



# 牵引变电所及其自动化

孙继星 副教授

牵引供电研究所

Email: [jxsun@bjtu.edu.cn](mailto:jxsun@bjtu.edu.cn)

办公室：电气楼808

办公电话：010-51685212-602



## ◆ 教材：

- 《轨道交通牵引供电技术》，贺威俊、高仕斌等，2015
- 《高速铁路牵引变电所技术》，中国铁路总公司，2014
- 《交流电气化铁道牵引供电系统》，谭秀炳，西南交通大学出版社，2007

◆ 考核形式和成绩评定：笔试占成绩 60%。上课出勤占成绩 40%(抽查点名缺课一次扣5分)。

◆ QQ学习交流群：614152328



在电力系统和各种用户系统中，高压电器和开关设备均具有重要的地位和作用，各种高压和开关设备的工作原理和功能各不相同，构成供变电工程的各个组成部分。

## 一. 高压电器的作用和分类

### 1. 高压电器的文字和图形符号

每一种类电器设备，都有其代表符号。目前，我国电器表示符号有老的标准和新的标准两套，这两种标准目前在我国并用。

文字符号：新旧标准可查看《电气技术中的文字符号制订通则》(GB 7159—87)和《电工设备文字符号编制通则》(GB 315—64)。

图形符号：GB /T 4728《电气简图用图形符号》，等同采用IEC 60617 database《电气简图用图形符号数据库标准》中的相应内容。

GB /T 5465—1996《电气设备用图形符号绘制原则》，等同采用IEC 416:1988《设备用图形符号绘制原则》

GB/T 5465.2—1996《电气设备用图形符号》，等同采用IEC 417:1994《设备用图形符号—目录、索引、一览表和活页资料汇编》



# 一. 高压电器的作用和分类

## 2. 高压电器的作用和分类

在高压系统中，用来对电路进行开、合操作，切除和隔离事故区域，对电路运行情况执行监视、保护及数值测量等功能的电器设备，统称为高压电器。高压电器都应满足可靠、灵活、经济的基本要求。根据高压电器工作条件及所起作用的不同，其结构和工作性能应其有不同特点，如开关能力、精度要求等。

**高压电器的分类如下：**



# 一. 高压电器的作用和分类

## (1) 按照用途不同，把高压电器进行以下分类：

- ① **开关设备** 用于对电能或信号通路进行分或合的操作，这些开关设备有：
- ◆ **断路器(QF,DL)**：用于分 and 合正常电路或故障电路，是变电站等进行倒闸操作的主要设备；
  - ◆ **隔离开关(QS,G)**：用于把高压设备于带电部分隔离开来，以便工作人员对相应的高压设备进行检修；
  - ◆ **熔断器(FU,RD)**：熔断器兼有开关设备和保护设备两个功能，主要的功能是保护设备，用于当流过熔断器的电流超过允许值时，断开电路；
  - ◆ **负荷开关(QL,FW)**：是电路进行正常操作开/合电路的一种开关，与断路器不同的是，断路器可以开/合故障电流，而负荷开关只能开/合负荷电流。



# 一. 高压电器的作用和分类

② **限制电器** 用于对电路中电流或电压的水平进行限制的高压电器（通常是限制电流超过某些值或电压超过某些值）

◆ **电抗器(L,DK)**: 作用是限制短路电流;

◆ **避雷器(F,BL)**: 作用是限制大气过电压或操作过电压, 保护其它电器设备的安全;

③ **变换电器** 用于把高压系统电气参数转换为测量、计量、保护等系统能接受的信号。

◆ **电压互感器(TV,YH)**: 用于把高压转换为低压;

◆ **电流互感器(TA,LH)**: 用于把大电流转换为小电流。

④ **组合电器** GIS、SIS

(2)按照安装位置不同, 高压电器又可以分为:

① **户内式** 顾名思义, 是安装在室内的高压电器设备;

② **户外式** 当然是安装在室外的高压电器设备。

(3)按照电能制式不同, 有直流电器和交流电器的分类



## 二. 交、直流电弧的形成及熄弧原理和方法

开关设备在高压电器中占有重要地位，在开关电器的分/合闸操作过程中，有可能存在一个在触头之间产生电弧、电弧存续和熄灭的过程，对开关能否完成所进行的操作有重要影响，因此有必要对电弧的产生和熄灭机理进行研究。

### 1. 电弧的形成

开关电器一般由**导体**(用于提供电能从开关外部到开关触头之间的通路)、**触头**(对电能通路进行分开和闭合，分动触头和静触头)和**绝缘介质**组成。

带电体周围介质从绝缘状态变为导通状态从而使电能通过的现象，称为**放电**。

开关设备进行切断电路或关合电路时，当动触头和静触头之间电场强度大于介质强度时，触头之间将会击穿，从而出现**电弧**。开关设备在开断电路过程中，触头间介质达到一定游离程度时，触头间隙被击穿而产生电弧。产生电弧的条件是电路内的电流不小于**80mA**，触头间的电压不小于**10-20V**。

增强电弧的因素作用的结果，我们称为**游离**，而削弱电弧的因素作用的结果，我们称为**去游离**。

**电弧具体的发展方向取决于游离强还是去游离强。研究电弧的形成必须掌握介质的游离过程。该过程包括：**



## (1) 表面发射：由金属电极(触头)表面发射电子，叫做表面发射

- ① **强场发射**：强场发射。当金属表面存在较高的电场强度(大于 $10^7\text{V/mm}$ )时，自由电子可能逸出金属，这种过程叫强场发射。断路器触头刚分离时，强场发射占主导地位。
- ② **热发射**：热发射。当金属温度升高到2000-5000K，金属表面的自由电子可能获得足够的动能，克服将电子滞留在金属内部的力量而逸出金属，这种过程叫热发射。断路器触头分离后期，热发射较强烈。
- ③ **光发射**：光发射。当红外线、紫外线及其他射线照射到金属表面时，引起电子从金属表面逸出的过程，叫光发射。光波越短，引起光发射的能力就越强。在触头分离过程中，随着电弧的燃烧，存在着光发射的现象。
- ④ **二次发射**：二次发射。当正离子在电场作用下高速撞击阴极，或者自由电子高速撞击阳极时，也可能使金属电极表面发射出电子，此过程叫二次发射。在气压较高的放电间隙中，通常阴极表面附近电场强度较高，所以阴极表面二次发射较强，并在气体放电过程中起重要作用。



(2) **空间游离**：电极(触头)间的介质在外界力量的影响下，其分子及原子分裂成自由电子和正离子的过程，叫空间游离。

- ① **热游离**：气体温度达到3000-4000K以上时，气体中的中性原子或分子由于高速热运动而相互碰撞，产生明显的热游离。在相同的温度下，由于金属蒸气的游离电位小于一般气体的游离电位，所以金属蒸气更容易产生热游离。断路器触头分离后期，热游离起主导作用。
- ② **光游离**：中性粒子受到光的照射，当中性粒子的能量大于介质原子或分子的游离能时，就在空间产生光游离。光的波长越短，游离作用就越强，可见光几乎不能引起气体游离。
- ③ **碰撞游离**：由表面发射或光游离所产生的带电粒子，在触头间电场作用下被加速，从而获得动能。若运动中的电子从电场中获得的动能足够大，当它与中性质点碰撞时，能从其中打出一个或几个电子，使失去电子的中性质点变成正离子。从中性质点中打出的电子在向阳极运动的过程中又与其他中性质点发生碰撞，造成新的中性质点的游离。这样的连锁反应，产生大量的电子，并移向阳极，使电极(触头)间的介质迅速大量游离。断路器触头分离初期，碰撞游离起主导作用。。



应当指出：光游离、热游离及碰撞游离可能同时进行，但在触头分离的不同阶段，各种游离所起的作用可能各不相同。在触头分离初期，开距小，电场强度高，碰撞游离作用明显；在触头分离后期，开距大，电场强度减小，但电弧温度较高(表面温度可达4000-5000 ℃，弧柱中心温度可高达10000 ℃)，热游离作用加强，使电弧得以维持；在热游离和碰撞游离的同时，电子与正离子复合时释放的能量以光量子的形式辐射给周围的中性粒子，使中性粒子游离。

**在触头分离初期，开距小，电场强度高，强场发射、碰撞游离作用明显。在触头分离后期，电弧温度较高，热发射、热游离作用强，使电弧得以维持。光发射、二次放射、光游离也会同时进行。**



## 2. 电弧的特点

- (1) 电弧是强功率的放电现象。** 在开断几十千安短路电流时，以焦耳热形式发出的功率可达10000kW。与此有关，电弧具有上万摄氏度或更高的温度及强辐射，在其作用下，任何固体、液体或气体都会产生强烈的物理及化学变化。在有的开关中，电弧燃烧时间比正常情况只多10-20ms，开关就会出现严重烧损，甚至爆炸。
- (2) 电弧是一种自持放电现象。** 不用很高的电压就能维持相当长的电弧稳定燃烧而不熄灭。例如，在大气中，**每厘米长电弧的维持电压只需15V左右**，在100kV电压下开断仅5A电流时，电弧长度可达7m；电流更大时，可达30m。因此，单纯采用拉长电弧的方法来熄灭电弧是不可取的。
- (3) 电弧是等离子体，质量极轻，极易改变形状**(电弧区内气体的流动包括自然对流，以及外界甚至电弧电流本身产生的磁场都会使电弧受力，改变形状，有时运动速度可达每秒几百米)。因此，可利用这一特点来快速熄弧，并预防电弧的不利影响及破坏作用。



### 3. 电弧熄灭的物理过程

研究电弧产生的机理和其中对电弧发展作用的因素，目的在于熄灭电弧。在开关设备中，在电弧存在的过程中，介质发生游离过程的同时，也存在着带电离子消失的去游离过程。如果在单位时间内，电弧中产生的带电离子数和消失的带电离子数相等，则通过电弧的电流不变，电弧燃烧是稳定的；如果离子消失的数量多于产生的数量，则电弧电流减弱，直至最后熄灭。因此，熄灭电弧的措施也就是强化去游离因素。

**游离气体的去游离作用由下述因素造成：**

- (1) 复合。**从导体或粒子中逃逸出来的电子在电场作用下运动，在运动过程中可能与正离子发生碰撞，从而可能被正离子俘获，当正离子俘获足够的电子后，会成为中性粒子。温度、电场、速度越低，电弧越细，复合越强。当触头间电压接近零时，复合特别强烈。
- (2) 扩散。**弧柱中的带电质点由于弧柱与周围气体介质间的温差很大，并且质点的浓度差也很大，因而大量地扩散到周围的气体介质中去，与气体中的自由电子或负离子复合而失去电荷。扩散使电弧内的正离子数目减少，使电弧的电导变小，加强电弧的去游离。
- (3) 散热。**电弧在燃烧过程中其温度极高，而周围环境温度要低得多，因此，电弧的能量主要地通过辐射和对流的方式向周围扩散。



## 4. 电弧电压分布

电弧本身是一个非线性电阻、电感的综合。沿着电弧，存在着电压分布，这种电压分布可以划分为三部分：阴极电压、阳极电压和弧体电压。

- (1) 阴极电压：**在靠近阴极的“阴极区”内，正离子移向阴极，与阴极发射的电子复合而不断地消失，使电弧在这一区域内的电导变小，形成阴极区电压降。
- (2) 阳极电压：**在弧柱内形成的负离子，一部分与正离子复合，一部分移向阳极。在离阳极不远处，电子从负离子脱出而进入阳极，所形成的中性质点，由于惯性而继续向阳极运动，并冲击阳极。因此，在靠近阳极的空间内，离子的密度也是不大的，形成阳极区电压降。
- (3) 弧体电压：**在阴极区和阳极区以外的弧柱部分，正负电荷的数量大约相等，其电导近似为一个不变的常数，期间产生一定弧体压降。

沿电弧的电压分布如图所示。在阴极区 $l_0$ 内，集中着正体积电荷，**阴极区电压降 $u_K$ 达10-20V**，阳极区电压降 $u_a$ 略小些。

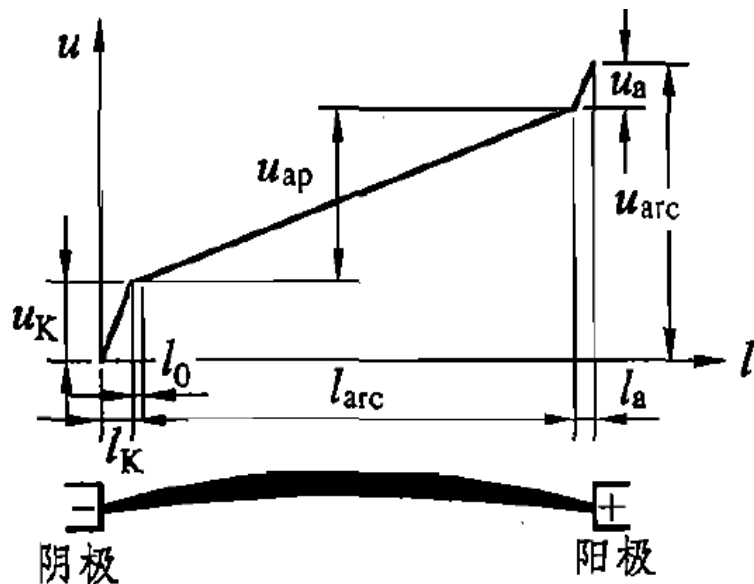


图 2.1 沿电弧的电压分布

$l_K$ —阴极辉光区域； $l_0$ —正体积电荷区域； $l_{arc}$ —弧柱长度；  
 $l_a$ —阳极空间； $u_{arc}$ —电弧上的电压降； $u_K$ —阴极电压降；  
 $u_{ap}$ —弧柱上电压降； $u_a$ —阳极电压降

显然，**只有当加到电极上的电压总是大于电弧电压降时，才会产生电弧。**在低压短电弧情况下，阴极区和阳极区电压降具有重大意义，因为它占电弧上电压降 $u_{arc}$ 的比重较大；而在高压长电弧的情况下，阴阳电极区电压降与弧柱电压降 $u_{ap}$ 相比则是较小的。



## 5. 直流电弧的熄灭条件

- (1) 阴极电压：在去游离强度加强有利于介质的绝缘强度的恢复，当介质的绝缘强度恢复到电子无法从电极表面发射时，就意味着电弧无法继续燃烧下去。
- (2) 介质绝缘强度的恢复用一个参数表示，即恢复电压，指的是导致绝缘介质无法发生击穿的最大电压。
- (3) 电弧是一个非线性电阻和电感，受外界因素的影响较多，当电弧电流发生变化时，电弧体的粒子浓度也就发生了变化，从而电阻和电感也就发生了变化。



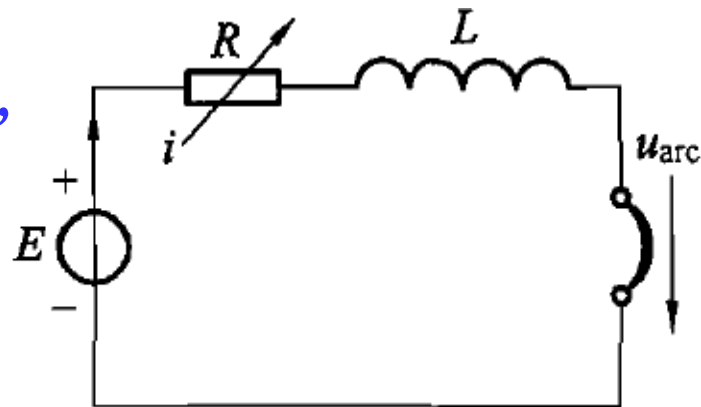
为便于分析，把开关设备操作时的电气变化过程用以下等值电路表示。从电路的角度看，电弧是一个非线性电阻，其阻值随电流以及其他因素而变化。对于如图所示的具有电弧的R-L直流电路，当燃弧后其电压平衡方程式为：

$$E = iR + L \frac{di}{dt} + u_{\text{arc}}$$

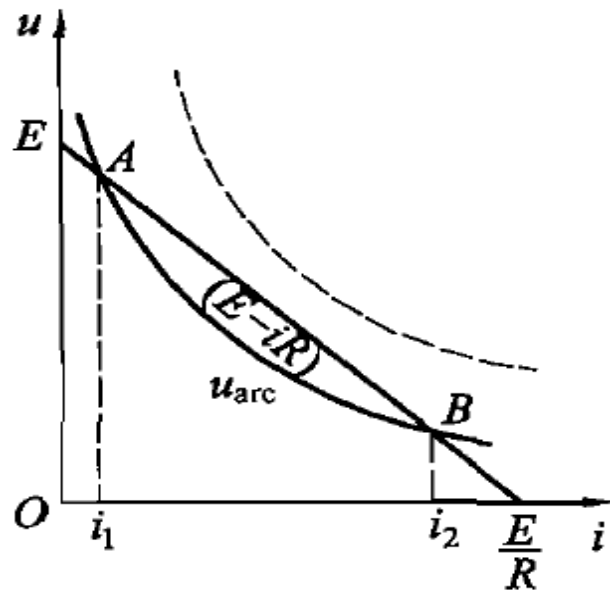
当游离与去游离处于动平衡状态，电弧稳定燃烧， $di/dt=0$ ，此时  $E - iR = u_{\text{arc}}$

若将 $f(i)=E-iR$ 定义为电路的伏安特性，则 $f(i)=u_{\text{arc}}$ 定义为电弧的静伏安特性。A点与B点是电弧的燃烧点，其中A点为视在稳定电弧燃烧点，B点为稳定电弧燃烧点。

若将电弧静伏安特性提高到虚线位置，使两条曲线没有交叉点，则电弧熄灭，即直流电弧的熄灭条件为  $E - iR < u_{\text{arc}}$



(a) 具有电弧的 R-L 电路



(b) 直流电弧的稳定燃烧点



从  $E - iR < u_{\text{arc}}$  方程可以看出：

当施加在断路器触头两侧的电压大于或等于电弧电压时，电弧将继续燃烧，否则电弧将熄灭。

在上述方程中，实际电路参数基本不变，施加在直流断路器断口之间的电压也基本不变，因此要把电弧燃烧的条件从维持稳定燃烧降下来是一件相当困难的事情。

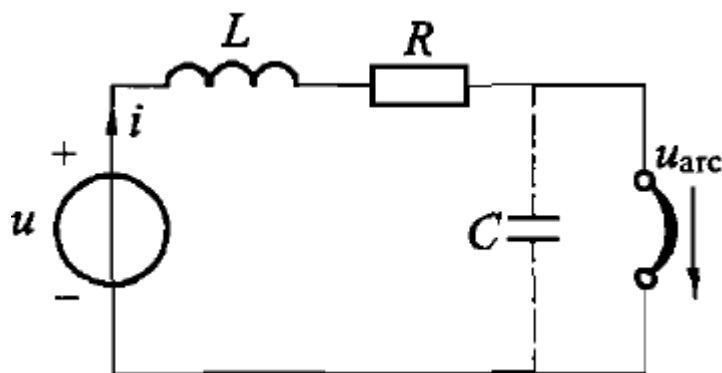
实际的直流断路器熄灭电弧只能通过一些外部条件来实现，如通过外力把电弧柱体拉长、强化对电弧的冷却、通过外力把电弧推到多断口装置中以利用两极压降梯度大于电弧柱体压降梯度的有利因素，使需要维持电弧稳定燃烧的电压增大。



## 6. 交流电弧的熄灭条件与熄灭过程

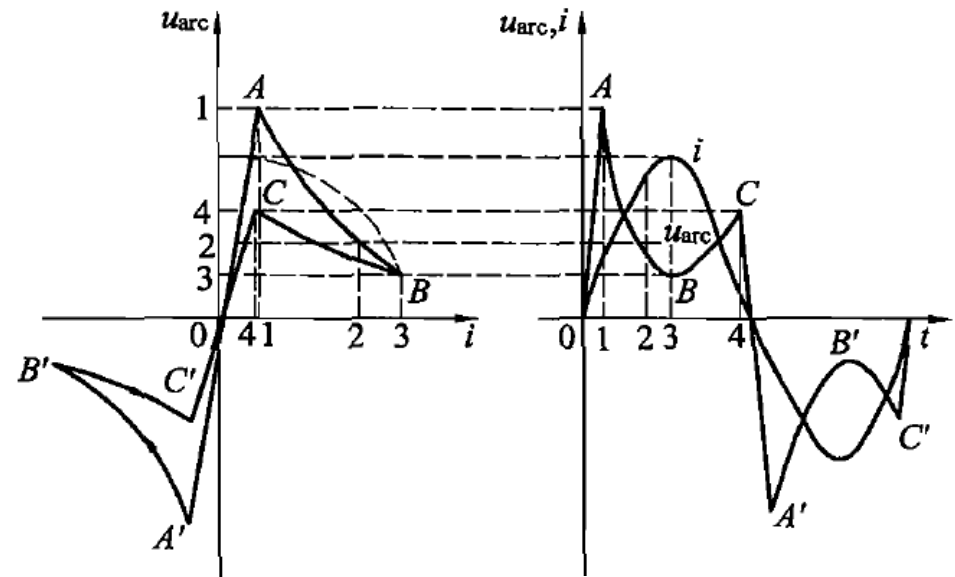
### (1) 交流电弧的熄灭条件

交流电弧与直流电弧有所不同，交流电流瞬时值随时间变化，每周期内有两次通过零点。电弧的温度、电阻与电弧电压也随时间而变化，但弧柱受热升温或散热降温都有一个过渡过程，即温度的变化总是滞后于电流的变化，此现象称为电弧的热惯性。



(a) 交流电路的电弧

交流电弧一直处于动态过程，并且在电流过零时电弧自行熄灭，以后在一定条件下又重燃。如图 2.3(a)所示的交流电路，当电路处于稳定状态且电弧长度不变时，其伏安特性如图 (b)所示。



(b) 交流电弧伏安特性 (c) 电弧电压波形

从图 (b)可以看出：电流由负值过零瞬间，电弧暂时熄灭，此时，电源电压加于触头之间。当触头间电压上升到电弧点燃电压 $U_{bu}$ (对应A点)时，重新燃弧。由于电弧的热游离相当强，特性曲线AB段是下降的。从B点以后，电流由峰值逐渐减小，电弧电压相应回升，但因弧柱存在热惯性，因此，BC段低于AB段。当电弧电流趋近于零时，电弧电压也趋近于零。c点电压通常称为熄弧电压 $U_{de}$ 。电弧电压随时间的变化波形呈马鞍形，如图 (c)所示。

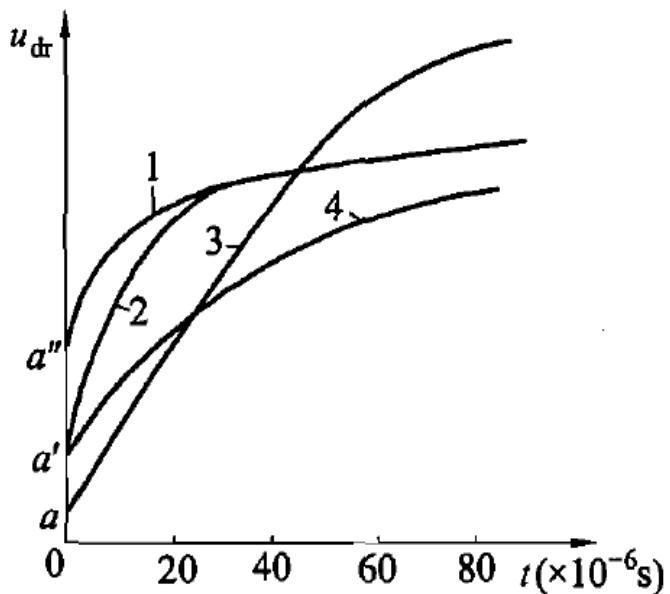
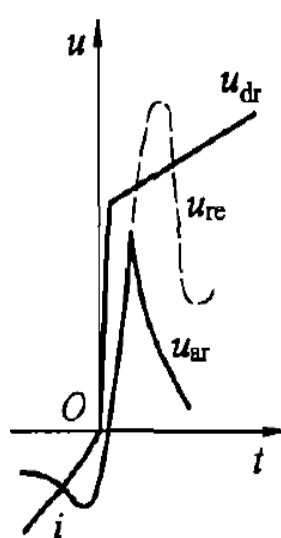
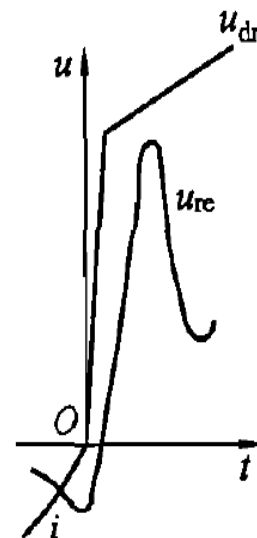


图 2.4 介质强度恢复过程曲线

1—真空；2—SF<sub>6</sub>；3—空气；4—油

(a) 重燃



(b) 熄灭

图 2.5 交流电弧的熄灭条件

电弧过零后，又反向重燃，伏安特性与正半周对称。从电弧电流在前半周熄灭时起，到后半周重新燃弧时止的一段时间，称为零休期间。在零休期间，弧隙中的介质强度恢复过程与电压恢复过程是同时进行的，并且互有影响。电弧是否重燃，取决于两个过程的“竞赛”。弧隙介质强度恢复过程介质恢复强度用耐受电压 $u_{dr}$ 表示。弧隙恢复电压用 $u_{re}$ 表示。

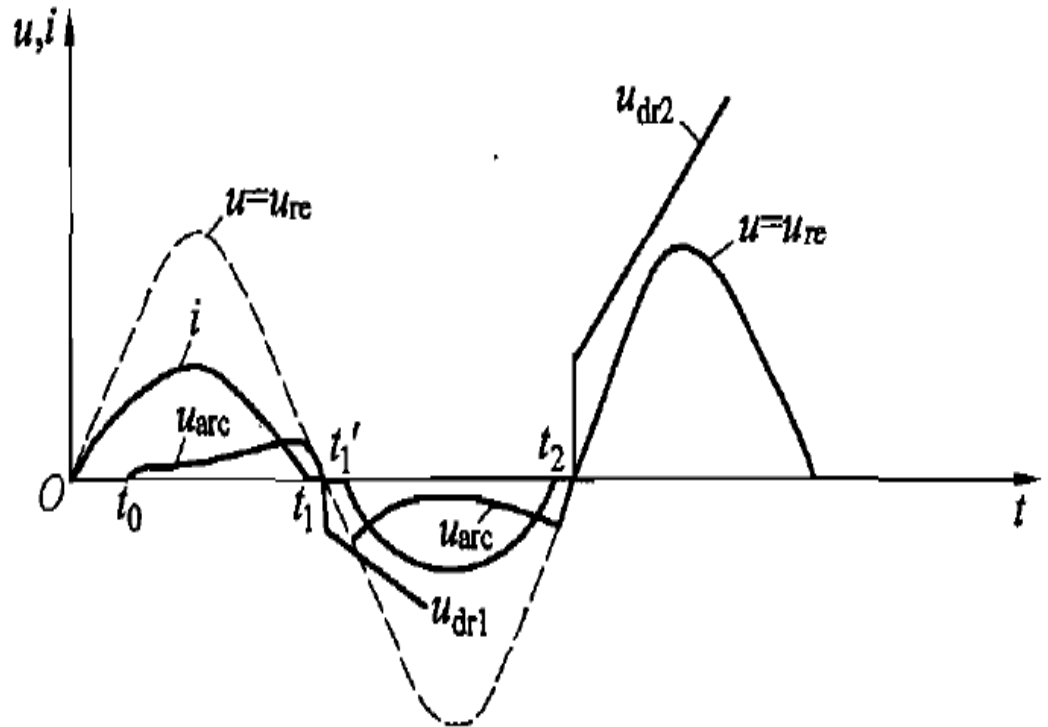


## (2) 交流电弧的熄灭条件

对于交流电路来说，由电源提供能量的负荷可能是电阻性负荷、电感性负荷或者电容性负荷，不同负荷性质对电弧的熄灭是有一定的影响的。

### ① 电阻性负载中，交流电弧的熄灭

- ◆ 触头 $t_0$ 时刻分开，电弧产生，零休期间暂时熄灭。
- ◆ 由于曲线 $u_{dr1}$ 与电源电压 $u$ 有交点，所以在 $t_1'$ 时电弧重燃。
- ◆ 当电流第二次过零时，此时触头间距离更大了，去游离作用更强烈， $u_{dr2}$ 与电源电压 $u$ 无交点，电弧不会重燃。



开断电阻电路时各参数波形图

## ② 电感性负载中，交流电弧的熄灭

对于感性负载来说，电压超前于电流，并且电感元件中电流是不能突变的。当电压为零时，电流不为零，说明触头之间仍然存在着带电粒子的运动，这种运动将妨碍到绝缘介质强度的恢复。因此，开关在开断感性负载时，介质绝缘强度恢复更加困难。

- ◆ 触头 $t_0$ 时分开起弧，在电流第一次和第二次过零后，两种因素“竞赛”的结果，电弧重燃。
- ◆ 在第三次过零时，由于介质恢复强度曲线高于恢复电压曲线 $u_{re}$ ，电弧熄灭。
- ◆ 在 $t_3$ 时刻电弧虽然熄灭，触头间还有剩余电流。

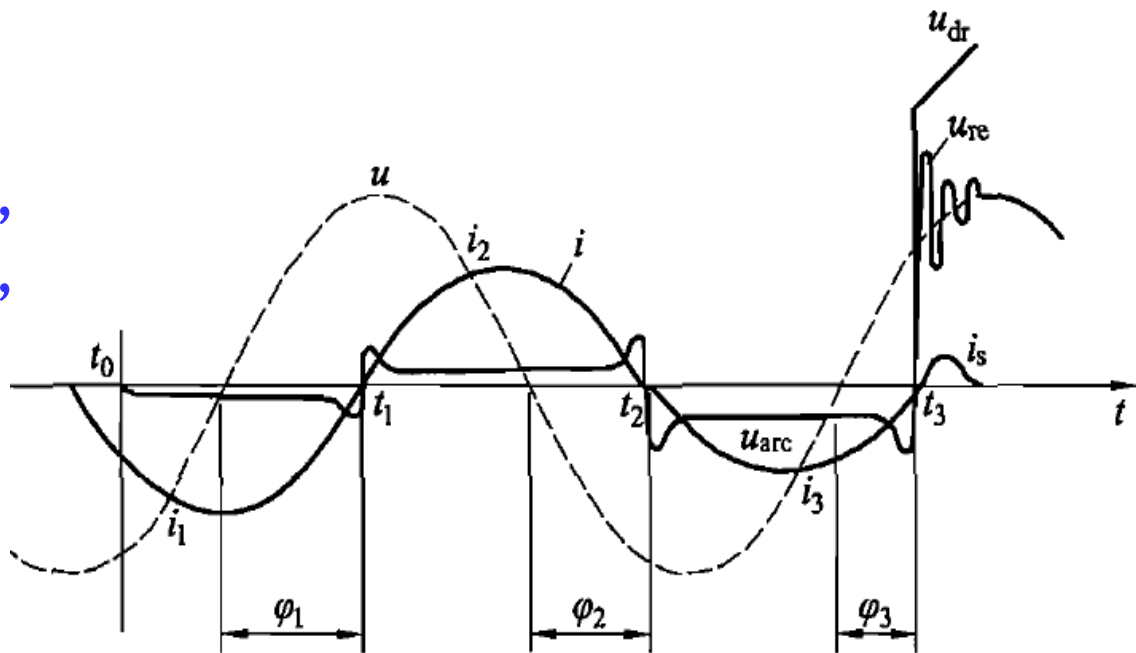


图 2.7 开断电感电路时各参数波形图

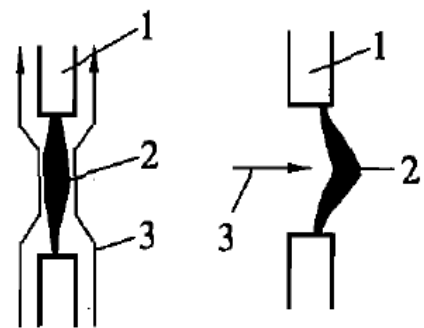
**电容性负载与电感性负载性质相同**



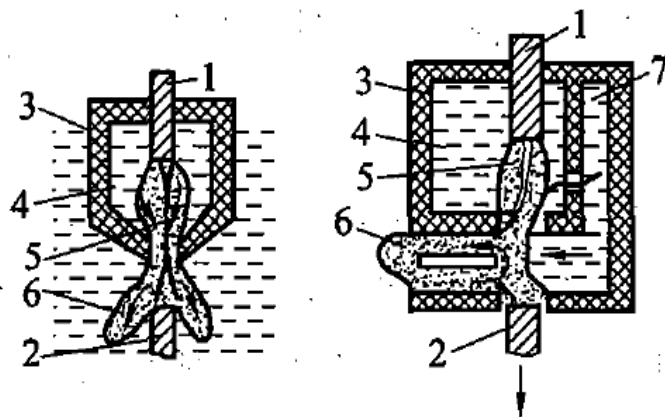
## 7. 熄灭电弧的基本方法

在现代高压开关电器中，除在触头间隙采用介质强度高的绝缘材料（如油、SF<sub>6</sub>等介质）和采用真空降低带电粒子在触头之间的碰撞几率外，常用的基本灭弧方法可以归纳为下列几种：

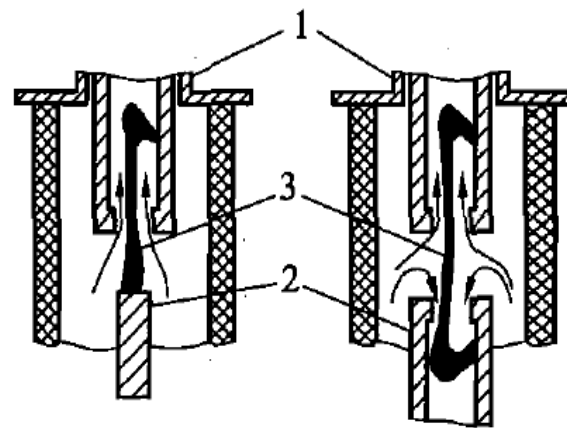
- ① **加快触头分离速度**。迅速使触头之间距离变长(减弱电场去游离)；
- ② **采用未游离的流体吹动电弧**。当流体与电弧接触后，电弧表面或内部的带电粒子被不断吹走，扩散作用增强；同时电弧受冷却作用，热游离减弱而复合作用有所加强。吹动方式可以是沿电弧的纵向吹动，也可以是垂直于电弧的横向吹动及纵、横向混合吹动。吹弧能源可以是油断路器自能式吹弧，也可以是空气断路器外能式吹弧；



(a) 纵吹 (b) 横吹



(a) 纵吹 (b) 横吹



(a) 单向纵吹 (b) 双向纵吹

图 2.8 吹弧方式

1—触头；2—电弧；  
3—吹弧方向

图 2.9 油断路器的灭弧方式示意图

1—静触头；2—动触头；3—灭弧室；4—油；  
5—电弧；6—气泡；7—空气垫

图 2.10 空气断路器纵吹

灭弧方式示意图

1—静触头；2—动触头；3—电弧

当流体与电弧接触后，电弧表面或内部的带电粒子被不断吹走，扩散作用增强；同时电弧受冷却作用，热游离减弱而复合作用有所加强。吹动方式可以是沿电弧的纵向吹动，也可以是垂直于电弧的横向吹动及纵、横向混合吹动。吹弧能源可以是油断路器自能式吹弧，也可以是空气断路器外能式吹弧；



③ **磁吹灭弧。**电弧在磁场中将受到力的作用，通常是在开关中安装磁性材料做成的器件或线圈，使电弧生变形从而使电弧变长；

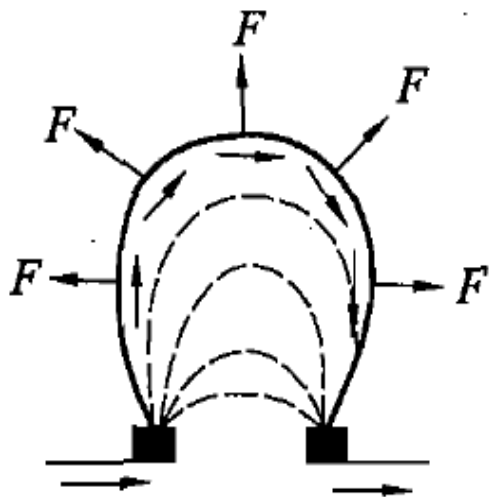


图 2.11 电弧在电动力影响下的伸展

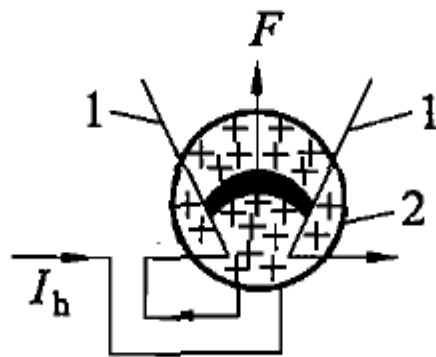


图 2.12 电弧在磁吹力影响下的移动

1—触头及弧角；2—线圈

- ④ **采用多断口结构把长电弧分成短电弧。**当电弧被分短以后，每段短弧在新的阴极和阳极区都要产生新的阴极压降和阳极压降，当两触头间的电压不变时，这许多短弧无疑增加了触头间总的压降，如果这个压降值大于触头端电压，则电弧即行熄灭。增加高压断路器断口的数目(见图2.13)及在触头外侧加设金属熄弧栅(见图2.14)，都可将长电弧分成短电弧，达到快速熄弧的目的。

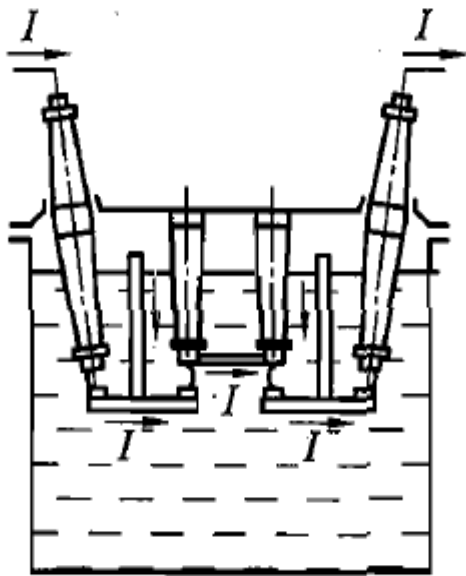


图 2.13 每相有四个断口的油断路器原理图

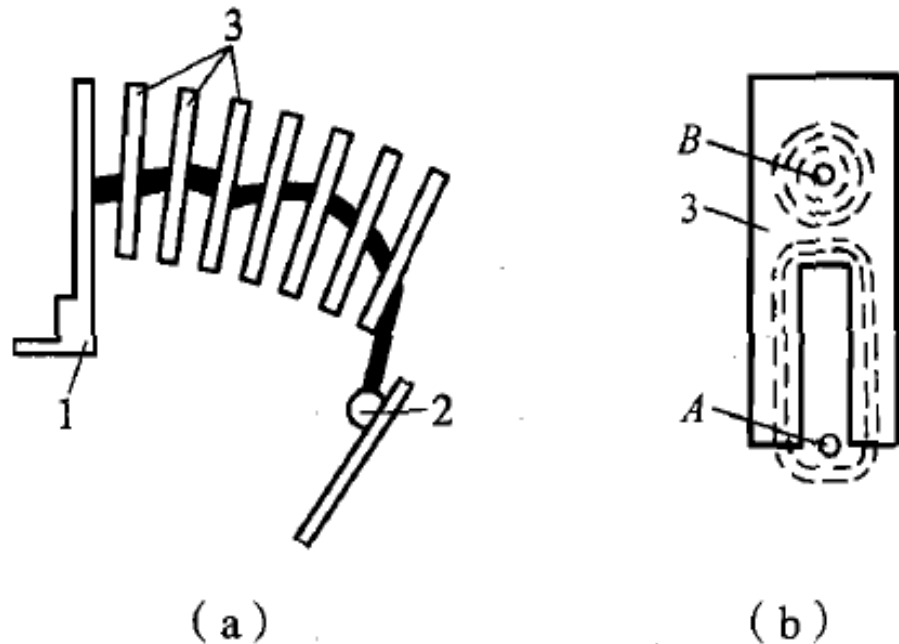


图 2.14 熄弧栅作用原理图



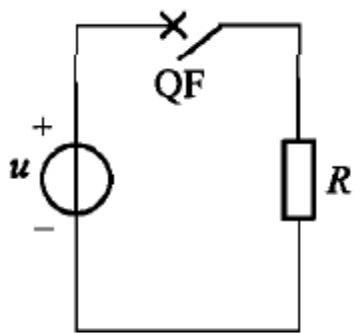
## 总结

- ◆ **加快触头分离速度。**迅速使触头之间距离变长；
- ◆ **采用未游离的流体吹动电弧。**当流体与电弧接触后，电弧表面或内部的带电粒子被不断吹走，扩散作用增强；同时电弧受冷却作用，热游离减弱而复合作用有所加强。吹动方式可以是沿电弧的纵向吹动，也可以是垂直于电弧的横向吹动及纵、横向混合吹动。吹弧能源可以是油断路器自能式吹弧，也可以是空气断路器外能式吹弧；
- ◆ **磁吹灭弧。**电弧在磁场中将受到力的作用，通常是在开关中安装磁性材料做成的器件或线圈，使电弧生变形从而使电弧变长；
- ◆ **采用多断口结构。**电弧电压由三部分组成，电极的阳极电压降和阴极电压降斜率比电弧体电压降的斜率大，当把触头之间用多块导体隔离开后，就整个触头之间出现多个阴阳极，其压降相对减小。

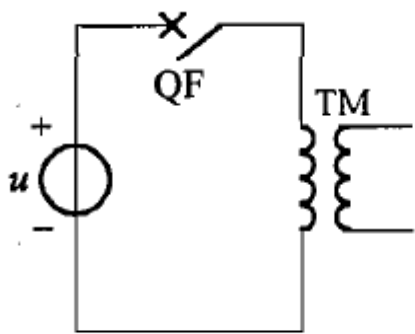


### 三. 断路器开断短路电流的工作状态分析

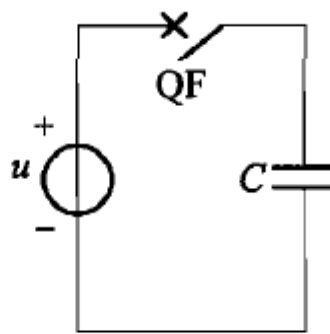
断路器要能闭合和开断各种性质的电路。以单相电路为模型，电力系统中常遇到的电路有：**电阻性电路、电感性电路、电容性电路**。除电阻性电路外，开断和闭合其他性质的电路时，均将在系统中引起**暂态过程**，出现异常的电压和电流，危害设备的安全运行。因此，对断路器触头在开断电路时的**恢复电压进行暂态分析**，不但可以使我们了解在不同电路参数下触头恢复电压的建立过程，而且为改善断路器的灭弧能力、提高开断容量、保证电力系统供电的可靠性提供了科学依据。



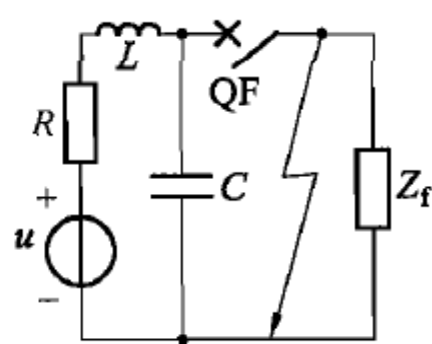
(a) 电阻性电路



(b) 电感性电路  
(感性小电流)



(c) 电容性电路  
(容性电流)



(d) 系统短路时的电路  
(感性大电流)

图 2.15 电力系统中各种性质的电路



## 1. 弧隙电压的恢复过程

现以断路器开断单相接地故障为例，说明弧隙电压的恢复过程。 $L$ 和 $R$ 为电源电感和电阻， $Z_f$ 为负荷阻抗， $C$ 为电源侧对地电容。

当在断路器出口发生单相短路时， $Z_f$ 被短接，断路器中通过单相短路电流。断路器 $QF$ 断口电压恢复过程，就是交流电压 $u$ 通过 $R, L$ 对电容 $C$ 充电的过程。

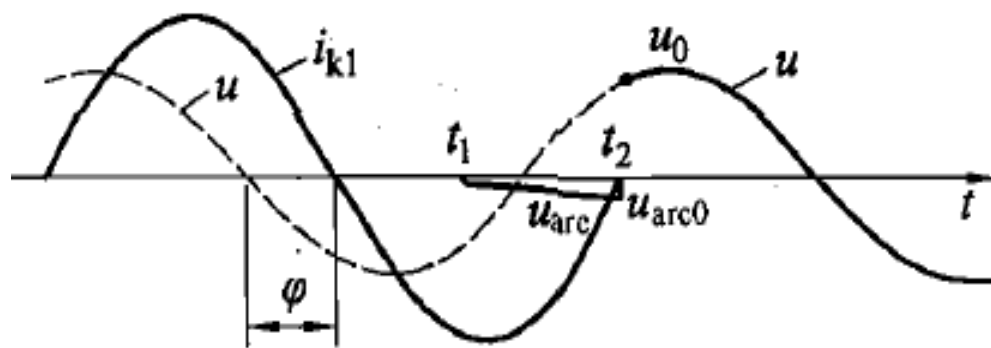
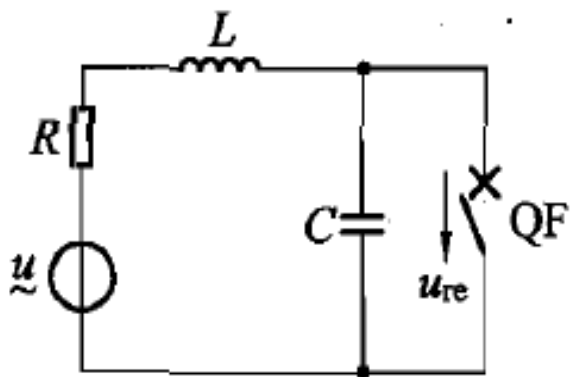


图 2.16 图 2.15 (d) 的等值电路 图 2.17 短路电流  $i_{k1}$ 、电压  $u$  的波形图



## 1. 弧隙电压的恢复过程

在电流零休时间内电源电压变动很小，因此在分析电压恢复过程时，可以近似地把交流电源简化为直流电源，其电压取值为交流恢复电压 $u_0$ 。

断路器QF电压的恢复过程，相当于电压为 $u_0$ 的直流电源和电感 $L$ 、电阻 $R$ 及电容 $C$ 组成的串联电路在突然合闸时电容 $C$ 两端的电压变化过程。这样可以用图2.18的电路来分析电压恢复过程。

假设断路器弧隙电阻在电流过零时为无限大，则电路的回路方程式为

$$LC \frac{d^2 u_C}{dt^2} + u_C = u_0$$

$$u_{re} = u_C = u_0 - (u_{arco} + u_0) \cos \omega_0 t$$

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$$

若 $u_{arco} \ll u_0$ ，则上式可简化为

$$u_{re} = u_0 (1 - \cos \omega_0 t)$$

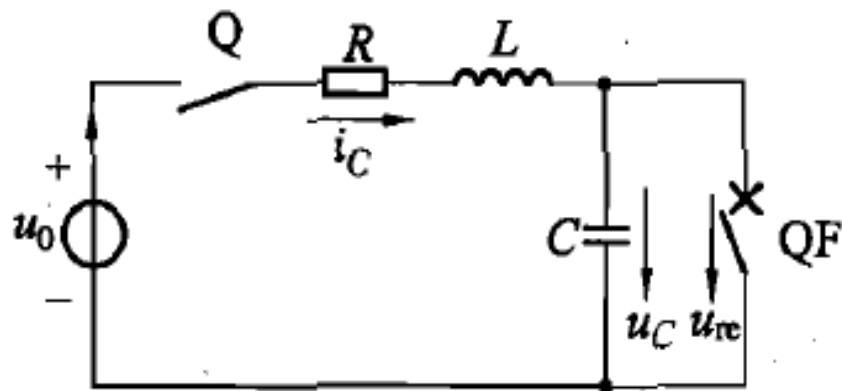


图 2.18 计算电压恢复过程的电路

实际电路中，恢复电压最大值 $u_{rem}$ 达不到电源电压的两倍，一般在 $u_0$ 的1.3-1.6倍以下。

**恢复电压由两部分组成:瞬态部分和工频部分。**瞬态部分即瞬态恢复电压以高频振荡形式出现，其振荡频率与电网参数有关。在实际电路中，这个瞬态部分衰减很快，持续时间很短。工频部分就是交流50 Hz正弦电压 $u_s$ 。

$\omega_0$ 越大，电压恢复越快； $u_0$ 越大，电压也恢复越快。电压恢复越快，则电弧燃烧的时间就延长。为了降低恢复电压的上升速度，可以在断路器断口处采取并联电阻的方法。

$$\frac{du_{re}}{dt} = \frac{u_0}{T/4} = 4f_0u_0 = \frac{2u_0\omega_0}{\pi} \cdot 10^{-6} \quad (\text{V}/\mu\text{s})$$

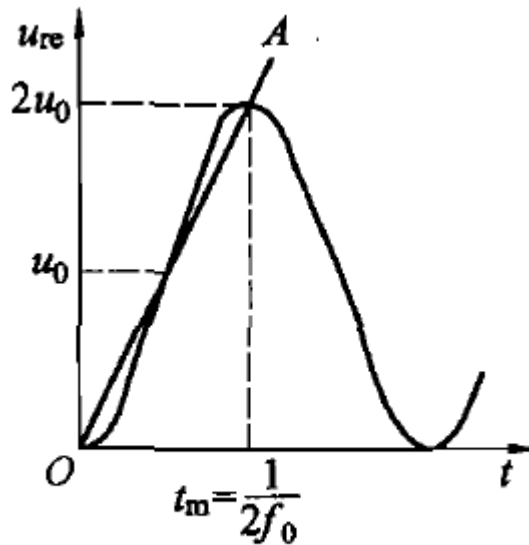


图 2.19 恢复电压变化波形

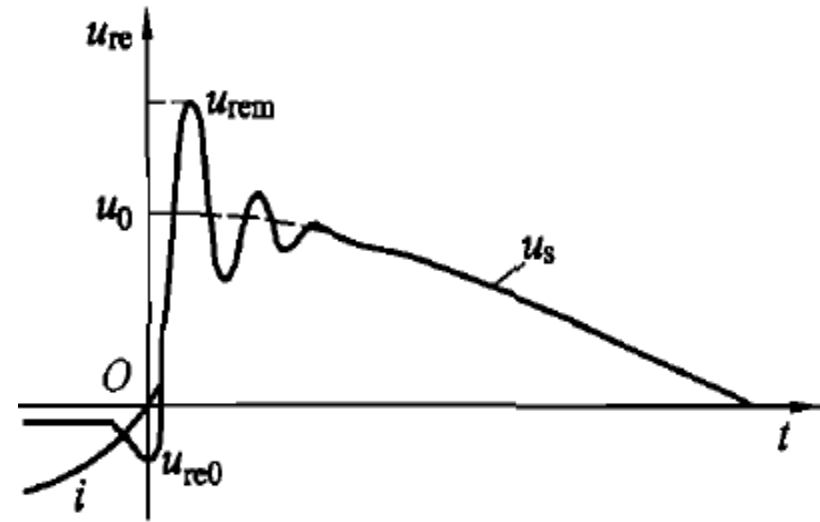


图 2.20 实际电路中的恢复电压波形



## 2. 断路器断口并联电阻降低恢复电压上升速度

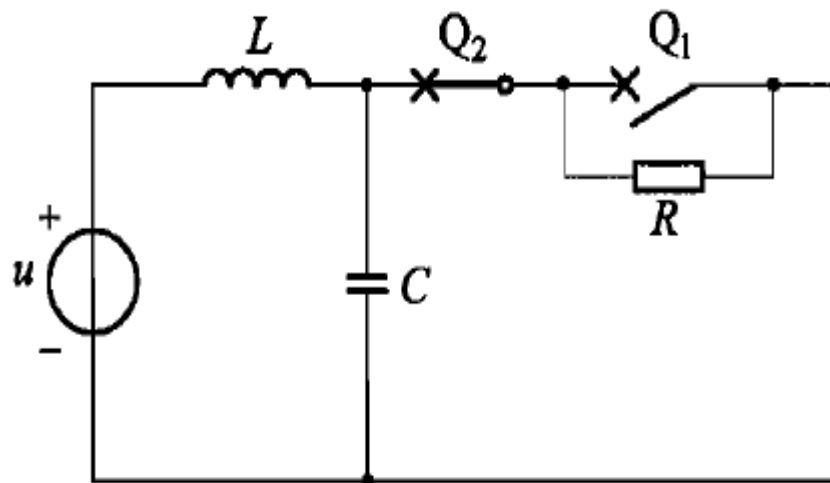
图2.21表示两断口的断路器在主触头Q1处并联电阻R的情形。Q2为辅助触头，断路器分断电路时，主触头Q1先打开，并联电阻接入电路，使主触头Q1间的电弧熄灭，然后辅助触头Q2接着分开，切断并联电阻中的电流，最终使电路完全断开。

$$LC \frac{d^2 u_C}{dt^2} + \frac{L}{R} \cdot \frac{du_C}{dt} + u_C = u_0$$

$$u_{\text{rel}} = u_0 + \frac{u_0}{P_2 - P_1} (P_1 e^{P_2 t} - P_2 e^{P_1 t})$$

$$P_{1,2} = \frac{-\frac{L}{R} \pm \sqrt{\frac{L^2}{R^2} - 4LC}}{2LC} = -\frac{1}{2CR} \pm \sqrt{\frac{1}{4C^2 R^2} - \frac{1}{LC}}$$

$$u_{\text{rel}} = u_0 (1 - e^{-\frac{R}{L} t}) \quad \left. \frac{du_{\text{rel}}}{dt} \right|_{t=0} = \frac{R}{L} u_0 \quad (\text{V/s})$$



加并联电阻的目的是使瞬态恢复电压从周期性振荡过程变为非周期性过程，以降低恢复电压的上升速度。



- ◆ 并联电阻 $R$ 值越小，恢复电压上升速度越低。
- ◆ 主触头间的电弧熄灭后，并联电阻 $R$ 与电源、电感 $L$ 及辅助触头形成串联连接。通常短路时电路感抗很小，此时电路基本上成为电阻性电路，电路中的电流较主触头开断时的短路电流小得多，因此，当辅助触头 $Q2$ 分开时，触头间的电弧很容易熄灭。
- ◆ 并联电阻值主要根据熄灭主触头间电弧的要求来选择。一般来说，此电阻值常在几欧至几百欧之间(与断路器的额定电压有关)，通常称为低值并联电阻。



## 四. 高压断路器的技术要求及基本参数

电力系统的运动状态、负荷的性质是多种多样的，作为控制、保护元件的高压断路器为了保证电力系统的安全可靠运行，对其要求是多方面的。

### 1. 开断、关合电路方面

- ① 开断负荷电路和短路故障。主要参数是额定电压 (kV)、额定开断电流kA；
- ② 快速开断。标志参数是开断时间 $t_{br}$ ， $t_{br}$ 是从断路器接到开断信号到短路电流终止(电弧熄灭)的全部时间，它又分为：固有分闸时间 $t_{in}$ (s)(从断路器接到分闸命令起到触头分离的时间间隔)和燃弧时间 $t_a$ (s)(从触头分离到电弧全部熄灭的时间间隔)。
$$F_H = \frac{\mu_0 i^2}{4\pi} \ln\left(\frac{R}{r}\right); \quad r = \sqrt{\frac{F_K}{\pi \cdot \xi \cdot H}}$$
- ③ 关合短路故障。触头间电流收缩产生电动斥力导致触头关合不到底(见注)。
- ④ 自动重合闸。很短的时间内，可靠地连续分合几次短路故障。
- ⑤ 分合各种空载和负载电路。断路器的绝缘应可以承受电路产生过电压。
- ⑥ 允许分合次数。机械寿命和电寿命。



## 2. 一般电气性能方面

- ① **电压。**额定电压一定的断路器，要求其绝缘部分应能长期承受相应的最大工作电压，而且还要求能承受相应的大气过电压及内部过电压的作用。标志参数是：**最大工作电压、工频试验电压、全波和截波冲击试验电压、操作波试验电压。**
- ② **电流。**长期通过工作电流时，各部分温度不得超过允许值；通过短路电流时，不应因电动力而受到损坏，各部分温度也不允许超过短时工作的允许值，触头不应发生焊接或损坏。

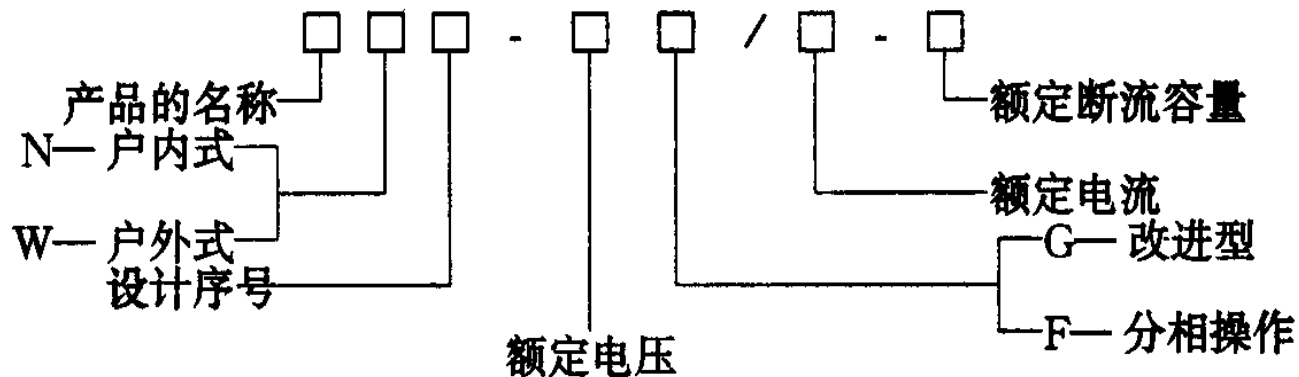
## 3. 自然环境方面

- ① **海拔高度。**高海拔影响外绝缘；空气稀薄影响散热；
- ② **环境温度。**温度过低会使变压器油、液压油及润滑油的粘度增加，影响开关电器的分、合闸速度；温度过低还会使SF<sub>6</sub>气体液化；密封材料在低温下会出现性能劣化，造成电器设备的漏气漏油。温度过高，可能造成导电部分过热及电容套管的密封胶渗出等。



## 断路器的型号

断路器型号主要有以下七个单元组成。



第一单元是产品字母代号：S—少油断路器；D—多油断路器；  
K—空气断路器；L—六氟化硫断路器；Z—真空断路器；  
Q—自产气断路器；C—磁吹断路器；G—隔离开关。

第二单元是装设地点代号：N—户内式；W—户外式。

第三单元是设计序号。第四单元是额定电压，kV。

第五单元是补充工作特性标志：G—改进型；F—分相操作。

第六单元是额定电流，A。第七单元是额定开断电流，kA。



## 五. 高压断路器的构造及工作原理

按照绝缘和灭弧介质的不同，高压断路器可以分成油断路器、SF6断路器、空气断路器、真空断路器等。

### 1. 高压断路器的构成

- ① **触头。**分为动触头和静触头两部分。在开关进行分闸或合闸操作时，静触头不运动，动触头由运动机构带动运动；
- ② **灭弧室。**电弧在灭弧室中被纵向或横向吹长、冷却而熄灭。灭弧室的结构必须满足断路器一定开断容量下灭弧的要求。
- ③ **绝缘介质。**它可以分为灭弧用绝缘介质及支持用绝缘介质。灭弧用绝缘介质可以是变压器油、SF6气体、压缩空气或真空等。支持用绝缘介质可以是电工瓷、环氧树脂或玻璃钢等。
- ④ **壳体结构。**把触头、灭弧室、绝缘介质等组装在一起，它多由钢材、电工瓷、密封紧固件等组成；
- ⑤ **运动机构。**它是推动动触头在规定范围内动作的联动机构，多由连杆机构组成。运动机构可以直接和断路器的操动机构连接，执行操动机构对断路器的操作。



## 2. 少油断路器的典型结构

油断路器有多油、少油之分，多油断路器与少油断路器采用工作原理相同的灭弧室。多油断路器中的变压器油既完成灭弧作用，又作为断路器载流体与外壳的绝缘介质，故需油量较多，少油断路器只要求变压器油完成吹动、熄灭电弧的作用，载流体与外壳的绝缘则由电工瓷或其他介质(如树脂筒壳)承担，故需油量较小。

多油断路器体积庞大，占地较宽，运输安装都不方便，特别是容易引起严重的火灾。因此，多油断路器在我国除早期建成的发电厂、供电系统中仍有运行及10 kV，35 kV电压等级仍有部分生产外，220 kV及以下各电压等级均以生产少油断路器为主。

## (1) SN10-10型少油断路器

这是我国当前生产10 kV电压级断路器的主要品种。断路器通过瓷瓶5固定在底架2上。图示断路器在合闸位置时，电流经上接线板9、静触头8、导电杆11、流动式中间触头12到下接线板13，形成导电回路。

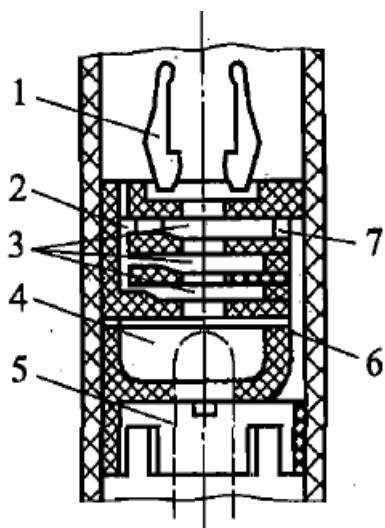


图 2.25 SN10-10 I 少油断路器灭弧室结构

- 1—静触头；2—吹弧排气道；3—横吹道中的油囊；  
4—纵吹油囊；5—动触头；6—附加油流通道；  
7—第一横吹弧道口

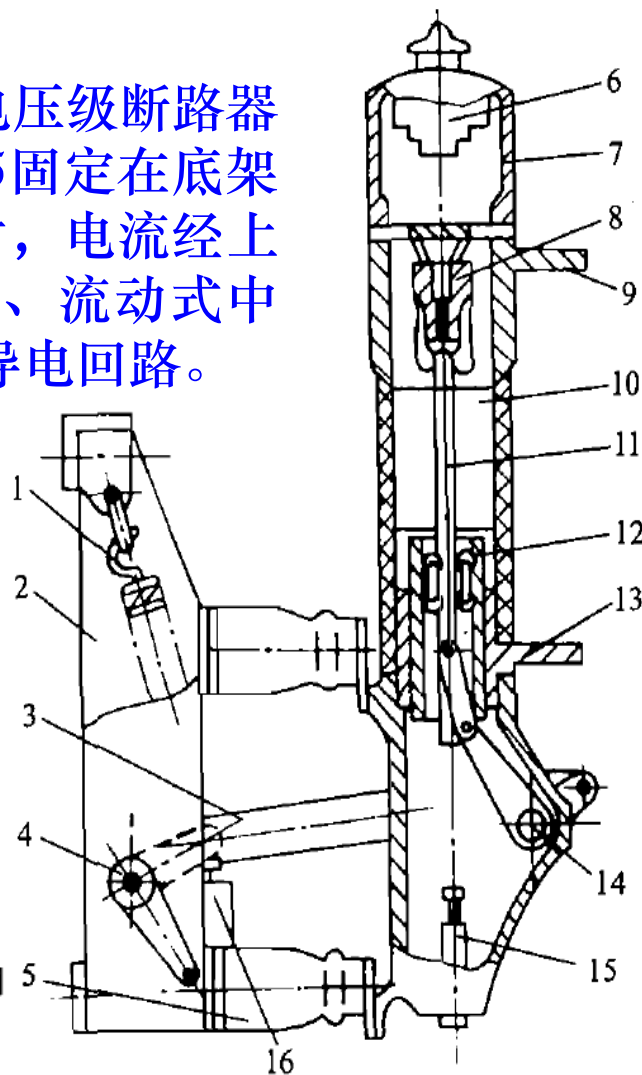
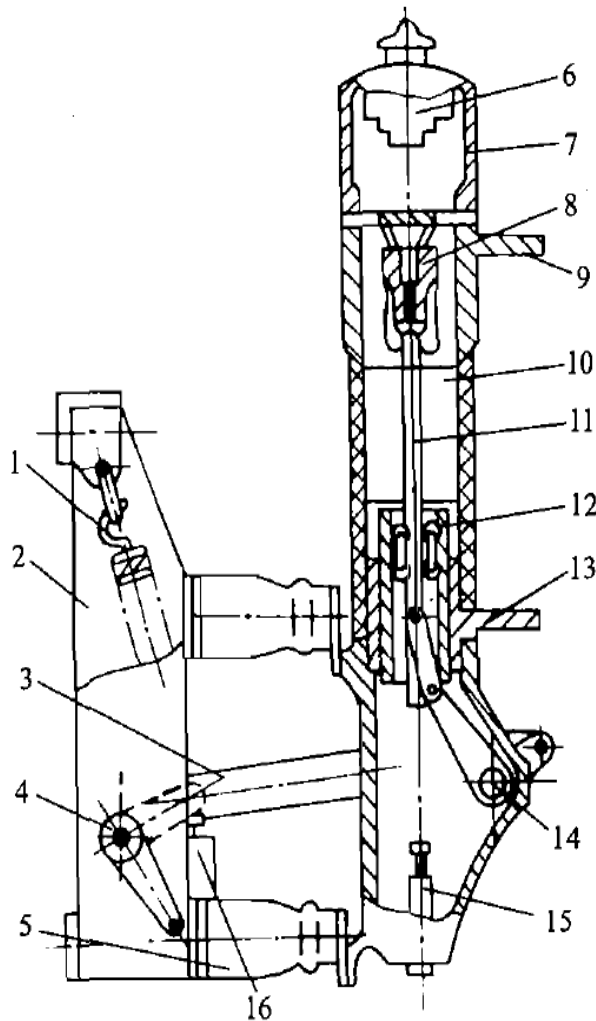


图 2.28 SN10-10 少油断路器的结构

- 1—分闸弹簧；  
2—底架；  
3—拉杆；  
4—主轴；  
5—支持瓷瓶；  
6—油气分离器；  
7—空气室；  
8—静触头；  
9—上接线板；  
10—灭弧室；  
11—导电杆；  
12—中间触头；  
13—下接线板；  
14—转轴；  
15—油缓冲器；  
16—合闸缓冲弹簧

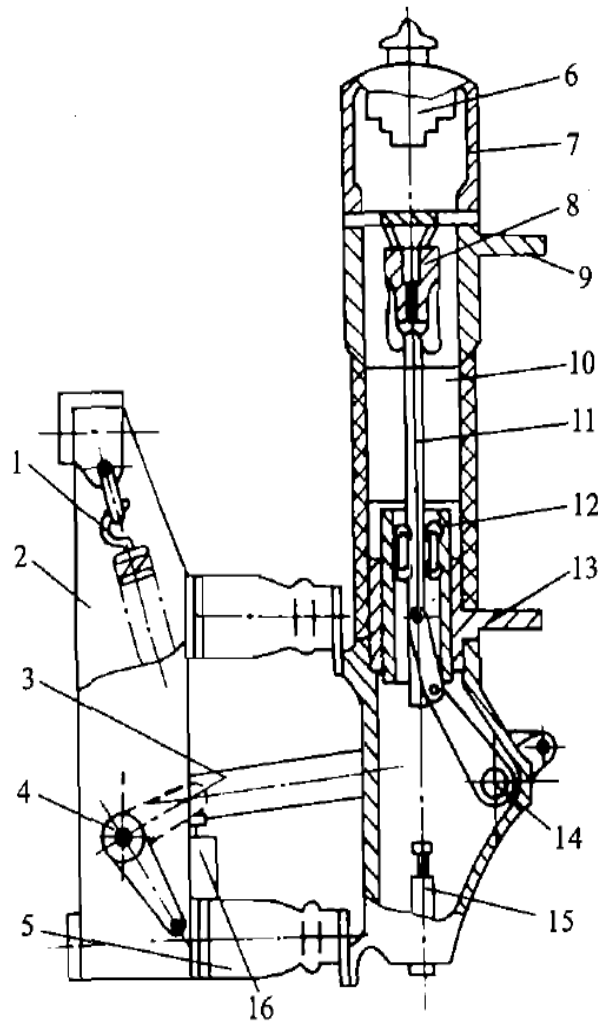
**分闸时**，在操动机构中的分闸电磁铁作用下，解开合闸保持机构的钩锁，由于分闸弹簧的作用，主轴4转动，经四连杆机构转动断路器各相的转轴14，将导电杆11向下拉动，动、静触头分离，触头间产生电弧，电弧在灭弧室10中熄灭。电弧分解和蒸发的气体，吹到空气室7内，膨胀、冷却，再经过油气分离器，气体从上帽顶部的排气孔排出，冷却的油回到空气室内，以减少油的消耗。在分闸行程接近终了时，油缓冲器活塞杆15插入导电杆底部钢管中进行分闸缓冲。



- 1—分闸弹簧；
- 2—底架；
- 3—拉杆；
- 4—主轴；
- 5—支持瓷瓶；
- 6—油气分离器；
- 7—空气室；
- 8—静触头；
- 9—上接线板；
- 10—灭弧室；
- 11—导电杆；
- 12—中间触头；
- 13—下接线板；
- 14—转轴；
- 15—油缓冲器；
- 16—合闸缓冲弹簧

图 2.28 SN10-10 少油断路器的结构

**合闸时**，操动机构中的合闸机构动作，使主轴4向与分闸时相反的方向旋转，一方面使导电杆11向上运动，静、动触头闭合，一方面拉伸分闸弹簧1，使之储能，以备分闸时用。当导电杆11接近合闸位置时，合闸缓冲弹簧被压缩，进行合闸缓冲。被压缩的合闸缓冲弹簧，在分闸过程中释放能量，有利于提高开断速度。为了在分闸过程中能得到较平缓的速度-行程曲线，在最新的SN10-10少油断路器中加用了在分闸过程中的弹簧缓冲器。



- 1—分闸弹簧；
- 2—底架；
- 3—拉杆；
- 4—主轴；
- 5—支持瓷瓶；
- 6—油气分离器；
- 7—空气室；
- 8—静触头；
- 9—上接线板；
- 10—灭弧室；
- 11—导电杆；
- 12—中间触头；
- 13—下接线板；
- 14—转轴；
- 15—油缓冲器；
- 16—合闸缓冲弹簧

图 2.28 SN10-10 少油断路器的结构



## (2) SW-110型断路器

SW-110型断路器由三个独立的Y形单元组成，每个Y形单元构成一相断路单元。每个单元的外形如图2.29所示。它由底座1、支持瓷瓶2、中间机构箱3，以及安装触头和灭弧室的两个斜立瓷瓶4等主要部件组成。

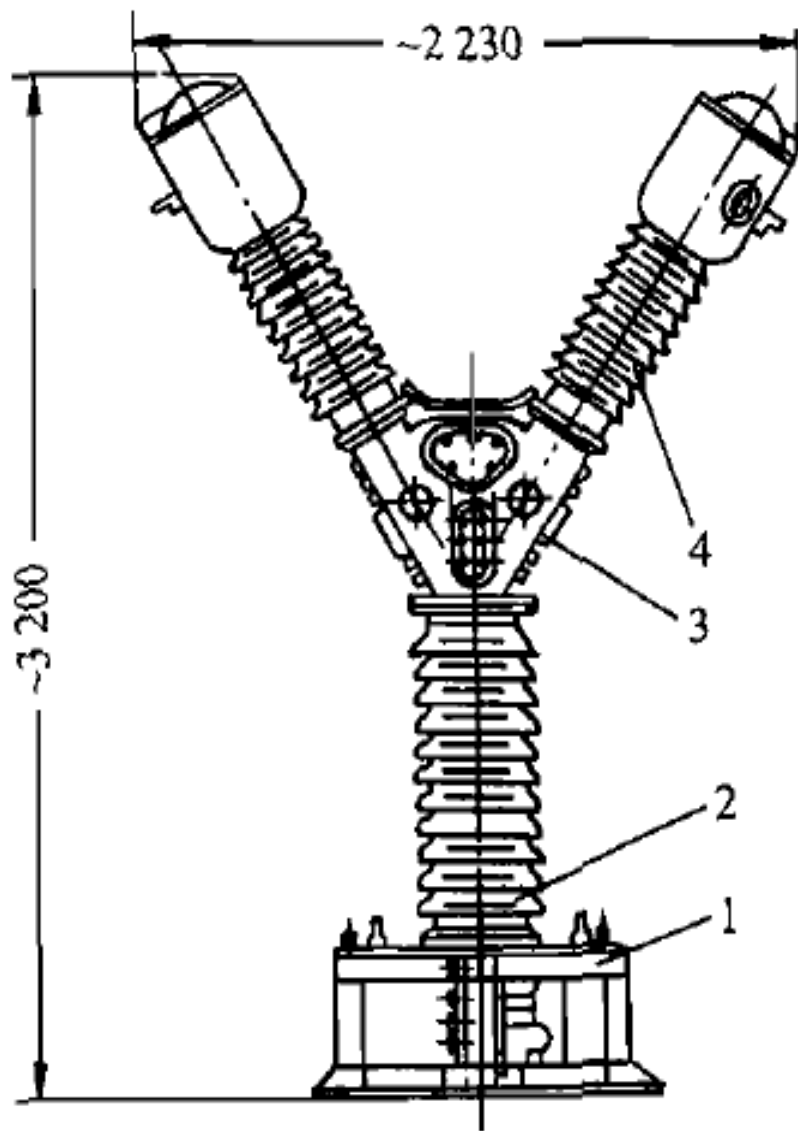


图 2.29 SW-110 型少油断路器一相单元外形图



SW-110型断路器的灭弧室通常采用单筒或双筒纵吹灭弧室。图2.30所示灭弧室为SW3-110型少油断路器的灭弧室。它由多个隔弧片组成多级油囊，当动触头与静触头分离向下运动时，在灭弧片中心孔部位燃烧。由于油囊的作用，油被蒸发和分解，产生高压力迫使气体顺着电弧方向，经灭弧室与静触头间引弧区吹向上部铝帽(图中没有画出)内的空气室，迫使电弧冷却和熄灭。这种灭弧室称为单筒纵吹灭弧室。

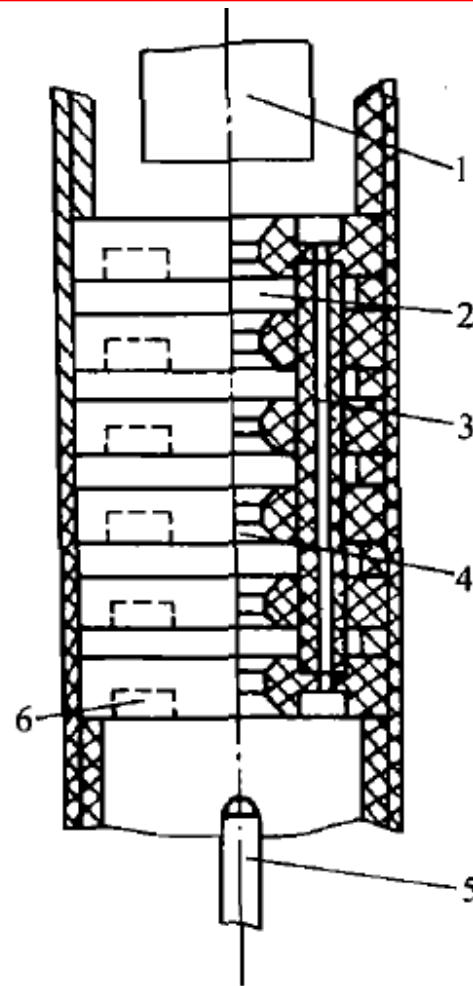


图 2.30 SW3-110 中的单筒式纵吹灭弧室

1—静触头；2—油囊；3—回油道；4—中心孔；  
5—动触头；6—空气垫



### 3. 六氟化硫(SF<sub>6</sub>)断路器

(1) SF<sub>6</sub>的主要特点。导热能力极强、化学性质稳定、均匀电场下绝缘能力是空气的2-3倍、灭弧性能是空气的100倍。SF<sub>6</sub>气体灭弧性能特别强的原因主要是：

- 散热能力强。SF<sub>6</sub>对流散热能力为空气的2.5倍，其分子在分解时吸收的能量多，对弧柱的冷却作用强。
- 电弧压降小，弧柱细。SF<sub>6</sub>气体的热传导特性十分奇异，在5000℃以上时，导热率十分低，使得弧心部分的热量难以传导出来，弧心温度特别高，气体的热游离充分，所以导电率高，弧压降下(只有压缩空气的1/3左右，少油断路器的1/10左右)。由于SF<sub>6</sub>断路器的电弧电压梯度较低，在相同的工作电压及开断电流条件下，电弧能量小，所以易于灭弧。在电弧周围温度低处(2000℃)，其导热率又十分高，所以弧柱细，含热量少，使得电弧电流过零时，电子密度减少得快，这就提高了介质耐压强度的恢复速率。
- 强电负性对电弧电流过零后的去游离极为有利，使弧隙的介质强度恢复大为加快。



**SF<sub>6</sub>在水分参与下将产生强腐蚀性的分解产物HF。这种物质对绝缘材料、金属材料、玻璃、电瓷等含硅材料有很强的腐蚀性。因此，必须严格控制SF<sub>6</sub>气体中的水分。常采用的措施有：加强断路器的密封；组装断路器时，先要对零部件进行彻底烘干；严格控制SF<sub>6</sub>气体中含水量；严格控制断路器充气前的含水量；在SF<sub>6</sub>断路器内部加装吸附剂。**



## (2) SF<sub>6</sub>断路器的气吹灭弧装置

气体断路器以六氟化硫作为绝缘和灭弧介质后，灭弧装置的性能和结构与压缩空气断路器、少油断路器等有极大的不同，并具有下列优点：

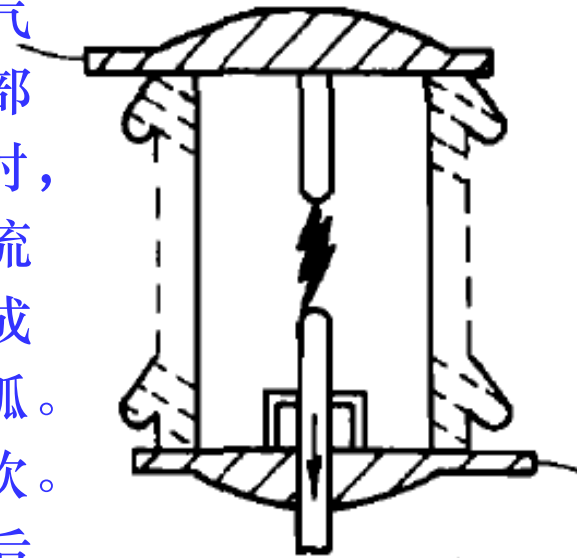
- ◆ 可以提高单断口的额定电压和开断电流。
- ◆ 切断小电感电流时较少发生截流现象；切断空载架空线时不会发生多次重击穿；能承受快速上升的瞬态恢复电压，尤其适宜于切断近区故障。
- ◆ 分解物内不含氧，所以燃弧时触头不会被氧化，而且磨损和烧蚀作用也不显著；能自行迅速复合，的满容量开断次数增加；
- ◆ 可以集合成全封闭气体绝缘变电站。它结构紧凑，设备占地面积小，污染和噪声小，又无爆炸和导致火灾的危险。



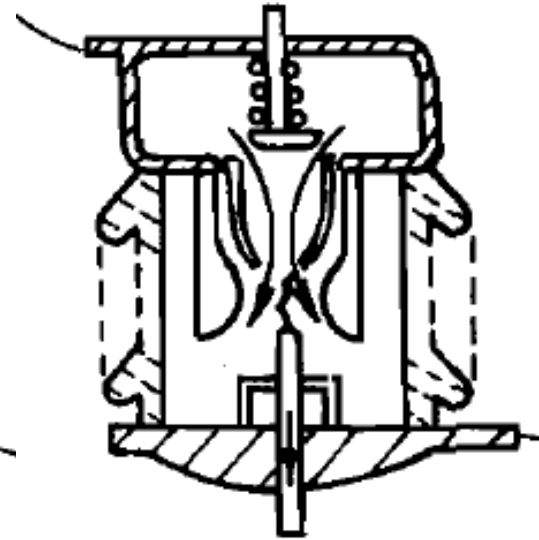
这些优点使得六氟化硫断路器在高压和超高压电力系统中取代压缩空气和少油断路器。综合六氟化硫气吹灭弧装置的发展历程和现有的结构，基本上分为两大类:纵向气吹和横向气吹。纵向气吹灭弧方式归纳起来有4种:

① **简单开断方式**。它完全依靠自然对流和传导散热冷却电弧。

② **双压力式吹弧**。这种吹弧方式须在断路器内设置两种气压，上部为高压室，下部为低气压室。当触头分开时，开启控制阀门，使高压气流通过喷口绝热膨胀，并形成高速气流，以此来吹熄电弧。熄弧后关闭阀门，停止气吹。低压气体经吸附过滤装置后用压气泵重新打入高压室，以备下次使用。

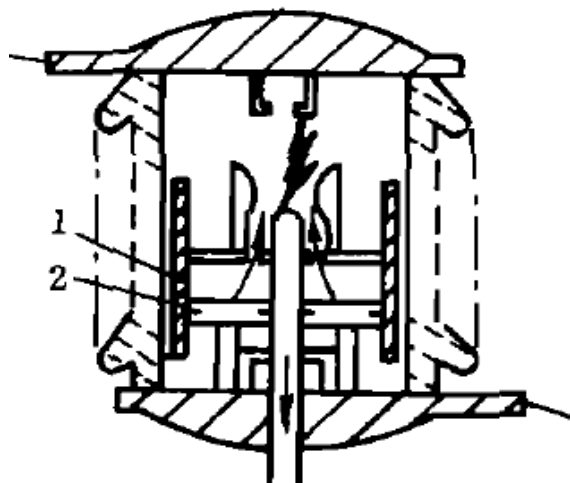


(a) 简单开断方式

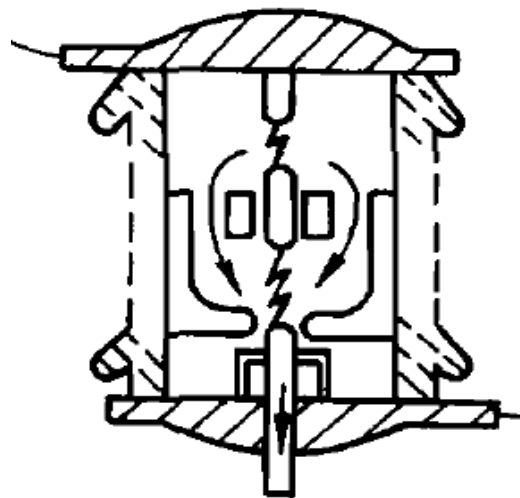


(b) 双压力式气吹

- ③ **单压力式吹弧**。它仅设置一种气压，即在灭弧室内充有一定压力(一般为0.4-0.7MPa气压)的六氟化硫气体。动触杆装有压气罩，当动触杆向下运动时使罩内气体被压缩，压力升高。当动、静触头分离，接着喷口开启时，压气罩内被压缩的高压气体通过喷口作绝热膨胀，形成高速气流，纵吹电弧。熄弧后的灭弧室内气体又处于同一气压下。
- ④ **自生压力式吹弧**。它利用上部电弧自身的能量加热气体，使压力升高去吹熄下部的电弧。目前，这种方式已有较大的改进，即不仅采用纵吹方式，还加横吹，以提高灭弧性能。



(c) 单压力式气吹



(d) 自生压力式气吹



- ⑤ **横向气吹灭弧装置。**它是利用电弧电流通过线圈，在其周围产生磁场，以此驱动电弧在六氟化硫气体中做快速旋转运动，使弧柱受到横向气流的吹拂、散热、冷却而达到灭弧的目的。

上述各种灭弧方式若按灭弧过程所施加的能量分，一类是外能灭弧，它是依靠外界能量(非电弧自身的)压缩气体，然后施行气吹。另一类是自能灭弧，它完全依靠电弧自身的能量灭弧。目前，正在把这两种灭弧方式在灭弧过程中恰当地结合起来，充分而合理地利用能量形成新的灭弧装置。

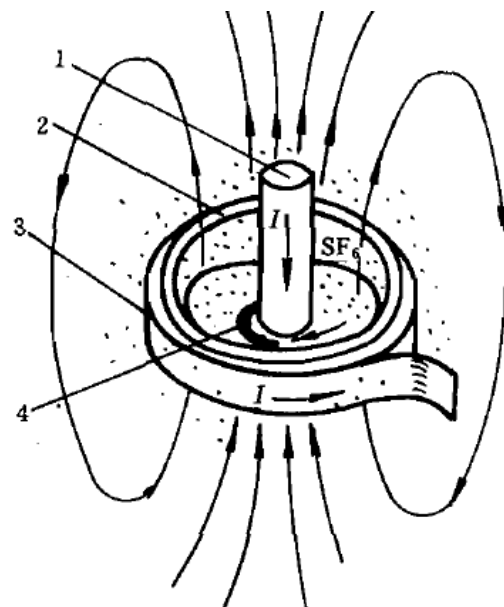


图 2.32 六氟化硫横向气吹灭弧方式

1—电极；2—短路线圈；3—磁场线圈；4—电弧

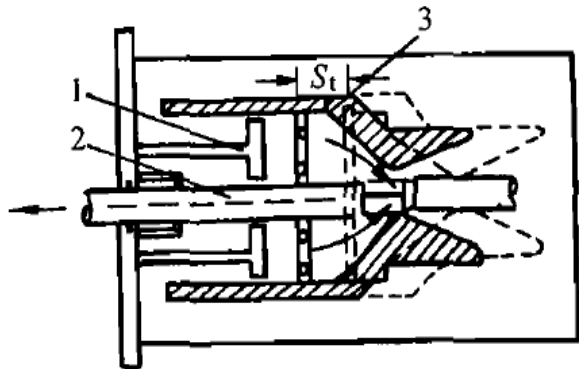
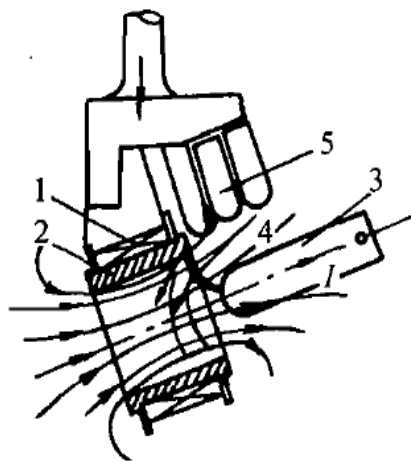
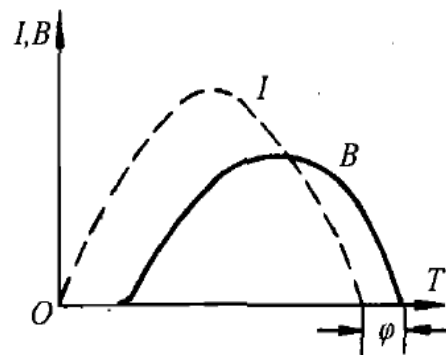


图 2.33 单压力式气吹灭弧装置工作原理

1—活塞；2—动触杆；3—压气罩及喷口



(a)



(b)

图 2.34 旋弧式灭弧装置

1—线圈；2—铜套；3—动触杆；4—电弧；5—静触指

## (2) SF<sub>6</sub>断路器的典型结构

六氟化硫断路器在电力系统中得到了广泛应用。根据电网对断路器的要求和使用场合的不同，六氟化硫断路器通常分为输电用、配电用和发电机端保护用断路器。前一类断路器均采用单压气吹灭弧装置，后两类一般采用旋弧或旋弧加辅助气吹灭弧装置。

### ① LW6-220型SF<sub>6</sub>断路器

LW6-220型SF<sub>6</sub>断路器为瓷瓶支持敞开式结构。灭弧室被密封在瓷套管1内，并固定安装在支持瓷瓶上。断路器的出线端和静触头座2相连，动触杆3通过传动机构4、连杆5和断路器的操作箱相连接。操作箱内装有气动操作机构。支持瓷瓶不仅起支持灭弧室的作用，而且使高电压导电部分和断路器机座绝缘。密封瓷套管两端可并联电容器，以改善断口间的电压分布，并降低恢复电压起始上升速度，提高开断能力。

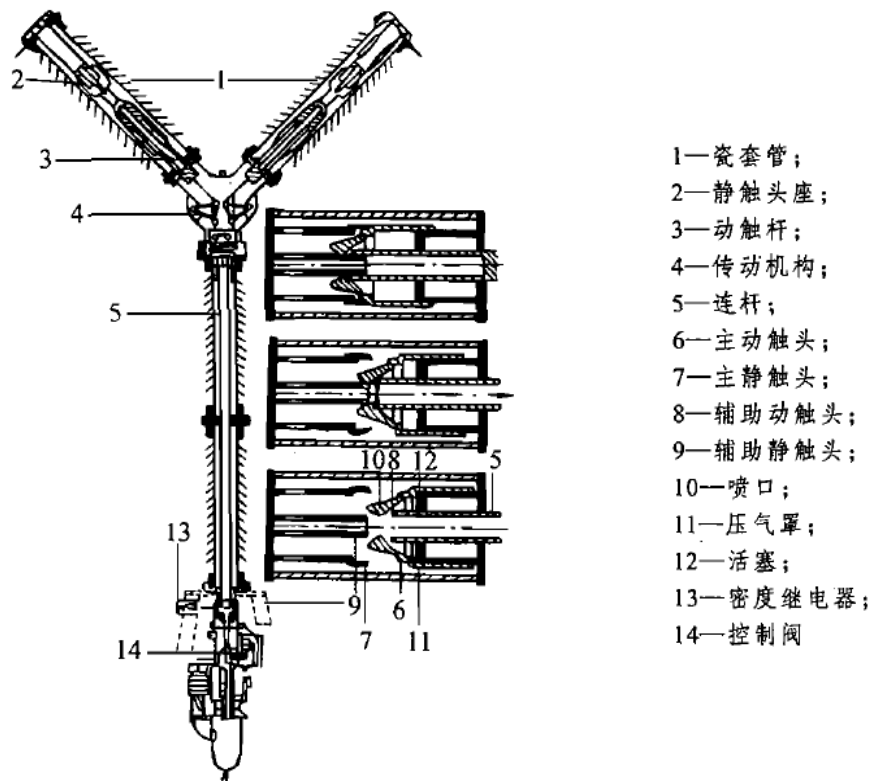


图 2.35 敞开式六氟化硫断路器

灭弧室采用双向气吹变开距式，其灭弧过程示于图2.35中。灭弧室内由主动、主静触头6、7组成主导电回路，以及由辅助动、静触头8、9组成的弧触头回路，前者仅通过电流，而电弧的燃烧与熄灭是在辅助触头上，这样可以提高主触头的载流能力和使用寿命。动、静辅助触头均采用空心导管，头部镶有耐弧材料。喷口10采用聚四氟乙烯材料制成。六氟化硫气体密度继电器13用以监视断路器的工作压力。

此类断路器的额定电压为220 kV(单个灭弧室的额定电压为110 kV)，开断电流为40-50 kA，额定电流可达4000A。SF<sub>6</sub>工作气压为0.65MPa，闭锁压力为0.5Mpa。当环境温度低至-50° C使用时，可采用混合气体(SF<sub>6</sub>和N<sub>2</sub>)为绝缘、灭弧介质。其灭弧室能方便地串联组合，构成110 kV、220 kV和更高电压等级的断路器。

此类断路器结构较简单，用气量少，金属用量少，组合性强，价格也适宜，适合我国现行变电站的使用;但该断路器不能自带电流互感器，抗振性能欠佳。

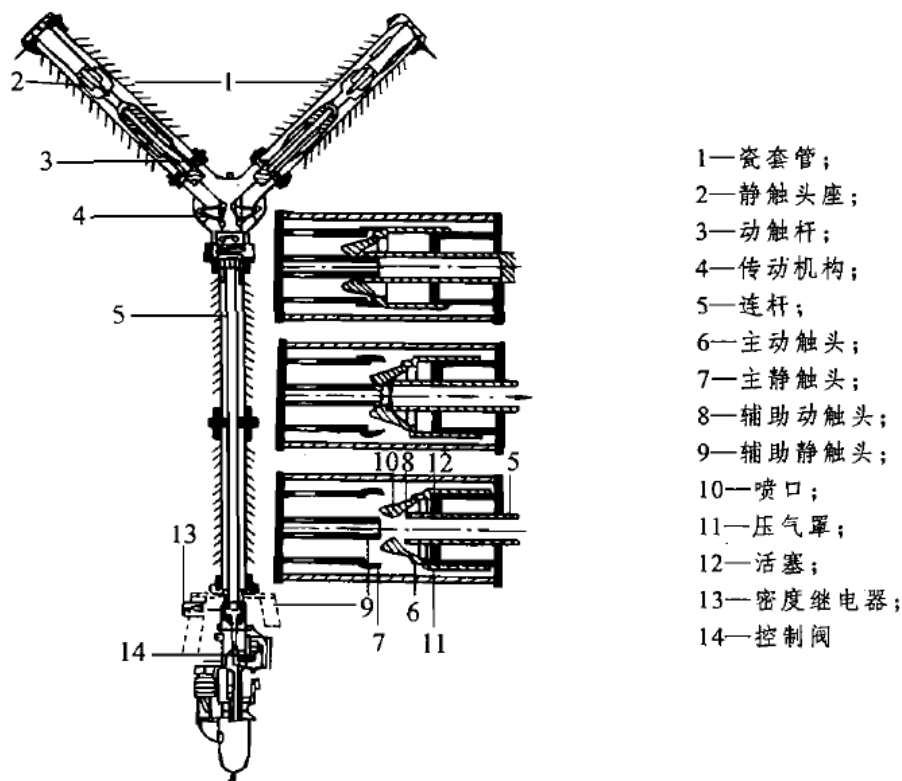


图 2.35 敞开式六氟化硫断路器

## ② LNI-27.5型SF<sub>6</sub>断路器

LNI-27.5型SF<sub>6</sub>断路器是电气化铁路牵引变电所广泛采用的断路器之一。这是一种压气式SF<sub>6</sub>断路器，其中3-5个大气压用以维持绝缘的需要。

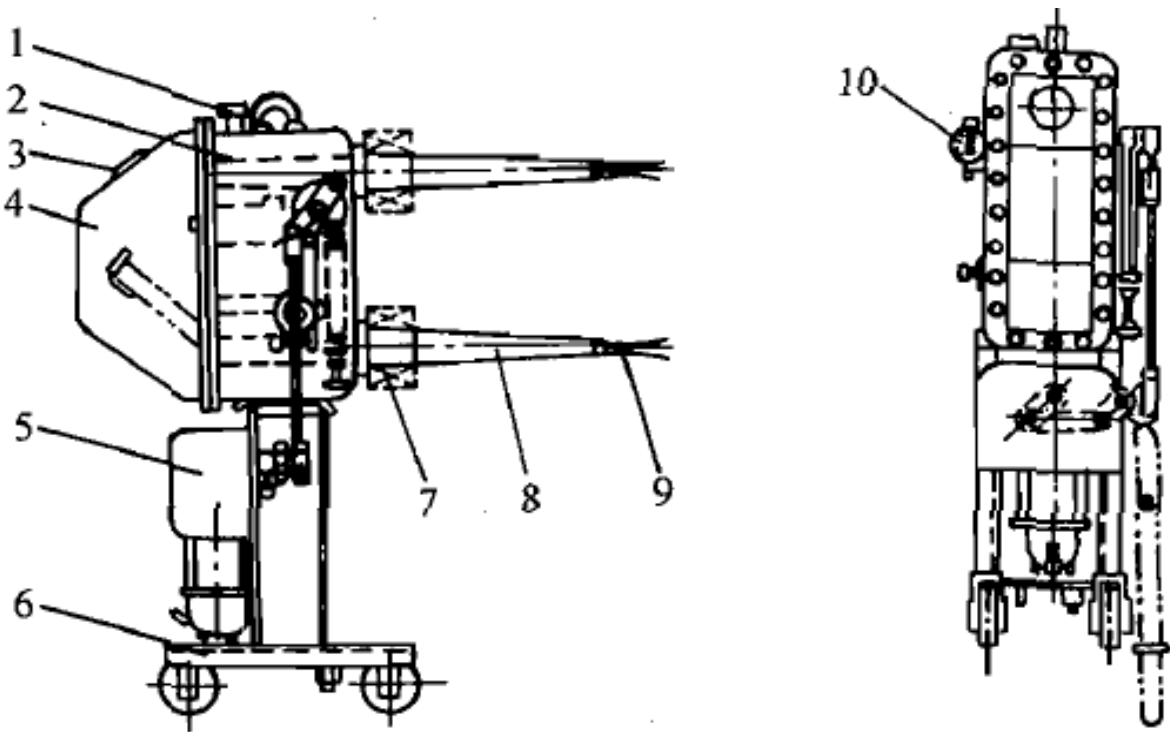


图 2.36 LNI-27.5 型 SF<sub>6</sub> 断路器

1—安全阀；2—箱体；3—观察窗；4—箱盖；5—操作机构；6—车架；7—电流互感器；  
8—绝缘套管；9—隔离触指；10—气压表



在合闸状态，这时工作电流由工作静触头1及工作动触头2导通。当断路器开始分闸时，这时工作触头1及2首先分离，熄弧静触头3和动触头4还保持接通，电弧尚未发生，但由于连杆机构的作用，压气活塞6已开始向上运动，压缩气缸5中的SF6气体。电弧产生后的熄弧过程如图所示，这时熄弧触头分离，在断口间隙产生电弧，而压气活塞6已将气缸中的SF6气体大量压缩，高压的SF6气体从断口的静触头喷嘴处大量喷出，从而使电弧迅速熄灭。当车架6退出后(见图236)，隔离触指和电路分离，断路器本体完全处于无电状态，所以检修比较方便。

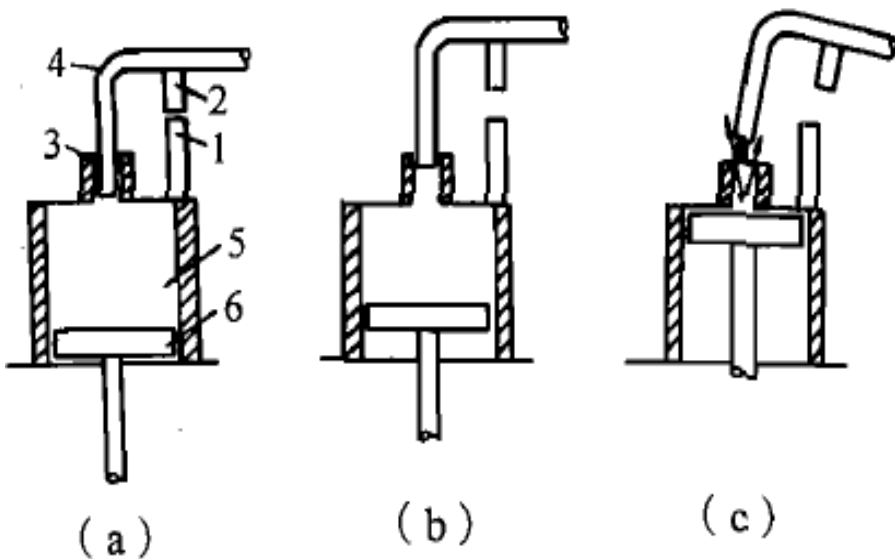


图 2.37 SF<sub>6</sub>压气式断路器开断过程示意图

由于牵引变电所接触网故障频繁，而SF6断路器具有允许开断次数多的优点，所以，牵引变电所馈线侧断路器曾广泛采用SF6断路器。



### 3. 真空断路器

利用真空作为绝缘及灭弧手段的断路器，称为真空断路器。真空断路器近年来不断发展对高中压开关行业产生了巨大的冲击，在3-35 kV电网中占据了举足轻重的地位。目前，许多国家都在致力于将真空断路器用于高压和超高压电网中的研究。

#### (1) 真空间隙的击穿特性

##### ① 真空间隙的击穿机理

真空断路器的触头置于 $10^{-2}$ Pa以上的真空中，其中每立方厘米内只有 $3.4 \times 10^{12}$ 个气体分子，电子的自由行程达26m以上，它比一般真空断路器触头间隙(几毫米到几十毫米)大得多，因此，即使真空间隙中存在自由电子也不可能由于电子和分子发生碰撞游离导致间隙击穿。所以，真空间隙的击穿机理必然只同电极情况有关。目前，关于真空间隙的击穿机理是正在发展的研究课题，有许多不同的说法，比较普遍的有场发射引起击穿和微粒引起击穿两种。



- ◆ **场发射引起击穿。**这一学说认为，电极表面不可能是绝对光滑的，总是存在着大量的微小凸起和尖端。当电极加上电压时，这些凸起和尖端的顶部将产生很高的电场强度，从而引起强场发射，使间隙中流过一定数量的电子电流。此电子电流通过两个途径使间隙击穿：
- 一是强场发射的电流流过电极表面的微小凸起和尖端时，由于电流密度高，使得它们熔化和蒸发，在间隙中产生大量的金属蒸气，电子在向阳极运动的过程中穿过金属蒸气时使金属蒸气游离，引起间隙击穿。
  - 二是强场发射的电子由电场加速后轰击阳极，使阳极表面释放气体、熔化和蒸发，电子再将这些气体和金属蒸气游离，引起击穿。



◆ **微粒引起击穿。**这一学说认为，电极表面存在金属微粒。这些微粒可能是机械加工留下的金属屑、电弧熔化或金属汽化后生成的金属微粒，也可能是强电场从金属内部拉出的金属丝状物。它们通常与电极本体结合得不太牢固，在电场作用时，在静电力作用下可能被加速，从一电极向另一电极运动。在运动过程中，微粒不断受到强场发射的电子流的轰击，温度不断升高，所带的电荷量也不断增大。因此，当微粒飞近相对的电极时，有可能因温度很高而蒸发成金属蒸气，以及由于微粒和电极之间电场很强而发射电子。另外，如间隙中电场足够强，则因微粒此时已积有相当大的动能，在微粒和电极相撞后，此动能转变为热能，也可能使微粒本身蒸发。通过这些方式产生的蒸气若被电子所游离，则将引起间隙击穿。

*实际上，这两种机理可能是同时存在而不一定是单独起作用。对于小间隙(10mm以下)，场发射说的分析与实验比较接近；而较大间隙，微粒说比较适合。真空间隙的击穿主要与真空间隙距离、真空度、触头(电极)材料、触头表面状况等因素有关。*



## ② 真空绝缘的“老炼”作用

一个新的真空间隙在进行试验时，最初的击穿电压值往往较低，随着试验次数的增多，击穿电压渐增，而且会最后稳定在一定值上。这种绝缘强度因放电过程而增大的现象就是“老炼”作用。

“老炼”就是消除电极表面的微观凸起、杂质的缺陷的过程，“老炼”对电极表层材料的纯化作用是很重要的。如果在“老炼”过程中保持抽气，把蒸发的气态产物抽走，则可以获得更纯净的真空间隙及电极表面，这对提高间隙长期稳定的绝缘强度是很有效的。



## (2) 真空电弧的特性

真空中的电弧与气体中的电弧有本质的不同。在气体电弧中，是气体被游离产生载电粒子；在真空中，电极间气体非常稀薄，不存在气体游离的问题，弧柱中存在的载电粒子，主要来自金属蒸气分子的游离。因此，**真空电弧实质上是金属蒸气中的电弧**，它的性质视电极材料的不同而有差异。

**真空电弧有两种类型：扩散型与集聚型**。一般来说，扩散型电弧的电弧电流小于几千安(小电流)，当电流超过几千安(大电流)，即发展为集聚型电弧。在同一真空间隙中，电弧电流变化时，这两种类型电弧的转换与电极材料、电极大小及形状有关，也与电流变化率及外界磁场有关。



## ① 扩散型电弧(小电流电弧)的物理特性

扩散型电弧一般存在于电弧电流小于几千安时。对于铜电极，当电弧电流小于100A时，通常阴极上只有一个阴极斑点，弧隙中只有一个电弧。电弧呈圆锥形，锥顶即阴极斑点，不存在阳极斑点，此电弧在电极表面上随机运动。试验表明：阴极斑点由于面积很小，电流密度很大，其温度可达电极材料的沸点。它不仅向弧隙蒸发大量的金属蒸气，而且同时喷射大量的电子和正离子，形成一股喷射力很强的等离子流。真空电弧即是依靠这些金属蒸气和等离子流而存在的。

当电弧电流增大时，扩散型电弧分裂成许多并联的支弧。每一支弧都有自己的阴极斑点和弧锥，相邻的弧锥可以部分地重叠。这些支弧的阴极斑点大致均匀地散布在电极表面上，同时由电极中心沿半径方向向电极边缘运动。当某一支弧到达电极边缘后，它便熄灭，随之电极中心部分的某一支弧又分裂出一个支弧来进行补充。正因为这种形态的真空电弧具有如此的运动特性，所以被称为扩散型。当电弧电流为交流时，由于电流随时间变化，支弧数也随时间变化。



## ② 集聚型电弧(小电流电弧)的物理特性

当电弧电流增大到超过一定值(如铜电极约10000A)时，真空电弧的各个支弧将不再向电极四周扩散，而是开始向中心聚拢，最后成为只有一个阴极斑点的电弧，集聚后的阴极斑点以很小的速度随机运动或者不运动。触头的电腐蚀速度迅速上升，阳极出现斑点，它和阴极斑点此时不仅同样蒸发金属蒸气和喷射等离子流，甚至可能直接向弧隙喷射金属颗粒或液滴，因而使弧隙中金属蒸气和等离子体密度大大增大，气压大大升高，电弧电压也突然上升。此时电弧的外形和特性基本上已和高气压下的电弧相同，这通常称为集聚型电弧。

真空电弧一旦变成集聚型电弧，如果不采取其他特殊措施，则因弧隙中带电粒子密度很高，在电流过零后来不及扩散，以及阴极斑点熔区厚度较深来不及冷却，还可能发射金属蒸气和带电粒子，造成弧隙的介质恢复强度上升慢而不能熄弧。所以，对一般触头可以认为，真空电弧由扩散型转变为集聚型的电流就是弧隙的极限开断电流。



### (3) 真空灭弧的基本原理与灭弧室结构

#### ① 真空交流电弧过零后的介质强度恢复

真空交流电弧的熄灭与其他交流电弧一样，主要决定于电流过零后弧隙介质强度的恢复。真空电弧电流过零后介质强度的恢复速度与下列情况有关：

**①过零瞬间，弧隙中的蒸气密度；②电流过零后，电弧的热状态，也即继续发射蒸气及带电粒子的能力。**

扩散型电弧表面温度很低，同时由于阴极斑点在电极表面上迅速扩散运动，它所经过的位置加热时间短，熔区厚度不深，在交流电流过零时，这些区域基本上已不再喷射金属蒸气和带电粒子，加上灭弧室中真空本身具有使弧隙中金属蒸气和带电粒子迅速扩散的作用，所以，真空弧隙在交流电流过零后，在极短的时间内(us级)就可以建立起很高的介质恢复强度，使电弧不致重燃。集聚型电弧将造成弧隙的介质恢复强度上升缓慢，不容易熄弧。



## ② 横向磁场与纵向磁场中真空电弧的熄灭特性

如果不采取提高灭弧能力的措施，真空开关的开断能力也是有限的。例如，铜电极的开断能力只能达到8-15kA。为了提高真空开关的开断能力，目前在真空断路器中采用的灭弧原理有：

- ◆ **垂直于电弧弧柱方向加一横向磁场，使电弧弧根不断地在电极上运动，而不停止在一处燃烧。**这时，即使出现集聚型电弧，它的温度以及在电极上烧熔的面积和深度都将大大降低。使阳极斑点的冷却时间常数由几毫秒甚至几十毫秒降至十分之几毫秒。这样，在电流过零期间，由阳极斑点发射的金属蒸气和带电粒子大为减少，而且冷却快，可以提高弧后介质恢复速度，阻止过零后电弧重燃。电弧受横向磁场的作用不断地运动，冷却作用加强，也可以使电流由幅值降到零值时，电弧由集聚型向扩散型的转变加快，使在过零期间，电弧早已处于扩散型状态。
- ◆ 顺着弧柱的方向加一纵向磁场，提高产生阳极斑点的临界电流，降低电弧电压，阻止阳极斑点的出现。



### ③ 真空交流电弧过零后的介质强度恢复

灭弧室的主体是一个抽真空而密封的硬质玻璃(或高氧化铝)陶瓷外壳3, 外壳的中间部分与可阀环7焊接成一个整体, 灭弧室的气体压力在 $10^{-2}\text{Pa}$ 以下。

屏蔽罩5焊在可阀环7上, 静触头6焊在导电杆上, 静导电杆焊在右端盖上, 端盖又与外壳焊在一起。动触头4焊在动导电杆1上, 动导电杆与波纹管2一端焊牢, 波纹管的另一端与左端盖焊接, 左端盖又与外壳焊在一起。为了不使金属蒸气凝结到波纹管上, 波纹管外也套有屏蔽罩, 左端盖上装有均压环。分合闸时, 通过动导电杆运动, 拉长或压缩波纹管, 而不致破坏灭弧室的真空度。波纹管大都用单层不锈钢制造。

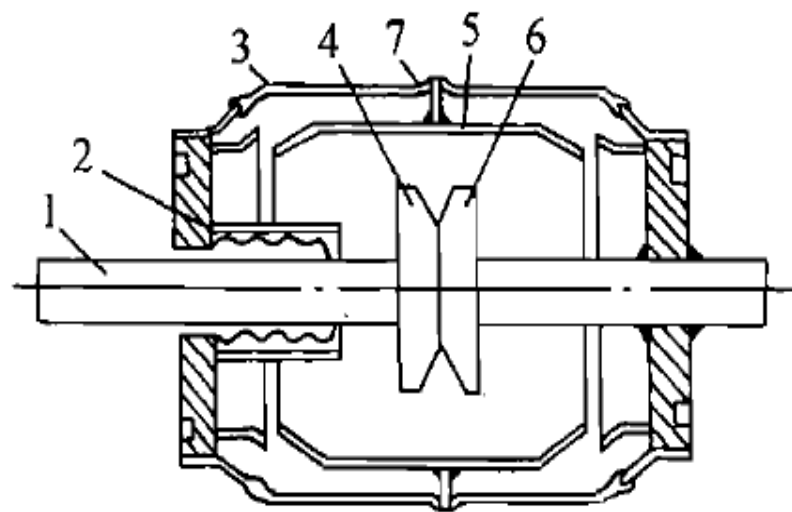


图 2.41 真空灭弧室的结构

- 1—动导电杆; 2—波纹管; 3—玻璃外壳;  
4—动触头; 5—屏蔽罩; 6—静触头;  
7—可阀环

屏蔽罩采用导热性能好的材料制造，常用的材料为无氧铜、不锈钢和玻璃，其中铜是最常用的。

屏蔽罩的主要作用是：

- ◆ 冷凝和吸附燃弧时产生的金属蒸气和带电质点，增大开断能力；同时保护外壳的内表面，使其不受污染，确保必要的内部绝缘强度。
- ◆ 屏蔽罩的结构和布置应尽可能使灭弧室内的电场和电容分布均匀对称，以获得良好的绝缘特性。

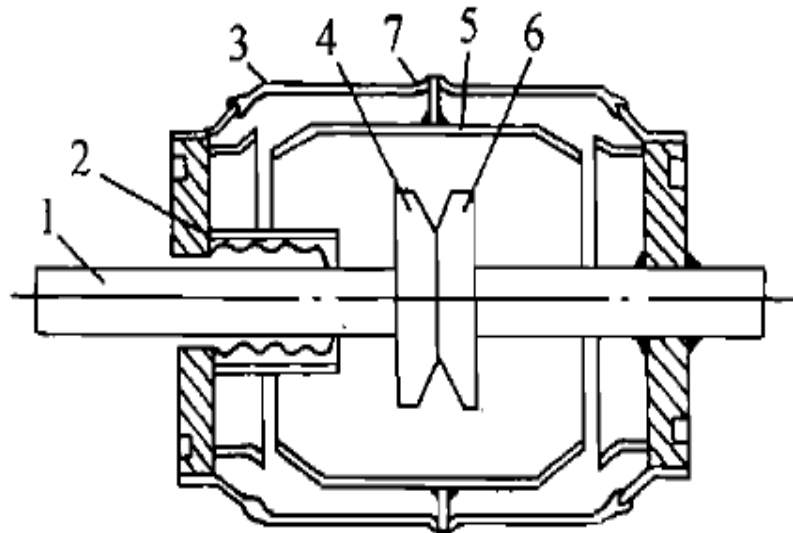


图 2.41 真空灭弧室的结构

- 1—动导电杆；2—波纹管；3—玻璃外壳；  
4—动触头；5—屏蔽罩；6—静触头；  
7—可阀环



## (4) 真空断路器的触头结构与材料

### ① 触头结构

真空断路器的触头结构对开断性能的影响甚大。目前，国内外采用的触头结构形式主要有四种：

- ◆ **圆盘平板式对接触头**。触头形状为中间有凹坑的圆盘形。经触头的电流路线呈U形，有微弱的横向磁吹作用，使电弧沿径向向外缘移动，避免局部过热而烧损。这种触头结构简单，易加工，机械强度高，但开断电流小，一般极限开断电流在10 kA以下。

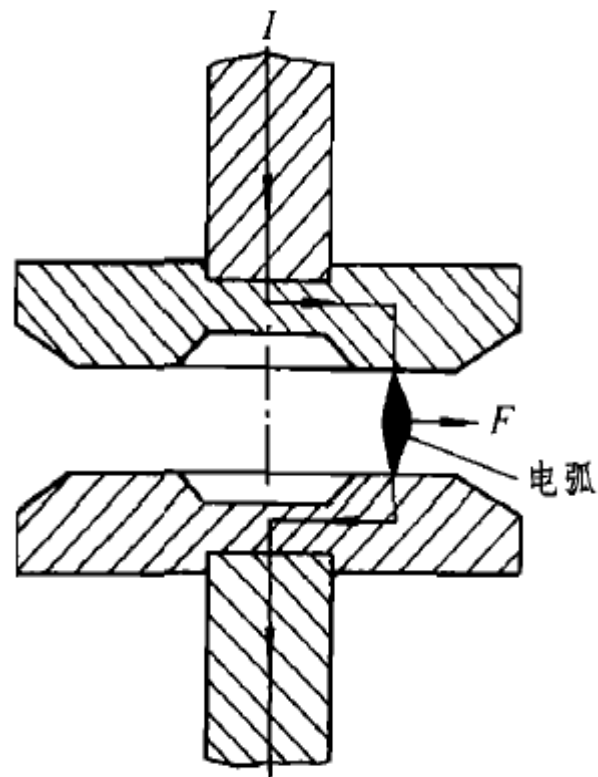


图 2.42 圆盘形触头

- ◆ **螺旋瓣形触头。**触头的形状如图 2.43 所示。其中接触部位是一个环形的突起部分，外层部分开有一系列螺旋形槽，形成螺旋形的花瓣。这些螺旋形槽在动触头和静触头上是向相反的方向开的，因此，装配好后，从触头杆部位的一端看出，两个触头上槽的方向是一致的。在合闸位置时，中间环形突起部位接触，电流由此部位通过。圆盘的外层部分，在触头闭合时，相互是不接触的。

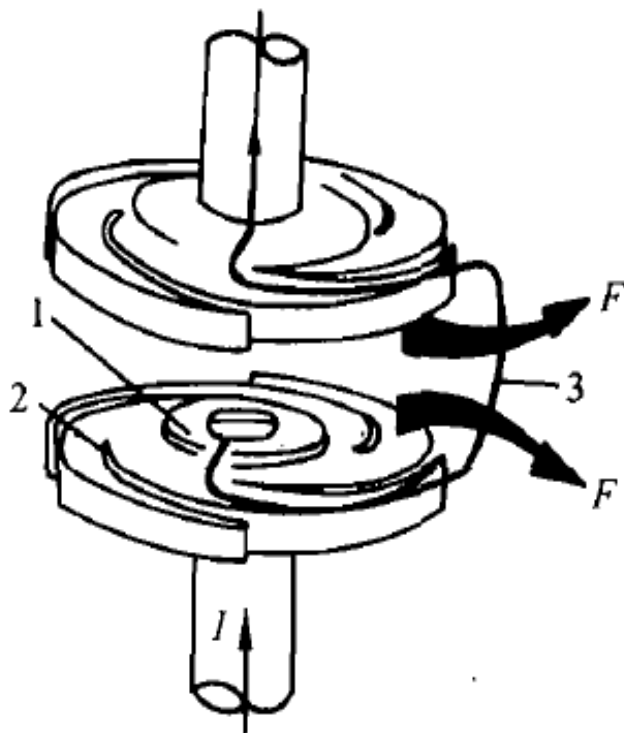


图 2.43 螺旋瓣形触头

1—主触头；2—弧触头；3—电弧及电流路径； $F$ —电动力

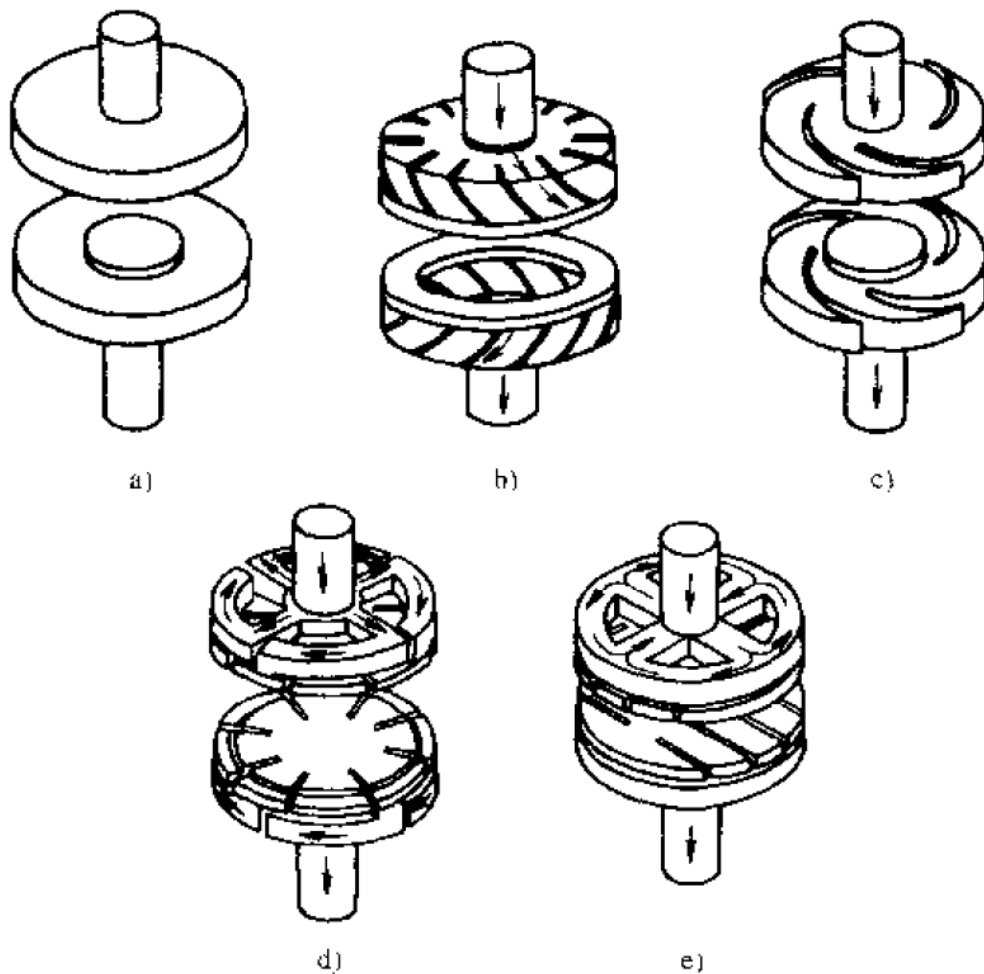


图 7-3 各种触头结构形状

- a) 平板触头    b) 杯状横磁场触头    c) 螺旋横磁场触头  
d) 纵磁场触头 1    e) 纵磁场触头 2



如果开断的电流很大，电弧是集聚型的，此时电弧只有一个弧柱，一对阴极斑点和阳极斑点。由于电弧电流流过触头的环形突起部位时，电流的路径产生曲折，电流的磁场对电弧产生电动力作用，使电弧弧根从中部接触部位移向周围的瓣形区域，使电流的弯曲程度更大。

由于开有螺旋形槽，电弧电流中有一个圆周的切线分量，建立了一个径向磁场，驱使电弧沿着触头周边按照螺旋槽所引导的方向旋转，不会停在一个位置。这样，降低了阳极斑点的温度和冷却时间常数，促使集聚型电弧在过零前提前向扩散型转换，提高了开断能力，在额定电压为10kV时，开断电流可达40-60kA。

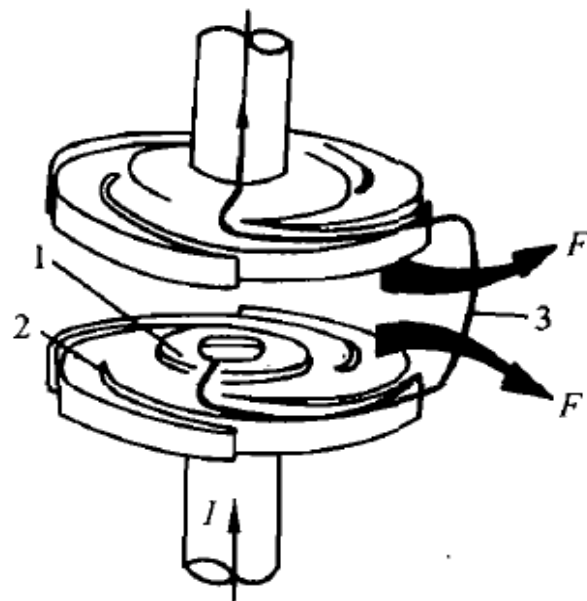
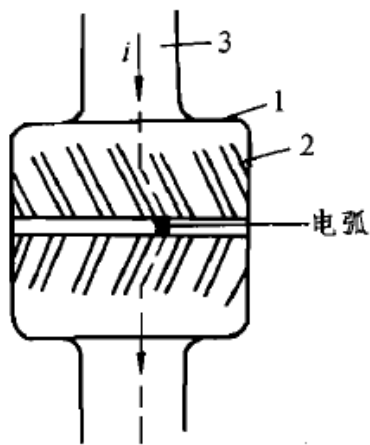


图 2.43 螺旋瓣形触头

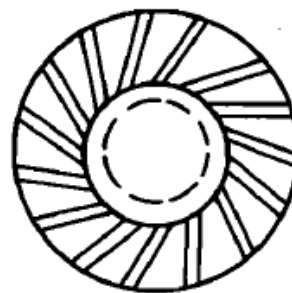
1—主触头；2—弧触头；3—电弧及电流路径；F—电动力



◆ **带斜槽的杯形触头。**在杯体1的壁上开有一系列倾斜的槽2，使杯壁变成许多触指，动、静触头上斜槽的方向相反。导电杆3焊在杯底上。当关合电路时，杯壁的端面相互接触，电流在各触指上流过。开断电路时，如电流较小，电弧为扩散型，则形成许多支弧均匀分布在各触指上，同时在各斜槽中电流产生的横向磁场作用下，电弧按反向运动的规则在端面上旋转运动；如果电流较大，电弧成集聚型，则按正向运动的规则在端面上旋转运动。由于在杯状触头中，电弧无论是扩散型还是集聚型都是在端面上旋转运动，所以它的电磨损率较小，极限开断电流较大。



(a) 杯状触头



(b) 一个触头的上视图

图 2.44 杯状触头和一个触头的上视图

1—杯体；2—斜槽；3—导电杆



◆ **带纵向磁场触头。**真空断路器利用外加磁场线圈来产生灭弧的纵磁场，在结构上存在着困难。首先是线圈电流小、匝数多，线圈本身的散热问题大，且不容易在电极间产生足够的磁通密度，而且线圈的绝缘问题也不易解决。由导电杆1向上流的电流 $i_0$ 沿半径方向等分为四，各自流过线圈2的圆周部分，再向上汇合到线圈型电极及触头片上。这样，四个分支电流 $i_1 = i_2 = i_3 = i_4 = i_0/4$ ，分别流过线圈2的四段圆周部分，总起来形成一匝励磁电流为 $i_0/4$ 的纵向磁场励磁线圈。开断电流时由于流过线圈的电流在弧区产生一定的纵向磁场，其与电弧电流的相互作用可使电弧电流分散，从而能大大提高触头的开断能力和电气寿命。

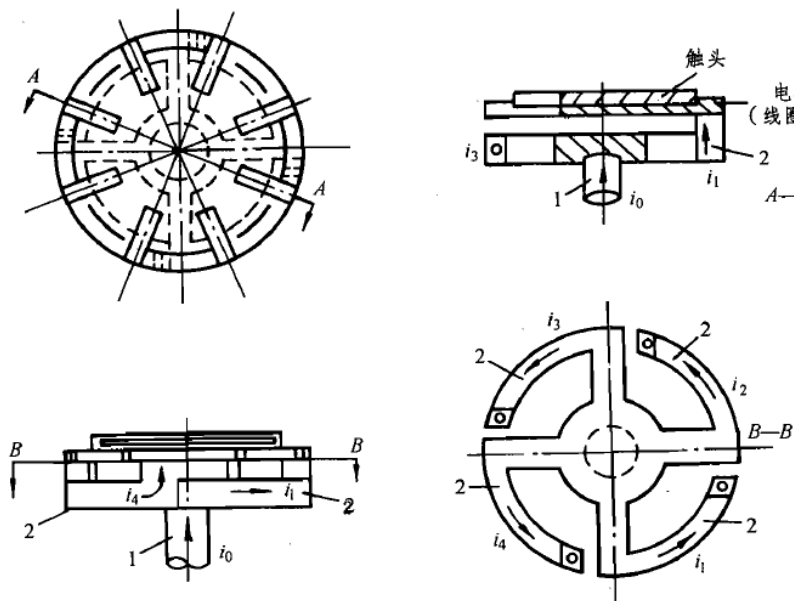
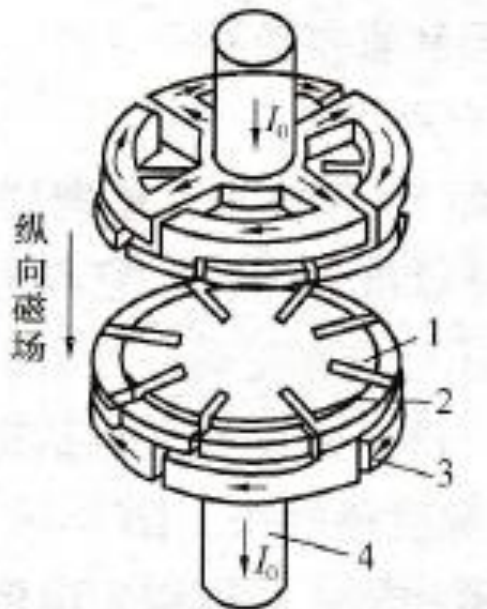


图 2.45 纵向单极磁场的触头结构

1—导电杆；2—线圈



## ② 触头材料

触头材料对真空灭弧装置的工作性能起着决定性的作用。它除了满足导电率、导热率、机械强度、接触电阻和电磨损速率的要求外，还应满足：

- ◆ 高的开断能力；
- ◆ 小的截断电流；
- ◆ 高的击穿电压；
- ◆ 高的抗熔焊能力；
- ◆ 低的含气量。

这些要求有些是相互矛盾的，例如，为了减小截断电流，希望触头材料的蒸气压高些、导热率小些，但是这样的材料对提高弧隙的开断电流却不利。采用单一的材料很难满足上述多方面的要求，所以目前作为开断大电流的真空灭弧装置的触头材料多采用合金，通常是铜铋、铜铟、铜铬、铜钴铋、铜锑等合金材料。我国目前生产的真空断路器采用的触头材料是铜铋银、铜铝镁、铜铝铁等合金，现正在开展铜铬合金的研制与应用。



## (4) 截流现象与截流过电压

### ① 截流现象

在小电流真空交流电弧中，当电流从幅值下降到一定数值时，电弧呈现不稳定现象；当电流进一步下降时，即出现截流。当电流下降到 $I_c$ 时，发生振荡；到 $I_0$ 时，发生截流，电流提前过零。 $I_c$ 称为不稳定电流， $I_0$ 称为截流值。真空开关在开断感性小电流时，要产生截流现象，并出现截流过电压。

截流现象的发生，主要与小电流电弧中阴极斑点的物理过程有关。定性地说，当电流值变小时，阴极斑点放出的金属蒸气量少，当蒸气的密度低于维持电弧燃烧所必需的密度值时，电弧变得不稳定，电流波形出现振荡，最后电流被截断。影响真空断路器截流水平的主要因素有触头材料、触头运动的速度及断路器回路参数。

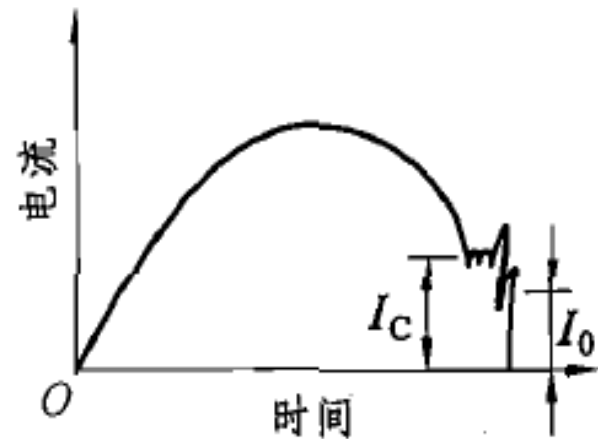


图 2.47 小电流真空电弧的电流波形



用真空断路器断开电路时，可能会出现操作过电压，主要形式有：截流过电压，所谓截流就是强制交流电流在自然过零前突然过零的现象，由于电路中存在电感，因此会发生过电压；切断电容性负载时的过电压，这是因熄弧后间隙发生重击穿而引起的。所以，真空断路器的重击穿几率越小越好；高频多次重燃过电压，断路器开断感性电流时，当间隙被击穿后电弧重燃，因电路参数影响，击穿后电流中含有高频分量。当高频分量的幅值很大时，受其影响，间隙被反复击穿，使负载侧的电压不断升高，从而产生较高的过电压。



## (4) 截流现象与截流过电压

### ② 截流过电压

#### ◆ 截流值所产生的过电压。

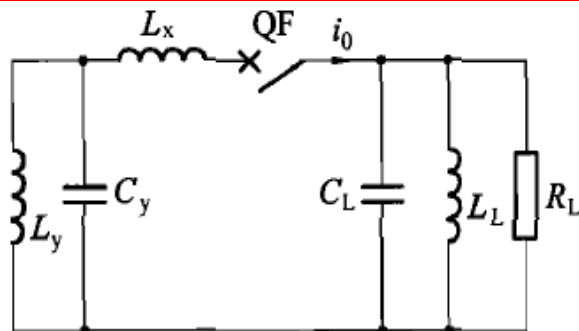


图 2.48 分析开断感性小电流的物理过程的等效线路

$$W = (1/2)L_L I_0^2 + (1/2)C_L u_0^2。$$

截流发生后，电磁能量  $W_{Lm}$  要放出来对  $C_L$  充电，变换成静电场能量，因此，出现在  $C_L$  上的最高电压（也就是线路中最大过电压）可以用 (2.40) 式表示：

$$u_{Lm} = \sqrt{I_0^2 Z_L^2 + u_0^2} \quad (2.40)$$

式中， $Z_L = \sqrt{L_L / C_L}$ ，为电感负载的波阻抗。

对于空载变压器来说， $Z_L$  较大， $u_0$  较小，故开断过程中的过电压值可以表示为

$$u_{Tm} \approx I_0 Z_T = I_0 \sqrt{L_T / C_T} \quad (2.41)$$

式中， $L_T$ 、 $C_T$  及  $Z_T$  分别为空载变压器的有关参数。

(2.40) 式及 (2.41) 式所示的电压值为截流后断口不被击穿而出现在电容  $C_L$  上的最大电压值。



## (4) 截流现象与截流过电压

### ② 截流过电压

- ◆ **多次重燃过电压。**在触头分离的间隙不大时，电流过零，暂态恢复电压将可能使电弧重燃，产生高频振荡。如果灭弧室开断高频电流的能力很强，则将产生多次重燃过电压。这种过电压的最高值将为触头间隙的绝缘能力所限，但高频电压和电流的上升率，将严重危害电动机和变压器的匝间绝缘。
- ◆ **视在截流过电压。**这种过程发生在真空断路器开断三相电流时。当首开相电流开断时，由于截流过电压的发生，引起重燃，产生高频振荡。这一高频电流感应到其他尚未断流的两相内，与原来的工频电流叠加，产生人工零点，使该两相的电流提前开断。这种情况下，三相中的电流几乎是同时开断的，产生很高的过电压。产生视在过电压的条件是：①负载电流的瞬时值小于高频振荡电流的幅值；②灭弧室开断高频电流的能力很强。



## (4) 截流现象与截流过电压

③ 防止截流过电压的措施电压：可以根据灭弧室的性能以及回路的参数采取不同的保护措施，包括：

- ◆ 选用截流水平低的触头材料；
- ◆ 采用低电涌真空灭弧室。这种灭弧室既可降低截流过电压，又可提高开断能力。
- ◆ 在负载端并联电容。既可以降低，也可减缓恢复电压的上升陡度。
- ◆ 在负载端并联电阻和电容。它不仅能降低截流过电压及其上升速度，而且在高频重燃时可使振荡过程强烈衰减，对抑制多次重燃过电压有较好的效果，电阻一般选 $100\sim 200\Omega$ ，电容选 $0.1\sim 0.2\mu\text{F}$ 。
- ◆ 串联电感。可降低过电压的上升陡度和幅值。
- ◆ 安装避雷器。用它限制过电压的幅值。

## (5) 真空断路器典型结构结构

### ① ZN4-10型真空断路器

ZN4-10型真空断路器用于10 kV三相系统。该断路器主要由真空灭弧室2、支持绝缘子7、操动机构8及支持框架4等部分组成。

每相的灭弧室2及上、下接线板由两只支持绝缘子固定在支持框架4的前方；灭弧室的静导电杆与上接线板固定连接，动导电杆则通过软连接与下接线板连接，上、下接线板间有绝缘加强杆支撑，其灭弧室采用横向磁吹灭弧；操动机构8(电磁式或弹簧式)和分闸弹簧都装在框架上，主轴3上的拐臂的一端连有绝缘拉杆6，拉杆的下端则通过另一拐臂、连杆及绝缘件与动导电杆连接。为了防止相间发生弧光短路，在相间加有绝缘隔板9。

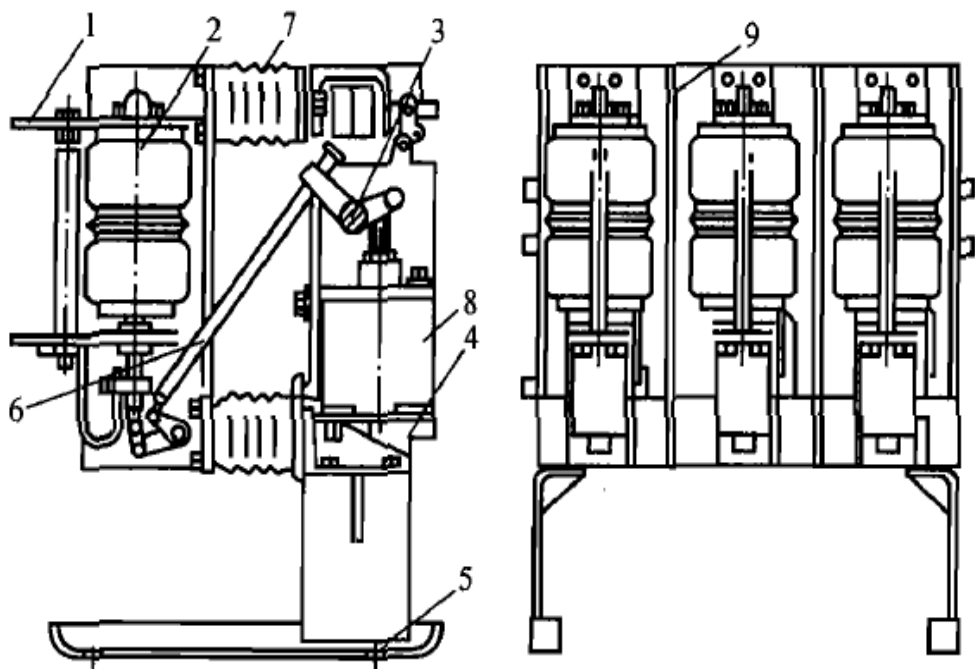


图 2.49 ZN4-10 型真空断路器结构图

1—接线板；2—灭弧室；3—主轴；4—支持框架；5—安装孔；6—绝缘拉杆；  
7—支持绝缘子；8—操动机构；9—绝缘隔板



## (5) 真空断路器典型结构结构

### ① ZN4-10型真空断路器

断路器在合闸位置时，上拐臂的另一端被操动机构拉紧并锁住，维持断路器在合闸状态；当操动机构接到分闸命令时，结构被释放，在分闸弹簧作用下，上、下拐臂均逆时针旋转，断路器分闸。

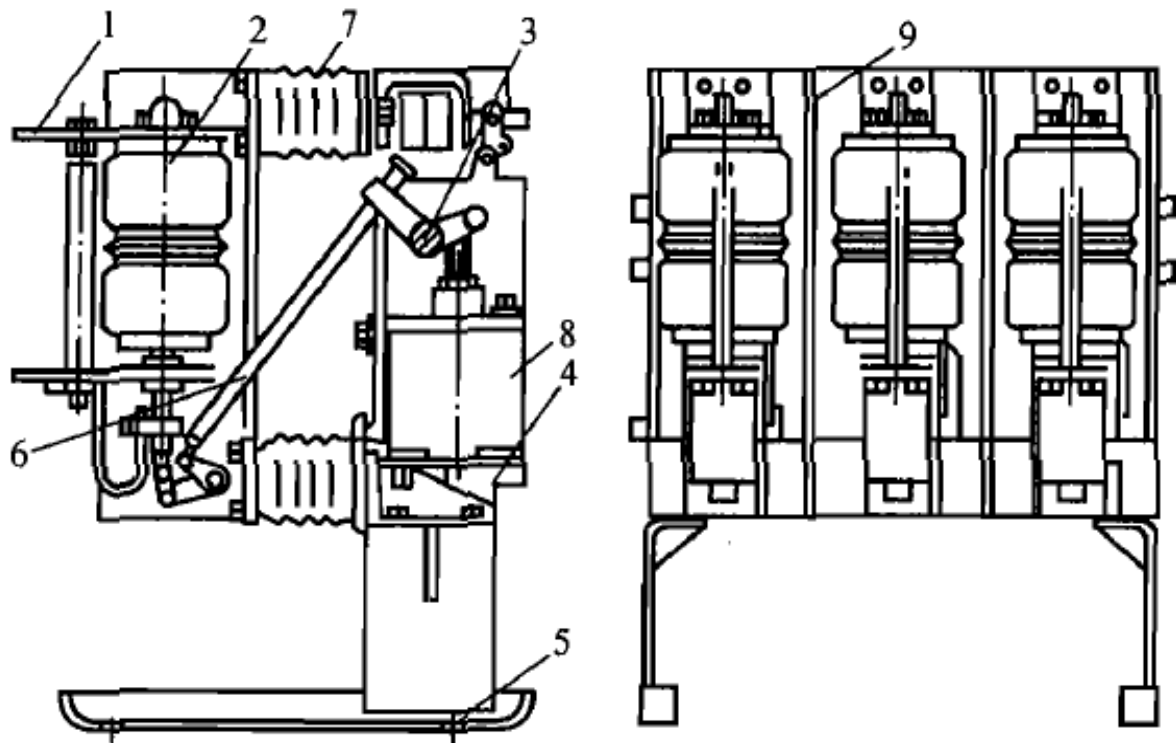


图 2.49 ZN4-10 型真空断路器结构图

1—接线板；2—灭弧室；3—主轴；4—支持框架；5—安装孔；6—绝缘拉杆；  
7—支持绝缘子；8—操动机构；9—绝缘隔板

## (5) 真空断路器典型结构结构

### ① ZN-27.5型真空断路器

目前，电气化铁路牵引变电所馈线侧断路器广泛采用真空断路器，主要产品有ZN-27.5、ZW-27.5及ZW55型真空断路器，前二者主要用于直接供电及BT牵引供电系统，后者主要用于AT牵引供电系统，都是单相结构。

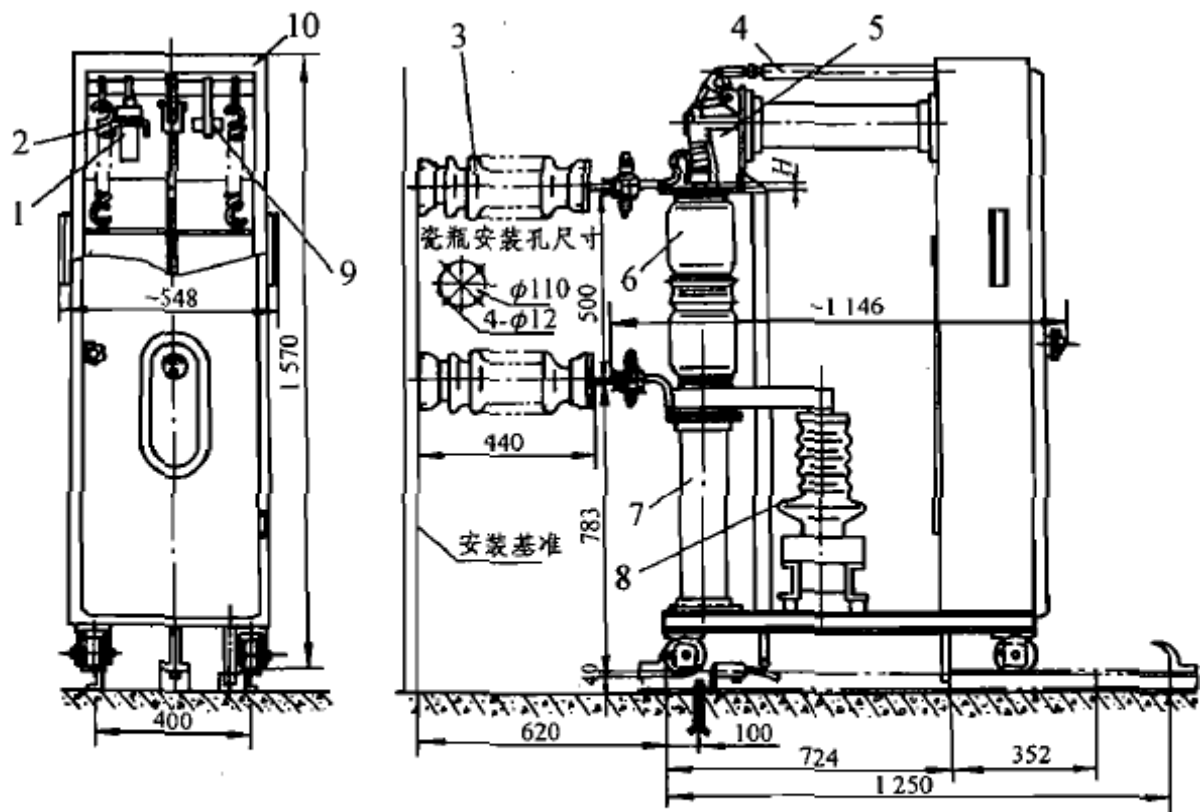


图 2.50 ZN-27.5 型真空断路器结构

1—油缓冲器；2—分闸弹簧；3—瓷瓶；4—拉杆；5—支架；6—真空灭弧室；  
7—绝缘座；8—LCZ-35 电流互感器；9—止位器；10—铁架

ZN-27.5型真空断路器主要由装在小车上的本体和CD2-40G操动机构组成，有带与不带LCZ-35型电流互感器和隔离插头的小车式结构两种形式。断路器所有零部件均装在小车上，小车的一侧固定着操动机构，另一侧通过支座绝缘子固定着真空灭弧室。操动机构通过本体的传动部分使真空灭弧室的动、静触头实现分、合闸操作，以切断或接通高压电路。

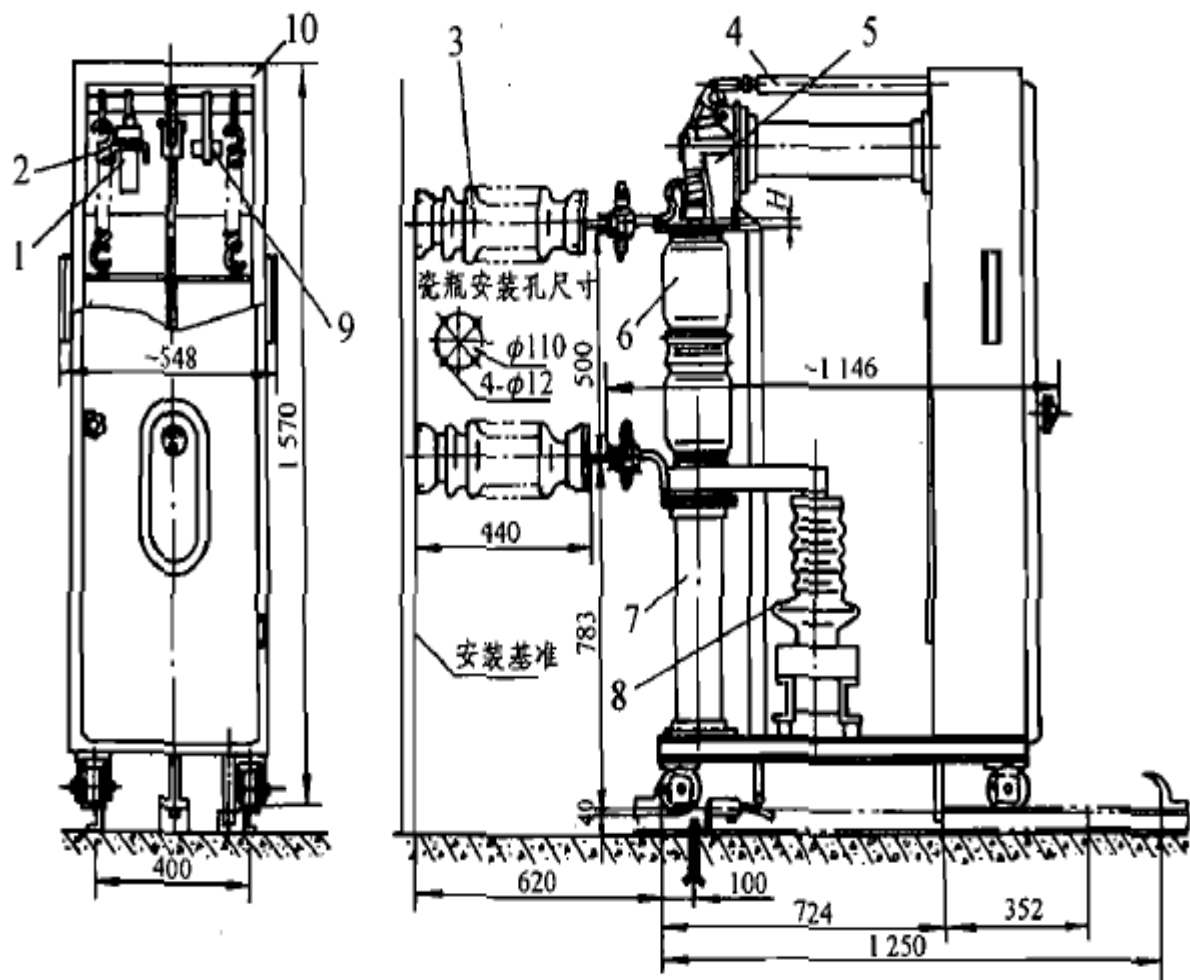


图 2.50 ZN-27.5 型真空断路器结构

1—油缓冲器；2—分闸弹簧；3—瓷瓶；4—拉杆；5—支架；6—真空灭弧室；  
7—绝缘座；8—LCZ-35 电流互感器；9—止位器；10—铁架



## 六. 高压断路器的操动机构

高压断路器依靠所配属的操动机构来完成分、合闸操作。操动机构接受变电所中央控制室或遥控调度站的命令信息，使断路器进行分、合闸操作；接受继电保护的命令信息，使断路器进行保护性分闸以切除故障。根据操动机构的任务，它一般由下列几个部分组成：

- ① **能量转换机构**。它把执行操作的赋能变成机械能，使操动机构按规定目的发生机械运动，这种机构如电磁铁、电动机、液压传动工作缸、压缩空气工作缸等；
- ② **联动机构**。它把能量转换机构所变成的机械运动能用来促使断路器的动触头发生按操作目的规定的动作。这种机构多由四边形连杆机构、拐臂、拉杆等组成；
- ③ **保持机构**。它使操动机构完成的操作得以保持，不因瞬时命令信息的消失而不能完成规定目标的任务，这种机构多由动作灵活的机械卡销等组成；
- ④ **释放机构**。它接受操作人员或继电保护系统的命令信息，对保持机构进行反作用，即解除保持。从而使断路器的跳闸弹簧释放能量，使断路器分闸。它多由电磁线圈推动可动铁芯，由可动铁芯打动保持卡销使保持解除来实现。

*根据能量形式的不同，操动机构可以分为手动操动机构(CS)、电磁操动机构(CD)、弹簧操动机构(CT)、电动机操动机构(CJ)、气动操动机构(CQ)和液压操动机构(CY)等。*



## (1) 对操动机构的要求

断路器的全部使命，归根结底是体现在触头的分、合动作上，而分、合动作又是通过操动机构来实现的。因此，操动机构工作性能的优劣，对高压断路器工作性能和质量的优劣以及可靠性起着极为重要的作用。对操动机构的主要要求如下：

- ① **合闸**。操动机构在实际工作条件下，应有足够的能力来带动断路器可靠地关合正常电路和预伏短路故障电路。标志操动机构能力大小的主要指标是其输出的机械功(操作功)。一般10kV断路器需要的操作功约为几百焦耳，而110kV断路器则需要几千焦耳。
- ② **保持合闸**。由于合闸过程中，合闸命令的持续时间很短，而且操动机构的操作力也只在短时内提供，因此，操动机构中必须有保持合闸的部分，以保证在合闸命令和操作力消失后，断路器仍能保持在合闸位置。
- ③ **分闸**。操动机构不仅要求能够电动(自动或遥控)分闸，在某些特殊情况下，应该可能在操动机构上进行手动分闸，而且要求断路器的分断速度与操作人员的动作快慢和下达命令的时间长短无关。



- ④ **自由脱扣**。自由脱扣的含义是指断路器合闸过程中如操动机构又接到分闸命令，则操动机构不应继续执行合闸命令而应立即分闸。
- ⑤ **防“跳跃”**。当断路器关合有预伏短路故障电路时，不论操动机构有无自由脱扣，断路器都应自动分闸。此时若合闸命令还未解除(如转换开关的手柄或继电器还未复位)，则断路器分闸后又将再次短路合闸，紧接着又会短路分闸。这样，有可能使断路器连续多次分、合短路电流，这一现象称为“跳跃”。出现“跳跃”时，断路器将无意义地连续多次合、分短路电流，造成触头严重烧伤甚至引起爆炸事故。
- ⑥ **复位**。断路器分闸后，操动机构中的各个部件应能自动地恢复到准备合闸的位置。
- ⑦ **联锁**。为了保证操动机构的动作可靠，要求操动机构具有一定的联锁装置。常用的联锁装置有：(1) 分合闸位置联锁。保证断路器在合闸位置时，操动机构不能进行合闸操作；断路器在分闸位置时，操动机构不能进行分闸操作。(2) 弹簧操动机构中的位置联锁。弹簧储能没达到规定要求时，操动机构不能进行分、合闸操作。



## (2) 各种常用操动机构的工作原理

- ① **电磁操动机构。**它是利用电磁铁作为断路器合闸和分闸的操作动力。图2.51是国产CD2型电磁操动机构的工作原理图，其中4为合闸电磁铁的动铁芯，断路器需要合闸时，合闸线圈中通以110V或220V的直流电流，电磁吸力使动铁芯上移，推动圆滚2，由圆滚2带动四连杆机构使拐臂1转动，从而带动主驱动轴5转动，断路器合闸。合闸以后，圆滚2应正好被顶至卡销3的顶端，使断路器保持合闸状态，合闸线圈的电流自动切除。

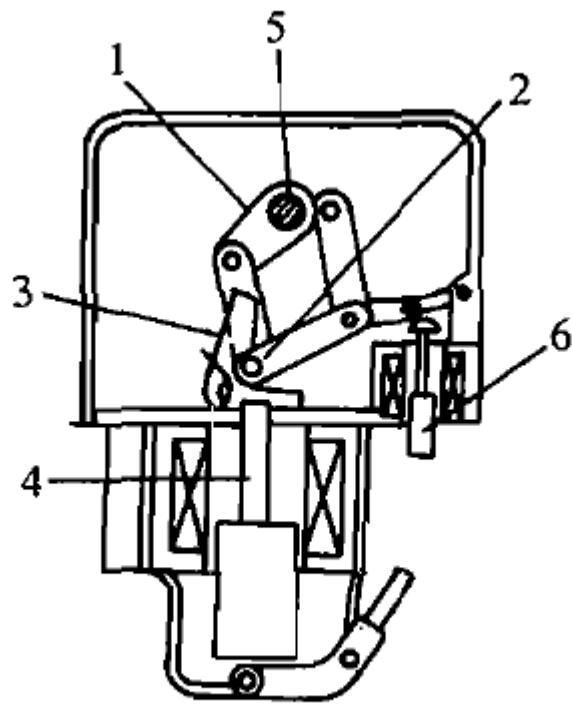


图 2.51 CD<sub>2</sub>型电磁操动机构原理图

断路器进行分闸时，分闸线圈通电，电磁吸力使分闸动铁芯6向上运动，打动连杆使滚子2从卡销3的顶端滑落，主驱动轴5被释放，断路器的分闸弹簧迅速把动触头拉至分闸位置。分闸的命令信息可以由操作人员由中央控制室通过控制键发出，也可以由继电保护装置发出。断路器分闸后，通过安装于操动机构中的辅助接点，使分闸线圈中的电流自动消失。分闸线圈中的电流消失后，分闸电磁铁的动铁芯6自动落下，准备第二次动作。

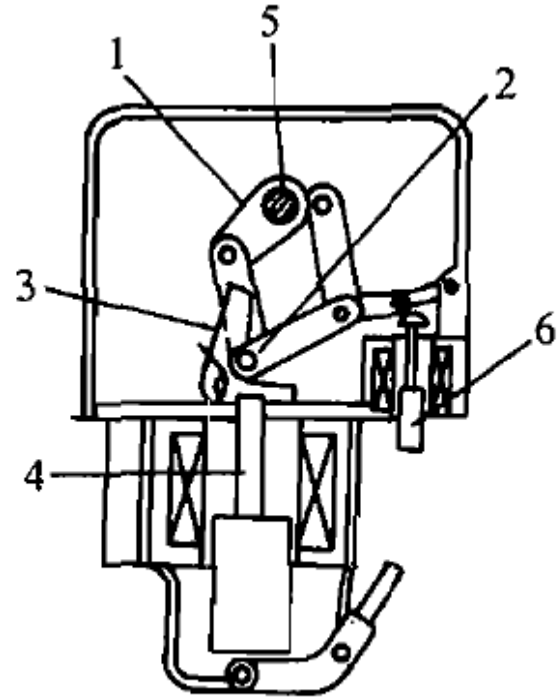


图 2.51 CD<sub>2</sub> 型电磁操动机构原理图

电磁操动机构的优点是结构简单、工作可靠，制造成本较低;缺点是合闸线圈消耗的功率太大，因而用户需要配备价格昂贵的蓄电池组，结构笨重，合闸时间长(0.2-0.8 s)，因此，超高压断路器中很少采用，主要用来操作110kV及以下断路器。



- ② **弹簧操动机构。**利用已储能的弹簧为动力使断路器动作的操动机构称为弹簧操动机构。弹簧储能通常由电动机通过减速装置来完成。对于某些操作功不大的弹簧操动机构，为了简化结构、降低成本，也可用人力来储能。弹簧操动机构的优点是不需要大功率的直流电源；电动机功率小；交直流两用；适宜于交流操作。缺点是结构比较复杂；零件数量多；加工要求高；随着机构操作功的增大，重量显著增加。
- ③ **液压操动机构。**利用液压油作为动力传递的介质。
- ④ **气动操动机构。**利用压缩空气作为能源。
- ⑤ **手动操动机构。**靠手力直接合闸的操动机构。
- ⑥ **电动机操动机构。**利用电动机经减速装置带动断路器合闸的操动机构。
- ⑦ **永磁操动机构。**



# 总结

## 断路器的结构特点

- ◆ 多油断路器。结构简单，制造方便，便于在套管上加装电流互感器，配套性强；耗钢、耗油量大、体积大、重量重；属自能式灭弧结构。
- ◆ 少油断路器。结构简单，制造方便，可配用各种操动机构；比多油断路器油量少、重量轻；采用积木式结构，便于制成各种电压等级产品。
- ◆ 压缩空气断路器。结构比较复杂，工艺和材料要求高；有色金属消耗量大、价格高；需要装设专用的空气压缩系统；操动机构与断路器合为一体；体积和重量比较轻。
- ◆ 真空断路器。灭弧室材料及工艺要求高；体积小、重量轻；触头不易氧化；灭弧室的机械强度比较差，不能承受较大的冲击振动。
- ◆ 六氟化硫断路器。结构简单，工艺及密封要求严格，对材料要求高；体积小、重量轻；用于封闭式组合电器时，可大量节省占地面积。



## 断路器的技术特点

- ◆ **多油断路器。** 额定电流不易做得很大；开断小电流时，燃弧时间较长；开断电路的速度较慢；油量多，有发生爆炸和火灾的危险性。
- ◆ **少油断路器。** 开断电流大，10kV等级可通过加并联回路以提高额定电流；110kV及以上电压等级时采用积木结构；全开断时间较短；增加压油活塞装置加强机械油吹后，提高开断小电流的能力；存在火灾危险。
- ◆ **压缩空气断路器。** 额定电流和开断电流都可以做得很大，适合开断大容量电路；动作快，全开断时间短；快速自动重合闸时断流容量不降低；无火灾危险。
- ◆ **真空断路器。** 可连续多次操作，开断性能好；灭弧迅速，开断时间短；开断电流及断口电压不易做得很高；无火灾危险；开距小，约为同等电压油断路器触头开距的1/10左右；所需操作能量小；开断时产生的电弧能量小；灭弧室的机械寿命和电气寿命都很高。
- ◆ **六氟化硫断路器。** 额定电流和开断电流都可以做得很大；开断性能好，适合于各种工况开断；SF<sub>6</sub>气体灭弧、绝缘性能好，故断口电压可做得较高；断口开距小。



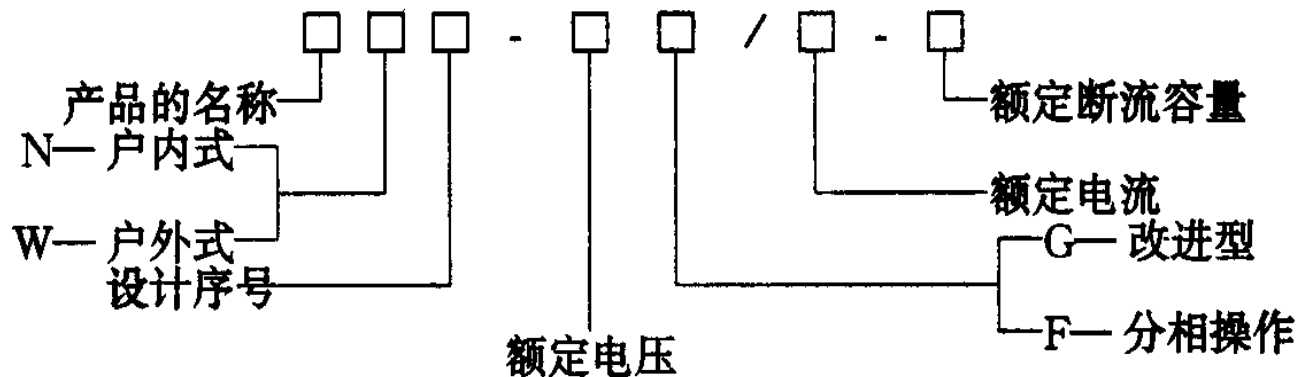
## 断路器的运行维护特点

- ◆ **多油断路器。** 运行维护简单；噪声低；检修周期短；需配备一套油处理装置。
- ◆ **少油断路器。** 运行经验丰富，易于维护；噪声低；油质容易劣化；需配备一套油处理装置。
- ◆ **压缩空气断路器。** 维修周期长；噪声较大；无火灾危险；需要一套压缩空气装置作为气源；运行费用大。
- ◆ **真空断路器。** 运行维护简单，灭弧室不需要检修；噪声低；运行费用低；无火灾和爆炸危险。
- ◆ **六氟化硫断路器。** 维护工作量小；噪声低；检修周期长；运行稳定，安全可靠，寿命长；可频繁操作。



## 断路器的型号

断路器型号主要有以下七个单元组成。



第一单元是产品字母代号：S—少油断路器；D—多油断路器；  
K—空气断路器；L—六氟化硫断路器；Z—真空断路器；  
Q—自产气断路器；C—磁吹断路器；G—隔离开关。

第二单元是装设地点代号：N—户内式；W—户外式。

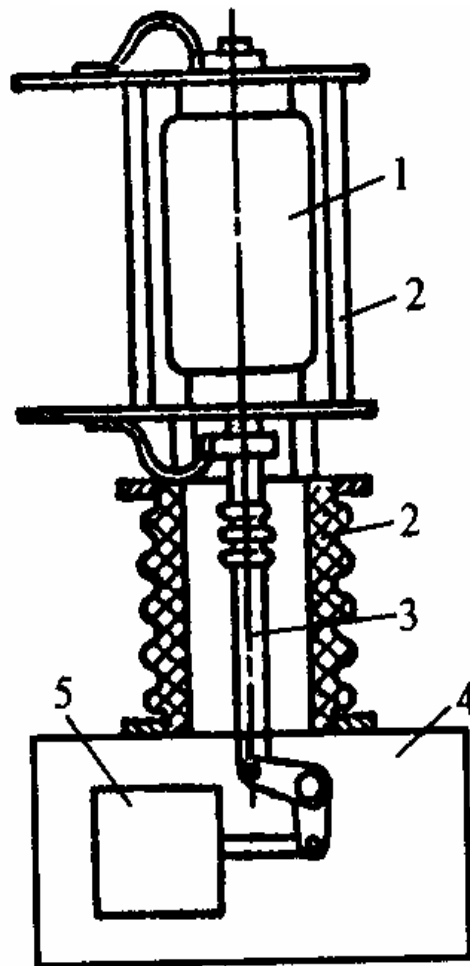
第三单元是设计序号。 第四单元是额定电压，kV。

第五单元是补充工作特性标志：G—改进型；F—分相操作。

第六单元是额定电流，A。 第七单元是额定开断电流，kA。



# SF<sub>6</sub> (六氟化硫)断路器



- 1—开断装置;
- 2—绝缘支撑;
- 3—传动机构;
- 4—基座;
- 5—操动机构



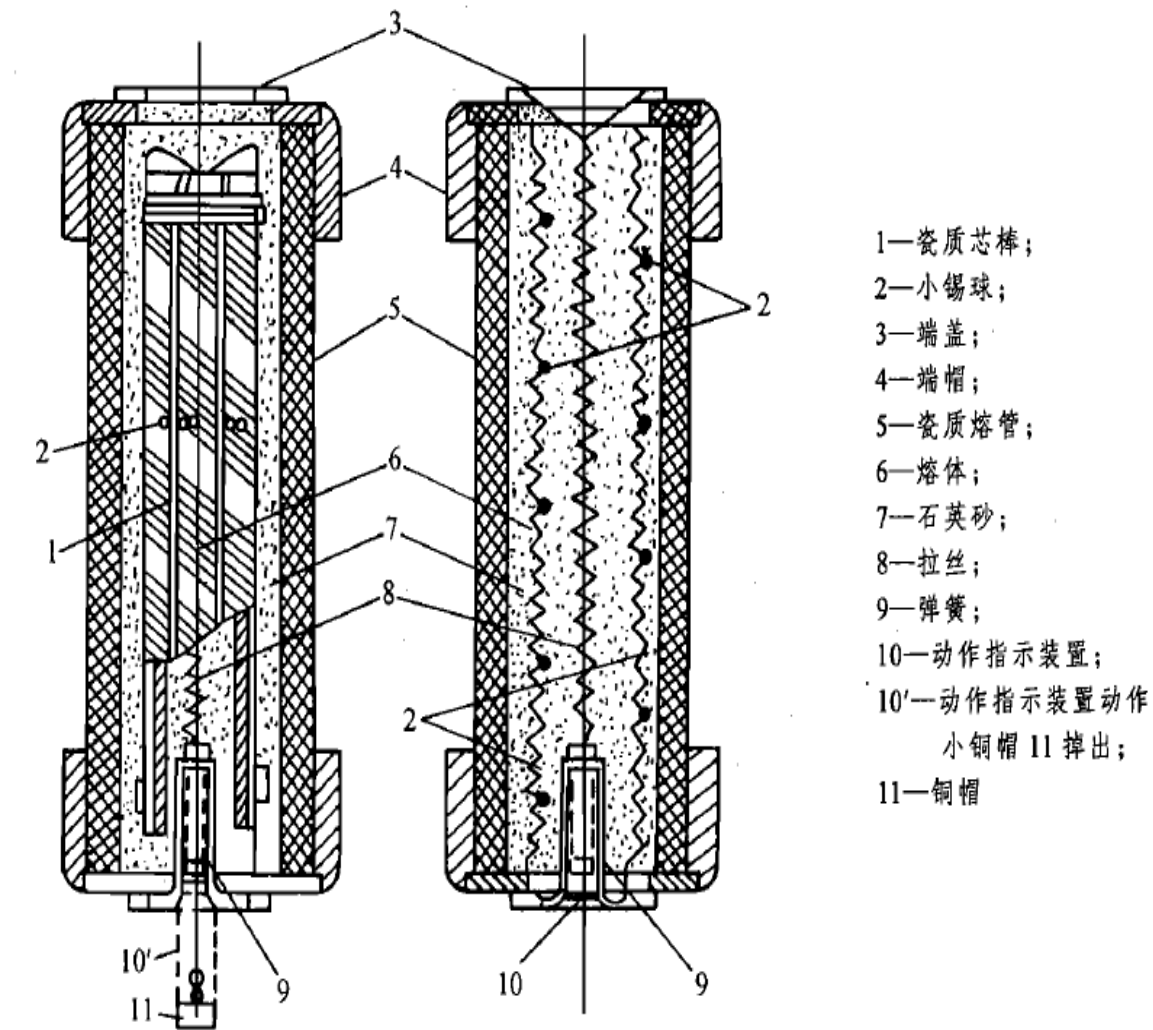
# 七. 熔断器、隔离开关及高压负荷开关

## 1. 熔断器

熔断器是最简单也是最早采用的一种限流元件，常和被保护的电气设备串接于电路中。**熔断器主要由金属熔体、支持熔体的触头和外壳构成**。有些熔断器内还装有特种熄弧物质(如产气纤维管、石英砂等)，用来熄灭熔体熔断时产生的电弧。熔断器的熔体材料有铅、铅锡合金、锌、铜和银等，熔体的熔化温度因材料而异，在熔体上焊上小锡球，大大降低熔体的熔化温度。熔体的截面不同，额定电流不同，熔断的时间也有差别。熔体中流过电流时，熔体发热，只有当通过熔断器的电流大于最小熔化电流时(如过负荷或短路故障)，熔体才能自动熔断，开断电路，完成保护其他电路设备的职能。

熔断器中熔体熔断后，必须停电更换熔体管;熔断器不能作正常的切断和接通电路用，而必须与其他电器配合使用。但由于熔断器结构简单、价格便宜，维护工作简便，在低压(1kV以下)装置中得到了广泛的采用。在高压及中压装置(10-35kV)中不太重要，容量较小的负荷也可以用熔断器来进行保护。

RN型3-35kV户内式高压熔断器可以用来保护电力线路和电力变压器，其中RN2型仅用来保护电压互感器。这种熔断器熔体管的结构如图2.53所示，熔断器的安装情况如图2.54所示。图2.53中熔体由镀银的铜丝制成，铜丝上焊有锡球，熔体管内充有石英砂。短路电流通过时，截面较小的部位首先熔断，然后联锁熔断、汽化，被石英砂冷却和吸附而灭弧。这种熔断器的熔断过程全部都封闭在熔体管内进行。



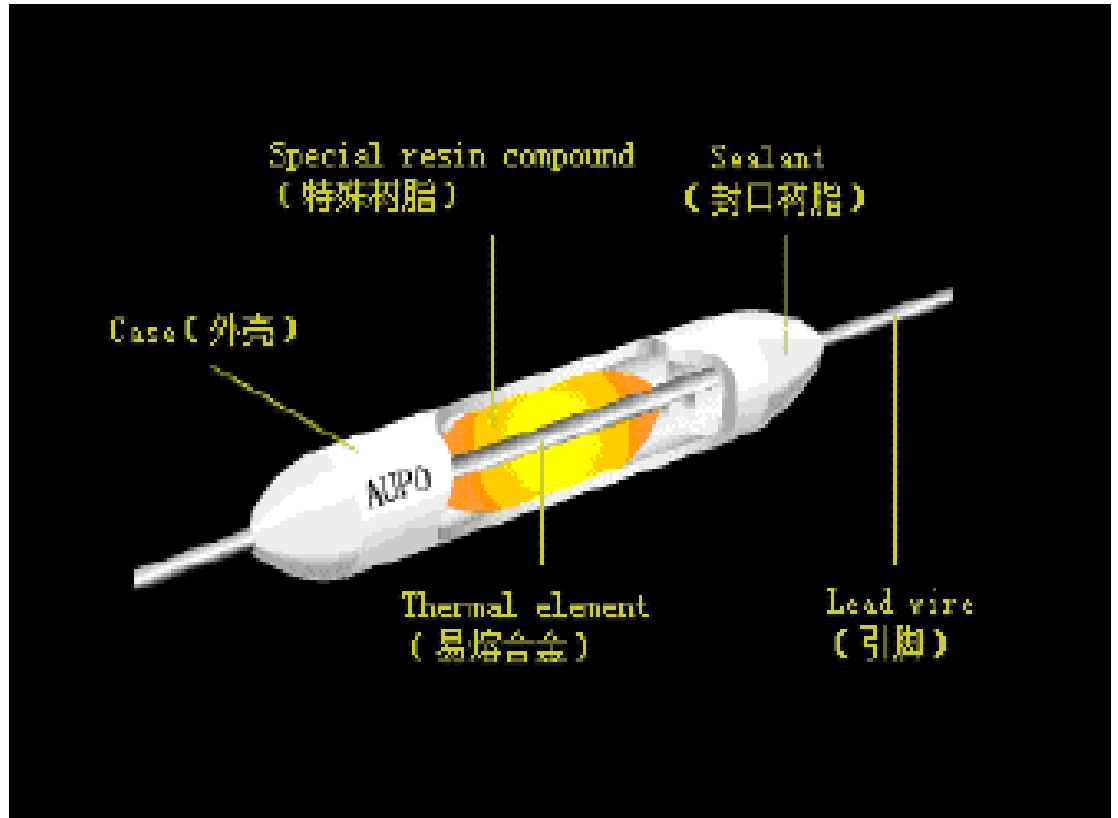
(a) 额定电流 7.5 A 及以下 (b) 额定电流 10 A 及以上

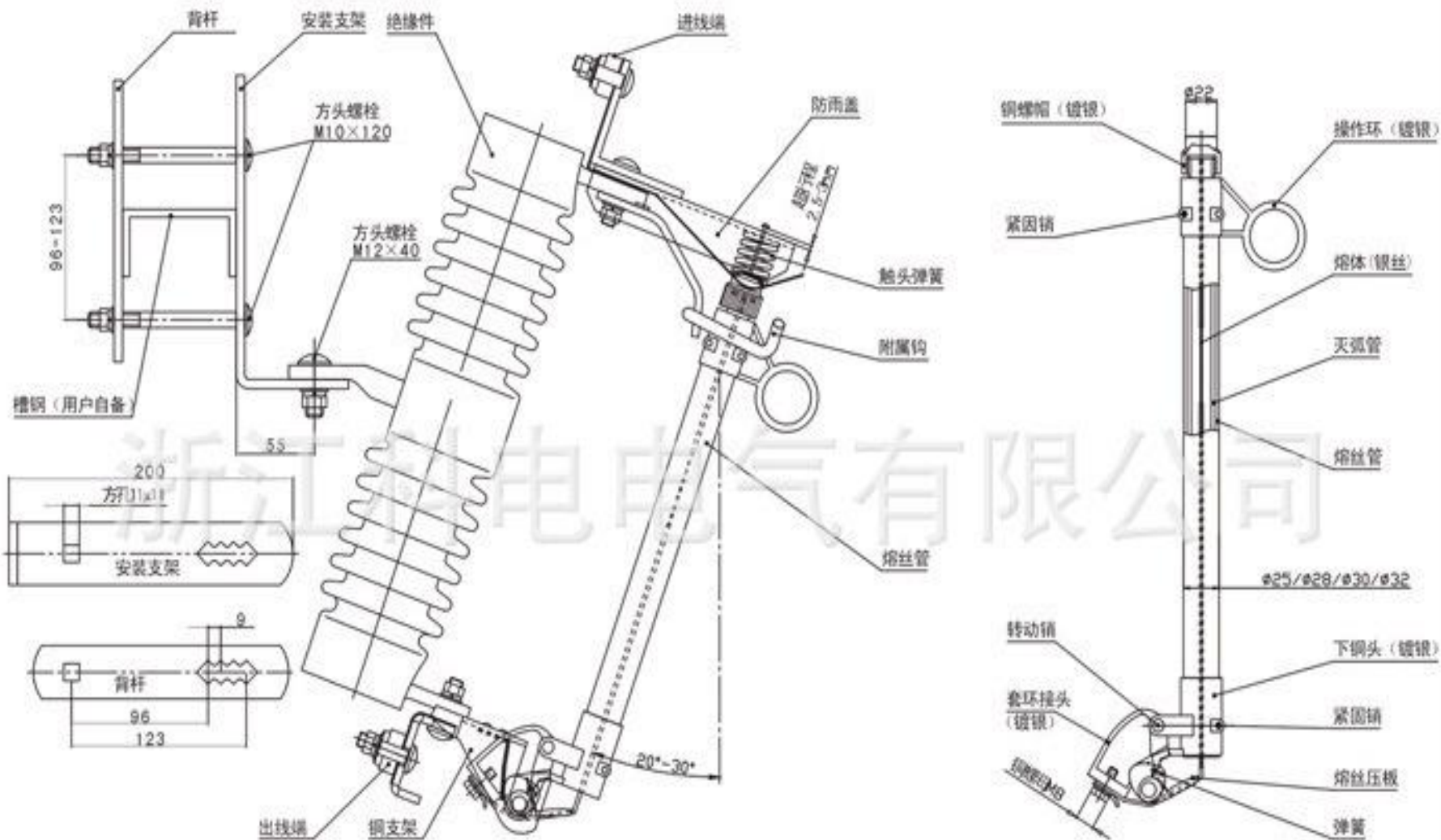
图 2.53 石英砂熔断器



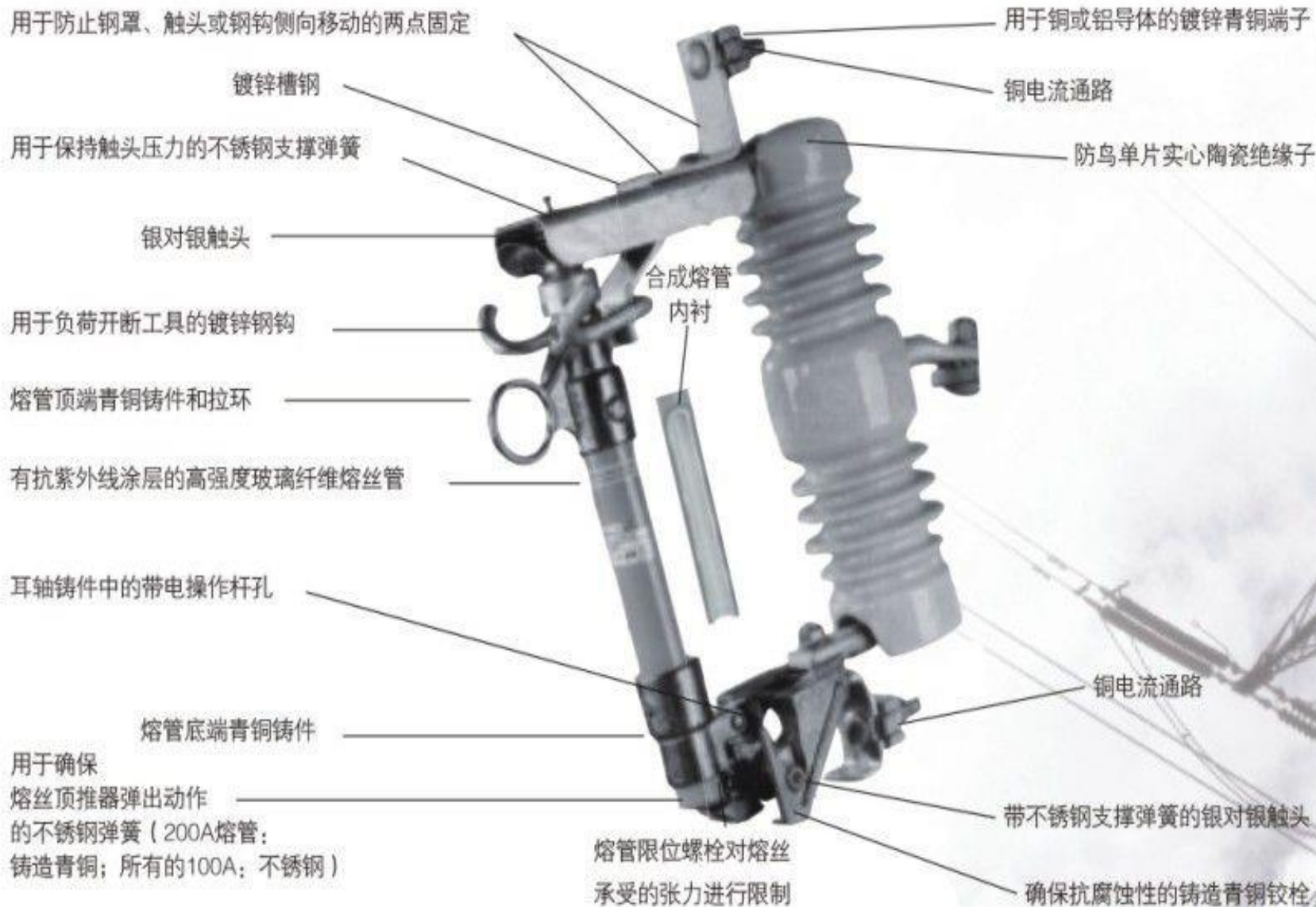
## 高压熔断器的技术参数

- ◆ **熔断器的额定电压。** 它既是绝缘所允许的电压等级，又是熔断器允许的灭弧电压等级。对于限流式熔断器，不允许降低电压等级使用，以免出现大的过电压。
- ◆ **熔断器的额定电流。** 指一般环境温度 ( $\leq 40^{\circ}\text{C}$ ) 下熔断器壳体载流部分和接触部分允许通过的长期最大工作电流。
- ◆ **熔体的额定电流。** 熔体允许长期通过而不致发生熔断的最大有效电流。该电流可以小于或等于熔断器的额定电流，但不能超过。
- ◆ **熔断器的开断电流。** 熔断器所能正常开断的最大电流。若被开断的电流大于此电流时，有可能导致熔断器损坏，由于电弧不能熄灭引起相间短路。





出口跌落式熔断器-安装方式示意图





## 2. 隔离开关

隔离开关是一种没有熄弧装置的开关电器。由于没有熄弧装置，隔离开关不能用于接通和断开负荷电流和短路电流，一般只在电路断开的情况下才能操作。隔离开关在分闸时，动静触头间形成明显可见的断口，绝缘可靠。它的用途是：

- ◆ **隔离电源。**在检修电气设备时用来隔离电压，使检修的设备与带电部分之间有明显可见的断口，以保证检修人员的安全；
- ◆ **倒闸操作。**在改变设备状态(运行、备用、检修)时用来配合断路器协同完成倒闸操作；
- ◆ **接通和断开小电流电路。**用来分、合小电流，可用来分、合电压互感器、避雷器和空载母线，分、合励磁电流不超过2A的空载变压器，关合电容电流不超过5A的空载线路；
- ◆ **隔离开关的接地刀闸可代替接地线，**保证检修工作安全。

隔离开关的种类和形式很多。按装设地点可分为户内式和户外式；按产品组装极数可分单极式(每极单独装于一个座上)和三极式(三极装于同一底座上)；按每极绝缘支柱数目可分为单柱式、双柱式和三柱式；等等。



## ① 对隔离开关的要求

按照隔离开关所担负的任务，应满足的要求为：

- ◆ 隔离开关应具有明显的断开点。
- ◆ 隔离开关断开点之间应有可靠的绝缘。
- ◆ 隔离开关应具有足够的热稳定性和动稳定性。
- ◆ 隔离开关的结构要简单，动作要可靠。
- ◆ 带有接地闸刀的隔离开关必须有连锁机构，以保证先断开隔离开关后，再合上接地闸刀，先断开接地闸刀后，再合上隔离开关的操作顺序。
- ◆ 隔离开关要装有和断路器之间的连锁机构，以保证正确的操作顺序，杜绝隔离开关带负荷操作的事故发生。



## ② 隔离开关的技术参数

- ◆ 额定电压。指隔离开关长期运行时所能承受的工作电压。
- ◆ 最高工作电压。指隔离开关能承受的超过额定电压的最高电压。
- ◆ 额定电流。指隔离开关可以长期通过的工作电流。
- ◆ 热稳定电流。指隔离开关在规定的时间内允许通过的最大电流。
- ◆ 极限通过电流峰值。指隔离开关所能承受的最大瞬时冲击短路电流。



### ③ 隔离开关的分类

- ◆ 按装设地点的不同，可分为户内式和户外式两种。
- ◆ 按绝缘支柱数目，分为柱式、双柱式和三柱式三种。
- ◆ 按动触头运动方式，可分为水平旋转式、垂直旋转式、摆动式和插入式等。
- ◆ 按有无接地闸刀，可分为无接地闸刀、一侧有接地闸刀、两侧有接地闸刀三种。
- ◆ 按操动机构的不同，可分为手动式、电动式、气动式和液压式等。
- ◆ 按极数，可分为单极、双极、三极三种，以及按安装方式分为平装式和套管式等。



## ④ 隔离开关的型号

隔离开关型号、规格一般由文字符号和数字表示：

$\boxed{1} \boxed{2} \boxed{3} - \boxed{4} \boxed{5} / \boxed{6}$

第一单元：产品字母代号，隔离开关用G；

第二单元：安装场所代号，户内用N，户外用W；

第三单元：设计序列顺序号，用数字1、2、3、……表示；

第四单元：额定电压，kV；

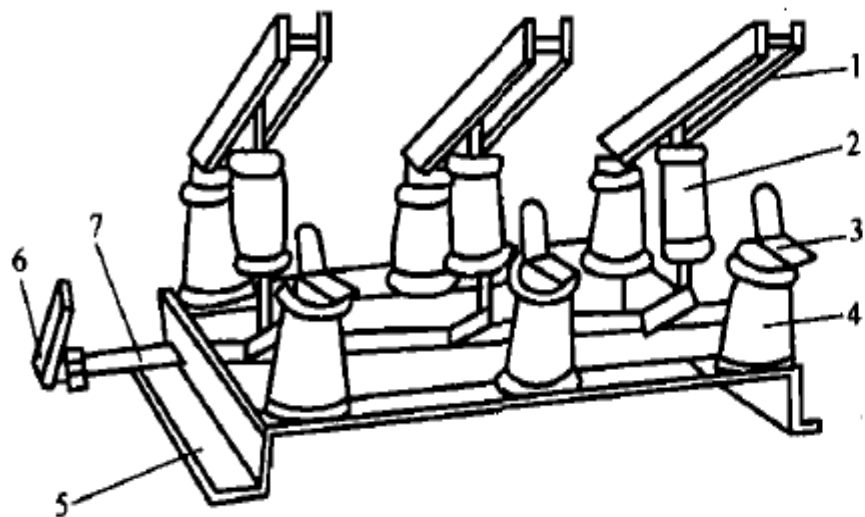
第五单元：其他标志，如T表示统一设计，G表示改进型，D表示带接地刀闸，K表示快分型等。

第六单元：额定电流，A。

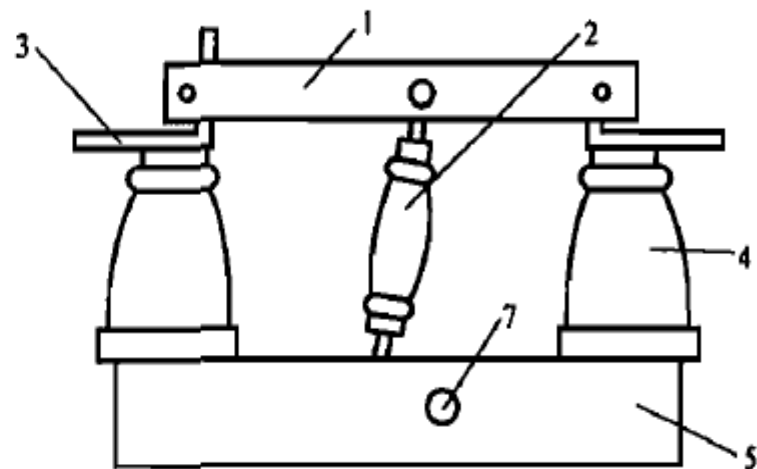


## ⑤ 户内式隔离开关

户内式隔离开关的典型结构如图2.55所示。它由导电部分、支持绝缘子4、操作绝缘子2(或称拉杆绝缘子)及底座5等组成。



(a) 三极式



(b) 单极式

图 2.55 户内型隔离开关典型结构图

1—刀闸；2—操作绝缘子；3—静触头；4—支持绝缘子；5—底座；6—拐臂；7—转轴



导电部分包括可由操作绝缘子带动而转动的刀闸1(动触头), 以及固定和支持绝缘子上的静触头3。刀闸及静触头采用铜导体制成, 一般额定电流为3 000 A及以下的隔离开关采用矩形截面铜导体, 额定电流为3 000 A以上则采用槽形截面铜导体, 使铜的利用率较好。刀库由两片平行刀片组成, 电流平均流过两刀片且方向相同, 产生相互吸引的电动力, 使接触压力增加。支持绝缘子4固定在角钢底座5上, 承担导电部分的对地绝缘。操作绝缘子2与刀闸1及转轴7上对应的拐臂铰接, 操动机构则与轴端拐臂6连接, 各拐臂均与轴硬性连接。当操动机构动作时, 带动转轴转动, 从而驱动刀闸转动而实现分、合闸。

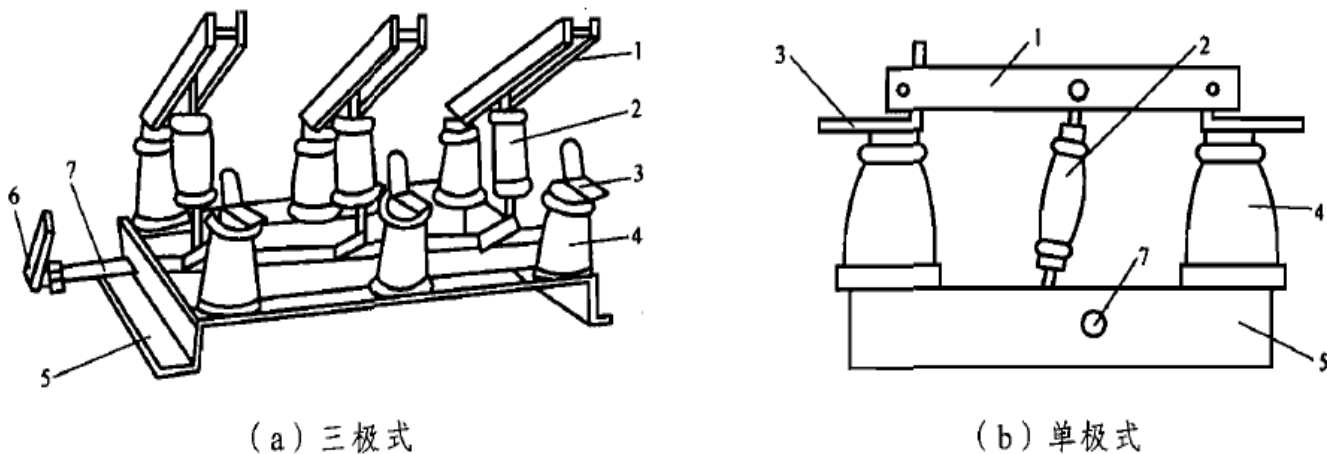


图 2.55 户内型隔离开关典型结构图

1—刀闸; 2—操作绝缘子; 3—静触头; 4—支持绝缘子; 5—底座; 6—拐臂; 7—转轴

## ⑥ 户外式隔离开关

图2.56为GW4-110型双柱式户外隔离开关(一相)。它为水平开启式结构,每相有两个瓷瓶1, 2, 既是支持瓷瓶又是操作瓷瓶, 分别装在底座13两端的滚珠轴承上, 并用交叉连杆3连接, 可水平转动; 导电部分分成两半(刀闸6, 7, 触头8, 连接端子9, 10, 挠性连接导体11, 12), 分别固定在瓷柱上端, 触头的接触位于两个瓷柱的中间, 触头上有防护罩。图中为隔离开关的合闸位置, 分闸操作时, 操动机构带动瓷柱1逆时针转动 $90^\circ$ , 瓷柱2由交叉连杆3传动, 同时顺时针转动 $90^\circ$ , 于是刀闸6, 7便向同一侧方向分闸。合闸操作方向相反。为了使引出线不因瓷柱的转动而扭曲, 在刀闸与出线座之间的转动瓷柱上方, 装有滚珠轴承和挠性连接导体。

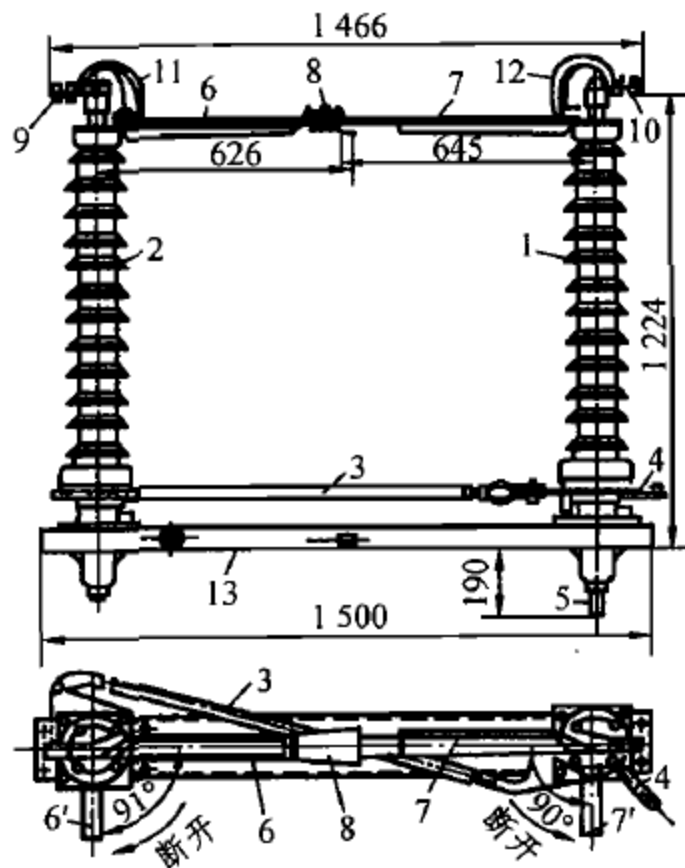
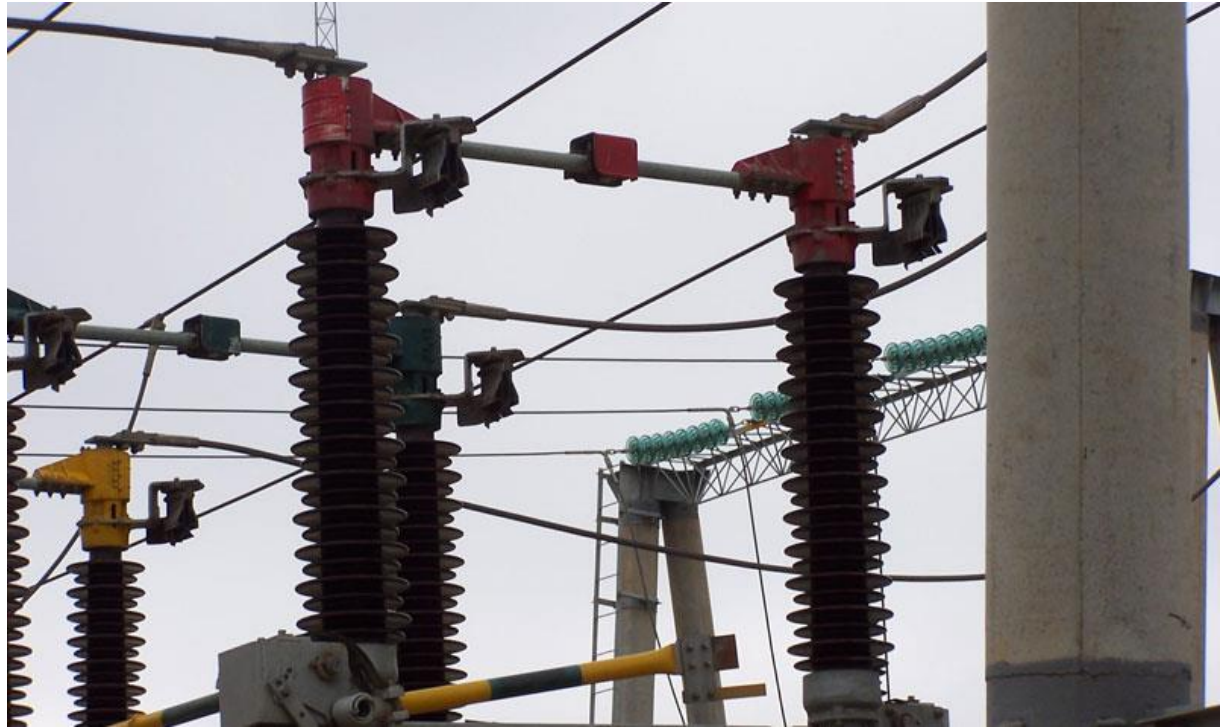
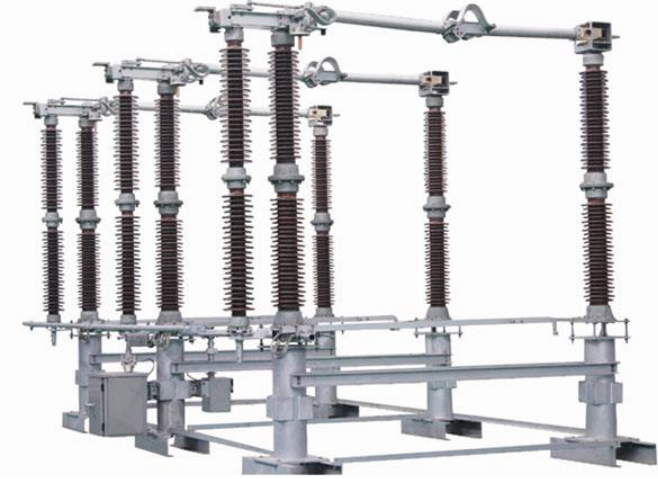


图 2.56 GW4-110 型双柱式隔离开关

- 1、2—支持瓷柱；3—交叉连杆；4—操动机构牵引杆；  
5—瓷柱的轴；6、7—刀闸；8—触头；  
9、10—接线端子；11、12—挠性  
连接导体；13—底座







### 3. 高压负荷开关

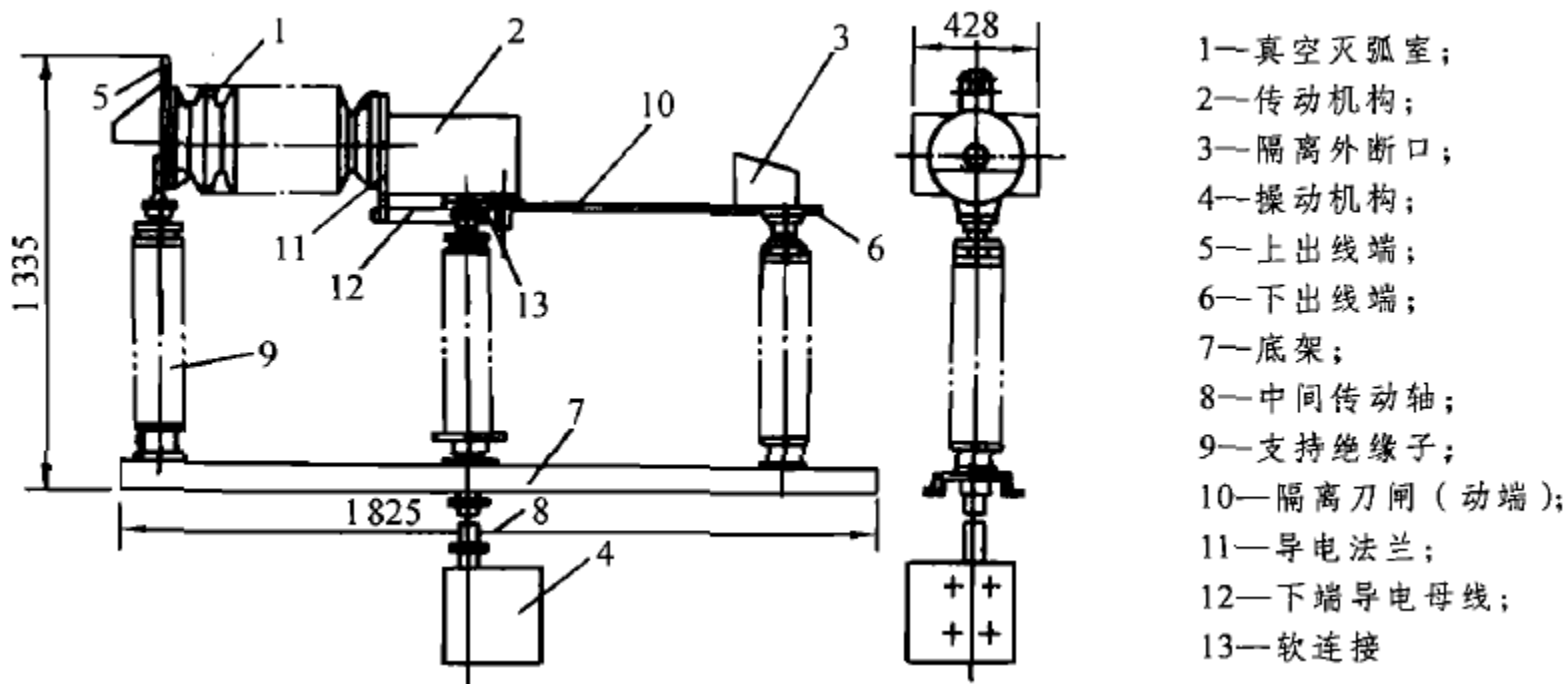
高压负荷开关用来开断正常工作下的负荷电流(包括规定的过载电流),并具有一定的关合短路电流的能力与动、热稳定性。在电力系统中常与熔断器一起使用,负荷开关起控制与过载保护作用,熔断器则起短路保护作用。高压负荷开关可用于控制供电线路的负荷电流,也可用来控制空载线路、空载变压器及电容器等。

由于负荷开关只需开断不大的负荷电流,因此,它的灭弧装置比断路器简单得多。按灭弧原理和介质不同,负荷开关可分为以下几类:

- ◆ 利用电弧能量使固体产气材料产生气体,吹拂电弧使其熄灭的固体产气式负荷开关;
- ◆ 利用活塞压气产生气吹作用使电弧熄灭的压气式负荷开关。气体可以是空气或六氟化硫气体;
- ◆ 在油中利用电弧能量使油蒸发和分解产生气体,使电弧冷却而熄灭的油浸式负荷开关;
- ◆ 在真空中熄灭电弧的真空负荷开关,结构与真空断路器相似,但触头材料不同;
- ◆ 在六氟化硫气体中灭弧的六氟化硫负荷开关。

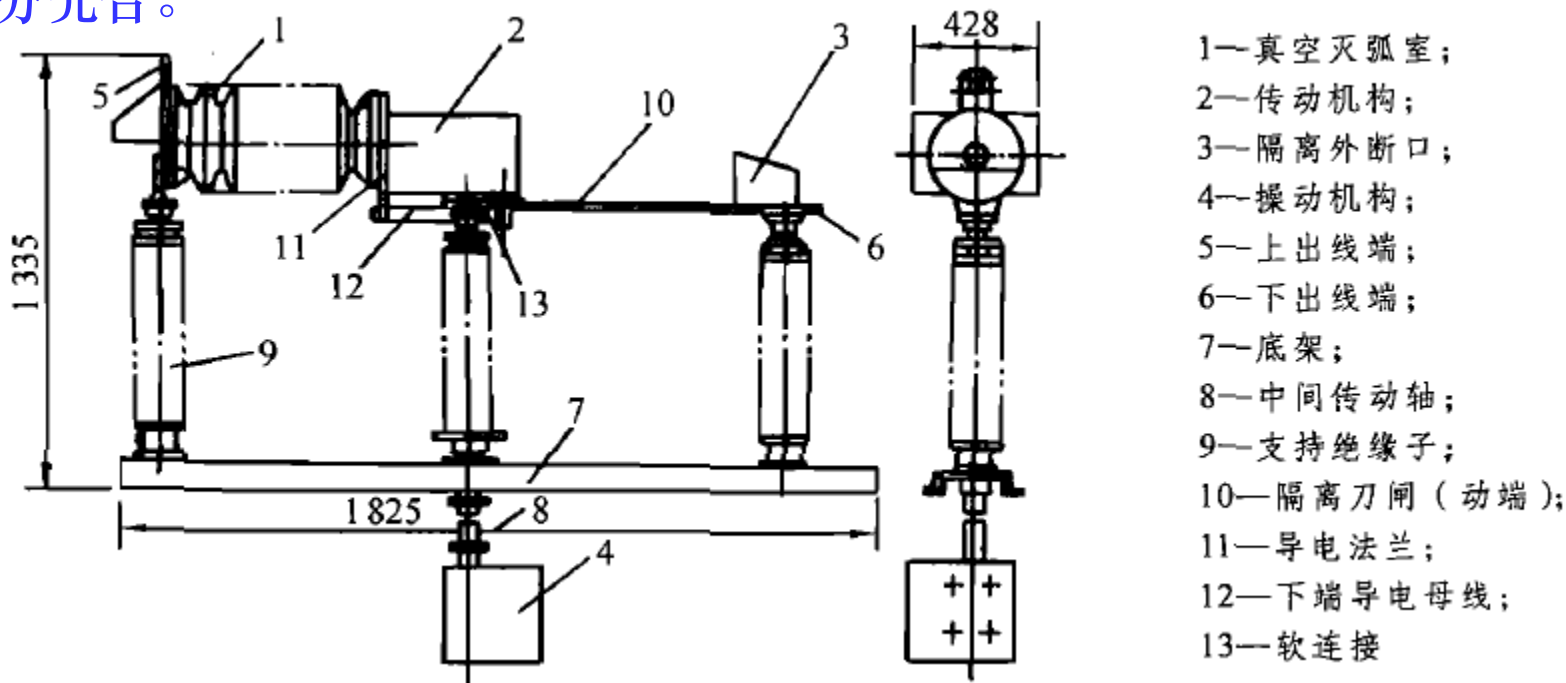


图2.57为电气化铁道专用的FW-27.5单极型隔离负荷开关，它由真空灭弧室、传动机构、隔离外断口和操动机构组成。真空灭弧室装在瓷套中，瓷套起绝缘及保护灭弧室作用，在灭弧室与瓷套之间充有SF<sub>6</sub>气体，用以增强真空灭弧室外绝缘。灭弧室中触头为一对平板圆触头，触头材料采用目前先进的铜铬合金。





FW-27.5单极型隔离负荷开关在电路中闭合状态时，电流由上出线端流入，通过真空灭弧室中静、动触头，经传动机构的左端导电法兰，再经下端导电母线、软连接到隔离刀闸，最后经下出线端流出。分合闸操作时，操动机构的输出轴转动约 $128^\circ$ ，通过中间传动轴把转动力矩传给中间支持绝缘子，也使其转动 $128^\circ$ 。中间支持绝缘子的转动带动传动机构的主轴，传动机构的主轴上有各种拐臂，通过弹簧储能带动真空灭弧室中的触头快速合、分，同时带动外断口刀闸合、分，而传动机构保证真空灭弧室先分后合，隔离外断口后分先合。





## 高压负荷开关的类型

1 2 3 — 4 5 6 7 / 8 9

一单元：F，表示负荷开关；Z，表示真空负荷开关。

二单元：N，户内型；W，户外型。

三单元；设计序号。

四单元：额定电压。

五单元：操动机构代号，有D表示电动操动机构，无D手动。

六单元：熔断器代号，有R表示带熔断器，无R不带熔断器。

七单元：S，表示熔断器装在开关上端，没S时装在下端。

八单元：额定工作电流，A。

九单元：额定开断电流，kA。



# 八. 高压互感器

## 1. 概述

变电站中各种测量、保护和监视装置都属于低压系统(二次部分), 这些设备都不能直接接入到变电站的母线、馈线上, 都需要通过特别的设备取得母线电压、馈线电流等信号。这些特别的设备就是高压互感器, 高压互感器有两类: 电压互感器和电流互感器。互感器是量测电器。电压互感器一次侧跨接在电网线间或线与地间, 二次侧接电压表或功率表、电度表的电压线圈以及继电器或自动装置的电压线圈, 用以量测电压。电流互感器一次侧串接在线路中, 二次侧接电流表或有关仪表、继电器或自动装置的电流线圈, 用以量观(线路中的电流。互感器的作用有如下三个方面:

- ◆ 电压电流变换;
- ◆ 电气仪表和继电器的标准化。电压互感器的二次侧额定电压为100V、 $100/\sqrt{3}$ V。电流互感器的二次侧额定电流大多为5A(少数为0.5A或1A), 这样就给产品生产带来了很大的经济性。
- ◆ 隔离高电压。电流互感器和电压互感器的一次侧和二次侧在电气上相互绝缘, 二次侧的电压很低, 可以较好地保证二次系统设备和操作人员的安全。



# 1. 电压互感器

## (1) 电磁式电压互感器

电磁式电压互感器是目前应用最广泛的电压互感器，其工作原理与变压器相同。由于负载阻抗很大，运行条件相当于变压器空载。二次绕组匝数远小于一次绕组匝数，所以二次侧不能短路，短路将产生危险的过电流。为了保证人在接触量测仪表和继电器时的安全，互感器的二次绕组应接地。这样，当互感器绝缘损坏时，可以防止在仪表上产生危险的高电压。

### ① 电磁式电压互感器的工作特性

- ◆ 额定电压比。一次侧额定电压与二次侧额定电压之比。注意额定电压比与互感器原次边绕组匝数比在某些情况下数值是不相等的。
- ◆ 误差。反映电压互感器误差的指标有：电压幅值相对误差和相位误差，电压幅值误差表示如下：

$$\Delta U = \frac{K_e U_2 - U_1}{U_1} \times 100\%$$



二次侧电压的相量旋转 $180^\circ$ 与一次侧电压的相量之间的夹角称为角差 $\delta$ ，并规定二次侧电压相量旋转 $180^\circ$ 后，超前一次侧电压时的角差为正值。

电压互感器的等值电路与变压器的等值电路无异(参数上有差别)。显然，电压幅值误差是和电压互感器的负载大小和负载功率因数有关的，过重的负载和过低的功率因数都会增大误差。从电压互感器的等值电路也可以看出，激磁回路是感性负载，如果激磁回路的阻抗较小(激磁电流大)，则电压互感器的误差将会增大，因此，与一般的电力变压器不同，电压互感器的激磁电流会很小(原边线圈匝数多)。

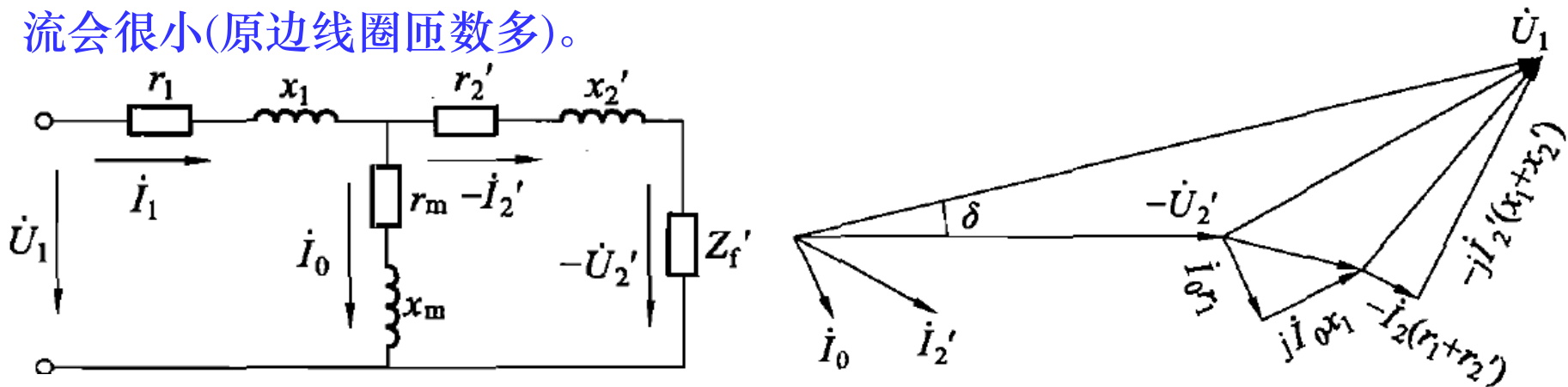


图 2.64 电压互感器等值电路和相量图

$Z_f'$ —负载阻抗； $r_1$ 、 $x_1$ —一次绕组电阻、电抗； $r_2'$ 、 $x_2'$ —二次绕组  
(已归算的)电阻、电抗； $r_m$ 、 $x_m$ —激磁电阻、电抗



电压互感器的精度用其精确度等级表示，如果该电压互感器的最大误差为 $\pm 0.1\%$ ，则该电压互感器称为0.1级，计量和测量用电压互感器共有以下精确度等级：0.1、0.2级：校验级，用于精密测量；0.5级：计量级；1.0、3.0级：一般测量用；3P、6P：保护用电压互感器精确度等级。

角度误差也用最大误差表示，每一精确度等级电压互感器的测量角度误差也相应地有一个规定范围。

表 2.1 测量用电压互感器的最大允许电压幅值误差和相角误差

级 名	$U_1/U_{1N} / \%$	$\Delta U_{\max} / \%$	$\delta_{u \max} / (^\circ)$	二次负荷条件
0.1	80 ~ 120	$\pm 0.1$	$\pm 5$	二次负荷在额定负荷 25% ~ 100% 内，负荷的功率因数 $\cos \varphi_f = 0.8$
0.2	80 ~ 120	$\pm 0.2$	$\pm 10$	
0.5	80 ~ 120	$\pm 0.5$	$\pm 20$	
1.0	80 ~ 120	$\pm 1.0$	$\pm 40$	
3.0	80 ~ 120	$\pm 3.0$	无规定	

表 2.2 保护用电压互感器的最大允许电压幅值误差和相角误差

级 名	$\Delta U_{\max} / \%$	$\delta_{u \max} / (^\circ)$	二次负荷条件
3P	3.0	120	二次负荷在额定负荷 25% ~ 100% 内，负荷的功率因数 $\cos \varphi_f = 0.8$
6P	6.0	240	

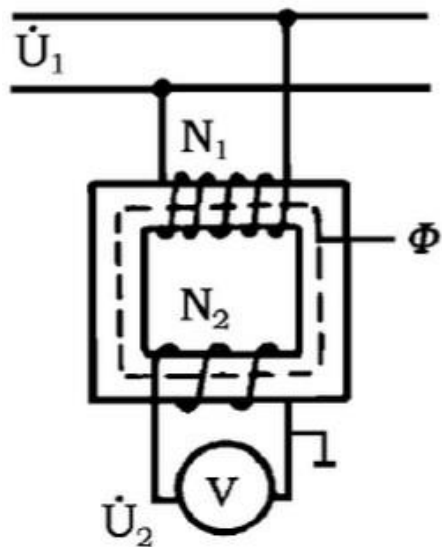


## ◆ 额定容量

电压互感器输出容量的大小将影响到其误差，因此对应于每个准确度级，都对应着一个额定容量，但一般说电压互感器的额定容量是指最高准确度级下的额定容量。例如JDZ-10型电压互感器，各准确度级下的额定容量为：0.5级-80VA，1级-120VA，3级-300VA。同时，电压互感器按最高电压下长期工作允许的发热条件出发，还规定最大容量，该容量是某些场合用来传递功率的，例如：给信号灯，断路器的分闸线圈供电等。

## 为什么电压互感器二次侧不能短路？

一般电压互感器主要用来测量测量高电压，即把不便于测量的高电压通过“变压器”原理变成低电压，然后串接大电阻即可安全方便测量电压的值，比如要测量110KV、500KV或者1000KV这样的特高压电压，不降压进行测量会出现很大的电流，危险性相当高，因此一般首先利用“变压器”进行降压处理，然后进行测量。因此，电压互感器的原边电压 $U_1$ 副边电压 $U_2$ ，所以 $N_2$ 远远小于 $N_1$ 电压互感器二次侧不能短路和电流互感器二次侧不能开路的原因分析，根据能量守恒原理可知， $P=UI$ 的总值是固定的，原边的电压很大，电流很小，而副边的电压很小，那么电流肯定很大(这也正是为什么副边接入的阻抗一定要大)，而电压表的内阻本身就很大，几乎接近于断路，所以电流才比较小，如果副边发生短路，那么此时会产生巨大的电流，大电流就意味着巨大的发热从而烧坏线圈。

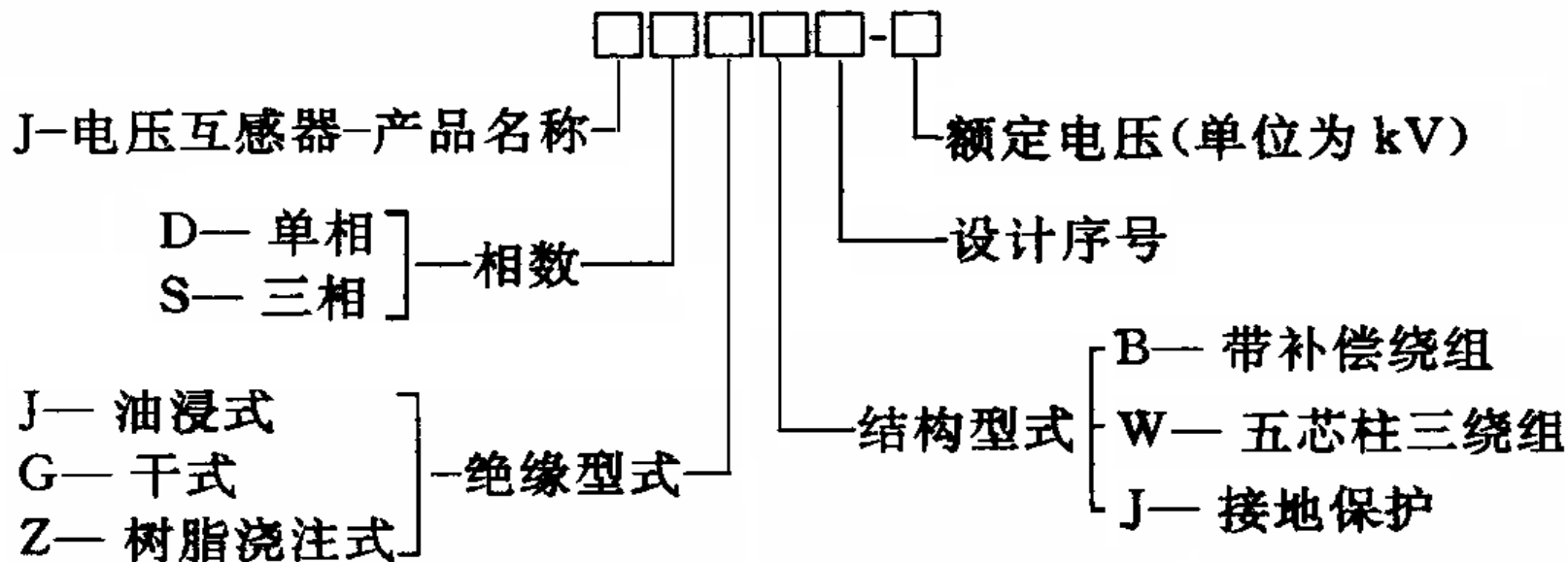




## ② 电磁式电压互感器的分类及结构

### ◆ 电磁式电压互感器的分类：

- 根据绕组数目来分有双绕组和三绕组的；
- 按相数来分有单相和三相的；
- 按冷却方式与绝缘方式来分有干式、油浸式、浇注式、瓷箱式；干式多用于低压；浇注式用于3-35kV；油浸式主要用于35kV及以上电压等级。
- 按结构来分有普通结构和串级结构；
- 按安装环境来分有室内的和室外的；



## ◆ 35kV及以下的电压互感器

35kV及以下电压互感器的结构和普通变压器基本一致。根据其绝缘方式的不同，可分为干式、环氧浇注式和油浸式三种。

干式电压互感器一般只用于低压的户内配电装置。浇注式电压互感器用于 3~35kV户内配电装置。油浸式电压互感器JDJJ2-35型、JDJ2-35型被广泛用于35kV 系统中。这类电压互感器的铁芯和一、二次绕组放在充有变压器油的油箱内。绕组出线端经固定在油箱盖上的套管引出。

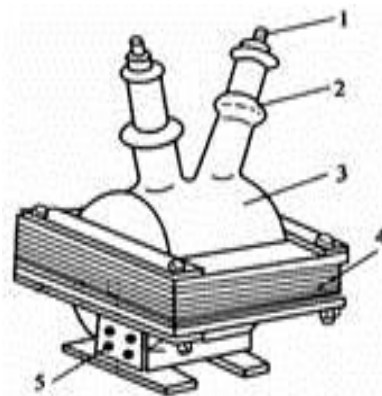


图 4-18 JDZJ-10 型

电压互感器

1—一次接线端子；

2—高压绝缘套管；

3—一、二次绕组及环氧树脂浇注；

4—铁心；5—二次接线端子



### ◆ 110-220kV电压互感器

随着电压的升高，电压互感器绝缘尺寸需增大。为了减少绕组绝缘厚度，缩短磁路长度，110kV及以上电压互感器采用串级式，铁芯不接地，带电位，由绝缘板支撑。国产JCC型和JDCF型电压互感器就是采用这种结构。

一次绕组分两部分，分别绕在上下两铁芯上，二次绕组只绕在下铁芯柱上并置于一一次绕组的外面。铁芯和一次绕组的中点相连。当电网电压U加到互感器一次绕组时，其铁芯的电位为 $(1/2)U$ 。而且一次绕组的两个出线端与铁芯间的电位差、一、二次绕组间的电位差及二次绕组和铁芯间的电位差将都是 $(1/2)U$ 。这就降低了对铁芯与一次绕组之间以及一、二次绕组之间的绝缘要求。

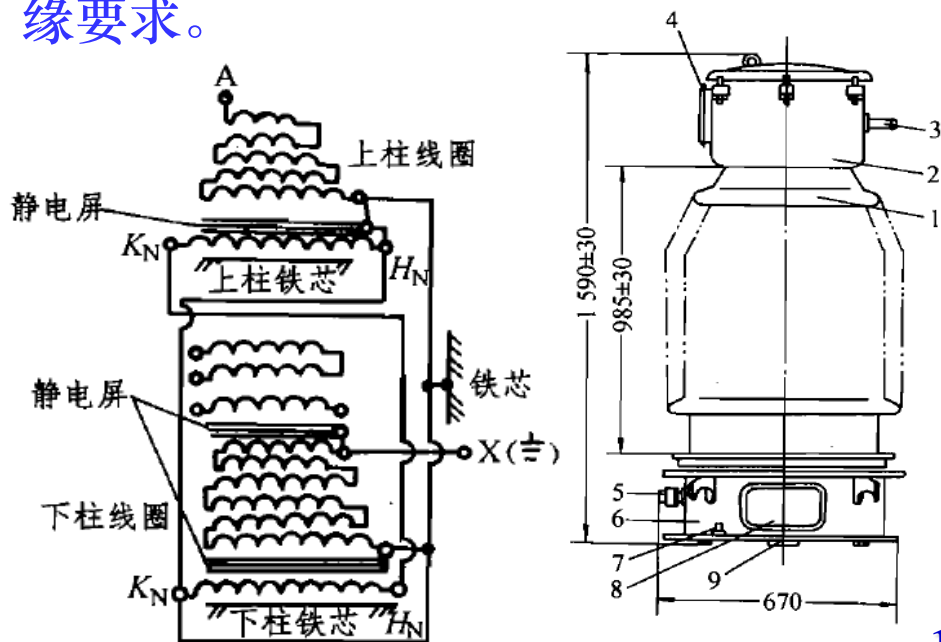
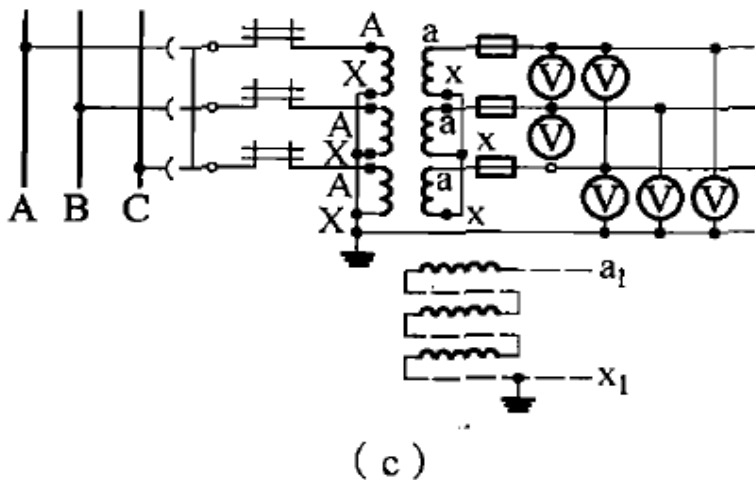
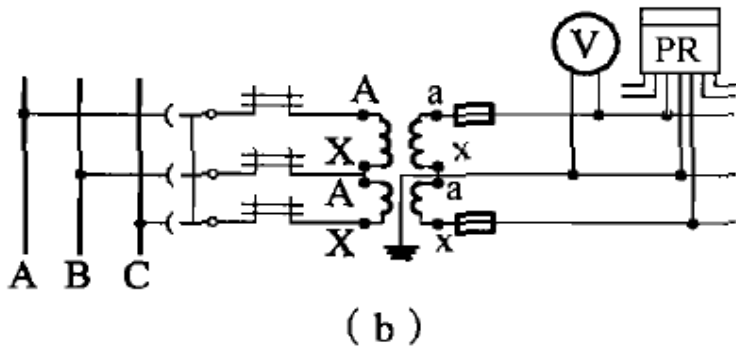
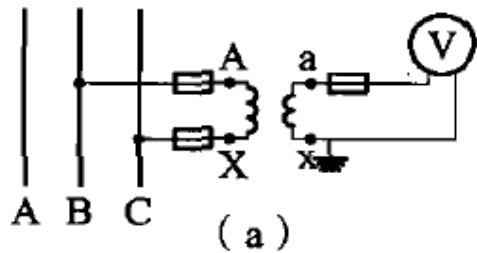


图2.67 JCCI型电压互感器的原理和外形图  
1-瓷套;2-储油柜; 3-高压出线端(A);4-油表;  
5-放油阀;6-底座; 7-接地螺栓;8-出线盒(二次线);9-出线管



### ③ 电磁式电压互感器的接线结构



图(a)只有一个单相的电压互感器，用于只需要某一个线电压的情况。

图(b)是两个单相互感器接成不完全三角形。这种接法广泛地用于中性点不接地或经高阻抗接地的电网中。

图(c)是三个单相互感器接成星形，可以测量线电压和相对地电压。在中性点直接接地的110kV以上装置中，广泛采用这种接法。互感器为JCC型。其一次绕组按相电压设计，三个互感器一次侧连接成Y形，二次绕组也连接成Y形，辅助绕组连接成开口三角形，如图中虚线所示。辅助绕组的匝数是根据单相接地短路时三角形开口处电压为110V计算的，也即对辅助绕组要求的额定电压值。开口三角形两端接电压继电器。

## (2) 电容式电压互感器

电容式电压互感器的主要特点是：首先把高电压经高压电容进行分压，然后把经过分压处理后获得的较低电压经过电磁式变换获得二次电压。

电容式电压互感器在技术和经济方面具有优势，国外66-765 kV电力系统中绝大多数采用这种类型的电压互感器，我国220 kV以上变电所大都采用电容式电压互感器，110-220 kV变电所设备更新或新建工程中优先采用电容式电压互感器已成为明显趋势。

### ① 电容式电压互感器的工作原理

电容式电压互感器由电容分压器和电磁单元两部分组成。由一级或多级耦合电容器组成的电容分压器从输电线的高电压抽取一个中间电压(通常为10-20 kV)送入电磁单元，再降为 $100/\sqrt{3}$ V和100V低压分别供计量和继电保护装置使用。为了补偿电容分压器的容性阻抗，使二次电压不因负载的变化而变化，在中压回路中接入了补偿电抗器K，阻尼器Z是为阻尼铁磁谐振而设置的。电容式电压互感器的工作原理可以归纳为：耦合电容器分压，中间变压器降压，电抗器补偿，阻尼器保护。

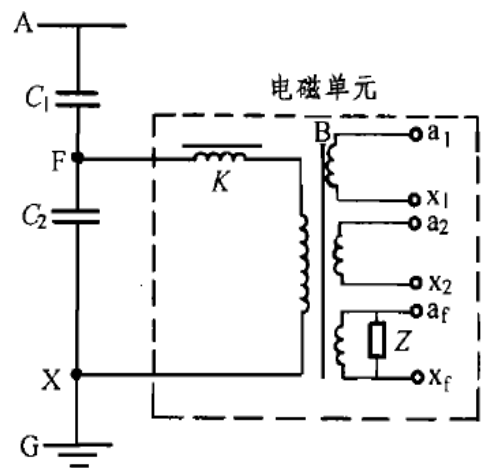


图 2.70 电容式电压互感器原理图

AX—一次端子； $a_1x_1$ —主二次1号绕组端子； $a_2x_2$ —主二次2号绕组端子； $a_fx_f$ —辅助二次绕组端子；  
K—补偿电抗器；B—中压变压器；  
C<sub>1</sub>—高压电容；C<sub>2</sub>—中压电容；  
Z—阻尼器

利用二端网络定理得出CVT等值电路图如2.7.1所示。若电抗器K的电感参数L按其与C1+C2在工频下谐振选择，则可使输出电压受负载变化的影响大为减小，这是电容式电压互感器内部接线的一个显著特点。

## ② 电容式电压互感器的频率误差

电力系统的频率会在50Hz上下波动，这时L与C1+C2不能完全谐振，相当于增加了等值电路中的内阻抗，将造成误差，该误差称为频率误差。频率误差的大小决定于电容(C1+C2)与电感L在频率(f+Δf)下的剩余阻抗Z的大小。

$$\Delta Z = j \frac{2\Delta f / f}{2\pi f (C_1 + C_2)}$$

为了减小剩余阻抗Z，以保证准确度，(C1+C2)不能太小。由于电容器的价格与其容量 $U^2\omega C$ 有直接关系，因此，高压电容器C1的价格在互感器成本中占相当比重。

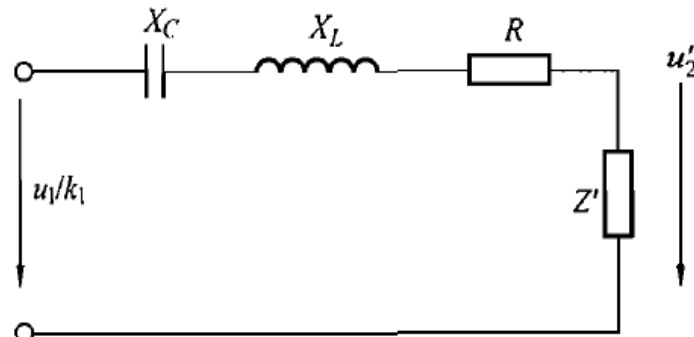


图 2.71 CVT 简化等值电路图

$u_1$ —一次电压； $K_1$ —电容分压器的分压比； $X_C$ —分压器的容抗为  $1/[\omega(C_1 + C_2)]$ ； $X_L$ —补偿电抗器的感抗与中压变压器一、二次绕组间漏抗之和； $R$ —等值电阻； $Z'$ —CVT 二次负载（折算到中压侧）； $u_2'$ —二次输出电压（折算到中压侧）



### ③ 电容式电压互感器结构与技术特性简介

电容式电压互感器中电容器的介质，普遍采用聚丙烯膜与电容纸复合浸渍烷基苯绝缘油，准确度有0.2、0.5、1和3级四个准确度等级，二次输出容量在0.5级准确度下最大可达500VA，在0.2级准确度下最大可达300VA；产品结构向单柱式方向发展，即将电容分压器叠装在电磁单元的油箱上成为一个整体；对不同电压等级实现积木式、系列化设计。



## (2) 电磁式电流互感器

电磁式电流互感器作为电磁元件，其功能和工作原理与电压互感器相同。由于其负载是仪表与保护设备的电流线圈，其阻抗很小，运行条件相当于变压器短路。二次绕组匝数远大于一次绕组匝数，所以二次侧不能开路，开路将产生危险的高电位。

### ① 电磁式电流互感器的工作特性

- ◆ 额定电流比：一次、二次额定电流之比。
- ◆ 误差、准确度：与电压互感器一样，用于表示误差方面的指标有幅值误差和相位误差，其表示方式也是用互感器的精确度表示。

幅值误差

$$\Delta I = \frac{K_e I_2 - I_1}{I_1} \times 100\%$$

角误差：旋转180°的二次电流与一次电流之间的夹角。规定二次电流负相量超前于一次电流相量时，角误差 $\delta$ 为正，反之角误差 $\delta$ 为负。



准确度级是指在规定的二次负荷变化范围内，一次电流为额定值时的最大电流误差。对于每种精确度，同样地互感器存在着角度误差，我国GB1208-1997《电流互感器》规定测量用的电流互感器的测量精度有以下几种规格：0.1、0.2、0.5、1.0、3.0、5.0。

保护用电流互感器按用途可分为稳态保护用（P）和暂态保护用（TP）两类，稳态保护用电流互感器的准确级用P来表示，常用的有5P和10P。其含义与前述精确度描述有所不同，主要是继电保护要求能很好地反应短路过程中电流的暂态电流波形。

所谓额定准确限值一次电流即一次电流为额定一次电流的倍数，也称为额定准确限值系数。例如10P20表示准确级为10P，准确限值系数为20。这一准确级电流互感器在20倍额定电流下，电流互感器负荷误差不大于10%。对于上述不同精确度的电流互感器的应用场合，基本上与电压互感器一样。

准确级数	一次电流占额定 电流的百分数 (%)	误差限值	
		电流误差(±%)	角误差(°)
5P	50	1.0	60
	120	1.0	60
10P	50	3.0	60
	120	3.0	60



### 电流互感器的准确度等级和最大误差

准确等级	原绕组电流占额定电流的百分数	最大正负误差		备注
		电流误差 (%)	角误差 (')	
0.2	从120~100	0.20	10	<p>副边负荷在额定值的25%到100%的范围内，功率因数<math>\cos\phi=0.8</math>同时副边负荷的最小值，对于额定副边电流为5A的电流互感器不应小于0.15欧姆，对于额定副边电流为1A的电流互感器不应小于1.5 欧姆。</p>
	50	0.30	13	
	20	0.35	15	
	10	0.50	20	
0.5	从120~100	0.50	40	
	50	0.65	45	
	20	0.75	50	
	10	1.0	60	
1	从120~100	1.0	80	
	50	1.3		
	20	1.5	100	
	10	2.0	120	
3	从120~50	3	无规定	
10	从120~50	10		



电流互感器的磁势平衡方程式为：
$$\dot{I}_1 W_1 = -\dot{I}_2 W_2 + \dot{I}_0 W_1$$

上式表明，电流互感器的误差与其激磁电流有极大关系，显然，激磁电流越小，互感器的精确度越高。因此，电磁式电流互感器（电磁式电压互感器同）在材料的选择、制造工艺等方面和一般的电力变压器又是有着极大的区别的。

同样地，电流互感器也存在着额定容量，如果二次回路负载超过允许范围，其误差将超标。

**注意：二次回路的负载是否超标，可通过二次回路负载的容量或阻抗确定。**

由相量图可知，电流误差为ab线段长度，其值为  $\Delta I = -\frac{I_0 W_1}{I_1 W_1} \sin(\psi_2 + \alpha) \times 100\%$

而相角误差  $\delta \approx \tan \delta$ ，可用线段bc与b0之比来确定，其值为

$$\delta \approx \frac{I_0 W_1}{I_1 W_1} \cos(\psi_2 + \alpha) \quad (\text{rad})$$

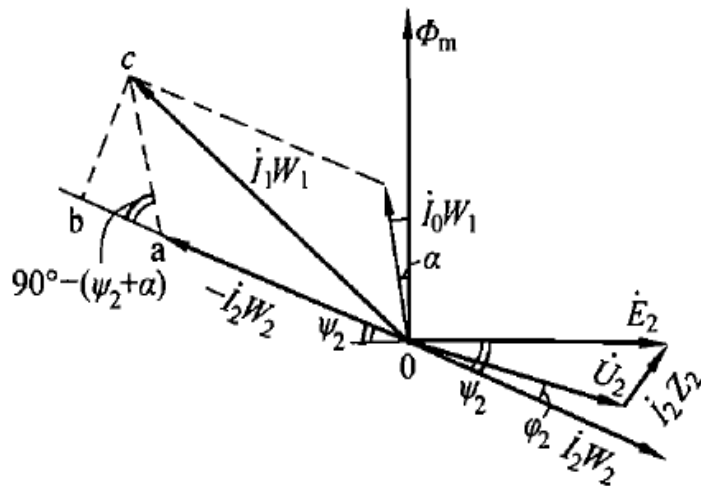


图 2.72 电流互感器相量图

从上面两式中可以看出，激磁电流 $I_0$ 是影响误差的主要因素。 $I_0$ 的大小决定于铁芯材料的品质、铁芯尺寸、绕组的匝数等。减少磁路的磁阻可使 $I_0$ 降低，减少误差。原边电流 $I_1$ 的变化对误差也将产生很大影响，当 $I_1$ 增加时误差将减少，但 $I_1$ 增加很大(超过额定原边电流)时，将使铁芯饱和( $I_2$ 不再与 $I_1$ 同等比例增加)，电流 $I_0$ 将增大，造成误差也增大，故互感器应工作在额定电流附近。二次侧负载( $Z_2$ )及其功率因数( $\cos \varphi_2$ )对误差也产生影响。当 $I_1$ 与 $\cos \varphi_2$ 不变时，增加 $Z_2$ 会使 $E_2$ 增大，从而使 $I_0$ 增加，故 $\Delta I$ 、 $\delta$ 都增加。功率因数的影响，从误差公式可知，负载功率因数降低时， $\Delta I$ 增加，而 $\delta$ 减少。负载对误差的影响表示在图2.73中。



## ② 电磁式电流互感器的分类和结构

### ◆ 按一次侧绕组分类：

- 单匝(指一次侧)：贯穿式(铜杆或铜管上)、母线式(安装在母线上)、套管式(安装在设备的绝缘套管中)。

### ◆ 多匝(指一次侧)：“8”字型、串级式（绕组结构）

### ◆ 按绝缘结构可分为干式、浇注式、油浸式等。

### ◆ 按安装条件又可分为室外和室内两种。还可以用其他方法进行分类。

通常一台电流互感器中可以有多多个二次线圈绕组，各个绕组的精确度不同，可以分别服务于不同的设备。下面就单匝式和多匝式电流互感器两种分类进行简单介绍。

## (1) 单匝式电流互感器

单匝式电流互感器的原边绕组只有一匝，显然这种电流互感器的特点是额定容量小，因此带负载能力要差一些，但其结构简单、体积小、价格低。

图2.74是LDZ-10型电流互感器(单匝贯穿式浇注绝缘电流互感器)的原理图及外形图，其二次绕组均匀绕在环形铁芯上，一次绕组采用圆导杆从铁芯中心穿过，并用树脂浇注成为整体。

额定电流大于1500A时，一次绕组制成粗大的芯柱并不适宜，故在10kV装置中多制成母线式互感器。这种互感器是中空的，利用配电装置的载流母线作为一次绕组。

额定电压在35 kV以上时，广泛采用套管式电流互感器。它的环形铁芯套在油断路器的绝缘套管上，利用套管中的载流体作为一次绕组。该型式又名装入式，优点是简单、经济，不另占空间；缺点是误差较大，因为磁路长度取决于套管直径，而套管直径一般较大，故使磁阻、误差增大。

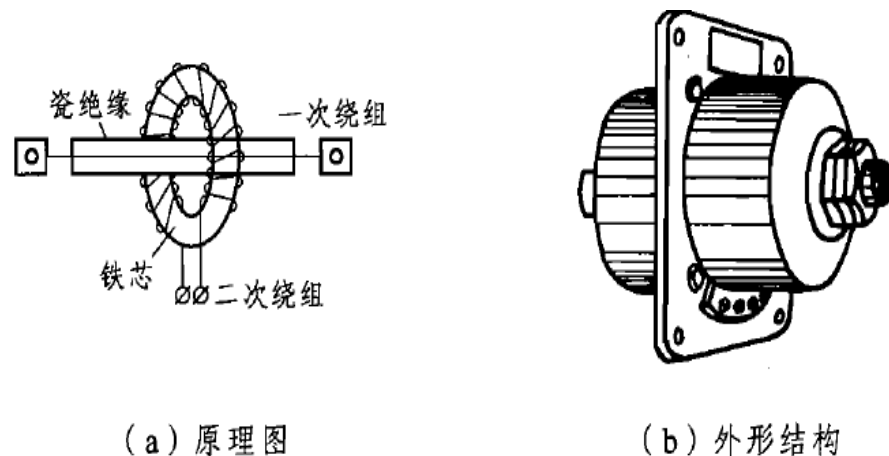


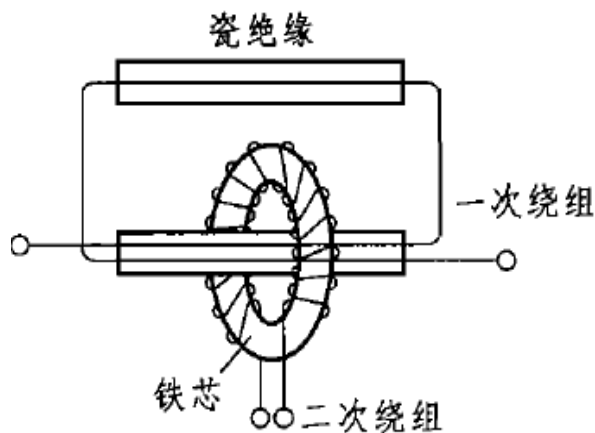
图 2.74 单匝式电流互感器



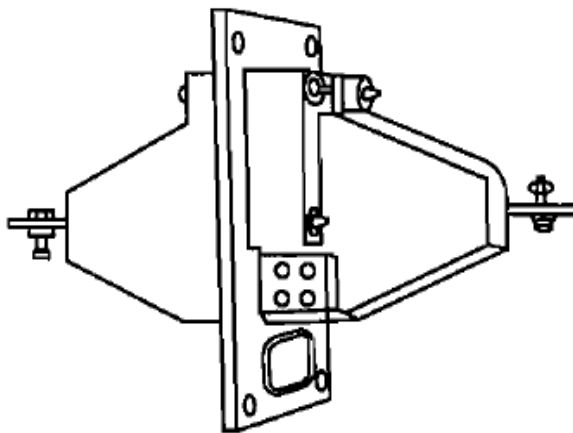
## (2) 多匝式电流互感器

多匝式电流互感器的原边绕组有多匝，因此易于制造出额定容量大的电流互感器，当然，其结构、体积和价格都与单匝式电流互感器不同。

对于以25kV作为电力牵引供电系统的额定电压，其设备的绝缘一般按照35kV电力系统中电压等级设备考虑，把电流互感器应用在电力牵引供电系统时，少数电流互感器的绝缘将达不到要求。在进行电流互感器的选型时应注意。



(a) 原理图



(b) 外形结构

图 2.75 多匝式电流互感器

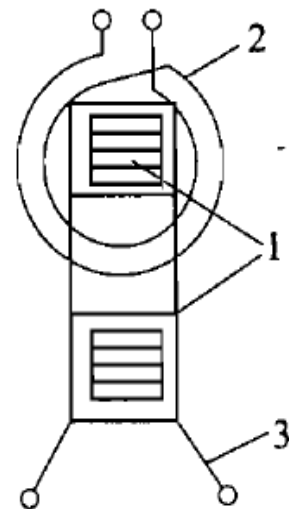


图 2.76 “8”字形电流互感器

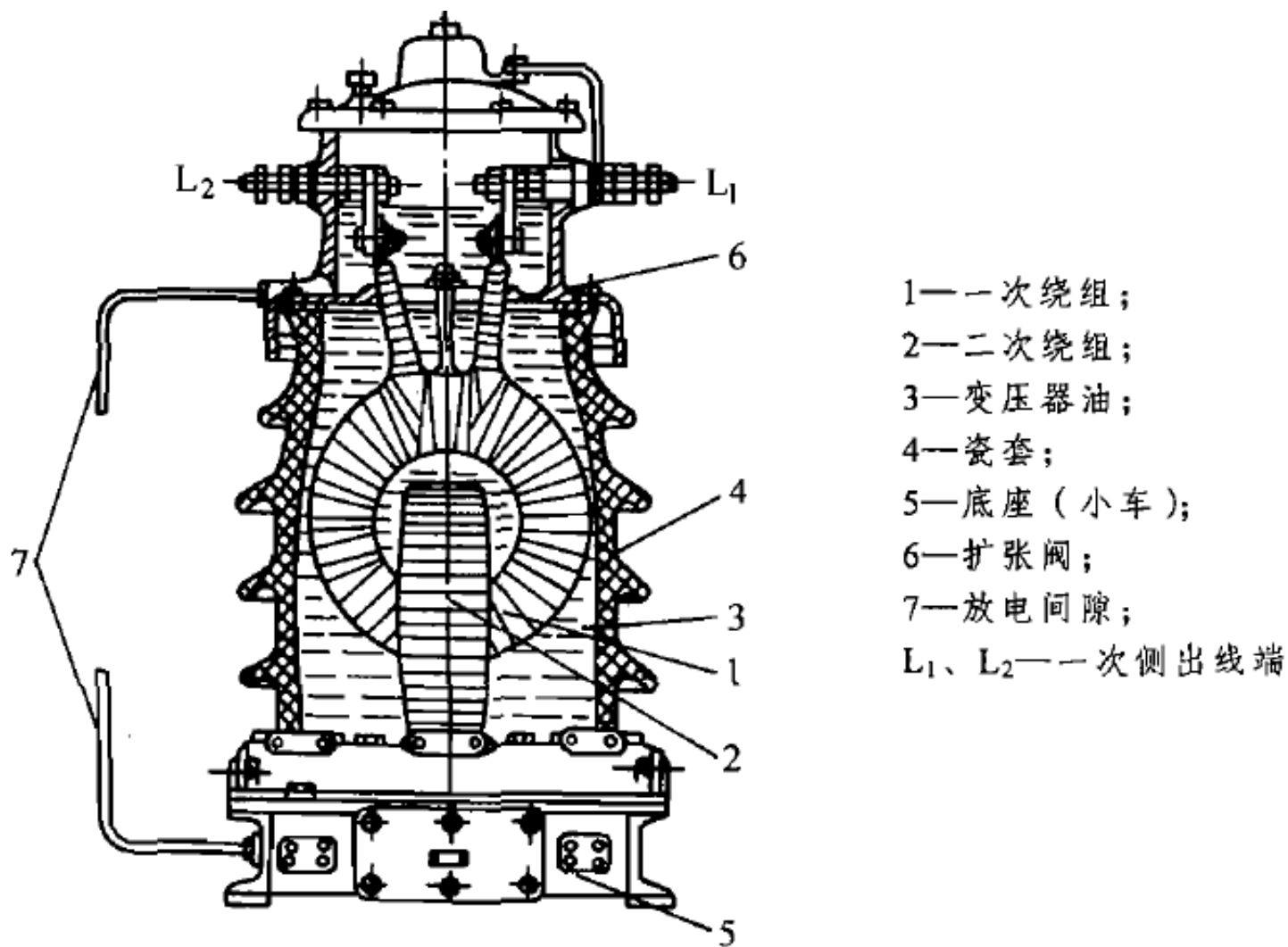
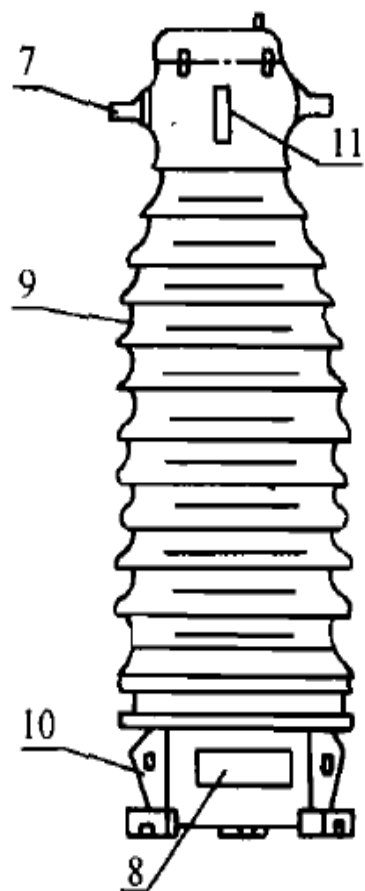
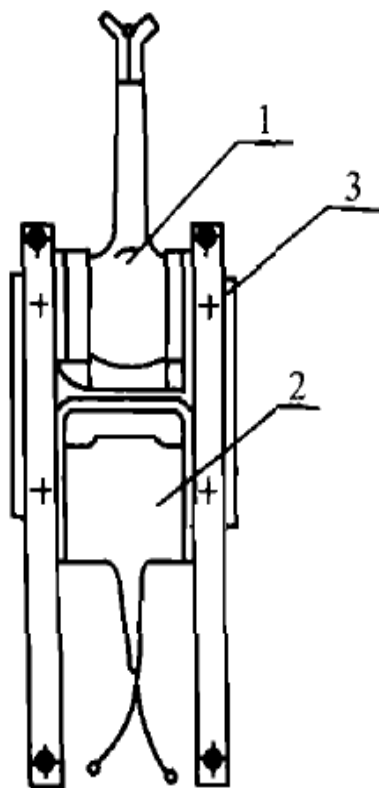


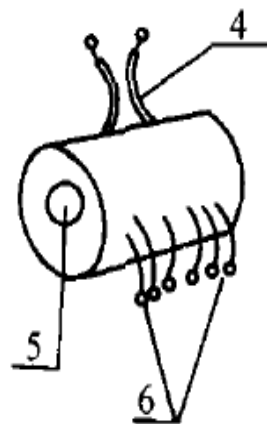
图 2.77 LCW-35 型互感器绕组布置图



(a) 外形图



(b) 一级互感器结构



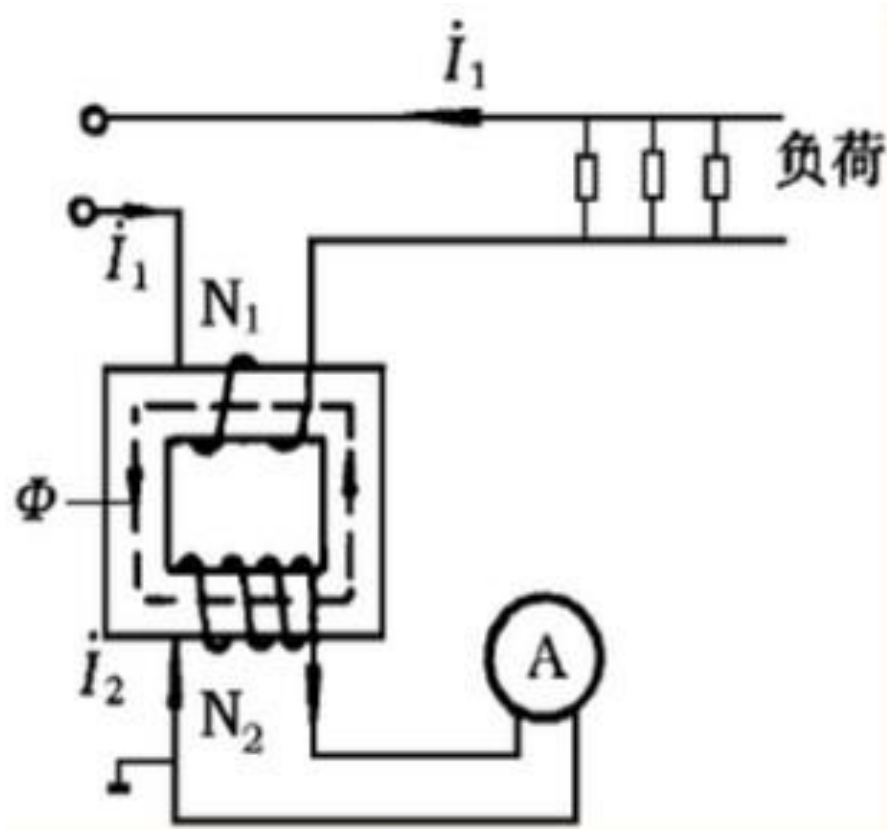
(c) 二级互感结构

- 1—一级互感器一次绕组；
- 2—一级互感器二次绕组；
- 3—矩形铁芯；
- 4—二级互感器一次绕组；
- 5—环形铁芯；
- 6—二级互感器二次绕组；
- 7—一级互感器一次绕组出线头；
- 8—二级互感器二次绕组出线端子；
- 9—瓷套；
- 10—底架；
- 11—油标

图 2.78 串级式电流互感器



## 为什么电流互感器二次侧不能开路？



电流互感器原方电流是由被测试的电路决定的，当负荷的电阻大小不同时，原边的电流大小也不同，在正常运行时，电流互感器的副方相当于短路，副方电流有强烈的去磁作用，即副方的磁动势近似与原方的磁动势大小相等、方向相反，因而产生铁心中的磁通所需的合成磁动势和相应的励磁电流很小。若副方开路，则原方电流全部成为励磁电流，使铁心中的磁通增大，铁心过分饱和，铁耗急剧增大，引起互感器发热损坏。同时因副绕组匝数很多，将会感应出危险的高电压，危及操作人员和测量设备的安全；



# 九. SF6全封闭组合电器(GIS)

## 1. 概述

在SF6断路器的基础上，进一步发展了SF6全封闭组合电器，就是把各种控制和保护电器：断路器、隔离开关、互感器、避雷器和连接母线，全部封装在接地的金属壳体内，壳内充以压力为0.2-0.5 MPa的SF6气体，作为相间和对地的绝缘，这样的组合电器称为GIS。

全封闭组合电器具有很大的优越性。

- ◆ 首先它大大缩小了整套配电装置的占地面积和空间体积。由于SF6气体具有很高的绝缘强度，GIS较常规敞开式电器的占地面积和空间体积都大大缩小，以110kv变电站为例，前者分别为168m<sup>2</sup>和1344m<sup>3</sup>，后者分别为2214m<sup>2</sup>和22140m<sup>3</sup>，而且电压等级越高，缩小的比例就越大。体积的缩小为大城市稠密地区、地形险峻的山区建设变电站及地下变电站建设提供了有利条件。而且整套设备基本上是在制造厂装成，现场施工的工作量大大减少，因此具有很大的经济价值。
- ◆ 其次，GIS运行安全可靠，全部电器封装在接地外壳中，避免了各种恶劣自然环境条件的影响，减少了设备事故的可能性，而且对人身安全也大有好处。SF6断路器本身检修周期长。整个组合电器可以做到连续运行至少十几年不需要检修，大大减少了运行维护的工作量。



## 2. SF6全封闭组合电器的结构与组合元件

### (1) 总体结构

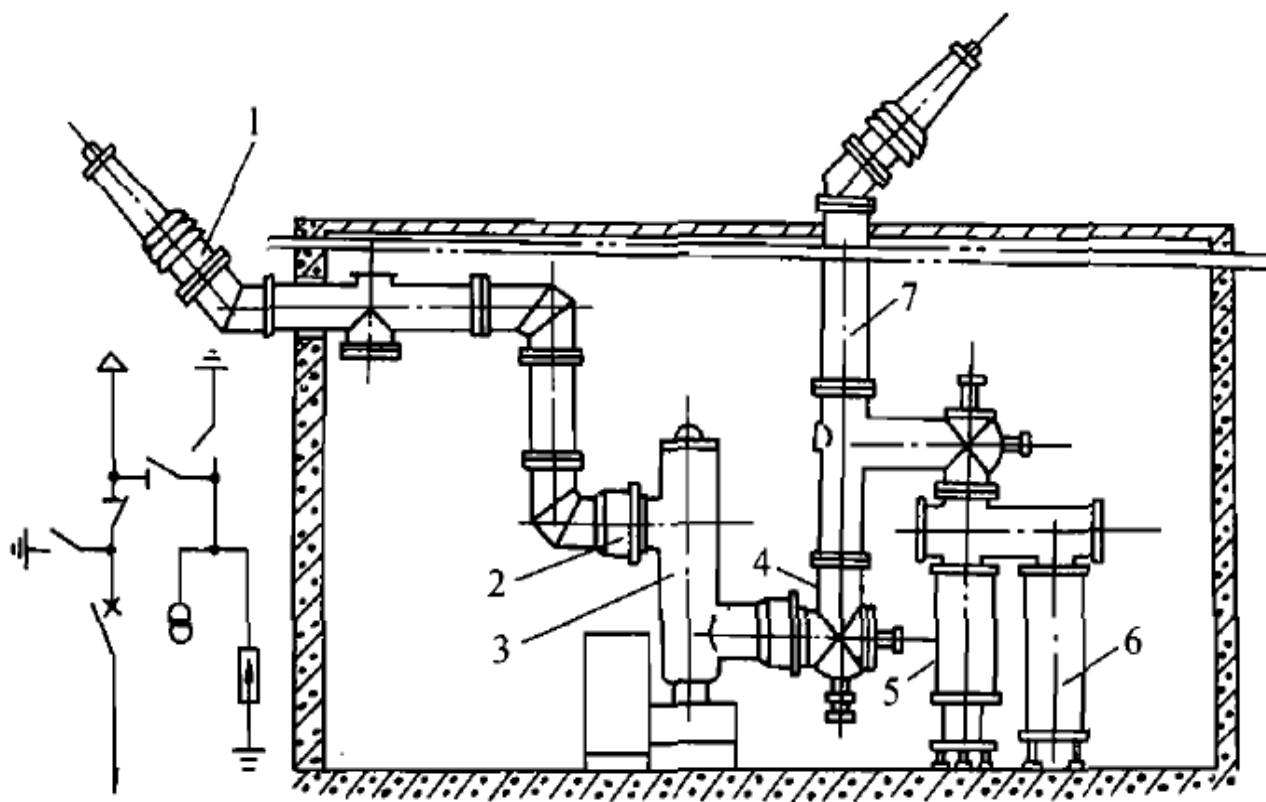


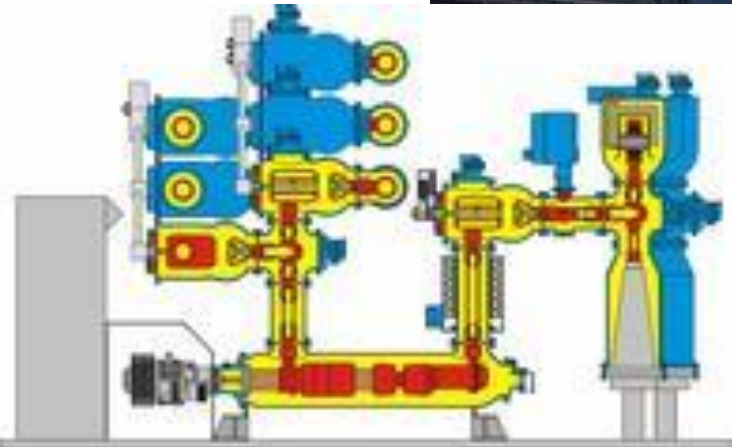
图 2.84 220 kV GIS 结构布置方案示例

1—充气套管；2—电流互感器；3—断路器；4—隔离/接地开关；5—电压互感器；6—避雷器；7—封闭连接线



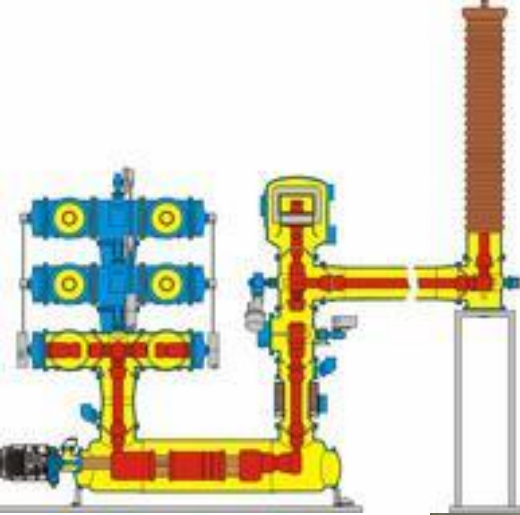
# 145kV三相共箱GIS

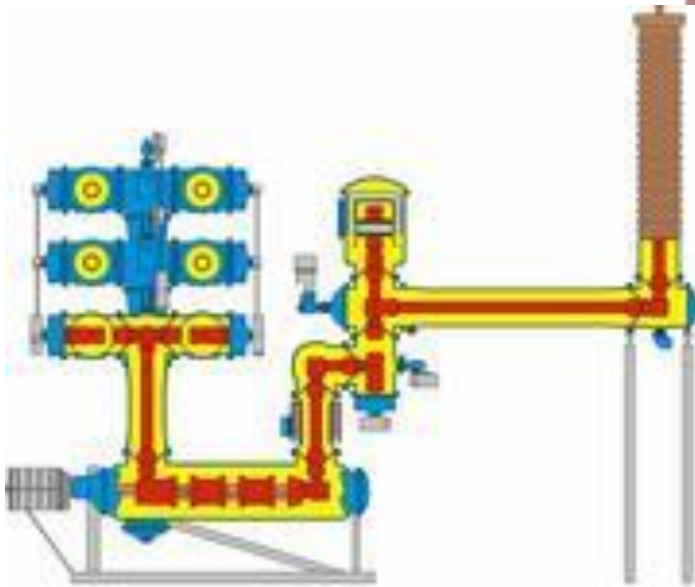






# 550kV三相分箱GIS







## 国产三相共箱126kV小型化GIS





## (2) 组合元件

- ◆ 断路器。垂直断口的单压式、变开距、配液压操动机构的SF6断路器。
- ◆ 隔离开关。视动触头运动方式的不同，有转动式和直动式两种类型。无论采用何种类型，都希望它能开断小电容电流和环流。
- ◆ 接地开关。接地开关或与隔离开关制成一体，或单独作为元件制造。有工作接地开关和保护接地开关之分，前者不要求有闭合短路电流的能力，后者则要求有此能力。图2.48中，隔离开关与接地开关制成一体，配有手动操动机构，并设有观察窗以观察触头的位置。
- ◆ 电流互感器。穿心式结构，每相有一个测量和三个保护线圈。
- ◆ 电压互感器。主要有电容式和电磁式两种，前者用于220 kV及其以上电压等级，后者用于110 kV以下电压等级。图2.84中用的是电容式结构。
- ◆ 避雷器。保护GIS的避雷器主要有3种：①常规带间隙的避雷器，装在组合电器的入口处；②无间隙的氧化锌避雷器或金属封闭的SF6绝缘的避雷器；③上述两种方式的混合应用。图2.84中采用的是以SF6为绝缘介质的磁吹避雷器。
- ◆ 母线和封闭连接线。母线的结构有分相式 and 三相共筒式两种。前者的导电部分装在接地的金属圆筒中心，用盆式绝缘子支持，可避免相间故障。后者的三相导电部分均匀地布置在一个共同的接地金属圆筒内，各相导体对圆筒分别用支持绝缘子支持，相间绝缘主要由SF6担任，圆筒壳体上的发热效应较低。图2.84中采用的封闭连接线为一金属壳体内装有铝管导体，以SF6为主绝缘。
- ◆ 引线的充气套管与电缆终端。图2.84中用的充气引线套管为空心塔形套管，内装导电杆并充有SF6气体。引线套管也可以采用油纸电容套管，它的尾部放在封闭电器的壳体中，SF6气体与套管的油腔隔绝。



### 3. 组合电器内部的局部放电与电弧接地

#### (1) 局部放电

由于GIS内部的工作电场强度较高，当绝缘存在各种形式的缺陷时，就可能形成局部放电。局部放电的主要形式有：

- ◆ 高电位导体表面缺陷引起的电晕性局部放电；
- ◆ 绝缘件和导体交接面的夹气层中的局部放电；
- ◆ 浇注绝缘中气泡里的局部放电；
- ◆ 导电微粒引起的局部放电。在GIS中，应尽量避免产生局部放电。

#### (2) 内部电弧接地

导致内部电弧故障的主要原因是：1)装配不合格。2)误操作，如带负荷电流操作隔离开关，或者带电时将气隔敞开在大气中。

当GIS发生内部电弧故障时，电弧在壳内燃烧，使发生故障的气室内部压力升高。如果不采取保护措施，这种压力升高可能会导致外壳破坏，所以每一独立气室中都要采用防爆膜。



## 4. GIS中隔离开关的操作

### (1) 隔离开关操作时的暂态现象

GIS中的隔离开关用来切断封闭母线和处于断开位置的断路器上的充电小电流(电容性电流)。当隔离开关开断时，由于其触头分闸速度一般较慢，可能引起电弧的多次重燃，在GIS内部要产生前沿陡峻的行波，这种行波在套管端点及母线连接点来回折反射，并与外壳耦合，形成快速暂态过电压(VFTO)，使接地外壳的电位瞬时升高。该过电压的上升时间极短，通常只有2-20ns，典型的幅值为额定值的1.5-2.0倍，最高可达3-3.5倍，基本振荡频率为5-10 MHz，高频分量在100MHz范围内。

这种接地电位的瞬时升高，可以使外壳与其底架之间产生火花，使保护回路与控制回路失效，导致保护继电器误动作。

## (2) 隔离开关操作时的暂态现象

双母线变电站往往采用如图2.85所示的典型接线。根据规定的安全操作程序，由工作母线WB1切换到备用母线WB2的操纵过程如下：QF5分闸状态时合QS7、QS8，接着合闸QF5，合QS2，合QS4，断开QS1，QS3，然后依次断开QF5、QS7、QS8。

下面分析QS2闭合、QS1还没有断开前，流过QS2的电流情况。流过QF1的电流 $I$ 在a点分成两路：一路经QS1到b点，设电流为 $I_{11}$ ，流经线路长度为 $S_1$ ；另一路，电流的通路为a-QS2-c-d-QS7-QF5-QS8-e-b，设电流为 $I_{12}$ ，流经线路长度为 $S_2$ ，显然 $I=I_{11}+I_{12}$  ( $I$ 为变压器全部负荷电流)。

对于某110 kV、15个间隔的GIS平面布置图，有 $S_1=0.7\text{m}$ ， $S_2=79.6\text{m}$ ，因此， $I_{11}=0.985I$ ， $I_{12}=0.015I$ 。切断QS1时电流接近额定电流。

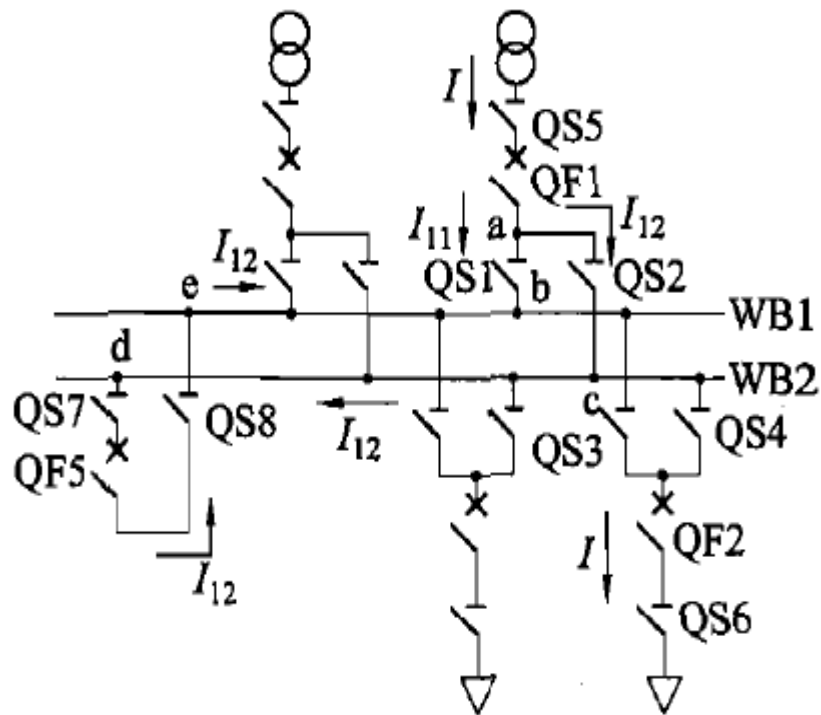


图 2.85 QS1 分断前电流流向简图



GIS中隔离开关切断环流，动、静触头间会产生电弧，由于隔离开关动作慢，且没有灭弧装置，开断环流时，燃弧时间长，可达几个周波。特别是开断电流较大时，开断电流中将产生大量的电弧分解物，如果开断次数相当频繁，就很容易使分解物积聚，以致损害GIS的绝缘性能。为了解决这一问题，可以在隔离开关上加装简单的灭弧装置，同时尽可能提高动触头的分闸速度。



## 主观题

1. 为何电压互感器二次测不能短路？减小电压互感器测量误差的方法有哪些？

正常使用主观题需2.0以上版本雨课堂

作答



## 主观题

为何电流互感器二次测不能开路？减小电流互感器误差的方法有哪些？

正常使用主观题需2.0以上版本雨课堂



作答



# 第三章 高压电器与开关设备

**结束**