



## 论文

# 高焓流动中电子密度的静电探针测试技术研究

汪球<sup>\*</sup>, 黄建栋, 聂春生, 赵伟, 余西龙

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;

中国运载火箭技术研究院空间物理重点实验室, 北京 100076

<sup>\*</sup>E-mail: wangqiu@imech.ac.cn

收稿日期: 2015-10-09; 接受日期: 2015-12-22; 网络出版日期: 2016-01-27

国家自然科学基金(批准号: 11402275 和 11532014)资助项目

**摘要** 高焓激波风洞能够产生模拟高马赫数飞行条件的气流总温, 是研究高温气体效应以及通讯中断问题的有效地面试验设备. 本文在 JF-10 高焓激波风洞总焓 16 MJ/kg、总温 7900 K 的高超声速试验气流状态下, 采用能够获得足够空间分辨率且不影响流场结构的针状探针, 发展了静电探针测试技术并对 10°尖劈模型流场进行了电子密度测量. 试验结果表明: 研制的探针能够获得模型流场空间电子密度分布规律且具有较好的测量重复性; 恒定偏压方法能够获得耦合流场参数的无量纲电子密度, 而发展的新型高频扫描电路能有效降低扫描电路中的干扰噪音, 提高测量的精度, 获得定量电子密度值.

**关键词** 高焓, 激波风洞, 电子密度, 静电探针

## 1 引言

在高超声速飞行条件下, 飞行器头部弓形激波后会由于激波压缩和黏性阻滞减速而产生高温, 导致空气分子的振动激发、离解甚至电离, 飞行器周围覆盖着发生复杂物理化学过程的高温等离子体鞘层, 而飞行器的雷达特性及电波输运特性强烈的依赖于流场中的电子密度分布<sup>[1]</sup>, 因此飞行器外流场电子密度的研究对其空间通讯十分重要, 它也是高温气体效应实验研究的重要课题之一.

对于高速飞行器流场电子密度的研究, 在数值方面由于高温物理模型的经验性及不确定性, 目前包含电子组分的数值研究大多是进行高温物理模型

的验证或者是对实验结果进行解释<sup>[2]</sup>, 通讯中断问题的解决更多地依赖于实验研究. 高焓激波风洞以其较高的焓值, 可产生模拟高超声速飞行所需的速度及总温条件, 具有研究高温气体效应的能力. 相比于其他高焓设备如激波管(试验时间短)、弹道靶(模型尺度小)、电弧风洞(总温不足)等, 它具有不可替代的优势及广泛的发展前景<sup>[3]</sup>, 是当前开展通讯中断问题研究的有效地面试验设备.

在电子密度的实验测量方面, 常用诊断技术有微波技术和探针技术. 微波技术主要包含微波干涉仪、微波谐振腔等, 作为一种非接触测量手段, 应用较多<sup>[1,4-7]</sup>, 理论也相对成熟, 但是其空间分辨率有限, 无法进行复杂外形流场电子密度的局部诊断, 在高

**引用格式:** 汪球, 黄建栋, 聂春生, 等. 高焓流动中电子密度的静电探针测试技术研究. 中国科学: 技术科学, 2016, 46: 500-508  
Wang Q, Huang J D, Nie C S, et al. Research on electron density measurements for high enthalpy flows (in Chinese). Sci Sin Tech, 2016, 46: 500-508, doi: 10.1360/N092015-00295

焓风洞应用也受到限制; 探针技术是一种接触式测量方法, 其结构简单, 具有良好的空间分辨率, 但是理论分析较为复杂, 须结合流场状态及探针参数. 但随着探针理论的发展, 静电探针已成为等离子体诊断的重要手段之一<sup>[8-10]</sup>. 美国为了理解和克服飞行器再入时的通讯中断现象(blackout of radio communication), NASA 兰利研究中心在 20 世纪 60 年代共开展了 8 次 RAM-C 飞行试验<sup>[11-13]</sup>, 8 个布置于尾部附近的静电探针获得了垂直于壁面的电子密度空间分布, 其结果为学者进行高温物理模型的数值研究及验证提供了大量可靠的数据, 但是通讯中断问题仍然没有得到完全解决, RAM 关键试验结果以及测试技术等也均为涉密信息, 很少能在公开文献中获得. 相比较而言, 飞行试验价格昂贵, 随着地面高超设备的发展, 更多利用高焓设备来开展通讯中断研究. Scharfman<sup>[14]</sup>、Boyer 等人<sup>[15]</sup>分别在激波管和激波风洞中获得了探针应用的相关理论及经验, 1997 年 Chadwick<sup>[16]</sup>在 Calspan 的 96-in 激波风洞中针对 4.4 km/s 的试验来流环境, 成功应用扫描电路探针(扫描电压 -5 ~ +3 V)获取了球头钝锥模型的边界层电子密度分布, 并给出了模型在不同攻角下的电子密度分布规律, 遗憾的是作者并没有给出具体的探针测试电路. 竺乃宜和王尚勇<sup>[17]</sup>在中国科学院力学所  $\phi 800$  mm 高温激波管中针对激波波后气流, 利用微型静电探针进行了电子密度的标定, 也获得了高温高速气流中低电子密度的一种测量方法. 总体而言, 探针技术在国内外得到了不断的发展和运用, 但是研究主要集中在等离子发生器、电弧风洞等长试验时间的地面设备上, 而在短时间脉冲型高焓设备上开展的研究则相对较少, 尤其是在能够模拟再入飞行速度、产生空气试验气流的高焓激波风洞上.

JF-10 爆轰驱动高焓激波风洞作为国内唯一一座高焓激波风洞, 它可以获得高总焓的超声速试验气

流, 具有模拟真实气体效应的能力, 是开展再入通讯中断问题研究的有效地面试验设备. 本文针对高焓激波风洞, 系统研究了静电探针技术应用于模型外流场的电子密度测量, 发展了高频降噪的探针电路, 利用 10°尖劈模型对测试方法进行了验证.

## 2 试验设备及测量原理

### 2.1 试验设备及试验状态

JF-10 氢氧爆轰驱动高焓激波风洞示意图如图 1 所示, 风洞主体结构长约 42 m, 它由爆轰驱动段、卸爆段、被驱动段、喷管、试验段、真空容器及真空抽气机组组成. 试验喷管为出口直径  $\phi 500$  mm、锥度 7°7' 的锥形喷管, 喉道直径  $\phi 11$  mm. 利用驱动段爆轰波后产生的高温、高压气体作为驱动气体, 风洞可以在获得高总焓的同时具有高总压的试验气源, 具有模拟高温真实气体效应的能力. 大量的理论、试验研究以及数值模拟为其工作原理、驱动性能及驱动的关键技术方面提供了可靠的依据, 并改善了气流品质和有效试验时间<sup>[3,18-24]</sup>.

本文运行的试验状态参数如表 1 所示, 通过在激波管分布的 5 个电离探针获得激波速度, 结合低压段初始状态参数确定风洞的驻室状态参数, 最终状态

表 1 风洞运行参数

	参数	数值
驱动段	驱动段氢氧比	4:1
	驱动段初压 $P_{4i}$	2.5 MPa
驻室	驻室总温 $T_0$	7900 K
	驻室总焓 $H_0$	16 MJ/kg
自由流	静压 $P_\infty$	103 Pa
	平动温度 $T$	430 K
	振动温度 $T_v$	3300 K
	密度 $\rho$	$7.5 \times 10^{-4}$ kg/m <sup>3</sup>
	速度 $u$	5080 m/s

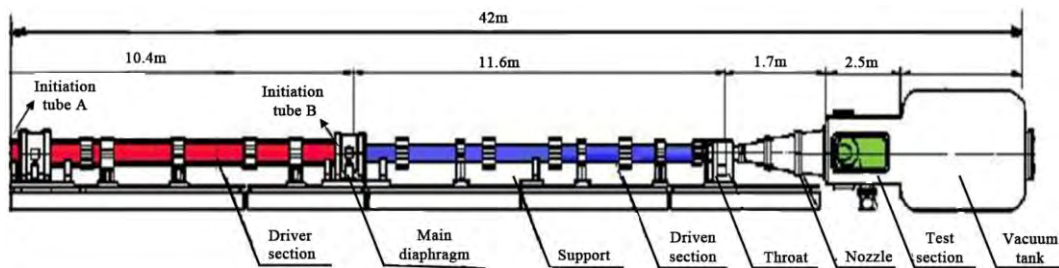


图 1 (网络版彩图)JF-10 高焓激波风洞结构示意图

焓值为 16 MJ/kg、总温约为 7900 K。在皮托测压的基础上, 喷管出口自由流参数由热化学非平衡流程序数值计算给出<sup>[25]</sup>。

## 2.2 试验模型及传感器布置

试验模型是一个尖劈模型, 如图 2 所示, 模型锥角为  $10^\circ$ , 长度为 400 mm, 宽度为 200 mm。初步评估模型斜激波角及边界层厚度的前提下, 在尖劈上表面布置两个传感器座, 依此标记为 B 和 C, 如图所示, 距离前缘的距离分别为 100 和 200 mm。每个传感器座上布置 5 个静电探针, 最靠近壁面的探针离壁面的距离为 4 mm, 每个探针间距离为 4 mm, 便于数据记录分析, 每个传感器座的探针从壁面向外依次编号为 1~5, 如 B1, B2, B3, B4 和 B5。探针半径为  $R=0.15$  mm, 长度为 8 mm。

## 2.3 测量原理

静电探针的基本原理是在探针上施加一定的偏压, 将探针置于等离子体中, 当探针电势和流动等离子体电势不相等时, 探针就会吸引电子或者离子, 在探针回路中形成一定的电流, 由所获得的电流来推算电子浓度。图 3 是典型的静电探针伏-安特性曲线, 在探针上施加不同的偏压时, 探针上就形成不同的回路电流, 该伏-安特性曲线分为 3 个区域: (1) 电子饱和区; (2) 电子转折区; (3) 离子饱和区。

静电探针的结构相对简单, 但探针数据的解释是较为复杂的, 须根据流动参数和探针参数来确定探针工作的区域: 自由分子流区、过渡区、连续介质流区, 这主要取决于两个无量纲参数: Debye 长度与探针半径之比、气体粒子的平均自由程长度与探针半径之比, 即为 Knudsen 数。一般希望探针处于无碰撞分子自由流区, 否则探针理论需要综合考虑流动效应的影响而进行相应修正, 根据 Laframboise 理论,

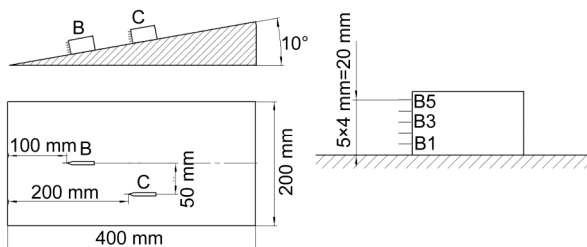


图 2 试验模型及传感器布置示意图

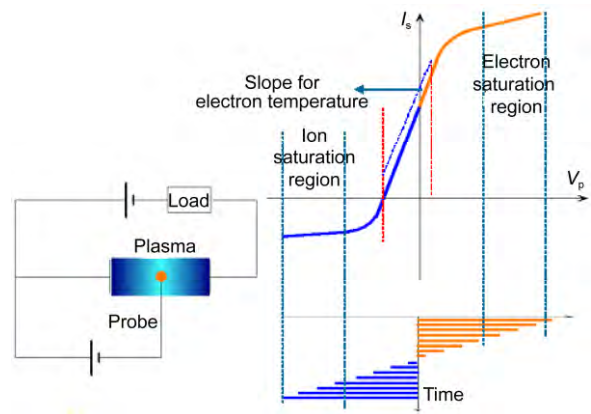


图 3 (网络版彩图) 典型探针电路及伏安特性曲线

和等离子体流平行放置的柱状探针的离子电流  $j_i$  和电子电流  $j_e$  由下式确定:

$$j_i = n_e \sqrt{\frac{kT_e}{2\pi m_i}} i_+ \left( \chi_p, \frac{T_i}{T_e}, \frac{R}{\lambda_D} \right), \quad (1)$$

$$j_e = n_e \left( \frac{kT_e}{2\pi m_e} \right)^{\frac{1}{2}} \exp(\chi_p), \quad (2)$$

其中,  $j_i$  和  $j_e$  为单位面积探针离子电流和电子电流,  $n_e$  为电子密度,  $R$  为探针的半径,  $\lambda_D$  为 Debye 长度,  $\lambda_D = \sqrt{\varepsilon_0 kT_e / (e^2 N_e)}$ ,  $\varepsilon_0$  为真空介电常数,  $k$  为玻尔兹曼常数,  $T_e$  是电子温度,  $e$  为电子电量,  $m_i$  为带电离子平均质量, JF-10 高焓风洞试验状态下, 带电正离子主要是  $\text{NO}^+$ ,  $m_i$  取为  $\text{NO}^+$  离子的质量。探针修正因子  $i_+$  由归一化探针电位  $\chi_p$ 、探针半径与 Debye 半径之比  $R/\lambda_D$ 、离子温度电子温度之比  $T_i/T_e$  决定。归一化探针电位  $\chi_p$  定义为

$$\chi_p = \frac{e}{kT_e} (V_p - V_\infty). \quad (3)$$

它代表探针电势  $V_p$  和等离子体电势  $V_\infty$  之间的无量纲差别。如果探针半径与 Debye 半径之比  $R/\lambda_D$  大于 50, 修正因子可以近似取为 1。由后面分析可知本实验中修正因子可近似取 1。

电子转折区域一般用来推算电子温度, 由(2)式取微分得

$$\frac{d \ln(j_e)}{dV_p} = \frac{e}{kT_e}. \quad (4)$$

在获得电子温度的基础上, 结合饱和离子电流及(1)式即可推算电子浓度。

对于本文尖劈模型在 JF-10 高焓风洞中所处的流动环境, 考虑如下.

(1) 尖劈模型流场电子密度范围为  $n_e=10^{10}\sim 10^{13}$   $\text{cm}^{-3}$ , 电子温度  $T_e=3000\sim 8000$  K, 因此 Debye 长度为

$$\lambda_D = \left( \frac{\epsilon_0 k T_e}{e^2 n_e} \right) < 10^{-2} \text{ mm}. \quad (5)$$

(2) 探针半径, 即探针特征尺度为  $R=0.15$  mm.

(3) 高焓风洞空气试验气流环境下, 主要带电离子是  $\text{NO}^+$ , 利用表 1 的结果即可推算自由流带电粒子的平均分子自由程:

$$\lambda_{\text{NO}^+} = \frac{kT}{\sqrt{2\pi} d^2 P_e} \approx 0.12 \text{ mm}. \quad (6)$$

图 4 是利用热化学非平衡流数值程序计算的 B 和 C 位置点垂直壁面方向上探针半径与当地粒子平均分子自由程之比, 参考 Scharfman<sup>[14]</sup>在激波管中获得的实验结果:  $R/\lambda_i < 3$  时分子自由流是适用的,  $R/\lambda_i > 20$  时分子自由流假设会引起较大的偏差,  $3 < R/\lambda_i < 20$  是转折区. 本文大部分探针小于 3, 其余探针也仅是略大于 3, 因此可认为本试验探针是处于近分子自由流区域, 探针半径和分子自由程量级是相当的,  $\lambda_D < \lambda_{\text{NO}^+} \sim R$ , 按照经典无碰撞探针理论来处理试验数据是合理的.

### 3 静电探针测量技术

#### 3.1 恒定偏压方法

恒定负偏压方法是在探针上施加恒定的负偏置电压, 此时探针只吸收离子, 回路中形成饱和离子流.

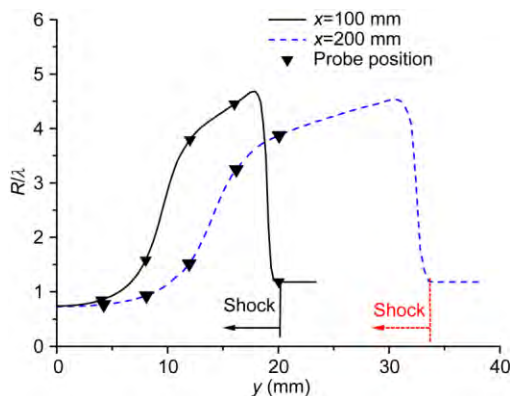


图 4 (网络版彩图)流场中探针半径和当地粒子分子自由程之比

恒定负偏压方法常被用来测量激波波后电子密度, 其优点是探针电路结构简单, 信号不受探针电路的干扰, 信噪比较好且能够反映基本的电子密度分布规律. 恒定负偏压电路示意图如图 5 所示, 在探针上施加恒定负偏置电压, 保证探针相互之间以及探针与尖劈模型之间绝缘, 模型接地, 通过 300  $\Omega$  取样电阻来获取探针电流信息.

恒定负偏压方法数据处理一般参考经验公式. Boyer 等人<sup>[15]</sup>阐述了高超声速风洞中利用齐平探针测量电子密度的相关结果, 参考该文中涉及到的激波风洞的部分实验结果, 参照他们关联数据的方法, 廖光等人<sup>[26]</sup>给出如下的经验公式:

$$\frac{J_i (S_{ci} R_{ex})^{0.5}}{n_e e u} = 1.8 \left( \frac{\lambda_D}{R} \right)^{1/3} (-x_p)^m, \quad (7)$$

其中,  $J_i$  为探针表面单位面积的离子电流;  $S_{ci}$  为离子的 Schmidt 数;  $R_{ex}$  为探针所在平板位置的雷诺数;  $n_e$  为电子密度 ( $\text{cm}^{-3}$ );  $u$  为速度 ( $\text{cm/s}$ ); 高焓风洞静电探针伏安特性实验曲线表明  $m$  接近于 1.

定义无量纲电子密度为

$$N_e^* = \frac{N_e u^{1.2}}{T_e (S_{ci} R_{ex})^{0.6}}, \quad (8)$$

代入电路及探针相关参数后简化上式得

$$N_e^* = 5.53 \times 10^{13} \left( \frac{V_i}{\phi_p f} \right)^{1.2}. \quad (9)$$

恒定负偏压方法结构简单且能反映电子密度的基本规律及变化趋势, 在实验中也容易实现, 因此受到了学者的青睐<sup>[26,27]</sup>, 图 6 和 7 是利用此方法在高焓风洞中应用所获得的部分试验结果. 图 6 给出的是 B 探针座的原始实验记录曲线, 在经历喷管起流动激波及模型流场建立时间之后, 形成稳定的试验气流, 记

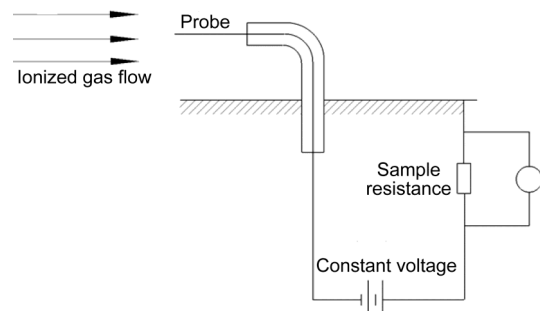


图 5 恒定负偏压电路图

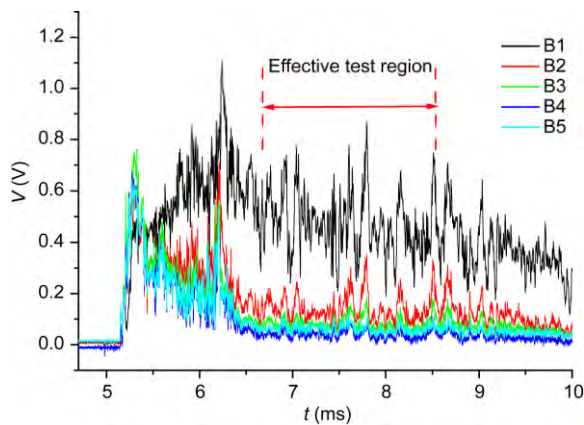


图6 探针座B的试验曲线

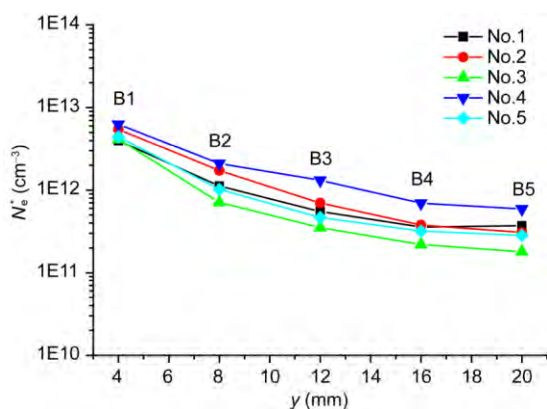


图7 B(x=100 mm)探针座处5次试验电子密度分布规律

录曲线也形成平稳的读数区域, 5个探针能反馈各自位置的信号值差别。图7给出的是5次试验B探针座的电子密度测量结果, 可以发现, 从壁面向外电子密度依次减小, 5次试验之间体现出较好的规律性和重复性。

由上分析可知, 恒定负偏压方法能够给出电子密度变化规律, 获得耦合流场参数的无量纲电子密度  $N_e^*$ , 但高焓流场参数的实验测量在当前是较为困难的, 尤其是复杂外形模型流场, 因此恒定偏压方法不能确定定量的电子密度值, 而在对通讯中断现象进行研究时, 需要知道定量的电子密度值来判断电子密度  $n_e$  是否超过了临界电子密度。恒定负偏压方法具有一定的局限性。

### 3.2 扫描电路方法

由3.1可知, 恒定偏压方法并不能获得定量的电子密度值, 要想获得定量的电子密度, 由(1)式知必

须知道电子温度, 电子温度一般通过(4)式推导, 它是取伏安特性曲线中电子转折区域对数曲线的斜率。因此, 需要在探针上施加扫描电压获取完整的伏安特性曲线才能推导电子温度及电子密度。

和恒定负偏压不同, 扫描电路是将图5中的恒定电压信号换为一定频率的扫描信号, 其基本结构示意图如图8所示, 由信号发生器产生所需频率的扫描信号, 一般输入三角波或者正弦波信号, 通过功率放大器放大后同时供给试验用到的探针, 扫描电压范围须覆盖饱和离子区和电子转折区。恒定负偏压即对应图3中离子饱和区中的1个点, 而扫描电路能覆盖整条伏安特性曲线。施加扫描电压时, 涉及到2个参数: 扫描频率和扫描电压, 这是和测试环境及测试要求密切相关的。

对于高焓风洞试验环境电子密度测量, 考虑到其有效试验时间为2~5 ms, 扫描电路的扫描频率必须大于1 kHz才能在有效的试验时间内获得足够周期的伏安特性曲线。图9给出的是按照图8所示电路获得的实验结果, 扫描电压为三角波, 频率1 kHz, 电压范围为-30~10 V, 能够覆盖饱和离子区和电子转折区域, 从探针信号曲线可以发现经历喷管启动激波及模型流场建立时间后, 1 kHz的扫描电压能够在有效试验时间内获得约3个周期信号, 但是试验气流还未到达之前, 探针上已经有了峰峰值约0.3 V的噪音信号, 其值相比于探针有效信号来说不可忽略, 它夹杂在探针信号中, 致使试验数据信噪比偏低, 导致数据处理时出现较大的误差。干扰噪音是由高频扫描电压情况下线路的RC特性所产生, 其噪音幅值随扫描频率变化而变化, 当扫描频率较低时, 噪音较小, 但是当扫描频率较高时, 这种电路干扰噪音较大, 会给数据处理带来较大的误差。图8扫描电路在本试验的测试环境中直接应用存在噪音较大的问题, 需要改进。

为了获得准确的试验结果, 由于RC特性所带来的干扰噪音必须减小到可以忽略不计的程度。图10是为了降低噪音而设计的新型高频扫描电路, 其基

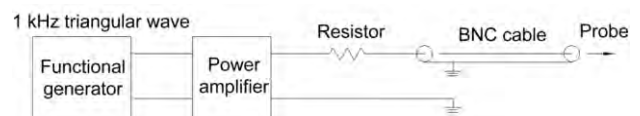


图8 扫描电路示意图

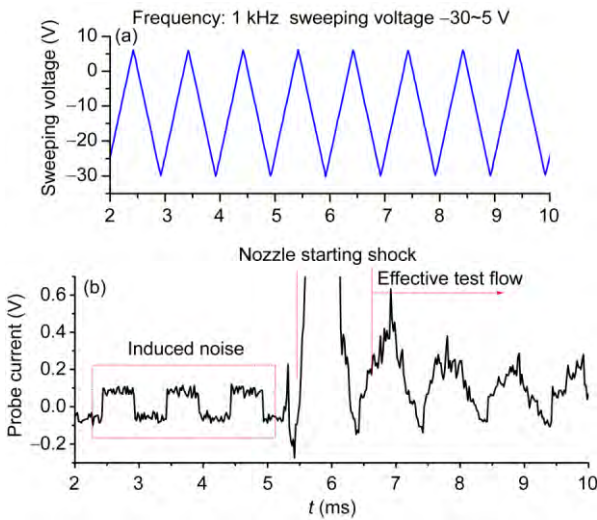


图9 (网络版彩图)高频扫描信号(a)及探针电压信号(b)

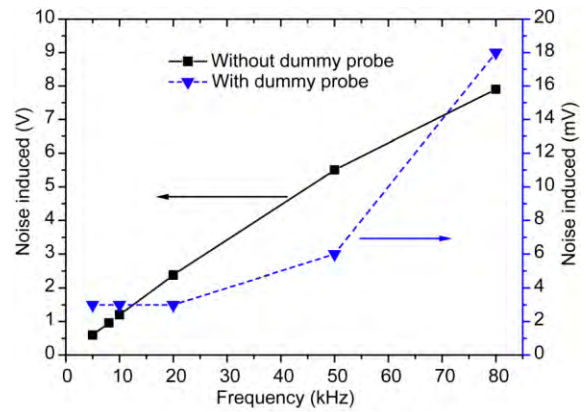


图11 (网络版彩图)噪音信号随扫描频率变化曲线

于 5 mV, 可以忽略不计. 高焓风洞测试环境下, 新型高频扫描电路能够大幅度提高测量精度.

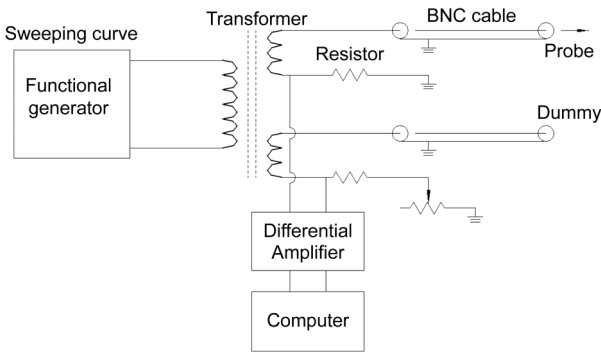


图10 新型高频扫描电路

本思想是设计一个和采集探针电路在导线种类、长度上完全相同的参考探针电路, 但是参考探针电路没有侵入到来流中的探针部分, 采集探针电路中设计的是一个固定取样电阻, 而参考探针电路中设计的是一个固定电阻加上一个可调电阻, 在没有带电粒子来流的情况下, 通过调节可变电阻可以使得两个电路中的噪音完全一致, 通过差分放大器处理后噪音信号能够降低到忽略不计的程度. 图 11 给出的是有参考探针电路和没有参考探针电路时噪音信号随扫描频率的变化曲线, 扫描信号为正弦波信号. 可以发现, 没有参考探针电路时, 探针噪音信号随扫描频率的增加成近线性增加, 在 10 kHz 以上时, 这种噪音能够达到 1 V 以上, 噪音信号幅值甚至超过了来流所反馈的探针信号值. 有参考探针电路时, 噪音信号能够降低 2~3 个量级, 在 20 kHz 以下时, 噪音信号小

#### 4 新型扫描电路应用试验

将新型探针电路应用于高焓风洞中尖劈模型表面电子密度测量, 扫描频率为 10 kHz, 在有效试验时间内能够获得更多周期的有效数据, 扫描波形为正弦波, 扫描电压范围为 -10~10 V. 图 12 给出的是采集到的探针信号曲线, 和图 9 对比可以发现, 在起动激波之前, 采用新型探针电路情况下, 噪音信号非常小, 它相比于探针信号可以忽略不计, 可见新型探针电路解决了弱电信号测量中的噪音干扰问题, 且扫描频率大大提高, 能够在有效时间内获得更多周期的有效数据, 提高了测量精度.

图 13 给出的是 1 ms 有效试验时间内正弦扫描电压和探针采集信号, 图 14 和 15 给出的是相应的伏安

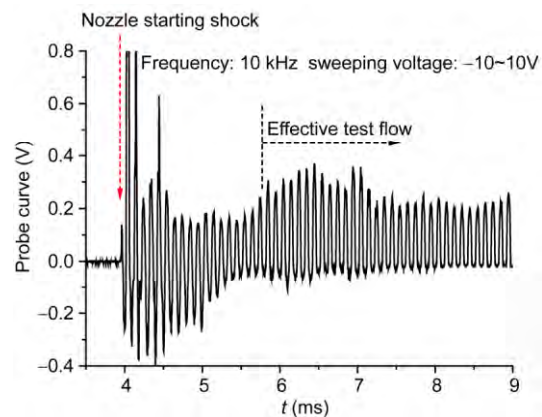


图12 (网络版彩图)新型电路试验曲线

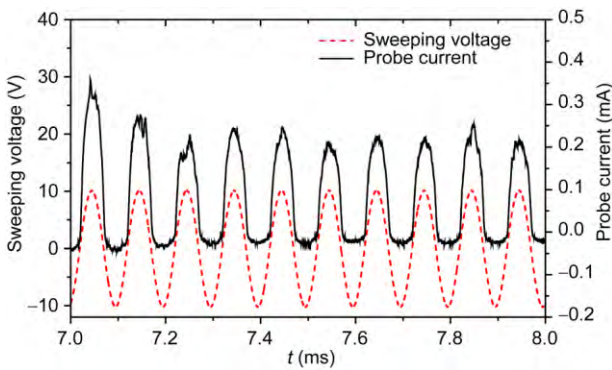


图 13 有效试验时间内探针扫描信号和探针信号

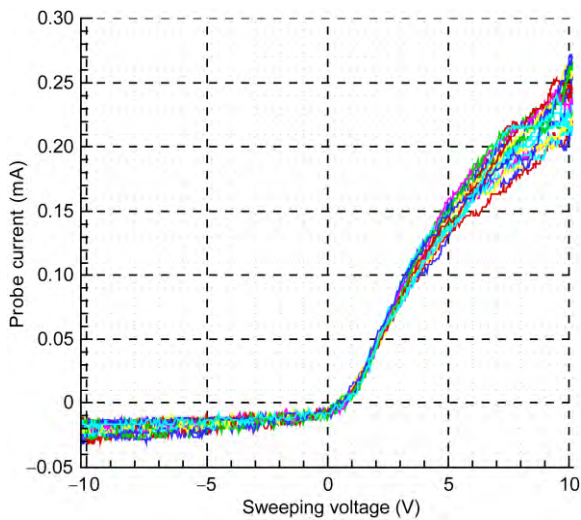


图 14 1 ms 有效试验时间内 20 条伏安特性曲线

特性曲线及一条典型伏安特性曲线的数据处理过程。可以发现, 探针信号和扫描信号同步输出, 在 1 ms 试验时间内能获得约 20 条伏安特性曲线, 且各条曲线基本重合, 另一方面也反映风洞来流较为稳定。对比图 3 可知, 当前的扫描电压覆盖了离子饱和区以及电子转折区, 还没有覆盖电子饱和区, 但电子温度以及电子密度的求解并不需要电子饱和区。伏安特性曲线的数据处理过程中,  $V_F$  为浮动电势, 对应于探针电流  $I=0$  的电压,  $V_\infty$  为等离子体电势, 一般对应于探针电流  $I$  对扫描电压  $U_p$  的一次导数最大值处。扫描电压远小于  $V_F$  的地方对应的是饱和离子流区域, 此区域探针信号随扫描电压的增加基本保持不变, 在  $V_\infty$  和  $V_F$  之间是电子转折区域, 在这个区域探针信号随扫描电压的增加迅速增加, 在电子转折区域通过(4)式可推导出电子温度, 获得电子温度后结合(1)式即可推导出电子密度。

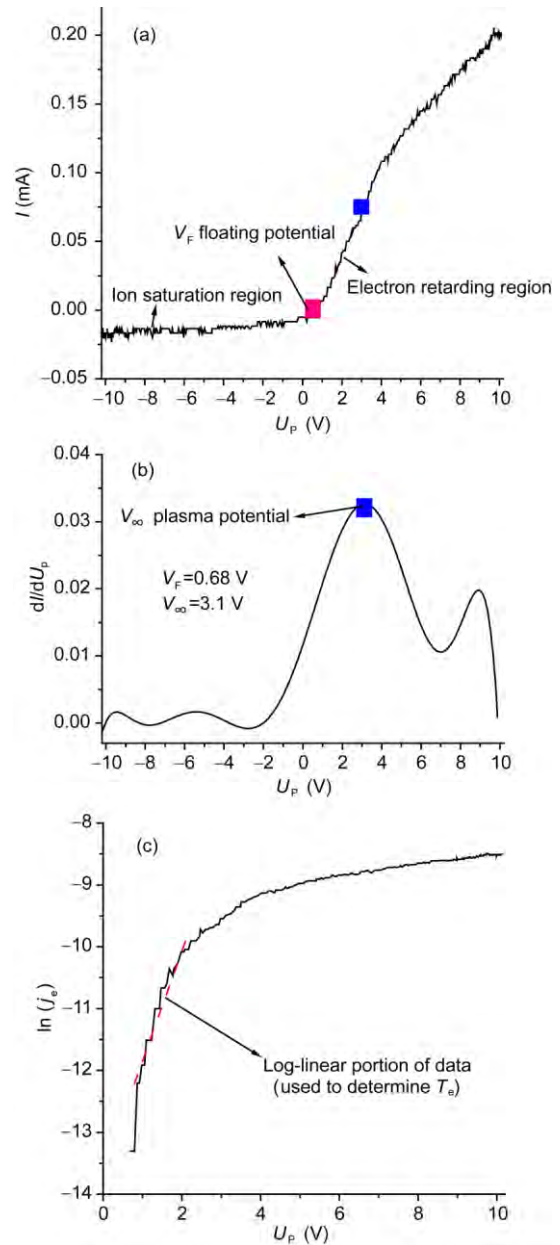


图 15 伏安特性曲线数据处理过程

图 16 给出的是 B2 探针电子密度及电子温度在 1 ms 有效试验时间内的测量值, 10 kHz 扫描频率能获得 20 组数据, 测量标准偏差小于 20%, 这对于电子温度和电子密度的测量来说较为理想。取 1 ms 内的平均值作为 B2 探针的电子密度, 其值为  $n_e=1.1 \times 10^{11} \text{ cm}^{-3}$ ,  $T_k=6600 \text{ K}$ 。

试验中为避免探针座之间的相互干扰, B 和 C 探针座分开开展试验, 且开展 C 探针座试验时, 拆除 B

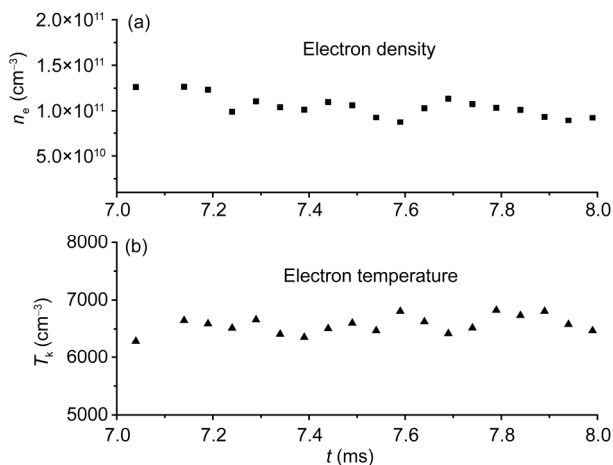


图 16 有效试验时间内 B2 探针结果

(a) 电子密度; (b) 电子温度

探针座。每组探针各开展两次实验, 实验结果如图 17 所示, 其空间分布规律和图 7 基本类似, 沿壁面向外电子密度逐渐减小, 区别在于图 17 中电子密度结果为定量值, 图 7 中给出的无量纲电子密度分布。可见新型扫描电路能够有效在高焓流场中获得定量的电子密度值, 高焓风洞和探针技术相结合能够为通讯中断及目标识别的研究提供地面技术支撑。本技术也可以应用于其他等离子体诊断环境, 尤其是进行瞬态电子密度诊断。

## 5 总结

本文针对高焓激波风洞的测试环境, 系统研究了高焓流动下的电子密度测量技术, 并利用尖劈模

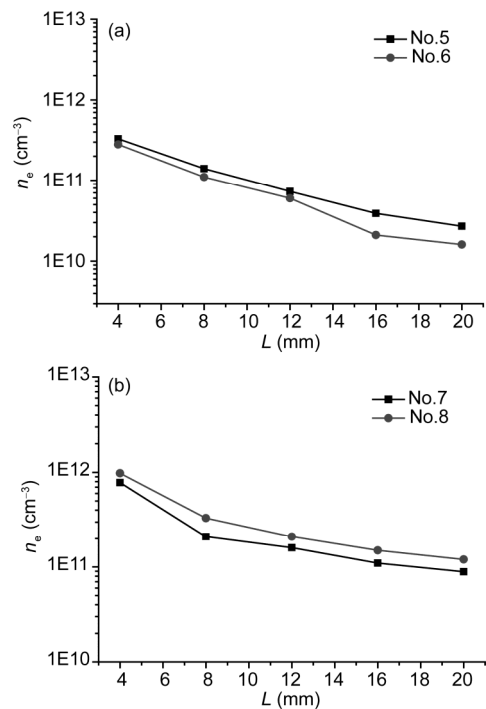


图 17 电子密度测量结果

(a) B 探针座; (b) C 探针座

型表面流场对测试技术进行了验证。

恒定偏压方法获得了耦合流场参数的无量纲电子密度; 通过串接参考探针电路的方式, 新型高频扫描电路有效降低了扫描电路中的干扰噪音, 获得模型流场定量电子密度值, 且结果重复性较好。高焓激波风洞与静电探针技术相结合, 可以获得高焓高超声速流动下模型流场空间电子密度分布规律, 为通讯中断及目标识别的研究提供地面技术支撑。

## 参考文献

- 1 马平, 曾学军, 柳森, 等. 高超声速球模型尾迹电子密度试验研究. 流体力学实验与测量, 2010, 24: 20–25
- 2 李海燕, 李志辉, 罗万清, 等. 近空间飞行环境泰富隆烧蚀流场化学非平衡流数值算法及应用. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2014, 44: 194–202
- 3 俞鸿儒, 赵伟, 袁生学. 氢氧爆轰驱动激波风洞的性能. 气动实验与测量控制, 1993, 7: 38–42
- 4 竺乃宜, 李学芬. 微波条纹干涉仪用于激波管中电离现象的研究. 力学学报, 1984, 16: 85–91
- 5 Fujita K, Sato S, Abe T, et al. Electron density measurement behind a shock wave by means of  $H\beta$  line profile matching. In: 33rd Thermophysics Conference. Norfolk, 1999
- 6 Dallas T, Walter R. Microwave and electrostatic probe measurements on a blunt re-entry vehicle. AIAA J, 1973, 11: 675–682
- 7 竺乃宜, 李学芬. 用 3 cm 微波透射仪测量强激波后的电子密度. 力学学报, 1981, 9: 507–510
- 8 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. 实验流体力学, 2014, 28: 72–77
- 9 Habiger H A, Auweter-Kurtz M. Investigation of a high enthalpy air plasma flow with electrostatic probes. In: 31st Thermophysics



- Conference. New Orleans, 1996
- 10 Fujita K, Sato S, Abe T, et al. Electron temperature and density measurement ahead of strong shock waves. In: 35th AIAA Thermophysics Conference. Anaheim, 2001
  - 11 Akey N D, Cross A E. Radio blackout alleviation and plasma diagnostic results from a 25000 foot per second blunt body reentry. NASA TN D-5615, 1970
  - 12 Grantham W L. Flight results of 25000 foot per second reentry experiment using microwave reflectometers to measure plasma electron density and standoff distance. NASA TN D-6062, 1970
  - 13 Jones W L, Cross A E. Electrostatic probe measurements of plasma parameters for two reentry flight experiments at 25000 feet per second. NASA TN D-6617, 1972
  - 14 Scharfman W E. The use of Langmuir probes to determine the electron density surrounding re-entry vehicles. NASA-CR-66108, 1965
  - 15 Boyer D W, Touryan K J, Russo A J. Experimental and numerical studies of flush electrostatic probes in hypersonic ionized flows. In: 10th Aerospace Sciences Meeting. San Diego, 1972
  - 16 Chadwick K M. Plasma and aerothermal measurements on a hypervelocity re-entry vehicle. J Spacecraft Rockets, 1997, 34: 602–608
  - 17 竺乃宜, 王尚勇. 低电子密度诊断技术研究. 气动实验与测量控制, 1996, 10: 24–28
  - 18 俞鸿儒. 大幅度延长激波风洞试验时间. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2015, 45: 094701
  - 19 赵伟. 利用氢氧爆轰产生高焓试验气流装置的性能研究. 博士学位论文. 北京: 中国科学院力学研究所, 1999
  - 20 林贞彬, 郭大华, 竺乃宜, 等. JF-10 氢氧爆轰驱动激波风洞自由流的测量和诊断技术. 流体力学实验与测量, 2000, 14: 12–17
  - 21 Jiang Z L, Zhao W, Wang C. Forward-running detonation drivers for high-enthalpy shock tunnels. AIAA J, 2002, 40: 2009–2016
  - 22 Zhao W, Jiang Z L, Saito T, et al. Performance of a detonation driven shock tunnel. Shock Waves, 2005, 14: 53–59
  - 23 杨宏伟, 黄敦, 俞鸿儒, 等. 前向爆轰驱动变截面激波管特性的数值模拟. 力学学报, 2005, 37: 494–500
  - 24 陈宏, 冯珩, 俞鸿儒. 用于激波管/风洞的双爆轰驱动段. 中国科学: 物理学 力学 天文学, 2004, 34: 183–191
  - 25 曾明. 高焓风洞流场测量的数值重建和非平衡效应的数值分析. 博士学位论文. 北京: 中国科学院力学研究所, 2007
  - 26 廖光, 林贞斌, 郭大华, 等. 高焓风洞中带翼钝锥体尾流电子密度的测量与分析. 实验流体力学, 2010, 24: 79–82
  - 27 乐嘉陵, 张若凌, 王苏, 等. 强激波阵面的非平衡特性研究. 空气动力学学报, 2009, 27: 1–8

## Research on electron density measurements for high enthalpy flows

WANG Qiu<sup>1</sup>, HUANG JianDong<sup>2</sup>, NIE ChunSheng<sup>2</sup>, ZHAO Wei<sup>1</sup> & YU XiLong<sup>1</sup>

<sup>1</sup> State Key Laboratory of High Temperature Gas Dynamics, Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China;

<sup>2</sup> Science and Technology on Space Physics Laboratory, Chinese Academy of Launch Vehicle Technology, Beijing 100076, China

The high enthalpy shock tunnel, which can provide the high temperature gas conditions for hypersonic flight, is an effective ground facility for the research of reentry problems. It also has the ability of studying real gas effect. The hypersonic test flow condition, with the stagnation enthalpy of 16 MJ/kg and stagnation temperature of 7900 K, was achieved in the JF-10 high enthalpy shock tunnel. The electron density of the flow-field for the 10 degree wedge model was measured using the electrostatic probe, which can obtain sufficient spatial resolution without influencing the flow structure. Results showed that the electrostatic probe has high sensitivity and the spatial electron density can be preferable acquired. The constant bias method can get the dimensionless electron density coupling with the flow field parameters, but the new developed sweeping circuit can get the quantitative value on the basis of effectively reducing the induced noise in the circuit.

**high enthalpy, shock tunnel, electron density, electrostatic probe**

doi: 10.1360/N092015-00295