

# 基于遗传算法的列车开行方案优化

孙亮<sup>1</sup>, 林翎<sup>1</sup>, 王莉<sup>2,3</sup>

(1. 中国标准化研究院, 北京 100044; 2. 北京交通大学 交通运输学院, 北京 100044;  
3. 北京市城市交通信息智能感知与服务工程技术研究中心, 北京 100044)

**摘要:** 根据列车停站方案的4种模式, 建立了列车开行方案双层规划模型. 上层以总的运营费用最小和未服务的旅客数量最少为目标进行停站方案和开行频次的优化; 给定停站方案和开行频次后, 下层以服务旅客数量最大和旅客总的旅行时间最小为目标, 建立了客流分配的混合整数规划. 基于GA的开行方案优化算法实现了停站方案生成与客流分配循环反馈优化. 最后以台湾高铁为实例分析, 验证了本文模型和算法的有效性.

**关键词:** 铁路运输; 开行方案; 遗传算法; 反馈优化

**中图分类号:** T 292.8

**文献标志码:** A

**文章编号:** 1001-0645(2016)增刊2-0026-05

**DOI:** 10.15918/j.tbit1001-0645.2016.增刊2.007

## Train Line Planning Based on Genetic Algorithm

SUN Liang<sup>1</sup>, LIN Ling<sup>1</sup>, WANG Li<sup>2,3</sup>

(1. China National Institute of Standardization, Beijing 100191, China; 2. School of Traffic and Transportation, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China; 3. Beijing Engineering Research Center of Urban Traffic Information Intelligent Sensing and Service Technologies, Beijing 100044, China)

**Abstract:** A two-layer optimization model for train line planning was proposed based on the 4 modes of train stop-schedule. The purpose of the top-layer was to optimize the stop-schedule set and the service frequencies with the minimum of the total operation cost and unserved passengers. The purpose of the bottom-layer was to establish the specific stop-schedule and a mixed integer program for passenger flow assignment with the maximum of the served passenger volume and minimum of the total travel time. A GA-based line planning optimization algorithm was implemented to realize the feedback optimization of stop-schedule generation and passenger flow assignment. The validity of the model and algorithm was verified by the case study on Taiwan high speed railway.

**Key words:** railway transportation; line planning; genetic algorithm; feedback optimization

开行方案是铁路运营部门根据一段时期内的OD客流量, 将列车分配至合适的线路或区间的技术文件, 其主要决定了列车与线路之间的空间关系, 具体内容包括列车的行走径路、开行区间、开行对数、停靠车站等. 很多学者从不同的角度对开行方案的优化进行了研究. 文献[1-2]关注企业收益和

乘客需求满意度, 建立了基于弹性需求的旅客列车开行方案的双层规划模型. 文献[3]采用模糊数学规划来研究台湾高速铁路列车开行方案, 建立了单条铁路线上城际高速铁路旅客列车开行方案的多目标优化模型, 其开行方案具有公交化运营模式的特点. Goossens等<sup>[4-5]</sup>建立了开行方案优化

收稿日期: 2016-10-30

基金项目: “十三五”国家重点研发计划资助项目(2016YFB1200401); 国家铁路局科技基金资助项目(2015Z057); 中央基本科研业务费资助项目(542016Y-4479)

作者简介: 孙亮(1980—), 男, 助理研究员, E-mail: sunliang@cnis.gov.cn.

通信作者: 王莉(1982—), 女, 讲师, E-mail: wangli@bjtu.edu.cn.

的 0-1 规划模型模型,利用分支-切割(branch-and-cut)的方法对模型求解;而后建立多类型路网的列车开行方案优化模型,将旅客对列车径路的选择行为描述为多商品流问题,转化为线性规划模型进行求解。Chakroorty 等<sup>[6]</sup>提出了基于遗传算法的进化优化技术来解决路网中最优换乘路径问题,其提出了径路集合的初始化生成模型,以建立固定数量的路径,以旅客满意度和旅行时间来衡量路径的优劣。

本文首先分析了列车开行方案的编制流程,建立了开行方案生成双层规划模型,而后根据问题特点设计了嵌入分支定界法的混合遗传算法,最后以台湾高铁进行实例分析,证明本文提出的方法可生成更灵活的开行方案。

## 1 列车开行方案编制流程

列车开行方案的编制过程一般需要 5 个模块支撑,如图 1 所示。

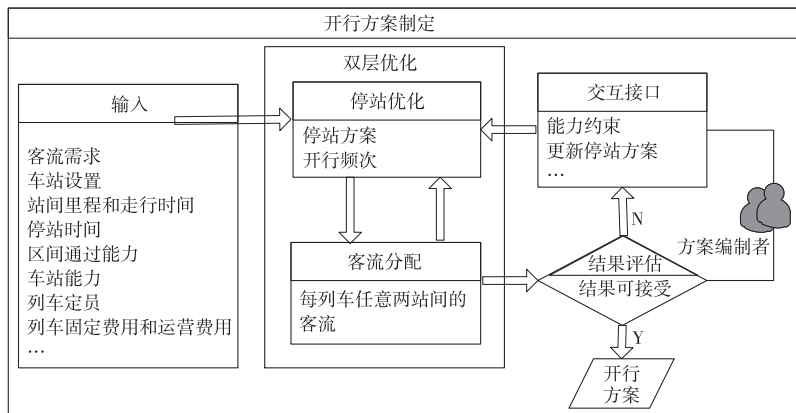


图 1 列车开行方案编制流程  
Fig. 1 Process of line planning

输入模块可以获得开行方案设计所需的各类基础数据,包括客流需求、车站设置情况、区间走行时间等信息;然后进行停站优化与客流分配的双层优化,上层主要确定停站方案和开行频次;在此基础上,下层对每列车任意两站之间的客流进行分配;上下层实现反馈闭环优化,将优化后的开行方案输出给结果评估模块,如果调度员认为结果可接受则输出优化结果作为最终的列车开行方案,如果认为方案不可行,则通过交互接口调整能力约束、更新停站方案,调整优化目标,重新进行停站优化与客流分配的双层规划过程,直至输出满意结果。

根据目前中国运输组织特点,一般设置 4 类停站方案:①一站直达列车方案(non-stopping-schedule, NSS),列车在两个枢纽站间或跨一个以上枢纽站运行,沿途不停站。当列车在两个枢纽站间运行时一般采用高速短编组;若列车跨一个以上枢纽站运行,则采用高速长编组。这种方案旅行时间最短,级别最高;②大站停靠列车方案(stop at major stations, SMS),列车跨一个以上枢纽站运行,只在枢纽大站停靠,一般采用高速长编组运行,这种方案旅行时间次短,级别较高;③交错停站列

车方案(stop at staggered stations, SSS),列车跨一个以上枢纽站运行,除在枢纽大站停靠外,还在沿途的中间站交错停站,采用长编组运行。这类方案可以满足大部分中等级别旅客需求;④站站停列车方案(stop at all stations, SAS),列车只在相邻两个枢纽站间运行,沿途各站均停靠,这类方案可满足短途旅客的需求,级别最低。

## 2 开行方案生成双层模型

根据上文描述,开行方案生成双层规划模型包含停站优化和客流分配两部分内容,上层从企业的角度关注总的运营费用最小,同时尽量满足所有客流需求;下层则以服务旅客数量最大和总的旅行时间最小为目标尽快完成旅客运输任务。同时上下两层实现闭环反馈优化。

文本设计的相关参数为: $T$  为开行方案制定的时间段,例如 1 天。 $S$  为路网中车站集合。 $E$  为路网中区间集合。 $L$  为列车类型,本文中涉及高速列车,中速列车等。 $L_{o,d}$  为车站  $o$  和  $d$  间的路径长度。 $P_{o,d,l}$  为在运营时间段  $T$  内乘坐  $l$  类型列车在车站  $o$  和  $d$  间客流需求。 $T_{o,d,l}$  为车站  $o$  和  $d$  间  $l$  型列车运

行时间.  $T_i^s$  为车站  $i$  的停站时间.  $C_i^s$  为运营时段  $T$  内车站  $i$  的通过能力.  $C_k^s$  为运营时段  $T$  内区间  $k$  的通过能力.  $C_l$  为  $l$  型列车平均定员.  $K$  为席位利用率, 在不超员的情况下,  $K < 1$ , 特殊运营条件下可适当增加  $K$  的取值.  $C_i^d$  为车站  $i$  始发终到能力标识, 如果车站  $i$  具有始发终到能力, 则  $C_i^d = 1$ ; 否则,  $C_i^d = 0$ .  $D$  为每列车的开行的固定费用.  $F$  为车公里费用.  $M$  为停站方案的总服务频次, 可以设置为满足旅客需求的足够大的整数.

本文涉及的决策变量为:  $y_j$  为列车  $j$  服务标识, 如果列车  $j$  存在于开行方案中, 则  $y_j = 1$ ; 否则  $y_j = 0$ .  $x_{j,i}$  为列车  $j$  在车站  $i$  的停站标识, 如果列车  $j$  在车站  $i$  停站, 则  $x_{j,i} = 1$ ; 否则  $x_{j,i} = 0$ .  $o_{j,i}$  为列车始发站标识, 如果列车  $j$  的始发车站为  $i$ , 则  $o_{j,i} = 1$ ; 否则  $o_{j,i} = 0$ .  $d_{j,i}$  为列车终到站标识, 如果列车  $j$  的终到车站为  $i$ , 则  $d_{j,i} = 1$ ; 否则  $d_{j,i} = 0$ .  $u_{j,o,d}$  为车站  $o$  和  $d$  间列车  $j$  承担的旅客数量.  $z_{j,l}$  为列车类型标识, 如果列车  $j$  为  $l$  型, 则  $z_{j,l} = 1$ ; 否则  $z_{j,l} = 0$ .  $s_{j,i}$  为车站服务标识, 如果车站  $i$  存在于列车  $j$  服务的停站方案, 则  $s_{j,i} = 1$ ; 否则  $s_{j,i} = 0$ .  $e_{j,k}$  为区间服务标识, 如果区间  $k$  存在于列车  $j$  服务的停站方案, 则  $e_{j,k} = 1$ ; 否则,  $e_{j,k} = 0$ .

## 2.1 停站优化

### ① 目标函数.

总的运营费用最小

$$C_{\text{cost}} = \min \sum_{j=1}^M D y_j + \sum_{j=1}^M \sum_{o=1}^{S-1} \sum_{d=o+1}^S y_j F L_{o,d} o_{j,o} d_{j,d}. \quad (1)$$

未服务的旅客数量最小

$$C_{\text{passenger}} = \min \sum_l \sum_{o=1}^{S-1} \sum_{d=o+1}^S (P_{o,d,l} - \sum_{j=1}^M u_{j,o,d} z_{j,l} y_j). \quad (2)$$

### ② 约束条件.

车站始发能力约束

$$C_i^d \geq o_{j,i}, \quad i = 1, 2, \dots, S-1, j = 1, 2, \dots, M. \quad (3)$$

车站终到能力约束

$$C_i^d \geq d_{j,i}, \quad i = 2, 3, \dots, S, j = 1, 2, \dots, M. \quad (4)$$

列车不能途径始发站之前的车站

$$\sum_{j=1}^M \sum_{i=2}^{S-1} \sum_{i_1=0}^{i-1} y_j o_{j,i} x_{j,i_1} = 0, \sum_{j=1}^M \sum_{i=2}^{S-1} \sum_{i_1=0}^{i-1} y_j o_{j,i} s_{j,i_1} = 0. \quad (5)$$

列车不能途径终到站之后的车站

$$\sum_{j=1}^M \sum_{i=1}^{S-1} \sum_{i_1=i+1}^S y_j d_{j,i} x_{j,i_1} = 0, \sum_{j=1}^M \sum_{i=1}^{S-1} \sum_{i_1=i+1}^S y_j d_{j,i} s_{j,i_1} = 0. \quad (6)$$

每列车只有一个始发站

$$\sum_{i=1}^S y_j o_{j,i} = 1, j = 1, 2, \dots, M. \quad (7)$$

每列车只有一个终到站

$$\sum_{i=1}^S y_j d_{j,i} = 1, j = 1, 2, \dots, M. \quad (8)$$

列车在其始发站需停站

$$o_{j,i} \leq x_{j,i}, j = 1, 2, \dots, M, i = 1, 2, \dots, S. \quad (9)$$

列车在其终到站需停站

$$d_{j,i} \leq x_{j,i}, j = 1, 2, \dots, M, i = 1, 2, \dots, S. \quad (10)$$

列车需经过其停站的车站

$$s_{j,i} \geq x_{j,i}, j = 1, 2, \dots, M, i = 1, 2, \dots, S. \quad (11)$$

车站能力约束

$$C_i^s \geq \sum_{j=0}^M y_j s_{j,i} i = 1, 2, \dots, S. \quad (12)$$

区间能力约束

$$C_k^s \geq \sum_{j=0}^M y_j e_{j,k}, k = 1, 2, \dots, E. \quad (13)$$

## 2.2 客流分配

在给定列车停站方案和服务频次后可进行客流分配优化, 根据问题特点可建立混合整数规划模型.

### ① 目标函数.

旅客服务数量最大

$$\max \sum_{j=1}^M \sum_{o=1}^{S-1} \sum_{d=o+1}^S y_j u_{j,o,d} L_{o,d}. \quad (14)$$

所有乘客总的旅行时间最小

$$\min \sum_{j=1}^M \sum_{o=1}^{S-1} \sum_{d=o+1}^S y_j u_{j,o,d} (\sum_l T_{o,d,l} z_{j,l} + \sum_{o_1=o+1}^{d-1} x_{j,o_1} T_{o_1}). \quad (15)$$

### ② 约束条件.

旅客需求约束

$$\sum_{o=1}^{S-1} \sum_{d=o+1}^S (\sum_{j=1}^M y_j u_{j,o,d} z_{j,l} \leq P_{o,d,l}), \quad l = 1, 2. \quad (16)$$

列车定员约束

$$\sum_{o=1}^k \sum_{d=k+1}^S y_j u_{j,o,d} \leq \sum_l C_l K z_{j,l} y_j, \quad j = 1, 2, \dots, M, \quad k = 1, 2, \dots, S-1. \quad (17)$$

### 3 基于 GA 的开行方案生成算法设计

根据问题特点本文设计了一个嵌套分枝定界法的 GA 混合智能算法来求解开行方案生成双层规划问题。

① 编码与初始化:设计不同类型停站方案开行频次为变量集,如图 2。图中涉及  $K$  个车站,所有可能的停站方案描述为一个  $K \times N$  的二维矩阵  $\mathbf{X}$ ,其中每一行代表一种停站方案,每一列代表相应的车

站。矩阵中的元素可取值为 1 或者 0,当停站方案  $j$  在车站  $i$  有停站时,  $X_{j,i} = 1$ , 否则  $X_{j,i} = 0$ 。左侧  $U$  个字符串代表  $U$  种可能的服务频次组合,每个字符串是维度为  $M$  的向量,其中每个元素取值为整数且对应一种停站方案,若取值为 0 则代表不采用该停站方案。根据第 1 节的分析,列车停站方案一般分为 NSS、SMS、SSS、SAS 4 种,设置其方案数量分别为  $A_1$ 、 $A_2$ 、 $A_3$ 、 $A_4$ ,则总的停站方案、种类  $M = A_1 + A_2 + A_3 + A_4$ ,故图 2 中染色体大小为  $M$ ,种群数量为  $U$ ;

服务频次			停站方案										
字符串1	字符串2	...	字符串 $U$	车站1	车站2	车站3	车站4	车站5	...	车站 $K-1$	车站 $K$	车站序列	
3	4		5	1	0	0	0	0	...	0	1	方案1	A <sub>1</sub>
5	6		1	1	0	0	1	0	...	0	0	方案2	
0	3		2	1	0	0	1	0	...	0	1	方案3	A <sub>2</sub>
0	1		3	1	0	0	1	0	...	1	1	方案4	
1	3		0	1	0	1	1	1	...	0	1	方案5	A <sub>3</sub>
3	0		1	1	0	0	1	1	...	0	1	方案6	
⋮	⋮	⋮	⋮										
2	1	7	1	1	1	1	0	...	0	0	方案 $M$	A <sub>4</sub>	

图 2 停站方案及服务频次描述

Fig. 2 Representation of stop-schedules and frequency

② 交叉算子:交叉算子的目的是通过交换字符串部分内容获得更好的染色体<sup>[7]</sup>。本文中染色体代表了停站方案的服务频次。首先选择两个父辈字符串,随机确定交换的开始位置  $\bar{s}$  和结束位置  $\bar{e}$ ,然后交换位于  $\bar{s}$  和  $\bar{e}$  中的字符串片段形成一个新的服务频次染色体。之后重复这个过程直到  $U$  个新的子代的服务频次字符串生成。这里没生成一个新的染色体都需要验证能力约束;

③ 变异算子:变异算子的目的是对开行频次进行微小的调整。首先,随机选择一个染色体的某个基因,然后将其改变为某个合适数值。文本设计变异的概率为 20%,这意味着将有 20% 的  $2U$  个染色体发生变异。

④ 复制算子:复制算子的目的是选择  $U$  个较优的染色体形成下一代种群。首先计算总的目标函数值  $f = \lambda_1 C_{\text{cost}} + \lambda_2 C_{\text{passenger}}$ , 其中  $\lambda_i$  是目标  $i$  的权重,故适应度函数可取函数值得倒数  $1/f$ ;而后根据轮盘赌方法生成下一代种群。这里目标函数的计算需要下层客流分配的结果;

⑤ 迭代终止:根据问题的规模,设置当最优解保持不变的迭代次数达到一定数量时,终止计算,输出最优开行方案。

### 4 算例分析

为了证明本文提出的双层规划模型及算法的可行性及优点。下文将对文献[3]中的算例进行对比试验。算例采用台湾高速铁路,里程 340 km,链接台北和高雄两个主要城市,全线有 7 个车站,3 个具有始发和终到能力。关于台湾高铁更多的信息可参见文献[3]。

按照本文提出的模型,首先获取所有可能的停站方案。根据其线路特点设置 NSS 方案为 3 种, SMS 方案为 1 种, SSS 方案为 14 种, SAS 方案为 3 种。因此算法中染色体大小为 21,种群数量设为 50。客流分配中对于长距离的旅客优先分支。根据本文提出嵌入分支定界法的 GA 算法求解。图 3 描述了最优解的迭代过程,经过 40 次分支后,最优解集中于 18 277,此时的开行方案可见图 4。该方案可

满足所有旅客的运输需求,总的服务频次为 11,即一共开行 11 列车,其中最后一列车从第 4 个车站发车,规避了文献[3]中所有列车只能从第一个车站发车的缺点,减少了能力浪费. 此外该模型的计算时间为 67 s. 该算例说明了本文提出的开行方案生成模型及算法的可行性.

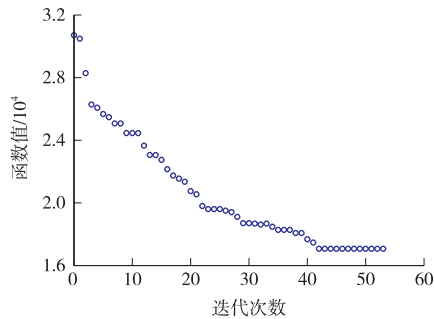


图 3 台湾高速铁路算法迭代过程  
Fig. 3 Iteration procedure of the solution of the Taiwan HSR

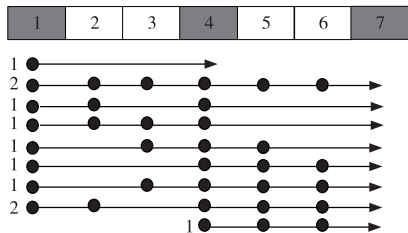


图 4 台湾高速铁路最优开行方案  
Fig. 4 Optimal line plan of the Taiwan high-speed railway

5 结 论

根据中国运输组织的特点设计所有可能的停站方式,将不同停站方案的服务频次作为决策变量,大大减少了原问题中变量的个数,同时满足了大量的始发和终到唯一性约束,使得算法迭代中只需判断能力约束即可,化简了问题规模和求解难度. 此外,通过嵌入分枝定界法的 GA 算法,使得列车停站方

案生成与客流分配得到循环反馈整体优化,适应复杂运营环境下列车开行方案优化问题,且算法速度快,适应性强.

参考文献:

[1] 史峰,邓连波,霍亮. 旅客列车开行方案的双层规划模型和算法[J]. 中国铁道科学, 2007, 28(3): 110 - 116.  
Shi Feng, Deng Lianbo, Huo Liang. Bi-level programming model and algorithm of passenger train operation plan[J]. China Railway Science, 2007, 28(3): 110 - 116. (in Chinese)

[2] 史峰,周文梁,陈彦,等. 基于弹性需求的旅客列车开行方案优化研究[J]. 铁道学报, 2008(3): 16 - 20.  
Shi Feng, Zhou Wenliang, Chen Yan, et al. Optimization study on passenger train plans with elastic demands [J]. Journal of the China Railway, 2008(3): 16 - 20. (in Chinese)

[3] Chang Y H, Yeh C H, Shen C C. A multi-objective model for passenger train services planning: application to Taiwan's high-speed rail line [J]. Transportation Research Part B, 2000, 34(2): 91 - 106.

[4] Goossens J W, Van H S, Kroon L. A branch-and-cut approach for solving railway line-planning problems[J]. Transportation Science, 2004, 38(3): 379 - 393.

[5] Goossens J W, Van H S, Kroon L. On solving multi-type railway line planning problems [J]. European Journal of Operational Research, 2006, 168 (2): 403 - 424.

[6] Chaktoborty P, Wivedi T. Optimal route network design for transit systems using genetic algorithms[J]. Engineering Optimization, 2002, 34(1): 83 - 100.

[7] Eiben A E, Smith J E. Introduction to Evolutionary Computing [M]. New York: Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2003: 57 - 104.

(责任编辑:李兵)