

# HT-7 装置微波系统的功率测量

中科院等离子体物理研究所 徐昂东 单家方 刘甫坤 王茂 蒋敏

**摘要** 阐述了在 HT-7 装置的强电磁干扰环境下微波系统功率测量的相关技术,分析了功率测量的方法及测量遇到的干扰问题,提出了干扰的解决方法,并介绍了功率测量系统的组成及各部分的原理、性能、相关电路。

**关键词** 微波 功率测量 检波 干扰

## 1 引言

HT-7 超导托卡马克装置是进行受控热核聚变及高温等离子体实验研究的平台,该装置是一套非常复杂的大科学工程,包括低温、主机、电源、微波、诊断、真空等系统。微波系统是其重要组成部分,在实验中主要利用微波进行等离子体电流驱动及加热研究。

微波系统的功率测量信号不仅仅用于采集,还作为高反射等故障的判别依据,因此对功率测量的可靠性、实时性都要求非常高,但由于托卡马克周边的电磁场环境恶劣,使得微波系统的功率测量变得异常困难,功率测量各个环节会受到很强的干扰,干扰甚至损坏测量器件。

## 2 微波系统简介

该微波系统主要由微波源、高低压电源、天馈线、功率相位测控等部分组成。微波源主要由 12 只俄罗斯产 2.45GHz Ku-2.45 型稳态速调管构成,每只速调管可稳态输出 100kW。如图 1 所示,振荡器输出 1 瓦 2.45GHz 微波信号,经过功分器、微波开关、移相器、前级放大器、单向隔离器后,送给速调管作为激励信号,激励信号功率约 1 瓦,速调管完成电能到波能的转换,其最大增益约 50dB,输出的高功率微波经 BJ-22 波导馈线传输送至相控多结波导阵天线,耦合给等离子体负载。相位反馈控制环路保证相控阵天线保持优化的功率辐射谱,使天线与等离子体负载保持良好匹配。功率测量环路对 12 个通道的入射波、反射波进行高速测量,并通过 PIN 微波开关执行高反射保护。

在此微波系统中,天线阵处于真空环境中,波导馈线中的器件处于大气中,以陶瓷窗实现隔离。由于等离子体负载比较复杂,存在不稳定性,引起高反射,这种情况下极易在陶瓷窗附近打火,导致陶瓷窗破裂。因此对微波功率测量及反射保护要求有很高的可靠性和响应速度,否则将造成 HT-7 超导托卡马克装置主真空室暴露大气的灾难性后果。

## 3 功率测量方法及关键问题

### 3.1 功率测量方法

功率测量的基本功能是将微波功率转换为可检测的电信号。根据速调管的功率输出特性,确定功率测量工作范围为 1~100kW。对这种高功率微波进行测量,一般有两种方法:流体(水或油)量热计法和扩展小功率计量程法。流体量热计法一般采用端接式方法连接,常用于台面测量,对于上述实际微波系统不适用。扩展小功率计量程法是把大功率按一定变比变换到小功率量程内,再进行测量。这种变换由定向耦合器和衰减器完成。

变换到小功率范围后,有两种方法测量其功率,一是用晶体检波器直接测量电压、电流,二是将微波功率转换成热,再借助某种热效应测量之。由于本系统要求测量的响应速度快,因此热敏式功率测量方法不适用,必须采用检波方法测量。

如图 1 所示,通过在主波导线路中的双定向耦合器,分别得到入射波和反射波,耦合的人、反射波再经过衰减器衰减到合适的功率送给检波器,检波输出的弱信号经放大器后,送给射频保护器、计算机等信号处理单元。

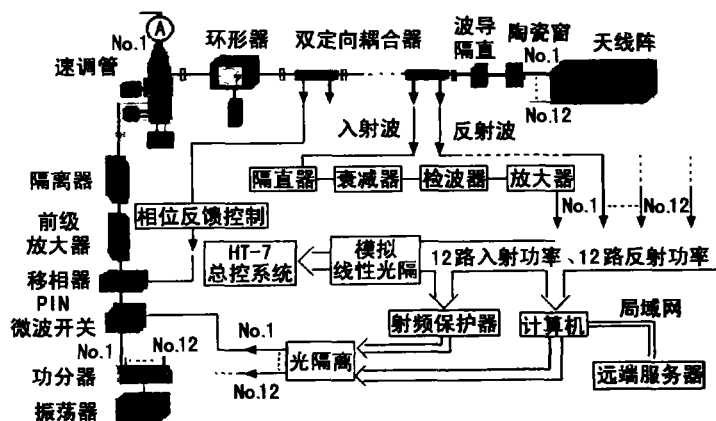


图 1 微波系统及功率测量原理图

收稿日期:2003 年 8 月 14 日

预先对测量通道的每一个器件进行定标、校准,定向耦合器、衰减器、检波器的离散性引起的差异由可变放大器均衡,使得所有测量通道的输出电压与输入功率之间都遵循统一的线性定标关系,根据定标关系由采集到的信号电压反推即得到相应的功率参数。

### 3.2 关键问题——干扰及解决方法

在 HT-7 装置上工作的微波功率测量系统极易受到干扰,有时甚至出现干扰淹没真实信号的现象。因此,干扰是功率测量所面对的关键问题。

按干扰的来源主要分为两类:空间电磁干扰和地线干扰。在装置周围分布的各种电子仪器和大功率电器设备,其工作时均向周围辐射电磁能量,形成空间电磁干扰;而 HT-7 装置的所有系统都共用一个接地点,使其接地系统非常复杂,这样在系统的地电流出现突变时,由于分布电感的原因形成很强的地反弹噪声,产生地线干扰。特别是微波系统出现故障状态时,大量能量通过地线瞬间泄放,形成的干扰电压很高,极易烧毁或击穿常用的低势垒肖特基检波二极管。另外如果微波系统内部有地环路存在,容易形成地环流。

在上述两类干扰中,以地线干扰最为严重,经频谱测量分析后发现,其能量主要集中在 100MHz 以下,因此在测量通道前端加入隔直器抑制地线干扰从主波导传向测量通道。隔直器实际是一个截止频率大约 100MHz 的高通滤波器,对直流耐压大于 1000V,内外导体均隔离。隔直器同时也起到阻断微波系统内 12 路之间地环流的作用。

同时将测量通道的隔直、衰减、检波、放大等诸多器件集成在一个屏蔽盒内,形成专用集成式检波器,提高机械稳定性及抗空间电磁干扰能力。

另外,实际应用中整个测量系统除前端使用隔直器外,所有输出的信号均经过光隔离输出,以保证测量系统单点接地(如图 1 所示)。而测量系统内信号远距离传输时,采用重负载电流传输,提高抗干扰性能。

## 4 功率测量系统的实现

### 4.1 双定向耦合器

根据以上的分析,要实现集成式检波器提高抗干扰性能,而在实践中,大功率衰减器要考虑散热问题难以集成,因此必须使用弱耦合定向耦合器,以减小后续衰减量。

常见的弱耦合定向耦合器有单孔和多孔两种类型,多孔工作频带宽,单孔方向性频带窄,但加工较容易,且占馈线尺度短。此微波系统属于窄带系统,

最终在主波导中采用弱耦合单孔双定向耦合器,其耦合度为 -68dB 左右,隔离度在 20dB 以上。

### 4.2 测量核心器件——专用集成检波器

将隔直器、衰减器、检波器、放大器集成在一起,封装在一个屏蔽盒内,构成专用集成检波器。为了提高该检波器的可靠性和抗干扰性,一方面使用隔直高通滤波、屏蔽等方法抑制干扰,另一方面合理优化电路参数,提高信噪比。

其电路如图 2 所示,C1、C2 高频电容构成隔直高通滤波,R1~R5 组成衰减器,R6 为频带补偿电阻,D1 为抗烧毁检波二极管,R0 为平方率校正电阻。

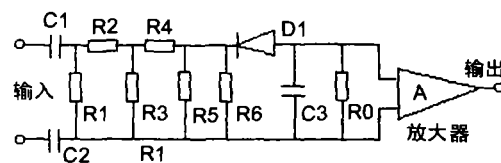


图 2 专用集成检波器电路

综合考虑检波二极管的线性工作区和信噪比,电路中衰减量定为 25dB,校正电阻 R0 约为几千欧。对应于主波导中 1~100kW 的工作功率范围,检波管输入功率为 -33dBm ~ -13dBm,处于检波二极管动态范围的高端,远高于其正切灵敏度,这样在强干扰的环境中能获得较高的信噪比。同时 R0 电阻采用热敏电阻,补偿温度特性。

### 4.3 信号处理单元

在信号处理单元中,射频保护器完成入、反射功率信号分析比较,判别在各路波导中是否发生了微波打火、高反射等现象,哪一路出现高反射,就关断该路速调管的激励信号,以防止天馈线中的连续打火及高反射损坏微波器件,如图 3 所示。

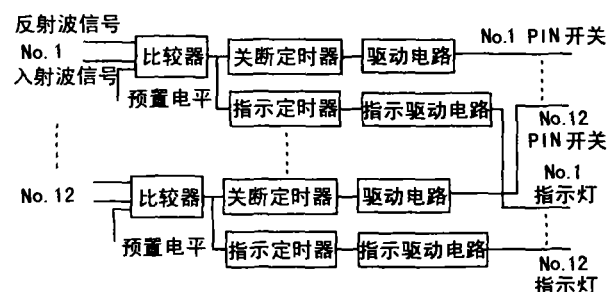


图 3 射频保护器

计算机完成功率信号采集,通过局域网以 Socket 通信方式向远端服务器发送采集数据,并以友好的人机界面显示波形。同时具有自由设定 PIN 开关状态,实现微波功率波形调制的功能。信号采集程序使用

## 测试技术

Visual C++ 编程,具有优良的人机交互界面。

远端服务器接收采集计算机发送的数据,以数据库形式存储,并接受网上其它用户对数据的查询、检索、下载。

### 5 实验结果

在 2003 年初长达两个月的连续实验运行中,测量系统稳定、可靠、精确、抗干扰能力强,基于测量的反射保护有效地保护了陶瓷窗及其它微波器件的安全。实际采集波形如图 4 所示。显示为其中一路的

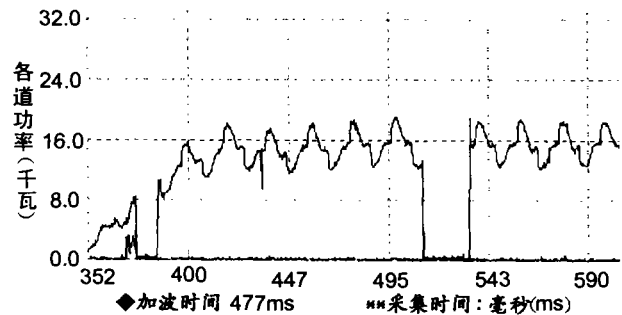


图 4 实际采集波形

(上接第 56 页)

保证两边端口的输出摆幅都能达到满电源幅值,并且有很好的噪声抑制性能,它的缺点是增加了功耗。

#### 5.4 模拟串口通信

软件设计中,89C52 单片机的 P1.0 和 P1.1 口分别模拟串行通信的发送和接收,其接口程序主要由 INPUT 发送子程序和 OUTPUT 接收子程序组成。通信速率 1200 bit/s,帧格式为 N.8.1。发送时,先发送一个起始位(低电平),接着按低位在前的顺序发送 8 位数据,最后发送停止位。接收时,先判断 P1.1 接收端口是否有起始低电平出现,如有则按低位在前的顺序接收 8 位数,最后判断 P1.1 口是否有停止高电平出现,如有则完成一个数据接收,否则继续等待。其中软件编写要严格按照异步通信的时序进行,每比特位传送时间间隔按通信速率 1200 波特计算。

### 6 应用

在语音处理领域,数字化已成为一种趋势,而为

入射和反射波形,波形的缺口为射频保护器判断出现了高反射发出保护指令所致。

### 6 结束语

实践证明,该功率测量系统性能卓越,其最突出的特性是抗干扰能力强。其相关技术对其它强干扰环境下的微波测量有很高的借鉴意义。 ❖

#### 参考文献

- [1] 中国集成电路大全,微波集成电路,北京:国防工业出版社
- [2] 赫崇骏,韩永宁,袁乃昌等,微波电路,长沙:国防科技大学出版社,1999
- [3] Guangli Kuang, A lower hybrid current drive system on the Superconductive Tokamak HT-7, Fusion Technology, September 1999
- [4] 钟景华,利用肖特基检波器实现大动态微波功率测量,计量学报,1998;19(4)

#### 作者简介

- 徐卫东 男,1977 年 9 月生,中科院等离子体物理研究所硕士研究生,研究方向为微波工程,曾获中科院院级成果 2 项,专利 1 项。
- 单家方 中科院等离子体物理研究所研究员,硕士生导师
- 刘鹏坤 中科院等离子体物理研究所高级工程师
- 王茂 中科院等离子体物理研究所研究实习员
- 蒋敏 中科院等离子体物理研究所博士研究生

了通信安全的需要,该系统必具有广泛的应用前景。通过将 MCU 与 PC 机串口相连,可以实现加密数据的通信,因此该系统的可扩展的余地很大,随着该系统的完善,将会满足移动用户的安全需要。 ❖

#### 参考文献

- [1] AMBE - 1000 Vocoder Chip User's Manual, Digital Voice Systems, Inc., 1999
- [2] TC35/TC37 Hardware Interface Description, <http://siemens.com/wm>
- [3] 耿德根,AVR 高速嵌入式单片机原理与应用,北京:航空航天大学出版社,2001

#### 作者简介

- 王立申 男,辽宁朝阳市人,1968 年 2 月出生,高级工程师,硕士研究生,研究方向:信号分析与信息处理
- 周常柱 男,山东省曹县人,1958 年 8 月出生,硕士生导师,研究方向:信号分析与信息处理
- 周东方 男,浙江诸暨人,1963 年 8 月生人;国家 863 主题专家组专家,研究方向:无线与微波通信系统
- 高世海 男,辽宁沈阳人,副教授,中国创新学会理事,研究方向:信号分析与信息处理

## 《无线电工程》征稿启事

《无线电工程》创刊于 1971 年,全国公开发行,是由信息产业部主管、中国电子科技集团公司第 54 研究所主办的学术性电子科技期刊,为中国电子学会遥感遥测遥控分会会刊。

本刊主要刊登内容为:博(硕)士学位论文、国家基金项目论文、发展趋势及热点技术、测控技术、电子对抗技术、网络技术与通信、计算机与软件技术在测控中的应用、遥感技术及遥感信息处理、新品研发与工程应用及相关电子信息专题技术等。

本刊作为信息产业部优秀电子科技期刊,热烈欢迎电子信息领域从事科研、教学、生产、工程设计、应用与管理的专家、学者、博(硕)士研究生及广大工程技术人员,根据本刊“来稿须知”所列要求惠赐佳作!