文章编号：2097-5899(2026)04-0032-09　**中图分类号**：U295　**文献标识码**：A
DOI：10.16669/j.cnki.issn.2097-5899.202312250001
引用格式：叶玉玲，朱资岳，顾子岳，等. 基于流程优化的铁路冷链运输设备智能洗刷与消毒方案研究[J]. 铁路物流，2026，44(4)：32-40.
YE Yuling，ZHU Ziyue，GU Ziyue，et al. Research on Intelligent Cleaning and Disinfection Scheme for Railway Cold Chain Transportation Equipment Based on Process Optimization[J]. Railway Logistics，2026，44(4)：32-40.

基于流程优化的铁路冷链运输设备智能洗刷与消毒方案研究

叶玉玲[1]，朱资岳[1]，顾子岳[2]，宋唯维[3]，周文涛[4]，黄宝静[5]

(1. 同济大学 道路与交通工程教育部重点实验室，上海　201804；2. 中国铁路济南局集团有限公司 淄博车务段，山东 淄博　255020；3. 宁波大学 科学技术学院，浙江 宁波　315300；4. 中国铁路上海局集团有限公司 杭州站，浙江 杭州　310000；5. 中国铁道科学研究院集团有限公司 运输及经济研究所，北京　100081)

摘　要：为优化铁路冷链运输设备洗刷与消毒作业流程，设计相应的智能化作业方案。通过细化洗刷与消毒任务，在考虑作业方法特点与适应场景的基础上，采用多准则妥协解排序法，确定适宜各任务环节的作业方法；对于各任务环节相互影响与制约的关系，利用解释结构模型，对作业全流程进行合理优化；并通过设立开箱作业消毒隔离区和引入具备物联功能的智能化喷淋消杀车，提出铁路冷链运输装备智能化洗刷与消毒方案。相较传统人工作业，该方案有望整体节约55%左右的作业时间和50%左右的作业费用，为铁路冷链运输设备的洗刷与消毒技术向智能化、高效化发展提供了参考。

关键词：铁路运输；洗刷与消毒方案；多准则妥协解排序法；解释结构模型；铁路冷链运输设备

0　引言

随着城镇化进程加快和消费结构升级，我国冷链物流行业面临新的发展机遇。“十五五”规划中现代物流体系将积极推进冷链物流规划建设，冷链物流市场规模将持续快速增长。中国物流与采购联合会公布数据显示，2025年我国冷链物流总收入达到5 567.1亿元，同比增长3.84%，占全球冷链市场的比重稳步提升[1]。基于行业发展趋势，预计“十五五”期末我国冷链市场规模有望突破8 000亿元。同时，“十五五”规划明确将建成符合国情和产业结构特点的冷链物流体系，重点提升卫生健康系统对于冷链食品药品风险的防范能力。在这一背景下，高质量物流服务的迫切需求使得铁路冷链运输装备洗刷与消毒任务显得尤为重要[2]。

针对铁路冷链运输设备的洗刷与消毒，众多学者从不同角度开展了相应研究。倪洪强[3]针对上海地区铁路冷链货运，提出完善行业标准，助力铁路冷链物流持续健康发展。刘杰等[4]从保障铁路跨境冷链运输角度出发，建议规范冷链消杀流程，为冷链班列高效开行提供支撑。赵楠等[5]针对后疫情时代冷链食品管理问题，提出针对冷链食品病毒消杀方法的研究。同时，相关机构也提出了针对进口冷链食品预防性全面消毒工作的方案，保障冷链运输安全稳定[6]。在此基础上，适用于冷链运输设备的消杀方案，尤其是进一步考虑自动化与智能化设备的整合，也逐渐成为研究的重点。张德良[7]基于冷链食品运输环境和消杀设备分析，以用户需求为导向，设计了冷链食品消杀设备产品。李智慧等[8]通过整合消杀模块、监控模块、显

收稿日期：2023-12-25　**修订日期**：2026-02-20
基金项目：中国国家铁路集团有限公司科技研究开发计划课题(P2022X023)；上海市自然科学基金项目(22ZR1465800)

示模块等，设计了基于紫外线消杀的智能机器人装置。陈志坤等[9]通过引入多角度查验与立体式喷雾消杀装置，设计了适用于港口集装箱的自动化消杀设备。

综上所述，针对铁路冷链运输设备的洗刷与消毒，应出台相应的作业标准，严格规范洗刷与消毒作业流程，明确各任务环节的操作方法，并在此基础上引入先进的自动化技术设备，开展智能化洗刷消毒方案设计。为此，首先分析当前冷链运输设备洗刷与消毒作业现状及作业流程中存在的问题，并提出了针对性的改进方向。然后结合既有洗刷与消毒方法的特点和适用场景，采用多准则妥协解排序法(VIKOR)为不同任务环节提供方法选择思路。最后在考虑各项任务环节相互影响与制约关系的基础上，构建解释结构模型(ISM)，优化铁路冷链运输设备的洗刷与消毒作业流程，并设计安全可靠的智能化方案，促进提高铁路冷链运输装备的洗刷消毒与作业效率，满足当前冷链运输卫生和安全的高标准需求。

1　铁路冷链运输设备洗刷与消毒现状及问题分析

1.1　铁路冷链运输设备概况

我国铁路冷链运输设备主要有冷藏车、保温车、冷藏箱、保温箱等，其中车类设备集中使用的多为B22型机械冷藏车、BH10型单节机械冷藏车、BX1K型冷藏集装箱专用平车和BH1型铁路隔热保温车等，箱类设备多为40 ft箱、20 ft箱等。这些设备结合了创新设计和先进技术，有效满足国内冷链运输的多元化需求，其中冷藏类设备主要承运水果、蔬菜、冻品等，隔热保温类设备主要承运牛奶、饮料、啤酒等。

1.2　铁路冷链运输设备洗刷与消毒现状

通过2023年3月中旬对清远双汇食品有限公司、广州南沙国际冷链有限公司、中铁特货物流股份有限公司广州机械保温车辆段等铁路冷链运输相关企业的调研，总结现有的铁路冷链运输设备洗刷与消毒流程，主要包含5个环节，涉及清扫、洗刷、消毒与干燥等，铁路冷链运输设备洗刷与消毒流程如图1所示。

1.3　问题分析

（1）洗刷与消毒作业任务不明确、流程不清晰。因缺少必要的洗刷与消毒作业标准文件，加之监管执行不力，使得冷链运输设备的洗刷与消毒作业没有明确的任务安排和清晰的流程规范。

（2）运维人员技术水平、业务能力参差不齐，难以保证冷链运输设备的洗刷与消毒作业质量。

（3）洗刷与消毒作业智自动化、智能化水平较低。现阶段冷链运输设备的洗刷与消毒作业主要由人工完成，对自动化、智能化洗刷与消毒工具的使用还停留在较低水平，一定程度上阻碍了作业效率的提升。

2　既有洗刷与消毒方法比较分析

传统的设备洗刷方法如手工擦洗、高压水枪、蒸汽清洁、化学清洗剂清洗和超声波清洗各有特点，适用于不同的清洁需求和场景。同样，消毒方法如高温灭活、消毒剂灭活、臭氧灭活和紫外线照射灭活，也因其独特的消杀机制而适合不同的消毒场合。在实际操作中，选择正确的洗刷和消毒方法，不仅可以有效提高清洁效率，还能保障设备运行的卫生和安全。

2.1　既有洗刷方法

手工擦洗是最基本和广泛使用的清洁方法之一，一般使用布、海绵、刷子或其他类似工具，配合清洁

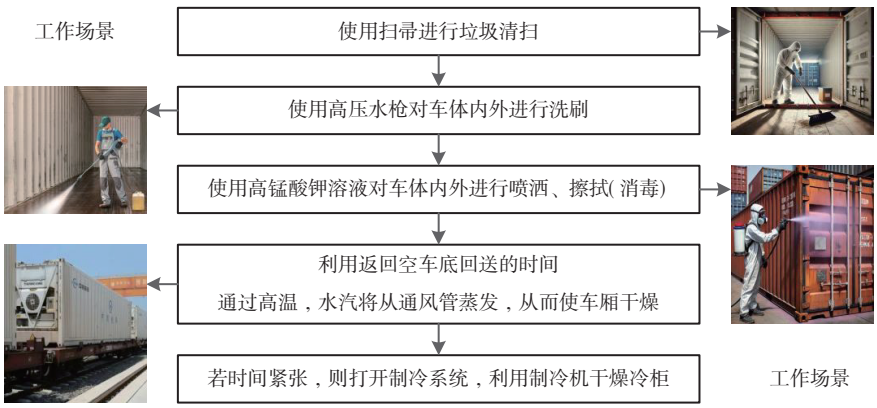


图1　铁路冷链运输设备洗刷与消毒流程

Fig.1　Cleaning and disinfection process of railway cold chain transportation equipment

剂来手动去除污渍和杂质。高压水枪清洗使用高压水流来去除污垢和残留物，这种方法在清洁大面积的室外表面时特别有效。蒸汽清洁是一种利用高温蒸汽进行深层清洁和消毒的方法，蒸汽清洁器将水加热至沸腾产生蒸汽，然后通过喷嘴将蒸汽喷射到需要清洁的表面。化学清洗剂清洗则涉及使用各种化学物质来去除污渍和残留物，这类清洁剂根据不同的用途和成分，可分为去油剂、除锈剂、消毒剂等多种类型。超声波清洗使用超声波技术产生微小的气泡，这些气泡在接触到物体表面时迅速破裂，产生强大的清洁力，超声波清洗特别适用于清洁精密部件、电子设备等需要细致清洁但不适合手工擦洗的物品。

2.2　既有消毒方法

高温灭活是一种通过热能杀灭或去活化微生物的方法，这种方法的效果基于高温对微生物细胞结构的破坏作用，尤其是对其蛋白质和酶系统。消毒剂灭活则是使用化学消毒剂来杀灭或去活化微生物，其作用机制包括破坏微生物的细胞壁、改变细胞膜的通透性或干扰其代谢途径。臭氧灭活利用臭氧强氧化性的特点来杀灭微生物，臭氧可以快速氧化微生物的细胞壁和内部结构，从而有效地杀灭细菌、病毒和其他微生物。紫外线照射灭活通过紫外线照射杀灭或去活化微生物，尤其是UVC波段，对DNA和RNA产生破坏作用，从而阻止微生物的繁殖和生长。

2.3　既有洗刷与消毒方法比较

通过比较分析，对既有洗刷与消毒方法的特点及适用场景进行归纳整理，得到既有洗刷方法特点及适用场景如表1所示，既有消毒方法特点及适用场景如表2所示。对于洗刷方法，手工擦洗效率最低但适用范围最广泛，高压水枪、蒸汽清洁、化学清洗剂清洗和超声波清洗的效果更为显著，但都存在一定的适用限制。对于消毒方法，4种方法受物理化学性质影响，适用材料和适用场景均有所不同。

3　铁路冷链运输设备洗刷消毒任务分析与方法选择

3.1　铁路冷链运输设备洗刷与消毒任务分析

结合图1中现有铁路冷链运输设备洗刷与消毒流程，在原有洗刷与消毒任务的基础上，为保障冷链运输作业的安全与高效，从车体不同位置入手，细化每个环节的任务内容，具体分为对车体外表面、内表面的洗刷任务和对开箱作业区、车体外表面、车体内表面的消毒任务。铁路冷链运输设备洗刷与消毒任务细化如表3所示。

3.2　铁路冷链运输设备洗刷消毒方法选择

铁路冷链运输设备洗刷与消毒任务涉及多个位置，不同位置的任务环节所需实现的效果不同，其适宜的洗刷与消毒方法也有所区别，因此需要以任务环节具体内容的目标为导向，选择适宜的洗刷与消毒方法。

VIKOR法是通过计算各备选方案与理想方案之间的接近程度，在假设决策过程稳定且决策者主观接受优势的条件下，将不同任务环节的各个洗刷与消毒方法作为备选方案进行排序。VIKOR法在多准则决策中具有显著优势，与层次分析法(AHP)依赖成对比较的层次结构不同，VIKOR在“正理想解”和“负理想解”之间寻求“妥协解”，通过平衡“群体效益最大化”和

表1　既有洗刷方法特点及适用场景

Tab.1　Characteristics and applicable scenarios of existing cleaning methods

方法	优点	缺点	适用场景
手工擦洗	灵活，适用性广	受人为因素影响较大，效率较低，难以满足大规模设备高效清洁的需求	小面积或精细清洁，如设备缝隙、弯角
高压水枪	清洁效率高，能去除顽固污垢	高压水流可能对设备表面造成损伤，不适敏感表面和精细设备	大面积非精细设备清洁，如车体外部、集装箱外部
蒸汽清洁	深层清洁，杀菌效果好，环保	高温蒸汽可能损坏设备的热敏组件，且长时间操作效率低下	厨卫、地板、食品设备
化学清洗剂清洗	强力去污，可快速去除油脂和污垢	化学残留的环境和健康风险较高，且不同清洁剂可能影响设备材料耐久性，不适用于食品接触表面	广泛场合，如货车车厢内部
超声波清洗	深入细缝，无损，不依赖人员精细操作	仅适用于小型设备，难以满足大型设备的清洗需求	精密设备，如电控装置

表2　既有消毒方法特点及适用场景

Tab.2　Characteristics and applicable scenarios of existing disinfection methods

方法	优点	缺点	适用场景
高温灭活	高效杀菌，环保	不适热敏材料，冷链环境中可能导致设备受损	耐高温物品，如装载工具和容器
消毒剂灭活	广泛适用，操作简便	消毒剂可能残留毒性，增加清洁时间且可能影响货物卫生，需考虑不同消毒剂与材料的兼容性	多种表面，如开箱作业区
臭氧灭活	快速高效杀菌，作用范围广，无化学残留	臭氧对操作环境及人员的刺激较大，需在封闭环境内使用，增加设备和人员的防护要求	空气、水消毒，如仓库内部
紫外线照射灭活	无化学残留，环保	紫外线无法穿透遮挡物，难以在复杂结构中实现全面消毒，且存在作业人员的健康风险	表面、空气消毒，如设备表面

表3　铁路冷链运输设备洗刷与消毒任务细化

Tab.3　Detailed tasks of cleaning and disinfection for railway cold chain transportation equipment

任务	位置	任务环节具体内容
洗刷任务	车体外表面	彻底清洁车体外部，包括去除所有可见污渍、尘土和外部杂质，保持外观清洁
	车体内表面(含死角)	深度清洁车厢内部，特别是难以触及的死角区域，确保无残留污垢和物质
消毒任务	开箱作业区	对开箱前后的作业区域进行全面消毒，以消灭空气中的潜在病原微生物
	车体外表面	对车体外部进行细致消毒，重点是频繁接触的部位，如门把手和侧面，防止微生物扩散
	车体内表面(含死角)	在内部清洁完成后进行周全消毒，特别关注死角和缝隙，保证车厢内部环境的卫生安全

“个体遗憾最小化”在复杂、多重指标任务间提供更客观的决策。相比双基点法(TOPSIS)仅考虑理想解接近度的单一标准，VIKOR法能够有效处理清洁效果、安全性、时间和成本等冲突指标，并兼顾各任务环节的最小遗憾值，确保在多样化任务需求中的适应性。

具体步骤包括确定最优和最差的理想方案，然后通过计算每个方案的最大群体效益、最小个体遗憾以及效益比率，来衡量每个备选方案与理想方案的差距，据此对各个方案的优劣进行有效排序[10]。基于这种方法，构建不同位置任务环节洗刷与消毒方法选择模型，具体步骤如下。

(1) 构建初始评价矩阵$\boldsymbol{X}$。针对第k项洗刷与消毒任务($k=1,2,\cdots,5$，分别代表表3中不同位置的5项任务环节)，令x_{ij}表示第i个洗刷与消毒方法($i=1,2,\cdots,9$，分别代表表1和表2中共9项方法)的第j个特征值($j=1,2,3$，分别代表表1中各方法的优点、缺点、适应场景的特征值)，记m为洗刷与消毒方法的数量，n为洗刷与消毒方法的特征值个数。

$$\boldsymbol{X}=\left(x_{ij}\right)_{m\times n}=\begin{bmatrix}x_{11} & \cdots & x_{1n}\\ \vdots & & \vdots\\ x_{m1} & \cdots & x_{mn}\end{bmatrix} \tag{1}$$

据此，考虑洗刷与消毒方法的优点、缺点与适用场景，对5项洗刷与消毒任务对应的方法各指标进行打分(缺点制约程度越高，得分越低，以划归正向型指标集)，得到初始评价矩阵如表4所示，后以此为基础展开计算。

(2) 对原始矩阵归一化处理，得到标准化决策矩阵$\boldsymbol{Y}=\left(y_{ij}\right)_{m\times n}$为

$$y_{ij}=\begin{cases}\dfrac{x_{ij}-\min\limits_{j}\left(x_{ij}\right)}{\max\limits_{j}\left(x_{ij}\right)-\min\limits_{j}\left(x_{ij}\right)} & j\in J_1\\ \dfrac{\max\limits_{j}\left(x_{ij}\right)-x_{ij}}{\max\limits_{j}\left(x_{ij}\right)-\min\limits_{j}\left(x_{ij}\right)} & j\in J_2\end{cases} \tag{2}$$

式中：y_{ij}为归一化后的指标值；J_1为正向型指标集；J_2为负向型指标集。

(3) 确定正理想方案y_j^+和负理想方案y_j^-为

表4　初始评价矩阵

Tab.4　Initial evaluation matrix

任务	位置/环节	方法	优点	缺点	适用场景
洗刷任务	车体外表面	手工擦洗	4	2	3
		高压水枪	4	4	5
		蒸汽清洁	4	3	2
		化学清洗剂清洗	4	2	4
		超声波清洗	4	2	2
	车体内表面(含死角)	手工擦洗	4	2	4
		高压水枪	4	4	4
		蒸汽清洁	4	3	3
		化学清洗剂清洗	4	2	4
		超声波清洗	4	2	2
消毒任务	开箱作业区	高温灭活	4	3	1
		消毒剂灭活	3	2	2
		臭氧灭活	4	4	3
		紫外线照射灭活	4	3	4
	车体外表面	高温灭活	4	2	2
		消毒剂灭活	4	2	3
		臭氧灭活	4	4	2
		紫外线照射灭活	4	4	4
	车体内表面（含死角）	高温灭活	4	2	2
		消毒剂灭活	4	4	4
		臭氧灭活	4	4	3
		紫外线照射灭活	4	4	2

$$\begin{cases} y_j^+ = \max\limits_i \left(y_{ij} \right) \\ y_j^- = \min\limits_i \left(y_{ij} \right) \end{cases} \tag{3}$$

（4）利用熵权确定指标权向量。第j个特征值的信息熵E_j为

$$E_j = -\frac{\sum\limits_{i=1}^{m} f_{ij} \ln f_{ij}}{\ln m} \tag{4}$$

$$f_{ij} = \begin{cases} \dfrac{y_{ij}}{\sum\limits_{i=1}^{m} y_{ij}} & y_{ij} \neq 0 \\ \dfrac{1 + y_{ij}}{\sum\limits_{i=1}^{m} \left(1 + y_{ij} \right)} & y_{ij} = 0 \end{cases} \tag{5}$$

式中：f_{ij}为第j个特征值下第i个方法的指标值的比重。

同时，第j个特征值的权重w_j为

$$w_j = \frac{1 - E_j}{n - \sum\limits_{j=1}^{n} E_j} \tag{6}$$

（5）方法排序。计算各洗刷与消毒方法最大群体效益值S_i为

$$S_i = \sum_{j=1}^{n} \frac{w_j \left(y_j^+ - y_{ij} \right)}{y_j^+ - y_j^-} \tag{7}$$

同时，计算最小个体遗憾值R_i为

$$R_i = \max_j \frac{w_j \left(y_j^+ - y_{ij} \right)}{y_j^+ - y_j^-} \tag{8}$$

此外，计算各备选洗刷与消毒方法的利益比率值Q_i为

$$Q_i = v \frac{S_i - \min S_i}{\max S_i - \min S_i} + (1 + v) \frac{R_i - \min R_i}{\max R_i - \min R_i} \tag{9}$$

式中：$v \in [0,1]$为决策系数，其值越大，表示决策中越注重最大化群体效用，越不注重反对者的个体遗憾，相关研究中一般取0.5，以兼顾群体效益最大化和个体遗憾最小化的均衡折中原则进行方案排序[11]。

最后，将得到的S_i，R_i，Q_i从小到大排列，遵循值越小越优先的原则，对各项任务对应的各个方法进行优劣排序，选定评价指标均为最小的洗刷与消毒方法，针对$k = 1,2,\cdots,5$，分别按上述方法进行计算，得到考虑方法优缺点及适应场景的不同任务内容下洗刷与消毒方法选择如表5所示。

表5　考虑特点及适应场景的不同任务环节下洗刷与消毒方法选择

Tab.5　Selection of cleaning and disinfection methods for different task phases considering characteristics and applicable scenarios

任务	位置	方法
洗刷任务	车体外表面	高压水枪
	车体内表面(含死角)	高压水枪
消毒任务	开箱作业区	臭氧灭活/紫外线照射灭活
	车体外表面	紫外线照射灭活
	车体内表面(含死角)	消毒剂灭活

4　基于流程优化的铁路冷链运输装备智能洗刷与消毒方案

4.1　铁路冷链运输设备洗刷与消毒流程优化

为提升铁路冷链运输设备洗刷与消毒作业的工作

效率，在确定各项任务环节对应洗刷与消毒方法后，考虑各项作业内容相互影响与制约关系，对其洗刷与消毒作业流程进行合理优化[12]。

采用ISM对铁路冷链运输设备洗刷与消毒流程进行优化。该方法多用于处理多任务复杂系统的流程设计与优化，其核心优势在于通过矩阵形式对要素关系进行多层次分解，有效构建因素间的层级依赖性，已广泛应用于供应链管理、公共安全和工业设备维护等领域。例如，在供应链管理中利用ISM优化各个物流环节的先后顺序和依赖关系，提升了物流系统的效率与协调性；在工业设备维护中借助ISM确定设备维护任务的优先级和衔接性，从而提高维护方案的合理性。因此，ISM在铁路冷链设备的洗刷与消毒流程优化中适用性较强，通过对问题要素的提取，结合实践知识与专家经验，利用矩阵等工具，对要素及其相互关系等信息进行处理，最终建立了一个分层的递阶结构模型，可确保流程的合理有序[13]。具体步骤如下。

（1）确定影响关系。在ISM方法中，通常用V，A，X与O表示要素间的直接影响关系，其对应含义为

$$f_{ab}=\begin{cases}\mathrm{V} & \text{要素}a\text{影响要素}b\\ \mathrm{A} & \text{要素}b\text{影响要素}a\\ \mathrm{X} & \text{要素}a\text{与}b\text{互相影响}\\ \mathrm{O} & \text{要素}a\text{与}b\text{互不影响}\end{cases}\tag{10}$$

将表3中不同位置的5项具体任务环节作为要素F_1至F_5，分析各要素间的逻辑关系，重点考虑任务环节作业是否应具备先后性，若存在优先必要性则构成影响，洗刷与消毒作业任务环节间影响关系如表6所示。

表6　洗刷与消毒作业任务环节间影响关系

Tab.6　Influence relationships among cleaning and disinfection operation task phases

V	A	V	V	F_1
X	A	A	F_2	—
A	A	F_3	—	—
V	F_4	—	—	—
F_5	—	—	—	—

（2）建立邻接矩阵。根据表6中各环节的相互关系，建立邻接矩阵，邻接矩阵如表7所示。其中，邻接矩阵中各元素数值的转换规则如下。①当$a=b$时，则$f_{ab}=1$。②当$a\neq b$时，按式⑽，若F_a与F_b间的关系为V，则$f_{ab}=1$且$f_{ba}=0$；若F_a与F_b间的关系为A，则$f_{ab}=0$且$f_{ba}=0$；若F_a与F_b间的关系为X，则$f_{ab}=f_{ba}=1$；若F_a与F_b间的关系为O，则$f_{ab}=f_{ba}=0$。

表7　邻接矩阵

Tab.7　Adjacency matrix

要素	F_1	F_2	F_3	F_4	F_5
F_1	1	1	1	0	1
F_2	0	1	0	0	1
F_3	0	1	1	0	1
F_4	1	1	1	1	1
F_5	0	1	0	0	1

（3）生成可达矩阵并层次化处理。可达矩阵是以矩阵的形式展示有向图中各顶点间经过一定路径长度后可达性的度量。这种矩阵是通过邻接矩阵计算得出的，其计算过程遵循布尔代数的运算法则[14]：①令$\boldsymbol{A}_1=(\boldsymbol{A}+\boldsymbol{I})$，$\boldsymbol{A}_n=(\boldsymbol{A}+\boldsymbol{I})^n$，其中$\boldsymbol{I}$为单位矩阵；②当$\boldsymbol{A}_1=(\boldsymbol{A}+\boldsymbol{I})\neq\boldsymbol{A}_2\neq\cdots\neq\boldsymbol{A}_{n-1}=\boldsymbol{A}_n$时，$\boldsymbol{R}=\boldsymbol{A}_{n-1}$即为可达矩阵。

在建立ISM模型时，需依据影响因素的分层次来重新排序可达矩阵，从而形成一个下三角矩阵，为了简化矩阵，可以在强连通块中只保留一个代表性因素（如删除F_5），从而得到重排序的缩减可达矩阵[15]，缩减排序后的可达矩阵如表8所示，由此可见，重排序缩减矩阵中上一层的因素不能到达下一层。

表8　缩减排序后的可达矩阵

Tab.8　Reduced and sorted reachability matrix

要素	F_2	F_3	F_1	F_4
F_2	1	0	0	0
F_3	1	1	0	0
F_1	1	1	1	0
F_4	1	1	1	1

（4）建立ISM并绘制多阶有向图。根据缩减排序后的可达矩阵，得出各要素间的层次关系，并还原被缩减掉的要素F_5，绘制多级递阶有向图，完成ISM，铁路冷链运输设备洗刷与消毒流程如图2所示。图2中不同位置的5项具体任务环节应按流程顺序进行，其中，车体内表面的洗刷与消毒任务属于强连通块，应同步进行，以提高作业效率。

4.2　铁路冷链运输设备智能化洗刷与消毒方案设计

针对优化后的铁路冷链运输设备洗刷与消毒流程，

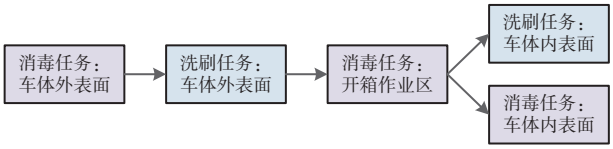


图2　铁路冷链运输设备洗刷与消毒流程

Fig.2　Cleaning and disinfection process of railway cold chain transportation equipment

结合3.2节方法的选择，考虑引入先进技术设备，在完成清扫的基础上，铁路冷链运输设备智能化洗刷与消毒方案设计如下。

（1）车体外表面消毒。在取出集装箱货物之前，使用便携式表面消毒设备对集装箱箱门进行针对性消杀。该设备通过紫外线辐射并采用UVC-LED技术，可快速灭活微生物，具有无化学残留、低能耗和瞬时启动等特点，而且体积小巧方便操作，维护频率低，初期投资回报周期短，在医用设备和食品物流行业的应用已经成功证明具有99.99%的灭菌率和45%的成本节约效果。

（2）车体外表面洗刷。在完成车体外表面消毒后，直接使用高压水枪彻底清洁车体外部，去除所有可见污渍、尘土和外部杂质，保持外观清洁，也保证了洗刷废水已不含病原微生物，可直接排污。高压水枪系统广泛应用于物流车辆的外部清洁中，一些冷链物流公司通过自动高压清洗系统能减少人工成本约30%。

（3）开箱作业区消毒任务。在站台的进货口，设立一个带有新风和负压排风净化消毒系统的隔离区，该系统通过臭氧灭活和新风系统的初级和中级过滤净化外部空气，随后利用紫外线消杀设备处理空气中的病原微生物，再将净化后的空气输送至室内。臭氧消毒系统无化学残留，操作简便，适合封闭环境，且初始投资较低，在食品加工和仓储中被证明可有效延长果蔬存储时间，细菌繁殖率降低98%，有助于确保铁路冷链开箱作业区清洁安全。

（4）车体内表面洗刷与消毒。采用智能化喷淋消杀车，车体上配备广角旋转枪头，车身携带消毒液壶(含易挥发无污染消毒剂)与清洗液壶(装水)，液体通过加压设备射出(压力可调)，能够对车体内部的各个死角进行消毒和清洗，同时车载摄像头将车内实况无线传输至操作人员设备，可遥控对车体内需洗刷消毒位置进行作业。智能喷淋消杀系统已广泛应用于大型货仓的自动清洁，能将人工成本减少40%，设备消毒效果稳定，可确保冷链设备内部的卫生标准。

综上，考虑冷链运输设备特点，结合实际操作过程，细化洗刷和消毒任务环节，优化铁路冷链装备智能洗刷与消杀作业流程，运用多种洗刷与消毒技术手段，形成了全方位精准消杀、多车型广泛适用、自动化集约高效、智能化网联物联、多技术安全可靠的“人员避开＋设备参与＋装备洗刷消毒＋废液无害”闭环的智能洗刷与消毒方案。

5　铁路冷链运输设备智能化洗刷与消毒方案应用案例评估

铁路冷链运输设备智能化洗刷与消毒方案，重点优化了洗刷与消毒作业流程，有效提高了洗刷与消毒技术效率和智能化水平，可广泛应用于各类参与铁路冷链运输设备洗刷与消毒作业的生产与维护部门，有针对性地解决现存相关问题。以下从生产部门与维护部门两大核心应用场景出发，分别评估该方案在作业效率、成本控制及环保合规等方面的实际应用价值。

（1）生产部门(大型生鲜食品企业铁路储运部门、港口铁路冷链物流分拨基地、铁路冷链物流车站及货场等)：在进行货物装卸前后，对铁路冷链运输设备进行全方位洗刷和消毒，减少货物因污染而受损的风险，有效提高货物的安全性；智能化喷淋消杀车和其他自动化设备的应用还可以显著提高清洗与消毒的效率，助力推动生产运转工作高效展开，并减少人力成本和时间成本。

（2）维护部门(机械保温车辆段、铁路冷链设备检修基地等)：重点针对冷藏集装箱、冷藏车、隔热车、隔热箱等铁路冷链运输设备，定期进行全方位清洗与消毒作业，可以延长铁路冷链设备的使用寿命，减少维修和更换成本；高效智能的洗刷和消毒方案中的UVC-LED技术与无污染消毒剂，也更符合洗刷废水的排污环保要求。

在所调研企业应用铁路冷链运输设备智能化洗刷与消毒方案，并将优化结果与调研企业现行各项作业的时间成本和费用成本进行估计比较，既有洗刷消毒方案与智能化方案成本比较如表9所示。

由表9可见，应用铁路冷链运输设备智能化洗刷与消毒方案，全部洗刷与消毒作业消耗时间分别降低约25%与60%(整体降低约55%)，费用分别降低50%与50%(整体降低约50%)。

6　结束语

针对铁路冷链运输设备洗刷消毒作业效率低、人工依赖度高等问题，构建了基于VIKOR-ISM的流程优化方法，并设计了融合环保消杀与物联技术的智能

表9　既有洗刷消毒方案与智能化方案成本比较

Tab.9　Cost comparison between existing cleaning and disinfection scheme and intelligent scheme

方案	全部作业	时间	费用
既有洗刷消毒方案	洗刷作业	20 min	10元(人工)
	消毒作业	2~3 h(不拆箱)	60元左右(不拆箱)
智能化洗刷消毒方案	洗刷作业	15 min	5元(人工)
	消毒作业	1 h(不拆箱)	30元左右(不拆箱)

化作业方案，可显著压缩作业成本，提升洗刷消毒效果与操作安全性，推动铁路冷链运输设备洗刷消毒作业向智能化、精细化转型，有助于强化冷链物流全链条卫生保障能力，为铁路冷链运输设备维护提供了可行的技术路径。

参考文献：

[1] 中国物流与采购联合会. 2025年冷链物流运行数据[R]. 北京：中国物流与采购联合会，2026.

[2] 王　言，周凌云，李　进，等. 铁路冷链物流高质量发展制约因素及实施路径研究[J]. 铁路物流，2024，42(3)：48-53.
WANG Yan，ZHOU Lingyun，LI Jin，et al. Research on the Restrictive Factors and Implementation Path of Railway Cold Chain Logistics High Quality Development[J]. Railway Logistics，2024，42(3)：48-53.

[3] 倪洪强. 上海地区铁路冷链物流发展对策研究[J]. 铁道货运，2020，38(2)：40-44.
NI Hongqiang. A Study on the Development Strategies of Cold-Chain Logistics in the Shanghai Region[J]. Railway Freight Transport，2020，38(2)：40-44.

[4] 刘　杰，白　雪，朱　琦，等. 新冠疫情下西部陆海新通道冷链班列开行优化策略[J]. 铁道货运，2022，40(9)：46-51.
LIU Jie，BAI Xue，ZHU Qi，et al. Optimization Strategy of Cold Chain Express in New Western Land-Sea Corridor under COVID-19 Pandemic[J]. Railway Freight Transport，2022，40(9)：46-51.

[5] 赵　楠，张　炀. 后疫情时代冷链食品管理方面的问题及对策[J]. 食品工业，2022，43(8)：205-208.
ZHAO Nan，ZHANG Yang. Problems and Countermeasures of Cold Chain Food Management in the Post Epidemic Era[J]. The Food Industry，2022，43(8)：205-208.

[6] 国务院应对新型冠状病毒肺炎疫情联防联控机制综合组. 进口冷链食品预防性全面消毒工作方案[J]. 中国病毒病杂志，2021，11(1)：56.

[7] 张德良. 基于用户需求的冷链食品消杀设备设计研究[D]. 武汉：湖北工业大学，2022.

[8] 李智慧，郑　曦，林　岳，等. 一种基于深紫外消杀的智能机器人装置：CN113157025A[P]. 2021-07-23.

[9] 陈志坤，苏　升，柯巍峰，等. 一种港口集装箱环境多角度查验与立体式喷雾消杀装置：CN215188982U[P].2021-12-17：5.

[10] 郭子雪，王兰英. 直觉模糊多属性决策理论方法及应用研究[M]. 北京：科学出版社，2019.

[11] 徐冬梅，徐梦臣，王文川，等. VIKOR法在城市供水方案优选中的应用[J]. 人民长江，2020，51(2)：116-118，159.
XU Dongmei，XU Mengchen，WANG Wenchuan，et al. Application of VIKOR Method in Urban Water Supply Scheme Optimization[J]. Yangtze River，2020，51(2)：116-118，159.

[12] 黄宝静，陈　诚，周凌云，等. 基于Petri网的高铁快运医药冷链作业流程优化及仿真[J]. 铁道运输与经济，2024，46(8)：126-135，160.
HUANG Baojing，CHEN Cheng，ZHOU Lingyun，et al. Optimization and Simulation of Pharmaceutical Cold Chain Workflow of High Speed Rail Express Based on Petri Net[J]. Railway Transport and Economy，2024，46(8)：126-135，160.

[13] JHARKHARIA S，SHANKAR R. IT-Enablement of Supply Chains：Understanding the Barriers[J]. Journal of Enterprise Information Management，2005，18(1)：11-27.

[14] 赵　华，尹贻林. 基于ISM的工程项目合理风险分担影响因素分析[J]. 北京理工大学学报(社会科学版)，2011，13(6)：15-19.
ZHAO Hua，YIN Yilin. An Analysis of Influencing Factors of Reasonable Risk Allocation in Construction Project Based on Interpretative Structural Modeling[J]. Journal of Beijing Institute of Technology (Social Sciences Edition)，2011，13(6)：15-19.

[15] 顾培亮. 系统分析与协调[M]. 天津：天津大学出版社，1998.

（责任编辑：刘宁馨）

Research on Intelligent Cleaning and Disinfection Scheme for Railway Cold Chain Transportation Equipment Based on Process Optimization

YE Yuling[1], ZHU Ziyue[1], GU Ziyue[2], SONG Weiwei[3], ZHOU Wentao[4], HUANG Baojing[5]

(1. Experimental Teaching Center of Transportation Engineering, Tongji University, Shanghai 201804, China; 2. Zibo Train Operation Depot, China Railway Jinan Group Co., Ltd., Zibo 255020, Shandong, China; 3. College of Science & Technology, Ningbo University, Ningbo 315300, Zhejiang, China; 4. Hangzhou Station, China Railway Shanghai Group Co., Ltd., Hangzhou 310000, Zhejiang, China; 5. Transportation & Economics Research Institute, China Academy of Railway Sciences Corporation Limited, Beijing 100081, China)

Abstract: To optimize the cleaning and disinfection process of railway cold chain transportation equipment, a corresponding intelligent operational scheme was designed. By refining the cleaning and disinfection tasks and considering the characteristics and applicable scenarios of the operational methods, the multi-criteria compromise ranking method was adopted to determine the suitable operational method for each task phase. Regarding the mutual influence and restriction relationships among various task phases, the interpretive structural model was used to rationally optimize the overall operational workflow. Furthermore, by establishing a disinfection isolation zone for unpacking operations and introducing an intelligent spraying disinfection vehicle with Internet of Things functions, an intelligent cleaning and disinfection scheme for railway cold chain transportation equipment was proposed. Compared with traditional manual operations, this scheme is expected to overall save operational time by approximately 55% and operational cost by approximately 50%, providing a reference for the development of cleaning and disinfection technology for railway cold chain transportation equipment towards intelligence and high efficiency.

Keywords: Railway Transportation; Cleaning and Disinfection Scheme; Multi-Criteria Compromise Ranking Method; Interpretive Structural Model; Railway Cold Chain Transportation Equipment