

电路保护技术
基础与应用设计

Circuit Protection Technology
Fundamental and Its Applications

和军平 杜尧生 杜志德 编著



电子工业出版社

PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

<http://www.phei.com.cn>

电路保护技术基础与 应用设计

和军平 杜尧生 杜志德 编著

電子工業出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING

内 容 简 介

电路保护设计是各类电气、电子设备安全、可靠运行的前提和基础,其针对电气、电子设备内、外部过电压、过电流、过热等多种瞬态、暂态危害进行有效保护,以取得及时消除危险、防止故障扩大的目的,涉及雷电、静电理论、电磁兼容理论及可靠性等多个领域。

本书首先系统地介绍了引起电气、电子设备瞬态、暂态过电压的雷电、静电、电网误操作的成因、特性、危害机理,进而对低压电器、电子设备的静电放电测试、雷击浪涌测试进行了阐述,并具体介绍了过电压保护基本原理和多种保护器件、保护电路设计。对于电气、电子设备内、外部的暂态过电流故障,本书具体介绍了熔断器和断路器的原理、特性和测试技术,阐述了过电流保护设计基本原理。为便于读者应用和参考,本书还归纳、列举了多个典型低压电器、电子设备及系统的实际电路保护设计方案。

本书可供从事电气与电子设备设计、电子产品生产和品质管理等工作的科技、管理人员使用及参考,也可作为高等院校相关专业师生的参考资料。

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

电路保护技术基础与应用设计/和军平,杜尧生,杜志德编著. —北京:电子工业出版社, 2011. 6
ISBN 978-7-121-13632-0

I. ①电… II. ①和… ②杜… ③杜… III. ①电力系统-继电保护 IV. ①TM77

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 095727 号

责任编辑:苏颖杰

印 刷:北京东光印刷厂

装 订:三河市皇庄路通装订厂

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:787×1092 1/16 印张:14.75 字数:370 千字

印 次:2011 年 6 月第 1 次印刷

印 数:3 000 册 定价:38.00 元

凡所购买电子工业出版社的图书,如有缺损问题,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。

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

服务热线:(010)88258888。

Preface (序)

It's well known that modern industrial, agricultural developments and daily life of people rely heavily on the latest electronic development in the form of automation and information. With the safe and reliable working of electrical appliance and equipment, people are getting increasingly benefit with the ever-developing electronic and electrical products. Owing to the fact that the change of external environment and the deterioration of internal electronic and electrical component characteristics, electrical appliances and equipments should be designed with very good self protection ability, which can eliminate the faulty conditions and enhance the long term of the electronic and electrical appliances.

Nowadays, billion of electronic and electrical equipments are evolved everyday in both China domestic market and oversea markets, circuit protection are quietly contributing to helping the electronic and appliance to enhance their reliability. Inadequate, improper and ignored circuit protection will result the poor reliability, abnormal operation and increase maintenance cost and more seriously, safety issues. Thus, circuit protection is one of the importance aspects in an enterprise and design engineers should have equipped the right level of circuit protection knowledge.

Circuit protection is so important to a company making the electronic and electrical products. A lot of Chinese domestic manufacturers are paying high attention to this so that the design, manufacture, after-sales and maintenance will have a good reflection to the image of the manufacturer. However, some of the manufacturers are deliberately removing the required circuit protection components because of the cost consideration. They have to pay the price for improper product quality and reliability. In fact, the ultimate result is the tarnish of their image and the potential hazard of their devices.

Also, to the design engineers, technicians and senior managements of an enterprise, the circuit protection concept and knowledge is a necessary step to raise the overall quality of their products. In this IT world, the circuit protection concept, compared to the integrated circuits, computer and networking, is a bit "traditional". The circuit protection knowledge is somewhat "fragmented" in which there is a lack of complete course or knowledge in that area so that some younger generation will find it difficult to learn from academic institutes. Some young designers have a good circuit design in the theoretical world, however, their design doesn't work in the reality world. One of the reasons for this is the circuit protection is not yet well designed into the system.

This book shows a systematic way on the circuit protection techniques including ESD, surge, electrical transient and overcurrent threats, with detail discussion on the function and operational theory of the TVS, MOV, GDT, Fuse and PTC devices which is good for electronic and electrical equipment designers. To make this book for practical, it documents some of the live applications such as IPTV, STB, telecommunication network, mobile phones, LED lightings, automotive elec-

tronics and portable medical devices.

The authors of this book have extensive practical, design and circuit applications experience in circuit protection in different market segments. The content of this book will start from some simple idea to in-depth design real cases. And we believe that this book will provide lots of help to electronic and electrical designers. Last but not least, we hope the readers to enjoy reading this book and think about the tradeoff between long term reliability and cost consideration with the introduction of circuit protection.

Teddy To

A stylized handwritten signature in black ink, consisting of a square-like shape with a diagonal line and a horizontal stroke extending to the right.

Littelfuse Inc.

1th Dec. 2010

序（译文）

众所周知，现代的工业、农业以及现代人的日常生活，是在相当程度上，是建立在以信息化、自动化为核心的电气、电子技术发展基础上的。各种电气、电子产品安全可靠的工作，使人们日益享受到它们带来的诸多便利。然而，由于外部环境变化、内部器件老化等因素的存在，电气、电子设备应具备在各种故障因素作用下进行有效自我保护的能力，才能减少故障因素，防止故障扩大，延长使用期限。

在今天数以亿计的电气、电子产品行销中国及海外市场的同时，电路保护技术也正在为全球电气、电子产品安全可靠使用而默默地做出贡献。不良的电路保护设计不仅会导致产品可靠性恶化，增加企业维修成本，甚至还会酿成人身、财产的损失。因此，电路保护技术不仅应为企业管理人员所重视，也是各类电气、电子产品设计人员需要熟练掌握的技能。

电路保护技术对于电子设备制造企业尤为重要。中国很多电气、电子制造企业对此都十分重视，在产品的设计、制造、售后服务方面认真实施，树立了良好的品牌形象。然而，也有不少制造企业对此还没有足够的重视，一些电气、电子产品设计者出于对成本的考虑，有意取消或大量减少电路保护设计，造成不少危害和隐患。实际上，这对企业自身长远的发展和品牌都是很不利。

对于电气、电子产品设计人员来讲，重视电路保护设计，掌握电路保护知识和技术也是非常必要的。在目前的 IT 时代，电路保护技术相比集成电路、计算机和网络技术而言，已略显“传统”，加之电路保护知识本身分散于不同学科，导致新一代年轻人对其不甚了解。一些年轻的设计者常有很好的电路功能设计灵感或方案，然而其设计仅能在实验室运行，在客户现场常不能正常运转，造成这种现象的原因之一就是电路保护方面做得不够完善。

本书面向电气、电子产品设计人员，比较系统地介绍了电气、电子产品常见的雷击，静电放电，电网过电压、过电流的形成和危害机理，对 GDT、MOV、TVS、PTC 瞬态过电压抑制器件、Fuse、Breaker 过电流抑制器件的原理和特性也进行了细致阐述，并介绍了电气、电子产品防护过电压、过电流的各种设计技术，有助于电气、电子产品设计人员较全面地理解、掌握电路保护技术。为便于读者的使用和学习，本书还具体介绍了交互式网络电视、手机、公共电话网、汽车电子产品、通信电源、LED 照明灯、便携式医疗电子产品中一些典型而成熟的电路保护设计方案。

本书作者在电路保护领域具有多年的设计、研发和应用经验，并熟悉此领域的海内外技术和市场情况，撰写的内容较为全面、细致，章节安排也由浅入深，易于理解和掌握。我相信本书会给广大的电气、电子设计工程师带来帮助。我也衷心祝愿各位读者通过阅读和思考，最终实现产品安全可靠与成本的良性平衡。

泰迪
美国力特公司
2010-12-1

作者简介



和军平，男，1971年生，哈尔滨工业大学深圳研究生院教师。1999年获得北京交通大学电力系统及其自动化专业硕士学位，2003年获得清华大学电气工程专业博士学位，主要从事电磁兼容、新能源发电、电力电子技术领域的研究。



杜尧生，男，1974年生，美国力特公司（Littelfuse Inc.）资深应用工程师。1996年毕业于中国地质大学（武汉）应用电子技术专业，主要从事电路保护与可靠性、电磁兼容、逆变器滤波网络等方面的研发及应用。



杜志德，男，1972年生，美国力特公司（Littelfuse Inc.）电路保护专家。1994年毕业于香港科技大学电气电子技术专业，主要从事电路保护、电力电子、电源管理系统的安全和可靠性设计及相关标准制定，曾供职于多家国际电路可靠性设计公司。

前 言

自 20 世纪 80 年代以来,伴随着全球信息化革命的浪潮,我国电子工业飞速发展,电子制造业不仅早已成为国民经济的支柱产业,电子产品也是我国对外贸易的重要品种之一。目前,我国珠江三角、长江三角、京津塘等地区均已形成了品种齐全、产业上下游配套、规模巨大的电子制造业体系,成为全球以及我国重要的电子设计和制造基地。伴随着电子产品规模和总量的不断增长,加之国内外用户对电子产品品质要求越来越高,欧美发达国家自 20 世纪 90 年代中期就开始进行电子产品认证制度,我国也于 2005 年实行了 3C 认证制度。电子产品安全性和可靠性作为其品质的重要组成部分,在安规认证和电磁兼容认证中得到了充分体现。电路保护技术作为实现安全和电磁兼容的一种重要手段,其对电子产品设计和生产的意义自然是不言而喻的。

电路保护技术自从电力系统诞生以来,就一直被人们广泛使用并持续改进发展。从电力系统的防雷、继电保护设备,到开关电源的输入/输出限流保护,再到集成电路芯片的抗静电引脚,随处都可找到电路保护设计及器件的例子,因而,电路保护技术应是电气、电子产品设计工程师们熟练掌握的一项技术。实际上,由于电路保护涉及的现象多是突发的、短时间的过电压、过电流等暂态现象,其形成和危害机制比较复杂,会根据产品的不同而呈现不同的表现,不易及时捕捉观察和重复验证,加之雷击、静电、过电流试验需要专门的试验和测试设备才能进行细致的测量,因此不少电气、电子工程师对其尚缺少深入的感受。特别是目前关于防雷、防静电、防过电流设计的有关书籍虽然不少,但多介绍基础原理和分析,对实际电气、电子产品的设计应用来讲,则存在着电路保护的相关知识分散、结合案例少等缺点,因此,不利于相关工程设计人员的深入理解和实际应用。

本书从电气、电子产品设计工程师及爱好者应用的角度出发,把电气、电子产品设计中常遇到的电路保护问题集中起来,采用理论阐释与案例相结合的方法专门进行分析、介绍和设计解决,来实现电路保护知识的集中和深化,并奉献给读者。本书首先对雷击、静电放电产生的过电压、负载短路故障引起的过电流等典型暂态现象的成因和危害机理进行细致介绍;其次对压敏电阻、瞬态抑制二极管、晶闸型闸流器、各类熔丝等电路保护器件的原理和特性进行介绍;最后,结合电信网络、消费类电子以及汽车电子系统的典型实际应用,进行了几个实际案例的设计和分析,以加深读者的理解和掌握。

本书的第 1、3~5 章和第 6、7 章部分内容由和军平执笔,第 2 章、第 7 章部分内容由杜志德执笔,第 6、7 章的其他部分内容由杜尧生执笔,全书由和军平进行统稿。

本书编写时不仅得到了一些企业单位以及个人的帮助或提供资料,也得到了国家自然科学基金项目(No50877015)的支持。在支持单位中,美国力特公司、上海煤炭科学研究院 EMC 中心还为作者提供了他们最新电路保护产品和设计的信息,也为本书的出版提供了经济赞助;研究生付琦、王建、伊磊等同学也为绘图、文字和资料整理付出了辛苦的劳动。编著者在此致以衷心的感谢!

本书的顺利出版,也得到了电子工业出版社的大力支持和帮助,感谢赵丽松、苏颖杰编

辑为本书付出的不厌其烦的修改和矫正。

本书所介绍的电路保护技术知识是基于该领域前人以及当今很多研究者、设计者工作和实践基础上的，书末列出了部分有关雷电、静电以及电路保护的参考文献，在编著本书时进行了引用和参考，在此对文献作者表示感谢！

由于电气、电子技术发展迅速，电路保护技术涉及领域宽广，并且其本身也在不断地推陈出新，作者水平和精力却很有限，因此本书难免会有错误和不妥之处，也殷切希望广大读者给予批评和指正。

编著者

目 录

第 1 章 电路保护技术概述	1
1.1 电路保护的作用和意义	1
1.2 电路保护技术及保护器件的发展情况	3
1.3 电路保护技术与电磁兼容性	4
第 2 章 雷电的形成和危害机理	6
2.1 雷电的形成和放电过程	6
2.1.1 雷电的形成	6
2.1.2 雷电放电过程	7
2.2 雷电的工程模型和雷电流波形	9
2.2.1 雷电的工程模型	9
2.2.2 雷电流波形	11
2.2.3 典型雷电压波形	13
2.3 雷电流的频谱和能量	14
2.3.1 雷电频谱分析	14
2.3.2 雷电释放的能量	15
2.4 雷电的危害和作用机理	18
2.5 直接雷击的危害效应	19
2.5.1 雷电流的热效应	19
2.5.2 雷电流的机械效应	20
2.5.3 雷电流的电动力效应	22
2.5.4 雷电流产生的高电压效应	23
2.6 邻近雷电对低压电器设备的危害作用	28
2.6.1 雷电的静电感应效应	28
2.6.2 雷电的磁场感应效应	30
2.7 远处雷电对低压电气设备的危害作用	34
2.7.1 传导耦合机制	35
2.7.2 阻性耦合机制	37
2.7.3 感性耦合机制	38
2.7.4 容性耦合机制	40
2.8 电力系统中的操作过电压	40
2.8.1 电力系统中的常见操作过电压	41
2.8.2 电力系统过电压的传输线效应	44
第 3 章 静电的形成和危害机理	46
3.1 静电的形成	46

3.2	静电的放电	48
3.3	静电对电子工业的危害效应和特点	52
3.4	静电起电工程模型与放电特性	57
3.4.1	人体起电与放电模型	57
3.4.2	机器起电与放电模型	62
3.5	电子设备的静电放电测试模型	64
3.6	静电放电的频谱和能量	66
3.6.1	静电放电电流的频谱	66
3.6.2	静电放电的能量	67
3.7	静电放电对电子设备的典型危害作用模式	68
3.7.1	直接静电放电危害的作用模式	69
3.7.2	间接静电放电危害的作用模式	74
第4章	电子设备的雷击与静电测试及保护原理	75
4.1	电子设备的电磁兼容雷击浪涌测试	75
4.2	低压电子设备防雷设计原理	81
4.2.1	感应雷及浪涌电流的危害形成模式	82
4.2.2	感应雷及浪涌电流的抑制原理	83
4.2.3	感应雷及浪涌电流瞬态抑制器件的应用方法	87
4.3	电子设备电磁兼容静电放电测试	90
4.4	电子设备静电放电保护原理与设计	94
4.4.1	电子设备静电放电保护原理	95
4.4.2	电子设备静电放电保护设计	97
第5章	瞬态过电压抑制器件及应用设计	109
5.1	气体放电管	109
5.1.1	基本结构和工作原理	109
5.1.2	主要性能参数	111
5.1.3	特性分析	113
5.1.4	应用设计及要点	114
5.2	金属氧化物压敏电阻	118
5.2.1	基本结构和工作原理	119
5.2.2	主要性能参数	120
5.2.3	特性分析	123
5.2.4	应用设计	126
5.3	瞬态过电压抑制二极管	128
5.3.1	齐纳二极管和雪崩二极管	128
5.3.2	TVS 瞬变电压抑制二极管	132
5.4	瞬态电压抑制晶闸管	136
5.4.1	基本结构和工作原理	136
5.4.2	主要性能参数	137

5.4.3 应用设计	138
5.5 过电压并联抑制型器件性能比较	140
5.6 瞬态过电压串联抑制器件	141
5.6.1 正温度系数电阻	142
5.6.2 抑制 ESD 高频滤波器	145
第 6 章 电子设备过电流保护原理	149
6.1 电子设备过电流的形式和危害	149
6.2 过电流的保护原理和过电流保护器件	152
6.3 熔断器及其基本原理	155
6.4 熔断器的性能参数	165
6.5 熔断器特性测试	170
6.6 熔断器典型应用设计	175
6.6.1 一般电气、电子设备熔断器的选择	176
6.6.2 半导体整流装置过电流保护熔断器选择	177
6.6.3 脉冲及瞬态冲击电流时熔断器的选择	179
6.6.4 熔断器线路选择性操作的设计	182
6.7 断路器及其基本原理	184
6.8 断路器的主要特性和参数	190
6.9 断路器过电流保护应用设计	191
6.9.1 断路器的选择	191
6.9.2 断路器与熔断器过电流保护能力比较	193
第 7 章 电路保护设计案例与分析	195
7.1 交互式网络电视设备的电路保护设计	195
7.2 手机电路板的保护设计	198
7.3 公共电话网及电信终端设备的保护设计	202
7.3.1 用户建筑内电信设备的保护设计	204
7.3.2 电话交换中心设备的保护设计	204
7.4 汽车电子产品的保护设计	206
7.5 移动基站通信电源系统的保护设计	209
7.6 LED 照明灯的保护设计	212
7.7 便携式医疗电子设备的保护设计	214
参考文献	219

第1章 电路保护技术概述

人类今天已生活和工作在充满了各式各样电气、电子产品的时代，电气、电子产品的可靠、安全运行为人们带来了生产的动力、方便的生活和轻松的娱乐。电路保护技术就是保证电气、电子设备安全运行，免受内、外部不良因素作用而形成故障危害的一种有效方法。雷击、静电放电、故障过电流是最常见的危害电气、电子设备安全运行的主要原因，对这些现象进行分析、总结和电路保护设计，对于提升电气、电子产品的安全性、电磁兼容性和可靠性都有着重要意义。

1.1 电路保护的作用和意义

在当今的工业化、信息化的时代，各式各样的电气、电子产品日新月异、层出不穷，并已广泛地应用在工业、农业、商业、交通、国防领域以及家庭日常生活等各个方面，给人们带来了巨大的经济效率和进步，使人们的生活更加方便和愉悦，电气化、电子化已成为普及全球的一个突出的特征。然而，众多的消费者在选购和使用这些电气、电子设备时，却常常忽略了其安全性和可靠性，而其实这也是产品品质的一个重要指标。一些用户甚至以为产品的安全和可靠是产品天生就有的，不需要进行设计和成本预算，而过度缩减甚至取消在产品安全性方面的支出。实际上，电气、电子产品的安全运行是其能够被广泛应用的先决条件。电气、电子产品在实际工作时不可避免地会遇到一些外界极端电磁环境的影响，如雷电（lightning）、静电（electrostatic）等恶劣工作条件造成设备损害的事例常有报道。此外，电气、电子产品自身也常会因为用户操作不当、负载故障、元器件老化等原因而形成过电流等安全故障。电气、电子设备只有具备了可抵御外界电磁危险以及防止自身故障扩大及传播的能力才能符合实际安全应用的要求，而这种安全能力的具备只有通过合理的电路保护设计才能实现。

电气、电子设备和产品开发设计的重要内容之一就是安全性、可靠性设计。电路保护技术的本质就是针对电气、电子产品乃至系统的内外部典型危害和故障，设计、制造保护器件，并结合所应用的设备或系统进行保护器件和保护方案的设计和优化，实现电气、电子设备及系统安全的一种有效措施。因此，电路保护技术是电气、电子设备和系统不可或缺的设计环节和构成要素。

特别是20世纪80年代以来，电信事业、电力工业、交通运输业飞速发展，电信网络、计算机网络、电力网络、汽车电子的建设和更新不仅已在全国范围内如火如荼地展开，在技术方式上也正在数字信息化、微电子化，全球的信息、能源、物资已经时时刻刻地“网络”在一起了。然而，数字信息处理所依赖的集成电路的低电平工作特性，使得电力网络、信息网络也更容易在“网络”的系统部件、终端设备上被干扰或损坏，造成能量或信息的中断或阻塞，甚至系统瘫痪，产生不可估量的巨大损失。据美国20世纪的一项研究结果，若信息网络故障无法提供服务，银行仅能支撑2天，制造厂能支撑4.9天，销售业则仅3.3

天^[1]。这种情景对交通设备和系统来讲也类似,不仅交通信息系统离不开网络,离不开电路保护,更典型的是现代主要的交通工具——汽车的电气化、电子化趋势更加明显。在一辆普通汽车中,发动机电喷系统、整车电控系统、防抱死系统、气囊保护系统、导航系统等电子设备的成本已占整车成本的30%以上。上述各种电子设备在车内恶劣电磁环境下可否实现安全电路保护,对于司机和乘员的人身安全有着直接影响^[2]。对混合动力汽车、电动汽车等新型交通工具来讲,电气、电子设备的比例进一步加大,电路保护的重要性更是自不待言。从以上几个事例可以看出,电气、电子设备与系统可靠的电路保护对于现代社会来讲是多么重要。事实上,电路保护技术不仅在工业、商业领域起着默默无闻的基础作用,在广大用户熟悉的消费类电子产品中,也被广泛地应用着。例如,手机、MP3、数码相机、电视、音响等,其中的IC芯片、输入/输出线缆上均采用了大量的电路保护元器件来实现对静电、雷击的安全保护,给用户使用提供了可靠的保障。

从事电气、电子设备及其系统设计的专业人员在工作中会常遇到电路保护问题或事先进行保护设计,对各类电路故障的形成原因和表现方式并不陌生。众所周知,电路故障突出反映在电压、电流指标异常上,通常为过电压、过电流两种形式,其典型特征是电压、电流幅值瞬间或短时内剧烈增加,同时伴随着剧烈的电磁变化。然而,要对这些快速异常变化的电压、电流进行准确感知,并设计出合理的措施进行有效、经济的保护并不是一件简单的事。比如,雷击电压和电流可高达上万伏特、几十千安培,其对电气、电子设备和系统的危害可以通过导线、电磁感应、公共地电平抬升等多种方式进行传播和作用,很不易准确辨识。要实现良好可靠电路安全保护,就需要结合被保护设备的结构,选择适当的堵、截、抗等措施,并合理选择保护器件和精心施工,才能使安全性得以提高。此外,对低电平工作电子设备危害甚大的高电压、瞬态静电放电现象,其危害机理和保护设计也需要认真分析、精心设计。对于熔丝、断路器等保护元器件的选择和使用,也存在类似的情况。特别是,由于目前不少电气、电子产品设计人员和一些用户对电路保护的重要性认识尚有不足,加之电路故障分析、保护器件所属的专业领域较分散,其技术细节和实施方式差异也大,导致电路故障和保护的有关分析、研究和设计知识积累较慢,还没有形成相对独立、完整的系统化知识体系,而散见于防雷、防静电、防过电流产品手册以及企业经验性设计等文字中,不利于电气、电子设计工程师全面掌握和准确参考。因此,非常有必要把电路保护的有关基础理论、常用技术及新进展较全面地总结一下,来促进电子行业的电路安全设计和生产。

当然,电路保护的最终实现要依赖于保护器件,如过电压保护器件、过电流保护器件。这些器件所依据的物理原理多种多样,不仅其特性好坏直接影响到产品的最终电路保护性能,这些器件自身的设计和制造也是一个重要的产业,涉及半导体工业、冶金工业、机械工业等多个部门。在一些缺少实际产品设计经验的人员看来,这些保护器件在产品电路板上似乎没有什么明显作用,有时在实验里甚至可以去掉它们,而对电路功能也没有明显影响,但是事实上保护器件却是重要的、不可缺少的。国内外均有一些著名公司在此领域进行认真地研究、开发和生产。例如,美国的力特公司(Littelfuse Company)等著名生产厂,其电路保护产品线几乎包含了全部类型的电路保护器件。我国的长三角、珠三角地区也有一些企业生产熔丝、压敏电阻等电路保护器件。因此,从广义上讲,这些器件的设计和生产技术也是电路保护技术应该包含的一部分。

本书针对我国广大电气、电子产品设计工程师设计工作的需要,结合电路保护技术发展

现状,对造成电路故障的几种主要典型现象的形成机理、传播方式、抑制方法和措施进行了介绍,特别对通信电子产品、消费类电子产品、汽车电子的防雷、防静电和防过电流的电路保护设计典型方案进行了介绍和分析,以利于加深读者的理解,促进实际工作。当然,由于电路保护技术行业范围广泛,特别是电路保护器件的进展日新月异,本书主要对常见的电子电路、通信电子、汽车电子等系统中的电路保护技术进行介绍,未能涵盖电路保护技术的全部内容,需要继续深入研究的读者请借鉴本书参考文献和其他相关资料。

1.2 电路保护技术及保护器件的发展情况

电路保护的历史实际上由来已久,美国著名科学家富兰克林 1752 年发明的避雷针就可以看作是最早的电路保护措施,其基本思路是将雷云的电荷通过避雷针金属引向大地,使雷电放电电流不直接流过所要保护的建筑物或设备,从而防止建筑物、设备被雷击损毁以及人员伤亡。美国发明大王爱迪生 1882 年为保护纽约珍珠街全球第一所商业电站设备和系统的可靠运行而发明了插塞式熔丝,也可以视为最常用的电路保护器件。其根据用电设备故障后电流常剧烈上升的现象,利用金属合金熔丝在故障大电流时迅速发热而熔断的机理,及时切开故障负载与电力系统的电连接,以避免故障持续下去,进一步危害电器用户和电力系统,从而达到有效防止故障的扩大的目的。时至今日,虽然熔丝的形态和种类已千变万化,但其基本原理变化不大,在大到电力系统,小至几瓦的各种低功率电气产品中,熔丝依然随处可见,因此,可称得上是应用最广、最基本的电路保护器件了。

目前,防止过电流故障的熔丝主要向高压大电流化、微型化、高准确和高可靠化几个方向发展,以满足电力系统、电力设备、电网用户的过电流保护,以及数量巨大、种类各异的工业和消费类电子产品的不同过电流保护特性的要求。例如,电力系统中用的国产高压电力过电流熔丝体积可达 $650\text{mm} \times \phi 76\text{mm}$,额定电流达 300A,分断电流容量达 50kA,分断电压达 40kV;而手机中用的微型过电流熔丝体积则可小至 $1\text{mm} \times 0.5\text{mm} \times 0.5\text{mm}$ (SMD0402 封装),额定电流为 0.25A,当过电流 200%~300%时就迅速熔断,分断电压仅 32V。熔丝的材料也不仅仅局限于金属合金,而在向高分子有机合成材料发展。为克服传统熔断型熔丝仅可保护一次的弱点,美国 Raychem 公司最先开发出自恢复过电流保护元件,其通过在有机高分子聚合物中加入导电颗粒而构成的,本质上是一个正温度系数的热敏电阻器,当发生过电流后其阻抗会大增,限制电流上升,故障消除后又会恢复到常态,即具有自恢复性,使用时不必更换,因而在小功率电子产品中得到了广泛应用。

熔丝虽然可以实现对故障电流的可靠切断,但常用的熔断型熔丝只能一次性使用,故障后需要人工更换,存在更换时间长、备件替代性弱等缺点,因此,在很多电力设备以及众多中、小功率电子设备中,继电保护、电子过电流检测/保护等技术也被广泛使用。例如,电力系统中网络化、智能化、微机化的过电流继电保护设备已在实际中大量使用,其中一些具有可重复使用、故障无损等优点,这方面技术的内容也非常丰富。然而,上述继电保护、电子保护电路部件因元器件多、工作电平低、易受干扰等问题可能出现失灵或故障,这时熔丝就成为整个设备的最后一道“保险”的办法,因而依然是不可缺少的保护部件。

自从 19 世纪电力架空供电网络开始建设并提供服务以来,电力系统及其供/用电设备就常遭受雷击等瞬态过电压的危害。由于直击雷、感应雷电压最高可达几十万伏、放电电流可

达 200kA, 全球电力网络每年由雷电而造成的设备、人员以及经济的损失高达数亿元, 因此, 防止雷击及其危害就成为国内外电力、电信、建筑等工程和学术界长期研究和改进的一个领域^[1,4-6]。本章 1.1 节中介绍的金属避雷针对直击雷有较好的保护效果, 但对于电力、电信网络中由电磁感应而产生的感应雷效应, 就需要综合使用屏蔽、接地和过电压保护器件, 才能取得预期的效果。放电保护间隙器、管形避雷管是两种出现时间较早的电力架空线路防雷保护器件。其中最原始的羊角形间隙器 19 世纪末就出现了, 其基本工作原理是在电力线路或电气设备上人为地制造绝缘薄弱点, 即间隙装置, 放电间隙的击穿电压比电力线路及电力设备的雷电冲击绝缘水平低, 在正常运行电压下间隙处于隔离绝缘状态, 当雷电过电压时, 间隙击穿接地而放电降压, 从而起到保护线路或设备绝缘的作用。间隙放电保护器虽有反应慢, 不易熄灭放电电弧, 容易造成电力线-线间、线-地间的短路等缺点, 但也具有放电电流容量大、钳位电压低的优点, 因此至今依然在广泛应用。气体放电管从本质上讲, 也是一种改进型的间隙放电保护器件。随着非线性半导体技术的发展, 阀型电压钳位避雷器得到了广泛的发展和应用, 如 20 世纪 50 年代出现的碳化硅避雷器、70 年代末出现氧化锌避雷器等。当这类器件两端子间的输入电压过高时, 器件就会自动泄流降压, 使后续电路免受雷击过电压危害; 当其两端子间电压恢复到正常运行电压时, 它又恢复高阻状态, 使正常工作电压顺利通过。这种避雷器的特性可避免电力系统直接接地或相间短路故障, 对过电压的保护动作不会影响电力系统的正常安全运行, 这是阀型避雷器突出优点。阀型避雷器的发展已有几代产品, 有不同的容量等级, 以适用于不同的场合, 小功率等级的有稳压抑制二极管等, 可用于电子设备板级的雷击保护。

与雷电类似, 静电放电也是人们在社会生产、生活中常遇到的一种强烈的电磁干扰现象, 其放电电压可高达 15kV, 放电电流可达几十安, 也常会造成火灾、设备损坏等灾害^[7]。特别是随着微电子 CMOS 技术的发展, 各种各样的集成电路在电气、电子设备中已被广泛应用, 集成电路已经成为现代电子工业不可或缺的“食粮”。然而, CMOS 工艺的集成电路工作电压低, 一般在 3.3~15V, 其栅极对电荷也极其敏感, 因而易受静电放电的影响, 出现直接或间接损坏。虽然静电放电所含能量比雷击要低得多, 但其放电位置不固定, 放电时间也远远短于雷击, 因而高频成分丰富, 极易通过多种电磁感应耦合方式而产生危害作用, 防止静电放电对各类电子产品的损伤也需要综合应用屏蔽、隔离、滤波、过电压钳位、接地等措施。静电放电过电压钳位保护器件主要有压敏电阻、瞬态抑制二极管等, 其电压钳位的基本原理与防雷半导体一致, 但反应时间则要快得多。特别的, 当在高速通信线缆上使用时, 还要求其极间电容很小, 以免影响正常信号的传输^[8]。

1.3 电路保护技术与电磁兼容性

电路保护技术是电气、电子产品实现可靠、安全运行的基本保障。对实际电气、电子产品来讲, 电路保护设计和电磁兼容性及其设计是相互关联、相互影响的。众所周知, 电磁兼容是指电气、电子设备在指定的电磁环境中, 对外不产生过大的电磁噪声, 同时又能抵抗一定外界电磁干扰的能力。特别是自 20 世纪 90 年代中期开始, 欧盟率先对进入其地区销售的电气、电子产品进行强制电磁兼容 EMC 认证制度, 即 CE 认证, 规定不符合其电磁兼容要求的产品不得在市场上销售, 对进口电子产品设立了技术门槛。世界各主要发达国家也相

继推出了自己的电磁兼容标准,如美国的 FCC 认证、日本的 VCCI 认证等。我国也于 2005 年对在我国销售的电气、电子产品开始执行 3C 电磁兼容强制认证制度。在电气、电子产品的电磁兼容性能中,电子产品抗外界雷击、静电放电、电快脉冲等瞬态强干扰的能力是其重要的抗干扰能力指标。而抗雷击、静电放电、电快脉冲的高电压也正是电路保护技术的重要内容,由此可见,电路保护技术与电磁兼容技术在抗过电压方面是有部分相同内容和要求的。换言之,在抵抗外界雷击、静电放电、电快速瞬变脉冲等过电压的电路保护设计和电磁兼容中抗雷、抗静电、抗电快脉冲等 EMS 性能要求是基本一致的。

当然,实际电气、电子产品遭受的过电压也可能来自产品内部或负载,如电力电子设备所带感性负载的突然切除、电力系统电力电容或大电动机负载的投切等,都会在电路内部的一些元器件上形成过电压,这时设备的抗过电压设计就属于传统电路保护设计的范畴,而不属于电磁兼容的范畴。在这方面,不同的电气、电子设备可以使用不同的检测过电压和保护设计的办法,技巧繁多。例如,在开关电源中,主电路功率开关管在关断时,由于迅速关断的电流与主电路功率环路的寄生电感相互作用,功率管关断时其两端电压会出现高幅度的电压尖峰,常超过正常工作电压的 50%,甚至更多,常导致功率管损坏。为降低该电压尖峰,可采用在功率开关管两端并接阻容吸收电路(RC Snubber);如还要实现低的开关功率损耗,则可以使用 RCD 等无损吸收回路办法来降压^[9]。又如,在电力系统中,一些非线性负载会向电网注入较大的谐波电流,其中的 3、5、7 次电流谐波常会与电力系统中并联的线路电感和滤波电力电容回路发生并联谐振,造成谐波过电压,损坏电力变压器或电力电容,减缓的方法之一就是在电力滤波回路中增加阻尼,降低谐波电压幅度^[10]。类似的例子还有很多,本处仅举两例。

电气、电子产品的过电流可由瞬态的雷击、静电放电、电快脉冲引起,更常见的是由其负载故障或内部元器件损坏而产生。对于前者,由于其持续时间很短,通常要求电气、电子产品过电流保护设计能够承受一定强度的过电流,这也是其电磁兼容 EMS 性能的一部分;后者引起的过电流通常属于产品安全性能范畴,需要及时予以过电流保护。在后者中,对于过电流形成原因比较明确的,如负载短路,常可通过及时检测到过电流信号,然后及时封锁输出来实现保护。在大家都熟悉的直流稳压电源中,输出过电流保护就是一个基本性能。对线性稳压电源来讲,运算比较电路检测到过电流后,立即关闭调接管门极电压来实现保护。对电流型控制的 DC/DC 变换器来讲,过电流信号会使驱动脉冲占空比立即减小或消除,从而实现限流^[9]。对于设备内部器件损坏而形成的过电流现象,由于故障点不易事先确定和检测,可在输入/输出端子上采用熔丝等措施进行保护。当然,在进行电磁兼容抗干扰试验时,如外界雷击、静电放电、电快脉冲过大,则可能引起过大的过电流故障,这时也需要过电流保护器件来防止故障扩大。另外,在进行电磁干扰发射测量时,设备一般处于正常工作状态下,不会出现过电流。

综上所述,电路保护设计与电磁兼容性能有着密切的关系,良好的电路保护设计有助于产品电磁兼容性能的提高。