

某混流装配线平衡优化方案研究

郝星宇 郭浩月 刘巍巍

沈阳工业大学机械工程学院 辽宁 沈阳 110870

【摘要】：随着市场需求向多品种、小批量方向发展，混流装配模式在复杂机械产品制造中得到广泛应用，线体平衡效率与装配过程可靠性对企业生产效能具有直接影响。本文以M公司变速器混流装配线为研究对象，针对其存在的平衡率不足、作业时间失衡、生产效率偏低及装配差错风险较高等实际问题，通过秒表测时法获取工序标准作业时间数据，构建工作站节拍平滑指数计算方法，改进装配关系复杂度测度模型并完成关键参数量化，据此提出针对性的装配线平衡优化方案。应用结果表明，该方案可有效压缩瓶颈作业时间，均衡站间与站内作业负荷，减少生产空闲时间，显著提升装配线平衡率与整体生产效率，降低错装漏装风险，可为同类企业混流装配线优化提供实践参考。

【关键词】：混流装配线；装配线平衡；节拍平滑指数；优化方案；变速器

DOI:10.12417/3083-5526.25.06.005

引言

在我国制造业加速向智能化转型的背景下，变速器作为汽车动力传动系统的核心部件，其装配效率与装配质量直接决定企业的生产节拍与市场竞争力。为适配多品种、小批量的生产需求变化，企业普遍采用混流装配线组织生产，以提升设备利用率与生产柔性。混流装配线在提升生产柔性的同时，也引发了装配工序复杂、工位负荷不均、节拍管控难度增大等问题，导致生产效率难以得到有效保障。在变速器等结构复杂产品的装配过程中，不同型号产品间的工艺差异与工序优先约束关系，进一步加大了装配线平衡的难度。

现有研究表明，混流装配线的平衡与排序问题是影响生产效率和装配质量的关键因素之一，针对这一问题，学者们提出了包括调度方法、混合整数规划模型及启发式算法等一系列优化策略。例如，郭具涛提出基于复合规则和强化学习的方法来解决混流装配线的平衡与排序问题，提高调度方案的合理性和动态适应能力（PPO 强化学习方法）^[1]。李冉冉等人从协同优化角度出发，将装配线平衡与物料供应策略联合建模，通过混合整数规划提高生产系统整体性能，并对参数敏感性进行了分析验证^[2]。此外，李珍萍等人通过建立排序优化模型通过考虑工序优先关系、节拍时间和工作站负载等多种约束，显著改善了工位负载均衡性和系统节拍效率^[3]。

综上所述，虽然现有研究在混流装配线平衡模型与求解算法方面取得了一定成果，但多以生产节拍或工位数量优化为主要目标，对装配关系复杂性以及工作站节拍波动对装配质量与错误风险的影响关注不足。本文以M公司变速器混流装配线为研究对象，结合其装配工艺特征与实际平衡约束，引入工作

站节拍平滑指数和装配关系复杂性指标，构建兼顾效率与稳定性的混流装配线平衡优化框架，为复杂产品混流装配线的优化设计与运行管理提供理论依据与实践支持。

1 M公司混流装配线概述

M变速器有限公司主要生产混合动力汽车专用变速器DHT系列产品。作为公司2.0代战略性产品，该系列年产规模约70万台套，主要应用于A-C级中高端车型。本文选取其中一条变速器混流装配线作为研究对象，该产线可同时装配ProC11、ProC21和ProC31三种型号产品，其需求比例分别为3:4:2。三种产品在核心工艺和总体结构上高度一致，具备同线混流生产条件。

该混流装配线共设置57道装配工序和20个工作站，各工序之间存在严格的优先约束关系。生产过程中，零部件及半成品需按既定工艺顺序依次通过各工作站完成装配。若任务分配与作业时间配置不合理，易造成工作站负荷失衡，进而影响装配线运行效率与生产稳定性。因此，有必要对该混流装配线开展系统的平衡优化研究，以实现工作站负荷协调与装配过程平稳运行。通过现场调研，绘制了该变速器混流装配线的布局示意图，如图1所示。

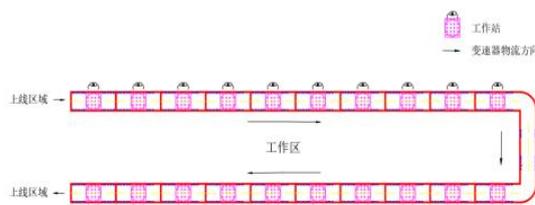


图1 变速器混流装配线布局示意图

作者简介：

郝星宇(2000-)，男，硕士研究生，研究方向：生产线平衡优化。

郭浩月(2001-)，女，硕士研究生，研究方向：装配线平衡优化。

刘巍巍(1973-)，女，教授，博士生导师，研究方向：企业资源优化

2 装配线平衡问题分析

通过对 M 公司变速器混流装配线的实际情况进行分析, M 公司的混流装配线存在的问题主要表现在以下几个方面:

2.1 生产效率偏低

变速器作为汽车动力传动系统的重要核心部件, 结构复杂且零件繁多。由于 M 公司产量需求较大, 且采用三种型号的混流生产方式, 其中 ProC11 为新开发型号, 部分工序作业时间较长, 导致整体装配线的生产周期延长, 进而影响生产效率。

2.2 产品错装、漏装风险高

变速器混流装配线上存在多个工序, 在工作站设计初期未考虑装配关系复杂性带来的影响, 导致在实际装配过程中, 各工作站内工作划分不合理, 装配关系复杂性波动严重。当工人处于装配关系复杂性高的工序时, 会在一些关键装配步骤上出现疏忽, 大大增加了产品装配过程的出错风险。

2.3 作业时间不均衡

工作站内和站间作业时间均存在明显时间差, 作业时间差异过大是影响装配线生产效率的重要原因之一, M 公司现有生产能力无法满足订单数量, 急需平衡工作站间的作业时间, 提升装配线生产效率, 满足客户需求。

3 平衡优化方案设计

3.1 核心要素的确定

本文的平衡优化方案基于 M 公司变速器混流装配线的现状与问题分析, 提出了以下核心要素:

(1) 生产节拍平滑指数

传统的生产节拍仅考虑工序的最长时间作为生产节拍, 而忽视了工作站之间作业时间的不均衡。为此, 提出了“工作站生产节拍平滑指数”, 旨在通过平衡各工作站内部的工序作业时间, 减少空闲时间, 从而提高生产效率。

(2) 装配关系复杂性

装配关系复杂性是影响装配质量的重要因素。M 公司装配线设计时未充分考虑装配关系的复杂性, 导致工作站间的装配关系不均衡, 增加了出错风险。

(3) 工作站负荷均衡

通过对各工作站的作业时间进行分析, 提出了工作站节拍平滑指数, 以实现工作站间负荷的均衡, 避免出现瓶颈和闲置工作站, 进一步提升生产线的平衡率和整体效率。

3.2 装配线平衡优化方案的设计

针对 M 公司变速器混流装配线运行过程中存在的装配效率和负荷不均衡等问题, 本文提出一种考虑装配关系复杂性的混流装配线平衡优化方案, 其整体研究思路与技术流程如图 2 所示。

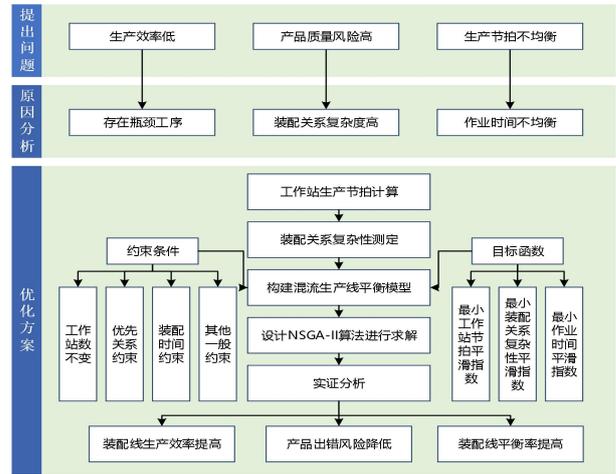


图 2 装配线平衡优化框架图

首先, 从混流装配线工序之间的装配关联特性出发, 构建装配关系复杂性测度方法, 提取能够表征工序装配关系特征的关键参数, 并对相关参数进行定量化描述, 以刻画不同工序在装配关系层面的复杂程度, 为混流装配线平衡建模提供基础数据支撑。

其次, 区别于传统以固定生产节拍为核心的装配线平衡方法, 本文引入工作站节拍平滑指数, 以更合理地反映各工作站负荷分布及装配线整体生产能力。在此基础上, 将装配关系复杂性平滑指数与作业时间平滑指数共同纳入优化目标函数, 构建以最小化工作站节拍平滑指数、最小化装配关系复杂性平滑指数以及最小化作业时间平滑指数为目标的多目标混流装配线平衡模型。同时, 模型中设置工作站数量不变、工序优先关系约束、作业时间约束以及其他一般约束条件, 以确保优化结果在工程实践中的可行性。

最后, 结合 M 公司变速器混流装配线的实际生产数据, 采用改进的 NSGA-II 算法对所构建的多目标优化模型进行求解, 获得较优的工作站任务分配与划分方案。通过该方案的实施, 可在保证装配约束条件的前提下, 提高装配线生产效率, 降低装配过程中的差错风险, 并提升混流装配线的整体平衡水平, 从而为企业生产效率和制造能力的提升提供有效支撑。

3.3 实施步骤

为了确保所设计的平衡优化方案在 M 公司变速器混流装配线中的成功应用, 本文提出了以下具体的实施步骤:

步骤 1: 数据收集与处理。在实施之前, 首先需要收集并处理相关的车间生产数据。这些数据包括: 工序作业时间, 工序优先关系, 工作站信息, 工作站能力与负荷。所有收集到的数据需要进行标准化处理, 确保其一致性与完整性, 并通过数据清洗去除异常值, 确保数据的准确性和可靠性。

步骤 2: 集成调度模型构建。在数据处理完成后, 开始构建集成调度模型。结合装配关系复杂性与工作站节拍平滑指数

这两个指标，构建多目标优化模型。

步骤3：使用改进的 NSGA-II（非支配排序遗传算法）进行求解^[4]。基于工序优先关系、工作站分配以及作业时间等数据，设计合适的编码方式。初始化种群并确保种群中的解能够覆盖不同的生产方案。同时，采用多点交叉操作，探索不同解空间中的潜在优解。在变异过程中引入高斯变异和柯西变异策略，进一步增强解空间的多样性。通过运行改进的 NSGA-II 算法，获得 Pareto 最优解集，并验证算法的收敛性与求解质量。对比优化前后方案的性能变化，评估优化效果^[5]。

步骤4：最优工序分配方案选择。在得到 Pareto 最优解集后，使用模糊理论和专家决策偏好，选择最优的工序分配方案。

步骤5：优化方案验证与调整。完成方案选择后，进行优化效果验证，并根据实际生产情况调整方案，通过对比优化前后的工序分配方案，验证优化方案在站间作业时间、站内作业时间、装配关系复杂性等方面的改进效果。评估生产效率、装配线平衡率、质量稳定性等关键指标的变化。

参考文献：

- [1] 郭具涛, 等. 基于复合规则和强化学习的混流装配线调度方法[J]. 中国机械工程, 2023, 34(21): 2600 - 2606.
- [2] 李冉冉, 李雪娇, 彭运芳, 朱海平. 装配线平衡与物料供应策略的协同优化[J]. 上海大学学报(自然科学版), 2025, 31(6): 945 - 960.
- [3] 李珍萍, 施莹, 吴凌云. 多约束混流线平衡与排序优化问题研究[J]. 系统仿真学报, 2023, 35(1): 27 - 40.
- [4] 郑锦灿, 邵立珍, 雷雪梅. 一种基于改进 NSGA-II 的多目标绿色柔性作业车间调度方法[J]. 制造技术与机床, 2023, (1): 145-152.
- [5] Li H, Cao Y, Kong F, Zhang X, Song G. Multi- Objective Large- Scale Assembly Line Balancing Considering Position and Equipment Conflicts Using an Improved NSGA- II[J]. Processes, 2025, 13(11): 3574.

步骤6：实施与持续优化。优化方案经过验证后，进入实际实施阶段，将优化后的工序分配方案应用到实际生产中，并根据生产过程中遇到的新问题进行调整。

4 结论

针对 M 公司混流装配线存在的生产效率偏低、错装漏装风险较高以及作业时间分布不均等问题，本文提出了一种考虑装配关系复杂性的混流装配线平衡优化方案。通过引入工作站节拍平滑指数，并将装配关系复杂性平滑指数与作业时间平滑指数纳入优化目标，构建了以最小化三类平滑指标为目标的多目标混流装配线平衡模型，从而在提升装配线生产效率的同时，有效降低产品装配错误风险并提高装配线平衡水平。在此基础上，本文搭建了面向实际生产过程的装配线全流程优化方案框架，并基于企业真实生产数据对所提方法进行了验证。结果表明，该优化方案具有良好的工程适用性和实践可行性，能够较好地匹配企业实际生产需求，为类似复杂产品混流装配线的平衡优化与运行管理提供方法参考。