

文章编号: 1671-7449(2026)01-0105-07

J. Test Measur. Technol., 2026, 40(1): 105-111.

高速再入飞行器等离子体实时诊断技术

邱长泉^{1*}, 袁延荣¹, 刘宇², 张晋¹, 崔同锴¹

(1. 中国运载火箭技术研究院 空间物理重点实验室, 北京 100076;

2. 中国科学技术大学 地球和空间科学学院, 安徽 合肥 230026)

摘要: 高速飞行器再入大气层过程中, 激波压缩与黏性滞止效应导致激波层内气体温度急剧升高, 形成等离子体鞘套, 进而引发“通信黑障”现象。解决该问题的首要研究基础在于实现等离子体参数的精确诊断, 然而现有诊断技术难以同时满足 1 600 °C 高温环境与动态实时测量的工程需求。提出一种与飞行器外表面共形设计的双平装探针诊断系统, 该系统通过耐高温电极、壳体、绝缘基座及高温密封胶的材料优化, 结合小型化、低功耗、高精度实时诊断装置的设计, 可适应飞行器载荷安装约束, 实现 $10^9 \sim 10^{13} \text{ cm}^{-3}$ 范围内电子密度的实时测量。电弧风洞试验表明, 该探针系统与传统静电探针在相同试验条件下的诊断结果量级一致, 且具备对流场无干扰、无热烧蚀的特性。本研究为高速再入飞行器等离子体参数实时诊断提供了一种有效的工程解决方案, 对黑障机理研究及通信优化具有重要的工程应用价值。

关键词: 等离子体; 实时诊断; 探针; 再入飞行器

中图分类号: V11; TP212

文献标识码: A

DOI: 10.62756/csjs.1671-7449.2026034

引用格式: 邱长泉, 袁延荣, 刘宇, 等. 高速再入飞行器等离子体实时诊断技术[J]. 测试技术学报, 2026, 40(1): 105-111.

QIU Changquan, YUAN Yanrong, LIU Yu, et al. Real-time plasma diagnostics for high-speed reentry vehicles[J]. Journal of Test and Measurement Technology, 2026, 40(1): 105-111.

Real-Time Plasma Diagnostics for High-Speed Reentry Vehicles

QIU Changquan^{1*}, YUAN Yanrong¹, LIU Yu², ZHANG Jin¹, CUI Tongkai¹

(1. Science and Technology on Space Physics Laboratory, China Academy of Launch Vehicle Technology, Beijing 100076, China;

2. School of Earth and Space Sciences, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China)

Abstract: During the reentry of high-speed vehicles into the atmosphere, shock wave compression and viscous stagnation effects cause a sharp temperature rise in the shock layer, leading to the formation of a plasma sheath and consequently triggering the “communication blackout” phenomenon. The fundamental research basis for addressing this issue lies in achieving accurate diagnosis of plasma parameters. However, the existing diagnostic techniques is hard to meet the engineering requirements of a 1 600 °C high-temperature environment and dynamic real-time measurements simultaneously. Therefore, a dual flush-mounted probe diagnostic system with conformal design on the vehicle's outer surface proposed. Through material optimization of high-temperature-resistant electrodes, housing, insulating base, and high-temperature sealant, combined with the

【收稿日期】2025-05-22

【基金项目】国家自然科学基金资助项目(92271119)

*【通信作者】邱长泉(1984—), 男, 研究员, 博士, 主要从事飞行器测控与通信系统、航电系统及自动测试系统集成技术等研究。E-mail: qcq.2000@163.com。

design of a miniaturized, low-power, high-precision real-time diagnostic device, the system can adapt to payload installation constraints while enabling real-time electron density measurements within the range of $10^9 \sim 10^{13} \text{ cm}^{-3}$. Arc-heated wind tunnel tests demonstrate that the diagnostic results of this probe system are consistent in order of magnitude with those of conventional electrostatic probes under identical test conditions, while exhibiting no flow-field interference or thermal ablation effects. This research provides an effective engineering solution for real-time plasma parameter diagnosis in high-speed reentry vehicles, offering significant practical value for blackout mechanism studies and communication optimization.

Key words: plasma; real-time diagnostics; probe; reentry vehicle

0 引言

空间高速飞行器再入大气层过程中, 激波强烈的压缩作用和黏性滞止效应导致激波层内气体温度急剧升高, 引发空气分子离解、复合、置换和电离等复杂化学反应, 形成由自由电子、离子及中性粒子(原子、分子)组成的等离子体鞘套。电磁波穿越等离子体鞘套时, 将经历显著的吸收、散射和反射效应, 导致信号幅值衰减、相位畸变, 甚至通信中断, 此现象称为“通信黑障”^[1-2]。根据NASA统计, 飞行器再入阶段因黑障导致的通信中断持续时间可达240~300 s, 严重制约遥测数据传输、外测信号应答、导航定位及安全控制等关键功能实现^[3]。例如, 2014年欧洲IXV再入验证飞行器在通信黑障期间丢失了约82%的遥测数据。

从20世纪60年代开始, 已提出数十种克服通信黑障的方法, 主要归纳为五类^[4-10]: 1) 提升通信频率与功率法: 将通信频段从S、C提升至Ka、Ku甚至Q、V频段, 如NASA猎户座飞船采用26.5~40 GHz频段; 2) 电子密度调控法: 减小天线窗附近电子密度, 包括亲电子物质注入、磁窗法、时变磁场法、主动冷却法及二氧化碳法等, 如MIT Lincoln实验室通过亲电子物质注入实现了电子密度降低达60%; 3) 气动外形与弹道优化法: 改进飞行器气动设计或优化弹道以降低流场电子密度, 如气动成形技术; 4) 新型通信技术: 如太赫兹通信、激光通信等; 5) 工程补救措施: 利用中继卫星, 遥测延迟波道或慢记快发技术, 以及存储器回收等方式尽可能获取数据。尽管上述方法各具特点, 但因应用场景差异、工程可实现性、环境适应性及成本等多方面限制, 针对高速再入飞行器的通信黑障问题尚未形成普遍且有效的解决方案。

黑障研究的基础在于获取有效的等离子体参数。等离子体诊断方法主要分为浸入式和非浸入式两类。

浸入式诊断以静电探针为代表^[11], 通过探针测量等离子体伏安特性曲线进而计算电子温度、密度、空间电位等参数, 具有结构简单、测量范围宽、空间分辨率高等优点, 广泛应用于地面实验, 但其因烧蚀问题不适用于长时气动加热环境中。非浸入式诊断包括微波诊断和光学诊断等^[12-13]。微波诊断利用电磁波与等离子体相互作用的幅度和相位变化反演近似均匀等离子体的电子密度等参数, 其空间分辨率受限于发射天线波束宽度。光学诊断法则基于光的折射与辐射特性测量等离子体参数, 涵盖激光干涉诊断、光谱诊断(如X射线、真空紫外光谱、紫外可见光谱诊断)等^[13]。此类方法仪器设备复杂、体积庞大、功耗高, 难以满足再入飞行器对空间、重量及能量管理等约束, 主要局限于地面实验, 在飞行试验中鲜有应用。

本文针对高速再入飞行器等离子体诊断需求, 提出一种小型化、低功耗、高精度、强实时且与飞行器外表面共形设计的双平装探针诊断系统, 旨在实现 $10^9 \sim 10^{13} \text{ cm}^{-3}$ 范围内电子密度的实时测量, 并通过电弧风洞试验验证其功能与性能。

1 基本原理

1.1 基本假设与边界条件

双平装探针系统基于朗缪尔探针理论, 结合双探针差分测量与表面共形设计, 通过其伏安特性曲线获取等离子体电子温度、密度及空间电位等参数, 实现对再入飞行器表面等离子体参数的实时诊断。其理论模型建立于如下假设^[14]:

1) 等离子体特性满足: 稀薄、均匀无限大且呈准中性, 即电子密度 n_e 近似等于离子密度 n_i ; 空间尺度远大于德拜长度($L \gg \lambda_D$); 鞘层以外等离子体基本不受探针扰动; 电子与离子速度分布服从麦克斯韦分布。

2) 探针边界条件满足: 鞘层厚度远小于探针

特征尺寸; 探针表面完全吸收电子和离子, 次级电子发射系数小于 0.1; 无显著表面化学反应。

1.2 诊断原理

图 1 为双探针诊断系统原理图。两个表面积相同的电极构成双探针, 偏置电压施加于两个探针之间。电压激励源在两探针间施加扫描电压 V_D , 通过电流监测装置测量回路电流 I_D 随 V_D 的变化, 获取 I - V 特性曲线, 进而计算电子温度和电子密度。

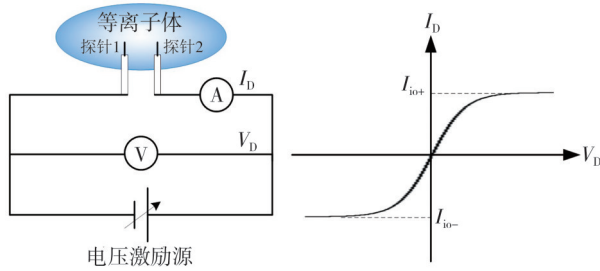


图 1 双探针诊断系统原理图

Fig. 1 Schematic diagram of double probe diagnostic system

电子温度 T_e 通过 I - V 特性曲线 I_D 过渡区斜率确定^[15-17],

$$\left. \frac{dI_D}{dV_D} \right|_{I_D=0} = \frac{eI_{i0}}{2kT_e}, \quad (1)$$

式中: e 为电子电荷 ($1.602\,173\,4 \times 10^{-19}$ C); I_{i0} 为饱和离子电流 (A); k 为玻尔兹曼常数 ($1.380\,649 \times 10^{-23}$ J·K⁻¹)。

电子密度 n_e 通过离子密度 n_i 确定^[18-19],

$$n_e \approx n_i = \frac{I_{i0}}{0.61eA_p} \sqrt{\frac{kT_e}{m_i}}, \quad (2)$$

式中: A_p 为探针有效收集面积 (m²); m_i 为离子质量 (空气等离子体中取 5.3×10^{-26} kg); 系数 0.61 为径向流修正因子。

在高气压条件下, 需考虑碰撞效应对双平装探针采集的离子电流 I_i 进行修正^[20],

$$I_{i, \text{mea}} = (1 + c\alpha^b)^{-1/2} I_i \tanh\left(\frac{eV_D}{2kT_e}\right), \quad (3)$$

式中: $I_{i, \text{mea}}$ 为修正后离子饱和电流 (A); $\alpha = \lambda_D/\lambda_i$ (无量纲), 其中, λ_D 为德拜长度, λ_i 为离子平均自由程; c 和 b 为碰撞修正系数 (无量纲)。

2 系统设计

2.1 总体方案

图 2 为双平装探针诊断系统框图。试验计算

机控制线性电源为实时诊断装置提供 28 V 直流供电。实时诊断装置产生周期性三角波激励信号加载至探针, 同步采集电压与电流信号, 根据 I - V 特性曲线实时计算等离子体参数并通过以太网传输至试验计算机。主要设计指标为诊断范围: $10^9 \sim 10^{13}$ cm⁻³; 激励电压: 三角波信号, 峰-峰值 ± 45 V, 频率 100 Hz; 激励电流 ≥ 4.5 A。

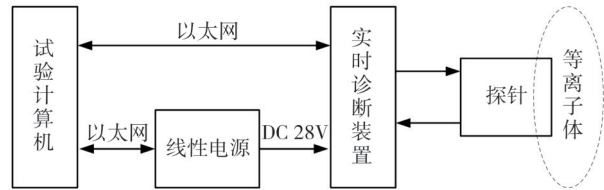


图 2 双平装探针诊断系统框图

Fig. 2 Block diagram of dual flush-mounted probe diagnostic system

2.2 探针设计

双平装探针结构如图 3 所示。电极 1 与电极 2 分别作为探针 1 与探针 2。综合考虑诊断范围、电极材料、重量及加工工艺, 电极直径设计为 8 mm, 两电极间距设计为 4 mm (不小于 2 倍等离子体德拜长度 λ_D), 以避免双电极间等离子体鞘层相互干扰。绝缘基座为电极提供支撑与绝缘; 壳体支撑绝缘基座; 法兰用于探针与飞行器表皮的安装; 各组件间通过高温胶密封。该结构特点包括: 采用对称双探针结构降低对等离子体扰动; 表面共形安装规避气动热负荷引起的烧蚀; 降低对飞行器气动特性的影响; 提高信号完整性, 共形设计可降低电缆引入的电磁噪声。

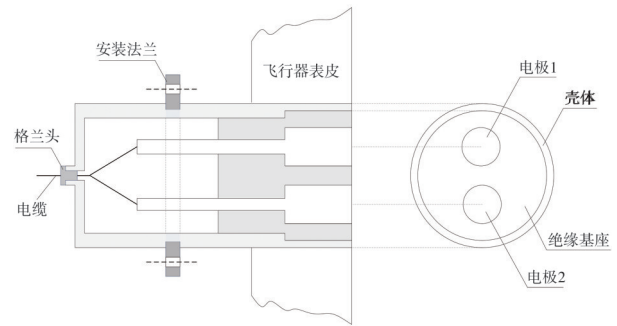


图 3 双平装探针结构图

Fig. 3 Structural diagram of dual flush-mounted probe

组件材料选取及耐温特性见表 1。通过耐温设计, 确保电极、壳体在正常环境或稀薄空气条件下不发生氧化, 绝缘层在使用温度下不烧蚀, 以适应再入飞行器高温、长时飞行环境。

表1 部组件材料选取及耐温特性

Tab. 1 Material selection and temperature resistance characteristics of components and assemblies

部组件	材料	耐受温度/°C
电极、壳体	Nb521	1 650
绝缘基座	Al ₂ O ₃	1 600
安装法兰	1Cr18Ni9Ti	1 000
导线	镀银铜丝	长时: 400 短时: 450

2.3 实时诊断装置

图4为实时诊断装置功能框图。主要功能包括:

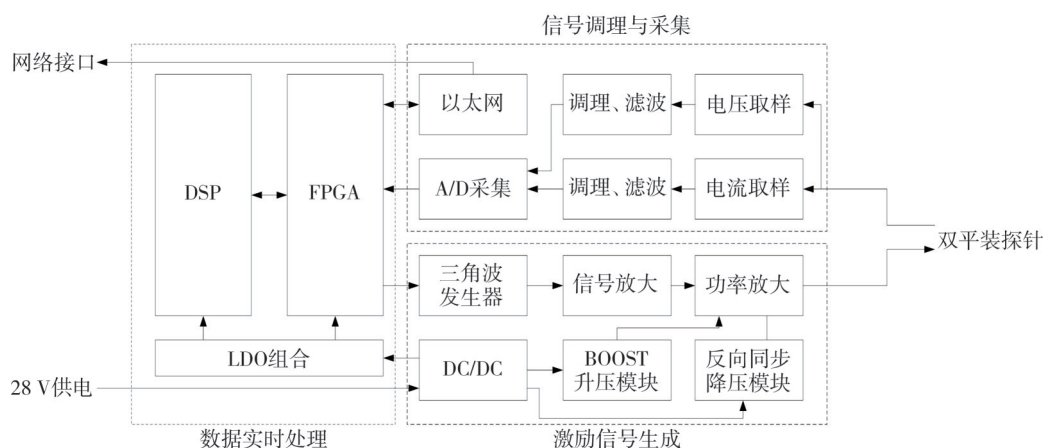


图4 实时诊断装置功能框图

Fig. 4 Functional block diagram of real-time diagnostic device

3) 数据实时处理: FPGA将采样数据传输至数字信号处理器(Digital Signal Processor, DSP)。DSP获取每个激励周期的I-V数据曲线,经滤波和拟合后,依据解算公式求解电子温度 T_e 和离子密度 n_i ,进而得到电子密度 n_e 。原始数据与计算结果发送至试验计算机。

3 试验及结果

3.1 试验方案

试验方案如图5所示。采用压力-真空式电弧

1) 激励信号生成: 鉴于飞行器电源通常为直流28 V,设计升压、降压电路及三角波发生电路,产生峰-峰值 ± 45 V、频率100 Hz的三角波激励信号,激励电流 ≥ 4.5 A。

2) 信号调理与采集: 激励信号加载至探针双电极,在等离子环境中产生微弱电流信号。该信号经I/V转换及滤波调理为0~5 V电压信号。同时,将 ± 45 V激励信号经调理转换为0~5 V电压信号。两路调理后的电压信号同步送入A/D转换器采样。

风洞产生等离子体流场。设计试验模型同时对传统静电探针和双平装探针进行对比测试。电弧风洞由电弧加热器、超声速喷管、测试区、扩压段、冷却器及真空系统组成。其中,电弧加热器采用分段式结构,包含前电极、后电极、弧室、绝缘压缩段及磁场线圈等,可提供中焓、中压流场;超声速喷管通过几何通道将高温高压气体加速形成所需流场;测试区放置试验支架与试验模型,通过石英玻璃窗口可对试验过程摄像及模型表面测温;流经测试区的高温气流进入扩压段降速,经冷却器降温后,由真空系统排入大气。

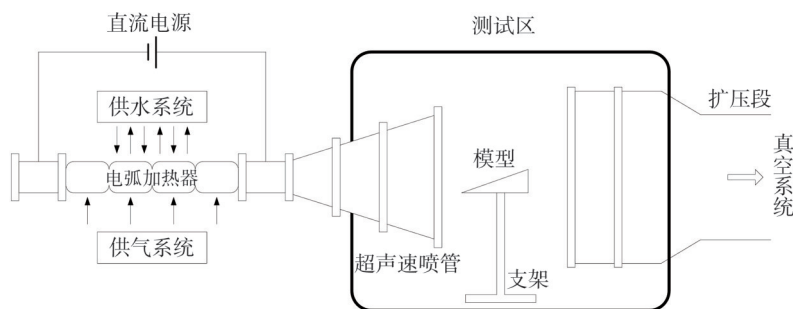


图5 试验方案示意图

Fig. 5 Schematic diagram of experimental setup

试验模型实物如图 6 所示。模型为矩形平板,模拟飞行器表皮结构。平板上同时安装突出表面的静电探针及共形安装的双平装探针,两者分别连接对应电子设备。试验开始前,试验支架位于喷管出口区域之外;待电弧加热器启动并运行稳定,在测试区形成高温高速气流后,通过水平移位台将试验模型送入流场核心区,探针持续诊断 2 s。

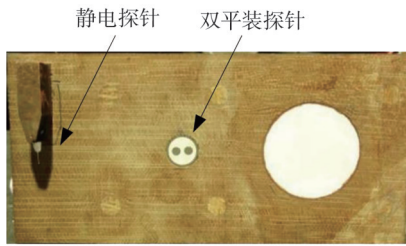


图 6 试验模型实物图

Fig. 6 Photograph of physical test model

试验状态如表 2 所示。通过调节风洞压力及流场速度,可实现不同量级的等离子体密度。

表 2 试验状态表

Tab. 2 Test operations status sheet

工况	壁面压力/kPa	来流速度/ ($\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$)	气体介质
A	0.9	3 000	空气
B	2.0	3 500	空气
C	3.2	3 500	空气
D	4.1	3 500	空气

3.2 结果分析

图 7~图 10 为典型状态(持续诊断时间中段)下双平装探针诊断系统采集的实验数据及拟合 I-V 曲线。

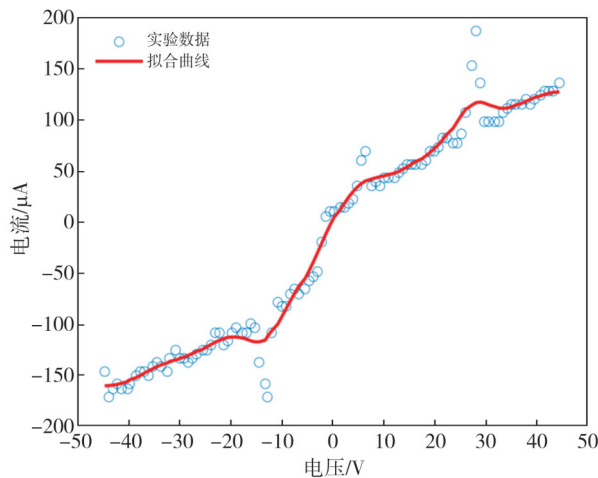


图 7 工况 A 典型 I-V 曲线

Fig. 7 I-V curve for case A

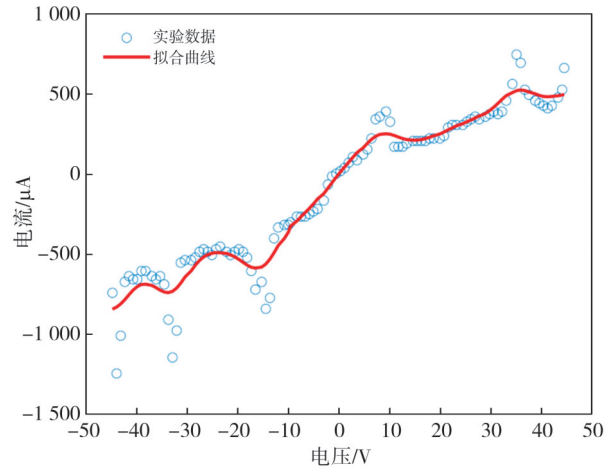


图 8 工况 B 典型 I-V 曲线

Fig. 8 I-V curve for case B

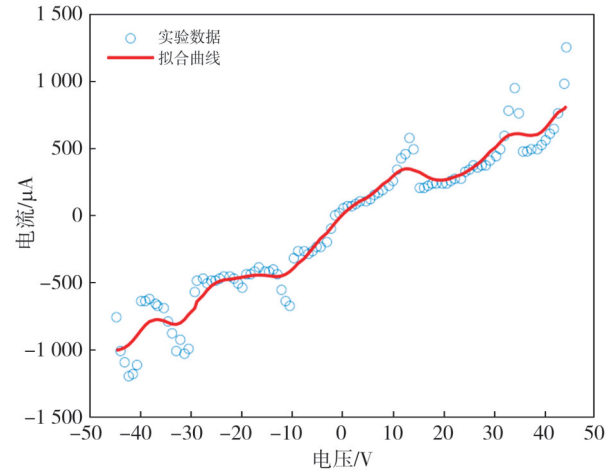


图 9 工况 C 典型 I-V 曲线

Fig. 9 I-V curve for case C

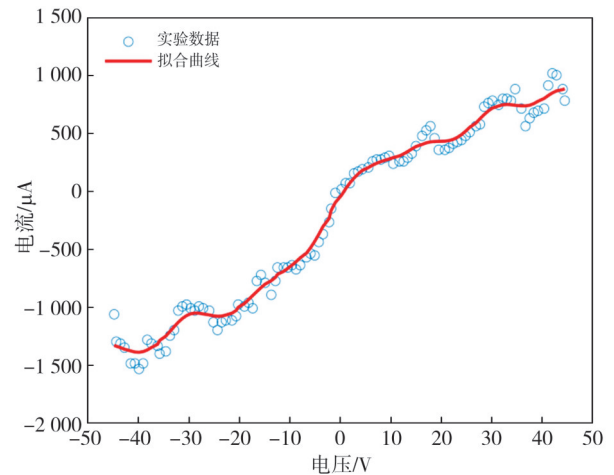


图 10 工况 D 典型 I-V 曲线

Fig. 10 I-V curve for case D

根据拟合曲线解算的等离子体密度分别为 3.63×10^{10} 、 1.28×10^{11} 、 1.49×10^{11} 和 $1.87 \times 10^{11} \text{ cm}^{-3}$ 。分析可知:

1) 实测 I-V 曲线与理论曲线特征一致。正、负

向饱和离子电流相对坐标原点基本对称,不完全对称源于两电极所处等离子体区域电位存在差异^[21]。

2) 饱和离子电流随电压增加持续上升,未如理论曲线般趋于平直,原因在于高压段鞘层厚度增加导致探针电流收集有效面积增大,与文献[22]试验现象一致。

3) 电流值由负值穿越为正值区域曲线线性度较好,选取该区域计算电子温度 T_e 。计算显示电子温度分布在1.89~6.07 eV范围,与激光汤姆逊散射测量结果一致(偏差<13%)。

4) 正电压激励下的电流采样值离散度相对负电压更小,计算时选取拟合后的正向饱和离子电流 I_{i0+} 。该现象可能与电极表面二次电子发射效应有关,需进一步研究。

5) 等离子体密度越高,采集的饱和离子电流越大。经统计,饱和离子电流分布在50~1 000 μA 范围。

表3为不同工况下双平装探针与静电探针测得的等离子体密度范围值的比较。

表3 试验结果数据
Tab. 3 Experimental data

工况	双平装探针 电子密度/ cm^{-3}		静电探针 电子密度/ cm^{-3}	
	最小值	最大值	最小值	最大值
A	3.19×10^8	8.19×10^{10}	1.12×10^8	3.55×10^{10}
B	8.21×10^8	1.31×10^{11}	3.25×10^8	1.01×10^{11}
C	1.08×10^9	1.49×10^{11}	0.73×10^9	1.27×10^{11}
D	2.14×10^9	1.87×10^{11}	0.91×10^9	1.39×10^{11}

数据分析表明:

1) 两种探针诊断的等离子体密度最大、最小值量级基本一致,且反映了各次试验中等离子体密度的动态变化;

2) 静电探针诊断值整体低于双平装探针诊断值,原因在于双平装探针与静电探针分别位于流场中心区域和边缘区域,同时表明流场内电子密度分布不均匀,中心区域密度略高于边缘区域;

3) 受试验条件限制,验证试验未覆盖到 10^{12} cm^{-3} 以上量级等离子体密度,但成功采集到低于设计下限的数据。试验后通过对原始数据的整理与修复,计算得出有效等离子体密度值,表明探针的实际诊断范围存在工程裕度,不严格受限于理论设计上下限。

4 结 论

针对高速再入飞行器“通信黑障”问题及等离子体实时诊断工程化需求,本文提出并验证了一种工程化双平装探针诊断系统。该系统诊断范围

覆盖 $10^9 \sim 10^{13} \text{ cm}^{-3}$,探针与飞行器表面共形设计有效解决了传统探针在高温流场中的结构失效问题。该系统具有小型化、低功耗、高精度、强实时等特点,能够适应飞行器载荷安装约束,且对流场无干扰、无热烧蚀风险。电弧风洞试验结果表明,该系统可有效获取等离子体参数,其诊断精度与传统静电探针相当,量级一致,可为黑障模型预测提供飞行环境实时诊断数据支撑。后续将择机开展飞行试验验证。未来可通过探针阵列化布局与机器学习反演算法等途径,进一步提升对非均匀等离子体鞘套的诊断分辨率。

利益冲突声明/Conflict of Interests

所有作者声明不存在利益冲突。

All authors declare no relevant conflict of interests.

参考文献

- [1] 任宁, 奚斌, 李晓斐. 黑障抑制技术的发展现状与研究难点[J]. 导弹与航天运载技术, 2018(1): 122-126.
REN Ning, XI Bin, LI Xiaofei. Development status and difficulties of the technology of blackout suppression[J]. Missiles and Space Vehicles, 2018(1): 122-126. (in Chinese)
- [2] 张作一, 赵良, 刘秀祥. 再入等离子鞘套对测控信号传输的影响[J]. 电讯技术, 2014, 54(9): 1265-1269.
ZHANG Zuoyi, ZHAO Liang, LIU Xiuxiang. Influence of reentry plasma sheath on TT & C signals transmission [J]. Telecommunication Engineering, 2014, 54(9): 1265-1269. (in Chinese)
- [3] STARKEY R. Electromagnetic wave/magnetoactive plasma sheath interaction for hypersonic vehicle telemetry blackout analysis [C]//34th AIAA Plasma Dynamics and Lasers Conference, 2003: 4167.
- [4] 龚旻, 谭杰, 李大伟, 等. 临近空间高超声速飞行器黑障问题研究综述[J]. 宇航学报, 2018, 39(10): 1059-1070.
GONG Min, TAN Jie, LI Dawei, et al. Review of blackout problems of near space hypersonic vehicles [J]. Journal of Astronautics, 2018, 39(10): 1059-1070. (in Chinese)
- [5] 喻明浩, 邱泽洋. 飞行器大气再入过程中黑障缓解方法综述[J]. 中国空间科学技术, 2022, 42(2): 1-12.
YU Minghao, QIU Zeyang. Review of blackout mitigation methods for vehicles during atmospheric reentry [J]. Chinese Space Science and Technology, 2022, 42(2): 1-12. (in Chinese)

- [6] 于哲峰, 刘佳琪, 任爱民, 等. 磁窗天线增强等离子体鞘套透波特性研究[J]. 宇航学报, 2011, 32(7): 1564-1568.
YU Zhefeng, LIU Jiaqi, REN Aimin, et al. Research on magneto window antenna for improving propagation characteristic of electromagnetic wave in plasma sheath [J]. Journal of Astronautics, 2011, 32(7): 1564-1568. (in Chinese)
- [7] STENZEL R L, URRUTIA J M. A new method for removing the blackout problem on reentry vehicles[J]. Journal of Applied Physics, 2013, 113(10): 103303.
- [8] 刘祥群, 刘宇, 凌艺铭, 等. 等离子体风洞中释放二氧化碳降低电子密度[J]. 物理学报, 2022, 71(14): 156-161.
LIU Xiangqun, LIU Yu, LING Yiming, et al. Electron density depletion by releasing carbon dioxide in plasma wind tunnel[J]. Acta Physica Sinica, 2022, 71(14): 156-161. (in Chinese)
- [9] 钟育民, 李艳华. 太赫兹通信解决黑障问题的探讨与分析[J]. 遥测遥控, 2019, 40(1): 14-19.
ZHONG Yumin, LI Yanhua. Discussion and analysis of terahertz communication for blackout elimination [J]. Journal of Telemetry, Tracking and Command, 2019, 40(1): 14-19. (in Chinese)
- [10] 文志军, 陈长兴, 凌云飞. 中继法解决再入航天器通信黑障问题优化研究[J]. 空军工程大学学报(自然科学版), 2017, 18(6): 40-46.
WEN Zhijun, CHEN Changxing, LING Yunfei. Study on solution about re-entry spacecraft communications blackout problem by relay optimum proposal[J]. Journal of Air Force Engineering University (Natural Science Edition), 2017, 18(6): 40-46. (in Chinese)
- [11] 潘德贤, 蒋刚, 王国林, 等. 静电探针在高频等离子体风洞中的应用[J]. 实验流体力学, 2014, 28(3): 72-77.
PAN Dexian, JIANG Gang, WANG Guolin, et al. Application of Langmuir probe in high frequency plasma wind tunnel [J]. Journal of Experiments in Fluid Mechanics, 2014, 28(3): 72-77. (in Chinese)
- [12] 杨敏, 王佳明, 齐凯旋, 等. 等离子体鞘套宽带微波反射诊断方法[J]. 物理学报, 2022, 71(23): 311-322.
YANG Min, WANG Jiaming, QI Kaixuan, et al. Method of diagnosing broadband microwave reflection of plasma sheath [J]. Acta Physica Sinica, 2022, 71(23): 311-322. (in Chinese)
- [13] JIANG W, GAO Y, WAN X, et al. Diagnostics of three-dimensional temperature distribution of Ar arc plasma by spectrum tomography technique[J]. IEEE Transactions on Plasma Science, 2011, 39(9): 1855-1860.
- [14] 余鹏程. 双平装探针诊断的理论和实验研究[D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2020.
- [15] 李京勇, 刘智民, 谢亚红, 等. 射频离子源朗缪尔双探针设计[J]. 真空科学与技术学报, 2017, 37(5): 484-487.
LI Jingyong, LIU Zhimin, XIE Yahong, et al. Design of double Langmuir-probe for radio frequency ion source [J]. Chinese Journal of Vacuum Science and Technology, 2017, 37(5): 484-487. (in Chinese)
- [16] 袁方园, 陆文琪, 林国强. 利用朗缪尔双探针诊断电弧离子镀等离子体参数[J]. 真空科学与技术学报, 2009, 29(5): 509-512.
YUAN Fangyuan, LU Wenqi, LIN Guoqiang. Diagnosis of arc ion plating plasma by Langmuir double probes [J]. Chinese Journal of Vacuum Science and Technology, 2009, 29(5): 509-512. (in Chinese)
- [17] 张宝芳, 刘华. 微波等离子体的双探针诊断[J]. 实验科学与技术, 2008, 6(3): 14-16.
ZHANG Baofang, LIU Hua. Double-probe diagnosis of microwave plasma [J]. Experiment Science & Technology, 2008, 6(3): 14-16. (in Chinese)
- [18] YU P, CAO J, ZHANG Z, et al. Influence of the probe radius on the double flush-mounted probe diagnostics[J]. AIAA Journal, 2019, 57(3): 904-910.
- [19] YU P, LIU Y, CAO J, et al. Double flush-mounted probe diagnostics and data analysis technique for argon glow discharge plasma[J]. Review of Scientific Instruments, 2017, 88(1): 013502.
- [20] 余鹏程, 刘宇, 雷久侯, 等. 实验室研究等离子体鞘套测量方法和干预技术[J]. 电波科学学报, 2024, 39(1): 12-17.
YU Pengcheng, LIU Yu, LEI Jiuhou, et al. The measurement and intervention technique of plasma sheath studied in laboratory [J]. Chinese Journal of Radio Science, 2024, 39(1): 12-17. (in Chinese)
- [21] 张洪志, 崔海峰, 姚斌. 气体放电等离子体特性测量 I-V 曲线不对称性的研究[J]. 物理实验, 2006, 26(7): 34-38.
ZHANG Hongzhi, CUI Haifeng, YAO Bin. Investigations on I-V curve asymmetry of the plasma in gas discharge [J]. Physics Experimentation, 2006, 26(7): 34-38. (in Chinese)
- [22] 葛萌, 张莉莉, 蔡惠华, 等. 利用静电双探针辉光放电等离子体诊断分析[J]. 宇航计测技术, 2017, 37(2): 68-72.
GE Meng, ZHANG Lili, CAI Huihua, et al. Diagnosis of glow discharge plasma by Langmuir double probe [J]. Journal of Astronautic Metrology and Measurement, 2017, 37(2): 68-72. (in Chinese)