

断路器的理论与设计

〔英〕C.H.弗卢夏姆 主编

李建基 张列中 庄稼人
胡天畏 吴维中 译



机械工业出版社

本书系统地介绍了断路器的电弧物理，断路器在电力系统中的运行条件，并在此基础上全面介绍油断路器、磁吹断路器、空气断路器、六氟化硫断路器和真空断路器的结构、设计原理及发展现状。此外还介绍了断路器的试验方法及断路器中的绝缘设计等有关问题。

全书共分九章，每章都有一定的独立性，读者可根据需要进行阅读、参考。

本书可供从事断路器科研、设计、制造及运行部门的科技人员阅读，也可作为大专院校有关专业师生的参考书。

**Power Circuit Breaker
Theory and Design**

C. H. Flurscheim

1 9 7 7

Peter Peregrinus Ltd

* * *

断路器的理论与设计

〔英〕 C. H. 弗卢夏姆 主编

李建基 张列中 庄稼人

胡天畏 吴维忠 译

*

机械工业出版社出版（北京阜成门外百万庄南街一号）

（北京市书刊出版业营业登记证出字第11号）

河北省南宮县印刷厂印

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

*

开本 $850 \times 1168 \frac{1}{32}$ ·印张 $14 \frac{5}{8}$ ·字数377千字

1984年3月北京第一版·1984年3月北第一次印刷

印数 00,001-5,500·定价220元

*

统一书号：15033·5586

目 录

第一章 断路器的电弧物理	1
1.1 引言: 断路器的分断元件——电弧	1
1.2 断路器中的电弧	2
1.3 高气压电弧	2
1.3.1 高气压电弧的特性	2
1.3.2 电极区	4
1.3.3 弧柱	5
1.3.4 电弧中的电离	6
1.3.4.1 热电离	6
1.3.4.2 碰撞电离	7
1.3.4.3 负离子的形成	8
1.3.5 复合	9
1.3.6 弧柱中的电子和正离子的速度	11
1.3.7 弧柱中的电流、电导率及功率损耗	11
1.3.8 电弧中的磁现象: 环形磁场	12
1.3.9 电弧中的磁现象: 横向磁场	13
1.3.10 电弧的热现象	14
1.3.10.1 电弧中的温度分布	15
1.3.10.2 电弧的边界	17
1.3.11 静态电弧特性	17
1.3.12 过渡状态中的电弧	18
1.3.13 动态电弧方程和电弧熄灭	20
1.3.14 弧后电流和电弧的时间常数	24
1.3.15 电流截断	25
1.4 真空电弧	26
1.4.1 真空电弧的定义	26
1.4.2 两种形态的真空电弧	26
1.4.3 扩散型真空电弧	26

1.4.3.1	阴极斑点	27
1.4.3.2	等离子区	28
1.4.4	扩散型电弧向集聚型电弧的转化	30
1.4.5	完全集聚的真空电弧	31
1.4.6	真空电弧的开断能力	31
1.4.7	扩散型电弧的电流零点过程	31
1.4.8	弧后电流	33
1.5	电弧特性的测量方法	34
1.5.1	(a)类: 测量	35
1.5.1.1	电压	35
1.5.1.2	电流	36
1.5.1.3	压力	36
1.5.1.4	电弧的几何形状	37
1.5.2	(b)类: 基础研究	37
1.5.2.1	电弧温度	37
1.5.2.2	气体密度	38
1.5.2.3	电子密度	38
1.6	参考文献	39
第二章	网络切合时的状况	42
2.1	前言	42
2.2	短路开断: 工频现象	42
2.2.1	三相短路开断: 工频恢复电压	42
2.2.2	不对称短路的开断	43
2.2.3	中性点接地的影响	44
2.3	短路切断: 瞬态现象	45
2.3.1	瞬态恢复电压	45
2.3.2	近区故障	54
2.4	负载和系统的开断	61
2.4.1	负载功率因数的影响	61
2.4.2	失步开断	66
2.4.3	单相开断	70
2.4.4	长输电线的合闸和重合闸	72
2.5	无功电流的切断	76

2.5.1 小感性电流的电流截断	76
2.5.2 电容开断	85
2.6 参考文献	94
2.7 通用文献目录	97
第三章 油断路器	98
3.1 概述	98
3.2 灭弧室: 设计原则	100
3.2.1 概述	100
3.2.2 横吹	100
3.2.3 纵吹单元	101
3.2.4 影响灭弧的因素	102
3.2.4.1 开断速度	102
3.2.4.2 关合速度	103
3.2.4.3 电路开断时产生的气体	104
3.2.4.4 典型灭弧室特性	106
3.2.5 灭弧室串联	107
3.2.6 结构特点	108
3.3 触头和导电系统——设计原理	112
3.3.1 概述	112
3.3.2 承载额定电流	112
3.3.2.1 集肤和邻近效应	115
3.3.3 承载短路电流	116
3.3.3.1 电动力	116
3.3.3.2 承载热稳定电流	116
3.3.4 结构特点	117
3.4 机构——设计原则	120
3.4.1 概述	120
3.4.2 能量水平	123
3.4.3 脱扣机构链	124
3.4.4 弓	127
3.4.5 电磁驱动器	128
3.4.5.1 概述	128
3.4.5.2 串联脱扣装置	129

3.4.5.3 并联脱扣装置	130
3.4.6 结构特点	132
3.4.7 液压机构	134
3.5 绝缘——设计原理	135
3.5.1 概述	135
3.5.2 绝缘配合	135
3.5.3 碳粒和水分的影响	137
3.5.4 结构特点	137
3.5.4.1 材料	137
3.5.4.2 套管	140
3.5.4.3 带支座的绝缘	142
3.6 断路器结构	142
3.6.1 概述	142
3.6.2 敞开式多油断路器	143
3.6.2.1 概述	143
3.6.2.2 69千伏多油断路器	143
3.6.2.3 161/220千伏多油断路器	144
3.6.2.4 300~380千伏多油断路器	146
3.6.3 敞开式少油断路器	147
3.6.3.1 单断口型	147
3.6.3.2 多断口型	148
3.6.4 金属铠装断路器	149
3.6.4.1 概述	149
3.6.4.2 金属铠装多油断路器	149
3.6.4.3 金属铠装少油断路器	151
3.6.5 绝缘铠装断路器	155
3.6.6 断路器有关应用方面的特点	156
3.6.6.1 概述	156
3.6.6.2 二次控制特性	156
3.6.6.3 基础	156
3.6.6.4 低温	156
3.6.6.5 地震条件	157
3.6.6.6 慢分和慢合	157

3.7	超高压油断路器的未来	157
3.8	参考文献	159
第四章	磁吹断路器	160
4.1	在空气中断弧的电路开断	160
4.1.1	灭弧原理	160
4.1.2	电弧的功率平衡理论	160
4.1.3	直流电路开断	161
4.1.4	交流电路开断	161
4.2	电弧控制	163
4.2.1	触头和起弧	163
4.2.2	灭弧栅	165
4.2.2.1	裸金属板型或冷阴极	165
4.2.2.2	绝缘钢板	168
4.2.2.3	具有外部铁磁回路的绝缘板	170
4.2.2.4	具有外部“吹弧”线圈而无铁磁回路的绝缘板型	171
4.2.2.5	旋弧绝缘板	173
4.2.3	性能特点	175
4.2.3.1	燃弧时间/电流特性	175
4.2.3.2	电压/电流特性	176
4.2.3.3	开断性能	177
4.3	结构	179
4.3.1	直流断路器	179
4.3.2	低压交流磁吹断路器	185
4.3.3	高压断路器	187
4.4	机构	189
4.4.1	合闸机构设计参数	189
4.4.1.1	设计问题	190
4.4.2	脱扣机构及设计参数	192
4.4.3	机构链	193
4.5	带熔断器的断路器	196
4.6	参考文献	199
第五章	压缩空气断路器	200

Ⅷ

5.1 导言	200
5.2 压缩空气介质的性能	203
5.2.1 概述	203
5.2.2 静态电气性能	203
5.2.3 动态电气性能	206
5.2.4 机械性能	214
5.3 灭弧装置的类型	218
5.4 断路器型式及基本布置	220
5.4.1 “敞开式”	220
5.4.2 金属壳封闭式	223
5.4.3 隔离器	224
5.4.4 电压控制用的阻抗	227
5.4.5 触头	240
5.4.6 气阀与气动机构	243
5.4.7 消音器	247
5.5 操作程序和要求	248
5.5.1 概述	248
5.5.2 合闸	249
5.5.3 分闸	251
5.6 典型断路器示例	251
第六章 SF ₆ 断路器	263
6.1 史话	263
6.2 SF ₆ 的特性	263
6.2.1 物理特性	263
6.2.2 化学特性	264
6.2.3 电特性	265
6.3 SF ₆ 断路器	268
6.3.1 开断方法	268
6.3.2 金属筒封闭的双压力式	269
6.3.3 绝缘支柱的双压力式	271
6.3.4 双压力式的气体干燥	275
6.3.5 高压冲击式或压气式	275
6.3.6 配电用冲击式或压气式	280

6.4 SF ₆ 断路器的喷嘴	285
6.5 SF ₆ 断路器的未来发展	286
6.6 参考文献	287
第七章 真空断路器	289
7.1 引言	289
7.2 与真空灭弧室触头相关的真空电弧现象	292
7.2.1 基本过程	292
7.2.2 螺旋瓣触头	292
7.2.3 杯状触头	296
7.3 电力真空灭弧室的设计和结构	297
7.4 真空灭弧室的开断能力	302
7.4.1 开断	302
7.4.2 真空灭弧室的重燃	303
7.4.3 电容电流开闭	304
7.4.4 感性小电流的开断	304
7.5 真空断路器的设计	304
7.5.1 真空断路器的一般形式和形状	304
7.5.2 灭弧室的固定	305
7.5.3 机械驱动的布置	306
7.5.4 动触头的导向	306
7.5.5 与动触头杆的连接	306
7.5.6 灭弧室电流的馈送	306
7.5.7 触头压力	307
7.5.8 触头行程	307
7.5.9 触头速度(关合)	308
7.5.10 触头速度(分闸)	308
7.5.11 加速力	308
7.5.12 触头磨损	309
7.5.13 灭弧室的冷却	309
7.5.14 机械偏置	310
7.5.15 绝缘	310
7.6 真空灭弧室的真空试验	310
7.7 真空断路器的形式	311

XV

7.8 真空断路器举例	312
7.8.1 配电和用电断路器	312
7.8.2 第二代真空断路器	314
7.8.3 25千伏铁道道旁断路器	316
7.8.4 铁道电气机车用断路器	318
7.8.5 超高压断路器	318
7.9 参考文献	321
第八章 断路器的规范和试验	323
8.1 规范	323
8.2 环境	323
8.3 正常工作条件	324
8.3.1 环境空气温度	324
8.3.2 海拔高度	325
8.3.3 大气条件	325
8.4 机械试验	326
8.4.1 机械强度型式试验	326
8.4.2 操作范围	327
8.4.3 部件试验	327
8.5 耐压试验	328
8.5.1 设计试验	329
8.5.1.1 升降法	329
8.5.1.2 固定电压多次加压法	329
8.5.1.3 累积频度法	330
8.5.1.4 等高线法	330
8.6 介质损耗试验	331
8.7 局部放电试验	332
8.8 无线电干扰试验	334
8.9 温升试验	334
8.9.1 试验安排	335
8.9.2 温度测量	336
8.9.3 控制和辅助回路	337
8.9.4 主回路电阻	338

8.9.5 试验结果的解释	338
8.10 短路试验	339
8.10.1 试验标准	339
8.10.2 瞬态恢复电压	340
8.10.3 回路固有参数	342
8.10.4 试验方法	344
8.10.5 电压分布	344
8.10.6 单元试验	347
8.10.7 选相	352
8.10.8 试验安排	353
8.10.9 开断失败的识别	355
8.11 合成试验	357
8.11.1 电压引入	358
8.11.2 电流引入	359
8.11.3 合成试验的有效性	361
8.11.4 开断电流	361
8.11.5 电流变化率	361
8.11.6 电流零前阶段	362
8.11.7 弧后阶段	363
8.11.8 恢复电压	363
8.11.9 引入时间	363
8.11.10 合成试验程序	364
8.11.11 多半波试验	364
8.11.12 具有分闸电阻的断路器	365
8.11.13 近区故障: 电流引入	367
8.11.14 关合能力	367
8.11.15 组合的试验循环	368
8.12 试验设备	368
8.12.1 短路发电机	369
8.12.2 短路合闸开关	370
8.12.3 保护断路器	370
8.12.4 变压器	370
8.12.5 限流电抗器和限流电阻	371

XVI

8.12.6	连接线	371
8.12.7	人工输电线	371
8.12.8	电容器	372
8.12.9	测量和控制设备	372
8.12.10	辅助设备	373
8.12.11	合成回路的恢复电压源	373
8.12.12	合成回路用的火花间隙	374
8.12.13	合成回路用的延弧设备	374
8.12.14	合成回路用的辅助断路器	375
8.13	容性电流切断	375
8.13.1	线路充电电流	376
8.13.2	电缆充电电流	377
8.13.3	电容器组电流	378
8.14	小感性电流开断	378
8.15	发展性故障	380
8.16	回路的并联开断	381
8.17	特殊工作条件	382
8.17.1	可燃性大气	382
8.17.2	污秽	383
8.17.3	地震	385
8.17.4	船用设备	386
8.17.5	噪音	387
8.18	参考文献	388
第九章	断路器的绝缘	389
9.1	绝缘设计技术	389
9.2	气体绝缘	396
9.2.1	断路器应用的气体	396
9.2.2	空气的耐电强度	397
9.2.2.1	均匀场	397
9.2.2.2	非均匀场	399
9.2.3	SF ₆ 的耐电强度	403
9.2.4	净化效应	404
9.2.5	粉尘和纤维效应	406

9.2.6	电极面积效应	406
9.2.7	温度效应	407
9.2.8	气体中绝缘支持件的表面闪络	407
9.3	真空绝缘	410
9.3.1	真空的耐电强度	410
9.3.1.1	与电极开距的关系	410
9.3.1.2	压力效应	411
9.3.1.3	老炼	412
9.3.1.4	电极材料	413
9.3.1.5	电极形状	413
9.3.1.6	真空中固体绝缘的闪络	413
9.4	绝缘液	414
9.4.1	矿物油的耐电强度	415
9.4.1.1	杂质的影响	415
9.4.1.2	油体积效应	419
9.4.1.3	频率效应	420
9.4.1.4	流体静压力效应	421
9.4.1.5	固体绝缘在油中的沿面闪络	421
9.5	固体绝缘	422
9.5.1	概况	422
9.5.2	塑料	422
9.5.2.1	热塑性塑料	423
9.5.2.2	热固性塑料	425
9.5.2.3	合成橡胶	425
9.5.3	浇注环氧树脂	426
9.5.3.1	场强控制	427
9.5.3.2	耐电强度	428
9.5.3.3	机械强度	430
9.5.4	增强塑料	431
9.5.4.1	玻璃纤维增强环氧树脂塑料的电气特性	432
9.5.4.2	玻璃纤维增强环氧树脂的机械特性	432
9.5.5	纸绝缘	435
9.5.5.1	合成树脂胶粘纸(S. R. B. P.)套管	435

XVI

9.5.5.2	油浸纸(O. I. P.)套管	435
9.5.5.3	环氧树脂纸套管	435
9.5.5.4	断路器套管内的场强	436
9.5.6	瓷	439
9.5.6.1	一般特性	439
9.5.6.2	设计判据	440
9.5.7	固体绝缘的电劣化	442
9.5.7.1	热老化	442
9.5.7.2	电痕化	442
9.5.7.3	气泡和局部放电	444
9.6	参考文献	445

第一章 断路器的电弧物理

M. P. Reece

1.1 引言：断路器的分断元件——电弧

众所周知，断路器的心脏是一个具有可变阻抗的分断元件。在大多数断路器中，此可变阻抗是高气压电弧。不过，现在有些断路器中，它可能是真空电弧；在大多数高压直流换流器中，它是低气压汞电弧；在其它开关应用中，包括一些现代高压直流换流器中，它可能是固体器件的晶格中的“放电”。在所有断路器中，电弧起着可变电阻的作用，断路器设计技术和科学就是控制电弧，以便使电弧的电阻随电流以下述方式变化，即在这种变化规律下，可令人满意地切断电流。

当切断直流电流（Rudenberg, 1922 和 Von Engel, 1929）时，电弧电阻必须足够迅速地增大，以强迫电流在相当短的时间内降到零，但为了防止在电路的电感中产生高的过电压，电流又不能降得太快。

对于交流断路器来说（Rudenberg, 1922），每一周期中有二个电流零点，在多数交流断路器中，设计者的目标是，在电流通导期间，使电弧具有高的电导率，把损耗在断路器内部的能量降至最小；在电流过零前数微秒，使电弧电导非常迅速地下降。设计者的难题是控制电弧，使电弧在电流零点的能量转移过程强烈得足以迅速地提高电弧零点的电弧电阻，以防止切断大的短路电流时发生重燃。但能量转移过程又不能太强烈，以致小电流在电流零点前被“截断”，造成大的过电压。

一些较低电压等级（15 千伏及 15 千伏以下）的交流断路器，灭弧栅（Babakov, 1974, Dickinson 等, 1946）和空气磁吹断路器的设计能使电弧维持高的电弧电压，以将事故电流降至预期短

路电流的三分之一左右，最后电弧在电流零点熄灭。断路器的灭弧栅中，能量的耗损速率几乎是线路所能提供的最大功率，因而，这一技术被局限在功率相当小的线路中。

对断路器的放电物理，目前还只有定性的了解，发生的许多过程太复杂了，现在还不能进行解析处理。即使不存在关于每毫米具有数千度的温度梯度的电弧的作用（我们对气体的性质的知识还不是非常精确），各相异性气流的涡流的严格的数学解析仍然是不可能的。因而可以看到，在电弧中存在着大量不确定的因素。尽管如此，主要由于空气动力学和计算技术的进步，断路器电弧物理的进步现在比过去任何时候都要快。

因而，断路器和其它电器装置有极大的不同：断路器在任何意义上都不能根据初始原理进行设计。我们所具备的关于电弧过程的知识仅仅在对设计进行修改时为我们指出方向。为了获得最终设计，在很大程度上是依靠经验知识、实验和试验。这些理由清楚地表明，要给出断路器电弧物理的精确的数值描述是不可能的。本章将力图阐明支配电弧分断的物理过程的基础。

1.2 断路器中的电弧

在断路器中被应用[⊖]的电弧可分成高气压电弧和真空电弧。高气压电弧的气压为一大气压到数百大气压之间，真空电弧的环境气压低于 10^{-4} 毛。由于在常规断路器中，正好与某些特殊开关应用相反，既不用汞弧换流器也不用半导体结，所以对这类放电，本章将不予讨论。

1.3 高气压电弧

1.3.1 高气压电弧的特性

在所有气吹型断路器中，燃弧和灭弧介质是流动的气体。这种气体在气吹型断路器中通常不是空气就是 SF_6 ，在油断路器中

⊖ “应用”这一词是经过考虑后才采用的，电弧是断路器最为本质的特性之一，而不是一种讨厌的和不要的现象——原注。

为氢 (Wedmore 等, 1929)。不同断路器中所包含的气体的实际成分列于表 1.1 中, 表中也列出了用于理论计算的名义成分及有关气体的压力范围。由表 1.1 可清楚地知道, 对理论家来说, 最感兴趣的气体是空气和氮、氢和六氟化硫。

表1.1 断路器中气体的气压和成分

气 体		气 压 的 大 致 范 围	应 用
成 分	理 论 计 算 所 假定的名义成分		
空气100%	空气 100%, 通常 为 N_2 100%	1 大气压 5 大气压~数百 大气压	灭弧断路器 压缩空气断路器和超高压 负荷开关
H_2 70% 乙炔25% CH_4 5%和微量 的各种碳化物	H_2 100%	1~3大气压 3~100大气压	负荷油开关 油断路器(多油和少油)
SF_6 100% 但可能含有少量 空气	SF_6 100%	3~15大气压	单压式和双压式 SF_6 断路器和超高压负荷 开关
硬 气 体 H_2 , CO_2 , H_2 和 其它 许多气体	没有详细的理论 研究†‡	1~10大气压	负荷开关和爆炸熔断器

†Trencham(1953)

‡ Petermichl(1940)

图 1.1 和图 1.2 表示了二种最常用的电弧的几何形状。图 1.2 为压缩空气和 SF_6 断路器断口的基本几何形状。它们的气流主要是沿着电弧轴向流动的, 但上游(入口处)具有向内的径向气流, 出口处有向外的径向气流。这种几何形状也用于“双向”式或“分向”式 (Trencham, 1953) 气吹装置中。图 1.2 示出油断路器的几何形状。初看起来, 在这一装置中, 由油和硬纸挡板热分解出来的氢和碳化氢气体好象是从横向流入电弧的。然而, 如果允许挡板分解产生气体和允许电弧作环形运动进入挡板的缝隙的话, 则将看