基于行为分析的叉车驾驶室造型设计研究

欧静[1]，郑云爽[1]，赵江洪[1,2]，易军[1]
（1.湖南大学 设计艺术学院，长沙 410082；
2.湖南大学 汽车车身先进设计与制造国家重点实验室，长沙 410082）

摘要：目的 现有的车辆人机分析过程，多以车辆本体为研究对象，驾驶员被动匹配，忽略了以用户为中心的设计原则。基于驾驶员主动驾驶行为的研究，可以系统地进行人机工程学分析，为叉车驾驶室造型设计提供有效的指导。**方法** 首先分析驾驶员行为与叉车造型的映射关系，通过任务分析法和动素分析法，研究叉车驾驶员的上车行为与驾驶行为，提取关键动作及序列；依据 ECRS 原则进行行为优化，关联归纳现有叉车造型存在的问题，为创新设计提供目标方向。**结果** 依据分析结果对叉车驾驶室进行了创新方案的设计，并通过 Proe 软件的 Manikin 模块，验证了创新设计方案的可用性。**结论** 最后总结出了基于驾驶行为分析的工程车辆驾驶室的造型设计流程，为现有工程车辆驾驶室的造型设计提供了系统性指导。

关键词：人机分析；造型设计；行为分析；Proe/Manikin
中图分类号：TB472 **文献标识码：**A **文章编号：**1001-3563(2019)14-0128-07
DOI：10.19554/j.cnki.1001-3563.2019.14.022

Driving Behavior Analytics-based Forklift Cab Appearance Design

OU Jing[1], *ZHENG Yun-shuang*[1], *ZHAO Jiang-hong*[1,2], *YI Jun*[1]
(1.School of Design, Hunan University, Changsha 410082, China; 2.State Key Laboratory of Advanced Design and Manufacture for Vehicle Body, Hunan University, Changsha 410082, China)

ABSTRACT: The existing vehicle ergonomic analysis, in which drivers were passively matched, mostly takes vehicles as the research targets and ignores the user-centered design principle. Research on active driving behaviors of drivers can have systematical ergonomics analysis and provide effective guidance for appearance design of forklift cabs. Firstly, the main postures and sequences of the driver were extracted and analyzed by taking advantages of mapping relationship between driver's behaviors and forklift appearance through task analysis and Therblig analysis. According to the ECRS principle, the behavior optimization was carried out, the problems of the existing forklift design were pointed out, and target and direction of innovative design were provided. According to the analysis results, the innovative design of the forklift cab was carried out and the usability of the new design scheme was verified by the Manikin module of Proe software. The design flow modeling of engineering vehicle cab is summarized based on driver behavior analysis and systematic guidance for current engineering vehicle cab shape design is provided.

KEY WORDS: ergonomics analysis; shape design; behavior analysis; Proe/Manikin

以人为中心的设计可以通过关注用户，避免以技术为中心的设计产生的错误，并提高效率[1]。目前，汽车人机工程学研究比较成熟，如对座椅[2—3]、踏板[4—5]以及人机界面的交互设计[6]研究等。而工程车辆的人机工程学研究较少，主要采用计算机人体仿真分析等技术，对工程车辆驾驶中人体姿势进行分析[7]，

收稿日期：2019-04-07
基金项目：中央高校基本科研业务费资助；湖南省自然科学基金项目（2015JJ4015）
作者简介：欧静（1981—），女，湖南人，博士，湖南大学助理教授、硕士生导师，主要研究方向为工业设计人机工程学、智能交互硬件及产品开发、智能可穿戴设计以及智能装备等。

可以有效缩减产品开发成本和周期，直观、有效地检验产品的可用性[8—9]。然而依据 SAM 标准，以车辆本体为对象的研究方式，忽视了人的主动行为[10]，而通过行为分析可以系统地挖掘设计痛点，使产品更加人性化[11]。叉车相对于普通车辆，涉及更复杂的操作行为，依据行为进行人机分析尤为重要。文中基于叉车驾驶行为与造型的映射，采用任务分析法和动素分析法，对驾驶员的驾驶行为进行动作提取与行为优化，归纳现有叉车驾驶室造型的关键问题，为创新设计提供参考，并运用 Proe/Manikin，验证新方案的可用性，形成了一套完整的基于行为分析的工程车辆驾驶室造型设计流程，为工程车辆驾驶室造型设计，提供了系统性指导。

1　行为分析与造型映射

1.1　行为分析理论

任务分析法是结构性地描述用户任务及子任务层次关系的方法，研究并说明用户为实现目标所执行的一系列的任务，以及用户与交互系统之间所产生的行为方式，帮助设计师构想任务的多种解决方法[12]。动素分析法（Therblig analysis）是通过研究和制定合理的动作，达到以最少的体力消耗来取得最大的成果[13]。ECRS（Eliminate 取消、Combine 合并、Rearrange 调整顺序、Simplify 简化）是对操作流程进行优化的 4 个原则，通过对现状进行否定的方式来进行调查分析，以达到重新分配和平衡工作负载的目的[14]。通过两种方法、4 种原则的结合分析，可以挖掘用户的显性和隐性需求，及从整体到局部的用户系统性行为关系和元素构成。

1.2　行为与造型的映射分析

行为是驾驶室与驾驶员产生联系的“媒介”，通过驾驶员行为发生过程中人与驾驶室产生交互的造型部件进行匹配，可以建立行为与驾驶室造型的映射关系[15]。同时使用计算机人机辅助分析软件，分析人体姿势，可以对造型进行优化。研究流程见图 1，构建基于驾驶行为分析的工程车辆驾驶室造型设计的研究路径。

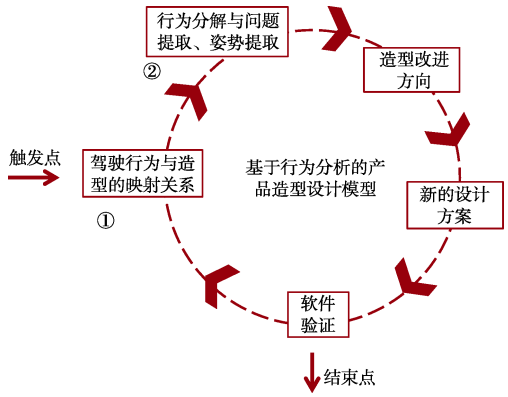

图 1　研究流程
Fig.1 Research process

2　行为分析实验

2.1　实验环境

文中的叉车环境为国内某品牌 16 吨叉车，叉车的室内布局和外饰，见图 2。

a 叉车内饰布局

b 叉车外饰

图 2　叉车结构
Fig.2 Forklift appearance

使用任务分析法将叉车操作过程分为上车任务与驾驶任务，并在此基础上进行子任务的划分。上车任务由上阶梯—开门—进门—关门 4 个子任务组成，驾驶任务由启动—空运—叉货—运输—卸货—熄火 6 个子任务组成。选取 1 名有 11 年驾龄的男性叉车司机为被试，使用口语分析，同时采用多角度摄像的方式，记录任务完成的过程。随后，对另外 4 名叉车驾驶员进行问卷调研及针对性访谈。

2.2　行为与造型映射关系

通过分解录像镜头，捕捉驾驶员动作的方法，归纳出执行特定任务时叉车与行为发生交互的造型部件，得到行为与造型部件间的映射关系，见表 1。

表 1　驾驶员行为与叉车造型的映射关系
Tab.1 Mapping relationship between driver's behavior and forklift appearance

任务	子任务	产生交互的造型部件
上车阶段	上阶梯	扶手、阶梯
	开门	阶梯、门锁、门外把手
	进门	门、门外把手
	关门	门内把手、座椅
驾驶	启动	扶手箱、座椅、显示屏
	空运	座椅、方向盘、踏板、操作手柄
	叉货	座椅、方向盘、仪表台、踏板、操作手柄
	运输	座椅、方向盘、踏板、操作手柄
	卸货	座椅、方向盘、仪表台、踏板、操作手柄
	熄火	扶手箱、座椅

2.3　叉车驾驶员行为提取

选用任务分析法与动素分析法相结合的方式。通过驾驶员完成目标行为过程的直观口语描述，找出现有产品的显性问题。通过多角度录像及镜头捕捉的方

式，对驾驶员的上车行为和驾驶行为进行动素提取，找到存在的隐性问题。

2.3.1 驾驶员上车行为分析

上车过程任务分析中驾驶员直观反馈：打开车门需要的避让空间过小。通过视频对上车过程进行动素分析，确定动作提取不再局限于双手以及眼部的动作变化，而是同时关注双手和双脚的动作。上车任务动素分析见表 2，上车任务完成过程见图 3。

表 2 上车任务动素分析

Tab.2 Therblig analysis of boarding

任务	子任务	序号	左手	右手	左脚	右脚	备注（问题、注意等）
上车	上阶梯	1	伸手	伸手	静止	抬脚	
		2	扶把手	扶把手	抬脚	踩台阶	
		3	松手	扶把手	踩台阶	抬脚	
		4	扶把手	松手	抬脚	踩台阶	
		5	松手	松手	踩台阶	踩台阶	
	开门	6	松手	扶把手	移步	移步	避让开门空间小
		7	松手	拉门把手	静止	静止	
		8	松手	开门	静止	静止	扶把手不方便
	进门	9	扶把手	扶门把手（外）	静止	抬脚	
		10	扶把手	松手	抬脚	落脚	
	关门	11	松手	扶门把手（内）	落脚	移步	动作幅度大，
		12	松手	关门	移步	移步	门内把手位置不适合

注：叉车型号为 16 吨叉车；对象为叉车驾驶员。

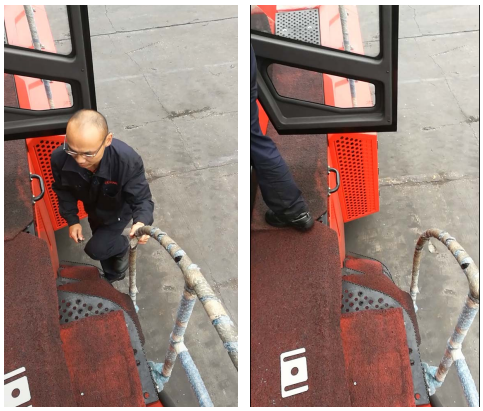

图 3 上车任务完成过程

Fig.3 Boarding process

对上车过程进行任务分析与动素分析后发现，上车过程主要存在以下几点不便情况：开门时（动作序列：开门 6~8），需要为开门预留避让空间；关门（动作序列：关门 11~12）时，人体动作幅度很大，驾驶室内门把手的位置不合理。

2.3.2 驾驶员的驾驶行为分析

驾驶叉车的过程中，任务分析过程中驾驶员未直接反馈驾驶过程存在问题。叉车驾驶演示过程中，驾驶员一直保持左手扶方向盘，右手握手柄，两只脚一直踩在踏板上，对驾驶员操作过程中的主要动作进行了整理与提取，驾驶任务动素分析见表 3，关键动作演示见图 4。

表 3 驾驶任务动素分析

Tab.3 Therblig analysis of driving

任务	子任务	序号	左手	右手	左脚	右脚	备注（问题、注意等）
驾驶	启动	1	扶方向盘	打开扶手	静止	静止	扶手阻碍钥匙的插拔
		2	扶方向盘	插钥匙并转动	静止	静止	
		3	扶方向盘	放下扶手	静止	静止	
		4	扶方向盘	调节显示屏	静止	静止	
		5	扶座椅扶手	调节空调面板	平放	踮脚	躯干向后旋转，臀部离开座位
	空运	6	转方向盘	握手柄	踩踏板	踩踏板	
		7	扶方向盘	握手柄	踩踏板	踩踏板	
	叉货	8	扶方向盘	握手柄	踩踏板	踩踏板	需身体前倾看前叉
		9	调节方向盘下手柄	握手柄	踩踏板	踩踏板	需身体前倾看前叉
		10	扶方向盘	握手柄	踩踏板	踩踏板	

续表 3

任务	子任务	序号	左手	右手	左脚	右脚	备注（问题、注意等）
驾驶	运输	11	转方向盘	握手柄	踩踏板	踩踏板	需看倒车影像
		12	扶方向盘	握手柄	踩踏板	踩踏板	需看左右视镜
	卸货	13	扶方向盘	握手柄	踩踏板	踩踏板	需身体前倾看前叉
		14	调节方向盘下手柄	握手柄	踩踏板	踩踏板	需身体前倾看前叉
		15	扶方向盘	握手柄	踩踏板	踩踏板	
	熄火	16	扶方向盘	打开扶手	静止	静止	
		17	扶方向盘	拔钥匙	静止	静止	扶手阻碍钥匙的插拔
		18	扶方向盘	放下扶手	静止	静止	

注：叉车型号为 16 吨叉车；对象为叉车驾驶员。

图 4　驾驶任务完成过程
Fig.4 Driving process

通过动素分析，对驾驶动作进行拆解、提取、分析后发现，驾驶员在操作过程中存在以下几点问题：叉车启动与熄火过程中（动作序列：启动 1~4，熄火 16~18），需要抬起座椅扶手；调节空调面板（动作序列：启动 5）极为不方便；驾驶员在叉货与卸货时（动作序列：叉货 8~9，卸货 13~14），需要特意前倾查看情况。

3　行为分析与创新设计

3.1　行为优化

上车过程中，针对问题 1（动作序列：开门 6~8），考虑到驾驶室门的高度在驾驶员的可触及范围内，动素分析中的无效动作主要为避让过程，依据 ECRS 原则，可以通过调整动作顺序取消避让动作，即将原本在阶梯上开门的方式，调整为立于地面的开门方式，使得在狭窄空间避让的不便利，得到有效改善。由此，优化仿真模拟动作：立于地面开门动作；上阶梯扶把手动作。针对问题 2（动作序列：关门 11~12），舒适姿势与座椅位置、把手位置以及空间大小 3 个因素有关。针对驾驶室空间与座椅位置不可变的情况下，通过调整把手位置以及把手长度等因素，可优化关门姿势。由此，优化仿真模拟动作为：关门动作。将优化的动作数目与动作总数的比值，作为优化动作百分比。上车行为过程优化的 4 个动作为 6、8、11 和 12，优化动作的百分比为 33.3%。

驾驶过程中，针对问题 1（动作序列：启动 1~4，熄火 16~18），主要原因为扶手与扶手箱上的启动键的布局存在问题，所以改变扶手位置与扶手箱的位置关系，可以通过取消打开扶手等（动作序列：启动 1、3，熄火 16、18）无效动作来简化操作流程。座椅扶手位置相对固定，可以重新设计扶手箱造型和调整位置。针对问题 2（动作序列：启动 5），主要为空调面板的位置布局不合理，合适的布局可以有效提高操作的效率，改变空调面板的位置为主要解决方式。针对问题 3（动作序列：叉货 8~9，卸货 13~14），结合问卷调查分析的结果，为仪表台高度和部件遮挡所致，可以通过改变仪表台的造型来进行调整。驾驶行为优化后，可取消驾驶任务过程的动作 1、3、16、18，简化动作 5、8、9、13、14，优化动作百分比为 50%。

问题行为与造型改进方向见表 4。

表 4　问题行为与造型改进方向
Tab.4 Problems and modelling improvement direction

操作阶段	问题任务序号	交互造型	造型改进方向	驾驶员姿势提取及优化
上车阶段	动作 6	阶梯、门锁	门锁位置调低，立于地面开门	立于地面开门的姿势
	动作 8	门外把手	加长把手长度或增加把手数目	扶把手
	动作 11	门内把手	加长门内把手长度	身体前倾关门，保持臀部不动
驾驶阶段	动作 1~4	座椅扶手、扶手箱	改变扶手与扶手箱的位置关系	操作扶手箱
	动作 5	空调面板	改变空调面板位置	调节空调面板
	动作 8~9	仪表盘遮挡视线	改变仪表盘造型或高度	标准驾驶坐姿下查看视野
	动作 16~18	座椅扶手、扶手箱	改变扶手与扶手箱的位置关系	操作扶手箱

参照中国土方工程国标和德雷福斯《人体测量》[16—17]中的人体尺寸标准、手部动态伸及范围等参数，见图 5，可以确定驾驶室门锁的高度区间、座椅扶手的高度区间等，为创新设计提供数据参考。

3.2 创新设计

设计人员参考造型的改进方向，进行叉车驾驶室的改进设计，最终获得外观及叉车驾驶室内布局方案，造型和内饰设计方案，见图 6。

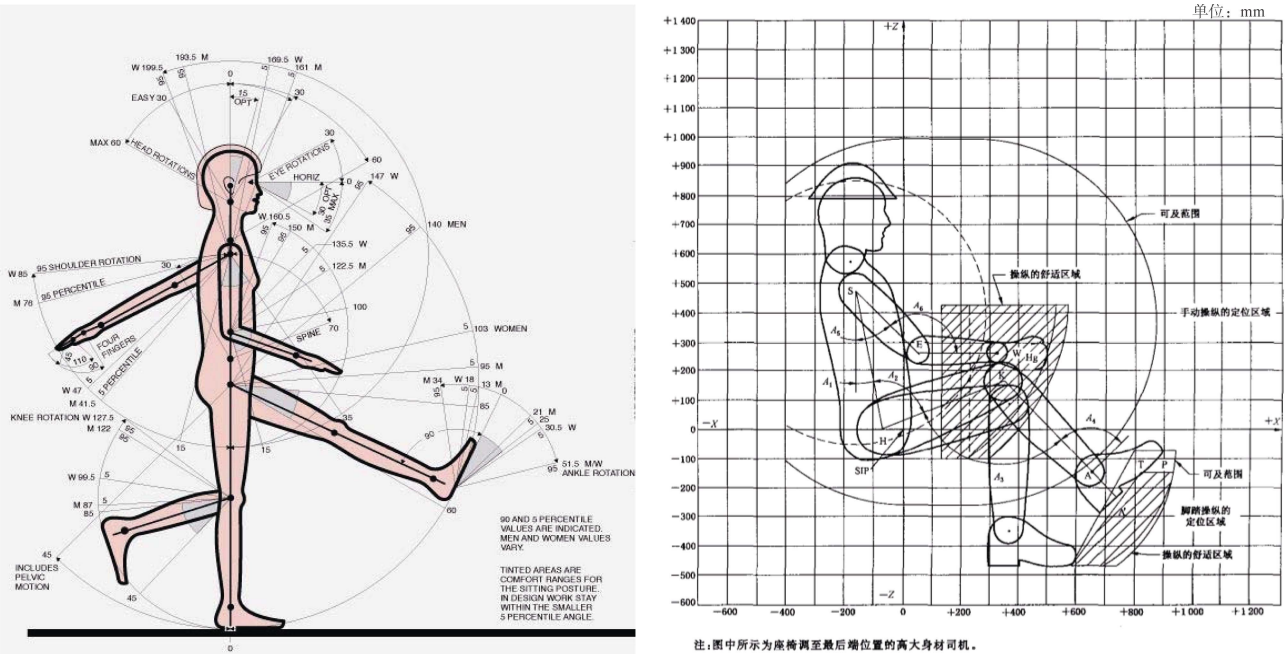

图 5 人体尺寸

Fig.5 Human dimension

a 驾驶室内饰布局　　b 驾驶室外观设计　　c 驾驶室内饰设计

图 6 驾驶室设计方案

Fig.6 Design scheme of cab

3.3 可用性验证

对新的设计方案进行可用性验证，为车辆设计过程中必不可少的环节。基于行为分析，可以更好对应人与造型的映射关系，使人机分析更具有目标性。计算机辅助人机工程学软件广泛应用于设计方案的人机工程学分析[18—20]。研究使用 Manikin 重点验证了上车与驾驶任务过程中存在的行为问题，同时也验证了可视性、可及域以及舒适性等基本项目，确保了人机分析系统的全面性。

3.3.1 上车过程行为问题验证

针对开门姿势的分析，选用第 5 百分位的人体模型进行开门时的手部可及性分析。参照 SAE 标准进行舒适度分析，在模型肩关节 DOF1 舒适度得分为 80%以上的情况下，测量确定门外把手高度不应超过 1550 mm。上车过程人机分析见图 7，图 7a 的阴影区域为手的包络范围，可直观确定人立于地面的开门方式，可以解决避让空间的问题，新方案的门外把手高度符合要求。按照图 7c 的方法，选用第 50 百分位的

a 开门　　b 上阶梯　　c 关门

图 7　上车过程人机分析

Fig.7 Ergonomic analysis of the boarding process

人体模型，进行优化前后关门姿势的舒适性分析，优化后的舒适度由原来的 71%提高到了 76%，舒适性问题得到了改善。

3.3.2　驾驶过程行为问题验证

针对驾驶员叉货过程中需要身体前倾查看货物的情况，见图 8，分别测量了方案优化前后 50%的人体模型在卡车的标准驾驶坐姿下，前叉可见部位的长度，优化前为 1356 mm，优化后为 1600 mm，可见部分增加了 244 mm，提高了可视性，仪表台造型的创新设计使得视野遮挡的问题得到了改善。

优化后空调面板置于仪表台上，对比优化前位于 B 柱平面上的情况，第 50 百分位的人体模型调节空调面板的舒适性，由原来的 70%提高到了 78%。

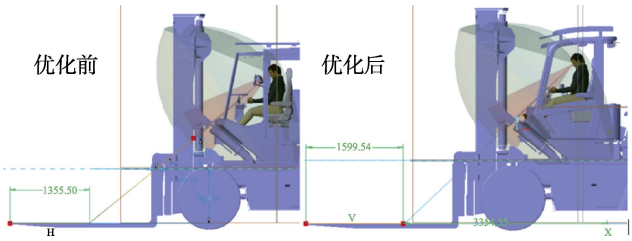

图 8　优化前后可视区间

Fig.8 Visibility change before and after optimization

4　基于行为分析的设计流程模型的构建

基于行为分析的设计流程是以行为与造型的映射关系为参照，行为分析为核心，系统有效的设计方案为结果的研究过程。整个设计流程共分为 3 个部分：行为分析、行为优化与创新设计、可用性验证。基于行为分析的设计流程模型见图 9。

行为分析过程改变了汽车人机分析中以产品功能需求为主导的思考方式，重点关注人的行为过程。选用任务分析与动素分析，得到了行为与造型的映射关系及驾驶员的显性和隐性需求。

行为优化与创新设计过程为产出的过程，此阶段依据 ECRS 的 4 个原则优化行为过程，得到了工程车辆驾驶室造型优化的方向以及新的创新设计方案。

可用性验证过程主要借助计算机辅助工具，对创新设计方案的可用性进行验证。针对行为分析过程发现的行为问题进行针对性验证，同时进行可视性、可及域等传统的普适性人机分析，确保创新设计方案的可用性分析的完整性。

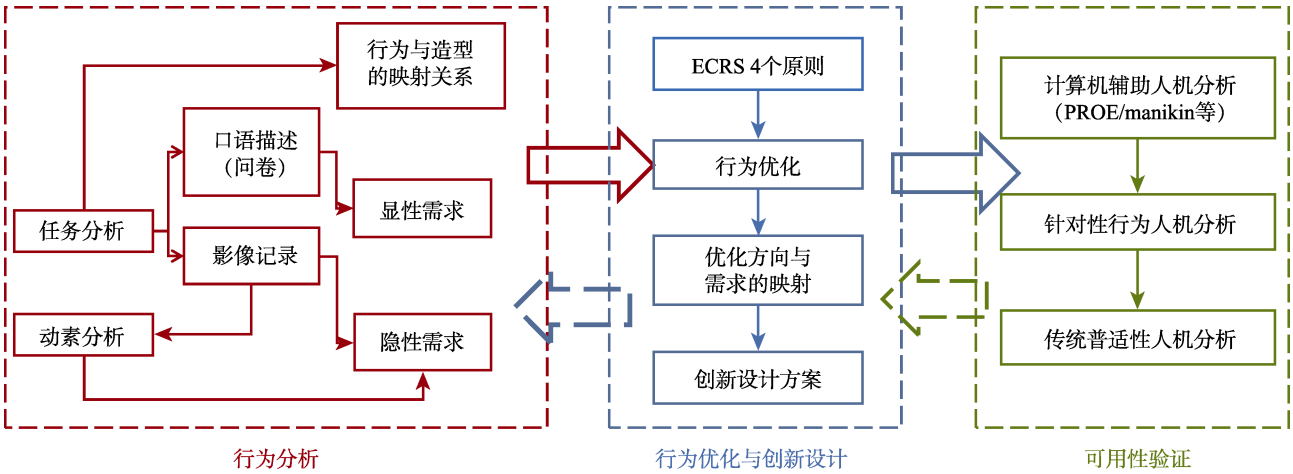

图 9　基于行为分析的设计流程模型

Fig.9 Design process model base on behavior analytics

5 结语

本文以用户为中心，重点针对叉车驾驶员的上车与驾驶过程行为进行分析，通过分析驾驶员行为与叉车造型的映射关系、关键动作提取、行为优化、建立行为与用户需求间的关联，提出叉车造型的明确目标方向，提高了设计创新性和可用性。最后选用计算机辅助人机分析软件，对基于驾驶行为分析得到的创新设计方案，进行针对性与普适性的人机分析验证，确保基于驾驶行为分析得到的叉车创新设计方案的可用性。提出了基于驾驶行为分析的工程车辆驾驶室造型设计流程的“三部曲”，即行为分析、行为优化与创新设计、可用性验证，并产出了一套基于驾驶行为分析的叉车驾驶室外观与内饰的设计方案。

基于驾驶行为分析的驾驶室造型设计是在传统的驾驶室造型设计上的完善。行为分析过程中选用的方法，主要为定性研究方法，后续研究中会深入对行为进行定量化分析。此外，行为分析过程中并未考虑驾驶员的个人行为习惯对造型设计的影响，未来的分析研究中，可以更深入地针对不同类别行为进行研究。

参考文献：

[1] ENDSLEY M R. Designing for Situation Awareness: an Approach to User-centered Design[M]. Boca Raton: CRC Press, 2016.

[2] PETER L E, JOSEPH R, GREGORY K, et al. Objective Classification of Vehicle Seat Discomfort[J]. Ergonomics, 2014, 57(4): 536—544.

[3] 陈杰. 汽车座椅的人机工程学分析[J]. 包装工程, 2015, 36(22): 145—148.
CHEN Jie. Ergonomics Analysis of Automobile Seat[J]. Packaging Engineering, 2015, 36(22): 145—148.

[4] 高振海, 高菲, 沈传亮, 等. 汽车椅面倾角对驾驶员乘坐舒适性的影响分析[J]. 湖南大学学报(自科版), 2017, 44(8): 43—49.
GAO Zhen-hai, GAO Fei, SHEN Chuan-liang, et al. Analyses of Driver Sitting Comfort in Different Automotive Seat-pan Angle[J]. Journal of Hunan University(Natural Sciences), 2017, 44(8): 43—49.

[5] REED M P, MANARY M A, FLANNAGAN C A, et al. Effects of Vehicle Interior Geometry and Anthropometric Variables on Automobile Driving Posture[J]. Human Factors, 2000, 42(4): 41—52.

[6] 曾庆抒, 赵江洪, 谭浩. 汽车人机界面交互设计的情景板工具与方法[J]. 包装工程, 2014, 35(22): 22—26.
ZENG Qing-shu, ZHAO Jiang-hong, TAN Hao. Mood Board Tool and Methods in Vehicel HMI Interaction Design[J]. Packaging Engineering, 2014, 35(22): 22—26.

[7] JHINKWAN A, SINGH J. Design Specifications and Ergonomic Evaluation of Car Seat(a Review)[J]. Esrsa Publications, 2014, 3(5): 611—612.

[8] 支锦亦, 向泽锐, 梁刚毅. 面向轨道装备的可视化人因综合仿真分析平台研究[J]. 包装工程, 2017, 38(2): 1—7.
ZHI Jin-yi, XIANG Ze-rui, LIANG Gang-yi. Visual Comprehensive Human Factors Simulation Analysis Platform for Rail Equipment[J]. Packaging Engineering, 2017, 38(2): 1—7.

[9] PATEL T, SANJOG J, KARMAKAR S. Ergonomics Perspective in Agricultural Research: a User-Centred Approach Using CAD and Digital Human Modeling (DHM) Technologies[J]. Journal of the Institution of Engineers (India): Series A, 2016, 97(3): 33—342.

[10] 尹航. 装载机驾驶舱人机工程改进设计研究[J]. 机械设计, 2017(8): 120—123.
YIN Hang. Improving Design of Loader Cockpit through Ergonomics Analysis[J]. Journal of Machine Design, 2017(8): 120—123.

[11] 郝亮, 解彪, 王健, 等. 用户行为准则在军工产品造型设计中的应用[J]. 机械管理开发, 2016(10): 87—90.
HAO Liang, XIE Biao, WANG Jian, et al. Application of the User Code of Conduct in the Military Industrial Product Modeling Design[J]. Mechanical Management and Development, 2016(10): 87—90.

[12] 曹文波. 基于任务分析的人机界面设计[J]. 美术大观, 2017 (11): 100—101.
CAO Wen-bo. Design of Human-computer Interface on Task Analysis[J]. Art Panorama, 2017(11): 100—101.

[13] DAVID F. Therbligs: the Keys to Simplifying Work [EB/OL]. http://gilbrethnetwork.tripod.com/therbligs.html.

[14] NAOGHARE P M, MORE A R, PATIL S S. Value Analysis of a Rubber Hose Moulding and Assembly Line: a Case Study[J]. International Research Journal of Engineering and Technology (IRJET), 2017(4): 1817—1820.

[15] 吴志军, 张映琪, 唐超. 用户行为导向的数控装备造型设计过程模型[J]. 机械设计, 2017(7): 105—109.
WU Zhi-jun, ZHANG Ying-qi, TANG Chao. User Behavior Oriented CNC Modeling Design Process Model [J]. Journal of Machine Design, 2017(7): 105—109.

[16] DREYFUSS H. Designing for People[J]. Arts Education Policy Review, 2003, 61(2): 32—33.

[17] GB/T 21935-2008, 土方机械 操纵的舒适区域与可及范围[S].
GB/T 21935-2008, Earth Moving Machinery, Zones of Comfort and Reach for Controls[S].

[18] 王建伟, 张建敏. 基于 Jack 的农机驾驶室人机工程学分析及仿真[J]. 农机化研究, 2018, 40(6): 246—251.
WANG Jian-wei, ZHANG Jian-min. Analysis and Simulation of Ergonomics of Agricultural Machinery Cab Based on Jack[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2018, 40(6): 246—251.

[19] 王一甲, 王余锐, 金立生. 基于人机工程的驾驶室舒适性设计与仿真研究[J]. 农机化研究, 2016(12): 247—253.
WANG Yi-jia, WANG Yu-rui, JIN Li-sheng. Comfort Design and Simulation Study of Driving Cab Based on Ergonomics[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2016(12): 247—253.

[20] 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.