

# 基于SLP与NSGA-II的KF公司通用阀车间布局优化

陈洪鑫

(安阳师范学院数学与统计学院, 河南 安阳 455000)

**摘要:** 针对因KF公司通用阀车间布局不合理而导致物料搬运交叉多、搬运成本高、面积利用率低等问题, 构建考虑物料顺、逆流动方向的, 以最小化物料搬运成本、最大化非物流关系和车间面积利用率为目标的布局优化模型。运用系统布置设计(SLP)方法对车间布局进行优化得到初步布局方案。在传统非支配排序遗传算法(NSGA-II)的基础上, 为提高算法初始种群的多样性将SLP方法得到的初步布局方案编码作为初始种群的一部分, 将自适应控制策略引入交叉、变异操作中, 并加入模拟退火算法。最后使用层次分析法(AHP)对算法得到的一组Pareto最优解集进行优化方案决策。结果表明, 此方法能使物料搬运成本减少38.83%, 非物流关系增加了44.83%, 车间面积利用率优化了19.50%, 证明了该模型在车间布局优化时的有效性。

**关键词:** 车间布局; 多目标优化; NSGA-II(非支配排序遗传算法); SLP(系统布置设计)

**中图分类号:** TH181 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-1807(2025)13-0040-11

车间布局规划是制造业的核心, 布局合理与否直接影响车间内生产效率、物流效率, 进而影响企业的生产成本和生产周期<sup>[1]</sup>。据中国产业信息网统计发现, 从生产产品的原材料进入生产车间开始, 中间经过一系列加工, 直到形成最终的产品的整个物流过程中, 物料很长时间处于搬运或者等待状态, 粗略统计其浪费的时间占比高于整个产品生产时间的90%~95%, 仅有5%~10%的时间是对产品进行加工及检验的。对于制造型企业, 物料搬运相关的成本占总成本的20%~50%, 如果合理的对企业车间进行布局优化可以将企业的生产成本降低10%~30%, 使生产效率提高约3倍<sup>[2]</sup>。

针对车间布局优化问题, 传统的是使用分支定界法、割平面法、CRAFT(定量布置程序)、ALDEP(构造布局方法)等<sup>[3]</sup>。随着工业的快速发展, 车间布局问题规模的增大和灵活性的增加, 传统的方法已不能很好得到可行解。系统布置设计法(system layout planning, SLP)、系统仿真法、智能算法等方法的出现和应用有效地解决了这个问题<sup>[4]</sup>, 并且能够缩短求解的时间, 提高求解的质量。例如, 高泽<sup>[5]</sup>、郑广辉等<sup>[6]</sup>借助SLP法来解决生产车间因布局不合理而造成的物流紊乱、生产效率低等问题; 孙凯和刘祥<sup>[7]</sup>提出以总物流费用最小为目标建立布局优化的二次分配模型, 并单独使用蚁群-

遗传混合算法求解, 使物流费用减少了10.6%; 刘冠权等<sup>[8]</sup>运用改进和声搜索算法求解多目标优化模型, 有效降低了物料流动费用, 增加了车间中各作业单位间非物流关系密切程度; 郭姣等<sup>[9]</sup>、罗灯兰等<sup>[10]</sup>、黄鹏鹏等<sup>[11]</sup>运用SLP方法对车间布局进行初步优化后, 运用Flexsim、Witness仿真软件建立模型验证优化方案的可行性; 姚明钊等<sup>[12]</sup>、张梦杨等<sup>[13]</sup>将传统的SLP方法和改进智能算法结合起来解决车间布局优化问题, 既弥补了SLP易受主观影响的缺点, 又保证了初始种群的多样性, 增强了算法的搜索能力, 提高了算法的求解质量。邱慧聪<sup>[14]</sup>、田世海等<sup>[15]</sup>运用改进的粒子群算法解决车间搬运路线重复、物流成本高等问题, 最后都通过系统仿真验证改进算法的有效性。

本文通过建立考虑物料顺、逆流动方向的多目标车间布局优化模型, 运用SLP方法结合改进的非支配排序遗传算法(nondominated sorting genetic algorithm II, NSGA-II)求解, 用来解决车间内物料搬运成本高、非物流关系不紧密、车间面积利用率低等问题。

## 1 建立车间布局优化模型

### 1.1 模型假设

本文研究的是多行、不等面积的车间布局优化问题。如图1所示, 车间平面被分为若干区域, 按照

**收稿日期:** 2025-01-06

**基金项目:** 国家自然科学基金(72174045); 黑龙江省自然科学基金(LH2021G013)

**作者简介:** 陈洪鑫(1997—), 男, 河南新密人, 硕士, 助教, 研究方向为生产制造系统工程、系统建模优化控制与决策。

一定的约束合理地将区域布置在若干行,以达到优化的目标。为了方便研究,对模型做出以下假设。

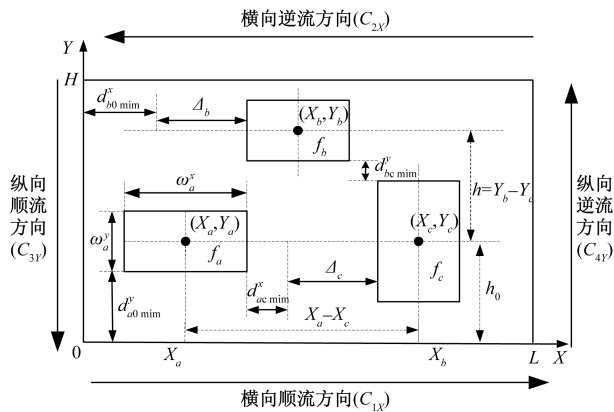
(1)把车间所占的区域形状简化为一个已知长和宽的矩形结构,以车间的左下角为坐标原点,车间的长边为 X 轴方位,短边为 Y 轴方向建立二维坐标系。

(2)忽略各作业单位的形状细节,均把它们视为已知长宽的规则四边形结构,且位于同一行作业单位中心点的纵坐标是相同的。

(3)车间内各作业单位物料流动都需在其中心点处进行,且物料以平行于 X 轴或 Y 轴的方向进行流动,流动距离  $D_{ab}$  按照物料起始流动位置  $(X_a, Y_a)$  与结束位置  $(X_b, Y_b)$  的坐标差值之和进行计算,即  $D_{ab} = |X_a - X_b| + |Y_a - Y_b|$ 。

(4)车间中各产品的工艺流程不变,即加工路线不改变。

(5)以平行于 X 轴正方向、Y 轴负方向为横向和纵向顺流方向,相反为横向和纵向逆流方向。逆向物流成本大于顺向物流成本。



$L$  和  $H$  为车间的总长和总宽;  $(X_a, Y_a)$  为任意一个作业单位  $f_a$  的中心点坐标;  $\omega_a^x$  和  $\omega_a^y$  分别为任意一个作业单位  $f_a$  的长和宽;  $d_{b0}^{x min}$  为任意两个相邻作业单位  $f_a$  和  $f_c$  在 X 轴方向的最小间距;  $d_{bc}^{y min}$  为任意作业单位  $f_b$  与车间左边界在 X 轴方向的最小间距;  $\Delta_c$  为作业单位  $f_c$  与其前面一个作业单位之间的净距离;  $h_0$  为首行作业单位与车间下边界在 Y 轴方向的距离;  $d_{a0}^{y min}$  为作业单位  $f_a$  与车间下边界在 Y 轴的最小间距要求;  $d_{ac}^{y min}$  为任意相邻两行作业单位在 Y 轴的最小间距要求;  $h$  为某相邻两行作业单位的行间距;  $C_{*X}$  为横向物料流动距离成本的系数;

$C_{*Y}$  为纵向物料流动距离成本的系数

图 1 车间布局模型图

### 1.2 目标函数

在实际生产过程中,车间中各类产品的生产工序各不相同,物料需要在不同环节、不同设备间频繁流转,整体的物料流动情况相当复杂。在对通用阀车间进行布局优化时,主要着眼点是车间内通道

规划,以及各作业单位之间物料搬运量。通过梳理各作业单位的物流与非物流关系,量化各车间的紧密程度,最终设计出能让总物流量最低的布局方案,为此,建立最小化物料搬运总成本目标函数  $F_1(S)$ 、最大化非物流关系目标函数  $F_2(S)$ 、最大化车间面积利用率目标函数  $F_3(S)$  如下。

(1)物料搬运总成本  $F_1(S)$  最小化:

$$\min F_1(S) = \sum_{a=1}^n \sum_{b=1}^n P_{ab}(S) Q_{ab}(S) D_{ab}(S), a \neq b \quad (1)$$

式中:  $P_{ab}(S)$  为在  $S$  布置方案下物料在作业单位  $a$  到  $b$  之间单位距离搬运成本;  $Q_{ab}(S)$  为作业单位  $a$  到  $b$  之间的搬运量;  $D_{ab}(S)$  为在  $S$  布置方案下作业单位  $a$  到  $b$  之间的搬运距离。

(2)非物流关系  $F_2(S)$  最大化:

$$\max F_2(S) = \sum_{a=1}^n \sum_{b=1}^n A\omega_{ab} B\varphi_{ab}, a \neq b \quad (2)$$

式中:  $A\omega_{ab}$  为非物流关系的密切程度值,见表 1;  $B\varphi_{ab}$  为非物流关系等级与距离相关的关联因子值,见表 2。

(3)车间面积利用率  $F_3(S)$  最大化:

$$\max F_3(S) = \frac{\sum_{a=1}^n S_a}{S(S)} \quad (3)$$

$$\max F_3(S) \rightarrow \min S_3(S) = \{(x_j - x_i)(y_j - y_i)\} \quad (4)$$

$$x_i = \min\left(x_a - \frac{\omega_a^x}{2}\right), \forall a = 1, 2, \dots, n \quad (5)$$

$$x_j = \max\left(x_a + \frac{\omega_a^x}{2}\right), \forall a = 1, 2, \dots, n \quad (6)$$

$$y_i = \min\left(x_a - \frac{\omega_a^y}{2}\right), \forall a = 1, 2, \dots, n \quad (7)$$

$$y_j = \max\left(x_a + \frac{\omega_a^y}{2}\right), \forall a = 1, 2, \dots, n \quad (8)$$

式中:  $S(S)$  为布局方案  $S$  时的包络面积;由于  $\sum_{a=1}^n S_a$  为一个定值,所以求车间面积利用率最大化问题可以转化为求包络面积最小值问题;  $(x_i, y_i)$  和  $(x_j, y_j)$  为能够包络车间内所有作业单位且面积最小矩形的左下方和右下方的坐标值。

表 1 关系密切程度值

符号	量化值 $A\omega_{ab}$	表达含义
A	4	绝对重要
E	3	特别重要
I	2	重要
O	1	一般
U	0	不重要
X	-1	远离

表 2 关联因子值

距离 $D_{ab}$ 取值范围	量化值 $B\varphi_{ab}$
$0 < D_{ab} \leq D_{\max}/6$	1.0
$D_{\max}/6 < D_{ab} \leq D_{\max}/3$	0.8
$D_{\max}/3 < D_{ab} \leq D_{\max}/2$	0.6
$D_{\max}/2 < D_{ab} \leq 2D_{\max}/3$	0.4
$2D_{\max}/3 < D_{ab} \leq 5D_{\max}/6$	0.2
$5D_{\max}/6 < D_{ab} \leq D_{\max}$	0.0

1.3 约束条件

1.3.1 行方向的约束

$$\sum_{m=1}^N Z_{am} = 1, a = 1, 2, \dots, n \quad (9)$$

$$\sum_{m=1}^N r_{am} = x_a, a = 1, 2, \dots, n \quad (10)$$

$$\sum_{m=1}^N S(m) = n \quad (11)$$

$$\left(\frac{\omega_a^x + \omega_c^x}{2} + d_{ac\min}^x\right) Z_{am} Z_{cn} \leq |r_{cn} - r_{an}|, \forall a \neq c \quad (12)$$

$$r_{an} - \frac{\omega_a^x}{2} - d_{a0\min}^x > 0, \forall a \quad (13)$$

$$r_{an} + \frac{\omega_a^x}{2} + d_{a0\min}^x < L, \forall a \quad (14)$$

$$\sum_{a=1}^n \sum_{b=1}^n (|\omega_a^x - \omega_c^x| + d_{ac\min}^x) \leq L \quad (15)$$

式(9)~式(11)表示车间内所有作业单位有且仅有一次被布置的机会,并且不能发生跨行现象;式(12)保证了相邻在 X 轴方向的两作业单位避免出现交叉重叠现象且必须大于两者间设置的最小间距限制,  $Z_{cn}$  和  $Z_{am}$  为决策变量;式(13)~式(15)表示在行方向每个作业单位都被限制布置在车间内部。

1.3.2 列方向的约束

$$y_{m(1)} = y_{m(2)} = \dots = y_{m[s(m)]} = y_m, m = 1, 2, \dots, N \quad (16)$$

$$\frac{(\omega_a^y + \omega_c^y)}{2} + d_{ac\min}^y \leq |y_a - y_b| \quad (17)$$

$$\sum_{m=1}^N \sum_{p=0}^{m-1} Z_{am} h_p + \frac{\omega_a^y}{2} + d_{a0\min}^y \leq y_a, \forall a \quad (18)$$

$$y_a + \frac{\omega_a^y}{2} + d_{ac\min}^y \leq \sum_{m=1}^N \sum_{p=0}^{m-1} Z_{am} h_p, \forall a \quad (19)$$

$$y_a - \frac{\omega_a^y}{2} - d_{a0\min}^y > 0, \forall a \quad (20)$$

$$y_a + \frac{\omega_a^y}{2} + d_{a0\min}^y < H, \forall a \quad (21)$$

$$\sum_{a=1}^n \sum_{b=1}^n (|\omega_a^y - \omega_c^y| + d_{ac\min}^y) \leq H \quad (22)$$

式(16)表示布置在同一行内的各作业单位纵坐标是相同的;式(17)~式(19)保证了相邻在 Y 轴方向的两作业单位避免出现交叉重叠现象,  $h_p$  代表第  $p$  行的高度式;式(20)~式(22)表示在列方向每个作业单位都被限制布置在车间内部。

1.3.3 考虑顺、逆向物流流动距离成本的约束

$$C_{1X}(x_b - x_a) + C_{3Y}(y_b - y_a) \leq D_{ab}, \forall a \neq b \quad (23)$$

$$C_{2X}(x_b - x_a) + C_{3Y}(y_b - y_a) \leq D_{ab}, \forall a \neq b \quad (24)$$

$$C_{1X}(x_b - x_a) + C_{4Y}(y_b - y_a) \leq D_{ab}, \forall a \neq b \quad (25)$$

$$C_{2X}(x_b - x_a) + C_{4Y}(y_b - y_a) \leq D_{ab}, \forall a \neq b \quad (26)$$

式(23)~式(26)中  $C_{*X}$ 、 $C_{*Y}$  表示距离成本系数,不同的系数设置会带来不同的布局结果,通过不断地系数调整来降低物料搬运成本,进而避免有较大的逆向物流方案的入选。本文根据该车间的实际情况和仿真实验结果,令  $C_{1X} = 1$ 、 $C_{2X} = -2$ 、 $C_{3Y} = -1$ 、 $C_{4Y} = 2$ 。

2 NSGA-II 设计

2.1 染色体编码设计

采用符号编码方式,编码长度为  $n$ ,基因为  $1 \sim n$  的整数的不重复排序,每个数字代表该车间对应的作业单位的编号。编码方式可表示为  $[\{1, 2, 3, \dots\}, \{\Delta_1, \Delta_2, \Delta_3, \dots\}]$ ,其中  $\Delta_i$  表示车间内设备间的净距离。由于本文是多行区域布置问题,为了满足设置的行方向的约束即不能超出车间的长,采用自动换行策略。

2.2 初始种群产生

为了加快改进 NSGA-II 算法的收敛速度,提升求得解的满意度,保证得到初始种群的多样性,将采用 SLP 方法得到的初步布局方案结合随机产生的解形成初始种群。初始种群的规模会影响算法的求解效率,一般取值范围为  $50 \sim 150$ ,根据实际情况取值为 100。

2.3 罚函数

由于本文采用自动换行策略,即所布置的各作业单位在行(X轴)方向是不会出现超出通用阀车间长度约束的情况。所以只需判断布置的作业单位在列(Y轴)方向最后一行的布置是否会超出车间的宽度。 $P_k$  为列方向不合理的惩罚项,  $T$  为较大的惩罚数,不同于其他简单地仅给  $T$  赋予一个较大的数字来设置惩罚,本文根据超出车间边界的大小

来确定惩罚数,具体如式(27)所示。

$$P_k = \begin{cases} 0, & \max(y_a + 0.5\omega_a^y) \leq H \\ T[\max(y_a + 0.5\omega_a^y) - H], & \max(y_a + 0.5\omega_a^y) > H \end{cases} \quad (27)$$

式中: $T$ 为较大的惩罚数,本文取值1000,超出车间边界的范围越大,惩罚值就会越大。

## 2.4 遗传算子

### 2.4.1 选择操作

为了克服传统 NSGA-II 使用固定拥挤度排序在迭代的后期出现个体集聚现象,可能会造成陷入局部最优解或面临该局部全部个体被淘汰的情况,本文先通过动态拥挤度计算、非支配排序、精英保留策略后,运用二元锦标赛法来进行选择个体,从而保障了种群的多样性。精英保留策略步骤如图2所示。

假设优化目标有  $J$  个,处于同一非支配层内中间个体  $p_i$  拥挤距离  $p_{i,d}$  如式(28)所示。

$$p_{i,d} = \frac{\sum_{j=1}^J \frac{|f_j^{i-1} - f_j^{i+1}|}{f_j^{\max} - f_j^{\min}}}{J} \quad (28)$$

其中把目标函数  $f_j$  的最大值记为  $f_j^{\max}$ ,最小值记为  $f_j^{\min}$ 。 $f_j^{i-1}$ 、 $f_j^{i+1}$  表示与个体  $p_i$  相邻的两个个体在第  $j$  个目标函数中的函数值。

### 2.4.2 自适应交叉、变异操作

交叉操作和变异操作的目的是更新种群中的个体。为了使改进算法能够进一步扩大搜索空间,避免陷入局部最优,提升算法的收敛性,将传统 NSGA-II 算法使用的模拟二进制交叉、多项式变异改为自适应交叉和变异,使交叉和变异的概率能够随着种群适应度的变化而自动调整,从而把适应度

高的个体留到下一代,把适应度低的个体淘汰掉。自适应交叉概率  $p_c$  和变异概率  $p_m$  函数如式(29)、式(30)所示。

$$p_c = \begin{cases} p_{c2} - \frac{(p_{c2} - p_{c1})(f_{\max} - f)}{f_{\max} - f_{\text{avg}}}, & f \geq f_{\text{avg}} \\ p_{c2}, & f < f_{\text{avg}} \end{cases} \quad (29)$$

$$p_m = \begin{cases} p_{m2} - \frac{(p_{m2} - p_{m1})(f_{\max} - f')}{f_{\max} - f_{\text{avg}}}, & f' \geq f_{\text{avg}} \\ p_{m2}, & f' < f_{\text{avg}} \end{cases} \quad (30)$$

式中: $p_{c1}, p_{c2}, p_{m1}, p_{m2} \in [0, 1]$ ,且  $p_{c1} < p_{c2}$ ,  $p_{m1} < p_{m2}$ ;  $f$  为当前需交叉的两个个体中适应度的较大值; $f_{\text{avg}}$  当前种群适应度的平均值; $f_{\max}$  为当前种群适应度的最大值; $f'$  为前需变异个体适应度值。通过式(29)、式(30)可发现,当种群中个体的适应度值趋于一致时,即当  $f_{\max} - f_{\text{avg}} \rightarrow 0$  时,为避免陷入局部最优解应增加交叉和变异概率的值,反之则减少。根据仿真实验结果,令  $p_{c1} = 0.4, p_{c2} = 0.7, p_{m1} = 0.01, p_{m2} = 0.1$  能得到较好的结果。

## 2.5 模拟退火操作

模拟退火算法具有较强的局部搜索功能,能克服传统的 NSGA-II 算法在后期出现的“早熟”现象。具体操作是将得到的子代种群  $P_{t+1}$  作为模拟退火算法的初始解,然后使用模拟退火算法产生一组新个体,计算增量  $\Delta F$ ,若  $\Delta F < 0$ ,则新解替换旧解,否则按照 Metropolis 准则以概率  $P$  判别是否接受新解作为下一代的起始值,如式(31)所示。具体算法流程如图3所示。

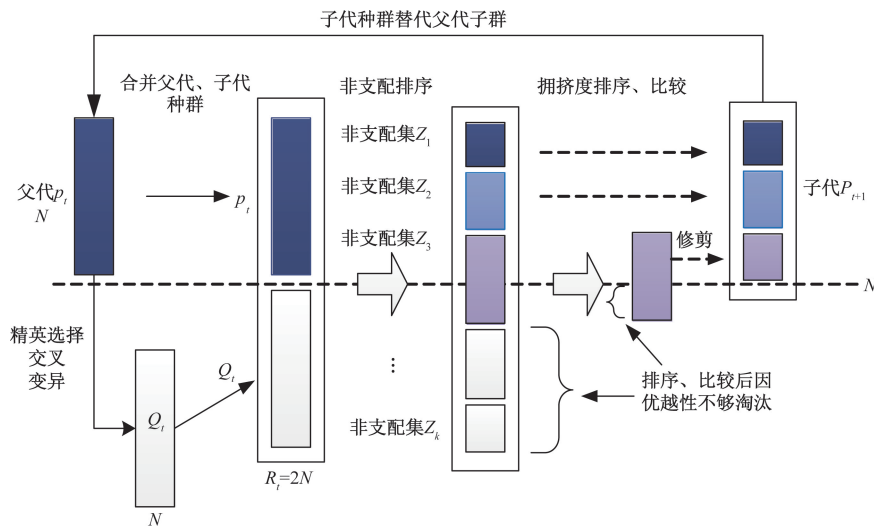
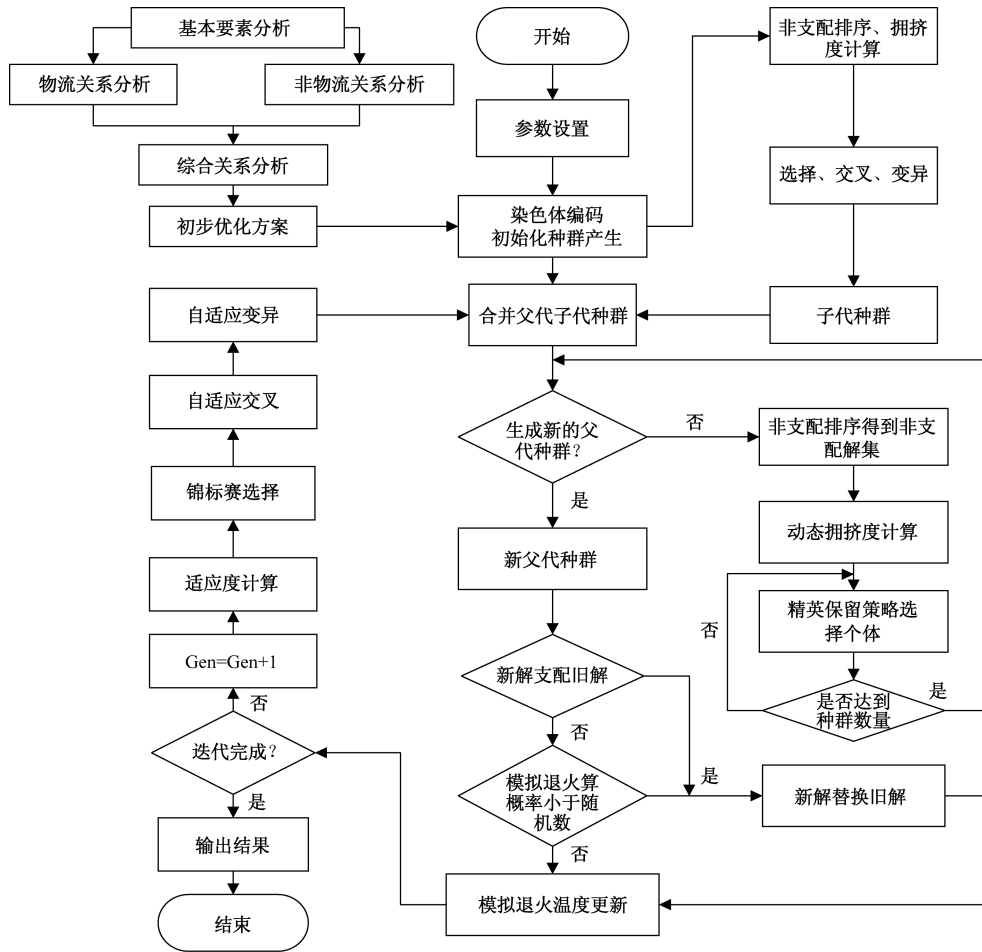


图2 精英保留策略步骤



Gen 代表当前的迭代代数。Gen = Gen + 1 这个操作的作用是让迭代代数加 1,也就是进入到下一轮迭代。首先把 Gen 初始化为 0,接着在一个循环里不断将 Gen 加 1,直至达到最大迭代代数 max\_gen。每一次迭代时,都会输出当前的迭代代数

图 3 NSGA-II 算法流程

$$P = \begin{cases} 1, & \Delta F = F_j - F_i < 0 \\ e^{-\frac{\Delta F}{\Delta T}}, & \Delta F \geq 0 \end{cases} \quad (31)$$

### 3 案例分析

#### 3.1 实例描述

KF 公司位于河南省开封市,是一家生产阀门的中小型制造企业,主要经营产品有自动类、驱动类、调节类等 30 多个阀门类型,产品被广泛应用于水利、电力、化工等行业。通用阀车间占地 9 856 m<sup>2</sup>,车间东西长为 112 m,南北宽为 88 m,为单层生产结构,共设有 13 个作业单位,各作业单位划分序号和面积见表 3,涵盖了从原材料的采购与制作,半成品的暂存,零部件,组件的总装,性能检验,上漆,成品的存储等整个生产流程。

#### 3.2 基于 SLP 的车间布局初步优化

##### 3.2.1 物流关系分析

对车间内各作业单位间的物料搬运量进行统计,计算各作业单位间的物料搬运量占总物料搬运

表 3 车间内各作业单位的编号和面积

编号	作业单位名称	占地面积/m <sup>2</sup>	编号	作业单位名称	占地面积/m <sup>2</sup>
1	原材料区	24×22.5	8	成品区	24×25
2	半成品区	15×24	9	性能检测区	18×24
3	机加工区	36×23	10	清洗区	15×23
4	铸造区	18×25	11	油漆区	18×24
5	热处理区	24×24	12	办公服务区	38×26
6	精密区	21×24	13	设备维修区	21×25
7	装配区	30×26	—	—	—

量得到各作业单位间的物流强度,并对其进行排序。根据每个作业单位对所承担的物流量比例,将排好序的作业单位对由高到低划分为 A、E、I、O、U 5 个等级,具体结果见表 4,物流关系相关图如图 4 所示。

##### 3.2.2 非物流关系分析

车间布局优化不仅要各作业单位间的物流关系分析作为重点,非物流因素分析在实际生产过程

表 4 车间内各作业单位间物流强度

作业单位对	物流量/kg	物流等级	作业单位对	物流量/kg	物流等级
5-3	5 290	A	2-4	1 830	I
9-10	5 135	A	3-6	1 534	O
7-8	3 145	E	1-4	1 426	O
11-8	2 914	E	2-7	1 305	O
10-11	2 800	E	9-8	1 140	O
1-3	2 204	I	1-5	760	O
3-10	2 132	I	1-5	429	O
7-9	1 995	I	—	—	—

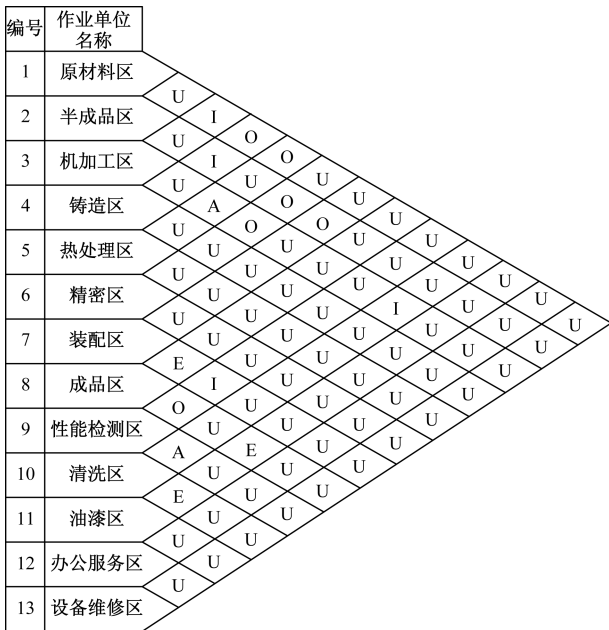


图 4 物流关系相关图

中有着非常重要的影响,也是在车间布局优化时不可忽视的一部分。根据该车间的特点,在进行非物流密切关系分析时主要考虑工艺流程衔接、物料搬运便捷情况、安全保障、管理方便等方面。仿照物流关系分析将车间内各作业单位间的非物流相互关系密切程度的等级划分为 A、E、I、O、U、X 6 个等级,结合该车间生产工艺特点,得到非物流相关图,如图 5 所示。

### 3.2.3 综合关系分析

对车间中各作业单位间的物流关系和非物流关系等级按照式(32)进行量化计算,令 A=4、E=3、I=2、O=1、U=0、X=-1。根据结果绘制出综合关系相关图,如图 6 所示。

$$CR_{ij} = \alpha AR_{ij} + \beta BR_{ij} \quad (32)$$

式中:  $CR_{ij}$  为综合关系值;  $AR_{ij}$  为物流关系等级量化值;  $BR_{ij}$  为非物流关系等级量化值;  $\alpha, \beta$  为加权

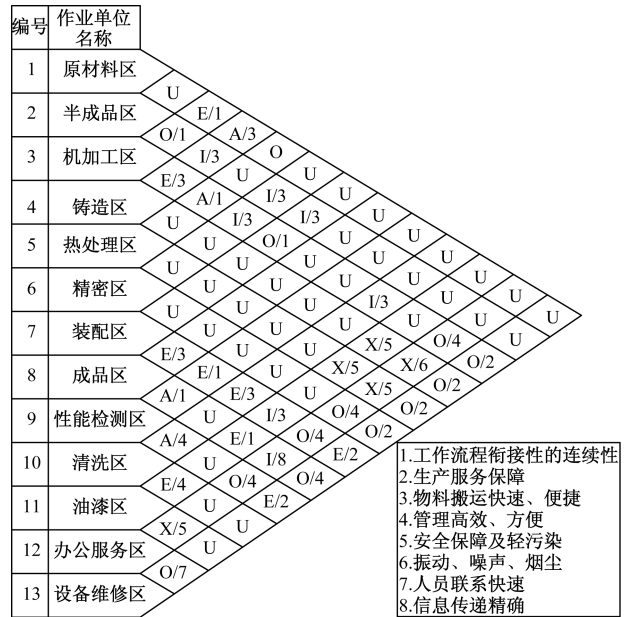


图 5 非物流相关图

值,根据该车间实际情况取 0.5。

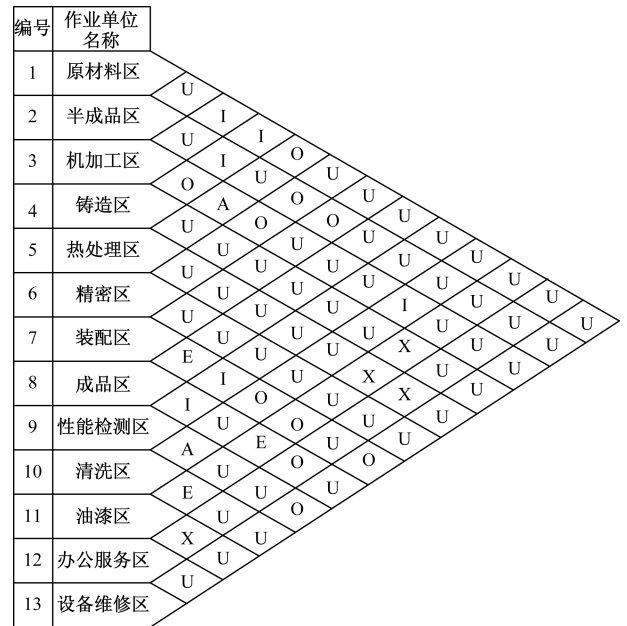


图 6 综合关系图

### 3.2.4 初步优化方案

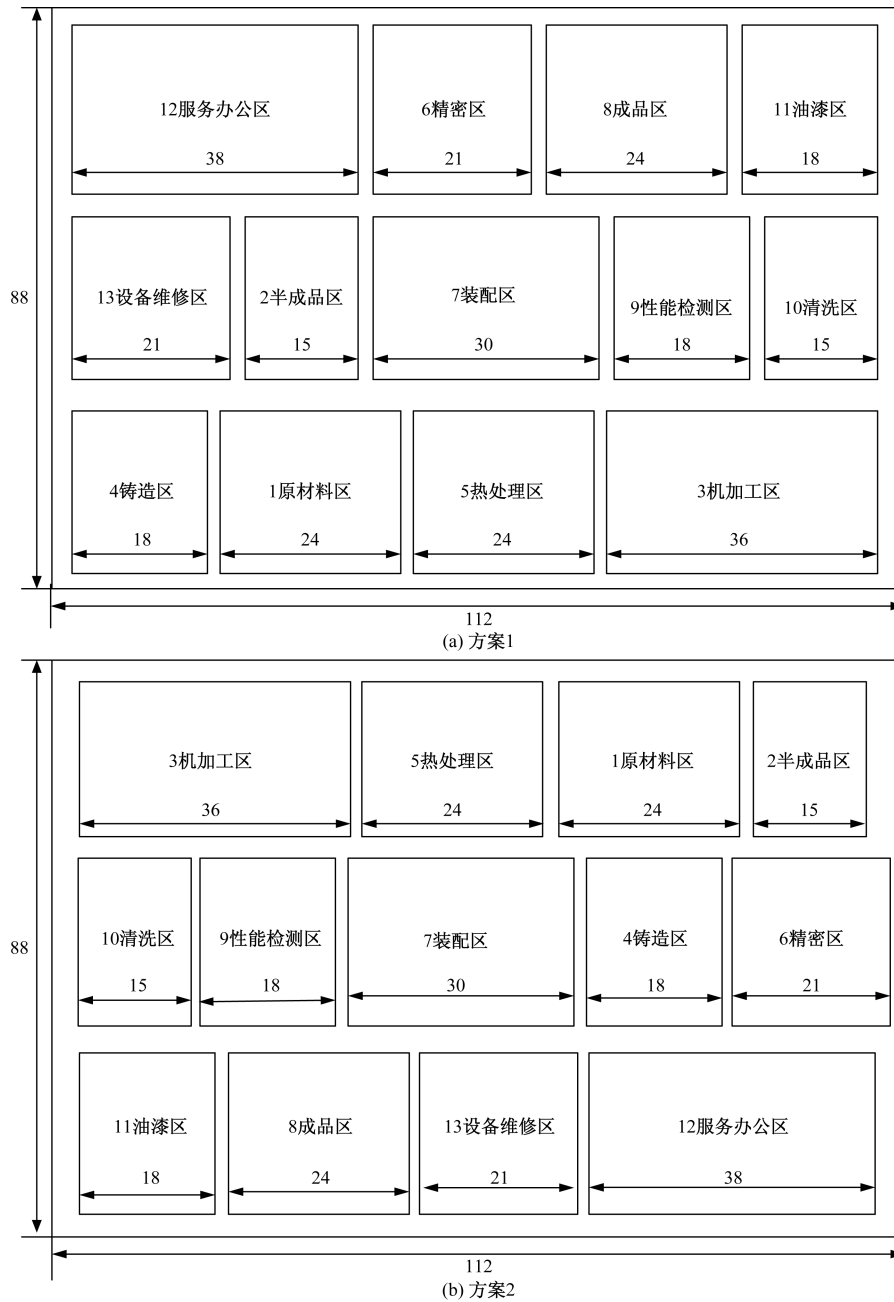
根据各作业单间的综合关系绘制出初步布局优化方案,如图 7 所示。

## 3.3 仿真实验

### 3.3.1 参数设置

改进 NSGA-II 参数值见表 5。

车间搬运用费用  $P_{ob} = 0.046 3 \text{ 元}/(\text{kg}\cdot\text{m})$ ;作业单位与车间下边界在 Y 轴的最小间距要求  $d_{a0 \min}^y$  为 2 m;作业单位与车间左边界在 X 轴方向的最小间距



单位:m

图 7 初步优化方案

表 5 改进 NSGA-II 参数值

序号	符号	参数名称	参数值
1	popsize	种群数量	100
2	maxgen	迭代次数	200
3	$P_c$	交叉概率	0.8
4	$P_m$	变异概率	0.01
5	$T$	惩罚值	1 000
6	$T_0$	初始温度	100
7	$\gamma$	降温系数	0.8

要求  $d_{i_{\min}}^x$  为 2 m;作业单位间的净距离  $\Delta_i$  在  $[0,1]$

内选取;横向最小间距  $d_{ac\min}^x$ 、竖向最小间距  $d_{ac\min}^y$ 、非物流关系  $A\omega_{ab}$  矩阵如式(33)~式(35)所示。通过 SLP 方法得到的初步布局优化方案作为算法初始种群的一部分,即(4,1,5,3,13,2,7,9,10,12,6,8,11)(11,8,13,12,10,9,7,4,6,3,5,1,2)。

### 3.3.2 优化过程及结果

在 Win10 下通过借助 MATLABR2018a 来运行传统的 NSGA-II 算法和改进的 NSGA-II 算法得到最佳 KF 公司通用阀车间布局优化的帕累托最优解集,如图 8 所示。

$$d_{acmin}^x = \begin{bmatrix} 0 & 6 & 6 & 6 & 6 & 6 & 6 & 5.4 & 5.8 & 5.4 & 6 & 6 & 6 \\ 6 & 0 & 6 & 4.8 & 6 & 6 & 5.4 & 4.8 & 6 & 6 & 6 & 6 & 6 \\ 6 & 6 & 0 & 6 & 6 & 6 & 6 & 6 & 4.8 & 5.4 & 6 & 6 & 6 \\ 6 & 4.8 & 6 & 0 & 6 & 6 & 6 & 6 & 6 & 6 & 6 & 6 & 6 \\ 6 & 6 & 6 & 6 & 0 & 6 & 6 & 6 & 6 & 6 & 6 & 6 & 6 \\ 6 & 6 & 6 & 6 & 6 & 0 & 4.8 & 5.4 & 6 & 6 & 6 & 6 & 6 \\ 6 & 5.4 & 6 & 6 & 6 & 4.8 & 0 & 6 & 6 & 6 & 6 & 6 & 6 \\ 5.4 & 4.8 & 6 & 6 & 6 & 5.4 & 6 & 0 & 6 & 5.4 & 4.8 & 6 & 6 \\ 5.8 & 6 & 4.8 & 6 & 6 & 6 & 6 & 6 & 0 & 6 & 6 & 6 & 6 \\ 5.4 & 6 & 5.4 & 6 & 6 & 6 & 6 & 5.4 & 6 & 0 & 6 & 6 & 6 \\ 6 & 6 & 6 & 6 & 6 & 6 & 6 & 4.8 & 6 & 6 & 0 & 6 & 6 \\ 6 & 6 & 6 & 6 & 6 & 6 & 6 & 6 & 6 & 6 & 6 & 0 & 6 \\ 6 & 6 & 6 & 6 & 6 & 6 & 6 & 6 & 6 & 6 & 6 & 6 & 0 \end{bmatrix} \quad (33)$$

$$d_{acmin}^y = \begin{bmatrix} 0 & 3 & 3 & 3 & 3 & 3 & 3 & 3 & 3 & 3 & 3 & 2.3 & 3 & 3 \\ 3 & 0 & 3 & 3 & 3 & 2.3 & 2.3 & 3 & 3 & 3 & 3 & 3 & 3 & 3 \\ 3 & 3 & 0 & 2.9 & 2.7 & 2.9 & 3 & 3 & 3 & 2.7 & 3 & 2.9 & 3 & 3 \\ 3 & 3 & 2.9 & 0 & 3 & 2.7 & 3 & 2.3 & 3 & 2.4 & 2.7 & 3 & 3 & 3 \\ 3 & 3 & 2.7 & 3 & 0 & 3 & 3 & 3 & 2.7 & 2.4 & 2.3 & 3 & 3 & 3 \\ 3 & 2.3 & 2.9 & 2.7 & 3 & 0 & 3 & 3 & 3 & 2.7 & 2.4 & 3 & 3 & 3 \\ 3 & 2.3 & 3 & 3 & 3 & 3 & 0 & 2.7 & 2.3 & 2.4 & 2.7 & 3 & 3 & 3 \\ 3 & 3 & 3 & 2.3 & 3 & 3 & 2.7 & 0 & 2.7 & 2.7 & 2.4 & 3 & 3 & 3 \\ 3 & 3 & 3 & 3 & 2.7 & 3 & 2.3 & 2.7 & 0 & 2.3 & 2.7 & 3 & 3 & 3 \\ 3 & 3 & 2.7 & 2.4 & 2.4 & 2.7 & 2.4 & 2.7 & 2.3 & 0 & 3 & 3 & 3 & 3 \\ 2.3 & 3 & 3 & 2.7 & 2.3 & 2.4 & 2.7 & 2.4 & 2.7 & 3 & 0 & 2.7 & 3 & 3 \\ 3 & 3 & 2.9 & 3 & 3 & 3 & 3 & 3 & 3 & 3 & 3 & 2.7 & 0 & 3 \\ 3 & 3 & 3 & 3 & 3 & 3 & 3 & 3 & 3 & 3 & 3 & 3 & 3 & 0 \end{bmatrix} \quad (34)$$

$$A\omega_{ab} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 3 & 4 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 2 & 0 & 2 & 2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 3 & 1 & 0 & 3 & 4 & 2 & 1 & 0 & 0 & 2 & 0 & 1 & 1 & 1 \\ 4 & 2 & 3 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 1 & 1 \\ 1 & 0 & 4 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & -1 & 1 & 1 \\ 0 & 2 & 2 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 \\ 0 & 2 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 3 & 3 & 3 & 2 & 1 & 3 & 3 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 3 & 0 & 4 & 0 & 3 & 2 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 3 & 4 & 0 & 4 & 0 & 1 & 3 & 3 \\ 0 & 0 & 2 & 0 & 0 & 0 & 3 & 0 & 4 & 0 & 3 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -1 & -1 & 0 & 2 & 3 & 0 & 3 & 0 & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & -1 & 1 & 1 & 2 & 1 & 0 & -1 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 3 & 1 & 3 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (35)$$

基于改进 NSGA-II 算法的 3 个目标函数的平均值和最值的迭代曲线对比运用 MATLABR2018a 输出如下图 9~图 11 所示。

通过观察分析上述各目标函数的迭代曲线可以发现,利用改进 NSGA-II 算法可使得求最小值

的目标函数 1 和 3 的均值和最值随着迭代次数的增加都保持着总体下降的趋势,使得求最大值的函数 2 的均值和最值随着迭代次数的增加都保持着总体上升的趋势。从传统的 NSGA-II 算法和改进的 NSGA-II 算法中选取几组非支配解集进

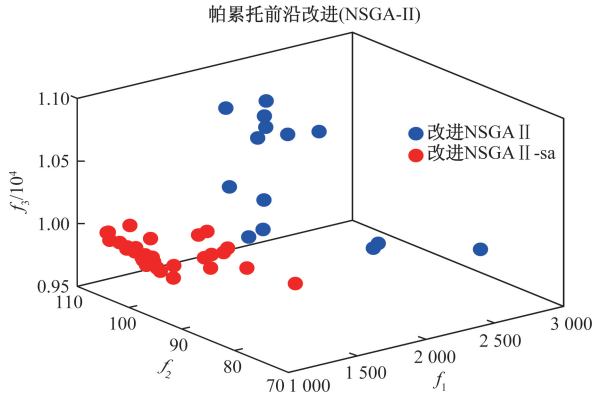


图 8 帕累托最优解集图

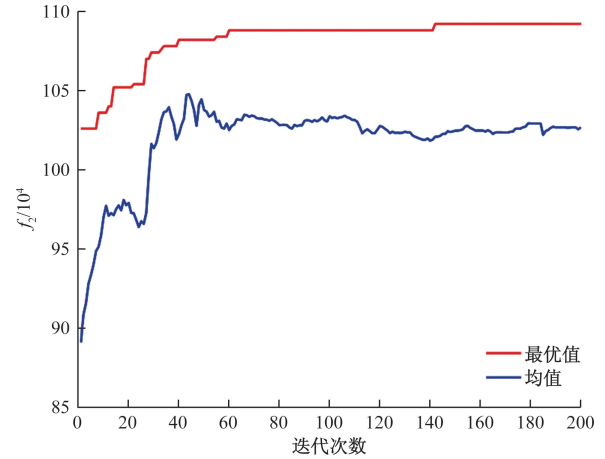


图 10 目标函数 2 迭代曲线

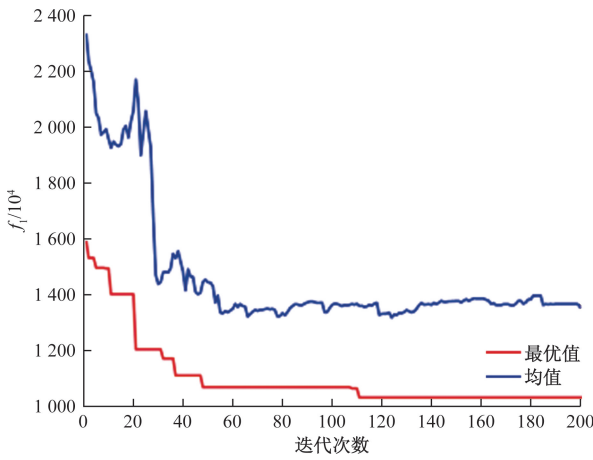


图 9 目标函数 1 迭代曲线

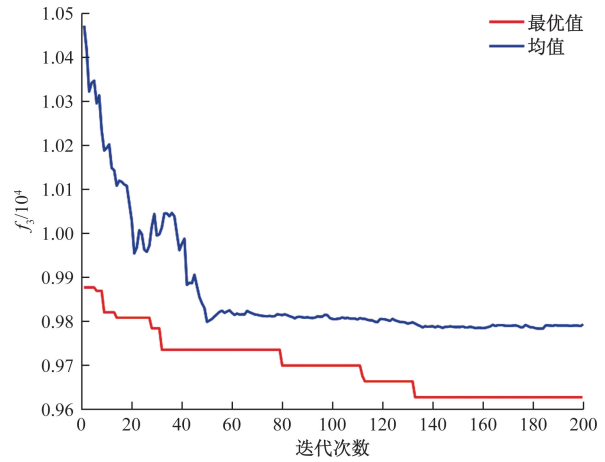


图 11 目标函数 3 迭代曲线

行数据分析,具体见表 6。可以发现使用改进算法得到优化目标的解大部分都要优于原始布局 and 传统算法得到的解。

### 3.3.3 优化方案评价

根据该车间的实际需求,使用层次分析法,邀请专家和车间技术人员对各指标的重要性打分,构造对比矩阵  $A$ ,如式(36)所示。经过计算、归一化得

到特征向量  $W=[0.3275,0.4126,0.2599]^T$ ,最大特征值  $\lambda_{\max} = \sum_{i=1}^n (AW)_i/nW_i = 3.0536$ ,一致性比率  $CR = \frac{CI}{RI} = 0.0462 < 0.1$ ,故准则层对目标的一致性检验通过。

表 6 备选布局优化方案解集

方案	非支配解集	目标函数 1	目标函数 2	目标函数 3	
		2 208.653	75.4	11 932.79	
传统算法	a	8,11,7,12,13,10,5,3,4,9,1,2,6	1 637.733	97.8	10 334.20
	b	8,9,7,11,10,5,13,2,3,1,6,4,12	2 038.844	101.4	10 642.50
	c	4,7,11,12,8,2,13,5,10,9,3,1,6	2 773.013	79.8	9 854.40
	d	8,1,10,2,13,11,3,5,6,9,7,4,12	2 245.453	86.4	9 882.00
	e	8,10,9,5,11,7,2,3,13,12,6,1,4	1 949.295	99.4	10 122.48
改进算法	f	5,3,11,8,13,1,4,10,9,12,6,2,7	1 034.263	97.2	9 894.10
	g	5,3,11,8,4,1,10,13,9,2,6,7,12	1 351.029	109.2	9 605.60
	h	5,3,11,1,9,10,4,8,13,12,6,7,2	1 849.028	90.8	9 628.02
	i	5,3,4,8,13,1,9,10,11,2,6,7,12	1 220.181	100.6	9 748.56
	j	5,3,11,8,4,1,13,10,9,2,12,6,7	1 166.709	103.4	9 845.20
	k	1,3,11,5,13,4,10,9,8,2,7,6,12	1 584.877	100.0	9 664.08

$$A = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 2 \\ 1 & 0.5 & 1 \end{bmatrix} \quad (36)$$

$$B_1 = \begin{bmatrix} 1 & 3 & 4 & 3 & 2 & 2 \\ 0.33 & 1 & 5 & 4 & 3 & 3 \\ 0.25 & 0.2 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 0.33 & 0.25 & 1 & 1 & 0.5 & 1 \\ 0.5 & 0.33 & 1 & 2 & 1 & 2 \\ 0.5 & 0.33 & 1 & 1 & 0.5 & 1 \end{bmatrix} \quad (37)$$

$$B_2 = \begin{bmatrix} 1 & 0.5 & 1 & 2 & 0.5 & 1 \\ 2 & 1 & 3 & 2 & 3 & 2 \\ 1 & 0.33 & 1 & 3 & 2 & 1 \\ 0.5 & 0.5 & 0.33 & 1 & 0.5 & 1 \\ 2 & 0.33 & 0.5 & 2 & 1 & 2 \\ 1 & 0.5 & 1 & 1 & 0.5 & 1 \end{bmatrix} \quad (38)$$

$$B_3 = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 0.5 & 2 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 3 & 2 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 0.5 & 2 & 1 \\ 2 & 0.33 & 2 & 1 & 2 & 2 \\ 0.5 & 0.5 & 0.5 & 0.5 & 1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 0.5 & 1 & 1 \end{bmatrix} \quad (39)$$

构造判断矩阵如式(37)~式(39)所示。经计算上述3个矩阵均为一致阵,CI值分别为0.072 2、0.076 5、0.080 2,当n=6时,RI=1.24,故CR值为0.057 3、0.060 7、0.063 7均小于0.1,通过一致性检验。使用层次分析法得到方案层的总排序的权值表7,经一致性比率计算见式(40),通过检验。从表7中可以看到方案g的权重最大,故选择方案g作为最终布局优化方案,通过MATLAB输出的布局图如图12所示。

$$CR = \frac{\sum_{j=1}^m a_j CI_j}{\sum_{j=1}^m a_j RI_j} = 0.062 0 < 0.1 \quad (40)$$

表7 方案层总排序权值

目标方案	物料搬运总成本 $f_1$	非物流关系 $f_2$	面积利用率 $f_3$	方案层总排序权值
	0.327 5	0.412 6	0.259 9	
方案f	0.342 4	0.133 2	0.154 4	0.207 2
方案g	0.278 5	0.317 0	0.238 9	0.284 1
方案h	0.081 8	0.177 4	0.154 4	0.140 1
方案i	0.078 4	0.090 1	0.216 4	0.119 1
方案j	0.127 7	0.163 3	0.096 5	0.134 3
方案k	0.091 1	0.119 0	0.139 3	0.115 1
CI	0.072 2	0.076 5	0.080 2	—
CR	0.057 3	0.060 7	0.063 7	—

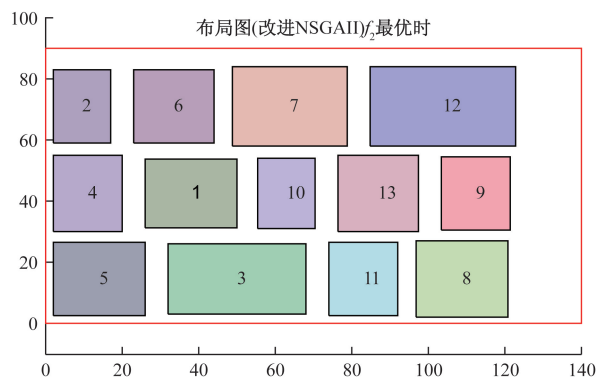


图12 MATLAB输出方案g布局图

### 3.3.4 优化结果及对比

经过对方案g微调并对各作业单位内部的设备进行布置和标注名称,得到最终优化方案布局图如图13所示,将优化前后的结果进行对比分析,见表8。

表8 车间布局优化效果对比

参数	优化前	优化后	优化率/%
物料搬运总成本/千元	2 208.653	1 351.029	38.83
非物流关系/m <sup>2</sup>	75.4	109.2	44.83
车间面积利用率	11 932.79	9 605.6	19.50

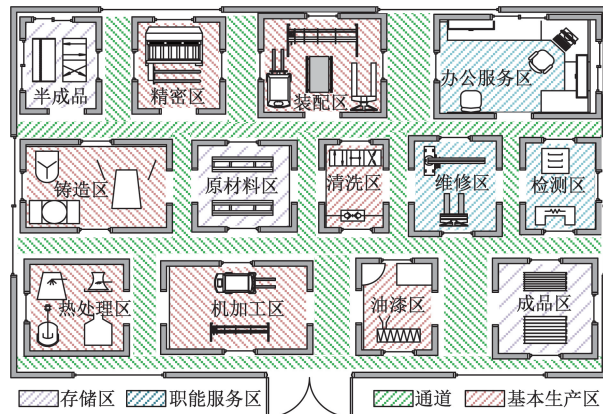


图13 最终优化方案布局图

## 4 结论

通过将SLP方法与改进的NSGA-II算法结合对KF公司通用阀车间布局进行优化,提出了一个系统性的优化流程,弥补了单独使用各方法的不足。与以往研究车间布局优化问题的角度不同,建立考虑车间内部物流交叉影响下的多目标车间布局优化模型,并设计了一种改进的NSGA-II算法来对该模型进行求解,得到如下结论。

(1)在对车间布局优化问题进行建模时将最小化物料搬运成本设置为优化目标之一,并考虑了车

间中物料的顺、逆流动和物流交叉对其的影响,经优化使得该车间的物料搬运成本减少了 38.83%。

(2)运用 SLP 方法对车间中各作业单位进行物流关系、非物流关系、综合关系分析得到初步布局优化方案,并将其编码后引入改进的 NSGA-II 算法的初始种群中,保证了初始种群的多样性。

(3)把模拟退火算法加入改进的 NSGA-II 算法中,克服了传统算法在后期局部搜索能力差的缺陷。最后通过一个具体实例来进行布局优化前后的结果对比分析,算例结果为非物流关系增加了 44.83%,车间面积利用率优化了 19.50%,验证了通用阀车间布局优化方案有效性。

### 参考文献

- [1] 张远庆,吕明奎,刘瑞德,等. 区域式 AGV 在螺栓智能生产车间布局及应用[J]. 科技和产业, 2024, 24(6): 220-225.
- [2] 姜金德,崔晓东,王荣,等. 基于 SLP 和 VSM 分析的 F 公司车间效率优化研究[J/OL]. 机械设计与制造, 1-6 [2024-12-20]. <https://doi.org/10.19356/j.cnki.1001-3997.20240913.003>.
- [3] 周估睿,张新艳. 运用系统布局规划方法改善电动机维修车间布局[J]. 上海电机学院学报, 2019, 22(2): 115-119.
- [4] 彭文明,金炎君,许丽丽,等. 面向中小型机械制造企业的智能工厂设计方法及应用[J/OL]. 机电工程, 1-13 [2024-12-20]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/33.1088.TH.20241010.2026.004.html>.
- [5] 高泽. 基于 eM-Plant 的某粉末冶金车间生产线平衡和厂区布局优化研究[J]. 粉末冶金工业, 2022, 32(4): 89-100.
- [6] 郑广辉,刘鹏,钱叶昶,等. 基于 SLP 的复兴号动车组关键部件生产车间布局优化研究[J]. 铁道机车车辆, 2023, 43(4): 59-64.
- [7] 孙凯,刘祥. 基于蚁群-遗传混合算法的设备布局优化方法[J]. 系统工程理论与实践, 2019, 39(10): 2581-2589.
- [8] 刘冠权,沈汝清,潘丹丹. 基于改进和声搜索算法的车间布局优化[J]. 武汉理工大学学报(信息与管理工程版), 2023, 45(5): 704-710.
- [9] 郭姣,段颖豪,郭飞宇. 基于 SLP 的电机制造厂生产车间布局优化及仿真[J]. 物流技术, 2023, 42(10): 85-91.
- [10] 罗灯兰,周俊,李奥. 基于 SLP 和 SHA 的多品种小批量生产车间设备布局优化[J/OL]. 重庆工商大学学报(自然科学版): 1-10 [2024-12-22]. <http://kns.cnki.net/kcms/detail/50.1155.N.20230616.0902.002.html>.
- [11] 黄鹏鹏,魏春珊,郑雅琳. 基于 SLP 和 AHP 的输液器组装车间布局优化及仿真[J]. 制造业自动化, 2022, 44(4): 17-21.
- [12] 姚明钊,陈鹏飞,裴小兵. 基于 SLP 和改进遗传算法优化 C 企业车间布局[J]. 有色金属工程, 2023, 13(9): 99-109.
- [13] 张梦杨,朱玉杰,张许英龙. 基于系统布置设计与混合算法的锻造厂车间布局优化[J]. 科学技术与工程, 2024, 24(1): 170-176.
- [14] 邱慧聪. 基于粒子群算法的车间设施布局优化[J]. 科技和产业, 2024, 24(23): 193-197.
- [15] 田世海,杨文蕊,王春梦. 基于 VSM-ISM 汽车空调铝扁管生产线优化及仿真[J]. 工业工程与管理, 2023, 28(2): 79-89.

## Optimization of KF Company's General Valve Workshop Layout Based on SLP and NSGA-II

CHEN Hongxin

(School of Mathematics and Statistics, Anyang Normal University, Anyang 455000, Henan, China)

**Abstract:** A layout optimization model was constructed to address the issues of multiple material handling intersections, high handling costs, and low area utilization caused by the unreasonable layout of KF Company's general valve workshop. The model considers the direction of material flow in both directions and aims to minimize material handling costs, maximize non logistics relationships, and workshop area utilization. The system layout planning (SLP) method was used to optimize the workshop layout and obtain a preliminary layout plan. Based on the traditional nondominated sorting genetic algorithm II(NSGA-II), the initial layout plan obtained by the SLP method was encoded as part of the initial population to improve the diversity of the algorithm. The adaptive control strategy was introduced into the crossover and mutation operations, and the simulated annealing algorithm was added. Finally, the analytic hierarchy process(AHP) was used to optimize the workshop layout. Process, AHP make optimization decisions on a set of Pareto optimal solutions obtained by the algorithm. The results show that this method can reduce material handling costs by 38.83%, increase non logistics relationships by 44.83%, and optimize workshop area utilization by 19.50%, demonstrating the effectiveness of the model in workshop layout optimization.

**Keywords:** workshop layout; multi objective optimization; NSGA-II(nondominated sorting genetic algorithm II); SLP(system layout planning)