

风力发电技术丛书

风电机组防雷与接地

张小青 编著



中国电力出版社

www.cepp.com.cn

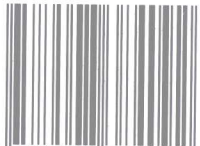
风电机组防雷与接地

本书参照国际电工委员会推荐标准《风发电系统—第24部分：防雷保护》（IEC TR 61400—24），注重反映近年来国内外出现的防护技术、设计方法和相关科研成果。在内容体系的安排上，本书立足于工程实用性，同时兼顾一定的理论深度，体现出内容的完整性和知识覆盖面，力图在工程技术与基本方法的结合上系统地讨论风电机组的防雷与接地问题。

本书共分为六章，内容涉及雷电放电的基本原理、雷击破坏机制、风电机组直接雷击防护、机组雷电电涌防护、接地计算与设计分析和接地指标测试等。

本书可供从事风电设计、安装、技术开发、运行管理等工作的技术人员阅读，也可作为高等院校电气工程类相关专业学生的选修教材和教学参考书。

ISBN 978-7-5083-8409-2



9 787508 384092 >

定价：30.00 元

上架建议：电力工程/新能源发电

风力发电技术丛书

风电机组防雷与接地

张小青 编著



中国电力出版社

www.cepp.com.cn

内 容 提 要

本书参照国际电工委员会推荐标准《风电发电系统—第 24 部分：防雷保护》(IEC TR 61400—24)，注重反映近年来国内外出现的防护技术、设计方法和相关科研成果。在内容体系的安排上，本书立足于工程实用性，同时兼顾一定的理论深度，体现出内容的完整性和知识覆盖面，力图在工程技术与基本方法的结合上系统地讨论风电机组的防雷与接地问题。

本书共分为六章，内容涉及雷电放电的基本原理、雷击破坏机制、风电机组直接雷击防护、机组雷电电涌防护、接地计算与设计分析和接地指标测试等。

本书可供从事风电设计、安装、技术开发、运行管理等工作的技术人员阅读，也可作为高等院校电气工程类相关专业学生的选修教材和教学参考书。

图书在版编目 (CIP) 数据

风电机组防雷与接地/张小青编著. —北京：中国电力出版社，
2009

(风力发电技术丛书)

ISBN 978 - 7 - 5083 - 8409 - 2

I. 风… II. 张… III. ①风力发电 - 发电机 - 机组 - 防雷
②风力发电 - 发电机 - 机组 - 接地保护装置 IV. TM614 TM862

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2009) 第 016750 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>)

航远印刷有限公司印刷

各地新华书店经售

*

2009 年 7 月第一版 2009 年 7 月北京第一次印刷

710 毫米×980 毫米 16 开本 14.5 印张 255 千字

印数 0001—3000 册 定价 30.00 元

敬告读者

本书封面贴有防伪标签，加热后中心图案消失
本书如有印装质量问题，我社发行部负责退换

版权专有 翻印必究

前 言

雷电是一种强烈的大气长距离放电现象，它能够直接或间接地对地面诸多设施造成灾害。作为地面上高耸突出的物体，风电机组长期暴露在大气环境中，且多位于旷野地带，很容易遭受雷击。在发生雷击时，由雷电放电所释放出的巨大能量会对风电机组的桨叶、传动装置、发变电设备和控制系统造成严重破坏，导致机组停运事故，引起经济损失。

随着风电机组单机容量的增大和机身高度的增加，以及大量先进的微电子电路配备于机组内，大容量机组雷电灾害的严重性正日趋显著，并已受到颇为广泛的关注。为了维护风电机组的安全正常运行，提高电能供应的可靠性，就需要对机组采取防雷措施。原则上讲，风电机组的防雷措施主要落实在直接雷击保护、雷电电涌防护、雷电电磁脉冲防护和接地等方面，且各个方面是相互密切联系的，属于一个系统性的整体。但迄今为止，国内外在风电机组防雷措施的实施上，尚未形成规范化的实施模式，国际电工委员会（IEC）虽于2002年颁布了风电机组的防雷推荐标准（IEC TR 61400—24），但该标准仅制定了一套设计导则，没有规定量化的设计条款和具体的实施细则。现行的风电机组防雷设计，基本上是参照其他行业（如建筑、电力和电子通信）的做法来进行的，且不同国家的机组对其防雷措施的设置方式尚不能统一，彼此之间常存在着较大的差异。

近年来，大容量风电机组的投产运行对防雷设计提出了新的要求，使得对现行防雷措施与保护方式的进一步完善与更新凸显出重要性和迫切性。诚然，由于雷电放电具有明显的随机性，雷击对风电机组产生的灾害是难以完全避免的，但可以在采取合理有效防雷措施的基础上，将机组的雷电灾害损失降低到最小程度，这就是机组防雷设计的目标。基于这一目标考虑，就需要有一本专门介绍风电机组防雷与接地的书籍，以便供风电行业中从事研发、设计、制造和运行人员参考，本书的写作正是为满足这种实际需求而作出的尝试。

在材料的选取上，本书立足于我国风电机组防雷保护的实际情况，并积极吸收国外出现的新技术成果，特别是一些大容量机组的雷电防护经验，反映IEC风电机组防雷推荐标准的精神；在内容安排与处理上，本书侧重工程实用性，注重

介绍工程设计方法和实用措施，同时也兼顾必要的基本原理分析，阐述相关的理论概念，力图从基本原理与实用技术的有机结合上，系统地讨论风电机组的防雷与接地问题。

本书共分六章，其中第一、二章介绍雷电的大气放电原理、雷电放电参数和雷电对地面设施的危害机制；第三章介绍风电机组的雷击特性、雷击对机组部件的破坏作用以及机组的防直接雷击措施；第四章介绍风电机组的雷电电涌过电压防护与雷电电磁脉冲防护措施；第五、六章介绍风电机组的接地设计分析与接地指标测量方法。

由于作者水平有限，加之经验不足，时间仓促，书中谬误之处在所难免，作者恳切希望读者批评、指正。

编著者
2008年8月

目 录


前言

第一章 雷电放电与雷电参数	1
第一节 雷电放电过程.....	1
第二节 雷击距、雷暴日和地面落雷密度.....	9
第三节 雷电流.....	16
第四节 雷电放电的简化计算模型.....	22
第二章 雷电的危害作用	27
第一节 雷击效应.....	27
第二节 雷电流的机械效应.....	30
第三节 雷电的静电感应与电磁感应.....	32
第四节 暂态电位抬高.....	41
第三章 风电机的直接雷击及其防护	48
第一节 风电机组的雷击特性.....	48
第二节 雷击对桨叶的损坏.....	53
第三节 雷电流对轴承的损坏.....	57
第四节 机组直接雷击防护.....	61
第四章 风电机组雷电电涌过电压防护	70
第一节 雷电电涌过电压的危害和机组防雷区划分.....	70
第二节 雷电电涌过电压防护.....	75
第三节 避雷器与电涌保护器件.....	78
第四节 电气系统的雷电过电压防护.....	111
第五节 信号线路的雷电过电压防护.....	119

第六节	改善电涌保护器的性能	125
第七节	屏蔽和等电位连接	134
第五章	风电机组的接地	146
第一节	接地装置与接地电阻	146
第二节	工频接地电阻	150
第三节	冲击接地电阻	160
第四节	土壤电阻率	168
第五节	降低接地电阻的措施	174
第六节	接地形式	185
第六章	接地测量	191
第一节	接地电阻测量	191
第二节	接地电阻测量仪器	206
第三节	土壤电阻率的测量	214
第四节	接触电压和跨步电压的测量	221
参考文献		225

第一章

雷电放电与雷电参数



雷电放电作为一种强大自然力的爆发,会给地面诸多设施带来灾害,为了抑制雷电的破坏作用和减轻雷电的灾害性,需要研究雷电的放电过程,掌握雷电参数。由于雷电放电受气象、地理和地质等自然条件的影响,具有很大的随机性,因而表征雷电放电特征参数也有明显的统计性质。我国经过长期的雷电观察,现已在统计处理大量观察结果的基础上得出了一批实用的雷电参数数据和经验公式,这些数据和经验公式是进行地面设施防雷保护的基本依据,本章将分别加以讨论。

第一节 雷电放电过程

一、雷云带电

雷电放电是由带电荷的云,即雷云引起的。关于雷云带电的机制目前假说较多,但尚未取得一致性的认识。根据现已被较多接受的假说,雷云放电是在某些适当的地理和气象条件下,强烈的潮湿热气流不断上升进入稀薄大气层后冷凝的结果。在雷雨季节,太阳的日照使地面的水分部分转化为蒸汽,同时日照辐射也会将地面晒热,而晒热的地面又会进一步加热地面附近的暖湿空气,空气受热后发生膨胀,其密度和压强减小导致热空气上升,形成上升热气流。通常日照热辐

射几乎不能直接对空气加热，热气流每上升 1km 其温度大约下降 10°C ，热气流不断上升并达到高空稀薄大气层时，气流团中的水蒸气与此处的冷空气相遇，将被冷凝并结成冰滴，形成热雷云。此外，对于水平流动的冷气团和热气团在它们的前锋交界面上也会因冷气团将湿热的暖气团抬高而形成锋面雷云。

雷云带电可能起因于一个综合的过程。在高空强气流作用下，云中的水滴会被吹裂，产生分裂带电，分裂后较大的残滴带正电荷，较小的残滴带负电荷。因为较小的残滴质量小、重量轻，会被气流带走，因此在云中各处会出现不同的电荷。在地面上空存在着大气电场，其方向指向地面，大气电场使云中水滴发生感应极化，极化后水滴上端带负电荷，下端带正电荷，大气中残存着微量由自然电离因素（如地壳中放射性物质和宇宙射线）产生的带电离子，极化后的水滴受重力作用向下运动，在此下落过程中，水滴将与大气中的带电离子相遇，水滴下端可能会俘获负离子，而正离子则会受排斥而上升，于是整个水滴就带上负电荷。极化后水滴也会与云中的冰晶粒和雹粒等云粒子发生碰撞，碰撞后，一部分云粒子被水滴吸附，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水滴下端的部分正电荷，使水滴整体上净带负电荷。实验证明，水在结冰时会带正电荷，而未结冰的水带负电荷。由此可知，在云中的冰晶粒区，当上升气流将冰晶粒上的水分带走后，将会发生电荷分离，使冰晶粒带上正电荷。实际上雷云带电的机制是复杂的，除了这里所讲的若干种起电效应外，国外研究者还提出了其他一些起电效应假说，如冰块的热冷端温差起电效应、冰表层融化引起表面电位效应、冰—水蒸气接触面处似液态层起电效应等，由于这些起电效应目前被引用较少，在此不再赘述。

在多种起电效应的共同作用下，雷云内部各部分都可能出现电荷，有的部分带正电荷，有的部分带负电荷，电荷分布不规则，且随机性很大。从云体的宏观外部特性来看，雷云内部可以近似看成有三个电荷区，如图 1-1 (a) 所示，如果再将三个电荷区加以集中考虑，可以简化成三个电荷中心，如图 1-1 (b) 所示。根据国外报道的探测结果，在不同地区得出的电荷分布数据是有差别的，其中主要正电荷中心 P 的电荷约为 $+24 \sim +40\text{C}$ ，高度为 $6 \sim 10\text{km}$ ；主要负电荷中心 N 的电荷约为 $-40 \sim -20\text{C}$ ，高度为 $3 \sim 6\text{km}$ ；弱正电荷中心 P' 的电荷约为 $+2 \sim +4\text{C}$ ，高度为 $1.5 \sim 3\text{km}$ 。图 1-1 所示的雷云内部电荷分布结构是能与较多探测结果相一致的外部宏观等值模式，在一些特殊情况下，国外研究者曾探测到雷云内部的主要负电荷中心 N 在上部，而主要正电荷中心 P 在下部的特例。由图 1-1 可见，当观测者站在地面上仰视雷云，即从雷云下方观察雷云时，雷

云好像带负电荷，因为云的中间部分为主要负电荷区，且负电荷量大，而云底部位的弱正电荷区电量小，这样就会在雷云以下至地面的大气空间产生方向向上的电场，这一电场方向与晴天大气电场相反，如图 1-2 (a) 和 (b) 所示，因此雷暴到来时常会观测到大气中电场突然改变方向的现象。当雷云发展到成熟阶段时，云与地之间大气中的反向电场强度将进一步增大，如图 1-2 (c) 所示，这就为接下来雷云向地面或地面上物体的放电创造了条件。

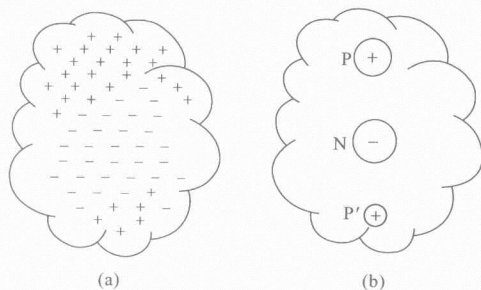


图 1-1 雷云内部电荷的分布示意图

(a) 电荷分布区；(b) 电荷中心

当雷云发展到成熟阶段时，云与地之间大气中的反向电场强度将进一步增大，如图 1-2 (c) 所示，这就为接下来雷云向地面或地面上物体的放电创造了条件。

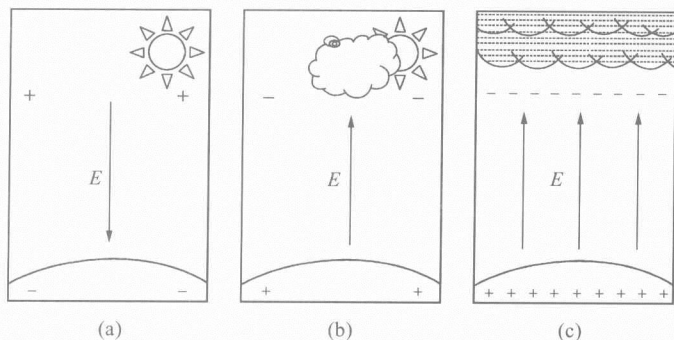


图 1-2 雷暴到来前后大气电场的变化

(a) 晴天大气电场；(b) 雷云出现时大气中反向电场；

(c) 雷云成熟时大气中反向电场增强

二、雷电放电过程

(一) 雷云对地面放电

雷电放电大多数是在雷云与雷云之间或雷云内部进行的，如图 1-3 (a) 和 (b) 所示。这两种形式的雷电放电对地面设施无直接破坏作用，但对电子信息系统有一定的影响。雷云对地放电也称为地闪，一旦发生将会对地面设施产生直接破坏作用，同时也会给电子信息系统造成严重危害，是地面设施防雷保护设计需要防护的主要对象。

雷云对地放电是从下行先导放电阶段开始的，雷电的极性是指雷云下行到大

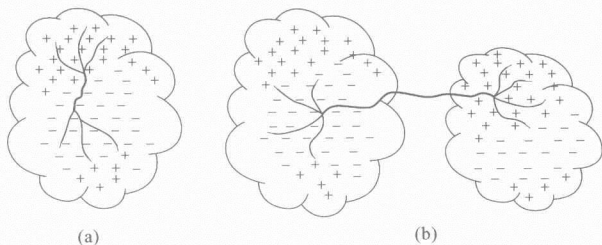


图 1-3 雷云之间及雷云内部放电

(a) 云内放电；(b) 云间放电

地的电荷极性，实际观察表明，约有 85% 的雷电具有负极性。在先导放电开始前，雷云内部主要负电荷区 N 将率先对弱正电荷区 P'（见图 1-1）进行放电，将云底部的正电荷清除，这种雷云内部的流注放电通道向下延伸，使负电荷能达到雷云的底部，于是在地面上感应出正电荷，这两种电荷将在大气空间中共同建立起电场。当雷云底部附近的局部电场超过空气的绝缘强度 $(2.5 \sim 3) \times 10^6 \text{ V/m}$ 时，此处的空气将发生游离，丧失原先的绝缘性能。雷云底部附近的空气游离是从流注式放电开始的，各流注向下发展形成一个向下运动的热游离通道，这就是下行先导。下行先导在电场作用下向地面发展，其下行取向受其头部电场强度和大气游离条件的影响，具有很大的随机性。下行先导向地面发展并不是一个连续的过程，不能一次性贯通雷云与大地之间的大气空间间隙，而是以间歇方式分级向地面伸长，即它发展到一定长度后就停歇一段时间，然后再继续下行发展，这就是下行先导放电阶段。在这一阶段，多级先导的每级发展速度为 $10^7 \sim 10^8 \text{ m/s}$ ，长度为 $10 \sim 200 \text{ m}$ ，各级之间的时间间隔为 $10 \sim 100 \mu\text{s}$ 。虽然各单级先导的发展速度比较快，但整个下行先导放电阶段的总体发展速度是比较慢的，仅为 $(1 \sim 2) \times 10^5 \text{ m/s}$ 。

因为先导通道具有较高的电阻率，雷云中的负电荷将会沿先导通道分布，并随先导的发展而不断向下发展，如图 1-4 (a) 所示。当下行先导通道不断向地面伸展时，在地面上感应出的正电荷将不断增大，使得先导头部与地面之间的电场不断增强，这将会进一步促进下行先导向地面发展。当下行先导通道头部与地面上感应出的正电荷接通以后，下行先导放电阶段结束，正电荷自下而上地沿先导通道上行运动，去中和通道中的负电荷，这就是回击放电阶段，也称为主放电阶段。当这种异性电荷中和沿通道向上发展到达雷云后，这一阶段就基本结束。回击放电阶段所需的时间很短，只有 $50 \sim 100 \mu\text{s}$ ，其发展速度要比下行先导速度

快得多，为 $(2 \sim 15) \times 10^7 \text{ m/s}$ 。在回击放电阶段，沿较高电导率通道产生的雷电流很大，可达几百千安，并同时伴随着闪光和雷鸣声。

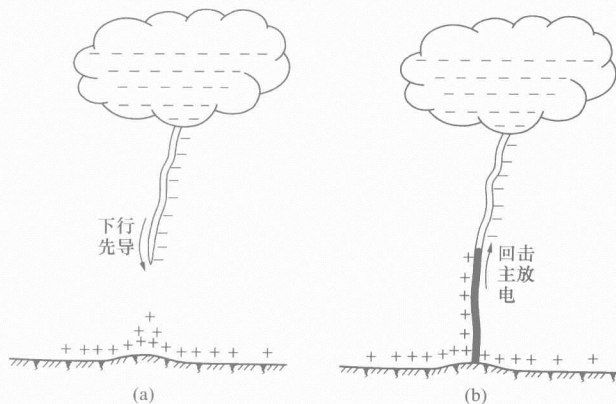


图 1-4 雷云对地放电
(a) 下行先导放电；(b) 回击放电

当回击放电阶段结束后，雷云中已发生放电的原电荷区中的残余电荷将经原先的放电通道向地面泄放，由于这时的泄放通道维持着一定的辉光，所以称为余辉阶段。在余辉阶段，泄放通道中的电导率将大为减小，残余电荷沿通道向下泄放的速度相当慢，所形成的雷电流不大，仅为几百安，但其持续时间较长，可达 $0.03 \sim 0.15 \text{ s}$ 。

正极性雷云对地放电过程与上述负极性雷云对地放电过程基本相同，但其下行先导通道中分布的是正电荷。该下行先导的分级发展特征不明显，放电所产生的雷电流较大，可达 $200 \sim 300 \text{ kA}$ ，常高于负极性雷云对地放电所产生的雷电流。

(二) 雷云对高结构体放电

风电机组结构属于地面上的高耸突出结构，随着单台机组容量的增大，从几百千瓦增大到兆瓦级，机组的最大对地高度也从 $80 \sim 90 \text{ m}$ 上升到 100 多米。与上述雷云对地的放电过程相比，雷云对这种高结构体的放电过程又有一些新的特点，如图 1-5 所示。

在雷云及其下行先导通道中负电荷的感应作用下，机组上将出现感应正电荷，见图 1-5 (a)。当下行先导头部接近机组时，由于桨叶顶端电场的畸变作用，使得顶端附近的电场强度急剧增大，导致这里的空气发生强烈游离，出现向上发展的放电先导，即上升先导。与下行先导不同，上行先导中分布的是正电

荷, 见图 1-5 (b), 它也没有明显的间歇式分级发展的特征, 其向上发展的速度为 $(0.05 \sim 1.2) \times 10^6 \text{m/s}$ 。这一上行先导与下行先导在空中会合连接时, 就开始了回击放电过程, 于是桨叶将直接遭受雷击, 其顶端即为雷击点, 见图 1-5 (c)。显然, 桨叶发出的上行先导升空去主动迎接来自雷云的下行先导, 这就在很大程度上增强了机组的引雷效果, 加大其遭受雷击的概率。图 1-6 是一组类似于机组结构的地面细高物体引起上行雷击的实拍照片。

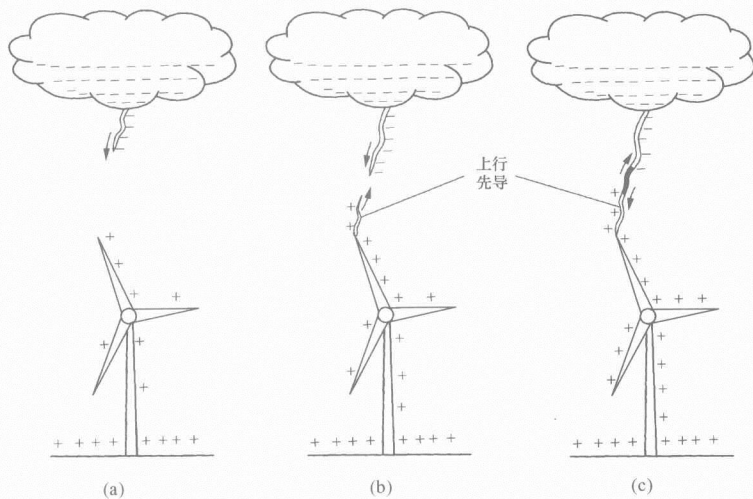


图 1-5 雷云对风电机组的放电

- (a) 下行先导在机组上感应出电荷; (b) 桨叶顶端起始上行先导;
(c) 上、下行先导在空间会合

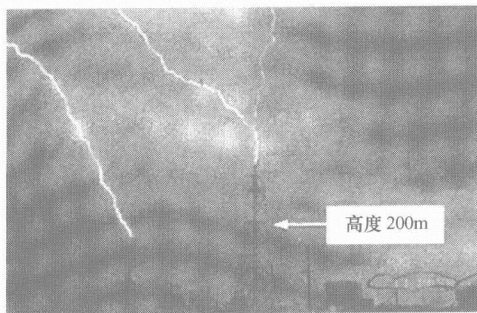


图 1-6 地面上细高物体引起上行雷击的实拍照片

三、雷电放电的多重性与选择性

(一) 雷电放电的多重性

从大量的雷电观察资料来看, 多数雷云对地放电不是仅进行一次性的下行先导——回击放电过程, 而是包含若干次这样的过程, 其平均次数为 $2 \sim 3$ 次, 最多的曾有 40 多次的实际观察

记录。观察结果还证实，在雷云对地放电的若干次下行先导即回击放电过程中，第一次放电时的下行先导是间歇式分级发展的，而第二次及后续各次放电的下行先导一般都是连续发展的，无间歇式分级现象。关于雷电放电多重性的原因，可粗略地用图 1-7 来描述。

由于雷云从宏观外部上看是一大块介质，其内部的电荷是不易运动的。在雷云带电后，云内同极性电荷并不像图 1-1 (a) 所示那样集中地分布在同一区域内，而是会形成若干个相互分离的电荷区。为了表述方便，图 1-7 仅画出了两个这样的分离电荷区。第一次放电结束时，主要是泄放了第一个电荷区的负电荷，如图 1-7 (a) ~ (c) 所示，此后，因为第一个电荷区中的负电荷已基本消失，使得第二个电荷区与第一个电荷区之间的电场强度显著增大，从而使得后者向前者发生流注式放电，如图 1-7 (d) 所示，这就为第二次放电在雷云内部打通了路径。由于此时由第一次放电所开创的云对地之间的放电通道尚未消失，

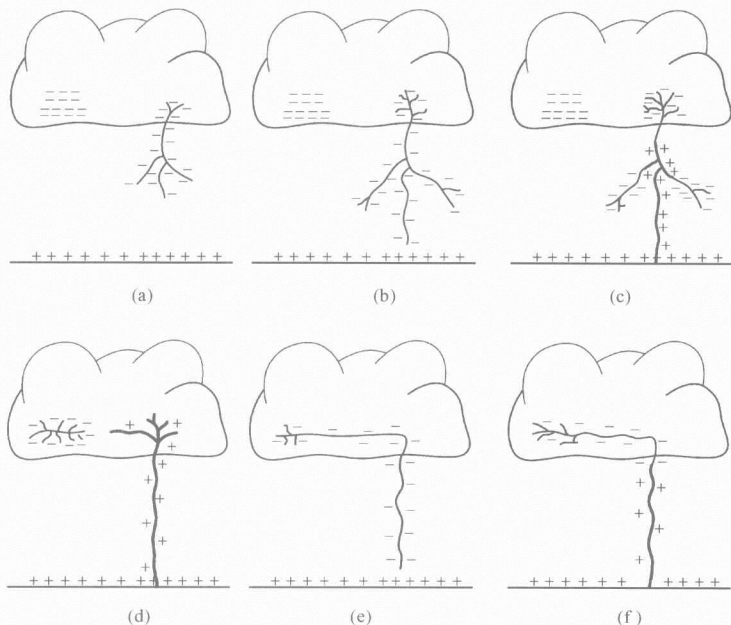


图 1-7 雷云对地放电多重性示意图

- (a) 第一个电荷中心开始先导放电；(b) 第一个电荷中心先到达地面；
 (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于第一个电荷中心的通道进行放电；
 (f) 第二个电荷中心的回击过程

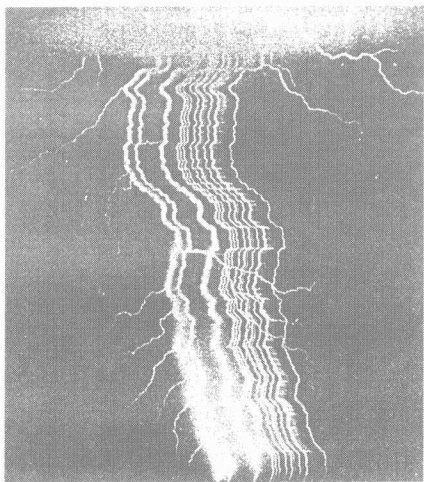


图 1-8 含 12 次放电的雷闪观察记录

仍维持可观的电导率，因此第二个电荷区中的负电荷就能够借助于这条通道以更快的速度完成第二次放电过程，如图 1-7 (e) 和 (f) 所示。依此类推，当雷云中 含有多个分离的电荷区时，则第三个及后续各电荷区将以类似于第二个电荷区的放电方式进行放电，这就形成了雷电放电的多重性。图 1-8 为一幅用高速扫描摄像机拍下的含 12 次放电的雷闪图像照片，它采用了时间展开方式，使得各次放电闪光通道能够被分离地显示出来。

前面已说过，在雷云对地多次放电过程中，第一次下行先导的发展是间歇分级式的，而第二次及后续放电则无间歇分级特征，如图 1-9 所示，该图同时给出了由各次放电产生的电流脉冲。在后续放电过程中，会出现持续时间长且幅值低的电流脉冲，这可能是在某次余辉阶段云中较多残余电荷被缓慢泄放的缘故。

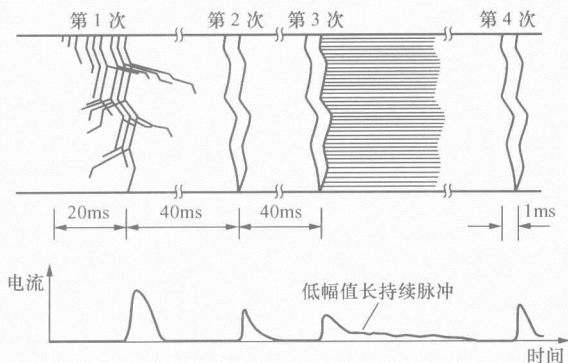


图 1-9 多次放电与相应的电流脉冲

(二) 雷电放电的选择性

雷云对地面或地面上物体的放电存在选择落雷点的问题，这就是雷电放电的选择性。虽然雷电放电的选择性受诸多自然条件的影响，有明显的随机特征，但根据现已积累的大量资料，仍可以对影响雷电放电选择性的实际因素作一些定性

的讨论。

实际观察和试验都表明，土壤电阻率是影响雷电放电选择性的一个重要因素。当雷云在某一土壤电阻率分布不均匀的区域上空形成时，雷云及后续下行先导中的电荷将在该区域地面上感应出反极性的电荷。由于该区域内土壤电阻率分布不均匀，势必会有一块土壤电阻率相对最小的地方，即该地方的导电性能相对最好，所以在该地方感应出反极性电荷要比在其他地方容易，这为下行先导向此处发展提供了更为有利的条件，所以下行先导被吸引到此处的可能性就更大些，从而使得在此处容易出现落雷点。国外研究者进行的模拟试验也证实了这一结论。一般地说，在平原和山地，落雷点经常出现在河岸、地下水出口处、地下含有金属矿床的地方、地下埋设有密集金属管道的地方以及山坡与水田相接壤的地段，那些处于河、湖、池、沼泽边沿以及处于潮湿和地下水水位较高地带的结构体也是比较容易遭受雷击的。在这类地方，无一例外地存在着低电阻率的地段，有利于下行先导感应出的反极性电荷在此处产生和聚积，使得位于这些地方的结构体易成为雷击的对象。

除了土壤的电阻率外，地面上结构体的形状和高度也会影响雷电放电的选择性。当下行先导发展到离地面不远的空中时，高结构体的存在将会在很大程度上影响下行先导头部的发展方向，使得下行先导能够较早地向高结构体走向发展。因为高结构体顶端尖劈部位易于发生电场畸变，使其周围的电场强度增大，产生上行先导去主动截击下行先导，具有较强的引雷效果，所以会比较容易遭受到雷击。矗立在风电场中的风电机组结构属于典型的高结构体，由于机组高耸突出的机身和桨叶顶端的引雷作用，从雷电放电选择性的角度来看，机组遭受雷击的概率是比较大的。

此外，大气条件也能影响雷电放电的选择性。在地面上的大气环境中，如果某个区域大气中含带电粒子浓度较高（如大气污染所致），则该区域内空气在电场作用下就能比较容易地发生游离，从而有利于雷电下行先导在该区域内的发展，对其地面上的物体进行放电。

第二节 雷击距、雷暴日和地面落雷密度

一、雷击距

（一）雷击距的概念

雷击距这一参数对于地面设施的受雷状况分析是十分有用的，它可以直接被