

基于案例的城市轨道交通车站能耗定额标准研究

刘爽*, 王慧文, 兴妍, 陈绍宽

(北京交通大学 综合交通运输大数据应用技术交通运输行业重点实验室, 北京 100044)

摘要: 车站能耗定额标准是城市轨道交通能耗评价和节能工作的重要基础. 本文从我国城市轨道交通发展对能耗的需求出发, 分析城市轨道交通系统能耗的构成; 以北京市轨道交通部分车站为例, 分析不同类型车站的设备能耗构成, 特点和建筑面积, 日客流量, 敷设方式, 出入口数量等因素对能耗的影响; 基于能耗定额评价方法, 提出包含基本、奢侈性、舒适性能耗定额水平的车站能耗定额标准; 基于不同类型车站, 探讨非空调季和空调季的车站能耗定额标准的差异, 从达到能耗目标角度提出相应的节能策略.

关键词: 城市交通; 能耗标准; 定额评价; 城市轨道交通车站; 节能策略

Energy Consumption Quota Standard for Urban Rail Transit Stations with Case Studies

LIU Shuang, WANG Hui-wen, XING Yan, CHEN Shao-kuan

(Key Laboratory of Transport Industry of Big Data Application Technologies for Comprehensive Transport, Ministry of Transport, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

Abstract: The energy consumption quota standard for urban rail transit (URT) stations can provide an important reference for energy consumption evaluation and energy saving. This paper analyzes the compositions of energy consumption in a URT system in consideration of the energy needs for urban transportation development. Using the URT stations in Beijing for case studies, this paper analyzes the impacts of major factors on energy consumptions, including the compositions of equipment energy consumptions, station characteristics, floor area, daily passenger volumes, station layouts, and number of exits at different stations. Using the quota evaluation method, this paper proposes the quota standard for different station energy consumption levels: basic, luxury, and comfortable. The energy consumption quota standard is also proposed for the season with air-conditioning on and the season with air-conditioning off. The energy saving strategies are also discussed for different types of URT stations.

Keywords: urban traffic; energy consumption standard; quota evaluation; urban rail transit station; energy saving strategy

0 引言

城市轨道交通是一种绿色出行方式,但其线网规模扩张带来的巨大电能耗不容小觑.2014年我国城市轨道交通线网总耗电量约94亿度,占全国总耗电量的1.7%.2014年底北京市轨道交通线网总耗电量约14.3亿度,占线路整体运营成本的

四成左右^[1].据规划,全国地铁总里程未来将达到1.4万km,预计年耗电将达400亿度,约占全国总耗电量的5%以上^[2].能耗大幅度增加不仅给城市能源供给带来沉重负担,也给运营单位带来巨大成本压力.国内外研究多集中在城市轨道交通系统能耗的影响因素及节能策略^[3-5],有关车站能耗的

收稿日期:2019-10-09

修回日期:2020-04-27

录用日期:2020-05-07

基金项目:国家自然科学基金/National Natural Science Foundation of China(71621001);北京市自然科学基金/Natural Science Foundation of Beijing, China(L191023).

作者简介:刘爽(1980-),女,北京人,副教授.

*通信作者:liushuang@bjtu.edu.cn

研究多是针对某类设备进行能耗测算并提出具体节能措施.与此相关的地方标准给出了能耗评价指标^[6],但对能耗定额标准的研究相对较少.因此,在城市轨道交通能耗高速增长和国家可持续发展政策的背景下,对车站能耗定额标准的研究具有重要实践价值.

1 城市轨道交通车站能耗特点

1.1 城市轨道交通车站能耗构成

城市轨道交通系统总能耗主要包括车辆能耗和车站能耗两部分,其中,车站能耗是指城市轨道交通车站为满足运营需求所消耗的设备能耗,其构成如图1所示.在车站能耗中,照明系统、通风空调系统、自动扶梯等设备用电占其总量的80%以上.

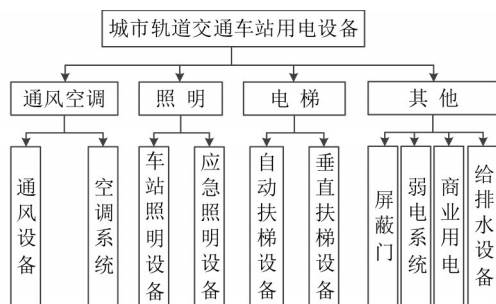


图1 城市轨道交通车站主要能耗设备构成

Fig. 1 Main energy consumption equipment in urban rail transit stations

1.2 北京市轨道交通车站能耗特点

根据不同车站结构,选取北京市轨道交通4条开通运营5年以上的线路,采用2017—2018年部分地上和地下车站的车站面积、日均客流、日均能耗及能耗设备用电占比等数据分析轨道交通车站能耗的主要特点.

(1) 不同敷设方式车站能耗构成比例.

地下换乘站、地下非换乘站、地上非换乘站3种类型车站能耗构成如图2所示.3类车站的通风空调设备能耗占车站总能耗的比例依次为49%、44%和35%,地下站显著高于地上站;照明系统能耗值差异明显,地上非换乘站所占比例最高;由于配置需求,地下站自动扶梯能耗比例也明显高于地上站;其他设备耗电主要包括售检票机、闸机、安检机、屏蔽门控制设备等,通常占车站能耗的10%~20%左右,其中,地上非换乘站明显高于前两者.

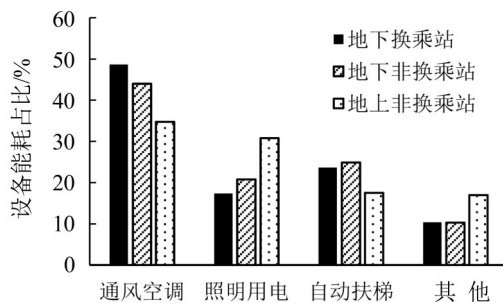


图2 北京地铁部分车站设备能耗占比

Fig. 2 Comparisons on energy consumption ratios of equipments in Beijing subway stations

(2) 不同季节车站能耗构成特点.

北京市轨道交通车站能耗依据气候变化分为空调季和非空调季,空调季为每年5~9月,非空调季为每年10月~次年4月.通过计算单位建筑面积能耗可知:地上站、地下站的空调季能耗分别为非空调季的1.33倍、1.27倍,是否开启通风空调设备对能耗影响显著,但不同车站敷设方式对是否开空调的能耗差异影响不显著.

(3) 车站能耗其他影响因素分析.

城市轨道交通车站能耗受多方面因素影响,除季节影响外,考虑建筑面积、日客流量、敷设方式、出入口数量、线路条数等主要影响因素,采用SPSS软件对案例数据进行相关性分析,具体结果如表1所示.

表1 主要影响因素对车站能耗的相关分析结果

Table 1 Correlation analysis results of different influencing factors on station energy consumption

影响因素	Pearson 相关性
建筑面积	0.706
日客流量	0.132
敷设方式	0.608
出入口数量	0.410
线路条数	0.279

由表1可知,车站建筑面积、敷设方式、出入口数量等影响因素与能耗具有较强相关性,而实际中通风空调、照明、电梯等主要耗能设施布置往往也是根据车站类型和建筑规模确定的.

2 能耗定额评价方法与标准

2.1 能耗定额评价方法

能耗定额方法一般分为技术定额和统计定额

两类.技术定额是通过能耗模拟软件构建建筑物模型,利用模拟结果确定能耗定额与修正系数的一类方法,但其模拟过程中所设定的条件可能与实际情况存在差异^[7].统计定额是基于大量实际数据通过统计方法编制能耗定额的一类方法,其中,定额水平法较为常用.定额水平法是指通过计算单位建筑面积能耗或者单位人均能耗的平均值及标准差,根据其累计概率估算能耗定额的办法,适用于建筑体量大而样本数据量少的情况.其具体编制步骤包括:收集能耗数据,数据检验,确定定额水平表,选择合适定额水平和界定不同类型设施能源需求等.其中,确定能耗定额水平计算表是关键步骤,决定了最终定额水平的准确性及可行性.定额水平法给出正态分布下能耗定额水平计算公式为

$$K = \bar{V} + z_{(1-\alpha)} \sigma \quad (1)$$

式中: K 为能耗定额水平((kW·h)/m²); $\bar{V}$ 为能耗样本数据均值((kW·h)/m²); $z_{(1-\alpha)}$ 为正态分布下累计概率 $(1-\alpha)$ 条件下的标准差; σ 为样本数据的标准差((kW·h)/m²).

定额水平计算表的确定与数据分布方式密切相关.若样本数据服从正态分布,则直接按照定额水平法给出的标准正态分布下的 $z_{(1-\alpha)}$ 进行定额计算;若样本数据服从对数正态分布、平方差正态分布等,应对样本进行相应转换后再进行定额计算,最后对其还原;若样本数据服从泊松分布等其他常见分布特征,应计算该分布特征下的概率密度函数、均值和标准差,再确定能耗定额水平^[8].

2.2 能耗标准体系

本文提出包含基本能耗定额水平,奢侈性能耗定额水平及舒适性能耗定额水平的城市轨道交通车站能耗标准体系.

(1) 基本能耗定额水平.

基本能耗定额是维持车站正常功能的最低能耗限额,可认为基本能耗定额对应的是所有低于样本数据能耗平均值的那部分数据的平均值 $\bar{V}_x$.德国 VDI3807 标准认为建筑能耗数据中较小的前 25% 的算术平均值,代表此类建筑节能目标值.本文利用两者均值作为基本能耗定额水平对应的单

位建筑面积能耗,基本定额水平 $\bar{V}_{\min}$ 的计算公式为

$$\bar{V}_{\min} = \frac{1}{2} \left(\frac{1}{h} \sum_{i=1}^h V_i + \frac{1}{m} \sum_{j=1}^m V_j^* \right) \quad (2)$$

式中: $\bar{V}_{\min}$ 表示基本能耗定额水平对应的单位建筑面积能耗((kW·h)/m²); V_i 表示单位建筑面积能耗低于 $\bar{V}$ 的第 i 个样本车站能耗((kW·h)/m²); h 表示单位建筑面积能耗低于 $\bar{V}$ 的车站数量(个); V_j^* 表示第 j 个车站的单位建筑面积能耗((kW·h)/m²); m 表示单位建筑面积能耗较小的前 25% 的能耗样本数量(个).

(2) 舒适性能耗定额水平.

舒适性能耗定额水平表示能够满足乘客需求的一般水平,是所有样本数据的平均值 $\bar{V}$ 对应的定额水平^[8].在近似正态分布的情况下,将能耗中值与平均值两者的平均值所对应的定额水平作为舒适性能耗定额水平,其公式为

$$V_s = \frac{X + \bar{V}}{2} \quad (3)$$

式中: V_s 表示舒适性能耗定额水平对应的单位建筑面积能耗((kW·h)/m²); X 表示车站单位建筑面积能耗中位数((kW·h)/m²); $\bar{V}$ 表示车站单位建筑面积能耗平均值((kW·h)/m²).

(3) 奢侈性能耗定额.

奢侈性能耗定额指所有高于样本单位建筑面积能耗平均值的那部分样本的平均值 $\bar{V}_{\max}$,计算公式为

$$\bar{V}_{\max} = \frac{1}{l} \sum_{a=1}^l v_a \quad (4)$$

式中: $\bar{V}_{\max}$ 表示奢侈性能耗定额对应的单位面积能耗((kW·h)/m²); l 表示单位建筑面积能耗高于 $\bar{V}$ 的车站数量(个); v_a 表示单位建筑面积能耗高于 $\bar{V}$ 的第 a 个样本车站的单位建筑面积能耗((kW·h)/m²).

结合《公共建筑限额能耗标准》等对能耗指标约束值和引导值的定义,本文认为奢侈性能耗定额水平代表城市轨道交通车站能耗指标约束值,即能耗上限值;舒适性能耗定额水平考虑到乘客舒适性问题,代表近期车站能耗的节能目标值,即能耗引导值;基本能耗定额水平值代表保障车站正常运行的能耗值,随着设施设备利用率和管理水平提高可达到该值,即能耗先进值,图 3 为车站能耗标准体系.

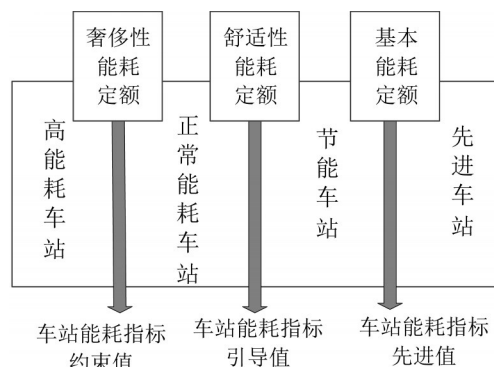


图3 城市轨道交通车站能耗标准评价

Fig. 3 Energy consumption standard evaluation of urban rail transit stations

3 案例研究

根据不同类型城市轨道交通车站能耗构成特点,本文分别确定地上站和地下站的能耗定额水平.以北京市轨道交通线网4条线路68个车站为研究对象,其中,地上车站14座,地下车站54座,选取2018年4月车站能耗数据及车站建筑面积数据进行定额标准研究.

3.1 样本数据检验

选择SPSS软件分析样本数据分布特征,检验结果如表2所示,Q-Q图数据分布检验如图4和图5所示.S-W检验中,显著性水平 $\alpha=0.05$,当概率 p 大于显著性水平 α 时,表明样本数据服从于正态分布,Q-Q图能够直观表现数据分布特征.

表2 不同类型车站分样本数据分布特征检验结果
Table 2 K-S and S-W test results of sample data from different types of stations

车站类型	样本数量	K-S检验	S-W检验
地上车站	14	0.042	0.089
地下车站	54	0.200	0.358

由表2、图4和图5可知,地上站和地下站的S-W检验概率均大于显著性水平 $\alpha=0.05$,Q-Q图直观地显示出其样本数据较为均匀的分布在直线两侧,故可认为地上站与地下站样本数据近似服从正态分布.

3.2 车站能耗定额标准确定

案例中车站能耗的均值及其标准差如表3所示,非空调季不同类型车站月能耗定额水平如表4所示.

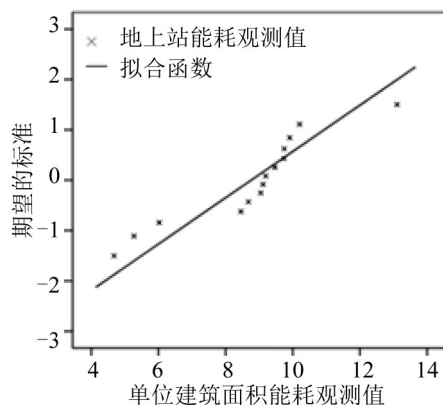


图4 地上车站Q-Q图

Fig. 4 Q-Q diagram of ground stations

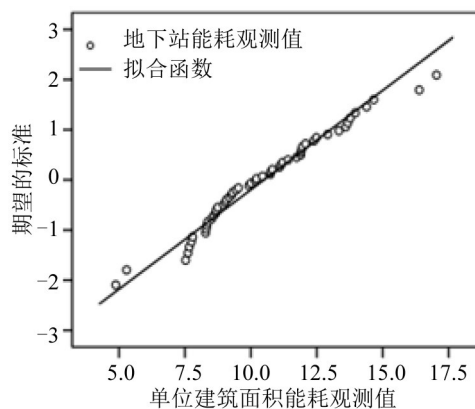


图5 地下车站Q-Q图

Fig. 5 Q-Q diagram of underground stations

表3 不同车站类型样本数据统计数值

Table 3 Statistical values of sample data according to different types of stations ((kW·h)/m²)

车站类型	中位数	均值	标准差
地上车站	9.15	8.76	2.18
地下车站	10.19	10.50	2.52

表4 非空调季不同类型车站月能耗定额水平

Table 4 Monthly energy consumption quota level according to different types of stations in non-air-conditioning season ((kW·h)/m²)

定额水平	地上站	地下站	定额水平	地上站	地下站
0.50	8.76	10.50	0.00	17.26	20.33
0.95	5.17	6.35	0.05	12.35	14.65
0.90	5.97	7.27	0.10	11.55	13.73
0.85	6.51	7.90	0.15	11.01	13.10
0.80	6.92	8.38	0.20	10.60	12.62
0.75	7.29	8.80	0.25	10.23	12.20
0.70	7.62	9.18	0.30	9.90	11.82
0.65	7.92	9.53	0.35	9.60	11.47
0.60	8.21	9.86	0.40	9.31	11.14
0.55	8.49	10.19	0.45	9.03	10.82

依据3种定额水平,非空调季北京市轨道交通车站月能耗定额标准如表5所示.根据前文对不同季节车站能耗比例的分析,可获得空调季车站月能耗定额标准.

表5 非空调季北京市城市轨道交通车站月能耗定额标准
Table 5 Monthly energy consumption quota standard of Beijing urban rail transit stations in non-air-conditioning season ((kW·h)/m²)

能耗定额水平		非空调季		空调季	
		地上站	地下站	地上站	地下站
舒适性能耗定额	计算能耗量	8.96	10.35	11.92	13.14
	定额水平	0.45	0.50	0.45	0.50
	定额能耗量	9.03	10.50	12.01	13.34
基本能耗定额	计算能耗量	6.57	8.14	8.74	10.34
	定额水平	0.85	0.80	0.85	0.80
	定额能耗量	6.51	8.38	8.66	10.64
奢侈性能耗定额	计算能耗量	9.95	12.69	13.23	16.12
	定额水平	0.30	0.20	0.30	0.20
	定额能耗量	9.90	12.62	13.17	16.03

最终,得到北京市轨道交通车站运营能耗标准建议值,如表6所示.

表6 城市轨道交通车站运营能耗标准
Table 6 Operational energy consumption standard for urban rail transit stations ((kW·h)/m²)

定额水平	地上站	地下站
奢侈性能耗定额水平(约束值)	135	170
舒适性能耗定额水平(引导值)	125	140
基本能耗定额水平(先进值)	90	115

4 结 论

本文结合城市轨道交通车站能耗特点分析,利用能耗定额方法探讨提出了北京市轨道交通车站运营能耗标准.其中,舒适性能耗定额代表车站能耗引导值,可作为近期节能目标;基本能耗定额在保障车站正常运行的前提下降低了舒适性,可作为远期节能目标,依据技术和管理水平逐步推行;奢侈性能耗定额水平代表车站能耗上限,可满足较高舒适度和特殊设施要求,高于此水平车站具有较高节能潜力.针对具体车站提出相应节能策略,可以为能耗评价和节能工作提供支持.

参考文献:

[1] 戴华明,李照星,宋杰.北京市城市轨道交通能耗现状及节能措施建议[J].铁路技术创新,2016(4): 77-80. [DAI H M, LI Z X, SONG J. Energy consumption and suggestion on energy saving measures of Beijing urban rail transit[J]. Railway Technical Innovation, 2016(4): 77-80.]

[2] 中国城市轨道交通网.中国地铁未来预计年耗电量将达400亿度[EB/OL]. (2018-11-06) [2019-10-09]. <https://www.chinametro.net/index.php?m=newscon&id=410&aid=45921>. [China Metro. China's subways are expected to consume 40 billion kilowatt-hours of electricity a year [EB/OL]. (2018-11-06)[2019-10-09]. <https://www.chinametro.net/index.php?m=newscon&id=410&aid=45921>]

[3] 冯佳,许奇,冯旭杰,等.基于灰色关联度的轨道交通能耗影响因素分析[J].交通运输系统工程与信息,2011,11(1): 142-146. [FENG J, XU Q, FENG X J. Influencing factors of energy consumption for rail transport based on grey relational degree[J]. Journal of Transportation Systems Engineering and Information Technology, 2011, 11(1): 142-146.]

[4] LEUNG C M, LEE W M. Estimation of electrical power consumption in subway station design by intelligent approach [J]. Applied Energy, 2013, 101: 634-643.

[5] GUAN B W, LIU H X, ZHANG T, et al. Energy consumption of subway stations in China: Data and influencing factors[J]. Sustainable Cities and Society, 2018, 43: 451-461.

[6] 北京市交通委员会.城市轨道交通能源消耗评价方法(DB11/T-1035-2013)[EB/OL].北京市质量技术监督局(2013-12-20)[2019-10-09]. http://jtw.beijing.gov.cn/xxgk/flfg/jthy/201912/t20191231_1548038.html. [Beijing Municipal Commission of Transport. Evaluation method of urban rail transit energy consumption(DB 11/T- 1035- 2013) [EB/OL]. Beijing Municipal Bureau of Quality and Technical Supervision. (2013- 12- 20)[2019- 10- 09]. http://jtw.beijing.gov.cn/xxgk/flfg/jthy/201912/t20191231_1548038.html].

[7] 陈义波,谭洪卫,周优,等.杭州市公共建筑能耗定额研究[J].建筑科学,2017,33(12): 90-95. [CHEN Y B, TAN H W, ZHOU Y, et al. Study on Energy consumption quota of commercial buildings in Hangzhou [J]. Building Science, 2017, 33(12): 90-95.]

[8] 周智勇.建筑能耗定额的理论与实证研究[D].重庆:重庆大学,2010. [ZHOU Z Y. Theoretical and empirical research on building energy consumption quota[D]. Chongqing: Chongqing University, 2010.]