

基于数字孪生的拖拉机混流装配智能排产仿真评价

王纪章 刘哲 高志恒 王涛

(江苏大学农业工程学院, 镇江 212013)

摘要: 车间排产对提高车间的效率至关重要,智能排产可以极大提高加工的自动化和智能化水平。但传统生产过程中大多采用固定的工时数据进行产线作业时间估算,而拖拉机混流装配以工人作业为主,工人作业时间不固定甚至存在较大差异。为满足智能排产要求,提出通过数字孪生车间对生产计划进行仿真评价以增强与实际车间的交互与反馈。搭建与现场拖拉机装配线一致的数字孪生三维模型场景及人机交互界面,根据MES系统中的过点信息实现装配线模型实时驱动,建立了一个拓展性强、可灵活复用的数字孪生系统。分析了生产计划评价指标,提出通过生产计划管理系统与孪生装配线的交互反馈,实现对基于数字孪生装配线的生产计划仿真运行及评价。通过数字孪生装配线采集到的实际工时仿真运行生产计划,可以得到优化后的生产计划。将低产、正常和高产月份各5d内的实际生产计划与本系统生成的计划进行对比,结果表明本系统仿真评价后得到的生产计划更优越。

关键词: 智能排产; 拖拉机装配线; 数字孪生; 实时驱动; 仿真评价

中图分类号: TP278; S238

文献标识码: A

文章编号: 1000-1298(2024)04-0385-09

OSID:



Intelligent Scheduling Simulation Evaluation of Tractor Mixed-model Assembly Based on Digital Twin

WANG Jizhang LIU Zhe GAO Zhiheng WANG Tao

(School of Agricultural Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China)

Abstract: Workshop scheduling is very important to improve the efficiency of the workshop. Intelligent scheduling can greatly improve the level of automation and intelligence of processing. However, in the traditional production process, most of the fixed man-hour data were used to estimate the operation time of the production line, while the mixed flow assembly of tractors was dominated by workers, and the operation time of workers was not fixed or even quite different. In order to meet the requirements of intelligent scheduling, it was proposed to simulate and evaluate the production plan through the digital twin workshop to enhance the interaction and feedback with the actual workshop. A digital twin 3D model scene and human-computer interaction interface consistent with the on-site tractor assembly line were built. According to the passing point information in the MES system, the real-time drive of the assembly line model was realized, and a digital twin system with strong expansibility and flexible reusability was established. The evaluation index of production plan was analyzed, and the interactive feedback between production plan management system and twin assembly line was proposed to realize the simulation operation and evaluation of production plan based on digital twin assembly line. Through the actual working hours collected by the digital twin assembly line, the production plan can be simulated and the optimized production plan can be obtained. The actual production plans of low-yield months, normal months and high-yield months within 5 days each were compared with the plans generated by the system. The results showed that the production plan obtained after the simulation evaluation of the system was superior.

Key words: intelligent scheduling; tractor assembly line; digital twins; real-time driving; simulation evaluation

收稿日期: 2023-09-20 修回日期: 2023-11-30

基金项目: 国家重点研发计划项目(2020YFB1713503)

作者简介: 王纪章(1981—),男,副研究员,博士,主要从事农业信息处理技术研究,E-mail: whxh@ujs.edu.cn

0 引言

近些年,随着农业机械化的快速发展,农户对于拖拉机型号的个性化需求增加,传统单一品种的拖拉机生产线已经不能满足农户需求,因此许多拖拉机制造企业开始从单一品种生产线向多品种生产线发展^[1-2]。在生产排程过程中大多采用固定的工时数据进行产线作业时间估算,而拖拉机混流装配以工人作业为主,导致不同机型、不同工位的工人作业工时存在较大差异,且各个订单的交付期上有一定的差别,这都会增加生产排程的困难性和复杂性。

数字孪生是以数字化的方式建立物理实体的多维、多学科、多物理量、多时空度的动态虚拟模型来仿真和映射物理实体在真实环境中的属性、行为、规则等^[3-4]。数字孪生的概念最早由 GRIEVES 等^[5]提出,数字孪生早期主要应用在航空航天及军工领域,如美国空军研究实验室、美国国家航空航天局^[6]。随着数字孪生技术的不断发展,数字孪生已被很多企业应用到产品生产的各个阶段,如产品设计、制造和服务等^[7-8]。GE(美国通用电器公司)运用数字孪生技术开发了虚拟模型,实现了对设备更好地运维^[9]。西门子公司在自动化设备和计算机辅助制造系统运用了数字孪生^[10],还使用数字孪生技术设计制造了小型工控机 Nanobox PC^[11]。陶飞等^[12-13]提出了数字孪生车间的概念,阐述了数字孪生车间的特点、系统组成、运行机制、关键技术等,在此基础上探讨了基于车间孪生数据的车间物理世界和信息世界的交互与融合理论以及实现方法。郭东升等^[14]面向航天结构件制造车间研究了数字孪生建模,通过搭建车间物联网增强了车间数据的泛在感知,通过工业总线和数据接口实现了物理车间与数字车间的互联互通。关辉^[15]对某加工车间内的生产线、立体仓库、自动引导运输车(AGV)等各要素模块建立了数字孪生模型,并通过数据接口实现了各孪生模块之间的信息交互,用于对车间的规划进行仿真。

生产排程连接了生产计划和实际生产,其目标是在现有的生产条件和生产能力约束下,合理地安排一套最优的生产方案^[16]。订单分解问题和生产排序问题是生产排程问题下的两个分支问题,订单分解问题^[17]是指将现有订单合理地安排到各个生产日或产线进行生产,尽量减少产品的拖期、库存等问题。生产排序问题^[18]是指在一定生产环境下,将不同类型产品投入到同一条产线生产时,合理地安排产品的投产顺序,尽量减少生产时间等指标。目前各类多目标优化方法被应用于生产订单分解和生

产排序。陶泽等^[19]考虑工人进行跨工位操作和停线操作导致生产时间的变化问题,以最小化最长完成时间为目标应用混合遗传算法进行调度,使调度结果更符合实际生产状况。WEN 等^[20]研究了机器故障对生产排序产生的影响,针对动态集成过程规划与调度问题,设计了遗传算法与邻域搜索算法相结合的两种混合算法,并提出一种基于作业分类的工艺调整方法,提高了重调度方案的稳定性。郑勇军^[21]以零部件消耗均匀化作为优化目标,通过目标跟踪算法仿真出车型投产的最优排产顺序,并与零部件消耗情况对比,验证了目标追踪法得出的车型排序比原有排序更合理。张源等^[22]针对混合流水车间调度问题,以总工位切换时间作为优化目标,提出一种基于种群并行融合机制的改进遗传算法,缩短了总工位切换时间。但上述研究由于缺乏与实际车间的交互与反馈,导致其调度方案与车间实际运行情况仍有差别。数字孪生因具备虚实结合和实时交互的特性可以解决这一难题。阮兵等^[23]通过分析农机装配线的生产特点,提出将数字孪生应用到农机装配过程中以提高生产效率和设备故障诊断的智能化程度,并梳理了建设农机装配线数字孪生场景的系统架构及关键技术。郭大方等^[24]以玉米联合收获机为对象,开发了联合收获机的数字孪生系统,实现了模型预测、模型更新、实时监测和优化决策等功能,解决了脱粒过程中籽粒破碎率高的问题。邓凡杰等^[25]叙述了山区和边远灾区应急供水系统提水装备的发展现状,并针对山区多点高压输水存在管道泄漏的安全隐患,提出了将数字孪生应用到应急提水管网控制上,依靠物联网、大数据、5G 和云计算等技术完成从基础数据到数字化模拟,再到指挥调度和决策支持,实现自动化、信息化到智慧化的升级,大大提高了应急救援效率。本文针对拖拉机混流生产过程的智能排产需求,构建拖拉机装配线的数字孪生模型,通过工时数据与生产订单驱动数字孪生装配线的仿真运行,实现对生产计划的评价,同时通过数字孪生模型的仿真运行,为生产排程中发现瓶颈点和评估工位作业效率提供依据,以提高生产排产的准确性和可执行性。

1 拖拉机混流装配线智能排产

1.1 拖拉机混流装配生产计划管理过程

拖拉机混流装配生产计划管理的主要流程为:收集所有客户一周内所发出的订单,在客户发出订单后,与客户确定订单的具体交货时间。一般情况下,销售部门在周末将本周收集到的所有订单下发到生产部门,排产员根据订单信息对订单进行分类

整理;最后排产员会将分类后的生产订单排入到每日计划中。生产计划体系可以分为 3 个阶段:

(1) 订单收集阶段:在本阶段,客户将订单提交,相关部门将本周内所有的订单进行收集和编号后写入到订单信息表中,之后将订单信息表下发到生产管理部。

(2) 订单分解阶段:在本阶段,拿到订单后由生产管理部排产员根据订单信息表中的机型描述将订单的机型信息、配置信息和交货期进行人工鉴别和分类,然后将分类后的生产订单根据订单的交货期

安排到下周的各个生产日,生成订单分解结果。

(3) 生产计划排序阶段:在本阶段,需要将每日所需生产的订单生成详细的日生产计划,排产员根据订单的机型信息和配置信息对每日要生产的所有产品进行排序,生成最终日计划表。

由生产流程可以看出,在对本周收集到的新订单进行安排时,首先将订单按照机型进行分类,然后拆分订单并安排到下一周的各个生产日,最后对每日需要生产的订单进行生产排序生成最终生产计划,主要流程如图 1 所示。

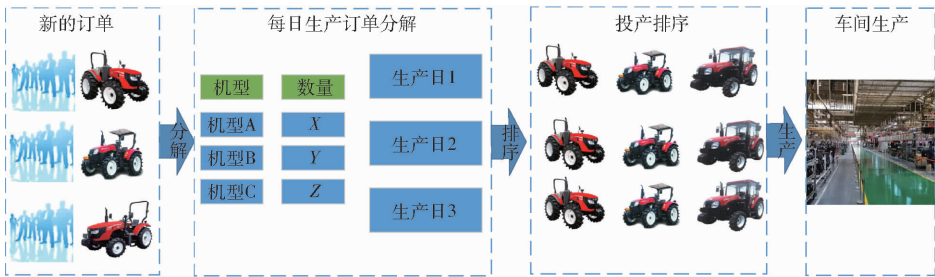


图 1 生产计划管理流程图

Fig. 1 Production plan management flowchart

1.2 基于粒子群算法的订单分解

以订单拖期成本、库存成本、停工成本以及超时成本 4 个因素为目标,构建总额外成本模型作为订单分解的优化模型,并使用粒子群优化算法^[26-27] (Particle swarm optimization algorithm, PSO) 对其进行求解,其流程如图 2 所示,主要流程为:①根据订单信息初始化种群和参数。②计算各个粒子的适应度。③更新个体最优解和全局最优解。④通过粒子的更新公式更新种群中粒子的位置和速度。⑤判断是否满足终止条件,如果不满足则返回步骤②,如果满足则直接输出最优解。

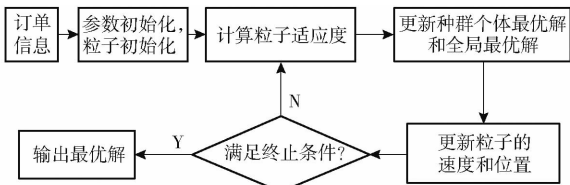


图 2 基于 PSO 算法的订单分解求解流程图

Fig. 2 Order decomposition flow chart based on PSO algorithm

1.3 基于改进病毒免疫算法的生产排序

对于生产排序问题,基于完工时间、停线时间、产品切换次数构建生产排序优化模型,并使用改进病毒免疫优化算法^[28] (Improved coronavirus herd immunity optimizer, ICHIO) 进行求解。其流程如图 3 所示,主要流程为:①初始化种群和算法参数。②使用自适应繁殖率社会距离公式更新种群和粒子状态,并替换病死粒子。③通过交叉变异操作更新种

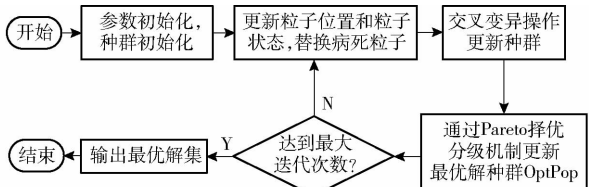


图 3 ICHIO 算法流程图

Fig. 3 ICHIO algorithm flow chart

群。④运用 Pareto 择优分级机制更新最优解种群。⑤判断是否达到最大迭代次数,如果达到则输出最优解集,否则返回步骤②。

2 拖拉机数字孪生装配线构建

2.1 数字孪生装配线系统组成

数字孪生装配线架构如图 4 所示,主要包括 3 方面:

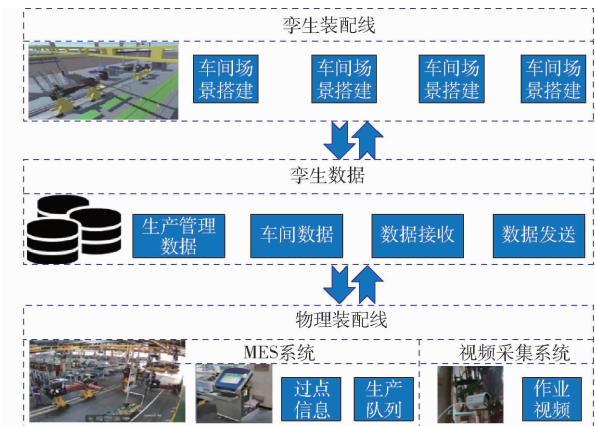


图 4 数字孪生装配线架构

Fig. 4 Digital twin assembly line composition

(1)物理装配线:产品实际生产的场所,是生产装配线所有实物的合集,包括产线各类生产设备、视频采集系统、MES 系统等。在实际装配线可以采集到 MES 系统中的生产队列信息、过点信息和架设在瓶颈工位上的视频采集系统采集到的工位作业视频数据等^[29-31]。

(2)孪生数据:主要是孪生装配线产生的运行过程数据和结果数据,以及物理装配线采集到的各类生产数据,可以实现孪生装配线的数据同步驱动和仿真驱动^[32-33]。

(3)孪生装配线:主要是产线的实体模型和信息的数据镜像,可以模拟产线生产运行过程,实现生产信息的三维可视化展示^[34-35]。驱动产线模拟运行的数据来源于物理装配线。

2.2 孪生装配线三维场景构建

对车间现场进行调研,提取车间内各设备的尺寸、结构和材质,使用 Solidworks 构建三维模型,将模型轻量化处理后导入 Unity3D 中进行渲染,形成装配线各要素的三维模型库,根据装配车间内不同区域的相对位置关系,将要素三维模型库中模型按照实际场景的位置进行部署,使孪生装配线的布局与实际相同。图 5 为搭建的拖拉机装配生产线三维场景布局。

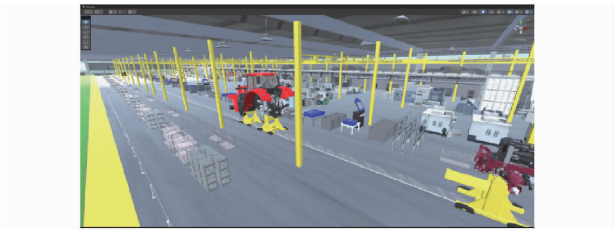


图 5 孪生装配线三维场景布局
Fig. 5 3D scene layout of twin assembly line

2.3 孪生装配线模型驱动

装配线运行逻辑主要包括:①产品在各工位之间的流转,即当前工位产品加工完毕后前往下一工位。②产品上线,即上线工位产品加工完毕前往下一工位后,在上线工位需要上线新的产品。通过上述两个过程的不断循环实现了生产过程的数字孪生。

2.3.1 孪生装配线模型运动原理

从运动学角度,将装配线内模型主要分为两类:

①静态模型,指不会发生运动以及位置不会发生变化的模型,父子结构之间不发生相对运动,例如厂房模型、厂房内料架和料箱等。②动态模型,指有相对运动或者位置会发生变化的模型,如台架、加工产品等,需要划分层次关系及父子组件关系。

为了实现实时数据驱动孪生装配线中的动态模型,对动态模型的运动流程进行分析,并根据三维图形变换理论定义模型的运动状态,在装配线运行数据更新时,孪生装配线内的动态模型能够执行相应的动作状态。在 Unity3D 中,模型的平移及旋转等运动根据三维图形变换理论编写相应的运动脚本来实现,孪生装配线中的动态模型随着物理车间设备或者产品的运动而同步运动。图 6 为装配线中板链台架工位切换运动过程。

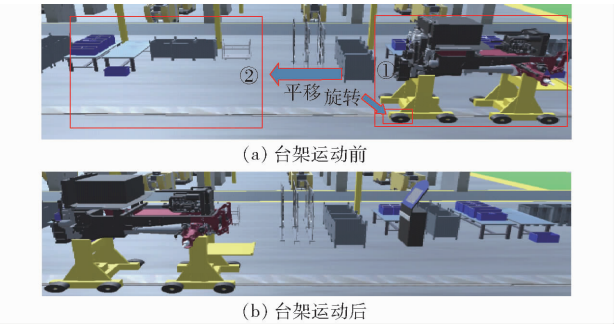


图 6 板链台架工位切换运动过程

Fig. 6 Process of station switching motion of plate chain bench

2.3.2 基于 MES 过点信息的孪生装配线模型实时驱动

在实际装配线中,装配线上的过点信息由 RFID 采集并存储到 MES 系统数据库,因此孪生装配线可以读取数据库中的过点信息来驱动孪生装配线仿真运行。MES 中过点信息包括机型信息和过点时间,而孪生装配线中的过点信息包括工位信息和产品模型位置。建立 MES 中过点信息与孪生装配线中的机型信息和模型位置信息之间的映射关系,即孪生装配线读取机型信息和过点时间,分别更新工位信息和产品模型位置。数据库中的 MES 过点信息和孪生装配线的过点信息之间的映射关系如图 7 所示。

装配线的过点信息更新后,装配线数字孪生模型能与物理装配线的实际生产情况同步变化,

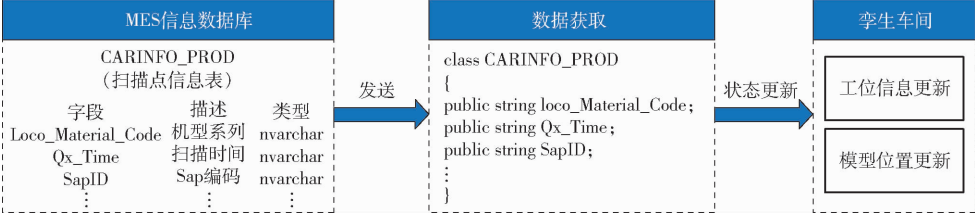


图 7 MES 系统数据驱动流程图
Fig. 7 MES system data-driven flow chart

通过调用 Unity3D 中 translate 组件结合三维图形变换来实现机型信息和模型位置信息的动态更新,实现孪生装配线与物理车间内生产过程的同步孪生。

2.4 基于工时数据的孪生装配线模型仿真驱动

基于工时数据驱动的生产计划仿真流程如图 8 所示。为了实现数字孪生装配线的仿真驱动,根据生产计划中的产品型号信息,检索工时数据库产线各个工位的工时数据,计算获得工位节拍信息,产生虚拟 MES 过点信息。通过 MES 过点信息实现孪生装配线模型的仿真驱动。其中触发各工位模型运动的行为从过点信息更新变为当前产线的节拍结束时间。在产线运行时间达到产线当前的节拍时间时,产品会前往下一个工位。之后遍历当前生产计划队列,如果队列内不为空,则取出当前生产计划队列排在第一的产品投入产线,同时删除队列中的产品信息;如果队列为空则表示生产队列都已投入产线。当所有产品加工完毕,仿真结束并输出结果信息。

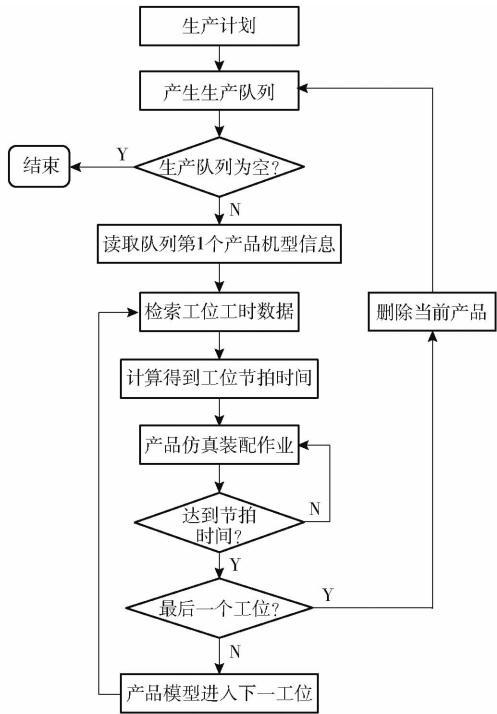


图 8 基于工时数据驱动的生产计划仿真流程图

Fig. 8 Production plan simulation operation flow chart based on man-hour data-driven

3 基于数字孪生装配线的生产计划仿真评价

3.1 生产计划评价指标

根据拖拉机混流装配生产计划的排产需求,将生产排序分为按日订单分解和逐日生产排序两步进行。根据生产计划的优化目标,生产计划的评价指标包括生产时间指标和生产成本指标。

(1) 生产时间指标

拖拉机装配线属于同步式产线,即在生产过程中所有产品按照同一个节拍运行至各个工位。对于拖拉机的混流装配生产时,由于不同的机型、不同工位的工人作业时间不同,导致各个工位的开始和结束时间不同,当出现某工位的作业时间超过节拍时,即出现瓶颈工位时,产线需要停线等待瓶颈工位完成后继续生产,从而产生停线时间。

假设产线需要生产 K 个产品,从产线上所有产品进入一个新的工位开始,到所有产品完成本工位的加工定义为一个阶段 l 。取当前产线上所有产品在当前阶段 l 时各工位最大理论加工时间作为当前产线的实际节拍时间 C_l ,则产线节拍时间为

$$C_l = \begin{cases} \max_s(t_{l,s}) & (l = 1, 2, \dots, L; s = 1, 2, \dots, S) \\ 0 & (l = 0) \end{cases} \quad (1)$$

其中

$$L = K + S - 1$$

式中

- s ——装配线上的工位数
- S ——装配线上的工位总数
- l ——所处阶段数
- L ——总阶段数
- $t_{l,s}$ ——处于 l 阶段时 s 工位所需加工时间

由实际节拍时间可得在投产位置为 k 的产品第 s 工位的加工开始时间 $S_{s,k}$ 和加工结束时间 $E_{s,k}$ 可表示为

$$S_{s,k} = \sum_{l=0}^{s+k-2} C_l \quad (s = 1, 2, \dots, S; k = 1, 2, \dots, K) \quad (2)$$

$$E_{s,k} = \sum_{l=0}^{s+k-1} C_l \quad (s = 1, 2, \dots, S; k = 1, 2, \dots, K) \quad (3)$$

由此得到实际节拍时间为

$$C_l = E_{s,k} - S_{s,k} \quad (4)$$

由上述过程可得到停线时间为

$$T_l = C_l - C'_l \quad (l = 1, 2, \dots, K - 1) \quad (5)$$

式中 C'_l ——当前产线的节拍时间

(2) 生产成本指标

当产品从产线生产完成后,如果生产完成时间在交货期之前,则需将产品存入仓库,产生相应的产品库存成本,如果生产完成时间在交货期之后则产生相应的拖期成本。库存成本和拖期成本的和 C_s 包括理论交货期 K_r 之前生产结束的订单 r 所带来的库存成本 S_r 和理论交货期 K_r 之后生产结束的订单 r 所带来的拖期成本 E_r ,可以表示为

$$C_S = \sum_{r=1}^R \sum_{d=1}^D t_{r,d} (K_r - d) [\phi_{r,d} S_r - (1 - \phi_{r,d}) E_r]$$

(6)

式中 R ——订单总数 D ——计划期总天数
 $t_{r,d}$ ——订单 r 在第 d 天的产品生产数量
其中 $\phi_{r,d}$ 用于判断订单 r 在第 d 天生产是需要支付库存成本还是拖期成本,0 表示产生拖期成本,1 表示产生库存成本。

当产品所需生产工时超出每日正常工作时间或者低于每日正常工时,会带来停工和超时,在计划期内停工和超时成本的和为 C_A ,可以表示为

$$C_A = \sum_{d=1}^D \left[T - \sum_{r=1}^R (t_{r,d} T_r) \right] [a_d M - (1 - a_d) O]$$

(7)

式中 T ——正常有效工作班制,min
 T_r —— r 订单中产品单件经验生产时间
 M ——每日不足正常生产工时的单位时间 (min) 停工成本
 O ——每日超过正常生产工时的单位时间 (min) 超时成本

其中 a_d 用于判断每日产生停工还是超时,0 表示超时,1 表示停工。

3.2 生产计划评价

在孪生装配线仿真运行过程中,通过数据库中的工时作为仿真运行的基础工时数据,然后根据仿真运行结果来评判生产计划的可靠性,判断是否需要调整生产计划。其具体过程为:在投入产品的过程中计算每一个产品在每一个工位的投入时间及完成时间,输出基于实际工时的详细生产计划信息,将实际工时仿真得到的运行结果与理论工时结果进行对比,如果差距小于设定阈值则表明当前计划与实际较为符合,如果差距大于设定阈值则将实际工时作为生产排序优化基础数据重新进行生产排序计算,详细流程如图 9 所示。

4 系统实现

4.1 生产计划管理系统

图 10 为所开发的生产计划管理系统界面,其主要功能包括生产订单导入、生产计划按日分解和逐日生产排序以及仿真评价等功能。用户在生产排程时,通过导入相应的生产订单后,系统根据基于粒子群算法的生产订单按日分解算法和基于改进病毒免疫优化算法的逐日生产排序算法进行生产排程。在完成生产排程后,通过 RabbitMQ 协议将计算得到的生产计划发送给数字孪生装配线进行生产计划的仿真评价。

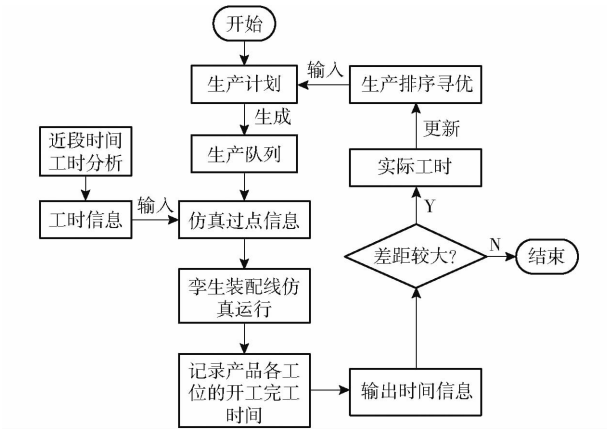


图 9 生产计划仿真评价流程图
Fig. 9 Production plan simulation evaluation flow chart



图 10 生产计划管理系统界面
Fig. 10 Production planning management system interface

4.2 基于数字孪生装配线的生产过程仿真

如图 11 所示,在孪生装配线接收到生产计划后,系统可以通过实际工时数据对生产计划进行仿真,在计划仿真面板里可以显示本次仿真运行的结果,用户可以通过查询各个产品在对应工位的作业情况,以及各个工位的产品生产情况,以了解当前生产计划是否存在瓶颈工位等信息。并将仿真结果反馈给生产计划管理系统用于生产计划的下发实施或重排。



图 11 孪生装配线仿真评价
Fig. 11 Twin assembly line simulation evaluation

5 应用案例与分析

考虑到在拖拉机企业中,2、7、12 月分别为产线的低产、正常和高产月份,分别在 3 个月份选取 1 周

(5 d) 的生产订单进行求解,每天工作时间为 480 min。订单分解问题的目标为每天的生产数量满足客户的订单需求,并使库存成本、拖期成本、停工成本及超时成本最小化。PSO 算法各组成部分参数设置为种群数量 200,迭代次数 500,学习因子 C_1 、 C_2 均为 2,惯性系数为 1。

为了验证订单按日生产排序的结果,以上述按日分解的 5 d 结果进行按日生产排序。生产排序的目标包括最小化总完工时间、最小化总停线时间和最小化产品类型切换次数。ICHIO 算法参数设置为种群规模 50,迭代次数 100,基本繁殖率下限和上限分别设置 0.2 和 0.7。图 12 为 ICHIO 算法每 10 次迭代后得到的最优解集进化过程散点图,随着迭代代数的增加不断地向更好的解前进,收敛性较好。

在生产计划管理系统获取到按日生产计划后,

表 1 生产时间对比

Tab.1 Comparison of production time									
项目	天数	完工时间/min		停线时间/min		切换次数/次		超时或停工时间/min	
		实际	优化	实际	优化	实际	优化	实际	优化
低产	1	421.8	462.7	2.3	0	3	2	58.2	17.3
	2	606.3	432.7	68.2	0	4	3	126.3	47.3
	3	408.6	478.1	20.7	8.4	2	6	72.6	1.9
	4	437.7	452.9	52.5	3.8	3	4	42.3	27.1
	5	493.1	388.2	38.2	2.3	3	0	13.1	91.8
	总和	2 367.5	2 214.6	181.9	14.5	15	15	312.5	185.4
正常	1	530.5	503.8	30.75	0	3	4	50.5	23.8
	2	541.0	546.25	2.3	0	4	4	61.0	66.25
	3	544.0	485.9	2.3	0	4	5	64	5.9
	4	467.3	503.9	2.3	2.3	2	4	12.7	23.9
	5	493.8	505.4	2.3	2.3	3	6	13.8	25.4
	总和	2 576.6	2 545.25	39.95	4.6	16	23	202	145.25
高产	1	567.4	564.6	2.3	0	2	5	87.4	84.6
	2	601.6	587.1	2.3	2.3	2	1	121.6	107.1
	3	568.6	578.5	2.3	0	3	3	88.6	98.5
	4	577.7	568.9	2.3	1.7	3	3	97.7	88.9
	5	593.6	598.2	2.3	2.3	2	7	113.6	118.2
	总和	2 908.9	2 897.3	11.5	6.3	12	19	508.9	497.3

表 2 生产成本对比

Tab.2 Comparison of production cost										元
项目	库存成本		拖期成本		超时成本		停工成本		总额外成本	
	实际	优化	实际	优化	实际	优化	实际	优化	实际	优化
低产	12 832	9 634	18 400	1 600	6 970	0	8 655	9 270	46 857	20 504
正常	25 182	23 380	4 600	4 000	9 465	7 265.5	635	0	39 882	34 642.5
高产	15 440	12 120	26 000	11 800	25 445	24 865	0	0	66 885	48 785

由表 1 可以看出,优化求解后的生产计划在低产、正常和高产月份 5 d 内的完工时间、超时或停工时间和停线时间总和比实际生产计划结果

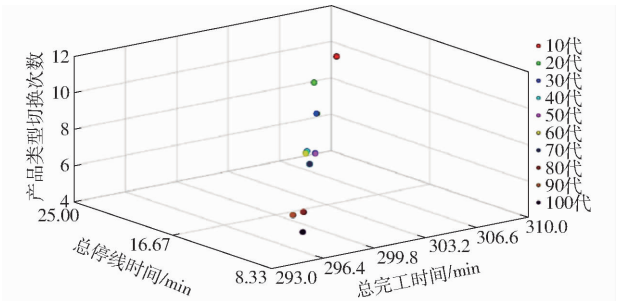


图 12 ICHIO 最优解搜索空间

Fig. 12 ICHIO optimal solution search space

生产计划管理系统将获取的排产计划发送到数字孪生仿真评价系统中进行仿真评价,生产成本模型中各类成本费用分别为:单位拖期成本 200 元,单位停工成本 50 元,单位超时成本 50 元。仿真评价获取的生产时间和生产成本结果分别如表 1、2 所示。其中实际为工厂实际生产计划运行结果,优化为通过本文的优化算法仿真运行结果。

小。完工时间总和和小,说明优化求解后的生产计划可以在更短的时间内完成所有工作;超时或停工时间总和和小,说明相较于实际生产计划,优化

求解后的生产计划所导致的停工或者超时问题得到了缓解;停线时间总和小,说明产线生产时所带来的停线等待时间减少,减少了产线的运行瓶颈;虽然优化求解后的生产计划在切换次数上略大于实际生产计划的切换次数,但综合来看,优化后的生产计划具有更大的优势。由表 2 可知,优化求解后的生产计划总额外成本相较于实际生产计划的总额外成本降低较大,能够提高企业的经济效益。

6 结 论

- (1)分析了拖拉机混流生产计划管理过程,阐述了基于粒子群算法的订单分解和基于改进病毒免疫优化算法的生产排序过程。
- (2)根据拖拉机装配线各工位的实际布置在

Unity3D 中搭建了车间的三维场景,根据产线 MES 系统中的实时过点信息实现了孪生装配线模型实时驱动。根据孪生装配线运行特点,研究了基于 MES 过点信息的孪生装配线模型实时驱动和基于工时数据的孪生装配线模型仿真驱动。

(3)从生产时间和生产成本两方面给出了生产计划的评价指标,研究了基于数字孪生的混流生产过程智能评价方法和系统,通过生产计划管理系统之间的交互,实现对智能排产结果评价。

(4)利用历史生产数据对生产计划进行了优化,通过基于数字孪生的智能评价系统进行了优化前后的生产计划评价分析,结果表明,优化后的低产、正常和高产月份 5 d 内的生产计划完工时间总和、停线时间总和以及超时或停工时间总和均更小,并且总额外成本降低较大。

参 考 文 献

[1] 呼格吉勒,葛雪,徐祝淇,等.汽车零部件 SPS 供货系统与装配线排序优化研究[J].汽车工程学报,2017,7(5):350-356.
HUGE Jile,GE Xue,XU Zhuqi,et al. Optimization of automobile parts SPS feeding policy and assembly line scheduling problem [J]. Chinese Journal of Automotive Engineering,2017,7(5):350-356. (in Chinese)

[2] 黄彩茹,杨文欣,吴永占.中型拖拉机生产线多品种生产拓展研究与应用[J].拖拉机与农用运输车,2013,40(4):66-74.
HUANG Cairu,YANG Wenxin,WU Yongzhan. Research and application of multi-production on medium tractor production line [J]. Tractor and Farm Transporter,2013,40(4):66-74. (in Chinese)

[3] TAO Fei, ZHANG Meng. Digital twin shop-floor: a new shop-floor paradigm towards smart manufacturing[J]. IEEE Access, 2017, 5:20418-20427.

[4] ZHANG C, LIU J, XIONG H, et al. Connotation, architecture and trends of product digital twin[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems,2017,23(4):753-768.

[5] GRIEVES M, VICKERS J. Digital twin: mitigating unpredictable, undesirable emergent behavior in complex systems[J]. Transdisciplinary Perspectives on Complex Systems: New Findings and Approaches, 2017,4: 85-113.

[6] GLAESSGEN E, STARGEL D. The digital twin paradigm for future NASA and US air force vehicles[C]//53rd Structures, In: Structural Dynamics, and Materials Conference: Special Session on the Digital Twin, 2012: 1-14.

[7] TAO F, SUI F, LIU A, et al. Digital twin-driven product design framework[J]. International Journal of Production Research, 2019, 57(11-12):3935-3953.

[8] TAO F, ZHANG M, LIU Y, et al. Digital twin driven prognostics and health management for complex equipment[J]. CIRP Annals-Manufacturing Technology, 2018, 67(1): 169-172.

[9] VACHÁLEK J, BARTALSKÝ L, ROVNÝ O, et al. The digital twin of an industrial production line within the industry 4.0 concept[C] //2017 21st International Conference on Process Control (PC), 2017:258-262.

[10] SCHLEICH B, ANWER N, MATHIEU L. Shaping the digital twin for design and production engineering[J]. CIRP Annals-Manufacturing Technology, 2017, 66(1): 33-35.

[11] GREYCE N, CHARLES S, CARLOS E P. Digital twin data modeling with automationML and a communication methodology for data exchange[J]. IFAC PapersOnLine, 2016, 49(30): 124-127.

[12] 陶飞,张萌,程江峰,等.数字孪生车间——一种未来车间运行新模式[J].计算机集成制造系统,2017,23(1):1-9.
TAO Fei, ZHANG Meng, CHENG Jiangfeng, et al. Digital twin workshop: a new paradigm for future workshop[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems,2017, 23(1):1-9. (in Chinese)

[13] 陶飞,程颖,程江峰,等.数字孪生车间信息物理融合理论与技术[J].计算机集成制造系统,2017,23(8):1603-1611.
TAO Fei, CHENG Ying, CHENG Jiangfeng, et al. Theories and technologies for cyber-physical fusion in digital twin shop-floor [J]. Computer Integrated Manufacturing Systems,2017,23(8):1603-1611. (in Chinese)

[14] 郭东升,鲍劲松,史恭威,等.基于数字孪生的航天结构件制造车间建模研究[J].东华大学学报(自然科学版),2018,44(4):578-585,607.
GUO Dongsheng, BAO Jingsong, SHI Gongwei, et al. Research on modeling of aerospace structural parts manufacturing workshop based on digital twin[J]. Journal of Donghua University (Natural Science), 2018, 44(4):578-585,607. (in Chinese)

[15] 关辉. 面向智能终端结构件加工的数字孪生车间关键技术研究及应用[D]. 武汉:华中科技大学, 2019.
GUAN Hui. Research and application of key technologies of digital twin workshop for intelligent terminal structural parts processing[D]. Wuhan:Huazhong University of Science and Technology,2019. (in Chinese)

[16] WUNSCH D, BRATUKHIN A. Multilevel order decomposition in distributed production[C] // 2007 IEEE Conference on Emerging Technologies and Factory Automation (EFTA 2007), 2007: 872 – 879.

[17] DAR-EL E, CUCUY S. Optimal mixed-model sequencing for balanced assembly lines[J]. Omega, 2009, 5(3):333 – 342.

[18] 唐国春. 排序论基本概念综述[J]. 重庆师范大学学报(自然科学版), 2012, 29(4):1 – 11.
TANG Guochun. Review of basic concepts of scheduling theory[J]. Journal of Chongqing Normal University(Natural Science), 2012, 29(4):1 – 11. (in Chinese)

[19] 陶泽,徐炜达,邵震霄. 具有跨工位操作的汽车总装车间调度仿真问题[J]. 系统仿真学报,2009,21(9):2527 – 2530.
TAO Ze, XU Weida, GAO Zhenxiao. Research on flow shop scheduling and simulation with multi-workstation operation in auto assemble workshop[J]. Journal of System Simulation,2009,21(9):2527 – 2530. (in Chinese)

[20] WEN X, LIAN X, QIAN Y, et al. Dynamic scheduling method for integrated process planning and scheduling problem with machine fault[J]. Robotics and Computer-Integrated Manufacturing, 2022, 77:102334.

[21] 郑勇军. SPS 模式下物料消耗平准化的混流装配线车型排序[J]. 汽车零部件,2016(5):31 – 33.
ZHENG Yongjun. Research on sequencing mixed-model assembly lines based on set part supply[J]. Automobile Parts,2016 (5):31 – 33. (in Chinese)

[22] 张源,陶翼飞,王加冕. 基于并行融合机制的改进遗传算法求解 HFSP 调度问题[J]. 计算机应用与软件,2022,39(6): 252 – 257.
ZHANG Yuan, TAO Yifei, WANG Jiamian. An improved genetic algorithm for HFSP scheduling problem based on parallel fusion mechanism[J]. Computer Application and Software,2022,39(6):252 – 257. (in Chinese)

[23] 阮兵,张可心,曾鹏,等. 农机装配产线数字孪生系统建设路径研究[C] //2021 年工业建筑学术交流会论文集,2021.

[24] 郭大方,杜岳峰,栗晓宇,等. 云-雾-边-端协同的农业装备数字孪生系统研究[J]. 农业机械学报,2023,54(10):133 – 141.
GUO Dafang, DU Yuefeng, LI Xiaoyu, et al. Digital twin system for agricultural machinery with cloud – fog – edge – terminal architecture[J]. Transactions of Chinese Society for Agricultural Machinery,2023,54(10):133 – 141. (in Chinese)

[25] 邓凡杰,司乔瑞,李方忠,等. 山区和边远灾区应急供水系统提水装备发展现状[J]. 排灌机械工程学报,2023,41(6): 614 – 623.
DENG Fanjie, SI Qiaorui, LI Fangzhong, et al. Review on water carrying equipment for emergency water supply system in mountain and remote disaster areas[J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2023,41(6): 614 – 623. (in Chinese)

[26] 刘凤杰,薛仁政. 混合粒子群算法求解作业车间调度问题[J]. 高师理科学刊,2022,42(6):38 – 43.
LIU Fengjie, XUE Renzheng. Hybrid particle swarm optimization for solving job-shop scheduling problem[J]. Journal of Science of Teachers' College and University,2022,42(6):38 – 43. (in Chinese)

[27] 陈强,王宇嘉,林炜星,等. 改进粒子群算法求解分布式柔性车间调度问题[J]. 电子科技,2021,34(10):63 – 68.
CHEN Qiang, WANG Yujia, LIN Weixing, et al. An improve particle swarm optimization algorithm for distribution and flexible job-shop scheduling problem[J]. Electronic Science and Technology,2021,34(10):63 – 68. (in Chinese)

[28] AL-BETAR M A, ALYASSERI Z, AWADALLAH M A, et al. Coronavirus herd immunity optimizer (CHIO)[J]. Neural Computing and Applications,2020,33:5011 – 5042.

[29] HAMEED B, KHAN I, DURR F, et al. An RFID based consistency management framework for production monitoring in a smart real-time factory[C] //Internet of Things, Iot for a Green Planet, Tokyo. IEEE, 2010:1 – 8.

[30] ZHAO G. Wireless sensor networks for industrial process monitoring and control: a survey[J]. Network Protocols & Algorithms, 2011, 3(1):46 – 63.

[31] CUTTING-DECELLE A F, BARRAUD J L, VEENENDAAL B, et al. Production information interoperability over the internet: a standardised data acquisition tool developed for industrial enterprises[J]. Computers in Industry, 2012, 63(8):824 – 834.

[32] LEE H. Framework and development of fault detection classification using IoT device and cloud environment[J]. Journal of Manufacturing Systems, 2017, 43:257 – 270.

[33] GAO R, WANG L, DORNFELD D, et al. Cloud-enabled prognosis for manufacturing[J]. Cirp Annals Manufacturing Technology, 2015,64(2):749 – 772.

[34] RUSSO D, RIZZI C. Structural optimization strategies to design green products[J]. Computers in Industry, 2014, 65(3): 470 – 479.

[35] LIU J, LIU X, NI Z, et al. A new method of reusing the manufacturing information for the slightly changed 3D CAD model [J]. Journal of Intelligent Manufacturing, 2018,29(8):1827 – 1844.