

考虑劳动负荷的某装配线工作排程优化方案设计

李赫男 邹昕卉 刘巍巍

沈阳工业大学 机械工程学院 辽宁 沈阳 110870

【摘要】：当前电力设备市场需求呈持续增长态势，国家电网等核心采购主体持续提升变压器产品的质量与精度要求，这对生产企业的生产流程管控水平提出了更高的标准，传统经验式工作排程模式在变压器手工装配线的技能匹配、负荷均衡与效率协同优化方面的问题日益凸显。考虑劳动负荷约束的工作排程优化方案，可通过量化技能需求与负荷水平、科学配置生产资源，实现装配线全局优化。本研究以某变压器制造企业手工装配线为研究对象，针对工人技能与工序需求不匹配、劳动负荷不均衡、休息制度不合理的核心问题，构建“技能量化-双维度负荷测度-多目标排程-差异化制度”一体化优化方案。该方案可实现工人、工序与负荷的动态适配，有效破解装配线生产瓶颈，为变压器装配线工作排程优化提供理论与方法支撑，助力企业提升生产效能与产品质量，为同类中小型制造企业手工装配线的高效运营优化提供实例。

【关键词】：变压器装配；工作排程；优化方案；劳动负荷

DOI:10.12417/2705-0998.25.24.041

1 引言

当前电力设备市场需求持续增长，国家电网等主要采购主体不断提高变压器产品质量精度与交付周期要求，对生产流程管控提出更高标准，推动企业优化生产环节。中小变压器企业受资金、技术约束，其装配工序仍以手工装配线为主，且普遍采用传统经验驱动的工作排程方式。该方式未系统分析与分配劳动负荷，易导致工序负荷不均、岗位技能与作业需求不匹配，造成装配效率偏低、产品不合格率较高。因此，开展考虑劳动负荷的手工装配线工作排程优化研究、探索低成本方案，对中小变压器企业高质量发展具有重要理论与实践价值。

劳动负荷均衡是产线排程优化的核心约束维度，Smith等（2023）从工业工程视角，将体力负荷量化指标纳入排程优化模型，通过实证验证了负荷均衡排程可有效降低手工装配线工序作业偏差率^[1]。Jonas&Lee（2024）聚焦手工装配线人机协同特性，构建了融合体力、脑力双维度负荷的多目标排程模型，证实该模型能缓解工人疲劳累积，减少因负荷失衡引发的操作失误^[2]。王健（2025）明确劳动负荷非单一作业时间概念，构建了综合劳动负荷量化测度体系，其研究证实基于负荷均衡的排程优化可显著降低装配线不良品率^[3]。易树平、郭伏（2024）在基础工业工程理论中，将劳动负荷均衡作为工序排程的核心原则，指出其对提升产线整体资源利用效率的关键作用^[4]。张绪柱（2024）从生产运作管理角度，提出通过工序组合与人员配置协同实现工人负荷均衡的排程思路，有效减少了产线物料

传递与等待时间^[5]。

本研究以某变压器制造企业为研究对象，围绕其手工装配线展开分析，通过梳理装配线工作排程生产现状，识别装配线运行过程中存在的核心问题，结合排程问题制定针对性解决方法，最终总结优化思路与实践价值，为同类中小型制造企业手工装配线的高效运营优化提供范例。

2 某变压器装配线工作排程的现状

A企业是一个生产多种油浸式变压器的中型制造企业，其变压器装配主要由人工完成，包括铁芯叠装、线圈绕制、器身装配、成品试验、包装入库五大基本环节。该变压器装配线采用U型布局设计，整条装配线原有41道工序、20个工作站，配置26名工人，各工作站根据工序难度、作业量合理分配工序与工人。

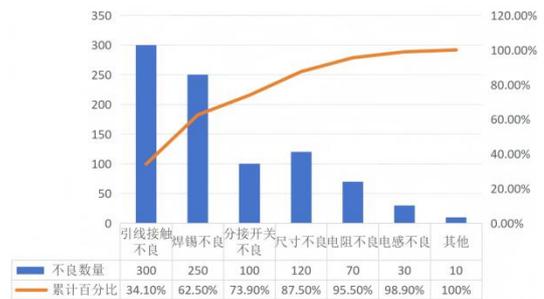


图1 A企业2024年度不良品种类、数量帕累托图

作者简介：

李赫男(2003-)，男，硕士研究生，研究方向：人因工程。

邹昕卉(2000-)，女，硕士研究生，研究方向：数字孪生建模与仿真、数据处理、船舶动力系统。

刘巍巍(1973-)，女，教授，博士生导师，研究方向：企业资源优化。

图1为统计企业2024年度的不良品种类及数量数据，制成不良品种类及数量分布的帕累托图。“引线接配不良”、“焊锡不良”及“分接开关不良”三类不良累计占比超过了70%，且均出现在装配环节。因此，考虑工人手工操作对装配线生产质量的实际影响，企业对装配工序进行合理简化，最终确定36道核心手工装配工序为研究对象。经统计，各工序的实际完工时间与标准作业时间、工作站理论完工时间存在不同程度偏差，部分工序偏差尤为显著。工序完成时间的不均衡，直接反映出装配线工序分配、人员配置的不合理性，也影响了装配线的整体生产效率。

3 工作排程问题分析

3.1 装配线的影响因素分析

为明确该企业手工装配线质量与效率的核心影响因素，锁定工作排程优化方向，本研究开展系统性分析，量化测度各因素影响程度与相互作用关系，进而确定排程优化关键因素。

研究结合手工装配线生产实际与相关文献，从体力负荷、脑力负荷、作业人员、作业任务、作业环境、企业管理六大维度，梳理出骨骼肌疲劳、技能水平、工作休息方案等多类潜在影响因素。

通过组建专家组评分筛选关键因素，完成直接影响矩阵与综合影响矩阵的构建及运算，计算各因素影响度、被影响度、中心度与原因度，结果显示，“工人技能水平”与“工作休息方案”为中心度和原因度双高的核心驱动因素，劳动负荷相关因素、作业便捷性、任务难度为重要影响因素。

分析结果表明，制约变压器手工装配生产线高效运行的主要因素包括：作业人员技能水平与工序作业要求的匹配度不足、休息制度设计缺乏科学依据、以及作业人员间劳动负荷分配不均衡。系统解决上述问题，可为后续排程优化方案的制定提供明确方向与核心依据。

3.2 核心问题成因分析

结合分析结果，三大核心问题的成因与影响，具体如下：

工人技能与工序要求适配程度不足。工序分配问题导致不同技能工人与相关工作的技能不匹配，直接降低装配线整体运行效率，制约生产质量与效率提升。

休息制度设计缺乏科学性与差异化。休息安排既无法满足高负荷工序工人的疲劳恢复需求，又造成低负荷工序工人休息资源低效利用，同时削弱工人工作满意度与积极性，间接影响装配线运行效能。

工人间劳动负荷分配不均衡。工序分配忽视各工序负荷差异。高负荷工人易疲劳累积、操作失误增加，不良品风险上升；低负荷工人效率偏低、技能资源闲置，影响装配线生产稳定性。

4 装配线工作排程优化方案设计

4.1 装配线工作排程优化思路

结合企业中小型制造企业的属性与变压器手工装配线的生产特点，本研究设计了一套聚焦“多人多任务场景”的装配线工作排程优化方案，方案以技能量化为基础、劳动负荷测度为依据、多目标优化为核心、差异化制度为保障，区别于传统排程研究聚焦“单工人多任务”的局限，实现技能匹配、负荷均衡与生产效率的协同优化，具体设计思路如下。

第一，完成工人与工序的技能水平量化定义，作为任务分配的核心依据。结合变压器装配线36道核心手工装配工序的实际情况，从工序和工人双视角出发，编制1-4级技能水平等级定义标准，明确不同等级对应的工序操作要求与工人能力标准；并以此为依据完成企业装配工人技能水平与各工序最低技能要求的分级量化，形成标准化的技能匹配参考体系，从源头解决技能与工序需求不匹配的问题，为工序精准分配提供量化支撑。

第二，构建体力与脑力双维度的劳动负荷量化评价体系，为负荷均衡分配提供科学依据。打破传统仅以作业时间衡量劳动负荷的单一模式，将劳动负荷拆解为体力、脑力两个维度，设计基于生理监测手段的负荷测度实验，分析工人作业过程中的疲劳与恢复规律，分别建立体力、脑力负荷的量化评价模型，再通过加权平均处理形成综合劳动负荷量化评价模型，实现对各工序劳动负荷的科学测度与量化分析。

第三，搭建多目标装配线工作排程优化模型，纳入多重约束与优化目标。结合技能水平量化结果与劳动负荷量化评价体系，构建兼顾“工人技能匹配程度、工人劳动负荷均衡性、装配线生产效率”的多目标工作排程规划模型，将最小化工序技能需求与工人技能水平的总体差异、最小化工人劳动强度差异、最小化工站最大完工时间设为核心优化目标；同时结合企业生产实际，设置劳动负荷上限、工作总时长、工人被分配工序总数、工序先后逻辑等一般性约束条件，保证模型的实用性与可操作性。

第四，重构基于劳动负荷的差异化休息制度，解决休息制度不合理问题。以各工序综合劳动负荷量化结果与工人实际疲劳情况为依据，设计差异化的休息安排，针对高、中、低不同负荷水平，设置不同的休息时长、次数与休息节点，同时设立弹性休息机制，依托优化后的休息环境配备疲劳缓解设施，实现休息安排与作业负荷的精准匹配，有效缓解工人作业疲劳，提升休息质量。

第五，采用改进的智能算法完成模型求解，形成最优排程方案。从初始解生成、惯性权重和学习因子三方面对粒子群算法进行改进，利用改进后的粒子群算法对构建的多目标工作排程模型进行求解，结合企业生产实际生成多组最优工作排程方

案,方案包含工人与工序的精准分配结果、差异化休息制度细则、工作站工序整合与人员配置方案等内容,实现技能匹配、负荷均衡与生产效率的协同优化。

4.2 实施步骤

为确保考虑劳动负荷的变压器装配线工作排程优化方案落地见效,结合企业生产现状与资源条件,设计“数据输入-模型构建-算法求解-方案决策-方案验证”全流程实施步骤,具体如下:

步骤1:生产数据采集与规范化。系统收集订单信息、工序工艺、工人技能、设备状态、劳动负荷监测数据及车间环境等核心数据,按行业标准完成清洗、补全与规范,保障数据可靠性,为模型构建提供基础支撑。

步骤2:多目标排程模型构建。基于工人-工序技能量化结果与体力-脑力双维度劳动负荷测度数据,纳入技能匹配、劳动负荷均衡约束及生产时长、工序优先级等一般性约束,构建贴合企业实际的多目标排程模型。

步骤3:改进算法求解与方案生成。采用改进粒子群算法求解模型,生成多组 Pareto 最优方案,输出工人-工序分配、作业安排、差异化休息制度、工作站配置及完工时间规划等核心内容。

参考文献:

- [1] Smith J,Brown K.Labor load measurement and scheduling optimization for manual assembly lines[J].Journal of Industrial Engineering,2023,40(05):45-52.
- [2] Jonas R,Lee S.Multi-objective scheduling model based on physical and mental load balance[J].International Journal of Production Research,2024,62(08):2568-2581.
- [3] 王健.制造业手工装配线劳动负荷均衡优化研究[J].工业工程与管理,2025(02):89-96.
- [4] 易树平,郭伏.基础工业工程[M].北京:机械工业出版社,2024.
- [5] 张绪柱.生产运作管理[M].北京:清华大学出版社,2024.

步骤4:最优方案筛选与决策。结合企业经营目标与资源实际,从技能匹配度、劳动负荷均衡水平、生产效率、不良品控制效果等维度综合评价,筛选兼顾质量、效率与工人作业状态的实施方案。

步骤5:方案验证与落地优化。对比最优方案与原经验方案,从不良品率、生产效率、劳动负荷均衡度、工人满意度等维度验证优越性,完善后落地并持续跟踪执行效果。

5 结论

针对变压器制造企业手工装配线存在的工人技能与工序要求适配程度不足、休息制度设计缺乏科学性、劳动负荷分配不均衡三大核心问题,本研究构建“技能量化-双维度负荷测度-多目标排程-差异化制度”一体化工作排程优化方案,得出如下结论:工人技能水平与工作休息方案是影响装配线生产质量与效率的核心驱动因素;基于1-4级技能量化标准与体力-脑力双维度劳动负荷测度的多目标排程方案,经改进粒子群算法求解后,可显著提升技能匹配度、劳动负荷均衡性与生产效率。该方案无需大规模设备投入,通过内部管理优化与数据驱动排程,适配中小型变压器制造企业资源有限的特点,为同类手工装配线提供“低成本-高适配”的优化路径,后续可结合数字化管理系统进一步增强排程动态调整能力。