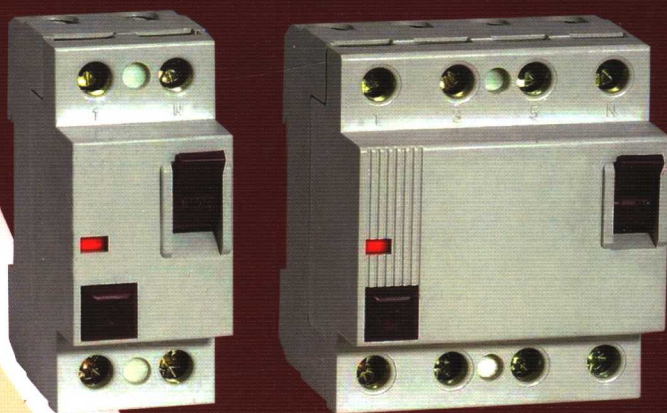


电 气 设 备 丛 书

触/漏电保护器

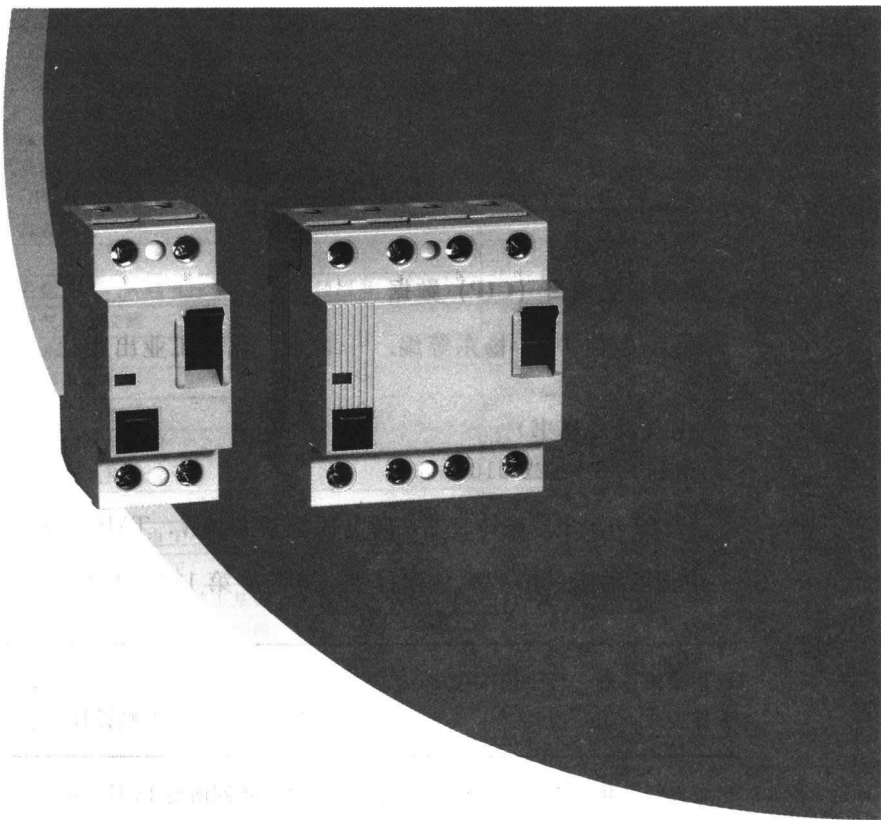
杨 东 张应龙 林 丛 李捷辉 编



电 气 设 备 丛 书

触/漏电保护器

● 杨 东 张应龙 林 丛 李捷辉 编



化学工业出版社

· 北 京 ·

本书从实用的角度出发,介绍触/漏电保护器的理论、结构、工作原理、技术参数和运行特性,同时也介绍触/漏电断路器的工作原理、技术参数、选择与使用、安装与接线、误动作及防范措施、常见故障及维修处理等方面的知识。

本书内容通俗易懂、资料丰富、观点新颖、实用性强,可供广大电工,特别是厂矿企事业单位电工、县乡所电工,各级安全用电管理人员,触/漏电保护器研究和生产人员,高等院校相关专业师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

触/漏电保护器/杨东等编. —北京:化学工业出版社,
2007.9

(电气设备丛书)

ISBN 978-7-122-01089-6

I. 触… II. 杨… III. 漏电保护开关 IV. TM564.8

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2007)第 135300 号

责任编辑:刘 哲 周国庆

责任校对:边 涛

装帧设计:于 兵

出版发行:化学工业出版社(北京市东城区青年湖南街 13 号 邮政编码 100011)

印 刷:大厂聚鑫印刷有限责任公司

装 订:三河市前程装订厂

787mm×1092mm 1/16 印张 14 $\frac{3}{4}$ 字数 363 千字 2008 年 1 月北京第 1 版第 1 次印刷

购书咨询:010-64518888(传真:010-64519686) 售后服务:010-64518899

网 址: <http://www.cip.com.cn>

凡购买本书,如有缺损质量问题,本社销售中心负责调换。

定 价:32.00 元

版权所有 违者必究

前 言

随着科学技术的迅猛发展,电气设备发展日新月异。尤其是以计算机、信息技术为代表的高新技术的发展,使制造技术的内涵和外延发生了革命性的变化,传统的电气设备设计、制造技术不断吸收信息控制、材料、能源及管理等领域现代成果,综合应用于产品设计、制造、检测、生产管理和售后服务。在生产技术和生产模式等方面,许多新的思想和概念不断涌现,而且,不同学科之间相互渗透、交叉融合,衍生新的研究领域,迅速改变着传统电气设备制造业的面貌,产品更新换代极为频繁。21世纪电气设备发展的总趋势是:强弱电技术的融合更为密切;多学科、多专业的交叉更为深入;我国电气产品与国际接轨的步伐将迈得更大,国内外的技术交流也将更为广泛。

当今世界,科学技术发展迅速,知识经济发展显现端倪,综合国力的竞争日趋激烈。国力的竞争,归根结底是科技与人才的竞争。为了适应我国现代化建设的需要,我们组织编写了这套《电气设备丛书》(以下简称《丛书》),以满足广大电气工作者和爱好者的迫切需要。

《丛书》编写时从实用出发,力求理论与实际相结合,突出新颖性,介绍电气设备的结构、工作原理、技术参数、适用场合、技术操作要点、运行与维护经验等,并注重理论联系实际,融入应用实例,突出技能和技巧。

《丛书》本着求精避繁的原则,对电气设备的基础理论、材料、器件、应用电路、安装、调试、运行与维修等适用面广、使用频率高和实用性强的技术内容做了详细的阐述。同时,还从实际出发,介绍反映电工电子、电力电子、计算机、自动控制、传感器技术、机电一体化相互交叉、纵横结合的发展大趋势。

本套丛书共10个分册,包括:《防爆电器》、《防雷与接地装置》、《电气测量仪器》、《电热设备》、《开关电源技术》、《触/漏电保护器》、《高压电器》、《低压电器》、《变压器原理与应用》、《电机原理与应用》。

本书是《触/漏电保护器》分册。

本书从实用的角度出发,介绍触/漏电保护器的理论、结构、工作原理、技术参数和运行特性,同时也介绍触/漏电断路器的工作原理、技术参数、选择与使用、安装与接线、误动作及防范措施、常见故障及维修处理等方面的知识。

漏电保护器主要包括检测元件(零序电流互感器)、中间环节(包括放大器、比较器、脱扣器等)、执行元件(主开关)以及试验元件等几个部分。

本书第1~4章及第6章的6.1节由杨东编写,第5章和第6章的6.2节、6.3节由张应龙编写,第7章由林丛编写,第8、9章由李捷辉编写,附录由李金伴编写。全书以杨东为主负责确定主要内容和统稿,由李金伴教授主审。

在此对本书编写过程中给予过帮助的老师和相关人员表示衷心的感谢!

由于编者水平所限,书中难免有不足之处,恳请广大读者批评和指正。

编 者

2007年8月

于江苏大学

目 录

第1章 绪论	1
1.1 电气事故与触电事故	1
1.2 触/漏电事故统计与分析	2
1.3 触/漏电保护电器的发展简史	3
1.4 触/漏电保护电器的应用领域	4
第2章 人体电气学	7
2.1 人体阻抗	7
2.2 电流对人体的作用	9
2.3 安全电压	13
第3章 低压触/漏电保护的理论和一般方法	15
3.1 概述	15
3.2 接地/接零保护法	17
3.3 双重绝缘保护法	20
3.4 隔离变压器法	22
3.5 触/漏电分断保护法	23
3.6 几种低压触/漏电保护法比较	25
第4章 触/漏电分断保护的原理	27
4.1 电压动作式触/漏电分断保护	27
4.2 电流动作式触/漏电分断保护	28
4.3 电流脉冲动作式触/漏电分断保护	37
4.4 电流鉴相动作式触/漏电分断保护	45
4.5 电流分离动作式触/漏电分断保护	55
4.6 直流动作式触/漏电分断保护	62
4.7 直流脉冲动作式触/漏电分断保护	66
第5章 触/漏电保护器	69
5.1 触/漏电保护器的工作原理	69
5.2 触/漏电保护器的分类	74
5.3 触/漏电保护器的性能参数	84
5.4 触/漏电保护器的试验	85

第 6 章 触/漏电保护器的基本组成及部件	91
6.1 触/漏电电流互感器	91
6.2 触/漏电保护器的测控电路	94
6.3 触/漏电保护器的脱扣器.....	114
第 7 章 触/漏电断路器	117
7.1 触/漏电断路器用途和分类.....	117
7.2 触/漏电断路器结构.....	118
7.3 电磁式触/漏电断路器.....	119
7.4 电子式触/漏电断路器.....	130
第 8 章 触/漏电断路器的配置、安装、选择与故障诊断	153
8.1 触/漏电断路器的保护对象.....	153
8.2 触/漏电断路器的配置方式.....	155
8.3 触/漏电断路器的选择.....	156
8.4 触/漏电断路器的安装与接线.....	161
8.5 触/漏电断路器的运行、使用维护.....	171
8.6 触/漏电断路器的误动作及防范措施.....	172
8.7 触/漏电断路器的常见故障和排除方法.....	175
第 9 章 电气安全技术	179
9.1 概述	179
9.2 电气安全运行组织措施	185
9.3 电气安全运行技术措施	192
9.4 触电及电流对人体的伤害	195
9.5 触电和触电急救的方法	197
附录 中华人民共和国国家标准 漏电电流动作保护器	203
参考文献	228

第 1 章

绪 论

电能作为现代化能源，具有容易控制、便于传送、传送/消耗过程中基本不产生污染以及利用效率高的特点。

进入 21 世纪以来，不管是生产还是生活，直接使用电力作为能源的场合越来越多，电力事业在 20 世纪 80 年代以前基本上每十年翻一番，90 年代基本上每五年翻一番，本世纪以来基本上每两三年就翻一番，电能与生产/生活的关系到了休戚相关的地步。但用电的危险性也随之大幅增加。如何安全高效地使用好电力能源，是摆在我们面前的一个大问题。对于普通使用者来说都不是电力方面的专家，最需要得到的是预防漏电和避免触电的保护。

1.1 电气事故与触电事故

电气事故不止是触电事故，它还包含了触电事故，正确的说法是：与电相关联的事故统称为电气事故。但从劳动保护的角度来讲，电气事故是指电对人体的伤害事故，主要包括电击事故、电磁场人体效应事故、雷电事故、静电事故等。

(1) 电击事故

发生电击主要有两种形式：一是人体直接接触一定电压的带电体，即所谓的直接接触电击，也称为正常状态电击；二是人体触及绝缘层劣化、破损或导电介质充入隔离带的一般原非带电体的带电体，即所谓的间接接触电击，也称为故障状态电击。

① 单线电击 由人体沟通一相导体与导电性地面或接地体，由加在人体上的对地接触电压造成的电击称为单线电击。

② 两线电击 人体离开接地导体，但人体某两部位触及两相导体时，由相间的接触电压造成的电击称为两线电击。

③ 跨步电压电击 人体进入地面带电的区域时，两脚间承受的电压称为跨步电压。由跨步电压造成的电击称为跨步电压电击。

电击伤害的实质是电流流过人体时，对人体造成的伤害的结果。

(2) 电磁场人体效应事故

当人体处在超过一定量的电磁场中，可能产生直接的肌体的热效应、化学效应，甚至机械效应等。如人体处在超过一定量的微波辐射中，会促使肌体的热效应。除了直接的肌体效应以外，目前科学界已经证实电磁辐射能造成人体生理功能改变，如高频电磁场可引起中枢神经系统失调（表现为神经衰弱，如头晕、乏力、睡眠失调、记忆力减退、心悸、多汗等症状），并对心血管、性机能等有影响。电磁场造成人体生理功能改变称之为人体间接效应。“直接”和“间接”造成的人体伤害总称为电磁场人体效应事故。



(3) 雷电事故

雷电事故是一种自然灾害。它一般分为直击雷、感应雷、球雷三种。它们均可能造成电力设施、建筑等的毁坏,伤及人、畜等,还可能引起火灾和爆炸。因此防止雷电灾害也是十分重要的。

(4) 静电事故

静电事故是由宏观范围内相对静止的正、负电荷形式的能量造成的事故。其静电是随着某些物料或物件之间的相对运动、快速接触与分离等过程中积累起来的寄生正、负电荷形式。静电放电引起的现场爆炸是最严重的静电事故,在化工、石油、橡胶等行业易发生此类事故。如1994年北京某粘合剂厂因为静电引起爆炸而造成5人当场死亡的严重事故。高压静电还会给人造成一定程度的电击伤害,静电还会妨碍生产。

(5) 电路事故

电路故障是由电能的传递、转换、分配失去控制或电气元件受损造成的。断线、短路、掉地、漏电、误合/掉闸、电气设备受损等都属于电路故障。不少电气故障可直接或间接造成人身伤害。例如,如果有人靠近短路点,就有可能被短路产生的电弧灼伤;如果短路造成了火灾,也会殃及短路点附近的人群。因此,某些电路故障应属于电气安全范围内的电气故障。

在上述的5类事故中,触电事故虽然不是最严重的电气事故,但对生产/生活中的人身安全来说,它是最常见、最易发生,也可以说是对人身安全最危险的一种电气事故。

1.2 触/漏电事故统计与分析

衡量一个国家或地区的触/漏电事故发生率,通常是以每消耗1亿度电造成死亡的人数来表示。它作为安全用电的重要标志,能反映一个国家或地区的安全用电水平。我国从改革开放以来,随着安全用电技术水平的提高,触/漏电事故发生率大大降低,但也存在沿海经济发达地区与经济落后地区、城市与农村地区的不平衡。总之,要将每消耗1亿度电造成死亡的人数控制在1人以下,才能达到经济发达国家的安全用电水平。

做好降低触/漏电事故发生率的工作,首先应该做好触/漏电事故的统计与分析工作,这样才能在技术上采取有针对性的措施,并收到满意的结果。

(1) 农村的触/漏电事故大大多于城市

从全国来看触/漏电事故在农村的发生率明显多于城市,一般有6倍之多。其主要的原因是:农村用电条件差,电气设备相对简陋,线路相对质劣,人员技术水平低,管理不太严格,群众相对缺乏电气安全知识等。近年来一些省区的有关部门针对农村触/漏电保安器的安装/使用情况调查来看,农村的安装/使用率远远低于城市。据不完全统计,全国380V以下触/漏电事故率,20年来总的呈下降趋势,但农村所占比例始终在85%以上。

(2) 触/漏电事故有明显的地区性及气候/季节性

我国的国土面积大,地区的经济发展、技术水平、自然环境有很大区别,气候特点也极不一样,它们对触/漏电事故的发生率有较大的影响。从地区生产企业差别来说,比如,有的地区多井下采掘型企业,有的地区却几乎没有,如长江三角、珠江三角地区。井下采掘型企业的生产环境决定了它是触/漏电事故高发型企业,此类型企业多的地区,其触/漏电事故的发生率必然受到此类型企业的影响。触/漏电事故发生率较高的企业类型除了上述井下



采掘型企业以外,还包括化工、建筑施工、冶炼、轧钢、造船、港口、造纸等企业。发配电企业此类事故并不高。如果触/漏电事故发生率较高的企业在该地区分布较多,就有可能触/漏电事故的发生率较高。但从实际情况来看,我国的触/漏电事故发生率从东到西呈由低到高的梯度分布。

除此以外,触/漏电事故的发生率也与地区性及气候/季节性有较大关系。从地区分布来看,一般相对空气湿度大的地区较湿度小的地区触/漏电事故的发生率要高。空气湿度也会反映在季节上,造成季节性触/漏电事故的发生率提高。季节性还能通过天气反映出来,如果天气炎热,人体多汗,皮肤电阻下降,着装后一般皮肤外露较多,接触带电体的机会增加,会引起触/漏电事故的发生率增加。

(3) 单相触/漏电事故及电气连接部位的触/漏电事故发生较多

根据触/漏电事故的统计,我国的触/漏电事故基本发生在 380V 以下的低压电网中,而且单相触/漏电事故大大多于两相间的触/漏电事故。这是由于我国的电压电网绝大多数是中性点直接接地,而且触/漏电事故的后果十分严重。因此,防止触/漏电事故的技术措施应重点放在单相触/漏电事故危险上。

人体的触/漏电事故一般发生在电气连接部位、电气设备外层破损部位(特别是移动电气设备外层破损部位),因为人体只有通过这些部位才能直接或通过介质接触到带电体。这些部位包括分支线、接户线、地爬线、接线端子、压头线、电缆接头、电线接头、灯头、插头插座、手持电动工具、移动式电动水泵、开关电器、控制电器、保护电器等处。

根据上述触/漏电事故发生、分布和规律的分析,对触/漏电事故有了较为全面的了解。全世界通行的保护方法有保护接地法、保护接零法、隔离变压器法、超低电压法、双重绝缘法、位置绝缘法以及依靠触/漏电保护电器来切断触/漏电事故电路的触/漏电分断法等。触/漏电保护电器保护法是以上诸法中最行之有效的单相触/漏电保护的方法(如果排除该保护受触/漏电保护器质量的影响)。综观世界触/漏电保护电器的发展史,经济发达国家 20 世纪 60~70 年代就基本普及触/漏电保护器。我国在 90 年代末城市中也基本普及触/漏电保护器。根据统计结果,凡基本普及了触/漏电保护器的国家和地区,触/漏电事故明显地下降,保护成功率明显高于保护接地法、保护接零法、双重绝缘法、位置绝缘法等,虽然略低于隔离变压器法和超低电压法,但后两种方法适用面窄且成本高,不宜普及,大大地限制了它们的推广使用。因此,用触/漏电保护器法来降低触/漏电事故是我们的首选。

1.3 触/漏电保护电器的发展简史

自从 19 世纪末,电力进入人类的生产和生活领域以来,人类就开始同触/漏电事故做不懈的斗争。一直到 20 世纪初才出现只能用于间接触/漏电保护的电压动作型的触/漏电断路器。1928 年,由德国人根据电力系统的差动保护原理,提出剩余电流动作型(也称电流动作型)触/漏电分断方法,才从根本上为触/漏电保护电器奠定了理论基础。

1930 年,法国人根据上述原理研制成功世界上第一台剩余电流动作型触/漏电断路器(动作电流为 10mA,动作时间为 0.1s)。仅从动作电流和动作时间来看,它完全可以很好地对人体提供触/漏电保护,但是,由于当时的工业化水平、技术水平、元器件及材料水平都较低,造成相对较高灵敏度的触/漏电断路器常常误动作,致使此类触/漏电断路器不能进入实用阶段,研制工作也一度停顿。工业化国家当时只能继续使用电压动作型的触/漏电断



路器。直到 20 世纪 50 年代,法、德才重新开始研制电流动作型触/漏电断路器。一开始动作电流在 300~3000mA 之间,仍然只能做间接触/漏电保护之用。

1958 年,世界上电流动作型触/漏电保护电器首次批量生产,其动作电流为 35mA。到了 20 世纪 60 年代,随着电子技术和低压断路器技术的进步,特别是小容量塑壳式断路器的日新月异,开始出现了动作速度快、灵敏度高,关键是可靠性有保证的剩余电流动作型触/漏电断路器。由于该类触/漏电保护电器的日臻完善,所以工业化国家从 20 世纪 60 年代开始逐步普及触/漏电保护电器。

20 世纪 60 年代,工业化国家相继制定出有关触/漏电保护的技术规范和标准。国际电工组织(IEC) TC64 委员会在《建筑物电气安装》标准中,规定了以保护接零为基层,装以高灵敏度触/漏电保护电器,或在 TT 电路中采用保护接地加触/漏电保护电器的保护方式。

同时,国际电工组织(IEC)第 23E 技术分会将家用断路器及其类似设备标准组几经修改,在 1963 年正式发表了剩余电流动作保护装置标准报告;1969 年,IEC 的 TC64《漏电保护》标准制定;1974 年,IEC 的 TC64 发表《剩余电流保护装置的要求》;1983 年,IEC 正式发布了 755《剩余电流保护装置的一般要求》(指导性文件)等。

我国的触/漏电保护电器发展同样也走了电压动作型到电流动作型的曲折道路。早在 1966 年,苏州金阊电器厂生产了数量不多的电压动作型漏电继电器。随之,当时的水利电力部和机械工业部也开始了触/漏电保护电器的研制工作,没过多久,由机械工业部上海电科所、浙江机械所、南京农机化所和嘉兴电气控制设备厂共同研制的 AB61-12 型 20mA、0.1s 的电子式触/漏电保护电器于 1968 年投产,共生产了近万台。

到了 20 世纪 70 年代后半期,浙江省、水利电力部等相继研制成功电磁式和电子式电流动作型触/漏电保护电器。

进入 20 世纪 80 年代,随着改革开放的趋势,社会对触/漏电保护电器的需求急剧增加,有关研究部门和生产厂家加大了研制/开发的力度,相继研制出 DZ5-20L、DZ15L、DZ16L、JD1 和 JCB1 型的触/漏电保护电器。到了 80 年代后期,我国的触/漏电保护电器生产厂家超过 200 家,年产量超过 600 万台。

进入 20 世纪 90 年代,特别是 1992 年以后,我国引进先进国家的产品/技术,合作/合资生产以及仿制了一大批国外的触/漏电保护电器。这些国外公司有法国的梅兰日兰,德国的西门子、施耐德、F&G 和 ABB,美国的 GE 和西屋,日本的寺崎等。到了 90 年代后期,我国结合引进产品和自主研发的产品,年产量达 1200 万台以上,其产品按大类分主要有脉冲型触/漏电保护电器、电流型触/漏电保护电器、三相触/漏电保护电器和单相触/漏电保护电器。

1986 年 9 月,国家标准局颁布 GB 6829—86《漏电电流动作保护电器(剩余电流动作保护器)》国家标准;1987 年 7 月,原水利电力部颁布了 SD 219—87《漏电保护器农村安装运行规程》的部颁标准;1997 年,国家标准局颁布了 GB 16916.1—1997 idt IEC 1008-1:1990《家用和类似用途的不带电流保护的剩余电流动作断路器(RCCB)》的强制性国家标准等。

1.4 触/漏电保护电器的应用领域

触/漏电保护电器品种繁多,机构各异,按其原理可以分为三大类:电压动作型触/漏电



保护电器、剩余电流动作型触/漏电保护电器和自动空载安全电压型触/漏电保护电器。按应用领域可以分为如下三个部分。

1.4.1 工农业用触/漏电保护电器

(1) 触/漏电断路器

触/漏电断路器是带有触/漏电保护,在配电网中用来防止人身触电和电路用电设备的漏电、接地事故及电气火灾的低压断路器。它既有不带电流保护的剩余电流动作断路器,也有将触/漏电脱扣器加入普通断路器的一体化的断路器。

触/漏电断路器一般安装于 TT 系统(即配电变压器二次侧中性点直接接地,用电设备保护接地的系统)、低压配电网入户配电箱处、施工工地进线处、井下采掘处、暂设临时用电处(如农村打鼓场、临时潜水泵等)或较大设备进线处等,同时也包括游泳池、医院、户外夜市、户外演出等场所。对上述生产场所提供直接接触/漏电保护,动作电流和动作时间的乘积小于 $30\text{mA} \cdot \text{s}$ 。当生产场所出现触/漏电事故,触/漏电脱扣装置使断路器脱扣跳闸,切断生产场所的电源,达到保障安全的目的。

(2) 触/漏电继电器

触/漏电继电器,顾名思义属于继电器类,是一种当漏电电流达到规定值时动作的控制电器。它可以与其他低压电器(如接触器等)组成触/漏电保护装置,与声光元件构成漏电或漏电火灾报警装置。

(3) 触/漏电保护器

它实际是一种需要临时提供触/漏电保护的具有触/漏电保护功能的控制箱/盒。它一般由触/漏电检测电路、电子电路、控制电器组成,可启动/停止(含急停),并有独立外壳电源控制箱。它一般是可移动的,如电动凿岩机控制箱、电钻综合保护控制箱、小型潜水泵控制箱等。

1.4.2 家用触/漏电保护电器

家用触/漏电保护电器属于日用电气产品类,主要用在家庭、住宅、办公室等的触/漏电保护方面。

(1) 家用触/漏电断路器

家用触/漏电断路器与工农业用触/漏电断路器没有明显的界线,只是家用触/漏电断路器的主触头有可能相对小一些,多数为单相双极的断路器。其动作电流和动作时间的乘积同样应小于 $30\text{mA} \cdot \text{s}$ 。它也同样有不带电流保护的剩余电流动作断路器和将触/漏电脱扣器加入普通断路器的一体化的断路器。另外,家用触/漏电断路器还要求具有使用简便、灵巧精美、价格低廉的特点。

(2) 触/漏电保护插头/插座

触/漏电保护插头/插座多数为插头/插座一体化产品。一般是插接在不含有触/漏电保护的电源插座上使用。因此,它是一种为没有安装触/漏电保护电器的用电网络提供保护的一种补充保安电器,基本上是小容量单相结构。由于触/漏电保护电器越来越普及,触/漏电保护插头/插座将逐步退出触/漏电保护电器的市场。

(3) 触/漏电保护分电板

触/漏电保护分电板的外形与普通分线板相差无几,其功能与触/漏电保护插头/插座相差无几,只是比触/漏电保护插头/插座多了一根延长电缆,便于触/漏电保护分电板移动

使用。

1.4.3 触/漏电保护类仪器/仪表

如果仅检查电路或设备的漏电情况，有传统的钳形电流表和漏电电流检测仪一类的仪表。但在研发、生产、使用、维护、检测、维修触/漏电保护电器过程中，自然需要专门的触/漏电保护类仪器/仪表。

这类仪器/仪表，一般可分为两大部分：一是专用检查电路或设备漏电情况的仪器/仪表；二是专用检查触/漏电保护电器各项指标的仪器/仪表。有了这两大部分的仪器/仪表，才能保证触/漏电保护电器发挥它的效能。因为触/漏电保护电器本身处于极少动作的工作状态，真正遇到触/漏电事故时，即使在触/漏电保护电器没有质量问题的情况下，也很难保证动作率在 100%，因此，触/漏电保护电器只能作为最后一道触/漏电安全保护使用。触/漏电保护电器本身必须保证一定的动作率，这个“动作率”需要通过触/漏电保护类仪器/仪表来检测。

第 2 章

人体电气学

经科学证实，人体细胞所含的组织液内包含有大量钾、钠、钙、镁等金属离子的极性分子的胶体溶液，但分子热运动使偶极子的排列杂乱无章，使整个电介质呈中性。这些电介质在外加电场的作用下，每个偶极子沿电场力作用方向取向，电介质表面产生“极化”；另外即使无极分子电介质也会在电场中变成偶极子，最终也产生宏观极化。两种极化的情况下，如果外加电场是直流电场，介质极化使电场能转换成偶极子位能，其位能与直流电压高低成正比；如果将电介质放入交变电场中，电介质会反复交变极化，其反复交变极化的快慢是由电场交变频率的高低来决定的，如果电场交变频率越高，电磁能直接转变成热能的比例越高。

从上述结论可以得出，人体细胞如果被引入“电路”中，就可以等效为许多小电阻和小电容串/并联起来的复杂的阻容网络。然而，要按细胞为单位等效出电阻、电容是不现实的，所以必须从整体的角度来研究人体的电气阻抗特性。

2.1 人体阻抗

2.1.1 人体阻抗定义及其特性

人体阻抗等效电路如图 2.1 所示。其人体阻抗也遵从物理学中的公式，即：

$$R = \frac{l}{\sigma S} \quad (2-1)$$

$$C = \epsilon \frac{S}{l} \quad (2-2)$$

式中 σ ——导电率；
 ϵ ——介电常数；
 S ——导体的截面积；
 l ——导体长度。

① 人体内部阻抗 (Z_i) 与人体接触的电极之间的阻抗 (去掉电极下的皮肤)。

人体内部阻抗可以认为主要是电阻性的，其值主要由电流通路决定，即人体接入电气回路，回路中的身体导体长度不同、组织器官不同，点到点的阻抗自然就不同；另外，较小程度上由接触面积决定。如果接触面积过小，对人体内部阻抗的影响程度会随之增加。

② 皮肤阻抗 (Z_p) 与皮肤接触的电极和皮下组织之间的阻抗。

皮肤阻抗可以认为是电阻和电容组成的网络，它由较高（变化）阻态层和小导电元件（汗孔）组成。当电流增加时，皮肤阻抗下降。有时可以观察到电流的痕迹。

皮肤阻抗值随电压、频率、通电持续时间、接触面积、接触压力、皮肤湿度和温度的变化而变化。当接触电压升高到 50V 时，皮肤阻抗随接触面积、温度和呼吸等的变化而急剧

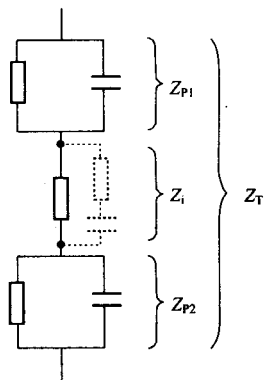


图 2.1 人体阻抗等效电路
 Z_i —人体内部阻抗； Z_{p1} , Z_{p2} —皮肤阻抗； Z_T —人体总阻抗

变化，即使同一个人也是如此；当接触电压达到 50~100V 甚至更高时，皮肤阻抗会大大减小；当皮肤被击穿时，皮肤阻抗可以忽略。

电流的频率对皮肤阻抗也是有影响的，频率增高，皮肤阻抗下降。

③ 人体总阻抗 (Z_T) 人体内部阻抗和皮肤阻抗的矢量和 (参见图 2.1)。

人体总阻抗由电阻性部分和电容性部分组成。当接触电压高到 50V 以上时，由于皮肤阻抗 Z_p 有相当大的变化，使得人体总阻抗 Z_T 也有较大变化；接触电压越高，皮肤阻抗对总阻抗的影响就越小；皮肤击穿，总阻抗值接近于人体内部阻抗值 Z_i 。

频率对人体总阻抗的影响在于皮肤阻抗与电流频率的依赖关系，对于直流电，人体阻抗则比较高。频率增高，人体总阻抗则下降。

抗则下降。

④ 人体初始电阻 (R_i) 当人体与接触电压接触的瞬间，人体中的“电容”尚未充电，此时的皮肤阻抗可以忽略，初始电阻 R_i 近似等于人体内部阻抗 Z_T (参见图 2.1)，初始电阻 R_i 主要由电流通路决定，接触面积仅对其有轻微影响，但它可以抑制短时脉冲电流峰值。

2.1.2 人体总阻抗值

人体总阻抗在下列条件下的统计值参见表 2.1：

- ① 在干燥条件下；
- ② 使用接触面积为 50~100cm² 的电极；
- ③ 电流途径为手到手 (也适于单手到单脚)；
- ④ 电压为正弦交流电压，频率为 50/60Hz。

表 2.1 人体总阻抗值

接触电压/V	人体总阻抗值/ Ω (其值不超过下列人群中的百分数)		
	5%	50%	95%
25	1750	3250	6100
50	1450	2625	4375
75	1250	2200	3500
100	1200	1875	3200
125	1125	1675	2875
220	1000	1375	2125
700	750	1100	1550
1000	700	1050	1500
渐近值	650	750	850

对于不同条件下人体总阻抗的预计值可按下述原则修正。

电压达到 50V 时，用自来水润湿接触表面所测得的人体总阻抗值，比原先干燥时测得的值低 10%~20%；如用导电液润湿接触表面，则总阻抗将显著降低，其值只有干燥条件下的一半。

当电压升至 150V 时，湿度和接触面积对人体总阻抗的影响甚微。



上述测量结果是在成年人身上进行的（男性/女性）。对于接触电压升至 700V 以后，人体总阻抗的变化范围如图 2.2 所示；当接触电压升至 5000V 以后，人体总阻抗的变化范围如图 2.3 所示。

表 2.1、图 2.2 和图 2.3 所示的数据，表明了成年人总阻抗的最佳实验数据。就目前所知，预计小孩身体的总阻抗与成年人身体总阻抗处于同一数量级。

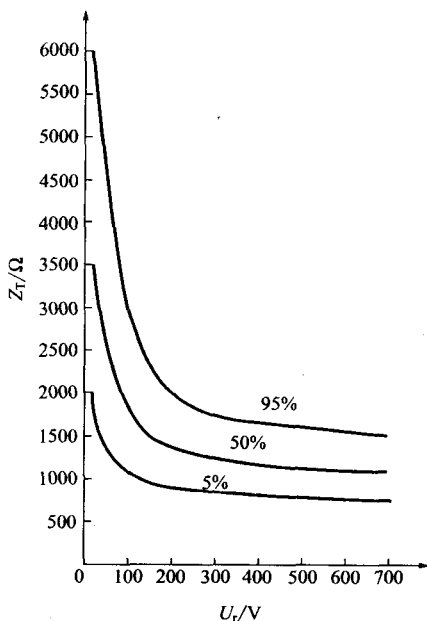


图 2.2 成人人体总阻抗统计值（一）

接触电压：700V；电流途径：手至手

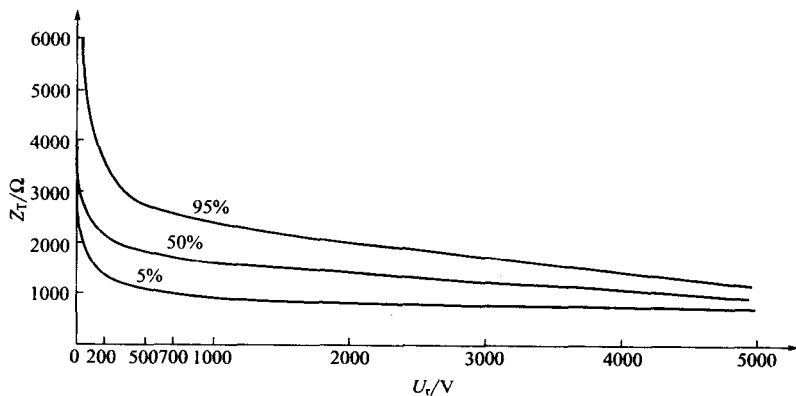
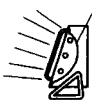


图 2.3 成人人体总阻抗统计值（二）

接触电压：5000V；电流途径：手至手或手至脚

2.2 电流对人体的作用

了解和掌握电流对人体作用的规律，才能制定出科学的触/漏电保护电器设计规范，才



能判断出触/漏电保护电器的适用性和有效性,才能判断触/漏电保护电器是否合格,才能科学地评价触/漏电保护措施和设施是否完善。

2.2.1 工频交流电流的效应

世界各国市电频率一般为 50Hz 或 60Hz,我国使用的工频交流电频率为 50Hz。各国的科学家经过大量的分析实验,认为 50/60Hz 频率的交流电的室颤阈值是最低的。因此,了解和分析该频率段交流电流的人体效应是十分重要的。

(1) 定义

为了解释清楚交流电流的人体效应问题,下面先介绍几个定义。

a. 感知阈值——在给定条件下,电流流过人体,使人刚好能产生感觉(感知)的最小电流值为感知电流阈值。

b. 摆脱阈值——在给定条件下,手握带电电极的人能自行摆脱的最大电流值为摆脱电流阈值。

c. 致颤阈值——在给定条件下,引起心室纤维性颤动的最小电流值为致颤电流阈值。

d. 心脏电流因子——心脏的电流因子把指定通路的电流在心脏内产生的电场强度和数值相等的通过左手至双脚的电流在心脏内产生的电场强度联系起来。另外,在心脏内电流密度与电场强度成正比。

e. 易损期(易颤期)——在心搏周期中易损期仅占相当小的一部分,此时心脏处于复极状态,如给以足量的电流刺激,即可引起心室颤动。

其中,上述三个阈值因人而异,不同的人有不同的生理参数值,对电流的敏感程度也是不同的。不仅如此,这三个阈值还与人体的触电部位、接触状态(干湿、压力、温度)以及电流(交流、直流)有关。IEC 根据大量的实验数据和资料,做出了交流电效应曲线如图 2.4 所示。该图适用于基准电流通路,频率范围为 15~100Hz。

(2) 安全区

如图 2-4 所示。当电流小于 0.5mA 时,为无感知区(安全区),即图中所示的①区。这说明当电流小于 0.5mA 时,人通常是没有任何感觉的,这与接触带电体的时间长短无关。0.5mA 即为感知阈值。

(3) 感知区

当电流超过 0.5mA 的感知阈值时,绝大多数人就会有感觉了,如图 2-4 中②区即为感知区。在该区域内,绝大多数人均会对流过人体的电流有感觉,但却可以摆脱。因此,通常人体不会发生威胁生命的生理反应(即病理反应)。

(4) 不易摆脱区

图 2.4 所示中的③区即为不易摆脱区。在这个区域内,触电者通常不易摆脱。也就是电流增加到这个程度,人体已经出现很明显的生理反应,如肌肉收缩,呼吸困难,可形成心脏搏动和心脏搏动传导的可恢复性紊乱,甚至发生心房纤维性颤动和心脏骤停的现象,但一般不会损害有机组织,不会发生心室纤维性颤动。感知区②和不易摆脱区③交界值虚线 b,即为摆脱阈值。它随着触电时间的延长而下降,当接触时间为 20ms 时,人的摆脱阈值为 500mA,当触电持续时间长达 10s 时,人的摆脱阈值约大于 10mA。

(5) 致颤区

图 2.4 所示中的④区即为致颤区。不易摆脱区③和致颤区④的交界线 c,即为致颤阈

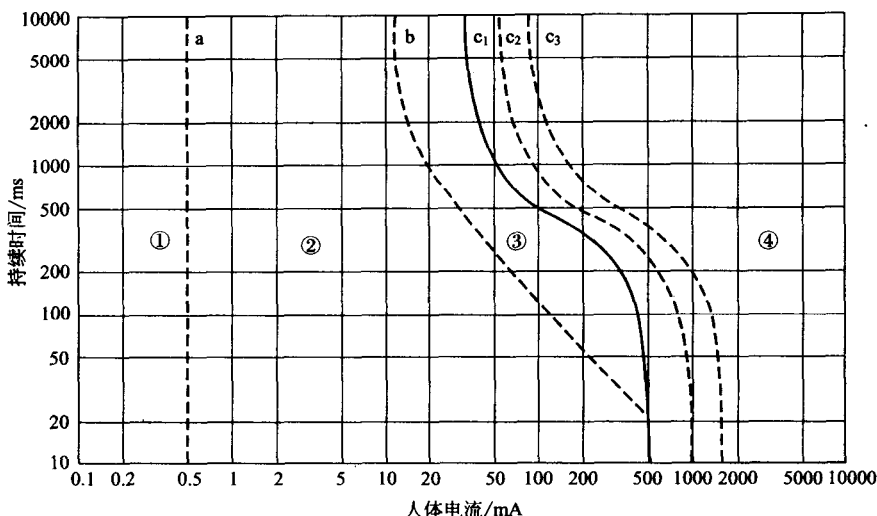


图 2.4 15~100Hz 交流电流对人产生的时间/电流区域

- 注：1. 本图所示的是以左手至双脚电流途径为例。对于心室纤维性颤动来说，其电流途径可用心脏电流系数修正。
2. 相应于 500mA/100ms 处的心室纤维性颤动概率为 0.14%。

值。但交界线 c 在图中分为 3 条线，其中曲线 c_1 为占总人数 5% 的人的致颤阈值；虚线 c_2 为占总人数 50% 的人的致颤阈值；虚线 c_3 为占总人数 95% 的人的致颤阈值。也就是说，当流过人体电流为 400mA、电流持续时间为 100ms 时，大约 5% 的人会发生心室纤维性颤动；若持续时间为 2s 时，大约 5% 的人在 30mA 的电流作用下会发生心室纤维性颤动。

(6) 心脏电流系数

首先应当指出的是，如图 2.4 所示的时间/电流区域，是以左手至双脚的电流通路为基准绘制的。如果电流流经人体的其他部位，致颤电流的三条曲线还将做相应的左右移动，即致颤阈值也会做相应的改变。其他电流通路的致颤电流阈值 I_h 的计算式为：

$$I_h = \frac{I_{\text{ref}}}{F} \quad (2-3)$$

式中 I_{ref} ——对应左手至双脚的心室纤维性颤动的致颤阈值，可由图 2.4 所示 c_1 查到；
 F ——心脏电流系数，见表 2.2。

表 2.2 不同电流通路的心脏电流系数

电流通路	心脏电流系数	电流通路	心脏电流系数
左手到左(右)脚或双脚	1.0	后背到左手	0.7
两只手到两只脚	1.0	胸部到右手	1.3
左手到右手	0.4	胸部到左手	1.5
右手到左(右)脚或双脚	0.8	臀部到左(右)手或两只手	0.7
后背到右手	0.3		

工频交流电流流经人的身体，造成人的生理损伤，是一个相当复杂的过程。如图 2.4 所示的情况，适应于一般健康人和一般的触电情况。例如，如果持续时间很短，小于 100ms，通常的情况下，大约 75% 的人需要 1A 以上的电流才会越过致颤阈值，引发心室纤维性颤