

动态场景目标光、电特性仿真方法综述

赵 涛¹, 王振华², 毛宏霞², 包醒东², 陈 轩¹

(1. 电磁散射重点实验室, 北京 100854; 2. 光学辐射重点实验室, 北京 100854)

摘要: 动态场景光、电特性仿真技术是目标识别技术发展中的关键技术之一, 目标特性仿真的精度和效率越来越受到关注。为推进目标动态场景的光、电特性仿真能力的发展, 结合国内外研究成果, 对基于物理模型的精确建模方法和基于目标特性数据库的工程化仿真两类动态场景仿真方法的思路、发展趋势、存在问题进行了梳理, 为动态场景目标特性精确建模和海量突防场景特性数据生成及训练的发展方向提供了参考。

关键词: 空天目标; 动态场景; 光学特性; 电磁特性; 仿真技术

中图分类号: TN 911. 73; TP 391. 9

文献标志码: A

DOI: 10. 19328/j. cnki. 1006-1630. 2019. 04. 014

Review on Simulation Methods of Optical and Electrical Characteristics of Dynamic Scene

ZHAO Tao¹, WANG Zhenhua², MAO Hongxia², BAO Xingdong², CHEN Xuan¹

(1. Science and Technology on Electromagnetic Scattering Laboratory, Beijing 100854, China;

2. Science and Technology on Optical Radiation Laboratory, Beijing 100854, China)

Abstract: Simulation technology of optical and electrical characteristic of dynamic scene is an important key method in the development of target identify. The accuracy and efficiency of target characteristic simulation attract the more and more attention. In order to promote the development of optical and electrical characteristic simulation capability of the dynamic scene, combined the achievement of domestic and foreign scholars, two simulation methods are reviewed in thesis, which are the accurate modeling method based on the physical models and the engineering simulation based on the target characteristics database. And more, the method, the development trend and the existing problems are expounded. These provide a reference for the future development direction of the accurate modeling of dynamic scene target and the data generation and training of massive defense penetration scene.

Keywords: space-objects; dynamic scene; optical characteristics; electrical characteristics; simulation methods

0 引言

大量的动态场景目标光、电特性数据获取是开展目标特征提取和识别研究的必要条件, 其中动态场景包括不同的目标轨迹、运动形式、传感器布点和波形参数等, 而且, 光、电特性数据的获取效率也是影响目标识别技术研究的因素。

目标光、电特性数据获取主要采用实验测量和理论计算 2 种手段。实验测量包含静态测量和动态测量, 尽管数据可信度高, 但测量代价很大, 时间周

期较长, 不能满足目标识别训练对大量动态场景光、电特性数据的需求; 而理论计算研究克服了实验测量的缺点, 具有周期短、应用平台灵活、数据获取多样化的特点, 不仅是目标识别技术研究的一种切实可行的途径, 而且是必不可少的研究手段。目标特性理论计算分为基于物理模型的精确建模方法和基于目标特性数据库的快速构建 2 种方式。精确建模方法计算的目标特性数据置信度高, 但效率较低, 难以实现大量动态场景的光电特性计算, 因此可作为

收稿日期: 2019-04-12; 修回日期: 2019-06-10

基金项目: 国家自然科学基金 (61490690)

作者简介: 赵 涛 (1986—), 男, 博士, 高级工程师, 主要研究方向为动态场景目标特性建模。

目标特性标准模型和标称值,用于其他计算方法的校验和评估。而后者通过计算观察视线在目标中的姿态角信息快速获取目标的光、电特性,该方法灵活设置传感器、目标运动及轨迹等,能支撑目标特性识别训练研究所需的大量动态特性数据。尽管基于目标特性数据库的快速构建方法效率高,但因为复杂目标的目标特性数据计算耗时且数据量巨大,也面临着动态仿真实时效率和计算精度的瓶颈,国内外已涌现一批目标特性工程模型算法,用于解决目标特性数据存储量大和重构精度问题。

本文针对目标动态场景的光、电特性仿真问题,结合国内外学者研究成果,给出基于物理模型的精确建模方法和基于目标特性数据库的快速构建2种理论计算方法的思路、优缺点和应用领域。基于物理模型的精确建模方法有效保证了目标特性数据的计算精度,基于目标特性数据库的快速构建在满足数据精度的基础上极大程度地减少加载数据量。电磁特性方面,基于目标 RCS 的稀疏性性质,利用压缩感知理论提取复杂目标的散射中心数据集,并能保证较高的精度,避免了超分辨参数估计算法中的定阶和精度问题。红外特性方面,通过建立弹道标度因子、视向角标度因子进行修正,并考虑发射初温、关机(分离)时间、关机(分离)倾角等的综合影响,实现了基于数据库的任意弹道下目标特性的快速重构。

1 电磁特性仿真

动态场景电磁特性仿真分为基于物理模型的电磁精确建模方法和基于目标特性数据库的仿真方法。其中,电磁精确建模方法采用低频数值或高频近似方法计算动态场景的电磁散射特性,精度高,但效率低,可作为标准模型和仿真数据基准;基于目标特性数据库的仿真方法基于目标传感器与目标姿态生成动态场景的电磁特性,通过数据压缩算法降低目标特性数据的存储率,提高动态加载的效率和精度。

1.1 电磁特性精确建模方法

在电磁特性精确建模方面,西方发达国家一直处于领先地位,相继开发了一批复杂目标电磁散射特性预估分析软件,如美国国防电磁公司(DEMACO)的 Xpatch^[1-2]、波音航空公司的 RECOTA^[3]、西班牙的 GRECO^[4]等。使用这些软件能够实现对各

类复杂目标电磁散射特性的快速准确预估,为目标识别等应用提供很好的理论支持。其中,Xpatch 是由空军研究实验室(AFRL)领导下的 SAIG-DEMACO 开发的用于预估雷达特征信号的首席高频仿真软件。早期的 Xpatch 版本使用立方体和平面元2种方法进行几何建模,使用射线追踪(SBR)方法产生实际的三维目标从0到3D的雷达特征信号,实现复杂目标的雷达散射截面(RCS)、高分辨距离像(HRR)和合成孔径雷达(SAR)图像的精确预估,包含目标的一次反射(PO)、边缘绕射(PTD)和多次反射(SBR)贡献。Xpatch 4.0 以后的版本在 CAD 模型等表示方面做了重要的改进,增加了对包括裁剪曲面在内的17种不同的基本图形转换规范(IGES)实体的支持。该软件仍在不断完善中,将会集成低频散射部分和高频散射的高阶散射的影响,从而实现全频段的电磁仿真。

自20世纪80年代以来,国内许多高校和科研机构相继开展了复杂目标电磁散射特性建模方法的研究,取得了一定的成果,开发了一批用于复杂目标电磁散射理论建模和目标与环境电磁散射特性分析的软件系统。如电子科技大学的 A-UEST 软件、北京航空航天大学 GRECO 软件、北京理工大学的合元极软件、东南大学的 NESC 软件、北京环境特性研究所 RatsPro 等。

虽然国内在电磁散射建模领域取得较大的进展,也开发了多种电磁散射预估软件,但是这些软件的建模精度和处理复杂目标电磁散射的能力都有待提高。以高频方法为例,大规模面元模型的快速消隐、通用的自动射线追踪快速算法、曲面绕射和爬行波的准确计算、阻抗边缘的绕射计算等问题都是需要关注和研究的课题。

近年来,用于复杂目标电磁散射计算的混合法得到迅速发展^[5]。混合法吸收了不同方法的优点,又克服了各方法的缺陷,因此有助于解决复杂的散射问题。例如,对于电大尺寸复杂目标的散射来说,除主要的散射效应外,一般还包括多次绕射和高阶散射效应,如行波、爬行波、表面导波以及谐振效应等;对于复杂目标上的一些特殊部件,如飞行器进气道,一般带有复杂终端,其散射问题十分复杂,仅用高频方法往往无法准确求解。在这些情况下,使用混合法将凸显其优越性。因此对求解电大尺寸复杂目标的电磁散射来说,混合法提供了一条有效的技术途径。

1.2 基于目标特性数据库的工程仿真

基于静态测量手段(暗室测量)或电磁仿真计算获得目标的全极化全空间 RCS 特性,并根据各个时刻目标质心相对于雷达天线相位中心的距离,计算由于目标质心平移运动产生的多普勒相位信息,并调制在目标的 RCS 序列数据上,即生成动态电磁特性。该方法动态生成方法较简单,但也面临着大量的目标特性数据存储资源使得计算效率慢的难点。针对目标特性数据大使得仿真效率慢,国内外很多学者针对目标特性数据压缩和重构进行研究,仅需存储有限参数值,而无需存储 RCS 数据,避免了巨量特性数据准备时间长且存储空间大的工程问题,克服了仿真效率和精度的瓶颈问题。

数据压缩的过程就是去除源文件中的冗余数据,将其转化为较小的输出文件的过程。对于任意非随机生成的数据来说,利用其内部固有的特定数据结构就可以得到一种更小的数据表示形式。数据压缩分为无损和有损压缩,若对压缩之后的数据进行反向处理,得到的结果与源文件完全一致,称这种压缩方法为无损压缩,反之为有损压缩。无损压缩方案通常被用来压缩文本等需要完全重建数据的文件,包括行程长度编码、霍夫曼编码、字典方法等,其中又以字典方法使用最为广泛。对于目标特性数据,无需保留它的全部细节,同时大量电磁散射理论分析和实验表明,在高频区域,目标部分位置(即散射中心)电磁散射的相干合成即为该目标总体的电磁散射,而这让利用散射中心的概念来实现对于目标特性数据的高效压缩成为可能^[8-9]。

散射中心简洁明了地描述了雷达目标的物理结构,其内涵也随着电磁散射机理研究的深入和雷达系统不断提高的性能而不断扩大,是高频区目标电磁散射的重要特征^[9]。早期的散射中心是仅包含位置信息的简单点,如今目标各部分的局部特性也能够利用散射中心的概念进行表征。散射中心的概念,在许多领域都有着较强的实用价值和较好的应用前景^[11-12]。

基于散射中心模型也有2种思路:1)散射中心参数估计方法。该方法对强散射中心的位置信息、散射类型、幅度等特性信息进行估计提取,通过有限个散射中心参数表征目标电磁特性。该方法数据压缩率高,但面临着散射中心数目(信源数目)和参数估计精度问题。前者为模型的定阶问题,在信号处理领域,有最小信息准则(AIC)、最小描述长度准则

(MDL)^[12]、盖氏圆盘估计法^[13]、基于奇异值分解^[14]等方法,但灵活性差,通用性不好。而估计精度主要受限于参数化模型,对喷口、波导等凹腔体散射中心和细长、球面等行波与蠕动波散射中心等难以精确估计,导致部分目标的参数估计精度不高。2)散射中心稀疏表征方法。该方法基于压缩感知(CS)理论,结合正交匹配追踪(OMP)方法求解优化方程^[15],可以获取散射中心参数集,由于优化方程中已设置与原始的 RCS 数据的精度大小,因此,该方法重构生成的目标特性数据精度比散射中心参数估计方法高,但存在复杂目标计算的散射中心数据多,压缩率不高的问题。

1.2.1 基于参数估计方法的散射中心模型

自20世纪60年代起,有关散射中心参数估计的研究广泛开展。1969年,CAPON提出了极大似然估计(MLE)方法。1971年,WALKER等提出了最小二乘估计(LSE)方法。1981年,KAY等总结并提出了PRONY方法。1984年,IHARA^[16]提出了最大熵估计(MEE)方法。1986年,SCHMIDT等^[17]基于信号子空间与噪声子空间的正交性提出了多重信号分类(MUSIC)方法;ROY等^[18]基于旋转不变技术阵列提出一种信号参数估计(ESPRIT)方法。1995年,KUNDU等提出了噪声子空间分解(NSD)方法。1997年,HAN等^[19]提出神经网络方法。2003年,BETTAYEB^[20]提出了基于遗传算法的混合迭代方法。2005年,付丽华等提出了利用小波变换的方法。同时,基于优化算法的参数估计方法不断出现,如遗传、粒子群、细菌群游算法等。2008年,ZHANG等提出基于稀疏分解(SD)的方法。2013年,INCE等^[21]提出了一种基于信号与噪声子空间分离熵(E-MUSIC)的最大化的方法。

多维散射中心的参数估计可分为非参量方法和参量方法。前者的特点是不用求解包含有限参数的模型方程,而直接根据自身或自相关延序列得到参数估计;后者则是根据观测过程的一些先验信息,来估计模型参数。最常用的非参量方法就是通常意义上的雷达目标成像,以及LSE方法、MLE方法、基于小波变换的估计等。参量方法可以突破“瑞利限”,从而实现超分辨率信号恢复和估计,MUSIC算法和ESPRIT算法是此类方法的代表^[22]。

近年来,很多基于模型的特征分解方法不断涌现,通常是将状态空间方法应用于目标散射参数提取和系统识别中。NAISHADHAM等^[23]为了估计

衰减正弦信号的频率和散射强度,将状态空间方法用于处理时间序列数据,效果显著。BOWMAN等^[24]利用状态空间方法提取基于DE模型的目标散射中心径向距离、衰减率和散射强度信息。CANDES等^[25]利用恢复正弦信号的例子证明了同传统方法相比,状态空间方法在估计参数时对噪声干扰的低敏感性。状态空间法对系统极点没有限制,且具有良好的噪声抑制能力,可应用的场景大大拓宽。

目前,常用的参数估计算法有:

1) 基于三维FFT的参数估计算法

对于理想点目标,基于三维FFT算法能实现若干个强散射中心的参数估计,但该方法受噪声和杂波影响,且对距离和方位分辨单元内的散射中心不能分辨。因此,该方法主要适合于简单强散射点组成的目标,对于复杂结构,散射机理复杂的目标难以达到准确的结果。

2) 基于三维MUSIC的参数估计算法

多重信号分类算法(MUSIC)基于信号与噪声这2个子空间互相正交特性,实现对信号参数信息的估计,通过对观测数据的自相关矩阵的特征分解来实现。由于上述2个子空间相互正交,当信号模式矢量和信号相似度越高时,其与噪声子空间基的乘积越小,乘积的倒数越大。在这一过程中,通过相关求和减小噪声扰动的影响。

3) 基于三维旋转不变算法(ESPRIT)的参数估计算法

ESPRIT是一种信号子空间的空间谱估计方法。其核心思想是利用阵列的自相关和互相关矩阵得到信号的旋转算子,进而计算出信号的频率和衰减因子等参数。现在,ESPRIT算法及其改进算法已广泛应用于雷达阵列信号、语音信号处理等场合。

4) 基于三维RELAX的参数估计算法

RELAX算法是一种基于非线性最小方差(NLS)准则的参数估计方法。它可以通过简单的FFT运算来实现,适用于对由多个强散射点组成的雷达目标作特征提取。RELAX算法本身对噪声和杂波不作任何限定性假设,它通过最小化非线性方差得到参数的估计值,具有较强的适应性。

5) 基于状态空间方法的参数估计

状态空间方法是现代控制理论一种基于模型的特征分解方法,具有不限制雷达发射信号波形种类、噪声抑制能力较强等优点。同时,状态空间方法对

于系统稳定性的要求不高,可以用于处理各散射中心强度与信号频率、角度依赖关系不同的目标特性数据,适合提取具有复杂结构目标的散射中心参数。

1.2.2 基于压缩感知的散射中心模型

借助散射中心概念,当满足一定条件时,目标的RCS可以看作由互相独立的散射中心的贡献合成得到的。这些散射中心在相应的空间场景中,往往体现出较强的稀疏性。基于以上原因,借助于稀疏信号处理的相关理论,对目标RCS数据进行处理提取特征散射中心,进而可以实现对原始RCS数据的压缩与重构。

假设测量信号RCS为矩阵 $b \in C^{M \times 1}$,在某个基或更一般的框架上是稀疏的或可压缩的,则可以将其表示为观测矩阵 $A \in C^{M \times N}$ 与散射中心矩阵 $x \in C^{N \times 1}$ 相乘的形式,即

$$b = A \cdot x + n \quad (1)$$

式中: A 表示 $M \times N$ 的已知RCS测量或计算中的观测参数矩阵,与测量频率和观测视角有关; x 通常被称作目标特性信号,为 b 在 A 上的系数,也就是稀疏问题中需要恢复的未知信息; n 表示噪声和其他干扰信号。从数学角度看,每个测量信号都是样本信号的线性组合,均包含了所有样本的部分信息。由于通常测量信号的维度 M 远小于需要恢复的样本信号的维度 N ,故式(1)所表示的线性方程组实际上是欠定的(病态问题)。为了在测试数据不足的情况下求解式(1),需要利用 x 稀疏特性的先验信息。对于稀疏性最直接的度量是 L_0 范数,因为 $\|x\|_0$ 表示 x 中非零元素的个数。现在已经有严格的数学证明,若 x 稀疏,则可通过式(2)的优化问题求解 x ,即

$$\hat{x} = \operatorname{argmin} \|x\|_0 \quad \text{s.t.} \quad \|A \cdot x - b\|_2 \leq \sigma \quad (2)$$

式中: σ 表示与噪声电平相关的误差允许量。但是,最小 L_0 范数问题是一个NP-Hard问题而无法求解。

该优化方程是欠定方程,求解也变成了凸优化问题,目前已有多名学者提出CS方法计算,主要分三类:贪婪追踪算法、凸松弛算法和组合算法。其中,比较常见有匹配追踪算法(MP)^[26]、正交匹配追踪算法(OMP)^[27]、正则化正交匹配追踪(ROMP)算法^[28]、基追踪(BP)算法^[29]等。

2 光学特性仿真

动态场景光学特性仿真分为固体目标光学特性

建模、高温尾焰气体目标光学特性建模和背景辐射特性建模。其中,固体目标光学特性主要采用考虑太阳和地球热网络法对其表面温度进行求解,从而依据空间遮挡关系获得不同观测方向的红外目标特性^[30]。由于其计算理论简单,对计算要求较小,因此对其理论建模的改进需求较小。而对于背景辐射计算广泛采用中分辨率大气透过率计算程序(Modtran)来进行计算^[31],其操作简单,且在对地观测计算中具有较好的计算精度。因此,对于光学辐射特性研究主要集中于发动机高温喷焰气体流动与红外辐射特性。

2.1 喷焰气体光学特性精确建模方法

目前,关于发动机喷焰流动与红外辐射特性的研究主要以数值模拟为主^[33-34],广泛采用CFD和DSMC算法来模拟不同流域下发动机的喷焰流动以获得完整的流场参数,采用视在光线法(LOS)、反向蒙特卡洛法(BMC)、有限体积法(FVM)等来计算喷焰的红外辐射特性。数值方法的适应范围广且精度高,但其计算量大,极为耗时,尤其是针对高空喷焰的流场计算,即使采用“CFD+DSMC”耦合算法在解决大推力发动机喷焰流动计算时仍存在巨大困难。因此对于工程应用,快速可靠的红外特性计算数理模型具有十分重要的现实意义和工程应用价值。

2.2 喷焰气体光学特性工程建模方法

对于喷焰高温气体的光学红外特性工程仿真计算模型,由于其涉及尾焰流动和高温气体的光学辐射2种不同的计算物理场,需对这2种物理场分别建立工程计算模型。同时对于低空域内的连续流喷焰和高空域稀薄流喷焰,其流动特性具有较为明显的不同,需采用不同的数值计算方法对其进行计算。因此,对于喷焰气体光学特性工程建模,涵盖了低空连续流、高空稀薄流喷焰快速工程计算模型和喷焰光学红外辐射快速计算模型3个方面。

2.2.1 连续流喷焰快速工程计算模型

喷焰流场求解计算的快速数理模型是指通过获得近似理论方程的解析解,并采用经验、半经验公式来简化流场计算模型以减少计算量的一种流场求解模型。在20世纪60—70年代,ALBINI等^[35-36]通过忽略流体黏性和扩散效应,利用激波层近似理论总结出了来流马赫数为3~5的流场求解的解析

式^[36];ANDERSON等^[37]采用修正的拉格朗日有限差分法和有限速度化学反应模型,对飞行高度在45 km左右的中流域喷焰流场结构及参数分布进行了快速预估;WOODROFFE^[38]结合伴随流与喷焰间的流动混合卷吸模型,建立考虑复燃效应的喷焰射流段内的一维预估工程算法,这种算法能够快速获得不同来流条件下喷焰射流段内的基本参数。而在此后,研究者逐渐将喷焰按照不同特性划分为不同区域,并对其分别研究。在喷焰核心区,由于涉及复杂的波系结构和混合边界层,成为被研究关注的重点。如CRIST等^[39]结合实验测量数据和射流混合长度理论,提出了高度欠膨胀射流马赫盘流场求解半经验公式;BAUER等^[40]将喷焰流体假定为无黏流,较为精细地建立起了能够快速预估喷焰第一马赫波的数理模型,其能够与数值计算方法获得吻合度很好的模拟结果;李海峰等^[41]考虑了多喷管喷焰流动的相干结构,研究了四喷管燃气射流流场结构以及对其的预估方法;郜冶等^[42]以射流冲击结构为研究对象,建立起了喷焰冲击平面和斜面的马赫波流动参数预估方法;肖育民等^[43]以喷焰分区结构为研究对象,建立起了欠膨胀超音速喷焰自由射流的工程计算模型。

2.2.2 稀薄流喷焰快速工程计算模型

由于稀薄流计算的DSMC存在着模型适用性差、计算量大、计算周期长的问题。因此高空稀薄环境下的喷焰流动数理模型一直受到广泛的关注。针对100 km以上高空区域,HILL等^[44]通过研究发现喷焰的特征尺寸与喷焰阻力和动压的比值相关联,进而由此提出了预估喷焰尺寸和形状的半经验模型。之后,ALBINI等^[45-48]研究了连续流高度膨胀时的极限转角变化问题,结果发现高空喷焰近场参数同喷管出口极坐标下的极径平方和极角的余弦值具有很强的关联作用,并以此研究结果为基础建立了用于高空稀薄气体环境下喷焰流动的COSINE-LAW模型。CAI等^[48-51]依据无碰撞自由分子运动学模型为基础,建立起了高空稀薄气体环境下的喷焰流场计算工程模型,这种模型与DSMC模拟的结果吻合很好,并逐渐被应用到了高空喷焰流场计算和气体分子与壁面碰撞的分析当中。在国内,刘青云等^[51]利用均匀激波层理论、真空膨胀模型和牛顿激波层理论建立起了一种针对高空喷焰的气体在真空中膨胀的简单分析模型。陈兵等^[52]采用SIMONS快速算法模拟了姿控发动机在真空

环境下的喷焰流场,并得到了符合流体运动规律的结果。高空稀薄气体环境下喷焰数理模型为快速有效预估高空复杂喷焰提供了条件,但目前已有的计算模型还存在对高速稀薄自由来流碰撞效应预估不足、适用范围窄等问题。因此结合稀薄气体环境下喷焰流动的机理和特性,继续对高空喷焰数理模型发展和完善,仍然是对喷焰流场继续研究的重要内容。1999年,黄琳^[53]将SIMONS模型的计算结果与DSMC法的计算结果进行了比较,结果表明SIMONS模型是目前分析高空稀薄气体环境下喷焰流动最简单、复杂程度最低的方法,其可以被用来对喷焰核心区内流场的工程预估。整体而言,我国在高空喷焰问题上的研究虽然做了一些工作,但与国外相比存在着较大的差距。

2.2.3 喷焰辐射特性快速工程计算模型

目前对于喷焰辐射特性计算同样存在快速工程计算的需求,1972年,PEARCE^[54]采用一种简化的数值计算模型,计算了喷焰对固体火箭发动机底部的辐射加热作用,并进行了相应的理论和试验分析。1979年,美国建立了针对喷焰红外计算的标准辐射传输模型(SIRRM),其采用六流法处理粒子散射问题,从而针对低空流域的红外辐射特性进行数值模拟^[55]。1981年,MALKMUS等^[56]完善了光谱数据的获取和谱带模型的计算方法,并对热流法进行改进之后,开发出了SIRRM-II模型。1984年,NELSON^[57]采用SIRRM-II模型对固体火箭发动机不同工况下的红外辐射特性进行了较为深入的研究,并定量分析了 Al_2O_3 粒子对喷焰红外辐射信号的影响。

2.3 基于目标特性数据库的工程仿真

2.3.1 喷焰红外特性数据重构

不同高度下发动机喷焰呈现出不同的流场结构,但是在小的高度区间内喷焰的流动形态存在一定程度的“相似”,主要受发动机工作状态、弹道高度上的大气环境参数、弹道速度的影响。

低空喷焰红外辐射特性工程模型通过研究提取典型高度的辐亮度,研究给出随弹道速度的弹道标度因子和视向标度因子,基于统计谱带模型,采用理论计算公式,实现任意弹道的2个预警波段的喷焰红外辐射特性实时生成。高空喷焰红外辐射特性工程模型通过提取典型高度的辐亮度,随高空密度和速度的标度律,采用标度律公式,实现高空喷焰红外

辐射特性实时生成。真空喷焰内核流区由于存在着复杂的耗散过程,理论计算存在着一定的难度,目前国内外尚未获得解析求解方法,但通过测量发现它满足简单的标度关系,可以基于推力的估算方法给出喷焰红外辐射特性。

2.3.2 空间目标平均温度重构模型

空间目标红外辐射特性主要受3个外部因素的影响:1)上升段的气动加热;2)中间飞行段下垫面对目标的辐射;3)初始温度对目标平均温度的影响。由于前2个因素对目标辐射特性的影响随弹道的不同而有所差异,因此对目标红外辐射特性的影响因素主要是弹道和发射初温。

在上升段,目标所受气动热主要由目标所在高度以及速度决定。当发动机的参数固定时,目标在该发动机工作时间内的合速度主要是由发动机工作时间决定。当目标的合速度相同时,飞行高度取决于目标在上升过程中的倾角。对于典型的弹道,当每一级发动机关机(分离)时间和助推级关机(分离)时的弹头飞行倾角确定时,其在上升段过程中的飞行轨迹基本相同。由上述可以得出,弹道对目标在上升段所受气动热的影响可以由每一级的分离时间、分离时弹头倾角确定。在中段,下垫面对目标的辐射决定于目标在中段的飞行弹道轨迹。弹道导弹在最后一级助推级关机或分离时的飞行状态决定导弹在关机后的弹道轨迹,因此最后一级发动机关机(或分离)时间和关机(分离)倾角决定了目标在飞行过程中下垫面对目标辐射的影响程度。

综上所述,中段目标平均温度变化主要受到3个弹道特征分类参数的影响,即发射初温、关机(分离)时间、关机(分离)倾角。因此在典型目标中段飞行的有限时间内,对于不同的发射条件,目标表面平均温度均可通过改变以上几个参数来描述。

3 结束语

目前,空天动态场景光、电特性仿真技术受到越来越多的关注,其仿真精度和效率影响着各型传感器跟踪和识别能力的发展。本文对动态场景的光、电特性精确建模和基于目标特性数据库的工程仿真方法的思路、发展及应用进行阐述,对其中存在的问题、后续研究方向进行了分析。但由于动态场景仿真的应用面较广,还有许多问题有待研究。随着计算机软硬件性能的不断提升,在电磁特性方面,基于电磁特性数据库的工程仿真模型能够在保证压缩效

率的基础上进一步提高目标特性重构的精度,更为接近精确理论建模方法的结果;在光学特性方面,基于光学特性数据的重构方法不仅能够较好保持精度,还能进行实时/准实时的仿真模拟,对工程应用具有很好的指导效果。

参考文献

- [1] 阮颖铮. 雷达截面与隐身技术[M]. 北京:国防工业出版社, 1998.
- [2] 庄钊文, 袁乃昌. 雷达散射截面测量:紧凑场理论与技术[M]. 长沙:国防科技大学出版社, 2000.
- [3] NAZIH N, YOUSSE F. Radar cross section of complex targets [J]. Proceeding of the IEEE, 1989, 77(5): 722-734.
- [4] JUAN M, FERRANDO M, JOFRE L, GRECO; graphical electromagnetic computing for RCS prediction in real time [J]. IEEE Antennas and Propagation Magazine, 1993, 35(2): 7-17.
- [5] HAN D H. Finite element-based hybrid electromagnetic methods for electrically large, complex scattering and radiation structures [D]. Phoenix: Arizona State University, 2001.
- [6] SALOMON D. 数据压缩原理与应用[M]. 2版. 吴乐南,译. 北京:电子工业出版社, 2003.
- [7] WANG Y, LING H. A model-based angular extrapolation technique for iterative method-of-moments solvers[J]. Microwave and Optical Technology Letters, 1999, 20(4): 229-233.
- [8] GUPTA I J, BEALS M J, MOGHADDAR A. Data extrapolation for high resolution radar imaging[J]. IEEE Transactions on Antennas and Propagation, 1994, 42(4): 1540-1545.
- [9] 黄培康, 殷红成, 许小剑. 雷达目标特性[M]. 北京:电子工业出版社, 2005.
- [10] 师俊朋, 胡国平, 王金龙, 等. 雷达隐身技术分析及其进展[J]. 飞航导弹, 2014, 2(1): 81-84.
- [11] 聂在平, 方大纲. 目标与环境电磁散射特性建模:理论、方法与实现[M]. 北京:国防工业出版社, 2009.
- [12] WILLIMAS D B. Counting the degrees of freedom when using AIC and MDL to detect signals[J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 1994, 42(11): 3282-3284.
- [13] WU H T, YANG J F, CHEN F K. Source number estimators using transformed Gerschgorin radii[J]. IEEE Trans Sp, 1995, 43(6): 1325-1333.
- [14] 陈庆, 张锦绣, 韩飞. 卫星集群网络仿真建模与路由算法性能分析[J]. 上海航天, 2018, 35(3): 44-50.
- [15] 付争, 芮国胜, 田文飏. 准稀疏信号的压缩感知重构[J]. 电子测量技术, 2011, 34(6): 33-37.
- [16] 王菁. 光学区雷达目标散射中心提取及其应用研究[D]. 南京:南京航空航天大学, 2010.
- [17] STOICA P, ARYE N. MUSIC, maximum likelihood, and Cramer-Rao bound[J]. IEEE Transactions on Acoustics Speech & Signal Processing, 1989, 37(5): 720-741.
- [18] ROY R, KAILATH T. ESPRIT—estimation of signal parameters via rotational invariance techniques [J]. IEEE Transactions on Acoustics, Speech, and Signal Processing, 1989, 37(7): 984-995.
- [19] 王永良. 空间谱估计理论与算法[M]. 北京:清华大学出版社, 2004.
- [20] 付丽华, 边家文. 谐波信号分析与处理[M]. 武汉:中国地质大学出版社, 2013.
- [21] 钟金荣. 目标三维电磁散射参数化模型反演方法研究[D]. 长沙:国防科学技术大学, 2016.
- [22] HUA Y, SARKAR T K. On SVD for estimating generalized eigenvalues of singular matrix pencil in noise [J]. IEEE Transactions on Signal Processing, 2002, 39(4): 892-900.
- [23] KUNG S Y, ARUN K S, RAO D V. State-space and singular-value decomposition-based approximation methods for the harmonic retrieval problem [J]. Journal of the Optical Society of America, 1983, 73(12): 1799-1811.
- [24] NAISHADHAM K, PIOUS J E. A robust state space model for the characterization of extended returns in radar target signatures[J]. IEEE Transaction Antenn Propagation, 2008, 56(6): 1742-1751.
- [25] BOWMAN J J, SENIOR T B, USLENGHI P L. Electromagnetic and acoustic scattering by simple shapes[R]. Michigan Univ Ann Arbor Radiation Lab, 1970.
- [26] CANDES E J, WAKIN M B. An introduction to compressive sampling[J]. IEEE Signal Processing Magazine, 2008, 3(1): 21-30.
- [27] 刘冰, 付平, 孟升卫. 基于正交匹配追踪的压缩感知信号检测算法[J]. 仪器仪表学报, 2010, 31(9): 1959-1964.
- [28] NEEDEL L D, VERSHYNIN D. Uniform uncertainty principle and signal recovery via regularized orthogonal matching pursuit[J]. Foundations of Computational Mathematics, 2009, 9(3): 317-334.
- [29] 杨海蓉, 张成, 丁大为, 等. 压缩感知理论与重构算法[J]. 电子学报, 2011, 31(1): 142-148.

- [30] 薛丰廷,汤心溢. 空间目标热分析建模研究[J]. 红外技术, 2008, 1(30): 35-38.
- [31] 钟宇,吴晓燕,黄树彩,等. 红外预警卫星弹道导弹主动段探测能力[J]. 红外与激光工程, 2015, 44(11): 3276-3281.
- [32] 赵承庆,姜毅. 气体射流动力学[M]. 北京:北京理工大学出版社, 1998.
- [33] 张福祥. 火箭燃气射流动力学[M]. 哈尔滨:哈尔滨工程大学出版社, 2004.
- [34] ALBINI F A. Approximate computation of under expanded jet structure[J]. AIAA Journal, 1965, 3(8): 1535-1537.
- [35] HUBBARD E W. Approximate calculation of highly under expanded jets[J]. AIAA Journal, 1966, 4(10): 1877-1879.
- [36] BOYNTON F P. Highly underexpanded jet structure — Exact and approximate calculations [J]. AIAA Journal, 1967, 5(9): 1703-1704.
- [37] ANDERSON E, TANNEHILL J. Intermediate altitude rocket exhaust plumes [J]. Journal of Spacecraft and Rockets, 1971, 8(10): 1052-1057.
- [38] WOODROFFE J. One — dimensional model for low-altitude rocket exhaust plumes [C]//Proceedings of the 13th Aerospace Sciences Meeting. 1975:17-21.
- [39] CRIST S, SHERMAN P M, GLASS D R. Study of the highly under expended sonic jet[J]. AIAA Journal, 1996, 17(8):103-105.
- [40] BAUER C, KOCH A, MINUTOLO F, et al. Engineering model for rocket exhaust plumes verified by CFD Results[R]. 29th ISTS, 2-9. 2013.
- [41] 李海峰. 四喷管燃气射流流场结构方法与计算[D]. 北京:北京理工大学, 1987.
- [42] 郜冶,王格宇. 火箭燃气冲击流场的激波特性[J]. 宇航学报, 1994, 15(3): 11-18.
- [43] 肖育民,何洪庆,蔡体敏. 欠膨胀超音速燃气自由射流的工程计算方法[J]. 推进技术, 1996, 17(4): 21-25
- [44] HILL J A F, HABERT R H. Gas dynamics of high altitude missile trails. MC61-18-R1[R], 1963.
- [45] ALBINI F A. Approximate computation of underexpanded jet structure[J]. AIAA Journal, 1965, 3(8): 1535-1537.
- [46] BOYTON F P. Highly underexpanded jet structure and approximate calculation [J]. AIAA Journal, 1967, 5(9): 1703-1704.
- [47] SIMONS G A. Effects of nozzle boundary layers on rocket exhaust plumes[J]. AIAA Journal, 1972, 10(11): 1534-1535.
- [48] CAI C, BOYD I D. Theoretical and numerical study of free — molecular flow problems [J]. Journal of Spacecraft and Rockets, 2007, 44(3): 619-624.
- [49] KHASAWNEH K, LIU H, CAI C. Surface properties for rarefied circular jet impingement on a flat plate[J]. Physics of Fluids, 2011, 31(4): 23-27.
- [50] CAI C, WANG L. Numerical validations for a set of collisionless rocket plume solutions [J]. Journal of Spacecraft and Rockets, 2012, 49(1): 59-68.
- [51] 刘青云,崔继嵩. 高空火箭发动机羽流特性的计算机预估[J]. 推进技术, 1993(6): 25-31.
- [52] 陈兵,蔡国彪. 模拟真空羽流场的特征线法[J]. 推进技术, 2002, 23(6): 500-504.
- [53] 黄琳. 分子气体动力学原理及数值方法若干应用研究[D]. 长沙:国防科学技术大学, 1999.
- [54] PEARCE B E. Radiation base heating from solid propellant launch vehicle exhaust plumes[R]. AIAA — 72-1168, 1972.
- [55] FREEMAN G N, LUDWIG C B, MALKMUS W, et al. Development and validation of standardized infrared radiation model(SIRRM) [R]. AFRPL — 79-55, 1979.
- [56] LUDWIG C B, MALKMUS W. The standard infrared radiation model[R]. AIAA — 81-1051, 1981.
- [57] NELSON H F. Influence of particulates on infrared emission from tactical rocket exhausts[J]. Journal of Spacecraft and Rockets, 1984, 21(5): 425-432.

(本文编辑:应振华)