

基于乘客选择的市域(郊)铁路快慢车停站方案设计

王静梅

(新疆铁道职业技术学院, 830011, 乌鲁木齐//高级讲师)

摘要 通过对乘客选择行为的分析,构建乘客选择行为的logit模型,得出乘客选择快车与慢车出行的概率。综合考虑快慢车开行比例、线路配线现状及线路通过能力等因素,构建乘客综合旅行时间最短的目标函数,并使用遗传算法进行求解。基于实际案例,提出了快慢车停站方案设计。案例分析结果表明,优化方案能缩短乘客总体旅行时间,增加乘客选择快车的概率,验证了目标函数及算法的有效性。

关键词 市域(郊)铁路;快慢车组合;停站方案;乘客选择

中图分类号 U292.4; U239.5

DOI:10.16037/j.1007-869x.2021.08.024

Stop Scheme Design of Suburban Railway Express/Local Trains Based on Passenger Choice

WANG Jingmei

Abstract Through analysis of passenger choice behavior, a logit model of passenger choice behavior is constructed, and the probability of passengers choosing express and local trains is obtained. Considering factors such as the ratio of operational express and local trains, auxiliary line status, and line passing capacity, objective function of the shortest passenger's comprehensive travel time is constructed, and is solved with genetic algorithm. Based on a practical case, the design of express and local train stop scheme is proposed. The case analysis results show that the optimization scheme can shorten the overall travel time of passengers, increasing the probability of passengers choosing express trains. The efficacy of the objective function and algorithm is verified.

Key words suburban railway; express/local train combination; stop scheme; passenger choice

Author's address Xinjiang Railway Vocational and Technical College, 830011, Urumqi, China

快慢车组合运行模式旅行速度快,可以满足市域(郊)铁路乘客的长距离出行需求,减少乘客出行时间和企业的运营成本^[1]。在快慢车组合运行模式下:快车在大站停靠,在小站越站不停车,且需在

安全限速内运行^[2];慢车站站停。

当前对模型构建与算法设计的理论研究较多,但在满足实际线路运营组织需求方面尚有不足:一方面,快车越行时的线路配线条件对于快车越行的选择十分关键,而现有研究大多未予考虑;另一方面,乘客对于快慢车的选择研究不多,难以得出符合实际需求的停站方案。因此,在市域(郊)铁路快慢车停站方案设计中综合考虑线路既有配线条件和乘客选择行为,对于实际运营组织工作的开展具有重要的意义。本文在乘客选择行为分析的基础上,综合考虑快慢车开行比例及线路配线现状,构建乘客综合旅行时间最短的目标函数,进而得出快慢车停站最优方案。

1 乘客快慢车选择行为分析

1.1 路径选择问题

出行者的路径选择,是指出行者综合考虑各影响因素而选择出自己认为效用最大的一条路径。在轨道交通中,出行者总希望选择最短、最快、最便捷又便宜的路线出行,即效用最大(一般指时间和花费最少)。出行路径综合效用可看作1个随机变量^[3]。其中,有一部分效用是可以被客观量化的,为效用的固定值;还有一部分效用是由主观定性评价的,为效用的随机因值。乘客在OD(起讫点)间选择的路径*i*效用值为。

$$U_{i,OD} = V_{i,OD} + \varepsilon_{i,OD} \quad (1)$$

式中:

$U_{i,OD}$ ——OD间第*i*条路径的随机效用值;

$V_{i,OD}$ ——OD间第*i*条路径的效用固定项;

$\varepsilon_{i,OD}$ ——OD间第*i*条路径的效用随机项。

用路径广义费用代表路径效用的固定项,有

$$V_{i,OD} = -C_{i,OD} \quad (2)$$

式中:

$C_{i,OD}$ ——OD间第*i*条路径可以确定的路径费用值。

乘客在线网中选择第 i 条有效路径的概率, 等价于此 OD 间所有乘客选择该路径的比例, 即:

$$p_{i,OD} = \text{Prob}(U_{i,OD} > U_{s,OD}; i \neq s, s \in A_n) = \text{Prob}(V_{i,OD} + \varepsilon_{i,OD} > V_{s,OD} + \varepsilon_{s,OD}; i \neq s, s \in A_n) \\ 0 \leq p_{i,OD} \leq 1, \sum_{i \in A_n} p_{i,OD} = 1 \quad (3)$$

式中

$p_{i,OD}$ ——乘客选择 OD 间第 i 条路径的概率;
 A_n ——OD 间有效路径的集合。

假设路径选择效用的随机项服从相同的 Gumbel 分布, 则各路径的选择概率可以用 Logit 模型进行测算^[4]:

$$p_{i,OD} = \exp(-C_{i,OD} / \overline{C_{i,OD}}) / \sum_{i \in A_n} \exp(-C_{i,OD} / \overline{C_{i,OD}}) \quad (4)$$

其中, $\overline{C_{i,OD}}$ 为 $C_{i,OD}$ 在 A_n 内的平均值。

1.2 路径选择行为的影响因素

实施快慢车运营模式的市域(郊)铁路线路虽能给中长距离出行的乘客带来众多好处, 但也增加了乘客选择出行路径的难度。乘客在选择快慢车时, 需要考虑更多的影响因素。根据文献[5], 可将影响乘客出行路径选择的因素分为乘客属性、出行路径属性及其他因素等 3 类。

1.2.1 乘客属性

乘客属性包含年龄、收入、性别等乘客的个人信息。一般来说, 收入、年龄和是否携带大件行李是路径选择的主要影响因素。

1.2.2 出行路径属性

乘客选择出行路径主要考虑时间、费用及换乘。这 3 个因素共同决定了出行路径的综合水平。

1) 时间。一般指乘客旅行时间, 是乘客由起点至终点的出行时间, 包括乘客候车时间、列车运行时间、换乘时间及停站时间等。

2) 费用。轨道交通出行费用有按里程计价和分段计价等 2 种计价方式。低收入者对该因素更加敏感。

3) 换乘。换乘对于乘客选择的影响十分重要。换乘因素具体可分为换乘时间及换乘次数, 其中换乘时间包括换乘的走行时间及换乘等待时间。乘客在快慢车换乘时, 一般同站台换乘, 无需额外走行, 仅考虑等待时间即可。换乘次数是影响乘客出行路径选择的重要因素。换乘次数过多会让乘客产生不良情绪。

1.2.3 其他因素

除了乘客属性和出行路径属性外, 出行路径中的拥挤度及路径总站点数等其他因素也会影响乘客出行路径的选择。过高的拥挤度会影响乘客的出行体验, 甚至会导致乘客上不去车, 发生滞留站台的情况。可见, 拥挤度是乘客需要考虑的因素。对于部分乘客而言, 总出行时间是不清晰的, 而路径中的站点数是表示出行路径所经过车站的数量, 乘客可能会倾向于选择站点数较少的路径。

1.3 出行路径广义费用函数及路径概率

根据乘客 OD 的不同, 将乘客分为 4 类: 第一类乘客的出行起终点均是快车站; 第二类乘客的出行起点为快车站, 终点为慢车站; 第三类乘客出行起点为慢车站, 终点为快车站; 第四类乘客出行起终点均是慢车站。第二、三、四类乘客可选择慢车出行, 也可选择快慢车换乘出行。这种选择行为就是乘客快慢车路径选择。本文假设: 乘客只会选择离自己最近的换乘车站来换乘相应快慢车, 第二、三类乘客换乘 1 次, 第四类乘客换乘 2 次。

为了借助 Logit 模型完成对 4 类乘客路径选择概率的计算, 需构建出行路径广义费用函数。在同一条线路上, 乘客 OD 对固定, 故快车与慢车出行费用相同。本文不考虑乘客属性和其他因素对出行路径广义费用函数的影响, 仅需考虑时间因素以及换乘因素对出行路径广义费用 $C_{i,OD}$ 的影响。其中, 时间因素包括乘客候车时间、列车运行时间及停站时间, 换乘因素通过换乘次数及换乘时间来量化^[6]。

$$C_{i,OD} = \alpha_w t_w + \alpha_r t_r + n_i \alpha_t t_t \quad (5)$$

式中:

α_w ——乘客候车时间感知系数;

α_r ——乘客在车内的列车运行时间感知系数;

α_t ——乘客换乘时间感知系数;

n_i ——乘客在 OD 对间选择第 i 条出行路径的换乘次数;

t_w ——乘客候车时间;

t_r ——乘客在车内的列车运行时间;

t_t ——换乘时间。

在一般的市域(郊)铁路中, 快车与慢车技术条件相同。快慢车的区别在于是否站站停靠。设快车的停站方案为 $X = \{x_1, x_2, \dots, x_i, \dots, x_n\}$ (x_i 表示快车在车站 i 是否停站, 为决策变量; 停车 $x_i = 1$, 不停车 $x_i = 0$), i 为车站序号; 快车开行 N_c 列, 慢车开

行 N_s 列,且快车、慢车的开行比例为 $1:p$, p 为整数; k 表示 m 个具有越行条件的车站的集合, $k = \{k_1, k_2, \dots, k_n, \dots, k_m\}$; y_i 为慢车是否在 i 站被快车越行,若越行, y_i 取1,否则取0;在第二类乘客选择的换乘路径中,换乘站为 h_1 ;在第三类乘客选择的换乘路径中,换乘站为 h_2 ;在第四类乘客选择的换乘路径中,距起点站最近的换乘站为 s_1 ,距终点站最近的换乘站为 s_2 。

1.3.1 乘客的候车时间

乘客候车时间一般指乘客在起点站的候车时间。假设乘客到达车站的时间近似服从均匀分布,那么乘客的平均候车时间为所乘列车发车间隔的一半。根据上述假设可知,乘客在 i 站的平均候车时间 $t_{i,w}$ 为。

$$t_{i,w} = \begin{cases} \frac{T}{2N_c}, & \text{选择快车,记为 } t_{e,i,w} \\ \frac{T}{2N_s}, & \text{选择慢车,记为 } t_{s,i,w} \end{cases} \quad (6)$$

式中:

T ——高峰时段时长。

1.3.2 列车运行时间

快慢车采用相同技术条件的车辆类型,车内时间的不同主要是由不同的停站数量以及慢车被越行造成的。因此在计算出行路径广义费用函数时,列车运行时间仅需要考虑的是列车停站时间(包含列车起停附加时间),快车越行慢车造成该越行站慢车停站时间的增加。

慢车每待避一次停站时间将会至少增加 $(2h - t_s)$ 或 $(2h)$,其中 h 、 t_s 分别为系统最小追踪间隔时间、慢车停站时间。

因此,乘客乘车时间为

$$t_{r,OD} = \begin{cases} \sum_{i=n_O}^{n_D} (t_{i,r} - x_i t_{save}), & \text{选择快车} \\ \sum_{i=n_O}^{n_D} (t_{i,r} + y_i t_{h,i}), & \text{选择慢车} \end{cases} \quad (7)$$

慢车在 i 站被越行所增加的时间为:

$$t_{h,i} = 2hx_i + (2h - t_s)(1 - x_i) \quad (8)$$

式中:

n_O, n_D ——分别为起、讫点车站的序号。

1.3.3 换乘时间

市域(郊)铁路乘客的快慢车换乘,一般为同站台换乘,无需额外的走行,仅考虑等待时间。当采

用均匀发车间隔后,乘客在快慢车之间的平均换乘时间与快慢车的发车间隔有关。在车站 i ,乘客由慢车换乘快车时,平均换乘时间 $t_{i,t}$ 为快车站发车间隔的一半;由快车换乘慢车时,平均换乘时间 $t_{i,t}$ 为慢车站发车间隔的一半。

$$t_{i,t} = \begin{cases} \frac{T}{2N_s}, & \text{快车换乘慢车} \\ \frac{T}{2N_c}, & \text{慢车换乘快车} \end{cases} \quad (9)$$

1.3.4 路径选择概率计算

根据上述分析可知,只有当乘客选择换乘路径的总出行时间小于慢车直达的路径时间时,才会存在路径的选择问题。因此,可利用Logit模型来计算各换乘路径的选择概率值:

$$p_{i,OD} = \exp(-C_{i,OD}/\overline{C_{i,OD}}) / \sum_{i \in A_n} \exp(-C_{i,OD}/\overline{C_{i,OD}}) \quad (10)$$

2 快慢车停站方案模型构建与求解

市域(郊)铁路的列车停站方案主要同社会效益及企业运营成本有关。

社会效益主要从乘客的角度出发,通过合理的停站方案使乘客快速到达目的地。设置停站方案后,乘客可根据方案选择自己的出行路径,并反馈给运营企业;运营企业根据乘客选择情况对停站方案进行评价与动态优化,从而实现乘客与运营企业的双赢。

2.1 模型假设

1) 不考虑出行者的个体属性及其他因素对于出行路径广义费用造成的影响。

2) 高峰时段 T 内的乘客均匀到达。

3) 乘客选择换乘路径时,会选择离自己最近的快车站换乘。

2.2 目标函数

保证乘客整体旅行时间最短是运营方面的首要任务。因此,本文目标函数为乘客人均旅行时间 Z 最短,即

$$\min Z = \frac{\sum_{n_O=1}^{n-1} \sum_{n_D=n_O+1}^n \sum_{i=1}^I p_{i,OD} M_{OD} (t_w + t_r + t_t)}{\sum_{o=1}^{n-1} \sum_{n_D=n_O+1}^{n_O} M_{OD}} \quad (11)$$

$$p_{i,OD} = \exp(-C_{i,OD}/\overline{C_{i,OD}}) / \sum_{i \in A_n} \exp(-C_{i,OD}/\overline{C_{i,OD}}) \quad (12)$$

第一类乘客:

$$C_{i,OD} = \begin{cases} \alpha_w \frac{T}{2N_e} + \alpha_r \sum_{i=n_O}^{n_D} (t_{i,r} - x_i t_{\text{save}}) \\ \alpha_w \frac{T}{2N_s} + \alpha_r \sum_{i=n_O}^{n_D} (t_{i,r} + y_i t_{h,i}) \end{cases} \quad (13)$$

第二类乘客:

$$C_{i,OD} = \begin{cases} \alpha_w \frac{T}{2N_e} + \alpha_r \sum_{i=n_O}^{h_1} (t_{i,r} - x_i t_{\text{save}}) + \frac{T}{2N_s} + \alpha_r \sum_{i=h_1}^{n_D} (t_{i,r} + y_i t_{h,i}) \\ \alpha_w \frac{T}{2N_s} + \alpha_r \sum_{i=n_O}^{n_D} t_{i,r} + y_i t_{h,i} \end{cases} \quad (14)$$

第三类乘客:

$$C_{i,OD} = \begin{cases} \alpha_w \frac{T}{2N_s} + \alpha_r \sum_{i=n_O}^{h_2} (t_{i,r} + y_i t_{h,i}) + \frac{T}{2N_s} + \alpha_r \sum_{i=h_2}^{n_D} (t_{i,r} - x_i t_{\text{save}}) \\ \alpha_w \frac{T}{2N_s} + \alpha_r \sum_{i=n_O}^{n_D} (t_{i,r} + y_i t_{h,i}) \end{cases} \quad (15)$$

第四类乘客:

$$C_{i,OD} = \begin{cases} \alpha_w \frac{T}{2N_e} + \alpha_r \sum_{i=n_O}^{s_1} (t_{i,r} + y_i t_{h,i}) + \alpha_t \frac{T}{2N_s} + \alpha_r \sum_{i=s_1}^{s_2} (t_{i,r} - x_i t_{\text{save}}) + \alpha_t \frac{T}{2N_s} + \alpha_r \sum_{i=s_2}^{n_D} (t_{i,r} + y_i t_{h,i}) \\ \alpha_w \frac{T}{2N_s} + \alpha_r \sum_{i=n_O}^{n_D} (t_{i,r} + y_i t_{h,i}) \end{cases} \quad (16)$$

式中:

M_{OD} ——从起点车 O 至终点车 D 的客流量。

2.3 模型约束

根据配线确定,快车在无配线条件下不准越行慢车。故有:

$$\sum_{i=n_O}^{n_D} (t_{i,r} - x_i t_{\text{save}}) \geq \sum_{i=n_O}^{n_D} (t_{i,r} + y_i t_{h,i} - y_i N_s) \quad (17)$$

从线网连通性的角度出发,换乘站快车必须停。即

$$x_i \in \{x_1, x_2, \dots, x_p\} \quad (18)$$

线路能力应满足要求:

$$N_s + N_e \leq C_{p,\max} \quad (19)$$

式中:

$C_{p,\max}$ ——快慢车比例 1:p 条件下的线路通过能力^[7];此时 $N_s = pN_e$,为整数。

3 案例分析

3.1 案例线路概况

本文选择北京地铁 6 号线(以下简为“6 号线”)作为案例线路。该线为 1 条贯穿中心城东西向市域(郊)铁路线,全长 52.9 km,共设 34 座车站,全部为地下车站,采用 8 节编组 B 型车。6 号线中西部穿越中心城区,东部连接通州与中心城。其在

常营站和通运门站设有双岛四线,供快车越行慢车。

3.2 现行的快慢车停站方案

根据线路配线情况与服务要求,6 号线于早高峰期间,在出城方向按照“一快两慢”(p=2)开行快车。快车在青年路站—郝家府站区间一站直达,并在常营站和通运门站越行慢车,详见图 1。相比慢车,乘客搭乘快车全程最多可省 7 min 8 s。在晚高峰期间,6 号线进城方向开行快车,停站越行方案和出城方向一致。

相对于之前的站站停方案,6 号线现行的快慢车停站方案(以下简为“现行方案”)减少了列车运行时间,从而有效提升了列车的周转效率。为了进一步提升快慢车停站方案的服务水平,本文基于线路特性与配线情况,对金台路站—潞城站区间(以下简为“金—潞区间”)的快慢车停站方案进行优化设计。

3.3 优化方案

为了与 6 号线现行快慢车停站方案进行横向对比,本文使用早高峰时段出城方向客流数据作为输入数据,如图 2 所示。对照 6 号线现行快慢车停站方案,采用遗传算法求解可得,金—潞区间的快慢车停站优化方案(以下简为“优化方案”)见图 3。

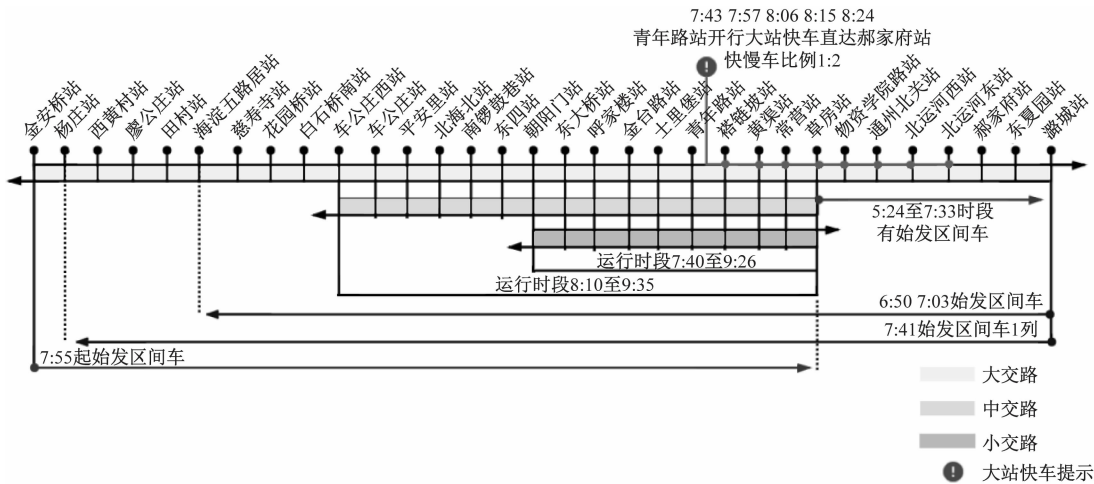


图 1 6 号线早高峰时段列车运行示意图

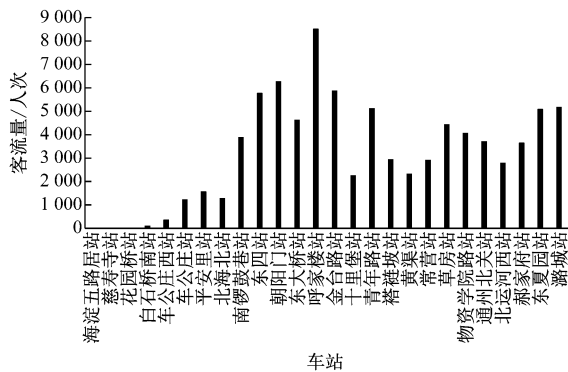


图 2 6 号线早高峰出城方向出站客流分布图^[8]

需要说明的是,由于金台路站以西的车站无越

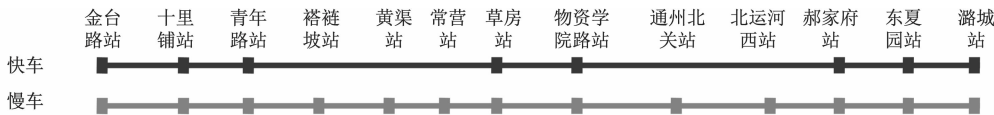


图 3 金—潞区间优化方案示意图

由表 1 发现,优化方案可提升 6 号线现有服务水平,从人均旅行时间来看,优化方案比站站停方案缩短了 1.25 min,比现行方案缩短了 0.18min,使乘客出行更加快捷;从乘客对快车的选择概率来看,优化方案更优。

在线路客运能力充裕的前提下,快慢车开行比例和乘客对快车的选择概率没有直接关系。快慢车开行方案通过影响对应快慢车的旅行时间来影响乘客对快车的选择概率。从乘客对快车的选择概率可以看出,乘客更倾向于选择快车出行。经分析,这有两方面原因:一方面,对于早高峰时段出城方向,部分车站乘降量较小,快车在部分车站不停站可有效提升乘客的旅行速度;另一方面,慢车会避让快车,乘客乘坐慢车反而可能会慢于晚出发的

行条件,故快车与慢车在金台路站以西区段均为站站停。此外,金台路站以东区段的客流量较少,车厢内拥挤度较低,不会产生乘客滞留的情况。

为了验证方案设计的合理性,将单一站站停方案、现行方案及优化方案进行对比,如表 1 所示。

表 1 各方案对比结果表

方案	人均旅行时间/min	乘客选择快车的概率/%
站站停方案	20.18	
现行方案	19.11	52.20
优化方案	18.93	54.59

快车,也减小了乘客对慢车的选择概率。与现行方案相比较,优化方案的快车在草房站与物资学院路站增加了停车。一方面,因为草房站及物资学院路站乘降量较大,快车停车能提高服务质量;另一方面,便于乘客在该站换乘慢车前往自己的目的地,减少了快车不停站对裕链坡站至北运河西站区间乘客的影响。

4 结 语

随着城市轨道交通线路的不断延伸,单一的站站停运营组织模式已无法满足乘客日益多样的出行需求,针对乘客需求及线路条件研究快慢车停站方案十分必要。为了更好适应乘客实际出行需求,通过对乘客选择行为的分析,本文构建了乘客选择

行为的 logit 模型,得出乘客选择快车与慢车出行的概率。在此基础上,综合考虑快慢车开行比例、线路配线现状、线路通过能力等因素,构建乘客综合旅行时间最短的目标函数。使用遗传算法进行求解,得出对应的快慢车停站优化方案。基于实际线路情况,进行了站站停方案、现行方案及优化方案的对比。对比发现:站站停方案组织形式单一,未考虑远途乘客,总旅行时间较长;现行方案停站较少,影响了乘客对快车的选择意愿;本文设计的优化方案更有助于提升市域(郊)铁路服务水平。

参考文献

- [1] ULUSOY Y, CHIEN S, WEI C H. Optimal all-stop, short-turn, and express transit services under heterogeneous demand [J]. Transportation Research Record Journal of the Transportation Re-

search Board, 2010, 2197:8.

- [2] 张化难.城市轨道交通快慢车运行模式研究[D].北京:北京交通大学,2015.
[3] 颜研.基于无缝换乘的城市轨道交通客流分配研究[D].成都:西南交通大学,2015.
[4] 赵欣苗,孙全欣,丁勇,等.市域快慢车越行组织下乘客选择行为研究[J].交通运输系统工程与信息.2016(5):104.
[5] 丁洁冰.基于 SP 调查的客运专线旅客乘车选择行为研究[D].北京:北京交通大学,2009.
[6] 狄迪,杨东援.基于快慢车组合的城市轨交走廊客流分析模型[J].同济大学学报(自然科学版).2014(1):78.
[7] 赵欣苗.城市轨道交通市域线快慢车开行方案优化研究[D].北京:北京交通大学,2017.
[8] 董树灿.城市轨道交通快慢线停站方案优化算法研究[D].北京:北京交通大学,2015.

(收稿日期:2021-01-28)

(上接第 112 页)

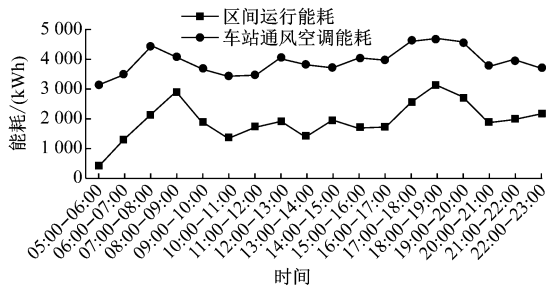


图3 回一鼓区段全天能耗分布

4 结语

本文考虑动态客流变化,针对地下屏蔽门系统车站的线路,建立了基于动态客流分时段综合运营能耗测算模型。以北京地铁 8 号线为例进行测算。结果表明,较已有的能耗测算方法,所构建的模型可较系统地测算城市轨道交通系统能耗。未来可

以考虑对城市轨道交通系统节能策略进行系统研究,以实现城市轨道交通系统的节能运营。

参考文献

- [1] GONZÁLEZ-GIL A, PALACIN R, BATTY P, et al. A systems approach to reduce urban rail energy consumption [J]. Energy Conversion and Management, 2014, 80:509.
[2] 樊佳慧.基于乘客在站停留时间估计的地铁环控系统负荷计算研究[D].北京:北京交通大学,2018.
[3] 宁晶洁.城市轨道交通列车节能运行模型及算法研究[D].北京:北京交通大学,2017.
[4] 中华人民共和国住房和城乡建设部,中华人民共和国国家质量监督检验检疫总局.地铁设计规范:GB 50157—2013 [S].北京:中国建筑工业出版社,2013.
[5] 黄翔.空调工程[M].2版.北京:机械工业出版社,2013.
[6] 赵杰.地铁通风空调系统能耗分析与研究[D].武汉:武汉理工大学,2014.

(收稿日期:2019-08-11)

《城市轨道交通研究》官方网站网址变更公告

根据同济大学对所属单位官方网站管理的统一要求,从 2021 年 7 月 15 日起,《城市轨道交通研究》官方网站网址(原网址:www.umt1998.com)变更为:https://umt1998.tongji.edu.cn。给各位作者、读者带来不便,敬请谅解。

上海铁大城市轨道交通研究杂志社有限公司

2021 年 7 月 1 日