

胶轮导轨电车电热装置设计的技术要点

张明顺 盛文刚 孙继伟 卢衍伟
(中车四方车辆有限公司产品开发部,266111,青岛//第一作者,工程师)

摘 要 寒冷地区使用的胶轮导轨电车需要配置电热装置,其设计中有一些问题需要研究。结合胶轮导轨电车的运行区域及车厢内部设备的布置特点,对整车冬季制热量的确定方法、司机室和客室电加热器布置方式、客室电加热器的技术特点进行了论述。

关键词 胶轮导轨电车;制热量计算;电加热

中图分类号 U270.38⁺3:U482.1

DOI:10.16037/j.1007-869x.2020.11.024

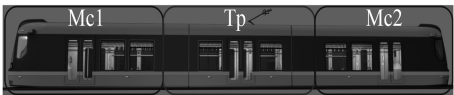
Technical Points of Guided Rail Tram Electric Heating Apparatus Design
ZHANG Mingshun, SHENG Wengang, SUN Jiwei, LU Yanwei

Abstract Guided rail tram in cold area requires electric heating apparatus, the design of which needs further study. Considering the operating area and compartment interior equipment layout features of guided rail tram, aspects including the way to determine winter heat demand of whole vehicle, electric heating layout of driver's room and passenger compartments, technical points of electric heating in passenger compartments are expounded. The technical features of electric heating in passenger compartments are discussed.

Key words guided rail tram; heat demand calculation; electric heating

Author's address CRRC SIFANG Co., Ltd., 266111, Qingdao, China

胶轮导轨电车是由胶轮驱动承载、由钢轮单轨导向的、可在寒冷地区运行的新型轨道交通工具。本文研究的电车车辆编组如图 1 所示。在冬季时,为保证车内乘客的舒适,车内需加装电热装置来进行热量补偿。



注: Mc1 及 Mc1 为带驾驶室动车; Tp 为带受电弓的拖车

图 1 胶轮导轨电车编组图

本文基于冬季制热量的计算,结合车辆内部设备的布置,对司机室电加热器的选型、客室电加热器的设计及客室电加热器的特点进行论述。

1 制热量的确定方法

目前,铁路客车和城市轨道车辆热负荷的计算一般参照 TB/T 1957—1991《铁路空调客车热工计算方法》^[1],其设计参数按照 GB/T 23431—2009《城市轻轨交通铰接车辆通用技术条件》执行^[2]。通过计算车体传热、车内旅客散热、新风(包括渗透)等负荷,可确定整车的制热量。

1.1 热负荷计算参数及公式

冬季热负荷计算参数如表 1 所示。

表 1 制热量计算参数	
计算参数	参数取值
车外干球温度/℃	-35
客室内干球温度/℃	10
司机室内干球温度/℃	14
车辆定员	137
客室人均新风量/(m ³ /h)	10
司机室人均新风量/(m ³ /h)	30

注:车辆定员包括司机、坐席定员和站立人员,其中司机 2 人,坐席定员 20 人,站立人数按 6 人/m² 计算

车辆整车及各部类的传热系数 K 应根据车体各部分结构即材料仿真计算得到。

冬季热负荷计算的热平衡方程式为

$$Q + Q_3 + Q_4 = Q_1 + Q_2 \tag{1}$$

式中:

- Q ——冬季热负荷;
- Q_1 ——传热负荷,即通过车体隔热壁损失的热量;
- Q_2 ——新风负荷,即加热送入车内新鲜空气所需热量;
- Q_3 ——人体热负荷,即车内旅客的散热量;
- Q_4 ——设备热负荷,即车内机电设备的散热量,一般作为安全储备热,在计算中可不予考虑。

1.2 热负荷计算

1.2.1 Q_1 的计算

司机室传热负荷为

$$Q_{1-1}=K\cdot A\cdot \Delta t\tag{2}$$

式中:

K ——传热系数;整车 $K=2.46\text{ W}/(\text{m}^2\cdot^\circ\text{C})$;

A ——车体表面积;本文取 17.4 m^2 ;

Δt ——为室内外温度差;本文取 $49\text{ }^\circ\text{C}$ 。

经计算, $Q_{1-1}=2\,097\text{ W}$ 。

客室传热负荷为

$$Q_{1-2}=\sum KA\Delta t\tag{3}$$

其中, Q_{1-2} 包括侧墙、贯通道、地板、顶板等 4 部分的计算,相关参数如表 2 所示。

表 2 冬季客室车体传热总负荷

部位	$K/(\text{W}/(\text{m}^2\cdot^\circ\text{C}))$	A/m^2	$\Delta t/^\circ\text{C}$	Q/W
侧墙	3.52	60.70	45	9 614.9
贯通道	3.93	8.41	45	1 487.3
地板	2.00	35.20	45	3 168.0
顶板	0.47	39.58	45	837.1

门窗部位 $K=6\text{ W}/(\text{m}^2\cdot^\circ\text{C})$,根据式(2)可得门窗部位传热负荷 $Q_{1-3}=24\,534\text{ W}$ 。故车体传热负荷 $Q_1=Q_{1-1}+Q_{1-2}+Q_{1-3}=41\,739\text{ W}$ 。

1.2.2 Q_2 的计算

$$Q_2=C\cdot M\cdot \Delta t\tag{4}$$

式中:

Q_2 ——加热送入车内新鲜空气所需热量;

C_p ——空气定压比热,取 $1\,004.83\text{ J}/(\text{kg}\cdot^\circ\text{C})$;

M ——新风量;

Δt ——为室内外温度差;司机室室内外温差 $\Delta t_1=49\text{ }^\circ\text{C}$,客室室内外温差 $\Delta t_2=45\text{ }^\circ\text{C}$ 。

计算可得,司机室新风负荷 $Q_{2-1}=985\text{ W}$,客室新风负荷 $Q_{2-2}=20\,348\text{ W}$,总新风负荷 $Q_2=Q_{2-1}+Q_{2-2}=21\,333\text{ W}$ 。

1.2.3 Q_3 的计算

$$Q_3=q\cdot n\cdot C\tag{5}$$

式中:

q ——不同室温和劳动性质时成年男子散热量,取 116.3 W ;

n ——室内全部人数, $n=137$ (含司机 2 人);

C ——群集系数, $C=0.96$;

经计算,司机室人体散热 $Q_{3-1}=223\text{ W}$,总人体散热 $Q_3=15\,933\text{ W}$ 。

1.2.4 冬季热负荷总量

将上述计算结果代入式(1)中可得, $Q=47\,139\text{ W}$ 。

同理计算可得,司机室冬季热负荷为:

$$Q_{\text{司}}=Q_{1-1}+Q_{2-1}-Q_{3-1}=28\,52\text{ W}$$

2 电加热器选型与布置方式

经过计算,在 $-35\text{ }^\circ\text{C}$ 的外界温度下,为保证客室温度达到 $10\text{ }^\circ\text{C}$,司机室温度达到 $14\text{ }^\circ\text{C}$,则列车电热功率约为 47.14 kW ,司机室电热功率约为 2.86 kW 。设计时考虑裕量,则列车需要约 48 kW 制热量,其中司机室需要 3 kW 制热量。每节车厢的空调机组装有功率为 10 kW 的新风预热器,且空调机组送风量 $3\,000\text{ m}^3/\text{h}$,故列车空调制热量为 30 kW 。由此可知,整车客室和司机室至少需增加 18 kW 的电加热器才能满足冬季制暖要求。

2.1 司机室电加热器选型与布置方式

司机室采用车顶引风机和操作台电加热的方式。引风机可分三档控制,风量分别为 $600\text{ m}^3/\text{h}$ 、 $4\,00\text{ m}^3/\text{h}$ 、 $4\,00\text{ m}^3/\text{h}$ 。按照高档风量 $600\text{ m}^3/\text{h}$ 计算,等比例换算通过引风机进入司机室的空调制热量约为 2 kW ,故司机室内需加装 1 kW 的电加热。

司机室电加热采用国内成熟的地铁司机室电加热装置。每个司机操纵台设置 2 个 600 W 强迫通风电加热器,并采用嵌入式安装,可节省司机室空间^[3]。

2.2 客室电加热器选型与布置方式

传统城市轨道交通车辆客室电加热通常安装在客室座椅下方的侧墙上。这种安装方式不仅便于热空气向上流动,形成客室内空气循环,而且还能合理利用客室内空间^[4]。胶轮导轨电车布置了横向单人座椅,若采用传统的电热安装形式,按 $500\text{ W}/\text{m}$ 的功率计算,3 个客室最多只能加装约 11.2 kW 的电加热,远不能满足冬季采暖要求。

根据胶轮导轨电车的空间特点和采暖要求,本研究选择在客室单人座椅骨架上加装带风机强迫对流式电加热器,其单台功率为 800 W 。此设计可充分利用了座椅下部空间,不占用乘客活动区域,为乘客提供更为宽敞的乘坐环境。

胶轮导轨电车客室电加热器功率分布见表 3 所示。由图 3 可见,客室电加热器总功率为 16 kW 。

表 3 电加热器功率分布

车辆	单个功率/W	数量	总功率/kW
Mc1	800	6	4.8
Tp	800	8	6.4
Mc2	800	6	4.8

可知,胶轮导轨电车客室和司机室总共加装了 18.4 kW 的电加热器,满足了计算要求。

3 客室电加热器技术特点

3.1 结构尺寸小,电热功率大

胶轮导轨电车客室在座椅骨架下加装的带风机强迫对流式电加热器(以下简为“客室加热器”)外形尺寸为 320 mm×280 mm×180 mm(长×宽×高),电加热功率为 800 W。普通铁路客车的 800 W(型号 DR80-80×30Y)单元式电加热器外形尺寸为 800 mm×300 mm×90 mm(长×宽×高)。可见,功率相同时,客室加热器结构尺寸明显更小。

根据 NF F13-835—1989《铁道车辆用强制通风套管式电加热器》,功率密度 $\alpha \leq 120 \text{ kW/m}^2$ 。其中

$$\alpha = P/S \tag{6}$$

式中:

- P ——额定电压时的空气预热器功率;
- S ——发热元件的单个或多个固定装置与空气预热器框架形成的内周长所限定的水平面面积。

经计算,客室电加热器 α 约为普通铁路客车电加热器 α 的 5 倍。

3.2 安装简单,便于维护

在客室电加热器外壳内表面埋有安装螺母,并在座椅骨架上预留长圆孔,安装时用 4 个螺栓固定即可。客室电加热器顶板两边的侧盖板均可拆卸。打开控制腔侧的侧盖板可直接进行电加热器电气接线的压线、电气元件的检修更换,打开发热腔侧的侧盖板可对发热板进行检修。可见客室电加热器安装简单,便于维护。电加热器的现场照片如图 2 所示。

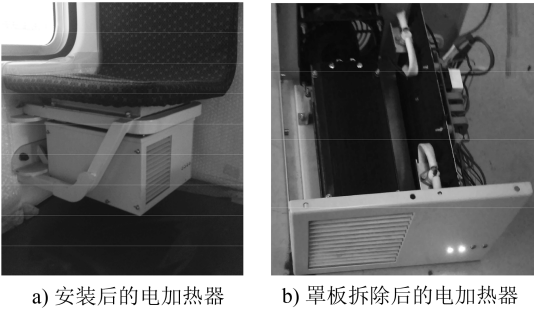


图 2 电加热器现场照片

3.3 客室电加热器的控制原理

客室电加热的发热元件由 2 组电发热板组成,每组电发热板功率为 400 W,采用 AC 220 V、50 Hz 的供电制式。电加热器的输入控制电路与半暖回路相连,采用相同电压等级;当采用半暖模式时,只有 1 组电加热板和风机工作;当采用全暖模式时,2 组电加热板和风机同时工作。通过 2 路电加热板的输入控制器 L1 和 L2,即可控制电加热的工作模式。

电加热控制板(PCB 板)集成了热继电器、延时继电器及电源模块等电气元件,减少了布线。风机由控制板直接驱动,提高了电加热系统的工作可靠性。控制腔空间的节省有利于后期检修维护。通过控制板可实现发热板和风机的顺序延时启动,确保风机正常运转后延时启动电加热器;可实现对电加热器工作状态的判断和控制,电加热器具有电源、风机工作指示和电热元件故障指示等功能。客室电加热器控制原理框图如图 3 所示。

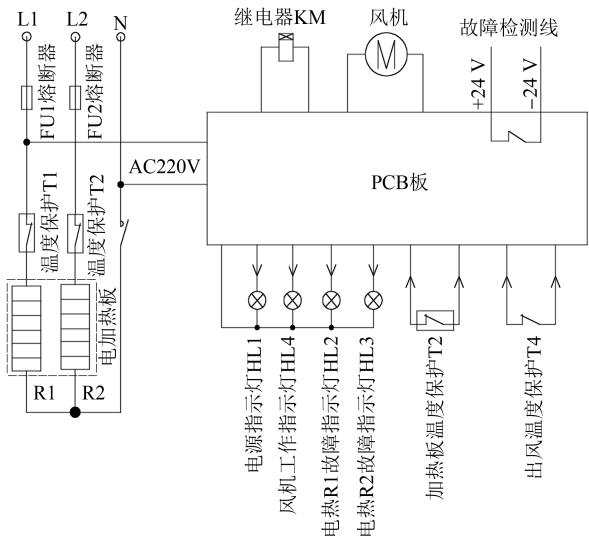


图 3 客室电加热器的控制原理图

3.4 安全防护及故障显示

3.4.1 电气元件隔离

电加热内部设置隔板将电加热的发热元件和 PCB 板、继电器等控制元器件进行有效隔离,提高了控制元件的可靠性和使用寿命。

3.4.2 多级温度控制

3.4.2.1 温度要求

按照 TB/T 2704—2016《铁路客车及动车组电取暖器》的规定,电加热器设计应满足以下要求:电加热器在环境温度为 18~20℃、无风条件下,加额定电压,工作 1 h 后的电加热板任意点最高温度不

高于 180 ℃,电加热器壳体表面任意点的最高温度不高于 65 ℃,距电加热器出风口 50 mm 处平均送风温度不高于 45 ℃。

为保证乘客易接触的位置温度在设计要求内,装车前对电加热发热元件表面温度,罩板出风口的温度进行测量。在上层电加热板的正面和反面中心位置设测点 1 和测点 2,在下层电加热板的正面和反面中心位置设测点 3 和测点 4。在出风口四周的前罩板中心位置设置 4 个测点,在出风口和距出风口 50 mm 相对应的位置各设置 4 个测点,前罩板温度测点和出风口温度测点布置如图 4 所示。客室电加热器各测点的温度测量数据如表 4 所示。

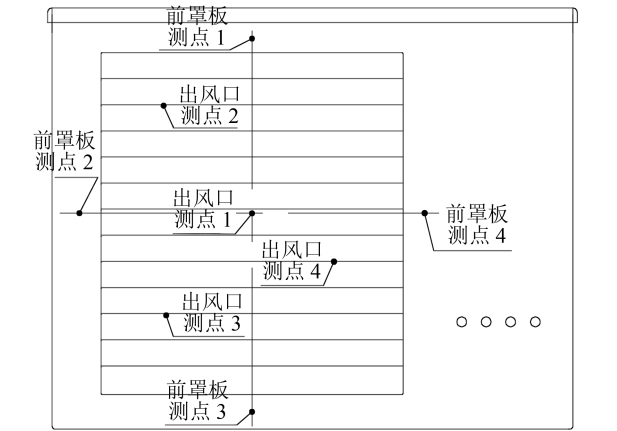


图 4 前罩板和出风口温度测点布置示意图

表 4 客室电加热器各测点的温度测量结果

测点	电热板温度/℃	前罩板温度/℃	出风格栅处温度/℃	出风口 40 mm 处温度/℃
测点 1	163	45	41	38
测点 2	164	47	39	37
测点 3	163	45	38	35
测点 4	162	47	40	37

3.4.2.2 温度保护

电加热器供电回路加装有两级温度保护装置。一级超温保护装置为可恢复式保护装置,能保证电加热器出风口温度不超过 65 ℃.;当出风口温度达到 65 ℃时,保护装置动作,供电回路断开,电热板停止工作;当出风口温度低于 65 ℃时,电热板继续工作加热。二级超温保护装置为不可自动恢复式保护装置。当电热板组成表面温度达到 210 ℃时,保护装置动作不可恢复。二级温度保护装置串联在供电回路中,当温度保护装置发生故障时,电热器不能

工作,杜绝了安全隐患。

3.4.3 故障显示功能

1) 客室电加热器设有电源指示灯、风机工作指示灯、发热元件 R1 故障指示灯和发热元件 R2 故障指示灯。当电加热器正常工作时,电源指示灯和风机工作指示灯亮;当发热元件故障时,相关的发热元件故障指示灯亮。故障显示功能显示了电加热器的工作状态,便于检修维护。

2) 在电加热器的一级温度保护装置动作后,风机能继续工作,以尽快降低出风口温度;在电加热器的二级温度保护装置动作后,风机和电加热板同时停止工作,电加热板故障指示灯亮;当控制电路检测到风机出现故障时,电加热板断电不工作,电加热器整体不工作。

3) 电加热器设置了故障检测线,与全车所有电加热器串联,并与司机室 TCMS(列车控制与管理系统)组成电加热故障检测回路。当电加热器正常工作或不工作时,故障检测回路处于接通状态;当电加热器发生故障时,故障检测回路处于断开状态,TCMS 显示屏上可显示警告信息,提醒工作人员及时检修故障电加热器。

3.5 低噪声

按照 UIC 553—2004《客车通风采暖和空调》的要求,室内电加热器产生的噪声不应超过 60 dB^[7]。按照 TB/T 2704—2016《铁道客车及动车组电取暖气器》的要求,单元式强制通风电取暖器正常工作时所产生的噪声应不超过 55 dB。

客室电加热器正常工作时,风机所产生的噪声仅为 47 dB,满足规范要求。

4 结语

胶轮轨道交通在司机室和客室加装的电加热器满足了整车制热的要求。加装电加热器后的样车在调试运行期间运行状态良好。特别是客室安装的强迫通风电加热器,体积小、重量轻、噪声低、安全性能高,满足了室内舒适性、美观及安全性的综合要求,能为其他寒冷地区城市轨道交通车辆整车电热装置的设计提供依据和参考。

参考文献

[1] 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—1991[S]. 北京: 中国铁道出版社, 1991.

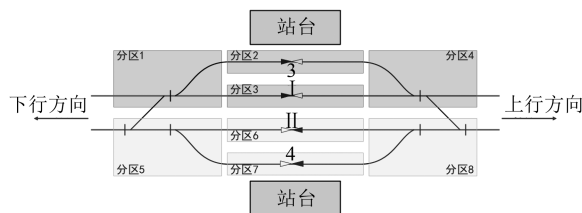


图9 “双侧四线”车站的多分区划分方式

将车站范围划分为8个分区后,大部分行车作业可通过分区之间的组合来实现,且基本不影响其他并行作业。例如,3道上的列车可以通过分区2和分区4开往上行方向;与此同时,I道上的列车可以用过分区3、分区1和分区5开往下行方向,从而实现站内的并发作业。

2.4 站场设计的其他考虑因素

如果车站的功能定位更加重要,运营调度功能更加丰富,那么车站的配线将更为复杂。相应的,车站到发线、存车线及渡线的数量均会增加。此时若要实现高密度行车、全站场的多任务并行调度,则车站范围内的分区数量必须设置得更多。这意味着分区运控设备、分区供电设备,以及轨旁控制电缆的数量都需要进一步增加,相应的建设投资成本和后期运维成本将大幅上升。

仍以图9所示站型为例进行分析。在特定的工程中,先要分析设置到发线的必要性,还要分析到发线与正线之间、到发线与到发线之间的并发作业,并根据行车检算出来的行车密度来判断各线之间的接发车作业是否必须同时进行。这些内容在传统轨道交通项目设计之初均是侧重于包容性设计原则,即是在设计原则和规范文件的指导下,在投资允许的情况下尽可能提供更加灵活的运营调

度方式。然而,与其他轨道交通方式相比,高速磁浮项目的运营需求存在较大差异。因此,应该在工程设计之初深入研究并明确上述问题。如果站内确实不存在某些并发作业形式,那么可以合并相应的分区,从而减少不必要的投资和运维成本。

由此可见,如何平衡运营需求与工程投资(含站场功能、站场规模、分区数量等)的关系,获得性价比更高的设计方案,将成为高速磁浮工程前期研究和设计的重点之一。

3 结语

高速磁浮交通车站的功能定位和站场配线形式,必须与运营需求相结合,并要充分考虑高速磁浮线路的运营特点。运控分区和牵引分区的划分,必须也要从运营需求为出发点,并结合站场布局,进行整体方案设计。只有从全局把握,统筹考虑,让各系统之间的设计理念互动起来,与运营需求高度匹配,才能合理地开展站场、运控和牵引供电专业的相关设计。

参考文献

- [1] 吴祥明. 磁浮列车[M]. 上海:上海科学技术出版社,2003.
- [2] 李京文. 高速磁浮交通系统在长大干线的适用性研究[M]. 北京:知识产权出版社,2014.
- [3] 张沛艳. 高速铁路站场设计几个问题的探讨[J]. 铁道工程学报,2008(10): 83.
- [4] 张前锋. 高速磁浮交通牵引控制系统原理分析及研究[J]. 设备管理与维修,2019(9): 126.
- [5] 钦臻文. 磁浮列车定位信号传输和列车初始状态定位过程[J]. 城市轨道交通研究,2015(5): 56.

(收稿日期:2020-02-21)

(上接第117页)

- [2] 中华人民共和国住房和城乡建设部. 城市轨道交通衔接车辆通用技术条件:GB/T 23431—2009[S]. 北京:中国标准出版社,2009.
- [3] 汪克强. 电力机车司机室电加热器的设计选型[J]. 电力机车与城市车辆,2008,(9): 9.
- [4] 葛党朝,李小平. 城市轨道交通车辆空调系统[J]. 电力机车与城市车辆,2013,(9): 143.

- [5] 法国标准化协会. 铁道车辆用强制通风套管式电加热器:NFF13-835—1989[S]. 巴黎:法国铁道标准化办公室,1989.
- [6] 中华人民共和国国家铁路局. 铁道客车及动车组电取暖器:TB/T 2704—2016[S]. 北京:中国铁道出版社,2016.
- [7] 方宗升,李绪全. 强迫对流电加热在青藏铁路客车中的应用研究[J]. 山东制冷空调,2009(2): 126.

(收稿日期:2019-01-08)