**文章编号**：1003-1421(2026)01-0212-09
**引用格式**：尹传忠，李永佳，石海川，等.考虑运输收益的货运铁路建设项目选择双层规划模型[J].铁道运输与经济，2026，48(1)：212-220.
YIN Chuanzhong，LI Yongjia，SHI Haichuan，et al. Bi-Level Programming Model of Freight Railway Construction Project Selection Considering Transportation Income[J]. Railway Transport and Economy，2026，48(1)：212-220.

# 考虑运输收益的货运铁路建设项目选择双层规划模型

尹传忠[1]，李永佳[1]，石海川[2]，张子昂[3]

(1.上海海事大学 交通运输学院，上海 201306；2.东方航空物流股份有限公司 货站事业部，上海 201207；3.上海海事大学 物流科学与工程研究院，上海 201306)

**摘 要**：由于铁路建设项目投资大、建设周期长，决策者需要从多个候选新项目中确定最佳的投资组合以保证货运需求和投资效益。研究构建了多项目、多阶段的货运铁路网投资建设双层规划模型，上层规划站在政府角度，以规划期内货流运输成本、未满足需求所带来的流失成本和各种建设项目所需要的年度化资金投入最小为目标；下层规划站在铁路运输企业角度，以企业年度收益最大化为目标，根据货流OD需求在路网上优化分配货流量。设计带有精英保留策略的改进遗传算法进行求解。案例结果表明：在预算较低时，投入的预算资金不能得到充分利用，需求流失与综合成本可能会处于较高水平，影响运输系统的效率和服务质量；而在预算逐渐增加的情况下，投入资金能够得到充分利用，降低综合成本，避免需求流失，加快货流实现“公转铁”。

**关键词**：铁路建设；项目选择；运输收益；双层规划；改进遗传算法
**中图分类号**：U2-9；F530.3 **文献标识码**：A **DOI**：10.16668/j.cnki.issn.1003-1421.20250306003

# Bi-Level Programming Model of Freight Railway Construction Project Selection Considering Transportation Income

YIN Chuanzhong[1]，LI Yongjia[1]，SHI Haichuan[2]，ZHANG Ziang[3]

(1. College of Transport & Communications, Shanghai Maritime University, Shanghai 201306, China; 2. Cargo Terminal Department, China Eastern Air Logistics Co., Ltd., Shanghai 201207, China; 3. Institute of Logistics Science and Engineering, Shanghai Maritime University, Shanghai 201306, China)

**Abstract:** Given the large-scale investment and long construction cycles of railway projects, decision-makers must identify the optimal investment portfolio from multiple candidate projects to ensure freight demand and investment returns. A bi-level programming model was constructed for multi-project and multi-stage freight railway network investments. The upper-level model, from the government's perspective, aimed to minimize freight transport costs during the planning period, the loss costs due to unmet demand, and the annualized capital required for various construction projects. The lower-level model, from the perspective of railway transport enterprises, sought to maximize annual enterprise profits by optimizing the allocation of freight flow across the network according to origin-destination (OD) demand. An improved genetic algorithm with an elite retention strategy was designed for solutions. Case analysis results show that under low budgets, the budget

**收稿日期**：2025-03-06
**基金项目**：中国国家铁路集团有限公司科技研究开发计划课题(N2023X023)

funds invested cannot be effectively utilized, leading to higher levels of demand loss and overall costs, which negatively impact the efficiency and service quality of the transportation system. Conversely, as the budget increases, the funds can be effectively utilized to reduce overall costs, avoid demand loss, and accelerate the transition of freight transport from road to rail.

**Keywords:** Railway Construction; Project Selection; Transportation Income; Bi-Level Programming; Improved Genetic Algorithm

## 0　引言

铁路基础建设作为国内大基建的重要组成部分，政策和市场对其将维持较高的关注度。2013—2024年铁路年均固定资产投资额为7 850亿元左右，到2035年，我国铁路营业里程将达到20万km，其中高速铁路7万km。随着交通运输供给侧结构性改革的推进，“公转铁”、铁水联运成为关注的热点。2025年，长江干线沿线主要港口全部实现铁路进港，沿海主要港口、年大宗货物吞吐量150万t以上的大型工矿企业和新建物流园区的铁路专用线比重力争达到85%，铁路相关基础建设保持积极推进的发展态势。铁路建设项目投资一般结合铁路发展规划进行，具有多阶段、不同阶段存在多个项目的特点。为合理配置投资预算，发挥投入资金的最大效率，需要决策者综合考虑项目特征、项目的急迫性以及项目建设产生的经济效益和社会效益，准确把握规划目标，对多阶段、多项目的铁路投资进行科学决策，以不断优化路网布局，推进铁路运输可持续、高质量发展。

目前单阶段铁路网投资研究相对成熟，从单一进行投资规划研究延伸至综合考虑投资与路网配流问题[1]，或是采用两阶段法进行网络均衡研究与效益分析，对新项目的投资进行经济和环境可行性分析[2]，以提出最佳的投资策略。单阶段离散网络可通过离散网络设计方法扩展为多阶段离散网络设计问题，捕获多周期网络投资决策的空间和时间模式[3]。Lai等[4-5]开发的随机多阶段投资选择模型，实现在长期战略能力规划过程中高效分配其资本投资。铁路建设项目评价同样是进行铁路投资的重要参考[6]，或识别铁路建设项目投资风险并构建风险指标体系，以提升铁路建设项目投资决策效率[7]。铁路工程建设项目具有建设周期长的特点，易受意外事件、自然灾害等因素的影响，面临的风险种类繁多，构建双层(物理层和服务层)铁路网络表示法，建立投资优化模型，可以在投资额限制下最小化预期铁路系统服务损失[8]。铁路建设项目可以分为新建项目与改建项目，改建项目中包含铁路线重建，构建估算铁路线重建投资价值的预测模型，可以提高铁路基础设施项目投资决策的效率和有效性[9]。在对资金投入大、生命周期长的项目进行评价与投资决策时，一般采用多种投资决策方法进行综合协同分析[10]。铁路网投资还应考虑新线引入通道后的货流分配问题，即在一定的路网能力约束条件下将货流OD需求分配至网络弧段上[11-12]，以满足路网能力的限制。针对大规模路网配流问题，K短路方法比较常见，该方法通过构造的路径筛选模型能减少冗余计算，采用运输线路筛选的方法将不必要的路径剔除[13]。通过基于货运的K最短路径算法也可以求解用于协调评价货流分配结果[14]，部分学者通过路径搜索算法解决综合运输体系下的货流分配优化问题[15]。Zhen等[16]引入定制策略的元启发式求解方法进行高铁快运资源配置和货流分配决策。

综上，现有对路网投资问题的研究多采用单目标或多目标模型，对于投资问题影响因素之间存在的相互制约关系以及各目标之间的影响考虑较少，而双层规划模型是解决该问题的有效途径。但是，双层规划方法主要集中在单阶段投资上，难以解决多个规划期内连续项目投资和铁路网的长期规划问题。同时，目前针对多阶段路网投资的研究主要采用静态投资模型，忽略多阶段投资时项目之间的关联性。为此，本研究用投资完成度表述项目不同状态，采用双层规划的方法研究多项目多阶段的铁路网投资问题，纳入时间变量与投资完成度变量，综合考虑运输成本、需求流失成本与投资成本之间互相制约的关系，研究不同规划期内普速货运铁路建设项目投资问题，优化铁路投资配置，适应铁路货运发展需求，推动铁路网的可持续发展。

## 1　货运铁路建设项目选择双层规划模型

货运铁路网建设项目多阶段通常按照可用投资的额度进行划分，根据预算每个阶段投资额度不同。铁路网建设多阶段、多项目投资需要平衡综合成本和资源利用效率，在实际应用中还应考虑规模经济效应，以及如何实现相邻规划期项目投资选择的关联性。基于动态规划思想，引入表示投资完成度选择的二进制变量与弧段所分配货流量为连续型变量，构建混合整数线性双层规划模型。从政府作为投资主体的角度出发，上层规划对投资项目进行优选，追求综合成本最小化。此外，考虑因未及时进行铁路投资而转移至公路的运量所增加的运输成本和碳排放。因此，为平衡投资与需求流失，模型将需求流失的机会成本纳入上层目标函数。下层规划对路网配流进行优化，以提高资源利用效率和运输利润最大化，在模型中引入时间变量，实现对多阶段投资方案设计的最优决策。

### 1.1　模型假设

模型假设如下。

（1）在网络中考虑1组新的或现有的有向弧，且每条弧容量有限。针对铁路建设项目分为新建与改建2类情况，考虑新的弧即规划新线，以及现有弧即对线路进行改建，此外还考虑到实际中每条铁路承担货运量有限的情况。

（2）每期预算有限，每个项目的成本计算基于可用预算。限制不同规划阶段的建设项目实际投资成本，以确保每阶段仅可选择部分项目进行投资，且投资项目总成本不可低于总预算，为减小计算复杂度，不同线路选择同样的项目投资建设所需费用相同。

（3）因未投资项目导致铁路流失的货流转向公路运输。推进“公转铁”政策，减少公路大宗货物运输量，平衡投资与需求流失。

### 1.2　符号定义

符号定义如表1所示。

**表1　符号定义**

Tab.1　Symbol definition

| 标号 | 定义 |
|---|---|
| $i$, $j$, $k$ | 运输节点标号，且$i$，$j$，$k \in C$ |
| $h$ | 网络弧，且$h \in H$ |
| $t$ | 规划阶段，且$t \in T$ |
| $q$ | 路段投资完成度，且$q \in Q$ |
| **集合** | **定义** |
| $H$ | 网络弧集合 |
| $I_k$ | 货流从节点$k$流入的弧，$I_k \in H$ |
| $Q_k$ | 货流从节点$k$流出的弧，$Q_k \in H$ |
| $Q$ | 投资完成度集合 |
| $T$ | 规划阶段集合 |
| $C$ | 运输节点集合 |
| **参数** | **定义** |
| $c_h^q$ | 弧$h$在投资完成度$q$后的单位货流运输成本，元/(t·km) |
| $p_{ij}$ | 节点$i$与节点$j$之间的单位运输收益，元/t |
| $l_{ij}$ | 节点$i$与节点$j$之间的距离，km |
| $l_h$ | 弧$h$的长度，km |
| $B_t$ | $t$阶段总投资预算，万元 |
| $\rho$ | 铁路公司流失1 t运输需求的机会成本，元/t |
| $E_h^{q'q}$ | 状态$q'$下的弧$h$投资建设至完成度$q$所需的单位投资额，万元/km |
| $K$ | 波动系数 |
| $T_h^q$ | 弧$h$建设至状态$q$后的使用寿命，a |
| $S_h^q$ | 弧$h$在状态$q$下的输送能力，万t/a |
| $F_{ij}^t$ | $t$阶段节点$i$与节点$j$之间的货物需求量，万t |
| **变量** | **定义** |
| $y_{hp}^t$ | 0-1变量，若$t$期弧$h$投资完成度为$q$，则$y_{hp}^t = 1$，否则，$y_{hp}^t = 0$ |
| $f_h^t$ | $t$阶段弧$h$上的货流强度，且$f_h^t = f_{h'}^t + f_{h''}^t$ |
| $E_{hp}^t$ | $t$阶段对弧$h$投资建设至投资完成度$q$的总投资额，万元 |
| $x_{ij,\ t}^h$ | $t$阶段从节点$i$至节点$j$经过弧$h$的货流量 |
| $m_{ij}^t$ | $t$阶段由于路网能力限制流失的节点$i$与节点$j$之间的货流量 |

### 1.3　模型构建

#### 1.3.1　上层规划模型

上层规划模型的目标为总成本最小，由年度化的运输成本、流失运输需求的机会成本和项目资金投入3部分组成。

$$\min U = \sum_t \sum_h \sum_q c_h^q y_{hq}^t f_h^t l_h + \sum_t \sum_{i,\ j} \rho m_{ij}^t + \sum_t \sum_h \sum_q \frac{E_{hq}^t}{T_h^q} \tag{1}$$

s.t.

$$\sum_q y_{hq}^t = 1 \qquad \forall h \in H,\ t \in T,\ q \in Q \tag{2}$$

$$\sum_h \sum_q E_{hq}^t \leqslant B_t \qquad \forall h \in H,\ q \in Q,\ t \in T \tag{3}$$

$$E_{hq}^t = \sum_{q' \in Q} y_{hq'}^t y_{hq}^t E_h^{q'q} l_h \qquad \forall h \in H,\ q \in \mathrm{Q},\ t \in T \tag{4}$$

$$y_{hq}^t \in \{0,\ 1\} \qquad \forall h \in H,\ q \in Q,\ t \in T \tag{5}$$

式中：$q'$为弧$h$在投资建设前的项目投资完成度；$y_{hq}^t$为决策变量，该变量在下层模型中用于计算下层

目标，并作为下层弧段运输能力约束的参数。

公式(2)反映项目不相容性约束，同一弧段在一个规划期内只能实施一个项目；公式(3)反映投资预算约束；公式(4)反映投资的规模效应，即项目建设投资成本需要结合项目初始状态进行确定；公式(5)为上层决策变量约束。

### 1.3.2　下层规划模型

下层规划是对路网货流进行优化，目标函数为年度化运输收入与运输成本之差，旨在实现铁路运输利润的最大化，采用基于节点–弧的线性货流分配模型。

$$\max L=\sum_{t}\sum_{i,j}p_{ij}\left(F_{ij}^{t}-m_{ij}^{t}\right)-\sum_{t}\sum_{h}\sum_{q}c_{h}^{q}y_{hq}^{t}f_{h}^{t}l_{h} \tag{6}$$

s.t.

$$Kf_{h}^{t}\leqslant\sum_{q}S_{h}^{q}y_{hq}^{t}\qquad\forall h\in H,\ t\in T,\ q\in Q \tag{7}$$

$$\sum_{h\in O_k}x_{ij,\ t}^{h}-\sum_{h\in I_k}x_{ij,\ t}^{h}=F_{ij}^{t}-m_{ij}^{t}\qquad\forall t\in T,\ \forall i,\ j,\ k\in C,\ k=i \tag{8}$$

$$\sum_{h\in O_k}x_{ij,\ t}^{h}-\sum_{h\in I_k}x_{ij,\ t}^{h}=m_{ij}^{t}-F_{ij}^{t}\qquad\forall t\in T,\ \forall i,\ j,\ k\in C,\ k=j \tag{9}$$

$$\sum_{h\in O_k}x_{ij,\ t}^{h}-\sum_{h\in I_k}x_{ij,\ t}^{h}=0\qquad\forall t\in T,\ \forall i,\ j,\ k\in C,\ k\neq i,\ k\neq j,\ i\neq j \tag{10}$$

$$0\leqslant x_{ij,\ t}^{h}\leqslant f_{h}^{t}\qquad\forall i,\ j\in C,\ h\in H,\ t\in T,\ i\neq j \tag{11}$$

其中，$f_{h'}^{t}$与$f_{h''}^{t}$的计算公式如下。

$$f_{h'}^{t}=\sum_{i}\sum_{j}x_{ij,\ t}^{h'}\qquad\forall i,\ j\in C,\ h\in H,\ t\in T,\ i\neq j \tag{12}$$

$$f_{h''}^{t}=\sum_{i}\sum_{j}x_{ij,\ t}^{h''}\qquad\forall i,\ j\in C,\ h\in H,\ t\in T,\ i\neq j \tag{13}$$

公式(7)为弧段运输能力约束，通过加入车流波动系数满足工程实践的富余量需求；公式(8)至公式(10)为OD对流量守恒约束与节点流量守恒约束；公式(11)为下层决策变量。模型中，变量$m_{ij}^{t}$与$f_{h}^{t}$会影响上层规划综合成本，模型通过这3个关键变量，实现上下2层模型间的相互影响。

## 2　算法设计

根据该问题的特点加入替换操作对遗传算法进行改进，该操作可以表述为一种精英保留策略，以保证表现较优的个体能够延续在子代中并更精确地去除表现较差的个体。算法求解思路为：处于上层规划模型的决策者首先给出决策，观察下层规划模型优化弧段配流后需求流失的情况；下层规划模型在固定上层决策变量的前提下求解其最优解决方案，当下层规划模型向上层反馈其最优方案后，上层规划模型根据结果调整决策，目标为上层目标函数值最优；重新给出决策，下层规划模型再根据上层新的决策优化自己的方案，反复执行该过程直至上、下层规划模型的决策不再进行调整，达到相对平衡。改进遗传算法主要应用在上层投资规划，嵌套采用YALMIP和CPLEX工具进行求解计算下层模型。改进的遗传算法流程图如图1所示。

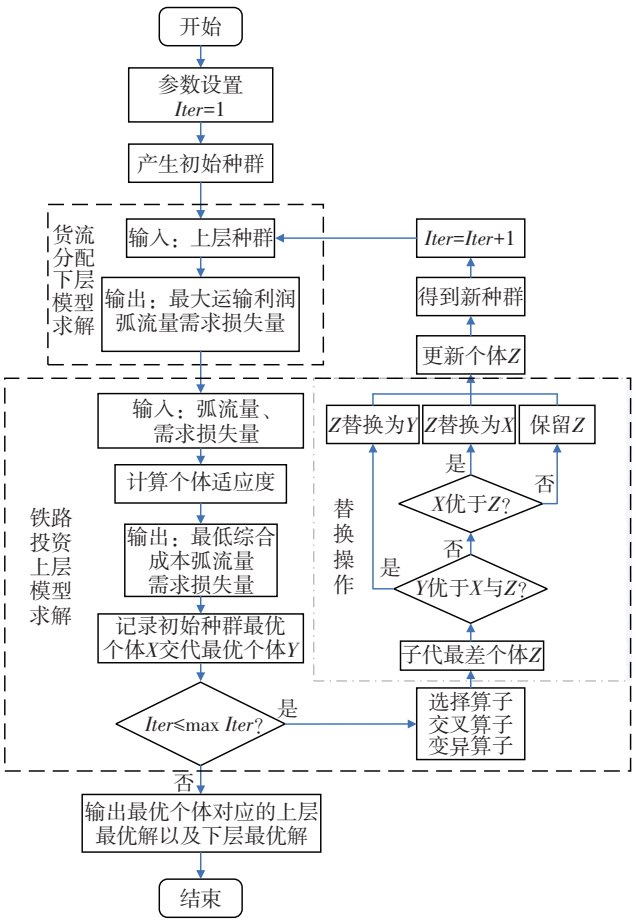


**图1　改进的遗传算法流程图**

Fig.1　Flowchart of the improved genetic algorithm

## 3　案例分析

### 3.1　案例背景

以安徽省重点铁路专用线规划建设为例，考虑整个区域内铁路网络的协同优化，实现各条线路之间的衔接与资源合理配置，以提高整个铁路网络的

运输效率和服务水平。安徽省重点铁路专用线及案例相关普速铁路网络示意图如图2所示。安徽省重点铁路专用线项目基本信息如表2所示。

基础数据方面，整理安徽省各市人民政府网相关普速铁路与铁路专用线的建设信息，包括铁路站点、建设长度、铁路运输能力等；案例中所运输的主要货物为集装箱货物、干散货、车辆、液体散货等，以40 GP(标准集装箱)运输成本为参考标准，对安徽省普速铁路单位运输成本进行整理；车流波动系数设置为1.1。路网既有区段(弧)运输能力如表3所示。路网既有区段长度与单位运输成本如表4所示。

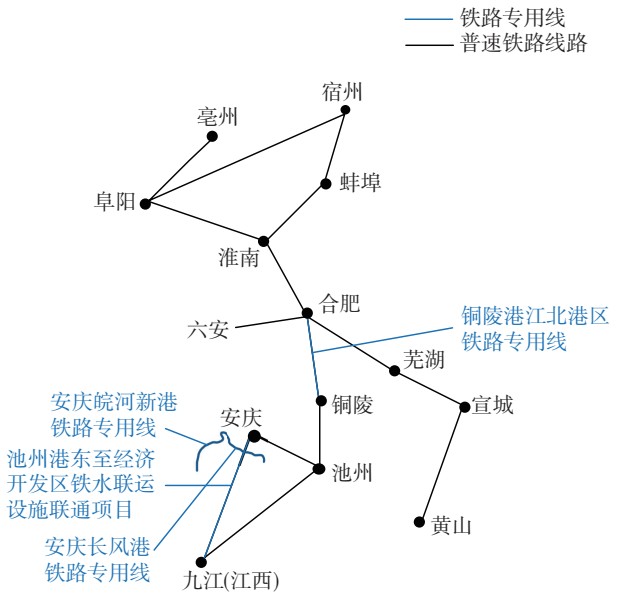


**图2　安徽省重点铁路专用线及案例相关普速铁路网络示意图**

Fig.2　Major railway special lines and related conventional railway networks in Anhui Province

## 3.2　路网投资规划分析

项目分4个规划期投资，各规划期投资额不同，投资建设项目包括既有线改造与新线建设；共分为5个项目投资完成度状态，为达到不同能力状态所需要的投资不同，最终能力体现为各个状态全部投资结束后形成的能力。路网重点投资建设项目完成度如表5所示。考虑项目投资的规模经济效应，使弧段项目建设投资成本受弧段前一阶段项目状态影响，设定弧段项目建设投资成本如表6所示。重点投资建设区段在不同项目投资完成度下的单位运营成本如表7所示，项目建成使用寿命设定为25 a，假设第1至第4规划期可用投资预算额度

**表2　安徽省重点铁路专用线项目基本信息**

Tab.2　Major railway special line projects in Anhui Province

| 项目名称 | 货类 | 建设期 | 工期/a | 线路总里程/km | 投资/亿元 |
|---|---|---|---|---|---|
| 铜陵港江北港区铁路专用线 | 集装箱散货 | 2019年12月—2023年12月 | 4 | 52.05 | 34.2 |
| 池州港东至经济开发区铁水联运设施联通项目 | 散货 | 2020年8月—2024年12月 | 4 | 7.86 | 11.7 |
| 安庆长风港铁路专用线 | 集装箱散货 | 2021—2023年 | 2 | 33.53 | 29.0 |
| 皖河新港铁路专用线(一期工程) | 散货 | 2024—2026年 | 2 | 12.00 | 10.7 |

**表3　路网既有区段(弧)运输能力**

Tab.3　Existing section transport capacity of railway network

| 区段 | 弧 | 线路运输能力/(万t/a) | 区段 | 弧 | 线路运输能力/(万t/a) |
|---|---|---|---|---|---|
| 亳州—阜阳 | $h1$ | 2 000 | 铜陵—池州 | $h15$ | 2 000 |
| 阜阳—宿州 | $h2$ | 2 000 | 阜阳—九江 | $h16$ | 2 000 |
| 宿州—蚌埠 | $h3$ | 2 000 | 合肥—九江 | $h17$ | 2 000 |
| 阜阳—淮南 | $h4$ | 2 000 | 铜陵—九江 | $h18$ | 2 000 |
| 淮南—蚌埠 | $h5$ | 2 000 | 合肥—安庆 | $h19$ | 2 000 |
| 阜阳—六安 | $h6$ | 2 000 | 铜陵港既有专用线 | $h20$ | 1 500 |
| 淮南—合肥 | $h7$ | 2 000 | 池州港既有专用线 | $h22$ | 1 500 |
| 淮南—芜湖 | $h8$ | 2 000 | 安庆港既有专用线 | $h24$ | 1 500 |
| 六安—合肥 | $h9$ | 2 000 | 芜湖港既有专用线 | $h27$ | 2 000 |
| 合肥—芜湖 | $h10$ | 2 000 | 芜湖港—铜陵港 | $h28$ | 2 000 |
| 合肥—铜陵 | $h11$ | 2 000 | 铜陵港—池州港 | $h29$ | 2 000 |
| 芜湖—铜陵 | $h12$ | 2 000 | 池州港—安庆港 | $h30$ | 2 000 |
| 芜湖—宣城 | $h13$ | 2 000 | 安庆港—九江港 | $h31$ | 2 000 |
| 宣城—黄山 | $h14$ | 2 000 | | | |

表4　路网既有区段长度与单位运输成本

Tab.4　Existing section length and unit operating cost of railway network

| 区段(弧) | 长度/km | 单位运输成本/(元/t) | 区段(弧) | 长度/km | 单位运输成本/(元/t) |
|---|---|---|---|---|---|
| $h1$ | 70 | 0.580 | $h15$ | 60 | 0.236 |
| $h2$ | 152 | 0.359 | $h16$ | 459 | 0.228 |
| $h3$ | 90 | 0.422 | $h17$ | 327 | 0.242 |
| $h4$ | 114 | 0.380 | $h18$ | 251 | 0.289 |
| $h5$ | 105 | 0.386 | $h19$ | 196 | 0.242 |
| $h6$ | 166 | 0.413 | $h20$ | 30 | 0.241 |
| $h7$ | 95 | 0.417 | $h22$ | 23 | 0.334 |
| $h8$ | 214 | 0.319 | $h24$ | 23 | 0.315 |
| $h9$ | 92 | 0.427 | $h27$ | 22.2 | 0.331 |
| $h10$ | 119 | 0.451 | $h28$ | 108 | 0.004 |
| $h11$ | 194 | 0.338 | $h29$ | 36 | 0.004 |
| $h12$ | 73 | 0.488 | $h30$ | 60 | 0.004 |
| $h13$ | 64 | 0.515 | $h31$ | 164 | 0.004 |
| $h14$ | 182 | 0.290 | | | |

表5　路网重点投资建设项目完成度

Tab.5　Progress of key investment construction projects

| 路网重点投资建设项目完成度 | $q$ |
|---|---|
| 规划建设(未建设) | $q1$ |
| 运能为500万t/a | $q2$ |
| 运能为1 000万t/a | $q3$ |
| 运能为1 500万t/a | $q4$ |
| 运能为2 000万t/a及以上 | $q5$ |

表6　项目建设投资成本　亿元/km

Tab.6　Project construction investment costs

| 初始状态 | $q2$ | $q3$ | $q4$ | $q5$ |
|---|---|---|---|---|
| $q1$ | 0.8 | 1 | 1.2 | 1.5 |
| $q2$ | — | 0.3 | 0.5 | 0.8 |
| $q3$ | — | — | 0.4 | 0.6 |
| $q4$ | — | — | — | 0.4 |
| $q5$ | — | — | — | — |

依次为30亿元、40亿元、70亿元、40亿元，各规划期投资可用预算如表8所示。

表7　重点投资建设区段在不同项目投资完成度下的单位运营成本　元/t

Tab.7　Unit operating costs of key investment construction section

| 投资项目 | 区段(弧) | 项目投资完成度 | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | | $q1$ | $q2$ | $q3$ | $q4$ | $q5$ |
| 铜陵港江北港区铁路专用线 | $h21$ | 0 | 0.138 | 0.133 | 0.128 | 0.124 |
| 池州港东至经济开发区铁水联运设施联通项目 | $h23$ | 0 | 0.912 | 0.907 | 0.901 | 0.898 |
| 安庆长风港铁路专用线 | $h25$ | 0 | 0.210 | 0.205 | 0.200 | 0.196 |
| 皖河新港铁路专用线(一期工程) | $h26$ | 0 | 0.578 | 0.573 | 0.568 | 0.563 |

表8　各规划期投资可用预算　亿元

Tab.8　Investment budget available for each planning period

| 规划期 | 第1期 | 第2期 | 第3期 | 第4期 |
|---|---|---|---|---|
| 投资可用预算 | 30 | 40 | 70 | 40 |

## 3.3　铁水联运货流需求

安徽省铁水联运运量预测是在对农业及制造业产值、主要制造业产品及产量进行调研分析的基础上，结合区域内传统货源情况以及运输需求持续快速增长的需要，将制造业原材料及产成品分为干散货、车辆、液体散货和集装箱4类进行的总运量预测。通过安徽省各地区交通运输局平台收集各内河港口的铁水联运数据，并根据安徽沿江区域腹地铁水联运预测量，考虑港口腹地城市自身发展情况，对腹地内各城市间的铁水集疏运量进行预测。货流OD需求预测如表9所示。

## 3.4　结果分析

### 3.4.1　投资方案

模型参数设置，每期种群个数设置为10，最大迭代次数设置为40，交叉概率和变异概率依次设置为0.9，0.05，采用数学软件进行计算。求解得到各规划期项目投资方案如表10所示，改进遗传算法求解迭代曲线图如图3所示。

表9　货流OD需求预测　万t

Tab.9　Forecast of freight flow OD demands

| OD | 2025年 | 2030年 | 2035年 | 2040年 | OD | 2025年 | 2030年 | 2035年 | 2040年 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 芜湖港—芜湖 | 231 | 266 | 306 | 352 | 池州港—池州 | 140 | 170 | 206 | 230 |
| 芜湖港—合肥 | 230 | 265 | 304 | 350 | 池州港—黄山 | 48 | 78 | 108 | 138 |
| 芜湖港—黄山 | 552 | 635 | 730 | 840 | 池州港—九江 | 35 | 65 | 99 | 125 |
| 铜陵港—铜陵 | 250 | 280 | 310 | 340 | 安庆港—安庆 | 400 | 430 | 460 | 480 |
| 铜陵港—合肥 | 90 | 120 | 150 | 186 | 安庆港—六安 | 130 | 160 | 195 | 220 |
| 铜陵港—宣城 | 60 | 90 | 115 | 150 | 安庆港—九江 | 210 | 240 | 270 | 305 |
| 铜陵港—池州 | 45 | 80 | 105 | 132 | 安庆港—合肥 | 90 | 120 | 157 | 180 |
| 铜陵港—黄山 | 50 | 80 | 110 | 140 | 安庆港—池州 | 110 | 146 | 178 | 211 |

**表 10　各规划期项目投资方案**

Tab.10　Project investment program for each planning stage

| 规划期 | 总投资成本/亿元 | $h21$ | $h23$ | $h25$ | $h26$ |
|---|---|---|---|---|---|
| 规划初始时刻 | — | $q1$ | $q1$ | $q1$ | $q1$ |
| 第1期 | 24.29 | $q1$ | $q2$ | $q1$ | $q5$ |
| 第2期 | 37.46 | $q1$ | $q4$ | $q3$ | $q5$ |
| 第3期 | 62.40 | $q4$ | $q4$ | $q3$ | $q5$ |
| 第4期 | 34.21 | $q5$ | $q4$ | $q4$ | $q5$ |

从表 10 可以观察到各候选投资项目随规划期建设的投资完成度而变化。从总体投资建设结果来看，模型所设计的投资方案与投资建设目标完成度基本一致，各规划期实际资金投入占预算额的比率均在 80% 以上，铜陵港、池州港、安庆港的需求流失情况控制良好，体现了该投资规划方案的有效性，说明该模型在解决多项目、多阶段的铁路网投资双层规划问题方面具有参考价值。

传统的遗传算法在寻优时会出现陷入局部最优解的情况，需要经过有效的选择、交叉、变异操作才有可能跳出局部最优，经过对遗传操作的改进，改进遗传算法在寻优策略上体现出一定的优势，能够以更高的概率寻找到最优解，同时更直观地观察到每次迭代的最优个体对应的目标函数值，有效地剔除每代群体中表现差的个体，提高生成接近最优个体的概率。

### 3.4.2　货流分配方案

基于上层投资项目的决策对路网货流进行分配，得到货流分配方案如表 11 所示，各规划期路网线路能力利用率如图 4 所示。同时对各规划期 OD 需求流失量进行统计，仅芜湖港至黄山段产生了需求流失，其中第 3 规划期需求流失量为 6 万 t，第 4 规划期需求流失量为 257 万 t。

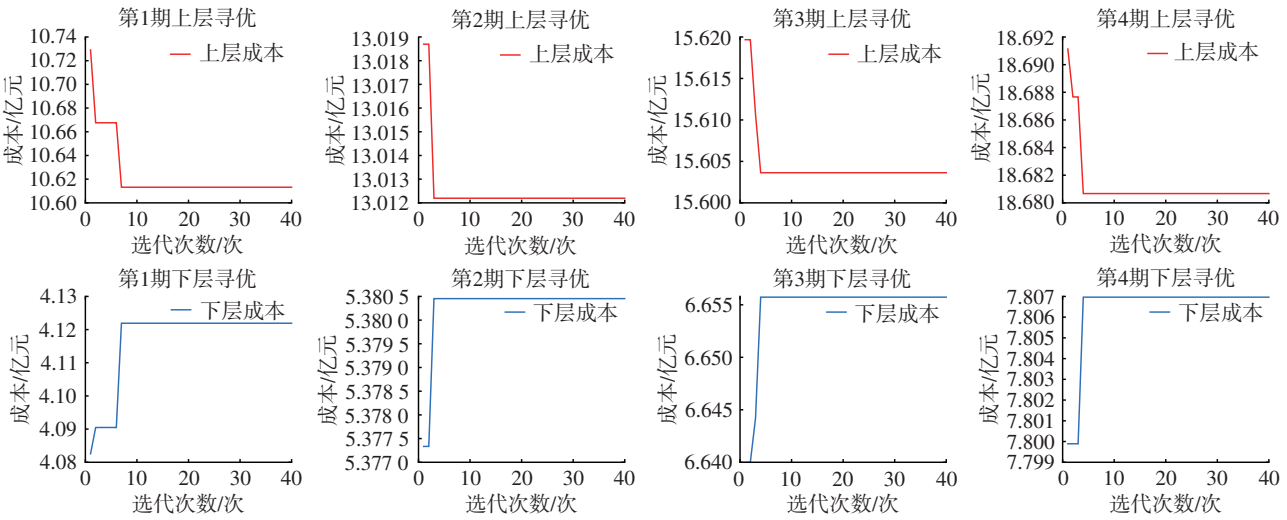


**图 3　改进遗传算法求解迭代曲线图**

Fig.3　Iteration profile of the improved genetic algorithm in the solution process

**表 11　货流分配方案**　　万 t

Tab.11　Freight flow distribution program

| 弧段 | 第1期货流 | 第2期货流 | 第3期货流 | 第4期货流 | 弧段 | 第1期货流 | 第2期货流 | 第3期货流 | 第4期货流 |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| $h9$ | 130 | 160 | 195 | 220 | $h25$ | 0 | 186 | 357 | 909 |
| $h13$ | 710 | 883 | 1 057 | 1 011 | $h26$ | 909 | 909 | 909 | 507 |
| $h14$ | 650 | 793 | 942 | 861 | $h27$ | 941 | 1 149 | 1 363 | 1 363 |
| $h19$ | 540 | 665 | 806 | 936 | $h28$ | 388 | 513 | 637 | 778 |
| $h20$ | 250 | 280 | 0 | 0 | $h29$ | 413 | 543 | 667 | 806 |
| $h21$ | 0 | 0 | 310 | 340 | $h30$ | 465 | 596 | 731 | 872 |
| $h23$ | 295 | 396 | 489 | 573 | $h31$ | 245 | 305 | 369 | 430 |
| $h24$ | 31 | 0 | 0 | 0 | | | | | |

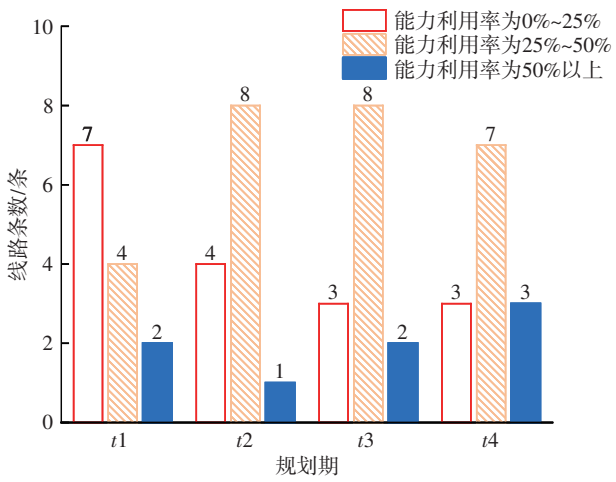


**图4　各规划期路网线路能力利用率**

Fig.4　Utilization rate of railway network capacity in different planning stages

### 3.4.3　灵敏度分析

由于可用预算的变化会在一定程度上对铁路网络的建设规模、线路运能、设施扩建等产生影响，从而进一步影响建设成本、运营成本、投资成本等。对可用预算参数进行灵敏度分析以更好地了解在不同预算下需求流失的变化趋势。由于第3规划期的投资额相对较大，对该期的最佳可用预算进行分析，评估不同投资预算对流失的货物需求量与综合成本的影响，第3规划期可用预算对综合成本及实际投入资金占比的影响如图5所示，不同投资预算下模型求解的投资方案及需求流失对比如表12所示。

通过图5与表12可知，可用预算设置在[60，80]区间时，不仅节省预算，也能有效减少综合成本，由实际投入资金占比可以看出，当投资预算位于该区间时，预算资金能够得到充分利用。在第3规划期中，用于投资现有候选项目的预算为70亿元，在可用预算超过70亿元后，实际投入资金占比随着预算额增加而不断下降，综合成本减小趋势也放缓，此时加大投入可能导致下期预算不足，因此预算设置为70亿元为较优的投资策略。

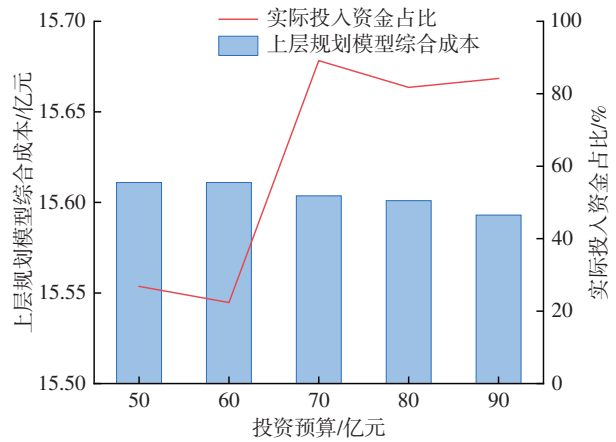


**图5　第3规划期可用预算对综合成本及实际投入资金占比的影响**

Fig.5　Influence of budget on overall costs and actual percentage of invested funds

**表12　不同投资预算下模型求解的投资方案及需求流失对比**

Tab.12　Comparison of investment programs and demand loss for model solutions at different budget levels

| 投资预算/亿元 | 上层规划模型综合成本/亿元 | 实际投入资金/亿元 | 投资方案 | | | | 流失百分比/% |
|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 50 | 15.611 | 13.412 | $q1$ | $q4$ | $q4$ | $q5$ | 6 |
| 60 | 15.611 | 13.412 | $q1$ | $q4$ | $q4$ | $q5$ | 6 |
| 70 | 15.604 | 62.400 | $q4$ | $q4$ | $q3$ | $q5$ | 6 |
| 80 | 15.601 | 65.412 | $q3$ | $q4$ | $q4$ | $q5$ | 6 |
| 90 | 15.593 | 75.812 | $q4$ | $q4$ | $q4$ | $q5$ | 6 |

## 4　结论

为提升铁路投资效率，满足运输需求，实现运输企业收益最大化，构建货运铁路网建设项目选择的双层规划模型，采用改进的遗传算法求解。主要结论如下。

（1）双层规划模型能够将投资成本和网络货流分配进行协同，对多项目、多阶段铁路建设投资问题进行综合决策，实现整体优化。

（2）基于货流需求流失和投资额度对路网多项目投资进行分阶段控制，能够充分发挥铁路投资效益，均衡路网货流分配，满足货流需求。

（3）研究得到的投资方案与投资建设目标完成度基本一致，各规划期实际资金投入占预算额的比率均在80%以上，铜陵港、池州港、安庆港的货流需求流失控制较好，体现了研究方法的有效性。

由于铁路网投资规划涉及的因素众多，本研究未在模型中充分融入环境成本，项目投资状态转移成本与实际的投资成本会存在一定的偏差，需要进一步精确投资状态转移成本。同时，网络运输能力随着建设项目建成会有提升，而网络能力提升并不是简单的叠加，存在相互制约及瓶颈效应。以上问题将作为后续重点研究方向。

**参考文献：**

[1] 严贺祥，林柏梁，梁　栋. 铁路网多项目多阶段投资规划模型[J]. 铁道学报，2007，29(3)：19-24.
YAN Hexiang，LIN Boliang，LIANG Dong. An Optimization Model of Railroad Network Design and Investment Including Multiple Projects in Several Five-Year Plans[J]. Journal of the China Railway Society，2007，29(3)：19-24.

[2] HOLLER BRANCO J E，BARTHOLOMEU D B，ALVES JUNIOR P N，et al. Evaluation of the Economic and Environmental Impacts from the Addition of New Railways to the Brazilian's Transportation Network：An Application of a Network Equilibrium Model[J]. Transport Policy，2022，124：61-69.

[3] HAQUE K，MISHRA S，GOLIAS M M. Multi-Period Transportation Network Investment Decision Making and Policy Implications Using Econometric Framework[J]. Research in Transportation Economics，2021，89：101109.

[4] LAI Y C，SHIH M C. A Stochastic Multi-Period Investment Selection Model to Optimize Strategic Railway Capacity Planning[J]. Journal of Advanced Transportation，2013，47(3)：281-296.

[5] SHIINA T，TAKAICHI T，LI Y G，et al. Multistage Stochastic Programming Model and Solution Algorithm for the Capacity Expansion of Railway Network[J]. Journal of Advanced Mechanical Design，Systems，and Manufacturing，2018，12(3)：JAMDSM0077.

[6] 卢子健，郭丽华，陈　娟，等. 铁路投融资深化改革背景下的铁路项目评价体系研究[J]. 铁道经济研究，2023(1)：7-17.
LU Zijian，GUO Lihua，CHEN Juan，et al. Railway Project Evaluation System under the Background of Deepening Reform of Railway Investment and Financing[J]. Railway Economics Research，2023(1)：7-17.

[7] 段晓晨，鲍　默，孟春成，等. 基于BP神经网络的海外铁路建设项目投资风险评估研究[J]. 铁道运输与经济，2022，44(7)：8-13，28.
DUAN Xiaochen，BAO Mo，MENG Chuncheng，et al. Investment Risk Assessment for Overseas Railway Construction Projects Based on BP Neural Network[J]. Railway Transport and Economy，2022，44(7)：8-13，28.

[8] YAN Y Z，HONG L，HE X Z，et al. Pre-Disaster Investment Decisions for Strengthening the Chinese Railway System under Earthquakes[J]. Transportation Research Part E：Logistics and Transportation Review，2017，105：39-59.

[9] LAKUSIC S. Estimating Investment Value in Railway Lines Reconstruction Process[J]. Journal of the Croatian Association of Civil Engineers，2017，69(9)：885-892.

[10] LI X Y. Investment Decision Analysis of PPP Project of Hangzhou-Taizhou High Speed Railway in China[C]//2022 7th International Conference on Business and Industrial Research (ICBIR). Bangkok：IEEE，2022：622-626.

[11] 陈　阳，马　驷，赵　睿. 竞争条件下快运货物班列定价研究[J]. 铁道科学与工程学报，2016，13(3)：590-594.
CHEN Yang，MA Si，ZHAO Rui. Price Studies of Railway Express Freight in Competitive Context[J]. Journal of Railway Science and Engineering，2016，13(3)：590-594.

[12] 马春山，廖正文. 基于服务网络的高铁快运基地选址及规模优化方法[J]. 铁道科学与工程学报，2023，20(2)：463-472.
MA Chunshan，LIAO Zhengwen. An Optimization Method of High Speed Rail Express Base Location Selection and Scale Based on Service Network[J]. Journal of Railway Science and Engineering，2023，20(2)：463-472.

[13] 罗经纬. 基于K最短路的流量分配算法研究[J]. 公路与汽运，2017(5)：14-16.

[14] 刘星材，何世伟，孙　杨，等. 基于云和声搜索的综合运输网络设计和货流分配优化[J]. 吉林大学学报(工学版)，2016，46(1)：108-113.
LIU Xingcai，HE Shiwei，SUN Yang，et al. Comprehensive Transportation Mixed Network Design and Freight Flow Allocation Based on Cloud Harmony Search Algorithm[J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition)，2016，46(1)：108-113.

[15] HU W S. Advances in Electric and Electronics[M]. Berlin，Heidelberg：Springer Berlin Heidelberg，2012.

[16] ZHEN L，FAN T Y，LI H L，et al. An Optimization Model for Express Delivery with High Speed Railway[J]. Transportation Research Part E：Logistics and Transportation Review，2023，176：103206.

(责任编辑　金　颖)