基于 STAMP 的民航进餐推车人因设计

徐江华[1,2]，郭慧凌[1]
（1.上海工程技术大学，上海 201620；2.同济大学 上海国际设计创新研究院，上海 200092）

摘要：目的 为解决空乘人员因工作负荷大、工作环境颠簸易发生碰撞事故等导致患肌肉骨骼病概率逐年上涨的问题，对民航进餐推车造型设计过程进行研究。**方法** 确定民航进餐推车系统中的安全约束，构建基于层级模式的民航进餐推车事故风险控制—人因模型；识别控制模型中潜在的不安全控制行为，采用层次分析法对这些行为的综合权重值进行计算并排序；运用虚拟仿真软件进行人因分析与设计优化，得到最优方案。**结果** 通过民航进餐推车设计实践，验证该方法的可行性与有效性。**结论** 在民航进餐推车设计过程的前期，引入 STAMP 模型和人因工程理论，可提升空乘人员在进餐推车服务过程中的安全性与舒适性，为研制符合空乘人员行为方式的新型民航进餐推车提供新的思路。

关键词：系统理论事故模型和过程；人因工程；民航进餐推车；安全性；事故预防
中图分类号：TB472 **文献标识码：**A **文章编号：**1001-3563(2022)10-0283-10
DOI：10.19554/j.cnki.1001-3563.2022.10.034

Human Factors Design of Civil Aviation Dining Cart Based on STAMP

XU Jiang-hua[1,2], *GUO Hui-ling*[1]
(1.Shanghai University of Engineering Science, Shanghai 201620, China; 2.Shanghai International College of Design and Innovation, Tongji University, Shanghai 200092, China)

ABSTRACT: The paper aims to solve the problem that the probability of flight attendants suffering from musculoskeletal diseases increases year by year due to heavy workload and bumpy working environment, and to study the modeling design process of civil aviation dining cart. The safety constraints in the civil aviation dining cart system are determined and the accident risk control-human factor model of the civil aviation dining cart based on the hierarchical model is built; potential unsafe control behaviors in the control model are identified, and the comprehensive weight values of these behaviors are calculated and sorted by AHP. The virtual simulation software is used for human factor analysis and design optimization, and the optimal scheme is obtained. Through the design practice of civil aviation dining cart, the feasibility and effectiveness of this method are verified. By introducing the STAMP model and human factors engineering theory into the preliminary design process of civil aviation dining cart, the safety and comfort of flight attendants in using dining cart for service can be improved, which provides a new idea for developing a new type of civil aviation dining cart that conforms to flight attendants' behavior.

KEY WORDS: STAMP; human factors engineering; civil aviation dining cart; security; accident prevention

民航进餐推车是空乘人员为旅客提供备餐、送餐服务的最重要的厨房设施，其设计的优劣直接影响到空乘人员的工作效率、使用舒适性及服务满意度。随着空中服务延伸到短途飞行的上升和下降阶段，狭小机舱环境中大量重复的备餐动作及飞机颠簸等引发的潜在不安全性因素，使空乘人员患肌肉骨骼类疾病的概率大幅上升。一项针对民用航空公司空乘人员患肌肉骨骼疾病（WMSDs）概率的调查显示，空乘人员总患病率高达 64.4%（522/810）[1]。当前，民航进餐推车的研发多集中于结构、材料的隔热与阻燃等物

收稿日期：2021-12-14
基金项目：2020 年度上海艺术科学规划项目一般项目（YB2020F02）
作者简介：徐江华（1977—），男，博士，副教授，主要研究方向为航空装备设计与飞机客舱舒适性设计。

理安全方面[2]，较少从事故预防与舒适性等角度进行造型设计。在此背景下，提出基于 STAMP 模型的民航进餐推车人因设计方法，在预防进餐推车事故发生的同时，提升空乘人员使用的舒适性与安全性。

1 民航进餐推车人因研究现状

欧美国家在民航进餐推车人因方面的研究较早，Hoozemans 等[3]对空乘人员在使用进餐推车过程中的推拉等常用动作进行了研究；日本学者 Eunja[4]对飞机厨房空间及空乘人员工作内容进行了研究，并对进餐推车进行了结构改进设计；Hans[5]对空乘人员服务流程进行了分析研究，研究结果显示，当乘务员采用不安全的姿势移动和操纵负重的手推餐车时很容易受伤；Schaub 等[6]研究结果表明，在有倾角的飞机客舱地板上使用较大负载重量的推车时，空乘人员的工作负荷通常会超过身体的承受极限。国内关于民航进餐推车人因方面的学术研究更注重硬件、工程等方面。现阶段，民航进餐推车设计主要参考 CAAC 发布的《飞机厨房手推车、物品箱及相关组件的最低设计和性能》以及 FAA、EASA 等发布的适航设计准则。随着民航业的快速发展，仅从标准化着手已无法满足当下进餐推车的安全性需求和与时俱进的舒适性需求，因此，有必要对现有推车进行人因优化设计。

2 STAMP—人因设计方法概述

2.1 STAMP 模型

STAMP（Systems Theoretic Accident Model and Process）即事故分析模型，又被称为事故预防与风险控制模型，由 Leveson[7]于 2004 年提出。该模型指出在一个系统的开发和建设过程中，其发生故障的概率和隐含的结果代表了一种风险，而设计的主要目标就是降低和消除风险[8]。STAMP 模型主要应用于调查系统中安全事故发生的成因、系统安全性的校验等方面，并以模型的方式将系统中风险防控的执行机构与流程呈现出来。STAMP 模型由安全约束、分层控制结构和过程模型 3 个部分组成，强调系统安全的本质是控制问题，在整个系统中分层安全控制结构采用由上至下的层级关系，各控制层次之间的交互关系用过程模型表示，一般过程模型包含控制器与控制过程、二者间的输出与反馈过程，以及过程的输入和输出、外界信息的干扰[9]。当构成分层控制结构的个别或部分层级之间的控制回路存在缺陷时，随之产生的一系列复杂过程会使系统行为违反安全约束，导致事故发生[10-12]。由于航空领域对安全性的特殊强调，若在民航进餐推车设计初期没有预先考虑到潜在事故发生的可能性，在飞行过程中一旦发生事故，则后果将是非常惨重的，因此，需要将 STAMP 模型与人因设计方法相结合，从系统层面将事故预防与使用舒适性纳入设计范畴。

2.2 基于 STAMP—人因模型的设计流程

2.2.1 明确服务流程并确立安全约束

在民用航空领域，安全高于一切。根据以往学者的研究成果和民航事故统计表明，飞机颠簸引发的餐车撞伤是飞机厨房设施系统中发生的事故的主要构成部分。由于飞机厨房及客舱通道的空间非常狭小，当飞机发生颠簸时，进餐推车作为机上的移动设施，容易出现堵塞客舱通道、磕碰甚至重伤乘客等问题，其设计的优劣对乘客满意度有直接的影响，进而影响适航性，尤其是客舱的安全性[13]。为预防上述风险的发生，应明确民航进餐推车运作流程与安全约束。

2.2.2 构建人因—事故风险模型

飞机厨房空间可以看成是一个在狭小空间状态下注重安全性能与工作效率的飞机厨房系统。民航进餐推车 STAMP—人因控制过程模型见图 1。从图 1

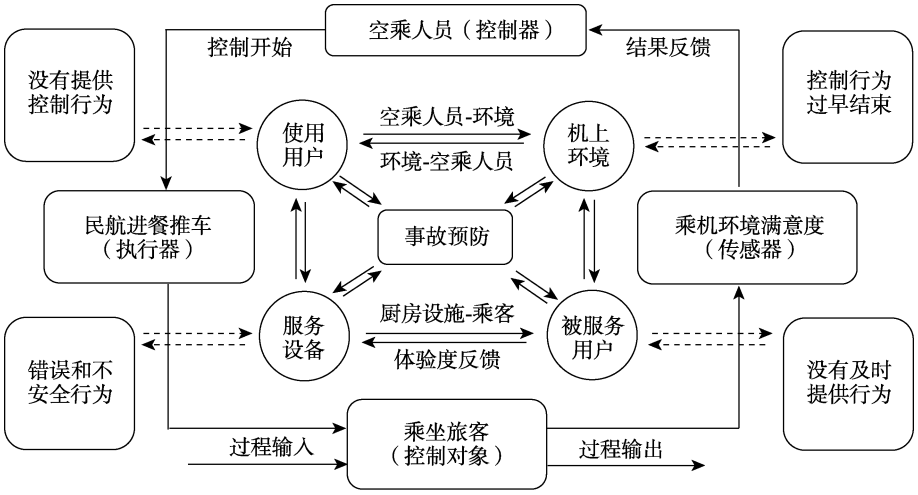


图 1 民航进餐推车 STAMP—人因控制过程模型

Fig.1 STAMP: human factor control process model of civil aviation dining cart

中可知，进餐推车与乘机满意度反馈机制分别对应过程模型中的执行器与传感器，空乘人员担任控制器的角色，通过使用餐车为处于被控主体的乘客提供机上餐饮服务，航班结束后，乘客将乘机体验反馈给机组成员形成闭环。空乘人员与乘客分别对应过程模型中的控制器与控制对象，担任着人因系统中的用户角色，民航进餐推车与乘机环境分别对应人因系统中的服务设施与环境因素，4 个部分的交互关系构建出飞机厨房设施系统中进餐推车使用阶段的 STAMP—人因控制过程模型。

2.2.3　不安全控制行为识别

各层级组成的事故预防模型与人—机—环境为主的人因系统相结合。对控制回路中的组件进行逐项检查，找出空乘人员在整个服务流程中与进餐推车交互时潜在的不安全控制行为，并根据没有提供所需要的控制行为、提供错误或者不安全的控制行为、提供的控制行为延迟、提供的控制行为过早结束 4 种控制缺陷类型进行划分，将潜在不安全行为与人因系统中各交互因素相对应，为后续优化设计提供依据。

2.2.4　AHP 筛选与人因优化

识别出进餐推车的不安全控制行为后，引入层次分析法（AHP）对所识别的不安全行为进行权重排序，筛选出最易导致事故发生的 3 项综合评分较高的潜在不安全行为。使用 JACK 虚拟软件对空乘人员的疲劳程度与各关节进行受力分析[14-16]，对空乘人员使用习惯、作业姿势、身体部位舒适度等因素进行分析，改良并优化餐车造型与内部结构，从而规避客舱事故的发生。

3　民航进餐推车设计实践

3.1　系统安全约束识别

为保障民航进餐推车在厨房系统中正常运行，安全约束包括：空乘人员按照规定的行为准则正确操作餐车；起飞前，空乘人员应检查餐车，确保餐车在飞行过程中正常运行；维修人员定期对餐车开展故障排查与维修。

3.2　构建民航进餐推车 STAMP—人因模型

将进餐推车代入飞机厨房系统人因—事故预防模型中进行分析，针对控制结构的核心部分，得出在使用阶段的局部控制结构和控制回路，见图 2。

3.3　STAMP—人因模型中不安全行为识别

对安全控制模型中处于使用阶段的民航进餐推车层级控制回路和安全约束进行分析，识别餐车层级系统中的不安全控制行为，将人—机—环境系统中的 6 个要素与潜在事故过程原因进行对照，识别结果见表 1。

3.4　不安全行为 AHP（层次分析法）筛选

3.4.1　建立目标层的层次分析结构

对民航进餐推车设计过程中应该规避的不安全控制行为进行定量化分析，以筛选出占比较大的控制行为并进行设计优化，针对上述“可能发生的行为过程”基于层次分析法来构建层析结构。将目标层不安全控制行为重要性用 A 表示，准则层用 B_{1i}=1,2,3 表示，要素层用 B_{ii} 表示，采用 1—9 标度法对层次结构模型中的各因素进行赋值，见图 3。

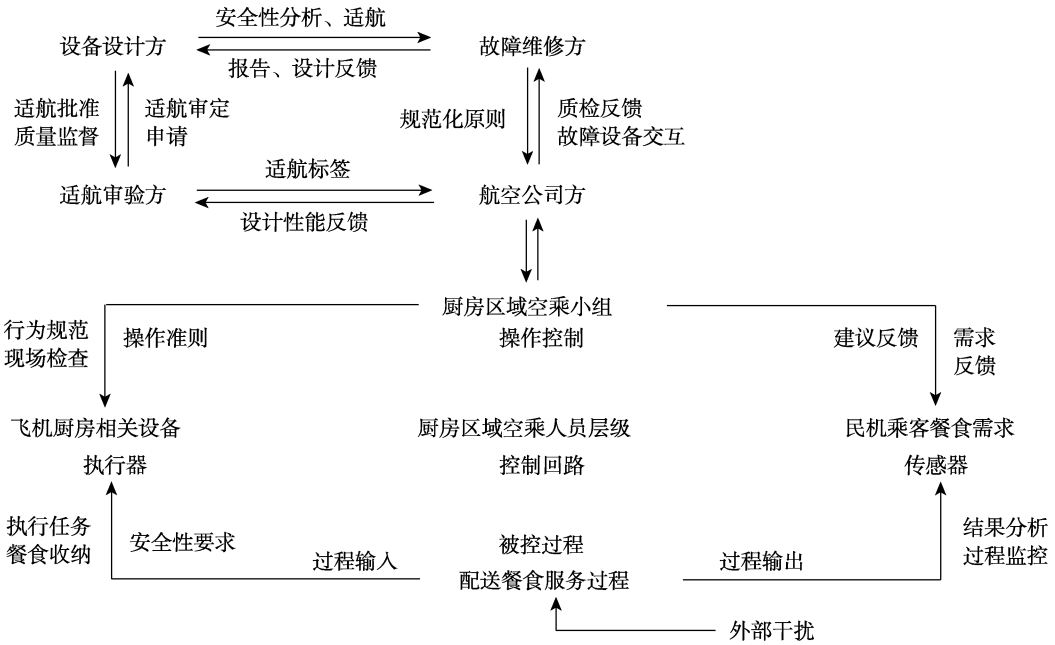


图 2　民航进餐推车使用阶段分层控制结构与过程模型

Fig.2 Hierarchical control structure and process model of civil aviation dining cart in use stage

表 1 民航进餐推车设施潜在不安全控制行为识别与分析

Tab.1 Identification and analysis of potential unsafe control behaviors of dining cart facilities in civil aviation

不安全控制行为类型	不安全控制行为	可能发生过程	人因关系
没有提供所需要的控制行为	①推车无法提供服务 ②无法使用进餐推车配餐	①起飞前未检查民航进餐推车 ②进餐推车在飞行过程中出现故障 ③颠簸等突发状况导致无法服务	人—环 机 环—人
提供错误或不安全控制行为	①民航进餐推车自身存在故障 ②空乘工作存在不安全控制行为	①未按照操作准则使用进餐推车 ②未遵循正确流程进行配餐服务 ③进餐推车不便使用导致出错频率高④误操作导致使用过程中出现故障	人—机 人 机—人 人—机
控制行为延迟	进餐推车在配餐过程出现延迟	①整理使用过的进餐推车耗时过长 ②设法解决故障 ③使用进餐推车过程中人员受伤 ④进餐推车没有固定容易碰撞舱内设施	环—人 人—机 环—人 机—人
控制行为过早结束	提前结束使用进餐推车进行配餐的操作	①结束配餐流程前未整理设施 ②漏掉配餐操作等工作环节 ③未按照反馈需求进行备餐服务	人—机 人 人—环

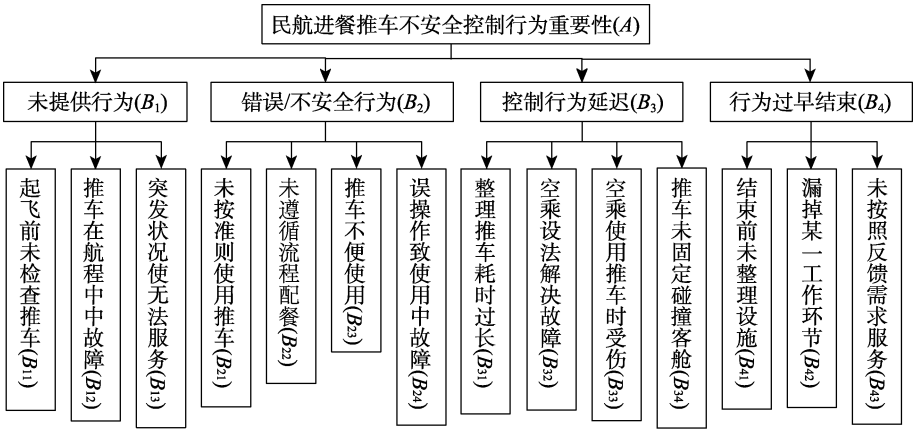


图 3 民航进餐推车使用阶段局部控制结构和控制回路

Fig.3 Local control structure and control loop of civil aviation dining cart in use stage

3.4.2 各控制行为对应判断矩阵

为保证不安全控制行为评估过程的客观性，由民航进餐推车结构设计人员、现役南航空乘人员及设计学类专业老师形成专家小组，并构建判断矩阵，分析如下：

$$\boldsymbol{A}=\begin{bmatrix}1 & 3 & 3 & 8\\ 1/3 & 1 & 2 & 5\\ 1/3 & 1/2 & 1 & 4\\ 1/8 & 1/5 & 1/4 & 1\end{bmatrix}\quad \boldsymbol{B}_1=\begin{bmatrix}1 & 5 & 7\\ 1/5 & 1 & 3\\ 1/7 & 1/3 & 1\end{bmatrix}$$

$$\boldsymbol{B}_2=\begin{bmatrix}1 & 1/3 & 1/8 & 1/3\\ 3 & 1 & 1/6 & 1/2\\ 8 & 6 & 1 & 7\\ 3 & 2 & 7 & 1\end{bmatrix}\quad \boldsymbol{B}_3=\begin{bmatrix}1 & 1/2 & 3 & 1/6\\ 2 & 1 & 2 & 1/5\\ 1/3 & 1/2 & 1 & 1/7\\ 6 & 5 & 7 & 1\end{bmatrix}$$

$$\boldsymbol{B}_4=\begin{bmatrix}1 & 3 & 5\\ 1/3 & 1 & 2\\ 1/5 & 1/2 & 1\end{bmatrix}$$

3.4.3 层次总排序与优化内容确定

利用 Yaahp 层次分析软件计算方案层中各要素的权重值并排序，评价结果均通过了一致性检验，见表 2。“进餐推车不方便使用”“起飞前空乘人员未检查进餐推车”“进餐推车没有固定导致撞伤机上乘员”是可能会导致事故发生的 3 个重要的潜在的不安全控制行为，因此，有必要以此为中心开展进一步的人因分析与设计优化。

3.5 不安全行为人因分析与设计优化

3.5.1 “推车不便使用”人因分析与优化

首先，为保证实验过程中数据样本的多样性，选

表 2　民航进餐推车潜在不安全控制行为综合权重
Tab.2 Comparative analysis of "safety human factors" of civil aviation dining cart

准则层因素权重	决策层因素及权重		综合权重	综合排名
未提供行为（B_1）0.249 1	起飞前未检查推车（B_{11}）	0.723 5	0.180 3	2
	推车在航程中中故障（B_{12}）	0.193 2	0.048 1	6
	突发状况使无法服务（B_{13}）	0.083 3	0.020 8	11
错误/不安全行为（B_2）0.530 2	未按准则使用推车（B_{21}）	0.056 8	0.030 1	8
	未遵循流程配餐（B_{22}）	0.120 0	0.063 6	5
	推车不便使用（B_{23}）	0.666 4	0.353 4	1
	误操作致使用中故障（B_{24}）	0.156 8	0.083 1	4
控制行为延迟（B_3）0.168 7	整理推车耗时过长（B_{31}）	0.129 9	0.021 9	10
	整空乘设法解决故障（B_{32}）	0.160 9	0.027 1	9
	空乘使用推车时受伤（B_{33}）	0.069 7	0.011 8	13
	推车未固定碰撞客舱（B_{34}）	0.639 5	0.107 9	3
行为过早结束（B_4）0.052 0	结束前未整理设施（B_{41}）	0.647 9	0.033 7	7
	漏掉某一工作环节（B_{42}）	0.229 9	0.011 9	12
	未按照反馈需求服务（B_{43}）	0.122 2	0.006 3	14

取现役空乘和空乘服务专业学生共 33 名成员作为数据测量对象。其中，女性 18 人，年龄为 19~35 岁，男性 15 人，年龄为 20~36 岁。为精确捕捉空乘人员的服务动作，以获取与真实状况最为接近的实验结果，将测试人员按照身高平均分为 5 组，以随机抽样的方式从每组被测人员的数据库中提取身高、体质量、蹲立高度、手臂长度、腿部长度的有效测量数据，见表 3。同时，调整被测人员各关节部位和角度，并建立尺寸数据，以创建虚拟模型，见图 4。

表 3　被测人员部分身体尺寸数据
Tab.3 Partial body size data of tested personnel

被测者	1	2	3	4	5
身高 S_1/mm	165.2	168.2	172.5	180.2	185.7
小臂长 b_1/mm	23.5	24.2	25.6	26.9	27.5
全臂 b_2+b/mm	52.4	53.4	56.1	59.1	59.8
小腿长 t_1/mm	45.2	46.5	46.8	48.2	49.1
全腿长 t_2/mm	95.2	96.3	97.9	101.9	103.3
蹲立高 D_1/mm	104.0	105.5	108.1	113	117.8

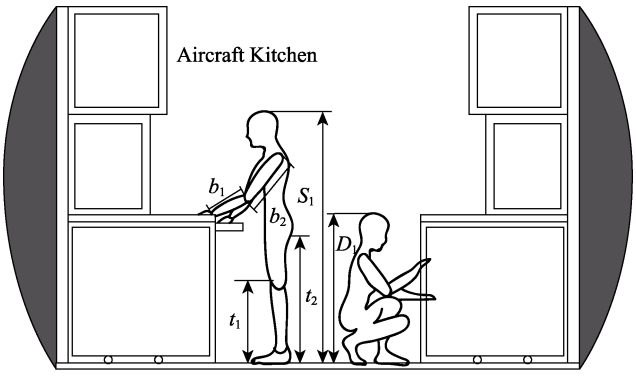


图 4　飞机厨房空间中空乘人员操作场景
Fig.4 Flight attendant operation scene in aircraft kitchen space

其次，通过观察空乘人员重复进行“直立—下蹲—直立”的作业姿势，可将其转化为 4 个固定姿势的过渡与循环，依次表现为直立姿势，多用于空乘人员在前期使用烤箱加热餐食或发放餐食过程中的初始状态；半蹲姿势，当空乘人员取放餐车中间层的餐食、饮料时，往往会稍微弯下身子，每次动作持续时长约为 3~6 s；下蹲手臂拿取姿势，当空乘人员下蹲打开车门拿取下层餐食时，每次动作持续时长约为 3~5 s；下蹲手臂抬升姿势，多出现在空乘人员回收餐盒、整理餐车等状态中，持续时间较长，约为 10~30 s。

运用 JACK 软件中的 Animation 工具，模拟空乘人员在备餐、送餐等服务流程中与推车的交互行为，将整个流程划分为 4 个阶段：第 1 阶段，直立工作状态至半蹲备餐状态；第 2 阶段，屈膝半蹲工作状态至全蹲手臂拿取餐食状态；第 3 阶段，全蹲拿取餐食状态至手臂上抬整理餐车内物品状态；第 4 阶段，完成工作任务由蹲姿转为直立状态。空乘人员工作流程仿真分析见图 5。

再次，进行服务流程虚拟仿真与结果分析。运用静态强度预测（Statistic Strength Prediction）分析工具对空乘人员完成指定任务时的姿势进行强度预测，仿真结果见图 6。Percent Capables 表示在对应强度下可以完成某一动作的人数百分比，对整个服务过程进行静力强度预测分析后可以发现，当空乘人员处于下蹲备餐姿势时，将膝盖与其他关节受力程度进行对比，所对应的 Percent Capables 数值从接近 100%下降到约 72%。

对整个流程进行 OWAS（Ovako Working Posture Analysis）分析，见表 4。OWAS 能够提供数值并评估不同姿势下空乘人员的不适度，并提供纠正必要性等级来评价姿势纠正的必要性[17]。通过分析姿势负荷级别来确定空乘人员的负荷情况，一般认为评价级别

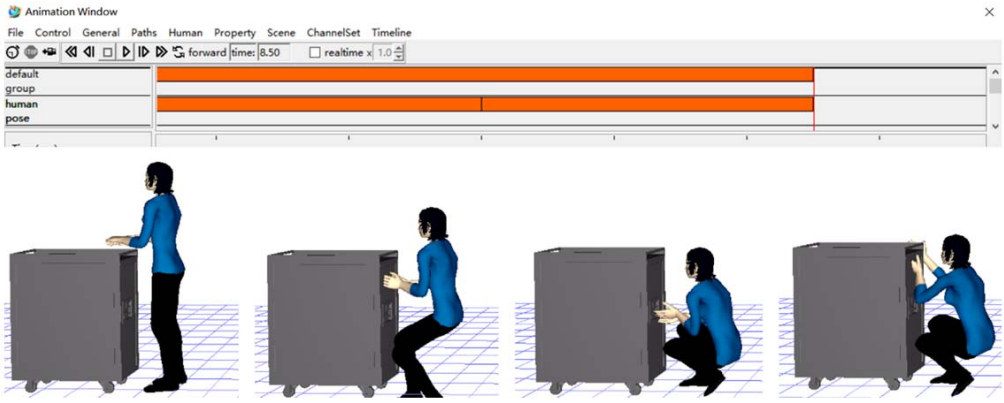


图 5 空乘人员工作流程仿真分析

Fig.5 Simulation Analysis of flight attendants' work flow

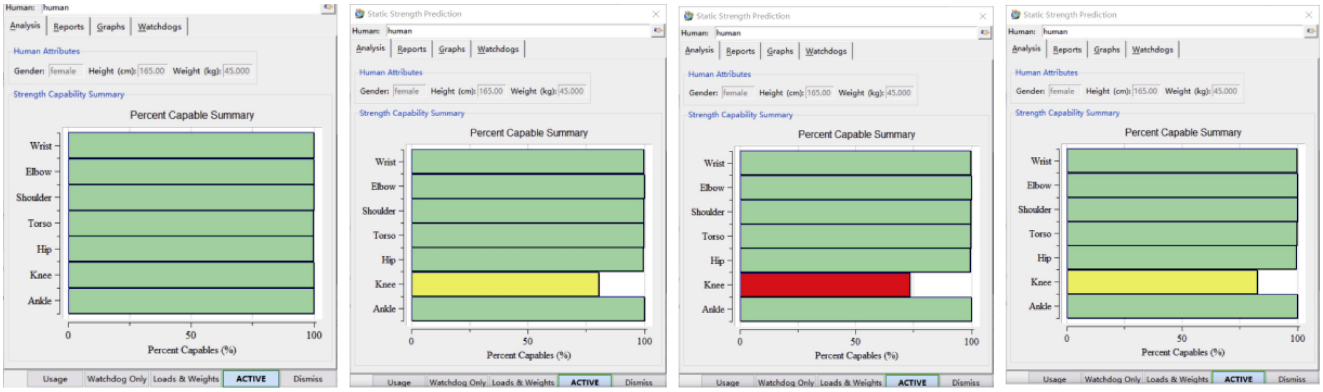
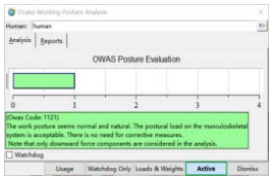
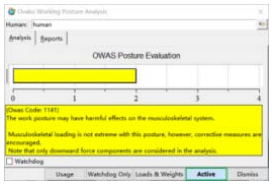
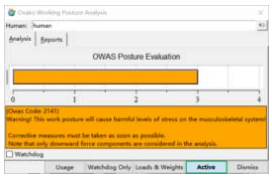


图 6 静态力分析过程各阶段对应仿真结果

Fig.6 Simulation results corresponding to each stage of static force analysis process

表 4 OWAS 工作姿势分析个人动作对应结果

Tab.4 OWAS work posture analysis individual action corresponding results

姿态	仿真结果	OWAS 级别	系数对应姿势影响
直立姿态		级别：第 1 级别 OWAS Code： 1 121	正常的姿势，不需要纠正
半蹲姿态		级别：第 2 级别 OWAS Code： 1 141	在没有保持或重复更长时间的境况下，该姿势是可行的
下蹲手臂拿取姿势		级别：第 3 级别 OWAS Code： 2 141	警告！这种工作姿势会对肌肉骨骼系统造成有害的压力，必须尽快采取纠正措施
下蹲手臂抬升姿势		级别：第 4 级别 OWAS Code： 4 341	警告！这种工作姿势可能会导致肌肉紧张，须立即采取纠正措施

不超过二级即处于正常状态，超过二级时说明姿势负荷有不良影响，应当及时纠正[18]。当空乘人员以“直立”姿势推动进餐推车时，OWAS 分析结果为 1 级，OWAS Code 为 1 121，说明姿态并没有不良影响；当空乘人员从“直立推车”姿势转为“下蹲取餐”姿势时，OWAS 分析结果从一级逐渐过渡为标红 4 级，OWAS Code 为 4 341，表明该姿势在空乘人员工作过程中并不合理，需要及时修正。

最后，基于上述人因分析，结合不安全行为对进餐推车设计的影响，进行设计优化。结合现有机上厨房空间的设施收纳结构与厨房设施的手推车设计标准进行分析[19]，确定餐车整体长、宽、高尺寸分别为 300 mm、793 mm、1 002 mm。通过对空乘人员备餐、发餐过程的人机仿真分析，发现空乘在完成第 3、4 个动作时会产生强烈的腰部及腿部不适感，在飞机厨房及狭小拥挤的客舱通道中频繁重复此动作易增加患骨骼疾病的概率，从而导致安全事故。由此，对进餐推车内部设计进行改良：采用滑轨传动装置与抽屉式结构相结合的方式运送餐盘，当空乘人员取完第 1 层餐盘上的餐盒，关上抽屉后，空抽屉沿最上层横向滑轨向后滑动，下层满载餐盒的托盘沿滑轨上移，避免空乘出现大幅的弯腰动作，使其只需对进餐推车最顶部的抽屉进行重复开合动作，即可拿取、整理餐车托盘内的餐食，见图 7。

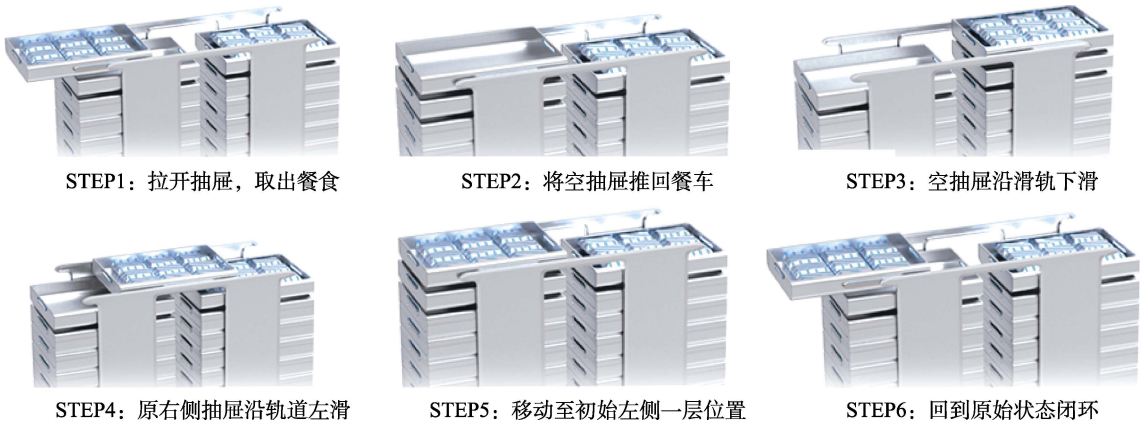


图 7　民航进餐推车内部设计结构改良

Fig.7 Improvement of internal design structure of civil aviation dining cart

新型的进餐推车内部结构设计，改良了餐盘的拿取方式，简化了空乘人员在前期备餐、中期发餐及后期回收餐食的整个工作流程中的服务动作，可减少大幅度的弯腰、下蹲等动作，从而减轻空乘人员的工作疲劳度。此外，为满足大多数女性空乘不需大幅度弯腰即可开合顶部抽屉的需要，结合谢晓雨[20]对女性空乘在直立姿态下的手功能高度数据，见表 5，选取第 95 百分位对应的数据 790 mm 作为民航进餐推车顶部餐食托盘距地面的高度，确保空乘在拿取动作时手腕部位处于平直的舒适状态；抽屉的拉取部位采用 U 型圆角造型，避免空乘人员在使用过程中因不慎或突发状况划伤手部。

表 5 女性空乘人员 P5、P50、P95 手部数据截取

Tab.5 interception of P5, P50 and P95 hand data of female flight attendants

百分位数	第 5 百分位	第 50 百分位	第 95 百分位
身高/mm	1 630	1 690	1 750
体质量/kg	59	66	74
前臂长/mm	226	239	253
手肘高/mm	996	1 038	1 079
手功能高/mm	724	757	790

3.5.2 “起飞前未检查推车”人因分析与优化

为便于空乘人员在旅客登机前查看民航进餐推车设施是否处于可用状态，避免事故的发生，分别在车轮底部制动系统、车门旋钮开关以及干冰盒收纳处 3 个可移动构件部位安装按键检测装置，并在检测装置按键处通过观察提示灯带来直观检测进餐推车的运行状况：空乘人员依次检查 3 个可移动部位的开合状态，确保进餐推车部件可以正常使用；按下对应的检测装置按键，其外部灯带由初始的红色转变为绿色，表明设备运转正常可以执行后续的配餐工作；当进餐推车出现部分故障无法提供服务时，灯带反馈由绿色变为红色，提示空乘人员警惕故障件，需要立即对故障部位进行处理。

进餐推车检测装置按键的设计还要考虑使用的舒适度与安全性，按键形态与尺寸选择应符合手指的宽度。选取第 95 百分位的空乘人员所对应的身高数据，并利用人体各部位与身高对应的一元线性方程，计算出空乘人员的手部宽度为 80 mm，成年女性手部号型对应的控制部位尺寸的回归方程如下：

$$Y_1=12.80+0.05X_1 \tag{1}$$

式中：X_1 为空乘人员的手掌宽度，mm；Y_1 为掌宽对应的食指近位指关节的宽度，mm。

将已知掌宽数据代入式（1），可得 Y=16.80 mm。推车检测装置按键尺寸应与食指近位指关节宽度相符合，因此按键横截面直径设定为 16.80 mm；此外，根据人机工程学中强调的适宜性原则，民航进餐推车按键的压入深度设定为 10～15 mm，检测装置的按键高度超出餐车外表面约 15 mm。

3.5.3 “推车未固定碰撞客舱”人因分析与优化

飞机在起降或颠簸状态下，当进餐推车在狭窄的客舱通道内滑动时，由于刹车制动系统、餐车自重等因素，存在空乘人员无法及时抓住推车、踩下红色制动脚踏装置等隐患。在餐车扶手部位增设制动装置，可以避免空乘人员在双手离开推车为乘客提供服务或飞机突发颠簸时，无法及时准确踩下刹车装置而导致乘员受伤状况的发生。当空乘人员双手握住推车手柄并向前转动时，餐车处于通行状态；双手离开，手柄旋转回复原始位置，餐车处于制动状态。扶手部位是空乘人员操纵整个进餐推车时直接接触的部位，其人机设计尤为重要，传统的进餐推车扶手是截面直径为 20 mm 的圆柱体，过细的杆部设计与单一的曲面设计不方便手部进行抓握，空乘人员在推餐车时手指呈蜷缩状态，较为吃力；为使空乘人员在推行餐车时更舒适、省力，应增大双手与餐车把手部位的接触面积。利用人体部位与身高对应的一元线性方程计算出空乘人员手部长度为 192.78 mm，并根据女性手部控制部位尺寸的标准回归方程计算出最长的手指长度：

$$Y_2=-3.52+0.44X_2 \tag{2}$$

式中：X_2 为空乘人员的手掌宽度，mm；Y_2 为掌宽对应的中指长度，mm。

将已知掌宽数据代入式（2），可得 Y_2 对应的中指长度为 81.30 mm。由此，计算得出适宜空乘人员手部抓握的扶手截面直径约为 34.52 mm；女性空乘人员单手宽度 Y_1 为 80 mm，在设计餐车双手抓握凹槽部位时，应留出不少于 160 mm 的长度供空乘人员推行，见图 8。扶手正面造型采用内凹曲面，与空乘人员手掌贴合便于向前用力，条形凸起造型可以增加摩擦力，避免手滑导致餐车失控；其背部采用 1/2 的圆柱弧面造型，可以增大手指与餐车扶手的接触面积，使推行时手指可以不用蜷缩，并为大拇指提供放置的位置，从而提升使用舒适性；边缘造型采用小尺寸的圆角处理，视觉上更具柔和的特征。

3.6 最终设计方案展示

根据上述分析，通过对餐车内部结构、监控装置、扶手与脚踏双重制动装置的优化设计，形成基于 STAMP—人因的民航进餐推车的最终设计方案，见图 9。餐车圆润的整体造型传达出安全、友善的语义，圆润柔和的相关型倒角也可有效减轻餐车的体量感，

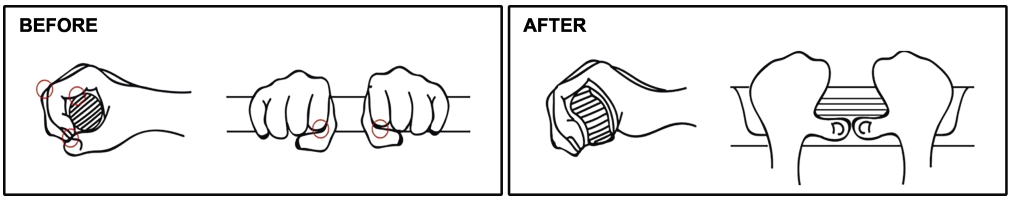


图 8 进餐推车扶手部位设计前后对比

Fig.8 Comparison before and after the design of dining cart handrail part

图 9 民航进餐推车优化设计方案

Fig.9 Optimal design scheme of civil aviation dining cart

避免过于笔直坚硬的倒角对乘客造成二次伤害。将优化设计后的民航进餐推车三维模型导入 JACK 虚拟仿真软件来验证其可行性，结果显示，空乘人员为乘客提供服务的整个流程中所采用的工作姿态“纠正需求”级别均为 1 级，呈绿色无需纠正的舒适状态；对空乘人员使用餐车服务时的姿态进行静态强度测试，结果显示，各关节的 Percent Capables 数值均接近 100%，表明空乘人员在直立姿势下完成取放餐盒动作时，其手臂尺寸与餐盘高度的匹配度较好。JACK 人因虚拟分析结果检验见图 10。

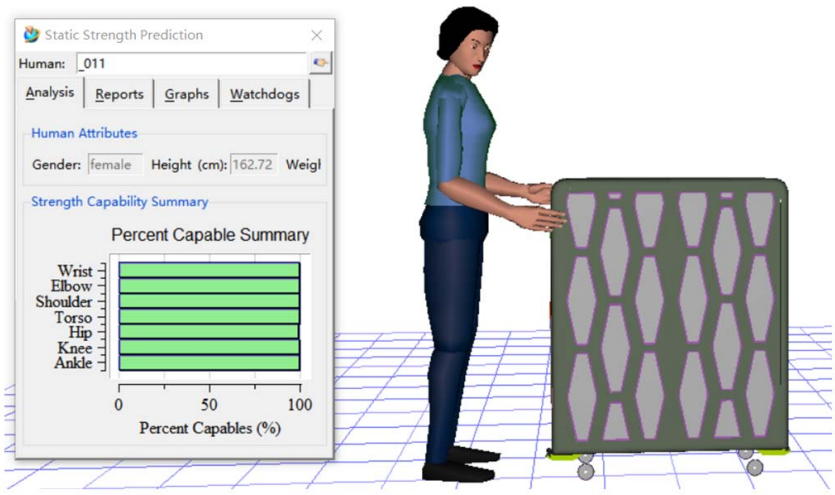


图 10　JACK 人因虚拟分析结果检验

Fig.10 Jack human factors virtual analysis result test

4　结语

笔者将 STAMP 模型与人因理论相结合，对民航进餐推车设计过程进行研究。首先，确定安全约束并构建民航进餐推车 STAMP—人因控制过程模型；其次，识别处于使用阶段的民航进餐推车控制回路的潜在的不安全控制行为，使用 AHP 层次分析法对潜在的不安全控制行为进行重要性排序，筛选出综合权重排名靠前的行为；最后，依据进餐推车人因设计的分析结果，开展餐车造型、结构等方面的设计优化。通过上述研究方法，一方面可以在设计初期解决民航进餐推车的使用安全性与舒适性问题，从而优化设计流程；另一方面可以为民航进餐推车造型设计提供新的思路，从而提升设计效率与附加值。

参考文献：

[1] 刘铁兵，邱兵，刘志宏，等. 民用航空空乘人员工作相关肌肉骨骼疾患影响因素分析[J].中国职业医学，2021, 48(1): 12-18.
LIU Tie-bing, QIU Bing, LIU Zhi-hong, et al. Analysis on Influencing Factors of work-related Musculoskeletal Diseases of Civil Aviation Flight Attendants[J]. China Occupational Medicine. 2021, 48(1): 12-18.

[2] 李鹏飞. 民用飞机厨房设计需求研究[J]. 科技视界，2018(19): 18-19.
LI Peng-fei. Research on Design Requirements of Civil Aircraft Kitchen[J]. Science and Technology Perspective, 2018(19): 18-19.

[3] HOOZEMANS M, VAN D, FRINGSDRESEN M, et al. Pushing and Pulling in Relation to Musculoskeletal Disorders: a Review of Risk Factors[J]. Ergonomics, 1998, 41(6): 757-781.

[4] EUNJA K，HIDETAKA U. The Actual State of Galley Space: Ergonomics Studies of Galley Space in Aircraft(1)[J]. Bulletin of Japanese Society for the Science of Design, 1999, 45(6): 19-24.

[5] HANS J O. Physical Workload of Flight Attendants when Pushing and Pulling Trolleys Aboard Aircraft[J]. International Journal of Industrial Ergonomics, 2007, 37(1112): 845-854.

[6] SCHAUB K, BERG K, WINTER G, et al. Muscular Capabilities and Workload of Flight Attendants for Pushing and Pulling Trolleys Aboard Aircraft[J]. International Journal of Industrial Ergonomics, 2007, 37(11): 883-892.

[7] LEVESON N. A New Accident Model for Engineering Safer Systems[J]. Safety Science, 2004, 42(4): 237-270.

[8] VALENTIN M I. Safety Culture in Modern Aviation Systems-Civil and Military[J]. Incas Bulletin, 2016, 8(2): 135-142 .

[9] 李华，金萌，钟兴润. 基于STAMP模型的建筑事故致因因素定量分析方法研究[J]. 中国安全生产科学技术, 2020, 16(4): 169-175.
LI Hua, JIN Meng, ZHONG Xing-run. Study on Quantitative Analysis Method of Cause Factors of Construction Accidents Based on Stamp Model[J]. China Science and Technology of Work Safety. 2020, 16(4): 169-175.

[10] 刘杰，阳小华，余童兰，等. 基于 STAMP 模型的核动力蒸汽发生器水位控制系统安全性分析[J]. 中国安全

生产科学技术, 2014, 10(5): 78-83.
LIU Jie, YANG Xiao-hua, YU Tong-lan, et al. Safety Analysis of Water Level Control System of Nuclear Power Steam Generator Based on Stamp Model[J]. China Safety Production Science and Technology, 2014, 10(5): 78-83.

[11] 陈浩然, 崔利杰, 任博, 等. 基于 STAMP 的试飞安全指标体系构建方法[J]. 火力与指挥控制, 2019, 44(2): 54-59.
CHEN Hao-ran, CUI Li-jie, REN Bo, et al. Construction Method of Flight Test Safety Index System Based on Stamp[J]. Firepower and Command and Control, 2019, 44(2): 54-59.

[12] 刘炳琪, 胡剑波, 刘畅, 等. 飞机差动刹车纠偏过程的 STAMP/STPA 安全性分析[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2020, 52(4): 66-73.
LIU Bing-qi, HU Jian-bo, LIU Chang, et al. STAMP / STPA Safety Analysis of Aircraft Differential Braking Deviation Correction Process[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2020, 52(4): 66-73.

[13] 贾克帅, 孙金磊. 飞机厨房手推车适航验证方法的探究[J]. 民用飞机设计与研究, 2018(4): 75-78.
JIA Ke-shuai, SUN Jin-lei. Research on Airworthiness Verification Method of Aircraft Kitchen Trolley[J]. Civil Aircraft Design and Research, 2018(4): 75-78.

[14] 周尔民, 邓洪, 费卫卫, 等. 人因视角下的设备布局时间成本优化研究[J]. 现代制造工程, 2020(2): 110-115.
ZHOU Er-min, DENG Hong, FEI Wei-wei, et al. Research on Time Cost Optimization of Equipment Layout from the Perspective of Human Factors[J]. Modern Manufacturing Engineering, 2020(2): 110-115.

[15] 赵晏林, 陈昱熹, 刘春旭. 基于 JACK 虚拟仿真技术的裁板锯人机功效优化[J]. 林产工业, 2021, 58(1): 27-32.
ZHAO Yan-lin, CHEN Yu-xi, LIU Chun-xu. Man Machine Efficiency Optimization of Panel Saw Based on Jack Virtual Simulation Technology[J]. Forest Products Industry, 2021, 58(1): 27-32.

[16] 王辉, 潘超, 彭原. 基于 JACK 的机载航电产品虚拟维修仿真及人机工效评估[J]. 测控技术, 2021, 40(3): 14-18.
WANG Hui, PAN Chao, PENG Yuan. Virtual Maintenance Simulation and Ergonomic Evaluation of Airborne Avionics Products Based on Jack[J]. Measurement and Control Technology, 2021, 40 (3): 14-18.

[17] 赵芳华, 孙惠东, 关玉明. 基于 JACK 虚拟仿真分析的介助老人护理床人机工程学设计[J]. 包装工程, 2020, 41(24): 30-39.
ZHAO Fang-hua, SUN Hui-dong, GUAN Yu-ming. Ergonomic Design of Assisted Elderly Nursing Bed Based on Jack Virtual Simulation Analysis[J]. Packaging Engineering, 2020, 41(24): 30-39.

[18] 姜兴宇, 马明宇, 齐鹏. 基于 JACK 的盾构机换刀作业人员工作负荷评估模型[J]. 沈阳工业大学学报, 2021, 43(5): 542-549.
JIANG Xing-yu, MA Ming-yu, QI Peng. Workload Evaluation Model of Shield Machine Tool Changing Operators Based on Jack[J]. Journal of Shenyang University of Technology, 2021, 43(5): 542-549.

[19] 中国民用航空局. MH/T6061—2010, 飞机厨房手推车、物品箱及相关组件的最低设计和性能[S]. 北京: 中国科学技术出版社, 2010.
Civil Aviation Administration of China. MH/T6061-2010, Minimum Design and Performance of Aircraft Kitchen Trolleys, Suitcases and Related Components[S]. Beijing: China Science and Technology Press, 2010.

[20] 谢晓雨. 某型宽体机客舱人机尺寸设计研究[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2020.
XIE Xiao-yu. Research on Human-machine Dimension Design of a Wide Body Aircraft Cabin[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, 2020.

责任编辑：马梦遥