

文章编号: 1671-6612 (2019) 06-684-07

# 地铁车站站厅空调冷负荷影响因素分析

李婷婷 毕海权 王宏林

(西南交通大学机械工程学院 成都 610031)

**【摘要】** 目前地铁车站公共区域空调系统能耗较高,从空调系统能耗与空调负荷的关系入手,以影响地铁车站公共区域空调系统的主要环境因素为研究对象,利用 trnsys 软件建立了全封闭屏蔽门地铁车站站厅空调负荷与热环境基准模型,模拟出各试验条件下,地铁车站站厅公共区域全年空调季空调系统总能耗变化情况。利用 spss20.0 软件对模拟结果进行极差分析、方差分析比较各因素、水平的显著性,定量分析了显著性因素的显著程度。各因素显著性大小有助于地铁空调系统设计人员明确设计研究重点,并为地铁车站通风空调系统节能优化等研究提供必要的的数据支撑。

**【关键词】** 地铁车站;冷负荷;正交试验;方差分析。

中图分类号 U231.1 文献标识码 A

## Analysis on Influencing Factors of Air Conditioning Cooling Load in Metro Station Hall

Li Tingting Bi Haiquan Wang Honglin

(School of mechanical engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu, 610031)

**【Abstract】** At present, the energy consumption of air conditioning system in public area of metro station is in a high position. This paper starts with the relationship between energy consumption and air-conditioning load in air-conditioning system. The main environmental factors affecting the air conditioning system in public area of metro station are taken as the research object. Based on TRNSYS software, a benchmark model of air conditioning load and thermal environment of fully enclosed shielded door subway station hall is established. The change of total energy consumption of air conditioning system in public area of subway station hall during air conditioning season is simulated under various test circumstances. The simulation results were analyzed by range analysis and variance analysis using SPSS 20.0 software. The significance of each factor and level was compared, and the significance degree of significant factors was quantitatively analyzed. Significance of each factor is helpful for Metro air conditioning system designers to clarify the key points of design and research. Provide necessary data support for energy-saving optimization of ventilation and air-conditioning system in Metro Station.

**【Keywords】** Metro station; Cooling load; orthogonal test; variance analysis

## 0 引言

城市轨道交通系统车站空调系统正常运行期间为乘客提供舒适的候车环境,由于其运行时间长,且目前车站空调系统均按预测的远期客流量和最大通过能力进行设计<sup>[1]</sup>,导致其能耗较高,已成

为城市轨道交通站房能耗中的重要组成部分。在建筑结构确定的情况下,地铁地下车站大系统空调能耗基本由冷负荷决定。由负荷计算<sup>[2]</sup>方法可知,地铁车站站厅公共区域负荷受多种因素影响,是车站建筑系统在外扰(室外气象条件波动)和内扰(站

基金项目:国家重点研发计划先进轨道交通专项(2017YFB1201105)

作者简介:李婷婷(1994.11-),女,硕士研究生,E-mail: tt10232005@126.com

通讯作者:毕海权(1974.12-),男,博士研究生,教授,E-mail: bhquan@163.com

收稿日期:2019-05-20

厅内灯光、人员、设备等发热)综合作用下的系统输出<sup>[4]</sup>。由于负荷变化是由众多因素共同决定的复杂过程,即室外温湿度改变、室内人员变化等情况都会影响空调系统能耗。

为研究各环境因素对地铁车站大系统空调负荷的影响,本文采用数值模拟的方法计算不同环境条件下的空调系统能耗,利用正交试验法设计试验方案,并采用极差分析法和方差分析法对试验结果进行了分析,得出影响因素显著性排序,旨在为地铁车站空调系统节能研究提供建议。

## 1 试验方法

### 1.1 物理模型

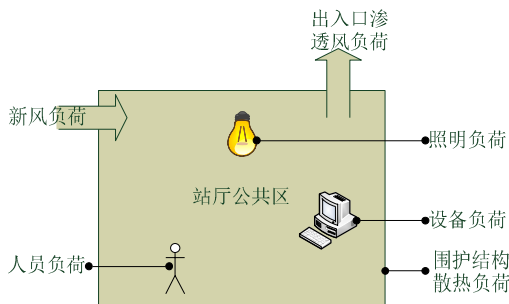


图 1 车站站厅负荷组成

Fig.1 Load Composition of Metro Station Hall

在地铁车站通风空调系统中,通常将站台、站厅层公共区通风空调系统称为大系统,设备管理用

房通风空调系统称为小系统。大系统空调负荷主要由 6 部分组成:人体散热、散湿负荷,围护结构散热、散湿负荷,照明负荷,新风负荷,出入口空气渗透负荷,车站公共区设备发热负荷。其中照明负荷和设备负荷基本不随时间变化而改变,人员负荷和新风负荷随客流变化较大。

本文模拟车站位于四川省成都市,属夏热冬冷地区。该站为采用屏蔽门系统的地下两层标准岛式站台车站。站厅层公共区长 385m,宽 35m,高 6.5m。空调季为 5 月 1 日~10 月 1 日,单日空调运行时间为 6:00~23:00,围护结构材料及热物理性能参数均按设计说明设定,模拟结果取空调季的空调系统整体能耗累加值。

### 1.2 正交试验方案

正交试验设计能在很多试验方案中挑选出代表性强的少数试验方案进行试验,并通过对这些少数试验方案的试验结果的分析,推断出最优方案。将正交试验法用于空调能耗影响因素的试验中,假定 3 个外部环境因素(室外空气温度、室外空气相对湿度、太阳辐射)、3 个室内热扰参数(人员数量、设备发热量、灯光发热量)等 6 个因素相互独立、互不影响。在各个影响因素中分别选取 3 水平,影响因素及水平取值见表 1。试验完成后,对试验结果进行统计分析时必须估计随机误差,故预留一列空白列作为误差项,该列的结果变化将完全来自于随机效应<sup>[5]</sup>。

表 1 影响因素及水平取值

Table 1 Influencing factors and level selection

水平 影响因素	室外空气温度 (℃)	室外空气相对湿度 (%)	太阳辐射 (W/m <sup>2</sup> )	客流变化(个)	设备发热量 (kW)	灯光发热量 (kW)
1		成都地区		北京地铁 1 号线	设备全开	灯光全开
2		北京地区		北京地铁 5 号线	设备半开	灯光半开
3		广州地区		北京地铁八通线	设备开 1/3	灯光开 1/3

客流变化情况参考王凯<sup>[6]</sup>统计分析的北京轨道交通线路客流时间分布特征图,分布选用北京地铁 1 号线、5 号线、八通线一天内客流变化情况作为不同水平;设备发热量、灯光发热量按站内设备和灯光全部开启、仅开启一半、仅开启 1/3 等 3 种情况作为 3 种不同水平,具体取值参考本文所选取的模拟车站系统设计说明。

选用 L18(3<sup>7</sup>)型的正交表,共有 18 组试验。由于选取因素较多,实地实验对于水平变化量不好控制,所得测试结果不准确继而影响后续分析结果。本文通过计算机软件 trnsys 进行车站全年逐时负荷模拟,可以有效计算出各组试验条件下的全年车站总负荷。模拟试验平台见下图,模拟结果见下表。

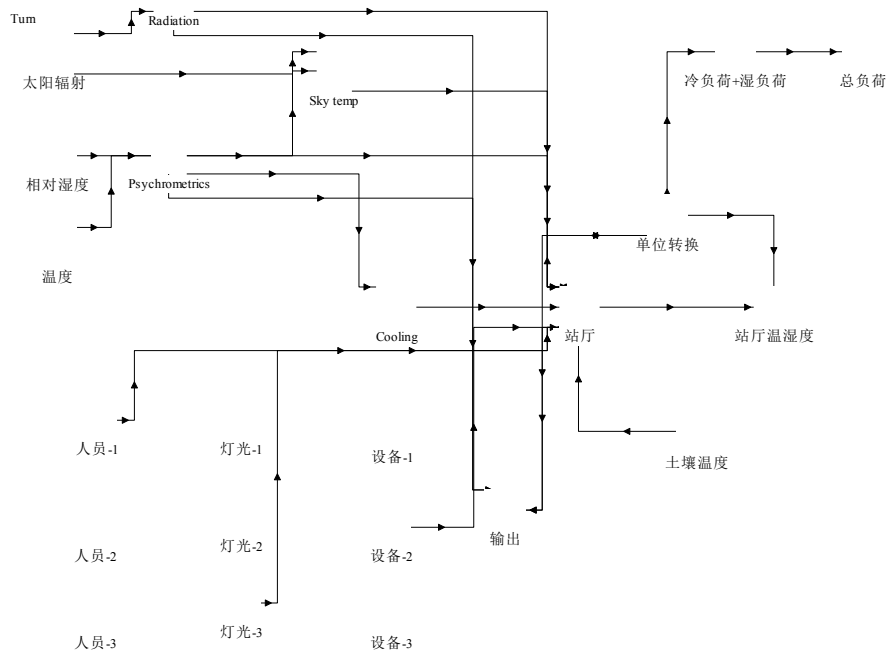


图2 仿真模拟试验平台

Fig.2 Numerical simulation test platform

表2 正交试验表

Table 2 Orthogonal experiment table

试验号	A 室外空气 温度 (°C)	B 室外空气 相对湿度 (%)	C 太阳辐射 强度 (W/m <sup>2</sup> )	D 客流变化 (个)	E 设备 发热量 (kW)	F 灯光 发热量 (kW)	G 空白	总负荷 (kW)
1	成都	成都	成都	北京地铁1号线	106.29	192.44	1	1656014
2	成都	北京	北京	北京地铁5号线	53.15	96.22	2	504033
3	成都	广州	广州	北京地铁八通线	35.43	64.15	3	312828.5
4	北京	成都	成都	北京地铁5号线	53.15	64.15	3	863817.1
5	北京	北京	北京	北京地铁八通线	35.43	192.44	1	434942.2
6	北京	广州	广州	北京地铁1号线	106.29	96.22	2	1600806
7	广州	成都	北京	北京地铁1号线	35.43	96.22	3	2985184
8	广州	北京	广州	北京地铁5号线	106.29	64.15	1	1333698
9	广州	广州	成都	北京地铁八通线	53.15	192.44	2	1291330
10	成都	成都	广州	北京地铁八通线	53.15	96.22	1	343090.8
11	成都	北京	成都	北京地铁1号线	35.43	64.15	2	836883.9
12	成都	广州	北京	北京地铁5号线	106.29	192.44	3	1091727
13	北京	成都	北京	北京地铁八通线	106.29	64.15	2	434805.2
14	北京	北京	广州	北京地铁1号线	53.15	192.44	3	1235021
15	北京	广州	成都	北京地铁5号线	35.43	96.22	1	818591.5
16	广州	成都	广州	北京地铁5号线	35.43	192.44	2	2081431
17	广州	北京	成都	北京地铁八通线	106.29	96.22	3	916011
18	广州	广州	北京	北京地铁1号线	53.15	64.15	1	2686422

### 3 结果分析

#### 3.1 极差分析

对于正交试验结果分析常用极差分析法或方差分析法, 极差分析法计算量较小、简单易懂, 但不能区分同一因素下各水平所对应的试验结果的差异是水平改变引起还是试验误差引起。方差分析

法能把因素水平的变化所引起的试验结果间的差异与误差的波动所引起的试验结果间的差异区分开, 并能给出可靠的数量估计<sup>[7]</sup>。本文分别采用两种方法对模拟结果进行分析, 比较各因素、水平的显著性。极差分析法所得计算结果如表 3 所示。

表 3 极差分析法结果

Table 3 Result of maximum difference method

因素	水平	数值	均值	极差 R
A 室外空气温度 (°C)	1	4744577.677	790762.9	1091583
	2	5387982.77	897997.1	
	3	11294076.19	1882346	
B 室外空气相对湿度 (%)	1	8364342.862	1394057	517292.3
	2	5260589.082	876764.8	
	3	7801704.802	1300284	
C 太阳辐射强度 (W/m <sup>2</sup> )	1	4726633.639	945326.7	410858.9
	2	8137113.685	1356186	
	3	6906875.258	1151146	
D 客流变化 (个)	1	9344316.665	1868863	1246695
	2	6693298.034	115549.7	
	3	3733007.883	622168	
E 设备发热量 (kW)	1	7033061.455	1172177	91024.72
	2	6923713.49	1153952	
	3	7469861.8	1244977	
F 灯光发热量 (kW)	1	7790465.972	1298411	220335.3
	2	7167716.522	1194619	
	3	6468454.252	1078076	

各因素的极差 R=各因素最大均值-各因素最小均值<sup>[8]</sup>。极差越大, 该因素对车站冷负荷的影响越大。则可将上述 6 个因素按影响冷负荷最大到最小排序为: D>A>B>C>F>E 即客流变化>室外空气温度>室外空气相对湿度>太阳辐射强度

>灯光发热量>设备发热量。其中, 设备发热量、灯光发热量的影响相对较小, 客流变化影响最为明显。

#### 3.2 方差分析

方差分析法所得计算结果如表 4 所示。

表 4 方差分析法结果

Table 4 Result of variance analysis method

源	因变量: 总负荷				
	III 型平方和	自由度 df	均方	F	显著性
校正模型	10191088187729.840 <sup>a</sup>	14	7.28E+11	60.961	0.003001744
截距	2.55E+13	1	2.55E+13	2135.972	0.000022302
室外空气温度	4.34E+12	2	2.17E+12	181.894	0.000739705
室外空气相对湿度	9.12E+11	2	4.56E+11	38.167	0.007353434

续表4 方差分析法结果

源	III型平方和	因变量: 总负荷		F	显著性
		自由度 df	均方		
太阳辐射强度	2.70E+11	2	1.35E+11	11.321	0.040019685
客流变化	4.45E+12	2	2.23E+12	186.398	0.000713270
设备发热量	2.78E+10	2	1.39E+10	1.166	0.422146533
灯光发热量	1.46E+11	2	7.29E+10	6.105	0.087592292
空白	4.00E+10	2	2.00E+10	1.677	0.324452360
误差	3.58E+10	3	1.19E+10		
总计	3.57E+13	18			
校正的总计	1.02E+13	17			

a.R 方=.996 (调整 R 方=.980)

从上表可知, 室外空气温度、客流变化对总负荷影响都较为显著, 但其影响程度大小有较大差异。按影响作用的大小排序依次为: 客流变化 ( $P=0.000713$ ,  $P < 0.05$ ) > 室外空气温度 ( $P=0.000739$ ,  $P < 0.05$ ) > 室外空气相对湿度 ( $P=0.00735$ ,  $P < 0.05$ ) > 太阳辐射强度 ( $P=0.04$ ,  $P < 0.05$ )。而设备发热量  $P=0.422$ , 灯光发热量

$P=0.087$ , 均大于 0.05, 可见设备发热量、灯光发热量对总负荷不具有显著影响。

正交试验中, 除考虑各因素影响车站空调系统能耗的显著性外, 还考虑单个因素各水平间对影响空调系统能耗的显著性。本文主要针对室外空气温度、人员数量、太阳辐射等 3 个因素介绍, 如下表所示。

表5 配对比较表 (室外空气温度)

Table 5 Matched comparison (Outdoor air temperature)

(I)室外空气温度	因变量: 总负荷				95%置信区间		
	均值差值(I-J)	标准 误差	Sig.	95%置信区间			
				下限	上限		
LSD	成都	北京	-1.07E+05	6.31E+04	0.1877466	-3.08E+05	9.35E+04
		广州	-1091583.0859*	6.31E+04	0.0004207	-1.29E+06	-8.91E+05
	北京	成都	1.07E+05	6.31E+04	0.1877466	-9.35E+04	3.08E+05
		广州	-984348.8860*	6.31E+04	0.0005722	-1.19E+06	-7.84E+05
	广州	成都	1091583.0859*	6.31E+04	0.0004207	8.91E+05	1.29E+06
		北京	984348.8860*	6.31E+04	0.0005722	7.84E+05	1.19E+06

从表3可以看出, A3 均值最大(11294076.19), 且  $A3 > A2 > A1$ ; 从表5可以看出, A2、A1 之间不存在显著性差异 ( $P=0.1877$ ,  $P > 0.05$ )。A3 与

A2 之间有显著性差异 ( $P=0.00042$ ,  $P < 0.05$ )、A3 与 A1 之间有显著性差异 ( $P=0.000572$ ,  $P < 0.05$ )。

表6 配对比较表 (太阳辐射)

Table 6 Matched comparison (solar radiation)

(I)太阳辐射强度	因变量: 总负荷				95%置信区间		
	均值差值(I-J)	标准 误差	Sig.	95%置信区间			
				下限	上限		
LSD	成都	北京	-292410.9801*	6.31E+04	0.01892279	-4.93E+05	-9.16E+04
		广州	-8.74E+04	6.31E+04	0.26011092	-2.88E+05	1.13E+05
	北京	成都	292410.9801*	6.31E+04	0.01892279	9.16E+04	4.93E+05
		广州	205039.7379*	6.31E+04	0.04749079	4.26E+03	4.06E+05
	广州	成都	8.74E+04	6.31E+04	0.26011092	-1.13E+05	2.88E+05
		北京	-205039.7379*	6.31E+04	0.04749079	-4.06E+05	-4.26E+03

从表3可以看出,C2均值最大(8137113.685),且 $C2>C3>C1$ ;从表6可以看出,C1、C3之间不存在显著性差异( $P=0.26, P>0.05$ )。C1与C2

之间有显著性差异( $P=0.0189, P<0.05$ ),C2与C3之间有显著性差异( $P=0.04749, P<0.05$ )。

表7 配对比较表(人员数量)

Table 7 Matched comparison (number)

(I)客流变化		均值差值(I-J)	标准 误差	Sig.	95%置信区间	
					下限	上限
北京地铁1号线	北京地铁5号线	717838.7991*	6.31E+04	0.00145654	5.17E+05	9.19E+05
	北京地铁八通线	1211220.4908*	6.31E+04	0.00030864	1.01E+06	1.41E+06
LSD 北京地铁5号线	北京地铁1号线	-717838.7991*	6.31E+04	0.00145654	-9.19E+05	-5.17E+05
	北京地铁八通线	493381.6917*	6.31E+04	0.00435319	2.93E+05	6.94E+05
北京地铁八通线	北京地铁1号线	-1211220.4908*	6.31E+04	0.00030864	-1.41E+06	-1.01E+06
	北京地铁5号线	-493381.6917*	6.31E+04	0.00435319	-6.94E+05	-2.93E+05

因变量:总负荷

从表3可以看出,D1均值最大(344316.665),且 $D1>D2>D3$ ;从表7可以看出,D3、D2、D1之间均存在显著性差异( $P=0.0014, P=0.0003, P=0.0043, P<0.05$ )。

#### 4 结论

地铁车站空调系统作为地铁车站的用电大户,其能耗的影响因素众多,但缺乏对影响因素对空调系统能耗影响显著性大小的定量研究。经理论分析及模拟试验,本文形成以下结论:

(1) 各类环境因素对车站站厅负荷按影响作用的大小排序依次为:客流变化( $P=0.000713, P<0.05$ )>室外空气温度( $P=0.000739, P<0.05$ )>室外空气相对湿度( $P=0.00735, P<0.05$ )>太阳辐射强度( $P=0.04, P<0.05$ )。而设备发热量、灯光发热量对总负荷不具有显著影响。

(2) 从单个因素各水平之间对影响总负荷的显著性分析,可以看出:

①单因素中并不是每个水平之间都具有显著性:如室外空气温度、太阳辐射等因素对总负荷有显著影响,但其中各水平间并不具有显著性差异;

②该因素影响总冷负荷具有较高的显著性,则其水平之间的显著性较为明显;该因素影响空调能耗的显著性较弱,则其水平之间的显著性不明显(或没有显著性):在本文所选取的模拟工况下讨论的6个因素中,除去设备发热量、灯光发热量这两个对冷负荷没有显著性影响的因素后,在其余4个因素中,客流变化这一因素对冷负荷的影响最

大,太阳辐射这一因素对空调能耗的影响最小。对两个因素各水平间的成对比较发现,客流变化各水平间的显著性( $P=0.00145654, P=0.00030864, P=0.00435319, P<0.05$ )高于太阳辐射各水平间的显著性( $P=0.0189, P=0.04749, P<0.05$ )。

本文通过应用 trnsys 软件,以成都地区采用屏蔽门系统的地下两层标准岛式站台车站为基准模型,利用正交试验法确定了试验方案后,对影响地铁车站站厅公共区域空调系统能耗的6项主要因素处于不同水平下的空调系统能耗情况进行模拟,并对模拟结果采用极差分析、方差分析法进行了显著性分析,定量分析了上述因素对地铁车站站厅公共区域空调系统能耗的影响程度,为实际工程应用中合理监测环境参数、节能优化重点等工作提供一定参考。

#### 参考文献:

- [1] GB 50157-2013,地铁设计规范[M].北京:中国建筑工业出版社,2014.
- [2] 张伟捷,吴金顺,魏一然,等.基于正交实验法的建筑冷负荷影响因素分析[J].暖通空调,2006,36(11):77-80.
- [3] 彭程.浅谈城市轨道交通地下车站通风空调系统的负荷分析[J].科技信息,2011,(13):363-364.
- [4] 何绍明.浅谈地铁车站空调负荷特性[J].暖通空调,2007,37(8):125-127.
- [5] 张玉军,莫志江.文献中正交试验的常见问题分析和解决方法[J].中国现代应用药学,2013,30(6):696-700.
- [6] 王凯.北京地铁客流特征分析[J].Management

- Science&engineering, 2014,3(1):51-56.
- [7] 李艳玲,范艳花,陶偌偈.SPSS 16.0 软件在化学正交试验中的应用[J].化学教学,2011,(6):17-19.
- [8] 中国科学院数学研究所统计组.常用数理统计方法[M].北京:科学出版社,1973.
- [9] 张伟捷,吴金顺,魏一然,等.基于正交试验法的建筑冷负荷影响因素分析[J].暖通空调,2006,36(11):77-80.
- [10] 郝拉娣,张娴,刘琳.科技论文中正交试验结果分析方法的使用[J].编辑学报,2007,(5):340-341.

### (上接第 668 页)

- [11] 华高英,李磊,南化祥,等.城市环隧全横向排烟模式的烟气控制分析[J].消防科学与技术,2014,33(1):21-25.
- [12] 朱江.综述城市地下环形隧道及其设计要点[J].特种结构,2011,28(6):79-83.
- [13] 刘力力.公路隧道通风系统的节能设计及应用[J].桥隧工程,2010,(2):48-50.
- [14] 王影.城市特长水下公路隧道组合式通风方案研究[D].成都:西南交通大学,2018.
- [15] 赵驰.城市轨道交通综合节能管理系统的设计与实现[D].广州:华南理工大学,2014.
- [16] 陈艳超.多种能量综合利用的公路隧道自然通风系统仿真及实验分析研究[D].西安:长安大学,2016.
- [17] 刘易家.高速公路隧道照明节能和通风联动研究[D].广州:华南理工大学,2018.
- [18] 吴冬英.公路隧道的通风设计与节能简析[J].黑龙江交通科技,2018,(12):179-181.
- [19] 杨超,王志伟.公路隧道通风技术现状及发展趋势[J].地下空间与工程学报,2011,7(4):820-823.
- [20] 朱江.综述城市地下环形隧道及其设计要点[J].特种结构,2011,28(6):79-83.

### (上接第 678 页)

度。因此,本文采用 CFD 模拟技术手段,通过数值模拟结果,客观评价办公空间内的气流组织,提出改善措施及意见,提高室内人员的舒适性。

### 参考文献:

- [1] 丁伟翔,刘春林,刘红梅.基于正交设计的不同送风参数对室内气流组织和舒适性影响的模拟研究[J].建筑节能,2018,46(11):51-56.
- [2] 徐小林,李百战,罗明智.室内热湿环境对人体舒适性的影响分析[J].制冷与空调,2004,(4):55-58.
- [3] GB 50736-2012,民用建筑供暖通风与空气调节设计规范[S].北京:中国建筑工业出版社,2012.
- [4] 丁伟翔,刘秀会,金羽佳.基于 Fluent 的某超市空调工况下室内气流组织模拟[J].建筑热能通风空调,2018,37(9):60-63.