

基于 SLP 改进遗传算法的多区域 单双行设备布局优化方法

邢彩虹^{1,3}, 刘刚², 胡晓兵^{1,3}, 江代渝^{1,3}, 郭爽^{1,3}

(1. 四川大学机械工程学院, 成都 610065; 2. 工业云制造(四川)创新中心有限公司, 成都 610096;
3. 四川大学宜宾产业技术研究院, 宜宾 644000)

摘要: 针对多区域单、双行车间设备布局问题, 利用车间二维平面坐标系将车间和设备参数化, 构建出多区域单、双行设备布局的数学模型, 并提出一种系统化布置设计法(SLP)与改进遗传算法结合的 SLP 改进遗传算法. 算法以最小化车间物流成本为目标, 考虑加工过程中产品质量的变化, 采用分阶段的算法思想, 引入自适应的交叉算子, 使用混合种群的初始化方式. 实验结果显示, 该算法在解决多区域单、双行车间设备布局问题时能够以较快的速度收敛到较优解.

关键词: 设备布局; 系统化布置设计法; 遗传算法; 车间物流

中图分类号: TP18 **文献标识码:** A **DOI:** 10.19907/j.0490-6756.2022.052004

Multi-region single and double rows equipment layout optimization based on SLP improved genetic algorithm

XING Cai-Hong^{1,3}, LIU Gang², HU Xiao-Bing^{1,3}, JIANG Dai-Yu^{1,3}, GUO Shuang^{1,3}

(1. School of Mechanical Engineering, Sichuan University, Chengdu 610065, China;
2. The Innovation Center of Sichuan Industrial Cloud Manufacturing Co., Ltd., Chengdu 610096, China;
3. Yibin Institute of Industrial Technology, Sichuan University, Yibin 644000, China)

Abstract: Aiming at the problem of equipment layout in multi-region single-row and double-row workshops, the workshop and equipment are parameterized by using the workshop's two-dimensional plane coordinate system to construct a mathematical model of multi-region single and double-row equipment layout, and a combination of SLP and improved genetic algorithm is proposed. The SLP improved genetic algorithm. The algorithm aims at minimizing the logistics distance of the workshop, adopts a staged algorithm idea, introduces an adaptive crossover operator, and uses a mixed population initialization method. Experimental results show that the algorithm can converge to a better solution at a faster speed when solving the equipment layout problem of multi-region single and double-line workshops.

Keywords: Facility layout; System Layout Planning; Genetic algorithm; Workshop logistics

1 引言

在土地红利逐渐减少的今天, 人们越来越意识

到车间合理布局的重要性. 合理的车间布局不仅能提高空间的利用率, 还能减少企业的物流成本, 对提高企业的生产效率至关重要. Tompkins 等^[1]提

收稿日期: 2021-12-03

基金项目: 川大-泸州战略合作项目(2020CDLZ-1); 中国制造 2025 四川省行动计划(2020QT-2020-jww-11-26)

作者简介: 邢彩虹(1997-), 男, 内蒙古乌海人, 硕士研究生, 研究方向为智能制造、嵌入式软件开发. E-mail: 14905267338@qq.com

通讯作者: 胡晓兵. E-mail: huxb@scu.edu.cn

出,优秀的车间设备布局能够减少 10%~30% 因车间布局不合理带来的损失. 设备布局问题(Facility Layout Problem, FLP)主要研究在一定的工厂空间、设备参数的约束下,建立模型求解出满足生产需求的设备布局^[2]. FLP 已被证明是 NP-hard 问题,当车间的设备数量过多,优化目标复杂时,简单的启发算法已经不能解决 FLP 问题. 因此,近年来众多学者采用超启发算法、智能优化算法来解决 FLP 问题,并取得了许多显著的成果.

遗传算法在车间生产排产等优化问题上有较为广泛的应用^[3]. 隋振等^[4]讨论了遗传算法在布局设计中的应用研究,并提出一种改进遗传算法来解决布局仓储问题. 王亚良等^[5]学者构建了车间多目标模型,并提出动态差分元胞多目标遗传算法来求解. Yang 等^[6]针对车间布局的动态设施提出了一套评估模型,使得车间布局的效益更为可观. 张屹等^[7]提出一种差分元胞多目标遗传算法,在解决多目标车间布局优化问题上取得了较好成果. Pourvaziri 等^[8]提出了一种新颖的混合多群体 GA 来解决动态设施布局问题,该算法产生了良好的优化效果.

SLP 方法通过图表、图形的定量分析可以在一定时间内解决一定规模的车间布局问题,但是应用在大规模的 FLP 问题上,SLP 方法不能保证优化的效率以及设备布局的准确位置. 近年来,SLP 方法在车间布局的应用^[9,10]也热度不减. 目前,学者们研究的车间设备布局主要针对单行设备布局和多行设备布局. 本文提出并建立了单、双行多区域车间布局优化模型,考虑了加工过程中产品质量改变对车间物流成本的影响,针对模型构建了与 SLP 方法结合的改进多阶段自适应遗传算法.

2 多区域车间模型建立

2.1 车间布局的描述

- (1) 假设车间总长为 L , 车间总宽为 W , 通道宽度为 TD .
- (2) 假设车间的加工区域为 a 个, 每个独立的加工区域可以表示为 $A[L_{AC}, W_{AC}, (X_{AC}, Y_{AC})]$ 且 $c=1, 2, 3, \dots, a-1, a$; L_{AC} 表示加工区域的长度; W_{AC} 表示加工区域的宽度; (X_{AC}, Y_{AC}) 表示加工区域左下角的坐标. 将整个车间的左下角当做 X - Y 坐标系的原点, 绘出的车间二维布局图如图 1 所示.

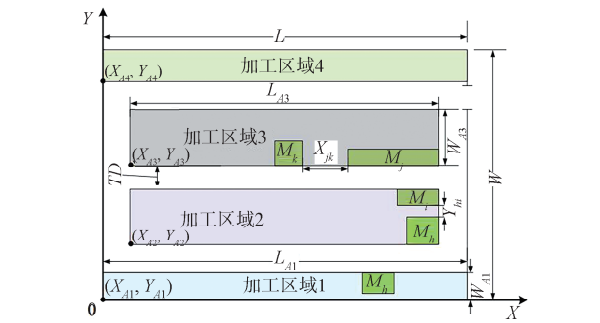


图 1 车间二维布局图
Fig. 1 Two-dimensional layout of workshop

2.2 车间设备的描述

- (1) 车间设备的种类为 t 种.
- (2) 各类设备的数量分别为 n_T 且 $T=1, 2, 3, \dots, t-1, t$.
- (3) 车间设备总数为 e 且 $e = \sum_{i=1}^t n_T$.
- (4) 每台设备可以独立表示为 $M(TN)$ 且 $N=1, 2, 3, \dots, n_T-1, n_T$.
- (5) 设备尺寸如图 2 所示, 长 l_T , 宽 w_T 且 $T=1, 2, 3, \dots, t-1, t$.

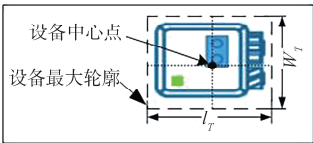


图 2 设备最大轮廓图
Fig. 2 Maximum outline of equipment

- (6) 约定设备的摆放方向有两种, 一种为横向摆放, 设备的长边与 X 轴线平行; 另一种为竖向摆放, 设备的短边与 X 轴线平行. 摆放方向由参数 B 表示, $B=0$ (横向摆放), $B=1$ (竖向摆放).
- (7) 对于车间中的任意两台设备 j, k 可以分别表示为 $M(T_j N_j)$ 、 $M(T_k N_k)$, 进一步可以简化为 M_j, M_k 且 $j, k=1, 2, 3, \dots, e-1, e; j \neq k$.
- (8) 车间中任意两台设备 j, k 之间的物流距离可以表示为 $D(M_j, M_k)$. 由图 3 所示, 设备 j, k 的位置可以由在 X - Y 坐标系中的设备中心点坐标 (X_j, Y_j) 、 (X_k, Y_k) 所表示. 计算设备间的物流距离需要确定每个设备的取(卸)货点, 对于设备 j, k 设定他们的卸货点坐标分别为 (X_j, Y_{Bj}) 、 (X_k, Y_{Bk}) , Y_{Bj} 和 Y_{Bk} 分别为离设备 j, k 最近的通道中心线的纵坐标.
- (9) 图 3 中实心圆点表示设备的几何中心, 如 (X_K, Y_K) 表示设备 K 的几何中心坐标; 空心圆圈代表设备的取(卸)货点坐标; 空心方块代表路径的拐点.

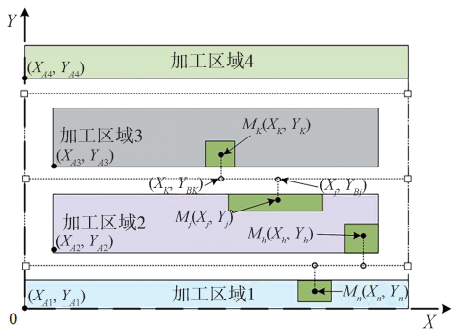


图 3 车间设备布局图
Fig. 3 Workshop equipment layout

2.3 最短物流路径的求取

在现实生产中,为了满足产量和生产效率,一个车间应该有多台相同的设备. 所以,工序间设备的选择就有多种,我们需要计算出相邻工序间任意两设备的距离. 我们可以采用 Floyd 算法求取任意两设备之间的最短距离. 根据图 3 中各设备的装(卸)货点和路径拐点以及连接各路径的边构成了按 Floyd 算法求两点间最短路径的带权无向图 $G(V, E)$; V -所有点组成的集合; E 为所有边构成的集合. 根据图 3 可知点集 V 由 6 个路径拐点和 e (设备总数)个取(卸)货点构成. 边集 E 则由这 $e+6$ 个点之间的连线构成.

Floyd 算法的基本思路: 首先根据带权无向图求出带权邻接矩阵. 接下来直接在图的带权矩阵中用插入顶点的方法依次构造出 n 个矩阵 $D^{(1)}, D^{(2)}, \dots, D^{(n)}$. 最后得到的矩阵 $D^{(n)}$ 即为图的距离矩阵.

2.4 模型相关约束

(1) 约束 1: 各设备互相不能干涉. 如车间二维布局图图 3 所示, 约定参数 X_{jk} 表示设备 j, k 在 X 轴方向上必须保持的最小距离, Y_{jk} 表示设备 j, k 在 Y 轴方向上必须保持的最小距离. 设备 j, k 分别可以表示为 $(M_j, B_j), (M_k, B_k)$, B_j, B_k 分别表示设备的摆放方向. 任意两设备应满足以下约束: 满足式(1)其中一项并且满足式(2).

$$\begin{cases} |X_j - X_k| \geq X_{jk} + (L_{xj} + L_{xk})/2 \\ \text{or} \\ |Y_j - Y_k| \geq Y_{jk} + (L_{yj} + L_{yk})/2 \end{cases} \quad (1)$$

$$\begin{cases} L_{xj} = B_j * W_{Tj} + (1 - B_j) * L_{Tj} \\ L_{yj} = B_j * L_{Tj} + (1 - B_j) * W_{Tj} \end{cases} \quad (2)$$

(2) 约束 2: 设备最大轮廓的某一边与某一加工区域的边界重合, 从而最大化利用车间的面积. 如车间二维布局图所示, 设备 M_j 的一条长边与加

工区域 2 的一边界重合. 如前所述每个独立的加工区域的位置可以表示为 $A[L_{AC}, W_{AC}, (X_{AC}, Y_{AC})]$ 且 $c=1, 2, 3, \dots, a-1, a$; L_{AC} 表示加工区域的长度; W_{AC} 表示加工区域的宽度; (X_{AC}, Y_{AC}) 表示加工区域左下角的坐标.

至此设备之间应满足以下约束:

$$\begin{cases} c=1 \\ (X_{A1}, Y_{A1}) < (X_j, Y_j) < (X_{A1} + L_{A1}, Y_{A1} + W_{A1}) \\ Y_j + l_{Yj}/2 = W_{A1} + Y_{A1} \end{cases} \quad (3)$$

$$\begin{cases} c=2, 3, \dots, a-1 \\ (X_{Ac}, Y_{Ac}) < (X_j, Y_j) < (X_{Ac} + L_{Ac}, Y_{Ac} + W_{Ac}) \\ Y_j - l_{Yj}/2 = Y_{Ac} \\ Y_j + l_{Yj}/2 = Y_{Ac} + W_{Ac} \end{cases} \quad (4)$$

$$\begin{cases} c=a \\ (A_{Aa}, Y_{Aa}) < (X_j, Y_j) < (X_{Aa} + L_{Aa}, Y_{Aa} + W_{Aa}) \\ Y_j - l_{Yj}/2 = Y_{Aa} \end{cases} \quad (5)$$

(3) 约束 3: 设备最大轮廓尺寸不超出加工区域的边界. 由于约束 2 已经约束了设备 Y 轴向上的位置, 现只需要对设备进行 X 轴方向的位置约束.

应满足如下约束:

$$\begin{cases} X_{Ac} \leq X_j - l_{Xj}/2 \\ X_j + l_{Xj}/2 \leq X_{Ac} + L_{Ac} \end{cases} \quad (6)$$

2.5 优化目标

加工工艺过程是设备布局的基础和重要前提, 加工过程中两道工序之间的单位物流成本可以表示为 C_{ij} ; 两道工序之间的物流距离表示为 D_{ij} . 不同类型产品的加工批量将影响设备的使用量, 产品在设备之间的流转对物流的成本有直接的影响. 假设车间内生产的产品种类为 p , 每类产品对应的加工批量为 N_p , 各类产品的单件质量为 $W_{p,ij}$, 在实际的生产中, 产品的质量往往会随着加工过程而改变, 质量的改变也将影响车间物流的成本. 将车间生产过程的总物流成本作为优化目标. 因此优化的目标函数可以表示为:

$$\sum_{k=1}^p \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n N_k * C_{ij} * D_{ij} * W_{ij} \quad (7)$$

3 设备布局优化算法设计

遗传算法这一智能优化算法由于其较好的全局搜索性能、对可行解表示的广泛性, 使得遗传算

法具有广泛的应用领域^[11]. 遗传算法在求解布局问题方面已取得许多成就^[12-15]. LENIN 等^[16]采用遗传算法减少了多产品生产线的物流距离和生产成本. 张青雷等^[17]采用改进的遗传算法解决了大型关键件车间布局优化的问题. 本文采用 SLP 方法结合改进的遗传算法解决单、双行混合布局车间的布局优化问题, 经过优化的布局将显著的降低车间内的物流距离.

3.1 SLP 概述

SLP 将以往凭经验的定性分析通过图表和图形的手段转化为定量分析. SLP 包含的 5 个基本要素分别为 P、Q、R、S、T, 分别表示产品、产量、工艺流程、辅助服务部门以及时间安排. SLP 方法的实施步骤如图 4 所示.

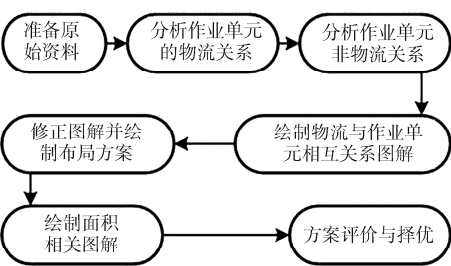


图 4 SLP 方法流程图
Fig. 4 SLP flow chart

3.2 改进遗传算法的设计

遗传算法作为一种借鉴生物界遗传机制的随机搜索算法, 它主要由编码、解码方式, 选择算子、交叉算子、变异算子以及适应度函数构成.

3.2.1 编、解码方式 经过分析可知, 车间布局方案的解应该包含每台设备的信息以及设备的位置信息. 所以可以将每台设备的长宽、方向、位置等信息存储在一个数组中, N 个数组的有序排列就构成了一个车间布局优化问题的可能解. 经过后继的尺寸约束和物流路径计算就构成了一个初始种群.

3.2.2 种群初始化方案 针对单、双行混合布局的车间布局优化问题, 采用图 5 所示的初始种群生成方案. 如图 5 所示, 布局方案有 3 种生成方式, 分别是随机生成方式、按面积利用率生成方式和按 SLP 方法生成. 除了设备的长宽尺寸, 设备布置的方向也对车间的面积利用率和物流距离有较大影响. 如图 6 所示, 某设备的长宽尺寸为 5×3 , 该车间区域的宽度为 6, 设备有如下两种布局方式, 分别称为长边布局 and 短边布局. 不难算出两种方案的空间利用率分别为 83.3% 和 50%. 随机生成的布局方案就是不考虑设备布局方向对物流距离和车

间面积利用率的影响, 长边布局、短边布局选中的概率相同. 按面积利用率生成的布局方案, 考虑布局方向对物流距离和车间面积利用率的影响, 就图 6 而言, 短边布局方案选中的概率明显大于长边布局的方案. 方式 3 运用 SLP 生成一定数量的较优解. 本方案运用以上 3 种布局生成方式生成一定比例的初始解, 在随机方案保证解的多样性的基础上, 运用方式 2 和方式 3 生成一些较优质量的解, 保证遗传算法收敛的速度.

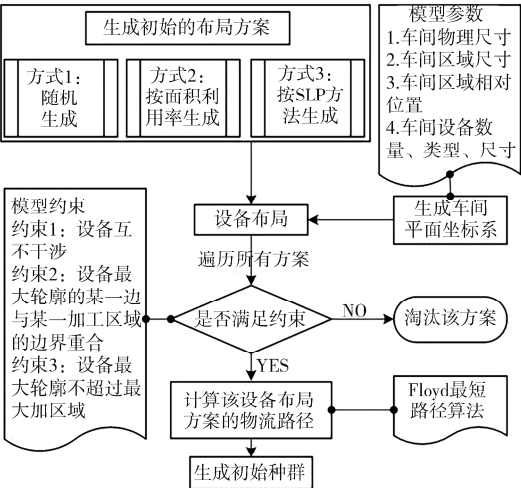


图 5 种群初始化流程图
Fig. 5 Population initialization flow chart

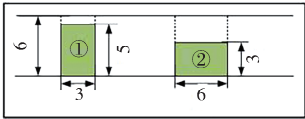


图 6 设备布局方案对比图
Fig. 6 Equipment layout plan comparison chart

3.2.3 选择算子的设计 在本改进遗传算法中有两种选择算子, 分别是简单选择算子和改进选择算子. 如图 7 所示, 在算法进化的前期采用简单选择算子, 后期采用改进选择算子. 简单选择算子将染色体的物流距离的倒数作为适应度, 使用轮盘赌方法来选择进行进化的个体. 改进的选择算子为了使群体更快收敛, 选择前将上次迭代的最优解保留, 其他可能解则通过轮盘赌方法选择.

3.2.4 交叉算子的设计 本文算法采用了两种交叉算子(如图 7 所示). 简单交叉算子以交叉概率 P_c ($0.25 \leq P_c \leq 0.75$) 对每个染色体产生一个随机数进行判定, 随机数小于 P_c 则进行子巡回交叉 (Subtour Exchange Crossover), 将交叉后生成的两个子代进行重新布局, 计算适应度, 最后保留父、子代中适应度较大的两个染色体. 简单交叉算子,

保证了迭代前期种群的多样性,避免算法进入局部收敛.迭代后期采用的交叉算子采用自适应的交叉概率,适应度越高交叉概率越低,适应度低的个体交叉概率高.这样既保证了种群的进化速度,也维持了种群的多样性.

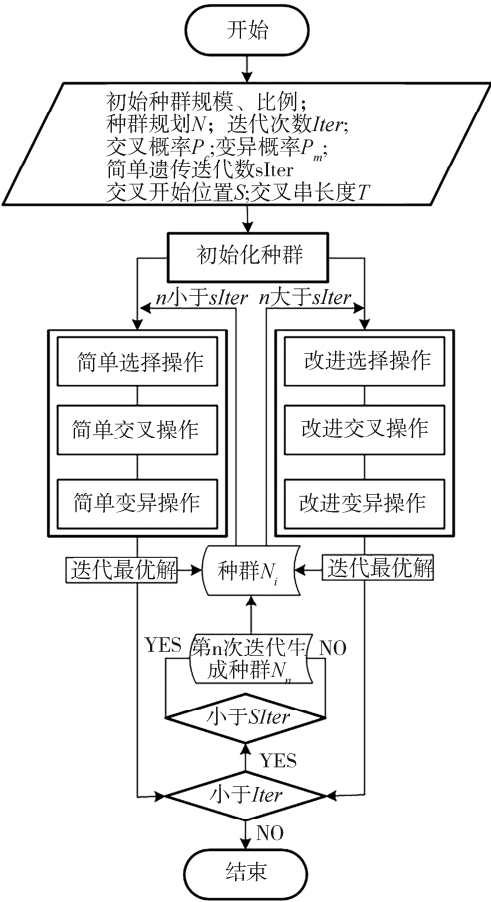


图 7 改进遗传算法流程图
Fig. 7 Improved genetic algorithm flowchart

3.2.5 变异算子的设计 迭代前期采用简单变异算子,算法为每个个体赋予一个随机数值,当随机数值小于 P_m (0.01, 0.2) 时,再生成两个染色体长度内的随机数,交换两个随机数位置的设备,重新布局后,计算变异前后染色体的适应度大小,保留适应度更大的个体.改进的变异算子则将适应度较高的几个染色体保护起来,不参加变异操作,一定程度上可以保证算法的收敛速度,保护优良基因不被破坏.

3.2.6 迭代最优解种群 算法每次迭代后都将生成一个当代最优解,将每代的最优解生成一个种群 N_i . 在下一次迭代开始前,将 N_i 中的染色体放入进行选择操作的种群,从而保证优良的个体不被淘汰,促进算法的收敛性能,提高收敛速度.

4 设备布局优化实例

4.1 车间情况概述

根据实地调研得到某制革企业鞣制车间的布局图如图 8 所示. 整个车间分为 3 个加工区域. 加工区域 1 和区域 3, 一长边靠墙另一长边靠近通道, 采用单行设备布局; 加工区域 2 两条长边靠近通道, 采用双行设备布局. 鞣制车间的主要工序有预浸水、主浸水、鞣制、去肉、片皮以及检测工序. 各个工序之间的流转采用自动导引运输车 (Automatic Guided Vehicle, AGV) 实现, AGV 有固定的停靠位置, 如图 8 所示. 车间的主要设备有预浸水转鼓、主浸水转鼓、鞣制转鼓、去肉机、片皮机、检测装置以及 AGV.

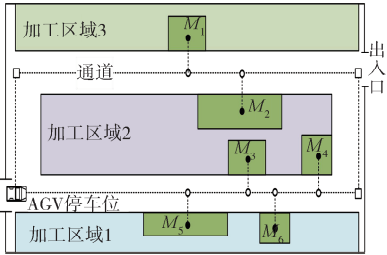


图 8 鞣制车间布局图
Fig. 8 Layout of tanning workshop

4.2 建模以及模型参数概述

根据上述模型建立方法,我们在鞣制车间的布局图中引入 X-Y 坐标系,构建车间的平面坐标系图. 根据车间实际情况建立以下的设备表(表 1)、工序-物流表(表 2)和车间尺寸表(表 3). 由设备表可知设备的总量 e 取值 47, 设备的种类 t 取值 6.

表 1 设备表
Tab. 1 Equipment table

设备名称	设备数量/台	设备长度(l_T)/m	设备宽度(w_T)/m
预浸水转鼓	4	4	3
主浸水转鼓	18	4	3
鞣制转鼓	12	4	3
去肉机	6	5	2
片皮机	6	3	3
检测装置	1	5	4

根据鞣制车间的工序流程,AGV 的物流路径可分为以下 5 段. AGV 的停靠位置用 P 来表示, 预浸水转鼓的取(卸)货点用 YJS 表示, 主浸水转鼓的取(卸)货点用 ZJS 表示. 以此类推, 鞣制转鼓、去肉机、片皮机、检测装置的取(卸)货点分别用 RZ 、 QR 、 PP 、 JC 表示. 具体的 5 段物流路径如表 2

所示,每个字母代表一个定位点,通过→指向下一个目标点.

表 2 工序-物流表
Tab. 2 Process-logistics table

序号	工序流程	物流路径
1	$P \rightarrow YJS \rightarrow P$	$(P, YJS), (YJS, P)$
2	$P \rightarrow YJS \rightarrow QR \rightarrow P$	$(P, YJS), (YJS, QR), (QR, P)$
3	$P \rightarrow QR \rightarrow JC \rightarrow ZJS \rightarrow P$	$(P, QR), (QR, JC), (JC, ZJS), (ZJS, P)$
4	$P \rightarrow ZJS \rightarrow QR \rightarrow P$	$(P, ZJS), (ZJS, QR), (QR, P)$
5	$P \rightarrow PP \rightarrow JC \rightarrow RZ \rightarrow P$	$(P, PP), (PP, JC), (JC, RZ), (RZ, P)$

如图 9 所示,鞣制车间分为三个加工区域,根据车间布局的描述,三个区域分别表示为 $A[L_{A1}, W_{A1}, (X_{A1}, Y_{A1})]$ 、 $A[L_{A2}, W_{A2}, (X_{A2}, Y_{A2})]$ 、 $A[L_{A3}, W_{A3}, (X_{A3}, Y_{A3})]$. 车间的长宽、通道尺寸分别为 62、30、5(单位:m).

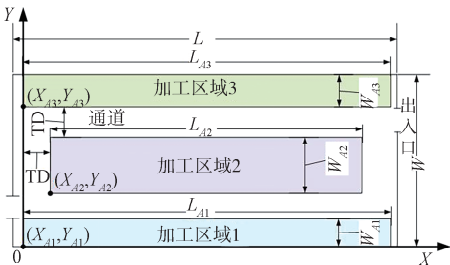


图 9 鞣制车间 XY 坐标系平面图
Fig. 9 XY coordinate system plan of tanning workshop

表 3 车间尺寸表
Tab. 3 Workshop size table

区域编号 c	L_{Ac}/m	W_{Ac}/m	(X_{Ac}, Y_{Ac})
1	60	5	(0,0)
2	50	10	(5,10)
3	60	5	(0,25)

如图 10, AGV 的物流路径如虚线所示,横向虚线处于通道的正中间,竖向虚线离加工区域 2 的距离为 5 m. 实心圆点表示设备的几何中心,如 (X_K, Y_K) 表示设备 K 的几何中心坐标;空心圆圈代表设备的取(卸)货点坐标. 鞣制车间物流路径共有 4 个路径拐点, 其中一个拐点位置与 AGV 的停车位置重合. 由各个区域的尺寸可得到 4 个拐点的坐标分别为 $(0, 7.5)$ 、 $(0, 22.5)$ 、 $(60, 22.5)$ 、 $(60, 7.5)$. X_{jk} 表示设备 j, k 在 X 轴方向上的最小距离, Y_{hi} 表示设备 h, i 在 Y 轴方向上的最小距离, 本文设定设备在 X, Y 轴方向上的最小间距都为 1 m.

对于鞣制工序,其主要产品为蓝湿革,是后继加工需要的主要基础原料,各种蓝湿革的加工工艺

没有太大区别,所以在鞣制车间的设备布局问题中可以忽略不同产品批量对物流成本的影响.

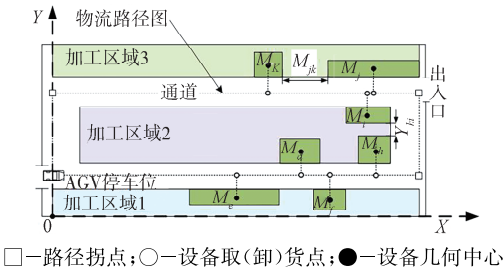


图 10 车间物流路径及设备约束图
Fig. 10 Workshop logistics path and equipment constraint diagram

针对此次优化的车间,鞣制的主要原材料为牛皮,鞣制的过程中牛皮的质量在不同的工序中会有明显改变,牛皮在各个工序之间的质量和单位物流成本如表 4 所示. 每批加工牛皮的数量 $N=20$. 根据表 4, 可以将优化的目标函数表示为

$$Object = \min(\sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n N * C_{ij} * D_{ij} * W_{ij})$$

(8)

表 4 物流参数表
Tab. 4 Logistics parameter table

物流路径 (i, j)	牛皮质量 $W_{ij}/(\text{kg}/\text{piece})$	物流成本 $C_{ij}/(\text{元}/(\text{kg} * \text{m}))$
(P, YJS)	20	3/1000
(YJS, QR)	25	3/1000
(QR, JC)	22	3.5/1000
(JC, ZJS)	22	3/1000
(ZJS, QR)	24	3.5/1000
(PP, JC)	23	3.5/1000
(JC, RZ)	23	3/1000
(RZ, P)	22	3/1000

4.3 Floyd 算法在模型中的应用

由车间物流路径及设备约束图可得到一个带

权无向图 $G(V,E)$;各设备之间的距离用 D_{ij} 表示. 图 $G(V,E)$ 的点集 V 由 4 个路径拐点和 47 个设备取(卸)货点构成, 边集 E 条数为 51 条. 针对设备布局这种 NP-hard 问题, 此模型的规模, 采取枚举法显然不现实, 本文将采用智能优化算法求取最优近似解.

4.4 SLP 算法在模型中的应用

根据 SLP 算法, 将鞣制车间作业单位的物流因素和非物流因素按照(A、E、I、O、U) 进行评级划分, 将得到的物流相关表和非物流相关表按照重要程度的不同进行加权求和生成车间综合关系表, 依据约束条件进行车间布局方案的规划, 具体流程如图 11 所示. 最后利用 SLP 布局设计流程进行得到初步最优布局方案, 作为车间设备布局规划后期改进遗传算法优化的基准和参照, 具体布局如图 12 所示.

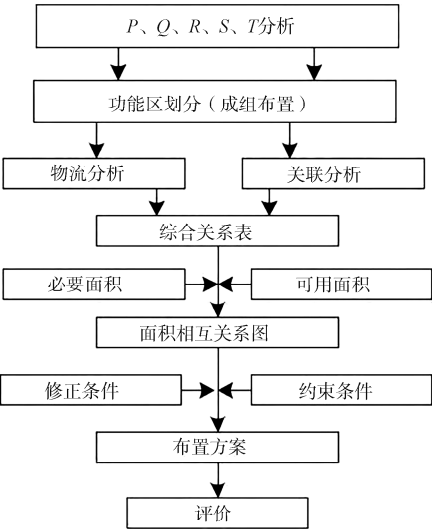


图 11 SLP 算法流程
Fig. 11 SLP algorithm flow

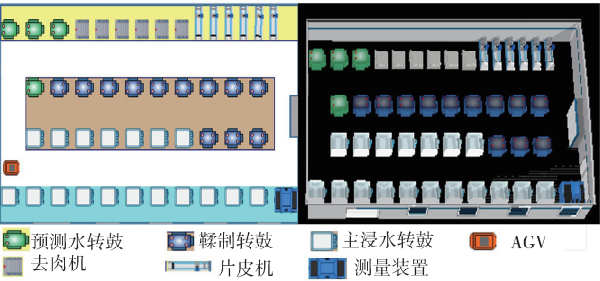


图 12 SLP 算法得到的最优布局
Fig. 12 The optimal layout obtained by the SLP algorithm

4.5 SLP 结合改进遗传算法的应用

车间模型建立完成后, 改进遗传算法运用的第

一步就是对车间的设备进行编码, 如图 13 所示. 设备的编码由 6 位实数表示, 第 1 位表示设备类型, 取值为 1~6, 分别表示预浸水转鼓、主浸水转鼓、鞣制转鼓、去肉机、片皮机、检测装置. 第 2、3 位参数分别表示设备的长度与宽度. 第 4 位参数表示设备的布置方向, 取值为 0、1, 分别表示长边布局 and 短边布局. 第 5、6 位参数表示设备几何中心的坐标位置.



图 13 设备编码形式
Fig. 13 Device coding form

鞣制车间布局优化问题的染色体由 47 个以上形式的编码结构随机组合而成. X、Y 坐标的初始值为 0, 经过布局后的染色体, 若满足模型约束就进入初始种群, 如前所述, 初始种群通过 3 种方式生成, 三种种群的比例如表 5 所示.

初始化后需要对种群进行选择、交叉、变异操作, 选择、交叉、变异需要的参数如表 5 所示. 算法采用的交叉方式为子巡回交叉, 交叉的过程如图 14 所示. 首先从选择操作后的种群中随机挑选出两个父染色体, 在父染色体 1 中确定交叉开始位置为 3, 交叉串长度为 5. 在父染色体 2 中找到响应的基因位, 按父染色体 2 中基因串的位置, 重新排布基因串得到子染色体 1; 重复上述操作得到子染色体 2. 将得到的子染色体重新布局, 根据适应度函数得到适应度, 最后从这 4 个染色体中得到较优的两个解. 变异操作对染色体内的两个基因位的设备进行交换得到变异后的染色体, 经过重新布局, 适应度比较后选取较优解作为变异结果.

表 5 算法参数表
Tab. 5 Algorithm parameter table

参数	值
初始化种群比例 (方式 1 : 方式 2 : 方式 3)	25 : 520 : 5
种群规模 N/个	500
迭代次数 Iter/次	160
简单迭代次数 sIter/次	40
交叉概率 P_c	0.75
变异概率 P_m	0.15
交叉开始位值 S	15
交叉串长度 T	15

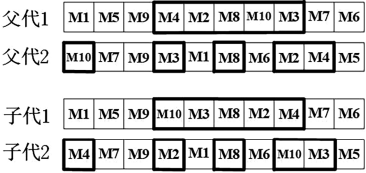


图 14 子巡回交叉流程

Fig. 14 Subtour exchange crossover process

4.6 模型假设

- (1) 假设 47 个设备取(卸)货点不重合;
- (2) 假设设备、物流 AGV 不发生故障.

4.7 算法仿真结果与设备优化布局

在满足以上模型假设的前提下,对此模型采用简单遗传算法,算法参数如表 5 所示,群体的进化过程如图 15 所示.

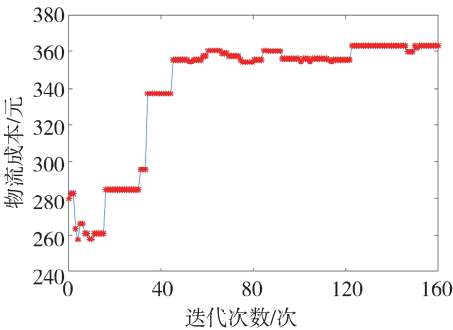


图 15 简单遗传算法进化过程

Fig. 15 Simple genetic algorithm evolution process

同样满足上述模型假设,对此模型采用改进遗传算法,算法的参数同上述基本遗传算法,初始化群体采用随机方法和面积利用率相结和的方式,不加入 SLP 方法生成的个体,算法的进化过程如图 16 所示.

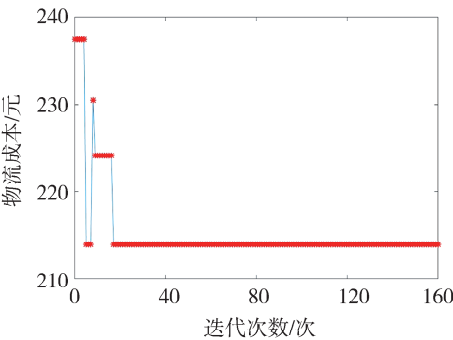


图 16 改进遗传算法进化过程

Fig. 16 Improved genetic algorithm evolution process

最后,在满足模型假设的基础上,采用与上述两种算法相同的算法参数,初始化群体采用随机方法、面积利用率和 SLP 方法结合的方式生成. SLP 改进遗传算法的迭代过程图 17 所示.

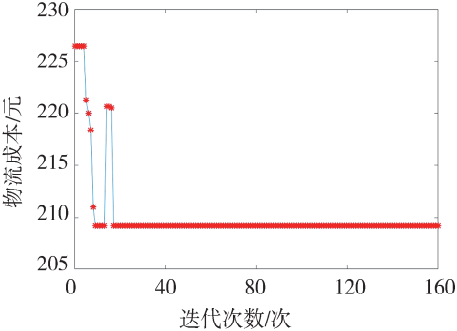


图 17 SLP 改进遗传算法进化过程

Fig. 17 SLP improved genetic algorithm evolution process

如表 6,我们分别利用 4 种算法对鞣制车间的设备布局模型进行 10 次求解,得到各种算法求得的物流成本平均值. 从表 6 知,简单遗传算法在解决布局问题时不能收敛到较优解,不适合用来解决设备布局这种 NP-hard 问题. SLP 算法只是基于人工经验判断出的最优布局,能够作为改进遗传算法的初始化种群. 从改进遗传算法的进化结果可以看出,算法经过一定次数的迭代能够收敛到一个较优解,但是相对于 SLP 改进遗传算法,得到的物流距离还不是最优. SLP 改进遗传算法,虽然在求解时物流成本时有波动,但是相对于改进遗传算法和简单遗传算法波动区间更小,得到的最终解更优.

表 6 车间物流平均成本迭代表	
Tab. 6 Workshop logistics average cost iteration table	
算法名称	车间物流成本平均值/元
SLP	214. 2
简单 GA	334. 7
改进 GA	213. 6
SLP-GA	209. 4

通过比较简单遗传算法和本文提出的多阶段改进遗传算法的迭代效果,证明了改进算法的有效性.

5 结 论

本文针对车间多区域单、双行设备布局问题,建立了数学模型;并将 SLP 方法与改进的遗传算法相结和构建了 SLP 改进遗传算法. 本文通过构建车间的平面二维坐标系,将设备布局问题参数化,利用空间、设备参数等之间的约束将设备的位置通过坐标固定,为之后的算法优化提供了依赖. 算法优化部分采用 SLP 方法产生的较优解作为一部分初始解,并引入自适应的交叉算子和分段迭代机制,保证了算法较大解空间和收敛性能. 通过实

验证明,SLP 改进遗传算法能有效解决多区域单、双行车间设备布局的问题. 本文主要将物流成本作为优化目标,在接下来的研究中应该将面积利用率考虑进来,寻找一个合适的目标函数作为优化目标;算法方面,SLP 改进遗传算法前期迭代阶段的波动性比较大,后期还需要对提高前期迭代的性能做优化.

参考文献:

[1] Tompkins J A, White J A, Bozer Y A, *et al.* Facilities planning[M]. 4th ed. New York: John Wiley & Sons Inc, 2013.

[2] Cagan J, Shimada K, Yin S. A survey of computational approaches to three-dimensional layout problems [J]. Comput Aided Design, 2002, 34: 597.

[3] 周原令, 胡晓兵, 霍云亮, 等. 双基球扁发射药生产线的改进遗传排产算法研究[J]. 四川大学学报:自然科学版, 2019, 56: 627.

[4] 隋振, 张天星, 吴涛, 等. 基于多种群空间映射遗传算法的立体仓库储位优化[J]. 吉林大学学报:理学版, 2022, 60: 127.

[5] 王亚良, 钱其晶, 曹海涛, 等. 基于动态差分元胞多目标遗传算法的混合作业车间布局改善与优化[J]. 中国机械工程, 2018, 29: 1751.

[6] Yang C L, Chuang S P, Hsu T S. A genetic algorithm for dynamic facility planning in job shop manufacturing [J]. Int J Adv Manuf Tech, 2011, 52: 303.

[7] 张屹, 卢超, 张虎, 等. 基于差分元胞多目标遗传算法的车间布局优化[J]. 计算机集成制造系统, 2013, 19: 727.

[8] Pourvaziri H, Naderi B. A hybrid multi-population genetic algorithm for the dynamic facility layout problem [J]. Appl Soft Comp, 2014, 24: 457.

[9] 徐熔. 基于 SLP 方法的 H 公司生产线布局优化设计[D]. 上海:上海交通大学, 2016.

[10] 梁煊林. 基于 SLP 和遗传算法的管桩生产线平面布置设计及优化[D]. 广州:华南理工大学, 2020.

[11] 雷英杰, 张善文. MATLAB 遗传算法工具箱及应用[M]. 2 版. 西安:西安电子科技大学出版社, 2014.

[12] García-Hernández L, Arauzo-Azofra A, Salas-Morera L, *et al.* Facility layout design using a multi-objective interactive genetic algorithm to support the DM [J]. Int J Knowl Eng, 2015, 32: 94.

[13] 李爱平, 鄢泽耀, 谢楠, 等. 基于 NSGA-II 的多目标车间设备布局[J]. 机械设计与研究, 2012, 28: 90.

[14] Li J, Hui G, Zhang S, *et al.* Optimum design of ship cabin equipment layout based on SLP method and genetic algorithm [J]. Math Probl Eng, 2019, 2019: 1.

[15] Golmohammadi A M, Bani-Asadi H, Esmaeeli H, *et al.* Facility layout for cellular manufacturing system under dynamic conditions [J]. Decis Sci Lett, 2016, 5: 407.

[16] Lenin N, Siva Kumar M, Islam M N, *et al.* Multi-objective optimization in single-row layout design using a genetic algorithm [J]. Int J Adv Manuf Tech, 2013, 67: 1777.

[17] 张青雷, 党文君, 段建国. 基于自适应遗传算法的大型关重件车间布局优化[J]. 机械设计与制造, 2021(1): 236.

引用本文格式:

中 文: 邢彩虹,刘刚,胡晓兵,等. 基于 SLP 改进遗传算法的多区域单双行设备布局优化方法[J]. 四川大学学报:自然科学版, 2022, 59: 052004.

英 文: Xing C H, Liu G, Hu X B, *et al.* Multi-region single and double rows equipment layout optimization based on SLP improved genetic algorithm [J]. J Sichuan Univ: Nat Sci Ed, 2022, 59: 052004.