

基于改进遗传算法的预制构件钢筋车间布局优化研究

林 峰

(上海隧道工程有限公司构件分公司, 上海 200127)

摘要: 随着行业的快速发展, 车间布局与预制构件企业的生产成本、经营能力、核心竞争力密切相关, 合理的车间布局, 不仅可以降低企业的运营成本, 还可以提高产品生产效率、设施使用率。本文以钢筋骨架成型中心的运输成本和时间成本的最小化为目标构建数学模型, 利用遗传算法进行求解实现了车间布局的优化。对于未来预制构件大规模制造企业优化车间布局具有一定的借鉴意义。

关键词: 车间布局; 遗传算法; 运营成本

中图分类号: TP27 **文献标志码:** A

1 引言

随着新一轮《中国制造 2025》制造强国战略, 工业化与信息化的两化融合、智能制造、工业 4.0 与互联网 + 制造等理念的提出, 预制构件行业与新型工业化正处于深度融合的磨合阶段, 新工业化技术和理念将推动行业跨越式发展^[1]。数字化和智能化技术不仅推进预制构件产线有效地提升设备生产效率, 降低人力资源需求, 提升产品成品质量, 有利于企业实现成本监控、提升经济效益。在新一轮的交通建设过程中, 流水线生产模式的应用使管片生产效率得到明显提升, 但是也暴露出生产调度不合理、过程管理效率低、运营成本不受控等问题。

现阶段管片生产工艺停留在工厂化和局部机械化的阶段, 从而暴露出了生产效率低下、成本管理失效等问题,

产品质量无法得到进一步的提升与管控。目前各类前沿技术在管片生产工艺中的应用较少, 随着基于信息化控制系统与智能化生产算法的相关研究的深入, 按传统经验进行车间布局的方法将无法满足新系统与设备的效率提升, 将会成为制约新技术助力产业实现升级转型的新矛盾。

2 车间布局概述

2.1 车间布局问题

车间布局优化问题从数学角度来说是一种几何图形进行组合装箱的问题, 而车间布局类似于图形布局, 但是在两者之间也存在一定的区别。平面图形布局一般是在一定约束的条件下, 实现最小面积, 各图形都是独立的个体, 不存在影响关系。而车间布局工况下, 不同区域是存在明显的物流和非物流关系。因此, 在车间布局问题的建模过

程中除了要考虑图形实体的约束条件外，包括区域不能重叠、各区域面积和不能大于区域的总面积等^[2]。

因此钢筋成型中心的车间布局优化是一种多约束、多目标的优化问题，既包括费用成本的降低，也包括时间成本的降低，是实现生产效率最大化的重要支撑。在满足约束条件下，不同区域的布局影响着产品的生产效率和运营成本，需要进行全面地分析和求解，才能达到帕累托最优的状态。

2.2 钢筋骨架成型流程

钢筋骨架成型的管理流程：由技术部门审定项目需求后，生产部门根据需求对钢筋骨架进行翻样，再交至

技术部门进行审定；翻样经审定后，进行产品生产技术交底，同时确定生产工艺流程，样品试制并交付至技术部门进行审定，审定符合设计要求后即可实现批量生产；批量生产过程中由生产部门实施过程管理，生产部门将生产过程中的设备、材料与进度情况反馈至其他相关职能部门。

生产过程中主要涉及的作业区域包括原材料堆放区、半成品加工区、焊接成型区及成品堆放区。不同的原材料按照一定的配比规则进行加工，制成各类半成品，再经过焊接成型的骨架成品堆放于成品堆放区。钢筋骨架生产工艺流程如图 1 所示。

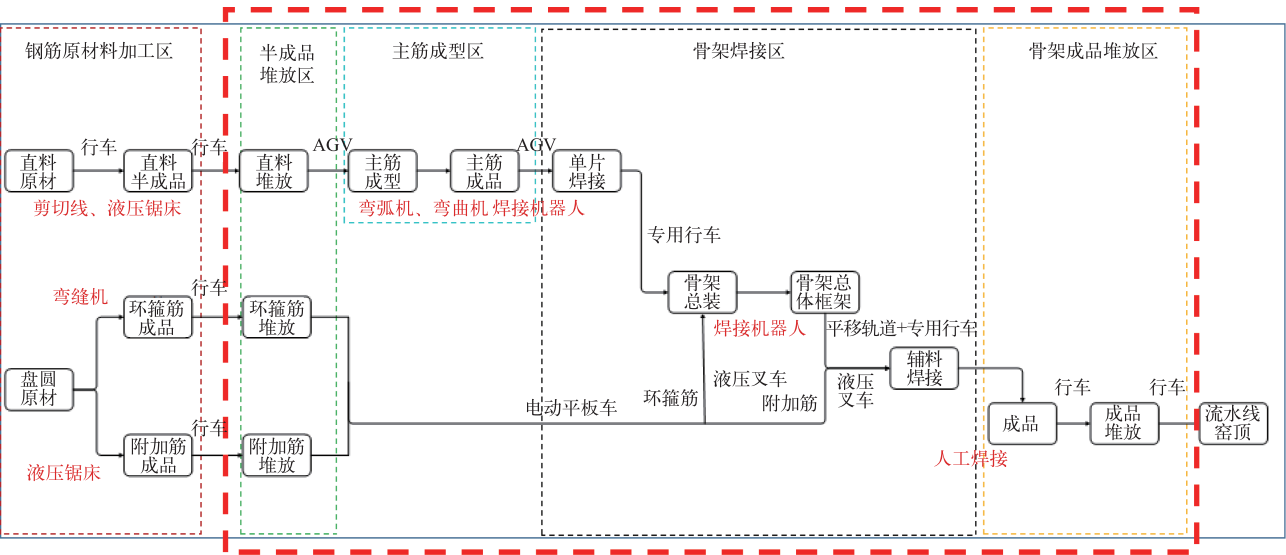


图 1 钢筋骨架生产工艺流程

2.3 骨架成型区域初始布置

钢筋骨架成型车间实际有效面积约为 16 986m²，其中长约 298m，宽约 57m，为单层生产结构，共布置了 19 个区域，涵盖了从存储、切断、弯曲、总装、焊接、入库和检验的整个生产流程。不同区域之间的编号及估算面积（均已包含人行通道面积）见表 1。在设施布置时，需要综合考虑到各区域面积及总的规划面积。

表 1 车间各区域功能及面积情况表

编号	区域名称	面积 /m ²	用途
1	直料原材切断区	750	原料加工
2	盘圆小料成型区	750	原料加工
3	直料原材暂存区	875	原料存放
4	盘圆原材暂存区	875	原料存放

(续)

编号	区域名称	面积 /m ²	用途
5	直料成品区	450	半成品暂存
6	弯曲成型区	250	半成品加工
7	主筋半成品堆放区	750	半成品暂存
8	骨架焊接成型区	1 250	成品加工
9	环箍成品区	1 125	半成品暂存
10	环箍直料暂存区	300	半成品暂存
11	环箍成型区	300	半成品加工
12	小料堆放区	400	半成品暂存
13	骨架堆放区	2 000	成品暂存
14	骨架堆放区	2 000	成品暂存
15	骨架吊装井	500	成品出库

(续)

编号	区域名称	面积 /m ²	用途
16	钢筋吊装井	500	原料进库
17	维修间	75	维修配件存放
18	气瓶间	75	配件存放
19	办公室	300	管理人员办公
20	合计	13 525	

根据 SLP 优化理论, 通过物流与非物流关系量化分析确定不同区域之间的综合评价指标后, 对各区域的布置顺序按综合得分从高到低进行优先排序。由于成型中心生产区域的总体面积是一定的, 因此在绘制面积相关图时, 总的生产区域矩形保持不变, 而不同作业单位的面积可进行长和宽进行适当的调整, 最终得到中心优化布局后的初始方案如图 2 所示。

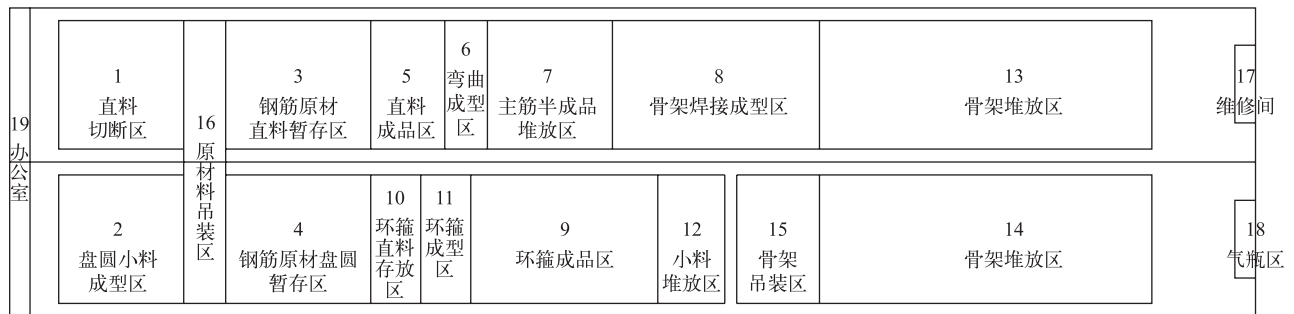


图 2 SLP 法中心布局方案

3 改进算法模型构建

3.1 设施布局模型

(1) 设施布局自动换跨 本文中心是一个双跨的钢结构区域, 区域只能布置在单跨内, 不会跨越钢结构柱, 基于上述情况可以实现对各区域的分跨排布, 在设施宽度的设计上定义为不大于该跨的宽度。各非固定区域布置方式按从左往右的顺序进行布置, 具体如下:

- 1) 各固定区域优先进行布置;
- 2) 综合评价最高的区域优先布置在某一跨, 并在可用区域的中线位置;
- 3) 评价第二的区域, 将其布置在车间的某一跨内, 如果该跨内没有其他区域, 则沿着区域边界布置, 如果有区域, 则沿着上一个区域的边缘向右进行布置, 如图 3 所示;

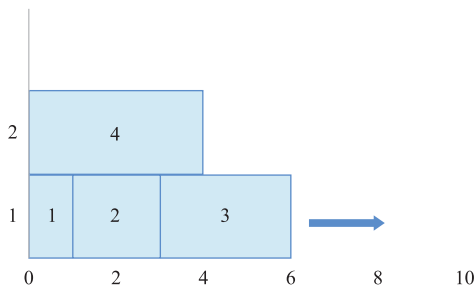


图 3 区域布置顺序示意图

- 4) 重复以上步骤, 直至全部单位放置完毕。

(2) 模型基础设定 针对中心基本条件, 中心内布局问题可以当做是两跨并行的布局优化问题, 为实现该模型的布局优化, 要对本中心及各区域进行基础信息的设定:

- 1) 将中心简化为矩形区域, 且固定长和宽;
- 2) 将坐标系原点设定在中心的左下角, X 轴为长度方向, Y 轴为宽度方向;
- 3) 所有区域设定在同一平面上, 不发生空间布置;
- 4) 所有区域均定义为矩形, 且各边与 X 轴、 Y 轴平行;
- 5) 各区域之间的距离计算均以直角坐标系作为依据;
- 6) 各区域的长宽均固定不变, 每行区域中心点与 Y 轴坐标相同;
- 7) 同规格的运输设施的所有参数近似一致。

基于上述的基础信息设定, 钢筋成型中心的布局坐标的实现如图 4 所示。

3.2 模型优化目标

假设中心各区域布局的一个方案为 X , 区域数量为 N , 非固定区域数为 n , 其中 i 和 j 为该方案中的区域。单位 i 到单位 j 的绝对距离用 P_{ij} 表示, 单位 i 到单位 j 的物流频率用 C_{ij} 表示, 单位 i 到单位 j 的单次物流量用 C_{ij} 表示, 单位到单位的单位运费用 F_{ij} 表示, $i, j=1, 2, \dots, N$ 。

物料的绝对距离的表达式为

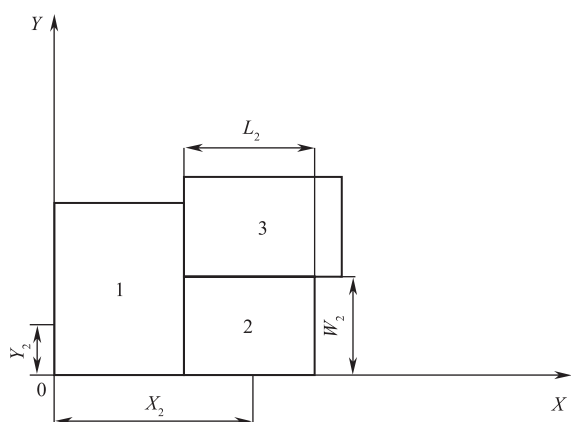


图4 区域坐标示意图

$$D_{ij} = |x_i - x_j| + |y_i - y_j| \quad (1)$$

费用成本是单位运费、运输频率、单位运输量及运输距离的乘积，表达式为

$$f_1 = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N C_{ij} P_{ij} F_{ij} D_{ij} \quad (2)$$

时间成本是运输距离与单位距离运输时间的乘积，表达式为

$$f_2 = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N T_{ij} D_{ij} \quad (3)$$

为便于模型进行计算求解，需要将多目标函数转化为单目标函数。由于运输费用成本和运输时间成本的量纲不同，因此先要对两者进行标准化处理。最终目标函数的表达式为

$$\min f = \alpha_1 f_1 + \alpha_2 f_2 = \frac{\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N C_{ij} P_{ij} F_{ij} D_{ij}}{\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N C_{ij} P_{ij} F_{ij} D_{\max}} + \frac{\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N T_{ij} D_{ij}}{\sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N T_{ij} D_{\max}} \quad (4)$$

3.3 模型约束条件

根据 SLP 法得到车间布局方案，在模型计算中还必须满足一定的约束条件。具体约束条件包括：

1) 将中心划分为 M 行，每一行设施的纵坐标相同；
2) 由固定设施将其划分为 K 个小区域，每个小区域的长度为 $\bar{L}_k$ ，设施数分别为 n_k ， $k=1, 2, \dots, K$ ，为表述方便，规定 $n_0=0$ ；

3) 每个小区域的长度满足约束

$$\sum_{i=n_{k-1}+1}^{n_k} L_i \leq \bar{L}_k, k=1, 2, 3, \dots, K \quad (5)$$

4) 区域不能重叠，其中 $\bar{W}$ 为中心总宽度，如果区域 i

和 j 位于同一行，

$$|x_i - x_j| \geq \frac{1}{2}(L_i + L_j) \quad (6)$$

如果区域 i 在 m 行，

$$y_i = \left(m - \frac{1}{2}\right) \frac{\bar{W}}{M} \quad (7)$$

5) 设施间横向边缘尽量紧挨；

6) 其他约束见遗传算法模型。

4 遗传算法求解

4.1 算法编码

在使用遗传算法对本文的目标函数进行求解的过程中，最重要的一步是对遗传基因型的编码形式。本文模型采用整数排列编码的方式，所有工作单位都有自己的数字编号，每一组基因编码就是一个染色体，即代表一种布局方式。

4.2 算法解码

对本文的基因进行解码，就是各基因所对应区域实际的布局，将染色体基因转换成区域的布置图，其解码过程是在模型优化完成以后，对最优解再进行的过程。

4.3 适应度函数

本文模型的适应度函数即是模型的最终优化目标，在于获取函数的最小值，因此在通过适应度函数来计算每个染色体的适应度值时，适应度值越小就表示染色体代表的布局方案越符合要求。

4.4 种群初始化

在本文模型的研究过程中，模型结果的计算速度不产生不利影响，而全局最优解的意义更重要。因此在本模型进行实践过程中，为了适当提高模型的初始化种群的设定值，特此将按 SLP 法布置的方案作为初始化种群。

4.5 复制、交叉与变异

复制是指在目前种群中选择适应度的个体，使其越可能成为父代，并繁殖出下一代，本文根据染色体的适应度采用的是赌轮盘方式挑选。

交叉是指在种群中筛选出两个父代个体进行两两组合，并以设定的交叉概率，交换它们之间的部分染色体，以此生成新的子代，本文模型是通过随机交叉染色体的部分基因，并形成新的子代染色体。

变异是指在染色体进行遗传迭代过程中，其基因发

生变化的情况，具体指对染色体的基因进行替换操作，从而产生新的个体，本文模型是以一定的概率随机改变其部分编码来实现变异。

4.6 终止准则

在遗传算法中一般终止准则是设定最大迭代次数，通过限定种群的规模来进行算法运行的终止，即当算法中的迭代次数等于最大的迭代次数时，则终止本次的优化过程，输出优化解集。

5 案例应用级验证

5.1 案例应用参数设定

在遗传算法中种群规模大小一般设置为 50~500，而由于本文的模型数字计算量较大，为了避免模型过早陷入收敛的情况，因此将模型的种群大小设定为 1 000；交叉概率 p_c 一般取值范围在 0.4~0.99 之间，本次模型取 0.9；变异概率 p_m 一般为 0.01~0.2，本次模型取 0.2；遗传代数 $\max$ 一般取 100~5000，考虑到本次模型计算过程复杂同时现有电脑的计算性能较好，因此取为 10 000。

5.2 数据统计及录入

根据成型中心的最大日生产能力 20 环/天（暂估钢筋用量约 75t/天），对各区域间物流频率取车间生产效率最高时的设施间物流频率，单位为次/每天，详细情况如图 5 所示。

工序	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
1	0	0	16	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	0	0	0	6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	15	0	0	0	0
4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	6	0	0	0
5	24	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6	0	0	0	0	12	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
7	0	0	0	0	0	24	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
8	0	0	0	0	0	160	0	0	0	24	0	0	0	0	0	0	8	0	0
9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	15	0	0	0	0	0	0	0	0
10	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
12	0	24	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
13	0	0	0	0	0	0	0	20	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
14	0	0	0	0	0	0	0	20	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
15	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	20	20	0	0	0	0	0	0
16	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
17	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
18	0	0	0	0	0	0	8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
19	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

图 5 钢筋成型中生产工序物流频率表

根据日产量的生产能力，对各区域间单次物流量以车间采用的不同运输工具最大运输量进行估算，单位为 t/次，详细情况如图 6 所示。

工序	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
1	0	0	4.2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	0	0	0	2.1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	4.2	0	0	0
4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	2.1	0	0	0
5	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6	0	0	0	0	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
7	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
8	0	0	0	0	0	0	0.3	0	3.2	0	0	0.7	0	0	0	0	0	0.5	0
9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1.1	0	0	0	0	0	0	0	0
10	4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
12	0	0.7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
13	0	0	0	0	0	0	0	1.8	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
14	0	0	0	0	0	0	0	1.7	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
15	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1.8	1.7	0	0	0	0	0
16	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
17	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
18	0	0	0	0	0	0	0	0.5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
19	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

图 6 钢筋成型中心生产设施物流量统计表

由于不同单元之间采用的运输工具不同，因此根据不同单元之间采用的运输工具统一按其平均运输速度进行估算，设定 AGV 运输速度为 50m/min，行车为 30m/min，人工推车为 20m/min，电动叉车为 30m/min。具体各区域的运输速度统计如图 7 所示。

工序	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
1	0	0	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	0	0	0	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	0	0	0
4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	0	0	0
5	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6	0	0	0	0	5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
7	0	0	0	0	0	5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
8	0	0	0	0	0	0	2	0	3	0	0	5	0	0	0	0	0	2	0
9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	0	0	0	0	0	0	0	0
10	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0
12	0	5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
13	0	0	0	0	0	0	0	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
14	0	0	0	0	0	0	0	3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
15	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	3	3	0	0	0	0	0
16	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
17	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
18	0	0	0	0	0	0	0	2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
19	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

图 7 钢筋成型中心生产设施物流速度统计表

由于不同区域之间采用的不同运输工具的成本摊销不同，因此根据各区域所采用运输工具的单次运输摊销作为单次运输成本进行统计计算，同类工具的运输成本按统一数据进行估算，具体如图 8 所示。

5.3 结论验证与评价

通过 MATLAB2021b 编写遗传算法程序，并将以上数据及相关参数带入进行运算，运算过程如图 9 所示。

从图 10 可以看到针对我们的双优化目标，在红点处达到局部最优解，其中适应度函数 FIT1 达到最优 35 841.33，适应度函数 FIT2 达到最优值 387.766 7。算



法运行到 7 600 代左右接近收敛，可以认为达到最优解，解为 0.300 53。

工序	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
1	0	0	1.5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	0	0	0	1.5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1.5	0	0	0	0
4	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1.5	0	0	0
5	1.2	0	0	0	3.6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6	0	0	0	0	0	3.6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
7	0	0	0	0	0	5	0.6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
8	0	0	0	0	0	0	2	0	2.4	0	0	3.6	0	0	0	0	0	0.3	0
9	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1.2	0	0	0	0	0	0	0	0	0
10	1.2	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
11	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1.2	0	0	0	0	0	0	0	0	0
12	0	3.6	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
13	0	0	0	0	0	0	0	1.5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
14	0	0	0	0	0	0	0	1.5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
15	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1.5	1.5	0	0	0	0	0	0
16	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
17	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
18	0	0	0	0	0	0	0	0.3	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
19	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

图 8 钢筋成型中心生产设施物流摊销成本统计表

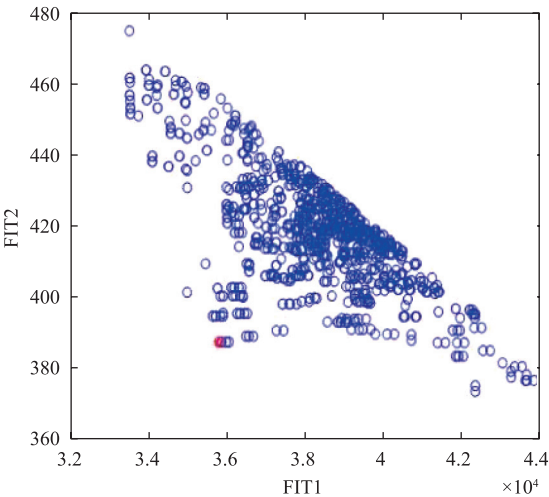


图 9 优化模型解空间

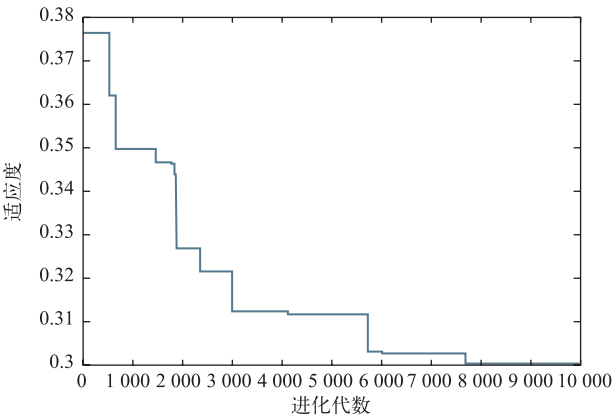


图 10 适应度进化曲线

两方案之间的对比见表 2，在费用成本方面，新方案比原方案降低了 19.6%，在时间成本方面新方案比原方案降低了 15.6%。

表 2 布局优化前后成本对比表

	费用成本	时间成本	综合运营成本
初始布局	44 571.69	459.567	0.364 3
优化布局	35 841.33	387.767	0.300 5

在考虑费用成本与时间成本对综合运营成本的权重影响相同的条件下，新方案比原方案降低了 17.5%，从本文的模型优化过程中，我们还可以发现在同样的车间布局下时间成本和费用成本之间存在着一定的相关性。

参考文献

[1] 杜珂，张凯，杨秀文. 预制构件行业的发展现状 [J]. 现代制造技术与装备，2019 (10) : 200-202.

[2] 杨涛. 基于 SLP 和遗传算法的 CR 公司车间布局优化研究 [D]. 北京：北京交通大学，2019.

[3] 袁奥，赵有华. 基于遗传算法的车间设施布局优化研究 [J]. 现代机械，2021 (3) : 43-46.

[4] 陈小波，王中原，梁玉美. 基于遗传算法的混凝土预制构件生产车间布局优化研究 [J]. 工程管理学报，2019，33 (3) : 36-41.

[5] 郭红，杨建军. 基于改进遗传算法的多行布置车间布局优化 [J]. 制造业自动化，2015，37 (4) : 24-26.

收稿日期：2024-09-11