

文章编号:1001-4098(2021)05-0143-09

# 基于人工蜂群算法的预制件厂平面布局优化<sup>\*</sup>

汪和平<sup>1</sup>, 杨子沫<sup>1</sup>, 陈梦凯<sup>1,2</sup>

(1. 安徽工业大学 管理科学与工程学院, 安徽 马鞍山 243000;

2. 重庆大学 管理科学与房地产学院, 重庆 400044)

**摘 要:**装配式建筑是由预制构件在工地装配而成的一种新型建筑,其中构件生产是其建造过程中的一个重要环节。对于预制构件制造企业而言,其工厂内部的设施布局情况会直接影响到构件生产过程的效率和质量。针对以往预制件厂依靠人工经验为主进行布局而导致的物料总搬运路线过长、生产作业单元布局不合理等问题,本文首先以物料总搬运距离最小和布局面积利用率最大为优化目标,建立预制件厂平面布局优化模型;其次,选择人工蜂群算法对模型进行求解。在初始解生成阶段,运用 SLP 方法获得初始布局作为部分初始种群,增加了种群的多样性。在引领蜂阶段,结合所研究的问题设计了移动、转向、交换三种算子进行邻域搜索。在追随蜂阶段融入精英策略进行更新;最后以某预制件厂的平面布局问题为例检验模型和算法的适用性。

**关键词:**预制件厂;布局优化;SLP;人工蜂群算法

**中图分类号:**TU741 **文献标识码:**A

近年来,以安全、绿色环保、建设效率高等优点著称的装配式建筑逐渐兴起,但粗放的生产管理模式带来的高额生产成本成为其在我国发展滞后的主要因素。因此,如何从预制件生产的各个环节降低成本、提高生产效率成为了当前的研究热点。相关研究显示,企业物料搬运成本约占产品总生产成本的 20%—50%<sup>[1]</sup>,因此,规划合理的生产布局方案能有效的提高物料搬运效率,降低搬运成本,进而帮助企业更加高效的进行生产。从现实情况来看,预制构件厂平面布局往往根据个人经验进行规划,而预制构件的生产过程通常包括多道工序,其中会涉及沙石、水泥、钢筋和一些粉煤灰添加剂、模具、预制构件等原材料、设备的调运。而传统上经验为主的布局方式极易因生产单元位置关系设置不合理,增加非必要的搬运成本,造成物流通路线堵塞,进而影响各个环节的生产进度。因此,对预制构件厂的生产设施布局进行优化是十分必要的。

目前,布局优化的相关研究主要集中于一般制造业。国内外学者主要从模型构建和求解方法上对一般制造业

的车间布局优化问题展开了相关研究并取得一系列成果。Pourhassan 等<sup>[2]</sup>针对车间的动态布局问题进行研究,建立了物料搬运量和搬运成本最小的双目标模型。Lenin 等<sup>[3]</sup>研究了多产品单列布局生产线的多目标优化问题。俞武扬等<sup>[4]</sup>针对生产多品种、小批量的单元制造系统的平面布局问题展开研究,通过建立最小化物料周转量和最大化设施面积利用率的双目标数学模型,对单元内部设施、单元间设施及单元方向三个元素同时进行优化,以求得最优单元制造系统的布局方案。陈瑾标等<sup>[5]</sup>针对带检测环节的智能制造业单元的机器摆放位置进行研究,以最小总物流强度为目标进行优化,并建立了相应的仿真模型。葛晓梅等<sup>[6]</sup>以作业单元间物料搬运费用最小和搬运时间最短为优化目标,建立车间布局多目标优化模型来求解多目标车间布局优化问题。

SLP<sup>[7]</sup>是专门用于解决平面规划问题的方法之一,国内外学者已将其广泛运用到各个领域<sup>[8-10]</sup>。然而,此方法具有一定弊端,主要表现为使用 SLP 方法时通常都是采

\* 收稿日期:2021-02-03;修订日期:2021-06-09

基金项目:国家自然科学基金资助项目(71872002);安徽省哲学社会科学规划项目(AHSKY2018D15)

作者简介:汪和平(1970-),男,安徽安庆人,安徽工业大学教授,研究方向:工程管理,工业工程;杨子沫(1999-),女,安徽滁州人,安徽工业大学研究生,研究方向:工程管理;陈梦凯(1991-),男,安徽蚌埠人,重庆大学管理科学与房地产学院博士研究生,安徽工业大学管理科学与工程学院讲师,研究方向:工程管理。

用手工操作来确定最后的布置方案,当作业单元数量较大时,这种操作方式的工作量则较大,且方案中会掺杂较多设计者的主观意见。鉴于此,众多学者将 SLP 与智能优化算法结合代替人工操作,省去了很多繁琐的步骤,使得求解效率大幅提高。例如,金淳等<sup>[11]</sup>在布局的出入口位置不确定的情况下,使用 SLP 和改进遗传算法求解物流转运中心的布局优化问题;冯芬玲等<sup>[12]</sup>结合铁路运输中心的特性,建立了相应的数学模型,并运用遗传算法求解得到了最优布局方案。贾佳等<sup>[13]</sup>基于建立人因视角下的布局优化模型,用 SLP 方法求得的初始布局方案作为遗传算法初始解,以此消除人为主观因素的影响。韩昉等<sup>[14]</sup>将遗传算法和改进的 SLP 方法结合求解 S 公司的车间布局问题。

上述文献的研究丰富了制造业车间平面布局优化的理论,也为本文的研究提供了借鉴意义。但相比一般制造厂,预制构件厂在设备空间布局和物流运输路线等方面具有自身的特点,主要表现在预制构件的尺寸较大,设施之间的物流强度大,设备占地空间大,另外运送构件的车辆体型较大。为了防止其运输路线对工厂内部物料调运路线产生干扰,需要将预制构件的堆场靠近主干道。因此现有文献的相关研究思路和方法并不完全适应,需要探讨适合预制构件厂的设施布局优化方法。

目前针对预制件厂的生产布局的研究相对较少。陈小波等<sup>[15]</sup>针对 PC 构件生产车间内物料的运输情况,建立了以时间成本和费用成本最小为目标的数学模型,并运用 NSGA-II 算法求得了最佳平面布局。Liu Y<sup>[16]</sup>等运用传统 SLP 方法对装配式预制梁厂进行手工迭代布置,得出三个车间的布置方案,最后经过评价选出最优方案。杨阿慧等<sup>[17]</sup>基于 SLP 思想对 PC 构件生产系统进行布局设计,并以预制混凝土保温外墙为例运用 Flexsim 软件对其进行仿真分析。上述文献主要针对构件生产车间的内部优化进行研究,并未考虑除生产车间之外的其他作业单元的位置关系,研究层面相对较浅,研究内容相对简单。而现实中,各类原材料和构件成品的存储、加工、生产和办公、生活等设施的设置均是构成工厂平面布局内容的重要组成部分,都应囊括在预制件厂的平面布局优化问题中。

综上,本文依据预制件厂布局的物流优化原则和紧凑性原则,结合预制件厂的生产特性,建立总物料搬运距离最小和布局面积利用率最大的双目标数学模型。在求解方法上,尝试将系统布局设计(SLP)方法与人工蜂群算法结合求解。通过本文的研究能够弥补预制构件厂平面布局优化领域相关研究的不足,为其今后的设计规划提供一定的实践参考。

## 1 工厂平面布置模型

### 1.1 构件生产作业单元功能分析

构件的生产的过程大致相同,需要经历模台清理涂

膜,安装构件对应模板,运送已加工钢筋至模台绑扎,安装 PC 构件的预埋件,浇筑并振捣混凝土,构件养护后脱模等一系列操作。上述生产工序必然会涉及到沙石、钢筋等原材料的运送、钢筋混凝土的加工、PC 构件成品的生产,因此本文从宏观的角度对预制构件生产过程的涉及到的各类存储、生产、生活、办公作业单元之间的关系进行分析,形成了图 1。

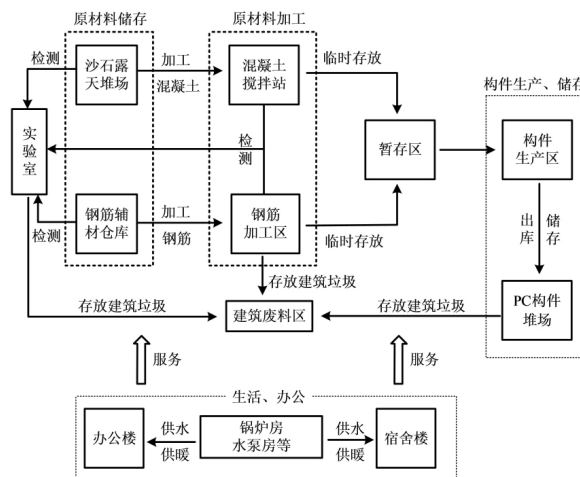


图 1 预制件厂作业单元关系图

### 1.2 问题描述

为便于数学建模,本文将工厂搬到直角坐标系中,并将其简化成长为  $L$ , 宽为  $W$  的长方形。假设本次设施布局共涉及  $m$  个矩形作业单元块,其中灰色部分为坐标已知的固定单元,其余为待布置单元,具体如图 2 所示。 $i, j$  分别代表两个待布置单元,  $i$  的长宽为  $l_i, w_i$ ,  $j$  的长宽为  $l_j, w_j$ , 其位置分别由质心坐标  $(x_i, y_i), (x_j, y_j)$  表示。假定所有作业单元的边均平行于  $x$  轴或  $y$  轴,且两作业单元之间的距离以曼哈顿距离计算,即  $d_{ij} = |x_2 - x_1| + |y_2 - y_1| = |\Delta x_{ij}| + |\Delta y_{ij}|$ 。

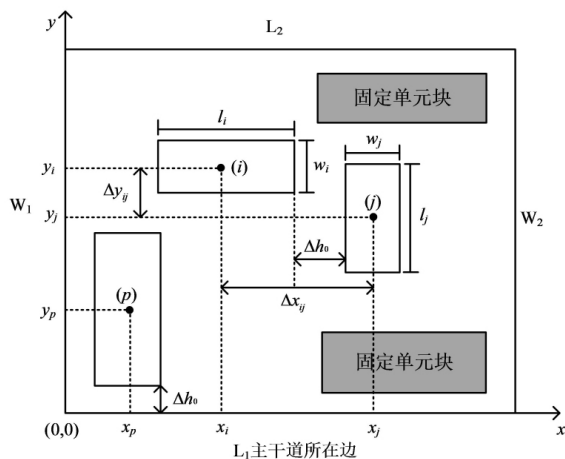


图 2 工厂布局单元块坐标图

由于预制件厂作业单元块的长宽差异较大, 考虑到单元的摆放方向可能也会对最终布局产生影响, 因此本文引入了方向变量参数  $z_i$ 。假设在预制件工厂布局时作业单元有横放和竖放 2 个摆放方向, 如图 3 所示。

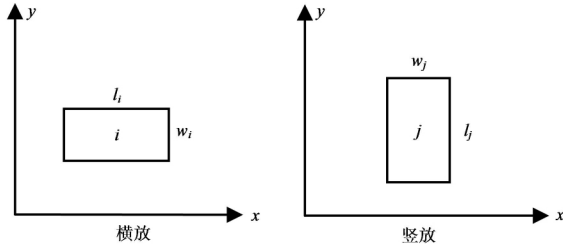


图3 单元块摆放方向图

$$z_i = \begin{cases} 1, & \text{作业单元横放} \\ 0, & \text{作业单元竖放} \end{cases} \quad (1)$$

式中,  $z_i$  为 0-1 变量, 表示第  $i$  个作业单元的摆放方向。当  $z_i = 1$  时, 代表第  $i$  个作业单元的摆放方式是横放, 当  $z_i = 0$  时, 代表第  $i$  个作业单元的摆放方式是竖放。此外,  $i$  作业单元在水平方向( $x$  轴方向)的边长  $v_i$  可用式(2)表示, 在竖直方向( $y$  轴方向)的边长  $h_i$  可用式(3)表示。

$$v_i = z_i l_i + (1 - z_i) w_i \quad (2)$$

$$h_i = (1 - z_i) l_i + z_i w_i \quad (3)$$

### 1.3 目标函数

#### (1) 总搬运距离最小化

设施规划问题实质是通过研究生产过程所涉及的相关单位的平面布局, 以达到降低工厂内的物料搬运成本的目的<sup>[18]</sup>。因此, 在设施布局时应当遵循物料流动总距离最短原则。

$$\min f_1 = \sum_{i=1}^{m-1} \sum_{j=i+1}^m d_{ij} r_{ij} \quad (4)$$

$$r_{ij} = \begin{cases} 1, & i, j \text{ 之间有物流量来往} \\ 0, & i, j \text{ 之间无物流量来往} \end{cases} \quad (5)$$

其中, 式(4)表示物料搬运总距离最小化, 式(5)为本文的 0-1 决策变量  $r_{ij}$ , 其值依据作业单元之间有无物流量来往确定,  $d_{ij}$  为  $i, j$  间的距离。

#### (2) 布局面积利用率最大化

由于土地费用的逐年提高, 在规划布局时应当充分利用布局空间, 使得布局方案满足紧凑性原则<sup>[19]</sup>。因此, 本文以最大化面积利用率作为目标函数。

$$\max f_2 = \frac{\sum_{i=1}^m s_i}{s_{\text{布}}} = \frac{\sum_{i=1}^m s_i}{l_{\text{布}} w_{\text{布}}} \quad (6)$$

$$l_{\text{布}} = \left\{ \max_{i=1}^m \left( x_i + \frac{v_i}{2} \right) - \min_{i=1}^m \left( x_i - \frac{v_i}{2} \right) \right\} \quad (7)$$

$$w_{\text{布}} = \left\{ \max_{i=1}^m \left( y_i + \frac{h_i}{2} \right) - \min_{i=1}^m \left( y_i - \frac{h_i}{2} \right) \right\} \quad (8)$$

其中,  $s_i$  为第  $i$  个作业单元的面积。  $s_{\text{布}}$  为布局结束后所占区域的总面积,  $l_{\text{布}}, w_{\text{布}}$  分别为布局区域在  $x$  轴、 $y$  轴方向上的总长。

#### (3) 总目标函数

本文综合考虑以上总搬运距离最短和布局面积利用率最大两个目标。这里为了方便计算, 将两目标函数式(4)和式(6)进行加权和量纲统一, 处理后得到总目标函数式(9)。

$$\min f = c + \mu \frac{f_1}{f_{1\max}} - (1 - \mu) f_2 \quad (9)$$

为了使得目标函数值非负, 这里引入常数  $c (c > 1)$ 。  $\mu (0 < \mu < 1)$  为目标函数  $f_1$  的权重, 具体设定可依据工厂设计者的实际需求确定。

### 1.4 约束条件

结合预制件厂实际情况, 本文设置的约束条件如下所示:

(1) 最小间隔距离约束。预制件厂内任意两作业单元除了不能在  $x$  轴和  $y$  轴方向上重合之外, 还应满足最小活动距离要求。

$$|x_j - x_i| \geq (v_i + v_j)/2 + \Delta h_{ij} \quad (10)$$

$$|y_j - y_i| \geq (h_i + h_j)/2 + \Delta h_{ij} \quad (11)$$

其中,  $\Delta h_{ij}$  为保证  $i, j$  单元间正常作业的最小间隔距离。

(2) 厂内任意作业单元之间的最大距离不得超过预制件厂厂区边界。

$$|x_j - x_i| + (v_i + v_j)/2 \leq L \quad (12)$$

$$|y_j - y_i| + (h_i + h_j)/2 \leq W \quad (13)$$

(3) 由于预制构件从向外输出的频率较高, 为了尽可能降低外运车辆路线对厂区内物料流动路线的干扰, 方便外部车辆的进出, 这里将构件堆放区  $p$  单元在工厂内的布局进行限制, 使得  $p$  单元下边界与  $L1$  边的距离始终为固定值即可。

$$y_p - \frac{h_p}{2} = \Delta h_0 \quad (14)$$

其中,  $p$  为预制构件堆放区单元,  $y_p$  为  $p$  作业单元的纵坐标,  $h_p$  为  $p$  单元竖直方向( $y$  轴方向)上的边长。  $\Delta h_0$  外部车辆进出的必要运输间距。

(4) 厂内所有作业单元坐标值均为非负值。

$$x_i \geq 0; y_i \geq 0; x_j \geq 0; y_j \geq 0 \quad (15)$$

## 2 求解平面布局问题的人工蜂群算法

### 2.1 人工蜂群算法基本原理

本文建立的数学模型属于混合整数线性规划模型, 是典型的 NP-hard 问题, 随着问题规模的增大, 求解复杂度会大幅度提高, 难以用精确解算法求解。目前很多学者在求解预制构件布局优化问题时主要以遗传算法求解为主, 尽管该算法在搜索能力和求解速度等方面取得较好的性

能,但无免费午餐定理指明不存在一个能解决所有优化问题的算法。随着人工智能的发展,出现了一些智能算法,尝试其他算法应用于预制构件布局优化问题上有一定的研究价值。

人工蜂群算法(ABC)是 Karaboga 等<sup>[20]</sup>提出的模拟人工蜂觅食行为的仿生优化算法,目前已经运用在各个领域中。人工蜂群算法相对其它算法有个明显的特点是需要设置的参数较少,操作简单,搜索效率更高<sup>[21]</sup>。而本文的平面布局优化问题相对复杂,求解时间耗时较长。因此,本文此次选择人工蜂群算法进行求解,更容易实现。

ABC 算法的基本原理如下:先生成 SN 个蜜源位置,将 SN 个引领蜂各分配一个蜜源;每个引领蜂在当前所处位置的附近展开搜索,若发现新蜜源存在,则记录下新蜜源的相关信息(位置、花粉含量);当引领蜂邻域搜索结束后,将记录下来的信息传递给蜂窝里的追随蜂。此时追随蜂选择一个蜜源位置展开领域搜寻。当引领蜂在原蜜源位置附近搜索次数达到 Limit 后,若还未发现新蜜源,则放弃当前蜜源,此时引领蜂转换成侦察蜂,随机寻找新蜜源。重复操作直至满足终止条件。

## 2.2 求解布局优化问题的设计算法

### (1) 编码方式及初始解的生成

①编码:为了让每个作业单元的位置信息和摆放方式更加直观,本文采用实数和二进制相结合的双层编码方式。如下图 4 所示,表格从左到右分别是 m 个作业单位的相关属性,上层是作业单元的质心坐标,下层是其对应作业单元的布局方式,1 代表作业单元横置,0 代表其纵置。

1	2	...	k	...	m
$(x_1, y_1)$	$(x_2, y_2)$	...	$(x_k, y_k)$	...	$(x_m, y_m)$
0	1	...	1	...	0

图 4 编码示意图

②初始解:标准人工蜂群算法的初始种群是随机生成的,种群多样性差。而 Syafaruddin 等<sup>[22]</sup>表明质量较好的初始种群有利于提高算法的搜索性能。为了提高种群的多样性,本文采用组合策略<sup>[23]</sup>产生初始解,即部分初始解基于 SLP 方法生成,部分随机生成。其中,SLP 方法的具体步骤如图 5 所示。

随机生成的方式如下:先在平面坐标图中设置固定单元的位置,其坐标、摆放方式已知且不随后续迭代而产生变化。然后以工厂左下角为起点,将随机选取的待布置作业单元按照从左至右,从下至上的顺序进行摆放。初始解产生后,判断是否满足本文约束条件,若满足则保留,否则重新生成。

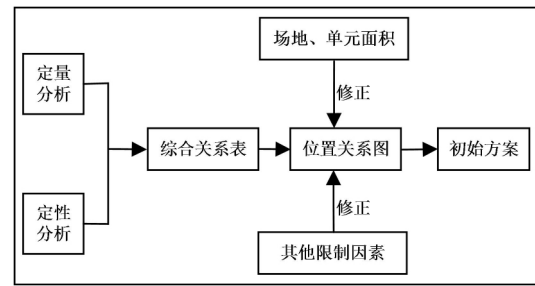


图 5 SLP 方法流程图

### (2) 引领蜂阶段

本文共设计了 3 个算子进行邻域搜索,分别为移动算子、转向算子、交换算子,且 3 个算子的选择概率相等。下面对以上算子操作进行详细说明:

①移动算子:随机选择个体中某个待布置单元,将其移动一定的距离。如本次随机选中了 2 作业单元,则将作业单元 2 在水平或竖直方向上移动一个距离  $d$ ,且保持其他作业单元的位置不变。假设在水平方向上随机移动,则实行移动算子之后的解由  $|(x_1, y_1)| (x_2, y_2) | (x_3, y_3) | \dots | (x_m, y_m) |$  变为  $|(x_1, y_1) | (x_2 + d, y_2) | (x_3, y_3) | \dots | (x_m, y_m) |$ 。

$$d = \text{rand}[-1, 1] \times \text{rand}[10, 50] \quad (16)$$

②转向算子:随机选择个体中某个待布置单元,变化其摆放方式。如本次选中了作业单元 1,则将其摆放方式由纵置变为横置,摆放信息由  $0|1|0| \dots |0|$  更新为  $1|1|0| \dots |0|$ 。

③交换算子:随机选择个体中的两个待布置单元坐标,进行位置交换。如本次随机选中作业 3 和  $m$ ,在实行交换算子操作后的解由  $|(x_1, y_1) | (x_2, y_2) | (x_3, y_3) | \dots | (x_m, y_m) |$  变为  $|(x_1, y_1) | (x_2, y_2) | (x_m, y_m) | \dots | (x_3, y_3) |$ 。

### (3) 追随蜂阶段

为了提高算法寻优效率,本文在追随蜂阶段结合精英策略进行更新。追随蜂先结合轮盘赌机制选择一个蜜源,放弃一部分较差蜜源,用最优蜜源代替,并按照引领蜂的方式进行邻域搜索,每个蜜源被选中的概率如式(17)。在追随蜂邻域搜索结束后判断其与引领蜂优劣,选择适应度较优的解进行更新。

$$P[X_i] = \frac{f[X_i]}{\sum_{i=1}^{SN} f[X_i]} \quad (17)$$

### (4) 侦察蜂阶段

当引领蜂累计搜索次数  $\text{Try} > \text{Limit}$  后还未发现更优解,此时将按照上述初始解的生成方式重新生成一个可行解参与搜索。

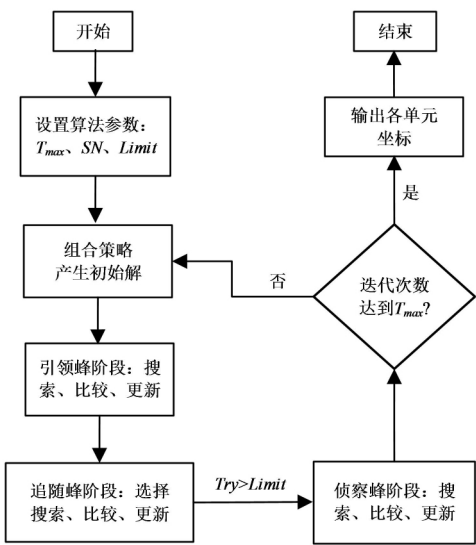


图 6 算法流程图

3 算例研究

3.1 案例背景

某公司计划在 M 市建一装配式建筑预制件厂, 占地面积约 225 亩。资料显示: 工厂建筑用地东侧为 M 市 × × 建筑科技有限公司, 周边唯一主干道位于工厂南侧, 西、北两侧为未开发用地且未通路, 具体如图 7 所示。工厂预备全部采用固定模台生产线生产, 厂内生产区内共设 3 跨, 第一、二跨区生产轻质墙板、叠合板、预制墙板等规则构件, 第三跨区主要生产楼梯、飘窗、阳台等异性构件, 建成后 PC 构件年产预计可达 5 万 t, 供江苏省及周边地区使用。



图 7 工厂周边实景图

本文将已在工厂内动工的办公楼和宿舍楼视为 2 个固定作业单元, 坐标为 (412, 29)、(409, 265), 且均为横置。其余原材料储存、构件生产、构件堆场和一些辅助生产设施视为待设置单元, 共计 12 个。资料搜集后得到各作业单元所需面积如表 1 所示。与此同时, 考虑预制件工厂内道路运输情况设置最小间隔距离矩阵  $\Delta h_{ij}$ , 具体如式 (18) 所示。

表 1 作业单元面积表

序号	作业单元	$l_i w_i$
1	生产区	160×50
2	钢筋加工区 1	60×30
3	钢筋加工区 2	60×30
4	临时存放区	80×50
5	混凝土搅拌站	60×33
6	钢筋、辅材仓库	90×55
7	露天沙石堆放区	90×74
8	PC 构件堆场	184×76
9	实验室	20×18
10	办公楼	155×38
11	宿舍楼	162×49
12	锅炉房	20×18
13	水泵房	20×18
14	废料堆场	33×15

3.2 SLP 分析获得部分初始解

依据 SLP 方法的步骤, 将工厂提供的预测日均物流量划分为 A、E、I、O、U 5 个物流量等级, 形成了定量分析表。在定性因素方面, 参考相关论文的研究成果, 综合考虑噪音、灰尘、工艺流程、管理、运输等 6 个因素的影响, 将各作业单元之间的密切度划分为 A、E、I、O、U、X 6 个等级, 形成了定性分析表, 具体如图 8、图 9。

$$\Delta h_{ij} = \begin{bmatrix} 0 & 8 & 8 & 8 & 10 & 8 & 8 & 10 & 8 & 20 & 20 & 0 & 0 & 8 \\ 8 & 0 & 0 & 8 & 10 & 8 & 8 & 10 & 8 & 20 & 20 & 0 & 0 & 8 \\ 8 & 0 & 0 & 8 & 10 & 8 & 8 & 10 & 8 & 20 & 20 & 0 & 0 & 8 \\ 8 & 8 & 8 & 0 & 10 & 8 & 8 & 10 & 8 & 20 & 20 & 0 & 0 & 8 \\ 10 & 10 & 10 & 10 & 0 & 8 & 8 & 10 & 8 & 20 & 20 & 0 & 0 & 8 \\ 8 & 8 & 8 & 8 & 8 & 0 & 8 & 10 & 0 & 8 & 8 & 0 & 0 & 8 \\ 8 & 8 & 8 & 8 & 8 & 8 & 0 & 10 & 8 & 8 & 8 & 0 & 0 & 8 \\ 10 & 10 & 10 & 10 & 10 & 10 & 10 & 0 & 8 & 8 & 8 & 0 & 0 & 8 \\ 8 & 8 & 8 & 8 & 8 & 8 & 8 & 8 & 0 & 8 & 8 & 0 & 0 & 8 \\ 20 & 20 & 20 & 20 & 20 & 8 & 8 & 8 & 8 & 0 & 8 & 0 & 0 & 8 \\ 20 & 20 & 20 & 20 & 20 & 8 & 8 & 8 & 8 & 8 & 0 & 0 & 0 & 8 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 8 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 8 \\ 8 & 8 & 8 & 8 & 8 & 8 & 8 & 8 & 8 & 8 & 8 & 8 & 8 & 0 \end{bmatrix} \quad (18)$$

定量分析表		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
1	生产区														
2	钢筋加工区1	U													
3	钢筋加工区2	U	U												
4	临时存放区	E	U	I											
5	混凝土搅拌站	E	U	E	U										
6	钢筋、辅材仓库	U	U	U	U	O									
7	露天沙石堆放区	U	U	O	U	U	U								
8	PC构件堆场	U	O	U	U	U	U	U							
9	实验室	U	U	U	U	U	U	U	O						
10	办公楼	U	U	U	U	U	U	U	U	U					
11	宿舍楼	U	U	U	U	U	U	U	U	U	U				
12	锅炉房	U	U	U	U	O	O								
13	水泵房	U	U												
14	废料堆场	U													

图 8 定量分析表

定性分析表		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
1	生产区														
2	钢筋加工区1	E													
3	钢筋加工区2	E	E	A											
4	临时存放区	A	A	O	E	I									
5	混凝土搅拌站	A	O	E	O	O	I								
6	钢筋、辅材仓库	U	U	U	O	O	I	X							
7	露天沙石堆放区	U	U	I	U	U	U	X	X						
8	PC构件堆场	U	I	U	U	U	U	U	U	O					
9	实验室	I	U	X	X	U	U	U	U	O					
10	办公楼	U	U	U	U	U	U	U	U	O					
11	宿舍楼	A	U	U	U	U	U	U	U	U					
12	锅炉房	I	I	I	I										
13	水泵房	U	U		X										
14	废料堆场	U													

图 9 定性分析表

将上述两表进行加权即  $F_{ij} = \mu_1 F_1 + \mu_2 F_2$ 。一般将定性因素和定量因素的权重  $\mu_1, \mu_2$  设置为 1:1, 将不同等级赋值为  $A=4, E=3, I=2, O=1, U=0, X=-1$ 。以 1、2 作业单元为例, 物流等级为  $U, F_1=0$ , 非物流等级为  $E, F_2=3$ , 则综合得分  $F_{12}=1 \times 0 + 1 \times 3=3$ , 其他作业以此类推计算。计算结束后将其从高到低重新划分 5 个等级, 得到综合相互关系如图 10 所示。基于综合分析表和其他限制因素修正后获得的 SLP 布局方案如图 11 所示。

综合分析表		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
1	生产区														
2	钢筋加工区1	I													
3	钢筋加工区2	I	I	A											
4	临时存放区	A	E	O	I										
5	混凝土搅拌站	A	O	E	O	O									
6	钢筋、辅材仓库	U	O	U	O	O	O								
7	露天沙石堆放区	U	U	I	U	U	U	U							
8	PC构件堆场	U	I	U	U	U	U	U	U						
9	实验室	O	U	U	U	U	U	U	U	O					
10	办公楼	I	U	U	U	U	U	U	U	U	U				
11	宿舍楼	O	O	U	U	U	U	U	U	U	U	O			
12	锅炉房	O	O	U	I	O									
13	水泵房	U	U												
14	废料堆场	U													

图 10 综合分析表

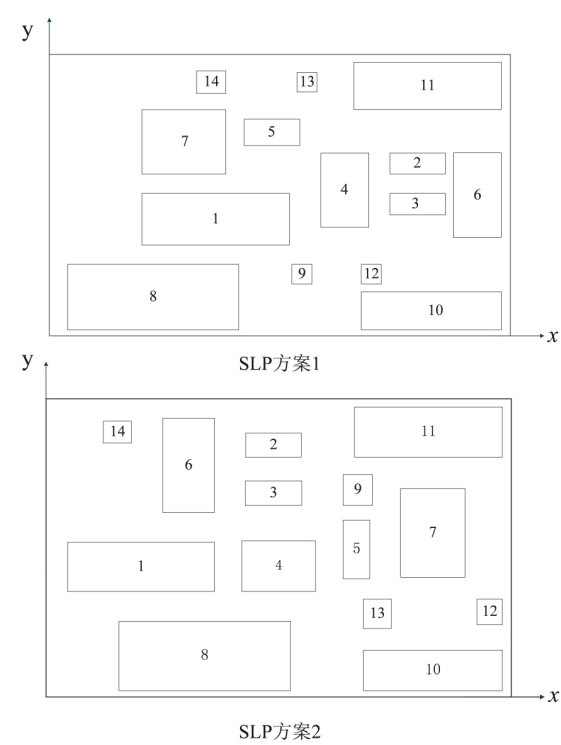


图 11 SLP 布局方案图

3.3 算法求解及结果分析

基于上节相关数据信息, 本文将利用软件 MATLAB R2019 a 进行编程。其中, ABC 算法的相关参数设置如下:  $L=500(\text{m})$ ,  $W=300(\text{m})$ ,  $p=8$ ,  $\Delta h_0=8\text{m}$ ,  $c=1$ ,  $\mu=0.5$ , 最大迭代次数  $T_{\max}=500$ , 初始蜜源数量  $\text{SN}=20$ , 引领蜂(SL)=追随蜂(SC)=20, 邻域最大搜索次数  $\text{limit}=5$ 。ABC 算法运行的迭代图如图 12 所示。

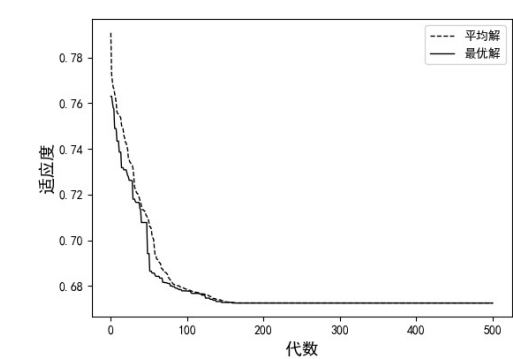


图 12 ABC 算法迭代图

由图 12 可知, 算法在迭代初期, 寻优效果好, 能快速地找到相对较优解, 运行到后期在第 150 代开始收敛。为了进一步证明算法的性能, 本文又对比了最优解和平均解的曲线变化。从两者的变化趋势可知, 在算法的整个寻优过程中平均解与最优解较为接近, 表明算法的整体寻优能

力较强。

通过运行算法得出各作业单元的坐标、摆放方式和工厂布局的优化方案如表 2、图 14 所示。在优化的布局方案中, 物料移动距离  $f_1=1975$ , 工厂布局面积利用率  $f_2=54.23\%$ 。图 13 为预制件厂原设计方案的平面布局, 对应的物料移动距离  $f_1^*=3038$ ,  $f_2^*=45.38\%$ 。相比原始方案, 物料移动路线减少了 35%, 工厂布局面积利用率提高了 8.85%。

表 2 优化后作业单位坐标及摆放方向

序号	质心坐标	摆放
1	(286,89)	1
2	(281,201)	1
3	(226,163)	0
4	(290,151)	1
5	(352,182)	0
6	(196,232)	1
7	(463,176)	0
8	(155,100)	0
9	(352,136)	0
10	(412,29)	1
11	(409,265)	1
12	(481,70)	1
13	(259,264)	1
14	(221,46)	1

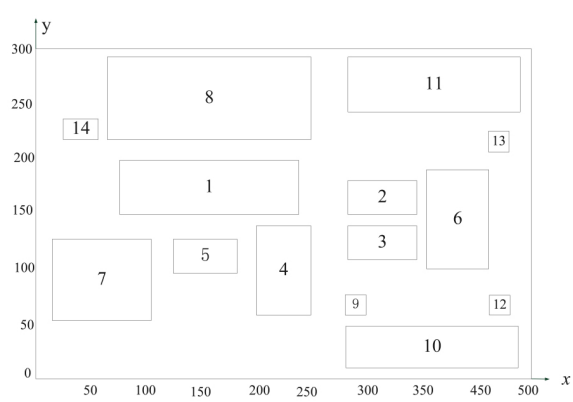


图 13 工厂原设计方案布局图

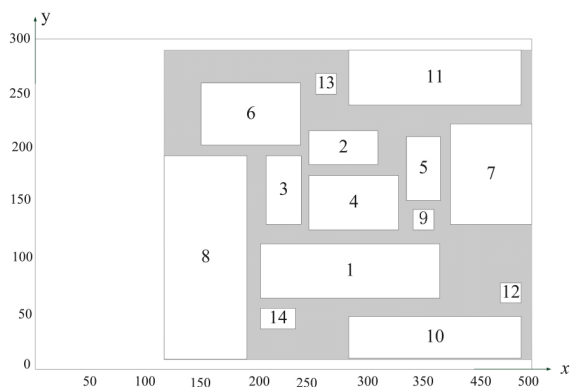


图 14 算法优化布局图

由图 13,图 14 进一步可以看出,除了宿舍楼、办公楼两个固定单元外,其他作业单元的位置关系和设备的摆放方式均发生一定程度的变化。优化的布局方案在保证最小物料搬运距离的基础上,充分利用了工厂布局区域面积,使各个作业单位进行了集中布置,满足了布局时应遵循的紧凑型原则。综上,本文建立的模型和提出的优化智能算法可以有效地解决预制构件厂的布局优化问题。

## 4 结论

预制构件厂在进行构件加工时会涉及到构件原材料、成品、半成品在各工作单元之间的调用、流通,因此需要在建厂初期合理布置预制构件生产单元位置,否则会造成人、财、物资源的过度支出,无形中增加生产成本,妨碍装配式建筑的发展。因此,本文构建了总物料移动距离最小、布局面积利用率最大的工厂布局双目标优化模型并利用人工蜂群算法进行求解。在生成初始解时采用组合策略,即初始种群是由运用 SLP 方法获得工厂的初始布局方案和随机方式产生的解共同组成的。在引领蜂邻域搜索阶段设计了移动算子、转向算子、交换算子。最后以某预制件工厂的布局规划为例验证本文构建的模型和算法。结果表明,改进后的布局方案在物料搬运距离和布局面积利用率等方面均得到一定程度的优化,较好地解决了预制件厂设施布局优化问题。

## 参考文献:

- [1] Tompkins J A, et al. Facilities planning[M]. New York: Wiley, 1996.
- [2] Pourhassan M R, et al. An integrated simulation-based optimization technique for multi-objective dynamic facility layout problem [J]. Journal of Industrial Information Integration, 2017, 8: 49—58.
- [3] Lenin N, et al. Multi-objective optimization in single-row layout design using a genetic algorithm

[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology, 2013, 67(5): 1777—1790.

- [4] 俞武扬,方俊俊.制造单元布局问题的双目标模型与算法研究[J]. 运筹与管理, 2018, 27(6): 100—106.
- [5] 陈瑾标,陈庆新,毛宁,彭乘风,俞爱林.带检测环节的制造单元布局优化[J]. 工业工程, 2020, 23(3): 107—114+131.
- [6] 葛晓梅,李世豪.基于改进遗传算法的多目标车间布局优化问题研究[J]. 现代制造工程, 2021, (3): 10—14+9.
- [7] Lee H J. Heuristic graph-theoretic approach in facility layout problem: The development of a decision support system[D]. Arlington, USA: University of Texas, 1988.
- [8] 张梅,张广泰,张梦.基于熵权优化模型的 SLP 法在设施空间布局规划中的应用[J]. 新疆大学学报(自然科学版), 2020, 37(1): 118—126.
- [9] 王雁,朱德顺,张彦如.基于改进 SLP 的大型活动场地布局方法[J]. 合肥工业大学学报(自然科学版), 2017, 40(6): 736—741.
- [10] 周廷美,汪磊,莫易敏.基于 SLP 方法的整车厂零部件配送中心布局优化[J]. 物流技术, 2017, 36(2): 142—145, 177.
- [11] 金淳,邵世文,高鹏,付明珠,蒙秋男.主通道位置不固定的设施布局问题多目标优化模型及算法[J]. 运筹与管理, 2013, 22(6): 1—10.
- [12] 冯芬玲,景莉,杨柳文.基于改进 SLP 的铁路物流中心功能区布局方法[J]. 中国铁道科学, 2012, 33(2): 121—128.
- [13] 贾佳,魏旭,杨丹,宋昭君,闫梓威.人因视角下 SLP/遗传算法集成模型车间布局优化[J]. 组合机床与自动化加工技术, 2021, (2): 161—164+168.
- [14] 韩昉,刘利军,张鸿斌.改进 SLP 算法的车间设施布局优化设计[J]. 机械设计与制造, 2021, (3): 297—300.
- [15] 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.
- [16] Liu Y, Li D. Research on production layout design of concrete prefabricated units based on SLP[C]// International Conference on Smart City and Intelligent Building Springer, Singapore, 2018.
- [17] 杨阿慧,尹静,徐畅,曾祥涓.装配式混凝土结构工业化生产系统规划与仿真[J]. 混凝土, 2020, (11): 108—111.
- [18] 李辉,黄国文,齐二石.基于混合蚁群算法的动态设



- 施规划系统研究[J]. 管理工程学报, 2014, 28(1): 110—118.
- [19] 俞武扬, 方俊俊. 直线型制造单元与设施集成布局方法研究[J]. 工业工程与管理, 2016, 21(1): 102—108.
- [20] Karaboga D, Basturk B. A powerful and efficient algorithm for numerical function optimization: Artificial bee colony (ABC) algorithm[J]. Journal of Global optimization, 2007, 39(3): 459—471.
- [21] 浦徐进, 李秀峰, 付亚平. 基于电商承诺送达机制的低碳“同日达”配送路径规划[J]. 系统工程, 2018, 36(12): 47—57.
- [22] Syafaruddin N H, Miyauchi H. Optimal energy utilization of photovoltaic systems using the non-binary genetic algorithm[J]. Energy Technology and Policy, 2015, 2(1): 10—18.
- [23] 李智杰, 石昊琦, 李昌华, 张颀. 基于改进遗传算法的影像中心布局优化方法[J/OL]. 系统仿真学报: 1—12 [2021-06-02]. <https://doi.org/10.16182/j.issn1004731x.joss.20-1043>.

## Plane Layout Optimization of Precast Component Factory Based on Artificial Bee Colony Algorithm

WANG He-ping<sup>1</sup>, YANG Zi-mo<sup>1</sup>, CHEN Meng-kai<sup>1,2</sup>

(1. School of Management Science and Engineering, Anhui University of Technology, Ma'anshan 243000, China;

2. School of Management Science and Real Estate, Chongqing University, Chongqing, 400044, China)

**Abstract:** Prefabricated building is a new type of building which is assembled by prefabricated components on site, and the component production is of great importance in its construction process. For the manufacturing enterprise of prefabricated components, the layout of the facility inside the factory will directly affect the efficiency and quality of the component production process. Manual experiences on the layout of prefabricated components factory may result in several problems, such as the material handling route is always too long and the unreasonable layout of production and operation units. Firstly, a two-objective optimization model which can minimize the total material handling distance and maximize the utilization rate of layout area is established. Secondly, the artificial bee colony algorithm is used to solve the problem. In the initial solution generation stage, the initial layout scheme of the factory is obtained by using SLP method and taken as an initial solution of the initial population, so as to increase the rationality of the initial population. In the stage of leading bees, three operators of moving, changing direction and switching are designed to search the neighborhood, and the following bees are updated with elite strategy in the following bee stage. Finally, the validity and rationality of the model and algorithm are verified by taking a prefabricated components factory as an example.

**Key words:** Prefabricated Components Factory; Layout Optimization; SLP; Artificial Bee Colony Algorithm