



射频与微波电磁学

RF and Microwave Electromagnetism

[法] Pierre Jarry

著

[美] Jacques N. Beneat

吴永乐 颜光友 李明星 刘元安

译

王卫民 审校



中国工信出版集团



电子工业出版社
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY
<http://www.phei.com.cn>

射频与微波电磁学

RF and Microwave Electromagnetism

[法] Pierre Jarry

著

[美] Jacques N. Beneat

吴永乐 颜光友 李明星 刘元安 译

王卫民 审校

電子工業出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING

内 容 简 介

本书系统介绍了射频和微波领域的基本知识。本书分为传输线、波导和腔体三个部分,其中传输线部分(第1章至第3章)介绍了传输线的基础知识,波导部分(第4章至第7章)介绍了波导的特性,腔体部分(第8章和第9章)介绍了射频微波腔体的实现方法。本书对于发射和接收技术的微波结构进行了完整的分析和建模,并针对各章节的知识点给出了相应的例题,以方便读者进一步加深理解、举一反三,使其具备独立解决射频和微波技术方面实际工程设计问题的能力。

本书的特点是基本概念清晰,所涉及的知识实用性强。本书适合作为高等学校相关专业的研究生、本科高年级学生的教学用书,也可供相关专业科研工作者、工程技术人员及大学教师参考使用。

RF and Microwave Electromagnetism, ISBN 978 - 1 - 84821 - 690 - 7, Pierre Jarry, Jacques N. Beneat

© ISTE Ltd 2014

The rights of Pierre Jarry and Jacques N. Beneat to be identified as the authors of this work have been asserted by them in accordance with the Copyright, Designs and Patents Act 1988.

本书中文简体中文字版专有翻译出版权由美国 John Wiley & Sons, Inc. 公司授权电子工业出版社。未经许可,不得以任何手段和形式复制或抄袭本书内容。

版权贸易合同登记号 图字:01-2016-4337

未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。

版权所有,侵权必究。

图书在版编目(CIP)数据

射频与微波电磁学/(法)皮埃尔·雅里(Pierre JARRY),(美)雅克·本尼特(Jacques N. BENEAT)著;吴永乐等译. —北京:电子工业出版社,2016.6

书名原文:RF and Microwave Electromagnetism

ISBN 978 - 7 - 121 - 28999 - 6

I. ①射… II. ①皮… ②雅… ③吴… III. ①射频-微波技术-电磁学 IV. ①O45

中国版本图书馆CIP数据核字(2016)第125933号

责任编辑:张 剑(zhang@phei.com.cn)

印 刷:三河市华成印务有限公司

装 订:三河市华成印务有限公司

出版发行:电子工业出版社

北京市海淀区万寿路173信箱 邮编 100036

开 本:720×1000 1/16 印张:9.5 字数:182千字

版 次:2016年6月第1版

印 次:2016年6月第1次印刷

印 数:3000册 定价:48.00元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题,请向购买书店调换。若书店售缺,请与本社发行部联系,联系及邮购电话:(010)88254888,88258888。

质量投诉请发邮件至zlt@phei.com.cn,盗版侵权举报请发邮件至dbqq@phei.com.cn。

本书咨询联系方式:zhang@phei.com.cn

译者序

本书从电磁场理论与电路理论的角度对微波传输线的特性进行了较详细的理论分析,内容涵盖了波导和传输线方面的知识。从该书的取材上可以看出,本书强调物理概念,对较难理解的问题均给予了物理诠释。本书也注重逻辑推理与数学推导及证明,对传输线涉及的特性几乎均给予了严格的证明过程,这有助于从事射频与微波的工程师们建立对传输线的进一步深刻理解与认识。

本书分为三部分。第一部分介绍了传输线基础知识,包括 TEM 传输线的特征参数、损耗,以及计算传输线特性的方法;第二部分介绍了波导的特性;第三部分介绍了实现微波射频腔体的方法。

本书各章节中均对所述的知识点举出例题,以方便读者进一步加深理解,并能够举一反三,独立解决射频和微波方面的实际设计问题。本书是一本较好的参考书,它适合作为研究生、大学高年级学生的教学参考书,也可供相关科研工作者、工程技术人员和大学教师参考,出于以上考虑,我们将这本书译成了中文。

书中用到的一些专业术语,有些目前国内尚无标准译名,为此,在书后编排了中英文对照术语表。

本书共分 9 章,其中前言、简介、第 1 章及术语表由吴永乐翻译;第 2 章至第 4 章由颜光友翻译;第 5 章至第 7 章由李明星翻译;第 8 章和第 9 章由刘元安翻译。全书译文由吴永乐最后统一审核与优化,并请王卫民校阅。本书的翻译工作得到了昆士兰大学在读博士生郭磊的帮助,电子工业出版社的编辑做了大量的策划和编审工作,译者在此一并表示深切的谢意。本书由多人合作翻译,不同译者在用语方面难免有所差异,加之译者水平有限,译文陋误之处在所难免,殷切希望读者批评指正。

译者

前 言

微波和射频（RF）单元在通信系统中发挥着重要作用。由于雷达、卫星和移动无线系统数量的激增，有必要对电磁学进行相应的研究。本书介绍了微波和射频领域的基本知识。本书作者总结了自身的教学经验，从而形成了一套完整的风格和方法，这种风格和方法对于流畅阅读是非常重要的。

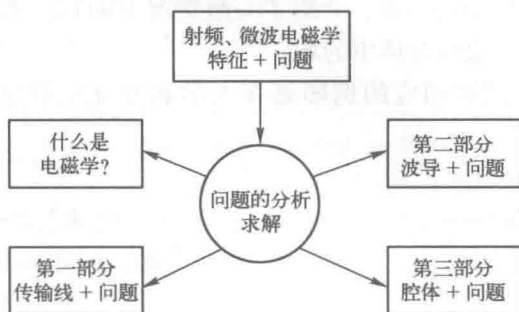
本书适合微波工程师和高年级研究生阅读使用。

本书的每个章节对用于发射和接收技术的微波结构进行了完整的分析和建模。我们希望这本书能为读者提供可用于现在和未来射频微波电路设计的一系列方法。我们通过总结分析步骤，给出翔实的案例及其解决方法，突出实际应用价值，让读者对射频微波能够有比较全面的了解。因此，本书对微波的 17 个问题进行了理论分析和实例分析，这些实例占据了本书大约 40% 的篇幅。我们认为这种方法具有连贯性、实用性和处理问题的现实性。

我们决定按如下顺序讲解地面站、卫星和射频（手机）等情况下信号收发都用到的内容：

- 传输线；
- 波导；
- 腔体。

本书分为三个部分，共 9 章。对于这三部分内容，我们用 9 章的篇幅，结合练习和问题，给出它们的主要特性。



本书第一部分（第 1 章至第 3 章）介绍传输线基础知识。第 1 章介绍了

TEM 传输线的特征参数（单位长度的电容、电导及特性阻抗）。本章中，我们首先讨论功率，然后给出带线和同轴线的例子和问题（附解答）。

第2章介绍了如何求解 TEM 传输线中的损耗问题。本章利用微扰法计算金属损耗和介电损耗，这些计算结果适用于传统的电磁传输线和同轴线。

第3章介绍了求解 TEM 传输线的特性的不同方法，如保角变换法和有限差分法。在本章例题的解答中，主要讲解了传统同轴线和偏心同轴线的保角变换。

本书第二部分（第4章至第7章）介绍波导的特性。第4章从麦克斯韦方程出发，介绍了场的计算。我们从散度定理（奥斯特罗格拉德斯基定理）和斯托克斯定理出发，计算能量的速度。本章分别介绍了截止频率、截止频率以上和截止频率以下（隐失波）的 TE 波和 TM 波。在本章结尾还给出了总结表。

第5章介绍了 TE 波和 TM 波的损耗。在本章例题中，求解了由平行金属面和有耗介质面组成的波导的损耗。

第6章重点介绍了矩形波导的 TE 模和 TM 模。我们给出了矩形波导 TM 模以及 $x = \text{cte}$ 面的磁场线和电场线。在 TE 波传播的情况下，我们把基模 TE_{01} 模的求解作为一个例题进行讲解。对于以上两种情况，我们还给出了色散关系、功率通量和衰减。

第7章介绍了圆形波导的 TE 波和 TM 波，并介绍了贝塞尔函数的应用。另外，本章还以例题的方式介绍了半圆波导、直角波导和 α 角波导。

本书第三部分介绍了实现微波射频腔体的方法。第8章中首先求解矩形腔体最基本的模式—— TE_{011} 模，然后给出了腔体中的场分布、电场能量和磁场能量，并且定义了腔体的品质因数 Q 。本章仅涉及一个单一且完整的问题，很容易理解。

第9章是比较复杂的一章，介绍了一般情况下的 TE_{mnp} 模和 TM_{mnp} 模，给出了不同 (m, n, p) 值时腔体中的场。

以上方面的知识和相应的例题是在大学和专业工程学校的第四年时给出的。

[法] Pierre Jarry 教授

[美] Jacques N. Beneat 教授

2014 年 4 月

目 录

微波简介	1
------------	---

第一部分 传 输 线

第 1 章 TEM 传输线的电磁场	7
1.1 广义电磁波	7
1.2 横电磁波 (TEM)	7
1.3 横电磁波的解	9
1.4 TEM 传输线的特征参数	10
1.4.1 单位长度的电容	10
1.4.2 特性阻抗	11
1.4.3 单位长度的电导	12
1.5 功率	13
1.5.1 密度	13
1.5.2 通量	13
1.6 例题	15
1.6.1 带线	15
1.6.2 同轴线	17
1.7 参考文献	19
第 2 章 TEM 传输线的损耗	21
2.1 简介	21
2.2 微扰计算法	21
2.3 电介质损耗	21
2.3.1 根据介电常数计算	21
2.3.2 根据麦克斯韦—安培关系的计算方法	22
2.4 金属损耗	23
2.5 一般情况: 电介质损耗和金属损耗	25
2.6 例题	27
2.6.1 低损耗传输线	27
2.6.2 有耗同轴线	31
2.7 参考文献	37

第3章 TEM 传输线特征值的计算	39
3.1 简介	39
3.2 保角变换法	39
3.2.1 电容的计算	39
3.2.2 复平面上的保角变换	40
3.2.3 保角变换法的正交性	40
3.2.4 ∇u 与 ∇v 的位置关系	41
3.2.5 总结	42
3.2.6 计算示例	42
3.3 有限差分法	43
3.4 例题	46
3.4.1 保角变换法	46
3.4.2 偏心同轴线的保角变换	48
3.5 参考文献	55

第二部分 波 导

第4章 线性、均匀、各向同性、无耗波导的电磁场	59
4.1 简介	59
4.2 无耗介质的方程	59
4.3 边界条件	61
4.4 行波和隐失波	63
4.5 电磁波的传播	65
4.6 群速	66
4.7 平均功率通量	67
4.7.1 斯托克斯定理	68
4.7.2 奥斯特罗格拉德斯基定理	69
4.8 功率密度	70
4.9 能量速度	70
4.10 TE 波	71
4.11 TM 波	72
4.12 反向波	73
4.13 不同工作频率和截止频率时 TE 波和 TM 波的特性	74
4.13.1 大于截止频率 ($\omega > \omega_c$) 的情况	74
4.13.2 等于截止频率 ($\omega = \omega_c$) 的情况	74
4.13.3 小于截止频率 ($\omega < \omega_c$) 的情况	74
4.13.4 总结	75
4.14 参考文献	75

第 5 章 波导损耗	77
5.1 简介	77
5.2 TE 波	78
5.3 TM 波	78
5.4 在 TE 波和 TM 波情况下的衰减	79
5.5 例题: 有耗平行金属板波导中的波传播	80
5.6 参考文献	87
第 6 章 矩形波导中的 TE 模和 TM 模	89
6.1 简介	89
6.2 TM 模矩形波导	89
6.2.1 TM 模的场分布	89
6.2.2 色散关系	91
6.2.3 功率通量	92
6.2.4 衰减	93
6.2.5 电场线	94
6.3 TE 模矩形波导	97
6.3.1 TE 模的场分布	97
6.3.2 色散关系	99
6.3.3 功率通量	100
6.3.4 $m=0$ 和 $n=1$ 时基模的衰减	100
6.4 例题	101
6.4.1 矩形波导的基模 TE_{01} 模	101
6.4.2 填充介质的矩形 TE_{01} 模波导	104
6.5 参考文献	106
第 7 章 TM 模和 TE 模圆形波导	107
7.1 简介	107
7.2 TM 模和 TE 模圆形波导的特性	107
7.3 TM 模圆形波导	109
7.4 TE 模圆形波导	110
7.5 基模与模式的分类	111
7.6 基模 TE_{11} 模的频带利用率	113
7.7 主要模式的场线	113
7.7.1 基模 TE_{11}	113
7.7.2 TM_{01} 模的对称交换性	114
7.7.3 TE_{21} 四极模	114
7.7.4 TE_{01} 和 TM_{11} 简并	114
7.7.5 TM_{11} 和 TE_{01} 简并	115

7.8 功率通量和衰减	115
7.9 例题	116
7.9.1 半圆波导和 1/4 圆波导	116
7.9.2 α 角波导	117
7.9.3 TM 模和 TE 模功率通量和衰减的计算	119
7.10 参考文献	119

第三部分 腔 体

第 8 章 矩形 TE_{011} 腔体	123
8.1 简介	123
8.2 基模	123
8.3 腔体结构	123
8.4 腔体	125
8.5 腔体中的场分布	125
8.6 腔体中的磁场能量和电场能量	127
8.6.1 电场能量	127
8.6.2 磁场能量	128
8.7 腔体的品质因数 Q	129
8.8 参考文献	132
第 9 章 圆形 TE_{mnp} 和 TM_{mnp} 腔体	133
9.1 简介	133
9.2 基本的传输模 TE_{mn} 和 TM_{mn}	133
9.3 TE 和 TM 静态场	133
9.4 腔体的实现	134
9.5 腔体	135
9.6 曲线描述	136
9.7 常见和特殊模式的示例	137
9.8 模式场分布的实例	137
9.9 参考文献	138
术语表	139

微波简介

1. 简介

微波最初应用在雷达和电信方面。现在，微波的应用正以每年 15% 的增长速度向前发展，它已广泛应用于众多领域，如：

- 卫星设备；
- 地面广播；
- 移动电话；
- 医疗应用；
- 射电天文；
- 数字传输系统；
- 加热，等。

早在 20 世纪 50 年代，人们已经开始使用真空电子管制作微波电路。20 世纪 70 年代，随着微波晶体管（如双极型晶体管和场效应晶体管（FET））的出现，电路变得越来越紧凑，这使得运用带线和微带线集成有源器件成为了可能。自 1990 年开始，使用微波放大器、耦合器、滤波器、二极管、衰减器、整流器、移相器等全集成微波电路已成为可能。

2. 电磁频谱

电磁波的特征在于其电场和磁场，工作频率在 300MHz ~ 300GHz 之间的电磁波就属于微波范畴。

1) 波长分类

工作频率 f	波长 λ	波长分类
300MHz ~ 3GHz	1m ~ 10cm	UHF, 特高频, 分米波
3 ~ 30GHz	10cm ~ 1cm	SHF, 超高频, 厘米波
30 ~ 300GHz	1cm ~ 1mm	EHF, 极高频, 毫米波

2) 微波波段分类

微波中的一些波段已分配给相应的波导。例如：

2 射频与微波电磁学

L: 1.14 ~ 1.73GHz

D: 1.72 ~ 2.61GHz

S: 2.6 ~ 3.95GHz

G: 3.95 ~ 5.85GHz

C: 5.20 ~ 5.90GHz

J: 5.30 ~ 8.20GHz

H: 7.05 ~ 10GHz

X: 8.20 ~ 12.4GHz

Ku: 11.9 ~ 18GHz

K_x: 17.6 ~ 26.7GHz

Q(Ka): 26.5 ~ 40GHz

3) 发展历史一览

1920年, 赫尔发明了第一个微波发生器——磁控管。

1935年, 罗赛尔和瓦里安开发了更为复杂的微波发生器——速调管。

1940年至今, 雷达的出现并一直在发展(广泛应用于军用和民用方面, 如制导、通信、太空探索等)。

1950年, 出现了铁氧体器件。

1962年, 耿氏(GUNN)二极管被发明。

1970年, 发明了微波晶体管(如FET)。

1990年至今, 出现了微波集成电路和移动电话。

3. 国际频段分配

特定的频率或频段被分配给特定的应用。例如:

➤ 470 ~ 890MHz: 广播电视。

➤ 890 ~ 940MHz: 民用通信。

➤ 940 ~ 1350MHz: 无线电话、雷达、移动电话、地面广播等。

➤ 1350 ~ 2700MHz: 数据、气象、无线电、移动通信等。

➤ 2.7 ~ 5GHz: 卫星、射电天文、雷达、移动通信、导航。

➤ 5 ~ 20GHz: 卫星、移动通信、广播电视等。

➤ 20GHz以上: 移动通信、数字光纤通信等。

利用微波可以设计宽带系统, 进而可以最大限度地传输信息。

4. 参考文献

- [1] COLLIN R. E. , Foundations for Microwave Engineering, McGraw – Hill, 1966.
- [2] EDWARDS T. C. , Foundations for Microstrip Circuits Design, John Wiley & Sons, 1981.
- [3] PENNOCK S. R. , SHEPHERD P. R. , Microwave Engineering with Wireless Applications, McGraw – Hill Telecommunications, 1988.
- [4] POZAR D. M. , Microwave Engineering, Addison Wesley, 1990.

第一部分

传 输 线

第 1 章 TEM 传输线的电磁场

1.1 广义电磁波

一般来说,电磁波由著名的麦克斯韦-法拉第方程组的解给出,由此可得电场强度和磁场强度($\mathbf{E}, \mathbf{H}$)。在没有电荷的情况下,有以下表达式:

$$\text{rot} \mathbf{E} = -\mu \frac{\partial \mathbf{H}}{\partial t}$$

$$\text{rot} \mathbf{H} = \varepsilon \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t}$$

$$\text{div} \mathbf{E} = 0$$

$$\text{div} \mathbf{H} = 0$$

1.2 横电磁波 (TEM)

横电磁波在线性、均匀、各向同性、无耗的媒质中传播。其中,线性介质的介电常数 ε 和磁导率 μ 均与频率无关。

对于时谐电磁场,电场强度和磁场强度可表示为

$$\begin{cases} \mathbf{E}(M, t) = \mathbf{E}(x, y) e^{j\omega t \pm \gamma z} \\ \mathbf{H}(M, t) = \mathbf{H}(x, y) e^{j\omega t \pm \gamma z} \end{cases}$$

其中,传播常数为

$$\gamma = \alpha + j\beta$$

式中, α 为衰减常数, β 为相位常数。

当我们只考虑正向传播的电磁波时,电磁场方程的解取 $-\gamma$ 项,得到如下形式的电场强度和磁场强度计算公式:

$$\begin{cases} \mathbf{E}(M, t) = \mathbf{E}(x, y) e^{-\alpha z} e^{j(\omega t - \beta z)} \\ \mathbf{H}(M, t) = \mathbf{H}(x, y) e^{-\alpha z} e^{j(\omega t - \beta z)} \end{cases}$$

由上式知,电场强度和磁场强度的幅度以因子 $e^{-\alpha z}$ 的速度衰减。若电磁场