



国际电气工程先进技术译丛

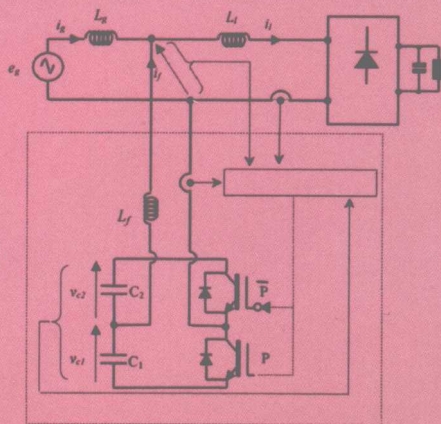


电力系统 中的电磁兼容

**Electromagnetic
Compatibility in
Power Systems**

(意) Francesco Lattarulo 主编
李庆民 李清泉 主译
娄杰 王辉 王冠 参译

 机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



国际电气工程先进技术译丛

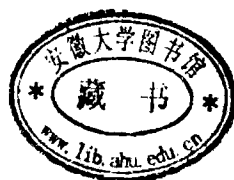
电力系统中的电磁兼容

Electromagnetic Compatibility in Power Systems

(意) Francesco Lattarulo 主编

李庆民 李清泉 主译

姜杰 王辉 王冠 参译



机械工业出版社

本书汇集了国际上电力系统电磁兼容领域的最新研究成果,包括雷电放电与感应、地磁暴效应、电力传输线电磁干扰、屏蔽结构与性能、人体静电学、电能质量评估、谐波传播与潮流分析、谐波治理等多个前沿研究专题。本书注重基础理论与工程应用相结合,表述严谨,图文并茂。

本书适合于从事电力系统电磁兼容研究的科研人员、研究生、技术开发与工程设计人员阅读,也可作为电磁兼容领域教师与研究生的专业教材。

© 2007 Elsevier Ltd. All rights reserved. This work is protected under copyright by Elsevier Ltd.

This first edition of Electromagnetic Compatibility in Power Systems is published by arrangement with ELSEVIER LTD, The Boulevard, Langford Lane, Kidlington, Oxford, OX5 1 GB

本书中文简体字版由 Elsevier 授权机械工业出版社独家出版。未经出版者书面允许,本书的任何部分不得以任何方式复制或抄袭。版权所有,翻印必究。

本书版权登记号:图字 01-2007-5829 号

图书在版编目(CIP)数据

电力系统中的电磁兼容/(意)莱塔儒勒(Lattarulo, F.)主编;李庆民,李清泉主译.—北京:机械工业出版社,2008.7

(国际电气工程先进技术译丛)

书名原文:Electromagnetic Compatibility in Power Systems
ISBN 978-7-111-24402-8

I. 电… II. ①莱…②李…③李… III. 电力系统—电磁兼容性
IV. TM71

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008)第 094418 号

机械工业出版社(北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

责任编辑:付承桂 责任校对:申春香

封面设计:马精明 责任印制:李妍

北京中兴印刷有限公司印刷

2008 年 8 月第 1 版第 1 次印刷

169mm×239mm·18 印张·350 千字

0001—4000 册

标准书号:ISBN 978-7-111-24402-8

定价:40.00 元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

销售服务热线电话:(010)68326294

购书热线电话:(010)88379639 88379641 88379643

编辑热线电话:(010)88379178

封面防伪标均为盗版

译者序

电磁兼容既是一门独立的学科研究领域，又具有学科交叉的突出特点，它渗透到工程科学的各个技术领域。目前关于电磁兼容的研究与应用显得愈加广泛和重要。随着电力网络的大规模发展，人们对系统运行安全、电能质量及供电可靠性提出了更加苛刻的新要求，促使电力系统电磁兼容这一新兴的分支交叉学科方向在近几年获得了迅速发展，创新性的研究成果不断涌现。

以前出版的电磁兼容教材或参考书，多注重讲述一些最基本的原理和分析方法，这对于普通高等教育是足够的，但并不能满足新形势下人们对电磁兼容设计与开发技术的迫切需要。非常遗憾的是，目前国内尚没有一本系统论述电力系统电磁兼容领域最新研究成果的教材或专著，而译者着力翻译的这本书正好填补了这一空白。

本书尽管看起来是若干专题研究的合集，但却涵盖了电力系统电磁兼容领域的各个最前沿研究分支。本书选材与编写饱含挑剔眼光和创新意识，致力于论述与以前出版物不同的研究主题和分析方法，涉及雷击放电感应、地磁暴效应、人体静电学、电能质量等方面的最新研究成果，以满足现代电力系统对电磁兼容问题研究的重要需求。同时，本书也可作为电力系统电磁兼容领域研究生的专业教材。

原书中一些明显的笔误或印刷错误，在翻译过程中已经改正但有些未加以说明。原书的部分符号不符合我国的使用习惯或国家标准，为保持与原书一致，翻译过程中没有加以改变。

本书的翻译工作由李庆民、李清泉、娄杰、王辉、王冠共同完成，其中李庆民负责翻译第1、3、4章以及前言、目录，李清泉负责翻译第2、6章，娄杰负责翻译第5、8章，王辉负责翻译第9、11章，王冠负责翻译第7、10章，最后由李庆民和李清泉完成统一校稿。

本书的翻译得到了国家自然科学基金（项目批准号：50577039）的资助；在翻译过程中，刘洪顺、段玉兵、李长云、龚宇雷、邹亮、吴明雷、王伟、秦丽伟、吕婷婷、马元、孟君、焦伟等研究生做了大

IV

量辅助工作，在此一并表示谢忱。

限于译者水平所限，书中难免存在一些错误或疏漏之处，恳请广大读者批评指正。译者联系方式：电子邮箱 lqmeee@sdu.edu.cn。

译 者

2008 年 3 月 25 日

于山东大学茗香斋

原 书 前 言

人们基于人工和自然物理现象进行了很多实际的开发与应用, 尽管同时也会产生一些令人不愉快的结果。这些结果往往以功能失常或故障的形式出现, 或表现为设备零部件或系统的最终损坏, 或对周围环境产生不良危害。迄今为止, 人们刻意开发或无意发现的许多自然能源一方面正在发挥积极的作用, 另一方面也在产生着一些负面效应。事实上, 一种有效的传输媒质极有可能威胁或污染到周围的受体, 因为其影响程度非常容易超过受体的预定耐受极限。

特别值得注意的是, 最近几十年里电子元器件与线路朝着超小型化和高灵敏度方向迅速发展, 但因它们时常运行在靠近强大电磁干扰源的环境内, 使得人们对电磁兼容 (EMC) 的研究兴趣与日俱增。电磁兼容是在以评估和减轻电磁干扰为目的的科学实践中被系统化和发展起来的。没有具体理论正是电磁兼容的特点, 它更多的是作为一个科学向导, 将许多已被明确表达和详细阐释的原理、理论、模型与方法, 有效应用于邻近的或交叉应用科学领域。电磁兼容汇集并有机组合了许多相关学科中的宽泛概念与方法, 目前已成为高等教育的基本内容, 它完全有资格作为一种科学学说或一门独立学科。

另一方面, 从事电磁兼容学科研究和教材编写工作的专家也非常清楚所面临的重重困难。鉴于对电磁兼容问题长期持久的研究兴趣, 人们希望能编写一本简单实用的教材或手册, 而事实上这并非一项简单的工作。除了为愿意在电磁兼容领域有所建树的学生提供阐述基本背景问题的教科书外, 我们最应该共同完成的一个有重要实际意义的出版活动, 就是能出版相关的专题研究论文或论文集。这些出版的研究资料是为那些工作在电磁兼容研究最前沿的研究生、科研人员和工程设计人员而编写的。因此, 编辑好此类学术出版物的重要前提是具有挑剔眼光和创新意识。

与其它普通的电磁兼容参考书不同, 这本书将致力于讨论与以前不同的研究主题, 或针对传统方法进行重新表述。基于这样一个普通动机, 激励本书作者汇集了他们数年来参与研究项目的许多最新成果, 以满足电力系统对有关电磁兼容问题研究的重要需求。这些研究内容将以章节的形式出现, 其主要论点概述如下。

第1章主要介绍雷电预击穿过程, 并确认其在建筑结构的保护系统可靠性研究方面的重要地位。甚至连辅助保护系统——主要用于减轻对系统内部受体的感应影响, 其运行效率也最终取决于雷电冲击特性。因此, 应该特别关注目前被忽

视的伴随在这个过程中的电动力学机制，因为传统上用于空气终端布置的纯粹静电学分析方法，被证明只是部分有效。

作为上述材料的补充，第2章主要分析雷电回击的物理过程以及相关的雷电电磁脉冲（LEMP）问题。此处，雷击闪络对附近水平架空线路等一般受体的感应影响，目前正在研究当中。令人惊讶的是，出现的耦合特征中雷电电磁脉冲的准静态分量并不明显，尽管在雷电回击通道模型中已作此假设。阐明这样一个未被发现的物理特征，就要从研究潮湿大地表面、放电通道以及空中雷雨云等构成的互连放电系统的综合电磁特性着手。

地磁暴对输电线路引起的电磁干扰是第3章的分析主题。有待研究的特殊威胁是对电力系统的非正常励磁，以及因此产生的一系列对系统安全和供电质量有害的结果。在这里作者概略介绍了基于静止无功补偿器的适当配置以有效减轻地磁暴影响的方法。

与第2、3章中将输电线路作为干扰受体进行研究的情况相反，在第4章中输电线路则变成了干扰源。这种情况最易发生在大量公用系统设施密集的独立输送走廊中，此时一条或多条高压（HV）输电线路与地下的天然气管道系统（干扰受体）共存。基于定义的专业术语，已采用简单可靠的“通用方法”对这些干扰进行了理论分析。通过和一些关键实例数据作比较，便于对该方法的一些既定特性进行验证和深入评介。

第5章详细叙述了一般导体类外壳在极暴露情况下屏蔽性能的退化机理，即一个薄壳结构位于准静态磁场内的情况。在其它领域广泛应用的经典椭圆几何学连同磁偶极子理论，被推广应用到小孔附近内部场点的分析中，有时甚至小孔处于荷载状态。这样一个解析起来较为困难的例子，已在多个孤立小孔的情况下获得解决，此时，通过限制在一个二维场空间的辅助数值算法，使得形成孔状结构或栅格的小孔之间的相互影响也能考虑在内。

采用一系列部分电容，第6章给出了一个针对人体的静电学描述，用于电磁兼容分析与应用。人们推荐使用网络分割理论，是因其具有某些特殊优点，即使采用低分割法仍能确保误差在所涉及问题的不确定性范围之内。人体既是极低频（ELF）电场感应效应的干扰受体，又是静电放电（ESD）源。由于直接采用部分电容代替了麦克斯韦系数，使得这一方法对那些从事工程设计和实验研究的人员特别有用。

鉴于当前非线性时变负荷的大规模应用，以及它们与供电系统的相互作用，使得电能质量（PQ）监测成为一项非常复杂的任务，而且显得愈加重要。因此，电磁兼容领域正面临配电单位与用电客户之间责任问题的挑战。在概述电能质量问题、影响电力系统的干扰因素以及相关国际标准之后，第7章描述了一个新的评估程序，能够在公共耦合点以谐波畸变程度来评估电能质量。该方法与其它谐

波评估程序相比具有相同的价值。

为了消除或补偿配电系统的谐波失真,推荐使用线路型脉宽调制(PWM)变换器等前置有源变换器以及有源滤波器。由这些变换器产生的谐波抑制作用,以及系统非理想状态、电网不平衡、死区时间、非典型性延迟等对其控制系统的影响,构成了第8章的主要内容。

第9章应用“虚拟电路法”来模拟前一章中所处理的非理想状态,其实质是采用无源元件来模拟数字控制系统。该方法的价值在于,它对电力部门从事谐波传递研究的技术人员而言显得简单直白。

第10章给出了针对供电系统谐波传播的详尽分析。文中详述了谐波潮流的分析方法,特别涉及无源滤波器设计及其在系统中的安装位置选择问题。同时,文中也提供了个例研究,以更好地评估所提出分析方法的实用价值。

如前一章所述,在供电系统中无源滤波器抑制谐波潮流的有效性,会因失谐而大打折扣,而采用有源滤波器则是更加合理的可选方案。结合微控制器的控制与设计实施问题,第11章分别论述了单相型、三相四线制的并联有源滤波器。

读者慧眼明鉴,大多数章节直接涉及电力线路的重要论题(第2~4章和第7~11章)。事实上,与针对电子产品的更普遍的电磁兼容研究领域类似,需要着力研究这个复杂分布式系统的电磁兼容综合特征。这是因为,仅仅满足单个元件或一个设备次级系统的电磁兼容设计目标,当它们嵌入系统时,并不能保证整个系统的电磁兼容性能符合要求。第5章和第6章的内容与电力线路有间接联系,因为这些线路本身被分别假定为磁场与电场干扰源进行研究。甚至第1章的内容也基本上与一个大型系统有关,该情况下研究的核心是雷击防护问题。再者,本书也做了某些尝试以把各个独立的研究课题贯通起来。第6章中有这方面的最明显例证,即将人体模型作为研究的主要对象,使得一些表面上看来并不相同的电磁兼容问题同时获得了研究和应用,如放射性危害与静电放电分析。

最后应当特别强调的是,一个在沉默中悄然渡过至今的深层动机和热情,驱使作者们编就了这本书。成书过程也表明,依靠在同一个机构工作的研究团队,只要大家努力合作且管理富有成效,合作本身对取得令人满意的结果不无益处。不过,倘若没有来自我们各自家庭的支持以及编辑们的鼓励和帮助,本书将难以付诸出版,对此我谨代表每一位作者,向他们表示衷心感谢。

Francesco Lattarulo
于意大利巴厘市

目 录

译者序

原书前言

第 1 章 分析雷电预击穿现象及其电磁兼容问题的静电学-电动力学混合法 ... 1

1.1 简评	1
1.2 雷雨云静电模型	2
1.3 平面电场	4
1.4 轴向电场	9
1.5 预击穿静电学	13
1.6 预击穿电动力学	17
1.7 本章小结	20

附录 A

A.1 地面场	24
A.2 轴向场 (雷云模型底部以下)	24

附录 B

附录 B	25
------------	----

附录 C

C.1 无空间电荷区的静电学解法	29
C.2 无空间电荷区的电动力学解法	29
C.3 考虑电晕的电场解法	30

附录 D

附录 D	33
------------	----

参考文献

参考文献	35
------------	----

第 2 章 分析雷电电磁学及与附近电力传输线耦合的有效方法 37

2.1 引言	37
2.2 预击穿及击穿过程机理	39
2.2.1 电晕现象	39
2.2.2 浪涌电流的速度	41
2.2.3 土壤特性	42
2.3 天线模型	43
2.4 讨论	45

2.5 回击放电电流	49
2.6 临近线路中的感应电压	52
2.6.1 实际激励场	52
2.6.2 与附近线路的耦合效应	53
2.6.3 应用范例与讨论	56
2.7 本章小结	59
附录 A	61
附录 B	62
参考文献	66
第3章 地磁暴效应对长距离交流输电系统的影响	70
3.1 导言	70
3.2 系统等效模型	71
3.2.1 电力变压器与自耦变压器模型	72
3.2.2 静止无功补偿器模型	73
3.3 协同补偿策略	74
3.4 试验结果	77
3.5 本章小结	80
参考文献	80
第4章 传输线与地下金属结构之间交流干扰的评估方法	82
4.1 导言	82
4.2 系统等效模型	85
4.3 试验结果	90
4.4 本章小结	93
参考文献	94
第5章 准静态磁场渗透金属外壳的关键实例：一种新模型	95
5.1 导言	95
5.2 无载荷短孔径	98
5.2.1 简评	98
5.2.2 集中式磁通渗透	99
5.2.3 分布式磁场渗透	99
5.3 有载荷的短孔径和穿孔薄层	103
附录 A	108

椭圆短孔径的磁链	108
附录 B	110
填充或未填充连续薄层的椭圆孔径的电阻与电感	110
附录 C	112
由不同材料填充的孔径的磁通渗透深度	112
附录 D	113
针对孔径磁链概念的评论	113
参考文献	114
第 6 章 用网络分割法解决涉及人体的电磁兼容问题	116
6.1 引言	116
6.2 网络分割法应用于接触人体的极低频电场	118
6.2.1 对地等效电容的提取法	118
6.2.2 有效静电高度及连接点电流的计算	122
6.2.3 人体在平面上接地	122
6.2.4 人体悬浮在地面上空	125
6.3 应用于静电放电分析的改进人体模型	126
6.3.1 简评	126
6.3.2 对串联参数 R_i 和 L_i 的计算	127
6.3.3 暂态分析	129
6.3.4 接触放电模式	132
6.3.5 气体放电模式	138
6.4 本章小结	140
附录 A	141
平面上方的球体	141
参考文献	141
第 7 章 针对谐波干扰的新电能质量评估标准	145
7.1 电能质量简介	145
7.1.1 干扰种类	146
7.1.2 频率波动	147
7.1.3 电压幅值波动	147
7.1.4 波形变化	148
7.2 电磁兼容标准	149
7.2.1 IEC 谐波标准	150

7.2.2 IEEE 谐波标准	152
7.2.3 IEC 与 IEEE 标准中的谐波限值比较	152
7.3 谐波畸变监测	152
7.3.1 对电压和电流畸变的评估	153
7.3.2 建立新评价指标的需要	153
7.4 非正弦情况下供电系统新的电能质量评估标准	154
7.4.1 基本假设	154
7.4.2 谐波畸变的新评估准则	155
7.4.3 仿真结果	156
7.4.4 实验结果	157
7.5 本章小结	162
参考文献	162
第 8 章 实际线路运行条件下前置变换器系统的设计	165
8.1 引言	165
8.2 基本功能、运行限制与数学模型	167
8.3 基本控制方法	171
8.3.1 相位控制	171
8.3.2 交流电流控制	171
8.3.3 基于双坐标轴的电流控制	172
8.3.4 平均化与线性化方法的应用	173
8.3.5 电压定向控制	174
8.4 先进控制技术	175
8.4.1 无传感器控制技术	175
8.4.2 直接功率控制	176
8.5 基于 PI 的电流控制器设计准则	177
8.6 直流电压控制的设计准则	186
8.6.1 基于 PI 的电压控制	187
8.6.2 基于 PI 的电压控制设计实例	189
8.7 非理想运行条件	191
8.7.1 延迟	191
8.7.2 电网不平衡	192
8.7.3 电网传感器的位置影响	193
8.7.4 LCL 滤波器的被动阻尼	193
8.8 本章小结	193

参考文献	194
第9章 应用伴随网络理论分析功率变换器的线路侧特性	196
9.1 导言	196
9.2 连接于线路的电压型变换器	198
9.3 用“虚拟电路”法建立电流控制的电压型变换器模型	199
9.4 频域内的灵敏度分析	202
9.4.1 基本定义	202
9.4.2 伴随网络理论的应用	203
9.5 基于伴随电路的灵敏度分析：个例研究	205
9.5.1 关于变压器感抗的线路电流灵敏度	205
9.5.2 关于采样延迟的线路电流灵敏度	206
9.5.3 关于 LCL 滤波器的灵敏度分析	207
9.6 本章小结	211
参考文献	211
第10章 工业电力系统设计中的谐波潮流应用	213
10.1 导言	213
10.2 电力系统谐波响应	214
10.3 概率表达式	219
10.4 实例研究	221
10.5 无源滤波器	226
10.6 成本最小的抑制谐波的设计	227
10.7 最优化算法	228
10.8 实例研究	229
参考文献	230
第11章 采用并联型有源滤波器减弱配电线路中的谐波传播	233
11.1 导言	233
11.2 有源滤波器	234
11.3 污染源负载的分类	235
11.4 并联型有源滤波器	238
11.4.1 参考电流的产生	239
11.4.2 p - q 法	240
11.4.3 有源滤波器的交流电流控制	242

11.5 并联型有源滤波器的优化控制方法	245
11.5.1 模糊控制简介	245
11.5.2 模糊逻辑用于并联型有源滤波器的电流控制	246
11.5.3 Nelder-Mead 单纯形优化方法简介	247
11.5.4 Nelder-Mead 优化方法用于有源滤波器三次谐波补偿	250
11.6 实时控制的实现	251
11.6.1 控制代码	251
11.6.2 模糊算法的软件实现	254
11.7 本章小结	255
参考文献	255
中英文对照	258

第 1 章 分析雷电预击穿现象及其电磁兼容问题的静电学-电动力学混合法

(F. Lattarulo, V. Amoroso)

摘要：本章提供了一组辅助性但很重要的知识，这些知识对于在设计中减轻建筑物的敏感电路遭受 LEMP（雷电电磁脉冲）干扰非常有用。即使可在受害设备上安装大型的雷电保护装置，但对次级保护系统的 EMC 设计而言，其前提条件仍然是在主保护系统中应用可靠的指导方法。本章系统地论述了几个方面的内容，并做了仿真分析，最终为研究空中建筑物的拦截效应提供了可靠的估计方法。在本章最后，研究了雷电预击穿阶段的最后瞬间发生的结合过程，同时还介绍了在以前的分析中被忽略的电动力学效应以及静电学本质。再次验证了静电学方法，并将其应用于雷雨云和先导电晕模型中。

1.1 简评

在雷电物理现象中，分级先导的结合过程以及雷击位置，对于安全与电磁兼容问题的研究非常重要。当雷电击中了保护系统或其附近的一个外部点时，在各种传导性和电磁耦合模式中会越来越广泛地涉及敏感型电力与电子元器件。因此，在雷电向大地放电之前，雷电流所呈现的多种实际模式将取决于雷击点的位置。同时，在上述设备所保护的电路中，出现的感应电流和冲击电压的特征也将受到明显影响。

通过观察发现，结合过程与雷击点之间的相互关联，可以解释为什么雷击点总是发生在迎面结合先导的起点与发射位置，该迎面先导由前行的分级先导所引发。但可惜的是，目前还不能预测雷击点的位置，即使结合现象发生在预击穿过程的最后瞬间，此时被击物体的物理性质、几何形状以及周围环境将对结合过程产生影响。被击物体一般是指自然的、人工制造的地面物体或者飞行器。针对第一种类型的受害设备，已经采用了大量的模型和实验方法来评估从建筑物内部的闭合回路中检测到的感应效应。在这些研究中，假设雷电击中的是地面上受保护建筑的金属部分或者外部点（参见 Ianoz, 2003）。针对几个分析案例，在从理论上评价感应机制之前，需对雷电电磁脉冲（LEMP）进行预测，此时应将保护系统的屏蔽特性考虑在内。主保护系统通常指空中的杆、悬垂线或网状导体以及接地装置，接地装置与一系列地下导体的两端点相连。已经证明这样的全金属保护系统能够经受火、爆炸和撞击，还能有效地抵御来自内部的 LEMP。但同时还需

要加装含冲击保护装置在内的次级保护系统（顺便说明，由于一直缺乏科学依据，所以对实验室和商用的非常规保护技术不作讨论）。

评价雷击感应效应，需发生直接或间接的雷击事件，即在主保护系统上或其外部确定雷击点位置。这就意味着已经发生了先导结合过程，它与上边提到的雷击点相对应。通常情况下，间接雷击事件发生的次数越多（相对于直接雷击事件），内部敏感设备遭受永久性故障或者破坏的可能性就越大。设备易受攻击的一个重要原因，就是对分级先导结合过程的物理机制缺少足够的理解。目前人们利用风险评估方法对综合保护系统进行优化设计（Mazzetti, 2003; Horvát, 2004），该方法通常需要借助于概率数学理论。此外，这种方法在本质上是迭代处理的，它首先假定一个综合保护系统，然后评价其发生故障时的相关风险。在获得的风险值降低到设定的风险临界值之前，应对保护系统的设计进行不断完善。有时利用设计保护系统的指导方法不能直接获得可接受风险的函数。因此，保护系统设计的很大一部分工作，就是通过试探性分析来选择合适的空中物体及其位置。针对空中物体布置的优化设计方法，2000年D'Alessandro和Gumley进行了细致分类，总结如下：

- (a) 纯几何形状；
- (b) 网孔宽度；
- (c) 滚动球体；
- (d) 先导进程；
- (e) 聚集体积。

在Horvát (2004) 之后，人们得到的一个较好的设计经验是，首先从上述方法中选择几种用于实际设计 [Horvát 建议采用方法 (a) ~ (c)]，然后将其余方法 [即 (d) 和 (e)] 用于辅助性风险评估。不过，正如其它文献中所述 (Horvát, 2004; Berta, 2005)，不管采用的设计程序与实际解法如何，研究者和用户对预测到的保护效率并不满意。在下文中，分析了出现难点问题的可能原因，并给出了一些重要依据，有利于对研究问题和方法进行修正。此外，在本章中还将广泛应用以静电学和电动力学为基础的基本概念。然而，为避免术语上的误解，这里有必要说明一下。静电源和准静电源是两种不同类型的自由电荷，分别指处于静电平衡状态下的静止电荷以及传导电路中的运动电荷（有电流产生）。在后一种情况下，将会同时出现电力（安培）效应，此时用“库仑”来代替“准静电”更为合适。

1.2 雷雨云静电模型

大气电学的基本研究课题之一就是带电的雷云。了解雷云的静电特性，对于研究雷电前兆现象以及防护问题非常重要。当雷云处于成熟阶段时，这通常表示

分级先导的开始,此时可将雷云分成两个重叠的圆柱区域,分别为主要积聚负电荷的区域(N-区域)以及主要积聚正电荷的区域(P-区域)(Rakov 和 Uman, 2003; Williams, 2003)。在数值上,每个区域积聚的电荷数量约为几十库仑。N-区域在云层下部,所以它对地面表层有很大的静电影响。实际上,由于静电平衡作用,在地面表层上感应的是与N-区域相对应的正电荷。另一个积聚正电荷的区域,位于N-区域的底端,通常被称为P-区域。

地面的电晕现象和高纬度宇宙射线分别产生了位于上述雷云下方和上方的空间电荷。在本章分析中,这种类型的空间电荷可忽略不计,尽管一些研究者将P-区域理解为某些正电荷的积聚效应,认为这些正电荷产生于地面表层的一些尖锐点或边缘的电晕现象中,然后运动到雷云的底端。雷云的高度可达20km,然而在非赤道纬度上,雷云的最低层离地面的高度很少超过2km。在一些特定地域内,云层底端离地面相对较近,相对于雷电总次数而言,这是落地雷发生较多的主要原因。虽然通常情况下观察到的大量雷云,由处于不同成熟阶段的云层聚集而形成,但圆柱形雷云的半径却只有1~5km(实际上这个值可能更小)。这里描述的大气电形态是不稳定的,尤其是强风作用对水泡形成了压力。这种不稳定性很大程度上影响了雷云电荷的分布,同时,在电荷积聚过程中的很多物理现象具有不确定性,鉴于这两个原因,使我们不能对其作更详细的描述,而且采用的静电学模型的复杂程度也受到限制。除此之外,我们很难找到一个有效且使用方便的静电场描述公式,该静电场源由体分布电荷形成。考虑了上述所有情况后,就可以解释为什么要采用一种新解析方法,而这种方法不仅能克服花费较大与耗时较长的数值计算问题的缺点,还能更好地帮助我们理解物理特性。

将大量的体分布电荷进行简化,可认为它们集中于一点,从而形成了雷云的偶极子和多重偶极子结构,这种结构已经得到了广泛应用(Ette 等人, 1977; Carpenter 和 Drabkin, 1999; Rakov 和 Uman, 2003)。把这些点电荷源及其镜像表示(设地面是理想导体)放置在几何中心,同时计算它们对场的贡献大小。当观察点邻近电荷聚集处时,为避免出现无穷大场的情况,要求计算限制在所关心的区域内,通常限制在地平面上。对于空间电荷扩展区域的任意电荷积聚而言,一个突出特点是,在模型中引入了与上述非自然点电荷的空间位置相关的几何量。后面将讨论,几何变量的选取可在很大程度上影响电场的计算,一般情况下是通过反复试验来计算电场的大小,以重现地平面上电场分布的轮廓图。

与保护系统的预防/拦截效率设计有关的理论研究,可分为两部分:首先明确在雷击之前发生的不稳定静电过程,能否用一个合适的模型来重构;在可重构的前提下,然后判断这个模型能否给出合理的分析依据,以验证空中物体的预防/拦截效率。因此,替代了原来的单偶极子模型或双重偶极子模型,本章中推荐采用三层带电圆盘模型来表示一般的雷云结构(Amoruso 和 Lattarulo, 2002)。