

网络协同框架下中波调幅广播的远程监控与智能运维系统设计

郝 锐

内蒙古自治区广播电视传输发射中心乌海广播发射中心台 内蒙古 乌海 016000

摘要: 随着信息技术与广播电视行业的深度融合,中波调幅广播台站面临设备复杂化、运维智能化、安全高标准等多重挑战。本文提出基于网络协同框架的远程监控与智能运维系统设计方案,通过多维度感知技术、边缘计算与云计算协同架构、智能诊断算法等核心技术,构建覆盖设备监控、环境感知、安全防护、运维决策的立体化系统。系统实现发射机故障自诊断准确率 $\geq 98\%$ 、运维响应时间缩短至5分钟以内、设备可用率提升至99.95%等关键指标,为广播行业智慧化转型提供技术支撑。

关键词: 网络协同; 中波调幅广播; 远程监控; 智能运维; 多维感知

引言: 中波调幅广播关乎国家文化传播安全与应急广播体系建设,截至2025年,我国有超2000座中波发射台站,但70%仍采用人工巡检与单机监控的传统运维模式,存在效率低、难发现隐患、数据孤岛等问题,且无法满足设备智能化发展需求,易致大面积停播。如今,5G、物联网、人工智能等技术发展,推动广播行业运维范式转变。本研究聚焦网络协同框架下中波调幅广播运维体系重构,构建闭环系统,解决传统痛点,实现全方位实时监控等,为广播智慧化转型提供技术支撑。

1 系统架构设计

1.1 网络协同框架模型

系统采用“云-边-端”三级协同架构,构建覆盖台站全要素的监控网络:(1)终端感知层:部署200+类智能传感器,包括发射机功率传感器(精度 $\pm 0.5\%$)、环境温湿度传感器(量程 $-40^{\circ}\text{C}\sim +85^{\circ}\text{C}$)、电源质量分析仪(采样率1MS/s)等,实现设备状态与环境参数的毫秒级采集。(2)边缘计算层:在台站本地部署工业级边缘网关,集成FPGA(现场可编程门阵列)加速模块,实现数据预处理、实时告警、本地控制等功能^[1]。通过TSN(时间敏感网络)时间敏感网络技术,确保关键控制指令的端到端时延 $< 1\text{ms}$ 。(3)云端协同层:构建分布式云计算平台,采用Kubernetes(是开源的容器编排系统,主要用于自动化部署、扩展和管理容器化应用程序。作为现代化去原生技术的核心组件,它可跨平台管理容器集群,实现资源优化配置和故障自愈)容器编排技术管理1000+个微服务实例。通过Spark(物理火花流)流处理引擎实现每秒10万条监控数据的实时分析,结合知识图谱技术构建设备故障推理模型。

1.2 多源数据融合机制

针对广播设备产生的异构数据,如时序数据、音频数据、日志文件等,系统设计了基于ApacheFlink的实时数据融合管道。

数据清洗是数据融合的第一步,采用Kalman卡尔曼滤波算法消除传感器噪声。传感器在采集数据过程中可能会受到各种干扰,导致数据存在误差和噪声。Kalman滤波算法能够根据系统的动态模型和观测数据,对传感器数据进行实时估计和修正,提高数据的准确性。同时,通过正则表达式匹配过滤异常日志,确保进入后续处理的数据都是有效的。

特征提取是多源数据融合的关键环节。对时序数据应用小波变换提取故障特征,小波变换能够将时序数据分解成不同频率的子带,从而提取出数据中的突变信息和周期性特征,这些特征对于故障诊断具有重要意义。对音频信号进行MFCC特征参数化,MFCC(梅尔频率倒谱系数)能够模拟人耳对声音的感知特性,提取音频信号中的重要特征,用于检测发射机的音频质量问题。

关联分析是多源数据融合的核心。构建设备-环境-业务三级关联模型,能够识别复合故障模式。例如,当发射机功率突降时,系统不仅会分析发射机本身的电参数,还会关联天馈系统的驻波比和环境湿度等参数^[2]。如果发现天馈系统驻波比异常且环境湿度超标,就可以判断可能是天馈系统受潮导致接触不良,从而引起发射机功率下降。这种关联分析能够更准确地定位故障原因,提高故障诊断的准确性。

2 核心功能模块实现

2.1 发射机智能监控子系统

2.1.1 状态感知矩阵

构建含127项关键指标的发射机状态评估体系,涵盖

电、热、机械参数。电参数监测关注入射功率（反映输出能力）、反射功率（关联天馈匹配）、调制深度（影响信号质量，动态范围0-150%），可及时发现电气故障。热参数监测用红外热成像技术（分辨率640×512）监测功放模块温度场，温度异常可及时报警。机械参数监测包括风机转速（PWM控制精度±1rpm）、冷却液流量（流量计精度±0.5L/min），可发现机械故障。

2.1.2 故障诊断引擎

采用“规则引擎+深度学习”混合架构。规则库含3000+条专家规则，覆盖95%已知故障，可快速诊断常见故障。对未知故障，构建1D-CNN时序分类模型，识别准确率达98.7%。故障诊断流程：先异常检测，再特征提取，接着与规则库匹配，匹配成功确定故障；不成功则输入深度学习模型验证，确定故障信息。

2.2 环境安全防控子系统

2.2.1 多维环境感知

为了保障广播电台的安全运行，部署了六类环境传感器网络，实现对气象、电磁环境和安防等多方面的监测。气象监测是环境感知的重要组成部分。风速传感器能够实时测量风速，量程达到0-60m/s，对于位于沿海或风力较大地区的台站，准确监测风速可以及时采取防护措施，避免天线塔等设备被风吹倒^[3]。降雨量传感器的分辨率为0.2mm，能够精确测量降雨量，为台站的防汛工作提供数据支持。雷电定位系统的定位精度为500m，当检测到雷电活动时，系统可以及时发出警报，提醒工作人员采取相应的安全措施。电磁环境监测对于保障广播信号的传输质量至关重要。场强监测设备可以监测530-1605kHz频段的电磁场强度，及时发现外界电磁干扰。谐波失真度测量精度达到±0.1%，能够准确测量发射机输出信号的谐波失真情况，确保广播信号的质量符合标准要求。安防监控是保障台站安全的重要手段。智能摄像头支持行为识别算法，能够自动识别人员的异常行为，如闯入禁区、破坏设备等，并及时发出警报。红外对射探测距离为150m，能够在台站周边形成一道无形的防线，当有人或物体闯入时，系统会立即检测到。电子围栏的定位精度为0.5m，可以精确确定入侵位置，为安保人员提供准确的信息。

2.2.2 安全联动机制

安全联动机制构建了“感知-决策-执行”的闭环控制，能够快速响应各种安全事件。以天线塔倾斜检测为例，当系统检测到天线塔倾斜角度大于2°时，会立即触发一系列安全联动动作。首先，系统会自动切断发射机输出功率，防止因天线塔倾斜导致发射机损坏或信号异常。然后，启动备用天线切换程序，确保广播信号能够

继续正常传输。同时，系统会向运维人员推送3D可视化故障场景，运维人员可以通过手机或电脑直观地看到天线塔的倾斜情况和周围环境，以便快速做出决策。最后，系统会生成包含应力分析报告的维修工单，为维修人员提供详细的技术支持，指导他们进行维修工作。

2.3 智能运维决策子系统

2.3.1 运维知识图谱

运维知识图谱是智能运维决策的核心，它构建了包含设备台账、维修记录、故障案例等10万+实体的知识库。智能推荐功能是运维知识图谱的重要应用之一。根据故障现象，系统可以在知识库中快速搜索相关的维修方案，并推荐给运维人员。例如，当发射机出现功率下降的故障时，系统会根据知识图谱中的关联关系，推荐可能的维修方案，如检查天馈系统、更换功率放大器等。经过测试，Top3推荐方案的准确率达到92%，能够为运维人员提供有效的参考。预测性维护是运维知识图谱的另一个重要应用。基于LSTM（长短期记忆网络）神经网络，系统可以对设备的剩余使用寿命进行预测。LSTM神经网络能够处理时序数据中的长期依赖关系，通过对设备历史运行数据的学习，预测设备在未来一段时间内的性能变化趋势。实验表明，该模型的RMSE小于15%（均方根误差：是衡量预测值与真实值偏差的常用指标），能够较为准确地预测设备的剩余使用寿命，为运维人员提前安排维修和更换设备提供依据。资源调度也是运维知识图谱的重要功能之一。通过对设备维修记录和备件库存信息的分析，系统可以动态优化备件库存。例如，根据设备的故障频率和备件的使用情况，系统可以预测未来一段时间内备件的需求量，并合理安排备件的采购和储备，使库存周转率提升40%，降低库存成本。

2.3.2 协同运维平台

协同运维平台开发了基于WebRTC（网页实时通信，由谷歌开发的开源技术，允许浏览器直接进行实时音视频通话和数据传输）的远程协作系统，为运维人员提供了高效的协作工具。多方视频会商功能支持8路高清视频+屏幕共享，运维人员可以通过手机、电脑等设备随时随地参与会商。在处理复杂故障时，不同地区的专家可以通过视频会商共同分析故障原因，制定维修方案，提高故障处理的效率和质量。AR辅助维修功能通过HoloLens（全息透镜：微软首款独立混合现实头显设备，通过深度摄像头与传感器实现虚拟与现实叠加）设备为维修人员提供实时的维修指引。维修人员佩戴HoloLens设备后，可以看到设备内部的结构和维修步骤的虚拟叠加图像，就像有一个虚拟的维修专家在现场指导一样^[4]。这种AR辅助维修方式能够减少维

修人员的操作失误,提高维修效率,尤其适用于复杂设备的维修。数字孪生仿真功能构建了发射机的数字镜像,运维人员可以在虚拟环境中对发射机进行虚拟拆装训练。通过数字孪生仿真,运维人员可以熟悉设备的内部结构和工作原理,提前进行维修演练,提高实际操作能力。同时,数字孪生仿真还可以用于新设备的培训和研发,为广播行业的发展提供技术支持。

3 关键技术创新

3.1 基于TSN的确定性网络技术

系统创新应用时间敏感网络TSN(Time-Sensitive Networking)时间敏感网络由IEEE802.1工作组开发,通过扩展传统以太网协议,实现了对时间敏感型数据的确定性传输)技术,满足广播设备实时性要求。(1)时间同步:采用gPTP(通用精确时间协议)协议实现全网设备时间同步,精度 $\pm 50\text{ns}$,保障设备协同工作,如发射机与天馈系统信号传输。(2)流量调度:为关键控制报文预留专用时隙,传输可靠性达99.999%,确保控制指令及时到达,满足实时性要求。(3)冗余设计:构建双活网络架构,主网络故障时50ms内切换至备用网络,避免广播停播,提高系统可靠性。

3.2 轻量化深度学习模型

针对边缘设备算力受限,提出模型压缩三步法。(1)知识蒸馏:将ResNet-50(一种深度卷积神经网络模型)教师模型压缩为MobileNetV3(一种轻量级的卷积神经网络模型)学生模型,减少参数和计算量,保持较高准确率。(2)量化训练:采用8位定点量化,模型体积缩小75%,减少存储和传输开销,提高运行效率。(3)剪枝优化:移除90%冗余通道,推理速度提升8倍,减少计算量,提高边缘设备运行速度。

3.3 区块链赋能的数据安全

构建基于HyperledgerFabric(超级账本Fabric,是一个开源的企业级区块链框架,由Linux基金会发起,旨在为企业提供构建区块链应用的平台和工具,支持模块化架构和可插拔组件,可实现灵活的区块链解决方案定制)的运维数据链,保障运维数据安全。(1)访问控制:采用ABAC属性基加密,实现细粒度权限管理,根据用户属性决定访问权限。(2)审计追踪:所有操作记录上链,形成不可篡改审计日志,为故障排查、责任认定提供依据。(3)智能合约:自动执行备件领用、工单流转等业务流程,如验证备件领用申请合法性,自动更新库存信息。

4 系统应用验证

4.1 测试环境搭建

在某省级广播电台部署完整系统,监控对象包括3部100kW全固态发射机、2座150m自立塔、1套柴油发电机

组和500+个环境传感器。该台站设备复杂,业务繁忙,具有代表性,能够充分验证系统的性能和功能。

4.2 效能评估指标

经过6个月连续运行测试,系统取得了显著的成效。与传统模式相比,故障定位时间从45分钟缩短至3.2分钟,缩短了92.9%。这得益于系统的实时监控和智能诊断功能,能够快速准确地定位故障原因,减少了运维人员的排查时间。平均无故障时间从1200小时提升至1850小时,提升了54.2%,说明系统的稳定性和可靠性得到了显著提高。运维人力需求从8人减少至3人,降低了62.5%,降低了运维成本。能源利用率从78%提升至89%,提升了14.1%,通过优化设备的运行状态,减少了能源浪费。

4.3 典型案例分析

2025年3月15日,系统在02:47检测到2号发射机功放模块温度异常。边缘网关立即启动本地保护,降低输出功率至30%,防止设备因过热而损坏。同时,云端平台分析历史数据,诊断为冷却液泵轴承磨损。系统自动生成包含备件清单、维修步骤的电子工单,并通过AR系统(Augmented Reality System增强现实系统,是一种将虚拟信息与真实环境实时融合的交互技术,通过计算机视觉、传感器和显示设备实现虚实结合)指导值班人员完成更换作业。整个处置过程耗时18分钟,较传统模式缩短87%,避免了一次重大停播事故。这个案例充分展示了系统的实时性、准确性和高效性,能够在关键时刻保障广播的正常播出。

5 结语

本研究构建网络协同框架下广播智能运维体系,实现三大突破:技术融合创新,为广播技术升级提供新思路;效能提升,关键指标达国际先进,运维成本降低,提高效益与效率;模式转型,推动广播从“人工经验驱动”转向“数据智能驱动”,奠定智慧化转型基础。未来工作聚焦三方面:研发6G广播专网,实现超低时延远程操控;探索量子加密技术保障运维数据安全;构建广播运维大数据平台,推动标准体系建设,促进行业运维规范化标准化。

参考文献

- [1]郭启勇.中波调幅广播应急广播系统架构及应用研究[J].电视技术,2025,49(02):120-122.
- [2]李想.中波调幅广播发射台数智化技术改造[J].家庭影院技术,2024,(22):21-23.
- [3]刘钊.10kW数字调幅中波广播发射机智能动态监测方法研究[J].长江信息通信,2024,37(06):235-237.
- [4]王明伟.中波调幅广播发射机监测控制系统V1.0.0.0.陕西省,陕西科技大学,2021-10-01.