

[文章编号] 1009-1300(2005)04-0025-04

洲际导弹雷达截面弹道分段研究

何俊发，周友杰，王莲芬，赵玮，王君

(第二炮兵工程学院，陕西 西安 710025)

[摘要] 针对超声速飞行的导弹周围不可避免地出现等离子体层以及导弹具有高频散射特性的特点，提出了一种洲际导弹 RCS 弹道分段计算的思想和方法，给出了洲际导弹 RCS 在各个弹道阶段的表达式，可满足工程分析的需要，在弹道导弹的防御方面具有重要理论意义和实际参考价值。

[关键词] 洲际导弹；雷达散射截面；等离子体；物理光学；几何光学

[中图分类号] TJ760

[文献标识码] A

Trajectory Segment Study on RCS of Intercontinental Missile

He Junfa, Zhou Youjie, Wang Lianfen, Zhao Wei, Wang Jun

(The Second Artillery Engineering Institute Xi'an 710025, China)

Abstract : Based on the characteristic of the plasma around missile and high-frequency scattering, a kind of way and thinking of calculating the intercontinental missile radar with sectional scattering by stage has been put forward. Each stage expression formula of RCS of intercontinental missile has been calculated out, which have important theory meaning and actual reference value in the respect of defending ballistic missile.

Keywords : intercontinental missile；RCS；plasma；physical optics；geometrical optics

1 引言

飞行目标的雷达散射截面(RCS)研究一直是电磁场与微波技术学科较为活跃的领域，而对于导弹尤其是洲际导弹这类超高速飞行的军事目标的 RCS 研究并不多见，因而分析研究洲际导弹 RCS 具有重要的理论意义和实际参考价值。大气层中高速飞行导弹的周围以及它的尾焰热气产生等离子体，所以针对实用的军事目标均具有高频散射特性，采用高频方法对导弹 RCS 进行计算的同时，也要考虑到等离

子体在某阶段对散射目标的影响。当洲际导弹周围不存在等离子体时，以高频散射的局部性原理为基础，采用部件解法，将导弹分解为若干相对独立的单个散射中心，根据各散射中心的几何结构和散射机理分别使用不同的高频方法计算各自 RCS。当洲际导弹周围存在等离子体时，根据等离子体电磁特性分析洲际导弹 RCS。

2 主动段等离子体覆盖目标下的 RCS

2.1 洲际导弹周围等离子体的产生

等离子体是由大量的自由电子和离子组成，且在整体上表现为近似电中性的电离气体。它是与大

[作者简介] 何俊发，教授。

[收稿日期] 2004-11-12

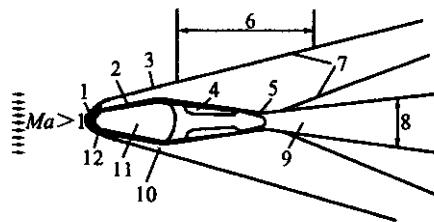


图1 在稠密的大气层中以超声速飞行的导弹周围气流示意图

家熟悉的物质三态(固态、液态和气态)一样存在的又一种聚集态,即等离子态。从理论上讲,任何由中性粒子组成的普通气体,只要外界供给能量使其温度足够高,总可以成为等离子体。当超声速飞行或高速物体穿越稠密大气层时,或者在大气中燃烧含有容易电离成份的物质时(火箭及导弹喷气式发动机的燃料,一般尾焰温度可达三千度以上),都会导致局部区域的电离,因此可以形成假目标形式的等离子体。假如喷射燃料的源在运动着,则在它后面形成燃烧的痕迹并在增高游离电子密度的同时极易产生等离子体。在导弹的头部进入稠密大气层时,在导弹的轨迹中可以观察到类似的现象,图1为这种区域的示意图。图中1为亚声速区域($Ma < 1$);2为边界层;3为冲击波前沿;4为环流区;5为断裂区;6为轨迹的接近部分;7为尾部的激波;8为湍流轨迹;9为轨迹口部;10为超声速区($Ma > 1$);11为目标;12为声速线($Ma = 1$)。

众所周知,一般的中远程导弹飞行过程大体可以分为主动段(包括助推段与后助推段)和被动段(包括中间段与再入段)。射程为9250km^[1]的洲际导弹飞行时间为28min^[1],其助推段典型的工作时间为200s~300s^[1],一般洲际导弹是多级火箭,图2、图3描述了主动段高度和速度随时间变化曲线图。从两图可以看出,在洲际导弹飞行的100s~250s这段时间,虽然稠密空气相对逐渐变稀,但导弹平均速度已达到声速,其周围产生的等离子区对射频以及红外线波段产生强烈干扰。所以,洲际导弹RCS问题就转到电离区的有效散射面积上来。

2.2 电离区的有效散射面积

导弹轨迹中自由电子所存在的时问及其密度取决于复合强度、自由电子与空气的中性分子的结

合、湍流扩散及其它因素,而它的电离程度完全取决于进入其内容易电离成份的密度、电离电位、温度和压力。假如已知自由电子的密度分布和自由电子在等离子层内和导弹轨迹内与气体的其它分子碰撞的次数,则可估算出进入稠密大气层的导弹的有效散射面积及其轨迹。为了模型计算的方便,轨迹的尺寸可认为是表面尺寸,在该表面上,自由电子的密度此时有同一临界值。当在与波长相称的距离上自由电子的密度改变得很小,同时在等离子区内能量损耗也较小时,可用几何光学的方法估算出电离区的有效散射面积。如图1具有旋转椭圆体或球形的电离区的有效散射表面,取决于在其内部自由电子的密度分布。假如将球形等离子区域内的自由电子密度定为 n_e ,角频率为 ω_p , $\omega = 2\pi f$ 为雷达波频率, v 为自由电子与其它粒子碰撞速度,并且仅取决于导弹弹体截面半径 r 与电离区的球面半径 r_n 关系:

当时 $r \leq r_n$ 时, $n_e = b^2 |1 - (r/r_n)^2|$,其中, $b^2 = \omega_p^2 / (\omega^2 + v^2)$,且 $\omega_p^2 > \omega^2 + v^2$ 。

当 $r > r_n$ 时, $n_e = 0$,则导弹的有效散射面积为

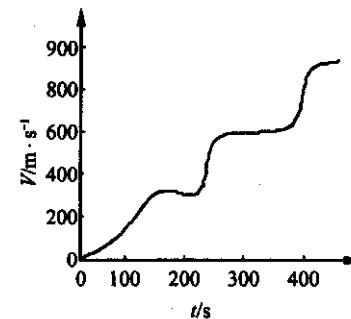


图2 发射阶段速度 v 随时间 t 变化的仿真曲线

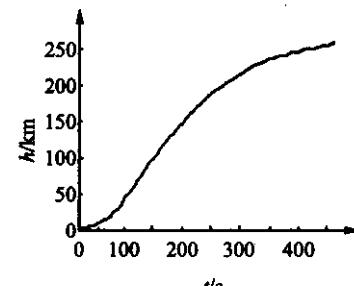


图3 发射阶段高度 h 随时间 t 变化的仿真曲线

$$\sigma_0 = \left(\frac{\sqrt{\pi}r_n}{1 + (b^2 - 1)^{-1}b} \right)^2.$$

3 可忽略等离子体飞行段导弹的 RCS

3.1 助推段初期洲际导弹的 RCS

在助推段的 0s ~ 100s 内, 由图 2 可以看到洲际导弹速度比较小, 这时导弹周围没有等离子体, 或者存在少量等离子体, 但不足以对洲际导弹雷达散射面积造成影响时, 可以考虑采用部件解法, 对导弹结构进行简化, 构造合理的电磁散射模型. 在这种模型下, 其高频散射主要来源于弹头、弹体和弹翼三方面的镜面散射, 其它如表面边缘、拐角与多排散射中心之间的多次绕射等相对导弹整体的雷达散射面积来说可忽略. 弹头、弹体和弹翼的镜面散射是一种强散射机理, 其 RCS 强度取决于镜面反射点处的表面曲率半径和反射系数. 对于后向(单站)散射而言, 其镜面反射点就是指散射体表面法线指向雷达方向的点.

3.1.1 弹头镜面散射

半椭球体弹头具有旋转对称性, 当其几何尺寸与入射波长 λ 在同一数量级时, 为减少误差可使用扩展物理光学法 (EPO) 计算其 RCS^[2], 简化后计算公式如下:

$$\sqrt{\sigma} = \sqrt{4\pi}(-T_x \sin\theta - T_z \cos\theta).$$

式中 θ 为入射波与弹体轴线的夹角, 且满足 $0 \leq \theta \leq \pi/2$; $k = 2\pi/\lambda$. 其中:

$$T_x = T_{xR} + jT_{xi},$$

$$T_z = T_{zR} + iT_{zi},$$

$$T_{xR} = -T_{xi},$$

$$T_{zR} = -\frac{b}{\lambda a} \int_0^{2\pi} \int_{-a}^0 \sqrt{a^2 - z^2} \cos\varphi \sin$$

$$\left[2k \left(\frac{b}{a} \sqrt{a^2 - z^2} \sin\theta \cos\varphi + z \cos\theta \right) \right] d\varphi dz,$$

$$T_{zi} = -\frac{b^2}{\lambda a^2} \int_0^{2\pi} \int_{-a}^0 z \sin$$

$$\left[2k \left(\frac{b}{a} \sqrt{a^2 - z^2} \sin\theta \cos\varphi + z \cos\theta \right) \right] d\varphi dz,$$

$$T_{xi} = -\frac{b^2}{\lambda a^2} \int_0^{2\pi} \int_{-a}^0 z \cos$$

$$\left[2k \left(\frac{b}{a} \sqrt{a^2 - z^2} \sin\theta \cos\varphi + z \cos\theta \right) \right] d\varphi dz.$$

3.1.2 弹体镜面散射

弹体镜面散射主要表现在入射角 $\theta = 90^\circ$ 附近的狭小区域, 考虑到圆柱型弹体是单弯曲几何形体, 采用物理光学计算其单站 RCS^[3]:

$$\sqrt{\sigma} = jL \sqrt{krs\sin\theta} \frac{\sin(kL\cos\theta)}{kL\cos\theta} \exp(j2k\cos\theta)$$

$$\exp(j2krs\sin\theta) \exp(-j\frac{\pi}{4}).$$

其中, r 为圆柱体半径, L 为弹体长度.

3.1.3 弹翼镜面散射

导弹弹翼可用薄金属板代替, 对于任意的多边形平板, 物理光学法给出如下表达式^[3]:

$$\sqrt{\sigma} = -\frac{jkS}{\sqrt{\pi}} \hat{n} \cdot (\hat{e}_r \times \hat{h}_i) \exp(jk \bar{r}_0 \cdot \bar{w}).$$

式中, S 为平板面积, \bar{r}_0 是平板上或平板附近某源点的位置矢量, \hat{e}_r 是远场接收装置点极化方向的单位矢量, \hat{h}_i 为磁场极化方向单位矢量, \bar{w} 为入射方向单位矢量和散射方向单位矢量之差. 对于单站的边射情况(垂直入射到平板上)可由下式估算:

$$\sigma = 4\pi S^2 / \lambda^2.$$

3.2 被动段洲际导弹的 RCS

经过助推段, 导弹获得了需要的末端速度. 此后大约 400s ~ 700s 的时间里, 在近似真空中的弹头与弹体进行了分离, 弹头定姿态的释放子弹头和突防装置, 最后弹头按照要求沿弹道以定姿态旋转飞行以及在真空中飞行的中间段 1 000s 内, 弹道导弹弹头飞行高度 1 000km 以上, 外形尺寸是比较小的(比如美国典型的核弹头^[2]的长度约 180cm, 底部直径 45cm, 类似一个长炮弹弹壳). 此时也不涉及等离子体, 只需要考虑弹头部分的 RCS. 此时 RCS 同前文的式为

$$\sqrt{\sigma} = \sqrt{4\pi}(-T_x \sin\theta - T_z \cos\theta).$$

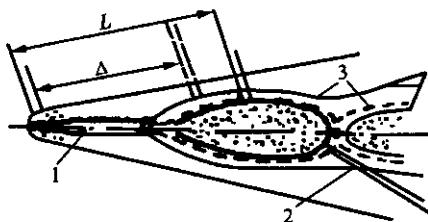
4 再入段洲际导弹的 RCS

洲际导弹的第四个飞行段称为再入段, 大约持续飞行 40s^[2]. 此时作为一个圆柱体相连的半径为 r 的半椭球形状的弹头, 在稠密大气层中飞行速度几十马赫以上, 必然形成等离子层. 此时段从防御角度来讲, 计算洲际导弹 RCS 意义不是很大, 高空空

气密度很小, 等离子层的自由电子密度不足以影响无线电波的传播。它的有效散射面积可以简单估算^[2]为 $\sigma_0 = \pi r^2$ 。

在低空, 空气的密度增加时激波后面气体进一步加热, 引起等离子层内自由电子密度增大, 电波在没有到达金属的半球面上时便从等离子层开始反射。接近地面时, 自由电子的密度变得更为临界, 而电波开始从激波反射。因为激波比金属半球面的半径大, 所以此时洲际导弹有效散射面积将式(8)放大 η 倍 $\sigma = \eta \sigma_0$ 。

假如不考虑激波后面热空气所辐射的能量, 并认为自由电子的密度高于临界值, 则在飞行速度增大时, 系数 η 将稍微减小, 保持在 1~2 以上, 这是因为速度增大使激波接近于物体的表面(图 1)。



(1 为导弹, 2 为火焰, 3 为 n_e = 常数的线)

图 4 导弹的喷射气流和火焰的形状

5 喷气式发动机射流对洲际导弹散射中心的影响

在洲际导弹中, 如果在推进系统的多级火箭中存在喷气式发动机, 它所喷出的射流热气可对雷达波形成消极干扰。这是由于在高温作用下射流气体被电离生成等离子体。因此射流很显著地影响导弹的有效散射面积, 同时也很显著地影响导弹散射中心的位置。所有这些都降低了确定目标坐标的精确度。射流的有效散射截面积取决于其中的游离电子的分布及数量。雷达辐射给导弹的能量同时又会由喷射气流所反射(参看图 4), 由于相加的结果, 获得了总信号。辐射的中心偏移到具有大的有效散射面积的二次辐射体的一边, 即在一定的条件下偏移到喷气流的一边。辐射中心的偏移同样还取决于发动机工作的高度; 射流的最大有效反射面积是在

60km 左右的高度获得。二次辐射的中心偏移

$$\Delta L = L \frac{\sigma_c}{\sigma + \sigma_c}.$$

式中, L 为导弹与射流的反射点之间的距离; σ_c 为射流的有效反射面积。二次辐射是在中心的偏移, 表示引导系统的雷达确定的目标坐标将有误差。

6 实时导弹整体 RCS 的计算

复杂目标 RCS 一般来说十分复杂, 在各个阶段弹体与弹头的分离以及所处环境的差异, 还有随目标姿态角的变化, 各散射源的场或是同相或是反相, 相互干涉, 使得总 RCS 图急剧起伏; 物体的电尺寸越大, 这种起伏变化越显著。而且在有些阶段等离子体覆盖导弹目标成为单个散射中心或者是导弹散射中心发生偏移, 为正确地表示各散射中心之间的干涉作用, 导弹整体 RCS 应由相关的公式计算:

$$\sigma = \left| \sum_{n=1}^N \sqrt{\sigma_n} \exp(j2kR_n) \right|^2.$$

式中, σ_n 表示第 n 个散射中心(包括只有一个散射中心的情况)的复数散射场, R_n 是从雷达到该散射中心的单程距离。

7 结 论

本文应雷达识别、目标识别以及导弹攻防等方面的需求, 分析了洲际导弹弹道每个阶段的空间环境, 充分考虑了洲际导弹某些飞行阶段其周围存在等离子体层的因素以及导弹本身具有高频散射特性的特点, 提出了一种弹道分段计算洲际导弹雷达散射截面的思想和方法, 计算出各个阶段洲际导弹 RCS 的表达式, 可满足工程分析的需要, 同时为雷达探测及洲际导弹攻防提供了理论依据和技术支持。

[参 考 文 献]

- [1] 马骏声. 弹道导弹弹头攻防技术的新较量[J]. 航天电子对抗, 2004, (9).
- [2] 刘建 郭文颜 吕长荣. 用扩展物理光学计算旋转对称目标雷达截面[J]. 哈尔滨工业大学学报, 1991, (3).

(下转第 56 页)

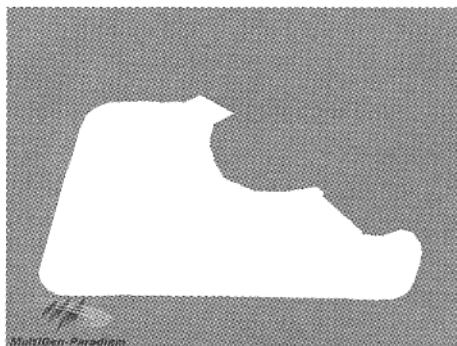


图1 未纹理化的地形

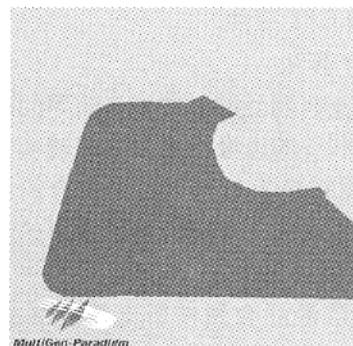


图2 纹理化的地形

的硬件,因为它允许用户控制多边形的数量,通过在崎岖的地形区域生成较多多边形和在平坦区生成较少多边形,来实现最大的地形精度,特别适合于少量的多边形的地形效果.要生成连续自适应的地形,最好选择 CAT 算法,它允许地形从一个 LOD 平滑变形过渡到另外一个 LOD,当然前提是必须运行在 SGI IRIX 以上的图形系统,因为该算法很耗费 CPU.

本文以某地区为例,标杆采样率设置为 20,地形生成算法选用 Polymesh,三角形生成规则选择“Bottom Right /Upper Left”,LOD 级数为 2,投影方式采用“Flat Earth”,地球椭圆模型为“WGS84”,批处理选项“Area Block Size in X Y”设置为 120 格标杆,“Number of Objects Per Group X Y”设置为 6,经过系统的计算机处理,最后生成的地形数据库如图 1 和图 2 所示.

4 结束语

虚拟战场景形的生成是虚拟现实仿真中重要的

(上接第 28 页)

- [3] 阮颖铮. 雷达截面与隐身技术[M]. 北京: 国防工业出版社, 1998.
- [4] 李擎, 吕级三. Matlab/Simulink 环境下多级运载火箭及其载荷飞行轨道仿真的实现[J]. 导弹与航天运载技术, 2004, (4): 1~4.
- [5] 贾沛然, 陈克俊, 何力. 远程火箭弹道学[M]. 长沙: 国防科技大学出版社, 1993.
- [6] Harigel GG. The History of Defense Systems and Remarks on the National Missile Defense (NMD). [Http://www.fas.org/spp/sta/war/program.nmd.htm](http://www.fas.org/spp/sta/war/program.nmd.htm), 2001-10-30.

一部分,而地形的生成尤其是大范围地形的生成,更是一个极富挑战性的课题. 采用 Multigen creator 软件,以 Polymesh 算法实现了某地区的三维地形的生成,为虚拟战场对抗仿真提供了可视化平台,增强了可视化效果.

[参考文献]

- [1] 李珍香, 张跃华. 仿真技术与虚拟现实技术[J]. 电脑学习, 2000, (10).
- [2] 石教英. 虚拟现实基础及实用算法[J]. 北京: 科学出版社, 2002.
- [3] 舒娱琴, 唐丽玉, 彭国均. 采用 creator 生成三维地形[J]. 测绘信息与工程, 2003, (10).
- [4] The MultiGen Creator Desktop Tutor[M]. USA: MultiGen-Paradigm, 2001.
- [5] Creating Terrain for Simulations[M]. USA: MultiGen-Paradigm, 2001.

www.fas.org/spp/sta/war/program.nmd.htm, 2001-10-30.

- [7] Pike J. Ground Based Radar [GBR] X-band Radar [XBR]. [Http://www.fas.org/spp/sta/war/program.nmd.htm](http://www.fas.org/spp/sta/war/program.nmd.htm), 1999-07-04.
- [8] Juan M. Rius, Miguel Ferrando, Luisofre High. Frequency RCS of Complex Radar Targets in Real-Time [J]. IEEE Trans. on Antennas and Propagation, 1993, 41(9).

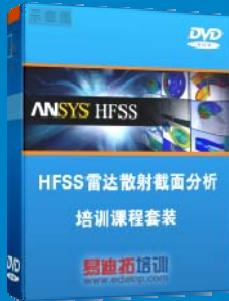
雷达散射截面 (RCS) 分析培训课程

易迪拓培训(www.edatop.com)由数名来自于研发第一线的资深工程师发起成立，致力和专注于微波、射频、天线设计研发人才的培养，是国内最大的微波射频和天线设计人才培养基地。客户遍布中兴通讯、研通高频、国人通信等多家国内知名公司，以及台湾工业技术研究院、永业科技、全一电子等多家台湾地区企业。

雷达散射截面 (Radar Cross Section, 简称 RCS) 是雷达隐身技术中最关键的概念，也是电磁理论研究的重要课题，使用 HFSS 软件可以很方便的分析计算各种目标物体的 RCS。

由易迪拓培训推出的《HFSS 雷达散射截面分析培训课程套装》是从零讲起，系统地向您讲授如何使用 HFSS 软件进行雷达散射截面分析的全过程。该套视频课程由专家讲授，边操作边讲解，直观易学。

HFSS 雷达散射截面分析培训课程套装



套装包含两门视频培训课程，其中：《两周学会 HFSS》培训课程是作为 HFSS 的入门培训课程，帮助您在最短的时间内迅速熟悉、掌握 HFSS 的实际操作和工程应用；《HFSS 雷达散射截面(RCS)分析》培训课程是专门讲授如何使用 HFSS 来分析计算雷达散射截面，包括雷达散射截面、单站 RCS、双站 RCS 等的定义，实例讲解使用 HFSS 分析单站 RCS、双站 RCS 和宽频 RCS 的相关设置和实际操作等。视频课程，专家讲授，从零讲起，直观易学...

课程网址: <http://www.edatop.com/peixun/hfss/130.html>

● 更多培训课程：

● **HFSS 培训课程**

网址: <http://www.edatop.com/peixun/hfss/>

● **CST 培训课程**

网址: <http://www.edatop.com/peixun/cst/>

● **天线设计培训课程**

网址: <http://www.edatop.com/peixun/antenna/>