

文章编号: 2095-4980(2021)01-0071-04

S 波段速调管微波源测控一体化及输出特性

杨浩^{a,b}, 闫二艳^{a,c}, 郑强林^a, 鲍向阳^a, 胡海鹰^a

(中国工程物理研究院 a.应用电子学研究所, 四川 绵阳 621999; b.研究生院, 北京 100088;
c.高功率微波技术重点实验室, 四川 绵阳 621999)

摘要: 大功率微波源在高功率微波应用及效应研究中使用广泛, 作为试验条件的输入端, 其控制、测量等操作需方便可靠、明确可记录。对 S 波段 1 MW 大工作比微波源开展了测控一体化技术研究: 通过光纤通信进行远程控制; 使用数字化仪代替示波器对输出信号和测试信号进行监测, 并自动保存数据; 运行过程时序清晰, 数据详实。微波源采用固态放大器推动速调管放大器的两级放大链方式, 测量其输出特性, 获取微波源各调节参数对输出信号的影响。通过测控一体化可对微波源输出信号实时监测, 为开展微波应用实验提供了帮助。

关键词: 高功率微波; 测控一体化; 速调管; 统计特性; 数据采集

中图分类号: TN99

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA2019330

Output characteristics of S-band klystron microwave source and measurement-control integration

YANG Hao^{a,b}, YAN Eryan^{a,c}, ZHENG Qianglin^a, BAO Xiangyang^a, HU Haiying^a

(a.Institute of Applied Electronics, Mianyang Sichuan 621999; b.Graduate School, Beijing 100088; c.Science and Technology on High Power Microwave Laboratory, China Academy of Engineering Physics, Mianyang Sichuan 621999, China)

Abstract: High-power microwave source is widely used in the application and effect research of high-power microwave. As the input of test conditions, its control and measurement operations need to be convenient, reliable, clear and recordable. The integrated technology of measurement and control for S-band 1 MW high work ratio microwave source is studied. The remote control is carried out by optical fiber communication. The output signal and test signal are monitored by digitizer instead of oscilloscope. A two-stage amplifiers link is adopted through solid state amplifier pushing klystron amplifier. The output characteristics are measured and the effect of conditioning parameters on the output signal is studied. The integration of measurement-control can monitor the output of microwave source in real time, which is helpful to the experiments of microwave application.

Keywords: high power microwave; measurement-control integration; klystron; statistical characteristics; data acquisition

大功率微波源在工业及军事领域应用广泛, 如大功率通信设备、电子对抗设备、高功率微波效应研究、微波等离子体应用等, 作为微波的产生端及试验条件的输入端, 需操作方便, 输出明确^[1-4]。特别是在多台多波段微波源耦合共用或诊断信号繁多时, 时序控制和数据采集都变得复杂, 测控一体显得尤为重要^[5-6]。

针对高功率微波效应及等离子体实验研究, 设计了一体化测控平台, 通过光纤及网线通信进行远程控制, 使用数字化仪代替示波器对输出信号和测试信号进行监测, 同时自动存储数据。利用该技术对实验室 S 波段速调管微波源传输特性进行测量, 分析其时序信号及高压脉冲波形, 为后续研究提供帮助。

收稿日期: 2019-09-06; 修回日期: 2019-11-26

基金项目: 高功率微波技术重点实验室基金资助项目(JCKYS2018212036)

作者简介: 杨浩(1992-), 男, 在读硕士研究生, 主要研究方向为微波放电等离子体、高功率微波应用等。email:mushui9@qq.com

1 微波源介绍

使用的 S 波段速调管微波源整体框图如图 1 所示, 采用两级放大链方案, 由标准微波信号源产生激励信号, 经固态功率放大器放大后推动多注速调管放大器, 最后由 BJ32 矩形波导输出, 具有体积小、可靠性高等优点。调制器系统由高压电源、充电隔离电路、固态串联调制器开关组合、储能电容等组成, 具有技术先进、调制脉宽变化灵活、波形好等显著特点。微波源设计有单次脉冲、脉冲串和多种重频工作方式, 具体参数为: 频率 2.92 GHz、重复频率 1 Hz~1 kHz 可调、脉宽 20 ns~20 μ s 可调、峰值功率 0~1 MW 连续可调、最大平均功率 10 kW。其中功率连续可调方法为: 改变速调管加载高压实现 1 MW~200 kW 范围调节; 改变注入微波功率实现 200~10 kW 范围调节; 通过大功率可调衰减器实现 10 kW 到接近 0 的范围调节。

微波源工作时, 由控制器产生脉冲信号给调制器系统, 为速调管提供高压脉冲, 同时产生一个 25 μ s 宽度的晶体管-晶体管逻辑(Transistor-Transistor Logic, TTL)电平同步触发信号给标准微波信号源, 提供可调延时、可调脉宽的微波激励信号, 经放大后输出。

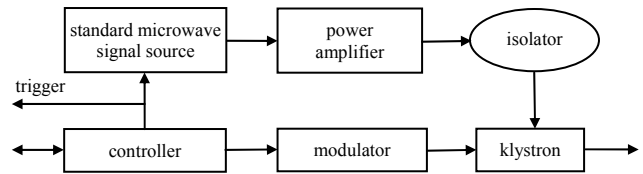


Fig.1 Diagram of microwave source
图 1 微波源系统框图

2 测控平台

在微波辐照测试实验中, 测试平台主要组成部分为大功率微波源, 用于模拟高功率微波或强电磁辐射环境, 配套设施为微波暗室和屏蔽室^[7-8]。图 2 为典型高功率微波辐照测试实验平台框图, 除微波辐照系统外, 还有光电采集器、分幅相机、视频监控、真空计等诊断或监测设备。该平台将控制与测量功能集成到屏蔽室内的上位机中, 控制微波源产生统一的触发信号, 同步输出微波并测量采集信号。

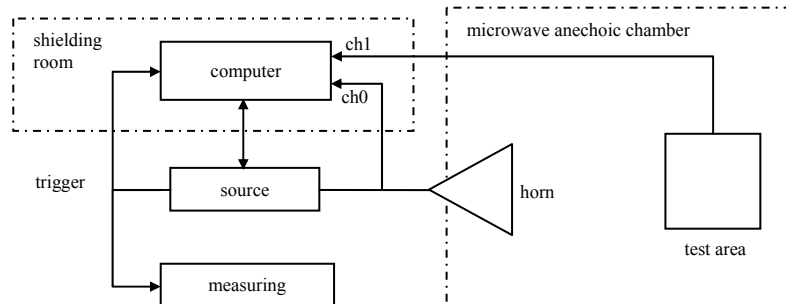


Fig.2 Schematic diagram of the device
图 2 装置总体示意图

2.1 体系结构

上位机使用 PXIe 控制器, 通过 PXIe 总线技术可以方便扩展各种接口及数据采集卡, 配备一台 2 通道 14 位 200 Msps 高速 PXI Express 数字化仪。在微波源与天线间通过定向耦合器引出一路信号, 经衰减检波后接入 ch0 通道, 用于微波源输出波形监测; 微波与测试目标相互作用产生的光电采集信号接入 ch1 通道, 用于诊断微波击穿时间。主要设备间通过 TCP 协议通信, 用于控制信号和数据传输, 如分幅相机、真空计等。其中微波源采用光纤通信, 以增强抗干扰能力; 光信号在屏蔽室内转换为 RS485 信号接入上位机 COM 端口, 实现对微波源的远程设置、监测及控制。

2.2 时序控制

实验时, 设置好采集参数和输出参数, 由上位机发出开始命令, 微波源内部控制器启动, 同时对外给出触发信号(trigger), 数字化仪和分幅相机同步触发采集, 获取实验数据。图 3 为根据测量结果绘制的微波源内部信号和采集信号时序图, 其中高压脉冲固定延时, 脉宽可调; 微波激励信号延时和脉宽均可调。由 ch0 采集信号可获取输出微波的波形, 即准确的输入参数; ch0 和 ch1 信号的上升沿时间差反映了微波击穿时间。

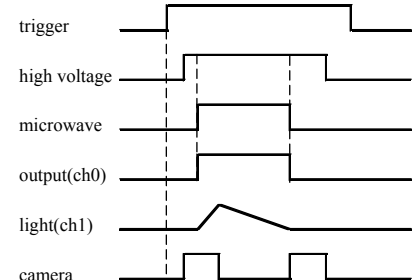


Fig.3 Sequence diagram
图 3 时序图

2.3 数据管理

微波源运行时，首先需要记录设置参数，每次实验产生一条记录，按时序排列，故以时刻作为次号构建数据库，参数和示例如表 1 所示(脉冲数为 0 表示重频模式)。

表 1 实验数据记录表
Table1 Experimental data

id	date/(y-m-d)	time/(h:min:s)	repetitive frequency/Hz	high voltage/kV	pulse width/ μ s	pulse number
1#	2019-06-26	11:25:32	1 000	23	10	0
2#	2019-06-26	11:36:24	50	23	2	10

微波源的实际输出以监测信号为准，由于最大工作比只有 1%，若每次实验持续记录将产生大量冗余数据，故采用有限点触发模式，只截取有效脉冲数据。每次实验单独构成一个数据文件，以时刻命名，与设置参数一一对应，图 4 为表 1 中 2#实验记录的 10 个脉冲输出幅值。其他采集数据以同样方式命名存储，形成完整的实验记录体系。

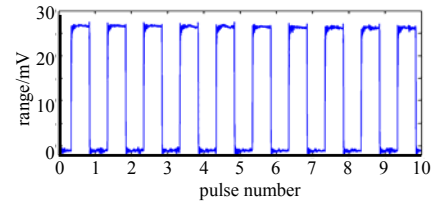


Fig.4 Pulse waveform
图 4 脉冲波形图

3 输出特性

为测试测控效果，利用采集数据分析微波源的输出特性。根据微波源时序信号关系，首先测试高压脉冲的延时与脉宽特性。设置标准信号源延时为 100 ns，脉宽大于微波源脉宽，此时在整个高压脉冲阶段都会有微波输出，微波源脉宽设置为 1~5 μ s，测量结果如图 5 所示。从图中可以看到，高压脉冲的延时在 400 ns，脉冲的上升沿和下降沿各有 1.3 μ s，蓝色虚线之间所示为微波源脉宽 4 μ s 时的稳定波形；微波源脉宽为 1 μ s 和 2 μ s 时，脉冲未达到稳定便开始下降。故实际使用时，标准信号源应设置延时和脉宽在微波源稳定脉宽之内。

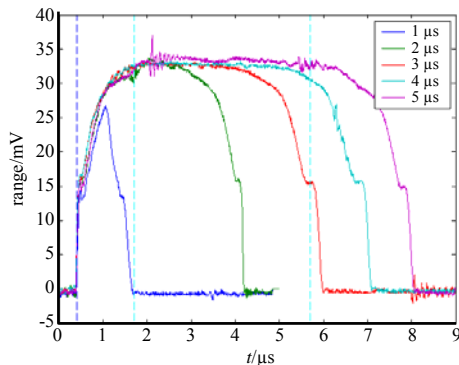


Fig.5 Effect of microwave source pulse width on output waveform
图 5 微波源脉宽对输出波形的影响

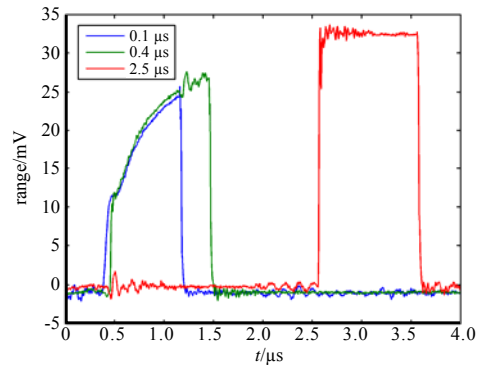


Fig.6 Effect of signal source time delay on output waveform
图 6 信号源延时对输出波形的影响

设置微波源脉宽为 5 μ s，标准信号源脉宽 1 μ s。延时分别为 100 ns,400 ns,2 500 ns，结果如图 6 所示，落在微波源脉宽内的微波输出较为平整，接近方波，标准信号源与设置相比有 60 ns 的延迟。图 7 对比了不同重频条件下连续 50 个脉冲的输出峰值，发现存在一个 50 Hz 的叠加干扰信号，使输出产生周期性波动，重频设置为 50 Hz 时可以消除(见图 4)。经分析，由信号采集系统与微波源间没有良好共地所引起，将其调整后该干扰信号消失。

4 结论

介绍了一种两级放大链方式的大功率速调管微波源，结合高功率微波效应实验和微波等离子体应用实验，对微波源测控一体化进行了设计，实现了单台上位机集成；并基于.NET 平台的 C#编程，实现了远程仪器控制、状态监测、数据采集、数据管理和存储，操作方便，记录详实。利用该技术对微波源输出特性进行了详细测试，数据结果表明，设置标准信号源延时应大于 1.7 μ s，微波源脉宽大于 3 μ s。

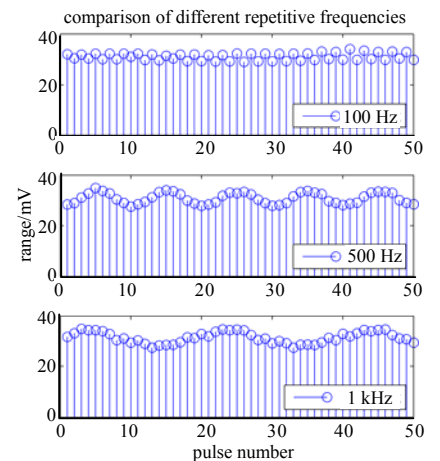


Fig.7 Effect of repetition frequency on output waveform
图 7 重频对输出波形的影响

参考文献:

- [1] BARKER R,EDI S. High power microwave source and technology[M]. Beijing,China:Tsinghua University Press, 2005: 126–138.
- [2] 雷丽,李刚. C 波段大功率速调管微波源设计[J]. 军械工程学院学报, 2012,24(2):59–62. (LEI Li,LI Gang. Design for high power klystron microwave source of C band[J]. Journal of Ordnance Engineering College, 2012,24(2):59–62.)
- [3] 熊久良,武占成,孙永卫. 连续波多普勒引信超宽谱高功率微波辐照效应试验[J]. 强激光与粒子束, 2015,27(10): 172–176. (XIONG Jiuliang,WU Zhancheng,SUN Yongwei. Interference of ultra-wide spectrum high power microwave on continuous wave Doppler fuze[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2015,27(10):172–176.)
- [4] 何诗英,蒋力,高格,等. 静态磁场测试平台的采集监控系统的设计与实现[J]. 强激光与粒子束, 2019,31(4):60–66. (HE Shiyong,JIANG Li,GAO Ge,et al. Design and implementation of acquisition monitoring system for static magnetic field testing platform[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2019,31(4):60–66.)
- [5] 蔡政平,武志勇. 高精度连续波速调管调制器[J]. 强激光与粒子束, 2019,31(4):134–138. (CAI Zhengping,WU Zhiyong. Development of high stability CW klystron modulator[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2019,31(4):134–138.)
- [6] 丁耀根,沈斌,丁海兵. 负载不匹配对大功率速调管输出特性的影响[J]. 强激光与粒子束, 2011,23(5):20–25. (DING Yaogen,SHEN Bin,DING Haibing. Influence of load mismatch on output characteristics of klystron[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2011,23(5):20–25.)
- [7] 胡海鹰,刘忠,杨浩,等. 微波准光学聚焦系统空间辐射场分布测试[J]. 太赫兹科学与电子信息学报, 2019,17(2): 274–277. (HU Haiying,LIU Zhong,YANG Hao,et al. Test on space radiation field strongly distributed in microwave quasi-optical focusing system[J]. Journal of Terahertz Science and Electronic Information Technology, 2019,17(2):274–277.)
- [8] 杨浩,闫二艳,郑强林,等. 一种准光反射聚焦微波放电大气等离子体装置[J]. 强激光与粒子束, 2019,31(5):10–14. (YANG Hao,YAN Eryan,ZHENG Qianglin,et al. A microwave plasma system with quasi optical focusing reflector[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2019,31(5):10–14.)

(上接第 70 页)

参考文献:

- [1] 张青梅,孙红兵. 相控阵雷达中宽带波导和差网络的研究[J]. 现代雷达, 2010,32(3):77–79. (ZHANG Qingmei,SUN Hongbing. A study on wideband waveguide sum and difference network used in airborne active phased array radar[J]. Modern Radar, 2010,32(3):77–79.)
- [2] 肖愚. 一种基于雷达系统和差信号的设计与实现[D]. 成都:电子科技大学, 2017. (XIAO Yu. Design and implementation of monopulse angle measurement based on a radar system[D]. Chengdu,China:University of Electronic Science and Technology of China, 2017.)
- [3] 吴昊旻,敬守钊,唐聪. 小型化和差功分器的设计[J]. 电子元件与材料, 2014,33(2):24–26. (WU Haomin,JING Shouzhao,TANG Cong. Design of a miniaturized sum and difference power divider[J]. Electronic Components and Materials, 2014,33(2):24–26.)
- [4] 周太富,张剑. 毫米波多通道收发电路与和差网络一体化集成技术[J]. 微波学报, 2019,35(2):31–33. (ZHOU Taifu, ZHANG Jian. Integrated technology of millimeter wave multi-channel transceiver circuit and sum–difference network[J]. Journal of Microwaves, 2019,35(2):31–33.)
- [5] 俞忠武,王光明,俞志英. 一种新型宽带平面和差网络[J]. 微波学报, 2011,27(2):63–67. (YU Zhongwu,WANG Guangming,YU Zhiying. A novel broadband planar sum–and–difference network[J]. Journal of Microwaves, 2011,27(2): 63–67.)
- [6] 朱琳琳,唐璞,王建. Ka 波段和差馈电网络设计[J]. 微波学报, 2010:255–257. (ZHU Linlin,TANG Pu,WANG Jian. A design of sum and difference feeding network in Ka-band[J]. Journal of Microwaves, 2010:255–257.)