

DOI:10.3969/j.issn.1003-5060.2024.07.004

面向钣金混流生产线的仿真优化研究

王勇¹, 张浩然¹, 张鹏¹, 陈娇娇¹, 于珺²

(1. 合肥工业大学 机械工程学院, 安徽 合肥 230009; 2. 马鞍山市中亚机床制造有限公司, 安徽 马鞍山 243131)

摘要:文章以某电梯钣金加工公司的钣金混流生产线为背景,通过虚拟仿真方法对钣金生产环节中的投产序列和瓶颈问题进行优化。首先,根据某电梯门板生产线的实际生产状况,建立生产线的仿真模型,以工件完工时间、设备空闲时间和设备总切换时间为目标,基于遗传算法,优化钣金混流生产线的投产序列;其次,通过分析缓存区添加位置和容量对钣金生产线产量的影响,解决生产线堵塞、利用率不平衡等问题。结果表明,对生产线的优化有效,经优化后的投产序列相比原始投产序列整体时间缩短约 15%,通过适宜的缓存区设置,各工位设备平均利用率提高了 9.6%,产量提高了 14.15%。

关键词:虚拟仿真;钣金混流生产线;遗传算法;瓶颈工位

中图分类号:TH181 **文献标志码:**A **文章编号:**1003-5060(2024)07-0887-06

Research on simulation and optimization of sheet metal mixed-flow production line

WANG Yong¹, ZHANG Haoran¹, ZHANG Peng¹, CHEN Jiaojiao¹, YU Jun²

(1. School of Mechanical Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China; 2. Ma'anshan Zhongya Machine Tools Manufacturing Co., Ltd., Ma'anshan 243131, China)

Abstract:Based on the sheet metal mixed-flow production line of an elevator sheet metal processing company, the production sequence and bottleneck problems in the sheet metal production link are optimized by virtual simulation method. According to the actual production status of an elevator door panel production line, the simulation model of the production line is established, and the production sequence of the sheet metal mixed-flow production line is optimized based on the workpiece completion time, equipment idle time and total equipment switching time, combined with genetic algorithm. At the same time, by analyzing the influence of added location and capacity of the buffer on the output of sheet metal production line, the problems of production line blockage and unbalanced utilization rate are solved. The results show that the optimization of the production line is effective, the overall time of the optimized production sequence is shortened by about 15% compared with that of the original production sequence, and the average utilization rate of each workstation equipment is increased by 9.6% and the output is increased by 14.15% through the appropriate buffer setting.

Key words: virtual simulation; sheet metal mixed-flow production line; genetic algorithm; bottleneck workstation

目前钣金加工已经被广泛利用于汽车、船舶、通讯电子、航空航天等领域,是机加工领域的重要技术。在面对多品种、小批量的产品混流生产时,

钣金生产线需要采用柔性化生产方式灵活应对市场需求变化和工程设计中变更产生的变动^[1]。而钣金混流生产过程中由于产品种类繁多、工序复

收稿日期:2023-02-22;修回日期:2023-03-13

基金项目:安徽省科技重大专项资助项目(202003a05020041)

作者简介:王勇(1969—),男,安徽无为,博士,合肥工业大学副教授,硕士生导师。

杂,会出现影响生产效率、生产线负荷分配不均衡等问题。针对这些问题寻求对钣金生产线进行优化的方法具有重要意义。

文献[2]面向中小批量混合装配线的生产计划问题,提出将数学公式与可变邻域搜索技术相结合的启发式算法;文献[3]建立装配线的混合非线性整数规划模型,采用改进的遗传算法进行优化求解;文献[4]针对批量生产的排序和生产线平衡问题,提出一种新多目标数学模型;文献[5-6]使用 Tecnomatix 工厂仿真软件通过计算机模拟分析限制有关生产线生产能力的问题,对瓶颈问题优化;文献[7]基于 Plant Simulation 对智能制造测试床的整体布局和工艺流程进行仿真,分析并优化生产节拍和设备利用率;文献[8]基于 Plant Simulation 的路灯杆件生产线建立数字化模型,并确定使产能最大化的缓存区位置、容量和处理工位位置、数量。

研究表明,生产线的优化可通过仿真分析软件进行计算机模拟分析,对生产线投产序列问题建立数学模型并进行优化,同时可以考虑从生产节拍,缓存区等方面解决生产线瓶颈问题。本文将使用西门子开发的 Plant Simulation 仿真软件构建钣金生产线仿真模型,该款软件可以为生产线仿真提供面向对象、图形化与集成化的工作环境^[9]。本文将从投产序列优化和工位瓶颈问题出发,通过软件仿真实验,分析得出缩短生产线加工时间、提升生产线产量的优化方案。

1 电梯门板生产线建模

某电梯钣金加工公司主要生产电梯门、电梯扶梯和支架门等零件,年产值约为 800 万元。该生产线采用 U 型布局,在面向多品种、小批量的制造环境下,拥有柔性、空间紧凑和方便工人交流信息的优势^[10]。

该生产线需要实现的工艺流程如下:板材通过物料小车从仓库出发送到自动上料装置,经过系统设定的程序对板材进行激光切割,通过机械手送至折弯单元,按照设计要求对钣金件进行折弯,进而到数控冲床加工相应工位,接着使用机械手进行焊接、压铆、打磨等工序,具体工艺流程如图 1 所示。

该公司的电梯门板生产线主要生产 A、B、C、D、E 这 5 种类型的钣金件。每年工作 250 d,每周工作 5 d,每天 14 h,生产轮班为两班倒,各类产品的 1 个月需求量的平均值见表 1 所列。

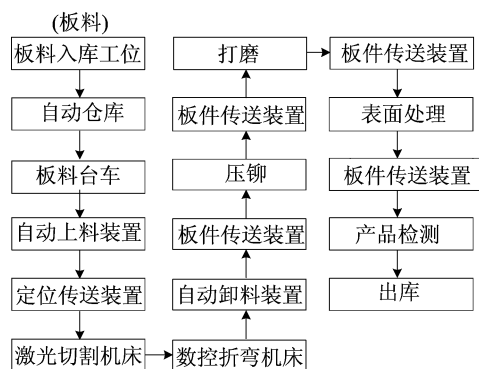


图 1 生产线具体工艺流程

表 1 各类产品的 1 个月需求量的平均值

产品	平均需求量/件
A	3 115
B	3 292
C	1 507
D	2 831
E	4 264

各工序的钣金门板生产线作业时间服从负指数分布,其加工时间分布函数期望值见表 2 所列。

表 2 电梯门板 5 种产品各工序加工时间 单位:s

工序	A	B	C	D	E
上料	21	21	22	23	24
激光切割	27	26	23	32	22
折弯	29	34	32	34	24
冲床	31	31	16	34	23
焊接	29	34	27	27	35
压铆	32	28	35	22	22
打磨	24	34	30	37	20
表面处理	18	30	19	26	29
产品检测	27	30	24	16	21

通过西门子开发的 Plant Simulation 仿真软件构建生产线模型,为下文分析奠定基础。Plant Simulation 是一款广泛应用于离散事件的工厂仿真软件,能够对大量的生产环节进行设计,并进行全面的统计分析^[11]。根据以上电梯门板生产线的基本信息在 Plant Simulation 平台构建该生产线的仿真模型。由于本文着重在投产序列以及工位利用率方面进行仿真分析,因此对生产线进行一些约束,以便分析,如不考虑实际生产中的次品生产率,备料区物料充足,且仓库空间足够大等。该钣金生产线包括龙门上料、激光切割机、折弯、

冲床、机器人焊接、压铆、打磨、表面处理和产品检测 9 个工位,为方便后续说明,对各工位编号分别设置为 WS1~WS9,通过 Plant Simulation 提供的基本单元工位进行设置。建立的生产线模型

2D 仿真视图如图 2 所示。

图 2 中: ExperimentManager 为实验模块; GAwizard 为遗传算法模块,本文后续均简称为 GA。

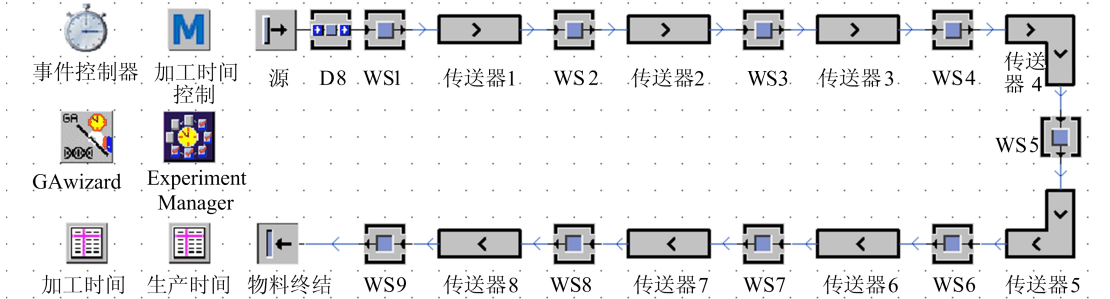


图 2 基于 Plant Simulation 平台构建的生产线模型 2D 仿真视图

由上文可知钣金件的加工时间满足负指数分布。本模型通过模块加工时间控制(method)来实现不同工件在不同工位上的加工时间设置,并将其保存在加工时间(table file)中,由各工位调用,加工时间设置取自表 2。源(source)的可移动单元(movable unit, MU)选择为序列,按照生产计划 Table file 进行产品的加工。

生产线工位和输送线开动率为 95%,故障修复时间为 5 min。生产线共有 8 条传送带,零件加工最大尺寸为 1.500 m×0.800 m×0.012 m,分别设置传送带的长度为 5.0 m,宽度 1.5 m,速度为 1 m/s,容量为 5 个。

在默认缓冲区的容量为无穷大,其他参数设置完毕的情况下,通过 100 组数据测试后,查看缓冲区属性并取最大值 50,即设置缓冲区 D8 的容量为 50。

2 投产序列优化

对于订单数量足够大、产品种类较多,寻找最优投产组合的组合优化问题,由于搜索空间巨大,一般算法求解效率很低。遗传算法具有效率高、全局搜索能力强等优点,能处理车间生产调度这种离散型问题。本文将采用遗传算法解决多订单投产序列最佳组合问题。

2.1 遗传算法解决最佳组合问题

遗传算法是一种模拟自然界自然选择的进化算法,从随机或者特定的初始解集出发,按照遗传操作来产生新的种群,对个体的适应度值进行评价选择,不断迭代后,逐步逼近理论最优解^[12]。遗传算法流程如图 3 所示。

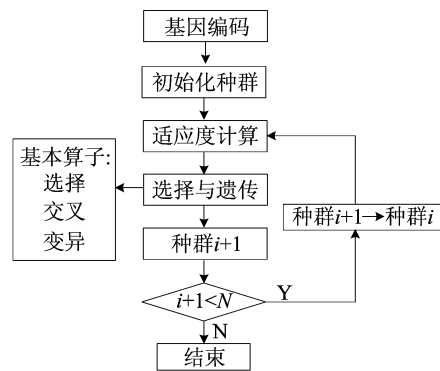


图 3 遗传算法流程

2.1.1 基因编码

1 个染色体编码即代表 1 种物料的投产序列,如本条钣金生产线需要加工 A、B、C、D、E 这 5 种钣金件产品,若某染色体编码是(7,6,9,2,4,3,1,8,5),产品通过 S1—S10 工位的顺序为 J7→J6→J9→J2→J4→J3→J1→J8→J5。

2.1.2 遗传算子

遗传算子实现基因编码迭代中的选择。选择算子筛选高适应性的个体,避免有效基因的缺失和维持种群恒定进而提高计算的效率;交叉算子随机选择 2 个个体彼此交换内部的基因,以此来寻找更好的染色体,同时会进行基因冲突检测,以保证子代染色体为可行解;变异算子会根据突变概率,将 2 个基因随机交换,可以增加种群的多样性,也避免了过早收敛的现象。

本文设定的遗传算法参数主要包含进化代数为 500 代、世代数为 10、交叉率为 0.8、突变率为 0.12。

2.1.3 适应度函数

适应度函数是通过对比染色体的优劣进行衡

量,以此来判断求解结果是否达到要求^[13]。由于生产序列优化中单一目标不能满足钣金生产线排序的要求,因此本文主要采用 3 个优化目标,工件完工时间、设备空闲时间、设备总切换时间的线型加权和法,将其转为单目标的优化,根据 3 个目标对钣金线的影响程度不同按经验分配不同的权重系数 w_1 、 w_2 、 w_3 ,分别取 0.4、0.3、0.3。加权后的目标函数即为本次遗传算法的目标函数,具体公式如下:

$$f = \min(w_1 T_1 + w_2 T_2 + w_3 T_3) \quad (1)$$

其中: T_1 为总完工时间; T_2 为总空闲时间; T_3 为总切换时间; f 为最小化目标函数值。

2.2 投产序列仿真结果分析

企业某投产计划包括 104 个订单、5 种钣金件,本文通过遗传算法求解出该计划的最佳投产序列。

加载遗传算法并运行,仿真运行一段时间后会得到遗传分析报告,其进化曲线如图 4 所示,进化次数设为 500 次,发现在 200 次遗传变异附近适应度逐渐收敛,最佳适应度函数值为 176.8 h,此序列为最优排序。

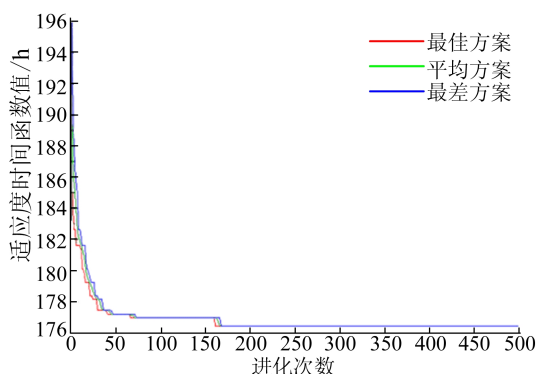


图 4 GA Wizard 进化曲线

为体现优化投产序列的效果,本文在对比时添加一组按 A、B、C、D、E 钣金件生产顺序批量生产的批量序列,仿真时间设置为 120 h,分别按照原始、批量及遗传算法优化的投产方式进行循环投产实验,得到不同投产序列方案的钣金线最小完工时间、设备空闲时间、产品切换时间以及优化后的投产序列。

在某一时间段的产品时间服从负指数分布,分别对原始投产序列、批量投产序列、优化后投产序列的 3 个目标参数形成 5 000 次数据求其平均值,在 table file 中导出 3 种序列的部分投产顺序,见表 3 所列。

表 3 部分不同序列投产顺序

序号	原始序列		批量序列		优化序列	
	MU	数量	MU	数量	MU	数量
1	MU. A	50	MU. A	21	MU. D	38
2	MU. E	55	MU. A	15	MU. B	47
3	MU. B	101	MU. A	20	MU. B	12
4	MU. D	2	MU. A	15	MU. C	24
5	MU. D	25	MU. A	48	MU. B	37
6	MU. E	67	MU. A	15	MU. D	47
7	MU. B	58	MU. A	46	MU. D	39
8	MU. D	80	MU. A	21	MU. D	46
9	MU. C	62	MU. A	45	MU. E	21
10	MU. C	21	MU. A	29	MU. A	19
11	MU. D	36	MU. A	25	MU. D	27
12	MU. E	83	MU. A	19	MU. D	18
13	MU. C	16	MU. A	19	MU. A	21
14	MU. D	12	MU. A	31	MU. A	42
15	MU. D	40	MU. A	43	MU. E	20
16	MU. C	43	MU. A	11	MU. E	14
17	MU. A	19	MU. B	19	MU. C	21
18	MU. D	31	MU. B	18	MU. A	26

运行结束后得到生产线仿真结果,投产序列优化前后各时间对比见表 4 所列。从表 4 可以看出,GA 优化后的投产序列的最小完工时间、设备空闲时间、设备切换时间明显减小,根据加权的目标时间函数式(1),相比原始投产序列缩短了约 15%,相比批量投产序列缩短了约 6%,若不考虑产品交货期、订单指标约束等条件,设备切换时间减少最为明显,最小完工时间、设备空闲时间也有所降低。同时批量投产序列较原始投产序列也有提升,考虑到当前市场对生产线实际的柔性需求,说明小批量、多种类产品生产的投产序列优化具有实际意义。

表 4 投产序列优化前后各时间对比 单位:h

优化目标	原始投产序列	批量投产序列	最佳投产序列
最小完工时间	194.78	359.35	167.68
设备空闲时间	226.60	205.36	193.41
设备切换时间	9.52	9.21	6.72

通过仿真得出的各工位工作状态占比见表 5 所列,由表 5 可知,生产线前半部分阻塞严重,其中工位 WS1、WS2 的堵塞率分别高达 39.38% 和 34.89%,整体堵塞率为 19.30%,且各工位利用率不平衡,部分工位存在大量等待时间,平均利用率仅为 64.85%,影响生产线产量。因此为进一步提高钣金生产线产量,将通过分析生产线的瓶

颈工位,解决生产线不平衡问题。

表 5 各工位工作状态占比 %

工位名称	工作	设置	等待	堵塞
WS1	60.56	0	0.06	39.38
WS2	59.41	0	5.70	34.89
WS3	69.68	0	7.50	22.81
WS4	65.80	0.01	15.48	18.72
WS5	72.88	0.01	12.80	14.31
WS6	61.63	0.01	19.85	18.51
WS7	58.18	0.01	23.58	18.23
WS8	78.76	0.01	14.08	7.15
WS9	59.67	0.01	40.32	0

3 添加缓存区优化

在实际的生产线瓶颈问题中,工位等待时间长、堵塞等问题都与工位间的缓存区设置有关^[14],故本文将从缓存区设置出发对生产线进行优化。同时考虑到成本问题,缓存区的数量和容量并不能尽多设置,因此将基于 Plant Simulation 的 ExperimentManager 实验模块设计实验,分析缓存区设置位置和容量对产量的影响。

3.1 缓存区设置位置对产量的影响

修改钣金生产线模型,在相邻工位间各设置 1 个缓存区,共计 8 个缓存区,编号分别设置为 B1~B8。通过 ExperimentManager 试验模块选择两级实验设计,输入值设置为 8 个缓存区的容量大小,分别取 1 和 10 这 2 个水平影响因子,输出值设置为生产线每小时产量,设置置信率为 95%,运行时间为 14 d,总计进行 256 次实验。得到各缓存区存放位置对产量的主效应值见表 6 所列。主效应指实验中由一个因素的不同水平引起的变异,用于判断某单一自变量对因变量的影响程度。由表 6 可知,缓存区 B3、B4、B5(分别设置于 WS4、WS5、WS6 前)的主效应绝对值相对较大,即对产量的影响程度较大,故选择在该 3 处设置缓存区。

表 6 各缓存区的主效应值

缓存区名称	主效应值
B1	0.530
B2	2.409
B3	6.552
B4	4.388
B5	3.742
B6	2.645
B7	0.617
B8	0.394

3.2 缓存区容量对产量的影响

通过 ExperimentManager 实验模块设置多级实验设计,输入值设置为 3 个缓存区 B3、B4、B5 的容量大小,分别设置为 1~10,其余设置同上,总计 1 000 次实验,得到的仿真结果如图 5 所示。

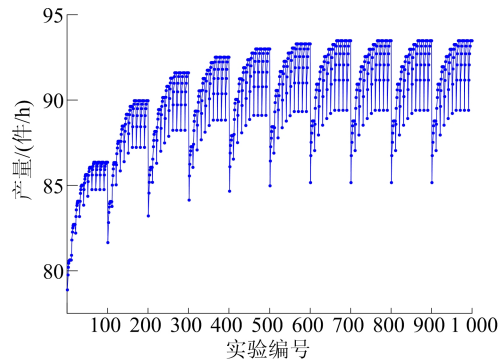
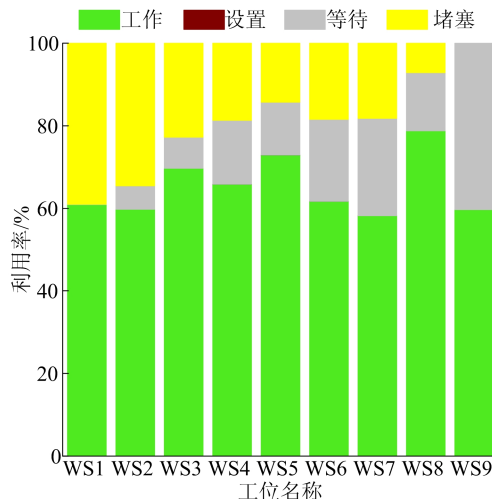


图 5 多级实验仿真结果

从图 5 可以看出,每小时产量随缓存区容量增加不断上升,但是增长速率不断减慢直至不变,说明过多的增加缓存区容量并无益处,考虑成本问题,缓存区尽量选择较少的容量,权衡产量增长速度后,选择实验编号 456 的组合,分别取缓存区 B3、B4、B5 为 5、5、6。最终设置好 3 个缓存区后,设置仿真时间为 14 d,仿真得出总产量为 31 277 件,每小时产量为 92.43 件。

同时导出添加缓存区前后生产线的工位利用率对比如图 6 所示。

据仿真结果可知,通过增加缓存区的方法,各设备平均利用率由 65.25% 提升至 74.85%,各工位设备利用率都得到有效改善,工位堵塞情况得到缓解,生产线负荷分配更加均衡,且每小时产量从 80.97 件提高至 92.43 件,提高了 14.15%。



(a) 缓存区添加前

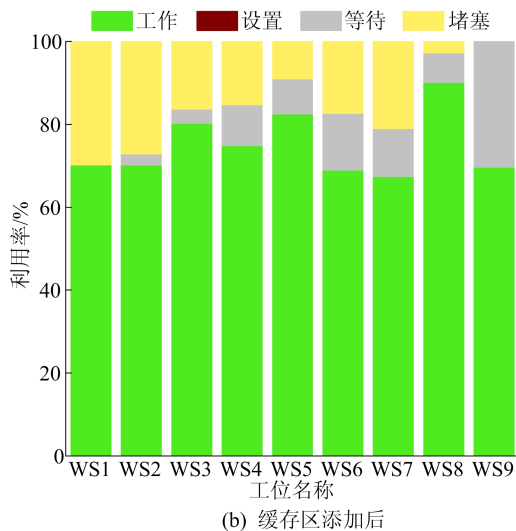


图 6 缓存区添加前后生产线的工位利用率对比

4 结 论

为对某钣金生产线进行优化,缩短生产时间以及提高产量,本文分别对投产序列和瓶颈分析 2 个方面进行优化,生产线得到有效提升。结论如下。

1) 结合遗传算法和 Plant Simulation 物流仿真软件求解模型,求得较好的投产序列,有效地减少生产线生产时间,相比原始投产序列缩短了约 15%。

2) 针对瓶颈问题,从缓存区设置位置和容量出发,通过 ExperimentManager 实验模块设计实验,得到合适的缓存区设置方案,缓解堵塞问题,生产线得到有效平衡,产量提高了 14.15%。

[参 考 文 献]

- [1] 涂集林,王永军,魏生民. 先进钣金成形技术及装备发展现状[J]. 航空制造技术,2015(16):44-47.
- [2] BIELE A, MÜNCH L. Hybrid approaches to optimize mixed-model assembly lines in low-volume manufacturing

- [J]. Journal of Heuristics,2018,24(1):49-81.
- [3] WANG T,FAN R,PENG Y J, et al. Optimization on mixed-flow assembly u-line balancing problem[J]. Cluster Computing,2019,22(4):8249-8257.
- [4] MAJIDIAN-EIDGAHI M, BABOLI A, TAVAKKOLI-MOGHADDAM R. Multi-objective optimization for mixed-model assembly line sequencing and balancing in the context of industry 4. 0[C]//2020 IEEE International Conference on Industrial Engineering and Engineering Management (IEEM). [S. l.]:IEEE,2020:1172-1178.
- [5] KIKOLSKI M. Identification of production bottlenecks with the use of Plant Simulation software[J]. Engineering Management in Production and Services,2016,8(4):103-112.
- [6] SIDERSKA J. Application of tecnomatix plant simulation for modeling production and logistics processes[J]. Business,Management and Education,2016,14(1):64-73.
- [7] 郑楠,岳磊. 基于 Plant Simulation 的智能制造测试床仿真模型设计与应用[J]. 工程设计学报,2019,26(5):552-560.
- [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.
- [9] 方赫,陆振东,宿彪,等. 基于 Plant Simulation 的冲压车间仿真优化[J]. 锻压技术,2020,45(12):85-89.
- [10] 彭运芳,梁玉珍,夏蓓鑫. 基于改进型遗传算法的混流 U 型装配线第二类平衡问题[J]. 上海大学学报(自然科学版),2021,27(2):360-368.
- [11] 黄亚星,袁秀志,于克勤,等. 基于 Plant Simulation 的发动机主轴智能锻造生产车间设计及仿真优化[J]. 锻压技术,2022,47(7):53-58,94.
- [12] 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.
- [13] ISHIBUCHI H, MURATA T. A multi-objective genetic local search algorithm and its application to flowshop scheduling[J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics, Part C (Applications and Reviews), 1998, 28(3):392-403.
- [14] 陆轶敏. 白车身焊装线仿真与优化研究[D]. 成都:电子科技大学,2019.

(责任编辑 吴 亮)