

# 新型电介质在 电力电容器中的应用

王国康 宛季华

水利电力出版社

(京)新登字115号

新型电介质在电力电容器中的应用

王国康 宛季华

水利电力出版社出版、发行

(北京三里河路6号)

各地新华书店经售

北京樱花园印刷厂印刷

787×1092毫米 32开本 9.75印张 215千字

1993年11月第一版 1993年11月北京第一次印刷

印数 2001—1950 册

ISBN7-120-01768-3/TM·493

定价6.50元

## 前 言

电介质（气体、固体、液体）是电力电容器的核心组成部分，它的优劣直接影响到电力电容器的性能及技术发展水平。因此，国内外都很重视新型电介质的开发研究工作。

国外电力电容器的介质更新较快，目前以气体电介质中的六氟化硫、固体电介质中的聚丙烯薄膜和金属化膜、液体电介质中的合成化合物和混合油为主要研究对象。国内电力电容器新介质的研究工作起步较晚，到70年代初期，由于氯化联苯（PCB）有毒，污染环境，为了寻找能够代替PCB的液体电介质，才开始由西安电力电容器厂、西安电力电容器研究所（原研究室）联合北京石油科学研究院、桂林电气科学研究所、西安交通大学、西北大学、西安化工研究所、湖南大学、北京焦化厂研究所、上海树脂厂、桂林电力电容器厂、苏州溶剂厂等单位，共同开发研究用于国产电力电容器的新型电介质。先后研究成功了硅油、烷基苯、烷基萘、异丙基联苯、双二甲苯基乙烷、偏苯三酸三辛酯、邻苯二甲酸双十三醇酯、丁基氯化联苯醚、苄基甲苯（单苄基和二苄基甲苯混合）、聚丙烯膜、金属化膜和六氟化硫等液体、固体和气体电介质，为我国电力电容器技术的发展并使其接近国际先进水平作出了一定的贡献。

由于到目前为止我国还没有介绍电容器电介质及其应用方面的著作出版，1982年在扬州召开的电机工程学会高压分专业会上，许多同志建议我们写一本有关这方面的书。自那

以后，我们便着手进行这本书的编写工作。

全书共分十章，对气体、固体、液体电介质的性能，组合绝缘试验、局部放电试验、液体电介质的毒性及其与接触材料的相容性试验、电力电容器的种类、试验和验收，运行中应注意的问题及对故障电容器的处理方法等均作了较详细的介绍。这对电力电容器的生产、科研、教学和使用部门的有关人员均有一定的参考价值。

本书第一章至第七章由王国康同志编写，第八章至第十章由宛季华同志编写，全书由王国康同志统稿。西安交通大学电气工程系绝缘教研室刘其昶、刘桂云教授对全书进行了审阅，并提出了许多宝贵的意见。西安电力电容器研究所房金兰所长对全书进行了校阅。对以上同志的热情帮助和支持，在此一并表示衷心感谢。

由于我们水平和经验有限，书中缺点、错误在所难免，恳请广大读者批评指正。

编 者

1992年6月

# 目 录

## 前 言

|                              |     |
|------------------------------|-----|
| 第一章 绪论 .....                 | 1   |
| 第一节 电介质在电力电容器中的重要作用 .....    | 1   |
| 第二节 电容器对新型电介质的技术要求 .....     | 2   |
| 第三节 电容器电介质的概述 .....          | 3   |
| 第四节 电容器电介质发展的趋势和展望 .....     | 8   |
| 第五节 电力电容器的发展和展望 .....        | 9   |
| 第二章 气体电介质 .....              | 11  |
| 第一节 气体电介质的用途和对气体电介质的要求 ..... | 11  |
| 第二节 气体电介质的通性 .....           | 13  |
| 第三节 电负性气体 .....              | 23  |
| 第三章 固体电介质 .....              | 41  |
| 第一节 概 述 .....                | 41  |
| 第二节 固体电介质的通性 .....           | 43  |
| 第三节 电容器纸 .....               | 51  |
| 第四节 聚丙烯薄膜 .....              | 65  |
| 第五节 聚酯薄膜 .....               | 81  |
| 第四章 液体电介质 .....              | 86  |
| 第一节 概 述 .....                | 86  |
| 第二节 液体电介质的通性 .....           | 88  |
| 第三节 液体电介质的稳定性 .....          | 101 |
| 第四节 液体电介质的精制处理 .....         | 103 |
| 第五节 天然绝缘油 .....              | 105 |
| 第六节 合成绝缘油 .....              | 116 |

|                                     |     |
|-------------------------------------|-----|
| 第五章 液体电介质与接触材料的相容性 .....            | 170 |
| 第一节 概 述 .....                       | 170 |
| 第二节 液体电介质与聚丙烯 薄膜的相容性试验 .....        | 171 |
| 第三节 液体电介质与接触材料的 相容性试验 .....         | 181 |
| 第六章 液体电介质的毒性及防 护 措施 .....           | 183 |
| 第一节 工业毒物 的基本概念 .....                | 183 |
| 第二节 液体电介质 的毒性 .....                 | 186 |
| 第三节 毒性防 护措施 .....                   | 194 |
| 第七章 几种新型液体电介质电容器的 性 能 .....         | 195 |
| 第一节 概 述 .....                       | 195 |
| 第二节 JARYLEC C101浸渍 的 电 容 器 性能 ..... | 195 |
| 第三节 二异丙基苯浸渍的 电 容 器 性能 .....         | 199 |
| 第四节 硅油浸渍的 电 容 器性能 .....             | 204 |
| 第八章 电力电容器的分类和 用 途 .....             | 212 |
| 第一节 电力电容器 的分类 .....                 | 212 |
| 第二节 各类电力电 容 器的用途及结构特点 .....         | 217 |
| 第九章 电力电容器的试验和验收 .....               | 233 |
| 第一节 主要试验项目及所采用的标准 .....             | 233 |
| 第二节 电容测量 .....                      | 239 |
| 第三节 损耗角正切的测量 .....                  | 246 |
| 第四节 电压试 验 .....                     | 252 |
| 第五节 测量绝缘电阻或自持放电时间常数 .....           | 263 |
| 第六节 局部放电试验 .....                    | 266 |
| 第七节、放电器件的检验 .....                   | 266 |
| 第十章 电力电容器的 使 用 .....                | 272 |
| 第一节 并联电 容 器的使用 .....                | 272 |
| 第二节 其他电力电 容 器的使用 .....              | 288 |
| 第三节 电力电容器 的损坏和处理方法 .....            | 294 |
| 参 考 文 献 .....                       | 303 |

# 第一章 绪 论

## 第一节 电介质在电力电容器 中的重要作用

在世界范围内的节省能源、节省资源呼声中，电力电容器作为节省能源的一种装置，其社会效益日趋显著。

近年来，随着科学技术的不断发展，电力电容器在材料技术和制造技术上已取得惊人的进展，尤其在固体介质和液体介质的研制与改进等方面取得了重大突破。

但是随着高电压输变电系统的发展，对电力电容器提出了越来越高的要求。如过去对电力电容器在高温下的性能特别关心，现在除了高温性能外，还对低温的局部放电性能提出了要求。电力电容器质量的优劣，除了与设计结构、工艺条件、测试技术有一定的关系外，最根本地决定于所使用电介质的种类、质量和技术性能。虽然，从这一观点看来，在当今不断发展的电力电容器技术领域，电介质具有重要的作用和决定性的意义。

电容器新型电介质的开发对电容器性能的重要作用主要有以下几点。

(1) 电容器电介质的作用主要是储藏能量。新型电介质可以提高电容器的单台容量及其比特性 ( $\text{kg/kvar}$ )，节省安装面积。电介质是决定电容器性能的关键材料。

(2) 新型电介质具有优良的物理、化学、电气性能，可以提高工作电场强度，降低电介质损耗角正切值，这样就可以

降低输变电线路上的能量损失。例如,用二芳基乙烷(PXE)浸渍的全膜电容器和纸电容器比用矿物油浸渍的电容器每年可节约能源消耗费225万元(按年产量为3000Mvar计算)。同时还可以延长电容器的使用寿命,降低电容器的年损坏率。例如,在使用条件相同的情况下,用氯化联苯(PCB)和矿物油浸渍的电容器年损坏率为5%~10%,而用新液体电介质浸渍的电容器年损坏率仅为0.10%~0.11%。当然,影响电容器损坏率的因素较多,但电介质是主要因素。

(3)新型电介质除了可改进和补充天然材料在性能和需要量方面的不足外,还可根据性能需要设计或选用新型化学结构的液体电介质和固体电介质,如PXE和聚丙烯薄膜等。这样,可使电容器制造厂在材料方面有更多的选择和更新余地。

(4)新型电介质可以提高电力电容器的可靠性,这对提高我国输变电电压等级和运行可靠性起着主要的作用。

## 第二节 电容器对新型电介质的 技术要求

由于输变电系统的电压等级不断提高,对电力电容器的质量要求更加严格,试验验收内容也不断增加。因此,对电力电容器所使用的新型电介质的要求也越来越高,其主要要求如下。

(1)电介质应无毒或低毒,能生物降解,不污染环境,不影响制造者和使用者的健康。

(2)电介质和电力电容器所使用的接触材料的相

容性要好。

(3) 电介质的工作电 场强度 $E$ 要高, 体积电阻率 $\rho_v$ 要高, 介质损耗角正切 $\tan\delta$ 要小。

(4) 电介质的相对介电常数 $\epsilon_r$ 最好较高。如果是 $\epsilon_r$ 较低的电介质, 当它的 $E$ 值较高时, 也可以采用。因为 $E$ 值高时, 储能因数 $\epsilon_r E^2$ 也高, 这样可以提高电容器的比特性。

(5) 电介质的高温性能、低温性能要好, 一般要求能在 $-40\sim+100^\circ\text{C}$ 范围内工作。特殊的可以更低或更高, 要根据电容器的产品类型而定。

(6) 电介质的氧化稳定性、热稳定性、电稳定性要好, 使用寿命要长, 并且安全可靠。

(7) 电介质最好不燃烧或难以燃烧, 并能自熄。

(8) 电介质的来源要广, 价格要低。

(9) 电介质的精制处理工艺要简便易行。

以上是电介质的通用性能要求, 对于气体、固体、液体电介质, 各自还有一些特殊要求, 因电容器的类型和使用环境的不同而异。

### 第三节 电容器电介质的概述

电力电容器的电介质的种类很多, 可以根据它们的物理状态或化学成分来分类。依据物理状态可分为气体、液体及固体三类; 依据化学成分又可分为有机和无机两类。

有机电介质和无机电介质在电力电容器制造中均有应用。它们各自又以其结构所决定的特性, 在电力技术领域中表现出不同的特点和用途。

一般说来, 有机电介质都是含碳的共价键化合物, 种类

繁多，以优良的电性能、机械性能、流动性、弹性、柔性、延展性、坚固性、可塑性和良好的加工性著称。在电容器所用的电介质材料中应用最广。

随着有机绝缘材料的发展，电力电容器的性能也得到了发展和提高。在早期的电容器产品中，若采用电容器纸作固体电介质，矿物油为浸渍剂，其最高使用温度不得超过 $85^{\circ}\text{C}$ ，一般都在 $80^{\circ}\text{C}$ 以下。如果采用耐高温的高分子有机绝缘材料，如用聚四氟乙烯薄膜制成电容器，其耐温限度可提高到 $150\sim 250^{\circ}\text{C}$ 。但对于高压并联电容器，由于介质损耗较大，其使用温度还应控制在 $100^{\circ}\text{C}$ 以下。

无机绝缘材料种类较少，有陶瓷、玻璃、云母等，它们的物理性能硬而脆，加工性较差。这是由于无机材料的结构通常都含有硅、铝等氧化物的缘故。从这方面看来，它逊色于有机绝缘材料。但无机材料的特点是具有高的耐热性，机械强度也高，对辐射、微生物等作用稳定性好。而有机材料在这些场合使用却受到限制。因此，有机和无机绝缘材料各有其特点，各能满足某一方面的要求，各有各的应用范围。

### 一、气体电介质

在电气绝缘技术中，气体电介质的应用是很普遍的，应用历史是很久的。对它的性能、特点和基础理论的研究等已有许多专门的著作，所以本书只介绍电力电容器所使用的气体电介质，重点是电负性气体六氟化硫。

气体可分为易吸附碰撞电子而形成负离子的电负性气体和不具备此特性的非电负性气体两类。氮、氢和惰性气体等不能形成负离子，为非电负性气体。六氟化硫和某些含卤素的氟化物气体等极易形成负离子，为电负性气体。氧气和空气也能形成负离子，亦应属于电负性气体，但在电力电容器中不但

不能应用，而且还要设法消除它们的有害影响。

电负性强的六氟化硫气体，由于具有介电强度高、沸点高、不爆炸、化学稳定性好等特性，还具有优异的灭弧性能，可用于气体绝缘全封闭电器，如管道充气电缆、变压器、标准电容器，避雷器、互感器等，可满足设备小型化和提高可靠性的要求。对电容器说来，气体电介质的发展变化不大，选择使用的范围也很小，目前用途较广的就是SF<sub>6</sub>气体。

## 二、固体电介质

在电力电容器所使用的固体电介质中，除云母、陶瓷、玻璃等无机材料外，传统的有机材料以电容器纸为主，但现在已经发生了巨大的变化，已生产出高分子塑料薄膜，如聚丙烯、聚酯薄膜等。

(1) 电容器纸。电容器纸是由硫酸盐木浆制造的。在电容器纸尚未应用于电容器中以前，用于改善功率因数 $\cos\varphi$ 的电容器是一个内外表面有金属层的大玻璃瓶，是由政治流亡在瑞士的波兰人莫舍克设计，瑞士佛列波尔城电容器厂生产的。这种电容器电压可达到10kV，但玻璃不是良好的电容器电介质，所以生产时间不长就停止了。

第一次世界大战期间，美国很快地发展了纸电介质电容器，其电介质和极板用的是先浸渍蜡、后浸渍食用油的普通纸和锡箔。然后才发展到采用矿物油浸渍的电容器纸和铝箔。

本世纪30年代，电容器制造史上发生了一次重大革命，即液体电介质氯化联苯（PCB）研制成功。该电介质的特点是化学稳定性好，不易分解，耐高温，不燃烧，相对介电常数大。在30年代至60年代的30年中，氯化联苯对电容器的发展

曾起过很大的作用。与此同时电容器纸也有很大的改进。美国克拉克等人发展了改进的木浆纸，去掉了纸浆中的木质素、戊碳糖等杂质。目前纸介质电容器仍在许多国家中生产，但已经不是发展的主要方向了。

(2) 塑料薄膜。塑料薄膜在电容器中的应用以聚苯乙烯薄膜为最早(1904年)，它的 $\tan\delta$ 在很宽的频率范围内很小，可以代替云母用于电容器中，一般用于容量不大、使用温度不高(不超过 $55^{\circ}\text{C}$ )的场所。为了提高聚苯乙烯电容器的耐温性能，研制成功了以聚苯乙烯薄膜与纸为介质的小电容器，耐温性能有所改善。由此产生了用膜纸复合介质来提高电容器性能的设想。但是用聚苯乙烯和纸复合做出的电力电容器的使用温度仍然达不到要求，为了提高电容器的耐温性能，先后又发展了聚酯、聚乙烯、聚碳酸酯、聚丙烯等有机薄膜。目前用作电力电容器介质的最佳薄膜是等规双轴定向拉伸聚丙烯薄膜，其分子结构合理，可承受 $90^{\circ}\text{C}$ 的温度。这种薄膜是意大利的纳塔教授发明的，他曾获得过诺贝尔奖金。聚丙烯膜纸复合介质电容器从开始生产至今已有20多年的历史，1966年美国GE公司开始采用膜纸复合介质，1968年日本箱式电力电容器几乎全部改成氯化联苯浸渍膜纸复合电容器。1973年美国MCCRAW-EDISON公司开始生产全膜电容器，1975年日本松下产业机器株式会社正式生产全膜电力电容器，我国于1980年也开始试制全膜电力电容器。

### 三、液体电介质

电力电容器液体电介质(习惯上称为绝缘油或浸渍剂)的发展很快，在1930年以前主要使用矿物油和蓖麻油，1930~1972年间主要使用氯化联苯，并以环氧化合物为稳定剂。美国孟山都化学公司是美国唯一生产PCB的厂家，该

公司将PCB产品命名为AROCOLOR出售。该产品可与各种氯苯混合,GE公司把这种混有氯苯的液体称为PYRANOL;而西屋公司称其为INERTEEN。1960年当PCB在淡水鱼中被发现时,它们才第一次被鉴定为食品污染物。到1966年,瑞典的Jensen博士开始把PCB称为新污染物。1971年美国成立了一个联邦特别工作组,专门了解PCB的毒性及污染情况。1972年日本发生米糠油事故后,PCB在日本被全面禁用。我国于1974年也正式停止使用和生产PCB。美国孟山都化学公司宣布,他们将在1977年10月前退出PCB市场。世界曾认为最优良的浸渍剂PCB以其致命的毒性和污染环境的弱点在大多数国家中停止使用。

为了寻找PCB的代用品,各国学者又研究开发了新的性能优良的液体电介质。先后公布的有:GE公司的ECONOL,适于小型电容器;道康宁化学公司的烷基氯化联苯醚(XFS—4169L),适用于变压器和电容器;孟山都公司的MCS—1238,适用于变压器和电容器。1976年至1984年,GE公司使用三氯代苯、邻苯二甲酸二辛酯加环氧稳定剂构成的混合电介质,1976年GE公司又研究成功了二芳基乙烷(P-XE),从1977年至今一直在使用。我国正式停止生产和使用PCB后,开始研究新的浸渍剂,先后研制了苯甲基硅油、偏苯三酸三辛脂(TOTM)、邻苯二甲酸双十三醇酯(DTDP)、十二烷基苯(DDb)、PXE、IPB、EDISOL I、EDISOL II、CPE、C101、DL-90等浸渍剂。目前大量使用的浸渍剂主要是DDb、IPB、PXE和EDISOL II等。

## 第四节 电容器电介质发展的 趋势和展望

电介质的发展主要由两部分组成：电介质材料的制造水平和应用电介质材料的技术。它们在实际工作中的针对性都很强，但无论是电介质材料的制造水平，还是应用电介质材料的技术，它们的发展方向都离不开与其有关的基础科学的发展。可以从两个方面来观察其发展方向。

### 一、与合成电介质材料有关的基础科学的发展和展望

总的来说，与合成电介质材料有关的基础科学很多，但是对电介质材料的制造水平和应用技术的发展起指导性和决定性作用的基础科学有三门：电介质物理学、量子化学、高分子科学。合成电介质及其应用技术的发展，主要取决于电介质物理学的发展。然而，由电介质物理学的发展确定的合成电介质及其应用技术的发展方向，须由高分子科学的实践来付诸实施。高分子科学分为高分子化学和高分子物理学两部分。要发展合成新介质材料依赖于高分子化学的发展，而要发展电介质的应用技术则依赖于高分子物理学的发展。无论是合成新的高分子电介质，还是在特定环境下应用高分子电介质，量子化学都能起指导和决定性作用。因为量子化学能够研究合成电介质材料的分子和原子中的电子行为，特别是在不同的使用环境中处于电场作用下的电子行为，从电子的角度以尽可能定量的方式来进行分析。

从电介质物理学来看，由于现代化技术的引用，对作为电介质物理学主要内容的四个方面（极化、电导、损耗、击

穿)的研究,可以发现一系列带有本质性的微观和宏观的物理现象,从而指导电介质的生产和应用。

## 二、合成电介质材料本身的发展和展望

在电介质物理学、量子化学、高分子科学之间的相互协调和渗透下,合成电介质材料的品种和质量将会有很大的发展和提高,而且合成电介质材料不一定限于固体高分子材料,液体电介质材料或低聚合物的气体电介质材料也会有崭新的发展。例如,在电容器和变压器方面就可能会出现高性能合成电容器油和高性能气体合成电介质。

## 第五节 电力电容器的发展和展望

本书除了介绍新型电介质在电力电容器中的应用外,对电力电容器的分类、用途、试验和使用也作了简要的介绍。根据国内外最有声望的几家大公司的产品开发情况来看,目前电力电容器的发展趋势大致有以下几方面。

(1)继续发展和改进全膜电容器。提高单台容量(400~600kvar),改进比特性(已达0.17kg/kvar,比膜纸产品轻10%~15%)。日本日新公司开发了单台容量为3000~20000kvar的电容器,我国单台容量可达400kvar左右。

(2)对于中频电热电容器,发展了大容量产品。英国BICCBKYCE电容器公司产品的容量为2800kvar,GE公司的为3300kvar,产品都是全膜水冷式结构。很多产品还装有温度报警热动开关,如意大利的伊卡尔公司和奥地利的KAPSCH公司的产品。

(3)对于脉冲电容器,发展了长寿命(直流50000h)、大储能量(480J/dm<sup>3</sup>)、低电感(0.5μH)的各种产

品。

(4) 对于标准电容器, 制成了1250kV的户外式结构等。

(5) 对于低压电容器, 近来趋向于用金属化电极、单层聚丙烯膜改进比特性。这种结构的电容器可做成干式(250V以下)或浸渍液体电介质(如邻苯二甲酸二壬酯、癸酯、聚异丁烯、蓖麻油等)式, 其单台容量可达60~120kvar, 损耗低。也有做成组合式的。

(6) 采用新型介质材料、新型结构、新制造工艺、新试验方法来制造可靠性高、性能优良的电容器。如对铝箔进行压花, 制成正弦图案, 改进了原来凸点图案造成尖点和孔洞的缺点。对聚丙烯膜表面进行粗化(单面或双面)处理, 粗化度为40%左右, 以此来补充压花铝箔的不足。使其粗化表面固定液体通道形成毛细管系统, 提高浸渍效果和局部放电起始电压(DIV)、熄灭电压(DEV)。最新的电容器结构取消了引线片(减少了毛刺、压伤等缺陷), 改用铝箔伸出元件来代替引线片。用机械压接引线代替传统的焊接工艺, 来改进电容器的性能, 提高产品质量。正在研究的某些粘度、倾点较低, 浸透率、吸气性、相容性较好的液体介质, 将逐步用于电容器中。

## 第二章 气体电介质

在电气绝缘技术中，气体电介质已得到广泛应用。对气体电介质的性能、特点、毒性、在运行中的变化规律和基础理论的研究等，国内外已经发表了很多有关的论文和著作。本章除对电力电容器中使用的气体电介质作一般介绍外，对电负性气体六氟化硫将作重点阐述。

### 第一节 气体电介质的用途和 对气体电介质的要求

#### 一、气体电介质的用途

气体电介质主要承担着电气设备中的绝缘任务。由于气体电介质的电导、介电常数和损耗都很小，对高压、高频绝缘都适用。因此，在电气绝缘技术中，它们被广泛应用于架空线路、通讯电缆、电力电缆、标准电容器、气固电容器、电容式电压互感器、全封闭组合电器、断路器及干式变压器等电气线路和设备中。

#### 二、对气体电介质的要求

(1) 起始游离电场强度和绝缘强度要高。绝缘强度越高，电气设备的体积就越小，重量就越轻；同时可使容器内的气压降低。这不仅给制造、安装、运输、施工和维修带来一系列的好处，还可提高运行的可靠性。

(2) 与电器设备内部所有结构材料（金属、非金属）的相容性要好。即在化学、热、电的作用下均能保持材料各