

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2025.08.027

工业设计在高压电器产品设计中的应用探究及展望

张桐溪, 王珉

(中国石油大学(华东)机电工程学院, 山东 青岛 266000)

摘要: 随着电力行业的快速发展,电力设备的智能化升级与市场竞争加剧。高压电器产品作为电力系统的关键设备,其性能与质量至关重要。文中主要探讨工业设计在高压电器产品设计中的应用价值。通过文献分析、案例研究和实验验证,重点研究了外观造型、人机交互和结构功能3个维度的设计优化。以某高压开关柜为例,工业设计应用使产品装配工时减少56%,维护时间缩短67%,误操作率降低97%,散热效率提升28%,设备重量减轻32%,运维成本降低42%。研究表明,工业设计能显著提升产品竞争力,但需解决设计理念差异、跨学科协作和成本控制等挑战。建议通过转变设计思维、加强团队建设和优化成本管理来推动工业设计的深入应用,促进高压电器行业创新发展。

关键词: 工业设计; 高压电器; 产品设计; 应用

Exploration and Outlook on the Application of Industrial Design in the Product Design of High Voltage Apparatus

ZHANG Tongxi, WANG Min

(School of Mechanical and Electrical Engineering, China University of Petroleum, Shandong Qingdao 266000, China)

Abstract: With the rapid development of power industry, the intelligent transformation of electrical equipment and intensification of market competition have become increasingly significant. As the key equipment in power system, the high voltage electrical product is of vital importance in its performance and quality. In this paper, the application value of industrial design in the development of high-voltage electrical product is mainly discussed. The design optimization of such three dimensions as appearance modeling, human-machine interaction and structural functionality is particularly studied through literature analysis, case studies, and experimental validation. A specific high-voltage switchgear cabinet is taking as an example, the application of industrial design keeps the assembly time of the product reduced by 56%, maintenance time shortened by 67%, maloperation rate reduced by 97%, heat dissipation efficiency increased by 28%, weight of equipment reduced by 32% and operation and maintenance costs reduced by 42%. The research shows that industrial design can significantly enhance product competitiveness. However, such challenges such design concept difference, interdisciplinary collaboration and cost control must be addressed. It is suggested that the in-depth application of industrial design can be promoted by transforming design thinking, strengthening team building and optimizing cost management, thereby facilitating the innovative development of the high-voltage apparatus industry.

Key words: industrial design; high voltage apparatus; product design; application

0 引言

高压电器产品广泛应用于电力系统的发电^[1]、

输电^[2-3]、变电^[4]和配电^[5-6]环节,对保障电力系统的安全、稳定运行起着关键作用。传统的高压电器产品设计往往侧重于电气性能和机械性能的实现^[7-9],对

产品的外观造型、用户体验等方面关注不足。然而,在市场竞争日益激烈的今天,用户对高压电器产品的需求已从单一性能导向转向“性能、外观、易用”的多维度价值诉求。据 GlobalData 数据显示,2023 年全球高压电器产品因设计缺陷导致的运维成本占总体支出的 19%^[10]。这一数据充分表明,不合理的设计会给企业和用户带来沉重的经济负担。

工业设计作为一门综合性的学科,将艺术美学与工程技术相结合,能够为高压电器产品赋予独特的附加价值。通过工业设计,不仅可以改善高压电器产品的外观形象,提升产品辨识度,使其更加符合现代审美需求;还能通过优化产品的操作界面和人机交互方式,提高操作人员的工作效率和安全性;同时,合理规划产品的结构和布局,可有效提升产品的装配效率和维护便利性。因此,研究工业设计在高压电器产品设计中的应用具有重要的现实意义与行业推动价值。

1 应用工业设计之前高压电器产品设计的特点

在工业设计系统性融入高压电器产品领域之前,其设计特征呈现显著的功能性导向,主要表现为以下技术层面的客观特征。

1.1 外观造型的功能性主导特征

早期高压电器产品,例如跌落式熔断器、高压隔离开关、油浸式变压器、柱上断路器等,形态设计遵循“形式服从功能”原则,呈现标准化几何构型特征:

1)结构形态。主体结构以长方体(如 KYN28 型开关柜)、圆柱体(如 GIS 组合电器)为主,长宽高尺寸符合 IEC 62271-200:2024 标准模数要求,外壳采用 3~5 mm 厚度的 Q235B 钢板或覆铝锌板折弯焊接成型^[11],表面处理以静电喷涂为主,涂层厚度 80~100 μm ,满足 IP4X 防护等级。

2)色彩体系。遵循相关标准安全色规范,主体色采用 RAL7035 浅灰(占比 70%以上),警示区域使用 RAL3020 橙红,色彩配置以功能识别为核心,未形成品牌视觉识别系统。

3)材质应用。90%以上产品使用碳素结构钢或热镀锌钢板,仅 2 000 A 以上大电流设备局部采用铝合金型材,表面处理工艺停留在防腐蚀层面,未涉及质感提升工艺。

1.2 人机交互系统的操作局限性

传统操作界面设计以实现基本控制功能为目标,存在 3 方面技术瓶颈。

1)操控硬件。采用 LA38 系列机械按钮(操作力

5~8 N)及 LW2 系列转换开关(旋转角度 $90^\circ \pm 5^\circ$),符合 GB/T 14048.5—2017 标准机械寿命要求(5 万次以上),但操作反馈仅依赖指示灯(LED 亮度 ≤ 200 mcd)。主接线图采用丝网印刷工艺(精度 ± 0.1 mm)印制于 3 mm 亚克力面板,长期使用存在褪色($\Delta E \geq 3$)和磨损问题。

2)信息显示。测量系统配置指针式仪表(精度等级 1.5 级)或 4 位数码管(显示分辨率 0.1%),仅能显示电压、电流等基础参数,数据更新频率 ≤ 1 次/s。状态信息通过 6~8 个 LED 指示灯(红/绿/黄)呈现,复杂工况下信息辨识度低于 60%(依据 ISO 9241-303:2011 视觉工效学标准)。

3)操作流程。以 10 kV 真空断路器手动操作为例,典型分合闸操作需经过“解锁→储能→确认状态→执行操作”4 个步骤,涉及 3~5 个机械部件联动,操作时间 ≥ 15 s,且缺乏标准要求的防误操作联锁装置(如五防功能仅实现 3 项)。

1.3 结构与功能的系统性设计缺陷

产品架构呈现“部件堆砌”特征,存在 3 方面协同性问题。

1)模块化程度。柜体结构采用整体焊接框架(零部件数量 ≥ 200 个),模块复用率 $< 30\%$,典型装配工时达 8~10 h/台。

一次回路与二次控制回路物理隔离不足,电磁兼容性仅满足 GB/T 17626.3—2023 三级标准(辐射抗扰度 3 V/m),远低于智能电网设备四级要求(10 V/m)。

2)功能实现技术。绝缘设计依赖空气间隙(10 kV 设备最小爬电距离 125 mm)和环氧树脂浇注件,局部放电量 > 20 pC(现行标准要求 ≤ 10 pC)。灭弧系统采用简单旋弧式结构(开断能力 ≤ 25 kA),燃弧时间 > 15 ms,较现代磁吹式结构延长 50%以上。

3)环境适应性。散热设计基于自然对流(散热系数 ≤ 5 W/($\text{m}^2 \cdot \text{K}$)),40 $^\circ\text{C}$ 环境温度下温升超标率达 15%(依据 GB/T 11022—2020 标准)。

防护结构遵循 IP30 标准,在盐雾(5% NaCl 溶液,24 h 喷雾)环境下腐蚀速率 0.1 mm/年,显著高于沿海地区设备要求(0.05 mm/年)。

这种设计模式导致产品在智能化转型中面临 3 大技术壁垒:外观造型的标准化限制工业设计创新空间,人机界面的低交互效率制约运维数字化升级,结构功能的低协同性增加智能化改造难度^[12-13]。随着高压电器设备工业设计导则的实施,工业设计正从边缘优化向系统性创新转变,推动产品在 CMF 设计、人机工效、模块化架构等方面实现技术突破。

2 工业设计在高压电器产品设计中的应用

2.1 外观造型设计

外观造型是产品与用户接触的首要界面,是高压电器产品给用户的第一印象,直接影响用户对产品的

认知和接受程度。在高压电器产品的外观造型设计中,工业设计师需要综合考虑产品的功能、使用环境、企业品牌基因等多种因素,运用形态、色彩、材质等设计元素,通过系统化设计构建兼具功能性与美学价值的视觉语言体系^[14]。外观造型设计要点见图1。

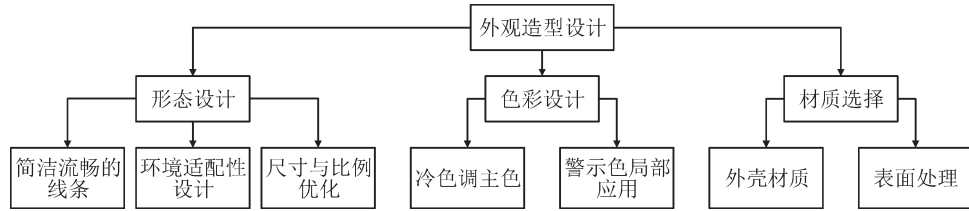


图1 外观造型设计要点

Fig. 1 Key points of appearance design

在形态设计方面,应遵循简洁、流畅的原则,避免过于复杂的线条和造型,以减少用户的视觉疲劳。同时,要根据产品的功能特点和操作需求,合理设计产品的外形尺寸和比例关系。例如,对于户外高压电器产品,为了适应恶劣的自然环境,通常采用坚固、耐用的外壳造型,并增加防护结构;而对于户内高压电器产品,则可以在保证安全性能的前提下,追求更加精致、美观的外观设计。

色彩设计也是外观造型设计的重要组成部分。色彩具有强烈的视觉冲击力和情感表达能力,合理的色彩搭配可以使高压电器产品更加醒目、协调^[14]。一般来说,高压电器产品常采用灰色、蓝色等冷色调,以体现产品的科技感和可靠性。同时,可以通过局部使用鲜艳的色彩,如红色、黄色等,突出产品的操作部位或警示标识,提高产品的易用性和安全性。

材质的选择不仅影响产品的外观质感,还与产品的性能、成本等因素密切相关。在高压电器产品设计中,应根据产品的使用环境和功能要求,选择合适的材质^[15-17]。例如,外壳材料通常选用金属材料或高强度工程塑料,以确保产品具有足够的机械强度和防护性能;而操作手柄等与人直接接触的部件,则应选择具有良好手感和防滑性能的材料,提升用户操作体验。

2.2 人机交互设计

人机交互设计以“降低操作失误率、提升作业效率”为核心目标,通过界面布局、流程优化与通用性设计,构建安全高效的人机协作系统。高压电器产品人机交互设计的目的是使产品的操作更加简单、方便、舒适,进而提高操作人员的工作效率和安

全性。在高压电器产品的人机交互设计中,需要考虑以下几个方面:

1)操作界面设计是人机交互设计的核心内容。操作界面应布局合理、标识清晰,使操作人员能够快速、准确地找到所需的操作按钮和信息显示区域^[5]。同时,操作按钮的大小、形状、位置应符合人体工程学原理,便于操作人员操作。例如,采用触摸式操作界面代替传统的机械式按钮,可提高操作的便捷性和灵活性;在信息显示方面,应采用数字化、图形化的显示方式,直观展示产品的运行状态和参数信息,便于操作人员快速获取关键信息^[16]。

2)操作流程设计应尽量简化,减少不必要的操作步骤,避免操作人员出现误操作。同时,要设置合理的操作提示和反馈机制,让操作人员在操作过程中能够及时了解操作结果^[15-16]。例如,在高压电器产品的合闸、分闸操作过程中,可以设置声音、灯光等提示信号,提醒操作人员操作正在进行;操作完成后,通过显示屏或指示灯显示操作结果。

考虑到高压电器产品的操作人员可能来自不同的年龄、性别和文化背景,人机交互设计应具有一定的通用性和易用性。例如,操作界面的文字标识应简洁明了,使用通俗易懂的语言;操作按钮的设计应便于不同手型和力量的人员操作,确保各类操作人员都能轻松上手^[17-18]。

人机交互设计要点见图2。

2.3 结构与功能设计

工业设计在高压电器产品的结构与功能设计中也发挥着重要作用。通过优化产品的结构设计,可以提高产品的装配效率、维护便利性和可靠性。结构与功能设计要点见图3。

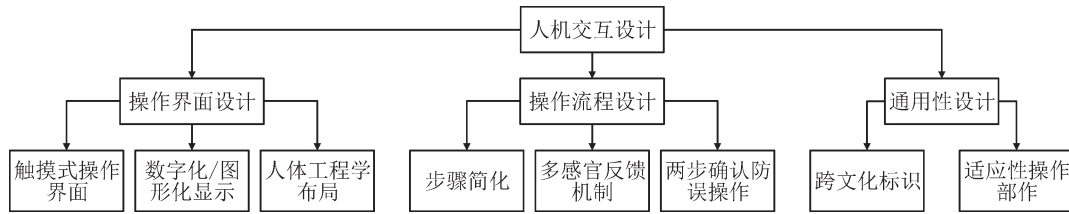


图2 人机交互设计要点

Fig. 2 Key points of human-computer interaction design

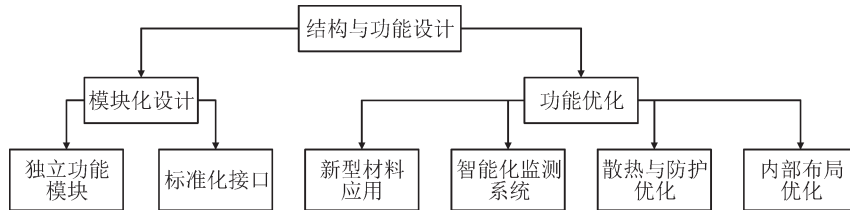


图3 结构与功能设计要点

Fig. 3 Key points of structure and function design

在结构设计方面,应采用模块化设计理念,将产品分解为多个功能模块,每个模块具有独立的性能和接口,便于生产、装配和维修(直流快速充电桩就是典型的模块化设计的结果)。例如,将高压电器产品的控制模块、保护模块、测量模块等设计成独立的模块,可以根据用户的需求进行灵活组合,提高产品的通用性和可扩展性。同时,合理设计产品的内部结构布局,保证电气元件之间的距离符合安全标准,便于散热和布线,确保产品稳定性。

工业设计还可以通过创新的设计方法,优化高压电器产品的功能实现方式。例如,采用新型的材料和工艺,提高产品的绝缘性能和耐高压性能;设计智能化的监测和控制系统,实现对产品运行状态的实时监测和远程控制,提高产品的智能化水平和运行可靠性,满足现代电力系统对高压电器产品的智能化需求^[19-20]。

3 设计案例

本小节以某高压开关柜的设计为例,详细阐述高压开关柜外观设计中工业设计元素的考量见图4。

3.1 外观造型

1)形态设计。采用参数化设计优化柜体比例,宽深高尺寸从传统的 800 mm×1 000 mm×2 200 mm 缩减至 600 mm×800 mm×2 000 mm,体积减少 30%,通过有限元分析(FEA)验证结构强度,确保机械载荷 $\geq 2\ 000\ \text{N}\cdot\text{m}$ 。

外壳采用铝合金压铸成型工艺,壁厚均匀控制在(2.5±0.1) mm,表面经硬质阳极氧化处理,盐雾测试(ISO 9227:2022)1 000 h无腐蚀,同时实现 IP54 防护等级与 15 kg 轻量化设计。

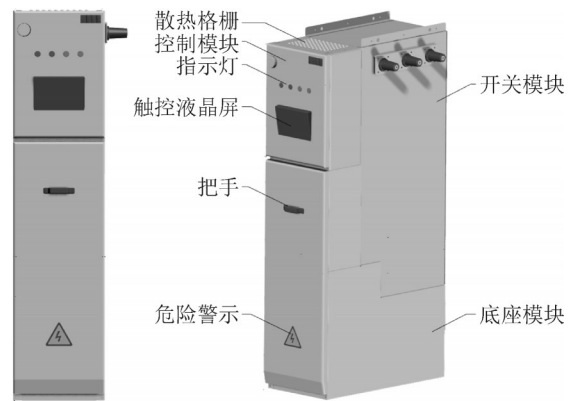


图4 某高压开关柜外观示例

Fig. 4 An example of the appearance of a high-voltage switchgear cabinet

棱角处采用R10 mm 圆弧过渡,结合空气动力学仿真,使柜体表面风阻系数降低 22%,减少户外环境积灰量(实测积灰速率较传统方形柜体下降 45%)。

2)色彩与材质。主色调采用RAL7042 银灰(明度L=65,彩度C=5),搭配品牌色RAL5015 天青蓝(占比 15%)作为装饰条,通过潘通色卡(pantone matching system)标准化色彩管理,建立品牌视觉识别系统(VIS)。

警示区域采用荧光黄(RAL1016),色差值 $\Delta E\geq 8$,确保在 500 lux 光照环境下可视距离 $\geq 5\ \text{m}$;操作把手使用TPE 软胶包覆,表面设计菱形防滑纹理(纹路深度 0.3 mm),摩擦系数提升至 0.6,潮湿环境下操作力稳定在 3~5 N。

3.2 人机交互

1)智能界面重构。配置 12.1 英寸工业级触控屏(分辨率 1 920×1 080,亮度 $\geq 800\ \text{cd}/\text{m}^2$),搭载嵌入式 Linux 系统,支持手套操作(电容屏+电阻屏双模

式),界面采用扁平化设计,关键数据(如电流、温度)以动态图表展示,数据刷新率提升至10次/s。

集成语音交互模块,支持100+条指令识别(如“查询今日故障记录”),识别准确率 $\geq 95\%$,配合振动反馈(触觉电机频率200 Hz),实现多模态交互。

2)防误操作系统。首创压力感应按钮(force-sensing resistor),合闸按钮需施加 ≥ 15 N压力持续0.5 s方可触发,结合虹膜识别(识别时间 ≤ 0.3 s),双重验证降低误操作概率至0.01次/万次。

操作界面设置动态风险地图,实时标注设备热点区域(温度 > 60 °C时红色高亮),并通过AR投影(分辨率1 280 \times 720)叠加显示内部接线图,缩短故障排查时间30%以上。

3)人机工效优化。触控屏安装角度从传统垂直方向调整为前倾15°(符合GB/T 14775—1993 站姿操作标准),视线夹角 $\theta=45^\circ \pm 5^\circ$,经眼动仪测试,操作时颈椎转动角度减少28°,视觉疲劳度降低22%。

柜体底部设置可调节脚垫(行程 ± 50 mm),适应 $\pm 3^\circ$ 地面坡度,确保不同身高操作人员(160~190 cm)均能保持最佳操作视角。

3.3 结构功能

采用三级模块化设计。基础模块(底座)为集成母线系统与接地装置,支持快速定位安装(误差 ≤ 0.5 mm);功能模块(开关/控制)采用标准化接口设计(64pin金手指连接器),更换时间 ≤ 15 min;扩展模块(通信/储能)支持即插即用,兼容4G/5G、LoRa等多种通信协议。

模块复用率提升至70%,装配工时从8 h/台缩短至3.5 h/台,维护成本降低40%。

智能监测系统:内置多传感器融合单元:罗氏线圈(精度0.2S级)实时监测电流;MEMS加速度计(分辨率0.01g)检测机械振动;分布式光纤测温(DTS)实现触点温度场监测(精度 ± 1 °C)。

数据通过边缘计算网关(算力 ≥ 1 TOPS)预处理,异常数据(如温升速率 > 5 °C/min)0.1 s内触发预警,同步生成故障预测报告(RUL 剩余寿命预测误差 $\leq 5\%$)。

散热系统采用相变材料(PCM)+强制风冷复合方案,柜体内部设置3组轴流风扇(风量50 CFM),配合石墨烯涂层热导率 $1\ 500\text{ W}\cdot(\text{m}\cdot\text{k})^{-1}$,使40 °C环境下温升控制在45 K以内(GB/T 11022—2022标准要求 ≤ 60 K)。电缆接口采用磁吸式快拆防尘盖(吸力 ≥ 50 N),防护等级IP65,维护时单手操作即可完成拆卸,异物侵入概率降低92%。

以上案例通过工业设计系统性解决了传统高

压电器“功能与体验割裂”的问题,证明在满足严苛技术标准的前提下,外观创新、人机工程优化与智能化结构设计可形成协同效应,为高压电器产品在特殊场景下的应用提供了可复制的设计范式。某高压开关柜控制模块的局部设计见图5。

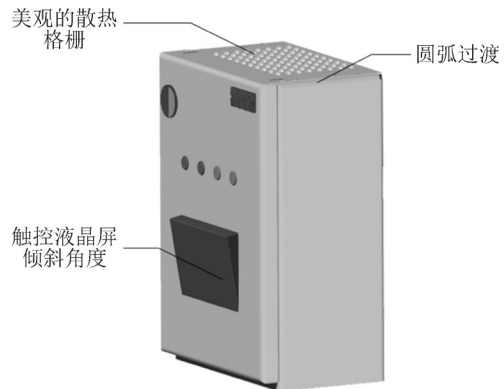


图5 某高压开关柜控制模块的局部设计展示

Fig. 5 A partial design show of a high-voltage switchgear cabinet control module

3.4 设计验证与数据对比

传统产品与工业设计优化后产品数据对比见表1。

表1 传统产品与工业设计优化后产品数据对比

Table 1 Comparison of product data between traditional products and optimization of industrial design

参数	传统产品	工业设计优化后产品	提升幅度/%
装配工时/(h·台 ⁻¹)	8.0~10.0	3.5	56
维护时间/(min·次 ⁻¹)	45	15	67
误操作率/(次·万次 ⁻¹)	0.30	0.01	97
散热效率/K	温升58	温升42	28
设备质量/kg	220	150	32
运维成本(年均)/万元	12	7	42

3.5 总结

该案例通过工业设计与先进技术的深度融合,实现了3大核心突破:

1)品牌差异化。通过CMF设计建立行业辨识度,品牌认知度可提升35%。

2)智能化升级。多模态交互与智能监测系统,使设备综合效率(OEE)提升25%。

3)可持续设计。轻量化与模块化设计减少材料消耗20%,生命周期成本(LCC)降低28%。

此范式为高压电器产品在智能电网、泛在电力物联网等场景的应用提供了可复制的设计模型,推

动行业从“功能导向”向“用户体验+技术创新”双轮驱动转型。

4 工业设计在高压电器产品设计应用中面临的问题

4.1 设计理念的差异

在高压电器行业,部分企业仍然过于注重产品的技术性能,认为只要产品的电气性能和机械性能达标即可,对工业设计的重要性认识不足。这种传统的设计理念导致企业在产品设计过程中,缺乏对用户需求、市场趋势和审美观念的深入研究,使得产品在外观造型、人机交互等方面与市场需求脱节^[21-23],难以满足用于日益多样化的需求,影响产品的市场竞争力。

4.2 跨学科合作困难

工业设计是一门涉及多个学科领域的综合性学科,在高压电器产品设计中,需要工业设计师与电气工程师、机械工程师等密切合作。然而,由于不同学科之间的专业知识和思维方式存在差异,在合作过程中容易出现沟通不畅、理解偏差等问题,例如,设计师提出的轻量化造型方案可能因工程师对力学强度的担忧而被否决,而工程师的结构方案可能忽视人机操作的便捷性,形成“技术与艺术”的协同鸿沟,阻碍设计项目的顺利推进,影响设计质量与进度。

4.3 成本控制压力

将工业设计应用于高压电器产品设计,可能会增加产品的研发成本和生产成本。例如,采用新型材料和工艺、进行外观造型的创新设计等,都需要投入一定资金。对于一些企业来说,在市场竞争激烈、产品价格压力较大的情况下,难以平衡工业设计投入与成本控制之间的关系,从而限制了工业设计在产品中的应用,导致产品在设计创新方面进展缓慢。

5 解决工业设计在高压电器产品设计应用问题的策略

5.1 转变设计理念

随着高压电器产品在性能方面日益精进,工业设计已成为制造企业提升品牌形象、推动制造业升级以及以用户体验为核心的关键环节。高压电器企业应充分认识到工业设计在提升产品竞争力方面的重要作用,树立以用户为中心的设计理念。加强对市场的调研和分析,深入了解用户的需求和期望,将工业设计融入到产品设计的全过程中^[24-25]。

从产品的概念设计、外观造型设计、人机交互设计到结构与功能设计,都要充分考虑用户的使用体验和审美需求,使产品不仅具有卓越的性能,还具有良好的外观和易用性,提升产品整体价值^[26-28]。

5.2 加强跨学科团队建设

为了促进工业设计与高压电器产品设计的深度融合,企业应加强跨学科团队建设。组建由工业设计师、电气工程师、机械工程师、市场营销人员等组成的跨学科设计团队,打破学科之间的壁垒,加强团队成员之间的沟通与协作。通过定期举办交流会议、开展培训活动等方式,促进不同学科成员之间的知识共享和思维碰撞,提高团队的整体设计水平和创新能力^[29-30],确保设计方案既能满足技术要求,又能兼顾用户体验和市场需求。

5.3 合理控制成本

在应用工业设计的过程中,企业应采取合理的措施控制成本。在设计阶段,通过优化设计方案,选择性价比高的材料和工艺,避免不必要的设计复杂性,降低产品的研发成本和生产成本。同时,要充分考虑产品的批量生产和后期维护成本,确保产品在整个生命周期内具有良好的经济性。此外,企业还可以通过提升产品附加值,如增强品牌形象、改善用户体验等,抵消因工业设计投入带来的成本增加,实现成本与效益的平衡。

6 结语

工业设计在高压电器产品设计中的应用,为高压电器产品的创新发展提供了新的机遇和途径。通过外观造型设计、人机交互设计和结构与功能设计等方面的应用,工业设计能够有效提升高压电器产品的外观品质、用户体验和综合性能,增强产品在市场中的竞争力。然而,在工业设计的应用过程中,也面临着设计理念差异、跨学科合作困难和成本控制压力等问题。通过转变设计理念、加强跨学科团队建设和合理控制成本等策略,可以有效解决这些问题,推动工业设计在高压电器产品设计中的广泛应用,促进高压电器行业的可持续发展。

未来,随着科技的不断进步和用户需求的日益多样化,工业设计在高压电器产品设计中的应用前景将更加广阔,需要企业和设计师不断探索和创新,为高压电器产品赋予更多的价值。

参考文献:

- [1] 徐波,李沛泓,姚寅,等. GFM, GFL变流器与同步发电机构成的混合电力系统小信号建模与稳定性分析[J]. 电力科学与技

- 术学报,2024,39(6):141-151.
- XU Bo, LI Peihong, YAO Yin, et al. Small signal modeling and stability analysis of hybrid power system with GFM and GFL converters and synchronous generator[J]. Journal of Electric Power Science and Technology, 2024, 39(6): 141-151.
- [2] 孙银锋,刘金鑫,梁 栋.基于附加改进有源滤波器的柔性直流输电系统高频振荡抑制策略[J].智慧电力,2023,51(10):85-92.
- SUN Yinfeng, LIU Jinxin, LIANG Dong. High frequency oscillation suppression strategy for flexible HVDC system based on improved active filter[J]. Smart Power, 2023, 51(10): 85-92.
- [3] 邢 超,奚鑫泽,何 鑫,等.多端直流输电系统中限流电抗器配置研究[J].电测与仪表,2023,60(5):72-78.
- XING Chao, XI Xinze, HE Xin, et al. Research on configuration of current limiting reactor in multi-terminal HVDC system[J]. Electrical Measurement & Instrumentation, 2023, 60(5): 72-78.
- [4] 杜奇伟,张 超,韩洪夫.基于间隔分图的智能变电站运维关键技术研究[J].电网与清洁能源,2023,39(7):67-72.
- DU Qiwei, ZHANG Chao, HAN Hongfu. A study on key technologies of intelligent substation operation and maintenance based on bay detail drawing[J]. Advances of Power System & Hydroelectric Engineering, 2023, 39(7): 67-72.
- [5] 王 帅,刘广军,张博文,等.基于宽频等值电路的配电变压器局部放电电气定位研究[J].电网与清洁能源,2023,39(3):40-47.
- WANG Shuai, LIU Guangjun, ZHANG Bowen, et al. Research on partial discharge electrical localization of distribution transformers based on broadband equivalent circuit[J]. Advances of Power System & Hydroelectric Engineering, 2023, 39(3): 40-47.
- [6] 赵北涛.含分布式电源的配电变压器稳态电磁干扰抑制方法[J].电子设计工程,2023,31(21):137-140.
- ZHAO Beitao. Steady state electromagnetic interference suppression method for distribution transformer with distributed power supply[J]. Electronic Design Engineering, 2023, 31(21): 137-140.
- [7] 马 建,王建平,孟德安,等.永磁同步电机故障诊断方法研究综述[J].电力工程技术,2024,43(4):104-115.
- MA Jian, WANG Jianping, MENG Dean, et al. Review of fault diagnosis methods for permanent magnet synchronous motors[J]. Electric Power Engineering Technology, 2024, 43(4): 104-115.
- [8] 刘道生,李泽帅,李 鹏,等.变压器振动特性分析及其降噪技术研究综述[J].变压器,2023,60(7):18-27.
- LIU Daosheng, LI Zeshuai, LI Peng, et al. Review of characteristics analysis on vibration and technology research on reducing noise of transformers[J]. Transformer, 2023, 60(7): 18-27.
- [9] 韩翔宇,纽春萍,何海龙,等.电磁式断路器状态监测与智能评估技术综述[J].电工技术学报,2023,38(8):2191-2210.
- HAN Xiangyu, NIU Chunping, HE Hailong, et al. Review of condition monitoring and intelligent assessment of electromagnetic circuit breaker[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2023, 38(8): 2191-2210.
- [10] Global Data. High voltage equipment market outlook 2023[R]. London: Global Data, 2023.
- [11] 罗卫洪.浅谈高压开关柜的设计与应用[J].中国高新技术企业,2017(6):39-40.
- LUO Weihong. A brief discussion on the design and application of high voltage switchgear[J]. China High-Tech Enterprises, 2017(6): 39-40.
- [12] 危 军.高压开关设备技术改进的优越性分析[J].中国设备工程,2022(6):138-139.
- WEI Jun. Analysis of the advantages of technical improvement of high voltage switchgear[J]. China Plant Engineering, 2022(6): 138-139.
- [13] 张宇洲.浅析智能高压开关设备的技术[J].中国设备工程,2024(9):36-38.
- ZHANG Yuzhou. Analysis of the technology of intelligent high voltage switchgear[J]. China Plant Engineering, 2024(9): 36-38.
- [14] 李 颖.元素思维的提取——产品设计中构成要素的综合分析[J].广西轻工业,2007,23(8):115-116.
- LI Ying. Elemental thinking extraction-comprehensive analysis of the constituent elements in product design[J]. Guangxi Journal of Light Industry, 2007, 23(8): 115-116.
- [15] 刘宗明,熊云飞.浅析产品形态的可知性问题[J].机电产品开发与创新,2005,18(6):54-55.
- LIU Zongming, XIONG Yunfei. Simply analyzing the cognition of the product form[J]. Development & Innovation of Machinery & Electrical Products, 2005, 18(6): 54-55.
- [16] 张志华,习 丽,郭文静.论工业设计中的统一性[J].包装工程,2005,26(4):131-133.
- ZHANG Zhihua, XI Li, GUO Wenjing. The oneness of industry design[J]. Packaging Engineering, 2005, 26(4): 131-133.
- [17] 王 锋.电力设备机柜产品设计要素研究[J].中国设备工程,2019(22):182-183.
- WANG Feng. Research on design elements of power equipment cabinet products[J]. China Plant Engineering, 2019(22): 182-183.
- [18] 姜文博.基于感性工学的产品造型设计研究[J].佳木斯职业学院学报,2018(2):477-478.
- JIANG Wenbo. Research on product modeling design based on kansei engineering[J]. Journal of Juamjusi Education Institute, 2018(2): 477-478.
- [19] 李锐鹏.智能仪器在高压开关设备在线监测系统中的应用分析[J].仪器仪表用户,2025,32(1):111-113.
- LI Ruipeng. Analysis of the application of smart instruments in the online monitoring system for high-voltage switchgear equipment[J]. Instrumentation Customer, 2025, 32(1): 111-113.
- [20] 王 勇.智能高压开关设备的技术分析[J].集成电路应用,2022,39(12):47-49.
- WANG Yong. Analysis of intelligent high voltage switchgear technology[J]. Applications of IC, 2022, 39(12): 47-49.
- [21] 宋邦申.谈绿色设计理念在高压电器制造行业的运用[J].电器工业,2012(4):65-66.
- SONG Bangshen. Talk about the application of green design concept in high voltage electrical manufacturing industry[J]. China Electrical Equipment Industry, 2012(4): 65-66.
- [22] 徐寅飞.电气设备的机柜设计探析[J].科技与企业,2015(7):233-233.
- XU Yinfei. Analysis of cabinet design of electrical equipment[J]. Technology and Business, 2015(7): 233-233.
- [23] 孙建波,陈 瑞,王 烁.高压开关设备技术及改进分析[J].集

- 成电路应用,2023,40(7):200-201.
SUN Jianbo, CHEN Rui, WANG Shuo. Analysis of high voltage switchgear technology and improvement[J]. Applications of IC, 2023,40(7):200-201.
- [24] 杨响亮,张智聪,孙小傅,等.基于产品形象的工业设计策略研究与应用[J].东莞理工学院学报,2018,25(5):67-70.
YANG Xiangliang, ZHANG Zhicong, SUN Xiaofu, et al. Research and application of industrial design strategy based on product image[J]. Journal of Dongguan University of Technology, 2018, 25 (5):67-70.
- [25] 胡志刚,李娜,乔现玲,等.工业产品形象塑造的策略研究[J].制造业自动化,2011,33(21):141-143.
HU Zhigang, LI Na, QIAO Xianling, et al. Study on the method of creating industrial product identity[J]. Manufacturing Automation, 2011,33(21):141-143.
- [26] 孙元,滕儒民.产品形象系统设计在品牌战略中的应用研究[J].设计,2012(2):30-31.
SUN Yuan, TENG Rumin. Application research of product image system design in brand strategy[J]. Design, 2012(2):30-31.
- [27] 周俊俊.基于产品形象的工业设计策略研究与应用[J].艺术科技,2019,32(3):205.
ZHOU Junjun. Research and application of industrial design strategy based on product image[J]. Art Science and Technology, 2019,32(3):205.
- [28] 杨颖,周立钢,雷田.产品识别在品牌策略中的应用[J].包装工程,2006,27(2):163-166.
YANG Ying, ZHOU Ligang, LEI Tian. Product identity and its applications in brand strategy[J]. Packaging Engineering, 2006, 27 (2):163-166.
- [29] 吴青霞.国内企业的产品形象设计管理研究[J].华东科技,2022(7):134-136.
WU Qingxia. Research on product image design management of domestic enterprises[J]. East China Science Technology, 2022(7): 134-136.
- [30] 毛红.产品形象识别体系建设研究[J].上海包装,2023(10):123-125.
MAO Hong. Research on the construction of product image recognition system[J]. Shanghai Packaging, 2023(10): 123-125.
- 张桐溪(2004—),女,本科,主要从事工业设计相关学习及研究工作(通信作者)(E-mail:2857552965@qq.com)。

(上接第212页)

- [23] 蒋龙,马峰,范雪丽.断路器操作机构分合闸电磁铁线圈故障分析[J].电器工业,2020(9):55-59.
JIANG Long, MA Feng, FAN Xueli. Breaker operating mechanism switching solenoid coil fault analysis[J]. China Electrical Equipment Industry, 2020(9):55-59.
- [24] 陈晓东.断路器液压机构控制阀故障分析与优化设计[J].液气气动与密封,2023,43(2):84-87.
CHEN Xiaodong. Fault analysis and optimization design of hydraulic mechanism control valve for circuit breaker[J]. Hydraulics Pneumatics & Seals, 2023,43(2):84-87.
- 雷琴(1982—),女,硕士,高级工程师,从事液压操纵机构和液压元件的研发工作(通信作者)(E-mail:leiqin@qq.com)。