

数字化车间物料动态配送规划研究

孙军艳, 李晶晶, 张媛媛

(陕西科技大学 机电工程学院, 西安 710021)

摘要: **目的** 针对数字化生产车间工位物料需求时间的不确定, 导致物料配送不准确、不及时的问题, 提出一种动态物料配送策略。**方法** 首先, 根据工位关联度和变动时间窗确定实时的配送工位和协同配送工位, 设计基于工位排序的动态物料配送路径优化策略。其次, 建立以配送成本和时间窗偏离惩罚成本综合最小为目标函数的数学模型。最后, 提出并采用系统动力学仿真与蚁群遗传融合算法联合的方法对模型进行求解。**结果** 模拟算例表明, 与静态物料配送优化策略相比, 该策略的平均时间成本减少率为30.1%, 平均库存减少率为14.86%。**结论** 该策略能够根据动态时间窗确定配送工位和协同工位, 并实时调整配送顺序, 实现物料配送的动态自适应性调整, 降低总配送成本。融合算法在迭代次数、收敛性、最优解质量方面有明显优越性。

关键词: 工位排序; 系统动力学; 物料配送; 路径规划; 算法融合

中图分类号: TH165⁺.1 文献标识码: A 文章编号: 1001-3563(2023)01-0101-10

DOI: 10.19554/j.cnki.1001-3563.2023.01.012

Dynamic Material Distribution Route Planning for Digital Workshop

SUN Jun-yan, LI Jing-jing, ZHANG Yuan-yuan

(School of Mechanical and Electrical Engineering, Shaanxi University of Science and Technology, Xi'an 710021, China)

ABSTRACT: The work aims to propose a dynamic material distribution strategy aiming at the problem of inaccurate and untimely material distribution due to uncertain material demand time in the station of digital production workshop. Firstly, the real-time distribution station and co-working station were determined according to the station correlation degree and change time window, and the dynamic material distribution route optimization strategy based on station sorting was designed. Secondly, the mathematical model with the objective function of minimizing the total distribution cost and the time window deviation cost was established. Finally, a combined method of system dynamics simulation and ant colony genetic hybrid algorithm was proposed to solve the model. The simulation results showed that compared with static material distribution optimization strategy, the proposed strategy realized the average time cost reduction rate of 30.1%, and the average inventory reduction rate of 14.86%. The strategy can determine the distribution station and co-working station and adjust the distribution sequence in real time according to the dynamic time window, realizing the dynamic self-adaptive adjustment of material distribution, and reducing the total material distribution cost. The fusion algorithm has obvious advantages in iteration number, convergence and optimal solution quality.

KEY WORDS: station sorting; system dynamics; material distribution; route planning; algorithm fusion

物料配送是制造车间生产经营流程中最基本的活动, 对物料进行科学有效的管理是车间生产稳定执行的基础。

当前, 由于车间物料消耗速率的非线性, 存在线边工位缺料、余料堆积、物料配送滞后、配送出错等问题, 为此, 大量学者对线边物料配送策略展开了研

收稿日期: 2022-04-23

基金项目: 陕西省社会科学基金项目(2020R043); 陕西省科技厅项目(2018GY-026); 西安市科技局项目(2021-0023)

作者简介: 孙军艳(1978—), 女, 博士, 副教授, 主要研究方向为智能供应链管理。

究。王昀睿等^[1]考虑物料消耗规律,提出基于混流生产模式的物料配送路径规划策略,采用改进蚁群算法求解以总成本最低为目标的优化模型。周炳海等^[2]基于物料循环配送策略,考虑装配线线边库存的容量约束设计,以线边总库存最小为目标建立了数学规划模型。Simon等^[3]基于准时制生产方式(Just in Time, JIT),考虑物料中间存储和路径依赖约束设计了物料配送策略,优化了物料配送周期和批次。韩兵等^[4]考虑工位等待、配送执行费用,优化了在定量、定时、即时配送方式下的线边物料配送策略。Zhou等^[5]提出一种改进的静态装配策略以优化物料配送过程,以物流工人数最小为目标建立整数规划数学模型,并利用改进动态微分进化算法求解。周晓晔等^[6]考虑配送次数与线边库存量间的背反关系,建立基于循环物料配送策略的优化模型,降低了配送总成本。陆志强等^[7]考虑成批配送和线边空间利用问题,提出了配送与存储集成的配送策略,同样优化了配送总成本。

现实中的物流消耗是实时动态变化的,上述研究大多基于车间已知的静态数据,因此,线边工位缺料、配送滞后问题依然存在。随着信息化、物联网技术不断更新迭代,大量学者基于数字化物联网车间的实时数据对物料配送策略进行优化。刘雪梅等^[8]提出了一种动态联合补料策略,即决策系统通过实时产生的生产线数据对物料配送方案进行调整,物料中心根据方案安排配送工位组的划分、对生产线进行主动式配送。杨清等^[9]通过多元数据感知和中间件技术为配送模型提供的实时数据信息,考虑剩余运力、关联程度和生产计划,建立动态物料配送模型。葛妍娇等^[10]根据工位实时生产状态,基于智能感知网建立以最小物料配送成本为优化目标的配送优化模型,动态调整了各工位配送时间窗。Alnahhal等^[11]提出了一种考虑不确定因素的动态配送策略,即通过物联网E-看板系统获得的信息与基于已知的产品模型序列和预期物料点需求信息相结合,确定了物料的最佳配送区间。张世文等^[12]通过射频识别技术(Radio Frequency Identification, RFID)和超宽带技术(Ultra Wide Band, UWB)混合的定位技术和瓶颈物料识别方法,提出了基于实时定位的物料配送策略,提高了配送准确性。伍伟民等^[13]利用RFID和复杂产品装配物料精细化管理方法,构建了日作业计划的物料配送策略,实现了对配送过程精细化控制。刘玉浩等^[14]基于动态配送时间和数量的物料配送方法,考虑物料价值、包装体积,并结合变异系数以确定重点配送物料,建立配送总成本模型。沈维蕾等^[15]基于物联网实时获取装配信息,提出了拉动式物料配送模式,建立了以实现准确配送为目标的配送系统。

不过,上述研究多是基于各工位实时的单点需求,采用及时响应的配送策略,虽然在一定程度上解决了工位缺料、配送滞后等问题,但是仍存在AGV

配送频次过高、装载率过低,AGV数量过多、配送成本过高等问题。

文中以各工位实时物料需求数据为基础,引入协同配送的理念,提出了“主配送工位+协同配送工位+协同工位顺序实时调整”的动态协同配送策略。核心思想是:在配送最紧急工位(主配送工位)物料的同时,基于其他工位物料需求的紧急程度和配送到达时间,将虽未达到线边库存下限的工位,在满足AGV容量的情况下,进行协同配送,并在协同配送的过程中,根据协同工位物料消耗的情况,实时地调整协同工位的配送顺序。文中提出的动态协同配送策略不仅提升了配送的时效性,实现了精准配送,而且进一步降低了配送成本,实现了线边物料配送环节的动态自适应调整,为数字化车间动态物料配送路径规划提供新的研究思路。

1 物料动态配送策略设计

静态物料配送路径规划(Static Material Distribution Path Planning, SMDP)策略是指根据规划好的路线进行配送,配送过程中配送线路不再调整。考虑到配送过程中物料需求的实时变动性,文中设计了一种动态物料配送路径规划(Dynamic Material Distribution Path Planning, DMDP)策略,DMDP实现流程见图1。

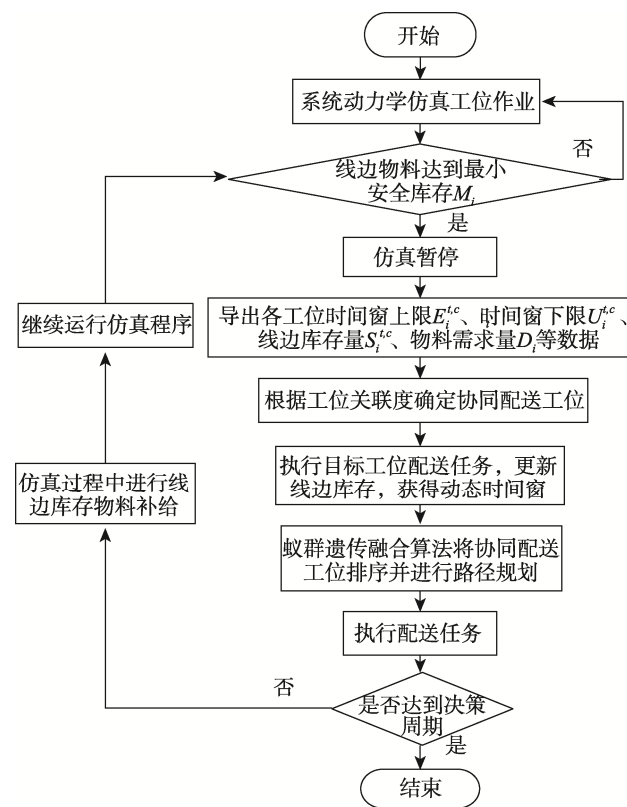


图1 DMDP实现流程

Fig.1 Flow chart of implementation of dynamic material distribution strategy (DMDP)

逻辑步骤如下:

1) 以一个确定看管期(即决策周期)为边界, 根据现实车间生产线物料消耗情况, 基于系统动力学理论建立工位物料消耗仿真模型。运行模型, 当出现某个工位的消耗量达到最小安全库存时仿真暂停, 将此工位作为配送的目标工位, 同时得到工位需求量、线边库存、软时间窗上下限等数据。

2) 根据 AGV 的车载量约束和工位关联度, 确定协同配送工位。

3) 根据优化目标, 基于蚁群遗传融合算法求出目标工位的配送路径, 完成目标工位的配送任务。

4) 更新动态软时间窗, 以整体配送距离和时间窗偏离成本最低为目标, 进行协同工位动态排序。

5) 基于融合算法计算排序第一的协同配送工位的最优配送路径, 完成该协同工位的配送任务。检测是否是最后一个协同工位, 如果否, 循环步骤 4; 如果是, 结束配送任务, 小车返回。

依据 DMDP 策略, 每完成一个协同工位的配送任务, 剩余协同工位动态排序一次。依据上述步骤, 完成整个决策周期内的配送任务。

2 数学模型建立

2.1 问题描述与假设

设车间内共 N 个工位, 每个工位 $i(i=1,2,\dots,N)$ 的物料缓存区容量范围为 $[M_i, B_i]$ 。由配送能力为 Q 的多台 AGV 循环运送所需物料, AGV 从配送点出发经过各工位后返回出发点, 即行驶路径为闭环, 所有的物料均由一个配送中心提供。记出发点编号为 $i=0$, AGV 小车待配送的为车间的 N 个工位, 优化目标为在一个确定的决策周期内所有 AGV 小车物料配送的总成本最低。

配送时间窗根据实时监测到的工位线边库存的变化而变化。基本假设如下。

1) AGV 在一次配送任务中只为同一工位配送一次, 已执行完配送的工位有新的物料需求下, 可安排下一辆 AGV 进行配送。

2) AGV 有固定容量限制。

3) AGV 的行驶速度 v 始终保持不变, 且忽略 AGV 小车故障、碰撞带来的影响。

4) 单个工位所需物料数量不能超过 AGV 的固定车载量, 且单工位所需的物料量不可拆分配送。

5) 两两工位之间的配送时间与其配送成本成正比, 设 2 个工位之间的配送成本为 $q_{ij}=kd_{ij}/v$ 。

数学模型符号说明见表 1。

2.2 数学模型建立

2.2.1 配送软时间窗及时间窗偏离惩罚模型

物料消耗动态变化, 线边库存随之动态变化, 引

起时间窗变化。根据 AGV 已完成前一个工位的配送任务时间点, 对工位线边库存及时间窗上下限进行更新, 相应的更新公式如下:

$$U_i^{t,c} = A_i^{t,c} + \frac{S_i^{t,c} - M_i}{C_i^t} \quad (1)$$

表 1 数学模型符号说明

Tab.1 Description of mathematical model notations

符号	描述
L	决策周期长度
Q	AGV 的装载容量
R	AGV 小车 c 配送的工位数
C	AGV 小车的数量, $c \in \{1,2,\dots,C\}$
N	选择配送工位的数量/编号, $i,j \in \{1,2,\dots,N\}$
v	AGV 行驶速度
d_{ij}	目标工位 i 和 j 之间的距离
O_i^c	AGV 小车 c 完成一个配送循环的总成本
$P_j^{t,c}$	工位 j 的软时间窗偏离惩罚成本
Z^c	AGV 小车 c 一个配送循环所产生的卸载成本
L^c	AGV 小车 c 一个配送循环所产生的路径成本
T^c	AGV 小车 c 一个配送循环所产生的时间偏离成本
f^c	AGV 小车 c 的固定成本
q_{ij}^c	AGV 小车 c 在两工位之间的运输费用
$T_i^{t,c}$	AGV 小车 c 在工位 i 的物料卸载时间
$A_i^{t0,c}$	AGV 小车 c 的配送的起始时刻
$A_i^{t,c}$	AGV 小车 c 到达工位 i 的时刻
$D_i^{t0,c}$	AGV 小车 c 配送起始时刻工位 i 的需求量
S_i^{t0}	AGV 小车 c 在配送开始时, 各工位实时线边库存量
$S_i^{t,c}$	AGV 小车 c 在配送过程中工位 i 的线边实时库存量
M_i	工位 i 的最小线边库存, 即安全库存
B_i	工位 i 的最大线边库存
$U_i^{t,c}$	AGV 小车 c 配送时工位 i 的时间窗下限
$E_i^{t,c}$	AGV 小车 c 配送时工位 i 的时间窗上限
c_i^t	工位 i 在 t 时刻的物料实时消耗速度
Y_i	工位 i 在看管期(即决策周期)内的总物料需求量
D_i^t	工位 i 在 t 时刻的物料需求量
H_i^t	工位 i 在 t 时刻的累计消耗量
N_i	单位产成品对应工位 i 零部件的需求量

$$E_i^{t,c} = U_i^{t,c} + \frac{M_i}{c_i^t} \quad (2)$$

$$S_i^{t,c} = S_i^{t_0,c} - \int_{A_i^{t,c}}^{A_i^{t,c}} c_i^t dt \quad (3)$$

其中, 式(1)用于计算当前时刻工位 i 的时间窗下限; 式(2)用于计算当前时刻工位 i 的时间窗上限; 式(3)用于更新当前线边库存。

时间窗偏移惩罚成本表示为:

$$P_i^{t,c} = \begin{cases} \gamma(U_i^{t,c} - A_i^{t,c}), A_i^{t,c} < U_i^{t,c} \\ 0, U_i^{t,c} \leq A_i^{t,c} \leq E_i^{t,c} \\ \delta(A_i^{t,c} - E_i^{t,c}), E_i^{t,c} < A_i^{t,c} \end{cases} \quad (4)$$

式(4)表示当 AGV 小车 c 到达工位 i 的时刻 $A_i^{t,c}$ 偏离期望时间窗(采用线性偏离)不同时, 偏离惩罚成本也不同, $A_i^{t,c}$ 为 AGV 小车 c 到达工位 i 的时刻。当 $A_i^{t,c}$ 早于 $U_i^{t,c}$ 时刻到达, 即小于时间窗下限, 此时偏离系数为 γ ; 当 $A_i^{t,c}$ 晚于 $E_i^{t,c}$ 时刻到达, 即大于时间窗上限, 此时偏离系数为 δ 。

2.2.2 协同工位选择模型

定义协同工位关联度 u_i 为线边库存值、库位与目标工位的距离值以及库位时间紧急程度量化值之和。

$$u_i = e_{i1} + e_{i2} + e_{i3} \quad (5)$$

$$e_{i1} = -\frac{(S_i^{t,c} - M_i)Y_i}{L} \quad (6)$$

$$e_{i2} = \frac{(\tau_1 d_{0,i} + \tau_2 d_{i,j})}{v} \quad (7)$$

$$e_{i3} = \rho P_i^{t,c} \quad (8)$$

式中: e_{i1} 为量化线边库存值; e_{i2} 为量化库位距离值; e_{i3} 为量化时间窗紧急程度值; τ_1 、 τ_2 为距离重要度系数; ρ 为紧急程度系数。

对关联度 u_i 进行降序排列, 在车载量约束下, 获得协同配送工位。协同配送工位 i 的需求量 $D_i^{t,c}$ 应满足式(9)、(10)。

$$\sum_{i=1}^{N-1} D_i^{t,c} \leq Q - D_j^{t,c} \quad (9)$$

$$D_i^{t,c} = \begin{cases} 0, Y_i - H_i^{t,c} < S_i^{t,c} \\ Y_i - H_i^{t,c} - S_i^{t,c}, S_i^{t,c} \leq Y_i - H_i^{t,c} \leq B_i \\ B_i - S_i^{t,c}, Y_i - H_i^{t,c} \geq B_i \end{cases} \quad (10)$$

其中, 式(9)表示所有工位的物料需求量累计不能大于 AGV 的装载能力与需求量的差值, 式(10)表示 $D_i^{t,c}$ 的取值情况。

2.2.3 基于排序的动态物料配送路径规划模型

以 AGV 从当前工位到达其余协同工位总的配送成本, 以及时间窗偏离成本最低为目标建立模型。

$$O_i^c = \min \left\{ \alpha \left(\sum_{i=1}^N x_{0,i}^c \frac{d_{0,i}}{v} + \sum_{j=1}^N x_{j,0}^c \frac{d_{j,0}}{v} + \sum_{r=1}^R \frac{\sum_{i=1}^N \sum_{j=i+1}^N w_{i,j}^{c,r} x_{i,j}^c d_{i,j}}{v} \right) + \beta \sum_{i=1}^N \sum_{j=i+1}^N x_{i,j}^c P_j^{t,c} \right\} \quad (11)$$

St:

$$\sum_{i=0}^N x_{i,j}^c = 1, \sum_{j=0}^N x_{i,j}^c = 1 \quad (12)$$

$$\sum_{c=1}^C \sum_{i=0}^N x_{i,j}^c = 1, \sum_{c=1}^C \sum_{j=0}^N x_{i,j}^c = 1 \quad (13)$$

$$\sum_{i=1}^N x_{0,j}^c = 1, \sum_{j=1}^N x_{0,j}^c = 1 \quad (14)$$

$$\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \sum_{r=1}^R w_{i,j}^{c,r} x_{i,j}^c \leq R-1 \quad (15)$$

$$i, j = 1, 2, \dots, N; c = 1, 2, \dots, C$$

决策变量:

$$x_{i,j}^c = \begin{cases} 1, \text{AGV 小车 } c \text{ 从工位 } i \text{ 去工位 } j \\ \text{执行配送任务} \\ 0, \text{其他} \end{cases} \quad (16)$$

$$w_{i,j}^{c,r} = \begin{cases} 1, \text{AGV 小车 } c \text{ 在 } r \text{ 次路径规划中 } j \\ \text{工位是排序第一的配送工位} \\ 0, \text{其他} \end{cases} \quad (17)$$

式(11)表示路径规划模型目标函数, 为配送产生的总成本最低, 式中的 4 项包含了初始小车从配送中心到达第 1 个配送点、最后完成工位配送返回配送中心、其余配送过程中产生的配送距离成本, 以及配送环节产生的时间窗偏离成本。其中 α 表示配送距离成本的权重系数, β 表示配送时间成本的权重系数, $x_{0,i}^c$ 表示 AGV 小车 c 是否从配送中心出发前往工位 i 配送物料, $x_{i,0}^c$ 表示 AGV 小车 c 是否在工位 j 配送物料结束后返回到配送中心。

式(12)表示一条配送路径的每个工位仅被访问一次; 式(13)表示所有需求物料的工位均被访问; 式(14)表示车辆从配送仓库离开, 需再返回仓库; 式(15)表示路径规划次数限制; $x_{i,j}^c$ 、 $w_{i,j}^{c,r}$ 均为布尔型变量, 式(16)表示当 AGV 小车 c 执行结束工位 i 的配送任务前往工位 j , 则 $x_{i,j}^c$ 为 1, 否则为 0; 式(17)表示当 AGV 小车 c 执行结束第 r 次路径规划中从 i 工位出发后搜索到工位 j 的配送任务, 则 $w_{i,j}^{c,r}$ 为 1, 否则为 0。

每完成一个协同工位的配送, 循环执行一次该模型, 对剩下待配送工位执行一次路径规划和配送任务的排序, 随后选择配送顺序排在第一的工位进行配送任务。

2.2.4 动态物料配送总成本模型

多次对工位配送排序进行实时调整, 使 AGV 在整个看管期内完成所有配送任务后, 产生了 4 项成本, 包括卸载成本 Z^c , 路径成本 L^c , 时间窗偏离成

本 T^c , 固定使用成本 F^c 。所有 AGV 小车的配送总成本表达式为:

$$F = \sum_{c=1}^C (Z^c + L^c + T^c + I^c) \quad (18)$$

其中,

$$L^c = \sum_{i=1}^N x_{0,i}^c \frac{d_{0,i}}{v} + \sum_{j=1}^N x_{j,0}^c \frac{d_{j,0}}{v} + \sum_{j=1}^N \sum_{r=1}^R \frac{w_{i,j}^{c,r} x_{i,j}^c d_{i,j}}{v} \quad (19)$$

$$T^c = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N P_{j,i}^c x_{i,j}^c \quad (20)$$

$$Z^c = \sum_{i=0}^N \sum_{j=1}^N T_{j,i}^c x_{i,j}^c \quad (21)$$

其中, 式 (18) 为配送总成本, 式 (19) 为 AGV 运输成本, 式 (20) 为时间窗偏离成本, 式 (21) 为因卸载货物产生的时间成本。

3 模型求解

3.1 系统动力学仿真模型建立

Anylogic 仿真软件中的系统动力学组件可以用于模拟工位物料消耗的过程。当前库存量 $S_i^{t,c}$ 、累计消耗量 H_i^t 用存量表示, 消耗速率 v 用流量表示, 时间窗上下限 $E_i^{t,c}$, $U_i^{t,c}$ 作为动态变量, 最大线边库存量 B_i 、最小安全库存 M_i 、初始线边库存 $S_i^{t0,c}$ 、总需求量 Y_i 等作为固定参数, 分析各个变量间的直接间接关系后得到系统动力学流程图, 见图 2。

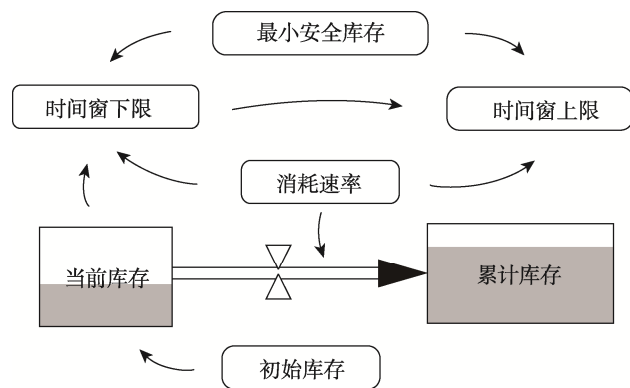


图 2 工位物料消耗系统动力学流程图
Fig.2 Dynamics flow diagram of station material consumption system

引入“事件(event)”、“变量(variable)”、“函数(function)”, 用来启动执行命令, 对系统动力学控件进行控制。事件 $event_i$ 的作用是判断工位 i 的物料消耗是否达到最小安全库存, 当库存小于等于最小线边库存量时, $this.S_i^{t,c} \leq M_i$, 当前模型暂停, 且黄色按钮变为红色, Java 语言编写为 `rectangle1.setFillcolor (red)`。此时, 启动各工位的需求量计算函数 $function(i)$, 计算此

时各工位的需求量 D_i^t 。function(i)的java 编程伪代码为:

Function(i): Calculate the demand D_i^t for each station at this time

Input: Material demand of the station Y_i , Initial sideline inventory S_i^{t0} , Current line inventory $S_i^{t,c}$,

Maximum lineside inventory B_i , accumulated consumption inventory total_i

Output: Material demand of each station D_i^t

if $Y_i - S_i^{t0} - \text{total}_i \leq S_i^{t,c}$

then $\{D_i^t = 0;\}$

elseif $S_i^{t,c} < Y_i - S_i^{t0} - \text{total}_i$ **and** $Y_i - S_i^{t0} - \text{total}_i < B_i$

then $\{D_i^t = Y_i - S_i^{t0} - \text{total}_i;\}$

elseif $Y_i - S_i^{t0} - \text{total}_i \geq B_i$

then $\{D_i^t = B_i - S_i^{t,c};;\}$

设定事件 event 实现物料库存的补给, 其在特定的时间点 t_i 执行库存积累操作, 程序语句为: $S_i^{t,c} = S_i^{t0} + D_i^t //$ 给工位 i 在 t 时刻的线边库存补给 D_i^t 个物料。以工位 1 为例, 系统动力学仿真模型运行中物料消耗情况见图 3, AGV 小车 1 配送工位结果及时间见图 4。

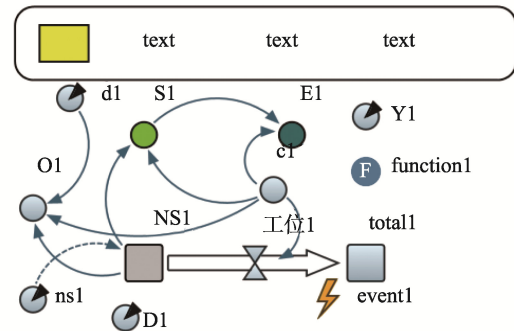


图 3 工位 1 物料消耗系统动力学建模
Fig.3 Dynamics modeling of material consumption system in station 1

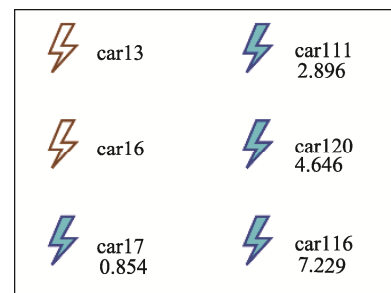


图 4 AGV1 配送结果示意图
Fig.4 Schematic diagram of AGV1 distribution results

3.2 路径规划模型求解

根据系统动力学仿真的结果, 确定目标工位和协同配送工位。为提升算法整体性能, 利用蚁周模型设计蚁群遗传融合算法对配送工位进行路径优化, 步骤如下。

1) 工位坐标信息输入及蚁群算法参数初始化。

2) 随机生成 m 只蚂蚁, 以配送中心 $(0,0)$ 点作为出发点, 按照如下状态转移概率 P_{ij}^k 完成对 N 个工位的一次游历。

$$P_{i,j}^k = \begin{cases} \frac{\tau_{ij}^\gamma(t) \times \eta_{ij}^\delta(t)}{\sum_{S \in a_k} \tau_{ij}^\gamma(t) \times \eta_{ij}^\delta(t)}, k=1,2,\dots,m \\ 0, \text{其他} \end{cases} \quad (22)$$

式中: a_k 为蚂蚁 k 下一步可走的工位集合; $\tau_{ij}(t)$ 为 t 时刻路径 (i,j) 上的信息素浓度; $\eta_{ij}(t)$ 为 t 时刻路径 (i,j) 的启发值, 可用路径 (i,j) 长度 d_{ij} 的倒数表示; γ 为轨迹的重要程度; δ 为能见度的重要程度。

3) 计算路径长度, 利用式 (23) — (25) 更新各路径上的信息素。

$$\tau_{ij}(t+1) = (1 - \rho_m) \times \tau_{ij}(t) + \Delta \tau_{ij}(t) \quad (23)$$

$$\Delta \tau_{ij}(t) = \sum_{k=1}^m \Delta \tau_{ij}^k \quad (24)$$

$$\tau_{ij}^k = \begin{cases} \frac{Q_m}{L_k}, \text{蚂蚁 } k \text{ 从工位 } i \text{ 走到工位 } j \\ 0, \text{其他} \end{cases} \quad (25)$$

式中: $\rho_m \in (0,1)$ 为信息素的衰减度; m 为蚂蚁个数; Q_m 为信息素增量为一常数; L_k 为蚂蚁 k 所走路径总长。

4) 达到最大迭代次数则停止迭代, 否则返回步骤 3, 输出当前全局最优解。

5) 遗传算法种群初始化, 将 (2) 中得到的 m 条路径作为遗传算法的染色体构成初始种群。基因位数对应的是配送工位顺序的排名, 基因值为工位的位置编号。

6) 进行遗传算法选择、交叉、变异操作。其中按照适应度函数值的大小以轮盘赌的方式选择下一代染色体, 变异概率 $P_m=0.4$, 交叉概率 $P_c=0.9$, 适应度函数以路径规划模型目标函数式 (11) 定义, 用式 (26) 表示。

$$f^1 = \min \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N x_{i,j}^c \quad (26)$$

$$\left\{ \alpha \frac{d_{i,j}}{v} + \beta \max(U_i^{t,c} - A_i^{t,c}, 0, A_i^{t,c} - E_i^{t,c}) \right\}$$

7) 达到最大迭代次数或当前全局最优路径则停止迭代, 更新全局最优路径, 输出最优值, 否则返回步骤 6。

4 结果分析

4.1 车间情况说明

设某装配车间共 4 条流水线, 每条流水线有 7 个

工位, 每 2 条紧邻流水线间巷道宽为 3 m, 单工位纵向长度 4.5 m, 横向长度 2 m, 见图 5。AGV 运行速度为固定值 $v=0.5$ m/s, 每个通道 AGV 可双向运动, 物料投放在工位的左侧。

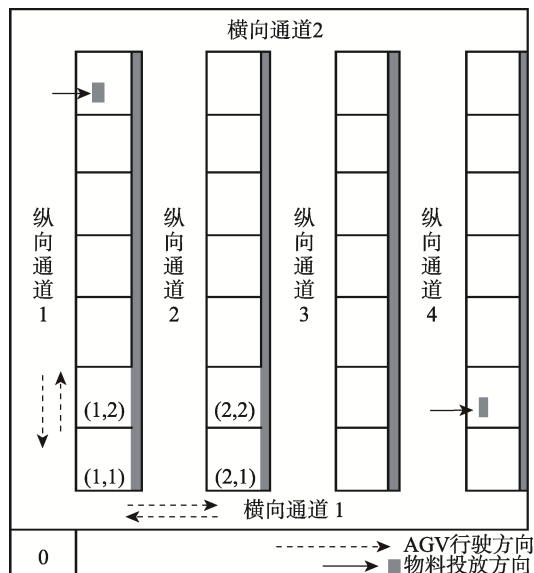


图 5 工位布局图

Fig.5 Station layout

4.2 两两工位之间的最短距离求解

任意 2 个同流水线 i, j 工位最短距离为:

$$d_{i,j} = |p_i - p_j| \times 4.5; (h_i = h_j, 1 \leq i, j \leq 7) \quad (27)$$

2 个工位分别在不同流水线上的最短距离公式为:

$$d_{i,j} = \min[p_i + p_j, 14 - (p_i + p_j)] \times 4.5 + |h_i - h_j| \times (3 + 2); (h_i \neq h_j, 1 \leq i, j \leq 7) \quad (28)$$

式中: h 为从工位布局产生的流水线 (直线型), $h=1,2,\dots,H$; p 为同一纵列流水线的工位编号, $p=1,2,\dots,P$ 。

4.3 系统动力学模型参数设置

设 4 条流水线的每个工段需要完成自己 50 件的半成品, 表 2 是部分工位的系统动力学模型的参数设置。

表 2 系统动力学建模参数说明

Tab.2 Parameter settings of system dynamics model

工位	$c_0/(\text{min} \cdot \text{个}^{-1})$	F_i (分布函数)	$S_i^0/\text{个}$	$M_i/\text{个}$	$B_i/\text{个}$	$Y_i/\text{个}$	$N_i/\text{个}$
1	4.17	triangular(3,5,4)	52	3	72	150	3
2	11.67	uniform(7,13)	112	6	108	300	6
3	7	exponential(6,8)	48	7	125	300	6
4	6.67	uniform(5,8)	92	8	142	200	4
5	2.5	triangular(1,4,2,5)	36	4	56	100	2
6	12.5	normal(0.2,15)	153	15	216	350	7
7	13	exponential(6,13)	173	20	233	400	8
8	5	normal(0.3,5)	55	4	80	150	3

4.4 有效性验证

通过运行仿真模型及算法求解后结果显示, 整个看管期内, 共发车 7 次, 如图 6 所示, 雷达图表示 7 辆 AGV 配送过程的到达工位及配送时刻。

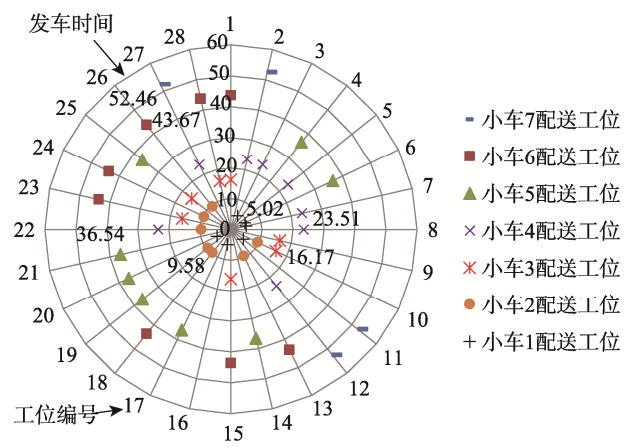


图 6 决策周期内各个 AGV 配送工位示意图
Fig.6 Schematic diagram of each AGV distribution station during the decision cycle

7 辆 AGV 的物料配送的仿真结果见表 3, 每辆 AGV 平均配送 7 个工位。线边 AGV 数量在发车时最大为 2, 线边保留 3 辆 AGV 小车即可满足所有工位配送任务。由于各工位的线边库存初始较为充足, 需求量少, 随着库存消耗, 各工位需求增大, 使装载率增加, 到看管期后期, 各工位避免堆积库存, 需求量变少, 使装载率下降, 故最终装载率呈现由低到高再到低的变化, 这表明在 DMDP 策略下 AGV 装载完成了灵活合理的动态调整。

以第 1 辆 AGV 为例, DMDP 和 SMDP 策略下的配送总成本迭代图见图 7。

结果表明, 在 DMDP 策略下, 每执行 1 次工位

配送顺序的调整即获得一次成本迭代图, DMDP 策略有 $R-1$ 个迭代结果。随着迭代次数的增加, 2 种配送策略下的配送总成本均呈递减趋势, 当迭代次数平均大于 20 次后, 配送成本趋于稳定值, 证明该融合算法在求解上具有较好收敛性。

4.5 合理性验证

4.5.1 线边库存变化合理性对比

对比 DMDP 与 SMDP 策略下的工位 1—7 的线边库存的变化, 见图 8。

由 2 种策略下的线边物料数量变化对比后, 得出结论: 静态策略下, 部分工位线边补货时间晚于动态策略下的补货时间, 补货量也略有差别。表 4 为两策略下的全部工位线边库存量对比。

由表 4 分析可知, 在看管期内, DMDP 策略下, 各工位线边库存量最大为 173, 最小为 1, 平均值为 74。与 SMDP 相比, 工位线边物料平均库存下降 14.86%, 最大库存量减少率为 12.72%, 说明对配送工位顺序实时调整减少了库存堆积的情况, 提高了线边物料的均衡性。从线边物料最小值来看, DMDP 能够及时考虑各工位物料需求时间窗, 避免工位因缺少物料而造成生产线停滞。

4.5.2 配送路线合理性对比

以第 1 辆 AGV 为例, 在 DMDP 策略下获得的配送路径为 3—6—7—11—20—16, 路径示意图与配送路径见图 9。在 SDMP 下获得的配送径为 3—16—20—7—6—11, 路径示意图与配送路径图见图 10。

对所有 AGV 在 2 种配送策略下的路线对比见表 5, 发现相较于 SMDP 策略, DMDP 策略平均调整的工位数量为 4 个, 一辆 AGV 平均访问 7 个工位时, 平均调整比例为 57.14%, 即在变动的时间窗基础上, 调整了超过半数的配送工位顺序。

表 3 DMDP 策略下的仿真结果
Tab.3 Simulation results under DMDP strategy

AGV 编号	出发时间/min	配送工位	发车时线边 AGV 数	装载率/%
1	5.02	3、20、16、11、7、6	0	87
2	9.58	10、26、18、24、19、22、13	1	97
3	16.17	28、23、25、15、1、9、10	2	99
4	23.51	2、3、5、8、12、22、27、7	2	95
5	36.54	6、20、19、21、14、4、17、25	1	96
6	43.67	18、1、15、23、24、26、13、28	0	86
7	52.46	2、11、12、27	1	54

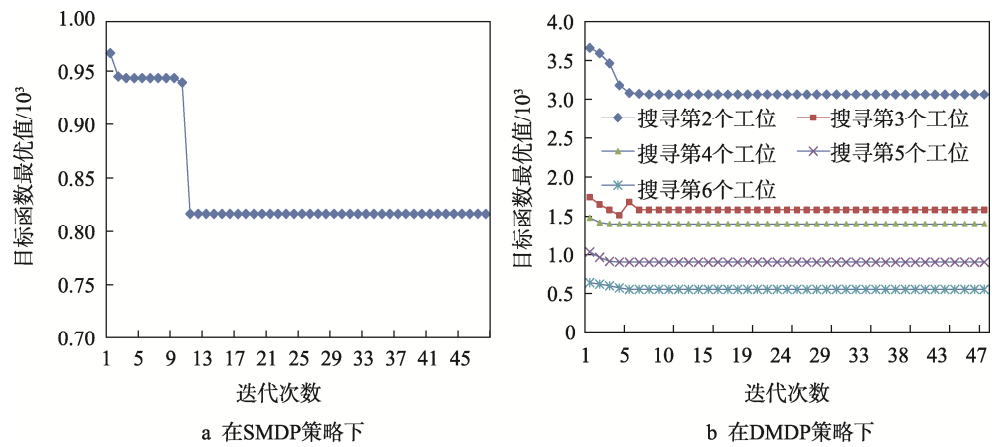


图 7 AGV 在 2 种策略下成本寻优迭代图
Fig.7 Cost optimization of AGV under the two strategies

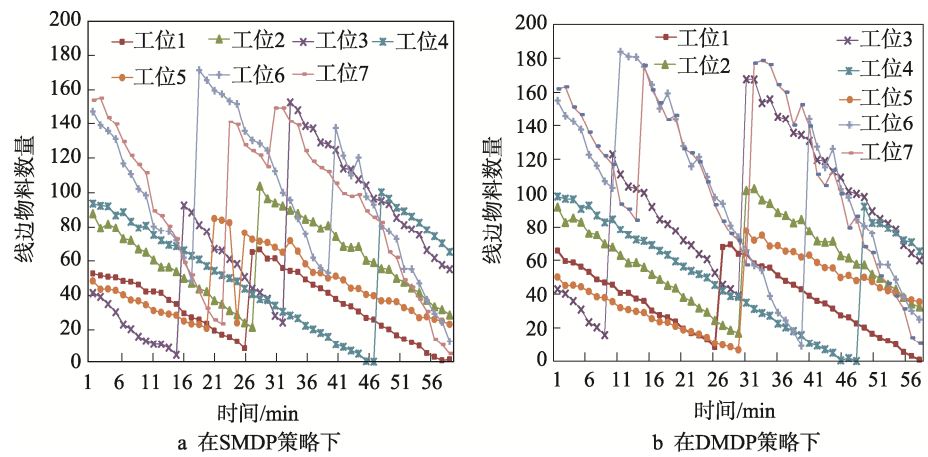


图 8 2 种策略下工位 1—7 的线边库存变化
Fig.8 Line-side inventory changes at stations 1 to 7 under the two strategies

表 4 2 种策略下的线边库存量对比
Tab.4 Comparison of line-side inventory under the two strategies

策略	最小值	最大值	最大库存减少率/%	平均缺货量	平均库存减少率/%
DMDP	1	173	12.72	0	14.86
SMDP	0	195		5.71	

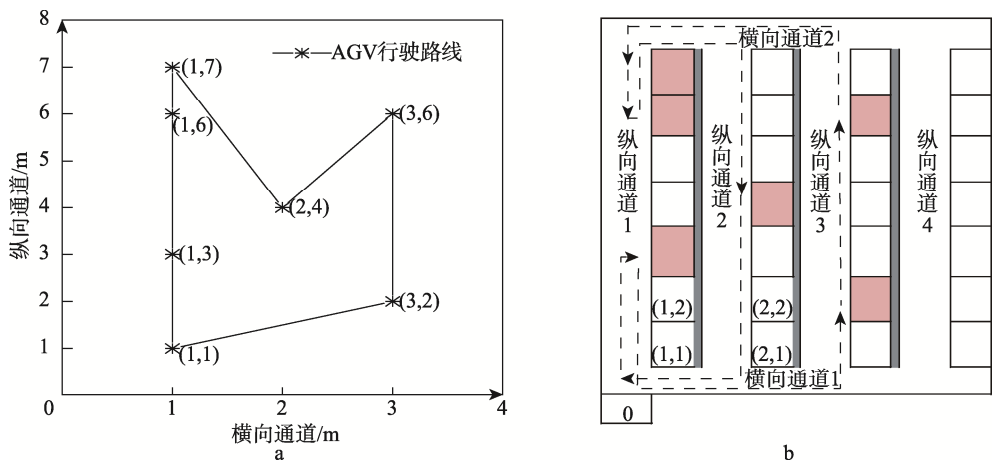


图 9 第 1 辆 AGV 在 DMDP 下的配送路径图
Fig.9 Distribution route of the first AGV under the DMDP

4.5.3 配送成本对比

表 6 为 2 种策略下的成本对比。在 DMDP 策略下，平均时间成本占总成本比例为 45.72%，SMDP 策略下的为 52.36%。DMDP 策略平均总成本为 636.86 元，相较于 SMDP 策略，平均每辆 AGV 总成

本减少了 19.42%，平均时间成本减少比例为 30.1%。总体上，每辆 AGV 节约的成本都较为明显，尤其是时间成本，可见 DMDP 策略能够很好地应对各个工位物料消耗的动态变化，比 SMDP 策略下的配送效果更优。

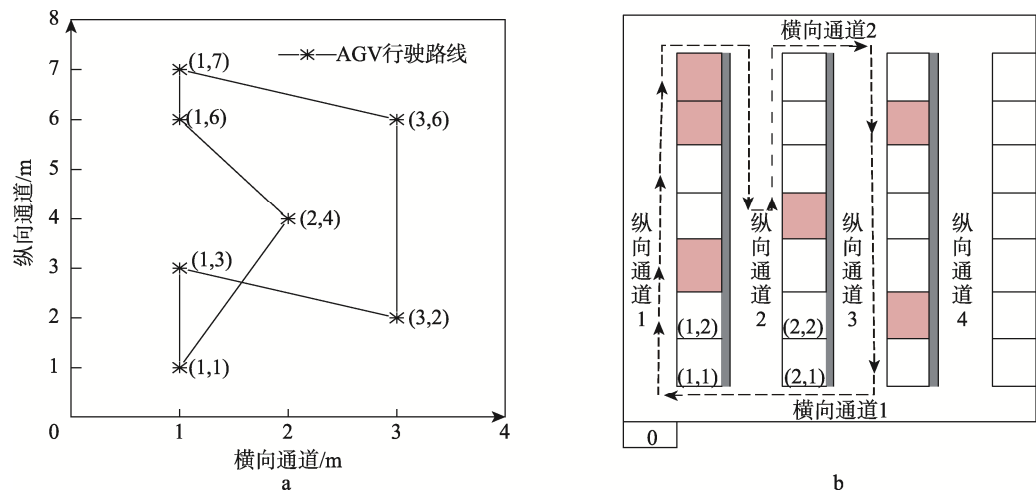


图 10 第 1 辆 AGV 在 SMDP 下的配送路径图
Fig.10 Distribution route of the first AGV under the SMDP

表 5 2 种策略下的配送路径对比
Tab.5 Comparison of distribution routes under the two strategies

AGV 编号	DMDP 配送路径	SMDP 配送路径	调整配送工位数量
1	3—16—20—7—6—11	3—6—7—11—20—16	5
2	10—22—24—26—13—19—18	10—19—18—22—24—26—13	6
3	28—23—25—15—1—9—10	28—25—23—15—1—9—10	2
4	2—3—5—7—27—22—8—12	2—3—5—7—12—27—22—8	4
5	6—14—21—20—19—25—17—4	6—14—21—20—19—17—25—4	2
6	10—22—24—26—13—19—18	18—15—23—24—26—28—13—1	4
7	2—11—12—27	2—12—11—27	2

表 6 2 种策略下的配送成本对比
Tab.6 Distribution cost comparison under two strategies

AGV 编号	DMDP 时间成本/元	SMDP 时间成本/元	DMDP 总成本/元	SMDP 总成本/元	时间成本减少比/%	总成本减少比/%
1	287	417	600	820	31.09	26.83
2	205	300	540	608	31.73	11.18
3	332	458	700	884	27.45	20.81
4	338	537	710	944	37.11	24.79
5	325	434	704	815	25.23	13.62
6	404	563	761	1002	28.27	24.05
7	177	250	443	519	29.17	14.64

5 结语

文中基于物联网部署后的数字车间环境,提出了基于工位排序的物料动态配送路径规划策略(DMDP),利用系统动力学仿真产生实时作业数据,在考虑车载量约束和相关工位关联度的基础上,确定初始物料配送工位,根据变动的时间窗,以总的配送成本最小为优化目标,利用遗传算法的快速全局搜索能力结合蚁群算法的正反馈机制设计了融合算法,优化了算法性能后对模型进行求解,最终完成对工位配送顺序的实时调整,实现了车间物料配送的动态自适应调整和物料的准时化配送。通过算例表明了DMDP策略的有效性与可行性。考虑物料配送环节中的不确定因素进行建模,并将DMDP策略成功嵌入至现实应用中是今后的研究重点。

参考文献:

- [1] 王昀睿, 赵旭雯, 武争利, 等. 基于混流生产模式的装配车间物料配送路径规划方法[J]. 现代制造工程, 2021(7): 109-116.
WANG Yun-rui, ZHAO Xu-wen, WU Zheng-li, et al. The Material Distribution Path Planning Method of Assembly Workshop Based on Mixed Flow Production Mode[J]. Modern Manufacturing Engineering, 2021(7): 109-116.
- [2] 周炳海, 谭芬. 基于循环配送策略的汽车装配线物料配送调度方法[J]. 东北大学学报(自然科学版), 2018, 39(3): 389-393.
ZHOU Bing-hai, TAN Fen. Scheduling Method of Material Delivery for Automotive Assembly Lines Based on Milk-Run Delivery[J]. Journal of Northeastern University (Natural Science), 2018, 39(3): 389-393.
- [3] SIMON E, NILS B. Optimally Locating in-House Logistics Areas to Facilitate JIT-Supply of Mixed-Model Assembly Lines[J]. International Journal of Production Economics, 2012, 135(1): 393-402.
- [4] 韩兵, 蔺宇. 随机过程下的生产配送策略对比[J]. 工业工程, 2014, 17(6): 48-53.
HAN Bing, LIN Yu. Comparison of Distribution Strategies for Production Lines in Stochastic Process[J]. Industrial Engineering Journal, 2014, 17(6): 48-53.
- [5] ZHOU B H, HE Z X. A Material Handling Scheduling Method for Mixed-Model Automotive Assembly Lines Based on an Improved Static Kitting Strategy[J]. Computers & Industrial Engineering, 2020, 140(1): 8352-8369.
- [6] 周晓晔, 马小云, 朱梅琳, 等. 基于循环配送的混流装配线物料配送优化研究[J/OL]. 系统工程: 1-11 [2022-12-13]. <https://kns-cnki-net.webvpn.sust.edu.cn/kcms/detail/43.1115.N.20220419.1746.004.html>
ZHOU Xiao-ye, MA Xiao-yun, ZHU Mei-lin, et al. Optimization of Material Delivery Problem for Mixed-model Assembly Line Based on Milk-run Delivery[J]. Systems Engineering: 1-11[2022-12-13]. <https://kns-cnki-net.webvpn.sust.edu.cn/kcms/detail/43.1115.N.20220419.1746.004.html>
- [7] 陆志强, 胡鑫铭, 杜鑫. 物料配送与线边存储集成决策模型与算法[J]. 浙江大学学报(工学版), 2018, 52(7): 1354-1363.
LU Zhi-qiang, HU Xin-ming, DU Xin. Integrated Modeling and Algorithm of Material Delivery and Line-Side Storage Problem[J]. Journal of Zhejiang University, 2018, 52(7): 1354-1363.
- [8] 刘雪梅, 王笑, 柳跃雷. 模糊时间窗约束下的装配线物料配送方案优化[J]. 中国机械工程, 2020, 31(17): 2095-2103.
LIU Xue-mei, WANG Xiao, LIU Yue-lei. Optimization of Assembly Line Material Distribution Planning under Fuzzy Time Window Constraints[J]. China Mechanical Engineering, 2020, 31(17): 2095-2103.
- [9] 杨清, 张彦如, 马靖. 基于物联网技术的车间动态物料配送问题研究[J]. 制造业自动化, 2015, 37(10): 129-131.
YANG Qing, ZHANG Yan-ru, MA Jing. Research on Dynamic Material Delivery Method of Workshop Based on Internet of Things[J]. Manufacturing Automation, 2015, 37(10): 129-131.
- [10] 葛妍娇, 郭宇, 黄少华, 等. 基于智能感知网的物料配送动态优化方法[J]. 计算机工程与应用, 2019, 55(22): 212-218.
GE Yan-jiao, GUO Yu, HUANG Shao-hua, et al. Dynamic Optimization Method for Material Delivery Based on Intelligent Sensing Network[J]. Computer Engineering and Applications, 2019, 55(22): 212-218.
- [11] ALNAHHAL M, NOCHE B. Dynamic Material Flow Control in Mixed Model Assembly Lines[J]. Computers & Industrial Engineering, 2015(85): 110-119.
- [12] 张世文, 袁逸萍, 李明, 等. 基于实时定位的离散制造车间物料配送方法研究[J]. 机械设计与制造, 2020(11): 18-20.
ZHANG Shi-wen, YUAN Yi-ping, LI Ming, et al. Research on Material Distribution Method of Discrete Manufacturing Workshop Based on Real-Time Positioning[J]. Machinery Design & Manufacture, 2020(11): 18-20.
- [13] 伍伟民, 刘检华, 唐承统, 等. 复杂产品装配物料精细化管控系统[J]. 计算机集成制造系统, 2017, 23(4): 769-780.
WU Wei-min, LIU Jian-hua, TANG Cheng-tong, et al. Refined Management and Control System of Assembly Material for Complex Products[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2017, 23(4): 769-780.
- [14] 刘玉浩, 姜兆亮, 阚平, 等. 发动机装配线关键工位物料动态配送方法[J]. 包装工程, 2021, 42(21): 239-246.
LIU Yu-hao, JIANG Zhao-liang, KAN Ping, et al. Dynamic Distribution Method of Materials at Key Station of Engine Assembly Line[J]. Packaging Engineering, 2021, 42(21): 239-246.
- [15] 沈维蕾, 钟岳听, 王强. 不确定加工时间下装配过程物料配送方法研究[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版), 2016, 39(3): 314-319.
SHEN Wei-lei, ZHONG Yue-xin, WANG Qiang. Study of the Method of Material Delivery in Assembly Process with Uncertain Processing Time[J]. Journal of Hefei University of Technology (Natural Science), 2016, 39(3): 314-319.