

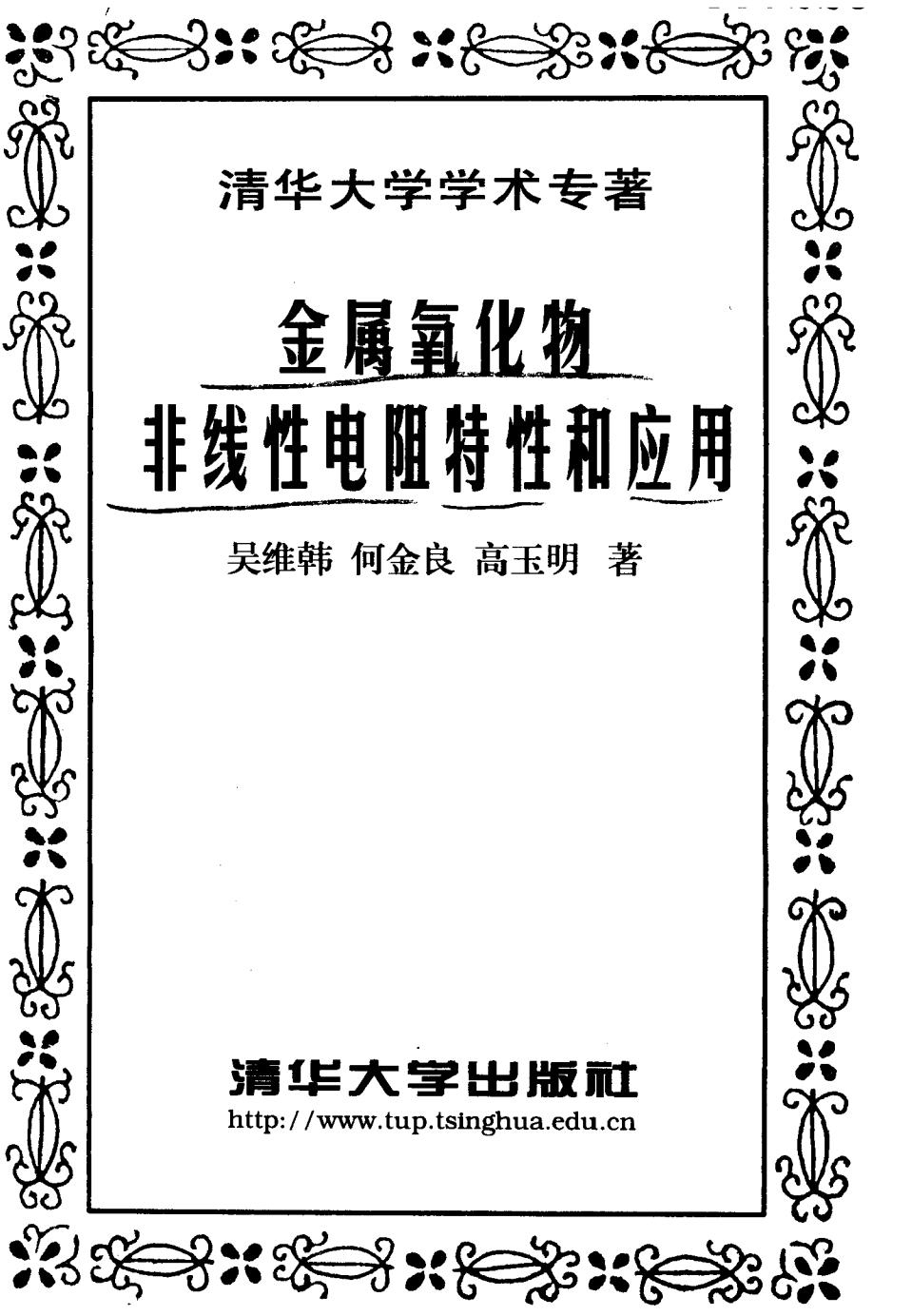
清华大学学术专著

# 金属氧化物 非线性电阻特性和应用

吴维韩 何金良 高玉明 著

清华大学出版社

<http://www.tup.tsinghua.edu.cn>



清华大学学术专著

**金属氧化物**  
**非线性电阻特性和应用**

吴维韩 何金良 高玉明 著

清华大学出版社

<http://www.tup.tsinghua.edu.cn>

(京)新登字 158 号

EA15/02

## 内 容 简 介

金属氧化物非线性电阻在电力系统和电子系统中得到了越来越广泛的应用,主要用来钳制电位和吸收过电压能量。本书系统介绍金属氧化物非线性电阻的几个重要电气物理特性的基础理论,并重点介绍金属氧化物限压器在应用方面的最新发展和提出的研究课题。

书中介绍了氧化锌非线性电阻的导电机理、老化机理以及热和冲击破坏机理等方面的研究成果和动态。详细介绍了作者在氧化锌限压器电位分布和热特性的数值计算方面的研究成果。为了适应将限压器扩展应用到提高输电线路耐雷水平和深度限制线路操作过电压的发展趋势,书中具体地介绍和分析了合成绝缘氧化锌限压器的结构原理及其应用中的重要科学技术问题。

本书可作为高电压技术和相关专业的本科生、研究生的教学参考书,也可供在电力系统和电工技术学科领域中,从事过电压及其防护方面工作的科学技术人员参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

金属氧化物非线性电阻特性和应用/吴维韩等著. —北京:清华大学出版社,1998

ISBN 7-302-03039-1

I. 金… II. 吴… III. 金属元素-氧化物-非线性-电阻-电气性能 IV. TM544

中国版本图书馆 CIP 数据核字(98)第 18839 号

出版者:清华大学出版社(北京清华大学校内,邮编 100084)

<http://www.tup.tsinghua.edu.cn>

印刷者:北京清华园胶印厂

发行者:新华书店总店北京科技发行所

开 本:850×1168 1/32 印张:12.5 字数:324 千字

版 次:1998 年 11 月第 1 版 1998 年 11 月第 1 次印刷

书 号:ISBN 7-302-03039-1/TM·29

印 数:0001~1500

定 价:29.00 元

# **Properties and Applications of Nonlinear Metal Oxide Varistors**

## **ABSTRACT**

Nonlinear metal oxide varistors have been widely used in the power and electronic system to suppress the potentials and absorb overvoltage energies. Some important electrical physics properties of nonlinear metal oxide varistors and several basic problems in the application of polymeric metal oxide surge arresters are discussed in this book.

The newest research achievements on the conduction mechanism, degradation mechanism, thermal and impulse destruction mechanism of zinc oxide nonlinear varistors are introduced systematically. The numerical calculating methods of potential distribution and the thermal properties of metal oxide surge arresters are described in detail. In order to use the surge arresters to increase the lightning withstanding level and deeply limit the switching overvoltage of transmission lines, the structures of polymeric zinc oxide surge arresters and the conditions of their applications are analyzed in depth.

The book can be referenced by high grade and graduate students, researcher in high voltage technology and other related fields.

# 前 言

金属氧化物非线性电阻由于其优异性能,近年来被广泛地应用于电力系统和电子系统,以限制各种不同类型的过电压和电磁干扰。它的使用范围包括从低压弱电系统到百万伏电压等级的特高压交流输电和直流输电系统。金属氧化物电阻除了在限制各种雷电和操作过电压方面具有优异的保护特性外,还具有巨大的能量吸收能力,可以用来作为电力系统大型电机励磁回路、高压断路器并联电阻和超高压直流断路器等的能量吸收元件。

自金属氧化物电阻逐渐得到应用和推广以来,对其物理性能和非线性机理方面的研究十分活跃,在70年代以来的文献中作了大量的报道。围绕金属氧化物非线性电阻在应用中所提出的各种电气性能的要求,主要集中在研究它的导电机理、老化机理以及热破坏和冲击破坏机理等几个方面。由于一些问题牵涉到金属氧化物半导体材料的微观结构和复杂的物理过程,至今在一些基础研究方面还没有形成完整和统一的理论体系,但所取得的研究成果无疑对不断改进金属氧化物非线性电阻的性能,开发出更优异的材料起到重要的指导和促进作用。

与此同时,随着金属氧化物非线性电阻应用的扩大,又不断提出一系列的技术应用方面的新课题。新近发展了合成绝缘金属氧化物限压器,和传统的瓷套式限压器相比,它在装置性能和使用上具有一系列优点。近年来国内外出现了金属氧化物限压器在电力系统的一些新的应用领域,如提出将悬挂式的合成绝缘限压器扩大应用到输电线路,以提高线路的耐雷水平和深度限制线路的操作过电压水平,突破了只把它作为变电所雷电侵入波防护的传统

概念。这些新的发展趋势又都提出了许多需要解决的科学技术问题。

为了适应以上的发展趋势,近年来,清华大学电机工程与应用电子技术系高电压技术教研组组织了一系列围绕金属氧化物非线性电阻特性及其应用方面的研究课题,其研究成果是编写本书的基础。有关金属氧化物的物理特性方面,主要是结合我们在实际应用中的一些电气性能,如导电机理、老化机理、热破坏和冲击破坏机理等所取得的进展。鉴于在机理方面的一些内容,理论上还不够成熟,在叙述中力求提供较系统的基础知识和新的研究动向,并介绍不同的观点。至于在金属氧化物非线性电阻的应用方面,本书的主要内容是我们在完成高压合成绝缘氧化锌限压器的研制以及研究将限压器扩大到线路防雷和深度限制操作过电压方面所取得的成果。编写的重点是限压器热特性和电位分布的数值计算方法;在线路上安装限压器情况下,雷击杆塔和绕击导线时线路耐雷水平的计算;限制线路上操作过电压时对限压器技术要求的计算分析以及合成绝缘氧化锌限压器的结构等。

这本书的内容是清华大学高电压技术教研组许多教师和研究生的多年研究成果的积累和概括。全书由吴维韩统一规划和主编完成。书中有关金属氧化物限压器特性和应用方面的许多内容包括在何金良于1993年完成的清华大学博士学位论文“高压合成套氧化锌避雷器的研究”中,后来根据课题组近几年的科研成果进行了补充和修改,并增加了物理特性方面的内容。高玉明撰写第11章初稿并对全部书稿进行了认真的校对和修改。全书经过作者集体反复讨论修改后定稿。

作者衷心感谢教研组的黄炜纲、张纬铍、吉嘉琴教授以及已故的张芳榴、薛家麒教授等,在有关领域的研究中我们长期合作研究,获益匪浅。历届研究生郝逢年、陈水明、常越、沈力、姚建国、何广昌、金祖山、杨立波等的工作也为本书作出了贡献。我们在编写

过程中参阅了他们以及其他作者的许多论文和书籍,并列入每章的参考文献中,作者对他们表示诚挚的谢意。

我们在进行有关研究时,得到合作单位许多专家的支持和帮助。在编写过程中,中科院电工研究所韩朔研究员和华北电力大学王文端教授评阅了书稿大纲;电力部电力科学院郑健超院士以及过电压防护专家刘继教授级高工评阅了全部书稿,并提出了许多宝贵的意见,对此我们也表示诚挚的谢意。

书中还难免存在缺点和错误,我们衷心欢迎读者批评指正。

作 者

1997年11月

# 目 录

<b>第 1 章 绪论</b> .....	1
1.1 金属氧化物非线性电阻 .....	1
1.1.1 陶瓷半导体材料.....	1
1.1.2 ZnO 非线性电阻 .....	2
1.2 金属氧化物非线性电阻的应用 .....	5
1.2.1 应用概况.....	5
1.2.2 在电力系统中的应用.....	6
1.2.3 在电子系统中的应用.....	7
1.3 ZnO 限压器及其发展 .....	9
1.3.1 过电压保护装置的发展.....	9
1.3.2 ZnO 限压器发展所提出的新要求 .....	10
1.3.3 合成绝缘 ZnO 限压器 .....	12
1.4 ZnO 非线性电阻及其应用中的主要研究课题 .....	15
1.4.1 ZnO 非线性电阻电气物理特性 方面的主要研究工作 .....	15
1.4.2 合成绝缘 ZnO 限压器应用方面 提出的新课题 .....	16
参考文献 .....	19
<b>第 2 章 金属氧化物非线性电阻的导电机理</b> .....	22
2.1 概述.....	22
2.2 ZnO 非线性电阻的结构 .....	23
2.2.1 ZnO 非线性电阻的基本结构 .....	23



2.2.2	晶界层 .....	24
2.2.3	ZnO 晶体的能带结构 .....	27
2.3	ZnO 非线性电阻的基本电气参数 .....	27
2.3.1	ZnO 阀片的非线性 $U-I$ 特性 .....	27
2.3.2	ZnO 电阻的非线性指数 .....	29
2.3.3	ZnO 阀片在低电场区域的泄漏电流 及其电阻的负温度系数 .....	31
2.3.4	ZnO 阀片的电介质特性 .....	32
2.3.5	导电机理应能解释的非线性电阻的 一些基本性能 .....	33
2.4	ZnO 非线性电阻的双肖特基势垒 .....	35
2.4.1	ZnO 非线性电阻的双肖特基 势垒的形成 .....	35
2.4.2	肖特基势垒高度 .....	38
2.5	ZnO 非线性电阻低电场区域的导电机理 .....	39
2.5.1	低电场区导电机理概述 .....	39
2.5.2	肖特基势垒的电子热激活发射 .....	40
2.5.3	电子的二步传输导电机理 .....	43
2.6	ZnO 非线性电阻中电场区域的导电机理 .....	45
2.6.1	中电场区域导电机理的讨论 .....	45
2.6.2	隧道电流机理 .....	46
2.6.3	晶界势垒消失机理 .....	49
2.6.4	产生空穴的证明 .....	51
2.7	金属氧化物非线性电阻特性曲线的解释 .....	52
2.7.1	低电场区金属氧化物非线性电阻 $U-I$ 特性 .....	52
2.7.2	中电场区金属氧化物非线性电阻 $U-I$ 特性 .....	53

2.7.3	高电场区金属氧化物非线性电阻 <i>U-I</i> 特性 .....	53
2.8	建立金属氧化物非线性电阻的等效模型 有关的几个问题 .....	54
2.8.1	ZnO 阀片在小电流低电场区的 极化现象 .....	54
2.8.2	冲击电流作用下 ZnO 阀片的 动态伏安特性 .....	55
2.8.3	陡波头冲击电流作用时 ZnO 阀片电压 的过冲现象 .....	58
2.9	ZnO 阀片和限压器的等效电路模型 .....	60
2.9.1	ZnO 阀片小电流低电场区域 的等效电路 .....	60
2.9.2	ZnO 阀片大冲击电流区域的 等效计算模型 .....	61
2.9.3	金属氧化物限压器的冲击等效电路模型 .....	62
2.9.4	快速暂态作用下 ZnO 阀片的 等效电路模型 .....	64
2.10	本章主要结论 .....	65
	参考文献 .....	66
<b>第 3 章</b>	<b>非线性金属氧化物电阻的小电流特性 .....</b>	<b>71</b>
3.1	概述 .....	71
3.2	ZnO 阀片的功率损耗及阻性电流测量 原理及系统 .....	72
3.2.1	ZnO 阀片功率损耗测量原理及系统 .....	72
3.2.2	交流 ZnO 非线性电阻阻性电流的测量 .....	73
3.2.3	ZnO 阀片功率损耗及阻性电流	

测量系统 .....	76
3.3 ZnO 非线性电阻的交流阻性电流及 功率损耗特性 .....	77
3.3.1 交流 ZnO 非线性电阻的阻性电流特性 .....	77
3.3.2 ZnO 非线性电阻的交流功率损耗特性 .....	79
3.4 ZnO 阀片功率损耗的人工神经 网络(ANN)模型 .....	80
3.4.1 人工神经网络(ANN)模型 .....	81
3.4.2 ZnO 阀片交流功率损耗的人工神经 网络(ANN)模拟模型 .....	84
3.5 直流限压器非线性电阻的功率损耗特性 .....	86
3.5.1 直流输电系统 ZnO 限压器可能承受的 工作电压波形 .....	86
3.5.2 直流 ZnO 非线性电阻在不同波形下的 功耗特性 .....	90
3.5.3 温度对直流 ZnO 非线性电阻功率损耗 特性的影响 .....	94
3.6 ZnO 非线性电阻片功率损耗的频率特性 .....	94
3.7 本章主要结论 .....	96
参考文献 .....	97
<b>第 4 章 ZnO 非线性电阻片的老化机理 .....</b>	<b>99</b>
4.1 概述 .....	99
4.2 ZnO 阀片老化的基本特征 .....	100
4.2.1 伏安特性曲线的漂移现象 .....	101
4.2.2 功率损耗和阻性电流的增加 .....	102
4.2.3 ZnO 阀片电介质特性的变化 .....	104
4.2.4 采用热处理方法恢复老化阀片的性能 .....	106

4.2.5	ZnO 阀片的主要老化现象 .....	107
4.3	老化时肖特基势垒的畸变及离子的迁移 .....	107
4.3.1	肖特基势垒的畸变导致老化.....	107
4.3.2	热激电流表明存在离子的迁移.....	108
4.3.3	引起肖特基势垒畸变的离子.....	111
4.4	离子迁移的物理过程描述 .....	114
4.4.1	老化时离子的迁移过程.....	114
4.4.2	热处理时离子的迁移过程.....	116
4.5	离子迁移对老化影响的评估 .....	117
4.6	直流和交流电压作用时的老化机理 .....	119
4.6.1	直流老化机理.....	119
4.6.2	交流老化机理.....	120
4.7	冲击电流作用时的老化机理 .....	122
4.7.1	冲击电流作用时的老化机理.....	122
4.7.2	冲击电流与工作电压同时作用的 复合老化.....	124
4.8	ZnO 阀片的微裂纹在老化中的作用 .....	126
4.8.1	ZnO 阀片内部的微裂纹 .....	126
4.8.2	微裂纹是氧原子扩散的通道.....	126
4.8.3	微裂纹可能成为水分扩散的通道.....	127
4.9	研究 ZnO 非线性电阻功率损耗长期稳定性能的 加速老化试验 .....	129
4.9.1	ZnO 阀片的加速老化试验 .....	129
4.9.2	提高温度进行加速老化试验.....	130
4.9.3	同时提高作用电压和温度进行交流加速 老化试验.....	131
4.9.4	直流 ZnO 阀片在不同电压波形下的 加速老化试验.....	133

4.9.5	加速老化试验曲线和老化机理·····	136
4.10	本章主要结论·····	138
	参考文献·····	139
<b>第5章</b>	<b>金属氧化物阀片的冲击破坏机理·····</b>	<b>142</b>
5.1	概述·····	142
5.2	ZnO 阀片冲击破坏类型及其基本特征·····	144
5.3	破裂破坏机理及影响破裂破坏能量的因素·····	148
5.3.1	破裂破坏机理·····	148
5.3.2	能量吸收均匀度对破裂破坏 能量的影响·····	149
5.3.3	阀片热物理性能均匀度对破裂破坏能量 的影响·····	149
5.3.4	能量吸收和热物理性能都不均匀对破裂 破坏能量的综合影响·····	151
5.4	穿孔破坏机理及提高阀片穿孔破坏能量的措施·····	153
5.4.1	穿孔破坏机理·····	153
5.4.2	提高阀片穿孔破坏能量的措施·····	156
5.5	本章主要结论·····	157
	参考文献·····	158
<b>第6章</b>	<b>金属氧化物限压器的热特性研究·····</b>	<b>160</b>
6.1	概述·····	160
6.2	金属氧化物限压器热传导分析·····	161
6.3	限压器的热传导方程及其边界条件·····	163
6.3.1	限压器的热传导方程·····	163
6.3.2	限压器的表面换热系数·····	164
6.3.3	瓷套限压器内部间隙的换热·····	165

6.4	计算限压器热性能的等值热路图法 .....	167
6.4.1	限压器的等值热路图法 .....	167
6.4.2	传导换热的热阻 .....	169
6.4.3	自然对流换热的热阻 .....	170
6.4.4	辐射换热的热阻 .....	171
6.4.5	等值热容 .....	171
6.5	计算限压器热性能的有限差分法的基本原理 .....	172
6.6	限压器热特性分析的有限元方法及软件 .....	174
6.7	合成绝缘氧化锌限压器的散热特性 .....	177
6.7.1	合成绝缘限压器各组成部分对限压器 整体散热性能的影响 .....	177
6.7.2	合成绝缘限压器的散热时间常数 .....	179
6.7.3	合成绝缘限压器的散热系数 .....	180
6.7.4	限压器的散热试验 .....	180
6.8	限压器的热稳定性能 .....	182
6.8.1	限压器的热稳定性 .....	182
6.8.2	合成绝缘限压器的热平衡图 .....	183
6.8.3	合成绝缘限压器的稳定工作温度 .....	185
6.8.4	合成绝缘限压器的极限工作温度 .....	186
6.8.5	合成绝缘限压器热稳定的过电压能量 吸收能力 .....	188
6.8.6	热稳定时的温度分布 .....	189
6.8.7	阳光辐射对热稳定性能的影响 .....	190
6.9	本章主要结论 .....	191
	参考文献 .....	192
<b>第7章</b>	<b>高压金属氧化物限压器电位分布的研究 .....</b>	<b>194</b>
7.1	概述 .....	194

7.1.1	限压器电位分布研究的重要意义	194
7.1.2	影响限压器电位分布的因素	195
7.1.3	电位分布研究的方法	197
7.2	采用模拟电荷法与矩阵变换的方法求 等效计算电路	199
7.2.1	模拟电荷法的应用	199
7.2.2	用矩阵变换求限压器各单元之间的 等效互电容	200
7.3	几种典型情况下的电位系数	203
7.3.1	点电荷	203
7.3.2	垂直布置的直线电荷	204
7.3.3	水平布置的直线电荷	205
7.3.4	环线电荷	206
7.4	用基尔霍夫电流定律计算电位分布	207
7.5	限压器电位分布试验的光电测量方法	209
7.5.1	电位分布测量的原理	209
7.5.2	光电测量装置的结构及优点	210
7.5.3	限压器电位分布的测量	211
7.6	变电站基座安装的限压器的电位分布	212
7.6.1	忽略阀片间的互电容对计算 结果的影响	212
7.6.2	安装高度对限压器电位分布的影响	214
7.6.3	限压器引线长度的影响	215
7.7	悬挂式合成绝缘限压器的电位分布	216
7.7.1	悬挂在室内变电站入口处的限压器 的电位分布	216
7.7.2	限压器悬挂在变电站门型构架上时 的电位分布	218

7.7.3	悬挂在输电线路杆塔上时限压器 的电位分布·····	220
7.8	本章主要结论·····	222
	参考文献·····	222
<b>第8章</b>	<b>输电线路采用 ZnO 限压器后的雷击杆塔分析</b> ·····	224
8.1	概述·····	224
8.2	计算原理及基本计算参数·····	225
8.2.1	输电线路参数和线路波过程计算·····	225
8.2.2	输电线路杆塔参数·····	227
8.2.3	ZnO 限压器参数·····	227
8.2.4	雷电流·····	228
8.2.5	计算示意图·····	228
8.3	采用 ZnO 限压器后雷击杆塔时线路 的耐雷水平·····	229
8.3.1	杆塔冲击接地电阻对耐雷水平的影响·····	230
8.3.2	限压器的冲击残压对耐雷水平的影响·····	234
8.4	合成绝缘 ZnO 限压器的雷电放电电流·····	236
8.4.1	合成绝缘 ZnO 限压器的雷电放电 电流波形·····	236
8.4.2	合成绝缘 ZnO 限压器的雷电放电 电流幅值·····	236
8.5	合成绝缘 ZnO 限压器吸收的雷电放电能量·····	242
8.5.1	杆塔冲击接地电阻对 ZnO 限压器吸收 的雷电能量的影响·····	242
8.5.2	雷电流幅值对 ZnO 限压器吸收的雷电 能量的影响·····	242
8.6	带串联外间隙的合成绝缘 ZnO 限压器	



的计算结果 .....	244
8.7 本章主要结论 .....	246
参考文献 .....	246
<b>第9章 输电线路装有限压器后的雷绕击导线分析</b> .....	249
9.1 概述 .....	249
9.2 用规程法分析雷击线路时的绕击率 .....	251
9.3 用电气几何击距模型分析线路的绕击次数 .....	253
9.3.1 电气几何模型 .....	253
9.3.2 击距 .....	254
9.3.3 雷绕击导线的总绕击次数 .....	256
9.4 雷绕击导线的概率数值计算模型 .....	257
9.4.1 概率数值计算模型基本原理 .....	257
9.4.2 雷电先导模型 .....	258
9.4.3 迎面先导产生的判据 .....	260
9.4.4 导线及避雷线表面场强 .....	262
9.4.5 绕击数值计算过程 .....	263
9.5 考虑工作电压影响的绕击概率计算模型 .....	264
9.5.1 雷击的多电极系统模型 .....	265
9.5.2 考虑工作电压影响的绕击概率模型 .....	268
9.6 用数值计算模型计算线路绕击结果 .....	270
9.6.1 不同电压等级线路绕击次数 的计算结果 .....	270
9.6.2 最大绕击雷电流与总绕击次数 .....	270
9.6.3 保护角对绕击次数的影响 .....	274
9.6.4 杆塔高度对绕击次数的影响 .....	274
9.7 在输电线路采用限压器后的绕击分析 .....	274
9.7.1 线路的最大绕击雷电流和最小	