

# 中国各气候区屏蔽门地铁站 通风空调能耗指标

苏子怡, 李晓锋

(清华大学建筑学院, 北京 100084)

**摘 要:** 通过对地铁站的实际调研和参考相关设计标准, 建立中国各城市地铁站的通风空调合理能耗指标, 包括约束值和引导值, 分别对应及格线和优秀线。首先, 对车站的客流量、列车运行时刻、站内控制温度等信息进行广泛调研, 分析确定研究案例的参数取值, 进而采用地铁站通风空调能耗原理模型, 对 43 座城市、36 种服务规模、2 种合理运行管理水平下共计 3 096 个案例进行大规模计算。模拟结果显示, 各城市地铁站通风空调年能耗的约束值在 17.6 万~85.9 万 kW·h/(年·站)之间, 引导值在 17.5 万~52.9 万 kW·h/(年·站)之间。其次, 采用线性回归分析通风空调系统合理能耗与气候条件的关系, 发现合理能耗指标与当地年平均湿球温度的拟合效果最好, 约束值和引导值的拟合  $R^2$  分别为 0.951 和 0.949。最后, 对每个城市地铁站通风空调的合理能耗与客流量、发车对数和隧道长度进行多元线性回归分析, 从而给出每个城市的拟合系数表, 可为车站运维和管理人员评估地铁站通风空调用能水平提供便捷、有效的工具。

**关键词:** 地铁站; 屏蔽门系统; 通风空调能耗; 合理能耗; 运营管理

中图分类号: U231.1

文献标志码: A

文章编号: 1672-6073(2023)01-0148-08

## Energy Use Index of Ventilation and Air-conditioning System for Subway Stations in Various Climate Regions in China

SU Ziyi, LI Xiaofeng

(School of Architecture, Tsinghua University, Beijing 100084)

**Abstract:** In this study, the constraint value (CV) and leading value (LV) for the ventilation and air-conditioning (VAC) energy consumption of subway stations with a platform screen door (PSD) system in various cities in China were investigated. First, extensive investigations were conducted on the number of passengers, train departure density, station temperature, device efficiency, and other information to determine the values of the input parameters for the studied cases. Then, the VAC energy consumption was simulated for a total of 3096 cases (for 43 cities under 36 types of service conditions and two kinds of operation management levels). The simulation results show that the CV and LV of the annual VAC energy consumption are 0.176-0.859 million kWh and 0.175-0.529 million kWh, respectively. Second, linear regression analysis was used to investigate the relationship between the CV and LV of annual VAC energy consumption and local climatic conditions. The  $R^2$  values of the VAC energy consumption and annual average wet-bulb temperature were 0.951 and 0.949 for CV and LV, respectively. Finally, for each city, multiple linear regression analysis was carried out on the CV and LV of the VAC energy consumption

收稿日期: 2021-10-25 修回日期: 2022-01-12

第一作者: 苏子怡, 女, 博士研究生, 从事地铁车站能耗指标与用能模型研究, su-zy18@mails.tsinghua.edu.cn

导师简介: 李晓锋, 男, 副教授, 博士生导师

基金项目: “十三五”国家重点研发计划课题(2018YFC0705006)

引用格式: 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): 148-155.

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): 148-155.

and the three service condition parameters, that is, the number of passengers, train departure density, and tunnel length. Based on this, fitting coefficients were proposed for each city, providing a convenient and effective tool for operators and managers to evaluate the VAC energy consumption at subway stations.

**Keywords:** subway stations; PSD system; VAC energy use; constraint and leading values; energy-saving management

## 1 研究背景

“十三五”期间,中国城市轨道交通发展迅速,累计新增运营线路 4351.7 km,年均增长率 17.1%;累计完成客运量 969.4 亿人次,年均客运量 194 亿人次,比“十二五”期间增长 83%,创历史新高<sup>[1]</sup>。其中,地铁系统是主要的制式。截至 2020 年底,中国大陆已有 39 座城市开通地铁,运营总长达 6 280 km,占城市轨道交通线路总长的 78.8%,另有 4 座城市获批新建地铁。

随着地铁建设规模的不断扩大,其节能运营也引发了越来越多的关注。据统计,2020 年城轨交通总用电量达 172 亿 kW·h,其中车站能耗占 51.3%。在地铁车站总能耗中,通风空调系统占比最高,为 54%~71%<sup>[2]</sup>,且在不同的气候条件下有较大的差异<sup>[3]</sup>。另外,当前地铁站的运行管理存在一些不合理现象,导致通风空调系统能源浪费,比如夏季站内温度控制偏低<sup>[4]</sup>、机械新风供应过量<sup>[5]</sup>等。因此,有必要研究不同气候条件下地铁站通风空调系统的合理能耗指标,从而评价当前运行能耗,规范地铁站的节能运行管理。

关于建筑运行能耗的评价,已有大量国内外学者进行过相关的研究,常用的方法包括基于统计学理论的黑箱方法、基于物理原理的白箱方法和两者相结合的灰箱方法<sup>[6-8]</sup>。由于当前地铁车站运行中存在大量不合理的用能现象,导致能耗偏高,因此不宜直接采用调研的当前社会平均用能水平建立能耗指标,而应首先规范运行管理参数,进而建立合理的能耗指标。在中国,建筑能耗评估中最常用的指标是能耗约束值和引导值<sup>[9-10]</sup>。本研究参考相关设计标准和实际调研,定义了地铁站通风空调合理能耗的约束值和引导值,分别对应及格线和优秀线。

通过基础信息调研、原理模型模拟、回归分析,对中国 5 个气候区的 43 座城市的屏蔽门地铁站建立了通风空调系统的合理能耗指标。首先,通过广泛调研车站的基本信息,确定了研究案例的参数设置,进而采用地铁车站通风空调能耗原理模型,对 3 096 个案例进行了大规模计算,得到了各城市合理能耗约束值和引导值。其次,采用线性回归的方法,分析了通风空调系统合理能耗与气候条件的关系。最后,针对每

个城市,给出了地铁车站合理能耗指标与服务规模参数的拟合公式,利用客流量、发车对数和隧道长度,对合理能耗进行拟合计算,以便于车站运维和管理人员实现用能水平的快速评估。

## 2 通风空调能耗模型

为了模拟各城市地铁车站通风空调系统能耗,笔者选择了能耗原理模型。该模型基于系统的运行特征,由冷负荷模型、系统能效模型和运行模式切换模型构成<sup>[2]</sup>。冷负荷通过人员负荷、机械新风负荷、风机温升负荷、无组织渗风负荷、围护结构得热量、站内设备散热量逐时计算得到。公共区域通风空调系统的全年运行模式包括空调模式(全新风空调和小新风空调模式)、通风模式和关机模式,根据室外气象条件逐时切换。设备管理用房通风空调系统,夜间全年运行通风模式,日间运行模式切换同公共区域的通风空调系统。

根据敏感性分析的结果,提取了地铁站通风空调能耗原理模型的关键输入参数,如图 1 所示。已有研究表明,采用这 15 个输入参数的简化模型的均方根误差变异系数为 7.6%<sup>[11]</sup>,在满足工程应用要求的同时,大大简化了工程上收集数据的工作量。因此,本研究采用地铁站通风空调系统简化的原理模型,开展大规模的模拟计算。

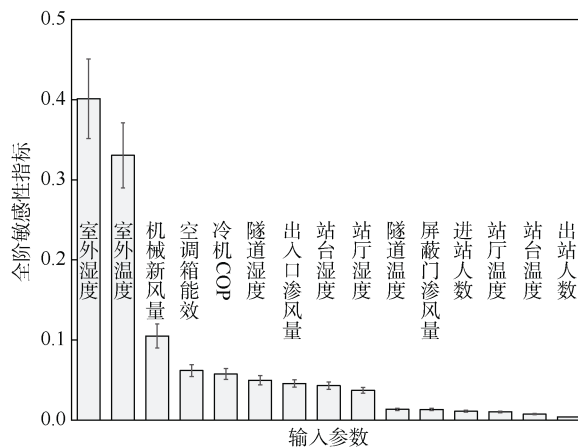


图 1 地铁站能耗模型的敏感性分析结果

Figure 1 Sensitivity analysis of VAC energy model for subway stations

### 3 地铁车站信息调研

采用地铁站通风空调系统简化的原理模型,对中國大陸已开通和正在建设地铁的5个气候区、43座城市开展模拟计算。模拟对象为采用屏蔽门系统的地下2层标准岛式地铁站。为了计算合理能耗,需要确定模型输入参数的取值。

1) 气候相关参数:包括室外、隧道空气参数,可通过气象数据集和长期实测数据获得。

2) 运行管理参数:包括站内环境参数、无组织渗风量、机械新风量和设备能效,是地铁车站节能运行管理中需要特别关注的参数,笔者结合实际调研、设计规范,给出了每个参数的约束值和引导值。

3) 服务规模参数:包括客流量、发车对数、隧道长度,是车站为了提供相应的服务固有的参数,不具备节能潜力。

本研究结合实际调研,给出了当前地铁车站中这些参数的几种常见取值,下面详细介绍。

#### 3.1 气候相关参数

##### 3.1.1 室外气象参数

地铁站具有多个出入口,与室外环境连通。在不同气候条件下,车站的出入口渗风负荷差异巨大,因此室外气象参数是影响车站通风空调能耗的重要

因素。

从中国典型气象年数据集中,获得了各城市全年逐时气象参数,包括室外空气温度、相对湿度等(见图2)。统计各城市的年平均温度,结果如图3所示。严寒地区各城市年均室外干球温度在 $4.1\sim 8.6^{\circ}\text{C}$ 之间,寒冷地区各城市年均室外干球温度在 $10.2\sim 14.9^{\circ}\text{C}$ 之间,夏热冬冷地区各城市年均室外干球温度在 $15.8\sim 18.5^{\circ}\text{C}$ 之间,夏热冬暖地区各城市年均室外干球温度在 $20.3\sim 23.3^{\circ}\text{C}$ 之间,温和地区各城市年均室外干球温度为 $15.5^{\circ}\text{C}$ 。

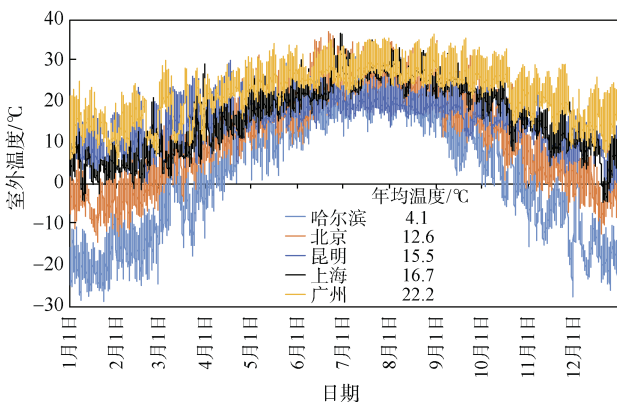


图2 部分城市典型气象年的逐时室外干球温度  
Figure 2 Hourly outdoor temperature curves of typical meteorological year for particular cities

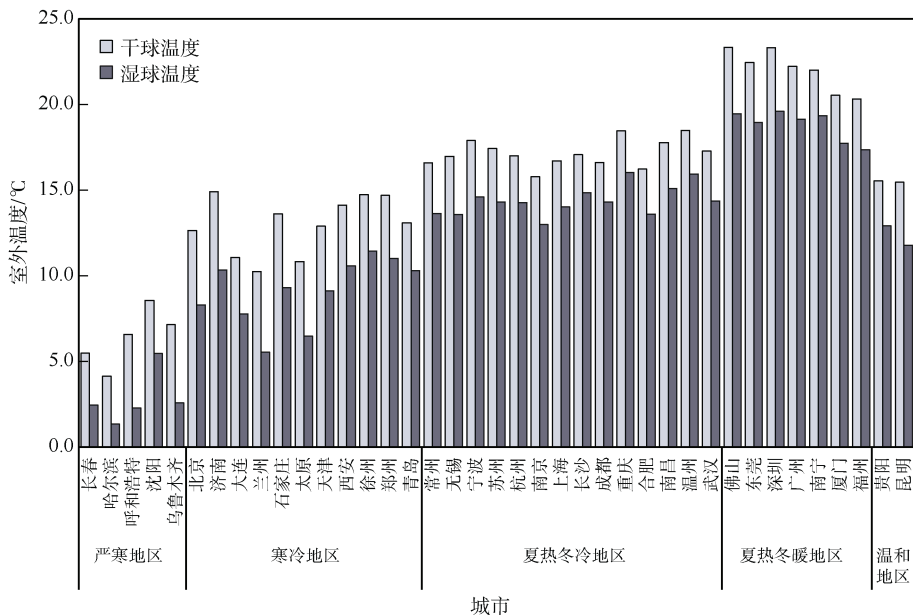


图3 各城市典型气象年的室外平均温度

Figure 3 Average outdoor temperature of typical meteorological year for each city

##### 3.1.2 隧道空气参数

由于活塞风效应,隧道空气温度和湿度影响从隧

道进入站台的无组织渗风负荷,以及围护结构的传热量,前者在通风空调负荷中占比巨大。

通过长期现场监测,结合热环境模拟,获得了各气候区地铁站的全年逐时隧道空气参数。统计结果如表1所示,各气候区年平均隧道温度在13.5~30.4℃之间,最热月平均隧道温度在18.5~33.4℃之间。

表1 各气候区隧道空气温度

Table 1 Tunnel air temperature in each climate region

气候区	年平均隧道温度/℃	最热月平均隧道温度/℃
严寒地区	13.5	18.5
寒冷地区	21.6	25.2
夏热冬冷地区	25.8	28.9
夏热冬暖地区	30.4	33.4
温和地区	13.5	18.5

### 3.2 运行管理参数

根据能耗原理模型敏感性分析的结果,需要关注的运行管理参数包括空调季站内环境参数、无组织渗风量、机械新风量和设备能效。由于地铁车站的运行管理水平对通风空调系统能耗的影响显著,应合理控制这类参数,以减少能源浪费。笔者结合实际调研和设计规范,给出了每个参数的约束值和引导值。

#### 3.2.1 站内环境参数

站内环境参数影响车站的无组织渗风负荷和机械新风负荷,包括站厅、站台的空气温度和湿度。已有研究指出,当前车站大量存在空调季站内温度控制偏低的现象,导致能源浪费。

根据设计手册、规范<sup>[12-13]</sup>和现场热舒适调研,提出了各气候区地铁站的空调季站厅、站台控制温度的约束值和引导值。由于各气候区室外温度不同,因此合理控制温度的设置略有不同,站厅控制温度的约束值在27~28℃。出于节能考虑,设置引导值比约束值高1℃,即引导值在28~29℃。考虑乘客从室外进入站厅→进入站台候车→进入列车车厢这一过程的动态热舒适,站台温度控制值比站厅温度控制值低1℃。

#### 3.2.2 屏蔽门气密性

由于活塞风效应,列车进出站过程中,大量室外空气经由出入口进入站厅,大量隧道空气经由屏蔽门缝隙进入站台,带来巨大的空调负荷。

已有研究通过调研中国多个地铁车站的屏蔽门气密性,指出当前车站屏蔽门当量缝隙宽度在5.7~13.8 mm之间<sup>[14]</sup>。笔者选择文献中调研的平均值8.5 mm和较优25%分位值6.9 mm,分别作为屏蔽门当量缝隙宽度的约束值和引导值。

#### 3.2.3 机械新风量

机械新风量直接影响地铁站通风空调的机械新风负荷,是空调负荷的重要构成部分。根据设计要求,地铁车站通风空调系统的机械新风量按照远期客流量的12.6 m<sup>3</sup>/h·人进行供应,且不低于空调箱总送风量的10%。

通过大量的模拟计算和现场测试,发现车站的无组织渗风量能够满足人员的新风需求,在停止机械新风供应后,站内二氧化碳的浓度不超标。因此,当室外空气焓值高于回风焓值,车站在小新风空调模式运行时,应尽可能减少机械新风量,以减少机械新风负荷。将小新风空调模式下的机械新风量的引导值设置为0,约束值设置为总送风量的10%。

#### 3.2.4 设备能效

冷水机组COP和空调箱EER是影响车站通风空调系统能耗的关键因素。参考相关标准和规范中对设备性能的要求<sup>[15-16]</sup>,将冷水机组COP的约束值和引导值分别设置为3.5和5.0,空调箱EER的约束值和引导值分别设置为7和10。

### 3.3 服务规模参数

服务规模参数包括客流量、列车发车对数和隧道长度,这部分参数是车站为了提供相应的服务固有的参数,不具备节能潜力。笔者通过实际调研,给出了这些参数在现有地铁站中的代表性取值。

#### 3.3.1 客流量

对中国不同气候区的43座车站全年逐时客流数据进行调研和统计分析,发现各车站年客流量在160万~3430万人次之间,超过80%的车站年客流量集中在300万~1470万人次之间,如图4所示。

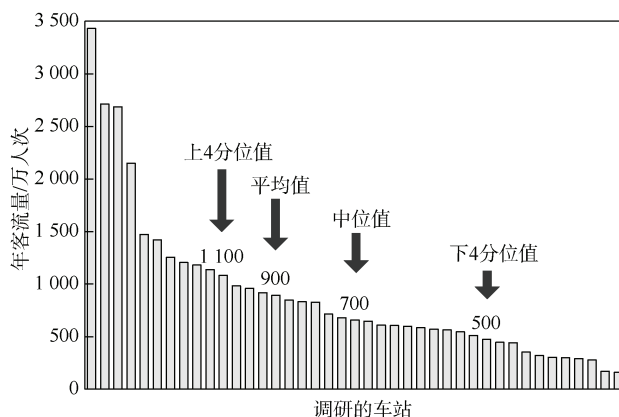


图4 地铁站的年客流量分布

Figure 4 Annual number of passengers for subway stations



调研地铁站年客流量的上4分位值、平均值、中位值和下4分位值分别约为1100万、900万、700万和500万人次,笔者对这4种年客流量水平下的车站通风空调能耗进行了模拟。

### 3.3.2 发车对数

根据对多条地铁线路列车运行时刻表的调研统计,选择日总发车对数140、220、310对/d的车站进行研究,对应的日高峰发车对数分别为12、16和26对/h。

### 3.3.3 隧道长度

隧道长度影响活塞风效应下隧道与站台之间的空气流动,对无组织渗风负荷影响显著。作为车站建设的固定参数,笔者选择常见的隧道长度800、1000和1200 m进行研究。

## 4 合理能耗指标建立

对每个城市的标准地铁站在合理运营管理参数下的通风空调能耗约束值和引导值,各模拟了36个案例(包含4种不同的年客流量、3种不同的日总发车对数、3种不同的隧道长度)。

### 4.1 通风空调合理能耗的模拟结果

通风空调合理能耗模拟结果如图5所示,各城市地铁站的通风空调年能耗的约束值在17.6万~85.9万kW·h/(年·站)之间,引导值在17.5万~52.9万kW·h/(年·站)之间。

按照气候区的不同对模拟结果进行分类统计。对于寒冷地区,83%以上的城市地铁站通风空调年能耗的约束值在33.0万~49.1万kW·h/(年·站)之间,引导

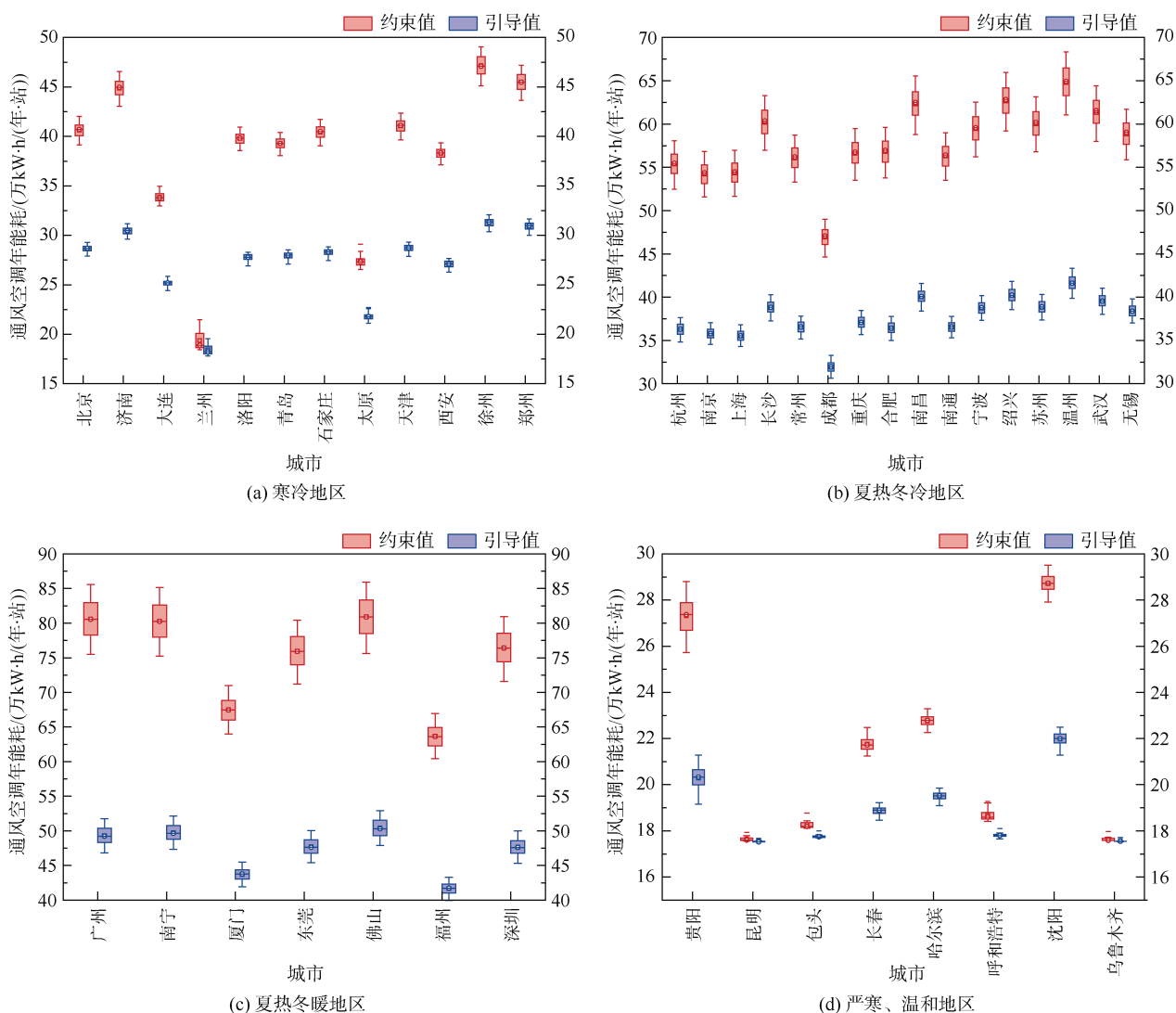


图5 各城市地铁站通风空调合理能耗模拟结果

Figure 5 Simulated CV and LV of a subway station's VAC energy use in each city

值在 24.4 万~32.1 万 kW·h/(年·站)之间。对于夏热冬冷地区, 94%以上的城市地铁站通风空调年能耗的约束值集中在 51.6 万~68.3 万 kW·h/(年·站)之间, 引导值集中在 34.3 万~43.3 万 kW·h/(年·站)之间。对于夏热冬暖地区, 71%以上的城市地铁站通风空调年能耗的约束值在 71.2 万~85.9 万 kW·h/(年·站)之间, 引导值在 45.3 万~52.9 万 kW·h/(年·站)之间。对于温和地区和严寒地区, 各城市夏季气温较低, 基本依靠运行通风模式即可满足站内环境控制的需求, 因此年能耗较低, 约束值在 17.6 万~29.5 万 kW·h/(年·站)之间, 引导值在 17.5 万~22.5 万 kW·h/(年·站)之间。

## 4.2 气候条件与通风空调合理能耗

气候条件是影响地铁站通风空调能耗约束值和引导值的关键因素。为了将地铁站通风空调合理能耗扩展到未来更多拥有地铁的城市, 将各城市合理能耗的平均值与当地气象参数进行拟合, 探索的参数包括当地典型气象年的年平均干球温度、年平均湿球温度、最热月平均干球温度、空调设计干球温度、空调设计湿球温度。研究表明, 对于能耗约束值和引导值而言, 拟合效果最好的参数均为当地典型气象年的年平均湿球温度, 拟合的  $R^2$  值分别为 0.951 和 0.949(见图 6)。

## 4.3 各城市通风空调合理能耗拟合

对于每个城市, 不同的服务规模参数(客流量、发车对数、隧道长度)导致通风空调合理能耗约束值和引导值的变化分别在 $\pm 8\%$ 和 $\pm 6\%$ 之间。

本研究通过多元线性回归的方法, 分析了各城市能耗合理值与服务规模参数之间的关系, 从而可以给出每个城市相应的拟合系数, 用于合理能耗的快速计算, 有

$$E_{\text{VAC}} = \alpha_1 \times \text{TDD} + \alpha_2 \times N_p + \alpha_3 \times L_t + b$$

式中:  $E_{\text{VAC}}$  为地铁站通风空调系统年能耗, kW·h/(年·站); TDD 为日发车对数, 对/d;  $N_p$  为年客流量, 万人次/年;  $L_t$  为隧道长度, m;  $b$  为拟合常数。

图 7 展示了拟合  $R^2$ , 图 8 展示了能耗拟合值与实际值的对比。以能耗约束值的拟合为例, 结果显示: 在 43 座城市中, 超过 80%城市的地铁车站的合理能耗与服务规模参数的拟合  $R^2$  值在 0.81 以上, 拟合效果较差的城市主要位于严寒地区和温和地区。对于位于寒冷地区、夏热冬冷地区、夏热冬暖地区城市的地铁站而言, 超过 90%城市的地铁车站的合理能耗与服务规模参数的拟合  $R^2$  值在 0.90 以上。能耗引导值的拟合效果略差于约束值的拟合, 规律类似。

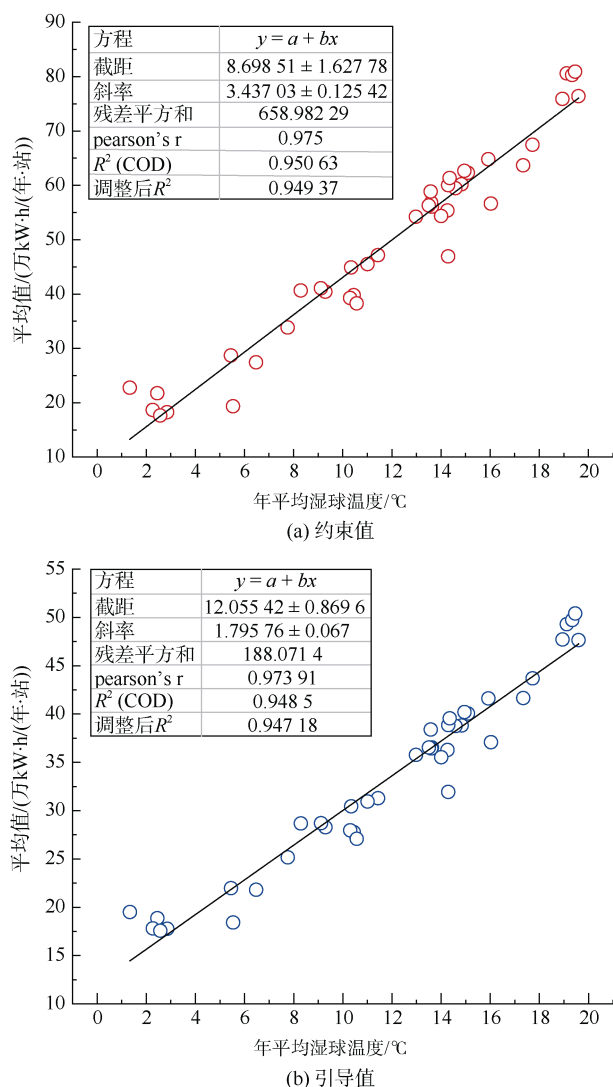


图 6 各城市地铁站通风空调合理能耗与当地年均湿球温度  
Figure 6 CV and LV of VAC energy use for subway station vs. local average annual wet-bulb temperature

## 5 结语

笔者以节能运行管理为出发点, 针对中国大陆已开通和正在建设地铁的 5 个气候区的 43 座城市, 开展了地铁站通风空调合理能耗指标的研究, 研究内容和结果总结如下:

1) 采用地铁站能耗原理模型, 对 43 座城市、36 种服务规模、2 种合理运行管理水平下共计 3 096 个案例进行了大规模计算, 模拟得到了通风空调能耗约束值和引导值。结果显示, 各城市地铁站的通风空调年能耗的约束值在 17.6 万~85.9 万 kW·h/(年·站)之间, 引导值在 17.5 万~52.9 万 kW·h/(年·站)之间。

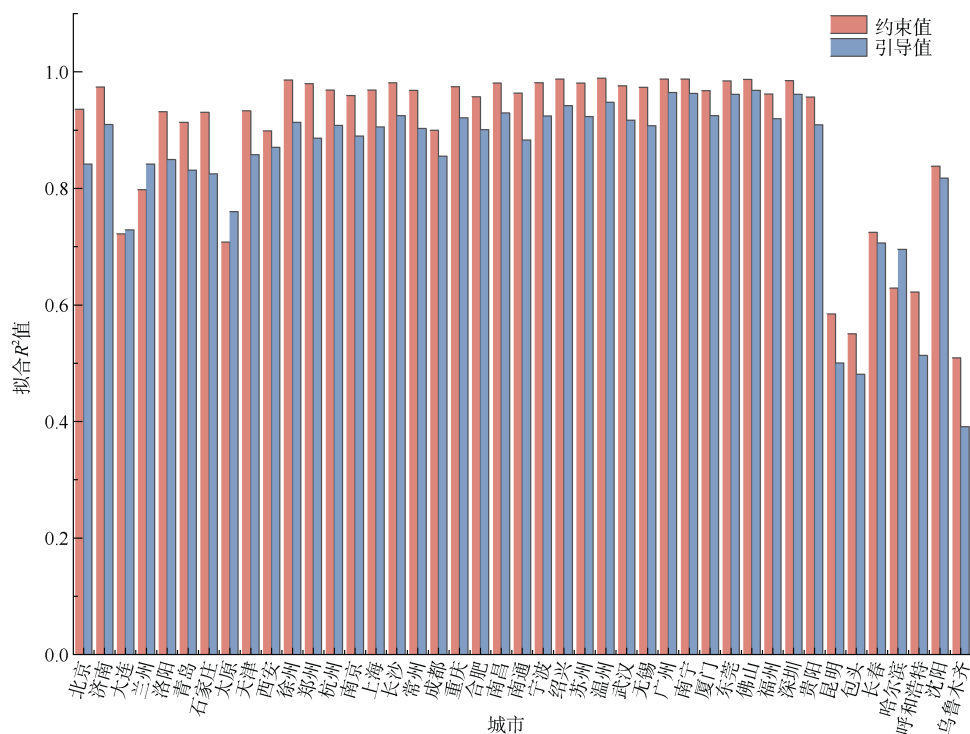
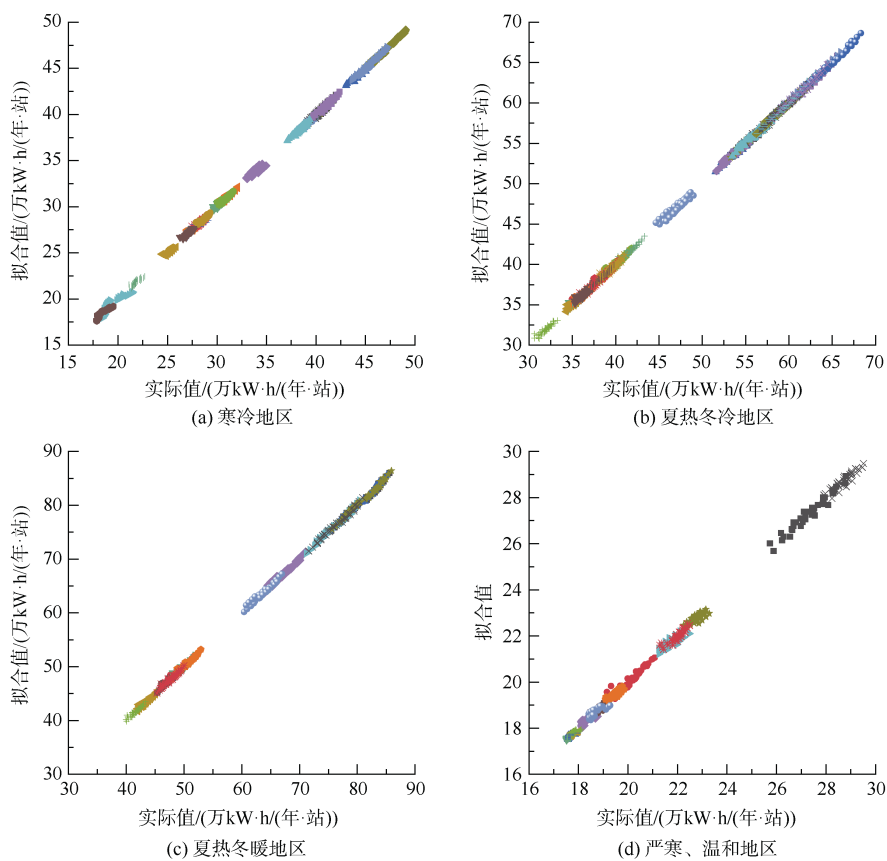
图 7 各城市地铁站通风空调合理能耗与服务规模参数的拟合  $R^2$ Figure 7  $R^2$  of CV and LV for VAC energy consumption of subway station in each city

图 8 各城市地铁站通风空调合理能耗拟合值与实际值

Figure 8 Comparison of fitting and actual value of CV and LV for VAC energy consumption of subway station in each city

2) 分析了通风空调系统合理能耗与气候条件的关系,发现年平均湿球温度与合理能耗指标的拟合效果最好,对于能耗约束值和引导值拟合的  $R^2$  值分别为 0.951 和 0.949。

3) 对各城市地铁站通风空调能耗的约束值和引导值,与客流量、发车对数、隧道长度进行了多元线性回归分析,发现超过 80% 城市的地铁站的合理能耗与服务规模参数的拟合  $R^2$  值在 0.81 以上,拟合效果较差的城市主要位于严寒地区和温和地区,进而给出了各城市合理能耗计算公式。

本研究提出中国各气候区地铁站的合理能耗指标和计算方法,为车站运维管理人员提供了便捷、有效地评估车站通风空调用能水平的工具。本研究的对象是采用屏蔽门系统的标准地铁站,能够通过自控系统实现运行模式的逐时切换。后续研究将继续深入探讨不同的模式切换间隔、非屏蔽门系统制式等情况下地铁站的合理能耗。

#### 参考文献

- [1] 城市轨道交通协会. 城市轨道交通 2020 年度统计和分析报告[EB/OL]. (2021-04-09)[2021-01-15]. <https://www.camet.org.cn/tjxx/7647>.
- [2] SU Z, LI X. Sub-system energy model based on actual operation data for subway stations[J]. Sustainable cities and society, 2019, 52: 101835.
- [3] 清华大学建筑节能研究中心. 中国建筑节能年度发展研究报告[M]. 中国建筑工业出版社, 2018.  
THUBERC. 2018 annual report on China building energy efficiency[M]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2018.
- [4] 焦焕炎, 冯浩东, 魏东, 等. 基于强化学习的地铁站空调系统节能控制[J/OL]. 控制与决策, 2021.  
JIAO Huanyan, FENG Haodong, WEI Dong, et al. Energy saving control for the subway station air conditioning systems based on reinforcement learning[J/OL]. Control and decision, 2021.
- [5] 孙勇, 郑建彬, 杨平文. 地铁站通风空调系统节能改造方案研究[J]. 暖通空调, 2019, 49(10): 32-37.  
SUN Yong, ZHENG Jianbin, YANG Pingwen. Study on energy saving reform scheme of ventilation and air conditioning system in underground railway station[J]. HV&AC, 2019, 49(10): 32-37.
- [6] ZHOU X, MEI Y, LIANG L, et al. A dynamic energy benchmarking methodology on room level for energy performance evaluation[J]. Journal of building engineering, 2021(3): 102837.
- [7] ZHAN S, LIU Z, CHONG A, et al. Building categorization revisited: a clustering-based approach to using smart meter data for building energy benchmarking[J]. Applied energy, 2020, 269: 114920.
- [8] KIM S C, SHIN H I, AHN J, et al. Energy performance analysis of airport terminal buildings by use of architectural, operational information and benchmark metrics[J]. Journal of air transport management, 2020, 83: 101762.
- [9] YAN D, HONG T, LI C, et al. A thorough assessment of China's standard for energy consumption of buildings[J]. Energy and buildings, 2017, 143(MAY): 114-128.
- [10] 民用建筑能耗标准: GB/T51161—2016[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2016.  
Standard for energy consumption of building: GB/T 51161—2016[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2016.
- [11] 苏子怡, 李晓锋. 地铁车站分项能耗原理模型及其简化研究[J]. 暖通空调, 2021, 51(9): 18-23.  
SU Ziyi, LI Xiaofeng. Theoretical models and simplification of sub-system energy use systems in underground railway stations[J]. HV&AC, 2021, 51(9): 18-23.
- [12] SEDH. Subway Environmental Design Handbook (1976).
- [13] 地铁设计规范: GB 50157—2013[S]. 北京: 中国建筑工业出版社, 2014.  
Code for design of metro: GB 50157—2013[S]. Beijing: China Architecture & Building Press, 2014.
- [14] 王莹. 屏蔽门地铁车站无组织渗风问题研究[D]. 北京: 清华大学, 2018.  
WANG Ying. Research on unorganized ventilation problems in subway stations with platform screen doors[D]. Beijing: Tsinghua University, 2018.
- [15] 冷水机组能效限定值及能效等级: GB19577—2015[S]. 北京, 2017.  
Minimum allowable values of energy efficiency and energy efficiency grades for water chillers: GB19577—2015[S]. Beijing, 2017.
- [16] 空气调节系统经济运行: GB/T 17981—2007[S]. 北京, 2008.  
Economic operation of air conditioning systems: GB/T 17981—2007[S]. Beijing, 2007.

(编辑: 傅依萱)