DOI: 10.3901/JME.2015.23.133

计及漂移瓶颈的时变物料配送路径优化*

凌琳 刘明周 葛茂根 王强 马靖
(合肥工业大学机械与汽车工程学院 合肥 230009)

摘要: 针对不确定作业车间环境下物料配送路径优化问题,采用能反映制造单元相对生产负荷及其变化趋势的瓶颈指数和瓶颈漂移指数表征实时变化的制造单元物料配送优先级,对路径选择过程中违反此优先级的行为设置惩罚成本,提出以最小化包括车辆运输成本和违反优先级的惩罚成本在内的总配送成本为优化目标,建立了时变的物料配送路径优化模型。在此基础上,为保证运输车辆所载物料全额配送,避免非必要负载以及由此造成的非必要配送子路径,对配送路径优化模型进行改进,允许运输车辆非满载和物料拆分配送,以提高物料配送效率降低配送成本;并结合模型特点将贪婪策略融入遗传算法对优化模型求解。最后,通过某作业车间内物料配送实例验证了所提出的计及漂移瓶颈的改进时变物料配送路径优化方法在不确定作业环境中具有有效性和实用性。

关键词: 漂移瓶颈; 时变物料配送; 路径优化; 物料拆分; 贪婪遗传算法

中图分类号: TH186

Time-varying Material Distribution Routing Optimization Considering Shifting Bottleneck

LING Lin LIU Mingzhou GE Maogen WANG Qiang MA Jing
(School of Mechanical and Automotive Engineering, Hefei University of Technology, Hefei 230009)

Abstract: Aiming at the material distribution routing optimization problem under uncertain job shop environment, the bottleneck index and bottleneck shifting index which represent the relative production load of each manufacturing unit and its the change trend are adopted to denote the time-varying distribution priority of the manufacturing unit. Then the time-varying material distribution routing optimization models are established and its objective is minimizing the distribution cost including vehicle transportation cost and punishment cost due to the violation of distribution priority. Based on that, suppose the condition that the vehicle haven't to be loaded fully and material can be distributed to one manufacturing more times in order to guarantee that the material in the vehicle is distributed totally before the vehicle comes back to the distribution center and to avoid unnecessary distribution sub-route, then propose the modified time-varying material distribution routing optimization model to enhance the distribution productivity and decrease the distribution cost further. The greedy-based genetic algorithm is presented to solve the proposed optimization model. An example of some job shop material distribution routing optimization is given to prove the validation and practicability of the proposed method under uncertainty.

Key words: shifting bottleneck; time-varying material distribution; distribution routing optimization; material separation; greedy-based genetic algorithm

0 前言

车辆配送路径优化问题是一个运筹规划问题,作业车间的物料配送路径优化问题可描述为:根据工位的物料需求,规划合理的行车路线,使车辆按

规定的顺序将物料送达至指定的工位,同时要求满足一定的约束条件并达到一定的优化目标。近年来,随着作业车间生产制造模式由少品种大批量向多品种小批量转换,车间内存在大量不确定性(如加工时间波动、设备故障等),导致计划物料配送路径方案不能适应实际工况。为解决这一问题,国内外学者们开始关注作业车间内生产加工过程对物料配送路径的影响,建立带有时间窗的物料配送模型以保

* 国家重点基础研究发展计划(973计划, 2011CB013406)和国家自然科学基金(71071046)资助项目。20141221收到初稿, 20150702收到修改稿

证物料配送与生产的同步性:如,李军^[1]在 1996 年建立带时间窗约束的车辆路径规划模型并设计启发式算法对模型求解;TAILLARD 等^[2]1997 年针对软时间窗车辆路径选择问题,进行建模并采用禁忌搜索算法求解;刘诚等^[3]在 2005 年也对带软时间窗的物流车辆问题进行了研究,提出并行遗传算法并通过实例验证证明该算法的合理性;王楠等^[4]在 2012 年提出了具有混合时间窗约束的运输时间最小化物料配送路径规划模型,并采用改进的轮盘赌选择算子利用遗传算法求解该问题。同时,作业车间内不确定性因素或者模糊信息也开始受到重视,成为物料配送路径优化的重要考虑因素以提高物料配送路径的适应性:如,CHEN 等^[5]在 1995 年针对时间窗信息模糊的车辆路径问题,对多目标问题:车辆数量最小化、运输距离最小化、排队时间最小化进行了研究并利用遗传算法求解;TEDOROVIC 等^[6]于 1996 年研究了作业车间内生产需求信息模糊的单车辆路径规划问题;樊建华等^[7]在 2008 年对需求随机的多车辆路径选择问题进行了研究,采用 rollout 算法将一个预优化单车辆路径划分为满足约束的多条子路径以供多车辆运输;李晋航等^[8]于 2011 年在考虑作业车间内工位物料需求信息、运输时间信息以及时间窗信息不确定性的基础上,建立了模糊信息条件下以最小化运输距离为目标的机会约束物料配送车辆规划模型并采用遗传算法求解。但是,由于作业车间车辆路径选择问题属于 NP-hard 问题^[9-10],采用时间窗或模糊隶属度方法来处理车间不确定性、提高物料配送与生产加工的同步性,将增加物料配送路径优化模型的约束条件数(大于等于问题规模数)导致问题计算的复杂度大幅增加;因此,本文拟通过不确定环境下作业车间内各制造单元生产负荷与生产能力的相对比值及其变化趋势表征制造单元对物料的需求优先程度,以代替制造单元物料需求时间窗同时预测各类不确定因素对物料配送过程的影响,简化路径优化约束条件,并最终提高物料配送方案和生产制造过程同步性和适应性。

1 物料流路径优化问题概述

传统的作业车间物料配送车辆路径问题一般被描述为:在一个运输网络 $G=(V,A,C)$ 中, $V=\{v_1,v_2,\dots,v_n\}$ 为需要配送的制造单元节点的集合称为节点集, $A=\{(v_i,v_j)|i\neq j,v_i,v_j\in V\}$ 各制造单元节点间的线路段称为弧集, $C=(c_{ij})$ 为系数矩阵,该矩阵可以指节点与节点间的路径长度或所需

时间或成本等,同时针对每个制造单元节点其物料需求由 $D=\{d_1,d_2,\dots,d_n\}$ 表示;安排合理的行车路线,使配送车辆在能够满足一定约束条件的前提下按规定的顺序将物料送至各制造单元同时达到一定的优化目标,如运输距离最短、所花费时间最少、费用最小、准时性最好等。

为明确所研究物料配送路径问题的范围,提出如下假设。

- (1) 作业车间内只有一个配送中心。
- (2) 单个制造单元的物料需求量不超过运输车辆的容量。
- (3) 运输车辆运输完成后要返回配送中心。
- (4) 运输车辆在一次运输路径中不能为同一制造单元配送两次。
- (5) 运输车辆运输物料不得超过其容量。
- (6) 各制造单元所需物料在运送中不得被拆分配送。
- (7) 运输车辆初始处于满载。

2 计及漂移瓶颈的时变路径优化模型

制造单元生产负荷和生产能力的比值反映了其生产能力满足生产负荷的程度,比值越大表明生产负荷相对于生产能力越大,机器的利用率越高,对物料及时送达的需求也更高;对于比值越大且尚未配送的制造单元,若运输车辆不及时将物料送达将很可能导致该单元生产的停滞,造成生产效率的降低。由于制造单元生产能力能否满足生产负荷是作业车间瓶颈产生的根本原因;因此,生产负荷和生产能力的比值为制造单元成为瓶颈的能力,可用于表征该制造单元对物料需求的迫切程度即物料配送的优先级。

2.1 瓶颈指数和瓶颈漂移指数

瓶颈指数用于描述制造单元在不确定性环境下成为瓶颈的能力,是制造单元动态瓶颈属性的数学表达^[11]。根据生产能力越大、生产负荷越小的制造单元成为瓶颈的能力越小这一特性,以制造单元生产能力和生产负荷为参数,建立瓶颈指数 I_{BN} 数学模型用于度量各制造单元的瓶颈程度。其中,生产能力包括加工速度和质量能力,生产负荷包括加工数量和质量需求。加工速度和加工数量均可以转化为时间参数进行度量;而针对不同的质量特性,质量能力和质量需求则合并为质量保证能力表示,采用量纲一指标表示。假设产品工艺路线和生产调度方案不变,制造单元 U_j 的瓶颈指数 I_{BN}^j 数学模型可表示为

$$I_{BN}^j = \omega_t(U_j^L/U_j^C) + \omega_q G(C_p, C_p^j)$$

$$\text{式中 } U_j^L = \sum_{i=1}^{N_j} (q_{ij}(1 + f_{ij}(C_{pi}^j))E_{ij} + F_{ij});$$

$$U_j^C = T_j \quad C_p^j = \omega_{1j}C_{p1}^j + \dots + \omega_{N_jj}C_{pN_j}^j;$$

ω_t, ω_q ——产品数量 and 产品质量在瓶颈指数中的影响权重, $\omega_t + \omega_q = 1$;

U_j^L, U_j^C ——制造单元 U_j 生产能力和生产负荷;

$G(C_p, C_p^j)$ ——质量保证能力对瓶颈指数的影响函数。其中, C_p 表示工序能力指数的评定标准, 一般 $C_p = 1.00 \sim 1.67$;

C_p^j ——制造单元 U_j 的综合工序能力指数;

ω_{ij} ——各产品在制造单元 U_j 的重要性分配权重, $\omega_{1j} + \dots + \omega_{N_jj} = 1$;

N_j ——制造单元 U_j 加工的产品种类数量;

q_{ij} ——制造单元 U_j 加工产品 i 的数量;

E_{ij} ——制造单元 U_j 加工单位产品 i 的时间;

F_{ij} ——制造单元 j 加工产品 i 的生产准备时间;

C_{pi}^j ——制造单元 U_j 加工产品 i 的工序能力指数;

T_j ——制造单元 U_j 计划可用生产时间;

$f_{ij}(C_{pi}^j)$ ——在稳定环境下, 制造单元 U_j 生产 i 的平均不合格品率。

平均不合格品率 $f_{ij}(C_{pi}^j)$, 产品质量权重 ω_q 以及质量保证能力对瓶颈指数的影响函数 $G(C_p, C_p^j)$ 均与工序能力指数 C_{pi}^j 相关, 具体关联关系以及具体数值的确定详见文献[11]。

但是, 作业车间内制造单元的瓶颈指数并不是保持不变的, 而是随着车间内某些不确定性因素变量的影响而累积发生变化。瓶颈漂移指数 I_{BNS} , 用于描述制造单元在各种瓶颈漂移因素变量综合影响下, 其瓶颈程度的变化趋势, 同时也可表征各制造单元物料配送优先级的变化趋势。由瓶颈漂移指数 I_{BNS} 的意义可知, I_{BNS} 大小直接反映了制造单元瓶颈指数变化的快慢, 其正负则反映了其瓶颈指数变化的方向。故 I_{BNS} 可被表示为 $\frac{\partial I_{BN}}{\partial t}$ 。据此, 构建制造单元 U_j 的瓶颈漂移指数 I_{BNS}^j

$$I_{BNS}^j = \left[\omega_t \left(\frac{U_j^L + L^j}{U_j^C + C^j} \right) + \omega_q (G(C_p, C_p^j) + Q^j) - I_{BN}^j \right] t^{-1}$$

式中 t ——瓶颈漂移预测的总时间;

L^j ——瓶颈漂移因素变量影响造成的制造单元 U_j 生产所需时间变化, 即时间需求变量的综合贡献度;

C^j ——瓶颈漂移因素变量影响造成的制造单元 U_j 生产可用时间变化, 即时间能力变量的综合贡献度;

Q^j ——瓶颈漂移因素变量影响造成的制造单元 U_j 质量保证能力变化, 即质量保证能力变量的综合贡献度。

时间需求、时间能力以及质量保证能力变量的综合贡献度的具体确定步骤详见文献[12]。

2.2 时变的物料配送路径优化模型

制造单元时间窗约束将增加物料配送路径优化模型的约束条件(具体数值为问题规模的整数倍); 且在存在不确定性干扰因素的作业车间内各制造单元的时间窗约束往往不尽准确, 以大幅增加问题计算复杂程度为代价也难以实现物料配送过程与生产过程的同步性。制造单元瓶颈指数和瓶颈漂移指数能够有效地表征制造单元对物料需求的迫切程度及其变化趋势, 不仅可以减少优化模型的约束条件、简化计算复杂度, 也可以通过制造单元的瓶颈程度将物料配送过程与时变的生产加工过程相结合, 提高配送路径的适应性。

假若运输车辆没有首先选择当前瓶颈指数最大的制造单元作为运送节点, 则所选运送的节点其节省的运输成本应大于没有当前瓶颈单元作为运输节点所造成的损失; 故本文将以最小化作业车间物料配送成本为优化目标的路径选择问题, 不仅考虑车辆运输本身花费的成本, 同时将因没有选择未配送节点中瓶颈指数最大的节点而造成的损失也纳入考虑范围。此外, 因不确定干扰因素的存在, 当运输车辆完成对一个制造单元的配送需要选择下一个配送节点时, 之前所依据的制造单元瓶颈指数将发生变化, 需根据瓶颈漂移趋势对一次选择后剩余制造单元瓶颈指数进行预测以令配送路径适应作业车间的实时工况。则该物料流路径优化问题定义如下。

作业车间存在唯一一个配送中心 v_0 和 m 辆容量为 Q 且具有相同行驶速度 v 的运输车, 用于为 n 个制造单元节点 $\{v_1, v_2, \dots, v_n\}$ 提供物料配送服务。已知每台车辆的固定使用成本为 $C \geq 0$, 各制造单元间的运输路径长度为 d_{ij} (制造单元 v_i 到制造单元 v_j 的距离), 各制造单元的物料需求量为 q_j , 各制造单元的初始瓶颈指数为 $I_{BN}^j(0)$, 其瓶颈漂移指数为 I_{BNS}^j , c_{ij} 为从制造单元 v_i 到制造单元 v_j 所需的运

输成本, f_{iB} 为运输车辆在制造单元 v_i 为选择具有最大瓶颈指数的制造单元 v_B 的损失(惩罚)成本; 问题要求车辆配送完成时所有制造单元都已被服务且各制造单元只被服务一次, 每台车辆的配送路径为一条回路即从配送中心 v_0 出发最终返回 v_0 , 同时要求总配送成本(运输成本和惩罚成本)最小。则物流路径优化问题数学模型如下

$$\min \sum_{k=1}^m \sum_{j=1}^n Cx_{0j}^k + \sum_{k=1}^m \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^n (c_{ij}x_{ij}^k + (I_{BN}^B(t) - I_{BN}^j(t))f_{iB}x_{ij}^k) \quad (1)$$

$$\sum_{k=1}^m \sum_{i=0}^n x_{ij}^k = 1 \quad j=1, 2, \dots, n$$

$$\sum_{k=1}^m \sum_{j=0}^n x_{ij}^k = 1 \quad i=1, 2, \dots, n \quad (2)$$

$$\sum_{k=1}^n \sum_{j=1}^n x_{0j}^k - \sum_{k=1}^n \sum_{i=1}^n x_{i0}^k = 0 \quad (3)$$

$$v_B \in \{v_j \mid \sum_{k=1}^m \sum_{i=0}^n x_{ij}^k = 0 \quad j=1, 2, \dots, n, i \neq j\} \quad (4)$$

$$t = \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^n \frac{d_{ij}x_{ij}^k}{v} \quad k=1, 2, \dots, m \quad (5)$$

$$I_{BN}^j(t) = I_{BN}^j(0) + I_{BNS}^j t \quad j=1, 2, \dots, n \quad (6)$$

$$\sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^n x_{ij}^k q_j \leq Q \quad k=1, 2, \dots, n \quad (7)$$

$$(l_i^k - q_j)x_{ij}^k = l_j^k x_{ij}^k \quad i, j, k=1, 2, \dots, n \quad i \neq j \quad (8)$$

$$l_i^k x_{ij}^k \geq q_j x_{ij}^k \quad i, j, k=1, 2, \dots, n \quad i \neq j \quad (9)$$

$$q_j \leq Q \quad j=1, 2, \dots, n \quad (10)$$

$$l_j^k, q_j, Q \geq 0 \quad j=1, 2, \dots, n \quad (11)$$

$$x_{ij}^k \in \{0, 1\} \quad (12)$$

式中, $x_{ij}^k = \begin{cases} 1 & \text{车辆} k \text{ 选择了 } (v_i, v_j) \text{ 路段} \\ 0 & \text{否则为决策变量} \end{cases}$; l_j^k 为第 k

路径的运输车辆在完成对制造单元节点 v_j 后所剩余的物料数量。约束条件式(1)、(2)保证了各制造单元均被运输车辆访问且只访问过一次; 约束式(3)表明任意一条物流路径均为回路, 由配送中心出发最终返回配送中心; 约束式(4)保证了每次运输车辆选择最大瓶颈指数制造单元作为参照时, 该单元尚未被访问; 约束式(5)为当前运输车辆选择路径时所处的时间点; 约束式(6)为 t 时刻的制造单元 v_j 的瓶颈指数 $I_{BN}^j(t)$ 的时变函数; 约束式(7)为容量限制, 一次路径配送量不能超过运输车辆的容量; 约束

式(8)为运输车辆上物料量的变化关系; 约束式(9)用于保证物料的不可拆分性; 约束式(10)规定单一制造单元物料需求量不超过运输车辆的容量限制; 约束式(11)规定了模型参数的取值范围; 约束式(12)规定了决策变量的范围。

3 改进的时变物流路径优化模型

本文第 1 节物流路径优化问题概述中对物流路径优化假设(6)将导致在物料配送过程中运输车辆难以保证每次承载的物料均全额运送(即运输车辆空载返回), 甚至增加车辆运输次数, 造成不必要的成本损失。在实际生产过程中制造单元对物料的需求可在一个时间段内分次配送而不影响加工^[13], 从而保证物料的全额配送减少配送子路径数量。图 1 为不允许和允许物料可拆分配送, 配送路径优化对比示意图。图 1 中圆形图样内 (j, q_j) 表示制造单元节点 v_j 对物料需求量为 q_j , 每种含有箭头的线型表示一条运输车辆路径。假设图 1 中运输车辆最大容量为 120, 其中, 图 1a 为制造单元物料配送不可拆分条件下的运输车辆路线图, 一台运输车辆以满载状态完成对制造单元 v_1, v_2 进行物料的运送后, 所剩余的 10 当量物料不足以供给余下任何制造单元则返回, 第二台运输车辆以满载状态选择对制造单元 v_4, v_3 进行物料运送, 同样剩余 10 当量物料不足以供给制造单元 v_3 , 返回, 此时需要第三台运输车辆完成对制造单元 v_3 的配送; 图 1b 为允许制造单元物料配送拆分条件下的运输车辆路线图, 一台运输车辆以满载状态完成对制造单元 v_1, v_2 进行物料的运送后, 此时所剩余的 10 当量物料用于供给制造单元 v_3 , 则制造单元的物料需求变为 10, 第二台运输车辆以满载状态正好可以完成制造单元 v_4, v_3 以及制造单元 v_3 剩余所需物料的配送, 从而减少了配送子路径的数量。

图 1 物料拆分配送示意图

在假设(6)被消除的条件下, 第 1 节对物料路径优化假设(7)不仅将导致物料配送过程中物料的非

全额运送, 还将造成运输车辆对制造单元的多次非必要访问, 增加运输成本。图 2 不允许和允许非满载条件下, 配送路径优化对比示意图。在图 2 中假设运输车辆最大容量仍为 120, 其中图 2a 中运输车辆每次均满载运送, 一条路径为运输车辆对制造单元 v_1, v_2 进行配送并将剩余的 10 当量物料运送至制造单元 v_3 , 另一条路径为运输车辆对制造单元 v_4, v_5 以及制造单元 v_3 剩余所需物料的配送, 并将剩余的 10 当量物料运返至配送中心; 图 2b 表示若在配送过程中运输车辆可不满载, 则两条配送路径为一台运输车辆以 110 的负载对制造单元 v_1, v_2 进行配送, 另一台运输车辆以满载状态完成对制造单元 v_3, v_4, v_5 的配送, 减少了运输车辆对制造单元 v_3 的访问次数, 同时保证了物料的全额运送。因此, 合理的车辆一次运载量以及物料拆分配送决策能够保证每次运输车辆的满载运送, 从而提高配送效率降低配送成本。

图 2 非满载配送示意图

在上节物料配送路径优化模型的基础上, 取消假设条件(6)和(7), 即在可拆分和允许车辆初始非满载条件下, 对计及漂移瓶颈的物料配送路径优化模型进行改进。由于允许物料拆分配送, 则制造单元进行物料配送过程中在同一条路径中制造单元最多被访问一次但在多路径中同一制造单元可以被访问多次; 由于允许运输车辆初始非满载, 则为减少运输车辆非必要载重(物料全额运送)要求运输车辆仅装载路径中制造单元所需物料量即车辆返回配送中心时负载为 0。故改进的物料路径优化问题数学模型如下

$$\min \sum_{k=1}^m \sum_{j=1}^n Cx_{0j}^k + \sum_{k=1}^m \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^n (c_{ij}^k x_{ij}^k + (I_{BN}^B(t) - I_{BN}^j(t)) f_{iB}^k x_{ij}^k) \quad (13)$$

$$\sum_{i=0}^n x_{ij}^k \leq 1 \quad j, k = 1, 2, \dots, n \quad (13)$$

$$\sum_{j=0}^n x_{ij}^k \leq 1 \quad i, k = 1, 2, \dots, n \quad (14)$$

$$\sum_{k=1}^m \sum_{i=0}^n x_{ij}^k \geq 1 \quad j = 1, 2, \dots, n \quad (15)$$

$$\sum_{k=1}^m \sum_{j=0}^n x_{ij}^k \geq 1 \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (16)$$

$$\sum_{k=1}^n \sum_{j=1}^n x_{0j}^k - \sum_{k=1}^n \sum_{i=1}^n x_{i0}^k = 0 \quad (17)$$

$$\sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^n x_{ij}^k q_j \leq Q \quad k = 1, 2, \dots, n \quad (18)$$

$$(I_i^k - q_j) x_{ij}^k = I_j^k x_{ij}^k \quad i, j, k = 1, 2, \dots, n, i \neq j \quad (19)$$

$$I_i^k x_{i0}^k = 0 \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (20)$$

$$v_B \in \{v_j \mid \sum_{k=1}^m \sum_{i=0}^n x_{ij}^k = 0 \quad j = 1, 2, \dots, n, i \neq j\} \quad (21)$$

$$t = \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^n \frac{d_{ij} x_{ij}^k}{v} \quad k = 1, 2, \dots, m \quad (22)$$

$$I_{BN}^j(t) = I_{BN}^j(0) + I_{BNS}^j t \quad j = 1, 2, \dots, n \quad (23)$$

$$q_j \leq Q \quad j = 1, 2, \dots, n \quad (24)$$

$$I_j^k, q_j, Q \geq 0 \quad j = 1, 2, \dots, n \quad (25)$$

$$x_{ij}^k \in \{0, 1\} \quad (26)$$

式中, 该优化模型的优化目标不变, 仍为最小化作业车间物料流配送成本; 约束式(13)、(14)用于保证一条配送子路径中同一制造单元只能被访问一次; 约束式(15)、(16)用于保证完成配送后所用制造单元均被访问过至少一次; 约束式(17)说明所有车辆路径为回路; 约束式(18)为运输车辆最大容量约束; 约束式(19)为运输车辆负载变化关系; 约束式(20)避免了运输车辆的非必要负载, 即返回时需为空载; 约束式(21)~(23)为作业车间制造单元瓶颈指数的时变关系; 约束式(24)规定单一制造单元物料需求量不超过运输车辆的容量限制; 约束式(25)、(26)为模型变量的取值范围。

4 贪婪遗传算法

物料配送路径优化问题模型为线性规划规划模型, 该问题在问题规模较小时可利用 CPLEX 或 Matlab 进行求最优解, 但当问题规模增大时, 由于其为 NP-hard 问题, 求解所需时间将成指数倍增长。因此, 采用合理的启发式算法获得满意解为解决此问题的可行方法。贪婪算法属于一类知识型启发式算法, 根据具体的优化目标和约束条件, 通过设置专门的邻域选择或搜索策略以完成对目标模型的求解^[14]。贪婪算法具有效率高的优点; 但是其在某些

特殊参数下难以保证解的质量方面, 由于短视性有时会得到最差解。遗传算法是由 Holland 其专著《Adaptation in Natural and Artificial Systems》(1975) 中首次提出, 后被广泛应用于求解 NP 问题, 具有较强的适应性, 但是容易“早熟”局部搜索能力不强。因此, 在求解物料配送路径优化问题时, 将局部搜索能力较强贪婪算法引入遗传算法, 提出贪婪遗传混合算法对模型求解。

4.1 初始种群的生成

针对模型中最小化配送成本的优化目标, 贪婪算法的每一步都是寻找使得运输成本以及非瓶颈惩罚成本最小的节点, 具体步骤如下。

(1) 对作业车间内各制造单元进行编号, 输入各制造单元的物料需求量 q_j 、瓶颈指数 I_{BN}^j 、瓶颈漂移指数 I_{BNS}^j 、运输车辆速度 v 、各制造单元节点间距离 d_{ij} 、运输车辆容量 Q 、节点间运输成本 c_{ij} 、非瓶颈惩罚系数 f_{IB} 以及派车固定成本 C 等基本参数;

(2) 以配送单元 v_0 为出发点分别选择 n 个制造单元节点 $v_1, v_2, \dots, v_n$ 作为首个配送单元, 即产生 n 条不同的部分配送路径 $R_m, m=1, 2, \dots, n$; 令 $m=1$ 。

(3) 选择此时令 $c_{1j}x_{1j}^k + (I_{BN}^B(t) - I_{BN}^j(t))f_{IB}x_{1j}^k$ 最小的制造单元 v_j 作为 R_m 的下一运送节点, 直至所有制造单元节点的物料需求均被满足; 则 $m=m+1$ 。

(4) 若 $m > n$, 结束; 否则, 返回步骤(3)。

以上步骤的运算复杂度为 $O(n^2)$, 可以生成一个种群规模为 n 的初始种群。若将步骤(2)进行延续, 即在生成 n 条不同的部分配送路径后, 针对每条不同路径选择剩余制造单元作为下一个运送节点, 则会生成 $n(n-1)$ 条部分路径, 继续步骤(3)和步骤(4), 最终选择 n 条完整路径作为初始种群, 则该初始种群质量更优; 但同时运算复杂度将变为 $O(n^3)$ 。若不断对步骤(2)进行延续, 初始种群质量将不断提高, 当步骤(2)延续 $n-1$ 次步骤(3)、(4)已无需执行, 此时该算法变为枚举法可得全局最优解, 运算复杂度 $O(n^n)$ 。因此, 若在实际运算中生成初始种群适应度较差, 可通过适当延续步骤(2)以获得适应度较高的初始种群。

4.2 杂交算子

杂交操作是进化算法中最主要的进化操作, 其主要作用是增加种群的多样性, 使得算法的搜索空间尽量扩散到整个解空间。若两个路径染色体相同的基因段越多, 则说明这两条染色体所代表的配送

路径相重叠的部分越多, 相似度越大。这两条染色体若进行杂交属近亲繁殖应尽量避免, 以保证杂交后种群的多样性。孟佳娜等^[15]对染色体的相似性进行了度量, 本节在此基础上结合本优化模型特点将路径染色体的相似度定义为染色体各子路径部分相同基因段长度总和 $\sum l$ 与较长染色体长度的比值, 且规定相同基因段长度必须大于等于 2

$$S(R_i, R_j) = \frac{\sum l}{\max\{|R_i|, |R_j|\}}$$

例如, R_i 和 R_j 分别为 01230456703890 和 0321045607890。 R_i 的第 1 条子路径为 01230, 将其与 R_j 的三条子路径 03210, 04560, 07890 比较, 相同基因段长度为 0; R_i 的第 2 条子路径为 045670, 将其与 R_j 的三条子路径比较, 相同基因段长度为 3; R_i 的第 3 条子路径为 03890, 仍将其与 R_j 的三条子路径比较, 相同基因段长度为 2; 则

$$S(R_i, R_j) = \frac{3+2}{\max\{14, 13\}} = 5/14$$

相似度阈值为判定两条染色体是否能够杂交的依据, 令阈值 $\bar{S} = \frac{1+\sqrt[3]{g/G}}{3}$, 其中 G 为设定的最大进化代数, g 为当前进化代数, 则 $\bar{S} \in (1/3, 2/3]$ ^[15]。随着进化代数的增加, 相似度阈值也不断增加, 不仅能够避免近亲杂交, 也能在代数增加问题收敛时保证染色体杂交数量。则采用顺序杂交算子的步骤如下。

(1) 从种群中随机选取两条染色体。

(2) 计算所选染色体的相似度, 若超过相似度阈值, 则返回步骤(1)。否则, 以其中一条染色体作为基本体, 从中随机截取一条子路径, 在从作为参考体的另一条染色体中按顺序选取尚未被访问以及尚未被满足配送要求的制造单元节点依次加入子代染色体中直至配送要求完全被满足; 同理交换基本体和参考体生成另一条子代染色体。

4.3 贪婪局部搜索方法

由于贪婪算法具有领域搜索, 改进解的质量的功能, 因此可以利用贪婪算法对所得种群进行局部搜索从而进一步提高染色体质量, 具体步骤如下。

(1) 从种群中随机选取一个染色体作为当前解。

(2) 计算染色体中各子路径的物料需求量, 若需求量大于运输车辆容量, 则依次从最小需求量的制造单元开始选择删除直至满足最大车辆容量约束, 检查完成删除的染色体, 将尚未被配送货尚未

被满足的制造单元按需求量大小排列, 依次尝试将其插入至当前染色体中。

(3) 比较原染色体和新染色体的目标函数值, 若新染色体目标值较优则用新染色体替换种群中的原染色体。

(4) 重复步骤(2)和步骤(3), 直至新的染色体无法改变解的质量。

4.4 算法描述

对配送路径进行编码为遗传算法中为的首要步骤, 染色体编码应尽可能直接且能满足问题约束, 故采取实数编码方式^[13]。染色体中每个基因对应一个制造单元节点, 每一台运输车辆的子路径间以 0 隔开, 对应配送中心。例如某染色体编码为 01230456703890, 可知作业车间内存在 9 个制造单元, 该配送路径由 3 台运输车辆完成即存在 3 条子路径分别为

$$\begin{aligned} v_0 &\rightarrow v_1 \rightarrow v_2 \rightarrow v_3 \rightarrow v_0 \\ v_0 &\rightarrow v_4 \rightarrow v_5 \rightarrow v_6 \rightarrow v_7 \rightarrow v_0 \\ v_0 &\rightarrow v_3 \rightarrow v_8 \rightarrow v_9 \rightarrow v_0 \end{aligned}$$

其中制造单元节点 v_3 物料被拆分运送。该染色体编码中各条子路径制造单元为有序的, 若第 1 条子路径 $v_0 \rightarrow v_1 \rightarrow v_2 \rightarrow v_3 \rightarrow v_0$ 变为 $v_0 \rightarrow v_2 \rightarrow v_1 \rightarrow v_3 \rightarrow v_0$, 则目标函数值将改变; 子路径与子路径之间是无序的, 即交换个子路径间的位置目标函数值不变。

基于以上对所提出贪婪遗传启发式算法中关键步骤的描述, 完整的算法步骤如下, 其中图 3 为算法框架图。

(1) 设计能够反映并满足约束条件的路径染色体。

(2) 利用贪婪算法生成初始种群。

(3) 计算种群中各染色体的适应度 $F(R_j)$, 目标函数为线性函数则令染色体适应度为染色体的目标函数值, 以便于计算和比较解的优劣, 若染色体无法满足约束条件, 则令适应度为 0。

(4) 根据各染色体的适应度决定可以进入下一代的染色体。

(5) 对种群中的染色体进行杂交操作。

(6) 对子路径中节点采用对换变异操作, 该操作不会改变染色体的可行性同时还能够增加解的多样性避免早熟。

(7) 对所得种群中不符合约束条件的染色体进行贪婪局部搜索。

(8) 若没有到达最大进化代数, 则转入步骤(3), 否则进入步骤(9)。

(9) 输出种群中适应度最优的染色体作为目标

优化模型的满意解。

图3 贪婪遗传算法框架图

5 实例分析

5.1 参数生成

本实例将以某作业车间 9 个制造单元节点为例, 对所提出的改进的物料配送路径优化方法进行实例分析, 以验证方法的可行性和有效性。由于该模型中所需参数较多, 为保证参数的多样性和实例的可回溯性, 对各参数采用如下生成方式。

5.1.1 作业车间内制造单元节点位置

假设作业车间为一个 $100\text{ m} \times 100\text{ m}$ 的正方形, 则 9 个制造单元以及配送中心所处位置的横竖坐标分别由符合在区间 $[0, 100]$ 内的均匀分布随机生成。由于作业车间内制造单元位置并不会随意变化, 故在以下多次实例分析中均遵循统一的作业车间布局。以下为本节将使用的作业车间制造单元以及配送中心位置坐标表(表 1)和布局坐标图(图 4)。

表 1 作业车间内节点坐标表

点	坐标	点	坐标
v_0	(34, 73)	v_5	(82, 88)
v_1	(28, 96)	v_6	(87, 35)
v_2	(4, 66)	v_7	(2, 6)
v_3	(9, 74)	v_8	(73, 72)
v_4	(41, 34)	v_9	(85, 96)

图4 作业车间运送节点布局坐标图

由表1和图4可得各节点间的运输距离矩阵 $D=(d_{ij})$ ，具体矩阵以及各节点坐标图如下所示，其中矩阵行列分别对应 $v_0, v_1, \dots, v_9$ 。令运输车辆的运送速度为 1 m/s。

$$D = \begin{pmatrix} 0 & 24 & 31 & 25 & 40 & 50 & 65 & 74 & 39 & 56 \\ 24 & 0 & 38 & 29 & 63 & 55 & 85 & 94 & 51 & 57 \\ 31 & 38 & 0 & 9 & 49 & 81 & 89 & 60 & 69 & 86 \\ 25 & 29 & 9 & 0 & 51 & 74 & 87 & 68 & 64 & 79 \\ 40 & 63 & 49 & 51 & 0 & 68 & 46 & 48 & 50 & 76 \\ 50 & 55 & 81 & 74 & 68 & 0 & 53 & 115 & 18 & 9 \\ 65 & 85 & 89 & 87 & 46 & 53 & 0 & 90 & 40 & 61 \\ 74 & 94 & 60 & 68 & 48 & 115 & 90 & 0 & 97 & 122 \\ 39 & 51 & 69 & 64 & 50 & 18 & 40 & 97 & 0 & 27 \\ 56 & 57 & 86 & 79 & 76 & 9 & 61 & 122 & 27 & 0 \end{pmatrix}$$

5.1.2 制造单元的单位加工时间

各制造单元所需物料采用统一的物料当量表示，则各制造单元所需加工的工件也采用统一当量表示，无须区分不同工件种类。考虑加工时间的波动性，该单位额定加工时间 p_j^0 由符合在区间 $[10, 100]$ 内的均匀分布随机生成，实际单位加工时间 $p_j \in [p_j - 10\beta_j, p_j + (10 + 40\alpha)\beta_j]$ ， β_j 为偏差控制参数由 $[0, 1]$ 随机生成以保证左区间 $p_j - 10\beta_j > 0$ ， α 为加工时间波动控制参数，用于调节加工时间波动区间大小， $\alpha = 0, 0.5, 1.0$ 。

5.1.3 制造单元物料需求量

制造单元物料需求量由一个配送周期内制造单元所需加工当量工件数量和单位当量工件所需当量物料量决定。各制造单元均以当量工件为加工单位，则单位当量工件所需当量物料量为 λ ，设 $\lambda = 3$ ；配送周期内各制造单元所需加工当量工件数量 q_j 由符合在 $[20, 60]$ 内的均匀分布随机生成，则制造单元对物料需求量 q_j 为 λq_j 。设一个配送周期为 2 h，运输车辆最大容量为 180 当量物料，以保证最大容量大于等于单制造单元最大物料需求量。

5.1.4 成本参数

制造单元节点间的运输成本与节点间距离直接相关，又因为作业车间路径选择仅与运输成本和非瓶颈选择损失成本直接相关，故可通过设定两者间的比例关系以分析物料配送路径的规律。令制造单元及节点间运输成本 $c_{ij} = d_{ij}$ ；非瓶颈选择损失成本 $f_{ib} = \gamma_1 \max\{c_{ij}\}$ ，其中 $\gamma_1 = 0.2, 0.5, 1.0, 1.5, 2.0$ ；一次派车成本 $C = \gamma_2 \max\{c_{ij}\}$ ，其中 $\gamma_2 = 0.2, 0.5, 0.8$ 。

5.1.5 算法参数

遗传算法参数设定为：初始种群染色体数为 500，最大进化代数数为 300，适应度筛选标准定为

$$\frac{\min_{i \in n} \{f(R_i)\} + \max_{i \in n} \{f(R_i)\}}{2}$$

式中， $f(R_i)$ 为路径 i 的目标函数值，变异率为 0.01。

5.2 实例设计和数据分析

为验证所提出计及漂移瓶颈的改进时变物料配送路径方法 (Modified time-varying material distribution routing model based on shifting bottleneck, MTMDRSB) 可拆分和非满载这一特点的有效性，将其与同样计及漂移瓶颈但不允许物料拆分配送和非满载的时变物料配送方法 (Time-varying material distribution routing model based on shifting bottleneck, TMDRSB) 在目标函数上进行比较。为验证 MTMDRSB 方法在不确定环境下对作业车间物料配送具有有效和实用性，将 MTMDRSB 方法中关于漂移瓶颈时变部分去除，即 MTMDRSB 方法中优化目标变为

$$\min \sum_{k=1}^m \sum_{j=1}^n Cx_{0j}^k + \sum_{k=1}^m \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^n (c_{ij}x_{ij}^k + (I_{BN}^B(0) - I_{BN}^j(0))f_{ib}x_{ij}^k)$$

且约束条件删除约束条件(22)、(23)，其他均保持不变，称该方法为非时变物料配送方法 (Material distribution routing model based on bottleneck, MDRB)；通过仿真比较两种方法所获得的配送路径下作业车间内各制造单元由于缺料的饥饿时间总和。此外，为验证所提出的利用瓶颈表征配送优先级以替换配送时间窗约束方法的有效性，将 MDRB 配送方法中优化目标变为

$$\min \sum_{k=1}^m \sum_{j=1}^n Cx_{0j}^k + \sum_{k=1}^m \sum_{i=0}^n \sum_{j=0}^n (c_{ij}x_{ij}^k + P(x_{ij}^k))$$

且将约束条件式(21)~(23)替换为各制造单元的配送时间窗约束，其中 $P(x_{ij}^k)$ 为违反时间窗约束的惩罚成本，令 $P(x_{ij}^k) = \gamma_1 \max\{c_{ij}\}$ ， $\gamma_1 = 1$ ，简记该方法为 MDR (Material distribution routing)。同时，通过调整模型中各类参数以分析其对满意解或最优解的影响。以下为针对上述实例设计，对实例比较结果进行的猜想以及相应解释，后通过实例结果数据对这些猜想

进行验证。若这些猜想均成立则可说明所提出的物料配送路径模型方法的有效和优越性。

猜想 1: MTMDRSB 方法在目标函数上表现优于 TMDRSB 方法。解释: MTMDRSB 方法由于能够拆分物料能够减少配送路径子路径的数量, 从而减少成本。

猜想 2: 随着 γ_1 的增大, MTMDRSB 方法较 TMDRSB 方法的优越性也逐渐增大。解释: 参数 γ_1 的增大表明运输车辆在选择下一节点时以减小目标函数的角度应优先选择瓶颈指数大的制造单元, 而评价指数越大反映该制造单元所需物料量越大, 运输车辆所剩余物料量有更大的可能不能满足该最大瓶颈指数单元的物料量, 若不允许物料配送拆分, 则该瓶颈单元不能被选择造成目标函数的增大, 因此, 相应提高了 MTMDRSB 方法较 TMDRSB 方法的优越性。

猜想 3: 随着 γ_2 的增大, MTMDRSB 方法较 TMDRSB 方法的优越性逐渐增大。解释: 根据猜想 1 可推测 MTMDRSB 方法优于 TMDRSB 方法是因为拆分物料在某种程度上能够减少子路径从而降低派车成本, 但若派车成本逐步下降, 该优越性则相应减少。

猜想 4: MTMDRSB 方法下作业车间内各制造单元物料饥饿时间小于 MDRB 方法。解释: 加工时间不确定环境下, 考虑瓶颈漂移的影响能够使所选择的路径更加适应实时作业车间工况, 以及时当前对所需物料最为紧迫的瓶颈单元进行物料配送以减少由于物料短缺而造成的制造单元饥饿。

猜想 5: 随着 α 的增加, MTMDRSB 方法较 MDRB 方法的优越性增大。解释: 当加工时间波动程度增大, 则瓶颈漂移影响增大; 显然 MTMDRSB 方法较 MDRB 方法的优越性随之增大。

猜想 6: 随着 γ_1 的增大, MTMDRSB 方法较

MDRB 方法的优越性增大。解释: 参数 γ_1 的增大将导致运输车辆在选择下一运送节点时更多的参照了节点的瓶颈指数, 则若瓶颈指数不能准确反映当时各制造单元对物料的需求紧迫程度, 易造成物料无法及时送达产生饥饿。

猜想 7: 相同运算时间下 MDRB 方法在目标函数上表现优于 MDR 方法。解释: MDRB 方法由于采用瓶颈约束代替制造单元物料需求时间窗约束, 简化路径优化约束条件; 故在相同运算时间下, MDRB 方法在目标函数上表现较优。

路径优化方法的求解将使用 Matlab 7.0 对参数进行生成并编写算法以求解优化模型获得满意或最优解(染色体), 在对 MTMDRSB 和 MDRB 两种方法下作业车间各制造单元缺料饥饿时间采用 Arena 11.0 对其仿真(假设在制品流动顺序为 123456789)以验证上述猜想的正确性。MTMDRSB 方法与 TMDRSB 方法比较的数据结果如表 2 所示; MTMDRSB 方法与 MDRB 方法比较数据结果如表 3 所示, 其中总饥饿时间单位为分钟。由表 2 可以看出, MTMDRSB 方法的目标函数值明显小于 TMDRSB 方法的目标函数值, 则猜想 1 成立; 随着 γ_1, γ_2 增大, 两种方法的目标差异值随着增加, 则猜想 2 和猜想 3 成立。观察表 3 易发现, MTMDRSB 方法下作业车间内各制造单元物料饥饿时间小于 MDRB 方法, 则猜想 4 成立; 同时发现随着 γ_1, γ_2 增大, 两种方法的饥饿时间差异逐渐增加, 则猜想 5 和猜想 6 成立。表 4 中, 将 MDRB 方法与 MDR 方法分别重复 10, 20, 50 次获取其目标函数值并进行比较, 表明在目标值表现上 MDR 方法较优, 故猜想 7 成立。因此, 可以验证所提出的计及漂移瓶颈改进的时变物料配送路径优化方法(MTMDRSB)具有有效性和实用性。

表 2 MTMDRSB 方法与 TMDRSB 方法数据结果表

γ_2	γ_1	MTMDRSB		TMDRSB		目标值差异
		最优染色体	目标函数值	最优染色体	目标函数值	
0.2	0.2	01237074608590	703.5	01203740650890	986.9	283.4
	0.5	0123037046808590	1 006.9	012037046085090	1 392.8	385.9
	1.0	0123074606850590	983.7	013024076095080	1 513.7	530.0
	1.5	01320274046808950	1 242.2	013027046085090	1 884.3	642.1
	2.0	0321018505960740	1 087.7	032018059064070	1 792.5	704.8
0.5	0.2	0321015809860470	853.9	032015089064070	1 217.9	364.0
	0.5	0123037046808590	1 004.2	012034070680590	1 425.3	421.1
	1.0	03210158098606470	1 493.8	032018098064070	2 025.8	532.0
	1.5	02370741015809860	1 832.6	023074015089060	2 497.3	664.7
	2.0	01230374046808590	1 632.4	013027046085090	2 421.5	789.1

(续)

γ_2	γ_1	MTMDRSB		TMDRSB		目标值差异
		最优染色体	目标函数值	最优染色体	目标函数值	
0.8	0.2	01230374046508590	966.1	012037046058090	1 361.7	395.6
	0.5	01320270468089050	1 243.9	0130207406809050	1 712.4	468.5
	1.0	01850956064707320	1 229.3	018059064070320	1 812.5	583.2
	1.5	014707320680590	1 028.5	0140703206085090	1 721.8	693.3
	2.0	0812023707460590	1 246.8	081023074065090	2 053.5	806.7

表 3 MTMDRSB 方法与 MDRB 方法数据结果表

α	γ_1	MTMDRSB		MDRB		饥饿时间差异/min
		最优染色体	总饥饿时间/min	最优染色体	总饥饿时间/min	
0	0.2	013202740680590	15.3	012303706408590	17.8	2.5
	0.5	0812023707409560	14.9	0850190237074060	18.2	3.3
	1.0	032101840709560	15.7	031202480705960	19.6	3.9
	1.5	0140230760650890	18.1	0140720340680950	22.9	4.8
	2.0	0312027046095080	17.5	03210185059606470	23.1	5.6
0.5	0.2	021808590370460	14.2	02840460270590	17.4	3.2
	0.5	0812023707409560	15.2	0850190237074060	19.5	4.3
	1.0	0321018059064070	14.9	037021808904650	19.7	4.8
	1.5	041046805902370	16.7	0410470680950	22.1	5.4
	2.0	051202370460890	16.2	0589096014707320	22.3	6.1
1.0	0.2	021404730680590	16.6	0217037404605890	20.4	3.8
	0.5	0721013046808590	16.3	0740321015909860	21.2	4.9
	1.0	08104602370950	15.9	08601230740590	21.6	5.7
	1.5	0123037048065090	17.0	018073202406590	23.1	6.1
	2.0	04102370650890	15.7	041202370960580	23.4	7.7

表 4 MDRB 方法与 MDR 方法数据结果表

重复次数	γ_1	MDRB	DRB	目标值	目标值相对
		平均目标函数值	平均目标函数值	绝对差异	差异(%)
10	1.0	1 637.3	1 766.6	129.3	7.9
20		1 604.8	1 736.4	131.6	8.2
50		1 593.1	1 730.1	137.0	8.6

6 结论

(1) 本文提出将作业车间制造单元瓶颈指数和瓶颈漂移指数作为物料配送节点初始优先级的确定依据,以最小化总配送成本(运输成本和违反优先级的惩罚成本)为优化目标,在允许运输车辆非满载和物料拆分配送的基础上,建立了时变的物料配送路径优化模型以提高配送路径与实际生产过程的同步性和适应性。

(2) 根据所建立模型的特点,将贪婪策略与遗传算法结合对模型进行求解,提高了初始种群个体适应度和搜索效率,避免早熟。

(3) 通过对所提出模型进行实例比较和分析,表明了考虑瓶颈漂移的时变物料配送路径优化模型能够更好地适应多变的作业车间环境;同时实例验证表明允许运输车辆非满载和物料拆分配送能够起到提高配送效率降低配送成本的作用。

参 考 文 献

- [1] 李军. 有时间窗的车辆路线安排问题的启发式算法[J]. 系统工程, 1996, 114(5): 45-50.
LI Jun. The time window of the vehicle routing problem heuristics[J]. Systems Engineering, 1996, 114(5): 45-50.
- [2] TAILLARD E, BADEAU P, GENDREAU M, et al. A tabu search heuristic for the vehicle routing problem with soft time windows[J]. Transportation Science, 1997, 31(2): 170-186.
- [3] 刘诚, 陈治亚, 封全喜. 带软时间窗物流配送车辆路径问题的并行遗传算法[J]. 系统工程, 2005, 23(10): 7-11.
LIU Cheng, CHEN Zhiya, FENG Quanxi. With soft time windows vehicle routing problem parallel genetic algorithm[J]. Systems Engineering, 2005, 23(10): 7-11.
- [4] 王楠, 李世其, 王峻峰. 带时间窗的汽车总装线物流配送路径规划[J]. 工业工程, 2012, 15(2): 94-99, 120.
WANG Nan, LI Shiqi, WANG Junfeng. Vehicle routing with time windows in material delivery for automobile

- general assembly line[J]. Industrial Engineering, 2012, 15(2): 94-99, 120.
- [5] CHENG R, GEN M. Vehicle routing problem with fuzzy due-time using genetic algorithms [J]. Japanese Journal of Fuzzy Theory and Systems, 1995, 7(5): 1050-1061.
- [6] TEDOROVIC D, PAVKOVIC G. The fuzzy set theory approach to the vehicle routing problem when demand at nodes is uncertain [J]. Fuzzy Sets and Systems, 1996, 82(3): 307-317.
- [7] 樊建华, 王秀峰. 随机需求多车辆路径问题的重优化算法[J]. 南开大学学报, 2008, 41(2): 103-107.
FAN Jianhua, WANG Xiufeng. Re-optimization needs of multi-vehicle routing problem with stochastic algorithm[J]. Journal of Nankai University, 2008, 41(2): 103-107.
- [8] 李晋航, 黄刚, 贾艳. 多模糊信息条件下的物料配送路径规划问题研究[J]. 机械工程学报, 2011, 47(1): 124-131.
LI Jinhang, HUANG Gang, JIA Yan. Vehicle routing problem in material distribution under condition of much fuzzy information [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2011, 47(1): 124-131.
- [9] FISHER M. Vehicle routing[M]. North-Holland, Amsterdam: Handbooks in Operations Research and Management Science, 1995.
- [10] RENAUD J, LAPORTE G, BOCTOR F F. A tabu search heuristic for the multi-depot vehicle routing problem[J]. Computers and Operations Research, 1996, 23(3): 229-235.
- [11] 凌琳, 刘明周, 唐娟, 等. 制造车间生产物流瓶颈指数研究[J]. 农业机械学报, 2012, 43(5): 197-202.
LING Lin, LIU Mingzhou, TANG Juan, et al. Bottleneck index of production logistic in manufacturing shop [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(5): 197-202.
- [12] LING Lin, LIU Mingzhou, TANG Juan, et al. The coupling relationship among bottleneck shifting factors in job shop [J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture, 2013, 227(9): 1373-1381.
- [13] 李晋航. 混流制造车间物料配送调度优化研究[D]. 武汉: 华中科技大学, 2009.
LI Jinhang. Flow manufacturing scheduling optimization workshop materials research[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2009.
- [14] 王文义, 任刚. 多种群退火贪婪混合遗传算法[J]. 计算机工程与应用, 2005(23): 60-62.
WANG Wenyi, REN Gang. Multigroup annealing greedy hybrid genetic algorithm[J]. Computer Engineering and Applications, 2005(23): 60-62.
- [15] 孟佳娜, 王立宏. 具有自识别能力的遗传算法求解旅行商问题[J]. 计算机工程与应用, 2006(13): 51-53.
MENG Jiana, WANG Lihong. A genetic algorithm with self-identify capability to solve TSP [J]. Computer Engineering and Applications, 2006(13): 51-53.
-
- 作者简介: 凌琳(通信作者), 女, 1987 年出生, 博士, 讲师。主要研究方向为生产物流控制。
E-mail: linglin8787@126.com
刘明周, 男, 1968 年出生, 博士, 教授, 博士研究生导师。主要研究方向为机械制造自动化、生产系统建模与仿真和 CIMS。
E-mail: liumingzhou0551@163.com
葛茂根, 男, 1979 年出生, 博士研究生, 讲师。主要研究方向为制造过程监测与控制。
E-mail: gmg320@163.com