

文章编号: 2095-2163(2020)09-0061-05

中图分类号: U125

文献标志码: A

基于客流偏差系数的城际铁路列车开行方案优化

邓紫欢, 胡 华, 刘志钢

(上海工程技术大学 城市轨道交通学院, 上海 201600)

摘要: 城际铁路的客流成长期与客流量会随着时间的推移而变化,因此需要定期或不定期的基于线路实际客流量对既有开行方案进行评价和优化。本文提出了客流偏差系数的定义及计算方法,用于评价开行方案与实际客流的匹配程度,在此基础上以乘客出行时间最小化和企业运营成本最小化为优化目标,建立了城际铁路开行方案优化模型,并设计特定遗传算法求解模型,最后以某城际铁路线路为例验证了模型和算法的有效性。该研究成果可为中国城际铁路客流成长期的开行方案周期性评价与优化提供依据。

关键词: 城际铁路; 客流偏差系数; 开行方案优化; 遗传算法

Optimization of intercity railway train operation plan based on passenger flow deviation coefficient

DENG Zihuan, HU Hua, LIU Zhigang

(School of Urban Rail Transit, Shanghai University of Engineering Science, Shanghai 201600, China)

[Abstract] Passenger flow and the growth period of passenger flow of the intercity railway will change with time, so it is necessary to evaluate and optimize the existing operation plan based on the actual passenger flow on a regular or irregular basis. The thesis proposes the definition and calculation method of passenger flow deviation coefficient, which is used to evaluate the matching degree between the operation plan and the actual passenger flow. On this basis, the thesis established an optimization model for intercity railway operation plan by minimizing passenger travel time and minimizing enterprise operating costs, and designs a specific genetic algorithm to solve the problem. Finally, an example of an intercity railway line is used to verify the effectiveness of the model and algorithm. The research results can provide a basis for the periodic evaluation and optimization of the development plan of the intercity railway in the growth period of passenger flow in China.

[Key words] intercity railway; passenger flow deviation coefficient; optimization of operation plan; genetic algorithm

0 引言

国内外对列车开行方案的研究多围绕开行方案的编制、优化方法展开,如国内于剑、张星臣等提出城市轨道交通网络过轨运营开行方案编制方法,采用编组方案和固定停站方案,以确定最佳开行频率和开行交路^[1];邓连波、王峰等基于旅客乘车选择的一般规律,建立了旅客总出行费用最小和企业效益最大为目标的优化模型^[2];国外 schobel 等建立了加入乘客换乘损失考虑的以旅客旅行时间最小为单目标的开行方案优化模型^[3];Bussieck 等讨论了铁路系统具有周期性时间表的交通线路的最优选择^[4]。而由于客流随时间不断变化,以预测客流制定的列车开行方案的使用是有适用期限的,因此铁路部门需要在一段时间之后对开行方案进行调整,使其适应客流的变化。

本文引入客流偏差系数的概念,介绍了一种利用客流偏差系数来评判是否需要开行方案调整优化

的方法,并针对需要调整优化的开行方案,以乘客出行时间消耗最小和企业运营成本最小建立开行方案优化模型,并给出相应求解算法,该方法对中国处于客流成长期的城际铁路列车开行方案周期性评价与优化具有很好的借鉴意义。

1 客流偏差系数的定义

现行开行方案所承载的客流量与制定现行开行方案时的客流量之间是存在一定偏差,如果偏差在设定的阈值范围内,则可认为现行开行方案与客流相匹配,反之则不匹配。这二者之间的偏差可以用客流偏差系数 δ 来表示。在对各个 OD 点对的偏差系数综合考虑的同时,还应重点考虑重要站点之间的偏差系数。因此,在计算客流偏差系数时,应考虑每一对 OD 站点的重要度,越重要的 OD 点对,其重要度越大,式(1)~(3)。

作者简介: 邓紫欢(1995-),女,硕士研究生,主要研究方向:轨道交通智能客运管理;胡 华(1979-),女,博士,副教授,主要研究方向:轨道交通智能客运管理;刘志钢(1974-),男,博士,教授,主要研究方向:轨道交通安全技术、人因工程。

收稿日期: 2019-12-26

$$\delta_{ij}^t = \frac{q_{ij}^t - Q_{ij}^t}{Q_{ij}^t}, \quad (1)$$

$$\delta = \sum_{i=1}^{N-1} \sum_{j=i+1}^N \omega_{ij} |\delta_{ij}^t|. \quad (2)$$

$$\omega_{ij} = \frac{q_{ij}}{\sum q_{ij}}, \quad (3)$$

其中, δ_{ij}^t 表示 t 时段 OD 对 i, j 间客流的偏差系数; q_{ij}^t 表示由售票数据计算获得的 t 时段 OD 对 i, j 间的客流量; Q_{ij}^t 表示由列车开行方案得到的 t 时段 OD 对 i, j 间列车输送的客流量; ω_{ij} 表示 OD 对 i, j 的重要度系数, 表示各 OD 站点之间的重要程度, 本文以 OD 对间的客流量在整个系统中的比例来衡量, 且所有站点重要度之和为 1。

表 1 优化模型参数及变量表

Tab. 1 Table of model parameters and variable

符号	含义
n / 个	线路车站总数
i, j	车站站序
$H = \{A, B, C\} (h \in H)$	不同停站方式的列车种类集合
d_{ij}/km	列车 i 和 j 站间路段的总距离
$k^h \in \{1, 2, \dots, K^h\}$	h 型列车按照停站方案 k^h 运行
A^h / 人	h 型城际列车的列车定员
t_i^h / \min	h 型列车在 i 站包括列车起停附加时间的列车车站时间
R_i^h / 万元	h 型列车在 i 站的停站费用
Q_{ijk}^h / 人	按停站方案 k^h 运行的 h 型列车在 i, j 站间运送的总客流量
q_{ij} / 人	i, j 站间的实际 OD 客流量
C / 万元	铁路部门运营 每车·公里 产生的费用
θ_1, θ_2	城际列车需满足的上座率下限和上限
ρ_{\max}^h	h 型城际列车的最大停站比

表 2 优化模型决策变量表

Tab. 2 Table of optimization model decision variable

决策变量	定义
X_{ik}^h	按照停站方案 k^h 运行的 h 型列车在 i 站是否停车, 0-1 变量
f_k^h / 次	按照停站方案 k^h 运行的 h 型列车的开行频率, 非 0 整数

2.3 模型建立

城铁企业运营成本分为停站费用、列车公里费用以及中转组织费用, 而由于城际铁路的客流为中短途客流, 一般不涉及换乘, 故本文不考虑中转组织费用。本文所讨论的旅客出行时间消耗包括城际列车中途停站时间消耗和城际列车在运行过程中的时间消耗, 城际列车停站而产生的时间消耗与旅客选择乘坐的城际列车等级相关, 列车纯运行时间指不包含列车起停附加和区间内轨道磨损等引起的附加

2 优化模型建立

2.1 模型相关假设

为构建城际列车开行方案优化模型, 须先对其相关边界进行假定:

(1) 所研究的城际铁路系统是封闭的, 其状态变化不受外界因素影响。

(2) 出行的客流充分了解其可能到达目的地的旅客列车的时间及费用消耗。

(3) 系统能够提供理想状态下最大设计能力。

2.2 模型相关参数及变量

城际列车开行方案优化模型的相关参数及变量定义见表 1 和表 2。

运行消耗, 只考虑列车运行速度和列车运行长度的列车运行时间标准, 这部分时间取决于列车的技术速度和列车运行长度^[5-6]。本文建立的以乘客出行时间消耗最小和企业运营成本最小为目标的开行方案优化模型如式(4)~(9):

$$\min C = \sum_{h \in H} (cl \sum_{k=1}^{K^h} f_k^h + \sum_{k=1}^{K^h} \sum_{i=2}^{n-1} X_{ik}^h R_{i,j}^h f_k^h), \quad (4)$$

$$\min T = \sum_{h \in H} \left[\sum_{k=1}^{K^h} \sum_{i=2}^{n-1} X_{ik}^h t_i^h \left(\sum_{p=1}^{i-1} \sum_{q=i+1}^n Q_{pqk}^h \right) + \sum_{k=1}^{K^h} \sum_{i=1}^n \sum_{j=1}^n Q_{ijk}^h \frac{d_{ij}}{V^h} \right], \quad (5)$$

s.t.:

$$\sum_{h \in H} \sum_{k=1}^{K^h} Q_{ijk}^h = q_{ij}, \quad (6)$$

$$\theta_1 \leq \frac{Q_{ijk}^h}{f_k^h A^h} \leq \theta_2, \quad (7)$$

$$\sum_i X_{ik}^h \leq \rho_{\max}^h, \quad (8)$$

$$X_{ik}^h \in \{0,1\}, \text{ (且 } X_{nk}^h = X_{nk}^h = 1; f_k^h \in N(\text{自然数集})\text{)}. \quad (9)$$

式(4)表示优化目标是城际铁路企业运营成本最小化;式(5)表示优化目标是旅客出行时间消耗最小化;式(6)表示客流约束,即构建的优化模型中的列车运送客流总量应等于实际OD客流量;式(7)表示列车上座率约束,即购票上车的旅客人数与列车定员的比率应满足一定要求;式(8)表示列车最大停站数约束;式(9)表示决策变量约束。

3 模型求解算法

本模型所涉及的数据的规模将随着车站数的增加而成倍扩大,解决这类问题的常用方法有粒子群优化算法、模拟退火算法、蚁群优化算法和遗传算法。本文选用遗传算法来解决这一问题,遗传算法具有较强的容错性,且其选择、交叉、变异等操作规则是随机的,适用于求解优化问题的全局最优解^[7]。

3.1 染色体编码

本文采用二进制编码方法对决策变量进行编码。 X_{ik}^h 为0-1变量,故可直接用其取值进行编码,长度为 $n-2$ (n 为线路中间站数),其取值0、1表示按停站方案开行的 h 型列车在中间站 $i+1$ ($i=1, 2, \dots, n-2$) 是否停站; f_k^h 则采用长度为8的二进制编码。编码时,所求列车开行方案的一个基因片段就由一种停站方案和它对应的开行频率组成。长度为 $(K^B+2)(n+6)$ 的列车开行方案染色体可以按停站方案和开行频率划分为 $2K^B+4$ 个基因片段,其中长度为 $n+2$ 的基因片段可直接读取基因位点上的值获得停站方案,长度为8的基因片段则需将二进制转化为十进制,从而得到开行频率,设基因编码为 $g_m g_{m-1} \dots g_2 g_1$, 则该基因片段对应的解码公式(10)为:

$$G = \sum_{i=1}^m 2^{i-1} g_i. \quad (10)$$

式中, m 为编码长度,即 $m=8$, G 为转化为十进制后的开行频率的值。

3.2 适应度函数

遗传算法要求适应度函数的输出为可以比较的非负值,而本文的目标函数值恒为正,故将各目标函数的和作为适应度函数值,式(11)^[8]:

$$Fit(X) = \min C + \min T. \quad (11)$$

3.3 变异算子

根据本文对开行方案基因片段的编码方式,此处对二种不同的基因片段使用不同的变异方法,故而在进行变异时,需要对随机选中的基因片段种类进行判断:

(1)对于表示停站方案基因片段:

Step 1 其中站站停与一站直达列车的停站方式是确定的,故只需对表示择站停列车的基因片段进行变异处理即可。故若选中的基因片段是属于一站直达列车和站站停列车,便不进行变异处理;反之进行(2)。

Step 2 从选中的基因片段中随机选择一个基因位点,用1减去该基因位点的值。

(2)对于表示开行频率的基因片段,本文采用非均匀变异的方法使交叉概率更具自适应性,加强遗传算法的局部搜索能力:

Step 1 将选中的开行频率基因片段的二进制值转化为十进制实数 r , 开行频率 r 的变化范围为 $[R_{\min}, R_{\max}]$ 。

Step 2 基因按式(12)规则变异:

$$x^{t+1} = \begin{cases} \lceil x^t + \Delta(t, R_{\max} - x^t) - 0.5 \rceil, & \text{if } \text{random}(0,1) = 0 \\ \lceil x^t + \Delta(t, x^t - R_{\min}) - 0.5 \rceil, & \text{if } \text{random}(0,1) = 1. \end{cases} \quad (12)$$

式中, $\Delta(t, v) = v \times (1 - r^{(1-t/T)^b})$, 表示的是 $[0, v]$ 范围内服从非均匀分布的随机数,要求其值随迭代次数而趋近于0。将 x 的取值转换为二进制编码。

通过以上操作,可以使遗传算法后期运算阶段,列车开行频次的取值更加趋于稳定,从而使得其最优解能够较为集中在最有希望的区域中进行搜索。

4 算例分析

某条城际铁路线路如图1所示,该线路共有7个站点,运行有A、B、C三种类型的城际列车。模型所需的相关参数和数据见表3,由于上下行方向计

算方法一致,本文以下行为例,原开行方案编制所使用的OD客流表见表4,根据原始OD客流表编制的列车开行方案见表5,在使用上述列车开行方案组织列车开行一段时间后,获取的实际客流OD表见表6,根据表4和表6按公式(1)和(3)求得的各OD点对之间的重要度和客流偏差系数分别见表7和表8。若将阈值设定为10%,根据表7和表8中的数据,利用公式(1)和(2)计算可得 $\delta_{\text{优化前}} = 15.9\% > 10\%$,则从客流量的波动情况来看,当前开行方案与客流不匹配,应适当调整优化。依据本文模型及算法,设定种群规模 M 为100,交叉概率 P_c 为0.65,变异概率 P_m 为0.09,终止进化代数为300,利用matlab2018a进行多次运行求解,最终可得到开行方案,见表9。算法收敛如图2所示。

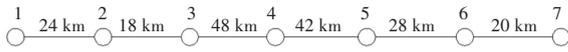


图1 城际铁路线路简图

Fig. 1 Intercity railway line diagram

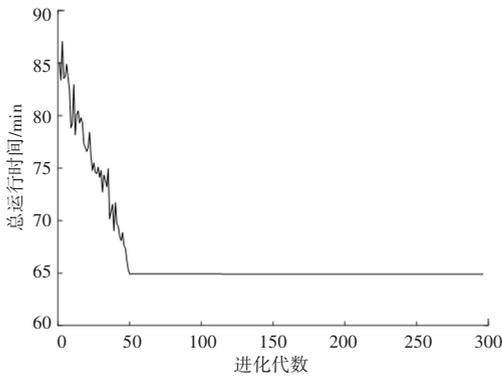


图2 算法收敛曲线

Fig. 2 Algorithm convergence curve

表3 模型所需参数列表

Tab. 3 Table of model parameter table

列车种类	A	B	C
车公里费用,元/车 km	150	150	150
最高运营速度/($\text{km} \cdot \text{h}^{-1}$)	250	250	250
停站时间/min	3	3	3
列车定员/人	600	600	600
上座率	0.8	0.8	0.8
列车最大停站比	0	0.8	1

表4 原始客流OD表

Tab. 4 Table of original passenger flow OD

车站编号	1	2	3	4	5	6	7
1	0	1 795	2 143	2 861	1 354	1 443	5 604
2	—	0	403	2 053	874	903	2 309
3	—	—	0	1 228	153	187	649
4	—	—	—	0	756	1 269	3 033
5	—	—	—	—	0	516	2 607
6	—	—	—	—	—	0	1 373
7	—	—	—	—	—	—	0

表5 当前城际列车开行方案表

Tab. 5 Table of current intercity operation plan

列车种类	停站方案	开行数量
A	1→7	4
B	1→4→7	5
B	1→5→7	4
B	1→2→4→7	6
B	1→3→4→7	5
B	1→4→5→7	5
B	1→4→6→7	3
B	1→2→4→5→7	4
B	1→2→4→6→7	5
B	1→3→5→6→7	3
C	1→2→3→4→5→6→7	5

表6 实际客流OD表

Tab. 6 Table of actual passenger flow OD

车站编号	1	2	3	4	5	6	7
1	0	1 913	2 378	3 939	1 352	1 781	6 319
2	—	0	417	2 095	759	854	2 411
3	—	—	0	896	149	179	677
4	—	—	—	0	966	1 157	2 520
5	—	—	—	—	0	523	929
6	—	—	—	—	—	0	1 708
7	—	—	—	—	—	—	0

表7 各OD点对的重要度系数表

Tab. 7 Table of importance coefficient of each OD point pair

车站编号	1	2	3	4	5	6	7
1	0	0.06	0.07	0.12	0.04	0.05	0.19
2	—	0	0.01	0.06	0.02	0.03	0.07
3	—	—	0	0.03	0.01	0.01	0.02
4	—	—	—	0	0.03	0.03	0.07
5	—	—	—	—	—	0.02	0.03
6	—	—	—	—	—	—	0.05
7	—	—	—	—	—	—	0

表8 各OD对偏差系数表

Tab. 8 Table of deviation coefficients between OD pairs %

车站编号	1	2	3	4	5	6	7
1	0	6.57	10.97	37.68	-0.18	23.42	12.76
2	—	0	3.36	2.05	-13.16	-5.43	4.42
3	—	—	0	-27.04	-2.61	-4.28	4.31
4	—	—	—	0	27.78	-8.83	-16.91
5	—	—	—	—	0	1.36	64.37
6	—	—	—	—	—	0	24.40
7	—	—	—	—	—	—	0

由于优化模型中的客流量约束使用的是实际客流OD,也即 $\delta_{\text{优化后}} = 0\%$,故从开行方案与客流的匹配性角度来说,优化后的开行方案更符合实际客流的需求。对比当前与优化后的开行方案表10可知,优化后的旅客出行成本明显减少,企业运营成本略有增加,优化后的列车开行停站方案和开行频率都

(下转第68页)