

激波风洞设施中的等离子体包覆目标电磁散射实验研究

金铭 韦笑 吴洋 张羽淮 余西龙

Backscattering measurements of plasma coated target in high-enthalpy wind tunnel

Jin Ming Wei Xiao Wu Yang Zhang Yu-Huai Yu Xi-Long

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 64, 205205 (2015) DOI: 10.7498/aps.64.205205

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.205205>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2015/V64/I20>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

霍尔推进器壁面材料二次电子发射及鞘层特性

Characteristics of wall materials secondary electron emission and sheath in Hall thruster

物理学报.2014, 63(8): 085204 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.085204>

电子温度对霍尔推进器等离子体鞘层特性的影响

Effect of electron temperature on the characteristics of plasma sheath in Hall thruster

物理学报.2013, 62(20): 205205 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.205205>

电子温度各向异性对霍尔推力器中等离子体与壁面相互作用的影响

Effect of electron temperature anisotropy on plasma-wall interaction in Hall thruster

物理学报.2012, 61(20): 205202 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.61.205202>

斜磁场作用下碰撞电负性等离子体鞘层的玻姆判据

Bohm criterion for a collisional electronegative plasma sheath in an oblique magnetic field

物理学报.2012, 61(15): 155204 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.61.155204>

等离子体浸没离子注入非导电聚合物的适应性及栅网诱导效应的研究

The study on adaptability and effect of mesh-inducing for plasma immersion ion implantation on non-conductor polymer

物理学报.2012, 61(15): 155206 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.61.155206>

激波风洞设施中的等离子体包覆目标 电磁散射实验研究*

金铭¹⁾ 韦笑¹⁾ 吴洋¹⁾ 张羽淮^{2)†} 余西龙²⁾

1)(电磁散射重点实验室, 北京 100854)

2)(中国科学院力学研究所, 高温气体动力学国家重点实验室, 北京 100190)

(2014年12月22日收到; 2015年6月19日收到修改稿)

利用JF10高焓激波风洞设施, 进行了等离子鞘包覆目标的电磁散射测量实验. 基于矢量网络仪的步进扫频体制, 在C波段进行实验, 观测到等离子鞘对目标雷达散射截面(radar cross section, RCS)的影响. 并且, 目标散射测量值中直接体现了激波风洞的高速气流状态信息: 气流前段会造成散射回波的剧烈变化且稳定性差, 持续0.5—1 ms; 激发的等离子鞘有效持续时间仅约为2 ms, 衰减了目标RCS回波.

关键词: 等离子鞘, 激波风洞, 电磁散射, 实验测量

PACS: 52.40.Kh, 41.20.Jb, 42.68.Mj

DOI: 10.7498/aps.64.205205

1 引言

高速飞行器进入大气层时, 摩擦周围气体产生解离甚至电离等一系列复杂的物理化学反应, 使得飞行器周围形成了一个由离子和电子组成的等离子鞘, 对再入飞行器的通信、探测造成阻碍和困难^[1,2]. 一定浓度的等离子体可以对电磁波产生吸收、折射或反射的效果, 进而影响飞行器天线辐射和整体的电磁散射特性. 20世纪60年代, 等离子鞘造成的再入通信黑障问题就受到关注^[1,2]; 随后, 对等离子鞘改变飞行器电磁散射的现象开展了持续的研究^[3,4].

除去成本极高的飞行试验, 理论与数值分析和地面模拟实验是研究等离子鞘中电磁传播及其散射特性的重要手段. 理论与数值分析方面的研究, 近年来已从均匀等离子体中电磁效应分析进展到对复杂分布等离子鞘的全数值计算. 文献^[5]结合流体与电磁数值方法, 计算了等离子鞘及尾迹对高速锥体目标雷达散射截面(RCS)的影响; 文献^[6]计算了不同飞行参数下的电磁散射, 并分析了不同

通信频段的黑障现象; 文献^[7]分析了等离子鞘层中的电磁波传播, 讨论了利用“磁窗”消弱黑障的可行性; 文献^[8, 9]研究了等离子鞘层对卫星定位信号的扰动, 包括信号波形畸变、去极化效应等. 此外, 文献^[10—12]研究了电磁全波数值算法在非均匀等离子体建模中的加速途径. 文献^[13—17]则对非均匀等离子体影响目标电磁散射的作用机理开展研究, 包括衰减、折射、低反射特性等, 并讨论了其在RCS减缩中的应用.

地面模拟手段的完善对等离子鞘中的电磁效应研究具有重要价值, 实验数据的积累可为数值仿真提供验证, 为理论研究提供依据^[18,19]. 近年来, 中国空气动力研究中心基于弹道靶设施, 模拟飞行器的再入气动环境, 针对球体、锥体等简单目标开展了一系列雷达测量实验, 在X及Ka波段对目标本体及激发尾迹的散射进行了对比分析^[20—22], 测量结果中目标本体的散射贡献更为显著. 弹道靶的优势在于可以对目标尾迹的散射进行测量. 但其规模大、费用高, 被测目标自由飞行而姿态难以控制, 要求尺寸小且形状简单.

* 国家自然科学基金重大项目(批准号: 61490695-07)资助的课题.

† 通信作者. E-mail: zhangyuhuai@imech.ac.cn

本文基于高速气动研究的通用激波风洞设施,开展目标电磁散射测量的探索. 实验在中国科学院力学研究所JF10爆轰驱动高焓激波风洞中开展. 其利用氢氧爆轰产生高温高压驱动气体,可形成当地马赫数12、总温约8000 K的高速流场,有效气流持续时间可达数个ms^[23,24]. JF10激波风洞的有效气流区横截尺寸达350 mm,相比弹道靶设施可实现更大目标的飞行模拟,并可对复杂构型目标开展定姿态测量,有望成为等离子体包覆目标散射特性的通用实验观测平台. 本文实验在C波段开展,得益于良好的背景对消效果^[25],在国内高焓激波风洞设施内首次观测到等离子鞘对目标RCS的影响,并从测量结果中读取了高速气流状态、等离子体持续时间等关键信息. 在此基础上,本文对测量参数进行了优化调整,最终在0.8 GHz的范围内观察到了等离子鞘套对目标RCS的减缩.

2 实验条件

2.1 风洞中微波测量实验设置

风洞内微波测量实验设置如图1所示. 风洞启动后,高速气流沿风洞轴向推进至目标,经一系列化学反应在目标周围产生等离子鞘. 微波测量系统由矢量网络分析仪和圆锥透镜天线组成,单站测量状态. 微波测量通道垂直于气流方向,天线通过风洞侧壁透波窗(聚四氟乙烯)照射目标. 目标由硬质尾杆支撑,以避免受气动压迫产生位移. 扁锥形目标的背面朝向天线,形成大散射回波,提供足够的信噪比. 实验基于矢网的步进扫频测量体制形成带宽测量,通过背景对消和距离像加窗^[25],最终获取目标的散射回波.

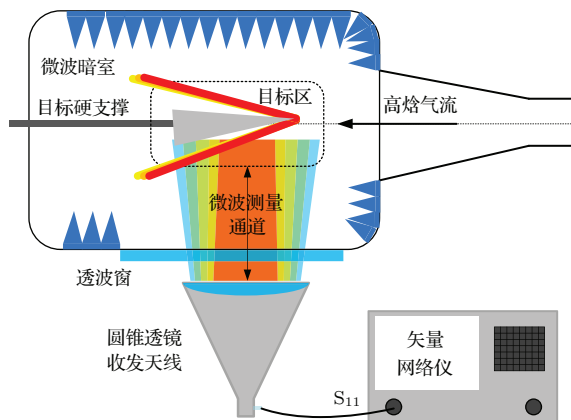


图1 JF10风洞内目标电磁散射测量示意图

Fig. 1. The configurations of the backscattering measurement in the JF-10 shock tunnel.

实验流程如图2所示,其中包括了对空室背景和参考定标体的测量^[25].

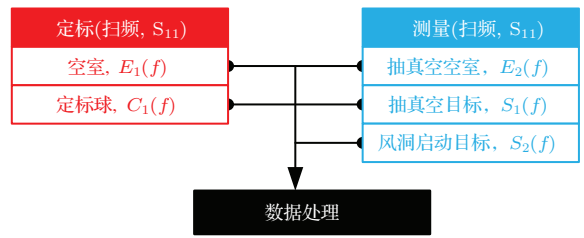


图2 风洞内目标散射测量实验流程(基于矢量网络分析仪,单发单收)

Fig. 2. The implementation procedures of the scattering measurements in the tunnel (based on the instrument of vector network analyzer, S₁₁ mode).

测量后的数据处理流程可用以下公式表示,其中体现了背景对消、距离像加窗,以及定标球比对定标的全部数据处理操作.

目标静态 RCS 测值(风洞启动前):

$$RCS_1(f) = \frac{O[S_1(f) - E_2(f)] \cdot A(f)}{O[C_1(f) - E_1(f)]}; \quad (1)$$

目标动态 RCS 测值(风洞启动后):

$$RCS_2(f) = \frac{O[S_2(f) - E_2(f)] \cdot A(f)}{O[C_1(f) - E_1(f)]}. \quad (2)$$

上式中O[]表示距离像加窗处理(软件门,加汉明窗^[25]),即将频域回波测值经逆Fourier变换至时域得到距离像(range profile),加窗截选目标区以滤除环境干扰,再经Fourier变换得到处理后频域值的过程^[25];A(f)表示定标球的频域理论RCS值.

2.2 风洞与微波测量的同步

JF10激波风洞的高速气流平稳持续时间仅数毫秒.微波测量需要在这段时间内完成.实验中,利用风洞探针触发源及外接延时器,为矢量网络仪提供触发.整个触发过程由数字示波器监视(图3),

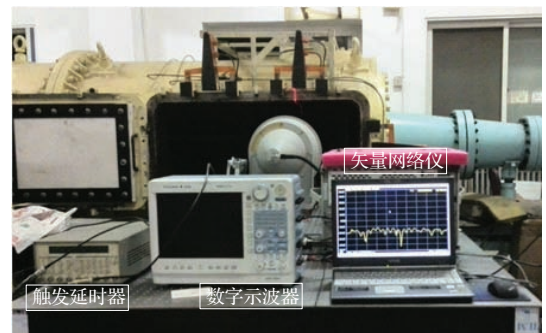


图3 JF10风洞内目标电磁散射测量现场

Fig. 3. Photo of a scene of the experiment.

典型触发记录如图4中所示. 图中 ΔT_d 为矢量网启动时刻(T_{ns})滞后于风洞探针信号(T_0)的设置延时; ΔT_n 为矢量网完成扫频测量的时间间隔($T_{ne}-T_{ns}$);而 ΔT_s 为预计稳定气流到达目标区时刻与风洞探针信号时间(T_0)的延时. 实验中, 设置矢量网扫频测量提前于气流到达启动, 并覆盖平稳气流观测段, 以全面地观测高速气流状态对目标散射回波的影响.

触发延时的设置以及对测值的判读, 需要掌握矢量网步进扫频的时间分布特性. 本文中使用的N5230c(Agilent)型矢量网络仪, 在中频带宽100 kHz时, 完成4.5—6.5 GHz 201点的步进频扫描需8.5 ms. 然而, 此扫描时间并不均匀分配, 借助数字示波器进行分段扫描测量, 发现其时间分配如

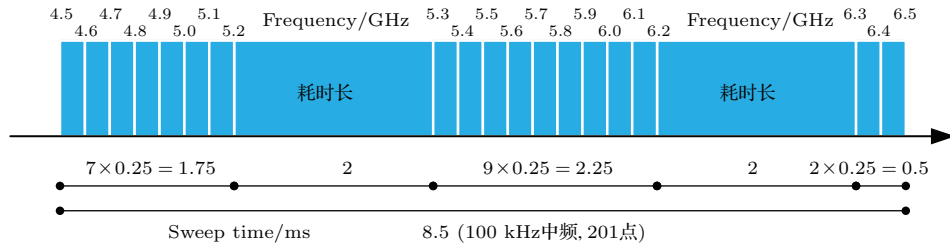


图5 N5230C完成4.5—6.5 GHz 201点步进扫频的时间分配特性(基于实验获得, 中频100 kHz)

Fig. 5. The distribution of time costs for the N5230 C VNA finishing the step frequency sweeping of 201 points, from 4.5 GHz to 6.5 GHz (measured, in case of 100 kHz IF bandwidth).

3 实验结果

根据矢网的扫频时间分配特性, 设置触发延时2.5 ms, 进行两次实验测量. 矢量网扫频与气流的同步情况如图6所示. 按约4 ms的等离子鞘持续时间估计, 4.9—5.9 GHz段的测量将对应观测窗口, 但其中5.2—5.3 GHz段耗时长, 约2 ms.

两次测量结果如图7—图9所示. 其中, 图7给出了第一次测得的背景对消后频域测值及其一维

图5中所示. 其中 $x.2-x.3$ (GHz)段耗时长, 可能是由于仪器需进行频综切换所致.

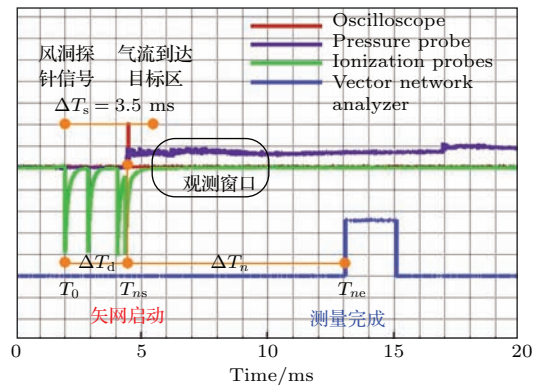


图4 (网刊彩色) 风洞动态测量过程中各触发信号显示
Fig. 4. (color online) A record of trigger signals during one dynamic tunnel measurement.

距离像(垂直于气流方向), 图8则给出了第二次测量的结果. 在图9中, 对比了两次测量经距离像加窗及定标后的最终RCS测值.

对比未经对消的距离像曲线, 可知通过背景对消, 消除了目标区前两个强回波源(天线透镜@1.5 m和透波窗@1.8 m)的回波贡献. 对消后的频域回波测值主要体现目标区及以后区域的散射特性. 在此基础上, 可结合矢量网扫频时间分配的先验信息, 依据频域测值的静动态差异, 直接分析高速气流对目标散射回波的影响.

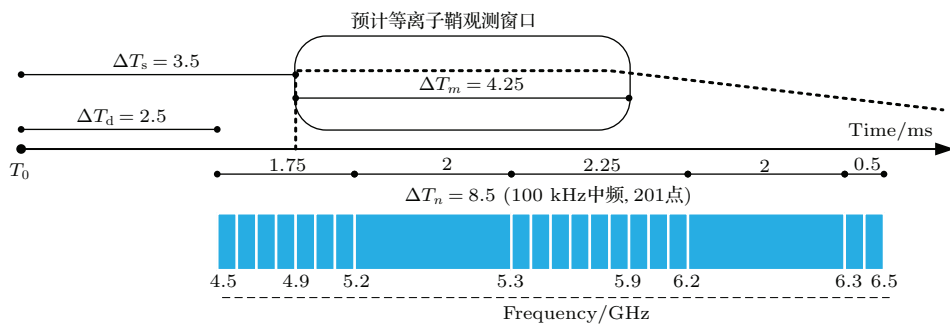


图6 C波段前两次测量扫频时间分配

Fig. 6. The distribution of time costs by the vector network analyzer (VNA) step frequency sweeping in the first two times of measurement in the C band.

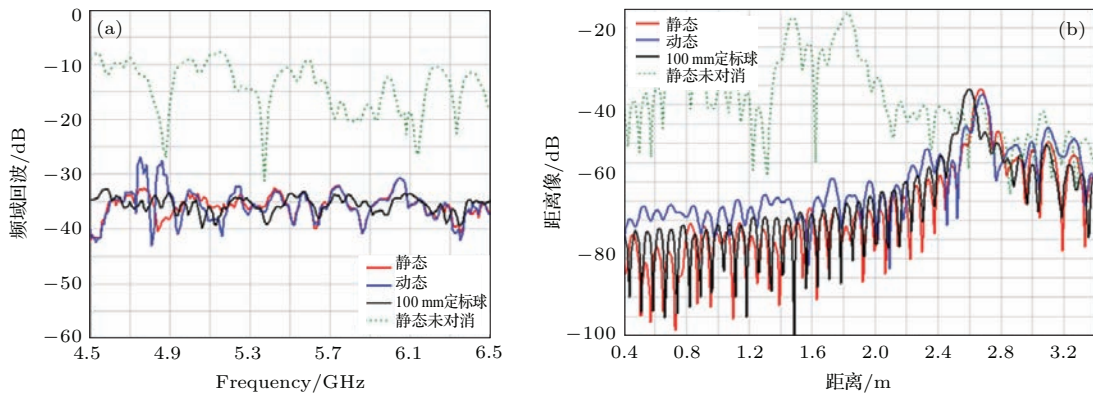


图7 (网刊彩色) C波段第一次风洞测量静动态对比 (a) 频域回波测值; (b) 未加窗的距离像

Fig. 7. (color online) The comparison of static and dynamic measured data in the first measurement: (a) Returned frequency signals; (b) range profiles before windowing.

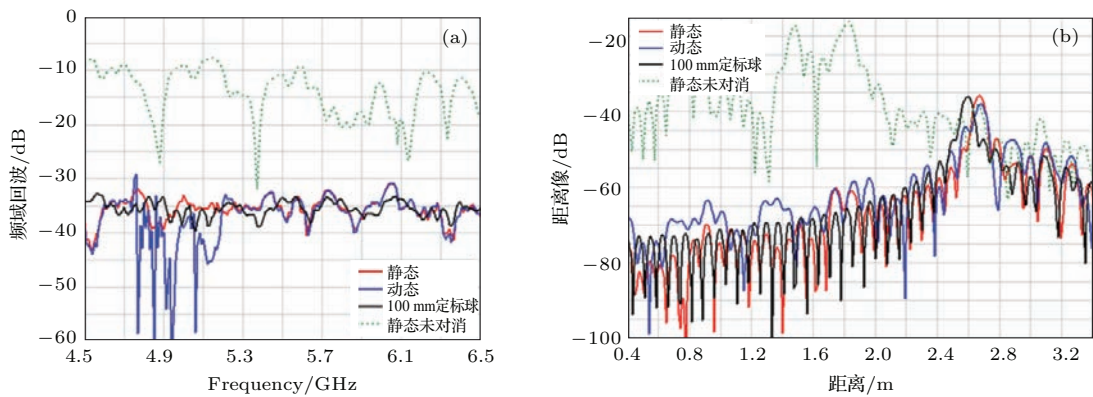


图8 (网刊彩色) C波段第二次风洞测量静动态对比 (a) 频域回波测值; (b) 未加窗的距离像

Fig. 8. (color online) The comparison of static and dynamic measured data in the second measurement: (a) Returned frequency signals; (b) range profiles before windowing.

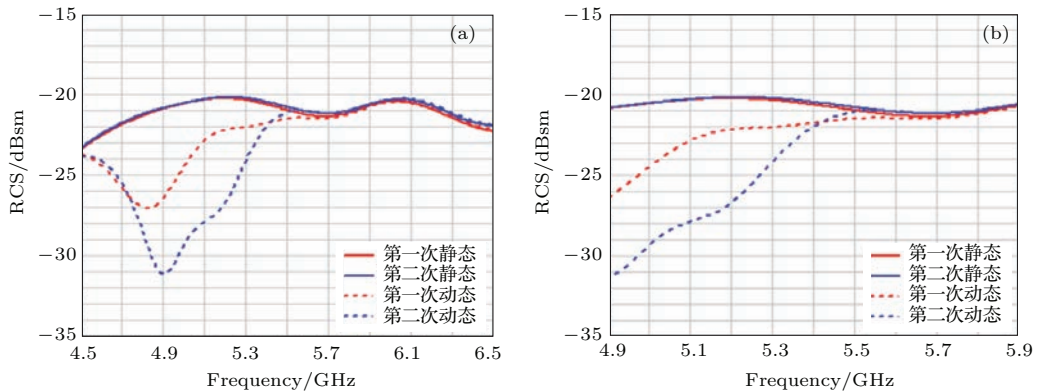


图9 (网刊彩色) 经距离像加窗处理后的最终 RCS 测量结果(汉明窗) (a) 4.5—6.5 GHz; (b) 4.9—5.9 GHz

Fig. 9. (color online) Processed RCS results (Hamming windowed in the range profile): (a) 4.5—6.5 GHz; (b) 4.9—5.9 GHz.

在4.7—4.9 GHz处, 气流尚未在目标区形成稳定作用, 但两次测量的动态频域测值都发生了剧烈抖动(图7和图8)。尤其在第二次测量中, 抖动更剧烈, 并扩散到4.9 GHz之后。第一次测量结果中

(图7), 4.9 GHz之后, 静动态频域测值间差异明显, 应为等离子鞘套作用所致; 但是在5.3 GHz之后, 静动态测值趋于一致。这个过程中, 5.2—5.3 GHz段耗时2 ms, 而4.9—5.2 GHz段仅耗时0.75 ms。第

二次测量结果与之类似(图8),但4.7 GHz之后的动态测值剧烈振荡一直延续到5.1 GHz,此段持续时间约1 ms.相应地,距离像加窗滤波后的最终RCS测值结果中,两次动态测量结果出现了明显差异(图9).

4 实验结果讨论

4.1 气流状态对散射测值的影响

虽然两次相同设置下的测量结果存在差异,但从中可以提取诸多重要的信息.

1) 结合一维距离像可知(图7和图8),对消后静动态测值的差异主要源于目标区;同时扫描频率末段静动态测值趋于一致.这些结果表明,通过硬支撑排除了由于高速气流压迫目标形变或位移,从而造成动态测值变化的可能性.在此基础上,观测到了等离子鞘对目标RCS的改变.

2) 等离子鞘影响目标RCS的持续时间较短.在约4 ms的测量时间内,4.9—5.9 GHz段动态测值的变化体现了等离子鞘作用从发生到迅速减弱的过程.特别是经过5.2—5.3 GHz长耗时(约2 ms)的时段后,等离子鞘效果已明显削弱.

3) 4.7 GHz之后的动态测值剧烈变化对应于气流前段.此段中一方面由于来波中含有一定的带电粒子,另一方面主膜膜片受爆轰波的强烈冲击,受冲减掉膜产生金属微粒^[26],再加上可能存在局部湍流,这些因素共同导致该时间段气流不稳定,造成目标区散射回波的剧变,同时可重复性差.相应地,两次实验中气流前段对应动态测值的差别大(图7和图8).

综上,图7和图8中的动静态测值对比,直接反映了激波风洞中的高焓气流状态,体现了其气流前(激波)段、平稳段和混合气流段的组成特点(图10).其中混合气流段中含有羟基、水蒸气以及氢气等杂质,再加上气流温度和压力降低,导致目标表面产生的等离子体密度下降,对目标RCS影响减弱.基于实验结果,估计有效观测窗口(平稳段)的时间只有2 ms左右.

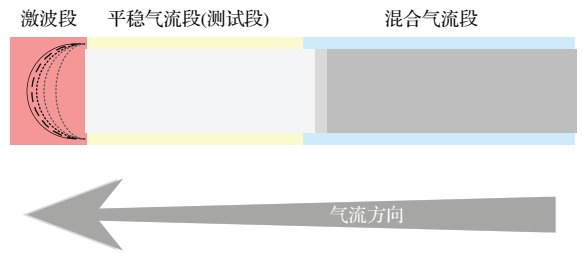


图10 (网刊彩色) 激波风洞中气流状态的分段(时)特性
Fig. 10. (color online) Sections of the air flow excited by in the shock tunnel.

4.2 调整同步参数后的散射测量

前两次测量中,等离子鞘的作用时段落在矢网扫频的长耗时区段(5.2—5.3 GHz),在短暂的测量窗口内测量频点过少,影响了对等离子体效果的观测.因此,调整矢网扫描频段(4.8—6.8 GHz)及触发延迟时间(0.5 ms),再进行测量.频率扫描时间分配情况如图11所示.此时,气流前段将在5.2—5.3 GHz的长时扫描段作用,接着在2.25 ms (ΔT_m)的测量时间内将完成5.3—6.2 GHz的测量.预计可在更宽的频率范围内观测到等离子鞘对目标RCS的影响.随后,经过6.2—6.3 GHz, 2 ms的测量时间段,等离子鞘消散.

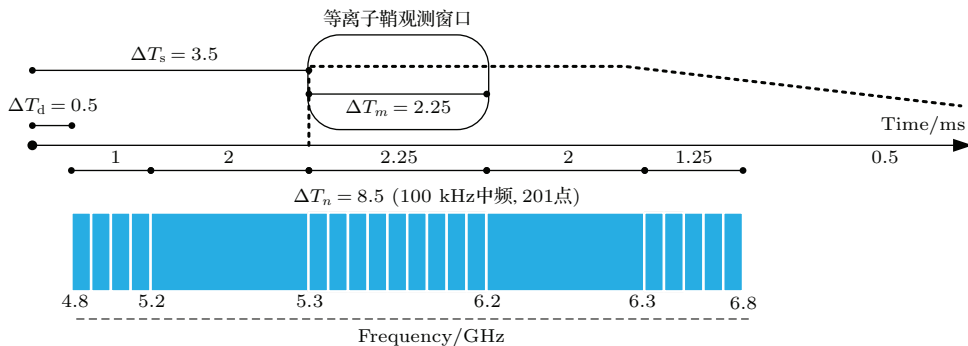


图11 C波段第三次测量扫频时间分配

Fig. 11. The distribution of time costs by the VNA step frequency sweeping in the third time measurement in the C band.

图 12 和图 13 给出了此次测量的测值数据, 包括对消后频域回波测值 (图 12)、对消后一维距离像 (图 12) 和距离像加窗后频域 RCS 结果 (图 13). 可以看出, 如所预计, 动态频域测值的剧烈变化发生在 5.2—5.3 GHz 频段, 对应不稳定的气流前段. 随后, 静动态测值在 5.3—6.2 GHz 频段内存在明显的差异, 对应等离子鞘对目标散射的影响. 本次测量中, 由于真空空室测量与风洞启动测量的时间间隔过长 (数小时), 距离像中透波窗区域的对消效果差于前两次测量. 因此, 静动态频域测值在频率

前端和末端的相符程度有所下降. 但从最终 RCS 结果中 (图 13) 可以看出, 通过滤除目标区以外的回波贡献, 目标静动态 RCS 在频率前端和末端相符良好. 在此基础上, 可以在 5.3—6.1 GHz 频段 (0.8 GHz, 2 ms 扫描时间) 内观测到较为平稳的等离子鞘效果, 目标 RCS 平均减缩约 2 dB. 随后经过 6.2—6.3 GHz 段, 静动态 RCS 值重新趋于一致. 测量数据验证了前面的推断: 在当前的实验状态下, 风洞的等离子鞘观测窗口在 2 ms 左右, 之后等离子体鞘作用迅速减弱而难以观测到显著效果.

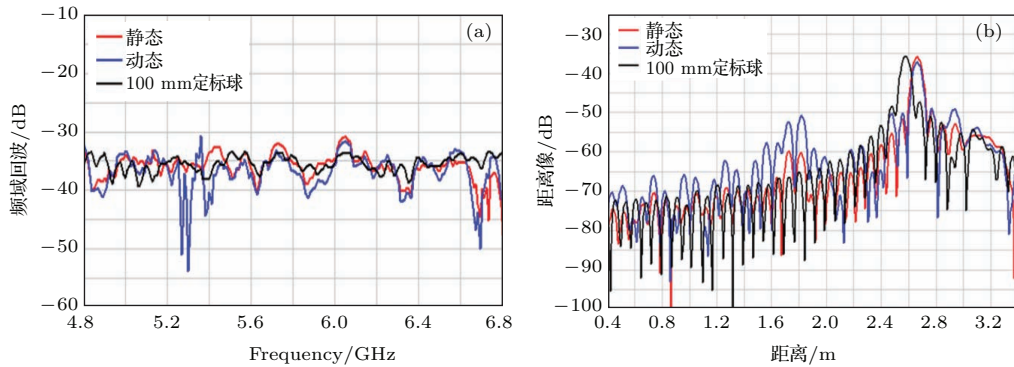


图 12 (网刊彩色) C 波段第三次风洞测量静动态对比 (a) 频域回波测值; (b) 未加窗的距离像

Fig. 12. (color online) The comparison of static and dynamic measured data in the third measurement: (a) returned frequency signals; (b) range profiles before windowing.

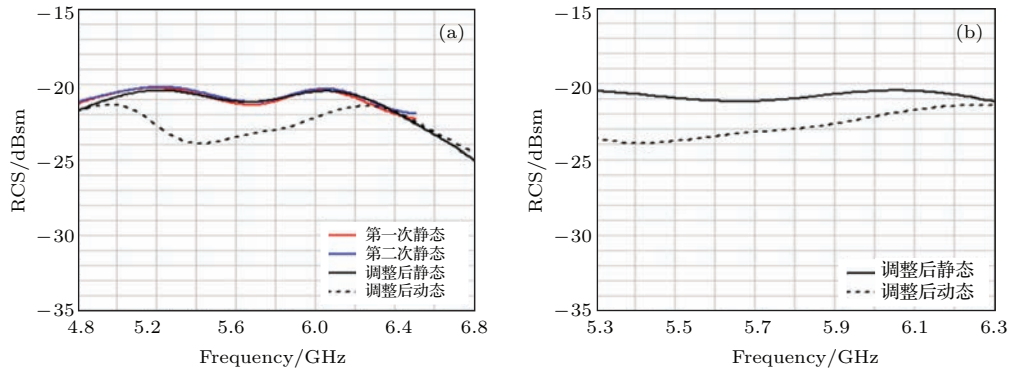


图 13 (网刊彩色) 经距离像加窗处理后的最终 RCS 测量结果 (汉明窗) (a) 4.8—6.8 GHz; (b) 5.3—6.3 GHz

Fig. 13. (color online) Processed RCS results (Hamming windowed in the range profile): (a) 4.8—6.8 GHz; (b) 5.3—6.3 GHz.

5 结 论

本文报道了在中国科学院力学研究所 JF10 激波风洞设施内开展的目标电磁散射实验探索. 实验在 C 波段开展, 首次利用该平台观测到等离子鞘套对目标 RCS 的减缩作用, 并直观地观察到气流状态对目标散射回波的影响. 测量结果表明等离子鞘的有效持续时间仅约 2 ms; 气流前段稳定性差并会

造成测值的剧烈变化, 不利于对等离子体效果的观测. 通过调整测量同步参数, 用矢量网络分析仪相对快的扫频频段对应等离子体的持续时间范围, 在 0.8 GHz 的范围内观测到了等离子鞘对目标 RCS 的减缩效果.

本次实验在 JF10 激波风洞设施内实现了对等离子体包覆目标 RCS 的定性观测. 实验中获取的 JF10 风洞高焓气流状态、等离子体的持续时间等信息, 可为后续等离子鞘效果的定量研究提供参考.

结合 JF10 风洞设施具备的大气流覆盖区域和目标姿态定位控制条件, 可在此基础上进一步开展比对分析等研究工作。

参考文献

- [1] Rybak J, Churchill R 1971 *IEEE Trans. Aerosp. Electron. Sy.* **7** 879
- [2] Mather D E, Pasqual J M, Sillence J P 2005 *Reston: Proc. AIAA AIAA-2005-3443*
- [3] Liu S B 2004 *Ph. D. Dissertation* (Changsha: National University of Defense Technology) (in Chinese) [刘少斌 2004 博士学位论文 (长沙: 国防科技大学)]
- [4] Li J T 2012 *Ph. D. Dissertation* (Xian: Xidian University) (in Chinese) [李江挺 2012 博士学位论文 (西安: 西安电子科技大学)]
- [5] Wei X, Peng S L, Yin H C, Yin G T 2011 *J. Syst. Eng. Electron.* **33** 506 (in Chinese) [韦笑, 彭世镠, 殷红成, 印国泰 2011 系统工程与电子技术 **33** 506]
- [6] Li J T, Guo L X 2012 *J. Electromagnet. Wave.* **26** 1767
- [7] Li J T, Guo L X, Fang Q J, Liu W 2011 *J. Syst. Eng. Electron.* **33** 969 (in Chinese) [李江挺, 郭立新, 方全杰, 刘伟 2011 系统工程与电子技术 **33** 969]
- [8] Song J G, Liu J F, Du Y X, Xi X L 2015 *Appl. Phys. A Pre-Online*
- [9] Bai B W, Li X P, Liu Y M, Xu J, Shi L, Xie K 2014 *IEEE Trans. Plasma Sci.* **42** 3365
- [10] Liu S B, Mo J J, Yuan N C 2004 *Acta Phys. Sin.* **53** 778 (in Chinese) [刘少斌, 莫锦军, 袁乃昌 2004 物理学报 **53** 778]
- [11] Liu J F, Xi X L, Wan G B, Wang L L 2011 *IEEE Trans. Plasma Sci.* **39** 852
- [12] Nguyen B T, Furse C, Simpson J J 2015 *IEEE Trans. Antenn. Propag.* **63** 304
- [13] Liu S B, Mo J J, Yuan N C 2002 *Int. J. Infrared Milli.* **23** 1179
- [14] Chaudhury B, Chaturvedi S 2005 *IEEE Trans. Plasma Sci.* **33** 2027
- [15] Chaudhury B, Chaturvedi S 2009 *IEEE Trans. Plasma Sci.* **37** 2116
- [16] Liu M H, Hu X W, Jiang Z H, Zhang S, Pan Y 2006 *Chin. Phys. Lett.* **23** 410
- [17] Gao H M, Fa P T 2008 *Chin. Phys. Lett.* **25** 2562
- [18] Zheng L, Zhao Q, Luo X G, Ma P, Liu X Z, Huang C, Xing X J, Zhang C Y, Chen X L 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 155203 (in Chinese) [郑灵, 赵青, 罗先刚, 马平, 刘述章, 黄成, 邢晓俊, 张春艳, 陈旭霖 2012 物理学报 **61** 155203]
- [19] Liang S C, Yu Z F, Zhang Z C, Shi A H, Ma P, Huang J 2013 *J. Experim. Flu. Mech.* **27** 19 (in Chinese) [梁世昌, 于哲峰, 张志成, 石安华, 马平, 黄洁 2013 实验流体力学 **27** 19]
- [20] Zeng X J, Ma P, Bu S Q, Liu S, Shi A H, Yu Z F 2008 *J. Experim. Flu. Mech.* **22** 5 (in Chinese) [曾学军, 马平, 部绍清, 柳森, 石安华, 于哲峰 2008 实验流体力学 **22** 5]
- [21] Ma P, Bu S Q, Shi A H, Zhang Z C, Yu Z F, Huang J 2010 *J. Experim. Flu. Mech.* **24** 56 (in Chinese) [马平, 部邵清, 石安华, 张志成, 于哲峰, 黄洁 2010 实验流体力学 **24** 56]
- [22] Zeng X J, Yu Z F, Bu S Q, Liu S, M P, Shi A H, Liang S C 2010 *Acta Aerodynam. Sin.* **28** 645
- [23] Jiang Z L, Yu H R 2009 *Adv. Mech.* **39** 766 (in Chinese) [姜宗林, 俞鸿儒 2009 力学进展 **39** 766]
- [24] Liao G, Lin Z B, Guo D H, Lin J M 2010 *J. Experim. Flu. Mech.* **24** 79 (in Chinese) [廖光, 林贞彬, 郭大华, 林建民 2010 实验流体力学 **24** 79]
- [25] He G Y, Lu C C, Hong J C, Deng H 2006 *Computation and Measurements of Electromagnetic Scattering* (Beijing: Beihang University Press) (in Chinese) [何国瑜, 卢才成, 洪家才, 邓晖 2006 电磁场散射的计算与测量 (北京: 北京航空航天大学出版社)]
- [26] Wang Q 2013 *Ph. D. Dissertation* (Beijing: Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences) (in Chinese) [汪球 2013 博士学位论文 (北京: 中国科学院力学研究所)]

Backscattering measurements of plasma coated target in high-enthalpy wind tunnel*

Jin Ming¹⁾ Wei Xiao¹⁾ Wu Yang¹⁾ Zhang Yu-Huai^{2)†} Yu Xi-Long²⁾

1) (*Science and Technology on Electromagnetic Scattering Laboratory, Beijing 100854, China*)

2) (*Key Laboratory of High Temperature Gas Dynamics, Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China*)

(Received 22 December 2014; revised manuscript received 19 June 2015)

Abstract

When high-speed vehicles enter into the atmosphere, plasma sheath may be excited around due to aerodynamic heating, resulting in difficulties in communicating and changes of electromagnetic scattering properties. Those facts have received lots of attention due to their influences on the aerospace communication and radio telemetry applications. While analytic and numerical studies have been carried out by many native institutions on the electromagnetic radiation/scattering problems in the presence of plasma sheath, there remains the lack of measurement data to support and verify those researches. This work reports the backscattering measurements for the target surrounded by plasma sheath in the ground high-enthalpy shock tunnel facility. Using the step frequency sweeping mode of a commercial instrument, i.e., vector network analyzer, we conduct the experiments in the JF-10 high-enthalpy shock tunnel. The dynamic electromagnetic scattering measurement must be completed on a time scale of ms while the shock tunnel is running. The implementation details are demonstrated in this work, including the experimental configurations, data processing procedures, timing synchronization, and discussion on the relationships between the air flow status and measured target scattering signals. The influences of the plasma sheath on the target RCS (radar cross section) in the C band are successfully and clearly observed. The influence of the air flow status on the measured data can be concluded as follows: the front section of high-speed air flow lasting about 0.5–1 ms will change the measured signal dramatically, which should be avoided in observation due to its instability; the effective plasma sheath lasts only about 2 ms, resulting in an overall reduction on the target RCS by about 2 dB in the measurements. Afterwards, the effects by the plasma sheath on the target scattering vanish quickly.

Keywords: plasma sheath, detonation-driven tunnel, electromagnetic scattering, experimental measurements

PACS: 52.40.Kh, 41.20.Jb, 42.68.Mj

DOI: 10.7498/aps.64.205205

* Project supported by the Major Program of National Natural Science Foundation of China (Grant No. 61490695-07).

† Corresponding author. E-mail: zhangyuhuai@imech.ac.cn