

高等学校教材

天线的计算机辅助设计

刘其中 宫德明

西安电子科技大学出版社

高等学校教材

天线的计算机辅助设计

刘其中 宫德明

西安电子科技大学出版社

1988

内 容 提 要

本书着重介绍天线计算机辅助分析与设计的基本原理和方法。内容包括：**CAD**简介；天线的基本电特性的分析和计算；矩量法分析线天线；典型面天线的设计；几何绕射理论简介；阵列天线分析与综合；天线的优化设计。

本书适用于电磁场与微波技术及其它有关专业的大学师、生和工程技术人员。

高等学校教材

天线的计算机辅助设计

刘其中 宫德明

责任编辑 曹晋龙

西安电子科技大学出版社出版

西安电子科技大学印刷厂印刷

陕西省新华书店发行 各地新华书店经售

开本 787×1092 1/16 印张 18 8/16 字数 447 千字

1988年12月第1版 1988年12月第1次印刷 印数1—1400

ISBN 7-5606-0050-6/TN·0019

定价:3.70元

出版说明

根据国务院关于高等学校教材工作分工的规定，我部承担了全国高等学校、中等专业学校工科电子类专业教材的编审、出版的组织工作。由于各有关院校及参与编审工作的广大教师共同努力，有关出版社的密切配合，从1978年至1985年，已编审、出版了两轮教材，正在陆续供给高等学校和中等专业学校教学使用。

为了使工科电子类专业教材能更好地适应“三个面向”的需要，贯彻“努力提高教材质量，逐步实现教材多样化，增加不同品种、不同层次、不同学术观点、不同风格、不同改革试验的教材”的精神，我部所属的七个高等学校教材编审委员会和两个中等专业学校教材编审委员会，在总结前两轮教材工作的基础上，结合教育形势的发展和教学改革的需要，制定了1986~1990年的“七五”(第三轮)教材编审出版规划。列入规划的教材、实验教材、教学参考书等近400种选题。这批教材的评选推荐和编写工作由各编委会直接组织进行。

这批教材的书稿，是从通过教学实践、师生反映较好的讲义中经院校推荐，由编审委员会(小组)评选择优产生出来的。广大编审者、各编审委员会和有关出版社为保证教材的出版和提高教材的质量，作出了不懈的努力。

限于水平和经验，这批教材的编审、出版工作还会有缺点和不足之处。希望使用教材的单位，广大教师和同学积极提出批评建议，共同为不断提高工科电子类专业教材的质量而努力。

电子工业部教材办公室

前 言

本书经电子工业部电波与天线教材编审小组评选审定，并推荐出版，由西安电子科技大学刘其中担任主编，南京邮电学院曹伟副教授担任主审。

本书是根据我们在西安电子科技大学多次讲授《天线 CAD》课程的教材经过修订补充后写成的。考虑到书的系统性和完整性，又尽量压缩篇幅，减少不必要的重复，做到少而精。我们着重介绍了一些新的内容，例如天线方向图的显示与绘制，天线的互耦，副瓣的搜索，矩量法和几何绕射理论，反射面天线的主、副面修正，天线的综合与优化设计等。对于经典内容只引用公式，并使之计算机程序化。书中注意了先进性和实用性，所介绍的方法基本上是目前工程上使用的先进方法，给出的例子也是实用例子，以期与工程实际紧密配合。为了压缩篇幅，突出原理和方法，仅给出了典型程序举例，并使程序具有典型性和实用性，每章后面附有习题，供读者练习。选择习题的原则是既要紧密联系该章内容，又使习题有实际意义。编者已将天线工程中的大量计算公式和设计图表程序化，以子程序的形式存入磁盘，形成天线 CAD 程序库，可供读者复制和调用。附录二中给出了程序库中程序的目录。全部程序均用 FORTRAN 语言(其中方向图的计算机屏幕显示程序用 BASIC 语言)编写，并在 IBM-PC 机上调试通过，可以直接在 IBM-PC 及其兼容机上运行。对于复数运算采用分开实部和虚部的办法，以适用于不具备复数运算功能的微型计算机。

书中对时谐场的表示用 $e^{j\omega t}$ 计量单位采用我国法定计量单位。附录及参考文献附于全书之末。

本书参考教学时数为 40~60 学时，因为各章节之间存在一定的相互独立性，因此，可以根据具体情况进行取舍。刘其中编写第 1、2 章和第 4 章除双反射面天线以外的部分以及附录，宫德明编写第 3 章和第 5 章，付德民编写第 4 章的双反射面天线。

梁昌洪教授审查了全书，提出不少宝贵的意见，并帮助修改了部分内容。还要特别提出的是，本书主审人曹伟副教授对全书进行了认真、仔细的审阅，提出了许多中肯的意见。在本书的编写过程中，还得到西安电子科技大学和出版社的许多同志的热情支持和帮助，使本书能及早与读者见面，对此我们一并表示感谢！

由于作者水平有限，时间仓促，错误与不妥之处在所难免，敬请读者批评指正。

作 者

目 录

前言

第1章 绪论

§ 1.1 天线 CAD 简介	1
§ 1.2 CAD 基本方法	2
§ 1.3 本书内容和框图	3

第2章 天线的基本电特性

§ 2.1 单元天线的辐射场	5
§ 2.2 方向函数	9
§ 2.3 方向图	13
§ 2.4 天线的方向特性参量	29
§ 2.5 天线阵的方向性	39
§ 2.6 反射面对天线方向性的影响	44
§ 2.7 天线的辐射电阻	49
§ 2.8 等效传输线法计算对称振子的输入阻抗	51
§ 2.9 感应电动势法计算对称振子的自阻抗与互阻抗	53
§ 2.10 反射面对天线阻抗的影响	61
§ 2.11 综合举例	62
习 题	84

第3章 矩量法

§ 3.1 细线天线的积分方程	86
§ 3.2 矩量法的求解过程	89
§ 3.3 基函数和权函数的选择	91
§ 3.4 近似算子	98
§ 3.5 扩展算子	99
§ 3.6 任意弯曲细线天线的矩量法解	101
§ 3.7 小结	119
习 题	120

第4章 面天线

§ 4.1 平面口径的绕射	122
§ 4.2 喇叭天线	139
§ 4.3 双反射面天线	144
§ 4.4 微带天线	162
§ 4.5 几何绕射理论	168
习 题	192

第5章 天线综合与优化设计

§ 5.1 天线综合原理	195
§ 5.2 方向图形状控制的 Woodward—Lawson 综合法	202
§ 5.3 方向图波瓣控制(I)——Dolph—Chebyshev 分布	213
§ 5.4 方向图波瓣控制(II)——连续源的 Taylor 分布	225
§ 5.5 方向图的能量控制及方向系数最优化	237
§ 5.6 最优化概念	241
§ 5.7 一元函数最优化方法	244
§ 5.8 多元函数最优化方法	257
习 题	267
附录一 常用算法和函数计算	269
附录二 天线 CAD 程序库	280
参考文献	284

第 1 章 绪 论

§ 1.1 天线 CAD 简介

如果说 40 年代的第二次世界大战刺激了天线的初步发展、成形,那么,自 60 年代开始卫星通讯、宇航技术等方面的要求使天线理论和实践都更上一层楼。原来那些不被注意,或无关紧要的问题逐步显得突出。例如多重单元的互耦问题;超低副瓣天线阵列的综合优化问题;大型抛物面支架和边缘的影响问题;复杂馈源的设计问题;方向图的快速描绘和副瓣检取问题;内外问题的一体化考虑等等。这一系列问题使天线原有的解析手段和方法远远不能适应要求,而且计算机和计算技术的飞跃发展也必然地使两者发生了“横向联合”。于是计算技术用于天线的一门新兴学科——天线 CAD 技术自然应运而生。

天线 CAD 技术,即天线的计算机辅助设计,它通常泛指利用计算机完成天线的计算、分析、综合、设计、优化及模拟等内容。自 60 年代以来,有关这方面的文献逐年增多,但真正要全面进入教材却确非易事。要把大量深奥繁复的原理通俗简要地介绍出来使读者入门更需长期的教学实践和体会。

本书是自 1984 年以来,在西北电讯工程学院经历了四次教学实践和反复讨论的讲义《天线的计算机辅助设计基础》的基础上,根据天线与电波传播教材编审组审定的编写大纲,以及众多专家和同行的意见,作了彻底的修订和补充后才形成的。

首先,作者考虑到全书应有统一的主干线——即计算技术在天线领域中的应用。因此,本书不同于一般天线原理著作,为了做到取材上删繁就简,削枝强干,我们假定读者已经学习了大学本科的天线原理^{(1)~(3)}、计算方法^{(4),(5)}、FORTRAN 语言⁽⁶⁾知识。

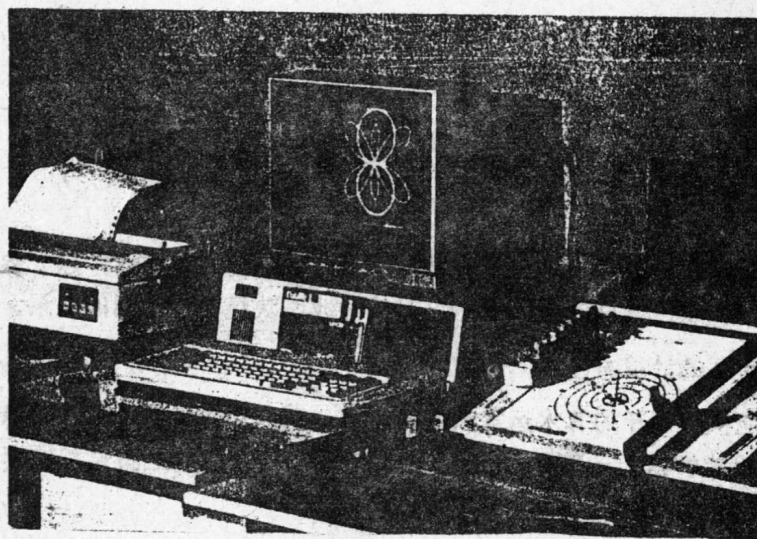


图 1-1 计算机及外围设备

其次，在内容的选择上力求基本、实用并有代表性。例如方向图的绘制，振子的互耦，副瓣电平的检取等等都是天线工程人员经常遇到而作难的问题。书中介绍了经典方法，也介绍了近代数值分析方法：矩量法(MM)和几何绕射理论(GTD)。

最后，本书介绍了优化理论在天线设计和综合中的应用，可以相信这些内容对于广大读者是颇有裨益的。

应该指出，本书远不能概括天线 CAD 的全部内容，而只能看作是一本人门的导论。

全书的绝大部分程序采用 FORTRAN 语言编写，全部程序可以在 IBM-PC 或长城 0520 计算机上运行，大部分图形是由 DXY-800 绘图仪绘制的。计算机及外围设备如图 1-1 所示。

§ 1.2 CAD 基本方法

CAD 方法的流程如图 1-2 所示，它是建立数学模型、选择计算方法、编制计算机程序、调试计算机程序、计算并分析检验计算结果等环节往复循环，渐趋正确的过程。

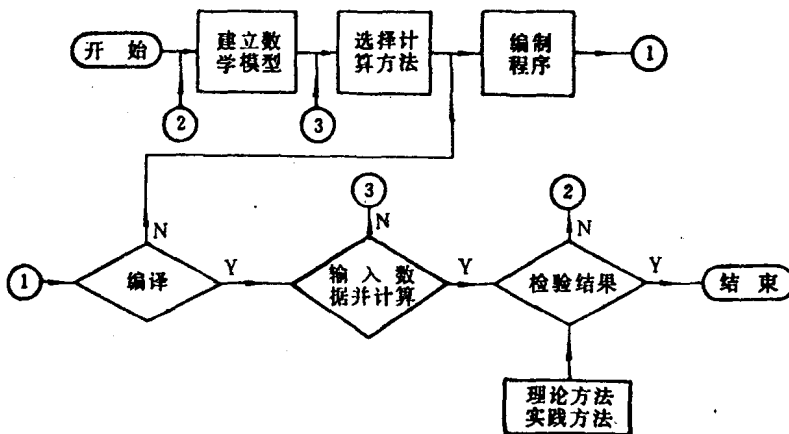


图 1-2 CAD 流程图

一、建立数学模型

所谓建立数学模型是把要解决的问题用一系列数学公式来描述。建立数学模型的基本原则是逼真，即在误差允许的范围内尽可能精确地反映量与量之间的关系。

二、选择合适的计算方法

计算机只能执行简单的算术运算和逻辑运算，所以必须选择合适的计算方法，将复杂运算变为计算机能够执行的简单运算。选择计算方法的原则是：满足精度要求，计算结果稳定，逻辑结构简单，节省时间，节省存贮单元。

三、编制计算机程序

通常，在编制程序之前先绘出程序流程图(又称框图)，以保证程序的逻辑关系正确。

对于复杂的算式，还要列出符号对照表，使程序符号不致于重复并正确地反映计算公式。一个好的程序应该是：精练，易读，输入、输出明了、清晰；具有通用性；计算时间短；占用计算机内存少。

四、编译

将编好的程序通过键盘、卡片或纸带等输入计算机，然后由配备好的编译程序对源程序(用高级语言编制的程序)进行编译，即将源程序翻译成计算机能够接受的机器指令程序并同时进行语法检查，再根据编译提供的错误信息，修改源程序重新编译，直至通过。对于复杂的程序，为了节省机时，可将常用的计算方法、常用的函数作为子程序单独编译，通过后存入磁盘，使用时直接复制和调用，从而提高编译效率。

五、计算

编译通过后，再经过连接、装配形成可执行程序，然后输入数据进行计算。若算不出结果或者结果不对时，应检查所采用的计算方法是否恰当，计算程序是否正确地反映了计算公式。一个大程序的调试、试算往往是首先分别调试每个子程序，保证它们正确后再统一到整个程序中，也可以采用分段调试、检查各个中间结果的办法，由中间结果的正确逐步调至整个程序的运算正确。

六、结果分析

对于数值计算结果应该用理论方法和实验方法进行检验，即分析计算结果与实验值是否吻合(当然应保证实验值是正确的)，或者进行试算，检查试算结果与已有的理论结果是否一致。如果不一致，应当从数学模型开始逐步检查、修改，直至结果正确为止。

§ 1.3 本书内容和框图

本书包含以下内容：

第1章绪论，对天线CAD作一般性介绍，概述了CAD的基本方法。

第2章天线的基本电特性，讨论了基本辐射单元，天线的特性参数(方向函数、主瓣宽度、副瓣电平、方向系数、自阻抗、互阻抗和耦合振子阻抗等)，天线阵的方向特性和地面对天线影响的计算，介绍了用计算机外部设备(屏幕、打印机和绘图仪等)显示、打印和绘制天线方向图的方法。

第3章矩量法，介绍了近代数值计算的矩量法并举例说明它在线天线中的应用。

第4章面天线，讨论了平面口径的绕射，包括平面矩形口径和圆形口径各种振幅分布时辐射场的计算，介绍了几种典型相位分布对方向图的影响以及双反射面天线的计算、副面的修正等，最后介绍了微带天线及几何绕射理论(GTD)的基本概念，并举例说明了几何绕射理论的应用。

第5章天线综合与优化设计，介绍了天线综合原理和优化的基本概念，给出了天线综合及优化设计中一些常用的方法。

本书框图如图1-3所示。

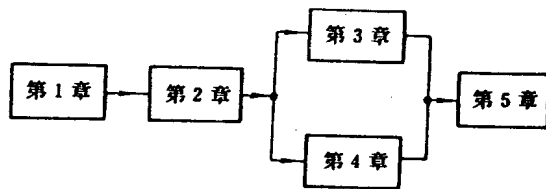


图 1-3 本书框图

第 2 章 天线的基本电特性

提 要

作为天线 CAD 的基础, 本章介绍基本辐射单元的辐射场和天线基本电特性参量的计算, 着重讨论如何用计算机计算一些典型实用的问题, 例如副瓣的搜索, 不等长对称振子间互阻抗的计算和非理想导电地面的影响等。还举例说明了天线各种方向图的计算机屏幕显示和绘图仪绘制图形的方法。

§ 2.1 单元天线的辐射场

一、电流元的辐射场

所谓电流元(也称电基本振子或电偶极子), 是一小段导线, 导线直径 $D \ll dz$ (dz 为导线长度), $dz \ll \lambda$, 线上所载高频电流沿轴线流动, 沿线等幅同相。电流元是线天线的基本辐射单元, 采用图 2-1 所示的坐标系, 电流元的辐射场为^{(1) (2)}

$$\begin{cases} dE_{\theta} = j \frac{I dz}{2\lambda r} \eta \sin\theta e^{-jkr} & (\text{V/m}) \\ dH_{\phi} = j \frac{I dz}{2\lambda r} \sin\theta e^{-jkr} & (\text{A/m}) \end{cases} \quad (2.1)$$

式中: I —— 电流元电流振幅值(A);
 dz —— 电流元的长度(m);
 r —— 电流元中心至场点的距离(m);
 λ —— 工作波长(m);
 θ —— 电流元轴线与场点方向之间的夹角(°);
 η —— 媒质的波阻抗,

$$\eta = \sqrt{\mu / \epsilon} \quad (\Omega)$$

对于自由空间

$$\eta = \eta_0 = \sqrt{\mu_0 / \epsilon_0} = 120\pi \approx 377 \quad (\Omega); \quad (2.2)$$

k —— 电磁波在媒质中传播的波数

$$k = 2\pi / \lambda \quad (\text{rad/m}) \quad (2.3)$$

二、磁流元的辐射场

自由空间载流小环是另一种基本辐射单元, 如图 2-2 所示。当环的周长远小于波长时, 环上各点的电流等幅同相。取圆环中心为坐标原点, 环轴与 z 轴重合, 环面在 xoy 面

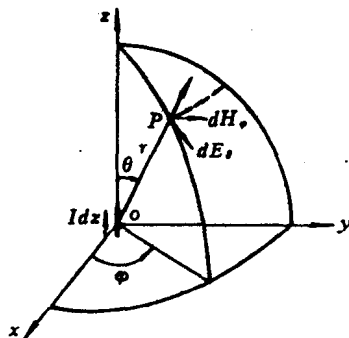


图 2-1 电流元及坐标系

上, 小圆环的辐射场为⁽¹⁾

$$\begin{cases} H_{\theta} = -\frac{kIS}{2\lambda r} \sin\theta e^{-jkr} & (\text{A/m}) \\ E_{\varphi} = \frac{kIS}{2\lambda r} \eta \sin\theta e^{-jkr} & (\text{V/m}) \end{cases} \quad (2.4)$$

式中: I —— 环上电流的振幅值(A);
 S —— 环的面积(m^2);
 θ —— 环的轴线与场点方向的夹角($^{\circ}$).

其余符号的定义与电流元相同, 载高频电流小环的性质可以用它的等效磁流 I_m 描述, 磁流的方向与环电流符合右手定则, 其大小为

$$I_m = \frac{jkIS\eta}{l} \quad (\text{V}) \quad (2.5)$$

式中 l 是磁流线的长度, 单位是 m. $l \ll \lambda$ 的磁流称为磁流元, 磁流元的辐射场为

$$\begin{cases} H_{\theta} = j \frac{I_m l}{2\lambda r \eta} \sin\theta \cdot e^{-jkr} & (\text{A/m}) \\ E_{\varphi} = -j \frac{I_m l}{2\lambda r} \sin\theta \cdot e^{-jkr} & (\text{V/m}) \end{cases} \quad (2.6)$$

三、惠更斯元的辐射场

惠更斯元实际上是天线口径面上传播波前的一块面积元 ds , $ds = dx dy (dx \ll \lambda, dy \ll \lambda)$. 设 ds 上 $E_s = E_{xy} \hat{y} (E_{sx} = 0)$, 且等幅同相, 如图 2-3 所示. 不难看出, 惠更斯元是口径天线的基本辐射单元, 在 E 面 ($\varphi = 90^{\circ}$ 平面—— $yo z$ 面) 上, 辐射场为⁽¹⁾

$$dE_{\theta} = j \frac{E_{xy}}{2\lambda r} dx dy (1 + \cos\theta) e^{-jkr} \quad (\text{V/m}) \quad (2.7)$$

在 H 面 ($\varphi = 0^{\circ}$ 平面—— xoz 面) 上, 辐射场为⁽¹⁾

$$dE_{\varphi} = j \frac{E_{xy}}{2\lambda r} dx dy (1 + \cos\theta) e^{-jkr} \quad (\text{V/m}) \quad (2.8)$$

空间任意一点 (r, θ, φ) 的辐射场为⁽¹⁾

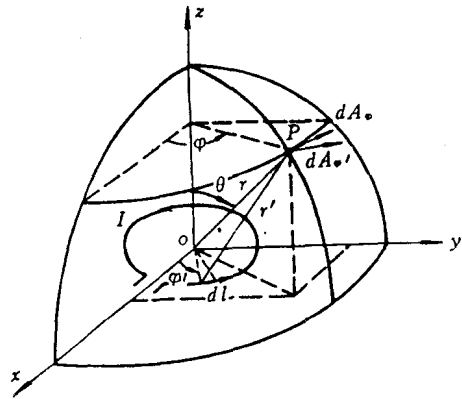


图 2-2 小圆环及其坐标系

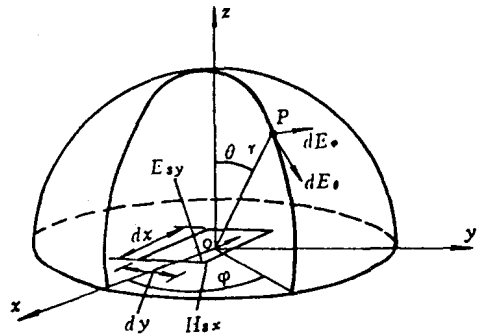


图 2-3 惠更斯元及其坐标系

$$dE = j \frac{E_{xy}}{2\lambda r} dx dy (1 + \cos\theta) e^{-jkr} \quad (\text{V/m}) \quad (2.9)$$

四、电流为三角形分布的短振子的辐射场

短振子的电流分布及坐标系如图 2-4 所示。短振子全长为 $2l$ (m)，振子上所载高频电流沿轴线流动且同相，可用下式表示：

$$I(z) = I_M (l - |z|) / l \quad (\text{A}) \quad (2.10)$$

式中： I_M ——短振子上最大电流的振幅值。

将电基本振子的场叠加，即沿线积分，可以得出电流按三角形分布的短振子的辐射场为⁽⁸⁾

$$E_\theta = j \frac{60 I_M \pi l}{r \lambda} \sin\theta \left[\frac{\sin\left(\frac{\pi l}{\lambda} \cos\theta\right)}{\frac{\pi l}{\lambda} \cos\theta} \right]^2 e^{-jkr} \quad (\text{V/m}) \quad (2.11)$$

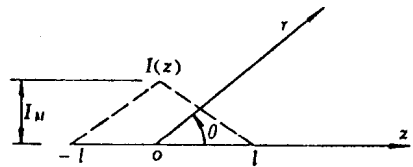


图 2-4 短振子的电流分布及坐标系

五、对称振子的辐射场

对称振子的结构如图 2-5 所示。它由两根同样粗细(半径为 a)、同样长度(l)的直导线构成，在中间的两个端点处馈电。它可以作为独立天线使用，也可以作为复杂天线的组成单元或面天线的馈源。

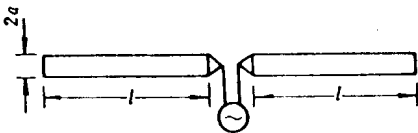


图 2-5 对称振子的结构

采用图 2-6 所示的坐标系，假设 $a \ll \lambda$ ， $a \ll l$ ，且馈电间隙为零时，对称振子上电流可以近似表示为

$$I(z) = I_M \sin\beta' (l - |z|) \quad (\text{A}) \quad (2.12)$$

式中： I_M ——对称振子上的波腹电流(A)

β' ——对称振子电流传输的相移常数(rad/m)， $\beta' = 2\pi / \lambda'$ ，(λ' 为振子上波长)，若忽略损耗 $\beta' = k = 2\pi / \lambda$ 。

忽略损耗时对称振子的辐射场由下式给出：⁽²⁾

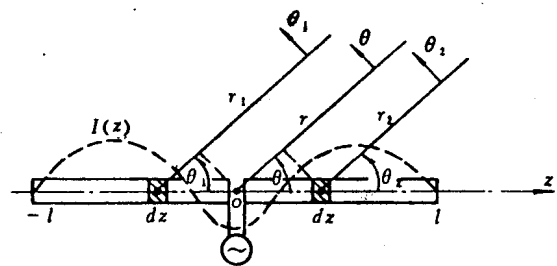


图 2-6 对称振子的坐标系

$$E_{\theta} = j \frac{60I_M}{r} \frac{\cos(kl \cos\theta) - \cos(kl)}{\sin\theta} e^{-jkr} \quad (\text{V/m}) \quad (2.13)$$

六、行波单导线天线的辐射场

如图 2-7 所示，当天线上只有电流行波时，设电流沿 z 方向流动，输入端电流为 I_0 ，则天线上电流可以表示为 $I_0 \exp(-j\beta'z)$ ，其中 β' 为电流沿导线传播的相移常数，于是行波单导线天线的辐射场为⁽¹⁾

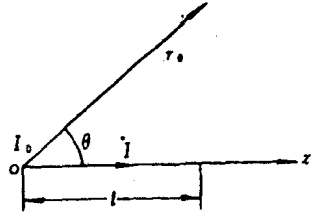


图 2-7 行波单导线天线及坐标系

$$|E_{\theta}| = \left| \frac{60I_0}{r_0} \sin\theta \frac{\sin\left[\frac{kl}{2}(\xi - \cos\theta)\right]}{\xi - \cos\theta} \right| \quad (\text{V/m}) \quad (2.14)$$

式中

$$\xi = \frac{\beta'}{k} = \frac{\lambda}{\lambda'} = \frac{c}{v} \quad (2.15)$$

ξ 表示电波在自由空间的传播速度(即光速)与电流沿导线的传播速度之比，当两者相等时， $\xi=1$ ，式(2.14)变为

$$|E_{\theta}| = \left| \frac{60I_0}{r_0} \sin\theta \frac{\sin\left[\frac{kl}{2}(1 - \cos\theta)\right]}{1 - \cos\theta} \right| \quad (\text{V/m}) \quad (2.16)$$

七、驻波单导线的辐射场⁽¹⁾

如图 2-8 所示，如果导线一端馈电，另一端开路，忽略线上损耗时，线上电流形成驻波，并且可以表示为

$$I(z) = I_M \sin k(l-z) \quad (\text{A}) \quad (2.17)$$

式中 I_M 是电流波腹值。当线长 l 为半波长的奇数倍时，辐射场为

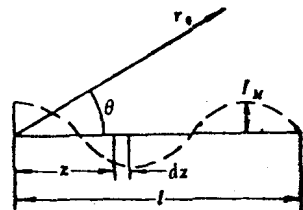


图 2-8 驻波单导线及坐标系

$$|E_{\theta}| = \left| \frac{60I_M}{r_0} \frac{\cos\left(\frac{kl}{2} \cos\theta\right)}{\sin\theta} \right| \quad (\text{V/m}) \quad (2.18)$$

当 l 为半波长的偶数倍时，辐射场为

$$|E_{\theta}| = \left| \frac{60I_M}{r_0} \frac{\sin\left(\frac{kl}{2} \cos\theta\right)}{\sin\theta} \right| \quad (\text{V/m}) \quad (2.19)$$

§ 2.2 方向函数

一、方向函数的定义⁽²⁾

通常，天线在 (θ, φ) 方向的辐射电场振幅可以表示为

$$|E(\theta, \varphi)| = |E_r(\theta, \varphi) + jE_i(\theta, \varphi)| = Af(\theta, \varphi) \quad (\text{V/m}) \quad (2.20)$$

式中 $E_r(\theta, \varphi)$ 和 $E_i(\theta, \varphi)$ 分别为场强的实部和虚部； A 是与方向无关的常数； $f(\theta, \varphi)$ 称为场强方向函数，简称方向函数。如果以功率密度表示辐射场，可以定义出功率方向函数 $p(\theta, \varphi)$ ，两者的关系是

$$p(\theta, \varphi) = f^2(\theta, \varphi) \quad (2.21)$$

我们主要讨论场强方向函数，功率方向函数可以通过类似的推导得到相应的表示式。

天线的归一化方向函数定义为

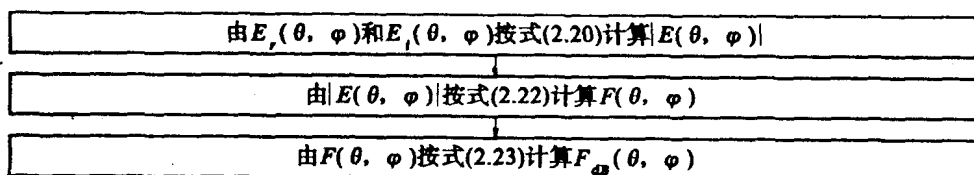
$$F(\theta, \varphi) = \frac{f(\theta, \varphi)}{f(\theta_m, \varphi_m)} = \frac{|E(\theta, \varphi)|}{|E(\theta_m, \varphi_m)|} \quad (2.22)$$

式中 (θ_m, φ_m) 为最大辐射方向即场强振幅最大的方向。方向函数的分贝值定义为

$$F_{\text{dB}}(\theta, \varphi) = 20 \lg F(\theta, \varphi) \quad (\text{dB}) \quad (2.23)$$

二、方向函数的计算

程序框图为



符号对照：

公式中	程序中	说 明
	N	计算方向函数值的点数
$E_r(\theta, \varphi)$	ER(N)	存放场强实部的数组
$E_i(\theta, \varphi)$	EI(N)	存放场强虚部的数组
$ E(\theta, \varphi) $	EMO(N)	存放场强振幅的数组
$F(\theta, \varphi)$	RF(N)	存放归一化方向函数值的数组
$F_{\text{dB}}(\theta, \varphi)$	DBF(N)	存放方向函数分贝值的数组
	M(N)	存放相应方向度数的数组
	NI	起始方向的度数值
	IDU	度数间隔
	DB0	方向函数的最小分贝值

程序为 CAD3004, 程序中

子程序 MO —— 计算场强振幅值;

子程序 FR —— 计算归一化方向函数值;

子程序 FDB —— 计算方向函数的分贝值;

子程序 FRDB —— 同时计算归一化方向函数值和方向函数的分贝值。

举例:

计算电流元的辐射场振幅值、归一化方向函数值和方向函数的分贝值。

由式(2.1), 设 $|Idz\eta e^{-jkr} / (2\lambda r)| = 0.5$, 每隔 10° 计算一个值, 总共计算 19 个方向的方向函数值。调用程序中 N 表示计算方向函数的点(方向)数, IDU 表示相邻两点间的度数间隔。输入数据及打印结果参见 CAD3004 的执行结果。

CAD3004 由场强的实部, 虚部计算场强的模值, 归一化方向函数, 方向函数的分贝值

```
SUBROUTINE MO(ER,EI,EMO,N)
  DIMENSION ER(N),EI(N),EMO(N)
  DO 20 I=1,N
    AR=ABS(ER(I))
    AI=ABS(EI(I))
    EMO(I)=0.0
    IF(AR.EQ.0.0.AND.AI.EQ.0.0) GO TO 20
    IF(AR.GT.AI) GO TO 10
    EMO(I)=AI*SQRT(1.0+(AR/AI)**2)
    GO TO 20
10  EMO(I)=AR*SQRT(1.0+(AI/AR)**2)
20  CONTINUE
    RETURN
  END
```

```
SUBROUTINE FR(EMO,RF,M,N1,IDU,N)
  DIMENSION EMO(N),RF(N),M(N)
  EM=0.0
  DO 10 I=1,N
    IF(EM.LT.EMO(I)) EM=EMO(I)
10  CONTINUE
  DO 20 I=1,N
    M(I)=N1+(I-1)*IDU
    RF(I)=EMO(I)/EM
20  CONTINUE
    RETURN
  END
```