

# PBTS 跨坐式单轨车辆辅助供电系统输出功率研究

王 伟<sup>1</sup> 朱冬进<sup>1</sup> 马步春<sup>2</sup> 李卫兵<sup>1</sup>

(1. 中车浦镇庞巴迪运输系统有限公司, 241060, 芜湖;

2. 南京华士电子科技有限公司, 210039, 南京//第一作者, 工程师)

**摘 要** 对 PBTS 跨坐式单轨车辆辅助供电系统的组成、电压制式, 以及辅助电源装置的设备构成和工作原理进行了分析总结。针对某海外项目, 环境温度高、对单轨车辆空调系统的制冷需求较大的情况, 辅助供电系统输出功率需要从 PBTS 跨坐式单轨车辆原有的 37.5 kW 增大至 43 kW。为此, 从辅助电源装置内使用的主要设备, 对如输入电感、输入熔断器、预充电电路、输入电流传感器、智能功率模块等的可行性和适应性进行研究。研究发现, 既有 PBTS 跨坐式单轨车辆辅助电源装置内大部分设备都能适应功率变大后的要求, 三相输出滤波电感、去耦电感、输出接触器等设备则需要重新设计或选型。

**关键词** 单轨; 车辆; 辅助供电系统; 三相输出功率

**中图分类号** F570.73

**DOI:**10.16037/j.1007-869x.2019.10.014

## Output Power of PBTS Straddle Monorail Vehicle Auxiliary Power Supply System

WANG Wei, ZHU Dongjin, MA Buchun, LI Weibing

**Abstract** In this paper, the composition and voltage type of the auxiliary power supply system, the equipment structure and working principle of the auxiliary power unit for PBTS straddle monorail vehicle are analyzed and summarized. According to the higher refrigeration demands for the monorail vehicle air conditioning system which will work in an oversea project with high ambient temperature, the output power of the auxiliary supply system needs to be increased from the original 37.5 kW of PBTS straddle monorail vehicle to 43 kW. For this reason, the feasibility and adaptability of the main equipment in the auxiliary power unit are studied, including input inductance, input fuse, pre-charge circuit, input current sensor, IPM, etc. The research result shows that most of the equipment in the auxiliary power unit of PBTS straddle monorail vehicle can meet the requirements of the increased power, but the three-phase output filter inductance, decoupling inductance and output contactors need to be redesigned or re-selected.

**Key words** monorail; vehicle; auxiliary power supply sys-

tem; three-phase output power

**First-author's address** CRRC Puzhen Bombardier transportation Systems Ltd., 241060, Wuhu, China

PBTS 跨坐式单轨车辆是由庞巴迪公司研发的跨坐式单轨车辆。该型车辆已在巴西圣保罗市轨道交通 15 号线项目中投入运营, 具有转弯半径小、爬坡能力强、噪声低、无人驾驶、编组灵活、系统能耗低、安全可靠、乘坐舒适性高等特点。辅助供电系统是单轨车辆的重要组成部分之一。为了保证单轨车辆能够长时间正常运行, 辅助供电系统需要给车辆辅助负载设备提供充足的电源, 并应具有高的安全性、可靠性及冗余性。

本文对 PBTS 跨坐式单轨车辆辅助供电系统的组成、电压制式, 以及辅助电源装置的设备构成、工作原理进行了分析总结, 并考虑到车辆辅助负载设备功率增大的情况, 对辅助电源装置增大三相输出功率的可行性进行研究。

## 1 单轨车辆辅助供电系统的组成及电压制式

单轨车辆每节车都配置有 1 套辅助供电系统。每套辅助供电系统由 1 台高压分线箱、1 台辅助电源装置、1 台电源分配箱和 1 台蓄电池组成。

高压分线箱的主要功能是把从受流器收集到的主电源分配给辅助电源装置和牵引系统。当车辆停放在维护车间时, 可操作电动隔离开关至车间电源位, 将车辆电源从受流器隔离, 并从车间电源获取主电源。

辅助电源装置通过三相逆变模块、单相逆变模块、低压变换模块 1、低压变换模块 2 等部件, 将 DC 750 V 主电源转换为适用于车辆车载设备的交流电源和直流电源。

电源分配箱的主要功能是从辅助电源装置获

取三相 AC 380 V、AC 220 V、DC 110 V 和 DC 24 V 电源,经电源分配箱断路器以及控制接触器向车载设备提供交流、直流电源和短路保护。

蓄电池用于在 DC 750 V 主电源故障或缺失的情况下,为必要的低压负载提供紧急低压电源。

单轨车辆相邻两车的辅助供电系统结构如图 1 所示。

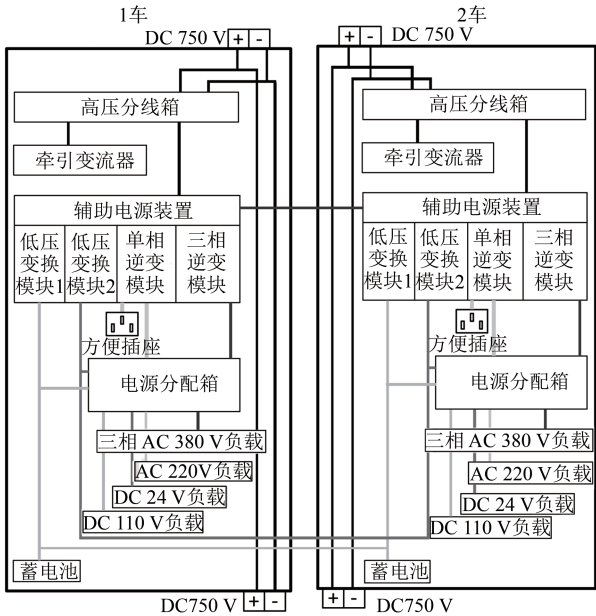


图 1 单轨车辆相邻两车的辅助供电系统结构

## 2 单轨车辆辅助电源装置的设备构成及工作原理

辅助电源装置接收来自受流器或车间电源的 DC 750 V 一次电源,并将其转换成 4 种类型的电压:三相 380 V/50 Hz 交流电、单相 220 V/50 Hz 交流电、124.5 V 直流电、24 V 直流电。然后,这些电压将分配给整个车内的各种子系统:

- 1) 380 V 交流电源:向供暖、通风和空调系统,以及液体冷却系统供电;
- 2) 220 V 交流电源:向车载插座供电;
- 3) 124.5 V 直流低压电源:输出端向 110 V 直流(标称)低压总线供电;
- 4) 24 V 直流低压电源:输出端向 24 V 直流控制电压总线供电。

相邻两车辅助电源装置间的车间连接为相连车厢的 380 V 交流、110 V 直流和 24 V 直流电基本负荷提供冗余。

辅助电源装置与控制器局域网总线网络相接,从而实现与列车管理系统,以及其他列车子系统之间的通信。辅助电源装置内部监控系统对其控制电路进行监控,并通过控制器局域网总线网络向列车管理系统发送状态和故障信息。

相邻两车的辅助电源装置连接如图 2 所示。

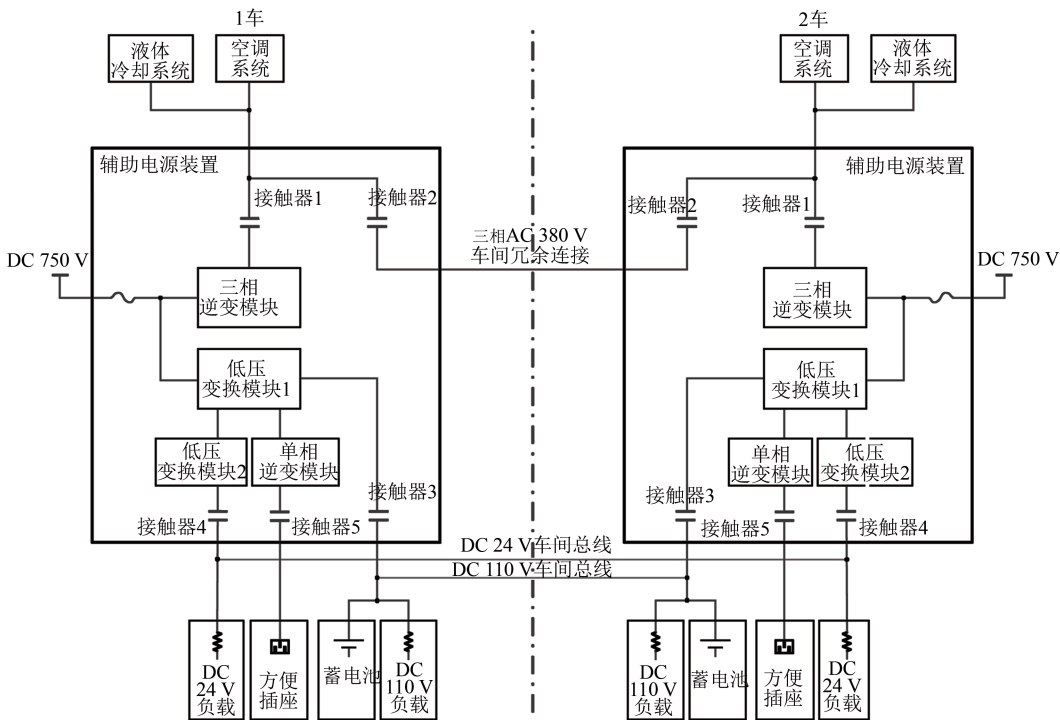


图 2 单轨车辆相邻两车的辅助电源装置连接

## 2.1 设备构成

辅助电源装置由 1 个三相逆变模块、1 个低压变换模块 1、1 个低压变换模块 2,以及 1 个单相逆变模块组成。

1) 三相逆变模块:该模块为三相非隔离式逆变模块,与正弦滤波器连接,继而在输出端产生三相正弦电压。当有重载接入时,该模块可以通过控制电压与频率之比(V/F)来限制涌入电流。

2) 低压变换模块 1:该模块为隔离变换模块,可将 DC 750 V 转换为 DC 110 V,继而为车辆上的 DC 110 V 用电设备提供电能,同时为蓄电池充电。通过均流控制与相邻车辆的低压变换模块 1 连接起来。

3) 低压变换模块 2:该模块为隔离变换模块,可将 DC 110 V 转换为 DC 24 V。当低压变换模块 1 无输出时,该模块由蓄电池提供输入电压。

4) 单相逆变模块:该单相隔离逆变模块由低压变换模块 1 提供输入电压,并输出 AC 220 V 单相电压。当低压变换模块 1 无输出电压时,该逆变模块由蓄电池提供输入电压。

## 2.2 工作原理

辅助电源装置示意图如图 3 所示。

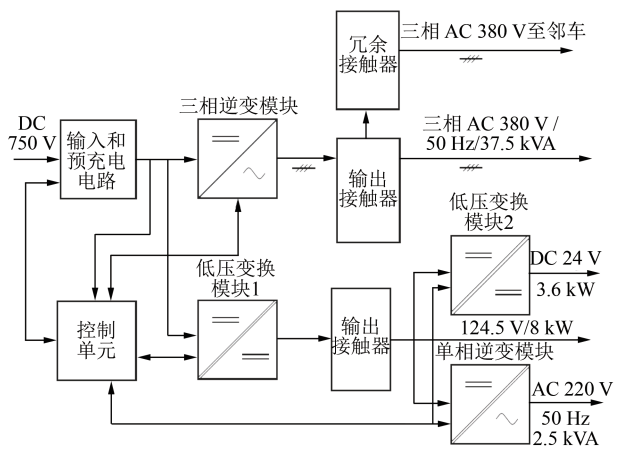


图 3 单轨车辆辅助电源装置示意图

DC 750 V 经输入熔断器、电感和预充电回路后,一路给三相逆变模块,另一路给低压变换模块 1。

三相逆变模块以 DC 750 V 作为电源,由中央处理器(CPU)提供数字空间矢量脉宽调制(SVPWM)信号,为三相逆变模块开关管 IGBT(绝缘栅双极型晶体管)提供驱动信号。为保证输出调制电压幅值不变,通过调整 SVPWM 信号的时间间

隔来调节输出电压。输出电压经由交流电抗器与滤波电容构成的滤波器滤波获得 380 V/50 Hz 的交流电,给负载设备供电。根据检测到的电感电流及交流输出电压进行双闭环控制,通过对输出幅值与相位控制来实现电源输出稳定。

低压变换模块 1 和低压变换模块 2 均采用了移相全桥软开关控制技术和高频化隔离的方案,既可实现功率管的零电压软开关,又可提高效率,大大地减小了体量;采用电压、电流双闭环控制保证输出电压的稳定,过载时采用调节输出电压限流的方式。

单相电源为日常清洁、维护和测试工具/设备供电。单相电源将 DC 110 V 直流经高频变换隔离升压,再经过高频逆变、滤波,输出 220 V/50 Hz 单相交流电,其额定功率为 2.5 kVA;该单相电源输入输出高频隔离,采用高频逆变经 LC(电感电容)滤波,谐波含量少,在全部输入电压范围内从空载到额定负载条件下,输出单相电源的总谐波失真(THD)小于 5%,适合笔记本电脑等使用单相电源的小型便携设备使用。

## 3 辅助电源装置三相输出功率研究

既有 PBTS 跨坐式单轨车辆辅助电源装置三相输出功率为 37.5 kVA。该型号辅助电源装置已在国内外多个项目中得以广泛应用,技术成熟。已应用的项目包括巴西圣保罗市轨道交通项目、我国芜湖市单轨项目等。但在国外某个新项目上,因当地气候炎热,列车运行环境温度高,对列车空调系统的制冷需求较大,所需空调系统的功率也较大。经初步分析,需要将辅助电源装置的三相输出功率由 37.5 kVA 提高至 43 kVA。本文对功率增加后的关键参数及其适用性进行研究。

### 3.1 辅助电源装置参数设计计算

根据项目需求,对功率增大前后辅助电源装置相关参数进行计算,计算时取功率因数为 1,结果如表 1 所示。

### 3.2 可行性与适用性研究

#### 3.2.1 输入电感

既有 PBTS 跨坐式单轨车辆的输入电感技术参数如表 2 所示。

功率增大至 43 kW 后,电感量保持不变,输入电感额定电流为 70 A,实际的额定电流为 82 A。该输入电感可满足新项目使用要求,其适用性分析如下:

表 1 辅助电源装置参数值对比

车辆	参数	参数值
既有 PBTs 跨坐式单轨车辆	输入电压	DC 750 V (500~900 V)
	输出电压	三相 AC 380 (1±5%) V
	输入额定电流	(37.5+15) kW/(750 V×0.94)= 74.5 A
	输入最大电流	(37.5+15) kW/(525 V×0.94)= 106 A
	输出额定电流	37.5 kW/(380 V×1.732)= 57 A
海外某新项目车辆	输入电压	DC 750 V (500~900 V)
	输出电压	三相 AC 380 (1±5%) V
	输入额定电流	(43+15) kW/(750 V×0.94)= 82 A
	输入最大电流	(43+15) kW/(525 V×0.94)= 117.5 A
	输出额定电流	43 kW/(380 V×1.732)= 65 A

表 2 输入电感技术参数

参数符号	参数名称	参数值	备注
$I_e$	额定电流/A	70	用于热设计
$I_{Line}$	线性电流/A	70	
$I_{ov}$	过载电流/A	190	
$I$	额定短路电流/A	350	
$t$	短路时间/ms	1	

1) 电感预埋电缆的截面积为 25 mm<sup>2</sup>,满足载流要求。

2) 电感量随电流变化曲线如图 4 所示。通过电流和电感量曲线可知:在 190 A 情况下,电感依然不会饱和,电流增大后对电感量无影响。

3) 实测温升远低于设计允许温升,额定电流增加后温升仍满足要求。

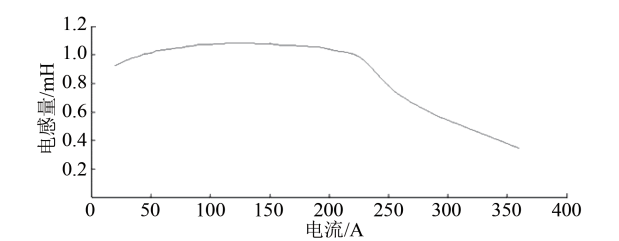


图 4 电感量随电流变化曲线

3.2.2 输入熔断器

从电压和电流两方面,说明熔断器在新项目中具有适用性:

1) 熔断器型号为 D120GC75V160TF,电压等级一致,可适用;

2) 额定电流为 160 A。在输入电压最低的情况下(525 V),辅助电源装置输入最大电流为 117 A,低于额定电流值。

3.2.3 预充电电路

预充电电路如图 5 所示。辅助电源装置得电后,通过预充电电阻 R 向直流环节电容充电。充电完成后,IGBT 导通并短路 R,辅助电源装置开始启动输出。

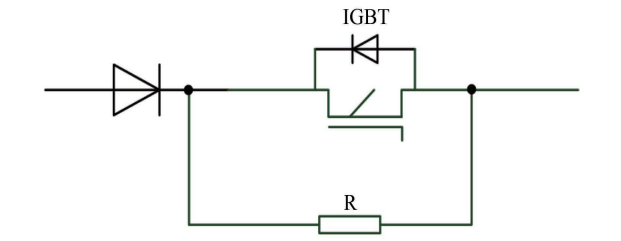


图 5 预充电电路示意图

预充电电路采用 IGBT 开关管,通过驱动信号控制其开关。预充电电路 IGBT 型号为 DIM400XCM45-TS000,技术参数如表 3 所示。功率增加后,由于 IGBT 的  $V_{CES}$  为 4 500 V,而输入电压为 DC 750 V(范围 500~900 V),电压可完全覆盖;IGBT 的  $I_C$  为 400 A,而输入最大电流为 82 A,电流可以完全覆盖。所以,从电压、电流上分析,设备依然满足使用要求。由于功率增加带来的损耗增加,在现有冷却条件下温升依然满足设计要求,因而,从温升角度设备也具有适用性。

表 3 预充电电路 IGBT 参数

关键参数	特性	数值
$V_{CES}$	max	4 500 V
$V_{CE(sat)}$	typ	2.7 V
$I_C$	max	400 A
$I_{C(PK)}$	max	800 A

注:  $V_{CES}$ ——集电极—发射极阻断电压;  $V_{CE(sat)}$ ——在辅助端进行测量的集电极—发射极饱和电压;  $I_C$ ——集电极直流电流;  $I_{C(PK)}$ ——集电极峰值电流; typ—典型值; max—最大值

3.2.4 输入电流传感器

电流传感器用于输入电流的检测,采用 LEM 厂家的 LF305-S/SP10,其额定电流为 300 A,完全覆盖输入电流范围,因而此电流传感器可满足新项目使用要求。

3.2.5 智能功率模块(IPM)

IPM 型号为 FS150R17N3E4,其集电极—发射极阻断电压值为 1 700 V,集电极直流电流为 150 A,集电极峰值电流为 300 A,电路如图 6 所示。单轨辅助电源装置采用 2 个 IPM 并联,单个 IPM 的最大使用电流为 58.5 A,使用率为 39%,输入电压范围短时最高值为 DC 1 300 V,故集电极直流电流为 150 A、耐压为 1 700 V 的功率管可适用,IPM 可以满足新项目的使用要求。

3.2.6 三相输出滤波电感

三相输出滤波电感技术参数如表 4 所示。

2) 本文在受力及网格划分时,充分考虑到导向框和 V 臂对车桥的受力影响,兼顾了所有可能的应力集中点,保证数值模拟的数据真实性。

3) 本文有限元分析的 12 种工况基本涵盖车辆运行中所有的路况,是一种可借鉴的系统分析流程。

参考文献

[1] 章蕾.某特种半挂车车桥疲劳可靠性分析[D].南京:南京理工大学,2007.

[2] 王星.货车驱动桥壳结构强度分析方法研究[D].重庆:重庆交通大学,2008.

[3] 郭年程,史文库,刘文军,等.驱动桥的整体有限元动态模拟[J].西安交通大学学报(自然科学版),2012,46(9): 91.

[4] 陈喆,王伟.汽车车桥结构有限元分析[J].机械,2012,39(12): 33.

[5] 黄焕超.汽车车桥结构有限元分析[J].现代制造技术与装备,2019(1): 27.

[6] 邵松标,刚宪约,柴山,等.整体式车桥有限元分析的位移边界模型研究[J].重庆交通大学学报(自然科学版),2015,34(3): 152.

[7] 张新,王正祥,牛家忠,等.基于 ANSYS Workbench 的重卡前轴的强度分析及疲劳寿命预测[J].制造业自动化,2015,37(17): 64.

[8] 孟斌,姚宾,燕颖,等.基于 Hyperworks 的微型车车桥疲劳寿命分析与研究[J].汽车实用技术,2014(10): 58.

[9] 丁炜琦,苏武,郑小艳,等.基于有限元的某矿用车桥桥壳结构优化设计[J].汽车实用技术,2018(18): 87.

[10] 郑娟英.我国重型汽车车桥历史、现状及发展趋势[J].汽车实用技术,2010(2): 19.

[11] 辛木.中国商用车车桥行业现状及发展动向[J].交通世界,2008(12): 70.

(收稿日期:2019-04-25)

(上接第 57 页)

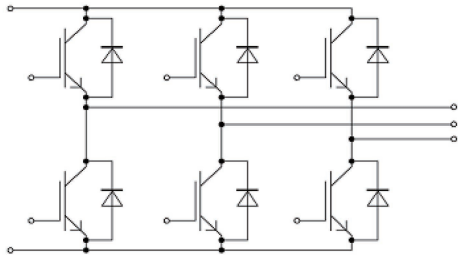


图 6 IPM 电路示意图

表 4 三相输出滤波电感技术参数

参数符号	参数名称	参数值	备注
$I_e$	额定电流/A	54	用于热设计
$I_{peak}$	额定峰值电流/A	85	
$I_{ovpeak}$	过载峰值电流/A	140	
$I_{ov}$	过载能力/A	$1.5I_e$	过载时间 10 min 10 s

滤波电感与滤波电容构成 LC 滤波器(滤波电容采用星形接法),额定电流为 54 A(对应功率为 35 kW)。新项目辅助电源装置的实际额定电流输出为 65 A,超出标称电流值,且实测该电感温升较高,功率增大至 43 kW 后过载使用温升无法达到设计要求。因此,在新项目中需要对此进行重新设计。三相输出滤波电感新设计方案的安装尺寸可以做到与既有方案兼容,质量则较原方案增加约 15%。

3.2.7 去耦电感

并联逆变器去耦电感,设计感量为  $2\times5\ \mu\text{H}$ ,额定电流为 28 A,并联后小于额定输出 65 A 的设计要求,在新项目中需要重新设计。去耦电感新的安装尺寸可以与原方案兼容,质量较原方案增加约 15%。

3.2.8 输出接触器适用性

接触器型号为 CL45D300MWD-RAIL,其接触器最大电流为 60 A。接触器适用性主要考虑其电压等级和过流能力,新项目辅助电源装置中额定的输出电流为 65 A,综合考虑设计余量,需选用容量较大的接触器。

3.2.9 输出电流传感器

输出电流传感器用于输出电流的检测和闭环控制,采用 LEM 厂家型号为 LF205-S/SP5 的设备,其额定电流为 200 A,完全覆盖输出电流范围,可满足新项目使用要求。

4 结语

针对海外某新项目对于单轨车辆辅助电源装置三相输出功率从既有的 37.5 kW 增大至 43 kW 的要求,既有 PBTS 跨坐式单轨车辆辅助电源装置内的大部分设备都能适用,不需要更换;而三相输出滤波电感、去耦电感、输出接触器等则需要重新进行设计或选型。新设计方案下的单轨车辆辅助电源装置与既有装置相比,总质量增加约 12 kg,增幅为 8%。

参考文献

[1] 康玮,于伟凯,候秀芳.CRH380A 型高速动车组辅助供电系统[J].机车电传动,2015(1): 19.

[2] 熊成林,冯晓云.不同结构的列车辅助供电系统分析与比较[J].机车电传动,2008(2): 15.

[3] 肖彦君,吴茂杉.城轨列车辅助供电系统的技术要求和电路选型[J].现代城市轨道交通,2004(4): 24.

(收稿日期:2019-05-12)