

# 机车变流器内循环风机电路的共模电压抑制研究

应 婷, 王继丽, 张 宇, 陈文光

(中车株洲所电气技术与材料工程研究院, 湖南 株洲 412001)

**摘 要:** 为了降低机车变流器内循环风机供电电源电路接地电压, 以减小风机共模电压故障, 文章分析了风机电源主电路共模回路及对地共模干扰对风机的影响, 提出了抑制风机电源共模电压的有效方法, 并通过仿真及试验验证了该抑制方法的有效性。

**关键词:** 机车; 风机电源; 共模电压; 电压抑制; 变流器

中图分类号: U264.3<sup>+</sup>7

文献标识码: A

文章编号: 2096-5427(2018)02-0034-05

doi:10.13889/j.issn.2096-5427.2018.02.008

## Research on Common-mode Voltage Inhibition for Locomotive Converter Internal Recycle Fan Circuit System

YING Ting, WANG Jili, ZHANG Yu, CHEN Wenguang

(CRRC ZIC Research Institute of Electrical Technology & Material Engineering, Zhuzhou, Hunan 412001, China)

**Abstract:** To reduce the grounding voltage of internal circulating fan power supply circuit in locomotive converter and the incidence of ventilator fault, this paper analyzed the common mode circuit of power supply main circuit and the effects of ground common mode interference on the fan, and proposed methods to suppress the common mode voltage in the fan power supply circuit. Effectiveness of the suppression methods was verified by simulation and experiment results.

**Keywords:** locomotive; fan power supply; common mode voltage; voltage suppression; converter

### 0 引言

辅助电源是电力机车中不可缺少的设备, 它负责除机车牵引系统主电路以外各种装置的供电任务, 其中就包括为变流器内循环的风机提供电源。

近年来, 机车辅助电路负载风机烧损现象时有发生<sup>[1]</sup>。风机烧损直接影响机车设备的供电及冷却, 导致车辆无法正常运行<sup>[2-3]</sup>。通过现场测试发现, 风机运行时其绕组对地电压会明显偏高, 可能因此造成绝缘击穿, 大大增加了故障发生率, 降低了系统的可靠性。

理想情况下, 风机供电电源输出为光滑的交流电压。但由于共模电压(共模电压即作用在负载中性点上的电压, 也被称为零序电压)的存在, 其通过直流侧对地杂

散电感、变压器一二次侧耦合电容以及负载设备对地寄生电容等综合作用形成回路, 在输出电压中引入了共模干扰, 造成了较大的对地电压。

共模电压通过风机的寄生电容耦合后将产生轴电压, 电动机轴承上若存在轴电压作用, 且当轴电压值大于轴承上润滑剂能承受的绝缘强度时, 润滑剂油膜将被击穿, 由此出现轴承电流, 轴承套将被轴承电流导致电腐蚀, 轴承因此遭到损坏。

由于风机电路共模电压故障较频发的情况, 为彻底解决该问题, 研究机车变流器内循环风机电路的共模电压及其抑制策略具有很强的实用价值。本文介绍了机车变流器内循环风机电路的组成, 对风机绕组上共模电压进行了分析, 并在此基础上采取抑制措施减小系统中(特别是风机输入电压中)的共模电压, 最后通过仿真及试验进行了验证。

收稿日期: 2017-10-27

作者简介: 应婷(1983-), 女, 高级工程师, 主要从事交流传动电气系统及其控制的仿真研究。

### 1 机车风机电路共模电压分析

典型的机车风机供电电路如图 1 所示：电网电压经过直流支撑电容器 ( $C_d$ ) 稳压后送到 IGBT 逆变器；逆变输出的 PWM 交流电压经辅助变压器 (FB) 降压、交流电容器 (ACC) 滤波后，得到低谐波含量的三相正弦电压，最后经过隔离变压器 (GB) 输出三相交流电至风机。

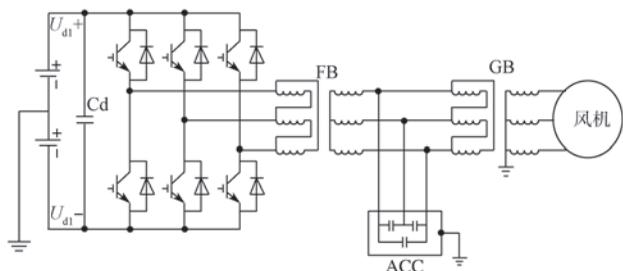


图 1 机车风机供电主电路

Fig.1 Main circuit of fan power supply for locomotive

由于变流器采用 IGBT 开关器件，脉冲信号触发的开关动作上升及下降速度很快，因此  $du/dt$  值大，该电压变化经过寄生电容等就形成了对地的共模回路电

流<sup>[4]</sup>。

除 IGBT 功率组件与散热器之间存在寄生电容外，风机外壳与定子绕组之间也存在很大的寄生电容；此外，风机外壳出于安全因素考虑被要求与大地相连，因此风机定子绕组与大地之间也存在共模干扰回路<sup>[5]</sup>。

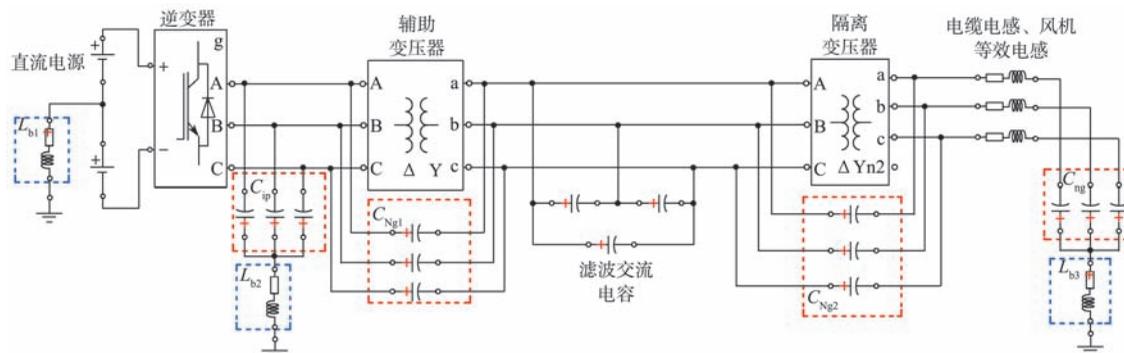
此外，变压器一、二次侧绕组的杂散电容及大地间也存在共模回路，变压器二次侧绕组又与逆变器输出相连，因此逆变器产生的共模电流将流经该回路<sup>[6]</sup>。

综合上述分析，得到风机供电回路中共模电路 (图 2)。图中，滤波交流电容器主要用于滤除差模干扰，不参与共模回路工作，所以下分析中不考虑该部分电路。

实际电路系统中的共模参数很多，且无法计算并不便测量，同时共模回路也存在很多支路。根据图 2 所示主要分布参数，共模支路有两条 (图 3)：

(1) 共模支路一，即大地  $\rightarrow L_{b1} \rightarrow$  逆变器  $\rightarrow C_{ip} \rightarrow L_{b2} \rightarrow$  大地；

(2) 共模支路二，为大地  $\rightarrow L_{b1} \rightarrow$  逆变器  $\rightarrow C_{Ng1} \rightarrow C_{Ng2} \rightarrow C_{ng} \rightarrow L_{b3} \rightarrow$  大地。



$L_{b1}$ 、 $L_{b2}$ 、 $L_{b3}$ ——接地线路上分布电感； $C_{Ng1}$ 、 $C_{Ng2}$ ——变压器原副边绕组寄生电容； $C_{ip}$ ——逆变器 IGBT 功率模块的功率端子 (发射极、集电极) 与散热器间的等效杂散电容； $C_{ng}$ ——电机定子绕组与机壳之间的寄生电容

图 2 风机供电系统共模电路

Fig.2 Common mode circuit of fan power supply system

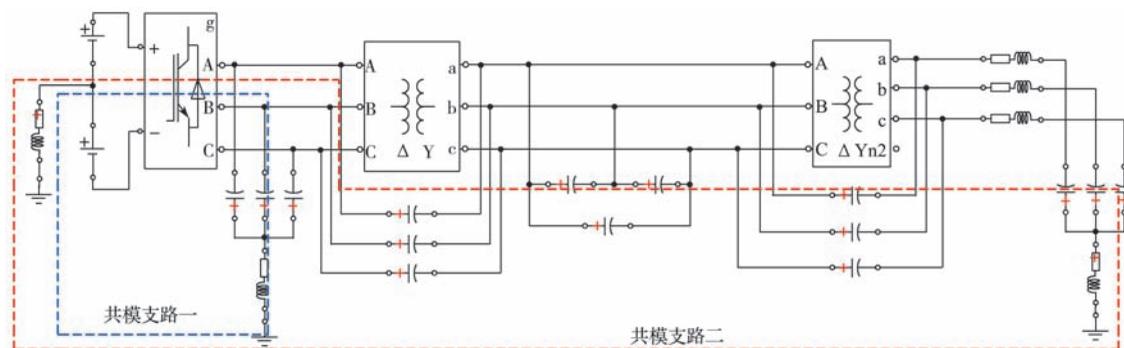


图 3 风机供电系统共模支路

Fig.3 Common mode branch of fan power supply system

### 2 风机电路的共模电压抑制方案

为了保证机车变流器内循环风机的可靠性及使用寿命，避免共模电压太大造成风机损坏，需要采取抑

制措施减小系统中 (特别是风机输入电压中) 的共模电压。

国内外关于抑制共模电压的策略较多，其中部分的

方案也已实现工程应用<sup>[6-9]</sup>,通常可根据实际需要选择所最适合的抑制方案。共模电压通过直流侧对地杂散电感、寄生电容等形成回路,在输出电压中引入了共模干扰,造成了较大的对地电压。由于系统中共模回路的存在,负载端的共模干扰也将客观存在,因此可以通过改变共模回路阻抗的分布、减小输出回路高频阻抗在整个回路中比例的方法达到减小输出对地共模电压幅值的目的,从而提高风机输出电源的品质。具体可通过下列措施改变共模回路阻抗的分布,从而减小输出电压中共模干扰的影响:

(1) 隔离变压器中性点接地,其原理为将共模回路部分短路,使电源输出端共模回路阻抗减小;

(2) 风机输入三相电源通过三相电容接地,其原理是在共模回路中增加交流电容,使电源输出端共模回路阻抗比例减小;

(3) 中间直流回路的中性点(即中间直流半电压)通过大电阻或大电感接地,其原理是将共模回路中直流回路侧阻抗增加,使电源输出端共模回路阻抗占整个共模回路阻抗的比例减小;

(4) 在辅变三相电源线路中增加磁环,相当于加入了低通滤波器,使高频信号进行衰减。

各抑制方案的接线示意如图4所示。

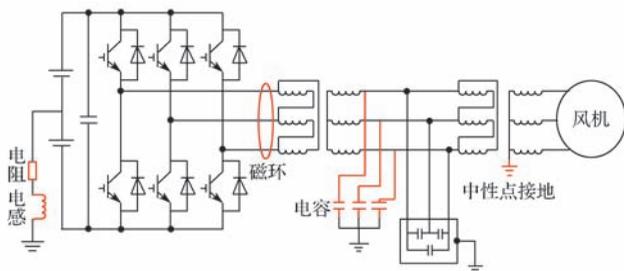


图4 抑制方案接线示意图

Fig.4 Schematic diagram of the suppression schemes

### 3 仿真实验

为验证上述分析的正确性,以某电力机车变流器内循环风机主电路为对象,通过 Matlab/Simulink 软件进行仿真实验。其中,辅助逆变器额定输入电压为 1 820 V,开关频率为 780 Hz,支撑电容为 3.2 mF;变压器容量为 300 kVA,变比为 1.73,短路阻抗为 40.5%;正弦滤波电容 0.25 mF/个;隔离变压器容量 0.5 kVA,变比为 1.1,短路阻抗为 4.1%;风机功率共计 220 kW,频率 60 Hz,额定电压三相 AC 400 V。

首先,对未加任何抑制方案的主电路(图1)进行建模仿真,风机电源输出结果如图5所示,其中,红色曲线为电源 UV 相线电压,蓝色为 U 相对地电压。

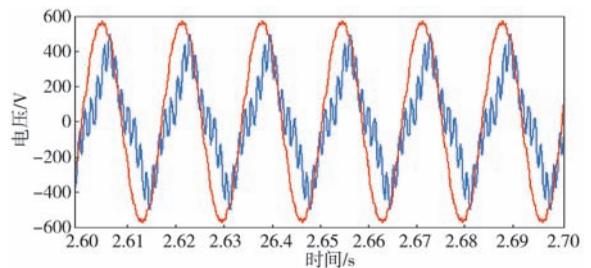


图5 未加任何抑制方法时,风机电源输出电压  
Fig.5 Output voltage of fan power without suppression method

从图5可以看出,未采取任何抑制方法时,风机输出线电压正弦性好且光滑,但各相对地的共模电压(例如图5中U相对地电压)谐波较大。通过对该共模电压进行谐波分析(图6)可知,接地电压中明显含有辅助逆变器开关频率(780 Hz)附近的谐波。该次谐波主要是由共模电压引起,而共模电压是因逆变器开关动作、功率模块寄生参数、线路参数等共同作用产生的。

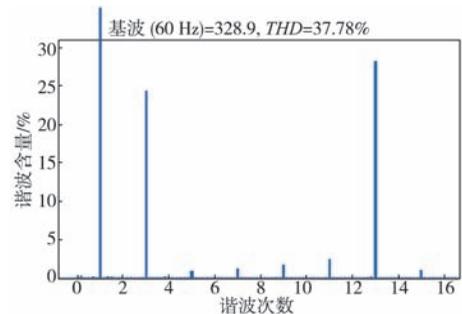
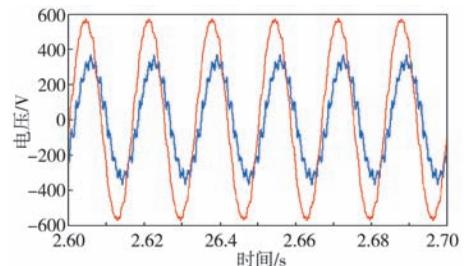


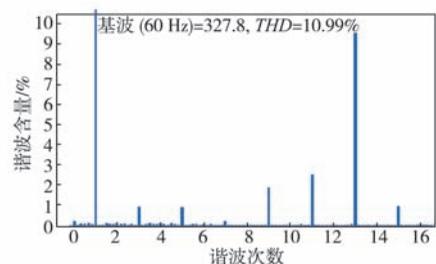
图6 未加任何抑制方法时,风机电源U相对地电压谐波分析结果  
Fig.6 Harmonic analysis of the U-phase ground voltage when no suppression method is added

分别采用以上抑制方案进行仿真验证,其结果如下:

(1) 隔离变压器中间点接地时,风机电源输出电压及对地电压谐波见图7。



(a) 风机电源输出电压



(b) 接地电压谐波分析

图7 隔离变压器中间点接地时风机电源仿真结果  
Fig.7 Simulation results of fan power supply with isolation transformer middle point grounding

(2) 去除隔离变压器，风机电源输出三相通过小电容 (30  $\mu\text{F}$ ) 接地，风机电源输出结果及对地电压谐波分析见图 8。

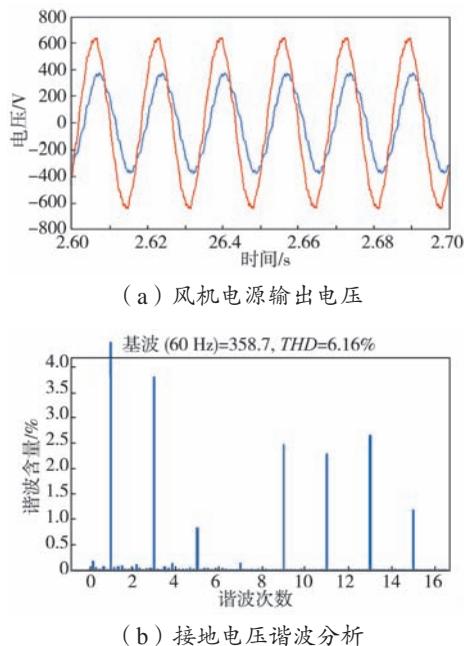


图 8 风机电源输出小电容接地时仿真结果  
Fig.8 Simulation results of fan power supply grounding by small capacitor

(3) 去除隔离变压器，中间直流半电压通过大电阻 (10  $\text{k}\Omega$ ) 接地，此时风机电源输出结果及对地电压谐波分析见图 9。

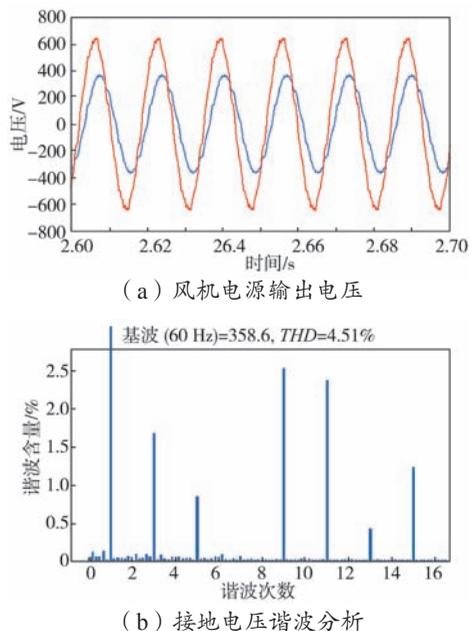


图 9 中间直流半电压通过大电阻接地时风机电源仿真结果

Fig.9 Simulation results of fan power supply grounding on half DC voltage by large resistance

(4) 在辅变三相电源线路中增加磁环 (共模电感值取 0.5 H)，风机电源输出结果及对地电压谐波分析见图 10。

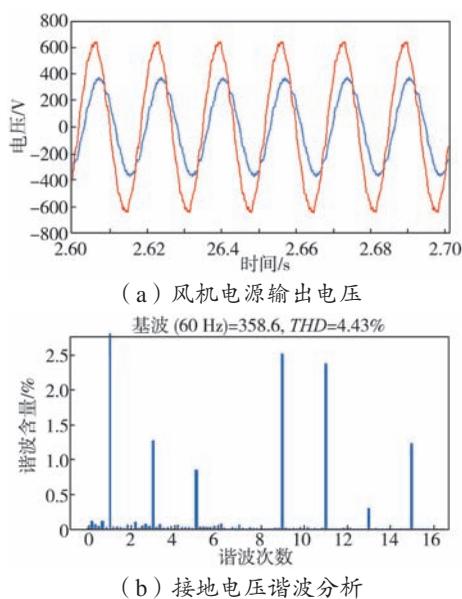


图 10 辅变三相电源线路中增加磁环时风机电源仿真结果

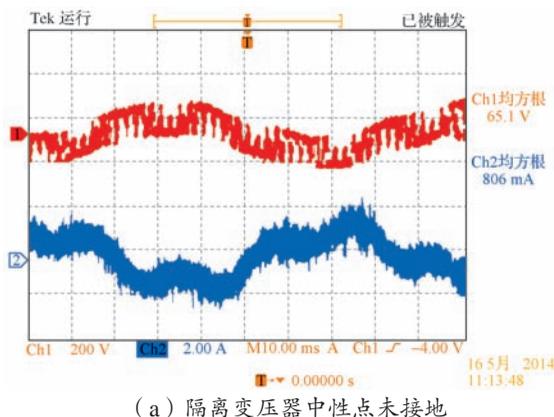
Fig.10 Simulation results of fan power supply voltages as magnetic ring adding in auxiliary converter three-phase power supply circuit

从仿真结果来看，采用任意一种抑制方案后，风机接地电压波形都较之前大为改观，谐波含量明显减小，可见，上述抑制方法均有效。

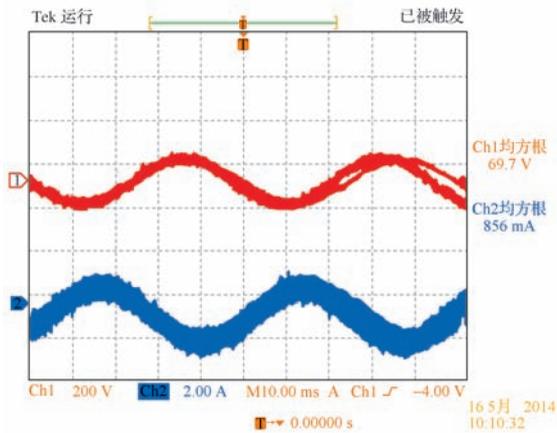
### 4 实验验证

为进一步研究上述抑制方案的有效性，采用机车牵引变流器系统进行试验。考虑到主电路的具体情况，结合抑制方案的成本、体积等因素，选择隔离变压器中性点接地和风机输入三相电源通过三相电容接地两种方案进行实验。实验机车选用型号为 S2D250-BH02-01 的热交换风机，其基本参数为：电压 AC400 V，频率 60 Hz，B 级绝缘，防护等级 IP44，未采用密封轴承。

隔离变压器中间点接地时试验结果见图 11：隔离变压器二次侧中性点未接地时，对地共模相电压幅值约为 240 V；变压器中性点接地后，风机对地共模相电压降至小于 40 V，且风机电流光滑稳定，电源品质明显改善。



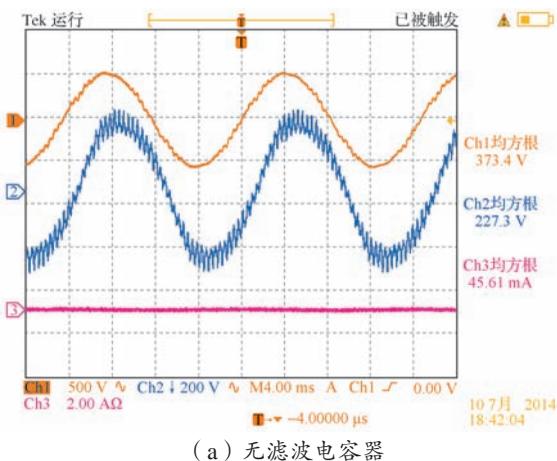
(a) 隔离变压器中性点未接地



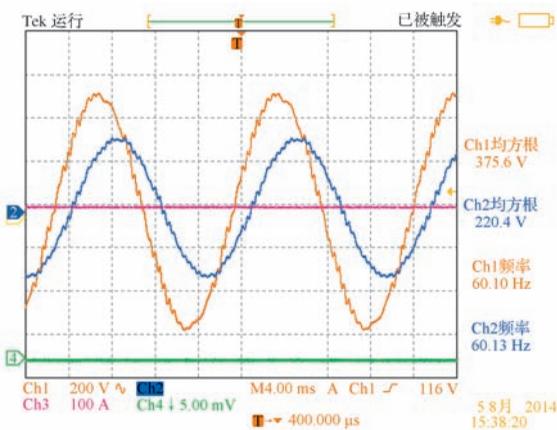
(b) 隔离变压器中性点接地

图 11 隔离变压器中间点接地时风机电源试验结果  
Fig.11 Test results of fan source when isolation transformer grounding on the middle point

辅助变压器输出添加滤波电容时的试验结果见图 12: 辅助变压器输出无滤波电容时, 绕组与地之间产生幅值较大的高频共模电压, 电源品质较差; 在辅助变压器三相绕组和地之间分别接一个滤波电容器后, 风机供电品质有明显改善, 共模线电压得到明显抑制。



(a) 无滤波电容器



(b) 添加滤波电容器

图 12 辅助变压器通过滤波电容器接地时试验结果  
Fig.12 Experiment results of auxiliary transformer grounding with filter capacitor

将图 11、图 12 与图 7、图 8 进行比较, 可以发现, 试验波形与仿真波形非常吻合, 进一步验证了上述抑制方法的有效性。

## 5 结语

为提高机车变流器内循环风机的可靠性及使用寿命, 本文对机车变流器内循环风机供电电源电路进行研究, 分析了主电路中主要的共模干扰, 提出了抑制对地共模电压的有效方法, 并通过仿真及试验验证了分析的正确性和抑制方法的有效性。但是, 目前对于各抑制方案的应用条件还有待进一步深入研究, 以便进行最优抑制方案的选取。

## 参考文献:

- [1] 倪大成, 应婷, 张宇. 机车牵引主电路接地检测回路共模电压研究 [J]. 机车电传动, 2016 (5): 63-67.  
NI D C, YING T, ZHANG Y. Grounding Detection Circuit Common-mode Voltage of Electric Locomotive Traction Main Circuit[J]. Electric Drive for Locomotives, 2016 (5): 63-67.
- [2] 赵磊. HXD1B 型机车辅助滤波柜风机故障分析及改进措施 [J]. 电力机车与城轨车辆, 2014, 37(6): 83-84.  
ZHAO L. Analysis and improvement of fan fault in auxiliary filter cabinet of HXD1B locomotive [J]. Electric Locomotives & Mass Transit Vehicles, 2014, 37 (6): 83-84.
- [3] 舒苗森. HX<sub>D3</sub> 型机车辅助风机故障分析 [J]. 铁道机车与动车, 2015(5): 34-37.  
SHU M M. Failure analysis of HX<sub>D3</sub> locomotive auxiliary fan [J]. Railway Locomotive and Motor Car, 2015(5): 34-37.
- [4] 陈海燕. 180 kVA 机车辅助电源电磁兼容问题分析及解决方案初探 [D]. 南京: 南京师范大学, 2014.
- [5] 陈郭霞. 牵引变流器电磁兼容技术研究 [M]. 成都: 西南交通大学, 2008.
- [6] 孟进, 马伟明, 张磊. PWM 变频驱动系统传导干扰的高频模型 [J]. 中国电机工程学报, 2008(15): 141-146.  
MENG J, MA W M, ZHANG L. High Frequency Model of Conducted EMI for PWM Variable-speed Drive Systems [J]. Proceedings of the CSEE, 2008(15): 141-146.
- [7] 姜保军. PWM 电机驱动系统传导共模 EMI 抑制方法研究 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2007.
- [8] 王益民, 余定华, 蔡万银. 大功率交流传动电力机车电磁兼容的研究 [J]. 机车电传动, 2011(1): 62-65.  
WANG Y M, YU D H, CAI W Y. Study on EMC of High Power AC Drive Electric Locomotive [J]. Electric Drive for Locomotives, 2011(1): 62-65.
- [9] 姜艳姝, 刘宇, 徐殿国, 等. PWM 变频器输出共模电压及其抑制技术的研究 [J]. 中国电机工程学报, 2005, 25 (9): 47-53.  
JIANG Y S, LIU Y, XU D G, et al. RESEARCH ON COMMON-MODE VOLTAGE GENERATED BY A PWM INVERTER AND ITS CANCELLATION TECHNOLOGY[J]. Proceedings of the CSEE, 2005, 25 (9): 47-53.