

城市轨道交通市郊线快慢车开行方案精细性 优化建模研究^{*}

万浩纯 丁小兵 刘志钢 黄秋瑜 王 靖

(上海工程技术大学城市轨道交通学院,201620,上海//第一作者,硕士研究生)

摘 要 以旅客最短出行时间和列车运能与客流量相匹配为目标,考虑停站次数、发车频率及追踪时间间隔等主要约束,建立了城市轨道交通市郊线快慢车开行方案双目标优化模型,并设计了遗传—蚁群算法来求解双目标优化模型。基于优化后的开行方案,提出了快慢车越行判别方法,并在此基础上实现快慢车通过能力的计算。以上海轨道交通 16 号线为例,对双目标优化模型进行验算。验算结果表明,优化方案的乘客总出行时间降低了 9.2%,运能与客流量的匹配度提高了 10.6%,验证了该模型及算法的有效性。

关键词 城市轨道交通市郊线;快慢车;开行方案;通过能力;遗传—蚁群算法

中图分类号 U292.4;U239.5

DOI:10.16037/j.1007-869x.2020.11.015

Research on Finely Optimal Modeling for Train Operation Scheme of Suburban Rail Transit Under Express-local Mode

WAN Haochun, DING Xiaobing, LIU Zhigang, HUANG Qiuyu, WANG Jing

Abstract Aiming at the shortest travel time of passengers and the matching of train capacity and passenger flow volume, considering the main constraints such as number of stops, frequency of departure and time interval of departure, the bi-objective optimization model of suburban rail transit operation scheme under express-local mode is established, and the genetic-ant colony algorithm is designed to solve the bi-objective optimization model. Based on the optimized operation scheme, the method for overtaking judgement in express-local mode is proposed, and on this basis, the carrying capacity of express-local trains is calculated. Taking Shanghai Metro Line 16 as an example, the bi-objective optimization model was verified through calculation. The result shows that the total passenger travel time is reduced by 9.2%, and the matching property of transport capacity with passenger flow volume is increased by

10.5%, which verified the effectiveness of the model and the algorithm.

Key words suburban rail transit; express-local mode; operation scheme; carrying capacity; genetic-ant colony algorithm

Author's address School of Urban Rail Transportation, Shanghai University of Engineering Science, 201620, Shanghai, China

城市轨道交通市郊线一般衔接城市周边卫星城与主城区,主要服务于通勤客流和通学客流。因此,其客流具有较大的时空分布不均衡特性。上海轨道交通 16 号线与北京轨道交通 6 号线等市郊线,均采用快慢车开行模式来实现市郊铁路客流量需求与运能的匹配。而现有的轨道交通快慢车开行方案会延长部分车站的乘客候车时间,还会影响部分区段运能。因此,优化市郊铁路快慢车开行方案,具有重要实践意义。

文献[1]以车站重要度为评价指标确定快慢车的停站权重,建立了基于客流、旅行时间、企业运营成本的多目标模型,优化了停站方案。文献[2]以乘客出行时间和列车周转时间为目标,实现了快慢车开行方案与客流分配方结果的相互协调优化,并以广州轨道交通 14 号线为例对该模型进行了验证。文献[3]设计了模拟—退火算法,以乘客的广义出行费用和企业运营成本为目标函数,对多交路快慢车开行方案进行了优化研究。文献[4]在分析了快慢车停车方案的基础上,构建了基于列车能耗及旅客出行时间的双目标规划模型,并与标准停站模式进行了比较。文献[5]提出了快慢车同步运行方案,以减少乘客出行时间和车站换乘延误。结果表明,该方案使用了更少的列车,提高了通过能力。文献[6]利用 logit 模型对乘客选择列车行为进行了分

^{*} 十三五国家重点研发计划子课题(2017YFC0804900)

析,提出了以乘客总出行时间最小为目标的停站方案整数规划模型。文献[7]通过优化慢车松弛时间来降低列车能耗,计算了快慢车最小时间间隔,并对列车时刻表进行了优化。文献[8]建立了基于慢车和快车在途时间比例的多项逻辑模型,并通过交互变量模型分析了出行特性及乘客个体因素等对快慢车选择的影响。

国内外专家学者在研究快慢车开行方案过程中,主要针对乘客出行时间或企业运营成本等单个或双目标对开行方案进行优化,往往只考虑到停站方案或开行比例等单个优化结果,未能建立多因素综合优化模型以全面考虑发车频率及列车通过能力。部分专家着力于构建复杂的优化模型,缺乏对实际运营现状的分析,其实际可行性不高。

本文针对现有城市轨道交通市郊线的快慢车开行方案的特点,以乘客出行时间最短及列车运能与客流量匹配度最高为目标,综合考虑列车停站方案、发车频率及通过能力,对已采用的快慢车开行方案进行调整,并以上海轨道交通 16 号线为例对该模型进行验证。

1 快慢车开行方案优化模型

快慢车开行方案主要包括快车停站方案、快慢车开行比例、列车运行交路等内容。乘客可通过选择恰当的快慢车以减少在途时间。不合理的开行方案会降低列车旅行速度、延长乘客乘车时间、增加列车能耗等。

1.1 模型假设

考虑到快慢车开行模式下市郊线开行方案的复杂性,本文在建模求解时,对模型做出以下假设:

1) 因晚高峰客流量分布比早高峰客流量分布更分散,故选取晚高峰时段客流进行研究,不考虑突发大客流状况。

2) 全线仅开行快车和慢车 2 类,且列车运行速度及交路均一致。

3) 乘客在出行过程中不考虑快车与慢车的换乘。

4) 沿线各列列车的车型相同。早晚高峰时段,快车 3 节编组,慢车 6 节编组;非高峰时段,快慢车各 3 节编组。

5) 快车与慢车的运行时间差主要受停站时间、起停附加时间及快车越行引起的慢车待避时间影响。

6) 仅以单向运营为研究对象,不考虑列车编组对运行时间的影响。

1.2 考虑乘客出行时间的优化模型

出行时间是乘客选择出行方式的重要影响因素。在快慢车开行模式下,列车运行组织较为复杂,其乘客出行时间受候车时间、在途时间及停站时间共同作用。如乘客乘坐快车,则因停站次数减少,从而缩短在途时间;如乘客乘坐慢车则会因慢车待避而延长了出行时间,故本文以乘客包含候车及停站等的总出行时间最小为目标。

1.2.1 乘客候车时间

采用客流量与乘客平均等待时间的乘积来描述乘客的总候车时间 t_w :

$$t_w = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n \frac{q_{ij} \times T_z}{2(f_1 + y_j f_2)} \quad (1)$$

式中:

n ——车站总数;

q_{ij} ——从 i 站到 j 站间的乘客人数;

T_z ——运行图周期时间;

f_1 ——慢车发车频率;

f_2 ——快车发车频率;

y_j ——布尔变量;若快车在车站 j 处停站,则为 1,否则为 0。

1.2.2 列车停站相关时间

列车停站相关时间包括停站时间和起停附加时间。列车停站总时间 t_{ss} 为:

$$t_{ss} = \sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n [q_{ij}(t_h + t_t + t_q) \sum_{r=1}^R x_{ijr} f_r] \quad (2)$$

式中:

R ——列车类别总数;

x_{ijr} ——自 i 站至 j 站,第 r 种列车停靠次数;

f_r ——对应车次的发车频率;

t_h ——列车平均停站时间,受开关车门及乘客上下车时间影响;

t_q ——列车起动附加时间;

t_t ——列车停车附加时间。

旅客总出行时间最短的目标函数为:

$$\min t_{it} = t_w + t_{ss} \quad (3)$$

约束快慢车发车频率,快车与慢车至少各发 1 列,即:

$$\text{s. t. } \sum_{r=1}^R f_r \leq N, \quad f_r \geq 1 \quad (4)$$

列车的全线停站次数 x_{1nr} 应满足:

$$2 \leq x_{1nr} \leq n \quad (5)$$

如列车在站不停靠,则无上下车乘客,即:

$$q_{ij} \leq Mx_{ijr} \quad (6)$$

式中:

M ——任意大的数。

1.3 考虑线路运能与客流量相匹配的优化模型

提高线路运能与客流量的适应性,就可提高列车输送效率,从而实现运营企业的利润最大化。其目标函数可看作列车标准载客量与实际客流量的差方和。常用的以列车满载率或负荷最大作为目标函数的计算方法,往往缺少对乘客舒适度的考虑。而本文提出的目标函数兼顾乘客与企业利益,使车厢内既不会过于拥挤,导致乘客滞留站台,也不会造成运能浪费,影响企业利益。为此,引入运能与客流量的差方和 Z ,来反映运能的客流量的匹配度。故目标函数为:

$$\min Z = \left[\sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n (q_{ij}) - f_1 C_1 - f_2 C_2 \right]^2 \quad (7)$$

在确保乘客舒适性的前提下,应满足线路运输能力大于最大断面客流量:

$$\max \left[\sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n (q_{ij}) \right] \leq 1.25(f_1 C_1 + f_2 C_2) \quad (8)$$

乘客候车时间应不超过最大忍耐时间,即

$$\frac{1}{t_{w, \max}} \leq (f_1 + y_j f_2) \quad (9)$$

为确保列车发车间隔大于追踪间隔时间,保证行车安全,有

$$\sum_{i=1}^{n-1} \sum_{j=i+1}^n (f_1 + y_j f_2) \leq \frac{1}{t_i} \quad (10)$$

式中:

C_1 ——慢车的标准载客量;

C_2 ——快车的标准载客量;

$t_{w, \max}$ ——乘客能够接受的最长候车时间;

t_i ——列车追踪最小时间间隔。

2 基于发车频率及越行次数的通过能力计算

城市轨道交通通过能力是指在采用一定开行方案及信号设备等基础设施的条件下,单位时间内通过列车的最大数量^[9]。根据上述快慢车开行方案优化模型可计算出满足最短乘客出行时间及运能与客流量最大匹配的最优停站方案和列车开行比例,在此基础上,可根据具体线路条件合理安排

快车越行慢车,以提高通过能力。

2.1 快慢车越行判定条件

t_i 须大于或等于安全行车的最小间隔时间。在快慢车追踪运行过程中,快车与慢车行车间隔逐步缩短,为避免了列车冲突,也为了最小化越行次数,减少慢车避让时间,需合理设计快车越行方案。

图 1 为快慢车开行模式下列车越行条件判定示意图。A 为慢车, B 为快车,其中快车和慢车的运行时间分别为 t_e 和 t_i , 有:

$$t_1 = t_{ij} + (n-2)(t_h + t_q + t_l) \quad (11)$$

$$t_e = t_{ij} \quad (12)$$

式中:

t_{ij} —— i 站到 j 站的列车走行时间;

通过计算快车与慢车到达时间间隔 t_a 与列车追踪时间间隔比较,可判断能否产生越行,如式 (13) 和 (14), 当 $t_a < t_i$ 时,列车在车站 4 发生越行(见图 1),反之则快车不越行慢车。

$$t_d + t_e - t_1 \geq t_i \quad (13)$$

$$t_d + t_e - t_1 < t_i \quad (14)$$

式中:

t_d ——快慢车的发车时间间隔。

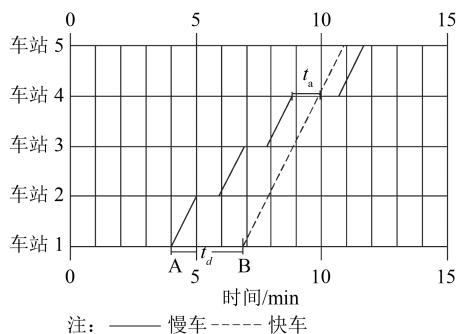


图 1 列车越行条件判定图

2.2 快慢车通过能力计算

快慢车开行模式的列车通过能力可采用图解法,通过计算其最小发车间隔 $t_{d, \min}$ 获得。快车与慢车的最小发车间隔时间由 $t_{i, \min}$ 与 t_s 之和决定。

如图 2 所示,若快慢车开行比例为 1:1,快车在车站 4 靠停且越行慢车时,有:

$$t_c = 3t_i + t_s \quad (15)$$

$$t_s = t_h + t_l + t_q \quad (16)$$

式中:

t_c ——快慢车组合的发车间隔;

t_s ——列车停站时间与起停附加时间。

其通过能力为

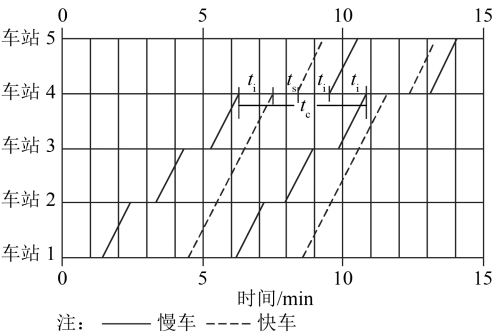


图2 快慢车比例 1:1 下列车通过能力计算图

$$N_{\max} = Kt_{1h}/t_c \tag{17}$$

式中：

- N_{\max} ——列车最大通过能力；
- t_{1h} ——通过能力计算时间，一般取 1 h；
- K ——快慢车组合内的列车数。

本文所优化的快慢车开行方案通过能力可通过图解法计算。

如图 3 所示，快慢车开行比例为 2:3，且快车在车站 4 和车站 2 分别越行了 2 列慢车。根据图解法，有：

$$t_c = 7t_i + 2t_s \tag{18}$$

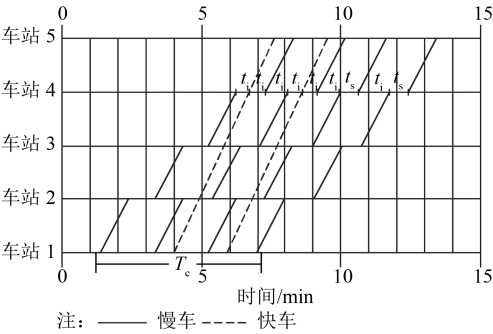


图3 快慢车比例 2:3 下列车通过能力计算图

3 快慢车开行方案实例研究

3.1 上海轨道交通 16 号线运营数据

为得到快慢车发车频率及停站方案，一方面根据各站历史运营数据，获取站站停方案的列车各区间走行时间；另一方面，通过现场调查，获取上海轨道交通 16 号线工作日晚高峰时段的下行方向客流量数据。数据清洗后，得到标准数据如表 1 所示。

列车停站时间由开关门时间、乘客上下车时间及确认发车时间等组成。其中，开门时间为 2 s 左右，关门时间为 3 s 左右。列车起停附加时间由列车最高运行速度，制动加速度及制动减速度共同决

定。上海轨道交通 16 号线停站相关时间计算结果如表 2 所示。

表 1 上海 16 号线下行方向工作日客流量及各区间运行时间

车站	上车人数/(人/d)	下车人数/(人/d)	区间的列车走行时间/s
龙阳路站	5 531	0	200
华夏中路站	3 276	1 085	130
罗山路站	2 372	676	220
周浦东站	583	491	165
鹤沙航站	224	277	130
航头东站	473	592	165
新场站	341	418	215
野生动物园站	248	593	255
惠南站	2 067	2 501	245
惠南东站	127	596	245
书院站	1 485	4 323	290
临港大道站	251	1 131	130
滴水湖站	0	4 286	

表 2 上海轨道交通 16 号线部分车站停站相关时间

车站	t_h/s	t_q/s	t_t/s
龙阳路	45	18.5	18.5
华夏中路	40	18.5	18.5
罗山路	40	18.5	18.5
⋮	⋮	⋮	⋮
滴水湖	45	18.5	18.5

3.2 算法设计

传统的遗传算法能快速搜索到全局最优解附近，但求最优解的速度较慢；蚁群算法具有较强的局部搜索能力。故本文设计了遗传-蚁群算法来对快慢车开行方案优化模型求解。遗传-蚁群算法步骤为：

1) 先进行遗传算法染色体编码。优化目标为乘客出行时间和运能与客流量的匹配度，决策变量为快车停站方案及快慢车发车频率。决策变量的染色体编码方式为： $000100000010010\dots00$ 。染色体前 12 位为快慢车发车频率 f_1 及 f_2 的二进制编码。例如， $f_1=000100$ 表示慢车发车频率为 4。以上海轨道交通 16 号线的 13 个站位为研究对象，因快车在起点站与终点站必停车，故令染色体编码第 3 段长度为 11；停站方案中“1”表示该站停车，“0”表示该站不停车。

2) 遗传算法求解。随机产生 200 条染色体，因本文模型约束较多，故生成的初始解应确保满足部分基本约束条件。在此基础上，对初始解进行交叉

及变异,逐步转变为可行解。

3) 采用蚁群算法进行计算。将遗传算法的所有近似最优解作为蚁群算法的初始信息素,计算每只蚂蚁访问下个开行方案的状态转移概率。

4) 每次循环结束后,进行信息素的更新,直至求出最优解。

3.3 模型求解

结合快慢车开行方案优化模型,采用遗传-蚁群算法,利用 Matlab 编程对模型进行求解。设置初始参数如下:交叉概率为 0.85,变异概率为 0.01,最大迭代次数为 400,蚂蚁个数为 50,信息素挥发因子为 0.8,转移状态常数为 0.2,迭代 100 次。经计算,得到快慢车开行方案函数的最优解为:0011000001111010001010011。这表示慢车开行 12 对/h,快车开行 7 对/h,在第 1、3、7、9、12、13 号车站实现大站停。

目前,上海轨道交通 16 号线下行方向晚高峰时段(17:00—19:00)开行 2 列快车。根据慢车发车间隔计算可得,其开行比例为 1:8。对比现有的快慢车开行方案、优化后的快慢车开行方案及站站停方案,评价指标如表 3 所示。

表 3 上海轨道交通 16 号线晚高峰不同开行方案优化结果

开行模式	快车/列	慢车/列	T_u/h	Z
站站停模式	0	20	1 005	796
现行快慢车开行模式	2	16	986	758
优化快慢车开行模式	7	12	895	678

注:Z 为线路运能与客流量的匹配度

由表 3 可知,相对于现有快慢车开行方案,优化后快慢车开行方案中, t_i 减少了 9.2%,Z 提高了 10.6%,充分说明了该优化方案的有效性。

根据优化方案及发车频率,铺画列车运行图如图 4 所示。在图 4 中,航头东站、野生动物园站与

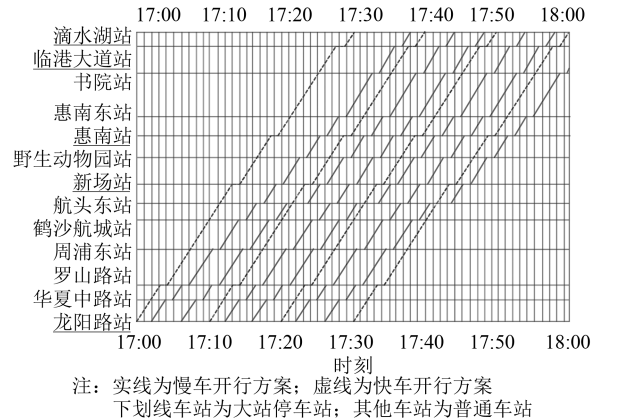


图 4 上海轨道交通 16 号线列车开行优化方案(部分)

惠南东站均为具备越行条件的车站。图 4 以 1001001001001001001 的间隔开行快慢车(其中“1”表示快车,“0”表示慢车),且快车在航头东站越行慢车。根据图 4,单位小时内共发车 19 列,从文献[10]中获取列车追踪间隔时间,以图解法计算组合运行周期内时间间隔,并计算该优化方案下快慢车通过能力:

$$t_c = 21t_i + 6t_s \tag{19}$$

由 $t_h = 40\text{ s}$, $t_q = t_i = 18.5\text{ s}$ 可得, $t_c = 2\,604\text{ s}$, 又 $K = 19$ 列,由式(17)可得, $N_{\max} = 26.3$ 列。

3.4 开行方案优化结果分析

根据 16 号线初期列车运行图,快车停靠惠南和新场,其慢车全程行车时间约 46 min,在越行站,慢车等待时间长达 5 min,使乘客候车时间较长,对乘客出行选择造成了一定程度的影响。

本文优化后的列车开行计划对适用性和可行性改善很多。优化后开行方案的关键指标为:

1) 快车停靠车站:龙阳路站、罗山路站、新场站、惠南站、临港大道站和滴水湖站。

2) 快车与慢车发车频率分别为 7 列/h 和 12 列/h,其发车间隔方式为 1001001001001001001(其中“1”表示快车,“0”表示慢车)。

3) 快车在航头东站越行慢车。优化后开行方案的最大列车通过能力为 26.3 列/h。

4) 综合现有开行方案,其乘客候车及停站消耗时间减少 9.2%,运能与客流量匹配度提高了 10.6%。

4 结语

针对市郊线客流分布不均的特点,本文提出了以乘客出行时间最短、线路运能与客流量相适应为目标的快慢车开行方案优化模型,并设计了遗传-蚁群算法进行求解,以获得不同列车的发车频率及快车停站方案。在此基础上,研究了快慢车开行模式下快车越行慢车的判定,并基于发车频率及越行次数计算出该开行方案下的通过能力。以上海轨道交通 16 号线对该模型及算法进行验算。验算结果表明:该方法有利于解决市郊线的乘客出行拥挤严重、服务水平骤降、大站停模式下部分乘客候车时间过长等问题,优化后的开行方案兼顾了乘客及企业利益,可为轨道交通运营企业调整开行方案提供参考。

(下转第 83 页)

变化基本一致;大多数振动频率下,边界元法的噪声压级略小于无限元法的噪声压级,并在 1.25 ~ 2.50 Hz 范围内相差较大。

经过有限元-无限元法和边界元法仿真计算,桥梁不同位置处的 1~200 Hz 频率线性总声压级大小如表 1 所示。由表 1 可见,有限元-无限元法总声压级仿真结果比边界元法的仅大 2~4 dB。

表 1 桥梁不同位置处不同仿真方法计算的
1~200 Hz 频率线性总声压级

测点位置	总声压级/dB	
	有限元-无限元法	边界元法
顶板	100.64	97.18
底板	104.30	101.98
腹板	100.72	97.93
翼板	100.65	97.53

4 结语

本文通过 Abaqus 软件构建了有限元-无限元仿真模型,仿真计算了城市轨道交通高架桥梁辐射噪声,并将仿真结果和传统的边界元方法计算结果进行对比。对比结果表明:

1)有限元-无限元法使用声无限单元技术模拟无限流场,取得了较好的效果;使用该方法可以根据不同需求改变有限单元声场的大小,从而降低建模和计算成本。

2)由边界元法与有限元-无限元法的计算结果比较可知,在箱梁顶板、底板、腹板、翼板处的振动幅值相差不多,且频谱特性与箱梁振动频谱相似。

(上接第 77 页)

参考文献

[1] 丁小兵,徐行方.基于在途时间的快慢车停站方案优化算法[J].城市轨道交通研究,2016(6): 55.

[2] 孙元广,史海欧,王莹,等.城市轨道交通快慢车开行方案双层规划模型[J].交通运输系统工程与信息,2018(3): 160.

[3] 汤莲花,徐行方.基于双层规划的市郊轨道交通多交路快慢车开行方案优化研究[J].交通运输系统工程与信息,2018(3): 152.

[4] GAO Y, YANG L, GAO Z. Energy consumption and travel time analysis for metro lines with express/local mode [J]. Transportation Research Part D Transport & Environment, 2016, 60: 7.

[5] CHUN J H, ANDERSON R M, PAIK D. The S-train system: Synchronized express & local trains for urban commuter rail systems[C]//International IEEE Conference on Intelligent Trans-

与边界元法相比,有限元-无限元法的噪声仿真结果在 1~200 Hz 频率的总声压级值仅大 2~4 dB,验证了有限元-无限元法的准确性和可行性。

3)使用有限元-无限元方法避免了软件的交叉使用,不会产生在使用边界元软件导入有限元结果时出现兼容性问题。

4)有限元-无限元法可选择三维声场内任意一点进行分析;如果边界元法需要更换分析点,则需要重新建立模型,相对繁琐。

参考文献

[1] 王子健,张迅,李小珍.铁路混凝土箱梁的振动与噪声频谱特性研究[J].应用力学学报,2014(1): 85.

[2] 李小珍,张迅,李亚东.高速铁路简支箱梁结构噪声的边界元方法[J].土木工程学报,2011(增刊1): 95.

[3] 尹镭,蔡成标,陈兆玮.基于瞬态边界元法的箱梁声辐射[J].西南交通大学学报,2015(6): 1100.

[4] 谢伟平,孙亮明.箱形梁声辐射问题的半解析方法[J].武汉理工大学学报,2008(12): 165.

[5] POISSON F, MARGIOCCHI F. The use of dynamic dampers on the rail to reduce the noise of steel railway bridges[J]. Journal of Sound and Vibration,2006(3): 944.

[6] 杨瑞梁,汪鸿振.声无限元进展[J].机械工程学报,2003(11): 82.

[7] 缪旭弘,钱德进,姚熊亮,等.基于 ABAQUS 声固耦合的水下结构声辐射研究[J].船舶力学,2009(2): 319.

[8] 王刚,李旭东,姜慧.汽车引擎盖的有限元分析[J].甘肃科技,2012(8): 71.

(收稿日期:2019-01-10)

portation Systems. Washington D C: IEEE, 2011.

[6] LUO Q, HOU Y, LI W, et al. Stop plan of express and local train for regional rail transit line [J]. Journal of Advanced Transportation,2018(3): 1.

[7] NOMURA K, MIYATAKE M. Scheduling method for minimum energy consumption considering constraints of time intervals between local and express trains [C]//IEEE International Conference on Intelligent Rail Transportation. Washington DC: IEEE,2016.

[8] BAEK J, SOHN K. An investigation into passenger preference for express trains during peak hours[J]. Transportation,2016,43(4): 623.

[9] 赵娟.超饱和客流情况下城市轨道交通网络运输能力的测算[D].北京:北京交通大学,2015.

[10] 魏玉光,夏阳,赖艺欢.城市轨道交通线路通过能力计算方法研究[J].中国铁道科学,2018(2): 112.

(收稿日期:2019-01-15)