

加电场减少等离子鞘套电子密度方案探讨

杨书林 肖 明

提 要 高速飞行器重返大气层时,在其表面形成高温等离子体鞘套,它在某一个飞行高度范围内会引起飞行器与地面之间的通讯中断,即“再入通讯中断问题”。目前国外减缓中断的手段较多,然而各有利弊。本文从原理上探讨了加电场减少鞘套边界层内电子密度方案的可能性,以期作为一种较简单的克服再入通讯中断的物理手段。

一、方 案 设 想

我们认为,根据流场分析可知,飞行器再入段等离子鞘套中的离子密度,驻点区为最高,由驻点区往后,到飞行器的底部,离子密度可降低两个量级。由此可以判断,飞行器再入段的高温等离子体主要是在驻点区形成的,尔后沿飞行器表面流向底部,形成高温等离子体鞘套。而除驻点以外飞行器表面上各点由于压力、温度等因素亦能在“本地”产生离子密度,但与驻点区相比其作用是次要的。鞘套相对于飞行器高速运动,激波气流由驻点区“漂”向飞行器底部的过程中,其温度及离子密度显著降低。鞘套中的离子的复合过程,当然也伴随着新的电离过程,但从总体上看,随着飞行高度的下降,复合率高于电离率。这就是鞘套内离子的“上游”概念,基于这一概念,我们只要在位于飞行器底部的天线上游,施加适当的直流电场,即能使电子和离子产生横向位移,从而在天线附近造成局部电子“真空”,为天线打开一个辐射“窗口”。只要细心分析不难发现,“上游”概念也是诸如在天线上游喷射水或亲电物质、减少防热层材料“污染”以及施加磁场等减缓中断的物理手段的基本物理机理。

我们认为,构成等离子体鞘套的气体处于弱电离状态。鞘套中最大电子密度一般为 10^{13} 个/厘米³量级,而相应的空气分子密度约为 10^{18} 个/厘米³,亦即空气的电离度 $r=10^{-5}$ 。这样的弱电离的等离子体,其性质接近于普通的流体,等离子体的集体行为不明显。特别是在飞行器进入低空段之后,构成等离子体必须满足的判据之一

$$\omega_p \tau > 1$$

不成立。这里 ω_p 是等离子体振荡频率, τ 是带电粒子(主要是电子)与中性分子碰撞的平均时间。若以碰撞频率 ν 表示,则 $\tau = \frac{1}{\nu}$ 上式可写成

$$\omega_p / \nu > 1$$

而当 $\omega_p / \nu < 1$ 时,电子和离子的运动主要是受普通流体力学的力而不是受电磁力所支

配，故在低空段电子与中性分子间的碰撞频率明显增大情况下，此时鞘套严格地说已不能称其为等离子体了。例如飞行器在高度18公里处，碰撞频率 $\nu = 7.6 \times 10^{10}$ 1/秒，电子密度 $N_e = 8.97 \times 10^{11}$ 个/厘米³，相应的等离子体振荡频率 $\omega_p = 5.3 \times 10^{10}$ 1/秒，此时即出现 $\omega_p / \nu < 1$ 的情况。因此这时鞘套不具有典型的等离子体性质，而可看作弱电离的准中性气体导电介质。德拜屏蔽是典型等离子体的集体行为的具体体现，在低空段电极的德拜屏蔽问题已属影响较小的因素。只要电源的内阻较小，两电极间就能在低空段内维持一定的电位差。

弱电离气体导电在物理学中已有成熟的演示实验，可以作为本方案的初步原理实验。

如图1所示，在两平板电极间加一高电压，两电极间置一点燃的蜡烛，可以明显地观察到蜡烛的火焰倒向负极板。若在电路中接一微安表，则表头有指示。

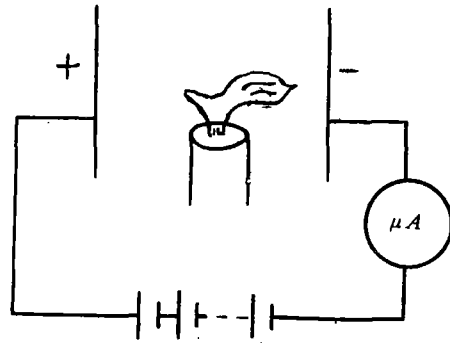


图1 蜡烛火焰电离气体导电实验

我们认为，蜡烛火焰电离气体导电实验，说明电离气体的正负离子作为载流子可以被电极所偏流吸收。蜡烛火焰与飞行器再入等离子体鞘套相比较，只有在离子密度及离子气流速度上的量的差别，而没有物理本质上的不同。

我们设想在飞行器天线窗口等离子流层的上游部位加电场，把等离子体中的电子和离子看成载流子。加电场后便在两电极间形成徒动电流，电子可以直接被正极所吸收，正离子则可以被负极所吸附，并被复合成为中性分子。这样，等离子体、电极、外电路和电源便构成简单的闭合回路。由于作为载流子的电子和正离子被电极所偏流吸收，从而改变了天线附近边界层内的电子密度分布，减少了鞘套内的电子和离子密度。低密度等离子体流流过天线窗口时，即为天线开辟出一个通讯“窗口”，从而避免通讯中断。

电极布置方案示意图如图2所示。考虑到由于正离子质量较大，对电磁波的衰减作用较小，对电磁波起衰减作用的主要是电子。我们选择将负电极布置在天线窗口的正上游，首先起到了改变来流流场分布的作用，正电极布置在天线窗口的两侧。这样，便形成一横向电场，载流子则受到这一横向电场力的作用，产生横向偏移。

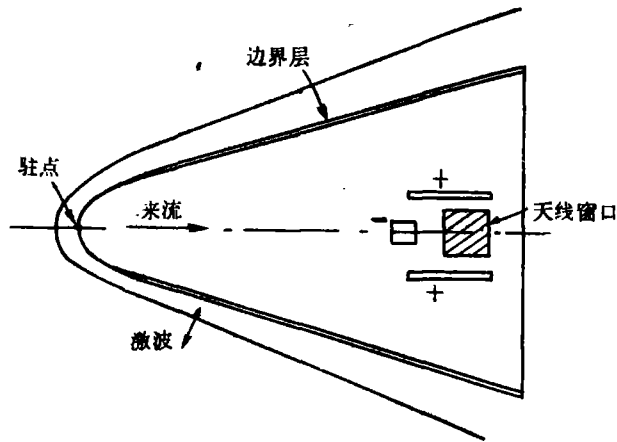


图2 加电场方案示意图

考虑到等离子体鞘套与飞行器间的相对速度，只要适当地设计电场的大小和取向、电极的长宽，调制方式以及电源等，就能使来流中的电子沿抛物线在天线窗口旁边掠过

为正极所吸收。至于正离子即使有部分未被复合，任其流过天线窗口，其所引起的电波衰减很小，对再入通讯的危害性不大。

国内外的研究和实验表明，加电场是能起作用的。国外资料指出：电子的扩散和电子密度的最终分布，对于加在飞行器导电表面的电场是很敏感的，加电场可导致最大电子密度的减少在两个量级以上^[1]。国内实验结果表明：在正交的横向电场和磁场共同作用下，降低电子密度的效果比单独加横向磁场的稍好些^[2]。

二、估 算

1. 关于不出现通讯中断时等离子体电子密度的估算

今以载波频率 $f = 2.2 \times 10^9$ 推算不出现通讯中断时对应的等离子体电子密度。

在高空段，满足 $\omega_p \gg \nu$ 条件，可以从等离子体中传播的电磁波的色散关系式

$$\omega^2 = \omega_p^2 + C^2 K^2$$

考虑。其中 $\omega = 2\pi f$ ， C 为光速， K 为相位常数。这个关系式指出，当给定频率 ω 的微波波束通过等离子体时，电磁波在等离子体中的波长为 $2\pi/K$ ，它依赖于等离子体频率 ω_p ，即依赖于电子密度 N_e 。当 $\omega = \omega_p$ 时， $K = 0$ ，波不能传播。只有 $\omega > \omega_p$ 时， K 才是实数，波才能在其中传播。根据截止条件 $\omega = \omega_p$ 可以求出对应的临界电子密度

$$N_e = \frac{m\omega^2}{4\pi e^2}$$

在飞行器再入段的低空段，由于低空大气稠密，碰撞频率剧增，电波传播与等离子体参数间的关系较为复杂，可由有关的实测曲线进行分析。如从给定频率的“天线反射系数与电子密度关系曲线”找出满足反射系数的电子密度；从“等离子体介质的衰减系数与归一化等离子体频率的关系曲线”找出满足衰减系数指标的 f_p/f 值，再由关系式

$$f_p = 8.978 \times 10^3 \sqrt{N_e}$$

求出 N_e 。

分析表明，当 $f_p/f \leq 0.1$ 时，可满足指标要求。因而，当 $f = 2.2 \times 10^9 \text{ Hz}$ 时

$$f_p = 8.978 \times 10^3 \sqrt{N_e} = 0.1f$$

$$N_e = 6.25 \times 10^8 \text{ 个/厘米}^3$$

由以上分析，若取最高的电子密度值 $N_e = 6.25 \times 10^8 \text{ 个/厘米}^3$ ，可以满足 $2.2 \times 10^9 \text{ Hz}$ 的再入通讯需要。

2. 关于最大电流值的预估

设某飞行器再入时，其等离子体鞘套的最大电子密度 $N_{e,\max} = 2.2 \times 10^{13} \text{ 个/厘米}^3$ ，出现在高度 $h = 20$ 公里附近。其余高度上的最大电子密度值均低于这一数值 $1 \sim 2$ 个量级。飞行器再入极限速度约为 7.6 公里/秒，由于空气是有一定粘滞性流体，因此，等离子体鞘套与飞行器之间的相对速度应低于这个极限速度。众所周知，在等离子体鞘套内沿着飞行器表面的法线方向上速度分布是不均匀的。一般认为，在飞行器表面上速度应为零，然后随着沿法线方向上距离的增加，速度按距离的 $1/7$ 次幂递增，到边界层时相对速度约为 3 公里/秒，当到达激波层时速度即为飞行器的极限速度。为简化起见，

在预估最大电流值时,我们取相对速度 $V_R = 3$ 公里/秒。鞘套内电子密度在飞行器表面的法线方向上分布也是不均匀的。个假定是函数 $N_e(r)$, 其中 r 为离开飞行器表面法线方向的距离。为分析方便计,沿用等面积法引入折合等离子体鞘套厚度

$$D = \frac{\int_0^{d_0} N_e(r) dr}{N_{e,\max}(h)}$$

式中 $N_{e,\max}(h)$ 是该高度处鞘套中的最大电子密度, d_0 为沿天线窗口法线方向取到其电子密度比 $N_{e,\max}(h)$ 低 5 个量级处的激波层厚度。计算表明在低空段 $D \leq 8$ 毫米。

假定由于飞行器与等离子体鞘套间的相对运动流过天线窗口的电子和离子均形成电流,若天线窗口面积为 100 毫米 \times 100 毫米,则最大电流值为

$$I_{t,\max} = I_e + I_i = 2I_e$$

式中: I_e 为电子构成的电流, I_i 为离子构成的电流。

$$I_{t,\max} = 2N_{e,\max} V_R W D$$

当 $N_{e,\max}$ 取为 2.2×10^{13} 个/厘米³

$$e = 1.6 \times 10^{-19} \text{ 库伦}$$

$$V_R = 3 \text{ 公里/秒}$$

$$W = 100 \text{ 毫米, 天线窗口宽度}$$

$$D = 8 \text{ 毫米}$$

$$I_{t,\max} = 16.9 \text{ 安培。}$$

3. 电导率

当 $v \gg \omega$ 时, 等离子体的电导率可由下式求得

$$\sigma = \frac{e^2 N_e}{m v_{eff}}$$

式中: N_e 为电子密度, m 为电子质量, v_{eff} 为等离子体有效碰撞频率。

当取

$$v_{eff} = 3.19 \times 10^8 \text{ 1/秒}$$

$$N_e = 2.2 \times 10^{13} \text{ 个/厘米}^3$$

$$m = 9.11 \times 10^{-28} \text{ 克}$$

则

$$\sigma = 1.93 \times 10^3 \text{ 西门子/米}$$

当取低空段

$$v_{eff} = 1.95 \times 10^{11} \text{ 1/秒}$$

$$N_e = 4.5 \times 10^{11} \text{ 个/厘米}^3$$

则

$$\sigma = 6.5 \times 10^{-2} \text{ 西门子/米}$$

4. 电场强度及电源电压

我们可以根据飞行器表面容许的条件设计出电极的面积, 根据电报设计估计出电流密度, 尔后求出电场强度, 电源电压及电源功率。

电极表面的最大电流密度 $J = I_{t,\max}/S$, S 为电极面积。再由 $J = \sigma E$ 可求出最大电场强度 E , 利用

$$V = \int_L \vec{E} \cdot d\vec{L}$$

估算最大电源电压。根据 $P=VI_{i,\max}$ 估算出最大电源功率。

今设 $S=5$ 厘米 \times 10厘米, 则电极表面最大电流密度 $J=0.34$ 安/厘米²。电极表面处的最大电场强度, 对于高空段 $\sigma=1.93\times 10^3$ 西门子/米, 则 $E=1.76$ 伏/米; 对于低空段由于电子密度降低, $I_{i,\max}=0.35$ 安培, $J=7$ 毫安/厘米², 则对于 $\sigma=6.5\times 10^{-2}$ 西门子/米

$$E=1.076\times 10^3 \text{ 伏/米}$$

这个最大电场强度数值是易于实现的, 进而可以估算出最大电源电压应在 10^2 伏的量级, 最大电源功率约在千瓦量级, 这在短时间内使用, 技术上也是容易实现的。

三、结 语

上面我们从物理上探讨了加电场减少鞘套边界层内电子密度方案的可能性, 并在此基础上对电场强度、电源电压以及电源功率进行了估算。当然, 这仅属定性的分析。为更深入地解决问题, 下一步应就等离子体鞘套内电子运动、电磁波和外加电场间的定量关系进行理论分析, 求解满足马克士威尔方程、流体动力学方程的电磁波和电声波耦合方程, 使之与天线场分布联系起来并满足可使用的边界条件(刚体边界条件), 利用追赶法求得数值解。另外, 应充分地进行地面模拟实验, 以便从中找到规律性的东西, 来验证我们的方案设想。

解决再入通讯中断的课题, 是个多学科性的综合的技术难题, 其重要性是众所周知的。我们认为, 本文提出的设想, 作为克服再入通讯中断的物理手段, 进一步研究其可行与否无疑都将是诱人的, 也是值得的。

参 考 文 献

- [1] Lrvin Pollin, "Control of Electron Density Distribution On Hypersonic Vehices" AD-743183, US Army Materiel Command Harry Diamond Laboratories 1972.
- [2] 吴承康、王柏懿, "横向磁场对电离非平衡高速气流的作用" 力学学报 第3期 1982.5.

The Research of Ploblem about Diminishing the Electronic Density in the Plasma Sheath by Using Electric Fields

Yang Shu-Lin Xiao Ming

Abstract

When a high velocity vchicle reenters the atmosphere, its surface

is surrounded by a plasma sheath with high temperature. In the region of a certain altitude, the communication between the vehicle and the ground will be discontinued, which is the problem of communication discontinuity in reentry. Some methods to diminish discontinuity have been tested abroad; each of them has its advantages and disadvantages. This paper discusses the possibility to diminish electronic density in the plasma sheath by using electric field. It is expected to be a simpler physic method for overcoming the communication discontinuity in reentry.