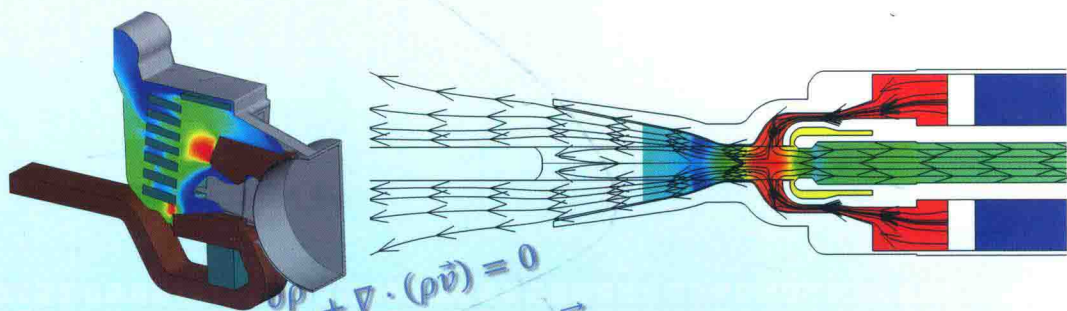


开关电器计算学

Computing Methodology
of Switchgears

荣命哲 吴 翊 著



科学出版社

开关电器计算学

Computing Methodology of Switchgears

荣命哲 吴 翊 著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书以开关电器领域多年的研究工作成果为基础,力图反映近年来国内外有关研究成果和发展动态。本书内容以理论研究为主,以实践经验为辅,通过对开关电器关键部件特性的准确数字化仿真为基础构建开关电器计算学理论方法体系,同时紧密结合实际工程应用,给出大量的技术实例。

全书共九章。第1~5章以电弧计算模型为主,内容包含电弧仿真的基础理论与计算方法、弧后介质恢复过程的特殊性分析、开关柜内部故障燃弧的计算以及服务于电弧仿真模型的物性参数计算与诊断手段;第6~8章以开关电器的机构特性、动热稳定性为对象,介绍对应的分析方法;第9章列举开关电弧的典型计算实例。

本书旨在为开关电器的设计研究人员,以及高等院校相关专业的师生提供参考。

图书在版编目(CIP)数据

开关电器计算学=Computing Methodology of Switchgears / 荣命哲, 吴翊著. —北京: 科学出版社, 2018.10

ISBN 978-7-03-058165-5

I. ①开… II. ①荣… ②吴… III. ①开关-计算机仿真 IV. ①TM56

中国版本图书馆CIP数据核字(2018)第139308号

责任编辑: 范运年 / 责任校对: 彭 涛

责任印制: 师艳茹 / 封面设计: 铭轩堂

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>

北京通州皇家印刷厂印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2018年10月第 一 版 开本: 720 × 1000 1/16

2018年10月第一次印刷 印张: 24 1/2

字数: 473 000

定价: 198.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

序 言

开关电器是电力设备的重要组成部分，也是实现电力系统保护、控制和调节的关键设备。开关电器的设计是一个综合考虑热、机械、绝缘、放电理论的复杂过程。开关电器的设计长期依靠经验公式、反复试制样机和试验测试，存在着设计效率低、产品性能提升困难等诸多问题。开关电器计算学通过将基本理论、仿真技术、计算方法相结合，实现对开关电器关键参数的计算，为开关电器的设计带来了重要的变革，旨在摆脱传统依赖于经验和反复试验的设计模式，可以大幅提高设计效率，对于加快新产品开发和已有产品升级换代具有重要的指导意义。

该书针对开关电器设计所面临的电弧放电和动热稳定两大类难题，探讨了具体的计算与分析方法。首先，结合开关电器的分断过程叙述了开关电弧建模的基本理论，从燃弧熄弧两个阶段提出了电弧的建模和计算方法，同时探讨了开关柜内部故障电弧条件下气压膨胀的模型，并叙述了气体电弧建模所必需的基本物性参数的计算方法，在此基础上探讨了电弧参数的光学测试手段，为开关电弧的计算结果提供验证方法。其次，本书围绕开关电器的动热稳定性设计问题，叙述了开关电器发热的计算方法，探讨了开关电器触头系统洛伦兹力和霍尔姆力的计算方法，并结合低压塑壳、框架断路器和高压真空断路器介绍了操作机构的建模方法。最后，该书为便于读者掌握计算方法和开展实践应用，给出了电流开断过程的计算实例。

该书是作者 20 多年来在开关电器研究方面的工作总结，集合理论、方法和实践案例，可读性强，对科研设计人员、高校教师和学生都有很好的指导和参考意义，本人愿意将著作推荐给相关读者。

中国科学院院士



2018 年 6 月

前 言

开关电器在电力系统中是一种能够实现控制与保护双重作用的电器，广泛用于电力系统的发电厂、变电站、开关站及用电线路上。基于开关电器的功能特点，在电力系统中，开关电器一方面应在额定开断和短路开断情况下具有可靠的开断能力，另一方面应保证在稳态额定通流以及延时过载或短时短路电流情况下的动热稳定性。

近年来，顺应电力系统的发展趋势，开关电器不断向环保化、智能化以及小型化方向发展，其应用场合也从交流系统向直流系统拓展。开关电器在分断和接通电路过程中伴随着强烈的电弧放电，其物理过程极其复杂，这对开关电器的设计和制造提出了很高的要求。传统的开关电器设计一直以实验为主，找到较为准确的设计计算方法，降低开关电器的设计研发周期，降低研发成本，是科研人员长期以来不懈的追求。

1. 开关电器计算学简介

为实现上述目标，开关电器计算学应运而生，这也是本书的由来所在。简而言之，开关电器计算学就是用数学的方法而非实验的手段，对开关电器的电弧特性、操作机构特性以及动热稳定性进行预测、评估和优化，其主要包含三个层面的内涵。

首先，随着分析方法被引入电磁学、传热学、结构力学、流体力学以及原子分子物理学等诸多学科中，人们对开关电器涉及的复杂物理过程的认识不断深入，同时，借助于 20 世纪 90 年代计算机技术的飞跃，已能够实现通过数学方法描述开关电器的物理过程。因此，开关电器计算学是一门基于数值仿真计算的多学科交叉的新兴学科。

其次，开关电器的关键部件包括灭弧系统、操作机构、脱扣系统、触头系统等，对其中单一物理过程的描述不足以全面指导开关电器的设计。开关电器计算学旨在多物理场耦合的基础上，解决开关电器涉及的诸多关键科学问题，综合描述开关电器的电弧特性、操作机构特性以及动热稳定性，形成用于开关电器设计的系统理论体系，实现对开关电器关键部件性能的全面数值预测，减少开关电器研发过程中的实验依赖。

最后，开关电器计算学一直处于不断发展的阶段，一方面其数值计算的过程不断优化，计算难度随之降低，会越来越广泛地应用到开关电器的研发设计当中；

另一方面其数值计算结果逐步从更微观、更根本的角度向真实情况逼近,让人们能够深入地了解开关电器内部物理过程的复杂本质,这必将为开关电器关键部件性能的优化提供更为准确的理论指导和更为广阔的设计思路。

2. 开关电器计算学理论的发展

从开关电器诞生以来,其研究设计手段的演变均从最初的经验公式起步,逐步发展成为结合经验公式与理论分析的半经验设计,直到现阶段相对成熟的数字化仿真。

1) 电弧模型的发展

从 20 世纪初开始,电弧仿真模型的研究经历了一个不断完善的过程,最早的模型大多基于经验公式和实验数据对电弧状态进行简单的定性分析。其中,有代表性的为 40 年代的黑盒电弧模型,该模型把电弧看作电路中的两端元件,通过 Mayr 与 Cassie 微分方程表述电弧的伏安特性,在与其他电路参数耦合求解的情况下,能够反映电弧-电路相互作用情况下的开断过程。然而,该模型仅为表征电弧总体电特性的经验方程,无法为电弧内部复杂的物理化学过程提供详尽的信息,而且微分方程中稳态电弧电导、电弧时间常数等相关参数不具备普适性,在不同开断条件下需要通过试验获得。在现阶段开关电器发展高速化、多样化的背景下,该模型的应用受到了越来越多的限制。

20 世纪 40 年代,Barbu 等最早提出了磁流体动力学的概念,这是一门研究导电流体在磁场中的运动规律的学科。借鉴该学科的研究成果,70 年代,用场描述电弧变化过程的方法逐步发展起来。由于当时高温电弧的理化特性尚未明确,加上计算能力的限制,这一时期的电弧数学模型相对简化,主要以一维电弧动态模型为主,难以为开关电器的设计提供指导。

20 世纪末,学者将热等离子体的分析方法引入电弧研究中,计算了电弧物性参数随温度、压力的变化规律,获得了磁流体动力学方程中焓值、比热容、黏滞系数、热导率以及电导率等大量未知量,攻克了高温电弧模型中的难点问题,实现了不同开断条件、灭弧室结构情况下的场电弧数字化仿真。随着计算机技术的飞跃,20 世纪末到 21 世纪初是电弧磁流体动力学模型蓬勃发展的阶段,包括我们的研究团队在内,电弧领域的研究取得了大量的成果,如电弧弧根转移与跳变规律、大容量空气断路器栅片切割与烧蚀机理、高压断路器电弧不稳定性、非平衡态电弧行为等。

2010 年以来,电弧模型的研究出现了工程化、理论化两个发展分支。一方面,借助于大型商业软件的完善与推广,很多开关电器相关的企业已具备电弧数值仿真的能力,能够指导其产品的结构优化;另一方面,随着等离子体诊断手段的引

入, 电弧特性的理论研究进一步深入, 学者开始从更微观、更基础的层面探寻电弧行为的发展机理, 以期当今几个热点问题, 如电流零区非平衡电弧的介质恢复行为、 SF_6 替代气体等的研究提供更为准确、深入的科学指导。

2) 结构特性与动热稳定性模型的发展

由于电磁学、牛顿力学、结构力学以及传热学等几门学科发展更早, 相比于电弧模型, 开关电器操作机构特性以及动热稳定性的设计手段发展更快, 其仿真设计手段更为成熟。

20 世纪, 开关电器操作机构与动热稳定特性的设计最初同样以经验公式为主。其中非常典型的是描述开关电器动静触头接触电阻的导电桥模型: 该模型中根据触头接触力、材料硬度等信息, 通过解析式即可获得接触表面导电斑点的半径。基于这一导电桥模型, 学者又推导了由触头间电流收缩产生的 Holm 电动斥力公式。另外, 在电磁机构设计方面, 以电磁分析为基础, 科研人员提出了诸多计算电磁机构磁路的数值方法, 包括解析法、图解法、磁场分割法等, 可以实现常见电磁机构的电磁场以及力学特性的分析。上述经验公式或半解析半经验公式是 20 世纪开关电器操作机构特性与动热稳定性分析的最常见方法。

20 世纪末到 21 世纪初, 伴随着开关电器不断提高的性能需求, 开关电器操作机构、触头系统等结构日趋复杂, 加上电磁操作机构中非线性铁磁材料的应用, 上述设计方法的工程应用难度越来越高。借助于有限元分析软件与计算机的迅速发展, 有限元方法开始应用到开关电器关键部件设计的各个方面, 包含触头系统动热稳定性、弹簧机构操作特性、电磁和永磁操作机构特性以及低压电器中热脱扣系统特性等。通过与试验测试结果对比发现, 有限元方法具有计算精度高、普适性好等诸多优点。

然而, 在有限元分析软件的应用当中, 由于几何模型处理过程复杂、剖分难度高、边界条件和载荷设置困难等, 早期该方法在开关电器设计中一直未得到推广应用。从 2010 年左右开始, 有限元分析软件发展迅速, 以 ANSYS 公司的 Maxwell 软件包为例, 很多软件朝着界面友好化、操作简便化方向发展, 计算精度不断提高, 操作难度大大降低, 功能模块日趋完善。有限元方法在开关电器操作机构特性、动热稳定性分析中得到了大规模的推广应用。

3. 本书内容介绍

构建开关电器计算学理论方法体系的基础, 是结合实践经验实现对开关电器关键部件特性的准确数字化仿真, 这是现阶段需要解决的关键问题。鉴于此, 我们的研究团队自 2000 年以来, 在开关电器数字化仿真计算方面进行了大量深入、系统的研究工作, 主要研究内容涵盖了开关电器研究设计的诸多方面, 如动热稳定性分析、高速电磁机构设计、电极与器壁烧蚀机理、低压断路器电流

转移与栅片切割过程、空气介质中压直流大电流快速开断技术、高压断路器电流零区非平衡电弧的介质恢复特性、电弧物性参数计算以及电弧等离子体诊断方法研究等。

本书以这些研究工作成果为基础，力图反映近年来国内外有关研究成果和发展动态。由于作者水平有限，书中不足之处在所难免，敬请读者指正。

荣命哲

2018年5月

目 录

序言

前言

第 1 章	开关分断过程电弧仿真基础与计算	1
1.1	电弧基本物理过程	2
1.2	电弧磁流体动力学模型	3
1.2.1	气流场控制方程	4
1.2.2	电磁场控制方程	6
1.3	辐射模型	8
1.4	湍流模型	12
1.5	电弧模型求解	15
1.5.1	控制方程组的离散化	15
1.5.2	Fluent 软件二次开发	16
1.6	空气电弧栅片切割仿真	22
1.6.1	电弧仿真数学模型和边界条件	23
1.6.2	电弧模型求解方法	31
1.6.3	考虑铁栅片烧蚀的电弧切割过程仿真结果	31
1.7	SF ₆ 喷口电弧仿真	34
1.7.1	SF ₆ 电弧模型磁流体动力学建模	35
1.7.2	超声速 SF ₆ 喷口电弧稳态特性	40
1.8	本章小结	42
	参考文献	43
第 2 章	弧后介质恢复过程计算与分析	46
2.1	热非平衡行为	48
2.1.1	热非平衡行为的成因	48
2.1.2	研究现状	49
2.1.3	双温模型建模	50
2.1.4	计算实例	54
2.2	化学非平衡行为	61
2.2.1	化学非平衡行为的成因	61
2.2.2	研究现状	63
2.2.3	化学非平衡电弧建模	64

2.2.4 计算实例·····	74
2.3 电子能量的非麦克斯韦分布行为·····	82
2.3.1 电子能量偏离麦克斯韦分布的成因·····	82
2.3.2 研究现状·····	83
2.3.3 高温气体临界击穿场强计算模型·····	83
2.4 本章小结·····	86
参考文献·····	87
第3章 开关柜内部故障电弧的计算与分析 ·····	92
3.1 内部故障电弧简介·····	93
3.1.1 故障电弧的基本特性·····	94
3.1.2 故障电弧的物理效应及危害·····	94
3.2 内部故障电弧研究的国内外现状·····	96
3.3 内部故障电弧的计算方法·····	97
3.3.1 标准计算法·····	98
3.3.2 改进标准计算法·····	101
3.3.3 CFD 法·····	102
3.3.4 磁流体动力学法·····	104
3.4 不同计算方法典型结果及分析·····	112
3.4.1 标准计算法结果及分析·····	112
3.4.2 CFD 法结果及分析·····	114
3.4.3 磁流体动力学法结果及分析·····	115
3.5 本章小结·····	123
参考文献·····	124
第4章 电弧等离子体物性参数计算 ·····	127
4.1 局部热力学平衡电弧等离子体物性参数计算·····	127
4.1.1 配分函数·····	127
4.1.2 粒子组分·····	130
4.1.3 热力学参数·····	132
4.1.4 碰撞积分与输运系数·····	133
4.2 非热力学平衡电弧等离子体物性参数计算·····	140
4.2.1 双温模型的基本假设·····	140
4.2.2 双温等离子体组分计算·····	141
4.2.3 双温等离子体热力学系数计算·····	145
4.2.4 双温等离子体输运系数计算·····	147
4.3 化学非平衡电弧等离子体物性参数计算·····	152

4.4 电弧等离子体辐射输运系数计算	154
4.4.1 电弧净辐射模型与净辐射系数	155
4.4.2 电弧 P-1 辐射模型与平均吸收系数	162
4.5 本章小结	165
参考文献	166
第 5 章 开关电弧等离子体相关参数的测量	171
5.1 介绍	171
5.2 原子发射光谱法测量温度与电子数密度	172
5.2.1 实验原理	172
5.2.2 应用实例	175
5.3 原子吸收光谱法测原子数密度	179
5.3.1 实验原理	179
5.3.2 应用实例	181
5.3.3 实验结果	182
5.3.4 局限性	183
5.4 激光汤姆孙散射法测温度与电子数密度	183
5.4.1 实验原理	184
5.4.2 应用实例	186
5.4.3 局限性	187
5.5 电弧形态测量	188
5.5.1 高速摄影仪测量原理	189
5.5.2 测量实验与分析	189
5.6 电弧热辐射测量	190
5.6.1 实验原理	191
5.6.2 应用实例	192
5.7 电弧光学测量的基本概念	195
5.7.1 光谱的线型与主要展宽机制	195
5.7.2 光度学相关基本概念	198
参考文献	199
第 6 章 开关电器的热计算	202
6.1 开关电器热计算的基本方法	203
6.1.1 开关电器热源的计算	203
6.1.2 开关电器传热过程分析	209
6.1.3 开关电器的热计算模型	212
6.2 低压断路器稳态热计算	215
6.2.1 基于气流场分析的塑壳断路器热分析方法	216

6.2.2 基于散热系数的塑壳断路器稳态发热简化分析方法	227
6.3 高压断路器热分析	233
6.3.1 高压断路器发热计算	233
6.3.2 高压断路器散热计算	239
6.4 本章小结	242
参考文献	243
第7章 电动力计算与分析	244
7.1 电力系统中短路电流分类与计算	244
7.1.1 电力系统中短路电流的分类	244
7.1.2 短路电流的计算方法	245
7.2 电动力计算原理与方法	250
7.2.1 洛伦兹力的计算方法	251
7.2.2 霍尔姆力的计算方法	251
7.3 低压电器电动力建模方法	254
7.3.1 框架断路器短路电流电动力计算	254
7.3.2 塑壳断路器短路电流电动力计算	274
7.4 高压电器短路电流电动力建模与分析	279
7.4.1 高压电器短路电流电动力建模	279
7.4.2 高压电器短路电流电动力计算与分析	282
7.5 本章小结	294
参考文献	294
第8章 开关电器操动机构的计算与分析	296
8.1 弹簧机构的计算与分析	297
8.1.1 中压弹簧机构的仿真建模与故障诊断	298
8.1.2 低压弹簧机构的仿真建模与优化设计	306
8.2 液压机构的计算与分析	313
8.2.1 液压机构的仿真建模	314
8.2.2 液压机构缓冲结构的优化设计	322
8.3 永磁机构的计算与分析	326
8.3.1 中压永磁机构的仿真建模与故障诊断	327
8.3.2 低压永磁机构的仿真建模与优化设计	331
8.4 本章小结	344
参考文献	345
第9章 开关电弧的仿真实例	347
9.1 微型断路器电弧仿真	347

9.1.1	微型断路器介绍	347
9.1.2	微型断路器几何模型简化	349
9.1.3	微型断路器电弧材料属性设置	351
9.1.4	微型断路器电弧仿真边界条件设置	353
9.1.5	计算结果	356
9.2	高压 SF ₆ 断路器电弧仿真	369
9.2.1	高压 SF ₆ 断路器几何模型简化	369
9.2.2	湍流模型	369
9.2.3	辐射模型	370
9.2.4	高压 SF ₆ 断路器材料属性设置	370
9.2.5	高压 SF ₆ 断路器电弧仿真边界条件的设置	370
9.2.6	计算结果	373
	参考文献	375

第1章 开关分断过程电弧仿真基础与计算

当电气系统需要分断电流时,对于气体断路器,其动静触头迅速打开,在这个过程中,触头间隙的气体介质(空气、 SF_6 等)中会产生一团温度极高、发出强光和能够导电的气体,本书称为气体开关电弧(简称电弧)。以空气断路器为例,电弧在产生后,会在动静触头上作短暂停滞,然后在磁场、气流场的作用下沿着电极的跑弧道快速向灭弧栅片运动或通过强烈气吹,并在磁场力、气流场的影响下被栅片切割、冷却并最终熄灭,故障电路也随之被切断。在开关电器中,电弧的存在具有两面性,一方面给故障回路提供了能量泄放的途径,降低电路开断时产生的过电压,电弧电压也有助于限制故障电流的快速上升;另一方面电弧会烧损触头,严重时会引起开关电器的着火爆炸。

在电器学科中对电弧研究,就是为了能了解电弧从起弧到熄弧全过程的相关物理现象的特性和内在机理,从而让电弧运动能趋利避害。对电弧的研究主要有两种方法,一是通过实验测取电弧电压、电流,电弧空间的气压、磁场变化,电弧运动形态等宏观参数来对电弧的运动进行观察分析;二是通过建立电弧数学模型,对开关电弧内的气流场、电磁场、温度场等进行仿真研究。在实际应用中,这两种研究方法并非彼此孤立,而是互为补充、相辅相成的。

触头打开后的燃弧过程是断路器开断的核心环节,研究断口燃弧过程及其特性,对于新型断路器的设计和优化具有重要的理论价值。目前开关电器的设计仍沿用传统的样机制作和反复试验的方法,不符合现代电器的设计理念,采用开关电器仿真优化的设计方法可以大幅提高设计效率、降低成本。其中,电弧模型的研究是一个跨学科的复杂问题,且电弧持续时间短、温度高,许多物理量难以直接测量,因此对它的研究难度较大。一直以来,气体电弧的动态计算模型被视为电弧理论的重要组成部分,许多科学工作者进行了广泛而深入的研究。

本章中针对电弧(以下章节如未特别指出,均指气体开关电弧)的仿真方法分为三个部分:第一部分对电弧仿真所需的磁流体动力学(Magnetohydrodynamics, MHD)模型、电弧辐射模型、湍流模型及电弧模型的一般求解方法进行详细阐述;第二部分以空气断路器中灭弧栅片切割电弧的过程为例进行三维建模仿真,同时讨论金属表面鞘层和烧蚀对电弧特性的影响;第三部分以 SF_6 断路器喷口电弧为例建立二维仿真模型,并对其稳态过程进行计算,同时引入湍流模型和修正后的电弧辐射模型。本章的学习可以使读者加深对电弧理论和建模方法的理解,初步掌握电弧计算的方法和技巧。

1.1 电弧基本物理过程

开断电路时若电流及加在触头间的电压大于一定值,则在触头间隙通常会产生一团高温、强亮光和能够导电的气体——电弧,图 1-1 给出了低压空气断路器和高压 SF₆ 断路器电弧的燃弧过程。对于开关电器,研究电弧的目的是尽快熄灭电弧,掌握触头打开后的电弧行为特性及其规律是优化开关设计、改善开断性能的关键。然而,电弧现象是一个多物理场之间强耦合变化的复杂过程,同时伴随与周围材料的相互作用,到目前为止,电弧理论仍有待进一步完善。

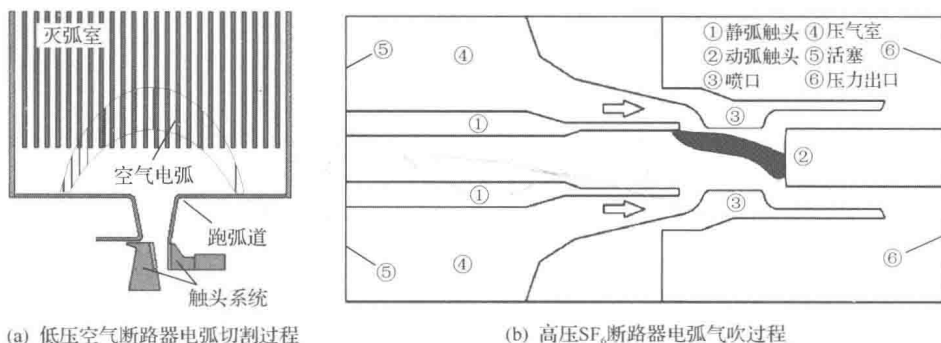


图 1-1 气体断路器中的燃弧过程

电弧等离子体中存在着气流场、热场、电磁场之间相互作用的复杂过程,如图 1-2 所示。由于电弧是电流的主要通道,电流产生的焦耳热使电弧等离子体具有很高的温度,炽热的电弧通过热传导、对流、辐射的方式向周围传递能量。在这个过程中,电极、器壁和灭弧室等低温区域被加热,而温度、压强的变化又导致了电弧电导率发生改变,从而导致电场及电流密度发生改变。电流密度的改变一方面使得焦耳热发生变化,另一方面导致电弧的自身磁场及洛伦兹力发生变化;电弧等离子体自身的气流场在洛伦兹力的作用下也不断改变,这时灭弧室内的温度、压力等参数也相应地发生了变化,由此形成了气流场、热场和电磁场之间复杂的耦合关系。总之,电弧的仿真涉及气流场、热场和电磁场、辐射场的计算,并且各方程组的计算中相互之间具有较强的耦合性,如何建立模型并求解相应的方程组是计算开关电弧的关键。

电弧等离子体包含电子、离子和其他中性粒子,由于气体的电离度与温度的变化有关,其内部各种粒子的密度也随温度不同而变化,图 1-3 给出了空气电弧中的粒子数密度图^[1]。整个等离子体空间呈电中性状态,遵循局部热力学平衡条件,因此,可以把电弧等离子体看成许多粒子的气体混合物,它具有流体的一般性能,但比普通流体复杂得多。它带有导电功能,内部电流能产生焦耳热,可以

用导电流体的理论对其进行计算分析。磁流体动力学就是研究导电流体在电磁场中的运动规律的一门学科，它是基于传统流体力学理论并与电磁理论相结合而产生的，已经广泛应用于许多工业领域。

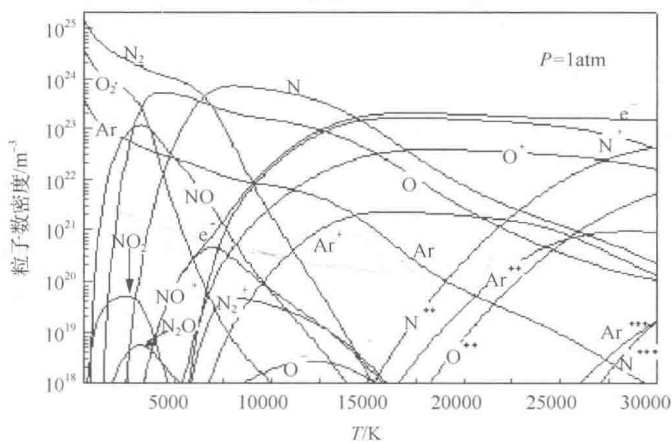
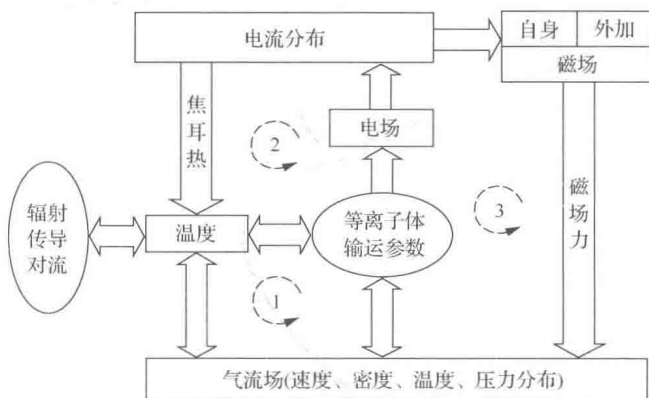


图 1-3 空气电弧中的粒子数密度图

注：1atm=1.01325×10⁵Pa

1.2 电弧磁流体动力学模型

电弧等离子体中，各种微粒之间发生着强烈的质量、动量、能量交换，包括宏观热传导、对流、辐射等能量转移以及微观粒子的分解、聚合及电离和复合等反应过程。它们的成分虽然不同，但都遵守流体质量连续、动量守恒、能量守恒方程，可构筑在统一的控制方程组内，不同的物质由温度和物性参数表征^[2]。仿

真包括气流场、热场、电磁场和辐射热的计算,因此仿真的首要问题就是建立相应的场量方程。

磁流体动力学模型是近年来应用最为广泛的电弧仿真模型,该模型基于局部热力学平衡(Local Thermal Equilibrium, LTE)假设,不需考虑单个粒子的运动,而是将等离子体作为可导电的连续流体介质处理,只关心流体元的平均效果。因此,该模型的基本控制方程为描述流体运动规律的质量、动量和能量守恒方程。

由于电弧等离子体具有复杂的物理现象,为了简化仿真的难度,国内外的学者均作出了一定的假设,根据所建立的模型情况,本书采用了如下一些基本假设条件^[3]。

- (1) 认为电弧等离子体处于局部热力学平衡状态^[4]。
- (2) 等离子体具有电中性,不存在空间电荷。
- (3) 不考虑电极和器壁的汽化问题。

1.2.1 气流场控制方程

气流场的计算有层流和紊流两种,按照流体力学的理论,采用雷诺数来判定流体是层流还是紊流^[5]:

$$Re = VD\rho / \eta \quad (1-1)$$

式中,当流场雷诺数 $Re > 10^5$ 时,流动为紊流;尽管灭弧室内的流速很大,但由于声速随着 $\sqrt{T}$ (T 表示温度) 的增加而变大,灭弧室内气流的速度 V 基本上是低声速的流动; D 为流场的特征长度,通常取流动通道的尺度; ρ 为流体密度; η 为等离子体的黏滞系数。以空气断路器为例,根据灭弧室的尺寸,其流动通道尺寸为 10^{-2}m 数量级;另外,高温下电弧等离子体的黏滞系数为 $10^{-4}\text{kg}/(\text{m}\cdot\text{s})$ 数量级,密度为 $10^{-3}\sim 10^{-2}\text{kg}/\text{m}^3$ 数量级,而温度相对较低的区域密度为 $10^{-2}\sim 1\text{kg}/\text{m}^3$ 数量级,通过以上分析,空气断路器灭弧室高温弧柱区域 Re 为 10^2 数量级,而灭弧室低温区域 Re 为 10^4 数量级,因此可以认为灭弧室中流体的流动性质为层流。

1. 质量守恒方程

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{V}) = 0 \quad (1-2)$$

式中, t 为时间; $\mathbf{V}$ 为流体运动的速度矢量。

2. 动量守恒方程

速度场求解采用 Navier-Stokes 方程组进行描述^[6-8]: