

基于人机工程的电气控制柜工业设计与优化

万奇 彭水红

浙江省工业设计研究院有限公司, 浙江 杭州 310000

[摘要]在工业生产过程中,电气控制柜作为核心的电气控制载体,其设计合理性对操作安全性、工作效率有着直接的影响。人机工程学主要是充分围绕人体生理与心理特征,对设备的设计进行优化,首先对目前设计过程中所存在的人机工程相关问题进行系统性的分析,在此基础上提出针对性的优化策略,确保优化设计符合人机工程要求,从而提高操作人员的工作效率,确保工作安全。

[关键词]人机工程;电气控制柜;工业设计;优化设计

DOI: 10.33142/sca.v9i2.19107

中图分类号: TM921.5

文献标识码: A

Industrial Design and Optimization of Electrical Control Cabinets Based on Ergonomics

WAN Qi, PENG Shuihong

Zhejiang Industry Design & Research Institute Co., Ltd., Hangzhou, Zhejiang, 310000, China

Abstract: In the industrial production process, the electrical control cabinet serves as the core electrical control carrier, and its design rationality has a direct impact on operational safety and work efficiency. Ergonomics mainly focuses on optimizing the design of equipment based on the physiological and psychological characteristics of the human body. Firstly, a systematic analysis is conducted on the human-machine engineering related problems that currently exist in the design process. Based on this, targeted optimization strategies are proposed to ensure that the optimized design meets the requirements of ergonomics, thereby improving the work efficiency of operators and ensuring work safety.

Keywords: human machine engineering; electrical control cabinet; industrial design; optimization design

引言

电气控制柜在工业生产自动化的进程过程中主要承担着线路布置、设备保护、信号控制等重要职能,操作人员需要对电气控制柜进行操作与维护。鉴于此,对于控制柜的设计除了要满足电气性能的要求之外,同时也要考虑到人机协同的科学性与合理性。人机工程学的核心目标是优化“人-机-环境”三者的关系,在设备设计的过程中,充分围绕人体的操作习惯、生理结构以及心理需求合理的进行,避免因设计不合理而导致的安全隐患以及操作失误,从而提高操作人员的工作效率。当下,在电气控制柜的设计过程中未充分重视到人机工程学应用的重要性,设计的重点依旧以电气功能实现为主要核心,不仅导致操作人员在使用过程中出现疲劳,降低使用舒适度,甚至会引发一系列安全隐患。基于此,有针对地提出一系列切实可行的优化策略,以充分满足工业生产中对电气控制柜人性化设计的需求。

1 基于人机工程的电气控制柜设计核心原则

基于人机工程的电气控制柜设计,遵循以下4个核心原则,各原则的核心要求与适配目标表1所示。

表中原则相互关联,在实际设计的过程中,需充分结合人体的尺寸标准,优先满足操作人员的核心需求,确保设计方案的实用、贴合物机工程要求。

表1 基于人机工程的电气控制柜设计原则的核心要求与适配目标

设计原则	核心要求	适配目标
人体适配原则	贴合人体生理尺寸,操作高度、操作距离、视野范围符合人体自然姿态	减少操作时的弯腰、仰头、伸手过度等动作,降低体力消耗
操作便捷原则	操作元件布局合理,操作流程简洁,标识清晰,易识别、易操作	缩短操作时间,降低操作失误率,提升工作效率
安全防护原则	避免操作过程中接触带电部件,设置防误操作、紧急停止装置	防止触电、设备误动作等安全隐患,保障操作人员人身安全
环境适配原则	适应工业现场的温度、湿度、粉尘等环境,减少环境对操作的影响	保证控制柜稳定运行,降低环境因素导致的操作疲劳与设备故障

2 电气控制柜人机工程设计现存主要问题

2.1 人体适配性不足

人体适配性不足是工业设计与人机交互领域中较为常见的一个问题,目前,在设计控制柜的过程中,并未充分考虑中国成年人的身高特征以及肢体的活动范围,导致控制柜的设计参数与人体的生理期尺寸并不适配,具体涵盖操作距离、操作面板倾斜角度、控制柜的整体高度等,操作人员在长期的工作中处于非自然的姿态,降低操作的舒适度,并且极易引发肌肉劳损等职业健康问题。下图为人体操作舒适范围与不合理控制柜操作高度的对比示意图,见图1。

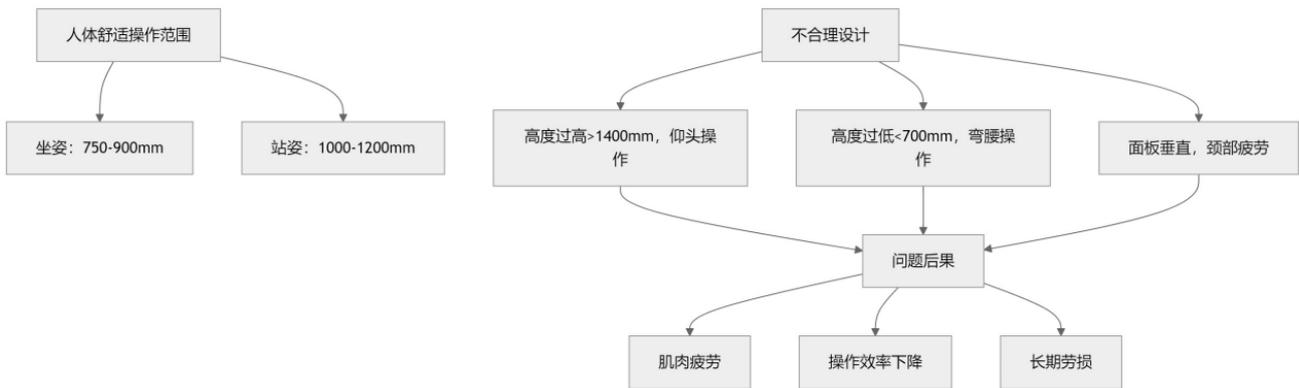


图1 人体操作舒适范围与不合理控制柜操作高度的对比示意图

2.2 操作布局不合理

在操作的布局方面，被重视操作人员的操作便利性以及认知习惯，并没有严格按照操作流程合理的排列操作元件，导致不常用的元件与常用的元件摆放较为混杂，增加操作时间元件间距过大或过小均会导致操作时移动的距离过长或容易出现误触情况。部分指示灯、按钮缺乏清晰、明确的标识，在一定程度上增加了操作失误的发生概率。

2.3 安全防护设计缺失

在部分控制柜的设计过程中，接线端子与裸露导线未实施有效的封闭处理措施，操作人员进行设备维护作业以及日常操作的过程中会不经意的触碰到带电部件，增加触电事故的发生风险。部分紧急停止按钮的设置也存在一定的缺陷，操作不够便捷，且缺乏明确的标识，位置也较为隐蔽，当遇到突发状况时，无法第一时间迅速找到并操作停止按钮，在一定程度上会导致事故的进一步扩大。部分控制柜的柜门设计存在不合理的情况，如开启的角度过小，给维护工作带来极大的不便。柜门未设置防夹手装置，使操作人员在关闭柜门的过程中手部极易被夹伤，不符合人机工程的安全防护原则。

2.4 环境适配性较差

鉴于工业现场的环境呈现出高度的复杂性，对于电气控制柜的设计以及运行提出了更为严格的要求。然而部分电气控制柜在设计的过程中并未充分考虑到现场的实际环境状况。因工业现场伴随着大量的水汽与粉尘，当侵入到电气控制柜内部时会引发电气故障，造成设备停机，甚至会损害部分元件。电气控制柜的散热设计存在不合理的情况，无法将内部的热量及时排出，会导致柜内的温度持续上升，操作人员进行操作过程中会感到闷热不适，降低操作的准确性与效率，同时也增加了企业维护成本。此外，在电气控制柜运行的过程中，接触器、风扇等部件会产生较大的噪音，操作人员在此工作环境之下容易出现注意力不集中的情况，降低操作效率的同时也会引发安全事故。

3 基于人机工程的电气控制柜优化设计措施

3.1 优化人体适配设计，降低操作疲劳

人体适配设计的核心是贴合人体生理尺寸与自然姿态，重点优化控制柜的整体高度、操作面板倾角、操作距离。结合成年人的身高范围（男性平均身高 1720mm，女性平均身高 1600mm），将控制柜整体高度控制在 1600~1800mm，其中核心按钮、指示灯、仪表等常用操作区域的高度控制在 750-1200mm，站姿操作时高度为 1000~1200mm，坐姿操作时高度为 750~900mm，避免仰头、弯腰等非自然操作姿态。将操作面板设计为倾斜式，倾角控制在 15°~30°，贴合人体视线角度，减少颈部疲劳，同时便于操作人员观察仪表数据与操作元件，提升操作舒适性。将常用操作元件的间距控制在 50~80mm，操作人员无需频繁移动身体，手臂自然弯曲即可完成操作。控制柜与操作人员的距离控制在 0.8~1.2m，保证操作人员观察清晰、便于操作。倾斜式面板与垂直面板的对比效果如表 2 所示。

表 2 倾斜式面板与垂直面板的对比效果

面板类型	倾角	操作舒适性	视线清晰度
垂直面板	0°	差，颈部易疲劳	差，需低头/仰头观察
倾斜面板	15°~30°	好，贴合颈部自然姿态	好，视线垂直于面板

3.2 优化操作布局设计，提升操作便捷性

将操作元件分为常用区、次常用区、备用区三个区域，常用区布置在操作面板的核心位置，次常用区布置在常用区两侧，备用区布置在面板边缘。操作面板分区布局示意图如图 2。

对元件的间距进行合理的优化，以免发生误触的情况，次常用区与备用区元件间距控制在 40-60mm，而比较常用的元件间距控制在 50-80mm 范围内。按照操作人员的习惯合理的排列元件，严格遵循操作安全以及便捷性的原则，从左到右、从上到下依次布置“启动-运行-停止-急停”按钮，避免出现操作失误的情况，以此为设备的稳定运行提供保障。对每一个操作元件设置一个清晰、明确的标识，醒目易识别。标识的位置应该紧邻对应元件，避

免出现混淆。对于指示灯的设置,为了确保操作人员能够及时且迅速的判别设备当前的运行情况,通常对指示灯涉及不同的颜色来区分设备的状态。

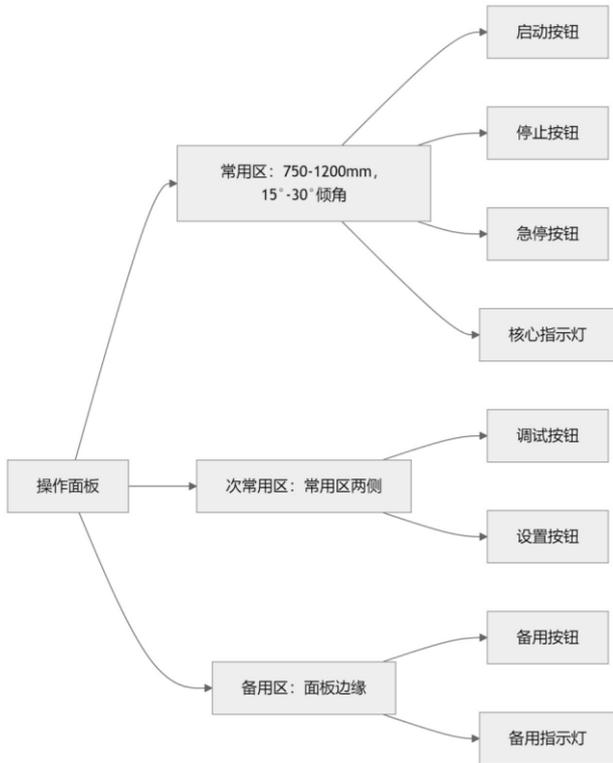


图 2 操作面板分区布局示意图

3.3 优化安全防护设计, 保障操作安全

在人机工程设计过程中应该严格遵循安全第一的原则,从防误操作、带电部件防护、紧急停止装置这三个关键维度进行优化设计。对于裸露导线、机器端子等关键部位进行全封闭的处理,从物理层面进行防护,并采用高绝缘性能、高强度的盖板进行覆盖,避免发生触电事故。采用先进的密封设计工艺,阻挡外界水汽、粉尘等有害物质的侵入,同时有助于防止操作人员因意外碰触内部带电部件。与此同时,为了进一步强化安全保障,在控制柜的明显位置张贴清晰醒目的断电提醒标志,以此来提醒操作人员进行维护作业的过程中,可以严格遵循标准使用专用的工具,做好个人安全。常用按钮设置防误触罩,避免误碰导致设备误动作。关键操作(如调试、急停)设置双重确认机制,需按下确认按钮后才能完成操作,减少操作失误。控制柜柜门设置联锁装置,柜门开启时自动断电,防止操作人员在维护时触电。将紧急停止按钮设置于操作面板的最显眼位置,基于人体工程学原理通常置于常用操作区的右侧,安装高度精准控制在 1000~1100mm 范围内,采用红色大尺寸按钮,同时配备清晰、直观的标识系统,便于操作人员在紧急情况下快速操作。紧急停止按钮的设

计应遵循自复位的原则,操作后需手动复位,避免误操作复位导致设备的意外启动,建议在控制柜的周边预设紧急停止按钮的备用连接接口,便于操作人员在不同的位置快速应急。

3.4 优化环境适配设计, 提升操作舒适度

环境适配设计的核心是适应工业现场环境,减少环境因素对操作人员与设备的影响,在控制柜顶部设置散热风扇,底部设置进风口,形成上下对流散热,风扇转速可根据柜内温度自动调节,避免柜内温度过高。柜内电气元件采用分散布局,预留散热间隙,减少热量积聚。散热风扇设置防尘罩,防止粉尘进入,降低风扇运行噪声。选用低噪声接触器、风扇等低噪声电气元件,降低设备运行时的噪声;在控制柜内部铺设隔音棉,吸收噪声,将运行噪声控制在 60dB 以下,避免噪声对操作人员的心理与生理造成影响。同时,合理布置控制柜的安装位置,远离操作人员的主要工作区域,进一步减少噪声干扰。控制柜采用 IP54 及以上防护等级,柜门边缘设置密封胶条,进风口、出风口设置防尘网,防止粉尘、水汽进入。控制柜底部采用抬高设计(抬高高度不小于 100mm),避免地面水汽、粉尘进入柜内,便于底部散热与线缆布置。

4 优化设计的简单验证方法

为确保优化设计符合人机工程要求,选取 10 名操作人员(男性、女性各 5 名,身高范围 1550~1800mm),验证人体适配性、操作便捷性、安全防护性。同时,选取 2-3 名专业的设备维护人员,从维护便利性角度提出反馈意见。操作人员严格按照常规的操作流程对于优化后的电气控制器进行调试工作操作以及维护工作,对于操作人员在操作过程中的疲劳程度、操作失误次数以及操作时间进行全面准确记录。操作人员在测试的过程中,由专人密切观察其操作姿势,做好相关记录,确保测试数据的真实性与全面性。通过与操作人员进行沟通,了解其在操作过程中对优化后的电气控制器使用过程中的安全性、便捷性以及舒适度的评价,重点收集操作人员认为仍需优化的问题。同时,与设备的维护人员进行沟通,了解其对设备维护方面提出的反馈意见,从维护便利性角度优化设计方案。将各项测试结果与优化前的指标进行对比分析,判断优化后的电气控制器安全性、操作便捷性、人体适配性是否达到预期的目标。对比过程中,重点分析操作时间、操作失误率、疲劳程度等核心指标的变化。根据反馈意见以及各项测试结果,适时调整优化设计,以此更加贴合人机工程的相关要求。调整后,再次进行小规模测试,直至达到预期目标。验证操作时间、操作失误率、疲劳程度、安全防护满意度,见表 3。

表 3 优化设计的简单验证方法

验证指标	验证标准	优化目标
操作时间	完成常规操作（启动-调试-停止）的时间	较优化前缩短 15% 以上
操作失误率	10 名操作人员操作中的失误总次数/总操作次数	降至 5% 以下
疲劳程度	操作人员连续操作 1h 后的疲劳评分（1~10 分，分数越低越舒适）	评分 ≤ 4 分
安全防护满意度	操作人员对安全防护设计的满意度评分（1~10 分，分数越高越满意）	评分 ≥ 8 分
维护便利性	维护人员完成常规维护（检查、清洁）的时间及操作难度评分	维护时间缩短 20%，难度评分 ≤ 3 分

通过上述验证方法，若未达到优化目标，则进行简单调整。同时，每 3 个月收集一次操作人员与维护人员的反馈意见，每 6 个月进行一次全面验证，持续优化设计方案，确保电气控制柜始终符合人机工程要求。

5 结论

本文从人体适配、操作布局、安全防护、环境适配四个方面提出了简单、可落地的优化措施，优化后的电气控制柜，能够贴合操作人员的生理与心理需求，减少操作疲劳与失误率，提升操作效率与安全性，同时适应工业现场的环境特点，保障设备稳定运行，推动电气控制柜向更贴合人体需求、更安全、更便捷的方向发展。本文未涉及复

杂的人机工程理论与高端优化技术，后续可结合工业自动化的发展需求，进一步完善优化设计，融入智能化元素，让电气控制柜的人机协同效果更优，更好地满足工业生产的实际需求。

[参考文献]

- [1]周亚男.浅谈基于人机工程的布局设计方法[J].中国管理信息化,2016,19(16):114-114.
 - [2]吴钟坤.基于控制理论的包装机械电气系统优化研究[J].上海包装,2024(4):6-8.
 - [3]李和森,柳冠中.基于人机工程的智能塑壳断路器面板造型设计[J].机械设计,2021,38(5):127-131.
 - [4]刘林.工程机械工业设计和探讨[J].中国设备工程,2021(4):254-255.
 - [5]李浩,刘根,文笑雨,等.面向人机交互的数字孪生系统工业安全控制体系与关键技术[J].计算机集成制造系统,2021,27(2):374-389.
 - [6]董志军.数控机床操作过程人机交互安全控制策略探析[J].现代制造技术与装备,2025,61(4):188-190.
- 作者简介：万奇（1986.7—），毕业院校：武汉大学，所学专业：机电一体化，当前就职单位：浙江省工业设计研究院有限公司，职务：电气设计，职称级别：中级工程师；彭水红（1990.4—），毕业院校：浙江理工大学，所学专业：土木工程，当前就职单位：浙江省工业设计研究院有限公司，职务：造价咨询组组长，职称级别：工程师。