

关于加电场减少等离子鞘 电子密度可行性的商榷

瞿章华

提 要 航天飞行器重返大气层时出现通讯中断,人们为此提出许多解决方案。国内外均有学者提出用外加电场改变天线窗附近电子密度的方案(文献[1],文献[2])。本文综合分析有关的理论和实验结果,认为应用外加电场减少等离子鞘电子密度是难以实现的。

一、等离子鞘套特性参数的分析

飞行器形状及飞行高度和飞行马赫数对等离子鞘有显著影响。为了获得等离子鞘套特性参数的数量级的概念,本文引用文献[3]的结果如下:

表1,不同轨道下正激波后平衡气体电子密度的典型数据(原文英制的地方已折算为公制)。

表 1

轨道类型	典型速度 (米/秒)	电子密度	
		60960米高	91440米高
亚轨道(I R B M)	4600	7×10^{12}	6×10^{10}
亚轨道(I C B M)	7071	8×10^{13}	8×10^{11}
轨道	7802	3×10^{14}	3×10^{12}
超轨道	11460	3×10^{16}	5×10^{14}

表 2, 尖锥等离子鞘套数据 (半锥角 10° ; 壁温 2000K; 亚轨道 I C B M, 当高度为 45.6 公里时, $V=7139$ 米/秒)。

表 2

滞 点 区			
高 度 (公里)	等离子体频率 ω_p (弧度/秒)	碰撞频率 ν (1/秒)	电子密度 N_e ($1/\text{cm}^3$)
80	1.77×10^{11}	2×10^9	10^{13}
61	5.22×10^{11}	1.41×10^{10}	9×10^{13}
45.6	1.51×10^{12}	7.6×10^{10}	7×10^{14}
30.4	4.97×10^{12}	5.6×10^{11}	8×10^{15}
15.2	4.46×10^{12}	3.2×10^{12}	8×10^{15}
裙 部			
80	3×10^9	6.3×10^7	3×10^9
61	1×10^{10}	5×10^8	3×10^{10}
45.6	3×10^{10}	2.75×10^9	3×10^{11}
30.4	7×10^{10}	2.10×10^{10}	1.6×10^{12}
15.2	4.3×10^{10}	1.3×10^{11}	6×10^{11}

现利用文献[4]的理论, 以典型数据分析鞘套的等离子体特征。

取温度 $T=5000\text{K}$, 电子密度 $N_e=10^{11}(1/\text{cm}^3)$, 则德拜长度 $\lambda_D=6.9\left(\frac{T}{N_e}\right)^{\frac{1}{2}}(\text{cm})$
 $=1.542 \times 10^{-3}(\text{cm})$ 。

若取飞行器的特征长度 $L=1$ 米, 则 $\lambda_D/L \ll 1$ 。又若取鞘套厚度 δ 为特征尺度, δ 的量级为 1cm , 则仍有 $\lambda_D/\delta \ll 1$ 。这就满足等离子体的“判据一”, 即德拜长度远小于流动的特征尺度。

德拜球内的电子总数 n 为

$$n = \frac{4}{3} \pi \lambda_D^3 \cdot N_e = 1380 T^{3/2} / N_e^{\frac{1}{2}} = 1542 \gg 1$$

这就满足等离子体“判据二”, 即德拜球内电子数远大于 1。

等离子体“判据三”要求平均碰撞时间大于等离子体振荡周期, 即 $\omega/\nu > 1$ 。利用表 2 的数据计算, 当 $H=30$ 公里~ 80 公里时满足 $\omega/\nu > 1$, 但当 $H=15.2$ 公里时, 裙部的 $\omega/\nu=0.33$, 头部滞点区 $\omega_p/\nu=1.39$ 。

可见除了低空 (如 $H=15$ 公里) 外, 再入飞行器的等离子鞘具有典型的等离子体特

征。关于低空的情况，留待第三节分析。

二、等离子鞘对电场的屏蔽作用

(一) 平衡等离子体对电场的屏蔽作用

这相当于研究平板探测仪的电压影响区(图1)。由文献[5]，决定电位 ϕ 分布的泊松方程为

$$\frac{d^2\phi}{dx^2} = -\frac{\rho_e}{K}$$

式中 ρ_e 为电荷密度

K 为介电常数，作简化假设

$$e\phi/kT \gg 1$$

及 $\lambda/\lambda_D \gg 1$

式中 e 为电子电量， k 为玻尔兹曼常数， λ 为平均自由程。在高空这两个条件可以近似满足。设探测仪电位 $\phi_p > 0$ ，壁面附近无正离子存在，则

$$\rho_e = N_e \cdot e$$

电子受正电位吸引，其最小速度为 $\sqrt{\frac{2e\phi}{m_e}}$ ，其中 m_e 为电子质量。这样，电子密度为

$$\begin{aligned} N_e &= N_{e0} \left(\frac{m_e}{2\pi kT_e} \right)^{\frac{1}{2}} e^{e\phi/kT_e} \int_{\sqrt{\frac{2e\phi}{m_e}}}^{\infty} \sqrt{\frac{2e\phi}{m_e}} e^{-m_e W^2/2kT_e} dW \\ &= \frac{N_{e0}}{2\sqrt{\pi} \left(\frac{e\phi}{kT} \right)^{1/2}} \left(1 - \frac{kT_e}{2e\phi} + \dots \right) \end{aligned}$$

式中： T_e 为电子温度，取 $T_e = T$ ； W 为电子热运动速度。

将 N_e 的表达式代入泊松方程，直接积分，最后得

$$x - x_0 = \frac{4}{3} \left(\frac{\pi}{4} \right)^{\frac{1}{4}} \lambda_D \left[\frac{e\phi}{kT} \left(1 + \frac{kT}{e\phi} \right) \right]^{\frac{3}{4}} \approx \lambda_D \left(\frac{e\phi}{kT} \right)^{\frac{3}{4}}$$

核心区 $\phi = 0$ ，则 $x = x_0$ ，壁面处 $\phi = \phi_p$ ，记对应的 x 为 x_p ，则过渡区宽度

$$x_p - x_0 = \lambda_D \left(\frac{e\phi_p}{kT} \right)^{\frac{3}{4}}$$

若取平板探测仪电位 $\phi_p = 150$ 伏，德拜长度 λ_D 仍取第一节再入飞行器鞘套中 λ_D 的典型值 $\lambda_D = 1.5 \times 10^{-3}$ (cm)，又取温度 $T = 5000$ K

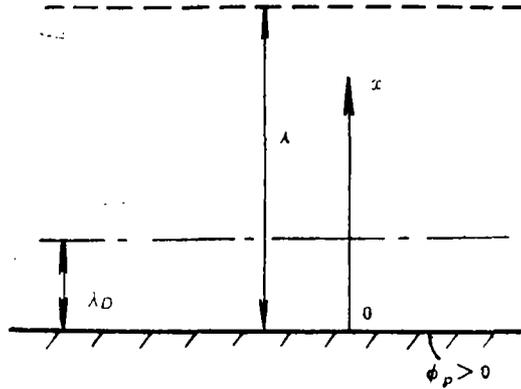


图1 平板探测仪

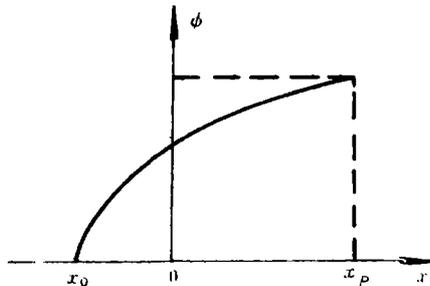


图2

则过渡区宽度

$$x_p - x_0 = 1.5 \times 10^{-3} \times \left(\frac{1.60207 \times 10^{-19} \times 150}{1.38 \times 10^{-23} \times 5000} \right)^{\frac{3}{2}} = 1.209 \times 10^{-1} (\text{cm})$$

由此可见电压影响区远小于等离子体鞘套的厚度，即壁面外加电场对鞘套的大部份区域无作用。

(二) 非平衡等离子体对电场屏蔽作用的实验分析*

电弧风洞中经高超音速喷管进入实验段的等离子体处于非平衡态，实际上接近冻结状态。在风洞实验段中置二极板，并施加电压，测量极板间等离子体电子密度 N_e 随极板电压的变化。测试手段一般有两种：一种是静电探针，测当地值。一种是微波诊断，测平均值（见图3）。

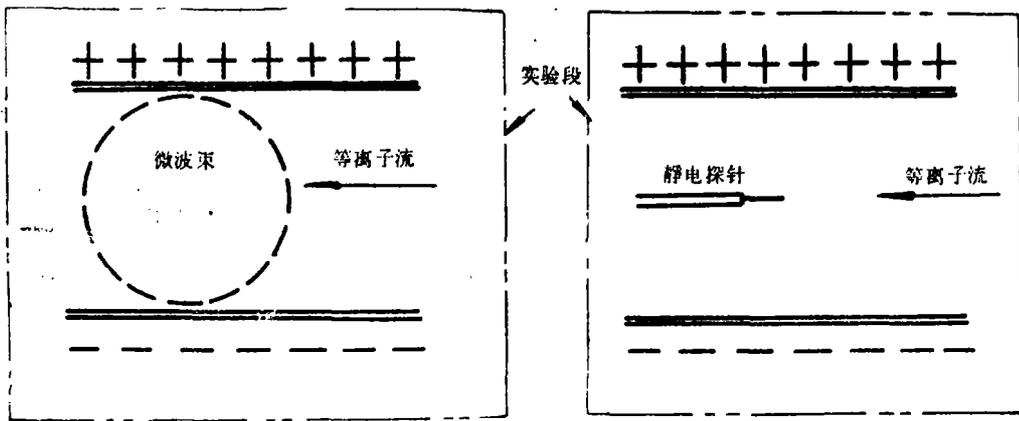


图 3

这里仅就极板加电压与不加电压二种情况作对比性实验。来流电子密度为 $N_e = 10^{11} (1/\text{cm}^3)$ ，外加电压值为 0—300 伏。测试结果表明，加电压与不加电压二种情况的实验结果相差很少，大多在实验误差范围之内。由此可见，外加电场对等离子体的电子密度无明显作用。

极板电压与极板电流的伏安特性实验表明：外加电压的绝大部分损失在极板附近的薄层中，等离子流的核心区域电场很弱。现以一组数据作粗略估算：

当极板电压为 200 伏时，测得电流密度为 40 安培/米²，在等离子流核心区，欧姆定律成立：

$$j = \sigma E$$

式中， j 为电流密度， E 为电场强度， σ 为电导率，由等离子体物理知识

$$\sigma = \frac{N_e \cdot e^2}{m_e \langle \nu_e \rangle}$$

N_e 是电子密度，取风洞实验段实测值 $N_e = 10^{11} (1/\text{cm}^3)$ ， $\langle \nu_e \rangle$ 为电子的碰撞频率，由实验段条件算得

$$\langle \nu_e \rangle = 10^8 (1/\text{秒})$$

*注：该实验由国防科技大学 403 教研室会同中国科学院力学所、航天部 14 所有关同志在力学所电弧风洞中进行。作者也参加了这项实验，详见杨书林同志的科技报告。

代入电导率公式, 得 $\sigma = 28.138$ (欧姆/米)

这样, 核心区的场强 $E_{\text{核心}} = j/\sigma = \frac{40}{28.138} = 1.42$ 伏/米

已知两极板的距离 $L = 0.046$ 米, 则两极板间的平均场强

$$E_{\text{平均}} = \frac{\Delta U}{L} = \frac{200}{0.046} = 4347 \text{ 伏/米.}$$

可见 $E_{\text{平均}} \gg E_{\text{核心}}$, 即在离开壁面的核心区域中外加电场几乎不起作用, 从而核心区的电子密度也不会随极板电压而发生明显的变化。极板间电位分布如图 4 所示。

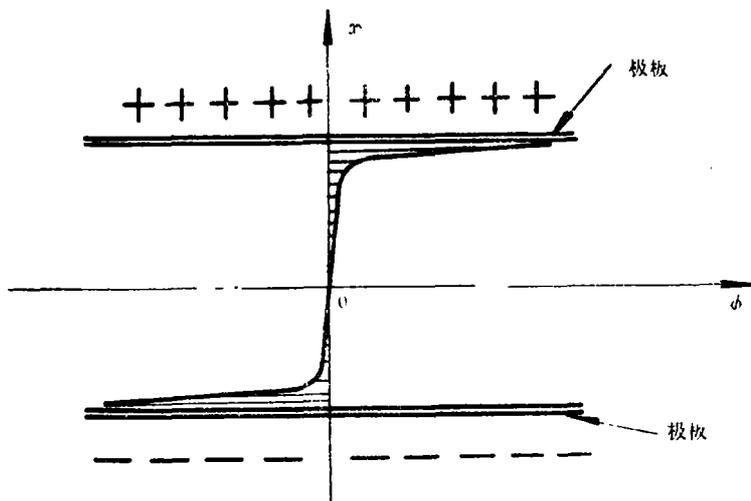


图 4

三、再入飞行的低空段外加电场对鞘套电子密度的影响

上面用到的一些假设条件在低空不满足。再入飞行的低空段可以应用高超音速附面层理论。文献[2]计算了有外加电场与没有外加电场时附面层内电子密度的分布。计算的情况是：尖锥；干净空气；海平面高度；飞行 M 数分 $M=10$ 和 $M=15$ 两种；对于每一个 M 数，外加的负电场分“弱负电场”和“强负电场”二种情况。外加负电场的大小用附面层外边界的电场强度 $\phi_{\eta}(1)$ 来表征。

当 $M=10$ 时,

$$\text{取 } \phi_{\eta}(1) = \begin{cases} -20x & \text{“弱负电场”} \\ -(20x + 0.008x^3) & \text{“强负电场”} \end{cases}$$

当 $M=15$ 时,

$$\text{取 } \phi_{\eta}(1) = \begin{cases} -200x^{0.8} & \text{“弱负电场”} \\ -(150x^{0.8} + 8.4x^2 + 0.1x^3) & \text{“强负电场”} \end{cases}$$

式中 x 为锥表面的纵向坐标, η 为横向坐标。

由于题设飞行器是尖锥的, 所以在 $x=0$ 处, 认为电子和离子的密度为零。

计算结果如图 5、图 6、图 7、图 8 所示。不同的 $\phi_\eta(1)$ 所引起的电子密度峰值 \bar{n}_{max} 的下降见图 5 和图 6, 相应的飞行器表面的电位值 $\phi(0)$ 见图 7 和图 8。

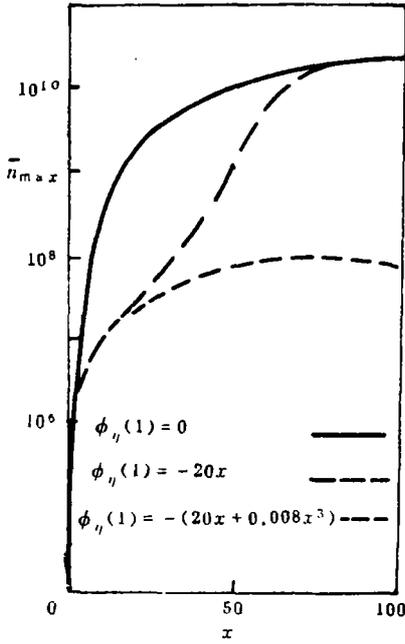


图 5 不同 $\phi_\eta(1)$ 时电子密度峰值
 $M=10$

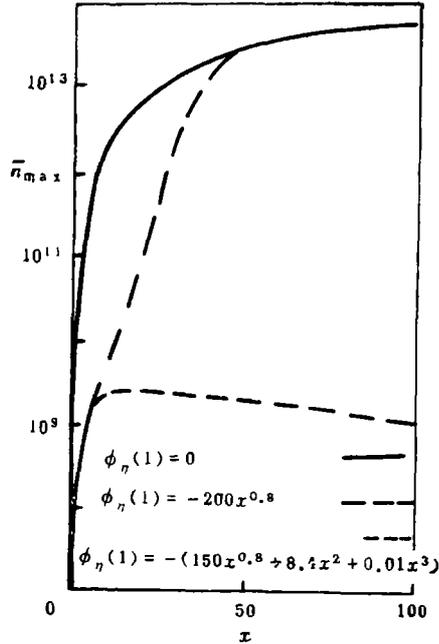


图 6 不同 $\phi_\eta(1)$ 时电子密度峰值
 $M=15$

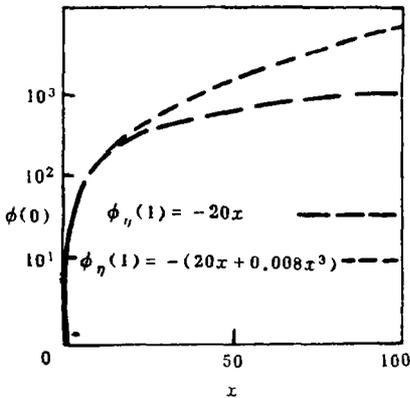


图 7 不同 $\phi_\eta(1)$ 时的 $\phi(0)$
 $M=10$

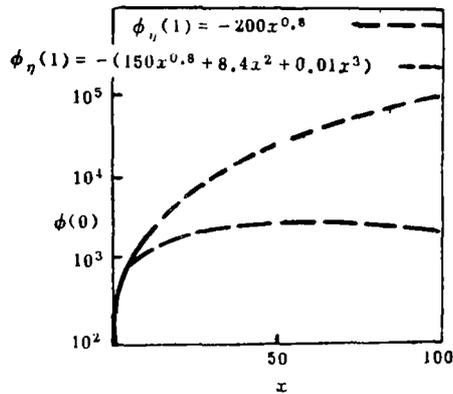


图 8 不同 $\phi_\eta(1)$ 时的 $\phi(0)$
 $M=15$

由于附面层很薄和物面 ($\eta=0$) 附近电离率很高, 造成该处电子和离子的密度梯度很大。电子和离子的扩散使电子密度的峰值低于电离平衡值。电子的质量扩散系数远大于离子的质量扩散系数。电子和离子扩散速度不同造成电荷分离。电荷分离本身会产生电场

ϕ_0 , 它引起反向的扩散, 阻止进一步的电荷分离。如果施加一电场, 使附面层中电场处处为负, 这时电子的反向扩散不出现, 就可进一步降低电子密度峰值。当电子密度不大时, 电荷分离引起的反电场较小, 那么外加负电场较弱就能起作用; 如果电子密度很大, 必须较强的负电场才有效。计算结果证实了上述论断。当 x 较小时, 电子、离子的密度也小, 电荷分离引起的电场不大, “弱负电场” 就可以降低电子密度峰值约二个量级。当 x 较大时 (如 $x > 50\text{cm}$), 电子、离子的密度很大, 外加的“弱负电场” 不足以克服电荷分离产生的电场, 就不能降低电子密度峰值。为了在各个 x 位置都能降低电子密度峰值, 就需外加“强负电场”, 如图 5、图 6 点线所示。

应该指出, 文献[2]的计算条件与实际情况出入很大, 因此计算的结果也与实际不符。文献[2]计算的物形是理想的尖锥。采用的初始条件是头部 $x=0$ 处, 电子和离子的密度为零。这样, 愈接近头部, 电子、离子的密度也愈小。实际的飞行器头部是钝的。头部的电子、离子密度应该是钝头滞点区的电离平衡值, 而不是零。对于钝锥, 从头部开始就有极高的电子密度值。所以文献[2]在 x 较小处的计算结果是不实用的。由于后身受初始条件误差的影响要小一些, 所以不妨借用文献[2]后身的计算结果作为分析钝锥等离子鞘 (包括头部区) 电子密度的参考值。那末为了降低电子密度峰值, 必须外加“强负电场”, 在飞行器表面需要 $10^4 \sim 10^5$ 伏高的负电位。实际的空气也不是干净空气, 而是有烧蚀产物混入, 它会进一步提高电离度, 要求外加电场更强。可以料到, 在高温烧蚀表面安置这样高电位的电极是困难的。

四、结 论

综上所述, 无论是高空还是低空; 无论是电离平衡还是电离非平衡, 在出现通讯中断的电子密度范围内 ($N_e \geq 10^{18}/\text{cm}^3$), 即使比重很少的电荷分离, 就会引起极大的电场, 阻止电荷进一步分离。由于等离子体这一固有特性, 所以用外加电场来减少鞘套电子密度的方案是不现实的。

参 考 文 献

- [1] 杨书林, 肖明, “加电场减少等离子鞘套电子密度方案的探讨”, 国防科技大学学报, 1983年第3期。
- [2] Irvin Pollin, Control of Electron Density Distribution on Hypersonic Vehicles, HDL-TR-1592, April 1972.
- [3] Fun A.E, Instrumentation for High Speed Plasma Flow, Gordon and Breach Science Publishers.
- [4] Chen F.F, Introduction to Plasma Physics, New York Plenum, 1974.
- [5] George W, Suttan, Arthur Sherman, Engineering Magnetohydrodynamics, McGraw-Hill Book Company, 1965.

Discussion of the Feasibility about Diminishing the Electron Density in the Plasma Sheath with the Applied Electric Field

Qu Zhanghua

Abstract

When a vehicle reenters the atmosphere, the communication will be discontinued. A lot of methods have been proposed to solve this problem. Some chinese and foreign scholars suggest methods of reductions of local electron density with applied electric field. In this paper, through synthesizing related theoretical and experimental results, the author finds that it is impracticable to reduce the electron density in the plasma sheath with applied electric field.