

[变电站]

基于端边协同的变电站远程智能巡视技术研究与应用

文/徐嘉巍¹ 黄润桃²

1. 中国南方电网超高压输电公司梧州局；2. 南方电网广西电网有限责任公司梧州供电局

随着新型电力系统建设的不断深入，变电站作为电网的核心组成部分，其安全稳定运行至关重要。传统的人工巡视存在劳动强度大、效率低和可靠性差等问题，难以满足新型电力系统的需求。分析探讨基于端边协同的远程智能巡视技术在变电站中的应用，依托智能巡视机器人、无人机将人工智能、图像识别、语音识别和自动导航等技术应用于变电站巡视，以视频、音频和红外等各类设备传感器为载体，将边缘计算的强大处理能力与云端的大数据分析相结合，实现室内外全覆盖巡视，有效提高巡视效率、保障设备安全、降低运维成本，实现了变电站巡视的智能化、高效化与精细化。

变电站作为电力系统的关键节点，承担着电力输送和分配的重要任务，其安全稳定运行直接关系到整个电力系统的可靠性和稳定性。随着我国电力行业的快速发展，特高压输电线路和无人值守变电站的数量不断增加，对变电站的运维管理提出更高的要求。传统的变电站巡视主要依赖人工进行，这种方式不仅效率低下、劳动强度大，而且受环境因素影响较大，难以确保巡视质量和及时性。

近年来，随着物联网技术、大数据分析和人工智能等领域的快速发展，智能巡视技术逐渐成为变电站管理中的重要工具。这些技术应用使得远程监控和智能诊断成为可能，极大地提升变电站巡视的效率和准确性。其中，端边协同架构是一种新兴的技术方案，它通过结合边缘计算的实时处理能力和云计算的数据分析优势，实现对变电站设备状态的全面感知和智能决策。为此，将边缘计算、云计算与变电站远程智能巡视相融合，采用智能机器人、无人机和设备状态采集装置等进行现场智能巡视，并结合高清摄像头、红外热像仪等传感器获取设备状态信息，利用边缘计算的实时处理能力和云计算

的大数据处理能力，将数据处理与远程集中管理相结合，实现变电站室内外全覆盖巡视，有效提高巡视效率、保障设备安全和降低运维成本，实现变电站巡视的智能化、高效化与精细化^[1]。

变电站巡视现状

变电站巡视是保障电力系统安全稳定运行的重要手段之一。传统的变电站巡视方法主要依赖于人工巡视，巡视人员需要定期检查变电站内的设备，观察设备运行状态，记录数据，并检查是否有异常情况。然而，随着电力系统的规模不断扩大和技术的快速发展，传统的巡视方法已经无法满足现代电力系统的需求^[2]。主要存在如下问题：

1) 主观判断的局限性。人工巡视依赖于巡视人员的经验和感官判断，这种判断可能会因个人差异而产生不一致性。巡视人员可能会因疲劳、注意力分散等因素而错过重要的细节。

2) 效率低下。人工巡视需要巡视人员花费大量时间在变电站内行走并检查每一项设备。

随着变电站规模的扩大，人工巡视变得更加耗

时且难以覆盖所有必要的检查点。

3) 记录的不准确性。手动记录数据可能导致记录不准确或遗漏关键信息。数据记录的质量受书写习惯、字迹清晰度等因素的影响。

4) 无法实现连续监控。人工巡视只能在特定时间间隔内进行,无法实现24 h不间断的监控。这意味着在两次巡视之间可能会错过设备的突然故障或其他紧急情况。

5) 难以量化评估。人工巡视的结果往往难以进行客观的量化评估,这给设备维护策略的制定带来了困难。

随着技术的进步,未来变电站的巡视工作需要采用自动化和智能化的技术手段,这将大大提高电力系统的可靠性和经济性。

智能巡视技术概述

在变电站运行管理的精细化转型中,智能巡视技术以其高度集成化的解决方案,正引领着变电站运维模式的深刻变革,该技术巧妙融合了机器人、无人机和传感器等尖端设备,并深度结合图像识别、红外测温和声纹检测等先进技术,构建起一套高效、智能的巡视与监测系统。这种分布式计算模式不仅减轻云端的处理压力,还提高数据处理的速度与效率,为实时监测与快速响应提供有力支持^[2]。

1. 巡视机器人技术

变电站巡视机器人集成移动载体、供电设备、通信设备和检测设备等关键组件,能够采用遥控或全自主运行模式进行工作。这种灵活性使得机器人能够根据实际需求,在变电站内高效、准确地执行巡视任务。目前巡视机器人在两种场景中使用,轮式巡视机器人适用于变电站的室外场地,凭借其灵活的移动能力和双镜头摄像装置,能够全方位、多角度地巡视设备,确保室外设备的安全运行,目前轮式机器人主要承担红外测温作业。导轨式巡视机器人在继电保护室及高压室等室内环境中使用,导轨式机器人能够沿着预设轨道精确移动,通过自动识别技术,对保护装置等关键设备进行全面巡视。

2. 无人机巡视技术

无人机技术在变电站运维中的应用日益广泛,其独特优势在于能够高空作业,极大地降低人工高

空作业的安全风险。装备有可见光和红外探头的无人机,不仅能够实时录制并传输高清可见光视频,还具备强大的环境监测能力。通过红外探头,无人机能够精准识别设备的表计读数、刀开关位置,并实时监测设备温度,一旦发现过热状态,立即发出报警,有效预防潜在的安全隐患。针对变电站复杂多变的需求,专为变电站设计的无人机通常采用轻型、小型多旋翼设计,使得无人机能够执行更高准确度的自主巡视任务,无需人工干预即可按照预设航线飞行,大大提高巡视效率,为变电站的安全稳定运行提供更为全面、精准的保障。

3. 边缘计算技术

边缘计算是一种计算架构模式,它将数据处理、计算和存储能力部署在网络的边缘,即数据产生的源头附近。这种方式可以减少数据传输到中心云所造成的延迟,提高响应速度,并降低网络带宽需求。边缘计算技术尤其适合需要即时响应和处理大量实时数据的应用场景。边缘计算在变电站智能巡视中的应用主要有:

1) 智能摄像头。边缘计算设备集成了高准确度摄像头,能够对变电站进行全天候监控。这些摄像头不仅可以捕捉高清视频,还能在本地进行初步的图像分析,例如识别异常行为或设备故障。

2) 温度监测。边缘计算设备可以集成温度传感器,实时监测变电站内的温度变化,并根据预设阈值触发警报。

3) 环境监测。除了温度外,还可以监测湿度、气体浓度等环境参数,以确保变电站处于安全的工作环境中。

4) 设备运行状态监测。针对测控装置、继电保护装置和合并单元等二次设备运行状态开展在线监测和分析,随时发现安全运行隐患。

5) 自动化响应。当边缘计算设备检测到异常情况时,它可以自动采取行动,例如调整设备设置或触发警报。

6) 远程监控。运维人员可以通过远程访问边缘计算设备来实时查看变电站的状态,无需亲自到场即可完成巡视任务。

智能巡视技术架构与实现

基于“端边协同”的智能巡视系统的整体架构

分为云端、边端和管理端，由远程智能巡视主机作为边端、云管理平台作为云端，巡视主机利用采集机器人、视频监控等采集设备数据，实现数据采集、自动巡视、智能分析、实时监控、智能联动和远程操作等功能，支持部署在工区、区域集控站，实现对管辖范围内变电站的机器人、视频监控和二次设备在线监视进行统一管理。

1. 系统总体架构

系统总体架构如图1所示。

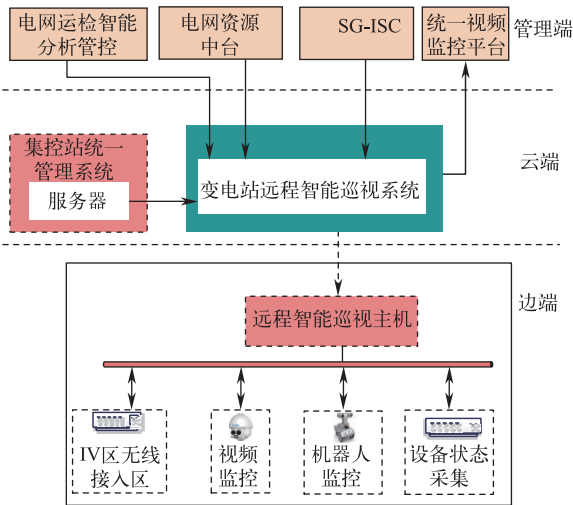


图1 总体架构

智能巡视系统采用先进的云边端三层架构设计，确保了数据的高效传输与处理。在端侧，通过部署边缘网关、智能网关及智能采集装置，实现各类终端设备的即插即用与无缝接入，极大地提升了系统的灵活性与可扩展性。在边侧，广泛分布的云边缘节点集成了数据采集、存储、AI计算及应用系统，实现了对海量数据的就近处理与分析。系统主要由综合展示、智能巡视组成，总体架构见图1。基于端边协同的变电站远程智能巡视系统包括：综合展示模块，实现对辖区内变电站监测、巡检、监控设备、缺陷等信息的总览和信息查询；智能巡视模块，实现对变电站端由机器人、视频摄像机和设备状态采集装置组成的联合巡检系统远程进行巡检监控、任务管理以及视频监控功能；告警联动模块，实现接收到告警信息后联动进行视频实时预览、视频录像、产生声光报警等功能；配置管理模块，实现告警联动配置、告警信息订阅设置、机器人调配管理、权限管理、日志管理等本地配置功

能，以及远程配置站端检修区域的功能。

变电站远程智能巡视的云端管理平台集成多种先进技术，支持多用户同时在线监控和管理多个变电站，收集大量的运行数据，进行分析和挖掘，以提供有价值的信息和洞察。通过大数据分析预测设备故障趋势，提前进行维护。允许运维人员通过移动设备随时随地接入云端管理平台，提供移动应用，方便工作人员现场检查 and 记录。在云端构建变电站的数字孪生运行模型，实现对变电站运行状态的实时模拟，有助于优化运维策略和提升故障预测准确性。云端管理平台应用机器学习算法进行设备健康状态评估，使用计算机视觉技术进行图像识别，自动检测设备异常，为变电站的远程智能巡视带来了革命性的改变，提高运维效率和安全性，同时也为电力行业的数字化转型提供强有力的支持。基于以上分析，边端设备全时段在线监测变电站设备的运行数据，强化设备的运行属性监测，通过对动态数据的诊断分析，实时掌握数据异动及异常发展趋势，边缘计算结构如图2所示。

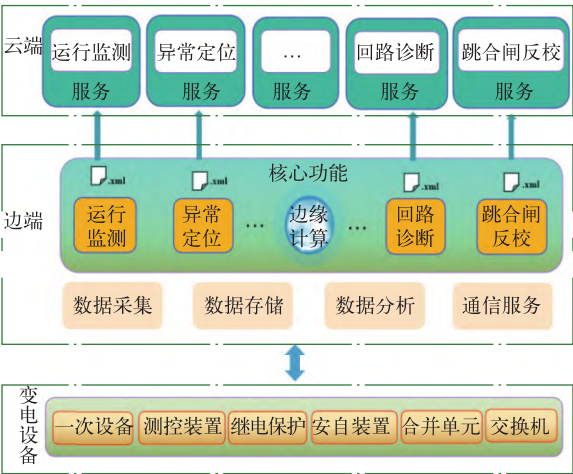


图2 边缘计算结构

2. 边缘计算模型定义

变电站端的边缘计算建模采用扩展通用边缘计算事件节点建模，应用GGIO逻辑节点类，各个边端装置定义N个GGIO，每一个边缘计算业务定义一个GGIO，在边缘代理默认具备如下表格定义的边缘计算功能，支持扩展。边缘计算功能通过定值管理，厂家在出厂时默认设置缺省定值，在用户不整定的情况下，不影响边缘代理功能，并支持用户整定，其定义见表1。

表1 边缘计算GGIO

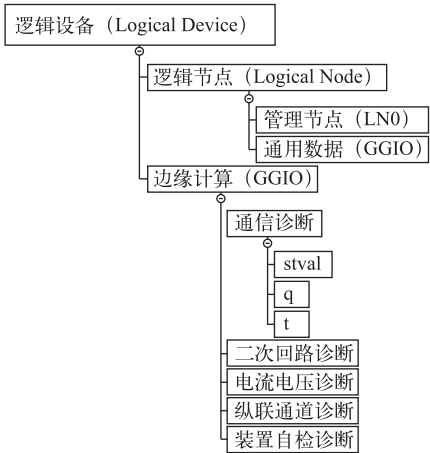
属性名	属性类型	全称	M/O	描述
公用逻辑节点信息				
Mod	INC	Mode	M	模式
Beh	INS	Behaviour	M	行为
Health	INS	Health	M	健康状态
NamPlt	LPL	Name	M	逻辑节点铭牌
诊断信息				
ComStatus	VSS	Communication Status	M	通信状态诊断
SecCircuit	VSS	Second Circuit Status	M	二次回路诊断
AnaExceed	VSS	AnalogsExceed Range	M	电流/电压诊断
...	...	...	...	...
Longitudinal Channel	VSS	Longitudinal Channel	M	纵联通道诊断
DevAla	VSS	Device Alarm	M	装置自检诊断

在边缘计算模型基础上，支持按照固定结构扩展边缘计算业务功能，云端按照边缘代理侧设置的边缘计算功能增加对应的解析服务即可实现云边协同模式下的变电设备动态诊断。

基于边缘计算功能模型，依靠变电站边端装置实时采集和可靠运行，基于采集的变电设备海量数据开展就地分析和动态诊断，各个边缘计算功能独立运行，生成对应的动态诊断结果，诊断结果以XML文件承载，使用UTF-8格式字符编码,文件命名为“STAT_功能码_告警码_时间信息”。在上送到云端的传输过程中不对文件进行任何解析和修改，云端针对不同类型的边缘计算功能，通过各个边缘计算业务诊断结果的功能码识别对应的业务类型，调用对应的解析服务进行分析展示，实现边缘计算功能可扩展和自整定，各个边缘计算业务功能码见表2，定义的边缘计算模型如图3所示。

表2 边缘计算功能码定义

功能码	功能描述	关键字
01	通信状态诊断	ComStatus
02	二次回路诊断	SecCircuit
03	电流电压诊断	AnaExceed
04	纵联通道诊断	Longitudinal Channel
05	装置自检诊断	DevAla



3. 智能巡视应用

远程智能巡视系统秉持“系统一张图”的理念提供管辖范围内变电站信息总览，从多角度、多维度，将在线智能巡视系统融合承载的各类数据在一个统一界面中加以汇聚，支持统计信息总览、巡检任务总览、巡检机器人应用总览、设备运维信息总览、视频设备应用总览、监测信息总览、缺陷信息总览及集中监控全景。

3.1 集中监控全景

远程智能巡视系统支持三维浏览，通过三维GIS地图展示所辖区域内变电站分布及设备巡检状况统计，通过在三维地图上点选变电站，经三维场景加载，进入变电站全景进入变电站全景，支持以漫游的方式，第一人称视角进行浏览浏览。支持三维场景中检索定位设备实体，及远程浏览巡检点定位，以设备为中心，运维人员可以远程浏览设备相关工况、台账信息、告警异常及缺陷信息的融合展示，同时通过点击集控站所辖变电站三维场景中的任意目标对象，基于精确空间位置信息，自动匹配站内视频监控资源，推送实时视频画面。对于运维人员日常在线自动巡视时，支持对所辖变电站三维场景的全景鸟瞰式全站查看，准确定位并提示全站告警信息，围绕目标位置的三维场景或设备三维模型，可以展开告警详情。

3.2 远程智能巡视

对于变电站各种类型的巡视，远程智能巡视支持管理周期性巡视任务，配置巡视方案后系统定时根据巡视方案生成巡视任务并下发站端执行。提供方案编制功能，包括例行巡检、特殊巡检、专项巡

检和自定义巡检等类型的编制。巡检方案支持停用、启用、修改、删除、新建和立即执行。支持以台历形式查看每日巡检任务情况，对于巡视中或暂停的任务可以查看巡检点总数、异常巡检点数、当前巡检点、已完成巡检点、任务完成进度和当前巡视实时画面等。支持实时展示可见光视频功能，可直观展示机器人或视频监控系统当前巡检设备的实时画面，支持实时展示红外视频功能，可直观展示机器人或视频监控系统当前巡检设备的红外图像及温度（如当前图像中的环境温度、设备的最高温度和最低温度等温度信息），可多图展示并具备对比功能。

远程智能巡视系统具备巡检报文实时显示功能，巡检报文分类显示事件报文功能，分为：实时信息、巡视告警信息和系统告警信息等层次。实时信息显示，包括显示正常、异常识别的结果信息，反映设备、机器人或视频监控系统设备、客户端的动态巡检情况；告警显示相应异常告警信息，异常信息应表述明确；具备声音报警或闪烁提醒等功能，且巡视告警信息、系统告警信息应采用不同的告警方式^[10]。支持以树形列表方式显示本单位设备资源信息，以不同图标显示表示机器人、高清视频和轨道机，并以不同的图标或颜色区分表示设备在线、离线等状态。支持按照在线、离线等过滤视频监控设备，支持通过树形导航调阅视频画面，支持1/4/9/16/全屏等多种方式显示视频画面。支持根据时间、设备和告警类型等信息查询历史录像文件，支持同一路视频不同的时间点同时回放，方便用户快速检索。远程智能巡视系统接收智能巡视主机推送的告警信息，接收到告警信息后进行相应联动，如视频实时预览、视频录像、声光报警等。根据告警等级支持告警展现形式进行配置，如是否弹窗显示告警联动视频、是否视频录像、是否声光报警等，根据告警联动策略执行相应联动动作，支持告警联动弹出视频实时预览窗口，通过预览窗口进行告警视频实时预览，实时了解现场情况。

3.3 二次回路诊断

动态采集分析保护装置、测控装置、交换机、合并单元和智能终端等二次设备的GOOSE和SV控制块虚回路链路状态、物理实回路链路状态，并结合通道光纤接口监测信息，以及链路异常告警信

息进行综合分析，诊断分析二次回路状态，采集分析遥信、遥测数据见表3。

表3 回路诊断分析数据

序号	数据集	信息名称	说明
1	dsWarning	GOOSE总告警	GOOSE除检修不一致外的所有异常的总报警
2	dsCommstate	GOOSE数据异常	GOOSE异常的信号
3		GOOSE链路中断	链路中断
4	dsAin	过程层光口1发送光强	过程层光强
5		过程层光口1接收光强	
6		过程层光口……发送光强	
7		过程层光口N接收光强	
8	dsGOOSE	GOOSE格式错误	GOOSE格式错误严重对象标识
9		GOOSE丢帧	GOOSE丢帧严重对象标识
10		GOOSE错序	GOOSE错序对象标识
11		GOOSE重复	GOOSE重复对象标识
12		GOOSE断链	GOOSE断链对象标识
13		GOOSE发送超时	GOOSE发送超时对象标识
14		GOOSE重启	GOOSE重启对象标识
15		GOOSE配置不一致	GOOSE配置不一致对象标识
16		GOOSE状态异常变化	GOOSE状态异常变化对象标识
17		GOOSE状态虚变	GOOSE状态虚变对象标识
18		SV格式错误	SV格式错误严重对象标识
19		SV丢帧	SV丢帧严重对象标识
20		SV发送超时	SV发送超时对象标识
21		SV断链	SV断链对象标识
22		SV重复	SV重复对象标识
23		SV序号异常变化	SV序号异常变化对象标识
24		SV采样无效位变化	SV采样无效位变化对象标识
25		SV同步信号标志变化	SV同步信号标志变化对象标识
26		SV双AD不一致	SV双AD不一致对象标识
27		SV配置不一致	SV配置不一致对象标识
28		SV延时通道异常	SV延时通道异常对象标识

通过建立二次设备物理连接信息和二次逻辑链

路关联关系模型，获取继电保护、测控装置对过程层设备的链路中断告警数据，融合分析GOOSE变位告警，研判过程层设备链路中断情况。采集过程层报文分析服务的链路状态报告，研判分析信号发送设备运行状态。判断逻辑链路通断状态变化时，触发链路状态告警信息，判断逻辑链路通断状态变化，判断相关端口状态，判定端口状态告警信息，判断逻辑链路通断状态变化时，研判产生链路异常的具体故障点，并通过图形化的方式标识二次回路对应的故障位置，如图4所示。

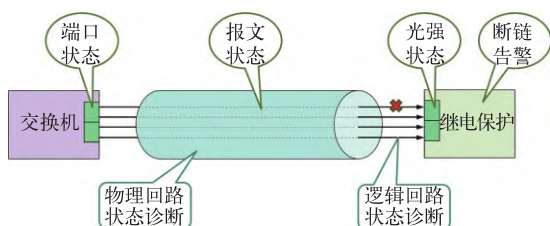


图4 回路诊断

3.4 装置自检诊断

当前变电站设备具备海量的自检数据，对继电保护、测控装置等二次设备的装置温度、电源电压、端口发送/接收光强和光纤纵联通道光强进行在线监测，运行趋势突变分析、状态趋势预测，分析二次设备自身状态渐变过程，通过数据统计、越限判断和同期差值越限比对等诊断手段，进行二次设备自身状态的就地诊断和主动预警，实现二次设备自身异常发展趋势的智能告警和及时发现。

在500 kV智能变电站中大量使用光纤接口，因发热量大，光功率衰减缺陷严重。光衰是一个渐变过程，依靠人工巡视难以发现，通过动态在线监视采集和分析光口光强的运行数据，通过斜率陡变分析及时发现保护装置的光口功率衰减问题，通过现场检查确认得以及时更换，避免保护误动作或拒动作事故的发生。

同时对于数字化的二次设备，其电源模块将不再6年更换，及时发现电源问题非常重要，但电源模块的缺陷很难直接通过电压数值反映出来。电源模块出问题前往往表现为带载能力下降（或称虚电），当装置进行大量计算或机箱温度高时，其电压会出现稍大幅度的跌落。依靠二次设备在线监视与诊断装置在就地侧实时采集机箱温度、电网故障事件以及保护装置启动的记录数据的优势，通过融

合分析开展“边缘计算”，可以及时发现并预警电源模块的此类缺陷。

应用案例

通过对变电站人工巡视问题分析和新技术在变电站远程智能巡视中的研究和实践，在500 kV变电站应用端边协同的远程智能巡视技术，该系统基于云平台和边缘计算技术，实时监测变电站设备状态、运行环境、告警信息和设备缺陷等信息，边缘设备即时分析数据，快速检测到异常情况，如设备过热、绝缘损坏和光口损坏等。当发现潜在问题时，立即向运维人员发送预警信息，同时将相关信息同步至云端进行进一步分析。通过云端的高级分析工具和人工智能算法，对边缘设备上报的数据进行深度学习，识别潜在故障模式，同时基于历史数据建立预测模型，提前预测设备的健康状况，指导预防性维护计划。通过基于端边协同的远程智能巡视系统的应用显著提高了运维效率，减少人工巡检的频率，降低运维成本，增强故障响应能力，缩短从发现问题到解决问题的时间间隔。通过及时预警，有效避免重大事故的发生。通过以上措施，在500 kV变电站成功实现远程智能巡视的现代化升级，显著提升运维水平和变电站的整体运行质量。

结束语

本文深入探讨和研究基于端边协同的变电站远程智能巡视技术的架构和应用，提出的端边协同智能巡视系统充分利用边缘计算的优势，减少数据传输延迟，提高数据处理的实时性。通过现场实践应用验证了该系统在变电站运维中的实用性和有效性，减少人工巡视的工作量，降低运维成本，减少人员进入危险区域的次数，降低安全事故的风险，实现变电站“立体化巡视”“全方位管控”。EA

（收稿日期：2024-09-02）

参考文献

- [1] 漆苗. 新形势下变电站智能巡视技术的应用研究[J]. 照明电器, 2024(6): 156-158.
- [2] 袁嘉诚. 基于智能巡视系统的变电站巡视技术研究[J], 2024(3): 42-44.