

再入飞行器尾迹流场及其 雷达散射效应研究*

牛家玉 许国斌

中国科学院力学研究所, 北京(邮政编码 100080)

曹荣达 任爱民

中国航天工业总公司, 北京(邮政编码 100086)

摘要 对再入飞行器等离子体尾迹及其雷达散射特性进行了分析、研究和大量的计算。讨论了物形、流场各因素对尾迹雷达散射截面的影响。流场计算使用准一维粘性尾迹方程,以修正基尔方法(多值法)求解,用一阶Born近似完成亚密雷达散射截面(RCS)计算。计算中使用8组元混合空气、14个非平衡化学反应模型,考虑5种不同尺度的小钝头锥形物体,沿再入轨道取65至34公里,共13个高程的飞行条件。通过计算得到了再入体尾迹各流场参数、电子密度分布及湍流亚密尾迹的RCS。

结果说明再入钝锥细长体粘性尾迹的转换特性对于等离子体的散射性质具有决定性的作用;再入弹头尾迹等离子体对地面单站雷达发射波的回波主要来源于尾迹湍流亚密的非相干散射;对确定的波长,当环境雷诺数达到临界值之后,可能出现RCS的突增现象;不同物形及来流条件造成尾迹转换位置的改变,从而影响RCS的数值及其沿轨道的分布;改变尾迹颈部初值会引起RCS值的明显变化。

关键词 等离子体尾迹, 雷达散射截面, 再入飞行器, 湍流, 回波特性。

引 言

近几年我们在利用工程方法进行再入飞行器等离子体尾迹及其雷达散射特性研究的基础上,进一步综合分析研究,计算了不同物形、尺寸及流场等因素对尾迹雷达散射截面的影响。研究的物形包括不同钝度比,不同长细比及不同尺度的小钝锥体共5种,流场环境只考虑纯空气在相同再入轨道条件下发生离解、电离的化学非平衡、轴对称粘性尾迹流动状态。

以下将分节介绍基本的物理模型分析、数值计算方法及通过计算得到的尾迹流场特性与电特性对其雷达回波特性的影响。

*中国航天工业总公司和国防预研基金委的资助项目。
本文于1995年3月21日收到,7月20日收到修改稿。

一、高超声速钝锥细长体尾迹流动模型

当再入钝锥体以高超声速返回大气层飞行时，由于激波压缩和物体与大气的强力摩擦致使其周围的环境气体急剧加热，从而发生离解和电离反应，使得物体周围形成一层等离子体鞘套，而沿流向到物体后部则构成等离子体尾迹。从许多流动问题的研究得知，在小钝头锥细长体沿再入轨道飞行的条件下，尾迹中等离子体主要密集于轴线附近温度较高的粘性区域，所以本文重点分析由肩部边界层脱落下来的粘性尾迹，典型的流动现象如图 1 所示。此时，尾迹中电子密度主要来源于肩部边界层以及颈部附近因再压缩引起的温升对于尾迹电离的贡献，实验测量也说明尾迹流场中电子密度峰值出现在轴上。基于这些考虑，本文选用了将边界层方程用于轴上的准一维数学模型，考虑到普遍使用的钝锥再入体在常用探测雷达波长范围内沿轨道出现回波突增的时间，计算的高程范围取在(60~35)公里，化学反应模型选用了 8 个组元(N₂, O₂, NO, N, O, NO⁺, O₂⁻, e⁻)、14 个化学反应的化学非平衡动力学模型，热力学状态计及了振动与平动、转动处于平衡、电子态未激发的状态。流动控制方程，计算方程及封闭条件可见文献[1~2]。

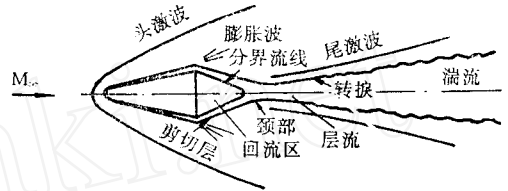


图 1 再入小钝锥体尾迹流场示意图
Fig. 1 Sketch of flowfield about hypersonic small blunted cone

二、高超声速钝锥细长体等离子体尾迹的雷达散射截面计算

再入体飞行中高度密集的等离子体尾迹正是雷达探测的主要目标、从理论上定性分析和定量地计算不同条件下等离子体尾迹的雷达散射截面具有重要的理论和实用意义。

不同的雷达波发射条件和不同的等离子体尾迹流动状态，引起尾迹对雷达波的频响效应是不同的。皆因实际飞行和探测状况复杂，为了进行工程计算，我们把分析的条件做一定的简化。因地面雷达站与飞行器再入尾迹出现的距离达几十公里，可视为远场发射，因此假设雷达发射波及其回波均为平面波；同时单站雷达接收到的是等离子体场对雷达波的后向散射信号，故入射电场与回波方向垂直；极化状态取平面线极化。

关于流场性质对电波效应的分析可见文献[3,4,8,9]，文献中指出，层流尾迹和湍流过密区尾迹对入射雷达波主要产生具有表面散射作用的相干散射，其 RCS 的大小只与等离子体截面大小和发射波的方位角有关，因此单站雷达发射波的后向散射回波能量很小，雷达接收系统不能明显地接收到这部分散射信号。在所考虑的轨迹及电波频率条件下，湍流过密表面散射能量也较小，而湍流亚密区尾迹对于地面单站雷达的后向散射是一

种具有体积效应的非相干散射,其 RCS的大小决定于随机运动散射场的性质,在此状况

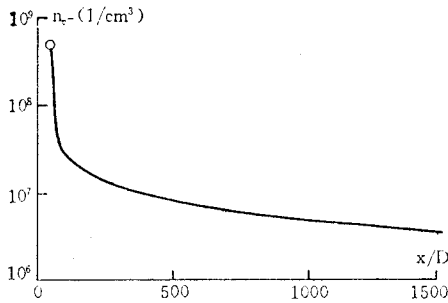


图 2 再入尾迹轴上电子密度分布
Fig. 2 Electron density distribution on hypersonic wake axis

下尾迹反射接收雷达的回波能量比前述状态下的要大得多。因此对于整个再入尾迹等离子体目标而言,地面雷达接收到的回波主要来源于湍流亚密等离子体部分。为此,我们将计算在平面线极化电场条件下,不同波长雷达波照射的再入尾迹湍流亚密等离子体后向散射的散射截面 $\sigma_{u,D}$ 。

由电磁波与等离子体相互作用的分析得知^[5~9],湍流亚密等离子体尾迹作为一种等效电介质,它的散射截面值与它的折

射系数、电子密度随机场强度,随机场的相关谱密度(或相关函数)成正比。本研究为做工程计算,使用了一阶玻恩近似的简化条件下导出的散射截面计算方法

$$\sigma_{u,D} = 8\pi \times 10^{-16} \int \frac{\Delta n_e^2 \cdot l^3}{[1 + (4\pi l/\lambda)^2]^2} dV$$

式中 l 为相关长度^[7],假定用平均电子密度的平方来代替脉动电子密度强度 (Δn_e^2) 。同时作了另外两点假设,即:忽略尾迹流场的转捩过程,取完全发展湍流出现的位置为转捩点;再假设随着沿尾轴电子密度的变化、等离子体场频率变化以入射雷达波频率所决定的临界值为界,自过密转为亚密是突然发生的。

在流动及雷达散射截面计算模型情况下,导出了计算流场的微分方程组和计算 RCS 的关系式^[1~3],先后对 5 种可比较的物形进行了沿再入轨道 230 余种情况的计算,在某些选定的初、边值条件下,定性地讨论了流场诸因素(如转捩位置、初始条件、边界条件、物体形状、尺寸等)以及电场条件(如入射波长、折射指数、起伏强度等)对尾迹电子密度分布及 RCS 的影响。典型的尾迹轴上电子数密度分布曲线可见图 2、亚密 RCS 沿轨道分布可见图 3。

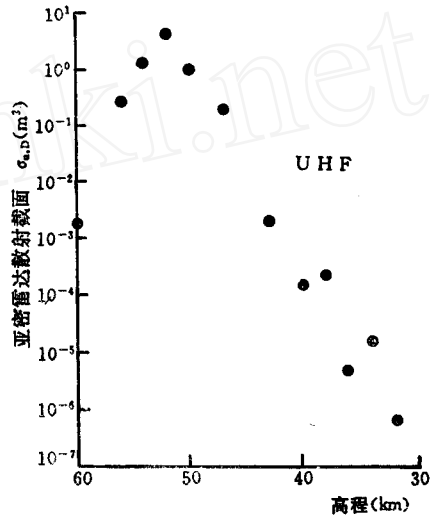


图 3 再入尾迹亚密雷达散射截面沿轨道分布
Fig. 3 Wake underdense RCS relationship with changes in altitude

三、计算结果分析

1. 转捩位置对尾迹 RCS 的影响

对单站雷达接收信号有意义的湍流亚密区尾迹流场计算而言,从层流向湍流的转换

位置对于 RCS 的计算有着定量的决定意义，但因飞行条件和流动本身的复杂，转换又是由稳定向不稳定发展的一个过渡过程，因此很难从理论上给出一种确切确定转换点位置的方法，国外结合实验研究得到了一些不同的半经验方法，我们使用这些方法确定同一物形在相同飞行条件下尾迹流场的转换位置也不尽相同^[10, 11]。

从图 4 的 RCS 分布可以看到：

(1) 同一物形在同样飞行条件及同样的初、边值条件下，转换位置不同会引起 RCS 峰值出现的时间(高程)不同。

(2) 在物体及飞行条件相同情况下，转换位置不同会引起 RCS 峰值的大小不同，具体的 RCS 峰值大小决定于峰值出现时高程附近 n_e - 对 RCS 的整体贡献大小。

2. 物体形状、尺寸对尾迹 n_e - 及 RCS 的影响

关于物形影响，分别讨论不同底部直径尺寸、长细比、钝度比所引起的结果差异。各种颈部初始值及粘尾外缘条件参照身部边界层解及底部流动实验结果的经验关系确定。

(1) 在钝度比、长细比相同的情况下，比较不同的底部直径对于 n_e - 及 RCS 的影响 ($D_{B2} = 2.4D_{B1}$)。A. 底径小者转换推迟，且颈部初始浓度 C_{icn} 及几何尺寸 δ_n 改变，所以使 n_e - 沿尾轴的分布状况改变。B. 在几何相似条件下，小底径钝锥体尾迹的 RCS 值比大底径者低几个量级，见图 5，同时突增出现的时间稍有推迟。主要原因是因前者 n_e - 对 RCS 的总体贡献小所致。

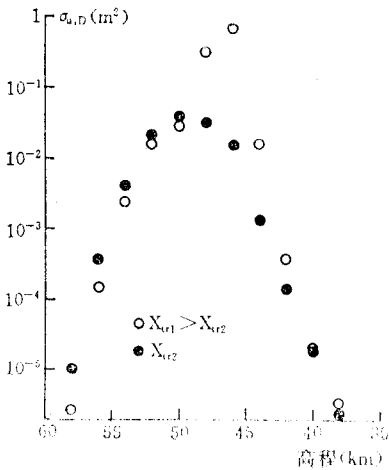


图 4 转换位置对 RCS 的影响 ($R_N/R_B = 0.16$)
Fig. 4 Effect of transition distance on the wake RCS ($R_N/R_B = 0.16$)

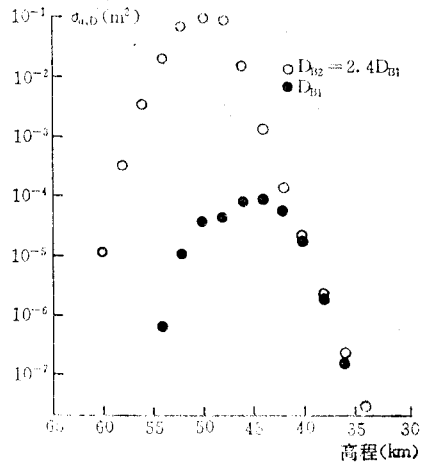


图 5 底径对小钝锥尾迹 RCS 的影响
Fig. 5 Effect of body's base diameter on the wake RCS

(2) 钝度比相同，长细比(锥角)不同对结果的影响：从计算结果看，长细比的变化对尾迹电子密度及其分布的影响不是单调的；在相应高程条件下，长细比小者 RCS 值比长细比大者要低。RCS 突增出现的时间稍有推迟(图 6)。

(3)长细比相同,钝度比不同的影响。A 钝度比不同引起尾迹转换位置的变化不大,这与已有的一些尾迹转换实验结果一致。钝度比对于物体边界层流场的影响不可不计,因此也带来尾迹颈部初值的变化,就本文考虑的三种钝度比 R_N/R_B (0.07、0.13、0.21) 而言,随着钝度比值的增加,颈部轴上浓度约呈半个量级的幅度增长,用此初始浓度 $C_{i,cn}$ 计算尾迹的湍流亚密 RCS 值也随之增加。在同一高程条件下, R_N/R_B 每增加一倍, RCS 峰值就出现 1 ~ 2 个量级的增长幅度(图 7), 突增出现时间亦有提前的趋势, 分析原因主要还是因 n_{e-} 的绝对值提高了, 从而增大了它对 RCS 的贡献。

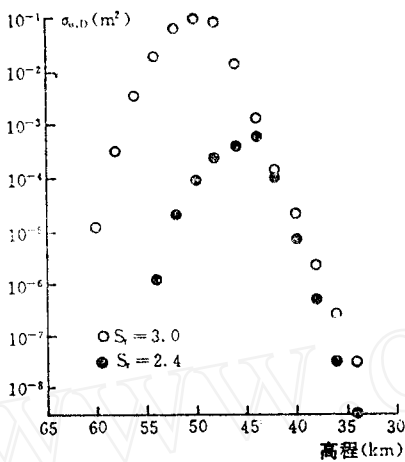


图 6 长细比 S_r 对 RCS 的影响
Fig. 6 Effect of body's slenderness ratio S_r on the wake RCS

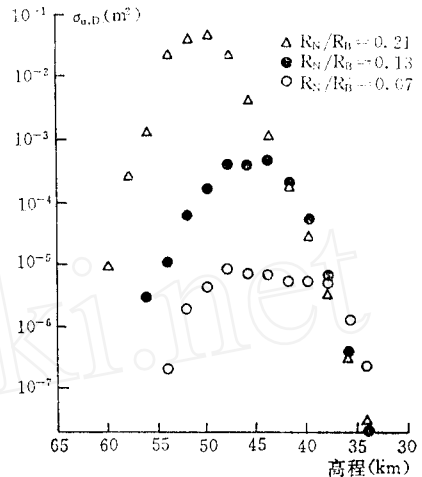


图 7 钝度比对 RCS 的影响
Fig. 7 Effect of body bluntness ratio on the wake RCS

3. 颈部电子密度初值变化对 RCS 的影响

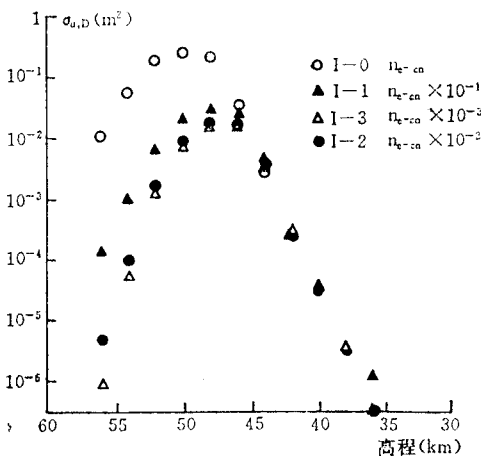


图 8 初值 n_{e-cn} 对 RCS 的影响
Fig. 8 Effect of initial electron density n_{e-cn} on the wake RCS

本文探讨了单纯改变颈部初始电子密度值对尾迹 n_{e-} 分布以及对 RCS 的影响问题。

(1)以物形 I ($R_N/R_B=0.16$) 的再入飞行为例, 若定颈部沿流向直到出现 $n_{e-} = 0.15 \times 10^6$ 的位置所在距离为等离子体尾迹之‘长度’, 在 52 公里以上, 初值电子浓度 C_{e-cn} 按量级逐次降低时, 尾迹的‘长度’将逐渐变短, 但变化的幅度渐次减小; 当高程达到 52 公里或低于 52 公里以后, 尾迹‘长度’几乎保持不变。只是在离颈部较近的区域 n_{e-} 下降的速率不同, 初值高者降得快、初值低者下降变缓。分析造成这一结果的原因, 应该考虑到不同高程条

件下的物理环境(温度、压力等)、颈部附近尾迹中电离反应过程、转换点处电子密度量值的大小等因素。从已进行的计算(数十种计算情况)得知,初值电子密度变化对于 n_e -分布的影响主要是发生在离颈部较近的区域内,这与上述分析相符。

(2)以小尺寸物体($R_N/R_B=0.045$)为例,当其尾迹颈部电子浓度 C_{e-cn} 按量级逐次增加后,在同一高程条件下,尾迹的RCS值是随之增加的,但增加幅度由2个量级的增量到几倍的增量以及到前后结果变化不大地逐渐变弱的增长趋势;而物形I尾迹颈部 n_{e-cn} 按量级逐级减小后计算的RCS值是逐渐变小的(图8),其变化幅度的规律与小物形的类同,只是方向相反而已。由这些结果也可以证明:在物形及其它环境流动条件不变的情况下,初值电子密度的改变只在颈部下游较小范围内起作用,因此对整个湍流亚密RCS的结果的影响并不能形成按初始电子密度的增减比例而增减的效果,但是,RCS峰值随初值电子密度的增减会有不同程度的增减。

4. 其它因素对尾迹RCS的影响

(1)根据物面加热程度的不同造成对底部不同的传热情况,由此引起颈部轴上焓值 H_{cn} 的不同,作为尾迹计算的初始条件,它也将使得尾迹湍流亚密RCS发生量的变化。以物形I,45公里再入飞行条件为例,取300倍底径距离为一个脉宽的覆盖区域,计算得到,随着 H_{cn} 增加,亚密RCS值有一定量的增加,与文献[7]中的计算结果比较趋势相符。

(2)湍流的相关长度直接影响RCS的数值结果。本研究讨论了不同相关长度引起的亚密RCS变化,与文献[7]计算结果相符。

(3)关于RCS沿飞行轨道随高程(或时间)变化的情况已经计算得很多了。从已经作过的再入过程中钝锥体等离子体尾迹对UHF,S及C波段4种频率雷达波的RCS结果可以看出,沿轨道RCS可能会在某个高度(时间)范围内出现突增,实际飞行的雷达回波测量也显示这一现象。本研究经大量的计算和流场分析、等离子体场与电波相互作用分析得知:每种入射波长所产生的回波突增时间与飞行中粘性尾迹流场的转换(从层流到湍流)过程和转换与尾迹等离子体频率临界值的相对状态有重要的关系。它的机制是等离子体与入射波频率共振引起的回波能量加强^[3],其具体出现时间要视具体物形、流动状态和入射波条件而定。只要理论模型和计算方法合理,是可以通过计算来预估的。

四、结 论

1. 再入飞行器尾迹等离子体对地面单站雷达发射波的回波主要来自于尾迹湍流亚密区的非相干散射;

2. 对于每种常用探测再入目标的雷达波长而言,当沿再入轨道飞行钝锥体的环境雷诺数 $Re_{\infty,DB}$ 达到临界值后,因尾迹等离子体频率与入射波频率发生共振而形成回波能量加强,因此有可能出现RCS的突增现象;

3. 再入钝锥细长体粘性尾迹的转换特性对于等离子体的散射性质有着决定性的作用。不同物形及来流条件造成尾迹转换位置的变化也会影响电子密度的分布,进而定量

地改变 RCS 数值及其分布,

4. 对同一物形、在相同的流动条件下, 改变(提高或降低)尾迹颈部初值电子浓度可以同向地改变尾迹 RCS 值, 但其变化幅度随着电子密度增值幅度的提高而趋于饱和。

作者对于曾经给予本项研究以支持和帮助的吴承康、王柏懿、刘铁军、沈大才、孟刚等同志致以诚挚的谢意。

参 考 文 献

- 1 牛家玉. 钝锥体非平衡尾迹简化计算方法. 空气动力学学报, 1983, (2):49~58
- 2 牛家玉, 沈大才, 曹荣达. 小钝锥尾迹流场及RCS计算与程序说明, IMCAS CRJ-91007, 1991.
- 3 牛家玉. 再入弹头非平衡尾迹的回波特性分析. 空气动力学学报, 1990, 8(3):286~292
- 4 刘铁军, 牛家玉, 沈大才等. 再入亚密湍流RCS. IMCAS STR-91020, 1991.
- 5 塔塔尔斯基 B M. 湍流大气中波的传播理论. 北京: 科学出版社, 1978.
- 6 Bisbing P E. Development of a Computer Model for Scattering of Electromagnetic Waves by a Turbulent Wake. AD-A 032662, 1976.
- 7 Fernandez F L. et al. Wake Radar Cross Section of Slender Re-Entry Vehicles. BSD-TR-64-152.
- 8 Pippert G F. On the Structure of Wake Turbulence Deduced from Field Radar Measurements. AIAA 63-446, 1963.
- 9 Dannel W L. Rader Cross Section and Optical Radiation from the Trailblazer IIa Half-angle Blunt Nose Cone During Hypersonic Reentry. NASA TND-3214.
- 10 牛家玉, 刘铁军, 沈大才等. 转捩及初值对再入弹头尾迹流场和RCS的影响. IMCAS STR-91006, 1991.
- 11 Wilson L N. Body-Shape Effects on Axisymmetric Wakes: Transition. AIAA J. 1966, 4(10)

Study of Wake Flowfield and Radar Cross Section of the Reentry Vehicle

Niu Jiayu Xu Guobin

(Institute of mechanics, Chinese Academy science)

Cao Rongda Ren Aimin

(Ministry of AeroSpace Industry)

Abstract In this paper, plasma wake flow of hypersonic reentry vehicle and radar scattering characteristics have been studied. The effects of body configurations and flow field properties on the radar cross section (RCS) have been analyzed. The flow field is calculated based on quasi-one-dimensional viscous equation proposed by the author, using modified Gill method. In computation, 8 components air mixture and 14 nonequilibrium chemical reactions are included. The RCS is calculated by first-order Born approximation, 5 different small blunt cones at various flow conditions including 13 reentry altitudes from 65 to 34 km are considered. Various flow field parameters, axial electron density and RCS of turbulent underdense wake of reentry vehicles are obtained. Results show that wake transition has a significant effect on the RCS. The echo wave energy of plasma wake received by a single station radar is mainly from the incoherent scattering in underdense region of turbulent wake. For a specific radar wave, the rapid rise in RCS occurs in a fully developed turbulent wake when environment Reynolds number exceeds transitional Reynolds number. Different body shapes and flow field parameters will change the location of wake transition and eventually the value and distribution of RCS. In addition, change of initial electron density at the wake neck causes obvious variation of RCS.

Key words plasma wake, radar cross section, reentry vehicle, turbulent flow.