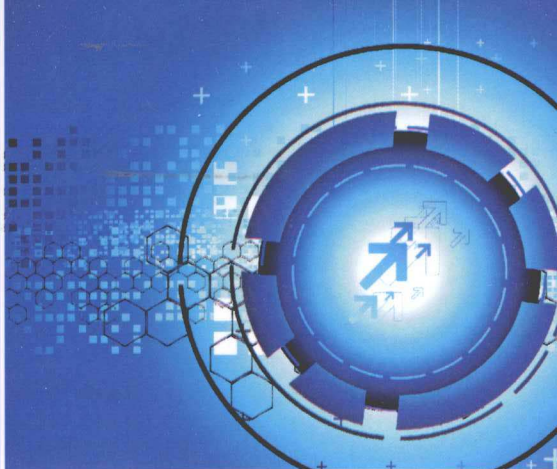
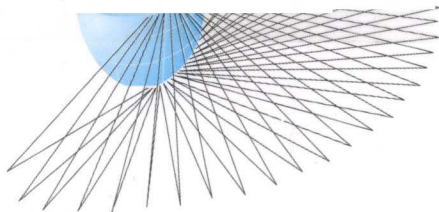


Modern Uniform
Geometrical
Theory of diffraction



现代一致性 几何绕射理论

王楠 著



西安电子科技大学出版社
<http://www.xduph.com>

现代一致性几何绕射理论

王楠 著

西安电子科技大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

现代一致性几何绕射理论/王楠著.

—西安:西安电子科技大学出版社,2011.1

ISBN 978-7-5606-2513-3

I. ① 现… II. ① 王… III. ① 几何光学—研究 ② 电波传播—电波绕射—研究 IV. ① TN011

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 231811 号

策 划 云立实

责任编辑 阎 彬 云立实

出版发行 西安电子科技大学出版社(西安市太白南路2号)

电 话 (029)88242885 88201467 邮 编 710071

网 址 www.xduph.com 电子邮箱 xdupfxb001@163.com

经 销 新华书店

印刷单位 陕西天意印务有限责任公司

版 次 2011年1月第1版 2011年1月第1次印刷

开 本 850毫米×1168毫米 1/32 印张 5.875

字 数 137千字

印 数 1~2000册

定 价 12.00元

ISBN 978-7-5606-2513-3/TN·0584

XDUP 2805001-1

如有印装问题可调换

本社图书封面为激光防伪覆膜,谨防盗版。

内 容 简 介

本书着眼于现代一致性几何绕射理论(UTD)方法的使用,总结了 UTD 方法的一致性特点,根据逻辑关系将 UTD 方法分为建模、射线寻迹、遮挡判断以及场值求解等四个基本模块并加以详细讨论,明晰了 UTD 方法的应用思路和使用步骤。本书内容不仅包括在工程中卓有成效的板、柱、锥 UTD 方法,也包括近年来新兴的 NURBS-UTD 方法以及 UTD 相关的混合方法,并且对时域版本的 UTD 方法也作了简单介绍。

本书可作为电子科学与技术、电磁场与微波技术等相关专业高年级本科生和研究生教材,也可作为高等院校、研究所以及从事电磁散射研究的科技工作者学习现代 UTD 方法的参考书。

序

这本书是西安电子科技大学年青学者王楠博士的处女作。全书理论联系实际,深入介绍了现代一致性几何绕射理论。

西安电子科技大学在电磁场数值计算领域一直保持着特色和优势。上世纪七十年代末,文革结束,百废待兴。王一平教授作为带头人,组织力量把国外正在兴起的《矩量法》和《几何绕射理论》通过学习、翻译、研究、应用,介绍过来迅速地提高了国内学者的学术水平。作为成果,较早出版了 R. F. Harrington《矩量法》的中译本和汪茂光的《几何绕射理论》。值得指出,几何绕射理论从一开始就紧密地与实际问题联系在一起,西电研究小组最早解决了飞行器和弹上天线的性能问题就是一个突出的范例。

计算电磁学始终存在着高频方法和低频方法。最近几年,计算机和并行计算技术的飞速发展使低频方法有了本质的提升;但这不仅没有阻止高频近似技术的前进,相反地现代 UTD 更加快脚步,昂首向前。

现代一致性几何绕射理论(UTD)是电磁高频分析中最有用最灵活的一种方法,将它应用于飞机、舰艇、导弹、卫星那样一些电尺寸很大的工组系统中,可以简单而快速地得到较好的结果。

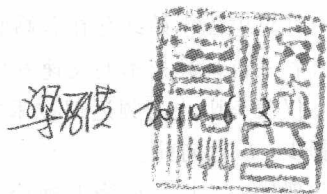
自汪茂光的《几何绕射理论》出版以来又快过去 20 多年了,我们迫切需要一本更新、更好、更现代的 UTD 方法使用和发展的书籍。在这种情况下,王楠博士以他近 10 年的扎实工作推出本书,可嘉可喜。

本书的主要特色有三。一是引领时代的步伐,把 GTD 发展成为 UTD 的过程论述得清晰、明确;二是紧跟国际 UTD 发展新方向,将最普遍的非均匀有理 B 样条(NURBS)建模技术引入到 UTD 方法之中,将建模精度提高了一个层次,同时又完成了整个 NURBS-UTD 的基本模块;三是作者结合科研工作,把 UTD 与实际问题的紧密连接,使本书的理论“双脚落地”,有实用,有实例。

简言之,这是一本 UTD 入门的书,这是一本高频计算理论的书,这更是一本科学研究应用的书。读者,特别是广大研究生通过此书可以由最短路径进入 UTD 前沿,并且占据高地。

王楠博士和他的青年同事们为课题、为本书洒下了大量的汗水,但是,这依然掩盖不住作者的年青和稚嫩。也许正是这一点,他把自己克服困难的过程和盘托出,把心交给读者,这恰好是年青作者的最大优势。

我向读者郑重推荐此书,是为序。



前 言

在电磁散射和绕射问题中,只有极少数问题可以求得严格的解析解。随着计算机技术的发展,虽然对于任意形状的物体可以用数值积分方法求得积分方程的数值,但当物体的电尺寸很大时,由于计算机容量的限制也难以求得数值解,需要使用近似解法。

几何绕射理论(GTD)及其“升级版”——一致性几何绕射理论(UTD)是20世纪50年代以来形成和发展的高频渐进计算方法,是一种典型的射线光学方法,它具有物理概念清楚、简单易用的特点。Keller利用几何光学的射线方法引入了绕射射线来描述绕射现象。几何绕射理论的解是以一些已知的几何形状简单的问题的严格解为基础的,这些原始问题称为典型问题。比较典型问题的严格解和由几何光学得到的近似解可以导出一些普遍规律,从而找到对近似结果进行修正的基本方法。因为形状复杂的物体可以看成是许多简单的几何构型的复合体,所以可以对一个复杂物体的各个局部分别应用已知的解,然后把各个局部对场的贡献叠加起来求得复杂物体的近似高频辐射和散射特性。这样的处理方法是高频绕射问题的局部性原理为基础的。所谓局部性原理,就是说在高频时,绕射现象和反射现象一样只取决于物体在绕射点附近的几何形状和入射场性质,而与距离绕射点较远的物体的几何形状无关。

GTD和UTD的一个共同困难就是它的算式不能正确计算

焦散区的场,因为焦散区类似于凸透镜的焦点,有无数条射线汇集,射线场叠加成为无穷大,这是射线光学的固有缺点。焦散区的场可以用等效电磁流法来计算。等效电磁流法在远离焦散区之处间接利用 GTD 求得劈边缘上的等效电流或磁流,然后通过辐射积分计算这些等效电流和磁流在焦散区内的辐射场,在焦散区外 UTD 的解就自动转化为一般的 GTD 结果。

到目前为止,国外出版的少量书籍有的偏重单一的理论或工程,有的又涉及面太广;在国内,系统阐述几何绕射理论及其应用的书籍很少,广泛流行的是西安电子科技大学汪茂光教授在 1985 年以及 1994 年出版的两版《几何绕射理论》教材。书中注重理论,给出了高频 GTD 解的详细推导过程,是很好的理论参考书,但是由于着重于复杂函数的推导求解,因此对 GTD 方法的工程使用细节介绍较少。另外还有王尔杰等在 1983 年出版的《几何绕射理论的工程应用》一书,书中主要翻译和收集了当时 GTD 的主流文献。这两本著作年代稍显久远且偏重 GTD 理论,而对当时新出现的 UTD 方法介绍较少。

时间进入 21 世纪,我们所面临的电磁问题有了不同的面貌。现代电磁环境如飞机、舰艇等运载平台变得越来越复杂,电磁兼容性问题也日渐突出。随着计算机技术的发展,电磁学的各种数值计算方法都有了长足的进步,但是复杂电磁环境中的各种大型设备的工作频率正在变得越来越高,换言之就是目标的电尺寸相对以往飞速增长,对于这样的电大尺寸目标来说,高频的近似方法可以实现快速、高效的数值仿真和预测,因此非常有必要对高频的 GTD、UTD,包括 PO 方法进行研究、推广。

在现代工程中,UTD 方法也一直在发展中,不论理论和应用都有新的方向出现,而与计算电磁学中的其它方法相比,UTD 这一简单、实用的高频电磁方法在国内还未得到必要的推广。

作者根据科研实际的需要,一直致力于高频电磁方法的研

究,尤其对 UTD 方法进行了较为深入的探索,对 UTD 方法有一定的发展并且取得了一些成果。在解析射线寻迹的基础上,解决了板、柱、锥组合模型的解析遮挡判断等 UTD 基本问题,由于使用解析公式使得计算效率相对也比较高。板、柱、锥 UTD 方法在相应工程中的应用获得了比较好的反馈。近年来,作者还引入了作为工业造型标准的非均匀有理 B 样条(NURBS)曲面建模技术来提高建模精度,对任意曲面建模的 UTD 方法展开了研究,并完成了 NURBS-UTD 的基本框架。

本书作者力图在理论以及工程积累的基础上,联系当今电磁兼容问题的需求,着眼于 UTD 方法的使用和推广,将 UTD 方法的基本研究框架、基本使用步骤以及近年来的新发展展示出来。希望本书可以成为读者使用 UTD 方法解决一些实际工程问题的一个参考。

本书总结了 UTD 方法的一致性特点,根据逻辑关系将 UTD 方法分为建模、射线寻迹、遮挡判断以及场值求解等四个基本模块分别进行了介绍。本书除去介绍工程中卓有成效的板、柱、锥 UTD 方法外,还介绍了 NURBS 建模技术与 UTD 方法相结合而产生的 NURBS-UTD 方法。在 UTD 方法的四个基本模块基础上,本书还引入了其它电磁计算方法,形成与 UTD 相关的混合方法。另外,本书对时域版本的 UTD 方法也作了简单介绍。

本书对于 UTD 方法的具体介绍是作者所在课题组长期以来在 UTD 方法上的积累,其中既有梁昌洪教授亲自推导完成的解析公式,也有前辈学长们辛苦完成的研究成果。作者在采纳、总结、吸收前辈们工作的基础上,能够事半功倍地对现代 UTD 方法,尤其是 NURBS-UTD 方法展开研究并获得成果,不能全然归功于自己,正如牛顿的名言——“如果说我可以看得更远,是因为我站在巨人的肩膀上”。

作者对梁昌洪教授在编写此书过程中给予的鼓励、支持和帮

助表示诚挚的感谢,同时对张玉副教授、苏涛副教授以及西安电子科技大学 AEMC Group,尤其是软件组各位兄弟姐妹的关心和关注表示衷心的感谢。

本书介绍的只是 UTD 方法中的一些方面,希望可以引起更多人对 UTD 方法的关注,并将这种方法进一步完善、发展,使之更加广泛地应用到实际工程当中。由于本人水平有限,书中的错误、不当和言之不详之处在所难免,请各位读者、有关单位的专家、学者和科技工作者批评指正。

作者

2010 年 7 月



目 录

第 0 章 绪论	1
第 1 章 从几何光学到一致性几何绕射理论	9
1.1 几何光学	9
1.2 Keller 的几何绕射理论	16
1.3 一致性几何绕射理论	20
1.4 等效电磁流方法	22
1.5 现代 UTD 的主要特点	23
1.6 现代 UTD 方法的基本模块	26
第 2 章 计算模型的建立	28
2.1 计算机建模技术的发展	28
2.2 计算电磁学中的建模方法	30
2.2.1 面元分解建模	31
2.2.2 典型部件分解建模	32
2.2.3 NURBS 曲面建模	33
2.3 现代 UTD 方法中使用的建模方法	35
第 3 章 板、柱、锥建模的 UTD 方法	37
3.1 板、柱、锥 UTD 的建模	37
3.2 板、柱、锥 UTD 的射线寻迹	38
3.2.1 费马原理	38
3.2.2 直射射线	42
3.2.3 反射射线的寻迹	42
3.2.4 直边缘绕射射线的寻迹	49

3.2.5	表面绕射射线的寻迹	51
3.2.6	尖顶绕射射线以及二次作用射线	58
3.3	板、柱、锥 UTD 的遮挡判断	59
3.4	板、柱、锥 UTD 的场值求解	62
3.4.1	直射场	62
3.4.2	边缘绕射射线场	64
3.4.3	反射射线场	69
3.4.4	表面绕射射线场	71
3.4.5	尖顶绕射场以及二次作用射线场	78
3.5	应用算例	80
第 4 章 NURBS 建模的 UTD 方法		89
4.1	NURBS - UTD 的建模	93
4.2	NURBS - UTD 的射线寻迹	93
4.2.1	直射射线	94
4.2.2	反射射线的寻迹	94
4.2.3	边缘绕射射线的寻迹	95
4.2.4	表面绕射射线的寻迹	96
4.2.5	尖顶绕射射线以及二次作用射线	102
4.3	NURBS - UTD 的遮挡判断	105
4.4	NURBS - UTD 的场值求解	108
4.5	应用算例	110
第 5 章 UTD 的混合方法		125
5.1	MoM - UTD 混合方法	126
5.1.1	MoM - UTD 混合原理	126
5.1.2	利用 MoM - UTD 混合方法计算隔离度	130
5.2	准混合方法及矢量场接口方案	134
5.2.1	准混合方法	134
5.2.2	矢量场接口方案	137

第 6 章 时域中的 UTD 方法	139
6.1 基本原理	140
6.2 曲边缘	142
6.2.1 PEC 曲边缘的 TD-UTD 脉冲响应	143
6.2.2 特殊情况的简化形式	147
6.3 光滑曲面	149
6.3.1 PEC 曲面的 TD-UTD 脉冲响应	150
6.3.2 特殊函数的计算	153
6.4 一般像散脉冲激励	158
参考文献	160

第0章 绪 论

电磁学是这样一门科学,它研究的是电磁源以及它们在特殊环境下产生的场。计算电磁学(Computational Electromagnetics, 简称 CEM)是电磁学的一个分支,它是依靠计算机来获得数值结果的一种方法。得益于过去几十年的发展,计算电磁学已经成为除实验观察和数学分析以外的第三种研究方法。计算电磁学在诸如移动电话覆盖、天线设计以及运载雷达等快速发展的工业领域都有应用。在产品制造周期当中的设计和制造阶段,电磁仿真可以代替许多昂贵、耗时的测量和实验。通过建立比如飞机、卫星、汽车或者船舶之类的模型,使用电磁仿真可以尽可能真实地预测场的散射或者辐射,同样也可以预测这些模型上所加载的天线的性能,以便得出电磁场的分布或者进行性能优化。

随着计算机技术的不断发展,软件功能不断强大,计算方法不断改进,我们能解决的电磁问题,其规模越来越大,其环境越来越复杂,因此计算电磁学已经被广泛应用于诸如微波与毫米波通信、雷达、精确制导、电磁防护、电磁兼容、医疗诊断、导航和地质勘探等各种电磁领域。

1. 计算电磁学的常用方法

当电磁波遇到障碍物如理想导体时,在其表面会感应出电流和电荷,由障碍物的感应电流和感应电荷产生的场称为散射场,这种现象称为散射现象,障碍物称为散射体。在电磁散射和绕射问题中,只有少数问题可以求得严格的解析解,而这些能求得严格解的问题所涉及的物体,其几何形状一般是比较简单的,而且

需要物体的表面和正交曲线坐标的曲面相重合。即使是这一类问题,如果所求得的本征函数的无穷级数形式,则这种级数往往收敛得也很慢,因而只对其尺寸远大于波长的那些物体才有实际意义。随着计算机技术的发展,虽然任意形状的物体都可以通过数值积分方法求得积分方程的数值,但当物体的电尺寸很大时,由于计算机容量的限制也难以求得数值解,因而仍不得不求助于近似解法。

依据现存的数学方程,计算电磁学的发展催生出许多可以选择的数值计算方法。各种方法之间各有优劣,彼此相互关联但又难分高下,没有哪种方法可以做到“一统天下”。Maxwell 方程是研究所有电磁学问题的起点,其形式如下:

$$\left\{ \begin{array}{l} \nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \\ \nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} \\ \nabla \cdot \mathbf{D} = \rho \\ \nabla \cdot \mathbf{B} = 0 \end{array} \right. \quad \left\{ \begin{array}{l} \oint_L \mathbf{H} \cdot d\mathbf{l} = \int_s \left(\mathbf{J} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} \right) \cdot d\mathbf{S} \\ \oint_L \mathbf{E} \cdot d\mathbf{l} = -\int_s \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \cdot d\mathbf{S} \\ \int_s \mathbf{D} \cdot d\mathbf{S} = \int_v \rho \cdot dv \\ \int_s \mathbf{B} \cdot d\mathbf{S} = 0 \end{array} \right.$$

微分形式
积分形式

常见的电磁数值算法有以下几种:

(1) 矩量法(MoM)^[1]。分析金属体辐射和散射问题最常用的方法之一是积分方程法,该方法以金属体表面的等效电流作为未知数,根据导体表面切向电场为零的边界条件建立积分方程。计算电磁学中的 MoM 就是用矩量法把 Maxwell 积分方程离散成一个矩阵方程来求解的,它是解决理想导体散射和辐射问题中非常有效的直接数值方法。矩量法的数学思想很简单,就是先把泛函方程用基函数展开,然后通过某种检验来确保展开后的误差很小,从而把一个泛函方程转化为一个线性方程组。

(2) 时域有限差分方法(FDTD)^[2]。1966年 K. S. Yee 首次提出了一种电磁场数值计算的新方法——时域有限差分法,它的核心是一组求解时域 Maxwell 旋度方程的时域有限差分方程组。Yee 的出发点不是 Laplace 方程或波动方程,而是原始的 Maxwell 方程,因此计算中所涉及的未知量不是一个而是两个,同时包括电场量和磁场量。Yee 的时空离散格式独特:在空间上,电场量和磁场量并没有在相同的位置取值,而是相互隔离;在时间方向上,电场量和磁场量也没有在相同的时刻取值,而是相互交替。为了模拟特定电磁环境下电磁场的真实时空演变过程, Yee 在直角坐标系中用立方体单元剖分待求解的物理空间,用差分方程代替 Maxwell 旋度方程,由时刻 1 的电场分量和时刻 2 的磁场分量导出时刻 3 的电场分量,再由时刻 2 的磁场分量和时刻 3 的电场分量导出时刻 4 的磁场分量……如此循环迭代,直到任意指定的时刻。

(3) 有限元法(FEM)^[3]。有限元法起源于航空动力学计算。其最早思想由 Courant 在 1943 年提出,但有限元法的学科和命名则是由 Clough 在 1960 年给出的。从 20 世纪 70 年代起,有限元法开始在电磁场和微波领域移植,并逐渐成为电磁场数值分析的一个主要分支。有限元法给出的结果是变分稳定的,从这个意义上来看,也可以把有限元法认为是广义 Ritz 方法。在静电场中 Thomson 原理是最早提出的变分原理,它指出:静电场中,在所有满足相同边界条件的位函数当中,最真实的位函数将保持能量极小。

(4) 几何光学方法(GO)^[4]。几何光学是研究射线传播的一种理论,它适用于计算电磁波长近似为零的情况。当电磁波的波长很短,也即频率很高,而媒质在空间的变化又在比波长大很多的尺度上才能显示出来时,我们就可以做几何学近似,也即假定:在局部区域中电磁波场的性质就和它在均匀媒质中的性质一样。

几何光学用射线和射线管的概念解释散射和能量传播机制,它具有物理概念清晰和简单易算的特点,能准确计算直射场、反射场和折射场,但不能分析和计算绕射问题。

(5) 物理光学方法(PO)^[5]。求解理想导体体的高频电磁散射时,广泛使用了物理光学(PO)方法。该方法基于三点假设:物体表面曲率半径远大于波长;物体表面上只有那些被入射波直接照射的区域才有感应电流存在;物体受照射表面上感应电流的特性和在入射点与表面相切的无穷大平面上的电流特性相同。物理光学方法用散射体表面的感应电流取代散射体本身作为辐射场的源,然后对表面感应电流积分从而求得散射场。此时假设散射体表面的曲率半径远大于波长,散射体上的表面感应电流则是用几何光学近似确定的,所以物理光学近似也是一种高频方法。

上面这些求解 Maxwell 方程的数值方法又可以分为两大类:

(1) 严格的数值方法,如 MoM、FDTD、FEM,它们也可称为低频方法。这一类方法在处理电磁问题时比较严格,精度比较高,并且理论上只要计算资源足够,它们便能够以较高的精度解决几乎任意频率的任何电磁场问题,但是对于同一个计算目标,当频率升高时,它们对计算资源的占用也急剧增加。显然实际当中的计算资源不可能无限大,这也就成了低频方法使用的一个局限,使其限制于一定频率以下使用,我们也因此将它们称为“低频方法”。

(2) 近似的数值方法,如 PO、GO,它们也可称为高频方法。这一类方法在处理电磁问题时都进行了一些与频率有关的近似,计算精度比低频方法稍差,但是对于同一个计算目标,如果频率无穷大,理论上它们的计算精度与低频方法区别不大,并且它们占用的计算资源很少且几乎不随频率变化。显然实际当中的工作频率也不可能无穷大,因此这也成为高频方法使用的一个局限,使其限制在一定频率以上使用,我们也因此将它们称为“高频