

空间站卫生间人机仿真评估与实践

姚湘, 刘俊, 毛建赞, 胡鸿雁, 江奥, 周家慷
(湘潭大学 机械工程学院, 湖南 湘潭 411105)

摘要: **目的** 对空间站卫生间的人机关系进行分析, 评价其人机工效, 为空间站卫生间人机工程评价、设计优化提供理论方法和技术支持。**方法** 以 DELMIA 软件为分析工具, 在对空间站卫生间环境建模后, 导入航天飞行乘员人体尺寸模型, 构建人机仿真虚拟场景。将空间站卫生间如厕过程分解, 调整人体模型的如厕姿态及舒适角度范围, 对空间站卫生间可达可视域进行判别, 开展空间站卫生间如厕姿态舒适性仿真分析与评价。**结果** 仿真结果显示虚拟航天成员如厕各阶段姿态可达性、可视性、舒适性均满足人机工程学需求。**结论** 该空间站卫生间能为航天乘员提供一个舒适的如厕环境, 其总体结构与布局符合人机工程学设计原则。

关键词: 空间站卫生间; 人因工程; 仿真技术; 适人性评价

中图分类号: TB472 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2023)04-0165-06

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2023.04.020

Evaluation and Practice of Human-machine Simulation in Space Station Toilet

YAO Xiang, LIU Jun, MAO Jian-yun, HU Hong-yan, JIANG Ao, ZHOU Jia-kang
(School of Mechanical Engineering, Xiangtan University, Hunan Xiangtan 411105, China)

ABSTRACT: The work aims to analyze the human-machine relationship in the space station toilet, and evaluate its ergonomics, to provide theoretical methods and technical support for the ergonomics evaluation and design optimization of space station toilet. DELMIA software was used as the analysis tool to import the human body size model of the space flight crew after the modeling of the toilet environment in the space station to construct a human-machine simulation virtual scene. The toileting process in the space station toilet was decomposed, the toileting posture and comfort angle range of the human model were adjusted and the reachable visual field in the space station toilet was determined to carry out the simulation analysis and evaluation on the comfort of toileting posture in the space station toilet. According to the simulation results, the virtual toileting posture of space flight crew met the ergonomic requirements at all stages in terms of accessibility, visibility and comfort. The space station toilet can provide a comfortable toileting environment for the space flight crew and its overall structure and layout are in line with the ergonomic design principles.

KEY WORDS: space station toilet; ergonomics; simulation technology; human-rating

空间站卫生间是载人航天系统中能够控制和保障航天员所处的环境与生命的一个重要组成区域, 是满足航天乘员生理需要必备的物质和安全保障条件, 其空间布置及硬件设计直接关系到乘员生活的质量高低, 重要性不言而喻^[1]。在过往对航天器废物收集装置的设计中, 通常需要经历产品设计-投产-试验-

改进设计-投产-再试验等阶段, 这个改进过程大多凭借经验进行, 然而人的经验和直觉会受到诸多因素的影响, 可能导致改进后的产品仍无法满足人机工程设计原则。

基于仿真技术的航天器-系统整合测评技术与平台一直是国内外航天界关注的重点领域。NASA

收稿日期: 2022-09-11

基金项目: 国家社科基金艺术学一般项目(20BG115); 湖南省教育厅优秀青年项目(19B568); 湖南省科技创新计划资助(2020RC1009); 空间站**产品工业设计(航天员科研训练中心)。

作者简介: 姚湘(1982—), 男, 博士, 教授, 主要研究方向为人因工程与设计。

Ames 研究中心于 80 年代中期开始,开发的人机整合设计与分析系统 MIDAS,能够实现行为绩效模拟、作业负荷分析、可视域、可达域分析等功能,对方案阶段的人-系统整合分析与测评起到重要支撑作用^[2]。而我国航天员中心人因工程重点实验室也根据载人航天工程重大需求,借助 973 项目研制了我国首个拥有自主知识产权的航天员建模与仿真系统 AMSS,初步实现了对骨骼肌肉生物力学、认知绩效和工作负荷等建模仿真^[3]。同时仿真技术也应用于不同领域的人因工程评价,如张帅等^[4]以虚拟仿真技术为基础,系统分析了载人潜水器舱室空间环境特征,对潜航员空间舒适性分析与分析方法进行了讨论。张乐等^[5]用人机工程学理论对元胡收获机驾驶室主要元件进行设计,并以 CATIA 软件平台为基础,从操作舒适性、可达性、可视性等角度对整个驾驶系统进行仿真分析与评价。

本文旨在通过仿真技术对空间站卫生间的人机关系进行研究,并通过实物验证仿真结果的可靠性,将有助于空间站卫生间人机工程评价体系的建立和应用,对空间站卫生间人机工程评价、设计优化等提供理论方法和技术支持。

1 空间站卫生间人机仿真流程分析

1.1 空间站卫生间使用流程

由于太空中特殊的失重环境,卫生间的操作方法也与地面上有着较大的差异,使用环境的不同直接影响到航天乘员操作的舒适性^[6-8]。通过对 NASA 航空航天局公开技术视频、文件和 ESA 发布《Astronaut Biographies Home Page》的内容进行分析^[9],其所能使用的主要组件有:大小便收集装置、大小便收集控制系统、负压密封设备等。空间站卫生间使用流程,见图 1。

在使用尿液收集器时,航天员首先取出漏斗型的

尿液收集器,然后将尿液收集器与尿液收集软管相互连接,利用脚步限位器将双脚进行固定,在固定后宇航员将身体重心下移,用手开启大小便收集控制器按钮,在吸力的作用下将尿液收集,在收集完毕后关闭控制器开关,使用专业的纸巾对尿液收集器进行擦拭,如图 1 橙色线所示。

在使用粪便收集控制系统时,航天员准备好粪便袋、纸巾、密封袋等物品,利用地板上的限位器将双脚进行固定,在掀开马桶盖,将粪便袋放置在坐便器中进行固定后,坐在马桶上操作大小便收集控制设备,开始排泄,随后排泄物被收集到粪便袋中,解开限位器,对个人卫生进行整理后,解除桶盖的固定作用,将相关的卫生用品投掷到粪便袋中,拿出密封袋,将其进行密封处理,封装后放入废品收集袋,并对马桶进行清理,如图 1 青色线所示。

在使用垃圾封装系统的过程中,航天员通过控制器将大小便收集系统中的风机打开,用以提供吸力作用,便开始负压封装,最后通过控制器的操作实现垃圾的封装,如图 1 蓝色线所示。

负压封装系统的程序包括:航天乘员将密封袋与负压封装组件气路接口耦合,随后推动手柄后,将密封袋分别放置到封装的相应区域,下压进行密封袋的封装工作。在负压封装的过程中需要完成密封、抽气才可以完成负压封装。在完成系列工作内容后,最后将负压封装气路接口与密封袋断开,抬起手柄,将密封袋放置在回收处理区域,如图 1 紫色线所示。

1.2 空间站卫生间人机仿真应用流程

通过使用 DELMIA 软件中的人机工程学设计与分析模块进行仿真分析,建立身体尺寸数据和身体坐姿数据,对作业姿态进行人机仿真实验。结合人体的活动角度和相关部位的活动自由度设计相关实验内容,从而验证完成动作的人机仿真数据。

人体模型库源自人体尺寸数据建模,人体模型结

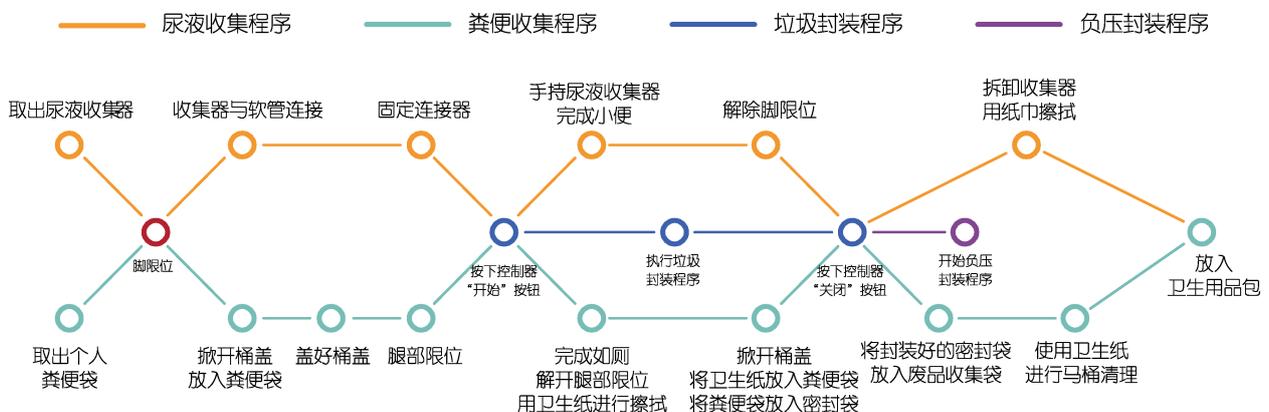


图 1 空间站卫生间如厕使用流程

Fig.1 Toileting process in the space station toilet

合人体的尺寸特定和力学特征能够进行人体的运动特性的数据体现。使用者可以结合实验的需求对人体外观尺寸进行修改, 从而获取各类型人群的仿真模型。姿态分析主要是在不同的姿态环境下对人体作业情况进行分析, 了解姿态的舒适性、可视性、可达性等, 并且姿态会随着人体的作业情况更新。空间站卫生间人机仿真应用流程见图 2。

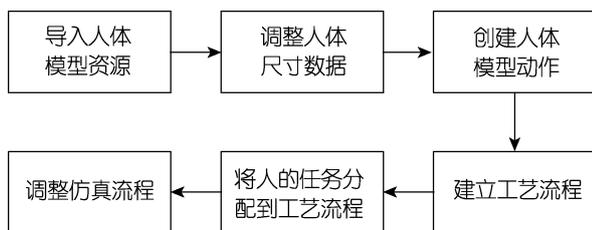


图 2 空间站卫生间人机仿真流程
Fig.2 Human-machine simulation process of space station toilet

2 空间站卫生间人机仿真场景构建

2.1 航天飞行乘员人体建模

根据空间站卫生间人机仿真需要, 按照 GJB 4856-2003《中国男性飞行员人体尺寸标准》^[10], 构建虚拟航天飞行乘员人体模型。为使仿真结果适用于大部分航天乘员, 在使用人体测量数据时, 不仅需要考虑航天飞行乘员的身高与空间大小的关系, 还需要考虑负压封装与控制器等的位置能否适应不同身材者的使用, 属于平均尺寸设计^[11]。因此, 本文仿真实践主要采用第 50 百分位数值作为建模依据, 辅以第 5 和第 95 百分位数值作为参考。在 DELMIA 软件设置可更改的人体参数选项, 构建符合中国人体结构尺寸特征的男性航天乘员数字人体模型, 具体参数见表 1。

表 1 航天飞行乘员人体建模参数
Tab.1 Human modeling parameters of space flight crew

名称	值/mm		
	P_5	P_{50}	P_{95}
身高	1 639.0	1 708.0	1 786.0
全臂长	516.0	550.0	587.0
上臂长	293.0	315.0	342.0
前臂长	213.0	235.0	255.0
乳头高	1 165.0	1 225.0	1 292.0
腰点高	919.0	972.0	1 030.0
会阴高	734.0	788.0	840.0
胸宽	278.0	306.0	338.0
腰节宽	246.0	279.0	321.0
臀宽	303.0	327.0	354.0

2.2 空间站卫生间环境建模

本文以某科研阶段空间站卫生区产品工业设计课题为基础, 构建基于 DELMIA 的空间站卫生间仿真场景, 能够高度地满足真实性、交互性等基本要求。空间站卫生间场景主要由大小便收集器、控制器、限位器及扶手模型和框架环境模型等组成, 为减少计算机不必要的内存占用, 提高仿真效率, 对空间站卫生间仿真场景进行了轻量化处理, 仅保留了仿真流程需要的部件, 见图 3。

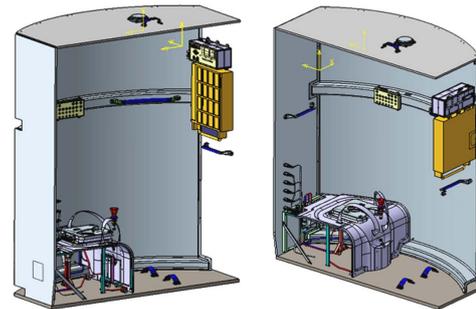


图 3 空间站卫生间仿真场景
Fig.3 Simulation scene of the space station toilet

2.3 空间站卫生间使用流程动作模组设计

根据空间站卫生间使用流程图对航天乘员如厕过程进行划分, 理解各阶段进行操作的具体要求, 将空间站卫生间如厕过程分解为 a 站姿、b 坐姿、c 手按“开始”、d 起身左手辅助、e 起身右手辅助、f 负压封装操作、g 手按“关闭”等阶段, 对 7 个主要姿态进行人机仿真分析, 见图 4。



图 4 如厕阶段姿态分解
Fig.4 Decomposition of postures in each toileting stage

3 人机仿真结果

3.1 空间站卫生间可达域判别

基于人机工程可达域空间分析的主要内容是航天乘员在如厕过程中,所需操作的仪器设备是否均在航天员可达域范围内,可达空间能否为使用者创造舒适的工作环境等。在分析过程中一般以中指指尖为最大可达域的分析基准,从而得到操作空间的最大范围值。

在人体行为模块当中,运用计算功能结合航天员在使用流程中的姿态顺序,对伸手的活动范围进行仿真模拟分析,通过选定合理的分析对象和相关尺寸参数设定,从而获得蓝色的可达区域,该区域也就是手臂作业所能够触及的区域,见图5。如图5a—5g所示,为航天员在如厕过程中7个主要姿态的左、右手空间可触及范围。

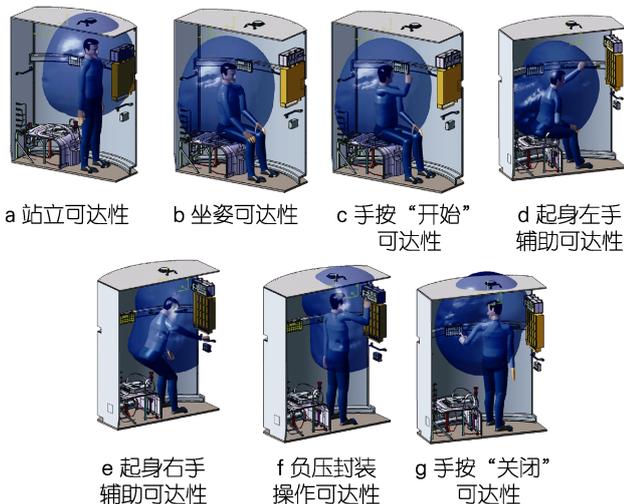


图5 空间站卫生间可达性分析

Fig.5 Analysis on accessibility of space station toilet

通过使用 DELMIA 软件 Human Activity Analysis (人体活动分析) 模块中的 Clash (检查碰撞) 工具,对航天员模型的可达域与空间站卫生间内的主要操作仪器进行碰撞分析,可以精准判断相关仪器设备是否处于可达包膜之内。根据以上对航天员手的仿真分析可知,空间站卫生间中大小便收集控制器和负封压组件均在椭球型包络区域内,即该空间站卫生间人机尺寸设计满足航天员的空间可达域需求。

3.2 空间站卫生间可视域判别

可视性仿真模拟主要是航天员在使用卫生间的过程中,对相关设备信息的获取及设备操作使用的舒适性和顺利性,通过人体模型进行可视性的分析,从而获得在正常作业环境下的视野范围和最佳舒适性视野范围。在卫生间废物收集系统工作时,航天员需观测负封压的运行状态。因此,对航天员进行视

野模拟是一项很有必要的工作。

结合需求将颈部关节进行角度调整,使虚拟航天成员视野范围内能够观察到整个空间站卫生间范围。利用 DELMIA 软件中的 Vision 工具对动态视野进行分析,结合人体视区对虚拟人可视锥进行区域划分,越靠近中心的区域可视性越好^[12]。然后点击 Vision 工具,定义属性中的视野类型为 Binocular,可得到航天员在空间站卫生间使用过程中各个阶段的可视范围,可视性分析见图6。

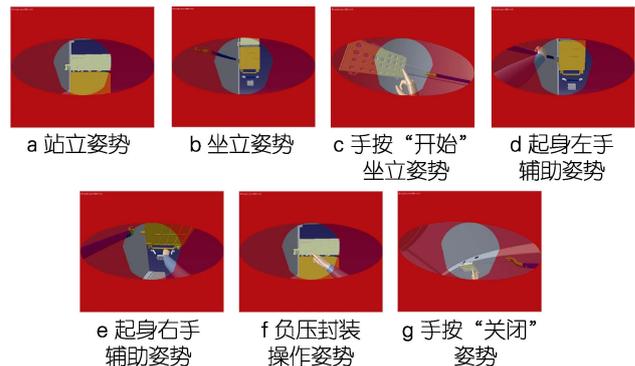


图6 操作可视性分析

Fig.6 Operational visibility analysis

通过以上对航天乘员的视野仿真分析,在该使用姿态下,其能够比较清晰地观测到负封压组件和控制器的工作状态。因此,该空间站卫生间的视野模拟符合驾驶员的航天员使用需求,即满足人机工程学设计要求。

3.3 航天飞行乘员人体姿态分析

人体姿态分析,可以对人的整体或局部姿态进行检查、评分和优化,从而确定使用者在作业过程中的人机交互最佳使用情况,并对其工效进行评定。

进入姿态分析模块,利用其中的工具菜单栏的功能,依据机械设计手册,对人体重要关节部位的最佳角度和最大范围角度的数值进行设置。工业设计与人机工程和 DELMIA 仿真软件允许用户创建并保存自定义的舒适度与人体主要活动范围,得出的主要调节范围见表2^[13-15]。以肩关节为例,白色的杆状代表人体模型,杆件交接的部分则虚拟成人的关节部位,杆件交接会形成不同的角度与范围,从而有了不同方向的自由度。对各个关节不同方向的自由度区域进行划分,从而将关节的最佳舒适度进行评分。在关节舒适性活动区域,越是在中心位置则表明得分越高,舒适性便越好,越是远离中心位置,则表示舒适性越差,得分也就越低。将关节不同方向的自由度分为5个不同的区域,绿色表示舒适区域,黄色表示可操作区域,红色表示极限区域^[16]。

以肩关节为例,由表2可知肩关节前摆、后摆的最大角度为+110~-25°,舒适调节范围为+20~+60°。

表 2 人肢体活动范围和舒适姿态的调节范围
Tab.2 Range of human limb movement and adjustment range of comfortable posture

关节	活动状况	最大角度/°	最大范围/°	舒适调节范围/°
肘关节	弯曲、伸展	+140~0	140	+85~+110
	上摆、下摆	+180~-45	225	+15~+35
肩关节	外摆、内摆	+95~-20	115	+40~0
	前摆、后摆	+110~-25	135	+20~+60
膝关节	前摆、后摆	0~-135	135	-95~-120
	前弯、后弯	+85~-20	105	+15~+50
腰关节	左弯、右弯	+15~-15	30	+7~-7
	左转、右转	+18~-18	36	+10~-10
髋关节	前弯、后弯	+120~-15	135	+85~+100
	外拐、内拐	+45~-30	75	+30~-15
腕关节	弯曲、伸展	+75~-60	135	+40~0
	外摆、内摆	+30~-30	60	+15~-20
颈关节	低头、仰头	+25~-25	50	+12~+20
	左歪、右歪	+55~-55	110	+10~-10
	左转、右转	+55~-55	110	+15~-15

因此, 定义可达极限区域为 0°~ -25°、+100°~ +110° (40 分), 可作业区域为 0°~ +20°、+60°~ +110° (60 分), 舒适区域为 +20~ +60 (80 分), 同理设定肩关节其他自由度的调节范围。运用 DELMIA 的人体姿态评估模块, 可使用图表形式比较直观地输出所有自由度评价结果。

根据对人体各结构所有自由度的综合评估计算, 由 DELMIA 软件可得出针对 7 组使用流程下姿态的各部位舒适度分值结果, 见图 7。

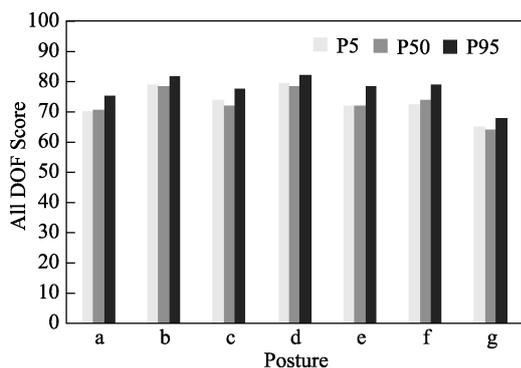


图 7 不同百分位人体舒适度评价数值
Fig.7 Human comfort evaluation values in different percentiles

通过分析以上的人体模型姿态舒适度分值, 可知第 5、第 50、第 95 百分位的人体模型, 在空间站卫生间如厕各阶段的姿态舒适度总分均超过 60 分, 见图 7。姿态舒适度仿真结果表明, 虚拟航天乘员的大部分关节在如厕过程中处于可作业区域与舒适区域之间。因此, 该空间站卫生间能为航天乘员提供一个

舒适的如厕环境, 其结构布局基本符合人机工程学设计原则。

4 实物验证与后续优化分析

4.1 实物验证

为验证仿真实验数据的可靠性, 根据基本原理可划分、技术成熟度、材料性能应用、分析模型产品特征和制作成本等综合分析, 采用激光固化成型 (Stereo Lithography Apparatus, SLA) 技术和熔融沉积技术 (Fused Deposition Modeling, FDM) 进行此空间站卫生间部分产品的 1:1 比例模型制作^[17], 并选取与实验中 P_5 、 P_{50} 、 P_{95} 百分位虚拟航天乘员身体尺寸数据相近的三名实验人员进行局部验证实验, 具体身体尺寸数据见表 3。

表 3 实验人员身体尺寸数据
Tab.3 Testee's body size data

名称	值/mm		
	P_5	P_{50}	P_{95}
身高	1 645	1 710.0	1 810.0
全臂长	525.0	560.0	580.0
上臂长	300.0	320.0	320.0
前臂长	225.0	240.0	260.0
乳头高	119.0	1 240.0	1310.0
腰点高	930.0	980.0	1 070.0
会阴高	740.0	790.0	810.0
胸宽	280.0	310.0	340.0
腰节宽	270.0	290.0	329.0
臀宽	320.0	330.0	343.0

根据图 7 的数据结果, 选取部分姿态进行验证实验, 结果表明实验人员在各姿态下可视性、可达性、姿态舒适性均较好, 无明显不适, 符合该姿态下的人机仿真结果, 见图 8。

4.2 后续优化分析

本文运用 DELMIA 软件, 依据 GJB 4856—2003 中国男性飞行员人体尺寸, 建立了航天飞行乘员人体尺寸模型, 以虚拟人体模型的关节自由度及动作活动角度设计仿真实验。将空间站卫生间如厕过程分解成 7 个主要姿势, 分析身体姿势并对姿势进行评估, 同时判别空间站卫生间可达域及可视域, 对空间站卫生间使用过程舒适性进行分析。可以得知人体在空间站卫生间中不同姿态的调整导致人体舒适度分值的改变。通过对人体模型同一部位舒适度的分析, 可知此空间站卫生间结构布局虽然基本满足了人机工程学要求, 但依然存在需要不断改进舒适度的设计点。根据仿真数据结果分析, 在虚拟航天飞行乘员各部位中, 手部的舒适度数值浮动变化较大, 见图 9。



图 8 模型验证实验

Fig.8 Model verification experiment

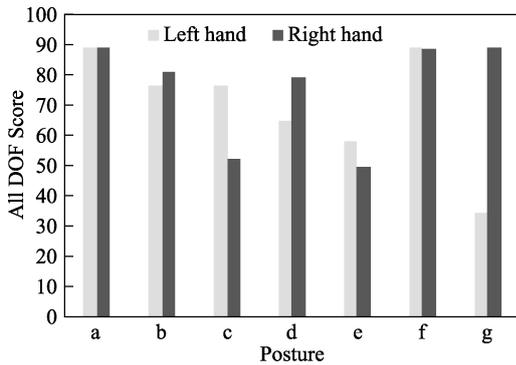


图 9 手部各姿态舒适值

Fig.9 Hand comfort value of each posture

以上数据表明，在虚拟航天飞行乘员处于姿态 c（手按“开始”）、e（起身右手辅助）和 g（手按“关闭”）时，左手和右手的舒适度变化较为明显，且舒适度分值低于 60 分，说明在该姿态下手部舒适度较低。因此，在今后空间站卫生间易用性的设计中，应针对舒适度较低的部位和特定的姿态进行优化设计，以便提升航天飞行乘员的整体舒适性和操作的协调性。

5 结语

本文运用 DELMIA 软件对空间站卫生间的使用流程进行了仿真分析与评价，将建立的航天飞行乘员人体尺寸模型导入空间站卫生间三维模型中，构建了人机仿真虚拟场景。通过对空间站卫生间使用流程姿态分解，调整了人体模型的如厕姿态及舒适角度范

围，对如厕各阶段可达性、可视性和姿态肢体舒适性进行了仿真分析评价，结果表明在航天员如厕的各阶段可达性、可视性与舒适性均符合人机工程学要求。最后通过对该空间站卫生间的实物验证分析，证明使用仿真技术评价该空间站卫生间的人机关系是可行的。

随着神舟十二号载人飞船与天和核心舱成功对接，该卫生区系统也亮相太空，为航天员的长期驻留提供了良好的如厕环境。由于空间环境的特殊性，在今后对航天产品的设计中，可针对中大型或与航天飞行乘员相关的装置提前进行仿真分析，以达到减少试产次数、缩短设计周期、提高产品工效的良好效果，为航天乘员提供一个更舒适、安全的空间站环境。

参考文献：

- [1] 陈善广, 姜国华, 王春慧. 航天人因工程研究进展[J]. 载人航天, 2015, 21(2): 95-105.
CHEN Shan-guang, JIANG Guo-hua, WANG Chun-hui. Advancement in Space Human Factors Engineering[J]. Manned Spaceflight, 2015, 21(2): 95-105.
- [2] GORE B F. Man-machine Integration Design and Analysis System (MIDAS) v5: Augmentations, Motivations, and Directions for Aeronautics Applications[C]// CACCIABUE P, HJÄLM DAHL M, LUEDTKE A, et al. Human Modeling in Assisted Transportation. Milano: Springer, 2011: 43-54.
- [3] 王春慧, 陈晓萍, 蒋婷, 等. 航天工效学研究与实践[J]. 航天医学与医学工程, 2018, 31(2): 172-181.
WANG Chun-hui, CHEN Xiao-ping, JIANG Ting, et al. Research and Practice in Space Ergonomics[J]. Space Medicine & Medical Engineering, 2018, 31(2): 172-181.
- [4] 张帅, 何卫平, 陈登凯, 等. 载人潜水器舱室空间舒适性复合评估方法[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2019, 51(10): 83-89, 193.
ZHANG Shuai, HE Wei-ping, CHEN Deng-kai, et al. Compound Evaluation Method for the Space Comfort of Manned Submersible[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2019, 51(10): 83-89, 193.
- [5] 张乐, 孙志学, 陈晨, 等. 基于人机工程学的元胡收获机驾驶室设计[J]. 陕西理工大学学报(自然科学版), 2018, 34(4): 16-22.
ZHANG Le, SUN Zhi-xue, CHEN Chen, et al. Design of Yuanhu Harvester Cab Based on Ergonomics[J]. Journal of Shaanxi University of Technology (Natural Science Edition), 2018, 34(4): 16-22.
- [6] 王黎静, 魏民, 李洪鹏. 载人航天器废物收集系统发展回顾及启示[J]. 航天医学与医学工程, 2014, 27(3): 230-234.
WANG Li-jing, WEI Min, LI Hong-peng. Review and Enlightenment of the Development of Waste Collection System in Manned Spacecraft[J]. Space Medicine & Medical Engineering, 2014, 27(3): 230-234.

(下转第 187 页)