

EMC ANALYSIS METHODS AND COMPUTATIONAL MODELS

EMC分析方法与计算模型

[美] 弗雷德里卡·M·特奇 (Frederick M. Tesche)

[瑞士] 米歇尔·V·艾诺茨 (Michel V. Ianoz)

[瑞典] 托比杰恩·卡尔松 (Torbjörn Karlsson)

吕英华 王旭莹 译



北京邮电大学出版社
www.buptpress.com

TN03
T412

EMC 分析方法与计算模型

EMC Analysis Methods and Computational Models

[美] 弗雷德里卡·M·特奇 (Frederick M. Tesche)

[瑞士] 米歇尔·V·艾诺茨 (Michel V. Ianoz)

[瑞典] 托比杰恩·卡尔松 (Torbjörn Karlsson)

吕英华 王旭莹 译

TN03
T412

北京邮电大学出版社

·北京·

EMC Analysis Methods and Computational Models

Copyright © 1997 by John Wiley & Sons, Inc.

All Rights Reserved. Authorized translation from the English
language edition published by John Wiley & Sons, Inc.

EMC 分析方法与计算模型

Copyright © 1997 by John Wiley & Sons, Inc

版权所有。经授权由 John Wiley & Sons, Inc 出版的英文版翻译。

著作权合同登记号 图字:01-2003-5308

图书在版编目(CIP)数据

EMC 分析方法与计算模型/(美)特奇(Tesche, F. M.), (瑞士)艾诺茨(Ianoz, M. V.), (瑞典)卡尔松(Karlsson, T.)著;吕英华,王旭莹译. —北京:北京邮电大学出版社, 2009. 11

ISBN 978-7-5635-1722-0

I. E… II. ①特…②艾…③卡…④吕…⑤王… III. ①电磁兼容性—分析方法②电磁兼容性—数学模型 IV. TN03

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 186300 号

书 名: EMC 分析方法与计算模型

作 者: [美]弗雷德里卡·M·特奇(Frederick M. Tesche), [瑞士]米歇尔·V·艾诺茨(Michel V. Ianoz), [瑞典]托比杰恩·卡尔松(Torbjörn Karlsson)

译 者: 吕英华 王旭莹

责任编辑: 陈 瑶

出版发行: 北京邮电大学出版社

社 址: 北京市海淀区西土城路 10 号(邮编: 100876)

发 行 部: 电话: 010-62282185 传真: 010-62283578

E-mail: publish@bupt.edu.cn

经 销: 各地新华书店

印 刷: 北京源海印刷有限责任公司

开 本: 787 mm×1 092 mm 1/16

印 张: 23.5

字 数: 581 千字

印 数: 1—3 000 册

版 次: 2009 年 11 月第 1 版 2009 年 11 月第 1 次印刷

ISBN 978-7-5635-1722-0

定 价: 38.00 元

· 如有印装质量问题, 请与北京邮电大学出版社发行部联系 ·

致 谢

这是作者们多年来在电磁领域共同工作的结果,在这期间,作者同许多人都进行了合作,这种共同的工作以及同其他学者的研讨,都对本书的论述和问题讨论做出了贡献。

Michel Ianoz 感谢十多年来协助过他的学者,他们是罗马大学(University of Rome)的 C. Mazzetti 教授、博洛尼亚大学的 C. A. Nucci 教授。以及洛桑联邦理工学院 F. Rachidi 博士在闪电电磁效应方面的帮助,使得 Michel Ianoz 澄清了许多问题并对他在电磁兼容领域的成果有帮助——部分内容已经写入本书中。Michel Ianoz 的许多关于雷电问题的想法都在与佛罗里达大学的 M. Uman 教授和现在 Swiss PTT 的 M. Rubinstein 博士的富有成果的讨论中得到了发展。Michel Ianoz 还感谢同 C. Baum 博士、D. Giri 博士、W. Radasky 博士和 E. F. Vance 等关于电磁场耦合现象的多次有益的研讨;感谢同 B. Demoulin 教授关于电缆的转移阻抗建模讨论,感谢同 G. Costache 教授关于数值方法在电磁兼容中应用的有益的研讨。他还感谢初期的合作者 M. Aguet,那是在 20 世纪 70 年代在瑞士。也感谢 F. M. Tesche 在 15 年间对他技术方面的影响。

Ianoz 教授还感谢与八家欧洲大学三年来的合作,他们的欧洲电磁兼容研究项目对本书提供了部分支持。他感谢与他进行精深研讨和思想交流的同事们,他们是 F. Canavero (Politecnico di Torino 都灵理工大学), M. D'Amore (Università di Roma 罗马一大), P. Degauque (Université de Lille 里尔科技大学), K. Feser (Universitaet Stuttgart 斯图加特大学), B. Jecko (Université de Limoges 利摩日大学), J-C. Sabonnadiere (Institut Polytechnique de Grenoble 格勒诺布尔综合理工大学)以及 J. L. ter Haseborg (Technische Universitaet Hamburg-Harburg 德国汉堡哈堡科技大学)。

Fred Tesche 非常感谢在他早期从事瞬态电磁研究工作时,C. E. Baum 博士(Phillips Laboratory, U. S. Air Force 美国空军飞利浦实验室)和 K. S. H. Lee 博士(Kaman Science Corp 卡曼科学公司。)对他的指导和随之的合作,以及随后与朗讯的 T. K. Liu 博士和 D. V. Giri 博士及 E. F. Vance (顾问)共同从事的电磁脉冲领域的工作对形成这本书的基础提供了帮助。Tesche 博士还感谢过去 25 年间从事电磁研究的同事们,他们之间的技术探讨使他受益非浅,他们是 R. L. Hutchens 博士(BDM), 陆军中校 R. Vance (U. S. Army 美国陆军)、Al Bahr 博士 (SRI), Kendall Casey 博士 (SRI), Peter Mani 博士 (formerly of the Swiss NEMP Laboratory 曾工作在瑞士核电磁脉冲实验室(NEMP))、Bruno Br? ndli (Swiss NEMP Laboratory 瑞士核电磁脉冲实验室)、Ray Latham 博士后(Northrop 诺思罗普公司)和 Lennart Marin 博士后 (Kaman Science Corp 卡曼科学公司),以及合著者 Ianoz 教授和 Karlsson 博士。特别感谢 F. Rachidi 博士(EPFL 洛桑联邦理工学院)提供的特殊帮助,即关于传输线耦合的部分数值结果。

Tesche 博士还感谢 R. Barnes 教授 (Oak Ridge National Laboratory 橡树岭国家实验室) 和 Armin Kälin 博士 (Swiss NEMP Laboratory 瑞士核电磁脉冲实验室) 对这本书给与的关注和支持。此外,感谢瑞士洛桑联邦理工学院为 Tesche 博士提供了两次机会,担任客座学术指导与合著者合作,并编写部分内容。最后,还感谢 Sharon Wesson,如果没有他的坚决支持和建议就不可能完成本书的写作。

Torbjörn Karlsson 认为 15 年的电磁脉冲研究工作为他理解电磁兼容提供了基础,在那期间,他有很好的机会与许多电磁脉冲专家讨论麦克斯韦方程的相关问题。需要提到的是,Lennart Marin 博士后是解决理论问题和公式化方面的巨大灵感源泉,Carl E. Baum 博士在拓扑问题和其他方面给了我们极大的鼓励。E. Vance 在接地和屏蔽电缆方面给了很多建议,合著者 Fred Tesche 对数值分析的研究给予很大的帮助。

早期与瑞典国防研究局 Berndt Backlund 的合作,对理论工作实验验证重要性的理解奠定了基础。最近几年与伊米康(Emicon)Sven Garmland 的合作,使我们拥有了研究电磁兼容精密测量的条件。

三位作者特别感谢肯塔基大学 (University of Kentucky) 的 Clayton Paul 教授对书稿的仔细评审和很多有益的建议,提高了本书质量。

F. M. Tesche
M. V. Ianoz
T. Karlsson

前 言

电磁兼容是一门既年长又年轻的学科,说它年长是因为当 100 多年前第一次使用无线电通信时就提出了射频干扰问题。然而只是到了最近的 20~25 年间,由于数值计算技术的发展,科学家和工程师们才不仅能为电磁干扰现象进行物理建模,而且还可以应用物理模型针对这些电磁干扰物理现象给出更形象化的、更好的推断,以及给出更有效地减小干扰影响的措施。

模型的发展和利用已经成为人类能动性的、极其核心的内容,下面引用 Peter Johns^① (TLM 模型的提出者)最近的演讲来说明时下建模分析的发展。

“纵观历史,人类一直在为观察到的物理现象进行建模,从岩洞壁画到超现实主义艺术,从原子模型到宇宙模型,都是在试图努力于进行具体的分析或者是与人们进行思想交流上。作为工程师,针对具体的工程设计理念建立或选用数学模型,必须能够特别精通。一个理想分析模型的特性看起来是明确的,例如加强需要的、相关内容的分析,剔除不相关的内容。然而,由于计算器或者计算机的普及使专业工程师唾手可得的计算能力大大加强。因此,建立分析模型的方法也变化了,这意味着我们过去已经选用的分析模型对现在或者将来可能并不是最好的。”

尽管数值模型对我们理解电气现象很有用,但数值模型具有内在的限制性不能预测所有我们希望的,如 Johns 指出的,有时为了建立模型需要引进数学基本理论而进行的基本假设就是对实际情况的近似,因此,基于这些近似假设的模型就限定了有效使用范围。另一种建模面临的情况(也就是“实际的”情况)会很复杂,以至于精确的建模变得很困难,如果并非不可能,也很难执行。这时,人们经常设计测量或者实验来分析理解物理现象。

那么,写一本关于电磁兼容建模的科学技术书是否轻率之举呢?其实并非如此,理由如下:

第一,电磁场建模已经取得了惊人的进步,特别是最近 15 年,并且目前的建模技术为未来的发展提供了很好的基础,并且这种发展将会更快。

第二,尽管目前的模型可能不完善,但是对于增进理解电磁干扰控制的基本原理是非常有用的。一个不完善的模型可以用来分析为什么模型没有如预期地得到应有的结果,这自然会导致更新的、改进的模型。

我们撰写本书是确信这本书一定会使正在追踪和收集迄今为止仍然分散的出现在学报上、技术报告中,以及会议论文中的文献资料的研究生、博士后研究员、高级研究员以及从事电磁干扰实际应用研发工作的电力工程师等人员从中受益。本书中的许多文献资料始终在不断地更新中,这是由于所涉及的研究工作是在全球范围的大学和实验室中不断进展的。

^① Johns, P. B., “The Art of Modelling”, Electronics and Power, August 1979, pp. 565-569. Reprinted by permission from the Institution of Electrical Engineers(IEE)

然而,在这部书的写作过程中,我们尽量地保证使电磁兼容建模主体内容保证处在本书完成时间的最新状态。一个典型的例子是编织网电缆的转移阻抗模型,远不够完善,也不能表达实际编织网屏蔽的复杂特性。然而,它的确使我们对编织网屏蔽起了什么作用有了更深一步理解,与此同时本书也尽量给读者提供关于最近几年这方面的重要研究工作的完整的描绘。

本书包括五部分,第一部分按惯例,概述了本书主题:电磁兼容分析方法和计算模型。第1章回顾了整个模型研究的思想,讨论了建模在电磁兼容领域显现的效果,总结了各种瞬态信号和连续信号并且利用傅里叶变换解释了时域信号和频域信号的联系。

建模的关键是怎样描述一个复杂的电气系统并且分解为可以进行电磁建模处理的部分,这件工作可以采用电磁拓扑的概念来处理,电磁拓扑将安排在第2章讨论。本书的“拓扑”不是数学课本中严格意义上的拓扑,而是提供一个概念上的工具,以便于观察者想象自己如同电磁波一样紧密接触某个电气系统,例如进入飞机。阻止你进入内部系统的整体屏蔽表面是哪里?允许你进入该系统的入口点是哪里?在系统内你是如何从一个区域进入另一个区域的?你对系统内各部分产生了什么作用?这些问题的答案都和观察系统的拓扑方式有关。

本书的第二部分只有一章,即第3章,讨论集总参数电路模型。在电磁场频率足够低时,两电路间的干扰可以用低频电路模型很好地描述。在这一章,通过讨论戴维南和诺顿等效电路给出了传导干扰模型,进而推广到有源和无源的二端口网络情况。对于低频模型,除了电路中的直接连接外,电容和电感耦合也是很重要的。本章讨论了这些耦合机理,如同连接了一个公共的、有损耗的导体产生的两个回路间的传导耦合。

第三部分,讨论了适合高频段的模型。当耦合电路的尺寸开始接近电磁场的波长时,电路模型不再适用,建模时必须考虑场的波动特性。用麦克斯韦方程组,得到了辐射概念的模型。第4章描述了辐射的总体过程:首先是基本的电偶极子和磁偶极子辐射源,然后是线辐射源(也就是线天线);给出了有干扰体存在的几个电偶极子辐射实例(地平面、球体、平行板内、空腔)。线天线分析的关键点是结构上的电流分布情况,这个电流分布可以用电流的积分方程近似估算,也可以用矩量法得到数值解。另一个人们关注的电流主题是奇点展开法(SEM),这种方法提供了RLC电路谐振特性与天线之间的联系。

第三部分的第5章讨论了孔缝的辐射、绕射和散射模型,此时不能采用第4章中相对简单的单维天线模型。在这一章中,首先论述了孔缝的标量绕射理论,然后是严格的矢量场绕射,这个理论也应用于辐射天线。一个特别重要的情形是孔缝的尺寸小于波长时,对编织网屏蔽的建模尤其重要。此时,穿透孔缝的场可以用位于孔缝处的等效电偶极矩和磁偶极矩建模,该偶极矩的强度取决于与孔缝的尺寸和形状相关的孔缝极化率。

第四部分,讨论了传输线模型,包括3章。第6章建立了后续论述所需要的理论基础,定义了传输线的分布参数(单位长度的),讨论了如何应用该参数得到关于传输线电流和电压的电报方程。然后以双导体传输线为例,求出了这些电报方程的解,首先讨论了传输线上简单传播波的情形,然后讨论了具有集总电压和电流源的情形。本章还给出了BLT方程,说明了该方程是传输线负载响应的一种具体的表达方式。此外,还讨论了在时域直接求取传输线问题的解。本章最后,详细讨论了确定传输线单位长度电感和电容参数。

第7章选取已有的出版物上的资料继续讨论电磁场激励下的传输线建模。需要指出的

是,传输线耦合模型只给出了完全解的一部分——差模响应,而忽略了共模响应(也就是天线模),然而很幸运的是对于许多实际情况,包括导电地面上方架空导线的情形,传输线模型都能给出精确计算感应响应的方式。本章还论述了高谐振传输线、传输线辐射、传输线网络以及非线性负荷传输线情形下的模型和计算公式。

第8章进一步论述了架设在有损耗地上的传输线这一重要情形,推导出相应的电报方程,给出了架空和埋地电缆的单位长度传输线参数。此外,还讨论了电磁场在有损耗大地上的入射、反射和传输特性,并给出了分布电磁场激励引起的电缆响应的实例。

本书最后是第五部分,讨论了屏蔽模型。其中的第9章,根据已出版的资料继续传输线问题的讨论,给出了实体金属屏蔽电缆和编织网电缆屏蔽的防护特性。在总结了计算实金属屏蔽体特性的经典公式之后,概述了最近的编织网电缆特性的建模研究工作。此外,还论述了具有不连续间断点的屏蔽结构(由电缆连接器和尾线连接结构产生的),并提出了相应的计算模型。

第10章研究了更常见的封闭体电磁屏蔽的情形,例如屏蔽室。首先扼要地重温了无限大平板屏蔽模型,需要指出的是,这种屏蔽模型与实际屏蔽体的情形不相符。更合适的模型是具有有限的屏蔽体积,具有有限的分界表面的结构,称为有限容量屏蔽体。本章还给出了许多有用的关于屏蔽的公式。

本书最后部分是附录,给出了应用于电磁兼容建模的物理常数、各种类型传输线的数据以及相关的矢量运算恒等式。附录中还包括本书中应用的4个计算机程序的总体资料,这些程序是根据文中提出的模型设计的,可用于计算各种传输线响应。

在每一章后面所附习题有助于加深理解模型所依据的基本理论,提示读者如何把模型应用于实际情形中,进行电磁干扰计算和防护控制,其中一些习题需要用到本书给出的计算机程序。

我们深感写这本书是一件有趣的探索。书中的资料是我们和我们的许多同事多年来收集的结果。每当想到正是全世界研究者在这方面的共同研究才有了现在的这些公式、进展和电磁学计算模型的应用,就难以抑制内心的激动。我们已经完成了很多,但是,还有更多的工作需要去做。这本书只是涉及了这个庞大技术领域的沧海一粟。

F. M. Tesche
M. V. Ianoz
T. Karlsson

目 录

第一部分 开篇语

第 1 章 电磁兼容分析与建模概述	3
1.1 建模的概念	3
1.2 模型的可应用性	5
1.2.1 实验模型的可用性举例	5
1.2.2 用非实验方法验证模型的可用性	5
1.3 电磁学分析建模	6
1.4 EMC 建模:历史回顾	6
1.5 EMC 建模的考虑	7
1.5.1 EMC 问题分类	7
1.5.2 EMC 模型中的信号类型	10
1.5.3 建模限制	12
1.6 什么问题该建模,建模对什么问题有用	13
参考文献	13
习题	14
第 2 章 EMC 建模中的系统分解	17
2.1 将建模分析方法应用于 EMC	17
2.1.1 系统设计阶段	18
2.1.2 系统结构设计阶段	18
2.1.3 EMC 验证阶段	18
2.1.4 模型分析应用总结	19
2.2 系统拓扑描述	19
2.2.1 电磁拓扑	19
2.2.2 系统间电磁影响	22
2.2.3 基于电磁拓扑的 EMC 逻辑设计的一般原理	24
2.3 建模精确度	24
2.3.1 分析中的固有误差	24
2.3.2 分析中的精度均衡	24
参考文献	25

习题 25

第二部分 低频电路模型

第3章 集总参数电路模型 31

3.1 概述 31

3.2 电路中的传导干扰 31

 3.2.1 戴维南定理和诺顿定理 31

 3.2.2 无源二端网络 33

 3.2.3 有源电路的二端口模型 38

 3.2.4 多端口网络 40

 3.2.5 电力系统中的传导干扰举例 41

3.3 电磁场在电路中引起的干扰 46

 3.3.1 磁场耦合 46

 3.3.2 电场耦合 51

 3.3.3 低频电磁场耦合 55

 3.3.4 减小低频干扰耦合的一般方法 57

 3.3.5 减小电容耦合的具体方法 58

 3.3.6 减小电感耦合的具体方法 60

3.4 公共接地回路引起的干扰 61

3.5 电路模型的高频推广 64

参考文献 65

习题 66

第三部分 高频宽带耦合模型

第4章 线天线的辐射模型 73

4.1 概述 73

4.2 时谐辐射电磁场 74

 4.2.1 总论 74

 4.2.2 单元辐射 75

 4.2.3 分布源辐射 78

 4.2.4 环境中存在其他物体时的偶极子辐射 86

 4.2.5 磁场分量的估算 98

4.3 频域电磁场的接收与散射 98

 4.3.1 一般出发点 98

 4.3.2 细导线近似解 98

4.4 电场时域积分方程 100

 4.4.1 概述 100

4.4.2	微积分方程	100
4.4.3	有损耗地面上的导线	101
4.4.4	时间域细导线的 EFIE 数值解	102
4.5	奇点展开法	102
4.5.1	基础	102
4.5.2	SEM 法的数学表述	104
4.5.3	天线电流的 SEM 表示	105
4.5.4	散射电流的 SEM 表示	106
4.5.5	辐射场的 SEM 表述	106
4.5.6	散射场的 SEM 表述	107
4.5.7	SEM 法应用于天线近似分析举例	107
	参考文献	110
	习题	113
第 5 章	孔缝辐射、绕射和散射模型	117
5.1	概述	117
5.2	经孔缝透入的电磁场	118
5.2.1	标量绕射理论	118
5.2.2	一般矢量场绕射	123
5.2.3	远区矢量场的绕射	125
5.2.4	孔缝积分方程	126
5.2.5	孔缝的等效区间	129
5.3	长天线辐射	131
5.4	低频近似	131
5.4.1	偶极矩	131
5.4.2	孔缝极化能力	132
5.5	孔缝的宽带和瞬态响应	134
5.5.1	宽带响应	134
5.5.2	时域直接计算解	136
	参考文献	136
	习题	137

第四部分 传输线模型

第 6 章	传输线理论	143
6.1	传输线模型概述	143
6.1.1	集总的和分布的电路参数	143
6.1.2	集总和分布激励源	144
6.1.3	双导体和多导体系统	144

6.1.4	传输线和天线的响应模式	145
6.1.5	双导体系统的电报方程	146
6.2	频域响应	148
6.2.1	双导体传输线电报方程的解	148
6.2.2	集总源激励的传输线	152
6.2.3	传输线终端:电压反射系数	153
6.2.4	端接传输线的一般解	153
6.2.5	有限长的有负载传输线上的响应	155
6.2.6	多导体传输线	157
6.2.7	多导体传输线的 BLT 方程	165
6.2.8	多导体传输线的链路参数	167
6.2.9	多导体传输线模型应用举例	167
6.3	时域传输线响应	168
6.3.1	时谐激励源	168
6.3.2	非正弦传输波	168
6.3.3	频域和时域的解析变换	169
6.3.4	频域和时域解的数值变换	170
6.3.5	时域的电报方程数值解	170
6.3.6	时域的电感和电容终端	171
6.3.7	时域的 Bergeron 图解法	172
6.3.8	电磁瞬态响应编程(EMTP)	176
6.4	传输线电感参数确定	178
6.4.1	电感测量	178
6.4.2	电感参数的理论分析	179
6.5	传输线电容参数的确定	183
6.5.1	电容参数的测量	183
6.5.2	电容参数的理论分析	184
6.5.3	静态电容的计算	185
	参考文献	193
	习题	195
第 7 章	应用传输线理论分析电磁场的耦合	202
7.1	概述	202
7.2	双线传输线	204
7.2.1	具有外激励源的电报方程推导	205
7.2.2	电报方程的其他形式	209
7.2.3	传输线电流和电压解	212
7.2.4	BLT 方程——负载电流和电压的解	213
7.2.5	平面波激励下的负载响应	213

7.2.6	传输线响应举例	215
7.3	理想导电平面上的单导线	217
7.3.1	电报方程推导	217
7.3.2	用电报方程求负载上的响应	221
7.3.3	平面波激励下的负载响应	222
7.3.4	耦合作用评估	223
7.3.5	非平面波激励的负载响应	224
7.4	高谐振结构分析	227
7.4.1	单线传输线	227
7.4.2	多导线推广	229
7.5	传输线辐射	230
7.5.1	互易原理	230
7.5.2	传输线辐射	231
7.5.3	传输线辐射举例	232
7.6	传输网络	233
7.6.1	用戴维南定理分析网络	234
7.6.2	网络 BLT 方程推广	236
7.7	有非线性负载的传输线	237
7.7.1	Volterra 积分方程	237
7.7.2	具有非线性负载的单导体传输线举例	238
	参考文献	240
	习题	242
第 8 章	损耗大地上的传输线效应	247
8.1	概述	247
8.2	电报方程推导	247
8.2.1	全电压方程	248
8.2.2	散射电压方程	251
8.2.3	导体的终端	252
8.2.4	电报方程的解	253
8.3	单位长传输线参数	253
8.3.1	传输线等效电路	253
8.3.2	接地阻抗的频域解形式	254
8.3.3	接地阻抗的时域解形式	256
8.4	平面波的传输与反射	257
8.4.1	平面波在大地的传输与反射	257
8.4.2	大地对瞬态场的反射	261
8.5	地上传输线响应举例	264
8.5.1	大地导电率影响	265

8.5.2	入射角的影响	266
8.5.3	随传输线架设高度变化规律	267
8.6	埋地电缆	268
8.6.1	严格求解外电磁波对埋地电缆的影响	269
8.6.2	传输线近似	271
8.6.3	TL 解的简化近似	272
8.6.4	计算无限长埋地电缆的感应电流响应举例	273
8.6.5	有限长埋地传输线的情形	274
	参考文献	276
	习题	277

第五部分 屏蔽建模

第9章	屏蔽电缆	283
9.1	概述	283
9.2	基本的屏蔽电缆耦合	284
9.2.1	转移阻抗和转移导纳定义	285
9.2.2	Z'_1 和 Y'_1 的相对重要性	285
9.3	电磁场经实圆柱导体屏蔽的耦合	286
9.3.1	转移阻抗	286
9.3.2	转移导纳	287
9.4	编织网屏蔽模型	287
9.4.1	电磁场在编织网屏蔽上的透射和绕射	288
9.4.2	单孔激励	289
9.4.3	多孔激励	290
9.4.4	孔缝极化方程	291
9.4.5	用编织参数表示编织网屏蔽的转移阻抗和转移导纳特性	292
9.4.6	编织网屏蔽转移阻抗公式改进	293
9.4.7	磁场轴向分量效应	299
9.4.8	编织网屏蔽转移导纳的其他表达方式	300
9.5	编织网电缆响应计算	300
9.5.1	外部传输线	300
9.5.2	内激励源	302
9.5.3	内负荷响应	302
9.5.4	屏蔽电缆系统举例	303
9.6	屏蔽不连续的电缆	305
9.6.1	简介	305
9.6.2	电缆连接器	308
9.6.3	尾线终端	309

9.6.4	不连续屏蔽	309
9.6.5	屏蔽不连续的电缆举例	309
	参考文献	313
	习题	314
第 10 章	屏蔽	316
10.1	概述	316
10.2	屏蔽的一般概念	316
10.3	屏蔽机制	318
10.3.1	静态场屏蔽	318
10.3.2	时变场屏蔽:涡流屏蔽	322
10.3.3	频率依赖性屏蔽总结	329
10.4	体屏蔽	329
10.4.1	封闭、均匀金属导体屏蔽	329
10.4.2	封闭金属网屏蔽	336
10.5	非平面波的屏蔽	338
10.5.1	近场屏蔽概述	338
10.5.2	两个环路间的屏蔽	338
	参考文献	340
	习题	341
附录 A	物理常数表	342
附录 B	矢量分析和函数	344
附录 C	单位长度线参数	347
附录 D	接地电阻参数	351
附录 E	同轴电缆和连接器数据	354

第一部分
开篇语

第一卷
卷一