

熊泰昌 编著

# 真空开关电器

( 第 二 版 )



中国水利水电出版社  
[www.waterpub.com.cn](http://www.waterpub.com.cn)

熊泰昌 编著

# 真空开关电器

( 第 二 版 )



中国水利水电出版社  
[www.waterpub.com.cn](http://www.waterpub.com.cn)

## 内 容 提 要

本书是《真空开关电器》的第二版。全书在系统叙述真空电弧理论的基础上,着重地介绍了近年来国外设计的技术先进型中压真空开关电器和国内具有典型代表意义的同类产品(如真空断路器、真空负荷开关、真空接触器以及空气绝缘和充 SF<sub>6</sub> 气体绝缘两大类真空开关装置)的设计原理、结构特点、发展趋势。此外,还对真空开关在运行中遇到的操作过电压、真空度的变化、X 光射线和绝缘特性以及抑制控制回路中操作过电压等技术问题进行了讨论。本书共分四章,内容包括真空开关电器的发展及其物理基础、常用真空开关、真空开关装置及有关技术问题、真空开关装置的运行。

本书供电力工程设计人员和开关使用、运行人员阅读,也可作为真空开关电器设计、制造、购销人员的参考资料。

## 图书在版编目(CIP)数据

真空开关电器/熊泰昌编著. - 2 版. - 北京:中国水利水电出版社, 2002

ISBN 7-5084-1251-6

I. 真… II. 熊… III. 真空开关-基本知识 IV. TM561.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2002) 第 084111 号

|       |                                                                                                                                                                                                                                |
|-------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|
| 书 名   | 真空开关电器(第二版)                                                                                                                                                                                                                    |
| 作 者   | 熊泰昌 编著                                                                                                                                                                                                                         |
| 出版、发行 | 中国水利水电出版社(北京市三里河路 6 号 100044)<br>网址: <a href="http://www.waterpub.com.cn">www.waterpub.com.cn</a><br>E-mail: <a href="mailto:sale@waterpub.com.cn">sale@waterpub.com.cn</a><br>电话: (010)63202266(总机)、68331835(发行部)<br>全国各地新华书店 |
| 经 售   | 北京密云红光印刷厂                                                                                                                                                                                                                      |
| 排 版   | 787×1092 毫米 32 开本 7.5 印张 160 千字                                                                                                                                                                                                |
| 印 刷   | 1996 年 10 月第一版                                                                                                                                                                                                                 |
| 规 格   | 2002 年 11 月第二版 2002 年 11 月第二次印刷                                                                                                                                                                                                |
| 版 次   | 5001—9100 册                                                                                                                                                                                                                    |
| 印 数   | 18.50 元                                                                                                                                                                                                                        |
| 定 价   |                                                                                                                                                                                                                                |

凡购买我社图书,如有缺页、倒页、脱页的,本社发行部负责调换  
版权所有·侵权必究

# 第一版前言

由于真空开关电器具有开断能力强、可靠性高、无爆炸危险，而且使用方便、对环境无污染等优异的特点，因而在工业国家的中压系统已大量使用，同时在低压和高压领域也有一定的发展。

在我国，采矿、冶金、化学等工业已经有多年使用各型真空开关的运行经验，近年来，随着电力工业蓬勃的发展，提高开关运行的可靠性和实现中压开关无油化已成为一项重要的任务。为推进这一任务的实现，作者在综述与真空开关电器密切相关的真空电弧理论及其最新研究的基础上，着重扼要地介绍国外技术先进型的，尤其是在中国已经移地生产的中压开关电器的设计原理、运行经验和发展趋势，以期加深对这些产品的理解并为推动我国自行设计开发的真空开关电器的改进与提高提供一些有益的借鉴，从而满足电力工业和用户不断向高质量、高水平发展的需要。

因为作者学习国外先进经验的体会尚不够深刻，又加之真空电弧理论和真空开关技术仍在不断研究、发展之中，所以难免有许多不足之处，恳请广大读者指正。

作者衷心感谢清华大学徐国政副教授对书稿的细心审阅，并提出了不少宝贵意见，特致以谢意。

作者

1996年5月于北京

## 第二版前言

本书自 1996 年出版以来，受到广大读者的欢迎，并提出了许多宝贵的意见和建议，希望能在第二版时加以改进，以使本书日臻完善。另外，由于真空开关电器的发展非常迅速，近期国内外有关机构又开发了许多技术、工艺和功能更加新颖的真空开关电器及其相关装置，这也强烈要求本书能够更新、增加新内容，以适合广大读者的最新需求。因此，作者经过一年多的调研、整理并根据本人参加国内、外研制和试验工作的体会对第一版进行了全面的修订，完成了第二版的编写工作。作者真诚希望本书能够继续为广大读者提供更大的帮助。

本书第二版在以下几个方面进行了修订：

(1) 增加了近期国内外开发的具有代表意义的几种新型断路器、负荷开关和接触器以及相关的开关装置。并且，为适应我国以负荷开关、接触器为主的组合电器使用量逐渐增多的趋势，完善了相关熔断器的合理选择与配合原则的叙述，为读者在实际应用中提供了方便。此外，还补充介绍了在垂直方向可移开式开关柜的结构特点和示例，扩展了可移开式开关装置的视角。

(2) 开关装置智能化在近几年的发展尤为迅猛，现在正处于一个不断完善和提高的过程。第一版中只简单介绍了几种数字式继电器的功能，已大大落后形势，为此，第三章第四节改为中压开关装置的智能化。在引入这一概念的同时，还简介了当前国际上典型的设计和已有实际应用的部分传感技术。

(3) 真空断路器切断、关合电容器组时的行为是尤为受到关注的课题。在第二版中着重对这种操作过程进行了详细的计算分析并介绍了试验考核的方法和有关开断成功与失败的事例。另外，还涉及了真空断路器切断并补电抗器有关的机理和过电压保护的实践。

(4) 对于开关柜防护内部电弧故障的结构设计与试验研究，国内外的报导很少。现根据国外的设计方法和作者参加该工作中得到的试验研究数据与体会补入第二版。

(5) 在关于操作过电压保护电器的讨论一节中，增加了避雷器释放过电压能量的分析。另外，根据近五、六年来的运行反映，对用于相间保护的组合避雷器发生事故的原因和其他类型避雷器的选择及其保护效果进行了评述。

作者

2002年7月于上海

# 目 录

第二版前言

第一版前言

第一章 真空开关电器的发展及其物理基础..... 1

第一节 真空开关电器的发展简述..... 1

第二节 真空介质的击穿特性..... 8

第三节 真空中的电弧现象和介质强度的  
恢复特性 ..... 13

第四节 真空灭弧室的结构及其用途 ..... 20

第二章 常用真空开关 ..... 35

第一节 中压真空断路器的典型结构及其  
性能 ..... 35

第二节 真空负荷开关 ..... 75

第三节 真空接触器..... 105

第四节 真空开关技术在低压和高压领域  
的扩展..... 112

第三章 真空开关装置及有关技术问题..... 120

第一节 空气绝缘的真空开关柜..... 120

第二节 真空接触器与限流熔断器组合装置..... 147

第三节 中压充  $\text{SF}_6$  气体绝缘的真空开关  
装置..... 160

第四节 中压开关装置的智能化..... 176

第四章 真空开关装置的运行..... 183

第一节 与真空开关有关的操作过电压及其  
防护..... 184

|      |                             |     |
|------|-----------------------------|-----|
| 第二节  | 关于操作过电压保护电器的讨论·····         | 204 |
| 第三节  | 与真空开关装置运行有关的一些<br>其他问题····· | 217 |
| 参考文献 | ·····                       | 230 |



# 第一章 真空开关电器的发展 及其物理基础

## 第一节 真空开关电器的发展简述

现代电力工业以及采矿、冶金、运输、化工和大型建筑物等的供电系统对开关电器在可靠性、安全性、安装维护 and 环境保护等方面都提出了越来越高的要求，因此促进了各类断路器、负荷开关、接触器等不同用途的产品和各种结构开关装置的发展。经过近二、三十年的实践，证实了在中压领域以及一些特定的供电系统中，真空开关电器具有无可比拟的优越性。

综述真空开关电器的发展，可概括经历了以下几个主要过程。

(1) 早期的理论研究阶段。最早关于真空介质中电弧熄灭机理的研究可追溯到上世纪末。1895 年，英国 Rittenhouse 使用扩散泵，首先制造出真空灭弧室模型，进行了开断电弧的研究。接着在以后的 30 几年中，不断有人继续改进灭弧室的构造并试制成功早期的真空开关。例如 1926 年美国公布了 Sorensen 的研究成果：一台试验性的真空开关成功地开断了 4.1kV、926A 的交流电弧。随后，美国 GE 公司和 Westinghouse 等公司又研究横向吹弧磁场对电弧运动和触头表面烧损的影响。

(2) 深入的理论研究和关键工艺发展的阶段。为将真空开关电器真正发展成为实用的产品，在 50~60 年代里成功地解决了与真空灭弧室密切相关的一系列工艺关键问题。例

如超高真空技术的发展和玻壳、陶瓷外壳与金属气密封接技术的改进以及高质量金属波纹管的试制成功确保了灭弧室的高耐压、长寿命等特性；新型触头材料的开发及其冶炼技术的研究促进了断路器向高水平的发展。

1955 年美国 Jennings 公司制成 15kV、2kA、200A 的真空开关，用于无线电设备的电源控制和短路保护。接着在这一基础上，该公司又成功地进行了切断单相输电线路的现场试验，以探讨真空开关用于电力系统的可能性。在提高灭弧室的开断能力方面，60 年代期间，美国和英国的许多公司都集中精力，深入研究触头结构设计和材料制造工艺。GE 公司首先开发了具有独特设计的电极上开有螺旋槽的触头，推动了真空断路器向大容量的发展，在 1961 年为电力系统制造出第一台商用三相真空断路器，其最高电压为 15kV，额定短路开断电流为 12kA，额定电流为 600A。英国则在独自研究镶嵌式触头的基础上开发成功了 400 ~ 3000V 的各种真空接触器，用于煤矿工业和输电系统。

日本和原联邦德国的研究工作起步较晚，但都在国外技术的基础上再加上各自的发展，取得了很大的成就。例如日立公司在 1965 年制造出它的第一台 7.2kV、50kA、400A 真空断路器。东芝、明电舍公司也差不多在同期试制成功它们的产品，1968 年，东芝又在从 GE 公司引进真空开关制造技术的基础上加上自己独特的研究成果，迅速推动了真空开关电器的生产与发展。在德国，Siemens 公司则在引进英国技术后又对触头结构和 Cu—Cr 合金制造工艺加以研究改进，开发了自己的真空断路器。

(3) 真空开关电器的全面发展与广泛应用阶段。这一阶段约始于 70 年代初。随着对大电流电弧状态的观察和深入

了解，萌发了一种新的设计思想，即利用电流本身通过触头时产生的磁场力驱动电弧运动并使之成为扩散状，克服大电流电弧在电极上产生的阳极斑点，减少触头的烧损，从而大大提高灭弧室的熄弧能力。由此出现了形形色色设计的磁控触头，导致了有实用价值的各类灭弧室的诞生。在这一时期，新型触头材料的研究也不断取得成果，促使真空断路器的性能有了重大突破，并使之向高开断容量、小尺寸化不断发展。例如，日本等国研制了用串联线圈产生纵磁场的触头；Siemens公司自行研究用电弧冶炼法冶炼出性能更加优异的低截流新型 Cu—Cr 合金，同时，又改进原来由英国 VIL 公司引进的杯状触头的设计，并开发了开有斜槽的纵向磁场触头，从而推出了它的高开断容量、低截流真空断路器，随之成为世界上重要的真空开关制造厂之一。近年来，它的中压断路器总产量中有 90% 以上是真空断路器。

随着各项关键工艺不断改进提高与新型灭弧室、操动机构的研制，真空断路器的各项技术参数不断提高。低过电压触头材料的出现促进了真空接触器的发展和广泛的使用。此外，在这一时期，各国还开发出适用于不同场所的真空负荷开关、真空分段器、变压器真空有载分接开关、各类成套开关装置甚至真空熔断器，充分发挥了真空开关电器在各个领域中的作用。在中压电力系统，原来油断路器、空气断路器占统治地位的情况已经改观，逐渐被真空断路器和差不多在同期发展的 SF<sub>6</sub> 断路器所取代。

SF<sub>6</sub> 断路器也是一种技术先进的开关电器，它和真空断路器都具有灭弧性能优异、断口恢复强度高以及无火灾等优点。但随着技术不断的进步，中压真空断路器的开断能力已能与 SF<sub>6</sub> 断路器相媲美，操作过电压也显著降低，终究因其

更突出的优点而超过了  $\text{SF}_6$  断路器。这些突出的优点如下：

(1) 真空介质绝缘强度高，恢复速度快，断路器行程很短，操动机构的操作功小，在开断短路电弧时弧压降很低，触头磨损小，断路器使用寿命长。

(2) 真空介质在开断短路电弧时不会产生对人体有害的物质，而  $\text{SF}_6$  断路器中的  $\text{SF}_6$  气体在高温电弧下可分解出  $\text{SF}_4$ 、 $\text{SO}_2\text{F}_2$ 、 $\text{SOF}_2$  等剧毒的低氟化物。运行单位在检修断路器时无法妥善处理这些物质，因此对人身安全构成威胁并污染了自然环境。这在人们日益加强环保意识的今天，无疑是一个值得重视的问题。

(3) 结构简捷，零部件数量比  $\text{SF}_6$  断路器显著减少，不但降低了造价，还大大提高了运行的可靠性，能在其整个寿命中做到少维修甚至无维修。图 1-1 示出了  $\text{SF}_6$  断路器和真空断路器每相零件数量的对比情况。从它们的相柱结构示意图来分析， $\text{SF}_6$  断路器的灭弧系统除了有主动、静触头之外，为使  $\text{SF}_6$  气体可靠熄弧，弧腔中还设置了辅助触头、磁吹线圈等必需的部件。另外，它的气密结构也很复杂，通常包括了数个 O 型环和密封槽。为防止开断电弧后的气体外逸，其顶部装有吸附装置，这使得断路器的零件数量多，产品体积大。零件数量越多意味着容易造成故障隐患的可能性越大，而真空断路器由于采用了电真空技术制造的灭弧室，其可动部分的零件只有动触头和波纹管两个，因此结构大为简化，可靠性程度高，用户易于使用和维护。

因此，在中压真空断路器和  $\text{SF}_6$  断路器竞争的过程中，前者越来越占优势。目前，国际上大量生产技术指标先进的真空断路器的重要厂家（公司）有十几家，其中美国的 GE、Westinghouse，德国的 Siemens、ABB Calor Emag、AEG，日本的

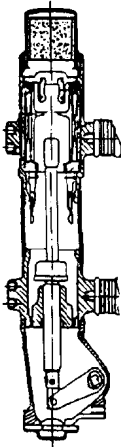
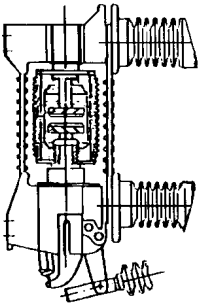
|         |                                                                                   |                                                                                   |
|---------|-----------------------------------------------------------------------------------|-----------------------------------------------------------------------------------|
| 断路器图示   |  |  |
|         | SF <sub>6</sub> 断路器                                                               | 真空断路器                                                                             |
| 每相零件总数  | 52                                                                                | 22                                                                                |
| 灭弧室零件数  | 24                                                                                | 9                                                                                 |
| 可动部分零件数 | 24                                                                                | 2                                                                                 |

图 1-1 SF<sub>6</sub> 断路器和真空断路器每相结构的对比

东芝、三菱、明电舍，英国的 GEC 等几个公司都自己生产灭弧室，系列化生产 1~36kV 各类真空开关电器。德国、英国中压系统运行的真空断路器已超过断路器总量的 50%。Siemens 公司生产的中压断路器总量中 90% 为真空断路器；日本中压 12kV 及以下系统的开关则完全实现了真空化。图 1-2 示出了截至 1993 年未包括中国、前苏联和东欧各国在内的世界中压断路器市场销售统计，显然，真空断路器处于逐渐上升的趋势，估计它与 SF<sub>6</sub> 断路器的比例已达 3:1。

中压真空断路器还在朝大容量方向发展着。例如，1993 年 Siemens 公司开发了 17.5kV、12500A，额定短路开断电流

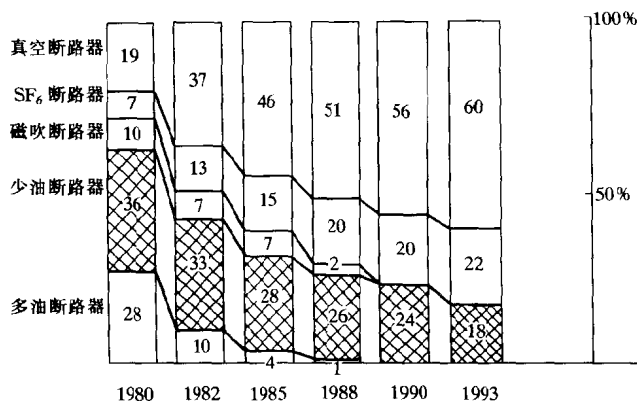


图 1-2 1980~1993 年世界市场中各类中压断路器的比例

为 80kA 的发电机断路器。

除中压断路器之外，一些国家还致力于高压真空断路器的研究工作。在 1975~1976 年，美国 GE 公司试制了 45kV、50kA 的灭弧室，用之研究 145kV（3 断口）、242kV（5 断口）、360kV（7 断口）高压真空断路器；日本明电舍公司试制成功 84kV、25kA 灭弧室和 145kV、25kA 双断口高压真空断路器，1981 年又研制出 168kV 产品；英国 GEC 公司试制成功 132kV（8 断口）高压真空断路器<sup>[1]</sup>。进入 90 年代后期以来，高压真空断路器又有新的进展，例如 Siemens 公司试制了 84kV 的真空灭弧室，Westinghouse、GE 公司也试制了 72kV、168kV 的真空断路器；我国、俄罗斯也在进行有关的研究工作。不过总的说来，真空断路器在高压领域的实际应用和推广，还需进行相当的努力。因为多断口的技术复杂，制造成本高。与高压、超高压 SF<sub>6</sub> 断路器相比，后者经过灭弧方式和操动机构设计的不断改进与发展，目前国内外很多

产品的单断口可达到额定电压 252kV，额定短路开断电流 50kA 的水平；少数公司的产品还能达到 550kV，63kA。操动机构的不断简化和多年积累的成熟运行经验使得高压、超高压 SF<sub>6</sub> 断路器在现阶段仍占绝对优势。但是，真空断路器的这一发展趋势是不容忽视的。

真空断路器除了向上述高电压、大功率发展外，还向低电压、大电流方向发展着，因为它的体积比空气断路器小，没有喷弧和引起火灾的危险，而且能频繁操作并适应极恶劣的气候条件和有粉尘的场所。例如，可用在 660V、1500V 煤矿供电系统和起重、泵站等。近年来德国和日本都已试制成功短路电流达 50kA 的低压大电流真空断路器。

欧洲的其他国家（如前苏联、荷兰和瑞典）也进行过许多研究工作，并生产着自行设计的产品。

随着真空断路器技术的不断发展，还带动了接触器、负荷开关等多种其他开关电器的开发和应用。

我国研究真空开关也有二十几年的历史，在 80 年代就有不少自行制造的中、低压真空断路器首先使用于煤矿、化工和冶金工业。但真空开关的发展和技术水平的真正提高则始于 80 年代后期。进入 90 年代后随着质量不断的提高又在电力工业上推广开来，在 6~10kV 系统中正迅速取代着少油断路器，逐步实现开关无油化。近年来通过和国外著名大公司的进一步合作，引进了各种软、硬件，采取先进的计算机设计和测量技术、自动化生产工艺和严格的管理体制，在这一基础上，通过国产化研究和进一步再开发工作，又促进了真空断路器和其他真空开关电器向高质量、多品种方向的进步。我们可以从下面近几年的统计数字明显地看出真空开关电器迅速发展的趋势：

1989 年真空开关产品仅占中压开关总产量的 10%；  
 1993 年真空开关产品占中压开关总产量的 30%；  
 1995 年真空开关产品占中压开关总产量总量的 70%；  
 1998 年真空开关产品已占中压开关总产量的 80%。

现在，在完成城网改造之后，各种类型以真空断路器为主的开关成套装置和 GIS、真空负荷开关、真空环网柜、户外柱上真空开关等更加广泛地应用于户内、外的 35kV 及以下的系统和用户中；大大提高了供电的经济性和可靠性。同时，在电气化铁道的单相系统以及铁路沿线的信号控制系统，27.5kV 真空断路器和 10kV 小容量柱上真空负荷开关的用量也有较大增长，因此这些系统的运行更加经济和可靠。

## 第二节 真空介质的击穿特性

在研究气体放电现象时，通常用来描述均匀电场中气体击穿电压  $U$  与气体压力和电极间距离乘积的函数关系的是巴申（Paschen）定律，它的数学表达形式如下

$$U = \frac{B_0 p d (T_0/T)}{\ln \left[ \frac{A_0 p d (T_0/T)}{\ln(1/\gamma)} \right]} = f \left( \frac{pd}{T} \right) \quad (1-1)$$

式中  $A_0$ 、 $B_0$ ——标准温度（20℃）与气体种类和温度有关的数；

$\gamma$ ——与电极材料和表面状态有关的系数；

$p$ ——气体压力；

$d$ ——电极间距离；

$T_0$ 、 $T$ ——标准温度与试验时温度。

在温度一定时，式（1-1）则可写成  $U = f(pd)$  的形式。



按式 (1-1) 绘制的曲线是一个有着极小值的 V 形曲线。在极小值的右侧，放电电压随气压的增大而升高；在极小值的左侧，放电电压却随气压的降低而升高。作为一例，图 1-3 示出了空气的放电电压与  $pd$  值关系的试验曲线，它大致上和巴申定律的计算值一致<sup>[2]</sup>。

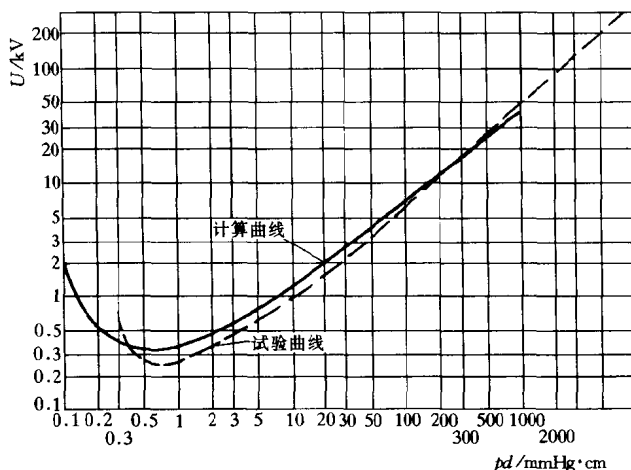


图 1-3 空气  $U = f(pd)$  的试验曲线和计算曲线

在  $(1 \sim 2000) \times 1.33 \times 10^2 \text{ Pa}$  范围内，气体放电电压随气压变化的规律可以用气体中电子碰撞理论来解释，但在气压极高或气压极低的情况下，这一理论就不再适用了。在  $pd$  值极小时，工程上相当于固定电极距离不变而抽取高真空  $1.33 \times (10^{-3} \sim 10^{-6}) \text{ Pa}$  的状态，这是因为此时空气密度极低，能够引起电离的自由电子所需的平均行程  $\lambda$  必须非常大，才可集聚足够的动能碰撞其他的气体分子产生电子崩从而引起击穿。例如在  $1.33 \times 10^{-3} \text{ Pa}$  真空中， $\lambda = 26 \text{ m}$ ；在  $1.33 \times 10^{-1} \text{ Pa}$  真空中， $\lambda = 26 \text{ km}$ 。而在真空灭弧室中，电