

文章编号: 0258-1825(2005)01-0103-05

湍流等离子体尾迹雷达散射截面的 计算及其影响因素分析

彭世¹, 高 巍, 牛家玉

(中国科学院力学所高温气体动力学开放实验室, 北京 100080)

摘 要: 针对一阶畸变波 Born 近似模型, 深入分析了湍流内外尺度和电子数密度脉动值对雷达散射截面的影响, 并且给出了关于湍流外尺度的一个经验的, 能被工程上较好使用的公式。在以上分析的基础上, 计算了几种高程条件下再入小钝头锥体等离子体尾迹的雷达散射截面, 与已有实验结果进行了对比分析。分析和计算结果表明, 湍流的外尺度和局部电子数密度值对雷达散射截面影响较大; 湍流内尺度变化的影响不大。

关键词: 一阶畸变波 Born 近似; 雷达散射截面; 湍流尺度; 电子数密度脉动

中图分类号: O35 **文献标识码:** A

0 引 言

再入物体的电磁散射特性研究的主要内容是研究分析雷达的入射电磁波与再入物体所产生的散射背景场相互作用机制, 最终定量地确定表征再入物体电磁散射强度的特征量: 雷达散射截面(RCS)。以往的研究表明^[1], 再入物体的电磁散射主要来源其尾迹的湍流等离子体场; 小钝头锥体再入飞行过程中, 对于单站雷达, 其后向散射主要来自尾迹亚密湍流脉动等离子体对雷达波的非相干散射, 因此本文探讨的对象是亚密湍流等离子体尾迹。

目前在工程上广泛使用的是一阶畸变波 Born 近似理论, 它是在一阶 Born 近似理论基础上发展而来的。同一阶 Born 近似理论(单电子单次散射)相比, 一阶畸变波 Born 近似理论考虑了入射电磁波在等离子体背景场中的折射效应, 计及了单电子多次散射, 因此一阶畸变波 Born 近似理论在工程上得到了广泛的使用。

作为散射的背景场, 首先要解出再入湍流尾迹流场及等离子体参数分布, 但从理论上求解湍流脉动电子密度是相当复杂的, 缺少成熟的理论与方法^[2]。工程上一直依靠经验方法确定电子数密度脉动水平(即 $\overline{n_e^2}/\bar{n}_e^2$) 的量, 例如常比例系数关系等。这简单的经验设定对于 RCS 值的确定影响如何? 在

用一阶畸变波 Born 近似理论求解 RCS 时, 表达湍流脉动谱时用到的脉动尺度应如何确定? 湍流尺度的选取对最终 RCS 的结果又会产生什么样的影响? 这些都值得进一步探讨。

本文从亚密湍流等离子体尾迹电磁散射的一阶畸变波 Born 近似理论模型出发, 对影响雷达散射截面的湍流内外尺度及电子数密度脉动量等因素作了探讨和分析。

1 一阶畸变波 Born 近似理论模型

当再入小钝头锥体等离子体尾迹相对于入射雷达波处于亚密(等离子体固有频率小于雷达波工作频率)状态时, 等离子体场对雷达波的频率响应包括透射、吸收及反射, 呈现为体积散射(非相干散射)效应。迄今在工程上求解湍流亚密等离子体尾迹 RCS 的方法, 广泛使用的是一阶畸变波 Born 近似理论。从数学的角度看, 一阶 Born 近似理论在数学上对应的是描写电场的 Neumann 数列的第一项, 其中 Keller^[3]给出了较为详细的推导过程。在此基础上, 考虑入射电场在等离子体中的二次散射, 可以推导出—阶畸变波 Born 近似理论的雷达散射截面计算表达式:

$$\sigma = 4 r_e^2 \frac{\overline{N_e^2}}{1 + (-)} / \bar{G}_0 \cdot \bar{E}_0 / S(k_s) dV \quad (1)$$

式(1)中 σ 表示雷达散射截面, $4 r_e^2$ 是单个电子的

* 收稿日期: 2004-02-03; 修订日期: 2004-04-26.

作者简介: 彭世¹(1965-), 男, 副研究员, 主要从事流体力学和再入物理研究。

Thomas 散射, \tilde{N}_e^2 为电子数密度的脉动强度量, 为电子碰撞频率, ω 是雷达工作圆频率, 式中的 E_0 不再(像一阶 Born 近似中)是入射场, 而是入射场和一次散射场叠加所形成的电场, G_0 是 E_0 的并矢 Green 函数, $G_0 \cdot E_0$ 则表示电子数密度平均场值所引起的背景场散射, $S(k_S)$ 为湍流能谱函数。

湍流能谱函数中频率与湍流涡尺度存在一定的相应关系; 在本文的一阶畸变波 Born 近似理论中, 能谱函数采用 Shkarofsky^[4] 给出包含双尺度的各向同性湍流的谱函数:

$$S(k_S) = \frac{(2)^{3/2} r_i^3 (r_i/r_o) K(U)}{U K(r_i/r_o)} \quad (2)$$

$$U = (r_i/r_o) \sqrt{1 + (kr_o)^2}$$

$$= (\mu + 2)/2, \quad = (\mu - 1)/2$$

式(2)中 r_i, r_o 分别是湍流的内外尺度, K 为第二类修正贝塞尔函数, k 为雷达波波数, μ 为确定谱函数形状的参数, 文中取值为 5/3。

2 雷达散射截面的计算

2.1 假设及其计算条件说明

本文所研究的等离子体尾迹参数(电子数密度、电子碰撞频率等), 由再入小钝头锥体零攻角飞行条件下的流场计算得到, 其中计及环境空气离解、电离过程的化学非平衡状态, 不考虑烧蚀效应。计算中将轴对称等离子体尾迹分成一定数目的同心圆柱层, 层内的湍流脉动场视为 Kolmogorov 均匀各向同性假定适用。

本文流场计算中的细长小钝头锥形模型的底部半径为 0.32m, 半锥角为 8°, 飞行速度为 6400m/s, 选取 30km 和 40km 这两个具有代表性的高程, 计算其等离子体尾迹场的雷达散射截面值。计算中的重要雷达参数如下: 雷达工作频率是 1300MHz; 雷达分辨力为 15m。

2.2 雷达波散射背景场

在雷达散射截面计算过程中, 其背景场即尾迹湍流等离子体场的计算采用差分方法解时均化尾迹方程, 利用代数模式解出湍流等离子体中的电子数密度时均值, 湍流等离子体的电子数密度脉动强度则由其与电子数密度平均值的简单关系得出。

2.3 湍流脉动场参数的处理与分析

在以往工程计算中, 湍流脉动场参数一般是简化取值, 将电子数密度脉动水平量 ($\overline{n_e^2}/\overline{n_e}^2$) 取为常值, 如 81%^[5]; 将湍流尺度取为与再入物体特征尺度相关的量(一般是取湍流外尺度为物体的特征尺度, 取湍流内尺度为湍流外尺度的 10%^[6])。

本文取相同参数后, 用文献[7]体积元解一阶畸变波 Born 近似(1)式, 计算了上述小钝头锥模型的尾迹湍流亚密 RCS, 如图 1 所示($x=0$ 取自流场的转掠点处)。

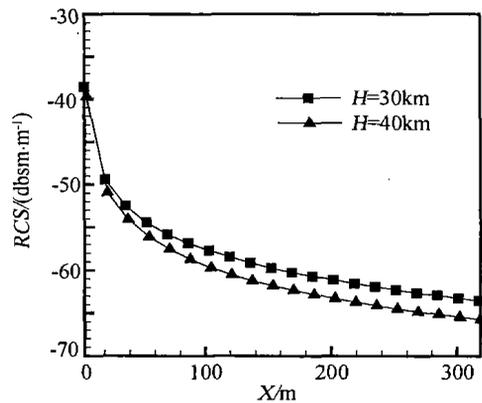


图 1 单位长度尾迹流向 RCS 变化曲线图

Fig. 1 RCS in unit length along wake flow

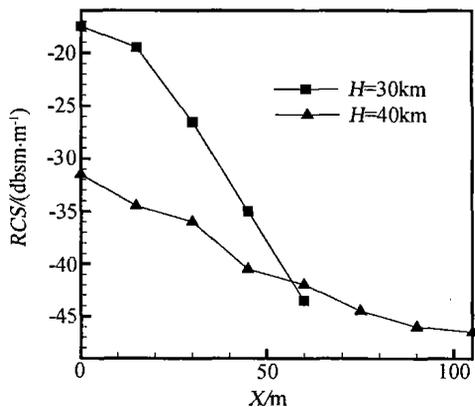


图 2 美国 RANT 飞行器雷达观察

Fig. 2 RCS of the RANT vehicle

从图 1 中可以看出随着局部电子数密度平均值的减小(与轴向方向增加一致), 单位长度的雷达散射截面值也减小。而且可以看出高程为 30km 的雷达散射截面值大于高程为 40km 的雷达散射截面值, 这与美国 RANT 飞行器雷达观测结果(见图 2)中得到的规律是一致的。

从式(1)和式(2)分析得知: 电子数密度脉动量和

湍流内外尺度对于雷达散射截面的计算起着重要的作用。因此为了从工程上更精确地计算雷达散射截面,需对电子数密度脉动量和湍流内外尺度的选取和计算作进一步的探讨。

2.3.1 电子数密度脉动量对 RCS 的影响

如前所述,在 RCS 工程计算中通常的做法是将湍流等离子体场中各点的电子数密度脉动水平量($\overline{n_e^2}/\overline{n_e^2}$)取为常值(如上述计算中选取的 0.81),这种取法的任意性很大;另一方面由于湍流的各向异性,湍流等离子体场中不同点的电子数密度脉动水平不可能处处相等。

因此在工程计算上为了更好与实验结果拟合,电子数密度脉动水平量除了采用不同的常值以外,曾有采用同一站位上沿径向呈负幂次方关系来拟合电子数密度脉动量的分布^[6]。以 40km 为例,本文选取了几种不同的电子数密度脉动水平量的值,也考虑了负幂次径向分布情况进行了计算与比较。

图 3 给出了电子数密度脉动水平取不同值时的单位长度的 RCS 曲线图。

图 3 中 C0.3 表示电子数密度脉动水平量取值为 0.3(C0.5 和 C0.81 等含义相同);P-2 表示电子数密度脉动水平量为($\overline{n_e^2}/\overline{n_e^2} = \exp[-r^2(j)/r_w^2]$),即在同一站位上沿尾迹径向呈负指数分布。从图中可以看出在电子数密度脉动水平取常数值情况下,随着 C 取值的增加,雷达散射截面也随之增大,计算结果亦有量级上的差异;电子数密度脉动水平量取负指数分布计算出来的雷达散射截面的在近尾迹区衰减趋势较电子数密度脉动水平量取常值时平缓。

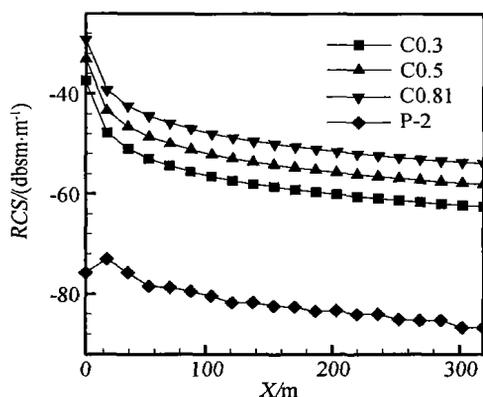


图 3 电子数密度、脉动对 RCS 的作用

Fig. 3 Effect of different electron density fluctuations on RCS

2.3.2 湍流尺度对 RCS 的影响

在湍流理论^[8]中,湍流涡尺度是速度发生显著改变的的距离的量级;当雷诺数增加时,大的涡首先出现,涡越小出现得越晚。对于非常大的雷诺数,从最大到最小的每一种尺度的涡都会出现。最大的涡在任何湍流流动中都起着重要的作用,最大的涡具有整个流动区域特征尺度的量级。另一方面,小涡具有较高的频率,而且以更加小得多的振幅出现在湍流中,它们可以看成是叠加在大的基本湍流涡上的精细结构。在充分发展湍流状态下,大涡尺度具有宏观流动的特征尺度的量级。

本文依据文献^[6]的理论,其电磁散射模型中采用的是 Shkarofsky 给出的谱函数,见式(2),其中用到的湍流尺度为外尺度 r_o ,内尺度 r_i ,这里的‘外尺度’我们可以理解为体现涡形态尺度的大尺度。为此,以往工程计算中,湍流外尺度一般取为物体的特征尺度(如前面计算中,湍流外尺度取值为模型物体的底部半径,即 $r_o = D_B/2$),湍流的内尺度取为湍流外尺度的 10%。但这只是工程上的一种简化处理,文献^[7]分析了湍流尺度对雷达散射截面值计算的影响,但没有更进一步的工作来指出湍流内外尺度对于雷达散射截面的计算的影响以及如何更好地选取湍流内外尺度。

本文首先计算了在湍流外尺度保持不变条件下,选取并计算了不同湍流内尺度的雷达散射截面值。湍流内尺度分别取为湍流外尺度的 0.1,0.01 和 0.001 倍,计算出来的雷达散射截面值数据见表 1。

表 1 不同湍流内尺度对雷达散射截面值的影响

Table 1 Effect of different turbulence inner scales on RCS

站位	湍流内尺度/湍流外尺度		
	0.1 dbsm/m	0.01 dbsm/m	0.001 dbsm/m
1	-29.258	-29.119	-29.118
5	-45.829	-45.795	-45.795
10	-50.036	-50.003	-50.003
15	-52.338	-52.304	-52.304
20	-53.950	-53.917	-53.916

从表 1 可以看出在湍流外尺度保持不变条件下,不同站位,不同湍流内尺度情况下的结果差异不超过 1%,说明湍流内尺度的选取对雷达散射截面值的计算影响不大。

以上计算中将湍流的外尺度取为物体的特征尺

度,是固定的。但是在实际尾迹流场中,湍流边界和流动涡的形态是不断发展、变化的,因此湍流外尺度(体现湍流边界形态的大涡尺度)取固定的数值是不尽实际。所以本文考虑在雷达一个脉冲照射下所覆盖的尾迹范围内,将湍流外尺度取为与当地尾迹流场的径向半径相关的量,这里用最简单的线性来拟合。即用 $A \times (x)$ 来代替模型底部半径 $D_B/2$,其中 A 为线性拟合中的常量, (x) 为当地尾迹半径。

图4中给出了取不同数值时 RCS 的曲线图。

图4中 Const 表示湍流外尺度取底部半径;且图中各曲线计算时,均取 C (电子数密度脉动水平量)为 0.81。

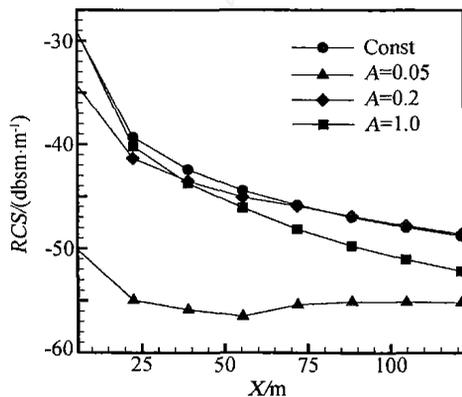


图4 湍流外尺度对 RCS 的作用

Fig.4 Effect of different outer scales of turbulence on RCS

从图中可以看出当取 0.2 时,在近尾迹部分,计算出来的雷达散射截面值比采用模型底部半径值计算出来的雷达散射截面值要小,沿流向 RCS 变化较平缓,更接近美国 RANT 飞行器雷达观测实验结果;在远尾迹处,计算出来的雷达散射截面值与采用模型底部半径值计算出来的雷达散射截面值大致相当。

造成两者差异的原因可以理解成在近尾迹处,湍流才刚刚发展,湍流大涡尺度(湍流外尺度)较小;随着尾迹的发展,湍流外尺度不断变大,因此在雷达散射截面计算中,采用湍流外尺度与尾迹半径成线性关系的方法假设要优于湍流外尺度取模型特征尺度的方法。

3 结论

本文用一阶畸变波 Born 近似模型,计算了小钝头锥模型在 40km 高超声速飞行条件下,尾迹湍流等离子体场对 1300MHz 雷达沿流向方向分布的单位距

离的 RCS;在此基础上重点分析了电子数密度脉动量和湍流尺度对 RCS 影响,并且给出了关于湍流外尺度的一个经验的、能被工程上较好使用的公式。这些为下一步 RCS 的特性分析和工程计算打下基础。计算结果说明,(1)在用经验方法处理湍流电子密度脉动场强度时,应慎重选取电子数密度脉动水平量的值;(2)用一阶畸变波 Born 近似理论求解 RCS 时,湍流内尺度的经验选取对 RCS 结果影响不大;(3)用一阶畸变波 Born 近似理论求解 RCS 时,湍流外尺度的经验选取应考虑沿流向的变化,取 $r_o = A \times (x)$ 较 $r_o = D_B/2$ 较计算出来的 RCS 值更趋合理。

本文计算中所使用雷达散射背景场的数据由中科院力学所的魏叔如研究员提供,在此表示感谢。

参 考 文 献:

- [1] PIPPERT G F. On the structure of wake turbulence deduced from field radar measurements [R]. AIAA Paper 63-0446, 1963.
- [2] 于明,牛家玉. 再入飞行器湍流尾迹流场研究 [J]. 力学学报, 2002, 34: 8-17. (YU MING, NIU JIA-YU. The study of turbulent wake flowfield in reentry vehicles [J]. *Acta Mechanica Sinica*, 2002, 34: 8-17.)
- [3] KELLER J B. A survey of the theory of wave propagation in continuous random media [A]. Probabilistic Proceedings of the Symposium on Turbulence of Fluids and Plasmas [C], Polytechnic Press, Brooklyn, New York, 1969.
- [4] SHKAROFSKY I P. Generalized turbulence space-correlation and wave-number spectrum function pairs [J]. *Canadian Journal of Physics*, 1968, 46: 2133-2153.
- [5] DAVID ATTWOOD. Microwave scattering from underdense and overdense turbulent plasmas [R]. AD-741187, 1972.
- [6] BISBING P E. Development of a computer model for scattering of electromagnetic waves by a turbulent wake [R]. AD-A032662, October 1976.
- [7] 于明,牛家玉. 再入尾迹湍流对雷达散射截面影响分析 [J]. 计算物理, 2002, 19: 501-506. (YU MING, NIU JIA-YU. Analysis for the effects of reentry wake turbulence on radar cross section [J]. *Chinese Journal of Computational Physics*, 2002, 19: 501-506.)
- [8] LANDAU L D, LIFSHITZ E M. Fluid mechanics [M]. Pergamon Press, 1987.

Calculation of radar cross section of the reentry wake turbulence and analysis for the characteristics

PENG Shi-liu , GAO Wei , NIU Jia-yu

(LHD, Institute of Mechanics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China)

Abstract : The precision of calculation of radar cross section (RCS) of a reentry vehicle, which is surrounded by the underdense turbulent plasma, is determined by the accuracy of the computation results on the characteristics of turbulent flow and electromagnetic field. Those characteristics are affected greatly by various complicated factors. In the present paper, the effects of inner scales, outer scales and electron density fluctuations in flow field are studied for the RCS calculation with the first order distorted wave Born approximation model. Based on the analysis, a practical and empirical formula for outer scales of turbulence is proposed. And the RCS at different altitudes are calculated, and compared with experiments. The results show that the effects of outer scales of turbulence and electron density fluctuations are important in the calculation of RCS, and that the effect of inner scales of turbulence can be ignored.

Key words : first order distorted wave Born approximation; radar cross section; turbulence scales; electron density fluctuations

(上接第 87 页)

- [5] ITSURO KAJIWARA. Simultaneous optimum design of shape and control system for micro air vehicles [R]. AIAA-99-1391.
- [6] PETER G IFU. Flexible-wing-based micro air vehicles [R]. AIAA-2002-0705.
- [7] MICHAEL S SELIG. Experiments on airfoils at low Reynolds numbers [R]. University of Illinois at Urbana-Champaign, AIAA 96-0062.
- [8] MUTILIN J C, LAURAL PAULEY. Low-Reynolds-number separation on an airfoil. AIAA Journal, 1996, 34(8):1570-1577.

MAVs aerodynamic characteristics and flight control

LI Feng¹, SHI Wen², OU Zhong-ming², ZHOU Wei-jiang²

(1. School of Aeronautics, Northwestern Polytechnical University Xi'an 710072, China;

2. China Academy of Aerospace Aerodynamics, Beijing 100074, China)

Abstract : The most important technique problems of MAVs are low Re number flow around aircraft and flight control. For the flight control, some new difficulties must be solved due to the low Re number flow over MAVs. In this paper, we investigate the aerodynamic characteristics of low Re number flow field of MAVs, different configuration effect on the aerodynamic and flight control.

Key words : MAVs; low Re number flow; aerodynamic configuration; flight control