

基于 WSR 的塔机驾驶室空间布局优化设计研究

李娟, 周慧敏, 刘涛, 李沛芸, 袁光宇, 胡蝶
(西华大学 美术与设计学院, 成都 610039)

摘要: **目的** 为提高现有塔机驾驶室布局的工作效率和舒适性, 提出塔机驾驶室布局优化设计方案。**方法** 采用 WSR 方法, 从物-事-人三个维度系统梳理各部分要素之间的关联性, 在物理层面将驾驶室划分为操作视野区、控制区、生活区, 在事理层面将驾驶员的行为流程划分为工作行为和生活行为, 在人理层面将驾驶员的需求划分为生理需求和心理需求, 剖析每个层面的问题, 提出设计要点, 建立塔机驾驶室空间布局优化设计方案。最后, 采用 JACK 人机仿真方法, 对驾驶视野可视性、驾驶员坐姿上肢可达性、驾驶员的操纵姿势舒适性三方面验证人机因素合理性; 使用量表评分调查驾驶室空间布局设计方案的满意度评价。**结论** 通过物理、事理、人理三个维度详细全面的分析, 得出塔机驾驶室布局优化设计要点, 对现有塔机驾驶室的空间布局要素合理划分和优化设计, 使其空间得到有效利用, 进一步提升驾驶员的易操作性、舒适性、流畅性。验证了 WSR 方法对塔机驾驶室空间布局设计分析是有效的分析方法, 为相关设计分析提供一定参考。

关键词: 塔机驾驶室; 人机工程; 布局设计; WSR 方法

中图分类号: TB472 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2023)02-0069-12

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2023.02.009

Optimized Spatial Layout Design of Tower Crane Cab Based on WSR

LI Juan, ZHOU Hui-min, LIU Tao, LI Pei-yun, YUAN Guang-yu, HU Die
(School of Art and Design, Xihua University, Chengdu 610039, China)

ABSTRACT: The work aims to improve the efficiency and comfort of the existing tower crane cab layout, and propose an optimal design scheme of tower crane cab layout. WSR method was adopted to systematically comb the correlation between various elements from the three dimensions of matter, practical and people. On the matter level, the cab was divided into operating vision area, control area and living area. On the practical level, the driver's behavior process was divided into working behavior and living behavior. On the human level, the driver's needs were divided into physiological needs and psychological needs. The problems at each level were analyzed. The design key points were put forward. The tower crane cab spatial layout optimization design scheme was established. Finally, JACK man-machine simulation method was adopted to verify the rationality of man-machine factors in three aspects: the visibility of driving view field, the accessibility of the upper limbs of the driver's sitting position and the comfort of the driver's control posture. The satisfaction evaluation of cab spatial layout design scheme was investigated with scale scoring. Through detailed and comprehensive analysis of the three levels of matter, practical and people, the main points of the optimized layout design of tower crane cab are obtained, and the spatial layout elements of the existing tower crane cab are reasonably divided and optimized, so as to make effective use of its space and further improve the operator's ease of operation, comfort and fluency. It is verified that WSR method is an effective analysis method for the spatial layout design of tower crane cab, which provides a certain reference for relevant design analysis.

KEY WORDS: tower crane cab; ergonomics; layout design; WSR methodology

收稿日期: 2022-08-22

基金项目: 四川省哲学社会科学重点研究基地现代设计与文化研究中心 (MD22E032)

作者简介: 李娟 (1985—), 女, 博士, 讲师, 主要研究方向为信息交互设计及人机工程学。

通信作者: 周慧敏 (1997—), 女, 硕士生, 主攻工业设计研究。

目前,在建筑施工中,塔式起重机(简称塔机)是一种常用的起重设备。塔机驾驶室是整个塔机的运转枢纽,也是驾驶员安全作业的地方,其内部空间狭小,功能模块多,且为保证前部操作区具有良好的采光与视野,各功能配件只能装配于内室两侧的中后位置,可利用空间非常有限。因此,如果缺乏合理设计,将造成功能布局混乱、空间凌乱、空间利用率低、高空作业体验差等问题。驾驶室空间布局的合理化设计对工作效率、驾驶员的舒适性问题尤为重要^[1]。塔机驾驶员属于高空作业,其视野区不同于其他机械驾驶室,对视野要求较高,并且夏冬季工作环境恶劣,驾驶员工作时间较长,设计时还需充分考虑驾驶员的视野、人机等特点。

王春燕等^[2]通过 DEMATEL 法的研究,并结合信息熵,建立分析模型,对影响塔机操作安全事故的因素进行研究;段锐等^[3]对现有塔机安全管理方法进行研究梳理,并提出 BIM 和 CV 技术相融的塔机安全管理框架;杨悦等^[4]通过构建塔式起重机的三类基本作业运动模型,基于 Maple 数学软件的运算分析,建立仿真模型得出塔机在工作中重物的运动路线和规律;王雅坤等^[5]对矿用挖掘机驾驶室操作界面采用模块重要程度分析法,建立操作界面的布局优化设计方案;张宏瑞等^[6]针对液压挖掘机的不同目标人群,基于 H 点的曲线分析,结合多功能区域法,对驾驶室的舒适度进行优化设计。根据相关文献,当前针对塔机的研究主要侧重于技术层面,包括安全监控系统、安全管理、事故分析、平衡臂、提升设备、回转机构等方面,而对塔机驾驶室的设计研究存在一定空间,其室内空间布局、功能配置与人机关系等问题是影响空间利用率、操作效率和舒适性的关键因素。本文将聚焦于塔机驾驶室空间布局优化设计,基于 WSR 方法论的系统分析,找出现有塔机驾驶室的布局设计要点,对其设计要素进行合理划分和优化设计,并采用 JACK 人机仿真评价系统进行设计验证。

1 WSR 方法论及其用于塔机驾驶室的适用性

1.1 WSR 方法论概述

“物理-事理-人理”系统方法论^[7],以下简称 WSR 方法论,是一种东方系统方法论,应用实践中要不断概括和协调物理层面、事理层面和人理层面的关联性。顾基发研究员^[7]将 WSR 方法定位为用科学的方法来解决系统中的复杂问题,见图 1。“物理”通常是研究客观实在的、物质的法则和规则,物理最重要的是真实性;“事理”指系统、组织如何管理和做事情的原理,针对不同的问题应该怎样做;“人理”指从个体到群体的联系,在系统中应当如何做得

更好,高效地处理事情的方式与方法。“物”“事”“人”相辅相成,在系统实践中要合理分析三者的关联因素。

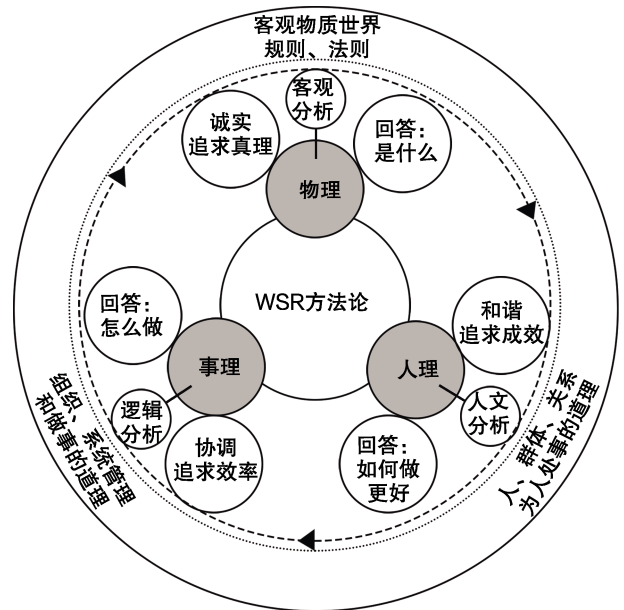


图1 WSR 方法论
Fig.1 WSR methodology

WSR 方法论的提出,在国内外都得到了很大的发展,且并不局限于某一领域^[8]。例如:罗琛琛等^[9]基于 WSR 方法论探究老年健康饮食配送服务体验用户需求,提出相应的设计指导方法,并在饮食、服务、用户三个层面推导出合理的老年健康饮食配送服务模式;方方等^[10]以单柱式液压机的优化设计为例,结合 WSR 方法,从物理-事理-人理三个维度展开设计研究,建立产品设计的三维过程模型。虽然 WSR 在设计领域应用得还比较少,但是对设计研究的作用显而易见,可以将复杂的系统问题分解成若干有条理的小问题,从而进行全面的梳理。

1.2 WSR 方法论用于塔机驾驶室设计的适用性分析

塔机驾驶室布局设计是一个复杂系统,其复杂性主要表现在,塔机驾驶室的空间有限,内部结构需要综合考虑设备、作业和人的因素,既要确保驾驶员作业中的规范性,又要综合考虑驾驶员行为的流畅性。对于塔机驾驶员,塔机驾驶室既是一个工作环境,也是他们从早到晚进餐、休息的生活场所,这就需要使塔机驾驶室中的空间多方面协调,以保证驾驶员正常的工作和生活。WSR 系统方法论就是针对事物之间的复杂关系所提出来的科学研究方法^[11]。将塔机驾驶室布局设计这一复杂系统对应到 WSR (物理-事理-人理)三个层面进行分析,可以避免遗漏其中的关键要素,以及梳理清楚整个系统中各要素之间的关联性和交叉性,见图 2。

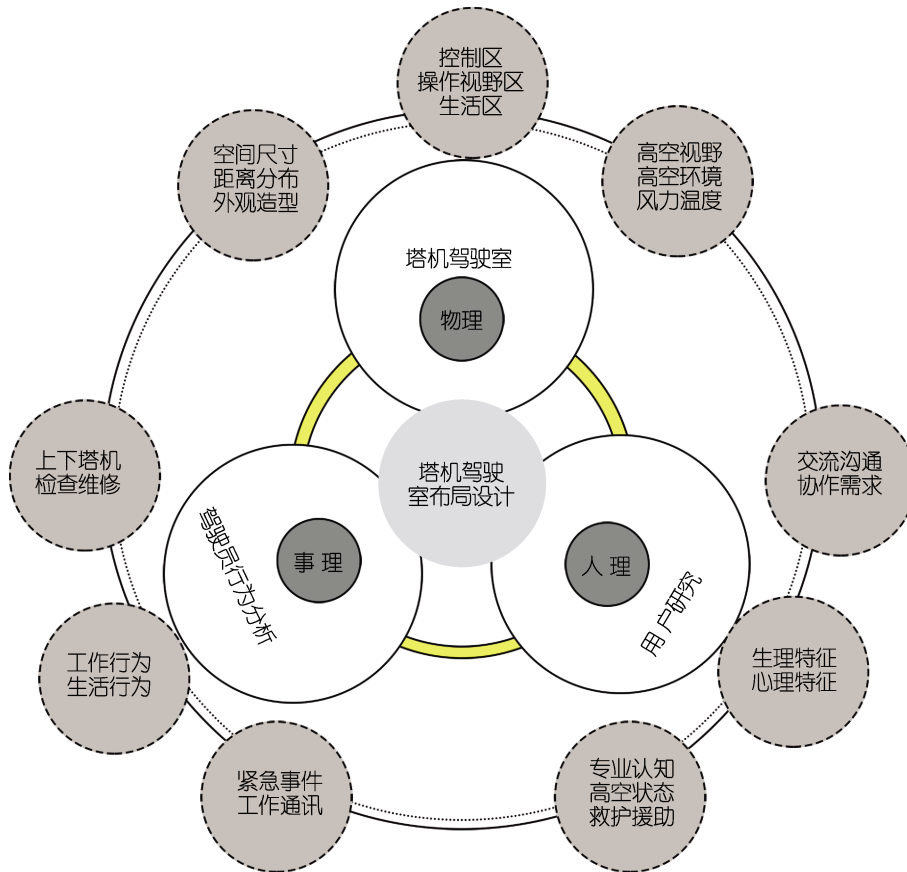


图 2 塔机驾驶室布局设计各要素的关系

Fig.2 Relationship between the elements of tower crane cab layout design




2 基于 WSR 的塔机驾驶室布局设计研究分析

塔式起重机主要分为平头塔、尖头塔和动臂塔三种基本类型, 为满足实际需要, 不同类型又可细分为多种规格和型号。国外知名塔机制造商包括法国波坦、德国利勃海尔、瑞士 Wolffkran、西班牙科曼萨、

马来西亚法福克集团等; 国内也拥有中联重科、徐工、永茂控股、川建和沈阳三洋等知名制造商。本文在资料文献调研的基础上, 选取中联重科、徐工和川建三款主流驾驶室进行实地调研, 梳理其外观尺寸、内部布局功能配置和操控装置等特征。由表 1 可以看出主流塔机驾驶室尺寸设计紧凑, 空间狭小, 主要尺寸相近, 功能配置及内部布局相仿, 且在驾驶人操作舒适

表 1 三款塔机驾驶室对比分析

Tab.1 Comparative analysis of three tower crane cabs

制造商	外观造型	外观尺寸/mm	内部布局功能配置	操控装置
中联重科		长: 1 250 宽: 1 800 高: 2 100	操控台、电源箱、座椅、空调内机、水杯置物架、插座、顶灯、灭火器等	操控台区域不可旋转、不可升降调节
徐工		长: 1 280 宽: 1 850 高: 2 100	操控台、电源箱、座椅、空调内机、空调外机、水杯置物架、文件置物架、衣帽钩、插座、顶灯、灭火器等	操作台区域不可旋转、可升降调节
川建马来西亚		长: 1 200 宽: 1 900 高: 2 200	操控台、电源箱、座椅、空调内机、水杯置物架、文件置物架、衣帽钩、插座、顶灯、灭火器等	操作台区域可旋转、可升降调节

性等方面均存在较多相似的问题,如功能布局混乱、操纵体验感差、空间利用率低等。依据“2021中国塔式起重机制造商10强”排名,中联重科位居前列,其塔机驾驶室布局功能配置及尺寸应用较广。因此,本文选用实地调研中的中联重科塔机驾驶室作为主要研究对象,结合WSR方法从物-事-人三方面进行深入分析与研究。

2.1 物理—塔机驾驶室内部布局分析

通过现场调研,对塔机驾驶室内部设施进行梳理。驾驶室的内部空间狭小(见图3),其中包含工作、生活等各种设施设备,要使作业空间和生活空间协调一致,确保驾驶员的吊装工作有条不紊地进行是设计的关键,进而提高了对塔机驾驶室空间布局优化设计标准。从物理层面,根据塔机驾驶员对驾驶室的使用状态,将塔机驾驶室分为三个区域:操作视野区、控制区、生活区,见表2。



图3 塔机驾驶室内部
Fig.3 Inside tower crane cab

表2 塔机驾驶室内部功能区域划分

Tab.2 Division of functional area inside tower crane cab

区域	主要功能部件
操作视野区	起重信息显示屏、前视窗、左右侧视窗、下视窗、雨刮器等
控制区	操控台、电源箱、座椅等
生活区	空调、置物架、垃圾桶、衣帽架、梳妆镜、工具箱、风扇、插座、顶灯、灭火器等

操作视野区是驾驶室空间布局物理层面中的基本要素。塔机的驾驶室位于整个塔式起重机的顶部或中上部,使驾驶员可以直观地观察当前吊钩的工作状态,保证驾驶员的视野高度,并与起重指挥人员配合,进而做到安全吊装。塔机驾驶员属于高空作业,要满足驾驶员视野的俯视特性,因此驾驶室操作视野区的范围需要考虑底部空间,在下前方及左右两侧都需要有透明玻璃窗口,使驾驶员的视野范围足够宽敞。起重信息显示屏为驾驶员提供塔机作业基本信息,信息显示主要包含当前吊重、小车距离、起升机构摄像头、吊钩位置摄像头等,是人-机之间的“桥梁”。因此,显示屏在布局中的位置尤为关键,既不能遮挡视野,又要使驾驶员精准捕捉显示屏所传达的信息。

控制区是驾驶室空间布局物理层面中的关键要素。控制区主要包含塔机的操控系统,是驾驶室中的核心,从单个要素看,体积占比也是最大的一部分。因此,对这一部分的布局设计重点是综合考虑整个驾驶室的空间尺寸关系,见图4。在操控台、电源箱、座椅的设计中,首先要考虑到工作的便捷、舒适与高效,其次是与其他布局要素相互协调,构成一体,见图5。



图4 塔机驾驶室电源箱和操控台
Fig.4 Power box and control console of tower crane cab

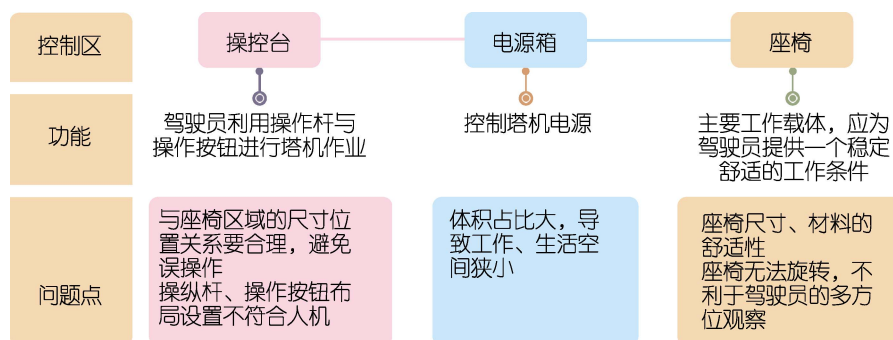


图5 塔机驾驶室控制区分析
Fig.5 Analysis of tower crane cab control area

生活区是驾驶室空间布局物理层面中的次要要素。生活区中的设施与驾驶员的作业和休息密切相关, 各设施之间比较分散, 见图 6。驾驶室布局设计

的生活设施包括空调、置物架、插座、垃圾箱、工具箱等, 以及一些根据用户的需求进行添置的物品, 见图 7。



图 6 塔机驾驶室生活区细节
Fig.6 Details of tower crane cab living area

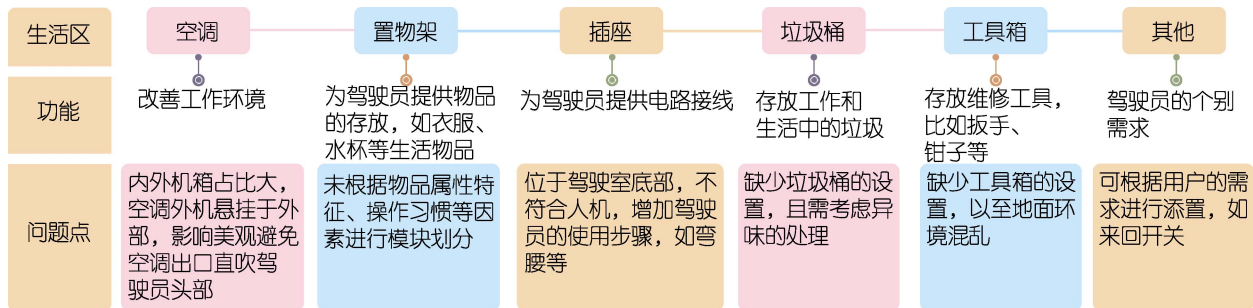


图 7 塔机驾驶室生活区分析
Fig.7 Analysis of tower crane cab living area

2.2 事理—塔机驾驶员行为流程分析

一般情况下, 塔机驾驶员通常会在塔机上工作 8 h 左右, 中途不会离开塔机驾驶室区域, 驾驶室承载了驾驶员一天的时间, 包括塔机作业、生活饮食、休息等。因此, 驾驶员的工作行为流程和生活行为流程分析对驾驶室的布局优化设计十分重要。对此, 本文在研究过程中, 前往建筑工地招募一名专业塔机驾驶员, 男性, 38 岁, 塔机驾龄 7 年, 设定操作任务为

同日常工作一样完成一次完整的塔机作业流程, 总持续时间为 30 min, 并为其配备 1 080 p 智能摄像眼镜, 将作业流程以视频形式采集, 见图 8—9。再通过 The Observer XT 行为观察分析系统, 定量地对视频中驾驶员的行为对应编码和描述, 并自动记录时间, 将行为数据在时间轴上进行可视化展示, 见图 10。驾驶员的作业流程归纳为 8 个行为项, 驾驶员的工作行为和生活行为占据绝大部分时间, 其中又包含不同的细



a 智能摄像眼镜

b 驾驶员佩戴智能摄像眼镜

图 8 设备及使用示例
Fig.8 Device and usage example

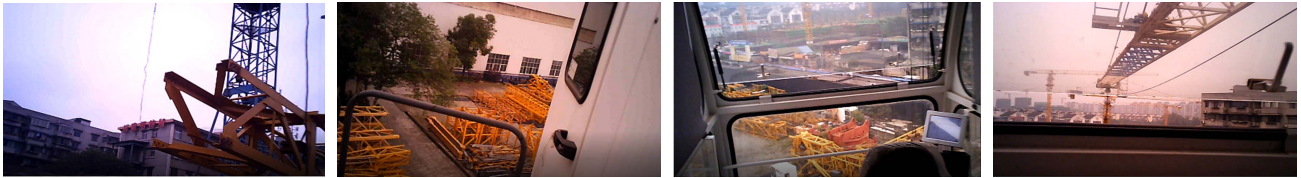


图9 智能摄像眼镜拍摄的部分画面
Fig.9 Part of the scene taken by smart camera glasses

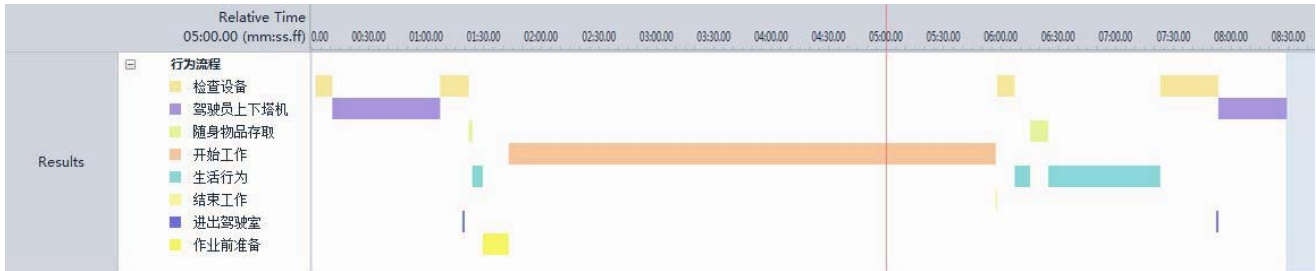


图10 Observer 行为流程分析
Fig.10 Observer XT experimental analysis

分行为。另外，结合用户访谈的方法，共招募了7名具有3~8年驾龄的塔机驾驶员，细致、深入探查驾驶员的工作行为和生活行为特征。在访谈中，主要聚焦于塔机操作流程、塔机作业中需要注意的细节、塔机作业中最重要的环节等工作方面的问题，以及在塔机上如何休息、休息期间的业余活动、对驾驶室的期望或设想等生活问题。

通过对驾驶员的行为分析和访谈，将驾驶员在驾驶室中的行为流程归纳为两条路线，见图11。路线一是当驾驶员刚来到驾驶室时，应先前往电源箱检查，再去操控台开始工作；路线二是在业余休息时间，驾驶员可自由出入驾驶室，以便活动身体。在这两条行为路线上，不仅包含了工作行为，也穿插着生活行为，见图12。设计中需要考虑更多的人-机交互因素，

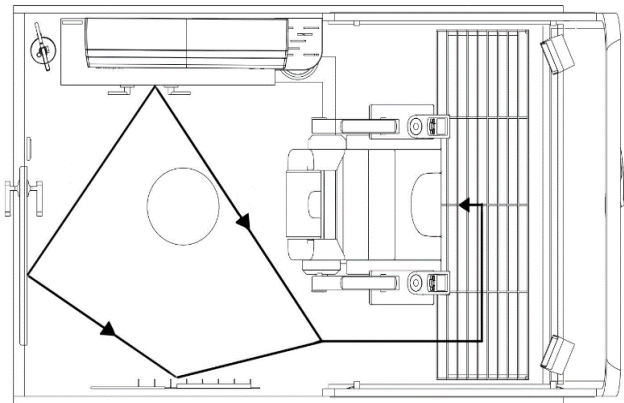


图11 驾驶员活动路线划分
Fig.11 Driver activity route division

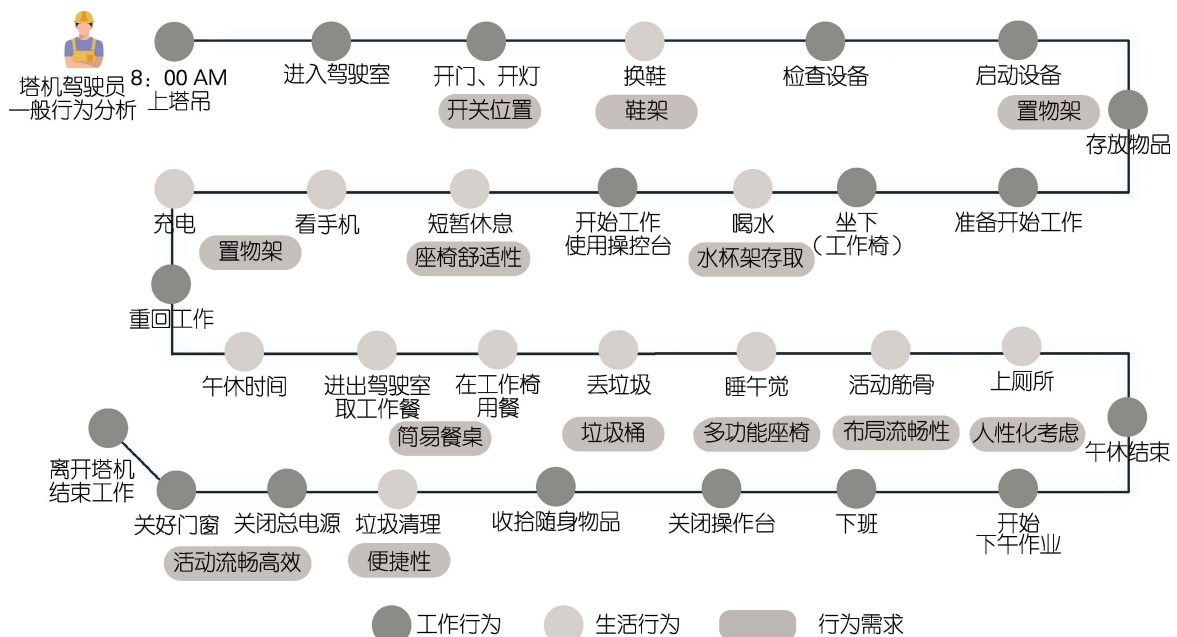


图12 塔机驾驶员一般行为流程分析
Fig.12 Analysis of general behavior flow of tower crane pilots

解析驾驶员在行为流程中所产生的需求点, 依此做出符合人机需求的布局设计, 为驾驶员提供高效的行为规划。

依据现有塔机驾驶室分析, 在驾驶员的工作行为流程中, 为了能让驾驶员顺利、高效地进行塔机作业, 其中的问题包括: 操作台过于机械化, 不符合人机需求; 布局设施的无序性, 导致驾驶员的操作繁琐, 加剧疲劳度。在驾驶员的生活行为流程中, 要保证驾驶员有一个好的工作环境和满足生理、心理需求, 其中的问题包括: 缺少物件放置的设施; 没有考虑驾驶员的就餐环境; 除了工作椅外, 驾驶员没有可以休息的地方; 空间狭小紊乱, 驾驶员行动不流畅。

2.3 人理—塔机驾驶员用户分析

依据访谈信息, 将驾驶员的需求归纳为生理需求和心理需求, 见图 13。塔机驾驶员在高空作业中, 对视野精准度要求较高, 同时, 长时间的坐姿工作致使驾驶员对其舒适性、腰颈椎的舒适度需求较高。塔机作业需要不停地重复相同的动作, 容易产生疲劳, 从而导致严重的安全事故。因此, 在布局设计中还需要考虑驾驶员的心理需求, 帮助避免或减少产生厌烦、疲惫的心态, 激发驾驶员在作业中的兴趣, 并有效提升塔机作业的高效性、舒适性。塔机驾驶室布局设计人理层面的分析与物理层面、事理层面相互贯穿和影响。

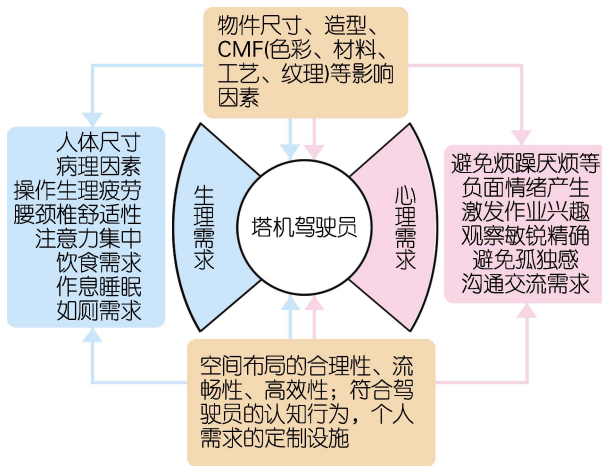


图 13 塔机驾驶员特征分析
Fig.13 Feature analysis of tower crane pilot

通过前期的调研分析, 以 WSR 方法论为基础, 理解塔机驾驶室空间布局设计的核心问题, 结合相关案例, 在物理层面、事理层面、人理层面进行详细的拆解和分析, 最终得到设计要素和各要素之间的联系, 从而系统化地研究驾驶室布局设计要点, 为后续布局设计方案建立基础。

3 塔机驾驶室布局优化设计

通过物理、事理、人理层面的分析, 塔机驾驶室布局设计主要包含物理层面中的视野区、控制区、生活区三个部分, 事理层面和人理层面又与物理层面相互作用, 三个部分的结构关系密切, 对塔机驾驶室的操作体验有重要影响, 使人-设备-空间三者相统一, 以达到驾驶室布局设计的易操作性、舒适性、流畅性, 见图 14。

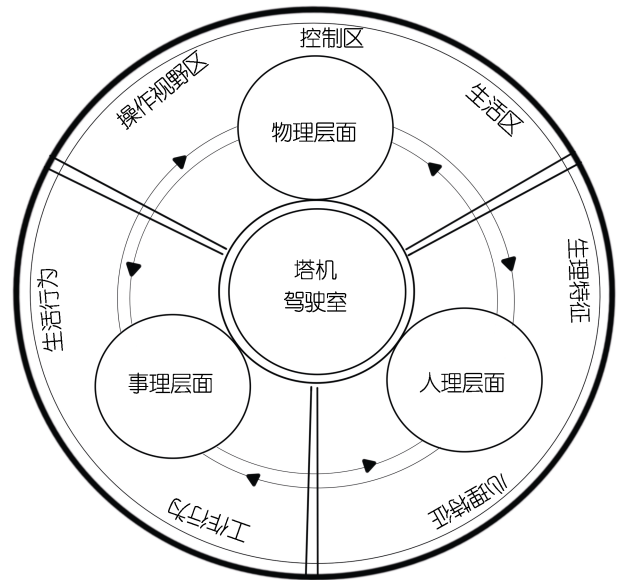


图 14 塔机驾驶室布局设计分析框架
Fig.14 Analysis framework of tower crane cab layout design

1) 在物理层面, 通过对操作视野区、控制区、生活区中各元素的归纳分析, 抓住各要素在布局设计中的要点, 从人机工程学的角度, 充分考虑人的因素, 根据驾驶员的必要需求和次要需求, 将单个元素的布局进行合理的设计要点分析, 见表 3。

表 3 内部布局要素设计分析
Tab.3 Design analysis of internal layout elements

区域	内部布局要素	布局设计要点
操作视野区	起重信息显示屏	符合人体坐姿下观察视野高度
控制区	电源箱	避开人体主要活动区域, 主机箱、外机箱位置安放
	置物架	从人体活动范围综合考虑, 可结合实际用处安置数量和形式(包含生活用品、工作资料等)
	插座	人体坐姿状态下的上肢可达范围内
生活区	垃圾桶	设置时应考虑其可活动性, 室内、室外的可活动性, 避免异味; 或者封闭式结构设计
	工具箱	可分为常用与不常用工具箱, 从而进行位置的恰当安置
	如厕需求	提供可密封的垃圾袋, 解决需求后, 将垃圾袋放于驾驶室外部

2) 通过对事理和人理层面的设计分析,对物理层面中所缺少的元素进行补充。考虑驾驶员的工作行为流程和生活行为流程中所涉及的部件来进行布局排列,结合人一机因素,优化布局设计,保证驾驶员工作环境的易操作性,减轻驾驶员厌烦、疲倦的心理,见表4。

表4 行为流程设计分析
Tab.4 Behavior flow design analysis

行为	布局设计要点
工作行为	1、保证工作区域的流畅性 2、易操作性,减少疲劳程度
生活行为	1、结合驾驶员的实际用处进行设置,比如挂钩等提供外衣,安全帽的放置 2、提供就餐空间(正餐、零食等) 3、休息、如厕等考虑
其他	结合用户需求添置

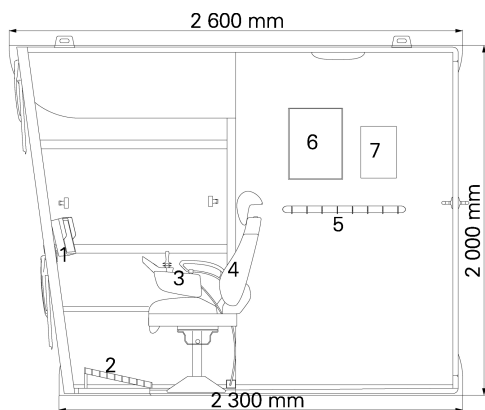
在进行塔机驾驶室布局优化设计时,依据以上设计分析,结合人机交互原则,建立新的塔机驾驶室布局设计方案,见图15—17。具体设计内容如下。



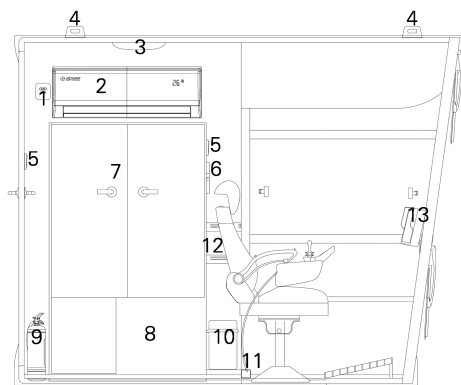
图15 塔机驾驶室外观设计
Fig.15 Appearance design of tower crane cab



图16 塔机驾驶室空间布局优化设计
Fig.16 Optimized spatial layout design of tower crane cab



1—起重信息显示屏; 2—脚踏板; 3—操控台;
4—座椅; 5—置物挂钩; 6—梳妆镜; 7—安全规范。



1—空调插孔; 2—空调; 3—灯; 4—吊钩; 5—灯开关;
6—电源插孔; 7—电源箱; 8—工具箱; 9—灭火器;
10—垃圾桶; 11—走线口; 12—置物架; 13—起重信息显示屏。

图17 塔机驾驶室空间布局
Fig.17 Spatial layout of tower crane cab

4 设计验证

设计验证涵盖两部分内容,一是为评估塔机驾驶

1) 针对物理层面的设计分析,在驾驶室中增添满足驾驶员工作和生活的需求设施,如置物架、工具箱、来回开关、垃圾桶、梳妆镜、衣帽挂钩等。

2) 根据驾驶员的行为流程分析,以驾驶员为中心,对相关设施的布局位置分布进行调整,使其设施布局符合驾驶员的日常行为流程,减少不必要的动作,且设计布局尽量分布于驾驶员上肢最佳可达范围内,满足驾驶员行为流程的高效性和一般工作姿势下的易操作性。调整驾驶员脚踏板的倾斜角度为 15° ,提升其一般工作状态的舒适性。

3) 考虑驾驶员的心理、生理需求,为尽量避免驾驶员产生疲惫、厌烦等负面情绪,驾驶室的内部配色以浅色为主,内部墙面采用皮革材质;集中地面走线,规范设施设备布局,增强空间感,通过舒适的感官体验来缓解驾驶员的负面心理情绪。

4) 驾驶室外部造型设计满足驾驶员作业时必需的视野环境,保证驾驶员的视野清晰,在无外部障碍物影响的状态下,驾驶员应始终能观察到起重吊钩、起吊物和臂架的运动,方便地了解周围的情况^[12]。

室布局优化设计的人机合理性,利用 Siemens JACK 人机仿真系统根据设计方案模拟作业环境,对塔机驾驶室空间布局方案的人机问题进行验证^[13]。首先,视

野范围是高空作业的关键要素,通过 JACK 中 Visual Fields、View Cones 工具,对驾驶员视野的可视性进行验证^[14]。其次,驾驶员工作以坐姿为主,要保证驾驶员在坐姿状态下能够有效触及所需设施设备,提升操作的舒适性和准确性,通过 Reach Zones 模拟分析,对驾驶员坐姿上肢可达性展开可行性分析^[15]。最后,为评估塔机驾驶室布局优化设计方案的人机舒适性,采用 OWPA 分析工具对驾驶员的一般作业姿势和一般取物姿势进行舒适度等级分析,检查驾驶员在模拟工作环境下的操纵姿势舒适性^[16]。二是评估设计方案功能配置、布局优化和内室色彩整体效果等满意度,采用五级量表评分的主观评价方法进行验证。

4.1 JACK 人机仿真

4.1.1 人机工程虚拟仿真模型的建立

塔机驾驶室空间布局设计的关键点是驾驶室内各要素与人体之间的空间位置关系^[17]。模型分为两个部分:一部分为塔机驾驶室布局优化设计三维模型,用于分析驾驶员的上肢可达性和驾驶员的操纵姿势舒适性,见图 18。另一部分为塔机整体简化三维模型,用于分析驾驶员的可视性,见图 19。塔机机身建模尺寸数据以中联 TC6015A—10 为参考,其固定式最大起升高度为 60 m,起重臂工作幅度为 2.5—60 m,平衡臂长为 14 m,平衡重最大重量为 18.75 t。最终以起升高度为 60 m,起重臂幅度为 60 m,其中分别在起重臂的最小限位 2.5 m 和最大限位 60 m 处设立吊钩,建立塔机整体三维模型。在 JACK 中导入三维模型,将所构建的虚拟驾驶室模型与塔机机身三维模型组合,得到塔机驾驶室人机工程虚拟仿真模型。

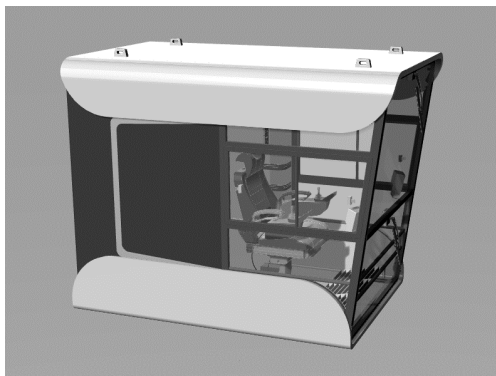


图 18 塔机驾驶室布局优化设计三维模型
Fig.18 Three-dimensional model of optimal design of tower crane cab

4.1.2 人体模型建立

根据 GB/T 10000—1988《中国成年人人体尺寸》尺寸数据^[18],采用 Siemens JACK 软件,建立数字人体模型。以 GB/T 10000—1988 为参考,建立塔机驾驶员第 90 百分位的人体数据模型,满足大部分驾驶员的操作要求,见图 20。

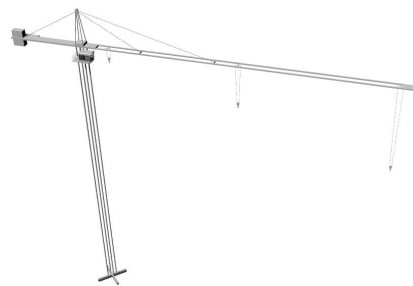


图 19 塔机整体三维模型
Fig.19 Overall three-dimensional model of tower crane

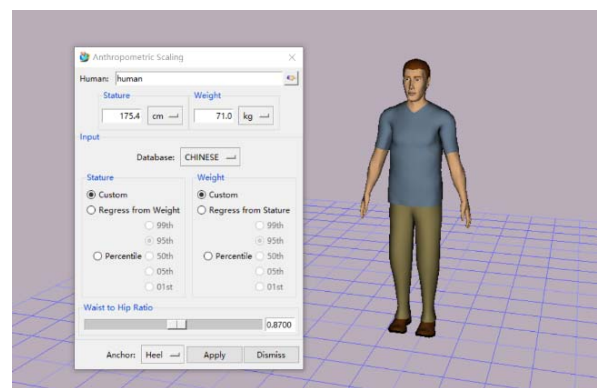


图 20 中国成年人人体数据模型建立
Fig.20 Establishment of human data model for Chinese adults

4.1.3 驾驶视野可视性分析

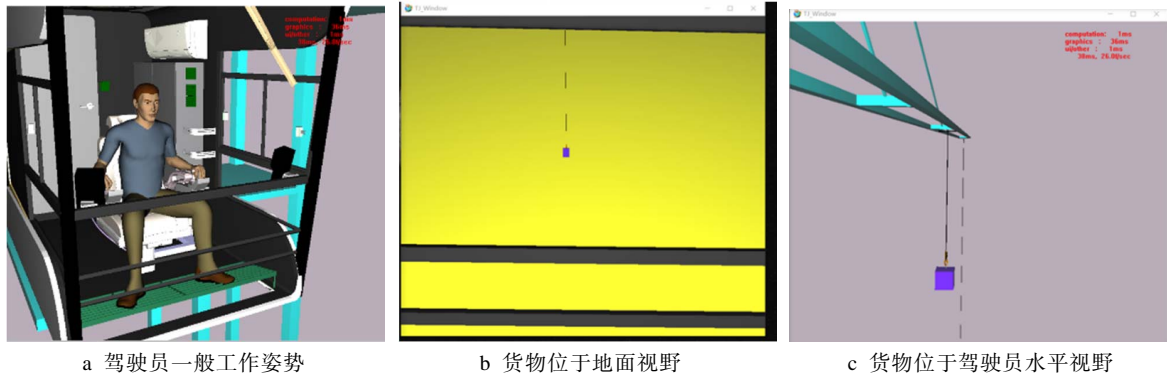
塔机作业工况复杂,驾驶室的视野窗要保证良好的可视性,以及起重信息显示屏的位置应处于头部和眼睛的自然转动范围内,尽量使驾驶员减少头部和眼睛的旋转。在位于起重臂 60 m 的吊钩处,设置 1.2×1.2×1.2 m 大小的货物。从 JACK 模拟场景中可知,当驾驶员处于一般工作姿势时,货物位于地面及驾驶员水平视野处,皆可被清晰地观看,见图 21。

使用 JACK 软件中的 Visual Fields 工具,生成人眼对不同颜色和盲区的视野范围几何体,得到驾驶员前方、左侧、右侧、底部及最佳认读范围视野,见图 22。

利用 JACK 软件中的 View Cones 工具,建立代表虚拟人体可视区域,验证视野区中左右起重信息显示屏位置的合理性,见图 23。根据 JACK 模拟实验的视野可视性验证,分析结果为合理。

4.1.4 驾驶员坐姿上肢可达性分析

塔机驾驶室的操纵装置是驾驶员工作的核心,需将操纵部件设计在驾驶员最佳空间内,如放操纵杆、控制键盘等,然后是塔机驾驶员日常生活相关的次要部件设置,如置物架、插座、垃圾桶等。JACK 软件中的 Reach Zones 模拟分析,可得出人体数据模型的手部操作空间,分析驾驶员双手的可达域,见图 24。可知,驾驶室操纵部件位于驾驶员手部操作最佳空间内,对次要部件的可达性也符合要求。



a 驾驶员一般工作姿势 b 货物位于地面视野 c 货物位于驾驶员水平视野

图 21 驾驶室前视窗视角
Fig.21 View from the front cab window

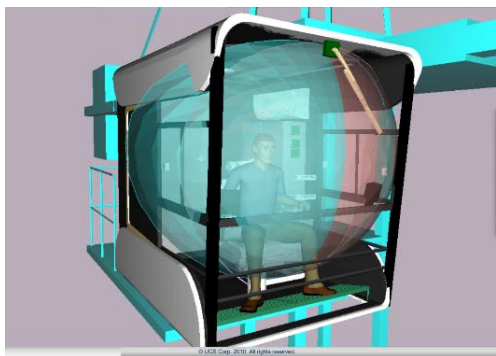


图 22 驾驶室一般工作姿势视野范围
Fig.22 Range of visual field of general working posture in cab

4.1.5 驾驶员操纵姿势舒适性分析

JACK 软件中的 OWPA 分析工具可快速检查驾驶员工作姿势的舒适性,得出作业人员工作姿势的行动等级 (Action Categories, 简称 AC) [19]。行动等级划分为 4 个等级,即 AC1-AC4, AC1 表示为舒适, AC2 至 AC3 表示舒适度依次递减, AC4 表示为不舒适。利用 OWPA 分析工具对一般工作姿势和一般取物姿势进行分析,见图 25。可见,驾驶员的两种行为姿势均是 AC1 等级,即舒适,无须纠正。

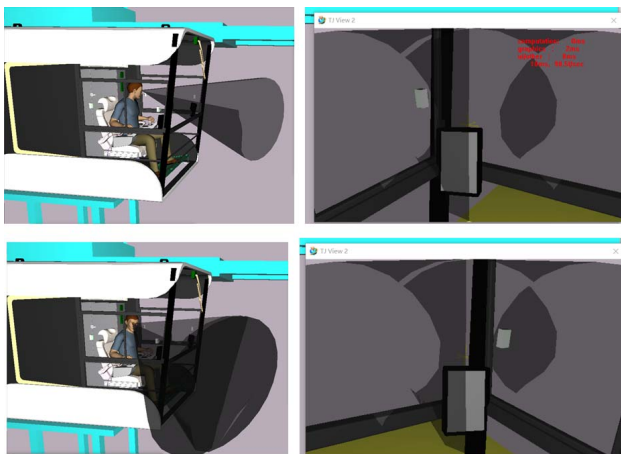
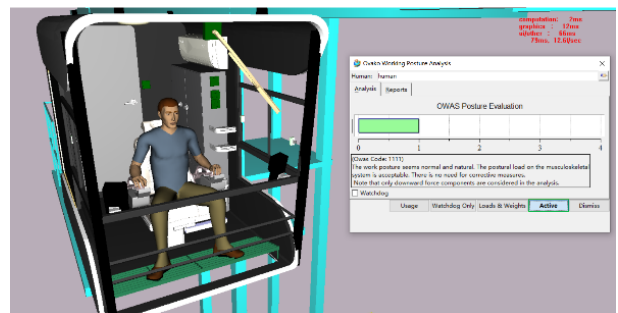
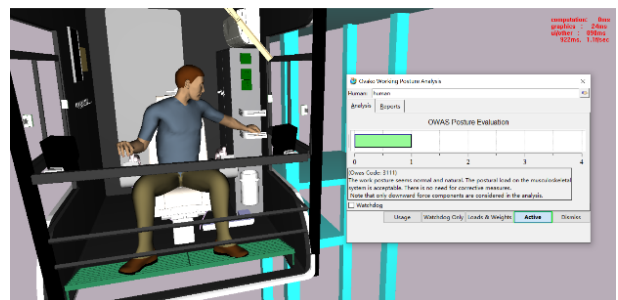


图 23 塔机驾驶室左右显示器视野
Fig.23 Visual field of left and right display in tower crane cab



a 一般工作姿势



b 一般取物姿势

图 25 驾驶员一般姿势舒适性等级分析
Fig.25 Analysis of general postural comfort level of drivers

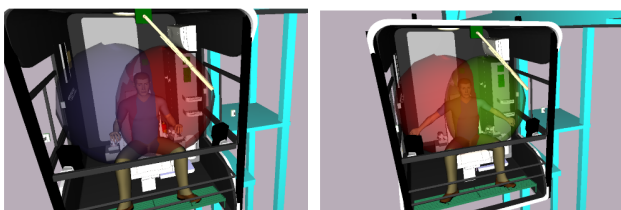


图 24 塔机左右手可达域
Fig.24 Left and right hand reachable domain in the tower crane

综上所述,针对塔机驾驶室布局优化设计方案的人机仿真验证,即驾驶视野可视性、驾驶员坐姿上肢可达性、驾驶员的操纵姿势舒适性三个方面的分析验证皆为合理。可知,对塔机驾驶室的布局要素进行合理划分和优化设计之后,使其空间得到有效利用,改善驾驶员

的操作疲劳, 符合驾驶员易操作性、舒适性的需求^[20]。

4.2 布局优化方案满意度评价

为评估塔机驾驶室空间布局优化设计方案的满意度部分, 采用主观量表评价进行问卷调查。问卷设计中, 首先通过 45°透视图、左右视图和俯视图等多角度效果图向受测者全面展示优化后的设计方案, 并对功能配置进行标注说明。之后前往建筑工地, 实地邀请专业的塔机驾驶员结合上述展示 (见图 26), 从物-事-人三个层面, 包括设施的添置和位置调整、已有设施的位置调整、日常使用习惯、内室色彩材质的搭配及整体效果等方面对设计方案进行满意度评级。问卷采用五级量表, 对各个因素进行满意度评分, 即 5-很满意、4-满意、3-一般、2-不满意、1-很不满意。由于塔机驾驶员属于专业性较强工种, 问卷发放的目标人群有限, 所以本次问卷调查共发放问卷 20 份, 回收 20 份, 无效废弃问卷。

对问卷调查结果进行分析, 包含塔机驾驶室空间布局优化设计方案中物、事、人三个方面的各项满意度均值、标准差和不同满意度等级的评分占比, 见表 5。



图 26 问卷调查现场
Fig.26 Questionnaire survey scenario

根据分析结果表明, 各项满意度均值均大于 4.00, 处于满意及以上区间, 且各项标准差均小于 1.00, 说明数据分布在平均值的左右, 离散程度较小。各评分项目的评分占比中, “非常满意”和“满意”之和均大于 80%, 由此可见, 驾驶室空间布局优化设计方案满足大部分用户的设计诉求。其中, 依据物、事、人三个层面的主观评分均值雷达图 (见图 27), 可知对人理层面的满意度评价最为突出, 物理与事理层面次之, 均处于满意及以上区域。

表 5 问卷调查结果分析
Tab.5 Analysis of the results of questionnaire survey

评分项目	均值	标准差	各级评分占比/%				
			5-非常满意	4-满意	3-一般	2-不满意	1-很不满意
置物架	4.45	0.74	60	25	15	0	0
插座	4.40	0.58	45	50	5	0	0
垃圾桶	4.55	0.67	65	25	10	0	0
工具箱	4.35	0.73	50	35	15	0	0
物理 照明来回开关	4.30	0.71	45	40	15	0	0
梳妆镜	4.15	0.79	40	35	25	0	0
衣帽挂钩	4.40	0.66	50	40	10	0	0
脚踏板	4.25	0.70	40	45	15	0	0
地面走线	4.50	0.74	65	20	15	0	0
生活设施布局	4.40	0.58	45	50	5	0	0
事理 工作设备布局	4.45	0.67	55	35	10	0	0
布局流线符合习惯特征	4.30	0.78	50	30	20	0	0
内室颜色	4.75	0.54	80	15	5	0	0
人理 内室墙面材料	4.75	0.43	75	25	0	0	0
整体的驾驶室	4.60	0.58	65	30	5	0	0

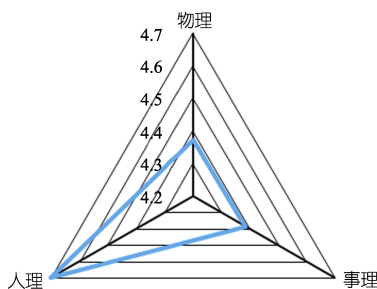


图 27 物事人三因素主观评分均值雷达图
Fig.27 Mean radar diagram of WSR three-factor subjective score

5 结语

基于 WSR 方法论, 从物理层面、事理层面、人理层面分别对塔机驾驶室空间布局设计展开详细全面的分析, 梳理归纳设计相关要素, 提出布局优化设计要点, 建立优化设计方案三维模型, 并采用 JACK 仿真评价系统进行验证, 从驾驶视野可视性、驾驶员坐姿上肢可达性、操纵姿势舒适性三个方面验证了优化方案的人机合理性, 结合量表评分调查, 塔机驾驶室空间布局优化设计方案的满意度良好。基于 WSR

开展塔机驾驶室空间布局优化设计的方法有效,可为同类型装备类驾驶室空间布局优化设计提供参考。

参考文献:

- [1] 李冉儿. 基于人机工程学的 75 m~3 大型挖掘机驾驶室设计[D]. 太原: 太原理工大学, 2016.
LI Ran-er. Design of 75m~3 Large Excavator Cab Based on the Ergonomics[D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2016.
- [2] 王春燕, 危宁. 熵权和 DEMATEL 耦合的塔机操作安全人因影响因素分析[J]. 水力发电, 2019, 45(4): 74-78.
WANG Chun-yan, WEI Ning. Operation Safety Factor Analysis of Tower Crane Based on Entropy and DEMATEL[J]. Water Power, 2019, 45(4): 74-78.
- [3] 段锐, 邓晖, 邓逸川. ICT 支持的塔吊安全管理框架——回顾与展望[J]. 图学学报, 2022, 43(1): 11-20.
DUAN Rui, DENG Hui, DENG Yi-chuan. Information Communications Technology Assisted Tower Crane Safety Management-Review and Prospect[J]. Journal of Graphics, 2022, 43(1): 11-20.
- [4] 杨悦, 曹旭阳, 高顺德. 塔式起重机刚柔耦合动力学模型研究[J]. 机械设计与制造, 2018(1): 79-82.
YANG Yue, CAO Xu-yang, GAO Shun-de. Rigid-Flexible Coupling Dynamic Modeling of a Tower Crane[J]. Machinery Design & Manufacture, 2018(1): 79-82.
- [5] 王雅坤, 任家骏, 李爱峰, 等. 矿用挖掘机驾驶室操作界面的布局优化设计[J]. 工程设计学报, 2020, 27(4): 469-477.
WANG Ya-kun, REN Jia-jun, LI Ai-feng, et al. Layout Optimization Design of Operation Interface in Mining Excavator Cab[J]. Chinese Journal of Engineering Design, 2020, 27(4): 469-477.
- [6] 张宏瑞, 任家骏, 李爱峰. 液压挖掘机驾驶室的舒适 H 点域研究[J]. 太原理工大学学报, 2019, 50(5): 630-634.
ZHANG Hong-rui, REN Jia-jun, LI Ai-feng. Comfortable H Point Domain Research Based on Hydraulic Excavator Cab[J]. Journal of Taiyuan University of Technology, 2019, 50(5): 630-634.
- [7] 顾基发, 唐锡晋, 朱正祥. 物理-事理-人理系统方法论综述[J]. 交通运输系统工程与信息, 2007, 7(6): 51-60.
GU Ji-fa, TANG Xi-jin, ZHU Zheng-xiang. Survey on Wuli-Shili-Renli System Approach[J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2007, 7(6): 51-60.
- [8] 陈进东, 刘琳琳, 杜雨璇, 等. 物理-事理-人理系统方法论演化发展及其影响[J]. 管理评论, 2021, 33(5): 30-43.
CHEN Jin-dong, LIU Lin-lin, DU Yu-xuan, et al. Evolution and Influences of Wuli-Shili-Renli System Approach[J]. Management Review, 2021, 33(5): 30-43.
- [9] 罗琛琛. 基于 WSR 的老年健康饮食配送服务设计研究[D]. 无锡: 江南大学, 2019: 5-112.
LUO Chen-chen. Design of Senile Healthy Diet Distribution Service Based on WSR[D]. Wuxi: Jiangnan University, 2019: 5-112.
- [10] 方方, 段齐骏, 李明珠, 等. 基于 WSR 系统方法论的产品设计研究[J]. 机械设计, 2013, 30(8): 113-116.
FANG Fang, DUAN Qi-jun, LI Ming-zhu, et al. Study of Product Design Based on WSR System Methodology[J]. Journal of Machine Design, 2013, 30(8): 113-116.
- [11] 张彩江, 孙东川. WSR 方法论的一些概念和认识[J]. 系统工程, 2001, 19(6): 1-8.
ZHANG Cai-jiang, SUN Dong-chuan. Some Concepts and Understandings about WSR[J]. Systems Engineering, 2001, 19(6): 1-8.
- [12] 中华人民共和国建设部. JG/T 54-1999, 塔机司机室技术条件[S]. 北京: 中国标准出版社, 1999.
Ministry of Construction of the PRC. JG/T 54-1999, Technical Conditions of Tower Crane Cab[S]. Beijing: Standards Press of China, 1999.
- [13] 何思俊, 支锦亦, 杜洋, 等. 装备驾驶界面人机设计评价研究综述[J]. 机械设计与研究, 2019, 35(5): 97-103.
HE Si-jun, ZHI Jin-yi, DU Yang, et al. A Review of Research on Man-Machine Design Evaluation of Equipment Driving Interface[J]. Machine Design & Research, 2019, 35(5): 97-103.
- [14] 苏珂, 廖越. 基于 JACK 的电动拖拉机驾驶室人机工程改进设计[J]. 机械设计, 2018, 35(8): 106-110.
SU Ke, LIAO Yue. Ergonomic Improvement Design of Electric Tractor Cab Based on JACK[J]. Journal of Machine Design, 2018, 35(8): 106-110.
- [15] 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, 256.
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, 256.
- [16] 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.
- [17] 边轩毅, 赵静, 李娟莉. WK-35 大型矿用挖掘机驾驶室人机工程改进设计[J]. 矿业研究与开发, 2019, 39(7): 92-98.
BIAN Xuan-yi, ZHAO Jing, LI Juan-li. Man-Machine Engineering Improvement Design of WK-35 Large Mining Excavator Cab[J]. Mining Research and Development, 2019, 39(7): 92-98.

(下转第 136 页)