

接触网绝缘子自动清洗技术演进与智能运维体系构建

王 雷¹, 李 攀^{2*}

¹国能朔黄铁路发展有限责任公司肃宁分公司, 河北 沧州

²成都新一驱动技术有限责任公司, 四川 成都

收稿日期: 2025年9月12日; 录用日期: 2025年10月9日; 发布日期: 2025年10月17日

摘 要

针对接触网绝缘子为避免污闪需定期进行清洗的问题, 根据清洗技术发展历程和技术演进方向, 对比分析了人工擦洗、机械辅助清洗、干冰清洗、激光清洗、带电水冲洗等多种清洗技术的特点和不同应用场景。基于绝缘子清洗技术自动化和智能化升级需求, 重点分析了带电水冲洗技术自动化升级所需的技术迭代, 如高精度识别定位、自动追踪瞄准及智能化控制系统等。以自动水冲洗技术为例, 提出了接触网绝缘子智能运维平台的建设构想, 并详细说明了其组成与所需技术储备, 为接触网绝缘子智能运维体系的建设和发展提供了新思路。

关键词

接触网绝缘子, 自动清洗, 带电水冲洗, 智能运维

Evolution of Automatic Cleaning Technology for Overhead Contact System Insulators and Construction of Intelligent Operation and Maintenance System

Lei Wang¹, Pan Li^{2*}

¹Suning Branch, Guoneng Shuohuang Railway Development Co., Ltd., Cangzhou Hebei

²Chengdu Xinyi Drive Technology Co., Ltd., Chengdu Sichuan

Received: September 12, 2025; accepted: October 9, 2025; published: October 17, 2025

*通讯作者。

文章引用: 王雷, 李攀. 接触网绝缘子自动清洗技术演进与智能运维体系构建[J]. 软件工程与应用, 2025, 14(5): 1067-1081. DOI: 10.12677/sea.2025.145095

Abstract

Addressing the issue of regular cleaning of overhead contact system (OCS) insulators to prevent pollution flashover, this paper compares and analyzes various cleaning technologies, including manual scrubbing, mechanically assisted cleaning, dry ice cleaning, laser cleaning, and live water washing, based on the development history and technological evolution direction of cleaning techniques. Focusing on the automation and intelligence upgrade needs of insulator cleaning technology, the paper delves into the technological iterations required for the automation upgrade of live water washing technology, such as high-precision identification and positioning, automatic tracking and aiming, and intelligent control systems. Taking automatic water washing technology as an example, the paper proposes the construction concept of an intelligent operation and maintenance platform for OCS insulators and details its composition and required technological reserves, providing new ideas for the construction and development of an intelligent operation and maintenance system for OCS insulators.

Keywords

Overhead Contact System Insulator, Automatic Cleaning, Live Water Washing, Intelligent Operation and Maintenance

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

接触网绝缘子是电气化铁路供电系统的核心组成部件,通过高电阻材料将高压导线与铁路基础设施进行物理隔离,防止电流通过非预期路径泄漏至地面,起到支撑、固定和电气绝缘的作用[1]。绝缘子长期露天运行,空气中的灰尘、各种工业污染物等颗粒黏附在绝缘子的表面后,在潮湿的环境下,绝缘子表面绝缘电阻会降低,严重时会引起接触网对地短路,使绝缘子在工频电压下发生污闪,污闪往往会造成大面积停电,影响列车正常运行[2]。

表面积污是绝缘子发生污闪的重要原因,因此国内外对绝缘子污秽特性研究展开了广泛研究,研究表明,对绝缘子进行有效清洁是避免污闪现象的最直接方法。随着铁路运营线路数量快速增加,运维压力日益增大,人力成本、设备维修成本高居不下,清洗效率低、风险高的接触网绝缘子传统人工清洗方式难以适应新时代的要求。随着现代信息技术及智能化技术加速与铁路产业进行融合,智能运维是铁路接触网供电系统运维发展的趋势和方向[3]。

本文对接触网绝缘子清洗技术发展过程中出现的技术和方法展开研究,分析其技术特点,剖析不同清洁技术的清洗作业效率和实现自动化的难易程度。以自动化冲洗技术为分析切入点,着重分析水冲洗技术的迭代过程以及激光雷达与伺服控制系统等现代信息技术的融合应用,为绝缘子清洗技术在智能运维领域的发展提供理论支持与实践指引。

2. 接触网绝缘子清洗技术发展历程

2.1. 传统清洗(人工擦洗)

传统人工清洗时,操作人员攀爬接触网支柱或站在作业平台接近绝缘子,靠视觉和触觉精准定位顽

固污渍并针对性擦拭。在隧道、桥梁、山区等空间狭小或设备密集处, 自动化设备难施展, 人工可借助工具灵活作业, 还能通过触摸和观察发现细微缺陷, 避免自动化设备因冲洗压力过大损伤绝缘子。



Figure 1. Manual scrubbing
图 1. 人工擦洗

如图 1 所示, 人工擦洗需接触网停电、逐个操作, 耗时久、效率低。且接触网绝缘子多在高空、露天或隧道内, 工人长期暴露在恶劣工况中, 攀爬或站在平台操作时, 安全带使用不当或平台晃动易致坠落, 安全风险高。因存在诸多弊端, 人工擦洗正逐渐被替代, 但其在精细化清洁、复杂环境适应和特殊污渍处理上不可替代。偏远地区若仍需人工清洗, 可推广防滑作业平台、智能安全带等降风险。

2.2. 机械辅助清洗

2.2.1. 小型清洗机器人

为帮助或替代人工清洗绝缘子, 多种机械清洗装置涌现。多种小型绝缘子清洗机器人, 能在绝缘子表面爬行并集成清洗模块, 攀爬时清洗表面, 可替代部分人工劳动[4]。不过, 清洁作业需停电, 靠升降平台辅助, 人工放置机器人, 清洗完一个再拆装换至其他绝缘子, 操作复杂, 效率未明显提升。且拆装清洗时, 机器人坚硬部件易刮擦损伤绝缘子, 此方式对变电站固定目标有一定价值, 在接触网绝缘子清洗领域难大规模推广。

2.2.2. 大型机械臂辅助清洗



Figure 2. Large robotic arm assisted cleaning
图 2. 大型机械臂辅助清洗

如图 2 所示, 机械臂辅助清洗是利用自动化机械臂带动滚刷、毛刷等清洗机构, 近距离精准清洁绝缘子的技术。陈鑫楠等人[5]设计制作了接触网绝缘子机械臂清扫装置并做了轻量化设计, 验证了其结构可靠性, 实验表明, 该装置在接触网停电时, 能固定机械臂与绝缘子相对位置, 调节机械臂角度和空间状态进行有效清洗。此方式可连续快速作业, 提高效率, 高精度控制确保精准清洗, 减少人工接触高压设备风险。但一般需喷射清洁剂应对顽固污渍, 且因体积大, 在空间受限区域难以施展。

2.3. 特种清洗

2.3.1. 干冰清洗

干冰清洗利用压缩空气加速固态二氧化碳颗粒喷射至绝缘子表面去污, 具有无二次污染、无需干燥、环保安全等优点, 已在我国电气化铁路系统应用。国内研究机构根据绝缘子污秽闪络机理, 分析干冰清洗相关参数后设计出清洗装置并用于实际工况[6]-[8]。



Figure 3. Dry ice cleaning (assisted by lifting platform)

图 3. 干冰清洗(升降作业平台辅助)

如图 3 所示, 干冰清洗有效冲洗距离短, 需辅助升降平台或大型机械臂运送装置; 干冰清洗效果受气压等参数影响, 需专业人员操作, 有效喷射距离短, 适用于近距离或定点清洗; 干冰制备存储需专业设备, 成本高; 操作难度大, 对人员技术要求高; 需接触网停电作业。由于受到诸多局限, 推广难度大。

2.3.2. 激光清洗

除干冰清洗外, 激光技术也被引入绝缘子清洗领域。方春华等人[9] [10]针对现有清洗方法效率低、安全性差等问题, 提出激光清洗瓷质绝缘子污秽的方法。激光清洗以高能光束与污垢作用, 无需接触绝缘子表面, 可避免化学腐蚀和机械损伤, 能在接触网带电状态下操作。但设备价格昂贵, 需配套辅助设备, 投入高; 且激光能量密度需严格控制, 参数要与绝缘子材质和污垢类型匹配, 否则会影响清洗效果或损伤表面。目前, 激光清洗应用场景逐渐拓展, 在变电站固定工况下有应用, 但在接触网绝缘子清洗方面尚处起步阶段, 若能解决设备携带不便、价格贵、污垢类型覆盖不全等问题, 推广速度或加快。

2.3.3. 无人机清洗

黄海鹏和张贺朋等人[11] [12]利用无人机优势, 研究单台无人机自主对准与清洗问题, 搭建实验平台, 验证了单台或多无人机协同自主清洗的可行性, 且采用压缩空气推动水柱清洗, 安全性高。无人机在电网高压电塔绝缘子清洗方面进展更快。



Figure 4. Drone cleaning
图 4. 无人机清洗

如图 4 所示, 云南电网公司[13] 3 天完成 6 基杆塔大量绝缘子带电清洗, 提高了效率、节约了成本。无人机清洗存在携带能力有限、单次作业时长短、连续性待提升的问题, 且飞行受环境影响大, 有风时控制难、清洗效果受影响, 还有失控风险, 可能造成电网损失。因此, 无人机在接触网绝缘子清洗领域的使用, 有待相关法规和标准完善, 以保障作业安全与效果。

2.4. 高压水射流冲洗

2.4.1. 带电水冲洗技术

高压水射流冲洗通过高压泵将水流加速至高速状态, 经特定设计的喷嘴形成高能量水柱, 直接冲击接触网绝缘子表面进行清洁。通过优化喷嘴结构和水柱的水气比例, 使用电阻率较高的自来水即可实现在接触网带电状态下进行冲洗作业, 避免了传统水冲洗需申请“天窗期”导致的供电中断。

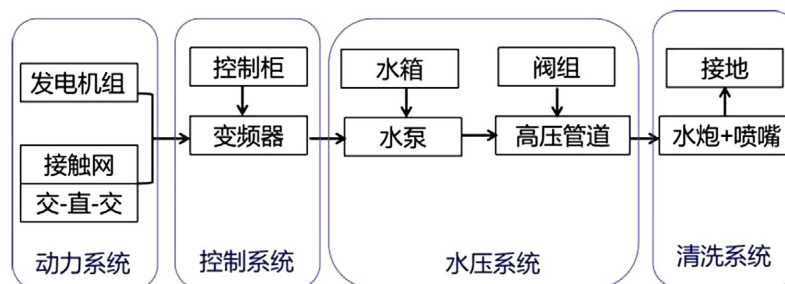


Figure 5. Schematic diagram of the composition of the electric water flushing device

图 5. 带电水冲洗装置组成示意图

2003 年, 我国首套电气化铁道绝缘子带电水冲洗装置[14]研制成功并投入使用。如图 5 所示, 该装置由动力、控制、水压和清洗系统组成, 通过变频器调速电动机来调节出水流量和水压系统压力, 进而改变射程以适应不同冲洗距离。此装置由多个模块构成, 置于轨道车上, 可随车运行, 在不停车状态下完成冲洗, 大幅提升清洗效率。带电水冲洗技术的推广应用, 提升了该领域自动化程度和作业效率, 随着技术迭代, 应用场景不断拓展, 已成为接触网绝缘子清洗的最重要方式。

2.4.2. 小型水冲洗装置

带电水冲洗技术的相关设备体积较大, 需要轨道车或其他载体进行装载牵引, 对于一些需要局部清洁或临时清洗作业的工况, 有点大材小用了, 因此出现了便携式的小型冲洗装置。

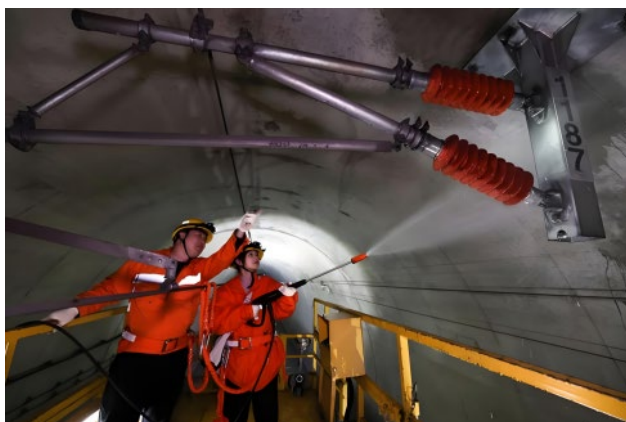


Figure 6. Schematic diagram of the composition of the electric water flushing device

图 6. 带电水冲洗装置组成示意图

如图 6 所示, 小型冲洗装置由于不需要长时间进行运距离冲洗作业, 因此对应的水箱、水泵等设备均进行了小型化、轻量化设计, 可放置在升降作业平台上, 在靠近绝缘子的位置进行冲洗作业, 小型水冲洗装置使用的喷枪有效射程较短, 不能进行远距离冲洗作业, 因此需要通过升降作业平台进行辅助, 操作人员站在作业平台上近距离对绝缘子进行冲洗, 因此需要在接触网停电状态下才能进行作业。由于小型水冲洗装置具有设备小、机动灵活、价格低、操作简单等优点, 在接触网绝缘子清洗领域得到了广泛应用。

2.4.3. 水冲洗作业车

随着水冲洗装置在接触网运维领域的大量应用, 对其提出的要求也不断提高, 相关技术的研究也在同步推进。王国志等人[15][16]对比分析了不同参数对水冲洗效果及安全性的影响, 研究表明入口压力、出口直径、风速等参数都会影响水射流的直线性能及冲洗效果, 分析了喷嘴直径、射流距离与水气比的关系, 为不同水冲洗情况下的喷嘴直径选择提供了参考。

对水冲洗技术进行大量研究工作的基础上, 水冲洗作业车往系列化方向发展, 出现了不同配置参数的多款型号, 形成了系列化产品。水冲洗车可连续作业 2~4 小时, 一次冲洗作业可完成 10~20 km 线路上绝缘子的清洗作业, 满足长距离线路清洗需求, 其效率大幅领先于其他清洗方式, 作业场景如图 7 所示。



Figure 7. Water flushing operation scenario

图 7. 水冲洗作业场景

2.4.4. 自动水冲洗技术研究

虽然水冲洗车具备清洗效率高、安全可靠、环保无污染等诸多优点，但其操作过程中操作人员暴露在户外环境中，需要防止触电和被“雨水”打湿，操作人员需要一定熟练度。相较于人工擦洗方式，水冲洗方式虽已经极大降低了劳动强度，消除了人工攀爬杆塔的安全隐患，但为了进一步改善操作人员的工作环境，进一步减轻劳动强度，自动化水冲洗的相关研究被提上了日程。

初期的自动化水冲洗采用远程控制技术，通过摄像头将水冲洗作业场景在控制室内进行复现，操作人员面对室内的屏幕，通过操作遥控手柄对水炮进行控制，以完成水冲洗作业。这种半自动化的操作方式对操作人员的熟练度要求较高，操作难度大，冲洗效果不佳，造成水资源的浪费。

随着数字孪生技术的发展，在接触网绝缘子清洗领域也开展了应用研究。将作业车辆分为室内和室外两个区域，室外区域设置自动水炮，室内区域设置模拟水炮，将模拟水炮的各个动作通过控制系统传递到室外的自动水炮，使室内的模拟水炮和室外的自动水炮形成孪生的关系，实现操作人员在室内即可完成对室外自动水炮的控制。

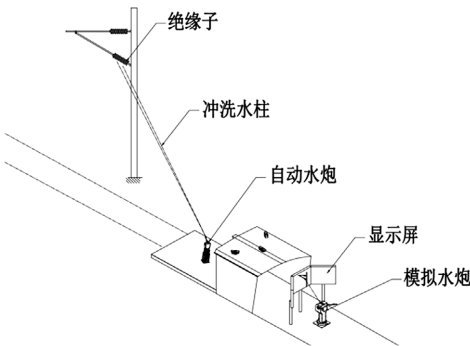


Figure 8. Schematic diagram of twin water flushing method
图 8. 孪生式水冲洗方式示意图

如图 8 所示，孪生式接触网绝缘子冲洗方式通过摄像头对外界环境进行图像捕捉和合成处理，将图像显示在室内半环绕型的显示屏上，室内的操作人员可以通过观察室内的屏幕来操作模拟水炮，带动室外孪生式的自动水炮完成冲洗作业。操作人员在室内完成相关操作，避免暴露在室外恶劣的环境下，极大改善了工作条件。孪生式接触网绝缘子冲洗方式为绝缘子自动冲洗研究提供了一条新的路径。

2.5. 对比分析

将上述几种清洗方法对比分析，如表 1。

Table 1. Comparison of characteristics of different cleaning methods
表 1. 不同清洗方式特性对比

清洗方式	安全性	效率	设备费用	人员投入	环境污染	易自动化
人工擦洗	低	低	低	多	无	低
小型机械辅助	中	低	中	中	有	低
大型机械臂辅助	中	中	高	少	有	中
无人机辅助	中	中	高	少	无	中
干冰清洗	高	中	高	中	无	中
激光清洗	高	中	高	少	无	中
高压水冲洗	高	高	高	少	无	高

上述各种清洗方式各有优缺点, 适应不同的作业工况, 从清洗效率、安全性、是否存在环境污染以及是否易实现自动化方面分析, 带电高压水冲洗技术无疑是最适合进行自动化、智能化提升的技术类别。

3. 自动清洗关键技术研究

接触网绝缘子清洗技术经过多年的发展, 已基本满足当前使用需要, 但随着信息化、智能化要求的不断提高, 自动清洗技术也受到了高度重视, 进入了快速发展阶段。以应用最广泛的水冲洗为例进行分析, 绝缘子自动清洗技术主要包括识别定位、实时追踪、清洗控制三个方面。

3.1. 接触网绝缘子识别与定位

对绝缘子进行识别和定位是进行自动清洗的前提条件, 在这方面开展了大量的研究工作, 付虹[17]等人提出一种基于启发式学习的接触网带电自动水冲洗定位、跟踪方法, 结合传感器信息, 建立了接触网带电自动水冲洗环境模型, 并提出了接触网带电自动水冲洗跟踪、定位方法。王奇[18]等人提出了基于机器视觉的自动水冲洗系统, 实现了对绝缘子进行捕捉、瞄准和定位的基本功能。廖国庆[19]等人制定了冲洗机器人的工作流程及利用计算机视觉系统控制的绝缘子自动化冲洗方案, 设计并搭建了双目自动水冲洗实验平台, 进行了绝缘子自动水冲洗实验, 验证了该方法可行性。

上述通过视觉的方法对绝缘子进行识别定位取得了一些效果, 但仍有一定的局限性, 在冲洗过程中产生的水雾对识别系统提出了严重挑战, 纯视觉方案很难突破水雾的阻碍, 必须有其他技术方法来辅助进行识别和定位。

采用激光雷达点云数据和工业相机图片数据进行多模态融合的方法是解决这一难题的有效方法, 通过多模态数据的交叉验证, 结合去水雾干扰算法的运用, 可以有效降低误报率和识别的准确度。

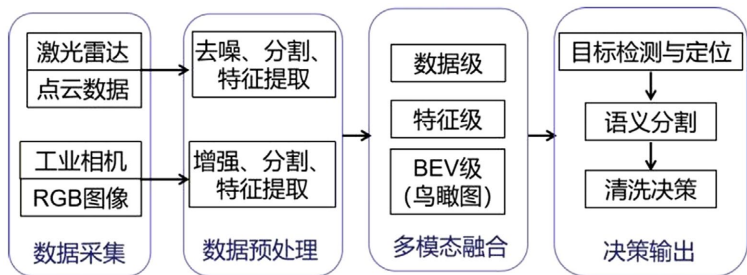


Figure 9. Schematic diagram of multimodal fusion
图 9. 多模态融合示意图

如图 9 所示, 多模态融合技术将激光雷达和相机的数据进行融合, 能够充分利用相机的语义信息和激光雷达的精确深度信息, 从而在 3D 目标检测和分割任务中取得更好的性能。融合方法可以利用图像提供丰富的纹理和颜色信息, 以及激光雷达提供精确的深度信息, 充分发挥不同模态数据的优势, 弥补单一模式的不足, 能够更全面地理解目标特征, 显著提高检测精度, 并有效解决远距离目标检测和小目标绝缘子检测的难题。

由于可以在雾天、阴天或小雨天等能见度不足的复杂场景下, 在有水柱对视线产生遮挡的工况时, 仍能实现对绝缘子的精准识别和定位, 基于激光雷达和工业相机的多模态融合技术在接触网绝缘子自动清洗领域将发挥重要作用。

3.2. 绝缘子目标动态追踪

对绝缘子进行识别定位后, 要完成清洗作业, 需要将清洗装置始终对准目标, 进行动态追踪。精确

跟踪目标绝缘子的空间位置信息是实现有效清洗的前提条件, 而确保运动状态下冲洗装置的实时稳定控制则是保障清洗作业质量的关键技术难点。在这方面也开展了大量的研究工作, 吴文海等人[20]采用基于图像的视觉伺服控制方案, 实现了对绝缘子动态瞄准。曾鑫鹏和王奇等人[21][22]建立了传动系统动力学模型以及伺服控制系统模型, 对系统动态响应进行了分析, 找出影响其动态特性的主要因素, 设计出基于图像的视觉伺服系统控制方法, 通过调整冲洗水炮炮管及相机姿态对绝缘子进行瞄准, 来完成绝缘子冲洗工作, 并以此为基础设计了一套智能水冲洗装置。上述研究主要解决了识别系统与伺服系统之间的联动问题, 主要技术路线如图 10 所示。

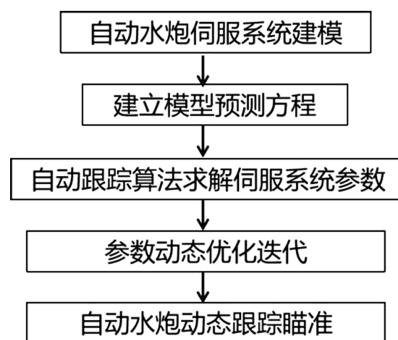


Figure 10. Schematic diagram of automatic tracking and aiming
图 10. 自动跟踪瞄准示意图

通过识别系统对目标绝缘子的空间位置标定, 结合水炮在系统中的相对位置, 加上里程传感器提供设备或车辆的行驶里程信息, 通过基于多信息融合的自动追踪算法, 实现冲洗水炮对目标绝缘子的自动跟踪瞄准。

在实际清洗作业过程中, 期望的水炮状态与水炮能实际达到的状态往往存在一定的差异, 因此要不断进行修正, 以满足自动跟踪瞄准的准确性, 其主要技术路线如图 11 所示。

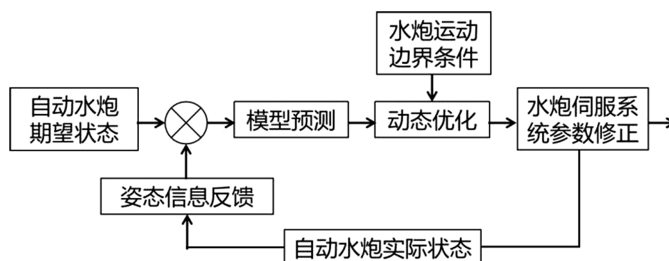


Figure 11. Schematic diagram of real-time status correction technology roadmap
图 11. 状态实时修正技术路线示意图

通过高频对比分析期望状态与实际状态的实时数据, 完成对伺服系统的自动精准控制来修正偏移量, 通过及时去除干扰、补偿误差, 实现智能水炮的自动化追踪和对准。以上述研究成果为基础, 目前出现了一种较为成熟的自动水冲洗水炮。

如图 12 所示, 该自动水炮采用二自由度结构, 通过俯仰伺服系统和回转伺服系统的协同作用, 分别控制智能水炮在垂直和水平方向上的转动, 实现对接触网绝缘子的精准跟随瞄准与冲洗。在实验室测试中, 该自动水炮已实现对目标绝缘子的精准自动追踪与定位, 基本满足自动清洗作业的核心需求。通过持续迭代优化, 该装置有望成为自动水冲洗领域的关键技术核心。

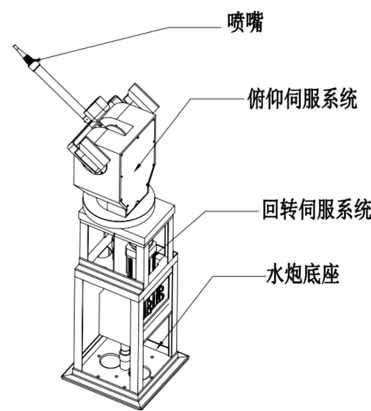


Figure 12. Schematic diagram of automatic water cannon structure
图 12. 自动水炮结构示意图

3.3. 智能冲洗控制

智能控制系统不仅是多种功能算法的集成，更体现了自动冲洗作业的整体策略与逻辑。尧新亮等人 [23] 分别对绝缘子目标检测、目标跟踪和控制算法进行了研究，完成了基于视觉伺服的自动水冲洗控制系统的总体设计，为后续相关研究提供了参考。

优秀的执行策略和逻辑是实现高效、稳定自动化作业效果的关键，自动控制系统的主要功能包括目标追踪与瞄准、水压与伺服控制、抗干扰与误差补偿，其技术路线如图 13 所示。

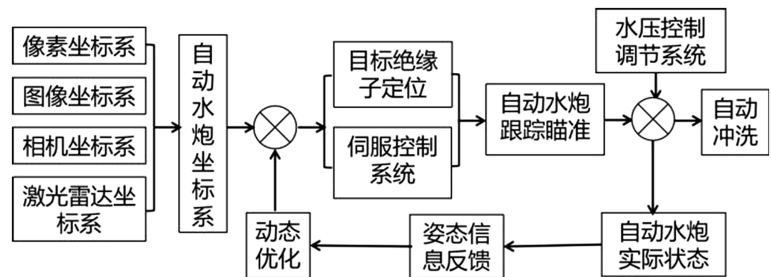


Figure 13. Schematic diagram of automatic control technology roadmap
图 13. 自动控制技术路线示意图

目标追踪与瞄准模块通过智能水炮控制系统，完成绝缘子的识别定位，建立目标坐标系与机器坐标系，并将目标坐标转换至机器坐标系，实现水炮对绝缘子的精准瞄准与动态追踪。水压与伺服控制模块快速建立水压射流，并驱动水炮伺服系统实时响应，确保冲洗动作的精准性。抗干扰与误差补偿模块在冲洗过程中主动消除环境干扰，动态补偿系统误差，同时持续检测并收集作业数据。

系统通过感知、决策、执行三大核心环节，实现对绝缘子冲洗全流程的自动化与智能化控制，在感知环节通过激光雷达、工业相机、各类传感器等设备采集环境与设备状态数据。在决策环节，基于感知环节获取的数据，智能控制系统确定冲洗目标，并运用先进控制算法规划设备动作；决策环节的各项参数下发到执行环节，驱动水炮、水压等子系统完成冲洗任务。这一架构显著提升了冲洗效率与质量，同时减少了人工干预并大幅降低了安全风险。

3.4. 技术难点与突破路径

在绝缘子自动水冲洗技术的研发进程中，复杂工况下的目标识别与定位、动态环境的精准冲洗控制

以及机械系统误差的累积效应, 构成了制约该技术广泛应用与效能提升的三大核心难题。

3.4.1. 复杂工况目标识别与定位

绝缘子自动水冲洗面临的首要难点在于复杂工况下的目标识别与定位。由于绝缘子材质多样、表面污秽程度不一, 传统视觉算法易因图像特征模糊产生误判; 冲洗过程中水柱喷溅形成的动态遮挡更导致定位中断, 形成识别盲区, 尤其在雨雾或强光环境下, 边缘特征与背景对比度降低进一步加剧识别难度。针对此, 技术突破方向为构建多模态融合的智能识别系统: 通过激光雷达点云与可见光、红外双目视觉的数据融合, 结合多种算法生成绝缘子三维模型, 实现遮挡工况下的持续追踪; 同时引入冲洗水柱建模技术与迁移学习技术, 优化识别模型对动态遮挡的预测能力, 提升盲区识别率, 增强复杂环境下的目标定位鲁棒性。

3.4.2. 动态环境精准冲洗控制

动态环境下水炮与绝缘子的远距离(5~15 米)动态对准需克服多重干扰, 成为技术实施的另一大挑战。轨道车行驶颠簸引发水炮俯仰角波动, 风速与车速突变导致喷射轨迹偏移, 而水炮反作用力与车辆振动的共振效应更使单次冲洗打偏率升高。为解决这一问题, 技术突破聚焦于鲁棒性动态冲洗控制策略: 一方面, 采用多自由度伺服稳定平台, 集成定位稳定系统, 实现水炮俯仰/方位角的实时动态修正; 另一方面, 基于 MPC 模型预测控制框架, 构建风速 - 车速 - 喷射参数的耦合计算模型, 动态调整冲洗系统压力和水柱出口流速, 提升冲洗覆盖率, 有效保障动态环境下的精准冲洗。

3.4.3. 机械系统误差抑制

机械系统误差的累积效应是制约自动水冲洗精度的关键因素。车辆振动导致水炮跟踪延迟, 影响实时定位误差; 水炮自身质量产生的转动惯量使调整响应时间延长, 装配间隙更引发重复定位精度下降。针对此类问题, 技术突破方向包括轻量化设计与闭环误差修正: 采用碳纤维 - 铝合金混合材质降低水炮质量, 减少转动惯量, 显著提升动态调整效率; 在关键连接部位部署光纤光栅传感器, 实时监测装配间隙变化, 并通过 PID 控制器进行动态补偿调整, 提高重复定位精度, 从根本上抑制机械系统误差对冲洗效果的影响。

4. 接触网绝缘子智能运维体系构建

自动水冲洗技术作为接触网绝缘子智能运维领域的一项关键创新, 正通过多维度、深层次的技术融合与应用模式创新, 与其他自动清洗技术一起共同为智能运维体系带来全方位的赋能, 推动其向更高效、智能、可持续的方向发展。

4.1. 数据驱动的运维决策

在智能运维体系中, 数据是核心, 自动水冲洗技术通过一系列先进的数据采集与分析手段, 为运维决策提供精准、实时的依据, 实现决策的科学化与智能化, 接触网绝缘子智能运维体系整体结构如图 14 所示。

4.1.1. 污秽度在线监测数据库

接触网绝缘子表面的污秽程度信息是运维体系的重要输入, 对绝缘子表面的污秽信息进行精准检测是获取这一信息的重要方法。孙磊等人[24]通过分析积污成分与污秽物分布情况, 排除可见光图像中干扰因素的同时提取了多个特征量描述绝缘子的污秽状况。通过实验样本测试, 验证了该方法的判别准确率可达到 90%以上。郭鑫慧等人[25]通过改进基于纹理特征和可能性均值聚类的绝缘子污秽检测方法, 使用灰度共生矩阵分别计算出沙子、铁锈等污秽类型的纹理空间相应特征向量, 进一步提高了绝缘子污秽检

测的准确率。

这些研究成果为接触网绝缘子在线检测提供了理论支持, 通过一些固定或移动的检测设备即可获得绝缘子动态污秽数据。将实时在线检测结果与历史维护数据进行结合, 可形成一个接触网绝缘子全生命周期污秽度在线检测数据库, 这个数据库可为运维人员提供及时、准确的清洗需求反馈。通过实时数据库反馈的信息, 运维人员可以精准掌握设备的清洁状态, 避免过度清洗或清洗不足的情况发生, 从而制定出更加合理、高效的清洗计划, 有效提升运维效率与质量。

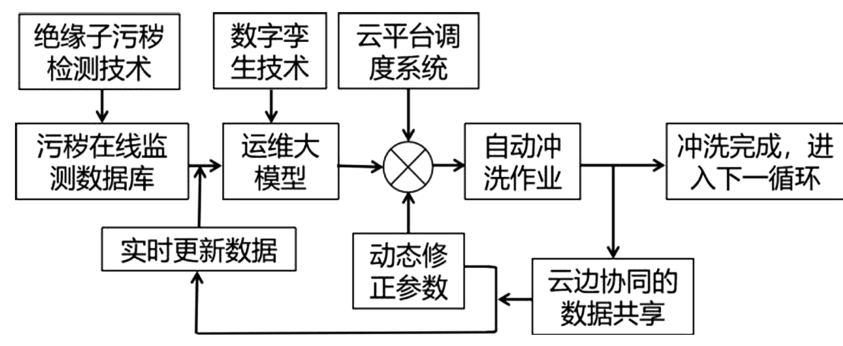


Figure 14. Schematic diagram of intelligent operation and maintenance system for contact network insulators

图 14. 接触网绝缘子智能运维体系结构示意图

4.1.2. 数字孪生与运维大模型

通过数字孪生技术可以将污秽在线检测数据的相关数据生成一个接触网绝缘子运维大模型。这个模型将为每个绝缘子建立单独的档案, 包含绝缘子全生命周期的所有信息, 也包括当前的维护需求, 通过这个大模型可以提前预警潜在故障, 为运维决策优化提供新的思路。

大模型能够根据实时数据动态规划冲洗路径, 为绝缘子运维作业提供可执行的推荐方案, 这一创新应用将使冲洗作业的冗余度大幅降低, 减少大量不必要的清洗作业, 不仅可以提高冲洗效率, 还可以降低能源消耗与设备磨损, 为运维决策的优化提供有力的技术支撑。

4.2. 云边协同的运维模式创新

随着物联网技术的快速发展, 云边协同将成为智能运维模式创新的重要方向。自动水冲洗技术通过边缘计算与云端调度的有机结合, 实现了运维模式的高效协同与智能化升级。

4.2.1. 自动清洗作业

随着绝缘子自动清洗技术的不断迭代升降, 无人化的自动清洗模式将对接触网绝缘子智能运维提供关键技术支持。运维系统的决策指令将通过自动清洗系统实际执行, 在进行清洗作业开始前, 具体清洗路径、目标任务标就已通过大模型规划完成, 冲洗系统只需按照清洗方案执行即可, 极大增强了接触网绝缘子运维系统的安全性, 避免了人为因素的干扰, 提升了智能化水平。

基于高速水射流技术的自动水冲洗方案, 在作业过程中, 通过激光雷达和工业相机完成作业场景的局部建模, 通过高精度伺服系统实现对目标绝缘子的自动跟踪对准, 智能控制系统自动完成冲洗参数的设定。自动清洗过程中, 系统将根据与目标绝缘子的相对距离以及目标绝缘子的污秽程度动态调节冲洗压力, 根据实时天气情况对冲洗水柱的出射角度进行修正, 根据载具的运行速度和相对位置关系计算伺服系统的控制参数, 按需求分配单个绝缘子的清洗时长, 节约作业时间, 在保证清洗质量的前提下, 减少水资源的消耗, 显著提升整体作业效率。

4.2.2. 基于边缘计算的数据共享

在对绝缘子进行自动清洗的过程中, 将产生大量冲洗过程中的图片、视频、污秽度检测数据等一系列数据, 这些数据需要共享给相关运维和决策人, 为运维作业提供清洗现场的实时信息, 快速做出决策, 同时这些数据也需要存入运维大模型, 对现有数据进行更新。

这些数据体量庞大, 如果直接通过云端进行传输, 将对传输网络带来极大压力, 因此, 要求清洗系统必须自带强大的本地数据处理能力, 通过边缘计算技术, 将这些数据在本地快速进行处理和分析, 经处理后的数据体量将大幅缩减, 再通过云端进行共享。这种基于边缘计算的数据共享技术不仅可以对运维大模型进行各项数据实时补充, 也可为在现场或不在现场的运维操作人员和管理人员提供第一手资料, 实现作业现场数据实时共享, 为实现全网绝缘子清洗作业可视化管理提供基础保障。

4.2.3. 云平台调度系统

各类接触网绝缘子清洗装置已在各路局广泛使用, 但各区域对设备的使用需求和设备配备密度是不一致的, 需求与供给存在较大的不均衡度。将污秽度在线监测数据库、运维大模型和现有清洗设备分布状况和技能水平结合等相关数据进行整合, 通过云平台进行管理, 可以形成接触网绝缘子智能运维平台, 实现一定范围内冲洗设备资源的整合与优化配置。如果这运维平台提高到国家层面, 由国铁集团发起并运行这个智能运维平台, 则资源整合范围可以扩展到全国, 形成可以对全国清洗资源进行统一调度的接触网绝缘子智能运维平台。

通过这个平台, 不同地区的冲洗设备能够实现信息共享与协同作业, 打破地域限制, 实现跨区域的高效调度。这一云端管理和调度模式, 将充分发挥绝缘子清洗设备的效能, 既可发挥设备集中的优势短时间解决突发问题, 又可根据实际污秽分布情况和历史清洗规律, 合理规划清洗方案, 减少设备闲置, 提高设备使用率, 提升运维效率, 降低运维成本, 为智能运维体系的大规模应用提供有利支撑。

4.3. 标准化和生态化的运维体系发展

现有清洗设备种类较多, 现有清洗技术仍在不断迭代, 同时不断有新技术应用到接触网清洗领域, 因为各有特点, 对使用环境的适应性各不相同, 接口不一致, 操作使用要求差异巨大, 尚没有统一的标准。随着接触网绝缘子智能运维系统建设工作的不断推进, 对绝缘子清洗设备的接口规格、数据通信协议、人员培训等进行规范, 直至提出统一的标准, 这是必然过程。随着相应标准的建立和实施, 可以对设备研发、生产制造、系统集成以及运维管理等环节提供统一的技术规范与质量标准, 提升设备的兼容性和设备使用复杂程度, 促进绝缘子清洗产业的规范化发展。

现有的清洗方式有多种形式, 清洗介质主要有清洁剂、干冰和水。由于清洁剂始终难以做到绝对环保, 对环境始终有或多或少的污染, 因此采用清洁剂进行清洗的方式将逐渐被替代, 干冰和水对环境都不会带来输入型的污染, 尤其是干冰, 使用完之后即气化了, 但干冰清洗距离有限的问题阻碍了其清洗作业效率的提升, 也增大了实现清洗自动化的难度。水冲洗以其独特的远距离冲洗方式, 可以在接触网不停电、作业载具不停车的情况下持续高效进行清洗作业, 冲洗用的水是普通自来水, 对环境无污染。随着自动水冲洗技术的持续迭代升级, 绝缘子水冲洗作业的耗水量将进一步减少, 安全、高效又环保的自动水冲洗技术将是实现绝缘子运维系统往生态化方向发展的重要组成部分。

5. 结语

对接触网绝缘子定期进行清洁是保障接触网正常工作的重要方式, 用于绝缘子清洁的方式多种多样, 所采用的技术和清洗介质各不相同, 从安全性、清洗效率、环保无污染、劳动强度以及实现自动化清洗作业的难易程度等方面考虑, 带电水冲洗技术无疑有明显优势。随着带电水冲洗技术的不断迭代, 逐渐

朝着无人化的自动清洗方向发展, 为接触网绝缘子的智能运维提供了强有力的技术支撑。

绝缘子清洗技术日益进步, 但在实际工程应用当中仍有很多需要解决的问题, 比如绝缘子污秽检测的准确度、自动清洗的质量、清洗作业的连续性、对冲洗水量的控制、对自然环境的适应性、对复杂工况的匹配性等。随着接触网绝缘子智能运维平台的构建和不断优化, 这些技术难题终将逐一得到解决, 智能运维平台将以数据驱动的绝缘子污秽在线检测系统为数据基础, 结合数字孪生技术完成运维大模型的搭建, 采用无人化的自动清洗技术, 通过边缘计算实现数据共享, 以云平台作为全局调度平台, 在这些技术的推动下, 接触网绝缘子智能运维平台将往标准化和生态化方向快速发展。

基金项目

国能集团[2025] 205 号, 重载铁路绝缘子多模式智能冲洗技术研究。

参考文献

- [1] 苟军年, 张昕悦, 杜慷慷. Anchor-Based 的接触网棒式绝缘子定位及破损检测[J]. 铁道学报, 2025, 47(5): 39-46.
- [2] 张金胜. 浅谈接触网绝缘子防污闪治理[J]. 电气化铁道, 2016(1): 34-37.
- [3] 陈乃海, 李如梅, 周志录, 等. 铁路供电系统智能运维生产组织优化研究[J]. 电气化铁道, 2024(4): 18-21.
- [4] Jiang, X.L., Yuan, J.H., Shu, L.C., *et al.* (2008) Comparison of DC Pollution Flashover Performances of Various Types of Porcelain, Glass, and Composite Insulators. *IEEE Transactions on Power Delivery*, **23**, 1183-1190.
<https://doi.org/10.1109/tpwrd.2007.908779>
- [5] 陈鑫楠. 高速铁路接触网绝缘子清扫装置的研究[D]: [硕士学位论文]. 石家庄: 石家庄铁道大学, 2022.
- [6] 王国志, 侯杰文, 张元彬. 基于 BP 神经网络的接触网绝缘子干冰清洗研究[J]. 计算机与数字工程, 2022(7): 1609-1614.
- [7] 王国志, 罗毅, 吴文海, 等. 铁路绝缘子干冰清洗喷枪优化研究[J]. 机床与液压, 2017, 45(13): 84-87+120.
- [8] 侯杰文. 接触网绝缘子干冰清洗设备设计与特性研究[D]: [硕士学位论文]. 成都: 西南交通大学, 2021.
- [9] 方春华, 方雨, 李景, 等. 脉冲激光清洗瓷式绝缘子表面污秽温度场和应力场分析[J]. 高压电器, 2020, 56(4): 62-67.
- [10] 孙维, 陶玉宁, 方春华, 等. 脉冲激光清洗典型污秽瓷式绝缘子温度特性分析[J]. 电力工程技术, 2021, 40(3): 114-119, 165.
- [11] 黄海鹏, 王成皓, 周海峰. 无人机搭载的高压喷水清洗绝缘子装置研制[J]. 科技资讯, 2018, 16(31): 246-247.
- [12] 张贺朋. 电网绝缘子无人机自主清洗系统的位姿控制研究[D]: [硕士学位论文]. 合肥: 中国科学技术大学, 2022.
- [13] 刘东, 李贞涛, 马莎. 快准省! 云南电网首次采用无人机清洗绝缘子[N]. 人民网-云南频道, 2024-11-22.
- [14] 王国志, 王兴民. KJ-A 型电气化铁道绝缘子带电水冲洗装置的研制[J]. 电气化铁道, 2003(1): 26-28.
- [15] 王国志, 彭好奇, 柯坚, 等. 溅射水对铁道绝缘子带电水冲洗效果的影响分析[J]. 铁道标准设计, 2017, 61(3): 143-147.
- [16] 张霆, 吴文海, 蓝天, 等. 接触网绝缘子带电水冲洗的关键参数研究[J]. 机械设计与制造, 2022(5): 181-184.
- [17] 付虹. 接触网带电自动水冲洗的绝缘子定位研究[D]: [硕士学位论文]. 成都: 西南交通大学, 2018.
- [18] 王奇. 接触网绝缘子的图像识别和跟踪[D]: [硕士学位论文]. 成都: 西南交通大学, 2018.
- [19] 廖国庆. 绝缘子冲洗机器人视觉控制系统研究[D]: [硕士学位论文]. 成都: 西南交通大学, 2022.
- [20] 吴文海, 姚波, 于兰英, 等. 绝缘子水冲洗机器人视觉伺服仿真[J]. 电瓷避雷器, 2017(6): 193-197.
- [21] 曾鑫鹏, 吴文海, 廖国庆, 等. 绝缘子智能水冲洗装置伺服驱动系统动态性能研究[J]. 机床与液压, 2023, 51(1): 12-19.
- [22] 王奇, 王国志, 党帅涛, 等. 基于图像伺服的接触网绝缘子自动水冲洗车[J]. 计算机测量与控制, 2018, 26(8): 257-261.
- [23] 尧新亮. 基于视觉的接触网绝缘子水冲洗装置控制系统设计与研究[D]: [硕士学位论文]. 成都: 西南交通大学, 2021.

- [24] 孙磊, 吴文海, 柯坚. 基于可见光图像的铁路接触网绝缘子污秽状况检测[J]. 电瓷避雷器, 2019(5): 240-244.
- [25] 郭鑫慧. 基于计算机视觉的复杂背景下接触网绝缘子污秽检测技术研究[D]: [硕士学位论文]. 兰州: 兰州交通大学, 2022.