

开关电器 现代设计方法

刘志远 纽春萍 编著

*M*odern Design Methods of
Switchgear



机械工业出版社
China Machine Press

高等院校电子信息与电气学科系列规划教材

开关电器 现代设计方法



刘志远 纽春萍 编著



机械工业出版社
China Machine Press

图书在版编目 (CIP) 数据

开关电器现代设计方法 / 刘志远, 纽春萍编著. —北京: 机械工业出版社, 2017.11
(高等院校电子信息与电气学科系列规划教材)

ISBN 978-7-111-58414-8

I. 开… II. ①刘… ②纽… III. 开关—电器—设计—高等学校—教材 IV. TM56

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2017) 第 271199 号

本书介绍了基于物理场的开关电器现代方法, 以及开关电器设计中的关键问题。书中既介绍了开关电器的静态特性 (电器的绝缘特性和发热特性), 又讨论了开关电器的动态特性 (电弧与磁场的相互作用, 以及电器的运动特性), 还包括教学实验, 有助于学生对开关电器的设计方法有系统而全面的认识。本书适合作为电子信息类专业的教材, 也可以供相关专业人士参考。

出版发行: 机械工业出版社 (北京市西城区百万庄大街 22 号 邮政编码: 100037)

责任编辑: 谢晓芳

印刷: 中国电影出版社印刷厂

开本: 185mm×260mm 1/16

书号: ISBN 978-7-111-58414-8

责任校对: 殷虹

版次: 2018 年 1 月第 1 版第 1 次印刷

印张: 14.5

定价: 49.00 元

凡购本书, 如有缺页、倒页、脱页, 由本社发行部调换

客服热线: (010) 88378991 88361066

购书热线: (010) 68326294 88379649 68995259

投稿热线: (010) 88379604

读者信箱: hzjsj@hzbook.com

版权所有·侵权必究

封底无防伪标均为盗版

本书法律顾问: 北京大成律师事务所 韩光 / 邹晓东

前 言

自从人们利用电能以来，就产生了对开关电器的需求，如导通电路和切断电路。随着我国国民经济的高速增长，电力行业也迅猛发展。伴随着电力行业的发展，开关电器制造业中的新产品、新技术层出不穷。与此同时，开关电器工程师也面临着更多的困惑：如果产品没有通过型式试验考核，应该从哪方面入手改进？又如何改进？如果产品通过了型式试验考核，但是产品的设计参数、材料选择和工艺参数很多都缺乏理论依据；即使产品通过了型式试验考核，产品会不会稳定可靠地运行？大量的基础研究成果有可能为解决上述困惑提供理论依据。本书旨在采用开关电器现代设计方法搭建一座“桥梁”，这座桥梁的一端连接开关电器产品的设计需求，另一端连接相关基础研究成果。这座桥梁一方面可为开关电器产品设计开发提供理论依据，使产品性能更优，质量更为可靠；另一方面，开关电器新产品与新技术的开发又为基础研究指引了方向，使基础研究更加有针对性。本书通过对开关电器现代设计方法进行归纳和总结，突出开关电器中各种物理现象的机理，为开关电器制造行业的工程师提供一个新的视角。

开关电器在工作中的主要任务是承担额定电压并导通额定电流，处于一种静止状态，因此本书从电器的静态特性入手，包括电器的绝缘特性和发热特性，这些内容构成了第2章和第3章。有时开关电器需要分断电路，此时的动态特性就变得尤为关键，如电弧与磁场的相互作用，以及电器的运动特性等内容构成了第4章和第5章。最后，本书第6章专门讨论了课程教学实验，该教学实验有助于学生掌握开关电器现代设计方法，从而为将来在工作中运用该方法打下良好基础。对于开关电器行业的工程技术人员，本书希望从“开关电器现代设计方法”的视角为开关电器产品的研究和开发提供思路。希望通过本书的启发，开关电器工程师们不仅能够研发出独具特色的新产品，还能创造出属于自己的“现代设计方法”，助力中国从开关电器的制造大国转型为开关电器的制造强国。

目 录

前言	2.3.6 面积效应与真空间隙绝缘 优化	45
第1章 绪论	2.3.7 真空中固体绝缘的沿面 闪络	47
1.1 电器中的物理场	2.3.8 真空灭弧室外壳的绝缘 包封	49
1.2 电器的虚拟样机技术	参考文献	51
1.3 开关电器的试验研究方法		
参考文献		
第2章 开关电器的绝缘	第3章 开关电器的发热	54
2.1 绝缘与电场	3.1 开关电器的发热与温度场	54
2.2 气体绝缘	3.2 开关电器的允许温升	55
2.2.1 均匀场和稍不均匀场中 的气体击穿	3.3 开关电器的生热	57
2.2.2 稍不均匀场中 SF_6 气体 击穿电压计算	3.3.1 电阻损耗	57
2.2.3 SF_6 断路器的空载介质 恢复	3.3.2 铁磁损耗	57
2.2.4 气体中固体绝缘的沿面 闪络	3.3.3 介质损耗	58
2.2.5 气体绝缘新技术	3.4 开关电器中的热传递	58
2.3 真空灭弧室绝缘	3.4.1 热传导	58
2.3.1 真空间隙的击穿机理	3.4.2 热对流	59
2.3.2 真空灭弧室的老练	3.4.3 热辐射	59
2.3.3 触头间隙的击穿特性	3.5 导热问题的数学模型	60
2.3.4 触头与主屏蔽罩间隙	3.5.1 导热微分方程	60
2.3.5 端部屏蔽罩与主屏蔽罩 间隙	3.5.2 单值性条件	61
	3.6 电器的热计算	62
	3.6.1 热计算的牛顿公式	62
	3.6.2 热计算的数值方法	62
	3.7 交流接触器稳态温度场分析	66
	3.7.1 接触器的结构	66
	3.7.2 热分析模型的建立	66

3.7.3 热参数的计算	67	4.2.3 真空灭弧室开断短路电流的 纵向磁场判据	120
3.7.4 表面对流换热系数的 计算	68	4.3 开关电器中的电磁铁	128
3.7.5 仿真结果与实验验证	69	4.3.1 磁路分析与计算	128
3.8 真空断路器稳态温度场分析	71	4.3.2 磁场分析与计算	131
3.8.1 真空断路器的结构	71	4.3.3 电磁系统的吸力	133
3.8.2 真空断路器的温度场 模拟	72	4.3.4 电磁系统动态特性的 分析计算	136
3.8.3 真空断路器温度场的 影响因素分析	72	4.3.5 交流接触器电磁铁静态特性 的分析	137
3.9 熔断器弧前安-秒特性的仿真 与实验	74	4.4 电磁脱扣器特性分析	143
3.9.1 熔体弧前过程的数学 建模	75	4.4.1 拍合式电磁脱扣器	144
3.9.2 熔体弧前过程的温度场 数学模型	75	4.4.2 电磁脱扣器静态特性 计算	144
3.9.3 熔体弧前过程的热电耦合 模型	76	4.4.3 电磁脱扣器保护特性 计算	146
3.9.4 熔体相变过程的 处理方法	76	4.4.4 电磁脱扣器保护特性 分析	147
3.9.5 基于 ANSYS 软件的弧前 热电耦合分析	77	参考文献	149
3.9.6 仿真结果与分析	80	第 5 章 开关电器的运动	151
参考文献	82	5.1 开关电器操动机构应满足的 要求	151
第 4 章 开关电器的磁场	86	5.1.1 合闸要求	152
4.1 典型导体的电动力计算	86	5.1.2 分闸要求	155
4.1.1 平行导体电动力	86	5.1.3 自由脱扣、防跳跃、复位 和联锁	156
4.1.2 垂直导体电动力	88	5.2 断路器弹簧操动机构	157
4.1.3 平板对接触头电动力	89	5.2.1 弹簧操动机构与其他 操动机构的比较	157
4.1.4 插入式触指电动力	93	5.2.2 弹簧操动机构设计中的 关键问题	158
4.1.5 三相导体的电动力	94	5.2.3 典型的断路器弹簧 操动机构	160
4.2 真空电弧与磁场	95	5.3 机构运动特性分析的能量 平衡法	166
4.2.1 真空灭弧室的磁场与开断 能力	97	5.3.1 分析过程	166
4.2.2 真空电弧触头立体角、阳极 斑点和纵向磁场	104		

5.3.2 归算方法	168	5.6 低压塑壳断路器弹簧操动机构	
5.3.3 计算示例	170	动态特性仿真与优化	210
5.4 弹簧操动机构关键部件		参考文献	213
设计	174		
5.4.1 凸轮机构设计	174	第6章 教学实验	216
5.4.2 锁扣、脱扣机构设计 ...	193	6.1 仿真实验	216
5.4.3 缓冲器设计	198	6.1.1 电场分析	216
5.4.4 储能机构设计	202	6.1.2 温度场分析	218
5.5 真空断路器弹簧操动机构运动		6.1.3 磁场分析	218
特性分析与优化	204	6.1.4 机构运动分析	219
5.5.1 虚拟样机仿真与分析 ...	204	6.2 物理实验	221
5.5.2 实现预定的分闸角		6.2.1 断路器开断能力试验 ...	221
速度	208	6.2.2 纵向磁场对真空电弧的	
5.5.3 断路器的柔性分析	208	影响	223

1.1 电器中的物理场

中国的电力工业正在以空前的规模和速度迅猛发展,2011年我国的用电量已居于世界第一位,达到4.72万亿千瓦·时,发电装机容量居于世界第二位,达到10.56亿千瓦。2020年我国最大负荷预计达到1211GW,装机容量1470GW。电力行业的迅猛发展给电力装备制造业带来了前所未有的发展机遇。2009年我国第一条特高压试验示范工程投入运行,标志着我国输变电技术和电力装备技术进入世界先进行列。

电力工业中大量使用各种电器设备。电器是根据外界指定信号和要求,自动或手动接通和断开电路,断续或连续地改变电路参数,从而实现对电路或非电对象的切换、控制、保护、检测、变换和调节作用的电气设备。^[1]电器按照用途可分为四类:开关电器、限制电器(如电抗器、避雷器)、变换电器(如电流互感器、电压互感器)和组合电器。^[2]开关电器是用来关合或开断一个或几个电路的电气设备。在空载条件下,关合或开断电路的开关电器有隔离开关和接地开关;在正常运行条件下,关合或开断电路的开关电器有接触器;在过载条件下,关合或开断电路的开关电器有负荷开关;在短路条件下,关合或开断电路的开关电器有断路器、快速接地开关、合闸开关、熔断器和故障电流限制器;在过电压条件下,关合或开断电路的开关电器有火花间隙和避雷器。^[3]开关电器是一种重要的电力装备,可对电路实现控制和保护等作用。开关电器一般通过电弧控制完成电的良导体和电的绝缘体之间的“开关”转换。开关电器需要满足诸多富有挑战性的技术要求。

断路器是一种集保护和控制功能为一体的重要开关电器设备。断路器能够开断、关合及承载运行线路的正常电流,在规定时间内承载、关合及开断规定的异常电流,如过载电流和短路电流。这意味着断路器不但能够在线路正常工作时开断电路、关合电路,以及承载电流,而且能够在线路异常的情况下(如发生电流过载或线路短路)开断、关合电路,以及能够在规定的时间内承载此异常电流。

以断路器为代表的开关电器设备需要满足极为苛刻的技术要求。例如,断路器关合带有预伏短路故障的电路时,电路中出现的短路电流可达几十千安,断路器导电回路受到的电动力可达几千牛,而且从断路器导电回路的布置及触头结构看,电动力常常是阻碍断路器关合的。因此在关合有预伏短路故障的电路时,由于电动力过大,断路器的触头有可能不能关合,从而引起触头严重烧伤。因此操动机构必须足以克服电动力,具有关合短路故障的能力。

再如,断路器的操动机构也需要满足相当苛刻的要求。操动机构的主要作用是使电器的触头合或分。初看上去这似乎是一个简单的要求,但是断路器在整个使用期限内的绝大部分时间内处于闭合位置,承载额定电流,而一旦需要就立即动作,不允许有任何多余的延迟,满足这样要求的操动机构就不像原来想象的那样简单。事实上断路器操动机构中锁

扣上的载荷非常大,摩擦对机构动作时间产生严重影响,可大大降低整体性能,所有这些因素都会对操动机构产生直接影响。

作为电网主要保护和控制设备,断路器的动作可靠性是极为重要的。这就要求断路器在各种自然环境、各种线路条件下都能可靠地开合电路,并具有一定的机械寿命和电气寿命。断路器该动不动、不该动时误动都会给电力系统带来巨大的损失。据国际大电网会议的调查,操动机构是造成断路器故障的主要原因。

各类开关电器设备还应满足相应电压等级下的一系列要求,包括电流开断要求、绝缘耐压要求、额定电流下的温升要求、关合能力要求、机械性能要求等。因此开关电器工程师需要应对包括开断性能、绝缘性能、热性能、关合性能、机械特性等一系列技术挑战。

如图 1-1 所示,开关电器产品是以电气工程学科为核心的多学科领域相互交叉融合的技术结晶,涉及多种物理场及其耦合。开关电器产品涉及的技术领域包括电气工程、机械工程、材料科学、等离子体物理、热物理等诸多领域。开关电器的绝缘性能涉及电场与绝缘,开断性能涉及磁场和气流场,热性能涉及温度场,机械性能涉及多体动力学等。

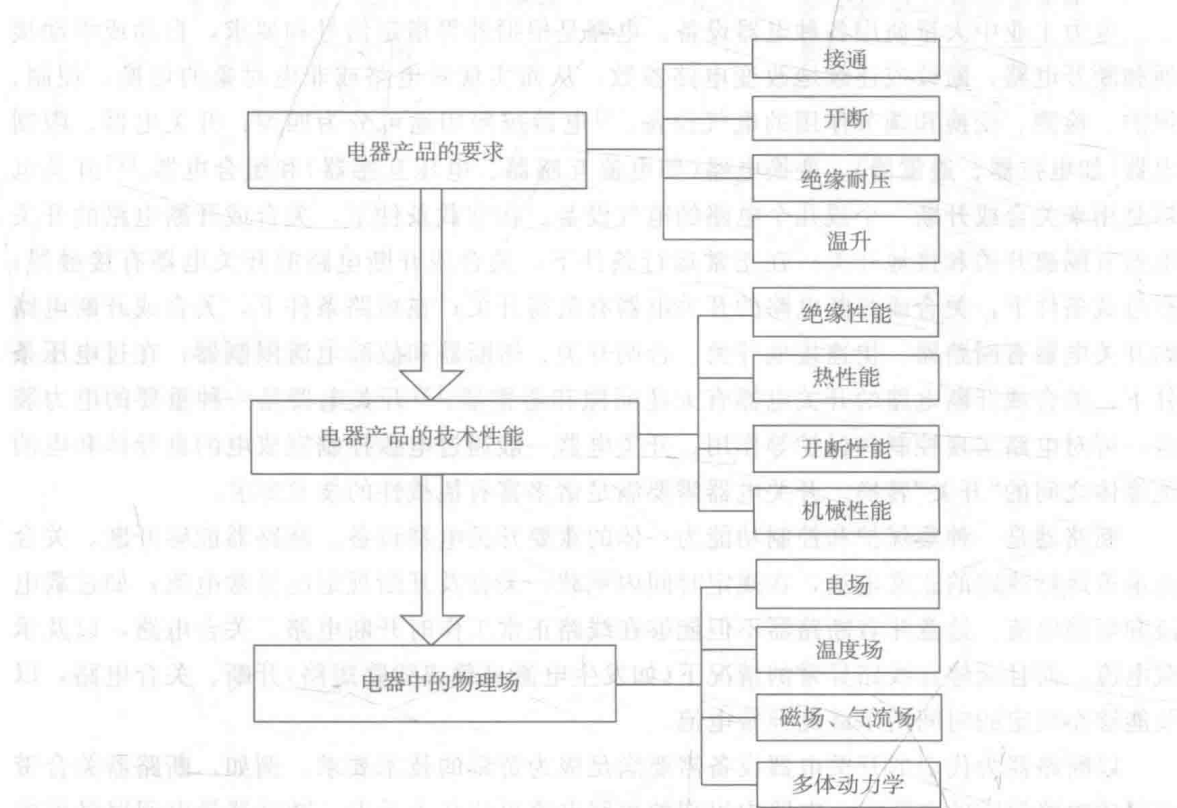


图 1-1 电器技术所涉及的物理场

传统的开关电器设计较多地依赖设计工程师的经验,采用尝试法进行“定性”设计。如图 1-2 所示,在经验设计方法中,试制出试品后,通过不断地通过实验对设计进行修正。因此开关电器的传统设计方法是一种“试错”型的经验积累方法。

随着电力系统的规模和容量的持续发展,以及对开关电器涉及的各相关物理场认识的不断深入,人们开始采用科学的方法(如虚拟样机数值仿真技术和先进测试技术)设计开关电器产品,以获得更好的性能和更高的可靠性,开关电器现代设计方法应运而生。开关电器的传统设计方法更多地依赖经验进行试错型设计,与之相比,开关电器的现代设计方法

更强调对物理场的定量掌握。开关电器现代设计方法包括如下三个方面的内容。

- 1) 定量的物理场仿真方法, 即虚拟样机技术;
- 2) 定量的试验测试方法, 包括:
 - ①开关电器产品样机性能的试验测试;
 - ②开关电器的物理性能的定量确定;
- 3) 定量的物理场仿真与定量的试验测试相结合。

开关电器现代设计方法的目的是实现电器的定量设计。与开关电器传统设计方法相比, 现代设计方法讲求通过计算分析和实验测量来定量地获取数据, 并以分析结果和实验数据作为开关电器设计的依据, 省去了大量的试品试制和产品性能验证时间。这样不但大大缩短了设计试制周期, 加快了产品开发的进度, 而且通过对产品技术性能的定量掌握, 显著地提高了产品的性能, 降低了产品的成本。因此开关电器现代设计方法已经作为一种高新技术广泛地得到应用。

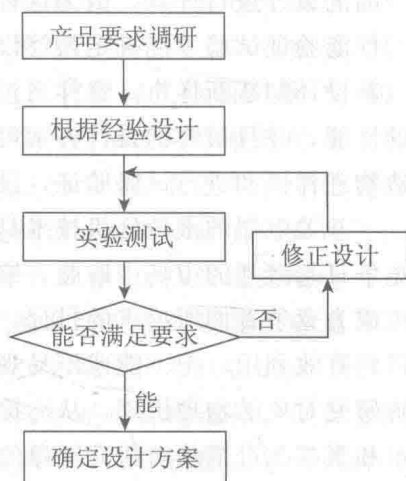


图 1-2 开关电器传统设计方法

开关电器现代设计方法既包括开关电器技术所涉及物理场的计算机仿真分析, 如电场、磁场、温度场、流场、应力场、多体动力学及其耦合场仿真, 又包括开关电器物理性能的定量实验, 如设计参数、材料参数和加工工艺等对开断能力、绝缘耐压性能、温升特性、机械性能等的影响, 还包括实验与仿真相结合的方法, 如通过实验测量为仿真获得输入参数, 或通过实验验证仿真的结果等。本书力求将上述方法融会贯通到开关电器设计中, 包括开关电器的绝缘、发热、磁场和运动。本书还设计了教学实验, 使读者对开关电器的电场、温度场、磁场和机构的运动有所了解, 并具备一定的试验和测量分析的能力; 可对电器方向的本科生起到启发作用, 进行创新性的设计; 可使广大从事开关电器设计的工程技术人员迅速掌握与国际前沿相接轨的开关电器现代设计方法, 可以使他们如虎添翼, 设计、制造出性能更好的产品, 为电力工业的发展做出贡献。

1.2 电器的虚拟样机技术

开关电器设计需要进行的多物理场仿真属于虚拟样机技术领域, 即科学计算可视化技术。^[4]20 世纪 80 年代末, 美国科学基金会在华盛顿召开的一次会议上提出“将图形和图像技术应用于科学计算是一个全新的领域”, 并把这种技术命名为科学计算可视化。在工程设计领域, 虚拟样机技术可对科学计算或仿真所获得的数据进行可视化加工, 形成二维、三维图形和动画, 并通过交互地改变设计参数来观察计算结果及其变化, 对各个工程学科的技术发展都有极其重要的意义和实用价值, 因而该技术一出现就得到人们的极大重视。

进行开关电器设计需要进行多物理场仿真。例如, 通过电场分析确定开关电器产品的电场应力, 通过温度场计算确定产品的热特性, 通过各零部件分析检查零部件的机械强度, 通过疲劳分析预测零部件的疲劳寿命, 通过操动机构的多体动力学分析了解其运动特性, 通过磁场分析确定操动电磁铁或永磁机构的静态特性和动态特性等。将数值仿真与计算机三维图形技术相结合, 采用可视化仿真, 将大大提高仿真的效率, 通过图形交互技术, 改变各种设计参数, 达到优化设计的目标。

开关电器的传统设计：首先通过调研确定初步设计方案，然后依靠简单的经验公式对产品的设计进行计算，因为这种设计对最终产品的性能把握不大，所以必须通过样机制造和性能验证试验才能确定最终设计方案。当通过试验发现产品缺陷时需重新修改设计，并重新设计制造新样机。这样通过反复的样机制造和性能试验，最终产品才能达到技术要求的性能，并且最终的设计方案可能不是最优的。传统设计主要依赖设计工程师的经验，制造物理样机和进行试验验证，设计周期长，成本高，无法对市场进行灵活反应。

开关电器的虚拟样机技术具有多方面的重要意义。随着经济和贸易的全球化，要想在竞争日趋激烈的市场中取胜，缩短开发周期，提高产品质量，降低成本及对市场的灵活反应成为竞争者们所追求的目标。虚拟样机技术可大大加快数据的处理速度，使庞大的数据得到有效利用，把不能或不易观察到的现象变为使人们能观察到的现象，进一步发现并理解研究对象的物理机理，从而提出改进设计的具体措施，通过二维、三维图形或动画来显示和观察改进措施对研究对象的影响，达到优化设计的目的。

开关电器的虚拟样机技术从分析产品性能及实现优化设计的目标出发，摆脱了传统设计方法的局限。开关电器设计工程师可直接利用三维图形技术在计算机提供的虚拟环境中建立设计对象的三维虚拟样机，利用可视化仿真软件模拟样机的各种物理性能，快速地分析各种设计方案，进行物理样机难以进行甚至无法进行的试验，直到获得最佳设计方案。另外，开关电器设计人员可以把自己的经验甚至想象综合在虚拟样机中，充分发挥自己的创造力。采用虚拟样机技术代替开关电器传统设计方法，不但缩短开发周期，而且设计产品的质量和效率都得到大幅度提高。因而虚拟样机技术成为开关电器现代设计方法中的一个重要组成部分。

采用虚拟样机技术进行开关电器的仿真研究，涉及电场、磁场、流场、温度场、应力场、多体动力学等多物理过程的耦合求解，这些仿真中的大部分可通过商业软件及其二次开发解决，因而商业软件成为虚拟样机技术的重要工具。自 20 世纪 90 年代以来，国际上推出的与开关电器设计相关的虚拟样机商业软件包括电磁场仿真软件(Ansoft Maxwell、Vectorfield、QuickField、MagNet 等)、流场仿真软件(Fluent、Phoenix 等)、多体动力学分析软件(ADAMS)以及多物理场耦合分析软件(ANSYS、COMSOL 等)。

1.3 开关电器的试验研究方法

开关电器中的物理现象尤其是电弧现象非常复杂，因而决定了电器科学是一门实验科学。新产品的设计主要依靠大容量实验室的试验结果决定。开关电器现代设计方法强调调用定量的实验数据对电器的物理性能进行开关分析，这体现在以下两个方面。

1. 开关电器产品样机性能的试验测试

当一个开关电器产品的原理样机完成后，通常需要用研究性试验来验证样机的性能。研究性试验的目标是使产品样机通过型式试验的考核。一旦产品样机通过型式试验的考核验证，将由认证实验室颁发型式试验证书，表明产品达到标准要求，可推向市场。产品的研究性试验不仅涉及型式试验的各项内容(包括大容量试验、绝缘试验、温升试验和机械特性试验等)，还涉及产品的品质测试(如环境适应性试验等)。

以高压断路器为例，大容量试验考核产品能否应对电力系统运行中可能遇到的各种故障情况。例如，出线端故障考核高压断路器切除在其出线端发生短路故障的能力，它不仅

考核断路器的满容量开断能力,还考核断路器的小电流开断能力;近区故障试验考核高压断路器的一种短路故障切除能力,即架空线在距断路器几百米至几千米处出现短路故障时的切除能力,尽管此时的短路电流不如出线端短路电流大,但由于架空线上的行波反射作用,因此断路器所承受到的暂态恢复电压上升率非常高,近区故障对气体断路器(如 SF_6 断路器)是一个严酷的挑战。再如,失步故障考核高压断路器所连接的两个系统的相位不一致时(甚至反相条件下)的故障电流开断能力,此时,断路器所承受的暂态恢复电压由两个系统共同施加,具有所有开断任务中最高的暂态恢复电压峰值。此外,还有许多考核试验,如电寿命试验、单相和异相接地故障试验、容性电流开合试验(包括线路充电电流开合试验、电缆充电电流开合试验、单个电容器组电流开合试验和背对背电容器组电流开合试验)以及感性负载开合试验(包括变压器励磁电流开合试验、并联电抗器开合试验)等。

大容量试验可通过直接试验或间接试验进行。直接试验显然是更好的选择,但直接试验的参数范围会受到实验室的容量限制。间接试验包括单相试验、合成试验、单元试验和分步试验。对于研究性试验,通常在成本较低的合成试验回路上进行间接试验,有些电工企业拥有可进行直接试验的大容量实验室。

开关电器产品的绝缘试验包括工频耐压试验(50Hz 或 60Hz)、标准雷电冲击耐压试验和操作冲击耐压试验。开关电器产品需要能够承受标准所规定的这三种试验对过电压的考核要求。在正常运行时,电器承受的最大电压为额定最高电压值。

开关电器承受的工频过电压出现在一些非正常条件下,例如,空载长线的电容效应将使线路末端电压升高 20%~30%。又如,出现相对地短路故障时可造成非故障相的电压超出正常值最高达 73%,这取决于系统接地的情况。再如,当断路器所连接的两个系统出现失步故障(即相位不同步)时,断路器断口上所见到的电压可高达额定电压的 2.2 倍。

目前所有标准中所规定的工频电压都远远高于系统中可能出现的过电压,其来源于绝缘测试的历史。在早期的开关电器产品绝缘测试中,对雷电冲击电压和操作过电压还都不太了解,当时唯一能做的绝缘测试就是 1 分钟工频耐压试验。而试验中的施加电压多来自于经验,认为只要开关电器能承受住足够高的工频电压就能够承受所有的过电压,如现在所熟知的雷电冲击电压和操作过电压。

电力系统遭到雷击时会产生雷电冲击过电压,并随线路传播施加到开关电器产品上。雷击有可能直接击中变电站,也有可能击中变电站的进线。一般来说,设计良好的变电站受到雷击的可能性很小,所以通常只考虑击中线路的情况。雷电过电压进入变电站后的幅值和波形与线路的绝缘水平,以及雷击点与变电站的距离有关,并受到变电站阻抗的影响。与开关电器的工频绝缘水平远大于系统中实际出现的工频过电压情况不同,开关电器的雷电冲击耐压水平远低于系统中出现的过电压。例如,一台 550kV 断路器所保护的线路在距断路器 3km 左右受到雷击时,断路器所见到的雷电过电压峰值可超过 3000kV。如果按照此雷电过电压设计断路器显然是不可行的,事实上,需要加装保护装置。变电站中电力设备的雷电冲击绝缘水平由避雷器或空气间隙等保护装置的数量和位置等特性来确定。雷电冲击电压标准的确定是降低电器雷电过电压水平与降低避雷器成本之间的折中。

开关电器承受的第三种过电压是操作过电压,它是由开关操作造成电路状态转换所产生的。在电力系统中有多种操作过电压,如断路器切除电力系统故障时产生过电压,甩空载长线或切除运行线路产生过电压,开关的分步开合产生过电压,所有这些过电压都会

对线路和电气设备产生影响。对于断路器而言,最严重的过电压是在关合或重合输电线时产生的,此时产生的过电压由理论分析最高可达 $3p.u.$ 。对于 $242kV$ 及以下的断路器不考核操作过电压耐受水平,其原因在于这些电器设备在操作过电压下的固有绝缘水平已超过 $3p.u.$,因此无须考核。

当开关电器产品通过电流时相当于一个热源,电器的载流能力主要受到温升的限制。当温升过高时会引起固体绝缘劣化,从而可能导致开关电器设备在正常工况下失效。温升过高还会引起金属材料或非金属材料机械强度降低。无论是额定电流下或短路电流下都可引起温升过高。温升试验就是要考核开关电器产品在额定电流下和短路电流下其温升不超出标准所规定的范围。

开关电器产品还需要通过试验考核其机械特性,包括机械寿命试验、端子静压力试验、机械可靠性试验等。

开关电器产品尤其是户外开关电器产品的环境适应性试验受到越来越多的重视,成为提升产品品质的重要技术保证。开关电器产品的环境适应性试验的范围很广,如低温试验、高温试验、高低温温度循环试验、潮湿环境试验、盐雾环境试验、酸雨环境试验、雾霾环境试验、沙尘环境试验、覆冰试验、高海拔环境试验、振动与冲击环境试验、深海高压环境试验、电磁干扰试验、核辐射环境试验、地震试验、阻燃试验等。环境适应性试验对提高用户满意度,进而提升企业品牌有深远的影响。

2. 开关电器物理性能的定量试验

定量试验方法可为虚拟样机模型提供输入参数或结果验证。例如,在开关电器运动分析中,通过试验测量方法可校准分合闸位移/速度曲线的动力学仿真结果,以便将摩擦力的影响在仿真中得以正确体现;通过冲击力测量校验电器机械部件碰撞时冲击力仿真结果;用高速摄影的方法测量弹簧操动机构中的位移、速度和时间特性,验证多体动力学仿真结果并提出改进方案;通过机械寿命试验验证机械零部件疲劳分析的仿真结果。

试验方法可确定设计参数、选用材料及加工工艺对产品电气性能的影响。例如,在 SF_6 断路器中改变喷口喉部的直径和喷口角度验证对其开断性能的影响,在真空断路器中改变触头直径、磁场以及触头材料等验证其对开断能力的影响等。

试验方法还用来测量开关电器中的物理参数,探索物理现象的形成机理。例如,电弧电压可用来了解断路器的很多信息,如显示触头在何时分开,对 SF_6 断路器确定电弧是否在喷口中。如果 SF_6 断路器开断出现故障,其恢复电压波形可显示其击穿属于热击穿还是电击穿。

开关电器中可进行观测的物理量非常丰富。例如,采用高速摄影的方法可观测真空电弧处于集聚态还是扩散态,如果真空电弧处于扩散态则非常有利于真空灭弧室的成功开断。高速摄影也用于观察气体电弧,如空气开关中电弧的发展及进入栅片的过程。可用容性或感性压力传感器测量低压空气开关和高压 SF_6 开关灭弧室中的气体压力,用光学方法测量气体密度,用光谱测量确定气体温度。还有,采用郎缪探针测量电弧等离子体中的电子密度,采用双色仪测量电流过零后真空灭弧室触头表面的温度,采用激光诱导荧光技术测量电流过零后的电弧弧区的金属蒸汽密度,采用电流零区测量装置测量弧后电流等。另外,可采用位移传感器或高速摄影机测量开关电器中触头和机构零部件在运动中的位移和速度,采用加速度传感器测量其加速度,采用拉压力传感器测量触头接触压力或拉开触头

熔焊的拉力,以及采用应变片测量触头或机构部件的冲击力等。这些物理量的获取对定量确定开关电器样机的物理性能有至关重要的意义。

参考文献

- [1] 张冠生. 电器理论基础(修订版)[M]. 北京:机械工业出版社,1996:1.
- [2] 尚振球,郭文元. 高压电器[M]. 西安:西安交通大学出版社,1992:1.
- [3] Mirsad Kapetanovic. 高压断路器:理论、设计与试验方法[M]. 王建华,闫静,译. 北京:机械工业出版社,2015:6.
- [4] 陆俭国,何瑞华,陈德桂,等. 中国电气工程大典:配电工程(第11卷)[M]. 北京:中国电力出版社,2009:62-82.

第2章

开关电器的绝缘

2.1 绝缘与电场

开关电器工程师在进行产品设计时所面临的首要问题是绝缘设计,因为开关电器的尺寸基本由绝缘设计决定。开关电器的绝缘设计需要依据两方面的信息:首先要获得整个场域的电场强度分布,然后分别考虑电器各个击穿间隙中绝缘介质的最大许用电场强度。绝缘设计的目的是使得开关电器绝缘运行可靠、经济耐用。开关电器的电场分析方法主要有有限差分法、有限元法和模拟电荷法等。第6章安排了电场仿真实验,以帮助读者掌握电场分析方法。本章对开关电器中常用绝缘介质的击穿机理和许用电场强度进行分析,以方便工程技术人员在电场分析结果的基础上判断开关电器的绝缘水平是否达到设计要求。

开关电器中常用的绝缘介质有气体绝缘介质、真空绝缘介质、液体绝缘介质和固体绝缘介质及不同绝缘介质的组合。开关电器中常用的气体绝缘介质包括空气和 SF_6 气体:如低压塑壳断路器和低压万能式断路器等使用空气作为绝缘介质, SF_6 断路器和气体绝缘开关设备 GIS 等使用 SF_6 气体作为绝缘介质。开关电器中真空灭弧室中用真空作为绝缘介质。开关电器中常用的液体绝缘介质包括变压器油。开关电器中常用的固体绝缘介质包括环氧树脂材料、硅橡胶及复合绝缘材料等。本章将介绍气体绝缘介质和真空绝缘介质的击穿机理,并进一步提供上述介质在多种电极结构和不同电压形式下的击穿电压或击穿场强的判断准则。

电场的均匀系数 η 首先由 Schwaiger 于 1922 年提出^[1],因此也称为 Schwaiger 因子。作为衡量电场均匀性的一个参数,它定义为

$$\eta = \frac{\hat{E}_{\text{mean}}}{\hat{E}_{\text{max}}} = \frac{\hat{U}}{d} \cdot \frac{1}{\hat{E}_{\text{max}}} \quad (2-1)$$

或

$$\hat{U} = \hat{E}_{\text{max}} \cdot \eta \cdot d$$

式中: $\hat{E}_{\text{mean}}$ ——电介质中的平均电场强度;

$\hat{E}_{\text{max}}$ ——电介质中的最大电场强度;

$\hat{U}$ ——施加在电极两端的电位差峰值;

d ——电极间距。

电场不均匀系数 η 满足 $0 \leq \eta \leq 1$ 。 η 值越高表示电场越均匀,绝缘介质利用得越好。当 $\eta=1$ 时代表一种理想状态,即为均匀场;当 $0.25 \leq \eta < 1$ 时表示稍不均匀场;当 $\eta < 0.25$ 时表示极不均匀场。Schwaiger 还给出如图 2-1 所示的 8 种电极结构下的 η 值。它有助于判断电器中一些常见电极间隙是否处于稍不均匀场。图 2-1 中横坐标 p 为电极特征因子,表示为

$$p = \frac{r+d}{r} \quad (2-2)$$

式中： r ——球电极、圆柱电极或曲面电极的半径；

d ——电极间距。

因此 $1 \leq p < \infty$ 。 η 为 p 的函数， $\eta = f(p)$ 。

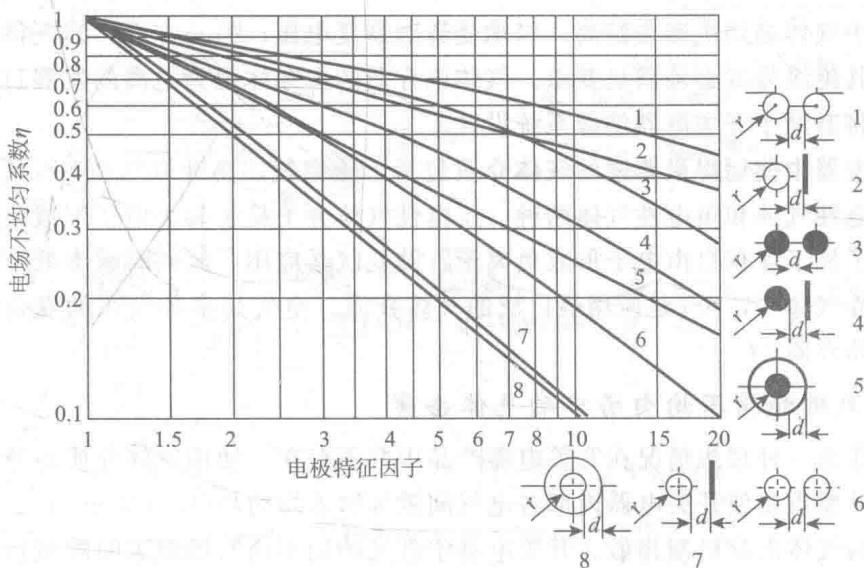


图 2-1 8 种电极结构下的 η 值^[1]

电场不均匀系数 η 对开关电器绝缘设计非常重要。要想产品设计得紧凑就必须充分利用绝缘介质的性能。在均匀场中和稍不均匀场中，绝缘介质的性能利用充分，表现为局部放电起始电压 U_i 与击穿电压 U_b 相等，即 $U_i = U_b$ 。在极不均匀电场中，绝缘介质的性能利用得很不充分，其局部放电起始电压 U_i 远低于击穿电压 U_b ，即 $U_i \ll U_b$ ，此时在开关电器的正常运行条件下就会出现局部放电。

局部放电是指在一个绝缘系统中仅仅在局部区域出现了电击穿，也就是说，局部放电并没有形成贯穿于触头之间的放电。局部放电可以出现在气体介质中，也可以出现液体介质、固体介质以及它们的任何组合中。需要指出的是，局部放电不会出现在真空介质中：虽然在真空中一对电极间施加电压后可产生微弱的场致发射电流，但是这并不是“局部放电”，而是真空中电极间隙施加电压后的一种正常现象，不导致“真空”绝缘介质的破坏。当真空灭弧室用固体绝缘材料固封后测量局部放电量时，应将真空灭弧室在固封前的场致发射电流所对应的局部放电量减去，剩余的局部放电量才是真空灭弧室外固封材料的局部放电量。

均匀电场和稍不均匀电场的击穿特性非常相似。而极不均匀电场的击穿则有显著不同，这不仅表现为电极形状和电极间距不同，还表现为其击穿电压受到电压极性和电压种类的影响，如直流电压、交流电压、雷电冲击电压和操作过电压等。

要实现开关电器绝缘的优化设计，必须深入了解开关电器中绝缘材料在不同电场情况下和电极形式下导致击穿的机理及其发展过程。在开关电器绝缘设计中应避免出现极不均匀场，以充分利用绝缘介质的性能减小开关电器的绝缘尺寸。因此在开关电器绝缘设计中，应保证开关电器内部每个电气间隙都是稍不均匀场，即 $0.25 \leq \eta < 1$ 。下面讨论均匀场和稍不均匀场的击穿机理。

2.2 气体绝缘

在开关电器中使用的气体介质需要完成的功能有两种：一种是电弧开断，另一种是电气绝缘。因此气体的绝缘特性也体现在两个方面：一方面，在开断过程中，电流过零后介质恢复过程中气体必须快速去游离，以承受暂态恢复电压；另一方面，当气体作为绝缘介质使用时，其绝缘强度必须满足要求。气体电介质的击穿体现为电离的发展过程，充分了解这个过程将有助于开关电器绝缘系统设计。

在开关电器中使用得最普遍的气体介质包括干燥空气、高纯氮气和 SF_6 气体。气体介质可分为正电性气体和负电性气体两种。正电性气体分子易于失去电子形成正离子，而负电性气体分子易于俘获自由电子形成负离子。纯氮气是应用广泛同时成本低廉的正电性气体。在负电性气体中， SF_6 是应用最广泛的气体介质。空气是多种气体的混合物，它是一种重要的气体介质。

2.2.1 均匀场和稍不均匀场中的气体击穿

均匀场作为一种理想情况在开关电器产品中并不存在。使用气体介质的开关电器绝缘系统，其设计要点是使开关电器内部各电气间隙为稍不均匀场 ($0.25 \leq \eta < 1$)。均匀场和稍不均匀场中的气体击穿机制相似。开关电器中常见的稍不均匀场触头间隙包括同轴圆柱电极、平行圆柱电极、球-板电极、同心球电极等。

均匀场和稍不均匀场中的气体击穿机制可分为在小电极间隙下的汤逊击穿机制和大电极间隙下的流注击穿机制。汤逊击穿与流注击穿的区别在于汤逊击穿中的电子倍增数量未达到临界值，即在一次电子崩中产生的电子数量小于 10^8 个；而流注击穿中的电子倍增数量超过上述临界值，在一次电子崩中产生的电子数量大于 10^8 个。由于流注击穿中的电子倍增数量超过临界值，产生的大量电子所形成的空间电荷对电场的畸变作用非常显著，以至于其特征场强与外施电场强度可以相比拟，因此电子崩空间电荷电场 E_a 可达到与外施电场强度 E_0 相同的量级。

汤逊击穿发生在电极间距 d 很小(毫米级)的情况下。在这样的条件下，电子崩产生的空间电荷无法达到临界倍增条件，即电子数量达到 10^8 个，空间电荷对电场的畸变作用可忽略不计。当电极间距达到一个临界间距 X_c 时，流注击穿机制开始起作用。对于均匀场和稍不均匀场，在一个大气压下空气中电极间击穿的临界间距为 2cm，即在 2cm 以下为汤逊放电，在 2cm 以上为流注放电。^[2]

1. 均匀场中的小电极间隙击穿——汤逊击穿机制

若气体中的一对电极间形成了高电导性通道，则说明该气体介质被击穿。气体介质的电离过程从“电子崩”开始。“电子崩”与电极间隙中的电场强度密切相关。气体介质的击穿经历一个强烈的电离过程，在气体中产生大量的带电粒子，导致电流急剧增加。下面以图 2-2 为例说明一个“电子崩”过程。

如图 2-2 所示，在气体中有一对平板电极形成均匀电场。电极上施加 30kV 电压，电极间距为 10mm，这样电场强度 E 为 3kV/mm 或 $3 \times 10^6 \text{ V/m}$ 。假设气体的密度使得电子的平均自由程 λ_e 为 $1 \mu\text{m}$ ，即 $1 \times 10^{-6} \text{ m}$ ，那么电子在走完一个平均自由程后在电场中获得的平均能量为 $E\lambda_e = 3 \times 10^6 \times 1 \times 10^{-6} = 3(\text{eV})$ 。假设此气体的电离能为 12eV，即轰击电子的能量达到 12eV 或以上时此气体发生电离，产生一个新电子和一个正离子。下面我们