

地铁列车电传动系统线路 空心滤波电抗器研制

鲁 力, 田奎森, 盛政彬

(株洲变流技术国家工程研究中心有限公司 机电事业部, 湖南 株洲 412001)



作者简介: 鲁 力 (1982-), 男, 工程师, 现从事机车产品干式变压器、电抗器的研制。

摘 要: 对地铁列车电传动系统线路空心滤波电抗器的开发研制情况进行了介绍, 重点描述了滤波电抗器的整体结构设计、电磁设计、关键工艺和试验等过程中出现的问题, 并就解决方法进行了分析和总结。

关键词: 滤波电抗器; 线圈; 试验; 地铁列车; 电传动

中图分类号: U231; TM477 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-128X(2011)02-0043-04

Research on the Hollow Filter Reactor of Metro Vehicle Electric Drive System

LU Li, TIAN Kui-sen, SHENG Zheng-bin

(Electrimechanical Business, Zhuzhou National Engineering Research Center of Converters Co., Ltd,
Zhuzhou, Hunan 412001, China)

Abstract: This paper introduced the development of hollow filter reactor of metro electric drive system and puts emphasis on overall structure design, electromagnetic design, key process and test. The solutions had been analyzed and summarized.

Key words: filter reactor; coil; test; metro vehicle; electric drive

0 引言

城市轨道交通车辆通常是从直流电网中获取直流电压, 电网直流电压为 1 500 V 和 750 V 2 种, 经过牵引逆变器 VVVF 和辅助逆变器 SIV 变换后输出不同的交流电压值, 给列车上的设备供电。在输入端接有线路电抗器及滤波电容器, 使系统稳定并将直流侧电容电压波动限制在允许范围内, 同时, 滤除高次谐波, 且在逆变器发生短路时抑制短路电流, 满足逆变器开关元件换流的要求。

地铁车辆具有频繁启动和制动, 并且制动峰值功率大, 使牵引系统主电路直流侧电流呈阶梯或锯齿波状态。为保证电抗器电感特性曲线不随电流变化而变化, 直流侧线路电抗器设计为空心结构, 其电感值几乎不受直流侧电流大小的影响。为满足上述应用特点, 同时具有较好的散热效果, 在设计时, 将电抗器轴向方向与线圈冷却气道方向定为一致。产品通常是悬挂式安装于车体下部, 对其体积、重量、结构稳定性、防

水性、防潮性能都有很高的要求。以下重点针对北京地铁 2 号线滤波电抗器进行介绍。

1 滤波电抗器结构设计和计算

滤波电抗器主要技术参数如下:

额定电流	DC 710 A
额定电压	DC 750 V
结构方式	空心式
冷却方式	走行风冷 (风速 2 m/s)
绝缘等级	H 级
安装方式	吊装 (4-M20 螺栓固定)
质量	785 kg

本线路滤波电抗器由承载骨架、线圈和接线盒组成。线圈作为一个刚性较好的整体通过 16 根 M16 拉杆均布前、后端板及夹紧螺杆固定在骨架上; 接线盒固定在前端板上, 采用 IP54 的密封结构, 打开接线盒的盖板就可以完成相应部位的日常维修和检测。图 1~图 4 采用 PRO/E 软件对滤波电抗器进行了结构强度和振动模态的有限元分析, 为结构的稳定性设计提供重要依据。

收稿日期: 2010-05-28; 收修改稿日期: 2010-07-19

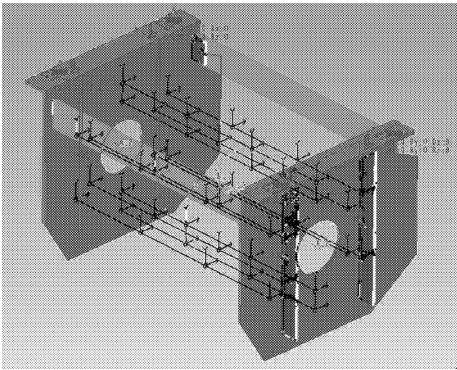


图 1 电抗器结构件受力图

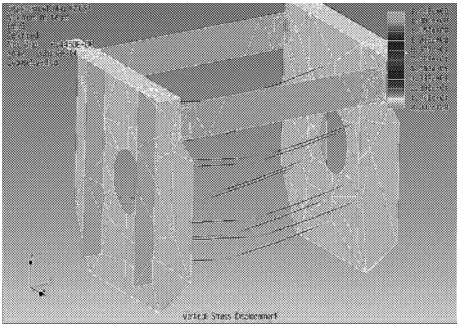


图 2 电抗器结构件加载应力图

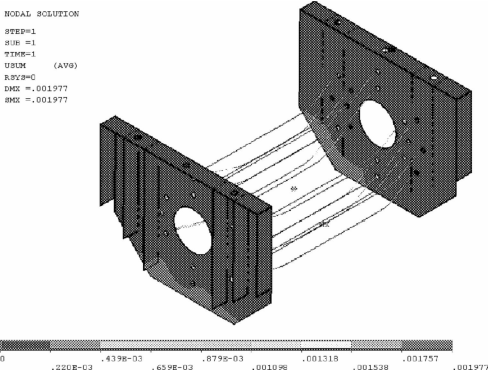


图 3 加载后位移云图

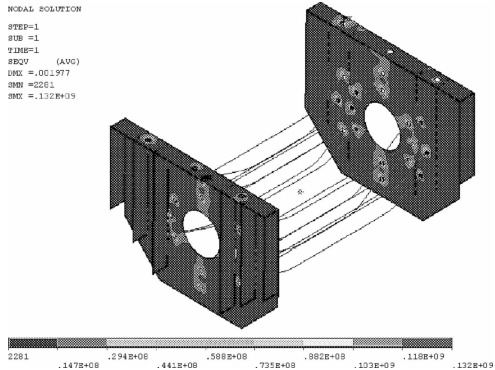


图 4 承载后应力云图

根据设计要求，结构在垂向、纵向与横向分别能够承受3g、5g与3g的冲击。通过强度分析可知：垂向、纵向、横向安全系数能满足设计要求。在大负荷情况下，拉螺杆两端及其与弯板连接处无永久变形及位移，拉螺杆无永久变形及位移，强度与刚度性能满足要求。该产品通过了IEC61373-1999 I类A级的产品冲击和振动

试验，满足车辆强度要求。

2 滤波电抗器电感量的计算

空心滤波电抗器线圈电感量

$$L=10.3 \times N \times N \times \Phi_N \times \{\Phi_N / (A+B)\}^K \times 10^{-7} \text{ mH}$$

式中： N 为线圈匝数，产品共28饼，每饼6匝，总计168匝； Φ_N 为线圈的平均直径，产品内径214 mm，外径569 mm，平均直径391.5 mm； A 为线圈的辐向尺寸，线圈辐向尺寸177.5 mm； B 为线圈的轴向尺寸，线圈轴向尺寸即线圈压缩后的高度 $L=750$ mm； K 为线圈的折合系数，通过查表计算 $K=0.83$ 。

通过以上数据计算 $L=3.12$ mH

该产品现已批量生产，通过DC+AC标准台的检测试验，测量产品的电感为3.152 mH，测量电感与计算电感的偏差为1%，满足技术条件要求。结构简图如图5。

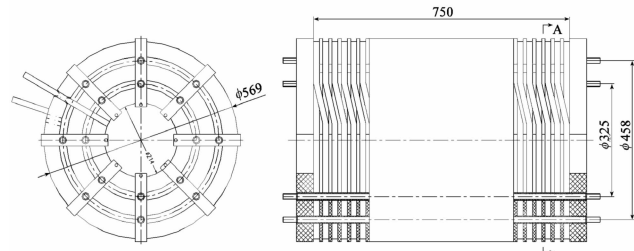


图 5 滤波电抗器线圈结构简图

3 滤波电抗器防漏磁的措施

空心电抗器的优点是电抗器电感曲线稳定，其电感量不随电流的变化而变化，电抗器不存在饱和现象。空心电抗器缺点是漏磁大，对周边的电磁设备有干扰，尤其在地铁设备中，会对带有心脏起搏器的人员造成致命的伤害。因此，需要采取降低电抗器漏磁的方法，在电抗器上方增加屏蔽板，具体方法见图6。

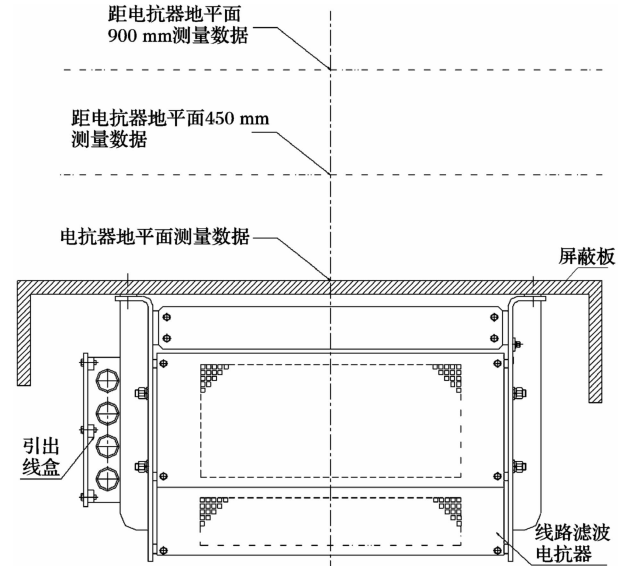


图 6 滤波电抗器屏蔽板安装图

图6为产品安装磁屏蔽板后的结构图，通过试验对

比结果表明, 滤波电抗器加装屏蔽板后漏磁比不加屏蔽板明显减小。表 1 为产品对比试验数据。

表1 电抗器在2种工况测量漏磁数据

测量位置	试验类型	
	型式 (T)	例行 (R)
电抗器上平面测量数据	√	√
距电抗器地平面 450 mm 数据	√	√
距电抗器地平面 900 mm 数据	√	√

4 关于滤波电抗器的线圈的制作

线圈是滤波电抗器的核心部件。图 7、图 8 为北京地铁 2 号线滤波电抗器国产化线圈照片。

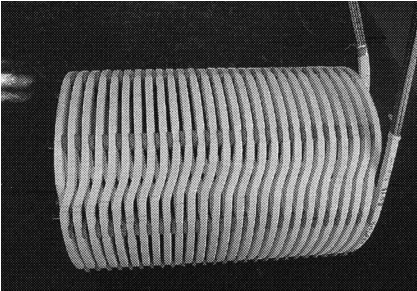


图 7 滤波电抗器线圈照片 1

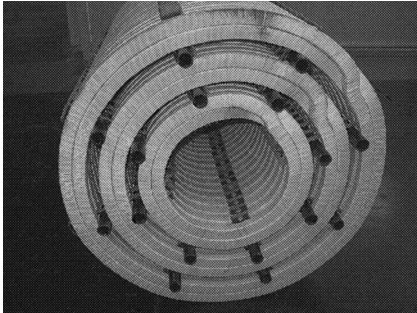


图 8 滤波电抗器线圈照片 2

电抗器线圈导线采用双玻璃丝包聚酰亚胺薄膜烧结铜导线, 导线薄膜烧结铜导体上, 附着力强, 单根导线能够承受工频耐压 4 000 V 以上, 电抗器采用辐向 4 根, 轴向 2 根, 总计 8 根导线并绕。在 8 根并绕导线外加包 0.1 mm 厚热收缩带, 采用此结构, 产品经真空浸漆后, 能满足 IP05 淋水试验的要求。

线圈采用特殊的“多层单螺旋”结构, 线段中间均布螺杆, 既可作为线圈的散热气隙, 又可作为线圈的固定支撑, 在线圈的匝与匝之间用 H 级有机硅层压玻璃布板作散热气道, 有效解决线圈的散热问题, 同时增加绝缘稳定和绝缘强度稳定性。线圈的层与层的升层间, 采用加包 0.2 mm 厚 NHN6650 复合膜处理, 有效防止在线圈升层时对线圈的损伤。

5 滤波电抗器试验

线路滤波电抗器经过多次结构和工艺的改进之后, 目前已能满足表格中各项试验的要求。下面介绍与日本三菱公司合作生产北京地铁 2 号线滤波电抗器

的型式试验中淋水试验的情况。

表2 滤波电抗器试验项目

试验项目	试验类型	
	型式 (T)	例行 (R)
外观检查	√	√
外形尺寸、安装尺寸及关键尺寸检查	√	√
接线端检查	√	√
接地端检查	√	√
重量测量	√	
测量绕组的直流电阻	√	√
损耗的测量	√	
电感量的测量	√	√
温升试验	√	
测量绝缘电阻	√	√
接线端之间的匝间耐压试验	√	√
工频耐压试验	√	√
雷电冲击耐压试验	√	
振动和冲击试验	√	
漏磁测试	√	
热寿命试验	√	
外壳的防护等级 (IP 代码)	√	
环境试验 (淋水)	√	

北京地铁 2 号线滤波电抗器接线盒采用 IP56 密封结构, 现针对 2 种不同结构密封方式加以讨论。

①采用接线盒周围粘接密封件爱姆卡条 EPDM 密封结构, 见图 9。

②采用接线盒盖板粘接 3M 密封胶带密封结构, 见图 10。



图 9 滤波电抗器接线盒密封方式 1

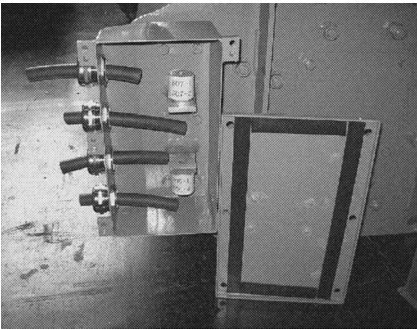


图 10 滤波电抗器接线盒密封方式 2

比较可知, 2 种密封结构都具有良好的防水效果, 但采用结构方式 1 密封结构可操作性更好, 现场安装更方便, 现国产化制作都采用图 9 密封方式。表 3 为 2 种密

封方式的性能比较。

表3 2种不同密封方法性能比较

密封方式	用爱姆卡条密封	用3M 胶带密封
密封件固定	粘接于接线盒	粘接于接线盒盖板
防水效果	良好	良好
缺点	密封件粘接于接线盒上, 粘接工艺实现比较困难	密封件粘接于接线盒盖板, 接线盒进行二次装配时, 密封件易变形
优点	防水性好, 现场操作方便	操作方便

6 结语

地铁列车电传动系统线路空心滤波电抗器采用敞

开式真空浸漆型结构, 产品具有结构紧凑、维护方便、防潮防霉等特点。类似产品结构已成功在北京地铁2号线, 广州地铁4、5号线, 天津地铁2、3号线, 北京地铁房山线成功应用。

参考文献：

[1] 丁荣军, 陈文光. 地铁车辆用交流传动系统的设计 [J]. 机车电传动, 2001 (5).
[2] 崔立君. 特种变压器理论与设计 [M]. 北京: 科学技术文献出版社, 1995.
[3] 变压器实验技术大全 [M]. 沈阳: 辽宁科学技术出版社, 2006.
[4] EN60310, 牵引变压器, 电抗器试验 [S].

(上接第42页)

紧急运行模式。作为备用操作, 在TMS出现故障时使用。如果按下“紧急运行”操作开关, 则进入该模式, VVVF逆变器将根据列车线路指令操作。在紧急运行模式中, 不论主控制器主控手柄位置如何, 牵引扭矩均被设置为一个规定的扭矩值, VVVF逆变器将最大列车速度控制在40~45 km/h范围内, 启动扭矩固定为空载(AW0)负载条件下的最大值。在紧急操作模式中不能进行再生制动操作。

3.3 空转 / 滑行控制

VVVF控制器估计牵引电机转动频率, 然后通过加速度或减速度差方法来检测空转或打滑状态。瞬时加速度或减速度将通过当前速度数据和15 ms前的速度数据来进行计算, 每5 ms计算1次。标准加或减速度通过200 ms前速度数据和1 s前的速度数据来进行计算, 每5 ms计算1次。加/减速度的微分是由标准加、减速度和瞬间加、减速度计算出来的。该方法能够将空转或滑行检测错误降到最低, 并提供快速响应的和最优的空转或滑行检测。

3.4 再生制动控制

TMS 以列车为单位进行再生制动控制, 再生制动控制过程如下：

- ① TMS根据司控器或车载装置(CC)发出的制动指令和电子制动控制单元(EBCU)发出的车辆载荷来计算每辆车的制动力, 并累加每辆车的制动力得到列车总制动力。在计算中, TMS考虑冲击限制参数。
- ② TMS根据每辆车的载荷计算各动车的再生制动力, 并送给各VVVF。
- ③ VVVF根据来自TMS的请求施加再生制动并将实际制动力反馈给TMS。
- ④ TMS再将列车的总制动力、各VVVF反馈的实际再生制动力送至各EBCU。

⑤ EBCU 根据总制动力和来自TMS的再生制动力计算和控制空气制动力。

为防止VVVF和牵引电机过热或轮对滑行, TMS控制再生制动切除, 通过TMS切除再生制动力有4种情况：

- ① 如果牵引系统发生某严重故障需要切除, TMS将切除所有VVVF的再生制动以防止VVVF和牵引电机过热。
- ② 如果VVVF检测到滑行现象, VVVF向TMS传输滑行控制信号, TMS向EBCU转送此信号。EBCU控制滑行并向TMS传输再生制动切除信号(为了保护), TMS接收到再生制动切除信号后便切除该车VVVF的再生制动命令。
- ③ 当来自VVVF的电制动有效信号是“0”时(直到制动信号关闭为止), 相应的VVVF再生制动信号将被切除。
- ④ 切除信号作为测试用输入。此信号输入时, 所有VVVF的再生制动信号将被切除。

4 结束语

沈阳地铁1号线车辆电传动系统集成度高、技术参数设置合理、设计理念先进, 并采用了先进、成熟的无速度传感器控制。自2010年9月27日投入试运营以来, 目前车辆性能稳定, 电传动系统的各项技术指标符合设计要求, 能适应沈阳地铁1号线的运行环境。

参考文献：

[1] 三菱电机株式会社. 沈阳地铁1号线牵引制动系统操作手册 [S]. 日本: 三菱电机株式会社, 2009.
[2] 徐惠林. 北京地铁5号线车辆电传动系统 [J]. 机车电传动, 2008(6): 36-39.