

我国屏蔽门地铁站的通风空调合理能耗修正方法^{*}

苏子怡 李晓锋

(清华大学建筑学院, 100084, 北京)

摘要 [目的] 针对地铁站能耗持续增长的态势, 为准确评价当前地铁站用能水平, 挖掘节能潜力, 推动建筑节能工作, 需要对屏蔽门地铁站的通风空调合理能耗修正。[方法] 采用能耗原理模型, 系统性地建立了各气候区地铁站的合理能耗基准。针对寒冷地区、夏热冬冷地区和夏热冬暖地区等不同气候区的典型城市, 模拟得到了基准工况下的屏蔽门地铁站通风空调系统能耗约束值和引导值。考虑到各地气候差异和车站服务状况的差异, 定量分析了气候条件、客运量、发车对数和隧道长度对地铁站通风空调合理能耗的影响程度, 进而提出了各气候区不同城市、不同服务状况的屏蔽门地铁站通风空调系统合理能耗的修正计算方法。[结果及结论] 气候条件中年平均湿球温度与能耗的相关性最高, 相关系数 R^2 为 0.950; 年总客运量从 500 万人次增加到 1 100 万人次, 各气候区合理能耗指标增加 2.2% ~ 2.9%, 各气候区之间差异不大; 日总发车对数从 140 对增加到 310 对, 各气候区合理能耗指标增加了 2.0% ~ 7.4%, 不同气候区之间具有明显差异; 隧道长度 1 200 m 的车站比 800 m 的车站, 合理能耗指标高 1.5% ~ 4.9%, 不同气候区之间具有明显差异。

关键词 地铁站; 通风空调; 合理能耗指标

中图分类号 U442.55

DOI: 10.16037/j.1007-869x.2024.06.059

Reasonable Energy Consumption Correction Method for Ventilation and Air-conditioning of Platform Screen Door Metro Stations in China

SU Ziyi, LI Xiaofeng

(School of Architecture, Tsinghua University, 100084, Beijing, China)

Abstract [Objective] In view of the continuous growth of energy consumption in metro stations, in order to accurately evaluate their current energy consumption level, tap energy conservation potential and promote energy conservation of buildings, it is necessary to revise the reasonable energy consumption of ventilation and air-conditioning in platform screen door metro stations. [Method] Based on the principle model of en-

ergy consumption, the reasonable energy consumption benchmark for metro stations in various climate areas is established systematically. For the typical cities in different climate areas including cold area, hot summer and cold winter area, hot summer and warm winter area, the energy consumption constraint value and guiding value of the ventilation and air-conditioning system in platform screen door metro stations under basic working conditions are obtained by simulation. In consideration of the climate differences and station services in different areas, the influence intensity of climate conditions, passenger volume, the number of train departures and tunnel length on the energy consumption of metro station ventilation and air-conditioning system is quantitatively analyzed. The revised calculation method is proposed for reasonable energy consumption of ventilation and air-conditioning system in metro stations with platform screen doors under different service conditions and in different cities and different climate areas. [Result & Conclusion] The annual mean wet-bulb temperature in climate conditions is highly correlated with energy consumption, showing a correlation coefficient R^2 of 0.950. The reasonable energy consumption indicator of each climate area increases by 2.2% to 2.9% when the annual total passenger volume increases from 5 million to 11 million, showing little difference among climate areas. The indicator increases by 2.0% to 7.4% when the number of daily total departure trains increases from 140 to 310 pairs, showing obvious difference between different climate areas. The indicator of stations with a 1 200 m long tunnel is 1.5% to 4.9% higher than that of stations with a 800 m long tunnel, showing obvious differences between different climate areas.

Key words metro station; ventilation and air-conditioning; reasonable energy consumption indicator

通风空调是地铁站主要的用能系统^[1]。已有研究指出, 当前地铁站存在空调季站内温度偏低、机械新风过量等不规范的运行现象, 导致能耗偏高^[2]。因此, 有必要系统性地建立各气候区地铁站

^{*} “十三五”国家重点研发计划课题: 公共交通运输建筑节能关键技术与示范项目(2018YFC070500)

合理能耗基准,以评价当前用能水平,挖掘节能潜力,推动建筑节能工作。

中国勘察设计协会近期发布的《公共交通建筑能耗评价标准(征求意见稿)》制定了各公共交通建筑的能耗指标,其中针对“地铁车站建筑能耗评价”规定了不同气候区、各类地铁站的能耗指标,提出了能耗约束值和引导值,分别对应合理运行管理水平下的能耗及格线和优秀线。

建筑能耗受到实际使用状态的影响,故在使用合理能耗指标对实际建筑进行用能评价时,需要根据建筑实际使用条件进行修正,以保证评价的公平性。不同类型的建筑其能耗影响因素不同,需要采用不同的特征参数进行修正。虽已有针对多种类型建筑能耗修正的研究^[2-4],但目前仍缺乏对地铁站建筑能耗修正方法的研究。

本文结合实际调研和模拟计算,研究了实际使用条件对屏蔽门地铁站通风空调合理能耗指标的影响,定量分析各参数的修正方法,以保证用能评价的公平性。

1 基准工况下的能耗指标研究

1.1 能耗计算模型及基准工况

在文献[5]的地铁站通风空调系统能耗原理模型(以下简称“能耗原理模型”)中,输入当地气候数据、车站服务参数及车站运行管理参数,即可计算得到地铁站通风空调系统的逐时冷负荷及能耗,进而得到各种不同工况下地铁站通风空调系统全年合理能耗(以下简为“年能耗”),且计算准确度能满足工程应用需求^[1,5-6]。故本文采用能耗原理模型来计算各气候区地铁站通风空调系统的能耗。能耗原理模型中的基准工况具体设置为:

1) 气候条件,包括室外和隧道的空气温湿度。本文以北京、上海和广州分别作为3个气候区(寒冷地区、夏热冬冷地区和夏热冬暖地区)的代表性城市,选取其室外和隧道的空气温湿度数据作为基准工况的气候条件。

2) 服务状况参数,包括客运量、发车对数及隧道长度等数据。本文通过现场实际调研和测量,收集了各城市地铁站通风空调能耗相关的实际数据,并选取常见水平数据设置基准工况:年总客运量为700万人次,日总发车对数为140对,隧道长度为1 000 m,设有全高屏蔽门的地下地铁站。

3) 运行管理相关的参数,包括站内空调控制温

度、屏蔽门气密性、机械新风量、冷水机组 COP(性能系数)和空调箱能效比。这些参数是节能运行管理需要关注的参数。根据现场实际调研与测量,以及相关标准规范^[7-9],本文按照一般管理水平和较优管理水平,设置了运行管理相关参数的约束值和引导值,如表1所示。

表1 运行管理相关参数的约束值和引导值

Tab. 1 Constraint and guiding values of operation and management related parameters

项目	站内温度/ ℃	屏蔽门当量缝隙 宽度/mm	机械新风量	冷水机组 COP	空调箱能效比
约束值	26~28	8.5	送风量的10%	3.5	7
引导值	27~29	6.9	0	5.0	10

1.2 基准工况下的能耗指标

基于各代表性城市数据,采用能耗原理模型模拟可得,基准工况下各代表性城市的年能耗指标(含约束值和引导值),如图1所示。

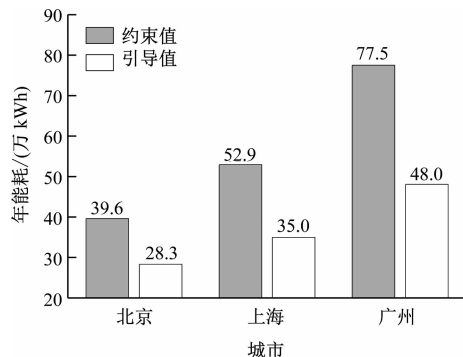


图1 基准工况下代表性城市的年能耗指标

Fig. 1 Annual energy consumption index of the representative cities under standard operation conditions

2 基准能耗的修正

为了量化分析基准能耗的修正方法,本研究根据调研结果确定了气候条件和服务状况参数的取值范围,进而大规模模拟了不同气候条件和服务状况下的地铁站通风空调合理能耗。针对3个气候区内开通和规划地铁系统的35座典型城市,对4种客运量、3种发车对数和3种隧道长度进行调查,设置计算工况参数的代表性取值如表2所示。通过数据统计和分析,提出了基于气候条件、客运量、发车对数及隧道长度等影响因素对屏蔽门地铁站通风空调系统年能耗指标的修正方法。

2.1 基于气候条件的修正

具体城市的能耗指标应基于基准工况下同气

表 2 计算工况参数的代表性取值

Tab. 2 Calculation of the representative values of working condition parameters

参数类别	参数名称	代表性取值
气候条件	室外空气参数	根据各城市典型气象年数据取值
	隧道空气参数	根据现场长期监测数据取值
	客运量/(万人次/年)	500、700、900、1 100
服务状况	发车对数/(对/d)	140、220、310
	隧道长度/m	800、1 000、1 200

候区代表性城市的能耗指标,按气候条件进行修正。

影响地铁站通风空调能耗的气候条件为室外空气温度和相对湿度,体现在对通风空调系统机械新风和无组织渗风负荷的影响上。

对 3 类气候区的 35 座典型城市开展大规模模拟计算,得到各城市地铁站通风空调年能耗的约束值和引导值。根据当地年平均湿球温度、年平均干球温度等参数,以及单座地铁站通风空调系统的年能耗指标,绘制气候条件-能耗指标约束值散点图如图 2 所示。根据统计结果,年平均湿球温度与年能耗约束值的相关性最高,其相关系数 R^2 为 0.950。

由此,在基于气候条件对年能耗指标的修正中,采用当地年平均室外湿球温度与该气候区典型城市基准湿球温度的差值来修正通风空调年能耗:

$$E_1 = [1 + \alpha_T (T_w - T_{w,base})] E_0 \quad (1)$$

式中:

E_1 ——气候修正后的年能耗约束值或引导值;

E_0 ——基准工况下同气候区代表性城市的年能耗约束值或引导值;

T_w ——年平均湿球温度;

$T_{w,base}$ ——各气候区年平均湿球温度基准值;

α_T ——气候修正系数,取值见表 3。

2.2 客运量修正

客运量会影响通风空调系统的人员负荷和扶梯设备散热量负荷。这两类负荷占全年空调负荷累计量的 6.0%~9.0%。本研究模拟了年总客运量 Q 分别为 500 万、700 万、900 万和 1 100 万人次下,3 类气候区代表性城市的能耗情况,结果如图 3 所示。

由模拟结果可知,随着 Q 的增加,能耗约束值和引导值呈线性增加: Q 从 $Q_1 = 500$ 万人次增至 $Q_4 = 1\,100$ 万人次时,各气候区能耗约束值增大了 2.4%~2.6%,引导值增大了 2.2%~2.9%;各气候区之间差异不大。因而,客运量修正后的地铁站

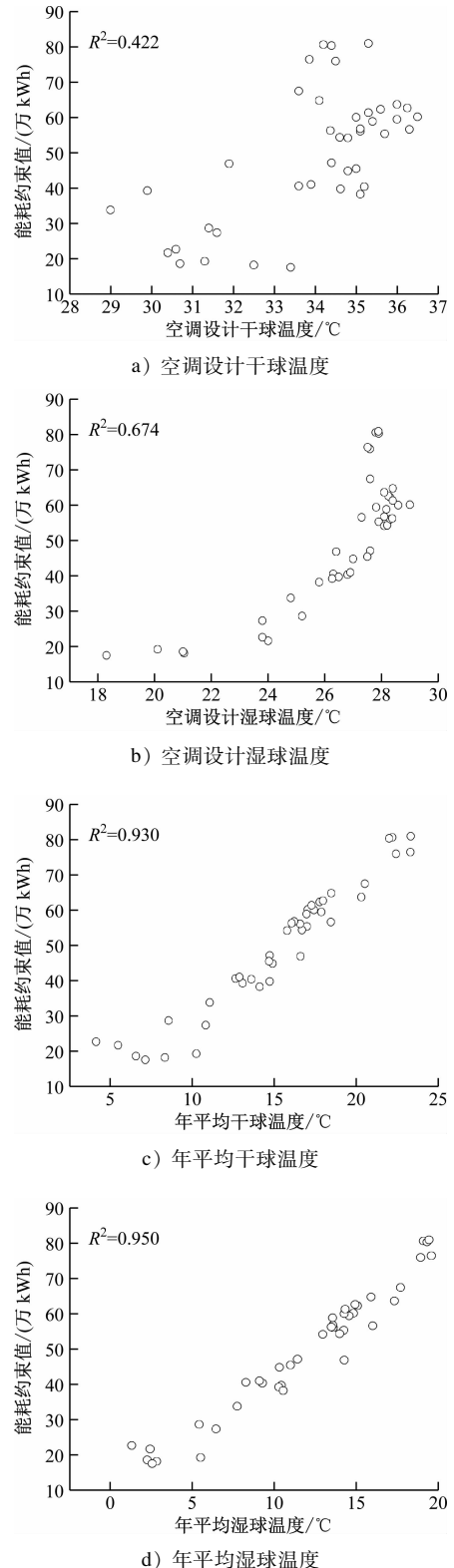


图 2 典型车站的气候条件-能耗指标约束值散点图

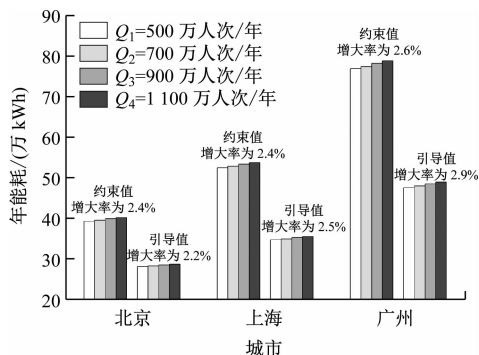
Fig. 2 Scattergraph of climate condition and energy consumption index constraints of a typical station

通风空调能耗指标为:

$$E_2 = [1 + \alpha_p (N_p - Q_1) / (Q_4 - Q_1)] E_0 \quad (2)$$

表3 气候修正系数 α_T Tab.3 Climatic correction factor α_T

气候区	典型城市基准 湿球温度/ $^{\circ}\text{C}$	$\alpha_T/\%$	
		约束值	引导值
寒冷地区	8.3	3.9	2.2
夏热冬冷地区	14.0	7.0	6.0
夏热冬暖地区	19.1	13.7	9.1



注：增大率指客运量由 Q_1 增至 Q_4 时，对应的年能耗增大率。

图3 不同 Q 的各气候区代表性城市能耗约束值和引导值Fig.3 Energy consumption constraint value and guiding value for the representative cities with different passenger flow (Q) in each climate area

式中：

E_2 ——客运量修正后的年能耗约束值或引导值，万 kWh/年；

N_p ——年客运量，万人次/年；

α_p ——客运量修正系数，按图3中对应气候区代表性城市的年能耗增大率取值。

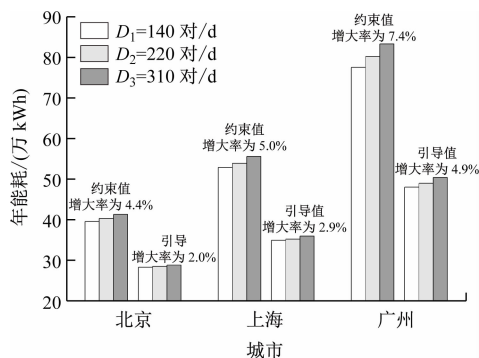
2.3 发车对数修正

发车对数主要影响车站通风空调的无组织渗风负荷。该负荷占全年空调负荷累计量的19%~25%。随着日总发车对数 D 的增加，列车活塞风效应增强，车站无组织渗风量也会增大，能耗约束值和引导值也随之增大。不同 D 的各气候区代表性城市能耗约束值和引导值如图4所示。

由图4可知：当 D 从 $D_1 = 140$ 对/d 增至 $D_3 = 310$ 对/d 时，各气候区能耗约束值增大了4.4%~7.4%，引导值增加约2.0%~4.9%；不同气候区之间的变化差异较大。经分析，由于气候炎热地区的室外和隧道空气温度较高，无组织渗风负荷在空调负荷中的占比较高，因此合理能耗受发车对数的影响程度更大。发车对数修正后的地铁站通风空调能耗指标为：

$$E_3 = [1 + \alpha_D(D - D_1)/(D_3 - D_1)]E_0 \quad (3)$$

式中：



注：增大率指日总发车对数由 D_1 增至 D_2 时，对应的年能耗增大率。

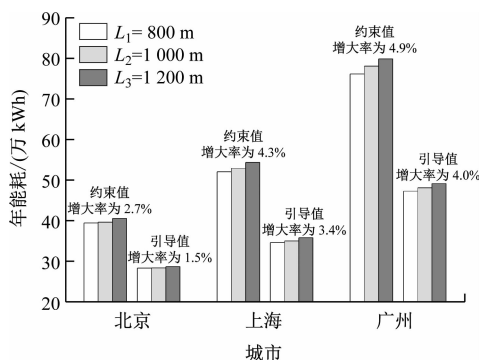
图4 不同 D 的各气候区代表性城市能耗约束值和引导值Fig.4 Energy consumption constraint value and guiding value for the representative cities with different daily total departure train pairs (D) in each climate area

E_3 ——发车对数修正后的年能耗约束值或引导值；

α_D ——发车对数修正系数，按图4中对应气候区代表性城市的增大率取值。

2.4 隧道长度修正

隧道长度影响列车在隧道内的运行时间和最高速度。隧道长度 L 越长，则列车在隧道内运行带来的活塞风效应就越强，进而导致车站无组织渗风量增加。因此， L 主要影响车站通风空调的无组织渗风负荷，这部分负荷占全年空调累计负荷的19%~25%。 L 较长的车站能耗约束值和引导值较高。不同 L 的各气候区代表性城市能耗约束值和引导值如图5所示。



注：增大率指隧道长度由 L_1 增长至 L_3 时，对应的年能耗增大率。

图5 不同 L 的各气候区代表性城市能耗约束值和引导值Fig.5 Energy consumption constraint value and guiding value for the representative cities with different tunnel length (L) in each climate area

由图5可以看出，与 $L_1 = 800$ m 的车站相比， $L_3 = 1200$ m 的车站能耗约束值高2.7%~4.9%，引导值高1.5%~4.0%。与 D 对合理能耗的影响

类似,在不同气候区之间, L 对合理能耗的影响差异较大——气候炎热地区的合理能耗受 L 的影响程度更大。隧道长度修正的地铁站通风空调能耗指标为:

$$E_4 = [1 + \alpha_L(L - L_1)/(L_3 - L_1)]E_0 \quad (4)$$

式中:

E_4 ——隧道长度修正后的年能耗约束值或引导值;

α_L ——隧道长度修正系数,按图5中对应气候区代表性城市的增大率取值。

3 各气候区能耗评价的修正建议

基于气候和服务状况参数对各气候区地铁站通风空调能耗约束值和引导值的定量修正结果可以发现,不同参数对不同气候区地铁站的影响程度不同,对约束值和引导值的影响程度也不同。

对于寒冷地区,年平均湿球温度、发车对数、隧道长度和客运量在其取值范围内的变化,对合理能耗最多分别影响12.1%、4.4%、2.7%和2.4%。对于夏热冬冷地区,上述参数在其取值范围内的变化,对合理能耗最多分别影响14.1%、5.0%、4.3%和2.5%;对于夏热冬暖地区,上述参数在其取值范围内的变化,对合理能耗最多分别影响24.3%、7.4%、4.9%和2.9%。各气候区地铁站应用能耗约束值和引导值对实际地铁站进行用能评价时,可根据车站实际情况和精度要求进行修正。

4 结语

本文针对寒冷地区、夏热冬冷地区和夏热冬暖地区的典型城市,模拟得到了基准工况下的屏蔽门地铁站通风空调系统能耗约束值和引导值。进而定量分析了室外温度、客运量、发车对数和隧道长度对能耗约束值和引导值的影响程度,提出了各气候区不同城市、不同服务状况的屏蔽门地铁站通风空调系统合理能耗的修正方法。最后,根据各参数对合理能耗的影响程度,对各气候区地铁站提出了能耗评价时参数修正的建议。

参考文献

- [1] 刘菁,王芳.办公建筑能耗影响因素与数据标准化分析[J].暖通空调,2017,47(5):83.
LIU Jing, WANG Fang. Analysis on influencing factors and data standardization of office building energy consumption[J]. Heating Ventilating & Air Conditioning, 2017, 47(5): 83.
- [2] SU Z, LI X. Sub-system energy model based on actual operation data for subway stations[J]. Sustainable Cities and Society,

2020, 52: 101835.

- [3] 夏婵,卜震,张蓓红,等.上海市星级饭店建筑能耗对标与修正研究[J].暖通空调,2020,50(3):63.
XIA Chan, BU Zhen, ZHANG Beihong, et al. Energy consumption benchmarking and correction of star hotels in Shanghai[J]. Heating Ventilating & Air Conditioning, 2020, 50(3): 63.
- [4] 中华人民共和国住房和城乡建设部.民用建筑能耗标准:GB/T 51161—2016[S].北京:中国建筑工业出版社,2016.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Standard for energy consumption of building: GB/T 51161—2016[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2016.
- [5] 苏子怡,李晓锋.地铁站分项能耗原理模型及其简化研究[J].暖通空调,2021,51(9):18.
SU Ziyi, LI Xiaofeng. Theoretical models and simplification of sub-system energy use systems in underground railway stations[J]. Heating Ventilating & Air Conditioning, 2021, 51(9): 18.
- [6] 苏子怡,李晓锋.中国各气候区屏蔽门地铁站通风空调能耗指标[J].都市轨道交通,2023,36(1):148.
SU Ziyi, LI Xiaofeng. Energy use index of ventilation and air-conditioning system for subway stations in various climate regions in China[J]. Urban Rapid Rail Transit, 2023, 36(1): 148.
- [7] 中华人民共和国住房和城乡建设部.地铁设计规范:GB 50157—2013[S].北京:中国建筑工业出版社,2014.
Ministry of Housing and Urban-Rural Development of the People's Republic of China. Code for design of metro: GB 50157—2013[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2014.
- [8] 国家质量监督检验检疫总局,中国国家标准化管理委员会.冷水机组能效限定值及能效等级:GB 19577—2015[S].北京:中国标准出版社,2017.
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. Minimum allowable values of energy efficiency and energy efficiency grades for water chillers: GB 19577—2015[S]. Beijing: Standards Press of China, 2017.
- [9] 国家质量监督检验检疫总局,中国国家标准化管理委员会.空气调节系统经济运行:GB/T 17981—2007[S].北京:中国标准出版社,2008.
General Administration of Quality Supervision, Inspection and Quarantine of the People's Republic of China, Standardization Administration of the People's Republic of China. Economic operation of air conditioning systems: GB/T 17981—2007[S]. Beijing: Standards Press of China, 2008.

· 收稿日期:2021-12-20 修回日期:2022-04-11 出版日期:2024-06-10
Received:2021-12-20 Revised:2022-04-11 Published:2024-06-10
· 第一作者:苏子怡,博士研究生,su-zy18@mails.tsinghua.edu.cn
通信作者:李晓锋,副教授,xfli@tsinghua.edu.cn
· ©《城市轨道交通研究》杂志社,开放获取 CC BY-NC-ND 协议
© Urban Mass Transit Magazine Press. This is an open access article under the CC BY-NC-ND license