

过电压、防污问题及前景



能源部武汉高压研究所

序 言

根据原水利电力部生产司的委托，武汉高压研究所于1987年11月在苏州举办了全国过电压防污专业研究班。邀请了二十多位理论造诣颇深，实践经验丰富的专家、教授，针对当前电力生产实践中关于过电压和防污的问题，精心编写了一套讲义，为来自全国各网、省局和试验研究所的专业人员进行了讲授，效果良好。应许多单位要求，我们在此基础上，进行了必要的充实和整理，汇编成《过电压、防污问题及前景》，该书集中反映了近年来有关这方面的最新结论、研究成果和生产运行经验，我们希望对从事这方面工作的同志有所帮助。

经过半年多的工作，这本书终于和大家见面了，在此向参加编写、整理、校对等工作，为此面付出辛勤劳动的同志表示衷心的感谢。

李士元
朱家骅

1988.11.17

目 录

上册 过电压部分

工频电压, 潜供电流和恢复电压	陈维贤(1)
500kV 电网的过电压保护与绝缘配合	杜澍春(42)
500kV 变电站雷电侵入波保护的计算	朱家骥(87)
500kV 系统调试过电压的测量分析	朱家骥(112)
输电线路绝缘配合的统计法	王秉钧(128)
电力设备绝缘在线诊断技术	朱德恒(146)
GIS 的过电压保护和绝缘配合	张伟敏(154)
SF ₆ 气体绝缘组合电器投运前的绝缘试验问题的研讨	陆新原(172)
变电站接地	方瑜(179)
3—60kV 电力网中性点接地方式问题	李福寿(200)
接地装置的腐蚀问题、接地降阻剂	陈先禄(218)
中性点不接地系统中电磁式电压互感器引起的铁磁谐振一些消谐措施装置的比较及使用	沈宗扬(235)

下册 一. 过电压部分

雷电参数的探测	吴朴三(1)
典型雷害事故的分析	岳建民(20)
并联电容器组的操作过电压及其保护	谷定燮(49)

相间操作过电压的研究	修木洪 江敏(68)
ZnO 避雷器(MOSA)基本特性、试验和使用	王维洲(80)
金属氧化物避雷器的技术条件及使用导则	李启盛(102)

二. 防 污 部 分

污闪放电理论和放电特性	张仁豫(114)
绝缘子污秽度的测量方法和指标	张仁豫(126)
提高绝缘子污秽条件下绝缘强度的方法	刘湘生(131)
污秽地区输变电设备外绝缘水平的选择	徐通训(137)
污闪绝缘子的试验	徐通训(157)
不同型号瓷瓶积污规律的试验研究	王靖勤(170)
污秽绝缘地区的运行维护	周定兴(178)
耐污秽绝缘子造型设计和选用	俞宜任(181)
陕西关中电网在今年初的大面积崩溃性污闪事故的技术分析研究 ...	喻华玉(190)

雷电参数的探测

武汉高压研究所

吴璞三

闪电是人们熟知的壮观的自然现象,观测表明:全球表面,任一时刻大约发展着一千个左右的雷暴。它对每个国家的许多国民经济部门造成一定的影响。在电力部门的众多事故中,雷击是最主要的原因。因此,雷电机理及其防护的研究一直为国民经济有关部门,特别为电力部门所重视。防雷成为一个专门学科。

我们电力部门研究雷电现象的目的,主要是测定对地闪击(简称地闪)的电气参数,并制订切实可行的防护措施。我国在五十年代末,六十年代初电科院和国内一部分电力科技人员,曾开展过雷电观测工作,除在广东石榴岗设立观测站外,还曾在全国各地一些输电线路上进行雷电流幅值和陡度的测量,有过相当的声势和规模。不幸,由于众所周知的原因,这些人员大多不久就离开了这个岗位。据知,除浙江新抗线外,先后中止了雷电流的测量,但仍为新订的电力设备过电压设计技术规程(以下简称“规程”)提供了一点我国自己的雷电流幅值数据,也为我们今后开展这项工作提供了有益的经验 and 启示。

一、国内外雷电观测的简要回顾

1. 世界主要观测站简介及主要观测手段

人类从富兰克林发明避雷针起,开始了控制闪电和闪电防护的最初尝试。至今避雷针仍是防雷的重要措施。1900年英国 Hoffer 把旋转照相机运用于闪电摄影,从此雷电现象的研究开创了真正的科学时期。以下简要介绍若干主要观测站。它们都在雷电现象的研究中作出过重要贡献。

(1) 美国纽约的帝国大厦,高 380 米,1939 年建站。首次使用了所谓回孔放电管示波器和磁钢棒测量雷电流波形和幅值。在 180 米远处使用旋转照相机拍摄雷击放电的发展过程。它总共测得 27 张示波图和 11 次磁钢棒幅值记录。从四十年代开始,美国曾先后建立几十个雷电观测站。

(2) 瑞士圣萨尔瓦多山,观测站最高点海拔 914 米,1943 年建立高为 60 米的木质测量塔,1950 年建立第二座 90 米高的铁塔。曾使用多种类型的示波器摄取击中测量塔的雷电流波形。1950 年用 8 架莱卡照相机进行全视野夜间照相。从 1946~1974 年共记录了 1786 次闪电示波图,得到一大批很有价值的雷击参数。并首先发现了脉冲正电流闪电。

(3) 意大利观测站。第一个观测站 1969 年建于福利尼奥。以后又在蒙塔—奥尔萨的电讯塔建立了第二个观测站。

(4) 法国火箭引雷站。进行人工引雷的实验研究。

(5) 苏联观测站。建于莫斯科高为 537 米的电视发射塔上,用安装在塔体上部的环形线圈作示波记录。据报导,该塔年均雷击数为 32 次,并表明该塔具有“负保护特性”。所谓负保护特性,反映了塔体本身吸引雷击的功效。据称,塔体周围 1 公里范围内的地闪比 1 至 3 公里范围内要多。

(6) 南非观测站。建于比勒陀利亚的一个小山上,美国人 Anderson 在该站建起 60

— 1 —

米高的绝缘塔。照相设备和电视摄影机均在远处遥控。电视摄影的方法可廉价地获得大量闪击发展过程的资料。从而确定整个闪电放电的一般特性。

在上述观测站中，研究雷电特性的主要测量手段有：磁钢棒、示波器、电场记录仪、旋转照相机、电视摄影机等。为测定对地闪电密度，常采用国际大电网会议推荐的经过 Golde 改进的闪电计数器（简称 CIGRE 计数器），这种计数器的缺点是不能区别云闪与地闪，不能给出有效测量范围，不同学者曾给出这类计数器在测量范围和云地闪密度比方面的不同数值。因此，用它计算地闪密度时可能有较大误差。

随着计算机技术的迅速发展和广泛应用。七十年代末美国雷电定位和保护公司（称 LLP 公司）制成雷电定向定位系统。它由若干个预编程序的微处理器组成，能在大范围内比较准确的测定地闪的发生时间、地点和雷电流幅值，信息自动传输，数据自动记录并打印，是一种全新的现代化的自动雷电探测工具。

2. 国内外雷电参数的实况与我国开展参数探测工作的必要性

本世纪 30 年代以来，国外一些学者相继发表由他们自己实测的雷电参数，并在一些国家的有关规程中所用。七十年代中期，一些极有声望的学者发表了一大批雷电参数的实测值。如 Berger 在 1975 年综合分析了圣萨尔瓦多山三十年来的实测波形，Popolansky 在 1972 年研究分析了八个国家的 624 个数据，他们得到的雷电流幅值的累积概率分布见图 1。雷电流最大陡度的累积概率分布见图 2。有关数字列于表 1（Berger, 1975 年）。

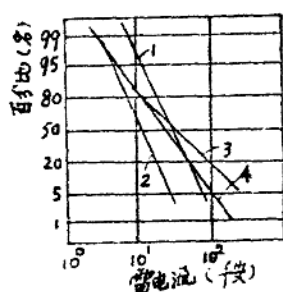


图 1 雷电流幅值的累积概率分布

1—第一负闪击；2—随后负闪击；
3—正闪击；4—Popolansky

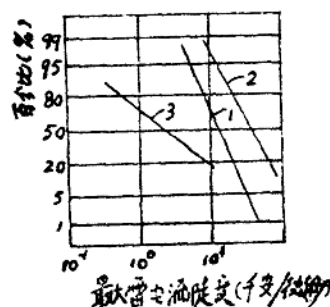


图 2 雷电流最大陡度累积概率分布

1—第一负闪击；2—随后负闪击；
3—正闪击

将图 1、图 2 和表 1 中的数据和我国“规程”值相比时可见：（1）雷电流幅值的中值（即 50% 值）相差不多，但在大电流范围内，我国“规程”值偏大较多（新杭线 20 年来幅值的实测也证明了这点）。（2）雷电流最大陡度我国“规程”偏小很多。表 1 中 Kroninger 用计算机分析实测波形的随后负闪击时得到，大于等于 162 千安/微秒的雷电流陡度占 5%，难怪在线路雷击跳闸事故中，当测得的雷电流幅值明显较小时，线路仍被击跳闸，不得不认为可能是闪击的陡度极大而引起反击的缘故。

表 1

雷击次数	参 量	大于表中数值所占百分比		
		95	50	5
	大于 2 千安的电流幅值			
101	第一负闪击和负闪电 (千安)	14	30	80
135	随后负闪击 (千安)	4.6	12	30
26	正闪电 (千安)	4.6	35	250
	$\frac{di}{dt}$ 最大值			
92	第一负闪击 (千安/微秒)	5.5(9.1)	12(24)	32(65)
122	随后负闪击 (千安/微秒)	12(4.1)	40(40)	120(162)
21	正闪电 (千安/微秒)	0.2	2.4	32

注: $\frac{di}{dt}$ 最大值中, 括号中的数字, 是由 Kroninger 对同一波形用计算机的分析值,

它比手算的数值大得多, 应该认为计算机修正值更正确些。

地面落雷密度 r 是输电线路防雷设计的重要基础参数, 我国尚未进行过这方面的实际测量。“规程”中推荐 $N_g = 0.015T_d$ (即 $r = 0.015$, T_d 一年雷电日数) 是根据国内若干条线路在假设受雷宽度 $W = 10h$ 时推算的。国际上五十年代曾把落雷密度的测量当作世界范围内努力研究的一个课题, 并取得一些进展。我们将世界各国通常被采用的估算式列于表 2。由表可知: 国外采用值相近, 我国的数值小得太多。

表 2

国家或地名	地面落雷密度 (次/年·平方公里)	线路落雷数(次/百公里·年) 当 $T_d = 40$ 日, $h = 30$ 米
我国规程推荐	$N_g = 0.015T_d$	18
Pierce 分析全球有关数据	$N_g = 0.04T_d^{1.35}$	
南非观测值	$N_g = 0.023T_d^{1.35}$	75
美国线路实测值	$N_g = 0.15T_d$	100
苏联		108

线路受雷宽度, 我国“规程”采用 $W = 10h$, 而国外通常采用 $W = 4h + D$, 其中 D 为双

避雷线时的线间距离。

列举以上这些数字和计算式，并不是想在我国规程中照搬外国的最新估算式。一些国家实测示波图表明：各地实测波形大致相似，而雷电流幅值、陡度、地闪密度则明显因地而异。因此，我国必须迅速在全国范围内开展雷电观测工作，收集符合我国实际情况的雷电参数。

3. 雷电观测与线路防雷

雷电观测是防雷的基础研究项目，初看起来和电力生产单位难以直接挂勾，其实并不完全这样。下面介绍一个坚持雷电观测 20 年，把雷电观测和本单位线路防雷性能的改善完好地结合在一起的事例。

浙江新（新安江水电厂）杭（杭州变）线的新富（富春江水电厂）2230 线，原属浙西供电局管辖，全长 48.5 公里，共 106 基铁塔，地处浙江西部山区，全线大部分铁塔立于标高为 150 米至 450 米的山顶或山脊，山高、坡陡、沟深，雷电活动强烈。1960 年 9 月投入运行，1961 年、1962 年雷击跳闸 6 次，因无自动重合闸，每次都造成停电事故，事故率为 6.18 次/百公里·年，因此得到各方面的关注。1963 年起全线按装磁钢棒，进行幅值观测，之后的三、五年内，在这条线路上做了大量的防雷尝试。现在看来，加装耦合地线，改善接地装置，增加一片绝缘子是有效果的。1962 年~1973 年上半年的 11 年半，共雷击闪络跳闸 19 次，事故停电 6 次，跳闸率为 3.4 次/百公里·年，线路的安全运行仍受到雷害的严重威胁。浙西供电局分析了 10 年雷电观测的成果，从中得到很大的启示。到 1978 年为止，测得 202 次雷击，现将重雷区和易击点的落雷与闪络情况列于表 3。

表 3

重雷区段塔号	落雷数	闪络数	易击点塔号	落雷数	闪络数
#10~33	64	14	#11~13, #19~21	21	5
#50~54	45	7	#59~60	15	4
#83~89	26	3	#86~88	14	2
#101~104	10	0	#102~103	7	0
共 40 基	145	24	11 基	57	11
占全线相应总数的百分数					
37.8	70	96	10.4	27.5	44

注：重雷区段——指落雷密度 ≥ 0.2 次/杆·年的区段；易击点——指落雷密度 ≥ 0.5 次/杆·年的杆塔。

由表可见：96% 的雷击闪络发生在占全线仅 37.8% 的重雷区段上，差不多一半的雷击闪络发生在占全线 10.4% 的易击点上。因此，62.2% 的杆塔从防雷运行的角度上几乎可以忽略其影响。提高重雷区特别是易击点杆塔的耐雷水平就等于提高了全线的耐雷水平，

重雷区和易击点是全线防雷的“刀口”。

1973年,总结了过去改进防雷措施的经验教训,分析了这条线路的具体情况,认识到提高全线耐雷水平的根本措施是设法有效降低重雷区和易击点杆塔的接地电阻,决定全线仅对47基杆(包括重雷区的40基,非重雷区的闪络杆塔和若干接地装置完全失效的杆塔)进行接地大修,并制订了接地大修技术措施。大修前,47基接地电阻的总和为1122欧,大修后的总和为496欧,降为原值的44%,易击点及其附近杆塔的接地电阻,均比“规程”提高一级,有的甚至提高二级。从1973年下半年至1982年,闪络数为3次,跳闸率为0.65次/百公里·年,没有发生一次停电事故。这个成果的取得,是和扎扎实实的雷电观测工作分不开的。

浙西供电局把雷电观测的部分成果直接运用于线路防雷性能的改善上,使雷电观测这个科研工作和观测单位的线路防雷工作紧密地联系在一起,是值得一些发供电单位借鉴的。

二、雷击档中的幅值观测与计算分析

1. 磁钢棒测量雷电流幅值的方法与档中落雷的测量

直至今日,磁钢棒仍是测量雷电流幅值的主要手段之一,输电线路大面积的幅值测量尤其如此。磁棒在杆塔上安装示意如图3,磁棒固定在支架的测孔中。安装在塔顶测针上的磁钢棒直接记录落在杆塔上雷电流幅值;安装在杆塔两侧架空地线上的磁棒测量雷击档中传至杆塔侧的电流幅值。这个电流幅值是雷电波经多次折反射后的叠加波的幅值,它受多种可变因素的影响,如雷击点电流波形和幅值、雷击点在档中的位置、档距长度、杆塔的接地电阻、电晕引起的波形畸变以及波在传播中的衰减等都对测量点的电流幅值产生或大或小的影响。因此,雷击点的电流幅值不等于档距两侧电流幅值

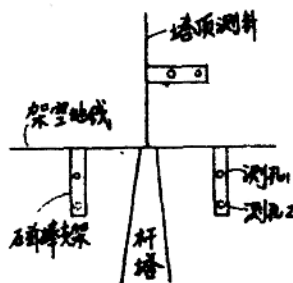


图3 磁棒安装示意图

之和,然而山区线路的击档率大约为70%,平原地区线路的击档率高达85%以上。为寻求击档雷电流幅值的规律和大大增加雷电流幅值概率分布样本量,对雷击档中,雷电流幅值的测量进行计算分析,是十分必要的。

我们采用特征差分法,编制雷击档中,两侧雷电流分布的计算程序,确定雷电流波头时间、档距长度、雷击点位置、接地电阻、避雷线高度和根数、雷电流幅值等对两侧电流幅值的影响,绘出雷击点电流幅值与两侧幅值之和的关系曲线和回归方程。回归方程的正确性得到了在500kV试验线段上的试验证实。

2. 网络的数学模型

计算采用如图4所示的网络模型,考虑雷电波在三个档距内的传播过程。图4中的O点为雷击点,A、B为两侧雷电流测量点。整个模型包含三种网络元件:线路杆塔及接地电阻、雷电源和输电线路(包括避雷线和输电线)

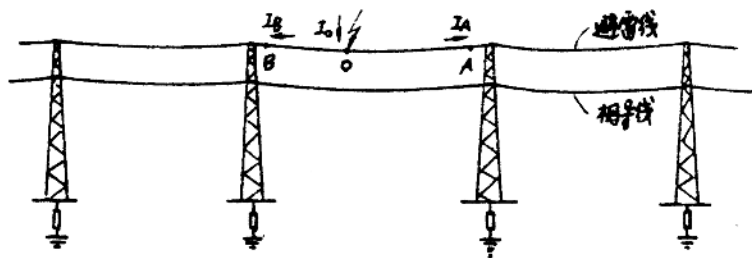


图 4 网络模型

(1) 线路杆塔及接地电阻

杆塔采用集中参数电感来模拟，如图 5 所示。为简化计算将杆塔及接地电阻用一个等值电阻和等效电流源代替。

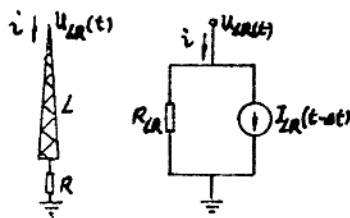


图 5 杆塔模型及等效电路

其中：

$$R_{LR} = \frac{2L}{\Delta t} + R \quad (1)$$

$$I_{LR}(t - \Delta t) = \frac{4L \cdot \Delta t}{(2L + R\Delta t)^2} U_{LR}(t - \Delta t) + \frac{2L - R\Delta t}{2L + R\Delta t} I_{LR}(t - 2\Delta t) \quad (2)$$

式中： \$L\$——杆塔等效电感；

\$R\$——接地电阻。

(2) 雷电源

雷电源采用一般计算时常用的模型，即电流源和雷道波阻抗的并联电路来模拟（图 6）。雷电流波形采用双指数波。

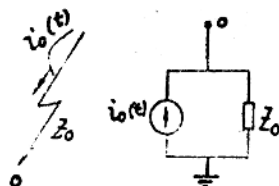


图 6 雷电流模型

其中: $i_0(t) = I_0 [\exp(-at) - \exp(-bt)]$ (3)

波阻抗 Z_0 取 1000Ω ;

波头时间取 $2.6\mu s$;

波尾时间取 $40\mu s$ 。

(3) 输电线路

输电线路是由输电线(三根)和避雷线(一根或二根)组成的多导体系统。计算中考虑了电晕效应,用特征差分格式代替输电线路的微分方程。

3、特征差分格式

m 根导线的输电线路微分方程为

$$L \frac{\partial I}{\partial t} + \frac{\partial V}{\partial x} = 0 \quad (4)$$

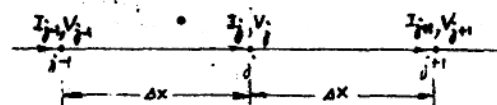
$$C \frac{\partial V}{\partial t} + \frac{\partial I}{\partial x} = 0 \quad (5)$$

根据解拟线性双曲型方程组的特征差分法,可推出求解(4)、(5)式的特征差分格式为

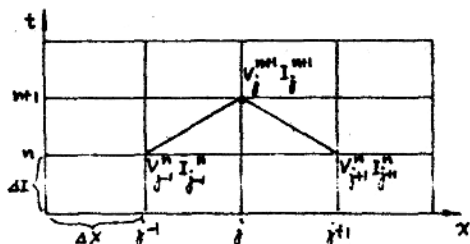
$$V_j^{n+1} = \frac{1}{2} \left\{ \left(V_{j-1}^n + V_{j+1}^n \right) + P_j^{n+1} \frac{\Delta t}{\Delta x} \left(I_{j-1}^n - I_{j+1}^n \right) \right\} \quad (6)$$

$$I_j^{n+1} = \frac{1}{2} \left\{ \left(I_{j-1}^n + I_{j+1}^n \right) + L_0^{-1} \frac{\Delta t}{\Delta x} \left(V_{j-1}^n - V_{j+1}^n \right) \right\} \quad (7)$$

式(4)、(5)、(6)、(7)中的 V 、 I 分别为电压、电流列向量。 L 、 C 分别为电感、电容系数矩阵。 P_j 为电位系数矩阵, P_j 的下标 j 表示电位系数矩阵为非常数阵。由于电晕的产生,使电位系数矩阵 P_j 中的自电位系数是非线性变化的。因此,计算时只需在 $V \geq V_c$ (电晕起始电压) 时的上升部分,改变 P_j 的对角元素为相应导线的动态电位系数采用迭代法求解。



(a)



(b)

图7 差分计算网格示意图

由图 7 和式 (6)、(7) 可见: 第 j 点处, 第 $n+1$ 时刻的电压、电流 (V_j^{n+1}, I_j^{n+1}) 是根据第 $j-1$ 和第 $j+1$ 两点第 n 时刻电压、电流 $(V_{j-1}^n, I_{j-1}^n, V_{j+1}^n, I_{j+1}^n)$ 求得的。将整个输电线路分为若干个 Δx 小段, 然后加上初始条件和边界条件, 即可根据 (6)、(7) 式计算输电线路上的波过程。

计算中考虑电晕的影响, 电晕对计算网络的影响反映在冲击电晕下的动态电容 C_d 上。电晕的伏库特性采用经验公式:

$$\frac{Q}{Q_c} = A + B(V/V_c)^{\frac{4}{3}} \quad (8)$$

式中 $A=0$, $B=1.02$ (正极性)

$A=0.15$, $B=0.85$ (负极性)

V_c 、 Q_c 分别为起晕时的电压、电荷

由 (8) 式可推出单位长度导线在冲击电晕时的动态电容 C_d 与电压 V 的关系。

$$C_d = \frac{\partial Q}{\partial u} = C_0 M \sqrt{u/u_c} \quad (9)$$

$$P_d = \frac{1}{C_d} \quad (10)$$

4. 节点方程的建立

图 8-a 所示的是有接地支路的节点线路图。接地支路可以是杆塔及接地电阻的等效电路, 也可以是雷电源模型。图 8-a 中第 j 点的电压、电流, 可用该节点的节点方程求得。本文参照贝格龙等效电路法, 并考虑电晕引起的线路波阻抗的变化, 推导出图 8-a 线路的等效电路图 (见图 8-b)。由图 8-b, 求解 V_j, i'_j, i_j 的节点方程为:

$$V_j = [-I'_j(t-\Delta t) - I_j(t-\Delta t) - I_R] / \left(\frac{1}{Z_1} + \frac{1}{Z_2} + \frac{1}{R_d} \right) \quad (11)$$

$$i'_j = -V_j / Z_1 - I'_j(t-\Delta t) \quad (12)$$

$$i_j = V_j / Z_2 + I_j(t-\Delta t) \quad (13)$$

$$I'_j(t-\Delta t) = -V_{j-1}(t-\Delta t) / Z_1 - i_{j-1}(t-\Delta t) \quad (14)$$

$$I_j(t-\Delta t) = -V_{j+1}(t-\Delta t) / Z_2 - i_{j+1}(t-\Delta t) \quad (15)$$

式中:

$$Z_1 = 0.5(Z_{j-1} + Z_j) \quad (16)$$

$$Z_2 = 0.5(Z_j + Z_{j+1}) \quad (17)$$

$$Z_j = \sqrt{L_0 / C_{df}(t - \Delta t)} \quad (18)$$

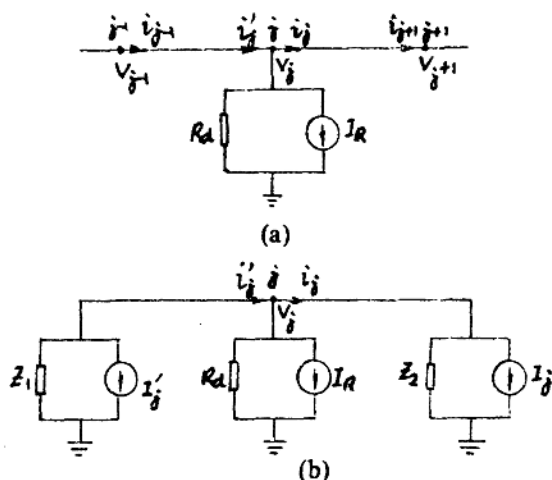


图8 接地支路节点的等效电路

5. 计算结果与回归方程

令两侧电流幅值之和(I_s)与雷击点电流幅值 I_0 之差的相对值为 y , 即

$$y = \frac{I_s - I_0}{I_s} \quad (19)$$

找出 y 值与其他因素的关系后, 就可根据两侧电流幅值之和 I_s 得到雷击点电流幅值 I_0 。

$$I_0 = (1 - y)I_s \quad (20)$$

令: $K = 1 - y$ (21)

称换算系数,

则: $I_0 = KI_s$ (22)

影响避雷线两侧电流幅值的因素有杆塔高度、档距长度、杆塔接地电阻、雷电流波形、雷电流幅值和雷击点位置等。采用正交设计方法, 对各因素影响的显著性加以分析, 得到如下结论。

(1) 两侧电流幅值之和 I_s 比雷电流幅值 I_0 要大, 两者最大偏差达39%, 平均偏差分别为21.33% (单避雷线) 和25.62% (双避雷线)。

(2) 同一条件下, 单避雷线时的 y 值比双避雷线时的 y 值小。

(3) y 值随波头时间的增大而减小。

(4) 当档距小于600m时, y 值随档距的增加而增大; 当档距大于600m时, y 值曲

线的变化与 600m 时的变化曲线一致。

(5) 雷电流幅值对 y 值也有影响。

(6) 接地电阻对 y 值影响较小。

(7) y 值几乎不受线路高度的影响。

(8) 雷击点位置对 y 值影响较大。

总结计算结果，画出不同条件下的一系列换算系数数值曲线。图 9 为不同档距的 K 值曲线，横座标 α 为档距两侧实测雷电流幅值之比 α ，同时还用多元回归法给出了适合于不同范围的分段多元回归方程，使用这些方程将更方便。例如单避雷线档距 $E \geq 230\text{m}$ ($E > 600\text{m}$ 时同 $E = 600\text{m}$)， $0 < \alpha \leq 0.6$ 时， K 值回归方程为：

$$K = 1.117 - 0.01(3.385N + 34.44\alpha + 0.0165I_s + 0.0277E - 0.0834R) \quad (23)$$

式中：N—避雷线根数

α —两侧电流幅值之比， $\alpha \leq 1$

I_s —两侧电流幅值之和 (kA)

E—档距 (m)

R—杆塔接地电阻 (Ω)

对回归方程经显著性检验，高度显著。

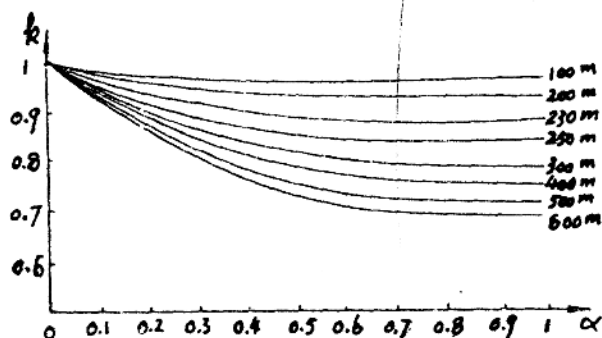


图 9 K 值曲线

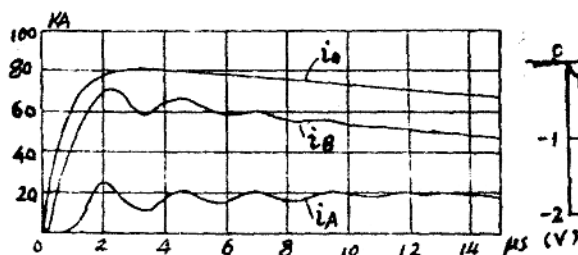


图 10 电流波形 ($E = 300\text{m}$, $L_p = 50\text{m}$)

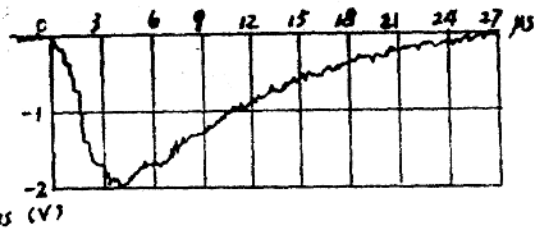


图 11-a 实测 0 点电流波形

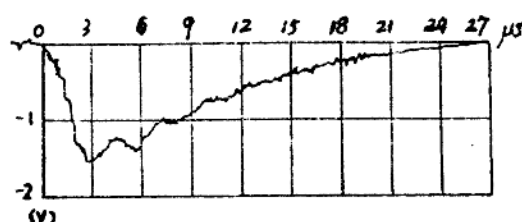


图 11-b 实测 B 点电流波形

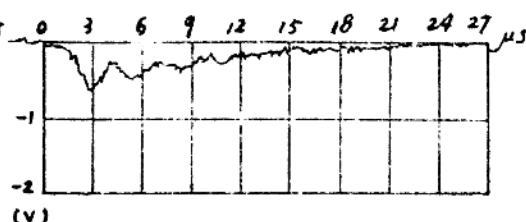


图 11-c 实测 A 点电流波形

6. 结果分析与实验验证

i_0 、 i_A 、 i_B 的计算波形为图 10，在 500kV 试验线段上外加冲击电流的实测波形分别如图 11-a、b、c。

由图可知：两侧电流幅值之和大于雷击点电流幅值以及上述其它几个结论的主要原因是波过程的折反射造成的。当雷击到档中某一点时，电流波同时向两侧传播，在两侧电流波未到达接地杆塔之前，雷击点两侧避雷线上的电流大小相等，方向相反。当电流波到达杆塔节点时，将产生折反射，由于电流反射波与入射波同极性，这时两侧测到的是入射波与反射波相加。而当某一侧的反射波返回到雷击点后，在雷击点又产生折反射，向另一侧的折射波与另一侧的电流波极性相反，从而使另一侧的电流值开始降低。以上过程不断重复，使两侧电流波呈波浪形。上述几个结论均可用波的折反射过程加以解释。

图 12 是考虑电晕与不考虑电晕两种情况下的波形的比较，可以看出考虑电晕时的电流波形的前沿部分有明显的延迟。正是由于考虑电晕时传播时延的作用，使得从一侧传来的反射波在雷击点产生的折射波对另一侧电流幅值的降低作用减小。因此，考虑电晕影响时两侧电流的幅值较不考虑电晕影响时的电流幅值略高。

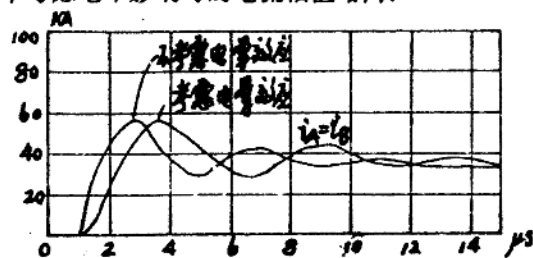


图 12 电流波形的比较 ($E=600m$, $L_p=300m$)

计算和实测表明：雷击避雷线档中，两侧测到的电流幅值之和大于雷击点的雷电流幅值，平均偏差 20% 以上。因此，将两侧测到的电流幅值之和作为雷电流幅值是不对的，必须对两侧的实测幅值根据不同条件下的 K 值加以修正。

三、雷电流最大陡度测量—磁钢式雷电流陡度仪

1. 基本原理

(1) 陡度的测量回路与微分方程

雷电流陡度即指雷电流的变化率。根据电磁感应可以在通过雷电流的导体附近装置一个闭合线圈来测量，如图 13 所示。感应回路的电势平衡方程式为：

$$M \frac{di_0}{dt} = L_1 \frac{di_1}{dt} + R_1 i_1$$

$$\text{或 } \frac{di_1}{dt} + \frac{R_1}{L_1} i_1 = \frac{M}{L_1} \frac{di_0}{dt} \quad (24)$$

式中 L_0 、 C_0 、 R_0 —雷电的特性参数

i_0 —雷电流

i_1 —感应电流

M —载流导体和测量回路间的互感

L_{w1} 、 L_{w2} —感应线圈和磁化线圈的电感

L_1 —总电感, $L_1 = L_{w1} + L_{w2}$

R_1 —测量回路总电阻

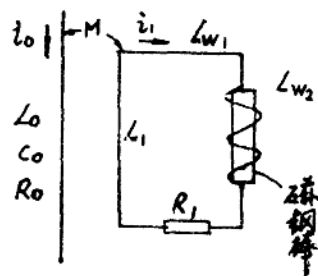


图 13 磁钢式阶度仪原理图

对于一个具体的陡度仪，给定一个 i_0 ，可求得一个 i_1 。当我们用磁钢棒来测量 i_1 时，可测得 i_1 的极大值 i_{1max} 。这时，由于

$$\left. \frac{di_1}{dt} \right|_{i_1 \rightarrow i_{1max}} = 0$$

所以

$$\left. \frac{M}{L_1} \frac{di_0}{dt} \right|_{i_1 \rightarrow i_{1max}} = \frac{R_1}{L_1} i_{1max} \quad (25)$$

由于测量回路电感 L_1 的延时作用，使得当 $i_1 \rightarrow i_{1max}$ 时，雷电流陡度并不是最大值， i_{1max} 的出现比最大陡度的出现在时间上要落后一个时间 t_0 ， t_0 的大小和雷电流波形、测量回路的电感 L_1 及时间常数 $\frac{L_1}{R_1}$ 有关。由于实际雷电流波形是变化的，不完全确定的，因此

不可能运用(25)式，用测得的 i_{1max} 直接精确地换算为被测雷电流的最大陡度。然而雷电流波形的变化也不是完全无规律的，它具有统计性。因此，我们又有可能运用(25)式，建立一种近似测量，即控制和规定一个允许的测量误差，直接建立起雷电流最大陡度和陡度仪最大感应电流 i_{1max} 的函数关系：

$$i'_{1max} = f(i_{1max}) \quad (26)$$

我们必须假定各种可能的雷电流波形，代入方程(24)，详细分析方程的解，论述近似测量中误差控制的可能性。

(2) 方程的解

雷电流的波形是多种多样的，我们假定几种典型的雷电流，代入方程(24)求解。

A. 冲击临界阻尼波 $i_0 = \frac{U_0}{L_0} t e^{-\alpha t}$ ，这是实验室里冲击电流发生器在临界阻尼情况下

的波形, 其中: U_0 —冲击电流发生器的充电电压; L_0 —冲击电流发生器的回路电感; $\frac{U_0}{L_0}$ —输出波形最大陡度; α —冲击电流的衰减常数, $\alpha = \frac{R_0}{2L_0}$, 其倒数为波头长即 τ , 即 $\tau = \frac{1}{\alpha}$; R_0 —发生器的回路电阻。对时间求导数得:

$$\frac{di_0}{dt} = \frac{U_0}{L_0} (1 - \alpha t) e^{-\alpha t} \quad (27)$$

将(27)式代入(24)式得:

$$\frac{di_1}{dt} + \frac{R_1}{L_1} i_1 = \frac{MU_0}{L_1 L_0} (1 - \alpha t) e^{-\alpha t} \quad (28)$$

它的解:

$$i_1 = \frac{MU_0}{L_1 L_0} \frac{1}{\left(\frac{R_1}{L_1} - \alpha\right)^2} \left[\left(\frac{R_1}{L_1} - \alpha \frac{R_1}{L_1} t + \alpha^2 t \right) e^{-\alpha t} - \frac{R_1}{L_1} e^{-\frac{R_1}{L_1} t} \right] \quad (29)$$

临界阻尼的最大陡度 i'_{0max} , 由(27)式不难看出在 $t=0$ 时出现, 即:

$$i'_{0max} = \frac{U_0}{L_0} \quad (30)$$

B. 正弦波 $i_0 = I_m \sin \omega t$

$$\frac{di_0}{dt} = I_m \omega \cos \omega t \quad (31)$$

将(31)式代入(24)式, 得:

$$\frac{di_1}{dt} + \frac{R_1}{L_1} i_1 = \frac{M}{L_1} I_m \omega \cos \omega t$$

其解:

$$i_1 = \frac{M}{L_1} \frac{I_m \omega}{\left(\frac{R_1}{L_1}\right)^2 + \omega^2} \left[\frac{R_1}{L_1} (\cos \omega t - e^{-\frac{R_1}{L_1} t}) + \omega \sin \omega t \right] \quad (32)$$

正弦波的最大陡度, 由式(31)可得:

$$i'_{0max} = I_m \omega \quad (33)$$

C. 半余弦波 $i_0 = \frac{1}{2} I_m (1 - \cos \omega t)$

$$\frac{di_0}{dt} = \frac{1}{2} I_m \omega \sin \omega t \quad (34)$$

将(34)式代入(24)式, 得:

$$\frac{di_1}{dt} + \frac{R_1}{L_1} i_1 = \frac{M}{2L_1} I_m \omega \sin \omega t$$