

基于多智能体的远程智能巡视系统优化设计

谢文君, 葛立青, 吴越, 倪广义, 席涵

(南京南瑞继保电气有限公司, 江苏 南京 210002)

摘要: 为了提高多智能体远程智能巡视系统的控制可靠性、工程配置的正确性和巡视任务的执行效率, 提出了位姿辅助的实时控制策略, 低成本解决了远程复杂网络环境下运动智能体可靠准确控制问题; 采用智能巡视系统基础服务模块, 解耦实现了不同类型智能体共享基础服务, 提升了系统资源利用率; 在此基础上通过巡视点位分布式管理, 实现了多种类型智能体的巡视点位一体化建模, 支撑多智能体采集设备在不同业务场景下联合巡视任务的高效稳定运行。

关键词: 智能巡视; 实时控制; 多智能体系统; 一体化建模; 联合巡视

Optimal design of remote intelligent inspection system based on MAS

XIE Wenjun, GE Liqing, WU Yue, NI Guangyi, XI Han

(NR Electric Co., Ltd., Nanjing 210002, China)

Abstract: In order to improve the control reliability, engineering configuration correctness and execution efficiency of the MAS remote intelligent inspection system, a real-time control strategy assisted by location and posture was proposed, which solved the problem of reliable and accurate control of motion agents in remote complex network environment at low cost and high efficiency. The decoupling of the basic service module of the intelligent patrol system realizes the sharing of basic services between different types of agents, and improves the utilization rate of system resources. On this basis, through distributed management of inspection points, the integrated modeling of different types of agents inspecting points is realized, which supports the efficient and stable operation of multi-agent systems in different types of business scenarios.

Keywords: intelligent inspection; real-time control; multi-agent system; integrated modeling; joint inspection

0 引言

变电站是电力系统配电和对外输电的集结点, 在此完成电能集中、变换和分配的工作任务。设备巡检是变电站运行管理的主要工作之一。长期以来, 我国的变电站一般都是采用人工巡检方式, 这种巡检方式会受到外部环境的干扰, 同时变电站的高压、超高压环境对巡检人员也构成很大的人身安全威胁。并且巡检效果也会受工作人员业务能力、工作经验和精神状态等各方面因素的影响, 误检、漏检的情况时有发生,

以至造成重大经济损失, 影响整个供电系统安全稳定运行。

近年来, 随着智能电网的快速发展, 利用移动巡检机器人、无人机、智能摄像头等智能巡视设备代替人工巡检已经成为电力行业研究的热点^[1-5]。然而, 传统的以机器人系统为中心的机器人远程控制系统仍然无法实现减轻巡检人员工作强度的目标。例如, 对一台三面有防火墙的变压器进行可见光、红外、在线监测、声纹等全面巡视时, 单一巡视设备无法完成任务。机器人

本身体积庞大、灵活性欠佳,摄像头探测存在死角,无人机则受到严格限制。而以多种机器人、无人机、智能摄像头等组成的多智能体系统可以有效地解决这个问题^[6]。相较于传统的机器人巡视系统,多智能体巡视系统具有冗余度高、采集信息互补、环境适应能力强等明显的优势^[7-8]。同时,由于无人机、机器人等不同智能体系统形成信息的互补,单个独立巡检设备不再需要极强的性能以及丰富的传感设备,制作与维护成本也会大大降低。

在包含多智能体的远程智能巡视系统运维场景下,多智能体子系统的运维管理成为其稳定高效运行的关键技术。本文分别从远程实时控制、多智能体系统集成以及一体化分布式运维管理等方面进行了优化设计,有效提高了远程智能巡视系统的可靠性以及运维管理质量和效率。

1 位姿辅助的远程实时控制

实时控制是远程智能巡检系统的重要基础功能,在机器人、无人机等智能体的巡视点位标定与人工介入异常处理方面有着重要意义。受制于复杂网络环境的稳定性以及远程控制中各控制环节功能模块的可靠性,因此难以保证控制指令的实时性和准确性,给智能体远程控制可靠性带来了挑战。目前国内在机器人远程控制方面的研究大多集中在视觉反馈、网络传输优化与实时仿真防碰撞技术等方面,在不同的行业领域提出了优化方案,提高了机器人远程控制的技术门槛和硬件成本,同时也使得远程控制的可靠性受限于新技术、新硬件的成熟度和可靠性^[9-10]。

1.1 控制模式比较

机器人远程实时控制可以采用启停式和脉冲式两种方式。启停式控制命令简单,启动、停止和切换控制命令均只需要一条控制指令完成,但是在网络异常情况下,如果无法正确接收到控制切换命令或停止命令,将会导致机器人运动失控;脉冲式的控制模式在按下某个位姿的控制按钮后,连续发送脉冲式的控制命令,在控制命令结束时即停止运动,能有效避免失控风险。

比较而言,脉冲式控制模式的控制指令较多,但是可靠性高,对远程复杂网络适应性更强,整体而言,由于运动控制的指令占用带宽较少,因此更推荐采用脉冲式的运动控制模式。

1.2 位姿辅助控制

脉冲式的运动控制模式能有效降低远程运动控制失控风险,但仍无法完全满足需求,当在整个控制链路的某个控制环节出现命令拥塞时,可能会存在智能体运动卡顿和超预期运动的情况,难以有效地对智能体进行精准定位。

因此,采用位姿辅助的运动控制方法,在运动控制命令中增加远程终端接收到的当前实时位姿信息。以机器人实时控制为例,位姿辅助实时控制示意图如图1所示。

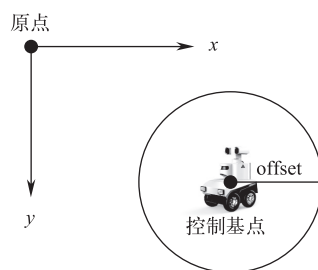


图1 位姿辅助实时控制示意图

Fig. 1 Schematic diagram of pose assisted real-time control

具体控制步骤为:

- 1) 通过导航定位技术获取并实时上送机器人本体位姿信息,远程巡视终端记录并通过二维、三维地图展示机器人智能体实时位姿^[11]。
- 2) 在对机器人本体进行运动控制时,采用周期脉冲的方式下发控制命令,并在控制命令中包含机器人本体当前的位姿信息。
- 3) 机器人本体接收到一条脉冲控制命令后,获取控制命令中的位姿信息,以此为控制基点,在一定的偏移量范围内移动,同时根据位姿变化实时上送新的位姿信息。
- 4) 远程终端根据实时接收到的位姿信息进行连续脉冲式控制,并不断更新控制基点信息,直至达到预期位姿;在位姿信息出现异常或无法接收到实时位姿信息时,闭锁运动功能并进行智能体设备异常告警。

通过位姿辅助可以有效地避免因为远程控制网络故障或控制流程中的关键模块异常引起的机器人本体失控，保障远程运动控制操作的安全；此外，通过调节控制过程中的偏移量offset，可以实现对运动智能体位姿精准微调的效果。

2 巡视系统功能模块分布式设计

传统的变电站巡视系统以采集设备为中心，包括机器人控制系统、巡视无人机、视频监控等，巡视系统业务功能与智能体采集、运动功能集成在智能体中，但是巡视智能体各自独立，功能未能充分融合^[12-14]。在智能巡检系统手段日趋丰富、智能体类型日益增多的情况下，以智能体为中心、各子系统独立运维的模式无法满足远程智能巡视系统的要求，主要存在如下问题：①基础服务重复部署，造成资源浪费；②不同种类智能体配置独立的运维管理系统，配置管理工具无法通用；③硬件资源冗余，系统网络架构复杂。因此，需要对远程智能巡视系统功能进行模块化解耦，使得各功能模块可以进行分布式灵活部署。

远程智能巡视系统主要包括软硬件部署环境、基础服务和业务功能三个部分，如图2所示。

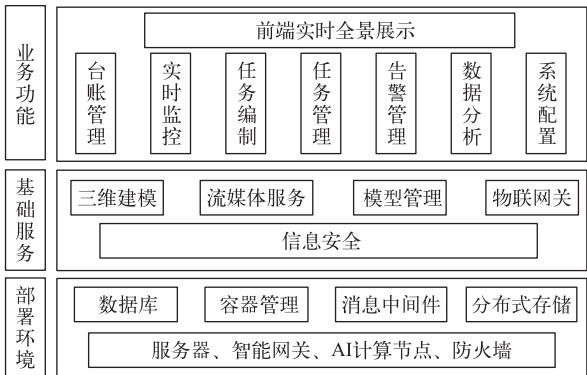


图 2 巡视系统架构图

Fig. 2 Architecture diagram of petrol system

业务功能模块从巡视系统解耦，包括设备台帐管理、实时监控、巡视任务编制、巡视任务管理、告警管理、数据分析、系统配置等业务功能模块，在前端进行实时全景展示。

公共基础服务包括三维建模、流媒体服务、

信息安全、模型管理和物联网关等模块。三维建模服务提供三维模型的导入、导出、删除、预览和台账管理等功能，支持点云、倾斜摄影实景三维和三维重建的列表查看，为业务功能提供统一的三维数据资源和接口。流媒体服务提供音视频流抓取、直播流存储、视频编解码、媒体分发、存储检索和摄像头云台指令响应等功能，对所有流媒体资源，包括各类摄像头、拾音器、机器人和无人机等智能体云台流媒体数据进行集中管理。信息安全模块实现用户身份鉴别、访问控制、数据保密和完整性、关键操作抗抵赖等功能，所有业务功能和智能体运维在统一的信息安全中心实现。模型管理模块与巡视上级系统、电网资源业务中台、主辅一体化监控系统等对接，管理智能巡视系统主设备模型、巡视设备模型和巡视点位模型，提供模型数据的导入、导出和对外接口。物联网关实现巡视智能体终端与智能叙事系统的统一接口，支持MQTT、HTTP、无人机、机器人接口协议等物联网通信协议的接入。

为满足远程智能巡视大容量和可靠性的需求，基础服务应满足分布式部署和可扩展性的要求。

2.1 无人机功能模块设计

无人机巡检子系统的主要功能包括实时监控、航线规划、巡视点位管理、航线管理、巡视任务管理等功能，在多智能体远程智能巡视系统中，子系统共享基础服务资源，无人机功能模块处理其核心业务功能，如图3所示。

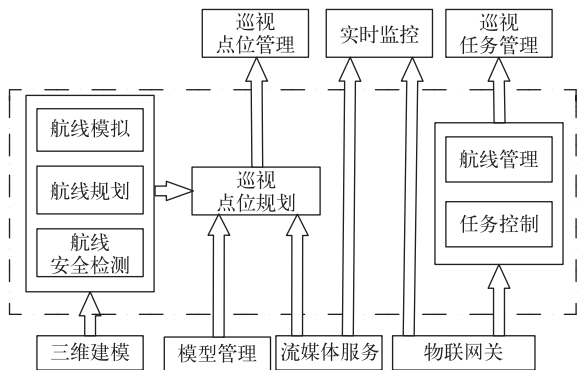


图 3 无人机功能模块支撑结构图

Fig. 3 Supporting structure diagram of drone function module

1) 实时监控。在前端实景三维页面展示无人机实时状态、资源列表、飞行轨迹和航线信息，多样式展示无人机和机巢实时视频，通过物联网关模块对无人机、机巢和云台实时控制。

2) 航线规划。根据变电站设备的布置特点和场地，基于三维模型基础服务，实现三维实景图上的航线新增、编辑和删除等功能，支持第三方航线的二次编辑和安全检测，在三维实景场景中进行模拟飞行和轨迹展示。

3) 航线管理。管理巡视航线的列表及其台账信息、动作属性等，根据巡视任务中的点位信息筛选航线，对于多航线任务，实现航线的动态组合，提高航线任务执行效率。

4) 巡视点位管理。结合工程现场模型管理对巡视点位的需求，在流媒体服务支撑下提供无人机实时航线视频，完成数据采集拍照动作编辑，生成并自动输出无人机巡视点位模型。

5) 无人机巡视业务。巡视业务功能由远程智能巡视系统业务功能模块实施，无人机功能模块在物联网关服务支撑下执行巡视任务，包括航线自主飞行、悬停控制、异常返航降落和任务暂停等，保证任务正确可靠执行。

2.2 机器人功能模块设计

机器人巡视子系统包括机器人本体和机器人巡视后台，通过对机器人巡视后台功能解耦，将巡视任务编制、任务状态管理、数据分析处理、实时监控等巡视业务功能集成在智能巡视系统中。机器人功能模块在智能巡视系统基础服务支撑下，实现离线点位标定、在线点位标定、任务控制和路径规划等功能，通过基础服务和业务功能共享，简化系统架构，机器人监视、配置、管理以及任务执行等实现All-in-One的操作与展示，如图4所示。

1) 实时监控。通过物联网关实现对机器人和云台的实时控制，接收机器人实时位姿信息，在二维或者三维地图实时展示机器人的运动轨迹，提供视频展示窗口，通过流媒体服务查看机器人云台的实时视频。

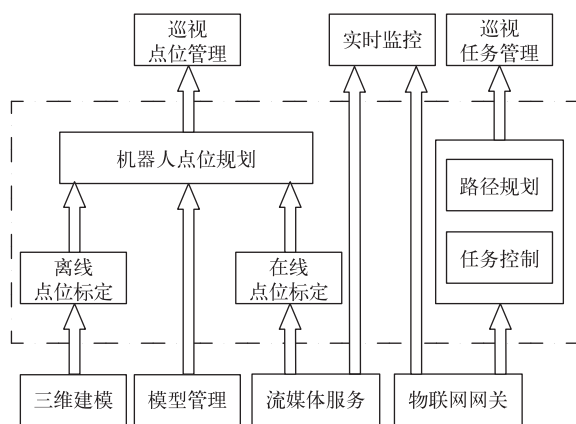


图4 机器人功能模块支撑结构图

Fig. 4 Supporting structure diagram of robot function module

2) 巡视点位管理。机器人巡视点位标定可以采用离线点位标定或在线点位标定模式，基于模型管理服务提供的变电站主设备模型和巡视点位建模需求，离线点位标定在变电站三维点云模型中对设备巡视点位进行识别并生成标定路线和巡视点位模型^[15]；在线点位标定功能通过机器人远程实时控制和流媒体服务依次对巡视点位进行设定，记录巡视目标的参考图和目标图等信息，完成点位标定功能，在线点位标定同时作为基于三维模型的离线点位标定功能的修订和补充。

3) 任务控制与路径规划。机器人子系统执行巡视任务时，智能巡视系统通过物联网关与机器人本体交互，实现巡视点位下发、巡视路径规划展示和任务流程状态控制的功能，在巡视系统上实现一体化的巡视任务管理，并通过实时监控前端页面检测巡视数据、路线以及任务执行状态。

3 多智能体一体化远程智能巡视系统

变电站设备复杂繁多的特性意味着需要配置大量巡视点位才能保证巡视的全覆盖，而多种巡视设备的加入使得巡视点位的配置量陡增。各类巡视设备子系统的点位信息和配置方式各自独立，容易导致巡视点位和名称冲突，不同厂家设备系统的集成将十分艰难。因此，规范统一的巡视系统配置信息，实现多智能体同源维护、统一管理，避免在工程实施过程中多专业交互带来的不同步现象，有利于简化工程配置流程，提高点

位配置效率，使站端系统、主站、电网资源业务系统等各系统间点位配置信息具备可复用性和可移植性。为多源数据分析、智能联动、全面监视等业务功能提供一体化数据支撑。

3.1 机器人功能模块设计

智能巡视系统设备模型包括变电站主设备和巡视设备，变电站设备模型ID与电网资源业务中台保持一致，智能巡视系统从电网资源业务中台获取变电站设备信息和台账，满足多智能体一体化巡视的需求；设备点位模型由智能巡视系统统一规划，智能体子系统巡视点位实现分布式管理。设备点位一体化建模流程图如图5所示。

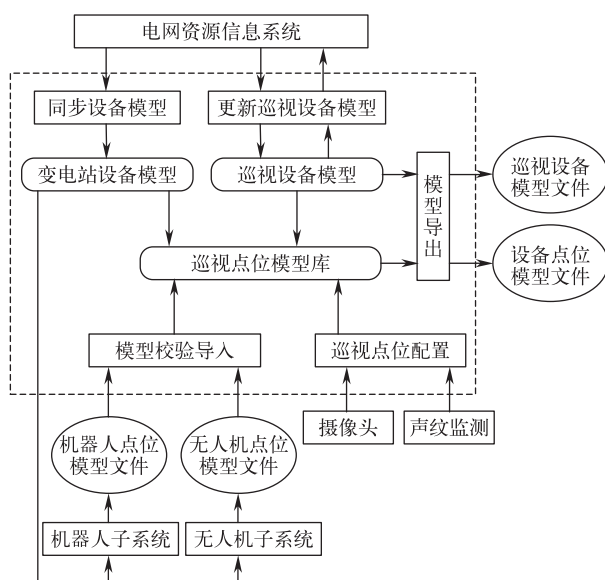


图5 设备点位一体化建模流程图

Fig. 5 Flow chart of equipment point integration model

智能巡视建模需要首先实现变电站设备和巡视设备智能体的同源维护。智能巡视系统通过调用电网资源业务中台接口获取变电站设备信息，包括所有被巡视的变电站设备及其台账信息；通过调用智能巡视设备管理接口，对智能巡视设备进行新增、查询、修改和删除等管理操作，实现智能巡视系统与电网资源系统的同源维护，建立设备模型数据库和巡视设备数据库。

巡视点位配置以智能巡视系统为中心一体化建模，视频子系统、智能摄像头、声纹等巡视设备直接接入，通过巡视点位配置模块统一规划，

远程配置摄像头采集点信息后与变电站设备模型关联，生成巡视点位信息，为保证巡视点位ID唯一，巡视点位ID采用NVR、摄像头和预置位信息组合字符串。针对存量视频监控系统或独立建设的工业视频子系统，采用就地配置预置位，基于变电站设备模型巡视需求生成子系统巡视点位模型，然后巡视点位配置模块导入视频子系统点位模型。

3.2 智能体巡视点位分布式管理

以无人机、机器人为代表的运动智能体需要进行航线和路径规划和点位标定等工作，运动智能体巡视点位模型采用分布式管理，智能体子系统采用模块化设计，充分利用巡视系统基础模块，实现巡视点位配置，以机器人子系统为例，典型的配置流程如下：

1) 机器人子系统从智能巡视系统模块获取变电站设备模型信息，根据变电站设备类型和工程应用需求，采用在线或者离线点位标定的方式，实现机器人巡检点位的标定工作。

2) 为满足一体化建模要求，巡视点位ID遵循全站唯一要求，在建模时巡视点位ID由巡视系统统一规划，生成标准机器人点位模型文件。

3) 智能巡视系统在线获取机器人点位模型文件，经过模型校验，检查设备台账和巡视点位ID是否符合一体化规划要求，导入并集成生成巡视点位模型库。

智能巡视系统根据业务和工程管理需求，导出巡视点位模型库信息，生成设备点位模型文件，实现与巡视上级系统、业务中台等系统模型的同步。

3.3 多智能体联合任务管理

远程智能巡视系统在任务编制时，通过区域、间隔、主设备不同层级设备需求进行巡检任务编制；巡视智能体数据采集点位根据智能体的类型、航线、路径等特征采集不同点位的数据，通过多智能体配合实现空地一体化巡视^[16]。

不同类型的巡视智能体执行任务的方式和效率存在差异。无人机的任务执行需要考虑电池电

量、无人机航线设计等多重因素，每个无人机执行任务的时间和点位数量也存在明显的差异，智能摄像头由于无位置运动需求，可以快速调用预置位执行巡视任务^[17]；从业务需求角度，日常巡视任务执行时间长、优先级较低，而智能联动任务要求能快速响应。如果采用依次执行巡视任务的方式，将会导致任务执行效率低下，无法对巡视智能体的工况饱和、任务冲突、故障、维护等状态进行充分调度协商。因此，需要分配任务优先级，流程图如图6所示。

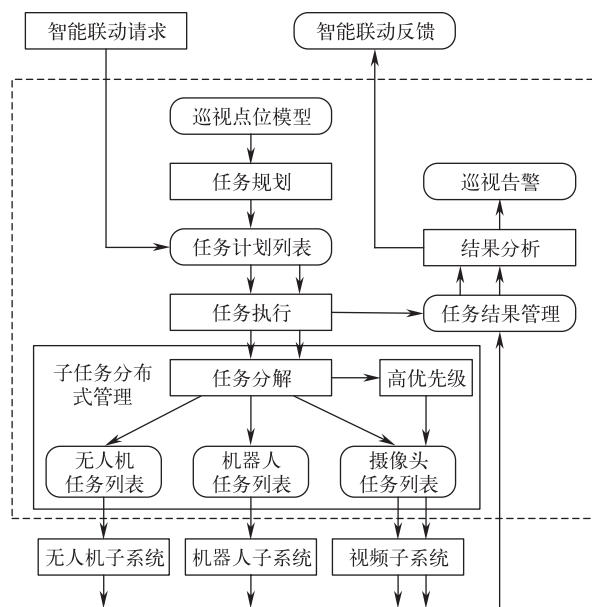


图6 联合任务执行流程图

Fig. 6 Flow chart of joint task execution

日常巡视任务通过任务规划，生成巡视任务列表，并定期、定时地执行日常巡视任务。任务执行阶段，通过分解联合巡视任务，生成子任务列表，子任务分布式管理模块将联合巡检任务分解为不同智能体并行执行的子任务，任务控制流程管理模块对子任务列表进行统一分布式管理，所有智能体子任务进入其任务列表中，按照优先级进行处理，在冗余度较高的情况下，根据智能体子任务列表的数量，可以优先安排子任务较少的智能体执行巡视任务。

针对不同业务优先级需求，如图6中粗线流程所示，智能联动请求通过设置高优先级子任务，智能摄像头可以快速响应智能联动任务请

求。在日常运维过程中，一键顺控、智能联动以及其他高优先级任务均能在子任务列表中快速响应，同时其他智能体并行处理日常巡视任务。

4 结束语

本文针对远程智能巡检中多智能体的远程实时控制、多智能体集成、一体化智能巡视等关键技术提出了改进设计方案，通过优化设计，提高了系统实时控制的可靠性和系统的运行效率。通过在集成无人机、多类型机器人、智能摄像头、声纹、在线检测等多类别大容量智能体采集设备的远程智能巡视工程应用，实现了多智能体巡视点位分布式建模、巡视点位一体化分布式管理和集成展示，提高了多种巡视智能体在不同类型巡视任务中的执行效率。信息技术发展迅速，未来根据设备的制造、安装、试验等数据，对同类被巡检设备进行面向对象建模，将油色谱和局部放电等一系列在线检测数据与多智能体巡检结果结合并进行人工智能分析，将会是远程智能巡视系统实用化和不断优化方向。

参考文献

- [1] 鲁守银，张营，李建祥，等．移动机器人在高压变电站中的应用[J]．高电压技术，2017，43(1)：276-284．
- [2] 喻洋，董明知．光伏变电站智能巡检机器人功能设计与实现[J]．电测与仪表，2023，60(6)：40-45．
- [3] 秦勇，邵长虹，杨怀志，等．京沪高铁基础设施无人机智能巡检系统关键技术[J]．中国铁路，2024(4)：15-21．
- [4] 李常钊，王秀毓，陶智宇，等．基于5G技术的电站智能巡检技术及故障诊断应用[J/OL]．水力发电学报，1-13[2024-07-30]．
- [5] 舒裕亮，樊绍胜．变电站高压室巡检机器人研究与设计[J]．电力学报，2023，38(3)：186-197．
- [6] 张春晓，陆志浩，刘相财．智慧变电站联合巡检技术及其应用[J]．电力系统保护与控制，2021，49(9)：158-164．

[7] 包翔宇, 曹学鹏, 张弓, 等. 多机器人协同系统的研究综述及发展趋势[J]. 制造技术与机床, 2019(11): 26-30.

[8] NIU Wennan, NING Baifeng, ZHOU Hai. Design of data transmission system of human-autonomous devices for UAV inspection of transmission line status[J]. Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing, 2019.

[9] 顾乃林, 刘丰. 虚拟现实远程操控机器人系统的关键技术研究[J]. 计算机仿真, 2023, 40(11): 398-402.

[10] 王宏民, 莫敦成, 江励, 等. 5G网络人形机器人远程控制实时性能研究[J]. 制造业自动化, 2023, 45(7): 155-159, 163.

[11] 文刚, 夏宋鹏程, 周仿荣, 等. 面向巡检机器人多源融合鲁棒定位与高逼真仿真方法[J]. 智慧电力, 2022, 50(4): 110-116.

[12] 范智霖, 佃松宜. 基于Qt的遥操作GIS维护机器人监控系统设计与实现[J]. 计算机应用与软件, 2024, 41(1): 1-6, 81.

[13] 陈柏希, 冯家波, 沈橙, 等. 面向电力巡检的无人机智能指挥控制系统设计[J]. 机械设计与研究, 2022, 38(5): 23-28.

[14] 杜珂, 苏淑敏, 于树海, 等. 基于视频监控的变电站巡检巡视系统设计[J]. 机械与电子, 2022, 40(6): 52-56.

[15] 王宏伟, 刘亚东, 田兵, 等. 基于空间关系的变电站巡检机器人巡检点自主生成方法[J]. 高电压技术, 2022, 48(8): 2982-2990.

[16] 葛志超, 谷艺林, 黄山, 等. 基于人工智能技术的变电站联合巡检系统应用研究[J]. 电力大数据, 2023, 26(11): 89-96.

[17] 高云飞, 胡钰林, 刘鸣柳, 等. 多无人机电输线路巡检联合轨迹设计方法[J]. 电子与信息学报, 2024, 46(5): 1958-1967.

作者简介

谢文君（1980—），男，高级工程师，研究方向为电力系统自动化、智能巡视。

葛立青（1975—），男，正高级工程师，研究方向为电力系统自动化、智能巡视。

吴越（1992—），男，硕士，研究方向为电力系统自动化、智能巡视。

（收稿日期：2024-08-06）

2025 年第 1 期 | 电力应用

69