

 应用电子  
Application Electronics

▶ 电工实用技术系列

# 电气电子系统 防雷接地实用技术

周志敏  
周纪海 编著  
纪爱华

<http://www.phei.com.cn>



电子工业出版社  
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

电工实用技术系列

# 电气电子系统防雷接地 实用技术

周志敏 周纪海 纪爱华 编著

電子工業出版社

**Publishing House of Electronics Industry**

北京·BEIJING

## 内 容 简 介

本书系统地介绍了供用电系统和电子设备防雷接地技术的基础知识、避雷器、过电压抑制器件、接地技术、电力自动化系统的防雷接地、建筑物防雷、低压供电系统的防雷技术、输电线路的防雷与接地、特殊场合的防雷接地等理论知识和应用技术,将防雷接地技术与城市、工矿企业、农村供用电设施防雷接地工程实践相结合,以提高读者的技术水平和实际操作技能。

本书通俗易懂,注重实用,可供工矿企业和农村电工阅读,也可供相关职业院校的师生参考。

未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。  
版权所有,侵权必究。

### 图书在版编目(CIP)数据

电气电子系统防雷接地实用技术/周志敏,周纪海,纪爱华编著. —北京:电子工业出版社, 2005.12

(电工实用技术系列)

ISBN 7-121-01821-7

I. 电… II. ①周…②周…③纪… III. ①电力系统—防雷—技术 ②电力系统—接地装置 IV. ① TM7 ② P427.32

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2005)第 116698 号

责任编辑:富军 特约编辑:郭宾

印刷:北京市海淀区四季青印刷厂

出版发行:电子工业出版社

北京市海淀区万寿路 173 信箱 邮编 100036

经销:各地新华书店

开本:850×1168 1/32 印张:15.25 字数:409.92 千字

印次:2005 年 12 月第 1 次印刷

印数:5 000 册 定价:24.00 元

凡购买电子工业出版社的图书,如有缺损问题,请向购买书店调换。若书店售缺,请与本社发行部联系。联系电话:(010) 68279077。质量投诉请发邮件至 zltz@phei.com.cn, 盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

# 前 言

防雷接地技术在发电、供电、用电单位中处于极为重要的地位，是保证电网安全、可靠运行及生产和生活用电的关键技术。防雷接地技术的应用直接影响供用电的可靠性、供电的质量及用电设备的安全，与社会的大生产和人民生命财产密切相关。为了提高发电、供电、用电单位防雷接地技术水平及电工队伍的技术素质，本书以防雷接地实用技术为主线，结合目前防雷接地技术的发展及新技术、新器件的应用，重点讲述防雷接地技术在发电、供电、用电单位电力系统中安全、稳定运行的需要。

本书结合现代防雷接地技术的发展，系统地把防雷接地技术的基础知识与现代防雷工程实践有机地结合起来，以便于电工可将防雷接地技术应用到工程实践中。书中内容尽量做到有针对性和实用性，在保证科学性的同时，注意通俗性。读者可以以此为“桥梁”，系统全面地了解防雷接地技术，并掌握防雷接地工程的施工技术和维护测试技能。

本书在写作过程中，无论从资料的搜集和技术信息的交流上，都得到了国内专业学者和同行的大力支持，在此一并表示衷心的感谢。

由于时间短，加之作者水平有限，书中内容难免有谬误之处，敬请读者批评指正。

编著者

# 目 录

<b>第 1 章 概述</b> .....	1
1.1 雷电形成 .....	1
1.1.1 雷云的形成 .....	2
1.1.2 电离层与地面间的电荷平衡及尖端放电 .....	9
1.2 雷击闪电的特性 .....	12
1.2.1 雷电流的特性 .....	12
1.2.2 雷电活动及雷击的选择性 .....	15
1.3 防雷技术 .....	19
1.3.1 防雷机理 .....	19
1.3.2 现代防雷技术 .....	22
1.3.3 现代防雷产品 .....	27
<b>第 2 章 避雷器</b> .....	31
2.1 防雷产品的发展 .....	31
2.1.1 避雷器发展过程 .....	32
2.1.2 阀型避雷器 .....	34
2.2 氧化锌避雷器特性与分类 .....	37
2.2.1 氧化锌避雷器 .....	37
2.2.2 氧化锌避雷器的分类 .....	39
2.2.3 高性能氧化锌避雷器 .....	41
2.2.4 氧化锌避雷器的选用 .....	43
2.2.5 500kV 带串联间隙复合绝缘避雷器 .....	51
2.3 避雷器的测试 .....	57
2.3.1 避雷器的在线测试与相间干扰 .....	57
2.3.2 氧化锌避雷器均压环对测量数据的影响 .....	60
2.3.3 金属氧化物避雷器泄漏电流现场测试 .....	63

2.3.4	氧化锌避雷器在线监测 .....	75
2.4	避雷器的应用 .....	79
2.4.1	避雷器应用中的误区 .....	79
2.4.2	阀型避雷器的安装与运行 .....	85
2.4.3	检查避雷器放电记录器的方法 .....	98
2.4.4	氧化锌避雷器应用中的问题分析 .....	99
2.4.5	避雷器的发热特点和受潮缺陷的红外诊断 .....	104
2.4.6	氧化锌避雷器本体爆炸问题分析及预防措施 .....	109
<b>第 3 章</b>	<b>过电压抑制器件 .....</b>	<b>113</b>
3.1	电子防雷器 .....	113
3.1.1	电子防雷器的主要技术参数 .....	113
3.1.2	电子防雷器的分类 .....	115
3.2	放电管 .....	117
3.2.1	放电管的特性 .....	117
3.2.2	气体放电管在电子信息系统中的应用 .....	122
3.3	新型保护器件 .....	125
3.3.1	二极管型保护器件 .....	125
3.3.2	TVS 选用指南 .....	130
3.4	氧化物压敏电阻 .....	132
3.4.1	氧化物压敏电阻特性及选用 .....	132
3.4.2	氧化物压敏电阻存在的问题 .....	143
3.5	SPD 浪涌防护器及其应用 .....	146
3.5.1	SPD 的性能特点 .....	146
3.5.2	SPD 的安装方案 .....	150
3.5.3	便携设备的 ESD 保护器件 .....	153
3.5.4	建筑物入口处 SPD 的选择 .....	157
3.5.5	浪涌防护器 (SPD) I 级分类试验测试方法 .....	169

---

<b>第 4 章 接地技术</b> .....	177
4.1 接地网的建设 .....	177
4.1.1 接地电阻 .....	177
4.1.2 地网形状 .....	189
4.2 变电所的防雷接地技术 .....	194
4.2.1 变电所的系统防雷保护 .....	194
4.2.2 变电所的雷击防护 .....	197
4.2.3 变电所的接地 .....	204
4.2.4 变电所接地设计 .....	207
4.2.5 变电所防雷接地设计施工中应注意的问题 .....	212
4.2.6 变压器及配电装置的防雷接地 .....	214
4.3 接地网设计 .....	220
4.3.1 110kV 变电所接地 .....	220
4.3.2 变电站接地网优化设计 .....	227
4.4 接地网施工技术 .....	231
4.4.1 导电混凝土在接地工程中的应用 .....	231
4.4.2 深井式垂直接地装置 .....	233
4.4.3 变电站爆破接地技术 .....	238
4.4.4 接地地网施工中的放热熔接技术 .....	243
4.4.5 变电站接地装置防腐措施 .....	245
4.5 接地电阻的测量 .....	251
4.5.1 测试方案 .....	251
4.5.2 地网安全判据 .....	255
4.5.3 垂直分层土壤中测试电极布置 .....	260
4.5.4 接地装置的试验项目及其试验方法 .....	266
<b>第 5 章 电力自动化系统的防雷接地</b> .....	275
5.1 电子设备的抗干扰技术 .....	275
5.1.1 电子设备防浪涌 .....	276

5.1.2	变电所电子设备的防雷 .....	282
5.2	变电站微波塔的防雷措施 .....	286
5.3	远动设备的防雷 .....	291
5.4	变电站自动化系统的接地 .....	294
5.4.1	变电站自动化系统接地 .....	295
5.4.2	地线干扰机理 .....	307
5.4.3	地线干扰对策 .....	309
<b>第 6 章</b>	<b>建筑物防雷 .....</b>	<b>312</b>
6.1	建筑物防雷技术 .....	312
6.1.1	建筑物防雷技术的发展 .....	312
6.1.2	建筑物防雷的分类 .....	315
6.1.3	建筑物防雷措施 .....	318
6.1.4	建筑物 SPD 的配置 .....	326
6.2	建筑物的接闪器 .....	328
6.2.1	接闪器的发展 .....	328
6.2.2	各种避雷针的结构及防雷性能 .....	332
6.2.3	避雷针的保护范围 .....	343
6.2.4	建筑物接地电阻 .....	347
6.3	建筑物的防雷电波侵入及等电位连接 .....	356
6.3.1	建筑物的防雷电波侵入 .....	356
6.3.2	等电位连接 .....	360
6.4	超高层建筑物的防雷接地 .....	364
<b>第 7 章</b>	<b>低压供电系统的防雷技术 .....</b>	<b>373</b>
7.1	电源防雷器 .....	373
7.1.1	电源防雷器的性能 .....	373
7.1.2	电源防雷器的配置 .....	377
7.1.3	供电系统的浪涌保护 .....	380
7.1.4	电源 SPD 与接地汇集排连线 .....	384



---

7.2	电源噪声的抑制 .....	387
7.2.1	电源设备中的噪声 .....	387
7.2.2	系统电源抗干扰技术 .....	397
<b>第 8 章</b>	<b>输电线路的防雷与接地</b> .....	<b>404</b>
8.1	输电线路的防雷与接地技术 .....	404
8.1.1	输电线路的防雷 .....	404
8.1.2	35kV 以上架空线路的防雷 .....	413
8.1.3	10kV 配电网的防雷 .....	415
8.1.4	0.4kV 用电网的防雷 .....	419
8.2	输电线路防雷计算 .....	421
8.3	线路避雷器的应用 .....	424
8.3.1	线路避雷器防雷的基本原理 .....	425
8.3.2	高压交流线路用金属氧化物避雷器 .....	427
<b>第 9 章</b>	<b>特殊场合的防雷接地</b> .....	<b>442</b>
9.1	特殊建筑物防雷接地 .....	442
9.1.1	玻璃幕墙建筑物的防雷接地 .....	442
9.1.2	现代金属屋面建筑防雷系统 .....	445
9.2	危险环境建筑物防雷接地 .....	448
9.2.1	爆炸危险环境建筑物防雷设施选择和布置 .....	448
9.2.2	石油储罐的防雷 .....	454
9.3	高耸构筑物的防雷 .....	460
9.4	防静电接地 .....	465
<b>参考文献</b>	.....	<b>473</b>

# 第1章 概 述

## 1.1 雷电形成

雷电这一自然现象，瞬变万千。古人以阴阳平衡之理论来认识这一自然现象，其理论与之千年的实践，同现代实证性科学相比，有着相当深的科学内涵。随着人类社会的进步和科学技术的发展，人们对雷电这一自然现象有了新的认识，其理论和防雷实践都在不断地完善。自200多年前富兰克林避雷针问世至今，其顺应雷云放电规律，创造优先放电条件，使防雷实用技术进入一个崭新的阶段。

通常，所谓雷击，是指一部分带电的云层与另一部分带异种电荷的云层，或者是带电的云层对大地之间迅猛地放电。这种迅猛的放电过程产生强烈的闪交并伴随巨大的声音。当然，云层之间的放电主要对飞行器有危害，对地面上的建筑物和人、畜没有很大影响。然而，云层对大地的放电，则对建筑物、电子电气设备和人、畜危害甚大，这是我们要研究的主要对象。

通常，雷击有三种主要形式：其一是带电的云层与大地上某一点之间发生迅猛的放电现象，叫做“直击雷”；其二是带电云层由于静电感应作用，使地面某一范围带上异种电荷，即当直击雷发生以后，云层带电迅速消失，而地面某些范围由于散流电阻大，以致出现局部高电压，或者在直击雷放电过程中，强大的脉冲电流对周围的导线或金属物产生电磁感应电压以致发生闪击的现象，叫做“二次雷”或称“感应雷”；其三是“球形雷”，球形雷是一种特殊的雷电现象，简称球雷。一般是以橙或红色，或似红色火焰的（也有带黄色、绿色、蓝色或紫色的）发光球体，直径一般约为10~20cm，最大的直径可达

1m, 存在的时间大约为百分之几秒至几分钟, 一般是 3~5s。其下降时有的无声, 有的发出“嘶嘶”声, 一旦遇到物体或电气设备时会产生燃烧或爆炸, 主要是沿建筑物的孔洞或开着的门窗进入室内, 有的由烟囱或通气管道滚进楼房, 多数沿带电体消失。

### 1.1.1 雷云的形成

在讨论雷电形成之前, 首先讨论雷云的产生。不管是直击雷还是感应雷都与带电的云层存在分不开, 带电的云层均被称为雷云。有关雷云形成的假说很多, 但至今尚未有一种被公认为无懈可击的完整学说, 这里仅介绍其中被认为比较完善并经常被推荐的假说。

#### 1. 雷云形成的假说

根据大量科学测试可知, 地球本身就是一个电容器。通常大地带有 50 万库仑左右的负电荷, 而地球上空存在一个带正电的电离层。这两者之间便形成一个已充电的电容器。它们之间的电压为 300kV 左右, 其场强为上正、下负。

当含水蒸气的空气受到炽热的地面烘烤受热而上升, 或者较温暖的潮湿空气与冷空气相遇都会产生向上的气流。这些含水蒸气的气流上升时温度逐渐下降形成雨滴、冰雹(称为水成物)。这些水成物在地球静电场的作用下被极化, 如图 1-1 所示, 负电荷在上, 正电荷在下。它们在重力作用下落下的速度比水滴和冰晶(称这二者为云粒子)要大, 因此极化水成物在下落过程中要与云粒子发生碰撞。碰撞的结果是其中一部分云粒子被水成物捕获, 增大了水成物的体积, 另一部分未被捕获的被反弹回去。这些反弹回去的云粒子带走水成物前端的部分正电荷, 使水成物带上负电荷。由于水成物下降的速度快, 而云粒子下降的速度慢, 因此带正、负两种电荷的微粒逐渐分离(这叫重力分离作用), 如果遇到上升气流, 云粒子不断上升, 分离的作用更

加明显。最后形成带正电的云粒子在云的上部，而带负电的水成物在云的下部，或者带负电的水成物以雨或雹的形式下降到地面。当带电云层一经形成，就形成雷云空间电场。空间电场的方向和地面与电离层之间的电场方向是一致的，都是上正下负，因而加强了大气的电场强度，使大气中水成物的极化更厉害，在上升气流存在的情况下加剧重力分离作用，使雷云形成得更快。

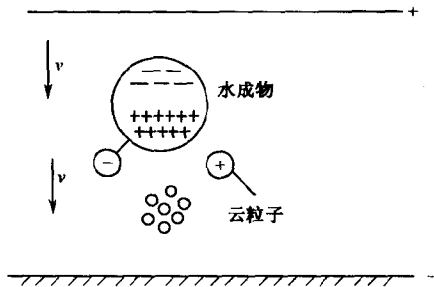


图 1-1 水成物在大气电场中的极化

综上所述，好像雷云总是上层带正电荷，下层带负电荷。实际上，气流并不单是只有上下移动，而是比这种运动更为复杂。因此，雷云电荷的分布也比上面讲的要复杂得多。

根据科学工作者大量直接观测的结果，典型的雷云中的电荷分布如图 1-2 所示。

科学工作者的测试结果表明，大地被雷击时，多数是负电荷从雷云向大地放电，少数是雷云上的正电荷向大地放电；在一块雷云发生的多次雷击中，最后一次雷击往往是雷云上的正电荷向大地放电。从观测证明，发生正电荷向大地放电的雷击显得特别猛烈。

上面的假说首先是由威尔逊 (Wilson) 提出的，通常把它叫做威尔逊假说。另外我国学者唐山樵先生曾对雷云的形成提出了如下的假说：雷电的出现是与气流、风速密切相关的，而且与地球磁场学有一

定的联系。雷雨云内部的不停运动和相互摩擦而使雷雨云产生大量的带正、负电荷的小微粒，即所谓的摩擦生电。这样，庞大的雷雨云就相当于一块带有大量正、负电荷的云块。而这些正、负电荷不断地产生，同时也在不断地复合。当这些云块在水平方向向东或向西迅速移动时（最大风速可达 40m/s），它与地球磁场磁力线产生切割，这就好像导体切割磁力线产生电流一样，云中的正、负电荷将产生定向移动，其移动的方向可按右手定则来判断。若云块是由西向东移动，而地磁场磁力线则是由地球的南极指向地球的北极。因此大量的正电荷向上移动，负电荷向下移动。这样云的下部将积聚越来越多的负电荷，而云的上部积聚大量的正电荷。当电场强度达到足够高（25~30kV/cm）时将引起雷云间的强烈放电，或是雷云中的内部放电，或是雷云对地放电，即所谓的雷电。

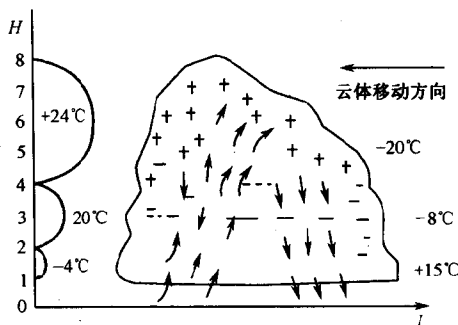


图 1-2 典型的雷云中的电荷分布

雷电是发生在因强对流天气而形成的雷雨云层间和雷雨云与大地之间强烈瞬间放电现象。至今还没有一个完整理论可以将全部雷电现象解释清楚。目前的办法是将不同理论综合起来，尽可能完善地解释各种雷电现象。

## 2. 雷电的形成

### (1) 雷电形成的三个条件

空气中必须有足够的水汽；有使潮湿水汽强烈持久上升的气流；有使潮湿空气上升凝结成水珠或冰晶的气象、地理条件。

### (2) 雨滴分裂作用理论

当潮湿水汽上升到高空，由于高空气温较低，产生凝结，在上升气流运动过程中逐渐增大形成小水滴。由于上升气流的不稳定，水滴在运动过程中相互摩擦、碰撞、分裂形成大小不等的水珠，大水珠带正电荷，小水珠带负电荷，小水珠容易被上升气流带到上层云层，大水珠则留在下层或降落到地面，这样便形成了电荷的分离过程。当带电荷云层逐步积累到足够的电荷量时，便产生闪电现象，形成雷电。实验证明：

① 水滴分裂时确实是大水珠带正电荷，小水珠带负电荷；

② 分裂水滴所需气流的速度为  $3\sim 8\text{m/s}$ ，正是雷云中上升气流的速度。

### (3) 电场极化理论

距离地面  $80\text{km}$  以上的电离层具有一定的导电能力，而且是带正电荷的，而大地是带负电荷的，从而形成比较稳定的大气电场。因此，电离层和地这两个带电导体中间被不导电的大气所绝缘，形成一个电容器。使处于其中的任何导体上端带负电荷，下端带正电荷（云层也是如此），即发生极化。此外，近地大气中还常有一定量的离子，其中正离子较重（约为电子质量的 2000 倍）不大活动，而负离子活动性较大。在大气电场的作用下，负离子向上运动，正离子向下运动形成上负下正离子层；另外，空气中水滴分裂后形成上负下正的带电云层，进一步被大气电场极化。这些云层电荷量逐渐积累增多，达到了足够的能量时，便产生闪电现象，形成雷电。

人们通常把发生闪电的云称为雷雨云。其实有几种云都与闪电有

关，如层积云、雨层云、积云、积雨云，最重要的则是积雨云，一般专业书中讲的雷雨云就是指积雨云。

云的形成过程是空气中的水汽经由各种原因达到饱和或过饱和状态而发生凝结的过程。空气中水汽达到饱和是形成云的一个必要条件。其主要方式有：

- ① 水汽含量不变，空气降温冷却；
- ② 温度不变，增加水汽含量；
- ③ 既增加水汽含量，又降低温度。

但对云的形成来说，降温过程是最主要的过程。而降温冷却过程中又以上升运动而引起的降温冷却作用最为普遍。

积雨云就是一种在强烈垂直对流过程中形成的云。由于地面吸收太阳的辐射热量远大于空气层，所以白天地面温度升高较多，夏日这种升温更为明显，所以近地面的大气温度由于热传导和热辐射也跟着升高，气体温度升高必然膨胀，密度减小，压强也随着降低。根据力学原理它就要上升，上方的空气层密度相对说来就较大，它就要下沉。热气流在上升过程中膨胀降压，同时与高空低温空气进行热交换，于是上升气团中的水汽凝结而出现雾滴，就形成了云。在强对流过程中，云中的雾滴进一步降温，变成过冷水滴、冰晶或雪花，并随高度逐渐升高，降温增多。在冻结高度（ $-10^{\circ}\text{C}$ ），由于过冷水大量冻结而释放潜热，使云顶突然向上发展，到达对流层顶附近后向水平方向铺展，形成云砧，是积雨云的显著特征。

在积雨云形成过程中，在大气电场及温差起电效应、破碎起电效应的同时作用下，正负电荷分别在云的不同部位积聚。当电荷积聚到一定程度，就会在云与云之间或云与地之间发生放电，也就是人们平常所说的“闪电”。

### 3. 雷灾特点

雷电以其巨大的破坏力给人类社会带来了惨重的灾难。尤其是近

几年来,雷电灾害频繁发生,对国民经济造成的危害日趋严重。为此应当加强防雷意识,做好预防工作,将雷害损失降到最低限度。当人类社会进入电子信息时代后,雷灾出现的特点与以往有极大的不同,可以概括为:

① 受灾面在不断扩大。从电力、建筑这两个传统领域扩展到几乎所有行业。特点是与高新技术关系最密切的领域,如航天航空、国防、邮电通信、计算机、电子工业、石油化工、金融证券等。

② 从二维空间入侵变为从三维空间入侵。从闪电直击和过电压波沿线传输变为空间闪电的脉冲电磁场从三维空间入侵到任何角落,无孔不入地造成灾害,因而防雷工程已从传统防直击雷、感应雷进入现代的防雷电电磁脉冲(LEMP, Lightning Electromagnetic Pulse)阶段。前面是指雷电的受灾行业面扩大了,这里是指雷电灾害的空间范围扩大了。

③ 雷灾的经济损失和危害程度大大增加了。被袭击的对象本身的直接经济损失有时并不太大,而由此产生的间接经济损失和影响却是难以估计的。

产生上述特点的根本原因,是雷灾的主要对象已集中在微电子器件设备上。雷电的本身并没有变,而是科学技术的发展,使得人类社会的生产生活状况变了。微电子技术的应用渗透到各种生产和生活领域,微电子器件极端灵敏这一特点很容易受到无孔不入的LEMP的作用,造成微电子设备的失控或者损坏。

为此,当今时代的防雷工作的重要性、迫切性、复杂性大大增加了。雷电的防御已从直击雷、感应雷防护发展到了整体的系统防护。必须站到新高度来认识和研究现代防雷技术,提高人类对雷灾防御的综合能力。

综上所述,按照雷电的成因为摩擦生电及云块切割磁力线的假说,而把不同电荷进一步分离进行解释。可见雷电的成因或者说雷电的主要能源来自于大气的运动,没有这些运动,是不会有雷电的。这也解释了为什么雷电总伴随着狂风骤雨而出现。

雷雨云的起电机理有三种理论,各解释一定的雷电成因现象。这



三种理论分别为：水滴破裂效应、水滴冻冰效应和吸收电荷效应。

笔者认为前两种解释有其一定的局限性，而从火花放电发展机理去解释，雷雨云起电机理采用吸收电荷效应理论来阐述更容易理解。由于宇宙射线或地面大气层的放射使气体分子游离，在大气中存在着两种离子，由于大气空间场的作用，使云层上部积聚正电荷，下部积聚负电荷，在空间场的作用下云层分离从而带电。

雷云中电荷的分布是不均匀的，而是形成许多堆积中心。因而不论是在云中或是在云对地之间，电场强度是不一致的。当云中电荷密集处的电场强度达到  $25\sim 30\text{kV/cm}$  时，就会由云向地开始先导（雷云中积聚电荷最密集处，首先对物体击穿形成的一条导电带）放电（对于高层建筑，雷电先导可由地面向上发出，称为上行雷），由雷云中发展至地面的时间约几个毫秒。光学照片显示先导继续生长不是均匀的，是跳跃式的、迈步式的，向地频繁迈步前进，即走一段停一会，再走一段，再停一会。每秒的长度约为  $10\sim 200\text{m}$ ，每秒停歇的时间约为  $10\sim 100\mu\text{s}$ 。先导发展速度约为  $10^7\text{m/s}$ ，延续时间约为  $1\mu\text{s}$ 。先导中心的线电荷密度约为  $(0.1\sim 1)\times 10^{-3}\text{C/m}$ ，先导的电晕半径约为

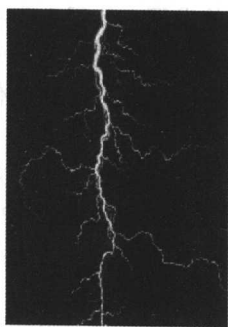


图 1-3 雷电电离通道图

$0.6\sim 6\text{m}$ 。它有一个向下伸展的电荷囊，相应先导发展时的电流约为  $100\text{A}$ ，先导中的纵向电位梯度约为  $100\sim 500\text{kV/m}$ 。下行负先导在发展中会分成数支，这和空气原来随机存在的离子团有关。当先导通道的顶端接近地面时，可诱发迎面先导（通常起自地面的突出部分）。当先导与迎面先导会合时，即形成了从云到地面的强烈电离通道，如图 1-3 所示。这就是雷电的主放电阶段，此时雷鸣和电闪都伴随出现。

迎面先导由地向云传播速度约为光速的十分之一。流经被击物的雷电流幅值与定位高度、先导电荷有关。可获得的雷电流与击距（击距——防雷计算中的抛球半径或滚球半径）有关，但有很多参数不是