

考虑通道总能耗的城际列车运行速度优化研究

朱宇婷^{1,2}, 毛保华¹, 吴珂琪^{1,3}, 戎亚萍¹, 蒋玉琨⁴

- (1. 北京交通大学 城市交通复杂系统理论与技术教育部重点实验室, 北京 100044;
2. 奥本大学 土木工程系, 奥本 36849; 3. 北京市交通委员会行政审批服务中心, 北京 100073;
4. 北京地铁设计研究所, 北京 100088)

摘要: 在考虑不同运输方式竞争关系的基础上, 探讨了能力约束下的通道客流分配方法. 以乘客出行总费用及通道运营总成本最小为目标, 构建了城际列车运行速度非线性优化模型, 并采用遗传算法对模型进行求解. 算例结果表明, 模型能够有效求解含限速区间的城际列车运行速度优化问题, 且随限速区间运行速度的下降, 非限速区间最优运行速度呈缓慢上升趋势; 对于短距离通道而言, 可开行较高运行速度的城际列车, 以吸引客流; 而对于中距离通道而言, 可适度降低城际列车运行速度, 减少运营能耗.

关键词: 城际铁路; 列车运行速度; 能源消耗; 通道

中图分类号: U292.43 **文献标志码:** A **文章编号:** 1001-0645(2016)增刊2-0058-05

DOI: 10.15918/j.tbit1001-0645.2016.增刊2.014

Research on Running Speeds of Intercity Railway Trains with the Consideration of Corridor's Energy Consumption

ZHU Yu-ting^{1,2}, MAO Bao-hua¹, WU Ke-qi^{1,3}, RONG Ya-ping¹, JIANG Yu-kun⁴

- (1. MOE Key Laboratory for Urban Transportation Complex Systems Theory and Technology, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China; 2. Department of Civil Engineering, Auburn University, Auburn 36849, USA; 3. Administrative Approval Service Centre of Beijing Municipal Commission of Transport, Beijing 100073, China; 4. Beijing Mass Transit Railway Design Institute, Beijing 100088, China)

Abstract: Considering the competition among different transportation modes, a transit assignment method with capacity constraints was proposed. Then, a nonlinear model was established to optimize the running speeds of intercity railway trains. The objective of the model was to minimize the total passenger and operational cost. A genetic algorithm was used to solve the model. Numerical results show that the proposed model can work well on speed optimization problem of intercity railway trains with speed-limit constraints. With the decrease of running speeds in speed-limit sections, the optimal speeds of intercity railway trains rise in sections without speed-limit. For short-distance corridors, a higher running speed can attract more passengers; while for middle-distance corridors, a lower running speed can reduce energy consumption.

Key words: intercity railway; running speeds; energy consumption; corridor

列车运行速度作为城际铁路运输系统的重要技术参数, 是体现城际铁路客运服务水平的重要指标,

收稿日期: 2016-10-30

基金项目: 国家基础研究计划项目(2012CB725406); 国家自然科学基金创新研究群体项目(71621001); 国家自然科学基金资助项目(71390332)

作者简介: 朱宇婷(1989—), 女, 博士, E-mail: 11114241@bjtu.edu.cn.

也是影响运营能耗的重要因素。

马大炜^[1]探讨了影响高速铁路速度目标值选择的主要因素,并给出了速度目标值的选择原则;苏梅等^[2]模拟分析了不同铁路目标速度对能耗和旅行时间的影响;HWANG^[3]和 MIYATAKE 等^[4]通过制定列车操纵策略,优化控制列车速度,减少运行能耗;肖雄和顾保南^[5]在分析功能定位、平均站距与速度目标值三者关系的基础上,提出了基于城际铁路功能定位的速度目标值比选评价模型;冯旭杰等^[6]采用数学规划的方法,以铁路部门及乘客利益最大化为目标,优化铁路运行速度。然而,上述研究主要以铁路运营部门及铁路乘客为研究对象,其虽然可以在一定程度降低了铁路运行能耗,但却可能导致整个客运通道能耗的增加。因此,城际铁路运行速度优化需要从系统的角度出发,着眼于整个客运通道的情况进行决策。

本文从整个客运通道的角度出发,以城际列车运行速度为决策变量,建立综合考虑乘客出行费用及通道运营总成本的城际列车运行速度优化模型,以达到提高通道服务水平、节约能源的目的。

1 模型的建立

1.1 问题描述及基本假设

考虑一条中短距离城际客运通道,令 M 为节点集合,即通道内的中心城区集合,有 $r, s \in M$; I 为区间集合,沿下行方向依次标记为 $1, 2, \dots, m$, 有 $i \in I$; K 为通道内出行方式集合,包括城际铁路、公路大巴及私家车,分别采用 w, b 和 a 表示, $K = \{w, b, a\}$, 有 $k \in K$ 。 Q_{rs}^k 表示 OD 对 rs 间的日出行需求。假定:城际列车日开行对数及发车间隔已知,分别为 N 和 H ; 城际列车区间 i 内的能源消耗率 e_i^w 与区间运行速度 v_i^w 有关,即 $e_i^w = \alpha(v_i^w)^2 + \beta v_i^w + A$, 其中, α, β 和 A 为模型系数。

1.2 模型目标

城际列车运行速度优化需兼顾乘客及运输通道两方面的效益。因此,城际列车运行速度优化模型应以乘客出行成本及通道运营总成本最小为目标。

1.2.1 乘客出行成本

乘客出行成本由乘客的时间成本和货币成本两部分组成。时间成本是指乘客出行消耗的时间,包括在途乘车时间和市内衔接时间;货币成本主要是指乘客出行所需支付的货币费用(即票价)。则有

$$u_k^{rs} = \omega \left(\sum_{i \in I} (\phi_i^{rs} l_i^k / v_i^k) + t_k^{rs} \right) + c_k \sum_{i \in I} (\phi_i^{rs} l_i^k). \quad (1)$$

式中: u_k^{rs} 表示 OD 对 rs 间乘客选择第 k 种运输方式所需支付的出行成本,元; ω 表示乘客时间价值,元/h; ϕ_i^{rs} 表示 OD 对 rs 与区间 i 的关系,当 OD 对乘客经过区间 i 时,取 $\phi_i^{rs} = 1$, 否则取 0; l_i^k 表示区间 i 内第 k 种运输方式的路段长度, km; v_i^k 表示第 k 种运输方式在区间 i 内的运行速度, km/h; t_k^{rs} 表示 OD 对 rs 间乘客选择第 k 种运输方式的市内衔接时间, h; c_k 表示第 k 种运输方式的运价率, 元/km。

1.2.2 运营成本

运营成本主要由固定运营费用和运行能耗两部分构成。

$$CO_k^i = (f_k + \eta e_i^k) l_i^k n_k^i. \quad (2)$$

式中: CO_k^i 表示第 k 种运输方式在区间 i 内的运营总成本,元; f_k 表示第 k 种运输方式单列(辆)车的固定运营成本,元/(车·km); η 表示能耗费率,元/MJ; e_i^k 表示区间 i 内第 k 种运输方式的能源消耗率, (MJ/km); n_k^i 表示第 k 种运输方式在区间 i 内开行的车辆数,有

$$n_k^i = \begin{cases} \sum_{r \in M} \sum_{s \in M} \phi_i^{rs} q_k^{rs} / AC_k & k \in \{b, a\} \\ 2N & k = w \end{cases}. \quad (3)$$

式中, q_k^{rs} 表示 OD 对 rs 间第 k 种运输方式的客流量; AC_k 表示第 k 种运输方式的平均载客人数。

1.3 优化模型

以乘客出行总成本和通道运营总费用最小为目标,各区间运行速度为决策变量,建立优化模型如下:

$$\min Z = \sum_{r \in M} \sum_{s \in M} \sum_{k \in K} u_k^{rs} q_k^{rs} + \sum_{k \in K} \sum_{i \in I} CO_k^i. \quad (4)$$

$$\text{s. t.} \quad \sum_{r \in M} \sum_{s \in M} \sum_{i \in I} \phi_i^{rs} l_i^k q_k^{rs} / \sum_{i \in I} (n_k^i l_i^k) \geq \varphi \quad k = w. \quad (5)$$

$$c_k \sum_{r \in M} \sum_{s \in M} \sum_{i \in I} \phi_i^{rs} l_i^k q_k^{rs} - \sum_{i \in I} CO_k^i \geq \vartheta \quad k = w. \quad (6)$$

$$\left[2 \left(\sum_{i \in I} l_i^k / v_i^k + d \right) / H \right] \leq \psi \quad k = w. \quad (7)$$

$$(N-1)H + 2 \sum_{i \in I} l_i^k / v_i^k + d \leq t_2 - t_1 \quad k = w. \quad (8)$$

$$v_i^k \leq v_i^k \leq \bar{v}_i^k \quad k = w. \quad (9)$$

式中: φ 为城际列车单位公里座位利用率下限; ϑ 为

城际铁路目标利润值,元; d 为城际列车折返时间, h ; ψ 为城际铁路列车配备数; t_1 、 t_2 为城际列车在始发站的最早发车和最晚到达时刻; \underline{v}_i^k 、 \bar{v}_i^k 为区间*i*内城际列车速度的下、上限,km/h.

式(4)为最小化通道总成本;式(5)保证城际列车上座率;式(6)保证铁路基本收益;式(7)确保城际列车周转需求;式(8)保证城际铁路在始发站能够具有合理的始发终到时间;式(9)保证城际列车满足区间限速.

1.4 通道客流分配方法

流量 q_k^r 是乘客出行方式选择的聚类结果,体现了不同交通方式间的竞争关系.无容量约束情况下,各交通方式的客流量可采用Logit模型获得,

$$\hat{q}_k^r = Q_{rs} \exp(-\theta u_k^r) / \sum_{k \in K} \exp(-\theta u_k^r). \quad (10)$$

式中: \hat{q}_k^r 表示无能力约束下OD对 rs 间选择第*k*种运输方式的客流量; θ 为模型待定系数.

然而,在实际操作中,为保证各站乘客的基本出行需求及提高座位利用率,铁路部门会根据实际情况,制定票额分配计划,确定城际铁路为各OD对提供的客运能力.当选择城际铁路的乘客超过该能力时,部分乘客将被迫使用其他方式出行.有城际铁路客票能力约束时,各运输方式客流量有

$$q_k^r = \begin{cases} \hat{q}_k^r + (\hat{q}_k^r - q_k^r) p_k^r & k \in \{b, a\}, k' = w \\ \min\{\hat{q}_k^r, Tik_{rs}\} & k = w \end{cases}. \quad (11)$$

式中, Tik_{rs} 为OD对 rs 间预留的城际铁路票额数; p_k^r 为OD对 rs 间乘客在第二次选择时选择第*k*种运输方式的概率,有

$$p_k^r = \exp(-\theta u_k^r) / \sum_{k \in \{b, a\}} \exp(-\theta u_k^r). \quad (12)$$

1.5 求解算法

采用遗传算法对模型进行求解,具体步骤如下:

步骤1:确定各项基本参数,生成初始种群 $V_{(1)}$,置进化代数 $N=1$.

步骤2:在式(5)~(9)的约束下,通过公式(4),计算种群 $V_{(N)}$ 中每一个体对应的适应度函数值*Z*.

步骤3:判断是否满足最大代数.若满足,则计算结束,选择最优结果进行输出;否则,令 $N=N+1$,对种群 $V_{(N-1)}$ 进行选择、交叉、变异等操作,得到新的种群 $V_{(N)}$,转步骤2.

2 算例及分析

2.1 算例设计与计算

以某城际客运通道为例,中心城区沿下行方向

依次为 S_1 、 S_2 、 S_3 和 S_4 ,区间编号依次为1、2和3,客流需求、线路长度及城际铁路票额分配情况见表1.城际列车日开行50对;发车间隔及折返时间为0.25h;始发站最早发车和最晚到达时刻分别为6:30和23:00;各区间运行速度下限均为100km/h,区间1运行速度上限为280km/h,区间2和3运行速度上限为350km/h;运价率为0.43元/km,固定运输成本为20元/(列·km);各区间能源消耗率满足 $e_i^w = 0.0009 \cdot (v_i^w)^2 - 0.0301 \cdot v_i^w + 5.9727$;市内衔接时间为1.1h;铁路部门最低利润要求为 1.5×10^6 元,座位利用率不低于0.8人/(座位·km),可用列车数不超过15列.公路大巴及私家车平均载客人数分别为44和3人/车,平均运行速度分别为60和100km/h,固定运输成本分别为3和1元/(车·km),平均能源消耗率分别为11.88和2.85MJ/km;运价率分别为0.30和0.92元/km,公路大巴的市内衔接时间为0.6h,不考虑私家车的市内衔接时间.能耗费率为0.28元/MJ;旅客时间价值为25元/h;模型参数 θ 取0.04.根据上述参数计算得到,当 $(v_1^w, v_2^w, v_3^w) = (198, 216, 204)$ km/h时,通道总费用最低,为3.07千万元.

表1 客流需求、线路长度及城际铁路票额分配情况

Tab.1 Demand, line length and railway ticket allocation

OD对	S_1-S_2	S_1-S_3	S_1-S_4	S_2-S_3	S_2-S_4	S_3-S_4
单向需求/(万人·h ⁻¹)	2.5	1.2	3.5	0.5	1.3	1.5
铁路单向票额/千张	7.6	5.7	22.7	1.1	6.5	6.8
公路线路长度/km	75	125	240	50	165	115
铁路线路长度/km	80	130	250	50	170	120

2.2 灵敏度分析

为分析列车最优运行速度的取值特点,对通道长度及区间限速进行灵敏度分析.由于遗传算法得到的解是近似最优解,为提高分析的准确性,对每次变化进行5次计算,再通过拟合确定变化趋势.

2.2.1 客运通道长度

令 ζ 表示通道总长度,等比例变化通道内各区间的长度,观察城际列车各区间最优运行速度的变化如图1所示.可以发现,随通道长度变化,区间最优运行速度呈现3种变化趋势.

(1)趋势I:当 $\zeta < 210$ km时,随通道长度的减小,城际铁路最优运行速度呈下降趋势.主要原因在于,出行距离越短,通过提高城际铁路运行速度吸引来的乘客越少,即便大幅度提高运行速度也难以快速降低公路运量及能耗,反而造成城际铁路自身

能耗的快速增加,最终导致通道总能耗增加。

(2)趋势Ⅱ:当 $\zeta \in [210, 270]$ km时,城际铁路在途运输时间短的优势逐渐显现。随着通道长度的增加,城际铁路优势愈发凸显,适度降低运行速度依然能够保证客流量,还能降低运行能耗。因此,在该距离范围内,随着通道长度的增加,城际铁路最优运

行速度呈现下降趋势。

(3)趋势Ⅲ:当 $\zeta > 270$ km时,城际铁路在途运输时间短的优势得到充分发挥,即使开行较低运行速度的列车,其仍能达到满载。此时,运行速度的选取仅为保证铁路运营成本及铁路乘客出行成本之间的平衡,案例最优运行速度的平衡点为 195 km/h。

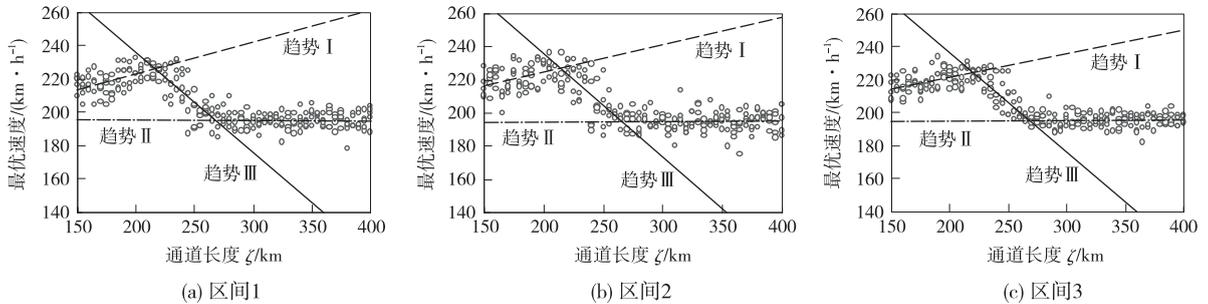


图 1 通道长度对城际列车最优运行速度的影响
Fig. 1 Impact of corridor's length on optimal speeds

2.2.2 区间限速

令区间 1 最高限速由 300 km/h 变为 125 km/h,观察城际列车最优运行速度变化如图 2 所示。结论如下:

(1) 当区间最高限速大于初始最优运行速度(即 198 km/h)时,区间限速不影响最优运行速度的选取。

(2) 当区间最高限速小于初始最优运行速度

时,随着区间最高限速的下降,限速区间的最优运行速度快速下降,且等于区间最高限速;非限速区间则呈现缓慢增加的变化趋势。这说明,为缓解限速区间造成的乘客出行成本的增加,非限速区间宜适度提高运行速度;同时,为保证能耗水平,非限速区间运行速度不宜过高。案例中,当 v_1^w 由 198 km/h 降至 125 km/h 时, v_2^w 、 v_3^w 仅提高了 20 km/h。

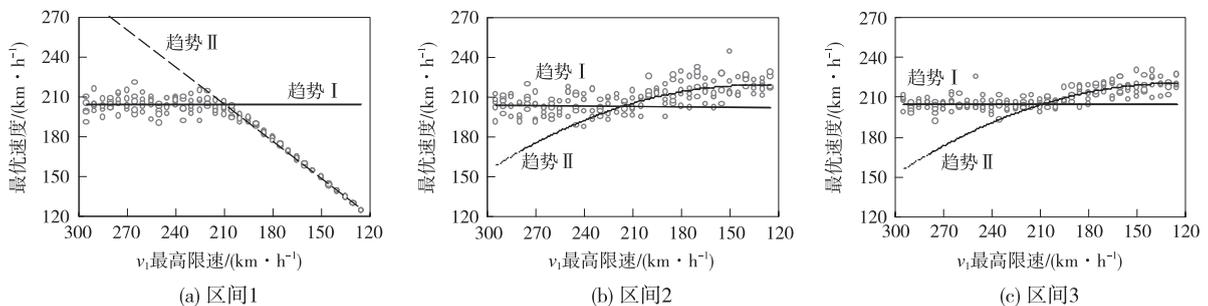


图 2 区间限速对城际列车最优运行速度的影响
Fig. 2 Impact of speed limitation on optimal speeds

3 结论

① 针对城际客运通道,建立了城际列车运行速度优化模型。算例结果表明,模型能够有效求解含限速区间的城际列车运行速度优化问题。

② 为提高竞争力,城际铁路在短距离通道内可采用较高的运行速度;而在中距离客运通道内,可适度降低城际铁路运行速度,从而在保证旅客出行需求的前提下,减少城际铁路运营能耗。

③ 为弥补限速区间带来的乘客出行成本的增

加,可适度提高非限速区间的运行速度;但为保证能耗水平,非限速区间运行速度不宜过高。

参考文献:

- [1] 马大炜. 高速列车及其速度目标值的探讨[J]. 中国铁道科学, 2003, 24(5): 1-8.
Ma Dawei. Research on high-speed trains and its targeted speed[J]. China Railway Science, 2003, 24(5): 1-8. (in Chinese)
- [2] 苏梅, 李建新. 我国城市铁路最高设计速度值研究[J]. 交通运输系统工程与信息, 2004, 4(4): 64-67.

- Su Mei, Li Jianxin. Maximum design speed for urban railways of China[J]. Journal of Transportation System Engineering and Information Technology, 2004, 4(4): 64 - 67. (in Chinese)
- [3] Hwang H S. Control strategy for optimal compromise between trip time and energy consumption in a high-speed railway [J]. IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics-Part A: Systems and Humans, 1998, 28(6): 791 - 802.
- [4] Miyatake M, Ko H. Optimization of train speed profile for minimum energy consumption [J]. IEEJ Transactions on Electrical and Electronic Engineering, 2010, 5(3): 263 - 269.
- [5] 肖雄, 顾保南. 城际铁路速度目标值评价方法研究[J]. 综合运输, 2015(3): 64 - 71.
- Xiao Xiong, Gu Baonan. Study on the speed target evaluation method of intercity railway based on the functional orientation[J]. China Transportation Review, 2015(3): 64 - 71. (in Chinese)
- [6] 冯旭杰, 孙全欣, 冯佳, 等. 考虑能源消耗的城际列车运行速度优化[J]. 中国铁道科学, 2013, 34(2): 106 - 112.
- Feng Xuejie, Sun Quanxing, Feng Jia, et al. The speed optimization of intercity trains considering energy consumption[J]. China Railway Science, 2013, 34(2): 106 - 112. (in Chinese)

(责任编辑: 刘芳)