

电力系统过电压

〔苏联〕A.И.多尔金诺夫 著

胡世雄 颜怀梁 译

中国工业出版社

本书叙述电力系统中过电压发展的基本理论和对过电压的防护技术。

本书供高压电气设备的设计、安装和运行方面的工程师和技术人员使用，也可供高等院校电机系的学生和工程师进修班的学员作为教学参考书。

本书1~4章由胡世雄译，颜怀梁校；5~11章由颜怀梁译，胡世雄校。

А. И. Долгин

ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЯ В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

Госэнергоиздат Москва—1962

* * *

电力系统过电压

胡世雄 颜怀梁 译

*

水利电力部办公厅图书编辑部编辑（北京东月坛南街5号）

中国工业出版社出版（北京任胡同路丙10号）

北京市书刊出版业营业许可证出字第110号

中国工业出版社第一印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·各地新华书店经售

*

开本 $850 \times 1168^{1/2}$ ·印张 $13^{7/8}$ ·字数346,000

1965年12月北京第一版·1965年12月北京第一次印刷

印数0001—5,110·定价(科五)1.90元

*

统一书号：15165·4157(水电-557)

統一書號:
15165·4157(水电-557)

定 价: 1.90 元

目 录

緒論	1
----------	---

第一篇 電力系統中大氣過電壓

第一章 雷電及其作用	5
1-1 雷電放電的發展	5
1-2 雷電流	10
1-3 雷電流的效應	17
1-4 雷電活動的特性	20
1-5 球雷	22
第二章 避雷針(綫)和接地體	23
2-1 避雷針(綫)的保護作用和模擬	23
2-2 避雷針的保護範圍	25
2-3 避雷針的結構	32
2-4 避雷綫的保護範圍	34
2-5 人工接地體的形式及其特性	36
2-6 土壤的計算電阻率	39
2-7 接地體的沖擊系數	43
2-8 人工接地體沖擊系數的試驗數據及接地體的選擇	52
2-9 利用鋼筋混凝土基礎作為自然接地體	58
第三章 避雷器	62
3-1 避雷器的用途和分類	62
3-2 火花間隙的沖擊特性	62
3-3 PBC和PBII系列閘型避雷器的主要元件	68
3-4 PBC和PBII系列閘型避雷器的結構和特性	76
3-5 磁吹閘型避雷器	86
3-6 閘型避雷器的安裝和裝置構架	94
3-7 閘型避雷器動作計數器	95
3-8 管型避雷器的主要元件	97
3-9 管型避雷器的結構和特性	100
3-10 管型避雷器的連接方式及其型號選擇	107

IV

3-11	管型避雷器的安装	113
3-12	棒电极火花間隙的特性	118
3-13	特性稳定的保护間隙	11 ^a
3-14	閘型避雷器和管型避雷器的运行	11
第四章	輸电綫路对大气过电压的防护	12
4-1	对綫路保护的一般要求	12
4-2	輸电綫路的絕緣	12
4-3	輸电綫路上电力电弧产生和燃烧的条件	13
4-4	輸电綫路上的大气过电压	14
4-5	輸电綫路保护的一般原則	15
4-6	110千伏及更高电压的鉄塔綫路和鋼筋混凝土杆綫路 的保护	155
4-7	高杆塔綫路的雷击特点	164
4-8	用避雷綫保护的輸电綫路的单位开断次数	168
4-9	35~220千伏电压的木杆綫路的保护	169
4-10	35千伏电压无避雷綫的鉄塔綫路和鋼筋混凝土杆綫路 的保护	171
4-11	3~10千伏綫路的保护	172
4-12	輸电綫路交叉跨越处的保护	174
4-13	避雷綫經火花間隙接地	178
第五章	变电所进綫上和变电所內的波过程	182
5-1	波在綫路上由于冲击电量而衰减和变形	182
5-2	波在綫路上由于导线的有功損耗而衰减和变形	188
5-3	变电所中波的反射和折射	190
5-4	变电所母线上的波过程	199
5-5	变压器繞組中振蕩的发展	203
5-6	变压器繞組中的梯度过电压	207
5-7	变压器的內部保护	211
5-8	現代典型結構的变压器內的振蕩	217
5-9	自耦变压器和調压变压器內的波过程	224
5-10	三相变压器中波过程的特点	228
5-11	变压器繞組間波的传递	230
5-12	繞組波过程的模拟研究	234
第六章	变电所对大气过电压的防护	235
6-1	变电所保护的基本原則	235

6-2	变压器的冲击强度(内絕緣)	236
6-3	变电所设备的外絕緣的冲击强度	242
6-4	变电所对直击雷的防护	245
6-5	35~220 千伏变电所对从线路侵入的过电压波的防护	248
6-6	330~500千伏变电所对从线路侵入的过电压波的防护	262
6-7	变压器的不接地中性点的保护	263
6-8	輸电线路分支线上的35~110千伏变电所和小容量 变电所的保护	266
6-9	高山变电所的保护	268
6-10	减弱絕緣的35~110千伏变电所的保护	268
6-11	35千伏及更高电压的变电所中3~10千伏配电装置的 保护	269
6-12	3~10千伏配电网的保护	272
第七章	旋轉电机的保护	274
7-1	旋轉电机与架空线路的连接	274
7-2	旋轉电机的絕緣及其預防性試驗方法	275
7-3	电机繞組中的波过程	278
7-4	发电机对感应过电压的防护	281
7-5	大容量发电机对线路直击雷过电压的防护	284
7-6	小容量电机的保护	289
7-7	經变压器接到架空线路的发电机的保护	289

第二篇 电力系统中的内部过电压

第八章	操作过电压	293
8-1	开断无载线路时的过电压及恢复电压	293
8-2	开断无载线路时的过电压(在模拟台上的研究数据)	302
8-3	空气开关和油开关中形成电弧重燃的条件	306
8-4	在实际系統中研究开断无载线路时的过电压	308
8-5	线路合闸时的过电压	309
8-6	开断无載变压器和电抗器时的过电压	310
8-7	开断異步电动机时的过电压	320
8-8	开断无載线路和变压器时操作过电压的限制; 无重燃 和不突然切断电流的开关	321
8-9	用开关中的并联电阻限制操作过电压	323
8-10	用避雷器限制操作过电压	329

VI

8-11 限制内部过电压的避雷器	334
8-12 开断无载线路时接在线路上的变压器和电抗线圈对 操作过电压发展的影响	337
第九章 弧光接地过电压	345
9-1 概述	345
9-2 中性点絕緣的电网中的弧光接地过电压	346
9-3 消弧线圈的作用原理及調諧	356
9-4 中性点补偿电网（有消弧线圈的电网）中的弧光接地 过电压	361
第十章 电力系统中的諧振过电压	364
10-1 电路中諧振現象的基本規律	364
10-2 无载长线路上工頻諧振的电压升高	383
10-3 不对称短路及不对称操作时长线路上工頻諧振的电压 升高	388
10-4 无载长线路上高次諧波諧振的过电压	391
10-5 在长线路无载状态下发电机的自励磁	394
10-6 不对称短路时高次諧波諧振的过电压	396
10-7 无载长线路合闸时的諧振过电压	397
10-8 在諧振条件下开断无载长线路时开关上的恢复电压	399
10-9 防止长线路上发生諧振現象的措施	400
10-10 线路不对称开断或断相时的諧振过电压	403
10-11 变压器的絕緣中性点上的振蕩引起的过电压	407
10-12 接有电压互感器的线路上的諧振过电压	409
10-13 带消弧线圈的系統中的諧振过电压	410
10-14 带纵补偿的长线路上的过电压和恢复电压	414
第十一章 絕緣配合	419
11-1 絕緣配合問題的一般特性	419
11-2 在大气过电压和内部过电压下絕緣的特性	421
11-3 线路絕緣配合	424
11-4 現有线路的升压	427
11-5 变电所絕緣配合	428
附录 I 1958年以前制造的PBC及PBII型避雷器和保护 旋轉电机的PBBM型避雷器的电气特性	431
附录 II 計算輸电线路偶合系数的公式和曲綫	432
参考文献	433

緒 論

电力和电器工作者的任务，是如何使高压输电线路和变电所的結线以及电气设备的型式和结构更加经济。在完成这一任务中，高压技术，特别是它的一个分支——过电压防护技术，起着重大的作用。容量及輸送能力的增加要求提高輸电的工作电压。要经济地提高电压，就必须适当地限制系统的絕緣水平和过电压。

使用更高一級的700~750千伏电压已經提到日程上来了。但这个电压也还不是极限。要把西伯利亚的巨型水电站和火电站用交流輸电同苏联欧洲部分的联合电力系统联接起来，所要求的电压达1000千伏。在解决这个技术问题的任务中，高压技术及系统过电压防护技术有极为巨大的作用。

高压电力系统的工作可靠性，主要取决于絕緣和作用于絕緣的各种电压。在电力系统正常运行情况下，載流部分的絕緣处在电网的相电压作用下，变压器和电机的线圈之間和线匝之間的絕緣上所承受的电压是很小的。但是，由于各种原因，电力系统的某些部分的电压可能升高，并大大超过正常状态下的电压。危及絕緣的电压升高称为过电压。

过电压可以分为内部过电压和大气过电压。

大气过电压是由于雷击电气设备而产生的。經驗表明，这种现象是极为頻繁的。当沒有专门的保护时，雷电放电时产生的过电压波可达数百万伏，这样的过电压足以使任何額定电压的设备的絕緣发生閃絡和损坏。

大气过电压在电力系统中以波的形式传播，它会波及系统的所有元件，特别是侵入变压器的繞組和电器。这时，所产生的过渡过程，会引起作用于变压器和电器內絕緣上的电压急剧升高。

因此，对大气过电压的防护是电力系统安全运行所必不可少的。

还在战前的年代就曾經研究出一些主要的技术措施，它們几乎能保証电网完全耐雷。但是，从經濟观点来看，完全耐雷可能只是对最高电压等級的系統才是合理的。目前的主要任务則是降低电网造价，为此，线路采用降低了耐雷性指标的經濟結構，并用降低絕緣水平的办法来降低变压器和电器的价格。所有这些措施給过电压防护技术提出了最艰巨的任务——在新的条件下用改善保护設備性能的方法来保証电网足够可靠地工作。

在电网中进行切换操作时、在中性点絕緣和补偿的电网中发生电弧接地时、以及在长线路上和在不对称状态下发生諧振現象时，都将产生內部过电压。內部过电压的幅值通常是电网相电压的2.5~3.5倍左右，它和設備（首先是开关）的特性及电网的結线有关。电器設備的絕緣水平应考虑承受內部过电压的能力。随着电网工作电压的提高，絕緣成了影响輸电經濟性的主要因素，限制內部过电压的問題就愈加迫切了。目前，在苏联的330千伏及500千伏高压系統中采取的一些特殊措施，可把內部过电压限制到 $2.5U_{\phi}$ ①。

电气設備的絕緣水平应同所作用的过电压协调起来（而后者又和系統中过电压的发展条件及保护电器的特性有关），这种关系称为絕緣配合。我們在高压技术方面的知識愈广，絕緣配合就愈有根据，从而变电所和线路的建設更能經濟。

絕緣配合和系統中性点的运行方式有密切的关系。当其余条件相同时，中性点絕緣的系統要求的絕緣水平要高得多，这是因为相电压有可能長時間地升高到电网的线电压。因此，在苏联，110千伏及更高电压的电网的中性点直接接地。在这种系統中內部过电压的主要形式是短時間的操作过电压，它是由于开断或接入电网的一部分（主要是线路和变压器）而引起的。随着操作过电压幅值得以降低，系統中的工頻电压升高将在絕緣配合中愈来

① 內部过电压幅值以对电网相电压的倍数来表示——作者注

愈起作用。这种电压升高可以利用系統自动装置（首先是发电机自动調節励磁）和从結线方式上加以限制。

这样，在电力技术中过去和高压技术沒有直接关系的一些部門，現在也开始对絕緣配合发生影响了。

本书的目的是向讀者介紹电力系統中过电压发展的基本理論和过电压防护的实践。作者尽量保留了“电气設備防雷保护”一书（动力出版社1954年版）的叙述方式。某些章节是根据該书略加修改而成。但是大部分章节是根据新的研究成果，并根据过电压防护技术和电网建設各个方面新的发展方向而完全改写过了。

本书对理解过电压防护技术所必需的基本原理，給予了充分的重視。作者不仅尽量反映过电压防护技术发展的目前状况，同时也尽量指出在这方面的发展前景。因此，主观片面是在所难免的。

书中的实际資料主要是取自苏联一些研究人員的成果和苏联电力系統的实践經驗，也利用了一些其他国家的研究成果。对所引用的資料都注明了文献来源。作者在編写本书时承蒙 H. B. 姆拉夫列娃、A. C. 麦柯帕尔、E. C. 福里得、И. A. 尤里科夫、A. H. 石林蔡斯、A. B. 薩波日尼科夫、A. И. 勃朗福曼給以协助，謹此深致謝意。

И. B. 拉泽維格在通讀本书手稿后曾提出了許多宝貴的意見，作者謹致謝意。

作者

第一篇 電力系統中大氣過電壓

電力系統中產生大氣過電壓的原因是雷電放電，通常是雲層和大地之間閃電形式的放電。如果是電網的導線上受到雷擊而產生過電壓，則稱之為直擊雷過電壓。雷電沒有直接擊於導線而引起的大氣過電壓，稱為感應過電壓。直擊雷過電壓可能達到很高的數值，足以使實際上任何電壓等級的線路絕緣發生閃絡。保護輸電線路免遭直擊雷的主要措施是懸掛良好接地的避雷線以屏蔽導線。這種保護主要應用於鐵塔及鋼筋混凝土杆線路。木杆線路因木材的絕緣性能良好，允許不用避雷線保護。提高線路可靠性的有效方法是採用自動重合閘。線路的自動重合閘現在被認為是一種可以降低避雷線的造價或根本不採用它的防雷措施。

在線路上產生的過電壓波侵入變電所，作用到變壓器、電器和母線的絕緣上。變電所絕緣的主要保護措施是採用閘型避雷器。閘型避雷器的保護特性不斷地得到改善，它在變電所設備的絕緣配合中起着決定性的作用。另一方面，由於電氣絕緣技術工藝水平的提高，以及人們對設備的衝擊特性和變壓器與整個變電所內的過渡過程方面的知識日益精確，這些也促進了絕緣配合。

閘型避雷器製造和保護結線的 research 方面的成就，保證現在不僅對變電所而且也對旋轉電機制定了可靠的保護結線，這就可以設計其發電機直接與架空線路連接的容量不大的電站。

防雷技術的特點，在於所發生的過程大多具有統計性質。這個特點的由來是雷電放電參數和絕緣內的衝擊放電有統計性。因此在防雷技術中概率論起很大作用。線路上和變電所的避雷器上的雷電主要參數（電流、電流陡度及其它）的概率曲線在防雷技術中有重大意義。防雷有效性的主要判據並不是個別的雷擊事件（分析它們也是必要的），而是研究多年的雷擊率的統計。因此，科學分析電網運行的統計指標、安排好情報業務以及統計數

据的处理，都是非常重要的。所得到的结果不仅在苏联范围内利用，也供国际电工委员会（MЭК）的工作使用。

第一章 雷电及其作用

1-1 雷电放电的发展

打雷，这个壮观的自然现象，是从古到今大量研究的对象。近代理论描述雷云的形成如下。

在水蒸汽饱和的大气中，在强烈上升的气流作用下，发生了水滴的散溅。实验指出，水滴散溅所形成的细微水尘被充以负电，而留下来的重水滴带正电（图1-1）。风把带负电的水尘带到很高的地方，形成雷云的主体。带正电的水滴以雨的形式落到地上，或保持悬浮状态，雷云中就局部聚积了正电荷。因此，由于异号电荷机械分离，以及在云中不同部分集中了大量同极性的体积电荷而使云起电，乃是雷电现象的开始。

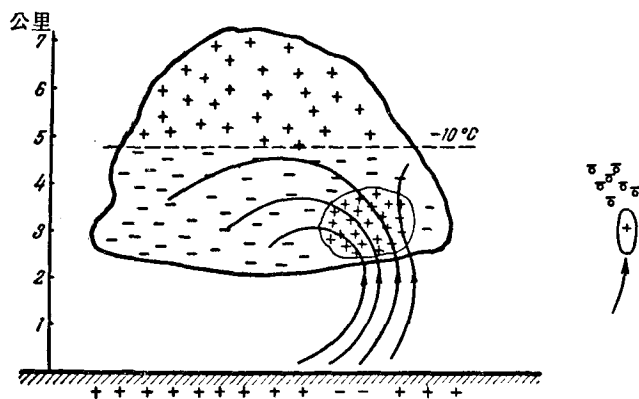


图 1-1 雷云中的电荷及气流

用球形探針所作的測量指出，在 -10° 等溫線以上的雲層中集中着正電荷。這兒是另一種電荷分離的過程（它和微小冰晶體的起電有關）在起作用。

主要是帶負電荷的下部雷雲形成巨大的電容器，它的另一“極板”就是表面感應了正電荷的大地。雲-地電容器的平均電場強度很少超過100千伏/米。但是這個數值是對均勻電場而言的。而在個別地方，電荷密度很大，為電暈放電創造了條件。例如，在地面上可觀察到從帶尖端物體發展的明亮放電。當靠近雲或靠近地面處的電場強度達到臨界值（25~30千伏/厘米）時，就造成雷電發展的條件。在雷電放電的所有形式（雲間放電、球雷、唸珠雷及其它）中，我們最感興趣的是雲和地之間線狀閃電形式的放電，因為電力設備遭到損壞，在絕大多數情況下正是由這種形式的放電所引起的。

雷電放電在主要特征上與在導體電極間的空氣中發生的長火花相同，但又以一系列特點而區別於後者，這些特點和雷雲（它是放電間隙的一個電極）的物理性質有關。

現在，由於蘇聯和國外進行的廣泛的試驗室研究和野外研究，雷電放電的物理過程和雷電特性在很大程度上已被闡明。

雲和地之間的放電，通常開始於從雲向地發展的微弱發光通道，它以 $10^7 \sim 10^8$ 厘米/秒（100~1000公里/秒）的平均速度跳躍式前進。這個預放電稱為分級先導。每一級的平長約50米。兩次跳躍的間隔為30~90微秒。每一級的發展速度約 5×10^9 厘米/秒。

圖1-2是雷電放電發展的一般過程。在上部（圖1-2，a）表示放電時在移動膠卷上所攝取的典型的放電發展照片。在末梢具有明亮的線段的細線條表示分級先導。這些線段相應於各分級的發展。先導表現出有分枝。通常先導通道的各分枝中只有一個到達地面。

先導過程分級發展的原因還沒有最終確定。通常認為，在先導跳躍式前進（分級）的間隔時間內，在先導的頭部積聚了電

荷，足以如此地增加它的电位，以致有可能形成下一个分級。

当先导到达地面，就开始主放电阶段，也就是肉眼感受到的闪电本身。按照光学仪器的记录，主放电是强烈发光且自地往云运动的波（图1-2， α 上的粗线）。这个发光的波称为主通道。主放电的速度在靠近地面处在 $\frac{1}{20} \sim \frac{1}{2}$ 光速的范围内，即15~150米/微秒。离地面愈远，光亮强度及主放电的运动速度降低。

当强烈发光的波到达云端，主放电完成。在下一阶段（图1-2， α 的阴影区）里，雷电通道的亮度大大减弱，但所谓“余辉”的光亮还持续千分之几甚至百分之几秒。一次冲击的过程以余辉阶段而告终。

大约40%的雷电放电有多重性，平均在一次放电里有三四次冲击。很少观察到冲击次数多得多的放电。重复冲击的先导，所谓箭形先导，不分級而沿着第一次放电的路径以约 10^8 厘米/秒的速度连续不断地运动。重复冲击的过程在其它方面和上面所说的没有区别。图1-2， δ 是与雷电放电发展的照片对应的雷电流曲线。

雷电先导可以粗略地理解为一个从云往地面下降的、有极大负电荷密度（单位长度的电荷，以 q_0 [库/米]表示）的导电通道（图1-3）。当先导到达地面时，放电波沿着它的通道以极高的速度从地往云传播，这相当于先导的负电荷流入地下。这放电波也就是主放电，雷电通道的强烈发光是其特征。放电波造成流过雷电通道和被击物体的电流。这电流也就被称为雷电流，在电气设备上产生的过电压波和它有关。以 v 米/秒表示放电波（主放电）的速度，雷电流可以用简单的关系式来表示：

$$i_m = q_0 \cdot v. \quad (1-1)$$

因为主放电的速度很高，雷电流的幅值达到数十甚至数百千安，但是雷电流的持续时间主要被放电波沿先导通道的行程时间所限制。

图1-4， α 表示了雷电流的示波图[文献1]。雷电流在几微

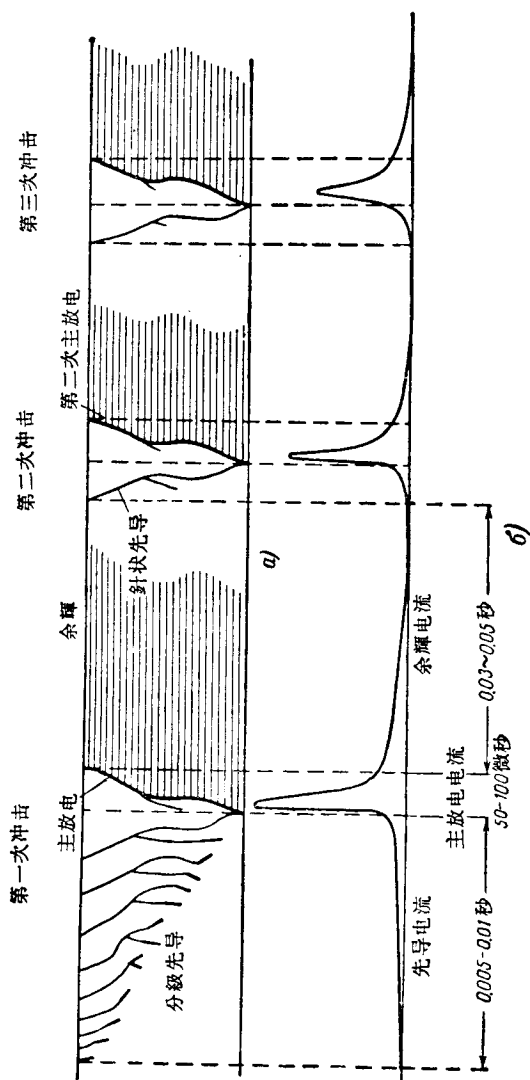


图 1-2 雷电的发展

a—照片; b—电流图形

秒的时间內升到幅值。雷电波的这段时间称为波头。电压下降部分称为“波尾”，它持續数十微秒。

主放电使得雷电通道的电导急剧增加。主放电完成以后，云的残余电荷通过这个通道流下来。这个阶段的电流称为余辉电流，它大約可达数百安培，而很少有数千安的。此电流就是雷电起始放电的那一部分雷电的剩余电荷流过雷电通道而造成的。在余辉阶段，雷电好象云和地之間的直流电弧。这电弧持續几千甚至几万微秒（图1-4， δ ）。

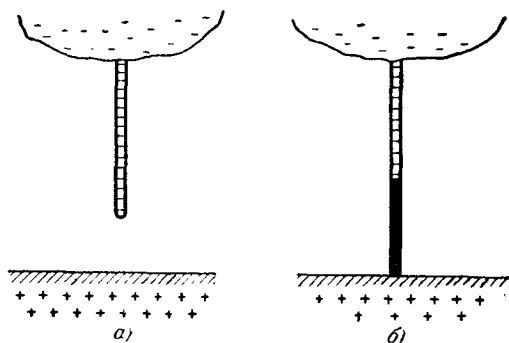


图 1-3 雷电流的发展

a —在先导阶段里电荷的积聚； b —在主放电阶段里电荷的中和

前面已經指出，沿着第一次放电路径跟随着重复冲击的情况是常有的。显然，雷云中电荷中和的区域和邻近积聚着电荷的区域之間的内部放电，是产生重复冲击的原因。重复冲击的雷电流照例小于第一次冲击的电流。

雷电放电的总持續时间达到零点几秒。曾记录到持續1.33秒的雷电放电。雷电放电的总电荷量通常在20~100庫伦的范围內。

在上述情况中，先导放电从云向地发展。当雷击高建筑物时，可能产生迎面先导。先导放电的負和正通道在离地面某一高度处相遇时，就开始了主放电。

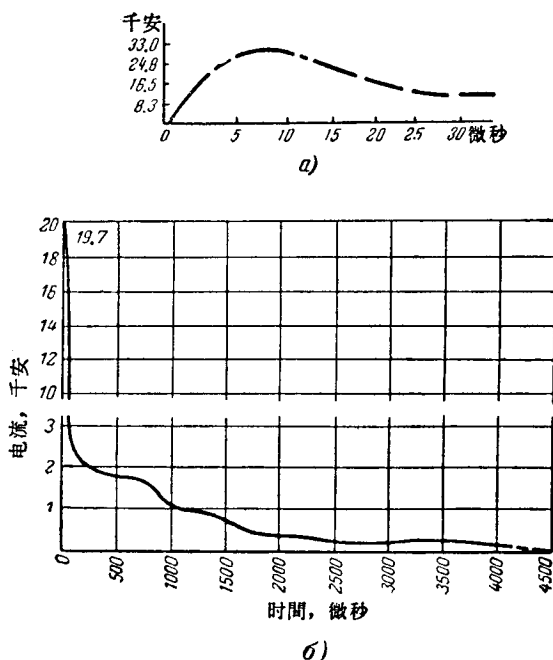


图 1-4 雷电流的示波图

α —主放电电流; δ —全部雷电流; 一次放电(按伯格尔的数据)

1-2 雷 电 流

在计算电气装置的耐雷水平时, 原始数据通常不是雷电压, 而是雷电流, 因为能够直接被测量的正是雷电流。

为了测量雷电流幅值, 采用了磁记录法, 它的实质如下: 用专门的架子把磁性材料的小棒状体(所谓磁钢记录器)安装在避雷针或输电线杆塔上(图1-5)。当雷电流通过时, 沿磁力线安装的小棒状体被磁化。雷雨季结束后, 取下记录器, 在检磁计上测量它们的磁化强度, 并按照校准曲线决定流过的雷电流。磁钢记录器用阿尔尼铁镍铅合金粉和钢粉的混合物以及绝缘漆压制而