

HUAZHONG UNIVERSITY OF SCIENCE AND TECHNOLOGY PRESS

发电厂电气部分

刘永俭 主编

FADIANCHANG DIANQI BUFEN

华中理工大学出版社

欲平知
如
PDG

前 言

《发电厂电气部分》是电力系统及其自动化专业的一门主要专业课程用的教材。本课程的教学目的是通过课堂讲授、生产实习及课程设计等教学环节使学生初步掌握发电厂及变电所电气部分的设计和运行的基本知识，并提高实践能力。在编写本书的过程中，力争做到理论与实际密切结合，有较强的实用性；教材的取材能反映现代电力系统的先进技术；内容叙述层次分明，重点突出，逻辑性强，深入浅出；便于自学，宜于讲授。

本书注意基本理论的阐述和讨论，对课程中理论部分的重点和难点力求分析透彻，次要部分从简叙述，详略恰当；在论述发电厂及变电所电气部分共性问题的基础上，对大机组电厂及超高压配电装置的特殊问题做了较多阐述；为了增强实用性，使理论联系实际，除对二次接线增加篇幅外，还编制了较多的复习思考题和习题，以增强分析问题的能力和计算能力。

本书第一、二两篇由李晓军编写，第三篇由徐兴海编写，第四、五两篇由刘永俭编写。全书由刘永俭统稿，由张维国审阅。

由于编者水平所限，书中如有错误和不妥之处，希望读者批评指正。

编者 于吉林

目 录

第一篇 电器基本原理

第一章 高压断路器..... (1)	2-2 电流互感器..... (28)
1-1 电弧的形成及其熄灭..... (1)	2-3 电压互感器..... (34)
1-2 高压断路器的基本类型和参数..... (9)	本章小结..... (40)
1-3 油断路器..... (13)	思考题和习题..... (40)
1-4 六氟化硫(SF ₆)断路器..... (17)	第三章 限流设备..... (40)
1-5 真空断路器..... (21)	3-1 限流措施..... (40)
1-6 高压断路器的现状与发展..... (23)	3-2 普通电抗器..... (41)
本章小结..... (26)	3-3 分裂电抗器..... (43)
思考题和习题..... (27)	本章小结..... (46)
第二章 互感器..... (27)	思考题和习题..... (46)
2-1 互感器的作用..... (27)	

第二篇 电气一次系统

第四章 电气主接线..... (48)	5-3 厂用变压器和电抗器容量选择..... (84)
4-1 电气主接线的作用和设计依据..... (48)	5-4 厂用电动机的选择与自启动校验..... (88)
4-2 电气主接线的设计内容和对主接线的要求..... (49)	5-5 降压变电所的所用电接线..... (93)
4-3 电气主接线的基本形式..... (52)	本章小结..... (94)
4-4 发电厂主接线形式及主变压器的选择..... (62)	思考题和习题..... (94)
4-5 变电所主接线形式及主变压器的选择..... (66)	第六章 配电装置..... (95)
4-6 主接线方案的技术经济比较..... (69)	6-1 配电装置的分类及对其要求..... (95)
本章小结..... (72)	6-2 屋内、外配电装置的最小安全净距..... (96)
思考题和习题..... (72)	6-3 屋内配电装置..... (99)
第五章 自用电..... (75)	6-4 屋外配电装置..... (103)
5-1 自用电负荷的分类..... (75)	6-5 成套配电装置..... (109)
5-2 发电厂的厂用电接线..... (76)	6-6 超高压配电装置的特殊问题..... (112)
	本章小结..... (118)
	思考题和习题..... (119)

第三篇 电气设备选择

第七章 发热和电动力的理论与计算..... (120)	7-4 大电流导体附近钢构件的发热..... (129)
7-1 导体和电器的发热及其允许温度..... (120)	7-5 短路时导体间的电动力..... (131)
7-2 均匀导体的长期发热..... (121)	本章小结..... (137)
7-3 均匀导体的短时发热..... (124)	思考题和习题..... (138)
	第八章 导体和电器的选择..... (138)

8-1 选择导体和电器所依据的条件	(138)	8-6 电流互感器的选择	(165)
8-2 母线结构的选择	(141)	8-7 电压互感器的选择	(168)
8-3 电力电缆的选择	(154)	本章小结	(171)
8-4 开关电器的选择	(157)	思考题和习题	(172)
8-5 限流电抗器的选择	(161)		

第四篇 电气设备运行

第九章 高压断路器的运行.....	(175)	10-5 三绕组变压器的并联运行	(208)
9-1 开断短路故障时的恢复电压	(175)	本章小结	(211)
9-2 近距故障开断	(182)	思考题和习题	(212)
9-3 失步故障开断	(184)	第十一章 同步发电机的运行.....	(213)
9-4 空载变压器和空载长线的开断	(185)	11-1 同步发电机在额定参数及非额定参数	
9-5 延伸故障开断与并联开断	(187)	时的运行	(213)
本章小结	(188)	11-2 同步发电机的容许运行范围	(216)
思考题和习题	(189)	11-3 同步发电机的正常运行	(217)
第十章 电力变压器的运行.....	(190)	11-4 同步发电机的进相运行	(222)
10-1 变压器的负荷能力	(190)	11-5 同步发电机的调相运行	(226)
10-2 自耦变压器的特点和运行方式	(197)	11-6 同步发电机的不对称运行	(229)
10-3 分裂绕组变压器的特点和运行特性	(202)	11-7 同步发电机失磁后的异步运行	(231)
10-4 不满足理想并联条件时变压器的并联运行	(205)	本章小结	(232)
		思考题和习题	(233)

第五篇 电气二次系统

第十二章 二次接线图.....	(234)	第十四章 断路器控制系统.....	(256)
12-1 原理接线图	(234)	14-1 控制回路的分类及要求	(256)
12-2 展开接线图	(235)	14-2 控制开关和操动机构	(257)
12-3 安装接线图	(236)	14-3 断路器的控制回路和信号回路	(260)
本章小结	(241)	本章小结	(266)
思考题和习题	(242)	思考题和习题	(267)
第十三章 操作电源系统.....	(242)	第十五章 信号系统.....	(268)
13-1 操作电源的功用和分类	(242)	15-1 信号系统的分类及要求	(268)
13-2 蓄电池组式直流系统	(244)	15-2 事故信号	(270)
13-3 硅整流电容储能的直流系统	(248)	15-3 预告信号	(274)
13-4 复式整流的直流系统	(250)	15-4 指挥信号	(277)
13-5 直流供电网络	(253)	15-5 闪光装置	(279)
本章小结	(255)	本章小结	(281)
思考题和习题	(255)	思考题和习题	(282)

参考文献

第一篇 电器基本原理

第一章 高压断路器

1-1 电弧的形成及其熄灭

电弧是开关电器特别是高压断路器在开断电路过程中产生的必不可免的现象。开关电器开断电路时，只要电路中的电流超过几百毫安，电源电压超过几十伏，在其动、静触头间就会出现电弧，此时触头虽已分开，但电流通过触头间的电弧仍继续流通，只有在电弧熄灭后，电路才真正切断。

一、 电弧的形成

断路器的动、静触头间充有空气或其它绝缘介质，为什么在开断电路时会形成导电的电弧呢？由于断路器的动、静触头是金属导体，在常温下，金属内有大量的自由电子，因此，只要在断路器的触头间加上电压，带负电的电子在电场的作用下，就能向阳极运动，形成电流，起到导电作用（如图 1-1）。而电弧之所以能形成导电通道，也是弧隙中出现大量自由电子的结果。弧隙中自由电子有如下两个来源：

1. 阴极发射电子

电极的表面发射出大量自由电子供给弧隙区，其中阴极区发射的电子对电弧的形成过程起决定性作用。

阴极表面发射电子有热电子发射和强电场发射两种方式。热电子发射是高温的阴极表面向周围空间发射电子，其发射电子的多少与阴极的材料、表面温度有关。强电场发射是当阴极表面处的电场强度很高时，则金属内部的电子在电场作用下被拉出来，其发射电子的数量决定于阴极表面的电场强度。

2. 气体的游离作用

弧柱区的气体游离产生大量的电子和离子。

阴极区发射电子只能在离阴极很近的距离内导电。在动、静触头间隙内的气体中要产生大量的自由电子才能使整个弧隙导电。在气体内产生自由电子主要靠游离作用，气体的游离有电场游离和热游离两种方式。

电场游离是阴极表面发射出的电子和弧隙中原有的少数电子在电场作用下向阳极定向运动，不断地与其它粒子（如气体原子、分子）发生碰撞。只要电子的运动速度足够高，电子的动能大于原子或分子的

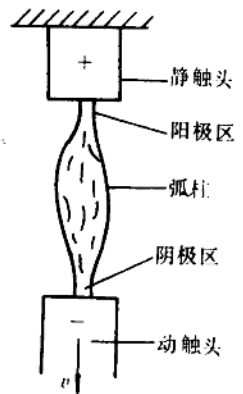


图 1-1 电弧

游离能，则在电子与气体的分子或原子碰撞时，就可使束缚在原子核周围的电子释放出来，变成电子和正离子。这种现象称为碰撞游离，见图 1-2。

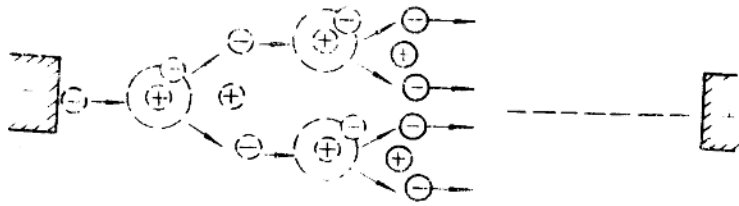


图 1-2 碰撞游离过程示意图

热游离是静止气体中的各种粒子，如分子、原子、自由电子等，都处于不断的热运动中，热运动的速度大小不同，方向杂乱无章，或者说是随机分布的。粒子的平均动能与绝对温度成正比，气体温度越高，热运动的平均速度越快，平均动能也越大。由于气体中的各种粒子在热运动中不断产生碰撞，当气体温度增高、粒子动能超过一定值时，就可由碰撞产生出电子和正离子。在电弧稳定燃烧情况下，弧柱温度很高，电弧电压和弧柱电场强度很低，因此，弧柱的游离作用主要由热游离决定。

由以上分析可看出，在触头刚分开时，由于触头距离很小，电场强度很高，阴极在强电场作用下发射电子，并使自由电子加速运动，产生碰撞游离形成电弧。在电弧高温作用下，阴极产生热电子发射，并在介质中产生热游离，使电弧维持和发展。这就是电弧的产生过程。

在弧隙中发生游离过程的同时，也存在着自由电子和正离子相互吸引发生中和而使带电质点减少的现象，称为去游离过程。去游离的主要方式是复合和扩散。

复合是带异号的带电质点的电荷彼此中和的现象。由于电子的运动速度远大于正离子，故直接复合的可能性很小，而电子在碰撞时，常附着在中性质点上形成负离子，可使速度大大减慢，从而易于与正离子复合。

扩散是弧柱内自由电子与正离子逸出弧柱以外，到周围冷介质中去的过程，即电弧中高温离子由密处空间向密度小、温度低的周围介质方向扩散。扩散出来的离子，因冷却而互相结合成为中性质点。

在稳定燃烧的电弧中，游离与去游离作用处于动平衡状态。若游离作用大于去游离作用，则电弧燃烧增强；反之，电弧逐渐减小乃至熄灭。

二、 电弧特性

直流电路中电弧的伏安特性如图 1-3 所示，电弧电压随电流的增加而下降。曲线 1 为静态特性，即在电流变化慢、电弧中每一点的游离和去游离作用已达平衡的稳定燃烧状态下得到的。曲线 2 为动态特性，是电流从 a 点迅速增大，因而游离作用落后于电流变化时得到的。曲线 3 为电流由 b 点很快减少，因而去游离作用迟于电流变化时得到的动态特性。动态特性随电流变化的速度而改变。

交流电路中，电流的瞬时值不断地随时间而变化，且

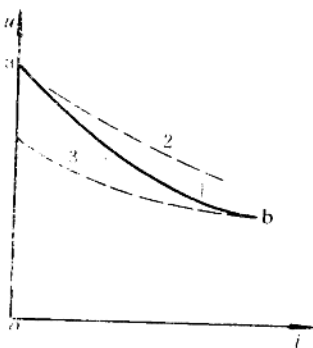


图 1-3 直流电弧的伏安特性

每半周过零一次。交流电流变化很快，弧柱热惯性作用较大，故交流电弧的伏安特性为动态特性，如图 1-4 (a) 所示。如果电流按正弦变化，由伏安特性可得图 1-4 (b) 所示的电压、电流波形图。图中 A 点为燃弧电压，B 点为熄弧电压。

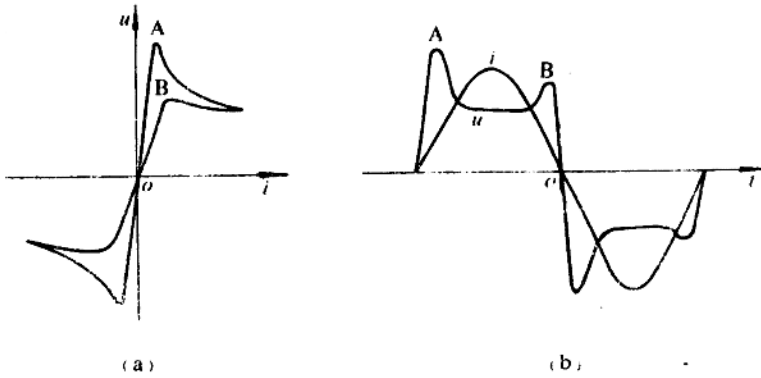


图 1-4 交流电弧伏安特性和电流、电压波形

三、交流电弧的熄灭

1. 交流电弧的熄灭条件

断路器开断交流电路时，动、静触头之间介质的中性质点被游离而产生电弧。在交流电弧电流过零前的几百微秒，由于电流减小，输入弧隙的能量也减少，弧隙温度急剧下降，从而使弧隙的游离程度下降，弧隙电阻增大，当电流过零时，电源停止向弧隙输入能量。此时弧隙不断散出热量，使温度下降，去游离作用加强，以致电弧熄灭。所以在交流电路中，随着电流每半周过零一次，电弧将会自然暂时熄灭。过零后的很短时间内，由于弧隙温度仍较高，还会存在热游离作用。电流过零后，电弧能否重燃，则取决于弧隙中游离作用和去游离作用的发展程度。如果弧隙的游离作用大于去游离作用，电弧将会重燃。如果在电流过零时，采取有效措施加强弧隙的冷却，使弧隙温度继续下降，增大去游离作用，当弧隙温度下降至使热游离基本停止时，弧隙将由导电状态转变为介质状态，若使介质的绝缘能力达到不会被弧隙外加电压击穿的程度，则电弧就不会重燃而最终熄灭。

电流过零时电弧熄灭，而弧隙区介质的绝缘能力尚需要一定的时间才能恢复到绝缘的正常状态，这一过程称为弧隙介质强度的恢复过程，以弧隙区介质在该过程中所能耐受的电压 $u_{is}(t)$ 表示；与此同时，弧隙电压也将由熄弧电压逐渐恢复到电源电压，这一过程称为电压恢复过程，以该过程中弧隙电压的变化 $u_{rec}(t)$ 表示。因此，在电流过零后，弧隙中存在两个恢复过程，如果电压 $u_{rec}(t)$ 高于电压 $u_{is}(t)$ ，弧隙仍被击穿，电弧重燃。反之，如果电压 $u_{rec}(t)$ 始终低于电压 $u_{is}(t)$ ，则电弧熄灭。因此，断路器开断交流电路时，熄灭电弧的条件为

$$u_{is}(t) > u_{rec}(t)$$

弧隙介质强度恢复过程主要由断路器灭弧装置的结构和灭弧介质性质所决定，而电压恢复过程则主要取决于系统电路的参数。两个恢复过程如图 1-5 所示。当恢复电压按曲线 u_{rec1} 变化时，在 t_1 时间以后，由于恢复电压大于介质强度，电弧即重燃。如果按 u_{rec2} 曲线变化，电弧就会熄灭。

2. 介质强度恢复过程

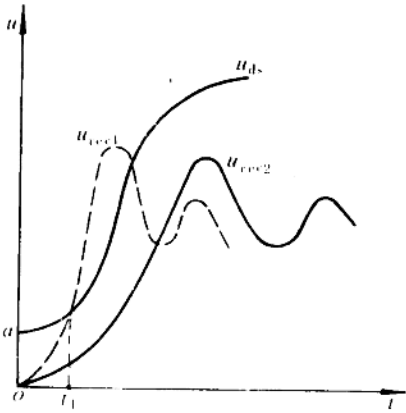


图 1-5 介质强度与恢复电压曲线

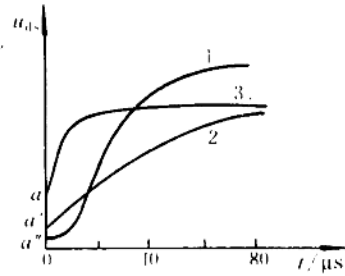


图 1-6 不同类型断路器介质强度恢复过程曲线

1—空气断路器 2—油断路器 3—真空断路器

弧隙介质强度的恢复过程，随断路器的型式而异，图 1-6 示出几种断路器的典型恢复过程。在 $t=0$ 电流过零瞬间，介质强度突然出现升高的现象，如图 1-6 中的 $0a$ ($0a'$ 或 $0a''$)，称为近阴极效应。这是因为在电流过零之前，弧隙间充满着电子和正离子，如图 1-7 所示。当电

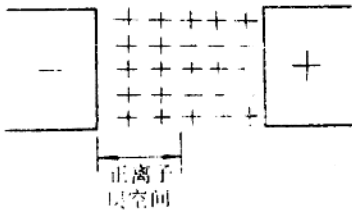


图 1-7 电流过零后电荷重新分布

流过零后，电极极性发生改变，弧隙中的电子立即向新阳极运动，而比电子质量大一千多倍的正离子则基本未动，从而形成弧隙间电子与正离子运动不平衡，使新阴极附近呈现正电荷离子层，其导电能力很低，显示出一定的介质强度，约在 $0.1 \sim 1\mu s$ 的暂短时间内，有 $150 \sim 250V$ 的起始介质强度。这种近阴极效应，对低压电器的熄弧特别有利。随后介质强度的增长速度和恢复过程，将与电弧电流的大小、介质特性、冷却条件以及触头分断速度等因素有关。电弧电流越大，电弧温度越高，介质强度恢复越慢。相反对电

弧冷却越好，温度下降越快，介质强度恢复就越快。

3. 弧隙电压的恢复过程

弧隙电压的恢复过程与电路参数、负荷性质有关。一般电路中有电感和电容，因此，电流与电压的相位不同。当电弧电流过零时，电弧熄灭，触头间电压此时不等于零。由熄弧电压恢复到电源电压，这一恢复过程将由电路参数决定，此过程可能是具有振荡特性的周期性过渡过程也可能是非周期性的过渡过程。此时首先出现在弧隙两端具有过渡过程特性的弧隙间的电压称为瞬变恢复电压 u_{tr} ，一般存在时间只有几十微秒至几毫秒。然后，弧隙两端出现的便是电源电压，称为工频恢复电压 u_{or} 。

断路器开断短路电流时的物理过程简述如下：

设断路器开断是由电阻 R 、电感 L 和电容 C 元件组成的交流电路，电压超前电流 φ 角，弧隙的并联电阻或弧隙等值电阻为 r 。在开断过程中，断路器动、静触头间电弧的产生与熄灭的全过程，可由图 1-8 所示的波形图来说明。

在 t_0 时刻，断路器触头开始分离，在电流由零开始增大时，在动、静触头之间将出现电弧电压 u_{arc} ，电弧电压随电流 i 的增大而迅速上升到最大值 A 点，此点电压为电弧的燃弧电压，也称弧隙的击穿电压，此时电流仍很小。此后，随着电流的增大，游离作用急剧增强，使电

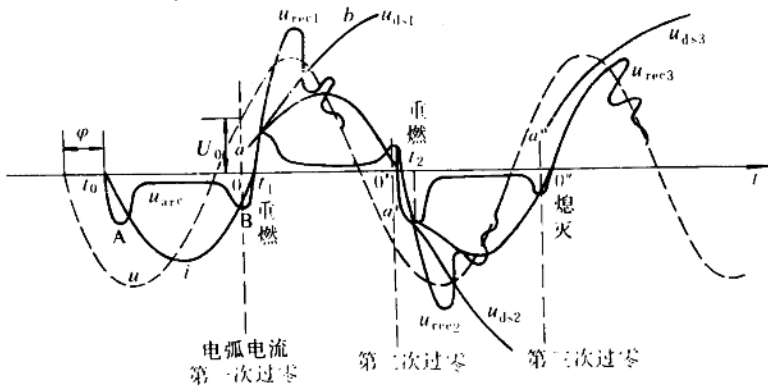


图 1-8 断路器开断短路电流时电弧产生与熄灭波形图

弧电阻迅速减小，所以电弧电压又很快降低。当电流较大时，弧隙已充分游离，电弧电压变化也较小，故在半周波内的中间部分电弧电压比较平坦。当电流减小到接近零时，热游离减慢，去游离加强，电弧电压又很快升高至 B 点，此时电流所产生的能量已不足以维持电弧燃烧，电弧便暂时熄灭，所以 B 点的电弧电压数值，又称为熄弧电压。由于热惯性，去游离作用来不及跟上电流变化，所以，熄弧电压总是小于燃弧电压。整个电弧电压曲线在半周内是马鞍形，如图 1-8 中标以 u_{arc} 的曲线。

当电弧电流第一次过零时，电弧熄灭后是否重燃，取决于电压 u_{ds} 与电压 u_{rec} 的对比关系。图中介质强度恢复曲线为 Oab ，其中 Oa 段代表近阴极效应所致的起始介质强度标以 u_{rec1} 的曲线为电压恢复曲线，若恢复过程为振荡性质，则瞬态恢复电压逐渐振荡衰减后过渡到工频恢复电压。 u_{ds1} 与 u_{rec1} 在 t_1 时刻相交，当 $u_{rec1} > u_{ds1}$ 时，电弧重燃。

当电流第二次过零时，仍类似上述情况，在 t_2 时刻，电弧又将重燃。电弧从最初点燃到 t_2 时刻已经经过了两个半波，虽然每半波都有一次暂时熄灭而随后又复燃的过程，但从宏观讲，电弧仍在燃烧。

当电流第三次过零时，因断路器灭弧装置不断增强去游离作用，使得灭弧介质的介质强度逐步得到提高，而电源恢复电压则受到弧隙电阻的阻尼作用，振荡幅值和陡度都逐渐下降，达到 $u_{ds3} > u_{rec3}$ 的熄弧条件时，电弧电流过零后就不再重燃，最终断开电路，电流 i 也随即终止。加于弧隙上的电压即为工频稳态电源电压 u 。

4. 熄灭交流电弧的基本方法

交流电弧能否熄灭，决定于电流过零时，弧隙的介质强度恢复速度和弧隙电压恢复速度两种过程竞争的结果。如果加强弧隙的去游离或减小弧隙电压的恢复速度，都可以促使电弧熄灭。

为此，现代开关电器中广泛采用的灭弧方法，有下列几种。

(1) 吹弧。利用气体或油吹动电弧，广泛应用于各种电压的开关电器，特别是大容量高压断路器中。

由于温度对熄弧的影响很大，而气体热游离的基本条件是需要有一定的温度。温度越低，热游离越不易发生。降低弧隙温度便能加强去游离，而且介质的绝缘强度随温度的降低而增加。介质强度恢复的快慢，在很大程度上决定于弧隙温度降低的速度。所以，冷却电弧是熄

弧的重要方法之一。用气体或液体介质吹弧，既能起到对流换热，强烈冷却弧隙，也有部分取代原弧隙中游离气体或高温气体的作用。气体流速大，对流换热能力就强，能使电弧散热加剧，对弧隙的冷却作用更大。

在断路器中，常制成各种形式的灭弧室，使气体或液体产生较高的压力，有利地吹向弧隙。

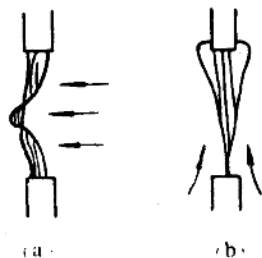


图 1-9 吹弧方式

吹弧方式有横吹如图 1-9 (a) 和纵吹如图 1-9 (b) 所示。吹动方向与弧柱轴线平行的叫纵吹，主要是使电弧冷却、变细最后熄灭；吹动方向与弧柱轴线垂直的叫横吹，是把电弧拉长，表面积增大并加强冷却，熄弧效果更好。纵、横吹的方式各有它的特点，不少断路器是采用纵横混合吹弧的方式，熄弧效果更好。

(2) 采用多断口熄弧。高压断路器常制成每相有两个或多个串联的断口，采用多断口是把电弧分割成多个小电弧段，在相等的触头行程下，多断口比单断口的电弧拉长了，从而增大了弧隙电阻，而且电弧被拉长的速度（即触头分离速度）也增加，加速了弧隙电阻的增大，同时也增大介质强度的恢复速度。由于加在

每个断口的电压降低，使弧隙的恢复电压降低，因此灭弧特性更好。

110kV 及以上电压等级的断路器，往往把相同型式的灭弧室（每个灭弧室是一个断口）串联起来，用于较高的电压等级，称为组合式或积木式结构。如用两个具有双断口的 110kV 断路器串联后，即成为 220kV 四个断口的断路器（参阅图 1-20）。

采用多断口结构后，每一个断口在开断位置的电压分配和开断过程中的恢复电压分配出现了不均匀现象，如图 1-10 所示的单相断路器在开断接地故障以后的电路图，图中 U 为电源电压， U_1 和 U_2 分别为两个断口的电压，电弧熄灭后，每个断口间可以看作一个电容 C_d ，中间的导电部分和断路器底座对大地也可以看成是一个对地电容 C_0 ，于是，两断口间的电压分布

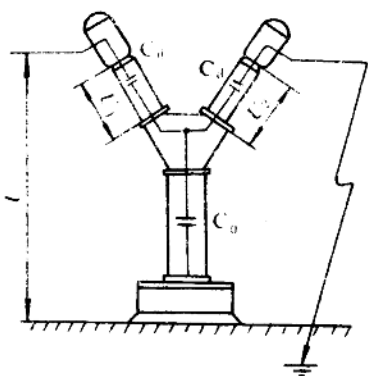


图 1-10 断路器中的电容分布

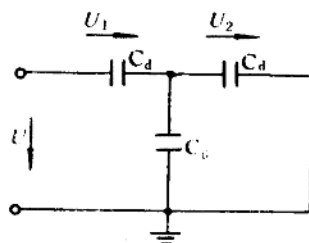


图 1-11 电压分布计算图

情况，可按图 1-11 的电路进行计算。

$$\left. \begin{aligned} U_1 &= U \frac{C_d + C_0}{2C_d + C_0} \\ U_2 &= U \frac{C_d}{2C_d + C_0} \end{aligned} \right\} \quad (1-1)$$

由式 (1-1) 可看出， $U_1 > U_2$ ，则第一个断口工作条件要比第二个断口严重。为了充分发

挥每个灭弧室的作用，应使两个断口的工作条件接近相等，通常在每个断口并联一个电容量比 C_d 和 C_0 的电容量大得多的电容 C ，称为均压电容。此时电压分布可用图 1-12 的电路图进行计算。

由于 C 很大， $C+C_d \gg C_0$ ，则按图 1-12 电路可计算出各断口的电压为

$$\left. \begin{aligned} U_1 &= U \frac{(C+C_d) + C_0}{2(C+C_d) + C_0} \approx U \frac{C+C_d}{2(C+C_d)} = \frac{U}{2} \\ U_2 &= U \frac{(C+C_d)}{2(C+C_d) + C_0} \approx U \frac{C+C_d}{2(C+C_d)} = \frac{U}{2} \end{aligned} \right\} (1-2)$$

由此可见，加装足够大的均压电容后，电压将平均分布在两个断口上，每个断口的工作条件基本上一样。

实际上，串联断口增加后，要做到电压完全均匀分配，必须装设电容量很大的均压电容，这样很不经济。一般按照断口间的最大电压不超过均匀分布电压值 10% 的要求来选择电容量，即不均匀系数 N 要求为

$$N = \frac{\text{断口上实际承受的电压}}{\text{电压均匀分配时断口承受的电压}} \leq 1.1$$

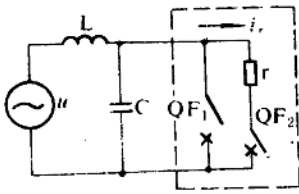


图 1-13 具有并联电阻电路

(3) 断路器触头加装并联电阻熄弧。具有并联电阻的断路器其原理接线如图 1-13 所示。断路器每相有两对触头， QF_1 为主触头， QF_2 为辅助触头。并联电阻 r 与辅助触头串联后再与主触头并联。断路器开断电路时，主触头 QF_1 先开断，并联电阻 r 接入电路，电流过零时，主触头电弧熄灭，此时通过并联电阻 r 的电流为 i_r 。由于 $r \gg \omega L$ ，此时电路基本上为电阻性电路，通过 r 的电流 i_r 也小得多，因此，当主触头熄弧后，辅助触头 QF_2 接着开断时， QF_2 触头间的电弧很容易熄灭。断路器的并联电阻值 r 主要根据熄灭主触头间电弧的要求来选择。一般取

$$r \leq \frac{1}{2} \sqrt{\frac{L}{C}}$$

并联电阻对恢复电压的过渡过程起阻尼作用，使恢复电压的幅值和电压恢复速度都会降低。此外，并联电阻还可以提高电路的功率因数，因而电流过零时工频恢复电压的瞬时值也降低（详见第九章第一节）。

上面介绍的三种灭弧方法一般用于高压断路器中，它们是按照熄灭长弧（弧长在几个厘米以上）的原理进行设计的。而对于低压开关电器，往往是采用熄灭短弧（弧长在几个毫米之内）的原理等进行设计的，常用如下一些方法：

(1) 利用短弧原理熄弧。在短弧中，当电流过零时，阴极附近几乎立即出现 150~250V 的介质强度。将电弧分割成许多短弧，利用这个起始介质强度，使得所有阴极的介质强度总值大于加在触头上的电压，则电弧被熄灭。

图 1-14 (a) 为低压电器中广泛采用的灭弧栅装置，它是利用短弧原理来灭弧的。栅片结构如图 1-14 (b) 所示，栅片由铁磁物质制成，当触头间燃弧后，可以利用电弧电流产生的磁场与铁磁物质间产生的相互作用力，把电弧拉入栅片内，将长弧分割成一串短弧，在每个短弧的阴极附近都有 150~250V 的介质强度。设有 n 个栅片，则整个灭弧栅总共有 $n \cdot (150 \sim$

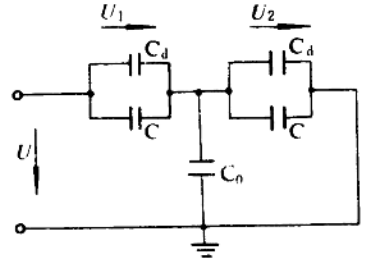


图 1-12 有均压电容时断口电压分布计算图

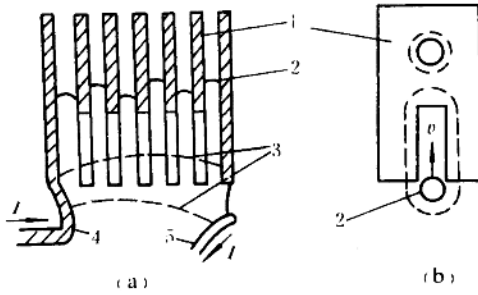


图 1-14 电弧在灭弧栅内熄灭

1—灭弧栅片 2—电弧 3—电弧移动位置
4—静触头 5—动触头

电弧拉入灭弧片的狭缝中。一方面把电弧拉长，同时将电弧直接与灭弧片冷壁紧密接触，加强冷却作用，促使电弧熄灭。

低压电器中的接触器、磁力起动器等的灭弧方法，都是采用狭缝熄弧原理。

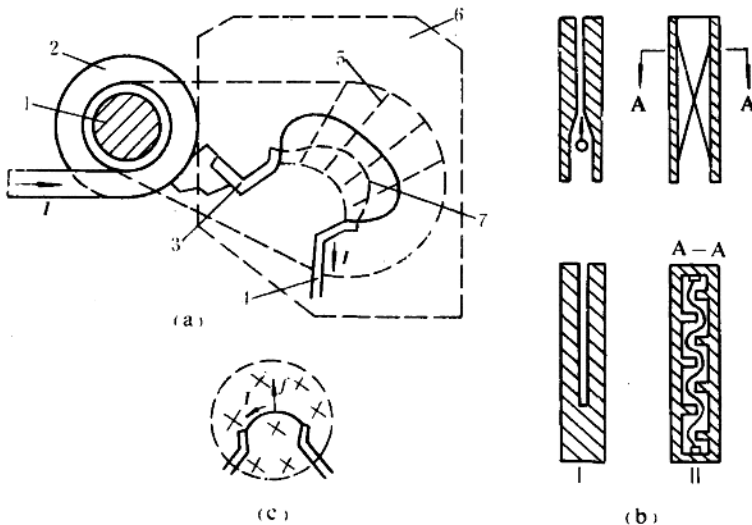


图 1-15 狭缝灭弧原理图

I—直缝式灭弧片 II—迷宫式灭弧片
1—磁吹铁芯 2—磁吹线圈 3—静触头 4—动触头 5—灭弧片 6—灭弧罩 7—电弧移动位置

四、现代断路器理论中的新观点

对于电弧与灭弧现象的认识，传统的断路器理论一向认为“电力断路器的电流开断过程就是灭弧过程，电弧对电流开断来说是有害而又不可避免的现象。”因而认为电力断路器技术上的一切改进都集中于一点，即如何迅速而有效地熄灭电弧，也就是说，人们实际上是把电流开断与灭弧作同义词来使用的。而现代断路器理论中的新观点认为，电力断路器的根本功能是在具有一定电位的导体电路的一部分上进行导体与绝缘体的快速相互转变，而为了实现这种转变，电弧是必不可少的媒介，只有通过电弧才能实现这种转变。因而现代大容量电力

断路器必须更积极地有效地去利用电弧现象。以这种观点为基础的断路器理论指出，宇宙空间物质存在的形式除固体、液体、气体三种状态以外，还有第四种状态——等离子体状态。而各状态的保持或各状态之间的变化，一般决定于温度。给固体分子加上热能，当分子的动能超过构成固体的结合能时，则从固体的结合状态转变为液体的结合状态。同样给液体分子加上一定热能时，则可变成气体。当气体分子得到超过其构成原子之间的结合能的能量时，则分解成单原子状态。如果再进一步得到超过其电离位能的能量时，则使其轨道上的电子发生电离，即成为等离子体状态。

电弧放电状态就是等离子体的一种形式。电离所产生的电子和离子的存在，使空气空间呈导电性，该空间的导电率在平衡状态下，可以认为是由温度的函数确定的，即空间导电率是一种热力学的状态量。对断路器来说，电流的开断即电弧导电性的迅速降低。在技术上，可以采用使电弧冷却的方法来实现。也就是说，将断路器的电弧等离子体看做是一种可以控制的可变电导体，而使它的可变电导值迅速而有效地突变为零的过程就是交流断路器的灭弧过程，也就是电流开断的实质，即尽可能造成导电性大的电弧等离子体，使之能导通大电流，然后迅速使之冷却，并使其在短时间内转变为绝缘性能高的气体空间。因此从导体—绝缘体相互转变这个开关作用的根本观点来看，电弧等离子体具有极为重要的特性，对于高压大电流电路的分断来说，只有产生电弧才能完成这一作用。

研究表明，在高温范围内对电弧等离子体进行温度控制，可使其导电性大幅度变化，因而断路器由于触头分开而产生的电弧等离子体的特性具有重要意义，只要掌握了其特性，就可以实现对其进行温度控制，按要求实现导体—绝缘体的转变。

以前一直认为，电弧等离子体的特性，除采用实验和试验的方法去探求外，别无它法。但近年来，对电弧等离子体的研究，也和其它电气设备一样，逐渐找出了可能进行理论的定量的设计途径。当然有待解决的问题还很多，但可以预料，关于电弧等离子体的特性，也将和铜、铁、半导体等的特性一样，逐步被人们所认识，并将能准确地掌握和对其进行控制。

1-2 高压断路器的基本类型和参数

高压断路器是用来在正常情况下接通和断开电路、且在故障情况下能自动迅速地开断故障电流的开关设备，其作用较为重要，结构也较复杂，所以，对它的基本要求是：在各种情况下应具有足够大的开断能力；尽可能短的动作时间和高度的工作可靠性。

一、 断路器的基本类型

断路器的最重要任务是熄灭电弧，所以，各种断路器都有不同结构的灭弧装置，它在很大程度上，影响断路器的灭弧性能。根据断路器所采用的灭弧介质及作用原理，断路器可分为下列几种类型：

1. 油断路器

采用油作为灭弧介质的断路器叫油断路器。断路器中，油除了作为灭弧介质外，还作为触头开断后的弧隙绝缘以及带电部分与接地外壳之间的绝缘介质的断路器，称为多油断路器；油只作为灭弧介质和触头开断后的弧隙绝缘介质，而带电部分对地之间的绝缘采用瓷介质的断路器，则称为少油断路器。少油断路器的用油量小，体积相应较小，耗钢材也少。目前，少油断路器在我国生产和应用较为普遍。

2. 压缩空气断路器 (简称空气断路器)

采用压缩空气作为灭弧介质的断路器,叫做压缩空气断路器。压缩空气除了作灭弧介质外,还作为触头开断后的弧隙绝缘介质。空气断路器具有灭弧能力强、动作迅速等特点。但结构较复杂,有色金属消耗量较大,因此,它一般应用于 220kV 及以上电压的配电装置中。

3. 六氟化硫 (SF₆) 断路器

采用具有优良灭弧性能和绝缘性能的 SF₆ 气体作灭弧介质的断路器,称为 SF₆ 断路器。它是近年来出现的一种新型断路器,具有开断能力强、体积小等特点,但结构较复杂、金属消耗量大、价格较贵。一般用于 220kV 以上的系统中,并与以 SF₆ 作绝缘的有关电器组成封闭式组合电器,这样可以大量节省占地面积和减少投资。

4. 真空断路器

利用真空高介电强度来灭弧的断路器,称为真空断路器。此种断路器具有灭弧速度快、触头材料不易氧化、寿命长、体积小等特点。真空断路器也是近年来才研制发展的新型断路器。

二、 高压断路器的基本参数

目前,我国电力系统中所广泛使用的高压断路器,其型号、规格一般由文字符号和数字以下述方式表示:

1 2 3 - 4 5 / 6 7 8

其代表意义: 1 为产品字母代号,如表 1-1 所示; 2 为安装场所代号,屋内 N,屋外 W; 3 为设计系列代号,以数字 1, 2, … 表示; 4 为额定电压 (kV); 5 为其他标志,如改进型 G; 6 为额定电流 (A); 7 为额定开断能力 (kA 或 MVA); 8 为特殊环境代号。

例如: SN10-10/3000-750 型,即指 10kV, 3000A, 750MVA, 10 型屋内式高压少油断路器。

表 1-1 高压断路器产品字母代号

断路器名称	少油断路器	多油断路器	空气断路器	六氟化硫断路器	真空断路器
字母代号	S	D	K	L	Z

下面从运行角度出发,介绍断路器的有关参数。

1. 额定电压及额定电流

额定电压 U_n 是指断路器长期工作的标准电压 (对三相系统指线电压)。电力系统在运行中允许有 5% U_n 的电压波动,断路器必须适应在允许电压变化范围内长期工作,为此断路器还规定了最高工作电压。对额定电压在 (3~220) kV 范围内的断路器,其最高工作电压较额定电压高 15% 左右;对 330kV 以上者,规定其最高工作电压较额定电压高 10%。断路器额定电压与最高工作电压对应值,见表 1-2。

表 1-2 断路器额定电压和最高工作电压等级

额定电压/kV	3	6	10	35	110	220	330	500
最高工作电压/kV	3.5	6.9	11.5	40.5	126	252	363	550

额定电压的大小影响断路器的外形尺寸和绝缘水平,额定电压越高要求绝缘强度越高、外形尺寸越大、相间距离亦越大。选择断路器时,额定电压是首先应满足的条件之一。

额定电流 I_n 是指在额定频率下长期通过断路器且使断路器无损伤、各部分发热不超过长期工作时最高的允许发热温度的电流。我国规定断路器的额定电流为: 200, 400, 630, (1000), 1250, (1500), 1600, 2000, 3150, 4000, 5000, 6300, 8000, 10000, 12500, 16000, 20000A。

额定电流的大小,决定断路器导电部分和触头的尺寸和结构,在相同的允许温升下,电流越大,则要求导电部分和触头的截面积越大,以便减小损耗和增大散热面积。

2. 额定开断电流

断路器在开断操作时,首先起弧的某相电流称为开断电流。在额定电压下,能保证正常开断的最大短路电流称为额定开断电流 I_{brn} 。它是标志断路器开断能力的一个重要参数。我国规定额定开断电流为: 1.6, 3.15, 6.3, 8, 10, 12.5, 16, 20, 25, 31.5, 40, 50, 63, 80, 100kA 等。

由于开断电流和电压有关,因此在不同的电压下,对同一断路器所能正常开断的最大电流值也不相同。以往认为断路器的开断能力既与开断电流有关,又受给定电压的限制,因此以往常采用断流容量这一概念,即把额定条件下的开断能力称为额定断流容量。三相电路的额定断流容量以 $S_{brn} = \sqrt{3} U_n I_{brn}$ 表示。必须指出:断路器在起弧时的开断电流与熄弧后的工频恢复电压,在时间上并非同时产生,这两者相乘并无具体物理意义,亦不能确切地表征开断能力。我国根据国际电工委员会(IEC)的规定,现只把额定开断电流作为表征开断能力的唯一参数。而断流容量仅作为描述断路器特性的一个数值。

3. 关合能力

当电力系统存在短路故障时,断路器一合闸就会有短路电流流过。这种故障称为“预伏故障”。当断路器关合有预伏故障的设备或线路时,在动、静触头未接触前尚距几毫米就发生预击穿,随之出现短路电流,给断路器关合造成阻力,影响动触头合闸速度及触头的接触压力,甚至出现触头弹跳、熔化、焊接以至断路器爆炸等事故,这远比在合闸状态下通过极限电流的情况更为严重。

衡量断路器关合短路故障能力的参数为额定关合电流 i_{mc} 。其数值以关合操作时,瞬态电流第一个大半波峰值来表示,制造部门对关合电流一般取额定开断电流 I_{brn} 的 $1.8\sqrt{2}$ 倍,即

$$i_{mc} = 1.8\sqrt{2} I_{brn} = 2.55 I_{brn}$$

断路器关合短路电流的能力除与灭弧装置性能有关外,还与断路器操动机构的合闸功的大小有关。因此,在选择断路器的同时,应选择操动机构,方能保证足够的关合能力。

4. 耐受性能

断路器在开断短路故障时,短路电流也将流过动、静触头,因此,要求断路器不致因发热和电动力的冲击而损坏,即断路器应有足够的耐受短路电流作用的能力,简称为耐受能力。

(1) 短时热电流(曾称热稳定电流) 在规定的时间内(规定标准时间 2s,需要大于 2s 时推荐为 4s)断路器在合闸位置,可能经受的短时热电流有效值(kA),称为短时热电流 I_t (或短时耐受电流),断路器标准中规定

$$I_t = I_{brn}$$

I_t 通过断路器时,各零部件的温度不应超过短时发热最高允许温度,且不致出现触头熔接

或软化变形，以及其他妨碍正常运行的异常现象。

(2) 峰值耐受电流 峰值耐受电流 i_{em} ，亦称动稳定电流，即在规定的使用条件和性能下，断路器在合闸位置时所能经受的电流峰值。它与关合电流 i_{mc} 不同的是， i_{em} 是断路器处于合闸位置时通过的短路电流，而 i_{mc} 则是由于断路器关合短路故障所产生的短路电流。峰值耐受电流也是以短路电流的第一个大半波峰值电流来表示，且

$$i_{em} = i_{mc} = 2.55I_{brn}$$

显然峰值耐受电流反映了断路器承受由于短路电流产生的电动力的耐受性能，它决定断路器的导电部分和绝缘支持件的机械强度以及触头的结构形式。

5. 操作性能

(1) 全开断时间 这是指断路器接到分闸命令瞬间起到电弧熄灭为止的时间，即

$$t_t = t_1 + t_2$$

全开断时间 t_t 由两部分组成： t_1 称为固有分闸时间——从断路器接到分闸命令瞬间到所有各相的触头都分离的时间间隔； t_2 称为燃弧时间——指某一相首先起弧瞬间到所有相电弧全部熄灭的时间间隔。

全开断时间 t_t 是说明断路器开断过程快慢的主要参数。它直接影响故障对设备的损坏程度、故障范围、传输容量和系统的稳定性。断路器开断单相电路时，各个时间的关系如图 1-16，其中 t_0 为继电保护装置动作时间。

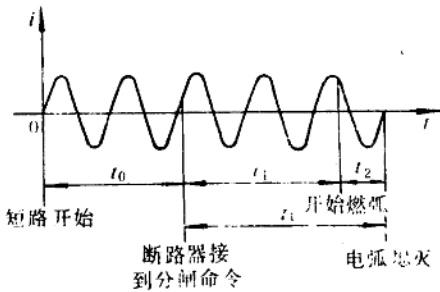


图 1-16 断路器开断时间示意图

(2) 合闸时间 处于合闸位置的断路器，从接到合闸命令瞬间起到所有相的触头均接触为止的时间称为合闸时间。

6. 自动重合闸性能

架空线路的短路故障，大多是暂时性故障。当短路电流切断后，故障亦随之消除。为了提高供电的连续性，故多装有自动重合闸装置。自动重合闸就是断路器在故障跳闸以后，经过一定的时间间隔又自动进行再次合闸。重合后，如果故障已消除，即恢复正常供电，称为自动重合成功。如果故障并未消除，则断路器必须再次开断故障电流。这种情况称为自动重合失败。在重合失败后，如已知为永久性故障应立即组织检修。但有时运行人员无法判断故障是暂时性还是永久性，而该电路供电又很重要，允许三分钟后强行合闸一次，称为“强送电”。同样，强送电也可能成功或失败。但失败时，断路器必须再开断一次短路电流。断路器的前述动作程序，称为自动重合闸的操作循环，记为分—0—合分—t—合分

其中， θ 为断路器开断故障电路时从电弧熄灭起到电路重新接通的时间，称为无电流间隔时间，一般为 0.3s 或 0.5s； t 为强送电时间，一般为 180s。

断路器在自动重合闸操作循环中的有关时间示意图如图 1-17。图中： t_0 、 t_1 和 θ 的定义同前所述， t_3 为预击穿时间， t_4 为金属短接时间， t_5 为燃弧时间。

断路器的全开断时间与无电流间隔时间之和 ($t_t + \theta$)，称为自动重合闸时间。金属短接时间 t_4 是指断路器重合闸操作以后，触头闭合到第二次触头分开所需用的时间。

断路器允许的无电流间隔时间取决于第一次开断后，断路器恢复熄弧能力所需要的时间。

如果间隔时间太短，当断路器重合后再次分闸时，尚未恢复其熄弧能力，则断路器在第二次分闸时的断流容量便要下降。

用于架空输电线路中的断路器，必须满足自动重合闸的要求。应在短时间内连续可靠的关合两次短路故障、开断三次短路电流，以保证电力系统运行的可靠性。

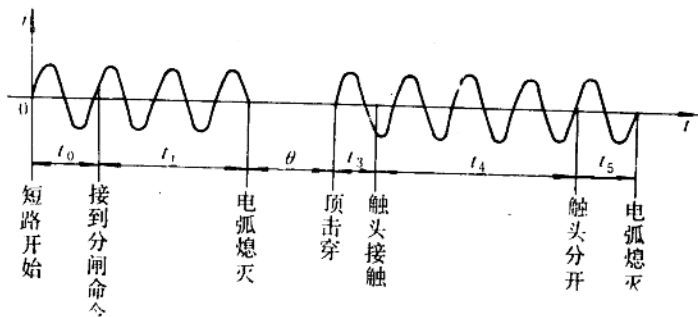


图 1-17 自动重合闸操作循环有关时间示意图

1-3 油断路器

按照绝缘结构的不同，油断路器可分为多油断路器和少油断路器两种。

一、多油断路器

多油断路器的触头放置在装了变压器油的、由钢板焊成的油箱内。箱内的油不仅作为灭弧介质，而且作为相间或相对地的绝缘用。因用油量多，故体积较大。

图 1-18 为多油断路器结构图。

多油断路器的导电部分多做成“U”形，分闸时，动触头通过灭弧室中的灭弧片下落，由电弧起燃的油气流经灭弧片孔道迅速灭弧。由于每相有两个断口，从而拉长了电弧，有利于灭弧。由于导电部分必须穿过地电位的箱盖，因此，需要采用绝缘套管，套管下端还可安装套管式电流互感器，以减少单独装设电流互感器的投资和占地面积。

多油断路器在运行中，油位既不能过高，也不能过低。因为电弧发生时会产生大量气体，若油面过高则缓冲空间太小，使油箱压力过大而发生爆炸。反之，若油面过低则冷却气体的油量不够，可能使高温氢气与缓冲空间的空气接触，引起燃烧甚至爆炸。因此，运行中应特别注意油位指示，并定期检查油质是否符合要求。

多油断路器的缺点是油量太多，不仅使得断路器体积增大，消耗原材料较多，而且增加了爆炸和火灾的危险性。此外，由于油量多，给运行和检修也带来困难，因此，限制了多油断路器的生产和使用范围。但多油断路器也有其特点，如内部带有电流互感器，配套性强；户外使用时，受大气条件的影响较小，故对于 35kV 的屋外配电装置，特别是小型水电站的 35kV 屋外配电装置，选用多油断路器在技术经济指标方面仍有可取之处。

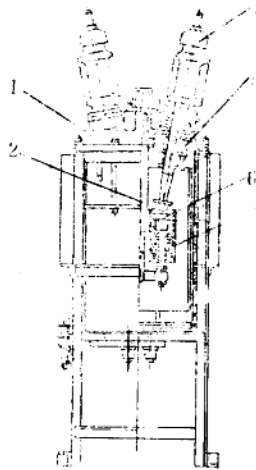


图 1-18 多油断路器结构图

- 1—油箱盖 2—提升机构
- 3—电容套管 4—灭弧室
- 5—电流互感器 6—静触头