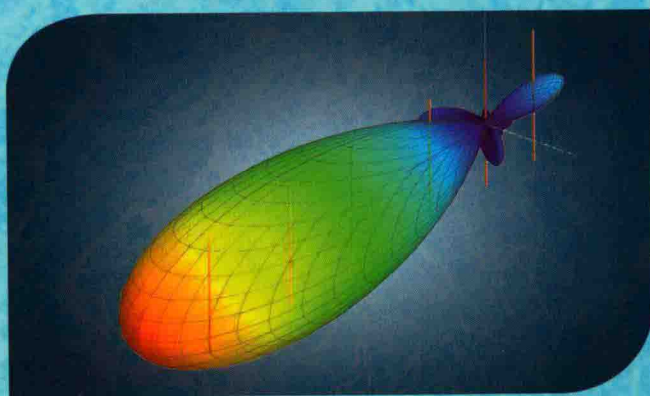


“十二五”国家重点图书出版规划项目
IET精选翻译图书

FEKO电磁仿真软件在 天线分析与设计中的应用



Antenna Analysis and Design Using FEKO Electromagnetic Simulation Software

[美] Atef Z. Elsherbeni ,
Payam Nayeri , C.J.Reddy 著
索莹 李伟 译
刘源 审



哈尔滨工业大学出版社

“十二五”国家重点图书出版规划项目
IET精选翻译图书

FEKO电磁仿真软件在 天线分析与设计中的应用

Antenna Analysis and Design
Using FEKO Electromagnetic
Simulation Software

[美] Atef Z. Elsherbeni ,
Payam Nayeri , C.J.Reddy 著

索莹 李伟 译

刘源 审

内容提要

本书主要介绍天线设计的基本理论以及使用 FEKO 软件进行仿真与分析的实例。内容包括鞭天线、环天线、微带贴片天线及微带馈电网络、宽带偶极子天线、行波与宽带天线、非频变天线、喇叭天线、反射面天线、阵列天线等多种天线结构。

天线设计者通过本书的学习,不仅可以直观地理解常用天线的工作原理,同时可以快速地掌握天线设计工程的实际方法。为方便阅读附录中还汇集了书中的主要彩图。

本书既可作为高等院校相关专业本科生和研究生的参考书,也可供通信、雷达等相关领域工程技术人员的参考。

黑版贸审字 08-2016-041 号

Antenna Analysis and Design Using FEKO Electromagnetic Simulation Software

Original English Language Edition published by The IET, Copyright 2014, All Rights Reserved

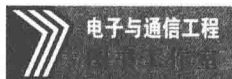
图书在版编目(CIP)数据

FEKO 电磁仿真软件在天线分析与设计中的应用/(美)阿提夫 Z. 埃尔舍贝利 (Atef Z. Elsherbeni), (美)帕亚姆·纳耶里(Payam Nayeri), (美)C. J. 雷迪 (C. J. Reddy) 著;索莹,李伟译. —哈尔滨:哈尔滨工业大学出版社,2016.11

书名原文:Antenna Analysis and Design Using FEKO Electromagnetic Simulation Software
ISBN 978-7-5603-6035-5

I. ①F… II. ①阿…②帕…③C…④索…⑤李… III. ①电磁场—
有限元分析—应用软件 IV. ①O441.4-39

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 117982 号



责任编辑 张秀华

封面设计 高永利

出版发行 哈尔滨工业大学出版社

社 址 哈尔滨市南岗区复华四道街 10 号 邮编 150006

传 真 0451-86414749

网 址 <http://hitpress.hit.edu.cn>

印 刷 哈尔滨工大节能印刷厂

开 本 787mm×960mm 1/16 印张 15.75 字数 290 千字

版 次 2016 年 11 月第 1 版 2016 年 11 月第 1 次印刷

书 号 ISBN 978-7-5603-6035-5

定 价 58.00 元

(如因印装质量问题影响阅读,我社负责调换)

序 言

一提到电磁场和天线技术,大家往往会联想到公式、符号以及大量的计算。仿真软件的出现能将这种看不见摸不着的能量传播具象地展示出来,这不仅有利于初学者直观高效地理解理论知识,更重要的是可以帮助工程从业人员快速准确地描述和解决工程问题。伴随无线通信技术的发展,各类应用蓬勃兴起,天线的规模和类型也在不断演进,对一些典型天线特性进行深入学习,掌握对其仿真分析的方法能帮助科研工作者提升天线分析与设计技能,达到事半功倍的效果。

Feko 进入中国已有十五载,用户遍布航空、航天、电子、汽车、通信、船舶等领域,已经成为分析各类天线、雷达系统、微波射频及其应用中不可或缺的重要工具。Feko 包含多种算法求解器,可针对不同类型的问题选择特定的算法组合以实现最优计算方案,为天线和系统设计师们提供精准高效的仿真数据支持,减少研发中对原型机验证过程的反复。2014 年 Feko 被 Altair 成功收购,成为 Altair HyperWorks[®] 平台中的电磁解决方案,当前已发展至 14.0 版本。

本书原作者均为电子工程及天线领域的知名专家,具备深厚的电磁理论基础及 Feko 应用经验,且在相关应用领域撰写和发表过多部著作和论文。本书充分结合了天线理论基础和工程应用经验,读者在学习天线知识的同时,亦可轻松掌握 Feko 软件的基本使用方法,是一部非常实用的天线设计和仿真教程。本书译者索莹博士同样具备扎实的天线、微波理论基础及丰富的工程实战经验,其所在团队也是 Feko 进入中国后的最早一批用户。她对原书

做了通透的阅读及审视后,认为其将对国内天线设计相关专业的师生及科研人员带来极大帮助和启示,遂花费8个月的时间进行认真翻译和校对,最终有了中文版的成稿和出版。

相信本书能给读者带来耳目一新的天线知识学习体验,切实提升工作效率。并希望本书能激发读者在天线设计等领域的灵感,提升我国天线工作者的自主创新能力。

我们鼓励广大读者借助 FEKO 探索各种先进的天线设计和复杂电磁问题分析,同时也衷心期待大家的宝贵建议,以利于我们不断完善和提升软件功能,与大家一同进步。

A stylized, handwritten signature in black ink, consisting of several fluid, connected strokes.

刘源 博士

Altair 大中华区总经理

译者序言

《天线技术》是电磁场与电磁波专业重要的专业基础课。目前,国内关于天线基本理论和相关分析方法方面的书籍众多,为在校学生和科研人员提供了重要参考。而随着电磁仿真软件的日新月异和计算机硬件的更新换代,天线的设计越来越依靠仿真软件的辅助。本书是美国科罗拉多矿业大学 Atef Z. Elsherbeni 教授的著作,全书在内容和编写方式上有别于常见的天线类专著。他通过基本理论与仿真设计相结合的方法,为读者详细介绍了天线的基本原理、设计方法和设计步骤。

全书的仿真工作使用 FEKO 软件进行,FEKO 软件是一款强大的三维全波电磁仿真软件,包含天线与天线罩设计分析、包含载体的天线布局、雷达目标特性、环境电磁场分布、屏蔽效能、复杂线缆束以及系统电磁兼容等分析功能,广泛应用于航空、航天、船舶、电子、汽车、通信与生物电磁等行业。

本书各章节的内容及翻译分工如下:前言,第 1 章天线简介,第 2 章线偶极子和单极子天线,第 3 章环天线,第 4 章微带贴片天线,第 5 章基于微带线的馈电网络,第 6 章宽带偶极子天线,第 7 章行波与宽带天线,第 8 章非频变天线,第 9 章喇叭天线和第 10 章反射面天线由索莹完成;第 11 章由李伟完成。全书由索莹统一校阅,由刘源博士审稿。

感谢哈尔滨工业大学电子与信息工程学院邓维波教授在本书的翻译过程中给予的支持和帮助。

感谢 Altair 工程软件(上海)有限公司大中华区总经理刘源博士对本书的翻译出版给予的大力支持。

在本书的翻译过程中,尽量保持了原作者的写作风格,同时也修正了书中的一些错误。为方便阅读附录中还汇集了书中的主要彩图。

由于译者水平有限,尽管经过反复的校对,难免还存在译词不当及疏忽之处,敬请读者不吝指正。

索 莹

于哈尔滨工业大学

2016 年 5 月

目 录

引言	1
第 1 章 天线简介	3
1.1 天线基础	3
1.2 关于本书	5
第 2 章 线偶极子和单极子天线	7
2.1 引言	7
2.2 电流元、短偶极子与有限长度偶极子天线	7
2.3 偶极子天线的全波仿真	9
2.4 单极子天线的全波仿真	21
2.5 偶极子天线和无线功率传输	27
2.6 PEC 地板上的偶极子天线	29
2.7 靠近 PEC 圆柱的偶极子天线	32
2.8 靠近 PEC 球体的偶极子天线	34
2.9 靠近介质球的偶极子天线	35
2.10 准对数周期偶极子天线	37
习题	40
第 3 章 环天线	43
3.1 引言	43
3.2 小环天线和大环天线	43
3.3 圆环天线	45
3.4 方环天线	57
3.5 三角环天线	71
3.6 PEC 散射体附近的环天线	79
习题	81

第4章 微带贴片天线	82
4.1 引言	82
4.2 贴片天线设计与分析	82
4.3 在 FEKO 中贴片天线的全波仿真	84
4.4 圆极化贴片天线	94
习题	97
第5章 基于微带线的馈电网络	99
5.1 引言	99
5.2 微带传输线设计	99
5.3 四分之一波长变换器	103
5.4 T 型结功率分配器	104
5.5 Wilkinson 功率分配器	107
5.6 正交耦合器	109
习题	110
第6章 宽带偶极子天线	111
6.1 引言	111
6.2 圆柱偶极子天线	111
6.3 双锥天线	115
6.4 折合偶极子天线	120
习题	124
第7章 行波与宽带天线	127
7.1 引言	127
7.2 螺旋天线	127
7.3 八木宇田天线	137
习题	149
第8章 非频变天线	152
8.1 引言	152
8.2 平面螺旋天线	152
8.3 对数周期天线	159
习题	165

第9章 喇叭天线	166
9.1 引言	166
9.2 扇形喇叭天线	166
9.3 角锥喇叭天线	170
9.4 圆锥喇叭天线	174
9.5 多模喇叭天线:波特喇叭天线	177
9.6 波纹圆锥喇叭天线	180
习题	182
第10章 反射面天线	183
10.1 引言	183
10.2 角反射面天线	183
10.3 抛物反射面天线的设计与分析	187
10.4 球形反射面天线的设计与分析	197
习题	200
第11章 阵列天线	201
11.1 引言	201
11.2 阵列天线原理	201
11.3 二元偶极子阵列	203
11.4 N 元等幅线性偶极子阵列	206
11.5 N 元非等幅线性偶极子阵列	213
11.6 平面天线阵列	216
习题	221
参考文献	222
附录 彩图摘录	225

引 言

出版目的

此书是为学习天线的学生和对天线设计与研究感兴趣的研究人员,介绍著名的商业仿真电磁软件 FEKO。由于本书的初衷是辅导教程,因此主要面向天线分析与设计领域的学生,然而其中的设计实例和仿真细节也为设计工作者提供了有价值的参考。阅读本书需要具有天线理论的基础,因而对于电子、电气工程等相关专业的学生也可以将其作为补充教材,作为天线工程的入门课程。

FEKO 的使用

由于 FEKO 软件的诸多优点,本书的仿真文件都由 FEKO 软件建立。特别地,该软件提供诸多求解器供用户选择,根据天线的类型能够快速有效地进行分析。此外,FEKO 软件为大学提供免费的学生版许可证,可用来仿真本书中的绝大多数天线结构。本书演示了如何在 FEKO 软件中建立不同类型和结构的仿真模型。书中的 FEKO 项目例子文件的开发均使用 6.2 版本。

本书的关键优势

本书前 3 章提供了天线仿真的基础,给出了最简单的辐射器类型——偶极子天线和环天线的设计过程,非常的详细、易于理解和遵循。书中对理论分析和使用 FEKO 软件的全波仿真结果进行了比较,使读者能够更好地阅读理解。天线设计的理论分析过程中常出现一些限制和近似,为此本书为读者提供了有效利用天线仿真软件的基本模型。在第 4~11 章为读者提供了不同天线结构的模型,在适当的位置,给出了一些与理论求解的讨论与比较。

此外,最重要的是本书提供了天线电流分布、辐射方向图和其他辐射特性的可视化,通过这些辐射特性的可视化分析,使其成为全面理解天线辐射特性的强大教育工具。

在每章的结尾,为该章讨论的天线类型提供一组相关练习,从而帮助读者评估对该章内容的掌握情况。

错误和建议

作者欢迎读者对本书可能出现的错误进行反馈,同时,也欢迎为了提高本书现有的主题和例子给出的建议。如果可能将勘误表张贴在出版商的网站上。

第 1 章 天线简介

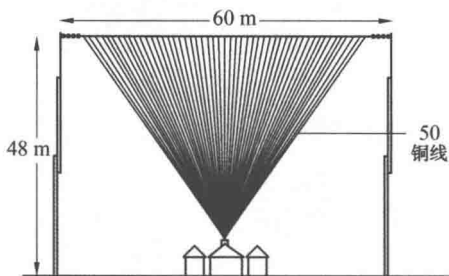
1.1 天线基础

几个世纪以来,人类一直在设计各种方法来满足远程通信的需要。早期的人们依靠声音(如鼓或号角)和视觉信号(如旗帜或烟),后者使用电磁频谱的可见区域。在 19 世纪早期,电磁波的发现在长距离通信领域开始了一个全新的时代。

基本通信系统的两个组成部分是发射机和接收机,对于射频(RF)通信,这两个组件可直接连接(有线通信)或间接连接(无线通信)。对于后者,发射机或接收机必须具备辐射或接收无线电波的能力,能够辐射或接收无线电波的射频装置被称为天线。天线用来实现发射端到接收端的电磁能量传输。1887 年,海因里希·赫兹进行了无线通信的实验演示,采用偶极子天线和环天线分别作为发射端和接收端。1901 年,古列尔莫·马可尼首次实现了横跨大西洋的长距离射频信号无线通信,如图 1.1 所示。



(a) 1901 年波尔杜的发射机



(b) 搭建的垂直扇形天线

图 1.1 第一个横跨大西洋的无线通信^[1]

这些年,根据不同应用产生了各种不同类型的天线,天线已经成为几乎任何通信设备的重要组成部分。总体而言,所有天线都是用来发射和接收电磁能量的,只是不同的应用需要不同的功能。天线增益是衡量天线的一个重要参数,是指在指定方向上的辐射强度与各向同性天线的辐射强度之比。对于

诸如无线局域网或手机通信之类的短距离通信,天线需要较低或者中等的增益,如偶极子或贴片天线。对于诸如卫星通信或者空间通信之类的长距离通信,天线需要较高的增益,采用的典型天线为反射面或阵列天线。这种情况下,为了建立通信链路,接收天线和发射天线的直线传播是必要的。

一些商业天线在图 1.2 中给出。为了满足增益要求,天线的工作频率要通过一定的规则确定。联邦通信委员会(FCC)为商业通信和军事应用划分了确定的频段,因此,天线设计者的一个工作是将设计的天线覆盖要求的工作频段。许多天线诸如偶极子天线和贴片天线通常具有较窄的频段,因此,天线设计者面临着应用宽带技术提高天线的带宽,从而满足设计要求。



图 1.2 商业天线的图片

除上述考虑之外,在实际应用中,周围环境对天线的设计性能具有显著的影响。例如,手机天线往往放置在其他电子设备和金属物品附近,因此,天线设计者必须要考虑实际的环境影响。

另一种天线的前沿研究是通信网络中天线的布局。最简单的无线链路形式,即单输入单输出系统(SISO)中,一个天线用来发射信号,另一个天线用来接收信号。如今,无线通信发展到由多个天线形成的无线通信网络,该系统称为多人多出系统(MIMO),而这些天线具有一定的隔离要求,如图1.3所示。

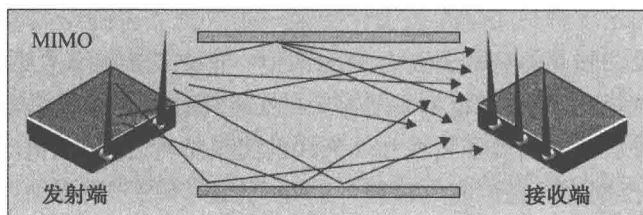


图 1.3 多人多出天线系统^[6]

在本书中,我们并没有专注于传统的天线设计,而是描述了一些特别的天线范例。关注的关键在于这些例子能够恰当地理解天线辐射的机理,换句话说就是天线如何辐射,哪些因素影响它们的辐射特性。

由物理学可知,加速的电荷产生电磁波,这是由于加速的电荷产生一个从源点传输的电磁场扰动。然而在实际中,加速电荷源很难实现,但是,产生射频信号的随时间变化的电流源(相对于充电时间的导数)是可以得到的。根据麦克斯韦方程组,天线中随时间变化的电流源可以产生电磁辐射。换句话说,天线的辐射方向图是电流的一种表现形式。因此,可以通过控制电磁设备(例如天线)的时变电流来控制辐射方向图。前面的简要讨论说明,学习和理解天线时变电流特性是必要的,在本书中我们将集中在该点上,学习与理解不同形式天线的辐射机理。

1.2 关于本书

在天线工程领域,理论分析对于理解辐射机理的基础知识是至关重要的。该领域绝大多数书籍都聚焦于此(如文献[7,8]),针对这些必须的概念为读者提供深入的理解。而本书则侧重于天线仿真过程,为优化设计提供帮助。

精确解决辐射问题在天线设计中是至关重要的。虽然发射和接收射频信

号的天线基本概念是已知的,但许多天线问题的精确解析求解是不可能的。根据理论分析方法,可以采用一些典型的近似方法去简化求解问题,这些方法相应地限制了求解的精度。然而,使用先进的电磁场数值方法和高效的计算软件,几乎可以精确求解天线问题。近年来,先进的软件技术显著地提高了计算能力,这个趋势还在发展,但目前已经相当成熟。相应地,几年前许多天线计算的问题在当时看起来是不可能实现的,现在在个人计算机上已经得到解决。

总之,理论求解是实际天线设计的第一步。为了得到令人满意的实际性能,天线的尺寸和其他特性需要合理的调整。本书的目的是给读者提供一本基本理论求解和实际设计范例手册有效结合的书籍。本书提供不同类型的天线研究,涵盖从诸如偶极子天线和环天线的简单结构,到诸如宽带微带贴片天线和高增益反射面天线的实际应用。这些天线设计均采用现如今广泛使用的 FEKO 电磁仿真软件^[9],并且尽可能地给出分析表达式。

第 2 章和第 3 章从最基本的天线形式——线偶极子和环天线开始。这两章重点介绍仿真的基本操作细节,使读者熟悉全波仿真的基本概念和要求。后续的章节将覆盖绝大多数常见的天线类型,如贴片天线、喇叭天线和反射面天线。其中第 5 章讨论基于微带线的馈电网络的基本概念,研究阻抗变换器,功率分配器和耦合器等几个例子。第 11 章描述阵列天线,将给出几种偶极子和贴片天线阵列的例子。

在每一章,都会首先讲述相关的电磁概念和基本的天线方程,如果需要,还会讨论解析解和全波仿真的比较。针对研究的任何天线结构进行全波电磁仿真,此方法的有效利用为读者不仅提供了天线设计和仿真的指导,还提供了天线辐射方向图、电流分布和其他辐射特性的可视性描述,这些对学习和实际应用都具有重要意义。

第2章 线偶极子和单极子天线

2.1 引言

线偶极子天线是最古老最简单的,同时也是成本最低廉的天线结构。此外,半波偶极子天线也是在低增益领域应用最广泛的天线。文献[7,8]中给出了有关偶极子天线详细的辐射特性分析。简单的设计和分析使得该类型天线适合作为天线工程领域学习的起点。在本章,我们主要研究一些偶极子天线的基础,给出使用 FEKO 电磁仿真软件设计偶极子天线的详细过程^[9],并演示几个例子。

2.2 电流元、短偶极子与有限长度偶极子天线

图 2.1 给出了一个相对于坐标系原点对称,并沿 $x-y$ 平面法向方向(即沿 z 轴)放置的线偶极子天线和观察点 P 的几何布局。

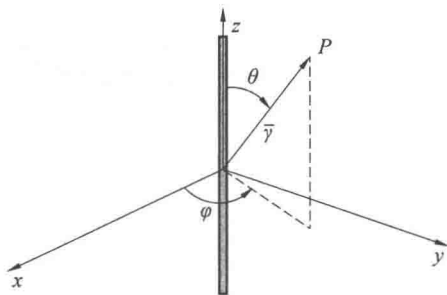


图 2.1 线偶极子天线和观察点 P 的几何布局

这里,我们假设导线由理想导电材料制成。由于导线传送电流,因此只有矢量位 $\mathbf{A}$ 需要求解,从而计算远场辐射方向图。文献[7]中矢量位 $\mathbf{A}$ 的定义为

$$\mathbf{A}(x, y, z) = \frac{\mu}{4\pi} \int_c \mathbf{I}_e(x', y', z') \frac{e^{-jkR}}{R} dl' \quad (2.1)$$

式中 x, y, z ——观察点的坐标;
 I_e ——电流矢量;
 x', y', z' ——导线(源)上电流分布坐标;
 R ——源上任一点到观察点的距离;
 k ——波数。

由于电流只沿 z 方向流动,大体上可以根据导线(偶极子)的长度对方程进行进一步化简。在本章中,假定偶极子导线半径远远小于波长。如果偶极子天线采用较粗的半径,也被称为圆柱偶极子,将在后续的章节中研究。

对于一个无限短的线元,即当 $l \ll \lambda$ 时,其中 λ 是产生辐射场的波长,沿线各点的电流可视为相同(即 I_0)。因此,在远区场,线上某点到观察点的距离可近似为

$$R = \sqrt{(x - x')^2 + (y - y')^2 + (z - z')^2} \approx \sqrt{x^2 + y^2 + z^2} = r \quad (2.2)$$

根据上述近似,式(2.1)的矢量位函数可写成

$$A(x, y, z) = \hat{z} \frac{\mu I_0 l}{4\pi r} e^{-jkr} \quad (2.3)$$

通常情况下,只有当导线长度小于 $\lambda/50$ 时,导线上的电流分布才可以认为是常数。当导线长度为 $\lambda/50 \sim \lambda/10$ 时,更精确且常用的电流分布是三角形分布,其表达式为

$$I_e(x' = 0, y' = 0, z') = \begin{cases} \hat{z} I_0 (1 - \frac{2}{l} z') & (0 \leq z' \leq l/2) \\ \hat{z} I_0 (1 + \frac{2}{l} z') & (-l/2 \leq z' \leq 0) \end{cases} \quad (2.4)$$

相应的矢量位可化简为

$$A(x, y, z) = \frac{\mu}{4\pi} \left[\hat{z} \int_{-l/2}^0 I_0 (1 + \frac{2}{l} z') \frac{e^{-jkR}}{R} dz' + \hat{z} \int_0^{l/2} I_0 (1 - \frac{2}{l} z') \frac{e^{-jkR}}{R} dz' \right] \quad (2.5)$$

类似地,当导线长度相对较小时,上式中的 R 可近似满足 $R \approx r$ 。

对于有限长度的线偶极子天线,通常导线长度大于 $\lambda/10$,导线上的电流分布可近似为正弦分布,该正弦电流分布的表达式为

$$I_e(x' = 0, y' = 0, z') = \begin{cases} \hat{z} I_0 \sin \left[k \left(\frac{l}{2} - z' \right) \right] & (0 \leq z' \leq l/2) \\ \hat{z} I_0 \sin \left[k \left(\frac{l}{2} + z' \right) \right] & (-l/2 \leq z' \leq 0) \end{cases} \quad (2.6)$$