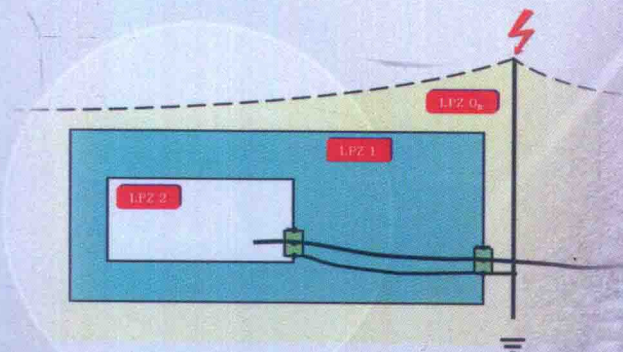


铁路通信信号防雷 技术与应用

陈建译 邱传睿 编著

T IELU TONGXIN XINHAO FANGLEI JISHU YU YINGYONG



中国铁道出版社
CHINA RAILWAY PUBLISHING HOUSE

铁路通信信号防雷 技术与应用

陈建译 邱传睿 编著

中 国 铁 道 出 版 社

2016年·北京

内 容 简 介

本书结合我国高速铁路和普速铁路实际,着重阐述了铁路通信信号系统综合防雷技术原理以及设计、施工与维护等内容。全书分为三篇:第一篇为铁路通信信号综合防雷技术原理,主要内容包括:雷电基本原理、防雷器件和防雷设备、接地系统、铁路通信信号系统综合防雷;第二篇为铁路通信信号综合防雷设计与施工,主要内容包括:铁路通信信号综合防雷设计方案、施工工艺、工程实例和高速铁路综合接地系统;第三篇为铁路通信信号综合防雷维护及典型雷害故障案例,主要内容包括:铁路通信信号综合防雷维护、典型雷害故障案例。

本书可作为铁路通信信号专业技术人员学习用书,可供相关研究、设计、维护和管理人员学习,对各类职业院校师生也有重要的参考价值。

图书在版编目(CIP)数据

铁路通信信号防雷技术与应用 / 陈建译,邱传睿

编著. —北京:中国铁道出版社,2016. 1

ISBN 978-7-113-20764-9

I. ①铁… II. ①陈… ②邱… III. ①铁路信号—信号设备—防雷 IV. ①U284. 93

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 167337 号

书 名: 铁路通信信号防雷技术与应用

作 者: 陈建译 邱传睿 编著

策 划: 崔忠文 编辑部电话: (路) 021-73146 电子信箱: dianwu@vip. sina. com
(市) 010-51873146

责任编辑: 亢嘉豪 崔忠文

封面设计: 郑春鹏

责任校对: 苗 丹

责任印制: 陆 宁 高春晓

出版发行: 中国铁道出版社 (100054, 北京市西城区右安门西街 8 号)

网 址: <http://www.tdpress.com>

印 刷: 三河市华业印务有限公司

版 次: 2016 年 1 月第 1 版 2016 年 1 月第 1 次印刷

开 本: 787 mm×1 092 mm 1/16 印张: 18.75 字数: 461 千

书 号: ISBN 978-7-113-20764-9

定 价: 78.00 元

版权所有 侵权必究

凡购买铁道版图书,如有印制质量问题,请与本社读者服务部联系调换。电话:(010)51873174(发行部)

打击盗版举报电话:市电(010)51873659,路电(021)73659,传真(010)63549480

前 言

铁路是我国国民经济的大动脉和大众化交通工具,对国民经济的发展起到至关重要的作用。铁路通信信号系统是保证列车安全运行、提高运输效率的关键技术装备之一,被称为铁路运输的“中枢神经”。

近年来,信息化、网络化、智能化等微电子技术铁路通信信号系统中得到广泛应用。铁路通信信号系统大量采用耐能量能力低的集成电路和微电子器件,极易受到雷电的侵入和干扰,影响系统的稳定性和可靠性。试验证明, 10^{-9} J 这样小的干扰能量可能使集成电路失效。而雷电在大气中产生的雷电电磁脉冲辐射进入或通过电缆传导进入铁路通信信号系统的能量可以达到数焦耳级别。因此,如果没有雷电防护技术的运用和支撑,设备遭受雷害的概率会增加,可能导致铁路通信信号设备失效和故障,影响铁路正常的运输秩序。

我国铁路通信信号系统历来重视雷害防治,是全国较早开展电子设备雷电防护研究的行业之一。经过长期不懈地努力,铁路通信信号系统综合防雷取得了较好的成绩,积累了丰富的经验,雷害故障大幅度下降。

我国高速铁路高架桥、隧道较多,铁路沿线的雷电电磁环境复杂,同时通信信号系统设备小型化、网络化,使其对雷电电磁干扰更加敏感。因此,研究铁路通信信号的雷电防护技术、提高雷电防护能力具有十分重要的意义。

本书结合我国高速铁路和普速铁路实际,着重阐述了铁路通信信号系统综合防雷技术原理以及设计、施工和维护等内容。全书分为三篇:铁路通信信号综合防雷技术原理,铁路通信信号综合防雷设计与施工,铁路通信信号综合防雷维护及典型雷害故障案例。

本书内容丰富、针对性强,既有一定理论深度,又有丰富的实践案例,立足于现场维护人员和管理人员,同时兼顾工程设计和施工技术人员以及设备研制人员。本书图文并茂,便于理解和掌握,有利于提高铁路通信信号专业技术人员的防雷技术水平,对确保铁路通信信号设备运用安全具有重要意义。

本书由陈建译、邱传睿编著,李文涛主审。参加编写人员有:廖显生、杨显来、姜秋妍、郭媛忠、鲁志鹰、张俊兴。广州铁路(集团)公司罗立军、黄祖文、张昕、罗海洋、陈小平、欧阳健雄、季忠洪对全书进行了审核。特别感谢铁路总公司电务部覃燕提出的宝贵意见。同时,也感谢有关研究、设计、施工及维护管理单位专家给予的意见和帮助。

铁路通信信号设备防雷技术涉及的领域较广,设备众多复杂,加之时间仓促,经验有限,书中难免有遗漏和欠妥之处,恳请读者批评指正。

编 者

2015年12月

目 录

第一篇 铁路通信信号综合防雷技术原理

第一章 雷电基本原理	1
第一节 雷电的产生	1
第二节 雷电活动强度及雷击选择性、连续性	11
第三节 雷电主要参数	15
第四节 雷电影响	22
第五节 雷电电磁脉冲传输	26
第二章 防雷器件和防雷设备	31
第一节 防雷器件工作原理及性能	31
第二节 防雷设备	59
第三章 接地系统	71
第一节 地和接地	71
第二节 接地装置	72
第三节 接地电阻测量	77
第四节 土壤电阻率测量	88
第四章 铁路通信信号系统综合防雷	91
第一节 电磁兼容和雷电防护	91
第二节 雷害源与雷害	94
第三节 电气电子系统设备雷害防护原理	100
第四节 建筑物防雷和铁路通信信号系统综合防雷	103

第二篇 铁路通信信号综合防雷设计与施工

第五章 铁路通信信号综合防雷设计方案	116
第一节 铁路通信信号综合防雷技术特点	116
第二节 通信综合防雷系统设计方案	121
第三节 信号综合防雷系统设计方案	139
第四节 驼峰区域防雷改造方案	149

第六章 铁路通信信号综合防雷施工工艺	162
第一节 通信信号机房直击雷防护及雷电电磁屏蔽设施	162
第二节 接地系统	165
第三节 信号机房接地汇集线及等电位连接	167
第四节 通信铁塔及天馈线接地防护	168
第五节 通信机房接地汇集线设置及设备接地	169
第六节 通信线缆防护	170
第七节 连接及布线工艺要求	170
第八节 高速铁路调度中心机房防雷施工工艺	175
第七章 铁路通信信号综合防雷工程实例	180
第一节 高速铁路信号车站综合防雷	180
第二节 普速铁路信号车站综合防雷	186
第三节 编组站信号区域防雷	193
第四节 通信综合防雷	199
第八章 高速铁路综合接地系统	208
第一节 铁路综合接地系统概述	208
第二节 高速铁路综合接地系统	210
第三节 综合接地系统工程设计方案	219
第四节 接地连接及施工工艺	231
第三篇 铁路通信信号综合防雷维护及典型雷害故障案例	
第九章 铁路通信信号综合防雷维护	233
第一节 工程验收	233
第二节 设备维护	239
第三节 测试	244
第四节 雷害故障管理	245
第十章 典型雷害故障案例	246
第一节 车站(中继站)、区间信号设备雷害故障	246
第二节 驼峰信号设备雷害故障	277
第三节 通信设备雷害故障	284
参考文献	293

第一篇 铁路通信信号综合防雷

技术原理

第一章 雷电基本原理

第一节 雷电的产生

一、雷电实质

雷电是人类最早观察到的自然现象。耀眼的闪电,沉闷的雷声,森林、草原大火,房屋击毁,生物击毙(伤)等使人们对雷电现象迷惑不解进而产生敬畏。进入18世纪,为揭示雷电本质,许多科学家进行了无数观测和实验研究,揭示了雷电现象的“电”本质。著名科学家本杰明·富兰克林(Benjamin Franklin)(1706—1790)的“风筝实验”,证明“闪电与电火花本质相同”,即闪电实质上是“放电现象”。近代大气物理学采用现代科学研究方法进一步证明,云彩在一定条件下会带电荷,这种带电云彩称为“雷云”,雷云是电荷载体。雷电是一种大气放电现象,雷击实质是雷云对地面物体的放电现象。其实,雷电放电是云中正负电荷聚集区间的放电、正负电荷的雷云间放电、带电雷云对大地的放电、带电雷云和大气中其他正负电荷聚集区放电。雷云放电的过程也是正负电荷中和,使物体趋于中性的过程。在地球上,平均每天发生800次雷闪。

二、雷云形成

云是形成雷电活动的必要要素,不是所有的云都带有电荷,只有带有电荷的云才能叫做雷云(或称雷雨云)。那么,什么情况下云才会带电呢?

总结雷云的形成,发现形成雷云必须具备以下三个条件:

- (1)空气中含有足够的水蒸气;
- (2)空气形成温度差,并使潮湿的空气形成强大的上升气流;
- (3)没有妨碍强烈而持久上升气流形成的因素。

从局地条件来看,雷云形成时,大气的垂直层结构是不稳定的,以便诱发对流活动的发生和发展;其次,空气中含有足够的水分,能够满足雷云的生成。从天气背景来看,应当有促发局部对流发展的天气形势,如冷锋过境、正在填塞中的低压、反气旋后部、小波动以及高空小股冷空气活动等。雷雨云往往由积云发展而来,是对流云发展的成熟阶段。一个发展完整的对流云,一般都有一个形成、成熟和消散的过程。

为了说明雷云形成,人们用夏天热雷暴现象来说明雷云的产生机理。图 1-1 是干燥空气和饱和空气上升情况示意图。

夏日炎热,中午的骄阳将大地炙热,地面土壤中的水分被汽化后上升。图 1-1(a)是干燥空气或未饱和空气上升的情况,即大气比较干燥,上升水汽不能饱和。这种气体每上升 1 000 m,大气压力会减少 12%,空气膨胀,同时温度降低 10 °C。一般空气上升 2 000 m 后就不会继续上升。这种情况下,气流不会产生雷云。

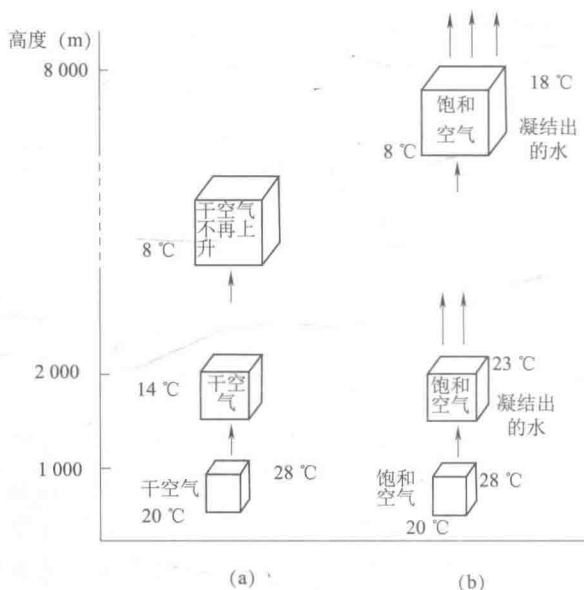


图 1-1 干燥空气和饱和空气上升情况示意图

气流上升,到云层上部。当云中电荷积聚到一定程度时,云内形成强电场,同时对地间也存在电场。云层带电就是所谓的雷云。雷云带电荷越多,它的电压越高,当它与另一雷云接近时,便可以击穿两片雷云间的空气,形成强烈的放电。当一片雷云带的电荷足够多,其对地的电场足以将云地间空气击穿,发生云地放电,使正负电荷中和。这就是热雷云,大多发生在 5—8 月温高湿重的天气。

三、雷 暴

雷雨由雷云产生,而由积雨云产生的激烈放电现象称为“雷暴”,雷暴是一种强烈的对流性天气。按照雷云形成时不同的大气条件和地形条件,一般将雷云分为热雷暴(气团雷暴)、锋面雷暴和地形雷暴三类。锋面雷暴又可分为暖锋雷暴、静止锋雷暴和冷锋雷暴三种。此外,也有人把冬季发生的雷暴划为一类,称为冬季雷暴。

(一) 热 雷 暴

夏日的气团雷雨一般称为热雷暴(气团雷暴),由热雷云产生。在夏季,发生雷暴之前常常使人感到十分闷热,说明大气低层气温高、层间结构不稳定、水汽含量大。此时,如果有冲击力作用,就产生雷暴。

在闷热的夏天,空气中的水蒸气已经接近饱和,空气非常湿润,地面吸收太阳辐射热量远大于空气层,所以白天地面温度较高,地面水分部分化为蒸气。若是地面无风,接近地面的气

体由于受热传导和热辐射的影响温度升高,气体温度升高后体积膨胀、密度减小,就会强烈上升。这部分带着水蒸气的热空气向上运动,而原来高层中冷空气密度相对较大,就会下沉。热空气在上升过程中膨胀、压力下降,同时温度下降。高空大气温度低,产生热交换,使得上升空气中水蒸气形成了小水滴,这就是云。在这个过程中,云也带上了电,这种云称为热雷云。这种热雷云产生的雷电常发生在闷热无风的夏季。

图 1-1(b)所示热雷云可以形成热雷暴。

(二)锋面雷暴

锋面雷暴(图 1-2)分为冷锋雷、静止锋雷暴和热锋雷三种,由气团的锋构成。气团形成源地需要的条件:有范围广阔、地表性质比较均匀的下垫面(气象学称大气下层直接接触的地球表面为下垫面)。空气中的热量、水分主要来自下垫面,因而下垫面性质决定着气团属性。大范围性质比较均匀的下垫面,可成为气团形成源地。在冰雪覆盖的地区往往形成冷而干的气团,即冷气团。在水气充沛的热带海洋上,常常形成暖而湿的气团,即暖气团。在沙漠或干燥大陆上形成干而热的气团但缺乏水分。锋则是冷、暖气团相交的地带。该地带冷、暖空气异常活跃,常常形成广阔的云系和降水天气,易出现大风、降温和雷暴等剧烈天气现象。

在我国,冷气团一般来自于西北,暖气团一般来自于东南。冷暖气团交界面称为锋面,实际锋面是冷暖气团之间的过渡区域。锋的两侧温度有差异,水平移动的冷气团和暖气团在交界面上会因为冷气团将湿热的暖气团抬高,并与暖气团对流形成面积极大的雷云,称为锋面雷云,如图 1-3 所示。这种雷云随着锋一起生成,向前延伸,致使雷的覆盖面积大,移动速度快,具有一定的方向性。锋面附近常伴有云、雨、大风等恶劣天气。



图 1-2 锋面雷暴

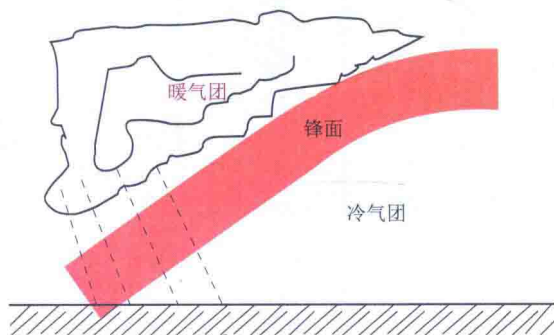


图 1-3 锋面雷云形成示意图

在各种雷暴中,锋面雷暴出现的次数最多。据统计,我国华北地区,锋面雷暴占总雷暴次数的 80% 以上;华东的上海地区,6—8 月份有 60%~70% 的雷暴形成在锋面附近。

冷锋雷暴也叫做寒潮雷。我国冷空气活动频繁,冷锋活动几乎遍及全国,冷锋雷暴是冷空气强烈冲击暖湿不稳定空气而形成。当冷锋强、锋面坡度大、移动快、暖空气不稳定、暖湿程度大时都可以形成雷暴。冷锋雷暴的特点是强度大,多个雷暴沿锋线排列成行,组成一条宽几公里至几十公里、长几百公里的狭长雷暴带。有时冷锋在北方没有雷暴,但移动到江南后,由于暖空气湿度和不稳定度加大,就出现大面积雷暴天气。由于冷空气往往来势很猛烈,是雷雨中最强烈的一种,常在短时间内转变为特大暴雨,因而危害最烈。冷锋雷暴在昼间、夜间、陆地、

海上都可出现,日变化较小,一般下午和前半夜较强,早晨减弱。它的移动速度较快,可达40~60 km/h。

静止锋雷暴多产生在入春以后,冷暖空气势均力敌情况下。我国长江以南地区在立夏以后静止锋出现次数较多。华东中部地区6—8月份出现的雷暴中,有40%以上是静止锋雷暴;华南地区春季出现的雷暴,有35%以上是静止锋雷暴。静止锋雷暴由暖湿不稳定空气沿锋面上升而形成。它多出现在地面锋线的两侧,呈分散型块状分布。静止锋雷暴特点是范围广、持续时间长(可持续几天内都出现),但产生的雷暴天气不像冷锋雷暴那样强烈,雷暴云常隐藏在深厚的层状云系中。准静止锋雷暴常有明显的日变化,多产生在后半夜,白天逐渐减弱或消散,其原因是层状云系下部在白天底层温度低,气层比较稳定,而夜间云层顶部辐射冷却,使气层变得不稳定。

暖锋雷暴在我国较为少见,在暖锋向前移动时,暖湿不稳定空气沿暖锋上升而形成。暖锋雷暴一般不如其他雷暴那样强烈,积雨云形成在较高的地方。与静止锋雷暴相似,暖锋雷暴可能镶嵌在雨层云或高层云中,雷暴云主体常常被浓密的层状云遮蔽,底部与雨层云混在一起。暖锋雷暴在一天中的任何时刻都能出现,但夜间出现次数较多。

(三)地形雷暴

地形雷暴和地形有关,大多产生于丘陵、山区和山体的阳面,由夏季潮湿气流随地形抬升而形成,发展快而移动慢,降水中常夹杂冰雹,升降气流非常强烈。在山岭地区,当暖空气经过山坡被强迫上升时,在山地迎风的一面空气沿山坡上升,到一定高度变冷而形成雷云。但到了山地背风的那一面,空气沿山坡下沉,温度升高,雷雨消散或减弱。特别是在滨海的山岳地带,



图 1-4 山地地形雷暴示意图

近海的一面山坡因海风潮气特别重常易发生雷雨。我国山地多,地形复杂,部分地区由于地形关系易产生雷雨,因此地形雷暴是夏季山区经常发生的一种雷暴。只要条件合适,地形雷暴也能在冬季产生。此外,在我国南部还常出现所谓旱天雷,也叫干雷暴,这种雷暴发生时无雨或微量雨,却伴随着强烈的台风,大气的带电作用已达到极端状态,干雷暴的破坏力尤其强大。图 1-4 所示是山地地形雷暴示意图。

(四)雷云起电机制

雷云必须带电才能发生放电,雷云放电就是雷闪。科学家们对雷云的起电机制及电荷分布规律进行了大量的观测和试验,积累了许多资料,并提出各种各样的论点。不过,有些论点至今还有争论,因此只能称为假说。

首先人们认为大气中存在着大量的正离子和负离子,在云中的雨滴上,电荷分布并不均匀,最外边的分子带负电,里层的带正电,内层比外层的电势差高约 0.25 V。为了平衡这个电势差,水滴必须优先吸收大气中的负离子,使水滴逐渐带上负电荷。当对流发展开始时,较轻的正离子逐渐被上升的气流带到云端上部,而带负电的水滴因为比较重,就留在了下部,造成正负电荷分离。这就是对流云初始阶段的“离子流”假说。

当对流发展到一定阶段,云体伸入 0℃ 层以上的高度后,云中就有了过冷水滴、霰粒和冰

晶等。这种由不同相态的水汽凝结物组成且温度低于 0°C 的云,称为冷云。冷云起电机理主要有四种。

1. 水滴破裂效应

云中水滴在高速气流中进行激烈运动,分裂成一些带负电的较大颗粒和带正电的较小颗粒,后者同时被上升气流携带到高空,前者落在低空,这样正负两种电荷便在云层中被分离,这也就是造成 90% 云层下部带负电的原因。

2. 感应起电效应

由于宇宙射线或其他电离作用,大气中存在正负离子,又因为空间存在电场,在电场力的作用下正负离子在云的上下层分别积累,从而使雷雨云带电。

3. 过冷水滴在霰粒上的水滴撞冻起电效应

在云层中有许多水滴在温度低于 0°C 时也不会冻结,这种水滴叫过冷水滴。过冷水滴是不稳定的,只要它们被轻轻地震动一下,就马上冻结成冰粒。当过冷水滴与霰粒碰撞时,会立即冻结,这被称为撞冻。当发生撞冻时,过冷水滴外部立即冻成冰壳,但它的内部仍暂时保持液态,并且由于外部冻结释放的潜热传到内部,其内部液态过冷水滴的温度比外面的冰壳高。温度的差异使得冻结的过冷水滴外部带正电,内部带负电。当内部也发生冻结时,云滴就膨胀分裂,外表皮破裂成许多带正电的冰屑,随气流飞到云层上部,带负电的冻滴核心部分则附在较重的霰粒上,使霰粒带负电并留在云层的中下部。

4. 温差起电效应

实验证明在冰块中存在着正离子(H^+)和负离子(OH^-),在温度发生变化时,离子发生扩散运动并相互分离。积雨云中的冰晶和霰粒在对流的碰撞和摩擦运动中造成温度差异,并因温差起电,带电的离子又因重力和气候作用而分离扩散,最后达到一定的动态平衡。

综上所述,雷雨云起电可能是某一机理也可能是多种机理效应而产生的。另外还有“破碎起电”等假说都能解释一定的现象,但仅能部分解释雷云起电的机制。

四、雷云内部电荷分布

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,如果从宏观上看雷云的外部,可以把雷云内部电荷分布看成是三个电荷集中区:正电荷集中区 P 在雷云上部,负电荷集中区 N 在雷云下部,弱正电荷集中区 P' 在雷云底部。图 1-5 所示是雷云内部电荷分布示意图。

实测表明,在 $5\sim 10\text{ km}$ 的高度主要是正电荷云层,在 $1\sim 5\text{ km}$ 的高度主要是负电荷云层,但在云层底部也有一块不大区域的正电荷聚集。雷云中电荷分布很不均匀,往往形成多个电荷密集中心。每个电荷中心的电荷约为 $0.1\sim 10\text{ C}$,而一大块雷云同极性的总电荷则可达数百库仑。这样,在带有大量不同极性或不同数量电荷的雷云之间,或雷云和大地之间就形成强大的电场。雷云中平均电场强度约为 150 kV/m ,而在雷击发生时刻达 340 kV/m 。雷云下面地表的电场强度

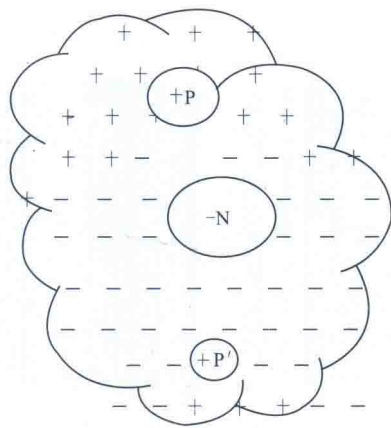


图 1-5 雷云内部电荷分布示意图

一般为 $10\sim 40\text{ kV/m}$,最大可达 150 kV/m 。空气击穿后就会发生云内、云间或对地的火花放电,放出几十乃至几百千安电流,产生强烈的光和热(放电通道温度高达 $15\,000\text{ }^{\circ}\text{C}\sim 20\,000\text{ }^{\circ}\text{C}$),使空气急剧膨胀震动,发生霹雳轰鸣。这就是闪电伴随雷鸣的缘故。雷云放电大部分是在云间或云内发生,只有一小部分是对地放电,雷云对地电位可高达上亿伏。

五、雷云放电

(一)雷云放电种类

雷电放电包括雷云对大地、雷云对雷云和雷云内部的放电现象。大多数雷云放电都是在雷云内部或雷云与雷云之间进行的,只有少数是对地进行的,雷云对地的放电才被称为雷击。近代防雷工程,重在保护地面建筑物、构筑物或者强电系统。因此,主要关注雷云对大地的放电——直击雷。现代防雷除了继续关注保护建筑物、构筑物或者强电系统外,大量的工作用在保护对雷电极其敏感的电子设备。现代防雷除了继续关注直击雷外,尤其关注造成电子、微电子设备雷害的雷电电磁脉冲干扰。

云地间的放电是云内荷电中心与大地和地物之间的放电过程,亦指与大地和地物发生接触的闪电,被称作地闪,如图 1-6 所示。云间闪是两个云层间不同电荷的放电,当两个云层正负电荷间电场强度被击穿时,发生云间闪,如图 1-7 所示。



图 1-6 重庆上空地闪



图 1-7 美国科罗拉多州的烟囱石
(Chimney Rock)附近上空的云间闪



图 1-8 冰岛火山诱发的云空闪

云内有许多不同大小的电荷中心,同一云层中不同部位的异性电荷中心间放电称为云内放电。云内闪发生频率极高,现在用场强法监测记录的雷电,许多是云内闪和云间闪。云内闪的放电电压都比较低,电流小,往往只对地面模拟通信设备造成干扰,而破坏作用不大。云空闪是雷云电荷对大气中其他异性电荷的放电,例如,在火山爆发时可以观察到云空闪,如图 1-8 所示。

(二)闪电形态

雷雨天可以看到形形色色的闪电,蔚为壮观。闪电根据形状分为线状闪电(或枝状闪电)、

片状闪电、带状闪电、联珠状闪电和球状闪电。

1. 线状闪电

线状闪电(或枝状闪电)是人们经常看见的一种闪电形状,如图 1-9 所示。闪电好像横向或向下悬挂的树枝,有耀眼的光芒和很细的光线。线状闪电有特别大的电流,平均达到几万安培,在少数情况下可达 20 万安培。如此大的电流足以毁坏和摇动大树,有时甚至伤及人、畜。当它接触到建筑物时,常造成雷击而引起火灾。线状闪电多数属于云对地的放电。

2. 片状闪电

片状闪电也是一种比较常见的闪电形状,如图 1-10 所示。它看起来好像是在云面上有一片闪光。这种闪电可能是云后面看不见的火花放电的回光,或者是云内闪电被云滴遮挡而造成的漫射光,也可能是出现在云上部的一种丛集的或闪烁状的独立放电现象。片状闪电经常是在云的强度已经减弱,降水趋于停止时出现的。它是一种较弱的放电现象,多数是云中放电。



图 1-9 线状闪电



图 1-10 片状闪电

3. 带状闪电

带状闪电由连续数次的放电组成,在各次闪电之间,闪电路径因受风的影响而发生移动,使得各次单独闪电互相靠近,形成一条带状,如图 1-11 所示。带的宽度约为 10 m。这种闪电如果击中房屋,可以立即引起大面积燃烧。

4. 联珠状闪电

联珠状闪电看起来好像一条在云幕上滑行或者穿出云层而投向地面的发光点的连线,也像闪光的珍珠项链,如图 1-12 所示。有人认为联珠状闪电似乎是从线状闪电到球状闪电的过渡形式。联珠状闪电往往紧跟在线状闪电之后接踵而至,几乎没有时间间隔。



图 1-11 带状闪电



图 1-12 联珠状闪电

5. 球状闪电

球状闪电虽说是一种十分罕见的闪电形状,却最引人注目。它像一团火球,有时还像一朵发光的盛开着的“绣球”菊花。它约有人头那么大,偶尔也有直径几米甚至几十米。球状闪电有时候在空中慢慢地游荡,有时候又一动不动地悬在空中。它有时候发出白光,有时候又发出像流星一样的粉红色光。球状闪电“喜欢”钻洞,有时候,它可以从建筑物与外



图 1-13 人工制造的球状闪电

界间缝隙(如窗户、门缝)钻进屋内,甚至由电源线进入建筑物的导管进入室内,在房子里转一圈后又溜走。球状闪电有时发出“啞啞”的声音,然后一声闷响而消失;有时又只发出微弱的噼啪声而不知不觉地消失。球状闪电消失以后,在空气中可能留下臭氧的味道。球状闪电大约为几秒钟到几分钟。在大自然中捕捉球状闪电十分困难,至今人们还未获得大自然中球状闪电的照片,图 1-13 是人工在实验室获取的。

六、地闪(雷云对地放电)过程

(一)地闪(雷云对地放电)三个阶段

地闪是雷云对地面的放电,当雷电击中地面物体并通过被击中物体入地时,称为直击雷。人们对地闪进行了长期的研究,根据长间隙放电理论,证明地闪的发生和发展可分为先导放电、主放电(回击)、余辉三个阶段:

(1)先导阶段:地闪发生前 $100\sim 200\text{ ms}$ 时间内,云中放电频繁,表现为云中的闪光和地面的场强显著变化,即地闪的预放电阶段。云中放电使云中电荷重新分配,对地面电场产生畸变,从而使得云层和地面间高电场区的电荷出现向地放电的趋势。云地之间的线状雷电在开始时往往从雷云边缘向地面发展,雷云下部形成微弱发光的放电通道,称为先导放电,逐级向地面发展,发展速度为 $100\sim 1\,000\text{ km/s}$,每级平均长度约为 $10\sim 200\text{ m}$,平均 25 m ,先导发展模式为先导通道交替向地面延伸,级间的停歇约 $10\sim 100\text{ }\mu\text{s}$,平均 $50\text{ }\mu\text{s}$ 。下行负先导在发展过程中分成数支,这与空气中存在离子团有关,下行先导电流约为 100 A ,温度约为 $(1\sim 3)\times 10^4\text{ K}$ 。

(2)主放电阶段:当先导放电接近地面,因周围电场强度达到了能使空气电离的程度,当这一场强达到 $25\sim 30\text{ kV/cm}$ 时,不论正负雷云都可能在凸出物上诱发上行的先导,也称迎面先导,这种雷叫上行雷。地面凸出物越高,产生上行先导需要的平均雷云下的电场强度 E_0 就越小。当先导放电到达大地,与迎面先导会合以后就开始主放电阶段,产生强烈的电荷中和,出现极大的电流、声音和闪光,这就是雷电的主放电过程。主放电时间约为 $50\sim 100\text{ }\mu\text{s}$,放电速度为 $15\,000\sim 150\,000\text{ km/s}$ 。在雷击中,雷击点有巨大的电流流过。大多数雷电流峰值为几十千安,少数达到几百千安。

由于雷云中通常有多个电荷中心,所以在第一次放电以后,往往会沿先导放电通路产生重复放电,这样的重复放电和第一次放电一样,也由先导放电和主放电组成。但第二次放电时,

沿途的导电性能已经很好,所以不像第一次放电那样逐渐前进,而是像箭一样射向地面,因此称为箭式先导放电。第二次先导放电到达地面后,就由地面向上开始第二次主放电。第二次以后的各次主放电均比第一次小,第二次主放电电流峰值不会超过 30 kA。

(3)余辉阶段:主放电完成后,云中剩余电荷沿着导电通道开始流向大地,这时通道中尚余一定的辉光,故称为余辉阶段。回击结束后,通道中的电导率大为减少,电荷运动较慢,所以余辉的电流不大(100~1 000 A),但持续时间长,可达 0.03~0.15 s。

图 1-14 是高速摄影机用胶片多次曝光拍得的下行负雷电过程及相对应的电流变化情况。

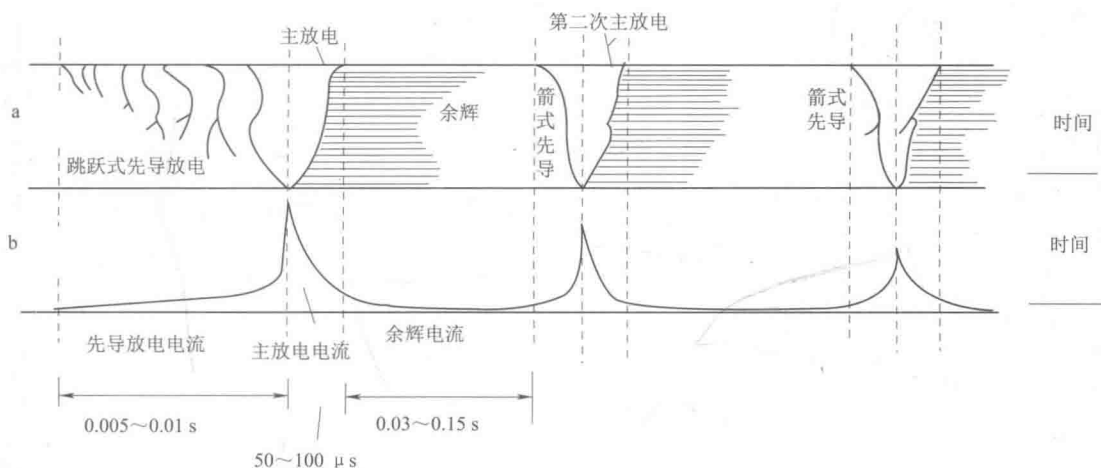


图 1-14 雷云对大地的放电过程

a—雷云的放电过程;b—放电过程中雷电流的变化情况

从高速照相机拍下的光学照片显示,大多数云对地雷击是重复的,即在第一次雷击形成的放电通道中,会有多次放电尾随,放电之间的间隔大约为 0.5~500 ms。主要原因是:第一次先导(主放电)冲击泄放的主要是第一个电荷中心的电荷。在第一次冲击完成之后,主放电通道暂时还保持高于周围大气的电导率,其他电荷中心将沿已有的主放电通道对地放电,从而形成多重雷击。第二次及以后的放电,先导都是自上而下连续发展的,没有停顿现象。放电次数平均为 2~3 次,最多放电次数观测到 42 次。通常第一次冲击放电的电流最大,后续电流幅值都比较小。

以上是负电荷雷云对地放电的基本过程,可称为下行负雷闪;对应于正电荷雷云对地放电的下行正雷闪所占的比例很小,其发展过程亦基本相似。

若地面上存在离地面极高并且导电性能良好的接地物体时,也可能首先从该物体顶端出发,发展向上的先导,称上行雷。但上行雷到达雷云时,一般不会发生主放电进程,这是因为雷云的导电性能比大地差得多,难以在极短时间内提供为中和先导通道中电荷所需要的主放电电流,而只能向雷云深处发展多分支的云中先导。通过宽广区域的电晕流,从分散的水性质点上卸下电荷,汇集起来,以中和上行先导中的部分电荷。这样电流放电过程显然只能是较缓和的,而不可能有大冲击电流的特性。其放电电流一般不足千安,而延续时间则较长,可能长达 0.1 s。此外,上行先导从一开始就出现分支的概率较大。

(二)地闪(雷云对地放电)极性和发展方向

地闪极性以雷电放电时流入大地的电荷极性来定义,雷电按照极性分成正极性雷和负极性雷两种。从雷电发展方向来定义,地闪分下行雷和上行雷两种。

从雷云向大地发展的雷称为下行雷,从地面高层建筑物体向雷云发展的雷称为上行雷。

下行雷一般为负极性,上行雷一般是正极性。再结合雷电有无主放电阶段,可以将雷分成八种类型,无主放电的标记为 a 类,有主放电的标记为 b 类,如图 1-15 所示。

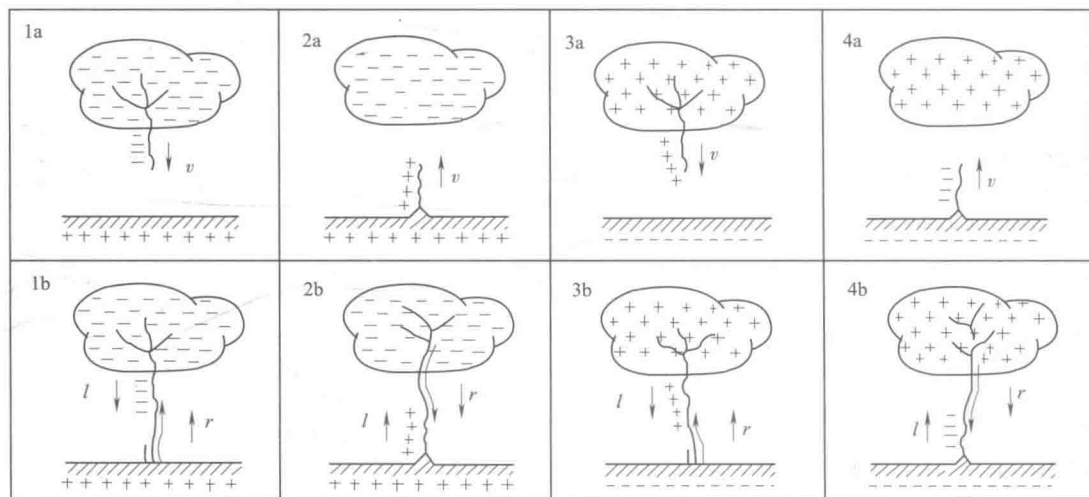


图 1-15 地闪的四种类型

l —先导; r —回击; v —发展方向

1a 型:放电始于从云中负电荷发展的向下先导。这是在没有极高凸出物的开阔地区的主要情况。先导带负电,电流也为负。若先导不落地(空中放电),就无主放电,并形成云内放电。1b 型:当向下负先导落地时,产生向上运动极快的主放电,主放电使先导和云中的部分电荷泄放到地。2a 型:放电始于高耸的接地体,然后出现向云中负电荷发展的向上先导。先导带正电,为正先导。向地流动的以及流经接地体的电流为负,电流持续时间较长,称为连续电流,也称为向上正先导-连续负电流。2b 型:开始阶段和 2a 型相同,其后是主放电。每一次闪击都与 1b 型相同,即包括先导和向下主放电,称为向上正先导-多闪击负闪电。3a 型:相当于 1a 型,只是云中电荷为正。先导电荷和先导电流均为正。由于先导不落地,于是在地下形成一位移电流。3b 型:当向下正先导落地时,引起向上正主放电,并泄放先导和云中部分电荷。这类闪电在山区极罕见。4a 型:云中电荷为正,向上先导始于高耸的接地体,先导带负电。流入地的电荷为正,即连续电流为正,定名为向上负先导-连续正电流闪电。4b 型:这类闪电的发生和 4a 型相同,但在向上先导后 4~25 ms,紧跟着一个极其强烈的向下正主放电。以上分类中没有考虑迎面先导的影响。

(三)地闪(雷云对地面放电)雷击距

当下行先导从雷云向地面发展时,如果头部离地面较远,则先导下行发展取向有明显随机性,实际上不受地面物体存在的影响。但当先导发展到接近某一物体的定向范围时,它就会定向向该物体发展,使该物体遭受雷击,这种定向临界距离称为雷击距(简称击距),如图 1-16 的