

供用电工人技能手册

电气试验

中国电机工程学会城市供电专业委员会 组 编
上海市电力公司超高压输变电公司 吴 钧 主 编
董华亭 副主编



中国电力出版社

www.cepp.com.cn

● 供用电工人技能手册

电 气 试 验

中国电机工程学会城市供电专业委员会 组 编

上海市电力公司超高压输变电公司 吴 钧 主 编

董华亭 副主编



中国电力出版社

www.cepp.com.cn

内 容 提 要

本书是《供用电工人技能手册》丛书中的一册,主要介绍了电力系统常见设备的现场试验方法。

本书主要内容包括:常用电气基础知识,常用电气试验仪器仪表的选择和使用,常规绝缘试验和判断方法,电力变压器、互感器、断路器和GIS组合电器、绝缘子和套管、电容器、绝缘油和SF₆气体、避雷器、线路工频参数测量、接地装置工频参数测量、电力电缆等各类电力系统常用设备的现场试验。

本书可作为电力系统生产运行单位的现场试验工作人员的参考书,也可作为高压电气试验人员职业培训的参考教材。

图书在版编目(CIP)数据

电气试验/上海市电力公司超高压输变电公司,吴钧主编;中国电机工程学会城市供电专业委员会组编. —北京:中国电力出版社,2008
(供用电工人技能手册)

ISBN 978-7-5083-3646-6

I. 电… II. ①上…②吴…③中… III. 电气设备—试验—技术手册 IV. TM64-33

中国版本图书馆CIP数据核字(2005)第115972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>)

北京丰源印刷厂印刷

各地新华书店经售

*

2008年9月第一版 2008年9月北京第一次印刷

850毫米×1168毫米 32开本 8.75印张 296千字

印数0001—3000册 定价18.00元

敬告读者

本书封面贴有防伪标签,加热后中心图案消失
本书如有印装质量问题,我社发行部负责退换

版 权 专 有 翻 印 必 究



高压电气设备的现场试验是高压电气设备运行管理中的重要环节,对保证电网的运行安全至关重要。现场试验与实验室条件下的试验相比,受到较多限制,需要采用一些不同的技术手段,其试验判断的特征也会有所不同。近年来,现场试验中也出现了许多新技术、新方法和新的试验装置。许多从事现场试验的同志都希望能有一本手册类型的工具书,以便于在现场工作中能较方便地参考查阅,本书的编写正是考虑了现场试验人员的这类要求。

本书介绍了电力系统常见电气设备的现场试验方法,编写中参考了大量有关现场试验的资料,还结合了上海市电力公司在现场试验工作中的一些经验。本书对试验原理叙述简单明了,内容侧重于对现场试验方法的描述,关注现场实际操作。本书针对每个具体试验项目,均按试验目的、现场接线、试验方法、试验结果判断、试验注意事项等分别进行叙述,以便于读者进行查阅。

本书共十二章。第一章基础知识,列出了常用的电气基础知识;第二章电气试验部分仪器仪表介绍,介绍目前较常用的电气试验仪器仪表的选择和使用;第三章常规绝缘试验,介绍了常规绝缘试验和判断方法;第四~十三章介绍了电力变压器的试验、互感器的试验、断路器和GIS组合电器的试验、绝缘子和套管的试验、电容器的试验、绝缘油和SF₆气体的试验、避雷器的试验、线路工频参数测量、接地装置工频参数测量和电力电缆的电气试验,分别介绍了各类电力系统常用设备的现场试验。

本书第一、九章由徐敏骅编写;第二、十三章由熊家安编写;第三章由邱永椿编写;第四章由袁聪波编写;第五章由朱兴盛、叶洪波编写;第六章由吴钧编写;第七章由叶洪波编写;第八章由吴剑敏编写;第十章由陈超杰编写;第十一、十二章由董华亭编写。全书由吴钧任主编,董华亭任副主编。在本书编写过程中,编者参考了有关资料和文献,在此对资料和文献的作者表示感谢。

由于现场试验技术和试验设备的日新月异,书中的结论和意见可能

会有一定的时间局限性。本书的一些试验主要是上海地区的一些实践经验，也可能会有地域局限。由于编者水平有限，书中不当和谬误之处在所难免，敬请读者批评指正。

编者

2008年9月



前言

第一章 基础知识	1
第一节 常用电气设备和仪器仪表的图形和符号	1
第二节 电路基础和电路定律	2
第三节 电子基础	9
第二章 电气试验部分仪器仪表介绍	12
第一节 绝缘电阻表	12
第二节 直流发生器	14
第三节 介质损耗测量仪	15
第四节 串联谐振耐压装置	16
第五节 变压器直流电阻测试仪	17
第六节 氧化锌避雷器交流阻性电流测试仪	18
第七节 SF ₆ 气体测试设备	20
第八节 接地电阻仪	23
第三章 常规绝缘试验	24
第一节 绝缘电阻、吸收比和极化指数试验	24
第二节 泄漏电流和直流耐压试验	29
第三节 测量介质损耗因数	39
第四节 交流耐压试验	45
第五节 局部放电检测	62
第四章 电力变压器的试验	76
第一节 测量绝缘电阻、吸收比和极化指数	76
第二节 测量泄漏电流	78
第三节 测量介质损耗因数	79
第四节 测量直流电阻	83

第五节	测量变压比	85
第六节	检查接线组别或极性	90
第七节	交流耐压试验	92
第八节	负载损耗和阻抗电压试验	94
第九节	低电压单相短路阻抗试验	95
第十节	空载电流和空载损耗试验	99
第十一节	测量零序阻抗	103
第十二节	频率响应法试验	106
第十三节	感应耐压与局部放电试验	109
第十四节	有载分接开关试验	113
第五章 互感器的试验		117
第一节	电磁式电压互感器的试验	117
第二节	电容式电压互感器的试验	130
第三节	电流互感器的试验	134
第四节	互感器中绝缘油和 SF ₆ 气体试验	137
第六章 断路器和 GIS 组合电器的试验		139
第一节	高压断路器的绝缘试验	139
第二节	高压断路器的特性试验	142
第三节	GIS 组合电器的试验	153
第七章 绝缘子和套管的试验		163
第一节	电容型套管的介质损耗因数试验	163
第二节	母线试验	164
第八章 电容器的试验		167
第一节	测量绝缘电阻	167
第二节	测量电容值	168
第三节	测量介质损耗因数	172
第四节	极对壳交流耐压试验	173
第五节	其他试验	173
第九章 绝缘油和 SF ₆ 气体的试验		175
第一节	绝缘油的试验	175

第二节	SF ₆ 气体的试验	192
第十章	避雷器的试验	198
第一节	避雷器现场试验项目	198
第二节	阀式避雷器试验	199
第三节	无间隙金属氧化物避雷器试验	202
第四节	运行中带电监测避雷器试验	204
第五节	避雷器底座和在线监测仪、放电计数器试验	205
第十一章	线路工频参数测量	207
第一节	线路参数测量目的	207
第二节	线路工频参数测量的项目、接线、 使用仪表、读数和计算	207
第十二章	接地装置工频参数测量	227
第一节	接地电阻的测量	227
第二节	土壤电阻率的测量	234
第十三章	电力电缆的电气试验	239
第一节	测量绝缘电阻值	239
第二节	直流泄漏电流试验和直流耐压试验	242
第三节	核相试验	247
第四节	橡塑电缆的交流耐压试验	248
附录 A	上海地区常用电气试验仪器设备一览表	251
附录 B	油浸式电力变压器绕组的绝缘电阻、泄漏电流、 介质损耗因数参考值和温度换算系数	254
附录 C	油浸纸绝缘电力电缆泄漏电流参考值	258
附录 D	常见试品的电容量	259
附录 E	单断距离与交流耐压试验电压的选择	260
附录 F	一球接地时, 球隙的工频交流、负极性 直流、负极性冲击放电电压	261
附录 G	上海电力公司关于电力电缆线路交接和预防性 试验规程	264
附录 H	橡塑电缆内衬层和外护套破坏进水的确定方式	270
	参考文献	271



基础知识

第一节 常用电气设备和仪器仪表的图形和符号

一、电气设备的图形、符号

电气设备的图形、符号见表 1-1。

表 1-1 电气设备的图形、符号

名 称	图形符号	文字符号	名 称	图形符号	文字符号
变压器		T	电压互感器		TV
断路器		QF	耦合电容器		C
隔离开关		QS	避雷器		F
电流互感器		TA	电缆终端		

二、常用仪器仪表的图形、符号

常用仪器仪表、测试设备的图形、符号和文字符号见表 1-2。

表 1-2 常用仪器仪表、测试设备的图形、文字符号

名 称	图形符号	文字符号	名 称	图形符号	文字符号
电流表		PA	功率表		PW
电压表		PV	静电电压表		Q

第二节 电路基础和电路定律

一、电路基础

(一) 电流和电压

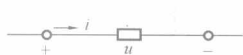
1. 电流的参考方向

电流的参考方向是任意指定的, 在电路中一般用箭头表示, 也有用双下标表示的, 如 i_{AB} , 其参考方向是由 A 指向 B。如果参考方向与实际电流方向相同, 则 $i > 0$; 如果参考方向与实际电流方向相反, 则 $i < 0$ 。

2. 电压的参考方向

两点之间的电压的实际方向只有两种可能, 当电压的参考方向与它的实际方向一致时, 电压为正值 ($u > 0$); 反之, 当电压的参考方向与它的实际方向相反时, 电压为负值 ($u < 0$)。

如果指定电流从标以电压“+”极性的一端流入, 并从标以“-”极性的另一端流出, 即电流的参考方向与电压的参考方向一致, 则把电流和



电压的这种参考方向称为关联参考方向, 如图 1-1 所示。

图 1-1 电压和电流的
关联参考方向

(二) 功率

电能量对时间的变化率就是电功率, 在电工中, 电功率常简称为功率

$$p = u \times i$$

(三) 电阻

在电压和电流的关联方向下, 按欧姆定律, 线性电阻元件的电压, 电流关系可写为

$$u = Ri \quad (1-1)$$

式中 R ——元件的电阻 (Ω)。

令 $G = 1/R$, 则式 (1-1) 变成

$$i = Gu$$

式中 G ——电阻元件的电导 (S)。

如果电阻元件电压的参考方向与电流的参考方向相反, 如图 1-2 所示, 则欧姆定律应写为 $i = -Gu$ 。

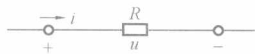


图 1-2 电压和电流
为关联参考方向

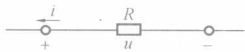


图 1-3 电压和电流
为非关联参考方向

在电压和电流的关联方向下, 任何时刻线性电阻元件吸取的电功率

$$p = ui = Ri^2 = Gu^2$$

(四) 电容元件

若电容元件上电压的参考方向规定由正极板指向负极板, 则任何时刻正极板上的电荷 q 与其两端的电压 u 有以下关系

$$q = CU$$

式中 C ——该元件的电容。

当 $q = 1\text{C}$, $U = 1\text{V}$ 时, $C = 1\text{F}$ 。通常还采用 μF (10^{-6}F) 和 pF (10^{-12}F) 作为其单位。

(五) 电感

当磁通 φ_L 与电流 i 在关联参考方向下, 在任何时刻线性电感元件的自感磁通链 φ_L 与元件中 i 有以下关系

$$\varphi_L = Li$$

式中 L ——该元件的自感或电感 (H)。

通常采用的还有 mH (10^{-3}H) 和 μH (10^{-6}H) 作为自感的单位。

(六) 基尔霍夫定律

基尔霍夫定律是集总电路的基本定律, 它包括电流定律的电压定律。

1. 基尔霍夫电流定律 (KCL)

在集总电路中, 任何时刻, 对任一节点, 所有支路电流的代数和恒等于零。

2. 基尔霍夫电压定律 (KVL)

在集总电路中, 任何时刻, 沿任一回路所有支路电压的代数和恒等于零。

(七) 电路定律的相量形式 (交流电路)

$$\sum \dot{I} = 0 \quad (\text{KCL})$$

$$\sum \dot{U} = 0 \quad (\text{KVL})$$

$$\dot{U}_R = R \dot{I}_R$$

$$\dot{U}_L = j\omega L \dot{I}_L$$

$$\dot{U}_C = -j \frac{1}{\omega C} \dot{I}_C$$

串联电路发生谐振时的条件为

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$$

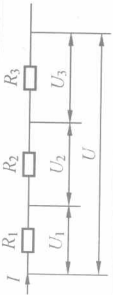
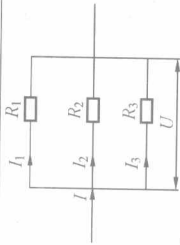
由于 $\omega_0 = 2\pi f_0$, 所以有

$$f_0 = \frac{1}{2\pi \sqrt{LC}}$$

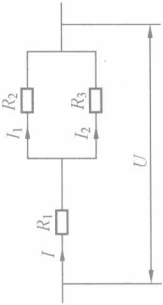
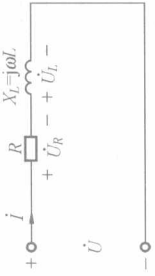
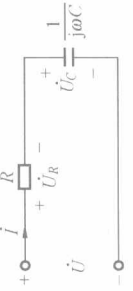
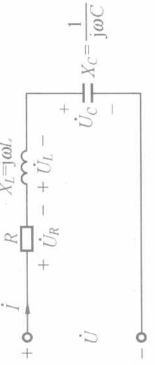
二、常见电路计算公式

常见电路计算公式见表 1-3。

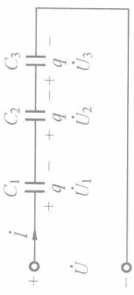
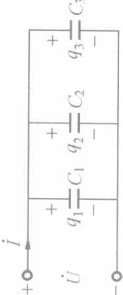
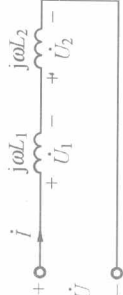
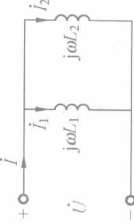
表 1-3 常见电路计算公式

项 目	电 路 图	公 式	说 明
直流电路中电压、电流、电阻之间的关系(欧姆定律)		$I = U/R$	
直流电路功率		$P = UI = I^2 R = U^2 / R$	
电阻与导体长度、横截面及材料性质的关系		$R = \rho l / S$	ρ —导体电阻率; l —导体长度; S —导体横截面积
电阻与温度关系		$R_t = R_{20} [1 + \alpha(t - 20)]$	α —电阻材料温度系数
电阻串联的总值		$R = R_1 + R_2 + R_3$	
电阻并联的总值		$1/R = 1/R_1 + 1/R_2 + 1/R_3$	

续表

项 目	电 路 图	公 式	说 明
电阻复联的总值		$R = R_1 + R_2 R_3 / (R_2 + R_3)$	
电阻、电感串联的阻抗值		$ Z = \sqrt{R^2 + X_L^2}$	$X_L = 2\pi fL;$ $X_C = 1/(2\pi fC);$ $ Z $ —阻抗模
电阻、电容串联的阻抗值		$ Z = \sqrt{R^2 + X_C^2}$	$X = X_L - X_C ;$ Z —阻抗 (Ω); R —电阻 (Ω); X_L —感抗 (Ω); X_C —容抗 (Ω); X —电抗 (Ω); L —电感 (H); C —电容 (F); f —频率 (Hz); φ —阻抗角 ($^\circ$)
电阻、电感、电容串联的总阻抗值		$ Z = \sqrt{R^2 + (X_L - X_C)^2}$ $= \sqrt{R^2 + X^2}$ $\varphi = \arctan \frac{X}{R}$	

续表

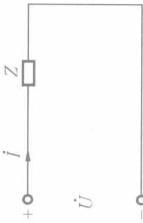
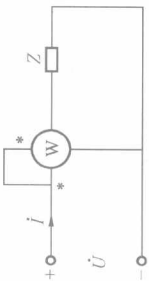
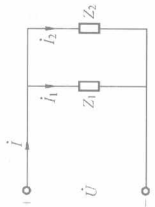
项 目	电 路 图	公 式	说 明
电容串联的总值		$1/C = 1/C_1 + 1/C_2 + 1/C_3$	
电容并联的总值		$C = C_1 + C_2 + C_3$	
电感串联的总值		$L = L_1 + L_2$	L —电感 (H); M —互感 (H)
电感并联的总值		$L = L_1 L_2 / (L_1 + L_2)$	

续表

项 目	电 路 图	公 式	说 明
具有互感的电感 串联的总值		$L = L_1 + L_2 + 2M$ $L = L_1 + L_2 - 2M$	L —电感 (H); M —互感 (H)
		$L = (L_1 L_2 - M^2) / (L_1 + L_2 - 2M)$ $L = (L_1 L_2 - M^2) / (L_1 + L_2 + 2M)$	
星形化为三角		$R_{12} = R_1 + R_2 + R_1 R_2 / R_3$ $R_{23} = R_2 + R_3 + R_2 R_3 / R_1$ $R_{31} = R_3 + R_1 + R_3 R_1 / R_2$	
三角形化为星形		$R_1 = R_{12} R_{31} / (R_{12} + R_{23} + R_{31})$ $R_2 = R_{23} R_{12} / (R_{12} + R_{23} + R_{31})$ $R_3 = R_{23} R_{31} / (R_{12} + R_{23} + R_{31})$	

电阻星形—三角形转换

续表

项 目	电 路 图	公 式	说 明
交流电路中电压、电流、阻抗三者之间关系(欧姆定律)		$\dot{I} = \dot{U} / Z$ $ Z = \sqrt{R^2 + X^2}$	
交流电路功率		$P = \dot{U} \dot{I} \cos \varphi = I^2 R$ $Q = \dot{U} \dot{I} \sin \varphi = I^2 X$ $S = \dot{U} \dot{I} = I^2 Z$ $\cos \varphi = R / Z, \sin \varphi = X / Z$	P —有功功率(W); Q —无功功率(var); S —视在功率(V·A); $\cos \varphi$ —功率因数
交流电并联电路的总电流		$I = \sqrt{I_1^2 + I_2^2 + 2I_1 I_2 \cos(\varphi_1 - \varphi_2)}$ $\varphi = \arctan(I_1 \sin \varphi_1 + I_2 \sin \varphi_2) / (I_1 \cos \varphi_1 + I_2 \cos \varphi_2)$ $\varphi_1 = \arctan X_1 / R_1$ $\varphi_2 = \arctan X_2 / R_2$	φ —总电流 $\dot{I}$ 与电压 $\dot{U}$ 之间的相角; φ_1 —第一支路电流 $\dot{I}_1$ 与电压 $\dot{U}$ 之间的相角; φ_2 —第二支路电流 $\dot{I}_2$ 与电压 $\dot{U}$ 之间的相角

三、常用物理名称、符号和单位

常用物理名称、符号和单位见表 1-4。

表 1-4 常用物理名称、符号和单位

名 称	符 号	单 位	
频 率	f	赫 [兹]	Hz
周 期	T	秒	s
电荷量	Q	库 [仑]	C
电 流	I	安 [培]	A
电流密度	J (S)	安 [培] / 平方毫米	A/mm ²
电压、电位	U	伏 [特]	V
电动势	E		
电场强度	E	伏 [特] / 米	V/m
电 阻	R	欧 [姆]	Ω
(复) 阻抗	Z		
电 抗	X		
电 导	G	西 [门子]	S
(复) 导纳	Y		
电 纳	B		
电阻率	ρ	欧 [姆] / 米	$\Omega \cdot m$
电导率	r	西 [门子] / 米	S/m
电 容	C	法 [拉]	F
电感、自感	L	亨 [利]	H
互 感	M (L12)	韦 [伯]	Wb
磁通量	Φ		
磁感应强度、磁通密度	B	特 [斯拉]	T
磁场强度	H	安 [培] / 米	A/m
磁导率	μ	亨 [利] / 米	H/m
真空磁导率	μ_0		
介电常数	ϵ	法 [拉] / 米	F/m
真空介电常数	ϵ_0	F/m	
相对介电常数	ϵ_r	量纲无	
相对磁导率	M_r		
(有功) 功率	p	瓦 [特]	W
无功功率	Q	乏	var
视在功率	S	伏安	V·A
电 能	W	千瓦小时	kW·h

第三节 电子基础

一、半导体的基本概念

在自然界中，存在着许多不同的物质，有的物质很容易传导电流，称