

第一章

高压断路器

断路器是能开断、闭合和承载运行状态的正常电流，并能在规定时间内承载、闭合和开断规定的异常电流（如短路电流）的电器设备，通常也称为开关。IEC 标准的定义是：所设计的分、合装置应能关合、导通和开断正常状态电流，并能在规定的短路等异常状态下，在一定时间内进行关合、导通和开断。

通常将额定电压为 3kV 及以上主要用于开断或闭合电路的高压电器称为高压断路器。本章将讨论有关高压断路器的问题。

在电力系统中，高压断路器同发电机、变压器、线路等一样，都是电力系统中的重要设备。它的主要功能为：

- (1) 在正常的闭合状态时应为良好的导体，不仅对正常电流，且对规定的短路电流也应能承受其发热和电动力的作用而可靠地接通；
- (2) 对地及断口间具有良好的绝缘性能；
- (3) 在闭合状态的任何时刻，应能在不发生危险过电压的条件下，在尽可能短的时间内开断额定电流以下的电流；
- (4) 在开断状态的任何时刻，应能在断路器触头不发生熔焊的条件下，在短时间内安全地闭合规定的短路电流。

断路器的工作特点是：瞬时的从导通状态变为绝缘状态或者瞬时的从绝缘状态变为导通状态。

总之，高压断路器在电力系统中起了两方面的作用：一是控制作用，即根据电网运行要求，将一部分电器设备或线路投入或退出运行状态，转为备用或检修状态；二是保护作用，即在电器设备或线路发生故障时，通过继电保护及自动装置动作断路器，将故障部分从电网中迅速切除，保护电网的无故障部分得以正常运行。

随着电力系统运行电压的提高和断路容量的不断扩大，对断路器的断流和灭弧性能提出了更严格的要求，出现了不同原理、多种形式的断路器，如：多油断路器、少油断路器、空气断路器、真空断路器、SF₆ 断路器、SF₆ 气体绝缘金属铠装全封闭组合电器 (GIS) 等，随着科技的发展，新原理、新材料、新工艺的应用和制造水平的提高，性能优越的断路器的应用将越来越广泛，如表 1-1、表 1-2 所示。

表 1-1 1998、1999 年在同一电压等级中各类断路器所占比例 (%)

电压(kV)	550		363		252		126		72.5		40.5		24		12		27.5/55	
年 份	1998	1999	1998	1999	1998	1999	1998	1999	1998	1999	1998	1999	1998	1999	1998	1999	1998	1999
SF ₆ 断路器 (%)	100	100	100	100	84.10	81.68	58.32	66.76	16.06	89.64	30.40	47.29	78.85	60	7.58	9.91		

续表

电压(kV)	550		363		252		126		72.5		40.5		24		12		27.5/55		
	1998	1999	1998	1999	1998	1999	1998	1999	1998	1999	1998	1999	1998	1999	1998	1999	1998	1999	
少油断路器(%)					15.90	18.32	41.68	33.24	83.94	10.36	10.99	3.38	21.15	40	8.82	3.69			
多油断路器(%)												27.99	19.09			3.89	2.96		
真空断路器(%)												30.63	30.25			79.70	83.44	100	100

表 1-2 1999 年各类断路器产品产量

产 量 类 别	电压 (kV)									
	550	363	252	126	72.5	40.5	24	12	27.5/55	
SF ₆ 断路器 (台)	42 (11)	38 (40)	767 (660)	1209 (1058)	398 (22)	2787 (2028)	15 (41)	8373 (6334)		
少油断路器 (台)			172 (125)	602 (756)	46 (115)	199 (733)	10 (11)	3120 (7367)		
多油断路器 (台)						1125 (1867)		2496 (3247)		
真空断路器 (台)						1783 (2043)		70463 (66228)	342 (423)	
封闭式组合电器 GIS (间隔)	1 (5)	(8)	42 (94)	645 (450)	25					
敞开式组合电器 (组)			34 (2)	60 (27)						
金属封闭开关设备 (台)						3775 (3936)		72219 (66704)		

注 () 内的数字为 1998 年 208 个企业高压断路器产量的统计数据。

从上述表 1-1 及表 1-2 中可看出：

(1) 少油断路器全面减产。126kV 少油断路器减少 20.37%；72.5kV 少油断路器减少 60%；40.5kV 少油断路器减少 72.85%（比上年减少 534 台）；10kV 少油断路器减少 57.65%（比上年减少 4247 台）。少油断路器产量的逐年减少，反映了高压开关设备无油化为大势所趋。

(2) 多油断路器。40.5kV 多油断路器 1999 年产量下降 12.73%；12kV 多油断路器产量下降 23.13%。40.5kV 多油断路器产量下降是受户外 SF₆ 和户外真空断路器发展的影响；12kV 多油断路器产量下降是真空和 SF₆ 柱上断路器的迅速发展和普及的必然结果。

(3) 12kV 真空断路器比 1998 年增长 6.39%，增长幅度远小于上年的 32.65%（16300 台），且其真正增长的是户外真空断路器（柱上）。

表 1-1 为 1998、1999 年不同电压等级中各类断路器所占的比例。

从表中可以看出，1999 年度除 252kV 等级外，少油断路器所占比例均大幅度减少；40.5kV 级真空断路器所占比例基本与上年持平，SF₆ 断路器所占比例增加明显（比上年增

长 16.89%)，少油和多油断路器所占比例减幅较大；在 12kV 产品中只有少油断路器减幅较大（减少 5.13%），其余产品变化较小。

表 1-2 可以看出，SF₆ 断路器市场中压产品增幅稍大，高压产品数量比较稳定；少油断路器 252kV 增长纯属特例，其余电压等级都在减少。

对六种特性断路器的性能列出 22 项分别进行对比，如表 1-3 所示。

表 1-3 六种断路器的性能对比

特性类型	多油式	少油式	压缩空气式	真空式	SF ₆	GIS
1. 电压等级 (kV)	10~220	10~330	110~1150	10~35	10~1150	35~500
2. 最大开断电流 (kA)	20 以下	40 以下	50 以下	40 及以下	60 以下	60 以下
3. 单断口电压水平 (kV)	55 (55)	110 (154)	62.5 (122.5)	40.5	250 (550)	250
4. 城网改造中地位	不宜用	不宜用	不能用	可大用	可大用	可大用
5. 农网中地位	不宜用	可用	不能用	可大用	可用	可用
6. 占地 (面积和空间)	大	较大	大	小	小	很小
7. 能否发展成 GIS	不能	不能	不能	能	能	—
8. 能否快速重合闸	不能	能	能	能	能	能
9. 连续多次开断能力	不能	有限次数	十几次	8~50 次	6~20 次	≤20 次
10. 燃弧时间	长	长	短	短	短	短
11. 能否频繁操作	不能	不能	能	能	能	能
12. 切电容器过电压	较高	要加压油活塞	低	低	低	低
13. 切电抗器过电压			高	高	低	低
14. 噪音	较大	较大	特大	小	较小	较小
15. 有无火灾危险	有	有	无	无	无	无
16. 加工要求	低	低	高	低	很高	很高
17. 产品积木式	不能	能	能	能	能	能
18. 运输	不方便	方便	方便	很方便	方便	方便
19. 检修	很不方便	不方便	很不方便	检修周期 10 年，很 方便	检修周期 10~15 年， 检修不方便	检修周期 10~20 年检 修不方便
20. 维护	麻烦	较麻烦	麻烦	简单	麻烦	麻烦
21. 价格	便宜	便宜	最贵	较高	较高	贵
22. 发展趋势	已淘汰， 但运行中很 多 35kV 级 仍需生产	使用最 多，但已停 止发展	已停止发 展	在 10~ 35kV 中 将 成为主要发 展产品	高压、超 高压都在发 展，有广阔 前途	高压、超 高压都在发 展，有广阔 的使用前途

优胜劣汰，这是自然法则，断路器的发展历史也是这样。性能优越、价格适中、方便耐用的产品会得到用户的青睐而具有发展前途，而与此相反的产品则前景暗淡，终将面临被淘汰的威胁。

使用中的断路器同其他电气设备一样，由于所用设备材料的磨损及劣化而需要更换，

各部件之间相对位置的变更超出允许范围就需要进行调整，传动部分的润滑剂也要及时添加，总之，为保证断路器的性能而必须进行定期的维护和检修；更由于断路器一般动作频繁，零部件多，所用的材料品种也多，机械结构比其他输变电设备如变压器、互感器、避雷器等更为复杂，导致它造成故障的原因、机率和部件也就比其他电气设备多，再加之由于安装、调试和维护中存在的问题和制造中留下的缺陷等都构成故障发生的因素。

断路器的状态监测和故障诊断是保证断路器可靠运行和进行有效检修的重要内容，也是在新颖理论指导下实用性很强的应用科学、在挑战传统的检修制度和完善现代检修管理的今天，以提高可靠性为中心的状态检修策略中，无论是国内还是国外，都是热门话题，都在积极的探索和实践，都在不断的完善和创新，都在努力推动电力设备的科学化管理，使之更为合理有效的、最大限度的满足全社会各行各业对电能服务的需求，并同时为电力企业创造更大的经济效益。

第一节 高压断路器的基本参数

高压断路器的特性和工作性能，可用它的基本参数来表征。

一、额定电压

额定电压是保证断路器正常长期工作的电压。产品铭牌上标明的额定电压为正常工作的线电压。我国采用的额定电压等级有：3, 6, 10, (20), 35, 66, 110, 220, 330, 500, (750) kV 等（括号中的数值为用户有要求时使用）。

额定电压决定着断路器的绝缘尺寸，对于 35kV 以上，几乎是决定它的结构尺寸，同时也决定断路器的熄弧条件。

二、最高电压

考虑到输电线始端与末端的电压可能不同，以及电力系统调压的要求，因此，对电器又规定了与各级额定电压相应的最高工作电压。断路器应能长期在此电压下正常工作。我国采用的最高电压有：3.6, 7.2, 12, (24), 40.5, 72.5, 126 (123), 252 (245), 363, 550, (800), 1200kV （括号中的数值为用户有要求时使用）。

三、额定电流

额定电流是断路器可以长期通过的最大电流。电器长期通过额定电流时，其发热温度不会超过国家标准。我国目前所采用的额定电流标准有：200, 400, 630, (1000), 1250, 1600, 2000, 2500, (3000), 3150, 4000, 5000, 6300, 8000, 10000, 12500, 16000, 20000A （括号内数字尽量不采用，它们只适用于老产品）。

额定电流决定电器的发热，因而也将决定导电回路的尺寸和断路器触头的尺寸。

四、额定短路开断电流

额定短路开断电流为在规定条件下，断路器能保证正常开断的最大短路电流。规定条

件（包括恢复电压参数、非周期分量比重、短路功率因数等）都应符合标准规定。通常，断路器开断短路电流时还包括非周期分量，所以一般情况下额定短路开断电流是用触头分离瞬间电流交流分量有效值和直流分量百分数来表示的。若直流分量不超过 20%，则额定开断电流仅以交流分量有效值表示，并简称为额定短路电流值，即 6.3, 8, 10, 12.5, 16, 20, 25, 31.5, 40, 50, 63, 80, 100kA

五、额定短时耐受电流

额定短时耐受电流即额定热稳定电流，为在规定的使用 and 性能条件下，在额定短路持续时间内，机械开关在关合位置时能承载的电流有效值。额定短时耐受电流等于额定短路开断电流。

额定短时耐受电流亦可理解为断路器在某一规定时间内允许通过的最大电流。它表明断路器承受短路电流热效应的能力。

六、额定短路持续时间

机械开关在合闸位置时能承载额定短时耐受电流的时间间隔。

220kV 及以上机械开关的额定短路持续时间为 2s；110kV 及以下为 4s，负荷开关为 2s 或 4s。

七、额定峰值耐受电流

额定峰值耐受电流即额定动稳定电流，为在规定的使用 and 性能条件下，机械开关在合闸位置时能承载的额定短时耐受电流第一个大半波的电流峰值。其后短时耐受电流持续时间不应小于 0.3s。

额定峰值耐受电流标准值等于 2.5 倍额定短时耐受电流。并且等于额定短路关合电流。

额定峰值耐受电流表明断路器在冲击短路电流作用下，承受电动力的能力，其值由导电和绝缘等部件的机械强度所决定。

八、合闸时间

处于分闸位置的断路器，从合闸回路通电起到所有极触头都接触瞬间为止的时间间隔称为合闸时间。除非另有说明，合闸时间就是直到主弧触头都接触瞬间的时间。根据 GB3309 《高压开关设备常温下的机械试验》，合闸时间是从合闸命令开始到最后一极弧触头接触瞬间的时间间隔。在以前的有关标准中，合闸时间又称为固合时间。

九、分闸时间

断路器分闸时间是从接到分闸指令开始到所有极的弧触头都分离瞬间的时间间隔。根据脱扣方法的不同，具体定义如下：

(1) 对用任何形式辅助动力脱扣的断路器，分闸时间是处于合闸位置的断路器从分闸

脱扣器带电瞬间起到所有各极的弧触头均分离瞬间为止的时间间隔。

(2) 对用主回路电流而不借助任何形式的辅助动力脱扣的断路器，分闸时间是处于合闸位置的断路器从主回路电流达到过电流脱扣器动作电流的瞬间起到所有各极弧触头均分离瞬间为止的时间间隔。

在以前的有关标准中，分闸时间又称为固分时间。

从电力系统对开断短路电流的要求看，希望分闸愈快愈好，即分闸时间越短越好。

十、全开断时间

全开断时间是从开关接到分闸指令瞬间起到各极电弧最终熄灭时为止的时间间隔。实际上，全开断时间等于断路器的分闸时间和燃弧时间之和。

对于不同电压等级的断路器，其基本参数也有所不同，例如，对于 63 ~ 220kV 电压等级，要标明额定雷电冲击电压；对于 330kV 及以上电压等级，还要加标额定操作冲击耐压水平。

对于有特殊要求的，应标明额定线路充电开断电流、额定电缆充电开断电流、额定电容器开断电流等参数。

第二节 高压断路器的种类

高压断路器按不同的方法分类，其种类也各不相同。一般按其采用的灭弧介质及作用原理分类，可以分为以下几种类型。

油 断 路 器

采用油作为灭弧介质的断路器称为油断路器。断路器中的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，称为多油断路器；油只作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，则称为少油断路器。少油断路器的用油量少，体积也相应要小，耗钢材也少，例如：SW6-220 型少油断路器的三相油重只有 800kg，而 DW3-220 型多油断路器的油重达 4800kg，所以，目前我国 110kV 及以上电压等级的多油断路器已停止生产，运行多年的也几乎全部淘汰更新。城网和农网改造以后，10kV 等级使用油断路器的品种和数量已极为有限，只有 35kV 的多油断路器仍在批量生产和使用，其主要型号和厂家如表 1-4 所示。

(一) 多油断路器

表 1-4 35kV 多油断路器的主要型号

序 号	型 号	配用操动机构型号	序 号	型 号	配用操动机构型号
1	DW1-35D (G)	CD2-40	3	DW8-35	CD11-X
2	DW2-35 (I、II、R)	CD3-X (1)	4	DW13-35	

多油断路器之所以还有一定市场，主要是：结构简单；以 35kV 的 DW2-35 型为例，

每相有两个断口，可靠性高；结构简单，运行单位易于掌握；对气候的适应性较强；可以安装套管式电流互感器配套性好。另外，其价格低廉，具有相当的吸引力。当然，它的缺点也是明显的，油量多；消耗金属材料多，体积庞大，维修工作量大。再者，其分闸、合闸速度低、动作时间长、开断电流较小，只适宜在离电源点较远的边远地点使用。多油断路器的基本结构可以 DW2-35 型为例说明每相由高压电容套管、套管式电流互感器、静触头、灭弧室、导电横梁、提升杆、传动机构、油箱、框架和操动机构等部件组成，三相为分箱式结构，如图 1-1 所示。

(二) 少油断路器

少油断路器曾经是多油断路器的替代产品，我国在 20 世纪 70~90 年代曾在 10~220kV 上大量使用，是这个电压等级的主导产品，主要有 SN10-I、II、III、SW2-35、SW2-110、SW4-110、SW6-110、SW2-220、SW4-220、SW6-220、SW7-220 型等产品，详见附表 1。以 SW4-110 型为例，其结构如图 1-2 所示。

随着新技术的发展，曾经在 10kV 电压等级中占主导地位的少油断路器已被能更为优越的真空断路器所替代，仅在 110kV 及 220kV 电压等级中少量使用。以 SW2-110、SW2-220 为例，该型断路器有以下特点：

- (1) 用油量少。同电压等级少油断路器的用油量只有多油断路器的 10% 左右。
- (2) 体积小，重量轻。钢材消耗量只有多油断路器的 20%~30%。
- (3) 主要技术参数比多油断路器好，积木式结构的少油断路器适用于 220kV 及以上电压等级使用。
- (4) 少油断路器仍使用变压器油，易燃易爆，有火灾危险。电气寿命短。
- (5) 开断电流大，可达 40kA，且切合空载长线性能好。
- (6) 结构简单，产品系列化强。
- (7) 安装维修方便，其断口、中间机构箱、支柱瓷套的油相通，便于检修。
- (8) 动作快，可靠性高，所配的液压操动机构具有防失压打压慢分性能。
- (9) 抗震性能较好。

另外，与 SF₆ 断路器相比，少油断路器的价格优势十分明显，因此，在要求不高的场

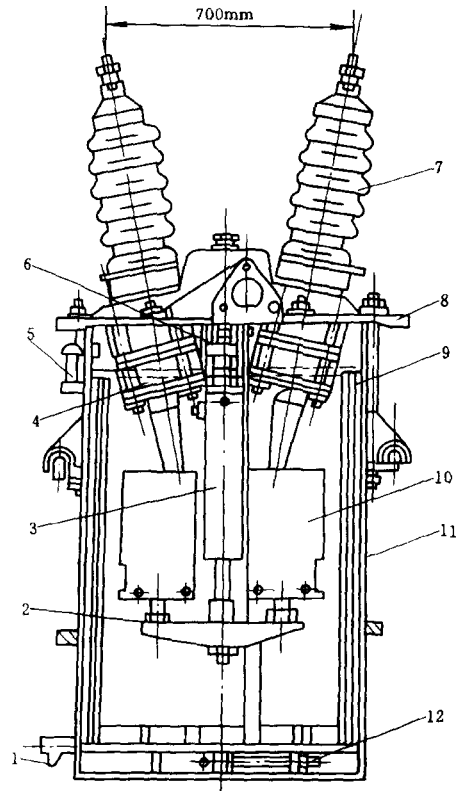


图 1-1 DW2-35 型多油断路器的基本结构

- 1—放油阀；2—动触头；3—导向管；
4—套管式电流互感器；5—油位指示计；6—传动机构；7—电容套管；8—油箱盖；9—油平面；10—灭弧室；
11—油箱；12—电热器

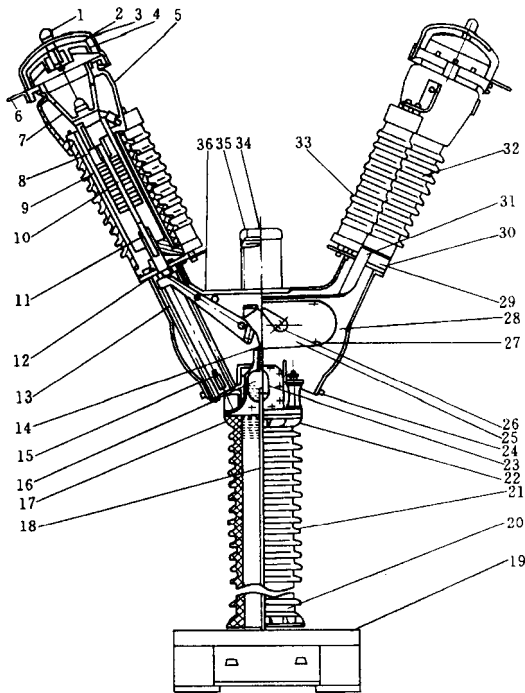


图 1-2 断路器结构图 (SW4-110)

- 1—螺母；2—防雨罩；3—排气阀盖；4—铝帽盖；5—铝帽；6—接线端；7—喇叭形基座；8—灭弧室玻璃钢筒；9—灭弧单元玻璃钢筒；10—动触杆；11—中间触头；12、17、27—螺栓；13—导轨；14—T字杆；15—油缓冲器；16—调节螺栓；18—绝缘拉杆；19—断路器底座；20—下瓷套；21—上瓷套；22—连接法兰；23—油位指示计；24、30—放油阀；25—罩壳；26—分合闸指示器；28—中间机构箱；29—灭弧单元基座；31—导电连接；32—灭弧单元瓷套；33—并联电容器；34—起吊孔；35—分闸弹簧；36—主拐臂

合，仍有一定市场。

电压在 110kV 及以上的户外式少油断路器，采用串联灭弧室积木式结构。图 1-2 呈 Y 形体的结构，两个灭弧室分别装在两侧，组成 V 形排列，构成双断口的结构。一个 Y 形体构成一个单元，根据电压的要求，可用几个单元串联起来。如每个单元的电压为 110 千伏，则用两个串联即成 220kV，3 个串联即成 330kV，如图 1-3 所示。这种结构的优点是：灭弧室及零部件均可采用标准元件、通用性强、使产品系列化、便于生产和维修；灭弧室研制工作量相对减少，便于向更高电压等级发展。

断路器的绝缘油在每个柱上分成三个部分，并且相互隔绝。上部灭弧单元的油作为灭弧和绝缘用，中部中间机构箱中的油作为分闸缓冲器及机构润滑油用，下部支持瓷套（主柱）中的油作为绝缘用。

SW4-220 和 SW4-110 III 型少油断路器为了使各灭弧单元的电压分布均匀，在各灭弧单元上并联了 1800pF 的并联电容器，使电压不均匀系数分别可达 1.09 和 1.05。

二、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，称为压缩空气断路器。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 及以上电压的大系统中。压缩空气断路器是利用预先贮存的压缩空气来灭弧，它的灭弧性能与压缩空气的压力有关，空气压力愈高，绝缘性能愈好，灭弧性能也愈好。我国一般选用的压缩空气的压

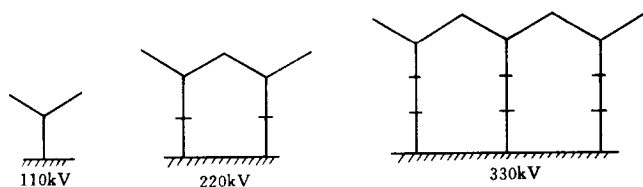


图 1-3 积木式结构示意图

力为 2MPa。

我国生产的空气断路器的型号有 KW1、KW3、KW4、KW5 型。

由于压缩空气断路器需要有气动机构作为压缩空气能量和传送能量的机构，而这种机构结构较复杂，需要体积庞大的空气压缩设备、转动设备，而且其密封部件工作可靠性较差，所以它正被性能更为优越的 SF₆ 断路器所淘汰。

三三、真空断路器

真空断路器是以真空作为灭弧和绝缘介质，在真空容器中进行电流开断与闭合的断路器。真空是相对而言的，为绝对压力低于一个大电压的气体稀薄空间，真空的程度用真空度表示，亦即稀薄气体空间的绝对压力值，用 Pa 来表示。绝对压力越低，则真空度越高，要满足真空灭弧的要求，真空灭弧室出厂时真空度不低于 1.32×10^{-5} Pa，保存有效期末不得低于 6.6×10^{-2} Pa。

目前，我国的真空断路器已在 10kV 电压级开发出户内式额定电压 12kV，额定电流 4000A，额定短路开断电流 63kA，额定短路电流开断次数 16 次，机械寿命 10000 次的新产品；户外式额定电压 12kV，额定电流 630A，额定短路开断电流 20kA，额定短路电流开断 30 次，机械寿命 10000 次的三极户外真空断路器。电压 35kV、开断电流 25kA 的真空断路器也已作为油断路器的替代产品而广泛使用。

(一) 真空断路器的基本结构

真空断路器由载流灭弧装置和操动机构两部分组成。操动机构对断路器在分、合闸时，提供所需要的操作功，由于真空断路器的开距短、电弧能量小，与开断参数相同的其他断路器相比，操作功所需量远小于 SF₆ 断路器及油断路器。早期真空断路器采用电磁机构，现在多数改用弹簧机构，就机构本身而言，除机械寿命次数高外，与油断路器及 SF₆ 断路器的操动机构没有本质上的区别，因此讲真空断路器的结构特色，主要是真空灭弧室，它与油断路器或 SF₆ 断路器相比，有本质上的差异。

真空灭弧室的基本构造（如图 1-4 所示），不论德国、英国、美国与日本的各家制造厂都大致相似，但材料和触头结构方面却大不相同，且各有专利，互相保密。真空灭弧室的基本结构可分为以下几个主要部分。

1. 外壳

外壳是为真空灭弧室造成一定真空度的机械承力空间，按制造材质分为玻璃、陶瓷与金属壳（将金属屏蔽罩外露于空气中，而在两端绝缘）。我国以往使用玻璃

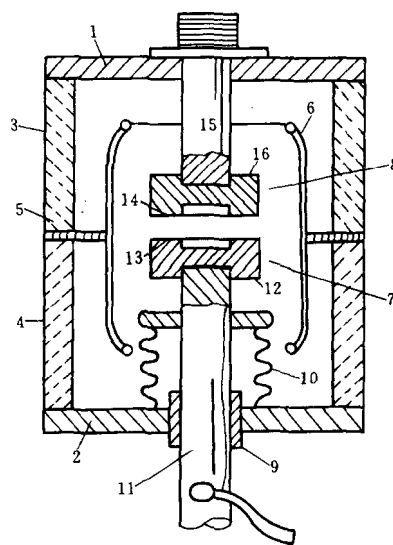


图 1-4 真空灭弧室基本结构

1—灭弧室金属上端盖；2—灭弧室金属下端盖；3—灭弧室上部陶瓷外壳；4—灭弧室下部陶瓷外壳；5—中间封接环状金属部件；6—金属屏蔽罩；7—动触子；8—定触子；9—导向管；10—金属波纹管；11—动触子导电杆；12—动触子金属基座；13—动触子铜铬合金表层；14—定触子铜铬合金表层；15—定触子导电杆；16—定触子金属基座

外壳居多，但陶瓷外壳的焙烘温度高，可实现一次排封封接工艺，易于实现机械化、自动化高效生产，而且比玻璃外壳有更高的机械强度和真空度。80年代开始，我国引进美国西屋公司的真空断路器制造技术如：采用陶瓷外壳。陶瓷外壳要求 Al_2O_3 含量大于 94%，能承受 1600 高温，熔点 2030℃，故一次排封工艺的烤烘温度为 800℃，用熔点为 779℃ 的 AgCu28 作钎焊剂，焊接后强度高、密封好。同时也引进德国西门子技术制造的真空灭弧室，亦为陶瓷外壳，呈“中”字形，陶瓷制成套管，焊接于两个端部，而金属屏蔽罩外露，成为壳体的一部分，有人称之为金属外壳，采用两次排封工艺。

2. 动触头和静触头

真空断路器内的一对触头，既是闭合时的通流元件，又是开断时的灭弧元件，其几何造型和金属元素成分随制造厂而各不相同。因触头在真空环境内工作，表面不易生成氧化膜，所以要求能抗熔焊；截流值小，就要求金属饱和蒸气气压高；另一方面又要求材料含气杂质少，开断电流大，过零后介质强度要高，这又要求金属的饱和蒸气气压不能太高。这些性能要求是既苛刻而又互相矛盾的。

真空断路器的触头材料大致分成两大类：铜—铬（Cu—Cr）合金，主要用于高电压；铜—硒—碲（Cu—Se—Te）合金，用于低压大电流。欧洲大多采用铜铬，日本、美国采用铜—硒—碲较多。即使金属合金元素相同，而制造方法亦随不同制造厂而异，铜铬合金具有高开断能力，在相同触头直径下比铜硒碲合金高 10%。触头材料的成份和性能与断路器的开断性能、电压承受能力、过电压高低均有密切影响。

为提高真空断路器的开断能力，除了选择性能优良的触头材料外，还必须研究采用触头的结构型式。这些触头的共同特点是利用磁场力使真空断路器的电弧很快地运动，防止在电极触头上产生需要长时间冷却的受热区域。研究和试验证实：采用杯状触头，发展纵向磁场触头适合于开断大电流的需要。杯状触头的突出优点是在分断电流过程中，增加了横向磁场强度，使电弧沿着触杯以极高的速度运动，大大减轻触头的磨损率，从而提高分断能力。纵向磁场触头结构能提高真空断路器的开断能力，这大大地推动了真空断路器向大容量和小型化方向发展的进程。我国自行研制的纵向磁场触头结构的真空断路器已取得了较好的实用效果。

3. 波纹管

使动触头有一定的活动范围而不使灭弧室内真空空间压强发生变化，可使用金属波纹管来承受触头活动时的伸缩。真空断路器每合分操作一次，相应地使波纹管产生一次机械变形，它是真空灭弧室中最易损坏的部件，其金属材料的疲劳寿命，决定了真空灭弧室的机械寿命。

波纹管的种类很多，但实际使用的有液压成形和膜片焊接两种。液压成形波纹管形如壁厚为 0.1 ~ 0.15mm 厚的手风琴风箱。它由 1 ~ 2mm 厚的金属板拉薄为 0.1 ~ 0.15mm 厚的圆管，再经油压成形和热处理加工而成。制造材料可用不锈钢、磷青铜、黄铜等金属。其中不锈钢材料因有不易氧化，不易因受热失去弹性和耐腐蚀等优点而最常采用。液压成形波纹管的最大工作行程仅为自由长度的 20% ~ 30%，并且因管壁厚度不均，各部分变形程度不同而影响其机械寿命，但价格比较便宜。

膜片焊接波纹管采用由 0.1 ~ 0.15mm 不锈钢片冲制成的环状膜片焊接而成，其波数可以很大，其工作行程可达波纹管长度的 2/3 以上。这种波纹管的疲劳寿命高，但价格较贵。

波纹管的机械寿命是波纹管管壁疲劳破坏的极限，其破坏主要由波纹管内部所受压力和负载行程作用下，产生的应力变化造成的。当真空断路器开断一定次数后，波纹管出现疲劳破坏，管壁产生皱裂，不再能保持真空灭弧室的气密性，波纹管就失效了。

波纹管的疲劳寿命与它的工作行程有着密切的关系，理论分析表明，波纹管的疲劳寿命与工作行程的 3.5 次幂成比例。所以，无论是在安装调试过程中还是在运行过程中，尽可能避免波纹管的过量压缩和行程过大，对提高真空断路器的机械寿命都是至关重要的。

4. 屏蔽罩

触头周围装设的金属屏蔽罩，通常称为主屏蔽罩，如图 1-4 中的 6。屏蔽罩要具有高的导热率和优良的凝结能力。屏蔽罩有三个作用：

(1) 防止燃弧过程中触头间产生大量的金属蒸气和金属粒喷溅到外壳绝缘筒的内壁，造成真空灭弧室外部绝缘强度降低或闪络。

(2) 改善真空灭弧室内部电压的均匀分布，提高其绝缘性能，有利于真空灭弧室向小型化发展。

(3) 冷却和凝结电弧生成物，使电弧的热量能通过屏蔽罩发散出去，有助于电弧熄灭后残余等离子体的迅速衰减，对增大灭弧室的开断能力起很大作用。

试验表明，真空灭弧室中电弧能量的 70% 左右消耗在主屏蔽罩上，因而燃弧时主屏蔽罩的温度升得很高。温度越高，表面凝聚电弧生成物的能力越差。因此，应采用导热性能好的材料来制造主屏蔽罩，如无氧铜、不锈钢、镍或玻璃等材料。

主屏蔽罩在用铜或不锈钢两种材料制作时，铜具有较高的导热率和优良的凝结能力，但铜材熔点低，和电弧生成物有较大的亲和力，且屏蔽罩内壁上附有的金属屑会使燃弧后的灭弧室内电场分布不均匀。选用不锈钢做主屏蔽罩就能克服上述缺点。

(二) 真空断路器的特点

1. 真空断路器的优点

(1) 在密封的容器中熄弧，电弧和炽热气体不外露。灭弧室作为独立的元件，安装调试简单、方便。

(2) 触头间隙很小，一般在 10mm 左右，合闸功小，机构可以简单，可延长使用寿命。

(3) 熄弧时间短，弧压低，电弧能量小，触头损耗小，开断次数多。

(4) 动导杆的惯性小，适用于频繁操作。

(5) 操作机构小，整机体积小，重量轻。

(6) 控制功率小。

(7) 开关操作时，动作噪声小，适用于城区使用。

(8) 灭弧介质或绝缘介质不用油，没有火灾和爆炸的危险，安全。

(9) 触头部分为完全密封结构，不会因潮气、灰尘、有害气体等影响而降低其性能。

工作可靠，通断性能稳定。

(10) 在真空断路器的使用年限内，触头部分不需要维修、检查，即使维修检查，所需时间也很短。

(11) 真空断路器开断后断口间介质恢复快（图 1-5），介质不需要更换。

(12) 断口开距小（一般为 9~12mm），合闸能量小（图 1-6），可靠性高，使用寿命长，一般可达 20 年左右。

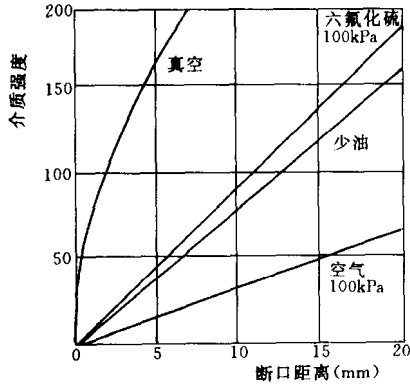


图 1-5 不同介质下断口距离与介质强度曲线

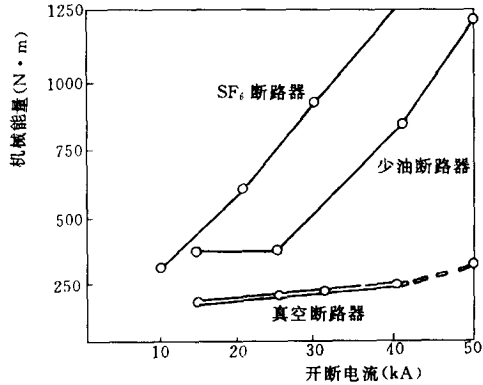


图 1-6 额定短路开断电流与机械功的关系曲线

(13) 开断能力强，目前开断短路电流已达到 63kA，主回路接触电阻小，触头电损耗小。

(14) 可靠性高，无火灾及爆炸的危险，能适用于各种不同的场合，尤其是对用于高层建筑的设备，可以频繁操作。

(15) 结构简单，维护工作量少，维护成本低，仅为少油断路器的 1/20 左右（图 1-7）。

(16) 具有多次重合闸功能，适合于 6kV~35kV 电压等级电网中应用。

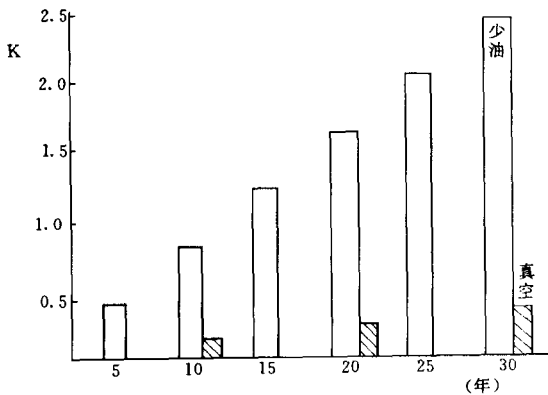


图 1-7 真空断路器与少油断路器运行价格比较

2. 真空断路器的缺点

由于真空断路器的灭弧原理与油断路器和 SF₆ 断路器的不同，所以有其独特的技术问题，因此在选型和安装调整过程中应予以考虑。

(1) 开断感性负载或电容负载时，引起过电压。

真空断路器开断感性负载（如电抗器组、电动机等）时，操作过电压一般分为：截流过电压、三相同步截流过电压及高频重燃过电压三种。

以开断电抗器为例，其等值电路图如

图 1-8 所示。

1) 截流过电压。产生的原因是因真空断路器灭弧能力强，在开断电抗器时，可能在电流到达零点之前发生强制熄灭，这就是断路器的截流。

此时有大的电流变化率 $\frac{di}{dt}$ 而电抗器侧压降 $U_L = L \times \frac{di}{dt}$ ，即形成过电压。

影响截流过电压大小的因素，根据理论计算，截流过电压倍数 K_a 可用下式表示：

$$K_a = \sqrt{\cos^2 \alpha + \eta_m (f_o/f) \sin^2 \alpha}$$

式中 η_m 磁能转化为电场能的损耗系数，小于 1；

f_o ——自振频率，大小为 $2\pi \frac{1}{\sqrt{LC}}$ ；

f ——工频，50Hz；

α ——截流相角。

由此可见，影响过电压倍数有以下两个主要因素。

电抗器电感的大小及外部连线与电气设备的杂散电容大小。

截流角度 α 。当 $\alpha \rightarrow 90^\circ$ ，即电流在接近峰值处被截断，过电压倍数达最大值，过电压现象最为严重。

对于真空断路器而言，其截流水平也直接影响操作过电压倍数，而截流水平又与真空灭弧室的制造工艺及断路器服务对象有关。强灭弧能力的真空断路器，在开断小电流时，截流过电压产生的机率较高，对于大电流负载则可能不会产生明显的影响。

截流有电流下降阶段截流与电流上升阶段截流（如图 1-9 所示），而电流在上升阶段时截流是真空电弧所特有的。它出现在电弧熄灭后，断口间隙在工频恢复电压的作用下，经过几十、甚至几百毫秒后发生击穿，在间隙中通过高频电流或半波工频电流，然后又自行熄灭。发生这种现象的原因尚待进一步研究。

2) 三相同步截流过电压。从物理角度而言，图 1-8 中，断路器 K 开断后，L、C 电路

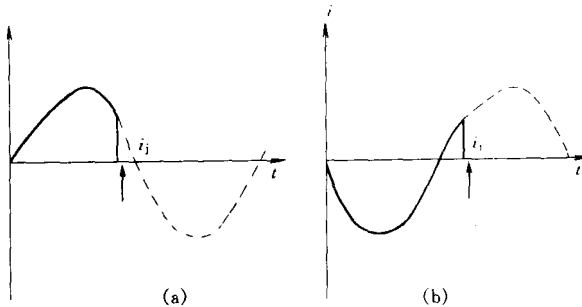


图 1-9 截流电流 i_j

(a) 下降截流；(b) 上升截流

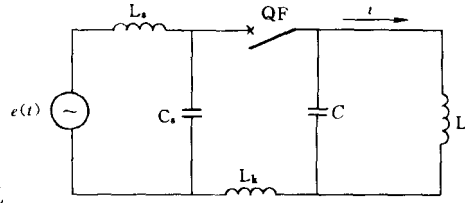


图 1-8 等值电路

L_s —电源等值电感； C_s —母线对地杂散电容； L_k —母线至电抗器连线的电感；QF—真空断路器； L —电抗器电感； C —电抗器侧全部连线及设备对地电容等效值

中定会产生高频率的能量振荡。在截流初始，恢复电压因高频振荡上升较快，此时断路器触头间弧隙介质小于恢复电压强度，触头间易发生电弧重燃，电容 C 上的电荷就要通过 $C-L_k$ 回路进行高频放电，该高频电流过零时，电弧又熄灭，接着又可能多次出现重燃又熄弧的过程。所以在某些情况下，如开断感性小电流时，

触头间的重燃相当于自动的放电间隙，限制了过电压幅值。另一方面，当电抗器与断路器通过三相电缆联接时，其电缆芯线间有相间互电容和互电感，使得当一相开断截流而产生过电压和重燃时，其暂态高频电流通过电磁耦合至其他两相同时感应出一个高频电流。该高频电流与原有的工频电流叠加，其结果可使两相电流瞬间过零而被截断。对于 50Hz 的工频而言，上述高频振荡过程极快，可视为三相同时截流，即在三相中同时产生截流过电压，且在后两相中的截流值可能很大，从而产生很高的过电压。本溪钢铁厂的试验中实测到过电压最大标么值为 4.3。

3) 高频重燃过电压。此处讨论的高频重燃过电压，是基于真空断路器切断较大电流且并未发生截流时出现的多次重燃。

根据图示，当工频电流过零时，真空断路器开断熄弧，电容 C 即向电感 L 放电，开始振荡，触头间出现恢复电压 U_H ，当电压等于断路器恢复强度时，发生第一次重燃；当振荡电压第一次达到幅值时，其值应为 $U_1 = E_m$ （电源电动势）+ U_H ，此时振荡电流第一次过零，再次熄弧，但电流值已非初次开断时的零值，即高频电流幅值大于工频电流瞬时值。如此反复，振荡电流不断升高，振荡最高电压不断加大，过电压可达极高幅值。虽然振荡必将衰减至稳态值，但已可能对设备绝缘产生严重危害。上海人民广场地下变电站在启动投运 37.5kV 接地变压器时就发生 37.5kV 侧接地变压器烧毁、主变出口短路的重大事故。原因是在真空断路器开断电抗器时，相间过电压仍然达到 120kV（峰值）。

对过电压的限制措施是在回路内设置阻容吸收装置或氧化锌避雷器（MOA）。阻容吸收装置不但能有效限制操作过电压峰值（标么值 2.5 以下），而且对抑制高频重燃过电压也远比 MOA 好，因电容的存在可减缓浪涌的上升陡度，又可降低断路器负载的波阻抗，电阻消耗能量使高频电流按指数曲线衰减。

开断容性负载（如电容器组）时，引起过电压。真空断路器开断电容器组时，由于复燃和重击穿而产生过电压。

断路器断开交流电路都在电弧电流过零时熄弧，由于电容器组的容性电流超前电压 $\frac{\pi}{2}$

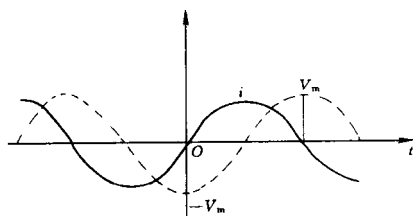


图 1-10 容性开断电压

弧度，所以电流过零及熄弧后电容器端子电压一直保持 $-V_m$ ，如图 1-10 所示，亦即断路器灭弧室断口的一侧为 $-V_m$ ，而另一侧为电源的工频交流电压，因此断口间的电压差由 0 到 $2V_m$ 作工频正弦波变化。

断路器型式试验是按首相开断系数 $K = 1.5$ 试验的，开断三相电源的电容回路由于存在相间电磁耦合，首相产生的高频电流被耦合到其余两相，迭加在工频电流上，所以较单相回路复杂。理论分析各相断口恢复电压的最大值（设 A 相首先开断）为：

A 相在 180° 时断口电压差为 $2.5V_m$ ；B 相在 300° 时断口电压差为 $1.87V_m$ ；C 相在 240° 时断口电压差为 $-1.87V_m$ 。

各种不同情况下各相恢复电压的最大值如表 1-5 所示。

如果断口间隙绝缘承受不住上述电压就发生击穿，即出现分闸后的复燃和重击穿。如

电弧经高频过零熄灭，此时电容器组端子上的电压最大值是 $3V_m$ 并保持不变。若经工频半波再击穿，则在断路器触头间出现切除——复燃——切除——复燃的持续过程，每次的复燃都会在电容器组上出现一个跃变量很大，跃变时间很短的高频过电压，理论上过电压要按 3、5、7 倍递增，首先是电容器承受，继而在断口间隙击穿时传递给系统，如果该母线系统无防止高频过电压的相应措施，则不仅会加速电容器绝缘老化的积累效应，而且会威胁该电压母线系统设备的绝缘，导致设备击穿事故。

表 1-5 开断电容回路时各相恢复电压最大值

首开相	不能开断相	不同柜工频恢复电压最大值 (V_m)		
		A	B	C
A	无	2.5	1.87	1.87
	B	2.3		3.46
	C	9.1	3.40	
	B、C	3.0		

为此，增大真空断路器的开断能力，消除其开断时的复燃和重击穿现象，始终是研究的方向。根据真空电弧产生的理论，真空断路器真空间隙的实际击穿总是有游离气体存在，这是施加电压后产生的金属蒸汽或触头释放了所吸附的气体所提供的，为提高真空灭弧室触头间隙的绝缘性能和开断能力，目前采取以下一些措施。

一是改变动静触头材料及现在使用的铜铬合金触头的合金含量比例，分析研究发现，铬含量由现在的 50% 降低到 25%，则触头的开断能力可提高 1/3；二是对真空灭弧室进行动态直流老炼试验，即在排气台上对灭弧室两端通以 100A 以上的大电流，利用灭弧室的纵向磁场，产生真空电弧，经数 10 次试验，烧灼掉触头表面的氧化层使其彻底去气，所放气体被真空泵抽走，以提高灭弧室真空度，改善其开断性能，有效地减少复燃和重击穿现象。此外，生产运行单位也在应用中不断完善防止过电压事故的措施，如在电容器组并联金属氧化物避雷器 (MOA)，以限制工频过电压的幅值；另外并联电容器或 R-C 阻容吸收装置以降低高频过电压的陡度和幅值。其中电容的作用是使切除后回路中的电磁能量有相当多的部分转变为电容的电场能量，并加长电流的突变时间，削弱高频电压的陡度；电阻则对高频振荡起阻尼作用，进一步抑制过电压。

(2) 合闸弹跳与分闸反弹。由于真空断路器的触头结构是采用杯状对接式，有别于其他断路器的插入式；加之在真空断路器的操动机构中使用了弹簧，而弹簧本身就是一个振动系统，在机械运动的作用下，易产生弹跳与反弹，这就形成了在操作真空断路器时的特殊问题：合闸弹跳与分闸反弹。

1) 合闸弹跳。真空开关合闸时发生弹跳，不仅会产生较高的过电压影响整个电网的稳定性，更重要的是使触头烧损甚至熔焊，这在投入电容器组产生涌流时及短路关合的情况下下更加严重，如果产生熔焊，后果十分严重。

真空断路器的弹跳是由于在操作过程中，能量的不平衡而产生的。首先，真空断路器采用杯状对接式触头，其动作受分弹簧、缓冲弹簧及触头弹簧的影响，由于弹簧的弹性、

触头自身的重量，触头动作时成为围绕运动方向的衰减性机械振荡过程，形成“触头弹跳”现象。由于真空触头的开距较小（10kV 为 10—12mm，35kV 为 22—24mm），若合闸后触头由于弹跳而分离，使真空断路器的动静触头之间的接触压力减小，接触电阻增大，如果此时通过大电流（如投入电容器组的真空断路器）而产生高温，有可能导致触头表面的金属熔化而产生金属蒸汽，如果动触头继续向分闸位置移动，则随着开距的增大会导致触头间隙绝缘的击穿和产生电弧，而产生工频过电压和高频过电压。

其次，弹跳还与整个操动机构及开关的框架有较大的关系。在真空开关的整个合、分过程中，由于机械冲击引起的预振动，因柔性元件（如弹簧、波纹管、框架等）的存在而产生不同频率的振动波，且一直影响着开关的合、分过程。不同的配合参数（如配合间隙）、不同的材质、不同的加工精度等都会产生不同的合、分闸过程，可以说，即使弹跳时间相同也不可能存在两个完全相同的弹跳过程。电力部门对合闸弹跳时间的规定一直是随生产厂家制造水平的不断提高而减小的，现规定为不大于 2ms。弹跳时间长，合闸时的冲量大，多余的能量只能消耗在断路器框架等处，使之产生微小的变形和震动，长此以往，有害无益，同时造成的触头磨损量大。

解决真空断路器合闸操作时的弹跳现象，须提高产品的工艺、零部件设计要求，采用国际上已广泛采用的新工艺、新技术、新材料，赶上先进国家的水平；并提高对零部件的加工精度要求，以保证整体成型的精度。其次，要认真仔细的调整，在生产中，也不难发现有个别产品的合闸弹跳偏离技术条件，必须重新调整装配。例如某开关合闸弹跳为 2.8ms 更换一只传动销则弹跳消除；某开关装配后合闸弹跳符合要求，而装入开关柜后出现弹跳超标，所以须在开关柜内进行调整；某开关柜出厂时弹跳时间符合技术要求，而在现场投运时或运行一段时间后超标，需要重新调整才能满足标准。

2) 分闸反弹。真空断路器分闸操作时的反弹现象也是真空断路器所特有的。真空断路器的触头间距很小，断口的开距小，分闸反弹更减小弧后的触头间距。这样就可能导致弧后的重击穿。分闸反弹关键的参数是反弹量，当然，对真空断路器的反弹量原则上也是越小越好。但反弹量的多少尚无统一标准，而且对其测量的方法亦无统一规定。目前，对于 10kV 真空断路器，根据生产经验及理论概算，一般以反弹后的触头间隙不小于 6mm 为宜（不同试验方式下的瞬态恢复电压峰值 U_c 为 19.7kV 或 21.1kV，考虑到分闸反弹在时间上为毫秒级，远大于瞬态恢复电压峰值时刻 t_3 ，也就是说，反弹到最小触头距离时，加在触头两端的为工频恢复电压，一般不会引起重击穿。而在容性电流，特别是在三相电容器组开断时，恢复电压波形几乎是一幅值为 21.1kV 的直流电压，要使其不发生重击穿，开关反弹后的触头间隙必须能够承受该直流电压。根据对实际产品的试验，再加上一定的裕度，该间隙应不小于 6mm）。

决定真空断路器分闸反弹的最重要因素就是缓冲器的设计。真空断路器开距较小，分闸速度相对较大，在分闸终了位置上必须有缓冲器以吸收剩余的动能，如缓冲不良将会引起触头反弹，使有效开距变小，很容易造成断路器的弧后重击穿。这也是一些真空断路器在投切电容器组时产生重燃的主要原因^[2]。常用的缓冲装置有油缓冲、毛毡缓冲、橡皮缓冲和凸轮缓冲等。

(三) 真空断路器的操动机构

任何一种断路器的操动机构执行分闸、合闸、重合闸的操作命令，都是由控制回路进行控制，发出操作指令，由操动机构执行，进行具体操作。

图 1-11 为真空断路器控制回路的原理图。合闸动作、分闸动作和自由脱扣动作按图 1-12 的方框动作程序进行。

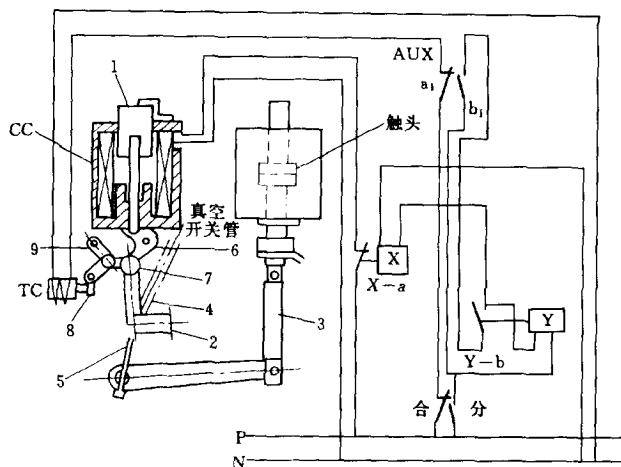


图 1-11 控制回路

X—接触器； Y—辅助继电器； AUX—辅助触点； TC—跳闸线圈；
CC—合闸线圈；合—合闸指令触点；分—跳闸指令触点； 1—衔铁；
2—拉杆；3—绝缘操作杆； 4—分闸弹簧；5—超程弹簧；6—支块；
7—脱扣销；8—脱扣拉杆；9—肘板

1. 真空断路器操动机构的分类

(1) 电磁机构。户内型真空断路器一般均用直流电源。现以 CD17 型电磁操动机构为例。

CD17 型电磁操动机构是专为 ZN28-10 型真空断路器设计的新型操动机构。在它的合闸铁芯上加有黄铜垫和压缩弹簧，线圈和铁芯间设有导向铜套。合闸电磁铁下部设置有铸铁座和橡胶缓冲垫。

连杆传动及脱扣机构如图 1-13 所示，采用的是平面五连杆机构。半轴 5 处于扣合位置时，连杆系统组成四连杆机构，如同 CD10 型电磁操动机构一样。滚轮 9 在合闸铁芯推动下向上运动，带动输出轴转动约 32° ，使断路器合闸。在合闸铁芯下落后，滚轮由支架 11 撑住，并维持在合闸状态。当接到分闸命令或手动使半轴脱扣时，连杆系统变为不确定的五连杆机构，在分闸弹簧和触头弹簧作用下，使滚轮从支架上滑下，最终使断路器分闸。这种脱扣装置脱扣功率小，具有自由脱扣功能，扣合也比较可靠。

CD17 型操动机构合闸电源容量为 220V、128A（或 110V、256A），分闸电源容量为 220V、1.5A（110V、3A）。

(2) 弹簧机构。弹簧操动机构的真空断路器一般将开关管放在机构的前面，采用前后