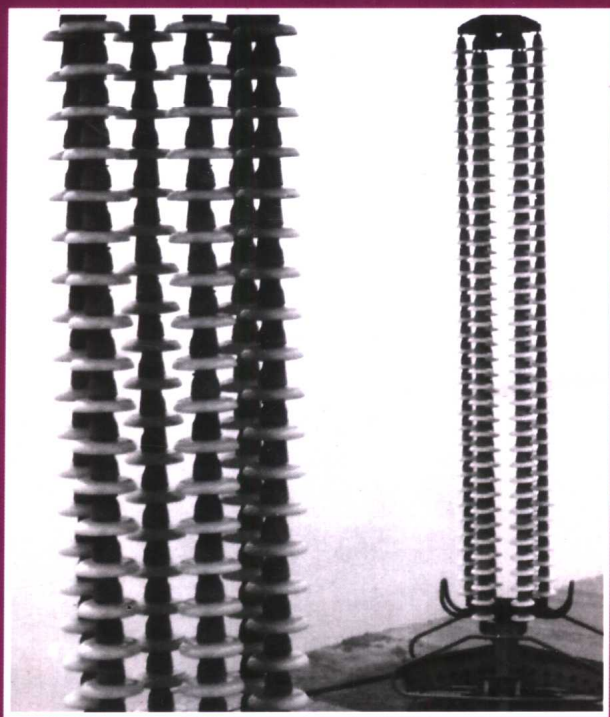


邱志贤 编著

高压绝缘子的 设计与应用



中国电力出版社

www.cepp.com.cn

高压绝缘子的 设计与应用

邱志贤 编著



中国电力出版社
www.cepp.com.cn



内 容 提 要

本书全面、详尽地介绍了各种高压绝缘子的设计与试验。主要内容包括：高压绝缘子设计；高压线路绝缘子；变电所绝缘子；高压套管；外绝缘污秽；高压绝缘子的检验和运行维护；直流绝缘子；聚合物绝缘子；数理统计方法在绝缘子设计与试验中的应用。

本书既适合电力工程设计人员及电力施工人员，也可作为大中专院校师生的参考资料。

图书在版编目（CIP）数据

高压绝缘子的设计与应用 / 邱志贤编著. —北京：中国电力出版社，2006

ISBN 7-5083-4457-X

I. 高… II. 邱… III. ①高压绝缘-绝缘子-设计②高压绝缘-绝缘子-试验 IV. TM216

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2006）第 062492 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>）

北京市同江印刷厂印刷

各地新华书店经售

*

2006 年 11 月第一版 2006 年 11 月北京第一次印刷

850 毫米×1168 毫米 32 开本 14.75 印张 389 千字

印数 0001—3000 册 定价 28.00 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



随着我国改革开放和社会主义现代化建设的迅速发展,我国高压、超高压和特高压电力系统正在不断发展和扩大,对高压绝缘子的机电性能要求日益提高,需要量迅速增加。为了适应各方面的要求,笔者在编写《电机工程手册》第一版第27篇“绝缘子”设计部分以及《电机工程手册》第二版输变电、配电设备卷第5篇“绝缘子与避雷器”绝缘子部分的基础上,将积累的资料汇编成本书的初稿。本书初稿编写完成后(包括1976~1978年在《电瓷避雷器》杂志上刊登过的讲座)承西安交通大学电机系刘其昶教授作全面审核,其中第10章还请该校数理统计教授范金城同志进行了认真审阅,并提出了宝贵意见,在此表示衷心的感谢。此外,本书初稿曾由本人所在单位西安电瓷研究所组织过全国审查。审查会议上承蒙西安、抚顺、大连、南京、醴陵、苏州电瓷厂以及西安交通大学、清华大学、湖南大学以及我所同志提出了宝贵意见。1996年应各方面要求曾内部少量印刷过该初稿。今依据最新国际标准,对初稿作适当修改,公开出版。

由于本书编写时间仓促,难免有纰漏之处,诚恳地欢迎读者批评指正。

编者

2006年5月

常用符号与缩写

1. 常用符号

A_c —接收数	E_{rm} —最大径向场强
a_{bg} —地震事件期间对套管重心的 等值加速度	E_{rp} —许用径向场强
a_g —地面加速度	E_u —运行电压下的场强
a_{gh} —地面加速度的水平分量	E_w —耐受电压梯度
a_{gv} —地面加速度的垂直分量	E_{wa} —工频耐受电压下场强
C —电容	E_{ws} —单位绝缘长耐受电压梯度
c —比热容; 样本变异系数 (即 $S/\bar{x}$)	F —形状因数; 机械力
D_{av} —平均直径	f —形状因数; 偏移; 固有频率
d_c —芯体 (管, 棒) 外径, 芯径	F_b —机械破坏负荷
d_t —主体直径 (f 来自法文 $fût$), 杆径	F_{bav} —平均破坏负荷
E —弹性模量; 电场强度	F_{br} —额定机械破坏负荷
E_a —轴向场强	F_c —临界力; 悬臂负荷
E_{ap} —许用轴向场强	F_{com} —压缩力
E_c —临界电压梯度	F_h —水平力
E_d —固体介质击穿场强	F_v —垂直力
E_{fa} —轴向闪络场强	G —电导
E_{faw} —潮湿表面部分工频湿闪络电 压梯度	g —重力加速度, 一般取为 9.8m/s^2
E_p —固体介质击穿场强	G_L —层电导
E_{pa} —固体介质工频击穿电压梯度	H —总高; 结构高度; 连接长
E_r —径向场强	I —材料截面的惯性矩
E_{ra} —空气腔的径向场强	I_c —临界电流
E_{re} —瓷壁的径向场强	I_{cs} —稳定的泄漏电流
	I_h —最高泄漏电流
	I_r —额定电流
	I_{sc} —短路电流
	I_{scp} —允许短路电流

I_{st} —稳态电流
 I_{th} —热短时电流
 k —安全因数; 斜率
 k_a —海拔校正因素
 k_D —直径系数
 k_d —散热系数
 k_p —邻近效应 (proximity effect) 系数
 k_s —集肤效应 (skin effect) 系数
 l —弯曲力臂
 L_a —湿闪络距离的空气间隙部分
 L_c —爬电距离
 L_d —干闪络距离
 L_i —绝缘长度
 L_p —击穿距离
 L_w —湿闪络距离的潮湿表面部分
 M_{bo} —破坏扭矩 ($N \cdot m$)
 M_{bor} —额定破坏扭矩 ($N \cdot m$)
 M_c —悬臂弯曲力矩
 M_{ct} —悬臂弯曲总力矩
 N —总体容量
 n —样本量; 伞数
 p —伞伸出; 内压力; 破坏 (闪络) 概率; 废品 (不合格品) 百分率
 $\bar{p}$ —过程平均废品率
 P_a —接收概率
 P_b —破坏内压力 (MPa)
 P_{br} —额定破坏内压力 (MPa)
 P_e —介质损耗产生的热损耗功率
 P_R —导体电阻产生的热损耗功率
 Q —质量指数
 q —合格品率

R —电阻
 R_e —拒收数
 S —样本标准偏差; 面积
 s —伞间距; 净距; 元件高度
 S_a —盐度 (kg/m^3); 加速度放大因数
 S_d —附盐密度 (mg/cm^2)
 S_N —不溶物密度 (mg/cm^2)
 T —绝对温度 (K)
 T_p —操作冲击波波前时间 (μs)
 T_t —总持续时间
 t —电流持续时间; 持续时间; 温度, 温升 (K)
 $\tan\delta$ —介质损耗角正切
 U —施加电压
 u —标准正态分布分位数
 U_a —工频电压 (kV) (rms)
 U_c —临界电压; 电晕电压 (kV) (rms)
 U_d —直流电压 (kV); 固体介质击穿电压
 U_f —闪络电压
 U_{fn} —工频闪络电压 (kV) (rms)
 U_{fad} —工频干闪络电压 (kV) (rms)
 U_{faw} —工频湿闪络电压 (kV) (rms)
 U_{L50} —50% 雷电冲击闪络电压 (kV 或 MV) (peak)
 U_m —设备最高电压 (kV) (rms)
 U_n —系统标称电压 (kV) (rms)
 U_{pa} —固体介质工频击穿电压
 U_r —绝缘子额定电压 (kV) (rms)
 U_s —操作冲击电压 (kV 或 MV) (peak); 规定试验电压 (kV)

或 MV)

U_{s50} —50% 操作冲击闪络电压 (kV 或 MV) (peak)

U_{sd50} —50% 操作冲击干闪络电压 (kV 或 MV) (peak)

U_{sw50} —50% 操作冲击湿闪络电压 (kV 或 MV) (peak)

U_T —试验电压

U_{test} —试验电压

U_{ws} —工频耐受电压 (kV) (rms)

U_{wd} —工频干耐受电压 (kV) (rms)

U_{war} —额定工频耐受电压 (kV) (rms)

U_{wl} —雷电冲击耐受电压 (kV 或 MV) (peak)

U_{wlr} —额定雷电冲击耐受电压 (kV) (peak)

U_{ws} —操作冲击耐受电压 (kV 或 MV) (peak)

U_{wsd} —操作冲击干耐受电压 (kV 或 MV) (peak)

U_{wsr} —额定操作冲击耐受电压 (kV) (peak)

U_{wsw} —操作冲击湿耐受电压 (kV 或 MV) (peak)

X —随机变量

x —随机变量特性值或样本观测值

$\bar{x}$ —样本均值

Z —惯用标准偏差; 弯曲、扭转断

面模数

α —伞倾角; 电阻温度系数; 显著水平; 生产方风险

β —伞倾角; 使用方风险

δ —击穿距离; 间距

ε_r —相对介电常数

K, κ —层电导率 (μS)

κ_L —层电导率 (μS)

κ_{lp} —局部层电导率

κ_p —局部电导率

λ —爬电比距; 胶装比; 台阶长度

μ —随机变量或总体的期望 (均值)

ν —自由度

ξ —阻尼因数

ρ —电阻率

σ —溶液或污液体积电导率; 随机变量或总体的标准差; 应力

σ_{av} —平均破坏应力

σ_b —机械破坏应力

σ_{bc} —悬臂弯曲破坏应力

σ_{bt} —拉伸破坏应力

σ_c —悬臂弯曲应力

σ_{com} —压缩应力

σ_{cr} —临界应力

σ_p —许用应力

v —总体变异系数 (即 σ/μ), 亦称为 (相对) 标准偏差

2. 常用缩写符号

a. c. , AC (alternating current) 交流电

ASTM (American Society for Testing Materials) 美国材料试验学会

av (average) 平均的

c (calculated) 计算的

CESI (Centro Elettrotecnico Sperimentale Italiano) 意大利电工试验中心

CF (Creepage factor) 爬电因数

CGIT (compressed-gas-insulated transmission line) 压缩气体绝缘输电线路

CIGRE (Conference Internationale des Grands Reseaux Electriques a Haute Tension) 国际大电网会议

d. c., DC (direct current) 直流电

DGA (dissolved gas analysis) 溶解气体分析

EDF, EdF (Electricite de France) 法国电力公司

EPDM (ethylene propylene diene monomer) 三元乙丙橡胶

EPM (ethylene propylene monomer) 二元乙丙橡胶

Epoxy (EP) resin 环氧 (EP) 树脂

ESDD (equivalent salt deposit density) 等值 (附) 盐密 (度)

FGH (Forschungsgemeinschaft für Hochspannungs-und Hochstromtechnik) 高电
压强电流技术研究联合会

FRP (fibre-reinforced plastics) 玻璃纤维增强塑料
(fiberglass reinforced polymer) 玻璃纤维增强聚合物

GIF (gas-impregnated paper or plastic film) 气体浸渍纸或膜

GIS (gas insulated metal-enclosed switchgear) 气体绝缘金属封闭开关设备

HTV (high temperature vulcanized) 高温硫化

HVAC (high voltage alternating current) 高压交流

HVDC (high voltage direct current) 高压直流

IEC (International Electrotechnical commission) 国际电工委员会

IEEE (Institute of Electrical and Electronics Engineers) 电气与电子工程师学
会

IREQ (Institute de Recherche d' Hydro-Québec) 魁北克电力研究所

LC (leakage current) 泄漏电流

L-G (line-ground) 线对地

MDCL (maximum design cantilever load) 最大设计弯曲负荷, 最大设计悬臂
负荷

MDT (maximum design tensile load) 最大设计拉伸负荷

MML (maximum mechanical load) 最大机械负荷

MSP (Maximum Service Pressure) 最大运行压力
NCI (non-ceramic insulator) 非瓷绝缘子
NEMA (National Electrical Manufacturers Association) 美国国家电机制造者协会
NSDD (non-soluble deposit density) 不溶物密度 (灰密)
OC curve (operating characteristics curve) 操作特性曲线
peak 峰值
RH (relative humidity) 相对湿度
RIV (radio-interference voltage) 无线电干扰电压
rms (root-mean-square) 方均根 (值)
RTL (routine test load) 全数试验负荷
RTV (room temperature vulcanized) 室温硫化
SCD (specific creepage distance) 爬电比距
SCL (specified cantilever load) 规定悬臂弯曲负荷
SDD (salt deposit density) 附盐密度
SDOF (single degree of freedom system) 单自由度系统
SF (Salt fog) test 盐雾试验
SFL (specified electromechanical or mechanical failing load) 规定破坏负荷
SIP (specified internal pressure) 规定内压力
SIR (silicone rubber) 硅橡胶
SML (specified mechanical load) 规定 (额定) 机械负荷
SSD (sum of squares of deviations) 偏差的平方和
STL (specified tensile load) 规定 (额定) 拉伸负荷
VDE (Verband Deutscher Elektrotechniker) 德意志联邦共和国电气工程师学会

目 录



前言

常用符号与缩写

第一章 概述	1
第一节 高压绝缘子的用途与分类	1
第二节 高压绝缘子的运行条件和要求	8
第三节 超高压和特高压输电对绝缘子的要求	11
第四节 绝缘子额定电压	12
第二章 高压绝缘子设计概况	13
第一节 引言	13
第二节 高压绝缘子的基本结构	13
第三节 绝缘子的试验电压	21
第四节 典型空气间隙的闪络特性以及绝缘子闪络 距离的估算	37
第五节 绝缘子的湿闪络特性	47
第六节 B 型瓷或玻璃绝缘子的工频击穿电压	52
第七节 绝缘子用材料的选择	54
第八节 绝缘子结构设计	64
第九节 圆柱形绝缘子机械强度计算 基本公式和参数	77
第三章 高压线路绝缘子	84
第一节 高压线路绝缘子的用途与分类	84

第二节	线路针式和线路柱式绝缘子	87
第三节	盘形绝缘子	97
第四节	瓷横担绝缘子	121
第四章	变电所绝缘子	128
第一节	高压支柱绝缘子的组成与分类	128
第二节	户内支柱绝缘子的设计计算	131
第三节	户外棒形支柱绝缘子的设计计算	137
第四节	支柱绝缘子的标准特性	144
第五节	空心绝缘子(绝缘套)	146
第六节	自由站立的瓷型设备的地震设计计算	148
第五章	高压套管	153
第一节	高压套管的用途与分类	153
第二节	高压套管的滑闪放电	156
第三节	高压套管的稳定温升与热短时电流	162
第四节	纯瓷穿墙套管	174
第五节	油绝缘套管	187
第六节	电容式套管	191
第六章	外绝缘污秽	205
第一节	引言	205
第二节	污秽物类型和污秽闪络过程	206
第三节	交流系统用高压绝缘子的 人工污秽试验方法	214
第四节	自然污秽绝缘子污秽度的测量方法	221
第五节	耐污盘形绝缘子的尺寸以及盘形绝缘子的 人工污秽耐受电压特性	234
第六节	耐污棒形支柱绝缘子的尺寸以及棒形支柱 绝缘子的人工污秽耐受电压特性	241

第七节	盘形和棒形支柱绝缘子的自然污秽试验	
	耐受电压特性	247
第八节	交流电力设备外绝缘污秽等级	267
第九节	污秽地区交流绝缘子的选用以及反污措施 ...	272
第七章	高压绝缘子的检验和运行维护	281
第一节	检验项目	281
第二节	耐受或闪络电压试验	285
第三节	B 型绝缘子的击穿试验	307
第四节	工频火花电压试验和瓷壁工频耐压试验	311
第五节	机械试验	312
第六节	温度循环试验	313
第七节	孔隙性试验	317
第八节	绝缘子串元件的热机性能试验	317
第九节	无线电干扰试验	319
第十节	尺寸和形位偏差检查	323
第十一节	其他试验	323
第十二节	绝缘子的运行维护	328
第十三节	电容式套管的安装使用和维护	328
第八章	直流绝缘子	338
第一节	高压直流输电对外绝缘的要求	338
第二节	直流电压下空气间隙的闪络特性	339
第三节	运行失效统计和从提高运行可靠性的观点 对绝缘子提出的要求	343
第四节	绝缘材料的选择	352
第五节	绝缘子脚和帽的抗腐蚀能力	354
第六节	直流绝缘子的直流和冲击闪络电压特性	357
第七节	绝缘子的直流污秽性能	358
第八节	直流盘形绝缘子的尺寸特性	369

第九节	直流线路绝缘子的专项试验	370
第十节	IEC 直流用套管批准稿 IEC 62199 (2001)	
	独有的问题	373
第九章	聚合物绝缘子	375
第一节	引言	375
第二节	树脂绝缘子	377
第三节	气体绝缘金属封闭开关设备 (GIS)	
	用绝缘子	381
第四节	复合绝缘子	391
第十章	数理统计方法在绝缘子设计与试验中的应用	403
第一节	引言	403
第二节	抽样检验	403
第三节	抽查试验结果与型式试验结果的比较	428
第四节	高压绝缘子闪络电压的分散性以及闪络	
	电压计算值的确定	432
第五节	高压绝缘子机械 (或机电) 破坏负荷和	
	油中工频击穿电压的分散性及其设计	
	计算值的确定	436
参考文献		441

第一章 概 述

第一节 高压绝缘子的用途与分类

高压绝缘子 (high voltage insulator) 是供处在不同电位的电气设备或导体电气绝缘和机械固定用的器件, 是输配电设备中的重要元器件。绝缘子过去曾称为“碍子”、“隔电子”等, 我国电工术语标准 GB/T 2900. 1^[1.1]—1992 和 GB/T 2900. 8^[1.2]—1995 中称作“绝缘子”。

绝缘子按其额定电压高低可分为低压、高压、超高压和特高压绝缘子等。通常习惯上称额定电压 1kV 及以下的为低压绝缘子, 超过 1kV 的为高压绝缘子, 但其中 (330 ~ 750) kV 的称为超高压绝缘子, 1000kV 及以上的称为特高压绝缘子。

传统的瓷、玻璃绝缘子或树脂绝缘子, 它们的结构设计是属于单一材料系统, 即它们是由一种绝缘材料构成的, 因而机械功能 (压缩、拉伸、弯曲) 和电气功能 (爬电距离) 都由一种材料来承担。20 世纪中期开始使用的复合绝缘子 (composite insulator) 属于多材料系统, 是至少由两种不同的绝缘材料构成的, 将绝缘子的各项功能由不同的材料分开承担, 共同一起发挥它们的最佳功能。

复合绝缘子中除了通常的聚合物复合绝缘子 (composite polymeric insulator) 外, 还存在一种芯体是由均匀材料 (陶瓷材料或树脂) 制作的混合绝缘子 (hybrid insulator), 但这种绝缘子目前使用得很少。

随着线路和变电所应用复合绝缘子的进展, 高压套管也采用了其绝缘套, 它是由带或不带橡胶外套的树脂浸渍纤维管做

成的复合套管 (composite bushing)。^[1.3]●

传统的高压绝缘子通常可以按其用途和结构分类,见表 1-1。

线路绝缘子 (insulator for overhead lines) 是指使用在架空输电线路中用来支持或悬挂线路导线的绝缘子。变电所绝缘子 (insulator for substations) 是指使用在发电厂和变电所 (站) 发、变电装置和电器上的绝缘子。但是,这样分类并不是绝对的,表 1-1 中规定的几种线路绝缘子也常使用在发电厂和变电所内,变电所绝缘子有的也使用在线路中 (如支柱绝缘子作横担绝缘子用)。套管 (bushing) 是指使用在发电厂和变电所 (站) 发、变电装置和电器上的能使一个或几个导体穿过像墙壁或箱盖之类的隔板,并使导体对隔板绝缘的一种器件。固定到隔板上去的装置 (法兰或紧固器件) 是套管的一个组成部件。

变电所绝缘子和套管统称为电站电器绝缘子。

线路绝缘子中的横担绝缘子 (cross-arm insulator) 可由针式、线路柱式或长棒形绝缘子所构成,而牵引绝缘子 (traction insulator) 可由针式、线路柱式、盘形悬式和长棒形绝缘子所构成。横担绝缘子可为线路导线提供刚性支持,牵引绝缘子用作架空电力牵引线路挠性或刚性支持物,这两种绝缘子有时具有专门的金属附件。

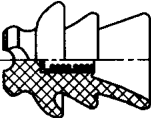
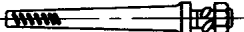
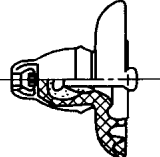
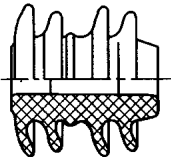
绝缘子按其他方式分类见表 1-2。

表 1-1 中 A 型和 B 型圆柱形支柱绝缘子符合表 1-2 和图 1-1 的定义。

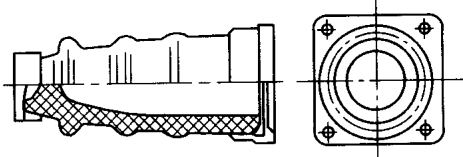
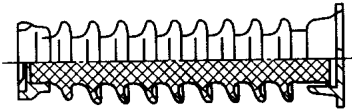
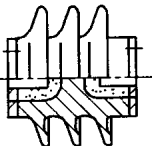
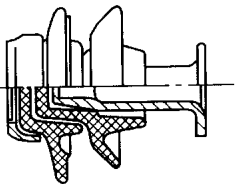
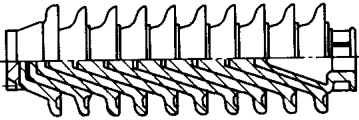
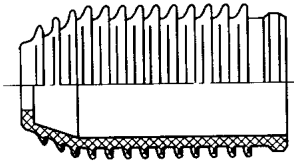
瓷绝缘子 (ceramic insulator) 和玻璃绝缘子 (glass insulator) 由于具有相当良好的电气、机械和化学稳定性,能较好地耐受各种气候条件的作用,原料普遍且成本低廉,因此目前最

● 按 IEC 60137^[1.3,1.4] 的定义,高压复合套管也包括橡胶直接施加到胶黏纸套管、胶浸纸套管、瓷、玻璃和类似无机材料套管以及浇注或模塑树脂绝缘套管主绝缘上的套管。

表 1-1 传统的高压绝缘子按用途和结构的分类

线路绝缘子	针式	线路柱式	盘形悬式	长棒形	蝶式
	 				
	户外用				

续表

隔板空心圆柱形支柱	A 型圆柱形支柱	B 型圆柱形支柱	针式支柱	叠锥体支柱	空心绝缘子
					

户内和户外用

变电所绝缘子