

# 电气设备防雷与接地 实用技术

主编 陈家斌 高小飞

DIANQI SHEBEI  
FANGLEI YU  
JIEDI SHIYONG  
JISHU

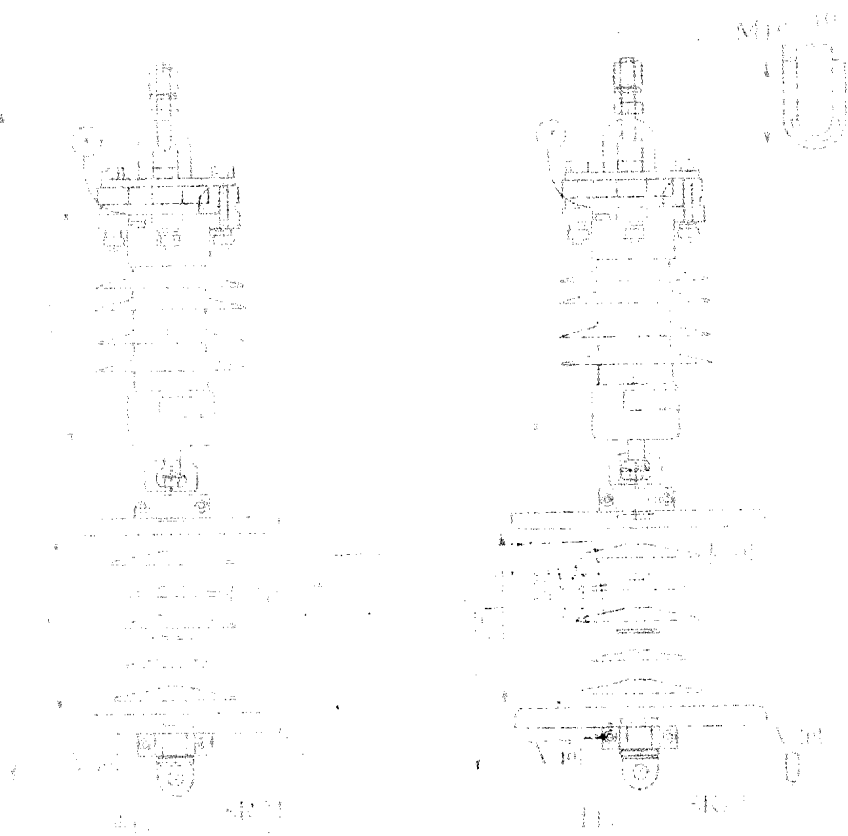


中国水利水电出版社  
www.waterpub.com.cn

电力新技术实用丛书

# 电气设备防雷与接地 实用技术

主编 陈家斌 高小飞



中国水利水电出版社  
www.waterpub.com.cn

## 内 容 提 要

本书共分九章，主要介绍了雷电的形成及防护方法；防雷设备的类型、结构和选用；金属氧化物避雷器的性能及选用；架空电力线路的防雷保护；发电厂、变电所及其他电气设备防雷保护；接地；防雷设备的安装；防雷及接地设备的运行维护和防雷设备的检测试验等内容。

本书可供电气专业设计、安装、运行维护专业的电工、工程技术人员岗位技能培训和大专院校师生阅读。

### 图书在版编目(CIP)数据

电气设备防雷与接地实用技术 / 陈家斌, 高小飞主  
编. — 北京: 中国水利水电出版社, 2010. 4  
(电力新技术实用丛书)  
ISBN 978-7-5084-7428-1

I. ①电… II. ①陈… ②高… III. ①电气设备—防  
雷②电气设备—接地保护装置 IV. ①TM774②TM862

中国版本图书馆CIP数据核字(2010)第071799号

|      |  |
|------|--|
| 书 名  | 电力新技术实用丛书<br><b>电气设备防雷与接地实用技术</b>  |
| 作 者  | 主编 陈家斌 高小飞   |
| 出版发行 | 中国水利水电出版社<br>(北京市海淀区玉渊潭南路1号D座 100038)<br>网址: www.waterpub.com.cn<br>E-mail: sales@waterpub.com.cn<br>电话: (010) 68367658 (营销中心) |
| 经 售  | 北京科水图书销售中心(零售)<br>电话: (010) 88383994、63202643<br>全国各地新华书店和相关出版物销售网点  |
| 排 版  | 中国水利水电出版社微机排版中心  |
| 印 刷  | 北京市兴怀印刷厂   |
| 规 格  | 184mm×260mm 16开本 23.25印张 551千字   |
| 版 次  | 2010年4月第1版 2010年4月第1次印刷  |
| 印 数  | 0001—4100册   |
| 定 价  | <b>47.00元</b>  |

凡购买我社图书, 如有缺页、倒页、脱页的, 本社营销中心负责调换

版权所有·侵权必究

# 前 言

## P R E F A C E

雷电是自然现象，因为雷电具有电流大、时间短、频率高、电压高的特点，有很大的破坏性。全国每年雷击损失财产不计其数，特别是雷击电网设备造成电网瓦解停电，对社会及经济建设影响更为巨大。雷击事故原因：一是到目前为止，雷电作为一种强大的自然力的爆发，尚无特效的方法加以制止，人们力所能及的工作是设法限制及疏导；二是现有防雷设备选型和安装不科学，有的是安装位置不正确，有的是选用防雷设备参数不合适，没有起到应有的防雷作用；三是使用中的防雷设施，维护管理不当，使防雷设备性能变化或损坏，失去了防雷的功能，起不到防雷的作用；四是很多人不重视防雷工作或严重缺乏防雷方面的知识。鉴于防雷的重要性和迫切性，为了尽可能减少雷害，确保国家财产和人民的生命安全，增强人们防雷知识，使广大电业部门职工提高防雷技术，科学合理选用防雷设备，安装维护管理好防雷设备，使各部门各单位能加大防雷工作力度，特编写本书。

本书的选材从防雷设备的选用、施工安装、运行维护等方面进行系统地、全面地，从理论到实际地介绍了电气设备的防雷实用技术。重点介绍了氧化锌避雷器的选用及新的接地实用技术，在内容的编排上既注重工程实用性，又兼顾必要的理论，力求从理论与实践结合上对各种电气设备的防雷保护技术进行阐述。以实用为主，通俗易懂。

本书严格按照现行国标和行业技术标准、规程、管理制度及厂家的使用说明书为依据进行编写，可供广大电业专业设计、安装、运行管理维护人员查找、学习参考。

本书第三、六章由上海电力学院高小飞老师编写，第一、二、四、五、七、八、九章由其他同志编写，本书由陈家斌统稿。

由于作者水平有限，书中谬误之处在所难免，恳请读者批评指正。

编 者

2010年1月

# 目 录

## CONTENTS

### 前言

|                                    |     |
|------------------------------------|-----|
| <b>第一章 雷电的形成及防护方法</b> .....        | 1   |
| 第一节 雷电的形成过程 .....                  | 1   |
| 第二节 雷电的类型 .....                    | 4   |
| 第三节 雷电活动参量及雷电参数 .....              | 8   |
| 第四节 雷电参量间的关系 .....                 | 16  |
| 第五节 雷电的危害 .....                    | 18  |
| 第六节 防雷保护方法 .....                   | 20  |
| 第七节 雷电的观测 .....                    | 21  |
| 第八节 雷电定位系统 .....                   | 33  |
| <b>第二章 防雷设备的类型、结构和选用</b> .....     | 43  |
| 第一节 防雷设备的发展及类型 .....               | 43  |
| 第二节 避雷针的结构和选用 .....                | 47  |
| 第三节 避雷线的保护范围和选用 .....              | 56  |
| 第四节 放电间隙的工作原理和选用 .....             | 59  |
| 第五节 消雷器的原理及应用 .....                | 61  |
| 第六节 避雷器的分类及结构原理 .....              | 65  |
| 第七节 气体放电管的结构及选用 .....              | 73  |
| 第八节 压敏电阻的结构及选用 .....               | 76  |
| 第九节 防雷接地装置 .....                   | 78  |
| <b>第三章 金属氧化物避雷器的性能及选用</b> .....    | 83  |
| 第一节 金属氧化物避雷器 (ZnO) 的发展及结构 .....    | 83  |
| 第二节 金属氧化物避雷器 (ZnO) 的电气性能 .....     | 87  |
| 第三节 金属氧化物避雷器 (ZnO) 的类型及主要参数 .....  | 92  |
| 第四节 金属氧化物避雷器的使用条件及部分产品主要技术参数 ..... | 99  |
| 第五节 避雷器的选择步骤及方法 .....              | 103 |

|            |                                 |            |
|------------|---------------------------------|------------|
| 第六节        | 金属氧化物避雷器的选用 .....               | 109        |
| <b>第四章</b> | <b>架空电力线路的防雷保护 .....</b>        | <b>118</b> |
| 第一节        | 架空电力线路雷电过电压 .....               | 118        |
| 第二节        | 架空电力线路防雷保护原则及防护方法 .....         | 126        |
| 第三节        | 架空电力线路雷电绕击分析及防止方法 .....         | 133        |
| 第四节        | 金属氧化物避雷器在交流电力线路上的应用 .....       | 139        |
| 第五节        | 架空线路杆塔安装防雷拉线 .....              | 146        |
| 第六节        | 山区的电气设备雷害的预防 .....              | 149        |
| 第七节        | 架空电力线路雷害故障性质鉴别 .....            | 152        |
| <b>第五章</b> | <b>发电厂、变电所及其他电气设备防雷保护 .....</b> | <b>155</b> |
| 第一节        | 发电厂和变电所内建筑物直击雷防护 .....          | 155        |
| 第二节        | 发电厂防雷电波入侵的保护 .....              | 162        |
| 第三节        | 变电所防雷电波入侵的保护 .....              | 168        |
| 第四节        | 配电网防雷电保护 .....                  | 178        |
| 第五节        | 电子设备的防雷 .....                   | 187        |
| 第六节        | 通信线路的防雷 .....                   | 197        |
| 第七节        | 通信站的防雷 .....                    | 202        |
| 第八节        | 家用电器的防雷 .....                   | 204        |
| <b>第六章</b> | <b>电气接地 .....</b>               | <b>206</b> |
| 第一节        | 电气接地的分类及范围 .....                | 206        |
| 第二节        | 电气接地装置的设计要求及步骤 .....            | 212        |
| 第三节        | 电气接地电阻的要求 .....                 | 213        |
| 第四节        | 接地电阻的计算 .....                   | 218        |
| 第五节        | 接地体的计算 .....                    | 228        |
| 第六节        | 接地线的选用 .....                    | 236        |
| 第七节        | 接地装置的布置 .....                   | 239        |
| 第八节        | 土壤高电阻率地区的接地装置选择 .....           | 244        |
| 第九节        | 接触电压和跨步电压的限制措施 .....            | 248        |
| <b>第七章</b> | <b>防雷设备的安装 .....</b>            | <b>254</b> |
| 第一节        | 避雷针的安装 .....                    | 254        |
| 第二节        | 避雷网的安装 .....                    | 263        |
| 第三节        | 避雷器的安装 .....                    | 267        |
| 第四节        | 接地装置的安装 .....                   | 278        |
| 第五节        | 降低土壤电阻系数的方法 .....               | 284        |
| 第六节        | 立体型接地网 .....                    | 289        |
| 第七节        | 电气设备接地的安装 .....                 | 293        |

|                                 |     |
|---------------------------------|-----|
| <b>第八章 防雷及接地设备的运行维护</b> .....   | 299 |
| 第一节 防雷管理工作 .....                | 299 |
| 第二节 接地装置的运行管理 .....             | 310 |
| 第三节 避雷器的运行故障分析和预防 .....         | 317 |
| 第四节 防雷接地装置的故障分析和预防 .....        | 320 |
| 第五节 雷击配电设备事故分析及预防 .....         | 323 |
| 第六节 雷击架空输电线路事故分析及预防 .....       | 333 |
| <b>第九章 防雷设备的检测试验</b> .....      | 340 |
| 第一节 金属氧化物避雷器的试验 .....           | 340 |
| 第二节 接地电阻的测量 .....               | 343 |
| 第三节 发电厂和变电所接地装置及杆塔接地电阻的测量 ..... | 354 |
| 第四节 土壤电阻系数的测量 .....             | 356 |
| 第五节 接触电压和跨步电压的测量 .....          | 358 |

# 第一章 雷电的形成及防护方法

雷电是一种自然现象，是自然界大气层中在特定条件下形成的。雷电流对地面的泄放，称为雷击。雷击时会产生极高的电压和极大的雷电流，所波及的范围内破坏力极大，对地面上的建筑设施以及人畜都可能造成直接或间接的损坏和危害。若雷击到电力设施上可能造成大规模的停电，也可能造成火灾爆炸事故或人身伤亡。

## 第一节 雷电的形成过程

大气中雷云的形成，必须具备三个基本条件：空气中应有足够的水蒸气；有使潮湿的空气能够上升并开始凝结为水珠的气象或地形条件；使气流能强烈持久地上升。

在夏季闷热的雨天里，空气中的水蒸气已接近饱和，空气是很潮湿的。再加上无风的条件，就能使气流强烈地上升。在晴朗的夏天，由于太阳光的照射，接近地面的空气层很快地受热上升，这就是使气流能够持久上升的首要条件。所以雷电常在闷热无风的夏天发生。

### 一、雷云形成

当太阳晒在大地上，接近地面的一层大气受热，空气的体积膨胀就变轻，因此就像氢气球一样向上升；但上升后，它的压力随高度而降低，由于压力降低而继续膨胀。另一方面，气体膨胀是需要热能的，可是空气本身的导热能力很差，因此这些热能不可能靠外界来供给，只有靠降低自己温度来取得热能，如图 1-1 所示。

图 1-1 (a) 中所示是干燥空气（或未饱和空气）的上升情况。这种气体每上升 100m，由于压力下降 12% 引起膨胀，而使温度下降约 10℃。一般上升到 2000m 处便不再上升。这种气流是不会产生雷雨的。

图 1-1 (b) 所示为饱和空气上升的情况。饱和空气在冷却时一部分水凝结出来，同时放出它的潜热。由于存在潜热使这种空气在膨胀时温度降低较少，这样上升的饱和空气便永远比周围的大气热，因而能加速上升；同时，水蒸气大量凝结，开始是水珠，后来变成冰，最后变成雪，雷云顶部白色者都是由雪花构成的，这块地方的温度即使在盛夏也常低到零下 40℃ 以上。这

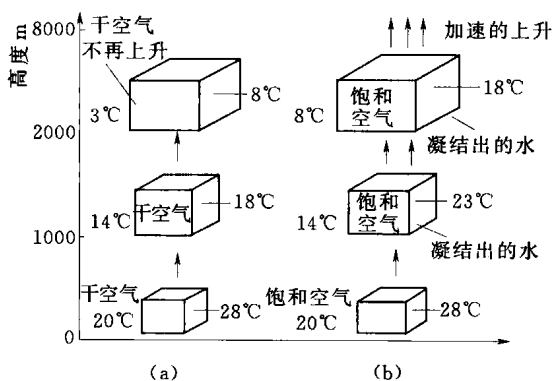


图 1-1 干燥空气和饱和空气上升情况  
(a) 干燥空气；(b) 饱和空气



是雷雨的一种，一般叫“热雷暴”，是夏天经常发生的雷暴，它的形状如图 1-2 所示。这种雷暴经常伴有暴雨，发展很快，下得很急，还常常带有冰雹。一般说来，热雷暴不是雷暴中最强烈的一种，时间较短促，持续时间约 1~2h，每一个雷暴区占的面积不大，最大不过 20~300km 长，几十千米宽。

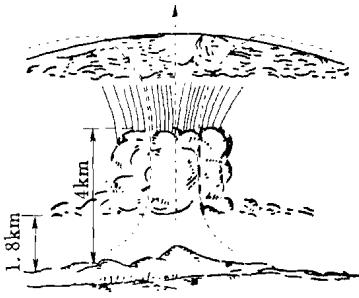


图 1-2 热雷暴的形成状态

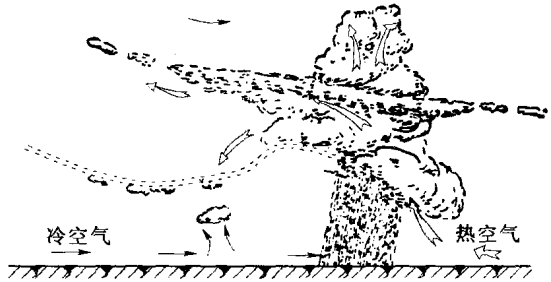


图 1-3 寒潮雷的形成状态

除此以外，只要合乎形成雷云的三个条件，都会形成多种多样的雷云，例如“寒潮雷”、“热雷暴”及“山地雷”等，现分述于下：

(1) 寒潮雷是由强大的冷空气突然侵入热空气地带时产生的，如图 1-3 所示。强大的冷气流突然侵入，由于它比较重像楔子一样插到原来较暖又较潮的空气层的下面，使热空气上升，到一定高度就形成了雷云，雷雨必然跟着到来。由于冷空气往往来势很猛，所以寒潮雷是雷暴中最强烈的一种，危害很大。这种雷雨一般是在沿冷热空气交界处好几百千米长的一条线上，宽度约为 20~60km 的带形地区内发展，并以每小时 50~60km 的速度向前移动，最高速度可达每小时 100km。

(2) 热雷暴是由于热气流侵入冷空气地带时所形成的。当热空气逐步升至冷空气的上层就产生了雷暴，因此它的发展要比寒潮雷缓和得多，一般很少发生强烈的雷雨。但是这种雷暴的宽度较广，在 40~160km 以上，而长度则较短，下雨时多半在夜间，且持续时间较长。

(3) 山地雷是由于地形关系在山丘地带发生的一种雷暴。例如滨海地区的山岳地带，近海的一面山坡上常易产生雷雨。它的形成是有两个因素：一方面海风吹来潮气很重，吹到山坡附近时，由于地形关系必须上升，因而容易使空气中的水蒸气达到饱和；另一方面是由于山坡吸收了太阳辐射能而将热传导给近山坡的一层空气，使它比远离山坡的空气为热，其结果必然形成一股类似烟囱的吸风力量，使气流强烈地上升，因而在山地形成了雷暴。

## 二、雷云中的电荷生产

雷云的主要成分是水各种状态（包括水蒸气、水滴、冰或雪），原来都是中和状态（即不带电的）。但在气流强烈上升过程中，小水珠就会分裂为水滴。在快速分裂过程中，水滴就带上了电荷，如图 1-4 所示。使带正（或负）电荷的水滴下降，带负（或正）电荷的水滴上升。当一定数量的电荷聚集在一个地区时，这个地区的电势就逐渐上升，达到可以使附近空气绝缘破坏的程度时，就产生了闪电。雷云中的电荷分布见图 1-5 所示。

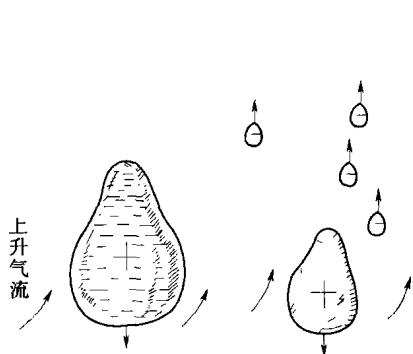


图 1-4 雷云中水滴分裂带电的过程

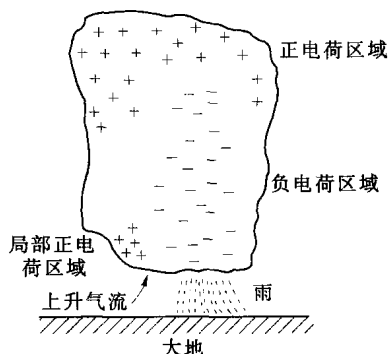


图 1-5 雷云中的电荷分布状态

雷云所带电荷越多，它的电压也就越高，当它和另一块雷云接近时，会使两块雷云之间的空气绝缘发生击穿，发生剧烈的放电，使正负电荷互相中和，从而出现耀眼的闪电。由于雷电电流很大，放电时会产生很高的温度，使周围的空气猛烈膨胀振动，发出震耳的雷声。由于声音的传播速度要比光的传播速度慢得多，所以人们总是先看到闪电，然后才听到雷声。

有时雷云较低，周围又没有带异性电荷的云层，而在地面上又有高大的树木或建筑物，雷云就会通过这些物体对大地放电，如图 1-6 所示。

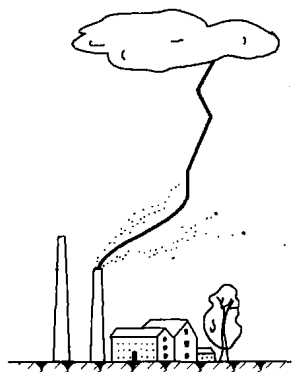


图 1-6 雷云对烟囱的放电

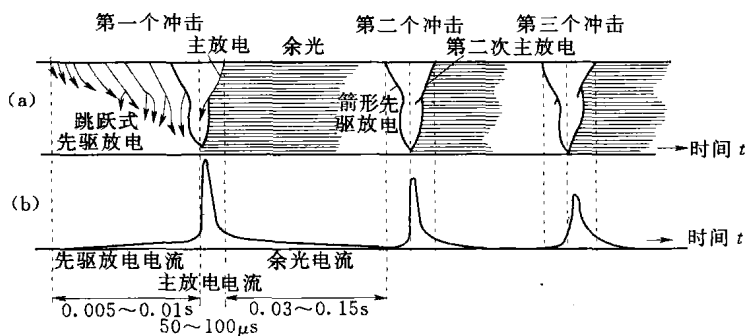


图 1-7 雷云对大地的放电过程

(a) 雷云的放电过程；(b) 放电过程中雷电流变化情况

### 三、雷云放电过程

雷云对大地的放电过程如图 1-7 (a) 所示。这种放电是由云端先发出一个不太明亮而以跳跃式向大地前进的通路开始的，这种预放电叫做阶段式先驱放电。它的平均速度是  $100 \sim 1000 \text{ km/s}$ ，每跳跃前进约  $50 \text{ m}$ ，就要停顿约  $30 \sim 90 \mu\text{s}$ （每一微秒等于百万分之一秒），然后再继续前进。当先驱放电的通路到达大地时，人们肉眼所能看到的主放电阶段才开始。主放电是从大地开始向云端发展的极明亮的放电通路，它的速度约为光速的  $1/5 \sim 1/3$ ，即每秒  $60000 \sim 100000 \text{ km}$ 。随着它的向上发展，其亮度也逐渐减弱，一到云端，主放电就完成了。主放电以后有发光微弱得多的“余光”。“余光”虽然发光微弱，但



时间却较长，可达千分之几至百分之几秒。“余光”阶段过后，就结束了整个脉冲放电过程。

大约有 50% 的雷云放电具有“重复放电”的性质，平均每次约包括 3~4 个脉冲，如图 1-8 所示，最多时曾出现过几十个脉冲。但它的先驱放电不是以跳跃的方式向前发展，而是连续的，其余过程与第一次放电的过程没有什么不同。

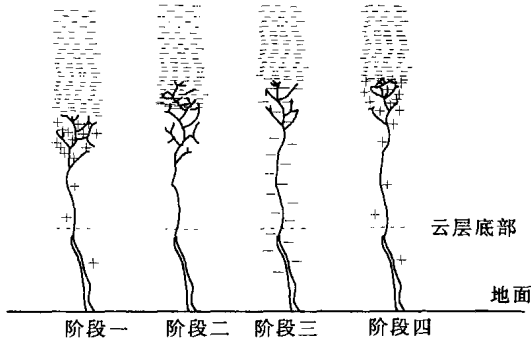


图 1-8 多次雷击的发展过程

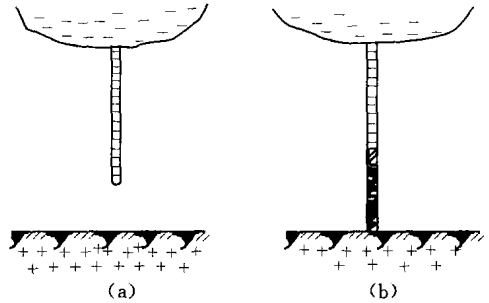


图 1-9 雷电流的发展过程

(a) 先驱放电阶段电荷的积累；

(b) 主放电阶段电荷的中和

图 1-7 (b) 表示雷云放电过程中雷电流的变化情况。在先驱放电时雷电流是不大的，此时，雷云的负电荷在放电通路中聚积了起来。当先驱放电到达大地以后，大地的正电荷很快地中和放电通路中的电荷，这就是主放电，它的电流很大，能达几十甚至几百千安。至于“余光”则是开始放电的那一部分雷云的主电荷向大地泄漏的过程。图 1-9 即表示先驱放电阶段电荷的积累和主放电时电荷的中和情况。

有关于雷电的本性应作为宇宙的系统来理解。宇宙的电系统是大地和电离层这两“极板”构成的大电容器，在地面感应有与雷云异号的电荷。当雷云—大地间的电场强度超过 25~30kV/cm 时，就构成了雷云对地面放电的条件。放电电流可达 200~300kA。

在雷电通道发展过程中，电场愈强，先导在接近地面时偏离垂直面的可能性愈小。在地球上的高物体附近可能发生闪击的范围是随电场强度而定的，这就给高物体提供“安全区”造成特殊困难。接近地面的闪击点取决于先导通道下面电位梯度的强度与大气空间电荷的分布。所以，不仅高物体和孤立的高处会受到雷击，就是平原、湖泊，甚至是两山之间的峡谷也会受到雷击。此外，烈风也可以从侧面改变随后的闪击位置，使其看来像一条宽带，即所谓带状闪电。所有这一切，就决定了雷击发展的随机性的避雷针、避雷线保护范围的相对性。

## 第二节 雷电的类型

雷电最常见的是线形雷，云层中有时也能见到片形雷，个别情况下还会出现球（形）雷。雷电按危害形式分为直击雷、感应雷、球雷。



## 一、直击雷

雷云对大地之间的放电称作直击雷。雷云接近地面时，在地面感应出异性电荷；两者组成一个巨大的电容器。雷云中的电荷分布是不均匀的，地面也是高低不平的，因此，其间的电场强度也是不均匀的。当电场强度达到  $25\sim 30\text{kV/cm}$  时，即发生由雷云向大地发展的跳跃式先驱放电，当先驱放电到达大地时，即发生大地向雷云发展的极明亮的主放电。

大约 50% 的直击雷有重复放电性质，平均每次雷击有三、四个冲击，最多能出现几十个冲击。第一个冲击的先驱放电是跳跃式先驱放电，第二个以下冲击的先驱放电是箭形先驱放电，其放电时间仅约  $0.001\text{s}$ 。一次雷击的全部放电时间一般不超过  $500\text{ms}$ 。如图 1-10 所示，先导放电是以较强的闪光逐级发展的。雷云向大地先导放电时，每一级的发展长度平均为  $50\text{m}$ ，每一级的发展速度为  $10^9\text{cm/s}$ ，两级间的间隔时间为  $30\sim 90\mu\text{s}$ 。

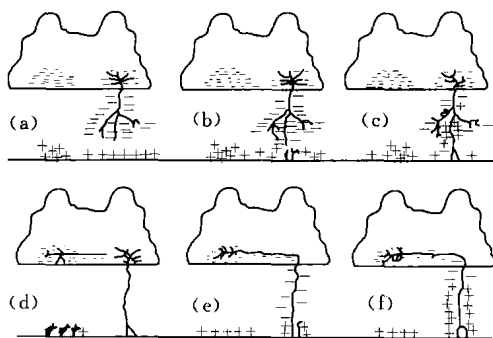


图 1-10 直击雷过程

由充负电的云向大地扩展的多重闪电发展的各个阶段

当曲折且带有分支的放电路径的某一分支首先到达大地时，如图 1-10 (b) 所示，另一个新的放电阶段立即开始，这便是沿着先导放电路径发展为主放电阶段，如图 1-10 (c) 所示。

在主放电阶段具有强烈的火光和雷声，火光是以很高的速度由大地向雷云发展。靠近地面处火光上升的速度为  $1/3\sim 1/5$  倍光速（光速每微秒  $300\text{m}$ ）。离地面愈高，其速度和亮度都逐渐减小，一直到光亮很强的波到达雷云后，主放电才告完成，即完成了一个雷电放电的冲击过程，如图 1-10 中的 (c)、(d) 所示。

在第一个电荷密集中心的先导放电还没有到达地面之前，该中心的电位是不变的，云中各电荷密集中心之间也不会发生任何相互作用。当第一个电荷密集中心的主放电阶段完成之后，该中心的电位可以认为等于大地的电位。这时，由于已经放电的中心和邻近的电荷密集中心之间的电位差增大，它们之间也开始发生放电，随着这一放电的发展，第一中心放电的通道虽然渐渐地去游离，但是仍然保留有一定的残余电导。当放电发展到达第一次放电的通道之后，放电便开始了第二个冲击过程。如图 8-10 中 (e)、(f) 所示。一般来讲，一个雷电过程是由多次冲击组成的，这种雷击称之为直击雷。

雷电直接向电气设备或建筑物放电，其过程与雷云向大地放电时一样。雷云中的大量电荷在极短的时间通过被击物，产生很大的电流，称之为雷电流  $I_t$ 。由于被击物和它接触的土壤有一定的电阻  $R_d$ ，所以当雷电流通过被击物而流入大地时，必然在  $R_d$  上产生极大的电压降  $I_t R_d$ ，其值可达几百万伏。由于此电压超过一般电气设备的正常运行电压许多倍，这种电压被称为直击雷过电压。它对电气设备的绝缘是非常危险的，将造成设备损坏和停电事故。

从上面对于直击雷的分析，知道了直击雷的危害性是由雷电直击于建筑物或设施引起的，若能设法使雷电不直接击中这些设施，则问题也就解决了。



## 二、感应雷

感应雷也称作雷电感应，分静电感应和电磁感应两种。

静电感应是由于雷云接近地面，在架空线路或其他导电凸出物顶部感应出大量电荷引起的。在雷云与其他部位放电后，架空线路或那里电凸出物顶部的电荷失去束缚，以高电压冲击波的形式，沿线路或导电凸出物极快地传播。研究表明，放电流柱会产生强烈的静电感应。在先驱放电阶段由于流柱发展较慢，流柱中的电荷对邻近的架空线路或导电凸出物产生强烈的静电感应。一旦主放电发生时，由于主放电速度比跳跃式先驱放电的高得多（100 倍上下），放电通道中的正、负电荷迅速中和，架空线路或导电凸出物上的感应电荷将转换成强烈的高电压冲击波。

电磁感应是由于雷击后巨大的雷电流在周围空间产生迅速变化的强磁场引起的。这种迅速变化的磁场能在邻近的导体上感应出很高的电压。如系开口环状导体，开口处可能由此引起火花放电；如系闭合导体环路，环路内将产生很大的冲击电流。

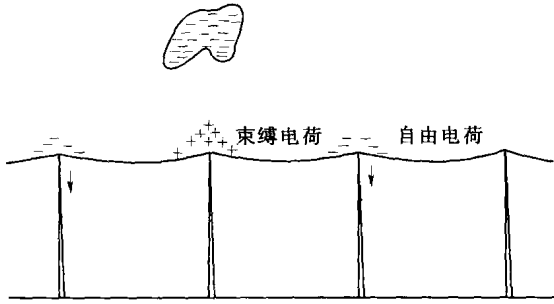


图 1-11 架空线路上感应雷的形成情况

当雷云出现于架空线路上空时，它使线路和线路附近的其他对象物都感生异极性电荷。如图 1-11 所示，在线路上，靠近雷云处由于静电感应而带有异极性的电荷，而处于离雷云层较远的线路上，则多出了带有同极性的电荷。聚集于雷云附近的异极性电荷是束缚电荷，而离雷云较远处的同极性电荷是不受束缚的自由电荷。后者可逐渐泄漏入大地。若一旦雷云与大地或其他对象物之间形成闪电通道而放电

时，则雷云就消失。这时原来线路上的束缚电荷因失去外力的束缚而成为自由电荷。由于此类电荷在线路上聚集极多，电荷聚集处的对地电压就比远处线路的对地电压高得多，因此这聚集着的电荷向线路的两端以很高的速度流动，形成两个电压很高的雷电波向线路两端前进，如图 1-12 所示。这种雷电波因为是被雷云感应出来的，所以称为感应雷。雷电波的电压的幅值一般为 200~300kV，最高可能达到 400~500kV，这种高电压称之为感应雷过电压。

雷电波的形状如图 1-13 所示。雷电波的 0~1 部分称为波头，1~2 部分称为波尾，

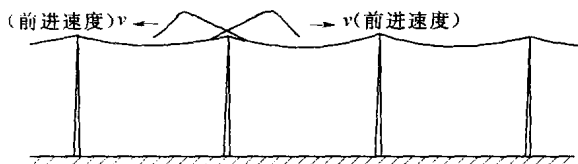


图 1-12 雷电波的产生情况

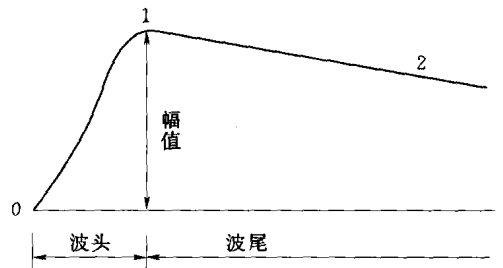


图 1-13 雷电波的形状



波的最大值称为雷电波的电压幅值。若电压由图中的 0 升到 1 很快，则认为波头的陡度很大，若升得比较缓慢则认为波头的陡度比较小。

如果雷电直接击中线路的导线或电杆，则出现的直击雷过电压也以雷电波的形式沿线路侵入到发电厂和变电站内，其电压的幅度值比感应雷过电压的幅值还要大。

雷电波沿着线路向发电厂侵袭而来，若发电厂、变电所不预先采取保护措施，则电气设备的绝缘因受不住这么高的电压会被破坏，尤其对于绝缘比较薄弱的发电机，更易发生绝缘击穿，造成设备损坏而停电。为此，在发电厂及变电所的主电路中装有避雷器，来保护电气设备免受沿线路侵入的雷电过电压的破坏。

### 三、球雷

最常见的是线状雷，有时在云层中还能见到片状雷。在个别情况下会出现球状雷，这是线状雷发展过程中形成的“火球”，温度约达  $5000^{\circ}\text{C}$ ，一般直径  $10\sim 20\text{cm}$ ，最大有达  $10\text{m}$  的。它随气流滚动，一般存在  $3\sim 5\text{s}$ ，个别可达几分钟，运动速度约为  $2\text{m/s}$ 。图 1-14 是球雷通道的照片，图 1-15 是被球雷击穿形成圆孔的玻璃窗的照片。球雷中可能有化学性质活泼的带电气体，最后会自动地或在遇到障碍物时发生爆炸而消失。20 世纪 60 年代在福建某地观察到球雷群（大者如篮球，小者如乒乓球）像炮弹自同一方向射来的情况。又如 2002 年 1 月 12 日我国某地区郊区在塑料大棚群里，发现了最早球形雷，而且震死一名 32 岁的菜农。不过，同成千上万的线形雷相比，球形雷毕竟是极罕见的，对电气设备造成的危害也极微小，又加上这种雷电极难防护，因此，世界各国一般对它都未采取防护措施。

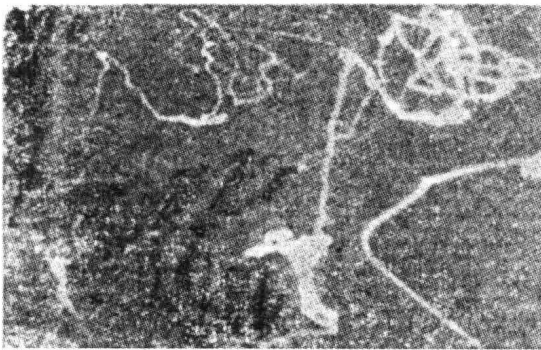


图 1-14 纵横交错放电通道的球雷雷击放电  
(由上而下近似直线的部分约有  $1.2\text{m}$  长)

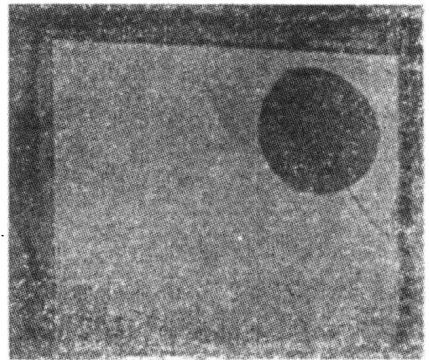


图 1-15 窗上被雷击穿直径  
约为  $10\text{cm}$  的孔洞

世界上最早的球雷记录见我国的《周书》，它记录下了公元前 1068 年一次袭击周武王住房的球雷。我国福建古田 1964 年 7 月一个晴天曾发生过一次特大型球雷，波及数华里内三十多户人家，伤亡多人。这种特大型球雷可能是太阳爆发抛出的带电高温等离子体进入大气后与大气互相作用造成的。防范球雷的办法是关上门窗，或至少不形成穿堂风，以免球雷随风进入屋内。



### 第三节 雷电活动参量及雷电参数

雷电活动强度不同地区是不同的，为了便于记录统计，规定了统一的表示雷电活动强度的标准，常用表征雷暴（雷电）活动强弱程度的雷暴活动参量，包括雷暴季节、雷暴持续期、雷暴月、雷暴日、雷暴时、逐时年雷暴时以及闪电密度等参量，而雷暴活动参量的气候值则为各雷暴活动参量的多年平均结果。

#### 一、雷暴活动参量

##### 1. 雷暴季节

是指一年中雷暴所发生的月份，而不论在这些月份中雷暴发生天数的多少。例如，某地某年，雷暴发生在4月、6月、7月、8月和9月，则雷暴季节为4月、6~9月，而不能认为是4~9月。雷暴季节仅表示一年中雷暴活动所发生的月份，而未表示在这些月份中雷暴发生多少天，因此，只能十分粗略地反映全年雷暴活动的年分布和强弱程度。

平均雷暴季节：是指雷暴季节的多年平均结果，近似为平均初雷所在月份至平均终雷所在月份。平均雷暴季节只能十分粗略地反映全年雷暴活动的年分布和强弱程度的多年平均情况。

##### 2. 雷暴持续期

是指一年中初雷日期与终雷日期之间的天数，单位为d（日）。雷暴持续期仅表示一年中可能发生雷暴的持续天数，而不能表示一年中雷暴可发生多少天。所以有的地方在不同年份可有相近的雷暴持续期，但一年中雷暴发生的天数则可相差较大。因此，雷暴持续期只是从另一个侧面，在一定程度上反映全年雷暴活动的强弱程度，但若配合雷暴季节，便能比其中单独一个雷暴活动参量，更好地反映全年雷暴活动的年分布和强弱程度。

##### 3. 平均雷暴持续期

是指雷暴持续期的多年平均结果，单位为d（日）。平均雷暴持续期表示一年中可能发生雷暴的持续天数，它粗略地反映了全年雷暴活动强弱的多年平均情况。

##### 4. 雷暴月

是指该月中的发生过雷暴，而不论该月中发生过几天雷暴。年雷暴月是指一年中的雷暴月数，单位为月。年雷暴月不同于雷暴季节，前者是指一年中雷暴发生的月数，而后者是指哪些月份发生过雷暴。例如，某地某年的季节为4~10月，而年雷暴月为7个月。不过就它们表征雷暴活动强弱程度而言，两者的差异并不显著。因此，本节采用雷暴季节而不用年雷暴月，仅在详细列出我国各气象台站雷暴活动气候资料中，才统计年雷暴月的气候资料。

##### 5. 平均年雷暴月

是指年雷暴月的多年平均结果，单位为月，它十分粗略地反映了全年雷暴活动强弱的多年平均情况。

##### 6. 雷暴日

是指该天中发生过雷暴，而不论该天雷暴发生的次数和持续时间。月雷暴日是指一个月中的雷暴天数，单位为d（日），它在一定程度上较好地反映了全月雷暴活动的强弱程



度。季雷暴日是指一个季度中的雷暴天数，单位为 d (日)，它在一定程度上较好地反映了整个季度雷暴活动的强弱程度。年雷暴日是指一年中的雷暴天数，单位为 d (日)。年雷暴日比雷暴持续期更为可靠地反映了全年雷暴活动的强弱程度，是目前广为采用的雷暴活动参量。不过，雷暴无法区别一天中只发生一次短暂的雷暴，还是发生几次雷暴，或发生持续时间有多长的雷暴，因而仍有局限性。

#### 7. 平均月雷暴日

是指月雷暴日的多年平均结果，单位为 d (日)，它在一定程度上较好地反映了全月雷暴活动强弱程度。平均季雷暴日是指季雷暴日的多年平均结果，单位为 d (日)，它在一定程度上较好地反映了整个季度雷暴活动的强弱程度。平均年雷暴日是指年雷暴日的多年平均结果，单位为 d (日)，它在一定程度上较好地反映了全年雷暴活动的多年平均情况。

#### 8. 雷暴时

是指该小时内发生过雷暴。月雷暴时是指一个月中的雷暴时数，单位为 h (时)，它比月雷暴日更为可靠地反映了全月雷暴活动的强弱程度。季雷暴时是指一个季度中的雷暴时数，单位为 h (时)，它比季雷暴日更为可靠地反映了整个季度雷暴活动的强弱程度。年雷暴时是指一年中的雷暴时数，单位为 h (时)。年雷暴时比年雷暴日更为可靠地反映了全年雷暴活动的强弱程度，也是目前广为采用的雷暴活动参量，不过，雷暴时并不能反映该小时内雷电活动的强弱程度，因而仍有其局限性。

#### 9. 逐时年雷暴时

是指一天中某一小时内在全年中的雷暴时数，单位为 h (时)，根据一天 24h 逐时年雷暴时的观测资料，在表征全年雷暴活动的日变化。

#### 10. 平均逐时年雷暴时

是指逐时年雷暴时的多年平均结果，单位为 h (时)。根据一天 24h 平均逐时年雷暴时的观测资料，可表征全年雷暴活动日变化的多年平均结果。

#### 11. 平均总闪电密度

是指总闪电密度的多年平均结果，它比平均年雷暴时更为可靠地反映了全年雷电活动强弱程度，平均地闪电密度是指闪电密度的多年平均结果，它又比平均总闪电密度更为细致地反映了全年地闪电活动强弱程度。

为了表征雷电活动频度，采用年平均雷暴日作为计量单位。一天内只要听到一次雷声，就记为一个雷暴日。由于各年变化较大，所以要采用多年平均值。也有用雷暴小时、雷暴刻作为单位的，即在一个小时或一刻钟内听到一次雷声，就记为一个雷暴小时或雷暴刻。通常在计算中，多采用雷暴日。我国规程、规范也是如此。

雷暴日数与纬度有关。在炎热潮湿的赤道附近雷暴日数最多，两极雷暴日数最少。例如，我国海南岛地区多数为 90~120 雷暴日；埃塞俄比亚有 230 雷暴日，印尼有 220 雷暴日，几内亚约为 220 雷暴日。至于两极，只有 1~5 个雷暴日整个地球而言，时刻都有雷暴爆发。据统计，在地球表面有 2000 个雷暴连续存在，以闪电的形式进行有力的雷暴放电，其放电平均速度约为 20Q/s，约相当于 2A 的稳定电流。

关于我国的雷电活动情况，经过研究和实地调查之后，做了如下概括：





西北地区雷暴日数多在 20d 以下，不超过 15d 雷暴日的少雷区也占相当大比重。有些地方小到 3d 以下，格松只有 0.3d，为我国雷暴活动最弱的地方。东北地区多在 30d 左右，华北地区和中部地区多在 40~45d 左右。长江以南到北纬 23°大部分地区，雷暴日数在 40~80d 之间。北纬 23°线以南，其中包括广东、广西、福建的大部，雷暴日数多在 80d 以上。年平均雷暴在 90d 及以上地区，以及运行经验证明雷害严重的地区，被称为雷电活动特别强烈的地区，在这些地区，应特别采取更加有效的防雷措施。我国幅员辽阔，雷电活动强度各地差异很大，因此，防雷措施必须因地制宜，区别对待。

我国把年平均雷暴日不超过 15d 的地区叫少雷区，超过 40d 的叫多雷区。作防雷设计时，应考虑到当地雷暴日的条件。

雷暴开始的月份各地也不相同。我国南部雷暴季节从 2 月开始，长江流域一般在 3 月，华北和东北到 4 月，西北要延迟到 5 月。到 10 月以后，大陆上除江南以外雷暴几乎绝迹。但也有特殊情况，如我国中原河南郑州等地在 2002 年 1 月 12 日（农历“三九”天）就听到了雷声。因此，要做好防雷工作，就要注意长期观察当地雷暴季节的开始和終了日期，即始雷日和终雷日，保证防雷设备在雷季到来之前检查完好，使之正常服役。

全国各省、自治区的主要城市雷暴日数见表 1-1。

表 1-1 全国主要城镇雷暴日数（供参考）

| 地 名    | 雷暴日数（日/年） | 地 名    | 雷暴日数（日/年） |
|--------|-----------|--------|-----------|
| 北京市    | 35.6      | 乌海市    | 16.6      |
| 天津市    | 28.2      | 赤峰市    | 32.4      |
| 河北省    |           | 二连浩特市  | 22.9      |
| 石家庄市   | 31.5      | 海拉尔市   | 30.1      |
| 唐山市    | 32.7      | 东乌珠穆沁旗 | 32.4      |
| 邢台市    | 30.2      | 锡林浩特市  | 32.1      |
| 保定市    | 30.7      | 通辽市    | 27.9      |
| 张家口市   | 40.3      | 东胜市    | 34.8      |
| 承德市    | 43.7      | 杭锦后旗   | 24.1      |
| 秦皇岛市   | 34.7      | 集宁市    | 43.3      |
| 沧州市    | 31.0      | 辽宁省    |           |
| 山西省    |           | 沈阳市    | 27.1      |
| 太原市    | 36.4      | 大连市    | 19.2      |
| 大同市    | 42.3      | 鞍山市    | 26.9      |
| 阳泉市    | 40.0      | 本溪市    | 33.7      |
| 长治市    | 33.7      | 丹东市    | 26.9      |
| 临汾市    | 32.0      | 锦州市    | 28.8      |
| 内蒙古自治区 |           | 营口市    | 28.2      |
| 呼和浩特市  | 37.5      | 阜新市    | 28.6      |
| 包头市    | 34.7      | 吉林省    |           |