文章编号:1005-0523(2022)06-0045-11

既有设施限制的铁路物流园区功能区布局方法

朱 晔[1,2],上官一丹[1,2]

(1. 同济大学道路与交通工程教育部重点实验室,上海 201804;2. 上海市轨道交通结构耐久与系统安全重点实验室,上海 201804)

摘要:从既有铁路货运设施升级改造成铁路物流园区的实际需求出发,分析铁路物流园区的主要功能和功能区布局要求,以货物搬运总成本最小和功能区总关联度最大为优化目标,综合考虑既有铁路货运设施限制、功能区长度、形状、方向要求和出入口设置等约束条件,基于功能区间实际走行距离,建立多目标铁路物流园区功能区布局优化模型。基于NSGA-Ⅱ改进设计求解算法,以布局结果对约束条件的满足程度设计连续罚因子,将约束条件转化为目标函数惩罚值,在此基础上,引入二叉树编码序列和多种变异方式,设计的算法能有效避免陷入局部最优。通过案例分析验证算法具有较高的求解精度,所得布局方案合理可行。

关键词:铁路物流园区;设施布局;NSGA-Ⅱ算法;帕累托解集

中图分类号:U29-3 **文献标志码**:A

本文引用格式:朱晔,上官一丹. 既有设施限制的铁路物流园区功能区布局方法[J]. 华东交通大学学报,2022,39(6):45-55.

Function Area Layout Design of Railway Logistics Park Considering Existing Facilities Restriction

Zhu Ye[1,2], Shangguan Yidan[1,2]

(1. Key Laboratory of Road and Traffic Engineering of the Ministry of Education, Tongji University, Shanghai 201804, China;
2. Shanghai Key Laboratory of Rail Infrastructure Durability and System Safety, Shanghai 201804, China)

Abstract: The planning of railway logistics park is mostly upgraded from the existing railway freight facilities. Following the analysis of the main functions and the requirements of the railway logistics parks layout planning, an optimization functional areas layout model is proposed to minimize transshipment costs and maximize relevance, considering the constraints of existing railway freight facilities, functional area length, shape, direction requirements, and entrance and exit settings. Route-based distance is adopted in the model. Based on the NSGA-Ⅱ algorithm, the continuous penalty factor is designed according to the satisfaction of the layout result for the constraint condition, and the constraint condition is converted into the objective function penalty value. On this basis, the slice tree coding sequence and multiple mutation methods are introduced, and the algorithm can effectively avoid falling into the local optimum. Case analysis demonstrates that the algorithm is effective and has high solution accuracy, and the layout scheme is reasonable.

Key words: railway logistics park; facility layout problem; NSGA-Ⅱ algorithm; Pareto solution set

Citation format: ZHU Y, SHANGGUAN Y D. Function area layout design of railway logistics park considering existing facilities restriction[J]. Journal of East China Jiaotong University, 2022, 39(6): 45-55.

收稿日期:2022-02-12

基金项目:上海市自然科学基金项目(19ZR1460800)

铁路货运场站既是铁路货运服务功能的聚居地,也是铁路与其他运输方式的衔接转换地。以“站到站”送达服务为核心的铁路运输服务时期,其铁路货场站场布局大多仅具备装卸及中转存储功能,物流服务功能单一,缺乏多式联运配套场地设施,无法充分发挥铁路货运在全社会物流体系中的核心作用。为此,传统铁路货场站需要通过功能升级改造,向集铁路运输、公铁联运、仓储配送及行业物流服务于一体的综合物流园区转变。

铁路物流园区功能区布局优化问题属于设施布局问题(facility layout problem,FLP),该类问题是根据一定的目标和条件,确定给定区域内最有效的设施布局方案[1]。FLP问题在算法复杂度上已被证明属于NP-Hard类组合优化问题[2]。FLP问题在工厂设施布局领域已有大量研究成果[3],在物流领域的研究以围绕物流搬运系统的布局设计为主[4-6]。求解FLP优化模型最普遍的近似方法是元启发式算法,最常用的有遗传算法[7-8]、模拟退火算法[9-10]、粒子群算法、禁忌搜索算法、蚁群算法和可变邻域搜索算法[11]。

目前,国内外对于铁路物流园区功能区布局优化问题的有关研究较少,大多以总搬运成本最小[12]或基于系统布置规划法(systematic layout planning,SLP)以设施综合关系最大[13-14]为优化目标建立单目标模型,近来部分研究对SLP方法进行改进,建立了总搬运成本最小和总设施关联度最大为优化目标的多目标模型。铁路物流园区布局由于受到功能区间物流量和关联关系的双重影响,多目标模型求解结果更能贴近实际布局要求。冯芬玲等[15]、王玖河等[16]采用“权重法”通过赋权将其多目标转化为单目标进行求解,优化结果受主观因素影响。由于多目标优化问题很难选择单一解,向决策者提供一组帕累托最优解,由决策者根据自己的优先级选择一种帕累托解决方案得到越来越多的应用[17-22]。大多数文献假设物料的取送点为设施的质心,采用欧几里得距离或直角距离进行简化计算[23-25]。然而,这种简化计算距离对于占地面积较大的铁路物流园区来说与车辆实际走行距离可能存在较大偏差,使得实际搬运成本要高于规划的最优成本。另一方面,由于物流搬运系统的布局设计多为在空旷的空间内进行布局,既有FLP问题的研究较少考虑固定设施限制的因素,Kar[26]研究了既有固定设施区域不可占用的设施布局问题,Chen[27]研究了规划地块被既有道路分割的物流园区布局问题。

铁路物流园区既有研究不能完全满足布局优化的实际要求,存在诸多问题:① 优化目标方面。多采用传统的多目标单一化方法将多目标问题转化为单目标问题,权重系数通过人为确定,优化结果受主观因素影响,难以保证多个目标的同步优化;② 现实约束方面。基本没有考虑既有铁路设施对功能区布局的影响,以及功能区在长度和形状方面的特定要求,难以适应铁路物流园区布局的实际要求;③ 算法效率方面。在遗传算法的设计上,染色体编码的不完善造成非法解概率增加,降低算法效率;交叉变异算子存在同质化设计,容易陷入局部最优。

综上所述,本文基于当前铁路物流园区功能区布局的实际要求,考虑既有设施限制对功能区布局的影响,构建了以功能区间货物搬运总成本最小和功能区间总关联度最大为优化目标的铁路物流园区功能区布局多目标模型,并以功能区间的实际走行距离作为货物搬运成本的标定参数,引入既有铁路货运设施覆盖要求、功能区特定形状、方向要求和出入口位置等约束,并将NSGA-II算法中的染色体结构与二叉树编码结合,设计基于NSGA-II的布局模型求解算法。

1 铁路物流园区的主要功能及布局要求

铁路物流园区是以铁路货运站、铁路货场、铁路专用线为基础,主要依托铁路运输,将多种物流设施和不同类型的物流企业在空间上集中布局的场所,是具有一定规模和综合服务功能的物流集结点。从物流作业能力与设施设备配置的角度出发,铁路物流园区的功能区主要分为3类。

1)铁路物流功能区。该类功能区配置铁路作业线及配套货运设施设备,具有铁路货物运输及有关物流作业能力。

2)非铁路物流功能区。该类功能区配置物流设

施设备,具有除铁路货物运输以外的物流作业能力。

3) 非物流功能区。该类功能区主要为园区提供辅助配套功能。

根据铁路物流园区的作业流程和特点,相比一般的设施布局问题,其功能区布局还具有以下特定要求。

1) 铁路物流园区与其他物流功能区间存在物流联系。具备综合物流服务功能的铁路物流园区,不再局限于简单的铁路货物到发、中转功能,在物流作业上铁路物流功能区与公路港、仓储区等其他物流功能区间存在物流量交换,功能区间的优化布局以更好发挥综合物流园区的物流聚集效应。

2) 铁路物流园区部分功能区之间在作业流程、设施配置、人员流动上存在关联性。如铁路物流功能区之间由于线路牵出要求通常紧邻布置,长大笨重作业区与集装箱作业区由于大型装卸设备的共用通常邻近布置,集装箱作业区与空重箱堆场间存在流程上的衔接关系、铁路物流功能区与其他运输方式间存在联运衔接关系等,使得功能区布局时不但要考虑降低功能区间物流交换带来的总体货物搬运成本,还需要考虑功能区间存在的流程、设施设备、人员的关联关系,使得关联度高的功能区紧邻布置,从而提高铁路物流园区的运作效率。

3) 铁路物流功能区因配置有铁路线,功能区的长度和形状需要满足指定要求,如整列装卸对铁路线路有效长的要求,以便满足后续铁路货运设施布局的需要。同时,与其他功能区的货物搬运走行方向也通常受铁路线路分割的影响。

4) 铁路物流园区大多是通过对已有铁路货场进行范围扩充、场地改造、功能升级而来的,规划地块范围内会存在铁路货运设施,这就要求相应的铁路物流功能区必须覆盖原有铁路货运设施。

2　考虑既有设施限制的铁路物流园区功能区布局模型

2.1　坐标系及参数定义

铁路物流园区功能区布局模型的研究基于以下设定。

1) 规划地块和功能区均为矩形;

2) 铁路物流园区出入口设置于规划地块边界,统一进行布局;

3) 所有功能区之间的物流交换量由功能区中心产生,铁路物流功能区只能沿装卸线走向两端边线的中心点进出功能区,非铁路物流功能区可以通过功能区四周边线上的中心点进出功能区;

4) 功能区间货物搬运线路沿着功能区边界走行且遵循最短径路原则,不得穿越其他功能区。

以既有铁路货运设施铁路线路水平方向作为铁路物流园区布局图的水平方向,规划地块左下角为坐标原点,建立铁路物流园区功能区布局坐标系,如图 1 所示。

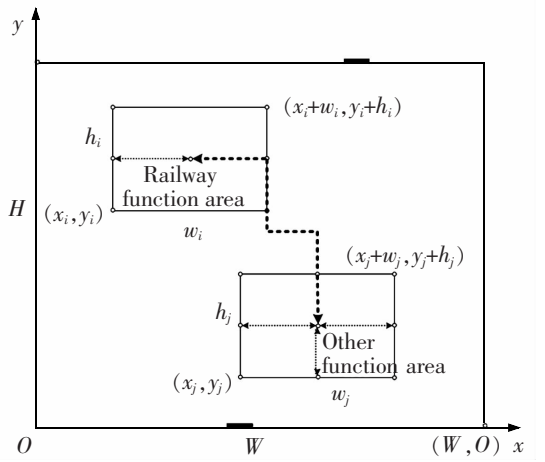


图 1　功能区布局坐标系示意图
Fig.1　Coordinate system diagram

定义规划地块的长 W,宽 H,既有铁路设施集合 $R=(r_i \mid i=1,2,\cdots,M)$,$(X_i^r, Y_i^r)$为 r_i 左下角坐标,W_i^r 为 r_i 的长度,H_i^r 为 r_i 的高度。规划功能区集合 $P=(p_i \mid i=1,2,\cdots,N)$,$(x_i, y_i)$为 p_i 的左下角坐标,w_i 为 p_i 的长度,h_i 为 p_i 的高度,S_i 为 p_i 需求面积,α_i 为 p_i 的最小长度要求,β_i 为 p_i 的最窄宽度要求,θ_i 为功能区地块布置时方向要求(0:不限定方向;1:横向布置;−1:纵向布置)。定义铁路设施覆盖要求集合 $F=(\varepsilon_{ij} \mid i=1,2,\cdots,K; j=1,2,\cdots,N)$,当要求既有铁路设施 r_i 由功能区 p_j 覆盖时,$\varepsilon_{ij}=1$,否则 $\varepsilon_{ij}=0$。出入口集合 $E=(e_i \mid i=1,2,\cdots,K)$,$(X_i^e, Y_i^e)$为 e_i 的坐标。c_{ij},q_{ij} 分别为功能区 p_i(或出入口 e_i)与功能区 p_j(或出入口 e_j)间的单位货物搬运成本和物流量,d_{ij} 为功能区 p_i(或出入口 e_i)p_i 与功能区 p_j(或出入口 e_j)间的货物搬运距离,v_{ij} 为功能区 p_i 与 p_j 间的关联度等级。u_{ij} 为 0–1 变量,表示功能区 p_i 与 p_j 是否有共同的边相邻布置。f_i 为 0–1 过程变量,(x_i, y_i),w_i,h_i,(X_i^e, Y_i^e)为决策变量。

2.2 目标函数

根据铁路物流园区的作业特点和布局要求，从降低成本和提高运作效率的角度出发，建立以功能区间总货物搬运成本(Z_1)最小和功能区间总关联度(Z_2)最大为优化目标。

目标函数 Z_1 表示功能区间的单位搬运成本 c_{ij}、物流量 q_{ij} 和功能区间的走行距离 d_{ij} 的乘积之和，如式(1)所示。其中 d_{ij} 为两个功能区中心点通过功能区边线的出入口，沿各功能区边线构成的路网走行的最短路径距离。

$$\text{Min } Z_1=\sum_{i\in P\cup E}\sum_{j\in P\cup E,i\neq j}c_{ij}\cdot q_{ij}\cdot d_{ij} \tag{1}$$

目标函数 Z_2 表示功能区间关联度值和邻接关系的乘积之和，如式(2)所示。其中，v_{ij} 为功能区 p_i 和功能区 p_j 之间的关联度值，根据功能区间关联程度的不同分为6个等级：最密切、非常密切、密切、比较密切、不太密切和不密切，其关联度值分别为5,4,3,2,1,0。u_{ij} 表示功能区 p_i 和功能区 p_j 之间的布局邻接关系，如式(3)所示，当功能区 p_i 与 p_j 存在完全或部分重合的边时，表示功能区 p_i 与 p_j 相邻布局，u_{ij} 取1，否则为0。

$$\text{Max } Z_2=\sum_{i\in P}\sum_{j\in P,i\neq j}u_{ij}\cdot v_{ij} \tag{2}$$

$$u_{ij}=\begin{cases}1 & x_i<x_j\wedge x_i+w_i=x_j\wedge y_i\leqslant y_j\wedge y_j-y_i\leqslant h_i,\forall i,j\in 1,\cdots,N\\ 1 & x_i<x_j\wedge x_i+w_i=x_j\wedge y_i>y_j\wedge y_j-y_i\leqslant h_j,\forall i,j\in 1,\cdots,N\\ 1 & x_i>x_j\wedge x_j+w_j=x_i\wedge y_i\leqslant y_i\wedge y_i-y_j\leqslant h_j,\forall i,j\in 1,\cdots,N\\ 1 & x_i>x_j\wedge x_j+w_j=x_i\wedge y_j>y_i\wedge y_j-y_i\leqslant h_i,\forall i,j\in 1,\cdots,N\\ 1 & y_i>y_j\wedge y_j+h_j=y_i\wedge x_i\leqslant x_j\wedge x_j-x_i\leqslant w_i,\forall i,j\in 1,\cdots,N\\ 1 & y_i>y_j\wedge y_j+h_j=y_i\wedge x_i>x_j\wedge x_i-x_j\leqslant w_j,\forall i,j\in 1,\cdots,N\\ 1 & y_i<y_j\wedge y_i+h_i=y_j\wedge x_j\leqslant x_i\wedge x_i-x_j\leqslant w_j,\forall i,j\in 1,\cdots,N\\ 1 & y_i<y_j\wedge y_i+h_i=y_j\wedge x_j>x_i\wedge x_j-x_i\leqslant w_i,\forall i,j\in 1,\cdots,N\\ 0 & \text{Otherwise}\end{cases} \tag{3}$$

2.3 约束条件

铁路物流园区功能区布局模型需满足地块边界约束、边界不重叠约束、功能区面积约束、功能区布局形状约束、既有设施覆盖约束和物流园区出入口约束等6个方面的约束条件。

1) 地块边界约束。式(4)、式(5)为地块边界约束，限定功能区顶点坐标不能超出规划地块坐标范围，使得功能区布置在规划地块之内。

$$0\leqslant x_i\leqslant W-w_i,\forall i\in 1,2,\cdots,N \tag{4}$$

$$0\leqslant y_i\leqslant H-h_i,i\in 1,2,\cdots,N \tag{5}$$

2) 边界不重叠约束。式(6)为功能区边界不重叠约束，功能区两两不重叠，保障每个功能区的用地都是独立的。

$$\left|x_i-y_j+\frac{w_i-w_j}{2}\right|\leqslant\frac{w_i+w_j}{2}\ \text{ or }\ \left|y_i-y_j+\frac{h_i-h_j}{2}\right|\leqslant\frac{h_i+h_j}{2},\ \forall i\in 1,2,\cdots,N,i\neq j \tag{6}$$

3) 功能区面积约束。式(7)为每个功能区的面积应不小于功能区需求面积，式(8)为功能区面积之和不能超出规划地块面积。

$$w_i\cdot h_i\geqslant S_i,\forall i\in 1,2,\cdots,N \tag{7}$$

$$\sum_{i=1}^{N}w_i\cdot h_i\leqslant W\cdot H,\forall i\in 1,2,\cdots,N \tag{8}$$

4) 功能区布局形状约束。式(9)为功能区最小长度必须满足实际长度要求的约束条件，以满足功能区对设施布置的特定要求；式(10)避免了因功能区形状过窄而出现布局方案脱离现实需求，无法进行物流设施配置；式(11)为功能区布置方向约束，对功能区地块形状是沿水平方向还是垂直方向布置进行限定，实现功能区地块布置时对铁路装卸线沿指定方向布置的要求。相比常规长宽比参数，通过式(9)~式(11)的组合约束可以更好地满足大型物流园区功能区场地布置要求。

$$w_i+h_i+|w_i-h_i|\geqslant 2\alpha_i,\forall i\in 1,2,\cdots,N \tag{9}$$

$$w_i+h_i-|w_i-h_i|\geqslant 2\beta_i,\forall i\in 1,2,\cdots,N \tag{10}$$

$$(1+\theta_i)(w_i-h_i)\geqslant(1-\theta_i)(w_i-h_i),\forall i\in 1,2,\cdots,N \tag{11}$$

5) 既有设施覆盖约束。式(12)，式(13)满足所有既有铁路设施区域被指定规划功能区覆盖，其中 f_i 为0-1过程变量，当满足既有铁路设施 r_i 由功能区 p_j 覆盖时为1，否则为0。

$$\sum_{i=1}^{M}f_i=M,\forall i\in 1,2,\cdots,M \tag{12}$$

$$f_i=\begin{cases}1 & \varepsilon_{ij}=1\wedge X_i^r\geqslant x_j\wedge Y_i^k\geqslant y_j\wedge X_i^r+W_i^r\leqslant x_j+w_j\wedge Y_i^k+H_i^r\leqslant y_j+h_j,\forall i=1,2,\cdots,M,j=1,2,\cdots,N\\ 0 & \text{Otherwise}\end{cases} \tag{13}$$

6) 物流园区出入口约束。式(14)保证物流园区出入口位置在规划地块四周边界上。

$$\begin{cases}X_i^e=0,W\wedge Y_i^e\leqslant H,\forall i=1,2,\cdots,K\\ \text{or}\quad Y_i^e=0,H\wedge Y_i^e\leqslant W,\forall i=1,2,\cdots,K\end{cases} \tag{14}$$

3　考虑既有设施限制的铁路物流园区布局模型算法设计

上述模型的求解需要解决 3 个关键问题:① 根据规划用地和功能区块面积，确定功能区块的布局；② 遵从既有设施覆盖要求及功能区场地要求，筛选出符合要求的布局方案;③ 对货物搬运成本和关联度进行多目标比选,确定优选布局方案。针对以上问题,对 NSGA-Ⅱ算法进行改进设计布局模型求解算法。NSGA-Ⅱ基于遗传算法建立,通过协调各个目标函数之间的关系,进而找到帕累托解集。

本文算法设计的基本思路是将 NSGA-Ⅱ算法中的染色体结构与二叉树编码结合,使用二叉树编码表征功能区布局方案以加强染色体的合法性,将非法解产生的概率减小到可控范围内,基于既有设施覆盖和场地要求设计罚因子,通过罚因子来实现对包含有局部优化布局的不可行方案的保留和其他不可行方案的排除,在此基础上设计多种变异方式,提高计算精度和算法效率。

3.1　染色体编码

二叉树能十分简洁地表达功能区块间的位置关系,通过编码结构保证模型中“功能区边界不能超出规划地块边界”(式(3)、式(4))、“功能区不能相互重叠”(式(5))和“功能区面积大小的符合性要求”(式(6))的约束条件,实现充分利用规划用地的面积，减少由于不满足以上要求而导致的不可行解。根据铁路物流园区功能区布局在平面空间上的切割要求,染色体编码由三段组成,依次为功能区顺序编码、切割位置编码和切割方向编码，如图 2 所示。其中,功能区顺序编码确定功能区的次序关系;切割位置编码依次确定功能区顺序编码的切割位置;切割方向编码依次确定切割的方向,0 表示横向切割,1 表示竖向切割。据此，当功能区数为 N 时,染色体编码位数为 $3N-2$。

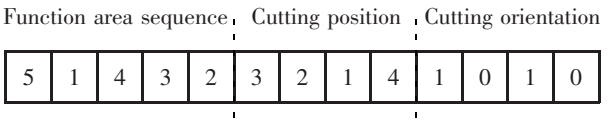


图 2　染色体编码方式

Fig.2　Encode mode

图 3 为染色体编码“5143232411010”通过二叉树转化后得到布局图的过程示意图。编码分为“51432”“3241”“1010”三段,根据第 2 段切割位置编码“3241”和第 3 段切割方向编码“1010”,通过二叉树转化后得到布局图,进一步计算后获得每个功能区的顶点坐标和长宽值,形成该染色体编码表达的功能区布局方案。

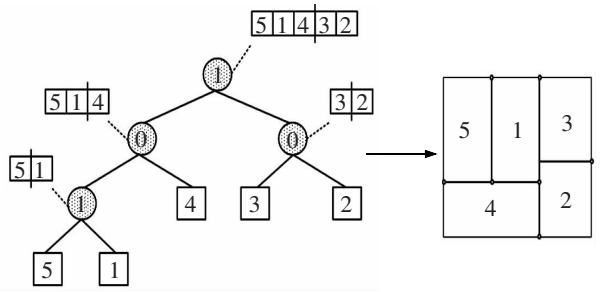


图 3　二叉树结构图

Fig.3　Slicing tree structure

3.2　交叉、变异算子

根据染色体编码特点，在功能区顺序编码、切割位置编码和切割方向编码 3 个编码区分别进行交叉、变异,在功能区顺序编码和切割位置编码这 2个编码区进行交换后，检验新形成的编码序列是否存在重复，如存在则将重复的基因进行补充替换,以避免出现非法染色体编码。切割方向编码序列为 0-1 变量,交换后的结果不需要进一步检验。

在二叉树编码形式下,因为染色体编码结构的特征,染色体变异如果只进行单点变异,变异后的编码方式和交换算子类似,容易陷入局部最优。为此,变异算子设计了交换变异、插入变异、倒置变异和特殊变异 4 种变异方式,以扩大解的搜索范围和提升算法效率。

1) 交换变异。在 3 个编码区内分别随机选取两个点,按照一定概率发生交换;

2) 插入变异。在 3 个编码区内分别随机选取一定长度的基因片段,并随机选取位置插入;

3) 倒置变异。在 3 个编码区内分别将基因序列按编码顺序前后对调形成新的变异染色体序列;

4) 特殊变异。在切割方式编码区进行,切割方式整体变异,进行 0,1 反转。

3.3　径路计算

功能区间的距离为 2 个功能区中心点间沿铁路物流园区内部道路网络走行的最短路径距离。铁路物流园区内部道路网络以园区出入口、功能区的顶点、功能区中心点和功能区出入口为网络节点,并以一定的规则连接节点构成网络的边。其中,非铁路物流功能区的出入口为 4 个功能区边界中心

点,铁路物流功能区的出入口为顺着铁路线方向功能区两侧边界中心点。网络节点间的连线规则为:① 连接功能区顶点、功能区出入口、园区出入口。以每个功能区顶点或功能区出入口为起点,以与之横坐标或纵坐标相同的距离最近的功能区顶点、功能区出入口或园区出入口为终点,建立功能区顶点、功能区出入口及园区出入口间的有向网络。② 连接功能区中心点与功能区出入口。边的权重为起点与终点间距离。

3.4 罚因子

对于功能区布局模型中的"功能区长度限定要求"(式(9))、"功能区形状限制要求"(式(10))、"功能区方向布置要求"(式(11))和"既有铁路设施区域需要被指定规划功能区覆盖"(式(12)、式(13))的约束条件,通过罚因子的设计将以上约束条件转变为目标函数惩罚值。罚因子设计的关键在于既要通过罚因子逐步排除不满足约束的不可行布局方案,又要能够在存在大量不满足约束条件的不可行布局方案的情况下(如初始解集或迭代初期),通过叠加罚因子的目标函数识别局部布局优化的不满足约束条件的不可行布局方案,将其纳入优选范围以保留优良基因片段和加速迭代过程。

基于以上设想,根据功能区对约束条件的满足程度及该约束对方案的影响程度,罚函数设计如下

$$\delta=\lambda\cdot(\delta_1+\delta_2+\delta_3+\delta_4)^2 \tag{15}$$

其中

$$\delta_1=\sum_{i=1}^{N}\left(\frac{|\alpha_i-\mathrm{Max}(w_i,h_i)|}{\alpha_i}+\frac{|\beta_i-\mathrm{Min}(w_i,h_i)|}{\beta_i}\right)\cdot\frac{w_i,h_i}{S_L}\cdot N_L \tag{16}$$

$$\delta_2=1-\frac{\sum_{f_{ij}=1} w_i\cdot h_i}{\sum_{\varepsilon_{ij}=1} w_j\cdot h_j} \tag{17}$$

$$\delta_3=1-\frac{n_{\mathrm{direction}}}{N_{\mathrm{direction}}} \tag{18}$$

$$\delta_4=1-\frac{n_{\mathrm{entry}}}{N_{\mathrm{entry}}} \tag{19}$$

上述罚函数中,α_i,β_i 为功能区长度限制要求;N_L,S_L 分别为有长度限制要求的功能区个数与面积之和,当功能区长度不满足要求时,产生式(16)长宽限制罚因子;当存在既有铁路基础设施没有被指定的功能区完全覆盖时,产生式(17)既有固定设施覆盖罚因子;$n_{\mathrm{direction}}$ 为满足方向设置要求的功能区数;$N_{\mathrm{direction}}$ 为有方向设置要求的功能区数,当存在方向设置不满足要求的功能区时,产生式(18)功能区方向设置罚因子;n_{entry} 为具备设置出入口的边界数;N_{entry} 为要求设置出入口的边界数,当出入口设置不符合要求时,产生式(19)出入口设置罚因子。

从保留优良基因片段和加速迭代过程的角度出发,综合考虑罚因子对目标函数的影响作用,结合 NSGA-II 的基本原理,在叠加罚因子后,原布局模型目标函数转化为

$$\mathrm{Min}\ Z_1'=(1+\delta)\cdot Z_1 \tag{20}$$

$$\mathrm{Min}\ Z_2'=(\delta-1)\cdot Z_2 \tag{21}$$

3.5 算法流程

Step 1 设置种群规模、总进化代数、交叉变异系数等基本参数。

Step 2 生成规模为 N 的初始种群。初始方案基本为不可行方案,通过罚因子在迭代过程中筛选优化。

Step 3 计算目标函数值:

Step 3.1 二叉树解码,计算每个个体的位置坐标和长宽值,形成功能区布局图,检查约束条件;

Step 3.2 计算功能区距离矩阵和邻接关系矩阵,结合关联度等级矩阵和物流量矩阵等参数,计算带有罚因子的货物搬运成本和关联度目标函数值;

Step 3.3 采用非支配排序,对种群进行分组并计算个体拥挤度。

Step 4 产生交叉变异后的子代种群:

Step 4.1 对上一代种群进行交叉、变异操作,产生种群规模同样为 N 的子代种群;

Step 4.2 重复 Step 3,计算子代目标函数值。

Step 5 筛选产生新的父代种群:

Step 5.1 将子代种群与父代种群进行合并,合并后的种群规模为 $2N$;

Step 5.2 采用精英策略,根据快速非支配排序结果和拥挤度值筛选产生新的父代种群。

Step 6 终止判断。当迭代次数达到后,终止迭代并输出结果,否则,返回 Step 4 继续迭代。

4 案例分析

以某铁路物流园区为例进行布局规划,对以上布局模型和算法进行验证。该铁路物流园区规划用地长 1 800 m,宽 1 400 m,总面积 252 万 m^2。规划用地上方靠近城市工业区,右侧靠近外部交通枢

纽,下方靠近城市商贸区,左侧靠近铁路车站。既有铁路货场占地面积 5.6 万 m^2,长 800 m,宽 70 m,位于规划用地左上方。该铁路物流园区规划 10 个功能区,分别为铁路成件包装物流区、铁路集装箱物流区、公路港区、集装箱空箱堆场、集装箱重箱堆场、仓储区、城市配送区、电商物流区、商贸展示区和综合服务区。其中,铁路件装货物物流区由原铁路货场改扩建,铁路集装箱物流区配置铁路装卸线,且需满足整列装卸要求。园区分别在规划用地上、右、下边界设 3 个出入口,与功能区统一进行布置。

4.1　基本数据

基于功能区的规模、功能配置、设施设备空间联系需求及作业关系,各功能区面积需求、功能区间物流交换量和关联度等级数据如表 1、表 2、表 3 所示。

4.2　结果分析

在种群规模 100、迭代次数 100,交叉概率 0.8、变异概率 0.2 的情况下,使用 Matlab 软件进行模型求解,计算结果稳定。表 4 为对 20 组结果中每组的最小货物搬运成本和最大关联度统计分析,得到最小货物搬运成本的均值为 271.5,标准差为 9.39,波动系数为 3.2%,最大关联度的均值为 51.36,标准差为 1.43,波动系数为 2.8%,波动范围合理。

表 5 为其中一组帕累托解集,可以发现,在该组备选方案中,当一个目标函数达到最小时,另一个目标函数为最大,不存在两个目标函数均达到最优的情况,这也进一步验证了在物流园区功能区布局规划中,货物搬运成本与关联度目标并不一致,需要整体考虑,进行综合优化。如图 4 所示,算法在第 5 代左右得到可行解,在 50 代以内得到优化解,能在具有多重约束的情况下实现快速收敛。

表 1　各功能区面积需求及形状限制要求表

Tab.1　Parameter of functional areas

Function areas	Area/m^2	Minimum length/m	Maximum length/m
1. Railway packed freight area	360 000	1 100	650
2. Railway container area	300 000	1 100	200
3. Highway port	450 000	500	240
4. Empty container area	200 000	500	390
5. Loded container area	260 000	500	300
6. Warehousing area	340 000	500	230
7. City distribution area	200 000	500	380
8. E-commerce logistics area	280 000	500	375
9. Commercial trade area	80 000	200	250
10. Comprehensive support area	50 000	200	200

表 2　功能区间的物流交换量表

Tab.2　Freight exchange volume between the functional areas

Function areas	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1. Railway packed freight area	0	0	140	0	0	70	50	90	0	0
2. Railway container area	0	0	0	100	70	0	0	0	0	0
3. Highway port	200	0	0	0	0	40	30	40	10	0
4. Empty container area	0	0	0	0	0	10	0	0	0	0
5. Loded container area	0	120	0	0	0	0	0	0	0	0
6. Warehousing area	60	10	60	10	0	0	40	30	10	0
7. City distribution area	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
8. E-commerce logistics area	100	0	40	0	0	0	0	0	0	0
9. Commercial trade area	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
10. Comprehensive support area	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
11. Right entrance	120	50	80	168	65	50	50	80	2	0
12. Top entrance	200	90	90	216	125	10	5	20	2	0
13. Bottom entrance	0	0	0	0	0	20	110	100	16	0

表3 功能区间关联度等级表

Tab.3 Relevance between the functional areas

Function areas	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1. Railway packed freight area	0	5	4	0	0	4	3	3	0	1
2. Railway container area	5	0	0	4	4	0	0	0	0	0
3. Highway port	4	0	0	0	0	3	3	4	2	1
4. Empty container area	0	4	0	0	4	2	0	0	0	0
5. Loded container area	0	4	0	4	0	2	0	0	0	0
6. Warehousing area	4	0	3	2	2	0	4	3	2	0
7. City distribution area	3	0	3	0	0	4	0	0	0	0
8. E-commerce logistics area	3	0	4	0	0	3	0	0	2	0
9. Commercial trade area	0	0	2	0	0	2	0	2	0	4
10. Comprehensive support area	1	0	1	0	0	0	0	0	4	0

表4 结果统计分析

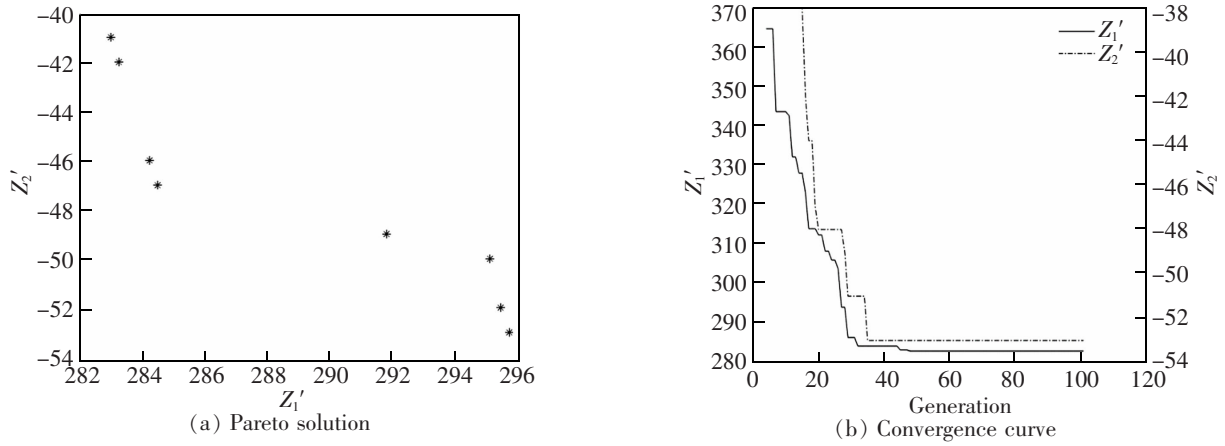
Tab.4 Statistical analysis of results

Index	Minimum	Maximum	Average	Standard deviation	Fluctuation coefficient/%
Minimum cost	271.5	308.75	291.51	9.39	3.2
Maximum correlation	48	54	51.36	1.43	2.8

表5 染色体编码及相应目标函数值

Tab.5 Chromosome encoding and objective function values

Scheme	Chromosome codes			Cost	Correlation
1	10 9 6 3 7 1 4 2 8 5	5 3 8 2 1 4 6 7 9	0 1 1 0 1 1 0 0 0	282.97	−41
2	10 9 6 3 7 1 4 2 8 5	5 3 1 4 8 2 6 9 7	0 1 1 1 1 0 0 0 0	283.23	−42
3	10 9 6 3 7 1 2 4 8 5	5 3 8 2 1 4 6 7 9	0 1 1 0 1 1 0 0 0	284.23	−46
4	10 9 6 3 7 1 2 4 8 5	5 1 3 8 4 2 6 7 9	0 1 1 1 1 0 0 0 0	284.49	−47
5	10 9 6 7 3 1 2 4 8 5	5 3 8 4 1 2 6 7 9	0 1 1 0 1 0 0 0 0	291.85	−49
6	10 9 8 3 7 1 5 2 6 4	5 1 8 3 4 2 6 7 9	0 1 1 1 1 0 0 0 0	295.19	−50
7	10 9 8 3 7 1 2 5 6 4	5 3 8 2 1 4 6 7 9	0 1 1 0 1 1 0 0 0	295.54	−52
8	10 9 8 3 7 1 2 5 6 4	5 1 3 8 4 2 9 6 7	0 1 1 1 1 0 0 0 0	295.81	−53



(a) Pareto solution (b) Convergence curve

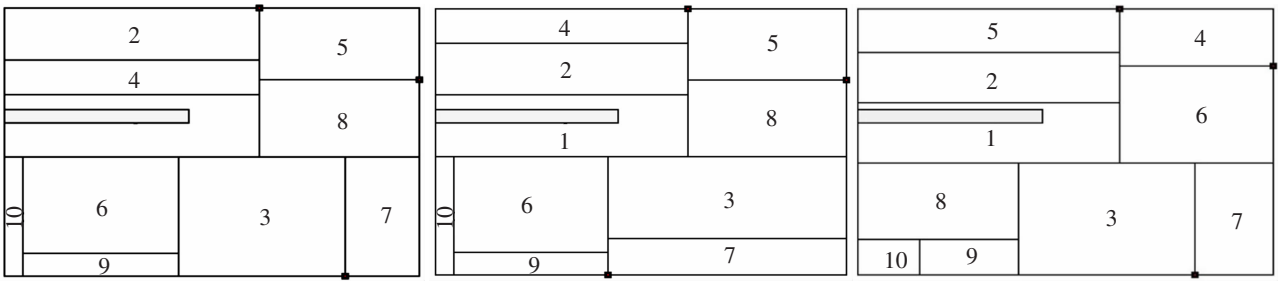
图4 帕累托解集结果图

Fig.4 Pareto solution set result

在本案例中，以两个目标函数值不同偏好的方案 2,5,7 为例进行比较分析说明。如图 5 所示，3 个布局方案均同时兼顾了货物搬运成本控制和关联度优化两个目标。从货物搬运成本控制的角度来看,物流交换量较大的功能区相邻布局,且靠近相应外部交换方向。铁路件装货物物流区与公路港、电商物流区、仓储区相邻;铁路集装箱物流区与重箱堆场、空箱堆场相邻,且靠近城市工业区一侧;公路港与电商物流区、城市配送区相邻,且靠近城市商贸区一侧。从关联关系优化的角度来看，铁路件装货物物流区与铁路集装箱物流区相近,且平行布局;铁路集装箱作业区与重箱堆场、空箱堆场相邻;公路港与电商物流区、仓储区、城市配送区相邻,且整体布局;商贸展示区与综合服务区相邻。

从不同方案的差异来看，关联度更大的方案(方案 7)中,铁路件装货物物流区与铁路集装箱物流区相邻平行布局,更加有利于铁路线路的整体建设;重箱堆场与装卸线平行布局,更符合铁路作业特征;仓储区更靠近城市配送区,更符合物流作业流程关系。从本案例来看,方案 7 更加符合铁路物流园区的布局要求。

物流量是影响模型优化目标货物搬运成本的主要因素,对于铁路物流园区而言,铁路货物到发量直接影响各功能区之间以及对外物流量。为进一步分析所得布局方案的对物流量变化的适应性,分别选取铁路货物发送量、铁路货物到达量和铁路货物到发总量的变化对布局方案进行灵敏度分析。如表 6 所示,当铁路到发量分别减少 10%、增加 10%,30%和 50%时,货物搬运成本呈线性变化,与目标函数公式一致,各方案成本变化幅度接近,且在合理范围。相比较而言,当铁路发送量变化时,方案 5 的成本变化幅度最小;当铁路到达量和铁路到发量总量变化时,方案 3 的成本变化幅度最小。



(a) Scheme 2　　(b) Scheme 5　　(c) Scheme 7

图 5　功能区布局图

Fig.5　Planning layout

表 6　铁路到发量变化对货物搬运成本的影响比例

Tab.6　Sensitive analysis of transportation cost

%

Scheme	Variation range of railway freight dispatch				Variation range of railway freight arrival				Variation range of railway freight volume			
	−10	+10	+30	+50	−10	+10	+30	+50	−10	+10	+30	+50
1	−4.59	4.59	13.76	22.94	−4.25	4.26	12.77	21.28	−8.84	8.85	26.53	44.22
2	−4.60	4.60	13.80	22.99	−4.27	4.27	12.81	21.35	−8.87	8.87	26.60	44.34
3	−4.59	4.59	13.78	22.96	−4.24	4.24	12.72	21.19	−8.83	8.83	26.49	44.15
4	−4.60	4.60	13.81	23.01	−4.25	4.25	12.76	21.26	−8.85	8.85	26.56	44.27
5	−4.54	4.54	13.61	22.69	−4.47	4.47	13.41	22.35	−9.01	9.01	27.02	45.04
6	−4.74	4.74	14.23	23.71	−4.30	4.30	12.85	21.35	−9.04	9.05	27.14	45.23
7	−4.68	4.68	14.04	23.40	−4.35	4.36	13.06	21.77	−9.03	9.04	27.10	45.17
8	−4.70	4.70	14.09	23.49	−4.35	4.35	13.05	21.75	−9.05	9.05	27.14	45.24

为验证本文基于NSGA-Ⅱ的铁路物流园区功能区布局模型的算法有效性,在相同初始种群和迭代代数下,分别对不同变异策略进行多次数值实验对比进行算法的有效性验证。如图6所示,实验结果对比表明,相比单一变异方式,本文设计的多种变异方式在迭代初期能够快速产生满足约束条件的解,持续优化目标函数值的能力更强,

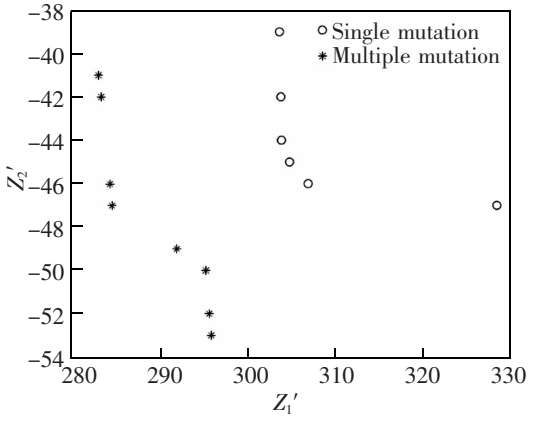


图6 不同变异策略下帕累托解优劣对比图

Fig.6 Comparison of Pareto solutions under different strategies

5 结论

1)构建了以货物搬运总成本最小和功能区总关联度最大为优化目标的铁路物流园区功能区布局模型,模型综合考虑既有铁路货运设施限制、功能区长度、形状和布置方向要求,以及出入口位置设置等约束条件,更加符合铁路作业特征和铁路物流园区功能区布局实际需求;

2)基于NSGA-Ⅱ改进设计了铁路物流园区功能区布局模型求解算法,在求解算法中引入了二叉树编码序列、连续罚因子和多种变异方式,求解算法在帕累托解集的计算效率和求解精度方面都有较好表现,可以满足具有既有设施限制的铁路物流园区功能区布局需要;

3)在基于NSGA-Ⅱ改进设计的铁路物流园区功能区布局模型求解算法中,基于约束条件满足程度设计了连续罚因子,将模型中的既有铁路货运设施限制、功能区长度、形状和布置方向要求等约束条件转化为目标函数惩罚值,连续罚因子能够有效识别布局结果对约束条件的不符合程度,有效提高了帕累托解集的计算精度和效率;

4)在基于NSGA-Ⅱ改进设计的铁路物流园区功能区布局模型求解算法设计中,基于铁路物流园区功能区布局约束条件较多的问题,采用了多种变异的遗传算法设计,通过多种变异增加进化机会,起到了加速进化和避免陷入局部最优。

参考文献:

[1] HOSSEINI N H,FEREIDOUNI S,FATEMI G,et al. Classification of facility layout problems:A review study[J]. International Journal of Advanced Manufacturing Technology,2018,94(1):957-977.

[2] AMINE D,HENRI P,SONIA H G. Facility layout problems:A survey[J]. Annual Reviews in Control,2007,31(2):255-267.

[3] MIGUEL F,MANUEL V C. Mathematical optimization approaches for facility layout problems: The state-of-the-art and future research directions[J]. European Journal of Operational Research,2017,261(1):1-16.

[4] PALUBECKIS G. Fast local search for single row facility layout[J]. European Journal of Operational Research,2015,246(3):800-814.

[5] MURRAY C C,SMITH A E,ZHANG Z. An efficient local search heuristic for the double row layout problem with asymmetric material flow[J]. International Journal of Production Research,2013,51(20):6129-6139.

[6] CHUNG J,TANCHOCO J. The double row layout problem[J]. International Journal of Production Research,2010,48(3):709-727.

[7] ROMERO J M,MORERA L S,HERNANDEZ L G. An island model genetic algorithm for unequal area facility layout problems[J]. Expert Systems with Applications,2017,68:151-162.

[8] ZHANG Q,JIANG C S,ZHANG J,et al. Application of genetic algorithm in functional area layout of railway logistics park[J]. Procedia-Social and Behavioral Sciences,2014,138:269-278.

[9] JERIN L I,SARAVANA S S,PONNAMBALAM S G. An elitist strategy genetic algorithm using simulated annealing algorithm as local search for facility layout design[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology,2016,84(5/8):787-799.

[10] KHAJEMAHALLE L,EMAMI S,KESHTELI R N. A hybrid nested partitions and simulated annealing algorithm for dynamic facility layout problem: a robust optimization approach[J]. Information Systems and Operational Research,2021,59(1):74-101.

[11] PEREZ-GOSENDE P,MULA J,DIAZ-MADROERO M.

Facility layout planning an extended literature review[J]. International Journal of Production Research,2021,59(12):3777-3816.

[12] 孙焰,高源发. 基于交通组织的物流园区功能区块布局[J]. 同济大学学报(自然科学版),2017,45(3):369-376.
SUN Y,GAO Y F. Traffic organizationbased layout of function area in logistics park[J]. Journal of Tongji University(Natural Science Edition),2017,3(45):65-72.

[13] 冯浩. 基于作业流线组织的铁路物流园区布局优化研究[D]. 成都:西南交通大学,2019.
FENG H. Research on layout optimization of railway logistics park based on operational streamline organization[D]. Chengdu:Southwest Jiaotong University,2019.

[14] ZHANG Q,JIANG C S,ZHANG J,et al. Application of genetic algorithm in functional area layout of railway logis tics park[J]. Procedia-Social and Behavioral Sciences,2014,138:269-278.

[15] 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.
FENG F L,JING L,YANG L W. Layout method for the functional area of railway logistics center based on the improved systematic layout planning[J]. China Railway Science,2012,33(2):121-128.

[16] 王玖河,韩希卓,时国强. 考虑铁路分割线的物流园区功能区布局规划研究[J]. 工业工程,2019,22(5):102-108.
WANG J H,HAN X Z,SHI G Q. Study of the functional area layout planning of logistics park considering railway dividing line[J]. Industrial Engineering Journal,2019,22(5):102-108

[17] MATAI R,SINGH S P,MITTAL M L. Modified simulated annealing based approach for multi objective facility layout problem[J]. International Journal of Production Research,2013,51(14):4273-4288.

[18] SAHIN R,TURKBEY O. A simulated annealing algorithm to find approximate Pareto optimal solutions for the multi-objective facility layout problem[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology,2009,41(5):1003-1018.

[19] GUAN C,ZHANG Z,LIU S,et al. Multi-objective particle swarm optimization for multi-workshop facility layout problem[J]. Journal of Manufacturing Systems,2019,53(4):32-48.

[20] LIU J,ZHANG H,HE K,et al. Multi-objective particle swarm optimization algorithm based on objective space division for the unequal-area facility layout problem[J]. Expert Systems with Applications,2018,102(35):179-192.

[21] EMAMI S,NOOKABADI A S. Managing a new multi-objective model for the dynamic facility layout problem[J]. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology,2013,68(5):2215-2228.

[22] AIELLO G,LA SCALIA G,ENEA M. A multi objective genetic algorithm for the facility layout problem based up on slicing structure encoding[J]. Expert Systems with Applications,2012,39(12):10352-10358.

[23] RIPON K S N,GLETTE K,KHAN K N,et al. Adaptive variable neighborhood search for solving multi-objective facility layout problems with unequal area facilities[J]. Swarm and Evolutionary Computation,2013,8(3):1-12.

[24] KOVACS G. Layout design for efficiency improvement and cost reduction[J]. Bulletin of the Polish Academy of Sciences-Technical Sciences,2019,67(3):547-555.

[25] ZHANG Z N,WANG X,WANG X H,et al. A simulation-based approach for plant layout de sign and production planning[J]. Journal of Ambient Intelligence and Humanized Computing,2019,10(3):1217-1230.

[26] KAR Y T. Genetic algorithms,function optimization and facility layout design[J]. European Journal of Operational Research,1992,63(2):322-346.

[27] CHEN Y R,JIANG Y S,WAHAB M,et al. The facility layout problem in non-rectangular logistics parks with split lines[J]. Expert Systems with Applications,2015,42(21):7768-7780.



第一作者:朱晔(1975—),女,讲师,博士,硕士研究生导师,研究方向为物流系统规划等。E-mail:zhuye@tongji.edu.cn。

(责任编辑:刘棉玲)