

DOI: 10.12326/j.2096-9694.2026020

基于整数规划的板木桌类家具生产线平衡优化

郑珂铭¹, 张乾辰¹, 康华², 熊先青¹

(1. 南京林业大学家居与工业设计学院, 江苏南京 210037; 2. 玛格家居股份有限公司, 重庆 401346)



摘要: 板木家具生产线的运行效率、资源利用率及生产成本直接关乎企业的市场竞争力, 是木家具制造的重要环节。针对M企业板木桌类家具生产线存在的工序分配失衡、瓶颈工序(生产线中作业时间最长、制约整条生产线生产速度的工序)突出等问题, 采用0-1整数规划方法, 分别针对固定生产节拍时间(第I类)与固定工作站数量(第II类)两类生产线平衡问题构建量化模型并求解, 以明确该生产线的优化潜力。并基于FlexSim仿真平台对优化结果进行模拟验证, 对比分析优化前后的方案。结果表明: 针对第I类平衡问题, 模型求解结果将生产线的工序数量由15道精简至8道, 平衡率提升至87.73%的良好水平, 各工序平均加工率提高18.62%; 针对第II类平衡问题, 模型求解结果使生产线的生产节拍时间从53.22 min降至30.01 min, 生产线的平衡率同样达到良好水平, 各工序平均加工率提升约12%。虽然两类优化路径视角不同, 但均能有效提升生产线的平衡水平, 研究为板木桌类家具生产线的精益化升级与智能化转型提供可行的参考路径。

关键词: 板木家具; 整数规划; 流程优化; 生产线平衡率; 工序数量; 生产节拍时间; 加工率

中图分类号: TS664

文献标识码: A

文章编号: 2096-9694 (2026) 03-0086-08

Balanced Optimization of Production Line for Panelized Wood Table Furniture Based on Integer Programming

ZHENG Keming¹, ZHANG Qianchen¹, KANG Hua², XIONG Xianqing¹

(1. College of Furnishings and Industrial Design, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, Jiangsu, China;

2. Macio Casa Furnishing Co., Ltd, Chongqing 401346, China)

Abstract: The operational efficiency, resource utilization rate and production cost of panelized wood furniture production lines are directly related to the market competitiveness of enterprises, constituting a critical link in wooden furniture manufacturing. Aiming at addressing the problems of unbalanced process allocation and prominent bottleneck processes existing in the panelized wood table furniture production line of Enterprise M, this study adopted the 0-1 integer programming method to construct quantitative models and solved them for two types of assembly line balancing problems, namely fixed production tempo (type I balancing problem) and fixed number of workstations (type II balancing problem), so as to identify the optimization potential of the production line. Subsequently, simulation verification of the optimization results was carried out based on the FlexSim simulation platform, and a

收稿日期: 2026-02-02; 修改日期: 2026-04-13

基金项目: “十四五”国家重点研发计划项目“基于数字化协同的林木产品智能制造关键技术”(2023YFD2201500)。

作者简介: 郑珂铭(2003—), 女, 硕士研究生。Email: 3114387857@qq.com

通讯作者: 熊先青, 男, 教授。Email: 96xiong0450@sina.com

comparative analysis was performed between the pre- and post-optimization schemes. The results showed that for the Type I balance problem, the model reduced the workstations from 15 to 8, improved the balance rate of the production line to a good level of 87.73%, and increased the average processing rate of each process by 18.62%. For the Type II balance problem, the model reduced the Takt time from 53.22 min to 30.01 min, while also achieving a good level of balancing efficiency and an approximate 12% rise in average processing rate. Although the two optimization paths differed in perspectives, both could effectively improve the assembly line balancing level. This study provided a feasible reference for the lean upgrading and intelligent transformation of panelized wood furniture production lines.

Key words: panelized wood furniture; integer programming; process optimization; line balance rate; number of workstations; takt time; processing rate

板木家具是指框架及主要部件采用实木、其余部件采用人造板加工而成的家具，兼具造型丰富、装配便捷等优势，高度契合国内消费市场的需求，已成为我国家具行业的主流发展方向^[1]。当前，随着智能制造理念在家具制造业的渗透及大规模定制生产模式的推广，行业竞争日趋激烈^[2-3]。在精益生产理念指导下，通过生产线优化对企业成本控制、经济效益和可持续竞争力提升具有重要作用^[4]。对生产线开展平衡优化，已成为企业实现提质增效与可持续发展的关键路径。生产线平衡问题是在满足生产工序优先与生产节拍时间约束下，合理分配作业要素至工位，实现降低工位数、缩短生产节拍时间、提升平衡率等目标。关于此问题，学术界形成启发式与元启发式算法和精确算法两类优化体系^[5]。

启发式与元启发式算法以可控的求解精度损失换取高效计算能力，更适用于大规模、动态实时场景，但其解的质量缺乏理论保证，容易陷入局部最优，且参数调优依赖经验，跨场景泛化能力有限^[6]。

精确算法以计算效率为代价保障全局最优，整数规划作为其代表，在处理离散型资源分配与工序调度问题中优势显著。其中，0-1整数规划以二元变量精确表征离散决策，与生产线优化中广泛存在的启停、切换及顺序依赖等逻辑高度适配；还能充分考虑所有变量和约束，找到一个目标函数最优的整体方案，不会陷入局部最优的困境，在量化改善生产线平衡现状和提高整个生产线系统平衡率方面具有重要作用^[7]。蒋坤伶^[8]采用整数规划构建多维度优化模型，协调汽车生产线布

局中的空间、物流与产能适配等问题，构建的模型可以提升空间利用率，降低物流成本，使产能与需求达成动态平衡。刘菲等^[9]通过融合工业工程理论与0-1整数规划，提升冷柜总装生产线的平衡率与产能。上述研究表明整数规划在生产线平衡优化中的有效性与实用性。

在家具制造领域，现有关于生产线平衡优化的研究多聚焦于单一材料产线（如实木家具、板式家具）^[10-12]，而对于融合实木与板式家具加工的板木家具产线的平衡优化研究暂未见报道。板木家具产线因加工工艺复杂和流程烦琐，调度协同难度相对较高。M企业作为国内定制家居行业的领先品牌，产品涵盖衣柜、橱柜、桌椅及木门等多个品类。其中定制衣柜为核心品类，板木桌类家具在订单中占比较小，但因其风格多样、结构复杂、异形部件较多，需调用企业更多的生产设备，工艺难度较高。鉴于此，研究以M企业的板木桌类家具生产线为研究对象，针对该产线生产过程中生产平衡率以及负荷率较低等问题，采用0-1整数规划方法进行建模与求解，以获取该产线平衡问题的理论最优解，最后借助FlexSim仿真软件^[13]对所提优化方案进行验证，旨在提升该产线平衡率与负荷率，并为同类板木桌类家具生产线的精益化改善提供参考路径。

1 试验样本与方法

1.1 试验样本

通过实地调研与数据统计，M企业板木桌类家具产线共配置28类加工设备。为准确掌握设备实际利用情况，对5个工艺流程较复杂的桌类订单

进行跟踪分析。在跟踪周期内,有9类关键设备平均利用率低于50%,产能配置与生产计划明显不匹配。同时梳理板木桌类家具的加工工艺流程,除板式家具的开料、封边等加工工艺以及实木家具的开榫、打磨等加工工艺外,还包括人造板与实木拼接、涂胶压合等工艺流程。需要说明的是,研究仅针对板木桌类家具的白坯生产环节进行优化研究,不涉及涂饰工序。

研究中板木桌类家具的工艺包括:配料、拼接、涂胶压合、封边、镂铣成型、榫槽加工、打磨砂光、实木试装、除尘检查和打包入库,其生产过程具体可归纳为15道主要生产工序,进一步细分得到33项具体作业元素。对各作业元素进行系统性分析与针对性优化,实现整条生产线的流程平衡与效率提升。

1.2 试验方法

研究针对M企业板木桌类家具生产线,构建基于整数规划的生产线平衡优化模型,并借助FlexSim仿真平台完成方案验证与效果评估。

依据生产线平衡理论,简单装配线平衡问题分为3类。第I类问题以固定生产节拍为约束,最小化工作站数量为目标;第II类问题则固定工作站数量,以最小化生产节拍为目标;第III类问题则处理多目标或动态场景。3类均需满足作业顺序约束,其差异在于约束与目标的优先级^[14]。结合板木桌类家具产线现状,应重点减少工序数量或降低生产节拍,以优化瓶颈工序,提升平衡率。因此研究针对第I类和第II类平衡问题展开分析。

1.2.1 各作业元素标准时间测算 采用秒表时间研究法对各作业元素的作业时间进行测量。根据GE公司基于作业周期时间的观测次数标准^[15],结合该产线作业周期较长的实际情况,确定各工序观测次数为8次。

测量完成后,采用三倍标准差法对8次测量数据进行异常值识别。先计算数据的平均值与方差,若测定数据在平均值上下三倍方差范围内则为正常值,否则为异常值,将其剔除。

期间还需同步评估操作者的工作速度与标准水平的差异,继而通过计算观测平均时间与评定系数的乘积得出“正常时间”,最后在此基础上增

加涵盖疲劳、生理需求及不可避免延误的“宽放率”,从而得到最终的标准时间,如式(1)所示。

$$\text{标准时间} = \text{测定时间} \times \text{评定系数} \times (1 + \text{宽放率}) \quad (1)$$

式中:评定系数以1.0为基准,根据操作者的熟练程度进行浮动调整。根据平准化法(西屋法)^[15],从熟练程度、努力程度、工作环境和一致性4个维度进行量化评定。经现场观测,该产线操作者的综合评定结果为:熟练程度C2(+0.03)、努力程度C1(+0.05)、工作环境D(0)、一致性E(-0.02),四项合计+0.06,故评定系数为1.06。宽放率则依据M企业现行标准,在5%生理宽放的基础上,结合疲劳宽放与管理宽放,综合确定为10%。

1.2.2 企业平衡效率计算 企业平衡效率主要由3项指标进行综合衡量。1)生产线平衡率(line balancing rate, LBR)表征各工位作业时间的均衡程度,是衡量负荷分配合理性的核心指标;2)平衡损失率(d)衡量因工位间作业时间差异导致的时间损失占比, $d \leq 10\%$ 为优秀,10%~15%为良好, $\geq 15\%$ 较差^[16],即值越低表明产线时间利用越充分;3)平滑性指数(smoothness index, SI)量化各工位作业时间相对于瓶颈工序时间的离散程度,用以评估产线运行的平稳性。

具体计算方法如式(2)~(4)所示。

$$\text{LBR} = \frac{\sum_{i=1}^n T_i}{\text{CT} \times n} \quad (2)$$

$$d = 1 - \text{LBR} \quad (3)$$

$$\text{SI} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\text{CT} - T_i)^2}{n}} \quad (4)$$

式中: T_i 为第*i*个工位的作业标准时间,min; n 为生产线工序总数;CT为瓶颈工序时间,min,与生产节拍*C*取值相同。

生产线平衡率是衡量生产线各工序作业时间均衡程度的关键指标,综合反映生产线的整体效率与资源利用水平。该指标通过量化各工位实际作业时间与瓶颈工序(生产线中作业时间最长、制约整条生产线生产速度的工序,其节拍直接决定生产系统的最大生产能力^[17])时间的匹配程度,评估生产线运行的协调性与连续性。生产线平衡率 $\geq 90\%$ 为优秀,80%~90%为良好, $\leq 80\%$ 为较差^[18];

平衡率越高，各工位之间的作业负荷越均衡，生产线的损失时间越少，整体生产效率也越高^[19]。

1.2.3 基于0-1整数规划的优化方法 为方便对生产线进行建模以及后续算法求解，先对模型中所需的相关符号和变量进行定义，详见表1。

表1 模型符号及定义

Tab.1 Symbols and definitions of model

符号	定义	符号	定义
C	生产节拍	t_i	第 <i>i</i> 个作业元素的作业时间, $i=1, 2, 3, \dots, m$
N	工序数量	$\text{Tasks}=\{1, 2, \dots, m\}$	作业元素的集合
n	工序编号, $n=1, 2, 3, \dots, N$	Pred	作业元素优先关系的集合
m	作业元素数量	$\text{Pred}=\{(i, j)\}$	作业元素 <i>i</i> 是 <i>j</i> 的上一道工序
i, j	作业元素编号		

在模型中引入 X_{in} 与 T_n 两种变量。其中 X_{in} 为0-1变量，具体含义见式(5)； T_n 为指示变量，具体含义见式(6)。

$$X_{in} = \begin{cases} 1 & \text{表示工序}n\text{有作业元素}i\text{分入} \\ 0 & \text{表示工序}n\text{没有作业元素}i\text{分入} \end{cases} \quad (5)$$

$$T_n = \begin{cases} 1 & \text{表示第}n\text{个工序已被占用} \\ 0 & \text{表示第}n\text{个工序未被占用} \end{cases} \quad (6)$$

在此基础上建立生产线平衡问题的数学模型，该模型应满足以下约束条件：

$$\sum_{n=1}^N X_{in} = 1; (i = 1, 2, 3, \dots, m) \quad (7)$$

式(7)保证每个工序中都包含不少于1的作业元素，所有作业元素都需分配进工序中。

$$\sum_{n=1}^N N(X_{jn} - X_{in}) \geq 0; (i, j \in \text{Pred}) \quad (8)$$

式(8)保证当作业元素*j*被分入工序*n*时，其之前的作业元素*i*已被分入工序*n*之前的工序之中。

$$\sum_{i=1}^m X_{in} t_i \leq C; (n = 1, 2, 3, \dots, N) \quad (9)$$

式(9)保证每个工序上作业元素的作业时间之和小于瓶颈工序时间。

$$\sum_{i=1}^m X_{in} \leq m T_n; (n = 1, 2, 3, \dots, N) \quad (10)$$

式(10)保证当每个工序上存在作业元素时，其数值定义为1，不存在作业元素时，其数值定义为0。按照上述分类方法建立生产线第I类和第II类平衡问题0-1整数规划模型。生产线第I类平衡问题要求在已知生产线生产节拍的情况下尽可能减少工序数量，需满足约束条件式(7)~(10)，模型目标函数如式(11)所示。

$$\text{Min} z = \sum_{n=1}^N T_n \quad (11)$$

式中： z 为目标函数的通用符号，最小化目标值。

生产线第II类平衡问题要求在已知生产线工序数量的情况下尽可能降低生产节拍，需满足约束条件式(7)~(9)，模型目标函数见式(12)。

$$\text{Min} z = C \quad (12)$$

LINGO是一款交互式线性与通用优化求解器，可快速构建并高效求解线性、非线性、整数等各类优化模型^[20]。使用LINGO软件对模型进行求解。

对生产线各作业元素的顺序关系进行集合：

$$\text{Pred} = \{ (1, 2) (2, 3) (3, 4) (4, 5) (5, 6) (6, 7) (7, 8) (8, 9) (9, 10) (10, 11) (12, 13) (13, 14) (14, 15) (14, 17) (15, 16) (17, 18) (16, 19) (18, 19) (19, 20) (20, 21) (21, 22) (22, 23) (24, 25) (25, 26) (25, 29) (26, 27) (27, 28) (28, 30) (29, 30) (30, 31) (11, 32) (23, 32) (31, 32) (32, 33) \}$$

设置好程序后分别对第I类和第II类平衡问题进行求解。

1.2.4 仿真模拟方法 为验证所提优化方法的有效性，基于FlexSim平台搭建M企业板木桌类家具生产线的仿真模型，如图1所示。

依据实际工艺流程，设置3个发生器、15个处理器、2个暂存区、3个运输工具、1个吸收器；依据实测数据设定各工序的标准时间与设备参数。完成优化前生产线模型的搭建并运行，通过FlexSim采集各工位的实时运行数据，经系统整理与汇总，获取各工序的加工率与空闲率，再根据0-1整数规划模型的优化结果，分别构建第I类与第II类平衡问题优化后的仿真场景，并运行获取的加工率数据，进而对优化前、第I类优化后及第II类优化后三组仿真结果进行对比分析。

2 结果与分析

2.1 各元素标准时间

根据前述材料与方法，研究首先对M企业板木桌类家具生产线优化前各作业元素的作业时间进行实地测算，得出各作业元素标准时间，以支持后续优化分析。具体测算结果列于表2。

依据表2中的测算数据，结合式（2）~（4），计算得到该生产线的平衡率为46.79%，平衡损失率为53.21%，平滑性指数为31.37。

由表2可知，该产线的瓶颈工序为面板贴薄木。对比发现，M企业板木桌类家具生产线平衡率远低于良好水平（≥80%），瓶颈工序突出；平滑性指数处于较高水平，进一步表明各工序作业时间差异悬殊、负荷分布不均。综上，该生产线平衡问题突出，亟需开展系统性平衡优化。

2.2 0-1 整数规划优化

2.2.1 生产线第Ⅰ类平衡问题的0-1 整数规划模型求解 生产线第Ⅰ类平衡问题是固定生产节拍，打乱作业元素并按时间重新规划各工序，减少生产线工序数量并降低各工序之间的时间差，从而减少等待时间，降低生产成本。运行LINGO软件得到针对生产线第Ⅰ类平衡问题的优化结果，显示优化后工序总数由15道精简至8道，各作业元素的分配方案及工序标准时间，列于表3。根据式（2）~（4）计算对比优化前后生产线的平衡数据，结果列于表4。

表3 生产线第Ⅰ类平衡问题求解后的作业元素标准时间

Tab.3 Standard time of work elements after solving the type I balancing problem of production line

工序编号	作业元素编号	作业元素	标准时间/min
1	1,2,3,4,5,6	辊涂,面板拼接,铆钉加固,设备调试,面板镂铣,设备清理	52.76
2	12,24,25,26	长度切削,板材开料,板材封边,设备调试	44.85
3	13,14,15,16,17,18	宽度切削,厚度切削,木材铣型,木材开榫,木材打眼,木材开槽	42.79
4	19,20,21,22	实木部件砂光,实木部件修型,实木部件打磨,实木部件涂胶	37.99
5	7,8,9	正面贴薄木,反面贴薄木,四周贴薄木	53.22
6	10,11,23,29	面板开工艺缝,面板打磨,实木部件组装,板材开槽	43.10
7	27,28,30	板材铣型,设备清理,板材钻孔	51.96
8	31,32,33	板材打磨,除尘检查,包装入库	46.89
总计			373.56

由表2与表3可知，优化后（37.99~53.22 min）各工序间的时间差异较优化前（8.01~53.22 min）减小。由表4可知，针对生产线第Ⅰ类平衡问题，优化后生产线平衡率大幅提升至87.73%，平滑性

表4 生产线第Ⅰ类平衡问题优化前后数据对比

Tab.4 Comparison of type I balancing problem of the production line before and after optimization

指标	优化前	优化后
生产线平衡率	46.79%	87.73%
生产线损失率	53.21%	12.27%
平滑性指数	31.37	8.33

指数降低23.04，各工序负荷趋于均衡。

2.2.2 生产线第Ⅱ类平衡问题的0-1 整数规划模型求解 生产线第Ⅱ类平衡问题是在不改变工序数量的情况下，尽量降低节拍时间。运行LINGO程序后，得出针对生产线第Ⅱ类平衡问题的优化结果，优化后的瓶颈工序由面板贴薄木变为面板镂铣，生产节拍由53.22 min降至30.01 min。整理求解数据得到优化后作业元素的标准时间，具体见表5。根据式（2）~（4）计算对比生产线平衡相关数据，结果列于表6。

表5 生产线第Ⅱ类平衡问题求解后作业元素标准时间

Tab.5 Standard time of work elements after solving the type II balancing problem of the production line

工序编号	作业元素编号	作业元素	标准时间/min
1	24	板材开料	11.57
2	1,2,25,26	辊涂,面板拼接,板材封边,设备调试	26.39
3	3,4	铆钉加固,设备调试	11.41
4	5	面板镂铣	30.01
5	6,7	设备清理,正面贴薄木	26.37
6	12,29	长度切削,板材开槽	28.10
7	13,14,17,18	宽度切削,厚度切削,木材打眼,木材开槽	29.94
8	8,15	反面贴薄木,木材铣型	23.35
9	9,16,19,20	四周贴薄木,木材开榫,实木部件砂光,实木部件修型	28.74
10	21,22	实木部件打磨,实木部件涂胶	26.92
11	23,27,28	实木部件组装,板材铣型,设备清理	29.82
12	30	板材钻孔	27.52
13	10,31	面板开工艺缝,板材打磨	25.21
14	11,32	面板打磨,除尘检查	29.43
15	33	包装入库	18.78
总计			373.56

由表2和表5可知，工序数量保持不变，优化后（11.41~30.01 min）比优化前（8.01~53.22 min）各工序标准时间的差异进一步减小。表6显示，优化后生产线平衡率提升，平滑性指数降至7.86，整体优化效果明显。

表 6 生产线第Ⅱ类平衡问题优化前后生产线数据对比
Tab.6 Comparison of type II balancing problem of the production line before and after optimization

指标	优化前	优化后
生产线平衡率	46.79%	82.97%
生产线损失率	53.21%	17.03%
平滑性指数	31.37	7.86

2.3 FlexSim 仿真验证

2.3.1 生产线第Ⅰ类平衡问题的仿真验证 仿真结束后收集实时动态数据，表 7 为生产线第Ⅰ类平衡问题优化前后各工序的加工率与空闲率。

表 7 生产线第Ⅰ类平衡问题优化前后生产情况对比
Tab.7 Comparison of production situation of type I balancing problem of the production line before and after optimization

优化前			优化后		
工序编号	标准时间/min	加工率/%	工序编号	标准时间/min	加工率/%
1	10.94	20.6	1	52.76	99.1
2	41.82	78.5	2	44.85	83.0
3	53.22	98.4	3	42.79	78.2
4	9.39	17.3	4	37.99	68.6
5	17.14	31.2	5	53.22	94.7
6	38.84	97.9	6	43.10	75.6
7	20.86	53.3	7	51.96	89.6
8	35.36	89.5	8	46.89	79.5
9	8.01	20.1			
10	20.08	52.1			
11	32.30	83.0			
12	38.71	98.4			
13	15.82	40.1			
14	12.29	96.9			
15	18.78	96.5			

表 7 显示，优化后仅有一个工序的加工率为 68.6%，其余所有工序的均提升至 75% 以上。经计算整体平均加工率从 64.92% 提升至 83.54%，提升 18.62%，总的来看具有优化效果。

2.3.2 第Ⅱ类平衡问题的仿真验证 整理汇总生产线第Ⅱ类平衡问题优化前后各工序的仿真模拟加工率与空闲率，具体列于表 8。

表 8 显示，优化后各工序加工率分布区域均衡，大部分工序处于 65%~95% 的负荷区间，生产线运行稳定性提升。整体平均加工率从 64.92% 提升至 76.91%，提升约 12%，实现生产资源利用率与整体生产效率的双重提升。

表 8 生产线第Ⅱ类平衡问题优化前后各工序生产情况
Tab.8 Statistics on the production situation of each process of type II line balancing problem before and after optimization

优化前			优化后		
工序编号	标准时间/min	加工率/%	工序编号	标准时间/min	加工率/%
1	10.94	20.6	1	11.57	38.6
2	41.82	78.5	2	26.39	87.6
3	53.22	98.4	3	11.41	37.8
4	9.39	17.3	4	30.01	98.5
5	17.14	31.2	5	26.37	85.8
6	38.84	97.9	6	28.10	90.7
7	20.86	53.3	7	29.94	66.8
8	35.36	89.5	8	23.35	74.3
9	8.01	20.1	9	28.74	90.6
10	20.08	52.1	10	26.92	84.3
11	32.3	83.0	11	29.82	92.4
12	38.71	98.4	12	27.52	84.5
13	15.82	40.1	13	25.21	76.8
14	12.29	96.9	14	29.43	88.8
15	18.78	96.5	15	18.78	56.2

3 结语

1) 研究构建整数规划全局优化+FlexSim 仿真验证的分层递进优化体系，以 M 企业板木桌类家具生产线为对象，开展从问题诊断、方案优化到效果验证的全流程实证分析。针对同一生产线两类平衡问题进行整数规划求解和仿真验证，第Ⅰ类平衡优化将原有的 15 道工序精简至 8 道，缩小工序作业时间差异，生产线平衡率提升至 87.73%，达到 80%~90% 的行业良好标准；工序平均加工率从 64.92% 提升至 83.54%，减少设备空闲时间。

2) 第Ⅱ类平衡优化将生产节拍时间由 53.22 min 降至 30.01min，平衡率提升至 82.97%。虽未达到行业优秀标准，但其平滑性指数低于第Ⅰ类方案，表明优化后生产线运行更平稳，工位作业负荷差异减小、等待时间变短，有利于降低生产成本。

3) FlexSim 仿真结果表明，优化后生产线工序加工率普遍提高、空闲率下降，验证所提优化模型的科学性与工程实用性。两类方案的实际选择需紧密结合市场环境、生产条件及企业发展目标，实现优化效果与实际需求的精准匹配。如小

批量柔性生产时，应选择第Ⅰ类精简工位方案，以降低固定投入、提升生存能力；大规模标准化生产时，应选择第Ⅱ类缩短节拍方案，以释放产能、提升营收与市场响应速度。

为方便模型构建与求解，研究将板木桌类家具生产线标准时间设为固定值，假设人员具备通用作业能力、设备稳定无故障，未考虑作业时间随机波动、人员技能差异、工位定员、设备切换及预防性维护等约束。上述简化处理是在保证模型可解性的前提下，将研究焦点集中于工序分配与平衡优化的核心问题，避免次要因素对建模框架的干扰，与实际生产存在一定差异。后续将引入更多实际约束进一步完善模型，为板木桌类家具生产线的升级与转型提供参考路径。

参考文献：

- [1] 吴智慧. 中国板式家具产业的升级与可持续发展[J]. 家具与室内装饰, 2011, 18(10): 9-11.
WU Z H. Upgrade and sustainable development of Chinese panel furniture industry[J]. Furniture & Interior Design, 2011, 18(10): 9-11.
- [2] 朱剑刚, 王旭. 木质家具智能制造赋能技术及发展路径分析[J]. 林业工程学报, 2021, 6(6): 177-183.
ZHU J G, WANG X. Research on enabling technologies and development path of intelligent manufacturing of wooden furniture[J]. Journal of Forestry Engineering, 2021, 6(6): 177-183.
- [3] 李晓莉, 符思捷, 熊先青, 等. 定制家具标准化研究与应用现状[J]. 世界林业研究, 2025, 38(4): 55-60.
LI X L, FU S J, XIONG X Q, et al. Research and application of customized furniture standardization[J]. World Forestry Research, 2025, 38(4): 55-60.
- [4] 董俊泽. 基于精益生产理论生产线优化对工业企业产能的影响研究[J]. 现代工业经济和信息化, 2025, 15(9): 60-62.
DONG J Z. Impact of production line optimization on industrial enterprise capacity based on lean production theory[J]. Modern Industrial Economy and Informationization, 2025, 15(9): 60-62.
- [5] SIVASANKARAN P, SHAHABUDEEN P. Literature review of assembly line balancing problems[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2014, 73(9): 1665-1694.
- [6] EL MACHOUTI S, HLYAL M, BABAY A, et al. Analysis of balancing solutions for simple assembly lines[J]. Journal of Industrial Engineering and Management, 2024, 17(3): 828.
- [7] 汤炜欢. 0-1 整数规划的介绍及其应用[J]. 经贸实践, 2016(21): 247.
- [8] 蒋坤伶. 整数规划驱动的汽车生产线设备布局与效率优化[J]. 汽车电器, 2026(2): 181-183.
JIANG K L. Integer programming-driven layout and efficiency optimization of automotive production line equipment[J]. Auto Electric Parts, 2026(2): 181-183.
- [9] 刘菲, 郑参, 刘正, 等. 基于 IE 及整数规划理论的生产线平衡研究[J]. 现代制造工程, 2021(6): 101-115.
LIU F, ZHENG C, LIU Z, et al. Research of production line balance based on IE and integer programming theory[J]. Modern Manufacturing Engineering, 2021(6): 101-115.
- [10] 黄尚伟, 李荣荣. 基于样本优化遗传算法的板式家具矩形零件排样技术[J]. 林业工程学报, 2026, 11(1): 189-196.
HUANG S W, LI R R. Layout optimization of rectangular parts for panel furniture using a population-based genetic algorithm[J]. Journal of Forestry Engineering, 2026, 11(1): 189-196.
- [11] 王媛, 陶涛, 张岩松, 等. 价值流分析在板式定制家具生产线优化中的应用[J]. 家具与室内装饰, 2024, 31(12): 53-58.
WANG Y, TAO T, ZHANG Y S, et al. Optimizing panel custom furniture production line based on value stream analysis[J]. Furniture & Interior Design, 2024, 31(12): 53-58.
- [12] 熊先青, 杨路洁, 马清如, 等. 实木家具异形零部件生产线平衡优化研究[J]. 木材科学与技术, 2023, 37(6): 20-27.
XIONG X Q, YANG L J, MA Q R, et al. Balance optimization of special part production line in solid wood furniture manufacture[J]. Chinese Journal of Wood Science and Technology, 2023, 37(6): 20-27.
- [13] 张建安. FlexSim 仿真技术在工艺布局中的运用与实践[J]. 微特电机, 2025, 53(3): 87-89.
ZHANG J A. Application and practice of flexsim simulation technology in process layout[J]. Small & Special Electrical Machines, 2025, 53(3): 87-89.
- [14] İLKER BAYBARS. A survey of exact algorithms for the simple assembly line balancing problem[J]. Management Science, 1986, 32(8): 909-932.
- [15] 易树平, 郭伏. 基础工业工程[M]. 2 版. 北京: 机械工业出版社, 2014.
- [16] 艾笑宇. A 公司光伏组件生产线平衡优化研究[D]. 吉林: 东北电力大学, 2025.
- [17] 石鹏宇. DS 公司动力电池产品总装生产线平衡优化研究[D]. 淄博: 山东理工大学, 2025.
- [18] 王辉. S 企业实木门扇生产线优化设计[D]. 长沙: 中南林业科技大学, 2023.
- [19] 叶晓素, 蔡勇. 精益生产方式下生产线平衡的研究[J]. 机电工程技术, 2009, 38(11): 58-59, 94.
YE X S, CAI Y. The research of the line balancing under the lean production[J]. Mechanical & Electrical Engineering Technology, 2009, 38(11): 58-59, 94.
- [20] 谢金星, 薛毅. 优化建模与 LINDO/LINGO 软件[M]. 北京: 清华大学出版社, 2005: 1-19.

(本文编校 向琴)

广告索引

广 1: 杭州太克干燥设备有限公司

广 2: 北京欧立华科技发展有限公司

广 3: 苏州苏福马机械有限公司

封三: 2026 大家居创新趋势研究报告

封底: 第五届中国木材科学与技术
学术大会