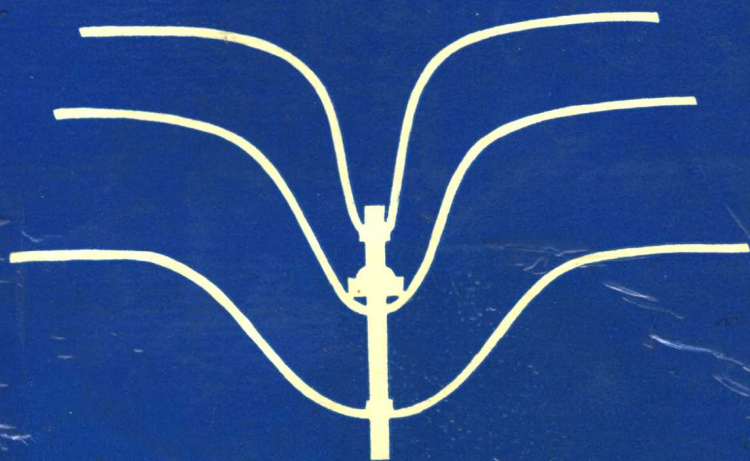


# 线天线优化

[德] F. M. 兰斯托夫 R. R. 沙克 著

王均宏 陈忠飞 译



西南交通大学出版社

# 线 天 线 优 化

[德] F. M. 兰斯托夫 R. R. 沙克 著

王均宏 陈忠飞 译

西南交通大学出版社

新登字(川)018号

## 内 容 提 要

本书为工程博士 F. M. Landstorfer 教授和工程博士 R. R. Sacher 合著的一本关于线天线近场特性和优化的专著。本书的前半部分借助于场线、瞬时和时间平均能流线以及玻印廷矢量椭圆分析了线天线的近场,讨论了近场内波的分离和辐射现象,并引入了一个有助于描述优化电小天线的新型等效电路。书的后半部分则重点讨论曲线天线的优化,阐述了数值优化方法。并对方向性系数、天线有效长度等天线重要特性参数进行了优化,给出了带有反射器和没有反射器的单线和分裂线天线的许多实用结果,获得的最大方向性系数从 7 到 16dB 不等。书中还讨论了多参数同时优化的问题,并给出了一些优化结果。最后讨论了利用这些最优曲线单元构成的背射阵、八木阵和对数周期阵,给出了这些阵的令人惊奇的结果。

本书可作为电磁场与微波技术专业的本科高年级学生及研究生的选修课教材,亦可供通信、广播电视、雷达、无线电技术等专业的师生参考,对天线专业的研究生以及从事天线设计的工程技术人员有参考价值。

## 线 天 线 优 化

王均宏 陈忠飞 译

※

西南交通大学出版社出版发行

(四川成都九里堤)

仁寿县印刷厂印刷

※

开本: 787×1092 1/32 印张: 4.9375

字数: 70 千字 印数: 1—1000 册

1992 年 2 月第 1 版 1992 年 2 月第一次印刷

ISBN 7-81022-471-9/O·039 1162

定价: 3.50 元

## 编 者 序

我们经常听到这样的说法：天线设计中数字计算机的运用常常使使用者无法深入理解所发生的物理现象。这种说法并不让人感到意外，因为现代计算机设计的主要目的之一是得出精确的理论模型，尤其是得出那些难以测量的电磁结构的模型。但事实上，最有效的方法似乎是把理论和物理解释和谐地统一起来。本专著就是以这种精神贯穿始终的。导线偶极子和单极子是人们早已了解和处理得比较彻底的，尽管如此，本书作者还是发现了一些具有较高增益的线天线形状。虽然求解场和天线优化的现代计算方法已被广泛应用，但最重要的还是要很好地理解场线、能流、远离近场区的场的形成以及其它在天线导体周围所发生的物理效应。本专著最后给出了一些具有较低旁瓣、形状特殊的八木天线和对数周期天线的实用结果。本书必将激起那些对线天线机理和优化关心的专家和学生的兴趣。

J. R. James

## 致 谢

本书作者非常感谢 J. R. 詹姆斯教授对写作本书的热心鼓励,感谢出版公司的支持和耐心。作者还感谢工程博士 N. M. Enders 和工程学士 O. Gotthard 的帮助,他们提供了大量的实验和计算数据。最后感谢所有在参考文献中列出的攻读学位的学生,他们参与了作者的研究。

## 符 号 表

|               |                    |
|---------------|--------------------|
| $\hat{a}$     | 场点处球坐标 $r$ 方向的单位矢量 |
| $\vec{A}$     | 矢量位                |
| $A$           | 海仑积分方程中的常数         |
| $A_{eff}$     | 有效面积               |
| $A_{SL}$      | 旁瓣衰减               |
| $b_n(z')$     | 基(展开)函数            |
| $Br$          | 相对带宽               |
| $\vec{c}$     | 位置矢量               |
| $C$           | 电容                 |
| $C_1$         | 死电容                |
| $C_2$         | 辐射电容               |
| $d$           | 距离                 |
| $d_0$         | 天线馈电点到反射壁的距离       |
| $D$           | 方向性系数              |
| $D(z)$        | 积分方程的右端            |
| $D_m$         | 矩阵矢量               |
| $\vec{e}$     | 瞬时电场强度             |
| $e_\rho, e_z$ | 瞬时电场强度的分量          |
| $\vec{E}$     | 电场强度矢量             |
| $E_{tan}$     | 切向电场强度             |
| $\vec{E}_i$   | 入射电场强度             |

|               |                    |
|---------------|--------------------|
| $F(\theta)$   | 辐射特性               |
| $G$           | 以点源(无方性)天线作参考的天线增益 |
| $\vec{G}$     | 梯度矢量               |
| $h$           | 天线尺寸               |
| $h_{\varphi}$ | 瞬时磁场强度分量           |
| $h_{eff}$     | 有效高度               |
| $\vec{H}$     | 磁场强度矢量             |
| $I_n$         | 展开函数的电流系数          |
| $\text{Im}$   | 函数的虚部              |
| $j_D$         | 瞬时位移电流密度           |
| $\vec{j}$     | 电流丝矢量              |
| $J(z')$       | 天线电流               |
| $J_A$         | 天线输入电流             |
| $J_{\max}$    | 电流波腹               |
| $J_n$         | 电流展开函数             |
| $K(z, z')$    | 积分方程的核             |
| $L$           | 天线(曲线)长度           |
| $l_{eff}$     | 有效长度               |
| $M$           | 品质因数               |
| $M_D$         | (方向性系数的)单个品质因数     |
| $P(z')$       | 脉冲函数               |
| $P_{av}$      | 可用功率               |
| $r$           | 半径(球坐标系中的半径)       |
| $r_0$         | 到天线导体表面上某点的半径      |
| $R_n$         | 到对数周期天线顶点的距离       |

|                 |                         |
|-----------------|-------------------------|
| $R_A$           | 天线电阻                    |
| $R_r$           | 辐射电阻                    |
| $R_{ro}$        | 本征辐射电阻                  |
| $\text{Re}$     | 函数的实部                   |
| $\dot{\vec{s}}$ | 瞬时能流密度矢量, 玻印廷矢量         |
| $\vec{S}$       | 能流密度矢量, 玻印廷矢量           |
| $\vec{S}^{(r)}$ | 玻印廷矢量的实部                |
| $\vec{S}^{(i)}$ | 玻印廷矢量的虚部                |
| $S_{\max}$      | 最大辐射方向上的能流密度(玻印廷矢量的绝对值) |
| $\hat{t}$       | 平行于导线表面的单位矢量(切向单矢)      |
| $T_m(z)$        | 检验函数或加权函数               |
| $TR(z')$        | 三角函数                    |
| $\hat{u}$       | 平行于电流元的单位矢量             |
| $\hat{v}$       | 与 $\hat{u}$ 对称的单位矢量     |
| $\vec{v}$       | 能量速度矢量                  |
| $V$             | 电压                      |
| $V^{(n)}$       | 第 $n$ 个区间               |
| $V_A$           | 天线输入电压                  |
| $V_0$           | 开路电压                    |
| $w$             | 能量密度                    |
| $W$             | 能量                      |
| $W_D$           | 方向性系数的加权因子              |
| $x$             | 直角坐标                    |
| $\hat{x}$       | $x$ 方向的单位矢量             |
| $X$             | 电抗                      |

|           |             |
|-----------|-------------|
| $X_A$     | 天线电抗        |
| $y$       | 直角坐标        |
| $\hat{y}$ | $y$ 方向的单位矢量 |
| $z$       | 直角坐标        |
| $\hat{z}$ | $z$ 方向的单位矢量 |
| $z'$      | (曲线)长度坐标    |
| $Z$       | 阻抗          |
| $Z_A$     | 天线阻抗        |
| $Z_C$     | 特征阻抗        |
| $Z_L$     | 负载阻抗        |
| $Z_{mn}$  | 阻抗矩阵元素      |
| $Z_0$     | 特征场阻抗       |

## 希腊字母

|              |                  |
|--------------|------------------|
| $\alpha$     | 张角               |
| $\alpha(z')$ | 倾角               |
| $\alpha_n$   | 第 $n$ 段的倾角       |
| $\beta_0$    | 自由空间的相位常数        |
| $\delta$     | $\delta$ (狄拉克)函数 |
| $\Delta h$   | 直线偶极子分段的长度       |
| $\Delta s$   | 曲线偶极子分段的长度       |
| $\epsilon_0$ | 自由空间介电常数         |
| $\theta$     | 球坐标              |
| $\lambda_0$  | 自由空间波长           |
| $\mu_0$      | 自由空间导磁率          |
| $\nu$        | 分段数              |

|             |                                |
|-------------|--------------------------------|
| $\vec{H}$   | 赫兹矢量                           |
| $\rho$      | 圆柱坐标                           |
| $\rho_0$    | 导线半径                           |
| $\sigma$    | 距离因子                           |
| $\tau$      | 比例因子                           |
| $\varphi$   | 球坐标                            |
| $\varphi_0$ | 磁通量                            |
| $\psi$      | 球坐标系中决定天线几何结构(几何尺寸)的角(见图 4.12) |
| $\omega$    | 角频率                            |
| $\Omega$    | 海仑参数                           |

## 电子电气工程研究专题

天线系列

系列编辑: J. R. 詹姆斯 教授

(英国皇家军事科学院)

1. 平板辐射偶极子及其阵的应用

G. 都伯斯特 著

Flat Radiating Dipoles and Applications to Arrays

G. Dubost

2. 导线天线的分析与综合

B. D. 波波维奇 等著

Analysis and Synthesis of Wire Antennas

B. D. Popović, M. B. Dragović and A. R. Djordjević

3. 变形反射器天线设计

B. S. 威斯考特 著

Shaped Reflector Antenna Design

B. S. Westcott

4. 电磁学中的矩量法技术和应用

J. 摩尔 等编

Moment Methods in Electromagnetics

Techniques and Applications

Edited by J. Moore and R. Pizer

5. 线天线优化

F. M. 兰斯托夫 R. R. 沙克 著

Optimization of Wire Antennas

F. M. Landstorfer and R. R. Sacher

# 目 录

## 符号表

|                     |       |
|---------------------|-------|
| 第一章 绪 论             | (1)   |
| 第二章 细线天线的一般假定       | (4)   |
| 第三章 细直线偶极天线和单极天线    | (8)   |
| 3.1 正弦电流分布理论        | (8)   |
| 3.2 矩量法理论           | (14)  |
| 3.3 直线偶极天线的近场       | (27)  |
| 第四章 细曲线偶极天线和单极天线    | (56)  |
| 4.1 有效长度的优化         | (56)  |
| 4.2 方向性系数的优化        | (65)  |
| 4.3 优化方法            | (80)  |
| 4.4 最优形状线天线近场区的能量传输 | (94)  |
| 第五章 曲线偶极天线阵         | (97)  |
| 5.1 八木阵             | (98)  |
| 5.2 背射阵             | (104) |
| 5.3 大反射壁前的曲线偶极天线    | (107) |
| 5.4 多参数优化           | (114) |
| 5.5 曲线单元组成的对数周期阵    | (119) |
| 第六章 结 论             | (127) |
| 参考文献                | (129) |
| 索 引                 | (139) |

# 第一章 绪 论

天线,任何无线电传输系统中重要的不可缺少的部分,自有无线电通信以来就一直受到重视。尤其是线天线,一种能够发射和接收电磁场的结构最简单的天线,已经在许多书和专著论文中研究过。其中参考文献[1]至[9]和[68]至[71]只是选出来的不完全的一小部分。虽然它们的结构简单,但线天线的严格理论直到最近三十年才出现。如果考虑到真实天线的馈电区,那么即便是现代大型计算机的解也成问题。相反,实用的近似理论(如传输线理论)早已被人们熟知,并一直在发挥它们的作用,为天线工程技术人员提供简单的概念和可靠的数据。至少对相当细的天线是这样。

本书的目的不是为了在已有文献的数值解中再增添“精确解”,也不是为了总结所有近似求解线天线问题的方法,而是为了给读者提供常规直线偶极子或单极子近场的最新研究成果,尤其是要让读者看到优化技术在综合线天线、得到新的非常规的几何形状以及令人惊奇的特性方面所发挥的作用。

为了得到这些结果,使用了不同的计算方法,从矩量法一直到天线上电流分布的正弦近似。对于某个特定问题,具体使用哪种计算方法应根据以下情况而定:即这种方法能使工作量和计算时间最少,同时又不至于使所得结果不切实际。

在讨论了线天线问题的一些特殊简化之后,第三章研究

了常规的直线偶极子和单极子。研究发现，在无限长细线的条件下海仑积分方程的渐近解就是正弦电流分布。接着介绍了矩量法，并用它计算了细线天线的电流分布、远区辐射场方向图以及近场特性。特别是讨论了电波从天线脱离出去的物理机理。3.3.1节中借助于电小单极子、四分之一波长单极子以及电长单极子的电场线时序图描绘了电磁波从单极子上脱离出去的情况。

虽然由电场线和电荷能很好地说明电波是如何从天线导体上脱离出去的，但对天线辐射自然规律的一些基本认识则只能从对能流的仔细观察得到。在3.3.2节中，用三种方法研究了直线单极子近场内的能量传输。这三种方法是：时间平均玻印廷矢量曲线，时间平均能流线以及瞬时玻印廷矢量椭圆。对于辐射的情况，文中给出了从馈线上出来的能量是如何被天线导体导行并转向远场的。天线导体本身并不辐射能量，而只是为了导行能量并改善匹配条件。通过计算离发射天线较远处的匹配单极子接收天线的能流线，就可以画出该天线的有效面积的形状。

研究瞬时能量传输可以得出电小辐射天线的一个新的等效电路。对直接分析时很复杂的天线，用这一等效电路能很容易地估算其特性。

第四章讨论了曲线天线的优化，目的是为了获得最优的特性数据。文中对其基本过程通过有效长度作为单参数的优化作了概述。优化结果表明，以有效长度最大综合出的单线天线的形状也是以方向性系数最大优化所得天线形状的一级近似。接下来的一节描述了具有最大方向性系数天线的直接综合，并且将由矩量法计算电流所得的结果以及直接由正弦

电流分布所得结果与实验结果进行了比较。结果表明,  $1.5\lambda_0$  的曲线偶极子似乎更具有吸引力, 因为它们以点源天线为参考的增益高达 7.2dB, 尤其是分裂线曲线天线甚至高达 10.5dB。

4.3 节概述了一些基本的优化方法, 4.4 节则讨论了最优形状天线近区场的能流。

第五章前面两节研究了最优偶极子组成阵的情况, 获得了新的性能更好的天线。文中重点研究了三单元最优八木阵和由曲线偶极子构成的几种不同的短背射阵。

前面都是将优化方法用于单个特性参数的优化, 接下来的一节则是处理多参数优化的问题。讨论的一个例子是对大反射壁附近的曲线天线同时进行方向性系数和旁瓣衰减的优化。接着的一个例子除了方向性系数和旁瓣电平外, 还对天线与馈线失配最小进行了优化。最后一节研究了将对数周期天线的宽带特性与最优偶极子的高增益相结合构成新的最优阵的情况。

## 第二章 细线天线的一般假定

本书讨论的天线指细线天线，也就是其长度  $L$  比直径  $2\rho_0$  大得多（如图 2.1 所示）。为了表征这种天线的线度特征，用海仑参数是方便的

$$\Omega = 2 \ln \frac{L}{\rho_0} \quad (2.1)$$

其中  $L$  和  $\rho_0$  分别为天线的长度和半径。在本书中如果满足

$$\Omega \geq 6 \quad (2.2)$$

的天线，则被称为“细的”或“相当细的”，但是在很多情况下， $\Omega$  甚至比 10 还大。在此前提和天线导体的导电率为无限大的假定下，我们可以做一些简化和近似：

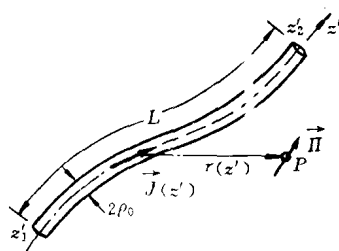


图 2.1 一般形状的线天线

(a) 沿天线导体表面的切向电场为零：

$$E_{tan} = 0 \quad (2.3)$$

(b) 天线电流平行于轴线。为了计算电场强度，用沿着天线导体轴线（图 2.1 中的  $z'$ ）的无限细电流丝代替天线电流较为方便。

(c) 终端效应可忽略，即天线导体的终端电流假定为零。

(d) 对于非圆截面天线, 可以考虑一等效半径  $\rho_{\text{eq}}$  后, 和圆截面天线一样处理。参考文献 [7] 和 [15] 中给出了一些这方面的公式。

在以上假定的基础上, 一个细线天线可以看成是由一系列无穷短的赫兹偶极子组成, 空间给定点的场由它们的场叠加而成。所以细线天线场的计算可以简化为对沿着天线的所有基本赫兹偶极子场的一维积分。为了方便, 习惯于用赫兹矢量位  $\vec{\Pi}$  或者矢量位  $\vec{A}$  来计算电磁场强度。在自由空间当电流和电荷只沿着完纯导体天线流动时, 这两个参数有如下关系<sup>[10]</sup>:

$$\vec{A} = j\omega\epsilon_0\mu_0\vec{\Pi} \quad (2.4)$$

其中  $\epsilon_0$  和  $\mu_0$  分别为自由空间的介电常数和导磁率,  $\omega$  为角速度。以后我们所有的计算将只在自由空间进行。

对于图 2.1 所示的线天线, 空间  $P$  点处的赫兹矢量  $\vec{\Pi}$  由下式得到<sup>[10]</sup>:

$$\vec{\Pi} = \frac{1}{j\omega\epsilon_0} \int_{z_1}^{z_2} \frac{\vec{J}(z') e^{-j\beta_0 r(z')}}{4\pi r(z')} dz' \quad (2.5)$$

$\vec{\Pi}$  为复赫兹矢量,  $\vec{J}$  为天线电流丝强度的复矢量。

$$\beta_0 = \omega \sqrt{\mu_0\epsilon_0} = 2\pi/\lambda_0 \quad (2.6)$$

为自由空间的相位常数。

方程 (2.5) 积分核中的

$$\frac{e^{-j\beta_0 r}}{4\pi r} \quad (2.7)$$

表示自由空间的格林函数。

给定赫兹矢量后, 电磁场可由下列方程得到:

$$\vec{E} = \beta_0 \vec{\Pi} + \text{grad}(\text{div} \vec{\Pi}) \quad (2.8)$$

$$\vec{H} = j\omega\epsilon_0 \text{curl} \vec{\Pi} \quad (2.9)$$