



# 昆明市地铁站设备与管理用房 冬季室内热环境实测分析

何璇<sup>1</sup>, 罗缘<sup>1</sup>, 刘猛<sup>2</sup>, 胡梦强<sup>2</sup>

(1. 中铁四院集团西南勘察设计有限公司, 昆明 650000; 2. 重庆大学 土木工程学院, 重庆 400045)

**摘要:**地铁站的通风空调系统能耗占比较高, 温和地区地铁站设备与管理用房通风空调系统装机容量大, 为节能重点。地铁站设备与管理用房通风空调系统的设计呈现“模块化”特点, 其设计、运行中存在的问题尚不清晰。2018 年 11 月, 对昆明市 3 座地下车站设备与管理用房室内热环境开展实测, 测试参数包括各房间的送、排风量, 空调送风温度, 通风送风温度, 通风排风温度。实测数据表明: 各房间送、排风量, 换气次数与设计值差异较大; 空调房间的换气次数普遍远高于规范规定的最小值; 新风井处的新风温度不能代表各房间的送风温度, 送风机及风管传热导致的温升不可忽略; 房间室内温度普遍偏低, 其中, 有人员常驻的房间室内温度集中分布在 20~24 °C, 无人员常驻的空调房间室内温度最低, 且存在较多低于规范规定范围下限的情况, 非空调房间室内温度受室内发热量、换气次数、室外气象影响明显。

**关键词:**设备与管理用房; 通风空调系统; 室内热环境; 换气次数

**中图分类号:** TU831      **文献标志码:** A      **文章编号:** 2096-6717(2019)06-0158-09

## Measurement and analysis of winter indoor thermal environment of facility room in subway stations in Kunming

He Xuan<sup>1</sup>, Luo Yuan<sup>1</sup>, Liu Meng<sup>2</sup>, Hu Mengqiang<sup>2</sup>

(1. Southwest Survey and Design Co., Ltd. of China Railway Siyuan Group, Kunming 650000, P. R. China;

2. School of Civil Engineering, Chongqing University, Chongqing 400045, P. R. China)

**Abstract:** The environmental control system in the subway stations accounts for a relatively high energy consumption. The installed capacity of environmental control system in the subway station facility room in the temperate zone is large, which is the key to achieve energy efficiency. The design of environmental control system in the subway station equipment and management room presents a modular feature, and the problems in its design and operation are still unclear. On-site measurement was carried out in the equipment and management rooms of three underground stations in Kunming in November 2018. Test parameters include the air supply and discharge volume, supply air temperature of air-conditioner, supply and exhaust air temperature of ventilation system in each room. The results show that the supply air volume, exhaust air volume and ventilation times differ greatly from the design value; the ventilation times of air-

**收稿日期:** 2019-04-22

**作者简介:** 何璇(1992-), 女, 主要从事地铁站环控系统节能研究, E-mail: 491292005@qq.com。

刘猛(通信作者), 男, 教授, 博士生导师, E-mail: liumeng2033@126.com。

**Received:** 2019-04-22

**Author brief:** He Xuan (1992-), main research interest: energy efficiency of environment control system in subway stations, E-mail: 491292005@qq.com.

Liu Meng (corresponding author), professor, doctoral supervisor, E-mail: liumeng2033@126.com.

conditioning rooms is much higher than the limited value. The fresh air temperature at the fresh air shaft can not represent the supply air temperature of each room, and the temperature increase caused by the supply air fan and air duct heat transfer cannot be neglected. The indoor temperature is generally low, and the air temperature in the rooms with people at 20 °C~24 °C. The air temperature in the air-conditioning room without people is the lowest, and sometimes it is below the lower limit of the specification range. The air temperature in the rooms without air-conditioning is obviously affected by the heat generation, ventilation times and outdoor environment.

**Keywords:** facility room; environment control system; indoor thermal environment; ventilation times

由于具有运量大、速度快、班次密、安全舒适、准点率高等优点,城市轨道交通在中国各城市迅速发展。截至 2018 年底,中国内地累计有 35 个城市开通城市轨道交通,共计线路 185 条,运营总长度 5 761.4 km<sup>[1]</sup>。与其他交通工具相比,城市轨道交通的特点之一是需要设置车站供乘客候车。在中国,地下轨道交通的数量占比大,如在北京、上海、武汉 3 座城市中,地下车站占比分别达到了 76%、70%、80%,即使在高架站较多的重庆,地下车站数量也达到了 58%。为营造舒适的候车环境,保证重要设备的运行安全,地下车站内通常设置有通风空调系统来控制室内热湿环境。根据服务对象不同,车站的通风空调系统往往分为“大系统”、“小系统”,其中“大系统”服务于车站公共区,“小系统”服务于设备与管理用房。

地下车站的能耗主要由通风空调系统能耗、照明能耗、电梯能耗和其他能耗组成<sup>[2]</sup>,其中,通风空调系统能耗占比较高,约占车站总用电量的 60%~70%<sup>[3]</sup>。近年来,针对地铁站通风空调系统的节能,相关学者开展了大量研究,包括地铁站通风空调系统用能特征研究<sup>[2, 4-5]</sup>、节能诊断研究<sup>[6-7]</sup>、系统优化控制研究<sup>[8-10]</sup>等。Wang 等<sup>[11]</sup>针对北京地铁的通风空调系统展开现场实测,并开发了自动控制系统(综合环境监测、人流监测、子系统运行监测)来实现节能,结果表明,车站有 31%~40%的能源消耗在了暖通空调系统,所开发的自动控制系统在不同车站可实现 20%~38%的节能效益。Fukuyo<sup>[12]</sup>使用计算流体力学与行人行为模拟来辅助地铁站的空调系统设计,结果表明,与传统的通风空调系统设计相比,所提出的设计方法可明显提高人员热舒适并降低能耗。目前,针对地铁站设备与管理用房的通风空调系统研究较少。黄明才<sup>[13]</sup>实测了某车站设备与管理用房通风空调系统,并认为主要存在风量分

配不合理与系统运行控制策略不明确两方面问题。王凤艳<sup>[14]</sup>认为,变风量空调系统能很好地适应车站设备用房冷负荷变化,节能效果好且初投资增量较少。余珏等<sup>[15]</sup>通过现场实测设备与管理用房的壁面温度、送回风状态参数和风量、设备表面温度等参数,计算了各房间内的设备发热量,结果表明,设计冷负荷远高于设备实际发热量。

昆明市地处温和地区,室外自然条件优越,气温波动小,对于营造室内的舒适环境十分有利。昆明地区的地下车站,公共区往往只设置通风系统,设备与管理用房设置通风系统和变频多联机空调系统。其中,设备与管理用房通风空调系统的设备容量占比较大,且其全天 24 h 运行,因此,节能潜力较高。本文针对昆明市地下车站的设备与管理用房的室内热环境展开实测分析,诊断通风空调系统设计、运行中存在的问题,为接下来的节能优化提供方向和数据支撑。

## 1 研究对象

昆明市目前在运营地铁线路共 4 条,分别为 1 号线(2013 年开通运营)、2 号线(2014 年开通运营)、3 号线(2017 年开通运营)和 6 号线机场线(2012 年开通运营)。从 2 号线中选取两座地下车站(车站 A 和 B),3 号线中选取一座地下车站(车站 C)进行实测。所选取的车站均为非换乘车站,基本信息见表 1。

表 1 目标车站的基本信息

Table 1 Basic information of target stations

车站	车站总长度/m	有效站台宽度/m	车站面积/m <sup>2</sup>		
			车站总建筑面积	车站公共区面积(站厅/站台)	设备与管理用房面积
A	173.1	11	10 079	1 544/1 158	1 441
B	262.8	11	13 378	1 783/1 194	1 620
C	181.0	11	12 068	1 395/1 155	1 849

3座车站设备与管理用房的通风空调系统设置同中有异。首先,均采用变频多联机空调系统为特定房间供冷;其次,通风系统均有分区,即并非1套通风系统服务所有设备与管理用房,但分区个数不同;最后,在车站C的1个通风系统(T1)中,送、排风机均“一大一小”设置,可配合空调系统实现“小新风空调模式”,这种设计方法并未用于车站A和B。根据车站C的通风系统设计表明,T1系统的运行风机取决于重要房间室内空气焓值(取信号设备室,56.12 kJ/kg)与室外空气焓值的大小,当前者大时,采用“全新风空调模式”(即大功率风机运行);反之,采用“小新风空调模式”(即小功率风机运行)。

3座车站设备与管理用房在功能划分上存在很高的一致性,但通风系统的装机容量存在较大差异,分别为43.8、30.8、66.8 kW。考虑到3座车站的设备与管理用房面积差异较大,但层高相同,因此,计算通风系统的风机功率密度分别为30、19、36 W/m<sup>2</sup>。3座车站的变频多联机空调的总制冷量分别为157、194、224 kW,单位空调面积的供冷量分别为0.29、0.28、0.36 kW/m<sup>2</sup>。

## 2 研究方法

研究主要关注对象为设备与管理用房的通风空调系统,因此,根据其设置情况,将房间分为4类:1)有人员常驻的管理用房,包括车控室、站长室等;2)设置有通风空调系统的设备用房,包括通信设备室、信号设备室等;3)只设置通风系统的设备用房,包括低压开关柜室、高压开关柜室等;4)其他通风房间,包括消防泵房、清扫间、卫生间等。选择1)~3)类中的代表房间作为研究对象。

现场实测分为两阶段。第1阶段为典型房间的实际尺寸、通风系统风量实测,目的在于获得房间的换气次数、送排风平衡状态等信息;第2阶段为典型房间空气状态长期监测,目的在于获得房间通风空调系统的送、排风温度,用于分析室内热环境。在现场实测过程中,通风空调系统均处于正常运行状态。需要说明的是,虽然车站C的T1系统设计时考虑了“小新风空调模式”与“全新风空调模式”,但实际运行时,“小新风空调模式”给车站管理人员的感觉是“没有风”,因此,日常运行时均采用“全新风空调模式”。风量测试与空气状态参数监测所选取的房间见表2。

表2 短期测试与空气状态参数长期监测所选取的房间

Table 2 Selected rooms during the short-term testing and long-term monitoring

测试类别	车站	房间名称
风量测试	A	第1)类:车控室、站长室、票务室、交接班室 第2)类:通信设备室、民用通信设备室、警用通信设备室、信号设备室、通信电源室、环控电控室、控制室、安全门设备室 第3)类:低压开关柜室、高压开关柜室、照明配电室、蓄电池室
	B	第1)类:车控室、站长室、票务室、交接班室 第2)类:通信设备室、商用通信设备室、警用通信设备室、信号设备室、通信电源室、信号电源室、环控电控室、控制室、安全门设备室 第3)类:低压开关柜室、高压开关柜室、照明配电室、蓄电池室
	C	第1)类:车控室、站长室、票务室、交接班室 第2)类:通信设备室、商用通信设备室、信号设备室、AFC设备室、综合监控设备室、安全门设备室、环控电控室、蓄电池室、控制室 第3)类:低压开关柜室、高压开关柜室、再生逆变室、照明配电室
空气状态长期监测	A	第1)类:车控室、交接班室 第2)类:环控电控室、安全门设备室 第3)类:低压开关柜室、照明配电室
	B	第1)类:车控室、交接班室 第2)类:环控电控室、安全门设备室 第3)类:低压开关柜室、蓄电池室
	C	第1)类:车控室、交接班室 第2)类:环控电控室、安全门设备室 第3)类:低压开关柜室、蓄电池室

风量测试于 2018 年 11 月初进行。在测试中,采用热线风速仪测量通风系统的送风口、排风口的断面风速,并乘以风口的有效面积,得到送风量和排风量。由于风口均为矩形,测试时的测点的选取满足《公共建筑节能检测标准》,按图 1 设置测点。在测量风口的断面风速时,每个风口重复测量 3 次,最终取平均值作为断面平均风速。

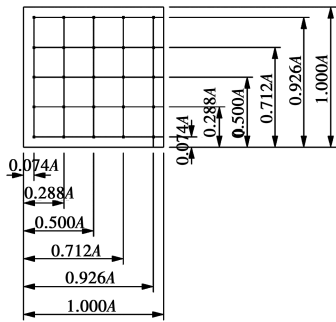


图 1 风口的风速测点布置

Fig. 1 Layout of velocity measurement points

空气状态长期监测中,使用温湿度记录仪测量记录通风空调系统的送、排风温湿度,仪器分别放置于空调系统出风口、通风系统送风口和排风口处,此外,在每座车站的新风井处安装一个温湿度仪器,用于监测室外空气参数。监测日期为 11 月 5 日—11 月 24 日,共计 20 d,仪器的记录间隔设置为 5 min。测试中所用的仪器的相关参数见表 3。

### 3 结果与分析

#### 3.1 风量分析

3.1.1 送排风平衡 短期测试中,通过测量送、排风口的断面风速,得到了通风系统的送、排风量,分别按照式(1)~式(3)计算了各房间送、排风的不平衡率,送风量差异和排风量差异。3 座车站的计算结果分别见图 2~图 4。

$$\text{不平衡率} = \frac{\text{送风量} - \text{排风量}}{\max(\text{送风量}, \text{排风量})} \quad (1)$$

表 3 测试用仪器相关参数

Table 3 Details of test instruments

仪器名称及型号	量程	精度
TSI 9535 热线风速仪	0~30 m/s	读数±3%与 0.015 m/s 之间的较大值
HOBO UX100-003 温湿度记录仪	温度 -20~70 °C	温度±0.21 °C (0~50 °C)
	相对湿度 1%~100%	相对湿度±3.5% (10%~90%)
AZ 8723 温湿度计	温度 -10~60 °C	温度±0.6 °C
	相对湿度 1%~100%	相对湿度±3% (25 °C, 10%~90%)

$$\text{送风量差异} = \frac{\text{实测送风量} - \text{设计通风量}}{\max(\text{实测送风量}, \text{设计通风量})} \quad (2)$$

$$\text{排风量差异} = \frac{\text{实测排风量} - \text{设计通风量}}{\max(\text{实测排风量}, \text{设计通风量})} \quad (3)$$

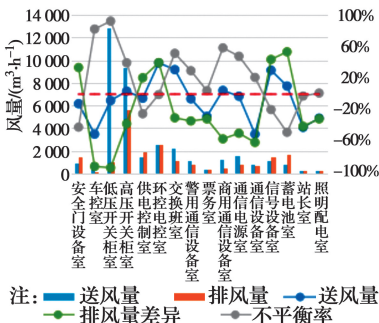


图 2 车站 A 设备与管理用房各房间送、排风量

Fig. 2 Supply/exhaust air volume of rooms in Station A

对于车站 A,送风量差异分布在 -50%~39%,排风量差异分布在 -93%~53%,送、排风不平衡率分布在 -48%~92%。不平衡率最大的情况出现在

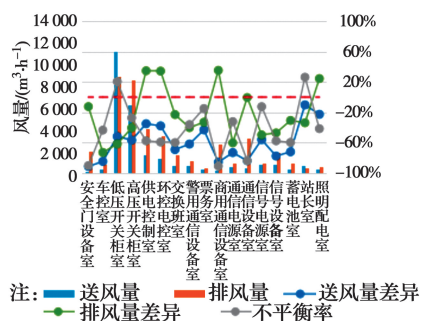


图 3 车站 B 设备与管理用房各房间送、排风量

Fig. 3 Supply/exhaust air volume of rooms in Station B

低压开关柜室,该房间所属通风系统的送、排风机布置在站厅,靠近低压开关柜室附近,而该系统中除低压开关柜室的其他房间均位于站台层,风管上存在较多的弯管,阻力特性较复杂。与车站 A 不同,车站 B 的送风量、排风量相较于设计值整体偏小,不平衡率负值居多,即大部分房间为负压状态。车站 C 的送风量差异分布在 -96%~14%,排风量差异分布在 -85%~46%,送、排风不平衡率分布在 -93%~



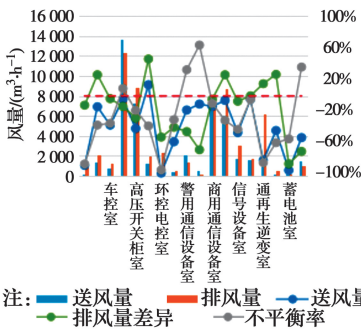


图 4 车站 C 设备与管理用房各房间送、排风量

Fig. 4 Supply/exhaust air volume of rooms in Station C

64%，与车站 B 相似，车站 C 的大部分房间也呈现负压状态。

图 2~图 4 表明，各房间的送、排风量差异较大，不平衡率较高。车站 A 的低压开关柜室、车站 B 的商用通信设备室、车站 C 的环控电控室，不平衡率超过了 90%。与普通民用建筑不同，地下车站的设备与管理用房位于地下，且房间密封性较好，通风系统成为其与外界的唯一联系，若通风系统送、排风量与设计值偏差较大，将影响室内热环境营造与环控系统能耗。

3.1.2 换气次数 根据风量测试得到的各房间送、排风量以及房间的实际尺寸信息，计算得到各房间的实际换气次数，见图 5~图 7。此外，图中给出了实测的换气次数与设计情况下的换气次数和规范规定的最小换气次数之间的倍数关系。

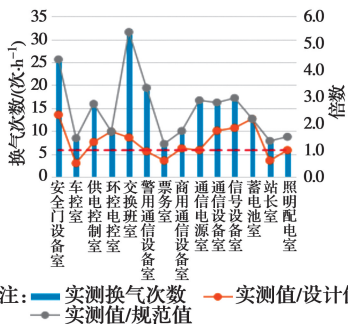


图 5 车站 A 设备与管理用房各房间换气次数实测值

Fig. 5 Air exchange rate of rooms in Station A

从图 5~图 7 可以看出，各房间的设备与管理用房的换气次数与设计值的比例分布在 1 左右，车站 A 的实测值/设计值最小为 0.5，最大为 2.3，平均值为 1.3。相比较车站 A，车站 B 的实际换气次数偏小，实测换气次数与设计值之比分布在 0.3~1.5，平均值为 0.8。对于车站 C，最小值、最大值和

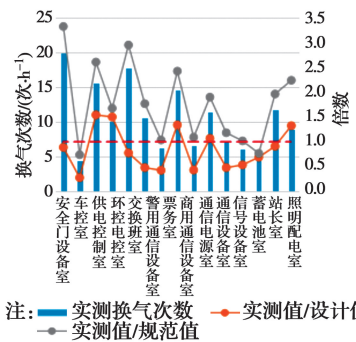


图 6 车站 B 设备与管理用房各房间换气次数实测值

Fig. 6 Air exchange rate of rooms in Station B

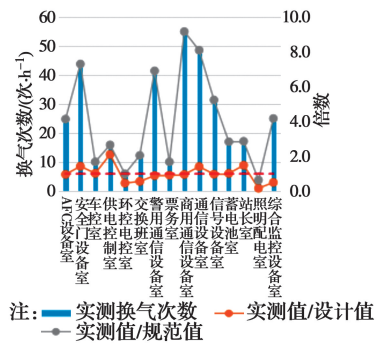


图 7 车站 C 设备与管理用房各房间换气次数实测值

Fig. 7 Air exchange rate of rooms in Station C

平均值分别为 0.2、2.1、1.0。而换气次数的实测值与规范规定的最小值的比例普遍大于 1，其中，车站 A 的交接班室二者的比例达到 5.4，车站 B 的安全门设备室二者的比例为 3.3，车站 C 的商用通信设备室二者的比例为 9.2。此外，在现场实测过程中发现，空调房间往往设置有较高的地板架空层和天花板吊顶，房间的实际层高远小于建筑层高（车站 A 站厅层的建筑层高与实际层高分别为 4.5 m 和 2.8 m），而在设计通风系统时，换气次数往往根据建筑层高设计计算，导致换气次数在房间实际尺寸下偏高。当室外空气焓值低于室内空气时，室外新风对室内余热有移除作用，而当室外空气焓值高于室内空气焓值时，过高的换气次数将增加通风空调系统能耗。因此，合理的设计房间通风系统，使换气次数在一定范围内对通风系统节能意义重大。

### 3.2 空气状态分析

3.2.1 送风温度与室外温度 空气状态监测期间，各房间的通风系统送风温度及车站新风井处测得的室外空气温度分布情况见图 8。从图中可以看出，通风系统的送风温度普遍高于新风井处测得的室外新风温度。车站 A 的第 2 类房间送风温度平均值

比室外新风平均值高 4.2 °C,第3类房间的差值为 5.9 °C;车站 B 的第2类房间、第3类房间的送风温度与室外新风温度的平均值分别相差 6.1、7.4 °C;对于车站 C,数值分别为 5.0、3.9 °C。

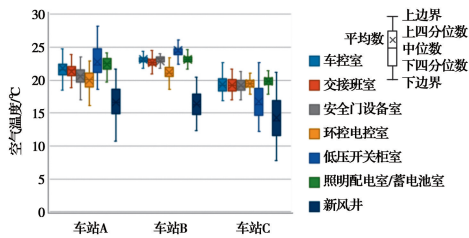


图8 长期监测的送风温度与室外新风温度

Fig. 8 Outdoor air temperature and supply air temperature during long-term monitoring

造成送风温度与室外新风温度差异的主要原因是送风机及风管传热导致的温升,根据文献[16],对于设备与管理用房的送风系统,当风机全压为 500 Pa 时,假定风机全压效率为 0.8(较高),空气通过通风机的温升值为 0.59 °C;而风管传热造成的温升与管内外温差、管内风量和流速、管长有关,当风管内风量为 500 m<sup>3</sup>/h、空气流速为 2.5 m/s 时,无绝热层薄钢板风管的温升为 0.38 °C/(°C·10 m)。车站 C 车控室、交接班室、安全门设备室、环控电控室、蓄电池室为同一通风系统,低压开关柜室为另一通风系统,可以看出,不同的送风系统设置造成送风温度差异较大。

3.2.2 送风温度与排风温度 在空气状态长期监测中,车站 A 的通风系统存在较多“停止运行”的状态,因此,从车站 B、车站 C 中选取房间进行空气状态参数分析。选择车站 B 交接班室(第1类)、环控电控室(第2类)、蓄电池室(第3类),车站 C 车控室(第1类)、安全门设备室(第2类)、低压开关柜室(第3类)作为分析对象。初步分析长期监测结果发现,房间的热环境参数呈现周期性变化,因此,选择车站 B、C 设备与管理用房通风空调系统的稳定运行时期(车站 B:11月14日12时—11月21日12时,车站 C:11月10日12时—11月17日12时),期间送风井的空气温度变化见图9。由图9可以看出,车站 C 夜间温度较低,这与车站运营时间较短、地层温度较低有关。

不考虑房间内的空气温度分布均匀性,将通风系统的排风温度视为房间的空气温度,可统计得到各房间的空气温度分布情况,见图10。图10显示各房间空气温度偏低,甚至出现较多低于规范规定

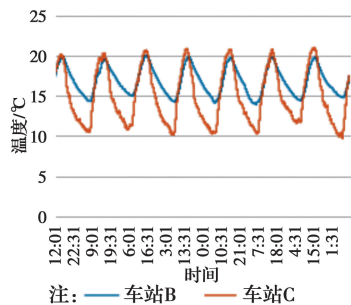


图9 所选时间段送风井处空气温度

Fig. 9 Outdoor air temperature during selected period

的 18~27 °C 区间的情况。3类房间中,第2类房间的空气温度最低,安全门设备室的平均温度为 18.6 °C,环控电控室的平均温度为 18.2 °C。第3类房间所选的两个房间,温度差异较大,车站 C 的低压开关柜室,室内平均温度为 18.5 °C,而车站 B 的蓄电池室,平均温度为 23.1 °C。这与车站 C 运行年代短,新风井处夜间空气温度低,低压开关柜室换气次数高(16次/h,规范规定最小6次/h),车站 B 蓄电池室换气次数低(5次/h,规范规定最小6次/h)有关。而第1类房间的空气温度集中分布在 20 °C~24 °C,未出现极低情况,表明室内人员会对通风空调系统进行调节以满足舒适性。

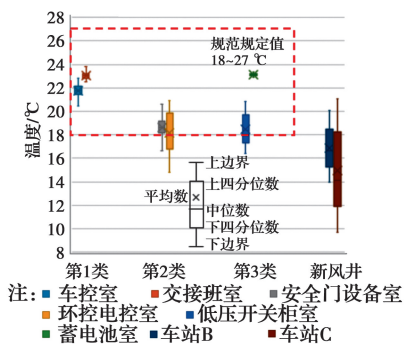


图10 空气温度分布

Fig. 10 Air temperature distribution

各房间通风系统的送、排风温度比较情况见图11。各房间均存在送风温度高于排风温度的情况,出现次数最多的为第2类房间,其中,车站 B 的环控电控室排风温度一直低于送风温度,车站 C 的安全门设备室这种情况的占比达 65%。相较于第2类房间,第1类房间出现排风温度低于送风温度的比例较低,车控室和交接班室的比例分别为 3%和 15%。第3类房间中未设置有空调系统,但在车站 B 的蓄电池室也出现了 42%的送风温度高于排风温度的情况,但温差并不大,在 0.5 °C 以内,主要出现在室外温度相对较高的 12~22 °C 时,其原因可能是

房间墙壁内表面温度较低,其对室外空气有一定的冷却作用。

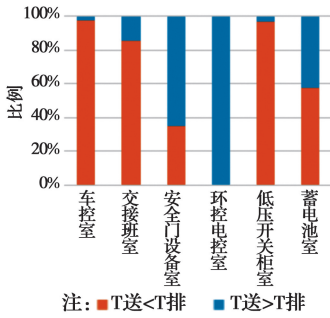


图 11 通风系统送、排风温度比较

Fig. 11 Comparison between supply and exhaust air temperature

3.2.3 空气状态逐时变化 根据测试结果,在室外空气温度相差不大时,各房间空调系统送风温度、通风系统送风温度和排风温度变化相差不大,因此,取其中一天(车站 B 取 11 月 15 日,车站 C 取 11 月 11 日)分析空调系统送风温度和通风系统送、排风温度,各房间的温度变化见图 12。

由图 12 可知,每类房间中的空调系统送风,通风系统送、排风变化趋势相似,对于第 1 类房间,由于空调系统设置温度相对较高,空调系统送风温度相对较高,交接班室、车控室的空调送风温度平均值分别为 21.7、19.3 °C。且第 1 类房间的空调系统开启频率较低,一天内只有 7 个工作周期。第 2 类房间的空调系统送风温度较低,环控电控室、安全门设备室的空调送风温度平均值分别为 13.9、16.9 °C。其中,环控电控室的空调系统运行启停频繁,一天内有 35 个工作周期。安全门设备室的空调系统运行不规律,但可以看出运行频率也高于第 1 类房间。第 3 类房间由于室内设备发热量较小或室内设计温度较高不设置空调系统,蓄电池室属于室内设备发热量小的情况,其通风系统排风温度变化很小,平均值为 23.2 °C,日较差仅为 0.34 °C。低压开关柜室属于室内设计温度较高的情况,在夜间,通风系统送风温度较低时,带走多余热量,排风温度较高;但当白天室外温度较高时,排风温度与送风温度的差值较低,排除热量的作用不明显。

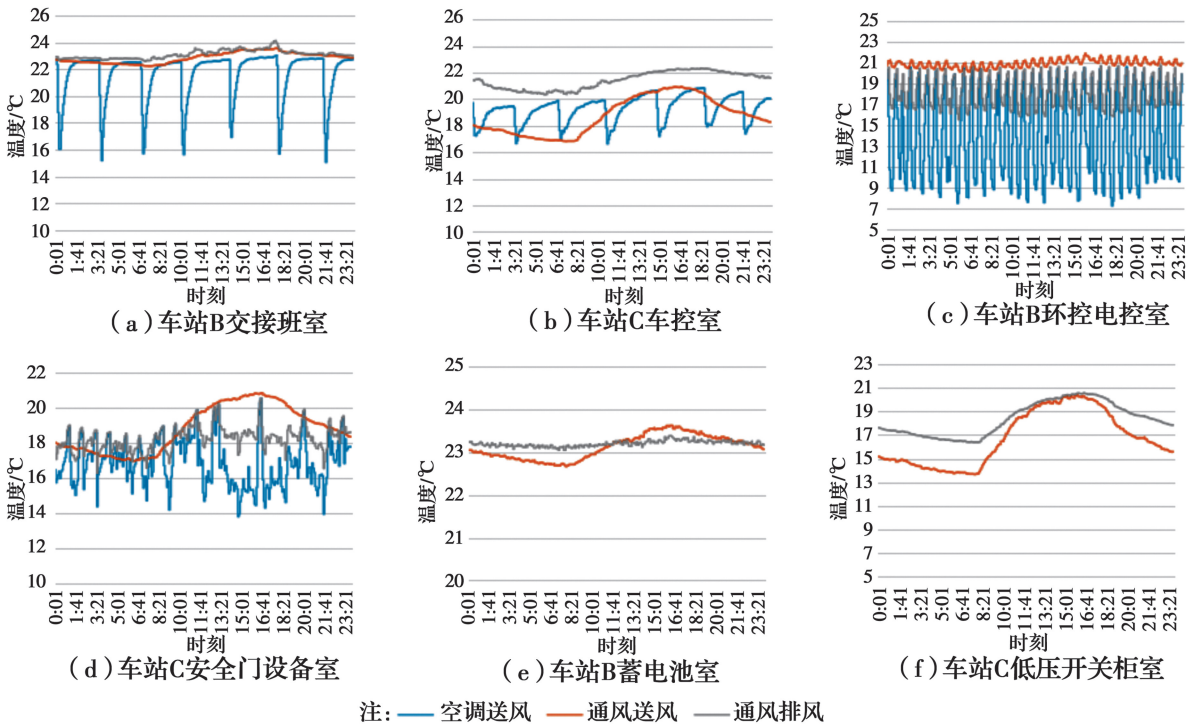


图 12 各房间的送、排风温度变化

Fig. 12 Supply and exhaust air temperature

### 4 结论

昆明市 3 座车站设备与管理用房通风空调系统实测,分析了房间通风量、换气次数、室内温度。分析结果表明,各房间送、排风量,换气次数的实际值

与设计值差异较大。在车站建成后,应对设备与管理用房的通风系统进行平衡调试,此外,由于未考虑地板架空层和天花板吊顶,空调房间的换气次数实际值普遍远高于规范规定的最小值,空调房间的地板、吊顶厚度相对固定,设计时应按照房间实际尺寸



计算换气次数;新风井处的新风温度不能代表各房间的送风温度,送风机及风管传热导致的温升不可忽略;房间室内温度普遍偏低,其中,有人员常驻的房间室内温度集中分布在20~24℃,无人员常驻的空调房间室内温度最低,且存在较多低于规范规定范围下限的情况,非空调房间室内温度受室内发热量、换气次数、室外气象影响明显。

通风空调系统的不合理设计或运行调节都将增加其能耗,若能根据上述分析结果采取有针对性的措施,如合理设计通风空调系统、优化通风系统平衡性、提高室内空调设置温度等,将起到一定的节能作用。此外,房间温度过低与空调系统设计容量偏大有关,因此,将来应针对房间内设备的发热负荷进行深入研究。

#### 参考文献:

- [1] 维基百科编者. 中国城市轨道交通系统[G/OL]. 维基百科, 2019(20190410)[2019-04-10]. <https://zh.wikipedia.org/w/index.php?title=%E4%B8%AD%E5%9B%BD%E5%9F%8E%E5%B8%82%E8%BD%A8%E9%81%93%E4%BA%A4%E9%80%9A%E7%B3%BB%E7%BB%9F&oldid=53955983>.  
Wikipedia Editor. China Urban Rail Transit System [G/OL]. Wikipedia, 2019(20190410)[2019-04-10]. <https://zh.wikipedia.org/w/index.php?title=%E4%B8%AD%E5%9B%BD%E5%9F%8E%E5%B8%82%E8%BD%A8%E9%81%93%E4%BA%A4%E9%80%9A%E7%B3%BB%E7%BB%9F&oldid=53955983>.
- [2] 杨乐. 地铁站用能特征与节能策略研究[D]. 北京:清华大学, 2017.  
YANG L. Research on the energy use characteristics and energy saving strategies of metro stations [D]. Beijing: Tsinghua University, 2017. (in Chinese)
- [3] 余光华. 地铁通风空调系统节能研究[J]. 制冷与空调, 2008, 22(2): 14-17.  
SHE G H. Study of the energy saving in metro HVAC system [J]. Refrigeration & Air Conditioning, 2008, 22(2): 14-17. (in Chinese)
- [4] CASALS M, GANGOLELLS M, FORCADA N, et al. A breakdown of energy consumption in an underground station [J]. Energy and Buildings, 2014, 78: 89-97.
- [5] AHN J, CHO S, CHUNG D H. Development of a statistical analysis model to benchmark the energy use intensity of subway stations [J]. Applied Energy, 2016, 179: 488-496.
- [6] 王春, 李楠, 刘志军, 等. 重庆地铁站通风空调系统节能改造[J]. 暖通空调, 2017, 47(1): 91-96.  
WANG C, LI N, LIU Z J, et al. Energy saving transformation of ventilation and air conditioning system of an underground railway station in Chongqing [J]. Journal Heating Ventilating and Airconditioning, 2017, 47(1): 91-96. (in Chinese)
- [7] 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: 509-524.
- [8] 赵建伟. 某地铁车站空调水系统节能控制系统设计及节能测试数据分析[J]. 暖通空调, 2017, 47(5): 9-14.  
ZHAO J W. Energy saving control system design and test data analysis of air conditioning water system in an underground railway station [J]. Journal Heating Ventilating and Airconditioning, 2017, 47(5): 9-14. (in Chinese)
- [9] 王晨宇, 李亚芬, 高学金, 等. 地铁站空调冷却水系统节能控制策略研究[J]. 建筑科学, 2017, 33(2): 102-106.  
WANG C N, LI Y F, GAO X J, et al. Energy-saving control strategies of subway station air conditioning cooling water system [J]. Building Science, 2017, 33(2): 102-106. (in Chinese)
- [10] KE M T, CHENG T C, WANG W P. Numerical simulation for optimizing the design of subway environmental control system [J]. Building and Environment, 2002, 37(11): 1139-1152.
- [11] WANG Y C, FENG H R, XI X Y. Monitoring and autonomous control of Beijing subway HVAC system for energy sustainability [J]. Energy for Sustainable Development, 2017, 39: 1-12.
- [12] FUKUYO K. Application of computational fluid dynamics and pedestrian-behavior simulations to the design of task-ambient air-conditioning systems of a subway station [J]. Energy, 2006, 31(5): 706-718.
- [13] 黄明才. 地铁车站设备管理用房通风空调运行优化[J]. 制冷与空调, 2018, 32(2): 169-174.  
HUANG M C. Optimization of ventilation and air



- conditioning system in subway station equipment room [J]. Refrigeration & Air Conditioning, 2018, 32(2): 169-174. (in Chinese)
- [14] 王凤艳. 地铁车站设备管理用房通风空调系统设计探讨[J]. 制冷与空调, 2014, 28(2): 141-143, 149.  
WANG F Y. Design of ventilation and air conditioning systems in the equipment management room of subway station[J]. Refrigeration and Air Conditioning, 2014, 28 (2) : 141-143, 149. (in Chinese)
- [15] 余珏, 李亮, 李晓锋. 基于现场实测的地铁站设备管理用房设备发热量计算方法研究[J]. 建筑科学, 2017, 33(8): 168-172.  
YU J, LI L, LI X F. Calculation method research on heat flux of management and equipment rooms in subway station based on field measurement [J]. Building Science, 2017, 33(8): 168-172. (in Chinese)
- [16] 陆耀庆. 实用供热空调设计手册(下册)[M]. 2版. 北京: 中国建筑工业出版社, 2007: 1496-1498.  
LU Y Q. Practical Heating and Air Conditioning Design Manual (2) [M]. Second Edition. Beijing: China Architecture & Building Press, 2007: 1496-1498.

(编辑 胡玥)