

EAST低杂波系统天馈线保护设计与实现

贾 华, 徐 辉, 刘甫坤, 王 茂, 单家方

(中国科学院等离子体物理研究所, 合肥 230031)

摘 要: 介绍了 EAST 低杂波系统天馈线保护的设计及其实现。针对 EAST 装置低杂波系统微波陶瓷窗破裂的原因, 在低杂波系统天馈线上设置了高反射保护和打火保护两种保护措施, 其中打火保护可以在打火发生后 20 μ s 以内迅速切断微波输出。实验结果表明, 两种保护并行工作, 能有效地保护整个波系统。

关键词: 高反射; 打火检测; 低杂波; EAST

中图分类号: TL62⁺9

文献标识码: A

1 引言

2.45GHz低杂波系统是EAST超导托卡马克装置重要的辅助加热系统, 通过波导输送大功率的微波来加热和驱动等离子体, 而功率的高反射和微波击穿打火成了低杂波系统高功率长脉冲运行的瓶颈。高反射一方面降低了波与等离子体的耦合效率, 另一方面连续的高反射容易导致微波击穿, 可能损害速调管放大器输出窗和隔断托卡马克真空与大气的微波陶瓷窗等微波元件。为了减小高反射和微波窗击穿的危害, EAST低杂波系统在天馈线上采取了高反射保护和微波击穿打火保护两种保护措施。在2006年秋季EAST装置首轮放电实验中, 低杂波系统投入双管进行工程实验, 在两种保护共同作用下, 有效地减小了大反射和微波击穿打火对整个系统的危害, 保证了低杂波系统以及托卡马克装置的稳态安全运行。

2 微波窗破裂原因分析

微波窗破裂原因^[1]主要有两种, 一种是窗材料的介质击穿, 另一种是窗片上应力过大造成破裂。

一般情况下, 微波窗材料介质击穿的主要原因是由于终端负载不匹配或者波导内起弧打火而造成的大反射引起窗片处的场强大大加强, 或者窗片有尖刺和杂质、气孔等其它原因造成的场强集中,

最终使窗片中的场强超过了窗片介质的击穿强度, 导致介质内部发生击穿, 形成巨大的电流, 从而熔化、烧焦窗片或者使窗片介质出现裂纹。

窗片上的应力过大造成破裂的原因除机械应力以外主要是热应力。一种原因是介质窗片中高频损耗或者封接处电阻层的损耗产生了过多的热量, 导致窗片温度过高, 致使材料膨胀引起的热应力超过窗片的承受能力, 造成窗片破裂。另外一个很重要的原因是介质窗片受到高能电子或者离子的轰击, 产生了二次电子倍增效应, 电子数目的迅速增加构成了强大的电流, 引起低气压下强烈的辉光放电。同时, 因电子轰击到窗上将动能以热和光的方式损耗, 造成窗片温度的局部增高, 也导致窗片穿孔或破裂。

对于低杂波系统而言, 一旦速调管输出窗或者陶瓷窗附近发生打火现象, 要求在50 μ s以内迅速关断微波前级, 切断微波功率输出, 从而保护微波器件。

3 保护设计及实现

针对以上微波窗击穿的原因, 在低杂波系统天馈线上设计了高反射保护和击穿打火保护两种保护措施。在总结HT-7低杂波高反射保护的优点并调研国内外大装置^[2, 3]的基础上, 设计了EAST低杂波系统的打火保护装置。

收稿日期: 2006-11-28; 修订日期: 2007-03-28

基金项目: 国家“九五”重大科学工程子项目

作者简介: 贾华(1982-), 男, 河南新乡人, 中科院等离子体物理研究所微波与加热研究室硕士研究生, 研究方向: 微波工程技术。

3.1 高反射保护的设计与实现

高反射保护主要是当波导内微波功率出现大的反射时,迅速关断微波PIN开关,切断微波前级输出一段时间。高反射保护的硬件原理框图如图1所示。

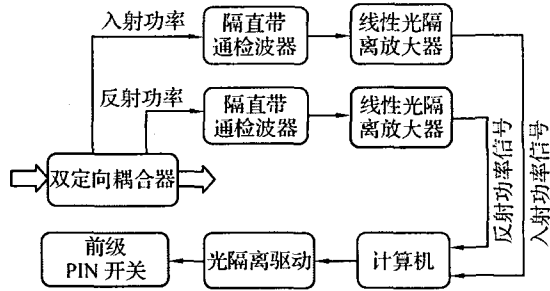


图1 反射保护原理图

波导内微波功率经过由耦合度为67.5dB左右的双定向耦合器组成的反射计中耦合出部分入射功率和反射功率使之进入隔直带通检波器,转换为mV级的功率电压信号。然后经过同轴电缆将此信号传送到线性光隔离放大器,放大为0~4V的电压信号后送入数据采集卡进入计算机。计算机把电压信号转化为相应的功率信号并显示。同时判断反射功率的大小,当反射功率超过入射功率的20%(可设定)时,计算机便通过DO卡发出TTL高电平指令,送入光隔离驱动器,变为电压大于13V、输出电流大于50mA的电压信号,然后再送入PIN开关。由计算机控制PIN开关切断微波输出一段时间后,再打开开关,重新通波。

高反射保护在实现保护功能的同时也完成了功率采集,并且反射保护阈值可以在程序中灵活设定,还可以在程序中融入不同的功率波形调制,满足不同的实验要求。其缺点是由于数据采集卡采集速率和计算机数据处理速度的限制,其响应时间在大约100 μ s以上,因而在波导内打火要求快速关断微波输出时,速度较慢。另外,对于定向耦合器前端部分,如果出现高反射或者打火现象时,定向耦合器并不能有效检测出功率信号的变化。因此,对于高可靠性要求的低杂波系统来说,仅有高反射保护是不够的。

3.2 打火保护的设计与实现

3.2.1 方案选择与设计

EAST 2.45GHz 低杂波系统每路最大输出功率为100kW,系统最大输出功率为2MW。在每一路的3个位置安装打火检测保护探头,即速调管放大器输出窗附近的弯头处、天线陶瓷窗的真空侧和大气侧。它们分别是为了保护速调管放大器和隔断托卡马克真空与大气的微波陶瓷窗。以天线陶瓷窗真空侧为例,介绍打火保护的硬件设计。

图2是真空侧打火检测安装示意图。波导打火最容易发生在最大电场强度处,根据矩形波导TE₁₀模的场型分布,我们将打火检测点设置在波导宽边中间。为了增大透光度且不影响大功率微波的传输,沿着波导传输方向开了一个“1”字型的槽孔。波导壁上的孔会造成边界的不连续性,从而引起驻波。开孔引起的回波损耗S₁₁用三维高频电磁场分析软件HFSS仿真,结果在-45dB以下,这对微波的传输影响很小。小孔的外面用石英玻璃密封,以保证波导内的真空不受影响。

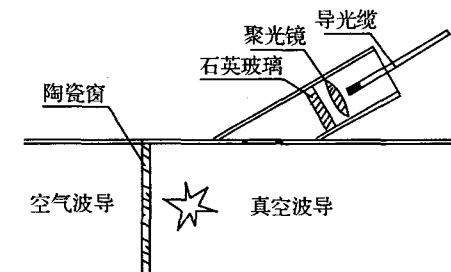


图2 安装示意图

由于控制台距离检测位置很远,现场电磁环境又非常恶劣,而光电转换后信号又很弱,用导线长距离传送电信号很容易受到电磁脉冲干扰,导致误保护,影响实验的进行。况且托卡马克周围存在一定的核辐射,给现场设备的人工维护带来很大的困难。为此,我们采用导光缆来直接将打火的光信号传送到控制台。导光缆在可见光范围内损耗小、绝缘性好、不受微波和辐射的影响,这既避免了电磁干扰,同时也方便了后续信号处理电路的维护。所用玻璃光纤导光缆损耗为110dB·km⁻¹,经过35m长的传输,能量约衰减为原来的41.2%。因此,增加了聚光镜以提高信噪比。当波导内打火时,打火光透过小孔,通过透镜耦合入导光缆内,直接将光信号送到信号处理单元。

托卡马克真空室内主要有H、D、N等元素。低杂波系统真空侧波导内打火时,打火光光谱分布在包括可见光在内的很宽的范围内,我们采用了硅光电三极管3DUOC作为光探测器。3DUOC的上升时间^[4]为4 μ s,光谱响应范围350~1100nm,这可以满足打火探测要求。

3.2.2 电路与软件设计

图3是检测电路原理框图。打火光经光纤导光缆传送到3DUOC上进行光电转换后成为电流信号,然后经过电流-电压转换为电压信号,送入低通滤波放大电路。输出的电压信号一路和比较器预置电平比较,另一路送入计算机采集,观察幅度的大小,以便设定比较器合理的阈值。如果输出电压大于比较器的阈值,则比较器迅速从高电平变为低电平,产生触发脉冲,触发NE555定时器展宽脉冲。由于NE555输出电流最大可以达到200mA,把一路13V的展宽脉冲直接送去关断前级PIN开关,同时,把分压得到3.6V的信号送入计算机,使计算机也同时去关断PIN开关。关断时间可以由程序灵活设定,以满足不同的实验要求。这样进一步便提高了低杂波系统的安全可靠性和灵活性。图4是软件保护流程。

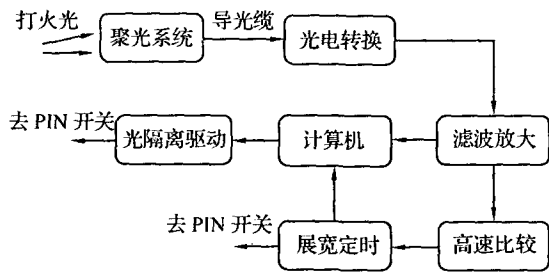


图3 打火保护电路原理

4 实验结果及分析

高反射保护的效果已经有文献^[5]介绍,这里不在叙述。打火保护装置我们经过模拟打火测试,图5为示波器采集到的波形图,其中T为光源触发时刻,1通道为电路转换波形,2通道为保护信号输出,由图5可见,从打火光发出并经过35m长的导光缆到电路保护信号输出,总响应时间远小于20 μ s,响应时间随着光源强度的减弱会稍微变长,但已满足系统的要求。在2006年秋季EAST装置首轮放电实验中,低杂波系统投入两只KU-2.45型速调管进行工程调试。其间,天馈线上高反射保护和打火保护并

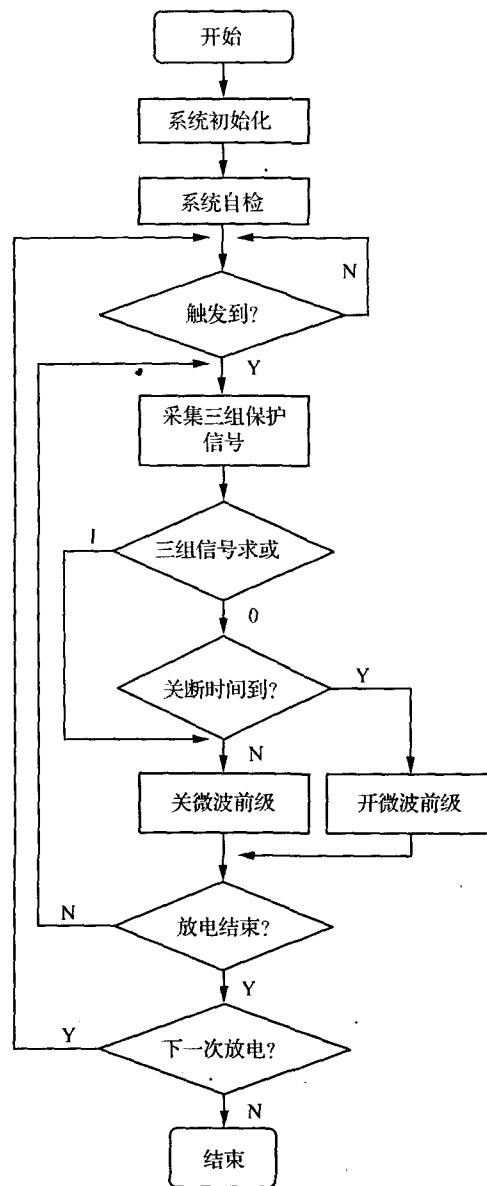


图4 打火保护流程图

行工作,即使输出功率达到150kW,也没有出现误动作,有力地保护了低杂波系统的安全。图6为某次放电中当陶瓷窗真空侧附近打火时,计算机采集到的波形图。由此图可见,在出现打火信号时立即关断了PIN开关。

需要说明的是,在等离子体击穿放电过程中,陶瓷窗真空侧附近同时存在等离子体的背景杂光,而这种背景杂光如果和波导内打火的光混在一起,就会干扰保护电路的判断。但是,在我们设计的方法中,通过陶瓷窗漫反射而进入导光缆的背景杂

光,其能量已经远远小于陶瓷窗附近打火时直射而耦合入导光缆的打火光。而且在实际等离子体放电没有出现打火现象时,多次观察了电路输出的等离

子体背景杂光的幅度。发现其幅度很小,与打火时产生的光信号相比,可以忽略不计,并不会使电路误动作。

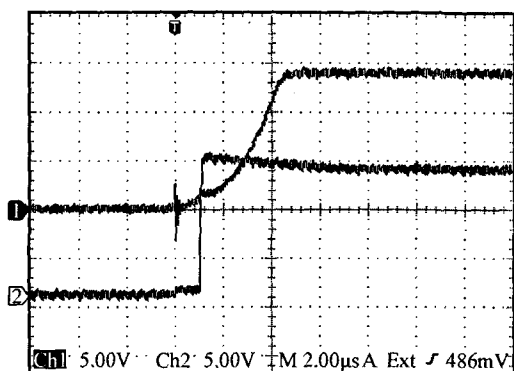


图 5 电路波形图



策略图 采集时间: ms
加波时间: 0.3ms

图 6 打火保护的波形图

5 结论

低杂波系统是EAST装置重要的辅助系统,高反射保护和打火保护是低杂波系统稳态安全运行的重要保障。设计出了一种不受等离子体背景杂光干扰的高可靠性打火保护装置,可以在实验中有效地保护低杂波系统的安全,同时也可以用于雷达等其他大功率微波工程。由图6也可以看出,连续的高反射很容易引起打火现象。根据真空电弧击穿理论^[6],并经实验证明,为了抑制打火的发生,采用实验前天线高温烘烤、通波老练、壁出气等预处理措施,或者提高天馈线真空段的真空度,可以有效减少击穿打火的概率。

参考文献:

- [1] 电子管设计手册编辑委员会. 大功率速调管设计手册 [M]. 北京: 国防工业出版社, 1979.
- [2] Tighe R. Arc detection and interlock module for the PEP-II low level RF system [A]. Proceedings of the 1997 IEEE Particle Accelerator Conference [C]. 1997. 2520.
- [3] 李秀娟, 王明伟, 宋绍栋, 等. HL-2A 装置低杂波低压实时保护性能分析 [J]. 核聚变与等离子体物理, 2006, 26(1): 27.
- [4] 戴大富. 微波发射机输出波导打火检测及保护 [J]. 现代雷达, 2003, 25(7): 48.
- [5] 徐昂东, 单家方, 刘甫坤, 等. HT-7 装置微波系统的功率测量 [J]. 无线电工程, 2004, 34(1): 62.
- [6] 拉弗蒂 J.M. 真空电弧理论和应用 [M]. 北京: 机械工业出版社, 1985.

Design and implementation of the protection for LHCD antenna transmission line on EAST tokamak

JIA Hua, XU Hui, LIU Fu-kun, WANG Mao, SHAN Jia-fang

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

Abstract: The design and implementation of the protection for LHCD antenna transmission line on EAST tokamak are described in detail. The reasons causing damage to the ceramic windows of the lower hybrid wave(LHW) system on EAST are analyzed, then two safeguards including high reflection protection and arc protection have been designed on the antenna transmission line to avoid the damage. Especially, the arc protection will shut down the microwave output in less than 20 μ s after arcing. Experimental results prove that the double-acting protections worked at the same moment, and protected the whole system efficiently.

Key words: High reflection; Arc detection; Lower hybrid wave; EAST