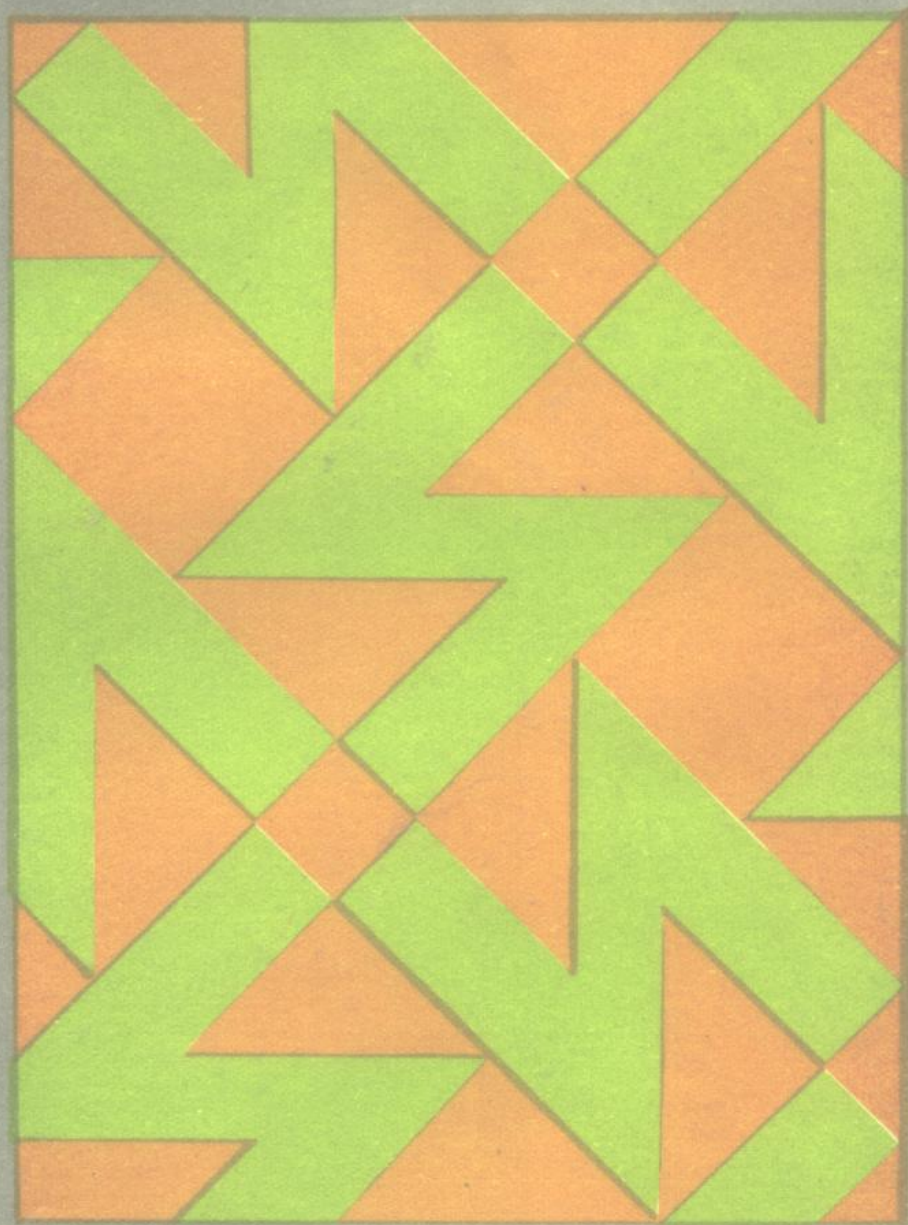


高等工科院校系列教材

高电压技术

胡国根 王战锋 主编



重庆大学出版社

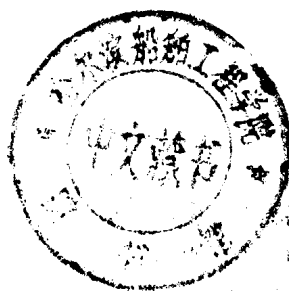
TM8

H57

383020

高电压技术

胡国根 王战铎 主编



T18

H57

重庆大学出版社

内 容 简 介

本书系专科系列教材之一。全书共九章,包括了雷闪过电压,防雷保护装置,输电线路的雷闪过电压及其防护,发电厂、变电所雷闪过电压的防护,电力系统工频电压升高,电力系统的操作过电压,电力系统谐振过电压的概念,电力系统绝缘配合,高压设备的绝缘试验等内容。并附有“高电压技术实验指导书”。

可供工科院校高压电力等专业本、专科师生及广大科技工作者作教材及参考书使用。

DY85/06

高 电 压 技 术

胡国根 王战铎 主编

责任编辑 谭敏

*

重庆大学出版社出版发行

新华书店经销

重庆建筑大学印刷厂印刷

*

开本:787×1092 1/16 印张:11.5 字数:287 千

1996年1月第1版 1996年1月第1次印刷

印数:1—3000

ISBN 7-5624-1136-0/TM·49 定价:9.60元

(川)新登字 020 号

序

近年来我国高等专科教育发展很快,各校招收专科生的人数呈逐年上升趋势,但是专科教材颇为匮乏,专科教材建设工作进展迟缓,在一定程度上制约了专科教育的发展。在重庆大学出版社的倡议下,中国西部地区14所院校(云南工学院、贵州工学院、宁夏工学院、新疆工学院、陕西工学院、广西大学、广西工学院、兰州工业高等专科学校、昆明工学院、攀枝花大学、四川工业学院、四川轻化工学院、渝州大学、重庆大学)联合起来,编写、出版机类和电类专科教材,开创了一条出版系列教材的新路。这是一项有远见的战略决策,得到国家教委的肯定与支持。

质量是这套教材的生命。围绕提高系列教材质量,采取了一系列重要举措:

第一,组织数十名教学专家反复研究机类、电类三年制专科的培养目标和教学计划,根据高等工程专科教育的培养目标——培养技术应用型人才,确定了专科学子应该具备的知识和能力结构,据此制订了教学计划,提出了50门课程的编写书目。

第二,通过主编会议审定了50门课程的编写大纲,不过分强调每门课程自身的系统性和完整性,从系列教材的整体优化原则出发,理顺了各门课程之间的关系,既保证了各门课程的基本内容,又避免了重复和交叉。

第三,规定了编写系列专科教材应该遵循的原则:

1. 教材应与专科学子的知识、能力结构相适应,不要不切实际地拔高;
2. 基础理论课的教学应以“必须、够用”为度,所谓“必须”是指专科人才培养规格之所需,所谓“够用”是指满足后续课程之需要。
3. 根据专科的人才培养规格和人才的主要去向,确定专业课教材的内容,加强针对性和实用性;
4. 减少不必要的数理论证和数学推导;
5. 注意培养学生解决实际问题的能力,强化学生的工程意识;
6. 教材中应配备习题、复习思考题、实验指示书等,以方便组织教学;
7. 教材应做到概念准确,数据正确,文字叙述简明扼要,文、图配合适当。

第四,由出版社聘请学术水平高、教学经验丰富、责任心强的专家担任主审,严格把住每门教材的学术质量关。

出版系列专科教材堪称一项“浩大的工程”。经过一年多的艰苦努力,系列专科教材陆续面市了。它汇集了中国西部地区14所院校专科教育的办学经验,是西

部地区广大教师长期教学经验的结晶。

纵观这套教材,具有如下的特色:它符合我国国情,符合专科教育的教学基本要求和教学规律;正确处理了与本科教材、中专教材的分工,具有很强的实用性;与出版单科教材不同,有计划地成套推出,实现了整体优化。

这套教材立足于我国西部地区,面向全国市场,它的出版必将对繁荣我国的专科教育发挥积极的作用。这套教材可以作为大学专科及成人高校的教材,也可作为大学本科非机类或非电类专业的教材,亦可供有关工程技术人员参考。因此我不揣冒昧向广大读者推荐这套系列教材,并希望通过教学实践后逐版修订,使之日臻完善。

吴云鹏

1993年
仲夏

前 言

近年来,《电力系统及其自动化》专业的专科教育有所发展,教学中找不到一本适合于大专层次的《高电压技术》教材,只得以本科教材充任,给教学带来不少困难。1991年西部地区地方工科院校年会决定编写一套具有地方特色的高等学校用书,随后于1992年12月在重庆大学召开了西部地区14所工科院校的教材建设会议。会议决定编写一本适用于大专层次的《电力系统及其自动化》专业的教材《高电压技术》。在编写过程中,注意了“针对性,简洁性,实用性与新颖性”几个方面。针对性即针对大专层次的学生编写的,学生的数理基础比本科生稍嫌不足,课时较少,是它的特点,故要求以简洁的方式将最必要的专业知识介绍给读者;大专学生应有很强的实践能力,故编写教材时应特别强调教材的实用性;将成熟的新技术介绍给读者,是任何一本教材都要求做到的,这是新颖性的涵义。基于以上的认识,我们对教材作了如下的处理。

1. 线路和绕组中的波过程,是本科教材的重要一章,一般都把这一部分内容当作理论基础对待。我们未提出波过程的概念,在讨论变电所侵入波过电压保护时,介绍了波在导线上的运动,在讨论变压器的防雷保护时,以“变压器绕组在过电压袭击时的行为”为标题,扼要介绍了波在绕组中运动的基本概念,并立即将这些概念或结论运用到具体的防雷保护接线中去。

2. 尽可能避免不必要的数学演算和公式推演。

3. 从实用的要求出发处理高压物理基础中的一些概念和理论,这是第九章的特色。

4. 为了强调实践的重要性,我们把总学时的20%(10学时)用于实验课,并附有高电压技术实验指导,与《高电压技术》配合使用,作为对理论课的补充。

5. 把“高压设备的绝缘试验”作为本书的最后一章,是编排上的一大特点,我们想强调说明一点,当前我国流行的把这部分内容放在卷首的做法并不是不可逾越的。

6. 本书对GIS作了必要的介绍,对500kV输电电压涉及的技术作了一定的介绍。

本书由胡国根、王战铎任主编。胡国根编写第一章、第四章、第八章及第九章的部分内容。王战铎编写第三章、第六章、第七章,刘明光编写第二章、第五章,刘晓波编写第九章部分内容及高电压技术实验指导部分。全书由胡国根统稿。

西安交通大学严璋教授主审本书,提出了许多宝贵的意见,谨致深切谢忱。

由于编者学识有限,不当之处望同行专家不吝指正。

编 者

1995年4月于贵阳

目 录

第一章 雷闪过电压	1
第一节 雷闪放电及雷电参数	1
第二节 直接雷击过电压	2
第三节 感应过电压	5
第四节 冲击波过电压和伏秒特性	6
习题	7
第二章 防雷保护装置	9
第一节 避雷针、避雷线	9
第二节 保护间隙、管型避雷器	12
第三节 阀型避雷器及磁吹避雷器	15
第四节 金属氧化物避雷器	22
第五节 防雷接地	25
习题	28
第三章 输电线路的雷闪过电压及其防护	29
第一节 输电线路上的感应过电压	29
第二节 雷绕击于导线时的过电压	30
第三节 反击过电压	31
第四节 雷击避雷线档距中央时的过电压	34
第五节 雷击跳闸率	35
第六节 污闪事故及其预防	39
第七节 小结	40
习题	42
第四章 发电厂、变电所雷闪过电压的防护	43
第一节 概述	43
第二节 发电厂和变电所的直击雷防护	43
第三节 变电所侵入波过电压防护	45
第四节 变电所的进线段保护	51
第五节 三绕组变压器、自耦变压器及变压器中性点的防雷保护	53
第六节 旋转电机的防雷保护	58
第七节 GIS 的过电压保护	61
习题	63
第五章 电力系统工频电压升高	65
第一节 概述	65
第二节 空载长线末端电压升高	66
第三节 不对称短路引起的工频电压升高	67
第四节 甩负荷引起的工频电压升高	69

第五节 工频电压升高的限制措施	70
习题	71
第六章 电力系统的操作过电压	72
第一节 概述	72
第二节 空载线路合闸过电压及其限制措施	72
第三节 切除空载线路过电压及其限制措施	74
第四节 切空载变压器过电压	77
第五节 利用避雷器限制操作过电压	78
第六节 中性点不接地系统中的弧光接地过电压及消弧线圈的应用	79
第七节 标准操作波	83
习题	83
第七章 电力系统谐振过电压的概念	84
第一节 概述	84
第二节 铁磁谐振过电压	85
习题	87
第八章 电力系统绝缘配合	88
第一节 概述	88
第二节 输变电设备绝缘水平的确定	88
第三节 架空输电线路绝缘水平的确定	91
第四节 变电所的绝缘配合	94
习题	95
第九章 高压设备的绝缘试验	96
第一节 概述	96
第二节 绝缘电阻和吸收比	99
第三节 介质损耗	101
第四节 电介质的击穿	105
第五节 工频交流耐压试验	113
第六节 高压测量装置	116
第七节 直流耐压试验与泄漏电流测量	118
第八节 冲击耐压试验	122
习题	127
附录 测量球隙安装空间示意图	
高电压技术实验指导	
前言	
实验一 绝缘电阻、吸收比的测量	140
实验二 泄漏电流及直流耐压试验	143
实验三 介质损失角正切 $\tan\delta$ 的测试	145
实验四 局部放电测量	150
实验五 交流耐压实验	153

实验六	冲击电压实验	156
实验七	接地电阻和土壤电阻率 ρ 的测量	159
实验八	绝缘子链的电压分布测量	162
附录 I	高压实验的基本要求	165
附录 II	高压实验室安全制度	166
附录 III	高压电气设备绝缘的交流耐压标准	167
附录 IV	变压器绝缘电阻、吸收比、泄漏电流、 $\tan\delta$ 的标准	167
附录 V	油浸纸绝缘电力电缆泄漏电流参考值	169
附录 VI	阀型避雷器的有关标准	169
附录 VII	绝缘子链电压分布典型值	171
参考文献		172

第一章 雷闪过电压

第一节 雷闪电放电及雷电参数

在大雷雨过程中,由于空气流的相互作用,正负电荷互相分离,冰晶在云层上部,雨水则在云层下部。有许多科学家对这一过程进行过研究,形成了许多理论,研究工作仍在进行中。但我们只对下列事实感兴趣:云层的绝大部分带负电,而在其顶部则有一正电荷层,其高度通常为 9—12km,靠近正电荷层的底部有少量带正电的杂质。负电荷中心在地面上大约 500—10000m。雷云的底部可能距地面只有 150m。雷云的电位估计最少有 100MV。

人眼看到的对地雷击似乎是一次单一的耀眼的放电,虽然有时也可能见到亮度的变化。但是用旋转镜头照相机拍下的照片或电视录像揭示:大多数雷击是重复的,即在第一次雷击形成的放电通道中,会有多次放电尾随,放电之间的间隔大约为 0.5—500ms。

第一次雷击可分为先导放电与主放电两个阶段。先导放电起始于云层中,云中局部的电荷集中区使电压梯度达到空气的临界击穿值(在海平面上干燥的空气中约为 30kV/cm,在海拔更高的充满水滴的空气中其值约为 10kV/cm)时,便开始先导放电。先导由高度电离的核心组成,它处于放电的前端并被一个直径约 30m 的电晕套所包围,其长度则为 50m 左右。先导是分级向地面推进的,每一级之间要间歇若干微秒(μs),其平均传导速度大约 150km/s。譬如雷击中心距地面 3000m,则先导要花费 20ms 才能到达地面,然后,开始主放电阶段。重复放电时,先导不是分级而是连续发展的。

主放电的电流(即雷电流)大约从几千安到 260kA,主放电的速度大约为光速的 10%—50%。

雷电流的典型示波图如图 1-1 所示。由图可见,雷电流具有以下几个特点:①雷电流多为负极性,图上表示为向下凹的波头(前);②波前时间短,最长可达 10 μs ;③波形中有一强电流部分,其持续时间约几十微秒;④强电流之后便是一个弱电流波尾,其持续时间可达几百微秒,这一部分电流是导致高温损坏的原因,故称“热雷闪”。

雷电流幅值的概率分布曲线如图 1-2 所示。超出纵坐标雷电流幅值的概率也可由下式求出:

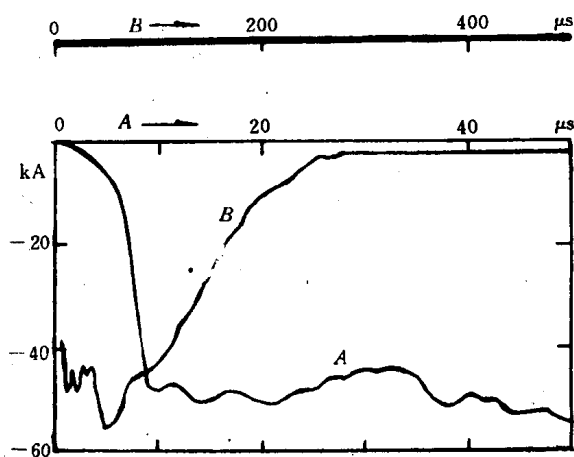


图 1-1 雷电流典型示波图

$$\lg P = -\frac{I}{108} \quad (1-1)$$

式中 P ——雷电流幅值概率;
 I ——雷电流幅值, kA。

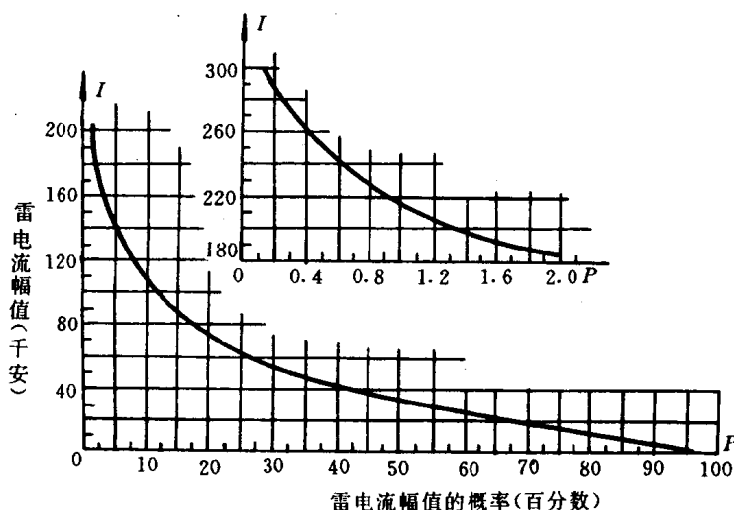


图 1-2 中国雷电流幅值的概率分布

有充分的数据证明:很大的雷电流峰值并不是与最大陡度同时发生的。现场测量数据说明,50%的雷电流上升率(陡度)超过 $7.5 \text{ kA}/\mu\text{s}$, 10%超过 $25 \text{ kA}/\mu\text{s}$, 超过峰值电流值一半的雷电流持续时间的平均值是 $30 \mu\text{s}$, 有 18%的雷电流可达 $50 \mu\text{s}$ 。

电气设备遭受雷击的危险性与雷电活动的强度有关。评定雷电活动强度的指标是年平均雷暴数,这当中又包括两种判据:一个是雷暴日,简称为 TD, 一个是雷电小时,但最好的指标是对地闪络密度 N_g 。经常用来估算对地闪络密度 N_g 的经验公式如式(1-2),这个公式是不很精确的:

$$N_g = (0.1 - 0.2) \cdot (\text{TD}) \quad \text{次}/(\text{km}^2 \cdot \text{年}) \quad (1-2)$$

我国电力设备过电压保护设计技术规程(以下简称《规程》)建议采用

$$N_g = 0.015 \quad \text{次}/(\text{km}^2 \cdot \text{TD}) \quad (1-3)$$

第二节 直接雷击过电压

当雷云向输电线路的相线放电时,在输电线上会造成很高的对地电位,这种超过输电线额定电压的危险电位升高就叫做过电压,雷闪直击于相线引起的过电压叫直接雷击过电压。

直击雷过电压可用图 1-3 右侧所示的等值电路进行估算。图中 I_0 为雷云直接向地面放电(大地可视为零阻抗)时的雷电流幅值, Z_1 为雷电通道的波阻抗, Z 为输电线路的波阻抗。那么什么是波阻抗呢?

如图 1-4(a)所示的是一条无限长输电线路合闸于直流电压源 E 的情况。单位长度的电感为 L_0 , 单位长度的对地电容为 C_0 , 其等效电路如图 1-4(b)所示。令开关 K 合上的瞬间为 $t=0$, 从这时起, 电源向线路电容充电, 即在导线周围空间建立起电场。靠近电源的电容立即充电, 并

向相邻的电容放电。由于线路电感的作用,较远处的电容要隔一段时间才能充上一定数量的电荷,并向更远的电容放电。这样,线路依次充电,线路由近至远逐渐建立起电场,形成电压。换言之,从 $t=0$ 开始,有一电压为 E 的波以一定的速度 v_0 沿线路传播, $v_0 = \frac{1}{\sqrt{L_0 C_0}}$, 其在空气中的值是 $v_0 = 300 \text{m}/\mu\text{s}$, 即光速。波在油纸电缆中的运动速度,则只有光速的约一半。

随着线路电容的充放电,将有电流流过导线的电感,即在导线周围建立起磁场。因此,和电压波相适应,还有一电流波以同样的速度沿线传播。

可以证明,沿线各点电压 u 与电流 i 的关系是:

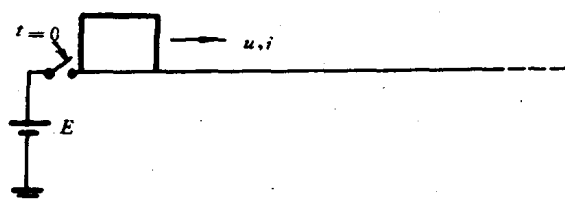
$$\frac{u}{i} = \sqrt{\frac{L_0}{C_0}} \quad (1-4)$$

式中 $\sqrt{\frac{L_0}{C_0}}$ 是一个实数,具有电阻的量纲,称为波阻抗,用 Z_0 表示:

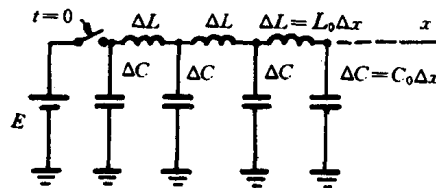
$$Z_0 = \sqrt{\frac{L_0}{C_0}} = 138 \lg \frac{2\bar{h}}{r} \quad (1-5)$$

式中 $\bar{h}$ ——导线的平均悬挂高度, m;

r ——导线的半径, m。



(a)



(b)

图 1-4 波在均匀无损单导线上的传播

应该强调指出, Z_0 是一个与线路长度无关的量, 决定于线路单位长度的电感 L_0 和电容 C_0 ; 单导线架空输电线路 Z_0 的典型值为 500Ω 左右, 计及电晕影响时, 取 $Z_0 = 400\Omega$, 不同的电压等级, Z_0 值稍有不同。分裂导线的 $Z_0 \approx 300\Omega$, 气体绝缘变电站 (GIS) 充气管道中导体的波阻抗 $Z_{0\text{GIS}}$ 一般为 $60-70\Omega$ 。各种杆塔及电缆的波阻抗如表 1-1 及 1-2 所示。雷闪通道的波阻抗大约为 $1000-3000\Omega$ 。

下面举例说明雷直击于相线时过电压的计算。

例 1 雷击输电线 A 相导线, 求雷击点的过电压。

解 当雷击一相导线时, 注入电流向两个方向流去, 所以阻抗为导线波阻抗的一半。故

$$V = \frac{1}{2} I_0 Z_0 \quad (1-6)$$

若 $I_0 = 10 \text{kA}$, 取 $Z_0 = 400\Omega$, 则雷击点对地电位将是 $V = \frac{1}{2} \times 10 \times 400 = 2000 \text{kV}$ 。很显然, 大多

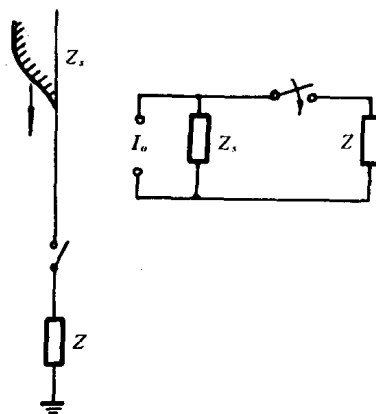


图 1-3 直击雷过电压的等值电路

数击于导线的雷都会产生闪络。

表 1-1 杆塔的电感和波阻抗的平均值

杆塔型式	杆塔电感($\mu\text{H}/\text{m}$)	杆塔波阻(Ω)
无拉线水泥单杆	0.84	250
有拉线水泥单杆	0.42	125
无拉线水泥双杆	0.42	125
铁 塔	0.50	150
门型铁塔	0.42	125

表 1-2 三相电力电缆的波阻抗

电缆标称截面(mm^2)	一相进波			三相进波		
	3kV	6kV	10kV	3kV	6kV	10kV
25	19.5	29	37	10	15	19
35	16.5	25.5	32	8.5	13	16
50	13.5	22.5	29	7	11.5	14.5
70	11.5	19	25.5	6	9.5	13
95	10	16.5	22	5	8.5	11.5
120	9	15	20	4.5	7.5	10.5
150	8	13	17.5	4	6.5	9
185	7.5	11.5	16	3.5	6	8
240	6.5	10	14	3.2	5.2	7
300	6	9	12.5	3	4.5	6.2

注 统计数据表明,电缆的波阻抗大约为 $30\sim 80\Omega$,本表所列只是部分电缆的波阻抗值。

例 2 同上例,并设雷电通道的波阻抗为 Z ,求雷击点的过电压。

解 若计及雷电通道波阻抗,则应使用图 1-3 进行计算,此时

$$V = IZ = I_0 Z / (1 + Z/Z_0) \quad (1-7)$$

式中 Z 为被击物的波阻抗。上题已说明, $Z = \frac{1}{2}Z_0$, I_0 是雷闪直接对地放电(即大地的电阻视为零)时的雷电流峰值。若取 $Z_0 = 2000\Omega$,则

$$\begin{aligned} V &= 10 \times \left(\frac{1}{2} \times 400 \right) / \left[1 + \left(\frac{1}{2} \times 400 \right) / 2000 \right] \\ &= 10 \times 200 / (1 + 0.1) \\ &= 2000 / 1.1 = 1818 \text{ kV} \end{aligned}$$

可见,计及雷闪通道的波阻抗后,过电压略低。

现在必须回答的问题是:每一年将有多少次雷直接击中输电线路?这将由对地闪络密度 N_g 和“吸引范围”等知识来作出回答。输电线路可以屏蔽地面的某些地区(线路走廊的一部

分),如果能确定线路下方地面上的屏蔽范围,在这个范围内的雷闪一般都落在线路上而不是落在地面上,这个范围就叫吸引范围。如果已知 N_g 并已确定吸引范围,则这两个因数的乘积便是一定线路长度上的落雷次数。作以下的假设是很合情理的:吸引范围将取决于容易受雷击导线的高度。有各种估算输电线路的吸引宽度的经验方法。一个简单的公式是 $4h+b$,式中 h 是双避雷线的高度, b 是它们之间的距离(图 1-5)。如系单根避雷线,则 $b=0$,若无避雷线, b 为最外侧相线之间的距离。

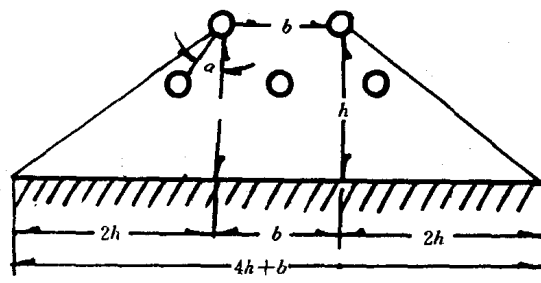


图 1-5 确定吸引宽度的方法

由于缺乏对地闪络的精确数据〔式(1-2)仍允许有 1:2 的偏差〕,人们不得不在现场经验的基础上去研究每年落于输电线路的雷闪数与雷暴水平的关系。下面介绍的式(1-8)是依据美国的现场记录与 AIEE 的计算方法导出的一个公式,该式适用于杆塔平均高度约 30m 的输电线路:

$$N_1 = 62(TD)/30 \quad \text{雷击次数 / (100km} \cdot \text{年)} \quad (1-8)$$

另一个相似的公式是根据前苏联的现场经验导出的,它适用于杆塔高度 25—30m 的输电线路,式中的 $\bar{h}$ 是架空地线的平均高度:

$$N_1 = 2.7 \bar{h}(TD)/30 \quad \text{雷击次数 / (100km} \cdot \text{年)} \quad (1-9)$$

我国计算输电线落雷次数的经验公式为

$$N_1 = N_g \times \frac{10 \bar{h}}{1000} \times 100 \times TD \quad \text{雷击次数 / (100km} \cdot \text{年)} \quad (1-10)$$

式中 N_g ——对地闪络密度, 0.015 次/($\text{km}^2 \cdot \text{TD}$);

$\bar{h}$ ——线路平均高度, m。

第三节 感应过电压

雷云较低部分和先导中的电荷在地面上,并在与地面相连的导电物体上感应出相反极性的电荷。这里所说的与地相连不仅指直接接地的导线(即架空地线)和杆塔;也包括通过变压器中性点与地联系在一起的相线;后者在静电场缓慢建立的过程中能保持其地电位。

雷云在输电线路附近地区一放电,静电场迅速消失,导线上的束缚电荷被释放。导线任一单位长度上的电压等于电荷除以单位长度的电容,这一静止电压可以用两个向导线不同方向传播、幅值只有原幅值一半的行波来代表。在电场迅速消失的瞬间,这两个波相互叠加,大小相等方向相反的电流互相抵消。实际上,电场的迅速消失不可能是瞬时完成的,所以生成波是在每一时间基元段内产生的元波之和,因为元波是连续开始其运动的,所以合成的波前变长了并与电场迅速消失的时间成正比,波幅则相应减小。

图 1-6 示意地说明了上述过程。

三相的感应过电压相等,通常是正极性,它们的波前一般为 $10\mu\text{s}$,波幅与雷电流的大小、

雷击点的距离、导线的高度、有无屏蔽线等有关。因为这种过电压很少超过 200kV, 在 35kV 或运行电压更高的输电线路, 由静电感应导致闪络是不大可能的。

根据理论分析与实测结果,《规程》建议: 当雷击点与线路的垂直距离 $S > 65\text{m}$ 时, 导线上的感应过电压最大值可按下式计算

$$U_x = 25 \times \frac{I \times \bar{h}_0}{S} \quad (\text{kV}) \quad (1-11)$$

式中 I 为雷电流峰值(kA), $\bar{h}_0$ 为导线平均悬挂高度(m), S 为雷击点与线路的距离(m)。

从式(1-11)可知, 感应过电压与雷电流峰值 I 成正比; 与导线平均悬挂高度 $\bar{h}_0$ 成正比, $\bar{h}_0$ 越大, 则导线对地电容越小, 感应电荷产生的电压就越高; 与雷击点到线路的距离 S 成反比, S 增大时, 感应过电压减小。还应指出, 感应过电压的极性与雷电流极性相反, 因而也与直击雷击引起的过电压极性相反。

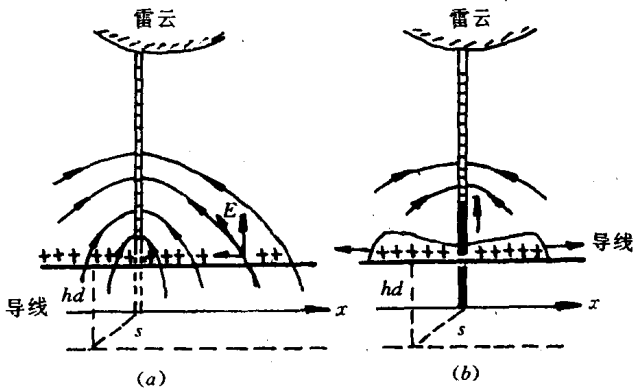


图 1-6 感应雷过电压形成示意图

第四节 冲击波过电压和伏秒特性

雷电产生的过电压, 不论是直击雷过电压还是感应过电压, 其持续时间都很短, 一般为几十 μs , 我们把这种作用时间很短的非周期性变化的过电压定义为冲击波过电压。

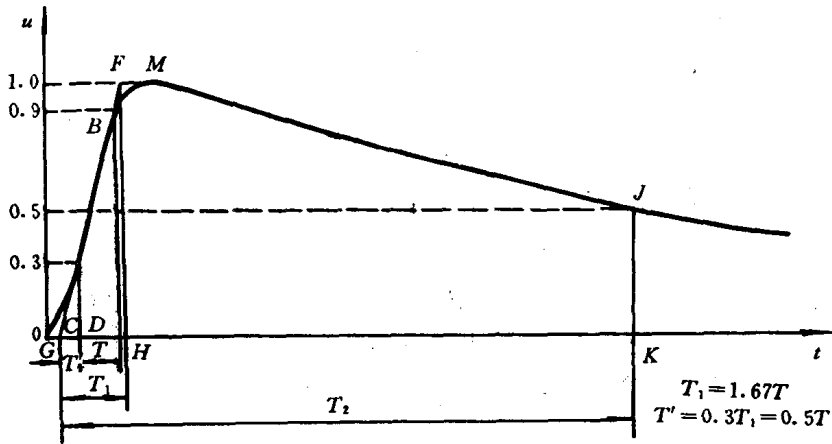


图 1-7 雷电标准冲击电压全波

为了在实验室中对雷电进行模拟研究, 可利用冲击电压发生器来产生所需要的波形和幅值, (见第九章第八节) 但为了使研究结果便于比较, 需要规定标准的冲击电压波形。图 1-7 便是这种标准波形。描述全波的参数是波前时间 T_1 和波长 T_2 。我国国家标准规定, $T_1 = (1.2$

$\pm 0.36) \mu s$ 和 $T_2 = (50 \pm 10) \mu s$, 因此标准波形通常可用 1.2/50 表示。

图 1-8 表示把一个冲击电压加在空气间隙上并导致间隙击穿电压波形。图中 U_0 表示静态击穿电压(即较长时间作用的工频交流击穿电压的幅值或直流击穿电压)。电压从 0 开始升至 U_0 的时间为 t_1 , 但这时间隙尚未击穿, 直到 $t=t_2$ 时间隙才发生击穿; 这中间经历了电压从 U_0 升至有有效电子出现(所需时间为 t_s)以及从有效电子出现起至间隙击穿(所需时间为 t_f)两个阶段, 整个间隙击穿所需时间为:

$$t = t_1 + t_2$$

$$t_2 = t_s + t_f \quad (1-12)$$

我们把 t_2 叫放电时延, 它又由统计时延 t_s 和放电形成时延 t_f 组成。不论是 t_s 或 t_f 都具有分散性, 与许多偶然因素有关, 但都与外加电压的大小有关, 外施电压加高, t_s 与 t_f 均会减小。

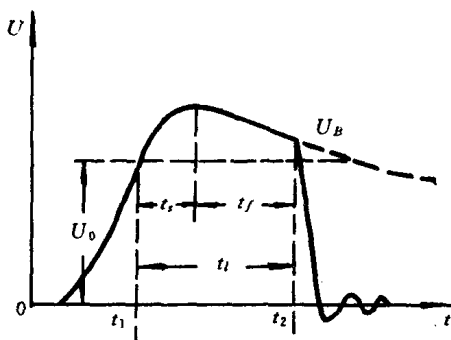


图 1-8 冲击电压作用下空气间隙的击穿

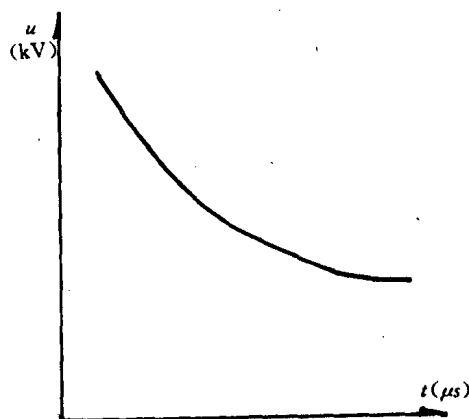


图 1-9 绝缘的伏秒特性

根据以上所述, 可以设想, 对一定结构的间隙, 在一定波形电压的作用下, 幅值越高, 所需放电时间就越短, 图 1-9 表示出了这种情形, 这幅图可根据击穿电压的示波图作出。这种表示放电电压与放电时间的关系曲线就叫做间隙(或绝缘结构)的伏秒特性。

由实验绘制伏秒特性(见图 9-18)的工作量很大, 因此通常用 50% 击穿电压表征间隙的冲击击穿特性。由于冲击电压作用下放电的分散性, 在间隙上加 N 次同一波形及峰值的冲击电压时, 可能只有 n 次发生击穿, 则击穿概率 $P = \frac{n}{N} \times 100\%$, 如果增大或减小外施电压的峰值, 则击穿概率就会随之加大或减小, 当击穿概率等于 50% 时, 这时的电压峰值就称为 50% 击穿放电电压, 并记为 U_{50} 。

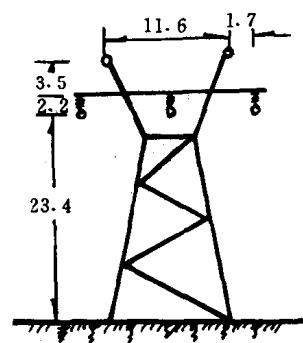
U_{50} 与静态放电电压 U_0 之比就定义为冲击系数:

$$\gamma = U_{50}/U_0 \quad (1-13)$$

习 题

1-1 计算如图 1-10 所示的 220kV 输电线路, 线路所经地区 $TD=40$, 导线平均悬挂高度的计算公式为 $\bar{h} = h_0 - \frac{2}{3}A$, 式中 h_0 为悬式绝缘子链上导线的对地高度, A 为导线的驰度, 本例中 A 设为 10m, 求该线路每 100km · 年的落雷次数。

1-2 如图 1-10 所示的 220kV 输电线路,不计避雷线的存在,当一个峰值为 20kA 的雷落在距线路 70m 远处的地面上时,求在输电线上感应过电压的幅值。这个感应过电压对 220kV 输电线路有无危害?



图中单位均为米

图 1-10 220kV 酒杯型铁塔