

面向离散型产线的资源配置仿真优化研究

张大伟, 王旭东, 赵哲, 张小英, 唐鑫森*

四川航天川南火工技术有限公司, 四川 泸州

收稿日期: 2025年8月15日; 录用日期: 2025年9月6日; 发布日期: 2025年9月15日

摘要

针对离散制造行业多品种、小批量的生产特性及常见的离散型产线资源配置需求, 以企业离散型装配产线为研究对象, 本文基于Plant Simulation开展了离散型产线的资源配置仿真优化研究, 以工艺流程、设备节拍、工作时间等约束条件为输入构建了产线仿真模型, 匹配生产产能目标, 系统建立资源配置优化策略, 通过分析评估产线设备利用率、库房容量、制造波动等相关数据, 进行了离散型产线全流程仿真, 实现了在给定产能条件下的资源配置调优, 为产线规划提供参考及支撑, 最终指导离散型产线的构建及资源配置。

关键词

离散型产线, 仿真优化, 资源配置, Plant Simulation

Simulation-Based Optimization of Resource Allocation for Discrete Production Lines

Dawei Zhang, Xudong Wang, Zhe Zhao, Xiaoying Zhang, Xinsen Tang*

Sichuan Aerospace Chuannan Initiating Explosive Technology Limited, Luzhou Sichuan

Received: Aug. 15th, 2025; accepted: Sep. 6th, 2025; published: Sep. 15th, 2025

Abstract

Addressing the multi-variety, small-batch production paradigm and prevalent resource allocation challenges in discrete manufacturing, this study examines a discrete assembly production line at an enterprise. Using Plant Simulation, we conducted simulation-based optimization of resource allocation for discrete production lines. A simulation model was developed with inputs including process flows, equipment takt time, and operating hour constraints, calibrated to production capacity targets. A systematic resource optimization strategy was formulated. Through analysis of equipment

*通讯作者。

文章引用: 张大伟, 王旭东, 赵哲, 张小英, 唐鑫森. 面向离散型产线的资源配置仿真优化研究[J]. 仪器与设备, 2025, 13(3): 489-499. DOI: 10.12677/iae.2025.133059

utilization rates, warehouse capacity, and manufacturing variability metrics, a full-scale discrete-event simulation of the production line was executed. This enabled resource configuration refinements under specified capacity conditions, providing actionable insights for production line planning. Ultimately, the framework guides discrete production line design and evidence-based resource allocation.

Keywords

Discrete Production Lines, Simulation-Based Optimization, Resource Allocation, Plant Simulation

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

随着生产制造向数字化、智能化迈进,传统的离散型制造企业的生产模式也逐渐转型升级,大量的数字化生产线随之建立,但离散型生产属性仍然对生产制造有着较大限制,特别是在当前空间资源成本越来越高、生产设备越来越昂贵、生产工艺复杂多样的情况下,提高设备利用率,节约人力资源,降低劳动强度,合理规划生产线工艺布局以实现生产线的调整优化是每个离散型制造企业仍然需要面临的现实问题,特别是在物流系统的基础上,如何做到最优的资源配置以提升企业竞争力将是一个难以依靠人工经验回答的难题。通过计算机仿真在产线规划建立前进行综合评估,可以有效减少产线节拍不平衡、产线瓶颈环节多、设备利用率低、物流路线不合理、产线投资与产能输出不平衡等问题的发生[1][2],同时对现有约束条件下的规划设计可行性进行计算验证,满足多目标产线设计方案快速迭代需求,高效评估输入性风险,缩短产线设计周期。

计算机仿真与虚拟现实技术的不断发展,使数字化工厂技术在制造业得到了越来越多的推广应用,特别是系统仿真技术在生产线规划中已被广泛应用,其主要通过模型体现真实系统的动态流程,在识别仿真对象后,制定一个系统化的仿真目标,通过采集相关数据,将概念模型转化为软件模型,利用相关算法对模型进行计算,通过迭代寻找优化解,其具有科学可靠、高效直观等优点[3][4]。常用的如 Plant Simulation、Witness、Flexsim 等商业软件均能用于产线系统仿真,满足诸如物流路线规划、物流强度求解、产线布局优化等现实需求,其中 Plant Simulation 作为高效的离散事件仿真软件工具被大部分团队采用[5]-[7],其归类分析、建模思路及算法等是和同类软件共通的,但是对于离散型产线,仍然有很多要点需要注意,特别是要体现多品种、小批量的特点以及断点多,人与设备混合生产等现实情况[8],在仿真过程中予以体现才能真实贴合离散型产线的特点。而在实际针对离散型产线的仿真中,大量工作集中于产线仿真模型构建和基于给定资源的结果仿真输出,而忽略了仿真反向对生产线的优化,本研究聚焦资源配置的优化,开展仿真实践,为同类工作提供借鉴。

2. 仿真目标与模型构建

2.1. 仿真对象及仿真目标

企业新规划建设某产品装配生产线工房布局如图 1 所示,该生产线具备典型离散生产线特征,工艺布局根据产品装配状态不同分为区域 1 和区域 2,区域 1 由 1 台 AGV 负责物料流转,其余物料流转环节由另 1 台 AGV 负责。该生产线上总计 37 个设备,其配置如表 1 所示,设备根据用途分为装配设备、暂

存设备、接驳位、运输设备以及其他设备，装配设备及其他设备均设置上料区与下料区，用于物料缓存。此外，部分设备无法直接与 AGV 对接，以接驳位作为中转位，人工对设备进行上下料，其余设备则直接由 AGV 进行上下料。

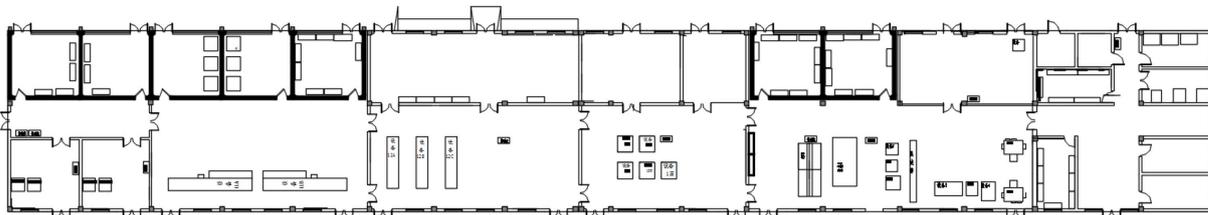


Figure 1. Assembly line layout overview

图 1. 装配生产线布局概览

产线建立后发现实际产能与规划产能存在一定差距，产能潜力尚未完全释放，拟通过 Plant Simulation 进行仿真优化，开展产能计算、瓶颈工序分析及库容评估，从而调整资源配置，提升设备利用率，进一步提升产线制造能力。

Table 1. Production line equipment and basic data

表 1. 产线设备及基础数据

设备名称	节拍	操作人员数量	物料周转工装	最大料盘数量	故障率	维修时间
设备 1	30 s/F	0	料盘 1	5	10%	5 min
设备 2	20 s/F	0	料盘 1	5	10%	30 min
设备 3	50 s/F	0	料盘 1	3	10%	30 min
设备 4	20 s/F	0	料盘 1	5	10%	20 min
设备 5	10 min/盘	1	料盘 2	5	10%	5 min
设备 6	20 s/F	1	料盘 1	5	10%	30 min
设备 7	20 s/F	1	料盘 1	5	10%	30 min
设备 8	40 s/F	1	料盘 1	5	10%	30 min
设备 9	10 s/F	1	料盘 1	5	10%	10 min
设备 10	30 s/F	1	料盘 3	6	10%	30 min
设备 11	20 s/F	0	料盘 1	6	10%	30 min
设备 12	30 s/F	1	料盘 1	6	10%	30 min
设备 13	30 s/F	1	料盘 1	6	10%	30 min
设备 14	10 s/F	1	料盘 1	6	10%	10 min
设备 15	30 s/F	1	料盘 1	6	10%	30 min
设备 16	0.8 m/s	0	全部兼容	6	10%	30 min

2.2. 产线模型建模

2.2.1. 工艺流转控制

整个生产流程由物料及工艺流程驱动，当某装配设备或其他设备空闲且所需原料存在，则由设备或

人工发起上料任务，AGV 或人工将原料转运至设备上料区；当该工序加工完成且暂存设备空闲(干燥柜或线边货架)，则由设备或人工发起下料任务，AGV 或人工将原料转运至暂存设备，直到产品完成所有装配工序。

每个产品及料盘均添加 State 属性，表示其状态，产品状态与工序号唯一绑定，明确产品流向；料盘状态用于任务锁定，判断该盘产品能否生成 AGV 或人工取放任务。

2.2.2. 设备工作控制

利用单工站(SingleProc)的 Proctime 属性设置装配设备单个产品加工时间，其他设备(如烘箱、清洗机)采用函数(Method)元素控制其产品加工时间。

产品均放置在料盘中进行流转，部分设备每次仅能加工单个产品，每个设备均可缓存多个料盘，装配设备拆码垛通过函数(Method)控制。设备空闲时，上料区料盘中单个产品进入设备，该产品加工完后，放入下料区的料盘中。

2.2.3. 物料运输控制

整个物料运输流程如图 2 所示，当满足周转任务条件时，生成物料运输任务，当 AGV 或人工空闲时，将任务下发给 AGV 或人工，接收到转运任务后，根据任务出发点与目标点，分配对应的 AGV 或人工进行周转，周转完成后，AGV 或人工回到等待位。

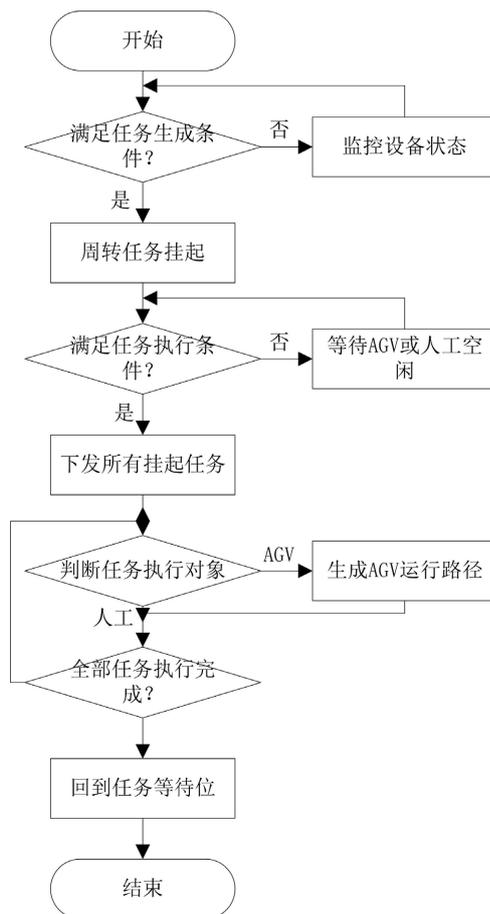


Figure 2. Material handling task process
图 2. 物料运输任务流程

1) 路径规划

在仿真模型中采用 Mark 点表示 AGV 实际地图路线中的站点与节点，通过表格(Table)建立站点与各个设备对应关系、站点间连通关系及站点距离。如图 3 所示，基于 Dijkstra 算法求解任意两个站点之间的最短路径作为 AGV 运行路径，在仿真软件中通过递归函数实现 Dijkstra 算法。

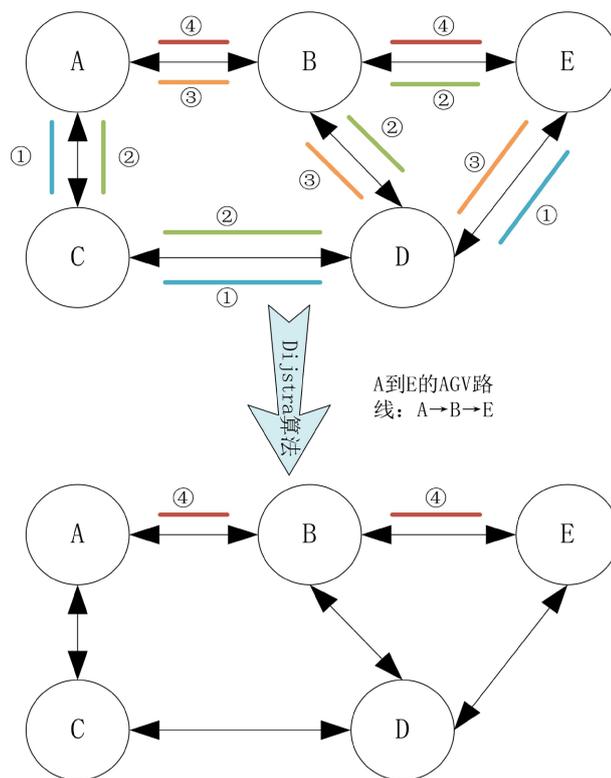


Figure 3. AGV path planning
图 3. AGV 路径规划

人工行走路径设置为沿通道行走，当有多条道路时，软件默认采用最短路径，仅需按照实际情况绘制人工通道。

2) 任务生成

运输任务包括 AGV 运输任务与人工运输任务，整条生产线包括 2 台 AGV 及 8 个工人，不同 AGV 及工人各自负责对应区域运输任务。AGV 任务生成分为两种情况：一类设备能够与 AGV 直接对接自动上下料，则自动请求上下料生成运输任务；另一类设备仅能人工上下料，则由人工在接驳位处发起上下料任务。为模拟人工运输，针对需要人工上下料的设备空闲且有原料或加工完成时，由设备发起人工运输任务。

3) 任务派发

受限于离散型产线的安全约束条件，AGV 在该产线采用点对点通信方式，运行中处于离线状态，任务生成后均添加至挂起任务表(Table)。每条任务中包含 Status 属性，描述该条任务是否具备下发条件，监控程序(Method)重复检查各条任务并刷新 Status 值，若具备下发条件则锁定该条任务对应物料。当 AGV 到达通信站点后，将所有具备下发条件任务下发至执行中任务表(Table)，人工任务依次执行即可，无需派发。

4) 任务执行

AGV 任务执行逻辑为根据执行任务表接收任务顺序依次执行, 若 AGV 未处于任务取料点, 则先生成前往取料点路径, 到达后检索锁定物料并取走, 转运至放料点并更新库位状态, 人工任务同理。

2.2.4. 产线模型构建

将上述的工艺流程控制逻辑、产线设备控制逻辑、工作时间表、设备节拍、物流逻辑等按照软件元素进行数字化定义并建模, 最后得到基于 Plant Simulation 软件的离散型生产线仿真模型如图 4 所示。生产线中各个设备与仿真模型各元素映射关系如图 5 所示。

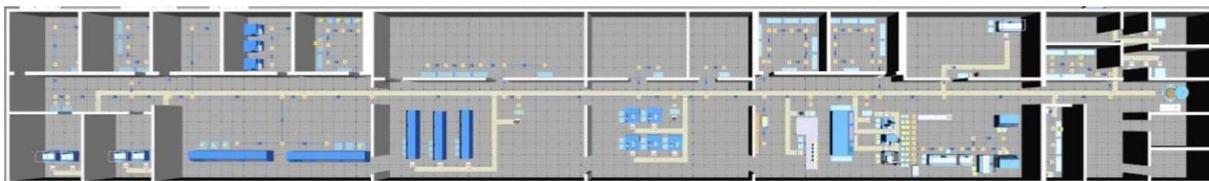


Figure 4. Production line simulation model

图 4. 生产线仿真模型

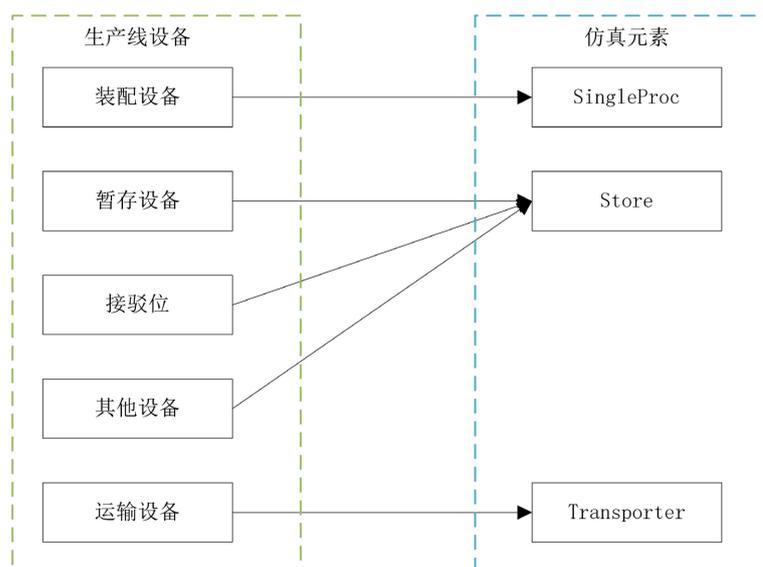


Figure 5. Mapping relationship between production line equipment and simulation model elements

图 5. 生产线设备与仿真模型元素映射关系

AGV 所有路径由 Mark 点组成, 根据物料周转任务实时生成 AGV 路由; 料盘采用容器(Container)元素表示; 零组件及产品由实体(Entity)元素表示; 工人由工人(Worker)元素表示, 工人工作逻辑由函数(Method)控制, 采用轨道(Track)作为工人行走通道; 采用系统出口(Drain)作为产品加工完成品出库区, 设备上下料区采用存储(Store)元素表示。

3. 仿真结果与分析优化

3.1. 区域 1 仿真结果

区域 1 仿真模型如图 6 所示, 以连续生成 1 万发产品作为仿真输入, 得到各个设备的利用率。根据

仿真结果可得, 当前区域 1 连续生产 1 万发产品约需 50 天(每天工作 8 小时), 各个设备利用率如图 7 所示。

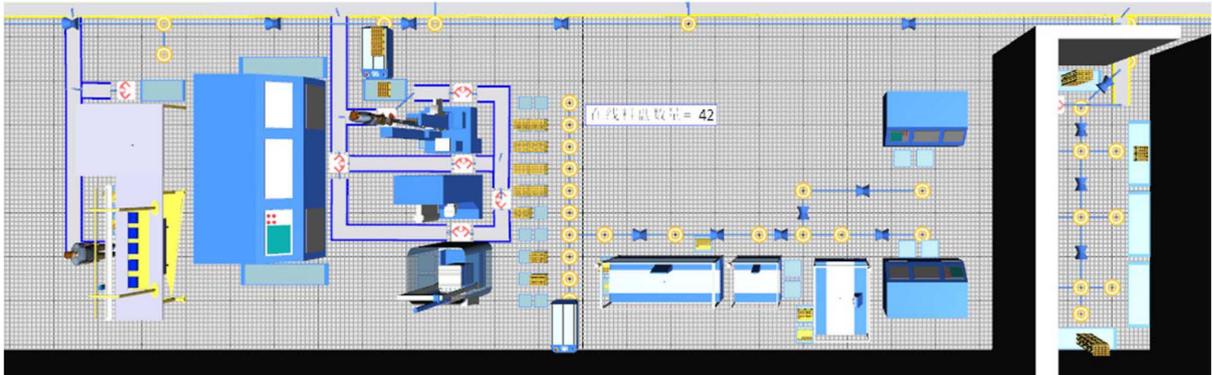


Figure 6. Simulation model for zone 1
图 6. 区域 1 仿真模型

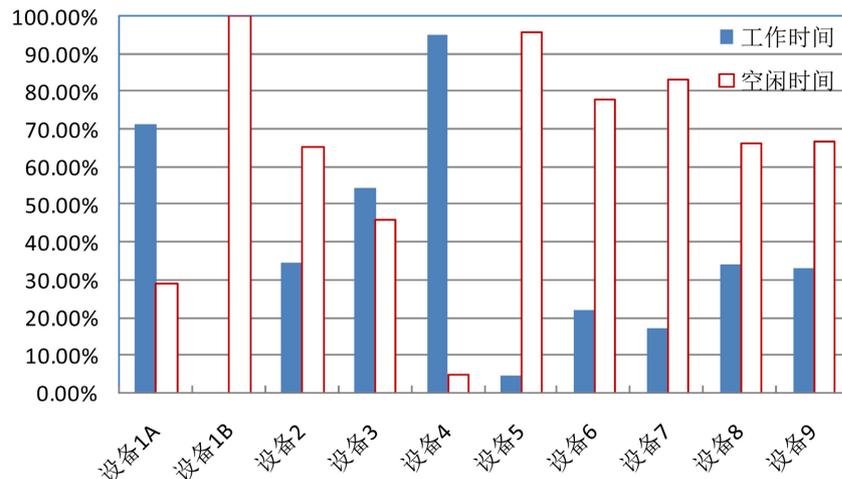


Figure 7. Equipment utilization rate in zone 1
图 7. 区域 1 各设备利用率

由图 7 可以看出, 区域 1 设备 4 利用率高达 95%, 长时间处于工作状态, 导致后续设备长时间等待设备 4 完成产品生产, 因此该对应工序为瓶颈工序。设备 5 产能上限较高, 设备使用率仅为 4.38%, 其余设备由于等待设备 4 加工, 物料在货架上堆积, 导致物料流转较慢, 利用率较低。为解决瓶颈工序带来的影响, 增加一台设备 4B 进行仿真, 增加后仿真模型如图 8 所示。

同样以连续生成 1 万发产品作为仿真输入条件, 配置两台设备 4 情况下, 区域 1 生产完成时长为 30 天(每天工作 8 小时), 相比单台设备 4, 产能能够提升约 40%。该条件下各个设备利用率如图 9 所示。

由图 9 可知, 当增加 1 台设备 4 后, 各个设备的利用率均有所提高, 此时由于设备增加、物料流转速度加快, 导致设备 3 工作时间增加, 该设备利用率达到了 90%, 成为了新的瓶颈工序, 同时尽管增加了 1 台设备 4, 两台设备 4 利用率依然超过 80%, 对产能依然有较大影响。

在离散型产线中, 各工序无法并行进行, 串行生产过程对产线的节拍平衡要求较高, 合理配置各生产设备的配比可以有效实现物料的快速均衡流动, 但是从投资 - 产出角度考虑, 生产目标为量纲的前提

下，能满足生产能力下的最小投资为产线的最优资源配置。

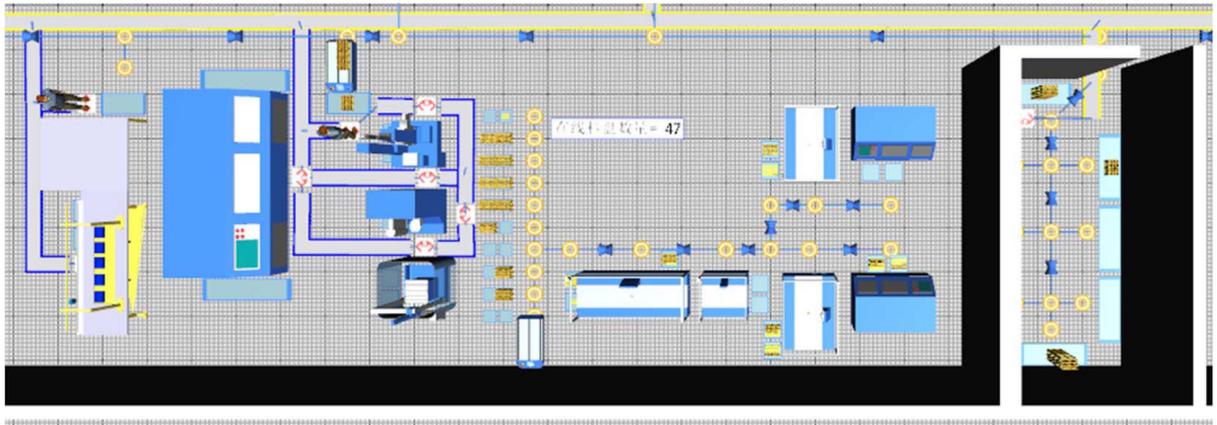


Figure 8. Optimized simulation model
图 8. 优化后仿真模型

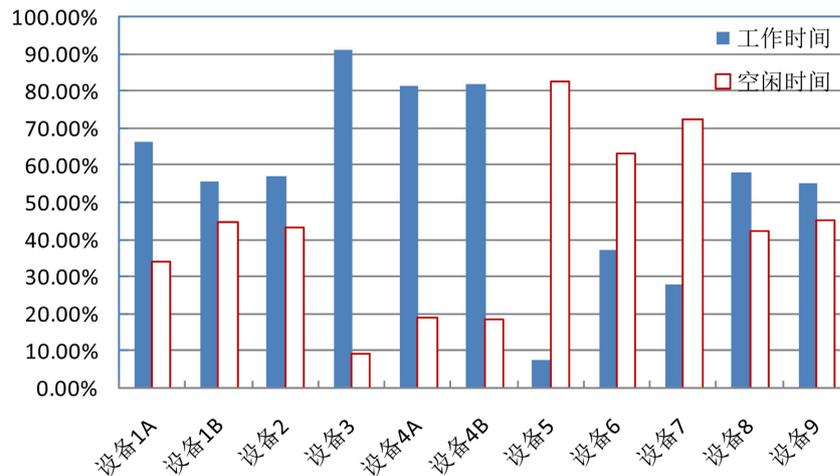


Figure 9. Optimized equipment utilization rate in zone 1
图 9. 优化后区域 1 各设备利用率

3.2. 区域 2 仿真计算

3.2.1. 产能评估

区域 2 进行仿真计算时，成品出库按照现场每周出库 1 次逻辑进行模拟，区域 1 设备不工作，区域 2 中所需区域 1 加工产品均假设已加工完成。区域 2 仿真模型如图 10 所示。

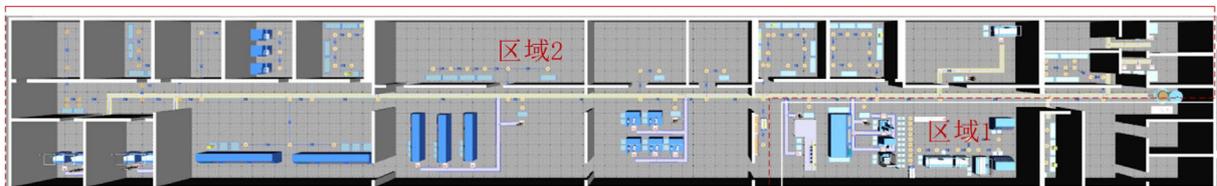


Figure 10. Simulation model for zone 2
图 10. 区域 2 仿真模型

以生成 1 万发产品作为仿真输入条件, 现有条件下区域 2 连续生产 1 万发产品时间约为 23 天(每天 8 小时), 各个设备利用率如图 11 所示。

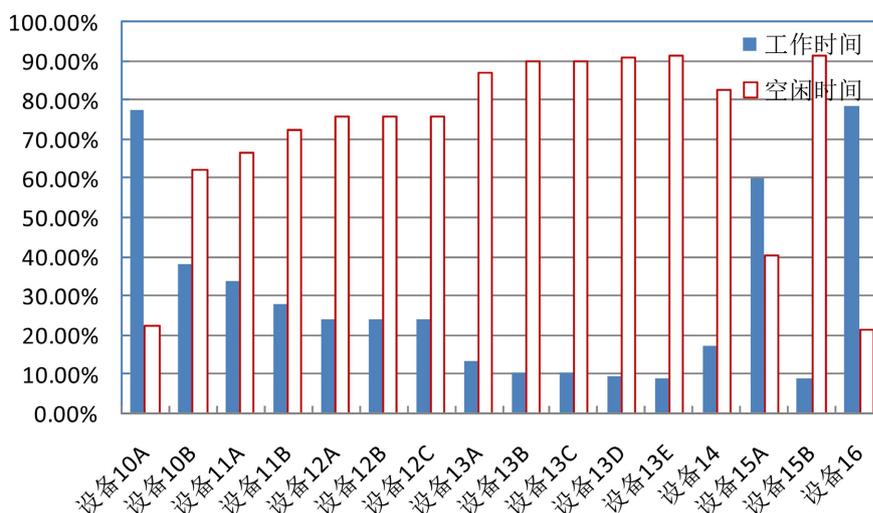


Figure 11. Equipment utilization rate in zone 2

图 11. 区域 2 各设备利用率

根据图 11 结果可以发现, 设备整体利用率均未超过 80%, 仅有设备 10A 和设备 16 (AGV) 利用率达到 78%, 其余大部分设备利用率均不足 40%, 因此在不考虑原料来源情况下, 物流转运是影响区域 2 产能的主要因素。其余设备利用率较低的根本原因也是设备长时间等待 AGV 转运物料, 从而产生空闲时间较多。

由于 AGV 物流强度较大, 其原因包括 AGV 数量过少或 AGV 调度策略有待优化。针对 AGV 数量过少情况, 增加 1 台 AGV (设备 16B) 进行转运。在同样条件下, 模拟连续生成 1 万发产品, 区域 2 仿真运行时长为 15 天(每天工作 8 小时), 相比单台设备 16, 产能能够提升约 34.5%。各设备利用率如图 12 所示。

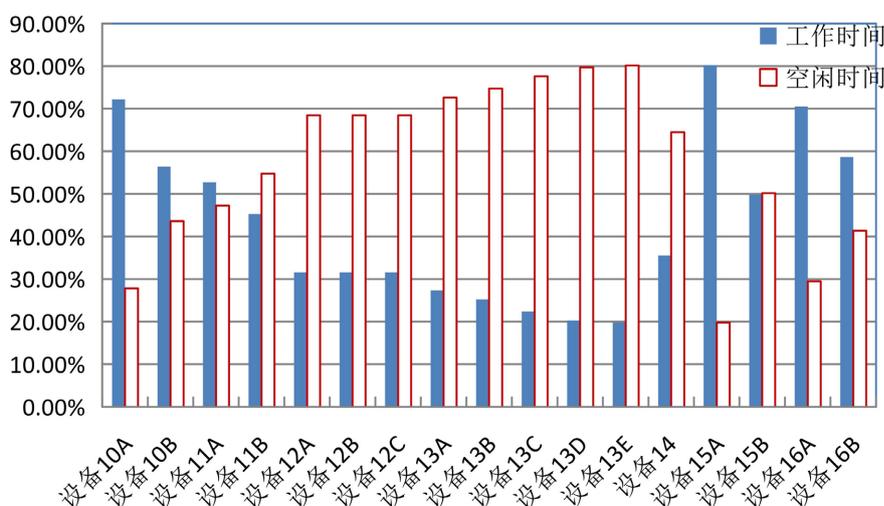


Figure 12. Equipment utilization rate in zone 2 with 2 AGVs

图 12. 2 台 AGV 情况下区域 2 各设备利用率

根据图 11 可知, 当增加 1 台 AGV 之后, 物料流转速度加快, 各个设备利用率均有明显提升, 并且两台 AGV 利用率分别为 70.53% 和 58.64%, 增加 1 台 AGV 能够明显缓解物流压力。此外, 设备 14 由于只有 1 台, 导致出现了产品堆积的情况, 该设备利用率达到了 80%。

离散型产线中的物流强度较大, 单台 AGV 在多个并行任务中响应能力的不足是限制产线产能的主要因素, 其归因于 AGV 与设备物流需求不平衡导致。

3.2.2. AGV 调度策略优化

针对 AGV 调度策略, 目前 AGV 任务执行策略为接收到若干待执行任务后, 依次执行任务, 可能会导致 AGV 有效转运时间浪费。因此, 优化调度策略为: 当有若干待执行任务后, 以 AGV 当前任务终点为起点, 计算各个任务取料点与起点距离, 按照距离最近重新对任务排序。其余条件不变情况下, 模拟连续生成 1 万发产品, 现有条件下区域 2 连续生产 1 万发产品仿真时间约为 20 天(每天 8 小时), 各个设备利用率如图 13 所示。

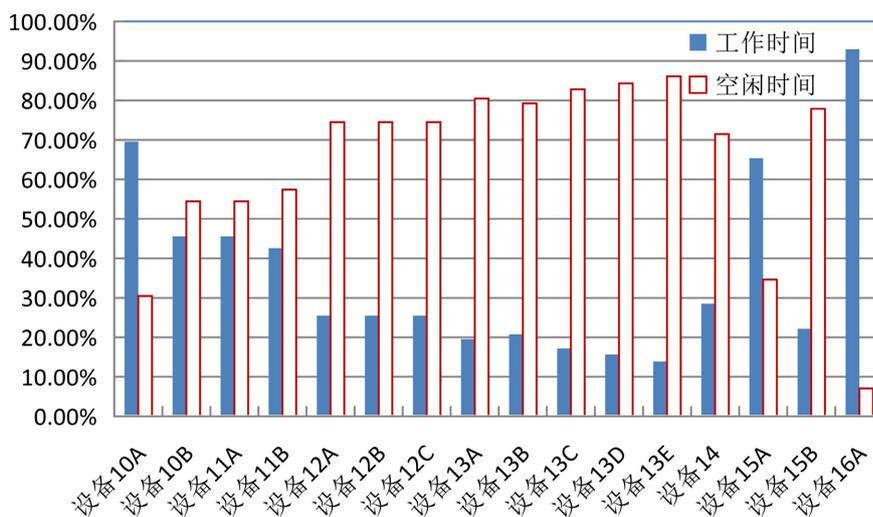


Figure 13. Equipment utilization rate in zone 2 with optimized scheduling strategy
图 13. 优化调度策略后区域 2 各设备利用率

根据图 13 可知, 通过优化调度策略后也可提升各设备利用率, 同时也能进一步挖掘 AGV 产能, AGV 利用率上升到了 92.95%, 明显提升了 AGV 有效转运时长。但相比于增加 1 台 AGV, 产能增加有限, 也从侧面印证了产线不平衡的情况下提升单台设备利用率并不能显著提升产能, 而增加设备对产能的提升更为有效, 可进一步释放生产线产能。

3.2.3. 产线库存容量评估

生产线产品加工完成后需要存放在库房中, 需要衡量库房容量是否能够满足存储需求, 共计 16 个存储位, 根据仿真结果, 如图 14 所示, 成品库房最大同时占用率约为 75%, 当前库库存位基本能够满足产线暂存需求, 无需优化。

4. 结论

本文针对离散型生产线建立了基于实际布局、工艺流程、物料周转流程、AGV 实际运行逻辑及库位管理等多约束条件的仿真模型, 从生产要素归类分析、数字化定义、系统建模、仿真计算及优化等多

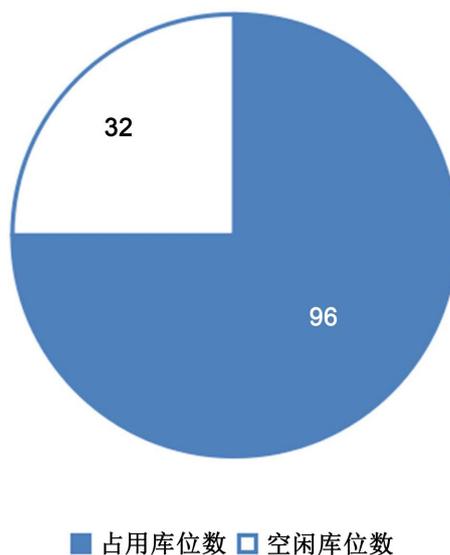


Figure 14. Storage location utilization rate
图 14. 库房库位利用率

方面实现了既定目标。以产能计算、瓶颈工序分析及库容评估为目标进行仿真试验，并根据仿真计算结果进行了资源配置优化与分析，为离散型生产线建设提供了科学有效的评估方法，支撑了实际产线的布置及资源配置。

参考文献

- [1] 李世荣. 数字化工厂实践指南: Plant Simulation 系统仿真与建模手册. 基础卷[M]. 北京: 机械工业出版社, 2021.
- [2] 李世荣. 数字化工厂实践指南: Plant Simulation 系统仿真与建模手册. 仿真分析与优化卷[M]. 北京: 机械工业出版社, 2021.
- [3] 邱伏生, 陈涤新, 李志强, 等. 智能工厂物流构建: 规划、运营与转型升级[M]. 北京: 机械工业出版社, 2022.
- [4] 郑维明, 王玲, 王刚, 等. 数字化制造生产线规划与工厂物流仿真[M]. 北京: 机械工业出版社, 2020.
- [5] 方宇光. 基于 Plant Simulation 的柔性离散化产线仿真探索[J]. 电子技术与软件工程, 2022(19): 34-37.
- [6] 江涛, 刘雪梅. 基于 Plant Simulation 的双离合器装配线仿真优化[J]. 农业装备与车辆工程, 2025, 63(6): 97-102.
- [7] 崔俊杰, 马臻, 郭海青. 基于 Plant Simulation 仿真技术的装配生产线优化研究[J]. 南方农机, 2025, 56(2): 145-149.
- [8] 任海林, 郭磊. 面向离散制造的产线仿真系统设计[J]. 自动化应用, 2023, 64(20): 218-220.