

真空断路器操动机构 的设计与优化

苑 舜 编著

中国电力出版社

内 容 提 要

本书对真空断路器机构设计中的基本理论基础进行了介绍,并通过试验和真空电弧数学模型对触头运动特性进行了全面研究,且获得触头最佳运动曲线。本书还对真空断路器整机构思进行了分析,其中包括整机类型、传动机构和操动机构的构思及各种操动机构优化设计,在分析真空断路器合分闸触头振动过程中从测试和理论方面都进行了全面论述,并分析了合、分闸预振动和消除预振动的方法。附录分析了一些国际现有真空断路器操动机构。

本书力争在理论分析基础上使结论工程化,目的使其成为工厂、高校和研究所研究真空断路器的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

真空断路器操动机构的设计与优化/苑舜编著. -北京:
中国电力出版社, 1997

ISBN 7-80125-305-1

I. 真… II. 苑… III. 真空开关-操动机构-最优设计
N. TM561.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (97) 第 04601 号

中国电力出版社出版、发行

(北京三里河路 6 号 邮政编码 100044)

三河市水利局印刷厂印刷

各地新华书店经售

*

1997 年 8 月第一版 1997 年 8 月北京第一次印刷
787 毫米×1092 毫米 32 开本 9.875 印张 219 千字
印数 0001—2070 册 定价 10.80 元

版 权 专 有 翻 印 必 究

(本书如有印装质量问题,我社发行部负责退换)

· 前 言

真空断路器在近年来迅猛发展，这是因为真空灭弧室具有优异的开断性能和高的可靠性。相对于真空灭弧室，操动机构的优化就成为真空断路器的突出问题，机构的运动特性对真空灭弧室开断电流性能影响如何以及真空断路器最佳合分闸曲线等问题是发展真空断路器操动机构的关键，本书就是从此入手展开真空断路器机构优化分析的。

在真空断路器整机优化设计中，首先要了解机械特性对开断特性的影响，换言之，要知道充分发挥真空灭弧室的开断电流能力的机械特性。真空断路器机械特性与电特性是靠触头运动紧密相联的，例如本书部分章节中分析的触头运动曲线、触头合分闸振动、触头熔焊等。

本书以真空断路器运动特性为主线，从真空灭弧性能出发对触头运动特性及与之相关的机械特性进行了分析，最后还进行了高压真空断路器新产品的研制。

本书第一章介绍了真空断路器的特点及发展趋势，而且对真空灭弧室进行了一定的论述与分析，以使读者对真空电弧有一定了解，同时指出了真空断路器设计中的关键问题。

第二章主要对真空断路器机构设计中的基本理论基础进行介绍。

第三章介绍了真空断路器机械特性及机构优化，从国内外资料来看，许多学者对触头运动特性十分关注，而且至今尚处理论探索阶段。本章通过试验和真空电弧数学模型对触头运动特性进行了全面研究，并获得触头最佳运动曲线，并

在分闸特性和合闸运动基础上对机构进行优化。

第四章主要对真空断路器整机构思进行分析，其中包括整机类型、传动机构的构思及操动机构的构思。

第五章内容为各种操动机构优化设计。

第六章对真空断路器合分闸过程中的触头振动从测试和理论两方面进行了全面分析，并分析了合、分闸预振动和消除预振动的方法。

触头弹簧是真空断路器设计的关键之一，本文第七章对触头熔焊进行分析的同时对触头弹簧优化选择进行了分析。

附录分析了一些国际现有真空断路器操动机构。

本书作者在西安交通大学攻读博士学位期间，真空断路器整机优化是博士论文的主要研究方向，本书在理论研究基础上力争使结论工程化，目的是使其成为工厂、高校和研究所研究真空断路器的参考书。

本书由西安交通大学王季梅教授主审。东北电业管理局总工（教授级高工）黄其励博士、东北电业管理局生产部教授级高工路树仁副主任、东北电力试验研究院教授级高工杨丞棠副院长、西北电力设备公司教授级高工楼家法总工、沈阳高压开关厂教授级高工沈聿修总工对本书初稿提出了宝贵建议，在此一并表示衷心感谢。

本书有不当之处恳请读者批评指正，信寄（沈阳）东北电力科学研究院高压所，邮编 110005。

编 著 者

1996 年 2 月于沈阳

目 录

前 言

第一章	真空断路器发展及优化中关键问题	1
第一节	真空断路器的优点及发展过程	1
第二节	真空灭弧室	2
第三节	真空电弧形态	8
第四节	真空断路器机构研制中的关键问题	11
第二章	机构优化设计的基础	16
第一节	机构的组成	16
第二节	机构的运动分析	31
第三节	机构的动力分析	51
第四节	真空断路器设计中典型机构简介	58
第五节	机构优化理论	86
第三章	真空断路器机械特性	96
第一节	分闸运动特性	96
第二节	用真空电弧数学模型分析触头最佳分闸运动特性	103
第三节	合闸速度特性分析	113
第四节	真空断路器合分闸操作对击穿性能的影响	120
第五节	通过燃弧时间的统计分析对真空断路器机械特性进行评估	130
第四章	真空断路器整机的设计构思	139
第一节	真空断路器基本组成	140
第二节	传动机构的类型	153
第三节	操动机构的构思	162
第五章	真空断路器操动机构设计及优化分析	190

第一节	真空断路器操动机构优化基础	190
第二节	动力源设计及优化	193
第三节	传动机构优化分析	224
第四节	弹簧操动机构中凸轮优化设计方法	235
第六章	真空断路器合分闸过程中的触头振动	245
第一节	测试系统及设备	246
第二节	测试结果	254
第三节	实验结果对比分析	254
第四节	应用纵波理论对试验结果分析	256
第五节	合分闸预振动及消除方法	259
第七章	触头熔焊及触头弹簧的选择	266
第一节	浅析阻止触头打开的原因	266
第二节	闭合状态下影响触头熔焊的因素	267
第三节	触头弹簧刚度对关合性能的影响	273
第四节	实验分析	274
第五节	触头弹簧的选取原则	276
附录	一些真空断路器结构简介	278
参考文献		304

第一章 真空断路器发展及 优化中关键问题

第一节 真空断路器的优点及发展过程

早在 1893 年, Rittenhouse 就发现了真空具有高绝缘性能, 而且对交流电弧有很强的灭弧能力, 为此他获得一项发明专利。1925 年加里福尼亚工学院的 Sorensen 教授发表了关于真空断路器的实验数据及分析结果, 并预言应用真空断路器的时代不久就会到来。由于当时的真空技术还很落后, 这使真空断路器在工业中的实际应用被推迟了许久。到 1956 年 H. C. Ross 对杰宁无线电制造公司生产的用于高频回路的真空断路器管进行了改造, 试制出用于电力系统的真空断路器。在真空断路器研制过程中, 美国通用电气公司一直走在前列, 后来又有许多制造厂家从事真空断路器产品的研制以及基础理论的研究, 从而迎来了今天的真空断路器新时代。

真空断路器具有以下特点:

(1) 灭弧过程在密闭的真空容器中完成, 电弧和炽热的金属蒸汽不会向外界喷溅, 因此不会污染周围环境;

(2) 真空的绝缘强度高, 熄弧能力强, 所以触头行程很小, 操动机构的操动功率要求较小;

(3) 灭弧时间短, 电弧电压低, 电弧能量小和触头磨损少, 因而分断次数多, 使用寿命长, 且适合于频繁操作;

(4) 灭弧介质为真空, 所以与海拔高度无关, 同时没有

火灾和爆炸的危险。

(5) 在真空灭弧室的使用期内，灭弧室部分不需要维修；

(6) 开断功能齐全；

(7) 开断可靠性高。

在真空断路器研制初期，还只限于小容量，随着真空断路器技术和理论的不完善，触头结构和断路器结构的不断发展和深入，真空断路器正向高电压、大容量方向发展。美国通用电气公司1980年生产出168kV、开断电流为40kA的双断口真空断路器；日本明电舍公司1980年开始生产123kV、开断电流为31.5kA的单断口真空断路器；东芝公司根据国内外市场竞争的需要，于1987年在日本首次研制成功145kV、31.5kA单断口真空断路器及168kV双断口真空断路器；西屋公司研制出双断口121~145kV真空断路器取代同等级少油断路器^[1~7]。

我国真空断路器研究开始于1958年，1964年研制成功国内第一台10kV、1.5kA三相真空断路器。1973年正式生产中压断路器，1978年开始生产低压真空接触器。从1978年至今十余年的时间内，不论技术上还是生产的产量及品种上都有很大的发展。目前，我国10~35kV电压等级真空断路器的生产已趋于成熟。

第二节 真 空 灭 弧 室

真空灭弧室是真空断路器的核心部件，它主要由动静触头、屏蔽罩、波纹管、波壳及上下法兰组成。

1. 真空灭弧室的结构

用于真空断路器的真空灭弧室的典型结构见图 1-1 所示，图 1-1 中各种真空灭弧室的结构特点及适用范围见表 1-1。

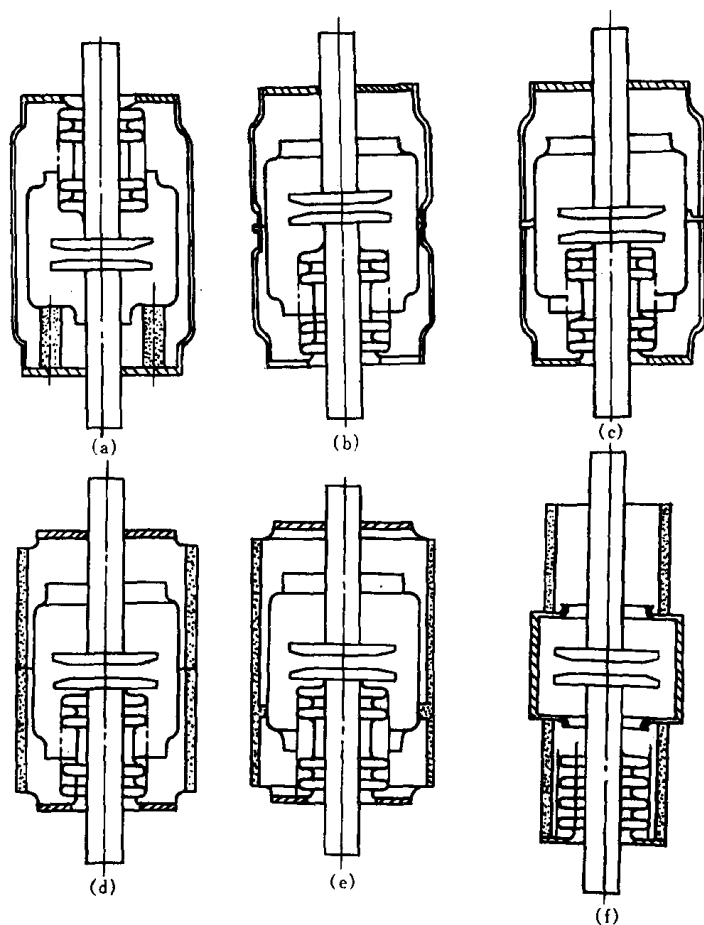


图 1-1 真空灭弧室的典型结构

表 1-1 真空灭弧室的结构特点及适用范围

图 号	结 构 特 点	适用范围
图 1-1 (a)	屏蔽罩用瓷柱固定, 玻璃外壳, 屏蔽罩与动、静触头的分布电容很难相等, 内部电场不均匀, 生产成本较低, 易于大量生产	一般用于 10kV 及以下电压等级真空灭弧室
图 1-1 (b)	玻璃外壳, 屏蔽罩固定在玻璃外壳上的两个可成环之间, 屏蔽罩与动、静触头间的分布电容可设计得完全相等, 内部电场可设计得比较均匀, 耐压水平较高, 生产成本较高	35kV 及以下电压等级真空灭弧室
图 1-1 (c)	玻璃外壳, 屏蔽罩固定在外壳中部的可伐盘片上, 可伐盘片用高频加热或火焰加热方式封接在玻璃外壳中部, 屏蔽罩与动、静触头间分布电容可设计得完全相同, 内部电场可设计得比较均匀, 但因工艺困难此结构只能用于直径不太大的真空灭弧室, 不能用于直径很大的产品, 生产成本低, 结构简单, 适宜于大量生产	35kV 及以下电压等级真空灭弧室
图 1-1 (d)	外壳由两个高氧化铝陶瓷管组成, 屏蔽罩固定于两个陶瓷管之间, 屏蔽罩与动、静触头间的分布电容可设计得完全相等, 内部电场可设计得较均匀, 结构简单, 可使用一次封排工艺, 适合于大规模生产	35kV 及以下电压等级真空灭弧室, 特别适用于额定短路开断电流很大和额定电压较高的真空灭弧室

续表 1-1

图号	结 构 特 点	适用范围
图 1-1 (e)	外壳为一内部有突缘的高氧化铝陶瓷圆铜, 屏蔽罩固定在突缘上, 内部电场不太均匀, 结构简单, 可使用一次封排工艺, 适合于大规模生产	10kV 及以下电压等级真空灭弧室
图 1-1 (f)	屏蔽罩成为灭弧室外壳的一部分, 两个高氧化铝圆管分布在屏蔽罩两端, 屏蔽罩与动、静触头间的分布电容可设计得完全相等, 内部电场均匀	35kV 及以下电压等级真空灭弧室, 特别适用于额定短路开断电流很大和额定电压较高的真空灭弧室

2. 对真空度的要求及检测

真空灭弧室内真空度不得低于 10^{-5}Pa , 通常要求真空度高于 $5 \times 10^{-6}\text{Pa}$ 。真空灭弧室真空度一般在 $10^{-7} \sim 10^{-9}\text{Pa}$ 之间。

真空灭弧室内的真空度可用磁控真空计测量。

在使用现场可用耐压法检查真空灭弧室的真空度是否符合使用要求。其方法如下: 触头开距为额定开距, 在触头间施加额定耐受电压。如果真空灭弧室内发生连续击穿或持续放电, 表明真空度已严重降低 (真空度低于 10^{-5}Pa), 否则表明真空度符合要求。

3. 触头结构

真空断路器均使用对接式触头。触头有简单圆片触头、横

磁场触头和纵磁场触头三类。

简单圆片触头只用于额定短路电流小于或等于 6kA 的小容量真空灭弧室中。横磁场触头是一种利用电弧电流流过触头上特定的路径在弧区产生与真空电弧垂直于触头轴线的横向磁场的触头。常用的横磁场触头如图 1-2 所示，图 1-2 (a) 和图 1-2 (b) 触头主体均为圆盘，为了产生横向磁场，在圆盘上切了一些特殊形状的槽，动、静触头槽的转向相反。图 1-2 (c) 的主体呈杯状，在杯壁上切割一系列倾斜的槽，动、静触头上槽倾斜方向相反。

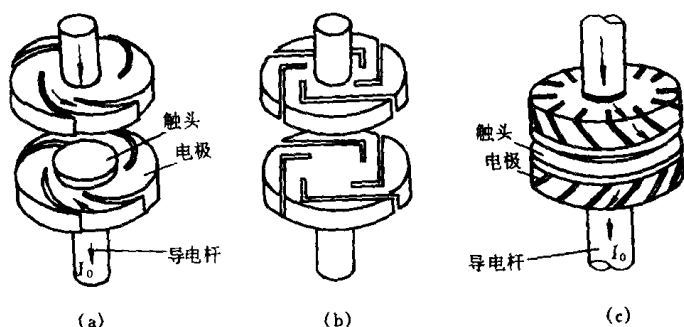


图 1-2 横磁场触头

(a) 螺旋槽触头；(b) 折线槽触头；(c) 杯状横磁场触头

纵磁场触头是利用电弧电流流经触头上特定的导电路径，在弧区产生与电弧方向相同的磁场（纵向磁场）的触头。纵向磁场使真空电弧在很大电流下保持扩散真空电弧，从而使纵磁场触头能开断很大电流。

两种常用的纵磁场触头的结构如图 1-3 所示。

纵磁场触头和螺旋槽横磁场触头的开断能力（即开断电流）与触头直径的关系见图 1-4，在触头直径相同时纵磁场触头的开断能力比横磁场触头的开断能力大得多。

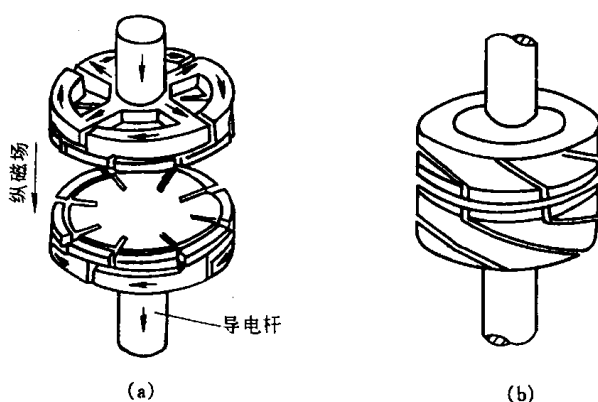


图 1-3 纵磁场触头

(a) 线圈式纵磁场触头；(b) 杯状纵磁场触头

横磁场触头主要用于开断电流小于或等于 40kA 的真空灭弧室中，纵磁场触头可用于开断电流很小直至 200kA 的灭弧室中。

由于直径相同时纵磁场触头比横磁场触头有更大的开断能力，在额定短路电流超过 20kA 的真空灭弧室中使用纵磁

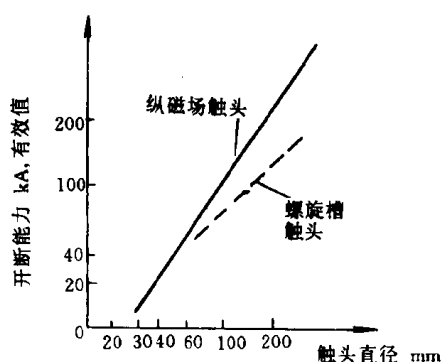


图 1-4 纵磁场触头及螺旋槽横磁场触头的开断能力与触头直径的关系

场触头有明显的优越性。

4. 触头材料

对真空触头材料的主要要求是：①含气量低；②开断能力大；③抗熔焊；④截断电流小；⑤高的击穿电压；⑥电磨损速率小；⑦导电率高，接触电阻小。

真空断路器常用铜基和铜铬两类触头材料。铜基触头材料是含少量高蒸气压合金成份的铜合金。这类触头材料的代表是铜铍、铜铍铝和铜碲硒合金。这类触头材料有较大的开断能力，具有很好的抗焊能力，导电率高，截流水平为10A左右，击穿电压较低，电磨损速率较大。铜基合金主要用于10kV级真空灭弧室，也可以用于35kV级真空灭弧室。

铜铬触头材料是含铬25%~50%，其余为铜的粉末烧结材料，可以用混粉法制造，也可以用浸渍法制造。铜铬触头材料的开断能力大，击穿电压高，电腐蚀速率小，具有较高的导电率。它的截流水平低，抗焊性差。由于铬和氧及另外一些气体有很强的亲和力，所以在燃弧过程中，铜铬触头材料有很强的吸气能力，这不仅有利于保持真空灭弧室的真空度，而且降低了铜铬触头材料的含气量要求，铜铬触头材料的含气量很高时仍能满足大电流开断的要求。铜铬触头材料是目前最适合真空断路器的触头材料，在3~35kV各种开断能力的真空断路器中均可使用。

第三节 真空电弧形态

真空断路器开断交流电流时，触头打开时刻相对电流相角来说是随机的，从触头打开到电流过零真空熄弧过程中，其

电弧经引燃到熄弧有许多形态的变化，而且对于不同触头间隙及不同开断电流其形态有所不同。

真空电弧引燃是通过开断电流的触头来实现的。当触头刚分离瞬间，电流将集中到触头上的某一点或某数点上，表现出电阻的剧烈增加和温度的迅速上升，直到发生金属桥的断裂和产生金属蒸气，同时形成极高的电场强度，这样就会导致强烈的场致发射和间隙击穿，继之形成真空电弧^[1]。

真空电弧是金属蒸气电弧，其金属蒸气及电子和离子的主来源是阴极。通过高速摄影观察结果表明，电子、离子和金属蒸气并不是来自阴极的整个表面，而是来自一些孤立的小斑点，这些斑点在阴极表面快速运动，有时分成两个或两个以上的更小的斑点，阴极斑点熄灭后又在别的地方重新形成。形成阴极斑点的电流密度很高，其原因一般认为是由于热——场致发射，所以，重新产生的阴极斑点的位置是在场强大的尖端出现，出现阴极斑点的位置与触头表面的平滑程度有关。

一般对阴极斑点的观察都是在小电流情况下进行的。随着电流的增加，阳极变得活跃起来，此时阴极斑点运动也变得缓慢，甚至停滞，以致于形成较大的斑点^[8]。

阳极的活跃首先来自阳极表面电弧的收缩，电弧的收缩使阳极表面熔化，因而在电流停止之后还能产生金属蒸气。这种情况的出现与许多因素有关，其中触头间隙和电弧电流是重要因素。图 1-5 显示出阳极放电状态与触头间隙和电弧电流的关系^[9,10]。低电流状态下阳极仅是来自于阴极粒子的被动接收者，处于不活跃状态，电弧电压相对较低，且无高频分量出现，这时电弧形态为扩散型真空电弧。随着电流的增

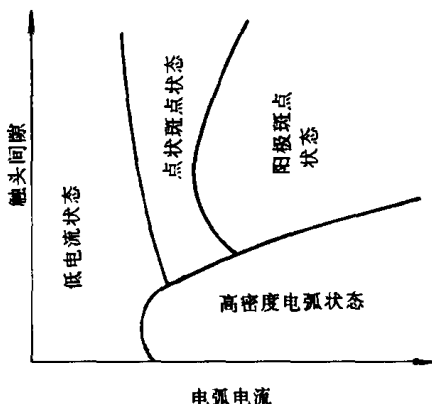


图 1-5 阳极状态划分图

加，且触头间隙较大时，阳极出现一个或几个明亮的斑点，但斑点很小，存在时间很短，这时电弧为点状阳极斑点状态。在电流较大且触头间隙较大时，阳极温度接近阳极材料沸点，有一个或多个阳极斑点出现，阳极出现熔化。在电流较大且开距较小时，电弧处于高密度电流状态，这时阴极和阳极烧蚀均很严重。阳极斑点的形成和电弧收缩是一个动态过程，阳极斑点的形成时间为 $50 \sim 800 \mu\text{s}$ ^[11]。

从以上真空电弧状态来看，在扩散型电弧及点状阳极斑点出现情况下，电弧电流过零时可以正常熄灭。若阳极出现阳极斑点或阳极出现严重熔化时，则开断可能失败。而在阳极斑点出现之前往往出现弧柱收缩，这种收缩先出现在阳极附近，若出现弧柱本身塌缩现象，则阳极斑点已经形成。因此，只有通过参数的合理选择来控制弧柱收缩，才能有效防止或减少阳极斑点出现的可能性。对一定的灭弧室结构和开断电流，只有通过触头间隙及外加磁场来控制真空电弧形态，以使灭弧室能充分发挥开断短路电流的能力。

第四节 真空断路器机构研制中的关键问题

真空断路器机构研制中有以下关键问题需要提前解决。

1. 触头开距对真空灭弧室开断能力的影响

影响真空断路器开断能力的因素很多，其中主要有灭弧室内的触头结构及材料、触头直径、真空度、触头开距、外加磁场等。众所周知，对触头结构而言，产生横向或纵向磁场的电极结构其开断能力明显高于平板型电极；对触头材料而言，目前铜铬材料比较理想。真空断路器的极限开断电流与电极直径近似成正比^[12]。

触头开距是影响真空灭弧室开断性能的一个重要因素，很多学者对此做过研究工作，O. R. Mitchell^[13]得出从扩散型真空电弧转变为集聚型真空电弧的临界电流与触头间隙之间成反比关系。

Yanabu^[14]认为无论采用哪种方式来提高真空灭弧室的开断能力，都必须考虑如何最大限度地减少注入间隙的能量。因为这些能量引起电极表面熔化，向间隙释放金属蒸气，导致弧后重燃。他最后得出纵磁结构灭弧室极限开断性能与触头间隙并不成反比，但也是随间隙增加而减小。

Voshall^[15]在研究真空灭弧室开断能力时也做过分析，并得到与以上不同的关系式。

从以上分析可以看出，触头间隙增加，极限开断性能将随之减小。以上研究对 10kV 来说对于间隙小于一定数值的情况并不适合。从大量的试验中发现，当触头间隙小于某一数值时，极限开断性能随触头间隙的减小而减小。