

CRH380A 型动车组 APU 装置整流逆变模块 电磁干扰故障分析及滤波器设计

董晓东¹, 陈 铎¹, 董修斌²

(1. 青岛动车段, 山东 青岛 266000; 2. 兖州车务段, 山东 济宁 272000)

摘 要: 针对 CRH380A 型动车组 APU 装置内整流模块与逆变模块控制电源因电磁干扰引发动车组辅助供电异常故障, 结合动车组 APU 装置内部电磁干扰产生机理和整流逆变模块控制电源电路原理, 设计了一种新型动车组 APU 装置模块控制电源转换电路滤波器。经试验证明, 新设计的滤波器对模拟整车正常运行及处于某些特殊工况(如合主断、升降弓、弓网离线等)下产生的电磁干扰有显著抑制效果。

关键词: CRH380A 型动车组; 电磁干扰; APU 装置; 整流逆变模块; 滤波器

中图分类号: U266.2; U264.3⁺72

文献标识码: A

doi: 10.13890/j.issn.1000-128x.2018.03.023

Electromagnetic Interference Fault Analysis and Filter Design for Rectifier and Inverter Module of APU Device in CRH380A EMUs

DONG Xiaodong¹, CHEN Duo¹, DONG Xiubin²

(1. Qingdao Railway Depot, Qingdao, Shandong 266000, China; 2. Yanzhou Train Depot, Jining, Shandong 272000, China)

Abstract: In order to restrain the influence of electromagnetic interference on module control power supply of APU device in CRH380A EMUs, combining the mechanism of electromagnetic interference and the principle of rectifier and inverter module control power supply circuit in APU device, a new filter design based on module control power conversion circuit of APU device was presented. The experiment showed that the proposed filter has a significant inhibitory effect on EMI caused by normal operation and some special conditions of EMUs (such as VCB on-off, lift and drop the pantograph, pantograph offline, etc.).

Keywords: CRH380A EMUs; electromagnetic interference; APU device; rectifier and inverter module; filter

0 引言

动车组辅助电源系统(APU)是动车组上除为牵引动力系统之外的所有需要用电负载设备提供电能的系统^[1], 整流逆变模块作为其重要部分, 作用是将牵引变压器引入的 25 kV 交流电转换为可供动车组用电设备使用的输入电压。一旦出现模块故障将会引起动车组辅助供电异常, 导致动车组降速运行甚至停车, 严重影响动车组的运行安全。

2014 年至今, 受电磁干扰影响, CRH380A 型动车组频频误报 APU 装置模块故障(整流模块故障和逆变模块故障), 给动车组的安全运行带来了严重威胁,

所以研究动车组内部电磁干扰产生机理和 EMI 滤波器, 有助于抑制电磁干扰的影响, 保障动车组的行驶安全。

1 故障分析

1.1 电磁干扰产生原因与特点

高速动车组因供电网输入电压大且内部电气设备配属多、电气元件排列密集, 运行中动车组 APU 装置整流器、逆变器内的大功率开关器件 IGBT 在以较高频率进行大电压、大电流开关转换时, 电压变化率(du/dt)和电流变化率(di/dt)一般都较大, 易产生射频能量, 形成干扰源。同时, 由于装置内变压器的漏感和输出二极管的反向恢复电流造成的高频尖峰脉冲, 也会形成电磁干扰。

收稿日期: 2017-11-22; 修回日期: 2018-02-05

动车组内的电磁干扰可分为共模干扰和差模干扰 2 种, 差模干扰是指存在于 2 根电源线之间, 作用于信号正端和负端之间的干扰。动车组内差模干扰主要来源于电路中输入直流电压进行高频开关器件通断后在电感负载上产生的纹波电压及夹杂在直流电压上的其他工频交流成分。差模干扰对输出电压幅值进行干扰, 可能会导致电路内部的二极管击穿或者电容烧损, 严重影响电子设备的正常运行和检测数据的准确性。共模干扰是存在于电源火线对地或电源中线对地之间, 作用于信号线和大地之间的干扰。动车组内的共模干扰主要来自于高频整流二极管反向恢复时二极管结电容和功率器件开关时功率器件结电容与线路寄生电感之间的谐振, 这种高频尖峰脉冲对装置内部的弱电控制和检测信号有直接影响, 破坏性极大。

由 CRH380A 动车组 APU 装置电路分析可知 (如图 1 所示), APU 装置的主要构成包括输入变压器、滤波回路、IGBT 脉冲整流器、IGBT 脉冲逆变器、输出整流器等。VCB 闭合后 25 kV 电网电压通过输入变压器转换为 400 V 不稳定交流电, 再通过预充电检测装置进入 IGBT 脉冲整流器进行整流, 整流后的原始直流电通过 IGBT 脉冲逆变器和输出滤波装置转换为 400 V

稳定交流电, 再依据不同负载电源需求经过输出整流器、变压器依次转换为 100 V 直流 (充电机负载)、220 V 交流、100 V 交流电进行输出, 其中 100 V 原始直流电源经过 APU 装置内部的控制机箱电源板转换为 ± 24 V 直流电作为整流逆变模块控制电源输入电源^[2]。伴随 APU 装置内部开关器件 IGBT 及控制机箱电源板上场效应晶体管导通与关断状态的频繁切换, 其感性负载中电流会产生波动, 在电源板输出的 ± 24 V 控制电源中形成一个与开关同频率的纹波电压, 这纹波电压大小一般和电路内部的 LC 电路以及等效串联电阻有关^[3], 电压频率与开关器件导通与关断切换频率相同, 为几十到几百赫兹, 这是一种差模干扰。

APU 装置电路输出整流器中因整流二极管的反向恢复特性, 在开关状态切换瞬间产生反向尖峰电流, 加之电路分布参数及寄生电容影响, 引起谐振产生大量谐波成分对电路造成干扰; 另外当电路内部大功率开关器件状态切换时, 由于上升沿和下降沿的存在, 也会出现高频谐振, 一般为几十兆赫兹。上述 2 种谐振干扰统称为高频尖峰脉冲, 幅值一般比差模干扰大很多, 属于共模干扰。研究对共模干扰的抑制, 一直是电磁兼容领域的重要一环。

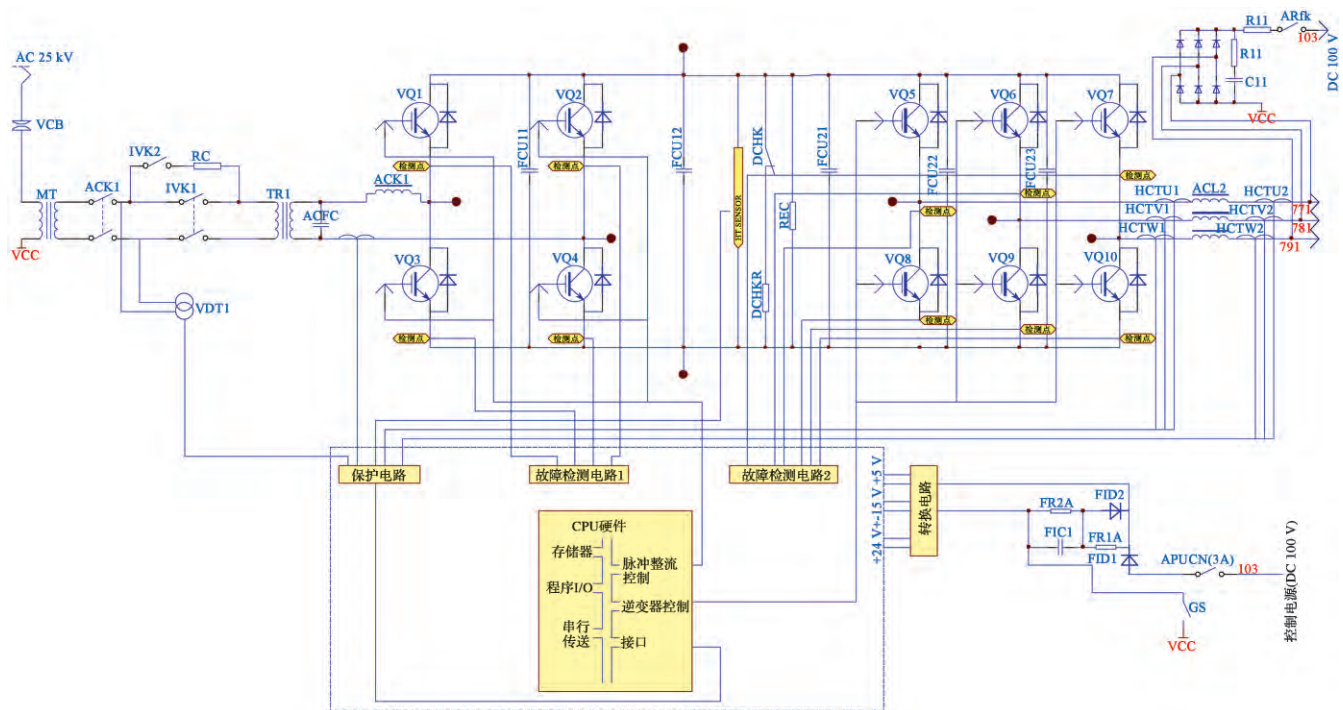


图 1 CRH380A 型动车组 APU 装置电路图

1.2 电路原理

触发 APU 装置中整流模块与逆变模块故障的原因有以下 3 种: 第一是模块中逻辑芯片 CPLD 状态异常; 第二是整流模块或逆变模块中 IGBT 状态异常; 第三是模块电源转换电路输入端电压异常。其中逻辑芯片 CPLD 状态异常检测和模块 IGBT 状态异常检测均由基于 CPLD 的故障检测处理电路进行数据采集和故障检测, 实时采集的状态信号经 CPLD 诊断后输出故障

触发信号送往 APU 装置控制电路 CPU 进行处理。模块电源转换电路输入端电压异常会导致电源转换电路输出电源电压异常, 同时引起 CPLD 状态异常和模块 IGBT 状态异常。

1.2.1 故障检测处理电路

APU 装置整流模块与逆变模块故障检测原理相同。由模块故障检测原理图 (如图 2 所示) 可知, 图中故障诊断电路部分主要用于采集模块内部 IGBT 和逻辑芯

片 CPLD 的工作状态; 逻辑处理电路部分是用于 CPLD 对采集信号的诊断处理; 故障输出电路部分是指故障诊断后, CPLD 封锁脉冲输出, 输出给 APU 控制装置内 CPU 的模块故障输出信号电平由低变高, CPU 开始封锁 IGBT 脉冲信号输出, 电路输出高电平, 触发故障。

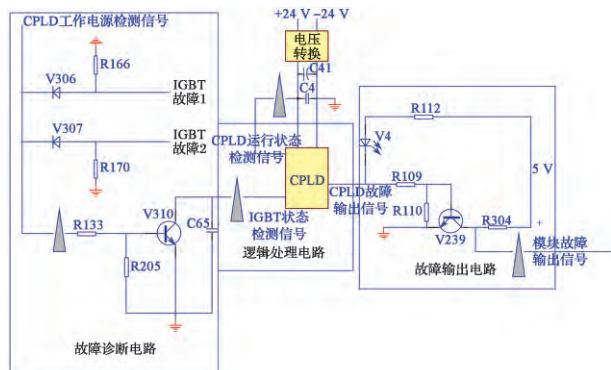


图2 APU装置模块故障检测原理图

1.2.2 模块控制电源转换电路

由模块控制电源转换电路结构框图(如图3所示)可知, 整流、逆变模块控制电源均由APU装置控制机箱中电源板 $\pm 24\text{ V}$ 提供, 分别通过整流模块和逆变模块内脉冲分配板上的控制电源转换电路转换为 $\pm 15\text{ V}$ 、 5 V 电源。其中 $\pm 15\text{ V}$ 电源为模块内IGBT门极驱动电路供电, 5 V 电源为模块控制和CPLD芯片工作电源。

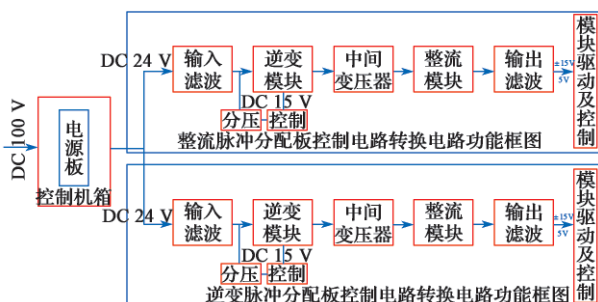


图3 模块控制电源转换电路结构框图

其中 $\pm 15\text{ V}$ 电源受电磁干扰异常波动时, 会导致故障诊断电路输出故障信号(高电平), 触发IGBT状态异常故障; 5 V 电源受电磁干扰异常波动时, 输出故障信号, 触发CPLD芯片状态异常故障。当控制机箱电源板输出的 $\pm 24\text{ V}$ 电压受电磁干扰异常波动, 正负线压降低 40 V 以下时, 会停止输出 5 V 电源电压, 同时引发模块CPLD芯片状态异常与IGBT状态异常, 触发故障。

2 电磁干扰试验

2.1 试验方法及干扰特性

由于运行中高速动车组APU装置本身就是很强的EMI干扰源, 其产生的干扰具有频率范围宽、强度大等特点。这些电磁干扰通过辐射和传导方式污染电磁环境, 进而干扰车体内其他电子设备的正常运行。为了对其进行有效抑制, 有必要了解电磁干扰对电路信号的影响程度。

这里以整流模块为例, 采用单模块通电试验方法,

将干扰源探头与模块散热器台面直接接触, 在散热器上进行高频尖峰电压干扰试验, 模拟整车正常运行或处于某些特殊工况(如合主断、升降弓、弓网离线等)时, 车体可能存在的高频尖峰电压。模块通过散热器与APU装置柜体接地, 因此高频尖峰电压可以通过模块散热器对模块内部控制电路以辐射和传导方式产生干扰。

用于模拟车体内电磁环境的干扰发生器, 其作用是用来模拟动车组正常运行或特殊工况下产生的高频尖峰干扰电压输出, 其发出的干扰信号特性上升时间为 2 ns , 幅值从 $1\,500\sim 2\,000\text{ V}$ 可调, 共8个挡位, 每挡相差 200 V 。

2.2 干扰测试波形分析

通过波形记录仪观察, 干扰发生器在从最小挡至最大挡过程中均会触发故障, 在干扰施加后, 模块内CPLD芯片状态信号、IGBT状态信号都不同程度地叠加了毛刺(如图4所示)。以CPLD芯片状态信号为例, 在干扰施加下, 其电源电压信号最小值约为 3.5 V , 持续时间约几十微秒, 电压信号波形如图5所示。



图4 模拟干扰下信号波形示意图一



图5 模拟干扰下信号波形示意图二

上述模拟车体内电磁干扰试验可知, 电磁干扰下, APU装置内CPLD芯片状态信号及IGBT状态信号中谐波和高频脉冲噪声明显, 故障诊断电路输出故障信号由低变高, 模块故障被触发。

3 滤波器电路设计

3.1 抑制差模干扰电路参数选择

为有效抑制差模干扰, 选用差模电感和电容组成的 L 型低通滤波电路^[4], 截止频率为

$$f = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_D C_D}}$$

式中: L_D 、 C_D 分别为抑制差模干扰的电感和电容值。

低通滤波电路中的差模电容一般选择容量相对较大的电容。电解电容因其设计结构问题, 在高频电路中往往呈感性, 对抑制效果有影响, 故本文设计的滤波器选用高频 UPJ 电容, 将高频 UPJ 电容与陶瓷电容并联, 对于频率较高的噪声也有抑制作用, 同时作为基准电压又起到去耦合的作用。对于差模电感选择由铁粉芯磁材制作的电感, 其电感值相对较大, 应用比较普遍, 差模噪声的抑制效果较好。

3.2 抑制共模干扰电路参数选择

电磁干扰中的尖峰脉冲主要由共模噪声引起, 共模噪声幅度大、频率高、造成的干扰较明显^[5]。在模块控制电源转换电路输入端选用适当的 EMI 滤波, 可有效抑制共模干扰, 显著减少尖峰脉冲产生。本文设计的滤波器中共模电容选用高频 UPJ 电容, 高频 UPJ 电容在大大提升自身电性能的同时也可实现对共模电感能量的迅速泄放, 保证共模电感后端的电压稳定, 确保了滤波装置在高速列车特殊工况 (如合主断、升降弓、弓网离线等) 下的可靠性。结合实际使用条件共模电容选择 μF 级别, 设定截止频率, 则共模电感值为

$$L_c = \left(\frac{1}{2\pi F_{\text{ocm}} \times 1/(2C)} \right)^2$$

综上所述, 设计的滤波器电路原理如图 6 所示, 在模块电源转换电路输入端先接电解电容过滤部分低频干扰, 再由共模电感与电容组成抑制共模干扰 LC 电路, 对高频脉冲进行抑制。因共模电感器由 2 个绕组组成, 其绕组间间隙较大, 易产生磁通泄漏, 形成差模电感, 具备一定的差模干扰衰减能力。然而考虑到差模干扰衰减能力有限不能有效过滤电压输入端原始波纹及其他电路产生的低频干扰, 通过再加一级差模电感和电容组成抑制差模干扰 LC 电路。这种基于共模差模 LC 滤波的新型滤波器能有效抑制共模、差模噪声干扰, 其中后加一小电容即能去除剩余高频干扰又可起到去耦合作用^[6], 减少后续电路对前端的影响。

观察波形记录仪, 信号在干扰施加下的毛刺叠加显著减少, 且故障输出信号电平未由低变高, 干扰未触发故障。通过验证可知采用新型滤波器滤波后的模块电源转换电路输出电压中共模、差模干扰成分已经得到显著抑制, 有效地减少了故障输出信号的异常触发, 降低了故障率。其抑制后模块内 CPLD 芯片、

IGBT 状态信号如图 7 所示。

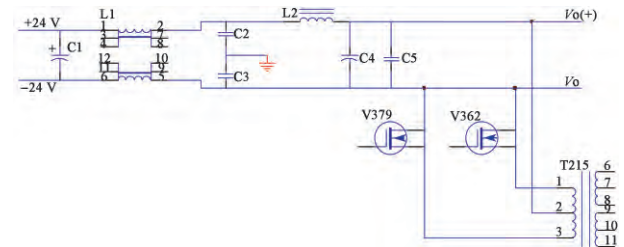


图6 模块电源转换电路输入端滤波器电路原理图

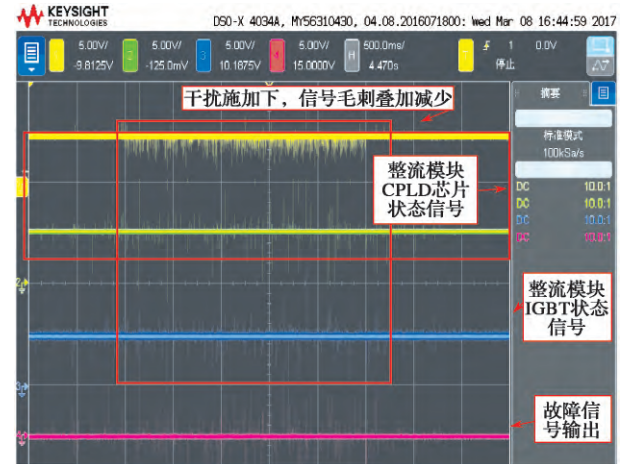


图7 综合滤波后信号波形示意图

4 结语

本文重点描述了动车组内差模及共模干扰产生机理, 设计了一种新型的模块电源转换电路输入端滤波器电路并进行了干扰模拟试验, 通过验证可知经上述滤波处理后, APU 装置整流逆变模块控制电源转换电路输入电压中的纹波噪声和高频尖峰脉冲干扰得到了显著抑制, 提高了电路输出端电源电压的稳定性。自 2016 年启动批量改造计划以来, 通过加装新型滤波器及优化模块软件参数, 有效降低了因电磁干扰导致 APU 装置内整流逆变模块故障的异常触发, 保障了动车组的运行安全。

参考文献:

- [1] 刘建强, 郭怀龙, 杜会谦, 等. CRH3 型动车组辅助供电系统可靠性研究 [J]. 铁道学报, 2015(11): 44-51.
- [2] 苑丰彪, 杨君. 高速动车组辅助供电系统 [J]. 机车电传动, 2009(1): 1-3.
- [3] 安捷伦. 应对电磁兼容测试挑战, 安捷伦 MXF 新品引领 EMI 测试标准 [J]. 电子测量与仪器学报, 2013, 27(11): 1053-1054.
- [4] 李季, 潘孟春. 基于形态滤波和 HHT 的地磁信号分析与预处理 [J]. 仪器仪表学报, 2012, 33(10): 2175-2179.
- [5] 陶陈彬. 开关电源共模 EMI 抑制技术研究 [D]. 天津: 天津大学, 2008: 33-38.
- [6] 张清鹏, 万健如. 电磁兼容系统中的接地研究 [J]. 国外电子测量技术, 2012, 31(10): 27-29.

作者简介: 董晓东 (1986-), 男, 硕士, 主要从事动车组运用与检修工作。