

[机器人]

基于LoRa网络的全智能空冷冷端清洗机器人智慧管控系统

文/宋天阳 赵亮荣 胡志明
神华神东电力有限责任公司郭家湾电厂

当前的全智能空冷冷端清洗机器人智慧管控系统，在导航、定位及清洗策略选择方面均存在不足，难以满足复杂的实际需求，这要求系统配备更高精度的传感器和采用更先进的算法。鉴于此，设计基于LoRa网络的全智能空冷冷端清洗机器人智慧管控系统。测试结果表明，该智慧管控系统满足大部分应用场景的要求。

在空冷设备维护领域，传统的人工清洗方式不仅效率低下，而且难以保证清洗质量和安全性。为此，提出基于LoRa网络的全智能空冷冷端清洗机器人智慧管控系统，旨在为空冷设备的清洗维护提供智能化、高效化的解决方案。该系统融合LoRa无线通信技术、智能机器人技术、大数据分析 & 云计算等多种先进技术，LoRa网络以其远距离、低功耗及抗干扰能力强等特点，为空冷冷端清洗机器人的无线通信提供稳定可靠的保障。智能机器人则凭借先进的导航与避障技术^[1]，能够在复杂环境中自主完成清洗任务，大大减轻人工劳动强度，提高工作效率。通过LoRa网络，清洗机器人能够实时传输清洗数据至中央控制系统，系统则根据数据分析结果，智能调整清洗策略，确保清洗效果的同时，最大化节省资源与时间成本。

硬件设计

1. 数据采集器

全智能空冷冷端清洗机器人的智慧管控系统的核心在于通过数据采集器捕捉空冷设备表面的污垢积累情况，将这一信息转化为电信号，并通过数据传输通道送至中央控制系统，以便进行智能化的分析与决策。数据采集器构成如图1所示。

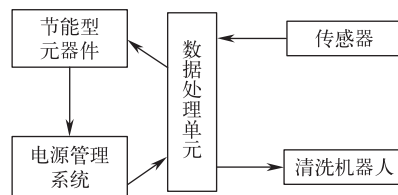


图1 数据采集器构成

为确保清洗作业的精确性和时效性，数据采集器的设计需遵循以下原则。

1) 选用高分辨率的传感器，能够精准量化空冷设备表面的污垢厚度。同时，鉴于机器人作业环境的复杂性，传感器需具备较强的环境适应性，能在各种恶劣条件下稳定工作。

2) 内置智能数据处理单元，能够及时对采集的污垢数据进行预处理与分析，确保后续清洗动作的精准执行。

3) 考虑到机器人持续移动作业的特性，数据采集器的能耗管理至关重要。因此，采用节能型元器件与高效的电源管理系统^[2]，确保在不影响性能的前提下，最大限度地延长机器人的单次作业时间，提升整体运营效率。

2. 无线通信器

基于LoRa网络设计无线通信器，旨在实现智慧管控系统的实时数据传输。该无线通信器集成传感

器单元、智能控制核心、LoRa通信模块以及电源管理系统，不仅支持数据的即时线上传输，还具备离线存储功能，确保数据的完整性与可追溯性。该无线通信器结构如图2所示。

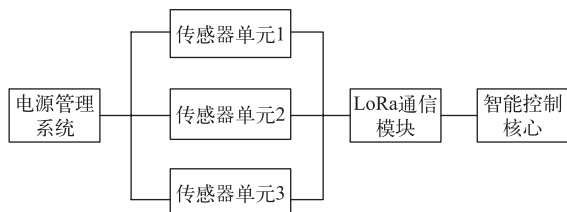


图2 无线通信器结构

清洗机器人利用LoRa通信模块，能够以简洁的单跳方式直接与网关建立通信联系，摒弃了繁琐的路由配置。这些设备并不局限于某一特定的网关，而是统一接受智能控制核心的管理。传感器单元内置基带处理器^[3]，具备并行处理多个通信通道的强大能力，从而确保数据能够迅速且高效地传输至智能控制核心。

软件设计

1. 计算空冷端热力

在进行空冷端热力计算的过程中，关键在于获取冷端各部分的热交换数据。设定空冷端表面的热辐射密度为特定的函数形式，用 $E(\eta)$ 表示，其中 η 代表空冷端热力的工作波段范围，界于特定的两个波长值 η_1 与 η_2 之间。这一设定能够针对特定波段的辐射能量进行分析，则某一监测点的输出信号为

$$B = \int_{\eta_1}^{\eta_2} E(\eta) \quad (1)$$

对于空冷凝汽器散热管而言，其内外壁上积累的污垢^[4]会显著影响传热性能。为量化这种影响，利用从监测点获取的输出信号 B ，得出总传热系数为

$$U = \frac{1}{h_i} + R_i + \frac{d}{\chi} B + R_o + \frac{1}{h_o} \quad (2)$$

式中， h_i 和 h_o 分别为管内蒸汽冷凝传热系数和管外空气对流传热系数； R_i 和 R_o 分别为管内和管外的污垢热阻； d 为管壁厚度； χ 为管壁材料的导热系数。

在假定总传热系数 U 在一定操作条件下为恒定值的前提下，可以进一步计算出空冷凝汽器散热管的总传热量为

$$Q = UA\Delta T \quad (3)$$

式中， U 为总传热系数； A 为传热面积； ΔT 为传热温差。

通过精确测量这些参数，并结合上述公式，能够准确地评估散热管的传热性能。

2. 利用全智能机器人清洗空冷冷端

基于空冷冷端热力的计算，融入LoRa网络 and 全智能机器人技术，成功实现了空冷冷端的智能化清洗。这一清洗过程采用多自由度结构，使得机器人能够灵活应对各种复杂多变的空冷冷端热力环境，确保清洗作业的全面性和高效性。这一多自由度清洗结构如图3所示。

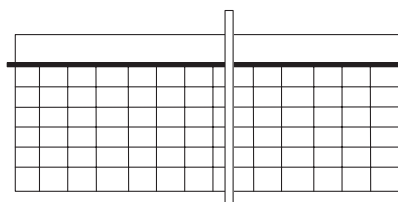


图3 空冷冷端清洗多自由度结构

清洗过程中，全智能机器人臂末端搭载着清洗喷嘴，电动机驱动机器人臂，在导轨上按照预设路径进行高速、稳定的移动，通过控制喷嘴的角度与喷射压力，确保清洗作业的全面覆盖与高效完成。LoRa网络实时监测清洗过程中的温度、湿度以及空冷冷端表面的污垢程度。特别是信息判断子模块，能够根据预设的空冷冷端热力阈值，智能判断空冷冷端是否需要清洗，从而避免不必要的资源浪费，提升清洗作业的针对性与效率。

3. 实现全智能空冷冷端清洗机器人智慧管控

在全智能空冷冷端清洗机器人的智慧管控系统中，规划如图4所示的田字形轨迹方案，旨在覆盖并清洗空冷冷端。该方案首先构建横向清洗路径，随后融入纵向路径，并在两者的衔接处巧妙设置边界航点，以确保清洗作业的无缝衔接。

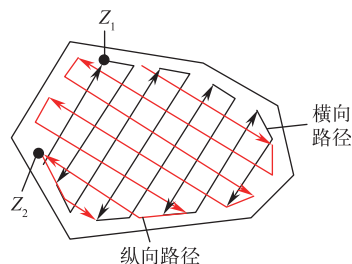


图4 田字形轨迹结构

该方案定义了任务航点数组 X_1 与路径方向标志 L ，用以存储与追踪清洗机器人的移动指令^[5]。按照从上至下的平行线顺序，系统遍历空冷冷端多边形边界的交点数组。在添加横向航点时，若 $L=0$ ，则将左侧边界点数组 Z_1 的首个点加入 X_1 ，并从 Z_1 中移除；随后，将右侧边界点数组 Y_1 的首个点亦加入 X_1 ，并从 Y_1 中删除，此时 $L=1$ 。为了平滑过渡到纵向路径，系统根据横向路径终点与纵向路径起点所在的边界，计算并添加最短边界连接路径的航点至 X_1 。

接着，按照类似逻辑添加纵向航点，但此时若 $L=0$ ，则是从左侧边界点数组 Z_2 中取点，并更新路径方向状态，直至完成所有田字形轨迹的航点规划。

在计算出航点后，需对航点数组 X_1 进行逆旋转，得到正确的作业路径航点数组 X_2 。这一过程可表达为

$$X_2 = K(-\alpha)X_1 \quad (4)$$

式中， α 为航点逆旋转角度； K 为旋转矩阵。

通过正确的作业路径航点数组 X_2 ，实现全智能空冷冷端清洗机器人的智慧管控。

系统测试

1. 测试环境

选取测试场地，已安装空调冷却塔的待清洗厂房，在获得技术部门的审核后，实施了系统测试。测试环境布局如图5所示。

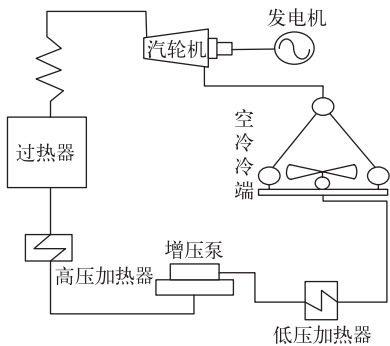


图5 测试环境布局

此空冷冷端装备X-22000型号的空冷散热器，其结构为单列式、自然通风和铝制翅片管型。采用闭式循环冷却系统，表1详细列出了空冷散热器的主要技术规格参数。

表1 空冷散热器的主要技术规格参数

序号	参数名称	参数值
1	换热面积/m ²	22 000
2	设计压力/MPa	0.6
3	设计温度/℃	-40~+80
4	风扇数量/台	24
5	风扇直径/mm	3 000
6	冷却风量/(m ³ /h)	1 200 000
7	耗水量/(t/h)	120
8	重量/t	850

操作人员通过智慧管控系统指挥LoRa网络全智能空冷冷端清洗机器人执行自动清洗、定点清洗及循环清洗任务，并实时追踪其工作状态。

2. 测试准备

全智能空冷冷端清洗机器人配置了水平移动机构、清洗刷组件与稳定支架、弹性线缆跟随系统、限位传感器、同步传动链条以及快速连接接口等部件。每套空冷冷端清洗任务均配备一个机器人，其结构设计如图6所示。

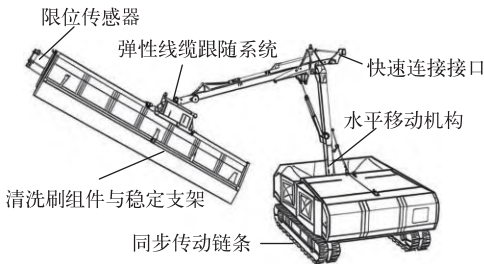


图6 全智能空冷冷端清洗机器人结构

水平移动机构集成直流伺服电动机、减速器、高强度联轴器以及定制驱动轮组件，伺服电动机额定功率提升至300 W，最高可承受温度跃升至200℃。清洗刷组件集成了清洗框架与喷嘴阵列，框架巧妙布局有上下两层喷嘴，每层配置8个高效喷嘴，总计16个，材质升级为304 L不锈钢，其产生的清洗水幕覆盖宽度超过80 cm，有效增强清洗效率。

实验选用的LoRa网络关键参数见表2。

表2 LoRa网络关键参数

序号	参数名称	参数值
1	频率范围/MHz	915-928
2	发射功率/dBm	20
3	接收灵敏度/dBm	-137
4	扩频因子(SF)	SF7~SF12
5	带宽/kHz	125、250、500
6	编码率	4/5、4/6、4/7、4/8
7	最大通信距离/km	10

在测试中，为全面评估基于LoRa网络的全智能空冷冷端清洗机器人智慧管控系统的实际效能，设计多种模拟清洗场景，其中包括重度油渍、灰尘积累以及顽固污渍。

3. 测试结果与讨论

清洗机器人作为系统的执行机构，其清洗效果是评估系统性能的重要指标。检测不同场景下，清洗后的表面清洁度指标，评估清洗机器人的清洗效果，如图7所示。

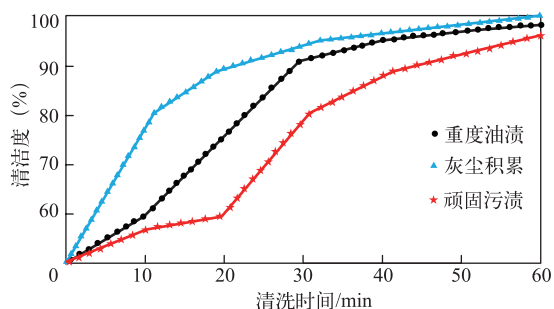


图7 清洗机器人的清洗效果

根据图7得出，在清洗时间为10 min时，清洗机器人对于重度油渍、灰尘积累和顽固污渍的清洁度指标分别为60%、80%和40%，显示出一定的清洗能力，但仍有较大提升空间。随着清洗时间的增加，清洁度指标逐步提升。当清洗时间达到30 min时，重度油渍和灰尘积累的清洁度指标已分别达到90%和95%，表明清洗机器人在这两个场景下的清洗效果已经相当显著。对于顽固污渍，清洗时间30 min时，清洁度指标从40%提升至80%，但相比重度油渍和灰尘积累，其清洗难度显然更大。不过，当清洗时间进一步延长至50 min时，顽固污渍的清洁度指标也达到了95%，显示出清洗机器人在长时间

清洗下对顽固污渍的良好处理能力。证明该智慧管控系统满足了大部分应用场景的要求。

结束语

基于LoRa网络的全智能空冷冷端清洗机器人智慧管控系统，以其高效、智能和可靠的特点，实现了清洗过程的全面智能化管理，不仅大幅提升了清洗效率与质量，更在节能减排、降低人工成本等方面展现出显著优势。展望未来，随着技术的不断进步与优化，该系统将进一步完善功能，提升性能，为空冷设备乃至整个制造业的智能化升级贡献更多力量。EA

(收稿日期：2025-01-20)

参考文献

- [1] 冯俊杰, 张锋, 杨阳, 等. 基于LoRa网络的变电站智能接地线及其管控系统设计[J]. 电瓷避雷器, 2024, 37(4): 89-97.
- [2] 李晓庆, 吴松松. 空冷机组散热器翅片智慧清洗系统设计分析[J]. 家电维修, 2024, 16(8): 3-5.
- [3] 李想, 雷明远, 韩孝军. 空冷岛全自动清洗机器人系统设计探析[J]. 华东科技, 2024, 42(7): 94-96.
- [4] 独敬东. 空冷岛全自动无人值守清洗机器人系统的设计研究[J]. 科技资讯, 2023, 21(11): 79-82.
- [5] 王磊. 炼化企业镀锌空冷器采取AOLO化学清洗的研究与实践[J]. 全面腐蚀控制, 2022, 36(11): 36-40.

