

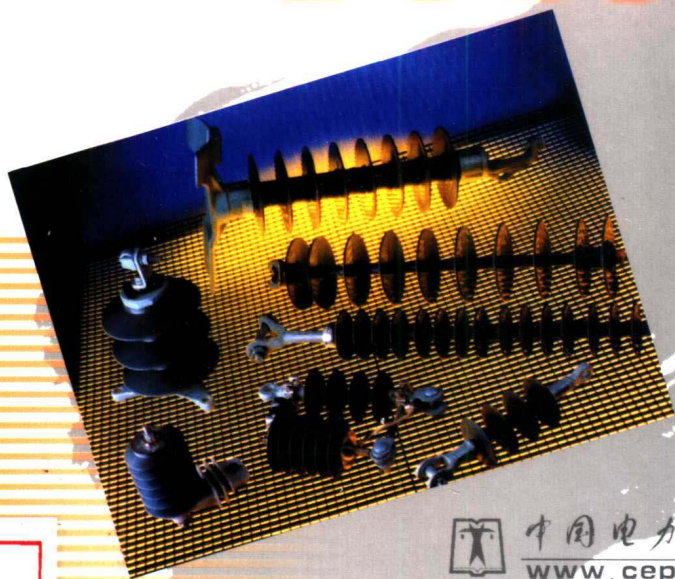
DIANLI SHEBEI
YUFANGXIN SHIYAN
JISHU
CONGSHU

电力设备预防性试验技术丛书

第五分册

何文林 叶自强 编

套管与绝缘子



中国电力出版社
www.cepp.com.cn

电力设备预防性试验技术丛书

第五分册

套管与绝缘子

何文林 叶自强 编



中国电力出版社

www.cepp.com.cn

内 容 提 要

为进一步提高高压电气设备绝缘状况诊断的有效性和准确性,能反映每一设备的具体试验过程,结合工作实际经验和《电力设备预防性试验规程》的要求,特组织编写了这套《电力设备预防性试验技术丛书》,共8册。本套图书的特点是:①对每一设备的每一试验,均从试验目的、试验周期及判断标准、试验方法、试验注意事项及异常情况处理、结果分析判断等方面予以介绍;②精简试验原理及有关结构的讲解,细化试验步骤;③给出一些具体的试验范例,方便读者参照进行试验;④引入了实际工作中行之有效的新工艺和新方法;⑤附录中给出了规程中的相关条文,可便于查阅。

本书为《电力设备预防性试验技术丛书》的第五分册,共2章,主要介绍了高压套管的绝缘电阻测量,介损测试,交流耐压及局部放电试验;支柱和悬式绝缘子的绝缘电阻及绝缘子表面污秽度的测量等内容。本书可供发、供电部门和电气设备制造单位从事高压设备试验技术和管理人员,以及各电力试验研究院(所)技术人员使用,也可供高校有关师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

套管与绝缘子/何文林,叶自强编. - 北京:中国电力出版社,2003

(电力设备预防性试验技术丛书;5)

ISBN 7-5083-1453-0

I. 套… II. ①何…②叶… III. ①套管(电瓷) - 电工试验②绝缘子 - 电工试验 IV. TM216

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2003)第 020054 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>)

汇鑫印务有限公司印刷

各地新华书店经售

*

2003年5月第一版 2003年5月北京第一次印刷
787毫米×1092毫米 32开本 2.875印张 58千字
印数 0001—5000册 定价 7.00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)



《电力设备预防性试验技术丛书》

前 言

电力设备的绝缘预防性试验是保证设备安全运行的重要措施，是绝缘监督工作的基础。通过试验，可以掌握电力设备的绝缘状况，及时发现缺陷，进行相应的维护与检修，以免运行中的设备绝缘在工作电压或过电压作用下击穿，造成事故。为了进一步提高绝缘监督管理人员和高压试验人员技术业务素质，满足电力行业技术人员等级培训和岗位培训的需要，特组织编写了《电力设备预防性试验技术丛书》。

丛书的分册结构与《电力设备预防性试验规程》的章节对应，内容突出电力行业技术等级培训和岗位培训的特点，深入浅出，针对性、适应性较强，密切联系生产实际，反映现场新技术。本套图书的特点是：①对每一设备的每一试验，均从试验目的、试验周期及判断标准、试验方法、试验注意事项及异常情况处理、结果分析判断等方面予以介绍；②精简试验原理及有关结构的讲解，细化试验步骤；③给出一些具体的试验范例，方便读者参照进行试验；④引入了实际工作中行之有效的新工艺和新方法；⑤附录中给出了预规中的相关条文，可便于查阅。全书共分8册：第一分册为《旋转电机》；第二分册为《电力变压器与电抗器》；第三分册为《互感器与电容器》；第四分

册为《开关设备》；第五分册为《套管与绝缘子》；第六分册为《电线电缆》；第七分册为《避雷器与接地装置》；第八分册为《绝缘油》。

本书是《电力设备预防性试验技术丛书》中的第五分册，由何文林、叶自强编写，全书共分2章，主要介绍了高压套管的绝缘电阻测量，介损测试，交流耐压及局部放电试验，支柱和悬式绝缘子的绝缘电阻及绝缘子表面污秽度的测量等内容。

本书由浙江大学叶蜚誉主审。在收资、编写和审查过程中，还得到华东六省一市电机工程（电力）学会联合编辑委员会陆桂婉及很多单位的领导、专家的大力支持与热心帮助，在此表示衷心感谢。

本书虽经数次审查修改，但由于编者经验所限，在编写中难免有疏漏之处，诚恳希望广大读者提出修改意见，并在教学、实践中进行调整和补充，使其更加完善。

编 者

2003年4月



目 录

前言

第一章	高压套管	1
	第一节 概论	1
	第二节 绝缘电阻测量	12
	第三节 介质损耗测试	16
	第四节 交流耐压试验	29
	第五节 局部放电试验	43
第二章	支柱和悬式绝缘子	66
	第一节 测量绝缘电阻	66
	第二节 零、低值绝缘子检测	67
	第三节 绝缘子表面污秽度的测量	72
附录 A DL/T 596—1996《电力设备预防性 试验规程》相关条文摘录		77
参考文献		84



第一章

高 压 套 管

第一节 概 论

套管绝缘子用以把电流引入或引出变压器、断路器、电容器或其他电气设备，也用于导体或母线穿过建筑物或墙壁（电站用套管）。

套管式结构是一种容易发生滑闪放电的绝缘结构。为了防止套管滑闪，一般在 35kV 及以下采用空气腔式或大裙式套管，在 110kV 及以上常采用内绝缘以电容极板改善电场分布的方法，即电容式套管。

一般高压套管按其绝缘材料组成和绝缘结构可分为纯瓷套管、有机复合材料和瓷与有机材料复合应用的套管等三大类，其中最重要的是电容套管。此外还有全部有机材料（如环氧树脂、硅橡胶）制造的套管，充气（如充压缩的 SF₆ 气体）套管等。

纯瓷套管是最简单的一种套管，只是简单的一个瓷套，其外表面上有裙或棱（户外用裙、户内用棱）。低电

压等级可采用空气腔，20 ~ 35kV 采用在法兰附近加以大裙的方式来防止滑闪。由于瓷壁愈厚，击穿场强愈低，而很厚的瓷壁在制造工艺上有困难，因此纯瓷套管在更高电压下不适用。

电容式套管是目前超高压系统中最常用的型式，防止滑闪的方法是改善套管的电场分布，在导杆和法兰之间加一个电容芯子作为内绝缘，电容芯子中有多层金属极板，以控制套管内部和表面的电场均匀化。

电容套管导杆常采用铜杆或铜管，纯瓷套管也有采用铝导体或直接以母线穿过对称母线式套管。对铜导杆而言，一般额定电流密度不超过 $2 \sim 2.5 \text{ A/mm}^2$ 。在电流为 1000 ~ 1500A 以上者，为了不使附件发热超过规定值，套管法兰及端盖常采用非磁性材料，如非磁性铁、黄铜、硅铝合金或硅铜合金等。

关于套管的尺寸，其直径在很大程度上决定于绝缘材料的耐电强度，但其长度并不由绝缘材料的性能决定，而由套管表面的放电电压决定，这与周围介质（空气或变压器油）及改善电场的方法有关。

110kV 及以上电压等级的套管的绝缘均采取内绝缘与外绝缘相结合结构。内绝缘有采用油屏障绝缘的充油式及胶纸或油浸纸绝缘的电容式两大类。瓷套是外绝缘，也可认为是辅助绝缘，它的作用一方面是作为内绝缘的容器，使不受外界潮气、尘土、风雪和雨露等影响，同时它具有足够的高度和裙边或棱以保证表面放电电压值。在户内特殊干燥的情况下，瓷套可以无裙甚至是光滑的，胶纸套管甚至可以不用瓷套。

高压电容式套管直径较小，充油式则较大。由于充油

式套管采取油屏障绝缘，极板数很少，结构简单，运行中维修方便，我国在 20 世纪 50 年代曾大量应用。60 年代初开始发展高压油纸式和胶纸式电容套管，电容式套管的经济性良好，不但本身尺寸小，而且可使装设电容式套管的电气设备，如变压器或油断路器等也相应减小尺寸和质量，可以大大节省成本。目前，电容式套管已在全国大量生产和应用，并已基本上取代了老式的充油式套管。

高压套管是发展超高压电力系统最先行试制的绝缘结构。我国以前发展 330kV 线路时，首先从试制 330kV 电容式套管开始。目前发展 500 ~ 750kV 超高压线路过程中套管的研究和试制也处于先行的地位，1978 年已试制成功 500kV 油纸电容套管。

套管型结构在交流电压作用下的表面放电过程比较复杂。如为一个光滑的管状结构，则当电压上升时，法兰附近可以出现电晕、刷形放电、滑闪放电和闪络四个过程，其相应临界电压值常以下列经验公式作计算。

(一) 电晕起始电压

$$U_k = \frac{1.06 \times 10^{-5}}{C_v^{0.45}} \quad (1-1)$$

式中 U_k ——电晕起始电压，kV；

C_v ——单位面积的体积电容（比电容），F/cm²，
在平板电极的情况下， $C_v = \epsilon_0 \epsilon_r / d$ 。

将 C_v 公式代入式 (1-1) 则得

$$U_k = 8.1 \left(\frac{d}{\epsilon_r} \right)^{0.45} \quad (1-2)$$

式中 ϵ_r ——相对介电常数；

d ——绝缘厚度，cm。

以上指金属电极情况，如为半导体电极，其值约可提高 30% ~ 40%。

(二) 刷形放电长度 l

刷形放电长度的计算公式为

$$l = \frac{U - U_k}{k_1} \quad (1-3)$$

式中 U ——外施电压，kV；

U_k ——电晕起始电压，kV；

k_1 ——系数，在交流电压下，对瓷而言 $k_1 = 5$ ，对胶纸而言，在空气中 $k_1 = 5.5$ ，在油中 $k_1 = 12.8$ 。

(三) 滑闪起始电压 U_w

滑闪起始电压 U_w 的计算公式为

$$U_w = \frac{1.355 \times 10^{-4}}{C_v^{0.44}} \quad (1-4)$$

以 $C_v = \epsilon_0 \epsilon_r / d$ 代入，得

$$U_w = 74.8 \left(\frac{d}{\epsilon_r} \right)^{0.44} \quad (1-5)$$

式 (1-5) 在 $C_v > 0.25 \times 10^{-12} \text{ F/cm}^2$ 时较为准确。当 $d = 0.01 \sim 0.40 \text{ cm}$ 时，式 (1-5) 可以近似为

$$U_w = 91 \sqrt{\frac{d}{\epsilon_r}} \quad (1-6)$$

由以上各式可见，套管的 C_v 愈大，即 ϵ_r 值大或 d 值小，电晕和滑闪起始电压愈低。

(四) 闪络电压 U_s

套管一旦发生滑闪则闪络将随树枝状滑闪放电之延伸很快发生，增加沿面放电距离收效甚少。因此，在实际高压套管中，必须消除滑闪的发生。在无滑闪的情况下，闪

络电压的近似计算为

$$U_s = 3.16L + 14 \quad (1-7)$$

式中 U_s ——闪络电压, kV;

L ——放电距离, cm, 当 $L < 200\text{cm}$ 时, 式 (1-7) 比较准确, 当 L 较长时, 闪络电压值可查图 1-1 曲线。

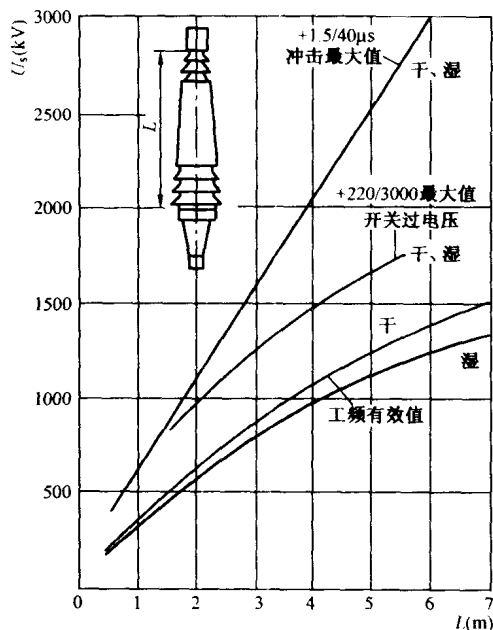


图 1-1 闪络电压 U_s 与套管长度 L 关系曲线

1. 纯瓷套管

纯瓷套管大量用于 35kV 及以下电压等级的电站用穿墙套管, 其结构主要包括一个圆管式的瓷件和金属附件,

如导杆、法兰、端盖等。

最简单的圆管形套管表面电场分布很不均匀。由图 1-2 可见，套管模型的法兰附近和端盖附近的电场强度大大超过平均场强。简单套管的表面电场分布在电极法兰和端盖附近都比较集中。套管直径愈小法兰附近的场强愈高，其原因是法兰处比电容 C_v 增加。端盖直径愈大，端盖附近的场强愈高。图 1-2 曲线 c 为理想的线性分布，曲线 a 为无端盖时的电位分布，两曲线可作比较。

为了改善电位分布和防止滑闪，最简单的方法是减小比电容 C_v 以及减小端盖处直径。减小套管 C_v 的最简单

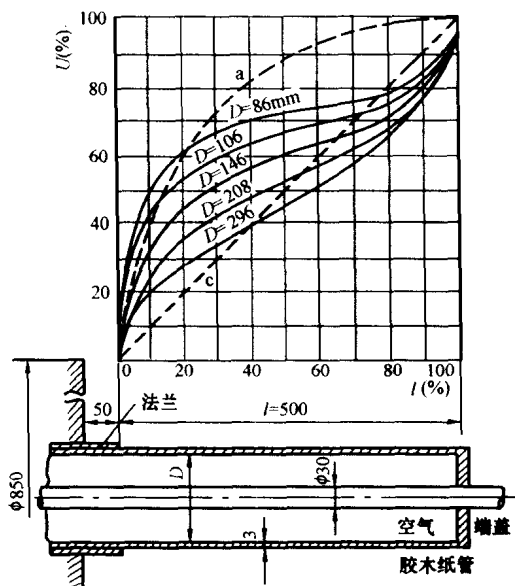


图 1-2 圆管形套管的电位分布及外形

D —圆形套管直径； l —圆形套管长度

方法是采用空气腔。图 1-3 所示为 6~10kV 空气腔套管，这种型式的套管只能用于 10kV 以下。当电压过高时，空气腔因发生电晕而失去作用，使套管仍会发生表面滑闪。空气腔套管的导杆有时可用胶纸作覆盖，通常厚度为 3~5mm，这样电晕电压可提高一倍，因而提高了放电电压，一般闪络电压可提高 20%，冲击电压可提高 50%，这种套管可以用于 20~35kV 电压级。

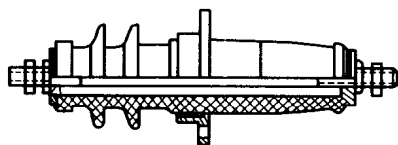


图 1-3 6~10kV 空气腔套管

空气腔套管的缺点是中部直径相当大，内孔又如鼓形孔则不能充分利用真空练泥机挤制，生产工艺上不方便。此外，导杆上如用纸层覆盖也易老化或受潮击穿，因此，目前我国 10kV 及以下的套管大多采用直孔空气腔套管，在 20kV 以上者均采用无空气腔的直孔大裙式套管，见图 1-4、图 1-5。没有空气腔则 C_v 值很大，因此必须在法兰附近做成一凹入处，使法兰边缘处电力线不存在经过空气再斜入固体介质表面的问题，从而防止滑闪和提高闪络电压。涂在凹处的半导体釉层不宜过低或过高，否则滑闪电

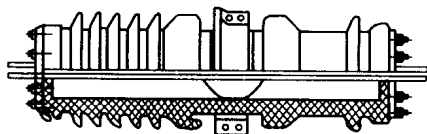


图 1-4 20kV 母线式穿墙套管

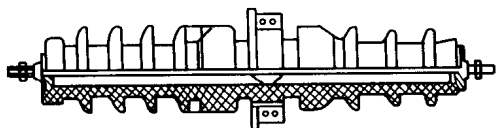


图 1-5 具有大裙的无空气腔
35kV 户外穿墙套管

压与闪络电压都会降低。瓷件内孔也涂半导体釉（或喷铝）成为均压层，然后以弹簧片与导杆接通，使与导杆同电位，以免内孔发生电晕。套管的法兰附近以及内孔的均压层，我国以前都规定为喷铝，但运行中常发生铝层脱落以致电晕和滑闪电压降低，甚至在额定电压下发生局部放电。20 世纪 60 年代以来，改用涂 $\rho_s < 10^3 \Omega$ 的半导体釉，克服了上述缺点。

2. 电容式套管

电容式套管具有内绝缘和外绝缘。内绝缘或称主绝缘，为一圆柱形电容芯子，外绝缘为瓷套。瓷套的中部有供安装用的金属连接套管，或称法兰。套管头部有供油量变化缓冲的金属容器称为油枕。套管内部抽真空并充满矿物油。

套管的整体连接（电容芯子、瓷套、连接套筒和油枕等的连接）有二种基本形式，即用强力弹簧通过导杆压紧的方式（常用于油纸式电容套管）以及用螺栓在连接处直接卡装的方式（常用于胶纸式电容套管）。连接处必须采用优质的耐油橡皮垫圈以保证套管的密封（不漏油和不使潮气浸入），要有一定的机械强度和弹性。油纸式电容套管内部有弹性板，与弹簧共同对因温度变化所引起的长度变化起调节作用，以防密封的破坏。这种连接形式，基本

上属于全封闭结构，使套筒内部完全与大气隔离，可以防止电容芯子和油的受潮或早期老化。老式充油套管采取油屏障结构，60kV 以上者胶纸筒屏障上也有铝箔电容屏，因用油量很大，只能采用非密封结构，套管内部绝缘油易受潮，运行中经常要对套管进行维修。全封闭式电容套管与此相反，具有很大的优越性。

有些套管在连接套筒上还带有电容分压抽头，可以抽取 2~3kV 电压，供测量线路电压及继电保护之用。

套管除主体结构外，还需要运行维护的装置，如在油枕上装有油面指示器、连接套筒上装有测量 $\tan\delta$ 用的接头（运行时和连接套筒接通）、取油样装置及注油孔等。

此外，套管上下高压端装有屏蔽尖端的金属均压罩或均压球。

电容式套管的瓷套是外绝缘，同时也是内绝缘和油的容器。变压器套管上瓷套表面有伞裙，以提高外绝缘抵抗大气条件，如雨、雾、潮湿、脏污等的的能力，下瓷套工作在油中，表面有棱。胶纸式变压器套管无下瓷套。

套管按用途可分为变压器套管、多油断路器套管和穿墙套管以及其他不是主要的套管，如电容器用套管等。电容式套管主要用于 110kV 以上电压级。在 330kV 以上电压级中，变压器套管是最主要的一种套管，本章所述主要是变压器电容套管。

电容套管的导电杆一般以优质硬铜杆或管制成。变压器套管的接线方式，在电流不很大（例如 1000A）的情况下，常采用穿缆式接线方式，即直接用变压器的引线从套管下端穿过铜管至套管的上端与套管的接线板相连接。

图 1-6 所示为我国生产的胶纸式和油纸式变压器用电

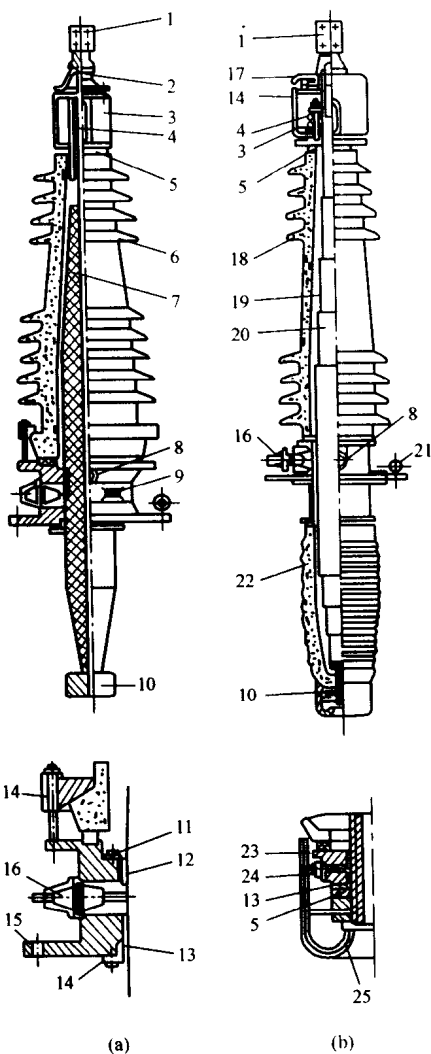


图 1-6 110kV 电容式变压器套管结构

(a) 110kV, 600A 卡装式胶纸电容式套管;

(b) 110kV, 600A 装配式油纸电容式套管

1—接线头; 2—放气塞和罩; 3—油枕; 4—卡紧螺杆; 5—密封垫圈; 6—瓷套; 7—胶纸电容芯子; 8—取油样塞子; 9—名牌; 10—均压球; 11—法兰; 12—锥形杯; 13—封圈; 14—压圈 (或螺钉); 15—安装法兰; 16—接地小套管 (测量端子); 17—均压罩; 18—上瓷套; 19—变压器油; 20—油纸电容芯子; 21—中间法兰; 22—下瓷套; 23—底座; 24—放油塞; 25—金属罩

容套管结构图。胶纸式采取法兰胶粘或卡装的结构，而油纸式采取导杆用弹簧压紧的装配方法，弹簧一般用4个。

3. 电容式套管的内绝缘

电容式套管的内绝缘电容芯子对于套管性能最为重要。电容式套管按其内绝缘材料不同可以分为胶纸电容式套管（简称胶纸套管）和油浸纸电容式套管（简称油纸套管）。

胶纸套管的电容芯子是由厚 $0.05 \sim 0.07\text{mm}$ 不透油的单面上胶纸和许多具有一定尺寸的电容极板卷制而成的圆柱形芯子。胶纸一般用整张包绕，尺寸过大时也可用纸带。

电容极板一般采用铝箔，卷制后呈同心圆柱形结构。为了提高局部放电电压，铝箔极板边缘常采用半导体纸镶边的方法，我国用半导体纸 $\rho_s = 10^7 \sim 10^8 \Omega$ ，宽 1cm 。国外也有采用整张涂刷或印刷的半导体极板或金属化纸极板的方法。电容芯子的极板数或绝缘层数愈多则控制电场愈好，起始电压也愈高。但是，极板数目过多在制造工艺上不方便，一般高压电容式套管的绝缘层最小厚度约为 $1 \sim 1.2\text{mm}$ 左右， $110 \sim 330\text{kV}$ 套管约 $30 \sim 90$ 层，电压高者层数多。

胶纸绝缘的密度约 1.3g/cm^3 ； $\epsilon_r = 3.8 \sim 4.5$ ；工频及常温下 $\text{tg}\delta \leq 0.007$ ；抗张强度不低于 $450 \times 10^5 \text{N/m}^2$ ；抗弯强度不小于 $800 \times 10^5 \text{N/m}^2$ ；顺着轴的抗压强度不小于 $400 \times 10^5 \text{N/m}^2$ 。

胶纸上涂的胶，可以是酚醛树脂或环氧树脂，我国现采用改性环氧树脂。实践证明，纸的含胶量较大则局部放电电压较高，但 $\text{tg}\delta$ 也较大。采用低损耗的胶和纸是十分