



# 雷电电磁脉冲防护技术

主编 李祥超 蔡露进 张 静 陈良英

非  
外  
借



科学出版社

# 雷电电磁脉冲防护技术

主 编 李祥超 蔡露进 张 静 陈良英

副主编 (按拼音排序)

刘 艳 马骧骐 万治成 汪计昌

王中洋 徐晓培 薛 奇 于月东

科 学 出 版 社

## 内 容 简 介

本书系统地介绍了雷电电磁波的辐射、耦合及其抑制方法。

全书共 8 章, 第一章讲述了雷电放电的基本特性; 第二章讲述了雷电放电通道的辐射和温度特性; 第三章讲述了天线耦合雷电电磁脉冲的特性; 第四章讲述了雷电波的激励下单导体传输线、双导体传输线和多导体传输线的耦合, 以及架空线缆、同轴线、双绞线和埋地线缆耦合雷电电磁脉冲的特性分析; 第五章讲述了雷电电磁脉冲在各种线缆中的传输; 第六、七章分别讲述了低压输电线路和信号线路雷电电磁脉冲的抑制; 第八章讲述了电涌保护器应用中存在的老化、劣化和漏电流、续流等问题。本书具有一定的理论深度、较宽的专业覆盖面, 并注重应用性, 以提高学生的防雷装置试验理论与实践能力。

本书可作为雷电科学与技术专业教材及防雷技术人员资格考试培训用书。

### 图书在版编目 ( CIP ) 数据

雷电电磁脉冲防护技术/李祥超等主编. —北京: 科学出版社, 2018.1  
ISBN 978-7-03-056170-1

I. ①雷… II. ①李… III. 雷-电磁脉冲 ②闪电-电磁脉冲 ③防雷  
IV. P427.32

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2017) 第 320298 号

责任编辑: 昌盛 罗吉 / 责任校对: 张怡君

责任印制: 吴兆东 / 封面设计: 迷底书装

科学出版社 出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码: 100717

<http://www.sciencep.com>

北京中石油彩色印刷有限责任公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

\*

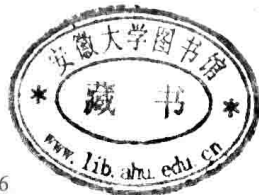
2018 年 1 月第 一 版 开本: 787 × 1092 1/16

2018 年 1 月第一次印刷 印张: 22

字数: 522 000

定价: 69.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)



## 前 言

南京信息工程大学在国内率先开设雷电科学与技术专业，所有问题都是新的探索。由于该学科建设时间较短、经验不足，许多问题需要我们共同探索和研究。

为满足普通全日制高等院校雷电科学与技术专业教学基本建设的需要，我们组织编写了《雷电电磁脉冲防护技术》，供雷电科学与技术专业学生使用，以改善该类教材匮乏的局面。

本书是根据雷电科学与技术专业培养计划而撰写的，从而保证了与其他专业课内容的衔接，理论内容和实践内容的配套，体现了专业内容的系统性和完整性。本书力求深入浅出，将基础知识点与实践能力点紧密结合，注重培养学生的理论分析能力和解决实际问题的能力。本书适用于雷电科学与技术专业教学及防雷专业技术人员。

随着电子设备的大规模普及和人们防雷意识的日益提高，国内外已将雷电电磁脉冲防护技术列为重要的科研领域之一。本书通过精选内容，以有限的篇幅取得比现有相关教材更大的覆盖面，在不削弱传统较为成熟的雷电电磁脉冲防护基本内容的前提下，更充实了雷电电磁脉冲防护方法的新思路，以及雷电电磁脉冲防护所选用的防护元件的原理和测试方法等，拓宽了知识面，并紧跟高新技术的发展，以适应雷电电磁脉冲防护、应用的需要。

鉴于雷电电磁脉冲涉及学科广泛，本书在编写中力求突出对雷电电磁脉冲产生原理的分析及对防护设计方法的介绍，并对雷电电磁脉冲防护的器件进行冲击试验和数据分析，给出了各类防护器件的测试方法和技术参数。

本书在编写过程中得到国内知名防雷企业：南京云凯防雷科技股份有限公司的支持，在此表示感谢。限于编者水平，书中不足之处在所难免，恳请读者批评指正。

李祥超

2017年5月

# 目 录

## 前言

第一章 雷电放电特性 .....	1
1.1 雷电通道放电过程 .....	1
1.2 雷电放电的电磁脉冲特性 .....	7
参考文献 .....	10
第二章 雷电放电通道的辐射 .....	11
2.1 雷电放电瞬态辐射理论 .....	11
2.2 雷电放电通道电磁辐射 .....	18
2.3 雷电放电通道电磁辐射等效模型 .....	19
2.4 雷电放电通道的温度特性 .....	25
参考文献 .....	31
第三章 天线耦合雷电电磁脉冲 .....	33
3.1 天线瞬态场响应理论 .....	33
3.2 雷电放电通道电磁辐射试验 .....	40
3.3 接收天线耦合雷电电磁脉冲的抑制 .....	46
参考文献 .....	55
第四章 线缆耦合雷电电磁脉冲 .....	56
4.1 雷电电磁脉冲瞬态场耦合模型 .....	56
4.2 雷电波激励单导体传输线耦合 .....	63
4.3 雷电波激励双导体传输线耦合 .....	68
4.4 雷电波激励多导体传输线耦合 .....	72
4.5 架空线缆耦合雷电电磁脉冲特性分析 .....	77
4.6 同轴线耦合雷电电磁脉冲特性分析 .....	88
4.7 双绞线耦合雷电电磁脉冲特性分析 .....	101
4.8 埋地线缆耦合雷电电磁脉冲特性分析 .....	110
参考文献 .....	121
第五章 雷电电磁脉冲的传输 .....	122
5.1 双导体传输线的电路理论 .....	122
5.2 多导体传输线的电路理论 .....	127
5.3 雷电波的波动方程 .....	136
5.4 架空传输线中雷电电磁脉冲的传输 .....	153

5.5	埋地传输线中雷电电磁脉冲的传输 .....	174
5.6	同轴线中雷电电磁脉冲传输的瞬态响应试验 .....	181
5.7	线路阻抗突变对雷电电磁脉冲传输的影响 .....	187
	参考文献 .....	201
<b>第六章</b>	<b>低压输电线路雷电电磁脉冲的抑制 .....</b>	<b>203</b>
6.1	限压型电涌保护器 ZnO 压敏电阻多片并联的分析 .....	203
6.2	电涌保护器级间能量的配合 .....	212
6.3	电涌保护器后备保护问题 .....	228
	参考文献 .....	242
<b>第七章</b>	<b>信号线路雷电电磁脉冲的抑制 .....</b>	<b>244</b>
7.1	信号电涌保护器电路结构分析 .....	244
7.2	信号电涌保护器对信号传输的影响 .....	258
7.3	$\frac{1}{4}\lambda$ 短路同轴线在雷电防护中的应用 .....	270
	参考文献 .....	276
<b>第八章</b>	<b>电涌保护器应用中的关键问题 .....</b>	<b>277</b>
8.1	限压型电涌保护器 ZnO 压敏电阻的漏电流问题 .....	277
8.2	限压型电涌保护器 ZnO 压敏电阻劣化、老化的问题 .....	285
8.3	暂态抑制二极管的性能问题 .....	293
8.4	开关型中续流问题 .....	304
8.5	雷电阻尼振荡波冲击下气体放电管击穿性能的问题 .....	331
8.6	固体放电管在组合波发生器冲击下的性能问题 .....	337
	参考文献 .....	343

## 1.1 雷电通道放电过程

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，或云间的异性电荷之间，或云中电荷和大地之间的放电过程。发生在电力系统中的通常为最后一种情况，称为云地闪击。

对雷云带电起因的解释很多。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的大气层冷凝的结果。强烈的上升气流穿过云层，水滴被撞分裂而带电。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，大滴水珠带正电，凝聚成雨下降，或悬浮在云中，形成局部的带正电的区域。雷云的底部大多数带负电，它在地面上感应出大量的正电荷。雷云和大地之间形成高电场，电势差达数兆到数十兆伏，超过大气的游离放电的临界电场强度(约  $30\text{kV/cm}$ ，有水滴存在时约为  $10\text{kV/cm}$ )，形成云间或云对地的火花放电，产生强烈的光和热，使空气急剧膨胀震动，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<sup>[1]</sup>。

关于雷暴云内的空间电荷，最经典的研究认为其是一个垂直的偶极性或三极性结构，即雷暴云上部 $-25\sim-60^{\circ}\text{C}$ 为正电荷分布区，下部 $-10\sim-25^{\circ}\text{C}$ 为负电荷分布区，有时在负电荷层下部  $0^{\circ}\text{C}$  区附近还有一个小的正电荷区。电荷分布区与温度相对应。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出现在同一高度。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，青藏高原地区多为准反极性电荷结构，但也可能出现正常结构<sup>[2]</sup>。

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。一般认为负极性雷电流占 90%左右。广东省电力试验研究所根据雷电定位系统得到的结论为：在云地闪击中，大多数为负极性闪击，在 1997 年、1998 年和 1999 年三年中，负极性分别占总闪击次数的 95.6%、95.6%和 95.8%<sup>[3]</sup>。根据国内外实测，75%~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采取负极性的雷电冲击波进行研究分析。

一次典型的负云地闪击(简称为地闪)所包含的各种物理过程随时间的变化如图 1.1

所示<sup>[4]</sup>。如图 1.1 中  $t=0\text{ms}$  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为 50C 左右，主负电荷区总电荷量大约为 100C，而次正电荷区的电荷量为 10C 以下。主正电荷区的电荷密度为  $0.5\sim 1.0\text{nC}/\text{m}^3$ ，高度为 5~8km，主负电荷区的电荷密度为  $1\text{nC}/\text{m}^3$  左右，高度为 3~6km，而次正电荷区的电荷密度小于  $0.5\text{nC}/\text{m}^3$ ，高度为 2~4km。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放电，预击穿过程为下行梯级先导形成创造条件。然后内部放电朝下向云层外部空间发展形成下行先导。下行先导为梯级先导。

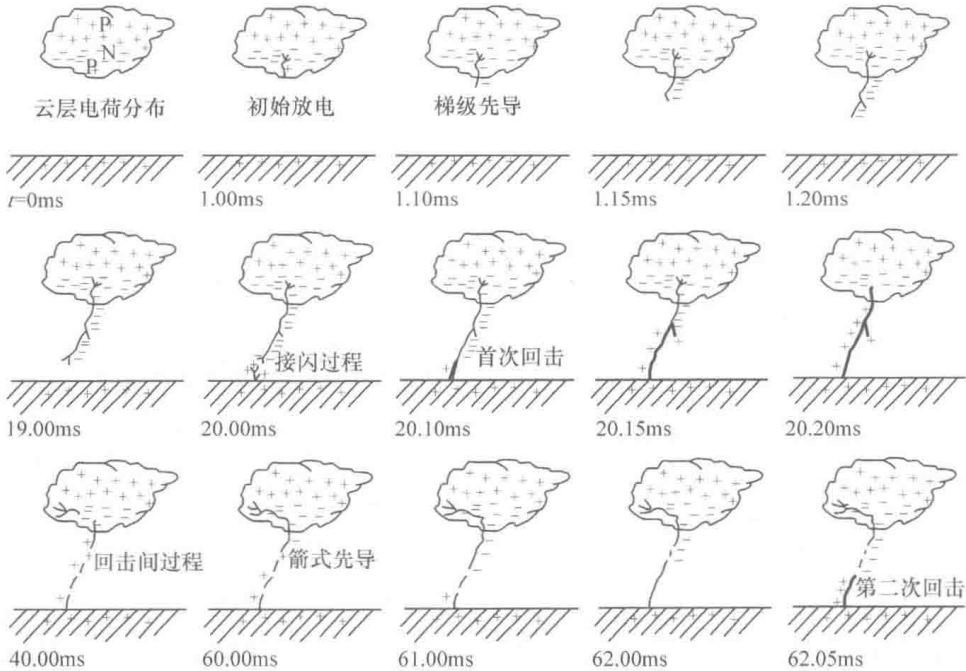


图 1.1 一次典型的负地闪所包含的各种物理过程随时间的变化<sup>[4]</sup>

当负极性的下行先导靠近地面时，会在地面感应出正电荷，然后从地面产生迎面先导，即上行先导。当下行先导和上行先导接近时，如果二者头部之间的电场超过空气间隙的击穿场强，则头部之间的空气被击穿而形成接闪过程，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(也叫直窜先导)，形成第二次回击过程。

梯级先导：在云中的负电荷中心的电场强度达到  $10\text{kV}/\text{cm}$  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。这一段暗淡的光柱在照片上显示出来的是一条弯曲有分叉的折线段，如图 1.2 所示，称为梯级先导或梯式先导。梯级先导的平均发展速度为  $1.5\times 10^5\text{m}/\text{s}$ ，变化



范围在 $(0.1\sim 2.6)\times 10^6\text{m/s}$ <sup>[5]</sup>. 近期的人工引雷试验表明, 先导发展过程的速度是非均匀的, 从4次火箭引雷的上行先导的发展过程得到的二维平均速度为 $10^5\text{m/s}$ , 局部速度在 $(0.2\sim 1.8)\times 10^5\text{m/s}$ 的范围<sup>[6]</sup>. 而单个的梯级推进速度达到 $5\times 10^7\text{m/s}$ . 单个梯级的平均长度为50m左右, 其变化范围为3~200m. 梯级间的间歇时间为30~125 $\mu\text{s}$ , 远离地面时平均为50 $\mu\text{s}$ , 靠近地面时平均为10 $\mu\text{s}$ . 梯级先导的通道直径在1~10m的范围.

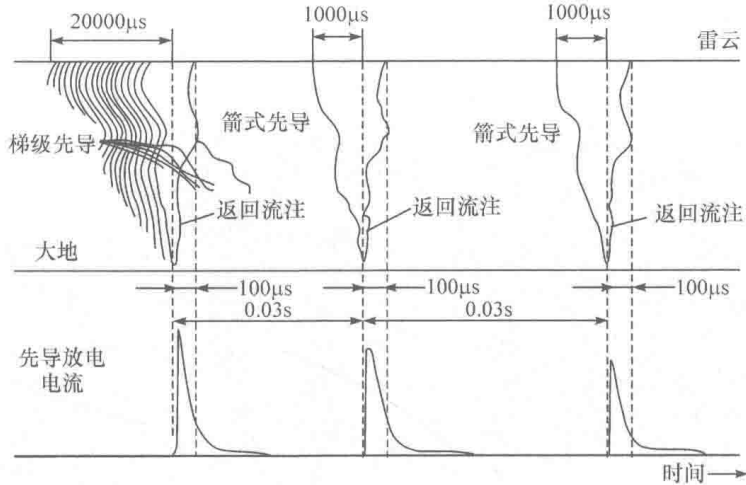


图 1.2 雷电放电的发展过程

带负电荷的雷云向下对地放电的基本过程称为下行负地闪, 可用图 1.3 来表示, 图下方为对应的放电电流波形.

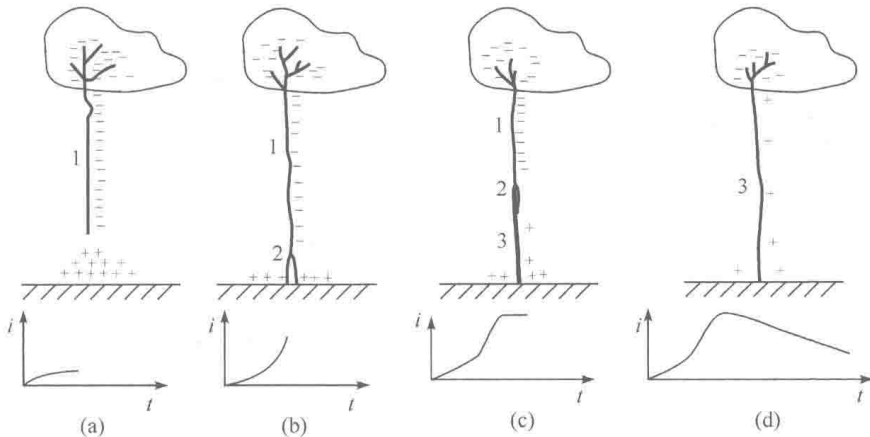


图 1.3 雷电放电的基本过程

1——先导放电通道; 2——强游离区; 3——主放电通道

先导放电阶段: 雷云中的负电荷逐渐集聚, 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 1.3(a)所示.

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天空发展，这种先导称为迎面先导或上行先导，图 1.4 所示为在一次下行先导发展过程中，从 4 个通信塔顶部产生的迎面先导的照片。当下行先导到达地面或与迎面先导相遇以后，就在通道端部因大气强烈游离而产生高密度的等离子区，此区域自下而上迅速传播，形成一条高电导率的等离子体通道，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 1.3(c)、(d)所示。

图 1.5 所示为日本横山茂教授提供的一次下行先导和迎面先导的发展过程的观测结果<sup>[8]</sup>。

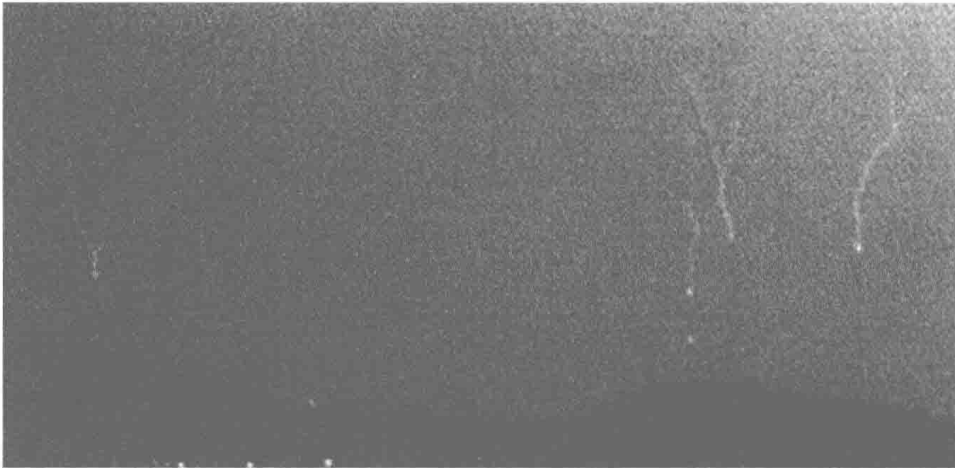


图 1.4 从 4 个通信塔顶部产生的迎面先导的照片<sup>[7]</sup>

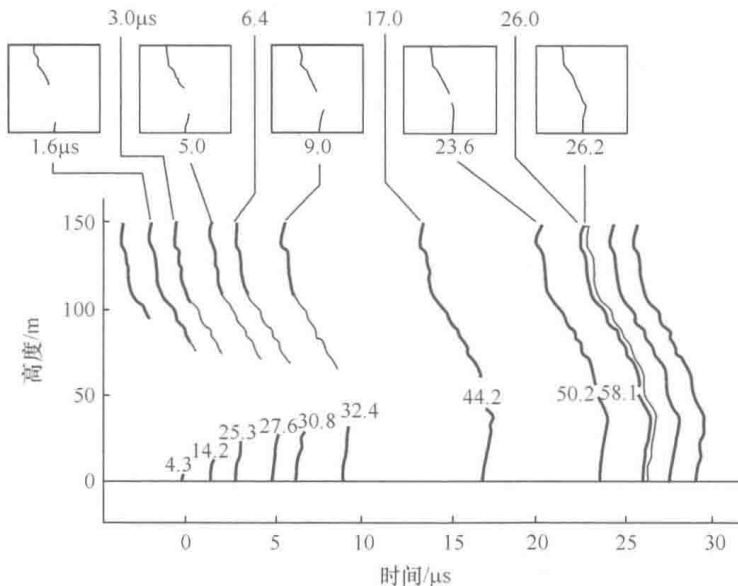


图 1.5 一次下行先导与迎面先导的发展过程的观测结果<sup>[9]</sup>  
(底部的水平横轴和上部小框对应的数字为时间，单位为 $\mu\text{s}$ )

图 1.6 所示为 Berger 和 Vogelsanger 采用时间分辨的纹影摄影(streak photograph)于 1966 年拍摄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<sup>[9]</sup>. 整个过程大约在  $300\mu\text{s}$  内完成. 下行梯级先导从照片的左上角发展到  $A$  点处, 而正极性上行先导的发光强度由于相对较弱无法拍摄到. 正极性上行先导可能也是梯级发展, 其从  $55\text{m}$  高塔的顶部起始, 发展到  $B$  点处产生分叉, 一条分支向左上部发展, 而另一条分支向右与从下行先导端部  $A$  点朝下发展的放电通道会合. 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.

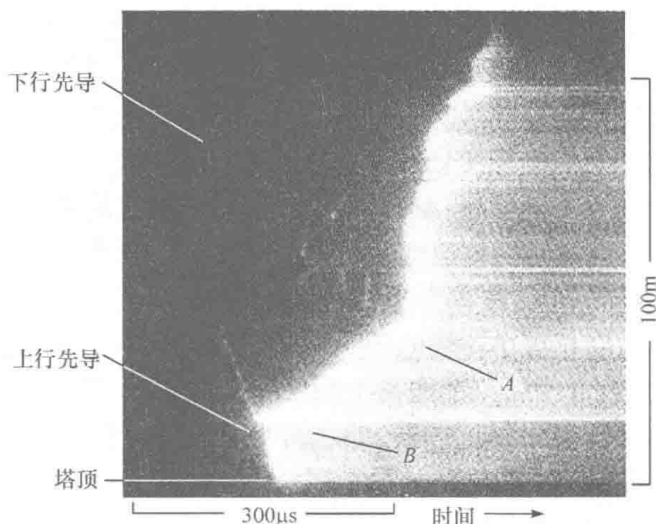


图 1.6 Berger 等拍摄的负下行先导接闪过程<sup>[9]</sup>

先导放电发展的平均速度较低, 回击的发展速度比梯级先导快得多, 为  $(0.2\sim 2)\times 10^8\text{m/s}$ , 平均为  $5\times 10^7\text{m/s}$ . 回击通道的直径平均为几厘米, 在  $0.1\sim 23\text{cm}$ . 回击过程是中和云中电荷的主要过程, 发热产生高温, 形成很亮的通道, 回击通道温度可达  $10^4\text{K}$  量级. 地闪所中和的云中负电荷, 绝大部分在先导放电过程中储存在先导的主放电通道和分支中, 在回击过程中, 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 1.3 中. 先导发展过程产生的电流不大, 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.

箭式先导: 云中分布的电荷被绝缘地相互分隔. 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, 平均发展速度为  $2\times 10^6\text{m/s}$ , 变化范围为  $(0.1\sim 2.1)\times 10^7\text{m/s}$ . 当到达地面上空一定距离后, 再次引发地面窜起的回击, 形成第二次完整的放电回击, 如图 1.1 所示.

在某些地区, 一次地闪包含一次放电闪击, 称为单闪击地闪. 多闪击地闪的各闪击间隔平均为  $50\text{ms}$ , 在  $3\sim 380\text{ms}$ . 一次地闪的平均持续时间在  $0.2\text{s}$  左右, 其变化范围为  $0.01\sim 2\text{s}$ .

回击间过程<sup>[10]</sup>：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，如 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。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 100μs 量级的时间内完成。在这期间，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 左右。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，以相对稳定的电场变化为特征，持续时间为几十毫秒，该过程不伴随有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要小。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得的云闪和地闪的 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，而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，但如果主放电通道在回击之后有连续电流流过，时间间隔可能会增加到 0.1s。连续电流在 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，一次可将几十库仑的电荷从雷云输送到地面。有 25%~50% 的地闪过程包含有连续电流过程。在连续电流阶段的脉冲性电场变化称为 M 分量。图 1.7 所示为发生在 20km 处(图 1.7(b)实际为 19km 处)

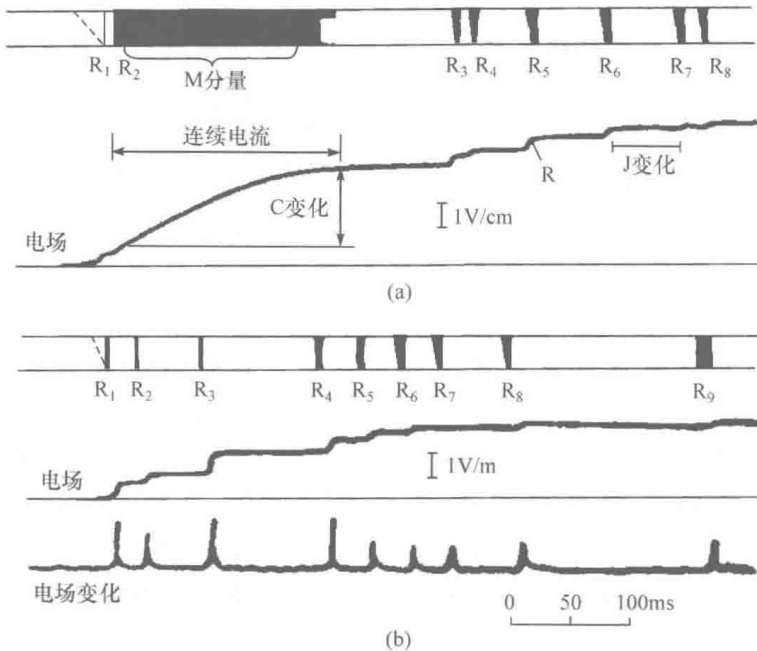


图 1.7 二次多回击地闪过程的毫秒级光学和电场变化过程示意图<sup>[11]</sup>

的二次多回击地闪过程的毫秒级光学和电场变化过程示意图<sup>[11]</sup>。图 1.7(a)表示该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。图中上部为光学观测，中间为慢电场变化，下部为快电场变化。并非所有的地闪过程都包含了所有云间过程，在图 1.7(b)所示的另一次包含了 9 次回击的地闪过程中就没有连续电流过程发生。

## 1.2 雷电放电的电磁脉冲特性

根据 IEC61312-1 标准的定义，雷电电磁脉冲(lightning electromagnetic pulse, LEMP)包括非直击雷产生的电磁场和电流瞬变。以此为依据，LEMP 可以划分为 3 种形式：静电脉冲、地电流瞬变和电磁场辐射。以往防雷工程中强调的 LEMP 通常是指地电流瞬变和架空输电线的传导浪涌，而现在电磁脉冲辐射场的危害越来越严重了。

### 1.2.1 静电脉冲

大气电离层带正电荷，与大地之间形成了大气静电场，通常情况下，平原地区地面附近电场强度约为  $150\text{V/m}$ 。雷雨云的下部净电荷较为集中，其电势较高，因此其下方地面局部静电场强远高于平时的大气静电场强，雷雨降临之前，该区域地面场强可达  $10 \sim 30\text{kV/m}$ 。

雷雨云形成的电场，在地面物体表面感应出异号电荷，其电荷密度和电势随附近大气场强而变化。例如，地面上  $10\text{m}$  处的架空线，可感应出  $100 \sim 300\text{kV}$  的对地电压。落雷的瞬间，雷雨云电荷被释放，大气静电场急剧减小，地面物体的感应电荷失去束缚，会沿接地通路流向大地，由于电流流经的通道存在电阻，因而出现电压，这种瞬时高电压称为静电脉冲(electrostatic pulse)，也称天电瞬变(atmospheric transients)，如图 1.8 所示。对于接地良好的导体而言，静电脉冲极小，可以忽略。但静电接地电阻较大的孤立导体，其放电时间常数大于雷电持续时间，静电脉冲的危害尤为明显。

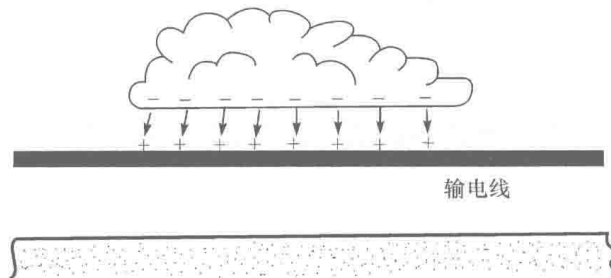


图 1.8 静电脉冲的形成原理

静电放电脉冲的危害形式主要表现为以下两种：

(1) 电压(流)浪涌。输电线路上的静电高压脉冲会沿导线向两边传播，形成高压浪涌，对相连的电气设备造成危害。

(2) 高压电击。垂直安置的导体，如果接地电阻较大，会在尖端出现火花放电，能

点燃易燃易爆物品；如果人、畜在闪电过后的短暂时间内触摸或接近这类物体，可能遭电击身亡。

### 1.2.2 地电流瞬变

地电流瞬变是由落雷点附近区域的地面电荷中和过程形成的。以常见的负地闪为例，如图 1.9 所示，主放电通道建立后，产生回击电流，即雷雨云中的负电荷会流向大地。同时地面的感应正电荷也流向落雷点与负电荷中和，形成瞬变地电流。地电流流过的地方会出现瞬态高电势；不同位置之间也会有瞬时高电压，即跨步电压，如图 1.9 中 A、B 两点。

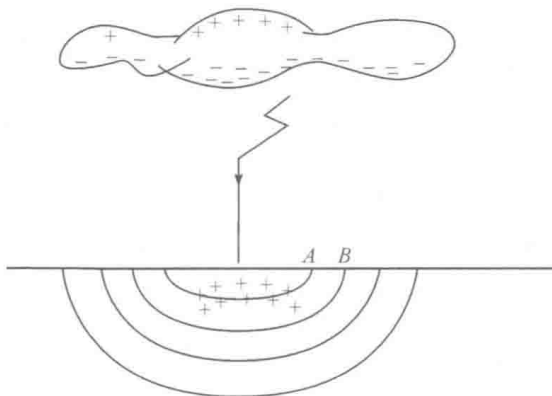


图 1.9 地电流瞬变

地电流瞬变的危害形式包括以下三种：

- (1) 地电势反击。地电势的瞬时高压会使接地的仪器金属外壳与不接地的电路板之间出现火花放电。
- (2) 跨步电压电击。附近的直击雷可能造成站在地面上的人、畜被跨步电压电击致死。
- (3) 传导和感应浪涌电压。埋于地下的金属管道、电缆或其他导体，构成电荷流动的低阻通道，其表面有瞬变电流流过，造成导体两端出现电压浪涌；对屏蔽线而言，地电流虽只流经屏蔽层表面，但由于存在互感，在内芯导线上会感应出瞬变电压，其数值正比于屏蔽层电流的一阶导数。由于地电流上升沿很陡，上升时间仅数百纳秒，故感应电压峰值极大，不但会干扰信息传输，还可能造成电路硬损伤。

### 1.2.3 电磁场辐射

主放电通道一旦建立，云层电荷迅速与大地或云层异号感应电荷中和，回击电流急剧上升，受电荷电量、电势和通道阻抗影响，其上升速率最大可达  $500\text{kA}/\mu\text{s}$ 。此时，放电通道构成等效天线，产生强烈的瞬态电磁辐射。无论是闪电在空间的先导通道或回击通道中闪电产生的瞬变电磁场，还是闪电流进入地上建筑的避雷针系统以后所产生的瞬变电磁场，都会在一定范围产生电磁作用，对三维空间内的各种电子设备产生干扰和破坏作用。图 1.10 是雷电放电各个阶段辐射电场强度波形，可见从雷雨云起电、预放电、阶跃先导到回击、后续回击等所有过程都伴随着电磁辐射。

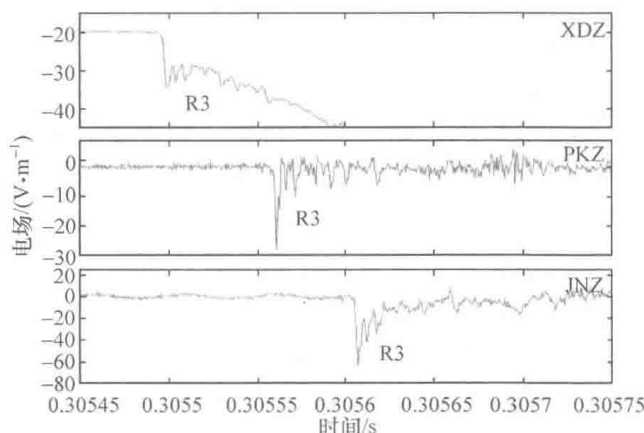


图 1.10 雷电辐射电场强度波形

图 1.11 是首次回击产生的电场强度频谱；图 1.12 则是云内负闪电电场强度频谱。两图比较，地闪和云闪的电磁场的频带相近，主要成分都是分布在极低频(ELF, DC~3000Hz)和甚低频(VLF, 3~30kHz)段，以长波干扰为主。

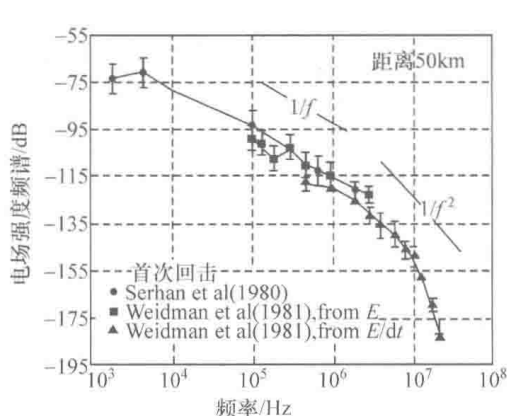


图 1.11 首次回击产生的电场强度频谱

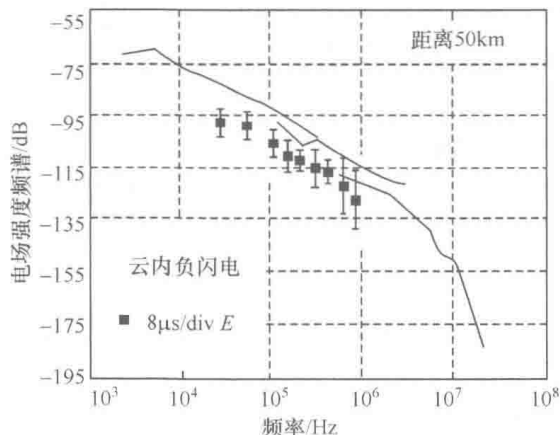


图 1.12 云内负闪电电场强度频谱

目前观测到的最大雷感应电压为 400kV，感应电流峰值为 110kA；其中，产生感应电压的落雷中，首次回击占 30%，二次回击占 33%，三次以后的回击占 37%。对通信线路的实际观测证明，雷电电磁感应浪涌的波头平均值为  $(25 \pm 2.5)\mu\text{s}$  (10~50 $\mu\text{s}$  内的占 90%)，半峰值时间平均值为  $(55 \pm 15)\mu\text{s}$  (25~110 $\mu\text{s}$  的占 90%)。而且，大地电导率越低，感应雷电浪涌越大。

1971 年，美国通用研究公司的 R.D.Hill 用类闪电(like lightning)模型进行仿真实验证明；磁场强度达到 0.07Gs 时(1Gs=10<sup>-4</sup>T)，无屏蔽的计算机会产生误动作，而 2.40Gs 的脉冲磁场能使计算机永久损伤，虽然该模型与目前的雷电流模型有较大差别，但都基本反映了当时计算机的电磁敏感度。

进入 20 世纪 80 年代，随着超大规模集成电路、计算机技术和计算机网络系统的发展，对电磁脉冲的敏感程度有所提高，由于对电磁脉冲的防护相对较为薄弱，因此雷暴

日虽未增加,但雷电灾害却呈逐年上升之势.1984年,D.Jaeger研究了LEMP对军用电子设备的危害,提出能量耦合通道主要包括机壳、天线、馈线和穿壳导线,并且分析了各种典型元件的损伤阈值.1988年,美国第26届航空科学年会上发表的研究报告指出,雷电对导弹的危害包括直击雷和电磁脉冲两个方面,其作用机理主要包括大电流直接注入以及壳体电流与内部电路之间的能量耦合.该报告参照美军标MIL-STD-1757中规定的雷电标准波形,建议用冲击电流发生器对导弹电弧放电模拟直击过程,而用脉冲高压发生器对地放电模拟LEMP.

在LEMP敏感度测试方面,美军标MIL-STD-464《系统电磁环境效应要求》,全面系统地提出了对武器系统全寿命过程中的电磁环境效应的一般要求,它所考虑的电磁环境效应包括雷电.该标准中明确规定了用于雷电直接效应和间接效应的电流波形,规定10m处云地闪电的磁场变化率为 $2.2 \times 10^9 \text{A} \cdot (\text{m} \cdot \text{s})^{-1}$ ,电场变化率为 $6.8 \times 10^{11} \text{V} \cdot (\text{m} \cdot \text{s})^{-1}$ ,该标准要求军械在暴露和储存条件下先经历雷电的直接打击和近距离打击后应保持安全并且满足其工作性能要求.

总的来说,目前对LEMP的研究主要集中在建立雷电流数理模型、研究LEMP电磁场、雷电电磁脉冲辐射场对架空电力线的耦合等方面.但是,因为闪电的种类多,过程也比较复杂,并且由于使用的脉冲源和电磁环境不同,各国对用于电路测试的LEMP标准波形的规定也存在较大差异,尤其是对模拟方式,还没有形成规范.有关LEMP对电子线路的效应和防护研究较少,而国内的LEMP危害研究大多借鉴国外研究经验,且研究主要集中于雷电对电力传输线、变压器、通信线路等方面的影响.

### 参 考 文 献

- [1] 张纬铍,高玉明.电力系统过电压与绝缘配合[M].北京:清华大学出版社,1988.
- [2] 张廷龙,郗秀书,袁铁,等.中国内陆高原地区典型雷暴过程的地闪特征及电荷结构反演[J].大气科学,2008,32(05):1221-1228.
- [3] Chen S M, Du Y, Fan L M, et al. A lightning location system in China: Its performances and applications [J]. IEEE Transaction on Electromagnetic Compatibility, 2002, 44(4): 555-560.
- [4] Uman M A. The Lightning Discharge [M]. New York: Academic Press Inc., 1987.
- [5] 虞昊.现代防雷技术基础[M].北京:清华大学出版社,1995.
- [6] Jiang R B, Qie X S, Wang C X, et al. Propagation features of upward positive leaders in the initial stage of rocket-triggered lightning[J]. Atmospheric Research, 2012, 129-130: 90-96.
- [7] Warner T A. Observations of simultaneous upward lightning leaders from multiple tall structures [J]. Atmospheric Research, 2012, 117: 45-54.
- [8] Cooray V. The Lightning Flash [M]. London: The Institution of Electrical Engineers, 2003.
- [9] Uman M A. The Art and Science of Lightning Protection [M]. Cambridge: Cambridge University Press, 2008.
- [10] 王道洪,郗秀书.雷电与人工引雷[M].上海:上海交通大学出版社,2000.
- [11] Kitagawa N, Brook M, Workman E J. Continuing currents in cloud-to-ground lightning discharges [J]. Journal of Geophysical Research, 1967, 67(2): 637-647.



## 2.1 雷电放电瞬态辐射理论

## 2.1.1 瞬变电偶极子的辐射场

## 2.1.1.1 瞬变电偶极子的辐射

设在真空中由相距  $2l$  的正负两个点电荷构成一电偶极子, 其电量为  $q$ , 在坐标系中的位置如图 2.1 所示。

从  $t=-l/v$  开始, 电荷  $+q$  突然以速度  $v$  匀速向电荷  $-q$  运动; 在  $t=-l/v$  时刻到达电荷  $-q$  所在位置而突然停止。这种情况相当于在一段时间内出现一个突然产生又突然消失的电流元, 该电流的电流密度可表示为

$$J(r, t) = \begin{cases} -\hat{z}q\delta(x)\delta(y)\delta\left(t + \frac{z}{v}\right), & |t| < \frac{l}{v} \\ 0, & |t| > \frac{l}{v} \end{cases} \quad (2-1)$$

这是因为  $J = \rho v$ ,  $\rho = q\delta(x)\delta(y)\delta(z+vt)$ , 而且

$$\delta(z+vt) = \delta\left[v\left(t + \frac{z}{v}\right)\right] = \frac{1}{v}\delta\left(t + \frac{z}{v}\right)$$

在频域电流元的密度为

$$\hat{J}(r, \omega) = \begin{cases} -\hat{z}\delta(x)\delta(y)e^{-i\omega z/v}, & |z| < l \\ 0, & |z| > l \end{cases} \quad (2-2)$$

相应的电流强度则是

$$\hat{I}(r, \omega) = \int \hat{J}(r, \omega) dx dy = \begin{cases} -qe^{-i\omega z/v}, & |z| < l \\ 0, & |z| > l \end{cases} \quad (2-3)$$

在远区, 即  $r \gg l$  时, 电流元的辐射场可视为球面波, 在球坐标系  $(r, \theta, \varphi)$  中, 仅有  $E_\theta$  和  $E_\varphi$  分量, 而且  $E_\varphi = \eta H_\varphi$ ,  $\eta = (\mu_0/\epsilon_0)^{1/2}$ , 对于  $z$  轴上的一个微电流源  $I(z')dz'$ , 其在  $(r, \theta, \varphi)$  处对电场的贡献为

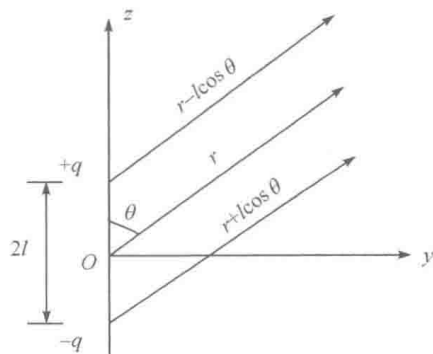


图 2.1 电偶极子