

文章编号: 1671-6612 (2022) 03-390-06

# 动车检查库库内热源特性实测与分析

邹磊<sup>1</sup> 于靖华<sup>1</sup> 郭辉<sup>2</sup> 毕庆焕<sup>2</sup>

田利伟<sup>2</sup> 赵金罡<sup>1</sup> 曾现宏<sup>1</sup> 宋一<sup>1</sup> 冷康鑫<sup>1</sup>

(1. 华中科技大学建筑环境与能源应用工程系 武汉 430074;

2. 中铁第四勘察设计院集团有限公司 武汉 430063)

**【摘要】** 检查库内的热源特性情况关系到动车检查库内通风系统的设计和热环境的改善。对夏热冬冷地区和夏热冬暖地区五个动车检查库开展了库内热源得热测试与调研, 结果表明: 实地测试到库内总得热的最大值达  $69.5\text{W}/\text{m}^2$ 。列车空调系统散热和太阳辐射是库内得热的主要来源, 列车空调系统散热单位面积散热强度可达  $28.8\sim 31\text{W}/\text{m}^2$ , 太阳辐射单位面积散热强度可达  $24.2\sim 35.2\text{W}/\text{m}^2$ 。设计工况下库内白天得热在  $78.4\sim 96.4\text{W}/\text{m}^2$ , 在夏热冬冷和夏热冬暖地区间差异不大。

**【关键词】** 动车检查库; 测试; 热环境; 热源特性; 太阳辐射

中图分类号 TU834 文献标识码 A

## Test and Analysis of Heat Source Characteristics in EMU Inspection Workshop

Zou Lei<sup>1</sup> Yu Jinghua<sup>1</sup> Guo Hui<sup>2</sup> Bi Qinghuan<sup>2</sup>

Tian Liwei<sup>2</sup> Zhao Jingang<sup>1</sup> Zeng Xianhong<sup>1</sup> Song Yi<sup>1</sup> Leng Kangxin<sup>1</sup>

(1. Department of Building Environment and Energy Engineering, Huazhong University of Science and Technology,

Wuhan, 430074; 2. China Railway Siyuan Survey and Design Group Co., Ltd, Wuhan, 430063)

**【Abstract】** The characteristics of heat source in the EMU inspection workshop are related to the design of ventilation system and the improvement of thermal environment. In this paper, five EMU inspection workshops were tested and investigated in hot summer and cold winter areas and hot summer and warm winter areas. The results show that the maximum value of total heat gain is  $69.5\text{W}/\text{m}^2$ . Heat dissipation of train air conditioning system and solar radiation are the main source of heat gain in the EMU inspection workshop. The heat dissipation intensity per unit area of train air conditioning system can reach  $28.8\sim 31.0\text{W}/\text{m}^2$ , and the heat dissipation intensity per unit area of solar radiation can reach  $24.2\sim 35.2\text{W}/\text{m}^2$ . Under the design condition, the daytime heat gain is in the range of  $78.4\sim 96.4\text{W}/\text{m}^2$ . There is little difference in heat gain in the warehouse between hot summer and cold winter and hot summer and warm winter.

**【Keywords】** EMU inspection workshop; Test; Thermal environment; Heat source characteristics; Solar radiation

作者简介: 邹磊 (1998.08-), 男, 在读硕士研究生, E-mail: lzou@hust.edu.cn

通信作者: 于靖华 (1981.03-), 女, 教授, E-mail: yujinghua@hust.edu.cn

收稿日期: 2021-10-09

## 0 引言

根据《中长期铁路网发展规划》, 到2025年我国铁路网规模达到17.5万公里左右, 其中高速铁路3.8万公里左右<sup>[1]</sup>。在铁路高速发展的背景下,

大量动车运营使用, 同时也需要建设大量动车检查库对动车进行各级检修, 以保证动车组安全完好地投入运营。动车检查库在夏季库内温度高, 主要工作区域超过  $35^\circ\text{C}$ <sup>[2]</sup>, 主要的原因是通风系统的设计

和库内得热不匹配,无法将库内余热及时排至室外,造成库内温度过高。目前针对检查库的研究主要是采用软件模拟的方法,对库内的通风组织形式<sup>[3]</sup>、库内热环境<sup>[5,6]</sup>、库内空调形式<sup>[7]</sup>进行了研究,但是缺乏库内热源散热特性的实测及分析研究。本文针对夏热冬冷及夏热冬暖地区五个检查库的库内热源特性进行测试调研为动车检查库通风降温方案设计提供理论依据和数据支撑。

## 1 测试概况

测试地点位于夏热冬冷地区(武汉、长沙)和夏热冬暖地区(广州),检查库规模上包括四线库、六线库、十线库。测试时间为 2020 年 8~9 月。检查库的几何尺寸如表 1 所示。

表 1 检查库几何尺寸

Table 1 Building size of the depots

	武汉十线库	长沙六线库	长沙四线库	广州六线库	广州十线库
长(m)	468	468	468	468	468
宽(m)	81.3	48	32	53.2	100.3

表 2 围护结构得热量

Table 2 Heat gain through envelope

	武汉十线库	长沙六线库	长沙四线库	广州六线库	广州十线库
东墙	-18248.7	-43447.4	9106	-55576.5	20685
西墙	-34378.3	-31680.7	-3041.5	-37611.6	32183
南墙	1797.8	1535.8	-2110.7	966.2	245
北墙	405.4	1861.5	-1586.2	147.12	2745
屋顶	354288.3	105338.2	114362.5	306703.8	189355
地面	-334625	20532.1	33762.6	-193918.5	225685
总得热量(W)	-30757.5	54100	150492.7	20710.52	270898
面积指标(W/m <sup>2</sup> )	0	2.41	10.1	0.9	5.77

## 2.2 太阳辐射得热量

太阳辐射得热主要来自天窗、侧窗和外门。天窗太阳辐射得热采用库内部地面(不受外窗和外门影响)的太阳辐射强度和地面面积计算。侧窗和外门太阳辐射得热采用各自开口面积和开口处测得的太阳辐射强度计算。武汉十线库、长沙六线库、

面积(m<sup>2</sup>) 38048 22464 14976 24898 46940

## 2 库内得热来源及测试方法

检查库作为动车检修、整备、卸污、司乘等一体化作业的场所,其库内的热源散热特性影响着室内的热环境。库内得热包括外扰得热如通过围护结构的传热、以及太阳辐射得热和内扰得热如人员、照明、设备等,此外,库内的检修作业过程中列车空调系统散热及新入库车辆外表面散热将成为重要的热量来源。

### 2.1 围护结构传热

通过测量围护结构内表面温度以及近壁面空气温度及风速,计算围护结构与室内空气的对流传热量,内表面对流换热系数计算方法参考文献[8]提供的计算公式。

将各围护结构得热代数和作为通过围护结构库内总的得热量,若其值为负值,则认为向库内的传热量为 0。各检查库围护结构测试数据汇总如表 2 所示。

长沙四线库、广州六线库、广州十线库在测试期间室外水平面平均太阳辐射照度为 827W/m<sup>2</sup>、792W/m<sup>2</sup>、560W/m<sup>2</sup>、627W/m<sup>2</sup>、31W/m<sup>2</sup>(阴雨天)。各地检查库太阳辐射得热量测试数据汇总如表 3 所示。

表 3 太阳辐射得热

Table 3 Solar radiation heat gain

	武汉十线库	长沙六线库	长沙四线库	广州六线库	广州十线库
北门	50792.0	10404	21157.5	9052	3001.15
北窗	11136.5	—	—	2295.3	518.16

南门	34425.0	8100	9639	24177.4	2186.63
<b>续表 4 太阳辐射得热</b>					
	武汉十线库	长沙六线库	长沙四线库	广州六线库	广州十线库
南窗	9664.5	—	—	6497.1	611.31
东窗	29685.6	3169.2	242358	46540.8	5072.20
西窗	611964.0	677484	109118.4	508723.2	2950.27
天窗	148291.2	89856	59904	99052.2	38667.92
总辐射量 (W)	895958.8	789013.2	442176.9	696338	53007.6
面积指标 (W/m <sup>2</sup> )	24.17	35.1	29.73	29.2	1.13

在室外太阳辐射较大的检查库内太阳辐射得热最大能达到 35.1W/m<sup>2</sup>，而广州十线库由于室外阴雨天气，库内太阳辐射得热很小。西窗是下午库内太阳辐射得热主要的来源，在检查库西侧采用遮阳设施有助于减少库内太阳辐射得热。

2.3 室内人员、照明、设备

库内检修工作全天分为两个班次，其中 8:00~18:00 为白班，19:00~次日 8:00 为夜班。库内工作人员包括检修人员和保洁人员，人员数量与检修任务安排有关。库内人员按散热量 61W（28℃ 条件下）计算。

库内照明系统包括顶部的吊灯、布置在各工作面上方的侧灯和列车轨道下方的地灯，白天库内照明系统一般不开启。

检查库内的设备主要分为操作设备、检修设备和辅助设备。包括工位终端操作台、隔离开关操作柜、风扇电器柜、移动式轮辋轮辐探伤设备和风扇。各检查库库内人员、照明及设备散热量如表 4 所示。

表 5 人员、照明及设备得热测试数据汇总

**Table 4 Summary of heat gain of test data for personnel, lighting and equipment**

	武汉十线库	长沙六线库	长沙四线库	广州六线库	广州十线库
人员数量	75	67	13	40	130
人员散热量(W)	4575	4087	793	2440	7930
人员单位面积散热量 (W/m <sup>2</sup> )	0.12	0.18	0.05	0.10	0.17
照明单位面积散热量 (W/m <sup>2</sup> )	0	0	0	0	0
设备散热量(W)	1.5	51.1	43.8	128.4	101.1
设备单位面积	0.04	2.27	2.94	5.4	2.16

散热量 (W/m<sup>2</sup>)

照明一般仅在夜间开启，在白天依靠屋顶的采光天窗和两侧立窗进行自然采光。人员得热最大为 0.18W/m<sup>2</sup>，长沙四线库内测试时段人员较少，人员得热仅 0.05W/m<sup>2</sup>。库内设备得热最大为 5.4W/m<sup>2</sup>，武汉十线库内无风扇等设备开启，库内设备得热仅 0.04W/m<sup>2</sup>。

经调研，夜间人员数量与白天不相同，照明全部开启，因此夜间得热量如表 5 所示。

表 5 夜间人员、照明设备得热量

**Table 5 Heat gain of personnel and lighting equipment at night**

	武汉十线库	长沙六线库	长沙四线库	广州六线库	广州十线库
人员数量	175	60	61	40	130
人员单位面积散热量 (W/m <sup>2</sup> )	0.29	0.16	0.25	0.10	0.17
照明散热量(W)	170.3	97.1	155.4	200.3	321.5
照明单位面积散热量 (W/m <sup>2</sup> )	4.59	4.32	10.45	8.39	6.86
设备散热量(W)	1.5	51.1	43.8	128.4	101.1
设备单位面积散热量 (W/m <sup>2</sup> )	0.04	2.27	2.94	5.4	2.16

2.4 车体表面散热

通过测量刚入库车辆的车体表面温度（包括车顶、侧面及车底），近表面空气温度以及风速，计算车体表面对流散热量。车体表面温度采用红外测温仪测量，在测试过程中选择刚入库的车辆取车头车中及车尾不同位置进行测量。车体近表面风速及空气温度用热线风速仪测量，仪器型号为 TSI 9565。库内停放的车型多为 CRH2A，头车长度 25700mm，中间车长度 25000mm，车辆宽度 3380mm，

车辆高度 3700mm。均按照 8 节车厢为一个编组。由于列车表面为流线型, 将车体简化为 201400mm × 3380mm × 3700mm 的长方体进行计算。

对在库车辆和刚入库的车辆进行测量, 取其各表面平均温差计算单列动车车体表面散热量。车体表面温度低于室内空气温度时, 将其散热量记为 0。

表 6 车体表面散热量

Table 6 Heat dissipation on the vehicle surface

	武汉十线库	长沙六线库	长沙四线库	广州六线库	广州十线库
顶面与空气平均温差 (°C)	2.6	6.1	-0.3	-1.3	0.8
侧面与空气平均温差 (°C)	1.5	3.3	-1.0	-1.2	0.5
底面与空气平均温差 (°C)	2.1	0.6	-0.9	-0.8	0.9
库内停放车辆数目	18	5	3	3	19
总散热量 (kW)	526.14	248.45	-65.96	-84.71	282.15
面积指标 (W/m <sup>2</sup> )	14.19	11.06	0	0	6.02

## 2.5 列车空调系统散热

动车在检修时列车门为打开状态, 列车内冷风向外渗透, 并最终将冷量渗透到动车检查库, 列车空调向库内散发的有效热量应该等于空调系统实际输入功率。测试了空调系统冷凝器排风口面积, 排风温度、排风风速, 动车冷凝器排风口一般为百叶风口, 其开口面积系数取 0.5, 计算得到空调系统的冷凝器实际散热量。

以和谐号 CRH2 系列车辆计算库内动车额定工况下单个冷凝器散热量。CRH2 型动车司机室设 1 台空调装置, 空凋制冷能力 7.1kW/台, 输入功率是 4kW; 每标准车厢即客室车厢设 2 台空调装置, 标准条件下制冷能力 37.21kW/台; 压缩机耗电量为 2 × 3.7kW (2 台压缩机), 冷凝器风机耗电量: 4 × 1.5kW (2 台冷凝器, 4 个冷凝器风机), 制冷总输入功率为 20kW; 因此, CRH2 型动车单个空调冷凝器向外的散热量为 47.6kW (制冷量+压缩机+冷凝器风机, 即 37.21+3.7 × 2+1.5 × 2)。冷凝器实际散热量与额定工况之比为部分负荷率, 从而根据总输入功率与部分负荷率的乘积计算空调向库内有效散热量。计算结果见表 7。

在五个检修库中, 武汉十线库和广州十线库中测试到了冷凝器散热的情形。动车检修时分为通电作业和无电作业, 检修共 90 分钟, 通电 40 分钟。冷凝器的通电检修率按 4/9 计算, 库内总散热量计算公式为:

$$Q = (q_1 \times 8 + q_2 \times 2) \times n \times \alpha \times \frac{4}{9} \quad (1)$$

$$= q_1 \times n_1 + q_2 \times n_2$$

表 7 检查库冷凝器散热

Table 7 Condenser heat dissipation

参数	武汉十线库	广州十线库
平均排风温差 (°C)	9.7	6.1
平均排风风速 (m/s)	13.0	12.2
单个冷凝器散热量 $q$ (kW)	41.6	25.65
部分负荷率	87.4%	53.9%
客室散热量 $q_1$ (kW)	35.0	21.6
司机室散热量 $q_2$ (kW)	3.5	2.2
库内停放车辆数目 $n$	18	19
客室/司机室开启数量 $n_1/n_2$	32/8	61/15
同时检修率 $\alpha$	0.5	0.89
总散热量 $Q$ (kW)	1148	1350.6
面积指标 (W/m <sup>2</sup> )	31.0	28.8

## 3 测试结果分析

### 3.1 实测结果分析

测试工况下库内各项热源测试结果如表 8 所示。

由表中数据可知, 武汉十线库库内得热实测值最大, 其单位面积散热强度为 69.5W/m<sup>2</sup>, 在有检修工作的库中, 列车空调系统散热和太阳辐射是库内得热的主要来源, 列车空调系统散热单位面积散热强度可达 28.8~31.0W/m<sup>2</sup>, 太阳辐射单位面积散热强度可达 24.2~35.2W/m<sup>2</sup>。检查库内车体表面散热量热源强度为 6.0~14.2W/m<sup>2</sup>。通过围护结构的传

热最大可达 10.12W/m<sup>2</sup>，人员得热最大可达 0.18W/m<sup>2</sup>，照明在白天一般不开启，设备得热最大可达 5.4W/m<sup>2</sup>。

表 8 各地区检查库实测工况各项热源强度数据汇总

Table 8 Summary of heat source intensity data for each measured working condition

热源强度 (W/m <sup>2</sup> )	武汉十线库	长沙六线库	长沙四线库	广州六线库	广州十线库
车体表面	14.2	11.1	0	0	6.0
空调散热	31.0	0	0	0	28.8
围护结构	0	2.41	10.12	0.9	5.77
太阳辐射	24.2	35.1	29.73	29.2	1.13
人员	0.12	0.18	0.05	0.10	0.17
照明	0	0	0	0	0
设备	0.04	2.27	2.94	5.4	2.16
总计	69.5	51.0	42.8	35.5	44.1

### 3.2 设计工况下得热分析

综合各检查库的测试结果，提出夏季设计工况下库内总得热的计算方法，为通风系统设计提供数据参考。根据《工业建筑供暖通风与空气调节设计规范》GB50019-2015<sup>[9]</sup>，设计工况下库内外设温度，太阳辐照度如表 9 所示。其中室外温度为夏季室外通风设计温度，室内温度取生产厂房工作地点与夏季通风室外设计温度允许最大温差（3℃）进行设计，且最高不得超过 35℃。

表 9 设计工况下室内外参数

Table 9 Indoor and outdoor parameters under design working conditions

城市	武汉	长沙	广州
夏季室外通风计算温度 (°C)	32.0	32.9	31.8
室内设计温度 (°C)	35.0	35.0	34.8
夏季室外太阳辐射 (W/m <sup>2</sup> )	870	874.8	815.6

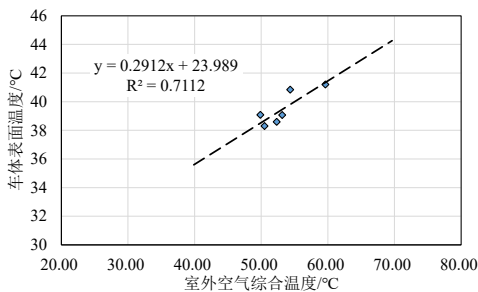


图 1 实测工况车体表面平均温度和室外空气综合温度关系图

Fig.1 The relationship between the average surface temperature of the vehicle body and the outdoor sol-air

### temperature

车体表面的散热量和车体表面温度和库内设计温度有关。根据测试数据，车体表面温度和室外空气综合温度的如图 1 所示。设计工况下车体表面计算参数如表 10 所示，其中对流换热系数取测试时的平均值。

表 10 设计工况单列标准列车（8 节编组）

### 车体表面散热量

Table 10 Heat dissipation on the vehicle surface of a standard EMU (8-section group) under design working conditions

地点	武汉	长沙	广州
太阳辐射强度 (W/m <sup>2</sup> )	870	874.8	815.6
室外空气温度 (°C)	32	32.9	31.8
室外空气综合温度 (°C)	52.4	53.4	50.9
室内设计温度 (°C)	35.0	35.0	34.8
车体表面温度 (°C)	39.2	39.5	38.8
表面对流换热系数	5.47	5.47	5.47
车体表面积 (m <sup>2</sup> )	2851.8	2851.8	2851.8
车体表面散热量 (kW/列)	66.1	70.7	62.5

设计工况下单辆车表面散热取平均值 66.5kW/列，且库内车辆按停满计算，刚入库车辆占在库车辆的比值取测试时的平均值 0.478。设计工况下库内总的车体表面散热量为：

$$Q = n \times 0.478 \times 66.5 \quad (2)$$

武汉十线库和广州六线库单辆车空调系统散热量分别为 287kW/列、177.2kW/列。设计工况下，库内考虑停满动车。检查库内动车检修时空调散热量取测试时的均值 232.1kW/列计算，列车空调同时开启率取平均值 0.31。因此库内空调器总散热量为：

$$Q = n \times 0.31 \times 232.1 = 72 \times n \quad (3)$$

表 11 测试工况太阳辐射得热及围护结构得热数据

Table 11 Solar radiation heat gain and envelope heat gain data for measured working conditions

地点	武汉十线	长沙六线	长沙四线	广州六线	广州十线
太阳辐射强度 $s$ (W/m <sup>2</sup> )	929.50	911.6	572.25	811.3	30.73
太阳辐射得热 (W/m <sup>2</sup> )	24.17	35.15	29.53	29.17	1.13
库内外温差	2.77	2.37	-0.40	2.02	1.90

$\Delta t$ (°C)					
围护结构传热 (W/m <sup>2</sup> )	-0.83	2.41	10.12	0.87	5.77

检查库内太阳辐射得热与室外太阳辐照度(s)、库内外温差与通过围护结构进入检查库内的热量均有明显的相关性。测试时相关数据见表11,对实测数据按线性拟合后提出设计工况下库内太阳辐射得热计算的公式(4)以及围护结构内表面散热量计算公式(5)。

$$Q = 0.0312s + 3.5231 \quad (4)$$

$$Q = -3.2046\Delta t + 9.2184 \quad (5)$$

其中,围护结构、太阳辐射以及车体表面的散热量与室外环境有关,在设计工况下夜间库内不存在这部分热量。由人员、灯光、设备散入检查库内的热量与检修库规模有关,以实测数据作为设计工况下的得热。

夏热冬冷(暖)地区设计工况白天和夜间的室内得热如表12所示。

表12 设计工况库内总得热对比

Table 12 Comparison of total heat gain for design working conditions

热源强度 (W/m <sup>2</sup> )	武汉十线库		长沙六线库		长沙四线库		广州六线库		广州十线库	
	白天	夜间	白天	夜间	白天	夜间	白天	夜间	白天	夜间
车体表面	17.05	0	18.05	0	18.18	0	15.03	0	12.76	0
列车空调	38.84	38.84	38.46	38.46	38.72	38.72	36.20	36.20	30.72	30.72
围护结构	0	0	2.49	0	2.49	0	0	0	0	0
太阳辐射	30.67	0	30.82	0	30.82	0	28.97	0	28.97	0
人员	0.12	0.29	0.18	0.16	0.05	0.25	0.10	0.10	0.17	0.17
照明	0	4.59	0	4.32	0	10.45	0	8.39	0	6.86
设备	3.83	3.83	5.31	5.31	6.13	6.13	5.38	5.38	5.78	5.78
总计	90.5	47.6	95.3	48.3	96.4	55.6	85.7	50.1	78.4	43.5

库内得热白天比夜间大,夏热冬冷武汉和长沙检查库设计工况白天的库内热源强度为 90.5~96.4W/m<sup>2</sup>,夜间库内热源强度为 47.6~55.6W/m<sup>2</sup>。夏热冬暖广州检查库设计工况白天热源强度 78.4~85.7W/m<sup>2</sup>,夜间库内热源强度为 43.5~50.1W/m<sup>2</sup>。由于在库内面积上存在较大差异,所以单位面积散热在夏热冬冷地区和夏热冬暖地区存在差异。

#### 4 结论

本文对夏热冬冷地区和夏热冬暖地区五个检查库库内得热进行了测试调研,得出了以下结论:

(1) 检查库内得热的来源包括通过围护结构的传热、太阳辐射得热、人员、照明设备得热、以及车体表面散热、列车空调系统散热;

(2) 实测到库内总得热的最大值达 69.5W/m<sup>2</sup>;

(3) 列车空调系统散热以及太阳辐射是库内得热的主要来源。列车空调系统散热单位面积散热强度可达 28.8~31.0W/m<sup>2</sup>,太阳辐射单位面积散热

强度可达 24.2~35.2W/m<sup>2</sup>;

(4) 设计工况下库内白天得热范围为 78.4~96.4W/m<sup>2</sup>,在夏热冬冷和夏热冬暖地区间差异不大。

#### 参考文献:

- [1] 闫昱霖.高速铁路产业发展的区域布局研究——基于中国铁路中长期发展规划政策[J].经济师,2017,(11):42-46.
- [2] 陈思,余南阳.南宁某动车检修库夏季热环境实测与分析[J].制冷与空调,2020,34(6):707-710.
- [3] 邵彦寰,张旭,叶蔚,等.某地铁检修库不同通风模式研究[J].建筑热能通风空调,2016,35(3):82-85,59.
- [4] 陈涛.某地铁车辆段检修主厂房自然通风数值模拟[J].建筑热能通风空调,2014,33(2):83-86.
- [5] 程雅丽,朱建章.带有上盖物业开发的地铁车辆段通风空调设计[J].暖通空调,2010,40(7):1-4.
- [6] 方进.动车检查库通风降温方案研究[J].建筑热能通风空调,2012,31(6):89-91.

- [7] 王荣华. 关于广州动车段转向架检修库增设空调设施的探讨[J].铁道车辆,2018,56(10):40-41,5.
- [8] 刘猛,龙惟定.夏季工况双层皮玻璃幕墙综合传热系数计算模型[J].同济大学学报(自然科学版),2009,37(10):1403-1408.
- [9] GB 50019-2015,工业建筑供暖通风与空气调节设计规范[S].北京:中国计划出版社,2015.