

真空断路器 开断与关合不同负载时 的操作过电压

苑 舜 编著



中国电力出版社
www.cepp.com.cn

196547

TM561.2

Y940

真空断路器 开断与关合不同负载时 的操作过电压

苑 舜 编著



中国电力出版社

www.cepp.com.cn

内 容 提 要

本书对真空断路器在开断与关合不同负载（主要包括感性负载和容性负载）时操作过电压的产生和影响因素进行了论述。在对感性小电流操作过电压理论和实验分析的基础上，指出了截流过电压的危害，提出了真空断路器出现截流的实质是真空电弧的不稳定性的观点。同时对影响截流的因素进行了详细的分析，并且对过电压的防护和真空断路器的设计提出了改进方案。从理论和试验研究的角度对容性负载（包括开断与关合电容器组和空载电缆等）操作过电压进行了阐述，对重燃过电压产生的过程及真空断路器重燃的实质进行了全面的分析。本书对真空灭弧室的老练工艺的各种形式进行了效果分析。最后，本书还对开断与关合不同负载的型式试验进行了介绍，为厂家对试验设备和方法的了解提供参考。

本书力争由浅入深、层次分明，使比较复杂的过电压过程简单化，以便电力系统专业技术人员，以及工厂、高校及研究院所从事真空断路器工作的专业人员参考。

图书在版编目（CIP）数据

真空断路器开断与关合不同负载时的操作过电压/苑舜编著. —北京：中国电力出版社，2000.11
ISBN 7-5083-0363-6

I. 真… II. 苑… III. 真空开关-开关电路-过电压-分析
N. TM561.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2000）第 34553 号

中国电力出版社出版、发行

（北京三里河路 6 号 100044 <http://www.cepp.com.cn>）

实验小学印刷厂印刷

各地新华书店经售

*

2001 年 1 月第一版 2001 年 1 月北京第一次印刷

787 毫米×1092 毫米 32 开本 7 印张 151 千字

印数 0001—3000 册 定价 15.00 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

真空断路器以其具有一系列的优点而大量用于配电系统。虽然配电系统可用多油、少油、磁吹等断路器，但许多配电设备需设在严重污染地区而要求断路器具有不爆炸、低噪声、体积小、高可靠性和检修周期长等特点。真空断路器独具这些优点，因而产量急剧增长，特别是在 36kV 以下电压等级中占主导地位，德国真空断路器的市场占有率 1993 年达 65%，英国约占 50%，日本已达 70%，且日本在 12kV 及 6kV 电压等级中几乎全部采用真空断路器。

目前国外生产真空断路器的 60 多家公司中主要有 12 家，它们是美国的 GE 公司和西屋公司；日本的东芝、日立、三菱、富士、明电舍公司；德国的西门子、AEG 和 CALOR-EMAG 公司；英国的 GEC 和 HAWKER SIDDELEG 公司。其中以东芝、三菱、明电舍、西门子、AEG、GE 和西屋 7 家公司的生产规模为最大，它们的共同特点是自行研制能力强，生产真空灭弧室（灭弧室年产量总和大于 1000000 只）技术参数高，品种齐全、可靠性高。

我国自 60 年代初开始真空断路器的研究工作，70 年代初开始工业生产真空断路器。经过二十多年的努力，我国进入了真空断路器生产大国的行列，我国真空断路器的技术水平也达到国际 90 年代初的先进水平。我国是真空断路器的生产大国，拥有真空断路器制造厂 100 多家，真空灭弧室制造厂 10 余家。主要真空断路器生产厂有北京开关厂、锦州开关厂、天水长城开关厂、四川电器厂等。主要真空灭弧室生产

10-3-33

厂有 4401 厂、777 厂、771 厂、沈阳灯泡厂、779 厂等。

目前我国真空断路器的年产量约为 3 万台。我国真空断路器品种很多，很多产品非常相似，而有些特殊用途的产品却无人生产，这种状况给生产和使用带来很大不便。

本书第一章阐述了真空断路器从发明到发展至今的过程，并对真空断路器应用情况进行了评述；第二章对感性负载下小电流载流过电压进行了理论和试验分析，在电弧不稳定理论的基础上，对载流的实质和影响因素进行了研究论述；第三章对感性负载下开断与关合操作过电压进行抑制方面的研究论述，从而得出 ZnO 避雷器的不同组合形式可以在不同程度上减少过电压，且提出电力设备的保护措施；第四章对真空断路器开断与关合电容器组时操作重燃过电压进行研究，同时对重燃原因进行了论述，提出了对断路器本身进行改行的方案；第五章重点论述了影响真空断路器开断与关合电容器组能力的因素，指出了触头材料的影响程度、老练工艺的影响程度以及机械特性的影响程度；第六章提出通过外部加装措施减少过电压的产生，并将事故原因及保护措施结合起来进行了全面分析论述。第七章对型式试验进行了全面介绍，对制造厂家的生产和型式试验可能出现的问题进行了阐述，为制造厂提供新品开发依据。

曹荣江博士对本书提出过宝贵意见，在此表示衷心感谢。本书许多内容受到辽宁省电科院同仁在试验和稿件组织方面的大力支持，在此一并表示衷心感谢。本书有许多不当之处，希望专家同仁给予批评指正。

作者

一九九九年三月二十一日

目 录

前言

第一章	真空断路器的发展和应用	1
第一节	真空断路器的发展和应用.....	1
第二节	不同负载下的操作过电压	12
第二章	真空断路器开断与关合感性	
	负载时的操作过电压	26
第一节	真空断路器开断感性负载的截流过电压	26
第二节	真空断路器截流的实质——真空电弧不稳 定性	66
第三节	影响截流的因素	90
第三章	真空断路器开断与关合感性	
	负载操作过电压的抑制	94
第一节	截流过电压的抑制方法	94
第二节	限制截流过电压的保护分析	95
第四章	真空断路器开断与关合电容器组时	
	操作过电压	118
第一节	真空断路器开断与关合电容器 组时重燃过电压.....	118

第二节	真空断路器开断电容器组重燃 几率的试验研究·····	134
第三节	真空断路器高频电流开断特性 的影响因素·····	137
第四节	真空断路器开断容性电流时发 生重燃的原因·····	145
第五章	影响真空断路器开断与关合 电容器组能力的因素	148
第一节	影响电流开断后介质恢复过程的 因素·····	148
第二节	真空断路器 CuCr 触头表面微粒 的生成·····	154
第三节	老练工艺·····	157
第四节	关合电容器组时弹跳引起的触头 分开最大允许时间的确定·····	159
第五节	改善真空断路器机械性能的 主要措施·····	162
第六节	选择适当的老练工艺降低真空 断路器开断电容器组的重燃率·····	162
第六章	真空断路器开断与关合电容 器组时操作过电压的抑制方 法	175
第一节	限制过电压方法简述·····	175

第二节	限制单相重燃过电压的避雷器	
	接线方式及其保护效果.....	184
第三节	氧化锌避雷器涌流能量及其计算.....	187
第四节	氧化锌避雷器使用不当所引发的事故.....	196
第七章	真空断路器开断与关合感性	
	与容性负载的型式试验	198

真空断路器的 发展和应用

第一章

第一节 真空断路器的发展和应用

一、真空断路器的发展

断路器在电力工业上的应用和发展已有很长历史。由在大气中自然拉长电弧、分断电流的断路器开始，发展到各种形式的多油断路器和少油断路器、产气断路器和压缩空气断路器，直到后来又出现真空断路器和 SF₆ 断路器。

早在 1893 年日德赫斯 (Rittenhouse) 就发现了真空对交流电弧有很强的灭弧能力，并为此获得一项专利。1926 年加利福尼亚工学院的索锐琛 (Sorensen) 教授发表了关于真空断路器的试验数据及分析结果，并预言应用真空断路器的年代不久就会到来。由于当时的真空断路器技术还很落后，这使真空断路器在工业中的实际应用被推迟了许久。直到 1956 年克锐斯 (H. C. Ross) 对杰宁无线电公司生产的用于高频回路的真空灭弧室进行了改造，试制出用于电力系统的真空断路器以后，真空断路器才真正商品化。在真空断路器研制过程中，GE 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，从而使真空断路器得以发展起来。

真空断路器由真空灭弧室、传动机构及操动机构组成。真

空灭弧室的结构原理图如图 1-1 所示。外壳由玻璃、陶瓷或微晶玻璃等无机绝缘材料做成，呈圆筒形状，两端用金属盖板封接组成一个密封容器。外壳内部有一对触头，其中静触头固定在静导电杆的端头，动触头固定在动导电杆的端头。动导电杆通过波纹管和金属板的中心孔，伸出灭弧室外。动导

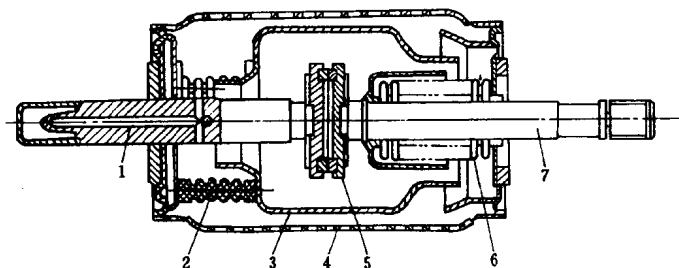


图 1-1 真空灭弧室结构原理图

- 1—静导电杆；2—支持屏蔽罩的瓷柱；3—主屏蔽罩；
4—外壳；5—触头；6—波纹管；7—动导电杆

电杆在中部与波纹管的一个端口焊接在一起，波纹管的另一个端口与金属盖板焊接。波纹管是一种弹性元件，其侧壁呈波纹状，它可以纹向伸缩。由于在动导电杆和金属盖板之间引入了一个波纹管，真空灭弧室的外壳就被完全密封，动导电杆可以左右移动，但不会破坏外壳的密封性。真空灭弧室内部的气压低于 $1.33 \times 10^{-2} \text{Pa}$ ，一般为 $1.33 \times 10^{-3} \text{Pa}$ 左右，因而动触头和静触头始终是处在高真空状态下。在触头和波纹管周围都设有屏蔽罩，触头周围的屏蔽罩称为全屏蔽罩，由瓷柱支撑，波纹管周围的屏蔽罩称作辅助屏蔽罩或波纹管屏蔽罩。

如果真空断路器接入如图 1-2 所示的电路中，当操动机

构使动导电杆向上运动时，动触头和静触头就会闭合，电源与负载接通，电流就流过负载。如果这时动导电杆向相反方向动作，即向下运动，动触头和静触头就会分离，在刚分离的瞬间，触头之间将会产生真空电弧。真空电弧是依靠触头上蒸发出来的金属蒸汽来维持的，直到工频电流接近零时，真空电弧的等离子体很快向四周扩散，电弧就被熄灭，触头间隙由导电体变为绝缘体，于是电流被分断。

真空断路器具有下列优点：

(1) 熄弧过程在密封的真空容器中完成，电弧和炽热气体不会向外界喷溅，因此不会污染周围环境。

(2) 真空的绝缘强度高，熄弧能力强，所以触头的行程很小，一般均在几毫米以内，因此操动机构的操作功率小，使整个断路器小而轻。

(3) 熄弧时间短，电弧电压低，电弧能量小，触头损耗少，因而分断次数多，使用寿命长，适合频繁操作。

(4) 断路器操作时，振动轻微，几乎没有噪声，适用于城市区域和要求安静的场所。

(5) 灭弧介质为真空，因而与海拔高度无关，同时没有火灾和爆炸的危险。

(6) 在真空灭弧室的使用期限内，触头部分不需要维修、检查，即使机构维修检查，也十分简便，所花费的时间也很短。

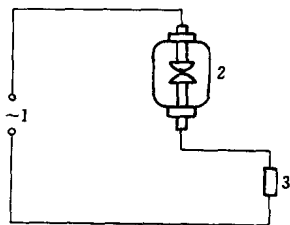


图 1-2 真空断路器设备
接入负载的电路

1—电源；2—真空断路器；
3—负载

真空断路器正向高压、大容量方向发展。通用电器公司 1980 年生产出 168kV 开断电流为 40kA 的双断口真空断路器；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的需要，于 1987 年在日本首次研制出 145kV、开断电流为 31.5kA 的单断口真空断路器及 168kV 双断口真空断路器；西屋公司研制的双断口 121~145kV 真空断路器已开始取代同等级少油断路器^[1~3]。

触头结构的改进是真空断路器技术发展的最积极因素之一。在日本首先发明了纵磁场触头，开始为线圈型，后来出现了多种结构形式。西门子公司开发的是杯状纵磁场触头。目前，所有先进的真空灭弧室都采用纵磁场触头，用的最多的是线圈型纵磁场触头和杯状纵磁场触头。

与横磁场触头相比，纵磁场触头在直径相同条件下，具有大得多的开断能力。在开断电流相同时，纵磁场触头的电腐蚀速率比横磁场触头小得多，因而其电寿命比横磁场触头长得多，同时在开断短路电流后，其触头表面比较平整光滑，所以触头间隙的耐压强度高。

东芝公司采用纵磁场触头后，开发出开断能力 100kA 的真空断路器，实验室中已成功开断了 200kA。西门子公司已将 63kA 真空断路器商品化，还用三台 63kA 真空断路器并联作为发电机保护断路器，其额定短路开断电流为 63kA，额定电流为 12kA。

真空断路器的发展明显趋向于大容量、高电压、低过电压和小型化，而其触头材料则是保证这种发展的一个重要因素。通常要求触头材料要开断容量大、耐压强度高、载流水平低、电磨损率小、抗熔性能好等，但还没有一种材料能同

时满足这些要求。一些公司采用铜铬合金做触头材料，铜和铬的蒸气压力差别极小，因此在电弧作用区域不会发生材料成分的明显变化。铜和铬在电弧作用下的熔化基本上具有平整形状，它们的平滑熔化区慢慢变硬而不会由于出现凸出部分、陷口和裂纹而发生畸变。由于触头表面平整，触头间隙才可能足够短，触头材料的容积也可能趋于最小（因为大量的触头蒸发材料沉积在另一个触头上并可重新利用）。被熔化的平整表面很快的硬化保证了开断电流之后电气强度的迅速增大。铬含量增加可以防止触头熔焊。西屋公司和西门子公司都采用铜铬合金做触头材料。西门子公司用烧结浸渍法和电弧熔炼法制造触头材料，西屋公司用的是混粉法。铜铬合金触头加上纵磁场可大大提高真空断路器的开断容量，铜铬触头材料的性能目前仍处于领先地位。东芝公司也早已采用了性能优异的铜铬触头材料和纵磁场触头，从而使电弧在开断大电流时由聚集型转变成扩散型，大大提高了真空断路器的开断能力。

在触头材料方面，外国在继续寻求和开发新的材料。例如，三菱公司开发了 Cu-Ta-a 和 Cu-Mo-a 触头材料（a 代表一种微量成分），可将触头的有效面积减小 1/2，该公司已用新触头材料开发出第五代小型真空灭弧室。东芝公司采用 Ag-Wc 触头材料，日立公司采用 Co-Ag-Se 触头材料，三菱公司还采用一种 Cu-Cr-Bi- α 多元合金触头材料，富士公司采用 CuCr 中添加高蒸汽的材料。前苏联全苏电工研究院先后开发过不少真空灭弧室触头材料，在其所生产的第二代真空灭弧室中，触头由 Cr-Cu-W 合金材料制成，以此代替了第一代灭弧室中所用的 Cu-Bi-B 合金。用这种材料制成的触头间隙具有较高的电气强度，因而与第一代灭弧室比较，触头行

程可平均减小 30%。这种合金材料也具有较高的耐电腐蚀性，与第一代相比，其灭弧室的操作寿命和机械寿命提高 1.5~2.5 倍。据说国外还研制出一种 Cu-Cr-Ne 触头材料，其性能优异，但造价昂贵。应该指出的是，目前在国外所开发的触头材料中，还没有一种能同时满足所有要求（开断容量大、耐压强度高、截流水平低、电磨损率小、抗熔性能好等）的万能性触头材料。这些材料多半是加进某种成分，使得某种参数改善，但其它参数却变坏。例如，加进铋可减少截流和熔焊程度，但同时会降低电气强度，还会明显降低开断能力。加进大量的铁和铬，会大大增加耐电气腐蚀性，提高开断电流和电气强度，但同时增大了平均电阻，并继而使得额定电流通过时真空灭弧室的温升提高。

真空灭弧室是真空断路器的心脏，真空断路器的可靠性在很大程度上取决于真空灭弧室的可靠性，因而真空灭弧室的制造技术至关重要。

真空灭弧室的外壳过去多采用玻璃材料制造，造价较低。目前在国外，一般都采用陶瓷外壳，多数是高铝陶瓷。它最大能承受 1600℃ 的高温，其熔点为 2030℃，耐压强度高。金属封接材料采用与陶瓷热膨胀系数十分接近的 FeNiCo 合金。陶瓷焊接面是经 MoMn 化学结合法形成陶瓷金属化层，用熔化温度为 779℃ 的 AgCu28 作为焊接材料，在真空中进行钎焊，也可在惰性气体中进行焊接。德国 AEG 公司在制造过程中所采用的钎焊工艺，是在钎焊以前，把一种特殊的金属镀层应用到高纯氧化铝陶瓷上，这种镀层要在 1500℃ 以上的氢气中经过烧结热处理。

真空灭弧室的触头材料也与制造技术密切相关，现在铜铬合金触头材料仍为真空灭弧室采用的最好的触头材料。

真空灭弧室的屏蔽罩一般采用中封式结构，它改善了电场分布，提高了绝缘强度。

波纹管的制造技术对灭弧室的机械寿命很重要。世界各公司都在不断改进波纹管的制造工艺，提高其寿命。西门子公司对每批波纹管抽一定数量进行寿命试验，试验不合格就不能投入生产线，还要检查波纹管的壁厚，壁厚不均匀的波纹管也不能使用。波纹管一般选用不锈钢材料，目前有成型波纹管和焊接波纹管。成型波纹管用于真空断路器中。焊接波纹管伸缩行程大、寿命长、体积大、造价高，多用于真空接触器中。英国对波纹管的试验研究表明，增加波纹管的波数并不能有效地延长波纹管的寿命。波纹管的设计应满足使波纹管的操作行程比率和波纹管的伸缩长度比率为 $0.3 \sim 0.4$ 。西门子公司在真空断路器灭弧技术中采用了等离子体技术，以减少触头表面的烧蚀和磨损，这样使真空灭弧管发生故障的平均时间为 25 年。

对真空灭弧室进行高压老练，可除去触头表面的微粒。其机理是利用场致发射作用，蒸发除去触头表面细丝或针状物。一般老练电压为 $30 \sim 100\text{V}$ ，电流为几百安。

现在国外先进制造公司普遍采用一次封排工艺。真空灭弧室的排气和封接过程用一次封排真空炉完成，用计算机进行操作控制。英国 GEC 公司用的是本国 Torvac 公司生产的电子控制一次封排真空炉。在德国，ABB 集团公司采用大型横向一次封排真空炉，其最高工作温度达到 1300°C ，工作效率很高，ABB 公司称他们的炉子可年产 30 万个真空灭弧室。有一些公司采用与显象管排气台类似的设备即排气小车，在轨道上步进的长排车对真空灭弧室进行排气。两种工艺都具有很高的生产效率，但相比而言，一次封排工艺要求严，不

易掌握；长排车排气的工艺灵活性大，但设备投资大。

操动机构是保证真空断路器机械可靠性的重要环节，因而各制造公司不断对操动机构进行改进。西门子、Calor Emag、日立、三菱、富士等公司都研制使用性能较好的专门配真空断路器的电动机储能弹簧机构（也可手动），机械寿命达10000次操作，高的可达70000次。西门子公司生产的弹簧操动机构采用蜗轮蜗杆，结构紧凑、加工精度高、可靠性高。Calor Emag公司生产的弹簧机构是采用盘簧储能，可调节操作功率，分二次脱扣。

日本东芝公司自1962年开始生产真空灭弧室以来，发展速度很快，已累计生产真空灭弧室170万只，36kV以下真空断路器的生产量占该公司断路器总产量的80%。

德国西门子公司生产真空断路器已有15年的历史，到1992年累计产量达10万台，它的产品包括3AF、3AG、3AH等型号。3AF所用的真空灭弧室采用西门子公司独立开发的杯状纵磁场触头，灭弧室的小型化程度很高。3AH型的零部件数量比3AF型大大减少，性能更可靠，技术经济指标更先进。

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，不论在技术上还是在生产的产量和品种上，都有很大发展。目前，我国10~35kV电压等级断路器已趋于成熟。但是这并不能满足电力系统的需要，且与世界先进水平的差距也很明显。

二、发展中存在的问题

真空断路器以其很强的灭弧能力受到广泛的应用，但正

因为灭弧能力太强，带来了截流过电压的产生，尤其对感性小电流更易发生截流。减小截流值是解决和杜绝截流过电压产生的关键。对系统来说，进行过电压保护也是一个必须深入研究的课题。当前从触头材料方面降低截流值的研究在国际各大公司有很大进展，并取得了实效，但截流值很低的触头材料影响开断能力。

英国真空灭弧室公司和德国西门子公司研制出含铬高的低截流水平 CuCr 触头材料，再加上纵磁场灭弧，能大大提高真空断路器的开断能力，且耐压强度高。例如西门子公司用铜铬合金生产的 3AF 系列真空断路器在 100 次满容量分断时不发生重燃，分断后的耐压水平不下降。日本各公司在这方面也有突破。富士公司使用含高蒸气金属成分的 CuCr 合金触头材料和纵磁场触头制成的低过电压真空断路器，其截流值为普通真空断路器的 1/10，平均截流值 0.4A。日本公司使用的 CoAgSe 触头材料，使真空断路器的截流值低于 1A。东芝公司用的触头材料为 Ag-WC，再加上纵磁场灭弧，提高了断路器的开断容量，原来它的低过电压真空断路器做到 7.2kV、20kA，现在做到 7.2kV、40kA。三菱公司的低过电压触头材料为 Cu-Cr-Bi- α 多元合金。日本还发明了一种公开特许，提出用铬和钨粉末烧结的骨架浸渍铜和铋做真空断路器的触头材料，以便降低截断电流，在其浸渍过程中，铋主要集中于难熔的钨和铬粒子附近，粒子之间的空隙充填铜，组成的各元素重量，铜占 20%~70%，铬占 2%~75%，钨占 2%~75%，铋占 1%~18%。对这几种材料的研究表明，提高铋含量（16%）和降低钨含量（4%）具有最好的特性。铜和铬含量分别为 45% 和 35% 时，截断电流为 0.5A，在 100000 次开断操作后截流值约提高到 1A。特许中指出，应用