

文章编号: 1001-4632 (2013) 03-0133-04

北京城市轨道交通中远期能耗预测研究

王子甲, 陈峰, 施仲衡

(北京交通大学 土木建筑工程学院, 北京 100044)

摘要: 在分析城市轨道交通牵引能耗和车站能耗主要影响因素的基础上, 根据影响因素的重要程度和数据可得性, 选择列车自重、客运量、电机类型、敷设方式、车站环控系统制式和季节因素建立城市轨道交通能耗的预测模型。采用北京城市轨道交通2009年能耗数据对模型中的基础性指标进行标定, 并用2010年北京地铁4号线的数据验证了预测模型的可靠性。根据北京城市轨道交通的建设规划调整方案, 预测其中远期能耗。结果表明: 北京城市轨道交通2015年和2020年的能耗分别为19.96和27.49亿kW·h。

关键词: 城市轨道交通; 能耗预测; 影响因素; 指标法

中图分类号: U239.5; U260.153

文献标识码: A

doi: 10.3969/j.issn.1001-4632.2013.03.22

城市轨道交通运能大, 效率高, 舒适性和安全性好, 能有效解决大中城市普遍面临的交通问题, 因此在我国得到了快速的发展。作为一种绿色交通方式, 虽然城市轨道交通的人公里能耗仅为私家车的1/9, 为常规公交的1/3^[1], 但是由于其运能大, 里程长, 城市轨道交通能耗的绝对量并不小, 北京、上海等部分城市的轨道交通年能耗已达10亿kW·h以上^[2]。

目前针对城市轨道交通能耗的研究主要集中在2个方面: 一是基于技术层面的计算方法或仿真研究, 文献[3—5]主要采用这种方法; 二是基于统计数据的回归分析, 文献[6—7]的研究属于这种方法。在这2种研究基础上, 形成了平均运量法、运行图法、指标法、需求系数法等理论方法。其中指标法模型简单, 可操作性强, 被较多地用于城市轨道交通能耗的测算中^[8], 但是既有的指标法模型很少考虑车站能耗; 考虑牵引能耗时多采用车公里、人公里等能耗指标, 没有综合考虑列车自重及载重周转速的影响, 也没有对敷设方式和电机类型加以区分。本文根据北京城市轨道交通既有能耗数据, 以及轨道交通规划阶段数据的可得性, 综合考虑列车自重及载重周转速, 在区分敷设方式、电机类型及环控系统制式的基础上, 建立和验证基于吨公里能耗和车站月能耗的指标法能耗预测模型, 并进行中远期能耗预测。

1 能耗影响因素

城市轨道交通能耗主要包括牵引能耗和车站能耗。

1.1 牵引能耗影响因素

影响牵引能耗的因素主要有列车自重、客运量、敷设方式、季节、电机类型、线路平纵断面和站间距等。文献[8]重点分析了列车自重、客运量、敷设方式和季节等因素对牵引能耗的影响, 但未分析电机类型、线路平纵断面和站间距等因素。

城市轨道交通车辆的电机类型对能耗有重要影响。北京城市轨道交通车辆先后采用凸轮变阻、斩波调压等类型的电机, 实际测试显示后者的能源效率比前者高; 另外, 直线电机较旋转电机具备适应小曲线半径等优势, 但运营能耗数据表明该类型电机能耗较大。线路平纵断面及站间距这2个因素主要通过影响列车的行驶条件及运行速度从而影响牵引能耗。一般情况下, 小站间距以及小半径曲线和大纵坡线路等都会造成牵引能耗的增加。

虽然线路平纵断面和站间距等因素对能耗有一定影响, 但是线网规划阶段的数据并不支持考虑这些因素; 季节因素主要通过影响列车空调系统能耗从而影响牵引能耗, 然而运营能耗数据显示这部分能耗占比较小, 可不考虑。根据影响因素的重要程

收稿日期: 2012-12-12; 修订日期: 2013-01-15

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51278029); 北京市科学研究与科研基地建设项目(C10H00010)

作者简介: 王子甲(1985—), 男, 河南叶县人, 博士研究生。

度和数据可得性,进行能耗预测时考虑列车自重、客运量、电机类型和敷设方式等因素。列车自重和客运量等因素建立能耗预测模型时直接作为自变量,敷设方式和电机类型等因素则通过既有数据分别计算其能耗指标值加以体现。

1.2 车站能耗影响因素

城市轨道交通的车站能耗主要包括站内环控、动力和照明等设备设施的能耗,影响因素主要有敷设方式、车站环控系统制式、季节、客运量和车站类型等。敷设方式对车站动力和照明能耗有根本性的影响^[8],北京地铁5号线运营能耗数据也显示,地下车站年平均能耗为地上车站的5倍。屏蔽门系统将隧道和车站空间完全隔离开,可以大大降低车站冷负荷,从而达到节能效果。地下车站夏季能耗远高于冬季,但是不同类型的车站受季节影响程度有差别;地上开式车站能耗受季节影响并不明显。客运量影响站内热量,从而影响通风空调负荷,客运量越大车站能耗越高。车站规模决定车站环境空间,从而决定冷负荷、动力照明系统规模等,与车站能耗正相关。

对于客运量和车站类型等因素,一方面因其影响较小,另一方面目前的数据不支持,因此预测车站能耗时暂不考虑。根据影响因素的重要性和数据可得性,测算车站能耗时主要考虑敷设方式、季节和环车站控系统制式等因素。

2 能耗预测模型

2.1 模型的建立

在分析牵引能耗和车站能耗影响因素的基础上,根据调研数据和线网规划资料,以车站月能耗及牵引吨公里能耗为基础指标,基于指标法建立城市轨道交通能耗的预测模型为

$$E = \sum_i E_i(i) \quad (1)$$

其中,

$$E_i(i) = E_v(i) + E_s(i)$$

$$E_v(i) = (2n_i W_i l_i + m P_i d_i)(\eta_{11} l_{i1} + \eta_{12} l_{i2}) / l_i$$

$$E_s(i) = \sum_k Q_{ik} (p_{i1} E_{ik1} + p_{i2} E_{ik2})$$

式中: E 为整个城市轨道交通的总能耗, $\text{kW} \cdot \text{h}$; $E_i(i)$, $E_v(i)$ 和 $E_s(i)$ 分别为第 i 条线路的总能耗,牵引能耗和车站能耗, $\text{kW} \cdot \text{h}$; n_i 为年列车开行对数; W_i 为列车自重, t ; l_i 为线路运营里程, km ; m 为乘客人均质量, t , 本文取 0.06 t ; P_i 为年客运总量, 人次; d_i 为乘客的平均运距, km ; l_{i1} 和 l_{i2} 分别为地下和地上线路里程, km ; η_{11} 和 η_{12} 分别为不同电机类型的地上和地下线路的吨公里能耗, $\text{kW} \cdot \text{h} \cdot (\text{t} \cdot \text{km})^{-1}$; Q_{ik} , E_{ik1} 和 E_{ik2} 分别为第 k 种类型车站的个数及其在空调月和非空调月的月能耗, $\text{kW} \cdot \text{h}$; p_{i1} 和 p_{i2} 分别为1年中运行和不运行空调的月数。

式(1)中, η_{11} , η_{12} , E_{ik1} 和 E_{ik2} 为基础性指标,基于已有的城市轨道交通能耗数据获得。其中, η_{11} 和 η_{12} 由式(2)得到。

$$\eta_{1j} = E_{ij} / (2n_i W_i l_i + m P_i d_i) \quad j = 1, 2 \quad (2)$$

式中: E_{ij} 为地上或地下既有线路的能耗统计值。

2.2 基础性指标的标定

采用指标法预测能耗,基础性指标数值的准确标定比较关键。根据相关调研课题得到2009年北京城市轨道交通全网的牵引和车站能耗,以及发车对数、客运量、平均运距和列车自重等运营数据,见表1。

北京城市轨道交通线路按照敷设方式和电机类型区分,有旋转电机地上线、旋转电机地下线以及直线电机地上线3种;按照车站类型区分,有地上开式、地下开式、地下闭式和地下屏蔽门式4种;按季节又分空调月及非空调月2种。则由表1可得北京城市轨道交通的基础性指标,见表2。

表1 2009年北京城市轨道交通能耗等运营数据

线路名称	敷设方式	牵引能耗/ (万 $\text{kW} \cdot \text{h}$)	车站能耗/ (万 $\text{kW} \cdot \text{h}$)	客运量/ (万人次)	平均运距/ km	列车开行 对数	列车自重/ t
1号线	地下	7 412	5 182	32 696	8.58	106 675.0	194
2号线	地下	5 205	3 005	37 776	5.50	93 959.5	194
13号线	地上	4 912	5 556	8 902	11.42	82 871.0	194
八通线	地上	2 347	5 549	7 057	10.51	66 696.5	203
8号线	地下	525	1 121	1 013	2.56	12 691.0	194
10号线	地下	3 925	949	7 734	7.33	48 362.5	194
机场线	地上	1 849		217	26.43	26 767.0	100
4号线	地下	1 363	1 042	4 965	6.72	22 455.0	194

注:4号线为10—12月数据。

表2 北京城市轨道交通基础性指标

不同电机类型和敷设方式下的吨公里能耗/(kW·h·(t·km) ⁻¹)			不同类型车站的月能耗(空调月/非空调月)/(万kW·h)			
旋转电机地上线	旋转电机地下线	直线电机地上线	地上开式	地下开式	地下闭式	地下屏蔽门式
0.039 4	0.052 1	0.080 4	7.64/7.11	23.3/11.82	36.15/20.12	21.93/13.49

2000年,北京地铁运营公司利用霍尔效应制成的直流电能表对正在运行的地铁1号线列车进行测试,得到旋转电机凸轮变阻车的吨公里能耗为 $0.052 \text{ kW} \cdot \text{h} \cdot (\text{t} \cdot \text{km})^{-1}$,旋转电机斩波调压车的吨公里能耗为 $0.051 \text{ kW} \cdot \text{h} \cdot (\text{t} \cdot \text{km})^{-1}$,与表1中旋转电机地下线的吨公里能耗指标值 $0.052 1 \text{ kW} \cdot \text{h} \cdot (\text{t} \cdot \text{km})^{-1}$ 非常接近,验证了基础性指标标定的准确性。

2.3 算例验证

由于各条地铁线路的总能耗之和即为整个城市轨道交通的总能耗,因此可以通过计算单条地铁线路的总能耗验证能耗预测模型的可靠性。以2010年的北京地铁4号线为例,对城市轨道交通能耗指标法预测模型进行算例验证。北京地铁4号线运营里程为28.165 km,除安河桥北站及相连的部分区间为地上线,其余均为地下线。该线设24个车站,其中23个为地下屏蔽门式车站,1个为地上开式车站。采用6节编组的B型车,列车自重为194 t。2010年的客运量为24 499.2万人次,平均运距为6.74 km,开行对数为93 336对。根据上述线路条件,吨公里能耗指标采用 $0.052 1 \text{ kW} \cdot \text{h} \cdot (\text{t} \cdot \text{km})^{-1}$,地下屏蔽门车站空调及非空调月份的月能耗分别采用21.93和13.49万kW·h,地上开式车站空调及非空调月能耗分别采用7.64和7.11万kW·h,月数分别为5个月和7个月。

表3 2010年北京地铁4号线能耗的计算值与实测值对比情况

能耗	计算值/ (万kW·h)	实测值/ (万kW·h)	误差/ %
总能耗	10 912.22	10 267.63	3.35
牵引能耗	5 830.26	5 558.41	4.89
车站能耗	4 781.81	4 709.23	1.54

注:由于SCADA系统的运营数据与供电局抄表数据存在6%左右的误差,因此表中实测值为修正值。

由式(1)得到2010年北京地铁4号线的总能耗、牵引能耗和车站能耗计算值,由北京地铁4号线所属的京港地铁公司SCADA系统的运营数据得到它们的实测值,见表3。由表3可以看出:城市轨道交通能耗指标法预测模型具备较高的可靠性。

3 中远期能耗预测

基于表2中的基础性指标,结合《北京市城市轨道交通建设规划调整方案(2011—2015年)》和《北京市城市轨道交通建设规划调整方案(2011—2020年)》,假定相关设备能源效率不变,得到北京城市轨道交通2015和2020年能耗的预测值,见表4。由表4可以看出:2015年北京城市轨道交通能耗将达到19.96亿kW·h,2020年将增加到27.49亿kW·h。

表4 北京城市轨道交通中远期能耗预测值

预测年度	运营里程/ km	车站 个数	牵引能耗/ (亿kW·h)	车站能耗/ (亿kW·h)	总能耗/ (亿kW·h)
2015	703	339	12.70	7.26	19.96
2020	1 050	450	17.28	10.21	27.49

4 结 语

影响城市轨道交通能耗的因素较多,根据不同详细程度的基础资料和不同的精度要求,其能耗测算有不同的手段和方法。从城市或国家层面的能源规划出发,基于线网规划资料对各个城市轨道交通中远期能耗进行预测,是相对宏观的测算,可以根据所积累的运营能耗统计数据,结合线网规划阶段的资料,采用相对简单的指标法,对未来线网总能耗进行估算。

参 考 文 献

- [1] 商金涛. 基于运营数据的北京市城市轨道交通能耗测算研究 [D]. 北京:北京交通大学,2011.
(SHANG Jintao. The Research of Beijing Urban Rail Transit Energy Consumption Estimation Based on Operational Data [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2009. in Chinese)
- [2] 王玉明. 城市轨道交通系统能耗影响因素的量化分析 [D]. 北京:北京交通大学,2011.

- (WANG Yuming. Quantification Analysis on the Energy Factors of the Urban Rail Transit System [D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2011. in Chinese)
- [3] 刘海东, 毛保华, 丁勇, 等. 城市轨道交通列车节能问题及方案研究 [J]. 交通运输系统工程与信息, 2007, 5 (10): 68-73.
(LIU Haidong, MAO Baohua, DING Yong, et al. Train Energy-Saving Scheme with Evaluation in Urban Mass Transit Systems [J]. Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2007, 5 (10): 68-73. in Chinese)
- [4] 石红国, 彭其渊, 郭寒英. 城市轨道交通牵引计算模型 [J]. 交通运输工程学报, 2005, 5 (4): 20-26.
(SHI Hongguo, PENG Qiyuan, GUO Hanying. Traction Calculation Model of Urban Mass Transit [J]. Traffic and Transportation Engineering, 2005, 5 (4): 20-26. in Chinese)
- [5] 刘剑峰, 丁勇, 刘海东, 等. 城市轨道交通多列车运行模拟系统研究 [J]. 交通运输系统工程与信息, 2005, 5 (1): 79-82.
(LIU Jianfeng, DING Yong, LIU Haidong, et al. Multi-Train Movement Simulation System for Urban Rail Transit [J]. Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2005, 5 (1): 79-82. in Chinese)
- [6] 王娟, 谢谦. 牵引计算在地铁车辆中的应用 [J]. 电力机车与城轨车辆, 2003, 26 (6): 46-48.
(WANG Juan, XIE Qian. Application of Traction Computation on Subway Vehicles [J]. Electric Locomotives & Mass Transit Vehicles, 2003, 26 (6): 46-48. in Chinese)
- [7] 杨臻明, 岳继光, 王晓保, 等. 基于回归模型的城市轨道交通能耗预测 [J]. 城市轨道交通研究, 2010 (12): 22-25.
(YANG Zhenming, YUE Jiguang, WANG Xiaobao, et al. Prediction of Urban Rail Transit Power Consumption Based on Regression Model [J]. Urban Mass Transit, 2010 (12): 22-25. in Chinese)
- [8] 袁宏伟, 孔令洋. 城市轨道交通能耗影响因素及测算研究 [J]. 都市快轨交通, 2012 (2): 41-44.
(YUAN Hongwei, KONG Lingyang. Study and Calculation of Influencing Factors on Urban Rail Transit Energy Consumption [J]. Urban Rapid Rail Transit, 2012 (2): 41-44. in Chinese)

Prediction on Medium and Long Term Energy Consumption of Urban Rail Transit Network in Beijing

WANG Zijia, CHEN Feng, SHI Zhongheng

(School of Civil Engineering, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

Abstract: Based on analyzing the main factors affecting traction energy consumption and station energy consumption of urban rail transit, according to the importance degree of influencing factors and data availability, prediction model was established for energy consumption of urban rail transit by incorporating such factors as train dead weight, passenger capacity, motor types, laying modes, the types of environmental control system at station and seasonal factors. The fundamental indexes of the model were calibrated with the energy consumption data of Beijing rail transit in 2009. The reliability of the model was validated using the energy consumption data of Beijing Metro Line 4 in 2010. In accordance with the adjustment scheme for the construction planning of Beijing rail transit, middle and long term energy consumption was predicted. Results show that the energy consumption of Beijing rail transit in 2015 and 2020 is 1 996 and 2 749 million kW · h respectively.

Key words: Urban rail transit; Energy consumption prediction; Influencing factor; Index method

(责任编辑 金 燕)