



建筑电气实用技术丛书

建筑防雷 与接地技术

张小青 编著



中国电力出版社

www.cepp.com.cn

5
0

建筑防雷 与接地技术

张小青 编著



中国电力出版社

www.cepp.com.cn

内 容 提 要

本书介绍建筑物的防雷与接地技术,内容涉及雷电的基本知识、接地计算与测量和建筑物及其内部信息系统的防雷保护措施。全书共分雷云与雷电放电,雷电参数,雷电的破坏作用,防雷设备与防雷措施,接地电阻与接地体设置,接地电阻和土壤电阻率的测量,建筑物的防雷保护,建筑物内信息系统的雷电防护8章。

本书可供从事建筑电气设计、安装施工与技术开发工作的技术人员阅读,也可作为高等工科院校电气类有关专业学生的选修教材和参考书。

图书在版编目(CIP)数据

建筑防雷与接地技术/张小青编著.-北京:中国电力出版社,2002

(建筑电气实用技术丛书)

ISBN 7-5083-0953-7

I.建... II.张... III.①建筑物-防雷②建筑物-接地系统 IV.TU895

中国版本图书馆CIP数据核字(2002)第011370号

中国电力出版社出版、发行

(北京三里河路6号 100044 <http://www.cepp.com.cn>)

北京密云红光印刷厂印刷

各地新华书店经售

*

2003年6月第一版 2003年6月北京第一次印刷

787毫米×1092毫米 16开本 9印张 216千字

印数0001—5000册 定价16.00元

版 权 专 有 翻 印 必 究

(本书如有印装质量问题,我社发行部负责退换)



前 言

雷电是一种强烈的大气放电现象。雷电闪击能够对地面上的建筑物和设施产生严重的破坏作用，它是间接和直接造成许多灾害的根源之一。长期以来，关于建筑物的防雷保护问题一直是建筑电气工程中一个必须考虑的重要问题，随着现代建筑智能化趋势的迅猛发展，这一问题的重要性正日益显著。

从富兰克林发明避雷针至今，人们经过大量的观察、试验、研究和实践，已经逐步掌握了一套比较有效的建筑物防雷技术措施。基于这些技术措施，虽然还不能完全避免雷电的危害，但已可以用投资有限的防雷保护装置去尽可能地限制雷电的破坏作用，大幅度地减轻雷电的危害程度。近些年来，由于信息系统广泛配置于各类建筑物内，对于建筑物内信息系统的雷电防护又为建筑物防雷技术增加了新的内容。为了规范建筑物的防雷设计，我国已颁布了 GB 50057—1994《建筑物防雷设计规范》，对建筑物的防雷设计条款和防雷技术措施的实施要则作出了明确的规定。以这一规范为依据，本书对建筑物的防雷与接地技术进行较为详细的介绍。全书可分为三个主要部分：第一部分为雷电的基本知识，第二部分为接地技术，第三部分为建筑物及其内部信息系统的防雷保护措施。在选材上，本书着眼于我国建筑物防雷保护设计的实际现状，并适当体现当前国外的发展动向、吸收当前国内外出现的一些新技术。在叙述上，强调基本概念，突出重点问题，同时注意一定的内容覆盖面。在内容安排上，以工程实用性为主，兼顾一定的理论深度，力图在实践与理论的结合上对建筑物的防雷与接地技术进行较为系统的阐述。

本书内容反映了作者承担教育部“高等学校骨干教师资助计划”项目和北京自然科学基金项目所取得的研究结果，并吸取了作者近些年来从事防雷保护设计所积累的工作经验。

由于水平所限，书中谬误之处在所难免，谨此诚恳地希望读者给予批评指正。

编者

2003年1月

前言	
第一章 雷云与雷电放电	1
第一节 雷云的形成与雷云中电荷的分布	1
第二节 雷电放电	4
第三节 雷电放电的多重性与放电分类	7
第四节 雷击地面目标的选择性	12
第二章 雷电参数	14
第一节 雷电日、雷电小时和地面落雷密度	14
第二节 雷电流	16
第三节 雷击距	21
第四节 雷电放电的计算模型	23
第三章 雷电的破坏作用	26
第一节 雷电的热效应	26
第二节 雷电流的机械效应与冲击波效应	28
第三节 雷电的静电感应与电磁感应	30
第四节 暂态电位升高	35
第四章 防雷设备与防雷措施	39
第一节 避雷针与避雷线	39
第二节 避雷带与避雷网	41
第三节 保护范围的确定	44
第四节 避雷器	49
第五节 信息系统的防雷保护器件	53
第五章 接地电阻与接地体设置	58
第一节 接地体的工频接地电阻	58
第二节 冲击接地电阻	66
第三节 降低接地电阻	73
第四节 接地体的设置	79
第六章 接地电阻和土壤电阻率的测量	83
第一节 电流极与电压极的布置	83
第二节 电压表—电流表测量法	88
第三节 接地电阻测量仪器	92
第四节 土壤电阻率的测量	94

第七章 建筑物的防雷保护	97
第一节 建筑物的防雷分类	97
第二节 第一类防雷建筑物的防雷保护措施	99
第三节 第二类防雷建筑物的防雷保护措施	106
第四节 第三类防雷建筑物的防雷保护措施	113
第五节 其他防雷措施	116
第八章 建筑物内信息系统的雷电保护	118
第一节 电子设备对雷电冲击的脆弱性与防雷区的划分	118
第二节 屏蔽	122
第三节 均压措施	127
第四节 箝位保护	131
参考文献	136



雷云与雷电放电

雷电放电是由带电的雷云引起的。雷云带电的原因是复杂的，涉及到诸多因素，现已提出的有关解释也较多，但尚未获得一致共识。本章仅就目前已被较广泛引用的雷云带电理论加以讨论，并在此基础上介绍雷闪的主要类型和雷电放电的基本过程，以便为后续内容的叙述在基本概念上做必要的准备。

第一节

雷云的形成与雷云中电荷的分布

了解雷云的形成过程和雷云中电荷的大致分布状况是认识雷电放电现象的前提，有关这些问题，迄今虽已开展了大量的实际观测和研究工作，但还没有得到令人满意的解决办法。本节将根据现已被多数人所接受的研究结论来粗略地对这些问题进行讨论，以便为下面介绍雷电放电过程打下基础。

一、雷云

一般认为，雷云是在某些适当的气象和地理条件下，由强大的潮湿热气流不断上升进入稀薄大气层后冷凝的结果。在夏季，由于太阳的照射，使得地面上的水分部分地转化为蒸汽，同时地面本身也因吸收太阳的辐射热量而温度升高，这种晒热的地面又将进一步加热地面附近的暖湿空气。空气受热后发生膨胀，其密度减小，压强也减小，因此热空气就会上升，从而形成上升的热气流。太阳辐射几乎不能直接使空气变热，热气流每上升1km，其温度约下降10℃。当热气流上升到高空稀薄大气层遇到这里的冷空气时，气流团中的水蒸气就会冷凝并结成小水滴，形成热雷云，如图1-1所示。在一定的地形条件下，往往会促成热雷云的形成，如图1-2所示。在夏季日照期间，山脚处与山顶处的空气之间、较低山坡附近与较高山梁附近的空气之间常存在着较大的温差，山体低处的温度较高，而山体高处的空气温度低，这样就会出现低处热空气上升，高处冷空气沿山体斜面下降的现象。这种对流过程将产生上升热气流，从而形成热雷云。除此之外，当冷气团或暖气团水平移动时，在其前锋



图 1-1 热雷云形成示意

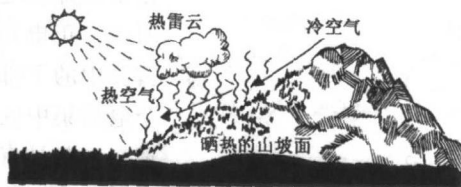


图 1-2 有利地形促成热雷云的形成

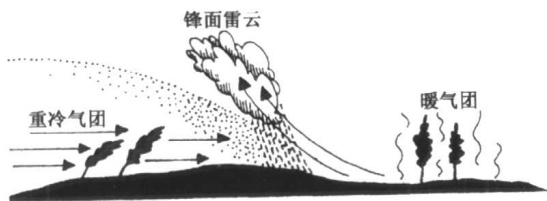


图 1-3 锋面雷云形成示意

云中的水滴在强气流作用下会被吹裂，较大的残滴带正电荷，较小的残滴带负电荷。由于较小的残滴质量轻，会被气流携带走，于是在云的各个部分可能会出现不同的电荷。

(二) 感应起电效应

大量测试结果表明，地球带负电，其电荷量约为 50 万 C，而在地球的上空存在着一个带正电荷的电离层，于是在电离层与地面之间就形成了一个电力线指向地面的大气电场。在这一大气电场的作用下，云中的水滴将被感应极化，其上部出现负电荷，下部出现正电荷。同时，大气层中存在着射线，如地壳中放射性物质发出的射线和宇宙射线等，在这些射线的作用下，空气会发生电离，产生正、负离子。极化后的水滴在重力作用下向下坠落，在下落过程中与空气中的离子相遇，水滴下部将俘获负离子，而正离子则被排斥而上升，这样整个水滴就带上了负电荷，如图 1-4 所示。另外，极化水滴还会与云中的冰晶粒和雹粒等云粒子发生碰撞，这种碰撞使一部分云粒子被极化水滴吸附，另一部分云粒子则被反弹回去。被反弹回去的云粒子将带走极化水滴下部的部分正电荷，使水滴带负电，如图 1-5 所示。

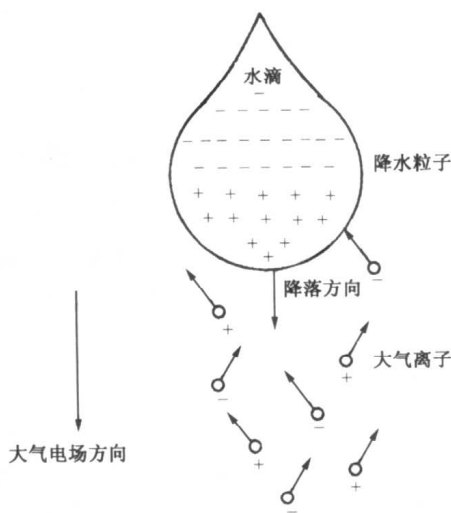


图 1-4 水滴的带电机制

(三) 水滴结冰效应

实验证实，水在结冰时会带正电荷，而未结冰的水带负电荷。因此，在云中的冰晶粒区中，当上升气流将冰晶粒上面的水分带走后，就会产生电荷分离，使冰晶粒带上正电荷。

二、雷云中的电荷分布

在一般情况下，雷云内部的各个部分都会出现电荷，有的部分带正电荷，有的部分带负电荷，电荷分布很不规则，且分布的随机性很大。但是，如果从远处看雷云的外部，可以把

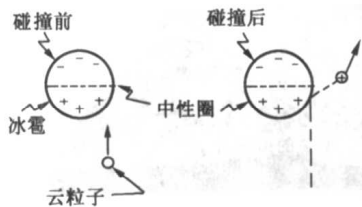


图 1-5 水滴与云粒子的碰撞带电

雷云内部的电荷分布宏观地看成是三个电荷集中区，如图 1-6 所示，正电荷集中区 P 在雷云中的上部，负电荷集中区 N 在雷云中的下部，弱正电荷集中区 P' 在雷云的底部。关于这三个电荷集中区的高度和电荷量，国外研究者进行过多次探测，现将一些具有代表性的探测数据示于表 1-1。由该表可见，在不同国家探测到的雷云内部电荷集中区分布数据是存在差异

的，我国目前尚缺乏这方面的探测数据。需要说明的是图 1-6

所示的雷云内部电荷分布模式仅仅是能与较多探测结果相符合的外部等效模式，并不是一种普遍适用的模式。在某些情况下，国外研究者曾探测到雷云内部主要负电荷集中区中心在上部，而主要正电荷集中区中心在下部的分布特例。实际上，雷云内部的电荷分布远不是均匀集中的，常会形成很多个电荷密集中心，每个电荷密集中心的电荷量约为 $0.1 \sim 10\text{C}$ ，而一大块雷云的整体净电荷可达上百库仑。雷云内部的平均电场强度约为 $1.5 \times 10^5\text{V/m}$ ，在雷击时可达 $3.5 \times 10^5\text{V/m}$ ，雷云下方地面上的场强一般为 $(1.5 \sim 4.5) \times 10^4\text{V/m}$ ，最大可达 $1.5 \times 10^5\text{V/m}$ 。由图 1-6 可见，如果从雷云下方观察雷云，雷云好像是带负电荷的，它在云与地之间产生电场的方向与晴天大气电场的方向是

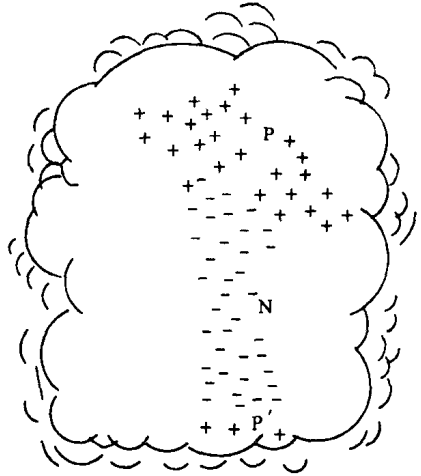


图 1-6 雷云内部的三个电荷集中区

相反的。因此，在雷暴到来时，常会观察到大气中电场会突然改变方向，如图 1-7 所示。在晴天时，大气电场方向是上正下负，指向地面，见图 1-7 (a)。在出现雷云时，由于雷云自身负电荷及其在地面上的感应作用，使云与地之间的电场突然改变方向，变为上负下正；指向雷云，见图 1-7 (b)。当雷云发展到成熟阶段时，云与地之间的这种反向的电场强度将进一步增大，这就为雷云向地面或地面目标的放电创造了条件，如图 1-7 (c) 所示。

表 1-1 雷云内部电荷集中区分布的实测数据

电荷集中区类别	P	N	P'	探测国别	探测者	探测年份
平均高度 (km)	10	5	2	南非	Malan	1952, 1963
电荷量 (C)	+ 40	- 40	+ 10			
平均高度 (km)	8.5	6	3	日本	Huzita Ogawa	1976
电荷量 (C)	+ 120	- 120	+ 24			
平均高度 (km)	6	3	1.5	英国	Winn 等	1981
电荷量 (C)	24	- 20	+ 4			

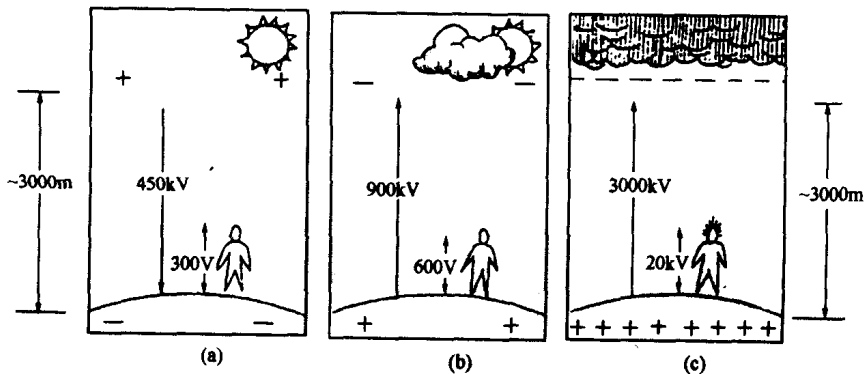


图 1-7 雷暴到来时云地间电场及电位差变化

(a) 晴天大气电场；(b) 雷云出现时大气电场反向；(c) 雷云前反向大气电场增强



第二节

雷电放电

大多数雷电放电发生在雷云之间（或雷云内部），当两块雷云的异性电荷集中区之间的电场强度超过这里的空气绝缘强度时，雷云之间就会发生放电。雷云之间的放电对地面建筑物等设施无直接危害，仅对以电磁波工作的通信等系统有一定的影响。雷云对地的放电虽然只占少数，但这种放电一旦发生，就会对地面建筑物等设施直接产生严重危害，因此在防雷保护研究中，这类放电一直倍受关注。

一、雷云对地放电过程

雷云对地放电过程可分为三个阶段，即先导放电阶段、回击阶段和余辉阶段。现分别加以介绍。

（一）先导放电阶段

带电雷云在地面上空形成后，由于静电感应的作用，雷云电荷在地面上感应出反极性的电荷。雷云下部的电荷大多数为负极性的，因此在地面上感应出的电荷多为正极性的，如图 1-8（a）所示。随着雷云的发展，在其内部负电荷集中区 N 与弱正电荷集中区 P' 之间的电场强度将达到足够高的数值（超过 10^6V/m ），能够将这里的水滴和冰晶粒之间的空气击穿，使得这两个电荷集中区间首先发生放电，如图 1-8（b）所示。这一内部放电所形成的流注（由一系列再生电子崩构成的游离波）向下方延伸，为雷云对地放电打下基础。当雷云发展到使云与地之间的局部空间场强超过空气的绝缘强度 [约 $(2.5 \sim 3) \times 10^6 \text{V/m}$] 时，局部空气的游离将会发生，使得这里的空气由原来的绝缘状态转变为导电状态。空气的游离从雷云底部开始，使流注越过雷云底部边缘向下发展，各流注的发展将形成一种向下运动的热游离通道，即下行先导，如图 1-8（c）所示。在先导的头部实际上是由许多流注组成的游离区，先导放电就是依靠其头部的流注放电来维持的。估计先导前端的对地电位可高达 $10 \sim 100 \text{MV}$ ，这种流注区的大小与雷云及先导通道中所带电荷的多少有关，它的位置对地面或地面物体上的落雷点（雷击点）将起着决定性的作用。下行先导放电并不是连续进行的，不能一次性贯通雷云与地之间的全部空间，而是以阶梯的方式分级发展。每一段先导的发展速度很快，平均约为 10^7m/s ，但它在发展到一定长度（平均约 50m ）后就要停歇一段时间（约 $30 \sim 90 \mu\text{s}$ ），然后再继续发展，所以先导放电

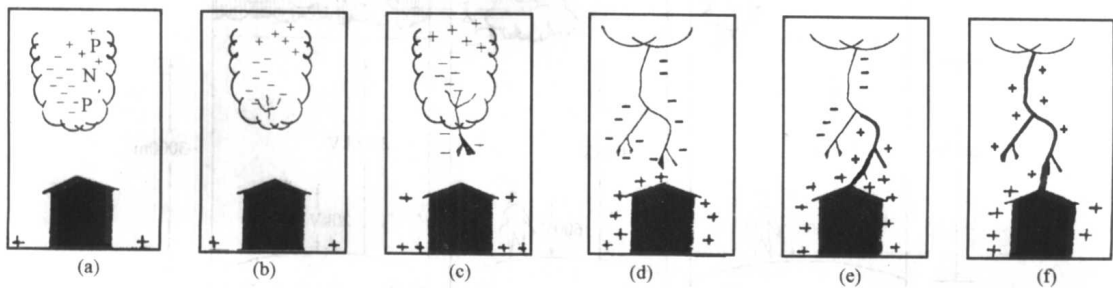


图 1-8 雷云对地的放电过程

(a) 放电前雷云中电荷结构；(b) 雷云内 N 与 P' 先放电击穿；(c) 雷云底部形成下行先导；(d) 下行先到达地面物体；(e) 回击开始；(f) 回击发展到云端

发展的总体速度相对比较慢，约为 $(1 \sim 2) \times 10^5 \text{m/s}$ 。由于先导通道具有较高的电导率，雷云中的负电荷将沿先导通道分布，并随先导的发展而不断向下伸展，相应地，在地面及地面物体上感应出的正电荷也逐渐增多。使得先导通道前端与地面之间的电场强度也逐渐增大，这将会进一步促进下行先导向地面的发展。

(二) 回击阶段

下行先导通道发展到临近地面时，由于其头部与地面物体之间的距离很短，场强可达到非常高的数值，使得这里的空气急剧游离，从而把先导通道中的负电荷与地面或地面物体上的正电荷接通，如图 1-8 (d) 所示。正、负电荷将分别向上和向下运动，去中和各自异性电荷，于是就开始了回击阶段。回击也常称为主放电，如图 1-8 (e) 所示。回击阶段所需的时间极短，只有 $50 \sim 100 \mu\text{s}$ ，其发展速度也比先导放电快得多，约为 $(2 \sim 15) \times 10^7 \text{m/s}$ 。由回击所产生的雷电流很大，可达几百千安。在回击阶段，由于电荷的强烈中和以及放电通道中电流很大，使得通道的温度迅速升高，发出耀眼的闪光，这就是人们所见到的闪电。同时，由于放电通道的高温使周围的空气骤然膨胀，以及在放电火花作用下使空气分解，并产生瓦斯爆炸，回击时将发出强大的雷鸣，这也就是人们在看到闪电后所听到的震耳欲聋的雷声。习惯上，把携带负电荷的下行先导称为下行负先导，而把携带正电荷的下行先导称为下行正先导。当下部为正电荷集中区的雷云对地放电时，就会出现下行正先导，这将在后面进行讨论。

(三) 余辉阶段

回击阶段在回击到达雷云端时就结束，如图 1-8 (f) 所示。然后，雷云中已放电的电荷区中的残余电荷经过主放电通道流向大地，这时通道中尚维持着一定的辉光，故称为余辉阶段。回击结束后，通道中的电导率大为减小，电荷运动较慢，所以在余辉阶段所产生的雷电流不大，约为 $100 \sim 1000 \text{A}$ ，但其持续时间却很长，可达 $0.03 \sim 0.05 \text{s}$ 。

闪电路径通常表现为分支状，如图 1-9 所示。这是因为放电常常是沿空气游离最强、电导率最高的路径发展，受大气随机条件和地面引雷条件的影响，各闪电分支中一般只有一条能够到达地面，其余分支将在发展过程中自行停止。同时，闪电路径常呈现为曲线状，而不是走垂直向下的直线。

以上讨论的是雷云中负电荷对地放电的过程，雷云中正电荷对地的放电过程与上述过程基本相同，区别是其放电过程中出现的是下行正先导。下行正先导的阶梯式分级发展不明显，放电过程中所产生的雷电流将明显大于雷云中负电荷对地放电所产生的雷电流，其幅值高

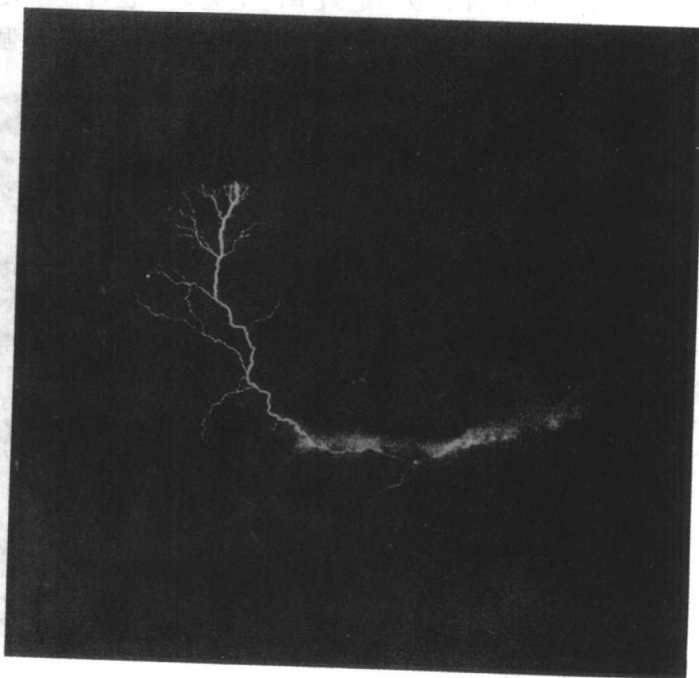


图 1-9 闪电路径的分支状

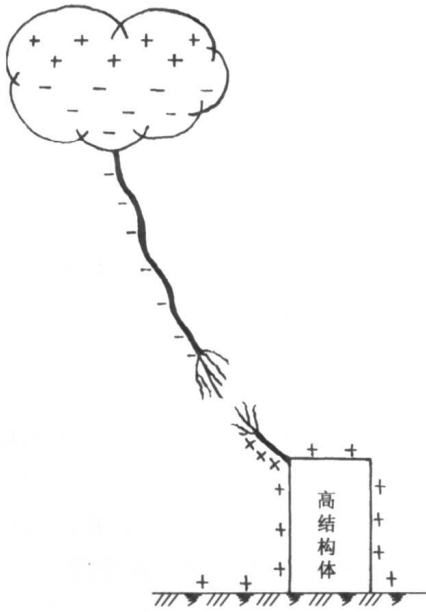


图 1-10 雷击高结构体

达 200 ~ 300kA。

雷云对地放电通常也称为地闪或雷击，并常把雷云中负电荷对地放电称为负极性雷或负雷，而把雷云中正电荷对地放电称为正极性雷或正雷。根据国内外的长期观测，负雷占绝大多数。

二、雷云对地面上高结构体的放电

在科技高度发展的今天，地面上耸立起的高结构体日益增多，如各种高层建筑物和发射塔等，雷云对这些高结构体的放电又具有某些新的特点，如图 1-10 所示。当下行负先导发展到接近于地面高结构体的顶端时，由于先导头部与高结构体顶端之间的电场强度急剧增大，同时又由于高结构体顶端的尖劈部位对电场的畸变作用，在尖劈部位附近的空气将会发生强烈游离，出现携带正电荷向上发展的先导，即上行正先导。当这一上行正先导与来自雷云的下行负先导相遇时，就开始了回击（主放电）。这里的上行正先导的物理特征与下行负先导类似，只是两者所携来的电荷极性相反。

相仿地，如果是雷云中正电荷对高结构体放电，则将会出现来自雷云的下行正先导和来自高结构体顶端的上行负先导。观察表明，无论是上行正先导还是上行负先导，都有可能一直上升到雷云内，当上行先导进入雷云内部后碰不到电荷集中区时，回击就不会发生。因为雷云的导电性能不如大地那样好，难以在很短的时间内产生中和上行先导电荷所必需的足够大的电荷流，所以只能出现缓慢的放电过程。事实上，即使是下行先导，当它触及到地面上电阻很大的岩石或高电阻率的土壤时，也可能不发生回击。

在一定高度和电荷量的雷云下方，地面上的电场强度 E_0 是个可确定的量，地面上高结

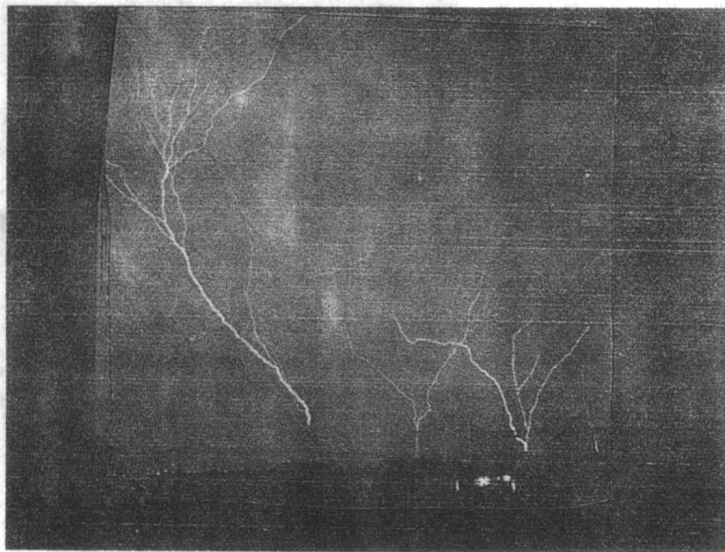


图 1-11 上行雷闪实拍照片

构体顶端的场强则随结构体高度 h 体增加而增大，所以结构体越高，其顶端尖劈部位发生上行先导的可能性就越大。高结构体发生上行先导的条件可按表 1-2 来估计。在地面高结构体尖劈部位首先出现上行先导的雷电放电有时也称为上行雷。图 1-11 给出了一幅外国研究者实拍到的上行雷照片，其中三条上行雷闪通道分别发自三座高 300m 的发射塔顶端。实际上，研究上行雷的放电特征对于目前广泛兴建的高层建筑物的防雷保护来说具有重要意义。

表 1-2 高结构体可能发生上行先导的条件

高结构体高度 h (m)	50	100	200	300	500
地面附近雷云电场 E_0 (kV/m)	37	22	13.5	10	7

第三节

雷电放电的多重性与放电分类

雷云对大地的放电常常不是一次性完成的，而是可能会出现多次重复放电的过程，这就是雷电放电的多重性。在讨论了这种多重性后，本节将进一步对雷电放电进行归类。

一、雷电放电的多重性

实际观察表明，雷云对地的放电可能不止仅进行一次就结束，约有 50% 的雷电放电平均包含 2~3 次先导——回击放电过程，最多的曾有过反复 40 次放电过程的观察记录。图 1-12 给出了一个三重雷电放电的示意。由大量的实测结果证实，第一次放电时的下行先导是阶梯式分级发展的，而第二次及以后各次放电的下行先导一般都是连续发展的（无停歇现象）。第一次放电产生的雷电流幅值最高，而第二次及以后的放电所产生的雷电流幅值则比较低，但其电流波形的上升沿却相当陡。后续放电的雷电流波形上升沿斜率大，所产生的电磁感应效应是颇为严重的，这对信息系统的安全可靠运行将会构成威胁，因此在建筑物内信息设备的防雷保护设计中常需要特别关注后续放电雷电流的作用。图 1-13 为一幅用高速扫描摄像机拍下的 12 重雷电放电的照片。它采用时间展开方式将 12 次放电自左向右依次展开，最左边的为第一次放电雷闪通道，最右边的为最后一次通道。关于雷电放电多重性的原因可用图 1-14 来粗略地加以说明。由于雷云在宏观上是一大块介质，其内部的电荷是不容

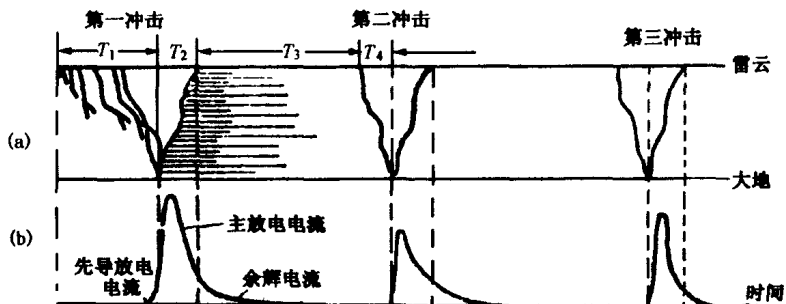


图 1-12 三重雷电放电示意

(a) 放电过程；(b) 雷电流

T_1 —第一次先导放电发展时间， $(1 \sim 2) \times 10^4 \mu\text{s}$ ； T_2 —第一次主放电时间， $50 \sim 100 \mu\text{s}$ ； T_3 —两次冲击的间隔时间， $0.3 \sim 0.5\text{s}$ ；

T_4 —第二次先导放电时间， $(1 \sim 3) \times 10^3 \mu\text{s}$ ，（雷云与大地距离定约 2km）

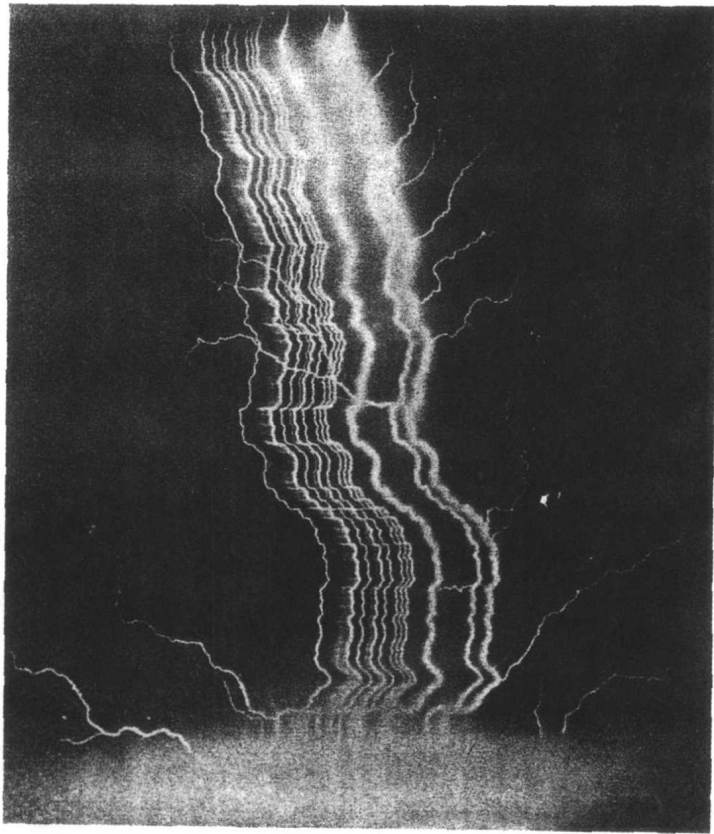


图 1-13 一个 12 重雷电放电的观察记录

易运动的。在雷云带电后，其内部同极性电荷实际上并不像图 1-6 所示的那样集中地分布，而是会形成多个相互隔离的电荷的中心。为了讨论上的简单起见，图 1-14 中仅画出了两个负电荷的中心。在第一次放电结束时，主要是泄放掉了第一个电荷中心的负电荷，如图 1-14 (a)、(b) 和 (c) 所示。此后，由于第一个电荷中心的负电荷已消失，使得第二个电荷中心与原第一个中心之间的场强增大很多，于是在雷云内部，第二个电荷中心与原第一个中心之间将产生流注式放电，如图 1-14 (d) 所示，这就为第二次放电搭起了桥梁。由于此时的第一次放电通道仍保持着高于周围空气的电导率，第二个电荷中心的负电荷将能借助于两个中心之间的流注放电通道和第一次放电的下行通道，以更快的速度进行第二次放电，如图 1-14 (e) 和 (f) 所示。依此类推，当雷云中含有多个电荷中心时，则第三个及其他的电荷中心将会以类似于第二个电荷中心的方式进行放电，每两次放电之间的时间间隔约为 $0.6\text{ms} \sim 0.8\text{s}$ ，平均值为 65ms ，这样就形成了多次重复的雷电放电。

二、雷电放电的分类

按雷云放电电荷极性、先导极性和有无回击等情况来划分，可以大致将雷电放电分为 8 类，如图 1-15 所示。在该图中，将雷电流的正参考方向取为从雷云指向地面的方向，字母 a 和 b 分别代表无回击和有回击的放电，l 和 r 分别代表先导和回击，V 代表发展方向。现就这 8 种类型的放电逐一加以说明。

(1) 1a 类型放电始于雷云负电荷集中区向下发展的下行负先导，这常发生于地面上没

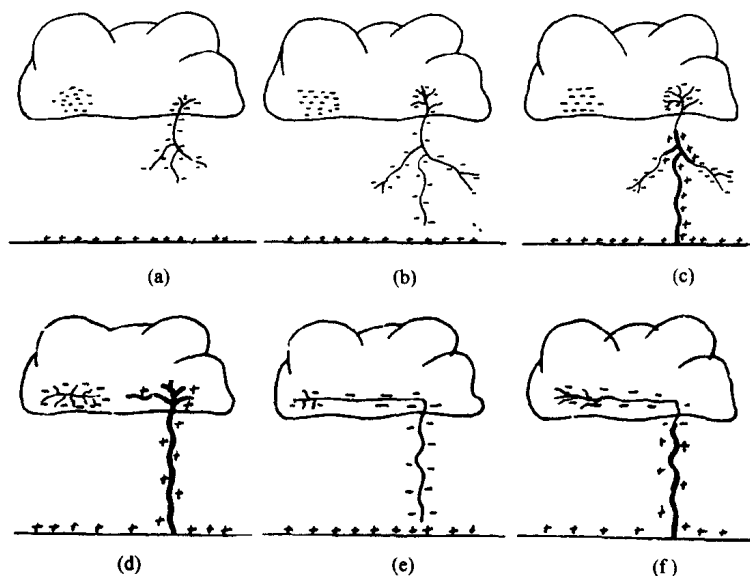


图 1-14 多重雷电放电发展示意

(a) 第一个电荷中心开始先导放电；(b) 第一个电荷中心先导到达地面；(c) 第一个电荷中心的回击过程；(d) 两个电荷中心之间开始放电；(e) 第二个电荷中心借助第一个电荷中心的通道放电；(f) 第二个电荷中心的回击过程

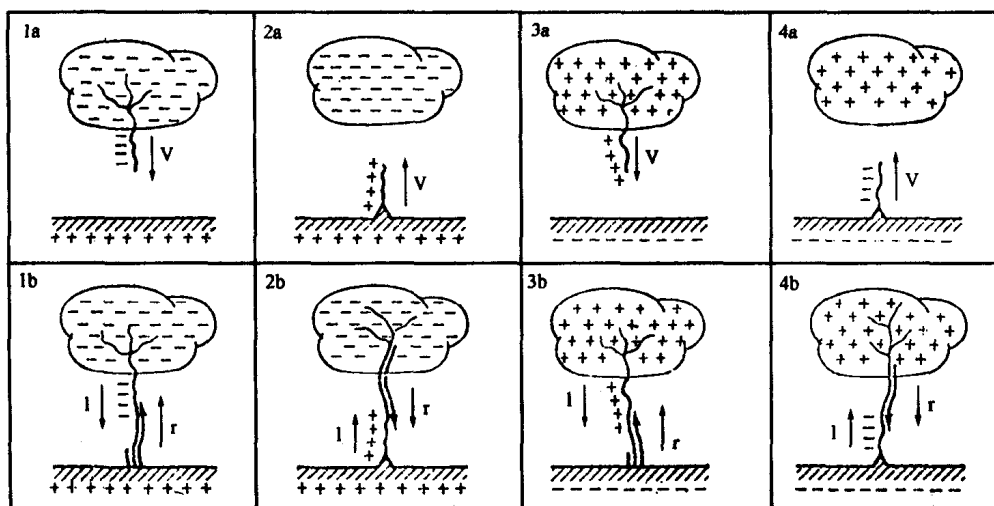


图 1-15 雷电放电的类型

有突出高结构体的开阔地带。由于下行先导不落地，无回击发生，放电只能在空中或雷云内进行，并可在地中形成位移电流。

(2) 1b 类型放电的负下行先导落地，产生向上发展的回击，回击使先导和雷云中的部分电荷泄入大地，雷电流方向为负。这种类型的放电可重复发生。

(3) 2a 类型放电始于地面上高耸的高结构体，如发射塔和高层建筑物顶端，然后出现向雷云发展的上行先导。



(4) 2b 类型放电的开始阶段与 2a 类型相同, 但随后发生了回击, 放电产生的雷电流为负。

(5) 3a 类型放电与 1a 类型类似, 只是雷云内正电荷集中区发生放电, 下行正先导不落地, 放电只能在雷云内或空中进行, 并可在地中形成位移电流。

(6) 3b 类型放电的下行正先导落地, 产生向上回击, 泄放掉雷云内的部分电荷, 所产生的雷电流为正。

(7) 4a 类型的放电由雷云内的正电荷引起, 上行负先导始于地面上高耸的高结构体顶端, 流入地中的电流为正。

(8) 4b 类型放电与 4a 类型相似, 但上行负先导在 $4 \sim 25\text{ms}$ 后就会紧跟着产生一个极其强烈的回击, 所产生的雷电流为正。

三、雷闪的形态

雷闪的闪光形态常有线状、片状、球状和联珠状等, 相应地, 从外观形态上来分, 就可以将雷闪分为线状雷、片状雷、球雷和联珠雷等。在这些形态的雷闪中, 线状雷是最为普遍发生的一种, 而其他几种形态的雷闪均属于非常见雷闪, 一般不容易被观察到。现行的防雷措施主要是针对线状雷的, 以上所介绍的雷电放电也均属于线状雷。典型线状雷的闪电形态见图 1-9 和图 1-13。

片状雷只是偶然在云层中观察到的, 关于这种雷闪的放电特性, 现在尚未见有较为详细的观察结果报道。

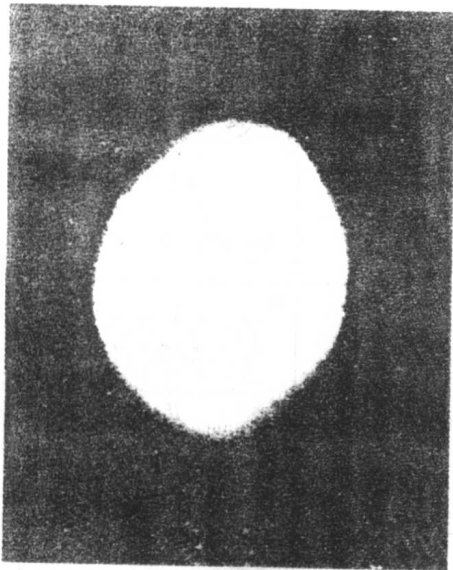


图 1-16 球雷的实拍照片

球雷的出现几率与线状雷相比虽然很小, 据北京地区观察统计, 它仅占雷闪总数的 8%, 但它具有许多与线状雷明显不同的特殊性质, 多年来, 人们对它一直抱有浓厚的兴趣, 并在国内外陆续有一些关于球雷特性的观察和研究结果的报道。就迄今已公布的资料来看, 对于球雷外部现象的认识, 现已基本取得共识。球雷是一种橙色或红色的发光球体, 图 1-16 给出了一张球雷的实拍照片。当球雷以特别明亮的眩目强光出现时, 也可以看到它带有黄色和绿色。球雷存在的时间通常为 $1 \sim 5\text{s}$, 但也观察到有些大的球雷在数分钟后才消失。球雷的直径通常为 $10 \sim 100\text{cm}$, 平均为 25cm , 国外报道的极端情况有 0.5m 至数米的。在天空观察到的球雷一般先是直接下降, 如图 1-17 所示, 当它下降到临近地面时就突然改变运动方向, 沿地面以 $1 \sim 2\text{m/s}$ 的速度移动, 也有少数球雷是贴地面滚动的, 其移动的轨迹为一弯曲路径, 如图 1-18 所示。球雷可以无声地消失, 但大多数球雷在消失时常伴随着爆炸声, 并在爆炸时散发出臭氧、二氧化碳和硫磺等气味。球雷能够从门、窗、烟囱和孔洞处钻进建筑物内, 造成破坏作用。由于现行的建筑物防雷措施主要是针对线状雷来设置的, 而对于球雷的防护尚无规范性的措施。对于这一点, 在今后应引起重视。关于球雷的发生机理, 目前已提出了多种理论模型, 但这些理论模型在球雷的结构、组成和能源等基本问题上



图 1-17 在空中下降的球雷

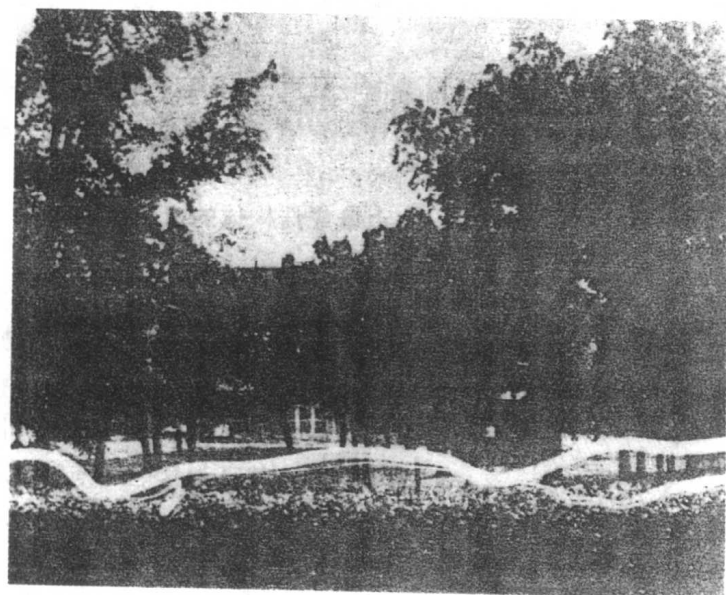


图 1-18 球雷在地面上移动的弯曲路径