

文章编号: 2095-4980(2019)02-0274-04

微波准光学聚焦系统空间辐射场分布测试

胡海鹰, 刘 忠, 杨 浩, 闫二艳*, 郑强林

(中国工程物理研究院 应用电子学研究所 高功率微波技术重点实验室, 四川 绵阳 621999)

摘 要: 针对研制的大功率微波(HPM)大气等离子体实验装置中一定封闭空间内微波准光学聚焦系统的空间辐射场强分布进行测试研究。由于需测量封闭有限空间内强电磁场的非均匀分布, 直接采用 HPM 辐射场测试方法已不适用。利用研制的非金属传动装置, 精确控制相对步进, 采用各向同性场测试探头作为电场测试接收系统, 通过量传完成小信号辐射场的非均匀分布测试。

关键词: 辐射场测量; 微波准光学聚焦系统; 高功率微波; 量传

中图分类号: TN606; O441.4

文献标志码: A

doi: 10.11805/TKYDA201902.0274

Test on space radiation field strongly distributed in microwave quasi-optical focusing system

HU Haiying, LIU Zhong, YANG Hao, YAN Eryan*, ZHENG Qianglin

(Science and Technology on High Power Microwave Laboratory, Institute of Applied Electronics, China Academy of Engineering Physics, Mianyang Sichuan 621999, China)

Abstract: Radiation field distribution is tested within a certain confined space in microwave quasi-optical focusing system of High Power Microwave(HPM) plasma experimental device. Because of the non-uniform distribution of strong electromagnetic fields in confined spaces, the traditional testing method of HPM radiation field is not applicable. Adopting non-metallic transmission device with the precise control on relative step, using the isotropic field test probe, the non-uniform distribution of the radiation field is tested. Accurate experimental data can be obtained for the study of HPM plasma with the test method.

Keywords: radiation field measurement; microwave quasi-optical focusing system; High Power Microwave; quantity-transfer

本文针对大气环境模拟室中封闭有限空间内强电磁场的非均匀分布的测试开展相关研究。在这种封闭有限空间内强辐射场的测试一直是个挑战, 直接采用大功率微波(HPM)辐射场测试方法已不适用, 研究人员采用各种方法研究新式传感器, 期望解决该问题^[1-4]。本文采用小信号辐射监测电场分布量传测试方法, 采用各向同性场测试探头作为电场测试接收系统, 标定小信号发生器, 通过小信号辐射监测电场分布, 实时在线监测 HPM 源输出状态, 通过量传给出强辐射场非均匀分布。采用的各向同性场测试探头可以满足 500 V/m 以内的空间辐射场监测、场均匀性测试, 特别适合小区域内部电场监测等, 具有微扰动、量值准确、高效快捷、抗干扰性强、布设灵活等优点^[4]。此外为了测量空间位置相对准确, 研制了非金属传动装置, 精确控制相对步进, 完成了小信号辐射场的非均匀分布测试。

1 测量基本原理

微波辐射场测量采用小信号传递的方式进行测量。先用小信号微波标定出大气环境模拟室中聚焦反射后形成辐射场的空间分布和耦合端口的小信号微波功率, 再利用微波传输特性, 推算出空间辐射场的电场强度分布。在本实验装置中, 重点关注空间电场峰值实时场强, 不关注时域波形的变化, 且在该实验装置中, 微波频

收稿日期: 2017-11-13; 修回日期: 2018-01-14

*通信作者: 闫二艳 email: yaneryan_2002@163.com

率固定, 因此可以采用式(1)推测实际辐射场的分布^[5-8]。

辐射场场强具体计算方法:

$$E = \sqrt{\frac{P_{\text{large}}}{P_{\text{small}}}} E_{\text{small}} \quad (1)$$

式中: E 表示辐射场电场强度, 单位: kV/cm; P_{small} 表示对标小信号功率值, 单位: W; P_{large} 表示微波源输出功率值, 单位: W; E_{small} 表示小信号在辐射场中的场强, 单位: kV/cm。

2 封闭有限空间内强电磁场的非均匀分布测试系统

需要测量的大气环境模拟室工作空间直径为 1 500 mm, 内部工作原理结构如图 1 所示。需要给出此封闭有限空间内的三维空间辐射场分布, 因此设计加工了非金属自动传动系统, 由该传动系统带动场探头测量小信号微波的空间分布。

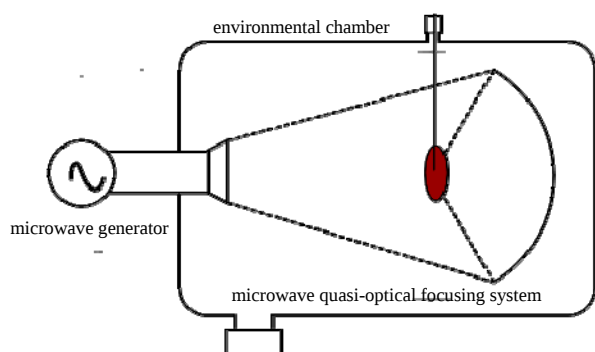


Fig.1 Working schematic diagram of the atmospheric environmental chamber

图 1 大气环境模拟室工作原理结构图

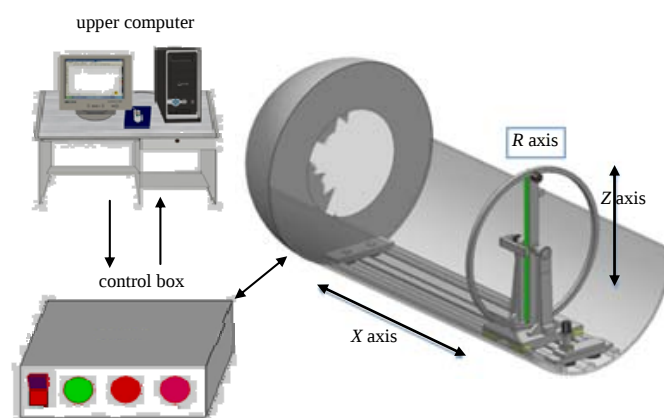


Fig.2 Diagram of system structure

图 2 系统结构框图

2.1 非金属自动传动系统

为满足上述要求的测试, 设计了非金属自动传动系统, 系统结构框图如图 2 所示。非金属自动传动系统由 X 轴、 Z 轴、 R 轴组成, 其总体结构设计见图 2 右侧。

2.1.1 非金属自动传动系统 X 轴设计

X 轴为最下面的轴, 安装于现有的导轨上面, 实现水平方向运动, 其运动距离为 1 600 mm。通过非金属的同步轮和同步带实现传动; 选用步进电机驱动, 开环方式控制, 实现位置和速度控制, 位置精确度 1 mm, 最大速度 10 mm/s。由于双导轨上还要滑动反射面, 传动部件需在导轨下方, 且为柔性连接, 便于反射面的安装。

2.1.2 非金属自动传动系统 Z 轴设计

Z 轴为圆心直径方向的轴, 安装于 X 轴上面, 实现圆心位置半径的调节, 使工件能够在直径方向有 900 mm 的行程, 整个检测装置能够检测一个直径为 900 mm、高度为 1 600 mm 的圆柱体空间。同样通过非金属的同步带和同步轮实现传动; 选用步进电机驱动, 开环方式控制, 实现位置和速度控制, 位置精确度为 1 mm, 最大速度为 10 mm/s。

2.1.3 非金属自动传动系统 R 轴设计

R 轴为圆周运动方向轴, 安装于 X 轴上面, 实现绕直径为 900 mm 的圆做圆周运动。通过非金属的同步轮、同步带实现传动; 选用步进电机驱动, 开环方式控制, 实现位置和速度控制, 位置精确度为 0.5° , 最大速度为 $10^\circ/\text{s}$ 。

2.1.4 非金属自动传动系统控制设计

选用 4 轴步进电机控制卡, 通过以太网与上位机通信, 采用高级语言 VB 编写上位程序。

2.2 封闭有限空间内电磁场的空间分布测试系统

采用非金属自动传动系统带动光纤电场传感器自动测量空间辐射场分布。与普通传感器相比, 光纤传感系统具有质轻、抗电磁干扰、抗腐蚀、耐高温、信号衰减小、集信息传感与传输于一体等特点^[4]。光纤电场传感

器基于电光效应的原理来实现。电光效应可以概括为：当电场施加在光正在传输的介质时，引起介质的光学特性(如折射率)发生变化的现象。应用电场传感器的电场探测系统组成示意图如图 3(a)所示，置于电磁辐射环境下的电场传感器是系统的关键，其内部没有电路，属无源非金属模块，对被测近场的扰动最小。光纤电场传感器外观如图 3(b)所示，主要性能参数：工作频率为 10 MHz~7.0 GHz，最大可探测电场强度为 200 kV/m，封装尺寸为 6.0 mm×6.0 mm×30.0 mm。系统中探测器将携带被测电磁场信息的光信号转换成电信号，送入示波器得到传感器所在位置电场的时域信号，或送入频谱分析仪得到其频谱信息。该型光纤电场传感器结构简单，与低感度小型天线相比，体积非常小，空间分辨率高，可实现近似点测量，兼具小体积和低扰动的优点，在耦合近场测量和小体积空间测量应用中具有一定的优势。文献[5-9]对光纤电场探测器的校准及系统不确定度进行分析，且开展了相关测试研究。

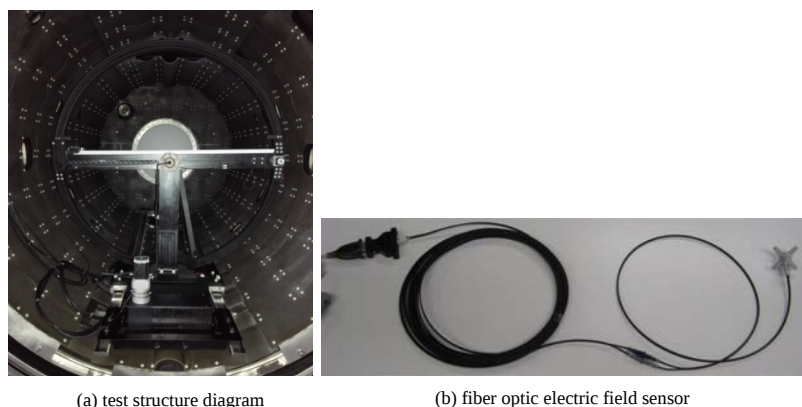


Fig.3 Automatic test transmission system for microwave radiation field distribution
图 3 微波辐射场空间分布自动测试传动系统

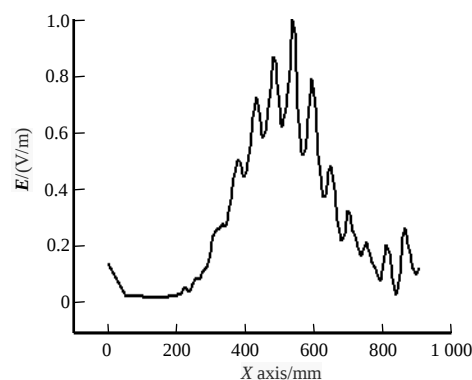


Fig.4 Normalized results of field intensity distribution in X axis
图 4 空间 X 轴线场强分布归一化结果

3 测量结果及数据处理

通过光纤电场传感器，自动测试传动系统采集到空间轴线和某一平面上的电场强度变化的数值，将数据进行归一化处理，从而避免了校准误差的影响。数据直接反映测试结果的变化趋势，空间 X 轴线场强分布归一化结果如图 4 所示。水平位置 535 mm 平面内电场归一化分布如图 5 所示。该截面电场分布数值模拟归一化结果^[9]与利用该系统测量结果进行比对，见图 6，实验测量归一化结果与数值模拟归一化结果一致。在该实验装置上开展了 HPM 大气等离子体相关实验，并获取了部分放电斑图，见图 7。放电斑图分布与辐射场电场分布趋势一致，与电场分布关系密切。

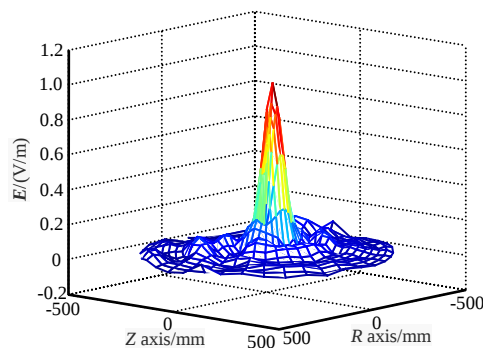


Fig.5 Normalized distribution of electric field in horizontal plane at 535 mm
图 5 水平位置 535 mm 平面内电场归一化分布

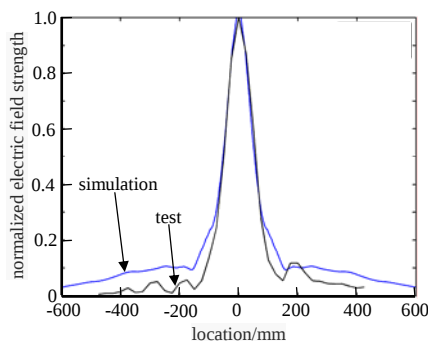


Fig.6 Experimental results and numerical simulation results
图 6 实验测量结果与数值模拟结果比对

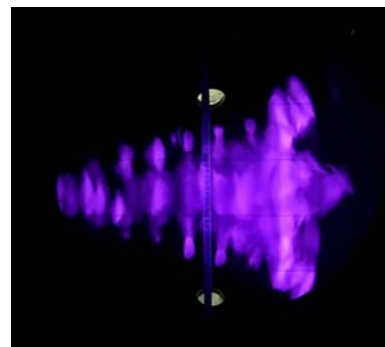


Fig.7 Discharge spot
图 7 放电斑图

4 结论

本文针对研制的 HPM 大气等离子体实验装置中一定封闭空间内微波准光学聚焦系统的空间辐射场强分布进行了测试研究。由于 HPM 辐射峰值功率大于 1 MW, 经反射聚焦后在辐射空间形成达到 kV/cm 量级的强场非均匀区域, 直接采用 HPM 辐射场测试方法已不适用; 采用小信号辐射监测电场分布, 实时在线监测 HPM 源输出状态, 通过量传给出强辐射场非均匀分布。利用研制的非金属传动装置, 精确控制相对步进, 完成小信号辐射场的非均匀分布。该测试为 HPM 大气等离子体相关实验研究提供了准确的实验数据, 进一步完善了 HPM 大气等离子体实验装置的实验能力。

参考文献:

- [1] 席洁,陈明,弟寅,等. 测量电场的铌酸锂光传感器综述[J]. 传感器与微系统, 2013,32(3):4-6. (XI Jie,CHEN Ming,DI Yin,et al. Review of lithium niobate optical sensor for measurement of electric field[J]. Transducer and Microsystem Technologies, 2013,32(3):4-6.)
- [2] 方奕庚,彭春荣,方东明,等. 微型折叠式三维电场传感器[J]. 传感器与微系统, 2016,35(5):67-69. (FANG Yigeng, PENG Chunrong,FANG Dongming,et al. Micro 3-dimensional folding electric field sensor[J]. Transducer and Microsystem Technologies, 2016,35(5):67-69.)
- [3] 崔雷,杨红玺. 一种天线近场间接测试方法[J]. 空间电子技术, 2014,11(2):47-49. (CUI Lei,YANG Hongxi. An indirect measurement method for antenna[J]. Space Electronic Technology, 2014,11(2):47-49.)
- [4] 杨拥军. 新型集成光波导全向电场传感器系统研究[D]. 成都:电子科技大学, 2007. (YANG Yongjun. A novel isotropic electric field sensing system using integrated optical waveguides[D]. Chengdu,China:University of Electronic Science and Technology of China, 2007.)
- [5] RAZAVI S F,RAHMAT-SAMII Y. Resilience to probe-positioning errors in planar phaseless near-field measurements[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 2010,58(8):2632-2640.
- [6] MATSUI T. A wide-band FET antenna and its calibration[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 1991,40(1):47-49.
- [7] 程奇峰,倪建平,孟萃,等. 强脉冲电场测量技术研究[J]. 电子测试, 2008(9):6-11,24. (CHENG Qifeng,NI Jianping, MENG Cui,et al. Study of measurement techniques for strong pulsed electric field[J]. Electronic Test, 2008(9):6-11,24.)
- [8] 牛粹,曾蝶,耿屹楠,等. 光电集成强电场传感器的频率特性校准研究[J]. 高电压技术, 2009,35(8):1975-1979. (NIU Cui,ZENG Die,GENG Yinan,et al. Frequency characteristics calibration of optical electric integrated sensor for intensive electric field[J]. High Voltage Engineering, 2009,35(8):1975-1979.)
- [9] 钟龙权,曹学军,赵刚,等. 耦合近场仿真及初步验模测试实验研究[J]. 强激光与粒子束, 2015,27(10):139-142. (ZHONG Longquan,CAO Xuejun,ZHAO Gang,et al. Near-field coupling simulation and preliminary validation test[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2015,27(10):139-142.)

作者简介:



胡海鹰(1967-), 女, 四川省绵阳市人, 工程师, 主要研究方向为高功率微波测量技术。
email:1473218835@qq.com.

刘 忠(1968-), 男, 四川省绵阳市人, 技师, 主要研究方向为微波源运行。

杨 浩(1992-), 男, 湖北省随州市人, 学士, 研究实习员, 主要研究方向为高功率微波与物质相互作用机理。

闫二艳(1978-), 女, 河南省焦作市人, 博士, 副研究员, 主要研究方向为高功率微波与物质相互作用机理。

郑强林(1983-), 男, 四川省广元市人, 硕士, 助理研究员, 主要研究方向为高功率微波与物质相互作用机理。