

智能铲运机造型设计及眼动追踪实验

韩宇翔, 张子正

(北京工业大学, 北京 100124)

摘要: **目的** 通过眼动实验对造型设计过程中区域的重要性和优先级进行确认, 为矿山开采设备造型设计过程提供更充分的数据支撑和理论依据。**方法** 追踪被试眼动轨迹和生理数据, 得出视觉热点图和视觉轨迹图, 分析用户对现有产品特征的视觉关注点的排布情况, 运用实验分析结果对整体造型各个区域进行优先级划分, 以此指导设计要素之间的主次和顺序, 指导设计方案中模块化区域的划分, 缩短试错阶段, 提高效率, 提出优化方案。**结果** 最终得出用户更加关注驾驶舱、轮胎区域, 其次是铲斗和车体区域。**结论** 将眼动实验结果运用到铲运机的造型设计中, 弥补了当前主要依赖设计师经验进行铲运机造型设计的不足, 验证了在开采设备造型设计过程中, 应用眼动实验方法来辅助区域划分和优先级制定的可行性, 从而进一步提升设计方案的科学性和合理性。

关键词: 工业设计; 铲运机造型设计; 眼动追踪; 模块化; 矿山开采设备

中图分类号: TB472 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3563(2022)02-0056-08

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2022.02.008

Modeling Design and Eye Tracking Test of Intelligent Scraper

HAN Yu-hong, ZHANG Zi-zheng

(Beijing University of Technology, Beijing 100124, China)

ABSTRACT: In order to provide more sufficient data support and theoretical basis in the modelling design process of the mining equipment, eye-tracking experiment is used in this paper to confirm the zonal significance and priority. Visual heat maps and visual trajectory maps are obtained by analyzing the eye movement trajectory and physiological data. By analyzing the user's visual attention points related to the zones with product features, the priorities and sequence of design features could be distinguished, so as to shorten the trial period and promote the efficiency, optimizing the project. In this experiment, it is realized that the driving zone, tyre zone, and then the bucket zone and vehicle body zone catch the major attention. This discovery could be utilized in intelligent scraper shape design, complementing the current way of designing relying on designers' experience, validating the availability to use eye movement experiment in mining equipment design process to distinguish the priority of different zones. The scientificity and rationality of design is also promoted.

KEY WORDS: industrial design; modelling design for intelligent scraper; eye tracking; modularity; mining equipment

地下铲运机是一种用于井下矿石装载运输的专用工程车辆,是实现地下矿山规模化开采的重要装备^[1]。可以完成半自动化生产作业循环,包括自动化行驶、卸矿和远程遥控铲装。其中包括辅助操作功能,操作者可以选择自动装矿或远程遥控装矿的方式,从而提升生产效率和安全系数^[2]。智能铲运机的设计和研发更具前瞻性,相对发达国家,中国尚处于自主研发阶

段。眼动行为反应用户与观察对象在交互时的重要认知过程,是视觉艺术研究中反映兴趣变化程度的重要因素^[3-4]。眼动追踪技术主要应用于心理学、医疗程序和交互系统中,先进的眼动追踪技术提供了更广泛认识、深入理解人体和精神功能的机会。目前在眼动追踪在机械设备造型设计的应用研究中,多用于评价现有的设计方案,主要在工程车辆和机械设计中有所

收稿日期: 2021-09-13

作者简介: 韩宇翔(1972—),女,长春人,硕士,北京工业大学副教授,主要研究方向为工业设计工程。

通信作者: 张子正(1992—),男,山东人,北京工业大学硕士生,主攻工业设计工程。

开展。然而，国内智能铲运机处于自主研发阶段，眼动追踪数据用于指导智能铲运机设计的案例和研究较少。通常机械设备的外观设计中以设计师个人（或团队）的主观判断及设计经验作为设计依据的方法有局限性，因此引入眼动追踪技术辅助设计方案的探讨有较高的研究价值。

1 眼动实验

国内的眼动研究多用于设计方案的评价，林丽等通过眼球的运动来探寻用户的心理活动，依据科学的眼动行为数据提升设计与需求的匹配度^[5]。韩飞等基于视觉选择性注意理论和形状知觉理论得到的产品形态视觉认知模型，以此用于设计方案的研究^[6]。胡伟峰等利用眼动实验与主观评价相结合的方法评估采油机械压裂车的外观设计，提出产品造型主特征应表现在最受关注的区域，以及配色应具有层次感^[7]；房启晓提出建立递进的工程机械类产品设计程序，并利用模块化划分与眼动仪实验等手段，对工程机械类产品的设计方法进行创新性探索^[8]；戚彬等将眼动跟踪技术运用于形态仿生的研究，得到眼动路径、注视频率、注视时间和注视点数量等数据，以定量实验方法分析得出生物原型的典型形态特征排序^[9]。国外有关眼动实验的研究中，Lisa 等提出了双眼共激活在评估眼动注视时间的影响与交互理论的探讨^[10]。Bogomolova 等提出利用眼动追踪技术，来测试单位价格标签设计因素是如何影响消费者在产品决策过程中的眼球运动的^[11]。眼动追踪技术的输出数据包括数字，以及眼睛注视的持续时间和坐标，经检验所提出的方法能够量化和预测仅通过监控眼睛行为而获得的审美偏好^[12]。

因此，本文探讨眼动实验数据辅助智能铲运机设计的研究具有创新性和探索性。眼动实验数据运用在具体的造型设计方案中，其眼动注视的区域划分与智能铲运机方案中模块化设计方法具有一致性，可用于规划和指导模块的划分，提升产品品质，使设计方案更加具有科学性、逻辑性、功能性和实用性。

1.1 实验方法

根据上述眼动追踪实验与形态设计优化的方法讨论，结合智能铲运机研发现状的研究，确定眼动追踪数据辅助指导铲运机造型设计的方法，具体如下：选取实验对象，收集和处理实验材料，收集现有案例中铲运机的图片，对照片尺寸、颜色、背景进行处理，排除其他干扰因素；对实验对象依据功能特征要素进行分区，铲运机为功能性机械设备，根据不同的功能要素划分不同的功能区域并进行编号；样本图片眼动追踪实验测试，设计双盲实验，减少人为因素对实验结果的影响；眼动数据与造型设计要素关系分析，对实验结果采取单因素方差分析，获取与设计要素显著

相关的眼动指标；设计方法的运用，依据眼动指标显著变化参数与铲运机不同功能要素建立联系，以及功能要素的优先级大小，据此排序并建立模型来辅助和优化设计方案。

1.2 实验准备

在已有产品设计与方法的基础上，来对设计方案进行辅助性佐证，并提供数据支撑和理论依据。通过眼动实验采集用户在关注不同的铲运机时的眼动数据，研究用户在铲运机外观不同时的注视情况，在现有的设计方法基础上得到更具科学依据和理论支撑的设计方案。实验在专业的眼动实验室进行，设备采用 Tobii X300 屏幕式眼动仪，使用 Ergolab 3.0 人机环境同步平台对数据进行采集和整理。实验前期准备工作主要分为 3 个部分：实验材料的预处理，对现有 2 款铲运机进行多角度的拍照取样，构建实验材料素材库；招募被测试者 34 名，其中男女比例为 1:1，年龄的区间为 22~30 岁，被测试者为企业在职工，其具有多年的工作经验或有较高的文化素质，双眼矫正视力均为正常，且不存在色盲、色弱、斜视、睡眠不足及精神紧张等其他问题；预实验及设备调试，提前进行预实验并完成设备调试。

1.3 实验操作流程

实验共计 2 天完成，每天随机抽取 17 人进行实验，首先采集被测试者的瞳孔数据、静息心率和皮电数据作为基准数据，随后对现有 2 款铲运机形态特征进行观测，采集实验过程中的瞳孔数据、静息心率和皮电数据输出实验结果。每位被测试者的实验过程大约需要 20 min，包括实验前注意事项讲解、实验设备调试校准，大约 3 min，被测试者观看实验材料时间约 17 min。具体实验步骤如下：实验准备阶段对被测试者讲解实验要求和注意事项；被测试者坐在指定位置，佩戴实验设备；询问被测试者的年龄、身高、体重等基本信息情况；随后进行眼动仪的校准，并采集 3 min 的静息基准数据；实验开始，被测试者观看实验材料至实验结束。

为保证实验数据的精准性，需要控制实验区域人员的流动，避免出现噪音、光线变化等环境因素，以免影响实验结果。实验开始后，被测试人员注视眼动仪屏幕上的图片，对现有 2 款铲运机的造型，以及在工作环境中的情况进行观察。每张照片播放照片为 5 s，时间过长容易造成疲劳，时间太短难以采集准确的数据。

1.4 实验结果及分析

通过 Ergolab 3.0 平台对实验数据进行导出，筛选、剔除了 3 个样本数据，是因为这 3 个样本数据中的被测试者追踪比例低于 90%，或者异常数据超出平均值 300%。然后提取剩余 31 个样本的眼动数据的热区图、方格兴趣区、被测试者不同区域首次注视持续时间等数据进行分析，见图 1—3。



图1 视觉热点
Fig.1 The visual hotspot map

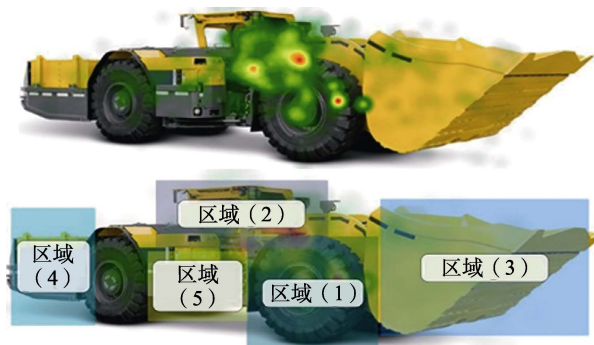


图2 视觉热点区域划分
Fig.2 The visual hotspot regionalism

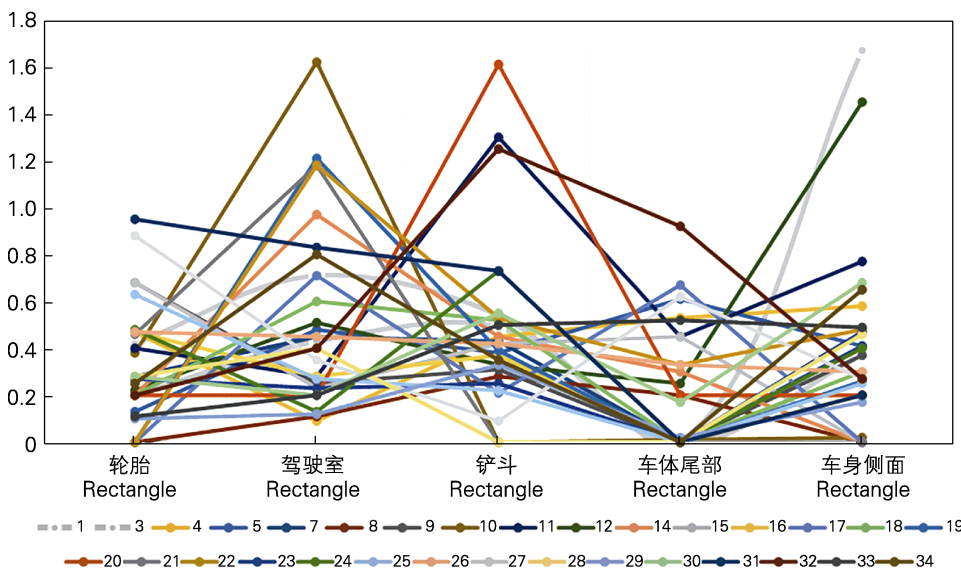


图3 被测试者不同区域首次注视持续时间
Fig.3 The duration of first fixation in different regions of subjects

据视觉热点对现有铲运机特征划分区域,分析上述视觉热点得出,视觉热点主要集中在车轮、驾驶室、铲斗、车身尾部、车身侧面这些特征。将整车按特征化分为5个部分,分别为轮胎区域、铲斗区域、车体尾部区域、车身侧面区域,形态特征分区可以更好地对每个部分的视觉数据进行对比。

筛选得到的眼动数据,通过眼动指标的整理及研究,最终选取均值性质和方差值性质的眼动指标作为备选眼动指标,运用SPSS软件对眼动数据进行方差特异性检验,选择最大注视时间和首次注视时间这2项眼动指标进行研究,见表1。

表1 眼动数据首次注视持续时间
Tab.1 The duration of the first fixation of eye movement data

眼动区域	最大注视时间(平均值)	首次注视时间(方差)
区域(1)	0.27	0.12
区域(2)	0.21	0.10
区域(3)	0.23	0.12
区域(4)	0.22	0.09
区域(5)	0.20	0.13

在浏览任务中,被测试者对某一区域最大注视时间的长短,反映了其观察时对该区域的重视程度,说明该样本区域内的设计形态对用户的吸引程度越大^[13]。通过搜集被测试者对不同区域的首次注视时间数据,分析得出用户对铲运机不同区域的外观特征关注程度,通过分析被测试者首次注视时间及被测试者的视觉热点图,可以发现被测试者关注铲运机特征的兴趣点依次为驾驶室部分、轮胎部分、铲斗部分、车体尾部、车体侧面,后续根据实验结果指导进行模块化方案设计。

1.5 眼动实验辅助设计方案提升探讨

在设计领域中,借助眼动实验中的首次注视时间数据及热点图来寻找设计机会点的实践较多。其中一般认为首次注视时间较短的区域是用户首先观察的区域,其主要影响因素是设计特征。观察对象特征元素明显时往往能先抓住用户的视觉中心,对这些形态特征进行提取、评价筛选,对后续设计具有改良或借鉴意义,可以帮助设计师更加确切地进行设计方案的优化推进。通过分析实验中得出的视觉热点图,可以发现用户关注铲运机形态时的兴趣点。与首次注视时

间不同的是，热点图反应的是该区域的持续关注时间，持续时间越久，说明该区域的特征元素越受到用户的关注，引起关注的原因主要是设计特征元素的美与丑。设计特征元素的美与丑都会使用户较长时间地关注某一局部特征，但总的来说，用户关注某一区域时间越长，说明该特征越容易引起注意，这些局部特征即应当重点进行设计和改良。通过分析区域关注度较高的原因，可以指导后续设计中采用不同的方法，如保留强化特征或删减修改特征。这一方法同样适用于交互设计中的界面设计领域。

1) 在网页设计中，通过捕捉眼动注视热点和注视轨迹，对界面区域进行分析，在设计布局时将不同层级的信息合理排布，满足用户更有效的获取信息的需求。眼动追踪技术运用到网站设计，以新版 12306 购票网站为例，通过眼动追踪实验获取用户眼动视觉热点图和眼动轨迹。车票查询页注视轨迹见图 4^[14]。对界面进行定量分析通过分析发现网页存在信息排版和操作效率的问题，在排版、配色和信息呈现进行改良设计，车票查询页面的改良设计见图 5^[14]。

2) 在广告设计和包装设计中通过分析眼动数据可以得出，用户是否对产品产生兴趣及产生兴趣点在哪里，从而进行产品的改进和优化。在云南白药包装设计中，通过分析视觉热点图，发现原有包装中信息

重要程度与视觉关注度不匹配。以此为指导将外包装颜色、图案、文字排版和打开方式等因素进行改进设计。云南白药胶囊外包装热点见图 6^[15]，云南白药胶囊改进外包装正面见图 7^[15]。

3) 在文化产品设计中，通过观察者对某一个文化形态的不同要素的关注程度进行排布，为文化元素符号提取提供方向。在侗族文化产品包装设计案例中，对比侗族传统建筑特征，通过观察者对不同要素关注的关注程度从强到弱依次为楼身、飞檐、塔顶和底部，为文化元素符号提取提供方向。以侗族鼓楼元素的主要特征，将鼓楼的楼身、飞檐和宝顶等具有典型形态特征的视觉元素映射于包装瓶体的设计中。实验刺激样本热区及轨迹见图 8^[16]，“侗水瓶”设计效果见图 9^[16]。

国外的一项基于单价的布局如何影响消费者决策的研究中，同样运用眼动实验的方法采集消费者在观察产品包装和价签时的视觉热点。设立对照实验将相同产品分为没有价格、正常大小的价签和增大的价签 3 组，分别采集被测试者的视觉热点和主观评价。运用统计学方法分析得出价格字符增大有助于消费者购物时正确决策，特别是对低价格感兴趣的人群而言结论更为明显^[11]。产品包装与价签的视觉热点见图 10^[11]，价签增大对消费者关注度的影响见图 11^[11]。

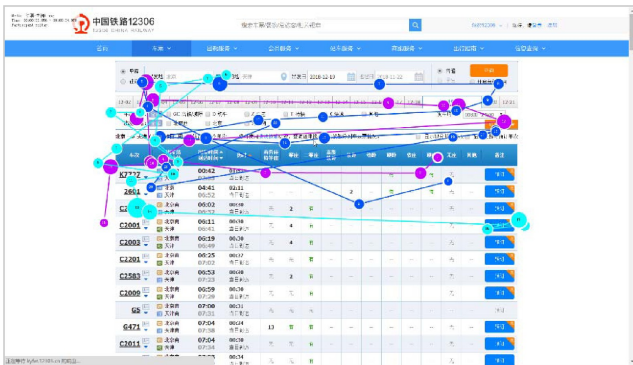


图 4 车票查询页注视轨迹
Fig.4 Gaze track map of ticket inquiry page



图 5 车票查询页面的改良设计
Fig.5 Improved design of ticket query page

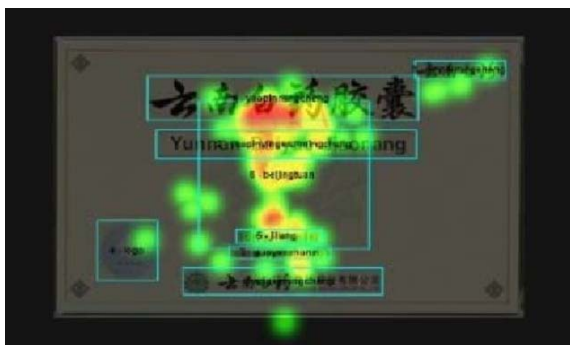


图 6 云南白药胶囊外包装热点
Fig.6 Hotspots overlay maps of Yunnan Baiyao



图 7 云南白药胶囊改进外包装正面
Fig.7 Improved front outer packaging of Yunnan Baiyao

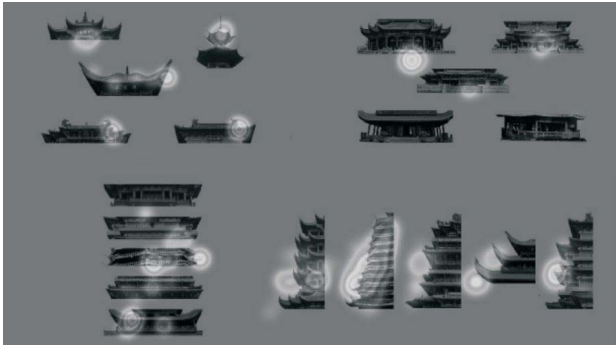


图8 实验刺激样本热区及轨迹

Fig.8 Heat map and track map of the test stimulation sample



图9 “洞水瓶”设计效果

Fig.9 Design effect of “Dong Water Bottle”



图10 产品包装与价签的视觉热点

Fig.10 Visual heat map of product packaging and price tag

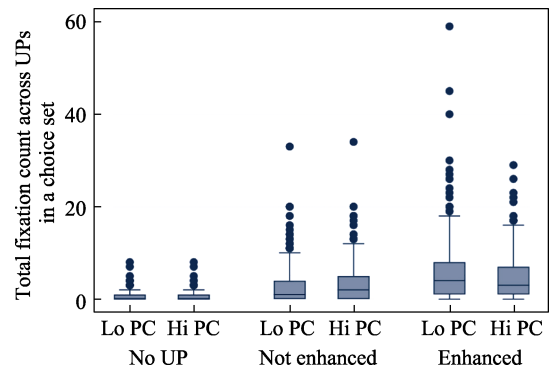


图11 价签增大对消费者关注度的影响

Fig.11 Influence of price tag increase on consumer attention

4) 在VR、AR交互领域,眼动数据直接影响视觉画面的构成,有侧重性地对眼球关注度高的区域来着重表现画质和细节,从而合理地完成计算机的资源调配,使虚拟影像更加接近现实。例如,眼动追踪的高铁候车屏幕信息交互研究,通过捕捉眼动注视热点和注视轨迹,对界面区域、字体呈现出的颜色进行分析,最后得出对比强烈的颜色更容易被注视,以及在屏幕中间区域更容易被注视,以此为依据,设计布局时将不同层级的信息进行合理排布,从而满足用户更有效地获取信息的需求。

对铲运机等大型设备而言,设备往往具有较多的特征,并且依据功能进行了区域化、模块化的设计。然而对单一特征的改进往往对整体的设计提升收效甚微。因此针对大型设备而言,眼动实验主要通过大的兴趣区域进行划分,对设计创意意向和眼动数据进行匹配,具体方法如下:分析概念设计阶段设计意向,将设计点的创意意向提取排列,对比眼动实验得出对象不同区域被观察时重视程度排列,然后判断两者的差异。如对比结果一致,说明设计意向符合用户观察规律,可以继续开展设计活动。如果两者对比差距较大,说明设计意向与用户观察重视程度不相符,此时可判断产生差异的原因,可以通过重复实验或文件调查等方法排除实验误差,然后设计师同行设计评价,对设计方案进行调整,从而达到辅助设计提升的目的,眼动实验辅助设计流程见图12。

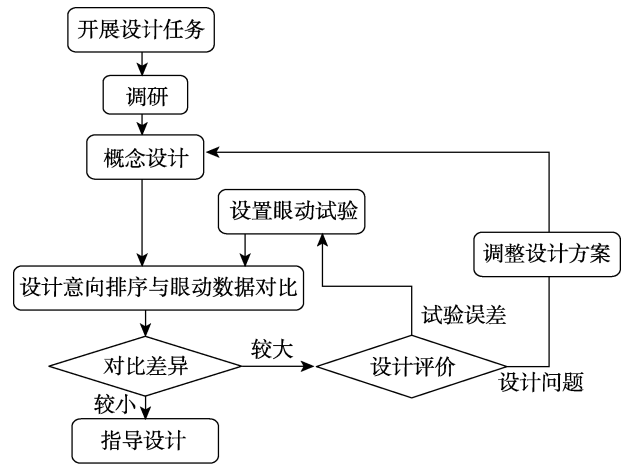


图12 眼动实验辅助设计流程

Fig.12 Flow of eye movement test aided design

本次探讨旨在探究眼动数据与大型机械设备的形态设计的评价关系,通过分析被测试者对设备外观特征的眼动数据,指导优化设备特征形态设计方案。本文的研究分析和设计方案优化路径对同类机械产品形态设计具有参考价值。

2 设计方案深入

2.1 模块化设计

模块化设计的运用可以有效解决智能铲运机机

身巨大的问题，在生产、运输、维护方面有明显的优势。模块化具有 3 个特征：相对独立性、互换性和通用性^[17]。模块化产品是实现大规模工业生产单一目标的有效方法。根据功能或构造特点划分成不同的模块，然后通过各模块间组合方式的排列组合，可以组成产品族群中的任意一款^[18]。在智能铲运机的研发和迭代过程中可有效节约减少能源消耗。设计过程中运用眼动实验的区域划分指导模块化的过程，将实验结果划分的车轮、驾驶室、铲斗、车身尾部、车身侧面 5 个区域进行整合，对应为驾驶模块、载重模块、中部链接模块和车尾电池模块，并根据眼动视觉关注度进行优化设计。

2.2 电动四驱

采用电动四驱设计，通过 4 个独立电机进行智能动力分配，可以减少传动环节使传动效率更高，并适用于各种路况，电动四驱与传统电机对比见表 2。

无人自动驾驶技术集成的 4 个独立电机传动效率高、结构简单、动力分配更合理、发热低、节省能源，可以更好地应对泥泞坑洼路面。独立悬挂系统在不同的坑洼路面及上坡、下坡时，通过弹性形变使每个轮胎都能充分接触地面产生动力，同时具备极好地通过障碍的能力和越野性能。无人驾驶汽车依靠人工智能、视觉计算、雷达、监控装置和全球定位系统协同工作，通过电脑实现无人驾驶，其技术具有成本低、

可以在恶劣环境工作、工作时间长等特点。自动驾驶技术集成见表 3。

无人驾驶技术是由多项技术集成的，主要工作原理为通过感应器遥感技术来搜集路况信息，由核心计算机技术运算，结合虚拟仿真技术得出运行方案，通过动力传动系统进行行驶操控。这项技术在实际路上测试时因为要考虑复杂的交通环境，因此对运算能力和数据采样有较高的要求，实现的成本较高。而在地下矿洞中环境相对固定，且没有复杂多变的路况，无人驾驶技术在地下铲运机上可以低成本情况下运行，从而得到更好地利用。

3 最终设计方案

整车从前端到后部有铲运模块、驾驶模块、中部动力模块、后部动力模块。铲运模块为前端铲斗与前部负载车体，该部分主要是铲斗及液压部分，主要是用来实现铲运机的铲运功能。驾驶模块用于人工驾驶时，主要是对铲运机进行操控。在无人驾驶作业的情况下，可以将此模块卸下，以此减轻车体、提高效率。中部动力模块为次要动力模块，提供部分动力及电池空间，同时是连接运载模块与动力模块的重要连接模块，也是驾驶模块的载体。后部动力模块为主要动力模块，可以提供大部分动力及电池空间，这是整机的主要动力来源。最终效果见图 13。

表 2 电动四驱与传统电机对比
Tab.2 Comparison of electric four-wheel drive and traditional motor

特性	传统电机	电动四驱
动力分配	依靠机械传动分配动力	有独立传感器，每个轮可以自主分配动力，根据阻力自动调节转速
传动链	动力由一个电机提供，传动环节多，能量损失较多	传动环节少，能耗低
传动效率	较低	较高
维护成本	装配与维护繁琐	便于组装维护

表 3 自动驾驶技术集成
Tab.3 The integration of autonomous driving technology

技术名称	传统电机	电动四驱
摄像头与计算机视觉感知技术	摄像机遥感技术与 ADAS 功能 毫米波雷达 激光雷达	摄像头能识别颜色和文字帮助探测路标、交通信号灯和接到指示 通过发射无线电波来探测物体，汽车借此探测迎面而来的物体的距离、范围和速度 运用最先进的传感器创建车辆周围环境的 3D 透视图能力，促进对物体的识别
驾驶技术仿真处理平台	V2X Cognata Drive Constellation	传统激光雷达系统包含一系列旋转元件获取车辆周围 360° 视角 静态层、动态层、感应层 先进性数据收集，然后图像注释，语义分割法，MightyAI 提供数据管理、注释和验证工具
精确定位与地图构建	GPS DeepMap	GPS 定位技术 地图构建软件，发放许可证，开发 3D 地图构建技术



图 13 最终效果
Fig.13 The final rendering

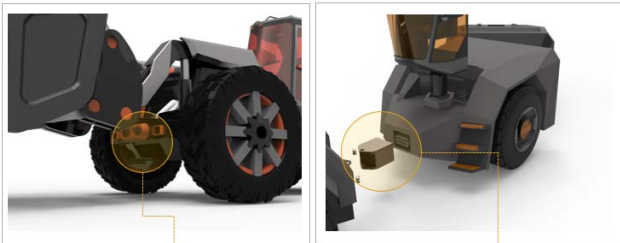


图 14 电力术设计
Fig.14 Schematic of the electrical technique



图 15 电池设计与组装方式
Fig.15 The battery design and assembly

模块化设计需要解决的是模块之间相互连接的问题,需要考虑机械连接的稳定性,同时需要将模块之间的电力进行连接。针对模块化的连接方式,采用概念化的电力术插接方式,可以便于拆卸组装。前方连接方式为铰接,可以方便铲运机转向。铰接为上下2个链接结构,中间穿过电力连接术,这种链接的优化方式,便于不同模块间的电力链接,采用物理链接包裹电力连接的方式,避免了电路外露,使结构简单可靠、形态更加美观。电力术设计见图14。

智能铲运机的主要动力模块,主要用于装载和更换电池组,在后续的研发中可以考虑设计无人更换电

池的装置,以此为未来的无人化作业提供设计思路,电池设计与组装方式图15。

后部动力模块遵循易用化原则,采用后部向下打开、上盖向上掀起的方式,使操作简捷,便于电池装配、更换和维修。更换时可以通过人工进行更换,也可以结合充电桩及充电装置,使用机械结构自动化进行装配和更换。

整体组装应用于人工驾驶铲运机作业中,以及去掉驾驶舱模块后,可以促进未来无人驾驶方案的研发。体现更好的通用性和延展性。不同的模块逐步进行迭代,可以尽可能地避免废弃造成的资源浪费,这符合可持续低碳设计发展的理念,不同模块组合效果见图16。

4 结语

在机械设备的外观设计中,以往设计师个人(或团队)的主观判断及设计经验常常成为设计的依据。经实验验证,通过对比眼动实验热点图划分区域与根据功能性模块化划分的结果,得出眼动实验数据可以指导产品造型设计和模块化设计。对比主观设计意向与实验结果关注程度的差异,帮助设计师区分设计方案中特征要素的主次,来有效提升设计方案。目前眼动追踪实验技术指导的设计方案处于探索阶段,补充眼动数据支撑,能够提升设计方案的有效性和科学性,极大程度上弥补了设计过程中通过主观判断而产生的缺陷。

1) 本次智能铲运机实验案例中,被测试者关注度最高、首次视觉焦点为驾驶舱模块,其次为轮胎部分和腰线,以此为依据来指导模块化设计,这与设计师通过经验、训练、技能等主观判断得出的结论基本一致,因此推及一般性设计任务,也可运用眼动数据辅助主观判断进行设计。

2) 通过眼动实验数据采用特异性方差检验,来对铲运机进行分区,通过不同区域之间数据比较,对不同区域关注度进行排序,利用不同区域代表不同的模块单元,在新的设计方案中,受关注高的模块着重进行优化。



图 16 不同模块组合效果
Fig.16 The composite effect diagram of different modules

3) 通过分析眼动数据可直接得到被测试者对设计方案的客观感受。这可以弥补设计过程中设计师主观判断的失误及设计经验的不足, 以此减少在实际评价中问卷法调查通过主观感受得出的结果, 受测试者经验和状态等因素的影响与客观的结果间的误差。

基于眼动实验探究机械设备形态特征优化, 聚焦受到关注的形态特征, 对不同要素和特征进行排序, 在设备模块化的过程中有重要的指导意义。本次实验研究给出了科学具体的铲运机设计方案, 拓展了眼动实验在工程设备领域的应用范围, 在未来的研究中可进一步探讨眼动实验结合人工智能辅助工程机械设计, 以及完全通过人工智能产生的设计方案的可能性。

参考文献:

- [1] 王运敏. 中国采矿设备手册[M]. 北京: 科学出版社, 2007(9): 489-605.
WANG Yun-min. China Mining Equipment Manual[M]. Beijing: Science Press, 2007(9): 489-605.
- [2] 杨洋. 地下矿山铲运机无人驾驶技术发展及应用[J]. 现代矿业, 2018, 34(10): 73-77.
YANG Yang. Development and Application of Unmanned Technology of Underground Mine Scraper[J]. Modern Mining, 2018, 34(10): 73-77.
- [3] CLIFTON C, FERREIRA F, HENDERSON J, et al. Eye Movements in Reading and Inshapeation Processing: Keith Rayner's 40 Year Legacy[J]. Journal of Memory & Language, 2016(86): 1-19.
- [4] RANCUZ P, ZANIEWSKI I, AUGUSTYNOWICZ P, et al. Eye Movement Correlates of Expertise in Visual Arts[J]. Frontiers in Human Neuroscience, 2018(12): 87-100.
- [5] 林丽, 高芸坤, 阳明庆, 等. 基于视觉认知理论的产品形态优化设计方法[J]. 包装工程, 2019, 40(8): 16-22.
LIN Li, GAO Yun-kun, YANG Ming-qing, et al. Optimal Design Method of Product Form Based on Visual Cognitive Theory[J]. Packaging Engineering, 2019, 40(8): 16-22.
- [6] 韩飞. 基于风格特征的居室集成吊顶设计研究[D]. 杭州: 浙江工业大学, 2015.
HAN Fei. Design and Research of Integrated Roof Based on Style Characteristics[D]. Hangzhou: Zhejiang University of Technology, 2015
- [7] 胡伟峰, 张坤, 张忠亚. 基于眼动追踪技术的压裂车外观设计评估研究[J]. 机械设计, 2015(6): 123-126.
Hu Wei-feng, ZHANG Kun, ZHANG Zhong-ya. Appearance Design Evaluation of Fracturing Truck Based on Eye Movement Tracking Technology[J]. Mechanical Design, 2015(6): 123-126.
- [8] 房启晓. 面向工程机械的工业设计程序与方法研究[D]. 济南: 山东大学, 2010.
FANG Qi-xiao. Research on Industrial Design Procedures and Methods for Construction Machinery[D]. Jinan: Shandong University, 2010.
- [9] 戚彬, 余隋怀, 王森, 等. 基于眼动跟踪实验的产品形态仿生设计研究[J]. 机械设计, 2014(6): 125-128.
QI Bin, Yu Sui-huai, WANG Miao, et al. Research on Bionic Design of Product Morphology Based on Eye Movement Tracking Experiment[J]. Mechanical Design, 2014(6): 125-128.
- [10] ANDEBERG L, SAMANTHA B, BRUNO R. Detecting Cognitive Interactions through Eye Movement Transitions[J]. Journal of Memory and Language, 2013, 69(3): 445-460.
- [11] SVETLANA B, HARMEN O, JUSTIN C. How the Layout of a Unit Price Label Affects Eye-movements and Product Choice: an Eye-tracking Investigation[J]. Journal of Business Research, 2018(10): 49.
- [12] SHAHABEDDIN K, GRAHAM G, CHRISTOPH S. Quantifying the Qualities of Aesthetics in Product Design Using Eye-tracking Technology[J]. International Journal of Industrial Ergonomics, 2015(49): 31-43.
- [13] 汪海波. 基于认知机理的数字界面信息设计及其评价方法研究[D]. 南京: 东南大学, 2015.
WANG Hai-bo. Research on Information Design and Evaluation Method of Digital Interface Based on Cognitive Mechanism[D]. Nanjing: Southeast University, 2015.
- [14] 潘飞, 姜可, 王东琦. 基于眼动追踪技术的购票网站可用性设计研究[J]. 包装工程, 2020, 41(24): 243-247.
PAN Fei, JIANG Ke, WANG Dong-qi. Research on Usability Design of Ticketing Website Based on Eye Tracking Technology[J]. Packaging Engineering, 2020, 41(24): 243-247.
- [15] 徐丽, 王昕怡, 朱南峰, 等. 云南白药胶囊药品的交互包装设计[J]. 包装工程, 2019, 40(21): 127-134.
XU Li, WANG Xin-yi, ZHU Nan-feng, et al. Interactive Packaging Design of Yunnan Baiyao Capsule Drugs[J]. Packaging Engineering, 2019, 40(21): 127-134.
- [16] 杨硕, 张超, 朱晓君. 基于眼动技术的侗族文化元素包装设计[J]. 食品与机械, 2020, 36(9): 149-154.
YANG Shuo, ZHANG Chao, ZHU Xiao-jun. Packaging Design of Dong Cultural Elements Based on Eye Movement Technology[J]. Food and Machinery, 2020, 36(9): 149-154.
- [17] 曹韵红. 模块化企业和产品[J]. 机械研究与应用, 2000, 13(1): 4-5.
CAO Yun-hong. Modular Enterprises and Products[J]. Mechanical Research and Application, 2000, 13(1): 4-5.
- [18] 赵可恒, 于海洋. 基于 3D 打印技术的产品模型族群化主观评估[J]. 机械设计, 2016(33): 112.
ZHAO Ke-heng, YU Hai-yang. Subjective Evaluation of Product Model Clustering Based on 3D Printing Technology[J]. Mechanical Design, 2016(33): 112.