

文章编号:1671-1637(2013)01-0084-07

高速铁路既有停站方案优化模型

冯旭杰,孙全欣,冯 佳,吴珂琪

(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)

摘要:分析了高速铁路停站方案对列车牵引能耗和旅行时间的影响,总结了列车牵引能耗的测算方法。将列车开行班次和停站方案转化为停站次数,并引进机械效率,改进了基于运动做功的列车牵引能耗的测算方法。以最小列车牵引能耗和最短旅行时间为优化目标,以既有的运输供给为约束,建立了既有停站方案的优化模型,并以沪杭高速铁路为例验证了模型的有效性。研究结果表明:最小列车牵引能耗的停站方案偏向于开行直达列车,单班列车的停站次数减少,中间站停站次数最多为3次,虽然旅行时间比既有方案增大14 min,但牵引电力每天下降559 kW·h;在最短列车旅行时间的停站方案中,直达列车班次为0,中间站停站1次的列车的开行班次达到了总班次的74.4%,旅行时间比既有方案降低12 min,但牵引电力每天增大3 299 kW·h;最小列车牵引能耗和最短旅行时间的同时优化结果对既有停站方案的改善效果不明显。

关键词:高速铁路;既有停站方案;牵引能耗;旅行时间;优化模型;多目标规划

中图分类号:U292.8

文献标志码:A

Optimization model of existing stop schedule for high-speed railway

FENG Xu-jie, SUN Quan-xin, FENG Jia, WU Ke-qi

(MOE Key Laboratory for Urban Transportation Complex Systems Theory and Technology,
Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

Abstract: The influences of stop schedule on traction energy consumption and travel time for high-speed railway train were analyzed. The calculating methods of estimating train traction energy consumption were summarized. The service frequency and stop schedule were converted into stop times, the mechanical efficiency was introduced, and the calculating method of estimating train traction energy consumption based on doing-work process was improved. The minimum traction energy consumption and the shortest travel time were taken as optimization objectives, the existing transportation supply was taken as constraint condition, and the optimization model of existing stop schedule was established. Huhang High-speed Railway was taken as a case, and the validity of the proposed model was verified. Research result shows that the stop schedule with the minimum traction energy consumption prefers through trains, the number of stop times reduces, and the number of maximum stop times at intermediate stations is three. Although travel time increases 14 min more than existing stop schedule, traction electricity reduces by 559 kW·h per day. In the stop schedule with the shortest travel time, the number of through train is 0, but the rate of train frequencies with one stop times at intermediate stations is 74.4%. Travel time reduces by 12 min and traction electricity increases by 3 299 kW·h per day. The

收稿日期:2012-09-13

基金项目:国家自然科学基金项目(71131001);国家973计划项目(2012CB725406);中央高校基本科研业务费专项资金项目(2011YJS239)

作者简介:冯旭杰(1985-),男,山东平度人,北京交通大学工学博士研究生,从事轨道交通运行能耗建模与优化研究。

导师简介:孙全欣(1956-),男,河北景县人,北京交通大学教授,工学博士。

stop schedule with the minimum traction energy consumption and the shortest travel time has an insignificant improvement effect compared with the existing stop schedule. 2 tabs, 3 figs, 25 refs.

Key words: high-speed railway; existing stop schedule; traction energy consumption; travel time; optimization model; multi-objective programming

Author resumes: FENG Xu-jie(1985-), male, doctoral student, +86-10-51682264, fengxujie@foxmail.com; SUN Quan-xin(1956-), male, professor, PhD, +86-10-51688623, qxsun@bjtu.edu.cn.

0 引言

高速铁路旅客列车的停站方案是开行方案的重要组成部分,在实际运营过程中,停站方案的选择具有一定的弹性,列车不一定在每个设站地点都停车。列车的起停不但会降低平均速度^[1],也会增加牵引能耗^[2],而这种影响对于速度目标值较高的高速铁路尤其明显。Lindgreen 等的研究表明:跨站停和直达列车的旅行时间分别是站站停列车的 77%和 56%左右,牵引能耗分别是站站停列车的 64%和 41%左右^[3],因此,停站方案的优化对于铁路运输部门节约能源以及对于旅客节约旅行时间具有重要的意义。

国内外针对高速铁路的停站方案问题已有较多的研究成果。Chang 等以运营商的运营成本最小和乘客的旅行时间最短为目标函数,重点研究了高速铁路的停站方案、开行班次等问题^[4];Ghoseiri 等对于包含单线和双线铁路以及多站台的铁路网络建立了多目标规划模型^[5];Lyons 等研究了旅行时间对旅客出行方式选择的影响,为铁路运输部门制定合理的停站方案提供了理论依据^[6];徐瑞华等提出了通过合并车流来推算列车的停站方案与开行班次的方法^[7];史峰等将停站次数作为重要约束条件,研究了铁路旅客列车的开行方案问题^[8-9];邓连波等通过分析停站设置和客流换乘选择之间的相互关系,构建了旅客列车停站方案优化的双层规划模型^[10];周文梁等将列车开行方案的制定与运行图的铺划结合,建立了双层规划模型^[11]。

上述研究从不同角度对旅客列车的停站问题进行了研究。然而,这些研究未能兼顾到停站对列车牵引能耗的影响。在国家大力提倡节能降耗的形势下,铁路列车的牵引能耗成为研究人员和决策者普遍关注的问题。目前,国内外对于铁路牵引能耗的测算方法主要分为基于燃油(电流)曲线和基于运动做功两类方法。毛保华等基于燃油(电流)曲线开发了列车运行计算系统,并研究了停站方案对列车运行能耗的影响^[12-13];Feng 等研究了停站间距对高速

铁路列车牵引能耗的影响,认为在平均停站间距小于 100 km 的情况下,列车的速度目标值不应高于 $190 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ ^[14-16];Jong 等建立了列车牵引能耗的仿真计算模型,计算了停站导致的列车动能损失量^[17]。这些方法难以计算燃油(电流)曲线未知的列车的牵引能耗,而基于运动做功的方法主要通过估计机械能来测算列车牵引能耗。Gonzalez-Franco 等建立了列车运行过程中牵引力的做功模型,并认为停站次数主要影响列车在加速段的牵引能耗^[18];Hickman 等建立了列车单位吨公里的牵引能耗的测算模型,该模型适用于测算停站次数较少、加减速不频繁的列车^[19];薛艳冰等提出的列车牵引能耗的计算方法确认了停站次数主要影响列车在加速段的牵引能耗^[20-22]。

本文基于文献[19]提出的基于运动做功的列车牵引能耗测算方法,将高速铁路列车的停站方案和开行班次转化为停站次数引入到牵引能耗的测算模型中,考虑列车的机械效率(即电能转化为有效机械能的效率),构建了高速铁路全天开行的列车牵引能耗的测算模型,同时关注开行方案的总旅行时间,以既有停站方案的运输供给为约束条件,在不改变既有供给结构和供给水平的基础上,以列车牵引能耗最小和旅行时间最短为目标函数,建立了停站方案的优化模型,并结合沪杭高速铁路对模型的有效性进行验证。

1 列车牵引能耗的测算方法

文献[19]提出的列车单位吨公里的牵引能耗的测算方法应用较为广泛,具体测算模型为

$$E_0 = \frac{N_s + 1}{2L} v_m^2 + B_0 + B_1 v_a + B_2 v_a^2 + g \frac{\Delta h}{L} \quad (1)$$

式中: E_0 为列车单位吨公里的牵引能耗; B_0 、 B_1 、 B_2 均为列车在固定载荷下的经验系数; N_s 为列车全程的停站次数(不包括起点站与终点站); Δh 为起点站

与终点站的高程差; v_a 为列车全程的平均技术速度; v_m 为列车每次加速到的速度目标值; L 为起点站与终点站的距离。

式(1)隐含了列车运行的功能转化过程,对具体参数的定义缺乏深入解释。在列车运行过程中,机械效率也不能忽略,本文在式(1)的基础上,推导列车牵引能耗的测算模型。

假设列车的总质量为 M ,在不考虑机械效率的条件下,列车的总牵引能耗 E_1 为

$$E_1 = E_0 ML = \frac{N_s + 1}{2} M v_m^2 + M(B_0 + B_1 v_a + B_2 v_a^2)L + Mg \Delta h \quad (2)$$

从式(2)可以看出,列车从起点站至终点站运行过程中的牵引能耗可分成 3 部分。

(1)列车每次停车后,速度从 0 加速至速度目标值,动能都增加 $\frac{M v_m^2}{2}$,停站次数为 N_s ,整个运行过程中动能增加 $\frac{N_s + 1}{2} M v_m^2$ 。

(2)第 2 部分为列车运行过程中克服阻力所做的功。列车运行过程中,单位质量受到的平均阻力为^[23-25]

$$f = b_0 + b_1 v_a + b_2 v_a^2 \quad (3)$$

式中: b_0 、 b_1 、 b_2 均为试验系数。

考虑到量纲与单位的转换,由式(2)、(3)可以近似得到

$$\begin{cases} B_0 = b_0 g \\ B_1 = 3.6 b_1 g \\ B_2 = 12.96 b_2 g \end{cases} \quad (4)$$

(3)第 3 部分为牵引能耗用于改变列车的势能, $\Delta h > 0$ 即起点站海拔高度低于终点站,势能增加; $\Delta h < 0$ 即起点站海拔高度高于终点站,势能降低; $\Delta h = 0$ 即起终点站海拔高度相等,势能不变。

在考虑动车组机械效率的条件下,高速铁路列车的牵引能耗 E_2 为

$$E_2 = \frac{\delta M}{\eta} \left[\frac{N_s + 1}{2} v_m^2 + (B_0 + B_1 v_a + B_2 v_a^2)L + g \Delta h \right] \quad (5)$$

式中: η 为列车的机械效率; δ 为功能转换系数,本文取 $3600^{-1} \text{ W} \cdot \text{h} \cdot \text{J}^{-1}$ 。

另外,文献[19]用大量数据拟合了在固定速度目标值下,列车的平均技术速度与平均停站间距的经验公式,即

$$v_a = \alpha_1 [1 - \exp(-\beta_1 L_a)] \quad (6)$$

式中: L_a 为列车的平均停站间距; α_1 、 β_1 均为拟合系数。

2 停站方案优化模型

本文对高速铁路全天单向开行的列车建立以下基本假设。

(1)在既有列车时刻表中,客运站自起点站至终点站依次编号为 1、2、 \dots 、 I ; 开行列车固定编组,定员为 C ,自重为 P 。

(2)全天列车单向开行 N 班,根据停站方案分成 K 类,其中,第 k 类停站方案下列车的开行班次为 N_k ,起点站与终点站均停车,中间站停站次数为 S_k ,平均停站间距为 L_k ,则有

$$0 \leq S_k \leq I - 2$$

$$\sum_{k=1}^K N_k = N \quad (7)$$

$$L_k = \frac{L}{S_k + 1} \quad (8)$$

在第 k 类停站方案下,列车在速度目标值 v_m 下的全程的平均技术速度 v_{ak} 为

$$v_{ak} = \alpha_2 \left[1 - \exp\left(-\beta_2 \frac{L}{S_k + 1}\right) \right] \quad (9)$$

式中: α_2 、 β_2 均为拟合系数。

(3)在各类停站方案下,列车在每站的停站时间均为 T_0 ,第 k 类停站方案下列车全程的旅行时间 T_k 为

$$T_k = \frac{L}{v_{ak}} + S_k T_0 \quad (10)$$

(4)按照既有列车时刻表,车站 i 和车站 j 之间的开行班次为 Q_{ij} ,用 0-1 变量 X_{ik} 表示第 k 类停站方案下列车在车站 i 的停靠情况,即

$$X_{ik} = \begin{cases} 1 & \text{第 } k \text{ 类方案列车在车站 } i \text{ 停靠} \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (11)$$

由以上分析可以得到

$$S_k = \sum_{i=1}^I X_{ik} - 2 \quad (12)$$

(5)由于列车的载客人数对牵引能耗的影响很小,因此,不同方案下列车的平均载客质量 G 近似为

$$G = C \varphi_0 m \quad (13)$$

式中: φ_0 为列车全天的平均座位公里利用率; m 为旅客的平均质量。

根据上述条件,以 E 与 T 分别为目标函数建立的基于牵引能耗(E)和旅行时间(T)的既有停站方案的优化模型为

$$\min E = \frac{\delta(P+G)}{\eta} \sum_{k=1}^K \left\{ N_k \left[\frac{S_k+1}{2} v_m^2 + (B_0 + B_1 v_{ak} + B_2 v_{ak}^2) L + g \Delta h \right] \right\} \quad (14)$$

$$\min T = \sum_{k=1}^K \left[N_k \left(\frac{L}{v_{ak}} + S_k T_0 \right) \right] \quad (15)$$

$$\text{s. t. } \sum_{k=1}^K N_k X_{ik} X_{jk} \geq Q_{ij} \quad (16)$$

$$\sum_{k=1}^K X_{ik} \geq 1 \quad (17)$$

$$\sum_{k=1}^K X_{1k} X_{lk} = K \quad (18)$$

约束条件式(16)保证车站 i 到车站 j 的开行班次满足既有的停站方案;约束条件式(17)保证客运站至少有一列车停靠;约束条件式(18)保证所有列车的运行从起点站开始,并在终点站结束。

3 求解算法

本文建立的模型为多目标非线性规划模型,可行解的个数与车站数量呈幂指数次增长,但约束条件中开行班次的影响因素较为复杂,因此,可以根据高速铁路中间站的数量,首先将非线性问题转化为线性问题,然后定义目标函数的隶属度函数,将多目标问题转化为单目标问题求解^[21-25]。模型的求解流程见图 1,具体步骤如下。

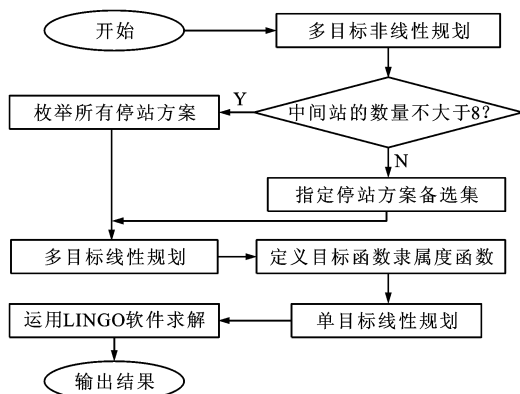


图 1 求解流程

Fig. 1 Solution flow

Step 1: 将非线性问题转化为线性问题。当高速铁路中间站数量不大于 8 个时,采用枚举法列举所有停站方案;当中间站数量大于 8 个时,指定停站方案的备选集。这两种方法均能将非线性问题转化为线性问题。

Step 2: 令目标函数 E 和 T 的隶属度函数分别为 u_1 和 u_2 , 则有

$$u_1 = \frac{E_4 - E}{E_4 - E_3} \quad (19)$$

$$u_2 = \frac{T_2 - T}{T_2 - T_1} \quad (20)$$

式中: E_3 、 E_4 分别为目标函数 E 单独在式(16)~(18)约束条件下的最小值和最大值; T_1 、 T_2 分别为目标函数 T 单独在式(16)~(18)约束条件下的最小值和最大值。

Step 3: 将多目标问题转化为单目标问题。令目标函数 E 和 T 的权重分别为 λ_1 和 λ_2 , $\lambda_1 + \lambda_2 = 1$, 且 $\lambda_1, \lambda_2 \geq 0$, 将多目标问题转化为单目标问题, 即

$$\max F = \zeta + \epsilon(\lambda_1 u_1 + \lambda_2 u_2) \quad (21)$$

$$\text{s. t. } \begin{cases} \zeta \leq u_1 \\ \zeta \leq u_2 \end{cases} \quad (22)$$

式中: F 为单目标问题目标函数; ζ 为最优满意度; ϵ 为充分小正数。

Step 4: 取 ϵ 为 1.0×10^{-7} , 在 LINGO 软件中求解单目标规划问题。

4 计算结果分析

沪杭高速铁路于 2010 年 10 月正式开通, 全长 169 km。全线设置上海虹桥、松江南、金山北、嘉善南、嘉兴南、桐乡、海宁西、余杭南以及杭州东共 9 座车站, 依次编号 1~9, Δh 为 8.0 m, v_m 为 $350 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$, 中间站平均停站时间为 3 min。每个旅客(包含行李)平均质量为 80 kg, 列车定员为 600 人, 列车自重为 536 t, 机械效率为 0.4, 列车全天的平均座位公里利用率为 50%, 列车运行全程单位质量受到的平均阻力 f 为

$$f = 0.755 + 0.006364013v_a + 0.0001151355v_a^2$$

根据既有列车时刻表, 沪杭高速铁路下行方向开行 43 班列车, 不同站间的开行班次见表 1。

表 1 开行班次

Tab. 1 Service frequency

开行班次	2	3	4	5	6	7	8	9
1	4	4	9	23	5	5	10	43
2		0	1	1	0	0	1	4
3			0	1	1	0	2	4
4				3	1	1	1	9
5					2	4	5	23
6						0	1	5
7							1	5
8								10

运用 MATCAB 软件, 列车平均技术速度 v_a 与

平均停站间距 L_a 的关系见图 2, 拟合结果为

$$v_a = 271.8054[1 - \exp(-0.0288L_a)]$$

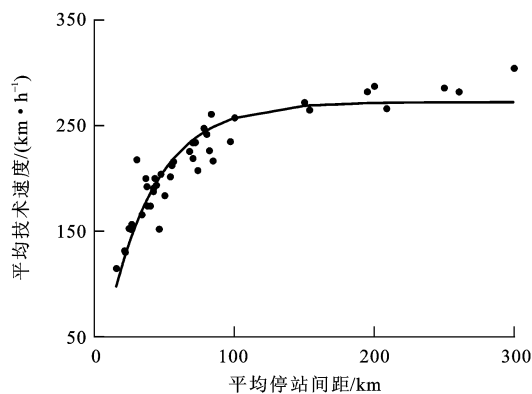


图 2 平均技术速度与平均停站间距的关系

Fig. 2 Relationship between average technical speed and average stop distance

将上述参数带入优化模型中, 采用枚举法将非线性规划问题转化为线性规划问题。目标函数的权重值分别取为 $\lambda_1 = 1, \lambda_2 = 0; \lambda_1 = 0, \lambda_2 = 1; \lambda_1 = \lambda_2 = 0.5$ 。利用 LINGO 软件求解得到的优化结果见表 2。

从表 2 可以看出, 沪杭高速铁路下行方向既有停站方案的总牵引能耗为 406 593 kW·h, 总旅行时间为 2 053 min。在同样开行 43 班列车的条件下, 最小列车牵引能耗($\lambda_1 = 1, \lambda_2 = 0$)的停站方案, 虽然旅行时间比既有停站方案增大 14 min, 但每天用于高速列车牵引的电力可节约 559 kW·h, 全年电力节省量超过 20 万 kW·h。最短列车旅行时间($\lambda_1 = 0, \lambda_2 = 1$)的停站方案, 虽然在旅行时间上较既有停站方案减少 12 min, 但要以每天多消耗 3 299 kW·h 的电力为代价。同时最小牵引能耗和最短旅行时间

表 2 与有停站方案及优化结果

Tab. 2 Existing stop schedule and optimization results

方案编号	既有停站方案		最小牵引能耗 ($\lambda_1 = 1, \lambda_2 = 0$)		最短旅行时间 ($\lambda_1 = 0, \lambda_2 = 1$)		同时最小牵引能耗和最短 旅行时间($\lambda_1 = \lambda_2 = 0.5$)	
	停站方案	班次数量	停站方案	班次数量	停站方案	班次数量	停站方案	班次数量
1	1-9	8	1-9	14	1-2-9	3	1-9	7
2	1-2-9	1	1-2-4-9	1	1-3-9	2	1-2-9	1
3	1-4-9	2	1-2-5-9	2	1-4-9	6	1-3-9	1
4	1-5-9	8	1-2-8-9	1	1-5-9	13	1-4-9	3
5	1-2-4-9	1	1-3-5-9	2	1-6-9	3	1-5-9	7
6	1-2-5-9	1	1-3-8-9	1	1-7-9	1	1-6-9	1
7	1-2-8-9	1	1-4-5-9	6	1-8-9	4	1-8-9	1
8	1-3-5-9	1	1-4-6-9	1	1-3-8-9	1	1-2-4-9	1
9	1-3-6-9	1	1-5-6-9	3	1-4-5-9	1	1-2-5-9	1
10	1-3-8-9	2	1-5-7-9	4	1-5-7-9	3	1-2-8-9	1
11	1-4-5-9	3	1-5-8-9	6	1-5-8-9	3	1-3-5-9	1
12	1-4-6-9	1	1-3-6-8-9	1	1-4-5-6-9	1	1-3-8-9	1
13	1-4-7-9	1	1-4-7-8-9	1	1-3-5-6-8-9	1	1-4-5-9	3
14	1-4-8-9	1			1-2-4-5-7-8-9	1	1-4-6-9	1
15	1-5-6-9	2					1-5-6-9	2
16	1-5-7-9	3					1-5-7-9	4
17	1-5-8-9	4					1-5-8-9	5
18	1-6-8-9	1					1-3-6-8-9	1
19	1-5-7-8-9	1					1-4-7-8-9	1
牵引能耗/(kW·h)	406 593		406 034		409 892		406 991	
旅行时间/min	2 053		2 067		2 041		2 051	

($\lambda_1 = \lambda_2 = 0.5$) 的停站方案在旅行时间上略有降低, 但相应牵引能耗也增加, 对既有方案的改善效果不明显。

对既有停站方案和目标函数不同权重下的优化结果按中间站停站次数分类的班次数量见图 3。

最小列车牵引能耗($\lambda_1 = 1, \lambda_2 = 0$) 的停站方案,

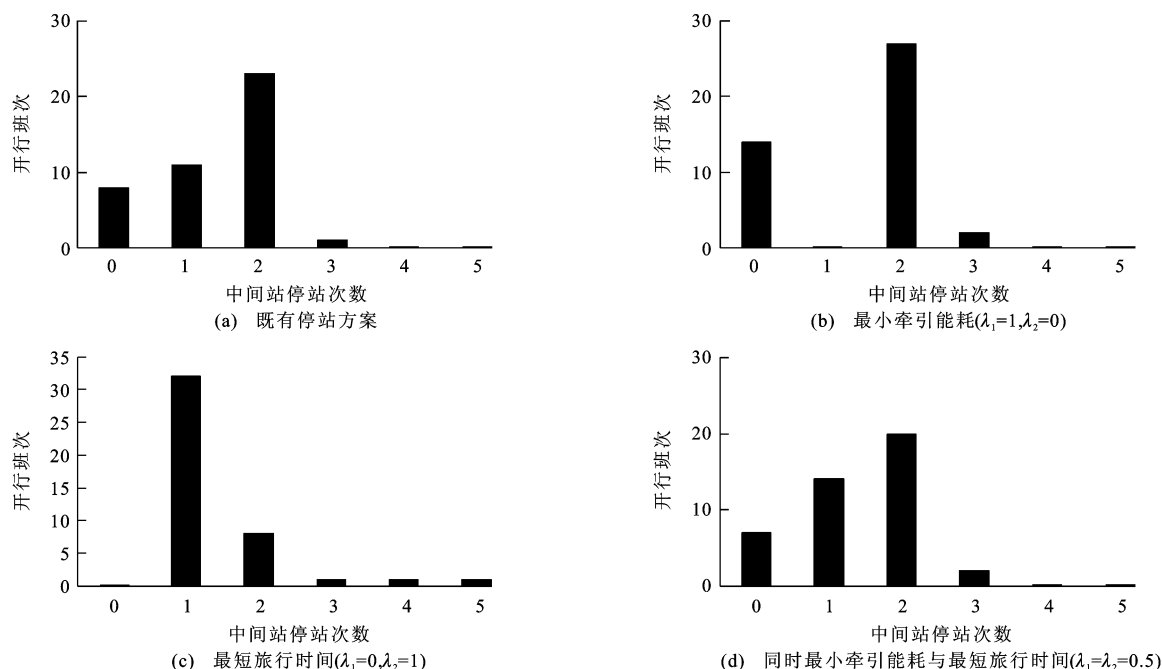


图 3 班次数量

Fig. 3 Frequency numbers

优化结果中的直达列车较多,并尽量减少单班列车的停站次数,如图 3(b)直达列车的开行班次占总开行班次的比例为 32.6%,停站次数最多的方案中间站仅停 3 次。

最短列车旅行时间($\lambda_1=0, \lambda_2=1$)的停站方案,优化结果中不包含直达列车,反而偏向于开行中间站停站 1 次的列车,中间站停 1 次的列车开行班次占总班次的比例达到了 74.4%,并开行少量停站次数较多的列车保证车站之间的连通,如图 3(c)中两班列车中间站停站次数分别为 4 次和 5 次。

同时最小列车牵引能耗和最短旅行时间($\lambda_1=\lambda_2=0.5$)的停站方案,优化结果没有表现出明显的偏向性,如图 3(d)中,中间站不同停站次数的列车开行班次介于图 3(b)、图 3(c)对应类别的最大值和最小值之间,并且与图 3(a)既有停站方案差别不大。

5 结 语

(1)高速铁路的停站方案是影响列车牵引能耗和旅行时间的重要因素,在满足既有停站方案的供给结构和供给水平的基础上,对停站方案进行优化能够有效减少列车的牵引能耗或旅行时间。

(2)最小列车牵引能耗的停站方案偏向于开行直达列车,单班列车的停站次数较少。最短列车旅行时间的优化结果的车次集中在中间站停站 1 次的方案,并开行少量停站次数较多的列车保证

车站之间运输服务的互通。同时优化牵引能耗和旅行时间的结果与既有方案的差别不大。

(3)通过建立高速铁路既有停站方案的优化模型,能够为铁路运输部门制定节能或节时的停站方案提供理论依据,对于提高铁路运输的能源及运输效率具有重要的意义。在优化后的停站方案的基础上,结合客流到发规律详细设计时刻表是下一步重点研究的问题。

参 考 文 献 :

References :

- [1] GIVONI M, BANISTER D. Speed: the less important element of the high-speed train[J]. Journal of Transport Geography, 2012, 22(1): 306-307.
- [2] ANDERSSON E, LUKASZEWICZ P. Energy consumption and related air pollution for Scandinavian electric passenger trains[R]. Stockholm: KTH Royal Institute of Technology, 2006.
- [3] LINDGREEN E, SORENSON S C. Simulation of energy consumption and emissions from rail traffic[R]. Lyngby: Technical University of Denmark, 2005.
- [4] CHANG Y H, YEH C H, SHEN C C. A multiobjective model for passenger train services planning: application to Taiwan's high-speed rail line[J]. Transportation Research Part B: Methodological, 2000, 34(2): 91-106.
- [5] GHOSEIRI K, SZIDAROVSKY F, ASGHARPOUR J. A multi-objective train scheduling and solution[J]. Transportation Research Part B: Methodological, 2004, 38(10): 927-952.

- [6] LYONS G, JAIN J, HOLLEY D. The use of travel time by rail passengers in Great Britain[J]. Transportation Research Part A: Policy and Practice, 2007, 41(1): 107-120.
- [7] 徐瑞华, 邹晓磊. 客运专线列车开行方案的优化方法研究[J]. 同济大学学报: 自然科学版, 2005, 33(12): 1608-1611, 1703.
XU Rui-hua, ZOU Xiao-lei. Study on train plans optimization for passenger traffic special line[J]. Journal of Tongji University: Natural Science, 2005, 33(12): 1608-1611, 1703. (in Chinese)
- [8] 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 Lian-bo, HUO Liang. Bi-level programming model and algorithm of passenger train operation plan[J]. China Railway Science, 2007, 28(3): 110-116. (in Chinese)
- [9] 肖龙文, 史 峰. 铁路公交化旅客列车开行方案优化[J]. 湖南大学学报: 自然科学版, 2009, 36(1): 85-88.
XIAO Long-wen, SHI Feng. Optimization of train of mass transit type plan[J]. Journal of Hunan University: Natural Sciences, 2009, 36(1): 85-88. (in Chinese)
- [10] 邓连波, 史 峰, 周文梁. 旅客列车停站设置方案优化[J]. 中国铁道科学, 2009, 30(4): 102-107.
DENG Lian-bo, SHI Feng, ZHOU Wen-liang. Stop schedule plan optimization for passenger train[J]. China Railway Science, 2009, 30(4): 102-107. (in Chinese)
- [11] 周文梁, 史 峰, 陈 彦, 等. 客运专线网络列车开行方案与运行图综合优化方法[J]. 铁道学报, 2011, 33(2): 1-7.
ZHOU Wen-liang, SHI Feng, CHEN Yan, et al. Method of integrated optimization of train operation plan and diagram for network of dedicated passenger lines[J]. Journal of the China Railway Society, 2011, 33(2): 1-7. (in Chinese)
- [12] 毛保华, 何天键, 袁振洲, 等. 通用列车运行模拟软件系统研究[J]. 铁道学报, 2000, 22(1): 1-6.
MAO Bao-hua, HE Tian-jian, YUAN Zhen-zhou, et al. A general-purposed simulation system on train movement[J]. Journal of the China Railway Society, 2000, 22(1): 1-6. (in Chinese)
- [13] 陈荣武, 刘 莉, 郭 进. 基于遗传算法的列车运行能耗优化算法[J]. 交通运输工程学报, 2012, 12(1): 108-114.
CHEN Rong-wu, LIU Li, GUO Jin. Optimization algorithm of train operation energy consumption based on genetic algorithm[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2012, 12(1): 108-114. (in Chinese)
- [14] FENG Xue-song. Optimization of target speeds of high-speed railway trains for traction energy saving and transport efficiency improvement[J]. Energy Policy, 2011, 39(12): 7658-7665.
- [15] FENG Xue-song, MAO Bao-hua, FENG Xu-jie, et al. Study on the maximum speeds of metro trains for energy saving as well as transport efficiency improvement[J]. Energy, 2011, 36(11): 6577-6582.
- [16] 张星臣, 冯雪松, 毛保华, 等. 我国高铁列车牵引能耗影响因素作用效果的模拟分析[J]. 交通运输系统工程与信息, 2011, 11(3): 83-86.
ZHANG Xing-chen, FENG Xue-song, MAO Bao-hua, et al. Simulation research on the traction energy consumption of high-speed trains in China[J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2011, 11(3): 83-86. (in Chinese)
- [17] JONG J C, CHANG En-fu. Models for estimating energy consumption of electric trains[J]. Journal of Eastern Asia Society for Transportation Studies, 2005, 6(2): 278-291.
- [18] GONZALEZ-FRANCO I, GARCIA-ALVAREZ A. Can high-speed trains run faster and reduce energy consumption? [J]. Procedia-Social and Behavioral Sciences, 2012, 48(3): 827-837.
- [19] HICKMAN J, HASSEL D, JOUMARD R, et al. Methodology for calculating transport emissions and energy consumption[R]. London: Transportation Research Laboratory, 1999.
- [20] 薛艳冰, 马大伟, 王 烈. 列车牵引能耗计算方法[J]. 中国铁道科学, 2007, 28(3): 84-87.
XUE Yan-bing, MA Da-wei, WANG Lie. Calculation method of energy consumption in train traction[J]. China Railway Science, 2007, 28(3): 84-87. (in Chinese)
- [21] MEIBOM P. Technology analysis of public transport modes[R]. Lyngby: Technical University of Denmark, 2001.
- [22] LUKASZEWICZ P. Energy consumption and running time for trains: modelling of running resistance and driver behavior based on full scale testing[D]. Stockholm: KTH Royal Institute of Technology, 2001.
- [23] 柏 赞, 毛保华, 周方明, 等. 基于功耗分析的货物列车节能运行控制方法研究[J]. 交通运输系统工程与信息, 2009, 9(3): 43-50.
BAI Yun, MAO Bao-hua, ZHOU Fang-ming, et al. Energy-efficient driving strategy for freight trains based on power consumption analysis[J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2009, 9(3): 43-50. (in Chinese)
- [24] 文 超, 彭其渊, 陈芋宏. 高速铁路列车运行冲突机理[J]. 交通运输工程学报, 2012, 12(1): 119-126.
WEN Chao, PENG Qi-yuan, CHEN Yu-hong. Running conflict mechanism of high-speed railway train[J]. Journal of Traffic and Transportation Engineering, 2012, 12(1): 119-126. (in Chinese)
- [25] 陈 涛. 高速列车运行能耗测算方法及其影响因素量化分析[D]. 北京: 北京交通大学, 2011.
CHEN Tao. Traction energy consumption measuring methods study and quantification analysis on energy impact factors of high-speed train[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2011. (in Chinese)