

物联网 + AI 在医疗建筑和医疗废弃物全生命周期管理中的实践

吴磊 吴建永 曾子安

南昌大学第一附属医院, 中国·江西南昌 330209

摘要: 医疗垃圾具有传染性、腐蚀性等多种危害特点。其全生命周期管理是公共卫生安全与生态环境保护的关键环节。传统管理模式存在信息断层、监管滞后、追溯困难等问题, 难以满足现代化医疗管理需求。本文结合物联网(IoT)感知技术与人工智能(AI)分析能力, 核心实践载体以医疗建筑和智能医疗废物转运车为载体。构建“感知—传输—分析—决策”一体化的全生命周期管理体系。

关键词: 物联网; 人工智能; 医疗废弃物; 医疗建筑

Practice of IoT+AI in the full lifecycle management of medical buildings and medical waste

Wu Lei, Wu Jianyong, Zeng Zian

The First Affiliated Hospital of Nanchang University, China Jiangxi Nanchang 330209

Abstract: Medical waste has various harmful characteristics such as infectivity and corrosiveness. Its full lifecycle management is a key link in public health safety and ecological environment protection. The traditional management model has problems such as information gap, lagging supervision, and difficulty in tracing, which make it difficult to meet the needs of modern medical management. This article combines Internet of Things (IoT) perception technology with artificial intelligence (AI) analysis capabilities, with medical buildings and intelligent medical waste transfer vehicles as the core practice carriers. Build a comprehensive lifecycle management system that integrates perception, transmission, analysis, and decision-making.

Keywords: Internet of things; Artificial intelligence; Biohazard wastes; Medical buildings

0 引言

随着我国医疗事业的快速发展, 医疗废弃物产生量年均增长率达 8%–10%, 2024 年全国医疗废弃物年产量已突破 120 万吨。如果处理不好医疗垃圾, 不仅会造成土壤和水源的污染。还可能引发疫情传播等公共卫生事件。然而, 当前我国医疗废弃物管理仍以“人工记录 + 事后核查”的传统模式为主, 在全生命周期各环节存在明显短板: 收集环节分类不规范、暂存环节超期超量、转运环节路线随意、处置环节追溯断层、医疗建筑不匹配。

物联网技术的感知能力与 AI 的数据分析能力为解决上述问题提供了新路径。物联网可通过射频识别(RFID)、红外传感器、GPS 等设备实时采集医废信息, 而 AI 可以对数据进行深度挖掘。实现路径优化、风险预测

与智能决策。其中, 作为连接医废产生点(医院)与处置点(处理厂)的核心载体, 转运车的智能化改造成为打通全生命周期管理“中梗阻”的关键。

1 医疗废弃物管理现状与核心问题

1.1 管理流程碎片化, 信息传递断层

医疗废弃物管理涵盖“产生—分类—暂存—转运—处置”五个核心环节, 涉及医院、转运公司、处置企业等多主体。传统模式下, 各环节信息记录依赖纸质单据或独立系统, 数据难以互通, 这种“信息孤岛”导致全生命周期管理效率低。

1.2 监管手段被动, 风险预警滞后

传统监管以“定期抽查 + 事后处罚”为主, 缺乏实时动态监控能力。据某省卫健委 2023 年数据显示, 该省医疗废弃物违规事件中, 82% 源于监管不及时。

1.3 人工依赖度高，管理效率低下

分类收集环节，医护人员需手动记录医废信息并贴标，易出现错记、漏记；转运环节，司机需人工核对医废数量与目的地，平均每车交接时间达 30 分钟；追溯环节，管理人员需逐一核对纸质单据与系统记录，查询医废流转信息平均耗时长。

1.4 建筑规划不足，布局不合理

长期以来，医疗机构对于医疗建筑的规划设计以及布局，均倾向于医疗业务，与医废处理的匹配关联度不高。存在选址、建筑布局、业务科室布置不合理、欠缺医疗废物暂存间等诸多问题。

2 物联网 +AI 技术在医疗废弃物管理中的应用原理

2.1 物联网：构建全环节数据感知网络

通过“感知层—网络层—平台层”三级架构，物联网技术实现实时采集和传输医疗废弃物信息。

2.1.1 感知层

在医废包装袋 / 周转箱加装 RFID 电子标签，记录医废产生单位、种类、重量、产生时间等核心信息；在智能转运车搭载 GPS 定位模块、温湿度传感器、重量传感器与视频监控设备，实时采集车辆位置、车厢内环境参数、医废重量变化与装卸过程影像；在医院暂存点与处置厂安装红外门禁与温湿度监测仪，管控医废暂存时间与环境。

2.1.2 网络层

采用“5G+LoRa”双模通信技术，实现数据高速传输与广覆盖。5G 网络保障车辆实时定位、视频流等大容量数据的快速上传，LoRa 技术则解决医院地下室、处置厂车间等信号薄弱区域的传感器数据传输问题。

2.1.3 平台层

构建医疗废弃物管理云平台。整合各环节数据，形成统一的数据中台，为 AI 分析与管理决策提供数据支撑。

2.1.4 应用层

应用层面作为面向医疗机构、各级卫生健康监督执法机构及生态环境行政管理部门的定制化软件系统，通过多维度功能模块的协同运作，为监管单位提供全方位的医疗废物应用解决方案。

2.1.5 医疗建筑空间层面

医疗建筑作为医废处理的主要场所，其建筑智能化需要进行提前的规划和实施，并匹配相关人员的管理标准，以满足医院对于医废处理的标准化流程化和科学化。其中重点是满足以下模块的建设：

改造模块	核心技术	实现功能	解决的核心问题
1. 智能库存管理	RFID 标签 (废物周转箱) + UWB 定位 + 库存系统	每个废物周转箱贴 RFID 标签，暂存处门口设 RFID 阅读器；UWB 定位实时显示各周转箱位置；系统自动计算暂存时间，推送预警至管理人员和处置机构。	杜绝超期存放，实现“库存可视化 + 超期预警”
2. 恒温恒湿管控	智能空调 (联动温湿度传感器) + 冷链监控 (针对病理性废物)	暂存区整体温湿度控制 ($\leq 25^{\circ}\text{C}$, 湿度 $\leq 60\%$)，传感器实时监测，超标时自动调节并报警；病理性废物需低温暂存 ($2-8^{\circ}\text{C}$)，专用冷藏柜内置温感。	符合医疗废物存储环境要求，防止变质滋生细菌
3. 人员准入管理	人脸识别 + 门禁系统 + 出入登记 APP	仅授权人员可通过人脸识别进入，未授权人员尝试进入时，触发声光报警并抓拍照片；人员出入时，系统自动记录“姓名 + 时间 + 事由”，替代纸质登记	防止无关人员接触废物，避免丢失或污染
4. 应急联动	气体检测传感器 (如 CO、有毒气体) + 消防联动	暂存处若发生废物泄漏，气体传感器检测到异味后，自动启动排风系统，并推送报警至安保和环保部门；与医院消防系统联动，若火情，自动关闭暂存处门并启动灭火装置。	应对突发风险，减少事故扩大化

2.2 AI：实现数据驱动的智能决策

AI 技术通过算法模型对物联网采集的海量数据进行分析，赋能管理效率提升与风险预警：

2.2.1 路径优化算法

基于实时交通数据、医废产生量与处置厂容量，采用改进的 Dijkstra 算法规划最优转运路线，减少空驶里程与运输时间。例如，当某区域多家医院同时产生医废时，算法可自动合并运输任务，减少了运输费用。

2.2.2 图像识别算法

通过转运车车厢内的摄像头采集医废装卸影像，采用 YOLOv8 目标检测算法识别医废分类是否规范，鉴定准确率达到 95% 以上。实时提醒司机与管理人员纠正违规行为。

2.2.3 风险预测算法

基于历史温湿度数据、车辆故障记录与医废泄漏案例，构建 LSTM (长短期记忆网络) 预测模型，提前 6-12 小时预警车厢温湿度异常、车辆潜在故障等风险，准确率达 88%。

3 智能医废转运车的实践应用设计

3.1 硬件架构：打造“移动感知终端”

智能医废转运车的硬件改造围绕“数据采集 - 实时传

输-现场交互”三大功能展开,核心硬件包括:

3.1.1 维度传感器模块

温湿度传感器:精度 $\pm 0.5^{\circ}\text{C}/\pm 3\% \text{RH}$,每隔 5 分钟采集一次车厢内环境数据,当温度超过 50°C 或湿度超过 80%时自动报警;重量传感器:安装于车厢底部,精度 0.1kg,实时监测医废重量变化,防止在运输途中遗失或被替代;RFID 读写器:安装于车厢门口,当医废周转箱进入车厢时自动读取标签信息,对照运单资料,确保“货单相符”;高清摄像头:车厢内安装 2 路 4K 摄像头,分别监控装卸过程与医废状态,视频数据实时上传至云平台,支持 7 天回溯。

3.1.2 智能终端与定位模块

车载终端:采用 10.1 英寸触控屏,内置安卓系统。支持司机接收运输任务、上传交接记录、查看预警信息;北斗 + GPS 双模定位:定位精度 1 米,每隔 10 秒上传一次车辆位置,平台实时显示运输轨迹,偏离预设路线时自动提醒。

3.1.3 通信模块

内置 5G 全网通模块与 LoRa 模块,确保在城市、郊区等不同区域的稳定通信,数据上传速率达 100Mbps 以上,满足视频流与传感器数据的实时传输需求。

3.2 软件系统:构建“全程管控平台”

依托物联网云平台,开发“车载 APP+ 管理后台”两级软件系统,实现数据可视化与智能管控:

3.2.1 车载 APP 功能

任务管理:接收平台下发的运输任务,包括医院名称、医废种类、预计装卸时间等信息,支持任务导航;

数据采集:自动读取 RFID 标签信息与传感器数据,生成电子运单,司机无需手动填写;

异常上报:当出现温湿度超标、重量异常、路线偏离等情况时,APP 自动弹出预警窗口,司机可拍照上传现场情况,发起协同处置请求;

交接确认:到达医院或处置厂后,司机与对方人员通过 APP 扫码确认交接,电子签名替代传统纸质单据,交接时间缩短至 5 分钟以内。

3.2.2 管理后台功能

(1) 全流程医疗废物信息可视化模块。该模块支持监管人员实时调取医疗废物从医疗建筑环境、产生源头到最终处置的全链条信息,涵盖废物分类生、暂存点收集、专用仓库入库登记及转运出库交接等关键环节。

(2) 多场景异常智能预警模块。系统基于预设的监

管规则与数据阈值,对医疗废物管理过程中的异常情况进行自动识别与实时预警。具体预警场景包括但不限于:医疗废物实际重量与申报重量偏差超标(抛重异常)、转运车辆偏离预设路线、废物处置流程未按规定执行(异常处理)、各环节操作超时(如暂存超时、转运超时)等;

(3) 动态化库存管理模块。监管人员通过该模块能够精准掌握不同类别、不同区域医疗废物的库存余量、积压情况及流转效率,为科学制定收运计划、优化收运路线、调整收运频次提供数据支撑,避免因库存管理不当导致的环境安全隐患;

(4) 专业化数据分析模块。依托大数据技术,可自动完成医疗废物产生量、处置量、类别占比、区域分布、收运效率等多维度统计分析,并生成丰富的可视化报表。自动统计各医院医废产生量、转运效率、违规次数等数据,生成日报、周报与月报;

(5) 精准化事后追溯模块。在监管过程中,监管人员通过扫描条码即可快速查询该批次废物的核心信息,包括产生机构名称、产生时间、废物类别与重量、收集责任人、转运车辆信息、处置机构及处置时间等全链条追溯数据。可一键查询医废从产生到处置的全流程记录,包括产生单位、重量、运输路线、交接人员等,追溯时间缩短至 10 秒以内;

(6) 风险预警模块。基于 AI 预测模型,在后台显示高风险转运任务(如高温天气下的感染性医废运输),并自动推送预警信息至管理人员与司机。

3.3 全流程应用场景

在医疗建筑空间对污物间、污物电梯、医疗废物暂存处等布局进行适当调整前提下,以某三甲医院至医疗废弃物处置厂的转运流程为例,智能医废转运车的应用场景如下:

3.3.1 出发前准备

医院暂存点工作人员将分类好的医废装入贴有 RFID 标签的周转箱,重量传感器自动记录重量,信息同步至管理平台;平台根据各医院医废量与交通状况,通过 AI 算法规划最优路线,将任务下发至司机车载 APP。

3.3.2 医院装卸环节

转运车到达医院后,司机通过车载 APP 扫码确认医院信息,车厢 RFID 读写器自动读取周转箱标签,与运单数据比对,确认无误后开始装卸;摄像头实时拍摄装卸过程,AI 图像识别算法检查是否存在混装问题,若发现违规则立即提醒司机。

3.3.3 在途运输环节

GPS 定位模块实时上传车辆位置, 管理后台显示运输轨迹; 温湿度传感器持续监测车厢环境, 当温度接近阈值时, 平台自动推送预警信息至司机, 提醒开启空调; 若车辆偏离预设路线, 后台立即发出警报, 管理人员可通过 APP 与司机实时沟通。

3.3.4 处置厂交接环节

转运车到达处置厂后, 司机与处置厂工作人员通过 APP 完成电子交接, 重量传感器数据与处置厂地磅数据比对, 确认医废无丢失; 平台自动更新医废状态为“已处置”, 生成完整的全生命周期追溯记录。

4 应用效益分析

4.1 管理效率显著提升

通过智能医废转运车的应用, 各环节管理效率大幅提升: 交接时间从传统的 30 分钟缩短至 5 分钟, 效率提升 83%; 医废追溯时间从 2 小时缩短至 10 秒, 效率提升 720%; 管理人员可通过后台实时监控所有转运任务, 无需现场抽查, 监管效率提升 60% 以上。

4.2 运输成本大幅降低

AI 路径优化算法减少了空驶里程与运输时间, 某转运公司应用后, 单辆车日均行驶里程从 200 公里减少至 150 公里, 油耗成本降低 25%; 电子运单替代纸质单据, 每年节省印刷与管理成本约 10 万元。

4.3 公共安全与环境效益凸显

全流程追溯解决了责任认定难题, 一旦发生医废泄

漏, 可在 10 秒内定位泄漏位置与责任主体, 处置反应时间由原来的 2 小时缩短为 30 分钟。降低了有害物传播与环境污染风险。

5 结语

本文以医疗建筑空间和智能医疗垃圾转运车为实践案例整理而成。证明了物联网 + AI 技术在解决管理碎片化、监管滞后、效率低下等问题中的核心作用。通过“感知 - 传输 - 分析 - 决策”全生命周期管理的技术架构, 医疗垃圾从产生到处置, 实现了全程智能化管控。显著提升了管理效率、降低了运输成本、保障了公共安全。

未来, 随着技术的不断迭代与政策的持续支持, 物联网 + AI 将在医疗废弃物管理中发挥更大作用, 推动行业从“被动监管”向“主动预防”、从“碎片化管理”向“全生命周期协同”转型, 为建设“健康中国”与“美丽中国”提供有力支撑。

参考文献:

[1] 张紫恩.《佛山: 以数智赋能实现医疗废物全过程管理》[J].《环境》, 2024(09):47-48.

[2] 曹云霄, 于晓东.《我国医疗废物处理处置技术发展与创新》[J].《中国环保产业》, 2024(01):46-53.

作者简介: 吴磊 (1987.05-), 男, 汉族, 江西省抚州市人, 硕士研究生, 工程师, 研究方向: 医院基本建设和设备技术管理工作研究。