

电力设备的防雷保护

苏联 А. И. 多尔根诺夫著

电力工业出版社

721186

电力设备的防雷保护

苏联 A. И. 多尔根诺夫著

王文端 解广润 王遵 刘繼译

3645850

电力工业出版社

內 容 提 要

本書敘述了高压电力設備防雷保护的基本物理原理、防雷保护裝置的構造和保护方法。

本書供从事于高压电力設備的設計、安裝和运行工作的工程技術人員參考。

А. И. ДОЛГИНОВ

ГРОЗОЗАЩИТА ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ УСТАНОВОК

ГОСЭНЕРГОИЗДАТ

МОСКВА

1954

电力設備的防雷保护

根据苏联国立动力出版社1954年莫斯科版翻譯

王文端 解广潤 王遼 刘繼譯

*

575D211

电力工業出版社出版(北京府右街26号)

北京市書刊出版營業證出字第082号

北京市印刷一厂排印 新华書店發行

*

780×1092 $\frac{1}{4}$ 开本 * 8号印張 * 190千字 * 定价(第10类)1.30元

1957年5月北京第1版

1957年5月北京第1次印刷(0001—5,100册)

序

蘇維埃動力工程的確定不移的原則——對國民經濟的連續不斷供電——要求電氣設備無事故運行。

高壓設備中電力網的無事故運行，主要決定於絕緣及作用於絕緣上的電壓。當電力系統正常運行時，各導電部分的絕緣是處於電力網相電壓的作用下的。這時，只有很小的電壓作用於變壓器及電機的繞圈間與層間絕緣上。但是由於各種原因，在電力系統中某些部分的電壓可能升高，而大大超過正常情況下的電壓。此種可能使絕緣發生危險的電壓升高，即稱為過電壓。

過電壓可分為內部過電壓與大氣過電壓。

當電力網中進行操作時，當發生不對稱短路而引起某種過渡狀態時，以及當弧光接地時，均可產生內部過電壓。內部過電壓的幅值用設備額定相電壓的倍數來表示，約為2.5—3.5倍。

電氣設備的絕緣永不是按照內部過電壓的作用來估計的。只有在絕緣的缺陷日益發展或者在非常少有的不良操作的情況下，內部過電壓才能引起設備故障。

雷雲放電落於電氣設備上時，可產生大氣過電壓。正如經驗證明，這種現象是很常見的。如無特殊保護時，由於雷雲放電能產生數百萬伏的過電壓電波。這種過電壓足以使任何額定電壓的設備發生絕緣閃絡或击穿。

在電力系統中，大氣過電壓以電波的形式傳播並侵襲於電力系統的所有設備，特別是電器和變壓器的卷繞。此時所產生的過渡過程，使電器和變壓器內部絕緣上所作用的電壓急劇升高。因此，防止大氣過電壓的保護，是電力系統安全運行不可缺少的要素。

在苏联正进行着防雷問題的有計劃的科学研究。比較年青的实用科学部門——“电气設備防雷保护”，已有很大的發展并已胜利完成其所面臨的任务。

苏联科学院动力研究所及全苏电工研究所，对雷电物理学及在防雷技术上的重要雷云放电参数进行了研究。

在1930—1940年这段时期內，在研究性實驗室工作人員及电力系统工作人員的合作下，曾創造了綫路及变电所防雷保护結綫方式，其中的主要部分目前仍在繼續沿用着。这些結綫方式已經可能大大地減少雷电事故。大型电力系統中所組織的防雷及絕緣科，在电力網防雷工作中起了显著的作用。

阿·阿·斯莫洛夫(А. А. Смуров)教授實驗室的工作人員，在創制第一批“射击式”避雷器和管型避雷器方面，以及在確定絕緣冲击强度方面作出了巨大的貢獻。在这个實驗室中，編制了高压电網防雷保护的第一个設計。

哈尔科夫电工学院(现为工学院)高压工程實驗室对接地裝置的冲击特性和电波在綫路上的衰減現象进行了研究。

战后，在防雷保护方面的工作已經达到了与苏联动力工業所面臨的新任务相适应的規模。

全苏电工研究所已經研究出取得避雷器所用新型閘性材料(維利特)的技术过程。

苏联变压器制造界，成功地解决了許多涉及雷电稳定性，冲击强度以及絕緣配合等不明確的問題。創造了变压器卷綫內瞬間过程的完善理論。由于莫斯科变压器厂及全苏电工研究所設計人員及研究人員的卓有成效的工作，已創造了高压耐雷变压器的結構，使变压器在簡單保护裝置的保护下，具有优良的冲击特性。

在阿·阿·高列夫(А. А. Горев)教授領導下，列宁格勒工学院在高压的电暈物理学、火花放电及瞬間过程等方面进行了广泛的研究工作。在莫·維·柯士欽科(М. В. Костенко)“大气过电压”(国立动力出版社1949年版)一書中所闡述的此等研究，为創造輸电綫路与变电所耐雷水平的新穎計算方法奠定了基础。

近几年来，在功勳科学技术工作者勒·依·西罗欽斯基(Л. И. Сиротинский)的领导下，在莫斯科动力学院进行了有关变电所与旋轉电机保护結綫方式，綫路耐雷水平計算方法，其中包括感应过电压的实驗研究以及冲击情况下接地裝置性能等多方面的研究工作。由于这些研究工作与实际工作是相結合的，就使其結果能广泛地应用于电站电工部的各种現行規程中。

在战后的数年来，苏联电站电工部的中央电工科学研究試驗所(ЦНИЭЛ)完成了关于綫路防雷保护的重要研究工作，他們对电力系统防雷工作运行指标的科學分析以及对开放性电力电弧的研究工作，在防雷保护方面已可成为重要的实用結果。根据这些研究工作所采取的决定是具有很大的經濟意义的，它不仅使保护費用低廉并且使运行簡便。綫路的自动重合閘在現今防雷保护的全面实际工作中已起着卓有成效的作用。正确地考虑木質絕緣的作用，便可以使我們避免利用管型避雷器来保护綫路，而采用管型避雷器保护是价昂的，而且对运行来說是相当煩难的。

电站和电工器材工業部已經有系統地總結了过电压保护科学研究工作的結果和运行中积累的經驗。

就問題的多面性、复杂性与新穎性來說，制訂“3—220千伏交流电气設備过电压保护导則”乃是最为龐大而艰鉅的工作。根据积累的理論、实驗与运行經驗，在30年代中期所頒佈的“导則”，已經有系統地被修改与深入鑽研，并且在提高电气設備运行可靠性上起了显著的作用。

由于將所研究的过电压保护結綫方式、方法与器具投入实际运行，雷害事故立即显著降低，而高压設備的损坏已經成为稀有現象。苏共第十九次代表大会关于苏联电气化的決議，在苏联电工界与动力工業面前提出了新的任务，其中也包括有高压技术方面的任务。特別是过电压保护器具及方法的合理化，使之在运行上与經濟上获得最大效果，有着很大的可能。

在本書下述各章中，讀者可以了解到电力設備防雷保护的基本物理原理与技术。

本書第一章論及雷云放电的性質問題。而第二与第三章則研討过电压保护設備的原理、結構及特性。

在第四与第五章中，在研究雷云放电、直击雷保护方法以及避雷器冲击特性的基础上，研究綫路与变电所的防雷保护。

在第六章中研討在架空綫路上运行的旋轉电机的保护結綫方式。在这方面，迄今尚未达到可以使电机与架空綫路相联而完全安全的成就。現有的各項建議多根据实验室內的研究，而根据运行数据則較少。

在第七章即結尾一章中，將研究防雷保护設備（主要是閘型与管型避雷器）的监护与試驗方法，同时也提出关于綫路与变电所雷害事故分析的建議。

附录 I 有补充一章的性質，大略介紹在綫路与結綫中瞬間过程的基本規律。此附录專为希望在防雷保护技术方面較為深入學習的讀者之用。

在附录 II 中，介紹有“电器”工厂以前所出品的閘型（契利特）避雷器的特性表。

在本書編写中，著者曾获得莫斯科电業管理局高压管理所絕緣与过电压保护科的工作同志們、火电設計院系統运行組的工作同志們以及莫斯科变压器厂实验室的工作同志們的宝贵意見。著者特向他們表示衷心的謝意。本書的計劃及其編写中的主要阶段均曾在全苏动力函授学院发电厂教研組进行討論。波·格·格魯金斯基（П. Г. Грудинский）教授曾對本書賜予經常的关怀，是著者深表感謝的。

目 录

序

第一章 雷电及其作用	7
1-1. 雷云放电的發展	7
1-2. 雷电流	11
1-3. 雷电流的作用	16
1-4. 雷云的活动特性	18
第二章 避雷針(綫)及接地裝置	21
2-1. 避雷針(綫)的保护作用及模拟方法	21
2-2. 避雷針的保护范围	22
2-3. 避雷針的構造	29
2-4. 避雷綫的保护范围	31
2-5. 避雷針(綫)的接地裝置	33
2-6. 計算用土壤电阻率	43
2-7. 輸电綫路接地裝置的合理型式	45
第三章 避雷器	47
3-1. 火花間隙的冲击特性	47
3-2. 閘型避雷器主要元件	53
3-3. 閘型避雷器的結構及特性	53
3-4. 閘型避雷器的安裝及裝置結構	69
3-5. 閘型避雷器動作記錄器	72
3-6. 保护变流器匝間絕緣的避雷器	73
3-7. 保护低压設備的避雷器	74
3-8. 管型避雷器主要元件	74
3-9. 管型避雷器的結構及特性	77
3-10. 管型避雷器的結構及型式的選擇	82
3-11. 管型避雷器的安裝	88
第四章 輸电綫路防止大气过电压的保护	92
4-1. 輸电綫路的絕緣	93
4-2. 輸电綫路上电力电弧的發生与燃点的条件	95
4-3. 輸电綫路上的大气过电压	100

4-4. 輸電綫路保护的一般原則	110
4-5. 154—220 千伏綫路的保护	115
4-6. 110 千伏綫路的保护	117
4-7. 35 千伏綫路的保护	120
4-8. 3—10 千伏綫路的保护	123
4-9. 輸電綫路交叉处的保护	125
4-10. 輸電綫路跨越桿塔及档距的保护	130
4-11. 避雷綫經火花間隙接地	131
第五章 变电所的保护	134
5-1. 变压器卷綫內的瞬变过程	134
5-2. 变压器的冲击强度	149
5-3. 变电所絕緣子的冲击强度	155
5-4. 用閘型避雷器保护变电所的絕緣	159
5-5. 35—220 千伏变电所对于从綫路襲来的过电压波的保护	163
5-6. 具有脆弱絕緣的 35—220 千伏变电所的保护	171
5-7. 35 千伏及以上电压等級变电所內 3—10 千伏配电装置的保护	172
5-8. 防止变电所遭受直击雷的保护	175
5-9. 配电网的保护	177
第六章 旋轉电机的保护	180
6-1. 旋轉电机的絕緣与卷綫內的过渡过程	181
6-2. 旋轉电机保护的设备及結綫	185
第七章 过电压保护装置的运行	191
7-1. 閘型避雷器的运行	192
7-2. 管型避雷器的运行	197
7-3. 避雷針及避雷器接地电阻的測量	199
7-4. 雷电事故及雷击的分析	202
附录 I 在綫路上和在結綫系統中的瞬变过程	203
Π-1. 無損長綫上波的过程	203
Π-2. 波在有損長綫路上的过程	210
Π-3. 在長綫路多导綫系統中波的过程	215
Π-4. 波在綫路結点的反射与折射	221
Π-5. 在有限長度的綫路上的多次反射	227
Π-6. 在接有避雷器的結綫中的过渡过程	230
附录 II “电器”工厂的閘型避雷器(契利特避雷器)的电气特性	236
参考文献	237

第一章 雷电及其作用

1-1. 雷云放电的发展

雷云的产生——这伟大的自然现象——从古至今是许多人的研究对象。雷云形成的近代的理论可用如下的情况来说明：在大气中，饱和的水蒸汽在强力的上升气流作用下，产生水滴的分裂过程。实验证明，在分裂过程中所形成的微细水滴是带负电的，而其余的大水滴则是带正电的(图1-1)。风将带负电的水滴吹散到相当远的距离，成为雷云的基本地体。带正电的水滴以雨的形式降落到地面，或保持悬浮状态，在雷云中形成正电荷的局部积聚。如此，由于异号电荷的机械分离以及在云的不同部分很多单极性体积电荷的集中而招致的云的电化是雷云现象的开始。

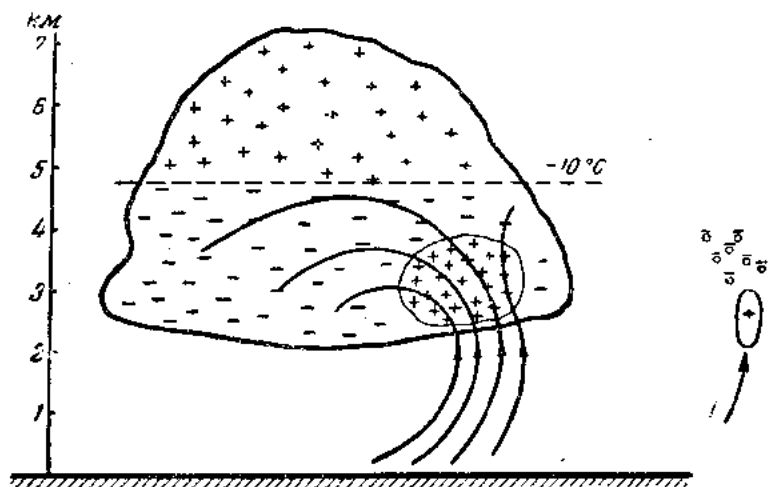


图 1-1 雷云中的电荷与气流

用球形探测器测量的结果表明，高于 -10° 等温线的云的上层聚集有正电荷。在这一层中，与冰结晶电化现象有关联的电荷分离的另一种机构在起作用。

下方主要帶負電荷的雷雲形成了巨大的電容器，它的另一“極板”是大地，在地表上感應有正電荷。這樣一個雷雲——大地所形成的電容器的平均電場強度很少超過100千伏/米。但是這一數字是指的均勻電場，在個別電荷密度大的地方，就構成了電暈放電的條件。尤其在大地上，可觀察到從尖端物體的閃光放電。在雷雲或大地的電場強度達到臨界值(25—30 千伏/厘米)的情況下，就造成閃電的發展條件。在所有雷雲放電形式中(雲間放電，球雷、念珠雷等)，最關重要的是雷雲與大地之間的放電所形成的綫型雷，因為使電力設備遭受損壞的絕大部分是與這種放電有關的。

雷雲放電的主要輪廓與發生於空氣中的兩導體電極間的長火花相同；和它尚有一系列的特點不同，這些特點與作為放電間隙的電極之一的雷雲的物理特性有關。

現在根據蘇聯科學院的動力研究所、全蘇電工學院和電力部動力系統中很多實驗室和現場的研究結果，我們確定了雷雲放電發展的物理景象及雷電的特性，這在電力設備防雷保護設計方面是具有重大意義的[文獻1, 2, 3]。

雷雲與大地之間的放電通常是從雷雲到大地發生微弱的閃光通道開始，以 10^7 — 10^8 厘米/秒(100—1000 公里/秒)的速度沖動地前進。這種預先放電叫做階段式先驅放電。每階段的平均長度約為50米。各脈沖間的間歇約為30—90微秒。每階段的擴展速度可達 10^9 厘米/秒。

圖 1-2 表示雷雲放電的一般發展情況。在上部(圖 1-2, α)是將放電攝於移動膠卷時的放電發展光學圖。階段先驅用先端帶閃光段的細綫段來表示，此等閃光段即相當於階段的擴展。先驅表示為分歧狀。通常只有一個先驅通路分枝達到大地。

當先驅達到大地時，即開始了主放電階段，后者正是肉眼所看到的雷雲放電本體。根據光學記錄，主放電成為強烈發光的波，由大地向雷雲前進(圖 1-2, α 中粗綫)。此發光的波稱為主通路。主放電的速度在大地附近等於 $1/3$ — $1/5$ 光速，相當於100—60

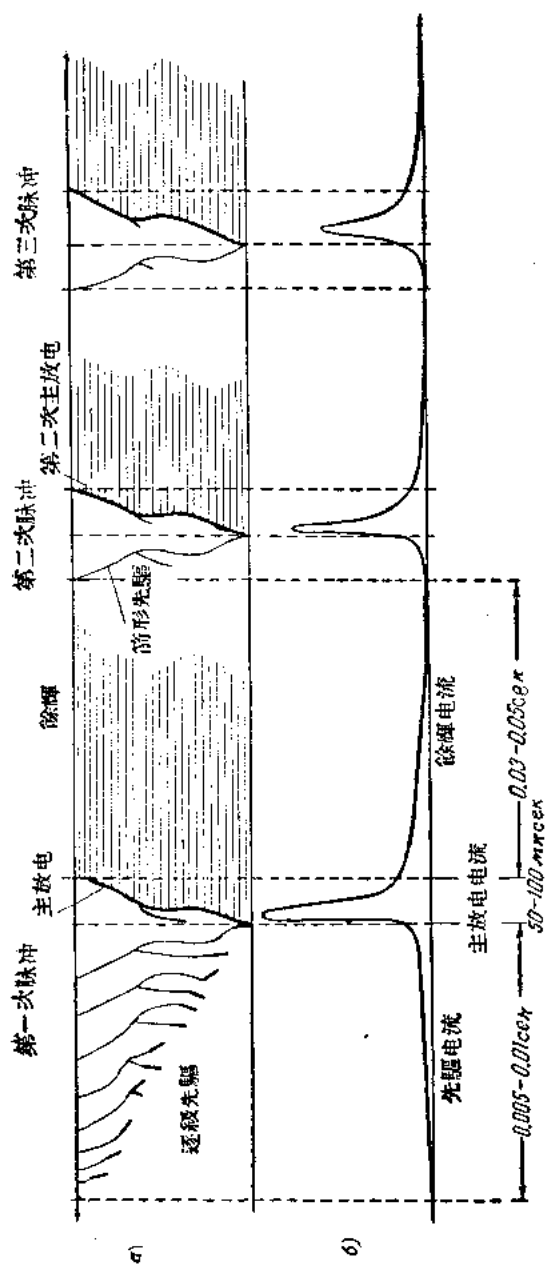


圖 1-2 雷電的發展
a—光学圖片; б—电流圖片。

米/微秒。离大地愈远，其發光的强度和放电的速度即愈降低。

强烈發光的波到达云以前主放电即告完成。后面的阶段(圖 1-2, α 中陰影範圍內)雷电通路的光亮显著降低，但所謂“余輝”的發光可延至千分之几秒至百分之几秒。一个脉冲的結構以余輝阶段而告完成。

雷云放电約有50%的情形是具有重复性的，一个放电平均包括3—4个脉冲。有时也观察到一些脉冲数目很多的放电。重复脉冲的先驅，即所謂矢形先驅，沒有阶段性，并以 10^8 — 10^9 厘米/秒的速度不間断地按第一个放电路徑前进。其余重复脉冲的構造与上述情况没有什么不同。

相当于雷云放电發展光学圖片的雷电流曲綫如圖 1-2, 6 所示。雷电先驅可粗略地以从雷云到大地下降导电通路来表示(圖 1-3)，該通路具有很大的負电荷密度(按單位長度而言)，后者以 τ 庫倫/米表示。可以假定，由于在先驅長度上的相当大的电位降，密度 τ 由雷云到大地亦行降低。

当先驅达到大地时，沿着它的通路由大地向雷云傳播相当于先驅負电荷入地的放电电波，傳播速度很大。此放电电波是主放电，它的特征是雷电通路强烈發光。放电电波造成通过雷电通路和被击物体的电流。这一电流称为雷电流，是与电力設備中过电压波的發生有关的。若以 v 米/秒代表放电电波(主放电)的速度，則雷电流可用下列簡單的关系式表示之。

$$i = \tau v. \quad (1-1)$$

因为主放电的速度很大，雷电流振幅可达数十甚至数百千安，但是，雷电流延續時間主要由于放电电波沿先驅通路傳播的時間来限制。

圖 1-4 表示雷电流示波圖[文献 2]。雷电流在几微秒內增長到振幅值。这一段电波称为波头。电压的下降部分称为波“尾”，長达数十微秒。

主放电引起雷电通道导电率的急剧上昇。云中的剩余电荷在主放电完成时通过这个通路。在这一阶段的电流(普通叫作余輝

电流)可达数百安,仅在罕有情况下可达数千安。开始雷云放电的那一部分雷云的主电荷被这个电流经过雷电通路带走。在余辉阶段中,雷电和云与大地间的直流电弧相似。这个电弧能维持百分之几秒。雷云放电的第一个脉冲以电弧的消灭而终止。

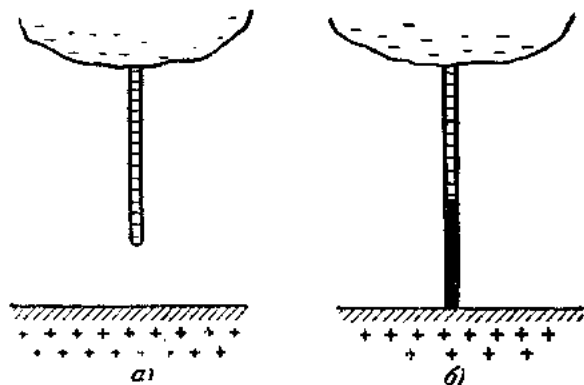


圖 1-3 雷电流的發展

a—在先驅阶段电荷的积聚; b—在主放电阶段电荷的中和。

上面我們已經指出,沿着第一次放电的通路常常有重复脉冲發生。很明显,重复脉冲的原因是在中和区域与相隣的电荷积聚区之間的雷云内部放电。一般重复脉冲的雷电流都比第一次脉冲的电流小。

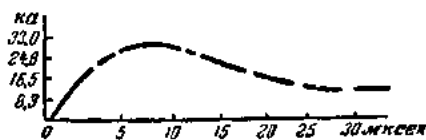


圖 1-4 雷电流示波圖

雷电放电的全部時間可达十分之几秒。雷电放电曾有持續到1.33秒的。雷所运送的总电荷普通在1—5庫倫范围以內。

在上述的情况中,先驅放电由雷云向大地發展。当雷向高层建筑物放电时,可能产生迎面先驅。先驅放电的負通道和正通道在地面上某一高度相接触,于是即开始主放电。

1-2. 雷 电 流

在电力設備耐雷性計算中,原始数值不是雷电压,而是雷电

流；因为雷电流是可以直接测得的。

一般采用磁鋼记录器测量雷电流的振幅，其原理可简述如下。在避雷针或输电线路杆塔上，用一个支持物装置一种由磁性材料做成的小棒，即所谓磁鋼记录器(如图 1-5 所示)。当雷电流

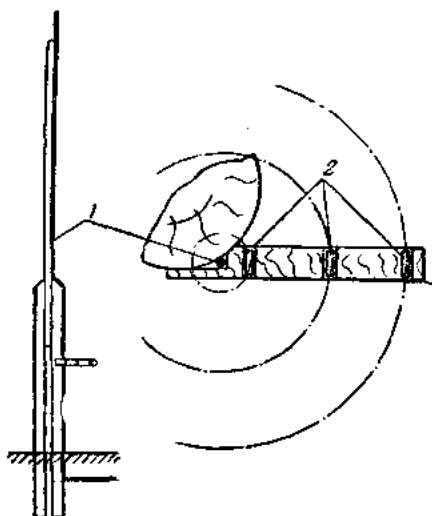


圖 1-5 避雷針上的磁鋼記錄器裝置

1—接地引下綫；2—磁鋼記錄器。

圖中點綫表示當有電流沿接地引下綫通過時所發生的磁力綫。

通過時，沿磁力綫所裝置的小棒即被磁化。在雷雨季末，便將此磁鋼記錄器取下，用檢磁表來測量它的磁化程度，再依校正曲綫即可確定其中流過的電流。磁鋼記錄器由鋁鎳合金粉末與鐵粉混合压制而成並加以絕緣漆，這樣可以保證很微小的渦流損失及高度的保磁力^①。

磁鋼記錄器是站電工部“配電盤”工廠所製造。其安裝及運行可依站電工部中央科學研究試驗所所編寫的規程執行^②。

利用磁鋼記錄器大批測量雷電流的波幅值，即可繪制全國各個不同地區的雷電流或然率曲綫並可確定某一數值的雷電流出現的頻度。根據研究也確定了雷電流與土壤電阻率 ρ 的關係。如所週知，此種關係與雷雲放電先驅過程的發展條件有關。當接近大地表面時的先驅放電電流由位移電流及土壤中的電導電流而閉合，如圖 1-6 中所示。由於土壤電阻率的增加，在大地中的電流滲入很深部分(此可由週知的集膚效果之公式了解)。在雷擊點附近的大地表面上電荷集結不多的情況下，便可轉入主放電階段，

① 所謂保磁力即為消除試品中的剩磁所需的去磁磁場強度。

② 蘇聯電站部 1951 年版“沖擊電流磁鋼記錄器的安裝及運行規程”。

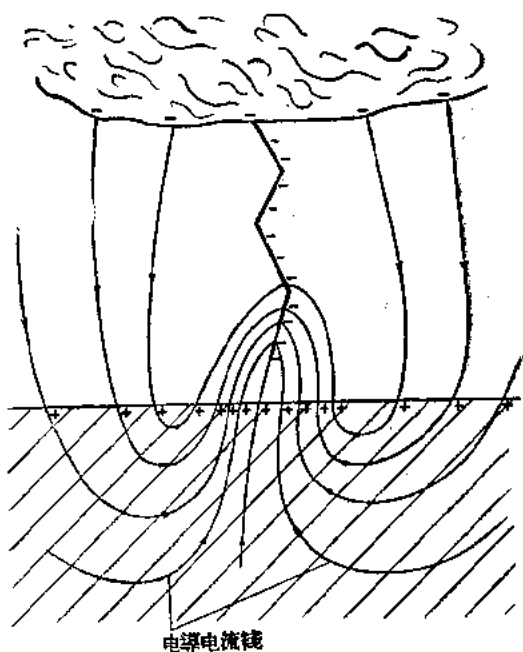


图 1-6 雷电发展先驱阶段中电荷流向雷击地点的情况

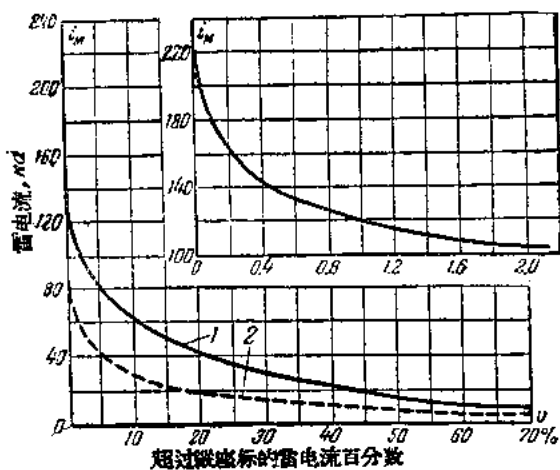


图 1-7 雷电流或然率曲线
1—在雷击点具有较小过渡阻抗的平原地区；2—在山岳地区。

这就使得主放电电流减低。雷电流与土壤电阻率之间的关系特别可以引起在平原地带的电流与山岳地带的电流显著不同[文献3]。

雷电流也和雷击点的散流电阻值 R 有直接关系。很自然, R 愈大, 雷电流则愈小。但对于在电力设备接地所采用的甚小阻抗的范围内, 测量数据并未指出雷电流与接地电阻 R 之间存在任何关系。因此, 普通认为在“良好接地的物体”中的雷电流(R 为数十欧以内者)与接地电阻的数值无关。

圖 1-7 所繪雷电流或然率曲綫, 是用磁鋼記錄器在平原地区实测的結果制成的(实綫)。

在横座标上标記有超过縱座标所示数值的电流或然率 v (以百分数表示)。此种雷电流或然率曲綫在耐雷性計算上用来非常方便, 例如, 用計算方法決定出, 高于50千安的雷电流將在輸电綫路上引起絕緣閃絡, 我們就可直接依圖 1-7 曲綫找出, 在100次綫路直击雷中, 有15次引起絕緣閃絡。

或然率曲綫指出, 最大多数的雷电流是在50千安之內。60—80千安的电流即很少被观察到, 而100千安以上的电流更是極为罕有, 因此, 只有在設計大容量电力设备时才有考虑的必要。

在山岳地区, 因其土壤电阻率甚大, 雷电流大为减小, 对于此等地区, 我們可以当作雷电流波幅降低到二分之一。圖 1-7 中的点綫曲綫即表示山岳地区的情况。

这个曲綫也是对于过渡阻抗約为数百欧的放电情况而言。例如, 此种情况可能在雷电对导綫放电时發生, 此时, 雷电流即被綫路波阻所限制。

按照雷云中电荷的分佈, 雷电流大多数是負極性的。同时也有較少見的正極性雷云放电, 有时具有甚大的雷电流。这可以用在雷云中正电荷的密度甚大以及正極性充电的先驅閃电路的扩展情况来解釋。

在耐雷性計算中, 雷电流昇高速度(以千安/微秒計算)是一項重要的特性。雷电流昇高速度(电流波头陡度)用安裝于避雷針上的小框来測量(圖1-8)。当雷电流通过避雷針时, 設其波头陡