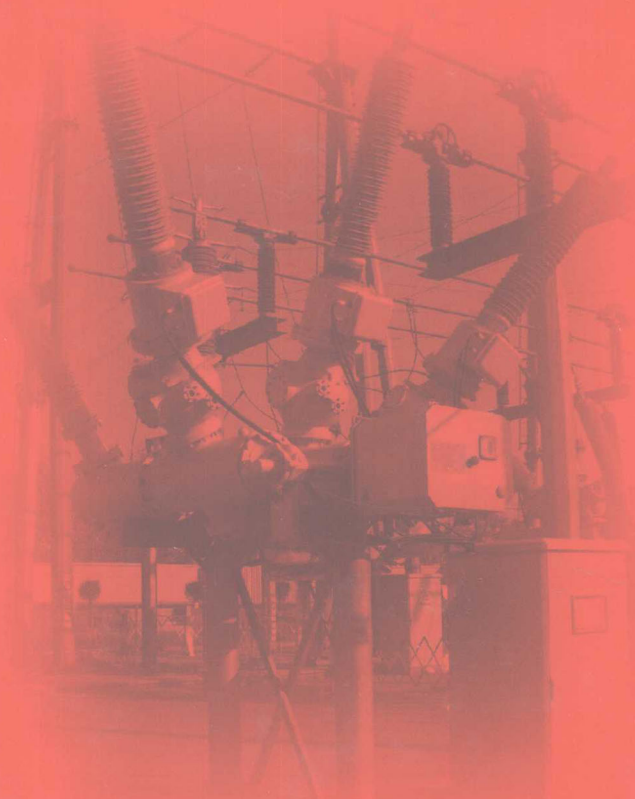




高压SF₆断路器

介质恢复特性的数值模拟

王尔智 编著



科学出版社

国家科学技术学术著作出版基金资助出版

高压 SF₆ 断路器 介质恢复特性的数值模拟

王尔智 编著

科学出版社

北京

内 容 简 介

本书系统论述了高压 SF₆ 断路器介质强度恢复特性数值模拟的理论和方法,全书分为 3 篇,共 17 章。第 1 篇为气体动力学基本理论,包括:介质强度恢复特性所涉及的气体动力学的基本知识、拉伐尔喷管内气体一维流动所遵循的基本规律、高压 SF₆ 断路器灭弧室气体流动的控制方程及数学性质。第 2 篇为高压 SF₆ 断路器灭弧室气流场的数值计算方法,包括:有限差分法的基本理论及数学性质、气流场的流体网格数值算法、总变差减小格式数值算法、边界元数值算法及有限体积多重网格数值算法。第 3 篇为高压 SF₆ 断路器介质强度恢复特性的数值模拟,包括:介质强度恢复的基本理论、压气式 SF₆ 断路器液压操动机构运动特性的数值计算、无载开断介质强度恢复特性的数值模拟方法、端子短路开断介质强度恢复特性的数值模拟方法、介质强度恢复特性的耦合数值模拟方法,以及喷口结构对介质强度恢复特性的影响及喷口优化设计。

本书可作为电气工程相关专业高年级学生教学参考书和研究生教材,也可供从事高压 SF₆ 断路器科学研究、产品设计和制造的人员参考。

图书在版编目(CIP)数据

高压 SF₆ 断路器介质恢复特性的数值模拟/王尔智等著. —北京:科学出版社, 2012

ISBN 978-7-03-034732-9

I. ①高… II. ①王… III. ①高压断路器-数值模拟-研究 IV. ①TM56

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012)第 122458 号

责任编辑:刘宝莉 汤 枫 裴 育 / 责任校对:朱光兰

责任印制:张 倩 / 封面设计:耕者设计工作室

科学出版社出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

中国科学院印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2012 年 9 月第 一 版 开本: B5(720×1000)

2012 年 9 月第一次印刷 印张: 32 1/4 插页: 1

字数: 635 000

定价: 128.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

近 20 年来,我国电力工业以空前的规模和速度发展,各大区基本建成以 500kV 超高压为主的电网。2009 年 1 月,晋东南—南阳—荆门全长 645km 特高压交流试验示范工程投入运行,标志着我国特高压远程输电技术登上了当代世界顶峰。根据我国电力工业远景发展规划,到 2020 年我国特高压电网将建成特高压交流变电站 60 座,变电容量 5.8 亿 kVA,线路 5 万 km。超高压、特高压输电技术的快速发展,必将带动我国电力装备制造业的大发展。

高压 SF₆ 断路器是电力系统中的重要保护与控制设备,在国内外高压,特别是超高压和特高压电力系统中,SF₆ 断路器占据着主导地位。开展高压、超高压特别是特高压 SF₆ 断路器理论与现代产品研发手段的研究,是当今高压 SF₆ 断路器领域的一项重要战略任务。在高压断路器的基本性能中,开断特性是衡量产品性能的最为重要的技术指标,而开断特性的优劣主要取决于断路器在切除故障的开断过程中,灭弧室内介质强度的恢复特性。目前,高压 SF₆ 断路器产品的开断性能是根据国家标准的规定,通过有关的型式试验考核的。然而,随着高速电子计算机的出现和计算流体力学理论的发展,对高压 SF₆ 断路器介质强度恢复特性的数值模拟,逐渐成为考核高压 SF₆ 断路器开断性能的一种数值试验手段。与试验研究相比,数值模拟具有较大的优越性:耗费少、时间短、人力省;便于优化设计;更自由、更灵活,能够观察到试验研究难以观察或测量到的现象和规律,如断路器开断过程中灭弧室气体流速、压力、密度、温度的分布,激波的位置和强度等。当代高压 SF₆ 断路器领域的发展,主要集中在特高压大容量及与之相应的特高压大容量 GIS 产品的开发、GIS 的三相共筒化、高压 SF₆ 断路器及 GIS 的小型化、高压 SF₆ 断路器及 GIS 的智能化的研究上。在这些现代化产品的研发阶段,可根据设计方案给出的设计参数,通过对介质恢复特性的数值模拟,考核设计方案的可行性,及时发现问题修改设计方案,这对企业的新产品开发或产品的更新换代是十分有益的,从而成为现代高压 SF₆ 断路器 CAD 和 CAM 的重要组成部分。目前,国内外尚未有系统介绍高压 SF₆ 断路器介质恢复特性数值模拟理论和方法的专著,期望本书的出版对推动我国实现高压 SF₆ 断路器设计现代化起到积极作用。

高压 SF₆ 断路器开断过程中介质强度的恢复特性涉及机构动力学、电磁学、气体放电、气体动力学、电弧等离质体以及传热学等理论。对介质恢复特性的数值模拟,难点主要体现在两个方面:一是对开断过程中灭弧室吹弧气体流动的数值计算;二是对端子短路开断过程动态电弧的建模与仿真。对于前者,由于断路器开断过程中灭弧室吹弧气体是一种非定常、可压缩、跨音速黏性流,这种流动是由双曲-抛物型偏微分方程组来描述的。因为它存在间断解,所以对这种流动的数值计

算存在很大困难,是计算流体力学中难度最大的一种数值计算。对于后者,端子短路开断过程中,电弧的产生、发展和熄灭是极其复杂的物理过程。仅从宏观角度看,电弧与吹弧气体之间、电弧与电场之间,以及电弧自生磁场与电弧之间存在着相互作用的关系,这就给电弧模型的建立及短路开断下的介质恢复特性的数值模拟,带来相当大的难度。

作者多年来一直以“高压 SF₆ 断路器介质恢复特性的数值模拟”作为主要研究方向,进行教学与科学研究工作。多年来的教学与研究生培养工作的实践表明,电气工程类专业的学生就所学的理论及知识来说,远不足以了解和掌握 SF₆ 断路器开断过程中,灭弧室所发生的复杂的物理现象、物理过程及其遵循的规律。基于此,作者在培养研究生的过程中,为博士生和硕士生开设了“高压 SF₆ 断路器灭弧室气体动力学及计算流体力学基础”专题课。本书是在这门课程讲义的基础上,进一步融入作者及其指导的博士生和硕士生的研究成果,并参阅近十多年来国内外有关研究成果撰写而成。全书分为 3 篇,共 17 章。第 1 篇为气体动力学基础。介绍气体动力学的基本知识,阐述气体的一些物理、化学特性及相关的物理概念;通过一维流动形式的讨论,以最简捷途径,给出有关气体流动的一些最基本的物理概念及理论,如拉伐尔喷管及其对气体流动的控制作用、激波的形成及所遵循的规律、流动参数的主要变化规律等;根据气体动力学原理,建立高压 SF₆ 灭弧室吹弧气体流动的控制方程并讨论其数学性质。第 2 篇为高压 SF₆ 断路器灭弧室气流场的数值计算方法。通过对流、扩散的模型方程,介绍差分离散的数学物理性质;给出高压 SF₆ 断路器开断过程吹弧气体数值计算的几种主要方法。第 3 篇为高压 SF₆ 断路器介质强度恢复特性的数值模拟。介绍介质强度恢复的基本理论,液压传动机构运动特性的数值计算,无载开断介质恢复特性的几种数值模拟方法,动态电弧模型的建立,端子短路开断介质恢复特性的几种数值模拟方法,介质恢复特性的耦合数值模拟,喷口结构对介质恢复特性的影响及喷口优化设计。通过各章内容的讨论,旨在使读者对高压 SF₆ 断路器介质强度恢复过程所涉及的理论和数值模拟方法及各种方法的适用范围有较为全面、系统的了解和掌握。应当指出的是,介质强度恢复特性的数值模拟是一种实践性和应用性都很强的数值试验手段,只有通过解决工程问题的实践,才能对它的理论和方法有更深入的理解和掌握。

书中第 2 篇和第 3 篇的主要内容取自于作者及其指导的博士生佟立柱、曹云东、刘晓明、陶瑞民、李莉、王连鹏和硕士生赵中原、刘锐、关盛楠、刘海峰、刘阳的研究成果。在全书的撰写过程中,得到了曹云东教授、刘晓明教授、高有华教授、李莉副教授的支持和帮助,全书成稿后又得到他们的认真审阅,提出了一些修改意见,在此作者向他们表示衷心感谢。

由于作者的水平有限,书中难免存在缺点和不足之处,敬请读者及专家予以批评指正。

目 录

前言

第 1 篇 气体动力学基础

第 1 章 气体动力学基本知识	3
1.1 流体的主要物理特性	3
1.1.1 流体的压缩性	3
1.1.2 气体的黏性	5
1.1.3 气体的导热性	7
1.2 气体动力学的研究范畴	8
1.2.1 连续介质假设	8
1.2.2 完全气体假设	9
1.3 气体的热力学特性及其关系式	9
1.3.1 气体的基本状态参数	9
1.3.2 气体的状态方程	10
1.3.3 热力学第一定律:内能、焓和比热容	11
1.3.4 热力学第二定律:熵	13
1.4 声速、马赫数	16
1.4.1 微弱扰动传播过程与传播速度、声速	16
1.4.2 声速公式	18
1.4.3 马赫数	21
参考文献	23
第 2 章 气体的一维定常流动	24
2.1 气体一维定常流动的基本方程组	24
2.1.1 连续方程	24
2.1.2 动量方程	25
2.1.3 能量方程	25
2.1.4 气体状态方程	26
2.2 气体的一维定常等熵流动	26
2.2.1 一维等熵流动方程组	26
2.2.2 一维等熵流动的三种特定状态	27

2.2.3	一维等熵气流参数的各种常用关系式	29
2.3	气流参数与管道截面积的关系	31
2.3.1	截面积变化对各气流参数的影响	31
2.3.2	一维等熵流的面积比公式	34
2.4	气流流道的性能参数	36
2.4.1	喷管的排气速度	36
2.4.2	喷管的排气流量	36
2.5	喷管的流动特性	37
2.5.1	收缩喷管	37
2.5.2	拉伐尔喷管	39
2.5.3	拉伐尔喷管流动状态的计算	43
2.6	膨胀波、压缩波与激波——超声速流中的扰动波	45
2.6.1	膨胀波	46
2.6.2	压缩波	47
2.6.3	激波的性质	48
2.6.4	正激波的运算	48
2.6.5	斜激波的运算	53
	参考文献	56
第3章	高压 SF₆ 断路器气流场数学模型及其性质	57
3.1	数学预备知识	57
3.1.1	物理场	57
3.1.2	标量场的梯度	58
3.1.3	矢量场的散度	58
3.1.4	矢量场的旋度	59
3.1.5	Hamilton 算子	60
3.2	矢量及指标表达式	60
3.2.1	自由指标	61
3.2.2	求和指标	61
3.2.3	δ_{ij} 符号	61
3.2.4	ϵ_{ijk} 符号	61
3.2.5	矢量及其运算的指标表述	62
3.3	张量分析初步	63
3.3.1	坐标变换下的标量与矢量	63
3.3.2	张量的定义	64
3.3.3	并矢张量与矢量场梯度	65

3.3.4	张量运算	67
3.4	流体力学基本原理	69
3.4.1	物质坐标与空间坐标	69
3.4.2	流体质点的随体导数	70
3.4.3	速度的分解与变形速度张量	72
3.4.4	流体的涡旋运动	74
3.4.5	流体内部应力的描述	75
3.5	流体力学的基本方程式	77
3.5.1	连续方程	77
3.5.2	动量方程	78
3.5.3	能量方程	78
3.5.4	本构方程	80
3.5.5	气体状态方程	82
3.6	欧拉方程	85
3.7	轴对称坐标下的 N-S 方程	86
3.7.1	连续方程	86
3.7.2	动量方程	87
3.7.3	能量方程	91
3.8	对流体力学守恒型与非守恒型方程组的讨论	93
3.8.1	N-S 方程的守恒形式	93
3.8.2	N-S 方程的非守恒形式	95
3.9	无量纲形式的 N-S 方程	100
3.10	流体力学控制方程组的数学性质	102
3.10.1	偏微分方程的适定性	102
3.10.2	初始条件和边界条件	104
3.10.3	偏微分方程的分类方法	105
3.11	湍流方程	113
3.11.1	湍流流动特性	114
3.11.2	湍流模型	114
	参考文献	116

第 2 篇 高压 SF₆ 断路器灭弧室气流场的

数值计算方法

第 4 章	有限差分法基本理论及数学性质	119
4.1	模型方程及其差分近似	119

4.1.1	模型方程	119
4.1.2	模型方程的差分近似	120
4.1.3	显式差分格式与隐式差分格式	121
4.2	差分方程的相容性	123
4.2.1	截断误差	123
4.2.2	相容性的定义	124
4.2.3	局部截断误差	125
4.3	线性差分格式的 Lax 定理	125
4.3.1	数值计算的收敛性	125
4.3.2	差分方程稳定性要求	127
4.3.3	相容与稳定条件下必然收敛	128
4.4	差分方程的稳定性及分析方法	128
4.4.1	不稳定现象	128
4.4.2	差分格式的稳定性分析	130
4.5	几种常用的差分格式及其稳定性分析	137
4.5.1	扩散方程的几种差分格式	137
4.5.2	双曲型方程的几种差分格式	139
4.6	离散方程的物理特性	140
4.6.1	离散方程的守恒性	141
4.6.2	离散方程的扩散特性和迁移特性	143
4.6.3	离散方程的假扩散性	146
4.7	双曲型方程差分离散近似中的逆风效应与迎风修正	149
4.7.1	一阶迎风格式	149
4.7.2	二阶迎风格式	150
4.8	数值耗散与数值频散	153
4.8.1	差分方程的修正方程	154
4.8.2	数值耗散与数值频散及其判别方法	156
	参考文献	158
第 5 章	高压 SF₆ 断路器气流场数值计算的总变差减小格式	159
5.1	激波的捕捉	159
5.1.1	激波拟合法	159
5.1.2	数值求解法	160
5.2	NND 格式	163
5.3	总变差减小格式	167
5.3.1	总变差及其减小条件	167

5.3.2	TVD 格式的构成	169
5.3.3	一阶精度 TVD 格式	171
5.3.4	二阶精度 TVD 格式	171
5.4	高压 SF ₆ 断路器气流场数值计算的总变差减小格式	176
5.4.1	高压 SF ₆ 断路器气流场 N-S 方程组	177
5.4.2	二维 $k-\epsilon$ 湍流模型方程	178
5.4.3	控制方程的有限体积 TVD 格式离散	179
5.4.4	边界层区域控制方程的离散	185
5.5	数值计算实例	187
5.5.1	SF ₆ 断路器气流场数值计算中关键问题的处理	187
5.5.2	无载开断下灭弧室气流场的数值计算	189
	参考文献	197
第 6 章	非定常可压缩流动数值计算的流体网格法	198
6.1	欧拉方程在流体网格法中过渡量的离散格式	198
6.2	流体网格法的计算步骤	200
6.3	边界条件的处理	203
6.4	激波的处理	205
6.5	任意多边形网格的欧拉方程差分格式——流体网格法的推广	206
6.5.1	控制方程的积分形式	206
6.5.2	轴对称坐标系下欧拉方程组的差分格式	207
6.6	小容性电流开断下高压 SF ₆ 断路器灭弧室气流场的计算实例	210
6.6.1	数值计算相关问题的处理	210
6.6.2	数值计算实例	211
6.6.3	不同时刻灭弧室内气流的流速分布	213
6.6.4	不同时刻灭弧室内气流的等马赫数分布	214
6.6.5	激波的存在	216
6.7	非定常可压缩黏性流数值计算的流体网格两步法	217
6.8	黏性气流流体网格法数值计算实例	220
	参考文献	222
第 7 章	高压 SF₆ 断路器气流场数值计算的边界元方法	223
7.1	无黏流动的控制方程	224
7.2	控制方程的边界元法基本解	224
7.2.1	定常条件下控制方程的基本解	225
7.2.2	定常条件下能量方程基本解的标准椭圆化	225
7.2.3	非定常流动条件下控制方程的基本解	227

7.3	高压 SF ₆ 断路器气流场数值计算的虚边界元法数学模型的建立	230
7.3.1	流场问题的方差泛函及场量的虚边界元方程	230
7.3.2	虚边界方程的离散数学模型	234
7.4	数值计算实例	239
7.4.1	虚边界元法数值计算验证	239
7.4.2	无载开断不同行程下灭弧室马赫数分布及其分析	242
	参考文献	247
第8章	灭弧室气流场数值计算的有限体积-多重网格法	248
8.1	有限体积法的基本概念	248
8.1.1	有限体积法的通用变量方程	248
8.1.2	有限体积法的基本思想	250
8.1.3	网格几何要素的标记	251
8.1.4	有限体积法的特点	251
8.2	一维稳态对流-扩散问题的有限体积法	252
8.2.1	计算网格的生成	252
8.2.2	离散方程的建立	253
8.3	二维对流-扩散问题的有限体积法	255
8.4	差分格式	256
8.4.1	网格的 Peclet 数	256
8.4.2	对差分格式的要求	257
8.4.3	中心差分格式	259
8.4.4	一阶迎风格式	260
8.4.5	混合差分格式	262
8.4.6	二阶迎风格式	264
8.4.7	QUICK 格式	265
8.5	工程问题数值计算的多重网格法	269
8.5.1	多重网格法概述	269
8.5.2	多重网格法的收敛性	270
8.5.3	多重网格法的格式	272
8.5.4	非线性方程的全近似格式	273
8.5.5	多重网格法的循环准则	274
8.6	贴体网格的生成	275
8.6.1	贴体网格生成概述	275
8.6.2	椭圆型微分方程法生成贴体网格	275
8.6.3	计算平面上的控制方程	279

8.7 计算平面上控制方程的有限体积法离散	281
8.7.1 交错网格技术	281
8.7.2 应用交错网格对计算平面上控制方程的有限体积法离散	283
8.8 离散方程组的求解	290
8.8.1 三对角矩阵的算法	291
8.8.2 线分布迭代计算	293
8.8.3 计算平面上控制方程的多重网格法	296
8.9 边界条件的处理	300
8.9.1 入口边界条件	301
8.9.2 出口边界条件	302
8.9.3 固壁边界条件	302
8.10 数值计算实例	304
8.10.1 分域边界的数值耦合	304
8.10.2 灭弧室气流场数值计算	306
参考文献	310

第 3 篇 高压 SF₆ 断路器介质强度恢复特性的 数值模拟

第 9 章 介质强度恢复的基本理论	313
9.1 介质击穿机理	313
9.1.1 汤逊理论	313
9.1.2 流注理论	314
9.2 实际系统中击穿电压的估算	314
9.2.1 流注理论法	315
9.2.2 临界场强法	315
9.2.3 SF ₆ 断路器中气体的击穿判据	315
参考文献	318
第 10 章 压气式 SF ₆ 断路器运动特性的数值计算	319
10.1 断路器液压操动机构的发展概况	319
10.2 液压操动机构的机构动力学模型	323
10.2.1 半液压式操动机构动力学模型	324
10.2.2 断路器触头行程特性	327
10.2.3 全液压式机构动力学模型	327
10.3 高压 SF ₆ 断路器无载开断运动特性的数值计算	328
10.3.1 无载分闸过程研究的意义	328

10.3.2	半液压式 SF ₆ 断路器无载开断运动特性计算	328
10.3.3	252kV 全液压式 SF ₆ 断路器无载开断运动特性计算	331
	参考文献	333
第 11 章	无载开断介质恢复特性数值模拟的有限元-流体网格法	334
11.1	研究无载开断介质恢复特性的意义	334
11.2	电场数值计算的有限元法基本原理	336
11.2.1	电场分布的数学模型及其等价变分问题	336
11.2.2	有限元剖分及分片插值与基函数	337
11.2.3	252kV SF ₆ 断路器灭弧室电场的有限元法数值计算	341
11.3	数值模拟实例	343
	参考文献	344
第 12 章	无载开断介质恢复特性数值模拟的有限元-总变差减小方法	346
12.1	电场的数值计算	346
12.1.1	灭弧室场域剖分	346
12.1.2	550kV SF ₆ 断路器灭弧室电场有限元数值计算结果与分析	347
12.1.3	不同喷口结构下灭弧室电场数值计算与分析	348
12.2	开断过程灭弧室气体压力和密度的数值计算	350
12.3	数值模拟实例	355
	参考文献	357
第 13 章	无载开断介质恢复特性数值模拟的虚边界元法	358
13.1	轴对称电场边界元数值计算的基本解	358
13.2	电场数值计算的虚边界元法	360
13.2.1	虚边界元法的构思	360
13.2.2	轴对称场的虚边界元法数学模型的建立	360
13.2.3	电场问题虚边界元数学模型的离散	362
13.2.4	电场数值计算	364
13.3	灭弧室压力场和密度场的虚边界元法数值计算	366
13.4	数值模拟实例	368
	参考文献	369
第 14 章	无载开断介质恢复特性的有限体积-多重网格法数值模拟	371
14.1	电场数值计算的有限分析-多重网格法	371
14.1.1	灭弧室分区贴体网格的生成	371
14.1.2	数学模型的坐标变换	373
14.1.3	550kV 单断口 SF ₆ 断路器灭弧室电场数值计算	374
14.2	灭弧室压力场的有限体积-多重网格法数值计算	380

14.3 数值模拟实例	383
参考文献	384
第 15 章 端子短路开断介质恢复特性的数值模拟	385
15.1 电弧模型发展概况	386
15.2 圆柱形电弧模型下弧后介质强度恢复特性的数值模拟	388
15.2.1 电弧数学模型	388
15.2.2 辐射项处理	389
15.2.3 端子短路开断过程灭弧室气流场数值模拟	390
15.2.4 不同燃弧时间零后灭弧室内气流的密度分布	396
15.2.5 弧后介质强度恢复特性的数值模拟	397
15.3 能量流电弧模型下弧后介质强度恢复特性的数值模拟	399
15.3.1 能量流电弧模型	399
15.3.2 热气流场数值计算	401
15.3.3 弧后介质强度恢复特性的数值模拟与分析	407
15.4 等效电导电弧模型下弧后介质恢复特性的数值模拟	410
15.4.1 等效电导电弧模型的建立	410
15.4.2 决定电弧形态的气流场与喷口电弧相耦合的数学模型	412
15.4.3 耦合数学模型中相关问题的处理	414
15.4.4 断路器短路开断过程动态电弧的仿真	416
15.4.5 弧后介质强度恢复特性数值模拟	421
参考文献	422
第 16 章 高压 SF₆ 断路器介质恢复特性的耦合数值模拟	425
16.1 无载开断下介质恢复特性耦合数值模拟	425
16.1.1 数值模拟的耦合关系	425
16.1.2 无载开断介质恢复特性的耦合数值模拟实例	426
16.2 短路开断下弧后介质恢复特性的耦合数值模拟	433
16.2.1 耦合数值模拟关系	433
16.2.2 电弧模型及洛伦兹力	433
16.2.3 灭弧室磁流体动力学方程	434
16.2.4 短路开断下弧后介质恢复特性耦合数值模拟实例	435
16.3 洛伦兹力对气流参数分布及介质恢复特性的影响	443
参考文献	450
第 17 章 喷口结构对介质恢复特性的影响及喷口优化设计	451
17.1 喷口型面结构对介质恢复特性的影响	451
17.1.1 不同型面结构喷口对电场强度分布的影响	451

17.1.2	光滑型面结构喷口的灭弧室内气流场的数值计算	454
17.1.3	具有局部“放-收”型面结构喷口的灭弧室内气流场的数值计算	460
17.1.4	两种型面结构喷口下灭弧室内气体流速及密度分布的对比分析	465
17.1.5	两种型面结构喷口下灭弧室内介质恢复特性的对比分析	466
17.2	喷口型面尺寸对介质恢复特性的影响	469
17.2.1	喷口仰角和喷口长度对介质恢复特性的影响	469
17.2.2	两段式型面结构喷口对介质恢复特性的影响	471
17.3	喷口的气动优化设计	475
17.4	252kV 断路器两段式型面喷口优化设计	477
17.4.1	实现喷口优化设计的非线性规划	477
17.4.2	通过流场的气体压力获取介质恢复特性	479
17.4.3	BP 神经网络和遗传算法相结合的喷口优化设计方法	480
17.5	550kV SF ₆ 断路器多级“放-收”型面喷口优化设计	488
17.5.1	高压 SF ₆ 断路器喷口中的湍流	488
17.5.2	考虑湍流影响的 550kV 断路器喷口优化设计	491
	参考文献	495
	附录	497

第 1 篇 气体动力学基础

气体动力学是流体力学的一个分支,其研究对象是可压缩流体的运动规律及其与固体的相互作用。高压 SF₆ 断路器开断过程中,依靠其液压操动机构压缩灭弧室内的 SF₆ 气体,在灭弧室的喷管中形成跨音速气流用于熄弧,实现对短路电流的分断。对断路器开断过程中吹弧气体流动规律的研究是对断路器开断特性研究的核心内容。吹弧气体的流动规律不仅取决于促成气体流动的外界因素以及气体流路的结构,而且还与吹弧气体本身的物理特性有关。吹弧气体的流动同其他物质流动一样,必然遵循自然界的一些基本规律,如质量守恒定律、能量守恒与转换定律等。但吹弧气体在其管道中的流动形成跨音速流时,又遵循一些特殊规律。本篇通过对气体基本物理属性和跨音速流动现象的讨论以及高压 SF₆ 断路器气流场数学模型的建立,为高压 SF₆ 断路器介质恢复特性的数值模拟奠定必要的气体动力学基础。

