

基于 Plant Simulation 的钣金生产线仿真与优化

彭 杰¹, 叶 霞¹, 潘艳飞², 李仲树²

(1. 江苏理工学院 机械工程学院, 江苏 常州 213001; 2. 江苏长江智能制造研究院有限责任公司, 江苏 常州 213164)

摘要: 针对江苏长江智能制造研究院有限责任公司钣金生产线设备平均利用率较低和产能不足的问题, 提出了基于 Plant Simulation 的生产线优化方案。首先, 根据工艺路线建立了生产线数字化模型, 运行仿真实验得到了生产线运行数据; 其次, 运用解释结构模型法, 确定了影响生产线高效运行的深层因素为缓存区的设置问题; 最后, 利用遗传算法, 通过仿真实验得到了缓存区数量与容量的配置, 再次优化生产线并进行了验证。结果表明, 经过优化的钣金生产线的设备平均利用率提高了 24%, 每小时产量从 55 件提升至 127 件, 提高了 130%, 为同类型生产线的优化提供了参考。

关键词: 生产线; Plant Simulation; 解释结构模型法; 遗传算法; 缓存区

DOI: 10.13330/j.issn.1000-3940.2025.06.034

中图分类号: TH181

文献标志码: A

文章编号: 1000-3940 (2025) 06-0277-08

Simulation and optimization on sheet metal production line based on Plant Simulation

Peng Jie¹, Ye Xia¹, Pan Yanfei², Li Zhongshu²

(1. School of Mechanical Engineering, Jiangsu University of Technology, Changzhou 213001, China;

2. Jiangsu Changjiang Intelligent Manufacturing Research Institute Co., Ltd., Changzhou 213164, China)

Abstract: For the problems of low average utilization rate of equipment and insufficient production capacity for a company metal sheet production line, a production line optimization scheme based on Plant Simulation was proposed. Firstly, the digital model of the production line was established according to the process route, and the operation data of the production line was obtained by running simulation experiments. Then, using the interpretative structural modeling method, it was determined that the underlying factor affecting the high-efficient operation of the production line was the setting of buffer area. Finally, through the genetic algorithm, the configuration of the number and capacity for buffer areas was obtained by simulation experiments, and the production line was optimized and verified again. The results show that the average utilization rate of equipment for the optimized sheet metal production line increases by 24%, and the hourly output increases from 55 to 127, an increase of 130%. Thus, this method provides a reference for the optimization of the same type of production line.

Key words: production line; Plant Simulation; interpretative structural modeling method; genetic algorithm; buffer area

数字化制造是一种先进的制造技术, 在推动工业技术高速发展的过程中, 数字化制造技术已经成为重要的手段^[1]。如今, 越来越多的制造业将数字技术与生产制造过程融合^[2], 改善生产效率与产品质量^[3], 提高自身的竞争力。生产系统仿真作为数字化制造领域中的一个核心技术^[4], 得到了广泛的应用。

Plant Simulation 作为直接面向对象的仿真软件,

能够对生产系统的性能、效率等方面进行仿真分析并找出优化方向^[5-7]。刘镇海等^[8]以路灯杆件生产线作为研究对象, 基于 Plant Simulation 建立数字化模型, 对生产线的缓存区与处理工作站进行了分析及优化。白帆等^[9]在 Plant Simulation 软件中建立了半导体制造执行系统实时派工机制, 提出了一种机台配置的优化算法, 有效地提升了半导体工厂的产能与设备利用率。陈杰等^[10]借助 Plant Simulation 软件, 对某柴油机缸体生产线设备建立了仿真模型, 利用遗传算法优化缓存区, 结果表明, 生产线设备的平均利用率和生产率均得到了提高。李慧等^[11]以某航空发动机叶片机械加工生产线为例, 通过 Plant Simulation 搭建模型, 从产能、设备利用率、缓存区设置等多方面进行了仿真分析与优化, 结果表明, 优化后生

收稿日期: 2024-05-01; 修订日期: 2024-08-06

作者简介: 彭 杰 (1998-), 男, 硕士研究生

E-mail: pjofficial@163.com

通信作者: 叶 霞 (1973-), 女, 博士, 教授

E-mail: yx_laser@163.com

产线的投资成本得到了节约,设计周期得到了缩短。

本文针对江苏长江智能制造研究院有限责任公司的钣金生产线设备平均利用率较低和产能不足的问题,基于 Plant Simulation 平台构建了生产线数字化仿真模型。利用解释结构模型和遗传算法,从生产线设备利用率和生产线缓存区的容量等方面对生产线进行优化,结果表明,生产线设备平均利用率和产能均得到了提高。

1 钣金生产线

1.1 产线现状描述

江苏长江智能制造研究院有限责任公司现有一条钣金生产线用于生产钣金,进行调研得到生产线每日生产时间为 10 h,每周工作 7 天,每周产量为 3710 件。

钣金生产线共有 9 道工序,具体流程如图 1 所示。第 1 道工序为冲压,此工序有 4 个工作站(工作站 1~工作站 4),功能为冲压出不同规格的钣金;第 2 道工序为抛光,此工序有工作站 5 和工作站 6,用于将第 1 道工序流出的钣金进行抛光;第 3 道工序为视觉检测 1,此工序有工作站 7,用于为检测钣金是否有瑕疵;第 4 道工序为激光打标,此工序有工作站 8 和工作站 9,用于对已完成检测的钣金进行标刻工作;第 5 道工序为机械贴标,此工序有工作站 10 和工作站 11,功能为将标刻完成的钣金贴上标签;第 6 道工序为视觉检测 2,此工序有工作站 12,用于检测标签贴装是否成功;第 7 道工序为安装流苏,此工序有工作站 13 和工作站 14,主要靠人工操作;第 8 和第 9 道工序分别为装袋和装盒,这两道工序分别有工作站 15 和工作站 16,主要依靠人工操作完成。

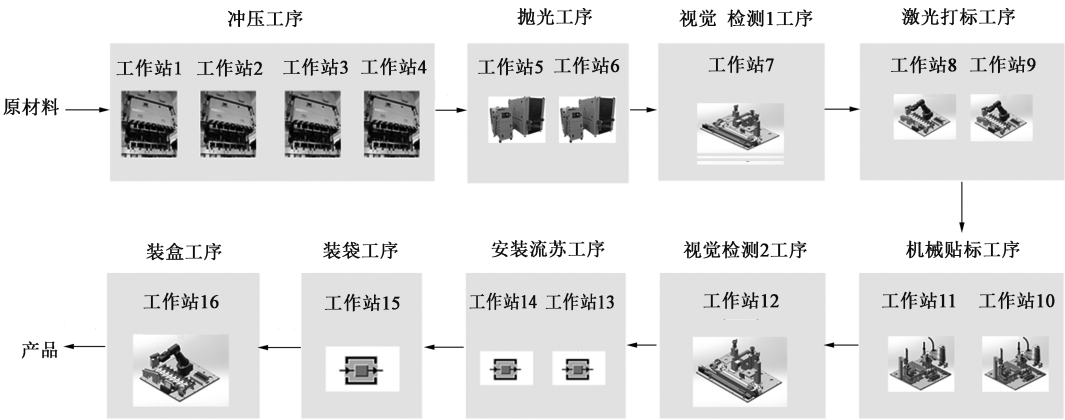


图 1 钣金生产线流程图
Fig. 1 Flow chart of metal sheet production line

各工序均包含一个或多个工作站,各工作站因自身工作内容不同,实际测量得出的工作时间也有

差异,现场采用秒表计时法对各工作站的实际工作时间进行统计,具体加工数据如表 1 所示。

表 1 钣金生产线加工数据
Table 1 Processing data of sheet metal production line

工序	1				2		3	4		5		6		7		8	9
内容	冲压				抛光		视觉检测 1	激光打标		机械贴标		视觉检测 2		安装流苏		装袋	装盒
工作站	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	
工作时间/s	14	14	14	14	35	35	2.5	3	3	5.5	5.5	2.5	28	28	14	9	

1.2 未优化生产线的模型建立

Plant Simulation 软件能够对生产系统进行建模、仿真、可视化和分析等方面的操作,对生产系统进行多层面的定量验证并根据仿真结果找出优化的方向。因此,采用此软件对生产线进行仿真建模,具体如图 2 所示。

1.2.1 物流库元素建立

在基于 Plant Simulation 的仿真模型中,建立 16 个工作对象,并注释为工作站 1、工作站 2、……、工作站 16;源实现原材料出库的功能;出料口实现产品加工完成入库的功能;AGV (Automated Guided Vehicle) 的生成通过源 1 实现,AGV 运输轨道通过

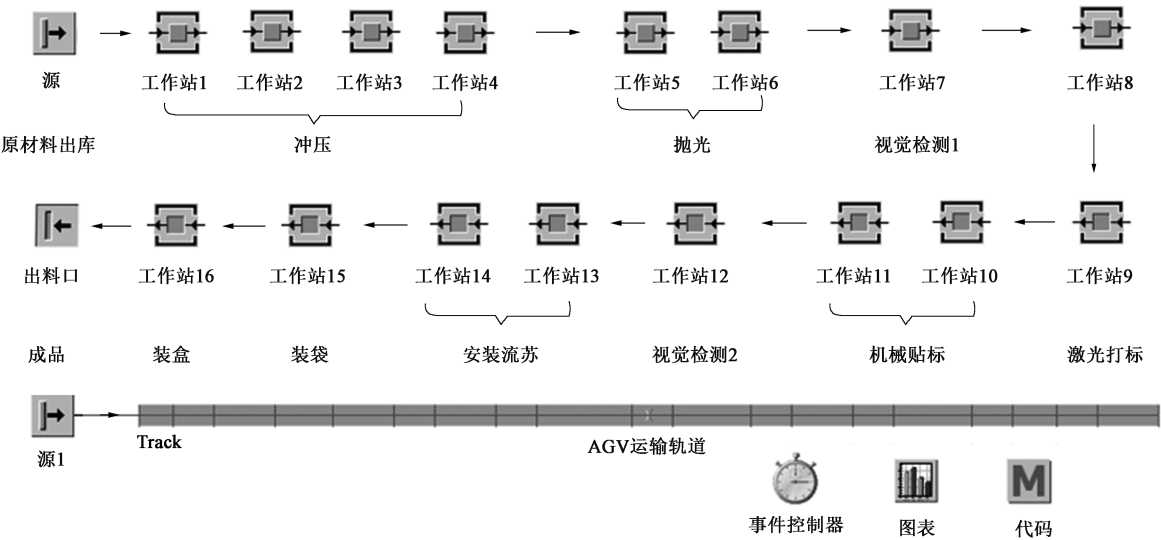


图 2 生产线数字化模型
Fig. 2 Digital model of production line

轨道 Track 表示，轨道入口为左侧；每道工序注释下方摆置对应的工作对象，源、出料口和各工作站之间的连接器不显示。

1.2.2 AGV 运输设置

源 1 生成 8 个 AGV 在轨道上循环运输物料，代码实现每个 AGV 均有托盘来装载物料。在轨道的入口处设置传感器，并添加控件代码，实现给进入轨道的 AGV 上料的功能，装载完零件后，AGV 开始沿轨道运行。

在轨道上，各工序入口设置一个上料传感器，工序出口设置一个下料传感器。在上料传感器上添加控件代码判断工件在工序中对应的加工设备，将 AGV 上的物料卸于对应的工序设备上加工，下料传感器的工作原理相同，若工序还未将工件加工好，AGV 则等待工序加工步骤完成后再进行上料。AGV 运行至工序附近时激活上料传感器，完成卸料后移动至该工序的下料传感器处，等待完成材料加工并且装载好后继续驶向下一个工序。在轨道出口处设置出口传感器，检测到轨道出口的 AGV 上装载有工件时，便将物料卸至出料口。AGV 到达轨道出口后会重新流入轨道入口。

运行仿真模型，得到优化前生产线模型的仿真结果，工作站的设备利用率和设备空闲率数据对比如图 3 所示。

优化前模型整体工作效率波动较大，每小时产量为 55 件，根据生产线每周生产计划，得到仿真模型中生产线的周产量为 3850 件，与实际周产量的误差为 3.77%。

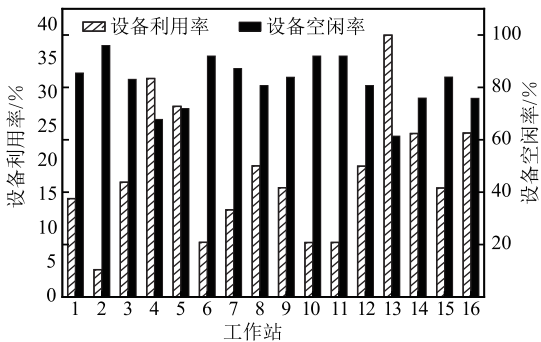


图 3 工作站的设备利用率和设备空闲率
Fig. 3 Equipment utilization and idle rates of workstation

2 影响因素的确定与解释结构模型的构建

2.1 影响因素的确定

通过分析调研得到影响生产线高效生产的因素^[12]如表 2 所示，通过解释结构模型可梳理各因素之间存在的逻辑结构关系并且找出因素间的层级关系。

表 2 生产线高效生产的影响因素

Table 2 Influencing factors of efficient production on production line	
影响因素	内容
S ₁	材料堆积
S ₂	工序堵塞
S ₃	工序空闲
S ₄	物流效率低
S ₅	缓存区配置少
S ₆	工作站稳定性偏低
S ₇	成本高
S ₈	AGV 路径规划不合理
S ₉	搬运时间长
S ₁₀	产品合格率低
S ₁₁	换料频率低

2.2 解释结构模型的建立

由表 2 得到生产线影响因素集合为 $S = \{S_1, S_2, \dots, S_{11}\}$ 。邻接矩阵是用来表示各影响因素间是否存在联系的方阵, 矩阵内的元素记为 a_{ij} ($i=1, 2, \dots, 11; j=1, 2, \dots, 11$)。当 S_i 对 S_j 存在直接影响关系的时候, a_{ij} 为 1, 当 S_i 与 S_j 无直接影响关系的时候, a_{ij} 则为 0。对影响因素间存在的关系进行归纳, 得到各因素间的邻接矩阵 A 如下:

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (1)$$

由布尔代数运算求出可达矩阵 M 如下:

$$M = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

在可达矩阵的基础上得到相对应的可达集、前因集与交集, 如表 3 所示。

表 3 可达集、前因集与交集

Table 3 Reachable set, antecedent set and intersection set

影响因素	可达集	前因集	交集
S_1	[1, 2]	[1, 5]	[1]
S_2	[2]	[1, 2, 5, 6]	[2]
S_3	[3]	[3, 5, 8, 9]	[3]
S_4	[4, 7]	[4, 8]	[4]
S_5	[1, 2, 3, 5]	[5]	[5]
S_6	[2, 6, 10]	[6]	[6]
S_7	[7]	[4, 7, 8]	[7]
S_8	[3, 4, 7, 8, 9, 11]	[8]	[8]
S_9	[3, 9, 11]	[8, 9]	[9]
S_{10}	[10]	[6, 10]	[10]
S_{11}	[11]	[8, 9, 11]	[11]

基于不同层级中影响因素之间的关系, 依据可达集、前因集和交集划分好层级, 得到生产线影响因素解释结构模型, 如图 4 所示。

由图 4 可知, 第 1 层影响因素, 即直接影响因素, 为 S_2 工序堵塞、 S_3 工序空闲、 S_7 成本高、 S_{10} 产品合格率低和 S_{11} 换料频率低, 生产线的生产效率直接受上述因素影响。第 2 层影响因素, 视为间接影响因素, 为 S_1 材料堆积、 S_4 物流效率低、 S_6 工作站稳定性偏低和 S_9 搬运时间长, 不直接对生产结果产生影响, 而是通过直接影响第 1 层因素作用于生产质量。第 3 层影响因素, 是影响生产效率的根本因素, 为 S_5 缓存区配置少和 S_8 AGV 路径规划不合理。

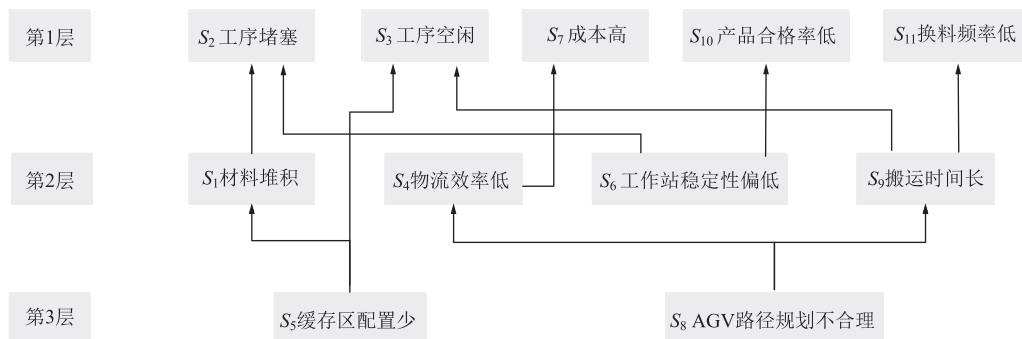


图 4 解释结构模型

Fig. 4 Interpretive structural model

根据 Plant Simulation 软件建模仿真结果, 发现缓存区数量对生产线优化的影响极大。因此,

从根本因素出发, 即影响因素 S_5 , 对生产线进行优化。

3 生产线缓存区优化

3.1 遗传算法

遗传算法 (Genetic Algorithm, GA) 是模拟达尔文生物进化论的自然选择和遗传学机理的生物进化过程的计算模型^[13], 是一种通过模拟自然进化过程搜索最优解的方法^[14], 因此, 采用遗传算法对缓存区进行优化。

针对缓存区问题使用遗传算法的相关计算步骤如下^[15]:

- (1) 将缓存区问题映射为数学问题, 建立数学模型;
- (2) 随机产生初始种群;
- (3) 对每个个体进行适应度评估, 选择出优良

的个体遗传至下一代;

(4) 在已有的种群中随机选取两个个体进行染色体交叉, 进而产生新的后代;

(5) 进行变异操作;

(6) 当满足停止条件时, 算法终止, 否则转至步骤 (3) 重新计算。

遗传算法以决策变量的某种形式编码为运算对象, 可以方便地应用遗传操作算子, 以目标函数作为搜索信息, 把搜索范围集中至适应度较高的部分搜索空间中, 提高搜索效率, 并且遗传算法属于自适应概率搜索技术, 选择、交叉、变异等运算是以概率的方式进行, 增加了搜索过程的灵活性^[16]。

在初步优化的模型中, 为每道工序的入口与出口配置缓存区, 如图 5 所示。缓存区的数量和自身能够容纳产品的容量为其基本属性。

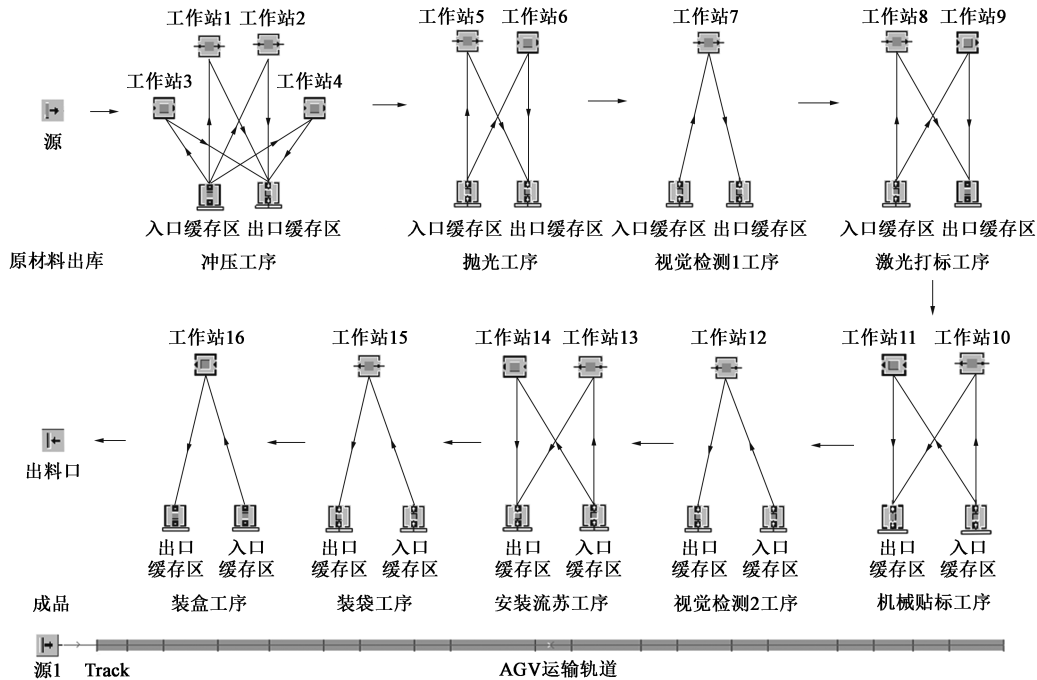


图 5 生产线优化模型

Fig. 5 Optimization model of production line

生产线共有 9 道工序, 根据优化建模中对每道工序的缓存区配置, 共有 18 个缓存区。问题的一个可行解即为一条“染色体”, 每条染色体拥有 18 个元素, 每个元素即染色体的一个“基因”, 初始种群即随机选择的一组染色体。

可行解的优劣程度需要根据计算得到的适应度函数值来判断。根据优化目标来构造适应度函数, 综合考虑通过设备平均利用率和缓存区的总容量这两个因素来构建适应度函数。

$$L = \frac{\sum_{x=1}^{16} t_x}{16} \quad (3)$$

$$R = \sum_{n=1}^{18} B_n \quad (4)$$

式中: L 为此生产线的设备平均利用率; t_x 为工作站 x 的利用率, $0 < t_x < 1$; R 为缓存区的总容量; B_n 为第 n 个缓存区的缓存容量。

计算所得出的设备平均利用率与缓存区总容量

并非同一数量级，放在适应度函数中需要添加调整系数 k 来保证其数量级相同。需要在提高整条生产线设备平均利用率的同时减少缓存区总容量，因此，为这两个评价指标添加的权重系数 a 和 b 需满足： $0 < a < 1$ ， $0 < b < 1$ ，且 $a + b = 1$ 。

综上得到目标函数 F ：

$$F = \frac{bk}{R} + aL \tag{5}$$

求设备平均利用率和缓存区总容量经过设计后的最大值，调整后得到适应度函数 F_{fitness} ：

$$F_{\text{fitness}} = \frac{bk}{\sum_{n=1}^{18} B_n} + a \frac{\sum_{x=1}^{16} t_x}{16} \tag{6}$$

在式 (5) 和式 (6) 中， a 的值为 0.5， b 的值为 0.5， k 的值为 100。

表 4 生产线各工序缓存区容量

Table 4 Buffer capacity of each process for production line

工序	冲压	抛光	视觉检测 1	激光打标	机械贴标	视觉检测 2	安装流苏	装袋	装盒
入口缓存区容量/个	5	1	5	2	0	1	3	0	2
出口缓存区容量/个	9	4	3	4	2	0	0	6	4

将缓存区的数量参数与容量参数在模型中进行设置，运行仿真模型，得到添加缓存区后的生产线运行数据，生产线优化前后的设备利用率对比图如图 6 所示。

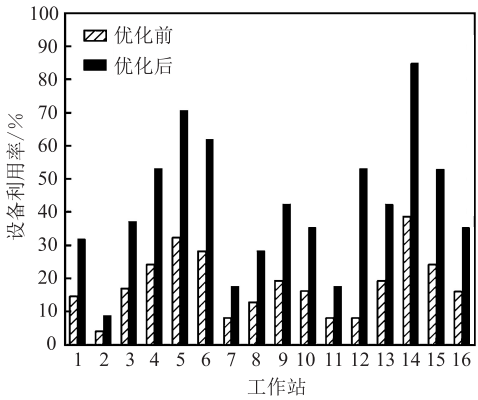


图 6 优化前后工作站设备利用率对比

Fig. 6 Comparison of workstation equipment utilization rate before and after optimization

由图 6 可知，在正常运行的条件下，增加缓存区后，生产线的设备利用率得到明显提高，工作站 14 的设备利用率提升最高，达到 46.28%。

3.2 仿真与优化

对遗传算法的控制参数进行设置，种群规模 G 设置为 80，交叉概率 $P = 0.8$ ，变异概率 $P_m = 0.5$ 。共有 18 个缓存区，根据未优化的生产数据，将每个缓存区的容量波动范围设置为 1~20，得到缓存区的总容量波动范围为 18~360。

在生产线优化前，AGV 作为搬运工具将物料从原材料库通过轨道直接搬运至第 1 道冲压工序的 4 个工作站进行加工，待加工结束后，通过 AGV 将物料通过轨道运送至下一道工序，直到一件产品被生产出。优化后，因为每个集群工序前均设有单个的入口缓存区和出口缓存区，AGV 将物料从原材料库运出后，通过轨道直接运输至第 1 道工序入口缓存区，待工序加工结束，AGV 将物料从出口缓存区运输至下道工序的入口缓存区，以此往复。

采用上述方法，对生产线缓存区的配置进行计算，得到各工序入口与出口缓存区的容量，如表 4 所示。

整条生产线的每小时产量优化状况如图 7a 所示，从优化前的 55 件提升至 127 件，提高量达到 72 件。整条生产线的设备平均利用率优化状况如图 7b 所示，优化前整条生产线设备平均利用率为 18.15%，优化后整条生产线设备平均利用率为 42.15%，提高了 24%。

机械贴标工序入口缓存区、视觉检测 2 工序出口缓存区、安装流苏工序出口缓存区和装袋工序入口缓存区的容量均为 0。在其他缓存区容量不变的情况下，调整缓存区的个数，进行二次优化，二次优化后的缓存区配置如表 5 所示，将上述 4 个容量为 0 的缓存区从生产线建模中去除，对比去除前后的生产线数据，二次优化的模型如图 8 所示。

与第 1 次优化模型相比，物料在前 4 道工序中的加工步骤均为先被运输至各工序的入口缓存区，待工序设备加工完成后从各自的出口缓存区运出，而从机械贴标工序开始，物料先进入该工序设备进行加工，完成加工后从出口缓存区流出，然后进入视觉检测 2 工序的入口缓存区，完成加工后直接运输至安装流苏工序的入口缓存区，加工完成后运输至装袋工序的工作站上，设备加工好后从出口缓存

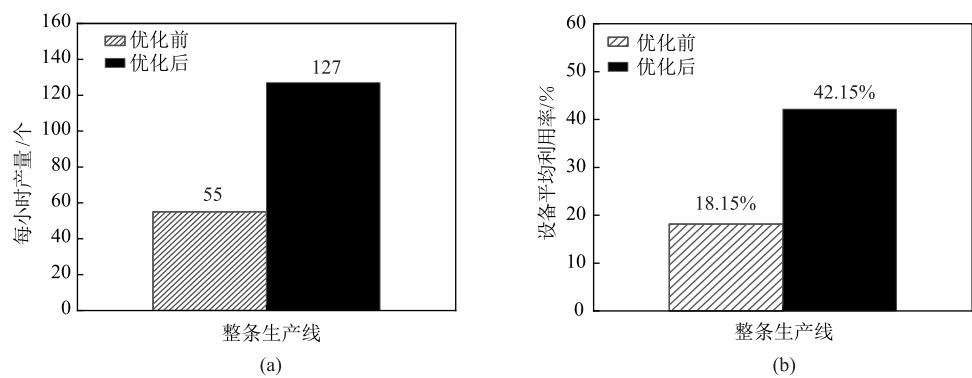


图 7 生产线优化前后产量 (a) 与平均利用率 (b) 提升

Fig. 7 Increase of output (a) and average utilization rate (b) before and after production line optimization

表 5 二次优化后生产线各工序缓存区容量

Table 5 Buffer capacity of each process for production line after secondary optimization

工序	冲压	抛光	视觉检测 1	激光打标	机械贴标	视觉检测 2	安装流苏	装袋	装盒
入口缓存区容量/个	5	1	5	2	—	1	3	—	2
出口缓存区容量/个	9	4	3	4	2	—	—	6	4

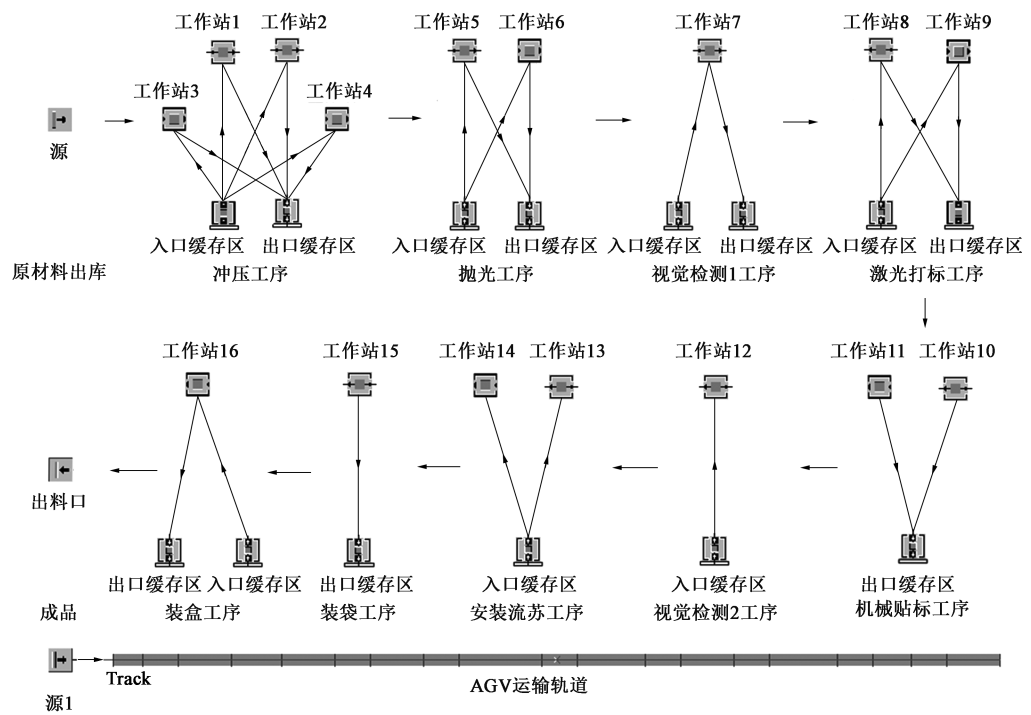


图 8 生产线二次优化模型

Fig. 8 Secondary optimization model of production line

区流出，进入最后一道同时配有上下料缓存区的工序后，完成整个生产步骤。

运行仿真，得到相关参数，在优化减去 4 个容量为 0 的缓存区的情况下，设备利用数据与图 6 中优化后利用率相比无变化，平均利用率仍为 42.15%，生产线每小时产量为 127 件。与首次优化结果相比，第 2 次

优化在保证首次优化效果不受影响的情况下，有效地减少了缓存区的数量，降低了生产线的优化成本。

4 结语

本文建立了基于 Plant Simulation 的钣金生产线

仿真模型,通过解释结构模型与遗传算法对生产线进行了优化,得到了缓存区的数量和容量,从结果来看,整条生产线的设备平均利用率提升了 24%,每小时产量从 55 件提升至 127 件,生产线的整体生产性能得到优化提高。

参考文献:

- [1] 程杰杰. 基于 Plant-Simulation 的硅片生产线的仿真与优化研究 [D]. 天津: 天津科技大学, 2024.
Cheng J J. Simulation of Wafer Production Line Based on Plant-Simulation and Optimization Research [D]. Tianjin: Tianjin University of Science and Technology, 2024.
- [2] 胡飞. 基于 Tecnomatix 的铁路报废货车拆解线仿真与优化研究 [D]. 合肥: 合肥工业大学, 2023.
Hu F. Simulation and Optimization of Railway Scrapped Freight Wagon Disassembly Line Based on Tecnomatix [D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2023.
- [3] 姜磊磊. 基于自定义流程的机器人产线作业仿真与优化技术研究 [D]. 浙江: 浙江大学, 2023.
Jiang L L. Research on Job Simulation and Optimization Technology of Robot Production Line Based on Process Customization [D]. Zhejiang: Zhejiang University, 2023.
- [4] 刘雪梅, 刘涛, 郭欢. 基于可用度评价的混联生产线缓冲区配置优化 [J]. 中国机械工程, 2020, 31 (18): 2220-2230.
Liu X M, Liu T, Guo H. Optimization of buffer allocations in hybrid production lines based on availability evaluation [J]. China Mechanical Engineering, 2020, 31 (18): 2220-2230.
- [5] 唐红涛, 张缓. 基于绿色生产的混合流水车间调度问题研究 [J]. 工业工程, 2022, 25 (3): 115-123.
Tang H T, Zhang H. A research on hybrid flow shop scheduling based on green production [J]. Industrial Engineering Journal, 2022, 25 (3): 115-123.
- [6] 常春光, 代宾宾. 预制构件生产-运输分批协同调度双目标优化 [J]. 工业工程与管理, 2023, 28 (4): 82-93.
Chang C G, Dai B B. Bi-objective optimization of prefabricated component production transportation batching cooperative scheduling [J]. Industrial Engineering and Management, 2023, 28 (4): 82-93.
- [7] 李春兴, 徐健, 易泰勋, 等. 基于 Plant Simulation 的压气机叶片型线加工产线分析与优化 [J]. 机械制造与自动化, 2024, 53 (1): 40-44.
Li C X, Xu J, Yi T X, et al. Analysis and optimization of compressor blade profile processing line based on Plant Simulation [J]. Machine Building & Automation, 2024, 53 (1): 40-44.
- [8] 刘镇海, 周友行, 徐长锋. 基于 Plant Simulation 的路灯杆件生产线产能优化方案研究 [J]. 现代制造工程, 2020 (1): 35-42.
Liu Z H, Zhou Y H, Xu C F. Production optimization of street lamp rod production line based on Plant Simulation [J]. Modern Manufacturing Engineering, 2020 (1): 35-42.
- [9] 白帆, 徐策, 程星华, 等. 基于 Plant Simulation 的半导体机台配置优化仿真分析 [J]. 半导体技术, 2024, 49 (1): 103-108.
Bai F, Xu C, Cheng X H, et al. Simulation analysis of semiconductor machine configuration optimization based on Plant Simulation [J]. Semiconductor Technology, 2024, 49 (1): 103-108.
- [10] 陈杰, 张松, 杜春刚, 等. 基于 Plant Simulation 的柴油机缸体生产线仿真与配置优化 [J]. 制造技术与机床, 2019 (3): 31-36.
Chen J, Zhang S, Du C G, et al. Production line simulation and its configuration optimization based on Plant Simulation for a diesel engine cylinder block [J]. Manufacturing Technology & Machine Tool, 2019 (3): 31-36.
- [11] 李慧, 孙元亮, 张超. 基于 Plant Simulation 的航空发动机叶片机加生产线仿真分析与优化 [J]. 组合机床与自动化加工技术, 2019 (7): 116-118.
Li H, Sun Y L, Zhang C. Simulation and optimization of an aero engine blades machining line based on Plant Simulation [J]. Modular Machine Tool & Automatic Manufacturing Technique, 2019 (7): 116-118.
- [12] 田世海, 杨文蕊, 王春梦. 基于 VSM-ISM 汽车空调铝扁管生产线优化及仿真 [J]. 工业工程与管理, 2023, 28 (2): 79-89.
Tian S H, Yang W R, Wang C M. Production line optimization and simulation of automobile air conditioner aluminum flat tube based on VSM-ISM [J]. Industrial Engineering and Management, 2023, 28 (2): 79-89.
- [13] 李泽军, 都腾飞, 李仲树. 基于柔性遗传算法的化工产线数字孪生仿真研究与优化 [J]. 制造业自动化, 2023, 45 (11): 142-146, 184.
Li Z J, Du T F, Li Z S. Research and optimization of chemical production line based on flexible genetic algorithm and digital twin [J]. Manufacturing Automation, 2023, 45 (11): 142-146, 184.
- [14] 张子凯, 唐秋华, 张利平, 等. 改进遗传算法求解大规模混流 U 型装配线问题 [J]. 机械设计与制造, 2016 (1): 137-139, 143.
Zhang Z K, Tang Q H, Zhang L P, et al. Balancing large-size mixed-model U-type assembly lines via improved genetic algorithm [J]. Machinery Design & Manufacture, 2016 (1): 137-139, 143.
- [15] 张琦. 钣金件自动展开 CAD 软件设计及其优化排样 [D]. 西安: 西北工业大学, 2005.
Zhang Q. Automatic Unfolding and Nesting of Sheet Metal Part in Designing CAD Software [D]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University, 2005.
- [16] 杨尚, 施乃勇, 侯智. 基于 Flexsim 与遗传算法的混流组装线仿真与优化 [J]. 重庆理工大学学报 (自然科学), 2021, 35 (3): 86-92.
Yang S, Shi N Y, Hou Z. Simulation and optimization of mixed flow assembly line based on Flexsim and genetic algorithm [J]. Journal of Chongqing University of Technology (Natural Science), 2021, 35 (3): 86-92.