

基于精益理论的新风机生产线平衡优化研究

杨英¹ 吴婷颖^{1,2}

1. 东北电力大学 经济管理学院, 中国·吉林 吉林 132012

2. 致果环境科技有限公司, 中国·天津 301799

摘要: 随着制造业转型升级加速, 生产线平衡优化成为企业提升竞争力的关键路径。本研究以 ZG 科技公司新风机生产线为研究对象, 针对其存在的生产效率低下、瓶颈工序突出等问题, 综合运用动素分析、5W1 技术提问、ECRS 原则及和声遗传算法等工业工程方法, 对生产线进行系统优化。结果表明, 优化后生产线平衡率由 54.8% 提升至 72%, 生产节拍缩短 45%, 生产空间得到释放, 物流成本减少至 7574 元, 验证了方案的有效性。该实践为同类制造企业提供了可复制的流程改善模型, 验证了精益管理理论与生产工艺创新融合的可行性, 对推动装备制造行业向精细化、柔性化方向发展具有示范意义, 同时拓展了精益生产理论在非汽车领域的应用场景。

关键词: 精益生产; 生产线平衡; 动素分析; ECRS 原则; 和声遗传算法

Research on Optimization of Fresh Air Fan Production Line Balancing Based on Lean Theory

Ying Yang¹ Tingying Wu^{1,2}

1. School of Economics and Management, Northeast Electric Power University, Jilin, Jilin, 132012, China

2. Zhiguo Environmental Technology Co., Ltd., Tianjin, 301799, China

Abstract: With the acceleration of transformation and upgrading in the manufacturing industry, production line balancing optimization has become a critical path for enterprises to enhance their competitiveness. Taking the new fan production line of ZG technology company as the research object, this study aims at solving problems such as low production efficiency and prominent bottleneck processes. It systematically optimizes the production line by comprehensively applying industrial engineering methods including therblig analysis, 5W1H technique questioning, ECRS principles, and harmony genetic algorithm. The results show that after optimization, the production line balance rate increases from 54.8% to 72%, the production cycle time is shortened by 45%, production space is liberated, and the material flow cost is reduced to 7,574 Yuan, verifying the effectiveness of the scheme. This practice provides a replicable process improvement model for manufacturing enterprises of the same type, confirms the feasibility of integrating lean management theory with production process innovation, has demonstrative significance for promoting the equipment manufacturing industry to develop towards refinement and flexibility, and expands the application scenarios of lean production theory in non-automotive fields.

Keywords: lean production; production line balancing; therblig analysis; ECRS principles; harmony genetic algorithm

0 前言

随着全球制造业竞争格局的深刻变革, 生产流程优化已成为企业实现降本增效、构建核心竞争力的战略选择。《中国制造 2025》明确指出, 智能制造与精益管理的深度融合是推动制造业高质量发展的重要路径。在“双碳”目标驱动下, 装备制造企业亟须通过工艺革新实现绿色低碳转型, 这对生产系统的柔性化、智能化提出了更高要求。

ZG 科技公司作为中国新风系统领域的领军企业, 其生产线运营效率直接影响企业在细分市场的竞争优势。然而, 当前生产线存在的结构性矛盾已成为制约其发展的核心瓶颈。具体表现为生产效率低下、瓶颈工序明显、设备布局不合理等问题, 集中体现在生产周期长、质量波动大、成本控制乏力等运营痛点。这些问题不仅制约企业快速响应市场需求的能力, 更与智能制造发展趋势形成显著差距, 亟须通过

系统性优化实现生产效能的突破性提升。

1 精益生产理论

1.1 准时化生产理论

准时化生产 (Just-in-Time) 是精益生产的核心方法论, 其核心理念是“在必要的时间生产必要数量的必要产品”。该理论通过消除生产过程中的七种浪费 (过量生产、库存、等待、搬运、加工、动作、不良品), 实现资源的高效利用和生产流程的优化。JIT 以需求驱动为基础, 采用“拉动式”生产系统, 通过看板管理传递生产指令, 确保各工序间的物料和信息流精准同步。在精益生产中, JIT 通过缩短生产周期、降低库存成本、减少资金占用, 提升企业对市场变化的响应速度。其实施依赖于稳定的生产节拍、标准化作业流程以及与供应商的紧密协作, 旨在构建一个无间断、无停滞的价值

流体系。JIT的最终目标是通过持续改善,推动生产系统向“零浪费”的理想状态演进。

1.2 均衡生产理论

均衡生产 (Heijunka, 平准化生产) 是精益生产中平衡生产负荷的关键策略,旨在通过平准化生产流程消除需求波动带来的资源浪费。该理论要求企业将不同产品的生产任务均匀分配到生产周期中,避免因订单波动导致的设备过载或闲置。均衡生产通过混合排产、调整生产批量或顺序,使生产过程在时间和数量上保持稳定。在精益实践中,它通过减少生产波动,降低在制品库存,提高设备利用率和生产效率,同时稳定员工工作负荷,为持续改善创造条件^[1]。均衡生产的实施需要企业具备灵活的生产系统、准确的需求预测能力以及跨部门协作机制,其本质是通过优化资源配置实现生产系统的稳定性与柔性化,最终提升整体运营效率。

1.3 自动化理论

自动化理论 (Jidoka) 是精益生产中“带人字旁的自动化”。因此,它强调在生产过程中融入人的智慧,实现质量控制的自主化。该理论通过技术手段(如传感器、防错装置)实时检测异常,并赋予员工停止生产线的权力,以防止缺陷扩散。在精益生产中,自动化将质量控制从“事后检测”转变为“实时预防”,通过建立质量文化和赋予员工决策权,实现全员参与的质量保障体系。自动化技术不仅缩短了问题响应时间,还促进了持续改进文化的形成。此外,它将员工从重复性劳动中解放出来,使其专注于问题分析与流程优化,增强团队的创新能力。自动化与准时化 (JIT) 共同构成丰田生产方式的两大支柱,二者相辅相成,推动企业实现高效、高质量的生产目标。

2 ZG 科技公司新风机生产线现状分析

ZG 科技公司的新风机型号具有多样性,经调查研究 XF-500 型新风机为企业的重点产品。因此,论文以该产品作为研究对象,旨在提升企业整体的生产状态。在采集流水生产线数据时,分别用到了秒表测时法、误差界限法以及三倍标准差法,最终经过放宽得到各工序的作业时间^[2],如表 1 所示。

表 1 各工序标准作业时间测定

工序	作业内容	时间 (s)
工序 1	物料准备	604
工序 2	钣金切割	1038
工序 3	冲压成型	990
工序 4	精密组装	1866
工序 5	质量检测	1038
工序 6	打包入库	604
总计		6140

为深入剖析生产线平衡状况,论文借助生产线平衡节拍图(见图 1)和生产线平衡指标进行量化分析。

2.1 生产平衡节拍图

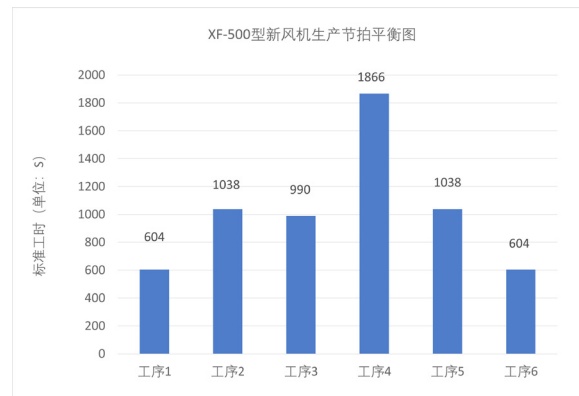


图 1 XF-500 型号新风机生产平衡节拍

由图 1 可知,工序 4 用时最长(1866 秒),成为瓶颈工序;工序 2、3、5 空闲率较高,存在资源浪费;工序 1、6 用时最短(约 10 分钟)。这些数据表明,生产线存在严重的时间分配不均和资源错配问题。

2.2 生产线平衡指标计算

①生产线平衡率 (LBR) :

$$LBR = \frac{\sum T_i}{CT \times N} \times 100\% \quad (1)$$

其中, $\sum T_i=6140s$; $CT=1866s$ (瓶颈工序时间); $N=6$ (工序数)。计算得:

$$LBR = \frac{6140}{1866 \times 6} \times 100\% \approx 54.8\% \quad (2)$$

②平衡损失率 (LBL) :

$$LBL = (1 - LBR) \times 100\% = 45.2\% \quad (3)$$

根据表 2 的平衡效果评判标准,该生产线平衡损失率处于“较差”等级,进一步验证了生产线优化的紧迫性。

表 2 平衡效果评判依据

生产线损失率 LBL	评判效果
$LBL \geq 40\%$	较差
$40\% \geq LBL \geq 30\%$	一般
$30\% \geq LBL \geq 20\%$	较好
$20\% \geq LBL \geq 10\%$	良好
$10\% \geq LBL$	优秀

结果显示,ZG 科技公司 XF-500 型号新风机生产线存在较高的平衡损失率。与标杆企业相比,存在很大的提升空间。

3 ZG 科技公司新风机生产线平衡优化方案设计

3.1 基于动素分析的瓶颈工序优化

针对瓶颈工序 4 (精密组装),采用动素分析法对动作要素进行重组。通过吉尔布雷斯 18 种动素分类(核心、辅助、无效),结合动作经济性原则^[3],将复杂工艺拆解为标准化动作单元并优化,使作业循环时间趋于稳定。本步骤旨在消除无效动作,提升核心动素效率。具体优化措施如表 3 所示。

表 3 瓶颈工序优化详情

动素分类	优化前	优化措施
核心动素	物料搬运、安装、拧紧等关键操作占比 60%	合并辅助动素，减少无效等待，释放核心动素的时间。
辅助动素	存在大量寻找、选择、预定位动作（如作业元素 15-18 寻找螺丝和工具）	优化工具摆放位置，采用模块化设计，减少寻找和选择时间。
无效动素	左手等待时间占比 40%（如作业元素 4-12 左手多次等待右手操作）	双手同时作业，减少单边等待；使用夹具替代人工持住，消除无效持住动作。
动作经济性	单手操作占比高，动作距离长（如作业元素 26-28 双手独立搬运工件）	重新设计操作台布局，缩短动作距离；采用同步操作流程，合并相似动作。

通过动素分析，瓶颈工序 4 的操作时间从 1866 秒降至 1112 秒，效率提升 40.4%，无效动素完全消除，实现了生产线平衡率的显著改善。

3.2 基于“5W1H-ECRS”方法的工艺流程优化

本策略以流程程序图为基础，建立从原材料到成品的全流程可视化分析框架，重点解决工序衔接不畅、物流路径冗余及资源错配等关键问题。

在 5W1H 技术提问^[4]（见表 4）阶段，聚焦于工序衔接、物流路径、资源配置三个维度，识别出典型浪费。随后，运用 ECRS 原则（见表 5）对工艺流程进行再造^[5]，将原本离散分布的工序整合为连续流单元，减少中间在制品积压。

表 4 5W1H 技术提问的应用

工序	主要提问	回答要点
工序 1	能否提前整理物料并优化搬运路径？	可按型号分类存储物料，优化路径并增加自动化设备，缩短搬运时间。
工序 2	为何需人工固定钢板？数控程序输入能否优化？	旧设备需人工操作；可建立程序模板库，合并输入与切割步骤。
工序 3	冲压区模具安装耗时的原因？能否预校准？	高精度要求导致耗时；采用模块化设计与预准备，合并安装与校准。
工序 4	为何需单独检查工具和清洁设备？紧固方式能否优化？	可在班后定期维护，取消单独检查；采用铆接/焊接替代螺栓拧紧。
工序 5	检测时间长的原因？能否简化流程？	检测项目多；结合 AI 预测模型，合并准备与检测步骤。
工序 6	叉车搬运效率如何提升？	建立智能仓库管理系统，优化布局，减少无效搬运。

表 5 ECRS 原则的应用

工序	ECRS 原则
工序 1	简化：取消人工分类，用预分类存储； 重排：优化搬运路线。
工序 2	合并：将程序输入与切割合并为自动调用模板； 简化：提前启动设备准备物料。
工序 3	合并：预安装模具与冲压成型； 简化：使用高精度传感器实时监控质量。
工序 4	取消：取消组装前工具检查与清洁； 简化：使用预布线束减少现场操作。
工序 5	合并：将检测准备与检测环节合并； 简化：基于历史数据优化检测项目。
工序 6	重排：优化仓库布局缩短路径； 简化：实时调度叉车减少等待。

通过上述措施，生产线的冗余流程被有效消除，生产线平衡率提升至 72%，各工序间衔接更加紧密。

3.3 基于和声遗传算法的车间布局优化

车间布局结合和声遗传算法的智能优化模型通过重新规划设备与工作站的相对位置，将切割、冲压、组装等核心工序整合在连续流动的制造单元内，显著缩短物料搬运距离，大大提高生产效率。此外，通过 Matlab 求解模型，能够直观地获得最小物流量成本，了解最优的车间布局。

3.3.1 和声遗传算法数学模型构建

以车间内物流费用作为最小目标函数^[6]，建立该车间的布局问题数学模型如下：

$$Min C = \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^M K_{ij} D_{ij} \quad (4)$$

其中， $Min C$ 为物流量的最小值， M 为区域的总数量， D_{ij} 为 i, j 区域间的搬运距离； K_{ij} 为 i, j 区域间的搬运次数^[7]。

构建生产车间布局规划数学模型需要根据实际布局添加相应约束条件，以保证优化后布局方案的可行性。论文基于车间现状给出以下约束条件：

① 车间范围约束：

$$x_i + x_0 + \frac{1}{2} S_i < W \quad (5)$$

$$y_i + y_0 + \frac{1}{2} L_i < H \quad (6)$$

式中， x_0 为区域距离布局范围即 x 轴方向的最小距离； y_0 为区域距离布局范围 y 轴方向的最小距离； W 为厂房总体布局在 x 轴方向的最大长度； H 为厂房总体布局在 y 轴方向的最大长度； S_i 为车间 i 在 x 轴方向上的总长度； L_i 为车间 i 在 y 轴方向上的总长度^[7]。

② 间距约束：

$$d_{ij} = |x_i - x_j| + |y_i - y_j| \quad (7)$$

$$\frac{1}{2} (S_i + S_j) + d_{xij} < x_i - x_j \quad (8)$$

$$\frac{1}{2} (L_i + L_j) + d_{yij} < y_i - y_j \quad (9)$$

式中， d_{ij} 为加工区域 i 到加工区域 j 的距离。 d_{xij} 为两区域间轴 x 方向的最小间距； d_{yij} 为两区域间轴 y 方向的最小间距^[7]。

3.3.2 和声遗传算法参数设置与 Matlab 求解

根据生产线实际情况，假设车间布局为矩形区域中心

坐标调整^[8]，并建立工作站坐标参数（见表 6）及搬运次数参数（见表 7）。

在利用 Matlab 求解过程中，通过设置和声记忆库大小为 30，和声记忆考虑率为 0.9，音调调整率 0.3，配合 0.1 的调整带宽，交叉率为 0.8、变异率为 0.1，种群大小为 50、迭代次数为 5000 次等关键参数，确保算法在全局搜索与局部优化间取得平衡。

然后，通过 Matlab 求解模型，得到优化后的最小物流量成本由原本的 8560 元降至 7574 元，并输出最小物流成本迭代过程（见图 2）以及最优车间布局方案（见图 3）。

表 6 工作站坐标参数说明

序号	工作站	坐标 (x,y)
1	原料区	(10, 32.5)
2	切割区	(35, 32.5)
3	冲压区	(60, 32.5)
4	半成品区	(85, 32.5)
5	组装区	(10, 10)
6	检测区	(45, 10)
7	打包区	(75, 10)
8	仓库	(100, 10)

表 7 搬运次数参数说明

序号	路径	搬运次数 (次/天)
1	原料区→切割区	50
2	切割区→冲压区	45
3	冲压区→半成品区	40
4	半成品区→组装区	35
5	组装区→检测区	30
6	检测区→打包区	25
7	打包区→仓库	20

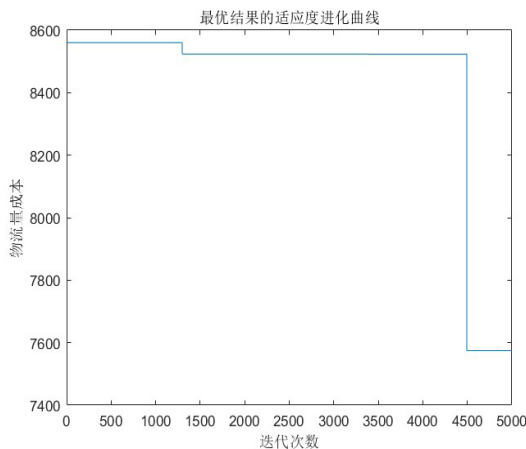


图 2 最小物流量成本

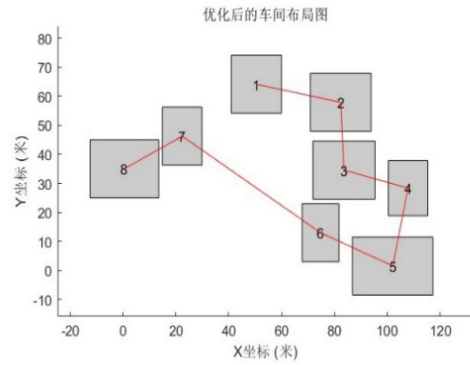


图 3 优化后的车间布局

优化结果显示，最小物流量成本在迭代至 4000 多次后趋于稳定，验证了算法的收敛性。该布局方案通过减少物料搬运路径和交叉流动，实现了生产流程的集约化与高效化，提升了空间利用率和生产效率。

4 实施效果

通过系统实施精益优化方案，ZG 科技公司新风机生产线实现全流程效能突破，为装备制造行业的流程改善提供了可复制的实践范式。优化后的生产系统在效率、质量、成本三个维度均取得显著提升：

①效率提升。生产线平衡率由 54.8% 提升至 72%，生产节拍缩短 45%，瓶颈工序作业时间减少 40.4%。这表明各工序间的时间分配更加均衡，资源利用率显著提高。

②质量改善。标准化作业与智能防错装置协同应用，质量缺陷发生率下降 30%。流程的规范化与智能化有效降低了人为失误的影响。

③成本降低。物流量成本由原来的 8560 元减少至 7574 元，在制品库存降低 50%，空间利用率提高 25%。车间布局优化与物流体系重构是成本下降的主要驱动力。

该实践为装备制造行业提供了可复制的流程改善模型，验证了精益管理理论与生产工艺创新融合的可行性，为同类企业在非连续型生产场景中应用精益工具提供了重要参考。

5 结语

本研究通过多维度优化实现了生产线平衡率提升，验证了精益理论在装备制造领域的适用性。研究成果不仅为 ZG 公司科技构建了可复制的流程改善模型，更拓展了精益生产理论在非连续型生产场景的应用边界。然而，本研究仍存在一定局限性：①未充分考虑多品种混线生产的动态性；②智能化技术融合深度有待加强。未来可进一步探索数字孪生技术与精益方法的集成应用，构建动态自适应的生产优化体系，为制造业高质量发展提供更具前瞻性的解决方案。

参考文献：

[1] 陈琦,黄莺,陈志昊,等.基于精益生产理论的电机生产线优化[J].机械工程与自动化,2023(5):136-137.
 [2] 赵凯莉.基于标准工时的汽车半轴生产线优化研究[J].物流科

- 技,2018,41(12):1-4.
- [3] Burawat P. productivity improvement of highway engineering industry by implementation of lean six sigma, TPM, ECRS, and 5S: a case study of AAA CO. LTD[J]. Humanities & Social Sciences Reviews,2019,7(5):83-92.
- [4] 郜业见,丰大顺.5W1H方法在铸造车间工程设计中的应用[J].工程建设与设计,2017(13):157-159.
- [5] 高贺云,任成渝,王霄.基于ECRS原则的生产系统流程优化[J].计算机产品与流通,2017(10):110.
- [6] 刘洋,黄勇,武玉柱,等.基于遗传算法的机械加工车间的布局优化设计与系统开发[J].机械工程师,2024(5):13-17.
- [7] 马佳雨,罗从瑗,刘颖,等.基于和声遗传算法的M印刷厂生产线布局优化[J].价值工程,2024,43(17):44-46.
- [8] 司宗刚,杨亚琼.基于遗传算法的装配车间工艺布局优化研究[J].汽车工艺与材料,2024(11):58-62.
- 作者简介: 杨英,女,中国吉林人,博士,教授,从事工程管理研究。