

机械工业智能化背景下的智能制造系统开发与优化

任焕梅

(上海建桥学院 机电学院, 上海 201306)

摘要: 为满足当前工业发展对制造业水平的高要求, 研究结合自动物流、机器视觉等技术, 开发了以工件自动化生产为主要功能的智能制造系统, 设计了该系统的硬件结构, 分析了其自动化加工生产流程。同时, 通过自适应技术对遗传算法进行改进, 并将其应用于该系统中, 进一步优化智能制造系统调度。结果表明, 改进算法在 25 次迭代左右才逐渐收敛, 最优解为 0.925 7, 收敛性能更优, 证明了该算法的有效性。将其应用于生产过程, 生产平衡率高达 92.57%, 工位耗时最高值为 35 s, 极大提升了该系统的调度能力, 为智能制造系统的开发与优化提供了实践参考。

关键词: 机械工业; 智能化; 遗传算法; 智能制造; 开发与优化; 自动化加工生产

中图分类号: TP18; TN164

文献标志码: A

文章编号: 1003-7241(2025)12-0168-05

Development and optimization of intelligent manufacturing systems under the background of intelligent mechanical industry

REN Huanmei

(Shanghai Jian Qiao University, Shanghai 201306, China)

Abstract: In order to meet the high requirements of current industrial development for manufacturing level, an intelligent manufacturing system with workpiece automation production as the main function is developed by combining technologies such as automatic logistics and machine vision. The hardware structure of the system is designed, and its automatic processing production process is analyzed. Meanwhile, the genetic algorithm is improved through adaptive technology and applied to the system to further optimize the scheduling of intelligent manufacturing systems. The results show that the improved algorithm gradually converges after about 25 iterations, with an optimal solution of 0.925 7. The convergence performance is better, proving the effectiveness of the algorithm. Applying it to the production process, the production balance rate is as high as 92.57%, and the maximum workstation time is 35 seconds, greatly improving the scheduling ability of the system and providing practical reference for the development and optimization of intelligent manufacturing systems.

Keywords: mechanical industry; intelligence; genetic algorithm; intelligent manufacturing; development and optimization; automatic processing production

0 引言

自 21 世纪以来, 德国、美国等发达国家进一步发展制造业, 部分发展中国家同样提出了自动化制造的远景规划^[1-2]。在国内外竞争日益加剧的背景下, 信息化管理大势所趋, 更多的制造企业将发展重点聚焦于智能制造系统。原因在于, 面对当前的生产需求, 传统的制造系统对于车间设备管理无法集中, 并且信息不透明, 设备的异常情况常常被忽略, 极大减缓了生产效率, 使得制造业的发展广受限制^[3-4]。而德国工业 4.0 技术的提出, 使得生产透明化与智能化成为现实, 企业竞争力逐步提高, 促进了制造业转型。现今, 在机械工业智能化背景下, 自动化技术在机械设计制造领域中被广泛运用, 很大程度上不但降低了制造成本, 还提升了产业生产效率。根据这一现状, 国内外诸多学者对车间调度问题进行了探讨。熊艳华等发现传统的车间调度

多数以大批量生产方向为中心, 忽略了小批量的生产方式, 一定程度上导致了实际应用价值的下降, 因此引入了 K-means 聚类进行调度优化^[5]。Sarwar M 等研究者针对当前制造生产规模扩大所导致的效率问题, 提出了基于模拟退火的优化算法, 其在一定程度上提升了生产效率^[6]。无论是国家还是企业, 都在科技日新月异的今天致力于信息化管理, 制造系统逐渐趋于智能化、自动化。在现代的制造型企业中, 生产计划的制定是重要前提, 而保证其有效执行则是有力保障。在此情况下, 以生产为中心, 合理地调控资源, 才能逐步提升生产效率和效益, 这便要求对智能制造系统进行调度优化。因此, 为改善智能制造水平, 研究利用工业 4.0 关键技术, 完成了智能制造系统搭建, 并改进遗传算法进行调度优化, 以期进一步实现制造智能化。

1 智能制造系统开发与优化

1.1 智能制造系统搭建

在当今机械工业智能化的大趋势下, 制造系统不再局

* 基金项目: 上海市晨光项目(AASH1805)

收稿日期: 2024-03-27

限于满足单一自动化设备的设计需求,转而关注提高设备之间的协同作用和联动能力。利用各种网络通信,可以实现制造系统设备的互通互连,从而在保证高效生产和促进自动化程度提高的同时,推动其向着智能化发展^[7-9]。研究结合工业 4.0 关键技术,搭建了智能制造系统。该制造系统的硬件结构相对复杂,首先包括两条路线,即皮带输送线和磁导航路线。其中,皮带输送线被伺服电机所控制,磁导航路线总计 28 米。同时,该系统包含一台激光打标机和钻铣加工中心、两台六自由度发那科(FANUC)机器人、一个立体仓库以及一辆自动导引运输车(automated guided vehicle,

AGV)。其中,AGV 中的调度系统同样隶属于所设计的智能制造系统。此外,该系统包括系统总控制台、制造执行系统(manufacturing execution system, MES)等重要组成部分。其中,该系统的硬件结构示意图如图 1 所示。如图 1 所示,在该智能制造系统中,工控机、FANUC 机器人、可编程逻辑控制器(programmable logic controller, PLC)属于整个系统中的关键部分,PLC 为主控单元,其与工控机及 FANUC 机器人相互连接。PLC 主要控制伺服电机实现皮带传送以及加工,并通过光电传感器监测立体仓库。各个模块的通讯主要通过传感器、控制器以及 PROFINET 总线实现。

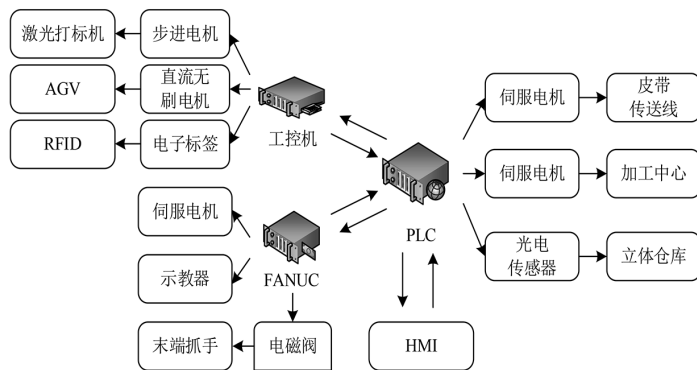


图 1 智能制造系统的硬件示意图

在零部件的加工过程中,传统管理方法会出现一定的误差和遗漏。因此,研究结合 MES、机器视觉、自动物流与工业机器人技术,实现了该制造系统的自动化且智能化。其中, MES 系统的软件利用上位机开发,并通过服务器等共同执行生产计划,所以这一系统主要发挥排产、数据采集、调度安排等功能。PLC 作为控制层的主控单元,按照控制、存储等需求,研究选择型号为 SIEMENS S7-

1200,并通过 PROFINET 进行通信和完成数据采集,最终达到控制设备的目的。实施层主要通过共同协作实现工件的自动化生产与加工。在整个智能制造系统中, MES 的应用是不可或缺的前提条件,其能够在不断的数据交互下,将所有的功能模块有机结合在一起,对生产数据进行全面处理,从而控制生产。研究所提出的智能制造系统的工件自动化加工生产流程见图 2。

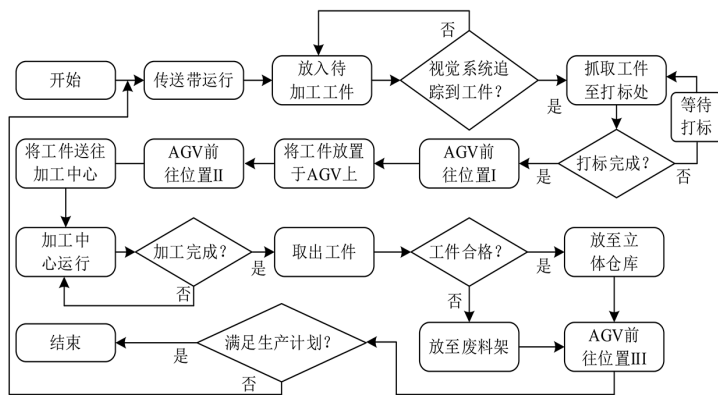


图 2 系统生产流程

在图 2 中,该系统首先将待加工的工件放置在皮带传送带上,接着利用视觉系统对工件的位置进行追踪。检测后机器人进行物料的抓取,在这一过程中,需要实时记录已加工的物料数量,同时将其与预先设定的生产计划进行对比。随后对物料进行打标,并判断打标是否完成,若完成,则将绑定物料与打标的相关信息。此时,AGV 将抵达预设的位置 I,将物料信息写入 RF 标签。接着 AGV 前往位置 II,对标签中的数据进行处理,并发送搬运信号。

之后, MES 系统发出加工任务,物料的加工处理开始进行。值得一提的是,物料种类不同,加工任务并不一样。机床的加工处理完成后,物料的加工数据通过系统读取绑定序列号,搬运机器人执行物料抓取任务。与此同时,成件质量进入评估过程。合格的工件置于立体仓库,并绑定对应的位置与序列号,数据库则存储该信息。对于不合格的工件,则被放进废料箱存储。最后,AGV 完成了其任务,会到达等待位,即位置 III,接收由 MES 系统发出的下

一个命令。而对于整个系统生产过程,生产看板都能实时监测,这便是一个完整的加工循环。

1.2 基于改进遗传算法的系统调度优化

虽然研究提出的智能制造系统能够完成自动加工生产过程,但运输时间长、生产线不平衡等弊端仍然存在。同时,在现代制造业中,系统调度重要性不言而喻,只有实时准确地控制生产进度,合理配置有限的资源,才能实现协同生产。而生产调度具有复杂性、随机性、约束性和多目标性,要使调度方案尽可能地协调各个部分,这也是最大的难题之一。为此,研究通过改进遗传算法进行该制造系统的调度优化,进一步实现智能调度,以提升该系统的运作能力。在生产管理中,假设一条生产线包含 M 台机器,需经过一系列工序加工 N 个工件,且这些工序的顺序是固定的。研究的目标是平衡各工序的工作时间,以最大化生产平衡率,最小化生产流程中的节拍时间,提高设备利用率,同时减少完成加工任务的最大流程时间,最终达到降低生产延迟的目的。由此构建出相应的数学模型,模型的目标函数及约束条件为

$$\begin{cases} \min C = \sum_{r=1}^R \sum_{s=1}^S T_{rs} \\ \max \eta = \frac{\sum_{s=1}^S T_{rs}}{S \cdot CT} \\ C'_{r_1 r_2^s} = U_{r_1 r_2^s} + T_{r_1 r_2^s} \\ C'_{r_1 r_2^s} - C'_{r_1 (r_2-1)(s-1)} \geq T_{r_1 r_2^s} \\ T_{r_1} \cap T_{r_2} = \emptyset \\ T_{rs} \leq CT \end{cases} \quad (1)$$

式中, T 表示工序集, T_s 代表第 s 道工序 ($s = 1, 2, \dots, S$)。 C 代表总完工时间, C' 为工序结束时间, U 表示工序的开始计时, CT 表示生产节拍。 η 为代表生产平衡率的最大值。 $\min C$ 表示最小完工时间所对应的调度方案。 $C'_{r_1 r_2^s}$ 表示从此道工序开始加工计时到结束为止的耗时。遗传算法利用遗传学理论构建数学模型,以求解最优解为最终目的^[10-12]。首先,该算法对要解决的问题进行编码,得到相应的染色体(个体)。所有个体会形成一个群体,并随机生成初始种群。接着,采用适应度函数进行适应值的计算,分析该数值是否满足要求。若达到终止条件,则输出最优解。若不满足终止条件,则继续更新种群,并通过交叉变异操作进入下一步的适应值计算。通过不断迭代,能够尽可能地趋近最优解。在传统的遗传算法中,交叉概率和变异概率对算法性能和行为起到了决定性作用。交叉概率和变异概率越大则可以更快地产生新个体,同时也会加大遗传方法被破坏的风险,从而导致适应值较高的个体被淘汰。同理,当交叉、变异概率较小时,会导致搜索过程缓慢,无法有效前进^[13-15]。为了解决这类问题,并更好地对最大化生产平衡率的调度问题进行求解,研究引入了自适应技术,将其应用于遗传算法的优化中。图 3 是改进遗传算法的执行过程。

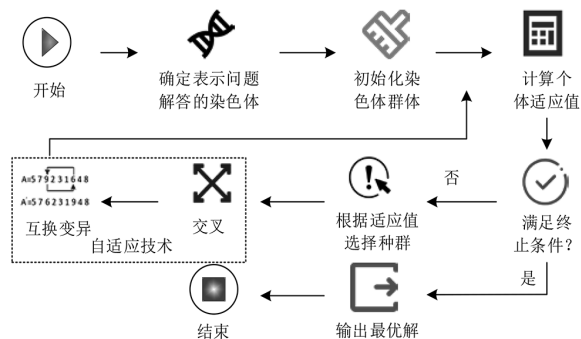


图 3 改进遗传算法流程

图 3 中,该方法在交叉与变异过程引入了自适应技术,通过适应度函数自动调整交叉概率和变异概率,进而使算法更具适应性和鲁棒性。通过该算法,研究将系统中的所有工序设成一个基因,通过调整基因的长度,控制时间的长短。单个染色体中不同的基因表示不同的解,即不同的调度方案,一般情况下,可以利用解码规则求出最优解中所有工序的时间。在该算法执行前,需要产生初始群体。研究通过计算机随机得到初始种群,去除较差的染色体,剩下的更优的染色体成为自带,以最大程度地保证最优化。解的质量需要通过适应度值评估,质量低的被排除,质量高的被选中。染色体的排除或纳入主要采用适应度函数进行计算,将其设定为

$$F = \eta \quad (2)$$

式中, F 则表示适应度值。遗传操作后进行选择操作,主要将所得较优个体遗传至下一代。研究通过轮盘赌方法使得染色体去留与适应度值相关联。染色体的去留评判通过式

$$P_h = \frac{F_h}{\sum_{i=1}^n F_i} \quad (3)$$

式中, h 表示染色体, P_h 代表选择概率。可以发现,染色体适应度值越大,其被确定为较优个体的可能性就越高。但该方法仍然会导致“早熟”,为此,交叉操作完成后,必须通过变异操作维持种群新鲜度。同时,自适应算法对种群进化初期的处理效果较差,因此研究通过最优保存使得迭代得到的最优个体均被保留。自适应遗传算法的交叉概率计算公式为

$$P_c = \begin{cases} P_{cu} - \frac{(P_{cu} - P_{cl})(F_l - F_{avg})}{F_{max} - F_{avg}}, & F_l > F_{avg} \\ P_{cu}, & F_l \leq F_{avg} \end{cases} \quad (4)$$

式中, F_{avg} 是平均值, F_{max} 表示最大值, F_l 表示交叉操作过程中的适应度较大值,并且隶属于父代。 P_c 表示交叉概率, P_{cu} 、 P_{cl} 均为交叉概率,分别对应适应度较差和较好的情况。变异概率与搜索的随机性成正比,其概率越大,随机性越大。概率越小,种群的多样性会大幅度下降。为寻找合适的变异概率,研究主要采用自适应技术进行计算,具体如式

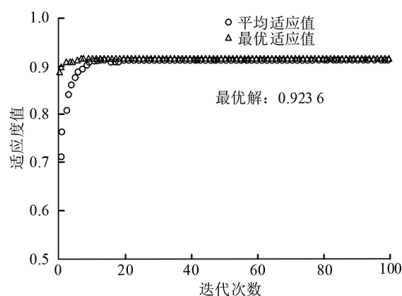
$$P_m = \begin{cases} P_{mu} - \frac{(P_{mu} - P_{ml})(F_{max} - F)}{F_{max} - F_{avg}}, & F > F_{avg} \\ P_{ml}, & F_l \leq F_{avg} \end{cases} \quad (5)$$

式中, P_m 表示变异概率, P_{mu} 和 P_{ml} 分别对应变异概率的最大和最小值。在运行过程中需要设置终止条件, 研究定为迭代 300 次, 适应度值在连续迭代 50 次后未改进, 适应度值在迟滞代数内的改变量不超过 $1e-6$, 满足其中之一, 则停止迭代。

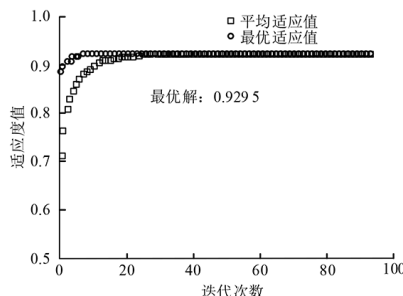
2 智能制造系统的优化调度效果分析

研究构建的智能制造系统可以进行多品种机器零件的加工, 为验证研究改进算法在该智能制造系统中的有效性, 通过 Matlab 软件对该系统调度进行仿真实验。实验

以某一型号的加工流程为例, 其涉及八项独立操作环节, 研究将其划分为五个工位, 每个工位作为一个独立实验对象。每个工位的作业时间均可调控, 同时考虑到物料运输所需时间。实验目的是探索一种高效的生产调度方案, 以减少设备闲置时间, 从而实现生产线平衡率的最优化。种群规模设定为 100, 传统遗传算法的交叉和变异概率分别为 0.8 和 0.01。图 4 是改进算法前后的迭代过程及结果。从图 4(a) 中可以发现, 传统遗传算法在迭代次数为 18 次左右即发生收敛, 最优解为 0.920 6, 收敛性较差, 陷入了局部最优。从图 4(b) 中可以看出, 改进遗传算法在 25 次迭代附近才逐渐收敛, 最优解为 0.925 7, 相比于传统遗传算法, 其最优解增加了 0.004 1, 可以获得全局最优值。说明改进遗传算法具有更优异的调度效果。



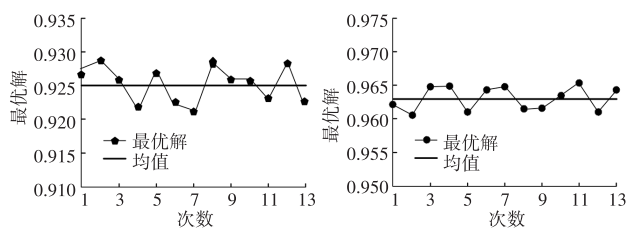
(a) 种群为 100 的传统遗传算法



(b) 种群为 100 的改进遗传算法

图 4 改进遗传算法前后的迭代过程及结果

研究继续探究不同算法的最优解分布情况, 图 5 是改进算法前后的最优解分布对比结果。从图 5(a) 中可以发现, 改进前算法的最优解波动较大, 均值为 0.925。从图 5(b) 中可以看出, 改进算法后的最优解曲线波动较小, 并且均值达到 0.963, 收敛稳定, 可以得到相对一致的最优解。说明改进算法的性能更优, 稳定性更强。

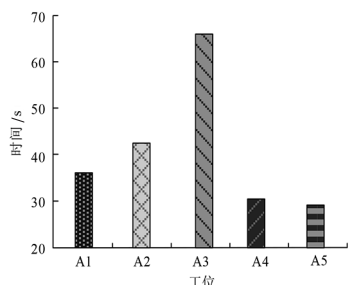


(a) 改进前的最优解分布 (b) 改进后的最优解分布

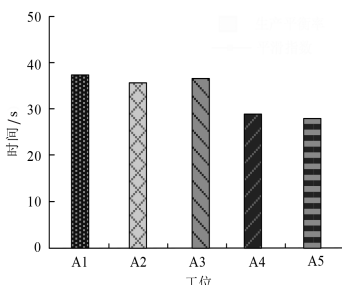
图 5 改进算法前后的最优解分布对比结果

通过对改进前后算法的仿真测试, 证明了改进算法的

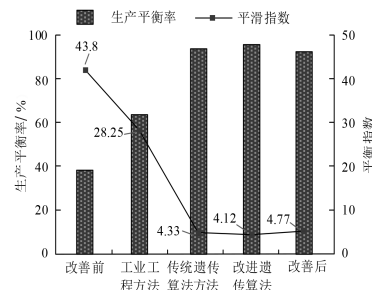
性能较好。研究进一步将其应用于智能制造系统实例中, 得到生产线平衡的影响结果如图 6 所示。图 6(a) 和图 6(b) 中, A1-A5 表示不同的工位, 纵轴为工位耗时。从图 6(a) 中可以发现, 在改善前, 最高耗时为 65 s, 波动较大, 并且均在 30 s 以上。从图 6(b) 中可知, 在改进算法应用后, 工位时间的波动相对较小, 最高值为 35 s, 并且出现两个工位耗时在 30 s 以下, 生产线更为平衡。生产线平衡情况可以通过平滑指数和平衡率反映, 平衡率越高, 平滑指数越低, 表示该生产线的平衡性越好。根据图 6(a) 和图 6(b) 即可计算出平衡指数和平衡率, 即图 6(c) 所示内容。从图 6(c) 中可以发现, 在原始生产线中, 平衡率仅为 38.65%, 相应的平滑指数却高达 43.8, 工序十分不平衡。在应用改进遗传算法后, 平衡率高达 92.57%, 平滑指数仅为 4.12, 极大解决了生产线平衡问题, 提升了智能制造系统调度水平。



(a) 改进前各工位时间分布



(b) 改进后各工位时间分布



(c) 生产平衡率与平滑指数比较图

图 6 生产线平衡的影响结果

3 结束语

智能制造是制造业转型的必经之路。据此,研究搭建了以机械制造业零部件加工为主要任务的智能制造系统,并针对其生产线不平衡等弊端,通过改进遗传算法进行调度优化,以进一步实现智能调度。结果显示,传统遗传算法在迭代次数为18次左右出现收敛,最优解为0.9206,陷入了局部最优。改进遗传算法在迭代25次时逐渐收敛,可以获得全局最优值。同时,改进前算法的最优解波动较大,均值为0.925,改进算法后的均值达到0.963,收敛稳定,性能更优。在改善前,工位耗时波动较大,均超过了30s。在改进后,波动相对较小,出现两个工位耗时在30s以下,生产线更为平衡。在原始生产线中,平衡率和平滑指数分别为38.65%、43.8,工序平衡性较差。应用改进遗传算法后,平衡率达到92.57%,生产线平衡问题得到较好解决,证明了所提方法对于智能制造系统优化的促进作用。但加工过程具有一定的动态性,不确定因素常常出现,未来需要通过实时分析提升智能制造系统调度的时效性。

参考文献

- [1] 张卫,王兴康,石涌江,等.工业大数据驱动的智能制造服务系统构建技术[J].中国科学:技术科学,2023,53(7):1084-1096.
- [2] 钟宏扬,刘建军,黎英杰,等.多层级装配作业车间分批调度算法设计与分析[J].工业工程,2023,26(4):124-134.
- [3] 胡一凡,张利平,白雪,等.深度强化学习求解柔性装配作业车间调度问题[J].华中科技大学学报(自然科学版),2023,51(2):153-160.

(上接第87页)

③ LogisticsRailCar按照UserController发送的物理实体驱动信号进行运动的同时,将自身的运动状态通过消息1.11、1.12、1.13反馈回UserController。UserController将对反馈数据进行记录并将之利用消息1.14传递至ModelCar。

④ ModelCar按照UserController传递的运动数据更新自身位置信息的同时,一方面会将之通过消息1.15.a实时映射至ModelCamera,另一方面会通过消息1.15.b反馈回UserController。

⑤ ModelCamera实时刷新包括ModelCar在内的所有三维模型在三维应用场景中的位置和运动状态,并通过消息1.16.a将管辖的可视化信息反馈至User。与此同时,UserInterfaceA将通过消息1.16.b将管辖的可视化信息并反馈至User。

3 结束语

本文基于数字孪生理论,为文献[4]提出的小尺寸航空标准件立体仓储系统开发了配套使用的数字孪生交互样机,一方面可在三维虚拟应用场景中再现物理实体样机的实时动作,对货箱托盘的储存状态进行记录;另一方面还可通过操作三维虚拟应用场景的相关按钮,控制物理实体样机进行对应动作;有效提升了航空标准件立体仓储系

[4] ZHENG X, HU X, ARISTA R, et al. A semantic-driven tradespace framework to accelerate aircraft manufacturing system design[J]. Journal of Intelligent Manufacturing, 2024, 35(1):175-198.

[5] 熊艳华,范业鹏,张潇月,等.基于叶轮等复杂部件的智能制造生产线设计[J].机床与液压,2024,52(4):106-111.

[6] SARWAR M, GULZAR W, ASHRAF S. Improved risk assessment model based on rough integrated clouds and ELECTRE-II method: an application to intelligent manufacturing process[J]. Granular Computing, 2023, 8(6):1533-1560.

[7] 金梁,李伟,朱清智.基于混沌遗传算法的农机铸件模具加工工艺优化研究[J].农机化研究,2022,44(11):225-228,233.

[8] 曹锦江,黄家才,陈道庆.面向机械加工的智能制造生产线控制设计与实现[J].制造业自动化,2023,45(7):70-74.

[9] 余娜,何国荣,李培东,等.基于改进SA算法在智能制造生产调度模型研究[J].计算机测量与控制,2023,31(11):293-298.

[10] 胡彦军,张彩虹,白燕青.基于大数据技术的大蒜品质智能化调控研究[J].农机化研究,2025,47(1):120-124.

[11] 罗锦泽,孟祥印,郭学理,等.基于数字孪生的产线设备实时监控方法与实现[J].计算机测量与控制,2023,31(11):212-220.

[12] 邢娜,刘彤军,孙晶,等.边云协同的数字化技术在生产信息管理系统中的应用[J].自动化技术与应用,2023,42(4):176-179.

[13] 郭伟飞,宋豫川,周璠,等.基于逆序虚拟零部件的紧密衔接综合调度算法[J].计算机集成制造系统,2020,26(12):3313-3328.

[14] 刘亮,姚春琦,贺禹铭.基于精益数字孪生体的智能制造系统设计[J].机械设计,2023,40(9):59-66.

[15] 张守京,王彦亭.基于改进NSGA2的柔性车间多目标智能调度问题研究[J].现代制造工程,2020(9):23-31.

作者简介:任焕梅(1982—),女,硕士,教师,研究方向:汽车新技术。

统的数字化操作水平和管理水平。

参考文献

[1] 黑龙江省人民政府.关于印发黑龙江省产业振兴行动计划(2022-2026年)的通[EB/OL].https://www.hlj.gov.cn/hlj/c108376/202206/c00_31186046.shtml?eqid=97fe1a4b003cae29000000264648266,2024-3-10.

[2] 黑龙江省人民政府.2024年政府工作报告.[EB/OL].https://www.hlj.gov.cn/hlj/c108465/202401/c00_31706519.shtml,2024-3-10.

[3] 黑龙江省人民政府.关于印发《黑龙江省加快推动制造业和中小企业数字化网络化智能化发展若干政策措施》的通知[EB/OL].https://www.hlj.gov.cn/hlj/c108373/202312/c00_31696434.shtml,2024-03-10.

[4] 吴文凯,李麒,董莘,等.一种适用于航空标准件贮藏运输的立体仓储系统设计方案初探[J].自动化技术与应用,2023,42(5):170-175.

[5] 中央网络安全和信息化委员会办公室.二十国集团数字经济发展与合作倡议[EB/OL].https://www.cac.gov.cn/2016-09/29/c_1119648520.htm,2024-3-10.

[6] 国家统计局.年度数据[EB/OL].<https://data.stats.gov.cn/easyquery.htm?Cn=C01>,2024-3-10.

[7] 中国信通院.全球数字经济白皮书(2023年)[EB/OL].<http://www.caict.ac.cn/kxyj/qwfb/bps/202401/P020240109492552259509.pdf>,2024-3-10.

[8] 陶飞,刘蔚然,刘检华,等.数字孪生及其应用探索[J].计算机集成制造系统,2018(1):1-18.

作者简介:李麒(1987—),男,助理研究员,硕士研究生,研究方向:机械仿真与智能装备领域机电一体化技术。