, 从而提高无线网络的安全性。④支持基于802.11协议的无线漫游功能, 由多个AP共同创建一个具有相同的SSID/ESSID的无线网络组成一个拓展服务集。每个AP用来覆盖不同的区域, 随着STA的移动自动在不同的AP之间切换。⑤同时存在AP (Access Point) 与 STA (Station) 两种工作模式的接口并可以同时运行, 用于实现在输

电线路上传输的多跳传输。⑥支持多虚拟接入点（Virtual Access Point, VAP），可以根据站点的业务类型来连接到不同的VAP，简化了路由器接入的管理。⑦无线路由器可以根据业务类型数据特性设置不同的数据分片阈值、汇聚阈值来优化无线传输的速率。

（4）无线安全设计

路由器无线链路的安全通过WPA/WPA2/MAC网络数据包的过滤策略、SSID隐藏实现无线信道和设备安全：①无保障无线接入的安全，采用WPA/WPA2加密无线信道，支持RC4、AES、TKIP加密算法和CCMP加密协议对，防止未被允许的站点加入网络。WPA/WPA2是一种高可靠性的加密方式，所以对设备计算性能的消耗也更为巨大。为保证平台的数据吞吐量，在平台设备中采用专门的硬件模块进行加解密和完整性校验计算。②应用MAC地址过滤功能，平台可以控制链路层上网络的无线及有线终端设备，允许授权的设备进入，并拒绝未授权的设备接入；③输变电路通信网络中的无线信道暴露于公共视野中，模块通过隐藏SSID信息以提升无线链路的安全。

（5）远程控制管理模块设计

因输变电无线路由一般部署于远离市区的环境，需要一套可远程对无线路由器进行监测和控制的系统来远程控制管理，GUI界面如图2-31所示。

图2-31 网络监控平台GUI

监控模块需能够远程检查无线路由器的内存使用率、存储空间剩余量、网络时延等运行状态，并能够通过直观的用户界面，方便用户快速掌握路由器的运行情况，以提高管理人员巡检和管理的效率，为系统正常稳定运行提供保障。功能包括：①系统私有资源和运行情况执行监控，如CPU利用率、内存使用情况、磁盘空间、系统时间、系统进程数、表空间大小等；②大多数应用程序都是通过TCP/IP端口向外部提供服务，如HTTP服务、FTP服务等，因此管理平台应能够通过检测目标端口能否正常打开来判断这些服务是否在正常运行；③检测主机是否在正常运转，由于所有被监控主机都分配有内部网络IP地址，可通过ICMP包对这些设备进行探测，如果无法正常接收到回应数目的数据包即说明对端存在严重的问题（掉电、系统崩溃、硬件损坏等）；④通过用户权限控制，不同身份的用户登录系统管理平台后，只能看到自己负责的那部分设备的监控情况。

在设备新增、网络环境发生变化时，远程控制模块需可以对设备的网络接口带宽、无线参数、路由增加删减等重要参数进行配置，在系统出现异常情况时，也能够远程对这些无线路由器进行恢复默认设置或系统重启等控制，其需要实现的控制功能主要有：①在一台被控制设备需要添加到管理平台时，只要填写正确的IP地址和执行控制的端口号，便可以添加到平台里，成为一个被监控的对象。信息包括：给网络设备取的名字、IP地址、执行控制的端口号等。②能够添加和删减网络设备的路由，在组网或是网络组织变动的时候，方便运维管理人员进行维护。③对无线的控制是整个管理模块的主要功能，无线网络设备工作于与普通无线网络不同的环境之中，在变电设备繁多的变电站环境中，通常有多台无线设备一块儿运行，可远程对无线设备的特性参数进行配置，对减少无线设备之间的干扰、降低误码率、提高数据传输效率具有不可或缺的作用。对无线设备的控制主要包括：接口开启关闭、安全设置、通道选项、无线特性、传输功率这几个方面的控制。④网络带宽是通信网络的资源，资源的分配在网络控制中尤为重要。连接于网络内部的网络设备通常有几个网络接口，每一个接口所需要承担的网络流量各不相同。为实现网络性能的最优化，管理模块应能够对网络设备的网络接口的带宽进行配置。⑤在被控设备出现异常时，管理模块能够远程对网络设备进行系统恢复和设备重启等操作。

该路由器添加了远程控制管理模块，可以远程对无线的路由器进行控制和在线监测，解决了在变电站、高压电塔等环境中运维人员不便近前维护的问题，同时也提升了输变电通信网络的运维管理效率，为网络的可靠性和可维护性提供了保障。支持在变电站多个路由器组网，为移动设备提供跨AP移动功能。无线路由器对输变电设备传感网信息进行了分类，并进行了优先级和带宽的分配，提供各种业务延时和带宽的区别服务。路由器管理平台扩展后，可以支持IED等智能终端装置的统一管理。

2. 输变电设备传感网通信网络典型应用

(1) 大镇线输电线路通信网络工程实施

大镇线1#至40#塔的经纬度信息三维地图如图2-32所示，在WiFi通信距离的设计上，两点之间的有效传输距离按照6~8公里设计，实际部署时，按照3公里左右部署。

1) WiFi热点布点规划1。

如图2-33所示：选取各线路段地址较高的1#塔、15#塔、20#塔、29#塔、40#塔为WiFi热点，进行数据中继，同时1#塔、15#塔、20#塔、40#塔为监测点，也有利于采集数据的接入。五基杆塔之间基本两两可视，其直线距离依次为：3600m、2040m、2010m、3280m，基本在3km左右，符合系统的设计要求。



图2-32 大镇线1#至40#塔线路情况



图2-33 方式一下WiFi热点布点规划

2) 备用WiFi热点布点规划2。

如图2-34所示：选取各线路段地址较高的1#塔、9#塔、15#塔、20#塔、28#塔、33#塔、40#塔为WiFi热点，进行数据中继，同时1#塔、15#塔、20#塔、40#塔为监测点，也有利于采集数据的接入。同时此方案下，两点之间需中继的距离更短，两点之间确定可视。

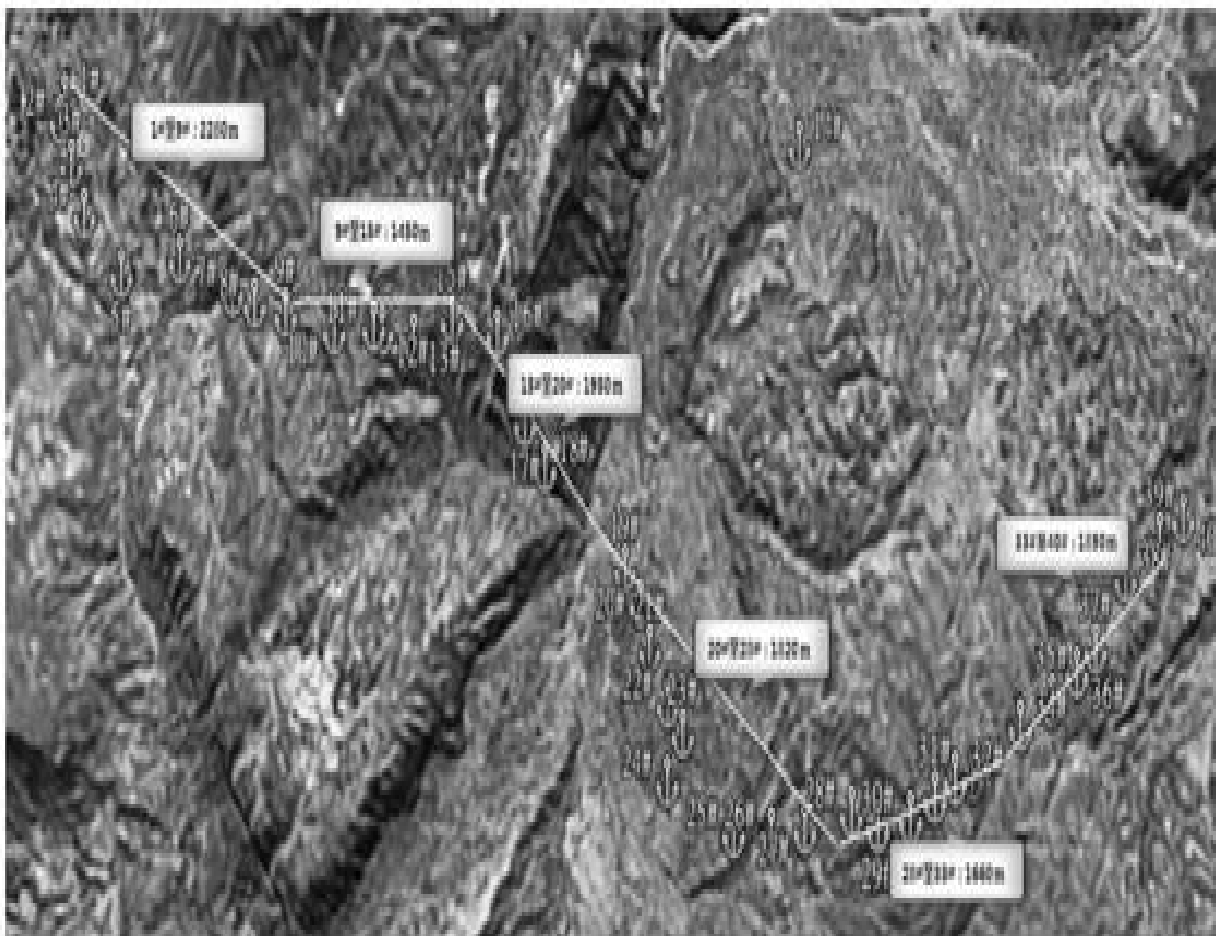


图2-34 方式二下WiFi热点布点规划

七基杆塔之间基本两两可视，其直线距离依次为：2280m、1450m、1950m、1820m、1660m、1890m，基本在2km左右，完全符合系统的设计要求。

在通信系统验证方案设计中，依据变电站和输电线路应用场景考虑大镇输电线路实施通信工程。本书提出的异构双网双通道结构实现了设备在线监测与资产管理结合；在大镇线验证了本任务采用WiFi的无线Mesh网络结构，支撑了偏远线路的在线监测。

（2）大理下关变电站典型组网验证

具体配置方案：在规划VLAN（Virtual Local Area Network，虚拟局域网）时给不同的部门分配不同的VLAN ID段，上下行业务使用相同的VLAN通道。接入交换机根据端口对上行业务流打上VLAN标签，透

传到汇聚交换机上行接口、解标签，进入主站系统。汇聚交换机通过学习上行数据流，得到源MAC（Media Access Control，媒体接入控制）地址和其对应的VLAN之间的绑定关系（或使用静态MAC地址与VLAN绑定）。定义ACL（Access Control List，访问控制列表）规则，当有下行数据时，根据不同的目的MAC，添加相应的VLAN标签。

通常输变电通信网络带宽为1~2Mbit/s，由于物联网技术的引入，使本地流量急剧上升，所以这里设定20Mbit/s为重负荷。在IEC61850-5：2003规约中，测试了单个100Mbit/s交换机在低负载（小于1Mbit/s）时的网络时延为0.04ms，如图2-35左下角所示。在此基础上参考IEC61850规约对其承载网络的通信需求，分别对单节点网络、点对多点树状网络和多点对多点网状网络进行时延、时延抖动的补充测试，测试结果如图2-35~图2-38所示。

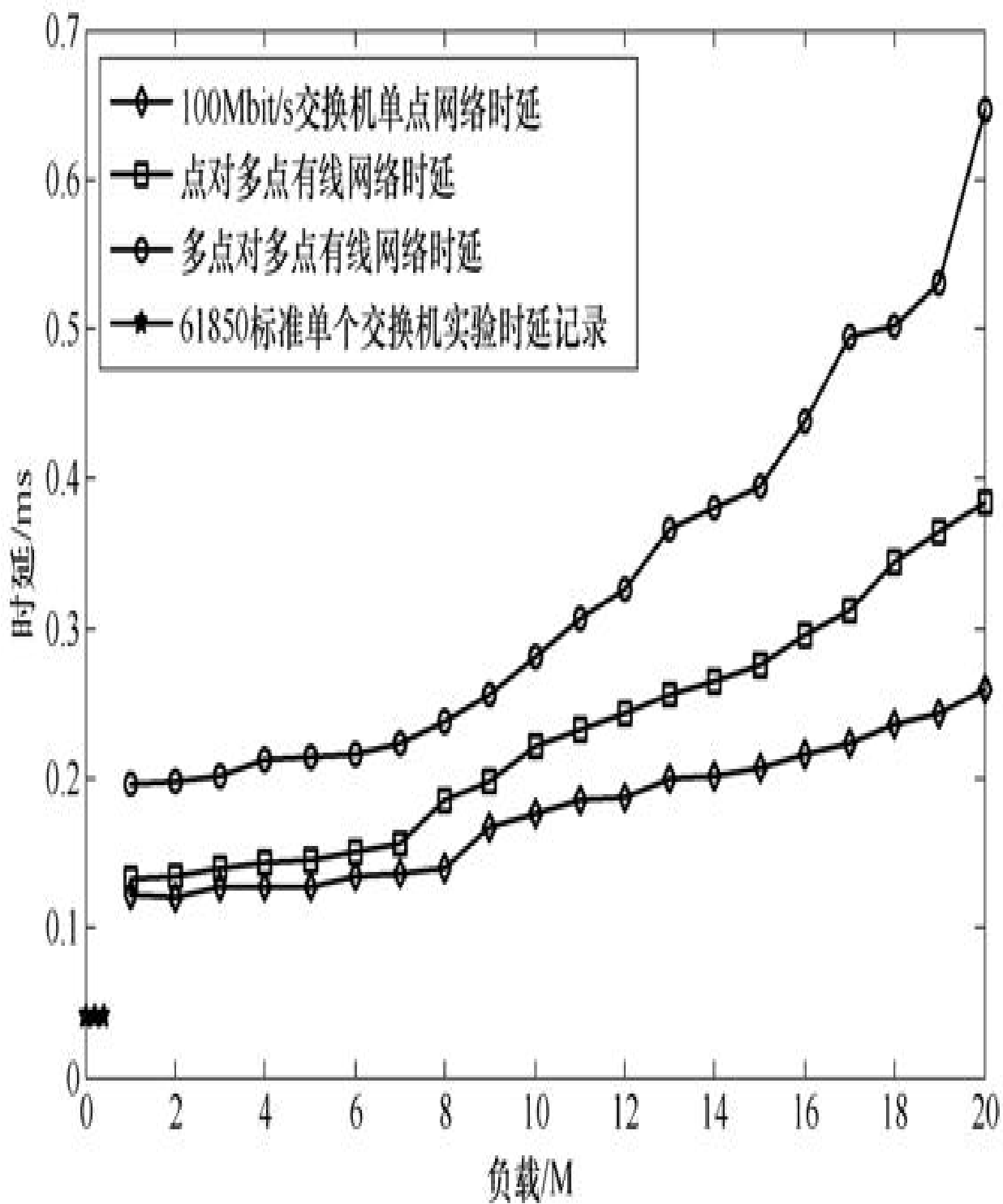


图2-35 有线网络时延测试

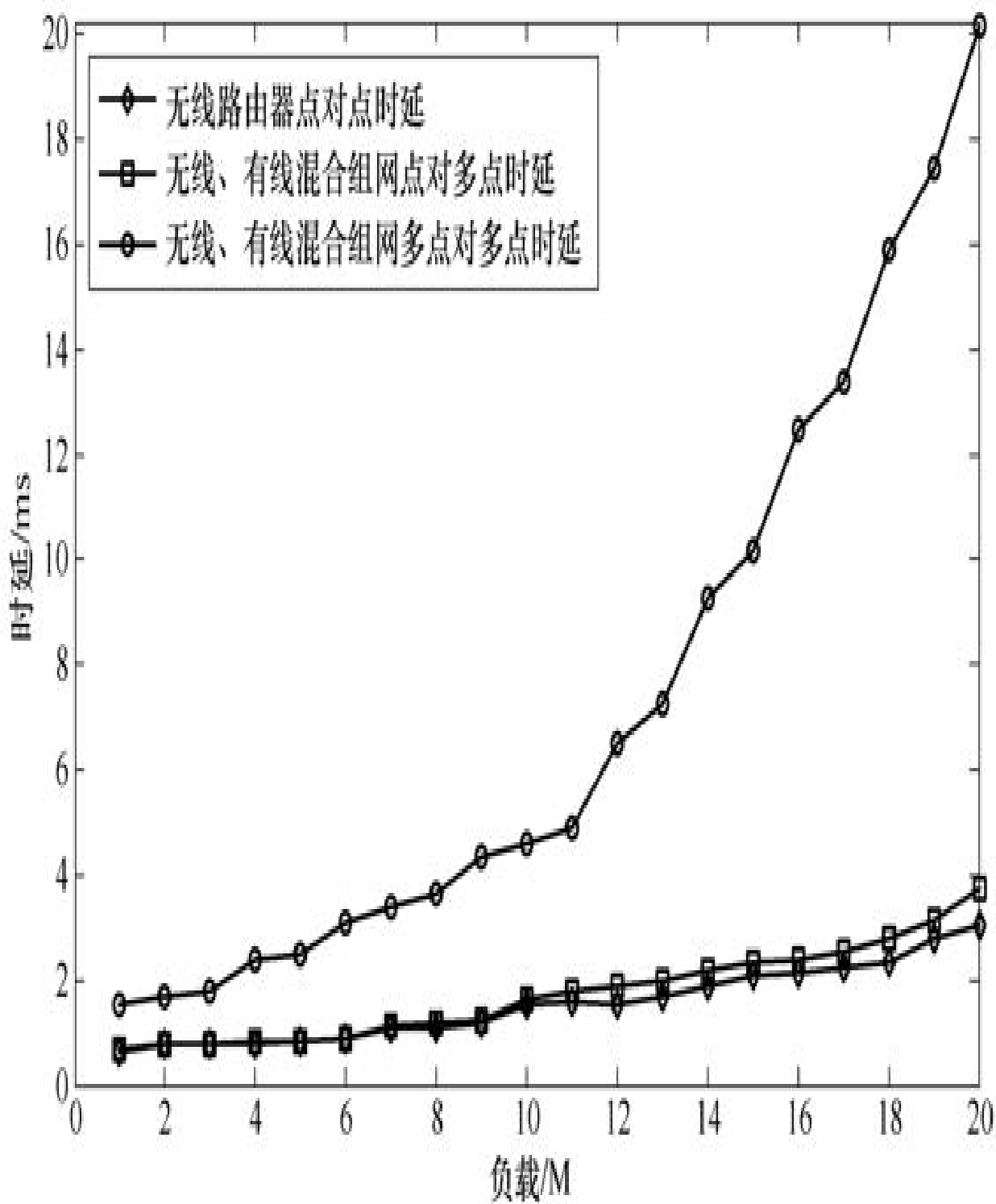


图2-36 有线和无线混合组网时延测试

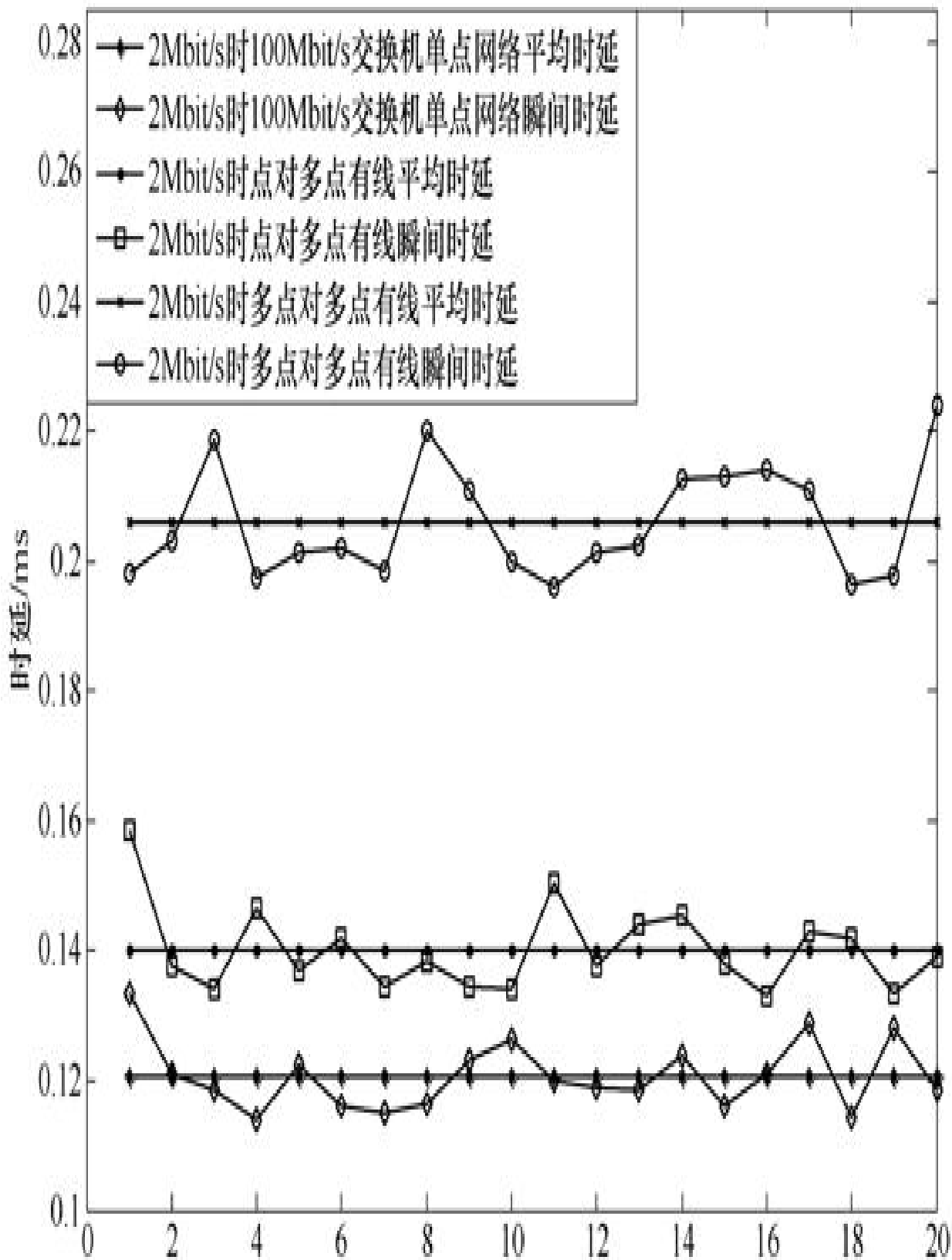


图2-37 有线网络时延抖动测试

图2-35和图2-36分别为有线网络及有线与无线混合网络时延测试。随着负载增大，网络的时延均增加，其中混合组网时延大于有线网络时延；相比于单节点网络和树状网络而言，多点对多点网状网络时延增加幅度最大。当负载为20Mbit/s时，多点对多点网状网络传输时延最大且为20ms。

对比传统两级网络结构（接入层+核心层）在重负荷时时延高达8000ms甚至网络无法联通，增加了汇聚层以后，轻负荷（2Mbit/s）时延为2ms，重负荷（20Mbit/s）时延为20ms，满足IEC61850实时性要求。

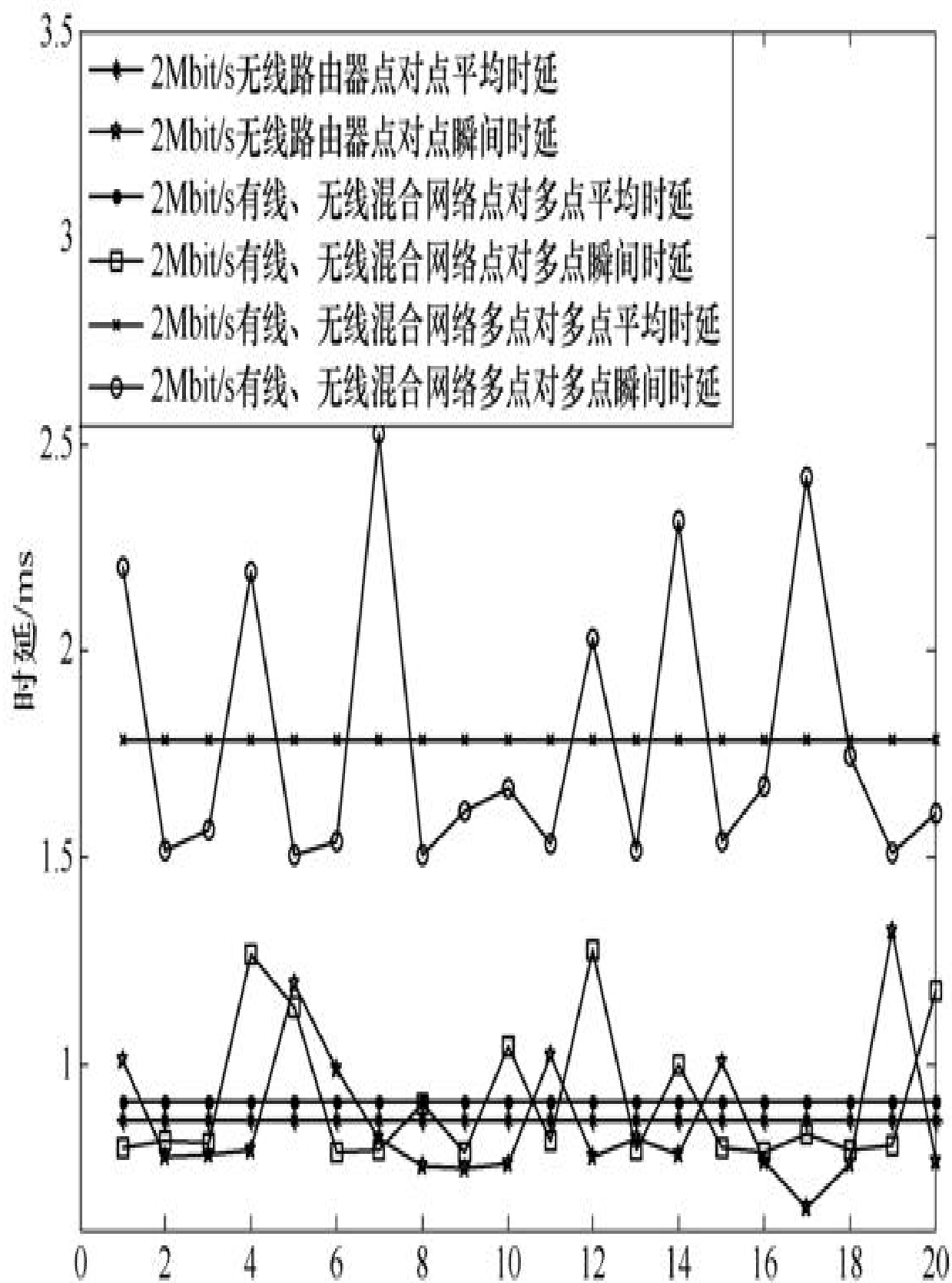


图2-38 有线和无线混合组网时延抖动测试

通信网络中，时延抖动对通信网络时钟同步影响较大。多组（共20组）数据测试结果如图2-37和图2-38所示，有线网络和无线网络混合组网中的多点对多点通信时延抖动最明显，最大达到约1.1ms，从数量级上不会影响CAC/CMA对时误差要求（不超过5s）。

利用ARP包模拟广播风暴故障产生的场景中进行数据联通性测试，传统网络近于瘫痪，而该网络最大时延小于100ms，依然满足IEC61850实时性要求。

2.3 输变电设备物联网一体化智能监测装置

输变电设备智能监测传感网络是输变电设备物联网感知层的重要组成部分，输变电设备物联网一体化监测装置是构成输变电设备智能监测传感网络的基本单元。建立输变电设备智能监测传感网络的目标，是为了解决已有变电站设备和输电线路状态监测系统中存在的主要问题。现有输变电设备状态监测系统存在两方面主要问题：①状态监测系统或装置种类多，相互孤立运行，不同系统或装置拥有独立的数据采集单元，数据通信协议、功能和接口各不相同，无法形成统一的规范，造成系统互操作困难以及数据无法共享，新增监测系统必须新增投资建设独立的数据采集系统，带来监测系统费用的浪费；②不同状态监测系统的数据分析与故障诊断软件系统相互独立，难以对各设备的运行状况进行关联分析，并做出有效和经济的检修决策，无法满足输变电设备全景信息对状态信息监测与数据共享的要求。

输变电设备物联网一体化智能监测装置研制任务的目标为：研制输变电设备物联网智能监测传感器及监测主IED，开发出具有分布自治能力的一体化智能监测装置，建立监测变电站设备和输电线路状态信息的传感网络，制定输变电设备智能监测传感网络相关设备的设计、制造与检测规范和标准。

通过上述目标的实现，将解决现有输变电设备状态监测系统存在的以上两方面问题。根据目标要求，输变电设备一体化智能监测装置的基本架构如图2-39所示，由传感器、监测主IED和电源模块组成，其设计思想主要包括五个基本原则：

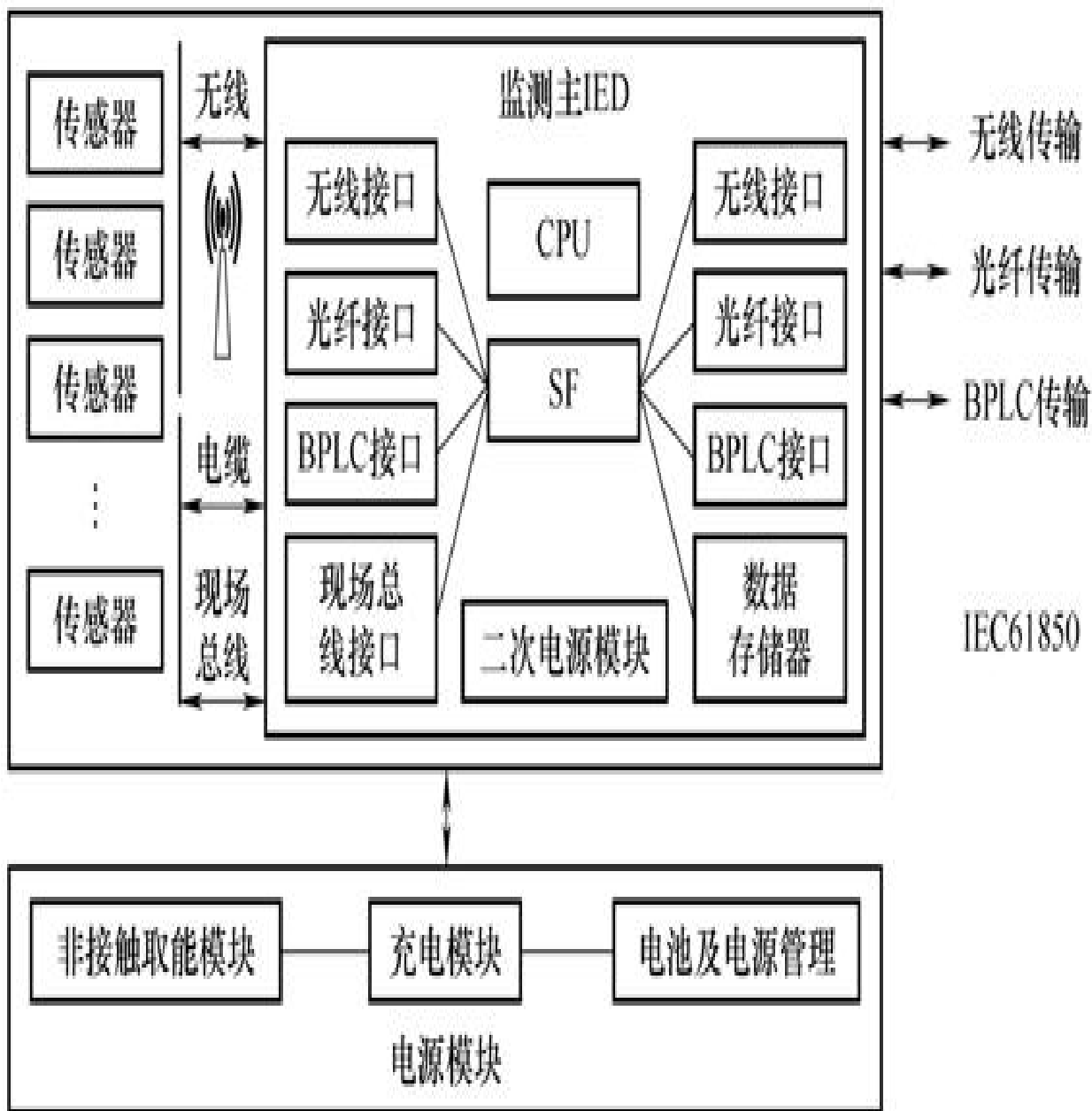


图2-39 输变电设备一体化智能监测装置结构示意图

1) 传感器分为无源传感器和有源传感器两类，有源传感器应具有一定的智能化能力，主要包括数据的初步变换和数据通信的能力。

2) 监测主IED提供各类传感器接入的通信接口，保障各类传感器的自适应接入监测主IED。

3) 监测主IED具有支持一体化智能监测装置之间数据通信和联网的能力, 保障一体化智能监测装置自适应接入智能监测传感网络。

4) 监测主IED具有数据处理和分析的能力, 支撑智能监测传感网络的分布式或网络化的数据计算和故障分析以及传感器网络的分布自治与协同工作。

5) 当采用电池、太阳能、非接触取能等供电方式时, 一体化智能监测装置应具有电源管理能力。

针对本项任务的目标和要求, 工作完成情况总体如下:

1) 建立了输变电设备智能监测传感网络, 对输变电设备监测装置间的组网方式进行了研究, 为输变电设备状态信息互联与交互奠定了物理基础。

2) 开发了满足变电站设备与输电线路智能监测传感网络需要的一体化智能监测装置, 实现了变电站主要设备和输电线路的智能监测功能, 提高了智能监测装置的通用性、一体化与智能化水平。

在关键技术方面开展的研究工作和取得的成果主要有:

1) 在新型传感器方面, 针对输变电设备智能监测传感网络的需要, 研制出局部放电与雷电监测的智能传感器, 实现了局部放电和雷电监测传感器的智能化, 具有传感网络的自适应接入能力, 同时研制出输电线路温度监测的分布式光纤传感器, 解决了输电线路温度实时准确测量的技术难题。

2) 提出了输变电设备智能监测传感网络信息建模方法以及云计算资源与任务分配策略, 研制出基于分布式计算的输变电设备智能监测传感网络数据处理与故障诊断支持系统, 解决了输变电设备智能监测传感网络自主故障诊断的技术难题。

3) 对高电位感应取能、地电位取能、势能取能和温差取能等多种非接触取能方式以及电源管理策略进行了研究, 试制出非接触取能电源模块及电源管理系统, 提高了输变电设备传感器及一体化智能监测装置的供电能力和稳定性。

2.3.1 关键技术

1. 新型传感器

(1) 智能传感器结构与功能要求

针对输变电设备智能监测传感网络需要，本任务设计了智能传感器的基本结构，如图2-40所示。智能传感器主要由传感单元、智能处理模块、通信模块、存储器及电源模块组成，其基本要求包括：

1) 具有双向数据通信的能力，可通过数据传输或接收指令实现各项功能。

2) 智能传感器内置微处理器，具有诊断能力与数据的处理及分析功能。

3) 具备可靠的供电模块，特别对于输电线路监测的智能传感器，电源模块应具有非接触取能能力。

基于图2-40所示的智能传感器结构，设计出变压器局部放电智能传感器、雷电监测智能传感器、母线温度智能传感器、线路拉力智能传感器等，其中局部放电智能传感器与雷电监测智能传感器是本任务研制出的新型智能传感器。

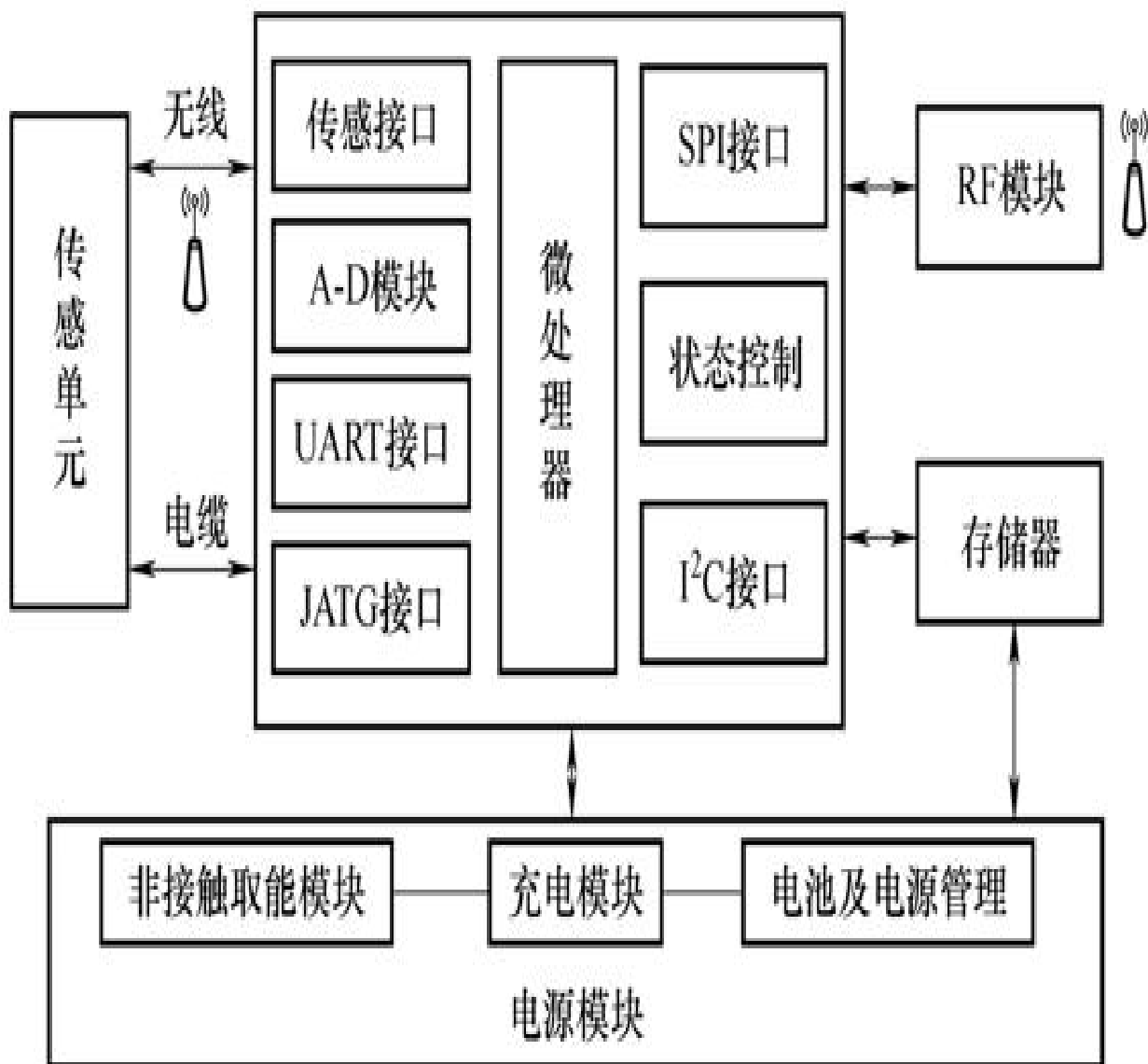


图2-40 智能传感器结构示意图

（2）局部放电监测智能传感器

局部放电监测智能传感器由Peano天线、电平扫描式数据采集模块以及数据通信接口组成，如图2-41所示。天线通过电缆与数据采集单元连接，数据采集单元通过以太网与IED连接，实现数据的双向通信。智能传感器直接输出放电图谱。

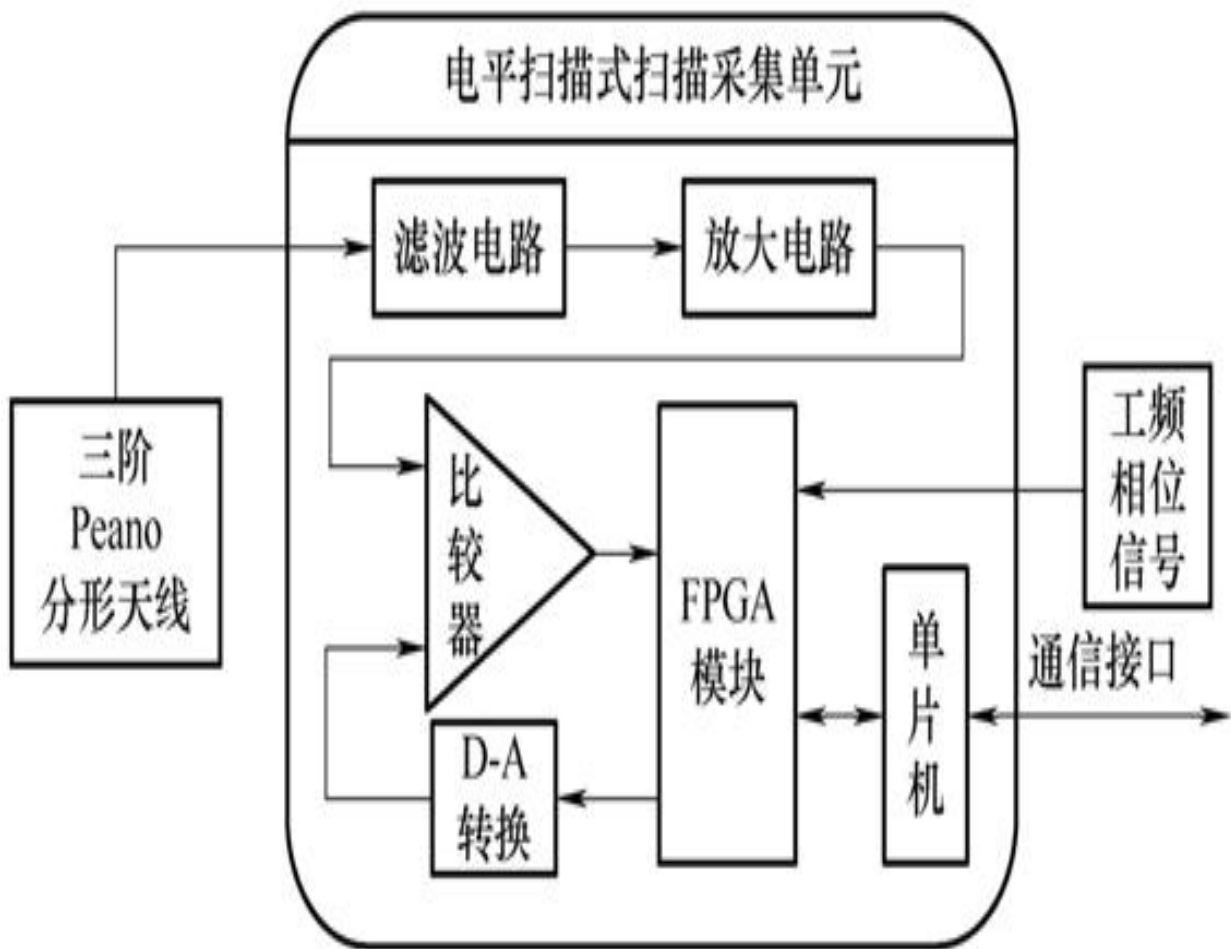


图2-41 局部放电监测智能传感器

1) 三阶Peano分形天线。

Peano分形结构如图2-42所示，第一层为导线层，第二层为介质层，第三层为接地层（屏蔽层），其中介质选用常见的环氧树脂（ $\varepsilon_r=4.4$ ）。

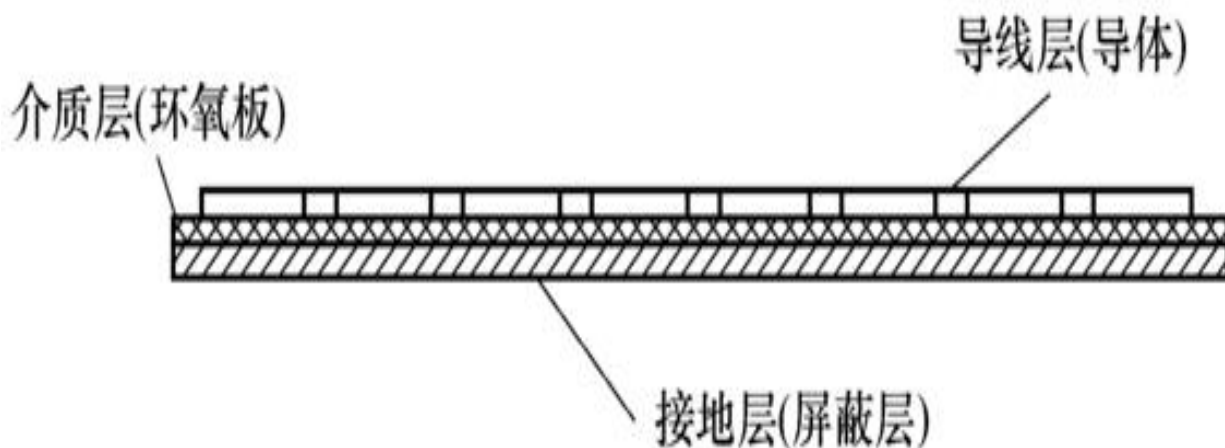


图2-42 Peano分形天线仿真模型

天线导体形状为三阶Peano分形曲线，如图2-43所示。天线优化设计步骤为：①选择Peano分形天线外围尺寸构建仿真模型；②对于每个外围尺寸，选取不同宽度的导线和不同厚度的PCB进行仿真，考察电压驻波比（VSWR）、增益和方向图等性能指标；③根据图2-43所示馈电点进行优化计算和选择。

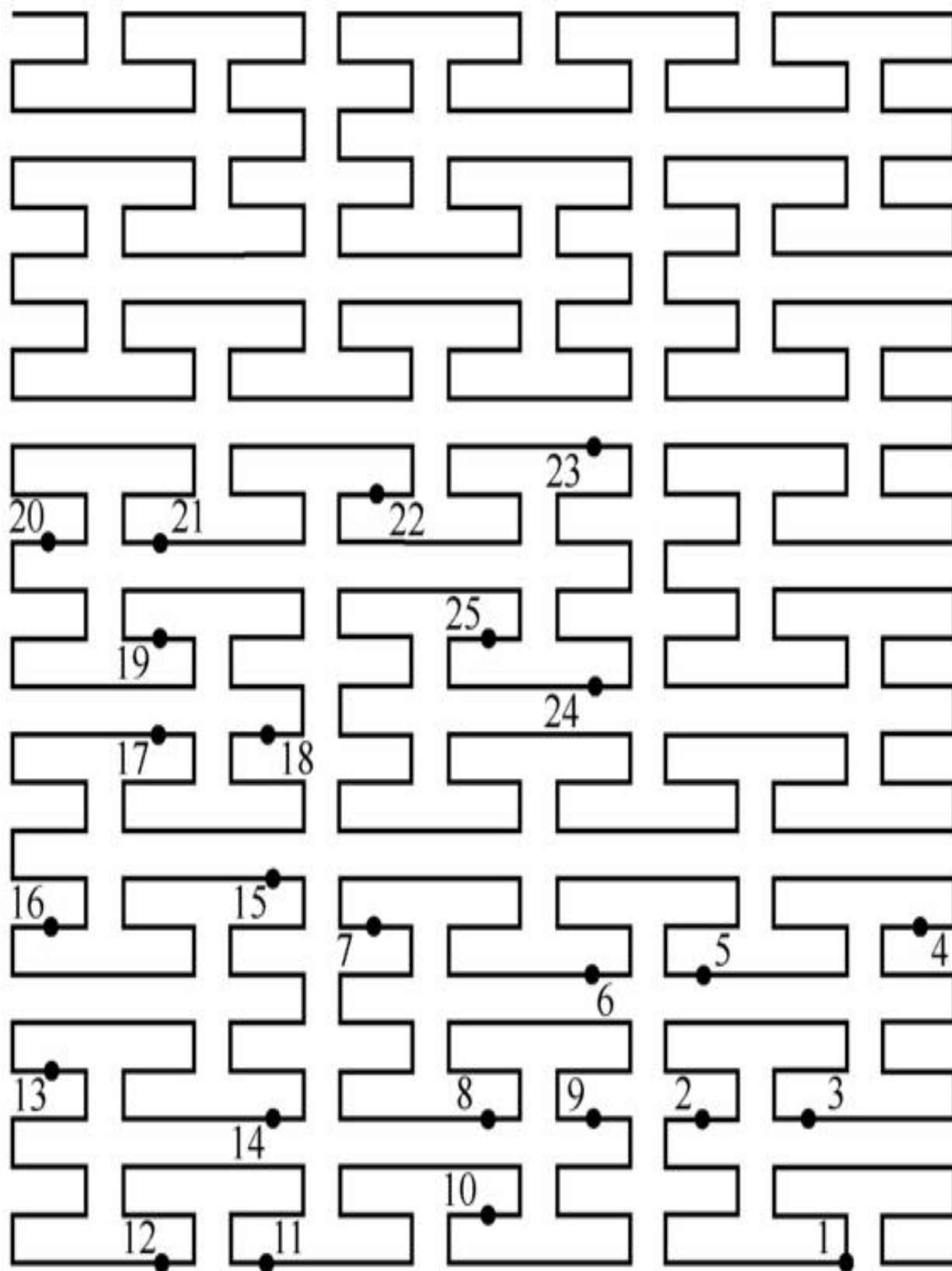


图2-43 三阶Peano分形天线及仿真馈电点的优化选择

优化的三阶Peano分形天线的参数为：外围边长为90mm，导线宽度为2mm，PCB厚度为2mm，馈电点为3。优化设计的三阶Peano分形天线在300MHz~1GHz内的驻波比如图2-44所示，Peano分形天线在300MHz~1GHz频带内有三个通带，分别为340~580MHz、650~740MHz与920MHz~1GHz。Peano分形天线在谐振频率处的二维方向图和增益如图2-45所示，天线具有半球状的方向图，能接收来自天线正前方各个方向的电磁波，在各个谐振频率处较为相近。Peano分形天线在300MHz~1GHz内的增益约为-18dB，与天线匹配的放大滤波器增益为300MHz~1GHz，频率范围内增益为40dB。

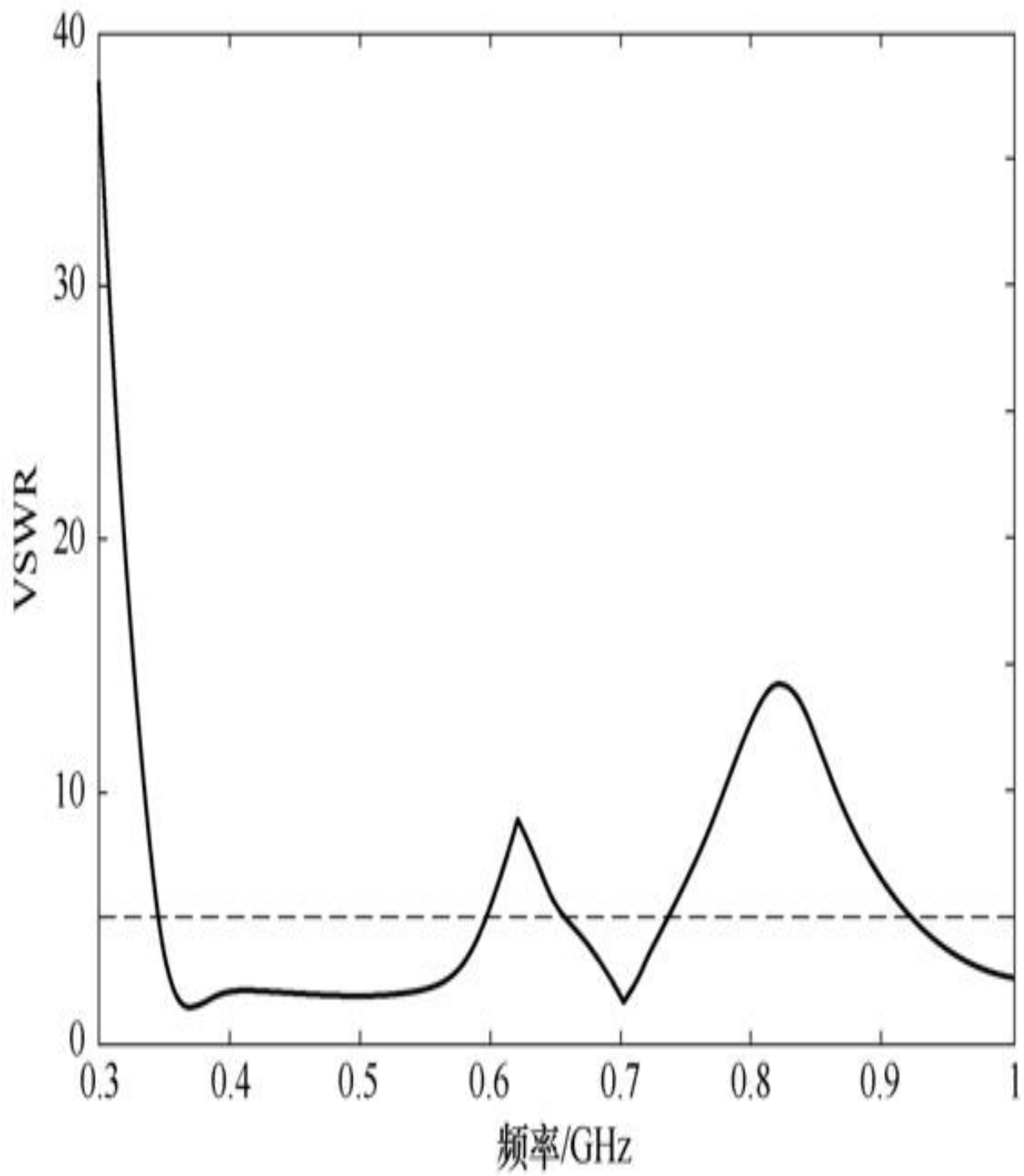


图2-44 三阶Peano分形天线的驻波比

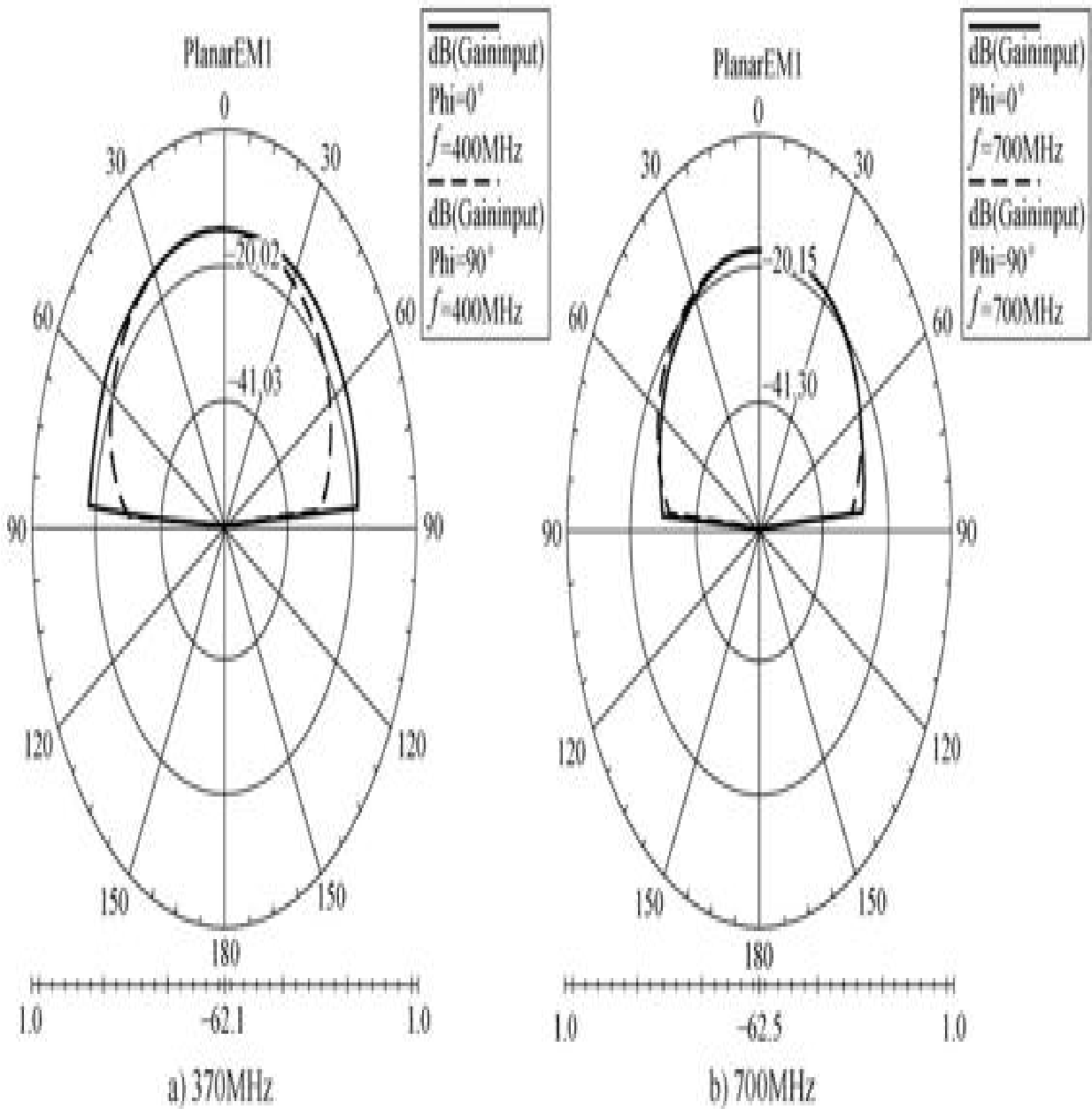


图2-45 三阶Peano分形天线二维方向图和增益

2) 电平扫描式数据采集技术。

图2-46所示的电平扫描式数据采集系统采用高速比较器和现场可编程门阵列 (Field-Programmable Gate Array, FPGA)，实现信号放大、比较电平及采集周期个数等的控制。FPGA得到参考比较电平指令后，通过D-A转换电路将比较电平转换成模拟信号后输入比较器作为比较参考阈值。设定的比较电平与信号进行比较时，FPGA存储高于比较

电平的脉冲个数。结合工频过零点触发，将各自相位区间上的脉冲个数存储在分配的存储地址上。具体实现步骤如下：

①信号接收：适当选择位置将天线安装在电气设备上接收局部放电信号。

②信号预处理：将采集到的局部放电脉冲信号进行滤波处理，抑制300MHz以下的干扰信号。再通过放大单元将局部放电脉冲信号放大后输入比较器。

③参数设定：单片机设定检测参数并提供触发命令开始采集，设定参数包括比较电平、相位区间个数、扫描工频周期数、信号放大倍数及扫描采集单元选择。

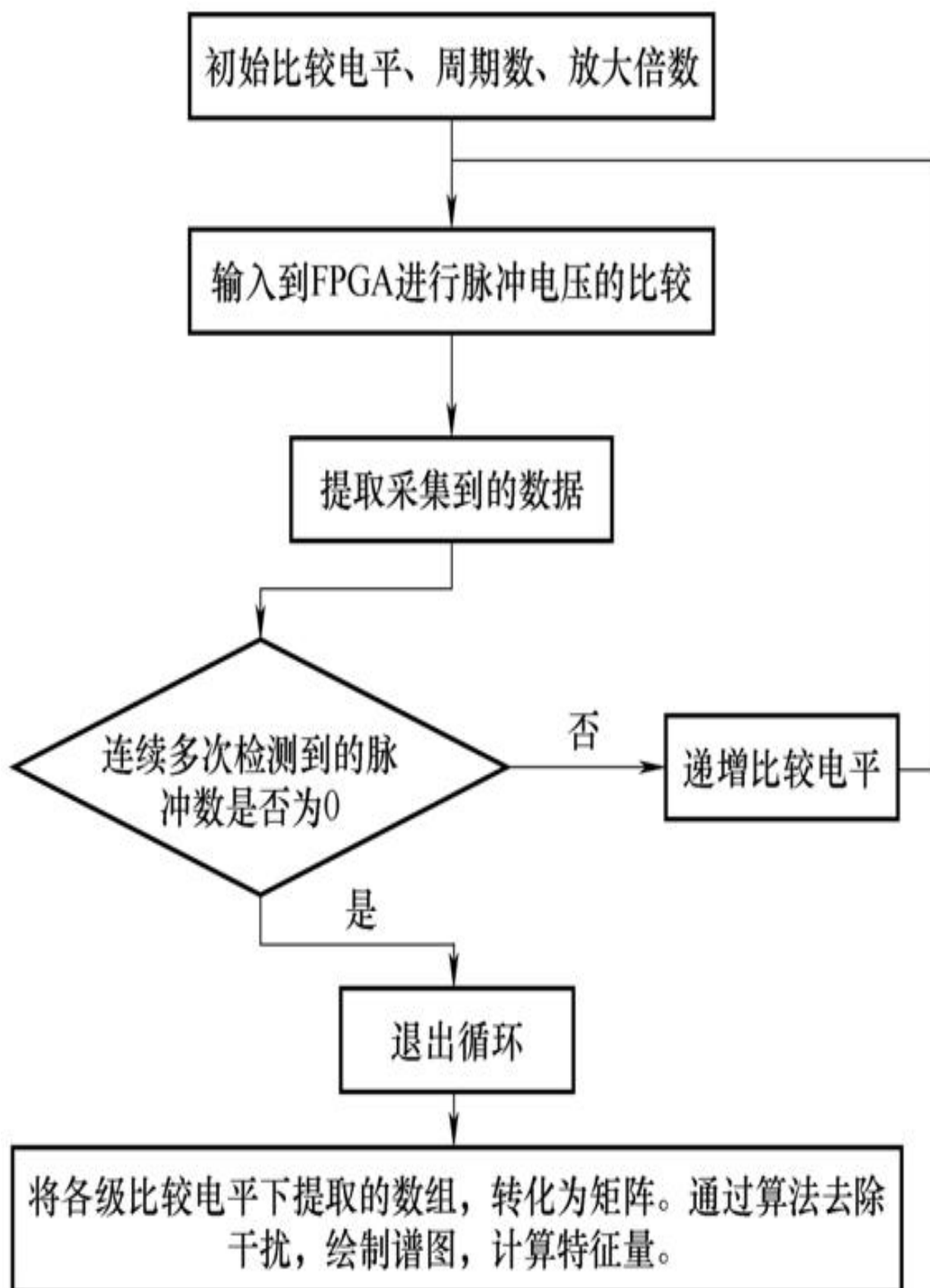


图2-46 系统的程序流程图

④比较存储：确定比较电平，比较电平通过D-A转换电路转换成模拟信号，输入至比较器中；将一个工频周期等分为设定的相位区间个数，FPGA分配每个相位区间一个存储地址；FPGA通过外接工频参考相位信号进行触发，在每一个触发周期内，比较器将每一个相位区间内的局部放电脉冲幅值与比较电平进行比较，将幅值大于比较电平的局部放电脉冲的个数进行统计并存储在每个相位区间对应的存储地址上；进行比较的工频周期的数目通过FPGA自带的计数器进行计数，当达到设定数目时，停止比较；并将比较所得数据返回给IED。

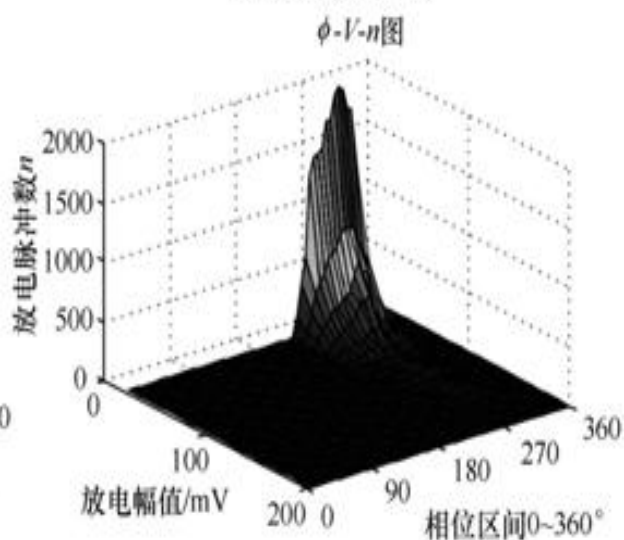
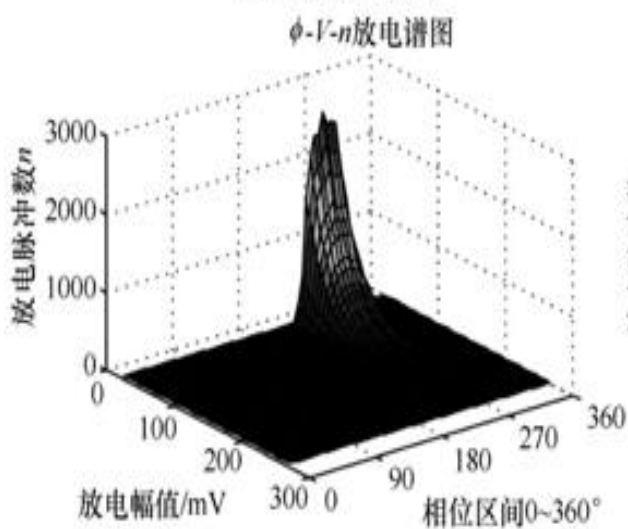
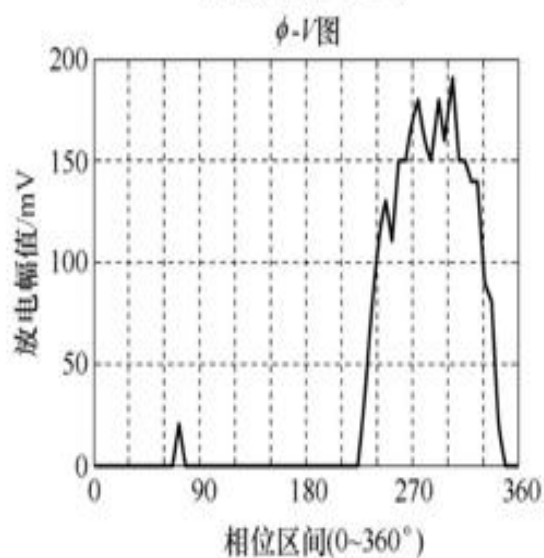
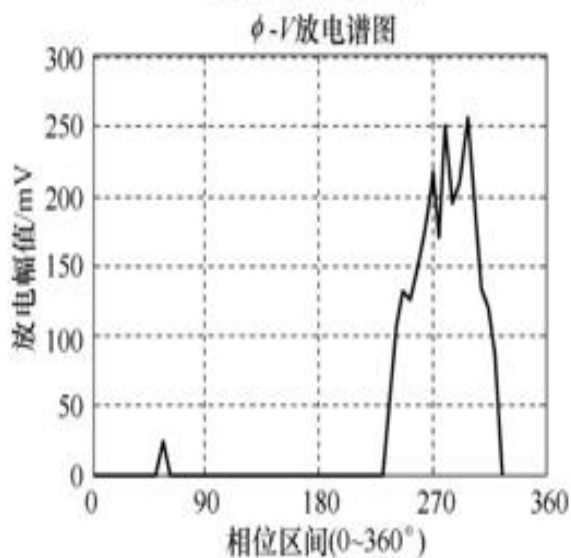
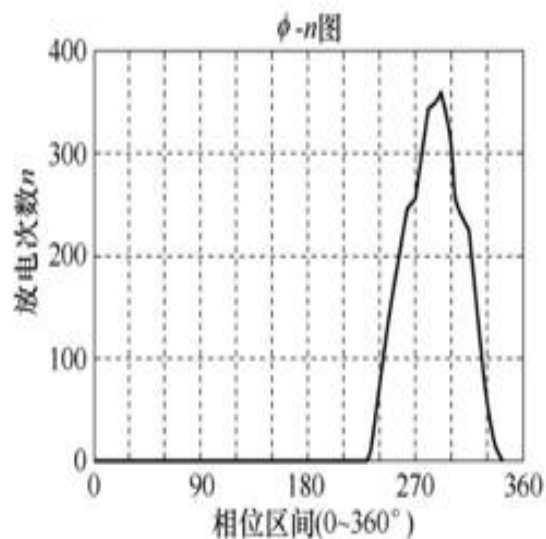
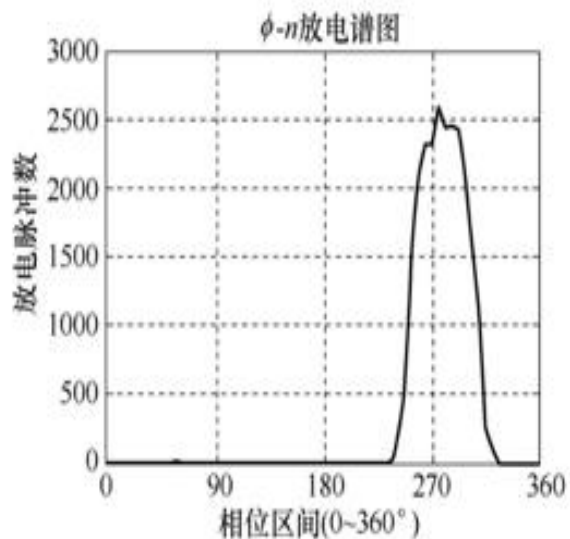
⑤变值比较并存储：单片机按算法自动改变比较电平的数值，重复上述步骤①，直至增加到某一比较电平时，没有大于该比较电平的放电脉冲存在，此时，该比较电平近似等于局部放电脉冲的最大电压幅值。

⑥数据处理：将采集的数据保存为一个表格，绘制放电谱图及计算特征量。

单片机通过后台程序控制之间的数据传输及处理功能实现与FPGA通信。上述③、④、⑤步骤可以通过单片机中的程序流程图描述。

3) 局部放电谱图分析。

为了检验局部放电监测智能传感器的测量效果，在实验室进行了针板放电模型局部放电实验，分别采用智能传感器和全波形采集法两种方式对局部放电超高频信号进行采集，得到的 $\phi-n$ 、 $\phi-V$ 、 $\phi-V-m$ 谱图，如图2-47所示。



a) 全波形采集法放电谱图

b) 智能传感器放电谱图

图2-47 局部放电超高频信号谱图

从图2-47中可以看出，两种方法的 $\phi-n$ 、 $\phi-V$ 、 $\phi-V-n$ 放电谱图的形状相似，放电相位区间也基本保持一致，但 $\phi-V$ 图中两者检测到的放电幅值有所差异。为定量分析 $\phi-V$ 谱图的相似度，引入皮尔逊相关系数衡量两个谱图的相关程度，计算得智能传感器与全波形采集法获取的 $\phi-V$ 谱图的相关系数为0.9086，属于极强相关，验证了智能传感器能够准确地获取并处理局部放电信号。

(2) 雷电监测智能传感器

雷电监测智能传感器的结构如图2-48所示。当雷电流流经罗氏线圈时，通过积分电路建立电压，然后由特殊设计的峰值保持电路将高速变化的电压信号进行短时时间保持，经A-D转换后送入微处理器进行数据处理得到雷电流的幅值、极性及过电压的大小，最后将得到的雷电参数经SPI接口写入存储器并通过RF模块无线上传；此外，设计的取能单元可获取雷电通道中的能量对传感器进行供能，实现了传感器的自供能。

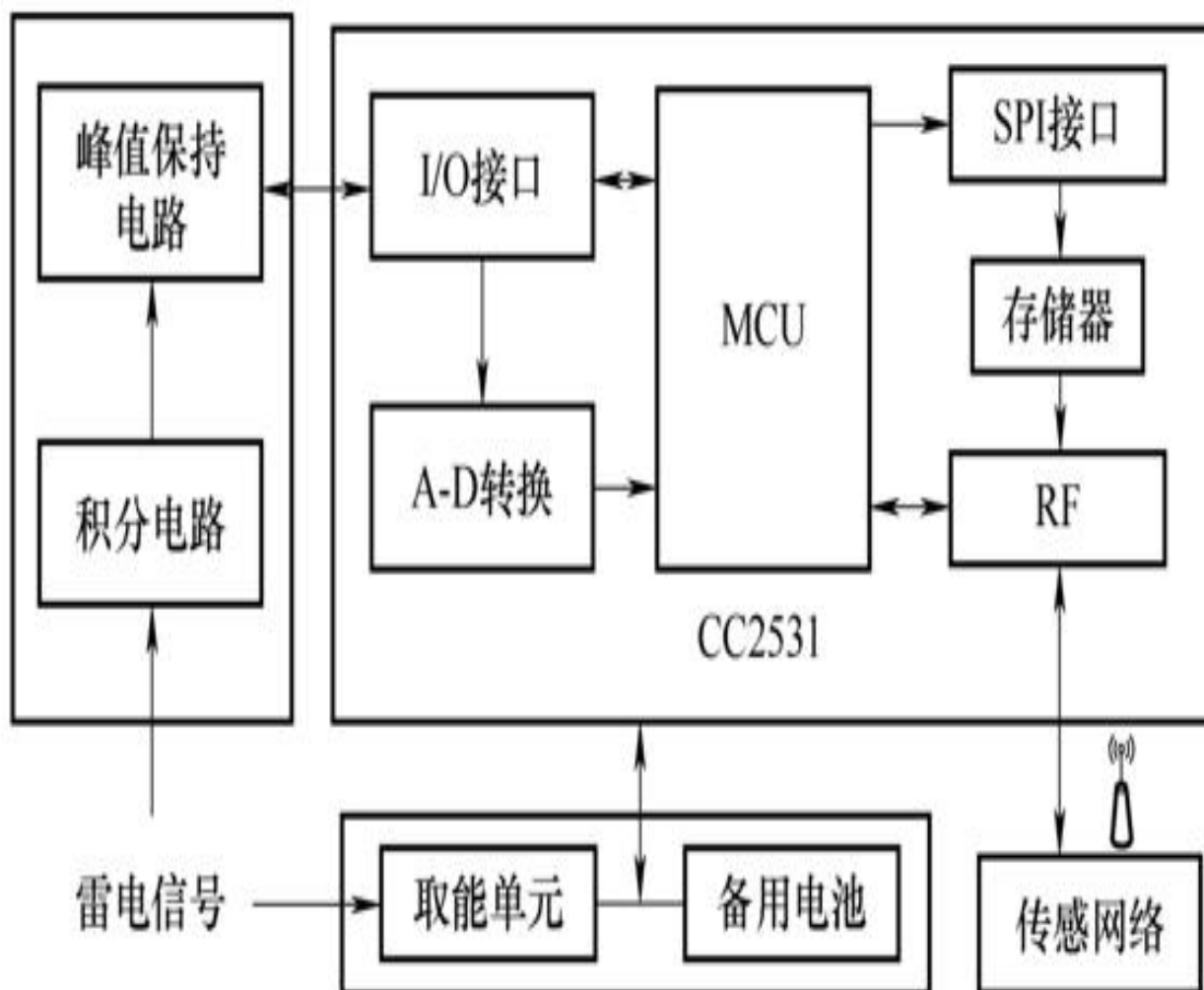


图2-48 雷电监测智能传感器结构图

1) 峰值保持电路。

当雷电流穿过信号线圈时，通过电磁感应从雷电通道获取雷电流信号，经积分后建立电压。为实现雷电流信号的低速采集，设计了峰值保持电路，如图2-49所示，通过对正、负极性雷电流进行保持，使得信号线圈输出的瞬时雷电流幅值信号保持足够长时间，让采集单元实现相对的低速采集，降低整个装置对器件的要求，从而降低成本。此外，合理匹配参数以确保输出电压和对应输入的雷电流之间有很好的线性度，通过测量输出电压即可以由电压/电流转换系数得出雷电流的幅值。

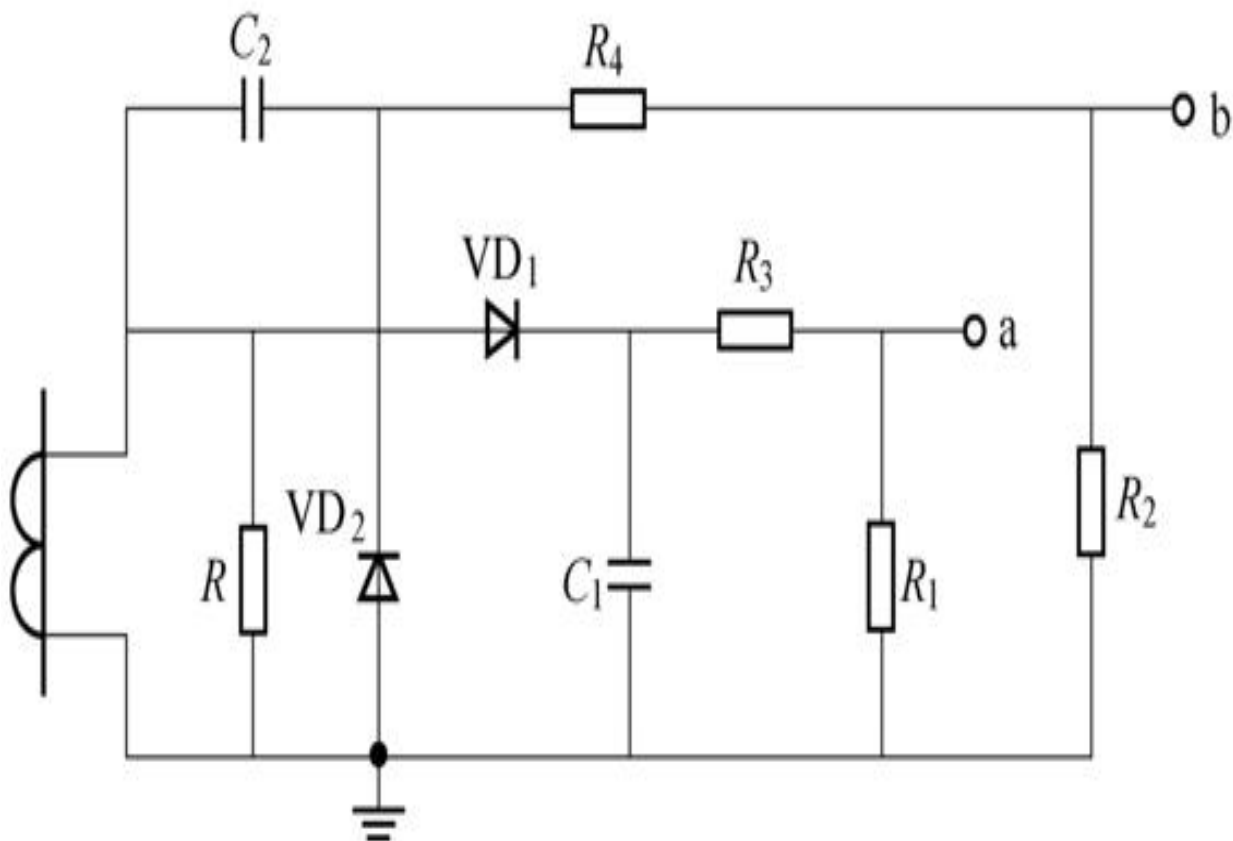


图2-49 雷电流测量图

具体工作时，当雷电流为正极性时，二极管 VD_1 导通、 VD_2 关断， C_1 充电后 VD_1 关断，然后 C_1 经 R_1 、 R_3 放电，合理选值 R_0C （ $R_0=R_1+R_3$ ），使a点电压按指数缓慢衰减，通过 R_1 与 R_3 的分压可以在雷电流10~200kA的范围内线性输出满足采集单元要求的信号电压；当雷电流为负极性时，从b点输出信号电压。

为验证峰值保持电路的性能，实验室利用冲击电流发生器分别注入幅值为10kA、15.6kA、20kA、25.6kA的雷电流，得到的试验数据见表2-20。

表2-20 冲击电流检测实验数据

序号	冲击电流 幅值/kA	仿真波形 幅值/V	实验波形 幅值/V	修正后 幅值/V	理论 幅值/V	幅值 误差/%	保持 时间/s
1	10	1.66	1.64	2.04	2	2	10.8
2	15.6	2.83	2.8	3.2	3.12	2.5	10.8
3	20	3.74	3.76	4.16	4	4	10.8
4	25.6	4.84	4.88	5.28	5.12	3	10.8

从表2-20看出，实测波形幅值与仿真波形幅值接近，这充分证明了该方案切实可行。实验时对应于幅值为10kA、15.6kA、20kA、25.6kA雷电流的电压/电流转换系数分别为0.204、0.205、0.208、0.206，几乎一致，说明线圈线性度良好。实验波形幅值通过二极管压降修正（即加上二极管压降0.4V）后，与理论值相近，误差不超过±4%。保持时间均为10.8s，与理论值一致，满足低速采集要求。

2) 取能单元。

取能单元包括取能线圈、过电压保护、整流、充电电容和稳压模块。取能线圈通过电磁感应，从雷电通道摄取能量，经过电压保护、整流、充电、稳压等处理后，为雷电流监测系统提供满足时间、电压要求的供电能源。其原理图如图2-50所示：

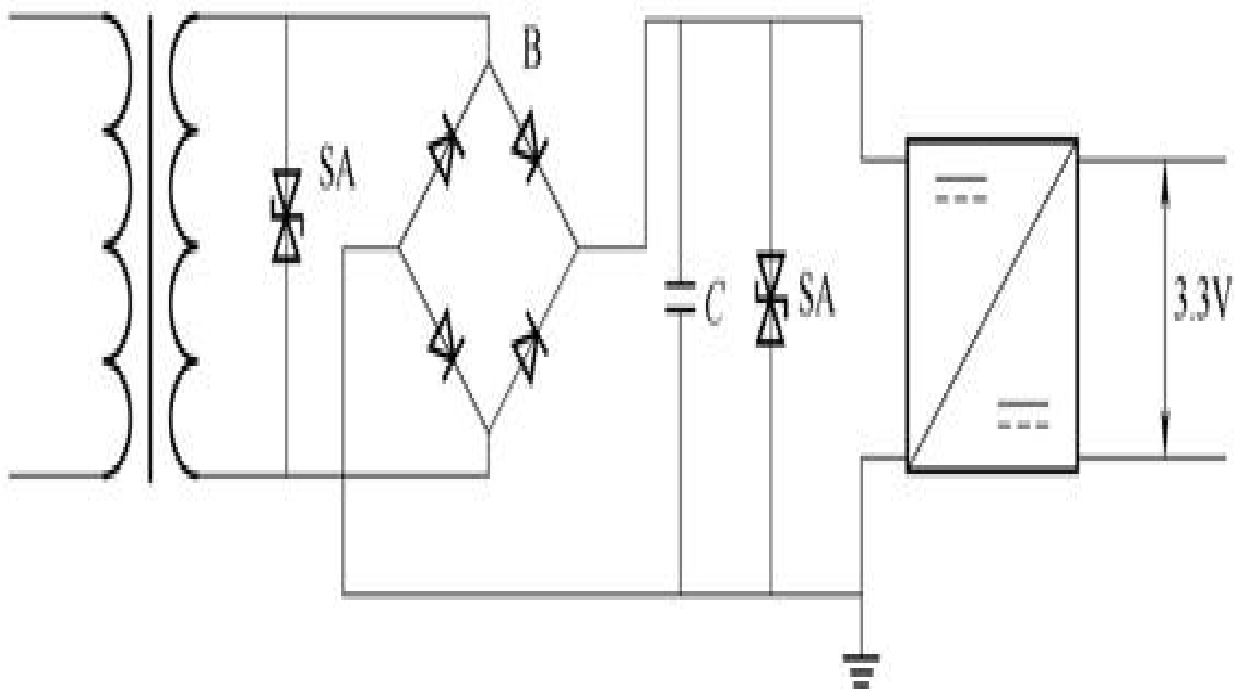


图2-50 取能单元原理图

为使取能单元提供持续稳定的能量，采用Saber软件进行仿真分析，以确定参数匹配的最优方案，并得到实验验证，实验结果见表2-21（试验过程中采用的雷电流为标准的8/20 μ s波形）。

表2-21 取能单元实验数据

序 号	冲击电流峰值/kA	输出电压/V	稳压时间/s
1	10.0	3.3	0.41
2	15.6	3.3	0.68
3	20.0	3.3	0.84
4	25.6	3.3	1.04

在输入不同四个电流幅值等级的情况下，电源输出电压恒定为3.3V，说明取能单元取能供电电压稳定，且稳定时间超过0.4s，可以满足采集时间要求。考虑到某些天气原因导致供能不足，外加备用电池。

3) 数据处理单元。

数据处理单元采用TI公司生产的CC2531，完成雷电参数的采集和存储，并通过其内部集成的ZigBee接入传感网络完成数据上传。为降低功耗，数据通信部分的工作模式设置为唤醒模式和触发模式。无数据上传时处于休眠模式，雷电流触发通信部分进行工作也可以远程唤醒实现数据上传。数据上传完毕后进入休眠状态。

4) 雷击过电压计算模型。

传感器可根据雷电流监测结果计算出雷击过电压。

当传感器安装于线路杆塔接地线时，输电线上感应出与雷电流极性相反的过电压，此时的感应电压为： $U = I_L h (1-k) / 2.6$ ，其中： I_L 为雷电流幅值，单位为kA； h 为输电线路距离地面的高度，单位为m； k 为避雷线和输电线之间的耦合系数。

当传感器安装于变电站避雷器接地线时，雷电侵入，避雷器动作之后，过电压幅值为： $U = (U_{bm} + I_b Z) / 2$ ，其中： U 为过电压幅值，单位为kV； U_{bm} 为避雷器残压最大值，单位为kV； I_b 为流过避雷器的电流幅值，单位为kA； Z 为等值阻抗，单位为 Ω 。

(3) 分布式光纤温度/应力传感器

1) 布里渊信号解调。

基于分布式布里渊光纤传感技术的温度/应力监测系统，其布里渊散射光的频移是温度或应变的函数，温度和应变的扰动都将对散射信号频谱的中心频率和幅度发生相应的偏移产生影响。为了同时测量准确的温度和应变信息，需要同时测量得到归一化的布里渊散射光功率和布里渊频移。布里渊散射光功率和频移与被测的传感量温度和应变成线性关系，如式(2-6)所示：

$$\begin{bmatrix} \nu_B(T, \varepsilon) \\ P_B(T, \varepsilon) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_{\nu, T} & C_{\nu, \varepsilon} \\ C_{P, T} & C_{P, \varepsilon} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \delta_T \\ \delta_\varepsilon \end{bmatrix} \quad (2-6)$$

式中， $P_B(T, \varepsilon)$ 为布里渊散射光功率； $\nu_B(T, \varepsilon)$ 为布里渊散射光频移； δ_T 为光纤的温度变化量； δ_ε 为光纤的应变； $C_{\nu, T}$ 为布里渊频移温度系数； $C_{\nu, \varepsilon}$ 为布里渊频移应变系数； $C_{P, T}$ 为布里渊功率温度系数， $C_{P, \varepsilon}$ 为布里渊功率应变系数。利用线性系数 $C_{\nu, T}$ 、 $C_{\nu, \varepsilon}$ 、 $C_{P, T}$ 与 $C_{P, \varepsilon}$ ，对式 (2-6) 进行求解，可以得到温度和应变，如式 (2-7) 和式 (2-8) 所示：

$$\delta_T = \frac{|C_{P, \varepsilon}| \cdot \Delta \nu_B + |C_{\nu, \varepsilon}| \cdot \Delta P_B}{|C_{P, T} C_{\nu, B} - C_{P, \varepsilon} C_{\nu, T}|} \quad (2-7)$$

$$\delta_\varepsilon = \frac{|C_{P, T}| \cdot \Delta \nu_B + |C_{\nu, T}| \cdot \Delta P_B}{|C_{P, T} C_{\nu, B} - C_{P, \varepsilon} C_{\nu, T}|} \quad (2-8)$$

对采集到的信号进行FFT分析，提取频谱信息，累加平均处理后得到沿传感光纤的频移和幅度分布；再根据上述频移和幅度与传感温度和应变的线性关系，解调出沿传感光纤的温度与应变。

2) 分布式布里渊光纤传感系统。

该系统主要包括种子光源、布里渊激光器、声光调制器、光耦合器、检测单元和监控主机等部分，系统结构图如图2-51所示。

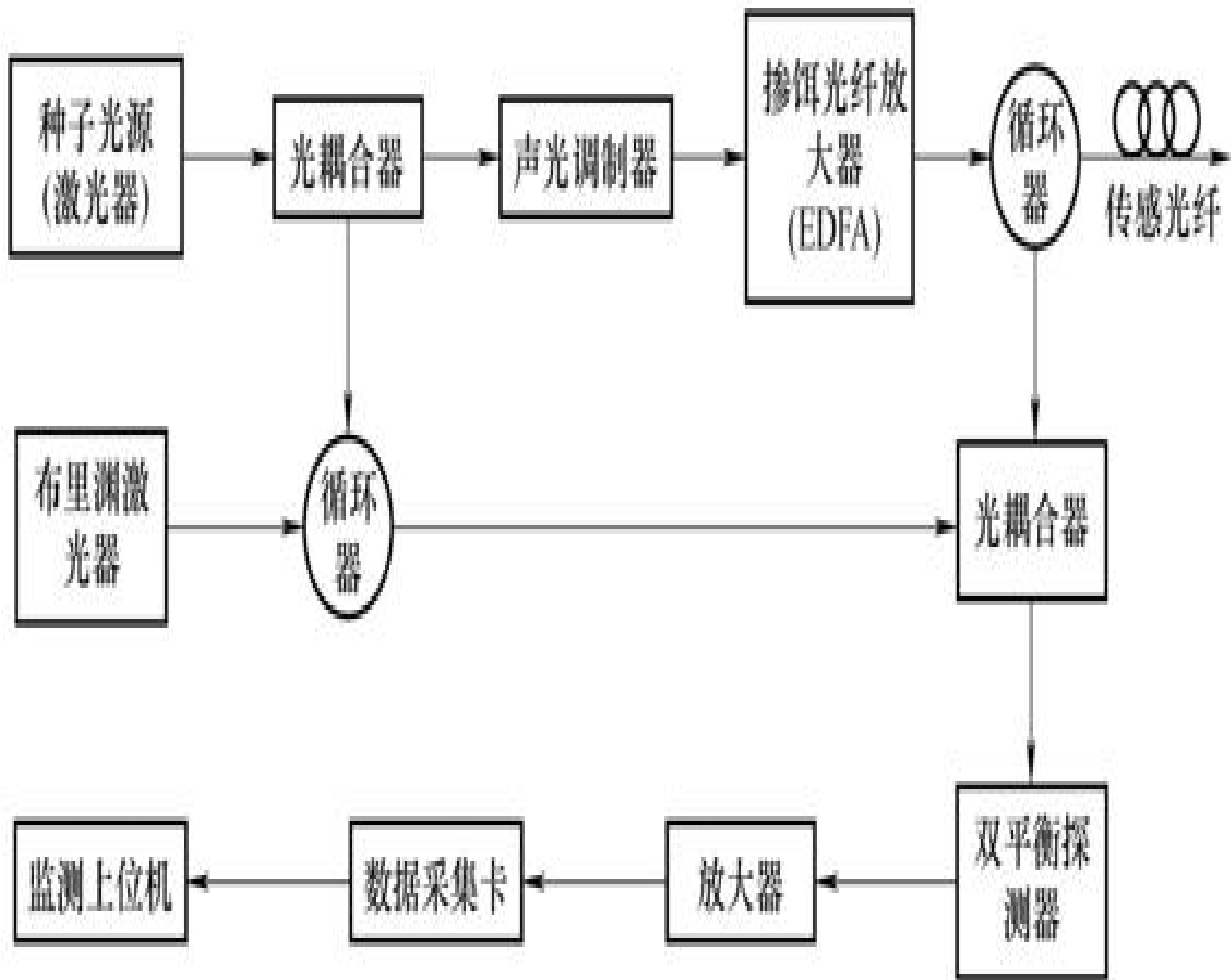


图2-51 系统主机技术结构图

布里渊自发散射光的强度极其微弱，为了扩大传感范围，首先要增大传感光脉冲的峰值功率，这样布里渊散射光功率才更强，然而，脉冲光功率过高会造成受激布里渊散射的非线性效应。因此，有必要对反射回来的微弱散射光进行滤波光放大，使得有用的布里渊散射光功率得到有效放大，从而扩大传感范围。同时，考虑到在长距离输电线路监测中，对传感距离要求严格，该系统选用声光调制器作为产生光脉冲的调制器件。

种子光源经过声光调制器产生一定脉宽和重复频率的脉冲序列注入传感光纤中，其后向散射光信号与本地布里渊光进行相干拍频；数据采集与处理单元对所得相干拍频信号进行时频FFT分析，提取频谱信息，经累加平均处理后得到沿传感光纤的频移和幅度分布；再根据频

移和幅度与传感温度和应变的线性关系，解调出沿传感光纤的温度与应变。

3) 架空线路温度/应变模拟试验。

实验室开展温度和应变模拟试验，针对松套不锈钢管型OPPC以及50km光纤测量距离，在人工覆冰室和室外分别进行了温度分布测量试验，并利用卷扬机给OPPC增加拉力，进行OPPC线芯应力和表面应力分布的测量试验，测量布里渊散射频率的变化。温度、应变测量试验布置分别如图2-52、图2-53所示。

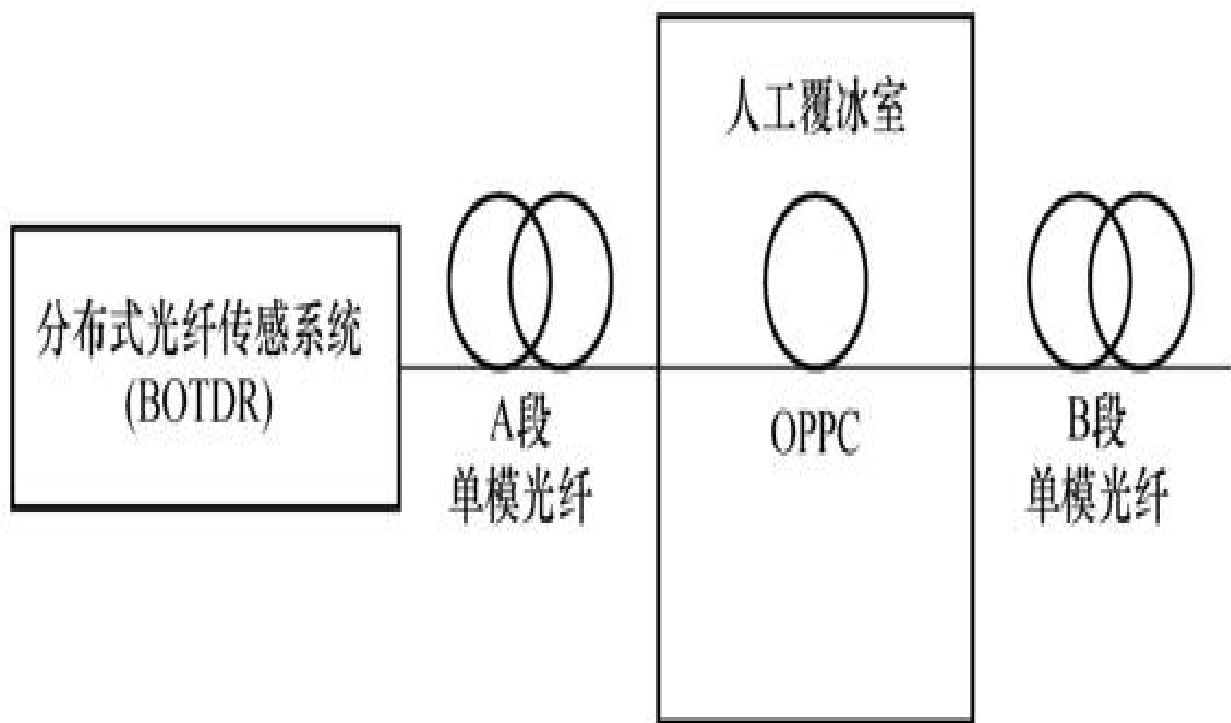


图2-52 温度试验布置图

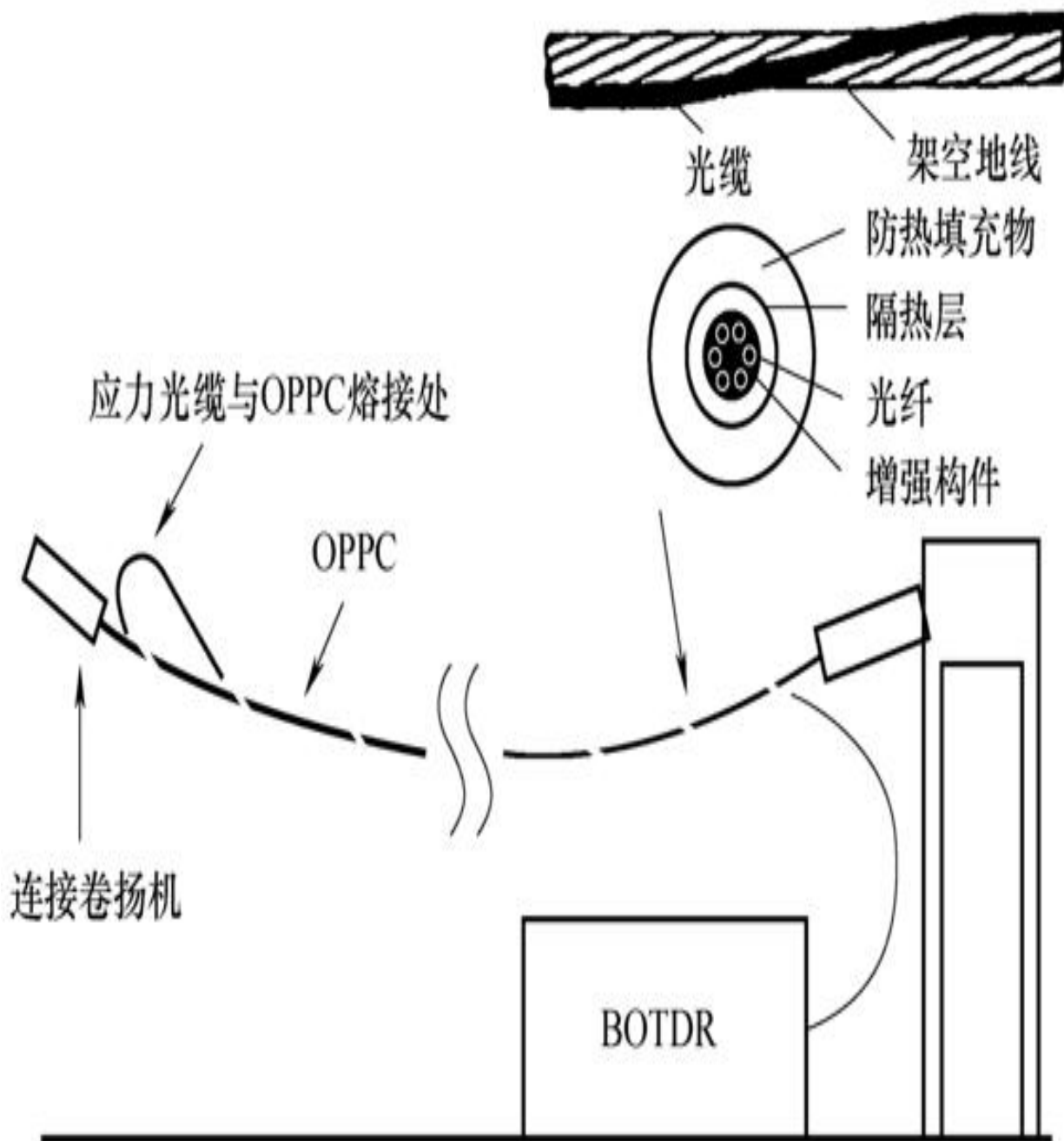


图2-53 应变测试试验布置图

①温度分布测量。

首先进行温度-频率校准，以便找到频率变化与温度变化间的线性关系。试验时，OPPC固定于覆冰室内，并保证OPPC不受力。以环境温度 26.4°C 为基准温度，改变覆冰室内温度 T_h ，然后记录温度变化。标定

结果如图2-54所示，布里渊散射频移 $\Delta \nu_B$ 与温度 T 成较好的线性关系，相关系数为0.978。

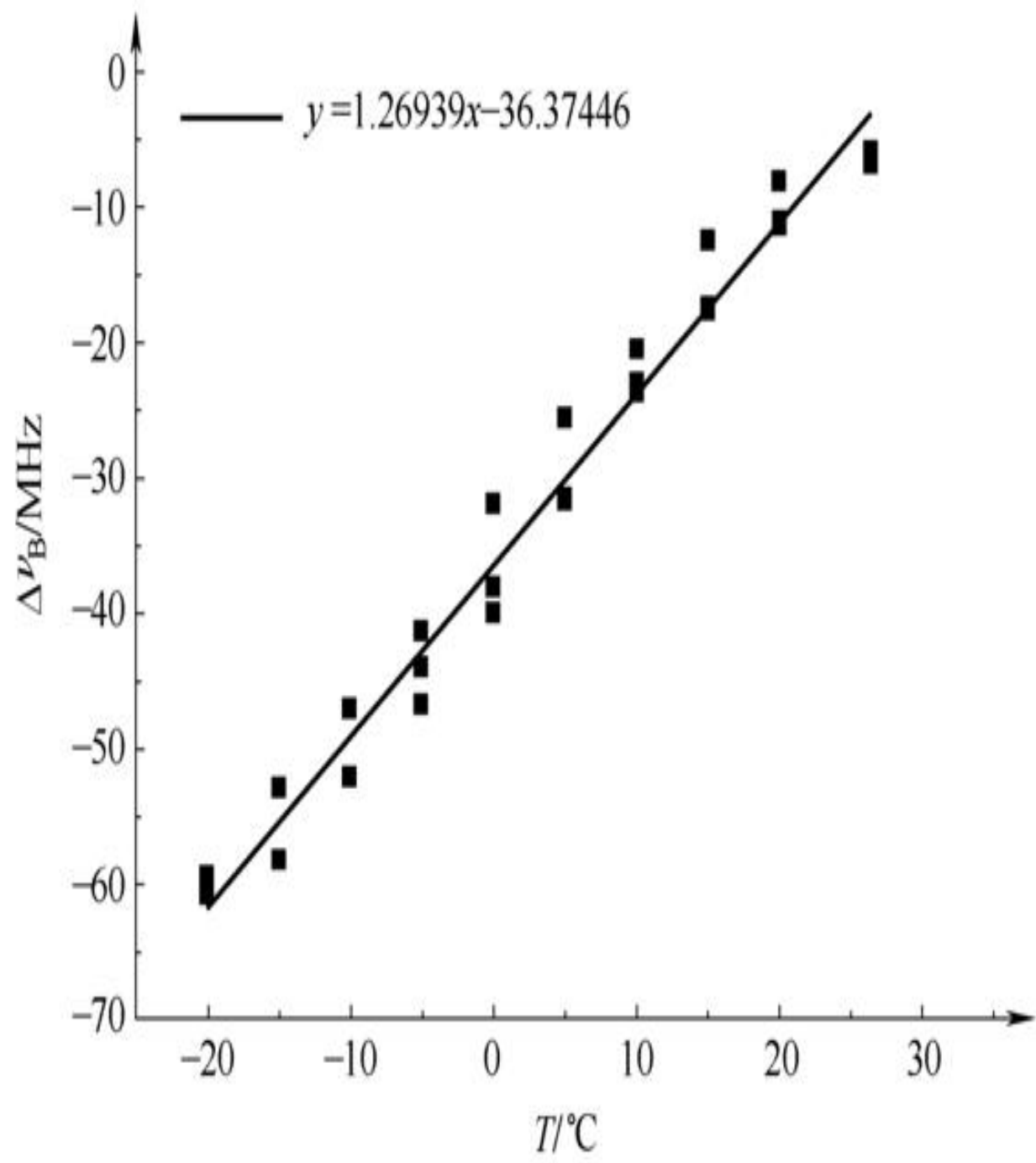


图2-54 频移与温度的关系图

根据图2-55中的试验布置，调节人工覆冰室温度从 26°C 下降至 -20°C ，不同温度时不同距离 D 处的频移 $\Delta \nu_B$ 如图（A、B段分别为50km、50m）所示。图中的温度值均为根据频移计算所得。

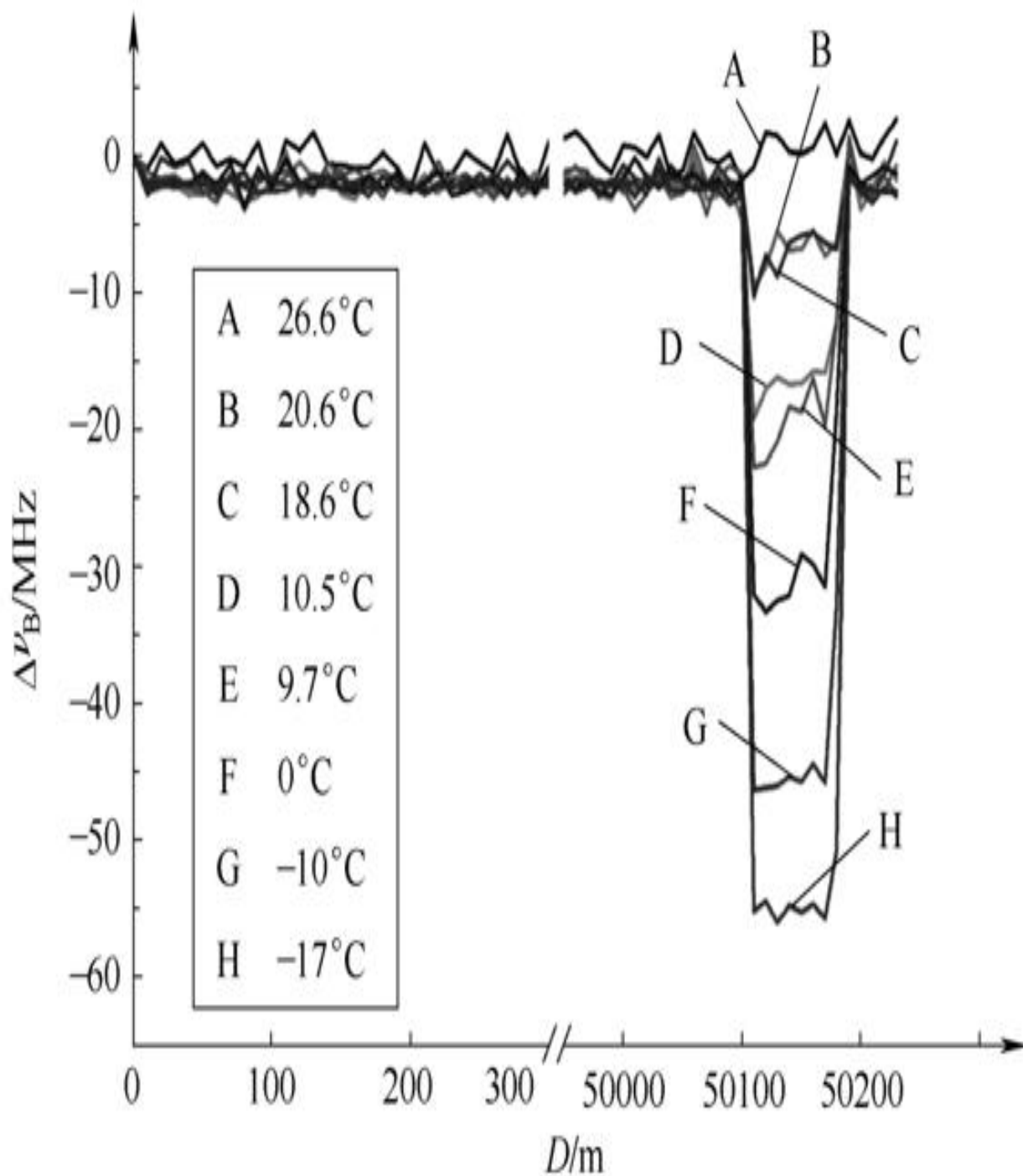


图2-55 光纤沿线测量温度分布

②应变分布测量。

用卷扬机增加OPPC的拉力，BOTDR测量的应力光纤布里渊频移量与线路应力具有良好的线性关系，如图2-56所示，其相关系数为0.99219。

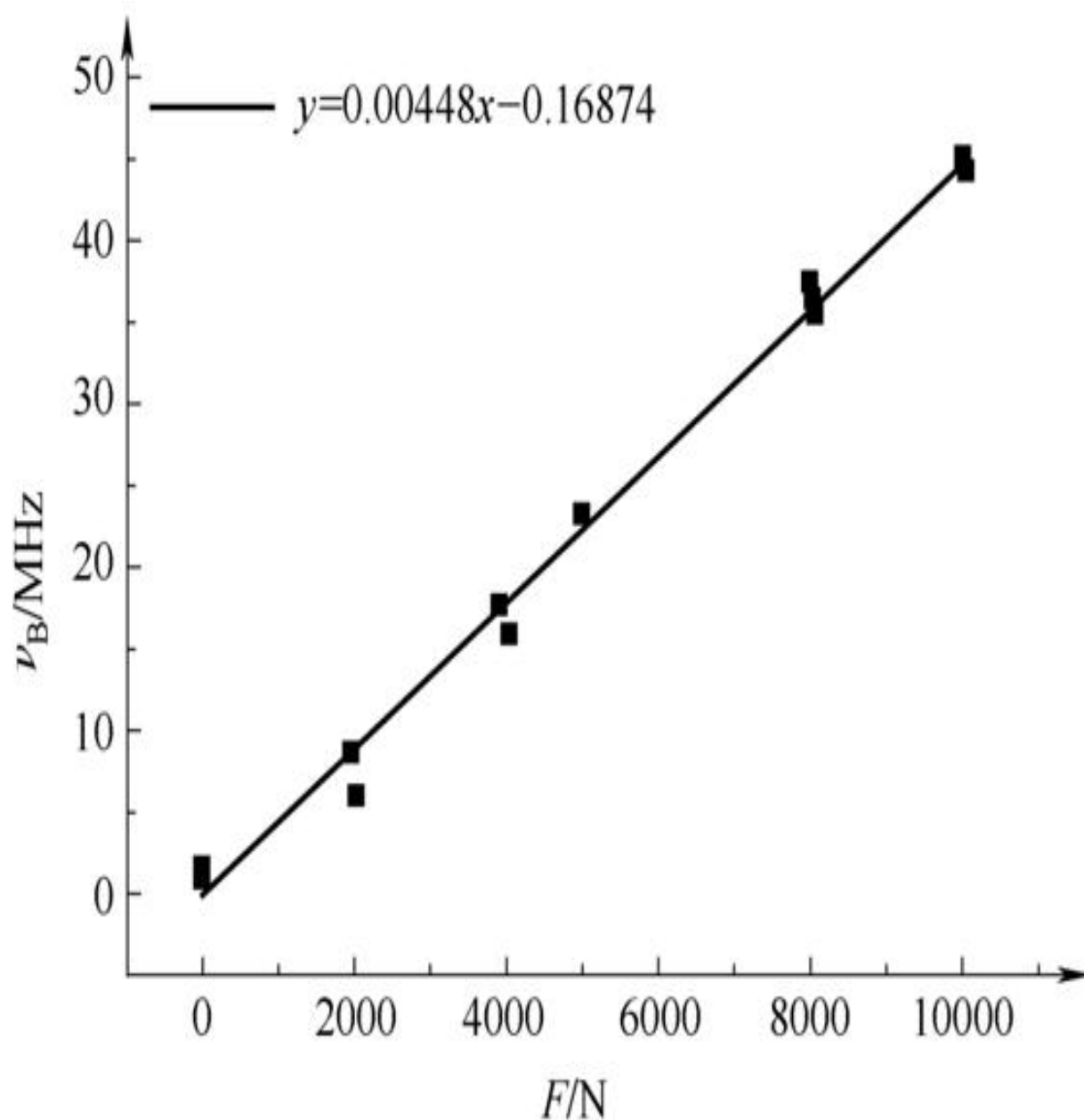


图2-56 频移与拉力的关系

系统测量OPPC的应力分布如图2-57所示，10~60m部分为BOTDR测量的与OPPC黏合的应力光缆，60~100m部分为OPPC内光纤。

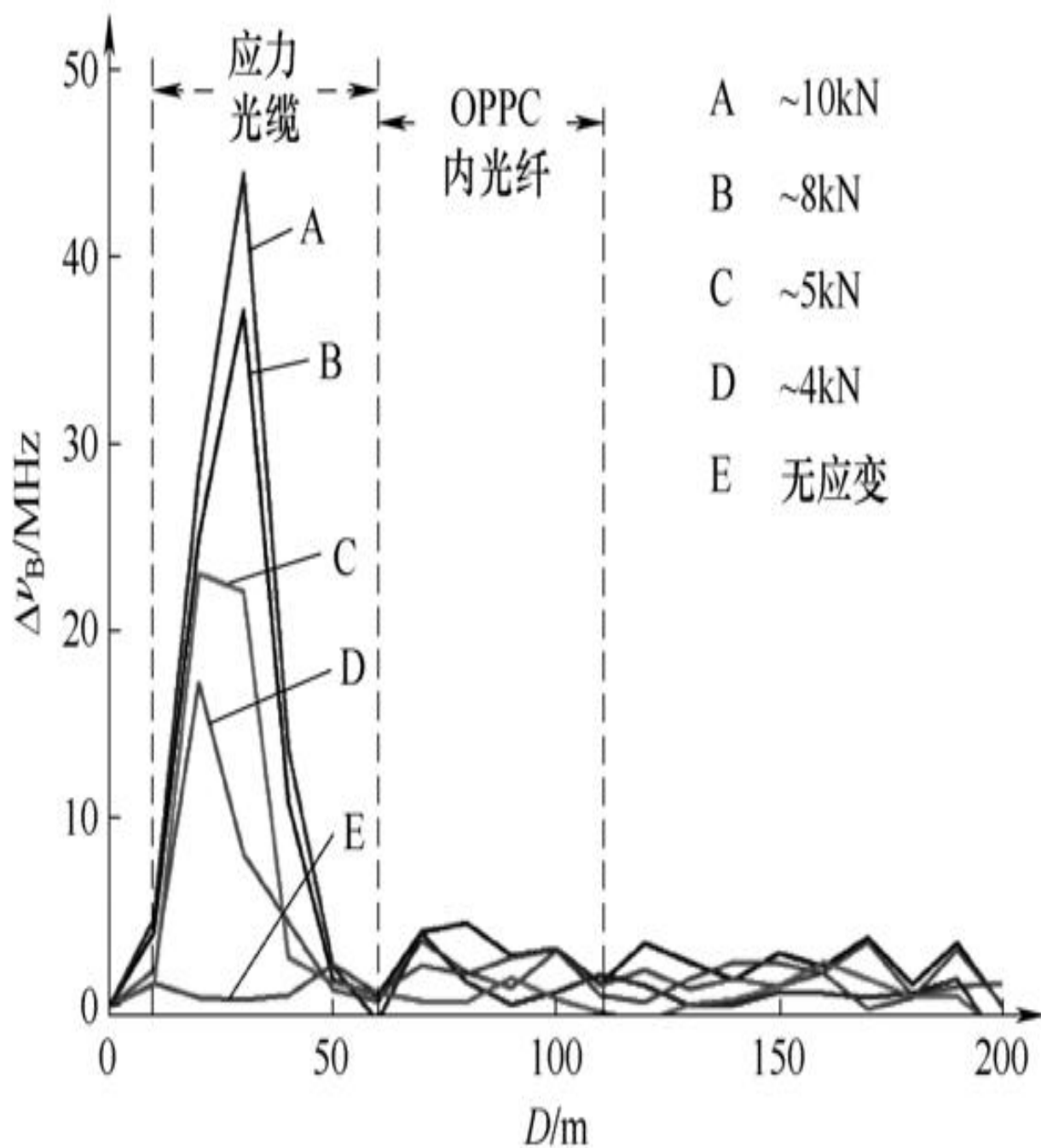


图2-57 BOTDR检测光纤应变分布

通过上述应力分布测量结果可知：由于松套型OPPC采取的一系列措施保证线芯光纤不受力，试验中对OPPC施加拉力，其线芯光纤无法

测量OPPC受力情况，此时，进行线芯温度测量时不需要校正应力的影响。当线路受力严重（如覆冰、舞动）时，OPPC内的光纤仍有可能因逐渐受力发生应变，此时需通过式（2-7）和式（2-8）去除线路覆冰时的应力对温度测量的影响，计算温度测量结果。通过OPPC表面敷设光纤方式可达到工程测量拉力的要求。

2. 传感网络分布式计算与故障诊断支持系统

传统的主IED设计目标是始终满足峰值性能，满足最高性能的要求，导致实际运行中除了高峰工作期外，系统资源利用率始终很低，同时传统的主IED不能进行数据通信与处理，单个主IED形成了“资源孤岛”，无法实现输变电设备的故障诊断，不能及时对可能存在的故障进行预警与处理。针对上述问题，本项任务建立了一个具有分布式计算与故障诊断能力的云平台，利用IEC61850标准对输变电设备进行抽象，建立了信息模型，采用云平台的数据分配算法，将抽象化的逻辑节点分配到各个主IED上进行处理，实现输变电设备的故障诊断。

（1）主IED的信息建模。

主IED的信息建模的主要目标是实现变电站内IED之间的互操作，IED的功能输出和对IED的访问都转移到信息模型，变电站内的信息交互直接在虚拟设备之间进行，为分布式计算和故障诊断等功能提供基础。

1) 面向对象的建模。

面向对象建模完成对设备功能进行抽象分解，得到逻辑节点和相应的数据对象。全面分析各个输电设备的各项功能情况并进行分拆归类，根据IEC61850标准抽象出若干个能够完成其基本功能的相对独立的逻辑节点，建立的信息模型如图2-58所示。

2) IED动态建模。

变电站系统运行时设备的添加或移除，将导致IED信息模型发生变化，因此需动态配置IED的信息。

IEC61850规约的信息模型中，服务器、逻辑设备、逻辑节点以及数据模型都提供读目录（GetDirectory）或读定义（GetDefinition）

服务，通过调用这些ACSI服务获得IED的模型信息并组建完整信息模型。

系统运行，通过ASCI将信息模型的读目录和读定义服务映射到MMS指定服务中去，服务请求方对读目录和读定义服务发出调用请求并等待响应。按照此过程，依次读服务器目录服务、读逻辑设备目录服务、读逻辑节点目录服务、读数据定义和读数据目录服务。

（2）分布式计算

利用云平台，将分布在不同主IED上的有关输变电设备状态的信息资源整合形成功能强大的信息共享平台；分布式计算可以将数据处理任务分配给其他IED，平衡主IED间的计算负荷，充分利用IED的计算资源。借助于云平台，可以使输变电设备监测主IED实现信息共享、分布式计算与存储，提高监测主IED的数据处理速度和效率，增强主IED间的互通互联功能。分布式计算示意图如图2-59所示。

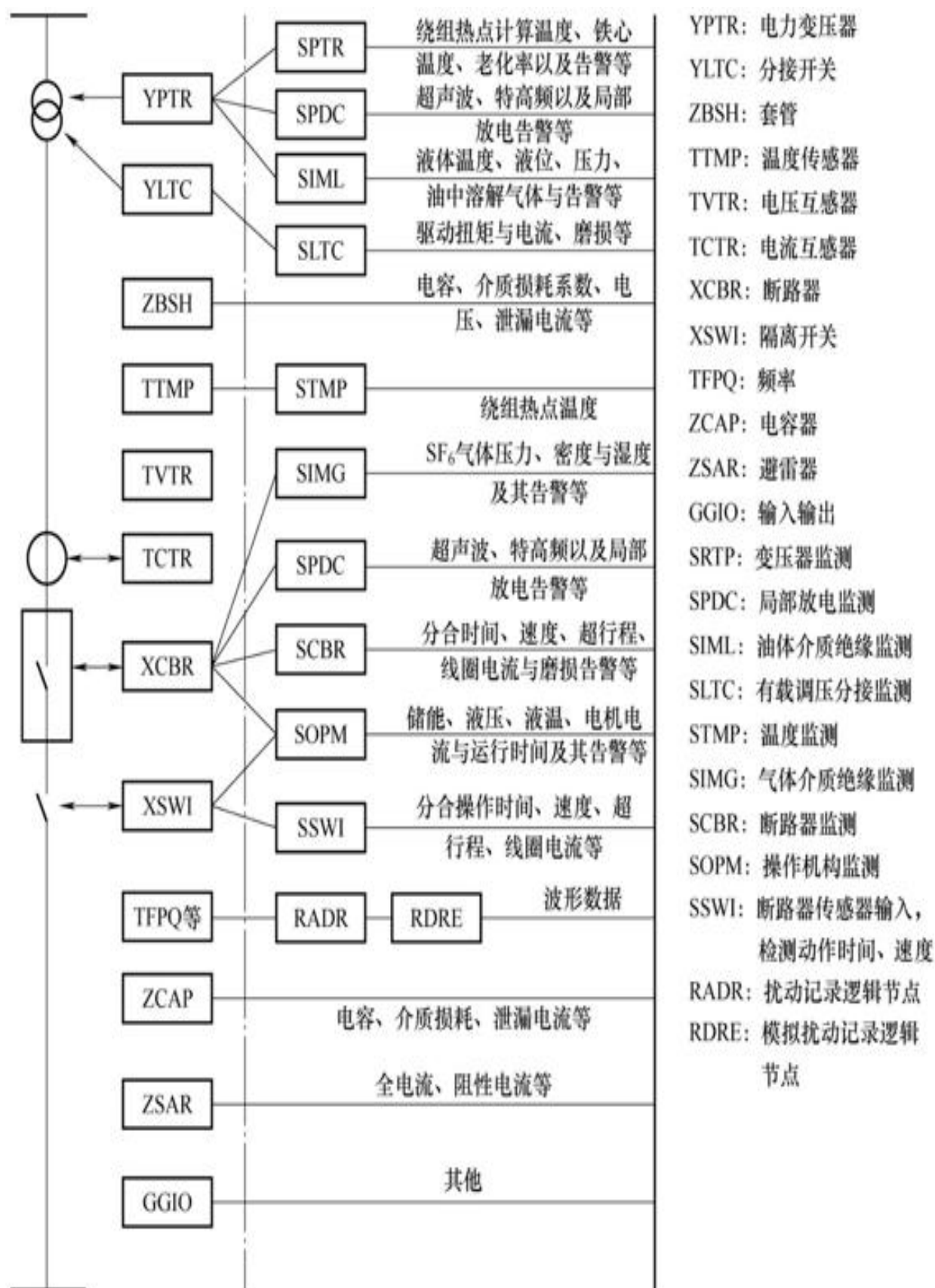


图2-58 变电站一体化监测装置信息模型

（3）故障诊断

利用云平台的数据通信及分布式计算等功能实现故障诊断和智能预警功能。

1) 分步诊断和智能预警。

主IED从初级诊断方法库中按顺序依次调用合适的诊断方法对实时数据进行分析。如果调用完所有诊断方法后分析结果显示设备无故障，则将数据存储在云平台上；如果至少一种诊断方法的分析结果显示设备存在故障，则将数据实时数据传输至变电站中心控制站。并进行预警，提醒操作人员某一设备可能存在故障。

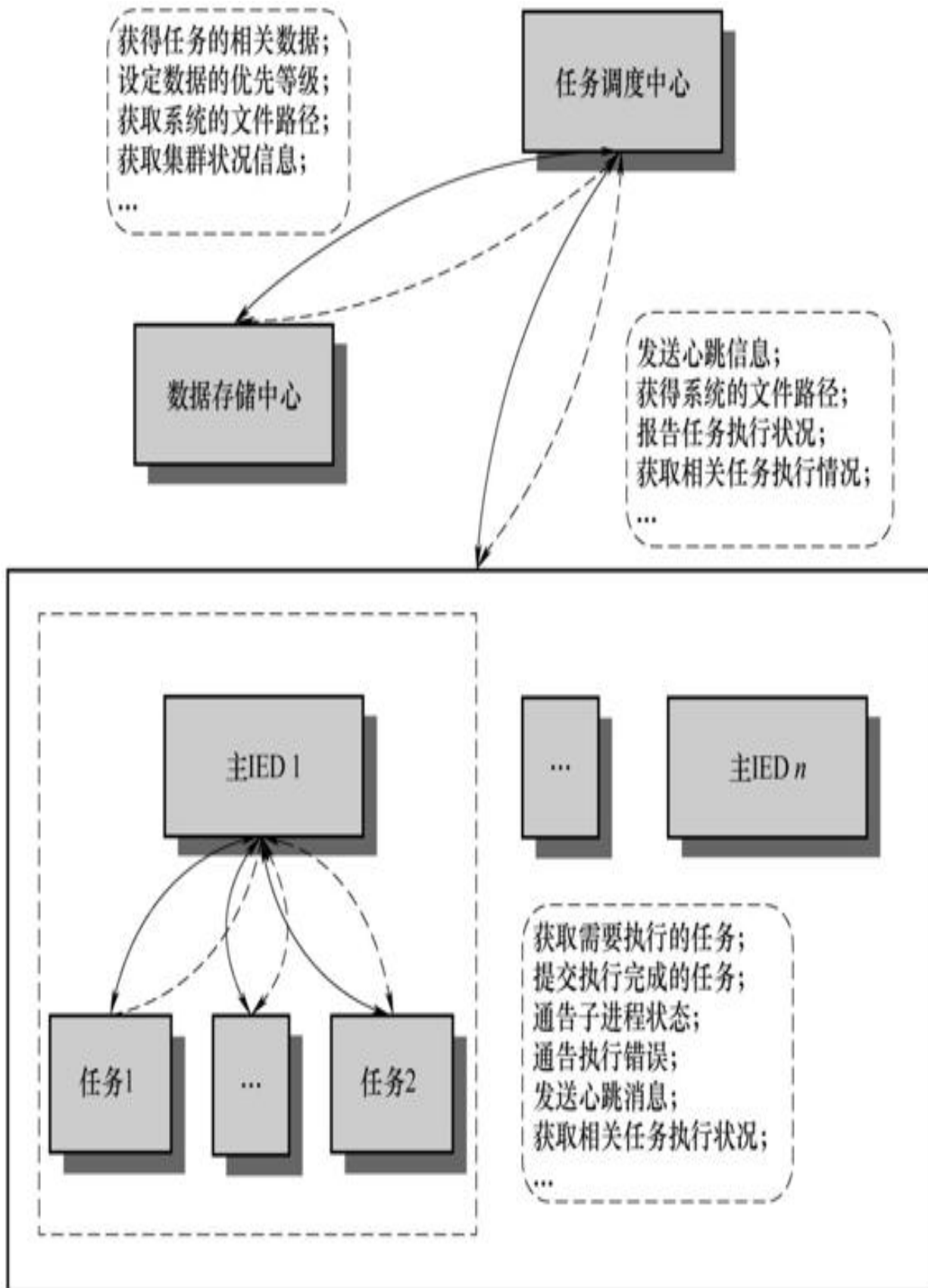


图2-59 分布式计算示意图

2) 分层诊断和协同诊断。

当故障设备实时数据传输至变电站中心控制站时，控制站调用该设备的历史数据和高级诊断库中的方法，对故障进行进一步准确地判断。如果信息不全面，可以向云平台发送信号调用其他设备的实时数据进行协同。如果此时监测设备无故障，则取消设备预警；如果此时监测到设备的确发生故障，则将预警转为报警，提醒工作人员对设备进行检修。

故障智能诊断具体流程图如图2-60所示。

3. 非接触取能供电

(1) 基本思路与设计原则

为解决输变电智能传感器及监测装置的供能可靠性问题，本任务对高电位感应取能及低电位感应取能两种非电气接触式取能的关键技术进行了研究；为解决电源模块的电费浪费问题，对电源管理策略进行了研究。研究工作旨在解决传感器及监测装置的电源可靠性技术难题，主要包括：

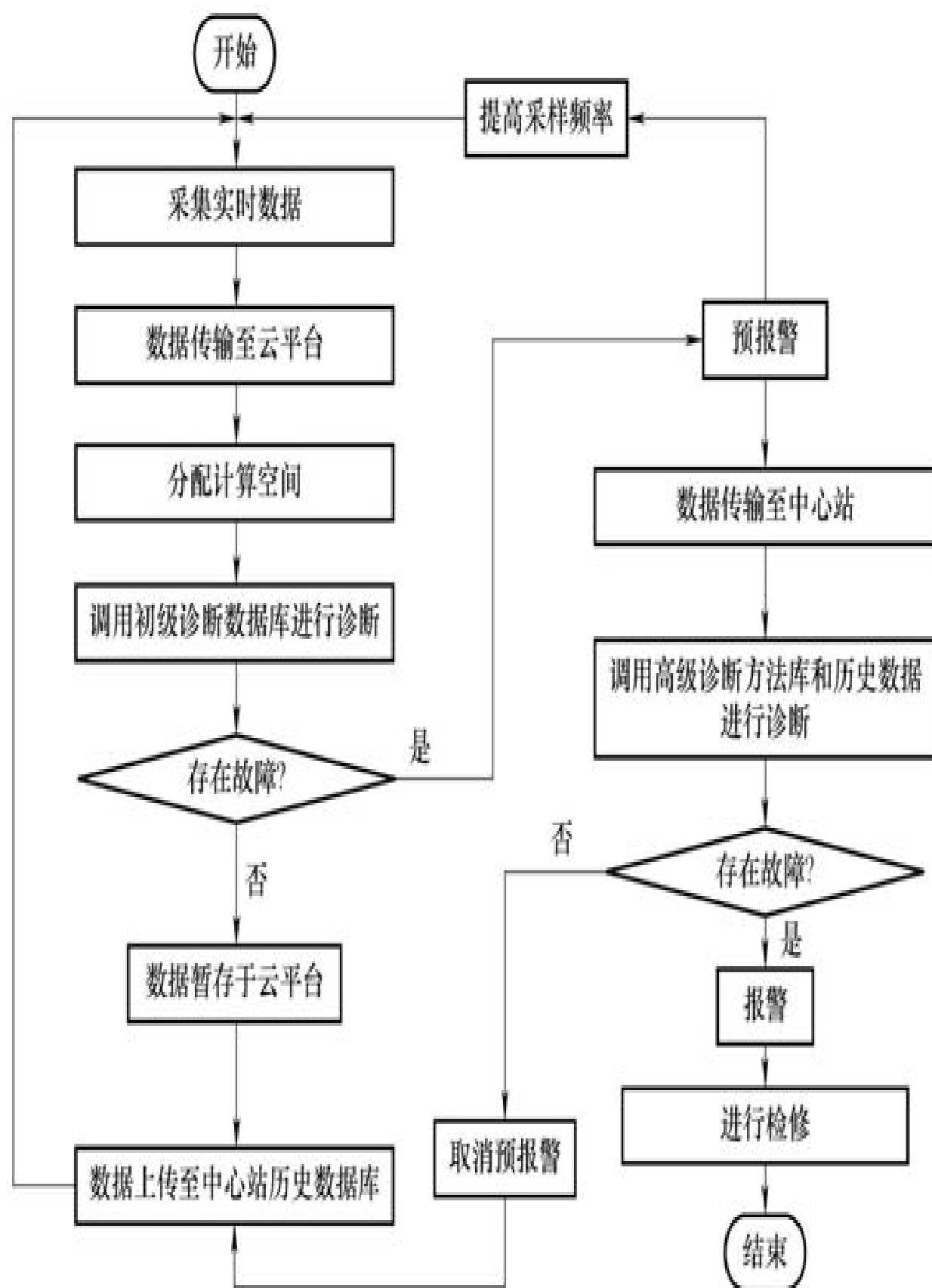


图2-60 故障智能诊断流程图

1) 高电位感应取能装置安装于高压输电导线上，其设计面临装置的小型化、绝缘性能高和低成本化三方面的技术难题。

2) 输电监测装置及传感器传统采用太阳能配合蓄电池为其供电，此种供能方式存在供能可靠性及免维护能力差的技术问题。

3) 变电站内的传感器及监测装置常采用变电站低压端的电源或电池为其供电，此种供能方式存在电源线布线复杂和电池更换成本高的技术难题。

4) 输变电监测装置常采用电源管理系统对其供能进行管理，但传统的电源管理系统面临监测装置性能最大限度的发挥与电源的最优使用如何达到最佳平衡的技术难题。

(2) 高电位感应取能

本任务研制出了高电位感应取能装置，其基本原理如图2-61所示，电流互感器将输电导线周围的电磁能量转换为电能，将获取的电能接入取能电源模块，取能电源模块对其进行整流滤波处理并实现隔离稳压输出。其中取电调节保护电路可实时地调节和限制输入模块的电能，吸收因雷击等特殊情况引起的瞬间大电流，保证了模块能在输电导线电流不稳定时仍能输出稳定的电压。

1) 取能铁心结构设计。

为便于高电位感应取能装置的现场安装，本任务研制的高电位感应取能装置采取开环设计。为提高取能装置的输出功率，取能铁心的设计原则如下：

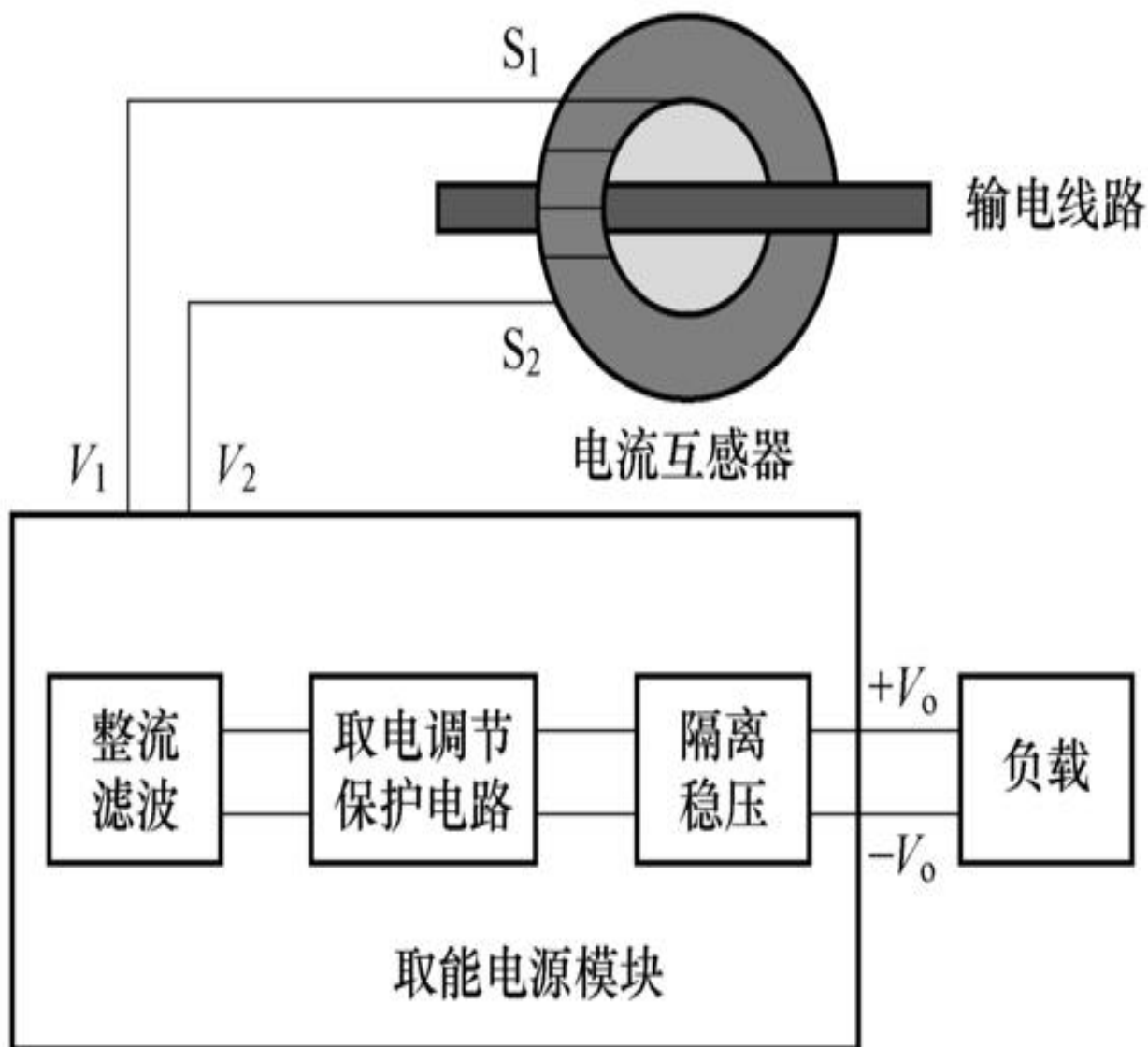


图2-61 电流互感器感应取能原理图

①取能铁心在质量相同、内径一定的条件下，铁心的形状选择空心圆柱体，其具有截面积更大、磁路更短的特点，取能效果更好。

②取能铁心在同为空心圆柱体的条件下，铁心设计得越扁平，其具有截面积越大、磁路越短，取能效果越好的特点。

本任务针对500kV输电线路研制了高电位感应取能装置。500kV输电线路通常采用的导线直径约为3.8cm，为保证取能装置在安装时具有足够的空间，取能铁心按 $r=6\text{cm}$ 设计。以下三式分别为电流互感器的磁路长度、截面积和铁心质量计算公式：

$$L_e = 2\pi(R+r)/2 = \pi(R+6) \quad (2-9)$$

$$S = (R-r)h = (R-6)h \quad (2-10)$$

$$M = (\pi R^2 - \pi r^2)\rho = (\pi R^2 - 36\pi)\rho \quad (2-11)$$

式中， R 为取能铁心外径； r 为取能铁心内径； h 为取能铁心高度； ρ 为硅钢密度。

按照以上计算公式，分别计算一次侧的导线电流为5A、15A、30A、45A时，分别感应输出2W、4W、6W、8W、10W、12W电能量时所对应取能铁心的质量及取能装置的总质量，计算结果见附录10～附录13。

2) 采用合成树脂铸模封装取能铁心。

本取能装置设计采用合成树脂铸模方式固定片状硅钢片，其具有如下优点：

①保证切割后硅钢片不散开，同时消除浸漆工艺带来磁导率下降的影响。

②用合成树脂铸模可代替取能铁心的安装附件，大大降低了整套感应取能装置的质量。

3) 取能装置研制及性能测试。

如图2-62所示，为本任务研制的高电感应位取能装置，包括电流互感器及电源控制模块，其中电流互感器质量为3.1kg、内径6cm、外径13.5cm、厚7cm，电源控制模块的输出电压为24V，输出功率为20W。

为对研制的取能装置的性能进行实验论证，在实验室搭建了如图2-63所示的实验环境，实验导线采用LGJ-400，大电流发生器的范围为0～3000A。



图2-62 高电位感应取能装置



图2-63 实验环境

高电位感应取能装置的取能特性曲线如图2-64所示，当一次电流达120A时，输出功率稳定到20W，本装置具有较好的输出伏安特性，满足输电导线上传感器的供电需求。研制的高电位感应取能装置的技术参数见附录14。

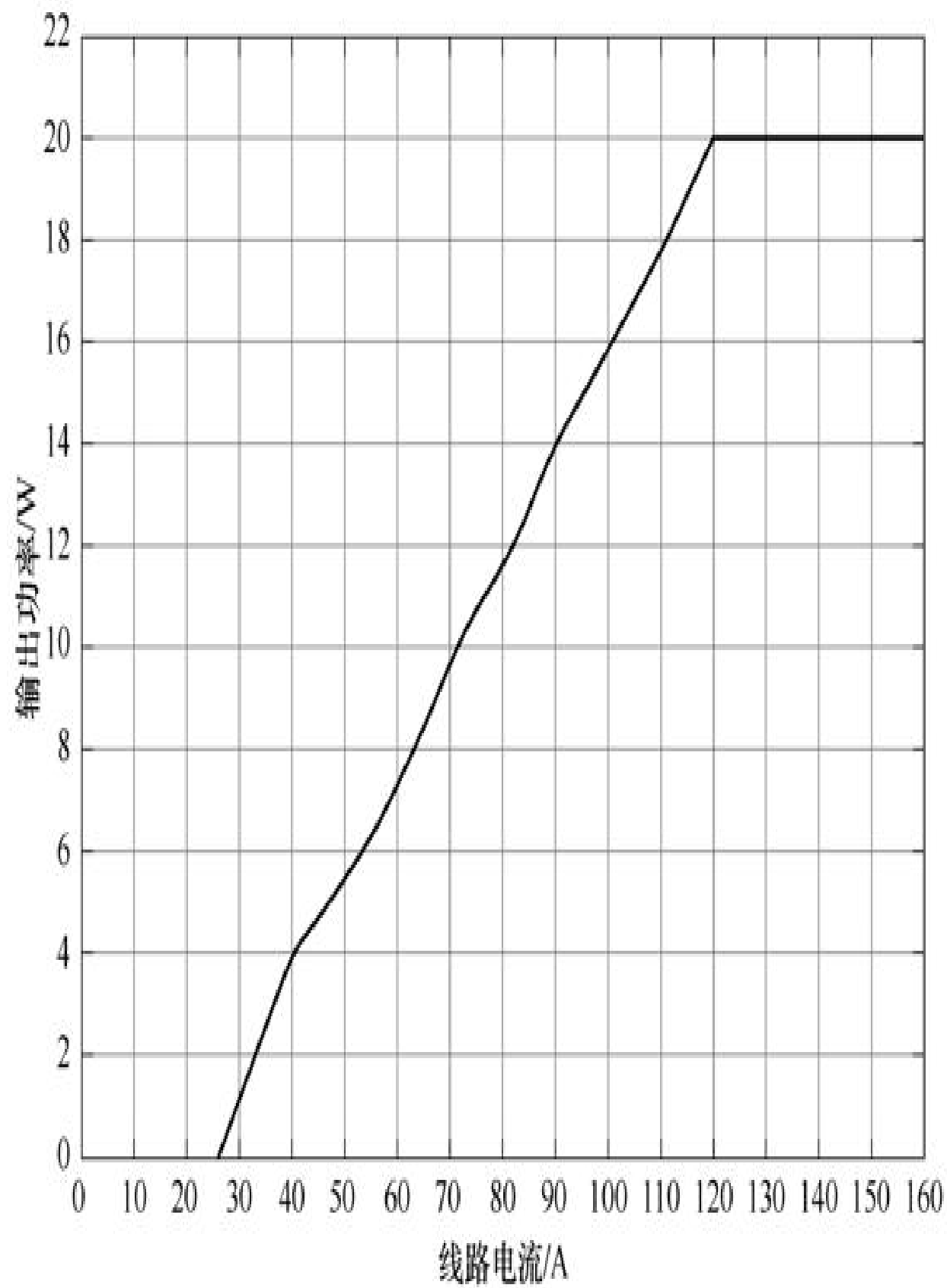


图2-64 高电位感应取能模块取能特性曲线

(3) 低电位感应取能

本任务研究了低电位取能方式，其基本原理在于利用带有铁心的取能线圈收集输电杆塔与输电线路之间的电磁能量。低电位感应取能原理如图2-65所示，将带有铁心的取能线圈安置于输电杆塔与输电线路之间，取能线圈将输电杆塔与输电线路之间的电磁能量转换为电能，将获取的电能接入整流滤波、调节保护电路及隔离稳压模块，实现整流滤波、调节保护及稳压处理。取电调节保护电路可吸收因雷击等特殊情况引起的瞬间大电流，保证模块能在输电导线电流不稳定时仍能输出稳定的电压。

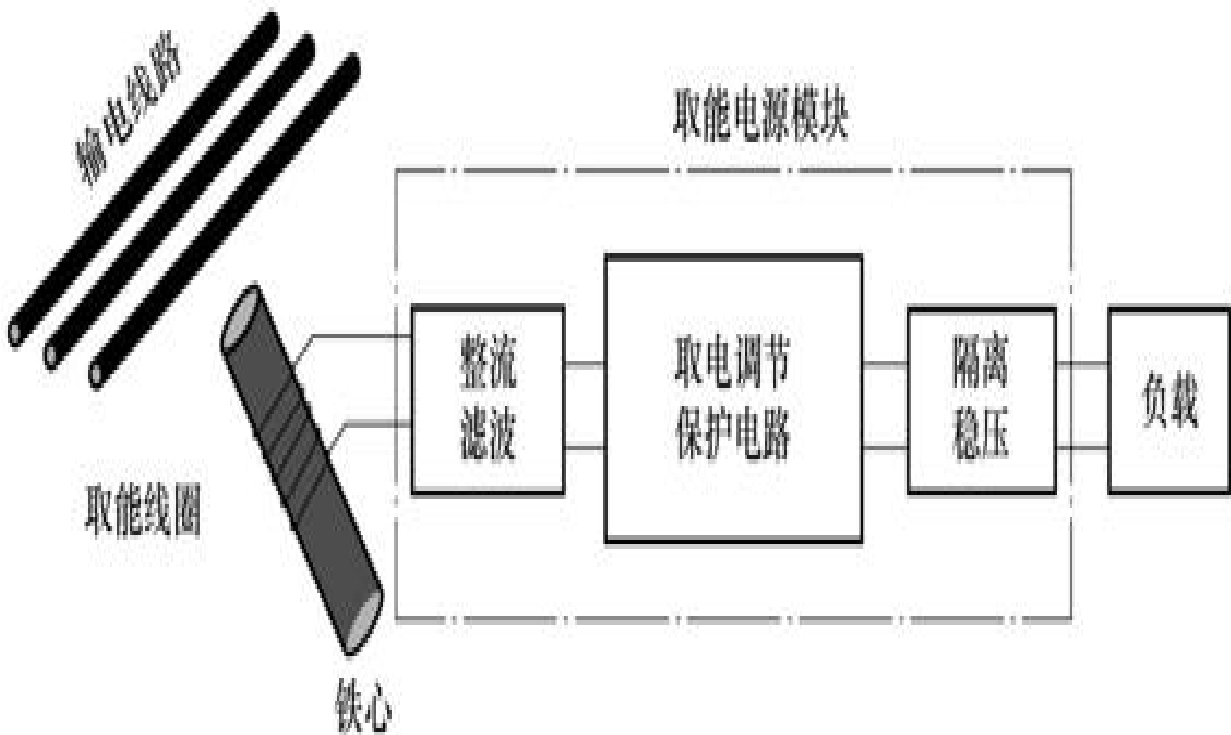


图2-65 低电位感应取能原理图

为研究此种取能方案的取能效果，建立如图2-66所示的坐标系，并据此进行了分析计算。在设计中使用高磁导率铁心，取能线圈为上万匝时，取能约为1W。从取能效果、经济性以及安装安全性角度考虑，此种取能效果还不够理想，有待新型高磁导率材料的产生以及取能装置的进一步研究改进。

(4) 电源管理策略

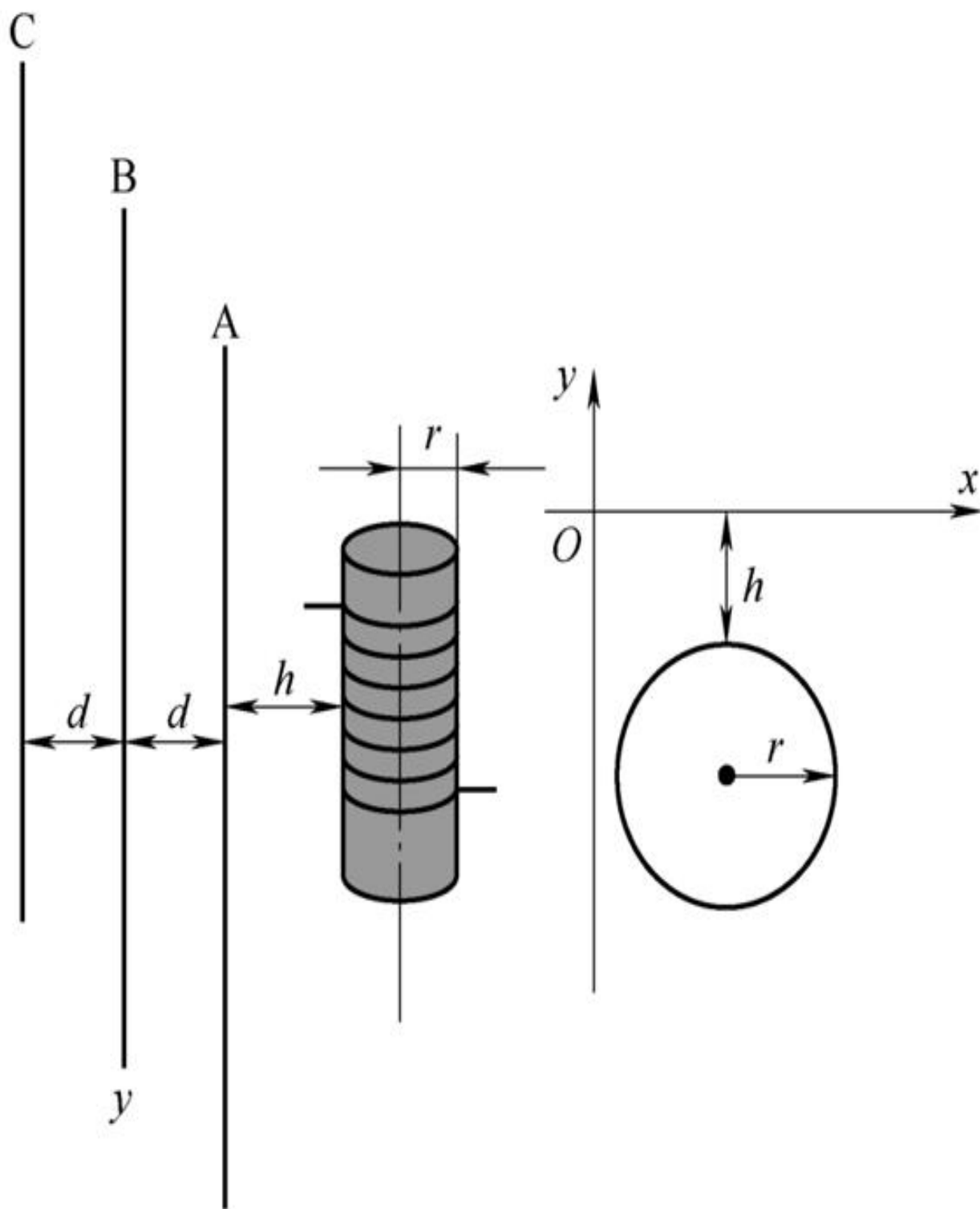


图2-66 低电位感应取能计算坐标系

本任务提出了电源模块的电压监控保护、电源优化管理及基于事件驱动电源管理策略。电压监控保护策略是依据监测电源模块的电压状态，控制电源模块的工作状态，进而保证电源模块的安全与合理使用；电源优化管理及基于事件驱动电源管理策略，是应用有限状态机划分装置工作的状态，并整理外部运行环境引起状态转变的各类事件，从而确定输变电监测装置工作状态的转移方式，这保证了监测装置功能最大限度的发挥及电源模块的有效利用。

1) 电压监控保护方案。

在电源系统电压低至23.6V时，整个电源系统进入超低功耗模式，设备停止工作；在电源系统电压为23.6~24.0V时，可使用GPRS和北斗通信功能，不能对传感器供电；在电源系统电压为24.0~24.5V时，可使用GPRS和北斗通信功能，同时对传感器供电；在电源系统电压高于25V后，可开启WiFi功能，否则关闭WiFi功能电源。

2) 电源优化管理策略研究。

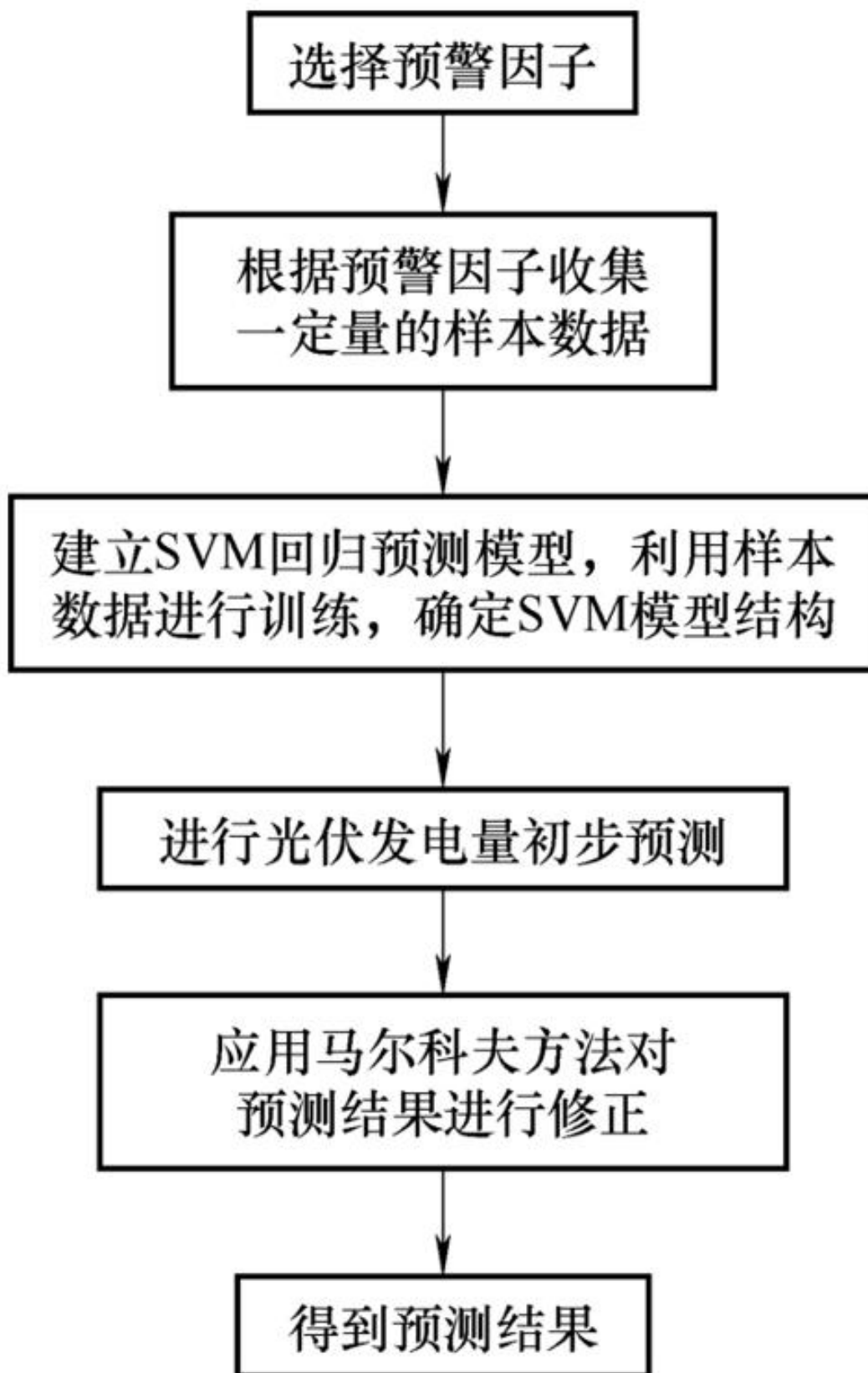


图2-67 基于SVM-马尔科夫组合法的太阳能光伏发电量预测方法

针对输电线路一体化智能监测装置，相继研究并提出了基于SVM-马尔科夫组合法的太阳能光伏发电量预测方法、基于内阻法的蓄电池剩余电量在线监测系统，以及动态电源管理技术（DPM）、动态电压频率调节技术（DVFS）和低功耗电源管理技术，其原理如图2-67～图2-70所示。

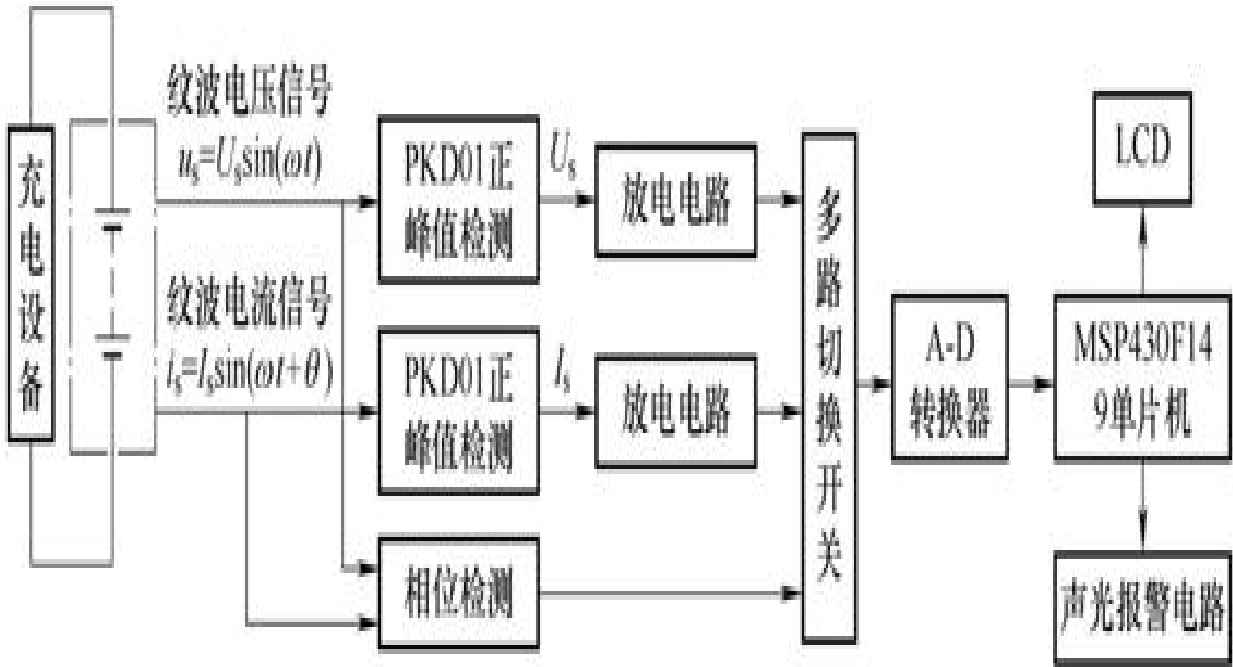


图2-68 基于内阻法的蓄电池剩余电量在线监测系统

3) 基于事件驱动电源管理策略研究。

本任务针对输变电监测装置的电源模块，提出了基于事件驱动电源管理策略，它是应用有限状态机划分装置的工作状态，并整理外部运行环境引起状态转变的各类事件，从而确定输变电监测装置工作状态的转移方式，这不仅保证了输变电监测装置功能的最大发挥，同时降低了监测装置的功耗，使电源模块得到了有效的利用。

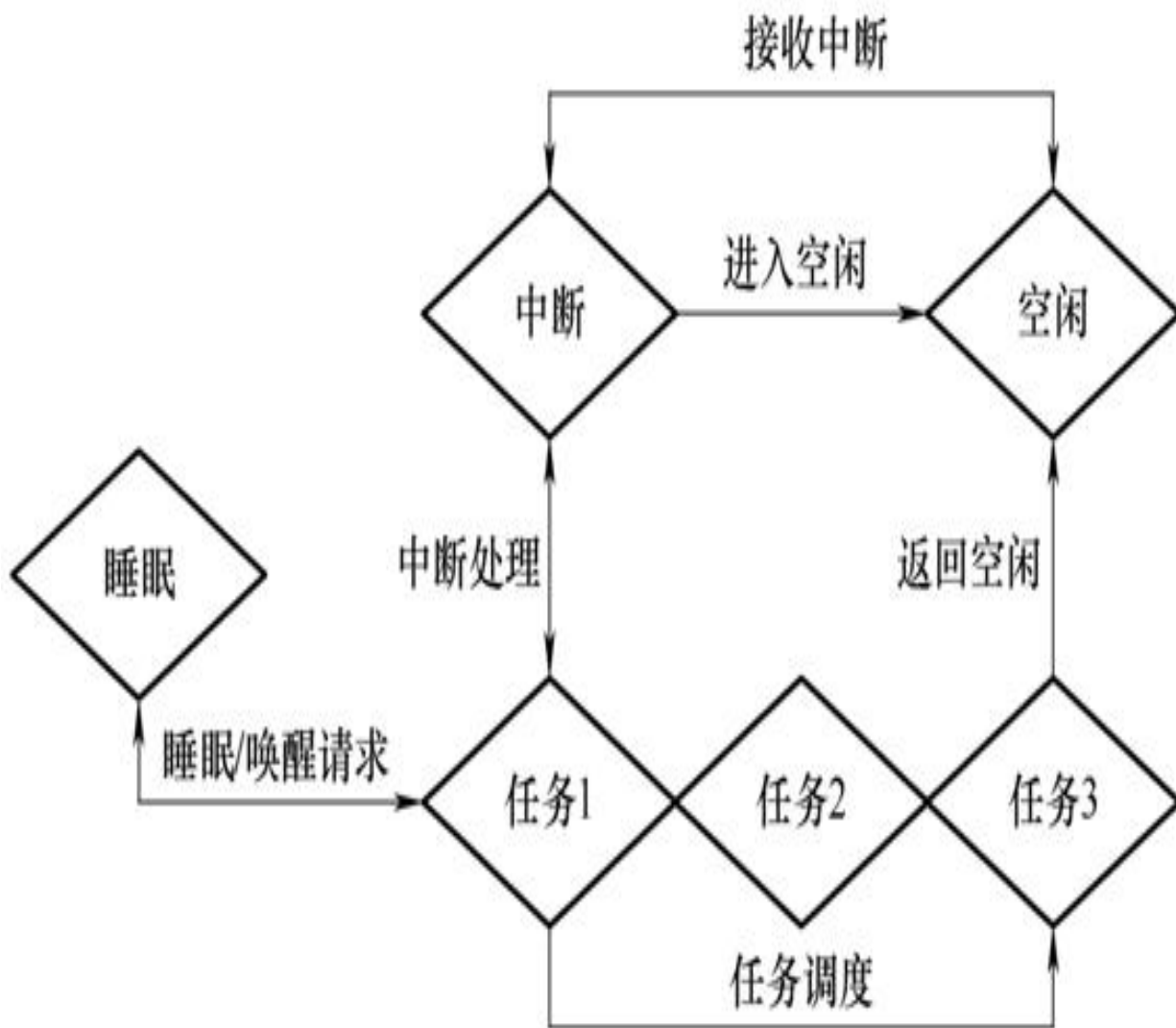


图2-69 动态电源管理技术 (DPM)

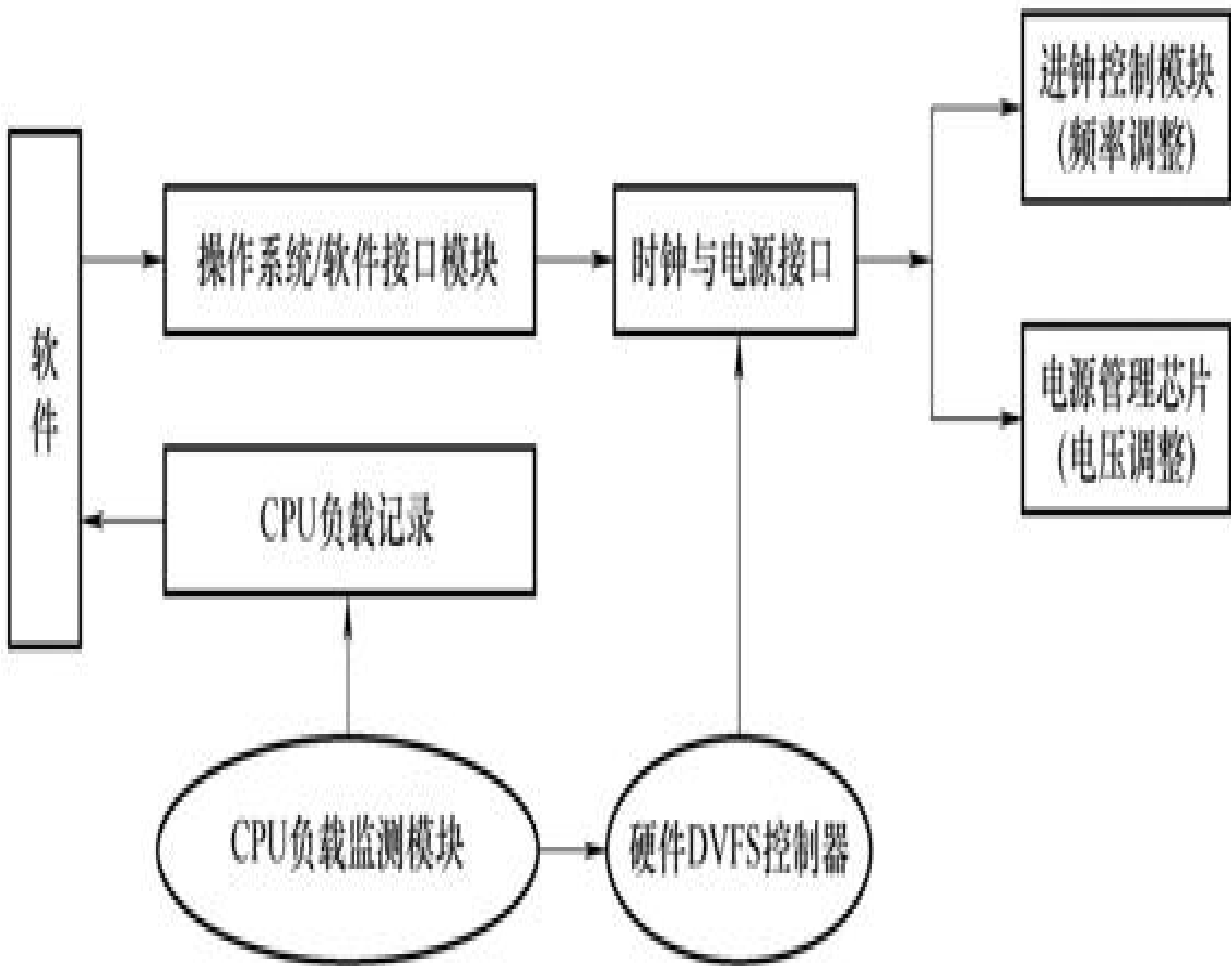


图2-70 动态电源频率调节技术 (DVFS)

2.3.2 设计与实现

1. 输变电设备智能监测传感网络

本任务根据变电站和输电线路的特点，设计了输变电设备智能监测传感网络，监测传感网络具有数据共享、故障诊断和分布自治等功能，实现了一体化智能监测装置之间的状态信息互联与交互。

(1) 变电设备智能监测传感网络

变电站具有状态监测参量多、监测点相对集中的特点。本任务设计了变电设备状态监测传感网络，如图2-71所示。变电设备监测传感网络采用有线的光纤以太网通信方式为主，无线通信方式为辅助和备用的通信方案。采用两级的网络结构，由主IED与智能传感器以及手持

式接入设备组成星形子网络，各子网之间采用Mesh网络结构进行互联，由网络设备解决子网冲突、多跳管理策略；智能传感器可以动态接入子网内的主IED，通信网络的信息流不再仅限于纵向流量通道，具备了主IED之间、过程层关联传感器之间信息交互的横向流量通道，实现了“物与物”和“物与人”之间通信的业务需求。

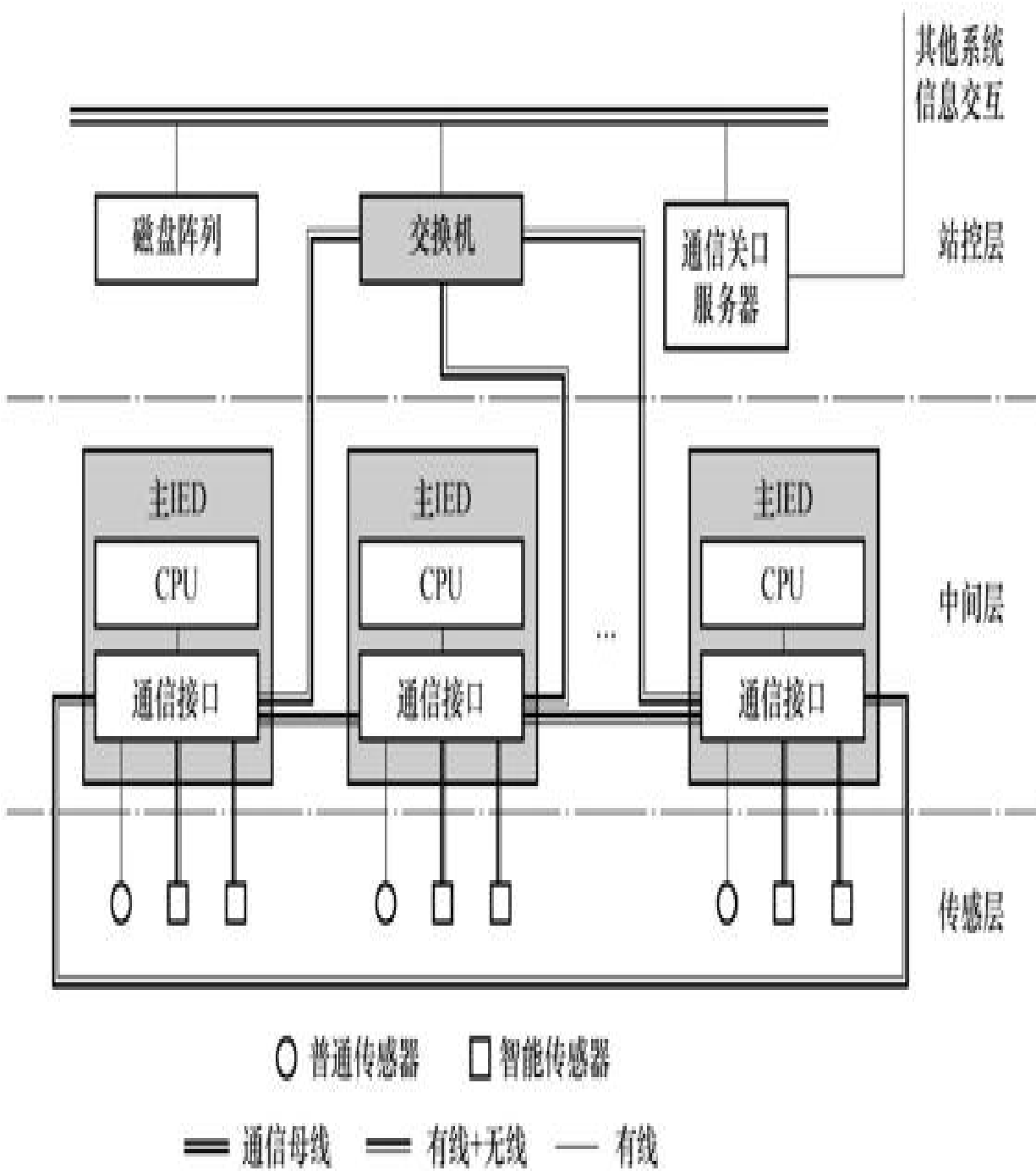


图2-71 变电站设备智能监测传感网络

(2) 输电线路智能监测传感网络

输电线路监测点具有分布广及呈线状分布的特点，数据远程传输成为难题，目前常采用公共通信网的数据通信业务通道实现数据远传。但公共通信网提供的服务种类和数据速率难以满足监测的可靠性要求，且运行维护成本高，尤其是在偏远地区往往没有充分的网络覆盖，无线公网不能满足电力输电线路的环境要求。

本任务提出了采用无线Mesh网络接力与电力OPGW光传输相结合为主、公共通信网为辅的网络解决方案。如图2-72所示，此种方案采用两级网络结构，由监测主IED与智能传感器以及手持式接入设备组成星形子网络，各子网之间采用无线Mesh网络结构进行互联；无线Mesh网络将输电线路多级杆塔信息采用无线中继方式汇聚到OPGW的信息接入点，从而减少了OPGW开口次数。本任务采用IEEE802.11g通信协议，实现了无线点对点5km、无线接力30km及最高54Mbit/s的物理层传输速率。

2. 传感网络分布式计算与故障诊断支持系统

(1) 分布式计算测试结果

本项任务利用模拟器CloudSim搭建了仿真实验的软件平台，仿真分析任务 t_1 、 t_2 、 t_3 在主IED r_1 、 r_2 、 r_3 上的运行情况。初始参数设置见表2-22和表2-23。

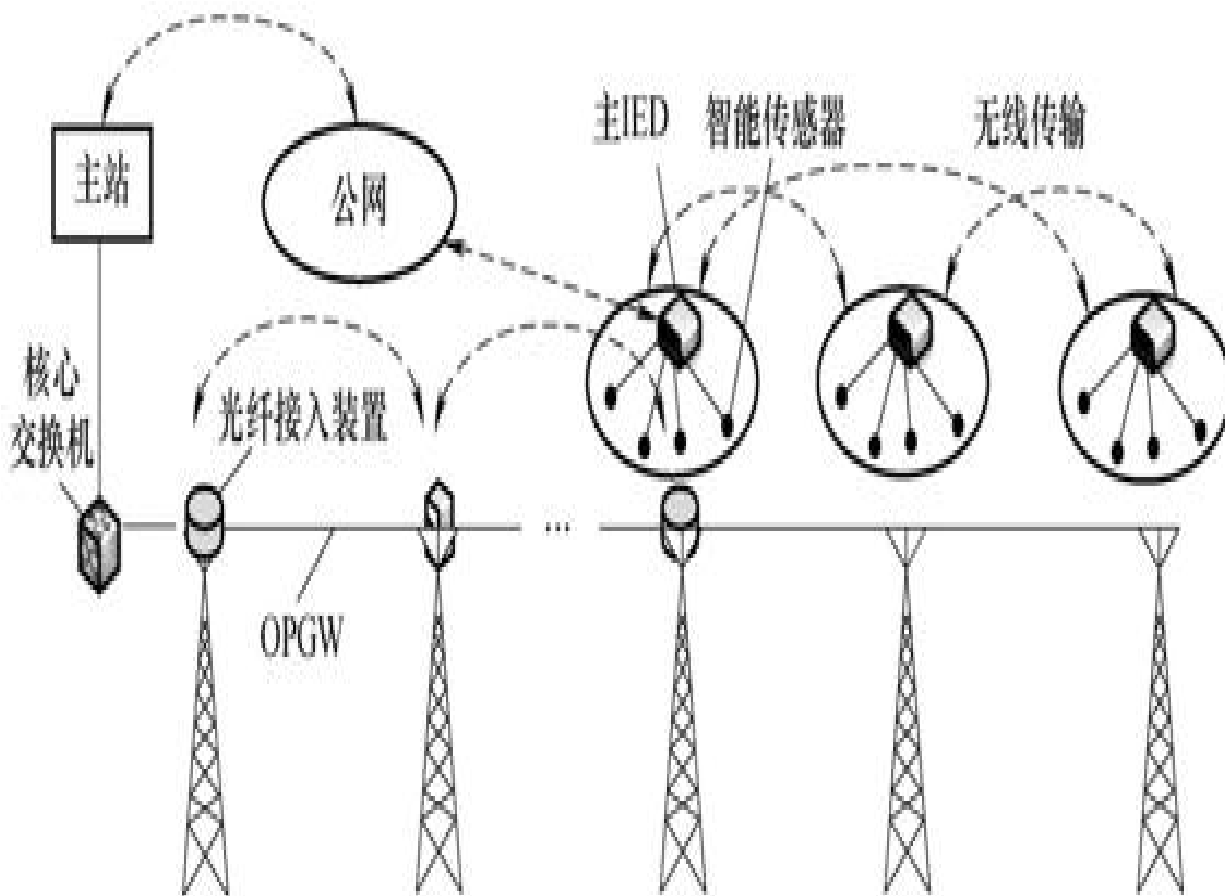


图2-72 输电线路智能监测传感网络

表2-22 任务属性说明

任 务	任务数据量/KB	任务完成截止时间/ms
t_1	54	6.9
t_2	34	4.5
t_3	103	5.4

表2-23 资源属性说明

主 IED 编号	执行能力/(KB/ms)	购置费用 (万元)
r_1	42	1.2
r_2	79	2.1
r_3	65	1.8

传统的输变电设备智能监测系统主 IED 之间无法进行通信，每个任务都单独由某一个主 IED 完成，即任务 t_1 、 t_2 、 t_3 分别由 r_3 、 r_1 、 r_2 完成。每个 IED 完成任务的时间见表 2-24，时间为 0.80ms 后，主 IED r_1 即进入了空闲状态，浪费了大量的资源，同时三个任务都完成的时间为 1.30ms。

表2-24 完成任务时间表

任 务	对应的主 IED	完成时间/ms
t_1	r_3	0.83
t_2	r_1	0.80
t_3	r_2	1.30

利用分布式计算的方式来完成的任务，将任务 t_1 、 t_2 、 t_3 有机地分配在三个主 IED 上进行，在任务开始到三个任务都完成的过程中，三个主 IED 每时每刻都在工作，没有设备空闲、资源浪费的现象，同时三个任务都完成的时间为 1.02ms，较传统的输变电一体化监测装置，任务完成时间提高了 21.5%。

采用分布式计算的方法将计算任务分配到多个主IED同时进行，能有效降低主IED的性能要求。该实例中完成三个任务的时间为1.30ms，配置主IED的经费为5.1万元，采用分布式计算的方式，为了达到完成三个任务的时间为1.30ms这一目标，配置的主IED属性见表2-25。

表2-25 基于分布式计算的主IED属性说明

主 IED 编号	执行能力/(KB/ms)	购置费用/万元
n_1	48.97	1.4
n_2	48.97	1.4
n_3	48.97	1.4

采用分布式计算后的主IED购置费用为4.2万元，相比于传统的一体化监测装置，购置经费降低了17.6%。

(2) 故障诊断与预警案例

以监测某变电站220kV变压器故障为例，说明变电站设备故障诊断的流程。

1) 数据采集：智能气体传感器采集变压器油中气体的实时数据见表2-26。

表2-26 变压器油中氢和烃类气体实时体积含量（ $\times 10^{-6}$ ）

气体组分	H_2	CH_4	C_2H_6	C_2H_4	C_2H_2	总烃
正常限值	134	137	154	13	11	315

2) 分布诊断：依次调用初级诊断方法库中的方法进行故障诊断。表2-27所示为变压器油中氢和烃类气体含量的正常限制。将采集的油中气体实时含量与正常限值相比可知， H_2 和 C_2H_2 在正常范围之内，总烃类严重超过正常限值，则诊断变压器可能存在故障。

表2-27 变压器油中氢和烃类气体含量限值 ($\times 10^{-6}$)

气体组分	H_2	C_2H_2	总烃
正常限值	150	5	5

采用三比值法分析变压器油中气体组分判断故障的类型。实时气体含量数据编码后的组合为120，判断该变压器设备可能存在电弧放电兼过热故障。

3) 高级诊断：选用中心控制站中历史数据库中最新更新的一半油中气体数据作为遗传算法的学习库，利用遗传算法分别生成判别函数 F_1 、 F_2 、 F_3 和 F_4 ，分别判断变压器是否存在故障和故障类型；将剩余一半的历史数据作为测试样本，生成总识别率显示在中心控制站的人机界面上，此时总识别率为92.1%；将油中气体的实时数据代入基于遗传算法的变压器故障分层诊断模型中，判断结果显示为高能放电。可以判断出变压器可能存在电弧放电兼过热故障，故障点在传感器A附近。

4) 故障修复：工作人员根据诊断结果对该变电站设备进行检查之后发现该变压器的线圈A、B相围屏、衬条都有过热、放电烧伤现象。工作人员对其进行维修之后，则采集的数据显示变压器正常。

3. 输变电设备一体化智能监测装置

本任务成功研制了输变电设备一体化智能监测装置，监测对象涵盖变电站主要设备和输电线路。研制的输变电设备一体化智能监测装置在云南电网部分变电站和输电线路等示范工程成功投用，监测效果良好，为输变电设备状态智能监测与全寿命周期管理提供了有力支撑。

(1) 智能传感器

智能传感器作为传感网络的重要组成部分，主要负责获取输变电设备状态监测信息，实现输变电设备监测传感网络的感知功能。输变电设备种类和监测参量众多，为准确感知输变电设备状态信息，本任务研制的输变电设备一体化智能监测装置使用了众多传感器，见表2-28。

表2-28 输变电设备智能监测传感网络传感器列表

装置名称	监测传感器
变压器	局部放电监测智能传感器、油中溶解气体监测传感器、用于套管介损和电容监测的套管监测传感器、油中微水传感器、铁心接地电流传感器、油温传感器、噪声传感器
断路器/GIS	局部放电超高频传感器、监测气体成分、微水及密度的气敏传感器、气室温度传感器、气体压力传感器
容性设备	泄漏电流传感器、等值电容及介质损耗传感器
输电线路	雷电监测智能传感器、分布式光纤温度/应力传感器、拉力传感器、湿度传感器、风速传感器、风向传感器、日照传感器、气压传感器、雨量传感器、倾角传感器、导线测温传感器、振动传感器、烟雾传感器、摄像机、红外微波感应器、污秽传感器

其中，基于分布式光纤温度/应力传感器，成功研制了用于测量输电线路温度/应力的分布式布里渊光纤传感系统，系统主机如图2-73所示，其规格参数见附录15。

为了验证该系统能实现长距离架空输电线路温度、应变传感信息的分布式测量，获取系统的测量精度及测量范围，在变电站开展了现场试验。现场试验线路为云南电网公司昭通供电局的110kV高靖线，以西衙门220kV变电站作为起点对110kV高靖线的OPGW线路进行温度监测。因该线路OPGW中光纤结构无法感受到外界应力变化，故此次现场试验仅对OPGW线路温度进行监测，不考虑线路受力形变的影响。系统测试每18s完整测量一组数据，整个传感距离上，监测结果的空间温度分布如图2-74所示，3.5km（平原地段）、11km（重覆冰山区）处的温度二维分布如图2-75所示。将此条线路上距离变电站15.4km处的所测温度分布与光纤光栅传感器监测的温度分布进行比较，结果如图2-76所示。



图2-73 系统主机实物图

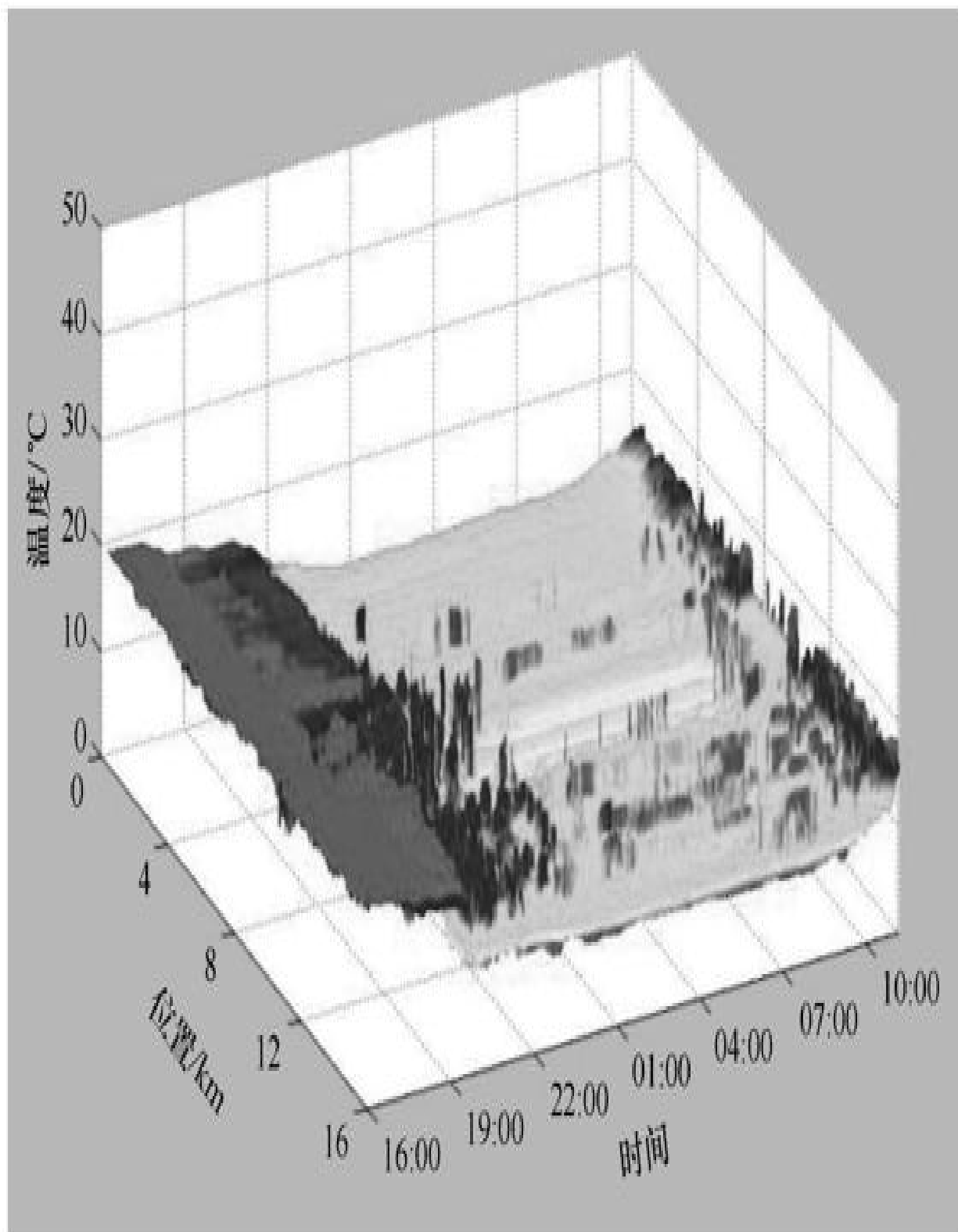


图2-74 空间温度分布

图2-74表明，山区较平原夜间温度低 $2\sim 3^{\circ}\text{C}$ ，符合自然规律；图2-75表明，本任务研制的分布式布里渊光纤传感系统能实现OPGW昼夜温度变化情况的分布式监测；图2-76表明，两种监测方法所得的温度曲线基本吻合，最大差值为 1.8°C ，分布式布里渊光纤传感系统满足工程应用要求。

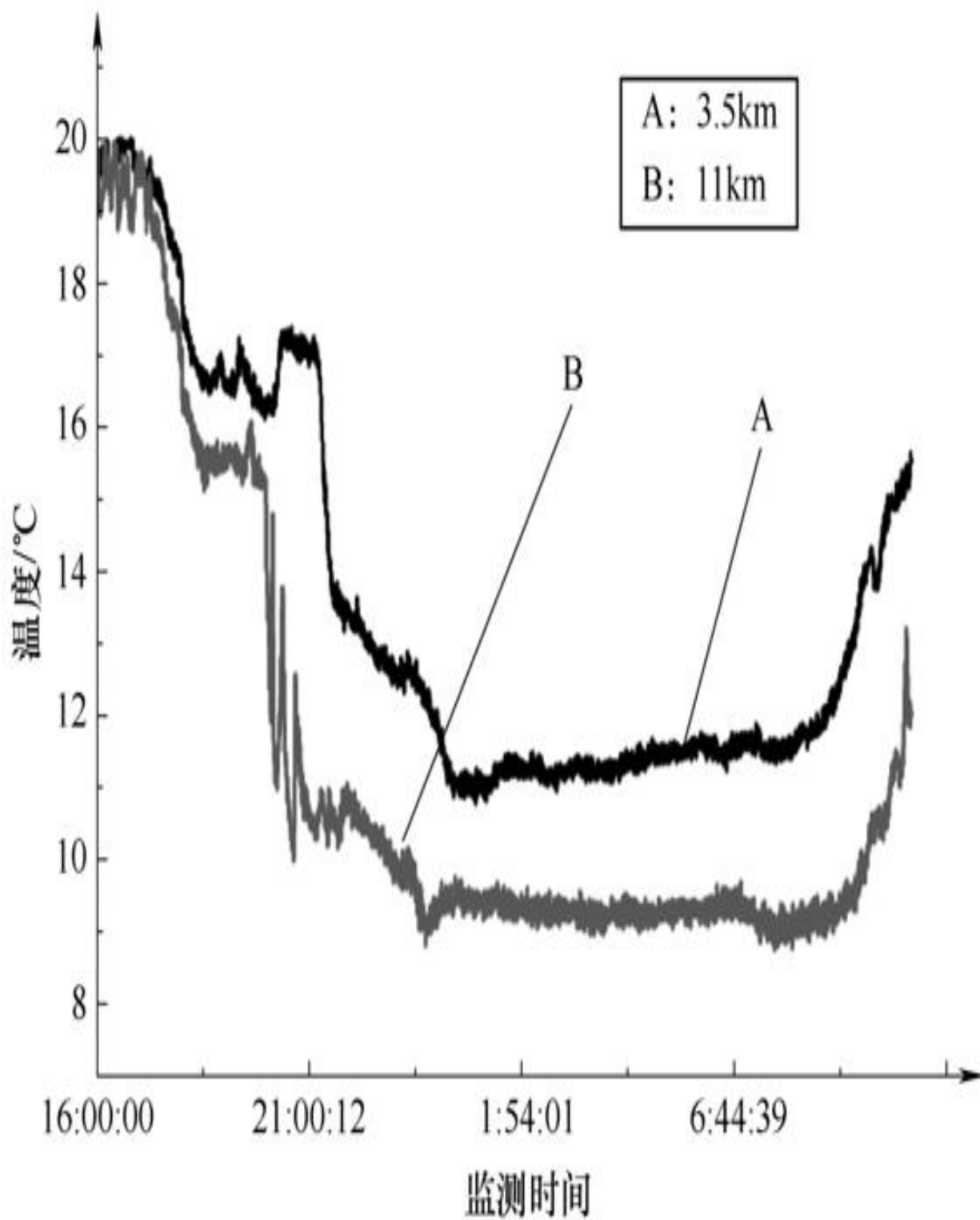


图2-75 3.5km、11km处温度随时间分布

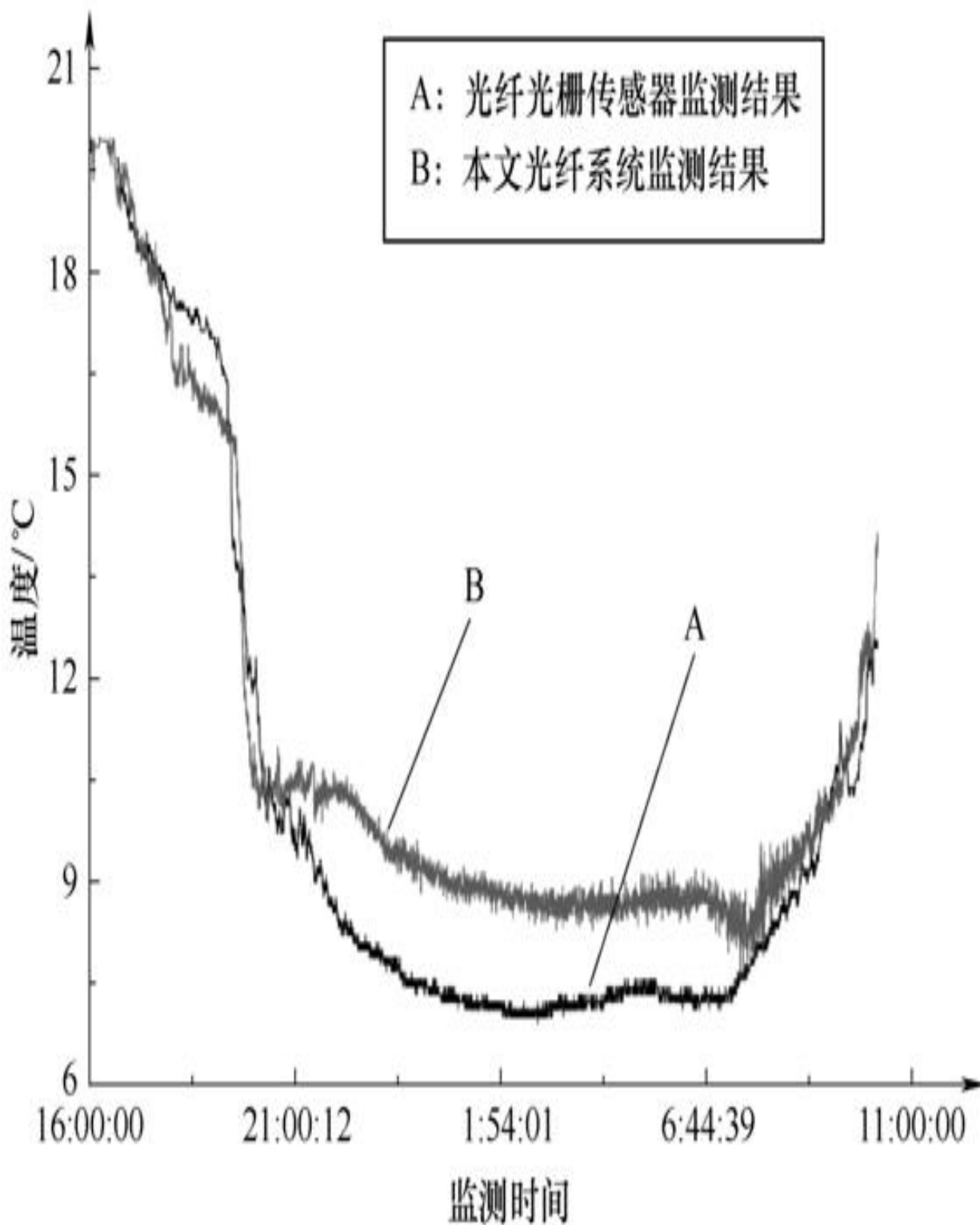


图2-76 15.4km处两种传感器监测结果

(2) 输电线路分布式智能故障监测网络

本任务建立的输电线路分布式智能故障监测网络，由故障电流监测传感器、数据中心和工作站3部分组成。数据中心和工作站通过广域网连接，传感器与数据中心通过GPRS/CDMA通信。故障电流监测传感器分布式安装于输电线路路上，如图2-77所示，传感器近距离及时捕获故障瞬间的行波信号并具有自供能能力；系统采用区间定位和故障点定位相结合的方式实现故障点的精确定位并进行故障模式的识别。

该监测网络已应用于云南昭通供电局大镇线，此线发生雷击跳闸故障，所有监测传感器均上传了行波故障电流信息，系统由行波故障电流方向判断故障发生点在195号杆塔和245号杆塔之间，其中尤以195号杆塔A相上的41号监测传感器和245号杆塔A相上的39号监测传感器上报的行波故障电流幅值较大，如图2-78所示。



图2-77 故障电流监测传感器

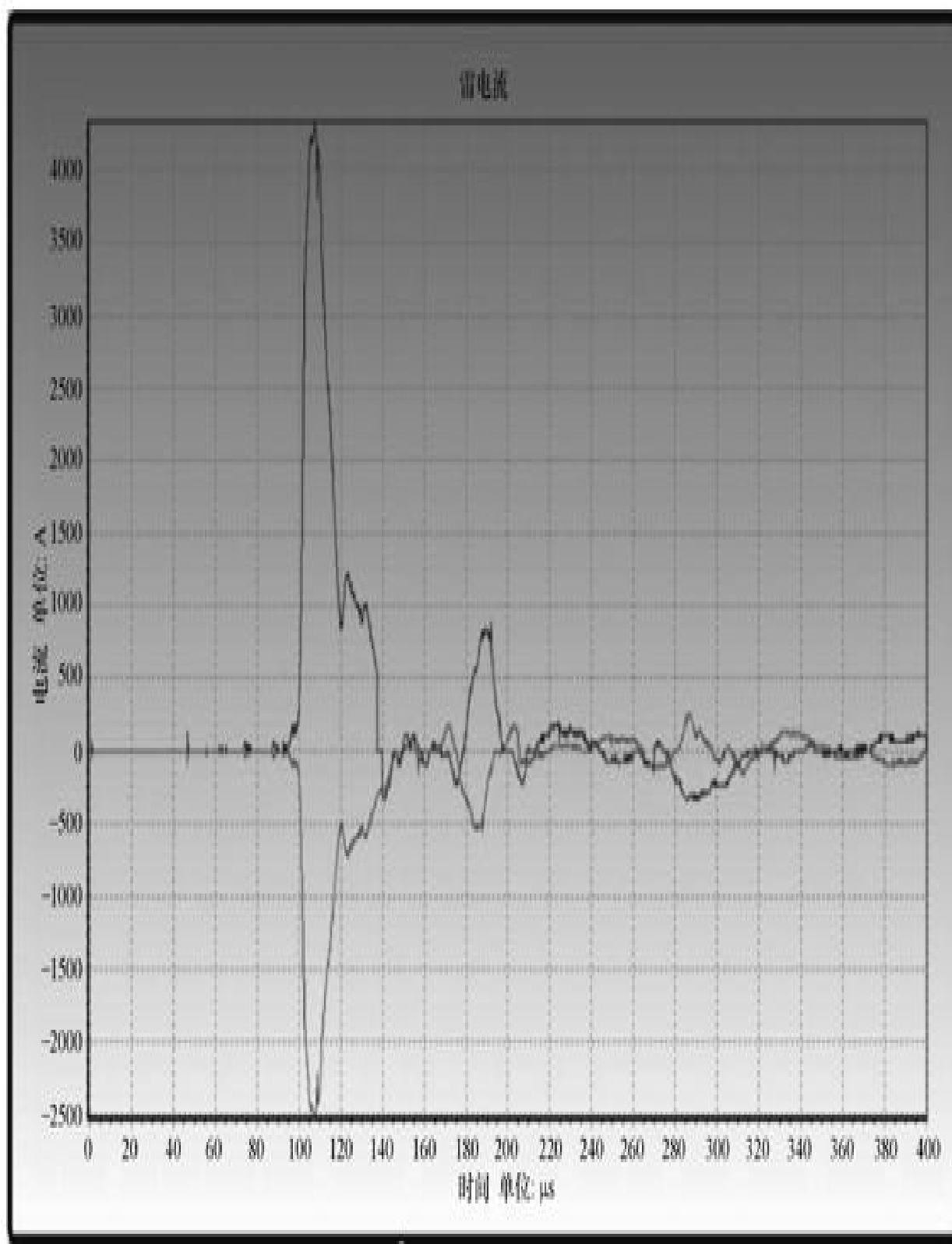


图2-78 行波故障电流

系统自动筛取195号杆塔A相上的41号终端和245号杆塔A相上的39号监测传感器上报的事故信息作为故障诊断依据，对其上报的行波故障电流进行计算分析，判断故障性质为绕击，分析内容见表2-29。

表2-29 系统分析内容

监测终端	GPS 时间	波形方向	波形幅值	波头时间	是否雷击	雷击性质
39 号监测传感器	202ms	1	4313A	101.01μs	幅值大，波头时间短，判断为雷击	幅值前无反符号大值，判断为绕击
	994μs					
	782ns					

(续)

监测终端	GPS 时间	波形方向	波形幅值	波头时间	是否雷击	雷击性质
41 号监测传感器	203ms	-1	2519A	101.02μs	幅值大，波头时间短，判断为雷击	幅值前无反符号大值，判断为绕击
	059μs					
	538ns					

故障点精确定位诊断结果图如图2-79所示，从图中可以看出237号杆塔发生绕击。

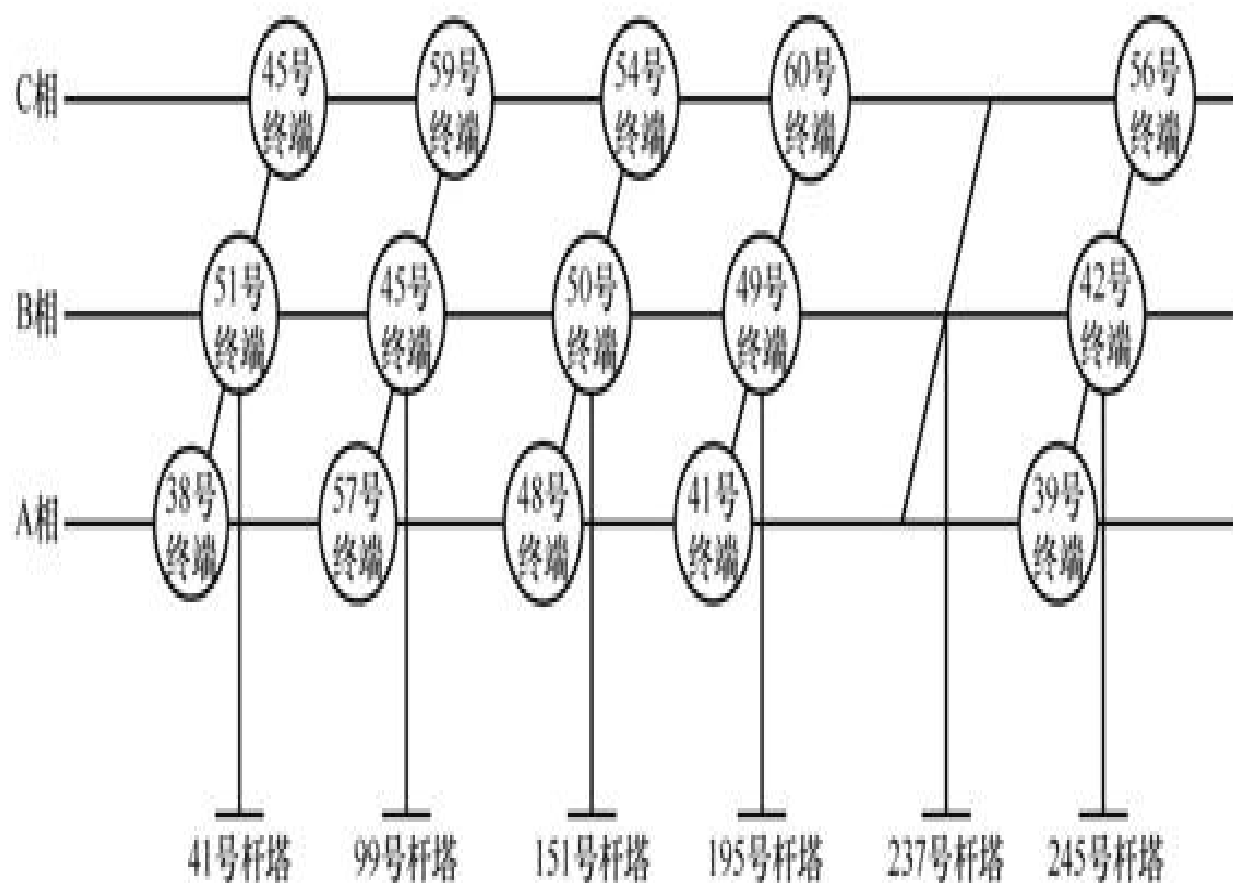


图2-79 诊断结果图

(3) 输变电设备一体化智能监测装置

本任务研制了变电站设备和输电线路一体化智能监测装置，主要包括变压器一体化智能监测装置、断路器/GIS一体化智能监测装置、容性设备绝缘一体化智能监测装置与输电线路一体化智能监测装置，实现了输变电设备状态智能监测功能。研制的一体化智能监测装置的监测参量如附录16所示，一体化智能监测装置如图2-80至图2-84所示。



图2-80 变压器一体化智能监测装置图

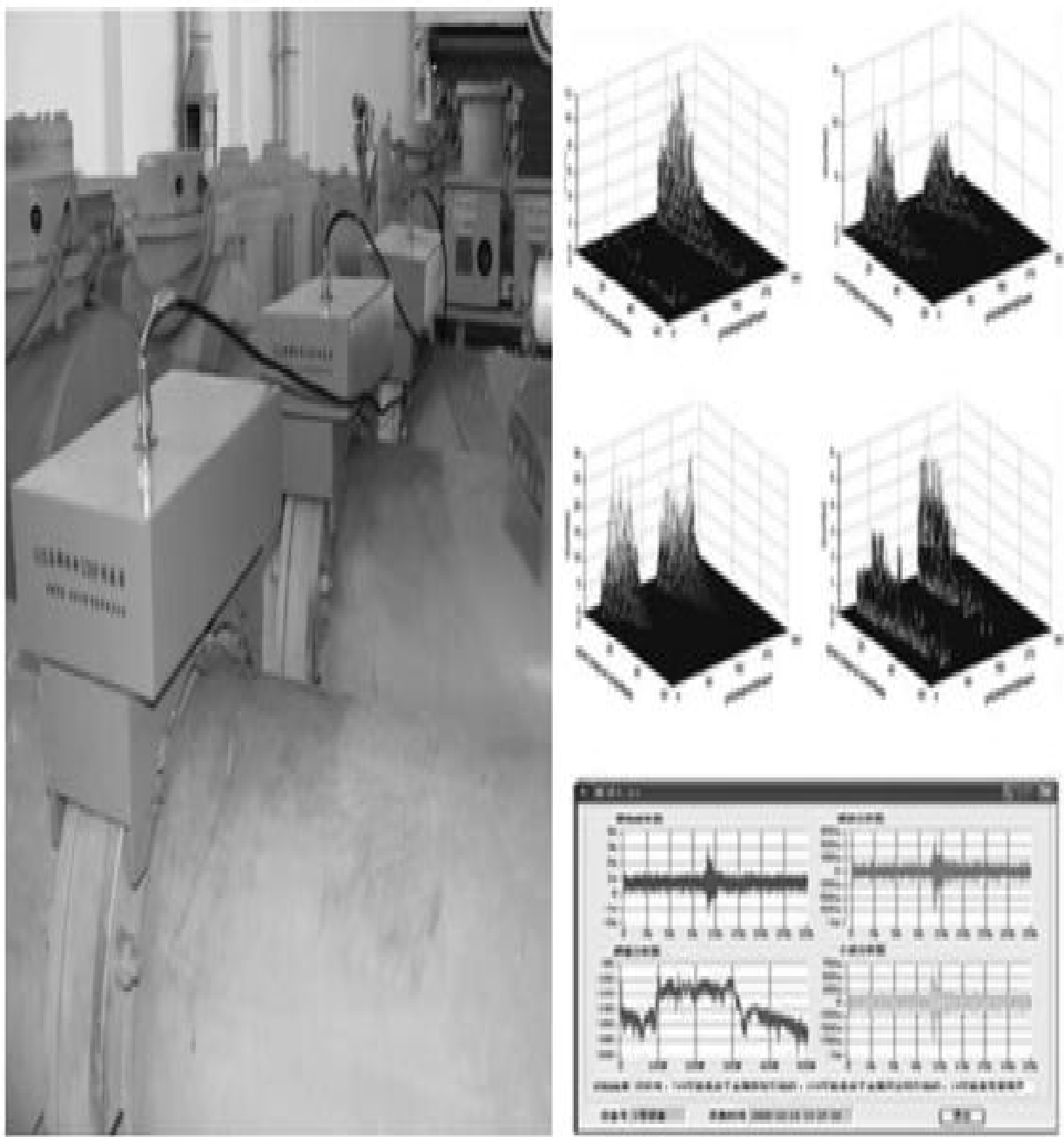


图2-81 GIS局部放电监测装置样机及软件界面图

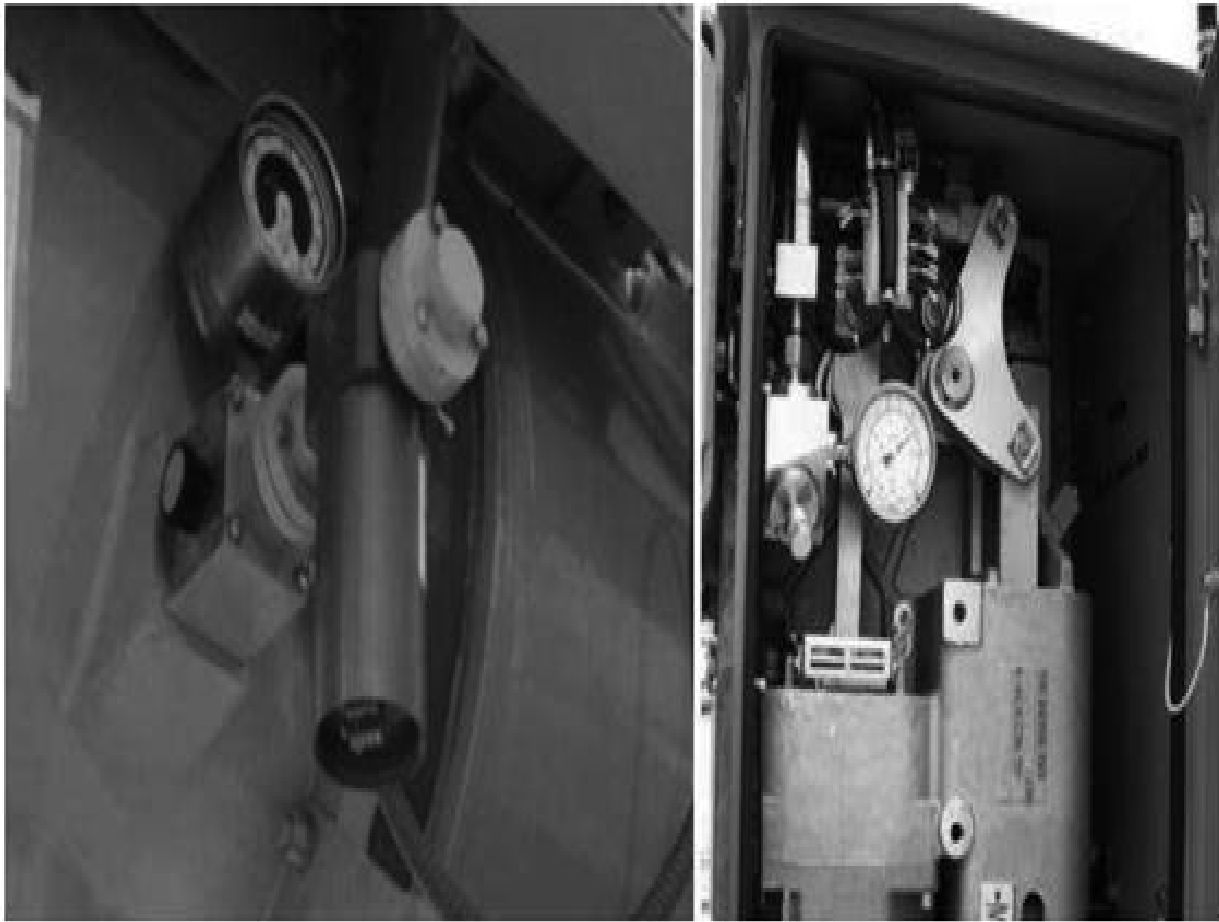


图2-82 SF₆气体密度与微水在线监测装置

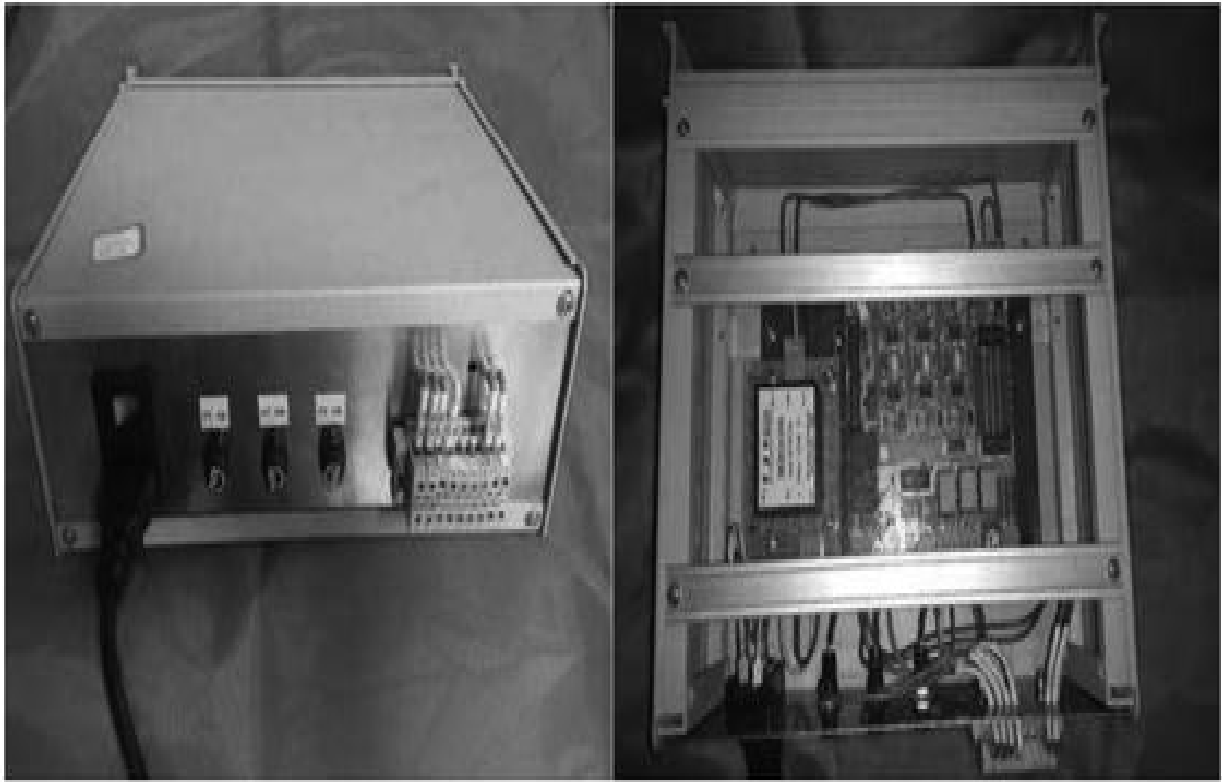


图2-83 容性设备一体化监测装置样机

1) 变压器一体化智能监测装置。

研制的变压器一体化监测装置实现了油中溶解气体、微水、局部放电等参量的在线监测与分析功能。变压器油中溶解气体在线监测装置检测参量及其灵敏度如附录17所示；变压器局部放电超高频监测装置主要技术指标见附录18。

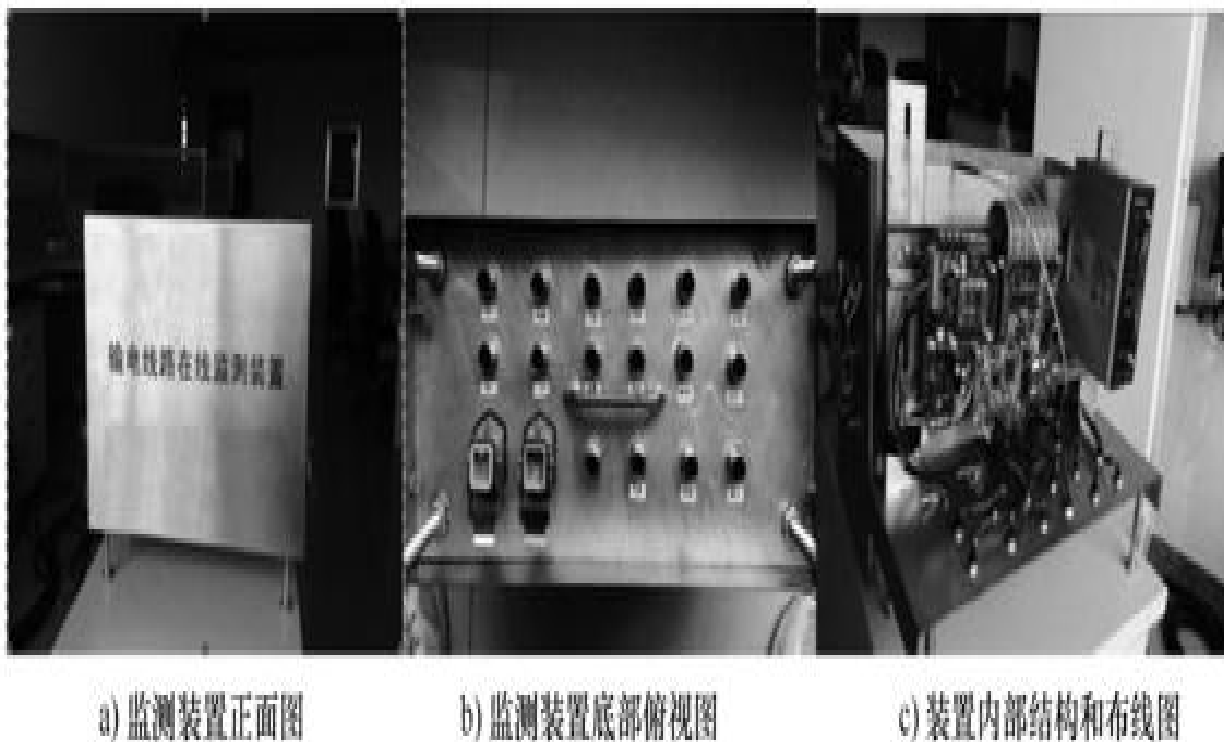


图2-84 一体化智能监测主机实物图

2) 断路器/GIS一体化智能监测装置。

GIS局部放电在线监测装置实现了局部放电非接触测量及在线监测的功能，主要技术指标见附录19；SF₆微水含量在线监测装置可实时监测SF₆气体的密度、微水、温度及其变化趋势，并具有自动报警功能，关键技术指标见附录20。

3) 容性设备绝缘一体化智能监测装置。

研制的容性设备绝缘一体化智能监测采用了通信、同步信息复用的分布式监测结构，实时监测容性设备的介质损耗角、绝缘泄漏电流及等值电容量等参数，其主要技术指标如附录21所示。

4) 输电线路一体化智能监测装置。

研制出的输电线路物联网一体化智能监测装置具备监测参量众多、对外接口丰富、通信方式多样化、电源管理智能化、结构精巧、集成度高等特点。输电线路一体化智能监测装置硬件基本配置见附录22，监测功能及技术指标如附录23所示。

2.4 输变电设备全景信息集成平台

输变电设备全景信息集成平台研发的目标是：构建规范、标准和便于扩展的输变电设备全景信息集成体系结构，开发可以实现输变电设备全景信息数据集成、共享和协同处理的底层数据应用，采用通用的方法实现全景信息模型的管理与校验，制定输变电设备全景信息集成平台的公共安全信息接入标准与规范。

建立输变电设备全景信息平台面临以下三个方面的问题：①物联网背景下输变电设备的数据信息量剧增，对数据的操作效率、服务响应均提出了更高的要求。传统的SOAP方法遵循大量的协议和标准，效率低下、实现复杂，因而难以满足要求。同时，由此构建的信息集成平台功能实现耦合度高，扩展性和适应性差。②输变电设备物联网存在多种不同数据源，不同数据源可能使用不同的数据模型表达相同的概念，导致输变电设备全景信息具有多源异构的特点，阻碍了各数据源之间信息的交流和共享，造成新业务带来的数据源无法快速接入和高效利用。③全景信息模型对象数量庞大、关联关系复杂，造成模型编码困难，不能实现对输变电全景信息模型在不同形式下的智能化转换，也不能对模型的有效性给出准确的评价，无法对信息模型进行有效管理与校验。

通过实现上述目标，可以解决目前输变电全景信息集成平台存在的三个问题。研发输变电设备全景信息集成平台主要包括关键技术研究 and 输变电全景集成信息平台的设计和实现两个方面。

针对本项任务的目标和要求，工作完成情况总体如下：

1) 构建了输变电设备全景信息集成平台，实现了输变电设备全景信息及多种服务的共同接入，并实现了服务流程的高效优化。

2) 完成输变电设备全景信息的多源异构数据聚合模块，为各种智能应用业务提供统一的数据服务接口。

3) 完成输变电全景信息模型管理与校验模块，为上层高级应用提供可靠、完备的面向对象模型、物理存储模型。

在关键技术方面开展的研究工作和取得的成果主要有：

1) 设计了基于Restful Web服务的数据访问流程,解决了分布式环境中数据难以高效操作的难题。设计了基于Restful的快捷服务总线,实现了对服务流程的编排、管理及监控。

2) 提出了一种输变电设备全景信息的多源异构数据聚合方法,通过RDF接口将异构数据源数据转换成RDF数据,将OWL本体构造和SWRL规则结合起来建立局部本体和全局本体之间的映射,解决了输变电设备全景信息的多源异构数据聚合中关键性的语义异构问题。

3) 提出了输变电全景信息模型高效管理的通用方法,实现了在全景信息模型在面向对象模型、CIM文件和数据库物理模型之间的智能转换。提高了全景信息模型的管理效率,增加了全景信息模型的可靠性。

2.4.1 关键技术

1. 可灵活扩展的信息集成平台构建技术

(1) 基于SOAP与Restful协同的平台构建策略

输变电设备全景信息集成平台主要采用Restful Web服务方式来实现对分散数据源的访问和其他操作,其请求和响应过程如图2-85所示。Restful Web服务基于REST风格的轻量级Web服务架构,为每一个资源赋予包含了作用域信息的唯一标识URI,其流程为:在对数据进行CRUD操作时,服务请求者将请求的数据置于HTTP文档主体,通过URI①向服务器发送请求;服务器依据方法参数处理完毕后,将结果以XML、HTML、JSON等格式通过URI②传回服务请求者。

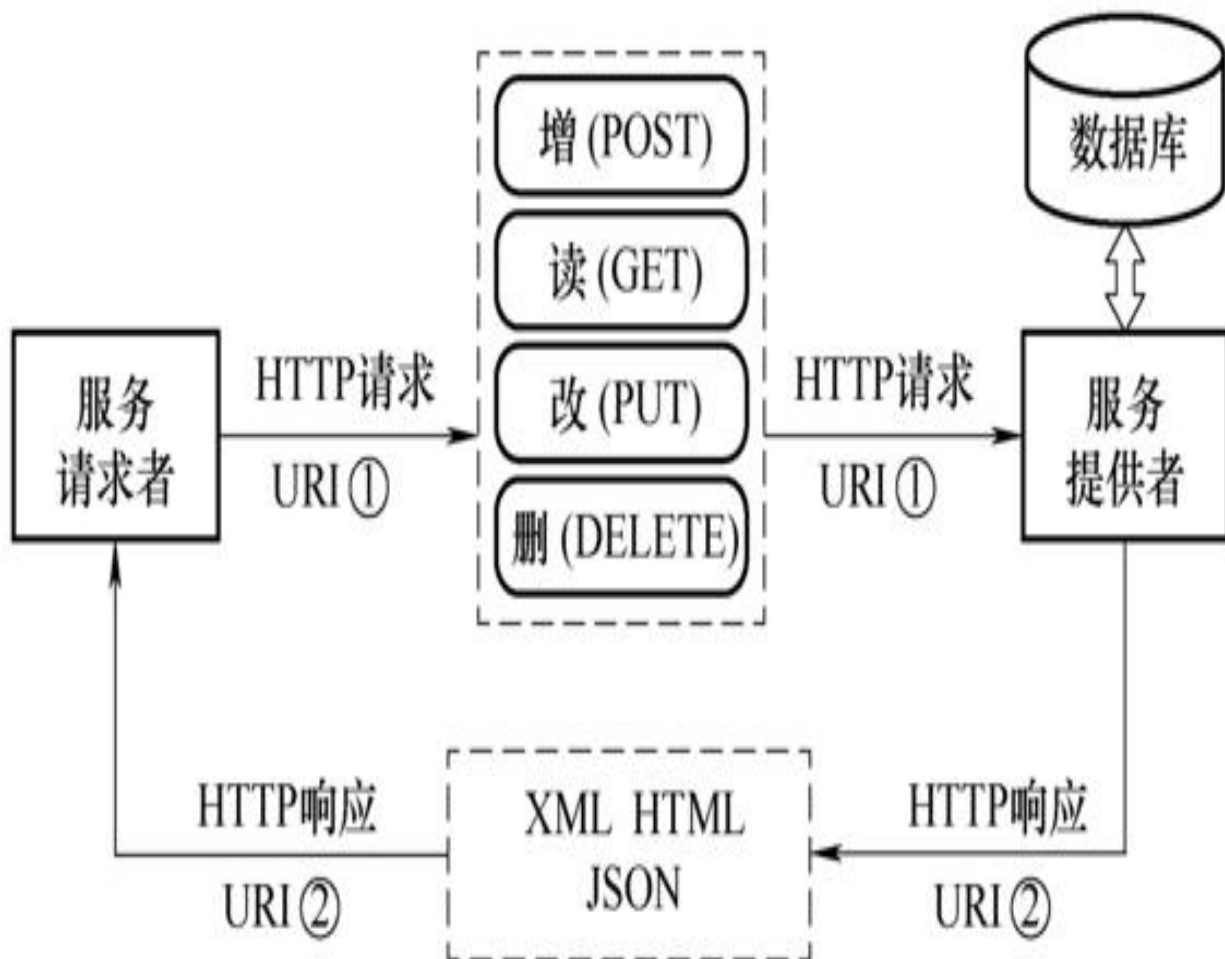


图2-85 基于Restful Web服务响应模型的数据访问技术

REST采用HTTP的简单协议，SOAP遵循WSDL语言描述的复杂的服务契约，REST可采用比XML更为轻量级的JSON数据格式。在访问相同大小数据量时，Restful Web服务比SOAP/WSDL传输效率高很多，响应速度快捷。此外，Restful Web服务简捷高效、低耦合，将需要操作的事物、关系和业务流程抽象为资源，同时为每一个资源赋予唯一的资源标识符URI，其本身与其他分布式组件的耦合度低，一旦数据源发生变更或增加，只需对URI进行简单的修改即可，其后期维护升级维护开发周期短，可实现服务的快速部署与应用。

由于SOAP/WSDL产生较早，在电力领域内的某些业务即采用该方式。对于新增业务在其对规范性要求不高的情况，采用Restful方式，如图2-86所示。若已有的采用该方式的业务对效率要求较高或其业务功能经常性更新变化，则将其替换为Restful方式。

(2) 基于消息驱动的轻量级服务总线动态管理与监控技术

图2-87所示为基于消息驱动的轻量级服务总线动态管理与监控技术流程。图中设计了一组丰富的功能启用管理和监控应用程序之间的交互，作为平台的处理中枢，集成在应用系统的逻辑层及服务层之间，通过多种通信协议连接并集成不同系统上的组件将其映射为服务，完成服务间的动态监控与互操作。

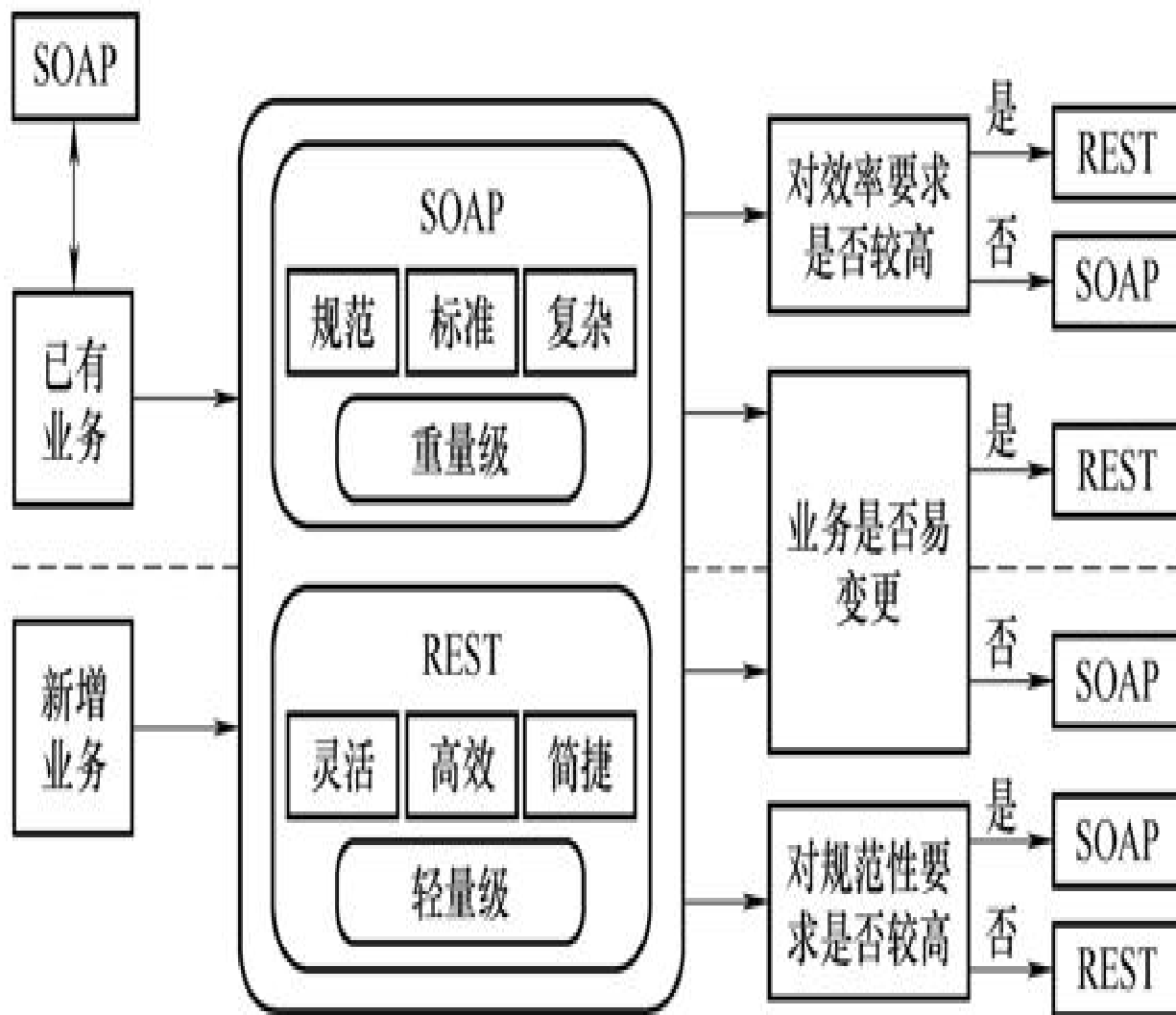


图2-86 基于SOAP与Restful的平台构建策略

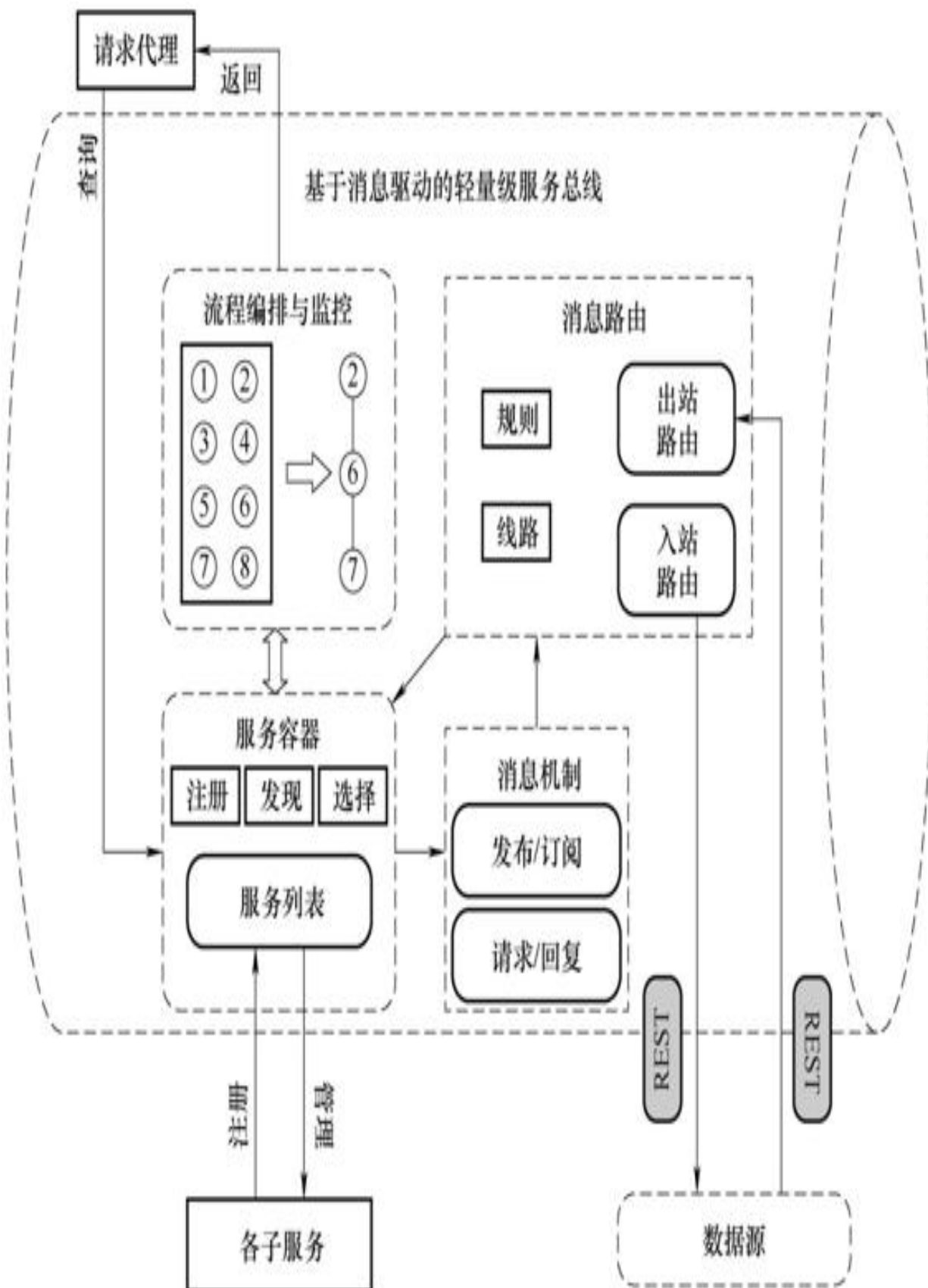


图2-87 基于消息驱动的轻量级服务总线动态管理与监控技术流程

服务容器封装用户应用软件和总线基础服务，通过服务的注册、发现和选择来实现业务的分布式处理。在平台中，服务列表依据相应的功能应用而事先被注册在服务容器内，当总线接收到来自逻辑层承接的应用层的请求代理时，服务容器发现请求并依照列表选择相应的服务。总线提供了发布/订阅和请求/回复两种消息模式，由消息路由分析服务传递的步骤并建立传递线路和规则，最终实现消息的传递过程。总线通过调用Restful Web服务对所需的数据源进行数据操作，并将结果返回到服务总线。

2. 输变电设备全景信息的多源异构数据聚合方法

(1) 基于改进混合本体的数据聚合

图2-88所示为基于改进混合本体的多源异构数据聚合方法流程。该方法中包括一个全局本体和多个局部本体，映射关系建立在全局本体和局部本体之间，局部本体之间不建立映射关系，使对全局本体的查询能够转换成为对各个底层数据源的查询，消除数据的语义异构。具体流程如下：

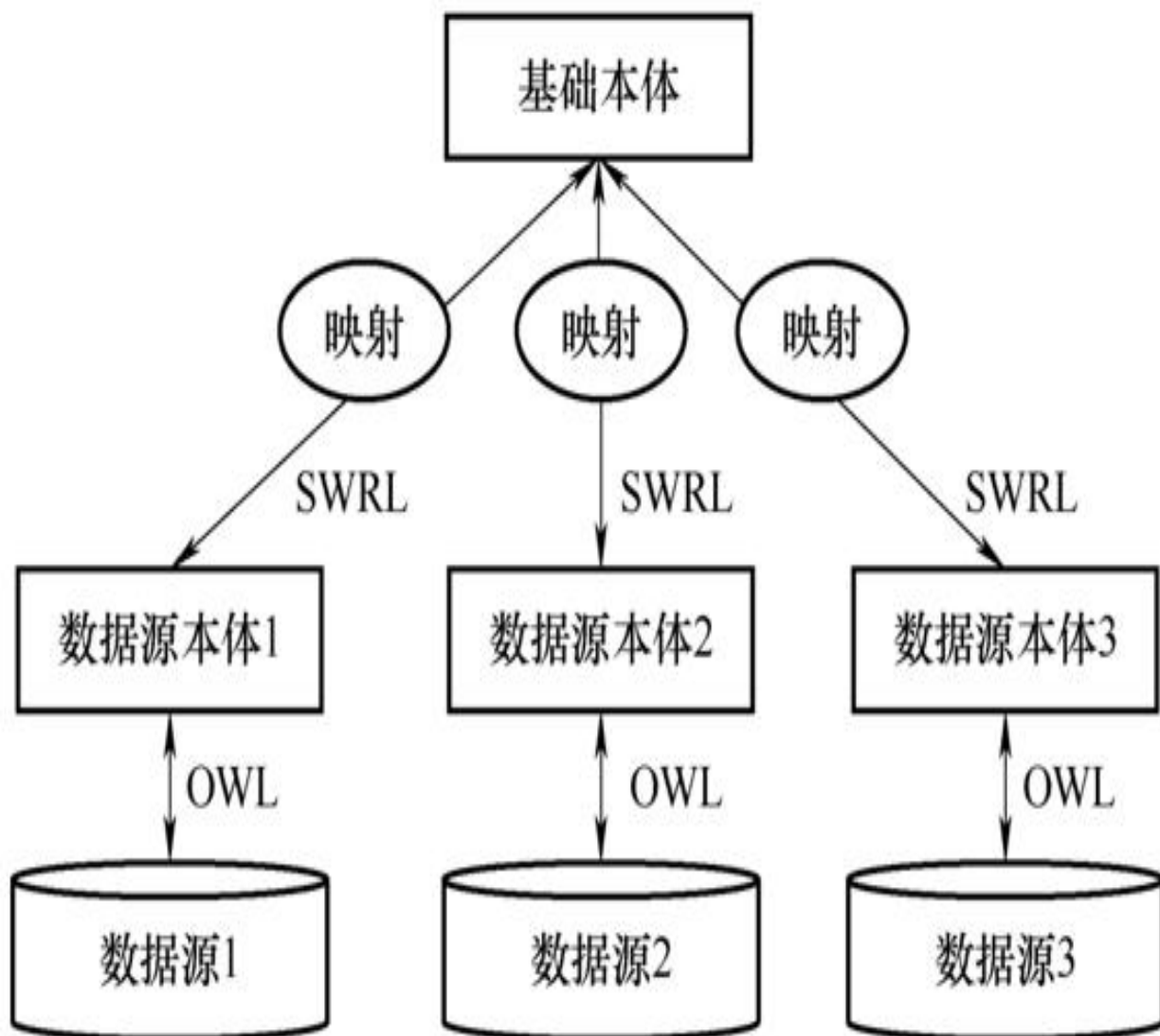


图2-88 基于改进混合本体的多源异构数据聚合方法流程

1) 异构数据源数据经过RDF接口，数据被转换成RDF数据，然后通过OWL本体描述语言构造数据源本体。

2) 通过本体构造和SWRL规则转换，建立了局部数据源本体和全局共享本体之间的映射，在运行过程中，实现数据源本体之间的转换，消除数据的语义异构。

3) 本体转换完成后，异构数据实现了有效聚合，结果被返回给用户或者应用程序，支持接下来的分析和计算。

(2) 开放性的数据转换

异构数据源通过RDF接口接入系统，RDF接口功能如图2-89所示。RDF接口将来自不同数据源的数据公开为RDF数据后，由数据抽取器抽取数据，通过数据加载服务提供给数据转换控制模块，进行统一的数据转换，通过OWL语言构造数据源本体。RDF接口将多源数据从分立的应用程序中分离出来，使多源数据交互和集成得以实现，无须大量的数据格式的改动，具有良好的开放性。

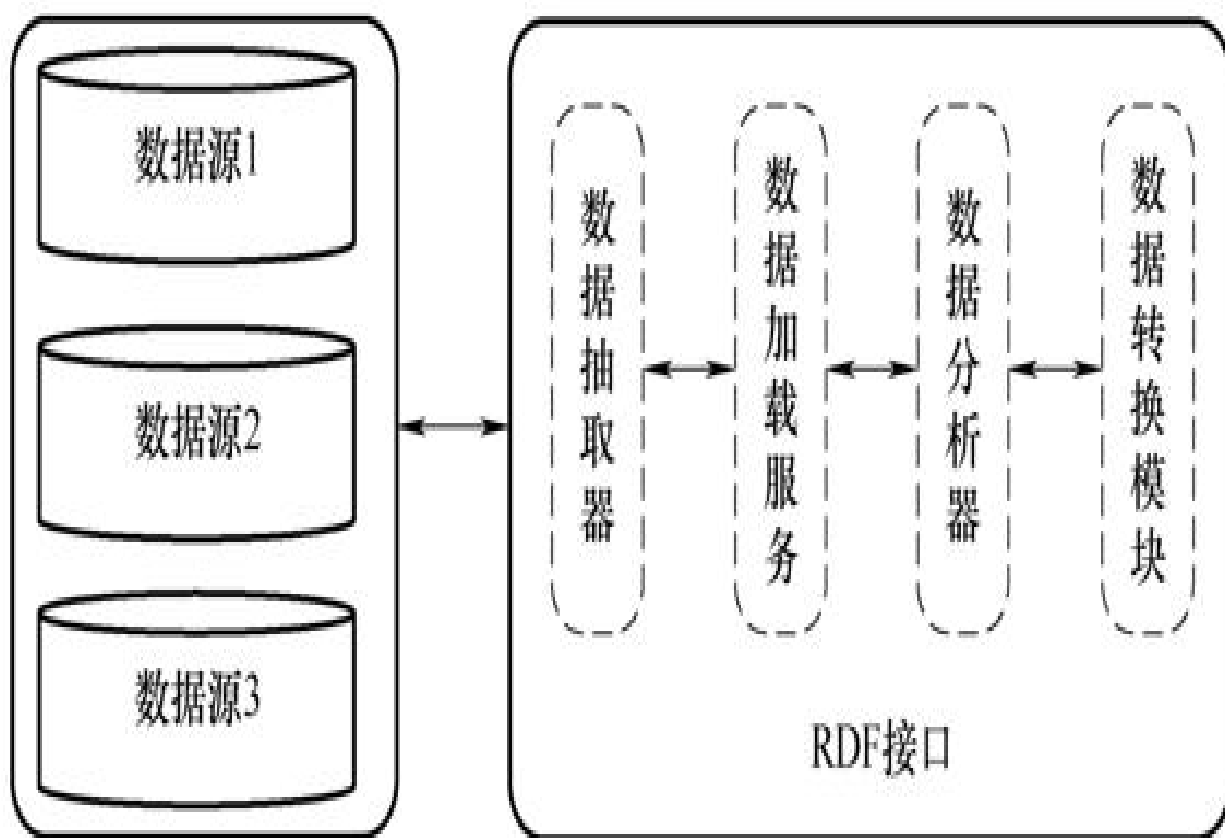


图2-89 RDF接口功能

(3) OWL和SWRL规则结合的本体映射

本体映射的建立过程如图2-90所示，其流程为：首次，通过统一的RDF语法形式呈现SWRL规则；其次，进行语义相似度计算，利用SWRL规则建立全局本体和局部本体之间的映射关系；最终，输出为一个完整的本体映射关系表。

OWL本体语言提供了将两个本体的类和属性关联起来的方式，SWRL通过建立规则对本体概念及其属性进行分析和语义推理。将SWRL规则和支持映射的本体构造一同使用，在已有的资源描述库中判定出各个

概念之间的语义关系，能够有效地发现本体之间隐含的语义关联，充分挖掘领域本体所提供的背景知识，适用于不同领域的多种信息。采用标准化的技术，以及可重用和共享的规则表达，将OWL和SWRL规则结合起来建立映射可以实现映射的重用和共享。

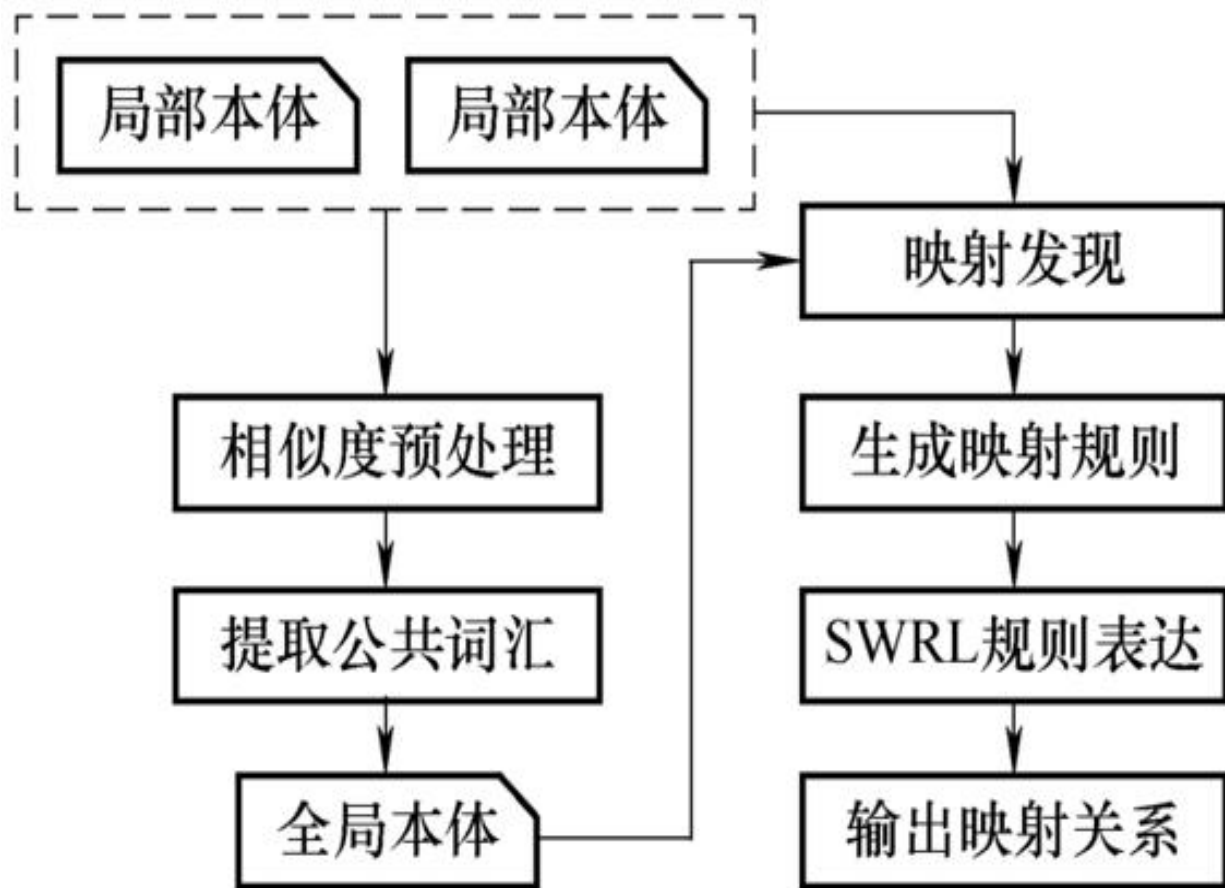


图2-90 局部本体和全局本体的映射构建

3. 输变电设备全景信息模型多态自动转换方法

(1) 模型的多态关联管理

信息模型建模是基于面向对象的，对象之间有很强的相似性，可以使用通用的方法进行处理。SAX (Simple API for XML) 解析器可以满足这一通用化需求。SAX在解析和创建XML文件时是基于事件驱动的，并且可以随着全景信息模型数据的流动而依次处理，无须等待整个CIM文件被存储后才采取操作，提高了CIM文件处理的效率。

在信息模型解析过程中，同时引入Eclipse的EMF框架和Java的反射机制进行编码。EMF是一个开放源代码的Java框架，可以快速为全景信息模型生成简单、正确、有效的Java代码。Java反射机制是利用Java本身的动态相关机制反射（reflection），动态访问、检测和修改程序本身的状态和行为，从而可以在EMF框架的基础上利用已经自动生成的面向对象模型动态获取类名并对相应的对象进行操作。

全景信息模型多态转换方法如图2-91所示。

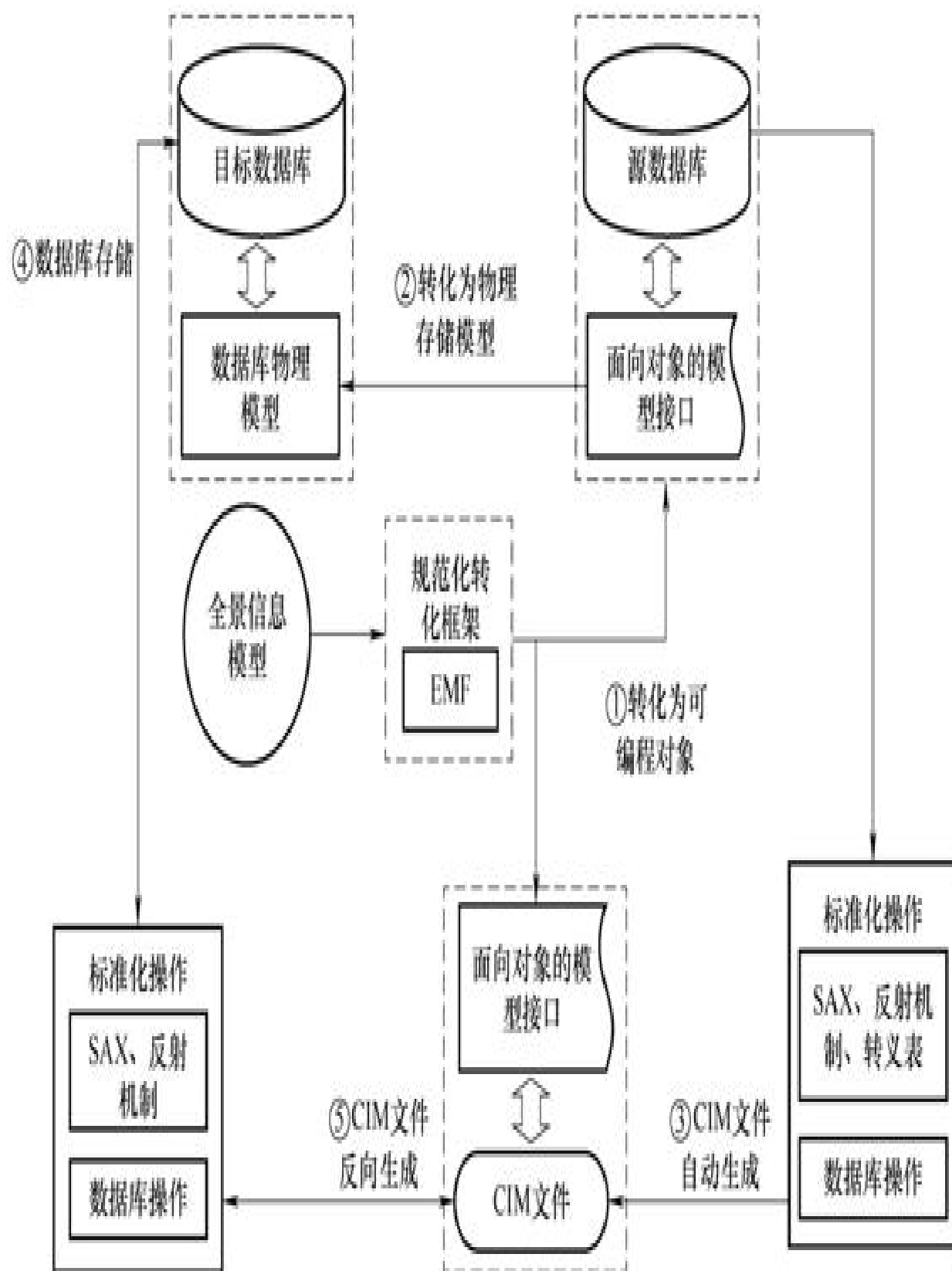


图2-91 模型多态转换关系

1) 规范化的EMF框架可以将可视化全景信息模型转换为面向对象模型接口，然后以面向对象接口作为全景信息逻辑模型的对接口，供CIM文件的生成、反向生成，数据库存储，模型校验等功能调用。

2) 全景信息模型通过面向对象模型接口，根据不同类的名称在目标数据库中建立相应的名称的表单，并根据类所包含的属性构造数据库表结构，从而形成用于存储的数据库物理模型。

3) 调用面向对象模型接口，通过SAX解析器、Java反射机制和数据库操作等标准化的操作，在命名转义表的辅助下，将源数据库中的全景信息模型相关数据以CIM文件的格式存储，形成静态文件存储系统。

4) 得到CIM文件后，通过除命名转移表辅助之外的标准化操作，同样调用面向对象模型接口，将CIM文件格式的模型数据根据②中形成的数据库物理模型导入到目标数据库中存储，从而对大量的模型数据形成有效管理。

5) 同时也可以利用规范化操作，从目标数据库中将已经按照全景信息模型规则存储的数据，反向生成CIM文件。

(2) 基于输变电设备全景信息模型的CIM文件自动生成流程设计

1) 首先需要通过EMF框架对输变电全景信息模型进行到面向对象模型的转换，再从源数据库中读取信息模型相关的数据库表单，经过命名转义表的转义后，与类名及其属性名关联。

2) 然后进入全景信息模型解析循环，首先根据类名及其包含的属性名在数据库表单中寻找属性所对应的属性值。若发现数据库表单中没有全景信息模型中所描述的属性或类名，程序会自动给这类属性值填充空格，用以表示源数据库中存储信息不够完整或者全景信息模型存在缺陷，然后生成对应数据信息的缺失日志，用以进一步规范数据源表单或完善输变电设备全景信息模型。

3) 根据全景信息模型中对每个属性值的限值大小，判定属性值是否越线，若发生越线则生成相应数据的越线日志，并继续向后执行。

4) 当所解析的全景信息模型实例对象属性值填充完毕后，将在内存中存储的实例按照标准CIM文件格式输出到RDF文件中，并检查是否

是最后一个需要实例化的实例对象。如果不是最后一个则需要重新进入全景信息模型解析循环，重复上述步骤；若是最后一个实例则关闭文件写入数据流，将文件存放到指定存储位置，完成全景信息模型解析。

信息模型的CIM文件自动生成的具体流程如图2-92所示。

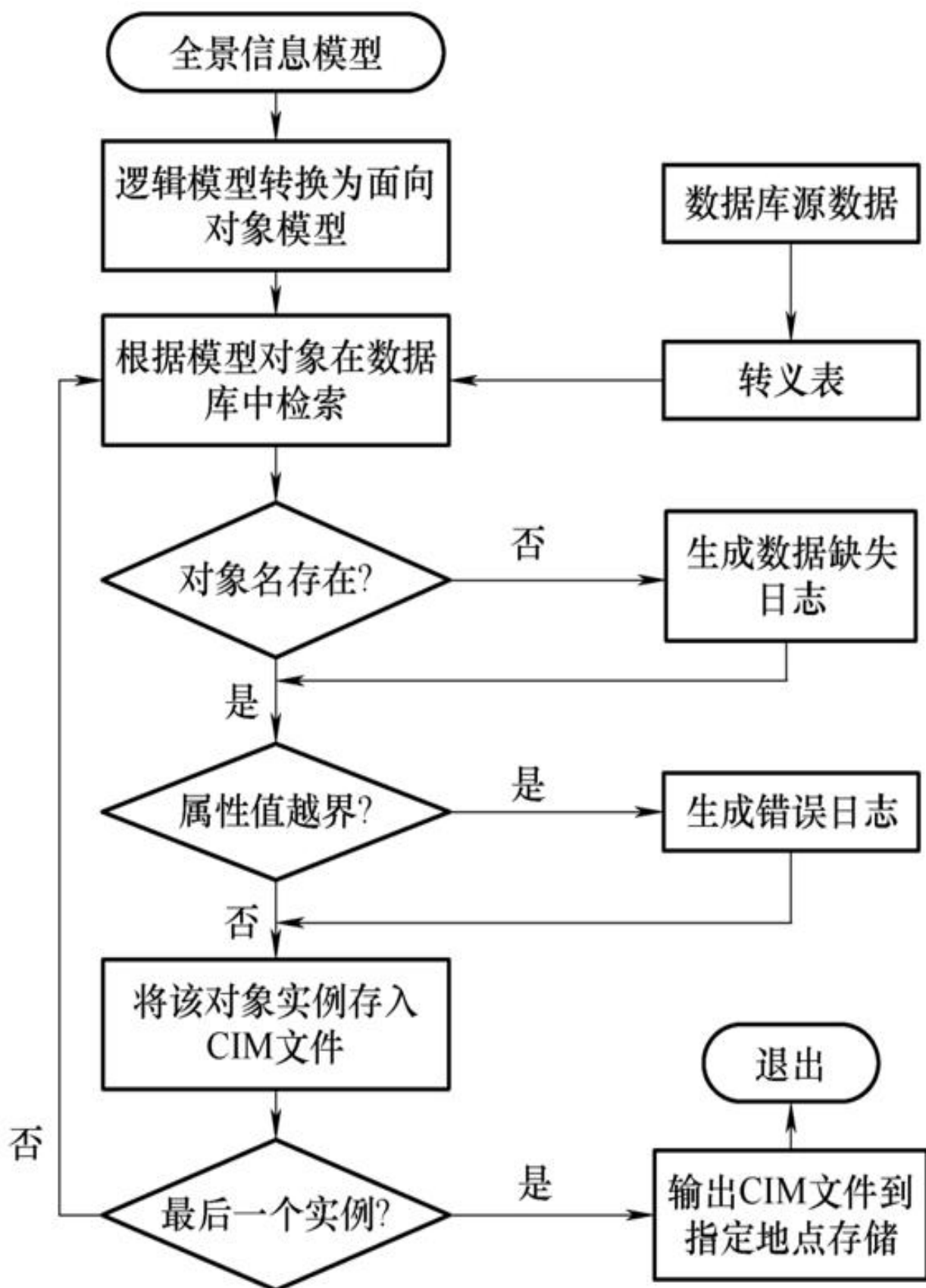


图2-92 CIM文件生成流程图

上述流程在转义表的辅助作用下，只需要对通用的面向对象进行编码，而不需要专门针对具体类名、属性名、方法名进行编码，在程序执行过程中利用Java反射机制根据类名列表实现自动加载，从而达到高复用性。

(3) 基于输变电设备全景信息模型的数据库存储流程设计

虽然数据存储 CIM 文件中，可以直接作为静态文件进行读取，而且读取速度比访问数据库快，但是相比静态的文件存储系统，数据库存储可以使整体数据结构化，加强了数据之间的关联性，为输变电设备全景信息平台提供便于上层调用、查询、处理的数据，主要步骤如下：

1) 在将模型数据存储到数据库时先将全景信息模型转换为面向对象模型，然后利用 CIM 文件充当数据源，根据类名列表在文件存储系统中搜寻与类名相同的文件名。如果发现在文件系统中没有所搜索的类名则说明所用的全景信息模型与 CIM 文件不对应，可能是由于使用了不同的信息模型或者是同一个信息模型不同的版本，根据不同情况生成对应的错误日志，并给出相应的告警信息。

2) 在 CIM 文件与全景信息模型对应的情况下，将 CIM 文件所描述的对象实例以表单的形式存放到目标数据库中。

3) 单一类下所有的对象实例全都存储到目标数据库（与源数据库区分）后，会继续根据类名列表对其余的 CIM 文件进行解析，直到将最后一个 CIM 文件解析完，然后关闭数据库链接，退出程序。具体流程如图 2-93 所示。

上述流程解决了输变电全景信息模型在文件系统与数据库系统之间的转换，与上一节方法结合就实现了 CIM 文件与数据库物理模型之间的双向自动转换。

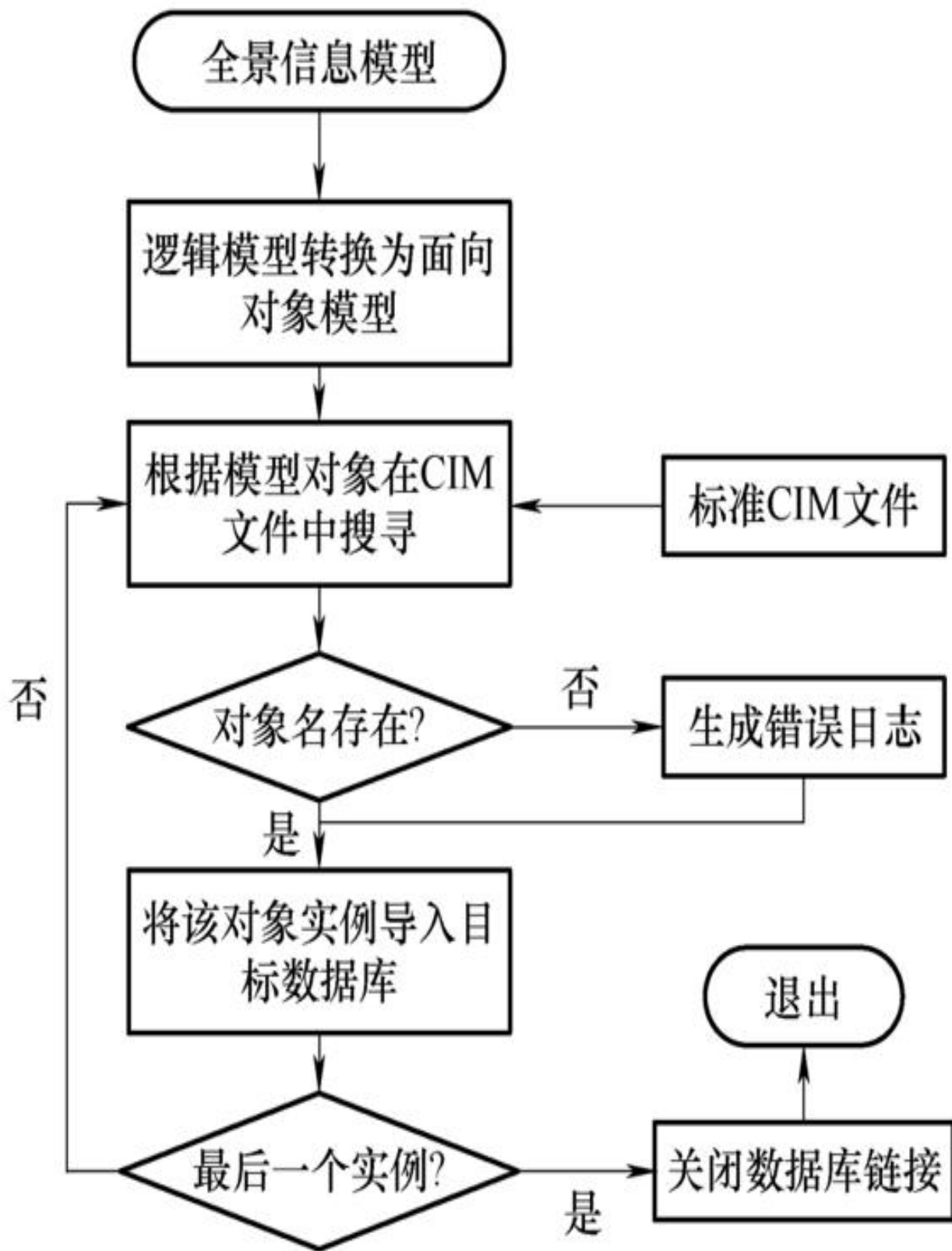


图2-93 数据库存储流程图

(4) 输变电设备全景信息模型校验流程设计

网络繁忙或者传输数据意外中断等情况会导致CIM文件在传输过程中出错，从而会使传输后的CIM文件不可用，因此在输变电设备全景信息平台上增设了全景信息模型校验功能，加强数据传输可靠性，全景信息模型校验步骤如下：

1) 校验前首先要保证信息模型版本的一致，防止因全景信息模型的修改而导致模型解析错误，因此需要进行版本的校对。

2) 查询CIM文件中的对象名在类名列表中是否存在，若不存在就在转义表中查询，如果还是没有对应名称记录则根据错误生成对应类的缺失日志，继续执行。

3) 检验对象属性与模型中的属性名称是否一一对应，若属性名称不对应再在转义表中查找，如果出现属性缺失、冗余、名称不对应等情况，就生成对应情况下的日志报告。

4) 校验全景信息模型类名的字符长度是否越界，若超过所使用数据库表名长度的上限，则记录越界信息，继续校验。

5) 当最后一个模型实例校验结束后，根据越界信息、实例个数、实例类别、校验时间等信息生成校验报告，退出执行，校验结束。具体流程如图2-94所示。

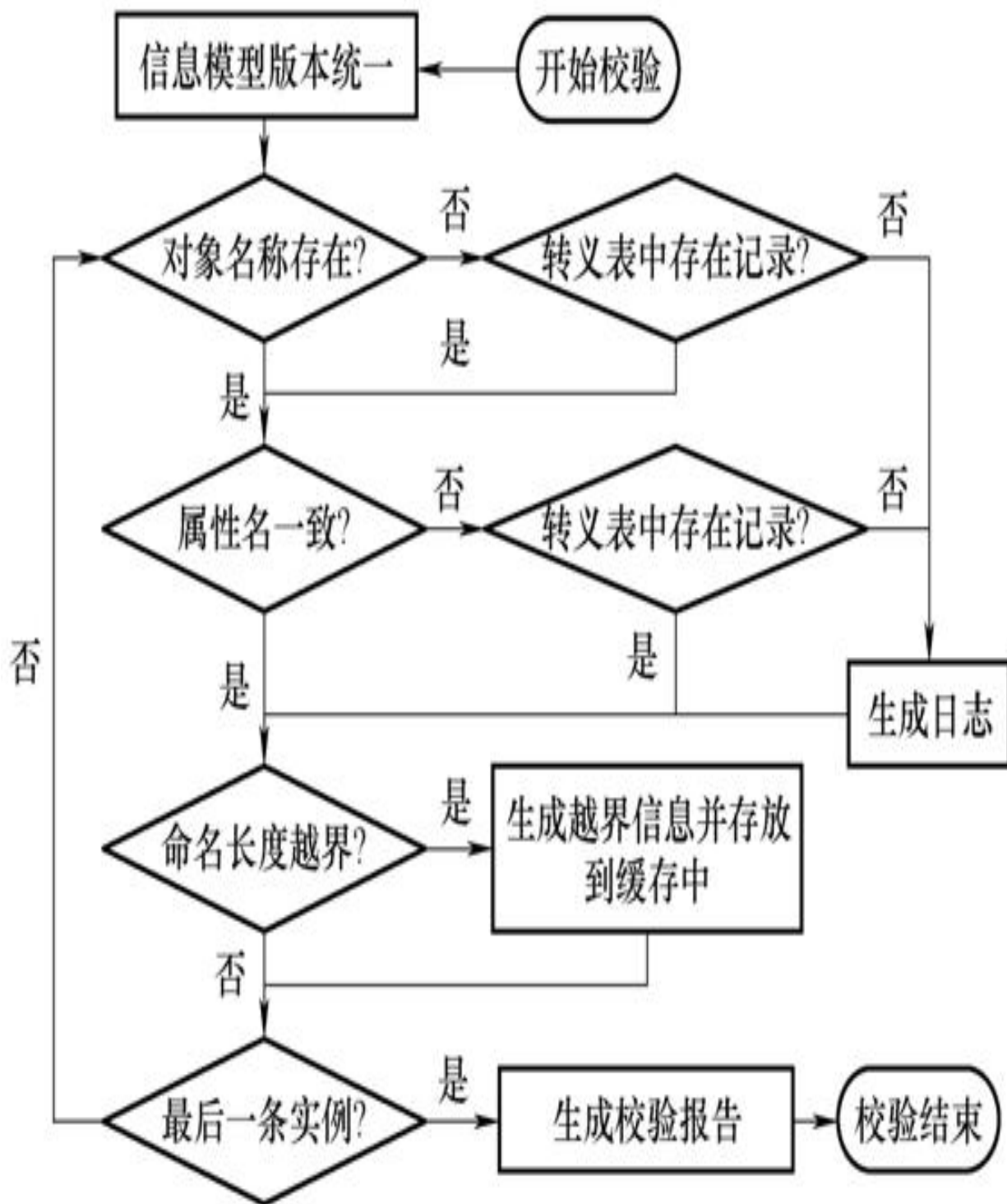


图2-94 信息模型校验流程图

根据输变电设备全景信息模型的语义、语法规则对CIM文件进行校验，并通过转义表对名称进行辅助查询，使得输变电设备全景信息模型的运用更加规范、一致、可靠。

2.4.2 技术应用与实现

1. 基于ESB与Restful的输变电设备全景信息集成平台

不同级别的输变电设备全景信息集成平台在各级电网中所面对的应用与需求各不相同，按照输变电设备智能监测与全寿命周期管理在各级电网的业务不同来构建各级的功能和应用。输变电全景信息集成平台业务架构分为以下几个层次，如图2-95所示。

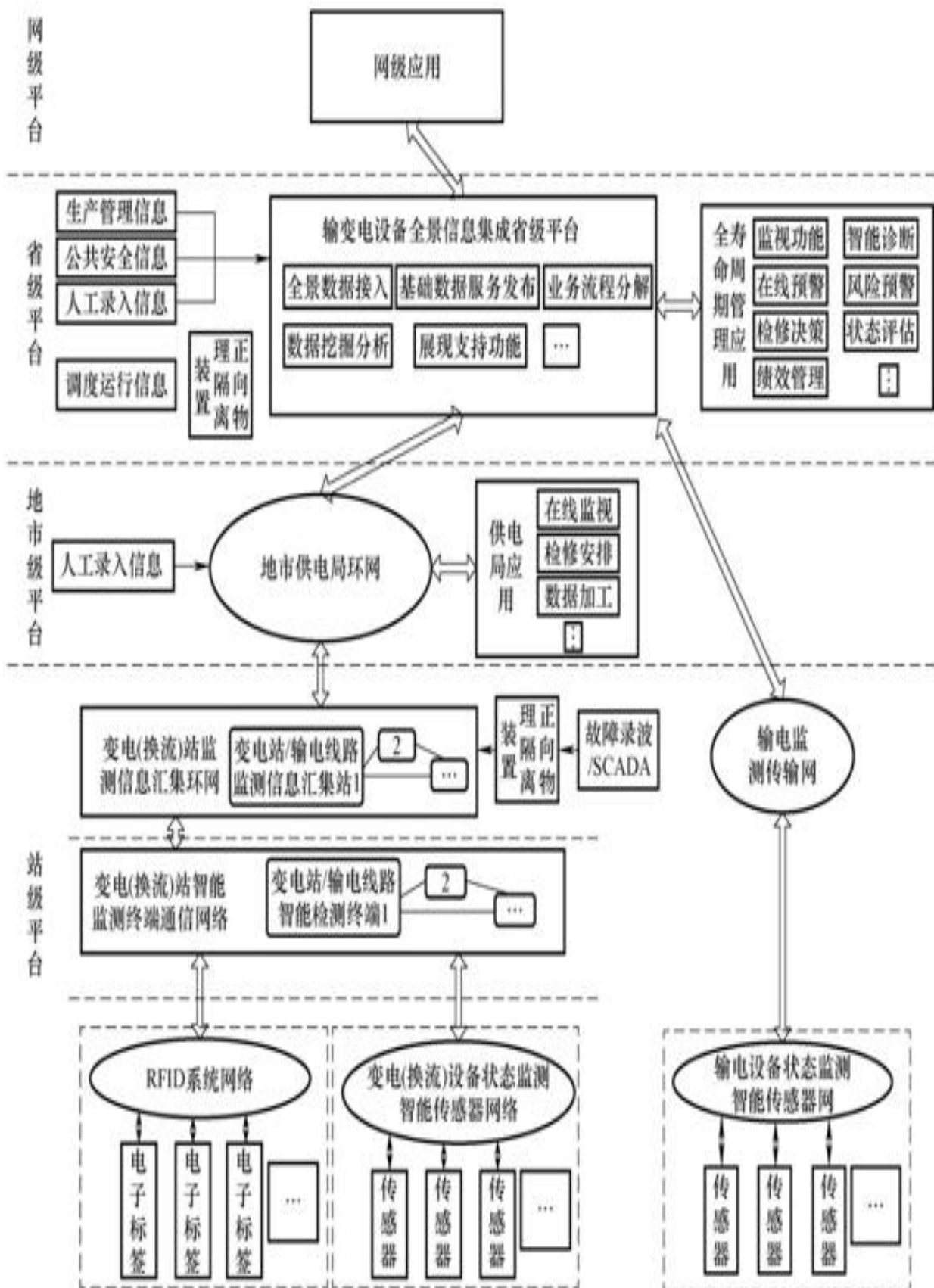


图2-95 输变电设备全景信息集成平台构架设计

需要通过平台进行集成的信息主要包含：输电设备监测数据、变电设备监测数据、调度运行信息、生产管理信息、公共安全信息以及人工录入信息。为满足以上输变电设备数据交互与共享的需求，更好地支撑输变电设备智能监测与全寿命周期管理在各级平台上不同的业务应用，满足输变电设备各种业务的复杂性和系统的开放性，本任务采用基于SOA架构来构建输变电设备全景信息集成平台。

（1）输变电设备全景信息集成平台功能分析与总体方案

平台设计的总体实施如图2-96所示。

（2）输变电设备全景信息集成平台架构

总体采用面向服务架构的思想，借助企业服务总线在消息路由、服务管理及自动集成多个应用方面的优势来构建平台的架构。输变电设备全景信息的多源分散问题突出，平台采用轻量级的Restful服务来实现对多源数据的读取访问。输变电设备全景信息集成平台的架构如图2-97所示，自下而上依次分为数据层、服务层、总线层、逻辑层和应用层共5层。

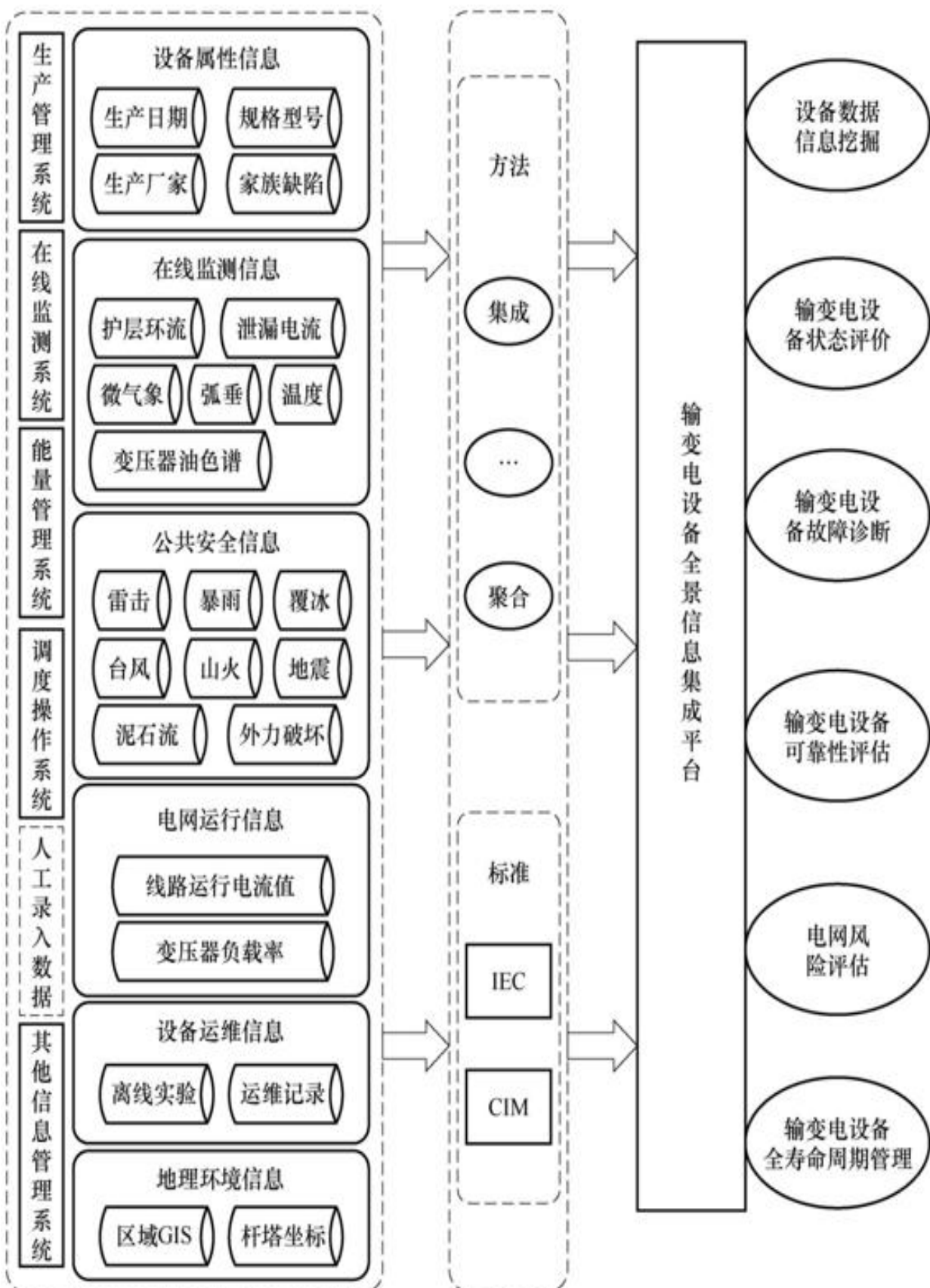


图2-96 输变电设备全景信息集成平台总体方案和技术路线

1) 数据层。作为整个架构的底层基础，数据层要提供分散于各子应用系统中的数据信息。目前电网数据的表示大多采用CIM模型，亦有E文件、XML、CSV等其他格式的数据，在访问时需要对数据模型进行必要的解析服务，将此类解析服务封装为可调用的独立服务，适于在分布式环境中构建松耦合和互操作性强的系统架构。

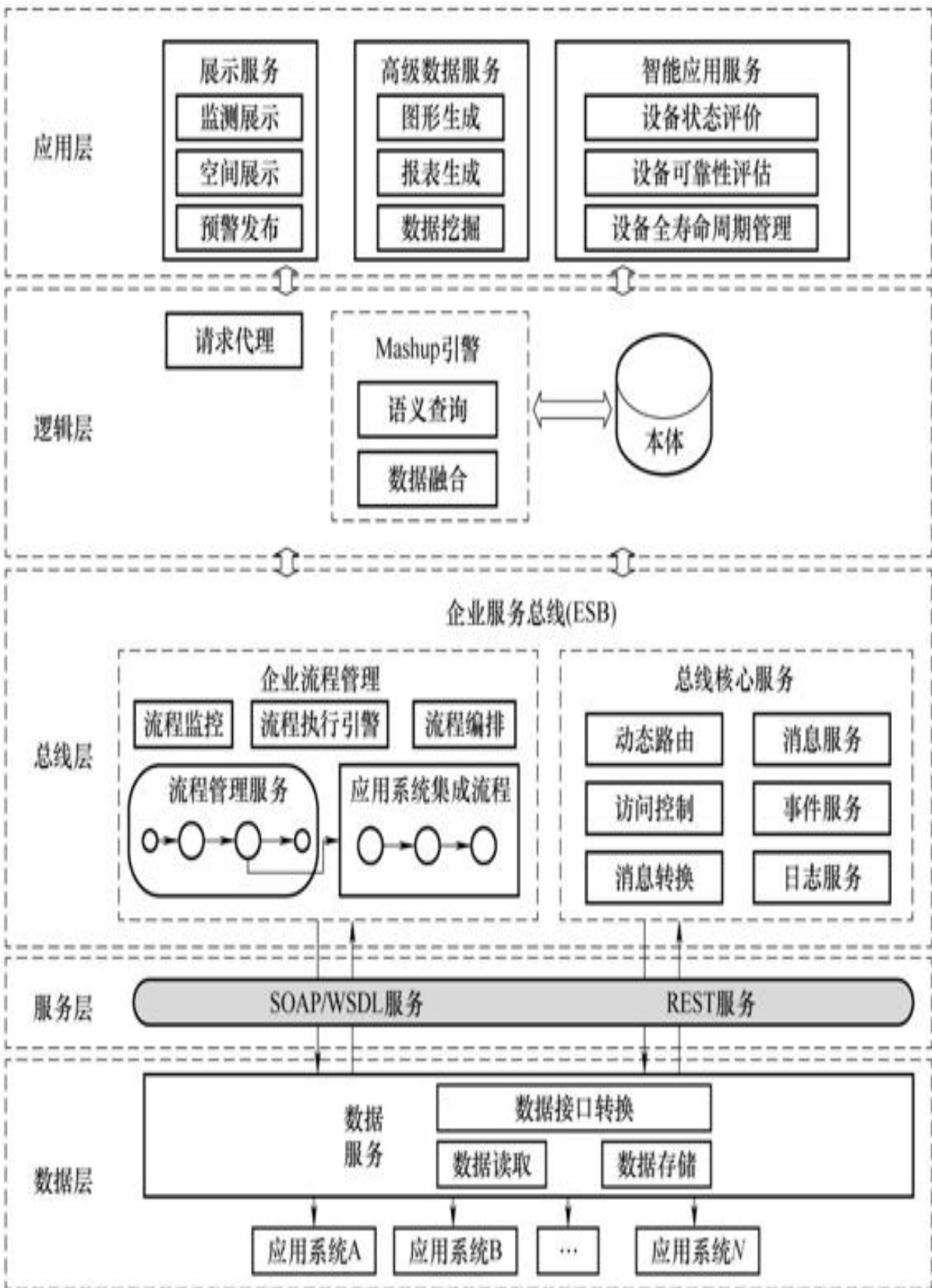


图2-97 输变电设备全景信息集成平台架构

2) 服务层。服务层通过创建REST服务与SOAP/WSDL服务来实现对底层分布数据源的访问。SOAP/WSDL服务通过UDDI统一注册与查找，并由WSDL描述服务的功能与接口，这种信封式的结构设计在构建实际应用时需遵守大量标准与协议，人为地增加了抽象的层次，使得系统更加复杂、扩展性不足，这种重量级的服务已经不能完全满足系统的开发需求。

相比之下，REST服务简捷灵活，可通过URI直接识别定位资源，避免了访问资源时烦琐的响应过程，在需要使用有限带宽提供更多连接时更具效率，使系统具有可寻址性、连通性，降低了与其他分布式组件的耦合性，具有高伸缩性和灵活性，适合构造松散组合的系统。表2-30是REST风格与SOAP风格Web服务的一些特点对比。

表2-30 REST风格与SOAP风格Web服务对比

Web 服务	REST	SOAP
消息格式	XML、JSON	Envelope 中的 XML
接口定义	无	WSDL
操作类型	四种标准操作	服务所定义的任何操作
传输方式	HTTP	HTTP、FTP、SMTP 等
复杂度	简单	复杂
耦合度	低	高
服务变更	容易	困难

REST方式比SOAP方式更易在分布式环境中构建更具前景的松耦合可扩展的系统架构。在输变电设备全景信息的集成过程中，对于已有的采用SOAP实现的某些服务，若其对效率要求较高或其业务功能经常性更新变化，则将其替换为Restful方式。对于新增业务在其对规范性要求不高的情况下采用Rest-ful方式。

3) 总线层。企业服务总线（Enterprise Service Bus, ESB）是构建输变电设备全景信息集成平台的关键核心部分，它提供了开放的、基于标准的消息机制，能够支持异构环境中的通信、连接、交互、消息服务，通过标准适配器和接口，提供粗粒度应用服务与其他组件之间的互操作。ESB通过对各子服务的组合调用实现对服务流程的编排、管理和监控，以支持异构环境中的集成需求。

4) 逻辑层。逻辑层主要处理输变电设备全景信息异构的问题。该层接收来自应用层的请求代理并在总线控制下通过REST服务获取多源异构数据, 在Mashup引擎下完成本体实例的创建并进行语义查询, 最终完成数据聚合。

5) 应用层。作为顶层的应用层根据逻辑层的处理结果, 可提供输变电设备的高级数据、展示与输变电设备全生命周期管理等服务应用。

(3) 输变电设备全景信息集成平台的实现与验证

输变电设备全景信息集成平台主要在Eclipse和Mule Studio的开发环境下实现。Eclipse开发平台源代码开放、基于Java且可扩展, 主要实现基础的数据服务、文件解析服务以及高级应用的算法服务等。Mule Studio可支持Mule ESB的大多功能, 可以图形化的方式创建Mule ESB的服务流程。此外, Jersey作为Mule核心部署的组成部分, 可按照JAX-RS的规范通过在Java中使用标注方式, 快速实现Restful的Web服务, 以实现Mule ESB对REST的支持。当客户端向相应服务端端口发送请求时, Mule Studio通过Jersey从数据源读取数据。图2-98为Mule Studio支持REST的风格的服务发布图。

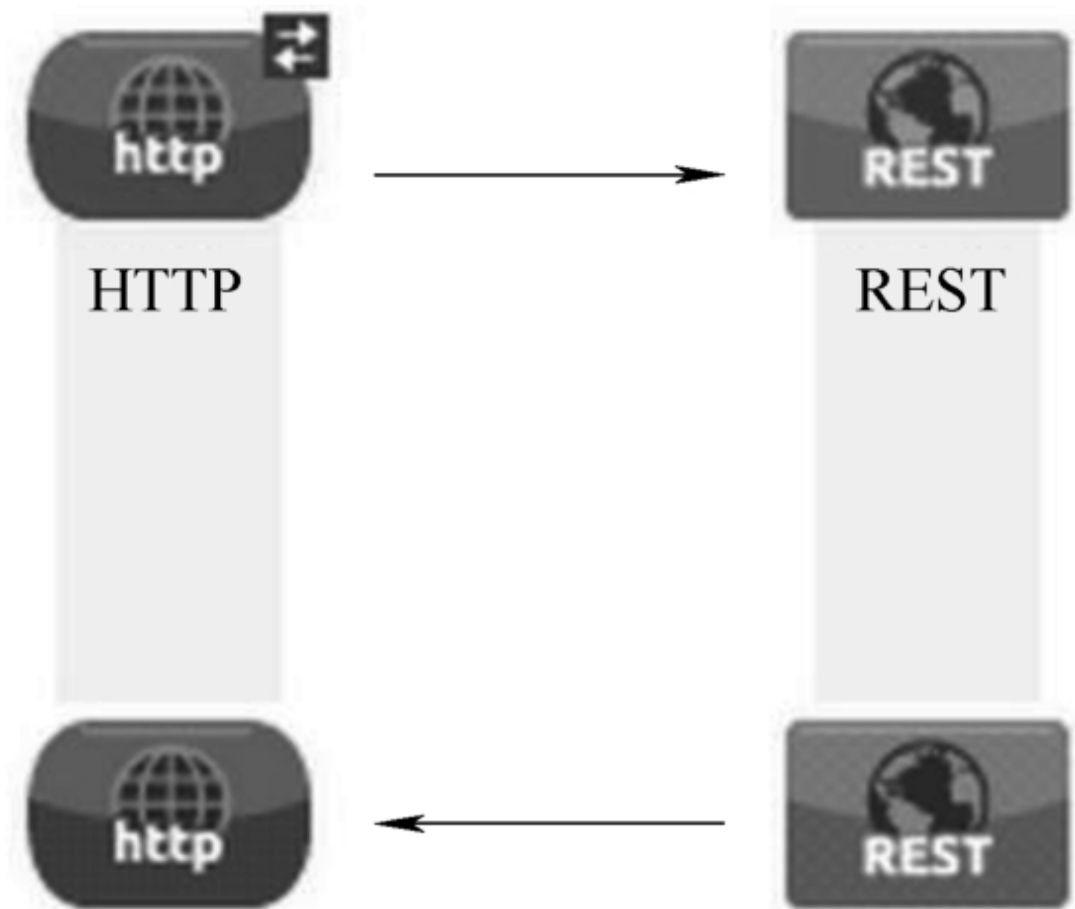


图2-98 Mule Studio中REST风格服务发布

验证：

以查询昭通局的变电站为例验证平台的数据服务，当在地址栏输入唯一标识符URI [http: //10.180.80.236:8080/qjxx/substation/json/get.do? dataSet=siteInfo&¶m=昭通局]之后，返回的数据结果如下：

```
{ "result":  
  {  
    "station": [  
      { "description": "220kV昭通变电站", "siteid": "昭通220kV昭通变" },  
      { "description": "220kV大关变电站", "siteid": "昭通220kV大关变" },  
      { "description": "110kV永善变电站", "siteid": "昭通110kV永善变" },  
      { "description": "110kV鲁甸变电站", "siteid": "昭通110kV鲁甸变" },  
      { "description": "110kV柿子变电站", "siteid": "昭通110kV柿子变" },  
      { "description": "35kV靖安变电站", "siteid": "昭通35kV靖安变" },  
      { "description": "35kV乐居变电站", "siteid": "昭通35kV乐居变" },  
      { "description": "35kV大山包变电站", "siteid": "昭通35kV大山包变" },  
      { "description": "110kV水富变电站", "siteid": "昭通110kV水富变" },  
      { "description": "220kV盐津变电站", "siteid": "昭通220kV盐津变" } ],  
    "success":  
      :true  
  }  
}
```

结果表明，实现了以Restful Web的方式对源数据的访问。

本部分以变压器的状态评价业务为实际需求进行相关服务和流程的实现。由设计部分可知，变压器的状态评价业务可以分解为数据服务、状态评价计算服务、状态评价流程服务这三个子服务。数据服务先由程序实现后封装然后对外发布，主要实现对相关数据的操作；状态评价计算服务先调用相关评价算法程序实现后封装为服务对外发布。这两类服务均为面向服务架构的基本服务，实现独立且功能不可

分，可重用性强且粒度适中。变压器状态评价相关服务的封装与实现过程如图2-99所示。

将以上两类服务在Mule Studio的管理和监控下按照数据交互、计算调用顺序、数据格式转换以及协议转换等要求进行业务编排，最终实现状态评价计算的流程服务。图2-100为Mule Studio对状态评价相关服务的调用及服务流程的编排。

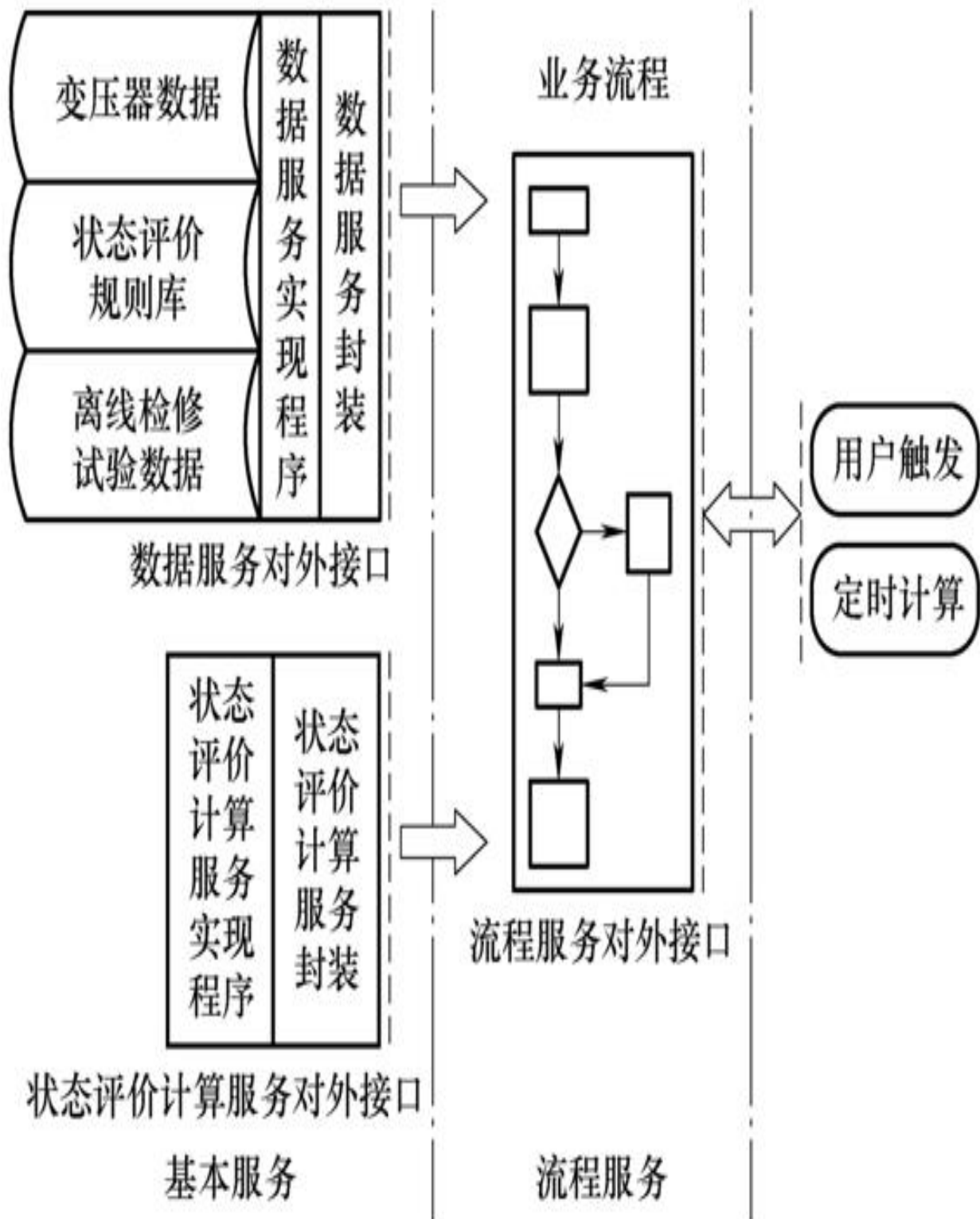


图2-99 状态评价相关服务的封装与实现

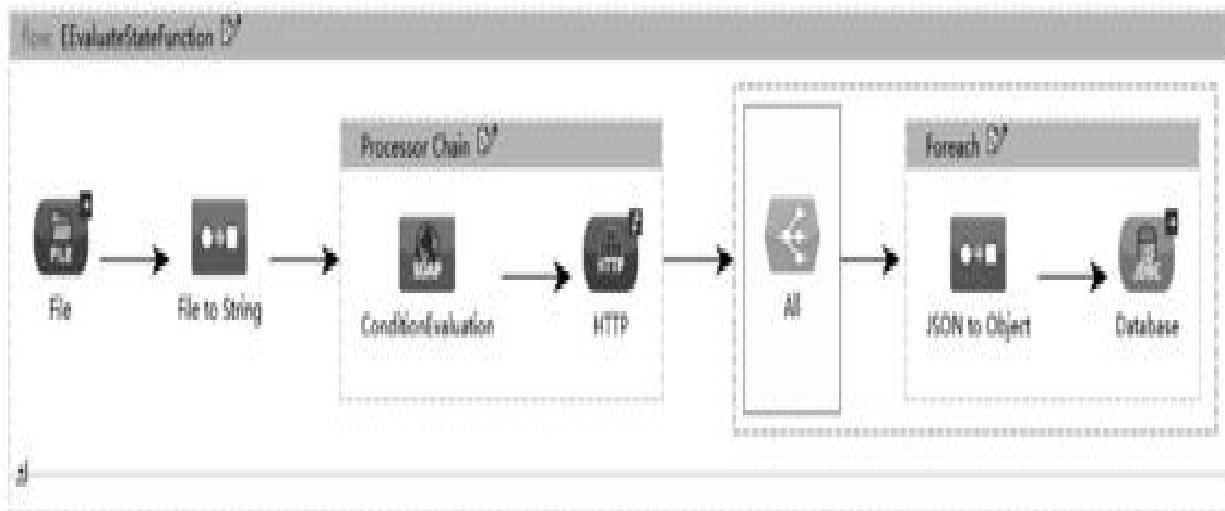


图2-100 Mule Studio对服务的调用及服务流程的编排

2. 输变电设备全景信息的多源异构数据聚合方法实现

输变电设备全景信息平台具有对输变电设备全景信息的汇聚、聚合功能，上层应用提供统一化、标准化数据，基于改进混合本体的多源异构数据聚合方法提高了输变电设备全景信息平台异构数据源之间信息的交流和共享能力，给上层应用提供统一访问的数据视图。

变电设备物联网中的输变电设备监测数据和公共安全数据是典型的异构数据源，数据聚合流程如图2-101所示。

(1) 将数据源转换为RDF格式

本任务应用Protégé本体编辑工具构建输变电设备和环境信息的本体，本体模型及可视化视图如图2-102、图2-103所示。

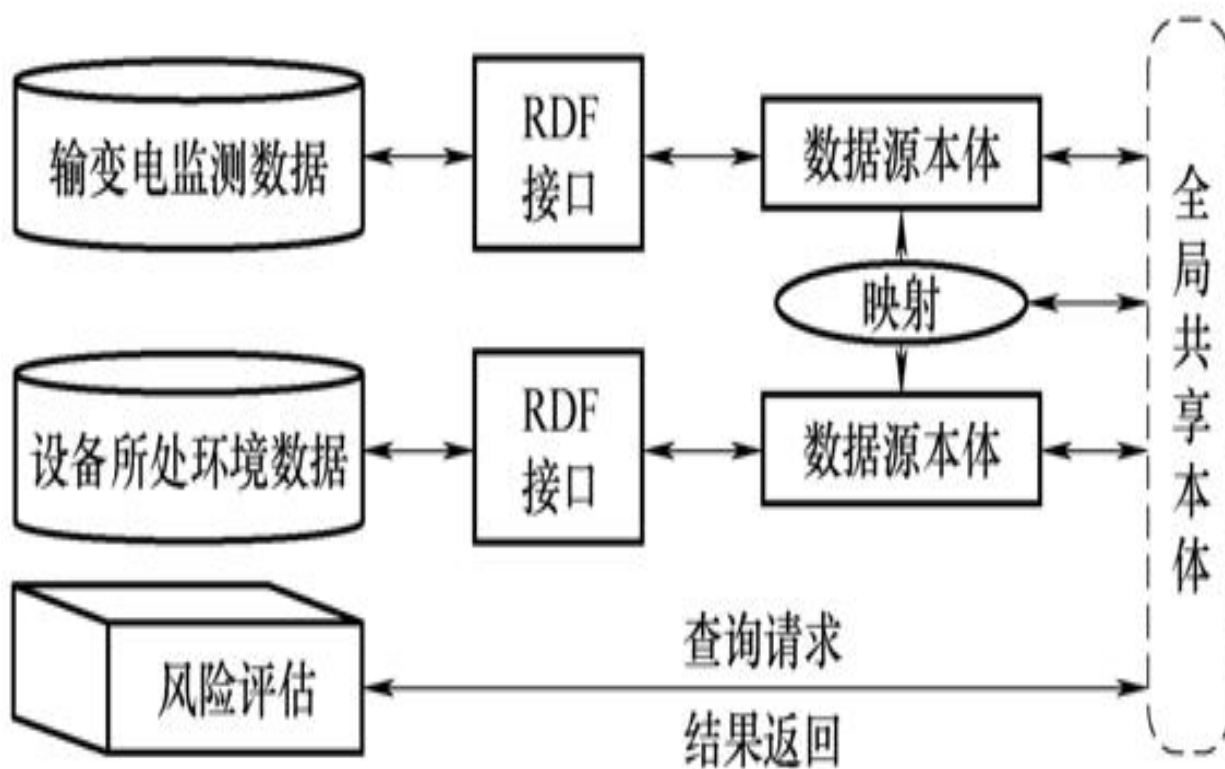


图2-101 多源异构数据聚合流程

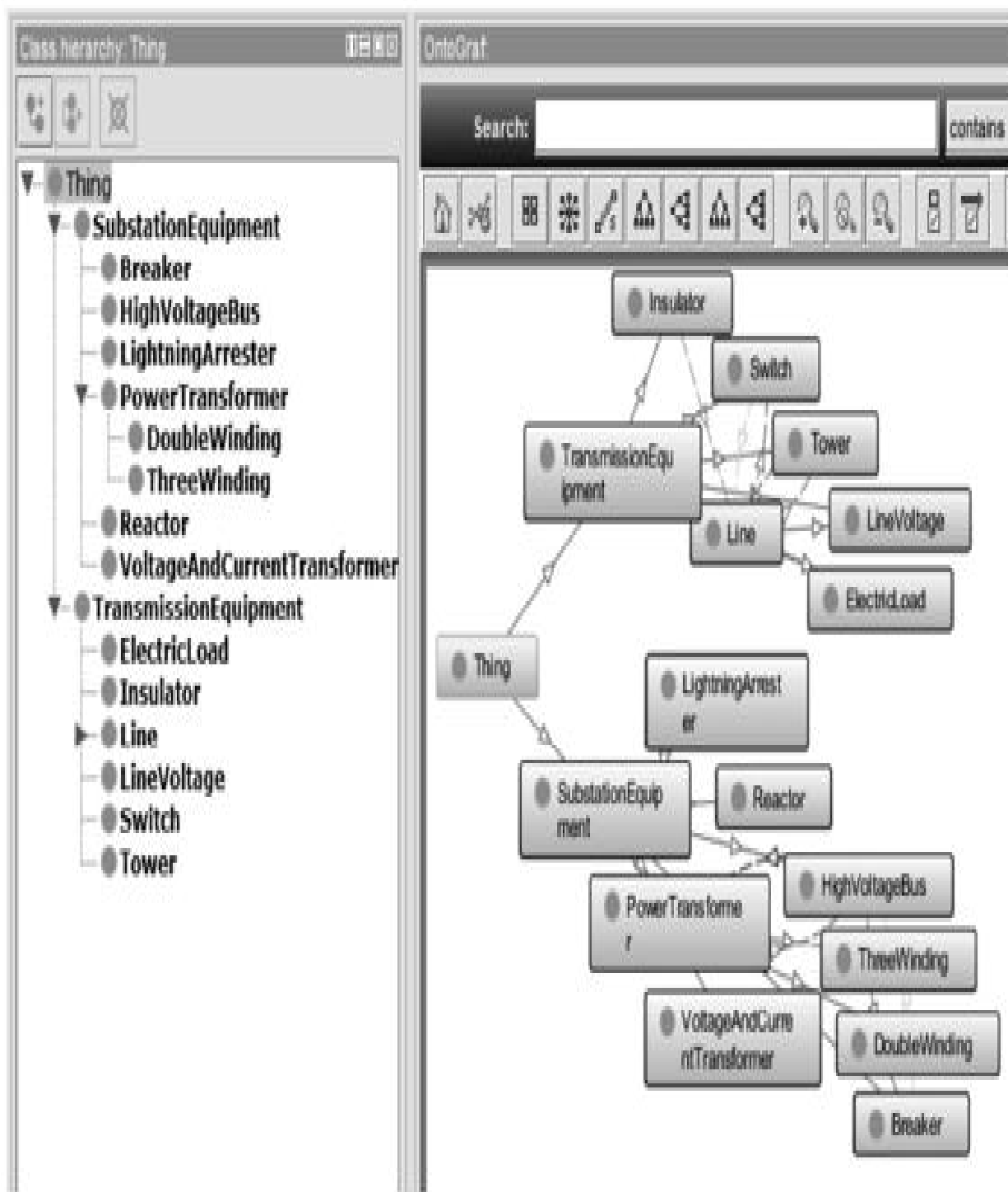


图2-102 输变电设备本体

(2) 本体映射

这里采用OWL本体构造和SWRL规则结合的方式建立映射，利用OWL进行本体构造后，基于SWRL建立了输变电设备本体和环境信息本体的模型映射规则库。表2-31列举了部分规则，例如，规则1的含义是：环境信息本体中的线路被映射到输变电设备本体中的线路。

表2-31 SWRL规则

序 号	规 则 名	规则表达式
1	线路	$tLine(?x) \rightarrow Line(?x)$
2	杆塔	$tTower(?x) \rightarrow Tower(?x)$
3	开关	$tSwitch(?x) \rightarrow Switch(?x)$
4	断路器	$tBreaker(?x) \rightarrow Breaker(?x)$
5	变压器	$tTransformer(?x) \rightarrow Transformer(?x)$

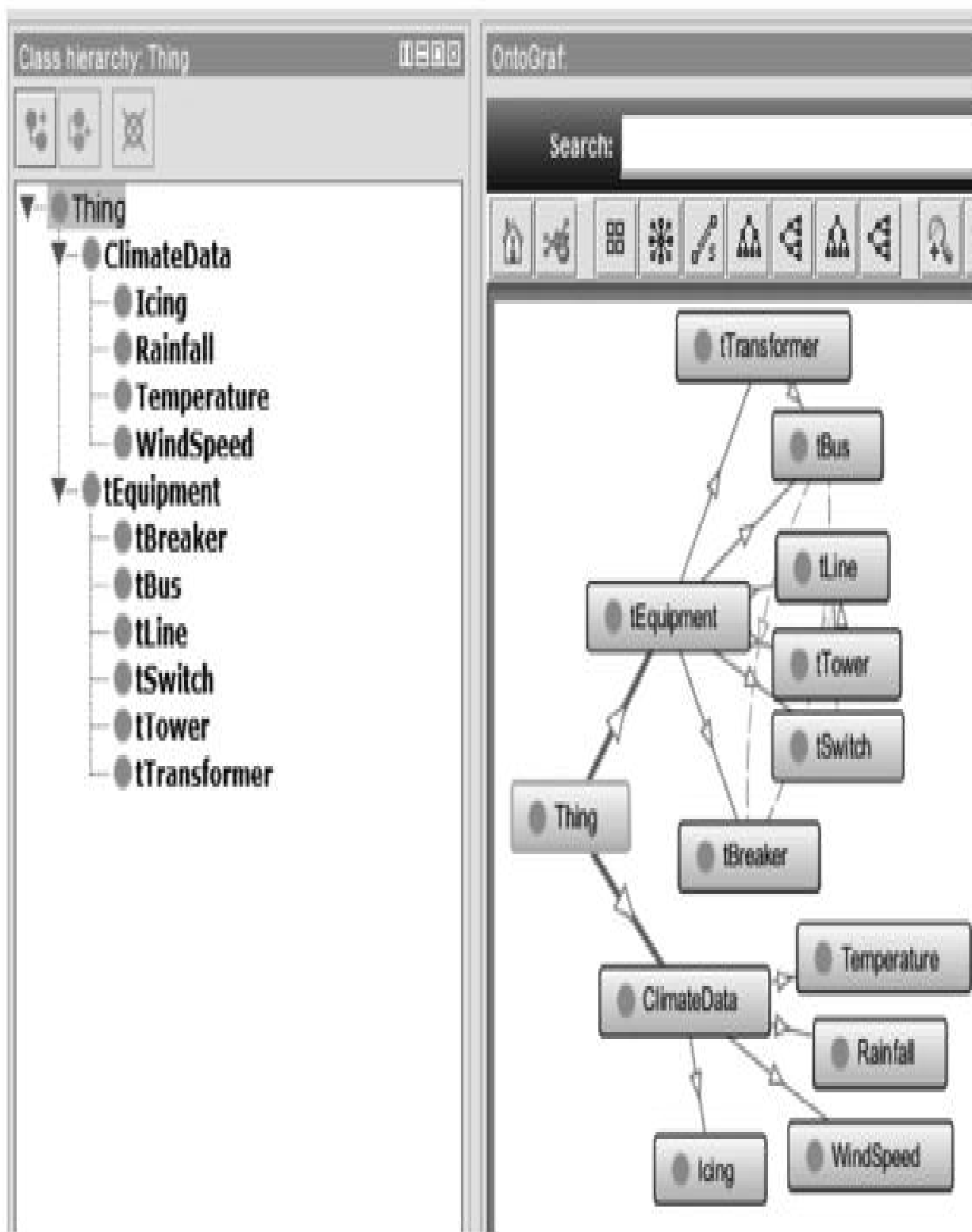


图2-103 环境信息本体

最后通过本体构造工具中的PROMPT选项卡中的CogZ表达映射视图，如图2-104所示。其中，虚线表示两个本体中未确定的候选映射对，灰色实线表示两个本体中的全部映射关系。

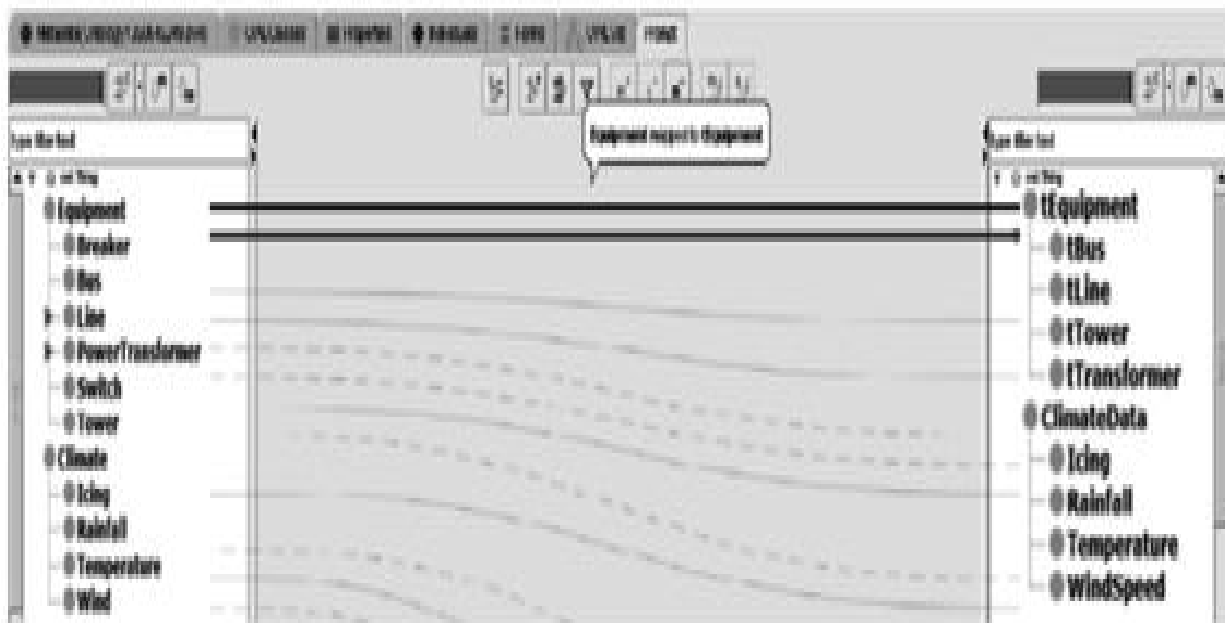


图2-104 局部本体与全局本体映射

(3) 聚合结果

输变电设备监测数据和线路所处环境信息数据聚合后，提供给风险评估系统使用，在对线路进行风险评估后，部分显示结果如图2-105所示。

风险评估的结果中包括了两个异构数据源中关于设备和设备所属天气因素的信息，数据得到了有效聚合和充分利用，证明了所提方法的可行性与有效性。

3. 输变电设备全景信息模型智能管理、校验的实现结果

输变电设备全景信息集成平台为上层应用提供包括存储在共有及私有数据库中的物理数据模型、可直接用于上层应用编码的面向对象模型及用于数据传输的CIM文件静态文件系统，全景信息模型多态自动转换方法可以提升模型之间的转换效率，增加平台向上层应用提供信息模型功能的可靠性。



图2-105 风险辨识

(1) 基于输变电设备全景信息模型的转换结果

下面以已经在输变电设备全景信息集成平台中应用的变压器资产相关模型为例来说明所述方法的有效性。

表2-32是全景信息模型经过自动转化后生成的Java类名列表，

表2-33给出的Transformer Asset类属性列表是变压器资产类下面的属性列表，根据给出的转义表，生成如图2-106所示的CIM标准格式

文件，表2-34是在数据库中生成的数据表单。

表2-32 变压器资产类名列表（部分）

Asset List	资产列表类	Asset Basics Version	资产基础版本类
Asset Modlle	资产模型类	Asset Catalogue	资产登记表类
Asset Property	资产属性类	Asset Property Curve	资产属性曲线类
Tap Changer Asset	分接开关资产类	Bushing Asset	套管资产类
Tran sformer Asset	变压器资产类	Bushing Type Asset	套管资产型号类
Gas Relay Asset	气体继电器资产类	Type Asset Catalogue	资产类型目录类

表2-33 Transformer Asset类属性列表

MRID	设备编码	construction Type	变压器结构类型
transformer Type	设备子类型	reconditioned Date	最近修理日期

```

<cim:TransformerAsset>
<cim:TransformerAsset rdf:ID="1">
  <cimExt:PressureReleaseDeviceAsset> </cimExt:PressureReleaseDeviceAsset>
  <cimExt:ReconfigWindings> </cimExt:ReconfigWindings>
  <cimExt:TransformerType>DPPSZ7-40000/220</cimExt:TransformerType>
  <cimExt:DayOverLoadRatings> </cimExt:DayOverLoadRatings>
  <cimExt:TransformerModel> </cimExt:TransformerModel>
  <cimExt:GasRelayAsset> </cimExt:GasRelayAsset>
  <cimExt:Thermomerassest> </cimExt:Thermomerassest>
  <cimExt:AltPrimaryNomVoltage> </cimExt:AltPrimaryNomVoltage>
  <cimExt:AltSecondaryNomVoltage> </cimExt:AltSecondaryNomVoltage>
  <cimExt:HourOverLoadRating> </cimExt:HourOverLoadRating>
  <cimExt:TransformerProperties> </cimExt:TransformerProperties>
  <cimExt:ConstructionType>DPPSZ7-40000/220</cimExt:ConstructionType>
  <cimExt:reconditionedDate>2007/11/29</cimExt:reconditionedDate>
</cim:TransformerAsset>
<cim:TransformerAsset>
<cim:TransformerAsset>
<cim:TransformerAsset>

```

图2-106 资产类CIM文件

表2-34 Transformer Asset表单（部分）

MRID	transformer Type	construction Type	reconditioned Date
027000023	DFPSZ7-40000/220	DFPSZ7-40000/220	2007/11/29
027000024	ODFS-250000/525	ODFS-250000/525	2011/4/1
027000025	DFPSZ7-40000/220GY	DFPSZ7-40000/220GY	2008/5/2

(2) 输变电设备全景信息模型校验结果

对资产类所对应的CIM文件进行校验后，生成的校验报告如图2-107所示，在对CIM文件合法性进行校验的同时，对全景信息模型的完善提供支持。根据校验结果显示的缺少资产属性曲线（Asset Property Curve）类和两个长度超出数据库字符限制的两个类名，对全景信息模型进行修改，进一步完善了全景信息模型。

校验项目	校验结果概况	ROM
CIM版本号	1.0	
类名完备情况	缺少AssetPropertyCurve类	
属性名完备情况	属性对应无异常	
数据库字符限制	30	
命名长度校验情况	TransformerOnLineMonitoringProperties、TransformerMechanicalProperties长度超出数据库字符限制	
校验类个数	38	
编码格式	UTF-8	
是否是拓展信息模型	是	

图2-107 校验结果

输变电设备全寿命周期管理是输变电设备智能物联网的集成应用和最终目标。目前国内外输变电设备资产管理受设备状态感知能力、信息综合应用能力、全局风险防控能力、监管流程统筹能力和执行过程协同能力的制约，整体效益无法得到充分发挥，已难以适应智能电网安全运行和资产精益化管理的需要。

建立输变电设备全寿命周期管理系统的目标包括：①在输变电设备物联网平台上，利用输变电设备全景信息，通过建立统一协调、科学高效的输变电设备全寿命周期综合管理策略和关键绩效指标体系，形成各业务环节紧密衔接的全过程闭环管理模式；②通过设备信息管理系统、电网能量管理系统、微气象监测系统、在线监测系统和相关事件信息的接入，扩展设备缺陷的状态诊断维度和运行风险的动态评估方法，提高运维决策的针对性和设备全寿命过程的管控能力，实现输变电设备的运行可靠性、使用效率和寿命成本的综合平衡。

为了实现上述目标，本任务建立了输变电设备全寿命周期管理系统功能架构。输变电设备全寿命周期管理系统在结构上分为数据层、支撑层、应用层和服务层。

数据层从全景信息平台获取输变电设备全寿命周期管理所需的基础数据，包括设备台账、技术参数、历史缺陷、检修历史、预试定检、监测数据、运行工况、环境信息和成本信息等。采用数据清洗策略，形成有效的设备关联信息集。

支撑层通过建立状态数据优化、异常预警、综合诊断、智能评价、寿命预测、风险评估和家族缺陷分析等完备的全寿命周期过程分析功能，实现对设备风险的准确判断和管理策略的智能生成。

应用层通过设备状态在线评估及环境安全分析，实现电网设备运行风险的动态预警；通过建立共性缺陷原因分析、备品备件物联管控

和风险控制策略等功能，实现检修资源的优化配置和协同联动。通过对比统计设备的关键绩效指标，形成对全寿命周期管理质量的追踪评价。

服务层建立设备全寿命周期的健康诊断档案，对各类各类设备的运行状态和健康状况进行动态的分类统计分析，完成设备缺陷及故障信息及时通报、检修与试验计划自动生成、缺陷和故障处理的过程管理与后评估，为设备规划、采购、基建、运行提供准确的量化评价依据。

本任务结合数据层、支撑层、应用层、服务层的各项功能需求，开展了系统的研发工作，建立了基于设备多源状态参量的融合分析方法，将具体、明确的可靠性量化指标覆盖管理的各个环节，从设备采购、工程建设、生产运营、技改报废等各环节控制影响设备安全服役的主要因素，实现对电网主设备全寿命周期的高效管控，降低寿命周期费用，优化资源配置。

本任务解决了输变电设备物联网应用层的三个关键技术问题：

1) 提出了全景信息的输变电设备风险多维度动态预警技术，建立了基于物联网智能监测的气象环境、运行工况和实时状态的实时风险预测方法，实现了输变电设备风险的早期防控，支撑了输变电设备全寿命周期管理系统的设备运行风险分析和风险防御。

2) 建立了基于可靠性和经济性的输变电设备综合寿命评估模型，将可靠性量化指标覆盖全寿命周期管理的各个环节，开发了输变电设备全寿命周期过程优化管理技术，实现了输变电设备全寿命周期闭环管理。

3) 提出了基于风险源综合辨识和分级防控的输变电设备全寿命周期运维管理策略，建立了全寿命周期品质跟踪管控原则，实现了基于物联网的备品备件、物资人员的优化配置和协调联动，实现了输变电设备运维检修的联动管控。

3.1 关键技术研究

1. 基于全景信息的输变电设备风险多维度动态预警技术

基于全景信息的输变电设备风险多维度动态预警技术包含多维度风险评估方法、设备故障动态预警方法以及对自然灾害的动态预警等三方面的主要研究工作。通过对设备自身及外在环境的全面综合监视，实现对大电网设备运行状态的全面感知。通过实时安全分析及智能诊断，实现电网设备运行风险的动态预警。

（1）多维度风险评估方法

输变电设备多维度风险评估包括运行风险要素分析、故障模式分析和运行风险评估三个环节。在运行风险要素分析的基础上，以云南电网典型故障模式和故障树分析为基础，建立了基于故障模式因果关系的多维度综合诊断模型，实现了基于物联网智能监测的气象环境、运行工况和实时状态的动态风险评估。

1) 输变电设备运行风险要素分析。

风险要素是后续风险评估和风险预测的基础。风险有三个构成要素：风险因素、风险事件和风险损失。具体到输变电设备运行阶段的风险，三要素为故障原因、故障模式与故障后果，如图3-1所示。对输变电设备运行风险要素进行分析即为识别输变电设备故障原因及其特性，确定故障发生条件及其表现形式，评价故障后果的过程。本任务从输变电设备的故障统计数据出发，更加客观地确定了输变电设备的故障原因及其故障原因的时间特性、故障模式及故障模式的因果关系、故障后果及故障后果的估计方法。

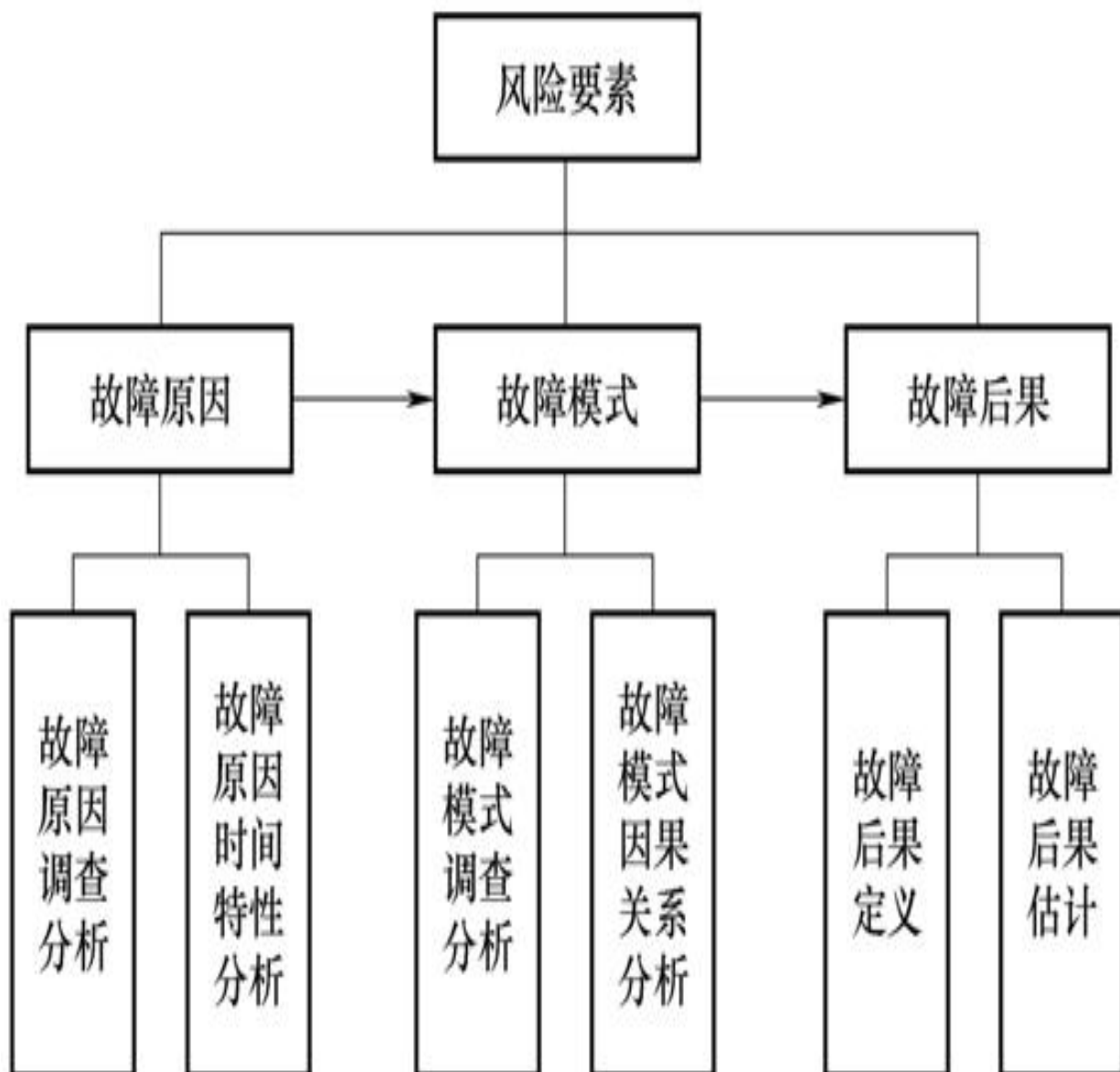


图3-1 输变电设备运行风险分析的研究内容

表3-1汇总了各组织机构对输变电设备故障原因的调查结果。根据以上统计结果，可以发现输变电设备的主要故障原因包括：设计/制造/工艺因素、不良工况、老化和人为原因。基于故障原因的特点，本任务将其划分为三类，设计/制造/工艺造成的隐患在输变电设备投运时就存在，称之为固有故障隐患；老化通常为输变电设备在工作应力作用下的劣化结果，不良工况产生的随机应力为输变电设备在运行环境中所遭受的主要诱因；人为因素指在输变电设备操作、维修等过程中人为引入的运行风险隐患。

表3-1 输变电设备故障原因统计

故障原因	故障次数	故障率
设备老化	15	15%
人为因素	10	10%
自然灾害	8	8%
设计缺陷	5	5%
施工质量问题	3	3%
材料质量问题	2	2%
维护不当	1	1%
其他	1	1%

调查机构	时间范围/年	地 理 位 置	设备电压等级 或容量	故障原因 (%)
CIGRE	1968—1978	13 个国家	60 ~ 700kV	制 造 (15.7)、设 计 (12.9)、材 料 (12.3)、雷 电 (8.9)、短 路 冲 击 (8.9)、维 修 (8.1)、组 装 (5.9)、过 载 (0.6)、储 运 (0.5)、冷 却 功 能 丧 失 (0.2)、其 他 (26.0)
INPO	1991—2001	美国核电运行 研究所所属设备	等级不明	套 管 故 障 (11.8)、接 地 故 障 (9.2)、外 部 事 件 (9.2)、绝 缘 故 障 (8.4)、维 修 (7.6)、压 力 释 放 阀 故 障 (6.7)、冷 却 系 统 故 障 (5.9)、操 作 (5.0)、其 他 (9.3)、未 知 (26.9)
HSB	1975 1988 1998	电厂、商业区、 制造企业	等级不明	雷 电 (25.0)、短 路 冲 击 (17.9)、绝 缘 老 化 (10.7)、维 修 不 足 (10.3)、制 造 工 艺 (6.9)、受 潮 (6.8)、过 载 (5.4)、连 接 松 动 (3.4)、蓄 意 破 坏 (1.4)、其 他 (12.2)
	1997—2001	电厂、变电站	25MV · A 以上	绝 缘 故 障 (25.5)、设 计 / 制 造 / 工 艺 (23.4)、连 接 松 动 (6.4)、维 修 操 作 不 当 (5.3)、过 载 (5.3)、线 路 电 涌 (5.3)、绝 缘 油 污 染 (5.2)、雷 电 (3.2)、起 火 / 爆 炸 (3.2)、洪 水 (2.1)、受 潮 (1.1)、未 知 (16.0)
南非电力 公司	1994	南非电力公司 所属设备	88 ~ 765kV; 20 ~ 800MV · A	小 型 输 变 电 设 备 (20 ~ 100MV · A)，老 化 引 起 的 故 障 占 主 导 地 位；对 于 中 型 输 变 电 设 备 (100 ~ 400MV · A)，分 接 开 关 具 有 最 高 故 障 率；对 于 大 型 电 力 输 变 电 设 备 (>400MV · A) 绝 缘 配 合 型 故 障 在 早 期 运 行 故 障 中 占 主 导 地 位

(续)

调查机构	时间范围/年	地理位置	设备电压等级 或容量	故障原因 (%)
中国电力 科学研究院	2002—2005	国家电网公司 所属输变电设备	110kV 及以上	抗短路强度不够 (37.7)、 设计/制造/材料 (24.7)、雷 电/过电压 (13.5)、分接开关 质量不良 (9.7)、套管质量差 (5.6)、绝缘老化 (3.7)、组 装不当 (2.1)、误操作 (2.0)、进水受潮 (1.0)

2) 基于因果网络图的输变电设备故障模式分析。

本任务将因果网络图引入到输变电设备故障模式分析中，以表征故障模式之间的因果关系。因果网络图用网络图的形式反映故障模式的故障原因、故障后果。构建的输变电设备（以变压器绕组为例）故障模式的因果网络如图3-2所示，不同的部件采用不同颜色区分，有助于直观清晰地观察故障在部件间的传播过程。

3) 基于综合故障诊断模型的输变电运行风险评估。

在分析输变电设备各故障要素之间因果关系的基础上，建立了以故障模式为中心、综合运行工况和故障征兆的贝叶斯因果网络，如图3-3所示，表3-2是以变压器为例相关节点符号的说明。输变电设备的

不良工况、故障模式、故障征兆分别对应于贝叶斯网络中的背景变量、问题变量和征兆变量。

将图3-3所示模型转变为可直接应用的综合故障诊断模型，如图3-4所示。图3-4a所示模型为仅已知变压器经历不良工况时的变压器运行风险评估模型，不良工况为致险因素，故障诊断依据是不良工况对变压器的劣化作用机理；图3-4b所示模型为依据故障征兆与故障模式之间的概率因果关系以及考虑不良工况为增险因素作为故障诊断的辅助证据信息两种情况下的运行风险评估模型。

动态故障诊断机制的流程如图3-5所示。该方法基于贝叶斯网络综合故障诊断模型，利用网络推理算法求取证据信息对故障模式支持度高低，从而确定逐步诊断中证据信息获取的先后顺序。图3-5所示 P_{th} 为预先设定的概率阈值，即当故障模式的后验概率大于该阈值时就认为该故障模式发生。变压器运行风险评估流程如图3-6所示。

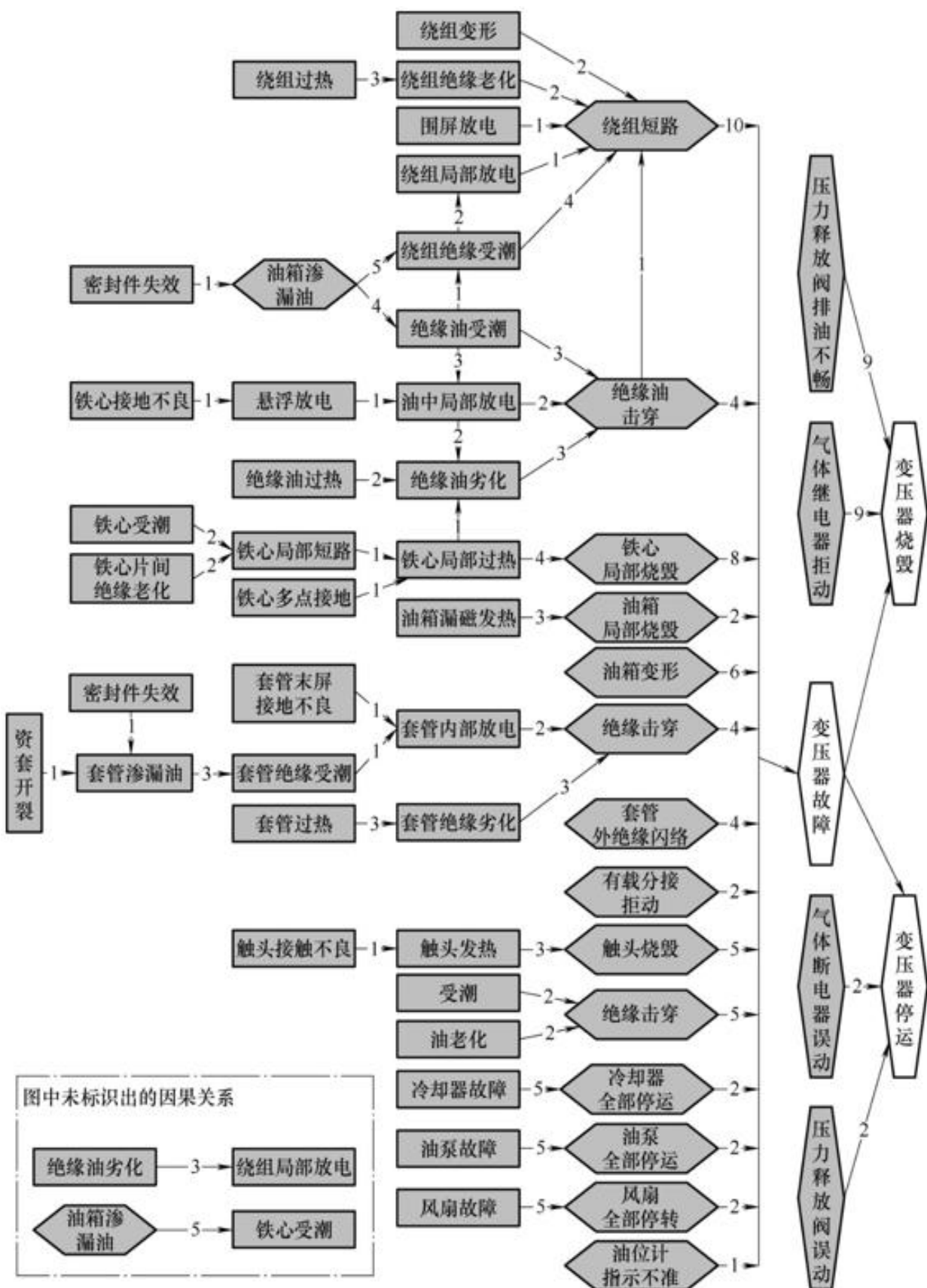


图3-2 输变电设备功能故障的因果网络结构

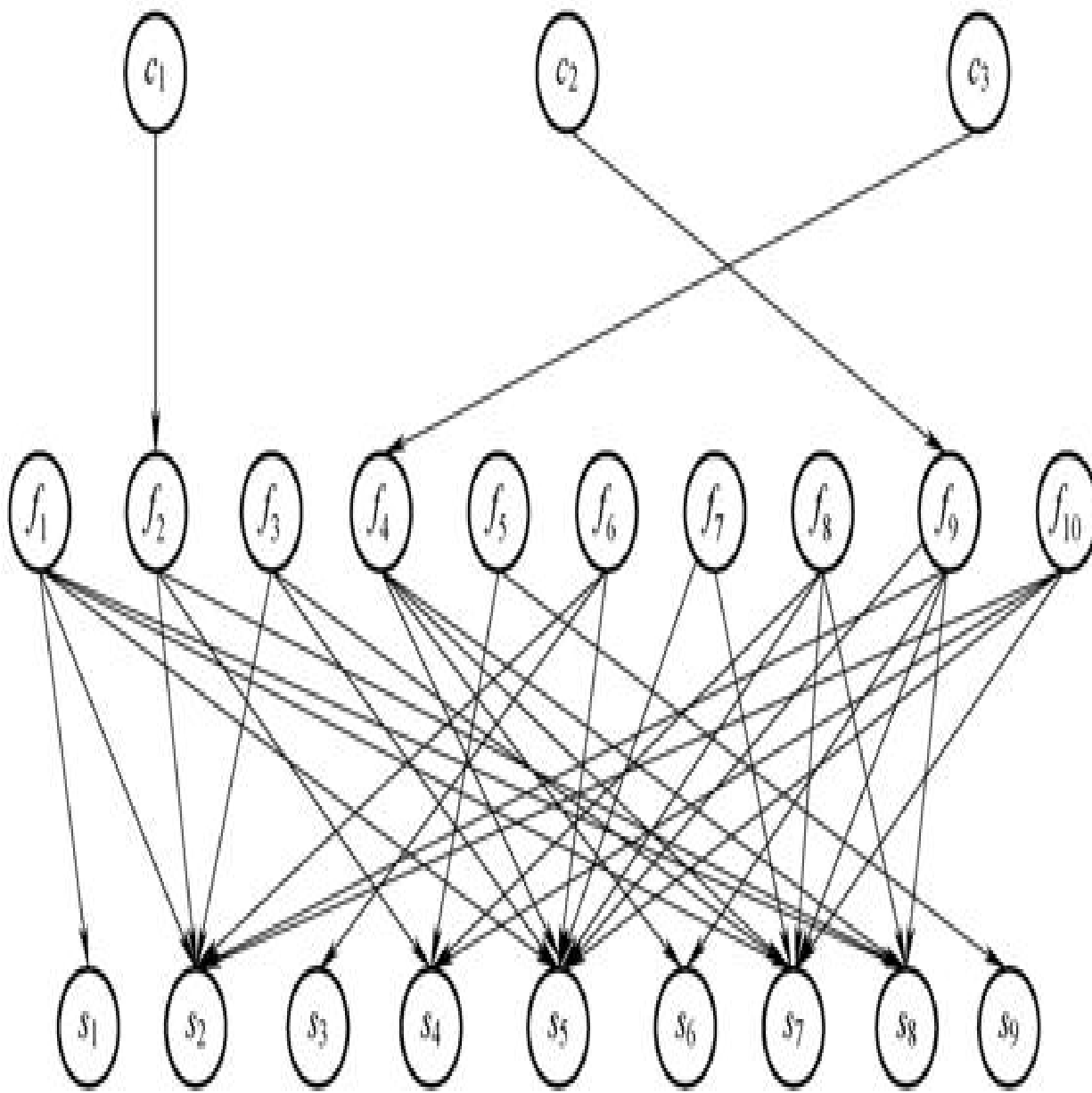


图3-3 不良工况、故障模式与故障征兆之间的基本因果关系

表3-2 对图3-3中节点符号说明（以变压器为例）

节点信息 (编号)		节点信息 (编号)	
不良 工况 c	过载 (c_1)	故障 模式 f	铁心多点接地 (f_1)
	短路冲击 (c_2)		绝缘老化 (f_2)
	雷电冲击 (c_3)		漏磁发热 (f_3)
故障 征兆 s	铁心接地电流 (s_1)		绕组短路 (f_4)
	三比值编码呈过热性故障特征 (s_2)		绝缘受潮 (f_5)
	绕组直流电阻的三相不平衡系数 (s_3)		分接开关故障 (f_6)
	变压器本体油中含水量 (s_4)		悬浮放电 (f_7)
	三比值编码呈放电性故障特征 (s_5)		围屏放电 (f_8)
	绕组电压比偏差 (s_6)		绕组变形 (f_9)
	局部放电 (s_7)		油中放电 (f_{10})
	$\varphi(\text{CO})/\varphi(\text{CO}_2)$ (s_8)		
	绕组的吸收比或极化指数 (s_9)		

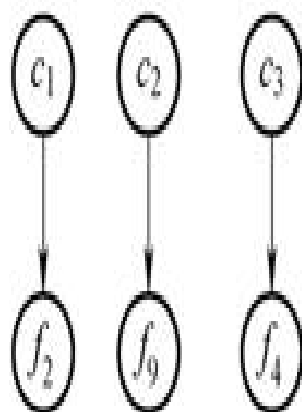
(2) 设备故障动态预警方法

通过输变电设备故障原因与后果的分析，提出了基于领结模型的风险预测方法，建立了基于半马尔科夫过程和输变电设备劣化统一理

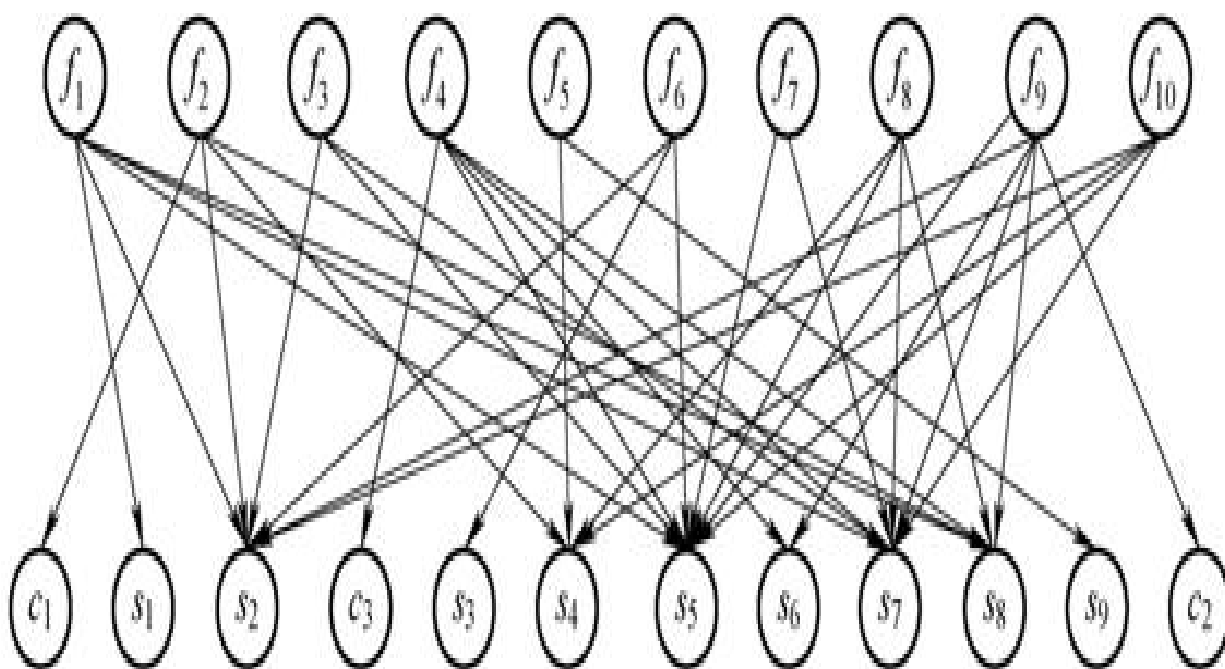
论的输变电设备状态转化模型，并以变压器为例，进行了基于半马尔科夫过程的变压器风险预测和故障动态预警分析。

1) 基于领结模型的风险致因分析。

以风险控制为导向的风险动态预警需要对故障模式同时进行向前向后的分析。本任务应用领结模型（Bow Tie, BT），结合故障树和事件树分析方法，分析常见故障模式的原因及后果，形成以故障模式为中心节点的领结模型，在此基础上进行风险预测。领结模型用图形的方式来描述一个关键事件的原因和结果，如图3-7所示，关键事件位于图形的中间，左侧用故障树分析关键事件的原因，右侧用事件树分析关键事件可能造成的后果。



a) 不良工况致險的故障诊断模型



b) 其他故障原因致險的故障诊断模型

图3-4 综合故障诊断模型

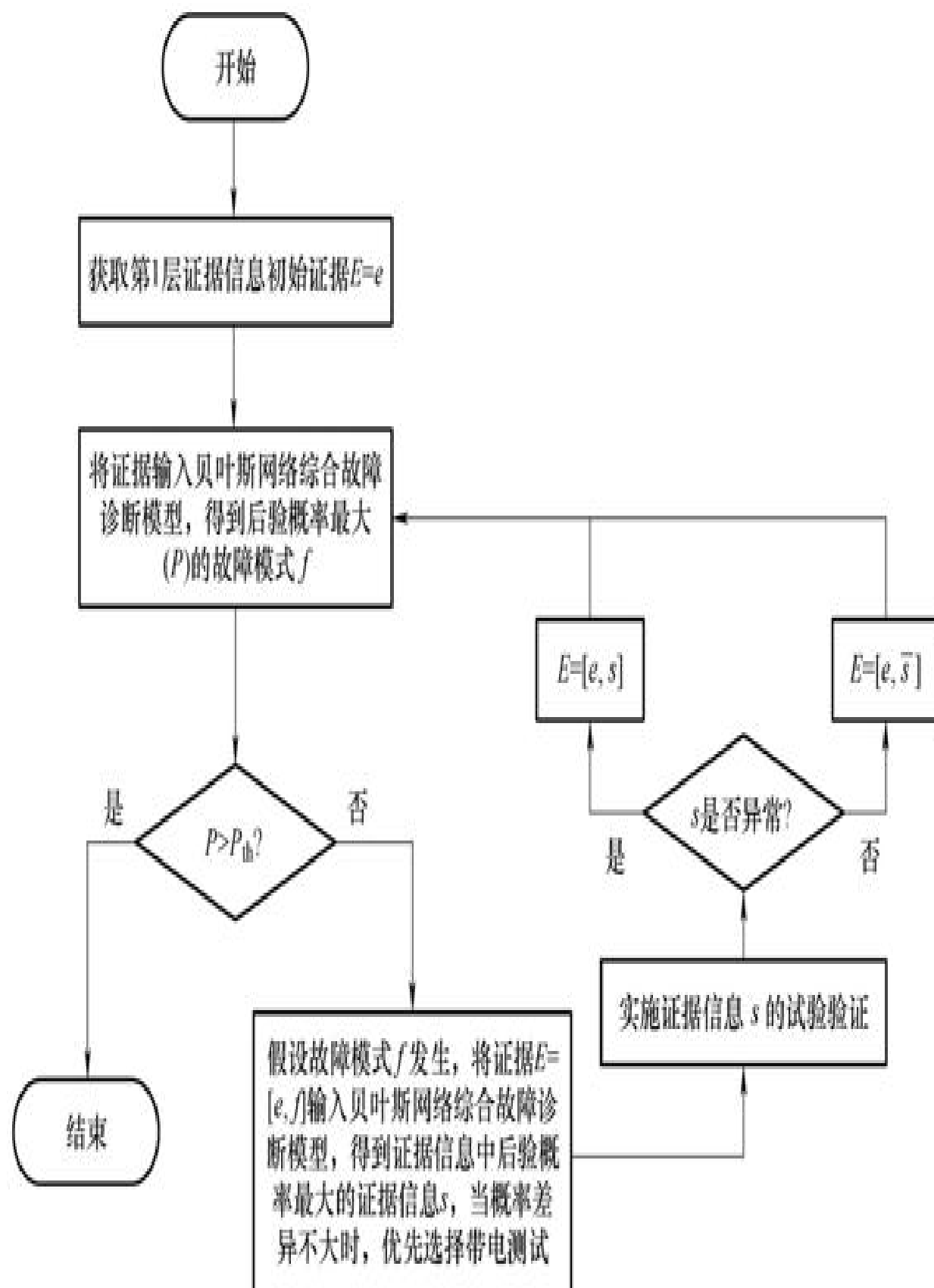


图3-5 动态故障诊断机制流程图

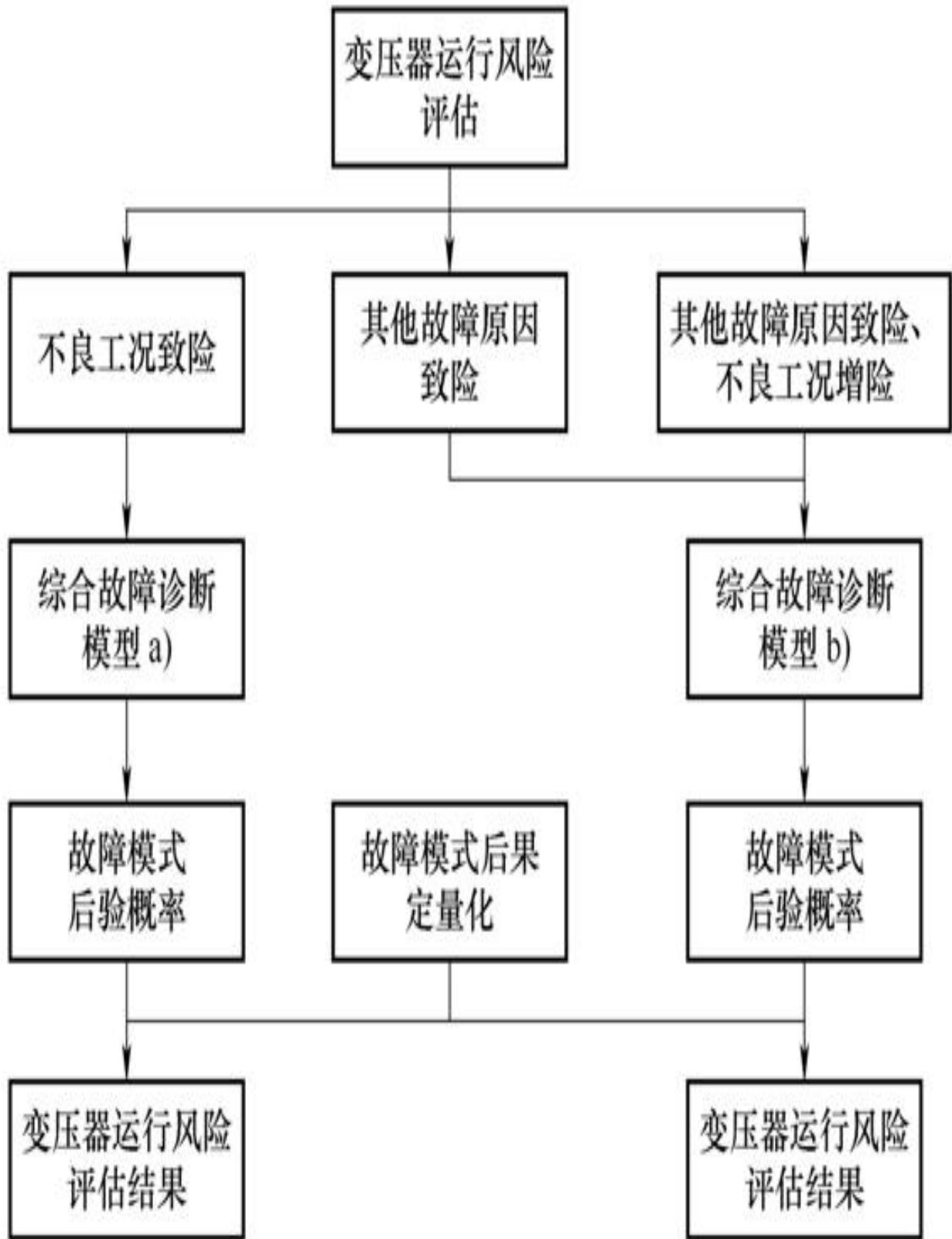


图3-6 运行风险评估方法流程示意图

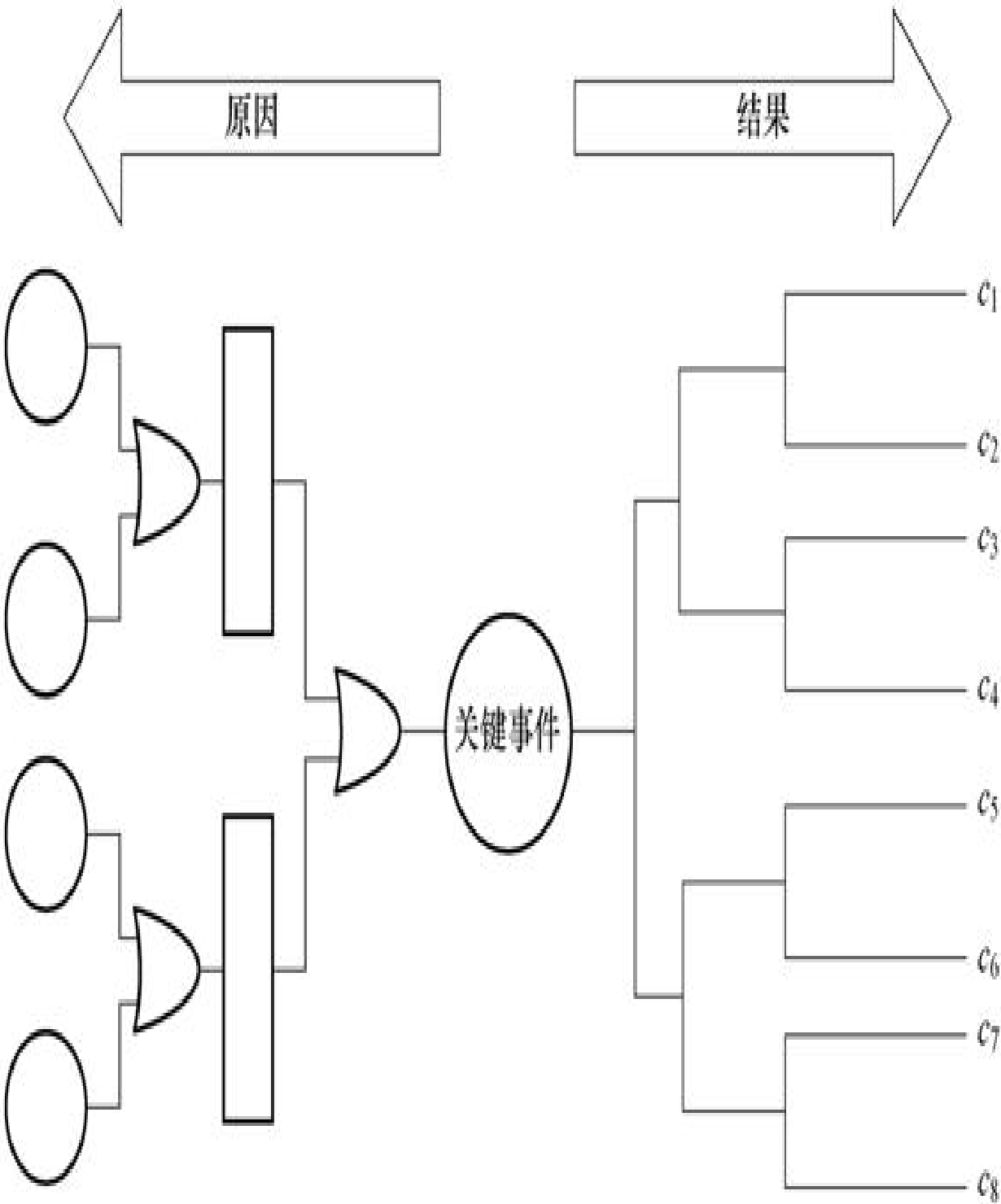


图3-7 领结模型结构示意图

传统的输变电设备故障树和事件树都可以用因果网络图表示，通过结果的前向分析和原因的后向分析可形成故障模式的领结模型。以常见的变压器绕组绝缘老化故障为例（图3-8），由图可见绕组绝缘老化的故障原因中含有绝缘油的作用，这是因为它们在物理位置和功能上有连接，造成部件间的故障传播。绕组绝缘老化的直接故障原因可以分为三类：固有故障隐患（统包绝缘膨胀、导线制造不良）、应力（过载、工作应力）和其他部件影响（绝缘油散热不良）。其他故障类似分析，不同的故障原因类别，会造成不同的故障发展过程，风险控制措施上也会有所差异。本任务基于故障模式的领结模型分析其前因后果，然后根据输变电设备的实际运行参数，形成对故障发展过程的定量化描述，并以货币值描述故障模式的风险。

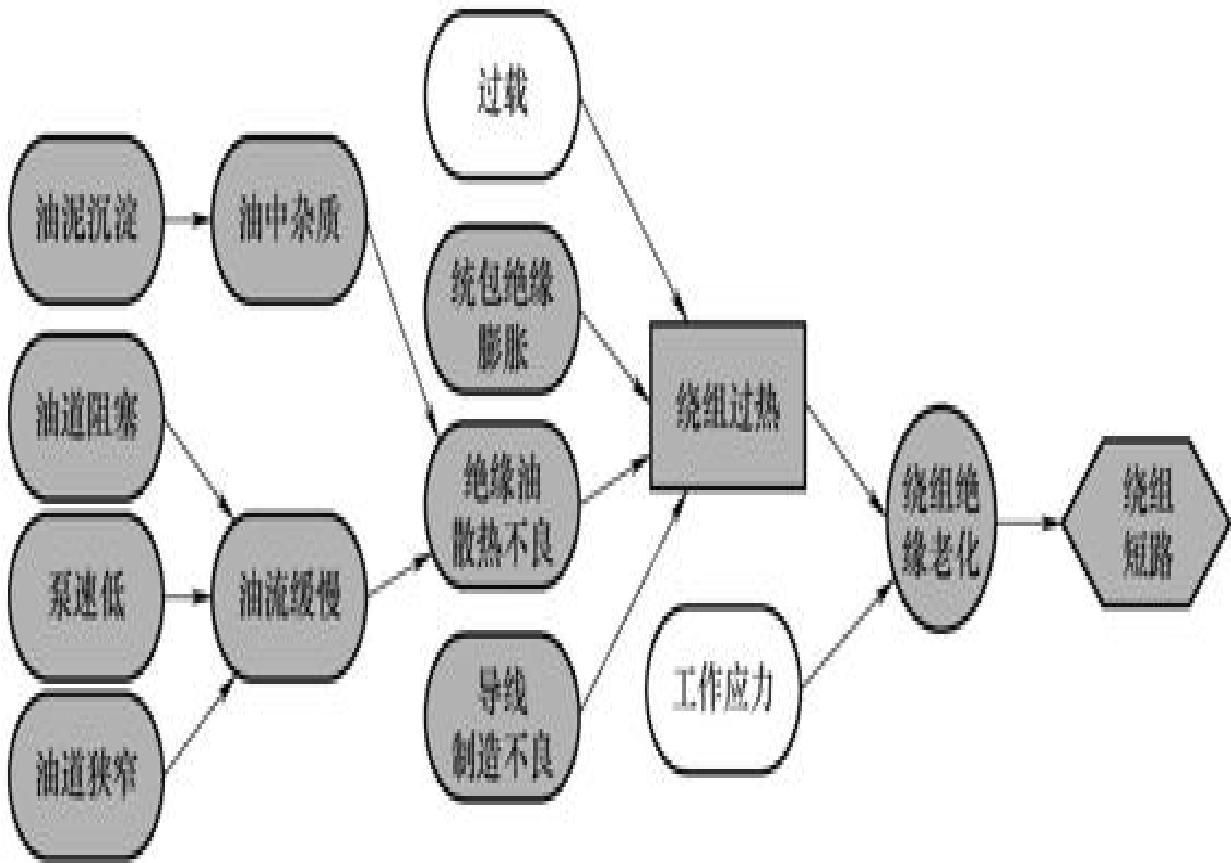


图3-8 绕组绝缘老化的领结模型

2) 基于半马尔科夫过程的变压器风险预测。

如果设备未来可能的状态仅与当前状态有关，则故障发展过程可用马尔科夫过程表示。传统的马尔科夫过程假设状态的停留时间分布

为指数分布，但实际情况中很难满足此要求，为此本任务采用半马尔科夫过程描述故障模式的发展过程。

半马尔科夫过程与马尔科夫更新过程有关，马尔科夫更新过程中，如 n 为非负整数，设随机变量 $X=\{X_n\}$ ， $X_n \in S$ ， $T=\{T_n\}$ ， $T_n \geq 0$ ，随机变量 $0=T_0 \leq T_1 \leq \dots < T_{n-1} \leq T_n \leq \dots$ 。若对于任意 $n \geq 0$ ， $j \in S$ ， $t \geq 0$ 满足：

$$\begin{aligned} P[X_{n+1}=j, T_{n+1}-T_n \leq t \mid X_n, T_n, X_{n-1}, T_{n-1}, \dots, X_0, T_0] \\ = P[X_{n+1}=j, T_{n+1}-T_n \leq t \mid X_n] \end{aligned} \quad (3-1)$$

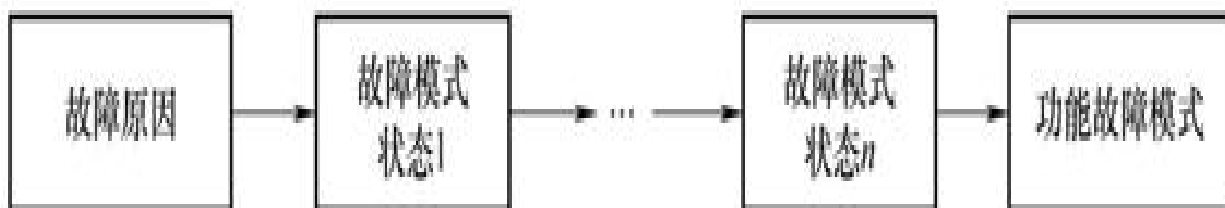
则称随机过程 $\{X, T\} = \{(X_n, T_n), n \geq 0\}$ 为状态空间 S 上的马尔科夫更新过程。其中

$$Q_{ij}(t) = P[X_{n+1}=j, T_{n+1}-T_n \leq t \mid X_n=i] \quad (3-2)$$

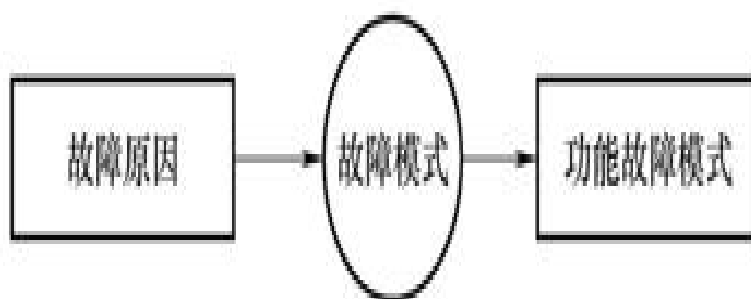
被定义为半马尔科夫核。

若 $\{X, T\} = \{(X_n, T_n), n \geq 0\}$ 为马尔科夫更新过程，则 $Y_t = X_n$ ， $t \in [T_n, T_{n+1}]$ 即为半马尔科夫过程。半马尔科夫过程对状态停留时间的分布没有要求，可以为任意分布，当其指数分布时，半马尔科夫过程就是连续时间的马尔科夫链。

获取故障概率的核心是量化关键事件与领结模型左侧原因节点和右侧后果节点间的概率关系，首先需要对领结模型左侧和右侧的结构进行简化。图3-9描述了领结模型化简后的基本结构，更复杂的情况一般可由这两种基本结构组成。



a) 存在劣化过程



b) 不存在劣化过程

图3-9 领结模型的一般化简结构

在获得领结模型的化简结构后，下一步工作是量化其中的因果关系。本任务采用半马尔科夫过程描述其中的劣化过程，如图3-10所示。

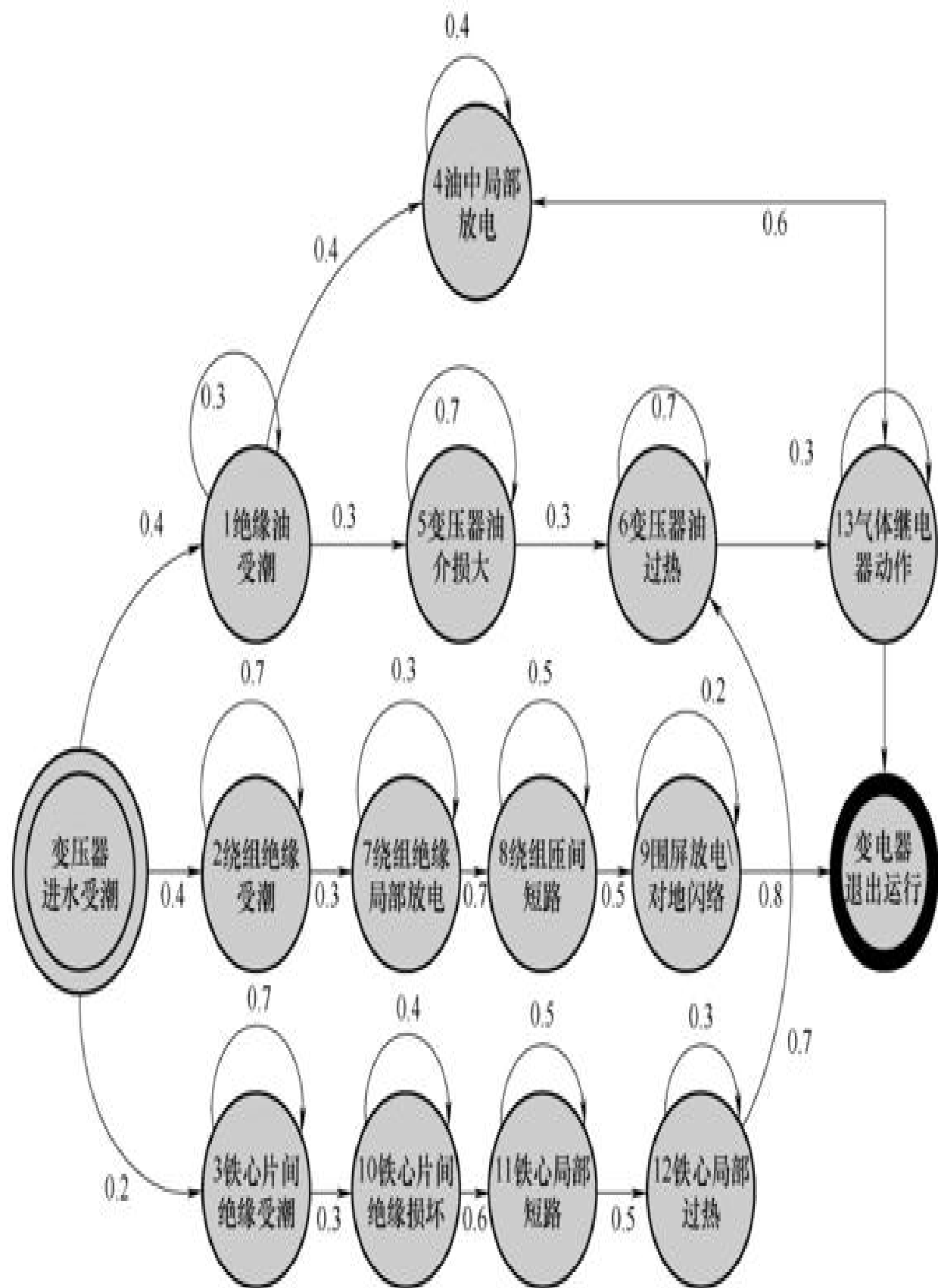


图3-10 变压器受潮故障马尔科夫链

本任务假设输变电设备在劣化状态停留时间的概率密度分布为威布尔分布，由此形成了半马尔科夫过程中常见的模型形式Weibull-Markov模型，如图3-11所示。在获取Weibull-Markov模型中的参数后，即可根据半马尔科夫过程的数值求解过程获取各个时刻输变电设备处于每个状态的概率，得到输变电设备风险中的故障概率因素。

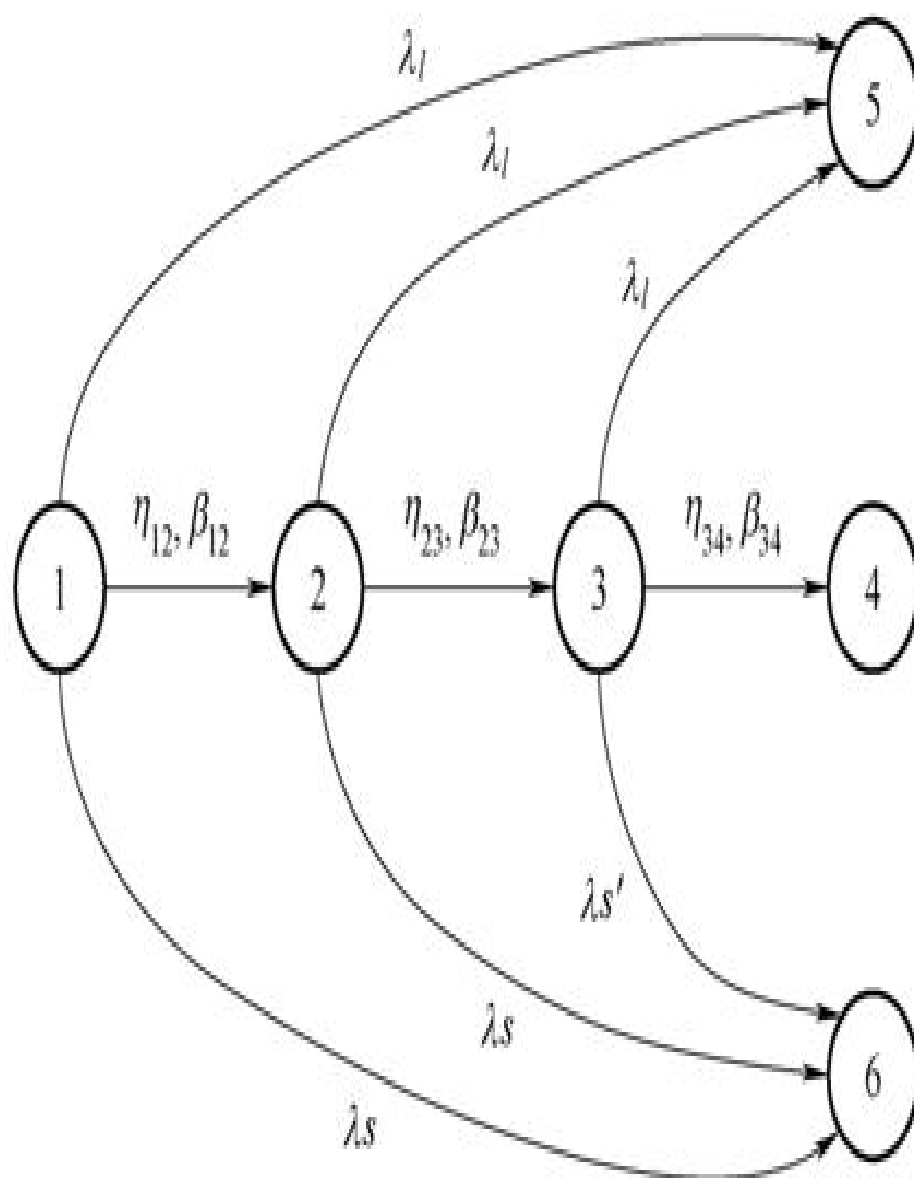
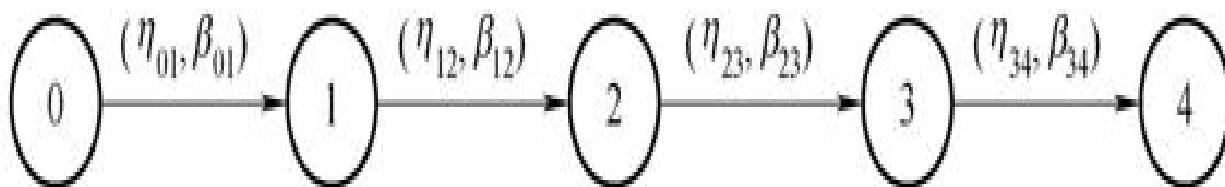


图3-11 领结模型对应的半马尔科夫过程模型

Weibull-Markov风险模型的故障后果即为维修各状态所需费用。首先依据经验估算状态的维修时间类别，然后查找维修时间类别对应的维修费用。故障维修时间与领结模型左侧的故障原因密不可分，在确定维修时间类别后，即可获得对应的维修费用。某变压器绕组过热引起短路故障的维修费用估算见表3-3。

表3-3 变压器绕组过热维修费用估算示例

故障模式	简化领结模型	绕组短路的维修时间分类	维修费用(欧元)
绕组过热	固有故障隐患—绕组过热—绕组绝缘老化—绕组短路	3	153000
	过载—绕组过热—绕组绝缘老化—绕组短路	更换	290000
	绝缘油散热不良—绕组过热—绕组绝缘老化—绕组短路	更换	290000

设备风险为故障概率和故障后果的乘积。通过以上分析获得了图3-11中输变电设备处于各状态的概率和各状态的维修费用后，根据式(3-3)即可获得设面临的运行风险：

$$R(t)=\sum_{i=1}^n P_i(t) \cdot C_i \tag{3-3}$$

式中， $R(t)$ 为在 t 时刻面临的运行风险的修复费用； n 为图3-11中的状态数； $P_i(t)$ 为在 t 时刻设备处于第 i 个状态的概率； C_i 为修复第 i 个状态所需的费用。

图3-12描述了风险预测的流程，其中灰色填充部分为该步骤的理论基础。

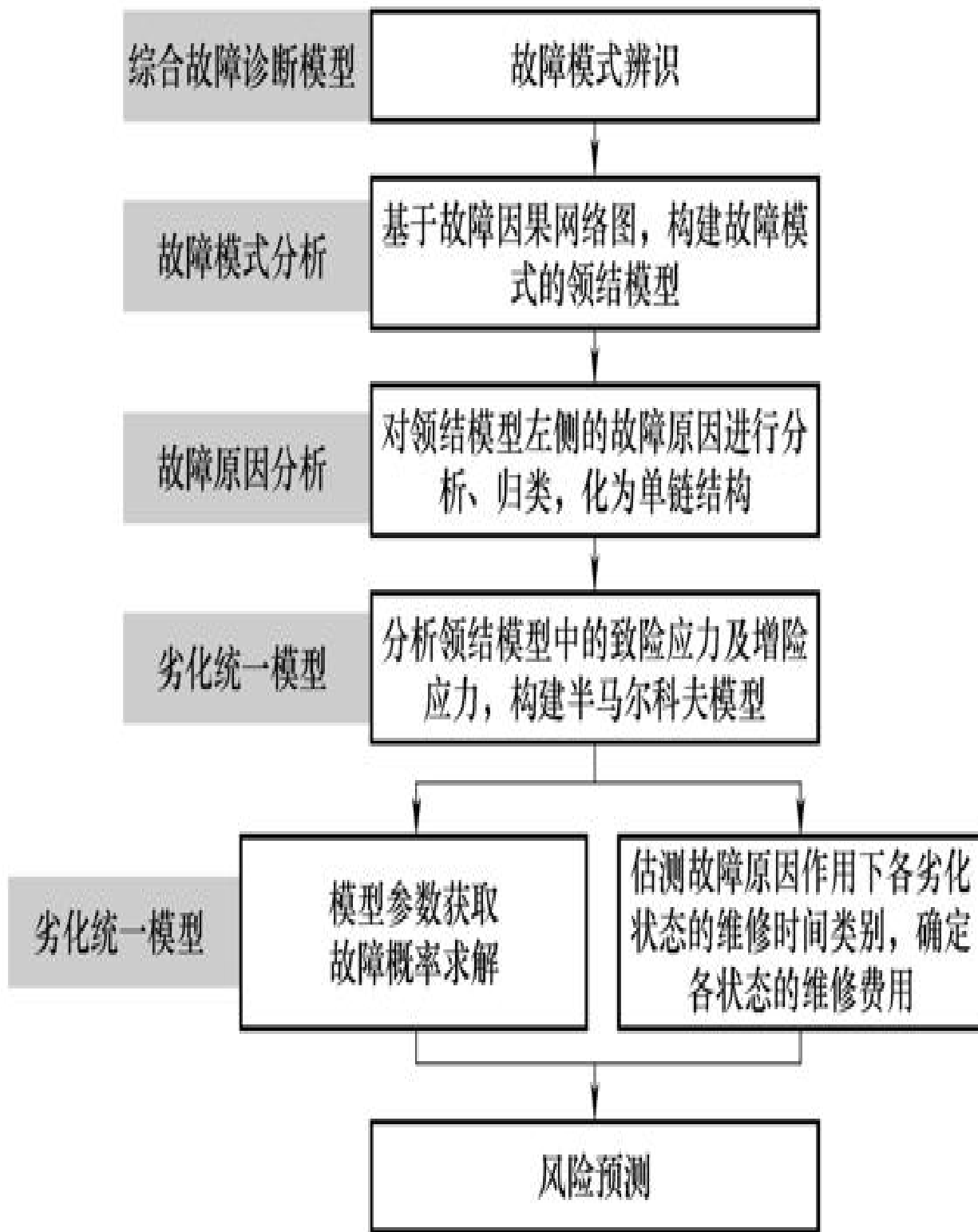


图3-12 基于领结模型的动态风险预测流程图

(3) 自然灾害因子预测方法

自然灾害包括山火、雷电、沙暴、台风、地震、覆冰等，都可能对电网和输变电设备带来巨大损失。本任务建立了变电站及输电线路的危险点信息库，提出了灾害因子的发展趋势和移动路径的预测方法，实现了雷电和覆冰的早期预警。

1) 雷电预测。

本任务基于雷电定位系统历史与实时数据建立了输电线路雷击概率和输电线路闪络概率的实时预测方法：首先将落雷区域划分为 $0.01^{\circ} \times 0.01^{\circ}$ （约 1km^2 ）网格单元，并结合地理坐标确定网格参数，利用DBSCAN算法剔除噪声点，利用多项式拟合预测未来雷云移动路径，利用反距离加权插值算法预测相应时刻雷云的覆盖区域，并根据引雷宽度、区域地形、是否易击点等数据预测每个网格内输电线路的雷击概率和跳闸概率。

雷云趋势预测：

本任务通过计算近10组雷电监测数据所占地理网格的数量和形状变化，预测下一时间段雷云形态变化趋势；通过拟合6组数据“质心网格”的运动轨迹，预测雷云路径。首先根据雷云路径拟合曲线求得该时刻雷云网格质心的地理坐标，然后将最后一时间段网格结构数据按照雷云路径拟合曲线进行计算，得到新的一组结构数据，然后进行反距离加权插值法确定落雷区域与区域内所有网格的落雷数量与雷电流赋值平均值，从而预测雷云趋势。

雷击概率预测：

本任务用引雷宽度 C_w 来描述落雷点与线路水平距离对线路雷击概率的影响，用网格易击系数 C_p 来描述地形与是否易击点和易击段对线路雷击概率的影响。

图3-13为线路雷击示意图，图中共有1#、2#、3#、4#、5#五座杆塔，用X表示，杆塔间相连的线段代表线路，·代表落雷点，矩形EFHG代表某网格，矩形ABCD代表引雷区域，线段 O_1O_2 代表引雷宽度。

引雷宽度 C_w 是描述输电线路及其附属设施（包括杆塔、避雷线）遭受雷击近乎必然事件的最小水平距离，如图3-13中 EF 所示。易知：

$$C_w = l_{AB} + 2r_s \quad (3-4)$$

式中， l_{AB} 为A、B相导线水平距离（m）； r_s 为击距（m）。

易击系数 C_p 是引雷宽度内落雷密度与网格内其他区域落雷密度之比， C_p 综合了地形与线路是否易击段对线路遭受雷击概率的影响，在地理跨度不大的情况下，可以较准确描述在引雷区域面积与非引雷区域面积相同情况下某高压输电线路雷击概率大小。当发生一次落雷时，线路遭受雷击概率：

$$P'_t = \frac{C_w \times l}{S_g} \times C_p \quad (3-5)$$

式中， P'_t 为线路遭受单次雷击概率； l 为线路在网格内的长度； S_g 为网格内总面积； C_w 、 C_p 为线路2-3在该网格内的引雷宽度与易击系数。

因此线路2-3遭受单次雷击概率为

$$P'_{l(2-3)} = \frac{C_w \times l}{S_g} \times C_p = \frac{O_1 O_2 \times AD}{EF \times EG} \times C_{p(2-3)} \quad (3-6)$$

式中， $P'_{t(2-3)}$ 为线路2-3遭受单次雷击概率； $C_{p(2-3)}$ 为线路2-3在该网格内的易击系数。

假设线路2-3所在网格在未来某时刻预测将发生N次落雷，则线路2-3引雷区域内的落雷数量为

$$N(l_{2-3}) = N \times \frac{C_w \times l}{S_g} \quad (3-7)$$

式中， $N(l_{2-3})$ 为线路2-3引雷区域内的落雷数量，由此可以确定雷击概率。

2) 覆冰预测。

这里研究了输电线路覆冰过程预测的数据驱动模型，如图3-14所示。该模型可以充分利用在线的实时数据和丰富的离线历史数据，定性和定量地对覆冰过程进行预测。定性预测模型采用基于粒子群及SOM聚类的输电线路覆冰过程微气象特征提取方法，克服了输电线路覆冰负荷预测及预警定性模型中主要依靠人工经验确定气象特征参数的弊端；定量预测模型基于Takens相空间理论和SVM的机器学习方法，建立了覆冰过程混沌时间序列模型，实现了覆冰的定量预测。

①覆冰过程微气象特征提取与定性预测模型。

本任务提出了基于Kohonen的自组织图（Self-Organizing Map, SOM）及粒子群（Particle Swarm Optimization, PSO）聚类算法的输电线路覆冰过程微气象特征提取模型，数据来源于滇东北大镇线覆冰监测，模型结构如图3-15所示。

具体实现步骤如下：

Step1: 对参与聚类的变量, 包括微气象信息、时效因子与对应的覆冰负荷数据进行相关分析, 剔除与覆冰过程相关性小的变量, 降低聚类数据的维度;

Step2: 基于粒子群聚类算法, 对微气象信息、时效因子与对应的覆冰负荷数据等过程信息进行自动分类;

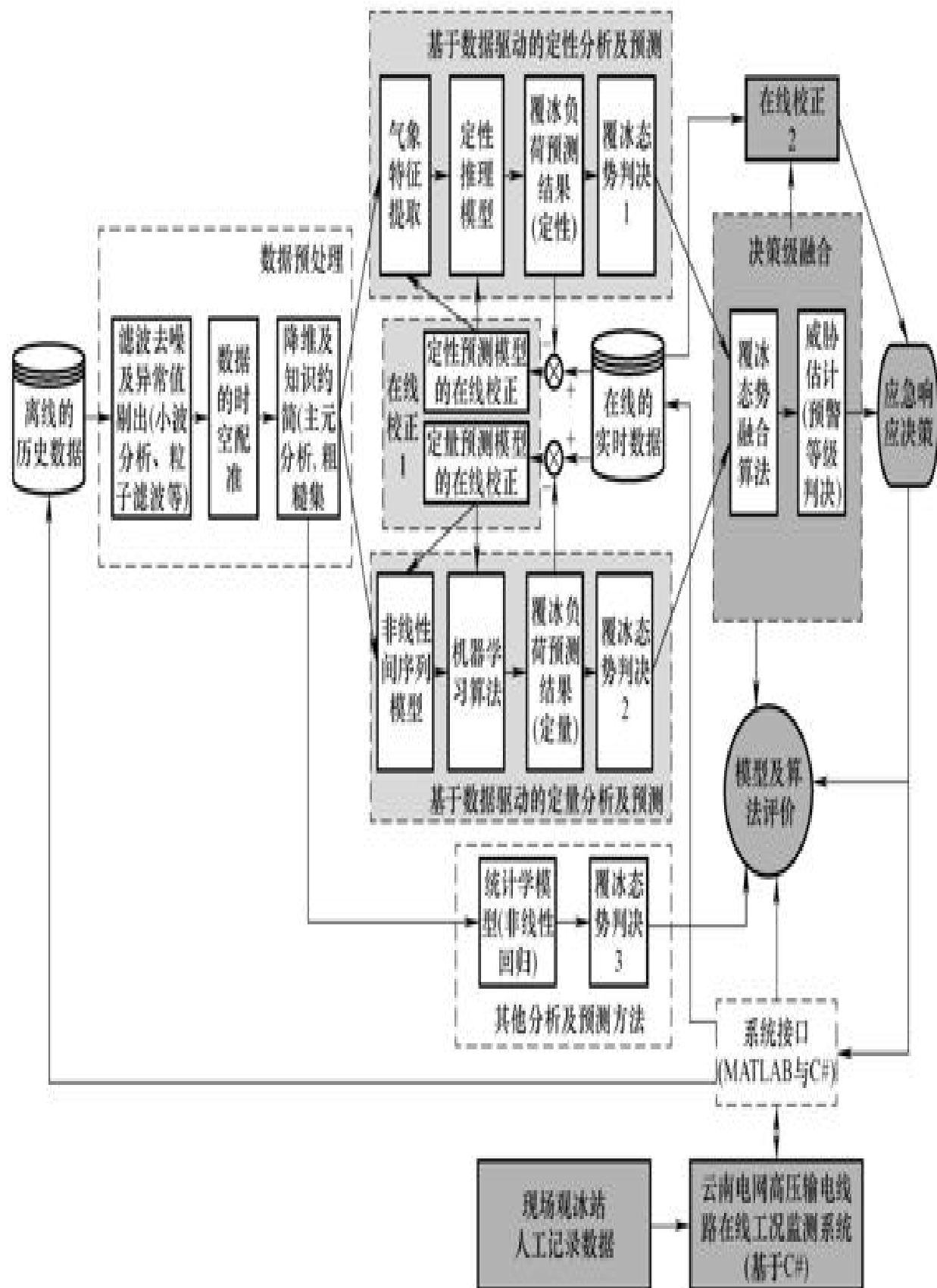


图3-14 基于数据驱动的覆冰过程预测模型

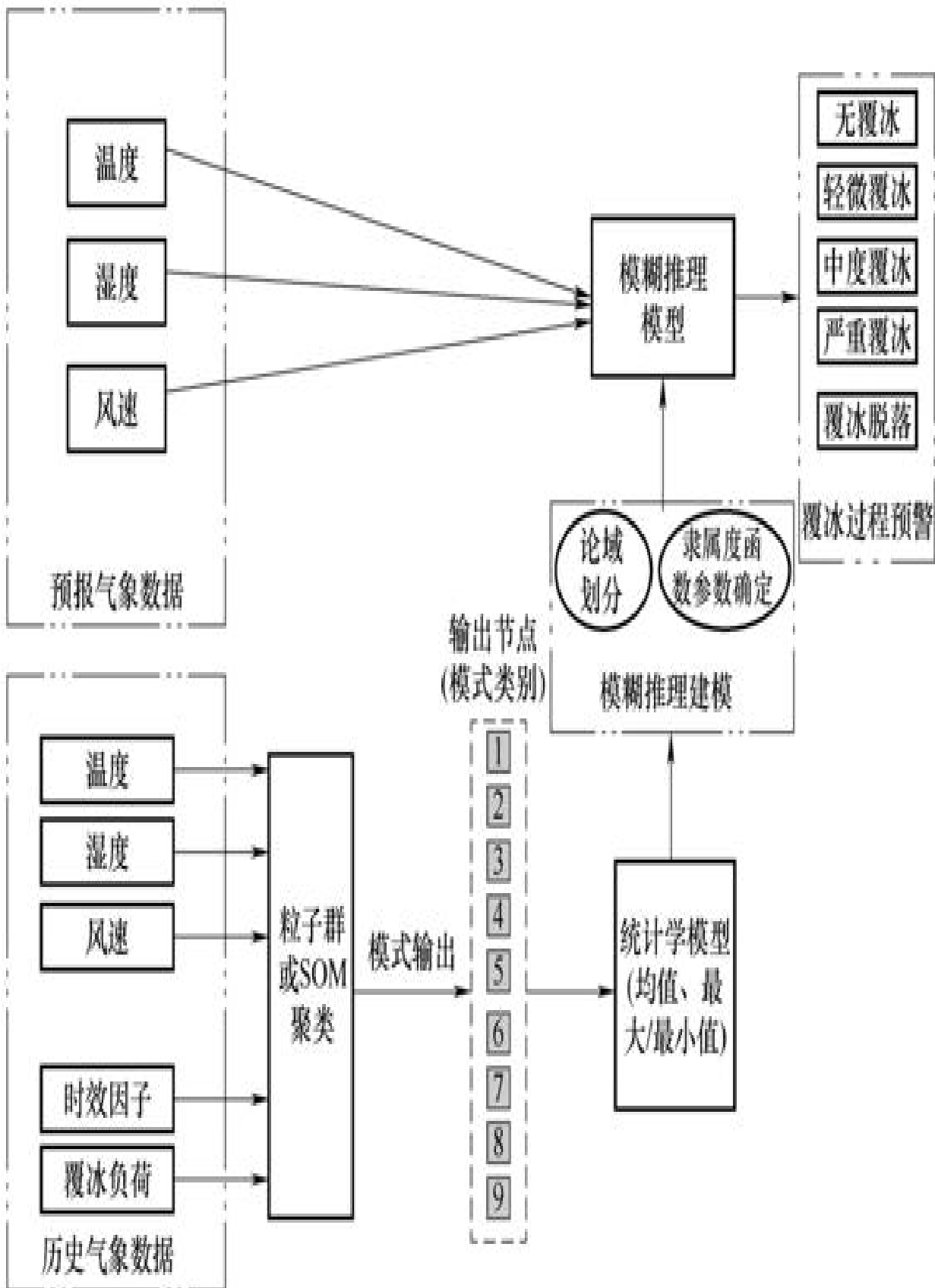


图3-15 覆冰过程微气象特征提取与定性预测模型

Step3: 通过统计学模型计算微气象信息的特征数据, 包括温度、湿度、日照等的平均值、最大值、最小值;

Step4: 依据微气象特征数据, 确定覆冰过程定性预测的模糊推理模型, 包括论域的划分、隶属度函数参数的确定等。

Step5: 依据覆冰过程定性预测结果, 结合该监测点对应的导线覆冰载荷设计标准, 得到覆冰预测信息。

②覆冰过程混沌时间序列模型。

输电线路的覆冰负荷会随时间的增加而快速增加, 特别是连续的冻雨天气, 输电线路的覆冰负荷达到杆塔设计冰载荷只需1至2天的时间。因此必须解决覆冰分析过程的时效性问题。

覆冰增长过程的状态方程如式(3-8)所示:

$$q'_w(k) = f(q_w(k-1), u(k-1)) \quad k=1, 2, \dots, n \quad (3-8)$$

输电线路覆冰状态过程是由 $u(k)$ 驱动的时间序列过程, 而 $u(k)$ 由微气象因子所决定, 主要包括环境温度、湿度、风速、风向、气压以及日照强度, 如式(3-9)所示。

$$u(t) = \Gamma(T_p(t), H(t), W_s(t), W_d(t), A_p(t), S_l(t)) \quad (3-9)$$

因此可以用如下的状态方程对覆冰过程进行描述。

$$q_w(k) = g(q_w(k-1), T_p(k-1), H(k-1), W_s(k-1), W_D(k-1), A_p(k-1), S_l(k-1)) \tag{3-10}$$

式中的变量定义见表3-4。

表3-4 变量定义表

单位覆 冰负荷	环境 温度	环境 湿度	风速	风向	气压	日照 强度	采样 时间	映射 函数
q_w	T_p	H	W_s	W_D	A_p	S_l	K	$g(\cdot)$

因此， k 时刻的输电线覆冰负荷是由 $k-1$ 时刻的微气象因子和覆冰负荷决定的，它是一个多变量的时间序列过程。

根据Takens嵌入定理及相空间重构理论，可以得到覆冰和微气象数据构成的多变量时间序列的关系式为

$$\begin{cases} q_w(n) = \Phi_1(V(n-k)) \\ T_p(n) = \Phi_2(V(n-k)) \\ \vdots \\ S_l(n) = \Phi_7(V(n-k)) \end{cases} \quad (3-11)$$

式中， $\Phi_i(\cdot)$ 是各时间序列从时间点 $n-k$ 到时间点 n 的非线性映射。因此 $q_w(n+k)$ 和 $V(n)$ 之间的映射关系可用式 (3-12) 来表示：

$$q_w(n+k) = \Phi_r(V(n)) \quad (3-12)$$

③基于SVM的覆冰负荷定量预测模型。

由覆冰过程混沌时间序列分析可知， n 时刻的覆冰重量与式 (3-12) 所示的重构相空间存在多变量的高维非线性映射 $\Phi_r(\cdot)$ ， $\Phi_r(\cdot)$ 可由各类机器学习方法等建立。其学习的目的是使式 (3-13) 的值达到最小。

$$\frac{1}{2} \sum_{n=1}^N [q_w(n) - \hat{\Phi}_r(V(n-k), T_p(n), H(n), S_l(n), W_s(n), A_p(n))]^2 \quad (3-13)$$

得到 $\phi_r(\cdot)$ 后，根据覆冰负荷定量估计与预测系统数据处理流程，可实现覆冰的在线定量预测。

2. 输变电设备全寿命周期过程优化管理技术

基于全景信息的输变电设备风险多维度动态预警技术包含基于统一劣化模型的设备寿命评估方法、输变电设备全寿命运维费用分析模型、全寿命周期关键指标体系、全寿命周期闭环管理机制等四方面的研究内容，将可靠性量化指标覆盖全寿命周期管理的各个环节，实现了输变电设备全寿命周期闭环管理。

(1) 基于统一劣化模型的设备寿命评估方法

本任务采用寿命损耗的概念将不同种类时变应力（热应力、电应力、机械应力、随机应力）对输变电设备的影响进行归一化处理，并在此基础上考虑多种应力的综合影响，提出了多老化时变应力作用下剩余寿命评估方法，使寿命评估结果更准确和符合实际。

多种时变应力作用下设备寿命的计算方法流程如下：

1) 将输变电设备运行时间段 t 划分为 n 个单位时间段 t_Δ ，记为 $t_1, t_2, \dots, t_n$ ，获取运行时间段 t 内受到的持续应力和随机应力，热应力以第一热点温度 $\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_n$ 表示，电应力以第一场强 $E_1, E_2, \dots, E_n$ 表示，机械应力以第一机械应力 $M_1, M_2, \dots, M_n$ 表示，过负荷冲击应力以输变电设备第二热点温度 $\theta_{o1}, \theta_{o2}, \dots, \theta_{ox}$ 和相应的过负荷冲击次数 $n_{o1}, n_{o2}, \dots, n_{ox}$ 表示，雷电冲击应力以第二电压 $U_{l1}, U_{l2}, \dots, U_{lx}$ 和相应的雷电冲击次数 $n_{l1}, n_{l2}, \dots, n_{lx}$ 表示，外部短路冲击应力以第二电流 $I_{s1}, I_{s2}, \dots, I_{sx}$ 和相应的短路冲击次数 $n_{s1}, n_{s2}, \dots, n_{sx}$ 表示。

2) 对热应力，根据阿伦纽斯模型，分别计算在第一热点温度 $\theta_1, \theta_2, \dots, \theta_n$ 下的输变电设备热使用寿命 $L_{\theta 1}, L_{\theta 2}, \dots, L_{\theta n}$ ：

$$L_{\theta} = a \exp\left(\frac{b}{\theta + 273}\right) \quad (3-14)$$

根据热使用寿命 $L_{\theta 1}, L_{\theta 2}, \dots, L_{\theta n}$, 计算得到输变电设备在时段 t 内由于热应力引起的热寿命损耗 d_{θ} 为

$$d_{\theta} = \frac{t_{\Delta}}{L_{\theta 1}} + \frac{t_{\Delta}}{L_{\theta 2}} + \dots + \frac{t_{\Delta}}{L_{\theta n}} \quad (3-15)$$

对电应力, 根据反幂模型, 分别计算在第一场强 $E_1, E_2, \dots, E_n$ 下的输变电设备电使用寿命 $L_{E1}, L_{E2}, \dots, L_{En}$:

$$L_E = c(E/E_0)^{-Z} \quad (3-16)$$

根据电使用寿命 $L_{E1}, L_{E2}, \dots, L_{En}$, 计算得到输变电设备在时段 t 内由于电应力引起的电寿命损耗 d_E 为

$$d_E = \frac{t_{\Delta}}{L_{E1}} + \frac{t_{\Delta}}{L_{E2}} + \dots + \frac{t_{\Delta}}{L_{En}} \quad (3-17)$$

对机械应力, 根据反幂模型, 分别计算在第一机械应力 $M_1, M_2, \dots, M_n$ 下的输变电设备机械使用寿命 $L_{M1}, L_{M2}, \dots, L_{Mn}$:

$$L_M = e(M/M_0)^{-f} \quad (3-18)$$

根据机械使用寿命 L_{M1} , L_{M2} , $\dots$, L_{Mn} , 计算得到输变电设备在时段 t 内由于机械应力引起的机械寿命损耗 d_M 为

$$d_M = \frac{t_\Delta}{L_{M1}} + \frac{t_\Delta}{L_{M2}} + \dots + \frac{t_\Delta}{L_{Mn}} \quad (3-19)$$

对过负荷冲击应力, 根据阿伦纽斯模型, 计算输变电设备在第二热点温度 θ_{o1} , θ_{o2} , $\dots$, θ_{ox} 下可承受的总过负荷次数 N_{o1} , N_{o2} , $\dots$, N_{ox} 。

然后, 根据可承受的总过负荷次数 N_{o1} , N_{o2} , $\dots$, N_{ox} , 计算得到输变电设备在时段 t 内由于过负荷冲击应力引起的过负荷冲击寿命损耗 $d_{\theta o}$ 为

$$d_{\theta o} = \frac{n_{o1}}{N_{o1}} + \frac{n_{o2}}{N_{o2}} + \dots + \frac{n_{ox}}{N_{ox}} \quad (3-20)$$

对雷电冲击应力, 根据已有的输变电设备 $U-M$ 曲线, 得到输变电设备在第二电压 U_{l1} , U_{l2} , $\dots$, U_{lx} 下可承受的总雷电冲击次数 N_{l1} , N_{l2} , $\dots$, N_{lx} 。

然后, 根据可承受的总雷电冲击次数 N_{l1} , N_{l2} , $\dots$, N_{lx} , 计算得到输变电设备在时段 t 内由于雷电冲击应力引起的雷电冲击寿命损耗 d_{l1} 为

$$d_{ul} = \frac{n_{l1}}{N_{l1}} + \frac{n_{l2}}{N_{l2}} + \cdots + \frac{n_{lx}}{N_{lx}} \quad (3-21)$$

对外部短路冲击应力，根据已有的输变电设备 $I-N$ 曲线，得到输变电设备在第二电流 I_{s1} ， I_{s2} ， $\cdots$ ， I_{sx} 下可承受的总短路冲击次数 N_{s1} ， N_{s2} ， $\cdots$ ， N_{sx} 。

然后，根据可承受的总短路冲击次数 N_{s1} ， N_{s2} ， $\cdots$ ， N_{sx} ，计算得到输变电设备在时段 t 内由于外部短路冲击应力引起的短路冲击寿命损耗 d_{ls} 为

$$d_{ls} = \frac{n_{s1}}{N_{s1}} + \frac{n_{s2}}{N_{s2}} + \cdots + \frac{n_{sx}}{N_{sx}} \quad (3-22)$$

在时段 t 内，由所有应力引起的输变电设备寿命损耗为

$$d = d_{\theta} + d_E + d_M + d_{\theta_0} + d_{ul} + d_{ls} \quad (3-23)$$

3) 计算 $T_k = T_{k-1} + t$ ($k=1, 2, \cdots, n$) 时刻，输变电设备的累积寿命损耗 $D_k = D_{k-1} + d$ ($k=1, 2, \cdots, n$)，对 D 进行判断，若 D 大于 1，则表明输变电设备使用寿命到期，即输变电设备的估算寿命为 $L = T$ ；若 D 小于 1，则表明输变电设备使用寿命未到期，重复步骤 2) ~ 步骤 3)，直到输变电设备使用寿命终止。

其计算机的流程实现如图 3-16 所示。

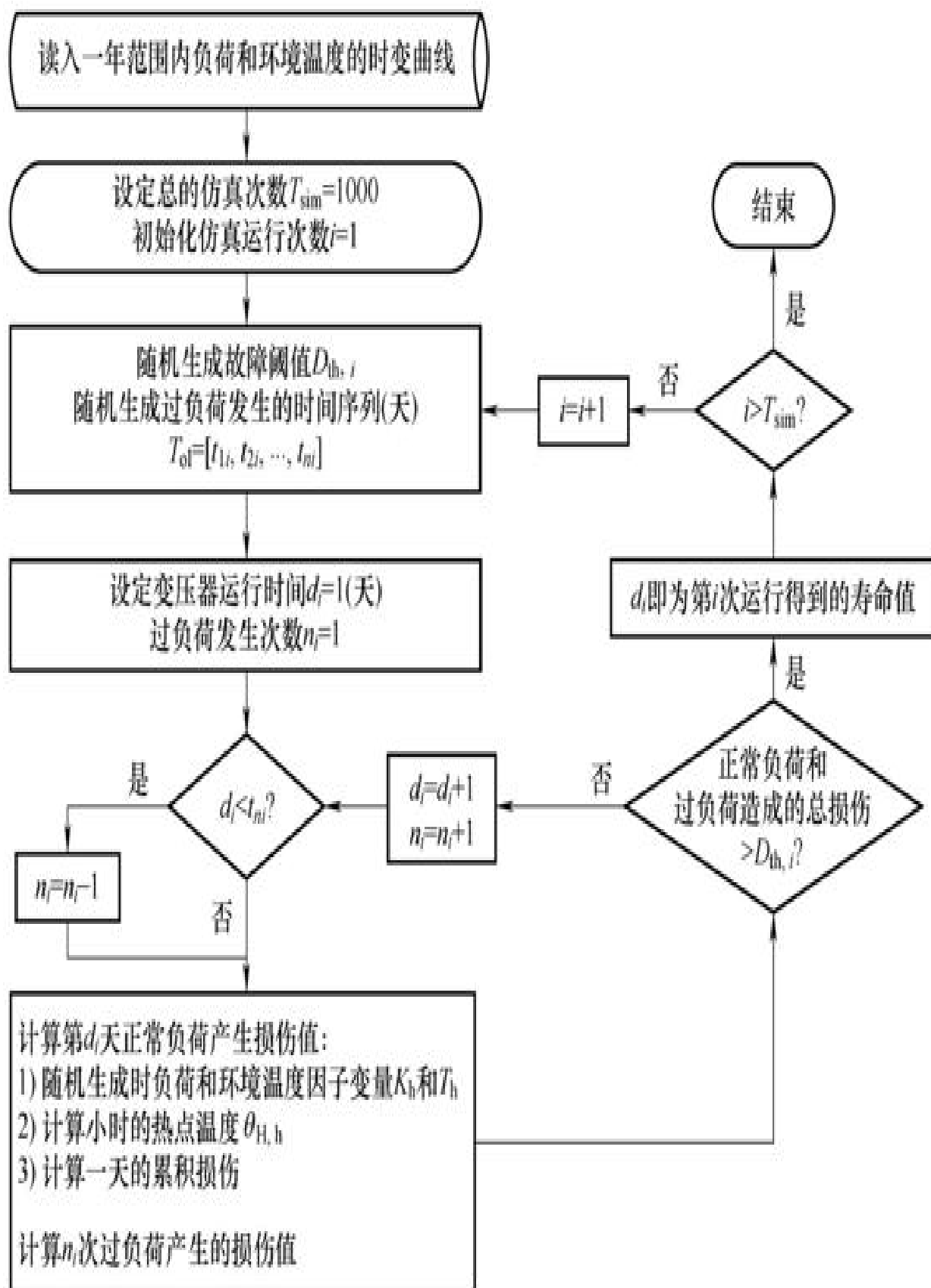


图3-16 累积损伤下的寿命评估流程

(2) 输变电设备全寿命运维费用分析模型

若认为输变电设备仅有运行和停运两种状态，则一个维修周期中总费用应该由两部分组成：日常维护和计划停运过程中预防性维修期间的费用（ C_p ），以及故障预警或者事故后的非计划停运期间的费用（ C_F ）。因此总维修费用为

$$C_s(T) = C_p + C_F \int_0^T \lambda(t) dt \quad (3-24)$$

式中， $\lambda(T)$ 为故障率； C_p 为预防性维修的费用； C_F 为非计划停运时的维修费用。

因为求解最佳预防性维修周期的目标函数是单位时间的维修费用，所以，需要通过总费用及周期时间计算单位时间费用函数 $C(T)$ ：

$$C(T) = \text{一个周期的总费用} / \text{周期时间} = C_s(T)/T \quad (3-25)$$

结合电力变压器维修周期模型，可得单位时间的维修费用为

$$C(T) = C_p + C_F \int_0^T \lambda(t) dt / T \quad (3-26)$$

式中， C_p 为每次计划停运维修平均费用； C_F 为每次非计划停运维修平均费用； $\lambda(t)$ 为故障率。

$C(T)$ 计算式的分母部分表示在该维修周期内设备的平均工作时间；分子表示该维修周期内的总维修费用，其中前一项表示计划停运部分，后一项表示非计划停运部分，二者在总费用中所占的比重与设备的可靠度函数有关，随着时间 T 的加长，非计划停运所占费用的比例加大。

以 $C(T)$ 为目标函数，认为满足 $C(T)$ 最小的 T 值为最佳维修周期 T^* 。对单位时间维修费用 $C(T)$ 进行求导，令

$$\frac{dC(T)}{dT} = 0 \quad (3-27)$$

经过整理可得最佳维修周期 T^* 满足

$$T\lambda(T) - \int_0^T \lambda(t) dt = \frac{C_P}{C_F} = k \quad (3-28)$$

式中， $\lambda(t)$ 为故障率函数； k 为费用系数 ($k = C_P/C_F$)。

当设备运行时间服从威布尔分布时，故障率

$$\lambda(t) = \frac{m}{t_0} t^{m-1} \quad (3-29)$$

将上述的威布尔分布的故障率表达式代入总维修费用公式，可得

$$T^* = \left[\frac{t_0 C_p}{(m-1) C_F} \right]^{\frac{1}{m}} \quad (3-30)$$

与最大可用度原则获得的最佳维修周期方程相似，最小维修费用原则下，对于早期故障期和偶然故障期，单位时间的维修费用也无解，而对于耗损故障期，由于故障率 $\lambda(t)$ 为增函数（威布尔分布时 $m>1$ ），最佳维修周期 T^* 有确定解。也就是说，最小维修费用原则和最大可用度原则都仅适用于耗损故障期。

输变电设备两种维修周期确定原则所对应的可靠性、维修性和经济性指标，可归纳如表3-5所示。

表3-5 预防性维修周期确定原则对应的指标

维修确定原则	可靠性指标	指标名称	意义
最大可用度	$\lambda(t)$	故障率	可靠性
	t_1	平均计划停运时间	维修性
	t_2	平均非计划停运时间	维修性
最小维修费用	$\lambda(t)$	故障率	可靠性
	t_1	平均计划停运时间	维修性
	t_2	平均非计划停运时间	维修性
	C_p	平均计划停运费用	经济性
	C_f	平均非计划停运费用	经济性

为了获取设备电力变压器的上述相关指标，考虑了以下三点：①维修性指标 t_1 和 t_2 可充分、合理地利用电力部门已有的可靠性数据，直接从电力部门发布的统计资料中获得；②可靠性指标 λ 需自行统计，应针对输变电设备的可维修性特点进行；③经济性指标 C_p 和 C_f 应根据电力变压器的运行和维修实际，针对一个维修周期进行费用分析，从而较为准确地获得有关的停运费用。

（3）全寿命周期关键指标体系

本任务建立了全寿命周期管理体系、技术体系和执行体系，通过精细化和科学化管理，提高设备检修的针对性和有效性，提高设备完好率和利用率，如图3-17中椭圆标注的为关键因素。

输变电设备全寿命周期关键指标体系层级结构如图3-18所示。决策层确定可靠性、经济性和社会影响三类企业目标；管理层将目标分解，即可靠性、维修性、保障性和费用，确保检修工作的目标和企业目标的一致性，使检修工作有效、更具针对性；执行层涉及设备运维检修的各方面信息。

通过制定从执行层到管理层和决策层的数据信息反馈机制，定期评估KPI值，不断改进检修策略，如图3-19所示。

（4）全寿命周期闭环管理机制

建立了基于关键组部件失效机理和家族缺陷的设备可靠性关联分析方法，提出了对设备采购、基建、运行、维护、技改退役各业务环节中影响设备安全服役主要因素的控制策略，形成了输变电设备全寿命周期闭环管理机制，如图3-20所示。

输变电设备全寿命周期管理系统的功能包括输变电设备状态监视、环境监视、异常预警、智能诊断、状态评价、风险预测、检修决策、绩效评估等功能，涉及多个技术管理部门，其所关心的技术经济指标有较大差异，管理流程和侧重点相互独立，典型的采购、基建、运维流程如图3-21～图3-23所示。

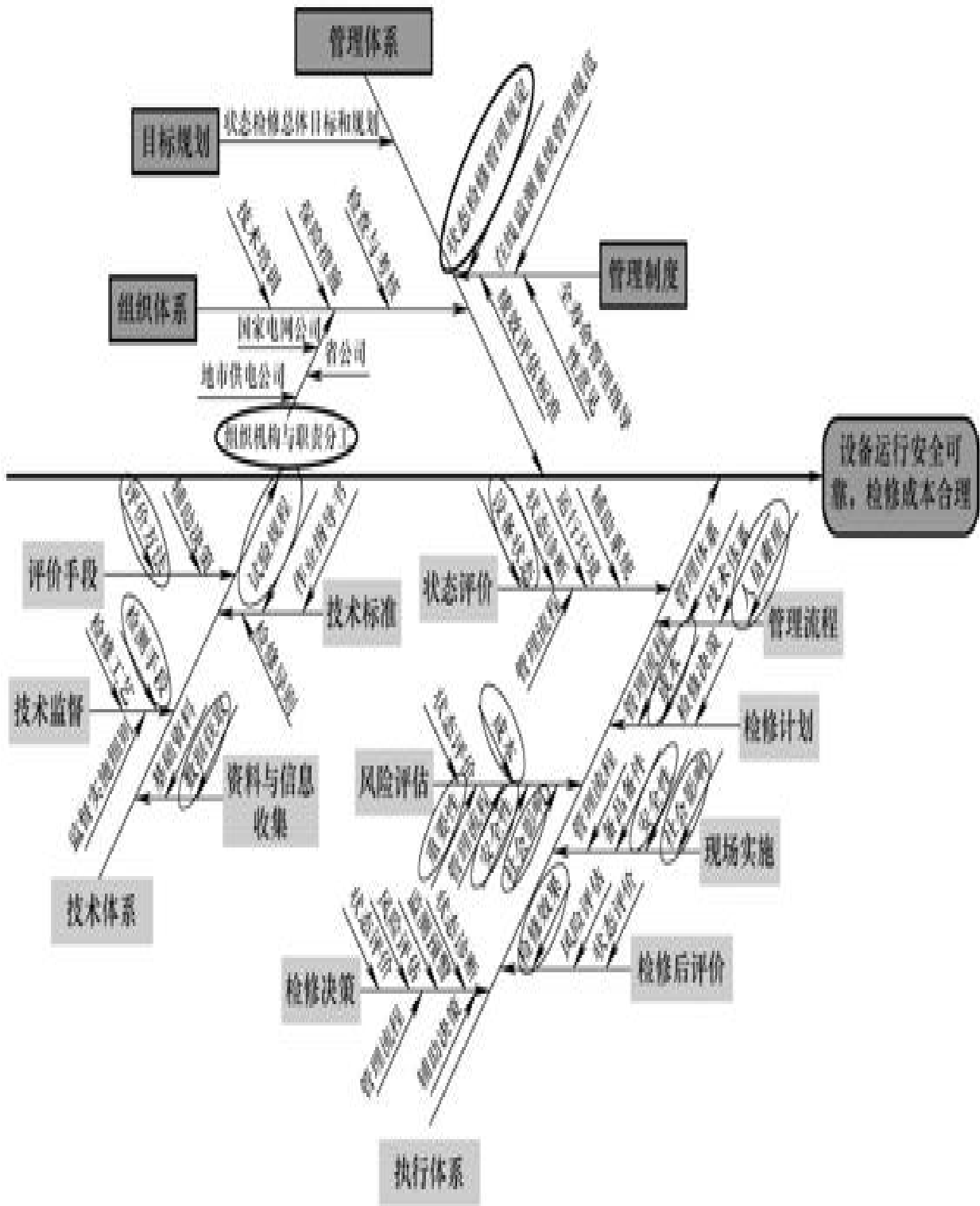


图3-17 设备全寿命周期关键指标体系



图3-18 从执行层到管理层和决策层的数据信息反馈机制

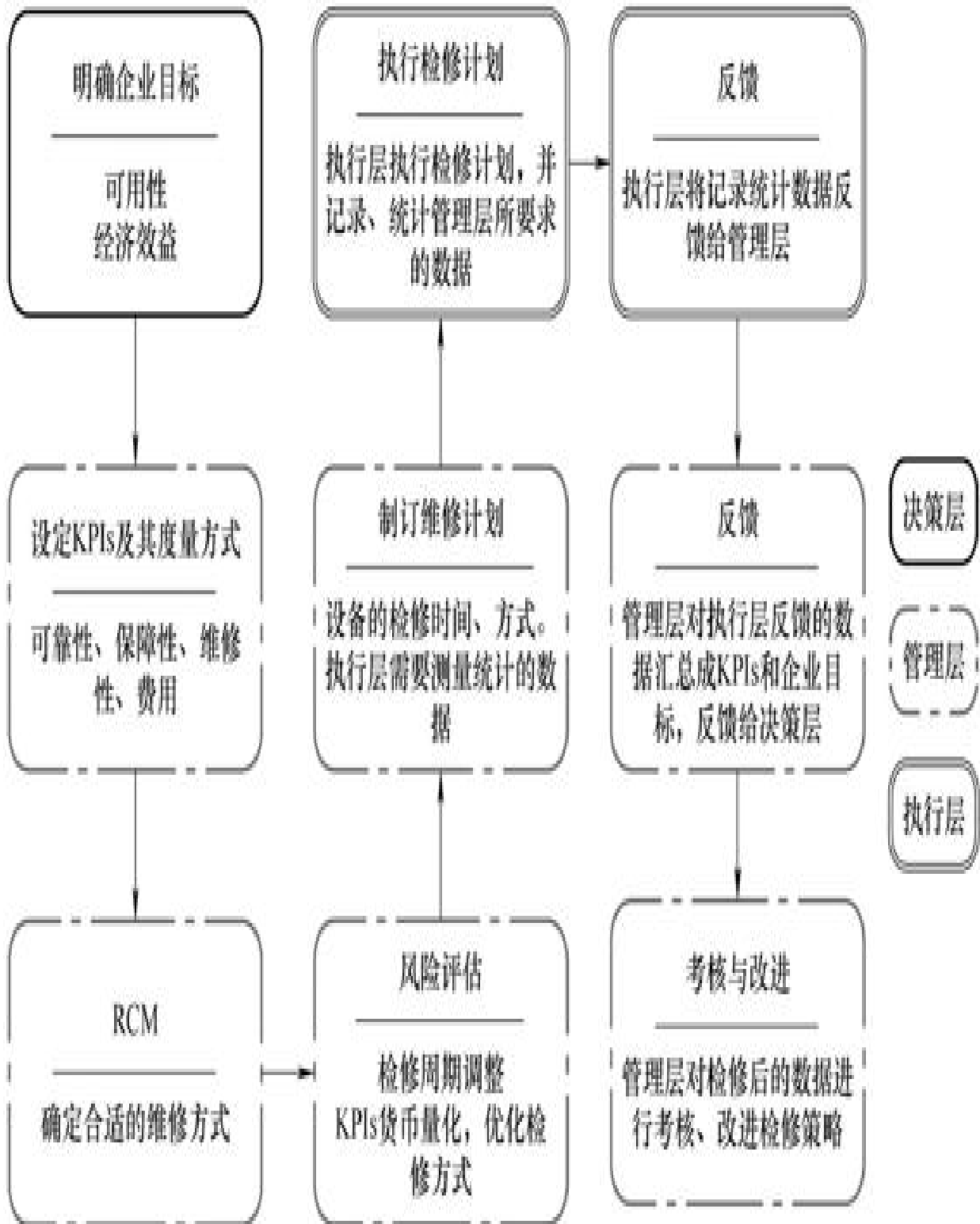


图3-19 定期评估KPI值，不断改进检修策略

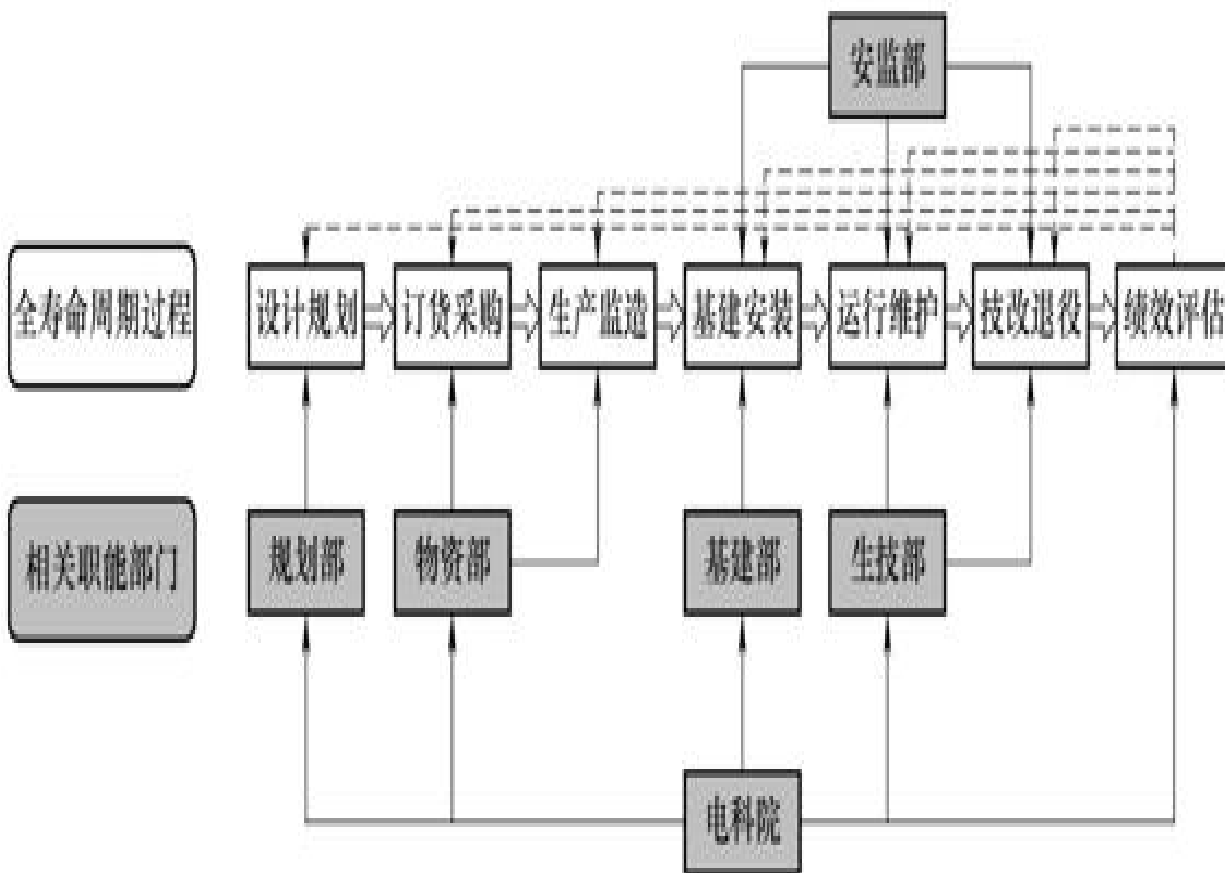


图3-20 全寿命周期闭环管理

3. 基于物联网的运维协同管控策略

(1) 全方位运行风险防控策略

提出了基于风险源综合辨识和分级防控的云南电网全寿命周期运维管理策略，建立了基于环境风险预测的重点管控设备应急防控方案，如图3-24所示。

建立了输变电设备运维、检修、更换、故障等成本分析模型，结合成本分析模型的研究，提出了输变电设备绩效评估方法，如图3-25所示。

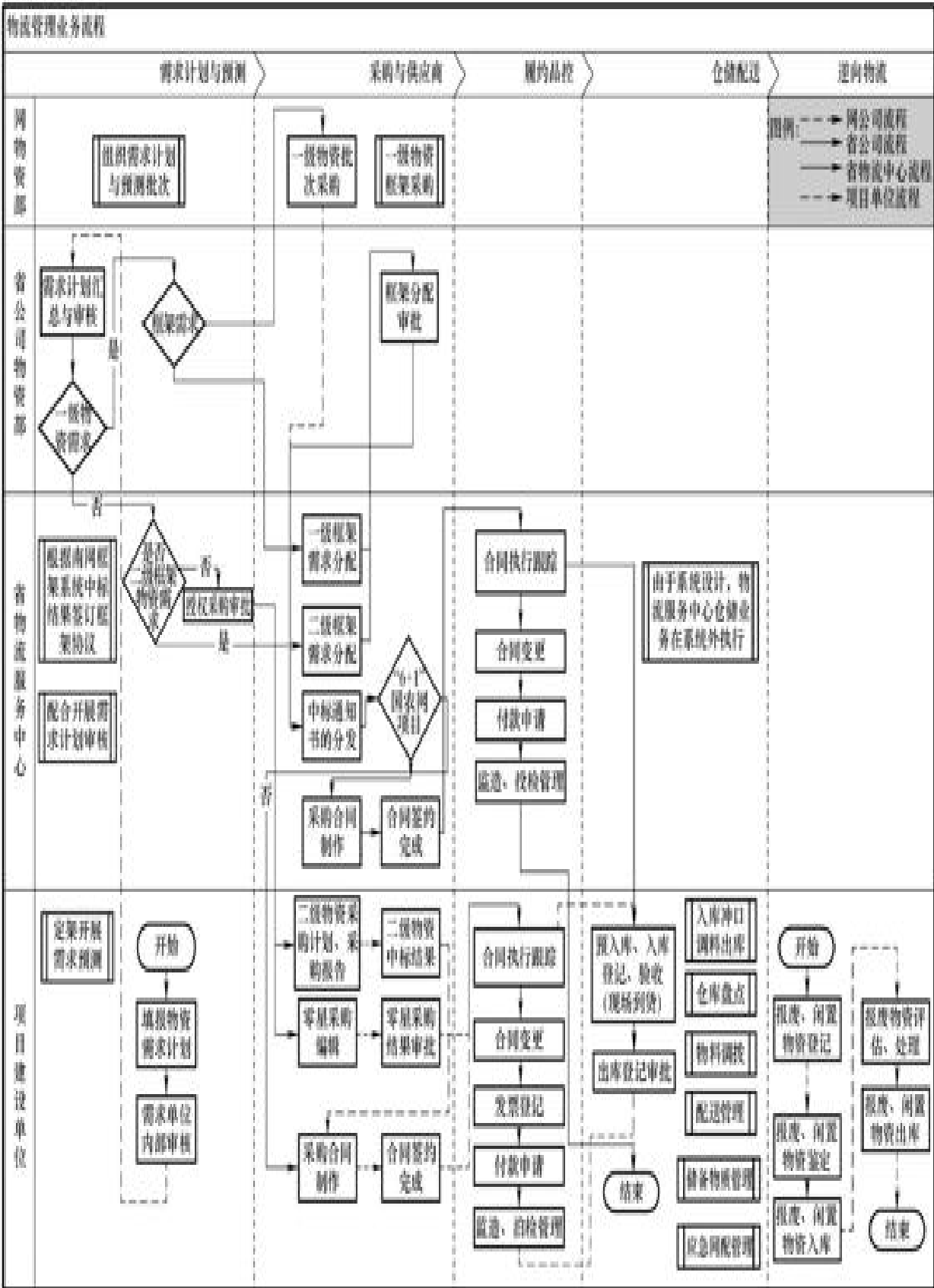


图3-21 全寿命物资采购流程管理



图3-22 全寿命周期建设工程流程管理

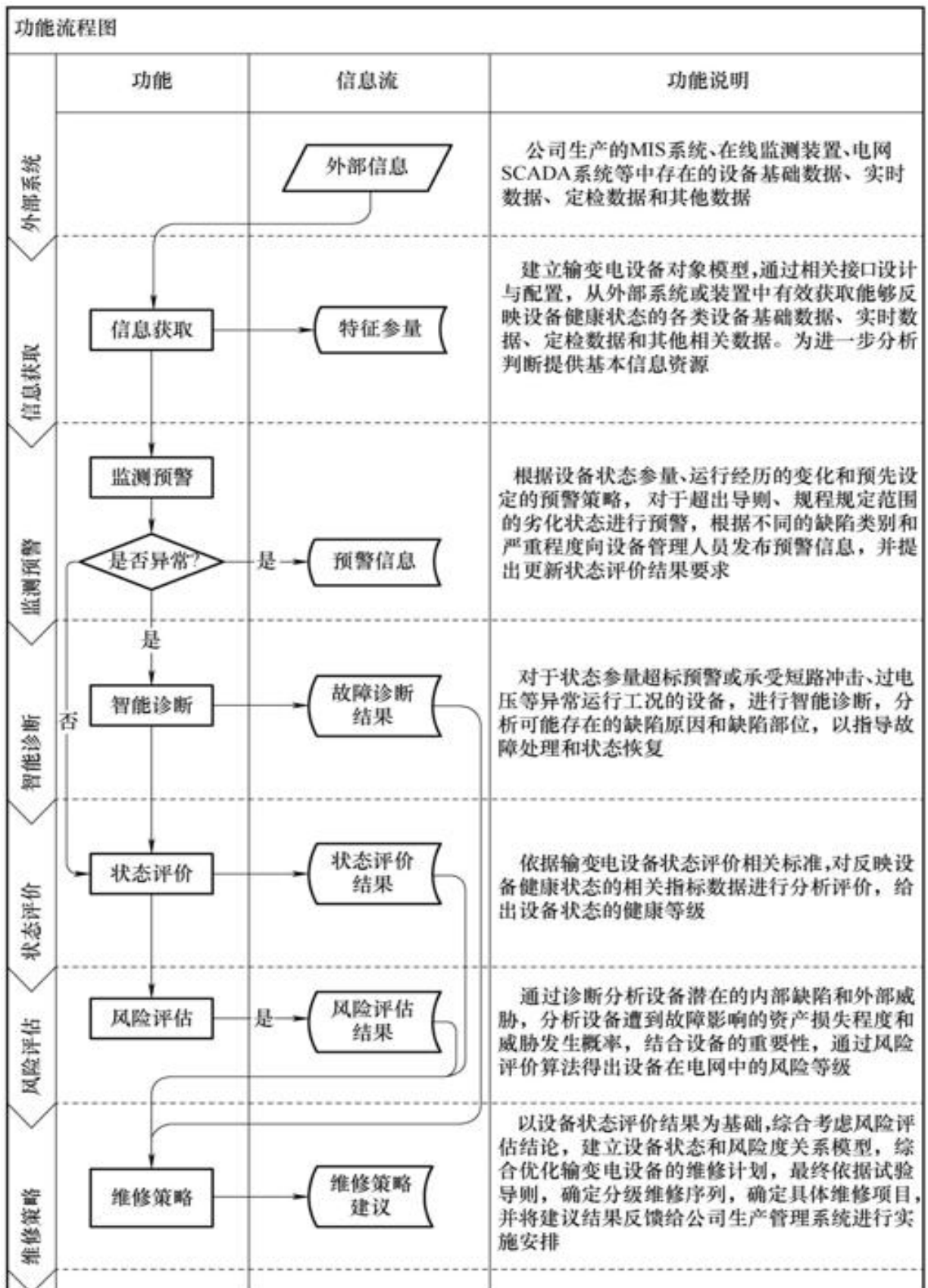


图3-23 全寿命周期运维流程管理

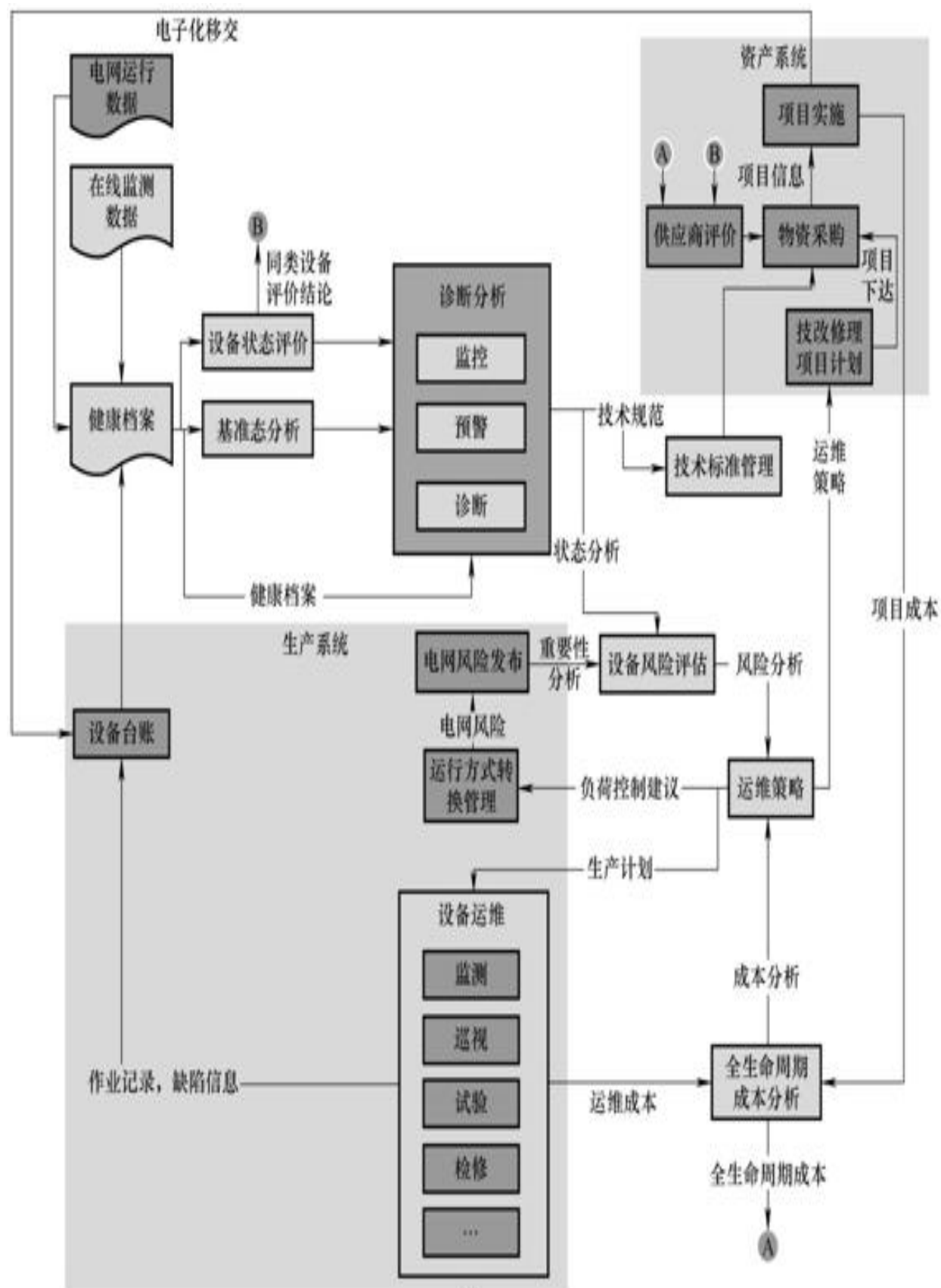


图3-24 全方位运行风险防范策略

（2）基于物联网的检修资源联动策略

应用目标识别、实时跟踪、风险分类和区域定位等相关物联网技术，建立了基于物联网的备品备件、物资人员的优化配置和协调联动策略，实现了对输变电设备检修资源的智能调配。

1) 设备关键组部件与备件库进行关联。

2) 记录设备各部件更换历史、缺陷及维修记录。

3) 记录备件的型号、厂家、储运年限、运输方式（车辆及道路要求）、安装方式、安装技术条件（含人员、装备）、状况及质量评价、备件存储地点、与相邻变电站设备的关联。

4) 针对电网的实时风险预测结果，建立应急预案。自动分析备料时间、运送时间（路线选择分析与导航系统交互）、安装调试时间以及投运时间。形成若干抢修方案，从时间和经济性两方面进行评估。

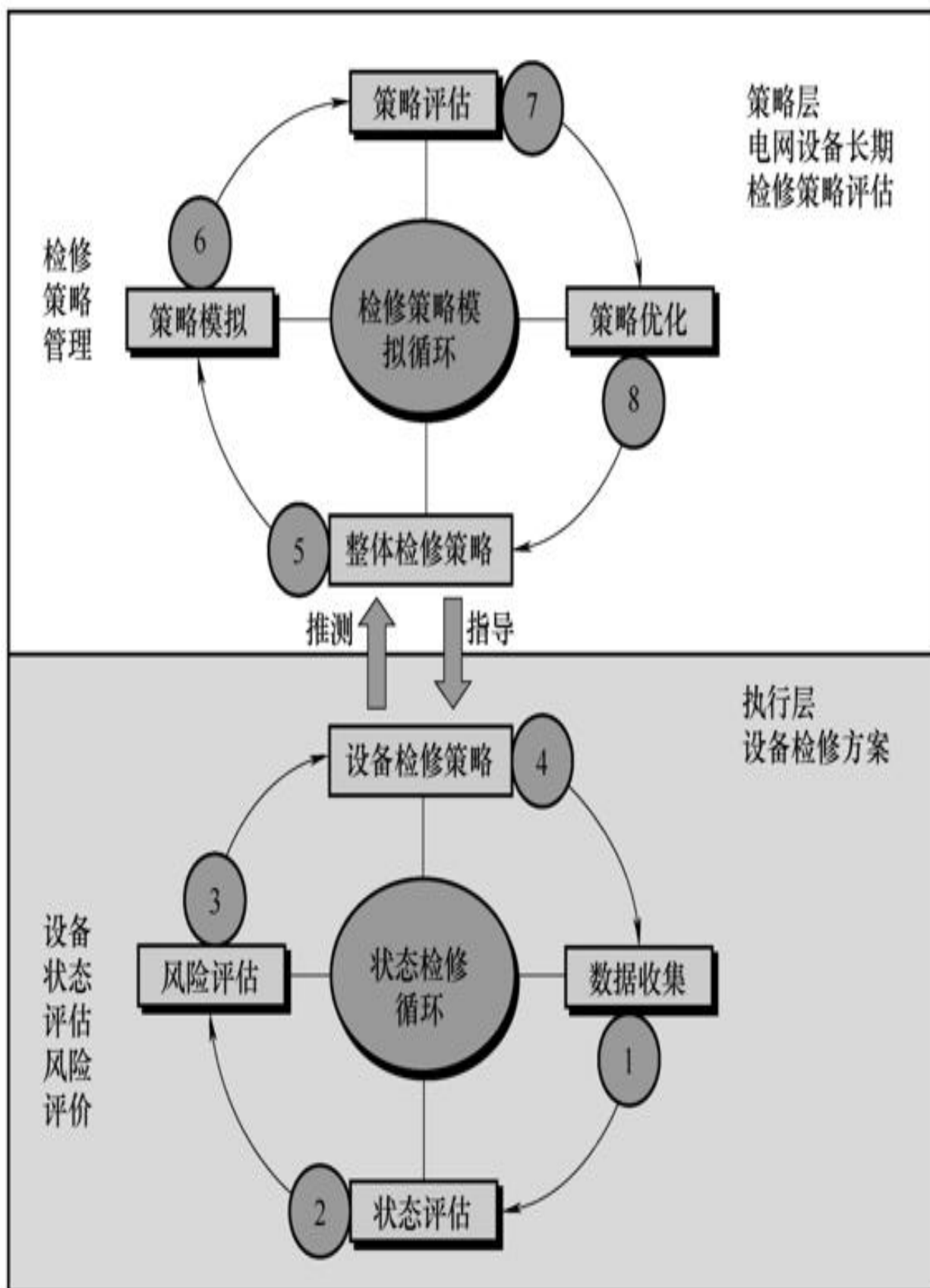


图3-25 设备状态评估和检修策略

5) 电网紧急风险下的抢修组织（人员、装备、设备资源）。

3.2 系统设计与实现

1. 基于物联网的输变电设备全寿命周期管理系统实现

在输变电设备风险评估、动态预警、寿命评估等方法研究成果的基础上，结合全寿命周期关键指标体系、闭环管理机制以及协同管控策略，开发了输变电设备全寿命周期管理系统，实现了从输变电设备的规划、设计、制造、选型、采购、安装、运行、维修、改造、报废乃至环保等整个价值链的全寿命周期管理，提高了运维决策的针对性和设备全寿命周期管理能力，最终达到了输变电设备的使用可靠性、使用效率、使用寿命和成本费用的综合平衡。

（1）全寿命周期管理系统架构

输变电设备全寿命周期管理系统的功能包括输变电设备状态监视、环境监视、异常预警、智能诊断、状态评价、风险预测、检修决策、绩效评估和全寿命周期管理等功能，其系统架构如图3-26所示。

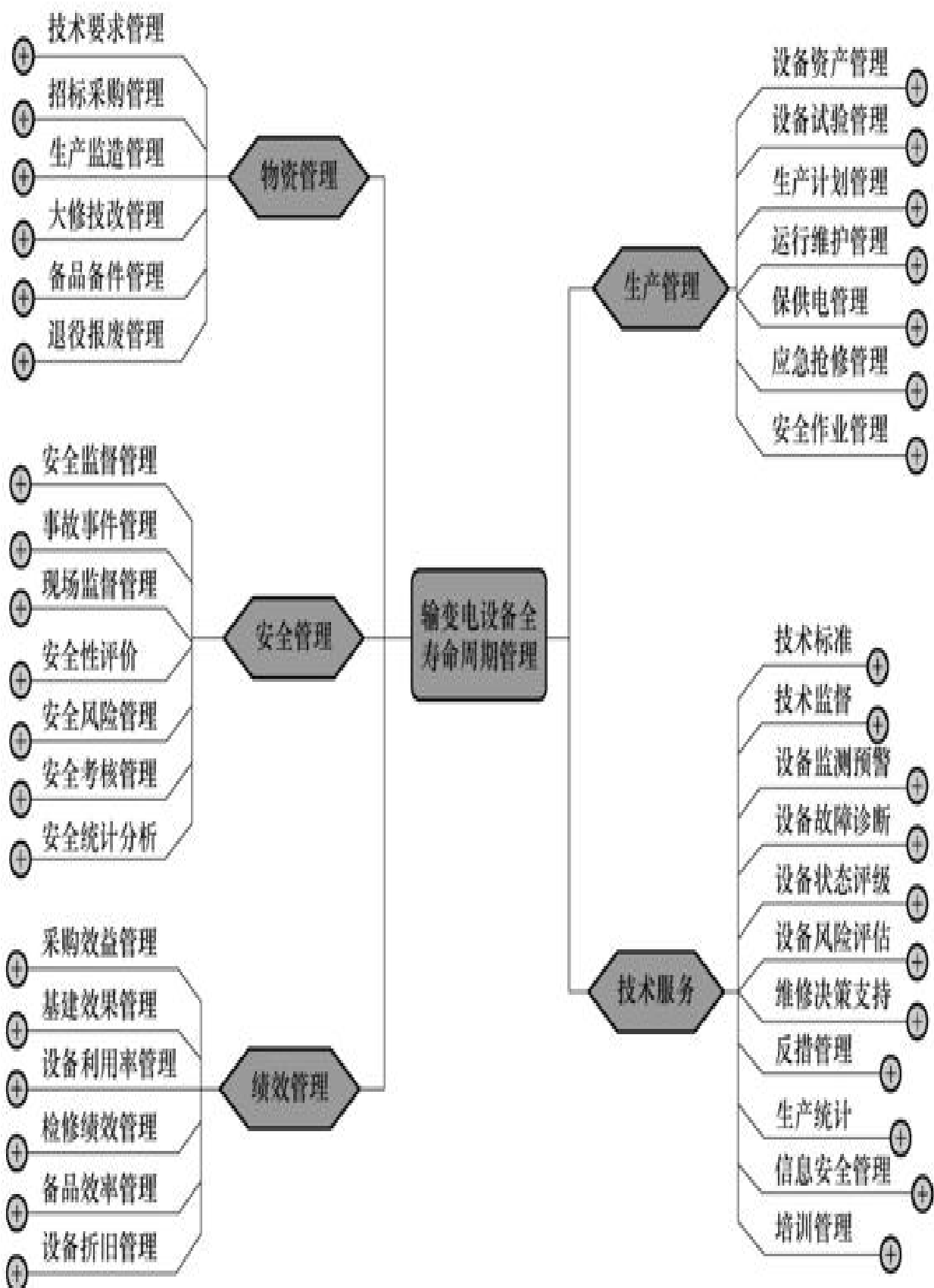


图3-26 输变电设备全寿命周期管理系统的架构

输变电设备全寿命周期管理系统以全景信息平台为基础，采用服务调用模式，获取系统各项功能所需的基础信息和关联模型，实现了输变电设备全寿命周期管理的高级应用服务系统建设。系统总体框架层次如图3-27所示。

（2）全寿命周期管理业务流程

全寿命周期管理系统提供形象、全面、直观的指标展示、预警、分析手段等，服务于公司高层决策管理和电网生产管理的关键岗位，各相关业务部门贯穿始终，同时在各环节相互配合、相互支撑，系统业务流程如图3-28所示。

（3）全寿命周期管理系统功能实现

输变电设备全寿命周期管理系统的功能包括设备状态异常预警、设备智能综合诊断、设备健康状态评价、设备运行风险评估及预测、设备运维决策支持、设备全寿命周期过程管理等功能。

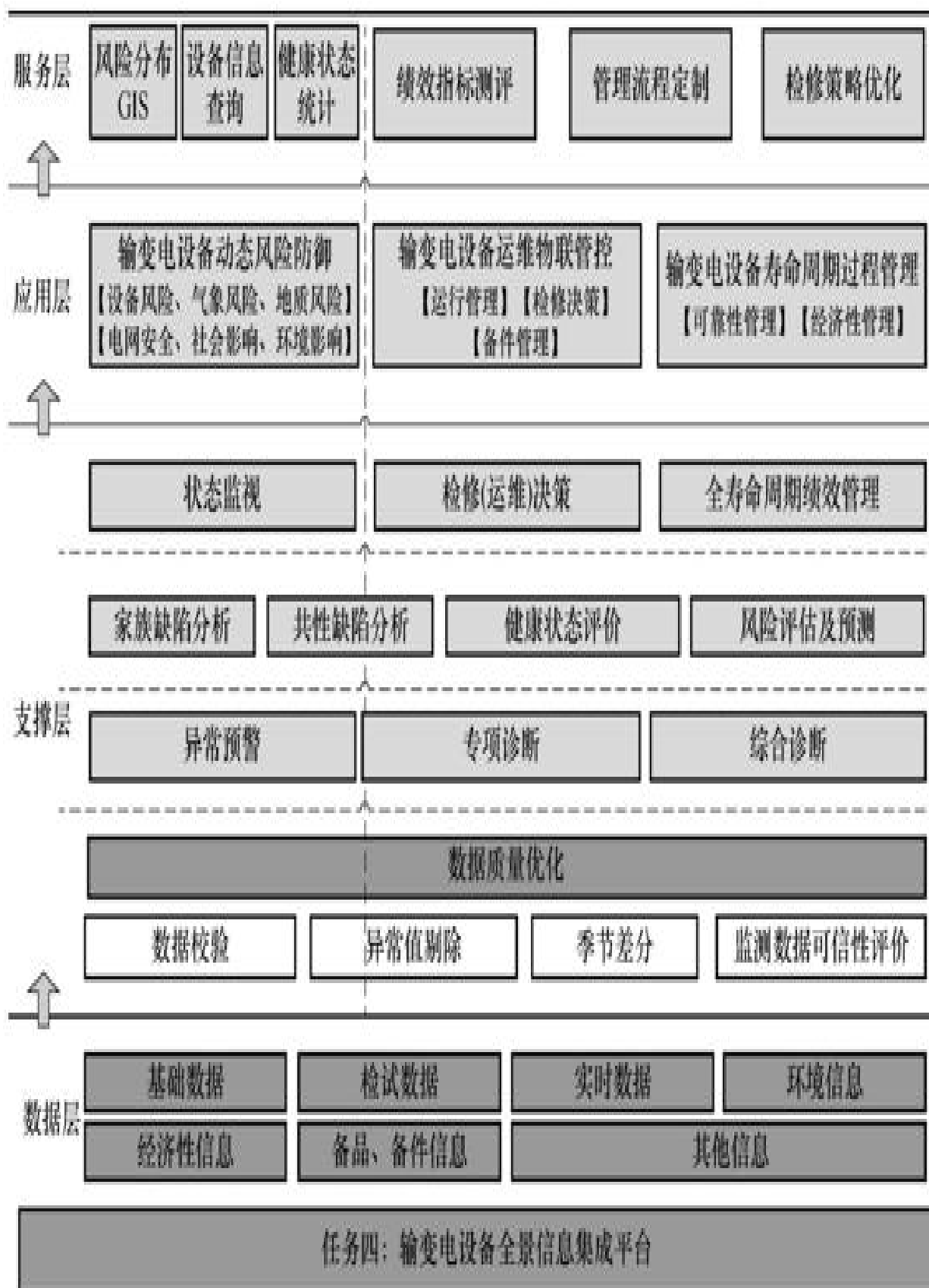


图3-27 输变电设备全寿命周期管理系统的总体框架

1) 设备状态异常预警。

本任务通过建立统一的阈值集中管理机制和趋势预警策略，根据实际情况对阈值进行修改调整并对历史上重复出现的不正确报警点和报警范围进行自动校正，结合监测数据的历史变化趋势进行深入分析，实现对超出阈值范围的在线监测数据和出现变化率异常的监测数据点进行二次告警，过滤不合理的告警数据，从而给出客观准确的预警信息。

监测阈值管理：对于关键设备，为了避免随机扰动带来误报警的风险，采用了多级别报警策略，在当前在线监测装置所提供的初步简单告警信息的基础上，通过统一的监测阈值管理，最大程度上避免了误报警、漏报警现象。

趋势预警：本任务采用趋势估计消除监测数据随机波动的影响。通常一旦根据检测信号上升梯度所得出的预测值持续偏离正常值，就可以认为设备处于“故障前兆期”。通过准确地截获故障的前兆信息并及时报警，就可以有效地控制故障的蔓延，避免事故的发生。

关联预警：由于设计、工艺和材质都相同，各台设备的同一状态量应该视为源自同一母体的不同样本，如果被分析设备的状态量值与其他设备存在显著性差异，必然存在原因，且很可能是早期缺陷的征兆，因此采取二次关联预警。同时建立了同相、同类型设备监测数据的“关联指数”，定量描述监测数据之间的相似程度，作为分析设备运行状态的有效判断工具。

模糊预警：通过建立不同状态参量变化的模糊隶属函数，确定判断异常的原则和上下限范围，可以更加准确可靠地发现可能的设备，为后续诊断故障原因提供了数据支撑。

2) 智能综合诊断。

利用设备全景信息，根据运行工况、运行环境、监测数据和定检试验等对设备可能发生的故障进行全方位综合诊断，为故障定位及设备检修提供决策支持。诊断专家系统的基本结构如图3-29所示。主要由知识库、推理机、综合数据库、解释接口（人机界面）以及知识获取模块等几个部分组成。

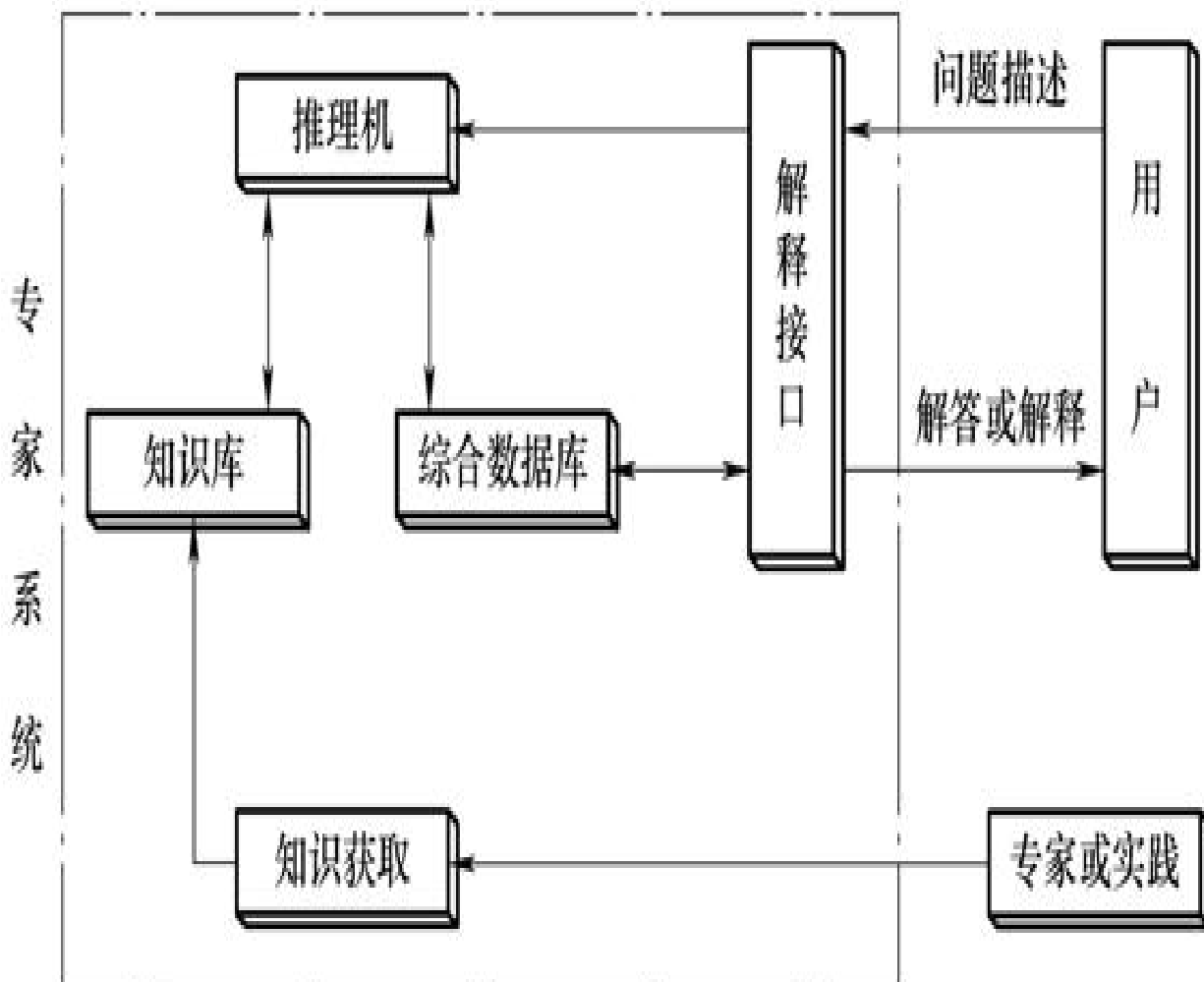


图3-29 输变电设备智能综合诊断专家系统结构

建立了序贯推理模拟人类专家的推理行为，采用“假设-测试”循环为核心的推理过程。首先根据有关诊断问题的初始信息，产生一组可能的故障假设，这些假设应能够解释所有初始信息；然后，根据这些假设设计进一步的试验计划对初步诊断结论进行证实，指导获取更多的故障信息，直到得到一个对各种故障现象最优的解释，作为最终的诊断结论。

采用可信度模型对输变电设备运行中出现的各种异常信息进行分析，通过对故障可信度加权的形式，可以将输变电设备的运行经历（短路、过电压、过负荷、停运等）对设备可能产生的影响引入到诊断推理过程中，如图3-30所示。

3) 健康状态评价。

状态评价功能对反映设备健康状态的各项指标数据进行分析评价，最终得出设备总体健康状态等级。可实现自动触发和人工触发功能，根据多种导则方法灵活配置，对单个设备或多个设备进行评价。评价时将设备及其部件的状态评价结果分为正常状态、注意状态、异常状态、严重状态和注意趋异常状态、异常趋严重状态两种过渡状态。将模糊隶属度函数与劣化程度相结合，对状态量的劣化程度进行模糊化调整，避免不同劣化程度等级分界点处阶梯形跳跃对评估结果造成的波动。设备部件及状态量扣分评价的计算流程如图3-31所示，状态评价计算流程如图3-32所示。

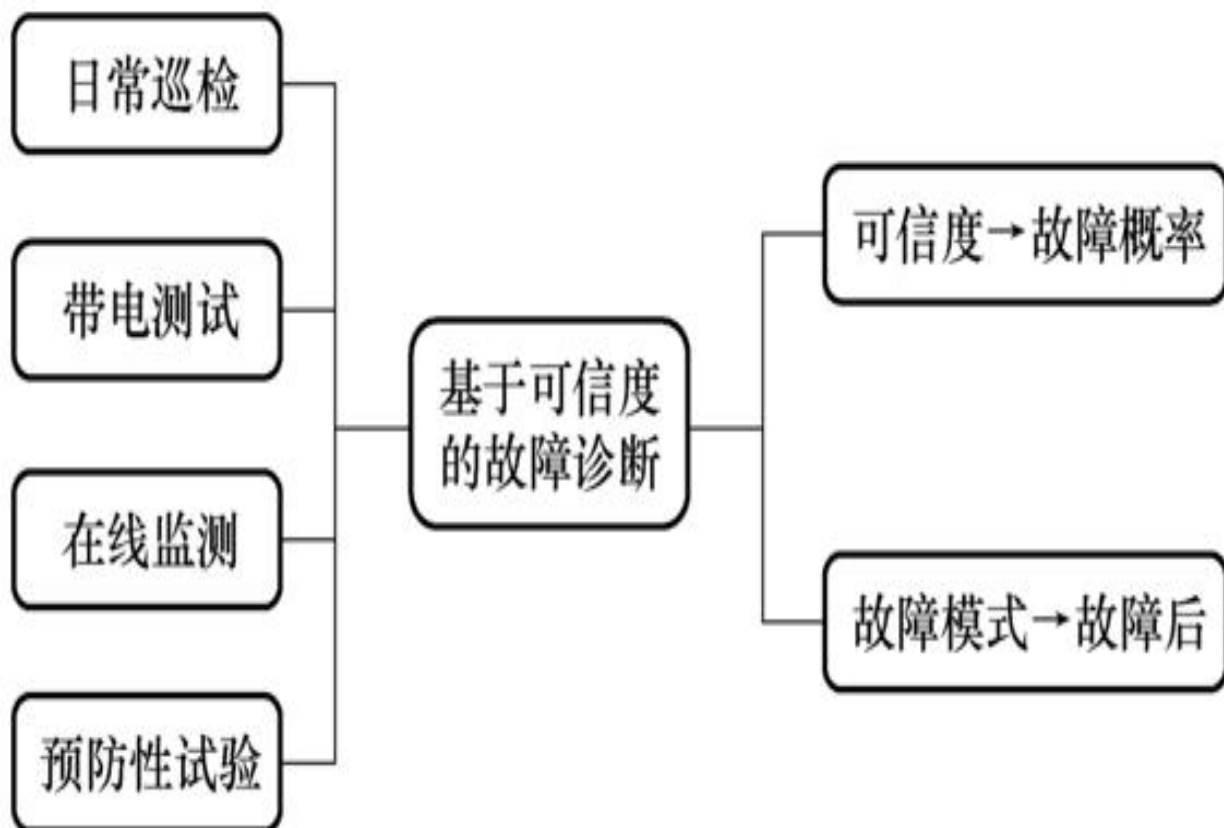


图3-30 输变电设备智能综合诊断系统结构

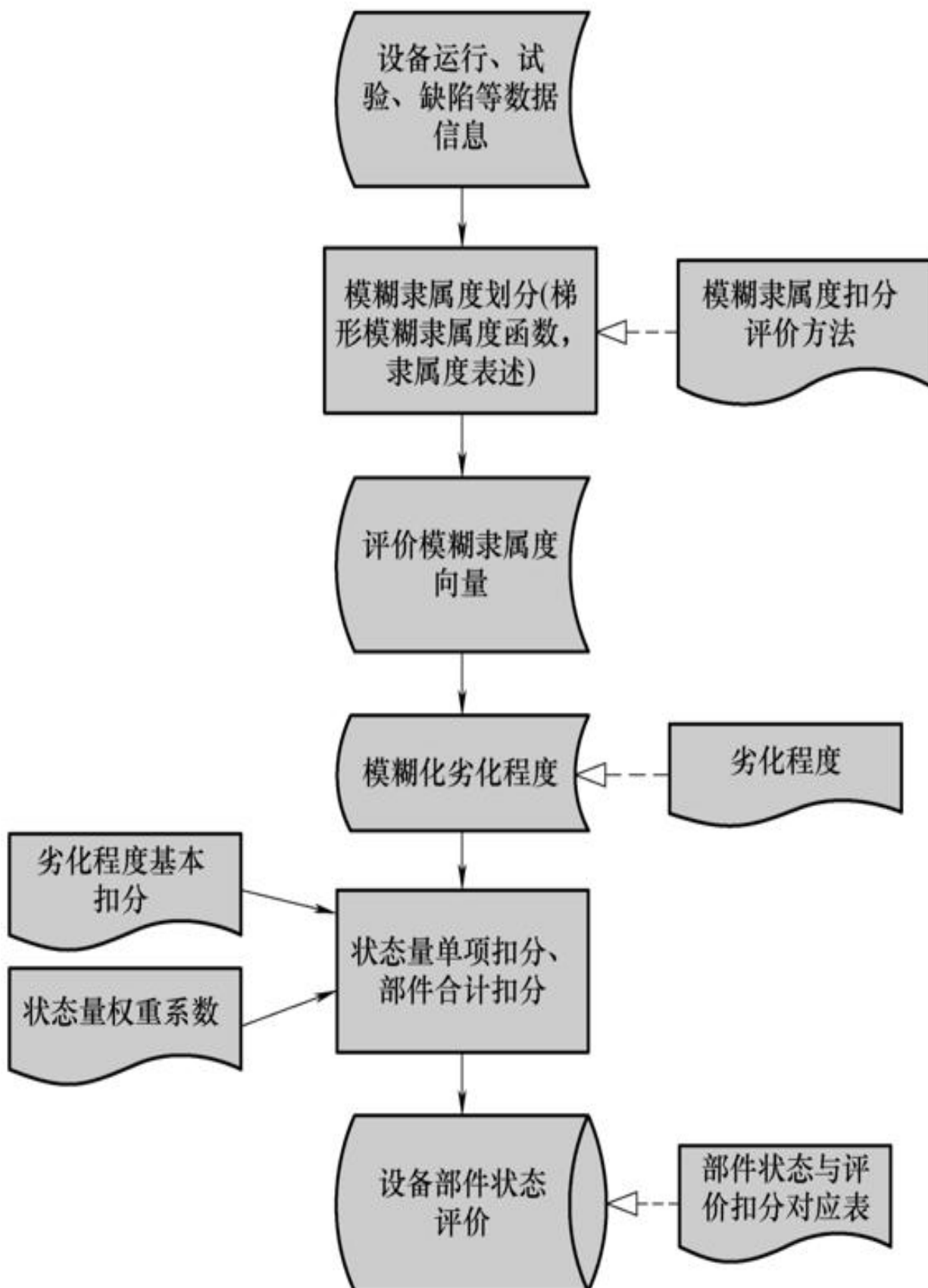


图3-31 设备部件及状态量扣分评价的计算流程

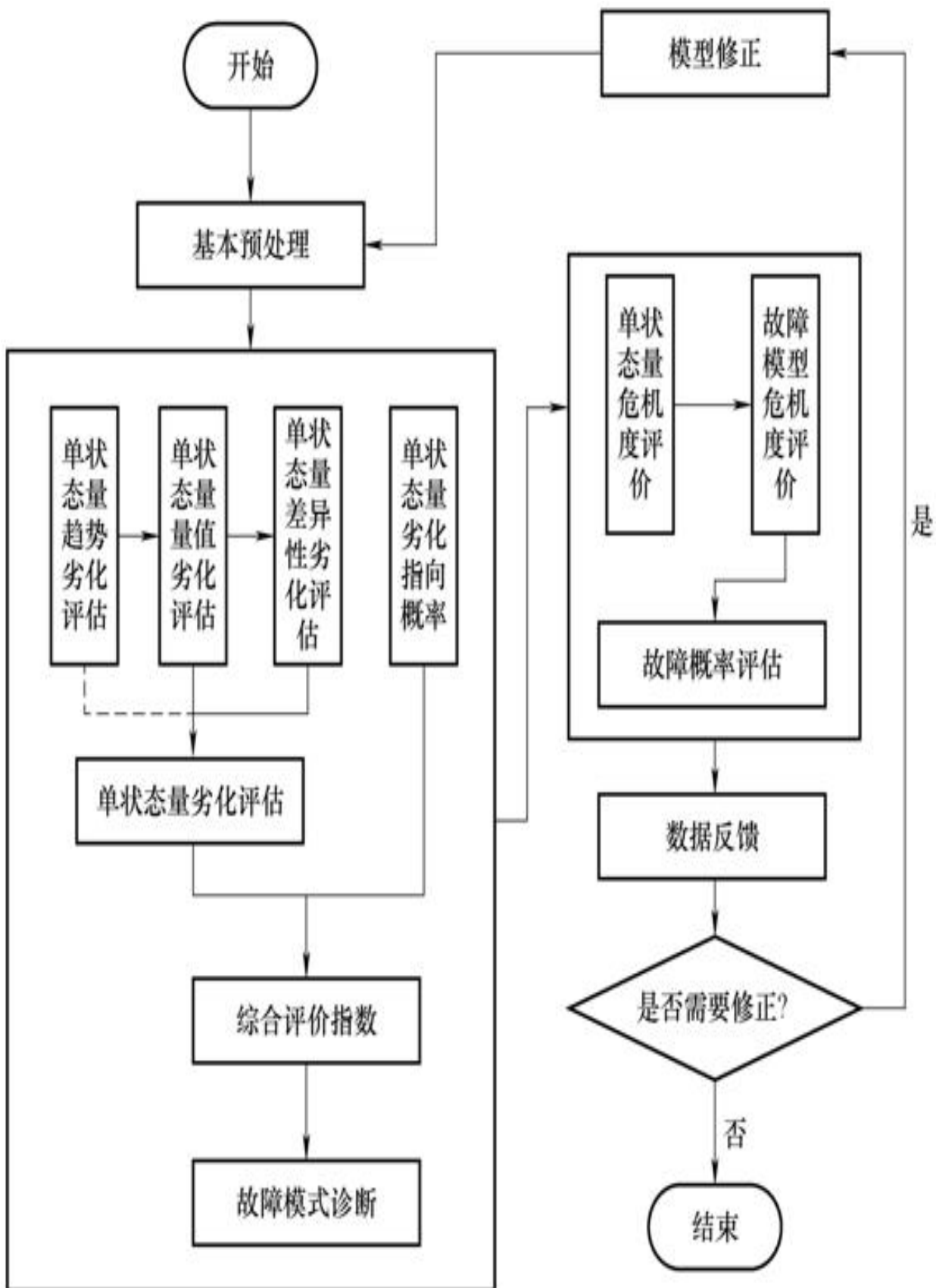


图3-32 设备部件及状态量扣分评价的计算流程

4) 风险评估及预测。

建立了基于故障模式的风险评估方法，风险评估模块通过识别设备潜在的内部缺陷和外部威胁，分析设备遭到失效威胁后的资产损失程度和威胁发生概率，通过风险评估模型得出设备在电网中的风险等级，如图3-33所示。

综合考虑设备的各类异常征兆和所经历的不良工况，利用可信度故障诊断模型，确定设备的故障模式及其概率。在此基础上，评估故障后果的严重性，综合分析设备故障造成的资产损失、电网损失、社会损失和环境损失四个方面的后果，形成对设备的风险评估值，作为输变电设备状态检修的决策依据，如图3-34所示。

5) 运维决策支持。

运维决策支持模块以设备状态评价结果为基础，综合考虑风险评估结论，建立设备状态和设备风险度二维关系模型，综合优化输变电设备维修次序、维修时间和维修等级安排。并依据状态维修导则确立的分级维修标准，确定具体的维修项目和维修时间，最终将建议结果递交设备管理人员或传送到相关的外部生产管理信息系统实施安排，为生技、调度等各业务部门提供决策支持及技术管理功能。

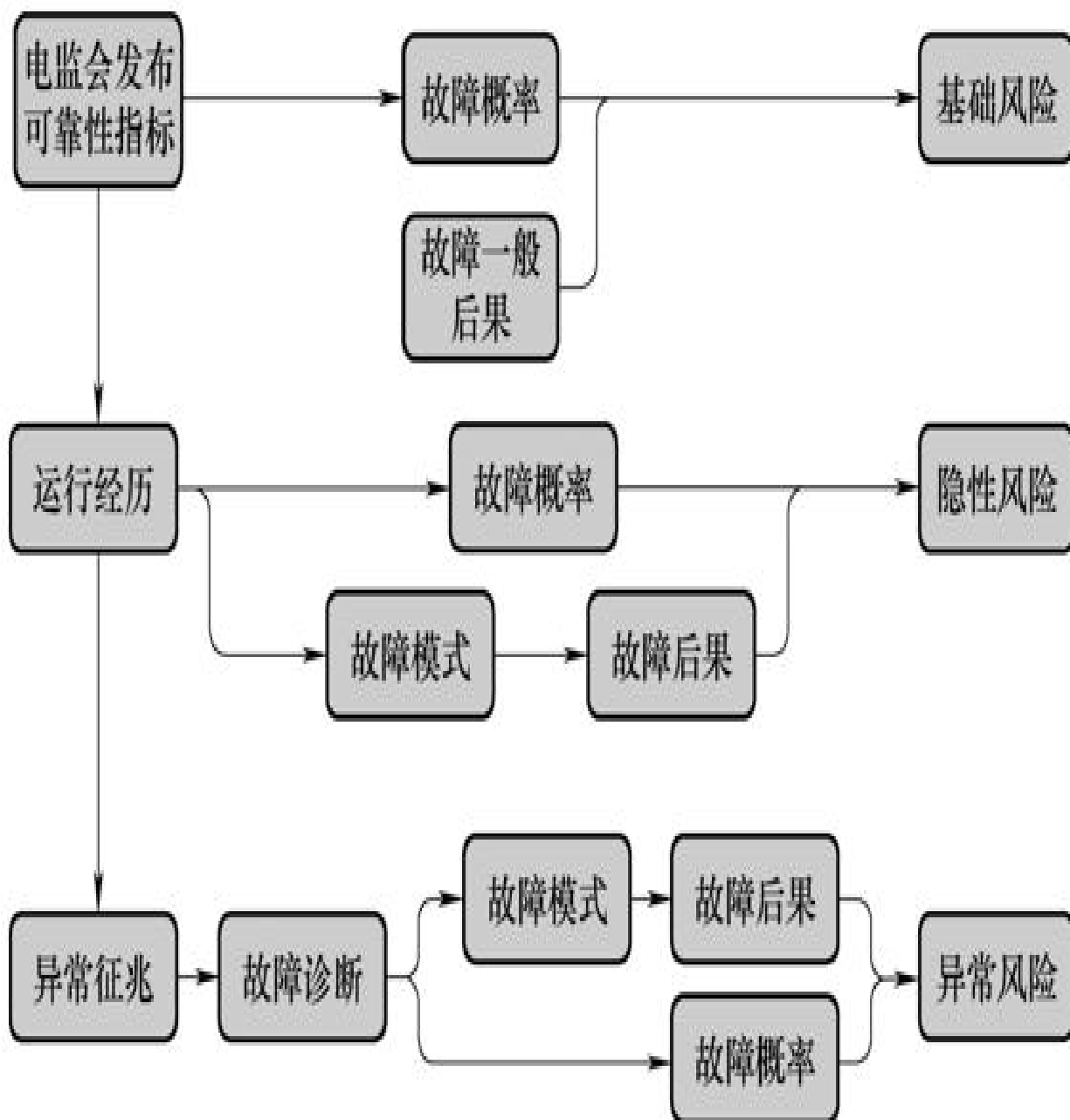


图3-33 设备风险等级分类

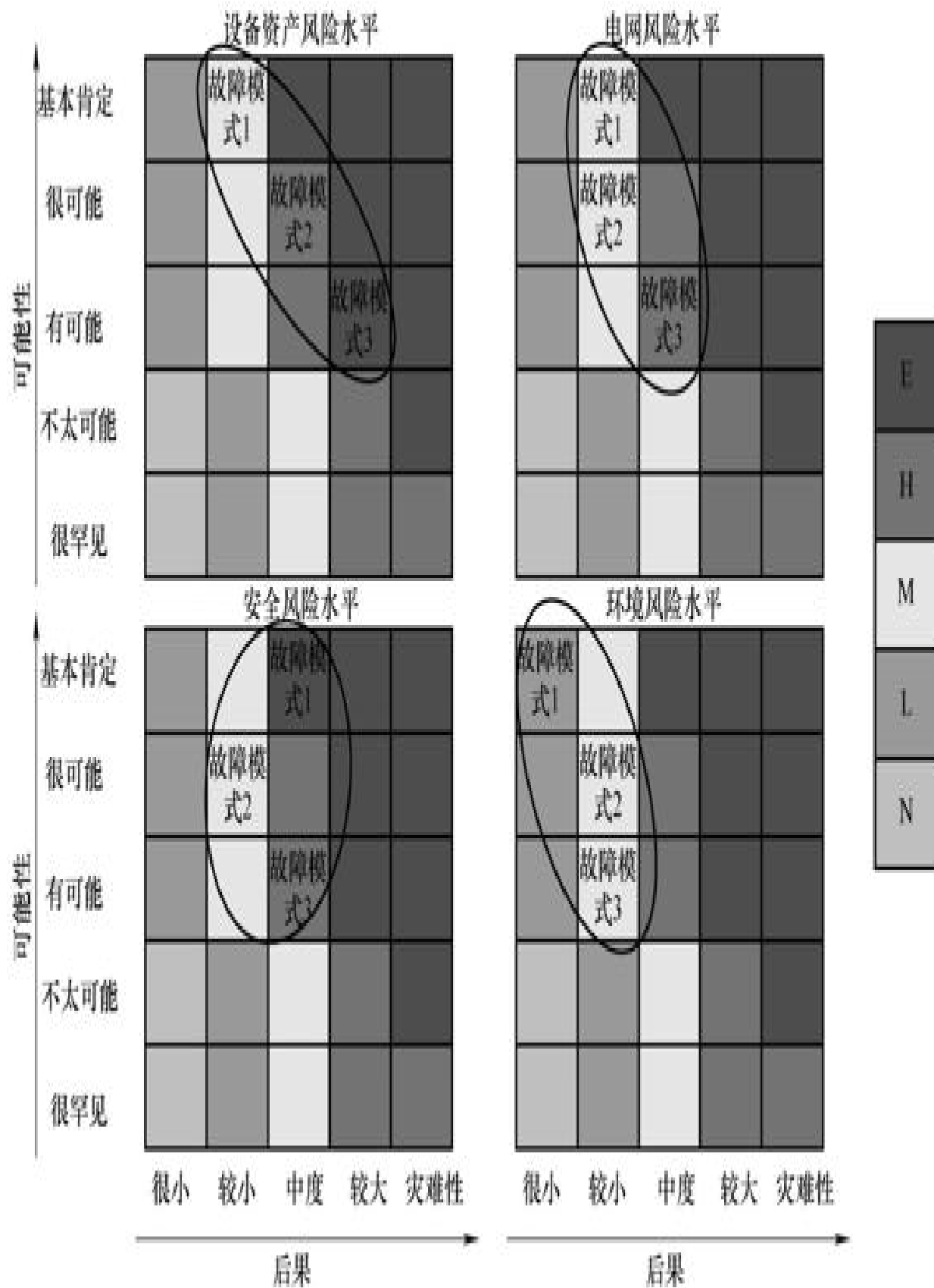


图3-34 设备四个维度的风险值及决策依据

风险的影响及危害程度按风险值大小进行区分，根据风险值大小可以确定设备风险级别。同类设备可以按照风险值大小排序，作为输变电设备运行、维护、检修、试验、技改的决策依据，同时考虑设备继续运行对风险值改变的影响。资产、资产损失程度、平均故障率也可以分别排序，作为生产决策的参考，见表3-6。

表3-6 设备风险级别划分

风险级别分类	I级	II级	III级	IV级	V级	VI级
风险值 (R)	$R \geq 5$	$5 > R \geq 3$	$3 > R \geq 1$	$1 > R \geq 0.5$	$0.5 > R \geq 0.1$	$R < 0.1$

确定设备风险值后，根据风险值的大小将设备的风险划分为不同的等级，以指导检修周期的调整，设备实际检修周期= f （基准周期，设备风险），见表3-7。

表3-7 基于设备风险评估的检修周期调整策略

设备风险	I级	II级	III级	IV级	V级	VI级
推荐周期	立即安排	尽快安排	适时安排	不大于正常周期	正常周期	延长周期

6) 全寿命周期过程管理。

在输变电设备风险评估、动态预警、寿命评估等方法研究成果的基础上，结合全寿命周期关键指标体系、闭环管理机制以及协同管控策略，开发了输变电设备全寿命周期管理系统，将电网资产的计划管理、资产信息管理和寿命周期管理有机地结合在一起，指导人、财、物各方面资源在设备全寿命周期过程各阶段的合理配置，强化以设备全寿命周期为主线的全过程成本管理，推行标准化成本，实现成本管理精细化、定额化，在设备可用性和寿命周期费用之间寻求平衡，探

索寿命周期费用最小的设备管理方案。强化资产寿命周期全过程的绩效管理，推行标准化作业，追踪评估战略规划、目标设定和实施过程的执行效果，建立能够持续改进的设备管理过程。

2. 基于物联网的输变电设备全寿命周期管理系统应用

输变电设备全寿命周期管理通过智能展示技术，在对数据智能分析的基础上通过驾驶舱的方式对数据进行集中、全面和有效的显示。采用统一的图形格式、界面风格和展现方式，可全面、直观、简洁、有效地监视全网设备运行状态、指标评价结果及各类统计信息，并集成关联各专业系统功能模块，实现设备运维监视全景可视，切实提高运维效果。系统展示如图3-35和图3-36所示。

一、二次设备

全景数据平台

驾驶台

变电站驾驶舱



图3-35 全景信息平台驾驶舱技术

基础信息



设备电压分布



设备类型分布



设备机构分布



状态信息

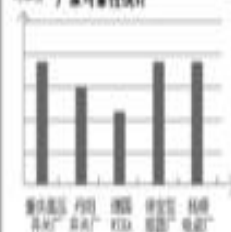
健康状态	风险评估	异常预警	运行状态	故障事件	装置状态
健康设备: 40台	健康指数>5: 4台	报警设备数量: 3台	最高电压: 4台	故障设备: 4台	需要检修设备: 4台
健康设备占比: 40%	健康指数>5占比: 12%	报警设备占比: 34%	最高电压占比: 34%	故障设备占比: 10%	需要更换设备: 4台
故障设备: 30台	风险等级>1: 2台	故障报警数量: 1台	输电线路: 30台	检修设备: 4台	
故障设备占比: 30%	风险等级>1占比: 34%	故障报警占比: 34%		雷击冲击设备: 1台	

业务信息

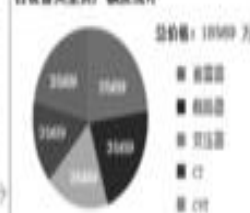
物资采购

规划: 变压器: 2000台, 断路器: 2000台, 电压互感器: 2000台, 电流互感器: 2000台, 避雷器: 2000台
设计: 变压器: 2000台, 断路器: 2000台, 电压互感器: 2000台, 电流互感器: 2000台, 避雷器: 2000台
采购: 变压器: 2000台, 断路器: 2000台, 电压互感器: 2000台, 电流互感器: 2000台, 避雷器: 2000台

厂家可替代性统计



自设备类型资产数量统计



规划采购完成率



关联信息

重点管控设备	相关指标	关联设备	计划规划
变压器 断路器 电压互感器	电压等级 设备类型 设备数量 设备状态	电压等级 设备类型 设备数量 设备状态	计划规划 系统设置 其他信息

图3-36 输变电设备全寿命周期管理系统主界面

3.3 验证

1. 多维度动态预警技术验证

当已知故障征兆量出现异常时，为其他故障因素致险作用下的运行风险评估问题，综合故障诊断模型为图3-4的模型b)。以某文献中所列实例为例子，已知变压器的三比值呈过热特征，油中含水量、局部放电量、铁心接地电流均在正常范围内，CO/CO₂体积分数比 $\phi(CO)/\phi(CO_2)$ 、 $\phi(CO)/\phi$ 值也合格，因此证据为

$E = (s_2, \bar{s}_1, \bar{s}_4, \bar{s}_5, \bar{s}_7, \bar{s}_8)$ 。为了表明本任务动态故障诊断机制的有效性，以下首先将该实例的证据直接输入综合故障诊断模型进行静态故障诊断机制下的风险评估，然后与动态故障诊断机制下的风险评估作对比分析。

(1) 静态故障诊断机制下的风险评估

将证据 E 直接输入图3-4中的模型b)，经过贝叶斯网络推理后，得到各故障模式的发生概率如表3-8所示，可见发生概率最大的故障模式为 f_6 ，即可认为诊断结果为变压器发生了分接开关故障。该故障诊断结果与实际情况相符，计算得到的变压器当前的运行风险值为2843EUR。

表3-8 其他故障因素致险例子中静态故障诊断机制诊断结果

故障模式编号	发生概率	故障模式编号	发生概率
f_1	0.0142	f_6	0.1147
f_2	0.0027	f_7	0
f_3	0.0348	f_8	0
f_4	0	f_9	0.0007
f_5	0.0003	f_{10}	0.0003

(2) 动态故障诊断机制下的风险评估

依据图3-37中的动态故障诊断机制进行诊断，其中 P_{th} 设为0.8。

第一步：初始证据信息为 $E = (s_2, \bar{s}_5)$ ，输入诊断模型，得到后验概率最大的故障模式为 f_1 ，铁心多点接地，其后验概率为 $P=0.1965$ ，小于概率阈值 P_{th} ；

第二步：假定 f_1 发生，将证据

$E = (s_2, f_1, \bar{s}_5)$ 输入诊断模型，得到第2层中后验概率最大的证据信息为 s_1 铁心接地电流；

第三步：实施铁心接地电流带电测试，本例中铁心接地电流未出

$$E = (s_2, \bar{s}_5, \bar{s}_1)$$

现异常，所以证据信息更新为 $\bar{s}_5$ 。将证据信息输入诊断模型，对故障模式的后验概率进行更新，得到后验概率最大的故障模式为 f_6 分接开关故障，后验概率 $P=0.1081$ ，小于概率阈值 P_{th} ；

第四步：假定 f_6 发生，将证据

$$E = (s_2, f_6, \bar{s}_5, \bar{s}_1)$$

输入诊断模型，得到第2层中后验概率最大的证据信息为 s_3 绕组直流电阻的三相不平衡系数；

第五步：实施绕组直流电阻的三相不平衡系数测试，本例中绕组直流电阻的三相不平衡系数出现异常，所以证据信息更新为

$$E = (s_2, s_3, \bar{s}_5, \bar{s}_1)$$

。将证据信息输入诊断模型，对故障模式的后验概率进行更新，得到后验概率最大的故障模式为 f_6 分接开关故障，后验概率 $P=0.9134$ ，大于概率阈值 P_{th} ，诊断过程结束。

图3-37描述了故障诊断过程。随着证据的不断更新，故障模式的后验概率也在不断变化。最终的动态诊断过程中仅需DGA、铁心接地电流和绕组直流电阻的三相不平衡系数3项测试即可确定最终的故障模式，少于静态故障诊断机制中进行的5项试验测试。另外，由图3-37可见， f_6 发生概率要明显高于静态故障诊断得到的发生概率，主要因为静态故障诊断中缺少对 f_6 支持度最大的故障征兆——绕组直流电阻的三相不平衡系数的检测，虽然在已知5项证据的情况下， f_6 的发生概率相对于其他9种故障模式要大，但缺少关键故障征兆将导致变压器故障概率的估计不准确。基于以上3项测试，计算得到的变压器风险值为9337EUR，明显高于静态故障诊断机制下的风险值。

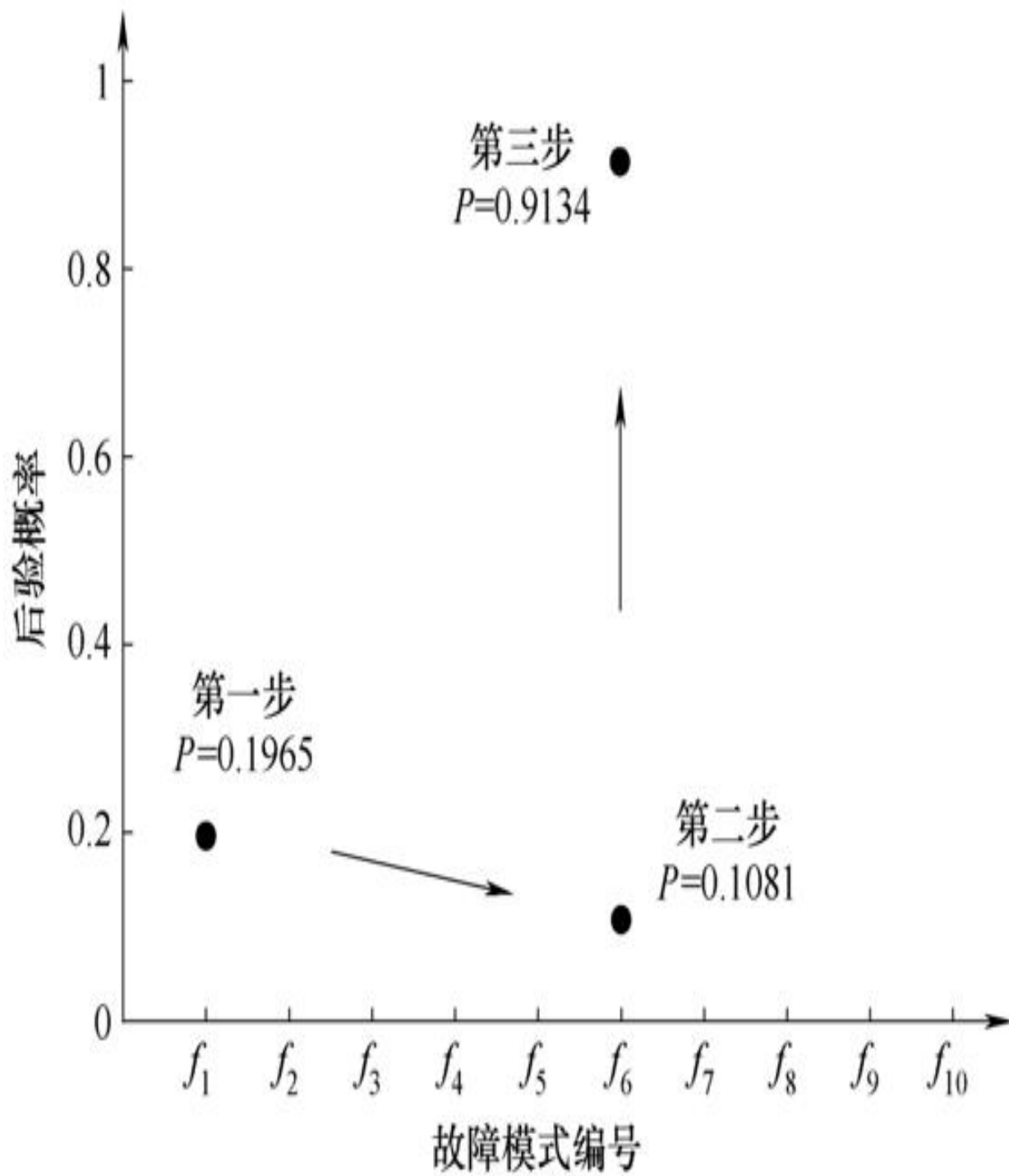


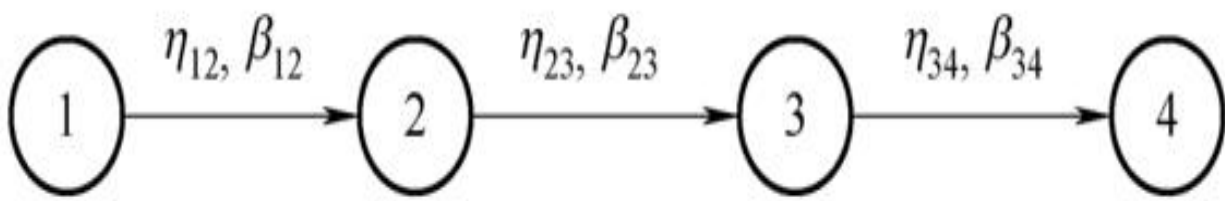
图3-37 实例1的动态故障诊断过程示意图

2. 基于油中溶解气体监测的风险预测验证

IEEE导则根据油中溶解气体的含量，将变压器的运行状态划分为良好、注意、警告和故障4个状态，见表3-9。图3-38描述了4个状态间的转换关系，同样假设在各状态的停留时间分布为威布尔分布，形成Weibull-Markov模型。对于图3-38所示模型，基于故障数据统计获取其参数，见表3-10。

表3-9 根据油中溶解气体体积分数的状态划分

状态	油中溶解气体的体积分数 ($\times 10^{-6}$)							
	H ₂	CH ₄	C ₂ H ₂	C ₂ H ₄	C ₂ H ₆	CO	CO ₂	TDCG
1	100	120	1	50	65	350	2500	720
2	101 ~ 700	121 ~ 400	2 ~ 9	51 ~ 100	66 ~ 100	351 ~ 570	2500 ~ 4000	721 ~ 1920
3	701 ~ 1800	401 ~ 1000	10 ~ 35	101 ~ 200	101 ~ 150	571 ~ 1400	4001 ~ 10000	1921 ~ 4630
4	>1800	>1000	>35	>200	>150	>1400	>10000	>4630



3-38 基于油中溶解气体监测的Weibull-Markov模型

表3-10 基于油中溶解气体监测的Weibull-Markov模型参数设定

参数	(η_{12}, β_{12})	(η_{23}, β_{23})	(η_{34}, β_{34})
取值	(120.5, 1)	(117.6, 1)	(51.8, 1)

在此参数设定下，求解Weibull-Markov模型即可获取变压器绝缘油劣化下的状态变化趋势以及处于各个状态的概率，如图3-39所示。在该故障模式作用下，变压器在预测时间 $t=100$ 周时以较大的概率处于状态1，在第300周时最大概率已转移至状态4，到第800周时，变压器在状态4的概率约为1，说明在第800周时变压器已确定处于故障状态。

对于以油中溶解气体含量描述的劣化状态，故障后果可根据历史故障统计数据进行分析。根据对变压器故障后果的统计，变压器更换性故障约占35.7%，维修性故障约占65.3%，见表3-11。根据表3-11可计算得到变压器处于警告状态所需的维修费用约为43552EUR，处于故障状态所需的维修费用约为70603EUR。

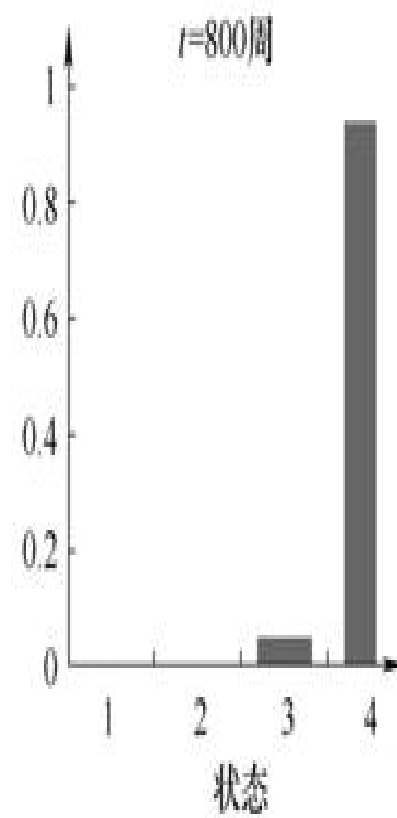
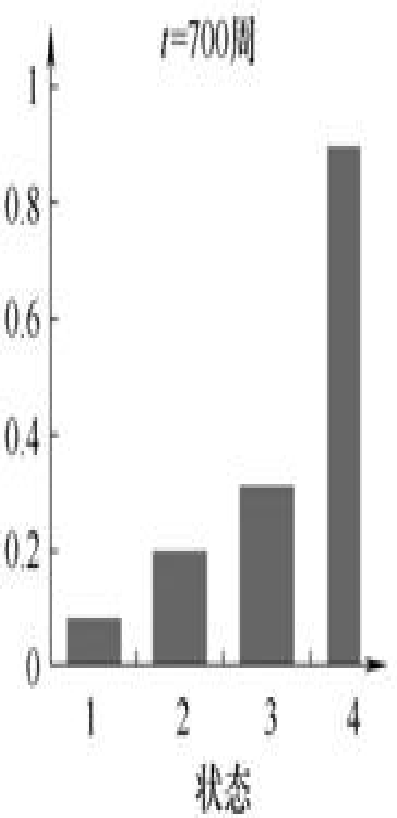
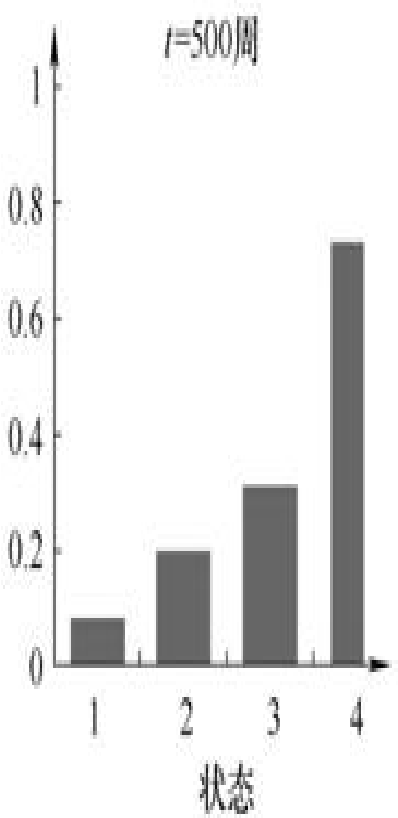
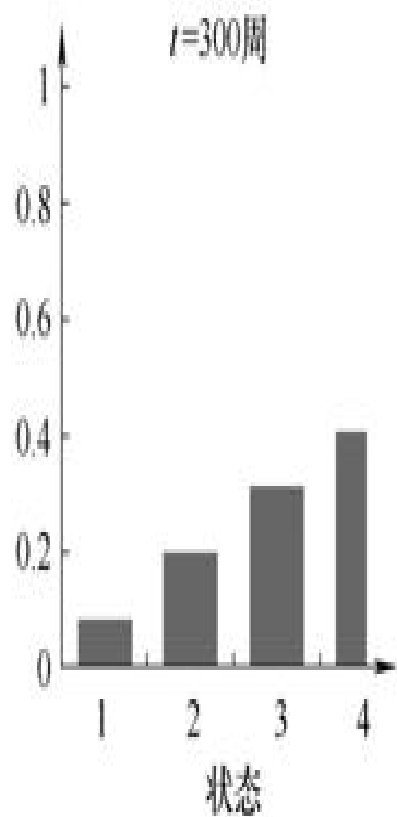
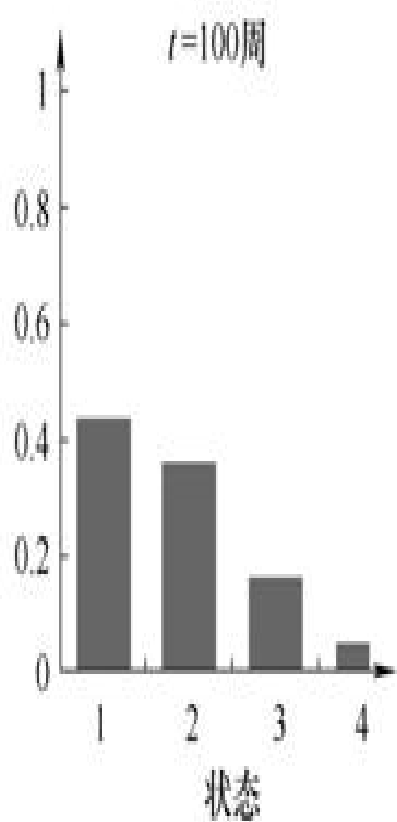
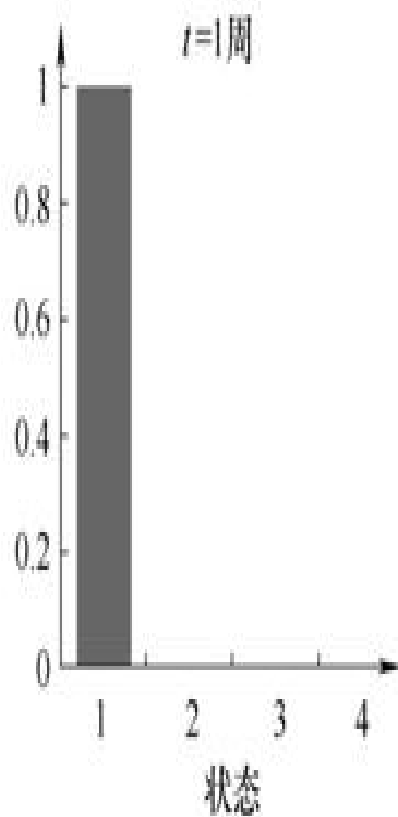


图3-39 基于油中溶解气体监测的变压器处于不同状态的概率

表3-11 基于油中溶解气体的状态计算维修费用

状态	故障部位		处理方式	
	部位	比例 (%)	方式	比例 (%)
1	—	—	—	—
2	—	—	—	—
3	绕组	26.4	维修	100
	铁心	2.4	维修	100
	套管	12	维修	100
	油箱	7.9	维修	100
	有载分接	40.7	维修	100
	其他附件	10.6	维修	100
4	绕组	41.0	更换	25.1
			维修	75.9
	铁心	7.1	更换	3.6
			维修	96.4
	套管	11.6	更换	0.9
			维修	99.1

(续)

状态	故障部位		处理方式	
	部位	比例 (%)	方式	比例 (%)
4	有载分接	33.9	更换	5.4
			维修	95.6
	其他附件	6.1	更换	1.8
			维修	98.2

基于故障概率和故障后果的分析，即可对变压器的风险进行预测。以下结合表3-12给出的实例（该实例对TDCG的含量进行了监测）进行分析。求解图3-38所示的Weibull-Markov模型，计算后续时间处于各个状态的概率变化曲线，如图3-40所示。由图可见，变压器处于状态2的概率在逐渐减少，转向状态4的概率逐渐增加，而处于状态3的概率一直处于较低水平，主要因为在状态3的停留时间参数很小，平均停留时间较短。约第270周时，变压器将以较大的概率处于状态4，即很有可能处于故障状态。结合状态维修费用的分析，可得到变压器风险预测曲线呈逐渐上升趋势，如图3-41所示。可设定风险阈值，适时进行风险控制。

表3-12 实例中TDCG随时间的变化

时间/周	1	54	87	155
TDCG ($\times 10^{-6}$)	574	509	620	1054
状态	1	1	1	2

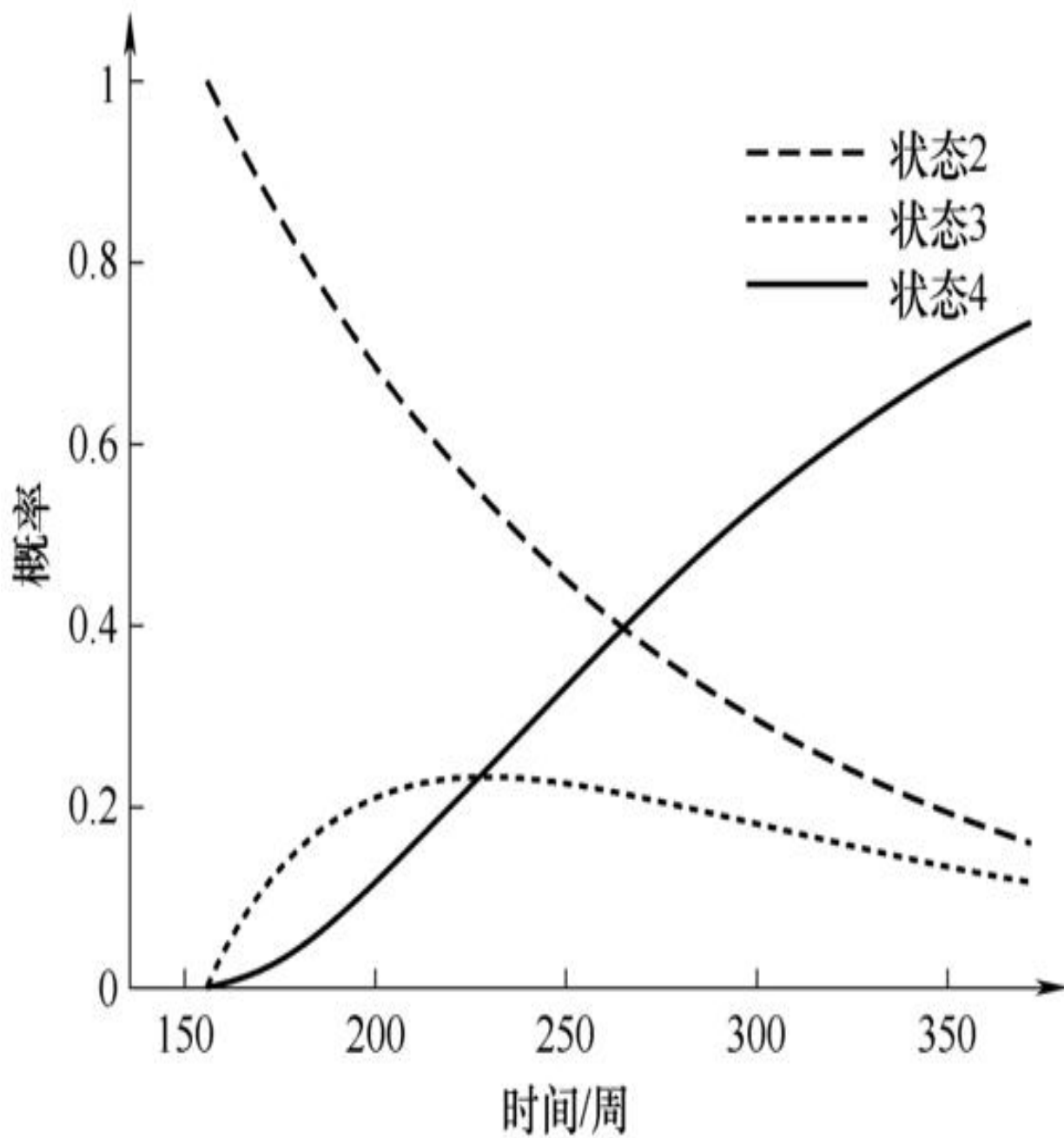


图3-40 实例中各个状态的概率变化曲线

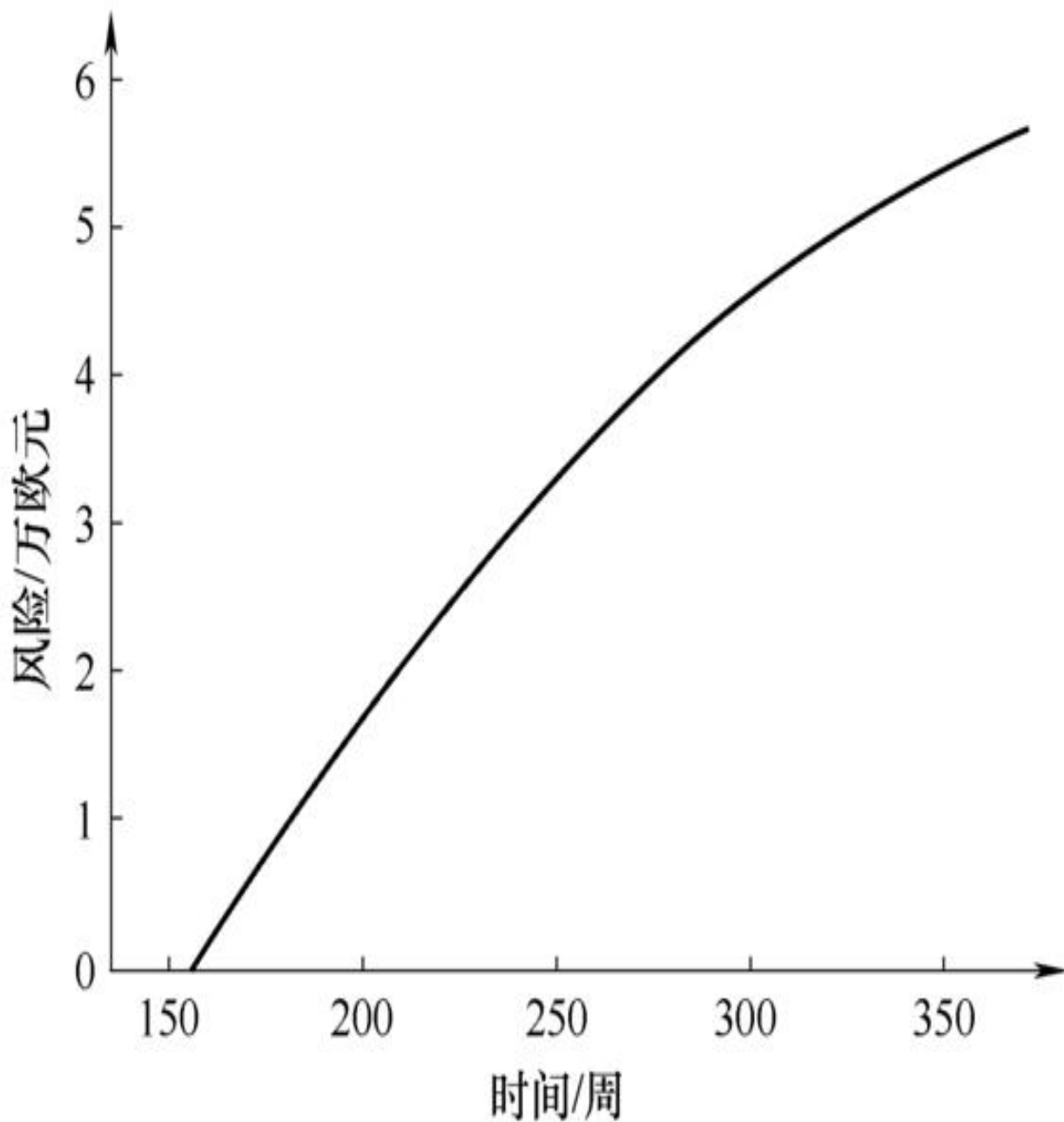


图3-41 实例中风险预测变化曲线

3. 过负荷试验数据下的劣化统一模型验证

本任务基于牛皮纸在重复过负荷周期下的劣化特点的试验数据建立LE LCDM理论模型，以含2%水分的牛皮纸作为试验样本，该牛皮纸在额定负荷下的温度为95℃。在5个试纸上，以图3-42中5种不同类型的过负荷应力作用60个周期，测量并记录第20、40、60个作用周期后试

纸的聚合度。假设所有牛皮试纸的*DP*初始值为1000，可由*DP*剩余度计算得到第20、40、60个作用周期后试纸*DP*的测量值，见表3-13。

表3-13 试纸在20、40、60个周期应力作用后的*DP*的测量值

过负荷模式	DP 测量值		
	第 20 周期	第 40 周期	第 60 周期
1	419	256	204
2	356	271	219
3	418	292	216
4	359	268	213
5	433	323	258

下面基于试验结果验证过负荷试验数据下的劣化统一模型的准确性。由LCDM的相关公式可计算得到图3-42中过负荷模式一个周期造成的理论损伤值，计算结果见表3-14。其中试纸的参考温度设定为95℃，试纸保持在95℃时的正常寿命为6.6年。

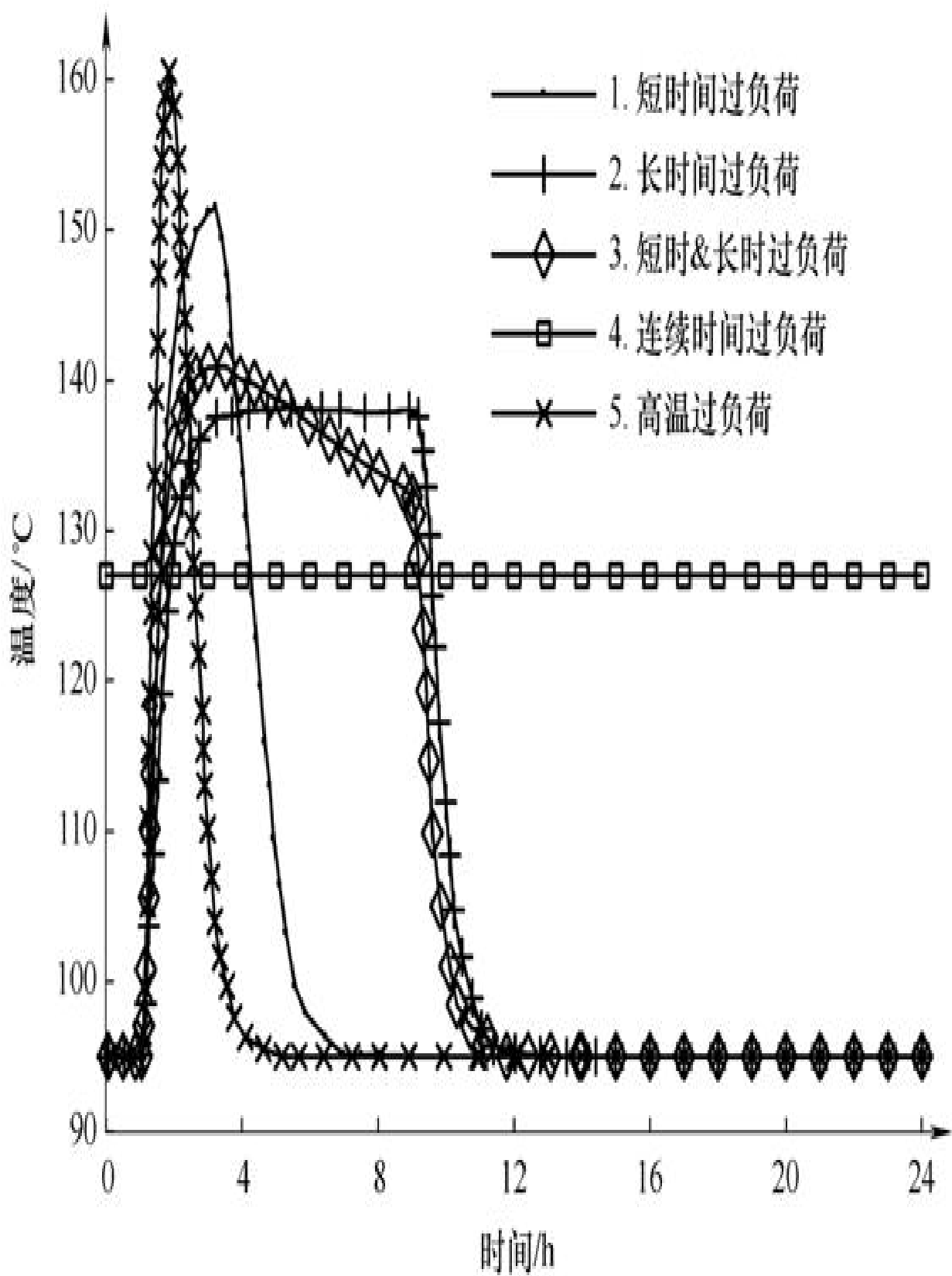


图3-42 五种过负荷模式对应的温度

表3-14 试纸在20、40、60个作用周期后的理论损伤值

过负荷	一周期造成的 损伤	试纸能承受的过 负荷周期数	特定周期后累积损伤计算值		
			第 20 周期	第 40 周期	第 60 周期
1	0.0167	60	0.33	0.67	1.00
2	0.0180	56	0.36	0.71	1.07
3	0.0184	54	0.37	0.74	1.11
4	0.0167	60	0.33	0.67	1.00
5	0.0180	56	0.36	0.71	1.07

每种过负荷模式实际造成的损伤可通过试验中 DP 测量值获得，Emsley提出的下式是联系二者的桥梁：

$$\frac{1}{DP_{t_1}} - \frac{1}{DP_0} = R_{\theta_H} t_1 \quad (3-31)$$

式中， DP_{t_1} 为绝缘纸在 t_1 时刻的 DP 值； DP_0 是初始 DP 值； R_{θ_H} 为绝缘纸在温度 θ_H 下的恒定劣化速度。

根据损伤的定义，由下式可得到在一个时间段（ Δt ： t_1-t_2 ）内绝缘纸受到的损伤 $D_{\Delta t}$ 为

$$D_{\Delta t} = \frac{\Delta t}{L_{\theta H}} = \frac{R_{\theta H} \Delta t}{R_{\theta H} L_{\theta H}} = \frac{\frac{1}{DP_{t2}} - \frac{1}{DP_{t1}}}{\frac{1}{DP_{\text{final}}} - \frac{1}{DP_0}} \quad (3-32)$$

式中， DP_{final} 为绝缘纸寿命终结时的 DP 值。如果设定 $DP_{\text{final}}=200$ ， $DP_0=1000$ ，则某种过负荷模式在时段 t 内造成的累积损伤为

$$D = \sum_i \frac{\Delta t_i}{L_{\theta H,i}} = \frac{\frac{1}{DP_i} - \frac{1}{DP_0}}{\frac{1}{DP_{\text{final}}} - \frac{1}{DP_0}} = 250 \left(\frac{1}{DP_i} - 0.001 \right) \quad (3-33)$$

根据式（3-33）得到每种过负荷模式在第20、40和60周期后造成的损伤值，如表3-13所示。损伤的理论计算值和测量值之间的对比如图3-43所示。

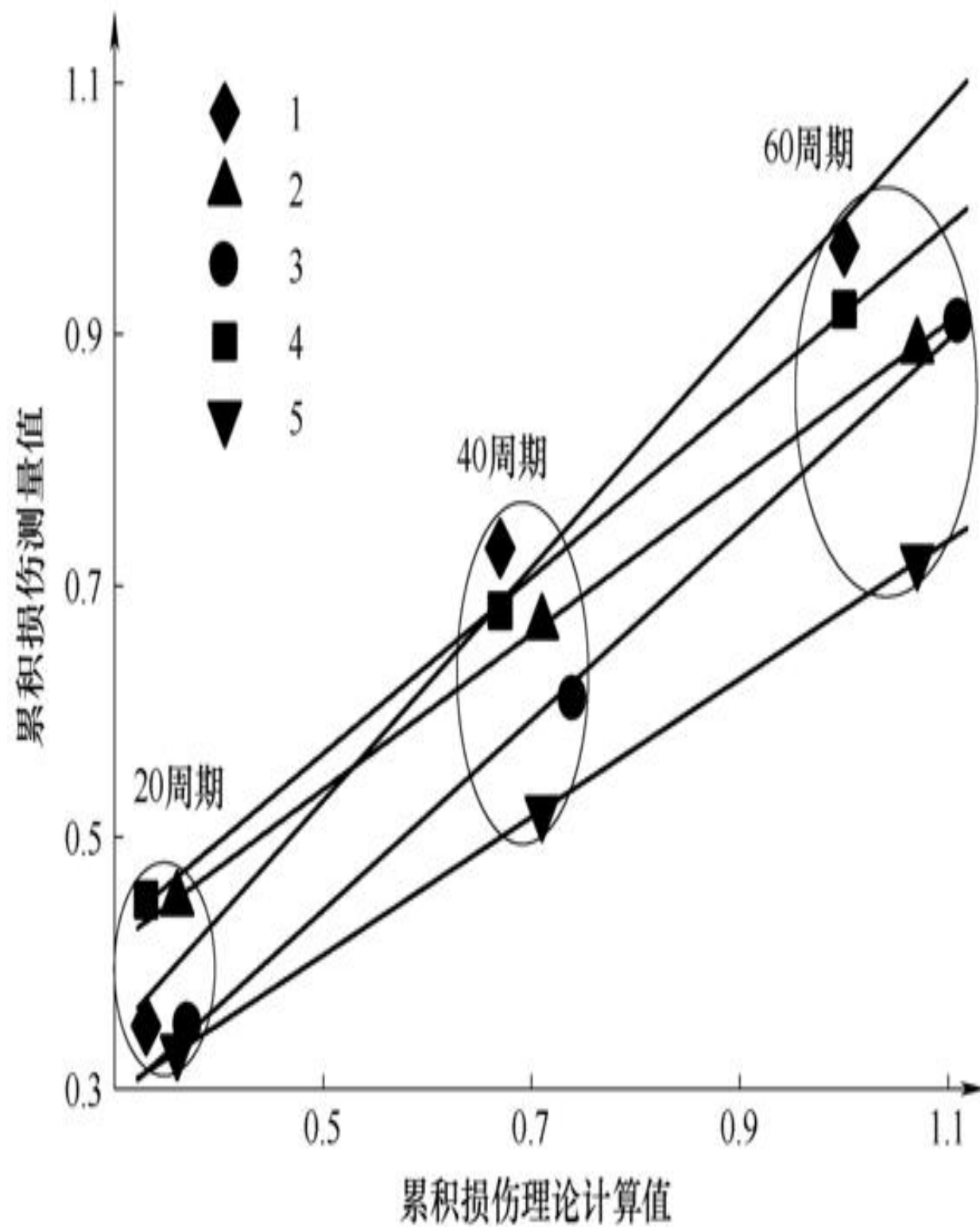


图3-43 累积损伤的理论计算值和测量值

分析结果如图3-43所示，表明理论值和测量值比较接近。第1~4种过负荷模式的理论值和测量值之间的差异相对较小，差异主要来源于第1~4种试纸的 DP 初始值并非都为假定值1000。另外，第5种过负荷模式——高温过负荷的最高温度高达 161°C ，高于第1~4种过负荷模式的温度。此温度足以将试纸中的部分水分转变为气泡，造成试纸含水量下降，实际的劣化速率比理论计算的劣化速率低，因此实际测量和理论计算的累积损伤值之间出现了相对较大的差异。通过以上分析，可以发现在低于气泡产生温度时，实际测量结果与LCDM的理论计算结果吻合较好。当温度高到足以产生气泡时，LCDM理论模型可能会带来较大的误差。但考虑到气泡的产生会降低变压器的绝缘强度，所以在实际运行中，一般不允许变压器在此高温下运行。综上可知，对于实际运行的变压器来说，LCDM在多数情况下都是适用的。

第4章

示范工程建设与验证

输变电设备物联网验证与示范应用任务的目标是面向输变电设备智能监测与全寿命周期管理智能应用，建立基于物联网技术的输变电设备智能监测与全寿命周期管理示范应用平台，并研究输变电设备物联网的试验方法，建立试验平台，实现输变电设备物联网关键技术及应用实效验证。

示范工程在云南电网公司4个地区供电局示范应用，接入± 800kV换流站1个、110/220/500kV变电站12个、输电线路3条；建立输变电设备物联网中心主站示范工程实施范围如图4-1所示。



图4-1 输变电设备物联网示范范围

示范工程建设主要解决多种关键技术在大范围及多环节输变电设备领域应用工程实现问题，制定示范工程建设原则，在综合考虑安全、经济及技术先进性等因素的基础上进行示范工程设计与实施，并通过设备、网络及系统的测试，验证输变电设备物联网关键技术及示范系统应用效果，保证示范工程有效运行。

4.1 示范工程建设

1. 建设原则与建设架构

示范工程按照“突出重点、兼顾规模、体现特色”的原则，选取一个变电站及一条输电线路作为重点示范，其他变电站和输电线路以重要设备和实际监测需求来进行示范，具体建设原则如下：

(1) 站、线建设原则

选取220kV下关变电站为重点示范站，实现主变压器、所有110kV、220kV的断路器、容性设备、避雷器及母线等主设备的特征量全监测；选取220kV大镇线为重点示范线路，实现对覆冰、外力破坏等电学、力学、视频及微气象特征量的全监测，结合其他示范变电站和线路的监测，实现110/220/500kV等级、监测特征参量的100%全覆盖。

(2) 身份标识建设原则

对于重点示范变电站，按照“设备、设施全标识”原则对主变压器、断路器等主设备，开关柜、二次屏柜等二次系统，以及建筑物、电缆等进行全标识建设，其他变电站按照“重要设备全标识”原则进行建设。

示范工程系统建设架构如图4-2所示，按照输变电设备监测智能传感网、供电局及网省公司主站进行建设。

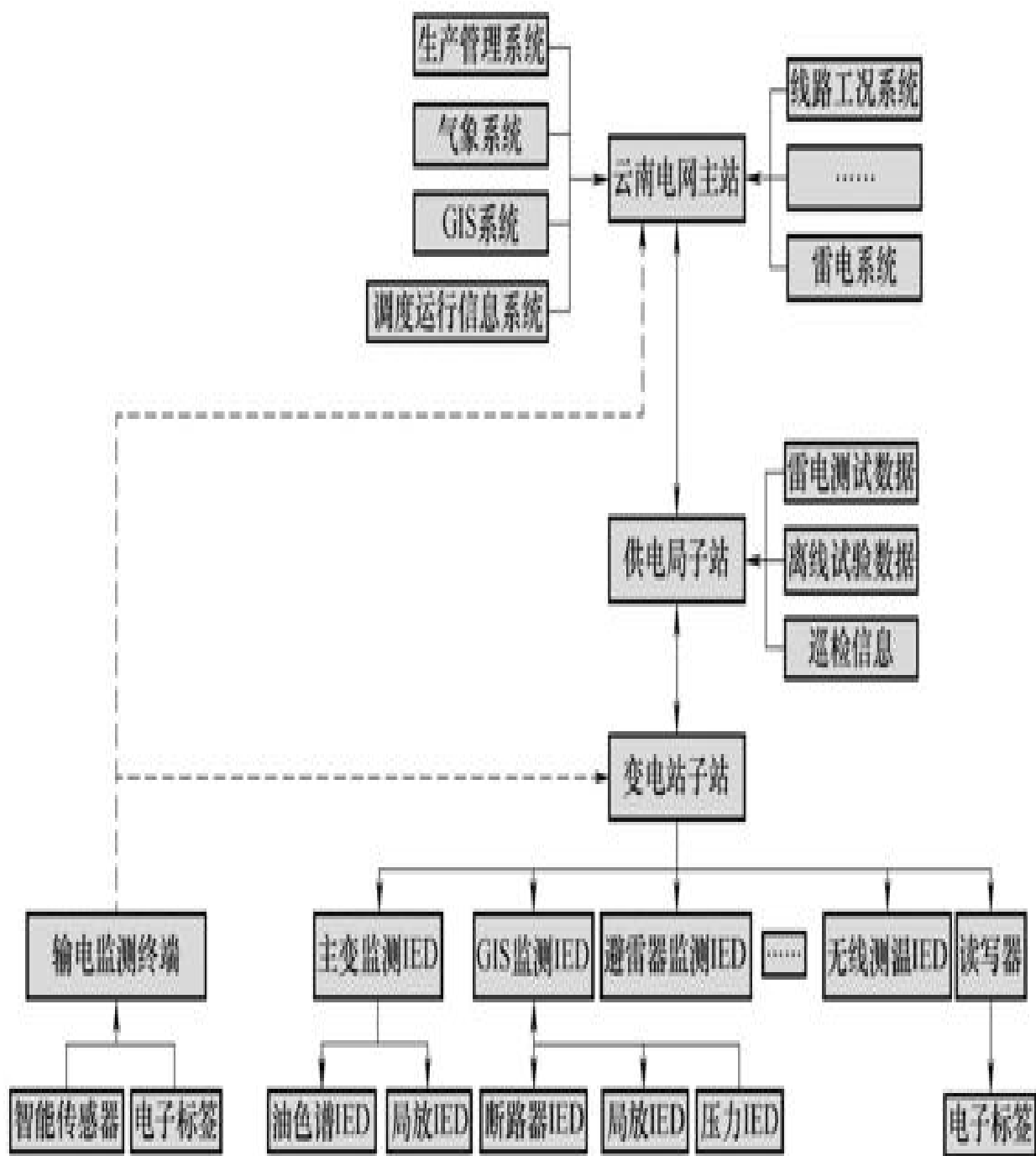


图4-2 系统建设架构

2. 输变电设备智能监测传感网络建设

输变电设备智能监测传感网络建设通过输变电设备身份标识、智能监测装置及移动互联网络建设，实现输变电设备身份标识、输变电

设备状态及环境信息智能感知、移动终端互联应用，建立可靠传输、可灵活接入的输变电设备智能监测传感网络。

（1）身份标识建设

示范工程共安装2837个超高频无源RFID电子标签，各变电站身份标识总体情况如附录32所示。

RFID标签粘贴如图4-3所示。



图4-3 RFID标签粘贴

(2) 智能监测装置建设

各示范点在接入原有输变电设备监测装置信息的基础上，按照监测需求新安装部分输变电设备智能监测装置。示范工程共新安装输变电设备智能监测装置334个，并接入已有输变电设备监测装置206套。变电设备智能监测装置安装情况如附录33所示，输电设备智能监测装置安装情况如附录34所示。

通过身份标识和智能监测装置建设，变电设备感知网络架构如图4-4所示。

3. 主站建设

供电局及网省公司主站对各变电站和输电线路的设备在线监测信息、省公司业务系统数据集成，提供灾害预警、辅助决策、全寿命周期管理等智能应用服务。供电局及网省公司主站建设内容包括服务器硬件环境建设、全景信息平台与全寿命周期管理系统部署，具体建设情况如下：

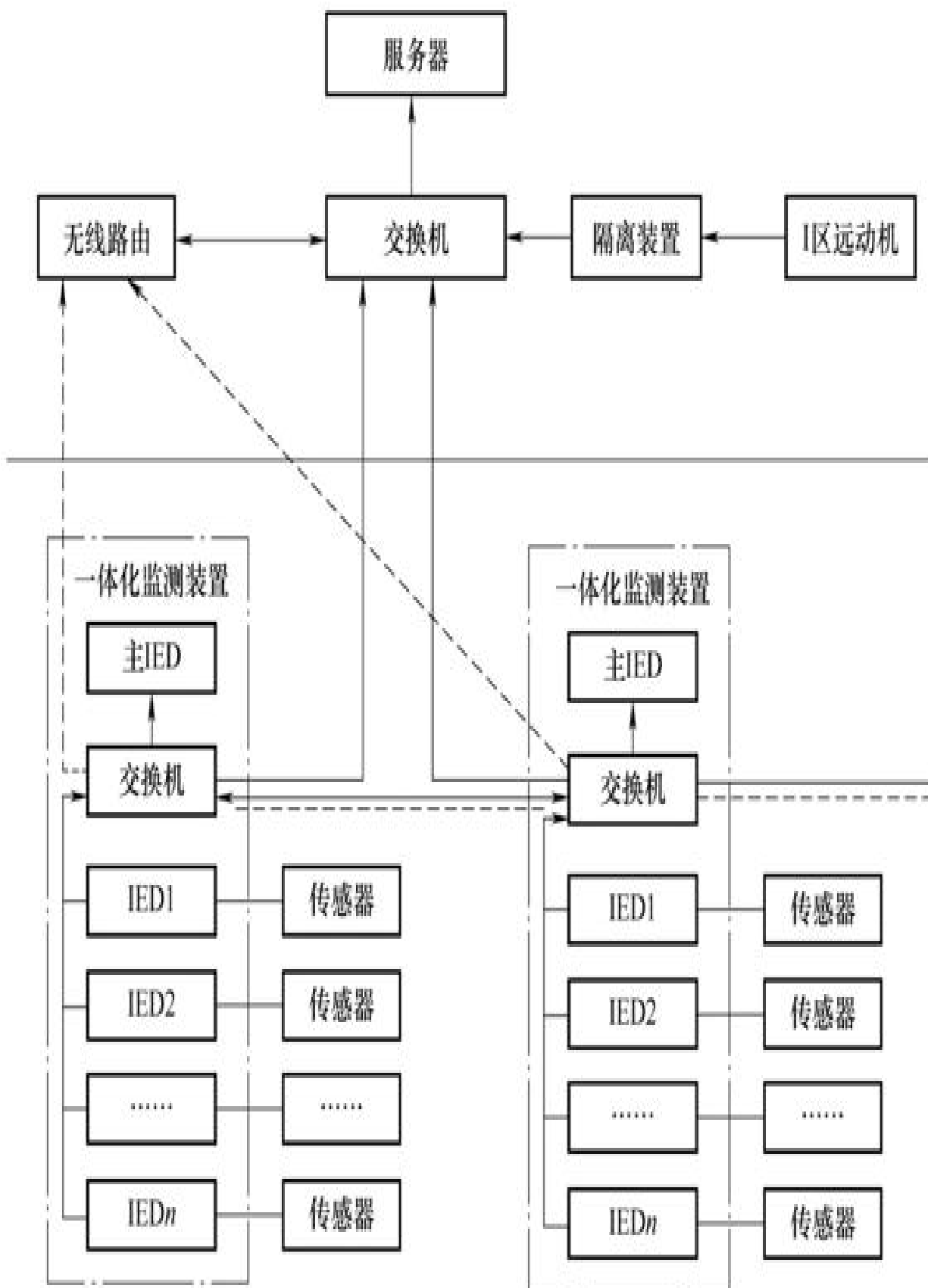


图4-4 变电设备感知网

(1) 硬件环境建设

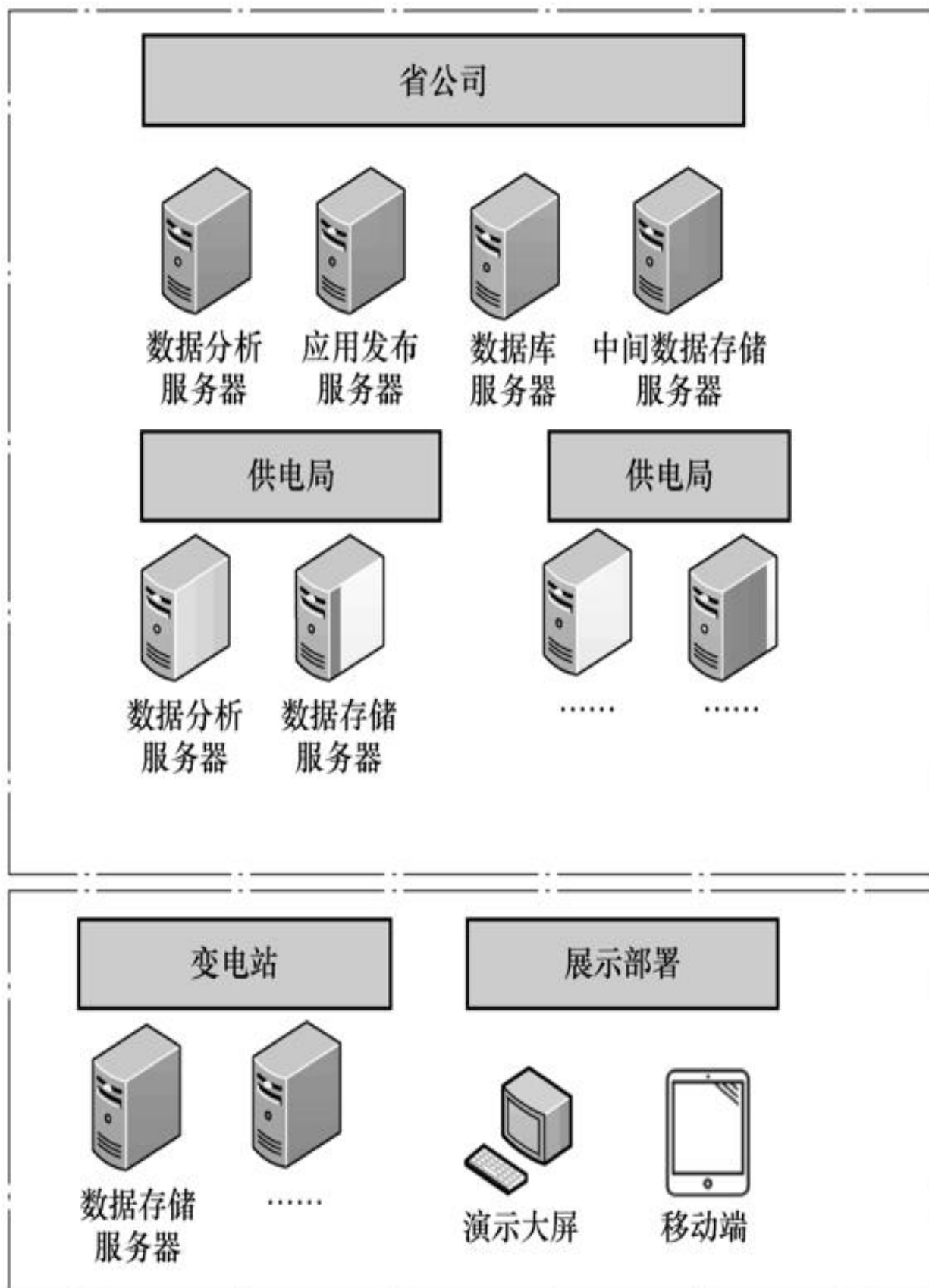
南方电网公司主站按已有硬件进行配置，云南电网公司主站满足2万个监测点和50万数据量及600个用户并发，供电局主站满足5000个监测点和20万数据量及200个用户并发，220kV及以上变电站满足200个监测点和5000数据量及50个用户并发，110kV变电站满足120个监测点和3000数据量及30个用户并发。

(2) 全景信息平台建设

全景信息平台集成了监测类数据、运行类数据、管理类数据三大类数据，接入整合了红外监测系统、视频监控系统、生产管理系统、线路工况在线监测系统、雷电定位系统、输电GIS系统、绝缘子污秽评估系统、状态检修辅助决策系统、物资管理系统、电力设备状态评价系统、技术监督数据分析系统、气象系统共12类系统数据。

(3) 全寿命周期管理系统部署

示范工程开发了输变电设备智能监测与全寿命周期管理系统，硬件部署按照多层部署、各级使用的原则，在省网、供电局、变电站进行三层分布式服务器、交换机等系统硬件部署，对系统的多层级处理和智能分析提供硬件支撑，如图4-5所示。软件部署通过平台采集单元、数据处理单元、集中分析单元进行多级处理，为系统快速智能处理提供软件支撑。



4.2 试验方法研究与平台建设

1. 试验方法研究

对于国家、行业标准满足项目测试需要的，则按国家、行业标准执行测试，对于项目新开发的装置及系统，主要开展监测装置可靠性评估、寿命评估、设备监测智能传感网整体模拟仿真比较以及设备状态和风险评估模型案例比较验证等试验方法的研究。

(1) 可靠性评估方法研究

1) 智能监测装置可靠性评估。

图4-6所示为智能监测装置可靠性等效模型，采用平均故障间隔时间MT-BF、平均无故障时间MTTF、平均修复时间MTTR以及可用度 A 、不可用度 U 等参数评估一体化智能监测装置的可靠性，采用非冗余系统、完全冗余系统、部分冗余系统以及备用系统来评估某个部件或分部件的可靠性，然后根据系统的拓扑结构评价整个装置的可靠性水平。

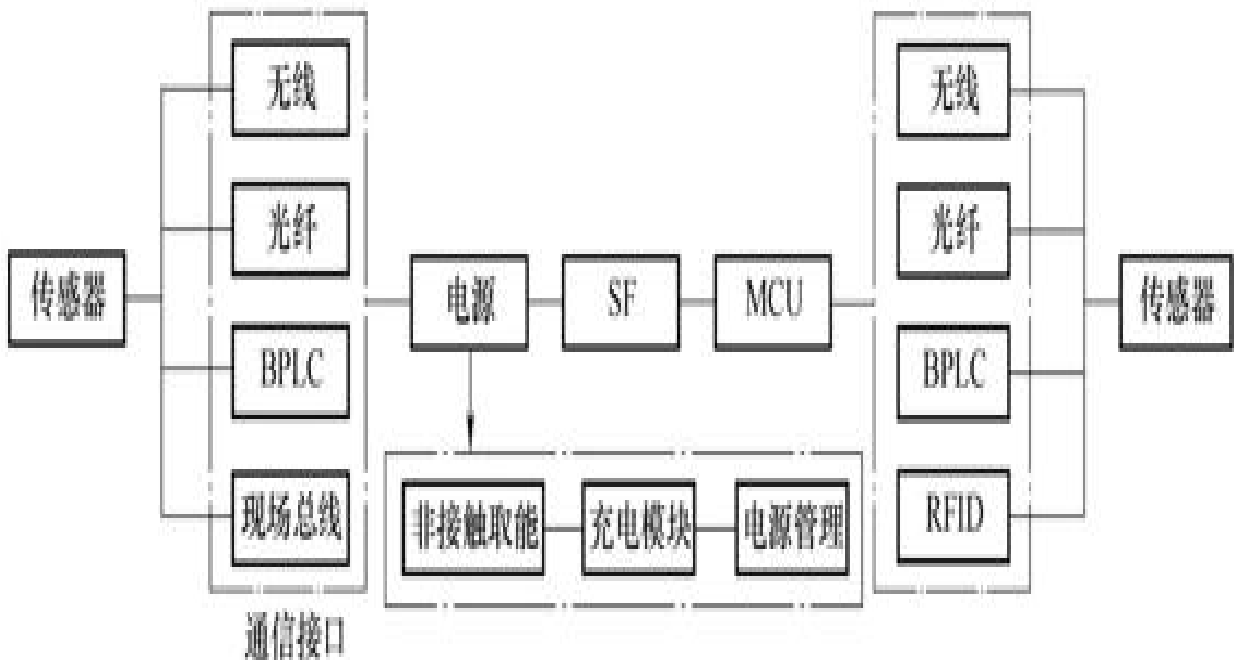


图4-6 一体化智能监测装置可靠性等效模型

2) 基于故障树模型的可靠性评估思路。

在输变电设备一体化智能监测装置FMEA分析的基础上，运用故障树分析方法建立一体化智能监测装置的故障树模型，考虑到不同事件（故障模式）对顶事件（装置故障）的影响程度（重要度），采用模糊层次分析法确定各事件的重要度，改善层次分析法存在的标度差异过大、判断矩阵一致性检验困难等不足，采用结合重要度的基于故障树分析的输变电设备一体化智能监测装置可靠性评估方法，实现对输变电设备一体化智能监测装置的可靠性评估。整体评估过程如图4-7所示。

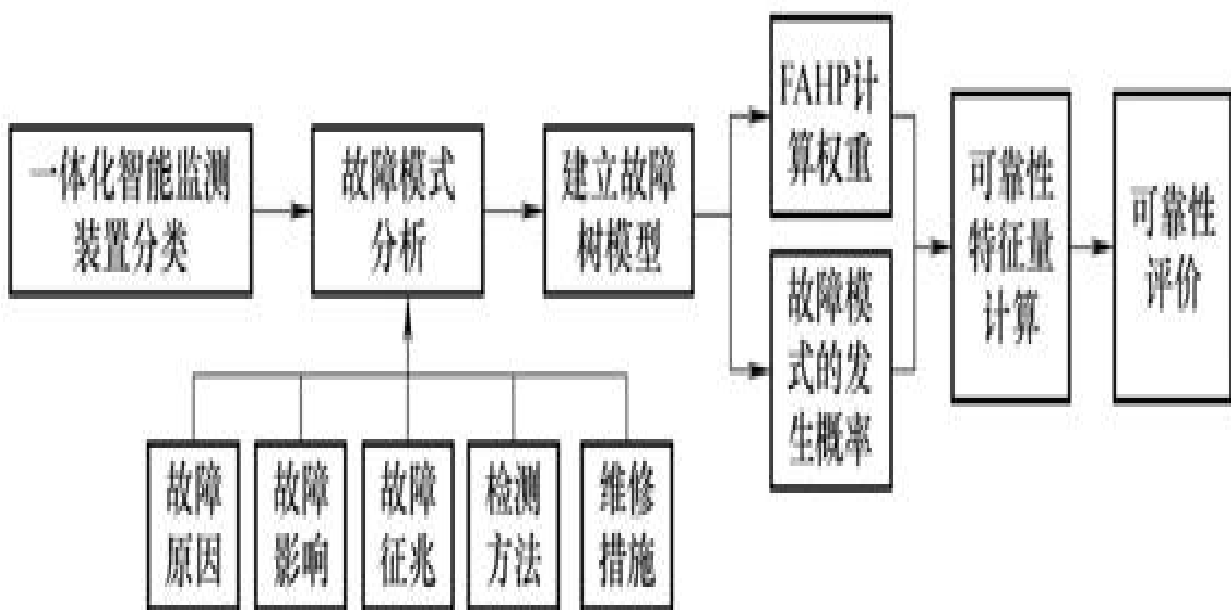


图4-7 输变电一体化智能监测装置可靠性评估流程

(2) 寿命评估方法

1) 基于图估法的寿命评估。

对于诸如输电线路覆冰监测装置等处于严酷运行环境与特殊运行工况的一体化智能监测装置关键组件，根据已开展的加速老化寿命试验结果，基于图估法估计其使用寿命。

恒定应力加速寿命试验的图估法，需要借助于两类类型的坐标纸，一类主要是威布尔概率纸或者对数正态概率纸；另一类是对数坐标纸，主要是单边对数坐标纸（用于以温度作为加速变量的情况）和

双边对数坐标纸（用于以电应力作为加速变量的情况）。概率纸主要用来分别得出不同应力水平下的寿命分布及其可靠性寿命特征量，对数坐标纸用来得到加速寿命曲线，并由此估计出正常应力水平下寿命分布的位置。

①以温度应力为加速变量的寿命模型。

基于Arrhenius模型，以温度应力为加速变量的寿命模型如式（4-1）所示：

$$L = Ae^{-1/kT} \quad (4-1)$$

式中， L 为一体化智能监测装置关键组件在温度 T 下的寿命； A 、 k 为常数。

由式（4-1）可见，寿命 L 将随温度上升而成指数下降，对此模型两边取对数，可得

$$\lg L = a + b/T \quad (4-2)$$

由式（4-2）可见，寿命的对数是温度倒数的线性函数。因此，若用 $t-1/T$ 单边对数坐标纸绘图，则可得出一条直线，然后用图估法可推算出器件在不同温度下的寿命值。

②以电应力为加速变量的寿命模型。

基于爱伦电应力模型，以电应力为加速变量的寿命模型如式（4-3）所示：

$$L = \frac{1}{kV^c} \quad (4-3)$$

式中， L 为一体化智能监测装置关键组件在测试电压 V 下的寿命； c 、 k 为常数。

对式（4-3）两边取对数，可得式（4-4），然后用图估法可推算出器件在不同电应力下的寿命值。

$$\lg L = -c \lg V - \lg k \quad (4-4)$$

③以湿度作为加速变量的寿命模型。

基于Arrhenius模型，以湿度应力为加速变量的寿命模型如式（4-5）所示：

$$L = A \int e^{-1/kRH} dt \quad (4-5)$$

式中， L 为一体化智能监测装置关键组件在湿度 RH 下的寿命； A 、 k 为常数。

由式（4-5）可见，寿命 L 将随湿度上升而成指数下降，对此模型两边取对数，可得

$$\lg L = a + b/RH \quad (4-6)$$

由式（4-6）可见，寿命的对数是湿度倒数的线性函数。因此，若用 $t-1/RH$ 单边对数坐标纸绘图，则可得出一条直线，然后用图估法可推算出器件在不同湿度下的寿命值。

2) 基于设备使用情况统计的寿命评估。

对于诸如色谱柱等一体化智能监测装置中的易损易耗部件，测试其在不间断工作下的寿命，结合实际运行中各组件年均使用次数、单次使用时间的统计情况，定量推断出其使用寿命。

$$L = \frac{L_D}{nL_d} \times 8760 \quad (4-7)$$

式中， L_D 为设备在不间断工作下的寿命； L_d 为设备单次使用平均时长； n 为设备年平均使用次数。

（3）整体模拟仿真比较

为实现输变电设备互联功能、输变电设备物联网全景信息平台数据完整性及输变电设备物联网主站模型正确性验证，采用整体模拟仿真比较法，将仿真信号源加入被测对象，将被测对象与标准源进行比较，得到比较结果差异，实现被测对象整体验证。变电设备物联网整体模拟仿真比较法如图4-8所示。

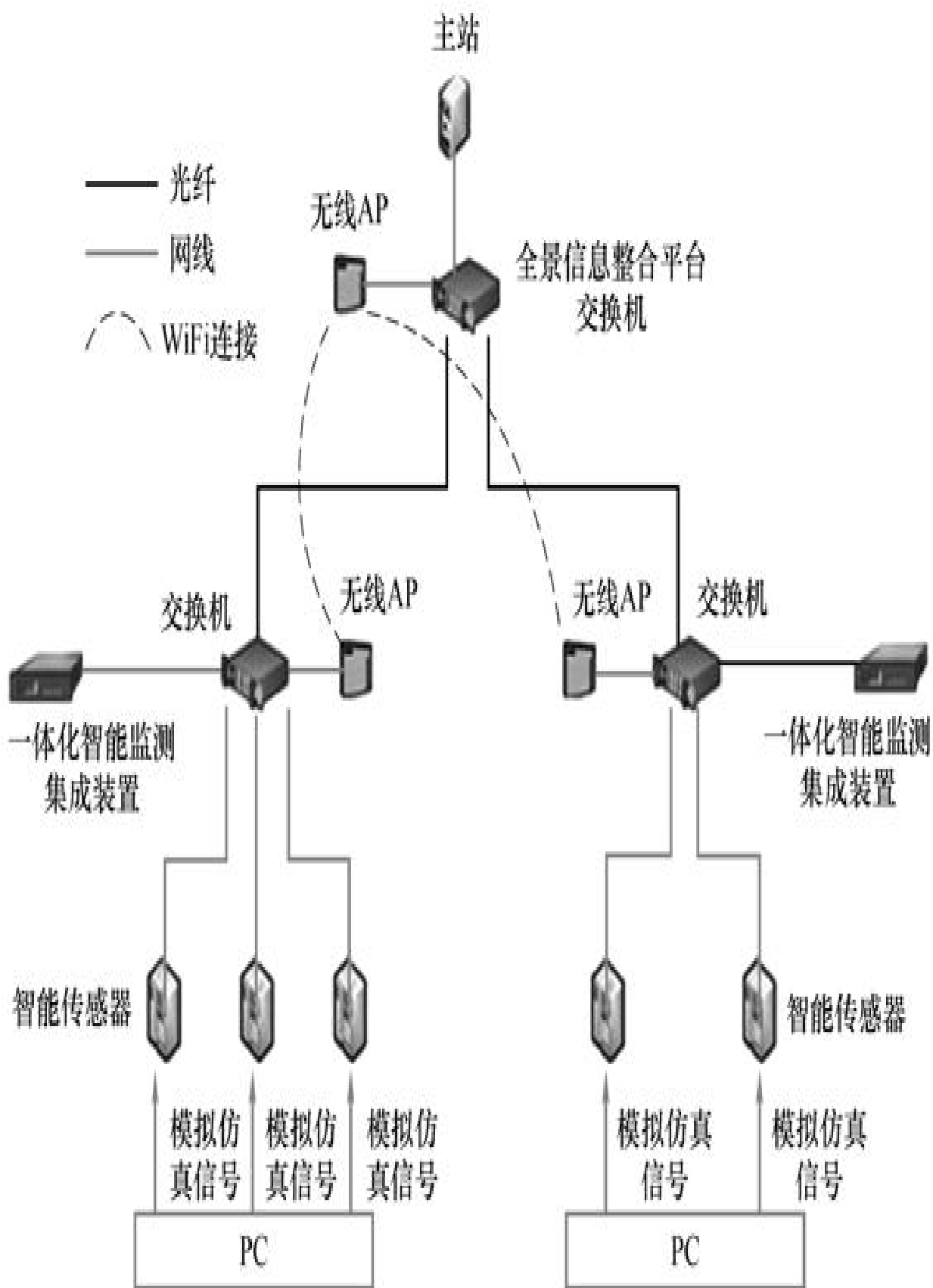


图4-8 整体模拟仿真比较法方法图

整体模拟仿真比较法模拟输变电设备物联网系统架构，利用智能监测装置、有线无线通信、全景信息平台及主站系统组件输变电设备模拟系统，实现输变电设备智能监测装置模型准确性判断、输变电设备互联有线无线切换、一体化集成监测装置互备用、IEC61850通信规约，全寿命周期管理系统模型等比较验证测试。

整体模拟仿真比较法可用于建立实物仿真平台，以项目建立的220kV GIS试验段仿真与整体试验平台为例，模拟可调局部放电缺陷典型模型，有效开展特高频局部放电内置监测系统、超声局部放电监测装置整体模拟测评工作。

(4) 设备状态和风险评估模型案例比较验证

设备状态和风险评估模型案例比较验证将实际案例数据仿真输入被测模型，对模型输出结果与实际案例结果进行比较，从而验证模型判断正确性。该方法适用于输变电设备监测模型、状态评估等模型的验证测试。

示范工程根据试验方法，编写了输变电设备物联网测试方案和基于物联网的输变电设备监测装置测试规范共10项，保证了项目顺利测试。

2. 试验平台建设

试验平台以电网公司电力研究院已有的电磁兼容、高低温、电气性能等试验平台为基础，针对输变电设备物联网整体模拟仿真测试需要，采用实物仿真及信号仿真技术实现测试平台搭建，搭建的核心测试平台包括：

1) 按照整体模拟仿真比较法采用实物仿真及信号仿真技术搭建输变电设备物联网模拟仿真测试平台，实现装置、网络及主站系统的整体测试。

2) 采用实物及信号仿真技术搭建10kV的局部放电智能传感器测量准确性长期带电整体模拟仿真测试单元、220kV GIS试验段整体模拟仿真测试单元，模拟实际运行条件考核各类监测装置长期运行能力。

搭建的测试平台总体架构如图4-9所示。

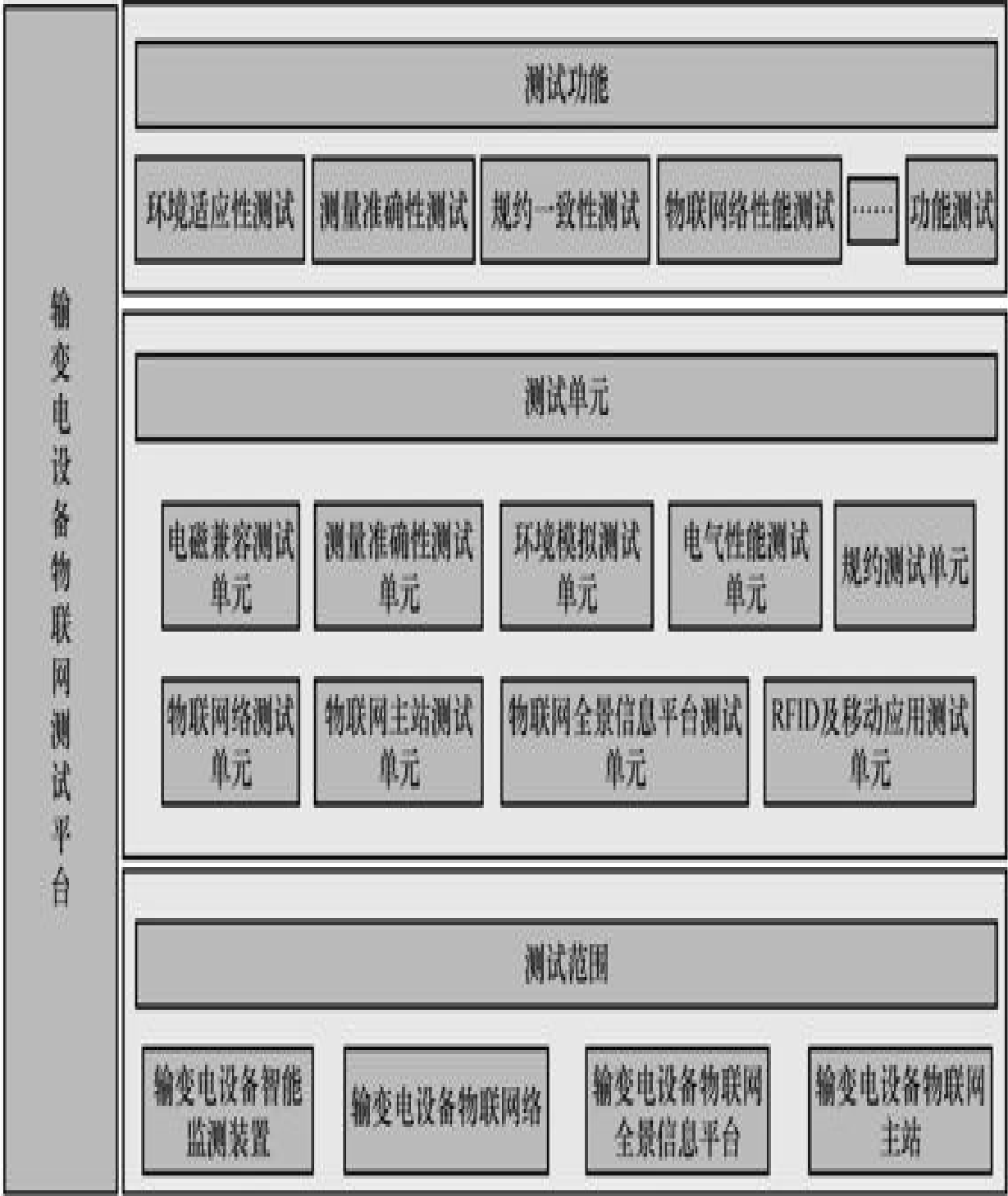


图4-9 测试平台总体架构

测试平台可实现的测试功能见表4-1。

序号	测试单元	测试项目
1	电磁兼容测试单元	静电放电抗扰度试验、电快速瞬变脉冲群抗干扰度试验、浪涌（冲击）抗扰度、射频场感应的传导骚扰抗扰度、工频磁场抗扰度、脉冲磁场抗扰度、电压暂降抗扰度测试
2	电气性能测试单元	绝缘电阻、冲击电压测试
3	环境模拟测试单元	高温、低温、恒定湿热测试
4	测量准确性测试单元	输电设备物联网一体化智能监测装置、容性设备绝缘在线监测智能传感器、绝缘油中溶解气体在线监测智能传感器、红外测温在线监测智能传感器、开关柜测温在线监测智能传感器、变压器局部放电在线监测智能传感器测量准确性测试
5	规约测试单元	输变电设备在线智能监测装置 IEC61850 通信规约测试
6	物联网络测试单元	输变电设备物联网功能及网络性能测试
7	物联网主站测试单元	输变电设备物联主站测试
8	物联网全景信息平台测试单元	输变电设备物联网全景信息平台测试
9	RFID 及移动应用测试单元	输变电设备 RFID 及移动应用测试

3. 测试试验与验证

示范工程按照输变电设备智能监测装置、输变电设备物联网络、输变电设备物联网全景信息平台及输变电设备物联网主站测试对象，进行了装置测试、整体测试、现场验收测试、输变电设备状态及风险评估模型验证测试。

(1) 装置测试

示范工程进行了试验样机初测、改进测试和可靠性测试、招标装置的验收测试，验证了试验样机及装置满足项目建设需要。

(2) 整体测试

利用输变电设备物联网模拟仿真测试平台对输变电设备智能监测装置、输变电设备物联网络、全景信息平台及主站组建输变电设备物联网系统进行联调测试，保证了系统互联互通。整体测试涉及6个供货厂家以及6类输变电设备智能监测装置、全景信息平台及主站，测试内容见表4-2。

表4-2 整体测试内容

	设备名称	测试项目
1	输变电设备智能监测装置	外观结构检查
		IEC61850 规约测试
		功能测试
		物联组网测试
2	输变电设备物联网络	互联互通备用功能测试
		有线无线切换测试
		网络性能测试
3	输变电设备物联网全景信息平台测试	数据完整性与正确性测试
4	输变电设备物联网主站测试	智能监测功能测试
		全生命周期管理功能测试
		模型验证测试
5	RFID 及移动应用测试	EPC 编码读写测试
		人机交互功能测试

（3）现场调试

示范工程对输变电设备智能监测装置、物联网、全景信息平台、主站及移动应用进行现场调试试验，有效完成了示范工程调试。现场调试项目如图4-10所示。

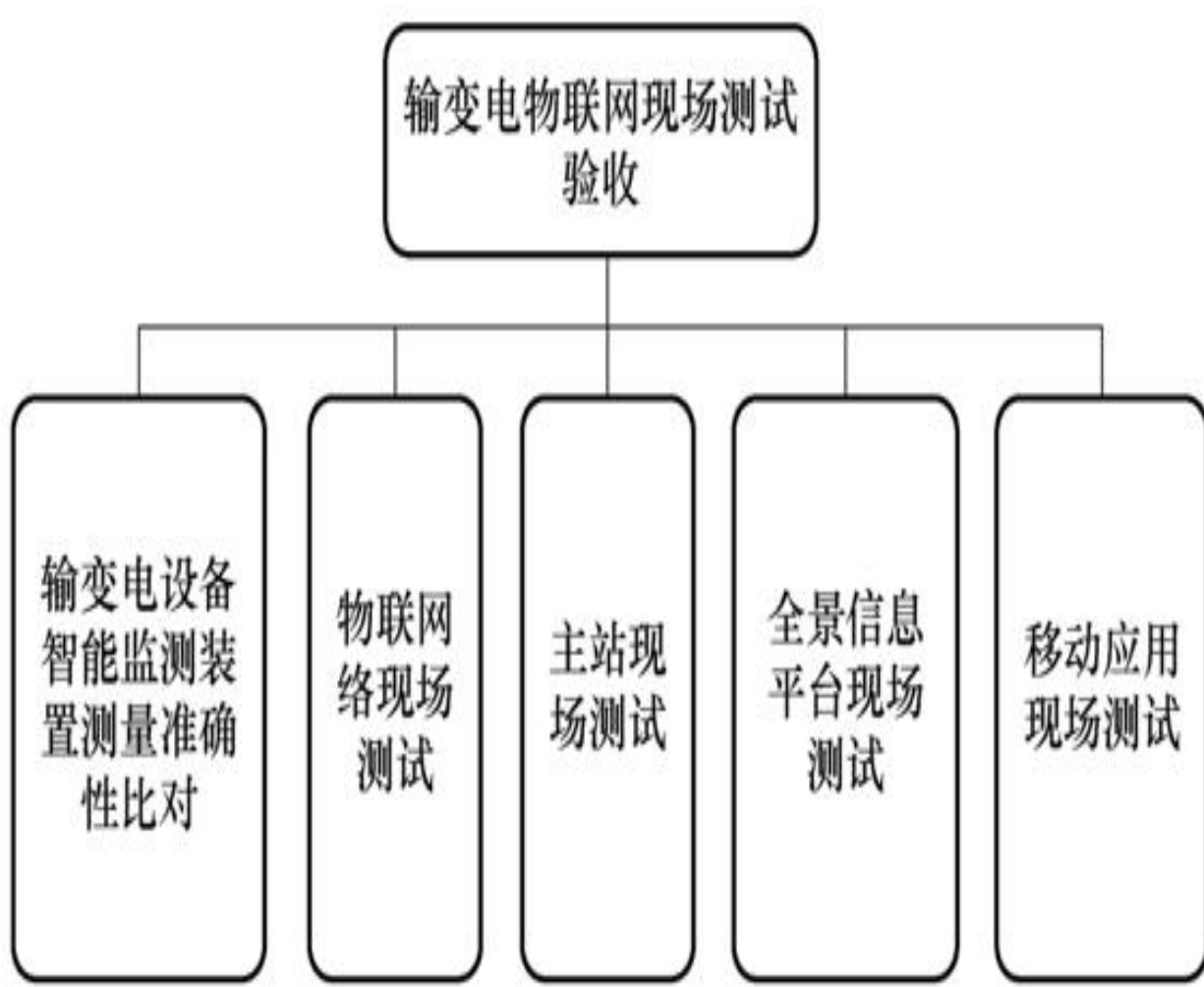


图4-10 输变电设备物联网现场测试验收

（4）设备状态和风险评估模型案例比较验证

现行输变电设备状态评价主要以人工打分、定期评价的形式，依赖规程阈值和人工估测对设备进行评价，从宏观上对设备运行状态进行判断。而全寿命周期管理系统能够充分融合输变电设备的环境信息、运行工况和实时监测进行异常触发和定期诊断的实时状态评价，给出可能出现故障的设备部件、具体原因、后果影响和处置措施。评价结果的正确性直接影响到系统的可靠性，因此，需要对评价方法的正确性进行验证，从而保证评价结果的正确性。

1) 验证方法。

项目以案例验证的方法，将实际案例中设备运行的相关工况数据，导入系统评价模型中进行自动诊断，与实际案例进行对比分析，对系统模型的实际评价及预测效果进行验证。

选取全网中符合模型验证的设备故障和缺陷案例，通过对案例相关性和数据健全性的判断，对评价所需要的特征量进行规范和整理，提供包括设备负载数据、在线监测数据、试验数据、巡检数据等相关工况信息的案例验证数据支撑。

将相关数据导入系统评价模型中，得到系统评价结论，与案例实际情况进行对比，按设备类型对验证情况进行分析，判断模型对设备故障诊断的准确程度，当通过系统模型计算得出的评价结果与实际案例的设备故障部件一致，故障模式差异较小时，即判定模型验证结论可靠。

2) 验证结论。

通过导入包括变压器、断路器、避雷器、电流互感器、电压互感器共56个实际案例，对系统评价模型进行验证，通过对诊断结果与现场设备故障部件及故障模式结果进行分析，得出系统评价模型综合准确率为92.9%，由此可以验证系统评价模型能正确评价输变电设备的运行状态、准确判断输变电设备的故障模型及故障部件，满足实际应用需求。

4.3 示范应用效果验证

1. 物联网特征和全生命周期管理支持的实现和应用

通过物联网技术在输变电设备监测与管理中的应用，使系统由“从物到人的简单数据汇聚和开环、集中式的数据处理、分析与展示”提升到“全面感知、物物互联、人机互动，闭环、分布式的数据智能处理、分析、决策与自动推送”。

(1) 全面感知和智能处理技术特征的实现和应用

系统以RFID、二维码等电子标签为统一标识，汇集设备监测传感网所采集的各设备的特征量、整合物资基建、生产管理、气象地质、自然灾害、缺陷故障、试验报告等系统的业务数据，结合系统中的分析评价策略和模型，得到设备的当前状态、历史信息和趋势信息、预测状态和剩余寿命，完成对输变电设备的“历史状态”“在线状态”“未来状态”进行全面感知，实现对输变电设备的状态、环境信息、本体属性及全寿命周期信息进行全面感知和识别。

系统可给出设备外观结构图像、规格、型号、制造厂商、投运日期、部件及技术参数等基础信息，如图4-11所示。

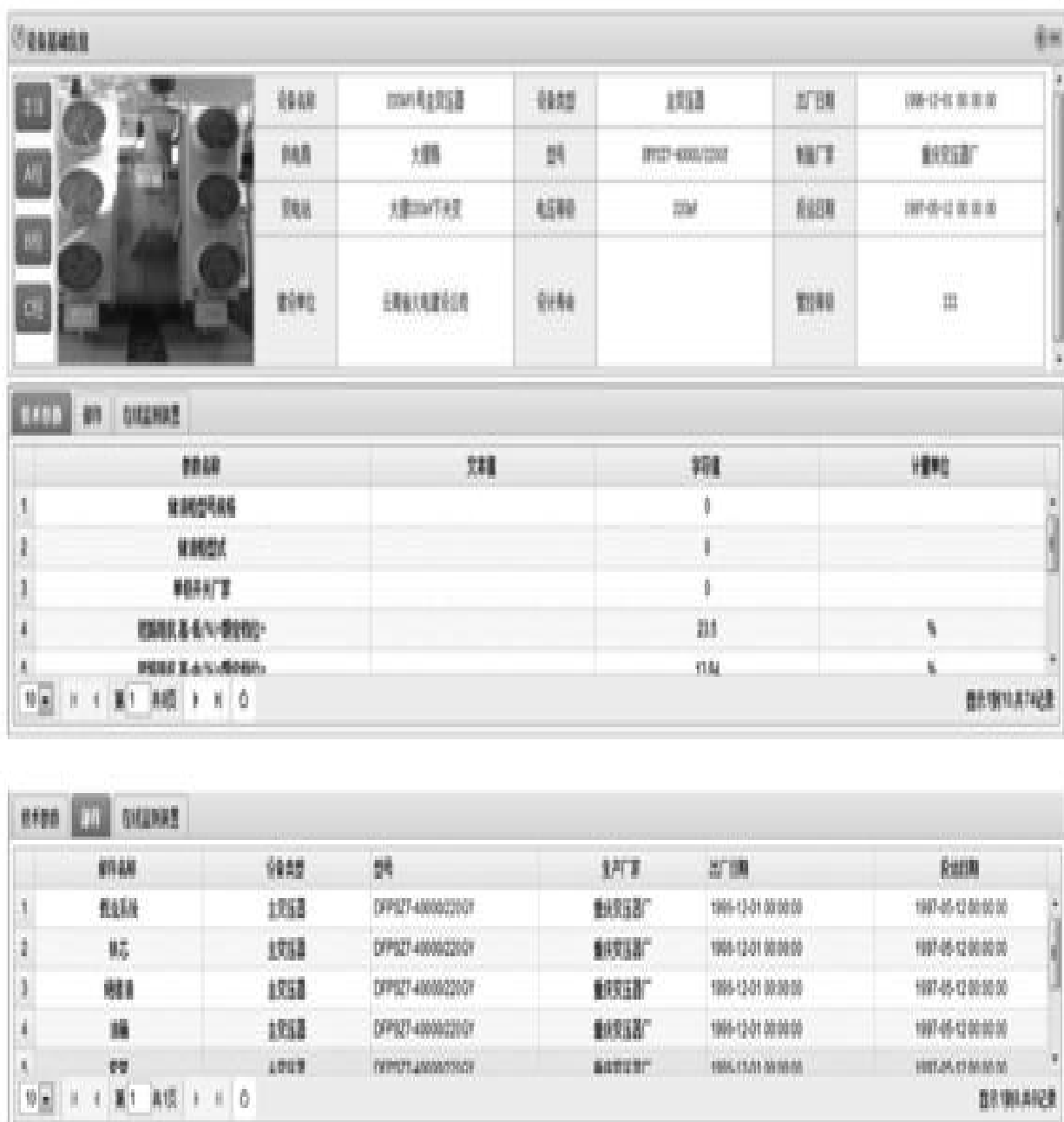


图4-11 设备基础界面

系统可以给出设备在线监测状态、巡检状态、试验状态、运行状态、气象状况、健康状况、风险状态和辅助决策的状态数据及功能，如图4-12所示。

在线数据	巡检状态	试验信息	运行状态	气象状况	健康状况
监测数据量: 11条 精度: 11条 监测时间: 2013-03-28 10:04:00	本次巡检状态: 正常 上次巡检状态: 正常	试验类型: 雷击短路试验 试验时间: 11条 正数: 11条 数量: 11条 试验时间: 2013-06-12 10:04:00	负载率: 71 温度范围: 11 环境温度范围: 11	气温: 11.1℃ 湿度: 11% 气压: 99.1kPa 风速: 4.1mm/s 风速: 1.1mm/s	故障类型: 11条 故障时间: 11条 严重程度: 一般

图4-12 设备总体状态界面

可以提供设备当前在线监测数据、历史趋势数据和阈值、专项诊断等在线监测诊断结论，如图4-13所示。

可以给出设备实时温度、历史温度分布；提供设备实时电流、实时电压的当前、历史数据，给出设备负载的情况，如图4-14所示。

可以给出设备的当前试验状态和历史试验记录，得到设备具体试验项的状态和试验数值，如图4-15所示。

可以给出设备巡检的当前和历史记录，包括日常巡检中的温度记录、跳闸次数等巡检数值和巡检记录，如图4-16所示。

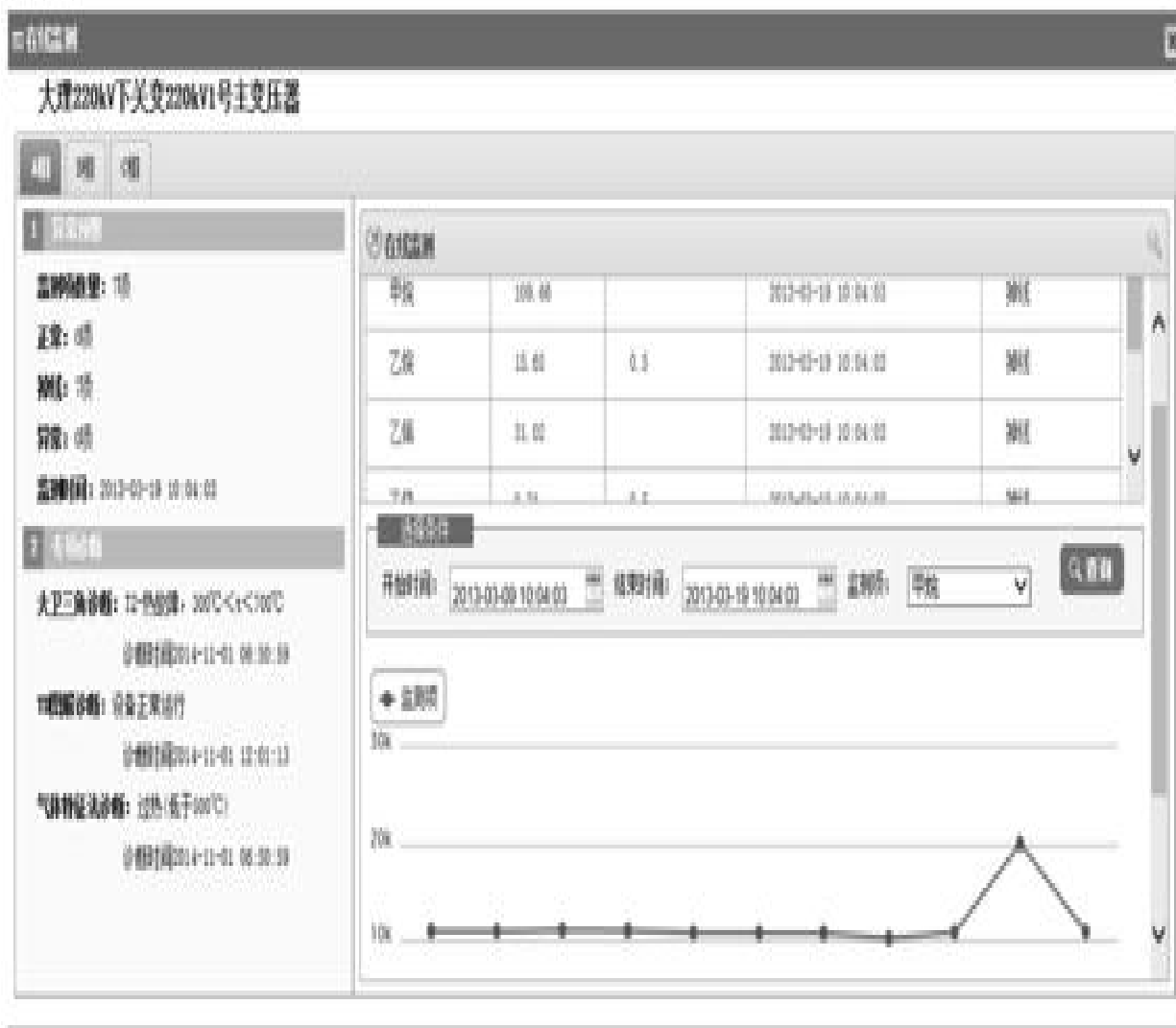


图4-13 设备在线监测状态界面



图4-14 设备运行状态界面



图4-15 设备试验状态界面

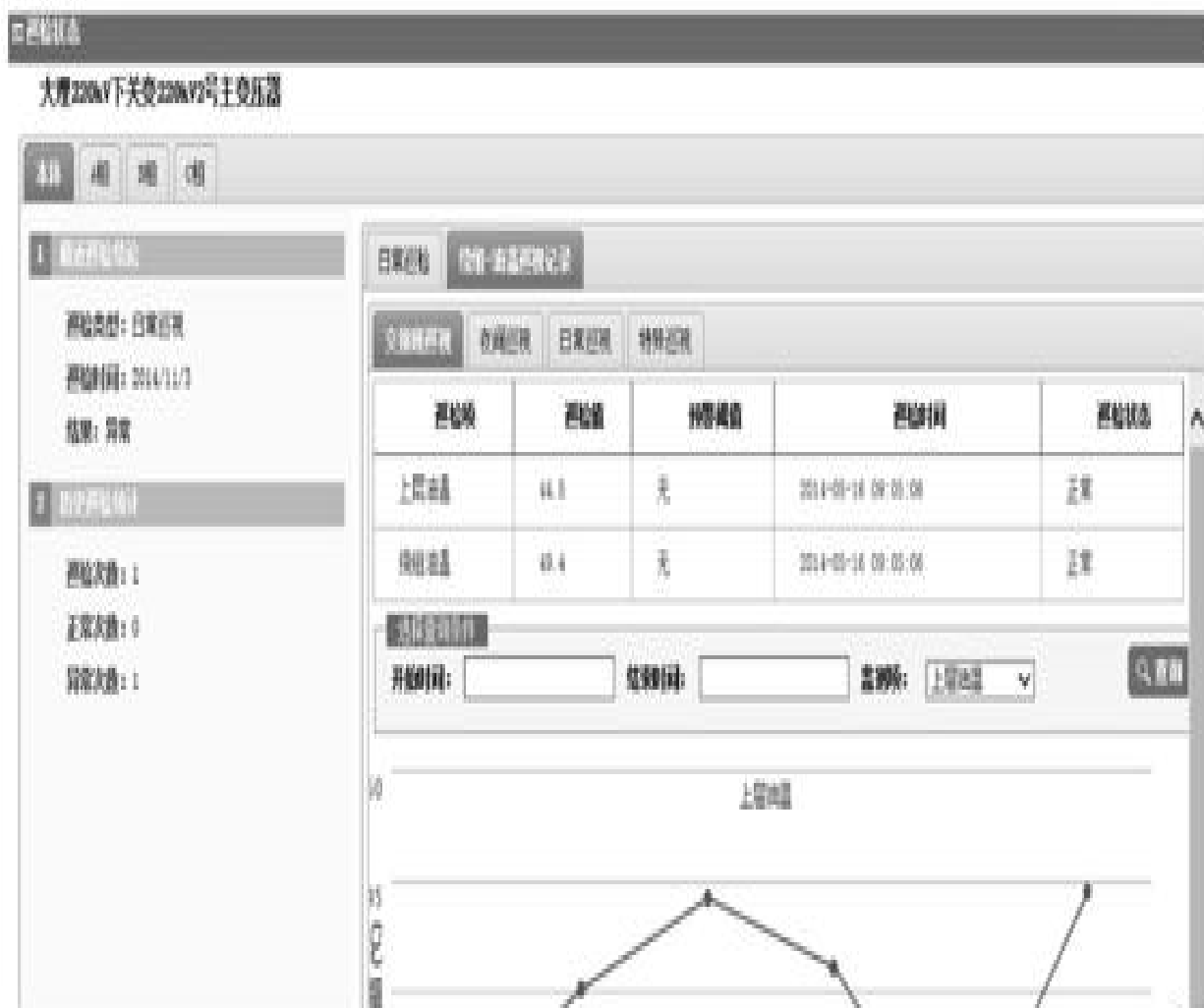


图4-16 设备巡检状态界面

可以得到设备当前的温度、湿度、风速等实时气象状态和未来三天的气象预报数据，如图4-17所示。

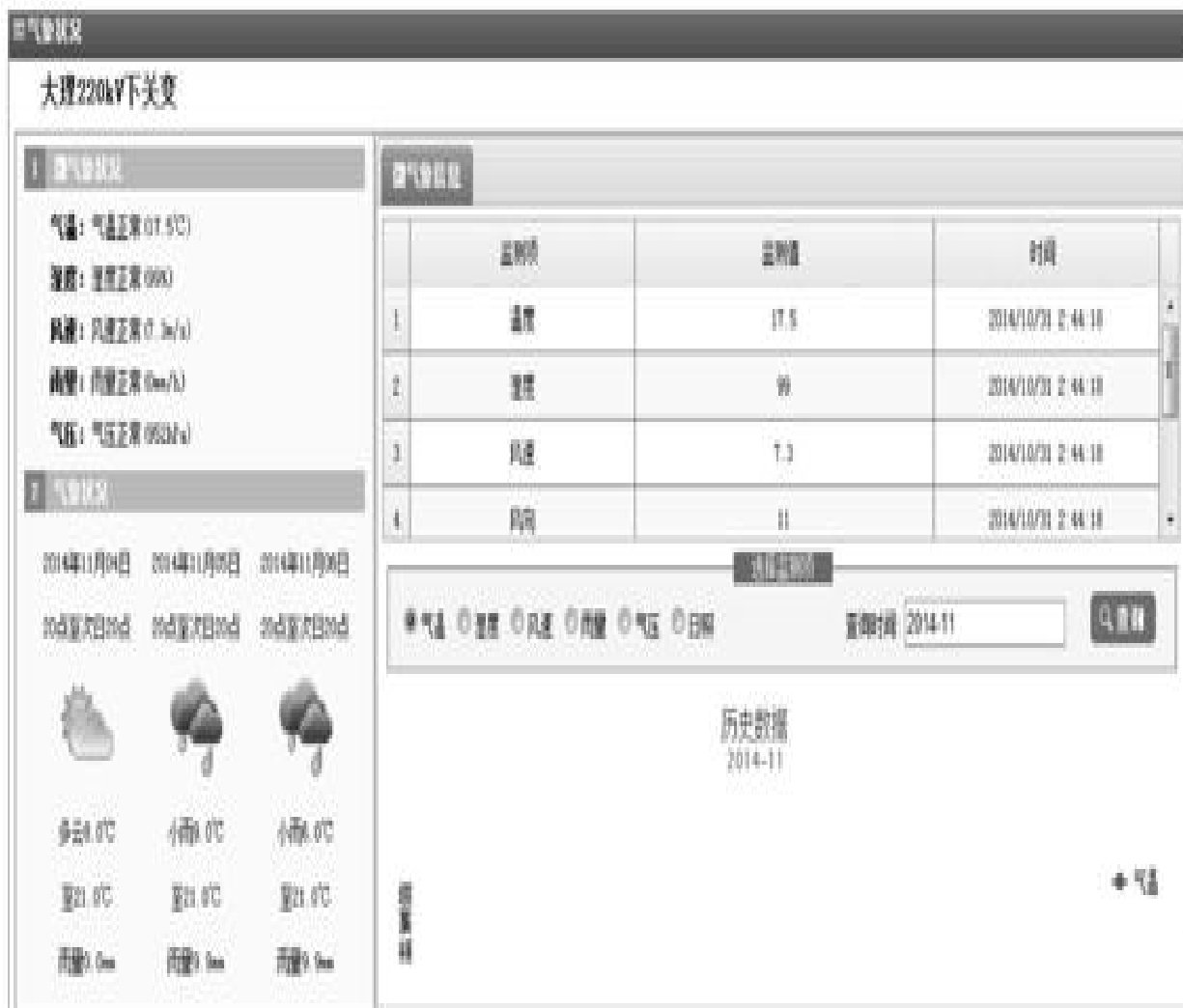


图4-17 微气象状况

可以得到设备健康状态、精确到设备部件的故障模式、故障概率和严重程度的设备健康评价信息，如图4-18所示。

可以得到设备的当前风险值、风险等级以及历史风险趋势和未来风险预测的设备风险评价，如图4-19所示。

可以提供设备的故障现象、故障原因、处理措施、检修内容、预防措施等辅助建议及结论，如图4-20所示。

(2) 物物相联和人机互动技术特征的应用和实现

系统通过建立同一间隔设备、不同间隔设备、不同变电站、变电站与线路、线路与设备、线路与线路的关联关系，结合设备规格信息、缺陷信息、安装位置信息、状态信息，可以得到物物间的关联信息；也可对不同特征量进行关联分析，如特征值和缺陷、特征值和设备等信息，从而体现不同的设备、不同的间隔、不同的子站、不同的主站之间的“物”的信息互联互通，在系统中实现物物相联。

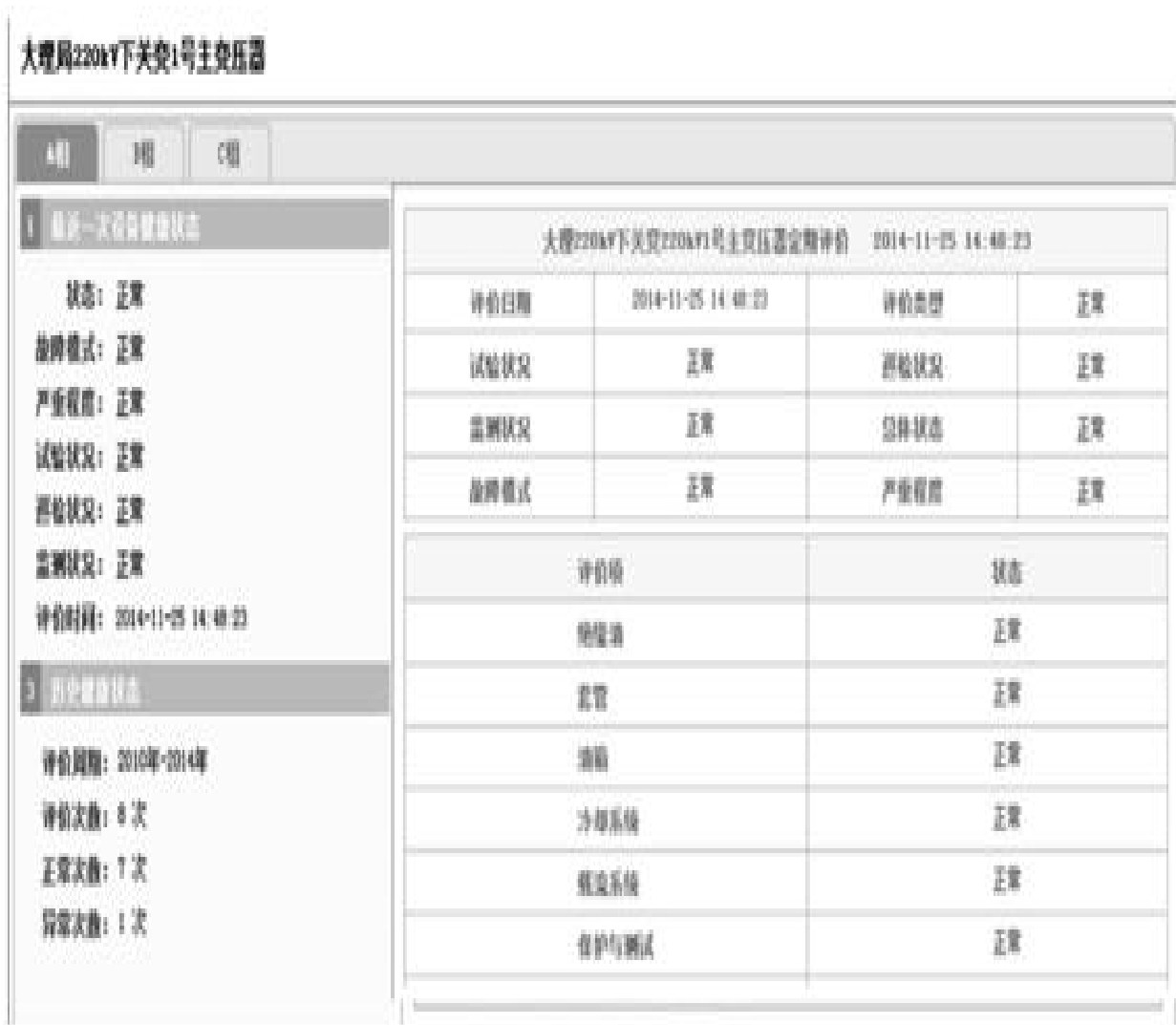


图4-18 设备健康状态详情界面



图4-19 设备风险状态详情界面

图4-20 设备辅助决策界面

系统可以给出同规格设备、同间隔设备、同状态设备、关联物资、关联线路、关联缺陷的关联数据及功能，如图4-21所示。

设备关联统计					
网络号设备	网络号设备	网络号设备	关联物理	关联物理	关联物理
网络号设备：51台 涉及供电局：4个	网络号设备：8台 涉及设备类型：3个	网络号设备：6台 涉及供电局：1个	涉及供电局：1个 涉及供电局：1个	关联物理：13条 涉及供电局：2个	关联物理：0个 涉及供电局：0个

图4-21 设备关联总体界面

系统可以得到全网相同规格的设备详情及地理分布情况，给出按照设备类型和地理分布的统计分析结果，如图4-22所示。

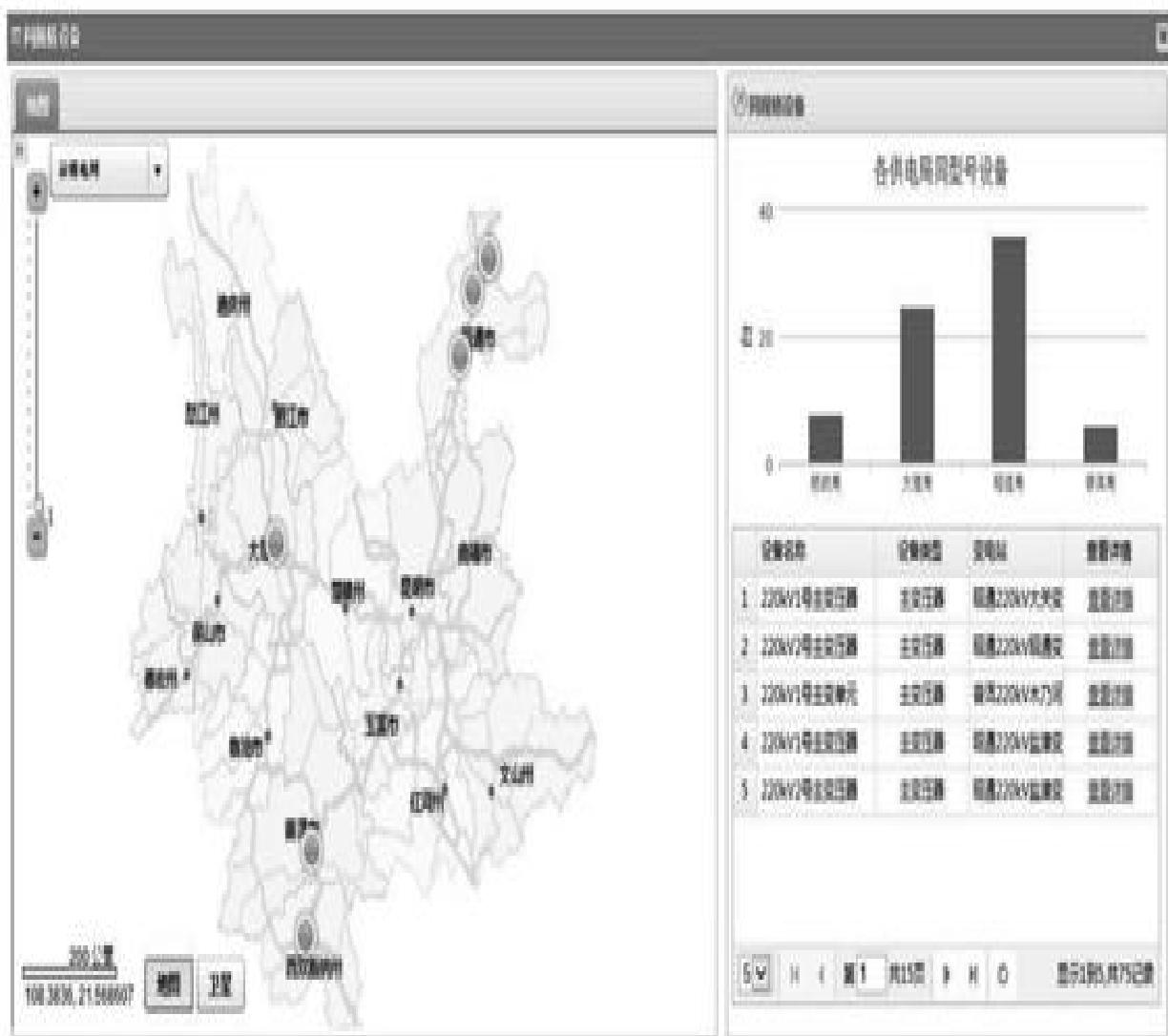


图4-22 同规格设备界面

系统可以得到变电站同一间隔的设备详情及一次接线图分布情况，给出按照设备类型的统计分析结果，如图4-23所示。

系统可以得到全网相同运行状态的设备详情及地理分布情况，给出按照设备类型和地理分布的统计分析结果，如图4-24所示。

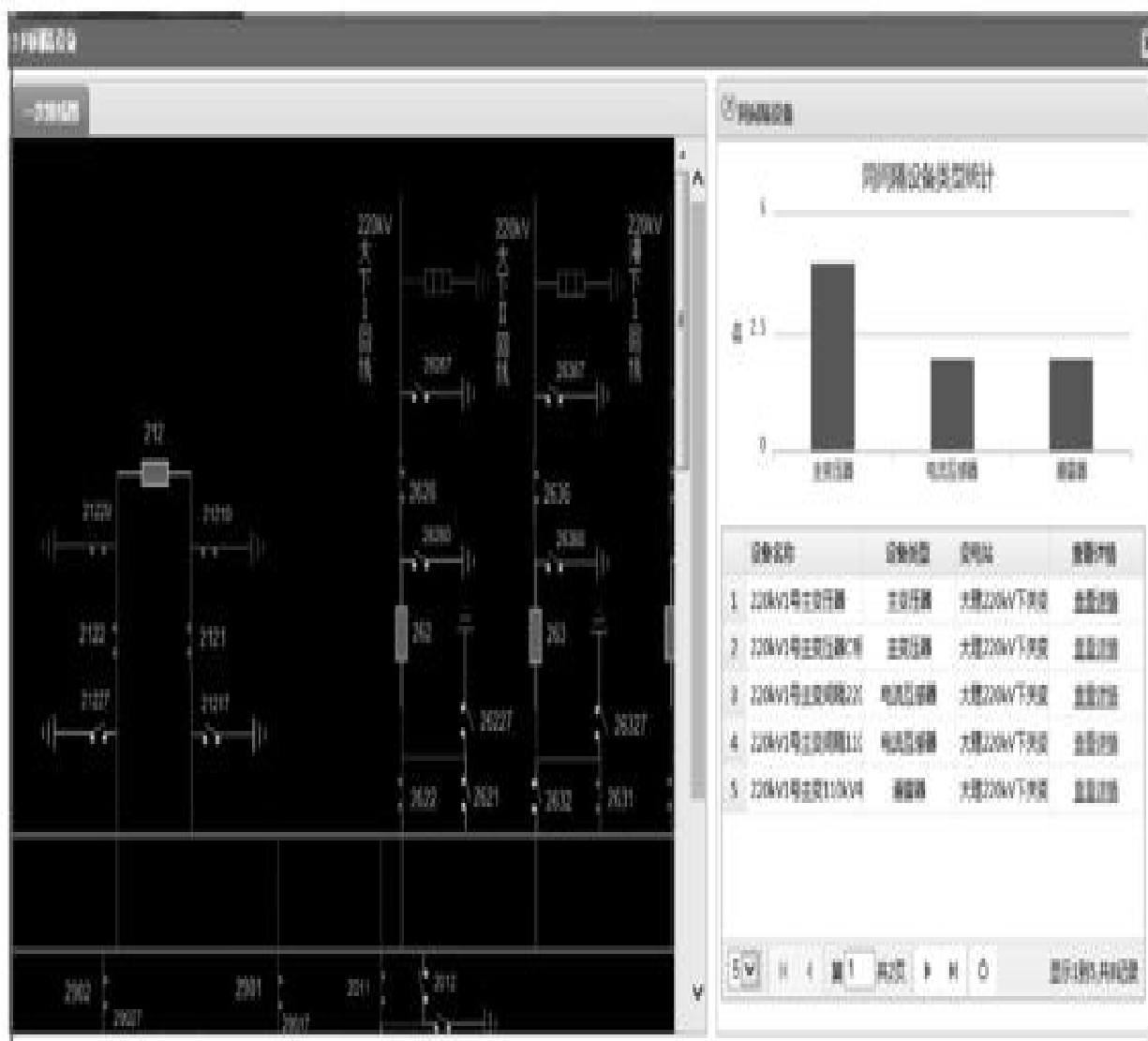


图4-23 关联线路设备界面

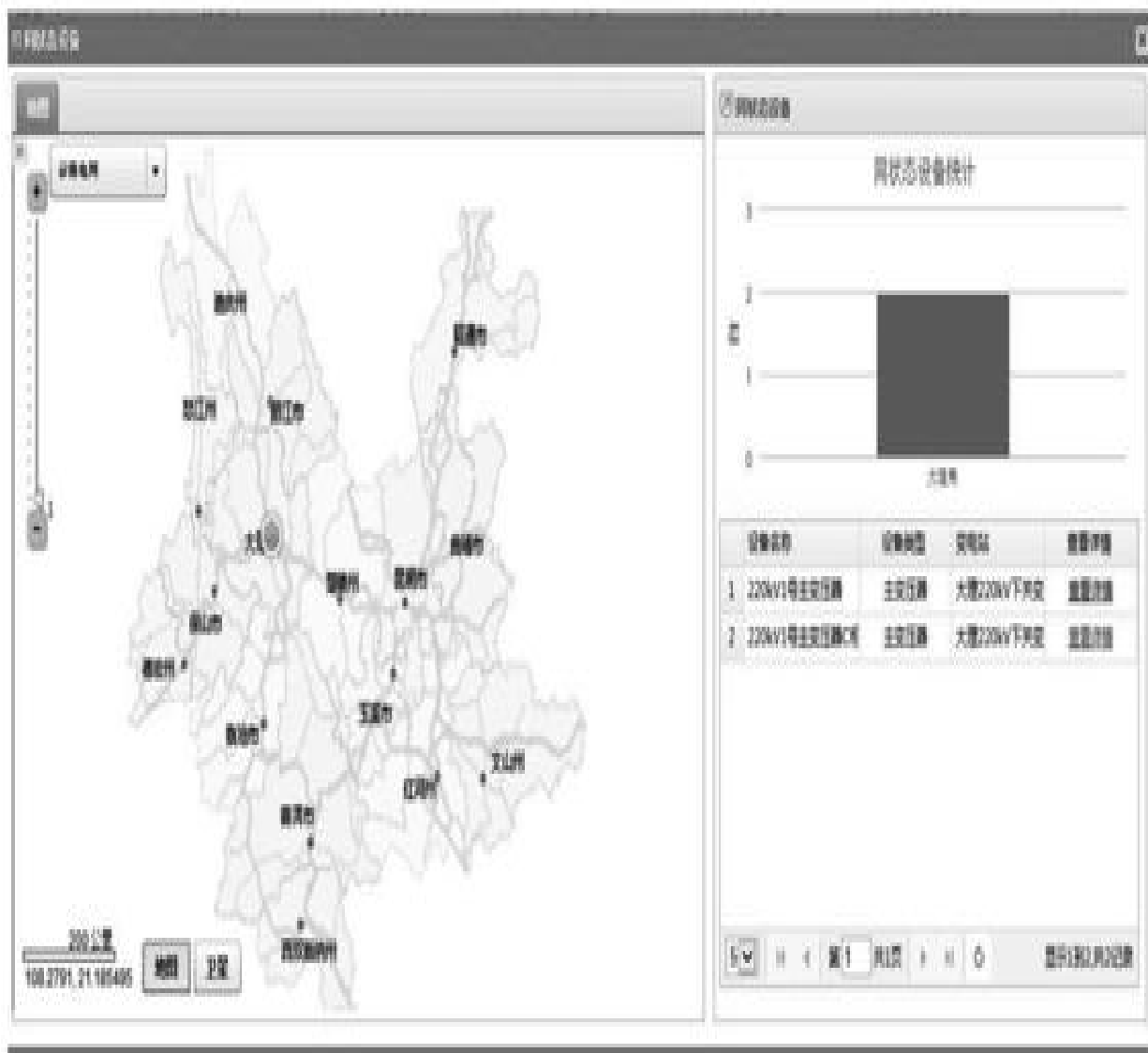
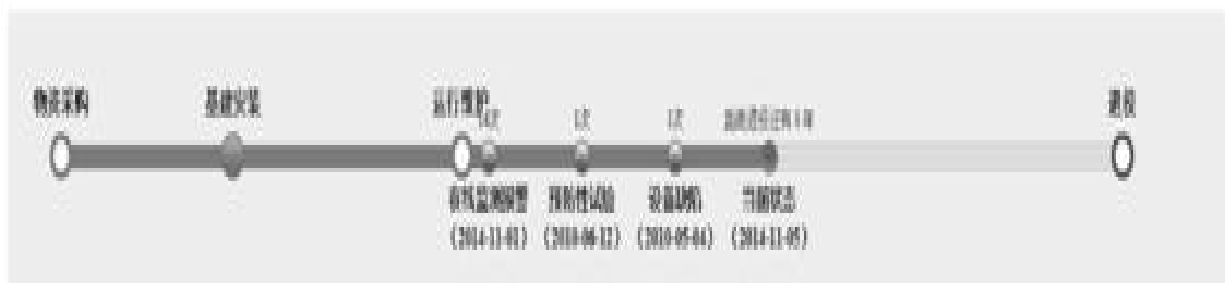


图4-24 关联状态设备界面

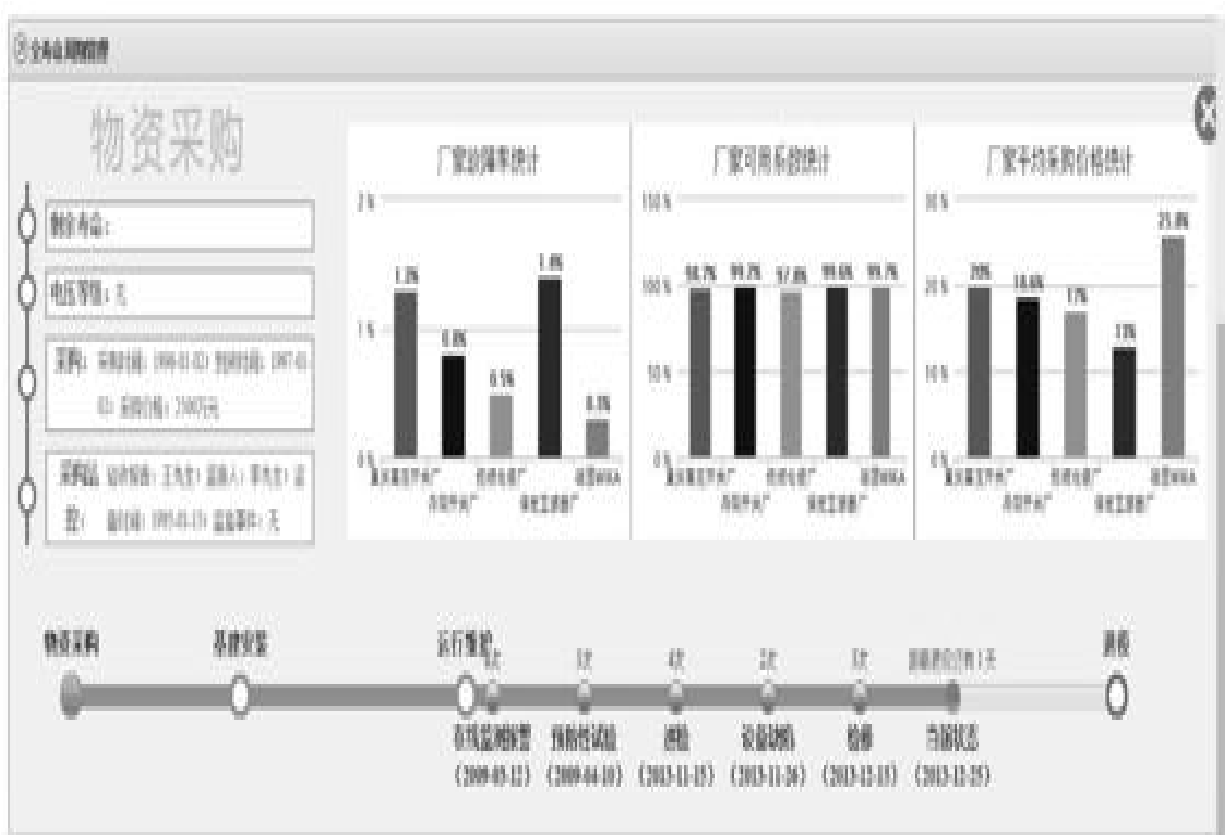
(3) 全寿命周期管理支持的应用和实现

系统结合物资采购、基建安装、运行维护、退役管理四个环节的分析评价模型及方法，可以得到设备在物资采购、基建安装、运行维护、退役管理的技术指标和统计分析，如图4-25所示。



1) 物资采购。

系统可以得到物资采购的相关信息, 给出不同厂家设备的采购成本、维护成本、可靠性、技术复杂度等对比分析结果, 以及厂家的质量评价结果, 如图4-26所示。



2) 基建安装。

可以得到设备的基建安装相关信息，包含安装及时率、安装费用、交接试验结论等，给出承包商的质量评价，如图4-27所示。

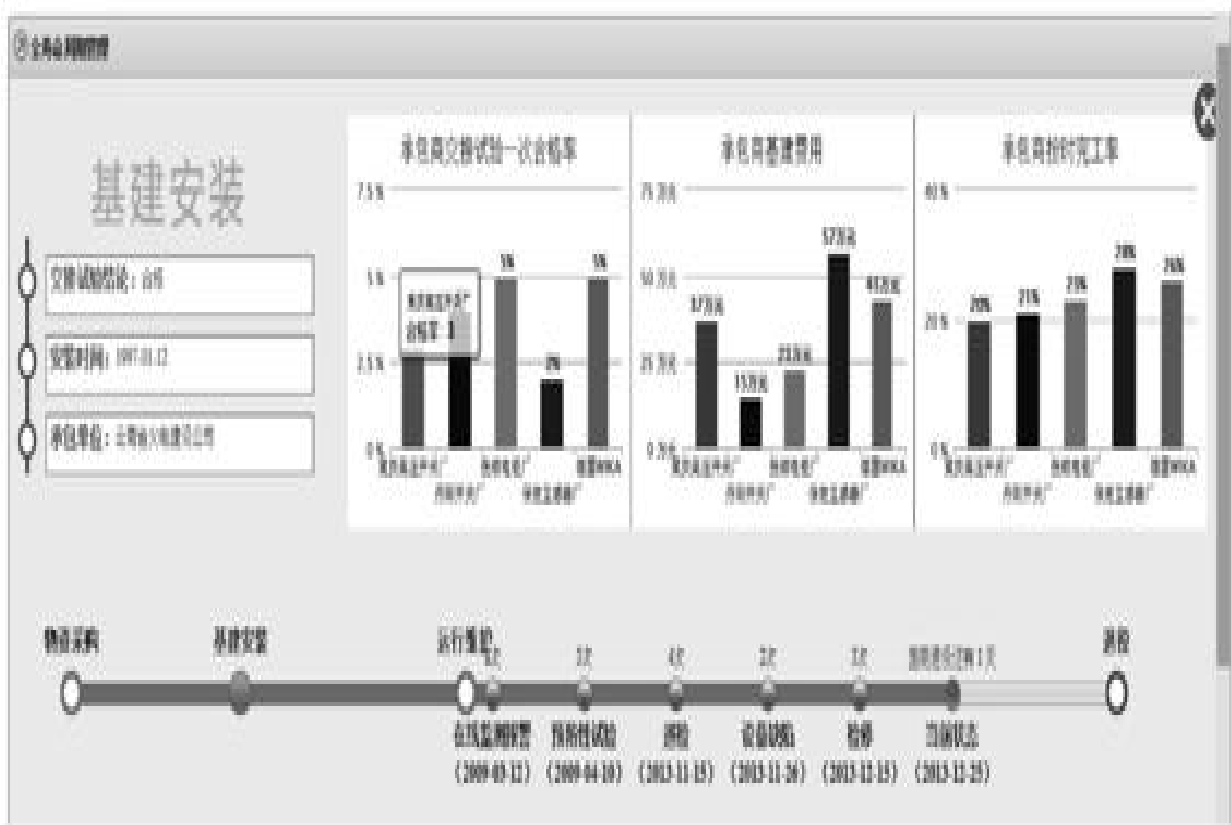


图4-27 设备基建阶段界面

3) 运行维护。

可以给出设备投运以来发生的异常、缺陷、故障、预试定检等设备运行经历，以及故障缺陷分析结论，如图4-28所示。

4) 退役管理。

可以得到输变电设备的退役情况，包括提前退役率、各类型设备退役处置成本、设备平均服役年限等统计分析结论，如图4-29所示。

2. 面向电网设备管理运维人员的应用

电网设备管理和运维涉及基建、物资、现场检视、巡检、设备管理等部门人员，系统通过针对面向电网设备管理和运维人员的应用，

可以提供给不同人员更多的数据支撑和功能服务。

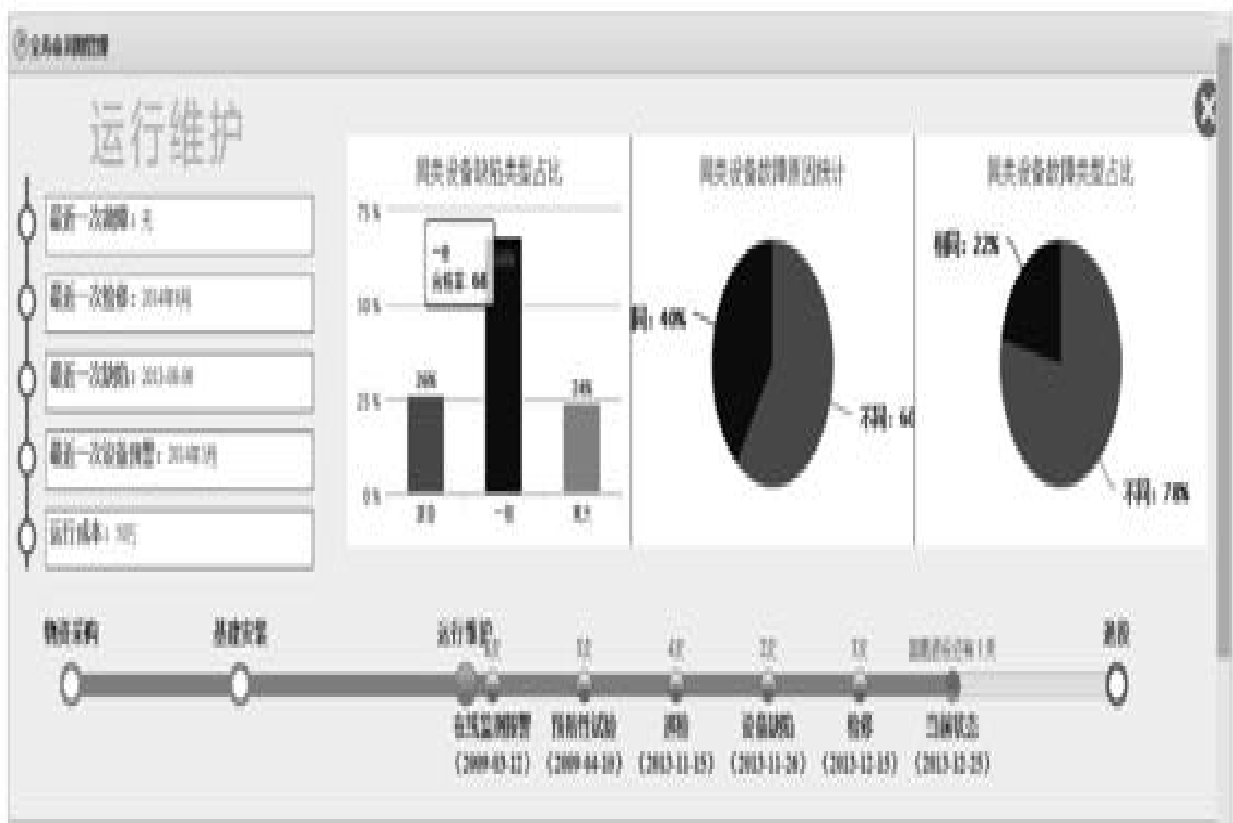


图4-28 设备运维阶段界面

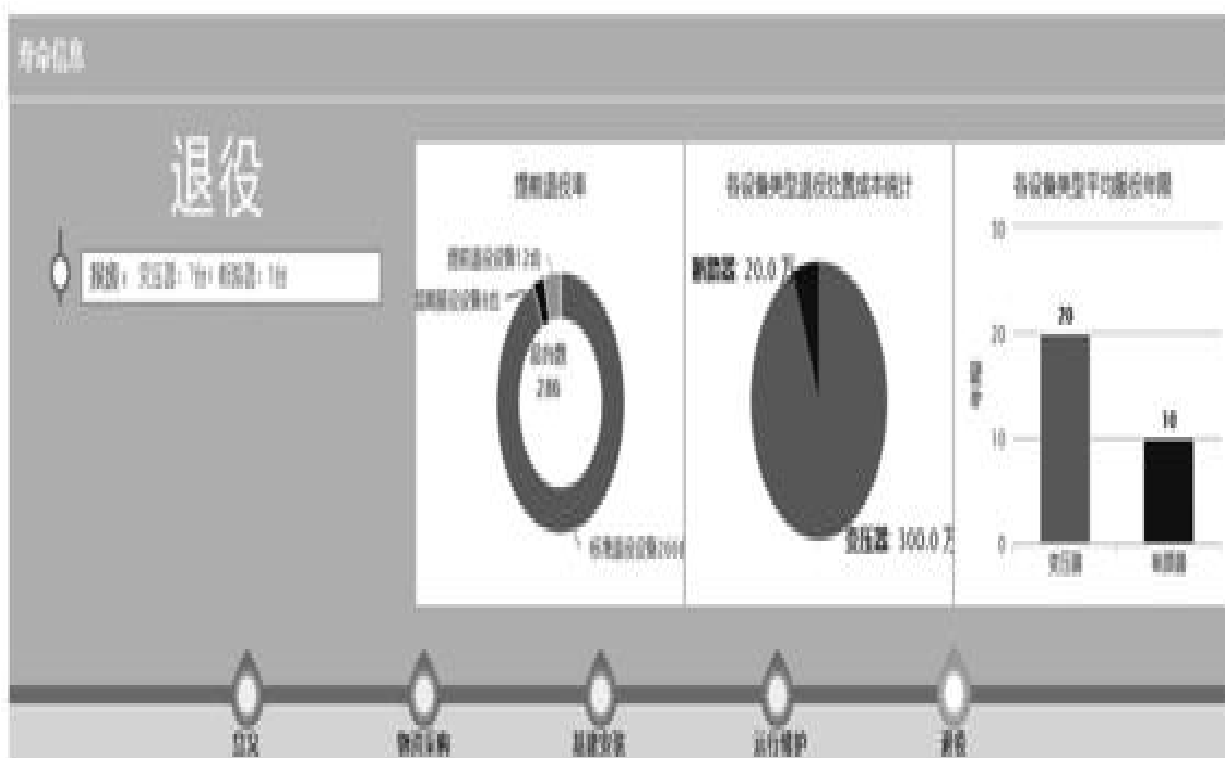


图4-29 设备退役阶段——退役管理界面

(1) 面向设备管理人员的应用

系统为设备管理人员提供全网的设备整体情况和实时预警情况，统计全网设备健康情况、设备风险情况、剩余寿命情况、气象情况等整体运行情况，实时告警电网所面临的风险及潜在危险，对全网范围的各种告警状况、风险、缺陷及故障信息进行及时预警，如图4-30所示。

通过全网山火分布、覆冰分布、灾害分布图结合全网气象分布区域图，实现对全网气象的综合分析，以图形化的方式，从全局和区域对气象情况进行展示。

通过变电站闪烁报警，以拟人化的方式，主动告诉设备管理人员，从变电设备、输电线路、气象对变电站告警情况进行展示，从健康状态、风险状态、剩余寿命对变电站整体情况进行推送，如图4-31所示。

对告警的设备从设备告警信息、关联设备运行情况、相关案例处理情况、备件分布情况、天气情况对设备运行情况进行展示，以在线

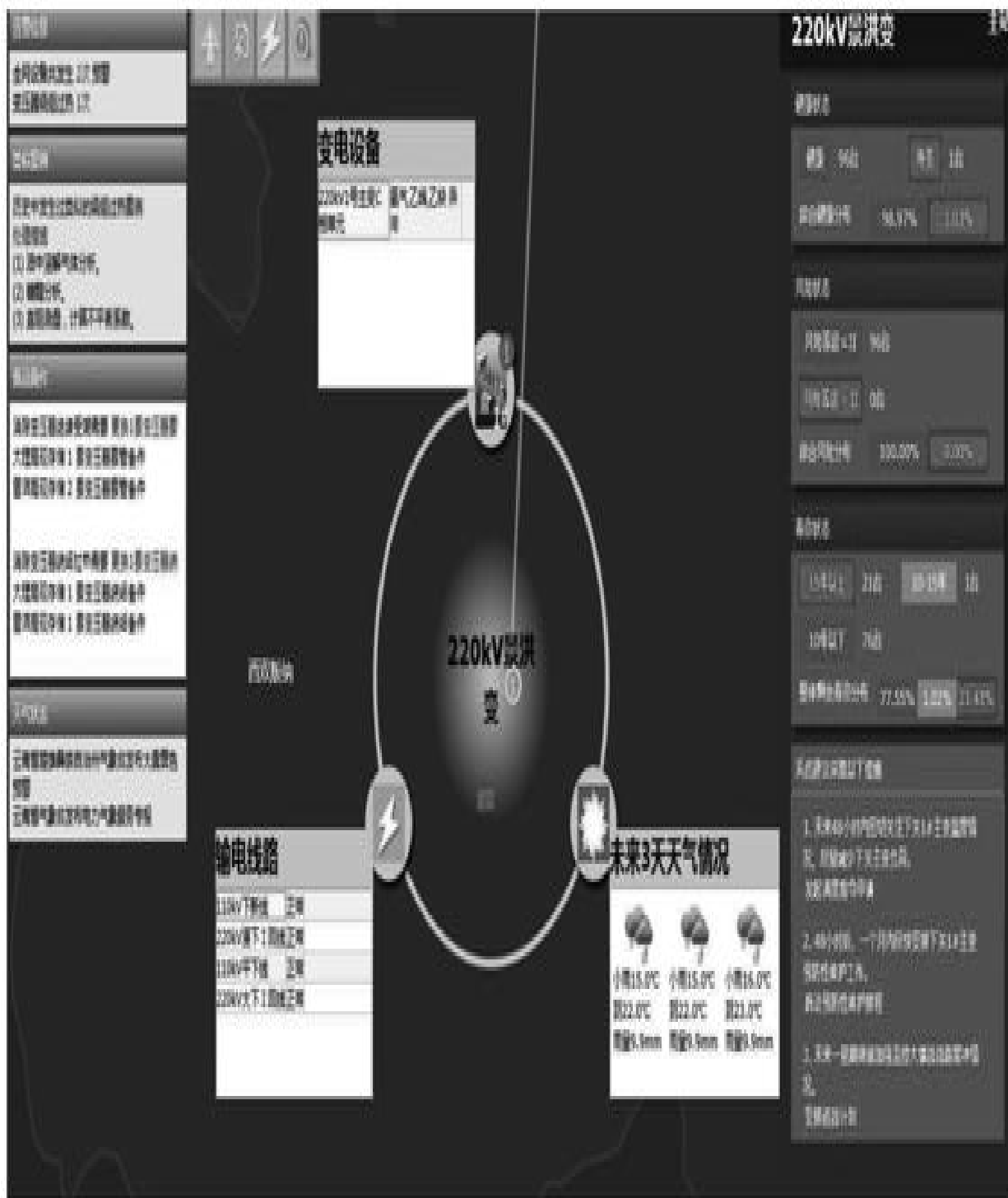


图4-31 设备告警界面1

进入到变电站，通过设备闪烁报警，指向发生告警的设备，对设备的告警信息进行推送，从变电站基础信息、主变运行负载情况、变

电站缺陷预警历史曲线、站端气象趋势对变电站的具体运行情况进行推送和展示，如图4-33所示。

系统也可以为设备管理人员提供按照设备状态、设备类型、厂家、所属部门等维度的设备统计分析结论；给出全网设备各阶段的资产成本统计分析结论，如图4-34所示。

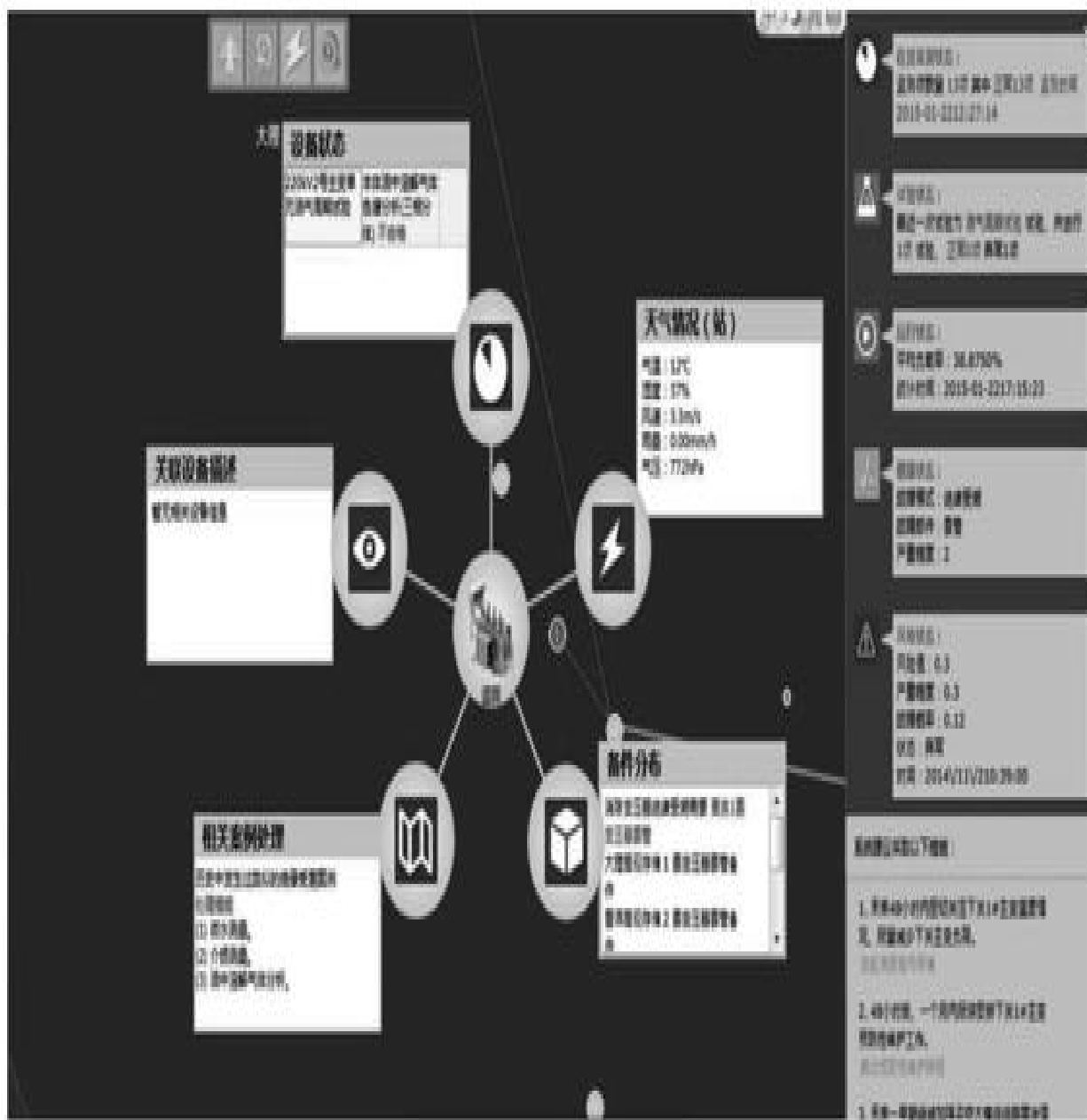


图4-32 设备告警界面2

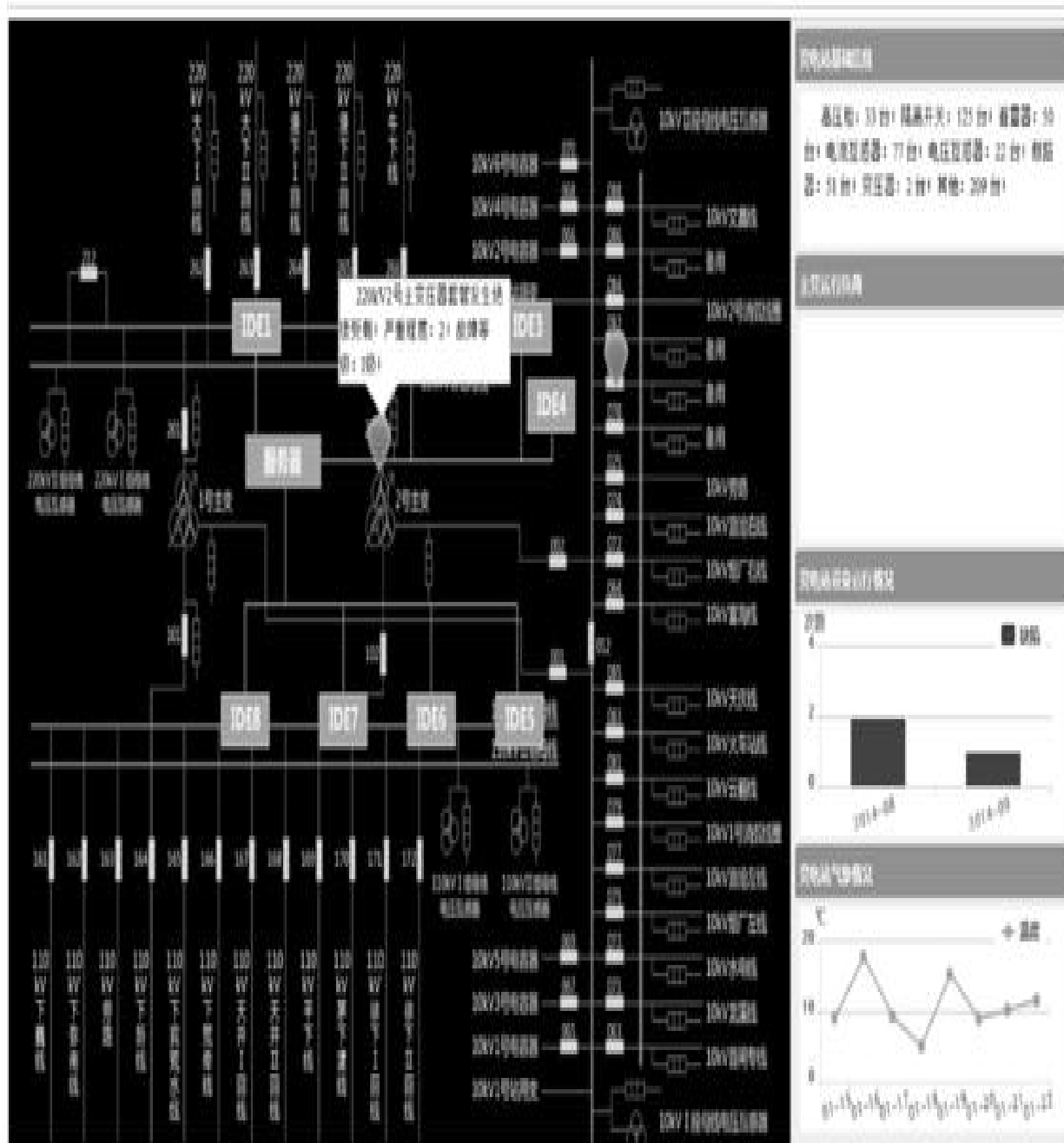


图4-33 设备告警界面3

发现设备异常，设备管理人员通过系统得到设备的异常告警项，可以看到特征量的变化趋势和当前数据量、特征诊断结论，对比分析后台预警结果与智能监测装置的预警结果，如图4-35所示。

可以给出设备与预警项对应时间点的其他状态数据情况，包括环境温度、顶层油温、负荷电流、铁心接地电流，如图4-36所示；还可

以给出最近一次预防性试验结果，以及各关联因素的分析结论，如图4-37所示。

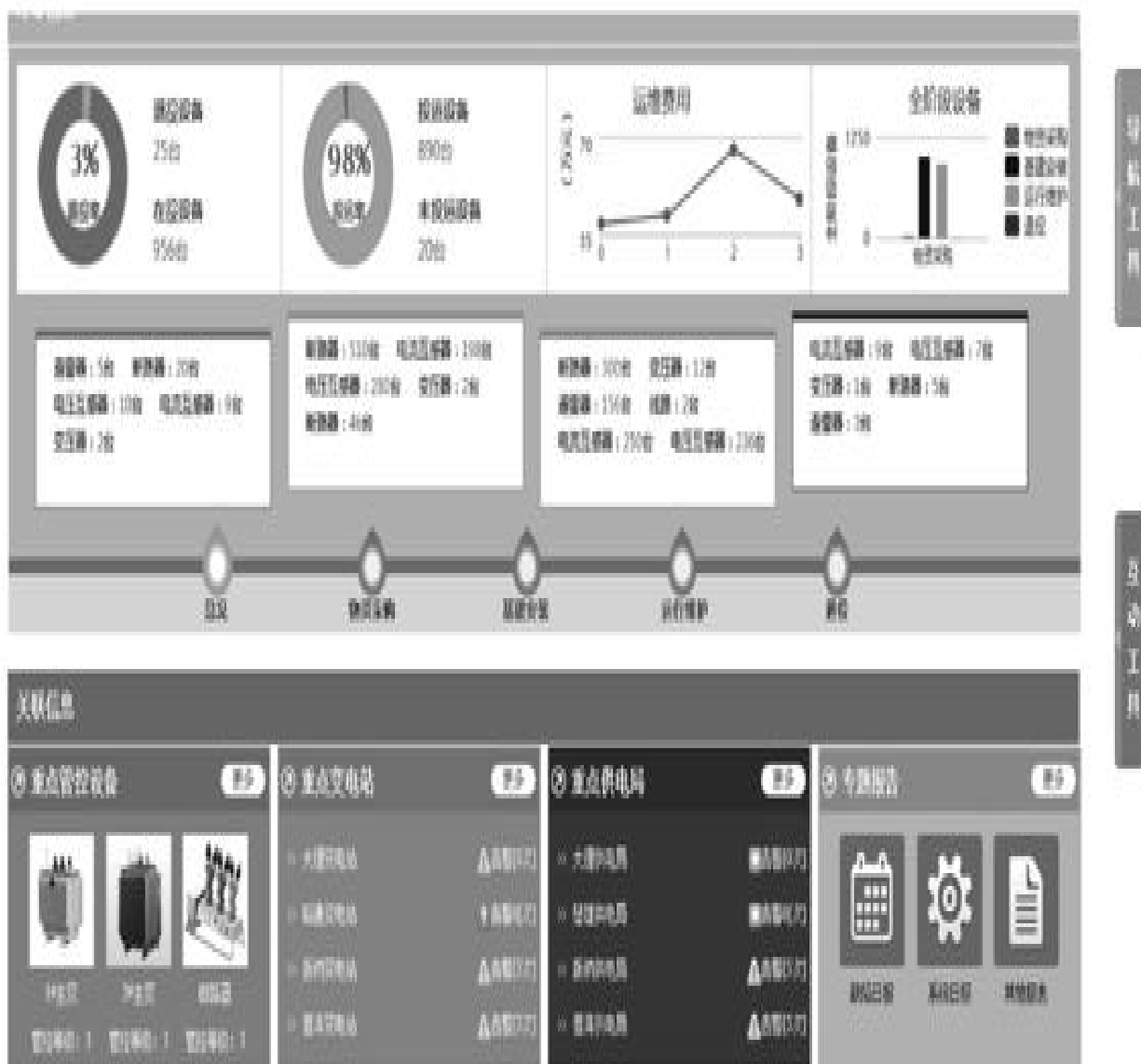


图4-34 全网指标统计界面

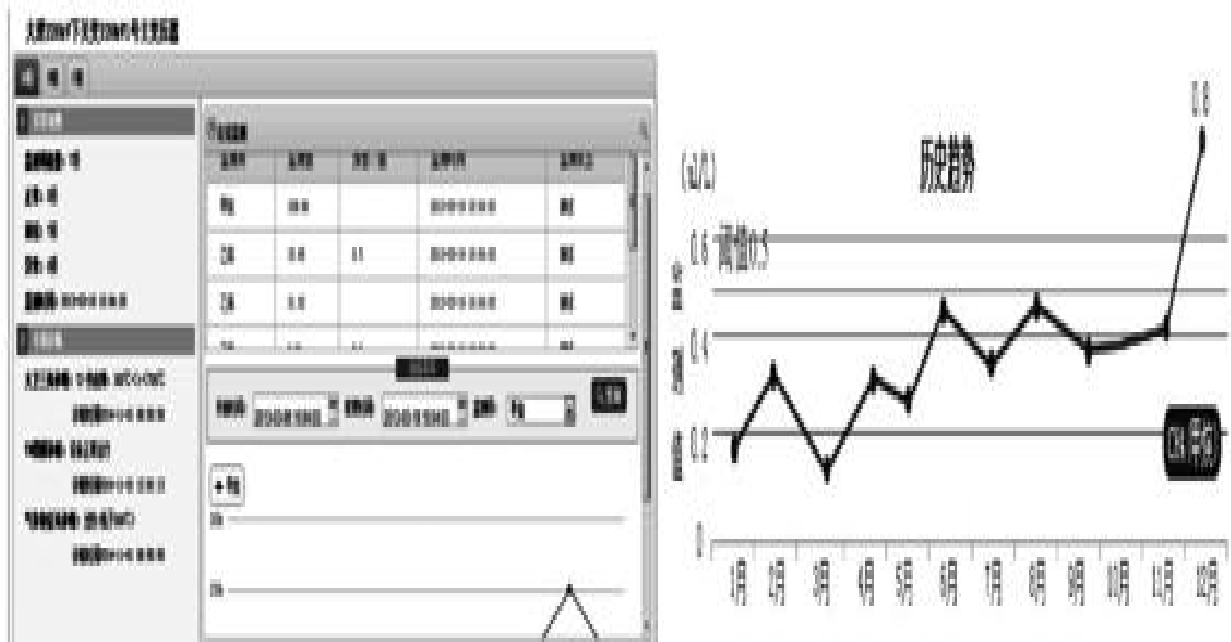


图4-35 设备在线监测详情界面



图4-36 其他状态数据界面

试验报告

220kV2号主变单元油气周期试验2014-11-01 15:48:00报告

天气情况	晴天	天气温度	-℃
天气湿度	-%	油气类型	-
试验日期	2014-11-01 15:48:00	试验类型	油气周期试验
试验报告	220kV2号主变单元油气周期试验	试验结论	不合格

	试验项	状态
1	本体油中溶解气体色谱分析(三相分体)	不合格

图4-37 最新一次预防性试验界面

给出综合诊断结果、健康状态、关注试验项、检修措施、承受负荷能力、设备故障率变化趋势、剩余寿命预测、经济寿命分析，如图4-38～图4-40所示。

大理局220kV下关变1号主变压器

A组B组C组			
1 最近一次设备健康状态			
状态：正常			
故障模式：正常			
严重程度：正常			
试验状况：正常			
巡检状况：正常			
监测状况：正常			
评价时间：2014-11-25 14:48:23			
2 历史健康状态			
评价周期：2010年-2014年			
评价次数：8次			
正常次数：7次			
异常次数：1次			
大理220kV下关变220kV1号主变压器定期评价 2014-11-25 14:48:23			
评价日期	2014-11-25 14:48:23	评价类型	正常
试验状况	正常	巡检状况	正常
监测状况	正常	总体状态	正常
故障模式	正常	严重程度	正常
评价项		状态	
绝缘油		正常	
套管		正常	
油箱		正常	
冷却系统		正常	
载流系统		正常	
保护与测试		正常	

图4-38 设备健康状态界面

1 基本信息	故障描述
状态: 正常 故障模式: 绝缘受潮 严重程度: 1级	(1) 绝缘对套管密封性的管理; (2) 密封绝缘受潮一般应采用器具加热烘干, 故由干燥处理; (3) 严重受潮的应不属位置后干燥处理; (4) 若绝缘老化则应返厂进行恢复性大修或更换老化部件。
2 故障原因	故障内容
(1) 水分含量高; (2) 介损增大; (3) 油中含解气体; (4) 氢气含量高; (5) 绝缘电阻降低; (6) 油耐压下降; (7) 部件存在受潮情况; (8) 单位增长较快; (9) 油色反黑或变黄;	1) 危险程度: 轻度时, 加强监视; 严重时, 提前停电计划安排检修; 2) 检修类型: B、C类检修; 3) 检修内容: 轻度时, 执行B1、C类管机升压试验及C1、C类管试验; 严重时, 更换套管;
3 故障处理	处理措施
密封不良。	(1) 从电气试验和油色谱检测到套管不会爆炸, 应更换套管。如电气试验不失败或油色谱异常, 应更换套管或进行针对性处置。油中单组氢气超过注意值时应加强跟踪监测 (2) 测量结果同最近一次的测量值无显著差别, 如有需查明原因。

图4-39 辅助决策界面

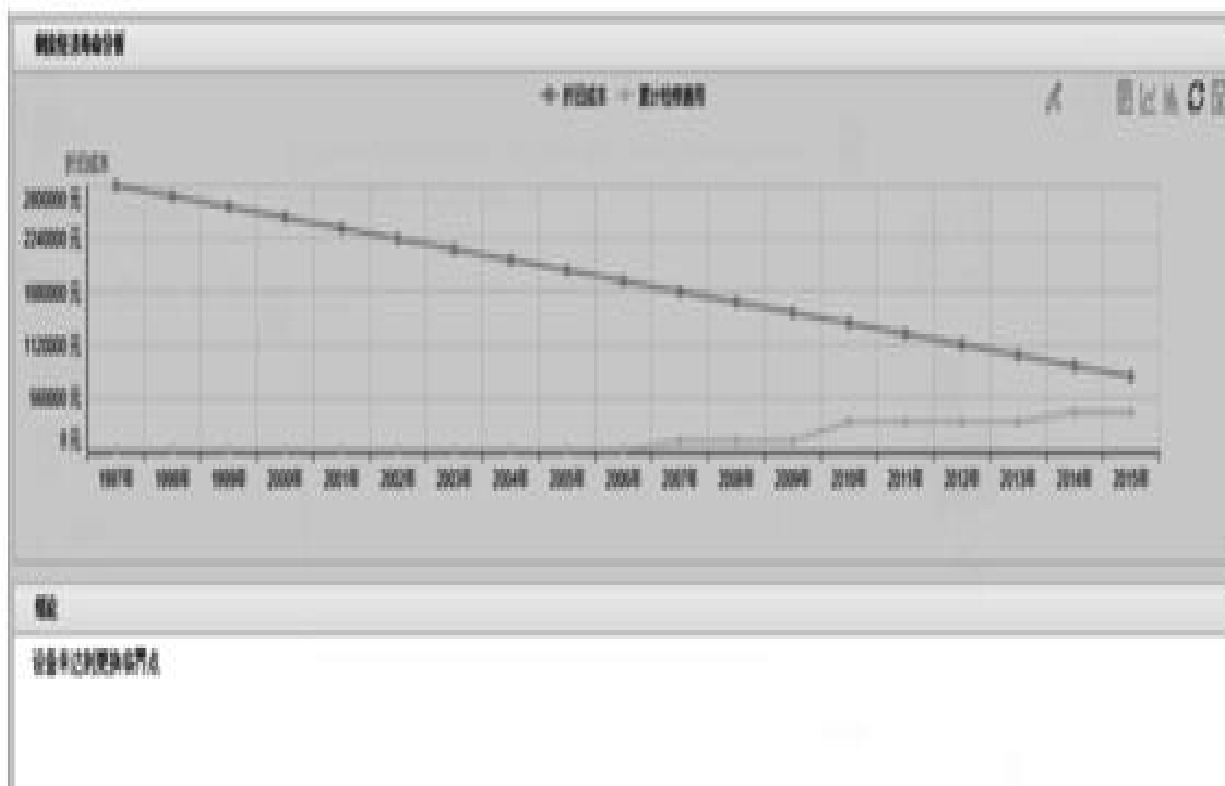


图4-40 剩余经济寿命界面

给出该设备家族缺陷情况统计，按照相似缺陷维度给出相似案例的处理情况，如图4-41所示。

可以结合检修决策给出需要的人员配置和备件配置,得到人员到达现场的时间和所需的装备配置,给出最优的备件调用方案,找出离检修设备最近的备品备件分布,得到备件所在仓库或者厂家的分布和到达现场时间,生成包含设备检修建议、决策建议、人员配置、备件配置的设备管理报告,如图4-43所示。

大理220kV下关变220kV2号主变油器

1 巡视记录

状态: 异常

故障模式: 绝缘受潮

严重程度: 严重

提交输入

提交审核

相似案例

经济寿命分析

2 故障记录

(1) 水分含量高; (2) 介损偏大; (3) 油中溶解气体;

(4) 氧含量偏高; (5) 绝缘电阻偏低; (6) 油耐压下降;

(7) 部件存在受潮情况; (8) 单位增长较快;

(9) 油色变黑或混油;

3 故障原因

密封不严;

人员配置

现场巡视人员: 高

设备配置

试验设备

部件需求

序号	件名	位置	规格	仓库名称	部件名称	部件数量
1	大罐筒	25. 00	00. 70	大理仓库	避雷	1

图4-43 设备管理建议界面

(2) 面向现场检视人员的应用

检视人员包括现场巡视和检修人员，系统为现场检视人员提供设备检视功能，通过移动端对检视内容进行感知，可以获得包括检视人员、时间、内容及注意事项，结合RFID识别技术，通过检视人员定位与电子工作票比对确认工作内容，如图4-44所示。

■ 供电局-变电站-设备

■ 检视人员

■ 检视时间

■ 工作票内容

■ 注意事项

第一页

第二页

第三页

第四页

详情页

单位

编号

1. 工作负责人(监护人)

时间

2. 工作班人员(不含工作负责人)

共 人

3. 工作的时间或设备位置名称(应注明设备编号)

4. 工作内容

工作地点或线路

(线路名、杆塔号名称、线路的起止杆号)

工作内容

5. 计划工作时间

自 年 月 日 时 分

至 年 月 日 时 分

图4-44 检视工作票界面

检视人员手持移动端接近待检设备，可以感知到设备基本结构、基础台账信息、设备管控等级、环境信息、运行信息（运行方式、运行电压、运行负荷）、设备健康状态，如图4-45所示。

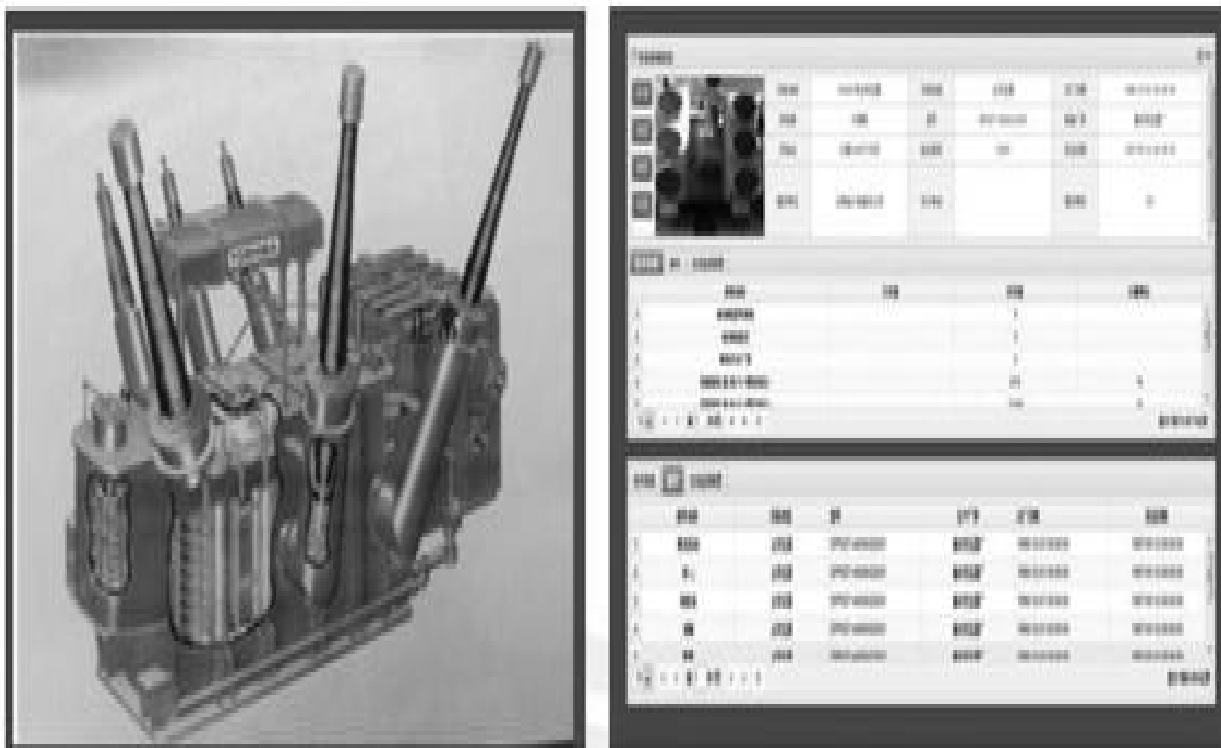


图4-45 检视设备基础信息界面

通过用户选择可进一步显示设备监造记录、基建质量控制记录、在线监测数据、检视历史记录、设备过往缺陷、设备异常经历（短路冲击、过电压、过负荷）记录，如图4-46所示。

系统可以以系统录入和移动端导入的方式，对现场检视记录进行录入，可以对检视过程中的检视记录的环比情况和设备状态变化趋势进行分析，对检视结果进行确认（同时记录检视工作结束时间），生成电子版检视报告，如图4-47所示。

（3）面向物资采购管理人员的应用

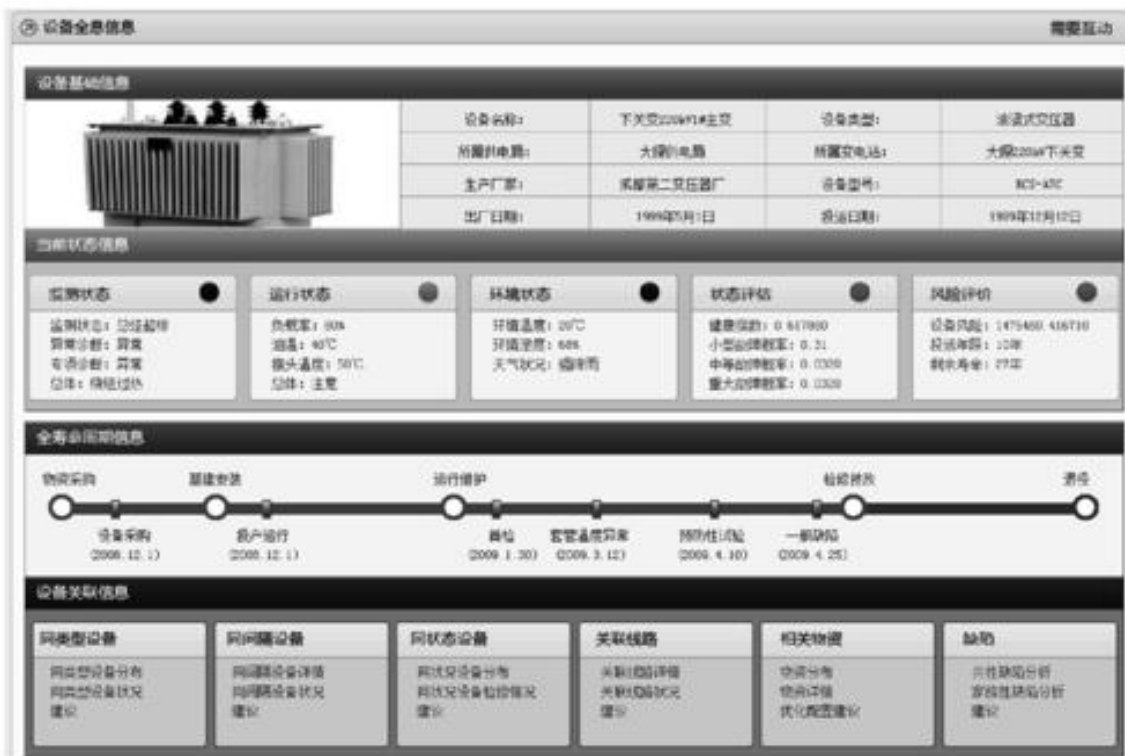
如图4-48所示，系统可以为物资管理人员提供制造商产品质量对比分析，包括：①各制造商在网内的设备数量对比（1~5年、5~20年、20~25年、退役设备，以分层柱状图表现）；②各制造商设备缺陷率对比（1~5年、5~20年、20~25年、退役设备，以并列柱状图表现）；③各制造商设备强迫停运率对比（1~5年、5~20年、20~25年，退役设备，以并列柱状图表现）（询问生产）；④各制造商设备平均退役年限对比；⑤各制造商设备的全寿命成本对比（针对退役设备）；⑥各制造商设备5年、10年、15年平均运维成本对比。

如图4-49所示，提供监造过程品质保障功能，包括①同类产品常见故障分析（按组部件）；②家族缺陷分析（各类缺陷占比）；③同类产品的各类备件使用数量。由此给出重点关注的监造环节和部件组装前补充试验要求。

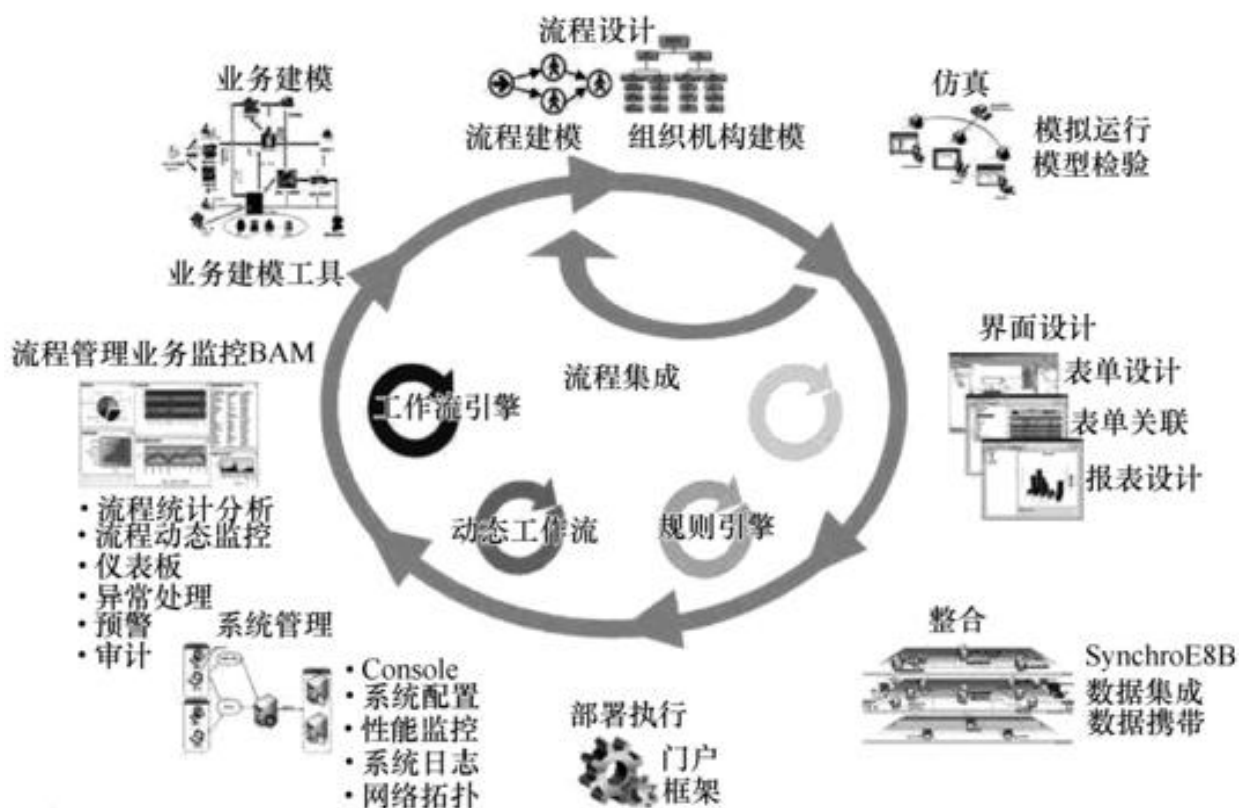
如图4-50所示，提供出厂试验管理功能，包括：①不同试验项目的出厂一次合格率；②运行缺陷分析，给出出厂试验重点关注项目，提出试验指标。

（4）面向基建工程管理人员的应用

如图4-51所示，系统可以为基建管理人员提供承包商工程质量对比分析，包括：①基建承包商在网内承接的设备安装数量对比（1~5年、5~20年、20~25年，退役设备，以分层柱状图表现）；②运行中因工程质量问题导致的设备缺陷率对比（基础沉降、安装错误、内部遗留物、一年内漏气超标、导杆过热、现场组装部件松动、表面锈蚀等，以并列柱状图表现）；③设备交接试验一次合格率对比；④设备首次预防性试验合格率对比；⑤设备首次预防性试验与交接试验的平均偏差对比；⑥设备运行1年内缺陷率对比；⑦与基建相关缺陷的平均维修费用对比。



a)



b)

图4-46 检视设备历史经历界面



10

1

000000	000000	000000	000000
000000	000000	000000	000000

姓名:	学号:
性别:	年龄:
职业:	住址:
电话:	邮箱:

股票名称	交易时间	备注
中国铝业	2014/1/1 1:00:00	涨停板
中国铝业	2014/1/1 1:00:00	涨停
中国铝业	2014/1/1 1:00:00	涨停

時間	活動項目	活動時間	活動地點
2019年10月10日	2019年10月10日	2019年10月10日	2019年10月10日

日期	姓名	性别	年龄
2000-05-11 11:00:00	2000年5月11日00时00分00秒至2000年5月11日00时00分00秒	男	2000年5月11日00时00分00秒

DATE	TIME	AREA	OFFICER
2016-05-26 11:00:00	0000	00	00

Year	2000	2001	2002	2003
2000-01-01 to 2000-12-31	100		100	100

000000 000000 000000 000000 000000

10

00000000 00000000 00000000 00000000 00000000 00000000 00000000 00000000

序号	姓名	身份证号	联系电话	电子邮箱	联系地址
1	王小明	110101199001010001	13800138000	123456789@163.com	北京市朝阳区XX路XX号
2	李小红	110102199002020002	13900139000	987654321@163.com	北京市海淀区XX路XX号



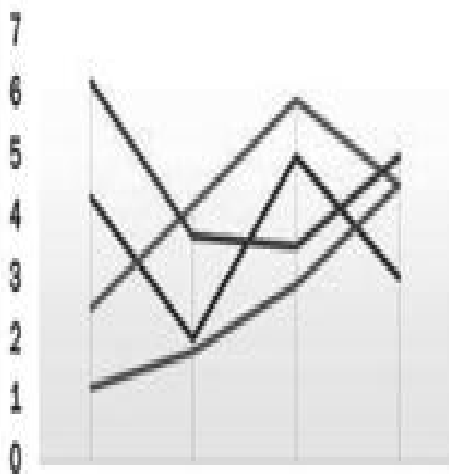
1

1998年12月15日

1

原值	原值	折旧年限	折旧年限	折旧年限
土地	45.1	月	2014-01-01 至 2014-12-31	2014
房屋	45.1	月	2014-01-01 至 2014-12-31	2014

设备状态变化趋势



12月1日 12月2日 12月3日 12月4日

—氢气——一氧化碳——甲烷——总烃

图4-47 检视报告界面

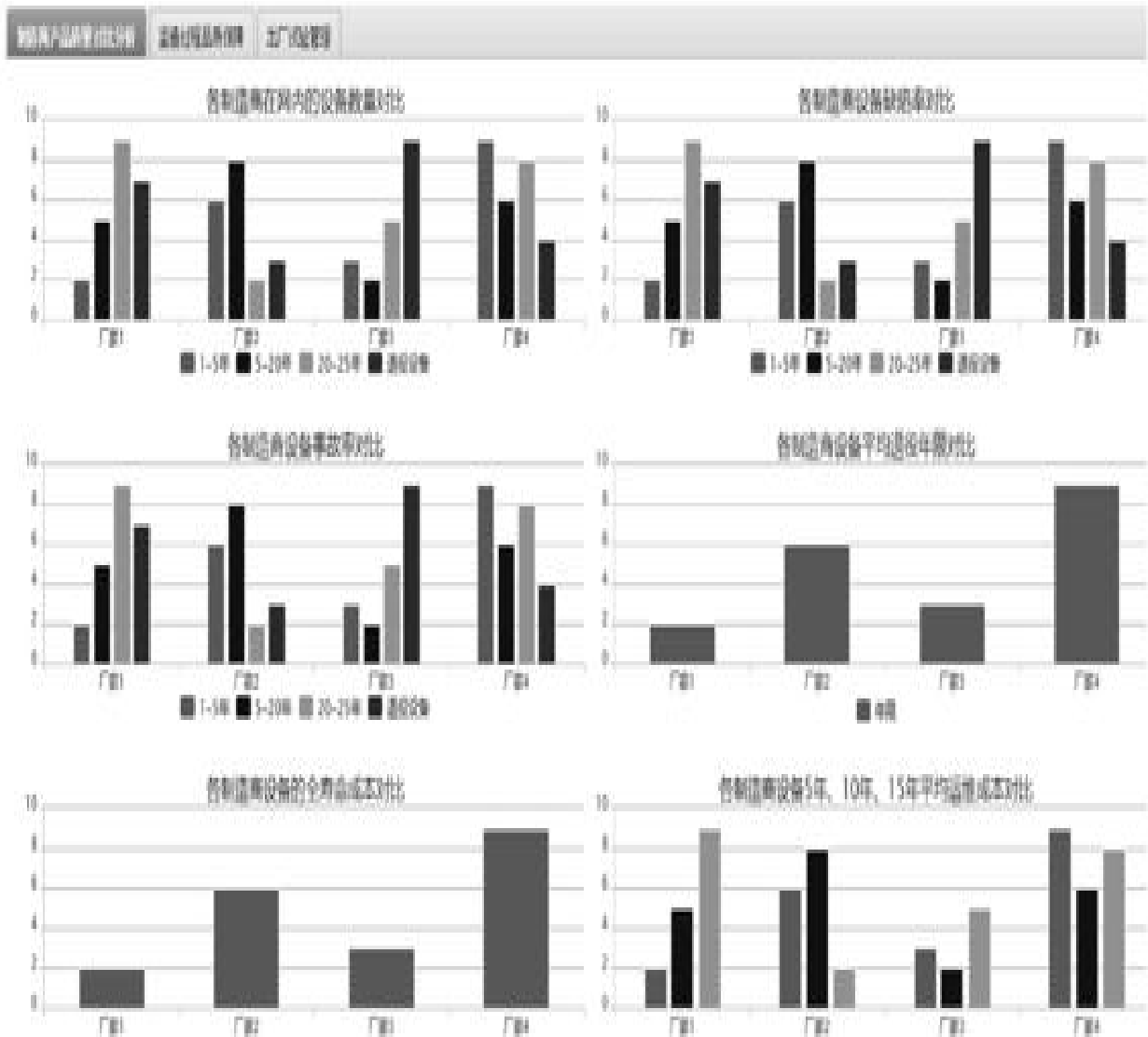


图4-48 制造商产品质量对比分析界面

如图4-52所示，提供工程监理品质管控功能，给出WSH合格率、GIS组件（断路器、隔离开关、刀闸、避雷器、互感器、母线段）运行一年内缺陷率；提供现场交接试验管理功能，给出不同试验项目的交接试验一次合格率、运行缺陷分析。

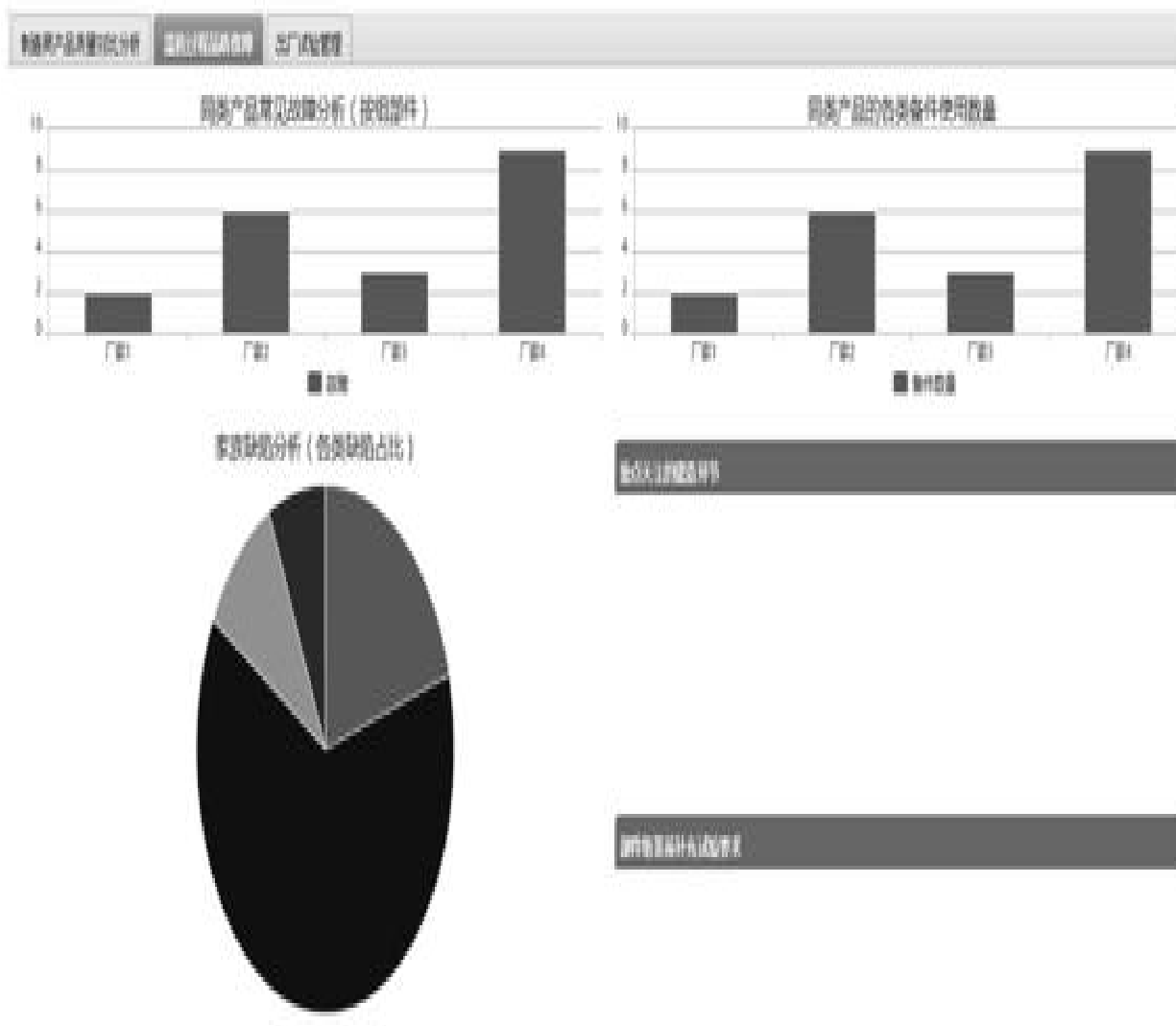


图4-49 监造过程品质保障界面

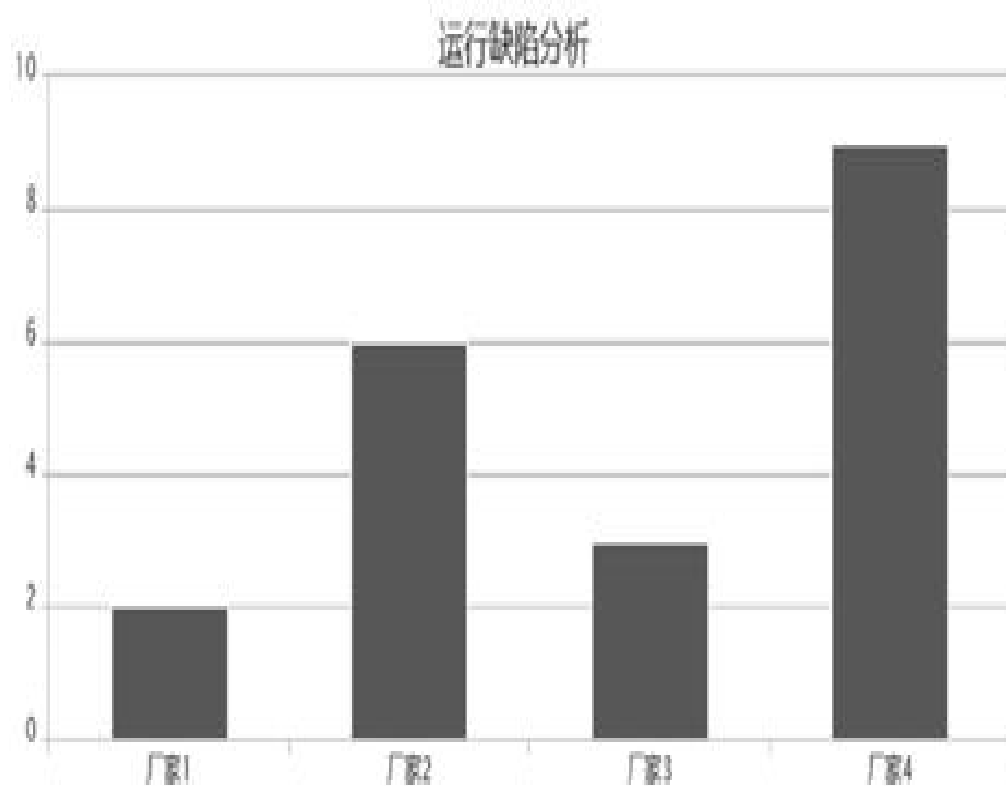
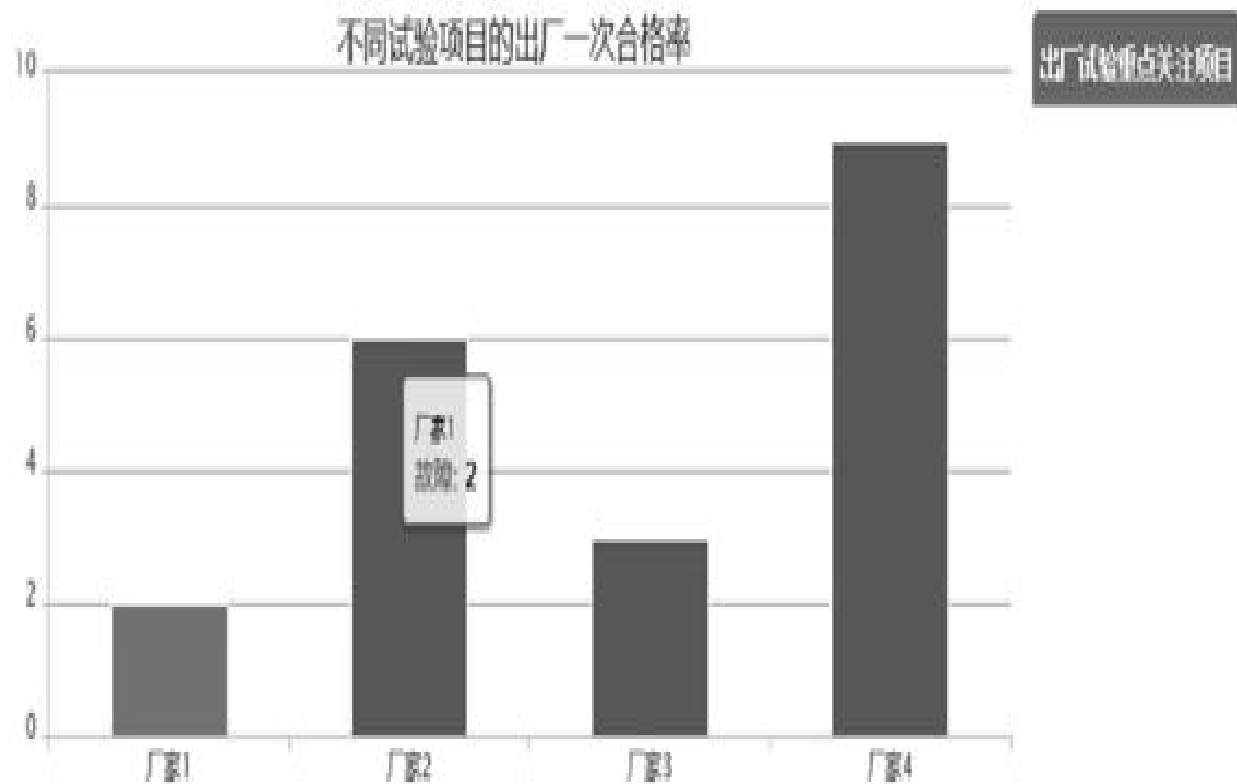


图4-50 出厂试验管理界面

3. 示范应用效益验证

从输变电设备状态监测误报率、输变电设备故障率、输变电设备维修成本、备品备件管理效率、输变电设备寿命延迟率五个方面对示范应用的效益进行验证，通过对示范站2013年和2014年的数据进行采样从而对示范应用的效果进行验证，具体验证指标如下：

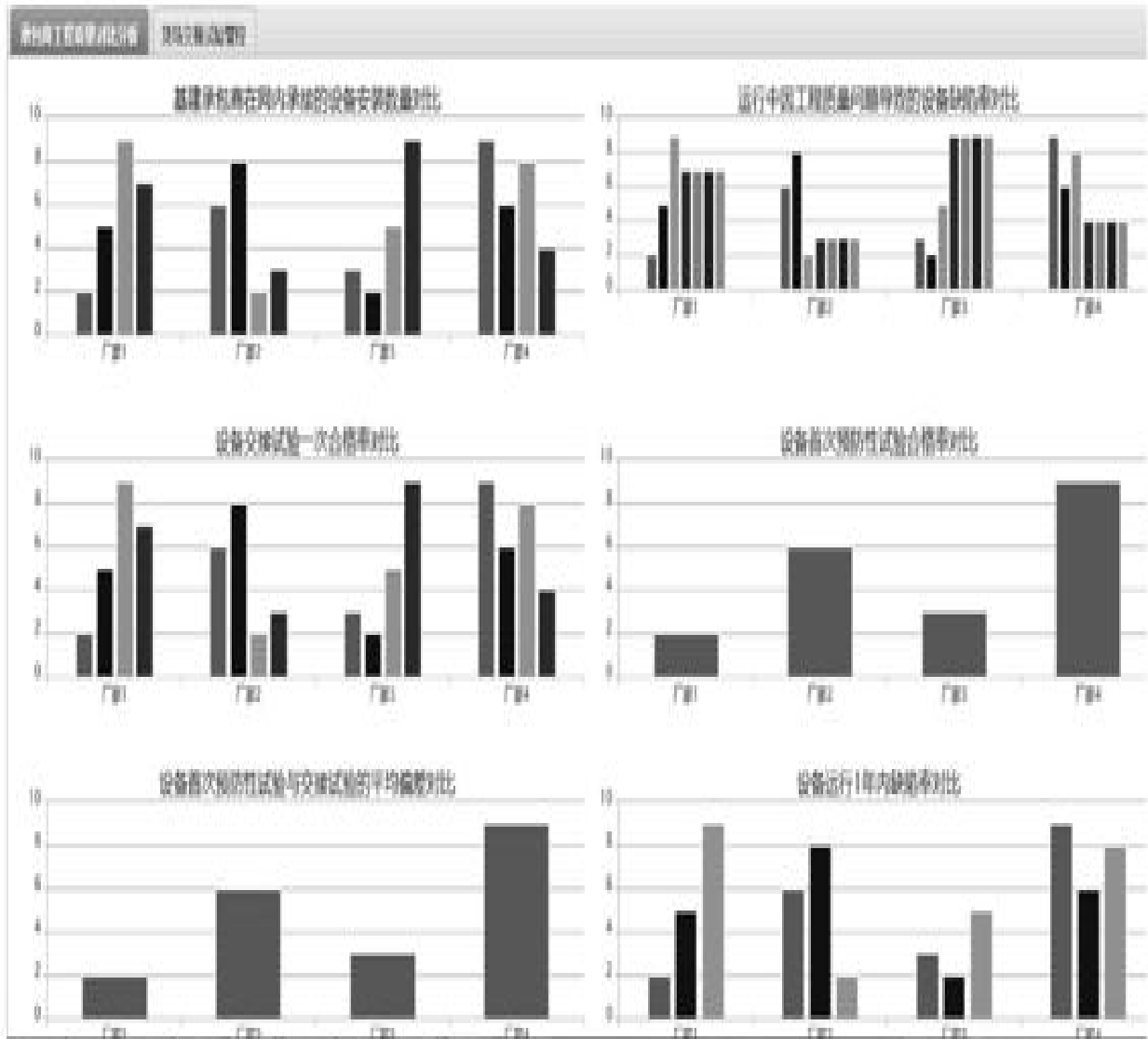


图4-51 承包商工程质量对比分析界面

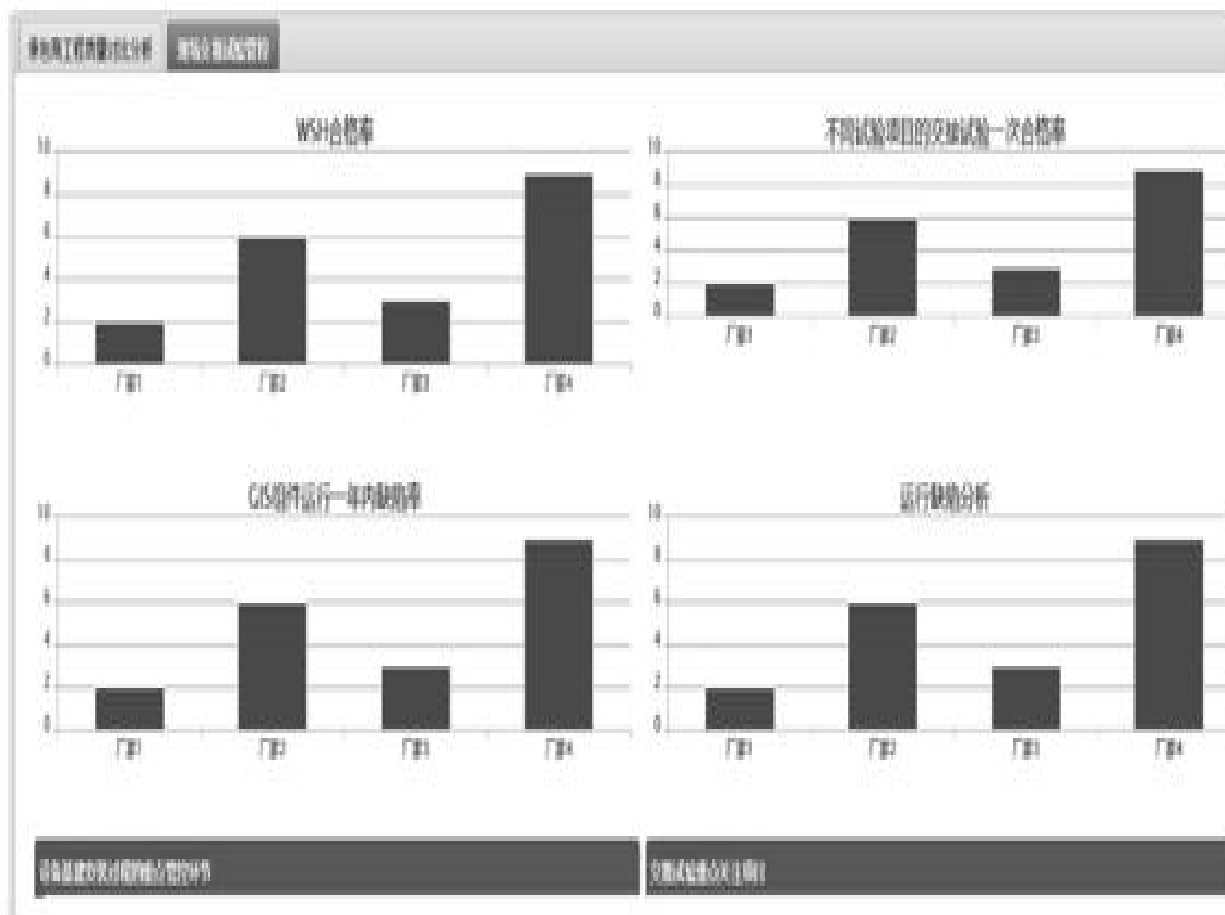


图4-52 监理、交接试验分析界面

(1) 输变电设备状态监测误报率

输变电设备状态监测误报率可直观地反映输变电在线监测装置的正确性及有效性，由于在线监测装置数据会受现场多种因素干扰，产生假数据，因此后台系统需对前端监测装置上送的监测数据进行有效验证，以提高监测的准确性，减少监测误报次数。输变电设备状态监测误报率可以通过设备错误报警次数及总报警次数计算得出，具体计算方法为：误报率=错误报警次数/总报警次数。

经过对示范站点及线路在线监测预警数据统计，统计出现场在线监测装置预警次数，以此作为原始预警数据；在线监测预警数据上传至系统后，系统经过多重验证后发出的预警次数，作为系统实际预警数据；与现场人员确认的预警次数，作为现场真实预警数据。

经过统计，示范站点在线监测装置原始误报率为4.76%，系统接收到在线监测预警数据后进行多级关联验证，发出的预警次数与现场人员确认预警次数一致，因此系统消除干扰后误报率为0。

（2）输变电设备故障率

输变电设备故障率可直观地反映电网运行的可靠性，输变电设备故障率的降低则意味着电网运行更加可靠。输变电设备故障率可以通过设备故障总次数及设备总台数计算得出，具体计算方法为：故障率=设备实际故障次数/设备统计台年数。

通过系统的使用，对示范站点设备相关数据进行综合关联分析，可以及时发现主要设备存在的安全隐患，避免设备由小缺陷发展为故障，以此达到降低设备故障率的目的。经过统计，2014年与2013年相比，主要示范站点设备故障率降低了17.71%。

（3）输变电设备维修成本

输变电设备维修成本直接关系着电网运行的经济性，输变电设备维修成本的降低，将减少电网运行的成本支出，提升电网运行的经济性。目前输变电设备的维修成本主要发生在设备检修消缺环节，因此以设备缺陷率指标的变化情况来衡量设备的维修成本，设备缺陷率的降低同时也意味着设备的维修成本降低。输变电设备缺陷率可以通过设备缺陷总次数及设备总台数计算得出，具体计算方法为：缺陷率=设备实际缺陷次数/设备统计台年数。

通过系统的使用，可对示范站点设备的各项特征量的变化趋势进行监测，当设备的某项特征量变化发生异常时，可及时感知预警，现场人员根据实际情况进行处理，消除可能发生的缺陷，减少设备缺陷发生次数，以达到降低设备维修成本的目的。经过统计，2014年示范站点设备缺陷率比2013年降低了32.27%。假定消除同种缺陷的费用不变，则可以认为由于设备检修消缺所带来的设备维修成本降低了32.27%。

（4）备品备件管理效率

原有的输变电设备物资储备及管理系统存在着布局不尽合理、储备方式单一，以及品种难以动态调整、更新、轮换等弊端。实施后，基于输变电设备物联网实现了各级管理子站之间、子站与中心站之间

备品备件信息的动态共享，优化了物品采购、征用、调拨和配送流程，提高了备品备件的管理效率和检修响应速度。

设备备品备件管理效率可以通过管理人员数、检修响应时间、备件价值、管理流程等因素进行综合考虑，具体计算方法为：

$$\eta = \frac{A}{\sum_{i=1}^n w_i \cdot x_i}$$

，其中 η 为管理效率，分子 A 为总的备品备件管理任务量，分母为进行管理任务所需要花销的资源， x_i 为归一化后的管理人员数、检修响应时间、资金、管理流程等资源因素， w_i 为 x_i 对应的权重。

通过系统的使用，可以直观地看到各个区域备品备件的储存情况，当需要进行部件更换时，可以跨区域从供电局的各个仓库进行资源调配，节省了响应时间，简化了管理流程，避免备品备件剩余过多造成浪费的问题，有效提升备品备件的管理效率。经过统计，2014年示范站点备品备件管理效率比2013年提升了54.71%。

(5) 输变电设备寿命延迟率

输变电设备的寿命直接影响电网的资产成本及经济效益，输变电设备寿命的延长则意味着经济效益的提高。输变电设备寿命延长率可以通过年度设备平均退役年限计算得出，具体计算方法为：寿命延长率=（全寿期评估后的平均退役年限-设备平均设计退役年限）/设备平均设计退役年限。

基于风险净现值模型及统一劣化模型，建立了变压器等主要输变电设备的寿命评估模型。基于上述模型，云南电网公司对示范站点的多台输变电设备进行最佳退役年限评估，而不是仅根据厂家提供的设备参数确定退役年限，从而提高了输变电设备的使用效率。

另一方面，通过输变电设备物联网的有效应用，运维人员及时发现了设备安全隐患，在对设备造成更为严重的影响前进行了消除，从

而减少对设备使用寿命的影响；对于已发生故障的设备，输变电设备物联网也能够精确定位到故障部件，并提供最优的检修措施，缩短故障处理时间，降低故障对设备寿命的影响。

经过统计，示范站点的主要设备基于输变电设备物联网进行全寿命评估后，与设备设计退役年限进行比较，平均延长了21.79%。

综上所述，通过对示范站及线路应用前后的关键技术指标进行对比计算，可得到输变电设备状态监测误报率为0、输变电设备故障率降低了17.71%、输变电设备维修成本降低了32.27%、备品备件管理效率提高了54.71%、输变电设备寿命延迟率提高了21.79%。

1. 输变电设备物联网体系架构及全景信息模型方面

针对输变电设备全景信息的多源、海量、异构、实时等特征，本研究建立了输变电设备物联网体系架构及全景信息模型。首先，设计了输变电设备物联网体系架构，定义了输变电设备物联网感知层、网络层和应用层的功能及要求。其次，提出了输变电设备全景信息的建模原则与方法，提供了一种用对象类和属性及它们之间关系来标识电力系统对象的标准方法。根据该建模思路，能够对某一具体的输变电设备全景信息模型的建立提供指导。最后，建立了输变电设备EPC-96编码规则，实现了对输变电设备的唯一标识以及EPC标签与输变电设备全景信息集成平台数据库中动态数据的链接。所做的这些工作实现了多源异构输变电设备信息的规范与扩展，达到各应用系统之间的信息共享和集成，使各系统之间能互联、互通、互操作，为输变电设备全生命周期管理等高级应用提供了模型支持。

2. 输变电设备物联网的通信模型与体系构架方面

针对输变电设备物联网中设备种类多、设备信息构成复杂、电网的安全运行与设备状态信息具有紧密联系等特点，为了适应物联网信息采集和处理方式的改变，本书建立了输变电设备物联网的通信模型及其构架。首先，定义了基于IEC61850的新的信息结构，通过增加层间接口、扩展间隔层接口功能，增加人机接口支持包括设备资产巡检在内的高级应用，在此基础上提出适应输变电设备物联网信息结构的通信网络结构，为关键设备开发提供了设计模型参考；其次，提供了变电站和输电线路的通信网络设计方法，指导了变电站与输电线路的通信网络示范工程建设；最后，开发了无线路由器及其网络管理平台，为输变电设备物联网的通信网络建设提供了通信验证设备。以上的工作解决了物联网技术与输变电设备物联网结合的技术架构问题，实现资源优化和运维管理。

3. 输变电设备物联网一体化智能监测装置方面

研制出局部放电与雷电监测的智能传感器，实现了局部放电和雷电监测传感器的智能化，具有传感网络的自适应接入能力，同时研制出输电线路温度监测的分布式光纤传感器，解决了输电线路温度实时准确测量的技术难题；提出了输变电设备智能监测传感网络信息建模方法以及云计算资源与任务分配策略，研制出基于分布式计算的输变电设备智能监测传感网络数据处理与故障诊断支持系统，解决了输变电设备智能监测传感网络自主故障诊断的技术难题；对高电位感应取能、地电位取能、势能取能和温差取能等多种非接触取能方式以及电源管理策略进行了研究，试制出非接触取能电源模块及电源管理系统，提高了输变电设备传感器及一体化智能监测装置的供电能力和稳定性；建立了输变电设备智能监测传感网络，对输变电设备监测装置间的组网方式进行了研究，开发了满足变电站设备与输电线路智能监测传感网络需要的一体化智能监测装置，实现了变电站主要设备和输电线路的智能监测功能，提高了智能监测装置的通用性、一体化与智能化水平。

4. 输变电设备全景信息集成平台

针对输变电全景信息模型管理和全景信息技术集成、共享和协同处理的底层应用，构建了基于ESB与Restful的输变电设备全景信息集成平台，为输变电设备全寿命周期管理系统的开发提供了平台基础。

提出了输变电设备全景信息的多源异构数据聚合方法，能够保证底层数据的有效聚合，提高数据的利用效率。提出了输变电全景信息模型高效管理的通用方法，保证输变电全景信息模型可以被上层应用合理调用。全景信息集成平台可以满足输变电设备各种业务的复杂性和系统的开放性。

5. 基于物联网的输变电设备全寿命周期管理系统开发方面

针对电网运行可靠性日益提升、设备精益化管理不断进步以及智能大电网发展的需要，首次成功建立了监测集成规范化、数据综合标准化、信息平台一体化、评价诊断智能化的输变电设备全寿命周期管理系统，基于首创的信息一体化模型成功构建了输变电设备全景信息平台，通过对设备全寿命周期信息的共享融合和多维度智能诊断，采用系统运维和监控驾驶舱完成了系统的多维度多视角综合展现，实现

了对全网设备的状态可视化集中管理、风险实时预警和检修决策支持，为输变电设备运行维护精益化、信息化、专业化奠定了坚实的基础。

6. 示范工程建设与验证方面

示范工程依托研究成果，建立了首个基于物联网技术的输变电设备智能监测与全寿命周期管理示范应用，实现了输变电设备身份标识、全景信息集成、状态动态评估、风险评估、寿命预测、全寿命周期闭环管理与面向对象的智能应用推送。示范工程研究了输变电设备可靠性、寿命评估等物联网试验方法，形成了电力行业标准《输变电设备物联网监测装置及系统测试通用技术规范》及输变电设备、物联网设备系统测试方案，建立了试验平台，对示范工程关键技术与应用效果进行了验证分析，证明了示范工程技术、管理水平及经济效益等各项技术指标可达到工程预期要求，为物联网技术在输变电设备领域广泛应用打下了坚实基础。

附录

附录1 基本信息的数据需求

	数 据 类 别	数 据 描 述
台账 数据	设备编码	EPC 编码
	设备地理位置	经纬度、海拔、区域等
	设备铭牌	设备名称、设备类型、功能位置、设备型号、制造商、出厂日期、投运日期、管理部门、维护人等
	设备技术参数	基础参数、部件、备件、关联的二次设备等各设备类型的公共属性及个体属性

附录2 电力资源信息的数据需求

	数 据 类 别	数 据 描 述
跳 闸 信 息	变电/换流站信息	变电/换流站的名称、变电/换流站电压等级、地理信息
	设备信息	设备名称、设备类型、电压等级
	开关跳闸记录信息	动作时间、动作性质、开关跳闸次数、开关允许跳闸次数、故障跳闸次数、故障跳闸累计等
潮 流 信 息	网络拓扑	区域编号、节点编号
	网络参数	发电机参数、线路参数、变压器参数、无功补偿设备参数
	基态潮流	有功、无功、电压幅值、电压相角、频率
	事故状态潮流	有功、无功、电压幅值、电压相角、频率

附录3 运维过程信息的数据需求

	数 据 类 别	数 据 描 述
缺陷 数据	运行单位信息	单位名称
	所属变电/换流站或 线路信息	变电/换流站的名称、变电/换流站电压等级、线路名称、线路 电压等级
	设备信息	设备名称、设备类型、设备编号、电压等级、设备型号、制造 厂家、投运时间

(续)

	数 据 类 别	数 据 描 述
缺陷数据	主要缺陷信息	发现时间、处理时间、缺陷性质、缺陷种类、缺陷编号、缺陷部位、缺陷原因、严重程度、临时措施、是否消缺、遗留问题处理
巡检数据	运行单位数据	单位名称
	所属变电/换流站或线路信息	变电/换流站的名称、变电/换流站电压等级、线路名称、线路电压等级
	设备信息	设备名称、设备类型、设备编号、电压等级、设备型号、制造厂家、投运时间
	巡检记录信息	巡检类型、巡检项目、巡检结论
	发现缺陷	缺陷种类、缺陷部位、缺陷原因、严重程度、是否消缺
试验数据	检修单位信息	检修单位名称
	设备信息	设备名称、设备类型、电压等级、设备型号、制造厂家、投运时间
	试验报告信息	试验类型、试验性质、试验项目、试验子项目、试验数据值、试验结果、试验合格率
	发现缺陷	缺陷种类、缺陷部位、缺陷原因、严重程度、是否消缺
	实验层次	系统（变电/换流试验、输电试验）、专业、性质
故障数据	故障单位信息	单位名称
	所属变电/换流站或线路信息	变电/换流站的名称、变电/换流站电压等级、线路名称、线路电压等级
	设备信息	设备名称、设备类型、设备编号、电压等级、设备型号、制造厂家、投运时间
	事故记录信息	事故类型、事故编号、事故填报人、事故等级、事故责任人、设备损坏程度、事故原因
停电数据	停电单位信息	单位名称
	所属变电/换流站或线路信息所属变电/换流站或线路信息	变电/换流站的名称、变电/换流站电压等级、线路名称、线路电压等级
	设备信息	设备名称、设备类型、设备编号、电压等级、设备型号、制造厂家、投运时间
	停电记录信息	停电类型、停电票号、申请人、申请单位、实际停电事件、实际复电时间、当前申请状态、停电原因

(续)

	数 据 类 别	数 据 描 述
计划 数据	计划单位	单位名称
	设备信息	设备名称、设备类型、电压等级、设备型号、制造厂家、投运时间
	计划信息	计划类型、计划数、计划完成数、计划完成率

附录4 输电线路在线监测信息的数据需求

数 据 类 别	数 据 描 述
杆塔数据	倾斜、振动、位移、防盗、过电压、雷电流
绝缘子	泄漏电流、风偏、拉力、倾角、污秽
输电导线	电晕、覆冰、舞动、拉力、振动、温度、倾角

附录5 变电设备在线监测信息的数据需求

数 据 类 别	数 据 描 述
变压器/电抗器	溶解气体、套管介损和电容、局部放电、油中水分、铁心接地电流、油温、绕组温度、绕组形变、散热装置
断路器/GIS	局部放电、气体成分、气体水分、气体密度、气体温度、气体压力、分合闸时间、分合闸绕组电流、断路器开关电流、储能电机工作
互感器	电容、介质损耗、局部放电
保护器件	气体继电器/泄压设备状态
避雷器	阻性泄漏电流、容性电流、局部放电、计数器动作、雷击次数
高压母线	温度

附录6 换流设备在线监测信息的数据需求

数 据 类 别	数 据 描 述
换流变压器/平波电抗器	油中气体、微水、局部放电、油温
直流互感器	局部放电
直流避雷器	阻性泄漏电流、局部放电

附录7 公共安全信息的数据需求

数 据 类 别	数 据 描 述
微气象	时间、地点、温度、湿度、风速、风向、气压、雨量、日照
山火	发生时间、地点、覆盖线路/杆塔、预警等级
雷电监测装置台账数据	所属线路、所属杆塔、设备编码、监测专业、装置名称、装置型号等
雷电监测的状态数据	开始时间、结束时间、闪击的时间位置、雷电流峰值和极性、回击次数以及每次回击的参数信息、定位站

(续)

数 据 类 别	数 据 描 述
雷 击	雷电活动情况数据 统计级别、总数、正极性数、负极性数、密度、平均电流、正平均电流、负平均电流
	雷击跳闸与雷电定位关联数据 所属线路、所属单位、跳闸日期、跳闸时间、巡线结果、电流、参与定位探测站个数、距离、杆塔范围
大风	发生时间、地点、覆盖线路/杆塔、风向、预警等级
防盗	偷盗报警时间、报警级别、报警图像（可接入）

附录8 缺陷事件类枚举属性

<<Enumeration>> 输电设备种类	<<Enumeration>> 缺陷分类	<<Enumeration>> 缺陷等级	<<Enumeration>> 缺陷结论
架空线路 避雷器 绝缘子 杆 塔 附属设备 其他设备	机械 电气 绝缘 发热 渗漏 锈蚀 误动 拒动 仪表指示 化学 土建 其他	紧急 重要 一般	已消除 部分消除 未消除 自行消除
		<<Enumeration>> 缺陷程度	
		重度 中度 轻度	

附录9 诊断事件类枚举属性

<<Enumeration>> 诊断设备种类	<<Enumeration>> 诊断结果（原因）	<<Enumeration>> 诊断技术方法	<<Enumeration>> 诊断仪器
- 架空线路 - 避雷器 - 绝缘子 - 杆 - 塔 - 附属设备 - 其他设备	- 内因 - 振动 - 冷冻 - 浪涌 - 水分 - 局部放电 - 冷热 - 机械力 - 电弧 - 紫外线 - 趋肤效应 - 熔丝熔断 - 树枝 - 落地 - 断杆 - 运行时间过长 - 表面闪络 (i) - 其他	- 目视 - 行走式电磁感应法 - 过电流法 - 绝缘电阻法 - 火花间隙法 - 分布电压法 - 激光振动检测法 - 红外成像和超声波 - 小波分解分析 - 光栅传感技术 - 温度及热像 - 绝缘诊断 - 人工智能 - 信号处理技术 - 数据处理技术 - 识别技术 - 预测技术 - 其他	- 绝缘电阻测量 - 泄漏电流测量 - 放电特性试验 - 膜厚测量器 - 脉冲式接地测试器 - KD式 - 氖灯式 - 音响式 - 兆欧表式 - 自走式电线检查机 8mm摄像机 - 红外线成像仪 - 红外传感器 - 污秽检测仪(j) - 故障原因判识系统 - 巡线机器人(J) - 电子光学探测器 (JYZ)
<<Enumeration>> 设备性能影响 - 导通性 - 放电容量 - 气密性 - 绝缘强度 - 机械强度 - 其他			

附录10 $I_1=5A$ 时二次侧输出功率与铁心质量的关系

输出功率/W	2	4	6	8	10	12
取能铁心质量/kg	9.9	20.46	29.04	40.26	60.72	84.48
装置附件体质量/kg	3.3	6.82	9.68	13.42	20.24	28.16
预估取能装置总质量/kg	13.2	27.28	38.72	53.68	80.96	112.64

附录11 $I_1=15\text{A}$ 时二次侧输出功率与铁心质量的关系

输出功率/W	2	4	6	8	10	12
取能铁心质量/kg	4.65	9.61	13.64	18.91	28.52	39.68
装置外壳体质量/kg	1.55	3.20	4.55	6.30	9.51	13.23
预估取能装置总质量/kg	6.20	12.81	18.19	25.21	38.03	52.91

附录12 $I_1=30\text{A}$ 时二次侧输出功率与铁心质量的关系

输出功率/W	2	4	6	8	10	12
取能铁心质量/kg	1.5	3.1	4.4	6.1	9.2	12.8
装置外壳体质量/kg	0.50	1.03	1.47	2.03	3.07	4.27
预估取能装置总质量/kg	2.00	4.13	5.87	8.13	12.27	17.07

附录13 $I_1=45\text{A}$ 时二次侧输出功率与铁心质量的关系

输出功率/W	2	4	6	8	10	12
取能铁心质量/kg	0.98	2.07	3.0	4.0	6.1	8.5
装置外壳体质量/kg	0.33	0.69	1.00	1.33	2.03	2.83
预估取能装置总质量/kg	1.31	2.76	4.00	5.33	8.13	11.33

附录14 高电位感应取能装置技术参数

类别	项 目	技 术 指 标	备 注
取能	启动电流	26A	电流互感器一次侧输入电流达到 26A 时，高电位感应取能装置开始工作
	运行电流范围	26 ~ 1000A	多分裂导线中的单根导线
	取能特性	电流互感器一次侧输入电流为 50A 时：取能 5.5W 电流互感器一次侧输入电流为 60A 时：取能 7.2W 电流互感器一次侧输入电流为 80A 时：取能 11.5W 电流互感器一次侧输入电流为 100A 时：取能 15.6W 电流互感器一次侧输入电流为 120A 及以上时：取能 20W 电流互感器一次侧输入电流达到 1000A 时，高电位感应取能装置进入保护状态	
装置质量	取能铁心质量	3.1kg	
	整体装置质量	10kg 以下	含取能铁心及全部安装附件

附录15 分布式布里渊光纤传感系统监测主机参数

显示	14in (1in = 0.0254m) 高清液晶显示器
规格	665 × 400 × 250 (单位: mm)
波长	1550nm 波段
传感范围/km	30
空间分辨率/m	10
温度测量范围/℃	-60 ~ 90
温度测量准确度/℃	2
应变测量/($\mu\epsilon$)	能分布式感应到应变
电源	AC 220V, 50Hz
传感光纤接口	FC-APC
记录存储	120GB 固态硬盘

附录16 输变电设备一体化智能监测装置监测参量

装置名称	监测参量
变压器一体化智能监测装置	油中溶解气体、套管介损和电容、局部放电、油中微水、铁心接地电流、油温、噪声、绕组温升、绕组振动、绕组形变、风扇等
断路器/GIS 一体化智能监测装置	局部放电、气体成分、气体微水、气体密度、气室温度、气体压力、分合闸时间、分合闸线圈电流、断路器开关电流检测、储能电机工作状态、声学指纹、接头温度等
容性设备绝缘一体化智能监测装置	泄漏电流、等值电容、介质损耗等
输电线路一体化智能监测装置	环境温度、环境湿度、风速、风向、雨量、大气压、日照强度、拉力、倾角、图像、导线温度、烟雾浓度、振动、红外等

附录17 变压器油中溶解气体在线监测装置的检测参量及其灵敏度

参 数	技 术 指 标
H ₂	灵敏度 1ppm，测量误差 ±10%
CO	灵敏度 1ppm，测量误差 ±10%
CH ₄	灵敏度 1ppm，测量误差 ±10%
C ₂ H ₄	灵敏度 1ppm，测量误差 ±10%
C ₂ H ₂	灵敏度 0.5ppm，测量误差 ±10%
C ₂ H ₆	灵敏度 1ppm，测量误差 ±10%
微水	测量范围 0 ~ 1000ppm，测量误差不大于 ±2%
油温	测量范围：0 ~ 120℃，测量误差不大于 ±0.1℃，能够连续监测

注：1ppm=1×10⁻⁶，下同。

附录18 变压器局部放电监测装置技术指标

项 目		参 数
最小检测放电量		脉冲电流法：200pC；超高频法：50pC
测量频带	脉冲电流法	50kHz ~ 5MHz
	超高频法	0.3 ~ 3GHz
采样率	脉冲电流法	最高 50MHz
	超高频法	最高 3GHz
局部放电特征参数		视在放电量、放电次数、放电相位等
显示形式		局部放电的时域波形、二维（ φ - q ， φ - n ）及三维（ φ - q - n ）放电谱图
抗干扰技术		采用差动平衡法结合超高频法实现外部干扰的鉴别，同时采用小波和 IIR 滤波器、开窗法实现对白噪声、周期性、脉冲性干扰的抑制和消除

附录19 GIS局部放电监测装置主要技术指标

监 测 频 率	超高频电磁波（UHF）测量频率：300MHz~3GHz
局放传感器	UHF 内置或外置式传感器
灵敏度	内置传感器 $\leq 2\text{pC}$
故障识别类型	电晕放电、悬浮电位放电、自由粒子放电、空隙放电、电灯闪光噪声、移动电话噪声、电动机噪声、雷电噪声、变压器内部 OLTC 触点正常动作时产生的火花和其他外部噪声
传感器位置	传感器的位置分布会影响局部放电检测灵敏度，在线监测装置的传感器可满足于最大限度覆盖所监测的设备
现场监测单元	不锈钢外壳，通过油阀插入变压器腔体，或者通过与人孔法兰对接 GIS，现场可以查看监测数据
噪声辨别	高压同步信号噪声抑制：可直接根据宽频带波形特征进行判断 环境噪声抑制：设置环境噪声传感器，利用噪声传感器消除外部噪声，频率响应范围：0.3~3GHz

附录20 SF₆气体密度和微水的在线监测关键技术指标

序号	监 测 参 数	检 测 范 围	精 度
1	湿度	10 ~ 20000ppmv (μL/L)	±2% FS
2	密度	0 ~ 1.00MPa	±1% FS
3	压力	0 ~ 1.00MPa	±1% FS
4	湿度报警门限	300ppmv (用户可自由设定)	

(续)

序号	监 测 参 数	检 测 范 围	精 度
5	密度报警门限	0.52MPa (用户可自由设定)	
6	密度报警解除	0.53MPa (用户可自由设定)	
7	密度闭锁门限	0.50MPa (用户可自由设定)	
8	密度闭锁解除	0.51MPa (用户可自由设定)	

附录21 容性设备绝缘一体化监测装置主要技术指标

设备类别	设备名称	介质损耗角	电流范围/mA	备 注
容性设备	变压器套管	0 ~ 10% (±0.05%)	0.1 ~ 100mA	泄漏电流 (mA)
	电流互感器	0 ~ 10% (±0.05%)	0.1 ~ 100mA	等值电容 (pF)
	耦合电容器	0 ~ 5% (±0.05%)	0.1 ~ 800mA	介质损耗 (%)
	线路压变	0 ~ 5% (±0.05%)	0.1 ~ 800mA	等值电容测量范围 为 50 ~ 10000pF
电流性设备	铁心电流		0.1 ~ 5A	泄漏电流 (mA)

附录22 输电线路一体化智能监测装置硬件基本配置表

总 类	子 类	序号	器 件 名 称	数量
监测主机	CPU	1	CPU 板	1
	PCB 底板	2	监测主机底板	1
	主机外壳	3	盒子式外壳	1
		4	箱体式外壳	1
	通信模块	5	GPRS 模块	1
		6	RF 模块	1
		7	无线 AP	1
		8	北斗通信单元	1
电源	电源管理	9	太阳能板	1
		10	太阳能控制器	1
		11	蓄电池	1
连接器	盒子式主机用	12	2 芯航空头	1
		13	3 芯航空头	1
	箱体式主机用	14	3+1 芯航空头	1
		15	4+1 芯航空头	1
	传感器转换头	16	5 芯航空头	15
	调试口转换头	17	8 芯航空头	1

(续)

总 类	子 类	序号	器 件 名 称	数量
传感器	气象传感器	18	6 要素气象传感器	1
		19	雨量传感器	1
	图像	20	视频传感器——模拟快球	1
		21	视频采集卡	1
	拉力	22	绝缘子拉力传感器	3
	倾角	23	绝缘子风偏和倾斜度传感器	2
	防盗	24	振动传感器	1
		25	室外被动红外探测器	1
	山火	26	二氧化碳传感器	1

注：表中所列数量是指一套装置的需求量。

附录23 输电线路物联网一体化智能监测装置功能及技术指标

监测类型	监测量	传感器	技术指标
微气象 监测	环境温度	温度传感器	① 测量原理：二极管结电压测温 ② 监测范围：-40 ~ +80℃ ③ 分辨率：0.1℃ ④ 测量精度：< ±0.5℃ ⑤ 漂移：< 0.04℃/yr
	环境湿度	湿度传感器	① 测量原理：电容式 ② 监测范围：0% ~ 80% RH ③ 准确度：±4% ④ 监测范围：80% ~ 100% ⑤ 准确度：±8% ⑥ 漂移：<0.5% RH/yr
	风速	超声波传感器	① 测量原理：超声波 ② 监测范围：(0 ~ 50) m/s ③ 准确度：± (0.5 + 0.03V) m/s, V 为标准风速值 ④ 分辨率：0.1m/s
	风向	超声波传感器	① 测量原理：超声波 ② 测量范围：0° ~ 359.9°，全方位，无盲区 ③ 分辨率：±3° ④ 准确度：±5°

(续)

监测类型	监测量	传感器	技术指标
微气象 监测	雨量	雨量传感器	① 测量降水强度：4mm/min 以内 ② 测量最小分度：0.1mm 降水量 ③ 最大允许误差：±4% mm
	大气压	气压传感器	① 测量范围：600 ~ 1100hPa ② 监测精度：±100Pa ③ 分辨率：0.1hPa
	日照强度	日照传感器	① 光谱测量范围：0.3 ~ 3.2μm ② 监测精度：±2%
力学参 数监测	拉力	拉力传感器	① 量程：7 ~ 50t（根据实际需要定制） ② 测量范围：5% ~ 100% FS（线性工作区间） ③ 工作温度：-20 ~ +70℃ ④ 回零误差： Z'_0 （% FS）：±0.25 ⑤ 示值误差： δ' （% FS）：±0.50 ⑥ 重复性： R' （% FS）：±0.50 ⑦ 滞后： H' （% FS）：±0.15 ⑧ 长期稳定性： S'_b （% FS）：±0.50 ⑨ 线性度：≤5.0%
	倾角	倾角传感器	① 倾角测量角度范围：双轴 ≥ ±60° ② 测量准确度：≤ ±0.1° ③ 测量分辨率：±0.01°
图像 监测	图像	图像传感器	① 具有图像压缩算法，能够实时上送现场图像 ② 能够采用 GPRS 和 WiFi 无线通信方式进行图像数据的实时传输 ③ 能够实时接收主站拍照（摄像）、拍摄角度转换等控制命令 ④ 具有远程调焦功能，能够对杆塔周围大范围的情况进行监控 ⑤ 具有远程控制摄像机电源、远程定时、定预置点拍摄功能 ⑥ 支持 1280 × 1024 像素、640 × 480 像素、320 × 240 像素、168 × 128 像素分辨率 ⑦ 光学变焦：10 倍 ⑧ 预置点：256 个 ⑨ 旋转范围：水平 360°无限位，垂直 180°，自动翻转 ⑩ 工作环境：-20 ~ +50℃（选配温控器件），<95% RH

(续)

监测类型	监测量	传感器	技术指标
导线温度监测	温度	温度传感器	① 导线温度测量范围：-55 ~ +125℃ ② 准确度：≤ ±0.5℃ ③ 允许长期通过导线负荷电流：20 ~ 1500A ④ 融冰情况下允许导线负荷电流：2000A，直流 ⑤ 工作的最小电流：线路电流 ≥ 50A
山火烟雾监测和报警功能	烟雾浓度	二氧化碳传感器	① 二氧化碳探头：NDIR ② 测量范围：0 ~ 5000ppm ③ 分辨率：1% ④ 工作温度：-25 ~ +55℃
防盗监测和报警功能	振动	振动传感器	① 灵敏度：≥ 0.1g ② 频率范围：0.5 ~ 20Hz ③ 监测方向：全向 ④ 工作温度：-40 ~ +80℃
	红外	红外传感器	① 探测方式：被动红外/微波防盗 ② 微波中心频率：10.525GHz ③ 探测角度：≥ ±60° ④ 探测面积：15 × 15m ² ⑤ 工作温度：-35 ~ +60℃ ⑥ 防宠物功能：15kg 以下不报警

附录24 输电设备监测数据需求

数 据 类 别	数 据 描 述	数据来源系统
杆塔数据	倾斜、振动、位移、防盗、过电压、雷电流	物联网监测数据
绝缘子	泄漏电流、风偏、拉力、倾角、污秽	物联网监测数据
输电导线	电晕、覆冰、舞动、拉力、振动、温度、倾角	物联网监测数据

附录25 输电设备监测数据需求详细描述

数 据 类 别	数 据 描 述	数据来源系统
导、地线测温数据	大号侧导线温度、小号侧导线温度、地线温度	物联网监测数据
导线倾角数据	导线倾角、最小风偏倾角、最大风偏倾角	物联网监测数据
地线倾角数据	地线倾角、风偏倾角	物联网监测数据
导线拉力数据	最大拉力、最小拉力、最大风偏、最小风偏、最大倾角、最小倾角	物联网监测数据

(续)

数 据 类 别	数 据 描 述	数据来源系统
地线拉力数据	最大拉力、最小拉力、最大风偏、最小风偏、最大倾角、最小倾角	物联网监测数据
泄漏电流数据	相平均、相最大、相超 3mA 次数、相超 10mA 次数	物联网监测数据
监测照片数据	照片、通道、预置位	物联网监测数据
杆塔振动数据	振幅、频率	物联网监测数据
导线振动数据	振幅、频率	物联网监测数据
覆冰	发生时间、地点、覆盖线路/杆塔、覆冰厚度、预警等级	物联网监测数据

附录26 变电设备监测数据需求

数 据 类 别	数 据 描 述	数据来源系统
变压器/电抗器	溶解气体、套管介损和电容、局部放电、油中水分、铁心接地电流、油温、绕组温度、绕组形变、散热装置	物联网监测数据
断路器/GIS	局部放电、气体成分、气体水分、气体密度、气体温度、气体压力、分合闸时间、分合闸绕组电流、断路器开关电流、储能电机工作	物联网监测数据
互感器	电容、介质损耗、局部放电	物联网监测数据
保护器件	气体继电器/泄压设备状态	物联网监测数据
避雷器	阻性泄漏电流、容性电流、局部放电、计数器动作、雷击次数	物联网监测数据
高压母线	温度	物联网监测数据

附录27 变电设备监测数据需求详细描述

数 据 类 别	数 据 描 述	数据来源系统
油中溶解气体监测数据	氢气 (H_2)、一氧化碳 (CO)、甲烷 (CH_4)、乙烯 (C_2H_4)、乙炔 (C_2H_2)、乙烷 (C_2H_6)、二氧化碳 (CO_2)	物联网监测数据
油中微水监测数据	水含量 (H_2O)、水活性 (aw)	物联网监测数据
局部放电监测数据	放电量 pC、放电次数 n 、放电类型和放电位置	物联网监测数据
套管绝缘监测数据	泄漏电流、介质损耗和等值电容	物联网监测数据
变压器铁心接地电流监测数据	泄漏电流	物联网监测数据

(续)

数 据 类 别	数 据 描 述	数据来源系统
冷却器风扇及油泵监测数据	自动/手动工作模式、风扇及油泵运行状态、累计运行时间、风扇及油泵电动机驱动电流及电压	物联网监测数据
温度负荷监测数据	环境温湿度、变压器负荷电流及电压、顶部油温、绕组热点温度	物联网监测数据
有载分接开关监测数据	自动/手动工作模式、触头位置及磨损、电动机驱动电流及电压、保护继电器状态和在线滤油机运行状态	物联网监测数据
保护器件监测数据	气体继电器状态、泄压设备状态等	物联网监测数据
GIS 局部放电监测数据	放电量 pC、放电次数 n 、放电类型和放电位置	物联网监测数据
SF ₆ 气体密度及微水监测数据	SF ₆ 气体密度、含水量	物联网监测数据
GIS 室 SF ₆ 气体泄漏监测数据	氧含量、SF ₆ 浓度	物联网监测数据
避雷器绝缘监测数据	泄漏电流、阻性电流、容性电流和计数器动作次数	物联网监测数据
SF ₆ 气体分离物监测数据	HF、SO ₂ 、H ₂ S	物联网监测数据
断路器动作特性监测数据	分合闸线圈回路、分合闸线圈电流、分合闸线圈电压、断路器动触头行程、断路器动触头速度、开断电流、断路器的操动次数统计、断路器操动过程中的机械振动、合闸弹簧状态、导电接触部位的温度和断路器的电寿命	物联网监测数据
电流互感器 (CT) 绝缘数据	泄漏电流、介质损耗和等值电容	物联网监测数据
电容式电压互感器 (CVT) 绝缘数据	泄漏电流、介质损耗和等值电容	物联网监测数据
耦合电容器 (OY) 绝缘数据	泄漏电流、介质损耗和等值电容	物联网监测数据
避雷器绝缘监测数据	泄漏电流、阻性电流、容性电流、计数器动作次数、雷击次数、最后一次落雷时间	物联网监测数据

附录28 换流站设备监测数据需求

数据类别	数据描述	数据来源系统
换流变压器/平波电抗器	油中气体、微水、局部放电、油温	物联网监测数据
直流互感器	局部放电	物联网监测数据
直流避雷器	阻性泄漏电流、局部放电	物联网监测数据

注：详细数据描述可参照变电设备。

附录29 生产管理系统数据需求

数 据 类 别		数 据 描 述	数据来源系统
台账数据	设备编码		生产管理系统
	设备铭牌	设备名称、设备类型、功能位置、设备型号、制造商、出厂日期、投运日期、管理部门、维护人等	
	设备技术参数	基础参数、部件、备件、关联的二次设备等各设备类型的公共属性及个体属性	
缺陷数据	运行单位信息	单位名称	生产管理系统
	所属变电站或线路信息	变电站的名称、变电站电压等级、线路名称、线路电压等级	
	设备信息	设备名称、设备类型、设备编号、电压等级、设备型号、制造厂家、投运时间	
	主要缺陷信息	发现时间、处理时间、缺陷性质、缺陷种类、缺陷编号、缺陷部位、缺陷原因、严重程度、临时措施、是否消缺、遗留问题处理	
巡检数据	运行单位数据	单位名称	生产管理系统
	所属变电站或线路信息	变电站的名称、变电站电压等级、线路名称、线路电压等级	
	设备信息	设备名称、设备类型、设备编号、电压等级、设备型号、制造厂家、投运时间	
	巡检记录信息	巡检类型、巡检项目、巡检结论	
	发现缺陷	缺陷种类、缺陷部位、缺陷原因、严重程度、是否消缺	

(续)

数 据 类 别		数 据 描 述	数据来源系统
试验数据	检修单位信息	检修单位名称	生产管理系统
	设备信息	设备名称、设备类型、电压等级、设备型号、制造厂家、投运时间	
	试验报告信息	试验类型、试验性质、试验项目、试验子项目、试验数据值、试验结果、试验合格率	
	发现缺陷	缺陷种类、缺陷部位、缺陷原因、严重程度、是否消缺	
	实验层次	系统（变电试验、输电试验）、专业、性质	
故障信息	故障单位信息	单位名称	生产管理系统
	所属变电站或线路信息	变电站的名称、变电站电压等级、线路名称、线路电压等级	
	设备信息	设备名称、设备类型、设备编号、电压等级、设备型号、制造厂家、投运时间	
	事故记录信息	事故类型、事故编号、事故填报人、事故等级、事故责任人、设备损坏程度、事故原因	
停电信息	停电单位信息	单位名称	生产管理系统
	所属变电站或线路信息所属变电站或线路信息	变电站的名称、变电站电压等级、线路名称、线路电压等级	
	设备信息	设备名称、设备类型、设备编号、电压等级、设备型号、制造厂家、投运时间	
	停电记录信息	停电类型、停电票号、申请人、申请单位、实际停电时间、实际复电时间、当前申请状态、停电原因	
计划信息	计划单位	单位名称	生产管理系统
	设备信息	设备名称、设备类型、电压等级、设备型号、制造厂家、投运时间	
	计划信息	计划类型、计划数、计划完成数、计划完成率	

附录30 调度运行信息需求

数据类别		数据描述	数据来源系统
跳闸信息	变电站信息	变电站的名称、变电站电压等级、地理信息	EMS/SCADA
	设备信息	设备名称、设备类型、电压等级	
	开关跳闸记录信息	动作时间、动作性质、开关跳闸次数、开关允许跳闸次数、故障跳闸次数、故障跳闸累计等	
潮流信息	网络拓扑	区域编号、节点编号	EMS/SCADA
	网络参数	发电机参数、线路参数、变压器参数、无功补偿设备参数	
	基态潮流	有功/无功电压幅值、电压相角、频率	
	事故状态潮流	有功/无功电压幅值、电压相角、频率	

附录31 公共安全信息需求

数据类别		数据描述	数据来源系统
微气象		时间、地点、温度、湿度、风速、风向、气压、雨量、日照	技术监督系统
山火		发生时间、地点、覆盖线路/杆塔、预警等级	技术监督系统
雷击	雷电监测装置台账数据	所属线路、所属杆塔、设备编码、监测专业、装置名称、装置型号等	技术监督系统
	雷电监测的状态数据	开始时间、结束时间、闪击的时间位置、雷电流峰值和极性、回击次数以及每次回击的参数信息、定位站	技术监督系统
	雷电活动情况数据	统计级别、总数、正极性数、负极性数、密度、平均电流、正平均电流、负平均电流	技术监督系统
	雷击跳闸与雷电定位关联数据	所属线路、所属单位、跳闸日期、跳闸时间、巡线结果、电流、参与定位探测站个数、距离、杆塔范围	技术监督系统
大风		发生时间、地点、覆盖线路/杆塔、风向、预警等级	技术监督系统
防盗		偷盗报警时间、报警级别、报警图像（可接入）	技术监督系统

附录32 身份标识汇总表

变电站	变压器	避雷器	变压器在 线净油装置	电流互感器	电压互感器	断路器	隔离开关	电容器组	耦合电容器	端子箱	高抗	电抗器	组合滤波器	母线	采集装置	变压器冷却 风扇	消弧线圈	建筑	屏柜	电缆沟
220kV 昭通变	7	50	0	71	29	95	25	6	0	44	0	0	0	0	0	0	0	11	104	2
220kV 大关变	9	44	0	5	29	21	62	4	5	23	0	0	0	0	0	0	0	5	124	0
220kV 盐津变	6	52	0	56	31	32	72	0	16	35	0	0	0	0	0	0	0	12	119	0
220kV 木乃河变	3	73	2	60	26	34	85	6	9	50	0	0	0	0	0	0	0	19	147	3
500kV 思茅变	1	45	0	0	22	46	95	0	0	75	12	15	0	0	0	0	0	17	151	2
220kV 景洪变	6	39	6	58	19	10	63	5	7	40	0	0	11	2	3	6	0	3	65	1
220kV 剑川变	6	58	0	43	7	20	19	0	11	49	0	0	0	0	0	0	1	0	101	0
220kV 古城变	0	15	0	9	6	12	11	0	3	14	0	0	0	0	0	0	1			
500kV 大理变	8	48	0	26	66	104	85	0	4	81	0	30	0	0	0	0	0	3	241	0
220kV 下关变	6	64	0	25	11	69	78	6	24	30	0	22	0	0	0	0	2	3	74	1
合计	52	488	8	353	246	443	595	27	79	441	12	67	11	2	3	6	4	73	1126	9

附录33 变电设备智能监测装置安装情况

变电站	装置类别	变压器铁心智能在线监测装置	套管介损和电容智能在线监测装置	油色谱智能在线监测装置	变电站红外测温装置	避雷器智能在线监测装置	容性设备智能在线监测装置	断路器智能在线监测装置		SF ₆ 、电压互感器智能在线监测装置		GIS在线监测装置	开关柜测温	微气象	总计
	监测量	铁心接地电流	套管介损和电容	主变油中溶解气体	红外温度监测	全电流和阻性电流	电容量和介损	分合闸线圈电流及动作次数、断路器开关电流检测、储能电机工作状态	SF ₆ 、微水、断路器在线监测	图像识别	压力监测	GIS在线监测装置	开关柜刀闸温度监测	环境监测	
220kV 下关变	新装	1	/	/	3	39	49	23	/	15	7	/	35	1	173
	原有	5	/	6	/	/	14	/	/	/	/	/	/	/	25
500kV 大理变	新装	1	1	/	2	6	6	2	/	/	/	/	/	1	19
	原有	/	/	8	/	/	/	/	/	/	/	7	/	/	15
220kV 剑川变	新装	1	/	/	1	3	3	1	/	/	/	/	24	1	34
	原有	/	/	6	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	6
110kV 古城变	新装	/	/	/	/	3	3	1	/	/	/	/	/	1	8
500kV 思茅变	新装	1	/	/	2	3	6	2	/	/	/	/	/	1	15

220kV 木乃河变	新装	1	/	/	1	3	3	1	/	/	/	/	18	1	28
220kV 昭通变	新装	1	1	1	1	3	6	1	/	/	/	/	/	1	15
220kV 盐津变	新装	1	1	1	1	3	6	1	/	/	/	/	/	1	15
220kV 大关变	新装	1	1	1	1	3	3	1	/	/	/	/	/	1	12
220kV 景洪变	新装	/	/	1	/	/	/	/	/	/	/	/	/	1	2
	原有	2	2	2	3	14	24	/	2	/	/	/	/	/	49
110kV 景东变	原有	/	/	/	3	24	/	11	/	/	/	/	13	1	52
110kV 巍山变	原有	/	/	2	3	14	2	10	/	/	/	/	17	/	48
新装合计		8	4	4	12	66	85	33	/	15	7	0	77	10	321
原有合计		7	2	24	9	52	40	21	2	0	0	7	30	1	195
所有合计		15	6	28	21	118	125	54	2	15	7	7	107	11	516

附录34 输电设备智能监测装置安装情况

输电线路	装置类别	输电线路一体化智能监测装置	气象站模块	视频及图像模块	烟雾模块	拉力模块	倾角模块	振动+红外超声波模块	导线测温模块	WiFi 双天线系统	GPS 模块	北斗通信
	功能	数据接入	环境监测	视频图像	山火	覆冰	覆冰	防盗	温度	通信	通信	通信
220kV 大镇线	新装	7	2	3	/	11	11	1	3	6	7	1
	原有	4	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/
500kV 博墨 I 回线	新装	4	3	2	1	3	3	/	/	/	4	/
	原有	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/
220kV 木景线	新装	1	1	1	/	/	/	/	/	/	/	/
	原有	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/
220kV 大下 II 回线	新装	1	1	1	1	/	/	1	1	1	1	/
	原有	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/	/
新装合计		13	7	7	2	14	14	2	4	7	12	1
原有合计		4										
合计		17	7	7	2	14	14	2	4	7	12	1

参考文献

[1]JUDD M D, LI Y, HUNTER I B B. Partial Discharge Monitoring for Power Transformers Using UHF Sensors Part 1: Sensors and Signal Interpretation [J]. IEEE Electr Insul Mag, 2005, 21 (3) : 5-14.

[2]高文胜, 丁登伟, 刘卫东, 等.采用特高频检测技术的局部放电源定位方法 [J].高电压技术, 2009, 35 (11) : 2680-2684.

[3]RUDD S, MCARTHUR S D, JUDD M D. A generic knowledge-based approach to the analysis of partial discharge data [J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2010, 17 (1) : 149-156.

[4]COENEN S, TENBOHLEN S. Location of PD sources in power transformers by UHF and acoustic measurements [J]. IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation, 2012, 19 (6) : 1934-1940.

[5]侯慧娟, 盛戈皞, 苗培青, 等.基于超高频电磁波的变电站局部放电空间定位 [J].高电压技术, 2012, 38 (6) : 1334-1340.

[6]胡凯, 付婷婷, 姚境, 等.超高频传感器检测电缆附件局部放电的研究进展 [J].传感器与微系统, 2010, 29 (11) : 1-10.

[7]王国利, 郑毅, 郝艳捧, 等.用于变压器局部放电检测的超高频传感器的初步研究[J].中国电机工程学报, 2002, 22 (4) : 154-160 .

[8]CHOO H, HUTANI A, TRINTINALIA L C, et al. Shape optimization of broadband microstrip antennas using genetic algorithm [J].

Electronics Letters, 2000, 36 (25) : 2057-2058.

[9]CHOO H, LING H. Design of broadband and dual-band microstrip antennas and propagation, 2003, 150 (3) : 137-142.

[10]AVILA S L, CARPES W P, VASCONCELOS Jr J A. Optimization of an Offset Reflector Antenna Using Genetic Algorithms [J]. IEEE Transactions on magnetics, 2004, 40 (2) : 1256-1259.

[11]KIM Y, GHOSH J, LING H. Application of Artificial Neural Networks to Broadband Antenna Design Based on a Parametric Frequency Model [J]. IEEE Transactions on antennas and propagation, 2007, 55 (3) : 669-674.

[12]TENBOHLEN S, PFEFFER A, COENEN S. On-site experiences with multi-terminal IEC PD measurements, UHF PD measurements and acoustic PD localization [C]. Conference Record of IEEE International Symposium on Electrical Insulation, 2010.

[13]LI J, JIANG T Y, WANG C S et al. Optimization of UHF Hilbert Antenna for Partial Dis-charge Detection of Transformers [J]. IEEE transactions on antennas and propagation, 2012, 60 (5) : 2536-2540.

[14]WANG M H. A novel extension method for transformer fault diagnosis [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2003, 18 (1) : 164-169.

[15]张晓星, 刘王挺, 杨孝华, 等.检测GIS局放的Hilbert分形天线及便携式监测系统[J].重庆大学学报, 2009, 32 (3) : 263-268.

[16]LI J, CHENG C K, BAO L W, et al. Resonant Frequency Calculation and Optimal Design of Fractal Peano Antenna for Partial Discharge Detection [J]. International Journal of Antennas and Propagation, 2012.

[17]Goldberg, DAVID E. Genetic Algorithms in Search, Optimization & Machine Learning [M]. Upper Saddle River, New Jersey: Addison-Wesley Press, 1989.

[18]HAUPT R L, WERNER D H. Genetic Algorithms in Electromagnetics [M]. Hoboken, NJ: IEEE/Wiley Press, 2007.

[19]沈鑫, 王昕, 赵艳峰.基于单周控制的并网逆变器在云南电网中的应用 [J].电子器件, 2013, 36 (5) : 722-727.

[20]GE Z X, SUN Z Q. Neural Network Theory and Its Application [M]. Beijing, China: Publishing House of Electronics Industry, 2008.

[21]CHUANG C, SU S, HSIAO C. The Annealing Robust Backpropagation (ARBP) learning algorithm [J]. IEEE Transactions on Neural Networks, 2000, 11 (5) : 1067-1077.

[22]TSUKIMOTO H. Extracting rules from trained neural networks [J]. IEEE Transactions on Neural Networks, 2000, 11, (2) : 377-389.

[23]HU Z Y, BAO Y K, XIONG T. Electricity load forecasting using support vector regression with memetic algorithms [J]. The Scientific World Journal, 2013, 2013: 10.

[24]KOLLAR L E, FARZANEH M, DYKE P V. Modeling ice shedding propagation on transmission lines with or without interphase spacers [J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2013, 28 (1) : 261-267.

[25]SCHMIDHUBER J. Deep learning in neural networks: an overview [J]. Tech. Rep., University of Lugano & SUPSI, Manno, Switzerland, 2014.

[26]VAPNIK V N. The Nature of Statistical Learning Theory [M]. Berlin, Germany: Springer, 1998.

[27]LONG X. Online Monitoring of Substation Grounding Grid Conditions Using Touch and Step Voltage Sensors [J], 2012, 3 (2) : 761-769.

[28]刘丽榕, 等.输电线路在线监测系统通信传输方式研究 [J].电力系统通信, 2011, 32 (4) : 20-25.

[29]黄小庆, 等.基于物联网的输变电设备监控体系研究 [J].电力系统保护与控制, 2013, 41 (9) : 137-141.

[30]朱庆豪, 等.基于GPRS的远程自动抄表系统的设计 [J].电测与仪表, 2006, 43 (487) : 31-34.

[31]刘柱, 等.基于基带拉远LTE 230MHz的配电自动化通信系统设计 [J].电力系统通信, 2012, 33 (242) : 35-40.

[32]CROCE D. Modeling Wireless Mesh Networks [D]. Institution Eurecom, Sophia-Antipolis, France, 2006.

[33]SEO C E, et al. Performance of IEEE 802. 11 in Wireless Mesh Networks, Microwave and Optoelectronics, 2005 SBMO/IEEE MTT-S International Conference on [R]. 2005: 363-367.

[34]NISHIMURA F, et al. OPGW Installation in Energized Transmission Line, Transmission & Distribution Conference and Exposition: Latin America, 2006 [R]. TDC 06. IEEE/PES: 1-8.

[35]IEEE-SA Standards Board. IEEE Std 802. 11g-2003, Part 11: Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) specifications, Amendment 4: Further Higher Data Rate Extension in the 2.4GHz Band [S]. USA: IEEE, 2003.

[36]TANAKA M, UMEHARA D. New Throughput Analysis of Long-Distance IEEE 802. 11 Wireless Communication System for Smart Grid [J].

Communication Networks for Smart Grid (IEEE Smart Grid Comm) : 90-95.

[37]BIANCHI G, et al. Performance analysis of the IEEE 802.11 distributed coordination function [J]. IEEE J. Sel. Areas Commun. 2000, 18 (3) : 535-547.

[38]KHALAF R, RUBIN I, JULAN H, Throughput and Delay Analysis of Multihop IEEE 802.11 Networks with Capture [J]. IEEE Conf. on Communications, 2007: 3787-3792.

[39]熊琚洁, 等.对IEEE802.11协议多跳传输时的时延性能改进[J], 微型机与应用, 2005, 12.

[40]ZIO E, MAIO F D. A data-driven fuzzy approach for predicting the remaining useful life in dynamic failure scenarios of a nuclear system [J]. Reliability Engineering and System Safety, 2010, 95 (1) : 49-57.

[41]LAROCHE E, ROUAT J, BOUCHARD G. Exploration of static and time dependent neural network techniques for the prediction of ice accretion on overhead line conductors [J]. in Proceedings of the 4th International Workshop on Atmospheric Icing of Structures (IWAIS'00) , Chester, UK, 2000.

[42]LI P, LI N, LI Q, et al. Prediction model for power transmission line icing load based on data-driven [J]. Advanced Materials Research, 2011, 144: 1295-1299.

[43]LI P, LI Q, CAO M, et al. Time series prediction for icing process of overhead power transmission line based on BP neural networks [R]. in Proceedings of the 30th Chinese Control Conference (CCC'11) , pp. 5315-5318, Yantai, China, July 2011.

[44]LI Q, LI P, ZHANG Q, et al. Icing load prediction for overhead power lines based on SVM [R]. in Proceedings of the International Conference

on Modelling, Identification and Control (ICMIC'11) , vol. 6, pp. 104-108, June 2011.

[45]MAKKONEN L. “Models for the growth of rime, glaze, icicles and wet snow on structures [J]. Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences, 2000, 358 (1776) : 2913-2939.

[46]FAN J, YAO Q. Nonlinear Time Series: Nonparametric and Parametric Methods [M]. Springer, Berlin, Germany, 2002.

[47]汪洋, 苏斌, 赵宏波.电力物联网的理念和发展趋势 [J].电信科学, 2010 (S3) : 15-17.

[48]饶威, 丁坚勇, 李锐.物联网技术在智能电网中的应用 [J].华中电力, 2011, 24 (2) : 2-3.

[49]龚钢军, 孙毅, 蔡明明, 等.面向智能电网的物联网架构与应用方案研究 [J].电力系统保护与控制2011, 39 (20) : 53-54.

[50]郭创新, 高振兴, 张金江, 等.基于物联网技术的输变电设备状态监测与检修资产管理 [J].电力科学与技术学报, 2010, 25 (4) : 37-39.

[51]王春新, 杨洪, 王焕娟, 等.物联网技术在输变电设备管理中的应用 [J].电力系统通信, 2011, 32 (223) : 118-120.

[52]曹一家, 何杰, 黄小庆, 等.物联网技术在输变电设备状态监测中的应用 [J].电力科学与技术学报, 2012, 27 (3) : 22-26.

[53]BRUNNER C. IEC 61850 for Power System Communication [J]. Transmission and Distribution Conference and Exposition, 2008. T&D. IEEE/PES, 2008, 1-6.

[54]ANDERSON L, BMNNER C, ENGLER F. Substation Automation based on JEC 61850 with new process-close technologies [J]. IEEE Powertech 2003, June 23-26, 2003, Bo-logna, Italy.

[55]LIU Y Q, GAO H L, WEI X, et al. Study on new type of IED with integrated functions in intelligent substation [C]. Advanced Power System Automation and Protection (APAP) , 2011 International Conference on, 2011, 161-165.

[56]窦晓波, 吴在军, 胡敏强, 等.IEC61850标准下合并单元的信息模型与映射实现[J].电网技术, 2006, 30 (2) : 81-82.

[57]YAN Y, QIAN Y, SHARIF H, et al. A survey on smart grid communication infrastructures: Motivations, requirements and challenges, IEEE Communication [J]. Surveys &Tutorials, vol. PP, No. 99: 1-16.

[58]钱义东.双星型网络拓扑可靠性分析 [J].计算机工程, 2009, 35 (16) : 224-225.

[59]梅生伟, 王莹莹, 陈来军.从复杂网络视角评述智能电网信息安全研究现状及若干展望 [J].高电压技术, 2011, 03: 672-679.

[60]余贻鑫, 栾文鹏.智能电网述评 [J].中国电机工程学报, 2009, 34: 1-8.

[61]王家华, 张艳杰.物联网在智能电网中的应用 [A].云南电网公司、云南省电机工程学会.2011年云南电力技术论坛论文集 [C].云南电网公司、云南省电机工程学会, 2011: 5.

[62]邵剑峰.变电站智能化改造关键技术研究 with 实施 [D].上海: 上海交通大学, 2013.

[63]邹建明.在线监测技术在电网中的应用 [J].高电压技术, 2007, 08: 203-206.

[64]成永红, 陈玉, 孟永鹏, 等.变电站电力设备绝缘综合在线监测系统的开发 [J].高电压技术, 2007, 08: 61-65.

[65]李鹏, 黄新波, 赵隆, 等.智能输电线路状态监测代理的研究与设计 [J].中国电机工程学报, 2013, 16: 153-161.

[66]王德文, 王艳, 邸剑.智能变电站状态监测系统的设计方案 [J].电力系统自动化, 2011, 35 (18) : 51-56.

[67]何杰.输变电设备物联网关键技术研究 [D].长沙: 湖南大学, 2013.

[68]郭创新, 高振兴, 张金江, 等.基于物联网技术的输变电设备状态监测与检修资产管理 [J].电力科学与技术学报, 2010, 25 (4) : 36-41.

[69]窦晓波.基于IEC 61850的新型数字化变电站通信网络的研究与实践 [D].南京: 东南大学, 2006.

[70]赵海英, 章坚民.IEC 60870-5-101在配电自动化系统数据通信中的应用 [J].电网技术, 2006, 11: 87-90.

[71]王德文, 邸剑, 张长明.变电站状态监测IED的IEC 61850信息建模与实现 [J].电力系统自动化, 2012, 03: 81-86.

[72]卞鹏, 潘贞存, 高湛军, 等.SCL在变电站远程配置管理中的应用 [J].电力自动化设备, 2004, 04: 54-56.

[73]徐志超, 李晓明.基于IEC 61850规约的IED模型动态建模问题研究 [J].华东电力, 2011, 07: 1073-1077.

[74]王德文, 朱永利, 邸剑.利用IEC 61850/MMS的电力远动实时数据交换新方法 [J].中国电机工程学报, 2008, 01: 65-70.

[75]郑建辉, 孟昭勇, 林馨.基于IEC61970/61968的发电厂资源CIM建模 [J].电力自动化设备, 2010, 30 (1) : 106-109.

[76]王阳光, 尹项根, 游大海, 等.应用于变电站自动化系统的无线传感器网络技术[J].电网技术, 2009, 33 (2) : 20-26.

[77]王秀敏, 李君, 韩丽艳, 等.基于ASN.1的电信系统中编码/解码设计和应用 [J].通信技术, 2007, 11: 403-405.

[78]邓秀兰, 饶运涛.ASN.1的编解码规则与应用层网络协议开发 [J].微计算机信息, 2004, 04: 99-100.