

基于 NSGA-Ⅱ 的生产线缓存与设备布局协同优化

李爱平, 于海斌, 傅翔, 范国良

(同济大学 机械与能源工程学院, 上海 201804)

摘要:为解决因布局过程忽略或粗略设置缓冲区占地面积而造成的生产拥挤或空间浪费问题,针对缓存配置与设备布局问题展开协同优化。基于连续时间 Markov 随机过程原理建立排队网节点状态模型,求解生产线设备平均利用率,以设备利用率、物料搬运距离和占地面积为优化目标,建立缓存配置与设备布局协同优化模型。通过改进的 NSGA-Ⅱ 算法对该模型进行优化。最终,通过某柴油机缸体生产线实例验证了本文提出方法的有效性。

关键词:设备布局;缓存配置;协同优化;Markov 随机过程;排队网;NSGA-Ⅱ 算法

中图分类号: TB491

文献标志码: A

Collaborative Optimization Method of Buffer and Facility Layout in Production Lines Based on NSGA-Ⅱ Algorithm

LI Aiping, YU Haibin, FU Xiang, FAN Guoliang

(School of Mechanical Engineering, Tongji University, Shanghai 201804, China)

Abstract: To reduce the congestion or wasted space caused by neglected space of buffer, the collaborative optimization of buffer allocation problem and facility layout problem was presented. Based on continuous-time Markov stochastic process theory, a queuing network node state model was established to solve utilization rate of facilities. A collaborative optimization model was built considering the utilization rate of facilities, material handling distance and floor area. The collaborative optimization model was calculated using improved NSGA-Ⅱ. A case study of diesel engine cylinder block processing line was provided to prove the effectiveness of the proposed method.

Key words: facility layout; buffer allocation; collaborative optimization; Markov stochastic process; queuing network; NSGA-Ⅱ algorithm

设备布局问题(facility layout problem, FLP)是制造系统中的研究重点和热点,合理的设备布局设计可提高生产效率、降低制造成本、缩短生产周期。因此,设备布局设计理论在新建、扩建、改建制造企业中具有广阔应用前景^[1]。自 Muther^[2]提出系统布局规划方法以来,国内外学者对 FLP 进行了大量研究。Wang 等^[3]和 Hernandez 等^[4]先后采用改进的遗传算法对占地面积不同的设备展开生产线布局优化。Yang 等^[5]对柔性制造系统中的设备布局问题进行研究,并基于空间填充曲线对传统模拟退火算法进行改进。Kazi 等^[6]以物料搬运成本及非物流关系为优化目标,曾强等^[7]以物料搬运成本、非物流关系及占地面积为优化目标,Giuseppe 等^[8]以物料搬运成本、设备长宽比、非物流关系及距离要求为优化目标分别对设备布局进行多目标优化。郑永前等^[9]采用一种协同粒子群算法对生产线设备进行单元布局设计。

同样,缓存配置问题(Buffer Allocation Problem, BAP)也是制造系统中的一个研究热点。近几十年来,国内外学者也进行了较多深入的研究。文献^[9]指出,由于生产线各工位的实际作业时间一般属于随机变化量,因此会造成局部堵塞,严重时甚至造成全线中断,而生产线中缓冲区配置则能很好地解决工位间的不平衡性。Malathronas 等^[10]为双工位单机床及单缓冲区的简单问题建立了可用度解析模型,但串行生产线的状态会随着机床的增加呈指数增长,使得该方法只适用于小规模的问题求解。Yeralan 等^[11]提出一种基于分解法的多级串行生产线可用度与缓冲区容量的关联模型。宋士刚等^[12]根据缓冲区容量、机床可用度和任务需求之间的关系,在满足生产任务的前提下,提出一种改进的粒子群

收稿日期: 2016-01-25

基金项目: 国家高档数控机床与基础制造装备科技重大专项(2011ZX04015-022)

第一作者: 李爱平(1951—),女,教授,博士生导师,工学博士,主要研究方向为制造系统与自动化、数字化设计与制造等。

E-mail: limuzi@tongji.edu.cn

算法,对缓冲区容量进行优化.李翔等^[13]针对多级流水生产线缓冲区容量优化问题,考虑各工序节点间的耦合关系,基于马尔可夫随机过程原理建立流水生产线排队网节点模型,求解缓冲区容量和任务拒绝率之间的关系,并提出一种启发式优化算法对生产线缓冲区容量进行优化.

然而,单独考虑 FLP 时,一般为简化问题,仅在工位间预设固定的安全距离以满足物流缓存的要求,却忽略了不同工位对缓存配置面积的需求差异性,导致对生产线占地面积与物料搬运距离等生产线关键目标参数的错误估算,使优化结果不再具备实际意义.因此,针对 FLP 与 BLP 的协同优化存在较大意义.近年来,国内外也有少量研究协同考虑了该问题.Yamamoto 等^[14]先求解合理的缓存配置,然后将缓冲区的占地面积加以考虑进行布局设计.Irohara 等^[15]以物料搬运距离为优化目标对设备布局进行优化,再以生产率为优化目标对已得到布局方案进行缓存配置的优化.陈行丰等^[16]构建了随时间变化的缓冲区面积计算模型,并对离散型加工生产线的存放待加工工件的缓冲区域面积进行分配.

上述文献均对 FLP 和 BAP 两问题进行了分步优化,未将 2 个问题的优化真正结合.黄君政等^[17]以在制品持有费用、缓冲区配置费用和物料搬运费用的总和为优化目标,提出与空间填充曲线结合的遗传算法,对考虑缓冲区面积的串联生产线布局进行

优化,但未考虑生产线中常见的并行工位.

因此,本文在前人研究的基础上,针对 FLP 与 BAP 两问题展开协同优化.针对存在并行工位的生产线,提出并行设备的排队网模型构建方法,在传统布局优化目标物料搬运距离和占地面积的基础上,引入缓存配置直接影响的设备利用率作为协同优化目标,建立协同优化模型,改进 NSGA-II 算法并用以求解模型,进而实现 FLP 与 BAP 的协同优化.

1 缓存配置与设备布局的协同优化模型

1.1 问题描述

假设生产线由至少 K 台设备及与之对应的前置缓冲区组成,如图 1 所示. M_i 表示第 i 台设备, B_i 表示第 i 台设备前置缓冲区.整线加工任务到达率均为服从参数为 λ 的泊松分布,各设备的加工时间服从参数为 $\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_K$ 的负指数分布.生产线为长宽已知的矩形区域,各设备及缓冲配置区的形状均为矩形.设备尺寸已知,缓冲区尺寸则随相应配置容量伸缩.生产线采用多行布局形式,设备及其前置缓存配置区平行于生产线边界放置.设备及缓冲区的最小水平间距和最小纵向间距视生产线的实际情况确定.

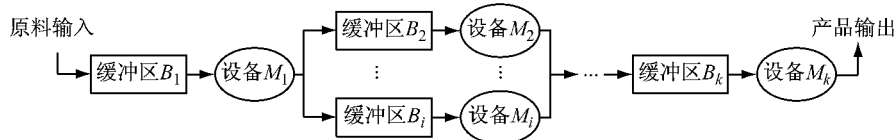


图 1 生产线缓存配置模型

Fig.1 Buffer allocation model in production line

1.2 模型优化目标

物料搬运距离和占地面积是生产线布局优化最常见的 2 个优化目标,减小物流搬运距离和占地面积都是为了使生产线能够更高效地生产.当缓存配置不合理时,生产线会出现不同程度的堵塞和空闲,设备利用率大幅度下降.所以,生产线所有设备的平均利用率也能很大程度上反映整个生产线的生产效率,对生产线的设计规划有一定的指导意义.因此,将设备利用率(F_1)和物料搬运距离(F_2)、占地面积(F_3)作为优化目标,具体如下.

1.2.1 F_1 最大

李翔等^[13]对串联模型中的设备利用率进行了求解.然而,生产线中普遍存在并行工位,本文在串联

模型研究的基础上,建立存在并联设备的排队网模型.模型中的设备分为正常设备和并联设备 2 类,正常设备的状态转移速率平衡方程如式(1)所示.

$$\begin{cases} \Pi_{0,\omega}(\lambda_i^*) = \Pi_{1,\omega}\mu_i(1 - P_{B,i+1}) + \Pi_{1,v}\mu_{i+1}^* \\ \Pi_{n,\omega}[\lambda_i^* + \mu_i(P_{B,i+1}) + \mu_i(1 - P_{B,i+1})] = \Pi_{n-1,\omega}\lambda_i^* + \Pi_{n+1,\omega}\mu_i(1 - P_{B,i+1}) + \Pi_{n+1,v}\mu_{i+1}^* \\ \Pi_{N_i+1,\omega}[\mu_i(P_{B,i+1}) + \mu_i(1 - P_{B,i+1})] = \Pi_{N_i,\omega}\lambda_i^* \\ \Pi_{1,v}(\lambda_i^* + \mu_{i+1}^*) = \Pi_{1,\omega}\mu_i(P_{B,i+1}) \\ \Pi_{n,v}(\lambda_i^* + \mu_{i+1}^*) = \Pi_{n,\omega}\mu_i(P_{B,i+1}) + \Pi_{n-1,v}\lambda_i^* \\ \Pi_{N_i+1,v}\mu_{i+1}^* = \Pi_{N_i+1,\omega}\mu_i(P_{B,i+1}) + \Pi_{N_i,v}\lambda_i^* \end{cases} \quad (1)$$

式中: $\Pi_{0,\omega}$ 为设备处于空闲状态的概率; $\Pi_{n,\omega}$ 为设备

处于正常加工状态的概率, n 为缓冲区内工件的数目, $0 < n < N_i + 1$; $\Pi_{N_i+1,\omega}$ 为设备正常加工未被后续设备阻塞但阻塞了前序设备的概率; $\Pi_{n,v}$ 为设备未阻塞其前序设备但被其后续设备阻塞的概率; $\Pi_{N_i+1,v}$ 为设备阻塞了其前序设备同时也被后续设备阻塞的概率; N_i 为缓冲区 B_i 的大小, 不包括正在加工的工件; $P_{B,i}$ 为设备 i 堵塞其前序设备的概率; μ_i 为名义加工速率; μ_i^* 为实际加工速率; λ_i^* 为工件实际到达速率。

$$\mu_i^* = \mu_i / (1 - P_{v,i}) \quad (2)$$

$$\lambda_i^* = \lambda_i / (1 - P_{B,i}) \quad (3)$$

$$\lambda_i = \mu_{i-1} (1 - P_{0,i-1} - P_{v,i-1}) \quad (4)$$

式中: $P_{v,i}$ 为设备 i 处于阻塞状态的概率; $P_{0,i}$ 为设备 i 处于空闲状态的概率; λ_i 为设备 i 的工件平均到达速率。

并联设备的参数的计算方法发生变化, 此处假设前序设备流向并行的 k 个设备的概率均等, 当所有并联设备均处于充满状态时, 其前序设备才会阻塞, 概率为 $P_{B,i} \cdot P_{B,i+1} \cdots P_{B,i+k-1}$, 并联设备的名义加工速率为 μ_i/k , 平均到达率为 λ_i/k 。并联设备空闲概率 $P_{0,i}$ 和阻塞概率 $P_{v,i}$ 不变, 并联设备的实际加工速率 μ_i^* 和实际到达速率 λ_i^* 的计算如式(2)和式(3)。

对模型中正常设备和并联设备参数计算进行总结, 如表1所示。

表1 设备参数

Tab.1 Parameters of facilities

正常设备	并联设备	正常设备	并联设备
$P_{B,i}$	$P_{B,i} \cdot P_{B,i+1} \cdots P_{B,i+k-1}$	μ_i	μ_i/k
$P_{0,i}$	$P_{0,i}$	λ_i	λ_i/k
$P_{v,i}$	$P_{v,i}$		

在求出设备的各种状态后, 可得所有设备的平均利用率求解公式, 如式(5)所示。

$$\max F_1 = \left(\sum_{i=1}^K \sum_{n=1}^{N_i+1} \Pi_{n,\omega,i} \right) K^{-1} \quad (5)$$

式中: $\Pi_{n,\omega,i}$ 表示设备 i 对应的概率。

1.2.2 F_2 最小

物料搬运距离决定着物流成本, 关系到企业的经济效益, 一个工件在设备间总的搬运距离可描述为

$$\min F_2 = \sum_{i=1}^K \sum_{j=1}^K (\Delta_{i,j} \Gamma_{i,j}), i, j = 1, 2, \dots, K \quad (6)$$

式中: $\Delta_{i,j}$ 为物料在设备 i 及其缓冲区和设备 j 及其缓冲区之间搬运的次数; $\Gamma_{i,j}$ 为设备 i 及其缓冲区与设备 j 及其缓冲区之间的矩形距离, $\Gamma_{i,j} = |x_i -$

$$x_j| + |y_i - y_j|.$$

1.2.3 F_3 最小

设备布局应考虑紧凑性原则, 即应降低生产线的占地面积, 占地面积可描述为

$$\min F_3 = L_{\text{line}} \times [(C-1)s + s_0 + 0.5\max(\omega_1) - (s_0 - 0.5\max(\omega_2))] \quad (7)$$

式中: L_{line} 为生产线的长度; s 为设备及缓冲区的纵向行间距; s_0 为设备及缓冲区和生产线的上边界及下边界之间的纵向最小距离; C 为布局方案中设备的总行数; ω_1, ω_2 分别为第1行设备和最后1行设备的宽度。

2 缓存配置与设备布局的协同优化算法设计

多目标优化算法的核心在于协调各目标函数之间的关系, Deb^[18]提出的 NSGA-II 算法可以较好地求解多目标问题。本文采用该算法, 并根据协同优化模型的特点, 对传统 NSGA-II 算法的编码、交叉和变异操作分别进行改进。其中, 对染色体编码过程进行改造, 引入缓冲区容量部分, 交叉和变异过程则根据染色体3个优化目标的值进行调整。

2.1 协同优化算法的流程设计

流程步骤为: ①迭代次数 $t=0$, 初始化种群 P_0 , 种群规模为 U , 对其进行拥挤度及非支配排序值计算。②根据初始化种群 P_0 中个体的拥挤度及非支配排序值大小进行选择操作, 经过交叉及变异后得到规模为 U 的子种群 Q_0 。③合并 P_t 和 Q_t (t 为迭代次数), 形成种群规模为 $2U$ 的种群 R_t 。④对 R_t 进行非支配排序, 得到 k 个非支配集 E_1, E_2, \dots, E_k , 其中 E_1 为最优非支配解集, E_2 为次优非支配解集, 依次类推。⑤从 E_1 起依次取染色体个体直到总数超过 U 个, 此时的非支配集为 E_i 。⑥由于 E_1, E_2, \dots, E_i 中染色体个体数量之和大于 U , 则对 E_i 中的染色体个体进行拥挤度计算。选择 E_1 至 E_{i-1} 中的全部个体和 E_i 中较好的个体一起组成规模为 U 的新种群 P_{t+1} 。⑦对新种群 P_{t+1} 进行选择、交叉和变异, 形成 Q_{t+1} 。重复③至⑦, 直至 $t=G$ (G 为最大迭代次数), 即可得到优化解集。

2.2 协同优化算法的操作设计

2.2.1 编码

在传统设备布局问题遗传算法的编码中, 只对设备编号进行编码, 本文在染色体设备编号的序列

后加入设备对应缓冲区容量大小的序列,如下:

$$[M, N] = [\{M_1, M_2, \dots, M_i, \dots, M_K\}, \{N_1, N_2, \dots, N_i, \dots, N_K\}] \quad (8)$$

式中: N_i 取值范围为 $[N_{\min}, N_{\max}]$.

2.2.2 交叉

传统的交叉操作是按照设定的交叉概率 p_c , 用 PMX(部分映射交叉)方法对染色体进行交叉操作. 但由于染色体中 M 对 F_2 响较大、对 F_1 和 F_3 影响较小, 而染色体中 N 对 F_1 影响较大、对 F_2 和 F_3 较小, 所以, 本文提出一种选择性的染色体分段交叉策略.

在分段交叉过程中, 分别针对 F_1, F_2 和 F_3 在整个种群中的优劣进行排序(从优到劣), 第 α 条染色体各目标在种群的排序中所处位置为 $R_{1,\alpha}, R_{2,\alpha}, R_{3,\alpha}$, 第 β 条为 $R_{1,\beta}, R_{2,\beta}, R_{3,\beta}$. 此处引入函数 $f(x)$, 其表示随机生成介于 0 与 x 之间一个小数. 在第 α 条和第 β 条染色体交叉过程中, 作如下判断: 若 $f(R_{1,\alpha}) + f(R_{1,\beta}) \geq f(R_{2,\alpha}) + f(R_{2,\beta})$, 则对 N 进行交叉, 若 $f(R_{1,\alpha}) + f(R_{1,\beta}) < f(R_{2,\alpha}) + f(R_{2,\beta})$, 则对 M 进行交叉. 每代交叉操作按照以上分段交叉方法进行 2 次操作.

2.2.3 变异

同样, 传统的变异操作是按照设定的概率 p_m 对染色体进行变异操作. 变异操作的改进如下: 对于 i 条染色体, 若 $f(R_{1,\alpha}) \geq f(R_{2,\alpha})$, 则对 N 进行变异, 若 $f(R_{1,\alpha}) < f(R_{2,\alpha})$, 则对 M 进行变异. 对于设备编号部分, 将变异前后的 2 个设备编号进行交换, 对于设备前置缓冲区部分, 变异之后仍在 $[N_{\min}, N_{\max}]$ 范围内随机取值.

2.2.4 解码

为使一个染色体对应唯一的布局方案, 解码方式设计如下: 按照染色体 $[M, N]$ 从最上方的一行开始, 对设备及缓冲区进行布局, 如果同一行内的各设备长度、缓冲区长度及间距之和大于生产线的长度, 那么最后 1 台设备及其缓冲区到下一行进行布局.

生产线设备及缓冲区的具体布局解码方法如图 2 所示, l_i 为设备 i 的长度; d_i 为设备 i 的宽度; L_i 为缓冲区 B_i 的长度; D_i 为缓冲区 B_i 的宽度; $h_{0,i}$ 为设备 i 及其缓冲区与生产线边界间的横向最小距离; $h_{i,j}$ 为设备 i 及其缓冲区和设备 j 及其缓冲区间间的横向最小距离.

设备的坐标 (x_i, y_i) 及缓冲区坐标 (X_i, Y_i) 的求解公式为

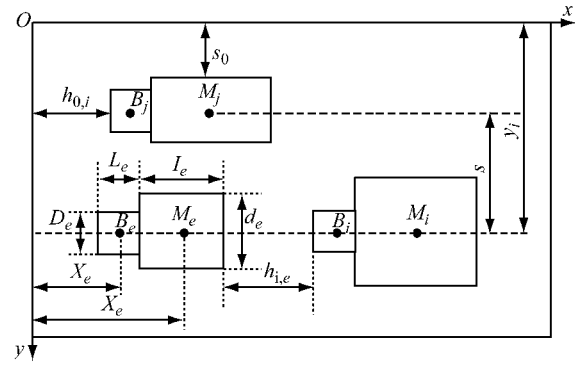


图 2 考虑缓冲区面积的设备布局

Fig.2 Facility layout considering buffer space

$$\begin{cases} x_i = x_e + (l_e + l_i)/2 + h_{i,e} + L_e = h_{0,e} + L_e + (l_i + 2l_e)/2 + h_{i,e} + L_i, & i = 1, 2, \dots, K \\ X_i = x_e + (l_e + L_i)/2 + h_{i,e} = h_{0,e} + L_e + (L_i + 2l_e)/2 + h_{i,e}, & q = 1, 2, \dots, C \\ Y_i = y_i = (q-1)s + s_0 + 0.5\max(\omega_1) \end{cases} \quad (9)$$

要求一台设备只能出现一次(设备 i 在 q 行上时 $z_{i,q} = 1$, 其他情况下 $z_{i,q} = 0$), 即

$$\sum_{q=1}^C z_{i,q} = 1, \quad i = 1, 2, \dots, C \quad (10)$$

同时, 每台设备的坐标及设备的前置缓冲区的坐标均为非负值.

$$x_i \geq 0, y_i \geq 0, X_i \geq 0, Y_i \geq 0, i = 1, 2, \dots, K \quad (11)$$

2.2.5 惩罚函数

生产线设备布局时一般会产生 2 种非法解: 超出生产线边界和设备重叠. 本布局方法只会产生最后 1 行设备在 y 方向上超过生产线的最大纵向宽度 W 的情况. P 表示 y 方向超出生产线纵向最大宽度 W 时的惩罚项, 如式(12)所示, 式中 $\delta = (C-1)s + s_0 + 0.5\max(\omega_1) - (s_0 - 0.5\max(\omega_2))$. 对于每条染色体, 在利用 NSGA-II 进行非支配排序时, 目标 1 除以 P , 目标 2 和目标 3 的值分别乘以 P , 从而达到淘汰不合格染色体的目的.

$$P = \begin{cases} T, & \delta > W \\ 1, & \delta \leq W \end{cases} \quad (12)$$

式中: T 为一个按实际情况所取的大于 1 的数.

3 实例仿真分析

某企业拟新建柴油发动机缸体加工生产线, 该生产线长为 38 m, 宽为 30 m, 根据生产纲领及工艺要求, 该生产线预计将投入组合自动线、加工中心等共计 12 台设备, 各设备尺寸、类型及其加工内容如

表 2 所示.

表 2 设备尺寸及类型

Tab.2 Size and type of facilities

设备编号	长/m	宽/m	加工时间服从参数	机床类型	加工内容
1	5.8	4.0	10	单面卧式机床	粗铣、钻、铰底面等
2	5.8	4.0	10	双面卧式机床	粗铣前后端面,粗扩凸轮轴孔
3	5.8	4.0	5	单面卧式加工中心	加工顶面、底面及侧面
4	5.8	4.0	5	单面卧式加工中心	加工顶面、底面及侧面
5	5.8	4.0	10	单面立式机床	粗铣顶面,粗镗缸孔
6	5.8	4.0	5	单面卧式加工中心	加工前后端面、侧面
7	5.8	4.0	5	单面卧式加工中心	加工前后端面、侧面
8	3.5	2.5	10	双面卧式机床	粗铣左右侧面
9	3.0	2.5	10	双面卧式自动线	钻攻前后面孔系
10	3.0	2.0	10	自动线	加工顶面、底面及结合面
11	6.0	4.5	10	单面卧式自动线	加工底面及挺柱孔
12	6.0	5.0	10	单面卧式机床	半精加工主轴孔、凸轮轴孔

设备 i 旁并排放置 C_i 个货架,货架用于存放待加工缸体(即缓存配置区),其中单个货架的长度 $L_0=0.4\text{ m}$,宽度 $D_0=2.8\text{ m}$,容量 $n_0=1$. 则缓存配置区宽度即货架长度 L_0 、货架数目 C_i 及缓存配置区长度 L_i 如式(13)至(14)所示.

$$C_i = N_i/n_0 \tag{13}$$

$$L_i = C_i \cdot D_0 \tag{14}$$

设备与生产线上下边界的距离为 1.5 m ,设备纵向行间距为 6 m ,生产线设备拓扑如图 3 所示. 外部工件到达率为 $9\text{ 个} \cdot \text{h}^{-1}$,即工件的到达服从参数 λ 为 9 的泊松分布,各工位名义加工时间服从参数为 $\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_K$ 的负指数分布,如表 2 所示.

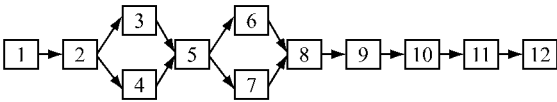


图 3 加工设备拓扑

Fig.3 Topological graph of facilities

物料在设备 i 和设备 j 之间搬运次数 $\Delta_{i,j}$ 如表 3,设备 i 及其缓冲区和设备 j 及其缓冲区间的最小距离 $h_{i,j}=1.5\text{ m}$,设备 i 及其缓冲区与生产线边界间的横向最小距离 $h_{0,i}=2$. 染色体中缓冲区容量的最小值 $N_{\min}=0$,最大值 $N_{\max}=6$. 在优化时种群数量 U 取 100,最大遗传代数 G 取 100,交叉率 p_c 取 0.7,变异率 p_m 取 0.2,惩罚函数 P 中 T 的值取 2.

表 3 物料在各设备间的搬运次数矩阵

Tab.3 Material handling times between facilities

设备编号	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
1	0	1.0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2		0	0.5	0.5	0	0	0	0	0	0	0	0
3			0	0	0.5	0	0	0	0		0	0
4				0	0.5	0	0	0	0	0	0	0
5					0	0.5	0.5	0	0	0	0	0
6						0	0	0.5	0	0	0	0
7							0	0.5	0	0	0	0
8								0	1.0	0	0	0
9									0	1.0	0	0
10										0	1.0	0
11											0	1.0
12												0

为验证本文协同优化模型和算法改进的有效性,此处采用传统 NSGA- II 算法分别对文献[15]模型和协同优化模型进行求解,再采用针对协同优化模型改进的 NSGA- II 算法对协同优化模型进行求解.

选用计算机的硬件参数为 Intel i7 处理器、4GB 内存,通过 MATLAB 7.0 软件实现算法运算,采用传统 NSGA- II 算法分别求解文献[15]模型和协同优化模型 20 次,再采用本文改进算法求解协同优化模型 20 次,结果如表 4 所示. 表 4 中 $F_{r\text{mean}}$ 和 $F_{r\text{best}}$ ($r=1,2,3$)分别表示 3 个目标函数在 20 次求解中的平均值和最值. 图 4 为求解仿真实例所得 3 个目标函数平均值和最值得分布情况.

表 4 模型与算法比较

Tab.4 Comparison between models and algorithms

模型	NSGA- II	$F_{1\text{mean}}/\%$	$F_{1\text{best}}/\%$	$F_{2\text{mean}}/\%$	$F_{2\text{best}}/\%$	$F_{3\text{mean}}/\%$	$F_{3\text{best}}/\%$
文献[15]	传统	79.61	79.61	105.76	77.65	807.4	760
本文	传统	79.84	81.92	102.29	76.35	801.3	760
本文	本文	80.16	81.92	92.63	74.15	776.2	760

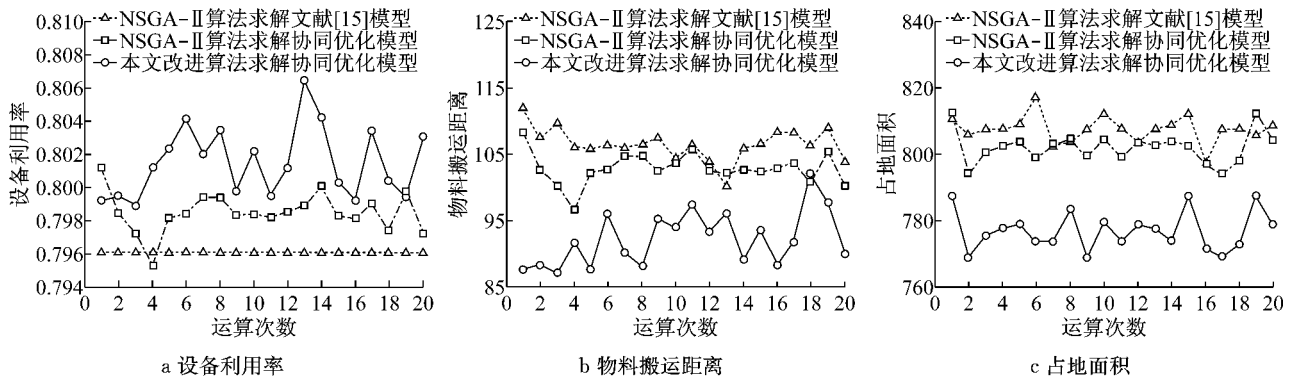


图 4 3 个优化目标平均值在不同模型及算法下的分布

Fig.4 Average values of 3 objectives in different models and algorithms

(1) 观察表 4 中传统 NSGA-II 求解部分及图 4 中 3 个优化目标平均值分布可得: 采用传统 NSGA-II 分别对两模型进行求解, 协同优化模型 3 个优化目标的平均值均略优于文献[15]模型, 且单纯观察 F_1 和 F_2 两目标的最优值较文献[15]模型也有一定的提升, 证明协同优化模型的有效性。

(2) 观察表 4 中本文协同优化模型求解部分及图 4 中 3 个优化目标平均值分布可得: 本文算法所得 3 个优化目标的平均值均优于传统 NSGA-II 算

法, 其单纯观察目标 F_2 的最优值也好于传统 NSGA-II 算法, 证明本文算法较传统 NSGA-II 算法具有更好的寻优能力。图 5 给出了本文算法及传统 NSGA-II 算法对协同优化模型求解时的收敛图。随着遗传代数的增加, 本文算法中 F_1 的平均值和最大值总体上逐渐上升, F_2 和 F_3 的平均值和最小值总体上逐渐下降。采用本文算法求解时, 3 个目标在分别进化 50 代、80 代和 85 代后趋于平稳, 说明本文算法可以使 3 个目标同时得到优化。

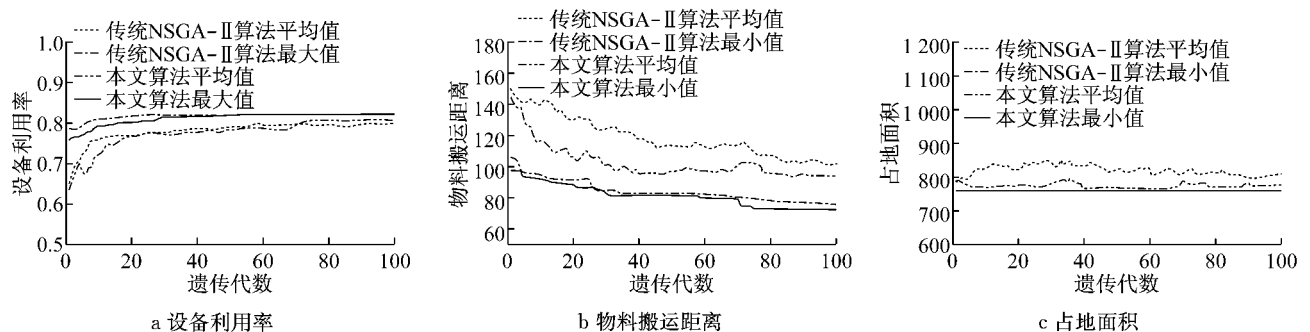


图 5 优化过程

Fig.5 Optimization procedure

图 6 为采用改进算法对协同优化模型进行求解时的 Pareto 解集。如表 5 所示, 实例的 3 个优化目标的最优解分别为 $F_{1best} = 81.92\%$ (方案 b), $F_{2best} = 74.15$ (方案 a), $F_{3best} = 760$ (方案 c), 没有一个方案可以使 3 个目标同时达到最优。方案 a 设备利用率最优, 但物料搬运距离过大。方案 b 设备利用率较高, 物料搬运距离最优, 但占地面积过大。方案 c 占地面积最优, 但缩小了缓冲区容量且没有尽量保证整个生产线的平衡, 设备利用率很低。方案 d 和方案 e 是整体上 3 个目标值都较优的方案, 方案 e 在占地面积上略好于方案 d, 而方案 d 在设备利用率和物料搬运距离上都明显好于方案 e, 所以为生产线选用了布局方案 d, 如表 6 及图 7 所示。图 7 中刻度值表示

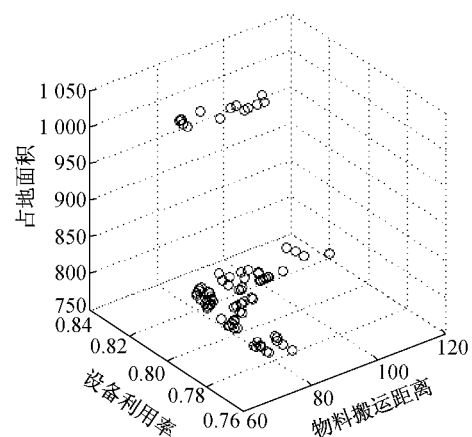


图 6 协同优化模型的 Pareto 解集

Fig.6 Pareto optimal set of collaborative optimization model

表 5 协同优化备选方案
Tab.5 Optional solutions

方案	染色体	$F_1/\%$	F_2	F_3
a	[{1,12,11,10,2,6,8,9,4,5,7,3}{6,6,6,6,4,6,6,6,6,4,3}]	81.63	74.15	1 020
b	[{1,3,11,10,2,7,8,9,6,5,12,4}{6,6,6,6,6,6,6,6,6,6,6}]	81.92	106.60	790
c	[{1,3,9,10,2,6,12,11,4,5,8,7}{6,6,6,6,5,5,2,4,6,4,2,2}]	78.23	84.45	760
d	[{1,12,11,10,2,3,6,9,4,5,7,8}{6,6,6,6,4,5,5,5,4,4,5,6}]	80.92	75.30	780
e	[{1,6,11,10,2,3,12,9,4,5,7,8}{6,6,6,6,4,6,3,4,3,4,5,4}]	80.25	77.20	770

表 6 企业选用方案设备坐标
Tab.6 Coordinates of facilities

编号	坐标	编号	坐标
1	(7.30,4)	7	(25.50,16)
2	(7.30,10)	8	(33.85,16)
3	(17.00,10)	9	(33.80,10)
4	(7.30,16)	10	(34.20,4)
5	(16.20,16)	11	(26.60,4)
6	(26.30,10)	12	(17.10,4)

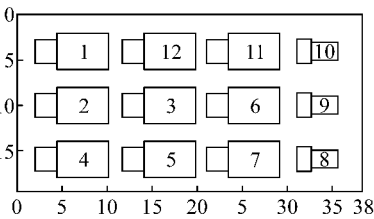


图 7 企业拟选方案
Fig.7 Adopted solution

生产线的长度

采用 Plant Simulation 软件对企业拟选方案的设备利用等关键参数展开了仿真验证,仿真模型如图 8 所示.设备利用率仿真结果如图 9 所示,其整线设备的平均利用率为 81.19%,与前文协同优化模型

求解结果(80.92%)基本一致,误差约为 0.3%.采用分析物流常用的 Sankey 图,对物流路径的物流负荷进行分析,线段的粗细代表物流负荷的大小,如图 10,物流负荷比较均匀,证明了方案布局的合理性.

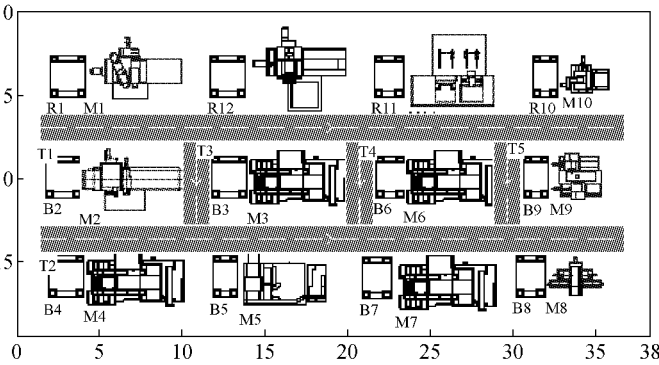
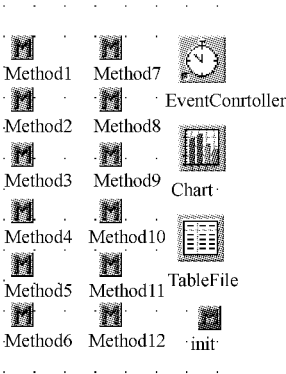


图 8 拟选方案的仿真
Fig.8 Simulation of adopted solution

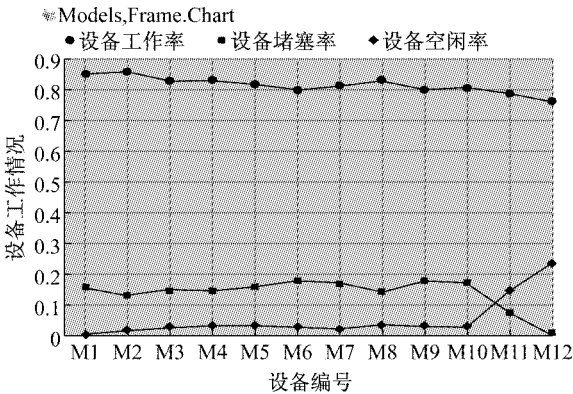


图 9 拟选方案仿真结果界面

Fig.9 Simulation results interface of adopted solution

4 结语

对缓冲区的实际占地面积加以考虑,使设备布局更接近生产线实际情况.引入同样能够较好反映生产线效率的设备利用率,结合物料搬运距离、占地面积作为优化目标,建立协同优化模型.设计基于 NSGA-II 的协同优化算法对模型进行求解,得到协同优化方案.该方法在设计阶段可为决策者提供同时考虑缓存配置和设备布局的规划方案,能够精简生产线空间,提升生产效率,具备较大优势.

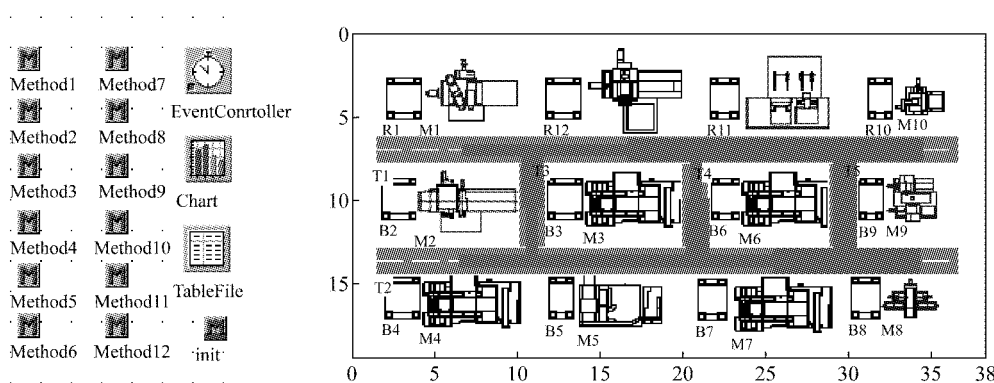


图 10 物流强度 Sankey 图

Fig.10 Sankey diagram of material handling

参考文献:

- [1] 锁小红. 基于制造系统功能的设施布局设计研究[D]. 济南: 山东大学, 2008.
SUO Xiaohong. Investigation on facility layout design based on manufacturing system functionality [D]. Jinan: Shandong University, 2008.
- [2] Muther R A. Systematic layout planning[M]. 2nd ed. Boston: Management and Industrial Research Publications, 1973.
- [3] Wang Ming-Jaan, Hu Michael H, Ku Meei-Yuh. A solution to the unequal area facilities layout problem by genetic algorithm [J]. Computers in Industry, 2005, 56(2): 207.
- [4] Garcia-Hernandez L, Pierreval H, Salas-Morera L, et al. Handling qualitative aspects in unequal area facility layout problem: An interactive genetic algorithm [J]. Applied Soft Computing Journal, 2013, 13: 1718.
- [5] Yang Taho, Peters Brett A, Tu Mingan. Layout design for flexible manufacturing systems considering single-loop directional flow patterns [J]. European Journal of Operational Research, 2005, 164: 440.
- [6] Kazi Shah Nawaz Ripon, Kyrre Glette, Kashif Nizam Khan, et al. Adaptive variable neighborhood search for solving multi-objective facility layout problems with unequal area facilities [J]. Swarm and Evolutionary Computation, 2013, 8: 1.
- [7] 曾强, 沈玲, 潘启东, 等. 基于 NSGA-II 的多目标车间设施布局优化方法 [J]. 计算机工程与应用, 2012, 48(27): 223.
ZENG Qiang, SHEN Ling, PAN Qidong, et al. Multi-objective optimization method for workshop facility layout based on NSGA-II [J]. Computer Engineering and Applications, 2012, 48(27): 223.
- [8] Giuseppe Aiello, Giada La Scalia, Mario Enea. A multi objective genetic algorithm for the facility layout problem based upon slicing structure encoding [J]. Expert Systems with Applications, 2012, 39: 10352.
- [9] 郑永前, 丁奎学, 王阳. 基于协同粒子群算法的单元集成布局方法 [J]. 计算机集成制造系统, 2012, 18(5): 950.
ZHENG Yongqian, DING Kuixue, WANG Yang. Integrated cellular layout design based on cooperative particle swarm optimization [J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2012, 18(5): 950.
- [10] Malathronas J P, Perkins J D, Smith R L. The availability of a system of two unreliable machines connected by an intermediate storage tank [J]. AIIE Transactions, 1982, 15 (3): 195.
- [11] Yeralan S, Feanck W E, Quasem M A. A continuous materials flow production line with station breakdown [J]. European Journal of Operational Research, 1986, 27(3): 289.
- [12] 宋士刚, 李爱平, 徐立云. 可重组制造系统缓冲区容量的优化研究 [J]. 计算机集成制造系统, 2008, 14(10): 1951.
SONG Shigang, LI Aiping, XU Liyun. Buffer capacity optimization in reconfigurable manufacturing system [J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2008, 14(10): 1951.
- [13] 李翔, 陈庆新, 毛宁. 基于排队网模型的流水车间缓冲区容量优化 [J]. 计算机集成制造系统, 2014, 20(4): 890.
LI Xiang, CHEN Qingxin, MAO Ning. Buffer allocation on optimization of flow shop based on queuing network model [J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2014, 20(4): 890.
- [14] Yamamoto H, Qudeiri J, Jamali M. Concurrent production engineering system for buffer size and flexible transfer line layout design [J]. Journal of Systems Science and Systems Engineering, 2008, 17: 187.
- [15] Irohara T, Yamashita H, Ishizuka Y. Facility layout problem with buffer space allocation for throughput and material handling cost [J]. Journal of Japan Industrial Management Association, 2007, 53(2): 363.
- [16] 陈行丰, 鲁建厦, 李英德. 离散型制造企业车间布局缓冲区面积设置仿真决策研究 [J]. 浙江工业大学学报, 2010, 38 (3): 246.
CHEN Xingfeng, LU Jiansha, LI Yingde. Simulation decision-making study of buffer area allocation in workshop layout of a discrete manufacturing enterprise [J]. Journal of Zhejiang University of Technology, 2010, 38(3): 246.
- [17] 黄君政, 李爱平, 刘雪梅, 等. 考虑缓冲区配置的生产线布局优化设计 [J]. 同济大学学报: 自然科学版, 2015, 43(7): 1075.
HUANG Junzheng, LI Aiping, LIU Xuemei, et al. Optimal design of production line layout considering buffer allocation [J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 2015, 43 (7): 1075.
- [18] Deb K. A fast and elitist multi-objective genetic algorithm: NSGA-II [J]. IEEE Transaction on Evolutionary Computation, 2002, 6(2): 180.