

第 1 章

雷电物理及雷击线路特征

输电线路雷电防护是以对雷电物理及雷击输电线路特征的认知为基础的。雷电的源头是雷云,带电荷的雷云“孕育”成熟后产生向下发展的下行先导,同时地面物体产生向上发展的上行先导,二者“汇合”就发生了雷击。雷击输电线路后沿线路传播,经杆塔入地,也可以同时导致线路闪络。本章主要介绍与输电线路雷电防护相关的雷电物理基本知识及关键参数,同时介绍国内外在实验室开展的雷击输电线路实验获得的雷击线路特征,以及上行先导起始条件及上行先导发展速度、通道内的电荷等关键上行先导参数。1.1~1.3 节是对原有书稿相关章节的补充和完善^[1]。

1.1 雷电放电

1.1.1 雷电放电物理过程

雷电是一种大电流的大气静电放电,通常被称为“闪电”。雷电放电由带电的雷云引起。雷电指积雨云中的异性电荷之间(云内),或云间的异性电荷之间(云间),云中电荷和空气之间、云中电荷和大地之间的放电过程。在电力系统通常为最后一种情况,称为云地闪击。除了云对地闪电中的雷电直击输电线路外,闪电对高压输电线路一般不具危害。但所有闪电,特别是云对地的闪电,都有可能造成绝缘水平很低的架空配电线路的闪络,影响架空配电线路的安全运行。

对雷云带电起因的解释有很多。一般认为雷云是在有利的大气和大地条件下,由潮湿的热气不断上升进入稀薄大气层冷凝的结果。强烈的上升气流穿过云层,水滴被撞,分裂带电。轻微的水沫带负电,被风吹得较高,形成大块的带负电的雷云,大的水珠带正电,凝聚成雨下降,或悬浮在云中,形成局部的带正电的区域。雷云底部大多带负电,在地面感应出大量的正电荷。雷云和大地之间形成高电场,电位差达数兆到数十兆伏。超过大气的游离放电临界电场强度(约为 30kV/cm ,有水滴存在时约为 10kV/cm),形成云间或云对地的火花放电,产生强烈的光和热,使空气急剧膨胀振动,发生霹雳轰鸣,而放电通道中的电流达几十至几百千安,这就是雷电^[2]。

一般认为雷暴云内的空间电荷呈垂直的偶极性或三极性结构。电荷分布区与温度相对应,雷暴云上部 $-60\sim-25^{\circ}\text{C}$ 的区域为正电荷分布区, $-25\sim-10^{\circ}\text{C}$ 的区域为负电荷分布

区,有时在负电荷层下部 0°C 区域附近还有一个小的正电荷区。研究表明,实际的雷暴云电荷结构比垂直分布的偶极性或三极性电荷结构复杂得多。除了主正电荷区、主负电荷区和底部次正电荷区以外,电荷结构还可能会发生倾斜,呈现多层正负极性电荷层层交叠,甚至反极性的电荷结构,不同极性的电荷也可能在同一高度。除了三极性、偶极性电荷结构,还有准反极性电荷结构,如果偶极性可被视为缺少底部正电荷区的三极性,准反极性则可被视为缺少主正电荷区的三极性结构。不同季节、地区的雷暴特征不一样。我国南方地区多为偶极性电荷结构,北方地区多为三极性电荷结构,青海高原地区多为准反极性电荷结构,但也有可能出现正常结构^[3]。

大多数雷电发生在云间。对地放电的雷云大多数带负电,因此形成的雷电流极性也为负。雷电定位系统多年的观测表明,云地闪击中负极性闪击约占 95.7% ^[4]。根据国内外实测, $75\%\sim 90\%$ 的雷电流是负极性的,因此电气设备的防雷保护和绝缘配合通常都取负极性的雷电冲击波进行研究分析。进行更为细致的防雷分析时,一般取负极性雷电流占 90% 左右,正极性雷电流占 10% 左右。

一次典型的负地闪所包含的各种物理过程随时间的发展如图 1.1 所示^[5]。如图 1.1 中 $t=0$ 对应的图所示,雷云电荷结构分为三层,从上至下依次为主正电荷区 P、主负电荷区 N 和下层次正电荷区 p。在雷暴云的成熟阶段,主正电荷区总电荷量约为 50C ,主负电荷区总电荷量约为 100C ,而次正电荷区的电荷量在 10C 以下。主正电荷区的电荷密度在 $0.5\sim 1.0\text{nC}/\text{m}^3$,高度在 $5\sim 8\text{km}$ 以上,主负电荷区的电荷密度在 $1\text{nC}/\text{m}^3$ 左右,高度在 $3\sim 6\text{km}$,而次正电荷区的电荷密度小于 $0.5\text{nC}/\text{m}^3$,高度在 $2\sim 4\text{km}$ 以下^[3]。最初 N 和 p 之间会因为某种原因产生放电形成预击穿,即在云层内部形成初始的放电,预击穿过程为下行梯级先

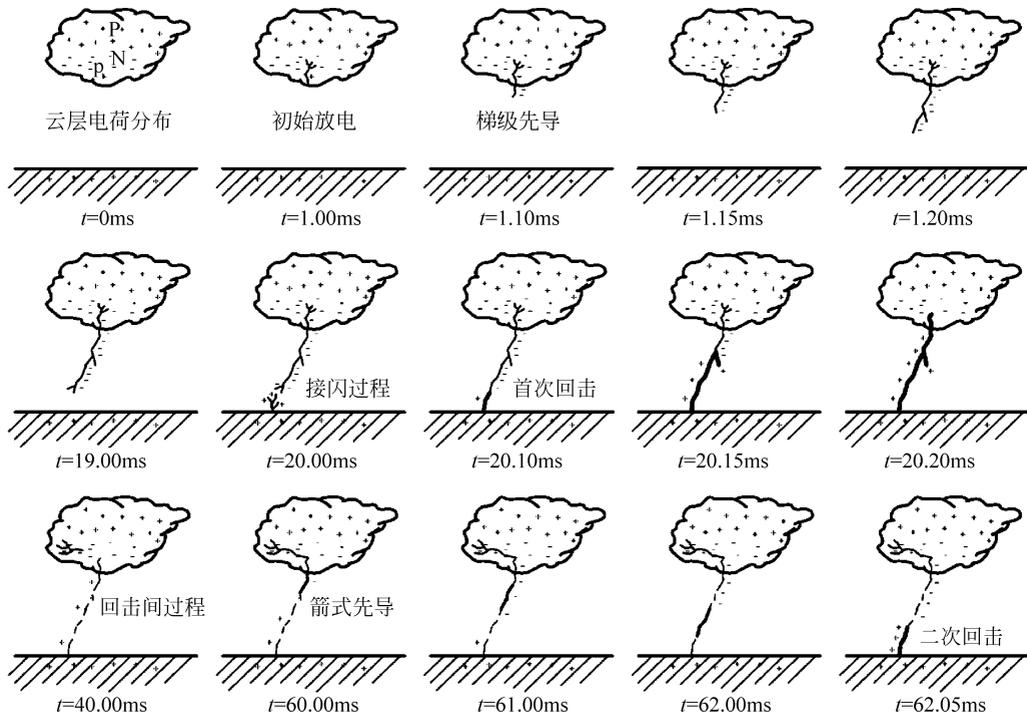


图 1.1 一次负地闪所包含的各种物理过程随时间的发展^[5]

导形成创造条件,接着内部放电朝向下云层外部空间发展形成下行先导,下行先导呈梯级先导向下发展,之后从地面产生上行先导。当下行先导和上行先导接近、二者头部之间的电场超过空气间隙的击穿场强时,二者头部之间的空气被击穿,形成接闪过程,即产生末跃过程,接着产生首次回击过程。

在首次回击后,将产生回击间过程,如 J 过程和 K 过程,接着产生箭式先导(直窜先导),然后形成第二次回击过程。

当云中的负电荷中心 p 的电场强度达到 $10\text{kV}/\text{cm}$ 时,雷云内部就会发生放电击穿过程,即发生初始放电。电子获得足够大的动能与气体分子碰撞,使其游离而产生大量离子,游离后的气体变为导电介质,伴随气体发光现象,这部分导电的气体称为流注。流注沿着电场作用的方向逐级向下延伸,但是由于电子运动的惯性和碰撞的概率,每个电子的运动方向并非垂直向下,诸多随机因素导致导电气体向下发展的方向并不垂直向下^[5]。这一段暗淡的光柱在照片上显示的是一条弯曲有分叉的折线段。雷电观测表明,先导放电并非一次就能完成整个放电过程,而是呈间歇性的脉冲发展过程,每次间歇时间约为几十微秒。先导生长一定长度后,出现生长停滞,然后继续生长^[6],如图 1.2 所示,称为梯级先导或梯式先导。当背景电场超过 $100\text{kV}/\text{m}$ 时,其逐步向地面生长^[7]。梯级先导的平均发展速度为 $1.5 \times 10^5 \text{ m/s}$,变化范围在 $1 \times 10^5 \sim 2.6 \times 10^6 \text{ m/s}$ ^[7]。其他学者研究表明^[8],当先导接近地面时,速度可能在 $0.3 \times 10^5 \sim 3.9 \times 10^6 \text{ m/s}$ 之间变化,平均值在 $1 \times 10^5 \sim 6 \times 10^5 \text{ m/s}$ 之间。近期的人工引雷实验表明,先导发展过程的速度是非均匀的,4 次火箭引雷获得的上行先导发展过程的二维平均速度为 10^5 m/s ,局部速度在 $2 \times 10^4 \sim 1.8 \times 10^5 \text{ m/s}$ ^[9]。而单个梯级推进速度则达到了 $5 \times 10^7 \text{ m/s}$,单个梯级的平均长度为 50m 左右,其变化范围在 $3 \sim 200\text{m}$ 。但随着梯级先导接近地面,梯级变短,其长度接近 10m ^[7]。梯级先导每步发展大约需要 $1\mu\text{s}$,但梯级间的间歇时间为 $30 \sim 125\mu\text{s}$,具体时间从先导初始阶段的约 $50\mu\text{s}$ 到接近地面时的约 $10\mu\text{s}$ 不等^[7]。

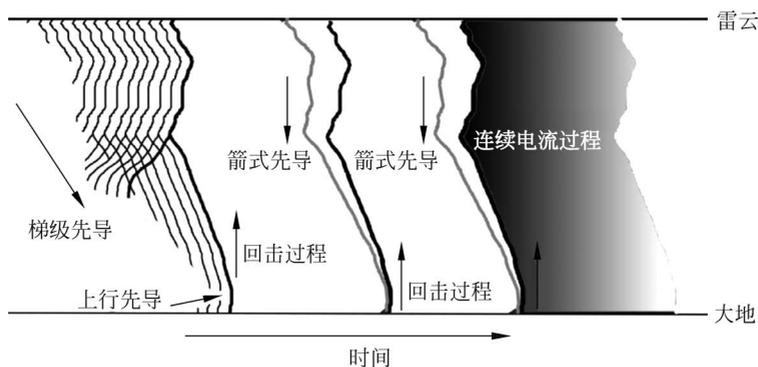


图 1.2 雷电放电的发展过程^[10]

经世界气象组织(World Meteorological Organization, WMO)确认,2020 年 4 月发生在美国南部的一次闪电长度约为 768km ,是有记录以来最长的闪电。这种超级闪电很难用传统的地面设备进行测量,本次是由气象学家使用地球同步卫星上的闪电测绘仪获得的。2020 年 6 月测量到的一次闪电,横跨乌拉圭和阿根廷边境,持续了 17s ,是迄今为止探测到的持续时间最长的闪电。这种长度和持续时间的超级闪电为雷电预警和雷电防护带来了新课题。

图 1.3 所示为 50000fps 拍摄速度下获得的下行先导分支头部的照片。可以看出,下行先导的每个分支头部都呈“蝌蚪”状,由球状头部和拖尾构成。下行先导头部放电形成球状流注区。头部放电导致下行先导的生长发展,同时也会使先导头部的球形电荷区尺寸增加,当尺寸足够大时,电荷球表面的电场无法维持放电,导致先导生长停滞。经过一段时间后,头部的电荷消散,球形头部直径减小,表面场强又能超过空间临界基础场强而再次发生表面放电,先导继续生长,即先导发展呈现梯级放电的形式。

梯级先导内部为热芯,该热芯被电晕套包围^[11],如图 1.4 所示。据估计,热芯直径为 0.2~1m,电晕套直径 $2R_0$ 约为 6m。

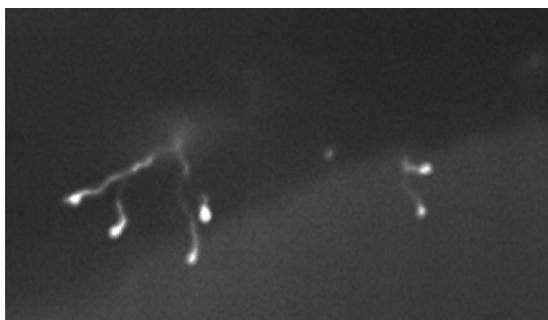


图 1.3 在 50000fps 的拍摄速度下获得的下行先导头部照片(中国气象科学研究院吕伟涛研究员提供)

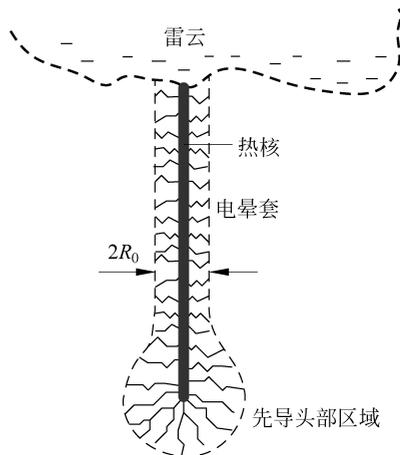


图 1.4 先导结构

梯级先导充当将电荷从云端传送到地面物体的导电路径。先导头部的几何形状和电荷密度会产生很高的电场,导致头部周围的空气产生雪崩状电离。这些电离细丝称为“流注”,它们在前导头部形成一个流注区,即图 1.3 所示的球形区域。流注区包括正流注区和负流注区。正流注从流注区边缘向后延伸至先导头部,负流注从流注区边缘延伸一小段距离,进入剩余间隙。流注是先导的前身,它们提供电流加热空气以形成先导。流注的导电性不如先导,但其沿长度方向保持恒定的电压梯度,对于正极性流注约为 500kV/m,对于负极流注约为 1000kV/m。最初,沿先导通道的梯度与流注的梯度大致相同,但随着先导通道升温,其梯度迅速降低至约 1kV/m 的极限值。

当梯级先导接近地面时,接地物体周围的电场增加,最高电场出现在接地结构的顶端。在某一点上,电场变得足够高,足以使空气电离,从而在高电场区域触发流注的形成。如前所述,当流注电流加热空气时^[12],流注合并为先导通道,从而建立上行先导。如果先导头部的流注区提供足够的能量来维持热流注通道,则它将朝下行先导发展。

1.1.2 雷电放电的主要阶段

带负电荷的雷云向下对地放电的基本过程称为下行负闪电,可用图 1.5 来表示,包括如下几方面的物理过程^[1,13]。

(1) 先导放电阶段

雷云中的负电荷逐渐积聚,同时在附近地面上感应出正电荷。当雷云与大地之间局部电场强度超过大气游离临界场强时,就开始有局部放电通道自雷云边缘向大地发展。这一放电阶段称为先导放电,由于向下发展,该先导称为下行先导。先导放电通道具有导电性,因此雷云中的负电荷沿通道分布,并且继续向地面延伸,地面上的感应正电荷也逐渐增多,如图 1.5(a)所示。

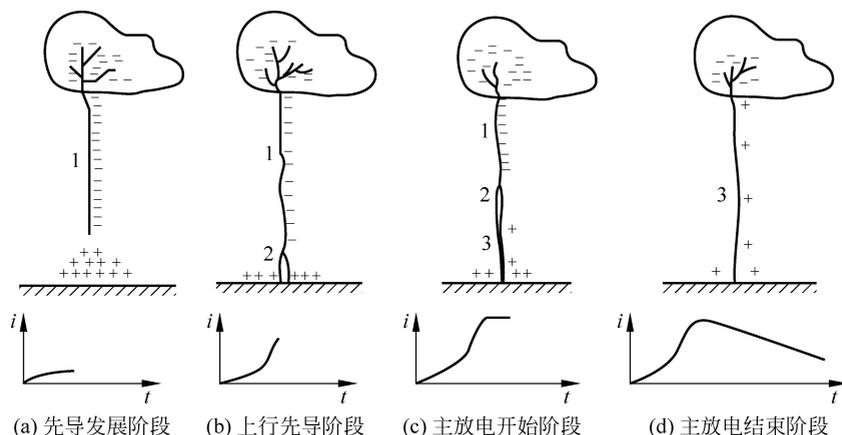


图 1.5 雷电放电的基本过程^[1]

1—先导放电通道; 2—强游离区; 3—主放电通道

(2) 主放电阶段

下行先导通道发展到临近地面时,由于局部空间电场强度的增加,常在地面突起处出现正电荷的先导放电向上朝天空发展,这种先导称为上行先导,如图 1.5(b)所示。图 1.6 为一次下行先导发展过程中,从 4 个塔顶部产生的上行先导的照片^[14]。当下行先导到达地面或与上行先导相遇时,会因大气强烈游离在通道端部产生高密度的等离子区,此区域自下而上迅速传播,形成一条高导电率的等离子体通道,使下行先导通道以及雷云中的负电荷与大地的正电荷迅速中和,这就是主放电过程,或回击过程,如图 1.5(c)、图 1.5(d)所示。

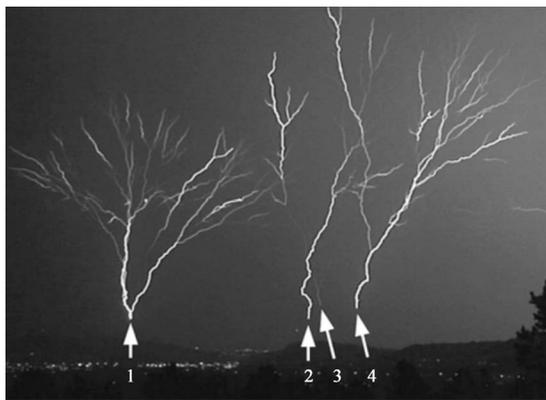


图 1.6 从 4 个信塔顶部产生的上行先导^[14]

图 1.7 所示为采用高速摄影机(拍摄速度为 50000fps)拍摄得到的一次完整的雷击过程,包括下行先导和上行先导的发展、末跃及回击过程。

下行和上行先导通常都沿最高电场的方向发展,但发展模式存在明显的随机性,因此它们不完全沿着最高电位梯度的路径发展。这是由先导头部的电晕和流注的屏蔽效应造成的。然而,在末跃之前的先导发展的最后几步中,如果背景电场变得足够强,足以克服流注

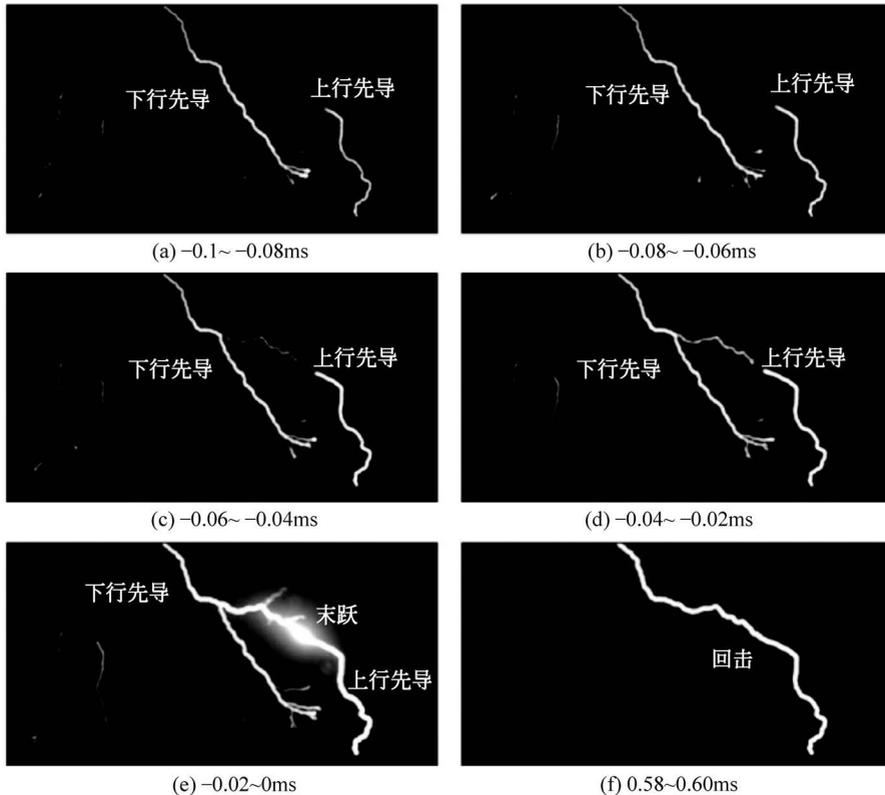


图 1.7 采用高速摄影机(拍摄速度为 50000fps)拍摄得到的一次完整的雷击过程
图中时间对应为每幅图像的曝光时间,时间的 0 点设置为末跃发生后形成回击的时刻^[15]

的局部电位梯度效应,先导可能相向发展^[12],如图 1.8 所示。当上行先导和下行先导的间隙被流注区桥接时,就会形成末跃^[12]。最终末跃的长度可以根据先导通道的电位(它是回击电流的函数)和先导通道内 500kV/m 的平均电压梯度估计值来确定。几个上行先导可能会与下行先导竞争连接,最终首个满足跳跃条件的上行先导与下行先导汇合。

图 1.9 所示为日本横山茂教授提供的一次下行先导和上行先导发展过程的观测结果^[6]。

图 1.10 所示为 Berger 和 Vogelsanger 采用纹影摄影(streak photograph)于 1966 年拍摄得到的负下行先导击中瑞士 San Salvatore 山顶 55m 高塔的接闪过程,这种照相机的胶片在固定棱镜后连续移动,快门一直打开^[16],整个过程大约在 300 μ s 内完成。下行梯级先导从图片的左上角发展到 A 点处,正极性上行先导因发光强度相对较弱而无法拍摄到。正极性上行先导可能也是梯级发展,从 55m 高塔的顶部起始,发展到 B 点处产生分叉,一支分支向左上部发展,另一支向右朝与从下行梯级先导端部 A 点发展的朝下发展的放电通道回合。末跃过程发生在 A、B 两点之间。从左侧的上行先导判断,末跃大致发生在靠近 A 点的位置。

先导放电发展的平均速度较低,回击发展速度比梯级先导快得多,在 $2 \times 10^7 \sim 2 \times 10^8$ m/s,平均为 5×10^7 m/s。回击通道的直径平均为几厘米,在 0.1~23cm。回击过程是中和云中电

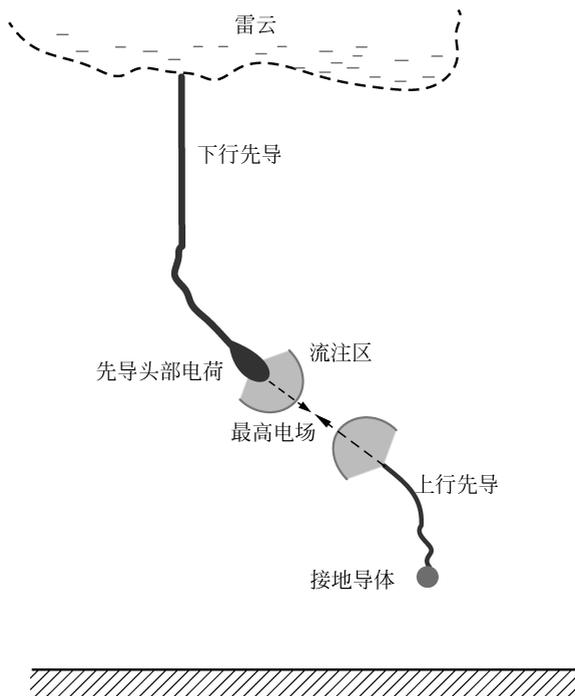
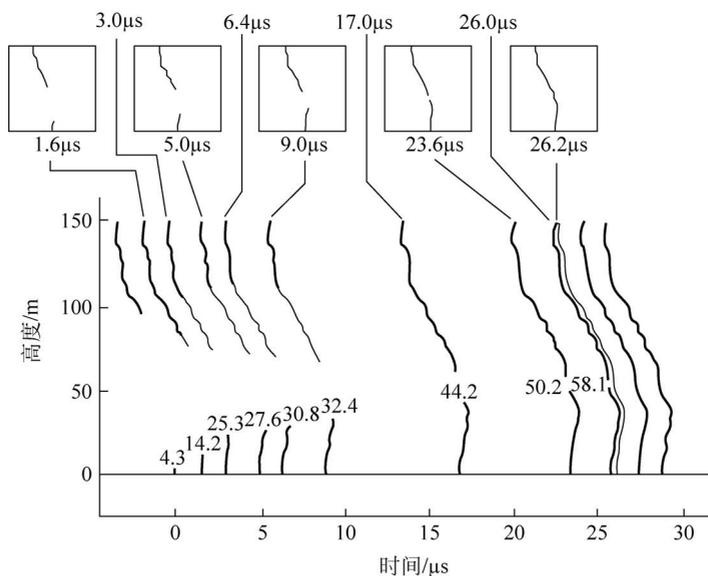


图 1.8 下行先导与接近地面物体产生的上行先导

图 1.9 一次下行先导与上行先导的发展过程^[6]

荷的主要过程。发热产生高温,形成很亮的通道,其温度可达 10^4 K 量级^[7]。地闪所中和的云中负电荷绝大部分在先导放电过程中被储存在先导的主放电通道和分支中。回击过程中,地面的正电荷不断将这些负电荷中和,称为主放电或主回击。

与先导放电和主放电阶段对应的电流变化也表示在图 1.5 中。先导发展过程产生的电

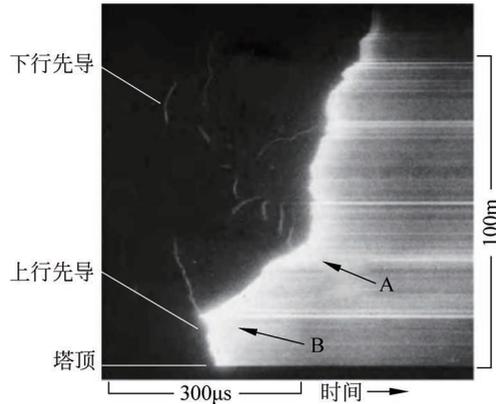


图 1.10 Berger 等拍摄得到的负下行先导击中瑞士 San Salvatore 山顶 55m 高塔的接闪过程^[16]

流不大,约为数百安,而主放电的发展速度很快,产生的脉冲电流达几十甚至几百千安。

(3) 箭式先导

云中分布的电荷被绝缘的空气相互分隔,形成不同极性的电荷团。由梯级先导到回击完成地闪的第一次放电闪击过程,经过几十毫秒后又出现了第二次放电闪击。电荷的迁移聚集需要时间,待迁移到负电荷中心后,可以沿着已有离子的原先通道再次放电。这时云中发出的流注不再像梯级先导那样逐级缓慢发展,而是快速发展,称为箭式先导或直窜先导,如图 1.2 所示,平均发展速度为 2×10^6 m/s,变化范围为 $1 \times 10^6 \sim 2.1 \times 10^7$ m/s^[7]。当到达地面上空一定距离后,再次引发地面窜起的回击,形成第二个完整的放电回击,如图 1.1 所示。

在某些地区,一次地闪只包含一次放电闪击,称为单闪击地闪。多闪击地闪的各闪击间隔平均时间为 50ms,在 3~380ms。一次地闪的平均持续时间在 0.2s 左右,其变化范围为 0.01~2s。

(4) 回击间过程^[17]

回击间过程包括发生于地闪回击间或回击后电场变化较慢的连续电流过程(C)和 J 过程,以及叠加于其上的小而快速变化的 M 分量和 K 过程。如图 1.2 所示的云地闪络的连续电流过程,是雷云中的电荷在回击之后沿闪电热电离通道对地的持续放电过程,该过程可引起慢而大幅度的地面电场的变化,且云下的闪电通道持续发光。负地闪中的回击沿先导通道从地面到云间的传播一般在 $100\mu\text{s}$ 量级的时间内完成。在此期间,先导通道底部的电流增加到峰值后又衰减到峰值电流的 1/10。在回击传播阶段之后,回击通道底部仍有约 1kA 的电流流动,持续时间为 1ms 左右,该电流称为中间电流。有时中间电流过程后还有 100A 的电流流动,称为连续电流。J 过程是在回击之间发生在云内的过程,简称击间过程,代表回击之间除去梯级先导过程 L 和回击过程 R 的过程,以相对稳定的电场变化为特征,持续时间为几十毫秒。该过程不伴随云地之间先导通道亮度的突然增加。J 过程产生的电场变化通常与连续电流产生的电场变化有明显的差别,而且较连续电流产生的电场变化小。M 分量指在回击过程之后通道微弱发光阶段通道亮度的突然增加,并伴随有电场的快速变化。有人认为 M 过程实际上是一个没有明显回击的先导过程,一次完整的 M 过程称为小型后续回击。K 过程指在地闪回击之间或最后一个回击之后以及云闪后期相对小的快电

场变化过程,其叠加在回击之间及云闪后期的慢电场变化及J过程上。在几十千米的距离上测量得到的云闪和地闪的K过程波形呈梯级状或者斜坡状。一般认为,K过程不伴随有云地之间明显的通道发光,原因是K过程中没有先导到达地面,只在云内产生电荷的微小调整。

两次回击之间的时间间隔约为几十毫秒,但如果主放电通道中在回击之后有连续电流流过的话,时间间隔可能会增加到0.1s。连续电流约在100A左右,是云中电荷直接向地面的转移。由连续电流产生的电场变化比较缓慢,持续时间约为100ms,一次可将几十库伦的电荷从雷云输送到地面。25%~50%的地闪过程中包含有连续电流过程。在连续电流阶段的脉冲型电场变化称为M分量。图1.11所示为发生于20km处(图1.11(b)实际为19km处)的两次多回击地闪过程的毫秒级光学和电场变化过程示意图^[18]。图1.11(a)所示地闪过程包含了前面所述的所有回击间过程。该次地闪包含了8次回击过程(标记为 $R_1 \sim R_8$),有明显的连续电流过程。并非所有的地闪过程都包含了所有云间过程,如图1.11(b)所示的另一次包含了9次回击的地闪过程,没有连续电流过程发生。图中R为回击过程。

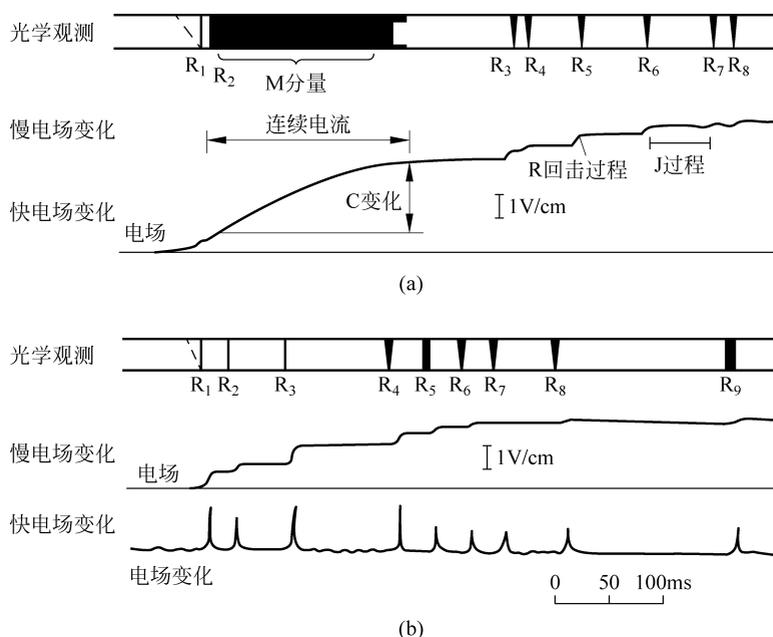


图 1.11 发生于 20km 处的两次多回击地闪过程的毫秒级光学和电场变化过程示意图^[18]

1.1.3 雷电放电类型

根据放电雷云电荷的极性,雷电可分为下行负闪电、上行正闪电、下行正闪电和上行负闪电,如图 1.12 所示^[1]。图中箭头为先导发展方向,而主放电方向与之相反。上行闪电通常仅能在有效高度超过 100m 的高层结构或特高压输电线路杆塔上观察到。巴西和美国的观测结果表明,只有 1/4 的上行先导会与下行先导汇合产生回击^[19],且峰值电流通常较低,不太可能发生在普通输电线路结构上。因此,在评估输电线路的雷电性能时,通常不考虑上行闪电。第五类是双极闪电,在同一次闪电中同时传递正、负电荷。双极闪电通常由高大建筑物的上行闪电引起,因此对典型的输电线路一般也不用考虑。

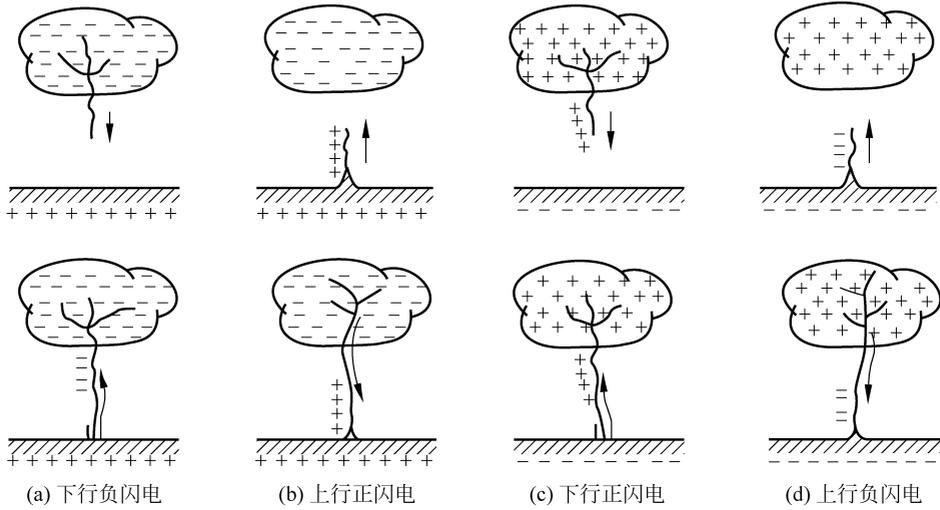


图 1.12 雷电放电类型^[1]

1.1.4 多重雷电放电

人眼观察到的一次闪电，往往包含多次先导—主放电的重复过程，如图 1.13 所示^[2]。根据高速摄影机照片绘制的多重雷电放电过程如图 1.14 所示，图中还绘出了相应的放电电流波形^[10]。

发生多重放电的原因可作如下解释。雷云是一块大介质，电荷不容易在其内部运动。在雷云集聚电荷的过程中，有可能形成若干个密度较高的电荷中心。如图 1.13(a)~(c)所示，第一次先导—主放电过程主要泄放第一个电荷中心及已传播到先导通道中的负电荷。这时第一次冲击放电过程虽已结束，但雷云内两个电荷中心之间的流注放电已经开始，如图 1.13(d)所示。主放电通道放电完成后，热游离通道内的介质恢复需要一定的时间，因此放电完成后的主放电通道仍然保持着高于周围大气的导电率，由第二个及更多个电荷中心发展起来的先导—主放电以更快的速度沿着先前的放电通道发展，如图 1.13(e)、图 1.13(f)所

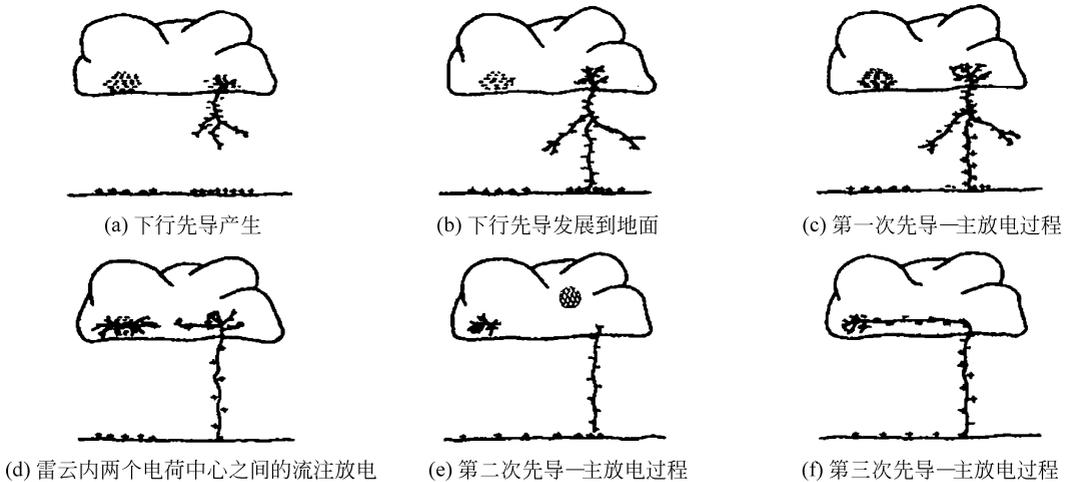


图 1.13 多重雷电放电发展过程示意图^[2]