

研
究
开
发

出口澳大利亚的 SDA₁ 型交流传动 内燃机车电气系统设计

韩 笑, 廖忠文, 王平华, 杨德萍, 孟玉发

(南车资阳机车有限公司 研发部, 四川 资阳 641301)



摘 要:系统地阐述了 SDA₁ 型机车牵引传动系统、辅助传动系统和控制系统的组成和特性, 介绍了该车新技术、新设备的运用情况。该车已投入澳大利亚运行, 运行状态良好。

关键词: SDA₁ 型交流传动内燃机车; 交流牵引传动系统; 辅助交流传动系统; 控制系统; 电磁兼容

作者简介: 韩 笑 (1980-), 女, 工程师, 主要从事机车电气控制系统的设计开发工作。

中图分类号: U262.33*3

文献标识码: A

文章编号: 1000-128X(2012)05-0025-05

Electric System Design of SDA₁ AC Drive Diesel Locomotive Exporting to Australia

HAN Xiao, LIAO Zhong-wen, WANG Ping-hua, YANG De-ping, MENG Yu-fa

(R&D Department, CSR Ziyang Locomotive Co., Ltd., Ziyang, Sichuan 641301, China)

Abstract: Components and performance of traction drive system, auxiliary drive system and control system of SDA₁ locomotive were described systematically, and new technology and equipment application of the locomotive was introduced. The locomotive had been put into Australia and worked well.

Key words: SDA₁ AC drive diesel locomotive; AC traction drive system; auxiliary AC drive system; control system; electromagnetic compatibility

0 引言

SDA₁ 型机车是南车资阳机车有限公司 2010 年根据与澳大利亚 SCT 公司签署的机车采购合同而设计制造的交直交电传动干线货运内燃机车。该型机车装用德国 MTU20V4000R43L 型电子控制燃油喷射柴油机和美国 Wabtec 公司的 Fast Brake 电空制动系统, 最大运用功率为 3 000 kW, 最大运行速度 120 km/h, 为澳大利亚国内目前功率最大且技术最为先进的内燃货运机车, 具有启动牵引力大、持续牵引力大、粘着利用率高等优点。为满足用户的需要, 机车采用了新的控制技术和电磁兼容技术, 安装了新型的行车安全设备、多机重联装置、事件记录仪等。本文将针对机车电气系统各主要部分作简要介绍。

1 SDA₁ 型交流传动内燃机车特性

SDA₁ 型机车交流传动系统中逆变器控制单元采

用轴控方式, 牵引电动机控制采用直接力矩控制方式, 主变流器采用大功率 IGBT 变流元件、冷却方式采用强迫水冷。机车辅助系统根据各辅助交流电机的特点, 对各负载均实现变频控制, 减少辅助电机直接启动对辅助系统的冲击, 达到节能目的。机车控制系统包括机车级控制系统、传动级控制系统、人机界面以及网络控制系统, 整个控制系统满足网络化、模块化、分布式控制要求; 同时, 该系统在中国首次实现了与 Wabtec 公司的 Fast Brake 电空制动机和 TRAINLINK II LCU-09 列尾装置的控制单元之间的正常通信。SDA₁ 型机车还具备与 3 台以上采用 AAR 标准重联的机车重联、不停车自动补充燃油等功能。

1.1 机车主要性能参数

用途	干线货运
主传动方式	交直交电传动
柴油机装车功率	3 000 kW
轴式	C ₀ -C ₀
最大运用速度	120 km/h

收稿日期: 2011-12-05; 收修改稿日期: 2012-06-16

持续速度	16 km/h
最大启动牵引力	600 kN
持续牵引力	520 kN
轮周电阻制动功率	3 600 kW
最大电阻制动力	325 kN

1.2 机车牵引特性

SDA₁型机车

启动牵引力为 600 kN, 持续牵引力为 520 kN, 恒功速度范围是 16~120 km/h。

图 1 为 SDA₁ 型交流传动内燃机车的牵引特性曲线。

1.3 机车电阻制动特性

SDA₁ 型机车采用动态电阻制动。制动工况时, 通过传感器对牵引电动机进行监测, 逆变器控制单元实时计算并对逆变器的频率和电压施以控制, 以便使每台电机以给定的减速度和转矩运行, 以实现机车的动态电阻制动。采用这种制动方式, 可以使机车速度降到 5 km/h 以下而无需增加别的制动硬件。

机车电阻制动特性曲线见图 2。

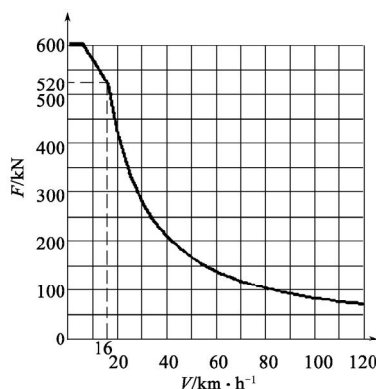


图 1 牵引特性曲线

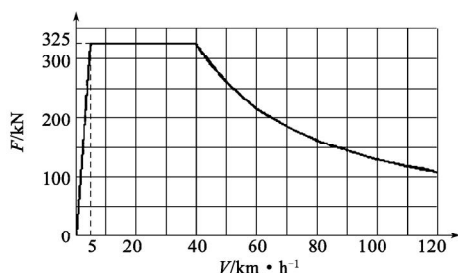


图 2 电阻制动特性曲线

2 机车交流牵引传动系统

SDA₁ 型机车牵引电传动系统主要包括：同步主发电机、主变流器、交流异步牵引电动机和制动电阻装置。

SDA₁ 型机车合同技术规范要求：机车启动牵引力 600 kN, 持续牵引力 520 kN。其高启动牵引力和高持续牵引力意味着牵引电动机大转矩和大电流, 相应地主变流器需输出大电流, 因此选择散热效率更高、冷却效果更均匀的强迫水冷作为主变流器的冷却方式。

为了满足机车高粘着利用的要求, 牵引电机的控制方式采用了轴控方式。与架控方式相比, 轴控方式可以相对独立地根据轮径差或轴重转移要求灵活地调节单个牵引电动机的转速和转矩, 从而充分发挥牵引电机的最大牵引力, 实现较高的粘着利用。利用 DF_{8DJ} 机车进行线路试验调试, 在原基础上优化了机车控制策略。同时为提高控制精度, 在机车上增设雷达测速装置采集机车速度, 并将牵引电机转速传感器齿盘的齿数增加到 192 个, 提高了转速信号采集精度, 为提高机车粘着利用控制创造了条件。

图 3 所示为交流牵引传动系统框图。

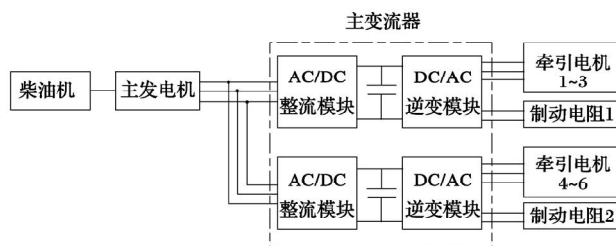


图 3 交流牵引传动系统框图

2.1 主变流器

SDA₁ 型机车的主变流器为一体化结构, 每台机车仅装备 1 台主变流器, 为 2 个转向架的 6 台牵引电机供电。主变流器主要由 1 个二极管整流模块和 6 个大功率 IGBT 牵引逆变器模块构成。中间直流环节并联有起支撑及滤波作用的电容器。为实现宽广的恒功率范围, 牵引电机的电压变化范围相应提高。考虑元件的电压等级和机车系列化要求, 中间直流环节采用 DC 1 500 V 等级。此外, 主变流器还包括牵引控制器 (DCU1, DCU2)、电流检测装置、电压检测装置、保护设备等部门。

主变流器主要技术参数如下：

额定输入电压	AC 1 248 V
额定输入电流	AC 1 326 A
额定输入频率	150 Hz
中间电路电压	DC 1 600 V
额定输出电压	AC 0~1 248 V
额定输出电流	3×601 A
最大输出电压	AC 1 248 V
最大输出电流	3×670 A
控制电源	DC 74 ^{+14.8} _{-22.2} V

2.2 主发电机

无刷励磁同步发电机是为大功率高速柴油机配套的交流传动内燃机车用牵引发电机, 为卧式单支承结构的三相无刷励磁凸极同步发电机, 采用防护式轴向自通风, 冷却风由前端盖的进风口进入, 由机座柴油机端圆周方向排风口排出。

主发电机主要技术参数：

额定容量	3 300 kVA
额定转速	1 800 r/min
额定频率	150 Hz
励磁方式	无刷励磁
额定励磁电流	≤8 A
额定励磁电压	<70 V

2.3 交流异步牵引电机

交流异步牵引电机是由逆变器供电的三相鼠笼式异步牵引电机, 为滚动抱轴承结构。

为达到合同上规定的机车启动牵引力 600 kN、持续牵引力 520 kN 的要求, 机车配置传动比 78/15, 半磨耗轮径 1 028.5 mm, 计算得出牵引电机应该满足启动转矩 10 143 N·m, 持续转矩 8 791 N·m 的条件。

牵引电机主要技术参数：

持续功率	395 kW
额定电压(基波)	521 V
额定电流(基波)	584 A
额定转速	430 r/min
最大转速	3 344 r/min
额定频率	22.6 Hz
额定转矩	8 793 N·m
后动转矩	10 143 N·m
最大电流	660 A

2.4 制动电阻装置

机车采购合同的技术规范

要求, SDA₁ 型机车最大轮周制

动功率应为 3 600 kW, 考虑齿轮传动、牵引电动机效率等因素, 制动电阻装置的总输入功率约为 3 352 kW。每台机车配备 2 台制动电阻装置, 每个制动电阻装置分为 3 组, 每组电阻单元的输入功率约为 559 kW。基于冗余考虑每组电阻单元的额定功率取为 600 kW。

考虑到减少斩波 IGBT 的开关损耗、制动电阻装置的空间限制及借鉴成熟部件, 制动电阻 $R=3.55\ \Omega$ 。电阻制动工况, 中间直流环节电压稳定在 DC 1 600 V, 则制动电阻的额定工作电压为 DC 1 600 V, 额定工作电流 $I_z=\sqrt{P/R}=\sqrt{600000/3.55}=411\text{ A}$ 。

3 机车辅助系统组成

机车辅助系统包括直流辅助系统和交流辅助系统。

3.1 直流辅助系统

直流供电系统在柴油机启动前由蓄电池组供电。蓄电池组供电给直流启动电机带动柴油机启动。柴油机启动后, 启动电机转换成发电机工况发出 74 V 的直流电给蓄电池充电, 同时给控制电路、照明电路、微机网络控制系统等供电。

3.2 交流辅助系统

交流辅助系统主要由交流辅助发电机、牵引电机通风机、高温水电机、中冷水电机、空压机电机、除尘风机、牵引变流柜冷却水泵电机、空调机组、生活用电设备(AC 220 V)、辅助变流柜 A 和辅助变流柜 B 等组成。辅助系统工作原理图见图 4。

辅助交流发电机为辅助变流柜提供输入电源, 其他设备为辅助变流柜的负载。正常情况下, 辅助变流柜控制冷却风机、牵引通风机根据负载温度变频工作; 控制空压机电机变频启动后, 电机

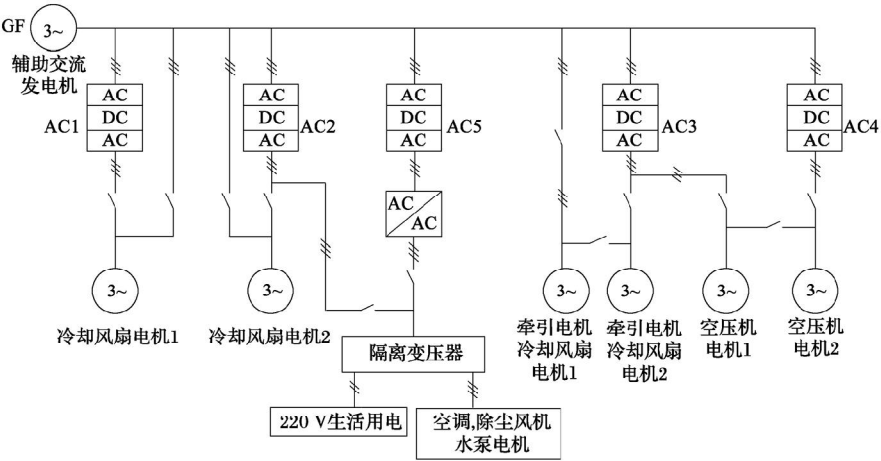


图 4 辅助系统工作原理图

转速随着柴油机的转速变化而变化; 控制三相 380 V/50 Hz 负载及单相 AC 240 V 生活用电变频/定压工作。当辅助变流模块发生故障时, 由 ACU 控制自动将负载进行切换, 在最大程度上达到节能和提高系统可靠性的目的。

4 机车控制系统

SDA₁ 型交流传动内燃机车的控制系统采用分布式微机网络控制系统。该微机网络控制系统是一个多处理器控制系统, 以分布式采集及执行、中央集中控制与管理为模式, 从而实现机车的全部控制功能。机车控制系统主要由机车微机控制装置 LCS32、传动控制系统 DCU、机车显示器 IDU、TCN 网关 VCM(包括 TCN GW1 和 GW2)、辅助控制器 ACU、柴油机控制器 PAU、列尾装置 EOT、机车事件记录仪、Fast Brake 电空制动系统、LEADER 系统等组成。

机车控制系统组成框图如图 5 所示。

TCN 网关 VCM、HCM、机车微机控制装置 LCS32、传动控制系统 DCU 及机车显示器 IDU 之间采用 MVB 总线

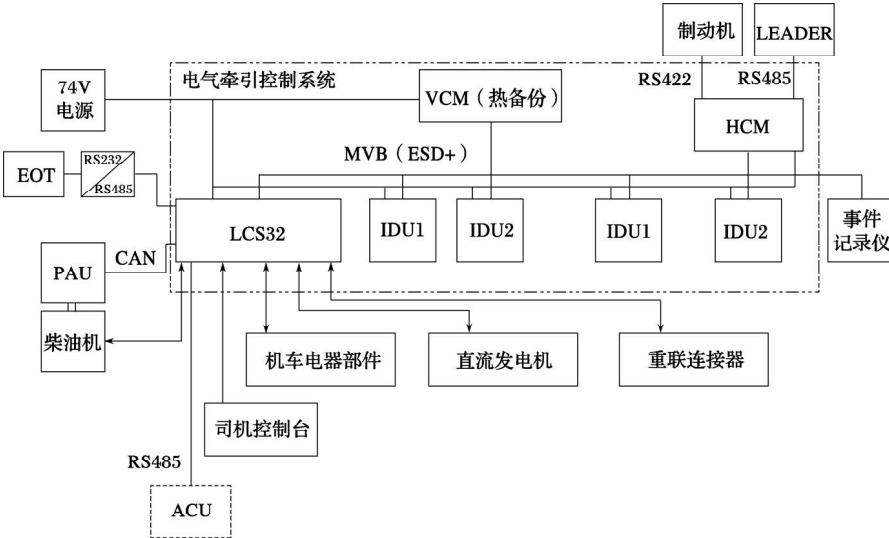


图 5 机车控制系统组成框图

进行通信,并由VCM控制和管理整个MVB网络通信系统,实现MVB网络的数据交换。

机车微机控制装置LCS32通过CAN总线与柴油机控制器PAU进行通信,通过RS232/RS485协议转换器与列尾装置通信(HOTD/EOT)。

辅助控制器ACU通过RS485与辅助显示屏及LCS32进行通信,其中ACU作为485总线的主机。

HCM通过RS422与制动机通信,通过RS485与LEADER通信。

机车通信系统框图见图6。

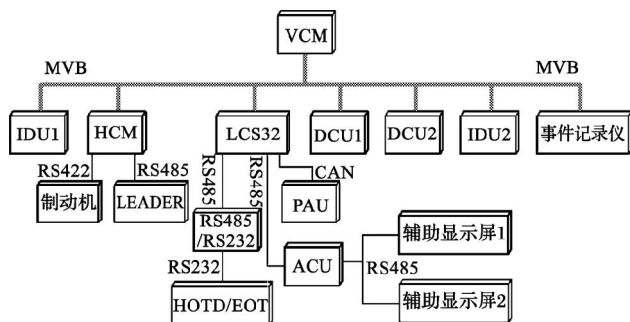


图6 机车通信系统框图

5 机车新技术、新设备的应用

根据澳大利亚对SDA₁型机车在功能上提出的高要求,在SDA₁型机车上采用了以下新技术和新设备。

5.1 多机重联技术

重联连接信号以AAR 27芯连接器信号的标准为基础,兼顾了低恒速功能和自动补燃油功能所需的信号,定义与澳大利亚现有GT46Ace机车相同。该技术的应用使机车具有以下优点:

①可3台以上机车重联,实现与用户现有机车GT46Ace的混编重联。同时可实现与74 V控制电压等级、采用AAR标准重联的所有机车的重联。

②实现低恒速控制。SDA₁型机车将恒低速控制功能集成在机车级微机控制系统中,微机显示屏与机车级微机控制系统采用MVB网络进行数据交换。当司机通过微机显示屏界面设置好重联的多台机车的功率发挥限值、在0.1~9.9 km/h范围内设定恒速运行时,微机控制系统将自动根据列车的牵引负载变化、线路的坡道、弯道等情况,自动调节控制柴油机转速和主发电机的励磁电流,使机车按照设定速度恒定运行,并通过27芯重联插座的5脚和11脚将此信号进行重联,实现整列车低恒速的控制。

③SDA₁型机车具有重联机车自动补燃油功能。其目的是当多台重联机车长途运行时,能自动将副挂的油罐车的燃油补充到机车油箱中,避免机车中途停车加油。其功能的实现是通过在机车燃油箱上单独设高、低液位燃油传感器,并将此信号送入自动补燃油控制箱。当机车燃油箱油位低于预先设定值时,自动补燃油控制箱将补油信号通过重联线送入副挂的油罐车控

制系统,实现将副挂的油罐车的燃油自动输送到机车燃油箱的功能;当燃油箱油位达到设定值时,停止向机车油箱供油。

5.2 新型的行车安全设备

应澳大利亚要求,在机车上装备了适合在澳大利亚使用的行车安全设备。

5.2.1 ICE系统

ICE系统保证了列车安全畅通地与远方控制中心和站台的通信联系。

5.2.2 LEADER系统

LEADER系统(Locomotive Engineer Assist/Display & Event Recorder,美国NYAB公司生产)广泛运用于北美铁路。该系统以图示化界面提示司机牵引操作挡位和空气制动压力的需求,使列车能以最佳速度运行,并能大量节约燃油,同时机车调度能更加合理地制订线路运行时间表。

5.2.3 EOT列尾系统集成到微机

目前在发达国家机车上被普遍采用的WABTEC公司生产的TRAINLINK型机车列尾装置,其主要包含2部分:安装在机车上的机车司机室装置LCU列尾主机(TLK-LCU-Head of Train)和安装在最后一辆车辆车钩上的列尾装置EOT(End of Train)。目前配置双操纵台机车均采用“2台LCU+1台EOT”的设计。而SDA₁型机车首先在LCU主机与微机之间采用RS232接口、LSI通信协议通信交换数据信息,LCU和EOT通过无线电路实现双向相互通信,实现微机显示屏、微机和LCU之间的双向通信。同时将列尾装置LCU的所有设置功能都设计到微机显示屏上,并在微机显示屏上设置LCU主机的多个显示画面,所有软功能键和其他软件功能,使司机可直接通过微机显示屏观测EOT返回的所有数据(如EOT制动管压力、EOT运动状态、EOT标志灯状态、EOT蓄电池状态等)并进行操作。通过此方式,将LCU列尾主机的操作、控制和显示功能集成到微机触摸屏,实现了在双司机室机车上采用“1台TRAINLINK II LCU型主机+1台EOT”的方式完成传统列尾装置的所有功能,不仅使每台机车减少1台LCU主机,并可灵活地根据用户需求进行优化设计,如将列尾装置自身记录的机车运行里程数在微机屏界面显示出来供司机观测等。

5.2.4 事件记录仪

事件记录仪实时记录机车运行状态参数、GPS全球定位系统所有位置参数,并能使用Google Earth软件下载和操作。当机车发生事故时,用户可以从事件记录仪的黑匣子中下载记录的数据文件,从中读取机车的位置信息,并在Google Earth上显示列车运行轨迹;同时针对每个位置点,可以按照其GPS信息,在Google Earth上显示这个位置的示意图(如图7)和在此位置机车的运行状态参数、司机动作参数,帮助查找与分析

事故原因。

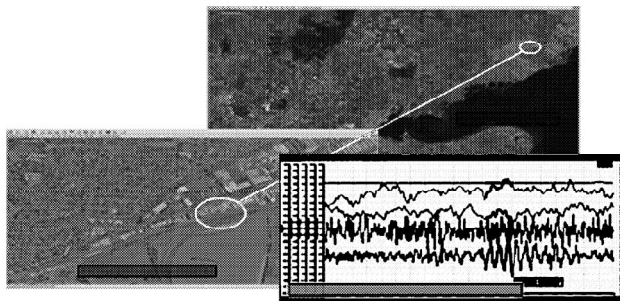


图7 事件记录仪记录截图

5.2.5 音像视频记录仪

音像视频记录仪实时记录司机室内的语音信号和机车前后端的图像信号, 并与当前记录的时间、地理位置(GPS)相关联; 时间、位置信息与视频画面进行叠加后再存储, 其中位置信号用经、纬度表示(时间和位置信息由事件记录以Ethernet的通信方式传输给视频记录仪)。当机车发生事故时可通过音频视频记录仪所记录的信息帮助分析事故原因, 确定事故责任。

5.3 电磁兼容技术及布线

因澳大利亚线路上地面设备多, 而机车产生的电磁干扰必须保证不会干扰到这些地面设备, 因此在SDA₁型机车的设计中, 既要充分考虑机车内部设备的抗电磁干扰能力, 又要避免这些设备对其他设备造成电磁干扰, 所以主要从机车电气设备设计、布线设计和接地设计3方面对机车的电磁兼容性进行了考虑。

①为避免车内电气设备与外界产生相互干扰, 对容易产生干扰的主传动系统部件(如主变流柜、电阻制动柜等)和辅助系统部件(如辅助变流柜等)进行电磁干扰试验, 机车上易受电磁干扰影响的各种信号线与通信线缆都采用屏蔽线缆。

②SDA₁型机车电气设备复杂, 车体内部走线空间紧张, 易受干扰, 依据布线应可靠和隐蔽的设计原则, SDA₁型机车采用在车架左右边侧梁上预埋钢管、集中布置线缆的方式走线(如图8)。同时在机车布线时, 按照高压线与低压线分离、交流线与直流线分离、动力线与控制线分离的原则对机车电缆进行了分类布置。将ICE控制线、车下左照明线、制动机控制线、交流线(220 V)分别布置在机车左边侧梁的4根钢管中; 网络通信线、车下右照明线、机车74 V控制线、重联走线分别布置在机车右边侧梁的4根钢管中; 蓄电池等大线通过专用线夹固定后单独走线。这种对车下走线采用不锈钢管和防护软管防护并分类走线的方式最大限度地加强了导线的防护, 加大了电缆间的电磁间隔, 有效减少了机车布线的电磁干扰问题。

③对机车网络通信电缆线的布置采用从I端到II端通信线缆单独走一根钢管, 对不便穿钢管处的通信线缆采用软管防护。同时设备到设备之间的通信线缆采

用整根不中断的线缆, 线路中间尽量不使用连接器和接线端子转接, 避免因线路中断打开屏蔽层, 造成网络信号对称不平衡的情况发生, 把电磁干扰减少到最低程度。

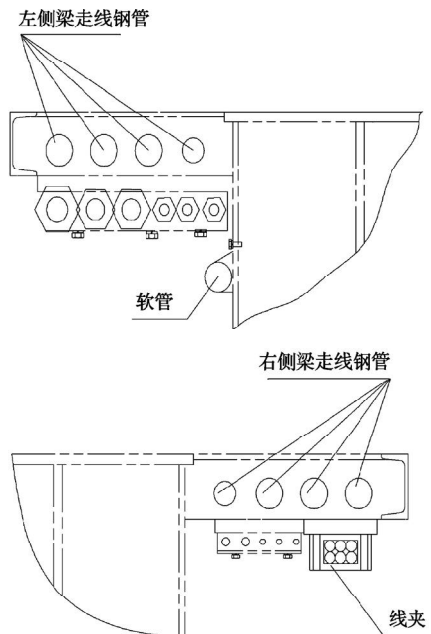


图8 车架左右边侧梁布线

④整车接地方案综合考虑了安全接地和EMC接地, 构建了完善的整车接地构架。机车操纵台、电器柜、主变流柜、辅助变流柜、电阻制动装置、牵引电机和辅助电机等电气关键件通过与机车车体连接的专用铜编织电缆接地, 同时机车车体-转向架构架-牵引电机轴承也通过专用铜编织电缆接地(如图9), 且接地线尽可能短以达到最好的接地效果, 使操作人员不致因设备外壳漏电或故障放电而发生触电; 同时将机车内的电气设备通过低阻抗的铜编织电缆最终连接到钢轨面, 消除高频干扰源的放电及电子、电气设备的静电放电, 从而避免设备受电磁干扰。 (下转第46页)

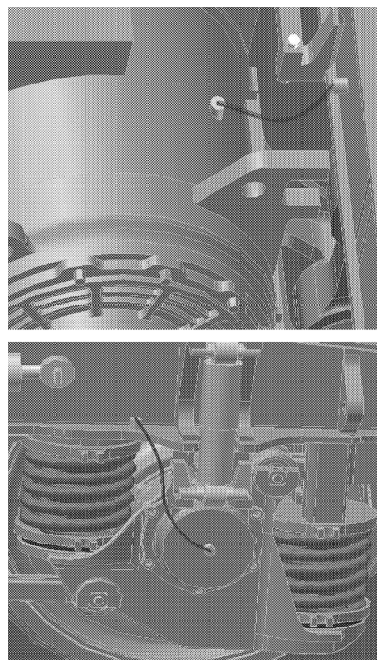


图9 车体—转向架构架—牵引电机轴承接地

硬短路放电装置由1个晶闸管和1个电感组成,当IGBT发生短路时,迅速地将直流支撑电容器上的能量进行泄放,以避免大电流振荡造成对其他器件的损坏。软短路放电装置由1个晶闸管串联1个 $1.3\ \Omega$ 电阻组成,当直流环节电压过压时,触发软短路放电装置。

其他车型的直流保护电路基本都是IGBT直流斩波保护电路,如图11所示。

该电路主要由1个IGBT串联1个电阻组成,当中间直流电压过压或直流环节出现异常时,触发IGBT将中间直流环节中的能量进行泄放,以保护其他器件不受损伤。

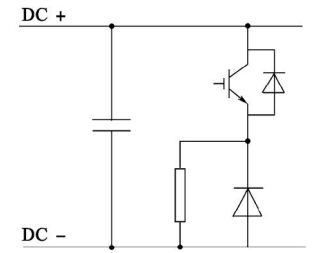


图 11 IGBT 直流斩波保护电路

以上2种型式的直流保护电路均能在直流环节出现异常时进行保护,在设计变流器时,可以根据需要进行合理选用。

3 主变流器主电路推荐

综合以上比较,几种变流器各有优缺点,如果可以将几家变流器的优点进行配合,则会使整个系统更加可靠实用,且能降低成本。图12为推荐变流器的主电路图,其由3个独立电路组成,每一路拥有独立的充放电电路、中间直流环节、过压斩波电路、接地检测电路等。3个电路的主电路及控制电路相对独立,分别为3台牵引电机供电。

推荐主电路的主要特点有:

- ①三路主电路完全独立;
- ②无LC谐振回路,通过控制策略来消除二次滤波

电压的影响;

③接地检测电路采用电压法检测方式,并能通过软件判断从而对接地故障进行准确定位。

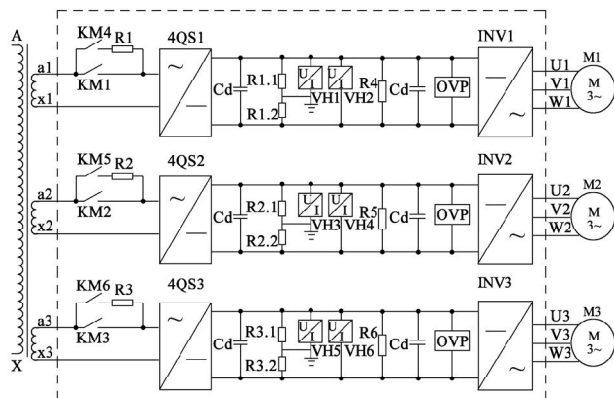


图 12 推荐主变流器主电路图

4 结语

变流器主电路的选择应根据机车的功率等级、可靠性要求、控制性能及经济性要求进行综合考虑。选择一种合理的主电路结构是主变流器成功设计的关键要素之一,而本论文正好为主电路的构造提供了理论依据与实践经验,对后续主变流器的改进设计有一定的借鉴作用。

参考文献:

- [1] 陈燕平,李中浩,忻力.牵引变流器中支撑电容器研究[J].铁道机车车辆,2011,31(2).
- [2] 李伟,郭晓燕,张波.“和谐”系列电力机车传动系统接地检测比较[J].机车电传动,2010(6).

(上接第29页)

6 结语

南车资阳机车有限公司研制的SDA₁型机车于2011年10月初组装完毕,11月公司委托株洲变流技术国家工程研究中心实验中心电磁兼容性实验室依据EN50121-3-1《铁路设施-电磁兼容性-第3-1部分:车辆-列车和配套车辆》和EN50121-3-2《铁路应用-电磁兼容性-第3-2部分:铁路车辆-设备》对机车进行整车电磁兼容测试,其结果完全满足澳大利亚的要求。2011年11月,按照《SDA₁型交流传动内燃机车粘着试验大纲》对机车进行粘着性能试验,启动粘着系数达到0.457,持续粘着系数达到0.396,完全满足澳大利亚提出的机车牵引力要求。2011年12月24日,机车经过澳

大利亚用户的验收签字认可并发运出厂,在澳大利亚阿德莱德完成了补油系统调试试验、列尾装置(EOT)通信试验、与SCT现有机车的重联试验,其结果均符合设计要求,满足机车正常运行条件。

截至2012年5月,机车已在澳大利亚使用了近3个月,运行了2万多公里,运用状况良好,能满足澳洲用户的行车需要,为今后机车出口海外发达国家尤其是澳洲国家起到了很好的示范作用。

参考文献:

- [1] 株洲变流技术国家工程研究中心试验中心.澳大利亚内燃机车电磁兼容检验报告[R].株洲:株洲变流技术国家工程研究中心试验中心,2011.