

EAST 极向场电源控制系统的 EMC 滤波设计与应用

王林森 武旭 李亚 何诗英

(中国科学院等离子体物理研究所, 合肥 230031)

摘要 滤波器是由电感、电容、电阻或铁氧体器件构成的频率选择性二端口网络, 可以插入传输线中, 抑制不需要的频率进行传播。结合电力电子系统电磁兼容理论和极向场电源的实际运行状况, 对传导干扰和信号滤波的设计与应用进行介绍。

关键词 电磁兼容 EAST 电源系统 滤波

中图分类号 TH841

文献标识码 A

文章编号 1000-3932(2013)05-0597-05

EAST 超导托卡马克聚变实验装置是国家九五重大科学工程, 工程包括托卡马克装置、真空系统、电源及控制系统、低温系统、数据采集和等离子体控制系统、波加热和波驱动系统以及等离子体诊断系统等。极向场电源系统是 EAST 装置的核心子系统之一, 由 12 套晶闸管相控变流器向 12 组相互耦合的极向场超导线圈供电, 实现各种不同要求的等离子体位形及各种不同运行模式下的等离子体的产生、加热、平衡与控制。极向场电源系统核心设备变流器和续流柜, 都是现代大型电力电子设备, 设计总功率为 60MW。12 套电源系统大功率晶闸管、二极管的数量约 1 800 只。

1 EAST 极向场电源控制系统的设备概况及电磁环境

晶闸管是现代电力电子技术的核心器件, 利

用其正向触发开通, 反向电压关断的特点, 完成交流电能向直流电能的转换。极向场电源中的变流器是三相全控桥式整流器, 主要产生 5、7、11、13 次诸如 $6n \pm 1$ ($n = 0, 1, 2, \dots$) 格式的谐波^[1]。除了变流过程产生的高次谐波之外, 电力电子器件的开关频率相当高, 其开关的重复频率可以从工频到几百千赫兹。在传导射频段系统中同样会出现大量的开关频率谐波。各种元件开通关断时会产生较强的 dV/dt 和 di/dt , 在这种尖峰信号的激励下, 系统中寄生电感、电容往往会形成谐振, 频率可达到数十兆赫兹。因此在极向场电源的内部, 产生的干扰频谱是相当宽的, 其频谱分布可以从电网频率一直到兆赫兹。

图 1 为典型的电力电子系统产生的干扰频谱分布情况。

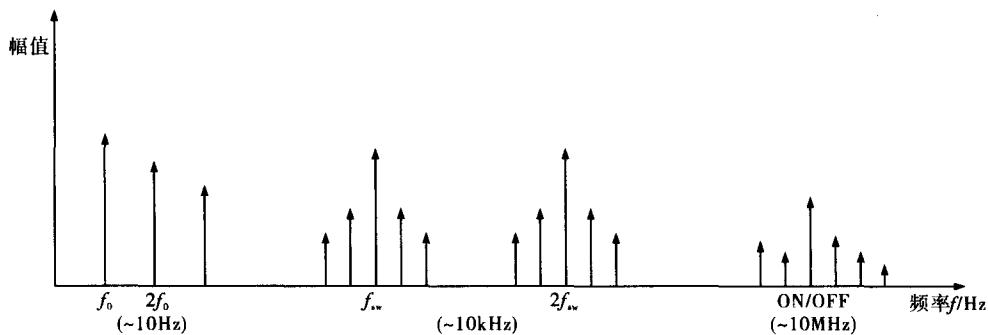


图 1 典型电力电子系统产生的干扰频谱

f_0 ——电源基频; f_{sw} ——开关频率

从图中可以看出, 电力电子系统中产生的干扰分为 3 类: 第一类是电网电源的各次谐波, 这种

收稿日期: 2013-03-20(修改稿)

干扰是在极向场电源相控整流环节形成的;第二类干扰是由电力电子器件本身的开关频率 f_{sw} 及其倍数频率附近的干扰,这一干扰是系统中的一些高频开关环节产生的,其频率分布和幅值与开关的控制策略有关,成为开关频率谐波;第三类干扰则出现在数十兆赫兹上,这些干扰是由开关本身通断时器件内部的瞬变过程引起的,与开关器件内部载流子的运动有关,称之为开关暂态干扰^[2]。

图2是电源的单套原理图,电源工作过程分

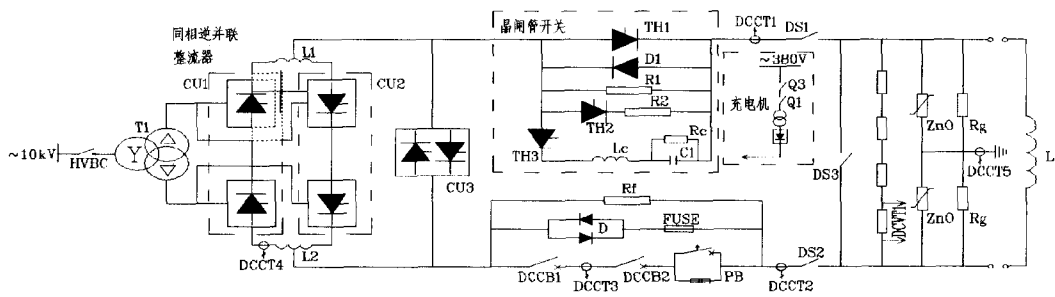


图2 EAST极向场电源单套电源原理

整个运行过程中,三相全控变流器处于整流或逆变状态,产生高次谐波;总数约1800只的晶闸管运行时快速导通和截止;三阶段15kA电流关断瞬间会有很强的 dV/dt 和 di/dt ;特殊的设备直流快速开关或爆炸开关的分合闸、继电器的分合动作;平波电抗器、交直流母排交错在电源大厅内,安装的密度大,实验下会产生较强的电磁和磁场。这些设备产生的强干扰源,符合图1所示的频谱分析。

2 极向场电源控制系统中的传导干扰

EAST极向场电源控制系统的EMC之接地设计和屏蔽设计与应用^[3],就是针对空间辐射干扰而设计的。不过实际运行表明,电源控制系统采用了屏蔽技术及各种接地措施,仍有传导干扰进入设备,这就需要采用滤波方式抑制干扰。

2.1 传导干扰的形成机理

传导干扰一般分为差模干扰和共模干扰,如图3所示。图中N为噪声源,R为受扰设备, V_N 为干扰电压,干扰噪声电流 I_N 和信号电流 I_s 的路径在往返两条线上是一致的。图3a所示差模干扰电流是由外界电磁场在信号线和信号地线构成的回路感应产生的。对于电流信号 I_s 来说,本身

5个阶段:预磁阶段——变流器处于正向整流状态,使磁体电流慢速上升,极向场超导磁体充磁;等离子体产生阶段——磁体电流达到预定值约15.0kA后,晶闸管快速开关关断,产生2.4kV电压,使真空室中的气体击穿产生等离子体;等离子体电流上升阶段;等离子体平顶阶段——当磁体电流过零后,晶闸管开关闭合,变流器处于逆变状态,维持等离子体处于平顶阶段;等离子体电流下降阶段——当磁体电流达到预定值后,变流器处于反向逆变状态,使磁体退磁,系统退出。

就是差模输入,差模信号 I_N 会直接叠加上真实信号 I_s 上,造成实际电流 $I'_s = I_N + I_s$,形成误差。图3b干扰源进入线路和地线间,干扰电流在两条信号线上各流过一部分,以地为公共回路,而信号电流只在两条信号线的线路中流过。共模电流流入设备R中,由于两个共模电流的大小相等,方向也一样,所以在设备R中两个电流相互抵消,不会产生干扰电压。图3c线路不平衡时, $Z_1 \neq Z_2$,则 $V_{N1} \neq V_{N2}$,从而 $I_{N1} \neq I_{N2}$,于是负载 Z_L 上产生干扰电压 $V_N = V_{N1} - V_{N2}$ ^[4]。

2.2 传导干扰的消除措施

EAST极向场控制系统中消除传导干扰的方法主要有:PCB线路板设计、机箱内接口电路的布线、控制系统中的接线、尽可能减少回路的面积、减小磁场耦合的强度;二次侧的电缆全部采用了双绞屏蔽电缆,保证线路平衡,利用双绞线较好的EMC特性抑制共模、差模的产生;传感器模拟量信号进入计算机AD采集前,用接口电路差分输入方法处理信号,利用差分电路的共模抑制特性来抑制干扰;运用变压器隔离、数字光耦、模拟线性光耦这些隔离器件,切断“地”回路,阻断干扰传播路径。

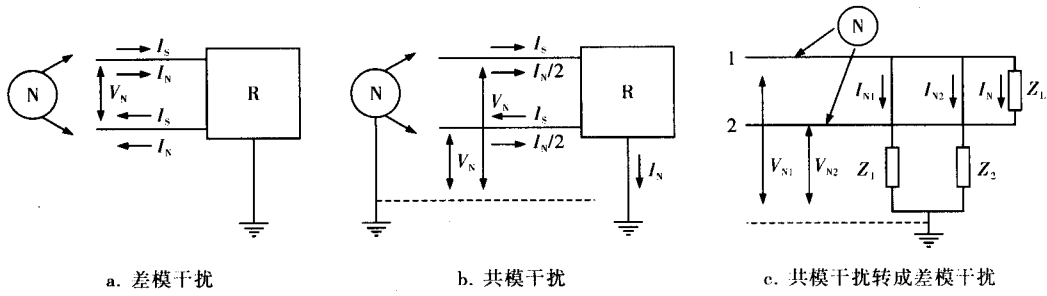


图 3 传导干扰的差模和共模

3 极向场电源控制系统中的滤波设计与应用

滤波器由电感和电容组成,当干扰源的频谱成分不同于信号频带时,能阻止干扰信号通过,并将其反射回信号源。极向场系统设计一般要求模拟量信号的频率为 5kHz,最高 10kHz,运用较多的是低通滤波器。对电阻和电感器件的使用考虑以下两点:接口电路机箱体积小,PCB 板面积小,电抗器的体积过大,不利小型化、集成化;碳膜电阻参数较多,更容易参数匹配,所以大部分都是 RC 配合的滤波器。数字量信号采用的办法是在输入端加单电容滤波设计,后面用逻辑电路对信号进行滤波、整形,即可获得较好的输出波形。

3.1 电容滤波器

电容滤波器运用较多的是抑制差模干扰的 X 型电路结构,抑制共模的 Y 型电路结构,还有 X、Y 型混合使用的模式。图 4 中设输入量为电流 $I_c(s)$,输出电压为 $U_o(s)$,则传递函数 $A(s) = U_o(s)/I_c(s) = 1/CS$;幅频特性为 $A(j\omega) = U_o(j\omega)/I_c(j\omega) = 1/j\omega C$ 。图 4a 中电容 C_x 主要运用在信号或电源输入端,抑制差模干扰或直流电源与地线之间的电源噪声;图 4b 中的电容 C_y 中点接地,能够将高频干扰电流旁路入地,衰减共模干扰;图 4c 是混合型接法,不仅能够消除共模干扰,还能抑制差模干扰。图 4d 电容滤波器的幅频特性,随着 $\omega = 2\pi f \rightarrow \infty$,滤波器输出电压逐渐衰减,起到低通滤波效果。

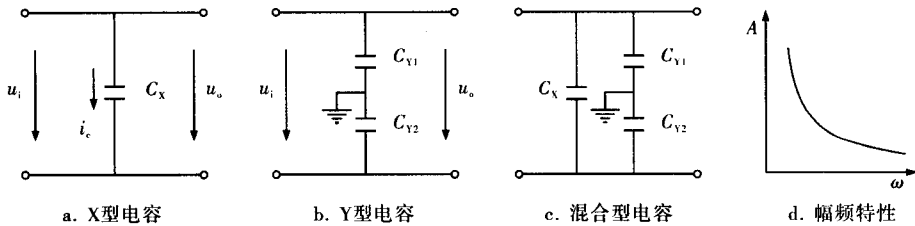


图 4 电容滤波电路结构和幅频特性

3.2 RC 低通滤波器

传感器的信号频率不高,EAST 电源控制模拟量输入接口电路全部采用 L 型低通滤波器,电路结构简单,如图 5 所示。

$$A(j\omega) = \frac{1}{1 + j\omega RC}$$

$$|A(\omega)| = \frac{1}{\sqrt{(\omega RC)^2 + 1}}$$

上限截止频率 $f_H = 1/(2\pi RC)$,则 $|A(\omega)| = 1/\sqrt{1 + (f/f_H)^2}$ 。

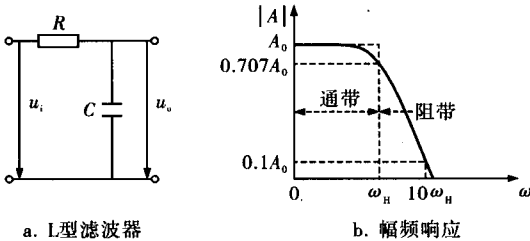


图 5 RC 低通滤波器电路及幅频特性
幅率特性为:

当 $f \ll f_H$ 时,输出电压几乎与输入电压相等;当 $f > f_H$ 时,则衰减很快,每当频率提高 10 倍, $A(\omega)$ 将下降 20dB。控制系统的模拟量信号频率最大 10kHz,通常将低通的带宽设置到约 100kHz,取电阻 $R = 510\Omega$,332 独石电容,求解 f_H ,
 $f_H = 1/(2 \times \pi \times 510 \times 33 \times 10^2 \times 10^{-12}) = 95\text{kHz} \cong 100\text{kHz}$,满足设计要求。模拟量信号最高频率

10kHz 时, $|A(\omega)| = 1/\sqrt{1 + (10/100)^2} = 0.995$, 只衰减了 0.5%, 这个精度是可以接受的。

图 6 为输入接口电路。电路中, 首先利用差分输入模式消除电路中的共模干扰; RC 低通电路

可以将耦合电路中的差模干扰进行大幅度衰减; ISO124 线性光耦, 对电路前、后进行了隔离, 使得 GND1 与 GND2 互相独立, 切断了干扰传播的路线。

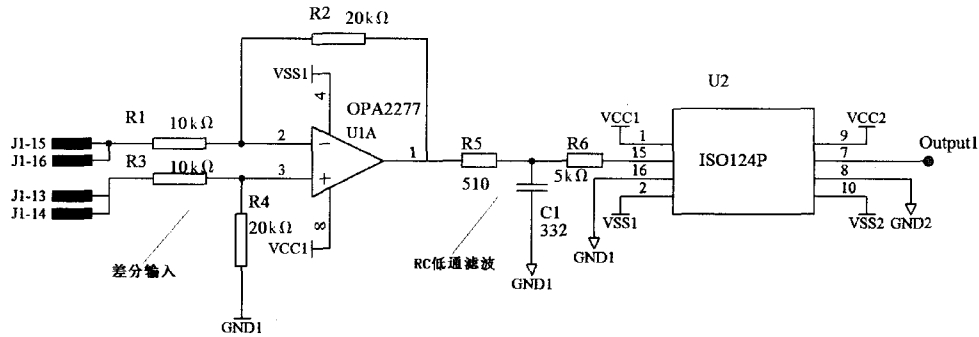


图 6 接口电路

3.3 测试结果分析

图 7 是 2012 年 EAST 实验装置春节运行, 靶号为 42727 和 42919 的两次数据。上方的波形为极向场第七套电源 PS7Idc5 的实际波形, 下方的波形是被测厂家生产的光纤电流传感器实验波形。装置实际运行时的电流约 10kA, 光纤传感器的输出信号幅值为 0.25V。传输过程中, 极向场

电源所处的环境干扰强度高, 采集的信号含有高频干扰较大, 转换成实际电流值可乘以 45×10^3 的系数。信号转换成实际值后纹波很大, 有 7 ~ 8kA。接口电路处理后, 采集信号的纹波衰减较多, 在 1kA 左右, 分析是传感器控制器自身输出的数字高频信号。由数据可知, 传导干扰进入接口滤波处理后衰减很快, 达到预期的效果。

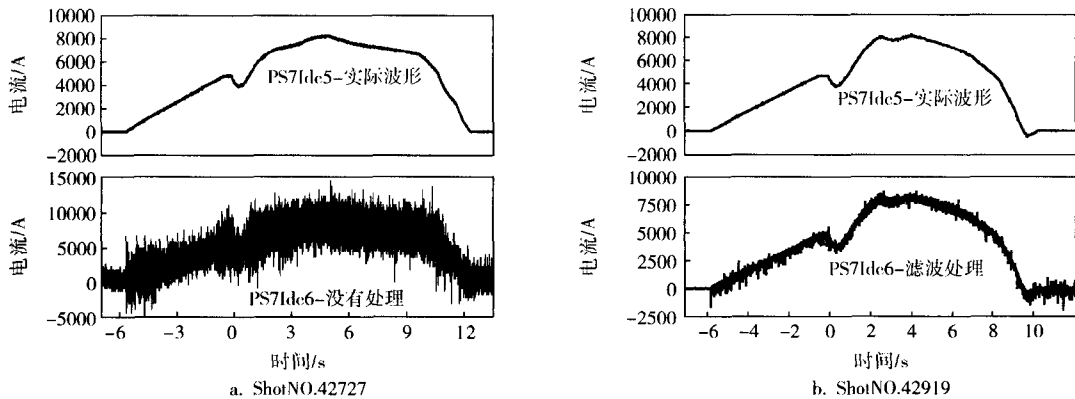


图 7 EAST ShotNo.42727 与 42919 的数据波形分析

3.4 电源干扰的抑制方法

极向场电源运行时感性负载(机械触头、继电器及线圈等)的瞬态过渡过程产生尖峰电压; 高频脉冲设备与电源之间通过杂散电容、杂散电感的辐射耦合; 电力线本身的天线效应, 接收到相应的干扰电压; 雷电现象; 高压绝缘放点引起的放电噪声等诸如上面的各种现象, 都会在电源上叠加干扰电压。电压信号不纯净直接导致传感器及

总线控制器等核心关键设备产生噪声输出或造成误动作, 影响设备运行的可靠性和安全性。抑制电源干扰主要采用以下几点来实现:

a. 采用传统的线性稳压电源取代新型开关电源, 避免开关电源的高频斩波信号耦合到负载(传感器和控制器); 为了减小在电源母线上的负载感应噪声, 采用负载独立供电模式, 减小负载间耦合。

b. 接口电路内部使用的电源变压器初级绕组和次级绕组间绕一圈铝薄片屏蔽,抑制共模干扰;直流侧加 Z_{n0} 电阻或加去耦电容 C_x 、 C_y ,抑制尖峰电压。

c. 为了减小电源动力线和信号电缆之间的耦合,动力电缆布线时走动力缆线槽,信号电缆走控制电缆线槽,两线槽互相独立,保持一定距离。

d. 变流器及高压充电机等噪声设备,其主回路进线和控制进线,供电变压器各自不同,保证控制电和主回路电独立供电,不会因为这些设备的运行,干扰到控制电的供电母线,造成干扰扩大化。

4 结束语

EAST 极向场电源系统是个总功率为 60MW、复杂的、庞大的现代电力电子系统,笔者分析了电力电子系统内干扰的基本带宽,了解干扰的传导特性。结合控制系统对信号频率的要求,针对性

地采取了信号滤波、电源抑制及隔离等诸多措施。实验运行中,实时反馈控制和数据采集系统采集的设备运行数据表明:较大地衰减了各种干扰幅度,保证了信号的最大真实性,确保实验稳定可靠的运行。

参 考 文 献

[1] 扶蔚鹏,王旭红. LC 滤波的三相桥式整流谐波电流的计算方法[J]. 电力电子技术,2001,35(4):26 ~ 27,31.
 [2] 马伟明,张磊,孟进. 独立电力系统及其电力电子装置的电磁兼容[M]. 北京:科学出版社,2007:43 ~ 44.
 [3] 王林森,汤伦军,高格,等. EAST 极向场电源控制系统的 EMC 接地设计[J]. 电力电子技术,2011,45(12):101 ~ 103.
 [4] 吕文红. 电磁兼容原理及应用教程[M]. 北京:清华大学出版社,2008:127.

The EMC Filter Design and Application in EAST Poloidal Power supply System

WANG Lin-sen, WU Xu, LI Ya, HE Shi-ying

(Institute of Plasma Physics, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China)

Abstract The filter, a two-terminal network composed of inductors, capacitors and resistance or ferrite component, can be plugged into transmission line to restrain unnecessary frequency. Based on the operation of poloidal field power and the EMC theory of power electronic system, both design and application of the conducted interference and signal filtering were introduced.

Key words EMC, EAST, power supply system, filtering

广 告 索 引

无锡昆仑富士仪表有限公司	封面	上海望源测控仪表设备有限公司	前插 9
广州森纳士仪器有限公司	封二	上海荷瑞会展有限公司	前插 10
四川华林自控科技有限公司	封三	天华化工机械及自动化研究设计院有限公司	前插 11
艾默生过程控制有限公司	封底	北京民和电气有限公司	前插 12
艾默生过程控制有限公司	前插 1	浙江中控软件技术有限公司	中插 1
南京帕罗肯科技有限公司	前插 2	天华化工机械及自动化研究设计院有限公司	
福斯(上海)流体设备有限公司北京分公司	前插 3	测量控制所	中插 2
上海大禹自控阀门有限公司	前插 4	眉山麦克在线设备有限公司	后插 1
北京西姆宏仪器仪表有限公司	前插 5	《化工机械》	后插 2
浙江三方控制阀股份有限公司	前插 6	常州市赛德电子有限公司	后插 3
杭州中创电子有限公司	前插 7	陕西创威科技有限公司	后插 4
重庆四联测控仪器有限公司	前插 8		