



尘埃等离子体微波衰减测量中应注意的问题

王彦同¹, 蒋林¹, 石雁祥^{1,2}

(1. 伊犁师范大学 电子与工程学院, 伊宁 835000; 2. 伊犁师范大学 信号检测与控制技术重点实验室, 伊宁 835000)

摘要: 尘埃等离子体参数是影响尘埃等离子体电磁特性的重要因素, 而尘埃等离子体中微波衰减系数的测量是尘埃等离子体参数反演的关键环节。该文介绍了微波衰减测量原理, 陈述了由尘埃等离子体产生装置、矢量网络分析仪、宽带喇叭天线等构成的测量系统对微波衰减测量的过程和必要设置。针对环境基底的影响、反射信号的干扰、设备参数设置以及实验数据处理等影响测量结果方面的问题给出说明和初步解决方法, 并对仍可能存在的误差进行了讨论, 为完善尘埃等离子体微波衰减测量方法提供参考。

关键词: 尘埃等离子体; 微波传输; 微波衰减测量

中图分类号: O53

文献标志码: A

DOI: 10.12179/1672-4550.20220383

Problems in Microwave Attenuation Measurement of Dusty Plasma

WANG Yantong¹, JIANG Lin¹, SHI Yanxiang^{1,2}

(1. Department of Electronic and Engineering, Yili Normal University, Yining 835000, China;

2. Laboratory of Signal Detection and Control Technology, Yili Normal University, Yining 835000, China)

Abstract: The parameters of dusty plasma are important factors affecting the electromagnetic characteristics of dusty plasma, and the measurement of microwave attenuation coefficient in dusty plasma is the key link in the inversion of dusty plasma parameters. In this paper, the principle of microwave attenuation measurement was introduced, and the process and necessary setting of microwave attenuation measurement by the measurement system composed of dust plasma generation device, vector network analyzer, broadband horn antenna and so on were stated. The influence of environmental substrate, the interference of reflected signal, the parameter setting of equipment and the experimental data processing on the measurement results were explained and preliminarily solved. The possible errors were discussed, which provides a reference for improving the microwave attenuation measurement method of dust plasma.

Key words: dusty plasma; microwave transmission; microwave attenuation measurement

微波传输法作为一种非接触式测量, 具有操作简单可行的优势, 早期常被用于非磁化等离子体参数的诊断^[1-2], 主要通过测量等离子体对微波的衰减, 并基于等离子体理论进行参数诊断。尘埃等离子体是指含有微米、纳米级尘埃粒子的等离子体, 也叫复杂等离子体, 20 世纪 90 年代起, 尘埃等离子体成为等离子体物理研究领域的热门。由于尘埃等离子体中粒子的相互碰撞和尘埃粒子的充放电效应, 使得尘埃等离子体的电磁特性更为复杂。实验室尘埃等离子体环境、极区中层夏季回波 (polar mesosphere summer echoes,

PMSE) 现象、固体火箭喷焰对微波信号的强衰减及航天器返回地面遇到的黑障效应等通信领域遇到的诸多问题都需要用尘埃等离子体相关理论给予解释^[3-7], 因而尘埃等离子体物理受到了越来越广泛的重视。

近 20 年来, 为研究微波在尘埃等离子体中的传输规律, 人们致力于建立尘埃等离子体电磁特性理论模型和微波在尘埃等离子体中传输的实验研究。文献 [8] 致力于研究尘埃等离子体的电磁特性; 文献 [9] 研究了电磁波在具有多分散性的磁化尘埃等离子体中的传播特性; 美国分别于 2009 年

收稿日期: 2022-06-18; 修回日期: 2023-02-12

基金项目: 伊犁师范大学校级青年项目 (KY082022015); 国家自然科学基金 (12065023); 电波环境特性及模化技术重点实验室开放课题资助项目 (JW2021-030)。

作者简介: 王彦同 (1993-), 男, 理学硕士, 实验师, 主要从事复杂介质中信号的传输与可控性方面的研究。E-mail: wyt6319@163.com

和 2015 年开展了带电粒子气体喷洒实验(charged aerosol release experiment, CARE), 利用激光雷达和光学诊断技术研究了人工尘埃等离子体云电磁特性^[10-11]; 文献 [12-13] 在考虑尘埃粒子充电的情形下给出了弱电离子尘埃等离子体的电导率和介电系数计算公式, 计算了微波在弱电离子尘埃等离子体中的衰减, 理论计算值与实测值给出了相近的结果; 文献 [14-15] 开展了微波在空心阴极放电尘埃等离子体中的理论建模和实验研究。计算和实验研究表明, 等离子体中加入尘埃粒子改变了微波在其中的传输规律, 而微波的衰减是影响微波在尘埃等离子体中传输规律的重要问题之一。在尘埃等离子体电磁特性研究中, 国内外对其研究的理论偏多, 实验还比较缺乏。尘埃等离子体电磁特性研究需要理论与实验相佐, 实现协同发展, 因而微波衰减测量有着至关重要的意义, 可靠的测量结果有助于进一步验证尘埃等离子体电磁特性理论。

本文介绍了尘埃等离子体微波衰减测量方法和原理及测量过程, 对测量衰减时应注意的一些问题进行分析 and 说明, 给出了初步解决方案, 这对今后进一步完善尘埃等离子体特征参数的测量方法具有一定的参考意义。

1 微波衰减测量方法及原理

微波传输问题的分析中常用到二端口网络, 微波二端口网络对衰减的定义有不同的描述, 但都可以看成是散射矩阵参数的函数^[16], 因此, 测出散射参数(S 参数)就可以得到网络的衰减, 散射参数可由矢量网络分析仪(vector network analyzers, VNA)测得。根据微波技术网络理论对衰减的定义^[17]有:

$$A = A_{\text{att}} + A_{\text{re}} = 10 \lg \frac{1 - |S_{11}|^2}{|S_{21}|^2} + 10 \lg \frac{1}{1 - |S_{11}|^2} \quad (1)$$

式中: A 是传输衰减 A_{att} 和反射衰减 A_{re} 的总和, 单位 dB; S_{11} 是反射参数; S_{21} 是透射参数。当反射效应可以被忽略时, 式(1)可写为:

$$A = 20 \lg \frac{1}{S_{21}} = -20 \lg |S_{21}| \quad (2)$$

根据式(2), 测量时, 在矢量网络分析仪面板上将 S_{21} 设置为取对数幅度即可直接得到 A 。

假设厚度为 d 的尘埃等离子体是非磁化的、局

部均匀的, 则微波信号发出端和接收端的电场强度可以表示为:

$$E = E_0 e^{-\alpha d} = E_0 e^{-A} \quad (3)$$

衰减可以改写为:

$$A = \ln \frac{E_0}{E} = -\alpha d \quad (4)$$

式中: α 为衰减系数, 单位 Np/m (捺培/米), 工程中也用 dB/m (分贝/米)。以分贝和捺培为单位的衰减满足 $1 \text{ Np} = 20/\ln 10 (\text{dB}) = 8.6859 \text{ dB}$ 关系, 因此, 式(4)也可写为:

$$A = -\alpha d \left(\frac{20}{\ln 10} \right) \quad (5)$$

由式(5)可知, 通过测量衰减量 A 即可得到微波在尘埃等离子体中传输时的衰减系数 α 。而衰减系数 α 和相位系数 β 与介电电导率 σ 、相对介电系数 ϵ_r 以及入射微波角频率 ω 有如下关系^[18]:

$$\alpha = \frac{\omega}{\sqrt{2}c} \sqrt{\left(\sqrt{(\epsilon_r)^2 + \left(\frac{\sigma}{\epsilon_0 \omega} \right)^2} - \epsilon_r \right)} \quad (6)$$

若衰减系数 α 以 dB/m 为单位, 则式(6)中的 α 需要乘以 8.686 ^[19]。式(6)中, σ 和 ϵ_r 是同时考虑电子-分子碰撞作用和电子-尘埃粒子充电作用的尘埃等离子体电导率和相对介电系数可分别表示为:

$$\sigma = \frac{\epsilon_0 \omega_{\text{pe}}^2 \nu_{\text{eff}}}{\omega^2 + \nu_{\text{eff}}^2} + \eta_{\text{ed}} c \frac{\omega^2 - \nu_{\text{eff}} \nu_{\text{ch}}}{(\omega^2 + \nu_{\text{ch}}^2)(\omega^2 + \nu_{\text{eff}}^2)} \quad (7)$$

$$\epsilon_r = 1 - \frac{\omega_{\text{pe}}^2}{\omega^2 + \nu_{\text{eff}}^2} + \frac{\eta_{\text{ed}} c}{\epsilon_0} \frac{\nu_{\text{ch}} + \nu_{\text{eff}}}{(\omega^2 + \nu_{\text{ch}}^2)(\omega^2 + \nu_{\text{eff}}^2)} \quad (8)$$

其中

$$\eta_{\text{ed}} = \frac{n_e n_d \pi r_d^2 e^2}{m_e} \quad (9)$$

式(6)~式(9)表明, 衰减系数是微波角频率 ω 、振荡频率 $\omega_{\text{pe}} = \sqrt{e^2 n_e / \epsilon_0 m_e}$ (rad/s)、电荷弛豫速率 ν_{ch} (rad/s)、电子-中性分子碰撞频率 ν_{eff} (rad/s) 和尘埃粒子特征参数相关的函数。通过可靠的测量方法得到尘埃等离子体对微波的衰减量和相位移动并计算出衰减系数和相位系数, 建立衰减系数和相位系数与微波角频率和尘埃等离子体特征参数的方程组可求解得到尘埃等离子体的特征参数。当等离子体中未加入尘埃粒子时, 式(7)的第二项和式(8)的第三项为 0, 则式(7)和式(8)退化为经典等离子体的电导率和相对介电系数公式。

2 测量系统及操作步骤

尘埃等离子体微波传输实验测量系统示意图如图1所示,它主要由尘埃等离子体产生装置、矢量网络分析仪、一对微波宽频背脊喇叭天线和一对低损耗同轴电缆构成。发射天线和接收天线正对放置在等离子体产生腔体两端的固定位置,用同轴电缆将天线分别连接至矢量网络分析仪的信号发射端口和接收端口。由于地面实验中尘埃粒子无法克服重力悬浮,实验时,先产生比较均匀稳定的等离子体,再通过外接电源控制筛网盒持续均匀振动,形成持续可测量的尘埃等离子体环境。

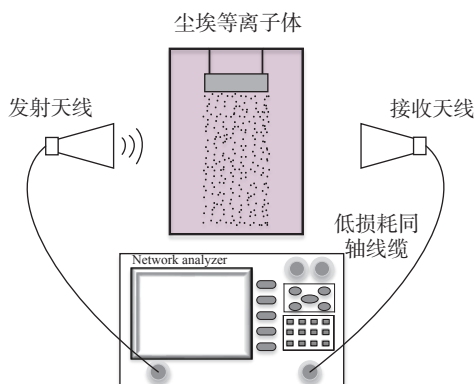


图1 微波衰减测量示意图

产生等离子体时,首先利用真空泵将放电室抽至真空,然后打开进气口的流量调节阀,通过二者的配合调节腔室的气压保持整个放电室气压维持动态平衡状态,气体压强计可以显示腔室的气压。如果实验需要氦气或氩气等气体产生较为纯净的等离子体,则需要对气体反复冲洗放电区以确保气体纯度。当腔室内的气压达到实验所需气压时,电极通电后使腔室内的气体电离形成等离子体。

在等离子体中加入尘埃粒子常用方法有气流注入法和化学合成法等,但这些方法在地面实验研究中有一定局限性,在加入尘埃粒子时,不仅要考虑加尘埃粒子过程对等离子体的影响,还要考虑尘埃粒子在测量区域的悬浮问题。由于等离子体对压强的变化非常敏感,因而用气流注入尘埃粒子容易造成等离子体的不稳定,且该方法在保证等离子体不被扑灭的前提下注入的尘埃粒子密度很低。化学合成法通常是在放电室内注入如硅烷和乙烯混合化学气体,通过化学反应形成尘

埃颗粒,这种方法在等离子体环境中产生尘埃粒子的浓度和大小很难控制,常用于尘埃等离子体中库伦耦合晶体的研究。

目前,尘埃散播法是加入尘埃粒子最常用的方法。但由于尘埃粒子无法克服重力悬浮,而外加电场平衡测量区范围尘埃粒子的重力实现悬浮是比较困难的。通常的做法是:利用安装在腔室内尘埃粒子容器的振动将所需尘埃颗粒通过筛网投入到腔内等离子体中形成尘埃等离子体。这避免了加入尘埃粒子过程中因腔内气体压强的改变而造成腔内等离子体的不稳定。通过尘埃粒子散播器的持续振动加入尘埃粒子形成持续可测的尘埃等离子体。

矢量网络分析仪的发展为微波测量提供了新技术,利用它可以实现高精度、扫频、单频和自动测量,能够比较准确测得微波幅度的变化,记录网络的S参数,还可以通过设置时域门去掉反射信号的影响及其他系统误差,对于电子浓度小于 $1 \times 10^{18} \text{ m}^{-3}$ 的情形,微波的反射几乎可以忽略^[19],但为了去除其他干扰因素,提高测量精度,实验过程中仍然应该开启时域门。

一个实际的测量系统如图2所示,开展测量时按以下步骤执行。



图2 微波衰减测量实验装置

1) 设置发射信号的功率(power)和频率的测量范围(frequency span),单击 start 输入起始频率,单击 stop 输入终止频率,具体设置需要参照矢量网络分析仪和天线的测量范围;设置扫描(sweep),选择扫描类型和扫描点数。点数设置不可太少也不可过多,点数过少可缩短扫描时间,但测量结果粗糙,点数过多可提高测量精度,但却大大增加了扫描时间。通常将扫描点数设置为 401 或 601。

2) 校准,单击 cal,依次选择与连接对应的校

准套件, 进行短路—开路—负载—直通(short-open-load-thru, SOLT)校准去掉同轴线缆、端口和基底的影响, 保存校准后的状态和校准文件。

3) 设置并开启时域门, 尘埃等离子体腔室的金属壁和电极对微波信号的多次反射使得接收到的数据中存在噪声数据, 需要通过时域门设置去除噪声信号。时域门要在时域模式下设置, 通过观察找到透射信号中第一个出现最大峰值信号的位置, 该位置就是微波经发射天线发出并透过尘埃等离子体垂直入射到接收天线的信号。设定门的宽度即可保留最强位置的透射信号而过滤其他时刻的信号, 最后在设置面板上开启时域变换, 将时域变换到频域。

4) 选择测量参数, 并设置轨迹线, 记录衰减和频率关系的曲线。

5) 设置数据处理方式, 选择对数幅度。

6) 对误差进行适当修正, 为有效降低噪声干扰, 提高实验的准确性, 可以通过平均功能设置平均次数和平滑功能设置平滑参数。

7) 选择自动, 测量曲线会以适合的比例显示, 选择保存文件, 通常是 CSV 文件格式或者 S2P 文件格式, 以上两种类型格式的文件都记录了微波透过尘埃等离子体的衰减和相位。

8) 根据矢量网络分析仪记录的衰减值可以计算出衰减系数, 这也是测量的主要目的。

3 测量结果及误差分析

利用天线传输直接测试和开启时域门的结果如图 3 所示, 主峰约 1.8 ns 处为时域门中心, 设置门宽约为 1.1 ns, 将滤除多次反射的非直接透射和噪声信号, 仅保留微波路径最短的微波信号, 保留直接透射的信号主峰有利于减小测量误差。

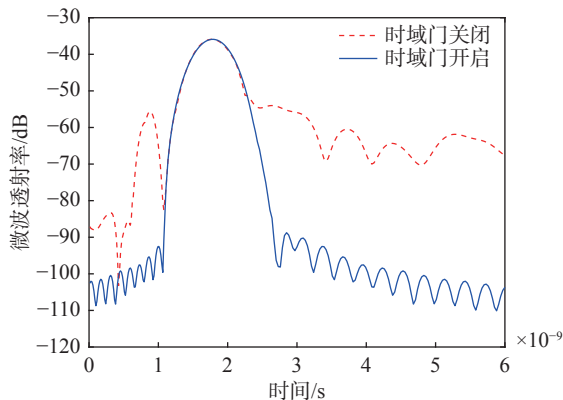


图 3 时域门关闭与开启对比图

60 Pa 空气条件下微波衰减测量结果如图 4 所示, 不同频率电磁波在尘埃等离子体介质中传输时, 衰减随着入射微波频率的变化而变化, 根据衰减测量结果计算衰减系数时, 通常取微波路径为微波透过尘埃等离子体的厚度, 但是在实际测量过程中, 喇叭天线所发射的是球面波, 微波实际传输路径可能要复杂得多, 但理论的推导是基于平面波的传播特性, 这使得在后期的数据分析与处理中不得不采用平均衰减。此外, 在设置测量条件或数据处理过程中, 要考虑微波的截止效应, 即微波角频率小于振荡频率时, 微波无法透入尘埃等离子体, 实验室等离子体电子浓度 n_e 趋于 $5 \times 10^{16} \text{ m}^{-3}$, 振荡频率 ω_{pe} 约为 $1.26 \times 10^{10} \text{ rad/s}$, 因此, 测得的有效衰减应该选取微波频率 $f > 2 \text{ GHz}$ 对应的衰减。

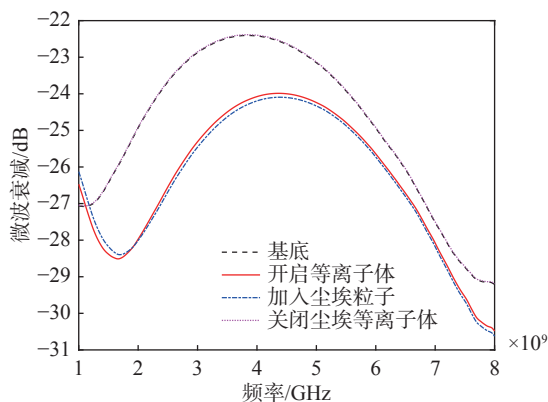


图 4 微波衰减测量

等离子体中加入尘埃粒子时会产生团簇问题, 标准尺寸的尘埃粒子(一般为几个微米)在进入有等离子体的腔室后会凝结成很大的颗粒(一般为上百微米)。虽然团簇问题本身对测量没有直接的影响, 但团簇使得尘埃粒子浓度下降达到几个量级, 这对尘埃等离子体特征参数的反演会造成影响。若要获得下落中尘埃颗粒粒径, 需要利用喷雾激光粒度分析仪对尘埃粒子的粒径进一步测量。

另外, 实验过程中, 由于尘埃等离子产生装置工作状态的不稳定, 使得尘埃等离子体中的一些参数如电子浓度可能会随时间发生一些变化, 图 5 给出了 Langmuir 探针辅助测量结果。但由于微量网络分析仪扫频测量时, 从一个频点变化到邻近频点的时间非常短, 因而, 两个相近频点上的尘埃等离子体参数可认为近似相等。

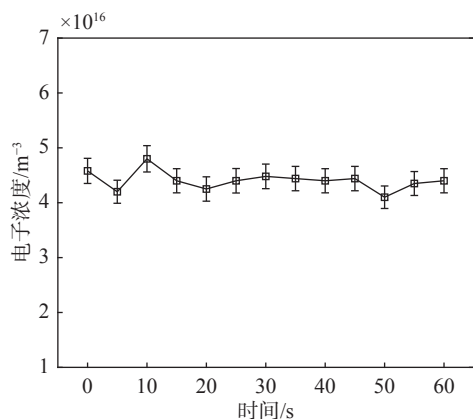


图5 腔室中心电子浓度随时间变化测量结果

微波传输法作为一种非直接接触式测量方法有其一定的优势,但同时面临的以上问题对误差分析和数据处理有一定影响,利用该方法测量尘埃等离子体的微波衰减存在的误差主要与实际情况和测量有关。

此外,仪器的精度和稳定度均可对测量结果产生误差,实验时,应尽可能采用较高精度的仪器设备。

4 结束语

固体火箭喷焰对微波强衰减、极区中层夏季雷达异常回波现象及“通信黑障”等通信领域的问题都与尘埃等离子体密切相关,尘埃等离子体与微波相互作用的地面研究是认识尘埃等离子体电磁特性的重要途径。在相关地面实验研究中,测量微波衰减是实验测量中的关键环节,通过可靠的测量方法可以获得较为准确的衰减值。为此,对测量方法和测量过程中需要注意的问题加以说明和分析很有必要。本文对尘埃等离子体微波衰减测量方法和测量过程做了介绍,针对其中应注意的问题进行了说明,这对开展尘埃等离子体微波衰减测量实验和进一步开展相关参数的反演具有较为重要的参考价值。

参考文献

[1] NEUMANN G, BANZIGER U, KAMMEYER M, et al. Plasma-density measurements by microwave interferometry and Langmuir probes in an rf discharge[J]. *Review of Scientific Instruments*, 1993, 64(1): 19–25.

[2] BLEVINS J, FREDERICK R, COLEMAN H. An assessment of microwave measurement techniques in rocket exhaust applications[C]//Aerospace Sciences Meeting & Exhibit. Washington: American Institute of

Aeronautics and Astronautics, 2015.

[3] 李海龙, 吴健, 黄际英, 等. 极区中层夏季回波火箭探空观测的个例分析[J]. *空间科学学报*, 2009, 29(4): 397–401.

[4] DUAN J Z, HAN J F, WANG C L, et al. Contribution of the dust grains to the damping of the electromagnetic waves propagating in plasma[J]. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2013, 41(8): 2434–2437.

[5] 王长起. 固体火箭发动机喷焰微波衰减的研究[J]. *固体火箭技术*, 1992(2): 14–20.

[6] KINEFUCHI K, FUNAKI I, ABE T. Frequency-dependent ftd simulation of the interaction of microwaves with rocket-plume[J]. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 2010, 58(10): 3282–3288.

[7] HE G, ZHAN Y, ZHANG J, et al. Characterization of the dynamic effects of the reentry plasma sheath on electromagnetic wave propagation[J]. *IEEE Transactions on Plasma Science*, 2016, 44(3): 232–238.

[8] SHUKLA P K, MAMUN A A. Introduction to dusty plasma physics[J]. *Plasma Physics & Controlled Fusion*, 2002, 44(3): 395–395.

[9] PRUDSKIKH V V, SHCHEKINOV Y A. Electromagnetic waves in a polydisperse dusty plasma[J]. *Physics of Plasmas*, 2013, 20(10): 543–549.

[10] BERNHARDT P A, BALLENTHIN J O, BAUMGARDNER J L. Ground and space-based measurement of rocket engine burns in the ionosphere[J]. *IEEE Transaction on Plasma Science*, 2012, 40(5): 1267–1286.

[11] SCALES W A, MAHMOUDIAN A. Charged dust phenomena in the near earth space environment[J]. *Physical Society*, 2016, 79(10): 1–27.

[12] 石雁祥, 葛德彪, 吴健. 尘埃粒子充放电过程对尘埃等离子体电导率的影响[J]. *物理学报*, 2006, 55(10): 5318–5323.

[13] 石雁祥, 葛德彪, 吴健. 尘埃等离子体微波衰减常数的理论分析[J]. *地球物理学报*, 2007, 50(4): 1005–1010.

[14] 李辉. 尘埃等离子体动力学及电磁特性研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2017.

[15] JIA J, YUAN C, GAO R, et al. Transmission characteristics of microwave in a glow-discharge dusty plasma[J]. *Physics of Plasmas (1994-present)*, 2016, 23(7): 073705.

[16] POZAR D M. 微波工程[M]. 张肇仪, 周乐柱, 吴德明, 译. 3版. 北京: 电子工业出版社, 1985.

[17] 黄志洵, 曲敏. 微波衰减测量技术的进展[J]. *中国传媒大学学报(自然科学版)*, 2010(1): 1–11.

[18] FREDERICK R A, BLEVINS J A, COLEMAN H W. Investigation of microwave attenuation measurements in a laboratory-scale rocket motor plume[J]. *Journal of Spacecraft & Rockets*, 2015, 32(5): 923–925.

[19] 胡红军, 陈勇, 陈菊. 飞行器黑障区测控技术问题探讨[J]. *弹箭与制导学报*, 2012, 32(2): 197–199.