

DOI:10.13296/j.1001-1609.hva.2016.07.016

工作接地对高速动车组接地回流的影响

万玉苏, 刘耀银, 陈盼, 高国强

(西南交通大学电气工程学院, 成都 610031)

摘要: 高速动车组工作接地方式对接地回流分配有显著影响, 接地回流在各接地碳刷间的分配规律对于碳刷的影响乃至动车组的安全可靠运行有重要意义。为揭示工作接地对于接地回流的实际影响, 笔者基于试验动车组实体及其工作接地方式, 利用Pspice建立高速动车组接地回流电路仿真模型, 仿真分析了不同工作接地方式对接地回流分配规律的影响, 对比分析了现场测试数据与仿真结果。结果表明, 在改进工作接地方式前, 牵引电流通过工作接地的电流最大达到300 A, 改进后降低值达总牵引电流的13%~21%, 左右轴差值仅占总牵引电流的2%。因此结论即增加工作接地点可以有效减小工作电流值, 降低流过不同碳刷的工作电流差异。以上结论为制定标准动车组的接地方式提供了理论依据。

关键词: 高速动车组; 工作接地方式; 接地回流

Effect of Working Grounding Mode on Grounding Reflux of High-speed EMU

WAN Yusu, LIU Yaoyin, CHEN Pan, GAO Guoqiang

(School of Electrical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

Abstract: The working grounding mode of high-speed electric multiple units (EMU) imposes a significant effect on distribution of grounding reflux. The distribution law of grounding reflux among each carbon brush is of great significance to the lifetime of brush as well as safe and reliable operation of EMU. In this study, to reveal the effect of working grounding mode on grounding reflux, a high-speed EMU grounding reflux model was built with the software Pspice based on real EMU body and its grounding way, effect of working grounding mode on distribution law of grounding reflux was analyzed, and the data obtained from simulation were compared with the data tested on site. The results show that the maximum working grounding current reaches 300 A before the improvement of grounding mode, while the working current is reduced by 13%~21% of total traction current, and the current difference among carton brushes is reduced to 2% of total traction current after the improvement. Conclusion is drawn that the working current and the difference of working current among carbon brushes can be reduced efficiently by increasing points of working grounding. The conclusion may provide a basis for determining working grounding mode of standard high-speed EMU.

Key words: high-speed electric multiple units; working grounding mode; grounding reflux

0 引言

工作接地是高速动车组牵引电流的主要泄流通道。随着列车运行速度的提升, 牵引电流不断增大, 通过工作接地的电流也随之增加^[1-2]。当列车的接地方式不合理时, 接地碳刷与车轴间的滑动接触

电阻的分散性增大, 易导致电流分配不均, 接地点产生电位差, 从而在接地碳刷间形成局部环流, 易导致车载电气设备的绝缘击穿与轴承电腐蚀^[3]。现有运行经验发现, 工作接地电流增大, 高速动车组过绝缘关节时产生绝缘关节击穿, 导致绝缘节与钢轨烧损, 严重时威胁到列车的行车安全^[4]。因此, 为确保高速列车的安全可靠运行, 有必要对高速动车

收稿日期: 2016-01-25; 修回日期: 2016-03-24

基金项目: 国家自然科学基金(U1234202, 51325704)。

Project Supported by National Natural Science Foundation of China(U1234202, 51325704).

组工作接地方式对接地回流的影响进行系统的研究。

目前,国内外学者致力于接地电流对轴承电蚀的研究,但是缺乏工作接地方式对高速动车组接地回流影响的研究。根据铁标 TB/T 2947—1999《列车干线供电技术条件》规定,客车轴箱应进行绝缘,以防止电流通过轴承造成损害^[5]。文[6]中分析了接地回流对轴承电蚀的影响,提出采用在车轴端加装接地装置来抑制车体回流;文[7]中研究了地铁车辆接地方式,并分析其对接地回流的影响,指出车体环流使得列车车体电流增大,并提出在工作接地和保护接地之间连接接地电阻器以抑制车体环流。国内高速动车组接地方式的设计没有统一的标准。根据中国高铁自身特点,文[8]中重点对现有动车组的接地方式优缺点进行对比分析,指出工作接地和保护接地分开设置且采用多点接地,可降低车体与轨道电势;文[9]中在车体与轴端之间采用隔离电阻,能降低回流到车体的电流;文[10-11]中为防止接地电流回流,在车轴与车体之间设置一个 $0.5\ \Omega$ 的接地电阻器,但车体电势随之升高,对降低浪涌过电压也极为不利;文[12]中分析了接地装置中使用不同碳刷的性能;文[13-14]中对客车转向架接地技术与电气接地进行了分析,指出接地电流可能造成轴承绝缘击穿或者是轴承损伤;文[15-16]中基于CRH380系列车型,提出了改进保护接地的方案,建议在所有动力转向架上加装保护接地装置。

文中针对试验动车组的工作接地方式,构建车体接地回流的整车分析模型,并结合现场试验数

据,分析接地回流分配规律,为深入研究工作接地方式对高速动车组接地回流的影响机理提供理论基础,同时也为标准动车组工作接地方式的设计提供依据。

1 高速列车主电路分析

1.1 主电路

动车组采用动力分散,其中1、3、6、8车为动车,每节动车下均装有牵引变流器提供牵引动力。受电弓安装在2号和7号车体上,见图1。图2给出了动车组接地方案,其中保护接地与工作接地相互独立。该动车组工作接地点分别设置在2、7号车2轴左侧和3轴右侧,通过接地碳刷、轮对、钢轨(或大地)实现回流。动车组每单节车辆均设保护接地装置且车辆间通过全列贯通电缆连接,因各保护接地距离较近,在充分保证车体与轨道等电势的同时,也能减小流经车体的电流。但由于多点接地,易构成各种电气回路,形成环路电流,造成车载设备发热等问题。图3给出了动车组主电路结构图,动车组正常运行时,采用交流传动系统交—直—交的传动方式,利用架设在TP02车(TP07车)的受电弓从接触网上接受电流,牵引电流通过与受电弓出线端相连的高压电缆、高压断路器传输到两台车载牵引变压器一次侧,变压器副边将电压降低并通过整流电路调节为直流,然后通过逆变器逆变成三相交流电驱动牵引电机;在变压器原边末端,电流经由工作接地装置泄流至钢轨,最后回流到变电所。

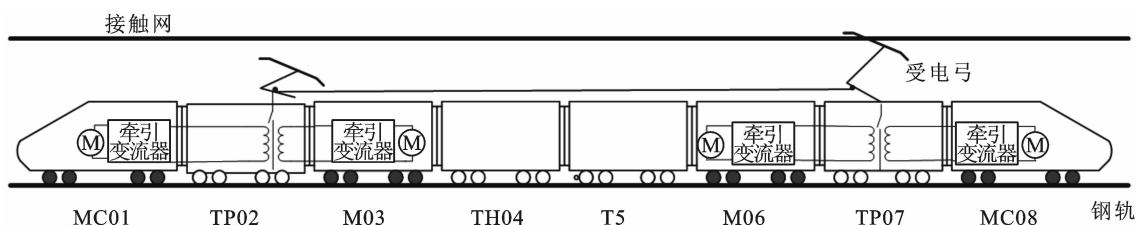


图1 动车组结构图

Fig. 1 The structure diagram of EMU

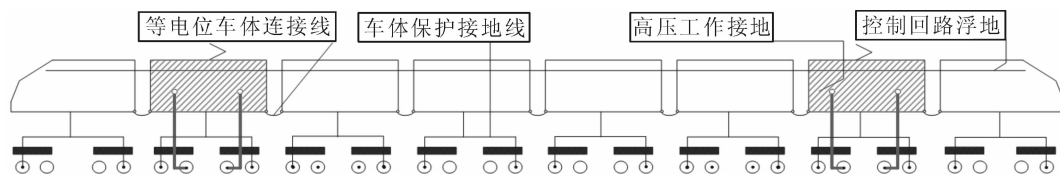


图2 动车组接地方式

Fig. 2 The EMU grounding method

1.2 高速动车组接地系统

高速动车组接地系统主要包括两部分,即主回

路电气工作接地和车体保护接地。动车组的工作接地是指牵引电流的回流接地,动车组工作接地通过

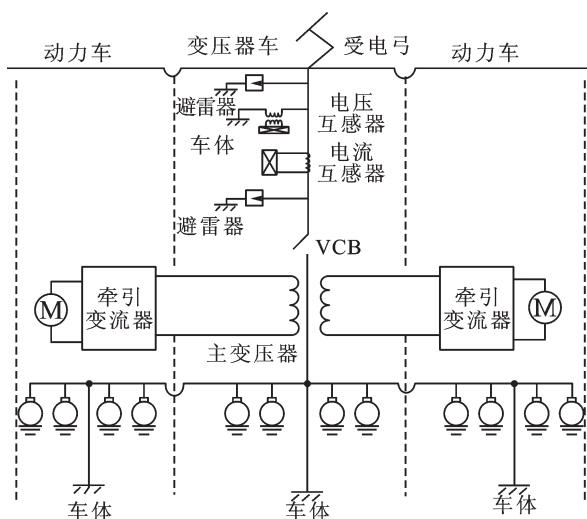


图3 主电路图

Fig. 3 The main circuit diagram

变压器末端输出点直接与接地装置连接,接地装置通过接地碳刷与车轴上的集电环相连,车轴经由轮对连接到钢轨,并通过综合贯通地线入地,将电流回流至牵引变电所^[7]。保护接地是指将整车电器设备故障电流及各类过电压或电气设备的漏电流导通到轨道。该动车组所有转向架均安装有保护通道,即每台车体转向架的1轴和4轴的轴端均安装有保护接地装置,通过保护接地电缆与车体相连。这两种接地方式通常都是由特定的电缆及安装在转向架轴端的碳刷组成,工作接地电缆同整车主变压器的原边相连,保护接地电缆连接车体与接地碳刷装置。接地电缆,碳刷装置与车轴,轮对,钢轨组成车体的接地系统^[18]。

2 高速动车组接地回流分析

2.1 工作接地对接地回流的影响机理

该动车组采用的是车体全部贯通,动车组主回路通过变压器车的工作接地碳刷直接接地,同时车体也直接通过保护接地碳刷实现接地。接地碳刷安装在每节车的车轴上,由于车体电阻较低,当接触碳刷接地电阻不稳定时,碳刷接触性能降低,车体接地系统电阻幅值上下波动,由于接地钢轨回路与车体回路电阻的差异,这种接地方式会使得钢轨回流通过在体接地点进入列车车体和轴承箱,导致车体局部环流,造成车体局部发热^[19-21]。而且当电流流入轴承时,造成轴承电腐蚀。此外,由于车体回流回路的整体阻抗低,接触网上的牵引电流会在钢轨回流时通过车体保护接地点进入到车体,加大了列车的非正常损耗。

2.2 高速动车组接地回流的仿真分析

正常工况下,动车组从受电弓受流,经车载变

压器等电气设备,通过工作接地碳刷流入钢轨。动车组每列车均有保护接地,使得车体、转向架、车体间互连的等电势连接电缆共同构成的牵引回流环流增多。图4为高速动车组接地回流过程的电路图,其利用Pspice软件建立仿真模型。根据中国高速铁路架设的典型参数:简单链型悬挂供电臂长度为25 km时,接触网电压为27.5 kV,接触网电阻 R_1 为4.45 Ω ,接触网电感 L_1 为35.7 mH。经现场实测,测得车体电阻 R_c 为0.047 Ω ,电感 L_c 为0.23 μH ,车间连接电阻0.002 Ω ,碳刷接触电阻值在0.006~0.1 Ω 之间变化,碳刷间连接电阻阻值0.01 Ω ,钢轨电阻0.135 Ω/km ,电感0.43 mH/km。列车正常运行时变压器副边等效阻抗取变压器在额定负载下运行时负载电阻阻值。

$$R = \frac{U_{2N}^2}{S_N/2} \quad (1)$$

式(1)中: U_{2N} 为牵引变压器二次侧额定电压值; S_N 为牵引变压器容值。

假设动车组2号车的受电弓受流,工作接地与保护接地电流分布见图5(图5中1车1表示一号车一轴,其他类似)。

由于动车组接地方式的对称性,主要考虑动车组1、2、3、4、8车的电流分布情况,图中工作接地电流(峰值)分别为200、300 A,流过左右接地碳刷的差值达100 A,主要是由车下钢轨电阻电感、转向架间连接线电阻等共同作用造成的。保护接地电流(峰值)1、2、3、4、8车1轴和4轴分别为37、13 A;8、18 A;10、3 A;3、2 A;13、37 A(由于车体对称性,图5(b)中1车1与8车4曲线重合,1车4与8车1曲线重合)。保护接地电流头车和尾车最大,这是因为由其他车的保护接地点进入到车体的电流车流经车体之后最终要由头尾车的保护接地点重新汇流到钢轨,并回流至牵引变电所。另外各节车厢保护接地电流不同,是每节车厢对应的钢轨电阻、电感、车间连接电阻共同作用结果。

2.3 接地回流实验与仿真结果分析

为检验动车组工作接地方式对接地回流的实际影响,并对仿真数据进行验证,在南昌—宜春段进行接地回流试验,试验装置主要包括:FLUKE传感器、同轴电缆线、数据采集器、PC机等,接地电流测试原理见图6。通过电流钳夹在动车保护接地线和工作接地线上,同轴电缆线一端与电流钳相连,一端与数据采集器相连,总共12路信号,数据采集器与PC机相连。试验共进行19次,试验结果分布趋势见图7。选取其中5组数据并与仿真结果对比

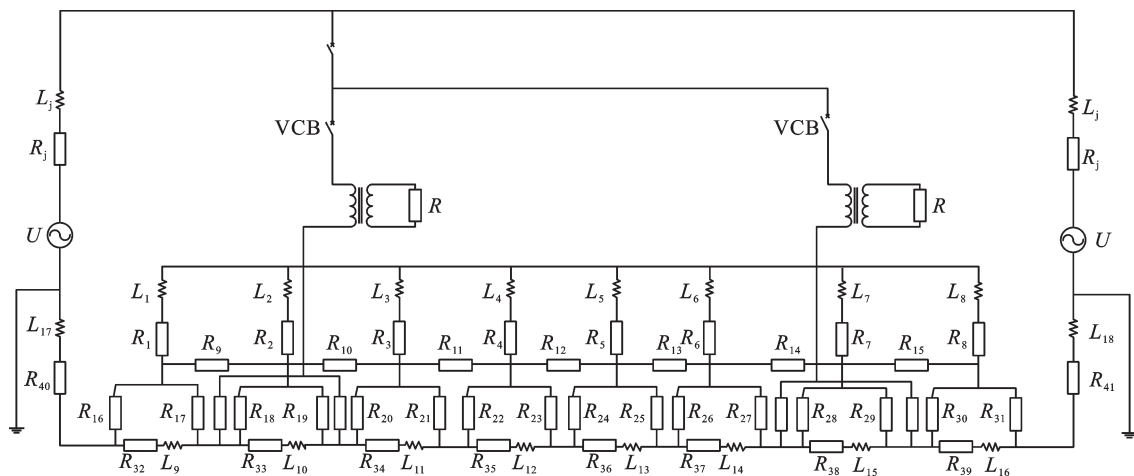
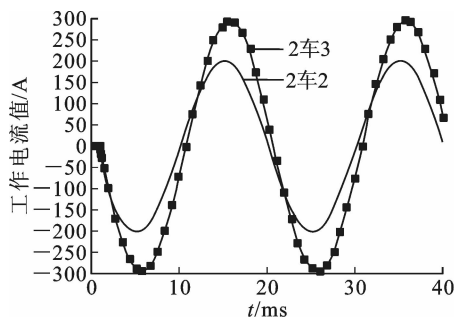
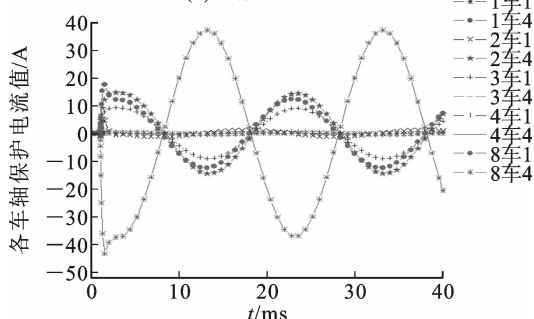


图 4 接地回流电路仿真结构图

Fig. 4 The simulation structure of ground reflux



(a)工作接地电流



(b)保护接地电流

图 5 该动车组原方式下接地电流

Fig. 5 The ground current of this EMU in the original mode

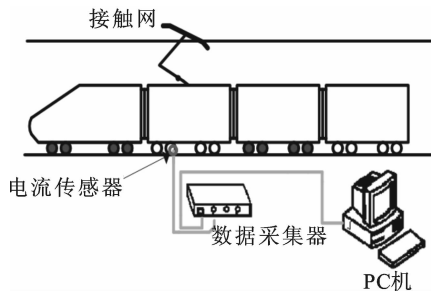


图 6 动车组接地电流测试原理

Fig. 6 Test theory of ground reflux

见表 1、2。

由图 7 可以得出,越靠近 2 车工作接地点保护电流值越大,其中头车尾车保护电流最大,最大达

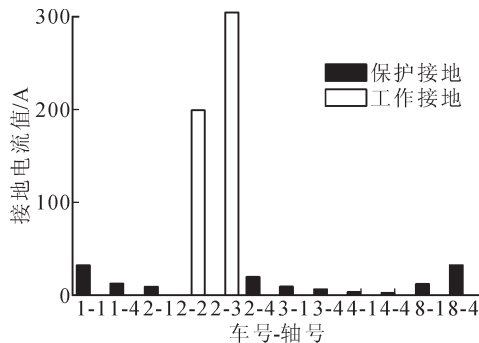


图 7 动车组接地电流试验结果

Fig. 7 Test results of ground current

表 1 工作接地电流仿真与实测值对比

Table 1 Comparison of simulation and test of working ground current

项目	2 车
试验 1	195,310
试验 2	200,300
试验 3	205,306
试验 4	202,305
试验 5	198,304
平均值	200,305
仿真	200,300
误差率/%	0、1.6

到 38 A,由于通过中间车的保护接地点进入到车体的电流在流经车体之后,最终要由头尾车的保护接地点重新汇流,因而电流变大;同车不同轴接地电流值差别较大,是车下钢轨电阻、电感,转向架间连接线电阻等共同作用的结果。试验数据与仿真结果一致。

分析表 1、2 中的试验与仿真结果对比,经计算得到,工作电流占整个接地电流的 84.175%,所以工作接地是列车主要泄流方式,动车组保护接地采用多点

表2 保护接地电流仿真与实测值对比

Table 2 Comparison of simulation and test of working ground current

项目	1车	2车	3车	4车	8车
试验 1	32、13	9、20	10、7	4、3	13、33
试验 2	34、12	10、21	11、6	5、2	14、33
试验 3	34、14	11、19	9、6	3、2	13、35
试验 4	34、11	8、18	8、7	4、3	15、34
试验 5	35、10	12、22	12、7	3、4	10、35
平均值	33.8、12	10、20	10、6.6	3.8、2.8	13、34
仿真	37、13	8、18	10、3	3、2	13、37
误差率/%	9.5、8.3	20、10	0、54.5	21.1、28.6	0、8.8

接地,车体—转向架—连接导线之间构成的电气回路增多,使得每个保护接地的电流增加。但总体而言,全车增加保护接地与单点接地以及多点有选择性接地相比,接地电流减小;最大误差率 54.5%出现在 3 车

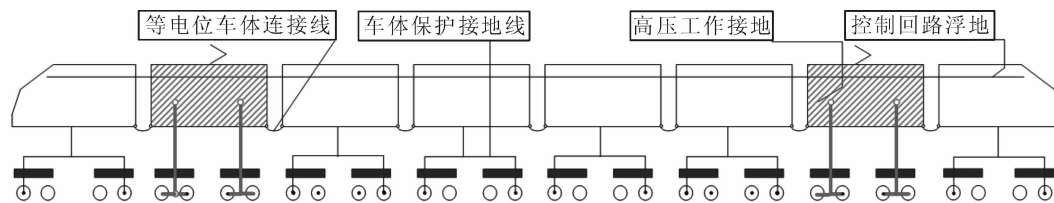
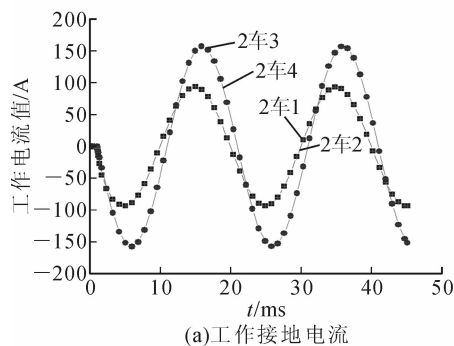


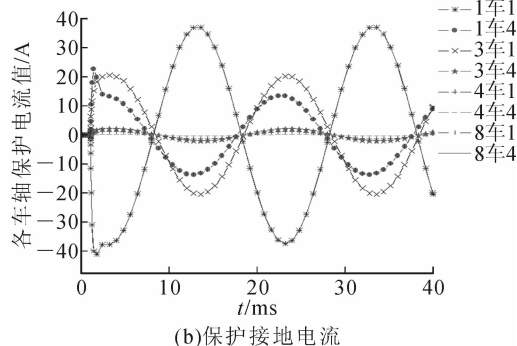
图8 工作接地改进方式1

Fig. 8 The improved mode 1 about working ground

该工作接地方式下的接地电流仿真结果见图9。各车保护电流大小分布趋势没有改变,头车尾车电流值仍然最大,靠近工作接地点的保护电流比其他车电流值大。但工作接地电流却明显变小为 90、90、160、160 A(图 9(a)中曲线两两重合),左右轴相差值降低为 70 A。



(a) 工作接地电流



(b) 保护接地电流

图9 改进方式1下接地电流

Fig. 9 The ground current of the improved mode 1

该接地方式下的接地电流仿真结果见图11。各车保护电流变化规律没有改变,工作接地电流分别为 150、170、170 A(图 11(a)中后两条曲线重合),左右轴差值降为 20 A。从波形中可以看出,流过左右接地碳刷的电流差值较于前两种接地方

保护电流,但相差值仅为 3.6 A,影响不大。因为仿真是考虑的理想环境,无法完全模拟复杂的现场环境,但整体来说试验与仿真具有较好的一致性。

3 不同工作接地方式对接地回流的影响

3.1 动车组工作接地改进方式

1)为深入研究动车组工作接地方式对接地回流的影响,现对标准动车组工作接地方式做如下改进,因考虑到工作接地电流值大对碳刷磨损显著,且左右轴电流值相差悬殊对不同碳刷寿命有影响,可以采用增加工作接地点将工作电流值整体降低。因此,改进方式1把变压器车设4个工作接地,不设保护接地,其余车均设2个保护接地,见图8。这种工作接地方式将2、7变压器车车体悬空接地,此时,动车组利用车辆间的等势线保证全列车等电势。

2)方式2把变压器车设3个工作接地,1个保护接地,其余车均设2个保护接地,见图10。变压器车增加了一个工作接地,也达到减小工作电流值的目的。保留一个保护接地可以方便地将该变压器车上设备感应电流或漏电流导通到轨道,整车保护接地得到充分保证。方式2是基于原方式以及方式1优缺点综合考虑设定。

式明显减小。

3.2 不同工作接地方式下接地回流对比分析

对比分析3种工作接地方式下动车组接地回流的分配见表3,加黑部分为工作电流值,其余为保护电流。从表3中可以发现,不同的工作接地方式

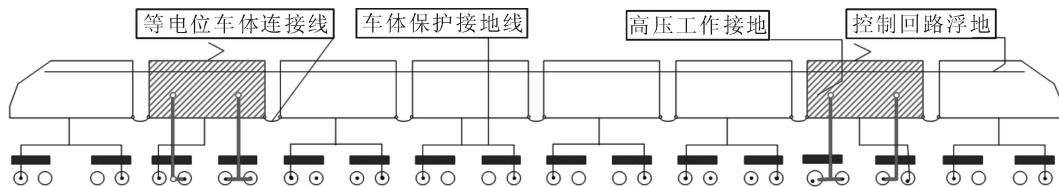


图10 工作接地改进方式2

Fig. 10 The improved mode 2 about working ground

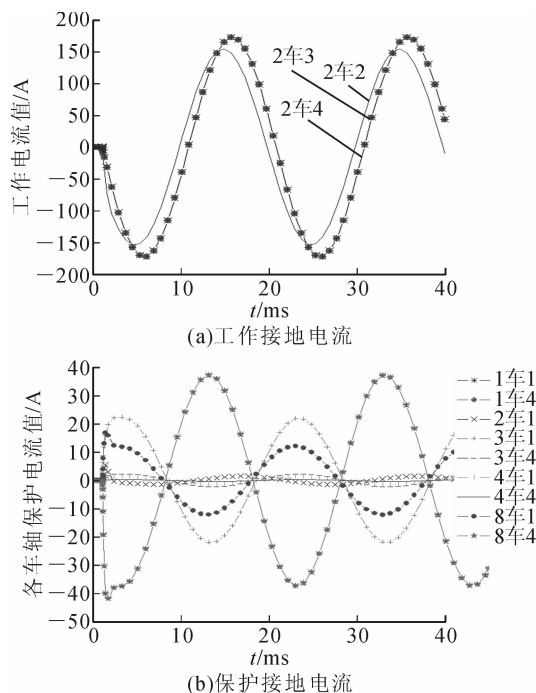


图11 改进方式2下接地电流

Fig. 11 The ground current of the improved mode 2

对保护电流的影响不大,各车保护接地电流分布规律没有改变。头车尾车保护电流值最大,越靠近工作接地点的保护电流值越大。但改进后的工作接地方式使得工作接地点增多,牵引电流通过与车体的接地点回落到车体的可能性变大,所以流过各个保护接地碳刷的电流相比于原方式变大,但整体影响不大。工作接地电流在各接地碳刷间的分配却大有不同,同车不同轴的左右两侧工作电流原方式相差100 A,占整车牵引电流1 000 A的10%,方式1左右轴接地电流相差70 A,占整车牵引电流的7%,方式2相差20 A,占牵引电流的2%。可见改进后的工作接地方式使得流过每个工作接地碳刷的电流分配的更加均匀,从而不同碳刷寿命差异减小;且流过工作接地碳刷的电流值变小,工作电流值由300 A降为90~170 A,降低值占总牵引电流的13%~21%,因此对接地碳刷磨损的影响变小。改进后的工作接地方式为今后标准动车组的工作接地方式提供理论依据。

表3 不同接地方式下接地电流的分配

Table 3 Ground current distribution of different grounding modes												A
方式	1-1	1-4	2-1	2-2	2-3	2-4	3-1	3-4	4-1	4-4	8-1	8-4
原方式	37	13	8	200	300	18	10	3.0	3	2	13	37
方式 1	37	15	90	90	160	160	20	4.5	4	3	15	37
方式 2	38	14	6	150	170	170	22	6.0	5	4	14	38

4 结论

1)越靠近高速动车组变压器车工作接地点的保护电流值越大,其中头车尾车保护电流值最大,最大达到38 A,因为由其他车的保护接地点进入到车体的电流在流经车体之后最终要由头尾车的保护接地点重新汇流,头车和尾车电流回路数多,电流相互叠加所致。

2)各车保护接地电流值不同,是车体自身电阻、电感,车下钢轨电阻、电感,车间连接电阻共同作用造成。同车不同轴电流幅值不同,主要是该车下钢轨电阻、电感、转向架间连接导线等共同所致。

3)通过增加动车组变压器车的工作接地点进行

仿真分析后发现:各车保护接地电流值分布规律没有改变。改进后工作接地电流值变小,降低值达总牵引电流的13%~21%,对接地碳刷磨损的影响明显变小。

4)工作接地点增多后,工作接地电流值在各个接地碳刷间分配的更加均匀,左右轴最小差值仅占总牵引电流的2%,防止接地碳刷异常磨损、轴承电腐蚀,减小因电流差异对碳刷寿命的影响。

参考文献:

- [1] 董安平,张雪原,邓明丽,等. 直供方式下综合地线对牵引回流的影响[J]. 西南交通大学学报,2010,45(1):88-93.
DONG Anping,ZHANG Xueyuan,DENG Mingli,et al. Im

- pact of integrated grounding wire on traction return current in direct power supply system[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2010, 45(1): 88-93.
- [2] 张战平. 直供方式交流电气化铁道钢轨漏泄电流分布特性及其地电位[J]. 铁道学报, 1991, 13(1): 25-33.
ZHANG Zhanping. The rail leak current distributing characteristic and its ground potential in the AC electrification railway with direct power supply system[J]. Journal of the China Railway Society, 1991, 13(1): 25-33.
- [3] 方 鸣. 电气化铁道牵引系统的绝缘、过电压保护和绝缘配合[J]. 中国铁道科学, 2001, 22(6): 28-33.
FANG Ming. The insulation, over voltage and insulation coordination for the traction system of electrified railway[J]. China Railway Science, 2001, 22(6): 28-33.
- [4] 杨世武, 姜锡义, 王星晖, 等. 高速铁路站内绝缘节和钢轨烧损模拟测试及研究[J]. 铁道学报, 2013, 35(10): 82-88.
YANG Shiwu, JIANG Xiyi, WANG Xinghui, et al. Study and simulation tests of burning damage to insulation joints and rails in high-speed railway stations[J]. Journal of the China Railway Society, 2013, 35(10): 82-88.
- [5] TB/T 2947—1999 列车干线供电技术条件[S]. 北京: 铁道部标准计量研究所, 1999.
TB/T 2947—1999 The main power supply technical conditions[S]. Beijing: Institute of Standard Measurement of the Ministry of Railways, 1999.
- [6] 吴利锋, 郭建良. 关于发电车转向架接地系统的改进建议[J]. 铁道车辆, 2009, 47(7): 42-43.
WU Lifeng, GUO Jianliang. Improvement suggestions about steering rack grounding system of power car[J]. Rolling Stock, 2009, 47(7): 42-43.
- [7] 钟碧羿. 地铁车辆接地技术分析[J]. 电力机车与城轨车辆, 2008, 31(4): 55-57.
ZHONG Biyi. Analysis on earth methods of metro vehicles[J]. Electric Locomotives & Mass Transit Vehicles, 2008, 31(4): 55-57.
- [8] 裴春兴, 李 娜, 贾 楠, 等. 高速动车组接地技术分析和研究[J]. 铁道机车与动车, 2014, 486(8): 17-21.
PEI Chunxing, LI Na, JIA Nan, et al. Analysis and re-search of EMU grounding technology[J]. Railway Locomotive and Motor Car, 2014, 486(8): 17-21.
- [9] MULERTT C. 防止电流通过轴承[J]. 国外铁道车辆, 1994(3): 46-49.
MULERTT C. To prevent electric current through bearings[J]. Foreign Rolling Stock, 1994(3): 46-49.
- [10] HATSUKADE S. Reduction method of surge voltage on AC railcar's body[J]. QR of RTRI, 2009, 50(2): 70-75.
- [11] HATSUKADE S, MAEDA T. Experiment and basic analysis of the surge on a rolling stock's body[J]. IEEJ Trans. on PE, 2005, 125(8): 754-758.
- [12] 刘 莹, 陈维金, 李 枫, 等. 高速动车组齿轮箱接地装置用碳刷性能对比试验[J]. 机车车辆工艺, 2011(6): 37-38.
LIU Ying, CHEN Weijin, LI Feng, et al. High-speed EMU gear box grounding device with carbon brush performance contrast test[J]. Locomotive & Rolling Stock Technology, 2011(6): 37-38.
- [13] 张维国. 客车转向架接地技术[J]. 铁道车辆, 2004, 42(3): 9-14.
ZHANG Weiguo. Grounding technique of passenger car bogies[J]. Rolling Stock, 2004, 42(3): 9-14.
- [14] 张维国. 客车车体转向架电气接地问题探讨[J]. 铁道车辆, 2000, 38(11): 21-23.
ZHANG Weiguo. Discussion of electrical grounding of car-body and bogie of passenger car[J]. Rolling Stock, 2000, 38(11): 21-23.
- [15] 袁德强, 张 宇. CRH380B 型动车组保护接地改进方案[J]. 铁道车辆, 2014, 52(3): 19-20.
YUAN Deqiang, ZHANG Yu. Improvement scheme of protection grounding for CHR380B multiple units[J]. Rolling Stock, 2014, 52(3): 19-20.
- [16] 李 军, 袁德强. CRH380BL 型动车组保护接地试验研究[J]. 铁道车辆, 2012, 50(11): 31-33.
LI Jun, YUAN Deqiang. Experimental study of protection grounding for CHR380B multiple units[J]. Rolling Stock, 2012, 50(11): 31-33.
- [17] 高国强, 董安平, 张雪原, 等. 高速铁路综合地线的接地效果[J]. 西南交通大学学报, 2011, 46(1): 103-108.
GAO Guoqiang, DONG Anping, ZHANG Xueyuan, et al. Grounding effect of integrated grounding wire for high-speed railway[J]. Journal of Southwest Jiaotong University, 2011, 46(1): 103-108.
- [18] 魏传元. 高速铁路接触网雷击特性及避雷器防护效果的研究[J]. 电瓷避雷器, 2014(3): 53-56.
WEI Chouyuan. Study on lightning characteristics and arrester protective effect of traction power supply catenary of high-speed railway[J]. Insulators and Surge Arresters, 2014(3): 53-56.
- [19] 张曙光. CRH2 型动车组[M]. 北京: 中国铁道出版社, 2008.
ZHANG Shuguang. China railways CRH2[M]. Beijing: China Railway Publishing House, 2008.
- [20] 刘东来. 高速动车组接地技术研究[D]. 成都: 西南交通大学, 2013.
LIU Donglai. Study on grounding technology of high-speed trains[D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2013.
- [21] 王兰兰, 张友鹏. 雷电入侵后轨道电路传输特性的建模与分析[J]. 电瓷避雷器, 2014(6): 115-120.
WANG Lanlan, ZHANG Youpeng. Modeling and analysis of track circuit transmission characteristics after lightning invasion[J]. Insulators and Surge Arresters, 2014(6): 115-120.

- Topics in Electrical Engineering.[S.l.]:IEEE,2013:23-25.
- [7] RAZI-KAZEMI A A,VAKILIAN M. Circuit-breaker automated failure tracking based on coil current signature[J]. IEEE Transactions on Power Delivery,2014,29(1):283-290.
- [8] 闫海宁. 基于在线监测的开关特性分析[J]. 高压电器,2014,50(8):119-123.
YAN Haining. Analysis of switchgear based on on-line monitoring[J]. High Voltage Apparatus,2014,50(8):119-123.
- [9] 徐建源,张彬,林莘,等. 能谱熵向量法及粒子群优化的RBF神经网络在高压断路器机械故障诊断中的应用[J]. 高电压技术,2012,38(6):1299-1306.
XU Jianyuan,ZHANG Bin,LIN Xin,et al. Application of energy spectrum entropy vector method and RBF neural networks optimized by the particle swarm in high-voltage circuit breaker mechanical fault diagnosis[J]. High Voltage Engineering,2012,38(6):1299-1306.
- [10] 金晓明,邵敏艳,王小华. 基于脱扣线圈电流的断路器机械状态预测算法研究[J]. 高压电器,2010,46(4):47-51.
JIN Xiaoming,SHAO Minyan,WANG Xiaohua. Research on prediction algorithm of circuit breaker's mechanical condition based on trip coil current[J]. High Voltage Apparatus,2010,46(4):47-51.
- [11] 李庆民,钱家骊,黄瑜珑,等. 高压开关操作电磁铁动态特性逆分析的研究[J]. 中国电机工程学报,2004,24(6):131-135.
LI Qingmin,QIAN Jiali,HUANG Yulong,et al. Converse analysis on dynamic characteristics of operating electromagnets in high voltage circuit breakers[J]. Proceedings of the CSEE,2004,24(6):131-135.
- [12] 张永奎,赵智忠. 基于分合闸线圈电流信号的高压断路器机械故障诊断[J]. 高压电器,2013,49(2):37-42.
ZHANG Yongkui,ZHAO Zhizhong. Mechanical fault diagnosis of high voltage circuit breakers based on open/close coil current parameters[J]. High Voltage Apparatus,2013,49(2):37-42.
- [13] 贾嵘,洪刚,薛建辉,等. 粒子群优化与最小二乘支持向量机算法在高压断路器机械故障诊断中的应用[J]. 电网技术,2010,34(3):197-200.
JIA Rong,HONG Gang,XUE Jianhui,et al. Application of particle swarm optimization-least square support vector machine algorithm in mechanical fault diagnosis of high-voltage circuit breaker[J]. Power System Technology,2010,34(3):197-200.
- [14] 黄建,胡晓光,巩玉楠,等. 高压断路器机械故障诊断专家系统设计[J]. 电机与控制学报,2011,15(10):43-49.
HUANG Jian,HU Xiaoguang,GONG Yunan,et al. Machinery fault diagnosis expert system for high voltage circuit breaker[J]. Electric Machines and Control,2011,15(10):43-49.
- [15] 王逸萍,梅军,郑建勇,等. 基于KPCA的高压断路器故障诊断[J]. 电测与仪表,2013,50(8):6-9.
WANG Yiping,MEI Jun,ZHENG Jianyong,et al. Fault diagnosis of high-voltage circuit breakers based on KPCA[J]. Electrical Measurement & Instrumentation,2013,50(8):6-9.
- [16] 邵冬阳. MZ6-810型直流电磁铁的设计[J]. 机电元件,2004,24(4):13-16.
SHAO Dongyang. DC electromagnet design of MZ6-810[J]. Electromechanical Components Machines and Control,2004,24(4):13-16.
- [17] 李广,黄中,马子文. 一种断路器操作机构的直流螺管电磁铁的有限元设计[J]. 船电技术,2010,30(3):18-21.
LI Guang,HUANG Zhong,MA Ziwen. A finite-element design method of direct current coil electromagnet of breaker's operating mechanism[J]. Marine Electric & Electronic Technology,2010,30(3):18-21.
- [18] 郭凯,徐诚,卜雄洙,等. 武器撞击动力学的参数估计方法与应用[J]. 兵工学报,2004,25(2):242-245.
GUO Kai,XU Cheng,BU Xiongzhong,et al. Method and application of parameters estimation in weapon impact dynamics[J]. Acta Armamentarii,2004,25(2):242-245.

张浩(1991—),男,硕士研究生,研究方向为高压开关状态检测。

赵莉华(1968—),女,副教授,硕士生导师,主要研究方向为电器设备监测技术、新能源发电及并网技术、电能质量。

(上接第109页)

万玉苏(1991—),女,硕士研究生,主要从事电气化铁道方面的研究(通信作者)。

刘耀银(1990—),男,硕士研究生,主要从事高速动车组过电压与绝缘配合的研究。

陈盼(1990—),男,硕士研究生,主要从事高速动车组过电压与绝缘配合的研究。

高国强(1981—),男,副教授,主要从事高电压绝缘技术及电气化铁道方面的研究。