

现代工程防雷技术

梁江东 程文锋 著



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

现代工程防雷技术

梁江东 程文锋 著



中国电力出版社
CHINA ELECTRIC POWER PRESS

内 容 提 要

本书通过对周围环境的变化分析,引领读者理解雷电过程并探讨如何消除雷电对我们生活的影响。

本书中第一部分主要从电磁场理论出发,辩证地看待和正视空间电荷的存在及其对放电过程与环境的影响。讲解时从大环境出发,不计较细小的经验公式,同时分析了现行保护设施失败的原因,提出如何进行有效保护的理论和防护实施要求。

第二部分为一些具体行业的防护实施方法介绍,其中重点是电力系统和江南小民居的防护,还涉及电气化铁路、移动通信、民航机场、森林等关系到国计民生的领域。

本书可供电力系统从事技术管理和安全运行管理的专业工程师,大型企业负责电气设备运行维护的高级技术人员,气象部门负责防雷专项管理的人员阅读,也可作为从事各类建筑电气设计和防雷保护设计的工程师及大专院校高电压专业及相关专业教师学生的参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

现代工程防雷技术 / 梁江东, 程文锋著. — 增订本. — 北京: 中国电力出版社, 2016.4

ISBN 978-7-5123-8880-2

I. ①现… II. ①梁… ②程… III. ①防雷工程 IV. ①TM862

中国版本图书馆CIP数据核字(2016)第024661号

中国电力出版社出版、发行

(北京市东城区北京站西街19号 100005 <http://www.cepp.sgcc.com.cn>)

北京九天众诚印刷有限公司印刷

各地新华书店经售

*

2016年4月第一版 2016年4月北京第一次印刷

850毫米×1168毫米 32开本 4.875印张 109千字

印数0001-2000册 定价 38.00元

敬告读者

本书封底贴有防伪标签,刮开涂层可查询真伪
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

雷电给人类的生命财产带来了巨大的灾难，如何做到有效防雷是人们追求的目标，也是高电压技术专业人员一直在研究的课题。

然而，很多防雷失败的案例至今还得不到合理的解释。

为此，需要对雷电地闪过程做进一步的研究，特别是地闪过程中地面物体的互动性能、迎面先导的成长机理都有进一步探讨的空间。

作者梁江东高级工程师长期从事雷电地闪机理及电力系统防雷方面的研究工作。在本书中，他通过理论分析、实验验证和雷电过程解释，在地面先导对雷电地闪发展及影响雷电流大小的因素等方面展示了独特的、颠覆性的见解，特别是提出了雷电场下的地面电磁环境影响雷电过程及雷云场下的环境和谐认识的观点，给我们开辟了一个全新的解决雷电防护问题的路径，使我们看到了彻底杜绝雷害事故的希望和可能。对进一步开展雷电放电机理研究和防雷措施改进有促进作用。

朱子述 教授 博士生导师
上海交通大学计算机及电力工程学院
高电压技术专业

前言

本书提笔前，偶然联想到中央电视台科教节目播放的关于湖南省一个“雷电村”的节目。节目中，从湖南省雷电防护中心的处理方法看，其实并没有找到出现雷害事故的症结。鉴于作者对雷电防护研究，相信类似事故在当地还将发生，只是可能因当地居住条件的改善而有所改观。比如民居不再是板壁屋，而是砖瓦屋；屋内不再是床前的拉线灯头，而是墙壁上的船形开关和屋顶照明灯和各种家用电器等。当然，这些方面的改变会使居民人身受伤害的可能性减小，但另一方面会使家电用具的损坏增加。原因是我们并没有认识到雷电进屋与 220V/380V 电源线在农田空旷地的走向有直接的关系。这就是科学技术的双刃剑。如果我们没有处理好科技进步与自然界的关系，即使是某些我们看不见的微妙变化影响了环境和谐，自然界的破坏因素也会在空中带来巨大的灾害。作者通过多年雷电研究和实践论证最终成稿此书，是想将作者对雷电的认识和理解与大家分享，使我们免受雷电的伤害。

作者在原电力部武汉高压研究所从事电力检测、雷电防护和电磁兼容等方面研究 30 年，一直认为雷电防护问题应该由从事高电压专业的电气工程师解决，与气象类工程师关系并不密切。因为雷电现象在气象学意义上被认为是已经解决或被认可了。目前气象学已经完全可以预报某地某时的雷电情况等，但就具体到

某地什么设备、什么物体会遭雷击等问题就与气象学的关系不大。因此，本书是为了给从事雷电防护工作的电气工程师一个全新的观念去认识雷电过程。

在著写本书时，一个重要理念的出发点是遵从自然规律与环境和谐。从自然界对抗雷电现象的手段看，大致可分为“躲”、“挡”、“引”三种方法。“躲”是动物所具有的能力，动物可以躲进森林、山洞；“挡”是植物因无法移动，只能通过顶部自然赋予的自我保护能力，避免被雷击；“引”是人类大规模使用金属以来，雷电防护才进入到的“引”雷入地的阶段。按照常识和对雷电的现有认识，我们编制了相关标准，并按标准埋下了数以千吨的钢铁，架设了无数的避雷针和避雷带，但雷害现象只是有所好转，并没有根除雷电损坏设备、致人死亡的现象，且近年来还有事故加剧的趋势。

我们做错了什么？错在哪里？应该怎么做？本书将从电磁场基本理论出发，按照近代物理学和科技手段得到的结论，带领大家重新去认识雷电过程。本书除了个别计算单元涉及较复杂的公式外，其他章节将使用最浅显的专业术语和简单明了的公式，引领读者分析雷电过程和我们防护失败的原因，提出一些工程防护的方法和建议供大家参考。其中第一章和第二章中一些主要理论提法，从某种程度上已经颠覆了传统的常识，可能会有点不易被人接受，但这个理论已经可以解释目前所遇到的所有的防雷失败问题和现象记录。因此，本书从另一层面上打开了一个新的防雷理念供大家探讨，共同推进我们的防雷水平向前发展。

本书中有些论证提出近 30 年了，但这些论证与雷电防护结合只是近十年的研究中完成的，不免有些问题没有解释清楚。希望与从事防雷工程的同行用本书的理论来解释遇到的实际问题，

共同来解决困扰人类几百年的问题，使雷害现象不再危害我们的生活。

本书不是标准，它只是提供给工程师一个新的概念和不犯原则性错误的方法。在成稿前增加了一个有关工程验收的建议附件，不太成熟。因为涉及标准，所以只是建议，供参考。

本书理论形成和成熟过程中，得到了国家电网公司陆宠惠先生的指导，在此表示谢意。

本书在著写过程中，得到了北京雷电防护装置检测中心赵军先生的试验数据、武汉大学电气工程学院文武先生的数值计算支持和广东电网公司肇庆供电局路军先生的现场经验分享，在此一并表示感谢。

作者

2015年6月

目 录

序

前 言

第一部分 防雷基础知识

第一章 雷电过程.....	3
第一节 雷云电场.....	4
第二节 雷电的上、下行过程.....	5
第三节 雷电流.....	11
第二章 雷云电场与空间电荷.....	23
第一节 直流电场下的电晕放电.....	23
第二节 雷雨前的电磁环境.....	27
第三节 空间电荷测试.....	30
第四节 电晕引起的避雷针上空空间电荷数量估计.....	33
第三章 普通避雷针及保护角.....	35
第一节 普通避雷针在雷电场中的表现.....	35
第二节 空间电荷影响避雷针的电场理论推导.....	39
第三节 避雷针电场强度及保护角数值计算.....	43
第四章 有效接闪器.....	51
第一节 接闪器稳定接闪的基本要求.....	51
第二节 接闪器的主动上行雷功能.....	53
第三节 接闪器的检验.....	55

第五章 接地.....	59
第一节 冲击接地电阻.....	60
第二节 相关综合措施.....	69
第六章 雷电防护与工程验收.....	73
第一节 保护角.....	74
第二节 防雷工程的验收检验建议.....	76

◀◀ 第二部分 工程防护 ▶▶

第七章 电力系统雷电防护.....	81
第一节 超高压输电线路防护.....	81
第二节 变电站防护.....	89
第三节 配电网防护.....	91
第四节 风力发电机组防护.....	104
第八章 建筑物雷电防护.....	108
第一节 民居小建筑防护.....	108
第二节 高层建筑防护.....	114
第九章 各类工程设施雷电防护.....	116
第一节 电气化铁路防护.....	116
第二节 移动通信基站塔防护.....	119
第三节 森林防护.....	122
第四节 野外营地设施防护.....	125
第五节 危险品加工间、存储库防护.....	128
第六节 机场和进场区域防护.....	131
附录 A 一种无晕避雷针的数值计算介绍.....	134
参考文献.....	144
后 记.....	145

第一部分 防雷基础知识

从事雷电的防护工作，首先要了解雷电的发展过程。其实了解雷电过程也不是那么容易，常常犯习惯性或常识性错误，对雷电过程不清楚或模糊，谈防雷问题就显得本末倒置，对很多问题就不能做出合理解释。所以要做到正确的雷电防护，就需从重新认识雷电过程开始。任何事物都有一个发生、发展、结束的过程，雷电也不例外。认识过程就是重构常识。本部分包括六章，重点介绍了一个全新的雷电认知以重构雷电常识。

本部分不探讨一些细小的定义和经验公式，重点是引领读者认识现象、了解过程。其中第一章和第二章是对自然现象的认识，第三章至第五章为对工程现象的认识。对空间电荷影响的认识，是本书的重点，也是防雷技术的重点。就是因为对空间电荷存在的重新认识，颠覆了我们所有的常识。



第一章 雷 电 过 程

本章主要揭示雷电过程中上行先导存在的必然性及流注放电中大量电荷是由地面喷上天空的过程这样一个事实。雷电过程不仅与空中雷云带电有关，也与地面物体有关。接地物体的接地阻抗在一定程度上决定了雷电流的大小。大接地电阻的物体上，稳定的大电流放电都不一定能够产生。从这点新的认识出发进行雷电防护，探讨将来有可能的雷电利用，进而产生更多的研究工作内容 and 提出更多的手段用于降低雷电影响。

为了叙述简单，本书中，场强一般泛指为电场强度。

从电气学角度看，雷电放电形式及特点见表 1-1。

表 1-1 雷电放电形式及特点

放电形式	特 点
电晕放电	局部尖端场强很高，周围场强低，一般从尖端处发出，肉眼不可见，严重时可听见，通常电流为微安级以下
先导放电	局部场强很高，周围场强也很高，肉眼可见，一般长度在数米至数百米，电流在数百安培，可造成人身伤害
流注放电	放电贯穿，场强降低，电流在数千安培以上；声暴强烈，威胁人员设备

在雷电放电过程中，这几种放电大都会出现。有时流注放电是否能够出现，还要受整个回路的阻抗影响。

严格地说，雷电过程可分为雷云电场的形成过程和雷电流的上、下行过程，本章将分别给予介绍。

第一节 雷 云 电 场

带电荷的云团可以被称为雷云。既然带电荷，就会在周围建立一个电场，其所有的运动变化规律符合电磁场理论。电磁场理论中描述静电场的方程为泊松方程^[1]，如式（1-1）所示，在数学上称为势函数

$$\nabla^2\phi = -\rho/\varepsilon \quad (1-1)$$

式中 ϕ ——电场空间内各点电位；

ρ ——空间的电荷分布函数；

ε ——电介质常数。

雷云电场是一个大气条件下的电场，有其独特的特点：

（1）它是一个小区域内的大面积电场，电荷不是集中在几个点上，而是分布在云朵中；

（2）地面上所有的物体都会感知到它的存在，并做出相应的反应；

（3）就地面电场来说，在放电贯穿前，它应该是逐渐增强的；

（4）维持时间在几十秒到数百秒，是一个准静电场；

（5）它将空间中与云中电荷极性相同的电荷压向地面；

（6）场的强度超过空气绝缘强度时，将产生局部的放电或整个绝缘空间击穿放电。

实际中，整个空间电场中的平均场强远低于空气绝缘强度时，整个绝缘空间击穿放电就开始发生了。目前公认平均场强为 1 kV/cm 左右。

第二节 雷电的上、下行过程

从电场的角度看，雷电放电应向电气距离最近的点发展。因为电气距离近，意味着整个路径的平均场强最强。20 世纪 90 年代，苏联科学家通过观察，提出了“300m 以上，雷电有选择性”的说法。就是说，雷电向电场强度最强的方向发展。通常雷电选择向当地的最高点发展，比如山顶、电视塔、高楼、通信基站、烟囱、电力高压线路等。我们经常会看见下行的雷电先导突然转弯，打向其他物体，被称为“300m 以下无选择性”。

随着科技的进步，在实际现场和试验室内，使用高速摄像技术，发现了上行迎击先导放电过程和多个上行先导共存的现象。认识了这个过程，我们就可以解释整个雷电最初的基本过程：

雷云电荷建立电场，并作用于地面上的所有物体。在场强足够强时，雷电开始沿场强最强方向下行。前面的先导放电端部将雷云所处的高电位带向地面，地面上所有物体的表面电场强度瞬时、同时提高。地面物体表面上达到空气击穿场强的点（通常是尖端）会最先出现上行迎击先导。随着雷云先导的继续下行，陆续会有其他物体表面上达到空气击穿水平，出现多个上行先导。在这多个先导中，如果没有空中阻碍或阻碍比较弱，突破阻碍区的上行先导就成为了有效先导，上行有效先导将开始屏蔽周围物体的场强，使之减弱。有效的上行先导加强了与下行先导之间的电场强度，强力发展，形成放电弧道。在空中，能够阻碍上行先导发展的只有与上行先导同极性的空间电荷。

图 1-1 为实验室内冲击放电上、下行先导过程的高速摄像截

图，拍摄速度为 $16\mu\text{s}/\text{幅}$ 。从图中可以看出，图 1-1 (b) 中先导对接后形成的放电流注的亮度远高于图 1-1 (a) 的亮度。

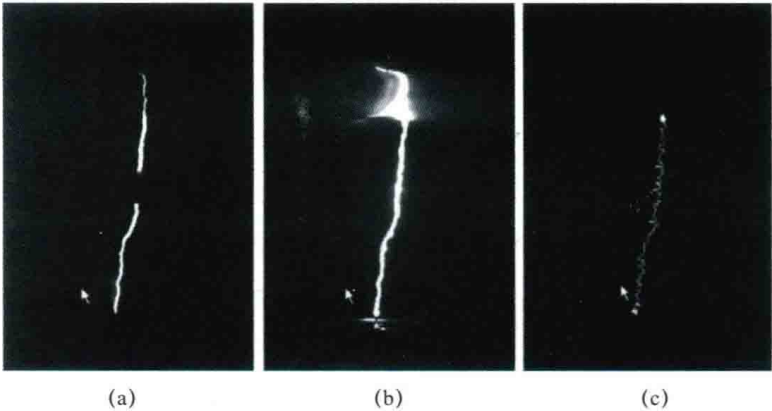
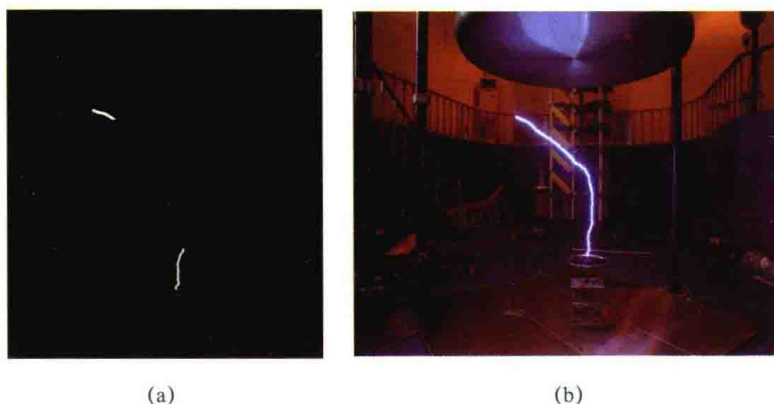


图 1-1 实验室内冲击放电高速摄像上、下行先导过程的高速摄像截图
(a) 上、下行先导放电同时出现，尚未对接前；(b) 先导对接后形成的放电流注；
(c) 主放电结束后的弧道残余放电

从上行先导的过程看，雷击点的选择实际上是来自地面，并非目前大多数人所认为的一种随机性。上行迎击先导放电实际上是将地电位送到了空中，进一步加强了上行先导端头与下行先导放电端头之间的场强，产生短路效应，强制屏蔽周围其他物体。

图 1-2 为北京雷电防护装置测试中心高压实验室中一次放电过程中，同一拍摄角度的高速摄像截图与常规 B 门照片的比较。图中先导发出后对接，形成主放电。这个试验是一个避雷针保护角的试验摄像，试验条件是预加直流 $50\text{kV}/2.5\text{min}$ 后，施加 650kV 的冲击电压。其中上云板上下垂电极的放电点模拟了已产生的下行先导。



(a) (b)

图 1-2 上下对进先导和整个间隙击穿

(a) 先导刚发生时; (b) 间隙击穿时

图 1-2 中两个时刻亮度的变化差百倍以上, 图 1-2 (a) 中, 高速摄像连背景都无法显示。

除了高速摄像证明上行先导的存在外, 近代物理学也提供了足够的物理学论据。

气体中导电与金属中导电不同。金属中, 分子被固定在原位置, 只有电子才可以自由移动, 所以金属中只有自由电子参与导电。大气中正负电荷都参与导电, 如果两种电荷相向移动, 则对外表现的电流的方向是一致的。

雷电放电是在大气中完成的。近代物理学认为: 气体中放电, 如果有光存在, 一定存在着两种电荷的复合过程。

分子复合与发光如图 1-3 所示。带正电的分子吸收电子 (或带负电的分子中的负电荷), 分子的能级将出现下降, 这个能量的释放将会以一定波长的光子的

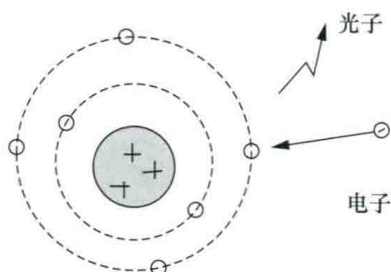


图 1-3 分子复合与发光

形式出现。如果只有单一极性的电荷在空气中运动，则没有光会被看到。所以空气中只要有光被看到就一定存在着两种极性的电荷在运动中复合。强烈的发光一定存在着大量的电荷瞬时复合过程，仅靠空气中自由存在的电荷是做不到的。

气体贯穿性放电发光，除了放电电极外，对面电极发出的迎击放电是不可缺少的。小到日光灯、霓虹灯，大到实验室放电和大气中雷电放电均如此。阴极显像管中是单一极性的电子束在真空中运动，所以没有光线从内部发出，只有电子束到达阳极荧光层，被荧光材料俘获后，才有荧光产生。这是日光灯管中只是低气压，而非真空的原因，我们需要带电分子在灯管中复合发光。

下行和上行迎击先导中各只带有一种电荷，但可以看见其发光，这说明仍然有一定量的复合过程。复合过程中所需的另一种极性的电荷主要来自于放电先导端部的高场强对空气的电离过程。先导端部高场强区单位体积内的储能^[1]为

$$e = \frac{1}{2} \epsilon_0 E^2 \quad (1-2)$$

式中 ϵ_0 ——电介质常数，为 $8.854 \times 10^{-12} \text{F/m}$ ；

E ——端部电场强度，约为 30kV/cm 。

高场强可以电离主要的空气分子。分子被电离后，同极性电荷的分子留在原地，作为先导的延伸；反极性的电荷分子（粒子），在通道内电场的作用下，将沿着先导通道，向先导放电发生点运动，并不停地产生复合过程，产生发光。由于电离数量有限，而且复合过程一直要延续到先导放电发生点，所以先导的亮度就不太高。

发光是一种能量转化输出过程。在先导向前发展过程中，它将雷云电场所储的部分能量转化成光能输出。整个先导端部电离过程所需的能量来自雷云层与地面之间储能电容结构的变化。带