

等离子体鞘套宽带微波反射诊断方法*

杨敏 王佳明[†] 齐凯旋 李小平 谢楷 张琼杰 刘浩岩 董鹏

(西安电子科技大学空间科学与技术学院, 极端环境下信息与装备效能教育部重点实验室, 西安 710071)

(2022年6月14日收到; 2022年7月22日收到修改稿)

飞行器再入过程中会产生一层包裹在其表面的等离子体鞘套, 导致通信质量恶化, 甚至中断, 形成“黑障”现象. 多年来“黑障”问题一直困扰着航空航天行业, 其中一个非常重要的原因是, 对等离子体鞘套测量上的局限导致对通信传输环境认知不足. 所以, 实现鞘套参数的在线原位测量是高超声速飞行器“黑障”问题研究中的关键. 本文设计了一种用于再入等离子体鞘套诊断的宽带微波反射方法, 通过理论推导得到宽带微波反射数据与等离子体参数之间的关系, 进行有效诊断频点选择. 再利用所选有效频点的反射数据反推得到等离子体参数, 实现电子密度和碰撞频率的同时诊断测量. 建立仿真模型并搭建实验平台, 对该方法进行了仿真分析和地面实验验证, 验证了该方法的有效性. 该方法能够对再入飞行器或高超声速飞行器的等离子体鞘套实时诊断提供技术支撑.

关键词: 等离子体鞘套, 谐振点, 参数诊断, 微波反射法

PACS: 52.40.Db, 52.55.Fa, 52.65.-y, 52.70.-m

DOI: 10.7498/aps.71.20221179

1 引言

飞行器再入地球大气层时会产生一层包裹在飞行器表面的等离子体鞘套^[1-3]. 等离子体鞘套会产生一种类似静电屏蔽的作用, 使通信信号恶化甚至中断, 严重影响飞行器安全飞行. 几十年来, “黑障问题”一直困扰着航空航天行业^[4]. 其中一个非常重要的原因是, 对等离子体鞘套测量上的局限导致对通信传输环境认知不足. 而等离子体对通信电波的传播性能影响由等离子体的电子密度和碰撞频率等参数决定, 因此, 对等离子体电子密度和碰撞频率的诊断具有重要意义.

早在20世纪60年代, 美国就曾开展过无线电衰减测量 (radio attenuation measurement, RAM) 飞行实验^[5] 以获取再入等离子体鞘套数据: 在航天器尾部流场进行探针测量, 高度范围为 53.3—

85.3 km, 测量密度为 10^8 — 10^{12} cm^{-3} . 在鼻部区域也进行了四频点反射计的测量: 共使用了 15 个天线以实现反射系数的测量. 遗憾的是, 自此之后再未见到相关文献涉及等离子体鞘套在飞诊断.

近年来, 随着技术进步, 探针诊断^[6,7]、激光干涉诊断、微波诊断和光谱法^[8-11] 等等离子体诊断方法已经得到长足发展. 这些诊断方法分为两大类: 介入式诊断方法和非介入式^[12] 诊断方法. 朗缪尔静电探针是目前最常用的介入式诊断方法, 但是由于探针与等离子体直接接触, 会对待测等离子体鞘套产生一定污染, 诊断精度受影响较大. 其次, 探针会破坏飞行器的气动外形, 对飞行器的正常飞行造成影响. 此外, 高超声速飞行器的飞行时间较长, 长时间高温环境的烧蚀会破坏探针, 使得探针诊断无法记录飞行器再入的整个过程.

激光干涉诊断和微波诊断等是目前常用的非介入式诊断方法. 这两类方法均假定等离子体为传

* 国家自然科学基金 (批准号: 62071355) 资助的课题.

[†] 通信作者. E-mail: jmwang_6@stu.xidian.edu.cn

输介质,且等离子体中的折射率与等离子体的电子密度等参数有关.激光干涉诊断在高电子密度下更具优势.微波诊断可分为反射诊断和透射诊断^[13-15].激光干涉^[16]和微波透射、干涉诊断^[17-19]需要完整的传输路径.然而在飞行器再入时,在等离子体鞘套的外端布置激光馈线或接收天线是不现实的.而反射法在飞行器表面布置天线实现电波发射和接收,更适合于再入等离子体鞘套的在线原位测量.

传统的微波反射方法是由雷达技术发展而来,在各种等离子体的密度分布和波动诊断中得到了广泛的应用.托卡马克等设备的微波反射计技术自1961年以来得到了巨大的发展^[20,21].反射计可分为调频连续波反射仪、调幅反射仪、脉冲压缩雷达反射计、微波多普勒反射仪等.

传统微波反射计的原理是,不同频率的电磁波入射到等离子体中,在不同位置发生全反射,再由电波频率推算出电子密度,即为该频率截止层位置处的电子密度值,经过扫频就可以得到密度剖面.传统的微波反射计需要测量反射信号的到达时间,要求电子密度分布存在明显的反射界面,且碰撞频率较低.而高速飞行器等离子体鞘套的碰撞频率跨度范围非常大,从几十到几百 MHz、一直延续到几十 GHz,跨越了数个数量级,相对于地面托卡马克等设备,高速飞行器等离子体鞘套的碰撞频率一般要大得多.而具有高碰撞频率的动态等离子体没有明显的反射截面,利用传统微波反射法就会存在较大的诊断误差.

针对以上问题,本文提出了一种基于宽带扫频

测量与反射系数分析的等离子体参数诊断方法.通过波阻抗分析建立等离子体参数与电磁波反射系数之间的关系,达到诊断再入等离子体鞘套参数的目的.能够同时测量等离子体的电子密度和碰撞频率,并且基于等离子体射流地面产生装置,设计了实验方案,研制了宽带反射测量天线,进行了诊断验证实验.本文的安排如下:第2节给出宽带微波反射法进行诊断的理论;第3节给出仿真模型和仿真结果;第4节描述该诊断系统和等离子体喷流装置以及诊断结果.

2 等离子体的宽带微波反射诊断方法

2.1 理论分析

在经典理论中^[22],等离子体被认为是一种特殊的有耗色散介质.用电动力学方程描述了等离子体中带电粒子的运动定律,并推导出了等离子体的介电常数和电导率.电磁波通过相位因子 $e^{j(\omega t - kz)}$ 传播到鞘套,其中 ω 为电磁波弧度频率,传播向量 k 可以表示为

$$k = \frac{\omega}{c} \sqrt{\varepsilon_r} = k_0 \sqrt{\varepsilon_r} = \alpha + j\beta, \quad (1)$$

其中 c 为光速, k_0 为自由空间中的波数, ε_r 为等离子体的等效介电常数,

$$\varepsilon_r = 1 - \frac{\omega_p^2}{\omega(\omega - j\nu_{en})} = 1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2 + \nu_{en}^2} - j \frac{\nu_e}{\omega} \frac{\omega_p^2}{\omega^2 + \nu_{en}^2}. \quad (2)$$

在非磁性等离子体的情况下,衰减系数 α 和相移系数 β 可以简化为

$$\begin{cases} \alpha = \frac{\omega}{c} \left\{ -\frac{1}{2} \left(1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2 + \nu_{en}^2} \right) + \frac{1}{2} \left[\left(1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2 + \nu_{en}^2} \right)^2 + \left(\frac{\nu_e}{\omega} \frac{\omega_p^2}{\omega^2 + \nu_{en}^2} \right)^2 \right]^{1/2} \right\}^{1/2}, \\ \beta = \frac{\omega}{c} \left\{ \frac{1}{2} \left(1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2 + \nu_{en}^2} \right) + \frac{1}{2} \left[\left(1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2 + \nu_{en}^2} \right)^2 + \left(\frac{\nu_e}{\omega} \frac{\omega_p^2}{\omega^2 + \nu_{en}^2} \right)^2 \right]^{1/2} \right\}^{1/2}, \end{cases} \quad (3)$$

其中, ω_p 是等离子体频率,

$$\omega_p = \sqrt{\frac{n_e e^2}{\varepsilon_0 m_e}}, \quad (4)$$

其中 n_e 是电子密度, e 是电子电荷, m_e 是电子质量, ε_0 是自由空间中的介电常数, ν_{en} 是碰撞频率.

电磁波垂直地进入等离子体时,会在等离子体边界上发生反射和透射.在图1中, μ_0 和 Z_0 分别为自由空间中的渗透率和波阻抗,等离子体的波阻抗为 $Z_p = \sqrt{\mu_r/\varepsilon_r}$, μ_r 为等离子体的相对磁导率,接近于1, d 是鞘套的厚度.

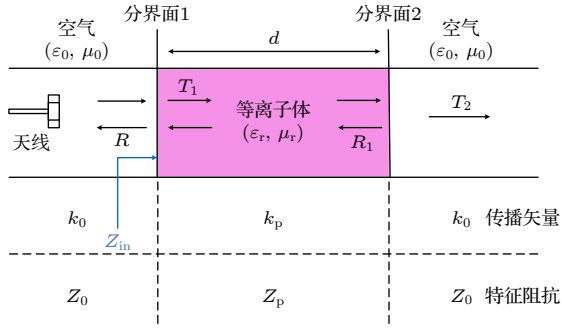


图 1 带有等离子体鞘套的等效传输线路的计算模型
Fig. 1. Calculation model of equivalent transmission lines with plasma sheath.

$$\begin{aligned}
 Z_{in} &= Z_p \frac{Z_0 + jZ_p \tan(2kd)}{Z_2 + jZ_0 \tan(2kd)} \\
 &= \frac{Z_0}{\sqrt{\epsilon_r}} \cdot \frac{Z_0 + j \frac{Z_0}{\sqrt{\epsilon_r}} \tan\left(\frac{\omega}{c} \cdot \sqrt{\epsilon_r} \cdot d\right)}{\frac{Z_0}{\sqrt{\epsilon_r}} + jZ_0 \tan\left(\frac{\omega}{c} \cdot \sqrt{\epsilon_r} \cdot d\right)} \\
 &= \frac{Z_0}{\sqrt{\epsilon_r}} \cdot \frac{1 + j \frac{1}{\sqrt{\epsilon_r}} \tan\left(\frac{\omega}{c} \cdot \sqrt{\epsilon_r} \cdot d\right)}{\frac{1}{\sqrt{\epsilon_r}} + j \tan\left(\frac{\omega}{c} \cdot \sqrt{\epsilon_r} \cdot d\right)}. \quad (5)
 \end{aligned}$$

反射系数表达式为

$$R = \frac{Z_{in} - Z_0}{Z_{in} + Z_0}. \quad (6)$$

微波反射法脱胎于电离层研究中使用的雷达技术, 是一种从等离子体截止反射层的电磁波的群时延中推断出等离子体密度的方法. 无碰撞等离子体的截止效应非常明显. 然而, 当碰撞频率较高时, 幅频曲线的转折点几乎难以区分. 用散射矩阵法 (SMM) 对反射系数和传输系数的幅频曲线进行了

数值模拟, 如图 2 所示. 随着电子中性碰撞频率的增加, 等离子体碰撞吸收率增加, 反射系数的振幅-频率曲线过渡区增大, 斜率也越小. 在这种情况下, 传统的反射计很难区分截止频率, 诊断电子密度.

从另一个方向切入, 结合 (5) 式和 (6) 式, 可以得到等离子体的等效介电常数 ϵ_r 与反射系数 R 之间的关系:

$$\begin{aligned}
 \frac{1 + R}{1 - R} &= \frac{Z_{in}}{Z_0} \\
 &= \frac{1}{\sqrt{\epsilon_r}} \cdot \frac{1 + j \frac{1}{\sqrt{\epsilon_r}} \tan\left(\frac{\omega}{c} \cdot \sqrt{\epsilon_r} \cdot d\right)}{\frac{1}{\sqrt{\epsilon_r}} + j \tan\left(\frac{\omega}{c} \cdot \sqrt{\epsilon_r} \cdot d\right)} \\
 &= \frac{1 + j \frac{1}{\sqrt{\epsilon_r}} \tan\left(\frac{\omega}{c} \cdot \sqrt{\epsilon_r} \cdot d\right)}{1 + j \sqrt{\epsilon_r} \tan\left(\frac{\omega}{c} \cdot \sqrt{\epsilon_r} \cdot d\right)}. \quad (7)
 \end{aligned}$$

根据方程 (7), 只要测量反射系数 R 和等离子体鞘的厚度 d , 就可以计算出等离子体的有效介电常数的根 $\sqrt{\epsilon_r}$. 但是, 方程 (7) 是一个超越方程, 很难得到解析解. 同时, 等离子体鞘套在真实环境中的厚度难以测量. 实际上, 界面 1 上的菲涅耳反射占总反射的绝大部分, 多重反射和折射可以被忽略. 因此, 该计算模型可以进行简化, 如图 3 所示. 在界面 1 从左向右看, 等离子体可以简单地看作是半无限介质, Z_{in} 可以近似等于 Z_p .

方程 (7) 可以简化为

$$\left(\frac{1 + R}{1 - R}\right)^2 = \frac{1}{\epsilon_r} = \frac{\omega_p^2}{\omega(\omega - j\nu_{en})}. \quad (8)$$

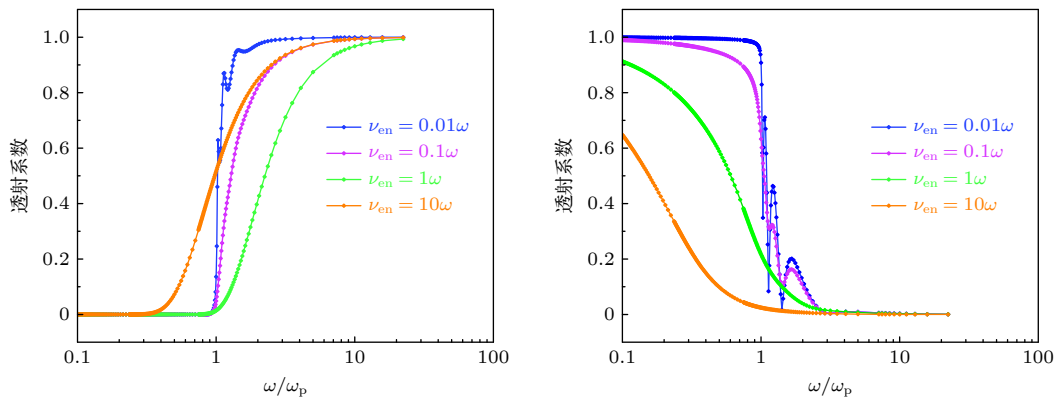


图 2 不同碰撞频率下反射系数和透射系数的幅度-频率曲线

Fig. 2. Amplitude-frequency curve of reflection coefficients and transmission coefficients with different electron-neutral collision frequencies.

方程 (8) 是复数方程. 通过测量反射信号的幅度和相位, 可以得到复反射系数 R , 然后得到等离子体的等效介电常数的根 $\sqrt{\epsilon_r}$, 该值可由方程 (8) 校正. 由此, 根据 (2) 式—(5) 式, 可以得到电子密度 n_e 和碰撞频率 ν_{en} :

$$n_e = \frac{\epsilon_0 m_e \{4\alpha^2 \beta^2 c^4 + [c^2(\alpha^2 - \beta^2) + \omega^2]^2\}}{e^2 [c^2(\alpha^2 - \beta^2) + \omega^2]}, \quad (9a)$$

$$\nu_{en} = \frac{2\alpha\beta\omega c^2}{c^2(\alpha^2 - \beta^2) + \omega^2}. \quad (9b)$$

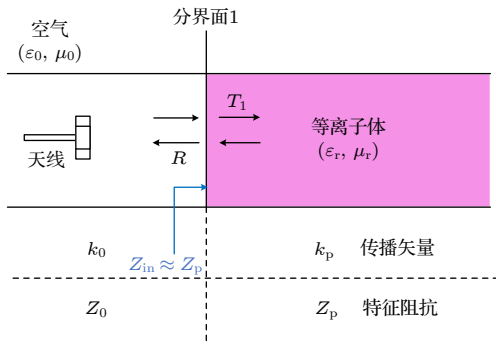


图 3 带有等离子体鞘套的等效传输线简化模型

Fig. 3. Reduced model of equivalent transmission lines with plasma sheath.

2.2 有效频点选择

理论上, 诊断结果可以通过测量任何频率点的反射信号来获得. 但实际上, 该诊断方法的应用范围受到等离子体频率 ω_p 、碰撞频率 ν_{en} 和电磁波频率 ω 等参数相互关系限制. 根据 (9) 式得到电子密度和碰撞频率的诊断结果, 其准确率非常依赖反射系数 R 的分辨率.

当 ω 远远大于 ω_p 时, 大部分波都能通过等离子体, 由于等离子体引起的反射太弱. 反射信号往往被淹没在其强烈的背景噪声中, 信噪比 (SNR) 太小, 难以被检测到; 当 ω 远低于 ω_p 时, 特别是碰撞频率不是很高时, 入射信号几乎被完全反射, 此时等离子体状态 (电子密度、碰撞频率等参数) 的变化并不能导致反射系数的显著改变. 计算结果只能明确等离子体频率大于入射频率, 难以推出可信度较高的反推值.

当 ω 接近 ω_p 时, 幅度-频率曲线的变化率较大. 不同状态的等离子体引起的反射信号易被区分. 如图 4 所示, 在这种情况下, 才可以有效地诊断等离子体参数.

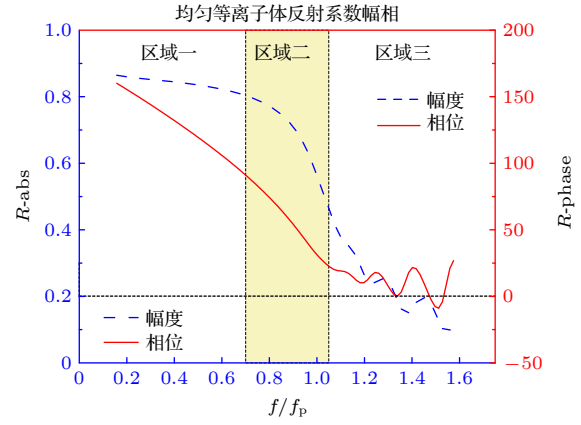


图 4 有效诊断频段选择

Fig. 4. Selection of effective diagnostic frequency band.

所以, 等离子体参数诊断过程中需要尽量选取与等离子体频率接近的扫频频点作为反解频点. 然而在诊断中, 等离子体特征频率又是待测参数, 如何选择有效频点就成为诊断的难点之一. 因此, 在宽带扫频测量数据的基础上又提出了一种基于谐振点的有效频点选择方法. 该方法提高了测量精度, 同时也降低了计算复杂度.

根据方程 (8), 得到

$$\begin{aligned} \left(\frac{1+R}{1-R}\right)^2 &= \frac{1}{\epsilon_r} = \frac{\omega(j\nu_{en} - \omega)}{\omega(j\nu_{en} - \omega) + \omega_p^2} \\ &= \frac{\nu_{en}^2 \omega^2 - \omega^2 \omega_p^2 + \omega^4}{\nu_{en}^2 \omega^2 + (\omega_p^2 - \omega^2)^2} \\ &\quad + j \frac{\omega_p^2 \nu_{en} \omega}{\nu_{en}^2 \omega^2 + (\omega_p^2 - \omega^2)^2}. \end{aligned} \quad (10)$$

方程 (10) 的实部为

$$\alpha(\omega) = \frac{\nu_{en}^2 \omega^2 - \omega^2 \omega_p^2 + \omega^4}{\nu_{en}^2 \omega^2 + (\omega_p^2 - \omega^2)^2}. \quad (11)$$

当 $\omega = \omega_p$ 时, $\alpha(\omega_p)$ 恒等于 1, 与碰撞频率 ν_{en} 的变化无关. 依据模型, 用散射矩阵方法 (SMM) 对该方程进行了不同参数下的数值模拟, 如图 5 所示.

从图 5 可以看到, 无论碰撞频率 ν_{en} 如何变化, 曲线都会穿过同一点, 在这个点等离子体频率 ω_p 等于载波频率. 此点左右会存在两个极点 M 和 N , 因此可以判断等离子体频率 ω_p 必然在 M 点和 N 点之间. 在数据处理的过程中, 极大值点 M 和极小值点 N 易于分辨, 因此, 可以选择点 M 和点 N 之间的频率点作为有效频率点来求解等离子体电子密度 n_e 和碰撞频率 ν_{en} .

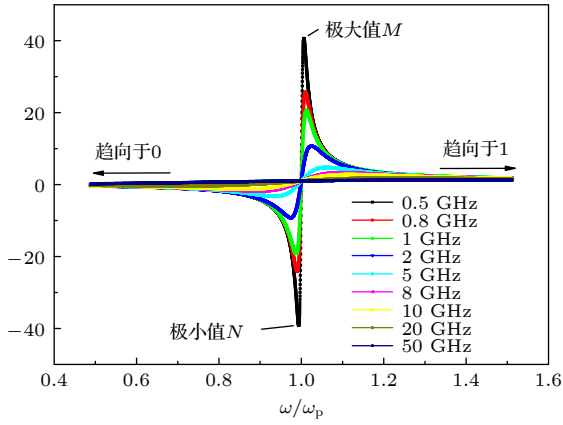


图 5 不同碰撞频率下 $a(\omega)$ 实部曲线

Fig. 5. Curve of real component of $\alpha(\omega)$ with different electron-neutral collision frequencies.

2.3 诊断算法步骤

2.3.1 反射数据获取

反射数据的获取是诊断过程中非常重要的一环, 反射数据的准确与否直接影响着诊断结果的可靠性. 为了确保诊断结果的准确, 需要设计一款合适的天线来实现反射数据的获取.

在要求结构简单及辐射特性好的情况下, 综合考虑天线频带、尺寸、极化和环境适应性等因素的影响, 基于 Vivaldi 天线设计了一种超宽带小型化天线 [23].

Vivaldi 天线是一款线极化天线, 这种天线的优点广泛, 平面结构简单、重量轻、体积小、超宽带阻抗特性好、增益合适、平面结构、方向图稳定、方便集成在微波电路中等, 这些优点使其广泛应用于电磁领域和通信场合.

为了避免诊断装置在配置到飞行器上与飞行器内其他装置产生互相干扰, 我们在天线外添加一个圆腔罩来阻断对诊断方向外的电磁波传播. 同时, 为了防止天线在实验时被等离子喷流烧蚀, 在天

线前端配置了隔热石英盖板. 这就不可避免地对该装置的诊断效果造成了影响, 导致了性能的下降. 为此, 设计了标定算法, 通过后期数据处理时进行标定删除, 分离得到等离子体引起的反射数据.

仿真设计的天线模型如图 6 所示. 该天线工作频带为 2—9 GHz, 在工作频带内的回波损耗 S_{11} 基本大于 8 dB, 具有良好的阻抗匹配特性. 在工作频段设置多个监视器, 方向图也比较稳定, 在宽频带下没有出现明显的恶化等现象, 增益变化也比较平稳. 天线工作频段所对应的能够有效诊断的等离子体电子密度上下限为 $5 \times 10^{10} - 1 \times 10^{12} \text{ cm}^{-3}$.

2.3.2 反射数据标定

在实际的测量中, 反射数据会受到天线、防隔热层、以及空间间隙等引起的干扰. 为了消除这部分的影响, 分别获取天线在无等离子体反射和等离子体全反射时的数据, 对反射数据进行标定, 得到由等离子体引起的反射系数 R 的相位与幅度.

如图 7 所示, 其中 R_a 为天线接收到的等离子体反射电磁波的反射系数, R_m 为天线对空状态下测量得到的 S_{11} 参数, R_s 为天线全反射状态下测量得到的 S_{11} 参数. 利用上述 S 参数对反射系数 R_a 的幅度进行归一化处理, 相位进行标定. abs 表示取 S 参数的幅度, phase 表示取 S 参数的相位, A 为归一化后的反射系数幅度, φ 为重新标定后的反射系数相位, 重新标定完成的反射系数为 R .

2.3.3 有效频点选择

诊断方法的应用范围受到等离子体频率 ω_p 、碰撞频率 ν_{en} 和电磁波频率 ω 等参数相互关系限制, 为了提高诊断结果的分辨率和准确性, 需要在扫频范围内选取能够有效诊断等离子体参数的频点. 详细描述见 2.2 节有效频点选择.

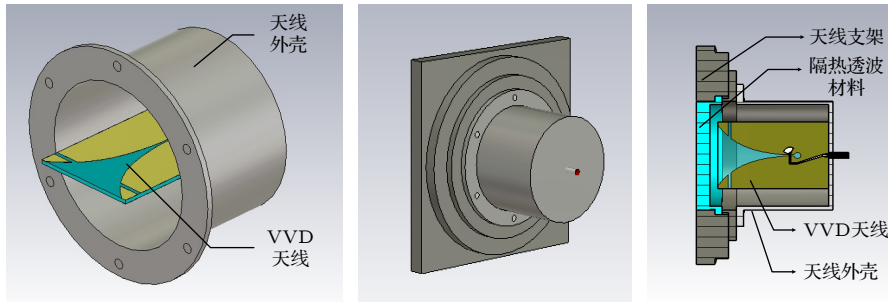


图 6 VVD 天线 CST 模型

Fig. 6. CST model of VVD antenna.

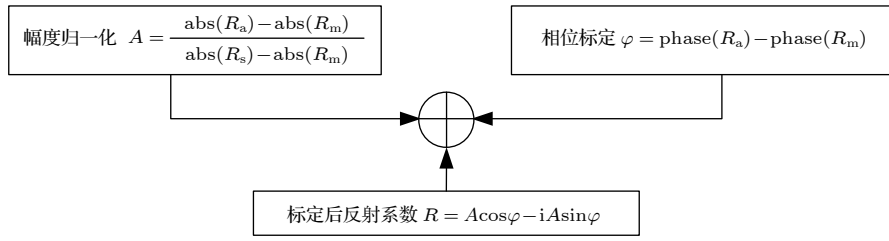


图 7 数据标定流程

Fig. 7. Data calibration process.

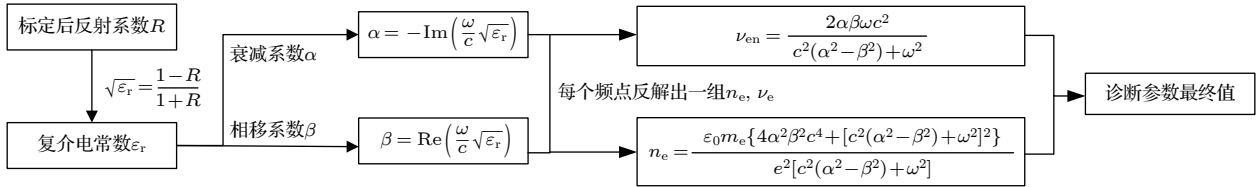


图 8 反解流程

Fig. 8. Reverse solution process.

2.3.4 反解

如图 8 所示, 将反射数据通过标定算法得到反射系数 R , 进而求得复介电常数 $\sqrt{\epsilon_r}$, 再计算求得衰减系数 α 和相移系数 β , 每个频点都可以反推出一组确定的电子密度 n_e 和碰撞频率 ν_{en} . 通过上述有效频点选择方法选取置信度较高的反解频点, 将有效频点的所有数据进行平均, 得到最终的电子密度和碰撞频率反解结果.

型, 如图 9 所示. 为了保证电磁波垂直入射, 天线发射端面对向等离子体模型表面.

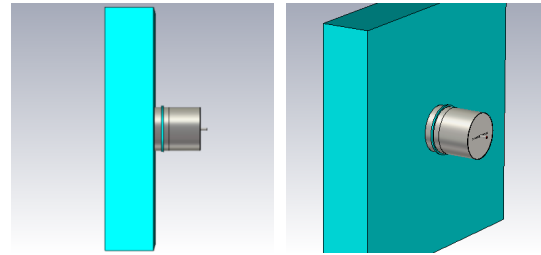


图 9 电磁仿真模型

Fig. 9. Electromagnetic simulation model of plasma.

3 仿真实验

为了对上述诊断算法的有效性和可靠性做进一步的验证, 利用 CST 仿真软件进行了电磁仿真设计与初步仿真实验. 其中包括设计 VVD 超宽带天线和整构建体电磁仿真模型.

3.1 仿真模型

针对等离子体的色散介质模型, 利用 CST 中的 Drude 散射模型来进行设置模拟. 表达式如 (12) 式, 是一种自由电子运动模型. ϵ_r 为等离子体的相对复介电常数, ϵ_0 为真空介电常数, ω_p 为等离子体特征角频率, ν_{en} 为碰撞频率, ω 是入射电磁波角频率.

$$\epsilon_r = \epsilon_0 - \frac{\omega_p^2}{\omega(j\nu_{en} + \omega)}. \quad (12)$$

建立相对于入射波为无限大平面的均匀等离子体模型, 与加腔体的天线共同组成电磁仿真模

3.2 仿真实验与分析

基于 CST 仿真模型, 在不同等离子体参数条件下, 对诊断算法的仿真实验与结果分析.

3.2.1 电子密度

设置碰撞频率为 $\nu_{en} = 1$ GHz, 厚度均为 0.1 m, 探究不同电子密度情况下的诊断. 以电子密度 n_e 为 $3 \times 10^{11} \text{ cm}^{-3}$ 为例.

天线对被测等离子体与天线无反射、全反射时的 S_{11} 幅度如图 10(a) 所示, 可以看出, 在低频段时由于受到等离子体的影响, 天线对等离子体 S_{11} 的幅度增大. S_{11} 经过标定算法处理, 再经过去噪平滑, 得到由等离子体引起的真实反射系数 R , 如图 10(b) 所示. 等离子体对低频段的电磁波产生了较大影响, 随着扫频频率的升高, 反射波幅度逐渐减小, 相位偏移也逐渐减小. 最终反解的结果如

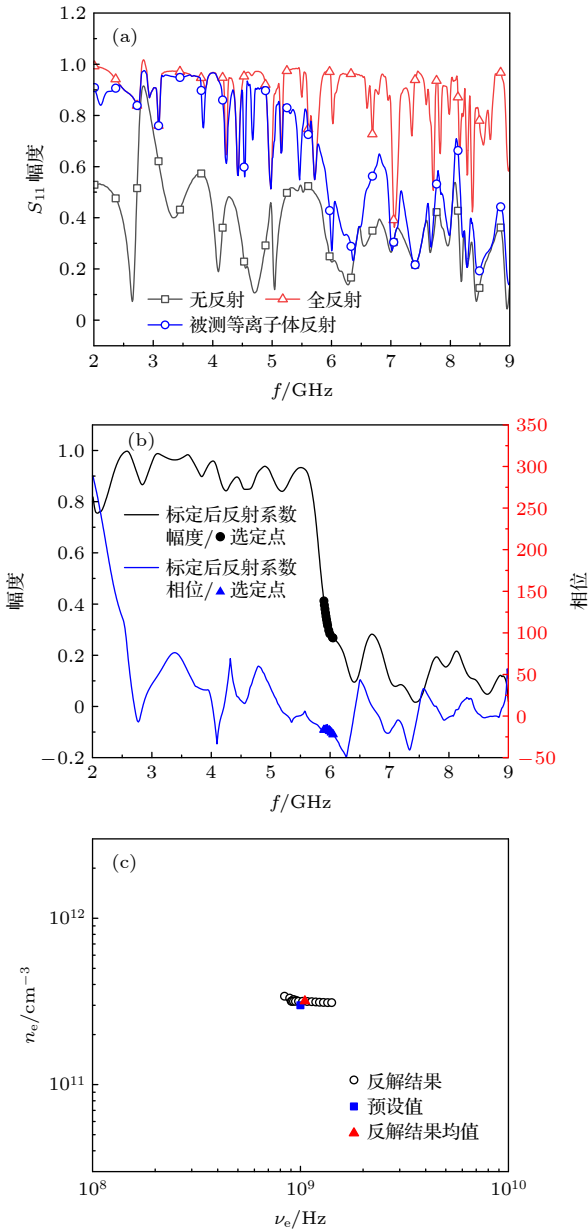


图 10 电子密度 $n_e = 3 \times 10^{11} \text{cm}^{-3}$ (a) 反射系数幅度; (b) 有效频点选择; (c) 反解结果

Fig. 10. Electron density $n_e = 3 \times 10^{11} \text{cm}^{-3}$: (a) Magnitude of reflection coefficient; (b) selection of effective frequency points; (c) inverse solution result.

图 10(c) 所示, 诊断结果与预设值基本对应. 仿真结果整理如表 1 所列.

表 1 中, 在等离子体电子密度 $n_e = 1 \times 10^{10} \text{cm}^{-3}$ 时, 无论是幅度还是相位, 天线对等离子体的 S_{11} 几乎与天线对空时重合, 说明此时整个扫频范围内的电磁波均未受到等离子体影响, 等离子体参数未在诊断范围之内, 无法诊断出具体数值.

等离子体电子密度 $n_e = 1 \times 10^{11} \text{cm}^{-3}$ 时, 反解结果误差为 28.3%. 这是由于所设计的超宽带天线在 3 GHz 附近反射特性不太理想, 该频点 S_{11} 反射参数相对较大, 而电子密度为 $1 \times 10^{11} \text{cm}^{-3}$ 的等离子体特征频率为 2.84 GHz, 恰好落在这一频点附近. 等离子体反射数据与无反射数据差异相对很小, 这就使得这一频点的反解结果出现了一定的误差.

综上可以得到如下结论: 扫频范围决定了能够有效诊断出的参数上下限. 随着电子密度的升高, 反射系数的扫频曲线, 包括幅度的明显下降段和相位的趋近零的频段均向高频率方向移动, 与 2.1 节中理论推导规律符合. 在诊断范围内的各个电子密度值 n_e 基本能够获得比较精确的诊断结果. 电子密度为 $1 \times 10^{11} \text{cm}^{-3}$ 时, 误差为 28.3%, 其余最大误差不超过 10%; 碰撞频率值 ν_{en} 最大误差不超过 15%.

3.2.2 碰撞频率

设置碰撞频率为 $\nu_{en} = 3 \times 10^{11} \text{cm}^{-3}$, 对应的截止频率为 6.35 GHz, 厚度均为 0.1 m, 探究不同碰撞频率情况下的诊断. 设置了 3 种不同碰撞频率的情况, ν_{en} 分别为 0.1, 1, 5 GHz. 以碰撞频率 1 GHz 为例, 如图 11 所示.

天线对被测等离子体与天线无反射、全反射时的 S_{11} 幅度如图 11(a) 所示, 可以看出, 在低频段

表 1 诊断结果

Table 1. Diagnostic results.

仿真设置值		诊断结果 n_e / cm^{-3}	诊断误差/%	诊断结果 ν_{en} / GHz	诊断误差/%
n_e / cm^{-3}	ν_{en} / GHz				
1×10^{10}		$< 5 \times 10^{10}$			
1×10^{11}		1.283×10^{11}	28.3	0.931	-6.9
3×10^{11}	1	3.181×10^{11}	6.03	1.050	5.0
5×10^{11}		5.274×10^{11}	5.48	0.896	-10.4
7×10^{11}		7.435×10^{11}	6.21	0.930	-7.0
1×10^{12}		1.026×10^{12}	2.60	0.954	-4.6

时随着等离子体碰撞频率的增加, 天线对等离子体 S_{11} 的幅度减小. S_{11} 经过标定算法处理, 再经过

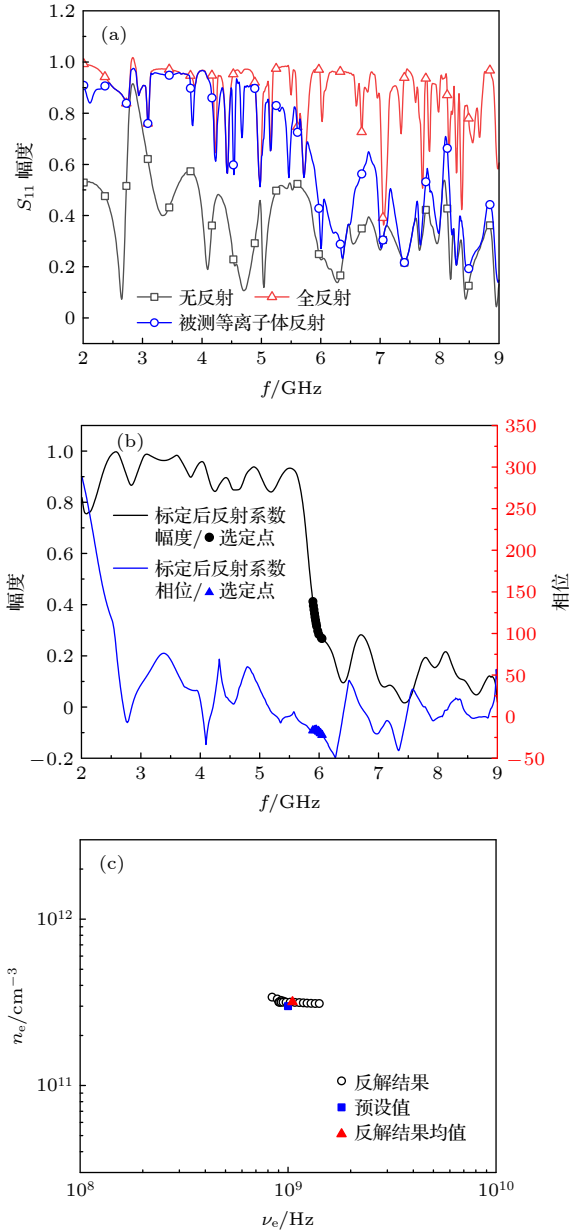


图 11 碰撞频率 $\nu_e = 1 \text{ GHz}$ (a) 反射系数幅度; (b) 有效频点选择; (c) 反解结果

Fig. 11. Collision frequency $\nu_e = 0.1 \text{ GHz}$: (a) Magnitude of reflection coefficient; (b) selection of effective frequency points; (c) inverse solution result.

去噪平滑, 得到由等离子体引起的真实反射系数 R , 如图 11(b) 所示. 当入射波频率小于等离子体截止频率时, 反射系数幅度随碰撞频率的增大稍有减小; 入射波频率高于等离子体截止频率后, 反射系数幅度明显减小并且与碰撞频率关联较小. 最终反解的结果如图 11(c) 所示, 仿真结果整理如表 2 所列.

扫频曲线表明, 反射波仍然在截止频率附近发生明显减小, 说明电磁波的传播与截止仍然主要由电子密度决定. 三种情况下相移扫频曲线基本重合, 说明相移与碰撞频率无关. 该仿真结果与 2.4 节中碰撞频率对电磁波的传播影响的理论推导一致. 在诊断范围内的各个电子密度值 n_e 均能够获得比较精确的诊断结果, 最大误差不超过 12%; 碰撞频率值 ν_{en} , 最大误差不超过 30%.

4 实验和结果分析

4.1 等离子体的产生

采用一种等离子体发生装置, 用以验证等离子体的微波传输理论. 等离子体源由感应耦合等离子体 (ICP) 产生, 电源功率在 50—500 kW 之间, 产生的等离子体通过直径为 150 mm 的圆形开口喷向真空室内部, 因此等离子体射流的直径也约为 150 mm. 真空暗室的直径为 7000 mm, 长度为 3000 mm. 用于等离子体传输实验的装置也被放置在真空暗室中. 等离子体通过扩散器抽离并冷却, 以减少真空室内等离子体流的回流和涡流.

4.2 宽带反射信号的采集

本文设计了一款电阻加载微型双层 Vivaldi 天线 (VVD 天线) 用于等离子体反射诊断, 如图 12(a) 和图 12(b) 所示, 该天线结构简单, 重量轻, 具有超宽带阻抗特性的优点. 从测量结果来看, 该 VVD 天线实现了 2.0—16.3 GHz 的 8:1 的宽阻抗带宽, 回波损耗超过 10 dB. 此外, 天线的测量增益为 4—11 dBi, 辐射方向图在整个频带上非常稳定.

表 2 诊断结果

Table 2. Diagnostic results.

仿真设置值		诊断结果 $n_e/10^{11} \text{ cm}^{-3}$	诊断误差/%	诊断结果 ν_{en}/GHz	诊断误差/%
n_e/cm^{-3}	ν_{en}/GHz				
	0.1	3.355	11.8	0.0835	16.4
3×10^{11}	1.0	3.181	6.03	1.0500	5.0
	5.0	2.887	3.77	3.6060	27.8

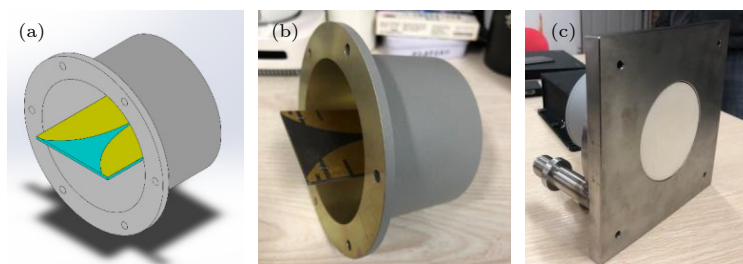


图 12 电阻负载式小型双层 Vivaldi 天线 (a) CST 仿真模型; (b) 待用天线的照片; (c) 带耐热透波陶瓷材料的天线照片
 Fig. 12. The resistance loaded miniaturized dual-Layer Vivaldi antenna: (a) CST simulation model; (b) photograph of proposed antenna; (c) photograph of proposed antenna with heat resistant wave-transparent composites.

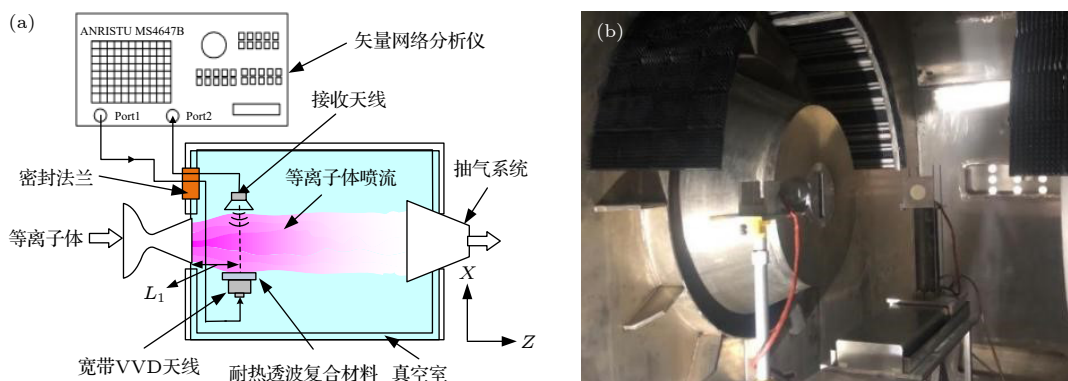


图 13 (a) 宽带微波反射等离子体诊断实验配置俯视图; (b) 微波反射等离子体诊断装置的安装图
 Fig. 13. (a) Top view of broadband microwave reflectometry plasma diagnostic system; (b) erection diagram of broadband microwave reflectometry plasmadiagnostic system in vacuum chamber.

等离子体测量要求天线靠近高温等离子体, 因此必须考虑天线的隔热和散热. 我们设计了具有水冷功能的天线支架, 天线表面覆盖一层由高纯石英纤维正交三轴织物组成的高温透波材料, 如图 12(c) 所示.

反射系数 R 由矢量网络分析仪 (VNA: Anritsu MS4647B) 测量 (该分析仪在 10 MHz—70 GHz 的频率带宽下工作). 矢量网络分析仪置于真空室外部, 微波信号由同轴电缆通过密封法兰传输至真空室外部的矢量网络分析仪.

利用该系统实现了 2—9 GHz 扫频反射测量验证实验. 同时, 采用微波干涉法诊断电子密度, 传输频率设置为 9.0 GHz. 实验布置示意图如图 13(a) 所示.

宽带微波反射等离子体诊断系统在真空室内的组装如图 13(b) 所示. 真空室的直径和厚度分别为 10 m 和 3 m. 腔室的内表面覆盖有吸收材料. 暗室中没有其他发射源, 因此天线几乎不受散射信号的影响. 测量的天线包括两个, 其中一个进行等离子体的反射测量, 也可作为发射使用; 另一个天

线安装在另一侧的支架上, 做接收使用. 利用两个天线的发射和接收, 可通过透射法对等离子体的电子密度进行诊断, 从而为反射实验提供对照.

4.3 实验验证

在实验室的地面等离子体发生装置上就该宽带微波反射诊断方法在实际情况下的有效性进行验证. 分别就不同状态下等离子体的诊断进行测试: 通过改变不同的输入电压而改变输入功率, 从而提供不同状态的等离子体. 共计进行了 6 次实验, 包括 1 次无等离子体实验和 5 次不同状态等离子体的实验: 状态 1, 不产生等离子体; 状态 2, 输入功率为 120 kW; 状态 3, 输入功率为 154 kW; 状态 4, 输入功率为 180 kW; 状态 5, 输入功率为 208 kW; 状态 6, 输入功率为 252 kW.

由于实验频率比较低, 故采用在输入气体为空气的状态下进行. 每次实验均是先用氩气点火, 然后分别切换到对应输入电压的状态下进行反射测量. 反射天线在距离中心 45 mm 的地方测量反射信息. 输入空气为 15 g/s, 随着输入功率的增加,

等离子体的尺寸逐渐增大, 亮度变得更亮, 电子密度逐渐增加. 随着输入功率的增加, 也即等离子体电子密度的增加, 得到实验结果如图 14 所示.

实验结果如图 14 所示, 分别为不同输入功率 (不同等离子体电子密度) 下, 时间、频率和反射系数幅度的图像. 如图 14(a) 所示, 输入功率为 0 时在工作区内全频段无明显反射. 输入功率为 120 kW 时, 工作区低频段出现较为明显的反射, 如图 14(b) 所示, 说明该输入功率下已经产生等离子体, 能够对较低频率的电磁波产生明显反射. 随着输入功率的增加, 发生明显反射的频段逐步扩大. 输入功率为 252 kW 时, 在工作区内全频段均有明显反射, 如图 14(f) 所示, 说明该输入功率下产生的等离子体能够使 2—9 GHz 全频段的电磁波发生反射. 以

状态 3 为例, 结果如图 15 所示.

对反射数据进行处理, 得到反射系数幅度如图 15(a) 所示. 根据前文所述的有效频率点的选取方法, 选取 $a(\omega)$ 曲线的谐振点 Y 左右的两个极点 (如图 15(b) 所示) M 和 N 点之间的频率点作为有效频率点. 将有效频点数据代入反解算法中, 反解得到等离子体的电子密度与碰撞频率, 并将结果作图, 结果如图 15(c) 所示, 其中黑色点为所选有效频点反解得到的结果, 红色点为反解结果的平均值. 诊断结果整理如表 3 所列.

基于上述诊断算法, 计算了不同状态下的电子密度 n_e 和碰撞频率 ν_{en} , 结果如表 2 所列. 实验中有 5 种等离子体状态, 在每种状态重复测量了超过 10 组数据. 通过诊断算法对每组数据进行诊断,

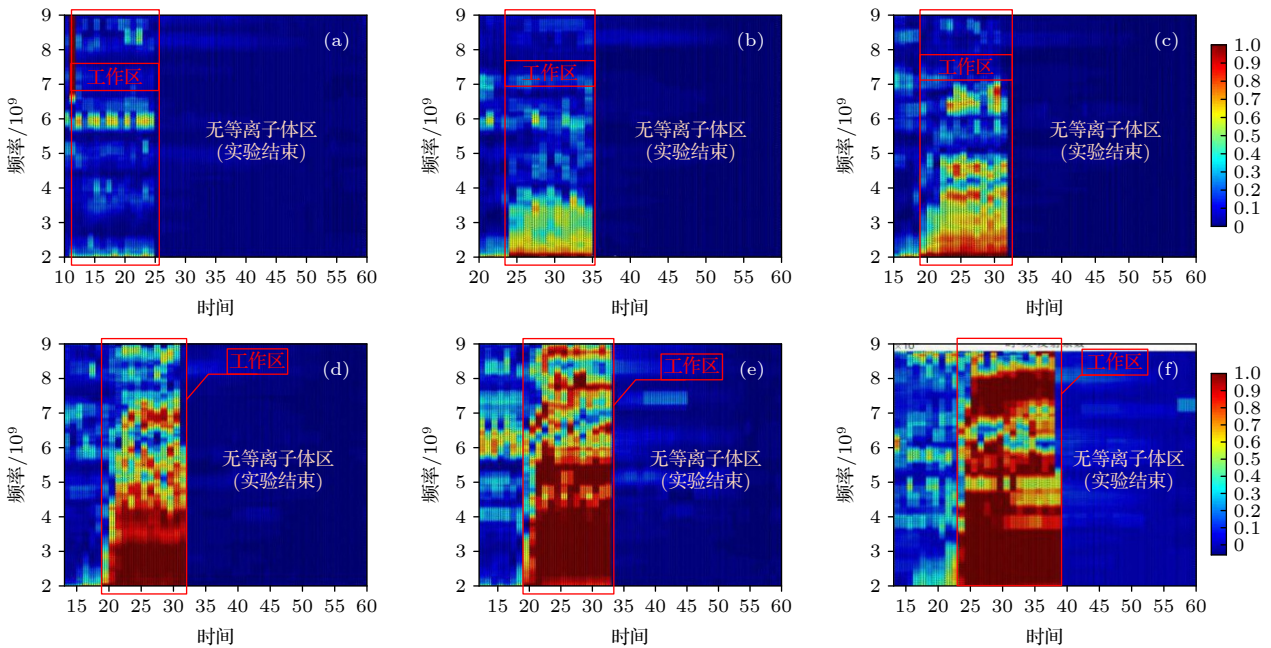


图 14 不同输入功率下时-频-反射系数图 (a) 状态 1; (b) 状态 2; (c) 状态 3; (d) 状态 4; (e) 状态 5; (f) 状态 6

Fig. 14. Images of time, frequency and reflection coefficient amplitude with different input power: (a) Status 1; (b) Status 2; (c) Status 3; (d) Status 4; (e) Status 5; (f) Status 6.

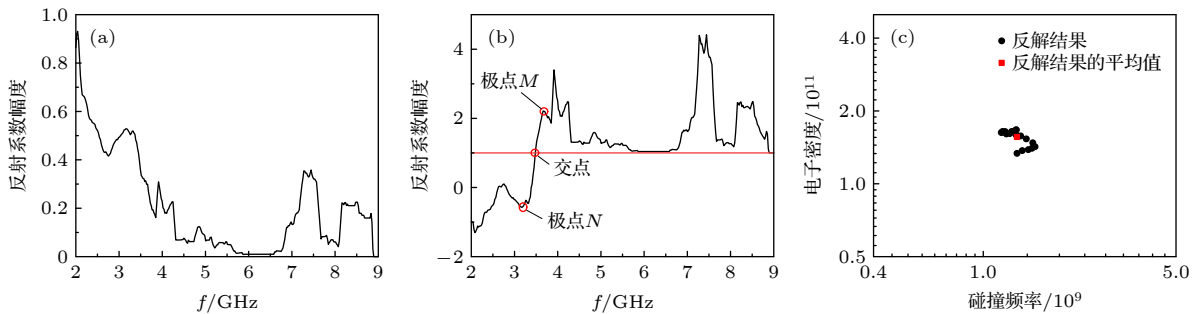


图 15 状态 3 (a) 反射系数幅度; (b) 有效频点选择; (c) 反解结果

Fig. 15. Status 3: (a) Magnitude of reflection coefficient; (b) selection of effective frequency points; (c) inverse solution result.

表 3 不同输入功率下 (不同等离子体状态) 反射计诊断结果
Table 3. Diagnostic results of reflectometer in different input power (different plasma states).

状态	功率/kW	电压/kV	电流/A	反射计诊断结果/(10^{11} cm^{-3})	碰撞频率/GHz	透射法诊断结果/(10^{11} cm^{-3})
状态2	120	6.0	20	0.7082	2.198	1.404
状态3	154	7.0	22	1.5620	1.309	1.982
状态4	180	7.5	24	2.1000	0.881	3.442
状态5	208	8.0	26	5.5150	0.238	7.958
状态6	252	9.0	28	>10.0000	—	9.358

取所有结果的平均值作为每个状态的诊断结果. 随着输入功率的增加 (也即电子密度的升高), 反射系数的扫频曲线 $a(\omega)$ 曲线的谐振点 Y 左右的两个极点均向高频方向移动, 与理论推导规律符合. 当输入功率为 252 kW 时, 等离子体电子密度足以使电磁波完全反射, 在规定的频带内无法识别不变点 Y , 测量的电子密度范围受到测量带宽的限制. 因此在状态 4 中, 电子密度大于 $1 \times 10^{12} \text{ cm}^{-3}$. 表 2 还给出了通过微波干扰获得的比较干涉诊断结果, 两种诊断结果的差别较小. 实验结果表明, 该诊断方法是有效的.

5 结 论

设计了一种用于再入等离子体鞘套诊断的宽带微波反射方法, 利用微波反射数据与等离子体参数之间的关系, 通过宽带扫频反射电磁波对等离子体主要参数进行诊断. 该装置可以同时测量电子密度和碰撞频率, 且弥补了传统反射计无法诊断高碰撞频率等离子体的不足. 通过仿真分析和诊断实验验证了诊断算法的适用性和准确性, 能够准确诊断电子密度与碰撞频率.

该方法能够满足多种飞行条件下再入飞行器或高超声速飞行器的等离子体鞘套实时诊断, 积累大量的第一手实测数据, 全面、客观、准确地认知等离子体鞘套特性, 具有较大的科学价值. 也可用于自适应测控系统环境的参数输入环节. 未来飞行器弹载信息系统 (包含测控系统、弹载导引头等) 将可以根据环境变化实时调整, 自适应环境变化进行参数修正, 实现稳定高效的信息传输与信息探测. 该方法可以为自适应测控体制提供输入参数, 成为自适应测控系统的一部分. 另外, 该方法还可用于地面等离子喷流环境参数实时测量, 在不改变喷流形态的情况下实时监控等离子喷流参数变化.

参考文献

- [1] Hartunian R, Stewart G, Curtiss T, Ferguson S, Seibold R 2007 *AIAA Atmospheric Flight Mechanics Conference and Exhibit* Hilton Head, South Carolina, USA, August 20–23, 2007, AIAA 2007–6633
- [2] Rybak J, Churchill R J 1971 *IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst.* **AES-7**(5) 879
- [3] Xie K, Yang M, Bai B W, Li X P, Zhou H, Guo L X 2016 *J. Appl. Phys.* **119** 023301
- [4] Yang M 2014 *Ph. D. Dissertation* (Xi'an: Xidian University) (in Chinese) [杨敏 2014 博士学位论文 (西安: 西安电子科技大学)]
- [5] Akey N D, Schroeder L C 1973 *J. Spacecr. Rockets* **10** 170
- [6] Boris D R, Fernsler R F, Walton S G 2015 *Plasma Sources Sci. Technol.* **24** 025032
- [7] Saifutdinov A I, Sysoev S S 2022 *Instrum. Exp. Tech.* **65** 75
- [8] Zhao G L 2010 *Ph. D. Dissertation* (Dalian: Dalian University of Technology) (in Chinese) [赵国利 2010 博士学位论文 (大连: 大连理工大学)]
- [9] Chen Z S, Lin Z D, Shi J M, Ma F L 2015 *Chinese Journal of Vacuum Science and Technology* **35** 646 (in Chinese) [陈宗胜, 林志丹, 时家明, 马丽芳 2015 真空科学与技术学报 **35** 646]
- [10] Berchtikou A, Lavoie J, Poenariu V 2011 *IEEE Trans. Dielectr. Electr. Insul.* **18** 24
- [11] Shi J, Guo Y C, Xiao S L, Qian F, Yang Z H 2017 *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res.* **A866** 72
- [12] Li B 2010 *Ph. D. Dissertation* (Hefei: University of Science and Technology of China) (in Chinese) [李斌 2010 博士论文 (合肥: 中国科学技术大学)]
- [13] Mo S Q 2016 *Ph. D. Dissertation* (Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China) (in Chinese) [莫少奇 2016 博士论文 (成都: 电子科技大学)]
- [14] Yuan Z C, Shi J M 2005 *Nuclear Fusion and Plasma Physics* **25** 78 (in Chinese) [袁忠才, 时家明 2005 核聚变与等离子体物理 **25** 78]
- [15] Wang J Y, Shi J M, Yuan Z C 2007 *High Power Laser and Particle Beams* **2007** 621 (in Chinese) [王甲寅, 时家明, 袁忠才 2007 强激光与粒子束 **2007** 621]
- [16] Liu Y M, Wu S J, Su J H, Xu J Q, Wang K X 2019 *Journal of Xi'an Technological University* **39** 521 (in Chinese) [刘荣明, 吴慎将, 苏俊宏, 徐均琪, 王可瑄 2019 西安工业大学学报 **39** 521]
- [17] Ermak G P, Varavin A V, Vasilev A S, Fateev A V, Varavin N V, Zacek V, Zajac J, Zorenko A V 2016 *Telecommun. Radio Eng.* **76** 903
- [18] Janson S 1994 *25th Plasmadynamics & Lasers Conference* Colorado Springs, USA, June 20–23, 1994 ppAIAA-94-2424
- [19] Ohler S G, Gilchrist B E, Gallimore A D 1995 *IEEE Trans. Plasma Sci.* **23** 428
- [20] Anabitarte E, Bustamante E G, Calderón M A G, Senties J

M 1987 *J. Infrared MillimeterWaves* **8** 733[21] Li J G 2016 *Physics* **45** 88 (in Chinese) [李建刚 2016 物理 **45** 88][22] Ginzburg (translated by Qian S X) 1978 *Propagation of electromagnetic wave in plasma* (Beijing: Science Press)

pp5–9, pp22–30, pp85–87 (in Chinese) [金兹堡 著 (钱善培 译) 1978 电磁波在等离子体中的传播 (北京: 科学出版社) 第5–9页, 第22–30页, 第85–87页]

[23] Zhao C W, Li X P, Yang M, Sun C 2020 *Microwave Opt. Technol. Lett.* **63** 205

Method of diagnosing broadband microwave reflection of plasma sheath*

Yang Min Wang Jia-Ming[†] Qi Kai-Xuan Li Xiao-Ping Xie Kai
Zhang Qiong-Jie Liu Hao-Yan Dong Peng

(Key Laboratory of Information and Structure Efficiency in Extreme Environment, the Ministry of Education of China, School of Space Science and Technology, Xidian University, Xi'an 710071, China)

(Received 14 June 2022; revised manuscript received 22 July 2022)

Abstract

During the re-entry process of the aircraft, a layer of plasma sheath wrapping its surface will be generated, which will lead the communication quality to deteriorate and even interrupt, resulting in the phenomenon of “radio blackout”. The “radio blackout” problem has plagued the aerospace industry for many years. One of the very important reasons is the lack of awareness of the communication transmission environment caused by the limitations of plasma sheath measurements. Therefore, the realization of in-situ measurement of sheath parameters is the key to the research of the “radio blackout” problem of hypersonic vehicles.

In this work, a broadband microwave reflection method is presented and developed for diagnosing the reentry plasma sheath. The relationship between broadband microwave reflection data and plasma parameters is derived theoretically, and effective diagnostic frequency points are selected. Then, the plasma parameters are obtained by inversely using the reflection data of the selected effective frequency points to realize the simultaneous diagnosis and measurement of electron density and collision frequency.

This method makes up for the deficiency that the traditional reflectometer cannot diagnose high collision frequency plasma, and it can diagnose the parameter of the plasma sheath of the hypersonic vehicle in a complex environment.

A simulation model and an experimental platform are established, and the simulation analysis and ground experiment are carried out to verify the method. The electron density of the plasma is diagnosed by transmission diagnostics to provide a control for reflection experiments. The experimental results show that the difference between the two diagnostic results is small, which verifies the effectiveness of the method.

The method can realize the real-time diagnosis of plasma sheaths of re-entry vehicles or hypersonic vehicles under various flight conditions, and accumulate a large number of first-hand measurement data, which is of great scientific value in recognizing the characteristics of plasma sheaths comprehensively, objectively and accurately. It can also be used for the parameter input link of the adaptive measurement and control system environment. In addition, this method can also be used for real-time measurement of environment parameters of ground plasma jet and real-time monitoring of changes of plasma jet parameters without changing the jet shape.

Keywords: plasma sheath, resonance point, parameter diagnosis, microwave reflection method

PACS: 52.40.Db, 52.55.Fa, 52.65.–y, 52.70.–m

DOI: 10.7498/aps.71.20221179

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant No. 62071355).

[†] Corresponding author. E-mail: jmwang_6@stu.xidian.edu.cn



等离子体鞘套宽带微波反射诊断方法

杨敏 王佳明 齐凯旋 李小平 谢楷 张琼杰 刘浩岩 董鹏

Method of diagnosing broadband microwave reflection of plasma sheath

Yang Min Wang Jia-Ming Qi Kai-Xuan Li Xiao-Ping Xie Kai Zhang Qiong-Jie Liu Hao-Yan Dong Peng

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 71, 235201 (2022) DOI: 10.7498/aps.71.20221179

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.71.20221179>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

静态强磁场对临近空间飞行器中天线辐射性能的影响

Influence of static strong magnetic field on antenna radiation in hypersonic vehicle

物理学报. 2022, 71(8): 085202 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20212044>

湍流等离子体鞘套中高斯光束的传播特性分析

Analysis of propagation characteristics of Gaussian beams in turbulent plasma sheaths

物理学报. 2019, 68(9): 094201 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20182169>

电子和负离子的反射运动对碰撞电负性磁鞘的影响

Effects of reflection of electrons and negative ions on magnetized electronegative and collisional plasma sheath

物理学报. 2020, 69(2): 025201 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20191307>

具有非广延分布电子的碰撞等离子体磁鞘的结构

Structure of collisional magnetized plasma sheath with non-extensive distribution of electrons

物理学报. 2021, 70(1): 015201 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20200794>

等离子体中X射线透过率分析及潜在通信应用研究

X-ray transmission characteristics and potential communication application in plasma region

物理学报. 2019, 68(4): 040401 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20181973>

等离子体风洞中释放二氧化碳降低电子密度

Electron density depletion by releasing carbon dioxide in plasma wind tunnel

物理学报. 2022, 71(14): 145202 <https://doi.org/10.7498/aps.71.20212353>