

B·D·波波维奇等著·杨渊译·人民邮电出版社出版

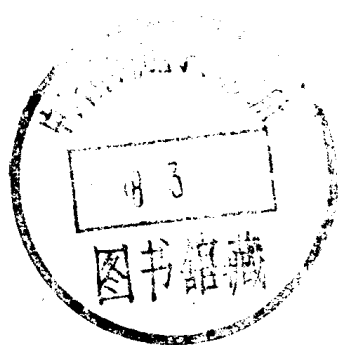
导线天线的分析与综合

73.41521
305

导线天线的分析与综合

B.D. 波波维奇等著

杨 渊 译



人民邮电出版社

8810140

0022/21
**Analysis and Synthesis
of Wire Antennas**

B.D. Popović, M.B. Dragović and A.R. Djordjević
Research Studies Press, England 1982

内 容 提 要

本书是南斯拉夫贝尔格莱德大学电机系B. D. 波波维奇教授等人1982年所著《导线天线的分析与综合》一书的中译本。

波波维奇等人在导线天线的研究方面享有很高的国际声誉，多年来发表了许多有关加载导线天线以展宽工作频带的论文。这本书就是他们多年来在这方面研究成果的结晶。

全书分为两部分，导线天线的分析与导线天线的综合。在天线分析部分，研究在真空中和在均匀与非均匀介质中，非加载和加载导线天线上电流分布的数值解、天线导纳和辐射图等，以及对激励区、导线结点和端点的处理问题。在天线综合部分，用最优化法系统介绍导线天线结构的现代计算机辅助设计。

本书讲解方法新颖，取材密切结合实际，可供天线专业方面的科技人员和这一专业的教师、研究生与本科高年级生参考。

导线天线的分析与综合

B.D. 波波维奇等著

杨 渊 译

•

人民邮电出版社出版

北京东长安街27号

河北省邮电印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行

各地新华书店经售

•

开本：850×1168 1/32

1987年10月第一版

印张：8¹⁶/₃₂ 页数：136

1987年10月河北第1次印刷

字数：220 千字

印数：1—2,500 册

统一书号：15045·总3310—无6399

定价：2.15元

0022/21

序 言

从1887年H.赫兹(Hertz)发现电磁辐射直到三十年代中期,细导线天线或者类似的天线结构,基本上是无无线电通信使用的唯一天线。三十年代中期,由于更高频率的使用,实际上才有可能设计出尺寸合用的其他天线类型。可是,直到今天,导线天线仍然在广泛应用。

导线天线的分析,最初是以正弦曲线逼近导线上的电流分布为基础的。这种逼近法对于预示天线辐射图是十分准确的,但是一般来说,对于准确确定天线导纳则是很不够的。虽然圆柱导线振子上电流分布的积分方程,早在1897年(1)*就已经由H.E.波克林顿(Pocklington)导出;但是在这种振子上,比正弦曲线更准确的电流分布,是第一个由H.海伦(Hallen)在1937年(2)求得的。在圆柱天线上,电流分布的另一积分方程,以海伦命名。海伦计算出该方程级数解的少数几项。R.W.P.金(king)主要遵循海伦的基本方法,给我们大大增添了导线天线方面的知识,在他的1956年的经典专著(3)中达到了顶峰。大约十年之后,高速数字计算机的广泛使用,彻底改变了导线天线分析的方法。此外,用最优化方法,打开了这种天线现代计算机辅助设计(综合)的大门。在目前,如能谨慎从事,对问题的物理方面和数值方面有清楚的理解,当导线天线结构的尺寸与波长相比适中的话,用计算机辅助进行分析与综合,是相当准确的;因而对于所得结果进行试验检验,几乎不是出于需要,而是一种惯例。然而,用来分析和综合导线天线结构的这种强有力的现代方法,看来并未受到天线设计工程师的广泛认可与赏识。这是由于,至少是部分由于以下事实:导线天线结构的分析,

*数字[1]表示本专著后边参考文献目录的序号。

尤其是综合，作为其基础的现代概念和数值技术，多数仍然存在于期刊之中。在本专著中，精炼地提出导线天线分析与综合的一些现代方法，而且将设计工程师和大学教育工作者的需要牢记在心。这就是本专著打算在一定程度上填补的空白。

本专著基本上是十年来在南斯拉夫贝尔格莱德大学，导线天线分析与设计方面研究活动的摘要。一开始选定的目标是，去发展准确的、但在概念上和计算方面是简单的分析方法；而在最后阶段，则是发展一般导线天线结构的综合方法。所以说，目标的大部分已经达到，因为实际上在所有考虑的情况下发现，理论结果与试验结果之间是极其一致的，差不多都在试验误差允许范围之内。本专著的主要目的是，以既有条理而又简洁的方式，将贝尔格莱德大学取得的、关于各种导线天线结构的分析与综合的主要结果提出来。我们并未试图将其他作者提出的求解导线天线问题的各种方法，进行介绍、讨论、比较以及评价，这会是一件特别复杂的任务。可是，我们特别注意，使本专著尽可能独立而完整。

虽然本专著没有详尽论述某些形状的导线天线结构（例如一般导线天线阵、直径突变的圆形导线天线、或者非圆形导线天线等等），但是大部分都能用本书提出的简单而准确的理论进行分析与/或综合，而不再花费多少力气。另一方面，许多有用的理论结果和试验结果（常常是彼此结合起来的），在全书中都有介绍；还有设计工程师所需的一些实用数据，例如在导电地平面上，由各种型号同轴线激励的垂直单极天线，其电导和电纳的准确曲线（附录五），和该天线的无衰减电场强度与辐射功率、天线粗细和高度的准确曲线（附录六）。所以，相信本书对于关心导线天线结构的大学教师、设计工程师和研究生，同样是有用处的。

本专著分为两部分：天线分析和天线综合。第一部分，在真空中或者在均匀和非均匀介质中（一般是有损的），从数值上确定各种非加载和加载导线天线上的电流分布，以及分析激励区和导线结点与端点。第二部分，用最优化法，介绍导线天线结构的现代计算

机辅助设计。

虽然书中所提出的资料，许多尚未发表过，但是本书的大部分，是著者们几年来在各种期刊和会议汇编上发表过的论文，在不同程度上经过改编而成的。因此之故，著者们为能允准使用发表过的材料而向有关出版单位深表谢意。

编 者 序

将近一个世纪以来，对导线振子天线和天线阵进行了广泛的研究；但是在理论和实践之间，迄今尚有鸿沟存在。出现这种情况的原因是，“精确理论只能应用于理想化几何形状的振子和单极子，而工程应用中却拥有多种用于辐射的导线结构形状。计算机的发明就能跨越这一鸿沟。因为在原则上，数值方法能使工程师计算任何随意成形的导线辐射器。但是这种方法并非总是成功的，因为计算技术还会引起另外的问题，阻碍计算机作为工程师的得力设计工具。可是，目前这本专著，在极其广泛的意义上，向读者提出了导线天线计算法方面的详尽论述；并且清楚表明，通过对这种辐射结构进行数值分析和综合，能得到极好的结果。在其他著作中，使用电流的各种分域(*Subdomain*)基函数表示法；本书使用电流的殆全域(*almost-entire domain*)多项式表示法，则是值得特别注意的一大特点。这种表示法，有缩减计算的优点，因而再要使用更复杂方法的必要性，就值得怀疑了。本书有许多值得注意的方面，如关注激励区发生作用的情况，以及精心制作实用的天线。书中有关著者们的这些研究成果，享有见解正确的评价。波波维奇教授及其同事，由于他们在工程电磁学方面的贡献，享有很高的国际声誉，而且本书是他们多年研究工作达到的顶峰。本书以明晰易懂的文体，独特地展示了必要的细节，而且要求研究生、科学家和工程师们要确信，用计算机设计导线天线是很有把握的。”

1982年4月J.R.詹姆斯(*James*)

目 录

第一部分：导线天线结构的分析

第一章 在激励的任意导线结构中，电流分布的确定	(1)
1.1 引言	(1)
1.2 在任意细导线结构中，电流分布的双位方程	(2)
1.2.1 双位方程的近似解	(6)
1.3 确定圆柱导体电流分布的几个方程	(9)
1.3.1 双位方程和矢量位方程	(10)
1.3.2 海伦 (Hallén) 方程	(11)
1.3.3 波克林顿 (Pocklington) 方程	(13)
1.3.4 谢昆纳夫 (Schelkunoff) 方程	(13)
1.4 结论	(15)
第二章 激励区的逼近法	(17)
2.1 引言	(17)
2.2 δ 函数发生器	(18)
2.2.1 用 δ 函数发生器求解海伦方程	(22)
2.3 同轴线激励的逼近法	(25)
2.3.1 用磁流环逼近同轴线激励	(27)
2.3.2 用带状发生器逼近同轴线激励	(33)
2.3.3 用波的模式高度逼近同轴线激励	(37)
2.4 双导线激励的逼近	(45)
2.4.1 用同轴线反射测量法测量对称天线导纳的一种方法	(49)
2.5 结论	(53)
第三章 导线结点和导线端点的处理	(55)
3.1 引言	(55)

3.2.	由克希荷夫第一定律产生的约束条件	(56)
3.3.	结点场约束条件	(58)
3.4.	导线端点的处理	(62)
3.5.	结论	(71)
第四章	分布加载的导线天线	(74)
4.1.	引言	(74)
4.2.	串联分布加载时, 天线上电流分布的方程	(76)
4.2.1.	分析串联分布加载天线的实例	(78)
4.3.	用介质或铁氧体涂层的导线天线	(81)
4.4.	结论	(89)
第五章	集中加载的导线天线	(90)
5.1.	引言	(90)
5.2.	电流分布方程的修改	(91)
5.2.1.	集中电阻加载圆柱天线的实例	(94)
5.2.2.	集中电容加载圆柱天线的实例	(97)
5.3.	测量集中加载的注解	(106)
5.3.1.	用补偿法测量集中电抗	(108)
5.3.2.	用同轴谐振腔测量装在天线上的集中电抗 ...	(111)
5.4.	混合加载的导线天线	(116)
5.5.	结论	(120)
第六章	在非均匀有损媒质中的导线天线	(121)
6.1.	引言	(121)
6.2.	在均匀有损媒质中的导线天线	(122)
6.3.	在两种均匀媒质的分界平面内, 导线天线上电 流分布的确定	(125)
6.4.	非理想导电地面之上的导线天线	(128)
6.5.	结论	(136)

第二部分: 导线天线结构的综合

第七章	导线天线综合问题的全面考虑	(139)
-----	---------------------	---------

7.1.	引言	(139)
7.2.	导线天线综合的总原则	(140)
7.2.1.	可能的最优化函数	(141)
7.2.2.	可能的最优化参数	(143)
7.3.	最优化方法概要	(144)
7.3.1.	完全寻优法	(145)
7.3.2.	梯度法	(146)
7.3.3.	单纯形法	(147)
7.4.	结论	(148)
第八章	天线导纳的最优化	(149)
8.1.	引言	(149)
8.2.	变化天线分布加载,进行天线导纳最优化	(152)
8.2.1.	最优化的几个典型范例	(155)
8.2.2.	对加载圆柱天线最优化的评论	(156)
8.2.3.	数值实例	(157)
8.3.	耦合极小的平行圆柱加载天线的综合	(161)
8.3.1.	方法概要	(162)
8.3.2.	耦合极小的电阻加载圆柱天线	(164)
8.4.	变化天线集中加载,进行天线导纳最优化	(169)
8.4.1.	最优宽频带电容加载圆柱天线	(172)
8.4.2.	最优宽频带电容加载圆柱天线,其VSWR的 极限值与其长度的关系	(176)
8.5.	变化分布的和集中的加载,进行天线导纳最 优化	(180)
8.6.	改变天线形状,进行天线导纳最优化	(185)
8.6.1.	宽频带折合单极天线的综合	(187)
8.6.2.	带寄生元的宽频带单极天线的综合	(187)
8.6.3.	仙人掌形天线在两个频率上与馈线匹配的 综合	(192)

8.6.4. 有电纳补偿元件的垂直单极天线的综合	(193)
8.7. 结论	(194)
第九章 天线辐射图的最优化	(196)
9.1. 引言	(196)
9.2. 变化天线阵元激励电压,进行辐射图最优化	(199)
9.3. 变化天线加载,进行辐射图最优化	(201)
9.4. 变化天线形状,进行辐射图最优化	(202)
9.4.1 用一个或两个引向器与两个反射器,综合再田—八木天线阵	(203)
9.4.2. 倾斜单极天线的综合	(206)
9.4.3. 用折合单极子作激励元,综合再田—八木天线阵	(207)
9.4.4. 中等宽频带再田—八木天线阵的综合	(210)
9.5. 结论	(213)
附录一 在分析由直导线段组成的导线结构时,关于计算积分的注解	(214)
附录二 海伦方程的注解	(217)
附录三 细导线天线辐射图和感应电动势的计算	(219)
附录四 用TEM磁流环逼近同轴线激励的注解	(224)
附录五 由同轴线激励时单极天线的导纳	(231)
附录六 理想导电地平面上垂直单极天线的场强与其辐射功率、高度和粗细的关系	(236)
附录七 单纯形最优化法	(238)
参考文献	(240)
索引	(249)

第 一 章

在激励的任意导线结构中， 电流分布的确定

1.1 引 言

本书研究导线天线的分析与综合，而天线结构是由导线段连接组成的。所谓“导线”，乃是指金属的、高导电的导线，但是也指电阻性的类似导线结构（例如涂电阻层的介质棒）。我们只考虑电细导线，也就是说，导线的直径远比使用频率在周围媒质中传播的平面波波长小得多。

一副导线结构可以由一定数量的导线段以很多种方法组成，这些线段原则上可以是笔直的，也可以是弯曲的。两条或更多的线段连接所在的区域叫做结点。结点、导线端点、导线上的集中加载，以及线段上可能有的过渡区（在其中导线直径有变化），统称“不连续点”。本章不讨论不连续点，而在第三章和第五章中详加论述。

一副导线结构可以用很多种方法激励。如果用周围媒质中传播的波的电场激励（例如一个入射平面波的场），它就是一副散射器。如果在一处或多处电小区域激励，它就是一个发射天线。“激励区”一辞是用来指明以任何外场激励的天线结构的一个小区域。在下一章，激励区的论述将更为详尽。

本专著所用的外场的定义与一般的定义有些不同。“外场”一辞我们理解为任何形式的已知源的场。例如，它可以是一个入射平面波的场，已知集中电流或集中磁流的场，等等。

如果用一副导线结构来做接收，就激励场而论，它可以看作是一个散射器和发射天线两种作用的结合。但是众所周知，如果天线的发射特性已知，那么实际上接收天线的一切有关特性（ emf 、阻抗和辐射图）也就知道了。所以我们对接收天线不作单独讨论，而主要研究的是发射天线结构。接收天线的理论，详见附录三。

确定天线结构导线段上的电流分布问题一旦解决之后，天线的一切特性便可以导出。如何处理这一问题，有很多可能的方法。如在序言中所述，本专著的目的不打算提出并讨论所有这些方法，而是选择一种最适合的特别方法，以后分析一般导线结构时，只用这种方法。作为分析出发点的是所谓的矢量位标量位方程，或简称双位方程，下一节就要推导这一方程。

当考虑圆柱导线天线或平行圆柱天线阵时，我们可以得到若干积分方程，它们在有些方面要比双位方程方便得多。因为常常遇到孤立的与平行耦合的圆柱振子，这种天线的电流积分方程，在本章的后面要略加叙述，而且还要介绍求解这些积分方程的数值方法。

1.2 在任意细导线结构中，电流分布的双位方程

今将图1.1所示的一副任意导线结构，放在一个线性、均匀和各向同性介质中，媒质的介电系数为 ϵ 和导磁率为 μ 。（最常见的媒质是真空或空气，其参量等于或非常接近 ϵ_0 和 μ_0 ）。目前假定结构的所有线段是粗细相同的，线段都是由理想导电的导线作成，在线段上也没有连接集中加载。

设将天线结构放在一个给定时谐(*time-harmonic*)外加电场之中，其强度为 $\vec{E}$ ，其角频为 ω 。作为对 $\vec{E}$ 的反作用，在结构的线段上感应出电流和电荷，这就是强度为 E 的二次电场的源。由于这

• 如无特别说明，本书中所有数值例题都用 ϵ_0 和 μ_0 作为媒质的介电系数和导磁率。

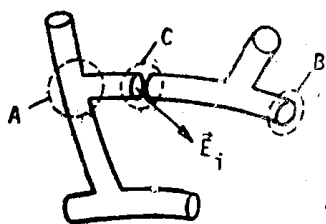


图 1.1 在外加电场 $\vec{E}_i$ 中的
任意导线结构。(A)
为导线结点, (B)
为导线端点, (C)
为天线馈端

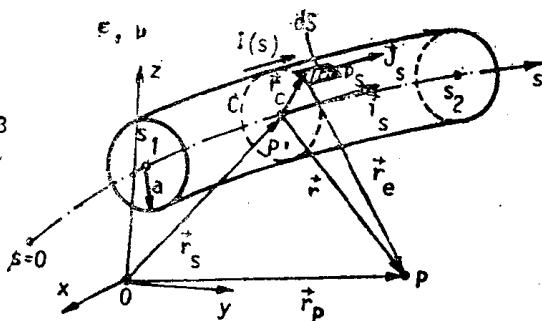


图 1.2 载流弯曲导线段和场点 P
(未按比例画)

些感应电流和感应电荷的作用, 在理想导电的导线结构表面的所有点上, 总电场强度矢量的切线分量等于零。

$$\text{在导线表面上 } (\vec{E} + \vec{E}_i)_{\text{tang}} = 0 \quad (1.1)$$

因为 $\vec{E}$ 可以用结构上感应的电流和电荷表示成一定的积分形式 (见后), 而电流和电荷又通过连续性方程彼此联系, 实质上 (1.1) 式就表示导线结构上电流分布的一个积分方程。

假定有一条曲线 s 轴, 沿着理想导电的半径为 a 的导线段的轴通过, 如图 1.2 所示, s 轴由一个适当坐标系的矢量函数 $\vec{r}_s(s)$ 来确定。假定 s 轴的曲率半径在 s_1 至 s_2 之间处处远比 a 为大。这段导线上感应的电流和电荷在线段表面 S 上形成一个无限薄层。一般来说, 面电流密度 $\vec{J}_s$ 有一个局部平行于导线轴的轴向分量和一个环绕导线的周向分量。导线很细时, 除在天线不连续点外, 周向分量一般非常小。因为不连续性问题要在以后各章讨论, 这里就将周向分量略去不计。此外, 在远离不连续点任意 s 的地方, 沿着线段横截面圆周 C , 电流和电荷实际上是均匀分布的 [4]。因此, 沿着圆周 C , 近似有 $\vec{J}_s = \frac{I(s)}{2\pi a} \vec{i}_s(s)$ 和 $\rho_s = \frac{Q'(s)}{2\pi a}$, 这里 $I(s)$ 是线段

的电流强度, $\vec{i}_s(s)$ 是与 S 轴局部相切的单位矢量, ρ_s 是面电荷密度, 而且 $Q'(s)$ 是单位长的线段电荷。因为导体是理想导电的, 其内部无场。所以我们可以想像在线段内部用任何媒质填充。如果想像填充的媒质是均匀的, 其参数是 ε 和 μ , 则通常的推迟位公式可以应用(5)。因此, 这一线段在 P 点的电场 $\vec{E}$ 可以计算如下

$$\vec{E} = -j\omega\vec{A} - \text{grad}V. \quad (1.2)$$

式中

$$\vec{A} = \mu \int_S \vec{J}_s g(r_s) dS \quad (1.3)$$

是磁矢量位,

$$V = \frac{1}{\varepsilon} \int_S \rho_s g(r_s) dS \quad (1.4)$$

是电标量位*,

$$g(r_s) = \frac{\exp(-jkr_s)}{4\pi r_s} \quad (1.5)$$

是无界均匀媒质的格林函数,

$$r_s = (\vec{r}_P - \vec{r}_S) - \vec{r}_C = \vec{r} - \vec{r}_C \quad (1.6)$$

是线段面元 dS 与场点 P 之间的精确距离, $\vec{r}$ 是 P 与 S 轴上的 P' 点之间的距离, 而且

$$k = \omega\sqrt{\varepsilon\mu} \quad (1.7)$$

是相位系数。围绕线段圆周积分求得

$$\vec{A} = \mu \int_{S_1}^{S_2} I(s) \vec{i}_s(s) G(s) ds \quad (1.8)$$

和

$$V = \frac{1}{\varepsilon} \int_{S_1}^{S_2} Q'(s) G(s) ds, \quad (1.9)$$

式中

$$G(s) = \frac{1}{2\pi a} \oint_C g(re) dl. \quad (1.10)$$

* 这里假定在线段端点无集中电荷, 即在线段两端, 电流连续流入相邻线段或者等于零, 从而克希荷夫第一定律在这些点处是满足的。

沿圆周 C 的积分很费时间, 而且当场点 P 在线段表面时, 积分有困难, 因为被积函数有奇异点。为了避免这种积分, 通常取 $G(s)$ 的如下近似(6):

$$G(s) \approx g(r_a), \quad (1.11)$$

式中

$$r_a = (r^2 + a^2)^{1/2} \quad (1.12)$$

是场点 P 与线段表面之间的近似平均距离。沿着一条笔直线段的 s 轴上, 由 (1.11) 式可得出电位的精确值。在弯曲线段的 s 轴上和离开笔直线段或弯曲线段的轴上, 只要 S 轴的曲率半径比半径 a 大得多, 或者分别有 $r \gg a$ 和 $ka \ll 1$, 则由 (1.11) 式也能得出非常好的近似值。当场点接近线段表面时, 由 $g(r_a)$ 代替 $G(s)$ 引出的误差最大。

根据连续性方程, $Q'(s)$ 可以表示为 $I(s)$ 如下

$$Q'(s) = \frac{j}{\omega} \frac{dI(s)}{ds}. \quad (1.13)$$

将 (1.2)、(1.8)、(1.9)、(1.11) 和 (1.13) 诸方程结合起来, 求得矢量 $\vec{E}$ 为

$$\begin{aligned} \vec{E} = & -j\omega\mu \int_{S_1}^{S_2} [I(s) \vec{i}_s(s) \\ & + \frac{1}{k^2} \frac{dI(s)}{ds} \text{grad}] g(r_a) ds. \end{aligned} \quad (1.14)$$

现在考虑由 N 条导线线段任意结合而成的一个结构。显然, 导线中的轴向电流只由总电场的轴向分量产生。假定 $\vec{E}_t$ 是沿导线的外加电场。由 (1.1) 和 (1.14) 式, 以及扩展边界条件的概念(7,5), 很容易求得线段电流所满足的积分微分方程

$$\begin{aligned} \sum_{m=1}^N \int_{S_{1m}}^{S_{2m}} [\vec{i}_p \cdot \vec{i}_{sm} I_m(s_m) + \\ \frac{1}{k^2} \frac{dI_m(s_m)}{ds_m} \vec{i}_p \cdot \text{grad}] g(r_a) ds_m = \frac{\vec{i}_p \cdot \vec{E}_t}{j\omega\mu}, \end{aligned} \quad (1.15)$$

式中 $\vec{i}_p$ 是这一结构的第 p 线段 ($p = 1, 2, \dots, N$) 轴上任一点的单位矢量, 它与轴局部相切。方程 (1.15) 叫做矢量标量位方程, 或者叫做双位方程 (*two-potential equation*)。要注意到, 在推导这一方程时, 曾假定克希荷夫第一定律在所有结点和导线端点都是满足的。

在一般导线结构的情况下, 方程 (1.15) 的核只有正比于 $1/r_0$ 项和 $1/r_0$ 的一阶导数项。在导线天线结构中, 确定电流分布的其它熟知积分方程, 一般情况下, 还有 $1/r_0$ 的高次项。因为 r_0 有时会很小 ($r = 0$ 时, 它等于导线半径 a), 在所有方程中的核是伪奇异的。但是在 (1.15) 式的情况下, 其伪奇异性的阶最低。由于所有方程只能求其数值解, 因此, 核的伪奇异性越弱, 越容易计算方程近似解中碰到的积分。所以, 为了分析任意形状导线天线结构, 著者认为 (1.15) 式是最适合的出发点。只有在圆柱天线与平行圆柱天线阵的情况下, 导出的方程有一个便于计算的核, 此核只含正比于 $1/r_0$ 的一项。此将在 1.3 节说明。

在目前的讨论中, 不包括结点 (如图 1.1 中的结点 A) 的适当处理问题和端点 (如图 1.1 中的端点 B) 的影响。这些不连续点将在第三章详加论述。

有几种方法来求方程 (1.15) 的数值解。有一种特别简单, 而且使用这种方法可以用中等容量和速度的计算机来分析较为复杂的导线结构。下一小节就要介绍这一方法。在 1.3 节将介绍确定圆柱导线天线上电流分布的其它方法。

1.2.1 双位方程的近似解*

求解方程 (1.15) 的数值方法可分为两类: (a) 按照在数值解之前对方程进行可能的数学运算 (例如, 根据矩量法的一般方法, 用适当的加权函数对方程进一步积分^[9]) 和 (b) 按照逼近电流分布的类型, 或者根据选择的所谓展开函数或基函数。概括而言, 用

* 本小节是由参考文献 [8] 改写的。