



电力科技专著出版资金资助项目

电磁兼容问题的 计算机模拟与仿真技术

周佩白 鲁君伟 傅正财 杜亚平 著



中国电力出版社
www.cepp.com.cn



电磁兼容问题的 计算机模拟与仿真技术

周佩白 鲁君伟 傅正财 杜亚平 著

电力科技专著出版资金资助项目



中国电力出版社

www.cepp.com.cn

内 容 提 要

电磁兼容问题已发展到必须在设计阶段解决,定量计算已不可避免。本书应用电磁场理论及数值方法定量分析计算电磁兼容问题,这在当前的教学、研究和生产中都是极为迫切需要的内容。在简明扼要地归纳了电磁场、电磁兼容的基本理论及多种数值计算方法的基础上,着重介绍作者们多年来结合实际问题所做的研究工作。书写的指导原则是力求物理概念清晰、方法具体可行,不但有实例而且配有相应的计算程序(附光盘),便于读者领会。也补充了一些常规书中未涉及的方法,如时域有限元法、并行算法等。到目前为止尚未见同类书籍出版。全书包括正文六章及两个附录(公式及程序):第一章,电磁兼容原理与建模;第二章,电磁兼容问题的数值计算方法;第三章,多导体传输线及干扰;第四章,低频电磁干扰的分析;第五章,高频电磁干扰的分析;第六章,脉冲电磁干扰的分析。

本书可作为电类专业高年级本科生、研究生的教材,也可供高校教师、工程技术和研究人员(包括强电、弱电、电磁兼容及建筑行业)等参考。

图书在版编目(CIP)数据

电磁兼容问题的计算机模拟与仿真技术/周佩白等著. - 北京:中国电力出版社, 2006
ISBN 7-5083-3654-2

I. 电… II. 周… III. ①电磁兼容性-计算机模拟-高等学校-教材 ②电磁兼容性-计算机仿真-高等学校-教材 IV. TN03

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2005) 第 118939 号

中国电力出版社出版、发行

(北京三里河路 6 号 100044 <http://www.cepp.com.cn>)

汇鑫印务有限公司印刷

各地新华书店经售

*

2006 年 2 月第一版 2006 年 2 月北京第一次印刷
850 毫米 × 1168 毫米 32 开本 9.375 印张 236 千字 4 插图
印数 0001—3000 册 定价 23.50 元

版 权 专 有 翻 印 必 究

(本书如有印装质量问题,我社发行部负责退换)



电磁兼容 (EMC—Electromagnetic Compatibility) 问题是近几十年来迅猛发展的一门交叉性学科。从实用性来看,如不解决,已阻碍国际、国内贸易及社会的可持续发展;从科学性来看,它提出了许多挑战性的、多学科的研究问题。国内、外已有许多专著、论文、定期的杂志和专业会议专门讨论此问题,但至今尚未在国内见到专门从电磁学的数值计算方面研究电磁干扰和消除干扰问题的专著。本书吸收了作者们多年来在这方面的研究成果,可以认为是第一本着眼于从场的分析方法讨论设备或系统在设计阶段尽早从 EMC 的角度满足要求的思路及方法的书籍。所以本书包括的范围较宽,从电磁场、电磁兼容建模的基本概念,各种数值分析方法到不同频率段的电磁干扰的分析。数值方法中除了有时域有限差分法以外,还包含时域有限元法、谐波平衡有限元法等很少在其他书中介绍的方法。在计算技术方面介绍了单指令多数据流的并行算法及可视化技术。涉及的物理问题有工频大电流母线周围的磁场、开关电源用变压器、天线及散热器的发射、高频电缆辐射的抑制、导线间的串扰、雷电电磁场在建筑物内的分布、静电放电等具体问题,而且提供部分可直接应用的程序。本书着重于概念、思路及应用的叙述,并注重于用实测对数值计算做校核。但由于电磁兼容涉及的面很深广,而本书作者掌握的知识、所做的工作都非常有限,此书涉及的是肤浅的表面,只能是抛砖引玉而已。

由于作者的水平有限,错误、不当之处难免,恳请读者提出宝贵意见。特别盼望国内在电磁兼容的研究方面已做了大量工作的同行们不吝赐教。全书共分六章:第一章,电磁兼容原理与建

模；第二章，电磁兼容问题的数值计算方法；第三章，多导体传输线及干扰；第四章，低频电磁干扰的分析；第五章，高频电磁干扰的分析；第六章，脉冲电磁干扰的分析。

有关部分基础程序在所附光盘中，以便读者可直接拷贝到相关的软件平台上应用。

第一章的第1、2节，第二章的第1节，第三章及第六章的第1、3、5节由周佩白写；第一章的第3、4节，第二章的第2、3、4、5节，第四章的第1、2节，第五章及第六章的第2节由鲁君伟写；第四章的第3、4节及第六章的第4节由傅正财和杜亚平写。全书由周佩白负责整理及统稿。

感谢马乃祥教授促成此书的出版及给予的宝贵意见；感谢南京航空航天大学的王世山博士协助编写多导体传输线的串扰的程序；感谢澳大利亚格理菲思大学的研究助理段晓协助鲁君伟的英文手稿的翻译工作。

感谢中国电力出版社给予出版基金的资助，特别感谢《电力设备》编辑部陈书贵主任对本书的出版发行工作给以的指导和帮助，也感谢作者的家属们对本工作的支持。

本书适合于高等院校研究生、高年级学生作为教材或参考书，也可供教师、工程技术人员使用。

作者

2005年3月



Preface

Electromagnetic Compatibility (EMC) is a fast growing area of science and technology. From the practical application point of view, if the EMC problems are not solved properly, it will affect the international and domestic business trading, the progress of the society and influence the health of people. The EMC problems have been paid much more attention by all societies and communities in the world due to its complexity and challenging problems. Many books, journals, magazines and Conferences are concentrating to discuss this subject. But in China, there has not been a published book classify the EMC problems by means of the numerical computation based on the electromagnetic field concepts. This book absorbs the research results of the authors, and may be regarded as the first book to classify the EMC problems in the design stage of devices or systems to satisfy the EMC standard by means of electromagnetic field analysis and computer modeling.

The book covers broad areas of know ledge, including the basic concepts of electromagnetic fields, the computer modeling techniques for electromagnetic compatibility problems and the numerical analysis methods, especially some of the methods that are very useful to solve the EMC problems such as the time domain FEM and the harmonic balance FEM that are not mentioned in other numerical calculation books. In the aspect of computational technology, the high performance parallel computation by cluster of personal computers and the visualization techniques are introduced.

The practical problem discussed in the book includes the magnetic

fields produced by current bus in power frequency, the radiation by antenna, heat sink, and by high frequency cable, cross talk in transmission lines, current and field distribution in building caused by lightning stroke and the characteristic of electro static discharge. Further more, the authors pay great attention to the Comparison between the numerical results and the measurement results.

Compared to the big range of EMC problems, the authors can only provide some limited application problems and the surface of this area. Because the knowledge of the authors are not consummate enough, they would appreciate the remarks, discussions and suggestions from all of the researchers working in this area.

Enclosed in the book is one CD, which includes some computer codes, the derivation of some equations and the materials causing the text tedious.

The book is divided into 6 chapters:

Chapter 1 Principle of Electromagnetic Compatibility (EMC) and Modeling

Chapter 2 Numerical Methods for EMC

Chapter 3 Multi – Conductor Transmission Line and Interference

Chapter 4 Electromagnetic Interference in Low Frequency

Chapter 5 Electromagnetic Interference in High Frequency

Chapter 6 Electromagnetic Interference by Pulse

The book is designed for the graduate students and senior undergraduate students at universities majoring in electrical and electronic engineering as textbook and the related engineers as reference book.

The sections 1, 2 of Chapter1, section 1 of Chapter2, Chapter3, sections 1, 3, 5 of Chapter6, are written by Peibai ZHOU; the sections 3, 4 of Chapter1, the sections 2, 3, 4, 5 of Chapter2, the sections 1, 2 of Chapter4, the Chapter5, and the section 2 of Chapter6 are written by Junwei LU; the sections 3, 4 of Chapter4 and the section 4 of Chapter6

are written by Zhencai FU and Yapin DU. All of the book is re – organized and revised by Peibai ZHOU.

Thanks for Professor Naixiang MA helps to bring about the publication of this book and many good remarks. Dr. Shanshi WANG, working in Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, who wrote the code of the cross talk in multi – conductor lines and the research asistant Xiao DUAN of Griffith University helped the translation of Junwei LU’ s English manuscripts.

Thanks for the financial support of the publication by the funding of China Electric Power Press, especially the detailed help from the Director of Electrical Equipment Editorial Dept. Shugui CHEN. Also thanks for the support of the family of the authors.

Authors 2005, March

目 录

前言

第一章 电磁兼容原理与建模

1.1 电磁兼容基本概念	1
1.1.1 定义及定量单位	1
1.1.2 电磁干扰源、干扰性质、干扰途径和 敏感设备	3
1.1.2.1 干扰源	3
1.1.2.2 敏感设备	5
1.1.2.3 干扰的耦合方式	6
1.1.2.4 电磁干扰的模式	8
1.1.2.5 干扰的耦合途径	9
1.1.3 干扰信号的时—频域特性及转换	10
1.1.3.1 周期性函数的傅里叶变换	10
1.1.3.2 非周期性干扰信号的频谱分析	11
1.1.3.3 脉冲信号的傅里叶积分	13
1.1.3.4 脉冲信号的快速时频域转换	16
1.2 电磁兼容问题中的场的概念	18
1.2.1 场的分类及特性	18
1.2.1.1 静电场与恒定磁场	19
1.2.1.2 准静态电场和磁场	19
1.2.1.3 电大与电小	20
1.2.1.4 准静态电流场(涡流场)	21
1.2.1.5 平面电磁波	22

1.2.2	辐射场的近区与远区	23
1.2.2.1	偶极子源	23
1.2.2.2	高频偶极子的近场与远场	24
1.3	EMC 问题的建模技术	27
1.3.1	明确 EMC 模拟的目的	28
1.3.2	正确把握问题所属的电磁场性质	29
1.3.2.1	准静态场技术	29
1.3.2.2	扩散场技术	29
1.3.2.3	全时域波技术	29
1.3.2.4	谐波平衡技术	30
1.3.3	严格剖析问题的空间维数	30
1.3.3.1	一维模型	31
1.3.3.2	二维模型	31
1.3.3.3	三维模型	31
1.3.4	计算方法的选择	32
1.3.4.1	时域有限差分法	33
1.3.4.2	有限元法	34
1.3.4.3	矩量法	34
1.3.5	EMC 模型中的元素	35
1.3.5.1	干扰源	35
1.3.5.2	耦合路径的模拟	38
1.3.5.3	受干扰对象	38
1.3.5.4	试验的配合	38
1.3.6	EMC 模型的实现	38
1.3.6.1	模型的几何问题	38
1.3.6.2	模型的完整空间的问题	39
1.4	有关商用软件包的介绍	39

第二章 电磁兼容问题的计算高模拟技术

2.1	数值分析的基本原则	45
-----	-----------------	----

2.1.1	场域的离散化处理	46
2.1.1.1	常数单元	47
2.1.1.2	线性单元	47
2.1.1.3	局部坐标	49
2.1.1.4	二次及高次单元的形状函数	51
2.1.2	误差最小原理	53
2.1.2.1	算子方程及算子性质与解的关系	53
2.1.2.2	变分原理	55
2.1.2.3	加权余数原理	56
2.1.3	区域元法及边界元法	57
2.1.3.1	区域元法	58
2.1.3.2	边界元法	58
2.1.4	数值模拟的误差讨论	60
2.1.4.1	误差的定义及类别	60
2.1.4.2	数值模拟结果的校核	61
2.2	时域有限差分法	62
2.2.1	二维空间的时域有限差分法	62
2.2.1.1	时域有限差分法的空间离散	63
2.2.1.2	时域有限差分法的时间离散	65
2.2.2	三维空间的时域有限差分法	66
2.2.3	吸收边界条件	68
2.2.4	完全匹配层及吸收边界	71
2.2.5	内部源和外部源	73
2.3	有限元法	75
2.3.1	用于标量和矢量函数的有限元形状函数	75
2.3.1.1	有限元的节点元素	75
2.3.1.2	有限元的边界元素	76
2.3.2	静态和准静态场的有限元仿真	76
2.3.3	用于谐波和非线性电磁场问题的谐波平衡 有限元法	77

2.3.4	频域有限元法	80
2.3.4.1	开放区域的亥尔姆霍兹方程	80
2.3.4.2	微带传输线有限元法的实现	80
2.3.5	时域有限元法	81
2.3.5.1	一维波动方程	81
2.3.5.2	二维波动方程	82
2.3.5.3	有损耗情况下的波动方程	83
2.3.6	Newmark- β 法	85
2.3.6.1	Newmark- β 法的标准矩阵方程	85
2.3.6.2	稳定性的评估	86
2.3.7	吸收边界条件及理想匹配层条件	86
2.3.8	远场的计算	87
2.4	矩量法	87
2.4.1	简介	87
2.4.2	矩量法的矩阵结构及解	88
2.4.3	矩量法解积分方程	92
2.5	EMC 模拟的高性能并行计算和可视化	92
2.5.1	高性能计算简介	92
2.5.2	使用集群式并行编程的时域有限差分法	93
2.5.2.1	并行代码结构	94
2.5.2.2	计算模型和激励	94
2.5.2.3	计算结果	96
2.5.3	计算模拟结果的可视化	97
2.5.3.1	计算机可视化	97
2.5.3.2	科学可视化	97
2.5.3.3	具有动画图像的印刷电路板平面波导 模型实例	99
2.5.3.4	协作互动可视化	100

第三章 多导体传输线及干扰

3.1 引言	106
3.2 双导线传输线	107
3.2.1 双导线传输线的基本假设	107
3.2.2 均匀双导体传输线的信号传输特征	108
3.2.2.1 均匀平行传输线的原参数	108
3.2.2.2 均匀无损传输线中的电压电流波	109
3.2.2.3 双导线传输线终端的折反射及匹配	112
3.2.3 干扰源位于任意位置时沿线电压电流 的分布	113
3.3 电缆在外电磁场中受的干扰	115
3.3.1 转移阻抗与转移导纳	117
3.3.1.1 转移阻抗与转移导纳的物理意义	117
3.3.1.2 转移阻抗与转移导纳的定义	118
3.3.2 共模干扰与差模干扰之间的转换	120
3.4 多导体传输线的分析方法及其特性	121
3.4.1 均匀介质中的无损多导体传输线	121
3.4.2 不均匀介质中的无损多导体传输线	122
3.4.2.1 模式理论及多导体传输线的解	123
3.4.2.2 传播常数 Γ 的确定	126
3.5 导线间的串扰	127

第四章 低频电磁干扰的分析

4.1 开关电源变压器中的谐波分析	133
4.1.1 应用于磁路的谐波平衡分析的概念	133
4.1.2 由电流源产生的磁场的谐波平衡 有限元法	134
4.1.2.1 由电流源激励产生的磁场的谐波平衡 有限元矩阵方程	134

4.1.2.2	电流源激励的开关电源的磁场分析	135
4.1.2.3	电压源激励的非线性磁场系统的谐波 平衡有限元法	136
4.2	用于开关电源的高频同轴变压器的屏蔽及耦合 效应	139
4.2.1	带屏蔽的高频同轴变压器结构	139
4.2.2	基于边界元法的数值模拟	141
4.2.3	耦合效率的验证	143
4.3	母线排周围的工频磁场及屏蔽	145
4.3.1	母线排周围的磁场计算	145
4.3.1.1	空气绝缘母线排周围的磁场	147
4.3.1.2	空气绝缘母线槽周围的磁场	149
4.3.1.3	全封闭母线槽周围的磁场	150
4.3.2	母线槽的屏蔽	152
4.3.2.1	工频磁场的屏蔽机理	153
4.3.2.2	不同形状的屏蔽盒的屏蔽率	157
4.3.2.3	金属槽的有关参数对屏蔽效果的影响	163
4.4	变电所工频磁场分布的数值计算	167
4.4.1	直导线产生的磁场	168
4.4.2	变电所工频磁场计算	168
4.4.3	计算实例及与测量值的比较	168

第五章 高频电磁干扰的分析

5.1	辐射问题的基本概念	178
5.1.1	线天线	178
5.1.1.1	赫兹偶极子	178
5.1.1.2	天线阵列	178
5.1.1.3	环天线	179
5.1.2	印刷板(平板)天线	180
5.1.3	三维空间结构的天线	182

5.2 印刷电路板的辐射	182
5.2.1 有关噪声的特性	182
5.2.1.1 模拟电路的问题	183
5.2.1.2 某些逻辑电路家族的问题	184
5.2.1.3 印刷电路板——“电子设备的基石”	185
5.2.1.4 元件与电磁兼容	186
5.2.2 印刷电路板的天线仿真	187
5.2.3 印刷电路板内部的电磁兼容	188
5.2.3.1 引线和印刷电路板的走线	188
5.2.3.2 差模辐射	189
5.2.3.3 共模辐射	189
5.2.3.4 高频印刷电路板	190
5.3 CPU 散热器辐射的模拟	191
5.3.1 CPU 散热器的电磁兼容模型	192
5.3.1.1 传统的散热器模型	193
5.3.1.2 英特尔 P4 处理器散热器	193
5.3.2 基于频域有限元法的 CPU 散热器模拟	194
5.3.2.1 两个接地点的传统散热器模型	195
5.3.2.2 四个接地点的传统散热器模型	196
5.3.2.3 P4 处理器的散热器模型	197
5.4 高频电缆辐射的抑制	199
5.4.1 用于抑制电磁干扰的铁氧体磁环	199
5.4.2 带屏蔽磁环的电缆的计算模型	200
5.4.3 S 参数的计算	201

第六章 脉冲电磁干扰的分析

6.1 引言	205
6.2 用 FETD 分析变压器绕组波过程	206
6.2.1 时域有限元法对色散传输线的波过程分析	207
6.2.2 高压变压器绕组的无损传输线模型	208

6.2.3	数值解的稳定性	211
6.2.4	某个典型变压器绕组中的波过程	211
6.3	建筑物直接遭受雷击时的干扰计算	213
6.3.1	雷电流在建筑物钢结构内的分布	213
6.3.1.1	钢构件的等值参数模型及离散化原则	214
6.3.1.2	电容和电感参数的计算	216
6.3.1.3	雷电流频率离散点数的选取	216
6.3.1.4	计算结果分析	218
6.3.2	磁场计算	220
6.3.3	电缆感应电压的计算	221
6.4	建筑物金属构架对近区雷击的磁场屏蔽效果	221
6.4.1	数值计算及其实验验证	221
6.4.2	金属构架的磁屏蔽效果	224
6.5	静电放电	226
6.5.1	静电放电的特性	226
6.5.2	静电放电产生的辐射场	227
6.5.3	静电放电的模拟方法	228
6.5.4	抑制静电对印刷电路板的干扰	229

附录 I	有关计算程序	233
目录		233
1.1	见软件内	233
2.1	2-D 时域有限差分法程序 (FDTD)	233
2.2	2-D 有限元法程序 (FEM)	235
2.3	在并行系统及 C 语言环境下运行 2DFDTD—Parallel	237
3.1	该程序用于计算 n 根平行导线间的串扰	238

附录 II	有关公式 (编号与章节号对应)	239
第二章		239

2.2 时域有限差分法	239
2.2.1 有限差分的基本概念	239
2.2.1.1 空间函数的中心有限差分近似	239
2.2.1.2 拉普拉斯方程的中心有限差分近似	241
2.3 有限元法	242
2.3.1 有限元的各种离散单元	242
2.3.2 静态和准静态场的基于有限元法的仿真	243
2.4 矩量法	248
2.4.1 矩量法理论	248
2.4.2 Pocklington 积分方程	250
2.4.3 Hallen 积分方程	252
2.4.4 基函数和检验函数	253
第三章	255
3.2 传输线的等值网络	255
3.3 同轴电缆参数计算	256
第四章	257
4.1 用于谐波和非线性电磁场问题的谐波平衡 有限元法	257
4.2 一段直导线周围的磁场	260
第五章	262
5.1 辐射问题的基本概念	262
5.1.1 赫兹偶极子的辐射公式	262
5.1.2 印刷板(平版)天线(二维空间问题)	267
5.4.1 基于铁氧体磁环模型的二维 BOR 时域 有限差分法	268
5.4.2 商用铁氧体磁环中空气缝隙对扼流的影响	272
第六章	273
6.2 基于 Newmark - β 法的矩阵方程的解	273