

# 机车辅助电源电快速瞬变脉冲群试验案例分析

窦爱玉<sup>1</sup>, 赵阳<sup>2</sup>, 颜伟<sup>2</sup>, 慈文彦<sup>1</sup>, 王珏<sup>1</sup>

(1. 南京师范大学泰州学院电力工程学院, 江苏 泰州 225300)

(2. 南京师范大学江苏省电气装备电磁兼容工程实验室, 江苏 南京 210042)

**[摘要]** 针对机车辅助电源电快速瞬变脉冲群(EFT)抗扰度问题,分析了脉冲群产生和骚扰机理,研究了脉冲群的处理方法,提出了针对电源线EFT问题的解决方法.试验结果表明,所提方法可以有效提高机车辅助电源EFT抗扰度等级,达到GB/T 17626.4—2008标准要求.

**[关键词]** 辅助电源,电快速瞬变脉冲群,共模电感,滤波器

**[中图分类号]** U260.4; TM15 **[文献标志码]** A **[文章编号]** 1672-1292(2014)02-0019-05

## Investigation on Locomotive Auxiliary Power in EFT Testing Cases

Dou Aiyu<sup>1</sup>, ZhaoYang<sup>2</sup>, Yan Wei<sup>2</sup>, Ci Wenyan<sup>1</sup>, Wang Jue<sup>1</sup>

(1. School of Electrical Power Engineering, Nanjing Normal University Taizhou College, Taizhou 225300, China)

(2. Jiangsu Electrical Equipment EMC Engineering Laboratory, Nanjing Normal University, Nanjing 210042, China)

**Abstract:** The mechanism of production and harassment to EFT is employed to investigate the EFT problems of the locomotive auxiliary power. This paper studies the processing method and puts forward the solution to EFT problems of power line and IGBT. The experimental results show that, the EFT level of locomotive auxiliary power is efficiently improved, conformable to GB/T17626.4-2008.

**Key words:** auxiliary power, EFT, common mode choke, filter

电快速瞬变脉冲群(EFT)抗扰度试验是电子电气类产品在进行电磁兼容(EMC)试验时广泛采用且较难通过的一项电磁抗扰度试验(EMS).EFT试验是将由许多快速瞬变脉冲组成的脉冲群耦合到电气和电子设备的信号、电源端口和控制端口的试验.EFT具有上升时间短、幅值和重复频率高等特点,且EFT不是单个脉冲而是一连串的脉冲,因此脉冲群干扰具有极其丰富的谐波成分.这就使得电子产品长期以来难以克服电快速瞬变脉冲群的干扰.

我国目前针对轨道交通电磁兼容试验的国家标准主要是GB/T 24338.4—2009第3-2部分<sup>[1]</sup>,该部分规定轨道机车车辆电气和电子设备电磁兼容性试验以GB/T 17626系列标准为基础参考标准,实际试验中再结合具体要求进行试验.

为了维持机车系统的正常运行,降低EFT对机车设备的危害,必须对机车设备进行EFT防护与抑制设计.传统的EFT抑制措施主要是设计滤波器<sup>[2]</sup>,但由于参数选择不当,抑制效果有限.本文结合某机车辅助电源在EFT试验中出现的通讯中断、绝缘栅双极型晶体管(IGBT)过热的的问题,针对EFT产生的共模噪声和差模噪声,设计了共模扼流圈和EFT滤波器.试验结果表明,采用所提方法可有效提高该型机车辅助电源EFT抗扰度等级,达到GB/T 17626.4—2008标准要求<sup>[3]</sup>.

## 1 EFT机理分析

EFT产生于继电器触点弹跳、感性负载切换等的瞬态过程.其对电源端口、控制端口和I/O等端口,主要以共模和差模的方式将脉冲能量注入到电子设备中,形成骚扰.其电压大小主要由介质耐压能力、开关器件断开速度和被测电路的电感决定.其中,开关关断会在电路中产生杂散电感和杂散电容,当断开感性

负载电路时,由于电感中的电流不能突变,此电流流向杂散电容,对其反向充电,电感负载两端出现暂态过电压,此过电压与电源电压叠加后加在开关触头两端,当触头两端电压高于介质击穿电压时,触头间形成电弧,开关重燃.开关导通后,杂散电容放电,形成高频电流,触头间的重燃电弧熄灭,两端又出现过电压,上述过程重复发生.脉冲电压幅值在开始时呈现较低的水平,频率却很高;随着触点之间间隙的增大,脉冲电压频率在下降,幅值却在不断升高.经过感性负载通断多次重复后,脉冲在与之对应的时间间隔内多次重复出现.实际测试数据表明,脉冲电压最高可达 5 kV,重复频率为 10 kHz ~ 1 MHz. 国家标准 GB/T 17626.4—2008 规定 EFT 脉冲为双指数波形,其干扰源电压  $v_0(t)$  可用双指数函数进行数学描述<sup>[4]</sup>,即:

$$u(t) = KU_0(e^{-t/\alpha} - e^{-t/\beta}), \quad (1)$$

其中:  $U_0$  为电压峰值;  $K$  是比例常数;  $t_\alpha$  为脉冲持续时间相关的时间常数;  $t_\beta$  为脉冲上升时间相关的时间常数; 依据 EFT 骚扰信号单个脉冲波形的上升时间和持续时间,可确定比例常数  $K$  为 1.269 94, 时间常数  $t_\alpha$ 、 $t_\beta$  分别为  $1.798 6 \times 10^7$  和  $3.037 \times 10^8$ .

当负载阻抗为 50  $\Omega$  时,脉冲上升时间为  $5(1 \pm 30\%)$  ns,持续时间为  $50(1 \pm 30\%)$  ns,因此脉冲群中具有丰富的谐波成分.每个脉冲能量达到 4 mJ,持续时间达到 15 ms,脉冲群周期为 300 ms.重复频率为 2.5 kHz(对 4 kV 测试等级)或 5 kHz(对其他测试等级).脉冲群概略图和接 50  $\Omega$  负载时单个脉冲波形如图 1、图 2 所示.

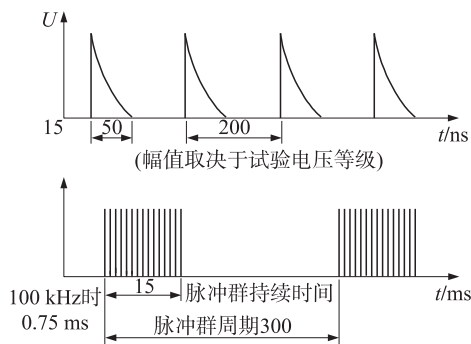


图1 快速瞬变脉冲群示意图

Fig.1 Schematic diagram of EFT

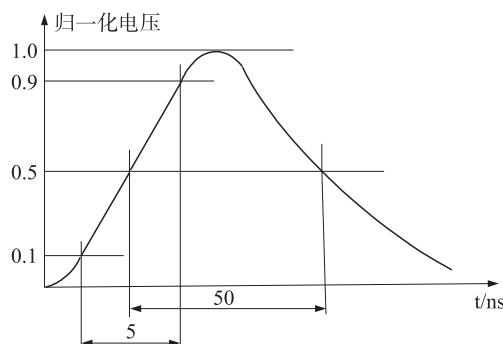
图2 接50  $\Omega$  负载时单个脉冲波形

Fig.2 Singal pulse waveform

单个 EFT 骚扰脉冲的幅值密度频谱如图 3 所示. 图中  $A_d$  为幅值密度/dB, 横轴单位为 MHz. 从图中可以看出, EFT 脉冲群骚扰的能量主要集中在 40 MHz 以下的频段, 40 ~ 400 MHz 频段内 EFT 骚扰的幅值衰减不大, 仍然具有较大的能量, 400 MHz 以上频段的 EFT 骚扰的幅值衰减很快, 到 1 GHz 基本衰减为零, 此频段内骚扰能量最小.

EFT 干扰电流会通过各种寄生电容, 以共模和差模的形式对电路各个部位产生影响. 试验时, EFT 干扰信号对设备线路结电容进行充电, 当结电容上电荷积累到一定程度后, 就会引起线路(甚至系统)出错. 实际上, 结电容充电的过程即为 EFT 中共模干扰电流流过被测设备的过程. EFT 试验的结果由流过被测设备的共模电流的大小和时间决定.

## 2 基于机车辅助电源 EFT 试验问题分析

### 2.1 试验测量

GB/T 24338 标准第 3-2 部分规定 EFT 试验等级为 3 级, 即电压峰值为 2 kV, 脉冲上升时间为 5 ns, 持续时间为 50 ns, 重复频率为 5 kHz. 结合 GB/T 17626.4—2008 标准, 对该型电源的群脉冲干扰做了相关试验. 试验布置如图 4 所示.

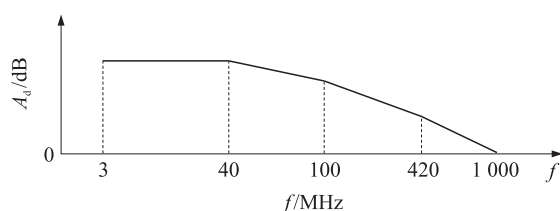


图3 EFT 骚扰电压幅值密度频谱

Fig.3 Amplitude density spectrum of EFT

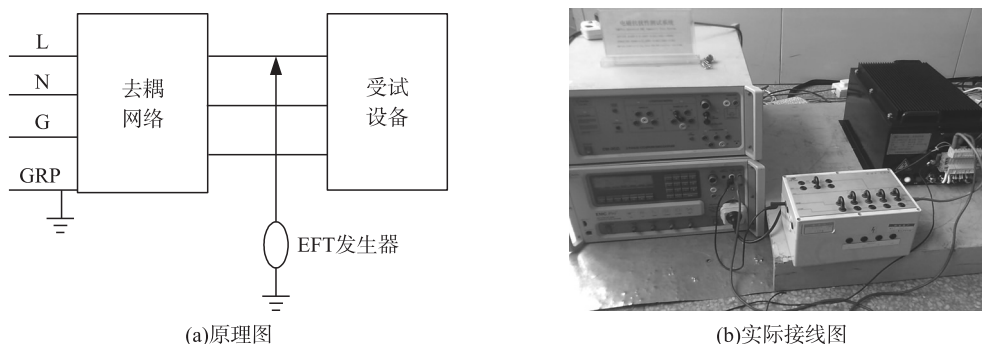


图4 EFT 施加到 EUT 电源相线的原理图和接线图

Fig. 4 EFT applied to the EUT power phase line and the actual wiring diagram schematic

实际测试中,为了全面了解该电源抵制 EFT 干扰电流骚扰的能力,分别对电源线加载+2 kV 和-2 kV 输出电压,表 1 为具体测试结果.

## 2.2 试验结果分析

试验结果表明,当施加 $\pm 2$  kV 的脉冲群时,电源不能正常工作,表现为通讯中断、IGBT 过热,撤销脉冲群后能恢复正常.可见电源的内部电路受到了脉冲群的冲击失去了作用,达不到国标要求.常用的器件如二极管、MOSFET、场效应管、晶体管等都是敏感器件.电源内部包含由一系列常用电路的大功率元器件组成的电路模块.当受到重复频率较高,波形上升时间短的脉冲群冲击时,会损害局部元件的功能,进而影响整个系统的工作,但是脉冲群的冲击并没有损坏系统,只是由于电量积累导致暂时性失效.

由于 EFT 干扰主要以电容耦合的传导方式通过共模干扰(发生于电路中各导线对接地线或外壳之间的干扰)和差模干扰(发生在电路各导线之间的干扰)作用于供电电源端口、信号和控制端口),图 5 为 EFT 干扰示意图,EFT 干扰电流流经电源内部时,由于电路阻抗的存在,会在电路上产生压降,压降越大,则电路受到的干扰越大.

## 3 EFT 干扰抑制

### 3.1 滤波器设计

对 EFT 干扰的抑制可以采用如隔离、滤波、屏蔽、去耦、接地、限幅以及合理布线以减少杂散电容等措施.本文采用在电源线上添加 EFT 滤波器、改进接地的方法.

电源线传导电磁干扰(Conducted EMI)包括共模干扰信号和差模干扰信号.共模干扰在电源线和地(机壳)之间传输,属非对称性干扰,其频率高、干扰幅度大,并可通过天线转化为辐射电磁干扰(Radiated EMI),危害较大;差模干扰在电源线之间传输,为对称性干扰,其频率低、干扰幅度小,所造成的干扰较小.因此,在电源输入电路中加装 EFT 滤波器是抑制 EFT 干扰最有效的措施.

EFT 滤波器的设计原理与电源滤波器相同<sup>[4]</sup>,是由电容和电感组成的低通滤波器,其允许直流或低频电流通过,如 50 Hz 市电;对高频信号则会产生较大的衰减.由于 EFT 干扰信号有共模和差模两种,因此电源线上的 EFT 滤波器要同时能够抑制这两种信号.

结合之前的整改经验,EFT 的滤波抑制方法中,最简单的方式是将电源线绕在铁氧体磁环上,形成滤波器.铁氧体材料具有较高的高频磁导率和高频阻抗,且绕线间电容最小.铁氧体一般做成中空型.当导线中的电流穿过铁氧体时,由于此时磁环呈电抗性,阻抗与干扰电流频率成正比,高频电流会受到很大的损

表 1 EFT 测试结果

Table 1 Experimental results of EFT

试验项目	试验顺序	实验结果
电源线	L 正极输出 2 kV	通讯中断
	L 负极输出 2 kV	电脑显示 IGBT 过热
	N 正极输出 2 kV	通讯中断
	N 负极输出 2 kV	电脑显示 IGBT 过热

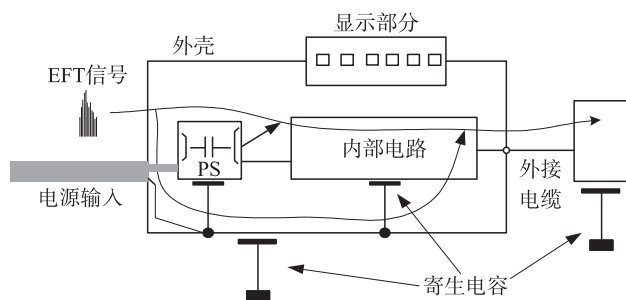


图5 EFT 对设备电路干扰示意图

Fig. 5 Schematic diagram of the interference of EFT to circuit

耗,转变成热量耗散,而低频电流可以几乎无衰减地通过,所以铁氧体和穿过其中的导线即成为吸收式低通滤波器,对于 EFT 干扰信号有一定的抑制作用。

在该电源 EFT 试验中发现,单加铁氧体磁环滤波器对干扰信号抑制效果有限,因此需要结合电感和电容设计常规 EFT 滤波器。依据传统电源滤波器设计方法,结合 EFT 频带宽、幅值大的特点,提出了如图 6 所示 EFT 滤波器。

图 6 中, $C_1$ 、 $C_2$  是 X 电容,主要用来滤除差模干扰; $C_3$ 、 $C_4$  是 Y 电容,主要用来滤除共模干扰; $L_1$ 、 $L_2$  是共模电感,又称共模扼流圈,共模扼流圈的接法如图 7 所示。

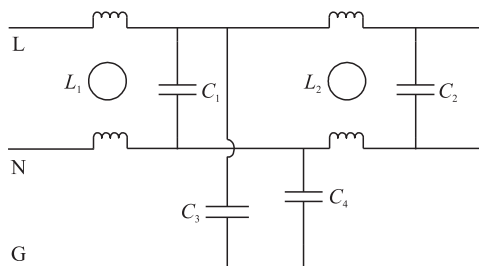


图 6 EFT 滤波器拓扑结构

Fig. 6 The topological structure of EFT filter

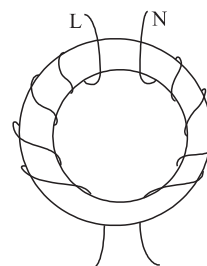


图 7 共模扼流圈结构

Fig. 7 The structure of common mode choke

$C_1$ 、 $C_2$  采用薄膜电容器,容量大致在  $0.01 \sim 0.47 \mu\text{F}$ ,分别接在 L、N 线之间; $C_3$ 、 $C_4$  多用陶瓷电容,分别接在 L-G 和 N-G 之间,容量一般在  $2\,000 \text{ pF} \sim 0.1 \mu\text{F}$ 。 $C_1 \sim C_4$  的耐压值均为 DC  $2\,000 \text{ V}$  或 AC  $250 \text{ V}^{[5]}$ 。

共模扼流圈是将 L、N 两线圈绕在同一铁芯(铁氧体磁环)上,匝数和相位相同,绕制方向相反。当电路中正常电流流经共模电感时,电流在同相位绕制的电感线圈中产生反向的磁场而相互抵消。当有共模电流流经线圈时,由于共模电流的同向性,会在线圈内产生同向的磁场,进而增大线圈感抗,使线圈表现高阻抗,产生较强的阻尼效果,以此衰减共模电流,达到滤波的目的。由于共模电感具有两个绕组,每匝线圈间有一定的间隙,间隙中会产生漏磁通,形成差模电感,因此共模电感对差模干扰电流也有一定的抑制作用。

共模电感的匝数由所需要的电感量决定。增加穿过磁环的匝数可以增加低频的阻抗,但此时寄生电容也会相应增加,高频阻抗会减小。而当需要抑制的干扰频带较宽时,可在两个磁环上绕不同的匝数,即两个共模电感分别取不同的电感值。由于铁氧体磁环对高频信号的抑制效果取决于原共模环路的阻抗,原共模回路的阻抗越低,则磁环的抑制效果越明显。因此需在电缆两端安装电容式滤波器,降低整个共模环路的阻抗,提高共模电感的抑制效果。

电感取值范围与电源额定电流之间的关系如表 2 所示。

表 2 电感量范围与额定电流关系

Table 2 The relationship between inductance and rated current

额定电流 $I/\text{A}$	1	2	6	10	12	15
电感量范围 $L/\text{mH}$	10 ~ 33	8 ~ 20	4 ~ 10	0.2 ~ 8	0.1 ~ 5	0.01 ~ 3

EFT 滤波器的参数选择参考了传导 EMI 滤波器的设计,并结合 EFT 干扰频带宽、幅值大的特点。经过反复试验,最终  $C_1$ 、 $C_2$  取  $20 \text{ nF}$ ;  $C_3$ 、 $C_4$  取  $5 \text{ nF}$ ;  $L_1$  取  $2 \text{ mH}$ ,  $L_2$  取  $2 \text{ mH}$ ,抑制噪声效果较好。加入 EFT 滤波器后,试验结果较为理想,未出现通讯中断、IGBT 过热的现象。

### 3.2 接地改进

拆开该电源外壳,在其内部发现,该电源内部有 3 个模块,每个模块都有一个接地点,3 个接地点之间只是通过较窄的 PCB 布线互联,当有高频信号流过时,线缆阻抗较大,在地线上产生较大的压降,以图 8 公共地阻抗耦合为例。

由于分布电容的存在,在 A、B、C、D、E、F 点之间构成了回路 B-C-D-E-F-A-B。当有电流  $I_g$  流过地平面时,在地阻抗  $Z_g$  上产生电压降  $V_i$ ,可视为在该电路的 B、E 两点间存在电压降  $V_i$ ,从而引起共模电流  $I_1$ 、 $I_2$  在线路中流动。由于  $I_1$ 、 $I_2$  所流路径的阻抗不平衡,在两线路间的负载两端将产生电压差,即差模电压  $V_0$ ,此为



地回路电磁干扰源之一,对电源构成较大干扰。

因此只采用一个接地点,即将多点接地改为单点接地,并用软铜编织带作为接地电缆,与接地参考平面连接。电快速瞬变脉冲群发生器、耦合去耦网络都通过软铜带接至接地参考平面,铜带尽可能短,对于 EFT 脉冲能起到进一步的抑制作用。试验数据如表 3 所示,结果表明测试电压能够得到 300 V 的裕量。

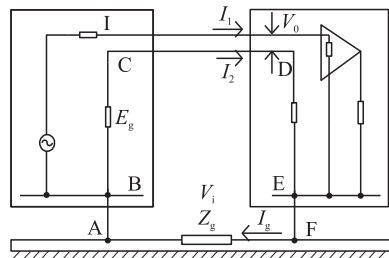


图 8 公共地阻抗耦合

Fig. 8 Common ground impedance coupling

表 3 EFT 测试结果

Table 3 Experimental results of EFT

试验项目	试验顺序	实验结果
电源线	正极输出 2.4 kV	通讯中断
	负极输出 2.4 kV	通讯中断
	正极输出 2.3 kV	电源工作正常
	负极输出 2.3 kV	电源工作正常
	正极输出 2.4 kV	通讯中断
	负极输出 2.4 kV	电脑显示 IGBT 过热
	正极输出 2.3 kV	电源工作正常
	负极输出 2.3 kV	电源工作正常

## 4 结语

针对机车辅助电源产生的 EFT 抗扰度问题,本文分析了 EFT 的产生和骚扰机理,提出了基于 EFT 滤波器设计改进电源接地的方法,并进行了试验验证。结果表明,采用本文所提方法能有效提高机车辅助电源 EFT 抗扰度等级,通过 GB/T 17626.4—2008 标准,并留有一定的裕量。

## [参考文献] (References)

- [1] 国家质量监督检验检疫总局. GB/T 24338.4—2009 轨道交通-电磁兼容,第 3-2 部分:机车车辆-设备[S]. 北京:中国标准出版社,2009.  
AQSIQ. GB/T 24338. 4—2009 Raily Application—Electromagnetic Compatibility, Part 3—2: Rolling Stock—Apparatus [S]. Beijing:Standards Press of China,2009. (in Chinese)
- [2] Zhao Yang, SEE K Y. Fundamental of Electromagnetic Compatibility and Application[M]. Beijing: China Machine Press, 2007:31-32,86-91.
- [3] 国家质量监督检验检疫总局. GB/T 17626.4—2008 电磁兼容试验和测量技术:电快速瞬变脉冲群抗扰度试验[S]. 北京:中国标准出版社,2007.  
AQSIQ. GB/T 17626.4—2008 Electromagnetic Compatibility Testing and Measurement Techniques;Electrical Fast Transient/Burst Immunity Test[S]. Beijing:Standards Press of China,2008. (in Chinese)
- [4] 王玉峰,邹积岩,廖敏夫. 一次回路形成电快速瞬变脉冲群骚扰的研究及防护[J]. 电力自动化设备,2007,27(9):22-26.  
Wang Yufeng,Zou Jiyan,Liao Minfu. Study of EFT/B generated in primary circuit and its countermeasures[J]. Electric Power Automation Equipment,2007,27(9):22-26. (in Chinese)
- [5] 邵志和. 电源输入滤波器的设计及应用[J]. 电力机车与城轨车辆,2009,32(3):22-24.  
Shao Zhihe. Design and application of power supply input EMI filters[J]. Electric Locomotives and Mass Transit Vehicles, 2009,32(3):22-24. (in Chinese)
- [6] 肖家旺,赵阳,董颖华,等. 称重控制器群脉冲测试案例分析[J]. 南京师范大学学报:工程技术版,2011,11(2):9-12.  
Xiao Jiawang,Zhao Yang,Dong Yinhua,et al. Investigation on weighing controller in EFT testing cases[J]. Journal of Nanjing Normal University:Engineering and Technology Edition,2011,11(2):9-12. (in Chinese)
- [7] 程利军,邓慧琼. 微机保护抗电快速瞬变脉冲群干扰研究[J]. 电力自动化设备,2002,22(6):5-8.  
Cheng Lijun,Deng Huiqiong. Research on electrical fast transient/burst immunity for numerical protection[J]. Electric Power Automation Equipment,2002,22(6):5-8. (in Chinese)
- [8] 梁志成,傅静波,李富同,等. 微机保护装置的电快速瞬变脉冲群抗扰度研究[J]. 电力系统自动化,2003,27(11):65-68.  
Liang Zhicheng,Fu Jingbo,Li Futong,et al. Electrical fast transient burst immunity of protection equipment[J]. Automation of Electric Power Systems,2003,27(11):65-68. (in Chinese)

[责任编辑:刘 健]