

地铁车厢扶手人机工程仿真分析及改进设计

张芳燕^{1a}, 郭佳佳^{1a*}, 张磊^{1b}, 郭庆龙², 赵起超³, 郭涵⁴

(1.天津理工大学 a.艺术学院 b.天津市先进机电系统设计与智能控制重点实验室, 天津 300384;

2.中车株洲电力机车有限公司 工业设计研究所, 湖南 株洲 412001;

3.北京津发科技股份有限公司, 北京 100083; 4.华南农业大学 工程学院, 广州 510642)

摘要: **目的** 为满足地铁乘客站姿乘车的便利性与舒适性, 结合人机工程仿真分析软件 Jack 对车厢扶手的设计方案进行分析校核和改进设计。 **方法** 依据 GB/T 7928—2003 中 A 型车主要技术规格和 GB 13094—2017 中客车扶手尺寸要求, 在 CAD 软件中搭建了地铁车厢内装三维模型; 根据 GB 10000—1988, 在 Jack 软件中建立了第 5 百分位成年女性和第 95 百分位成年男性人体数字模型; **结果** 对站姿乘客使用扶手时的不同姿势进行快速上肢动作分析和舒适度分析, 得到站姿整体舒适度评分结果; 通过人机分析结果, 对地铁车厢扶手数量布置和高度设置进行设计改进, 并再次通过 Jack 软件对乘客站姿舒适度进行测试。 **结论** 结果表明, 改进后的设计方案满足乘客的便利性和舒适性要求, 为地铁车厢扶手的人机工程设计提供参考, 相关的设计参数值可对现有标准形成补充。

关键词: 地铁车厢; 扶手设计; 人机工程; Jack; 仿真分析

中图分类号: U270.38; TB472 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2023)18-0019-08

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2023.18.003

Ergonomic Simulation Analysis and Improved Design of Subway Car Handrails

ZHANG Fang-yan^{1a}, GUO Jia-jia^{1a*}, ZHANG Lei^{1b}, GUO Qing-long², ZHAO Qi-chao³, GUO Han⁴

(1.a.College of Art b.Tianjin Key Laboratory for Advanced Mechatronic System Design and Intelligent Control,

Tianjin University of Technology, Tianjin 300384, China;

2.Industrial Design Institute, CRRC Zhuzhou Locomotive Co., Ltd., Hunan Zhuzhou 412001, China;

3.Beijing Kingfar Technology Co., Ltd., Beijing 100083, China;

4.College of Engineering, South China Agricultural University, Guangzhou 510642, China)

ABSTRACT: The work aims to analyze, check and improve the design scheme of subway car handrails in combination with the man-machine simulation analysis software Jack to satisfy the convenience and comfort of subway passengers. According to the main technical specifications of Type A cars in GB/T 7928—2003 and the size requirements of passenger car handrails in GB 13094—2017, a 3D model of subway cars was built in CAD. According to GB 10000—1988, the human body digital models of the 5th percentile adult female and 95th percentile adult male were established in Jack. Rapid upper limb assessment and comfort assessment were carried out to obtain the overall comfort score of standing posture. Through ergonomic analysis results, the number layout and height setting of handrails in subway cars were designed and improved, and the comfort level of passengers' standing posture was verified again by Jack. The results show that the improved design scheme meets the convenience and comfort requirements of passengers, and provides a reference for the ergonomic design of the handrails of subway cars. The related design parameters can supplement the existing standards.

KEY WORDS: subway car; handrails design; ergonomic; Jack; simulation analysis

收稿日期: 2023-04-15

基金项目: 中国中车股份有限公司科技研究开发计划项目 (2018CCB103); 教育部高等教育司“人因与工效学”产学研合作协同育人项目 (202002SJ13)

扶手作为地铁车厢的关键部件,要求以人机工程为依据,确保在包括应急刹车在内的各种运行条件下均能承受乘客的任何冲击力^[1]。此外,地铁车厢扶手可维持乘客站立时的身体平衡,缓解乘客疲劳^[2]。因此,合理的地铁车厢内扶手设计较为重要。近年来,相关研究人员对地铁车厢内扶手的人机工程设计进行了研究,例如:魏峰等^[3]提出地铁扶手的使用体验主要取决于人体身高和手臂功能上举高的差异,并运用 Jack 软件进行仿真分析,得出当吊环高度为 1 710 mm、横杆高度为 1 860 mm 时,舒适度评分最高。王硕等^[4]对现有地铁客室扶握系统进行了改进设计,并采用 Jack 软件对设计方案的人机工效进行验证。姜良奎等^[5]提出使用横杆的旅客呈“一”字形分布,竖杆呈圆形分布的设计方案,通过 Jack 软件对其进行人机仿真分析与评估,推荐中间竖杆间距为 1 520 mm,中间横杆高度为 1 850 mm。通过仿真分析软件,可在产品设计研发早期发现产品中人机工程设计的不足并及时修改,从而提高设计研发效率,减少样机测试,节约开发成本^[6]。此外,姜亮等^[7]通过开展乘客对扶握系统的偏好调查,得出地铁车厢两侧和车门区是乘客最爱站立的位置,提出扶握系统中横杆高度为 1 800~1 900 mm,吊环高度为 1 705~1 750 mm。姚望等^[8]通过分析地铁乘客在站姿状态下的无意识动作和实现抓握行为的有效性,提出一种符合乘客群体无意识需求的扶手设计方案。肖军等^[9]从人机工程学角度对西南地区公交车内扶手进行研究,提出抓得到和不碰头的扶手设计依据,并得出横杆、吊环高度分别为 1 800 mm 和 1 600 mm,能满足西南地区 95% 的成年乘客对扶手高度的要求。上述文献从不同角度对地铁车厢扶手的设计进行了研究,但仍缺少对处于站立姿势下不同乘客使用不同类型扶手时的人机工程仿真分析。为使乘客有更好的乘坐体验,文中利用 Jack 虚拟仿真技术,结合乘客的动态行为,对乘客站立时的姿势进行人机工程分析,并根据分析结果提出地铁车厢内扶手的设计缺陷及改进方案。

1 基于 Jack 的人机工程分析流程

Jack 是一个专门进行虚拟仿真和人机工效分析的软件,可建立真实的三维数字环境,并使用相应的人机工程分析工具进行模拟,从而实现对环境 and 产品的工效评估^[10]。

使用 Jack 作为人机工效仿真平台,首先需建立符合标准的地铁车厢模型和人体数字模型,搭建虚拟仿真环境;其次,调整站姿乘客使用不同扶手时的姿势,进行快速上肢动作分析和舒适度分析,得到分析结果,发现现有的地铁车厢扶手的设计缺陷,针对设计缺陷进行相应的改进设计;最后,对改进后的地铁车厢扶手模型再次进行验证。基于 Jack 的人机工程分析流程见图 1。

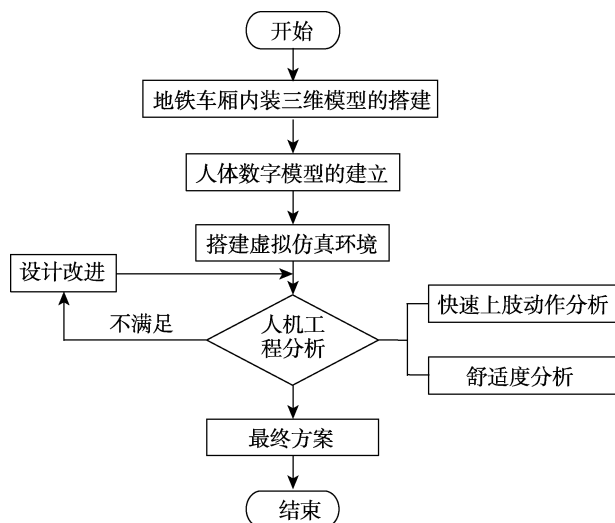


图 1 基于 Jack 的人机工程分析流程图
Fig.1 Flow chart of ergonomic analysis based on Jack

2 虚拟仿真环境构建

2.1 地铁车厢内装三维模型的搭建

地铁扶手分为高位扶手、低位扶手和竖向扶手,其中,高位扶手包括吊环和横杆,低位扶手即座椅侧的扶手,地铁车厢中的扶手类型见图 2。

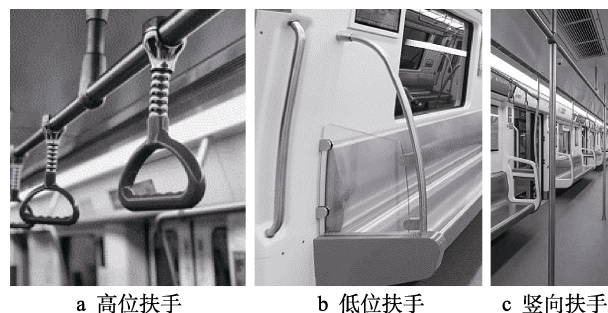


图 2 地铁车厢中的扶手类型
Fig.2 Types of handrails in subway cars

以 GB/T 7928—2003《地铁车辆通用技术条件》^[11]中给出的 A 型车主要技术规格和 GB 13094—2017《客车结构安全要求》^[12]中给出的客车扶手尺寸为参考,在 Rhino 软件中搭建地铁车厢内装三维模型,包括座椅、横杆、吊环、竖杆等部件,图 3 为地铁车厢内装原始设计方案。扶手布置参考我国地铁列车目前典型的布置方式,包括车厢中央位置的竖向扶手;车厢上部的高位扶手,包括横向扶手和固定在横向扶手上的吊环,且各吊环高度保持一致;座椅两侧各有 1 节横向扶手。每节车厢长为 22 800 mm,宽为 3 000 mm。其中,根据文献^[13]给出的扶手参数,横杆的外径设置为 32 mm,竖杆的外径设置为 38 mm。表 1 为各扶手的尺寸参数。

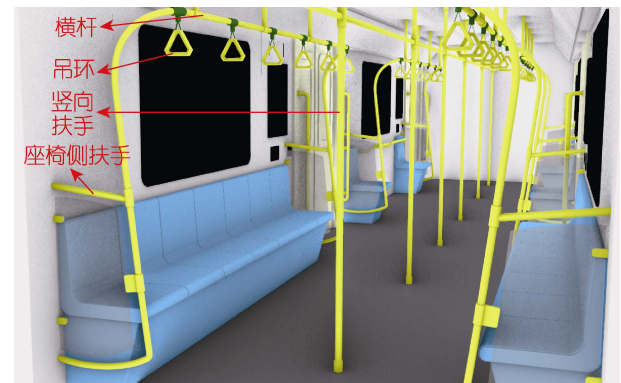


图 3 地铁车厢内装原始设计方案
Fig.3 Original design scheme of subway car interior

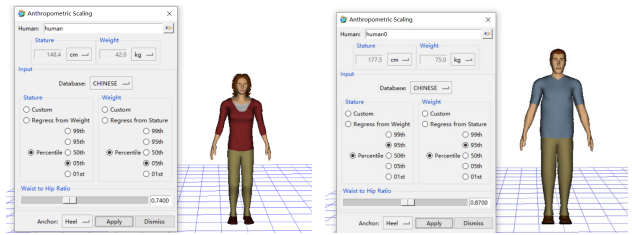
表 1 各扶手尺寸参数
Tab.1 Size parameters of each armrest mm

扶手类型	扶手部件	直径	距地板高度
高位扶手	吊环	—	1 700
	横杆	32	1 900
低位扶手	座椅侧横杆	32	1 030~1 080
竖向扶手	—	38	—

2.2 人体数字模型的建立

地铁扶手要尽量满足大多数乘客的使用需求,因此,选取第 95 百分位和第 5 百分位的中国成年人尺寸作为尺寸设计的上限和下限^[14]。

Jack 软件中的三维人体模型数据库包含多个国家的权威人体尺寸数据,其中,包括 1988 年基于中国 18~60 岁男性和 18~55 岁女性成年人尺寸数据(GB 10000—1988)。以 GB 10000—1988《中国成年人人体尺寸》^[15]为参考,建立地铁乘客第 5 百分位成年女性和第 95 百分位成年男性的人体数字模型,人体数字模型见图 4。

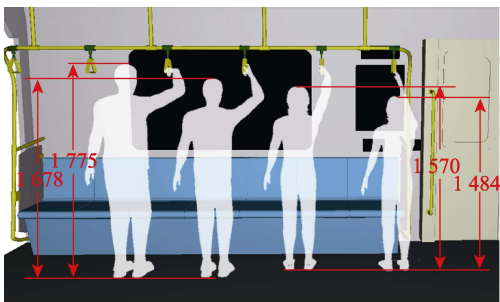


a 第 5 百分位成年女性 b 第 95 百分位成年男性

图 4 人体数字模型
Fig.4 Digital model of human body

2.3 虚拟仿真环境的搭建

将地铁车厢内装三维模型以.stl 格式导入 Jack 软件中,再通过人体尺寸编辑器对创建的人体数字模型进行姿势调整,与三维模型进行人机关系匹配,搭建出仿真环境^[16],见图 5。



a 乘客与扶手人机关系



b 地铁车厢人机仿真环境

图 5 虚拟仿真环境
Fig.5 Virtual simulation environment

3 人机工程仿真分析

将数字人调整至不同姿势,并于扶手各部位进行约束,如将数字人的右手约束至吊环,然后,使用仿真模块对数字人进行分析,数字人姿势调整见图 6。



图 6 数字人姿势调整
Fig.6 Posture adjustment of digital human

3.1 快速上肢动作分析

快速上肢动作分析(Rapid Upper Limb Assessment, RULA)工具可分析用户在上肢动作中的危险性,分数越低,代表危险性越低,评分为 1~8 分,RULA 评分等级含义见表 2。

通过快速上肢动作分析,对于乘客抓握不同类型扶手时身体各部位肌肉负载和暴露时间的结果分析见图 7。

表 2 RULA 评分等级含义
Tab.2 RULA grading scale meaning

评分	等级	含义
1~2 分	等级 1	表明在没有保持或重复很长时间的情况下，该姿势是可行的
3~4 分	等级 2	表明在较长时间过后需要研究并改变该姿势
5~6 分	等级 3	表明隔一段时间就应研究并改变该姿势
7 分以上	等级 4	表明应立即对当前姿势进行研究并改变

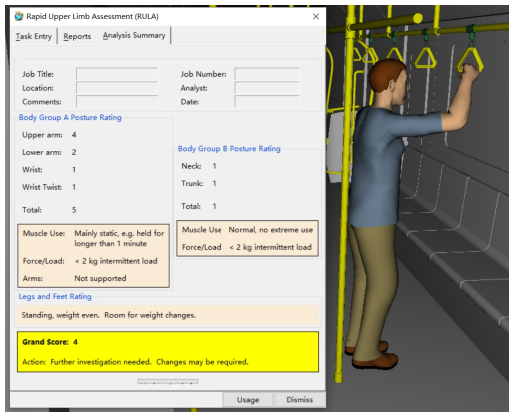


图 7 P₉₅ 男性抓握吊环 RULA 评估结果
Fig.7 P₉₅ Results of RULA evaluation of male gripping rings

由图 7 可知，第 95 百分位男性乘客抓握吊环时，身体 A 组评价：上臂姿势评级 4 分，下臂姿势评级 3

表 3 其余乘客抓握扶手的快速上肢分析评分结果
Tab.3 Rapid upper limb analysis score results of the rest of the passengers' gripping handrails

使用场景	上臂姿势 评级	下臂姿势 评级	手腕评级	手腕扭转 评级	A 组综合 评分	B 组综合 评分	上肢动作不 适度评分	等级
P ₉₅ 男性乘客抓握吊环	4	2	1	1	5	1	4	2
P ₉₅ 男性乘客抓握横杆	3	2	3	1	5	1	4	2
P ₉₅ 男性乘客抓握竖杆	2	2	2	1	4	1	3	2
P ₅ 女性乘客抓握竖杆	2	2	2	1	4	1	3	2
P ₉₅ 男性乘客抓握座椅侧横杆	1	3	1	2	4	1	3	2
P ₅ 女性乘客抓握座椅侧横杆	2	2	2	1	4	1	3	2

3.2.1 高位扶手舒适度分析

将乘客设置为单臂上举使用吊环和横杆的标准站姿，通过 Krist 选项分别对第 5 百分位女性和第 95 百分位男性乘客进行分析。乘客抓握吊环和横杆的舒适度分析结果见图 8—图 9。由图 8 分析结果可看出，在抓握吊环姿势下第 5 百分位女性乘客无法抓握吊环，设计考虑不够周全；第 95 百分位男性乘客整体舒适度评分为 34.5 分，属于 0~40 分，人体的舒适度在合理的范围内，疲劳度评分为 41.7 分，略高于 40，设计较合理。由图 9 分析结果可看出，在抓握横杆姿势下第 5 百分位女性乘客无法抓握横杆，不合理；第 95 百分位男性乘客整体舒适度评分

分，手腕和手腕扭转评级 1 分，肌肉使用主要是静态且暴露时间超过 1 min，属于小于 2 kg 的间歇性负荷，综合评分 5 分，属于 3 级操作；身体 B 组评价：颈部和躯干评级 1 分，综合评分 1 分，属于 1 级操作；腿部和脚部评价：腿和脚部支撑良好，质量均匀。综合评分为 4 分，属于 2 级操作。

对其余乘客抓握扶手进行快速上肢分析的评分结果见表 3。由表 3 可知，男性、女性乘客抓握不同类型扶手时的上肢动作不适度评分均在 3~4 分，属于 2 级操作，且地铁每站间隔时间为 3~5 min，短时间内保持这类姿势是可行的，因此，这类姿势无需调整。

3.2 舒适度分析

舒适度分析功能模块用于评价用户在某个姿势下关节及整体姿势的舒适度。选择 Krist 选项进行仿真分析，Krist 的数据可研究身体的不同部位的舒适程度，舒适程度按照从 0~80 打分，分数越低则代表舒适度越大^[17]，当舒适度值在 0~40 分时，表明人体的舒适度在合理的范围内；当舒适度值在 40~80 分时，表明人体感到不舒适。数据中涉及的身体部位包括颈部、肩膀、背部、臀部、左右手臂、左右腿部。疲劳评分指的是当前姿势总体疲劳程度，舒适评分是对上述所有部位舒适度的总体评估，是由软件定义的评分。通过对不同百分位数的数字人进行舒适度比较，可了解如何改变扶手参数，进而提高舒适性。

为 34.7 分，疲劳度评分为 39.6 分，均属于 0~40 分，在合理的范围内，设计较合理。

3.2.2 低位扶手舒适度分析

设置乘客为单臂侧举模拟使用低位扶手的标准站姿状态，分别通过 Krist 选项对第 5 百分位女性和第 95 百分位男性乘客进行分析。乘客抓握低位扶手舒适度分析结果见图 10。

由图 10 分析结果可看出，在使用这类低位扶手姿势时，第 5 百分位女性乘客和第 95 百分位男性乘客整体舒适度评分分别为 51.8 分和 59.3 分（满分 80 分），疲劳度评分分别为 52.7 分和 57.4 分，均属于 40~80 分，表明人体感到不舒适，设计不够合理，需进行改进。

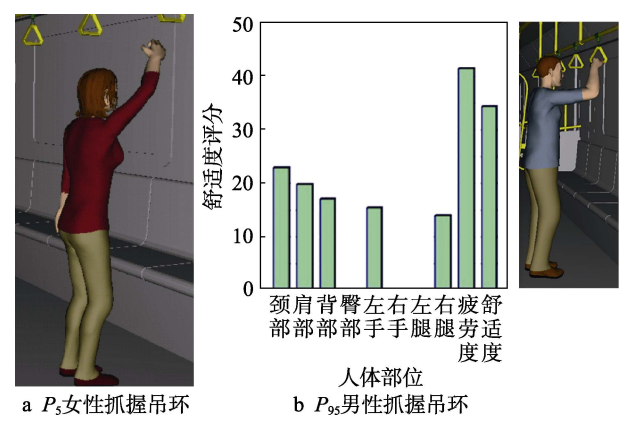


图 8 乘客抓握吊环舒适度分析评估结果
Fig.8 Comfort assessment evaluation results of passengers' gripping rings

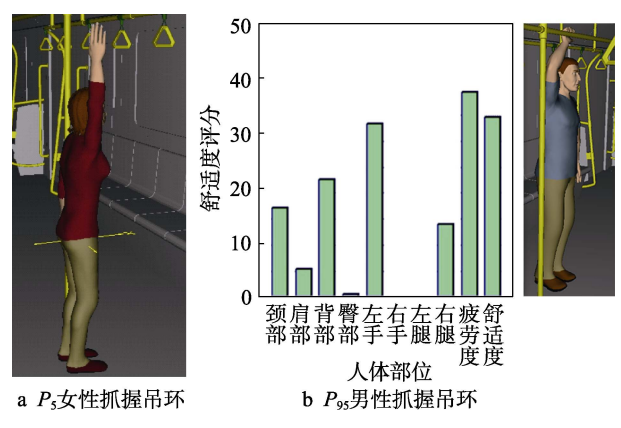


图 9 乘客抓握横杆舒适度分析评估结果
Fig.9 comfort assessment evaluation results of passengers' gripping crossbars

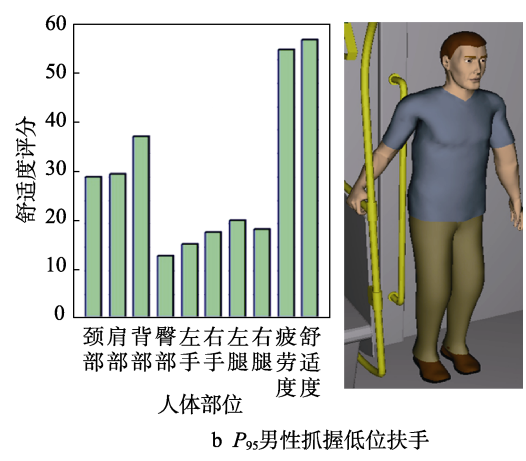
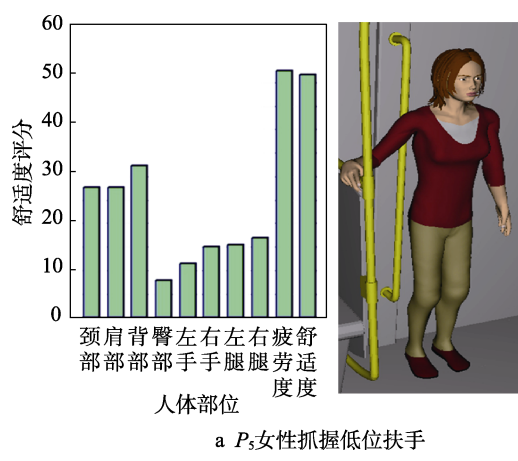


图 10 乘客抓握低位扶手舒适度分析评估结果
Fig.10 Comfort assessment evaluation results of passengers' gripping low armrests

3.2.3 竖向扶手舒适度分析

设置乘客为单臂侧握模拟使用扶手的标准站姿状态，分别通过 Krist 选项对第 5 百分位女性和第 95 百分位男性乘客进行分析。乘客抓握竖向扶手舒适度分析结果见图 11 所示。

由图 11 可看出，在抓握竖杆姿势下，第 5 百分位女性和第 95 百分位男性乘客整体舒适度评分分别为 50.9 分和 45.5 分，疲劳度评分分别为 51.8 分和 48.2 分，均属于 40~80 分，表明人体感到不舒适，设计不够合理。

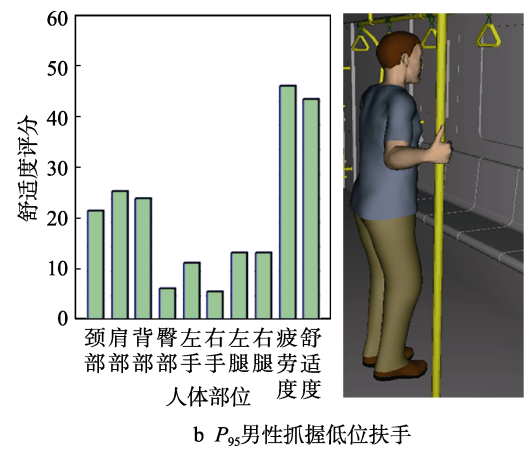
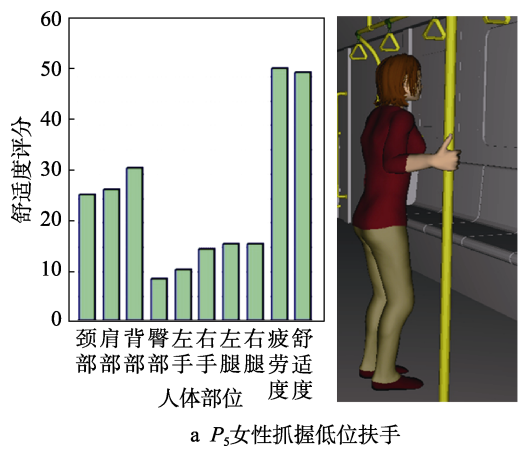


图 11 乘客抓握竖向扶手舒适度分析评估结果
Fig.11 Comfort assessment evaluation results of passengers' gripping vertical armrests

4 设计改进与验证

有关人体尺寸标准中所列的数据是在裸体或穿单薄内衣的条件下测得的，在 Jack 软件中的数字人并未考虑穿鞋修正量，而设计中所涉及的人体尺寸应该是在穿鞋条件下的人体尺寸^[18]。根据产品设计人体尺寸数据的应用方法及要求为：产品最小功能尺寸=相应百分位数人体尺寸+功能修正量^[19]。为在仿真分析中弥补 25 mm 的穿鞋修正量^[20]，将横杆、吊环以及座椅侧扶手的高度统一上调 25 mm，这样可保证在不改变数字人高度的前提下执行相关高度方向上的抓握仿真。

4.1 设计改进

针对舒适度分析结果，可找出地铁扶手设计中的问题，进而对扶手布置进行改进设计。主要改进包括。

1）高位扶手改进。为满足大部分乘客能够抓握的使用需求，将吊环设置为一高一低，并错落摆放于横杆下。吊环距地板高度分别调整为 1 725 mm 和 1 625 mm。横杆距地板高度调整为 1 875 mm。此外，吊环形态改为倒角长方形，可为乘客提供更大抓握空间，圆润的造型能为乘客带来更好的抓握体验，该改动不会影响设计的评价。

2）低位扶手改进。对座椅侧横杆扶手进行数量和尺寸的调整，数量上由原本的竖直方向上 1 节扶手调整为 3 节，尺寸调整为 1 025~1 075 mm（第 1 节），1 125~1 175 mm（第 2 节）和 1 225~1 275 mm（第 3 节）。

3）竖向扶手不改进。地铁车厢扶手布局尺寸原方案与改进方案对照见表 4。改进后地铁车厢扶手布置三维模型见图 12。

表 4 地铁车厢扶手布局尺寸原方案与改进方案对照
Tab.4 Comparison between the original scheme and the improved scheme of subway car handrails mm

部件名称	原方案 (距地面高度)	改进方案 (距地面高度)
吊环	1 700	1 725 (1 625)
横杆	1 900	1 875
座椅侧横杆	1 030~1 080	1 025~1 075 (第 1 节)
		1 125~1 175 (第 2 节)
		1 225~1 275 (第 3 节)

4.2 结果验证

4.2.1 高位扶手仿真分析

对改进后的地铁车厢内装三维模型在 Jack 软件中进行人机匹配，再进行舒适度分析，乘客抓握吊环和横杆舒适度评分改进前后对比分别见表 5—6。由

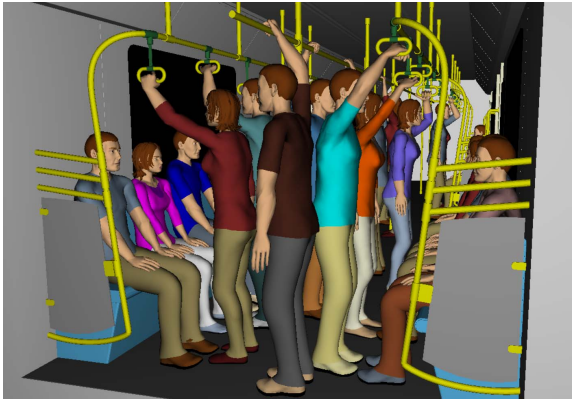


图 12 改进后地铁车厢扶手布置设计方案
Fig.12 Improved layout design of subway car handrails

表 5 抓握吊环舒适度评分改进前后对比
Tab.5 Comparison of comfort assessment before and after improvement of gripping rings

乘客类型	类型	整体舒适度 评分	对比结果
第 5 百分位女性	原方案	—	舒适度提高
	改进方案	53.1	
第 95 百分位男性	原方案	34.5	
	改进方案	3.9	

表 6 抓握横杆舒适度评分改进前后对比
Tab.6 Comparison of comfort assessment before and after improvement of gripping crossbars

乘客类型	类型	整体舒适度 评分	对比结果
第 5 百分位女性	原方案	—	舒适度提高
	改进方案	—	
第 95 百分位男性	原方案	34.7	
	改进方案	12.7	

表 5 分析结果可知，在抓握吊环姿势下第 5 百分位女性乘客可抓握吊环，整体舒适度评分为 53.1 分；第 95 百分位男性乘客整体舒适度评分为 3.9 分，属于 0~40 分，且评分较低，人体处在舒适的状态，此外，由于原方案的抓握舒适度评分也在 0~40 分，改进方案再次进行了高度的调整，因此，改进后的舒适度大大提高，改进后第 5 百分位女性乘客可抓握吊环，第 95 百分位男性乘客整体舒适度得到改善。由表 6 可知，在抓握横杆姿势下，第 95 百分位男性乘客整体舒适度评分为 12.7 分。改进设计后，第 95 百分位男性乘客整体舒适度得到改善。

4.2.2 低位扶手仿真分析

乘客抓握座椅侧横杆舒适度评分改进前后对比见表 7。由表 7 分析结果可知，第 5 百分位女性乘客抓握座椅侧横杆的整体舒适度分别为 44.3 分、44 分和 27.8 分，与改进前相比整体舒适度均得到改善。

第 95 百分位男性乘客抓握座椅侧横杆的整体舒适度分别为 68.4 分、49.6 分和 40 分, 在抓握第 1 节横杆时, 整体舒适度评分偏高, 人体感到不适, 抓握其余两节时, 与改进前相比整体舒适度得到改善。

表 7 抓握座椅侧横杆舒适度评分改进前后对比
Tab.7 Comparison of comfort assessment before and after improvement of griping seat side crossbars

乘客类型	类型	整体舒适度 评分	对比结果
第 5 百分位女性	原方案	51.8	舒适度提高
	改进方案	44.3	
		44	
		27.8	
第 95 百分位男性	原方案	59.3	舒适度提高
	改进方案	68.4	
		49.6	
		40	

5 结语

以 Jack 软件为分析平台, 对乘客使用地铁 A 型车厢扶手姿势进行快速动作上肢分析和舒适度分析, 发现存在的扶手设计不合理问题, 对扶手设计方案进行了改进设计, 并再次进行仿真, 验证改进设计方案的合理性。目前针对地铁扶手的人机工程研究较少, 为提升乘客乘坐体验, 提出采用 Jack 仿真分析处于站姿状态下不同乘客使用各类扶手时的舒适度, 可快速预判设计方案中存在的缺陷问题, 进而对车厢内装的布局设计与尺寸改进进行快速响应, 从产品可用性和提高乘客乘坐舒适性的角度, 为地铁列车的人性化设计提供试验依据和解决方案。文中仅对理想状态下站姿乘客进行人机工程分析, 未来还应对有负荷重量的站姿乘客, 以及车厢内拥挤状态下的站姿乘客抓握情况进行深入研究。

参考文献:

[1] 李振阳, 郭海洋. 上海轨道交通 11 号线车辆侧扶手强度分析[J]. 电力机车与城轨车辆, 2012, 35(3): 53-54.
LI Zhen-yang, GUO Hai-yang. Strength Analysis of Side Armrest for Shanghai Rail Transit Line 11 Vehicles[J]. Electric Locomotives & Mass Transit Vehicles, 2012, 35(3): 53-54.

[2] 卢艳玲, 刘厚林, 孟令峰. 武汉轨道交通一号线二期工程车辆内饰扶手的规范化设计[J]. 电力机车与城轨车辆, 2010, 33(3): 25-26.
LU Yan-ling, LIU Hou-lin, MENG Ling-feng. Standardization Design of Interior Decoration Armrest of Metro Vehicle for Wuhan Line 1 Extending[J]. Electric

Locomotives & Mass Transit Vehicles, 2010, 33(3): 25-26.

[3] 魏峰, 徐伯初, 支锦亦, 等. 地铁客室乘坐设备人机功能尺寸设计[J]. 西南交通大学学报, 2018, 53(4): 865-872.
WEI Feng, XU Bo-chu, ZHI Jin-yi, et al. Man-Machine Functional Dimension Design of Riding Equipment in Subway Passenger Compartments[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2018, 53(4): 865-872.

[4] 王硕, 李然, 安静. 地铁客室扶握系统优化设计研究[J]. 设计, 2020, 33(5): 16-19.
WANG Shuo, LI Ran, AN Jing. Study on Optimal Design of Holding System in Subway Passenger Room[J]. Design, 2020, 33(5): 16-19.

[5] 姜良奎, 向泽锐, 刘峰. 无辅助抓握件地铁车内扶手布置设计研究[J]. 包装工程, 2017, 38(2): 15-20.
JIANG Liang-kui, XIANG Ze-rui, LIU Feng. Layout Design of Handrails without Assistive Handles for Metro Vehicles[J]. Packaging Engineering, 2017, 38(2): 15-20.

[6] 宗威, 凌杰豪, 惠慧. 基于 RAMSIS 的除雪车驾驶室人机工程分析[J]. 机械设计, 2017, 34(8): 112-115.
ZONG Wei, LING Jie-hao, HUI Hui. Ergonomics Analysis of Snowplow Cab Based on RAMSIS[J]. Journal of Machine Design, 2017, 34(8): 112-115.

[7] 姜亮, 鲁晓涛, 何思俊, 等. 地铁车内扶握系统设计现状与优化研究[J]. 设计, 2020, 33(10): 110-112.
JIANG Liang, LU Xiao-tao, HE Si-jun, et al. Research on Design Status and Optimization of Holding System in Subway Cars[J]. Design, 2020, 33(10): 110-112.

[8] 姚望, 李芳宇, 支锦亦. 基于无意识设计理念的地铁车内扶手改良设计[J]. 包装工程, 2020, 41(4): 200-206.
YAO Wang, LI Fang-yu, ZHI Jin-yi. Improved Design of Subway Interior Handrail Based on Unconscious Design Theory[J]. Packaging Engineering, 2020, 41(4): 200-206.

[9] 肖军, 罗卫东, 袁森. 西南地区公交车扶手的人机工程学设计[J]. 机械制造与自动化, 2011, 40(2): 33-34.
XIAO Jun, LUO Wei-dong, YUAN Sen. Ergonomic Design of Bus Handrails for Southwest China[J]. Machine Building & Automation, 2011, 40(2): 33-34.

[10] 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.

[11] GB/T 7928—2003, 地铁车辆通用技术条件[S].
GB/T 7928—2003, General Technical Specifications for Subway Vehicles[S].

[12] GB 13094—2017, 客车结构安全要求[S].
GB 13094—2017, The Safety Requirements for Bus Construction[S].

[13] 孙丽萍, 王立国. 地铁车辆内装设计人机工程学分析

- [J]. 大连交通大学学报, 2010, 31(2): 15-19.
SUN Li-ping, WANG Li-guo. Ergonomics Analysis of Metro Car Interior Decoration Design[J]. Journal of Dalian Jiaotong University, 2010, 31(2): 15-19.
- [14] 章勇, 徐伯初, 支锦亦, 等. 高速列车旋转座椅的人机工程改进设计[J]. 机械设计, 2016, 33(8): 109-112.
ZHANG Yong, XU Bo-chu, ZHI Jin-yi, et al. Improved Design on Human-Machine Engineering for the Rotary Seat of High Speed Train[J]. Journal of Machine Design, 2016, 33(8): 109-112.
- [15] GB 10000—1988, 中国成年人人体尺寸[S].
GB 10000—1988, Human Dimensions of Chinese adults[S].
- [16] 刘李明, 彭博, 刘昊, 等. 基于 Jack 的游船驾驶室人机工程改进设计[J]. 机械设计, 2021, 38(12): 122-127.
LIU Li-ming, PENG Bo, LIU Hao, et al. Ergonomic Improvement Design of Cruise Ship Cabin Based on Jack[J]. Journal of Machine Design, 2021, 38(12): 122-127.
- [17] 周艾, 张建敏, 杨勤, 等. 基于JACK的工业搬运车驾驶室人机工程仿真分析[J]. 机械设计, 2020, 37(1): 26-34.
- ZHOU Ai, ZHANG Jian-min, YANG Qin, et al. Ergonomic Simulation and Analysis of the Industrial Truck's Cab Based on JACK[J]. Journal of Machine Design, 2020, 37(1): 26-34.
- [18] 陈悦源, 方卫宁, 刘慧军. 基于人因工程学的轨道车辆无障碍设计[J]. 机械设计, 2019, 36(8): 20-31.
CHEN Yue-yuan, FANG Wei-ning, LIU Hui-jun. Accessible Design of the Rail Train Based on Ergonomics[J]. Journal of Machine Design, 2019, 36(8): 20-31.
- [19] 阮宝湘, 刘永翔, 董明明. 工业设计人机工程[M]. 3版. 北京: 机械工业出版社, 2017.
RUAN Bao-xiang, LIU Yong-xiang, DONG Ming-ming. Ergonomics in Industrial Design[M]. 3rd ed. Beijing: China Machine Press, 2017.
- [20] 毛恩荣, 张红, 宋正河. 车辆人机工程学[M]. 2版. 北京: 北京理工大学出版社, 2007.
MAO En-rong, ZHANG Hong, SONG Zheng-he. Ergonomics in Vehicle Engineering[M]. 2nd ed. Beijing: Beijing Insititute of Technology Press, 2007.
- 责任编辑: 陈作

(上接第 18 页)

- [48] 李显生, 鹿应荣, 王云鹏, 等. 国产载货汽车的整车可靠性评价[J]. 公路交通科技, 2000, 17(5): 81-84.
LI Xian-sheng, LU Ying-rong, WANG Yun-peng, et al. Reliability Evaluation of Domestic Truck[J]. Journal of Highway and Transportation Research Andk Development, 2000, 17(5): 81-84.
- [49] 师勇, 徐格宁, 辛运胜, 等. 基于JACK仿真的电动单轨吊司机室人机工程分析[J]. 中国工程机械学报, 2023, 21(2): 139-144.
SHI Yong, XU Ge-ning, XIN Yun-sheng, et al. Ergonomic Analysis and of Electric Monorail Crane Cab Based on JACK Simulation[J]. Chinese Journal of Construction Machinery, 2023, 21(2): 139-144.
- [50] 侯明哲, 罗阳明, 佟禹. 跟驰状态下驾驶人安全可靠度模型[J]. 公路, 2014, 59(8): 70-74.
HOU Ming-zhe, LUO Yang-ming, TONG Yu. Safety Reliability Analysis of Driver under Car-Following Condition[J]. Highway, 2014, 59(8): 70-74.
- [51] 秦洪懋, 刘志强, 汪澎. 基于多通道信息融合的疲劳驾驶行为分析研究[J]. 中国安全科学学报, 2011, 21(2): 115-120.
QIN Hong-mao, LIU Zhi-qiang, WANG Peng. Research on Drowsy Driving Behavior Based on Multi-Channel Information Fusion[J]. China Safety Science Journal, 2011, 21(2): 115-120.
- [52] 刘志强, 於以辰, 汪澎. 驾驶员注视行为模式识别技术研究[J]. 中国安全科学学报, 2013, 23(6): 80-85.
LIU Zhi-qiang, YU Yi-chen, WANG Peng. Study on Driver's Gaze Behavior Pattern Recognition Technology[J]. China Safety Science Journal, 2013, 23(6): 80-85.
- 责任编辑: 陈作