

高等学校教材
GAODENG XUEXIAO JIAOCAI

电磁散射与辐射问题仿真实理论与方法

DIANCISANSHE YU FUSHEWENTIFANGZHENLILUN YU FANGFA

童创明 编著

西北工业大学出版社

电磁散射与辐射问题 仿真实理论与方法

童创明 编著

西北工业大学出版社

【内容提要】 本书系统介绍了电磁散射与辐射问题的仿真实理论与方法,共有 6 章内容,主要包括概论、复杂目标的几何建模、矩量法在中低频电磁散射与辐射问题中的应用、高频近似法在电磁散射问题中的应用、电磁散射问题的混合计算方法等。本书是作者在总结近 5 年来电磁散射与辐射问题的仿真实理论与方法的部分研究成果的基础上编写而成的,适合于高等院校相关专业高年级本科生及研究生、相关科研院所的工程技术人员研究电磁散射与辐射问题时学习和参考。

图书在版编目(CIP)数据

电磁散射与辐射问题仿真实理论与方法/童创明编著. —西安:西北工业大学出版社,2010.7
ISBN 978-7-5612-2813-5

I. ①电… II. ①童… III. ①电磁波散射—仿真②电磁辐射—仿真 IV. ①0441.4

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 116450 号

出版发行:西北工业大学出版社

通信地址:西安市友谊西路 127 号 邮编:710072

电 话:(029)88493844 88491757

网 址:www.nwpup.com

印 刷 者:陕西天元印务有限责任公司

开 本:787 mm×1 092 mm 1/16

印 张:9.625

字 数:231 千字

版 次:2010 年 6 月第 1 版 2010 年 6 月第 1 次印刷

定 价:20.00 元

前言

随着现代军事技术的迅猛发展,对雷达目标电磁散射与辐射特性的要求越来越高,作为衡量目标隐身能力以及进行雷达目标识别研究的重要参数,雷达散射截面积(Radar Cross Section, RCS)一直受到各国高度的关注和重视。RCS 分析控制和仿真计算不仅是隐身技术研究的基础和重要内容,而且也为隐身技术研究提供了分析手段。在实际应用中,理论分析计算还能发现一些在实验研究中难以发现的内在规律和联系,并具有时间短、费用低的特点。此外,目标电磁特性分析研究也是目标识别的基础,基于模型的目标识别方法在很大程度上依赖于目标特性建模的准确性,目标电磁特性的研究已成为遥感信息处理、目标分类识别等多种应用的瓶颈。因此,目标的电磁特性分析在地球遥感、战场侦察等领域有着迫切而广泛的应用需求。

通常,获取目标特性的途径有两种:实测和仿真计算。实测结果虽然可信程度高,但费用高,而且受诸多实际条件的限制,很难得到完备的散射特性数据,而如果电磁仿真计算可以达到一定的精度要求,则可以作为实测数据的有效补充来完善目标和环境特性数据库,从而可降低试验成本,缩短研究时间。随着计算机技术的不断发展,利用其强大的计算能力,高精度的复杂目标三维重建和电磁计算问题变得越来越容易实现,从而推动了以计算机图形学和电磁场数值分析为基础的电磁特性仿真计算能力的提高,使得可进行仿真计算的目标电尺寸越来越大,计算越来越快速、准确,包括地面目标、空中目标以及空间目标的电磁特性都可通过电磁仿真计算得到。因此,电磁仿真计算已成为目标散射特性分析的一个主要途径。当前的电磁数值分析方法的研究主要侧重于对已有方法的改进,以逐步提高计算效率和对复杂目标结构的适应性。

值得指出的是,高精度的目标特性仿真软件由于其潜在的军事应用价值,国外的类似软件产品对我国都实行禁运。因此该领域的研究和软件开发只有走自行研制的道路,最终形成具有自主知识产权的电磁仿真计算软件,以打破国外的技术垄断和限制。综上所述,最初推动电磁散射理论与方法研究发展的主要动因是武器系统和军事平台的隐身设计、反隐身技术和雷达目标识别研究。其后,微波定量遥感与微波集成电路设计的需求也成为促进其持续发展的重要推动力量。复杂目标散射特性的研究不但可以节省大量测量的费用,而且具有广泛的军事意义和经济效益。

本书系统介绍了电磁散射与辐射问题的仿真实理论与方法,共有 6 章内容,主要包括概论、复杂目标的几何建模、矩量法应用于中低频电磁散射与辐射问题、高频近似法应用于电磁散射问题、电磁散射问题的混合计算方法等。本书是作者在总结近 5 年来电磁散射与辐射问题的仿真实理论与方法的部分研究成果的基础上编写而成的,适合于高等院校相关专业高年级本科生及研究生、相关科研院所的工程技术人员研究电磁散射与辐射问题时学习和参考。

参加本书部分章节编写的还包括笔者指导的李西敏博士、耿方志博士、姬伟杰博士、吕丹

博士、付树洪博士、钟卫军博士、赵玉磊博士和项春望硕士、周明硕士以及张学礼讲师等。

本书的出版得到了军队“2110 工程”电磁场微波技术学科专业领域建设基金、毫米波国家重点实验室开放课题基金(K200818, K200907)和陕西省自然科学基金(2005F23)的资助,同时对西北工业大学出版社的大力支持表示感谢。

由于笔者水平有限,书中难免还存在一些缺点和不足,敬请广大读者批评指正。

编著者

2009 年 11 月

目 录

第 1 章 概论	1
1.1 研究背景及意义	1
1.2 国内外研究概况	2
1.3 雷达目标 RCS 仿真的研究方法	3
1.4 本书内容介绍	4
参考文献	5
第 2 章 复杂目标的几何建模	7
2.1 几何建模分类	7
2.2 基于截锥体的线段几何描述	8
2.3 基于三角面元的表面几何建模	9
2.4 基于双线性表面的几何模型	14
2.5 NURBS 参数建模	18
参考文献	26
第 3 章 矩量法应用于中低频电磁散射与辐射问题	28
3.1 矩量法	28
3.2 电流基函数	30
3.3 电磁积分方程的建立	39
3.4 阻抗矩阵的填充	42
3.5 激励源和激励矩阵	53
3.6 导线网格矩量法的计算	56
3.7 计算实例	58
3.8 本章小结	82
参考文献	83
第 4 章 高频近似法应用于电磁散射问题	87
4.1 高频区 RCS 的研究方法	87
4.2 金属导体目标的 RCS 计算	91
4.3 涂敷 RAM 的金属导体目标 RCS 计算	99
参考文献	109

第 5 章 MoM – PO 混合计算方法应用于电磁辐射与散射问题	111
5.1 引言	111
5.2 MoM – PO 混合方法原理及实现	112
5.3 MoM – PO 混合法在辐射问题中的应用	117
5.4 MoM – PO 混合法在散射问题中的应用	120
5.5 本章小结	129
参考文献	129
第 6 章 MoM – SBR/PO 混合计算方法应用于电磁散射问题	132
6.1 引言	132
6.2 基于 RDN 思想的 SBR 方法	133
6.3 MoM – SBR/PO 混合方法的混合机理	140
6.4 仿真计算实例	142
6.5 本章小结	146
参考文献	146

第 1 章 概 论

1.1 研究背景及意义

雷达是迄今为止最为有效的远程电子探测设备,自第二次世界大战中发明雷达以来,它就在军用、民用领域发挥着重要作用。目标在雷达波的照射下向空间各个方向散射能量,雷达正是通过接收并分析回波中含有的特征信息来探测和识别目标的。定量描述目标雷达回波特性的参量是目标对入射波呈现的有效散射面积,即雷达散射截面积^[1-3](Radar Cross Section, RCS),作为衡量目标隐身能力以及进行雷达目标识别研究的重要参数,RCS 一直受到各国高度的关注和重视。对 RCS 研究有利于控制目标的雷达特性。例如,提高 RCS 的技术可用于空中的雷达信标和靶机,降低 RCS 的技术可用于我方的军事目标以降低敌方雷达的作用距离,从而提高我方武器的突防能力,降低敌方武器的战斗效能。

目标电磁散射特性是雷达系统探测、跟踪、识别目标的基础,随着航空航天技术的发展与现代战争的需要,对目标电磁散射特性的研究变得越来越重要。隐身与反隐身已成为现代战争电子对抗的主要领域之一。隐身技术是当代具有陆、海、空、天、电磁五位一体的立体化战争中最重要、最有效果的突防战术技术措施之一。例如,美国的 F-117、F-22、B-2 战斗机,俄罗斯的苏 27、苏 37、米格 29、米格 31、米格 142 系列战斗机及安 24 运输机,法国的“阵风”战斗机,欧共体的 EF2000 战斗机等都应用了隐身技术。其中,F-117 在海湾战争中大约执行了 1 270 架次空袭任务,摧毁了巴格达 95% 的目标,而自己无一伤亡^[4]。隐身技术的研究与应用将逐步扩展到战术、战略导弹系统(美 AGM129A 巡航导弹、俄 X65C3 反舰导弹等)、雷达系统(南非“褐雨燕”隐身炮位侦察雷达)、水面舰船系统(美国“海影”号、瑞典“斯米盖”隐身实验艇)、鱼雷(法国“海鳍”小型电动反潜鱼雷、美 MK50 小型反潜鱼雷)、地面战车、坦克等^[5]。所以隐身兵器及其相关的隐身技术、隐身复合材料等已引起了各国的极大关注,与此同时反隐身技术也在深入发展,并不断取得新成就。不管是隐身还是反隐身,都必须从目标的电磁散射特性研究入手。随着现代军事技术的迅猛发展,对飞行器和地面目标隐身特性的要求越来越高,RCS 分析控制和仿真计算不仅是隐身技术研究的基础和重要内容^[6],而且也为隐身技术研究提供分析手段,在实际应用中,理论分析计算还能发现一些在实验研究中难以发现的内在规律和联系,并具有时间短、费用低的特点。

此外,目标电磁特性分析研究也是目标识别的基础^[7],基于模型的目标识别方法在很大程度上依赖于目标特性建模的准确性,目标电磁特性的研究已成为遥感信息处理、目标分类识别等多种应用的瓶颈。目标的电磁特性分析在地球遥感、战场侦察等领域有着迫切而广泛的应用需求^[8]。当前,无论是军用还是民用遥感领域,都急需建立地物环境特性数据库。通常,获取目标特性的途径有两种:实测和仿真计算。实测结果虽然可信程度高,但费用高,而且受诸多实际条件的限制,很难得到完备的散射特性数据,而如果电磁仿真计算可以达到一定的精度

要求,则可以作为实测数据的有效补充,来完善目标和环境特性数据库,从而可降低试验成本,缩短研究时间。随着计算机技术的不断发展,利用其强大的计算能力,高精度的复杂目标三维重建和电磁计算问题变得越来越容易实现,从而推动了以计算机图形学和电磁场数值分析为基础的电磁特性仿真计算能力的提高,可进行仿真计算的目标电尺寸越来越大,计算越来越快速准确,包括地面目标、空中目标以及空间目标的电磁特性都可通过电磁仿真计算得到。因此,电磁仿真计算已成为目标散射特性分析的一个主要途径。当前的电磁数值分析方法的研究主要侧重于对已有方法的改进,以逐步提高计算效率和对复杂目标结构的适应性。

值得指出的是,高精度的目标特性仿真软件由于其潜在的军事应用价值,国外的类似软件产品对我国都实行禁运。因此该领域的研究和软件开发只有走自行研制的道路,最终形成具有自主知识产权的电磁仿真计算软件,以打破国外的技术垄断和限制。

综上所述,最初推动电磁散射理论与方法研究发展的主要动因是武器系统和军事平台的隐身设计、反隐身技术和雷达目标识别研究。其后,微波定量遥感与微波集成电路设计的需求也成为促进其持续发展的重要推动力量。复杂目标散射特性的研究不但可以节省大量测量的费用,而且具有广泛的军事意义和经济效益。

1.2 国内外研究概况

正是由于 RCS 的分析与计算在隐身技术中占有重要地位,西方国家尤其是美国从 20 世纪 70 年代中期就投入了大量人力和财力开展复杂目标 RCS 计算方法的研究和仿真软件的开发。目前,西方国家在该领域处于技术领先地位,已形成了一套成熟的理论分析手段,并在 F-117A、B-2、F-22 等飞行器的隐身设计中发挥了不可替代的作用。时至今日,国外已经成功开发了一些用于电磁辐射和散射特性仿真计算的软件,专门用于目标电磁散射特性仿真的典型软件,如美国政府资助开发的 Xpatch^[9-10] 软件、美国表面光学公司的 RadBase 软件和波音航空公司的 RECOTA 软件^[11],以及美国伊利诺依大学的 FISC^[12] 软件。此外,还有一些应用范围较广的综合性电磁计算商业软件,如法国的 EMC2000、南非的 FEKO、西班牙的 GRECO 和 RANUS 等^[13-15]。在这些软件中,Xpatch 软件功能最为强大,1992 年美国推出了由 Illinois 大学的 S. W. Lee 教授主持开发的 Xpatch 高频电磁散射建模软件,之后经过多次改进和升级,尤其是在美国国防部的 PACE SETTER 计划安排下,在原 Xpatch 的基础上,集成了其他七种软件和算法,形成了多功能、一体化的集成建模环境,解决了复杂目标上的发动机腔体及叶片、机载天线、低可见性目标和部件等关键部位的精确建模问题,保证了该软件处理复杂目标电磁散射的高精度和高置信度,使其成为著名的美国政府电磁散射建模国家代码。该软件已成功地用于飞机、坦克等军用目标的 RCS 精确计算,并作为主要的建模工具支撑著名的“移动和固定目标的获取与识别”计划。Xpatch 的近期版本^[10] 实际上已形成目标电磁散射分析的专家库,成为美国电磁散射建模中起主导作用的模型,被广泛应用于军用目标识别、目标隐身机理等基础研究之中。总而言之,以高频方法(物理光学法、物理绕射理论和射线追踪方法)为基本分析框架的 Xpatch 软件和以高效数值方法(矩量法、共轭梯度迭代和多层快速多极子方法)为基本框架的 FISC 软件可谓是两种里程碑式的电磁散射建模工具,它们已相继投入工程应用并产生了很大的影响。

国内从 20 世纪 80 年代开始进行电磁仿真计算方面的研究,经过 20 多年的研究和发展,

经历了从无到有、从简单到复杂的过程。前期主要是进行一些简单目标的模拟和特殊背景下(特定频率、特定目标等)目标电磁特性仿真,截至目前为止,许多单位相继开发了一批用于复杂目标电磁散射特性仿真计算的软件系统^[16],如北京航空航天大学 GRECO—CMT 软件系统、北京理工大学的中算电磁仿真软件、东南大学的 NESC 软件和成都电子科技大学的 A—UEST 软件以及航天 207 所的雷达目标特征信息预估系统等。这些软件和模型已存入目标与环境特性中心库,并在武器系统的半实物仿真、导弹的突防设计、飞机和舰船的隐身评估等方面获得应用,但由于曲面绕射建模、特殊部件等方面处理的关键技术尚未取得突破性进展,使得这些软件的应用受到一定程度的限制。

迄今为止,电磁散射的建模与分析仍然面临理论和应用的很多挑战。例如,高频方法的理论模型粗糙,数值误差较大,射线自动寻迹太复杂,而数值方法的计算量过大,内存资源和计算资源要求太高,这些方法各自固有的缺点尚未得到根本的解决。而既具整体电大尺寸,又有局部电小尺寸结构的实际目标、含腔目标以及不同介质和金属材料组成的复合目标的高效数值分析的解决方案也还不够成熟,尚需进一步研究。

对于这些特殊的电磁散射问题(如表面开有小缝隙的电大尺寸目标的散射),单纯用高频方法无法获得精度可以接受的解。而 Xpatch4 版本设计了一种与其他方法混合求解的功能,支持与精确电磁求解器或测量的混合。这种混合方法允许计算电磁学(Computational Electromagnetic, CEM)分析者使用全波电磁求解器分析电小尺寸结构的特征,而应用 Xpatch 求解电大尺寸目标。混合法不仅扩展了计算目标的范围,而且提高了复杂目标散射计算的精度。而面向工程应用的电磁散射理论建模工作除要求前沿领域富于前瞻性的创新研究以外,还必须面对工程实践中出现的各种复杂形态,复杂结构和复杂组分的实际目标,各种不同的远、近场激励条件和不同的环境(背景)介质,这些都对电磁散射研究提出了新的挑战,也反过来促进了计算电磁学的发展。由此可见,在对传统电磁计算方法进行继承的基础上,如何有效地研究高低频混合技术在特殊问题中的应用,是计算电磁学研究领域的一个前沿课题。

1.3 雷达目标 RCS 仿真的研究方法

从仿真的角度研究雷达目标的 RCS,方法多种多样,经过长期的发展与完善,至今已经成熟的常用方法有以下几种:

1. 经典解法

经典解法是从电磁场波动方程出发,根据散射体的边界条件求得场的严格级数解,但只有当散射体的几何形状与某一可分离的坐标面相吻合时,才能用分离变量法求解,所以这种方法只能适用于一些外形简单的目标。

2. 数值法

数值法可分为微分方程法和积分方程法两大类。

微分方程法主要有两种:一种是有限差分法(FDM),这种方法将连续的三维空间用网格划分开,麦克斯韦方程化为具有一定精度的差分方程,这些网格点的未知电场强度便由代数方程给出,可由计算机求解。FDM 分为时域有限差分(FDTD)和频域有限差分(FDFD)。另一种是有限元法(FEM),这种方法将三维空间分成多面体,曲面分成多角形。这两种方法求解有限空间区域的问题是成功的,但求解三维散射问题时遇到困难。这是因为散射体外空间为

无限大,需人为地将求解空间限定为有限区域,使未知量数目保持有限;在区域外边界需设置边界条件,结果会导致出现误差;时域问题还会出现网格色散误差。这两种方法在实际应用过程中受到计算机内存及运算速度的限制。

在积分方程法中,未知量为导体表面电流或涂敷阻抗面的面电流以及可透入散射体内的体电流。通过应用等效原理,体积分方程可以转化为面积分方程。积分方程的求解局限于散射体表面或内部,离散化后,未知量的数目较微分方程法大为减少。散射常采用辐射积分求出,计算精度有保证。因此,积分方程法非常适于处理具有开放边界的散射问题,其中最基本的方法是矩量法^[8](Method of Moment, MoM)。但是通过 MoM 所得到的代数方程组系数矩阵为稠密矩阵,矩阵求逆的工作将消耗大量的计算机内存,耗费大量时间,因此 MoM 一般不能用于求解电大尺寸三维目标的散射场。随着计算机技术和算法的发展,MoM 已经拓宽了应用领域,能成功地求解某些电大尺寸目标的散射问题。

3. 高频法

在高频区,物体的每一部分独立的散射能量,其上的感应场只与入射波有关而与其他部分散射的能量无关。高频法正是基于这样的局部性原理来近似求得散射场的。高频法主要包括几何光学法(GO)、几何绕射理论^[18](GTD)、一致性绕射理论^[19](UTD)、等效电磁流法^[20](MEC)、物理光学法^[21](PO)、物理绕射理论^[22](PTD)、增量长度绕射系数法(ILDC)、复射线理论(CT)以及弹跳射线法(SBR)等。

高频法对计算机的内存与计算速度要求不高,计算公式简单明了,计算速度快。但是,高频法只适用于电大目标的电磁散射问题。由于该方法的近似性,所以计算精度不是很高,并且对于几何结构复杂及介质或其他非金属材料构成的系统存在困难。

4. 混合法

由于实际问题的多样性,单独使用一种方法可能并不能满足要求,近年来逐渐形成了把两种或两种以上的散射研究方法通过合理途径有机结合而成的“混合法”。混合法可以吸收不同研究方法的优点,克服各方法的缺点,有助于解决复杂的散射问题。

常见的混合方法包括边界积分方程与体积分方程/微分方程混合、高频近似法/低频精确法混合、解析法/数值法混合。

高频方法与低频方法的混合一般是针对电大尺寸复杂目标而提出的。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。另外,复杂目标上的一些特殊部件如飞行器进气道等的散射问题也十分复杂。所以仅用高频方法无法更准确地求解。常用的高低频混合法主要有:SBR/MoM 混合、PTD/MoM 混合、GTD/MoM 混合等。

混合法的出现是计算电磁学发展的必然产物,它代表了复杂目标 RCS 计算方法的发展方向。

1.4 本书内容介绍

本书各章节安排及其具体内容如下:

第1章——本书的概述部分,主要阐述本书研究的背景及意义,有关文献的主要观点,以往的国内外研究历史和当前研究与过去研究的关系等。另外,对于本书主要内容及其相关的

框架安排进行了介绍。

第2章——复杂目标的几何建模。简要地概述了几何建模方法的发展历史和目前常用的建模方法,主要描述了双线性四边形模拟表面、平面三角单元模拟表面以及截锥体模拟导线的方法和途径;剖分尺寸与计算结果的误差关系;棱边的自动识别和生成原理以及双线性四边形剖分时具有代表性的局部坐标之间的关系等内容。

第3章——矩量法应用于电磁散射与辐射问题。首先介绍了矩量法的基本原理,然后,主要介绍了基于双线性四边形的混合域基函数、基于截锥体的线混合域基函数以及基于三角单元对的RWG基函数和分段正弦基函数、线面结基函数,通过不同基函数在矩量法中的应用,可以相互进行校模,以保证计算的可靠性。在本章中,彻底解决了混合域基函数与局部坐标之间的依赖关系;在阻抗矩阵元素计算中引入了等效偶极子概念的快速算法;对导线网格矩量法进行了研究。最后,给出了大量计算结果来验证方法的准确性。

第4章——高频近似法应用于目标RCS仿真的基本原理。在PO法近似基础上,从麦克斯韦方程出发,详细推导了雷达目标散射的电场、磁场积分公式。通过格林函数近似,得到了远区条件下理想导体散射电场积分表达式及RCS计算公式。研究了金属导体目标涂敷雷达吸波材料(RAM)后的RCS问题。通过应用阻抗边界条件,给出了多层有耗介质反射系数的表达式。根据入射场、散射场、反射系数的关系,NURBS目标模型的Bézier转化,推导了非良导体的远区PO场表达式。研究了目标照明区的判断问题。给出了利用平面片判断遮挡,在Bézier面片上进行RCS积分计算的一种实用算法。此算法克服了一般方法求入射直线与曲面的交点和判断一点是否在曲面内的难题。当然,对于简单的凸目标不需要Bézier面片与平面片的近似,只需算出Bézier面片的法线矢量就可判断遮挡问题。

第5章——矩量法和物理光学法的混合技术在电磁散射与辐射特性中的应用。首先描述了基于流的高低频混合方法的基本原理,并实现了混合法在电磁辐射特性计算中的应用;随后,又将混合算法主要用于散射问题的计算中;最后,给出了大量计算结果。

第6章——矩量法和射线追踪法(SBR)以及物理光学法的混合方法在散射问题中的应用。首先介绍了射线密度归一化(Ray Density Normalization, RDN)的思想和概念,推导出了基于场的射线追踪过程,其正确性得到了传统射线追踪方法的检验。在此基础上,将基于射线密度归一化概念的射线追踪方法用于存在多次反射贡献的高频区域中,从而修正了高频区域的电流,改善了原混合方法的计算精度,得到了计算结果的检验。

参考文献

- [1] 克拉特 E F. 雷达散射截面——预估、测量和减缩[M]. 阮颖铮,陈海,译. 北京:电子工业出版社,1988.
- [2] 阮颖铮. 雷达截面与隐身技术[M]. 北京:国防工业出版社,1998.
- [3] 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.
- [4] 郭景丽. 飞行器上铆钉和螺钉的散射研究[D]. 西安:西安电子科技大学,2002.
- [5] 曲东才. 隐身与反隐身技术[J]. 航空电子技术,1997,3:21-35.
- [6] 薛晓春,王雪华. 隐身与反隐身技术的发展研究[J]. 现代防御技术,2004,32

- (2):60-65.
- [7] Harrington R F. 计算电磁场的矩量法[M]. 王尔杰,等,译. 北京:国防工业出版社,1981.
 - [8] Kolundzija B. M, Popovic B D. Entire-domain Galerkin Method for Analysis of Metallic Antennas and Scatters[J]. IEEE Proceedings—H. ,1993,140(1):1-10.
 - [9] Kolundzija B M, Popovic B D. General Localized Junction Model in the Analysis of Wire to Plate Junctions[J]. Proc. IEE, Pt. H, 1994,141(1):1-7.
 - [10] Kolundzija B M. Automatic Mesh Generation Using Single—and Double-Node Segmentation Techniques[J]. IEEE Antennas and Propagat Magazine, 1998,40:30-38.
 - [11] 项春望,童创明,耿方志. 复杂目标降维建模方法及其在电磁散射中的应用. 电波科学学报[J],2005,20(2):189-192.
 - [12] 耿方志. 电中、小尺寸目标电磁散射特性的计算[D]. 西安:空军工程大学,2004.
 - [13] 项春望. 导线及金属体的电磁辐射与散射数值计算[D]. 西安:空军工程大学,2005.
 - [14] Chang Y, Harrington R F. A Surface Formulation for Characteristic Modes of Material Bodies[J]. IEEE Trans. Antennas Propagat, 1977,25(6):789-795.
 - [15] Poggio J, Miller E K. Integral Equation Solutions of Three—Dimensional Scattering Problems[J]. Computer Techniques for Electromagnetics, 1973,卷(期):.
 - [16] 耿方志,童创明,项春望,等. 混合域基函数及其在线天线阻抗特性问题[J]. 系统工程与电子技术,2006,28(1):40-42.
 - [17] 童创明. 线状散射体的有效电磁建模方法及其应用[J]. 电波科学学报,2006,21(1):117-120.
 - [18] 耿方志,童创明,项春望,等. 一种新的混合基函数在电磁散射问题中的应用[J]. 系统工程与电子技术,2006,28(6):827-829,872.
 - [19] 项春旺,童创明,董文林,等. LPDA 宽带宽角响应的快速矩量法计算[J]. 电波科学学报,2008,23(5):960-964.
 - [20] 吕丹. 基于 NURBS 建模和 PO 法的雷达目标 RCS 仿真研究[D]. 西安:空军工程大学,2007.
 - [21] 李西敏. 介质及涂敷目标电磁散射特性仿真方法研究[D]. 西安:空军工程大学,2008.
 - [22] 耿方志. 电磁散射与辐射问题混合计算方法研究[D]. 西安:空军工程大学,2007.

第 2 章 复杂目标的几何建模

2.1 几何建模分类

要解决目标的电磁建模,首先要解决其几何建模问题。几何建模是指利用交互的方式将现实世界中的物体模型输入计算机,而计算机以一定的方式将模型存储起来的过程。在计算复杂目标的电磁散射时,目标的几何建模是一个关键的问题,建模方法的好坏将直接影响计算准确度和整体计算效率的高低。

20 世纪 60 年代初期,随着电子计算机的出现而迅速发展起来的计算机图形学对三维形体的描述、生成与几何变换进行了卓有成效的研究。时至今日,随着现代计算机水平的不断更新,较大的建模计算量已经不再是一个难题,为了使复杂目标的计算机模型更贴切,人们广泛采用图形软件来完成电磁散射计算中目标模型的建立工作,常用的软件有 AutoCAD, 3DS, Ansys 和 UG 等。这些图形软件建模能力很强,一般只需已知目标点、线、面、体等几何元素信息,经过平移、旋转、变换等几何操作和并、交、差等集合运算即可产生实际的或者想象的三维目标模型。

总的来说,定义几何形状和构造三维模型的方法有三类形式^[1]。

1. 线框模型

它是利用对象形体的棱边和顶点来表示几何形状的一种模型。它只反映出三维实体的一部分形状信息,难以得到物体的剖面图和进行消除隐藏线及画出两个面的交线或轮廓线等操作,通常只用于示意表达。不过,较早的导线网格矩量法使用的几何模型就是基于这种模型发展起来的。

2. 表面模型

它把线框模型中棱线所包围的部分定义成形体的表面,增加了面的有关信息及连接指针,然后利用形体表面的集合来描述形体的形状。一般常用的平面元模型和曲面元模型就是典型的表面模型。最具代表性的表面模型模拟方法是三角面元和非均匀有理 B 样条方法(NURBS)。对于基于表面积分或需要表面信息来进行的电磁建模,表面模型是最理想的几何模拟方法。基于表面剖分的电磁建模方法有物理光学法(PO)、物理绕射理论(PTD)、矩量法(MoM)等。

一般来说,基于表面模型的几何建模大致经历了从简单粗糙到细致精确的过程:

(1) 旋转体方法。这种方法仅限于表面是或近似旋转体的简单形体目标。因此在建模过程中用这种方法分析 RCS 有严重的缺陷,在实际的应用中,这种方法很少能表示真实目标的 RCS 的计算,常用于规则结构。

(2) 部件分解法。这种技术耗时并且仅能应用于电大尺寸($2\pi L/\lambda > 10$, L 为目标长度)目标。用这种方法,设计者可以把复杂目标分解为若干组部件。每一个部件又可近似成简单的

几何体,例如,锥、柱、球或者平面等,然后分别对这些近似体进行 RCS 计算,最后叠加部件的 RCS 就得到相应目标整体的 RCS。很明显,这种方法比旋转体方法更加灵活,但它仍旧是粗略的 RCS 预估方法。这源于部件法固有的建模和各部件之间相位关系的近似,以及忽略了阴影和多次散射等情况的原因。此外,这种建模方法所编制的程序通用性差。

(3)面元法。20 世纪 80 年代后期,由于计算机技术的迅速发展,计算量大已不再是个大问题。为了使复杂目标的理论建模更加具有通用性,人们广泛采用面元法计算复杂目标的 RCS,几何建模方法也改进为对目标外形进行精确逼近。在面元法中,目标被表示成许多面元和劈的组合。根据设计者的目的,面元可以用来描述目标,或是目标的部件和子部件。面元法将物理光学中的面积分转化为各面元面积分的代数和,而面元(一般为多边形,如三角形、四边形等)的积分又可以转化成围线积分,由解析式给出;对于劈的边缘绕射则可以由等效电磁流法(Method of Equivalent Currents, MEC)得到。采用面元模型计算复杂目标的 RCS,具有很高的精度。

(4)参数表面模型法^[2-4]。随着计算机图形学的飞速发展,复杂目标的参数曲面建模成为目标建模的发展趋势,参数曲面也已经应用到复杂目标 RCS 计算的建模中^[3-4]。参数曲面方法与面元方法相比,具有拟合效果好、划分曲面片相对少的优点,而且该方法消除了人工棱边“噪声”的影响,提高了 RCS 的计算精度。因此参数曲面拟合方法将成为 RCS 预估软件的潮流,其中 NURBS 方法将成为参数曲面描述的首选工具。

3. 实体模型

它是由许多具有一定形状和体积的基本体素通过布尔运算和基本变形操作建立的三维立体模型。实体建模的特点在于建立了一个物体的完整形状模型,它有明确的物体包容空间,且各表面间有严格的拓扑关系,形成一个整体,可以实施消除隐藏线或者剖切形体等操作,近年在计算机辅助设计(Computer Aided Design, CAD)中得到广泛的应用,最具代表性的实体造型方法是 ACIS 提出的边界表示法。对于实体模型,由于可以灵活地表示物体空间的材料变换特性,因此特别适合于各种均匀和非均匀介质目标的几何描述。基于实体模型剖分的电磁建模方法有时域有限差分法、有限元法等。

上述三类几何建模方法,虽然都能够用来作为电磁散射建模的几何表示,但却以表面模型应用最为广泛,在表面模型基础上得到的面元剖分模型是各种高频近似方法和矩量法等电磁场数值计算方法常用的计算几何模型,本书也将基于表面模型进行各种目标的几何建模,为下一步的电磁建模提供良好的几何信息。

2.2 基于截锥体的线段几何描述

由任意导线段连接成的导线结构代表一类特殊的金属天线或散射体。通常情况下,对于电细($a < 0.01\lambda$, a 为导线半径)导线结构的几何形状可以完全由其轴线参数方程及其半径决定,同时沿导线的电流分布是一维的(仅有轴线方向电流矢量),而用于导线几何形状模拟的拉格朗日样条的可能阶数有线性样条、平方样条和立体样条。其中,线性样条适用于截锥体(可以理解为截断的圆锥体),而截锥体在广义导线几何形状模拟时,是一种很方便的结构^[5]。

截锥体由其首尾两处的位置矢量与半径,即由 r_1 与 a_1 以及 r_2 与 a_2 共同决定,如图 2.1(a)所示,如果为半径均匀的导线,则 $a_1 = a_2$,轴线方向 $\hat{l}$ 与 $\hat{i}_z$ 重合。

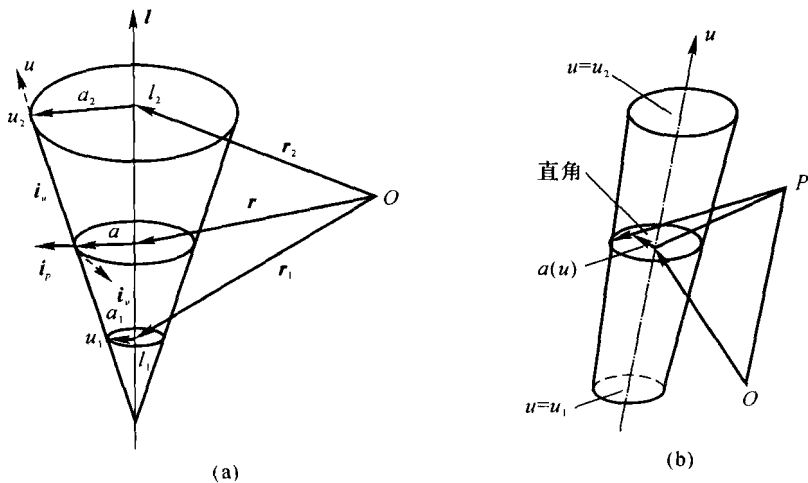


图 2.1 截锥体模型的定义

(a) 截锥体的几何形状描述； (b) 截锥体的简化形式

截锥体表面参数方程可写成^[5]

$$\mathbf{r}(u, v) = \mathbf{r}_a(u) + a(u)\mathbf{i}_p(v) \quad (2.1)$$

式中, $u_1 \leq u \leq u_2$, $v_1 \leq v \leq v_2$, 且 $\mathbf{r}_a(u)$ 与 $a(u)$ 分别是圆锥体轴线及圆锥体的局部半径的参数方程, 即

$$\mathbf{r}_a(u) = \mathbf{r}_1 + (u - u_1) \frac{\mathbf{r}_2 - \mathbf{r}_1}{u_2 - u_1} \quad (2.2)$$

$$a(u) = a_1 + (u - u_1) \frac{a_2 - a_1}{u_2 - u_1} \quad (2.3)$$

由此可见, 只要知道 $\mathbf{r}_1, a_1, \mathbf{r}_2$ 与 a_2 即可确定一个截锥体。在方程式(2.1)中 u 是沿参考圆锥母线的局部坐标, v 是从 x 轴线测起关于圆锥轴线的局部坐标, 而 $\mathbf{i}_p$ 是垂直于圆锥轴线的局部坐标系中的径向单位矢量, 如图 2.1(a) 所示。由于实际计算中导线是电细的, 所以可将截锥体简化为图 2.1(b) 所示的简化形式, u 分量定义在导线轴线上, 这样式(2.2)和式(2.3)就可以直接给出良好的参数表示了。另外, 由于 u, v 不是长度坐标, 而 u_1 和 u_2 可任意选择, 一般地, 取所用截锥体起点与终点的 u 坐标分别为 -1 与 $+1$ 时是方便的。

由于 u, v 坐标是互相垂直的, 即两坐标间的夹角为 $\pi/2$, 所以导线中的长度变量为

$$dl_u = e_u du \quad (2.4)$$

式中, e_u 是拉摩系数, 拉摩矢量 $\mathbf{e}_u$ 定义为

$$\mathbf{e}_u = \frac{d\mathbf{r}_a(u)}{du}, \quad e_u = |\mathbf{e}_u| \quad (2.5)$$

2.3 基于三角面元的表面几何建模

正如在 2.1 节中所述, 基于表面模型的平面元剖分是当今电磁建模所采用的主要几何建模方式, 而在平面元剖分中, 三角面元又是最为灵活的表面模拟方式; 另外, 三角面元又为不同

电磁建模方法提供相同的几何建模平台,使得高频渐近方法和低频数值方法以及高低频混合算法能够在三角面元剖分这同一平台上进行相应的运算。

2.3.1 复杂目标表面模型的生成

商业 CAD/CAE 软件的使用使复杂目标高精度几何建模成为可能,使目标的复杂外形可以用平面元统一表达,为其后的电磁散射计算提供了极大的方便。

实际工程应用中,复杂目标通常可以通过商业 CAD 软件(如 AutoCAD,UG,CATIA,Pro/E 等)准确设计出其实体的 CAD 图形,CAD 图中包含目标外形的准确数据,可直接用于目标的加工制造或剖分等操作。如图 2.2 和图 2.3 所示分别为使用 UG 软件设计的飞机和导弹的 CAD 模型。

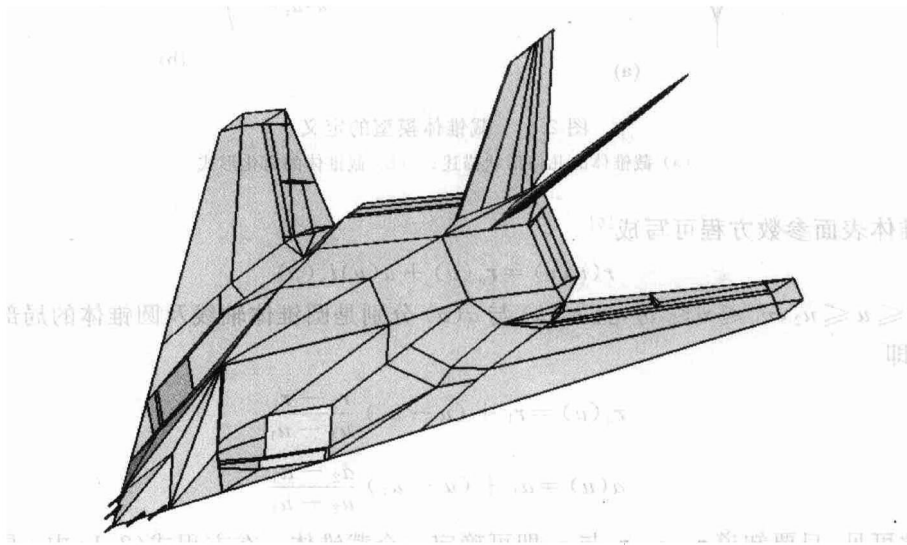


图 2.2 F—117A 飞机的 CAD 模型图



图 2.3 某型号导弹的 CAD 模型图