

物流冷链消毒设备改进设计与仿真分析

周红宇¹, 于佳惠¹, 肖哲文², 孙萧杰¹, 张学敏¹

(1.湖北工业大学 工业设计学院, 武汉 430070;

2.湖北三环汽车电器有限公司, 武汉 430010)

摘要: **目的** 为强化疫情防控工作, 针对物流冷链行业包裹消毒链工作效率缓慢的问题, 对消毒设备进行改进设计, 提高冷链消毒设备操作时的人机舒适性和工作效率。**方法** 基于人机工程学理论, 对现有物流冷链消毒设备原理与组成结构进行分析, 对消毒设备的功能布局和结构尺寸进行优化。利用 Jack 虚拟仿真软件对改进前、后的冷链消毒设备进行对比, 并进行人机工程仿真验证及评价。**结果** 通过仿真验证得出, 改进后的消毒设备方案增强了人体在不同工作流程中的舒适度, 有效改善了操作人员长期工作时的身体疲劳, 并提高了产品的使用效率。**结论** 冷链消毒设备的改进设计使消毒人员与机器之间形成和谐有效的人机关系, 研究结果可为消毒设备创新设计提供参考, 为疫情防控期间冷链行业的防疫工作提供有效建议。

关键词: 工业设计; 物流冷链消毒设备; 人机工程; Jack

中图分类号: TB472 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2023)16-0220-10

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2023.16.022

Improved Design and Simulation Analysis of Logistics Cold Chain Disinfection Equipment

ZHOU Hong-yu¹, YU Jia-hui¹, XIAO Zhe-wen², SUN Xiao-jie¹, ZHANG Xue-min¹

(1.School of Industrial Design, Hubei University of Technology, Wuhan 430070, China;

2.Hubei Tri-ring Auto-electric Appliance Co., Ltd., Wuhan 430010, China)

ABSTRACT: The work aims to improve the design of logistics cold chain disinfection equipment to improve the man-machine comfort and work efficiency in operation of cold chain disinfection equipment, to solve the slow work efficiency of the parcel disinfection chain in the logistics industry, and strengthen the epidemic prevention and control. Based on the ergonomics theory, the principle and structure of the existing logistics cold chain disinfection equipment were analyzed, and the functional layout and structural dimensions of the disinfection equipment were optimized. Jack virtual simulation software was used to compare the cold chain disinfection equipment before and after improvement, and ergonomic simulation verification and evaluation were carried out. Through the simulation, it was concluded that the improved disinfection equipment scheme enhanced the comfort of human body in different work processes, effectively improved the working fatigue of operators, and effectively improved the efficiency of product use. The improved design of cold chain disinfection equipment can form a harmonious and effective human-computer relationship between disinfection personnel and machines. The research results can provide reference for innovative design of disinfection equipment and effective suggestions for epidemic prevention in the cold chain industry during epidemic prevention and control.

KEY WORDS: industrial design; logistics cold chain disinfection machine; ergonomics; Jack

收稿日期: 2023-03-15

基金项目: 国家重点研发计划子课题资助项目(2018YFD0301303-4); 湖北省教育厅教学研究项目(2021309)

作者简介: 周红宇(1984—), 男, 硕士, 副教授, 主要研究方向为智能装备与工业设计方法。

通信作者: 于佳惠(1998—)女, 硕士生, 主攻智能装备设计与方法。

物流冷链消毒设备是应用于物流行业、可自动运输冷链产品并进行全面消杀的智能设备。大量研究表明, SARS-CoV-2 可以在低温下存活并保持高传染性^[1]。冷链物资需要进行特殊的消毒处理, 避免新冠病毒附着于冷链包裹上使之成为病毒传播的载体^[2], 高效的消杀工作可抑制物流冷链产品运输过程中的病毒传播, 提高消毒人员工作效率, 缓解人工操作疲劳。物流冷链消毒设备的设计优化, 对污染食品及时处置、保障食品安全以及疫情防控都具有重要意义。文献 [3-4] 在消杀原理与处理方法、消毒效果及检验等方面进行了研究, 但对设备的功能、结构布局和人机关系研究存在不足。文中从工业设计角度出发, 将人机工程学原理作为设计基础, 在研究初期发现设备弊端, 有针对性地进行优化, 将人的物理尺寸和行为特征作为参考, 使功能区域和设备结构的人机关系更加协调、统一^[5]。应用 Jack 软件进行人机工程仿真验证, 提高冷链消毒设备的使用效率, 提升人机操作的舒适度, 在节约成本的同时提高产品的研发效率。

1 物流冷链消毒设备雾化消毒原理及结构分析

物流冷链消毒设备由 4 个部分组成: 运输系统、雾化系统、废气处理系统及操作系统^[6]。传送带、输送管道和电机属于运输系统; 消毒仓、药剂传输单元、过滤单元属于雾化系统 (消毒仓内安装多个雾化喷头, 消毒液经超声波雾化技术打散成大小为 30~0 μm 的雾状微粒, 通过导向板作用均匀覆盖于冷链产品外包装上, 系统内输送的消毒液由设备底部的储液箱供给); 废气处理系统由废弃管道、吸附动力装置和废液回收盘组成; 操控系统包括计数器、测速器、操作台与显示屏, 消毒人员利用该部分控制消毒设备、观察包裹消杀状态, 见图 1。

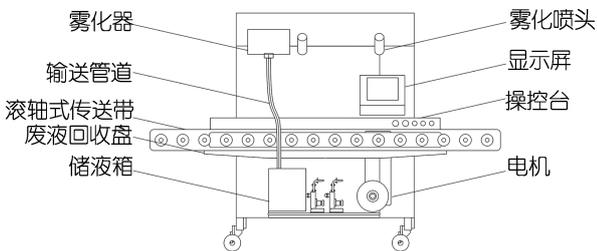


图 1 消毒机结构
Fig.1 Structure of disinfection machine

2 基于人机工程学原理的分析与优化

2.1 消毒设备人机交互分析与需求解读

物流冷链消毒环节离不开操作人员的管理与控制, 轻体力作业的人机交互分析主要为优化操作流程和改善人体生理心理感受^[7]。防疫期间大量冷链包裹

待消杀, 消毒人员不仅工作量大并且工作时间较长, 通过分析消毒设备的使用流程和使用者操作姿势, 评估方案的人机适配性, 得出不足, 从而提高消毒设备使用中的人机工效, 降低操作人员疲劳度。物流冷链消毒设备使用流程为: 向储液箱内加入足量消毒液, 将设备传送带与包裹运载平台对接, 包裹经传送带送至消毒仓后工作人员通过操控台和显示屏来控制、观察消毒进程, 消杀完成的包裹被输出消毒仓, 定期清理废液回收盘, 见图 2。

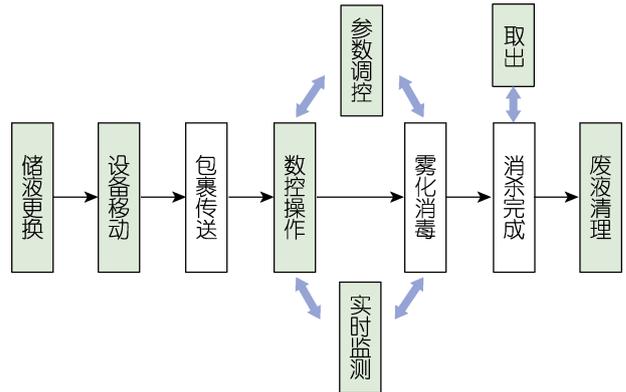


图 2 消毒设备使用流程
Fig.2 Use process of disinfection equipment

2.2 消毒设备需求转换与求解

通过研究使用流程及用户需求, 对设备人机交互过程中的痛点进行聚焦, 基于 KJ 法对目标人群进行研究, 以“使用消毒设备过程中影响消毒人员的操作感受与工作效率的因素有哪些”为研究点, 采用访谈法对消毒人员进行访谈研究, 分别记录 25 位消毒人员提出的在使用设备时的痛点, 其中有 19 位消毒人员认为影响操作感受与工作效率的因素与设备的功能布局、整体尺寸和设备自动化程度相关; 有 17 位消毒人员认为影响操作感受与工作效率的因素与功能布局和显示屏角度相关; 有 10 位消毒人员认为影响操作感受与工作效率的因素与设备移动和交互方式相关。因此, 将 25 位消毒人员所列举出来的 50 条影响因素进行相似聚类整合, 在目标层 (A_1) 冷链消毒设备最优解设计方案下定义准则层因素, 可分为功能准则 (B_1) 其中包括自动消杀、实时监控、终端操控; 人机准则 (B_2) 其中包括设备整体尺寸合理、补液方便、显示屏高度符合人机、屏幕倾角舒适、操作台在可达域内、清洁方便、移动方便、功能布局合理; 安全准则 (B_3) 其中包括无接触消杀、边缘柔和、材料安全, 见图 3。

根据准则层的分类描述, 将所收集的原始需求整理并排入需求列表, 信息整理后进行问卷调研, 采用 7 级里克特量表制作调研问卷, 向 30 名目标用户收集需求因素作为评判数据, 其中包括消毒人员 25 名, 设计师 5 名。构造判断矩阵 $A_1=(a_{ij})_{n \times n}$, 其中 $a_{ji}=1/a_{ij}$,

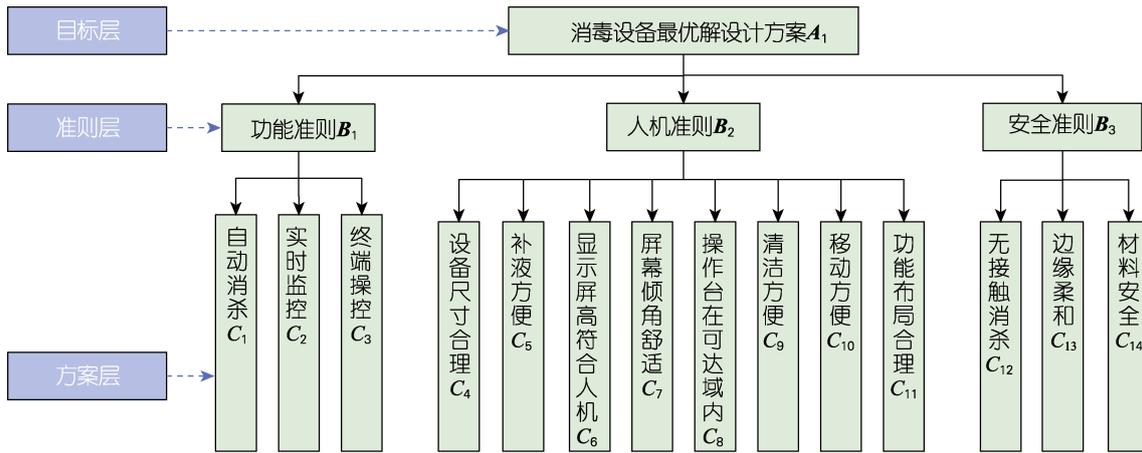


图3 消毒设备设计指标评价体系

Fig.3 Evaluation system for design indicators of disinfection equipment

使用式(1)列向量平均值算法计算矩阵中的因素权重^[8-9], w 表示各影响因素的权重。

$$W_i = \frac{\sum_{j=1}^n a_{ij}}{\sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n a_{ij}}, (i=1, 2, \dots, n) \quad (1)$$

通过设计判断矩阵,将消毒设备的设计影响因素进行重要程度对比,通过多轮打分,求出消毒设备最优设计方案判断矩阵及权重,见表1—4。

表1 冷链消毒设备最优设计方案判断矩阵及权重
Tab.1 Matrix and weight for optimal design judgement of cold chain disinfection equipment

消毒机	B_1	B_2	B_3	w_i
B_1	1	1/4	1/3	0.122 0
B_2	4	1	2	0.558 4
B_3	3	1/2	1	0.319 6

表2 功能准则判断矩阵及权重
Tab.2 Functional criteria judgement matrix and weight

消毒机	C_1	C_2	C_3	w_i
C_1	1	3	5	0.637 0
C_2	1/3	1	3	0.258 3
C_3	1/5	1/2	1	0.104 7

表3 人机准则判断矩阵及权重
Tab.3 Ergonomic criteria judgement matrix and weight

消毒机	C_4	C_5	C_6	C_7	C_8	C_9	C_{10}	C_{11}	W_i
C_4	1	2	1/2	1/3	2	3	3	1/7	0.100 4
C_5	1/2	1	1/2	1/2	1/3	7	3	1/2	0.093 6
C_6	2	2	1	2	2	5	4	1/3	0.166 9
C_7	3	2	1/2	1	2	3	5	1/3	0.149 0
C_8	1/2	3	1/2	1/2	1	3	5	1/3	0.110 7
C_9	1/3	1/7	1/5	1/3	1/3	1	1/2	1/4	0.033 0
C_{10}	1/3	1/3	1/4	1/5	1/5	2	1	1/4	0.037 9
C_{11}	7	2	3	3	3	4	4	1	0.308 5

表4 安全准则判断矩阵及权重
Tab.4 Security criteria judgement matrix and weight

消毒机	C_{12}	C_{13}	C_{14}	w_i
C_{12}	1	3	3	0.593 6
C_{13}	1/3	1	2	0.249 3
C_{14}	1/3	1/2	1	0.157 1

将功能、人机和安全准则层的各因素层权重与对应的准则层权重相乘计算出综合权重并排序,见表5。

表5 冷链消毒设备需求综合列表
Tab.5 Comprehensive list of requirements for cold chain disinfection equipment

准则层 (A_1) (权重)	指标层		综合权重	综合排序
	指标因素	权重		
B_1 (0.122 0)	C_1	0.637 0	1	6
	C_2	0.258 3	2	11
	C_3	0.104 7	3	14
B_2 (0.558 4)	C_4	0.100 4	5	8
	C_5	0.093 6	6	9
	C_6	0.166 9	2	3
	C_7	0.149 0	3	4
	C_8	0.110 7	4	7
	C_9	0.033 0	8	13
	C_{10}	0.037 9	7	12
	C_{11}	0.308 5	1	2
B_3 (0.319 6)	C_{12}	0.593 6	1	1
	C_{13}	0.249 3	2	5
	C_{14}	0.157 1	3	10

对得出的数据进行一致性检验,通过式(2)验证权重排序的合理性,计算可得 CR_{A1} 为 0.017 6, CR_{B1} 为 0.037 0, CR_{B2} 为 0.096 6, CR_{B3} 为 0.051 6 结果均小于 0.1,通过一致性检验。

$$CI = \frac{\lambda_{\max} - n}{n - 1}; CR = \frac{CI}{RI} < 0.1 \quad (2)$$

式中: λ_{\max} 为最大特征值; n 为判断矩阵的阶数。

通过分析冷链消毒设备的功能、人机、安全准则与需求筛选, 依照准则层各因素的权重排序, 在功能准则层, 需优先考虑自动消杀和实时监控功能; 在人机准则层, 产品要具备合理的功能布局, 显示屏高度及倾角、操作区域等应符合人机工程学要求; 在安全准则层, 采用无接触式消毒转运载货平台, 人机操控接触区域边缘采用圆角处理。

2.3 设备功能结构设计优化

冷链消毒设备的使用方式属于站姿近身作业, 显示屏与操控台未集中于操控模块会影响使用效率, 需进一步改进。原有消毒设备还存在运输模块较短, 消杀效率不高; 储液箱外露于设备侧面, 设备底部空间未得到合理利用且影响整体美观等问题。将功能分区重新梳理, 改进后的设备在提高使用效率和改善操作舒适度的同时, 加强产品整体感和美感; 操作模块位于消毒设备右侧, 显示屏设计为倾斜结构, 便于操作人员观察包裹消杀状态; 底部为收纳区域, 内部可放置补液箱并增加补液箱容量, 减少消毒人员补液频率。将设备功能模块进行主次划分, 依据人机交互操作频次, 置观察、操控、补液等区域于消毒人员可视域和可达域范围内, 保证人机交互重点区域操作高效。设备功能结构优化后整体见图 4。

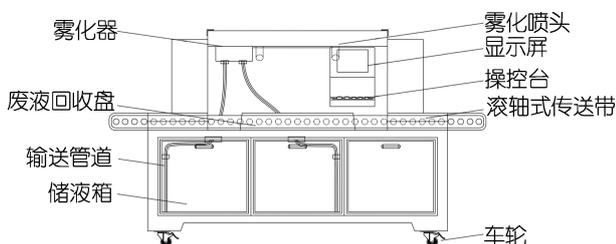


图 4 改进后的整体结构
Fig.4 Improved overall structure diagram

2.4 人机尺寸改进

人机工程学可根据人体的结构和技能特点对工业产品进行设计和优化, 实现产品使用过程中与人类活动的有效结合及产品体验的有效提升^[10]。人机交互设计优化要点对于产品尺寸、结构、功能设计有一定的辅助作用^[11]。消毒人员操作设备时的外界干扰因素导致操作指向性较差, 科学的设备结构尺寸能提高使用者操作效率, 初始冷链消毒设备尺寸参考, 见表 6。

表 6 冷链消毒设备尺寸参考

Tab.6 Size reference of cold chain disinfection equipment

尺寸类型	长/mm	宽/mm	高/mm	倾角/(°)
显示屏	250	160	120	35
操作台	320	80	60	45
储液箱	660	1 000	550	—
传送带	2 820	900	130	—

合理的人机尺寸设计能将人和设备组合成和谐有效的人机工程系统。冷链消毒设备需使用者站姿操作, 要充分考虑视野范围是否符合人机工程学标准。操作区域显示屏是查看包裹消杀状态的显示装置, 倾角设置不当会导致消毒人员工作姿势不便。依据人机工程学标准, 显示屏应设置在垂直方向、水平视线以下 $0^{\circ}\sim 30^{\circ}$ ^[12], 显示屏倾角由原来的 35° 优化为水平视线以下 15° 。

产品尺寸设计分为 I 型、II 型和 III 型^[13]。消毒设备属于 III 型 (平均尺寸设计) 产品, 参考颜声远编著的《人机工程与产品设计》, 选用男性和女性 P_{50} 身体数据作为产品尺寸设计的依据^[14], 考虑到消毒人员由于长时间工作, 无法保证身体随时处于挺立状态。因此, 采用放松时的人体数据作为消毒设备在设计中的尺寸依据。男性 P_{50} 站姿眼高为 1 568 mm 加穿鞋修正值 25 mm, 减去姿势修正值 10 mm, 得出 1 583 mm 为男性放松状态下站姿眼高均数; 女性 P_{50} 站姿眼高为 1 454 mm 加穿鞋修正值 20 mm, 减去姿势修正值 10 mm, 得出 1 464 mm 为女性放松状态下站姿眼高均数^[15], 可作为消毒设备显示屏设计参考。显示屏高度应设置于 1 233 mm 至 1 770 mm, 以满足消毒人员的观察需求, 通过对已有冷链消毒设备测量得出, 显示屏下方距地面 1 160 mm, 低于消毒人员舒适操作的高度范围, 需做进一步调整。

对于操作台的高度设置, 取男性和女性 P_{50} 站姿肘高平均值作为设备操控台的尺寸设计依据, 分别加穿鞋修正值 25 mm 和 20 mm, 减去操作功能修正量 12 mm, 得出 1 037 mm 为男性 P_{50} 站姿肘高; 968 mm 为女性 P_{50} 站姿肘高。男性前臂长 P_{50} 数据为 237 mm, 手长 183 mm, 上臂长 313 mm, 女性 P_{50} 前臂长 213 mm, 手长 171 mm, 上臂长 284 mm。根据 GB/T12985 消毒人员手指在操作触摸屏时弯曲程度不大, 可不作修正; 手指按操作台按钮时稍有弯曲, 手功能长减少 12 mm^[16], 即男性前臂垂直方向的最佳活动区间为 1 001~1 453 mm, 女性前臂垂直方向的最佳活动区间为 935~1 346 mm, 取男女最佳活动区间集合的交集为操作台高度设计的参考范围, 即 1 001~1 346 mm。经测量操作台距离地面的高度为 920 mm, 因此不符合消毒人员操作最佳高度要求。结合设备操控模块人机尺寸的分析及消毒人员操作舒适度的要求, 消毒设备具体区域高度划分, 见表 7。

对传送带高度设置, 考虑穿鞋修正量, 男性 P_{50} 手功能高度为 766 mm、女性 P_{50} 手功能高度为 729 mm,

表 7 设备模块区域高度划分

Tab.7 Height division of equipment control area

高度范围类型	尺寸数值
操控模块高度范围/mm	1 001~1 770
操控台操作区域高度范围/mm	1 001~1 364
显示屏区域高度范围/mm	1 406~1 770

因搬运冷链包裹需消毒人员手指大幅度弯曲,故手功能减少 25 mm,男性与女性前臂垂直方向的最佳运动范围分别为 732~1 173 mm 和 698~1 098 mm,即消毒人员拿取冷链包裹的最佳操作范围是 732 mm~1 098 mm。经测量消毒设备的传送通道底部距地面高度为 890 mm,符合操作最佳高度;女性 P₅₀ 站姿状态能够推拉补液箱箱门的最低高度数据为 586 mm,未达到该高度时用户则需要蹲下推拉箱门,影响使用感受^[17],补液箱箱门拉手高度为 440 mm,低于手功能操作舒适范围,

因此需进行改良。

结合文中对冷链消毒设备各部分人机尺寸的分析与操作舒适度的要求,设计改良后的物流冷链消毒设备尺寸,见表 8。

将消毒设备操控台下沿距地面的高度改进为 1 120 mm,操控区域显示屏下沿距地面高度优化为 1 350 mm,传送带高度优化为 940 mm,补液箱箱门拉手位置改为箱门上部,距地面 750 mm。依据人机尺寸设计改良前、后的消毒设备尺寸对比,见图 5。

表 8 冷链消毒设备优化后尺寸

Tab.8 Optimized size of cold chain disinfection equipment

尺寸类型	显示屏高度/mm	显示屏倾角/(°)	操控台高度/mm	传送带高度	补液箱箱门拉手高度/mm	消毒设备总高度/mm
原始数值	1 160	45	920	890	440	1 590
合理范围	1 350~1 600	15~40	960~1 312	720~1 020	527~1 055	>1 400
优化后数值	1 350	15	1 120	940	750	1 630

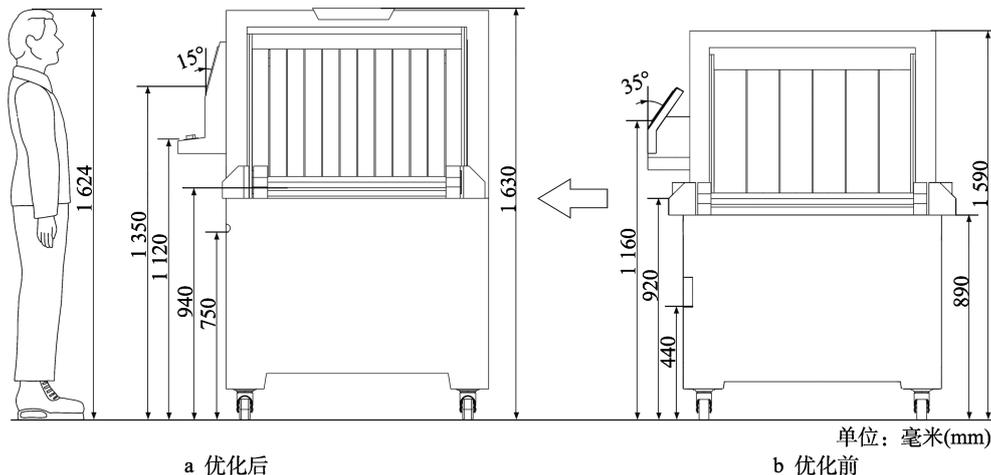


图 5 设计优化前、后的消毒设备尺寸对比

Fig.5 Size comparison of disinfection equipment before and after design optimization

3 人机工效模拟与仿真分析

3.1 Jack 人机系统构建与可视域评价

临床研究表明,长期站立或者弯腰工作会导致腰肌劳损^[18]。在 Jack 仿真软件中创建人体数字模型可用于人因工效分析,本研究通过对消毒人员搬运包裹和操作设备的姿势进行仿真^[19],验证消毒设备设计方案的人机结构是否合理。在 Jack 数据库中构建以中国成年人尺寸为标准的人体数字模型^[20],取男性和女性 P₅₀ 身体数据,分别为男性身高均数 1 678 mm,质量平均值 59 kg 和女性身高均数 1 570 mm,质量平均值 52 kg。将参数化建模软件中的三维实体置于 Jack 仿真环境,建立起物流冷链消毒设备人机系统。

消毒人员工作时眼部的可视域是消毒设备显示屏设计是否合理的衡量标准,在 Jack 软件中调节人体模型姿势及眼部注视点,利用 Visual Fields 工具得

到人的最佳认读视野,40°圆锥角为人的理想视锥范围,通过仿真验证可得改进前的设备显示屏不符合理想视觉范围,未能被 40°圆锥角完全覆盖,且显示屏高度较低时,观察舒适度较差。消毒设备改进后,显示屏倾角与高度位于人体模型观察时的最佳可视域范围内,屏幕可被 40°圆锥角覆盖,消毒人员观看屏幕时较为舒适,见图 6。

3.2 消毒人员工作姿势分析

在 Jack 仿真中,通过 Ovako 对消毒人员使用改进前、后消毒设备的工作姿势疲劳度进行对比分析,针对以下有负载任务的部位进行工作姿势模拟:上肢、下肢和背部。结果表示,消毒人员在使用改进前的设备时工作姿势可能对肌肉骨骼系统产生有害影响,评级为 2;设备改进后使用者在工作状态下的操作动作较为舒适,评级为 1,见图 7。结果表明消毒设备优化后可有效降低消毒人员的工作姿势疲劳度。

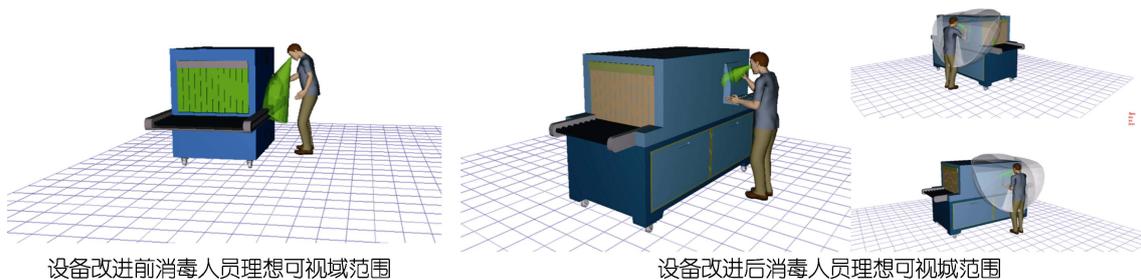


图 6 可视域评价
Fig.6 Visual field evaluation

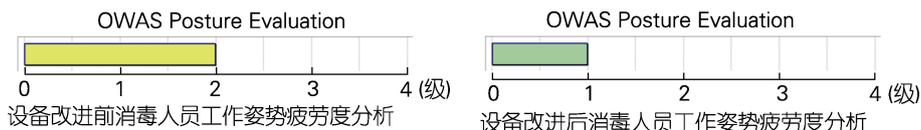


图 7 设备改进前、后消毒人员工作姿势疲劳度分析
Fig.7 Fatigue analysis of working posture of disinfection personnel before and after equipment improvement

3.3 静态强度预测

静态强度预测是对消毒人员工作姿势进行预测的仿真工具。通过静态强度预测,统计消杀工作中能保持同一动作的消毒人员人数占比。设备改进前、后预测结果对比如图 8 所示, Percent Capables 表示在使用优化后的消毒设备时,臀部和踝关节能够保持同一动作的人数有所提升,手腕和臀部两个部位在指定姿势测试中未能达到 100%;在此强度下消毒人员能在肘部、肩部、躯干、膝盖和踝关节姿势测试中达到 100%。

3.4 下背部受力分析

下背部分析即人员在指定条件下,下背部随人体脊椎受力改变而产生的影响。将仿真结果与 NIOSH 标准对比,得出消毒人员工作状态下姿势是否合理的结论,减少消毒人员在工作时下背部超负荷所引起的肌体受损问题。通过 Low Back Analysis 分析及计算可得 L4/L5 脊椎处压力,消毒人员在使用原有设备搬运物流包裹时下背部脊椎受力为 1 097 N;在消毒设备改进后,相同工作状态下背部脊椎受力为 432 N,对比 NIOSH 推荐压力极限(3 400 N),远小于压力

极限,表示消毒人员工作姿势受伤风险较小,脊柱承压良好,肌肉拉力和脊柱转矩均处于正常范围内,如图 9 所示。设备尺寸高度设计合理,消毒人员可保持此姿势进行工作。

4 方案展示与评价

4.1 概念方案设计展示

改进后的消毒设备在仿真测试中各项结果均优于原有设备,依据改进后的消毒设备尺寸进行方案设计,最终确定三款设备方案,见图 10。为匹配权重排序结果和用户需求,设计方案从功能出发,增加自动监测功能、提升设备使用率、提高消毒设备消杀效率;从人机角度出发,对消毒设备结构功能进行重新布局,各区域尺寸高度设计改良,提升用户使用感受;从安全角度出发,改变了现有设备锋利的棱角,选用防腐环保的材料,以保障使用者的安全作业。

4.2 模糊综合评价

冷链消毒设备方案评估采用模糊综合评价法,可

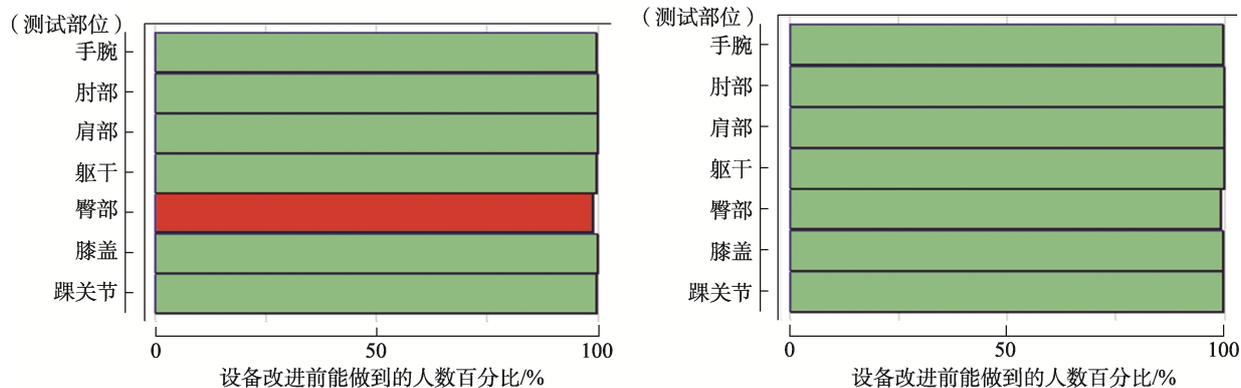


图 8 设备改进前、后消毒人员静态强度预测
Fig.8 Prediction of static strength of disinfection personnel before and after equipment improvement

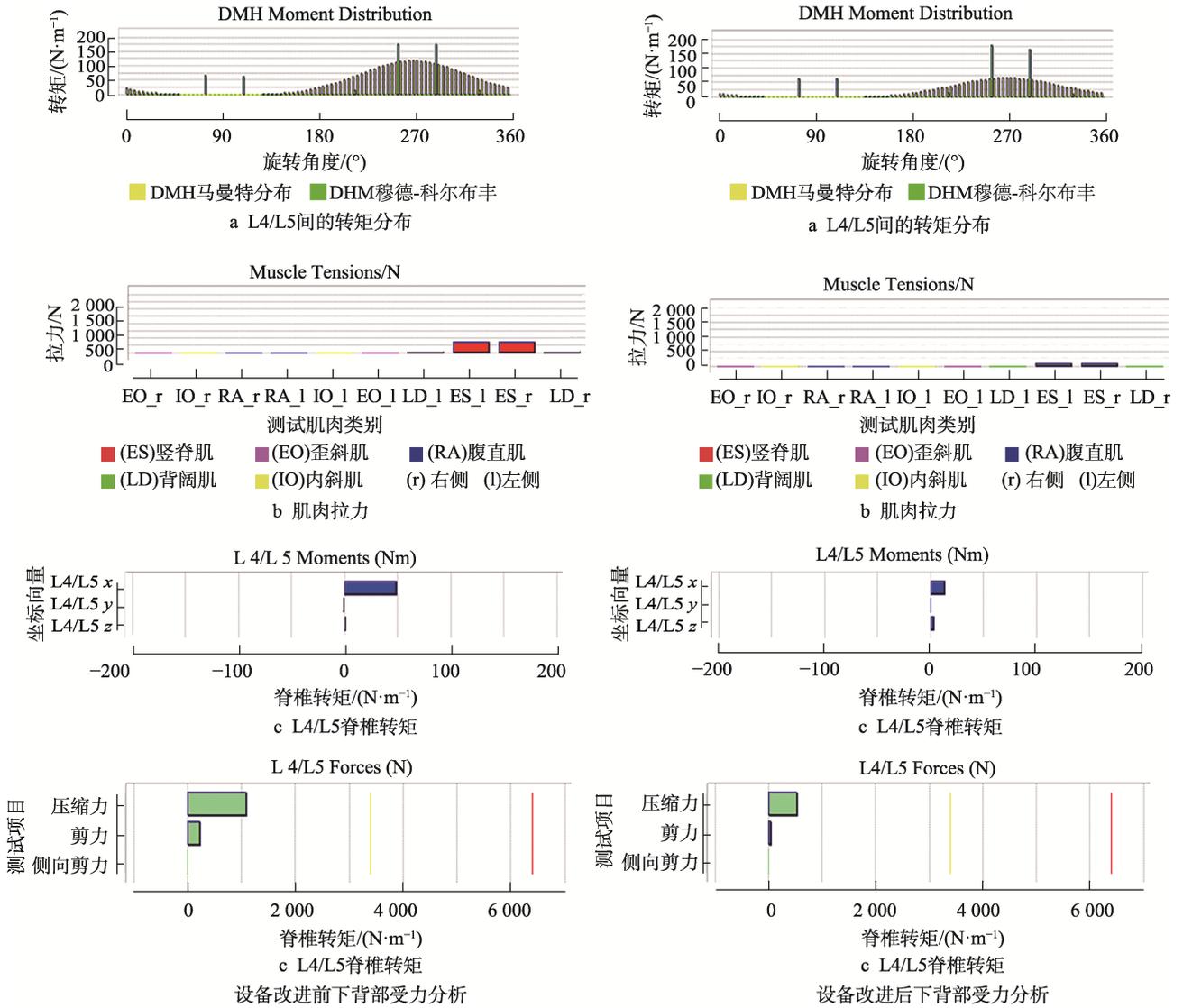


图9 设备改进前、后下背部受力分析
 Fig.9 Lower back force analysis before and after equipment improvement



图10 方案设计展示
 Fig.10 Project design exhibition

有效解决评价过程中无法量化的复杂问题,如设计师主观因素,环境干扰因素等^[21]。设计方案评估要素集由5名专家打分组成,用 $u=\{v_1, v_2, v_3, v_4\}$ 表示,依次为准则层中的功能准则、人机准则和安全准则。确定评估要素子集确定为 $q_i=\{q_{ij}\}(i,j=1,2,3,4)$;接下来,明

确专家评价标准与等级,规定评语集 $K=\{K_1, K_2, K_3, K_4\}=\{\text{I级, II级, III级, IV级}\}$,用来评估各项指标要素;为各评语集赋值,确定评语向量 $\alpha=(90, 80, 60, 40)^T$,分别代表I级, II级, III级, IV级。整理前期数据,目标层 $w_A=(0.122\ 0\ 0.558\ 4\ 0.319$

6); 功能准则 $w_{B1}=(0.6370 \ 0.2583 \ 0.1047)$; 人机准则 $w_{B2}=(0.1004 \ 0.0936 \ 0.1669 \ 0.1490 \ 0.1107 \ 0.0330 \ 0.0379 \ 0.3085)$; 安全准则 $w_{B3}=(0.5936 \ 0.2493 \ 0.1571)$ 。

对第一款冷链消毒设备方案, 5 名专家在评价矩阵中对因素层的要素进行打分评定, D_1, D_2, D_3 分别代表着功能、人机、环境的模糊综合评价矩阵。

$$D_1 = \begin{bmatrix} 0.4 & 0.4 & 0.2 & 0 \\ 0.6 & 0.2 & 0.2 & 0 \\ 0.4 & 0.4 & 0.2 & 0 \end{bmatrix}$$

$$D_2 = \begin{bmatrix} 0.4 & 0.4 & 0.2 & 0 \\ 0.4 & 0.2 & 0.4 & 0 \\ 0.6 & 0.2 & 0.2 & 0 \\ 0.6 & 0.2 & 0.2 & 0 \\ 0.4 & 0.4 & 0.2 & 0 \\ 0.4 & 0.4 & 0.2 & 0 \\ 0.4 & 0.2 & 0.4 & 0 \\ 0.6 & 0.2 & 0.2 & 0 \end{bmatrix}$$

$$D_3 = \begin{bmatrix} 0.4 & 0.4 & 0.2 & 0 \\ 0.4 & 0.2 & 0.4 & 0 \\ 0.4 & 0.4 & 0.2 & 0 \end{bmatrix}$$

依据各影响因素权重, 计算出三款物流冷链消毒设备设计方案的模糊评价结果:

$$P_1 = w_{B1} \times D_1 = (0.4517 \ 0.3483 \ 0.2000 \ 0)$$

$$P_2 = w_{B2} \times D_2 = (0.5249 \ 0.2488 \ 0.2263 \ 0)$$

$$P_3 = w_{B3} \times D_3 = (0.4000 \ 0.3501 \ 0.2499 \ 0)$$

依照结果, 二级模糊评价矩阵如下:

$$P = \begin{bmatrix} P_1 \\ P_2 \\ P_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0.4517 & 0.3483 & 0.2000 & 0 & 0 \\ 0.5249 & 0.2488 & 0.2263 & 0 & 0 \\ 0.4000 & 0.3501 & 0.2499 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

求得三款物流冷链消毒设备设计方案的最后得分。

综合评价权重向量为: $W=w_A \times P=(0.4760 \ 0.2933 \ 0.2306 \ 0)$;

采取百分制评价运算对第一款冷链消毒设备方案进行计算, 结果为: $M=W \times \alpha = 80.14$;

因而第一款消毒设备方案的最后得分是 80.14。

用此方法推算可得第二款方案得分为 79.90, 第三款方案得分为 76.36。考虑使用者需求并分析结果, 最终确定第一款消毒设备为最优方案。

为进一步适配用户需求, 设计方案经过操作人员和结构工程师二次评审, 优化后的设备操作人员在测试中体验较好, 操作区域功能集成有效解决了消毒人员因干扰因素造成的操作指向性不佳的问题, 消毒设备各区域尺寸优化缓解了消毒人员的工作疲劳, 方案整体可行性较强。最终的实施方案按照设计的结构尺寸和功能布局进行生产, 但由于受企业独立的想法和实际成本的限制, 对方案的装饰性模块进行了适当简

化, 实际效果见图 11。



图 11 实物装配测试
Fig.11 Physical assembly test

5 结语

目前疫情防控成为常态化, 物流冷链行业也受到高度关注。冷链消毒设备作为物流行业新兴产品需要不断优化与创新。本方案经过仿真测试结果呈现较好, 最终落地生产, 操作人员在实际测试中体验良好, 消毒设备的优化设计有效提高了消杀效率, 缓解了消毒人员的工作疲劳, 通过分析改进后的设备得出以下研究结论。

1) 采用功能整合—结构优化—人机交互的研究思路进行冷链消毒设备的设计改良。以人机工程学为基础, 设备功能根据技术原理整合分区, 设备结构依照使用者的操作姿势调整改进, 设备人机交互依据平均尺寸设计, 有效提高物流冷链消毒设备工作效率, 提升人机交互舒适性与安全性。

2) 冷链消毒设备人机交互优化设计的关键参数由技术原理、使用流程结合仿真测试的研究路径得出, 将改进前、后的设备采用 Jack 虚拟仿真软件进行验证分析, 得出优化后的设备功能结构合理, 使用者操作更为舒适安全的研究结果。

3) 文中通过优化操作区域的结构布局、显示屏倾角, 提高了消毒人员的操作舒适性; 通过改进消毒设备补液箱尺寸、箱门拉手高度、操控台高度和显示区域高度, 在工作状态下消毒人员的操作姿势有效改善, 设备的人机交互体验得到提升, 设备使用效率有效提高。

消毒设备的人机工程设计对装备类产品设计人性化提供了一定参考性, 后续的研究会基于产品落地后在实际操作中的反馈进行调整, 对冷链消毒设备不断进行迭代与优化。

参考文献:

[1] 张玮珊, 胡新玲, 律娜, 等. 新型冠状病毒对冷链运

- 输食品质量安全的影响[J]. 食品安全质量检测学报, 2021, 12(17): 6735-6742.
- ZHANG Wei-shan, HU Xin-ling, LYU Na, et al. Influence of Novel Coronavirus on Food Quality and Safety in Cold Chain Transportation[J]. Journal of Food Safety & Quality, 2021, 12(17): 6735-6742.
- [2] 思雨. 加强进口冷链食品的检测和消毒 有效防范病毒通过国际物流传入国内——国务院联防联控机制就冷链食品管理与冬季食品安全有关情况举行发布会[J]. 中国食品, 2020(23): 24-29.
- SI Yu. Strengthening the Detection and Disinfection of Imported Cold Chain Foods and Effectively Preventing Viruses from being Introduced into China through International Logistics—The State Council Joint Prevention and Control Mechanism Held a Press Conference on Cold Chain Food Management and Winter Food Safety[J]. China Food, 2020(23): 24-29.
- [3] 章舜玮, 杨剑豪, 陈英姣, 等. 过氧化氢雾化消毒机对采供血机构终末消毒效果的观察[J]. 中国输血杂志, 2021, 34(5): 532-535.
- ZHANG Shun-wei, YANG Jian-hao, CHEN Ying-jiao, et al. Terminal Disinfection Effect of Hydrogen Peroxide Atomization Sterilizer in Blood Centers[J]. Chinese Journal of Blood Transfusion, 2021, 34(5): 532-535.
- [4] 张海军. 一种超声波雾化消毒机: CN213468409U[P]. 2021-06-18.
- ZHANG Hai-jun. Ultrasonic Atomization Sterilizer: CN213468409U[P]. 2021-06-18.
- [5] 徐江华, 邱吉尧. 基于人机工程学的飞机经济舱座椅舒适性设计研究[J]. 包装工程, 2021, 42(18): 403-409, 422.
- XU Jiang-hua, QIU Ji-yao. Design and Research on Comfort of Economy Class Seat Based on Ergonomics[J]. Packaging Engineering, 2021, 42(18): 403-409, 422.
- [6] 戴彦榛, 王文联, 孙道鸣. 一种冷链产品消毒机: CN112691222A[P]. 2021-04-23.
- DAI Yan-zhen, WANG Wen-lian, SUN Dao-ming. Cold-Chain Product Sterilizer: CN112691222A[P]. 2021-04-23.
- [7] 杨勇强, 李小莹, 李静. 食品生产包装作业的人机工程学分析[J]. 包装工程, 2015, 36(3): 85-89.
- YANG Yong-qiang, LI Xiao-ying, LI Jing. Ergonomics Analysis of Operations in Food Production and Packaging[J]. Packaging Engineering, 2015, 36(3): 85-89.
- [8] 吕跃进. 基于模糊一致矩阵的模糊层次分析法的排序[J]. 模糊系统与数学, 2002, 16(2): 79-85.
- LYU Yue-jin. Weight Calculation Method of Fuzzy Analytical Hierarchy Process[J]. Fuzzy Systems and Mathematics, 2002, 16(2): 79-85.
- [9] 邓雪, 李家铭, 曾浩健, 等. 层次分析法权重计算方法分析及其应用研究[J]. 数学的实践与认识, 2012, 42(7): 93-100.
- DENG Xue, LI Jia-ming, ZENG Hao-jian, et al. Research on Computation Methods of AHP Wight Vector and Its Applications[J]. Mathematics in Practice and Theory, 2012, 42(7): 93-100.
- [10] FAN Xin. Research on the Application of Computer Ergonomics in Industrial Product Design[J]. Journal of Physics: Conference Series, 2021, 1915(3): 032044.
- [11] TOSI F. Ergonomics in Design and Design in Ergonomics[J]. Work, 2020, 66(4): 909-911.
- [12] 叶涛, 陈健, 邱变变, 等. 老年人智能药箱人机工程设计[J]. 机械设计, 2019, 36(10): 140-144.
- YE Tao, CHEN Jian, QIU Bian-bian, et al. Ergonomic Design of Intelligent Medicine Box for the Elderly[J]. Journal of Machine Design, 2019, 36(10): 140-144.
- [13] 金鑫, 张绍兵, 龚勇镇, 等. 基于人机工程的踏板电动车儿童安全座椅设计[J]. 包装工程, 2019, 40(20): 137-141.
- JIN Xin, ZHANG Shao-bing, GONG Yong-zhen, et al. Design of Children's Safety Seat on Electric Bike Based on Ergonomics[J]. Packaging Engineering, 2019, 40(20): 137-141.
- [14] 颜声远, 许彧青, 陈玉. 人机工程与产品设计[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 2017.
- YAN Sheng-yuan, XU Yu-qing, CHEN Yu. Ergonomics and Product Design[M]. Harbin: Harbin Institute of Technology Press, 2017.
- [15] 周茂, 刘明明, 刘全东, 等. 核电厂主控制室人因分析中的人体尺寸修正[J]. 上海交通大学学报, 2019, 53(S1): 17-23.
- ZHOU Mao, LIU Ming-ming, LIU Quan-dong, et al. Modification of Human Body Size in Human Factor Analysis of Main Control Room of Nuclear Power Plant[J]. Journal of Shanghai Jiao Tong University, 2019, 53(S1): 17-23.
- [16] GB/T12985—1991 在产品设计中应用人体尺寸百分位数的通则[S].
- GB/T12985—1991 General Principles for Applying Percentile of Human Size in Product Design[S].
- [17] 谢宗欢, 邬同舟, 安芳, 等. 电子存储柜人机工程分析与改良设计[J]. 机械设计与制造工程, 2014, 43(5): 54-56.
- XIE Zong-huan, WU Tong-zhou, AN Fang, et al. The Analysis and Improvement of Electronic Locker Based on Human- Machine Engineering[J]. Machine Design and Manufacturing Engineering, 2014, 43(5): 54-56.
- [18] 苏君, 杨帆, 熊毅. 腰部助力支撑外骨骼设计与评估研究[J]. 机械设计, 2021, 38(11): 108-114.
- SU Jun, YANG Fan, XIONG Yi. Study on Design and Evaluation of Waist-Supporting Exoskeleton[J]. Journal

- of Machine Design, 2021, 38(11): 108-114.
- [19] SU Jun, YANG Fan, XIONG Yi. Study on Design and Evaluation of Waist-Supporting Exoskeleton[J]. Mechanical Design, 2021, 38(11): 108-114.
- [20] 钮建伟, 张乐. Jack 人因工程基础及应用实例[M]. 北京: 电子工业出版社, 2012.
NIU Jian-wei, ZHANG Le. Jack Human Factors Engineering Foundation and Application Examples[M]. Beijing: Publishing House of Electronics Industry, 2012.
- [21] 刘李明, 彭博, 梁培生, 等. 基于人机工程的雌雄蚕蛹分拣机改进设计与仿真[J]. 机械设计, 2021, 38(5): 132-137.
- LIU Li-ming, PENG Bo, LIANG Pei-sheng, et al. Improvement Design and Simulation of Male and Female Silkworm Pupa Sorting Machine Based on Ergonomic[J]. Journal of Machine Design, 2021, 38(5): 132-137.
- [22] 虞晓芬, 傅玳. 多指标综合评价方法综述[J]. 统计与决策, 2004(11): 119-121.
YU Xiao-fen, FU Dai. Summary of Multi-Index Comprehensive Evaluation Methods[J]. Statistics & Decision, 2004(11): 119-121.

责任编辑: 陈作

(上接第 197 页)

- [18] 于子良, 任坤华, 许文天. 高速轨道交通发展趋势[J]. 装备制造技术, 2020(3): 230-232, 240.
YU Zi-liang, REN Kun-hua, XU Wen-tian. Development Trend of High Speed Rail Transit[J]. Equipment Manufacturing Technology, 2020(3): 230-232, 240.
- [19] 曾耀东. 高速列车外观设计的进展和发展趋势[J]. 时代汽车, 2021(8): 27-28, 67.
ZENG Yao-dong. The Progress and Development Trend of Exterior Design of High-Speed Trains[J]. Auto Time, 2021(8): 27-28, 67.
- [20] IDO A, IIDA M, MAEDA T. Wind Tunnel Tests for Nose and Tail of Train[J]. RTRI Report, 1993, 7(7): 59-66.
- [21] 牛纪强, 周丹, 梁习锋. 列车交会压力波的空间分布研究[J]. 武汉理工大学学报(交通科学与工程版), 2017, 41(1): 57-63.
NIU Ji-qiang, ZHOU Dan, LIANG Xi-feng. Study on Spatial Distribution of Instantaneous Pressure Pulse Caused by Two Meeting Trains[J]. Journal of Wuhan University of Technology (Transportation Science & Engineering), 2017, 41(1): 57-63.
- [22] UIC 651-2002 OR, 机车、动车、动车组和带司机室拖车的司机室布置[S]. 巴黎: 国际铁路联盟, 2002.
UIC 651-2002 OR, Cab Layout of Locomotives, EMUs, EMUs and Trailers with Cabs[S]. Paris: International Union of Railways, 2002.
- [23] ÖSTH J, KAISER E, KRAJNOVIĆ S, et al. Cluster-Based Reduced-Order Modelling of the Flow in the Wake of a High Speed Train[J]. Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics, 2015, 145: 327-338.
- [24] 刘霁虹. 基于认知识别的谱系化产品设计研究[J]. 装饰, 2016(2): 142-143.
LIU Ji-hong. Research on Pedigree Product Design Based on Cognitive Recognition[J]. Art & Design, 2016(2): 142-143.

责任编辑: 陈作