

# 考虑动态客流的城市轨道交通综合运营 能耗精细化测算方法\*

徐小海 李得伟 周玮腾 董欣垒

(北京交通大学交通运输学院, 100044, 北京//第一作者, 硕士研究生)

**摘 要** 考虑客流动态变化,提出了城市轨道交通综合运营能耗精细化测算方法。综合运营能耗主要包括列车牵引能耗、通风空调系统能耗和电扶梯能耗,以北京地铁 8 号线某区间为例,对其能耗进行精细化测算。测算结果显示,能耗分布特征与早晚高峰时段分布相符,验证了城市轨道交通综合能耗测算方法的准确性和可用性。

**关键词** 城市轨道交通; 动态客流; 综合运营能耗评估

**中图分类号** TK01\*8; U293.1\*3

DOI:10.16037/j.1007-869x.2021.08.023

**A Refined Calculation Method for Comprehensive Operation Energy Consumption of Urban Rail Transit Considering Dynamic Passenger Flow**

XU Xiaohai, LI Dewei, ZHOU Weiteng, DONG Xinlei

**Abstract** Considering the dynamic change of passenger flow, a refined calculation method for comprehensive operation energy consumption of urban rail transit is put forward. Comprehensive operation energy consumption mainly includes energy consumption of train traction, ventilation and air conditioning system, and escalator. Taking a section of Beijing Metro Line 8 as an example, the energy consumption is calculated in detail. Results show that the energy consumption distribution matches with the morning and evening rush hour distribution, verifying the accuracy and feasibility of urban rail transit comprehensive energy consumption calculation method.

**Key words** urban rail transit; dynamic passenger flow; comprehensive operation energy consumption evaluation

**Author's address** School of Traffic Transportation, Beijing Jiaotong University, 100044, Beijing, China

到,因此如何评估运营线路的综合能耗已成为实际节能减排工作中面临的关键问题。

在国内外已有相关的研究中,文献[1]给出了牵引能耗、设备能耗等之间的关系;文献[2]提出了基于乘客在站停留时间评估的地铁环控系统负荷计算方法;文献[3]对列车运行过程进行受力分析,建立了列车牵引能耗计算模型。但这些研究均未能精细化评估整个城市轨道交通系统的能耗,也未能充分考虑到动态客流对综合能耗的影响。

本文提出一种考虑了动态客流波动的城市轨道交通综合运营能耗测算方法,并以北京地铁 8 号线为实例进行测算。由于水耗受动态客流波动的影响较小,因此综合运营能耗不考虑水耗。

## 1 能耗测算的总体框架

本文以城市轨道交通的列车运行图为核心,从列车牵引、车站通风空调、电扶梯等方面入手,基于动态客流进行城市轨道交通系统全天运营能耗的精细化计算,并对运营能耗进行动态测算。能耗测算的框架如图 1 所示。

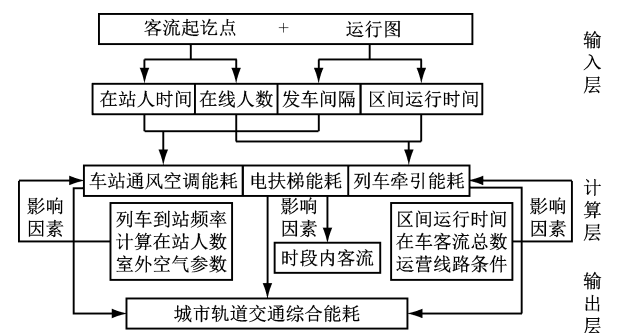


图 1 城市轨道交通综合能耗测算框架图

我国城市轨道交通快速发展,能耗巨大。目前,由于城市轨道交通的实际能耗量并不能直接得

本文通过对列车区间运行过程进行仿真,测算列车区间运行牵引能耗、车站通风空调能耗和电扶

\* 北京市自然科学基金资助项目(8162033)

梯能耗。

通过对 1 条线路上所有车站和区间的上述能耗加和,得到线路综合运营能耗。

## 2 能耗测算

### 2.1 列车牵引能耗

本文通过列车运行过程的仿真对列车牵引能耗进行计算,建立列车牵引能耗计算模型。

#### 2.1.1 受力分析

城市轨道交通列车在运行过程中主要受牵引力、运行阻力和制动力作用。列车在每一时刻所受牵引力或制动力大小根据牵引特性曲线或制动特性曲线使用插值法计算。

列车运行阻力主要包括基本运行阻力、坡道阻力和曲线阻力。其经验计算公式为

$$w_0 = a + bv + cv^2 \quad (1)$$

式中:

$w_0$ ——列车基本阻力系数;

$v$ ——列车瞬时速度,km/h。

$a$ ——基本阻力计算参数;

$b$ ——基本阻力计算参数,h/km;

$c$ ——基本阻力计算参数,h<sup>2</sup>/km<sup>2</sup>。

根据文献[3],基本阻力计算参数由试验确定参数值,随车辆类型而异。

$$w_i = i \quad (2)$$

式中:

$w_i$ ——坡道阻力系数;

$i$ ——坡道坡度。

$$w_r = \frac{A}{R} \quad (3)$$

式中:

$w_r$ ——曲线附加阻力系数;

$A$ ——经验常量,取值 600 m;

$R$ ——曲线半径。

在考虑动态客流对列车运行影响的情况下,列车受到的总阻力为:

$$F_w = (w_0 + w_i + w_r)(m_p + m_r n)g \quad (4)$$

式中:

$F_w$ ——列车所受总阻力;

$m_p$ ——列车自重;

$m_r$ ——1 名乘客的体重,按成年人平均体重取 0.06 t;

$n$ ——列车上的乘客数;

$g$ ——重力加速度。

#### 2.1.2 列车运动状态方程

列车运动状态主要有牵引、巡航、惰行和制动等 4 种工况。对于较短的区间,列车一般没有巡航工况。

列车在合力作用下运行。在位置变化过程中,列车受力、加速度及速度连续动态变化。列车在位置  $s$  的运动状态为:

$$\frac{dv(s)}{dt} = \frac{F(s) - F_B(s) - F_w(s)}{(m_p + m_r n)g} \quad (5)$$

式中:

$F(s)$ ——列车牵引力;

$F_B(s)$ ——列车制动力。

$$\frac{ds}{dt} = v(s) \quad (6)$$

#### 2.1.3 能耗计算

当列车有巡航操纵模式时,其操纵过程为牵引-巡航-惰行-制动。在巡航工况下,牵引力恒等于阻力。因此,在牵引区段只有牵引工况和巡航工况两种情况下,列车能耗为:

$$E = \int_0^s (1 - U_1(s))F(s) + U_1(s)F_w(s)ds \quad (7)$$

式中:

$E$ ——列车运行能耗;

$U_1(s)$ ——列车在位置  $s$  处的工况参数,巡航工况下  $U_1(s) = 1$ ,牵引工况下  $U_1(s) = 0$ 。

### 2.2 车站通风空调能耗

车站通风空调能耗主要为空调新风系统和电扶梯的能耗,以及风机温升、人员散热、屏蔽门漏风等情况引起的额外能耗。采用分析计算法分时段评估各类负荷,进而评估通风空调能耗。

#### 2.2.1 人员热负荷

为得到平均在站等车乘客数,引入在站人时间变量表示时段内车站所有乘客在站等车时间之和。在站人时间除以时段时间得到时段内乘客在站等车时间均等后的在站乘客数。人员热负荷为:

$$W_r = \frac{t_z q}{\Delta t} \quad (8)$$

式中:

$W_r$ ——人员热负荷;

$t_z$ ——时段内总在站人时间,人·s;

$\Delta t$ ——时段长度,s;

$q$ ——乘客散热全热标准值,表示乘客人均散

热功率, W/人。

### 2.2.2 屏蔽门漏风热负荷

屏蔽门开启, 站厅、站台的空气产生余热的平均速率同室内外空气参数及列车到达频率有关。因此, 屏蔽门漏风负荷为:

$$W_{lf} = L_{lf} \Delta H_{lf} \rho_{sn} \frac{m}{\Delta t} \quad (9)$$

式中:

$W_{lf}$ ——时段内屏蔽门漏风热负荷;

$L_{lf}$ ——屏蔽门漏风速率;

$\Delta H_{lf}$ ——空气焓值差, 指室外和站厅的空气焓值差或站厅和站台的空气焓值差;

$\rho_{sn}$ ——站厅与站台空气密度;

$m$ ——时段内到达站台的列车数。

### 2.2.3 相对固定的负荷

在车站, 屏蔽门传热、排热风道传热, 以及照明、自动扶梯、垂直电梯、广告指示牌和自动售检票机设备运转等负荷相对固定。这部分负荷为:

$$W_{gd} = W_{dt} + W_{qt} \quad (10)$$

式中:

$W_{gd}$ ——相对固定负荷, 站厅、站台按实际情况取值不同;

$W_{qt}$ ——固定负荷, 不包括受客流影响的电梯负荷;

$W_{dt}$ ——电梯负荷。

### 2.2.4 通风空调系统的运行负荷

城市轨道交通车站通风空调系统总送风量为:

$$L_z = \frac{W_r + W_{lf} + W_{gd}}{\Delta H_z \rho_{sf}} \quad (11)$$

式中:

$L_z$ ——总送风量, 站厅、站台应分开计算;

$\rho_{sf}$ ——送风空气密度;

$\Delta H_z$ ——空气焓值差, 计算站厅总送风量时取站厅空气与送风的焓值差, 计算站台总风量时取站台空气与送风的焓值差。

在通风空调设计中, 新风量不少于总送风量的10%, 为:

$$L_{xf} = 0.1 L_z \quad (12)$$

式中:

$L_{xf}$ ——最小新风量,  $m^3/s$ 。

通风空调所送冷风一部分来自于新风, 一部分来自于站厅、站台混合回风。因此, 新风负荷表示为:

$$W_{xf} = L_{xf} \rho_{sw} \Delta H_{xf} \quad (13)$$

式中:

$W_{xf}$ ——新风负荷;

$\rho_{sw}$ ——室外空气密度;

$\Delta H_{xf}$ ——室外空气和混风焓值差。

通风空调系统风机运转产生的热量, 会使制造的冷风由机器露点处空气焓值达到送风焓值。风机温升的负荷为:

$$W_{ws} = L_z \rho_{ld} (H_{sf} - H_{ld}) \quad (14)$$

式中:

$W_{ws}$ ——风机温升负荷;

$H_{sf}$ ——风机送风点空气焓值;

$H_{ld}$ ——风机露点处空气焓值;

$\rho_{ld}$ ——机器露点空气密度。

通风空调系统总负荷  $W$  为:

$$W = W_r + W_{lf} + W_{gd} + W_{xf} + W_{ws} \quad (15)$$

### 2.2.5 能耗计算

计算出车站各时段通风空调负荷后, 车站全天的通风空调能耗可表示为:

$$Q_T = \Delta t \sum_{x=1}^X W_x \quad (16)$$

式中:

$Q_T$ ——车站全运营时段通风空调能耗;

$X$ ——运营时段数;

$W_x$ ——第  $x$  时段站厅和站台通风空调负荷。

### 2.3 电梯能耗

在车站, 电梯运转功率随客流的变化而变化, 车站无客流时段电梯的运转速度很低, 功率较小, 甚至被关闭, 此时能耗忽略不计, 所以电梯运转负荷表示为:

$$W_{df} = S_x W_d \quad (17)$$

式中:

$W_{df}$ ——电梯负荷;

$S_x$ ——第  $x$  时段内车站是否有客流, 有客流取1, 否则取0;

$W_d$ ——电梯正常运转功率。

电梯能耗为:

$$Q_D = \Delta t \sum_{x=1}^X W_{x, df} \quad (18)$$

式中:

$Q_D$ ——电梯能耗;

$W_{x, df}$ ——第  $x$  时段电梯负荷。

3 实例测算

以北京地铁 8 号线回龙观大街站—鼓楼大街站区段(以下称为“回—鼓区段”)为例测算能耗。回—鼓区段长 17.65 km,有 13 座采用了全封闭屏蔽门的地下车站,其线路走向如图 2 所示。北京地铁 8 号线使用 B 型车 6 节编组列车,列车最高运行速度为 80 km/h。

选取 2016 年 6 月 17 日 5:00—23:00 客流 OD(起讫)数据和列车运营时刻表数据,对回—鼓区段 166 列列车的综合能耗进行测算。车站土建结构、设施设备及室内外空气参数如表 1 及表 2 所示<sup>[2,5-6]</sup>,车辆基本参数如表 3 所示<sup>[3]</sup>。根据《地铁设计规范》<sup>[4]</sup>规定,站厅温度取 30.0℃,相对湿度取 55%;站台温度取 28.0℃,相对湿度取 55%;时间粒度取 15 min。



图 2 线路走向图

表 1 车站结构、设备设施及室内外空气参数

参数	取值
屏蔽门漏风速率/(m <sup>3</sup> /s)	10
风机漏点焓值/(kJ/kg)	49.270
送风点焓值/(kJ/kg)	50.31
站厅焓值/(kJ/kg)	68.33
站台焓值/(kJ/kg)	62.02
混风焓值/(kJ/kg)	64.8
室外空气密度/(kg/m <sup>3</sup> )	1.1
站厅空气密度/(kg/m <sup>3</sup> )	1.1
站台空气密度/(kg/m <sup>3</sup> )	1.1
送风空气密度/(kg/m <sup>3</sup> )	1.2
机器露点空气密度/(kg/m <sup>3</sup> )	1.2
站厅电梯功率/kW	48.4
站厅固定功率/kW	60.7
站台固定功率/kW	70.1
站台电梯功率/kW	19.6
乘客散热全热标准/(W/人)	182

表 2 室外空气焓值

单位:kJ/kg

时段序号	时段	焓值
1	05:00—06:00	77.2
2	06:00—07:00	78.5
3	07:00—08:00	82.2
4	08:00—09:00	81.8
5	09:00—10:00	78.5
6	10:00—11:00	75.6
7	11:00—12:00	75.1
8	12:00—13:00	90.5
9	13:00—14:00	85.8
10	14:00—15:00	81.6
11	15:00—16:00	90.0
12	16:00—17:00	87.0
13	17:00—18:00	88.6
14	18:00—19:00	85.7
15	19:00—20:00	85.5
16	20:00—21:00	79.0
17	21:00—22:00	86.6
18	22:00—23:00	80.7

表 3 车辆基本属性参数

属性参数	结果
列车编组	B 型车 6 节编组
列车长度/m	118
列车质量/t	199
列车最高运行速度 v/(km/h)	80
列车基本运行阻力系数	$W_0 = 1.24 + 0.014v + 0.00034v^2$

由于无法获得北京地铁 8 号线每座车站的土建结构参数值,本文假设各车站的参数均为一致。

经计算,回—鼓区段在 05:00—23:00 时段内:列车牵引能耗为 34 129.6 kWh,列车运行单位能耗为 11.65 kWh/(车·km);每座车站的平均全天通风空调系统能耗为 5 427 kWh,13 座车站总能耗为 70 551 kWh,电梯能耗为 15 470 kWh;该线路全天综合运营能耗为 120 150.6 kWh。

回—鼓区段全天能耗分布如图 3 所示。由图 3 可知,列车牵引能耗和车站通风空调系统能耗存在早、晚高峰的现象。经分析,高峰时段的客流较多,列车发车频率高,导致列车牵引能耗和车站通风空调系统能耗在高峰时段偏高。

(下转第 118 页)

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)

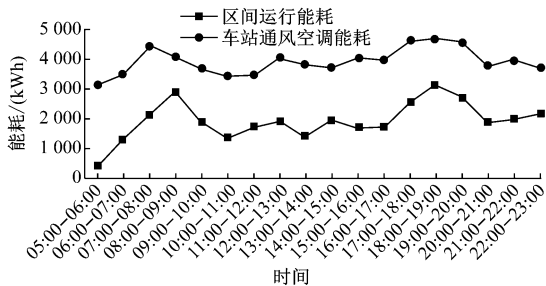


图3 回一鼓区段全天能耗分布

## 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