

地铁车辆空调系统能耗计算平台搭建

王彦鲁 张笑慰 刘忠庆 毛红梅 王永鏢

(中车青岛四方车辆研究所有限公司, 266031, 青岛//第一作者, 工程师)

摘要 为实现地铁车辆空调系统能耗的预测与评估, 以重庆地铁6号线第45列列车的Tc1车和Mp1车为研究对象, 搭建了地铁车辆空调系统能耗计算平台, 并详细介绍了计算平台搭建的思路和方法。通过设计正交试验和仿真计算得到空调系统能耗, 结合回归分析总结能耗关系式, 使用Matlab软件进行编程并搭建计算平台进行能耗计算, 并把地铁车辆空调系统能耗计算平台的计算值与实测值进行了对比, 计算结果误差在15%以内。该平台对地铁车辆空调系统能耗的预估具有指导意义。

关键词 地铁车辆; 空调系统; 能耗预估; 计算平台

中图分类号 U270.38⁺3

DOI: 10.16037/j.1007-869x.2020.10.024

Construction of Energy Consumption Calculation Platform for Metro Vehicle Air Conditioning System

WANG Yanlu, ZHANG Xiaowei, LIU Zhongqing, MAO Hongmei, Wang Yongbiao

Abstract In order to predict and evaluate the energy consumption of metro vehicle air conditioning system, the Tc1 and Mp1 cars of the 45th train on Chongqing Metro Line 6 are taken as the research objects, a computing platform for energy consumption of metro vehicle air conditioning system is established, the platform construction idea and method are introduced in detail. Then, through the design of orthogonal experiment and simulation calculation, the consumption of metro vehicle air conditioning system is obtained. Then, the Matlab software is used for programming and a computing platform is set up to calculate the energy consumption energy consumption combined with the regression analysis to summarize the energy consumption relationship. On this basis, the calculated value of the energy consumption computing platform for air-conditioning system is compared with the measured value, the error of the calculated results is less than 15%. Thus, the platform proves to have the guiding significance for energy consumption prediction of metro vehicle air conditioning system.

Key words metro vehicle; air conditioning system; energy consumption; calculation platform

Author's address CRRC Qingdao Sifang Rolling Stock Research Institute Co., Ltd., 266031, Qingdao, China

目前, 在城市轨道交通列车设计阶段对车辆空调系统全年能耗的预测尚没有成熟的方法。本文以重庆地铁6号线为例, 对车辆空调系统能耗进行仿真计算, 并搭建空调系统能耗计算平台, 从而实现设计阶段对地铁车辆空调系统能耗的预估。

1 地铁车辆空调系统全年能耗计算方法

在地铁车辆运行过程中, 车外温度 X_1 、车外相对湿度 X_2 、太阳辐射强度 X_3 、载客人数 X_4 、新风量 X_5 、车体传热系数 X_6 及车内设定温度 X_7 等影响空调系统能耗。计算空调系统能耗关键在于确定能耗与各变量之间的关系。

将全年分为夏季、过渡季和冬季, 关系式的形式也相应分为制冷时段空调每小时能耗 Y_1 、通风时段空调每小时能耗 Y_2 和采暖时段空调每小时能耗 Y_3 。

为判断某一时段处于制冷时段、通风时段还是采暖时段, 需要加入允许制冷最低车外温度 T_1 和允许采暖最高车外温度 T_2 两个阈值。当 $X_1 > T_1$, 则判定为制冷时段, 利用 Y_1 对应的关系式计算该小时能耗; 当 X_1 介于 T_1 与 T_2 之间, 则判定为通风时段, 利用 Y_2 对应的关系式计算该小时能耗; 当 $X_1 < T_2$, 则判定为采暖时段, 利用 Y_3 对应的关系式计算该小时能耗。最后, 将计算所得 Y_1 、 Y_2 、 Y_3 分别累加得到 $Y_{1,\text{sum}}$ 、 $Y_{2,\text{sum}}$ 、 $Y_{3,\text{sum}}$ 。则该节车辆空调系统全年能耗计算公式为:

$$Y_{\text{sum}} = Y_{1,\text{sum}} + Y_{2,\text{sum}} + Y_{3,\text{sum}} \quad (1)$$

2 制冷时段空调每小时能耗关系式的确定

空调系统全年能耗计算重点在夏季, 即确定制冷时段空调每小时能耗 Y_1 与 X_1 、 X_2 、 X_3 、 X_4 、 X_5 、 X_6 以及 X_7 之间的关系成为关键。

空调系统在制冷时段可能处于两种情况: 一是车内热负荷较低时, 空调系统在通风与半冷状态之

间切换;二是车内热负荷较高时,空调系统在半冷与全冷状态之间切换。

为确定 Y_1 对应的关系式,以 Y_1 为因变量, X_1 至 X_7 为 7 个自变量,每个自变量设置 3 个水平,在 AMESim 搭建的计算模型上进行多组工况的计算并得到相应制冷时段的空调小时能耗 Y_1 ,将数据进行回归分析,得到关系式。

2.1 研究对象

选取重庆地铁 6 号线第 45 列列车的 Tc1 车和

Mp1 车作为研究对象。每辆车安装制冷空调机组 2 台,每台空调机组名义工况下制冷量为 35 kW。空调机组采用单冷型式、顶置式安装。列车采用 6 辆编组,其中 Tc1 车为有司机室的拖车,AW2(满座+6 人/m² 额定载荷)条件下定员为 226 人;Mp1 车为带受电弓的动车,AW2 条件下定员为 254 人。

2.2 计算模型

本文采用 AMESim 软件建立车辆空调系统夏季能耗计算模型^[1]。图 1 为该模型的参数化建模过程。

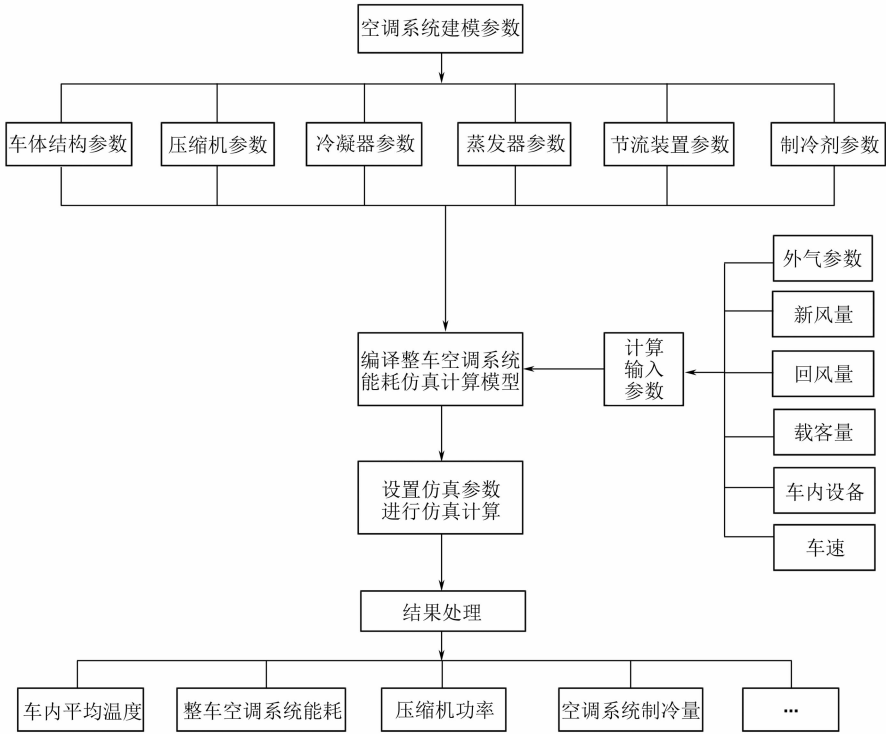


图 1 地铁车辆空调系统夏季能耗参数化建模过程图

为验证模型的准确性,参照文献[2-3]对车辆进行了静止和运行试验,采用能耗测试仪进行数据采集。结果对比如表 1 所示。

表 1 空调系统夏季能耗模拟计算及测试结果对比表

序号	车厢	工况	能耗计算值/ (kW·h)	能耗实测值/ (kW·h)	误差/ %
1	Tc1	24℃/50%载客负载	16.50	15.82	4.30
2	Tc1	26℃/100%载客负载	18.26	18.58	1.72
3	Tc1	2015-07-23 线路运行	130.88	121.27	7.92
4	Mp1	24℃/50%载客负载	16.53	17.31	4.51
5	Mp1	26℃/100%载客负载	25.28	25.99	2.73
6	Mp1	2015-07-23 线路运行	210.92	224.81	6.18

注:表中“2015-07-23 线路运行”试验是随车进行测试的,车辆为正常载客

表 1 中,序号 1、2、4、5 工况为静止试验工况,能耗测试值为车内状态稳定后 60 min 数据,表中的载

客负载按 AW2 计算;序号 3、6 工况为运行试验工况,车辆正常运行,能耗值为空调系统整天能耗值。

由表 1 可知,计算模型具有较高的精度,可用来计算车辆空调系统夏季能耗。

2.3 正交试验设计及计算结果

正交实验法是利用排列整齐的正交表来对试验进行整体设计、综合比较和统计分析。该试验设计法是从大量的试验点中挑选适量的具有代表性的点,利用已经造好的表格——正交表来安排试验并进行数据分析的方法。正交表能够在影响因素变化范围内均衡抽样,使每次试验都具有较强的代表性。

为使得计算工况能够处于通风-半冷状态或者半冷-全冷状态,自变量的水平应该合理设置。每个

自变量设置 3 个水平,需要计算 4 374 个工况,这显然不现实,因此使用正交实验法来处理。

利用正交表 $L_{18}(3^7)$ 来安排正交试验。正交试验工况安排及计算结果详见表 2。

表 2 正交试验工况安排及计算结果

序号	$X_1/^\circ\text{C}$		$X_2/\%$	$X_3/(\text{W}/\text{m}^2)$	$X_4/\text{人}$		$X_5/(\text{m}^3/\text{h})$	$X_6/(\text{W}/(\text{m}^2\cdot\text{K}))$	$X_7/^\circ\text{C}$	$Y_1/(\text{kW}\cdot\text{h})$	
	T-B	B-Q			T-B	B-Q				T-B	B-Q
1	24	26	50	0	0	180	1 000	1	25	2.08	14.77
2	24	26	70	300	40	220	2 000	2	26	4.13	17.42
3	24	26	90	600	80	260	3 000	3	27	8.19	21.67
4	27	29	50	0	40	220	2 000	3	27	5.36	18.73
5	27	29	70	300	80	260	3 000	1	25	12.44	25.20
6	27	29	90	600	0	180	1 000	2	26	3.02	18.49
7	30	32	50	300	0	180	3 000	2	27	5.70	20.72
8	30	32	70	600	40	220	1 000	3	25	10.63	24.87
9	30	32	90	0	80	260	2 000	1	26	15.92	27.30
10	24	26	50	600	80	260	2 000	2	25	7.57	19.21
11	24	26	70	0	0	180	3 000	3	26	2.05	14.76
12	24	26	90	300	40	220	1 000	1	27	4.83	17.76
13	27	29	50	300	80	260	1 000	3	26	9.26	21.50
14	27	29	70	600	0	180	2 000	1	27	2.00	17.69
15	27	29	90	0	40	220	3 000	2	25	10.06	25.54
16	30	32	50	600	40	220	3 000	1	26	10.55	24.49
17	30	32	70	0	80	260	1 000	2	27	11.95	25.38
18	30	32	90	300	0	180	2 000	3	25	9.75	26.73

注: T-B 为通风-半冷正交试验工况;B-Q 为半冷-全冷正交试验工况; X_2 、 X_3 、 X_5 、 X_6 、 X_7 列在通风-半冷正交试验工况安排中和半冷-全冷正交试验工况安排中相同

2.4 回归分析

利用 Excel 中的“数据分析”工具库进行数据的

回归分析,置信度选择默认的 95%。对通风-半冷和半冷-全冷正交试验进行回归分析,结果见表 3。

表 3 两种正交试验工况下的回归参数统计表

变量	两种正交试验工况下的回归参数取值					
	通风-半冷正交试验			半冷-全冷正交试验		
	系数	t 统计量	P 值	系数	t 统计量	P 值
X_1	1.097 049	21.402 060	1.63×10^{-23}	1.219 444	21.213 450	2.28×10^{-18}
X_2	0.062 888	8.179 122	4.53×10^{-10}	0.073 799	9.521 190	4.02×10^{-10}
X_3	0.000 186	0.763 525	0.449 630	0.000 117	0.486 548	0.630 505
X_4	0.092 839	24.149 020	1.82×10^{-25}	0.056 458	13.095 320	3.28×10^{-13}
X_5	0.000 602	3.432 819	0.001 402	0.000 801	4.643 765	7.93×10^{-5}
X_6	0.055 953	2.022 161	0.049 883	0.117 345	0.756 959	0.455 630
X_7	-1.208 250	-6.886 720	2.7×10^{-8}	-1.167 660	-7.532 220	4.21×10^{-8}

由表 3 可知, P 值为回归系数 t 统计量的 P 值。 X_1 、 X_2 、 X_4 、 X_5 、 X_7 的 t 统计量的 P 值远小于显著性水平 0.05,因此该 5 项的自变量与因变量相关。而其他两项 X_3 、 X_6 的 t 统计量的 P 值远大于前 5 项的 t 统计量的 P 值,如此大的 P 值说明这些项的自变量与因变量不存在相关性,因此这些项的回归系数不显著。由此可知, X_1 、 X_2 、 X_4 、 X_5 、 X_7 对地铁车辆空调系统制冷能耗影响显著, X_3 和 X_6 对空调系统制冷能耗影响不明显。从理论角度分析,这主要是由于:

1) 太阳辐射到车体表面,深色车体吸收约 70% 的太阳能,浅色车体吸收约 50% 的太阳能。车体吸收太阳能后表现为车体外壁温度升高,这样也会使得车体外壁更多向车外空气散热,因此太阳辐射强度增加对车内热负荷的贡献十分有限。

2) 在空调制冷季,车内与车外温差较小,因此 X_6 对车内热负荷的贡献也不大,故而对空调系统制冷能耗影响不明显。

根据表 3 可得到制冷时段空调系统每小时能耗 Y_1 的关系式。当空调系统在通风-半冷状态下:

• 97 •

$$Y_1 = 0.046\ 971 + 1.097\ 049\ X_1 + 0.062\ 888\ X_2 + 0.000\ 186\ X_3 + 0.092\ 839\ X_4 + 0.000\ 602\ X_5 + 0.055\ 953\ X_6 - 1.208\ 250\ X_7 \quad (2)$$

当空调系统在半冷-全冷状态下：

$$Y_1 = -3.208\ 280 + 1.219\ 444\ X_1 + 0.073\ 799\ X_2 + 0.000\ 117\ X_3 + 0.056\ 458\ X_4 + 0.000\ 801\ X_5 + 0.117\ 345\ X_6 - 1.167\ 660\ X_7 \quad (3)$$

3 空调系统能耗计算平台的搭建

3.1 通风时段和采暖时段空调系统每小时能耗关系式确定

通风时段空调的能耗即送风机的能耗。被研究车辆的空调系统共包含 4 个送风机。每个送发风机的额定功率为 0.5 kW,则通风时段空调小时能耗 Y_2 为 2 kW·h。

采暖时段空调系统能耗为送风机能耗与电加热设备能耗之和。根据文献[4],计算 Y_3 ：

$$Y_3 = 2 + \left(X_6 \cdot F \cdot \frac{|X_7 - X_1|}{1\ 000} + X_5 \cdot \rho \cdot C_p \cdot \frac{|X_7 - X_1|}{3\ 600} - n \cdot X_4 \cdot q \right) \cdot t \quad (4)$$

式中：

F ——车体传热面积,m²；

ρ ——空气密度,kg/m³；

C_p ——空气比热,kJ/(kg·K)；

n ——旅客群集系数,取 0.955；

q ——平均每人散发的热量,kW；

表 4 空调系统能耗计算值与实测值对比分析

日期	Tc1 车			Mp1 车		
	能耗实测值/(kW·h)	能耗计算值/(kW·h)	误差/%	能耗实测值/(kW·h)	能耗计算值/(kW·h)	误差/%
2015 年 6 月	1 844.46	1 729.09	6.25	3 562.99	3 490.10	2.05
2015 年 7 月	2 748.86	3 000.88	9.17	5 490.89	5 607.69	2.13
2015 年 8 月	2 736.02	2 818.80	3.03	4 889.03	5103.76	4.39
2015 年 9 月	1 691.98	1 440.94	14.84	2 819.21	3 182.71	12.89
2015 年 10 月	1 031.40	980.28	4.96	1 621.78	1 494.24	7.86
2015 年 11 月	791.25	723.07	8.62	838.83	739.69	11.82
2015 年 12 月	811.45	794.93	2.04	678.80	776.68	14.42
2016 年 1 月	1 054.33	1 034.58	1.87	1 151.91	998.29	13.34
2016 年 2 月	848.39	875.38	3.18	876.11	860.86	1.74

由表 4 可知,空调系统能耗计算值与实测值间的差值在 15% 以内,计算结果与试验结果吻合较好,表明该计算平台基本可以实现设计阶段对地铁车辆空调系统能耗的预估。

t ——时间,取 1 h。

3.2 计算平台的搭建

利用 Matlab 软件进行编程,搭建能耗计算平台。参数设置如图 2 所示。



图 2 空调能耗计算平台参数设置界面

4 空调系统能耗计算结果分析

在重庆地铁 6 号线第 45 列列车 Tc1 车和 Mp1 车上安装能耗测试仪,对其空调系统进行了能耗测试。

在计算平台中依次输入计算条件,将空调系统的能耗计算值折算为地铁实际运行天数下的能耗,并与试验值进行对比,结果详见表 4。其中,载客人数采用实测人数的平均值;列车出入库时间根据车辆实际运行统计结果进行设置,每日 06:00 出库,22:00 回库。

5 结语

本文以重庆地铁 6 号线第 45 列列车 Tc1 车和 Mp1 车为例搭建了空调系统能耗计算平台。该平台

(下转第 104 页)

4 结论

本文以西安某地铁车站为研究案例,通过数值模拟和施工现场监测两种方法研究半铺盖法施工的地铁车站基坑及其围护结构在开挖过程中的变形规律,得出如下结论:

1) 围护结构的现场监测是判断铺盖体系是否处于稳定状态的有效方法。监测数据显示中间临时立柱桩的桩顶水平位移最大值为 6.2 mm,最大沉降值为 6.3 mm,数据表明该车站基坑开挖中,铺盖体系各个部位的变形都在预警范围内,说明基坑一直处于安全稳定状态。结合具体的施工环境,狭小的施工空间和恶劣的暴雨天气对于基坑的变形影响比较大。

2) 数值模拟显示,在基坑开挖中地下地下连续墙的位移最大值随着基坑深度由 0.31 mm 增加至 13.1 mm;基坑周边土体的沉降曲线由近及远呈“倒锅型”,基坑开挖至 13 m 和 19 m 处基坑周边地表的沉降变化比较明显,距离地下连续墙 4.6 m 处地表沉降达到最大值 8.914 mm;基坑底部隆起值在开挖至 23 m 处达到最大值 5.156 mm。数值模拟可以分析在基坑不同开挖深度铺盖体系的变形以及基坑各个部位的稳定性,对于查找基坑的安全隐患很有效。

通过数值模拟计算结果与现场监测数据对比分析,数值计算值与现场监测值的变化曲线整体上

(上接第 98 页)

台的能耗计算值与实测值间的差值在 15% 以内,在目前地铁车辆空调系统全年能耗难以测试和计算的情况下,该计算平台的建立将对地铁车辆空调系统全年能耗的预估有一定的指导意义。

该计算平台只适用于重庆地铁 6 号线所用的空调系统,当空调系统参数发生改变时,该计算平台便不再适用。因此对于一个新的空调系统,只能重新搭建计算平台,实际上这个过程也保证了计算平台的精度。搭建一个能够针对所有地铁车型、所有空调机组的列车空调系统能耗预测平台,是今后的努力方向。

参考文献

- [1] 王彦鲁,刘忠庆,张笑慰,等. 数值计算地铁车辆空调系统全年能耗[J]. 铁道车辆, 2019(5): 1.
- [2] CENELEC. 铁路应用-城市和市郊轨道车辆空调-第 1 部分:舒适

较为吻合,模型建立的困难与地质的不均性是导致结果出现差异性的主要原因。本文的研究方法和结论可为地铁基坑施工和设计提供参考。

参考文献

- [1] 李化. 地铁车站明盖挖结合施工基坑稳定性研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2010.
- [2] 罗耀武,凌道盛. 环形超深基坑围护结构受力变形特性分析[J]. 岩土力学, 2011(2): 617.
- [3] 负永峰,吴禄源,袁超,等. 西安地铁四号线五路口站深基坑围护结构施工技术[J]. 铁道建筑, 2015(5): 78.
- [4] 刘俊伟,汤洪霞,皮景坤,等. 某地铁车站深基坑施工监测分析[J]. 工业建筑, 2014(8): 121.
- [5] 宋顺龙,章晓鹏,李文波. 新型盖挖法在上海地铁车站的应用[J]. 都市快轨交通, 2009(6): 71.
- [6] 赵伯霖. 基于 FLAC3D 地铁车站深基坑变形规律研究[D]. 石家庄:河北工程大学, 2011.
- [7] 丁勇春. 软土地区深基坑施工引起的变形及控制研究[D]. 上海:上海交通大学, 2009.
- [8] 成峰,张远芳,那姝姝,等. 北京地区深基坑变形特性研究[J]. 工业建筑, 2012(增刊 1): 361.
- [9] 刘长宝,邹金杰,彭加强. 既有地铁隧道上方明挖基坑施工方案分析[J]. 城市轨道交通研究, 2019(6): 133.
- [10] 李化. 地铁车站明盖挖结合施工基坑稳定性研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2010.
- [11] 郭洋洋,有智慧,王正振,等. 明挖与盖挖结合法对地铁车站基坑支护结构变形影响研究[J]. 施工技术, 2019(13): 94.

(收稿日期:2019-10-06)

度参数:EN 14750-1:2006[S]. Brussels:CENELEC, 2006.

- [3] CENELEC. 铁路应用-城市和市郊轨道车辆空调-第 2 部分:型式试验:EN 14750-2:2006[S]. Brussels:CENELEC, 2006.
- [4] 中华人民共和国铁道部. 铁路空调客车热工计算方法:TB/T 1957-91[S]. 北京:中国铁道出版社, 1992.
- [5] 陆强,杨美传,蒲思培. 列车空调制冷系统的仿真与分析[J]. 制冷与空调, 2011(5): 471.
- [6] 梁兆惠. 空调制冷系统性能模拟与能效标准的研究[D]. 天津:天津大学, 2003.
- [7] 吴业正,朱瑞琪,曹小林,等. 制冷原理及设备[M]. 西安:西安交通大学出版社, 2010.
- [8] 穆广友,臧建彬. 地铁车辆空调系统设计要点分析[J]. 城市轨道交通研究, 2008(11): 29.
- [9] CHRISTIAN D, WALTER S, MARTIN K. A modular thermal simulation tool for computing energy consumption of HVAC units in rail vehicles[J]. Applied Thermal Engineering, 2015, 78: 616.

(收稿日期:2018-12-28)