

32251

■ 许颖 刘继 马宏达 邱传睿 编著

建(构)筑物 雷电防护

中国建筑工业出版社

建(构)筑物雷电防护

许颖 刘继 马宏达 邱传睿 编著

中国建筑工业出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

建(构)筑物雷电防护/许颖等编著. —北京: 中国建筑工业出版社, 2010.5

ISBN 978-7-112-12050-5

I. 建… II. 许… III. 建筑物-防雷 IV. TU895

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2010) 第 073437 号

全书共包括六章和四个附录。内容丰富, 概念清晰, 观点明确, 并针对当前存在的重大实际问题作了精辟分析。例如, 论述了当前争议激烈的雷电流波形问题、雷击选择性问题; 指出了世界各国采用的雷电截闪系统 (俗称避雷针、线、网) 的保护范围计算方法均是经验公式, 不同《规范》规定的虚拟空间的保护范围的不同是因其允许的虚拟空间遭受雷击的概率 (简称绕击率) 不同所致; 阐明了一个接地网不论其上连接有多少 (或 10 个以上) 设备和设施, 它只有一个“真值”的接地电阻 (阻抗) 值, 而测量出多个 (或 10 个以上) 的相差 10% 以上的测量值, 这是测量方法不正确造成的; 分析了 SPD 七个重要参数; 强调了雷电防护技术是一门实践性很强的实证科学, 建 (构) 筑物雷电风险评估、或防护等级分类以及防护措施必须密切结合本地区、本行业、本国的实践经验, 否则即浪费钱财, 又会引发灾害。

本书为培训从事建 (构) 筑物雷电防护工程的技术人员编写。也可作为科研、设计、制造等方面科技人员的参考资料。

* *

责任编辑: 刘江 张磊

责任设计: 李志立

责任校对: 王金珠 王雪竹

建(构)筑物雷电防护

许颖 刘继 马宏达 邱传睿 编著

*

中国建筑工业出版社出版、发行 (北京西郊百万庄)

各地新华书店、建筑书店经销

北京红光制版公司制版

北京市铁成印刷厂印刷

*

开本: 787×1092 毫米 1/16 印张: 24 $\frac{1}{4}$ 字数: 590 千字

2010 年 8 月第一版 2010 年 8 月第一次印刷

定价: 55.00 元

ISBN 978-7-112-12050-5

(19308)

版权所有 翻印必究

如有印装质量问题, 可寄本社退换

(邮政编码 100037)

前 言

首先向读者介绍或解释本书名称《建(构)筑物雷电防护》的由来。第一点,雷电防护是 IEC/TC 81 定义取名的,如 IEC 62305—2006,这是准确的。自然界空中的雷暴或雷闪时产生多种效应;如常听到的雷声,这是雷暴或雷闪时产生的空气运动的压力冲击波引起的一种效应。这种压力冲击波效应会引起雷闪通道和被击物体周围的空间电荷运动和分布的改变,会严重影响到被击物体绝缘抗电强度下降。如常见到的雷闪的光、射线和热效应。这种效应会加速雷闪通道和被击物体周围的空气中的电荷游离和分布的改变。会引起被击物体熔化、着火燃烧和爆炸,轻则也会使绝缘体抗电强度下降。如常见到的被击物体的物理变形或破坏。这是雷电流产生的电动力效应。这个效应可能招致一些后果,例如细长金属管变扁。与闪电通道接触的某些材料可能使其发生强烈蒸汽或气化,紧接着机械损坏,例如木质裂开或混凝土中形成裂缝或破碎。如电磁场效应,这是通常所说的雷电效应。这种效应可以是直击雷引起的,也可以是在靠近闪电处的长金属电气和电子系统中感应或通过耦合引起的,呈现在被保护物上产生过电压,使被保护物绝缘发生闪络或击穿。上述列了多种效应。事实上,国内、外没有哪一本标准、规程、规范,能包括上述多种效应防护。雷电防护仅是防护与“电”字相关的效应。所以作者认为 IEC/TC 81 取名《雷电防护》是准确。笼统地,将《雷电防护》简称为《防雷》或《防雷保护》是不准确的。将《雷电防护》简称为《防雷电》也是可以的。

向读者介绍或解析本书名《建(构)筑物雷电防护》由来的第二点,有的《雷电防护标准》或《建筑物防雷设计规范》,号称范围包括:建(构)筑物内所有设施、物体、人员等以及连接到建(构)筑物的服务设施,事实上这是不可能的。例如,国内、外都有 3~500kV 电力设备进入建(构)筑物内,高压轨道机车进入建(构)筑物内等等。由工业部门中很多行业的技艺特殊性,有雷电防护特殊要求。这些行业都制定了本行业专用的《雷电防护》标准、规程、规范等,国际上也是如此。例如,电力、铁道、石油和天然气、化工、煤矿、冶金、电信、航空和航天等等。当然地,这些行业的《雷电防护》可参考或借鉴《建(构)筑物雷电防护》相关技术。还应说明的,所谓建(构)筑物内电气系统是低压(220~380V)电气系统。

前面已解释了本书取名由来。再说本书涉及的内容。雷电放电是自然界中巨大现象之一。对地球上人类产生多方面的巨大影响。其中之一,就是建(构)筑物以及内部造成破坏和人员生命财产损失。人们对这种自然界天灾,不断进行观测和研究,采取预防措施,积累经验,来减少天灾——雷害。

中国和国外,人们古代时,已认识到,地面上的凸出的高物体,具有吸引雷电的特征。据文[1]第 102 页介绍,大概地,在 4000 年前,古埃及建造教堂,在其顶上敷设 6 根铜带,当时称这种装置是为了教堂防止“天火”,现在称为“防护直击雷”。中国很多的千年以上的古建筑,采取防护直击雷措施。

因此,建(构)筑物雷电防护是老课题新话。所谓老课题,是人们对建(构)筑物的防护雷电持续观测和研究达几千年历史,积累了丰硕经验,创立了既经济又有效的技术防护措

施。随着历史发展,时代前进,建(构)筑物内部,不仅是人和生物,还有现代化的电气系统、电子系统等,雷电防护技术与时俱进,不断创新,这就是新话。

近年来,电子系统技术发展迅速,更新换代快,其雷电防护技术随着迅速发展,防护器件不断更新。现在鱼目混珠,涌向市场,有的改头换面,物种多,夸大功能,抬高售价。IEC/TC 81《建筑物电子系统防雷技术委员会》现任主席 C. Bouquegneau 教授在文[2]中指出:由于“潜在收益(潜在经济利益)是发明及提出许许多多不同防雷系统及产品的明显诱因,所宣称的优点常常是广告宣传。不幸的是,其性能未被验证,其作用未证实。”C. Bouquegneau 教授在文中还批判了像“aigreftes”一类的许多可笑装置误导人们。此外,还指出:“ESE、拒雷器、消雷器…等等,与简单的富兰克林避雷针(雷电截闪系统)一起接受自然雷击试验时,已证明在吸引距离方面两者没有明显的不同,截闪的雷击次数也没有明显区别。”C. Bouquegneau 教授指出的问题,正在我国泛滥。

作者在开头就说了,国内外建(构)筑物雷电防护技术源远流长,但对雷电并未全“真知”,实验室不能逼真模拟自然雷电闪电。但实验室的科学试验和理论分析是很重要的,是定性地指引着雷电防护技术方向的。而定量的,现在行之有效又经济的雷防护技术主要靠长期实践积累经验。雷电防护技术是一门实践性很强的《实证科学》。电力、邮电、铁道等行业,依靠实践经验不断地修订本行业的雷电防护技术标准[3、4]。例如,电信行业根据本行业的实践经验,就不用电压开关型 SPD。

当今,国内制订《防雷技术标准》存在两种截然不同的作法,一种是基于本国的、本地区的、本行业的实践经验和科学实验以及理论分析制定的[3、4],对国际上先进的,包括 IEC 雷电防护标准,是“借鉴”、“参考”。但不能“照搬”。另一种认为,对 IEC 雷电防护技术标准不是“借鉴”,而是如何“等同”和“等效”采用的问题,把 IEC TC81 制订推荐的雷电防护技术标准和资料性附录,仅仅“翻译”变成中国强制的国标(GB),资料性附录变成标准性附录,由这种做法,引起了国内几十名防雷专家的异议。国家标准管理委员会国家标准技术审查部沈同主任指出[5]:“部分标准的科学性、先进性和可操作性不强”、“采(用国际)标(准)时未对国际标准全面研究”,存在不少问题,比如:(1)“有些标准迁就落后的现状”;(2)“标准的内容远远达不到打破国外壁垒的要求”;(3)“标准确立未经严格验证”;(4)“盲目照搬国外指标”;(5)“相应的方法、设备等条件不具备”;(6)“仅仅摘录国际上有关文献的一部分”;(7)“不把重点放在转化国际上通用的方法、要求、规定上”;(8)“采(用国际)标(准)时仅仅是翻译工作”;(9)“未认真分析与国内现状的差异”等。

沈同主任指出这些存在的问题,非常及时和深刻。作者认为,是对我国建筑物雷电防护技术标准制订时的一副清醒剂。

建(构)筑物雷电防护的目的是减轻以下四方面的雷电灾害:

- (1) 建(构)筑物本体的损坏(包括爆炸和火灾危险)。
- (2) 建(构)筑物内的人员、牲口、家禽及设施等。
- (3) 建(构)筑物内电气系统。
- (4) 建(构)筑物内电子系统。

危害上述四方面被保护物的雷电过电压的来源是:

- (1) 雷电直击被保护物(如建(构)筑物)。
- (2) 沿进入建(构)筑物的供电线路的、电话线的、广播线的、电子信息线的以及其他

导电金属体的雷电侵入波。

(3) 雷电的电磁感应(耦合)脉冲波，常称为雷电电磁脉冲(LEMP)。

(4) 地电位升高的反击。雷电流通过接地引流体和接地装置上的压降对附近的低电位物体反击；击穿绝缘介质(包括地中绝缘介质和两分开的接地装置之间的土壤介质)以及两分开的接地装置之间的土壤介质虽不被击穿却由一个接地装置上电位升高在另一个接地装置上产生的电位升高(常称为阻性耦合)，这个升高电位对本接地装置上连接的电子系统会产生危害。

关于在上述四方面的雷电波的过渡过程的计算分析，请参阅文[6、7]。本书仅就物理概念和防护技术措施论述。对雷害不仅要“知其然”，还要“知其所以然”。作者希望，读者在工程雷电防护中，少花钱多收效。以尽作者一份绵薄之力。

清人郑板桥(1693~1765年)根据其作词四十年，“屡改屡蹶”经验，证明改而善者十之七，改而谬十之三(词钞、自序)。本书是由许颖、刘继、马宏达、邱传睿等共同编著，虽经多次修改，仍难免有错误，至希读者严加指正，甚为感谢。

目 录

前言

第 1 章 雷电放电基本特性和参数的简述	1
1.1 关于雷电放电的简述	1
1.2 雷电放电参数	3
1.2.1 主放电通道波阻	4
1.2.2 雷电流波形	4
1.2.3 雷电流幅值概率分布	6
1.2.4 雷电流陡度概率分布	7
1.2.5 雷电流极性	7
1.2.6 GB 50057 和 IEC 62305 规定的雷电流参数	7
1.2.7 俄罗斯 ПД34. 21. 122-87《建(构)筑物防雷保护配置规程》 中雷电流参数简述	8
1.2.8 俄罗斯国家标准 ПД153-34. 3-35. 125-99《6~1150kV 电网雷电和内过电压防护导则》推荐架空线路和变电所防雷 保护计算中使用的雷电参数	9
1.2.9 重复放电次数及对地输送的电荷量	11
1.3 雷电活动与气象条件的关系	12
1.4 雷击的选择性和易击点	12
1.5 地面上的建(构)筑物年预计雷击次数估算方法	15
1.6 雷电危险效应	23
第 2 章 雷电截闪系统防护直击雷的作用	25
2.1 雷电截闪系统防护直击雷的原理	25
2.1.1 雷电截闪系统的引雷性能	25
2.1.2 棒型截闪系统的雷电防护理论	27
2.1.3 建筑物易受雷击部位和网型雷电截闪系统	28
2.1.4 对棒型截闪系统雷电防护滚球法理论的质疑	28
2.1.5 用“几何原理”来解释雷电截闪系统的保护范围是不对的	30
2.2 高电压实验室的模拟试验研究	30
2.3 世界各国的雷电截闪系统保护范围计算方法均为经验公式	31
2.4 实际工程中雷电截闪系统选用的注意事项	32
2.4.1 实际工程中不宜设置高架的独立雷电截闪系统	32
2.4.2 独立棒型截闪器比较适用于平原地区低矮建(构)筑物的 雷电防护	33
2.4.3 山区建(构)筑物和高层建筑物不宜用棒型截闪器进行雷电防护	33

2.5 建(构)筑物内部雷电防护方式与雷电截闪系统的关系	34
2.5.1 内部雷电防护的隔离防护方式	34
2.5.2 内部雷电防护的连接防护方式及电阻耦合过电压	34
2.5.3 静电感应过电压的形成及其危害	35
2.5.4 电磁感应过电压的形成及其危害	36
2.6 非金属结构屋顶防直击雷用雷电截闪网	37
2.7 《交流电气装置的过电压保护和绝缘配合》DL/T 620—1997 有关 雷电截闪系统保护范围的规定	37
2.7.1 单棒雷电截闪系统的保护范围	38
2.7.2 两棒等高雷电截闪系统的保护范围	38
2.7.3 多棒等高雷电截闪系统的保护范围	39
2.7.4 单架空地线雷电截闪系统的保护范围	40
2.7.5 两等高平行架空地线雷电截闪系统的保护范围	40
2.7.6 不等高雷电截闪系统的保护范围	41
2.7.7 斜坡地面设置的雷电截闪系统的保护范围	41
2.7.8 相互靠近的棒和架空地线雷电截闪系统的联合保护范围	41
2.8 《建筑物防雷设计规范》GB 50057 用滚球法确定雷电截闪系统 的保护范围的计算方法	42
2.8.1 单棒雷电截闪系统的保护范围	42
2.8.2 两棒等高雷电截闪系统的保护范围	43
2.8.3 两棒不等高雷电截闪系统的保护范围	44
2.8.4 矩形布置的四棒等高雷电截闪系统的保护范围	45
2.8.5 单根架空地线雷电截闪系统的保护范围	46
2.8.6 两根架空地线雷电截闪系统的保护范围	47
2.8.7 确定建(构)筑物上任两雷电截闪系统在所需断面上的保护范围	48
2.9 俄罗斯国标推荐的直击雷防护的雷电截闪系统保护范围的 计算方法	49
2.9.1 单棒雷电截闪系统保护范围	49
2.9.2 两棒雷电截闪系统保护范围	50
2.9.3 多棒雷电截闪系统保护范围	51
2.9.4 单根架空地线雷电截闪系统保护范围	52
2.9.5 两根架空地线雷电截闪系统保护范围	52
2.9.6 俄罗斯国家工业建筑设计院[ГИПРОПРОМ]开发的 B 级 保护范围的计算诺谟图	54
2.9.7 不同的被保护物体应用雷电截闪系统实例	54
2.9.8 俄罗斯计算雷电截闪系统保护范围方法的结尾语	57
2.10 雷电截闪系统的配置	59
2.10.1 独立雷电截闪系统要求	59
2.10.2 被考虑的设备 and 结构按雷电防护必要性可划分为五类	59

2.11 结尾语	63
第3章 防雷接地	65
3.1 防雷接地是现代建(构)筑物防雷系统中不可缺少的一个 重要组成部分	65
3.2 接地装置通过雷电流时的过渡过程复杂	66
3.3 接地电阻(阻抗)物理概念	67
3.4 土壤电阻率	69
3.5 (工频)接地电阻值计算	71
3.6 冲击接地电阻(阻抗)	75
3.7 俄罗斯国标 ПД34. 21. 122-87 推荐的独立雷电截闪系统 典型接地装置	78
3.8 接地装置敷设	79
3.9 工企内部电网的大型地网接地装置工频参数测量	79
3.9.1 问题提出	79
3.9.2 一般原理及正确测量条件	80
3.10 《测量导则》DL/T 475—2006	83
3.10.1 接地装置特性参数测试的基本要求	83
3.10.2 接地装置的电气完整性测试	84
3.10.3 接地装置工频特性参数的测试	85
3.10.4 输电线路杆塔接地装置的接地阻抗测试	90
3.10.5 土壤电阻率的测试	91
第4章 SPD(限压器)	95
4.1 当前存在的问题	95
4.2 SPD 的类型	95
4.2.1 电压开关型 SPD	95
4.2.2 电压限制型 SPD	96
4.2.3 复合型 SPD	99
4.3 7个重要参数的阐述	99
4.3.1 SPD 的额定电压 U_r	99
4.3.2 SPD 的最大持续工作电压 U_c	99
4.3.3 电压保护水平 U_p	100
4.3.4 标称放电电流 I_n	100
4.3.5 标称放电电流 I_n 、冲击电流 I_{imp} 、最大放电电流 I_{max} 、 2ms 方波冲击电流 I_{lp} 四者间的关系	103
4.3.6 小结	105
4.4 SPD 试验问题	105
第5章 建(构)筑物雷电风险评估和雷电防护等级	106
5.1 建(构)筑物雷电防护等级是依据“实证科学”	106
5.1.1 前苏联《雷电防护技术规范》的制定和修订	106

5.1.2	我国《雷电防护技术规范》的制定和修订	107
5.2	IEC/TC 81 的《雷电风险评估法》	113
5.2.1	雷电风险评估方法的总思路	113
5.2.2	作者对《雷电风险评估法》的看法	114
5.3	我国《建筑物防雷设计规范》GB 50057 的防雷分类	115
5.4	前苏联(俄罗斯)ПД34. 21. 122—87《建(构)筑物防雷 保护规程》的雷电分类	117
5.4.1	第一类型级别防雷电建(构)筑物	117
5.4.2	第二类型级别防雷电建(构)筑物	118
5.4.3	第三类型级别防雷电建(构)筑物	118
5.4.4	ПД34. 21. 122—87 建(构)筑物防雷电分为三类时作如下 13 条规定	119
5.5	结语	121
第 6 章	建(构)筑物雷电防护要求和措施	122
6.1	概述	122
6.1.1	外部防雷电系统(ELPS)	123
6.1.2	内部防雷电系统(ILPS)	123
6.2	第一类防雷建(构)筑物防雷电要求和措施	126
6.2.1	第一类防雷建(构)筑物外部防雷电系统要求和措施	126
6.2.2	第一类防雷建(构)筑物雷电感应的防护要求和措施	130
6.2.3	第一类防雷建(构)筑物防护雷电波侵入危害的防护要求和措施	130
6.2.4	雷电截闪系统安装在第一类防雷电建(构)筑物屋面时的 要求和措施	132
6.3	第二类防雷建(构)筑物防雷电要求和防雷措施	134
6.3.1	第二类防雷建(构)筑物外部防雷电系统要求和措施	134
6.3.2	第二类防雷建(构)筑物可利用下列物体的钢筋作为防雷电装置以及 注意事项	134
6.3.3	第二类防雷电建(构)筑物的接地装置及有关规定	135
6.3.4	第二类防雷建(构)筑物防护雷电感应	138
6.3.5	第二类防雷建(构)筑物防护雷电波侵入危害	138
6.3.6	第二类防雷建(构)筑物防护侧击雷及其他	139
6.4	第三类防雷建(构)筑物防雷电要求和措施	139
6.5	《建筑物防雷设计规范》GB 50057 规定的《其他防雷措施》	143
附录		145
附录说明		145
附录一	GB/T 21714. 1—2008/IEC 62305-1: 2006 雷电防护 第 1 部分: 总则	146
附录二	GB/T 21714. 2—2008/IEC 62305-2: 2006 雷电防护 第 2 部分: 风险管理	185
附录三	GB/T 21714. 3—2008/IEC 62305-3: 2006 雷电防护	

第 3 部分：建筑物的物理损坏和生命危险	248
附录四 GB/T 21714.4—2008/IEC 62305-4：2006 雷电防护	
第 4 部分：建筑物内电气和电子系统	322
参考文献	373

第 1 章 雷电放电基本特性和参数的简述

人们认识雷电和雷电危害（例如引起火灾等）以及建立雷电防护技术，历史源远流长。古代时、无论是中国还是国外，人们已认识到，地面上凸出的高物，具有吸引雷电的特征，遭雷击会引起火灾，当时称为“天火”。据文^[1]第 102 页介绍，大概在 4000 年前，古埃及建造教堂，在屋顶上敷 6 根铜带，当时称这样是教堂防止“天火”。现在称为“防护直击雷”。中国很多的千年以上的古建筑，在其顶上敷设金属雷电截闪引入地散流系统。

随着历史前进，科学技术发展，对雷电研究和观测日益创新，对雷电认识不断深化，对下行闪电在地球上一些地区中积累了长时间的大量的资料。公布了一些雷电放电参数概率分布实测结果，如雷击时主放电过程中同一通道中多重放电脉冲次数、极性，对地输送电荷量、雷电流波形、雷电流幅值概率分布和雷电流陡度概率分布等。在雷电防护技术规范中也相应的规定了雷电放电一些简化模型的参数，其目的是便于雷电防护设计中选择防雷技术措施的计算评估和防护元件如 SPD 的检验。有人就误解，把防护技术规范中规定的“参数”当成自然雷电放电参数的“真值”。实际自然雷电先导的形成和继续发展是复杂物理过程。哪能像雷电防护设计技术规范中，规定雷电流幅值 100kA、150kA、200kA 时，它们的波形是 10/350 μ s。近年的文^[7]批评指出：（公布的）“雷电不同参数的实测 [陡度、雷电流最大值（幅值）、雷电流脉冲波前长度（波头时间）及它的持续时间（波长）] 是无系统性下完成的，没有符合逻辑规律的雷电放电发展相关和它的参数成因”。文^[7]认为：“雷电流仅与先导通道长度和放电极性相关”，“雷电流陡度仅决定于三个参数：①电子在跳跃式中的运动速度；②电磁波沿雷电先导通道传播速度——光速；③正跳跃和负跳跃中的电场强度之和”。所以，它们不可能给出放电发展所有阶段定量的记录以及它们在被击物体（如建筑物和电力设备）上的效应。文^[7]批评指出存在的问题是对的。但是，文^[7]现在也拿不出实测的“符合逻辑规律的雷电放电发展相关和它所得的参数成因。”文^[7]的贡献是进行了巨型 10~15m 长空气间隙的放电实验，得到了一些新现象。作者认为，还不是“逼真”模拟自然雷电放电。在本章中下面介绍的，还只是迄今为止所发表的实测资料。

1.1 关于雷电放电的简述

雷云是电荷载体。闪电是云团之间，或云团内部，或云团对地面，或对地面建（构）筑物之间发展中的几千米长的空气中的电气放电现象。在地球上，平均每天发生 800 万次雷击。

雷云中的电荷分布是不均匀的，通常形成好多个电荷密集中心。每个电荷中心电荷约 0.1~10C（库仑），而大块雷云同极性的总电荷可达数百库仑。

由于电荷分布不均匀引起不同极性云团之间和云与地之间产生强电场。造成闪电发生的条件，必须是该处电场强度超过了空气电气强度。

雷电放电是继续生长的先导形态，基本上是按电场电力线方向。实测结果表明，大部分雷电放电是云间或云内部进行的，只有小部分是对地发生的，雷云对地电位可高达数百万伏到上亿伏。对地的雷电放电中，90% 概率是由对地负极性云团发生的（这种放电通常称为负极性的放电）。雷电先导的形成和继续发展是复杂物理过程。对其更详细的了解，

至今研究不够。所以在工程防雷计算应用中难免使用各种不同的雷电放电简化模型，对负极性放电先导中看作为储存负电荷通道。

雷云团中电荷，通常在它底下的地表面上或地面突出物体(建筑物、构筑物等)感应电荷。当云团中电荷密集处的电场强度达到临界水平，产生雷电先导。由雷云中先导发展至地面时间约几个毫秒。光学照片显示，先导继续生长不是均匀的，是跳跃式的或迈步式的，向地频繁迈步前进，即走一段停一会，再走一段，再停会儿。每级的长度为 $10\sim 200\text{m}$ ，每级停歇时间为 $10\sim 100\mu\text{s}$ ，先导每级发展速度约为 10^7m/s ，延续时间约 $1\mu\text{s}$ 。先导中心的线电荷密度为 $(0.1\sim 1)\cdot 10^{-3}\text{C/m}$ ，先导的电晕半径约 $0.6\sim 6\text{m}$ 。它有一个向下伸展的电荷囊，相应先导发展时的电流约为几百安，是一个弱光通道，先导放电通道是曲折的，沿着先导运动方向前进。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。当下行先导接近地面上被击物时，地面上被击物(一般是较突出部分)会开始迎着它发出向上的迎面先导。迎面先导可以是一个，也可以是几个。当迎面先导与下行先导相遇时，就产生强烈的瞬间电荷中和效应，产生极大的放电电流，通常称其为“雷电流”，或称为“主放电电流”，并伴随有雷鸣和沿主放电通道中形成明亮光以及射线，这就是雷云放电的主放电阶段。主放电通道强烈发热，可达到 10 几个千 K(绝对温度——开尔文温标计量单位，K)。

闪电分为下行的和上行的。关于下行闪电在地球一些地区中积累长时间的资料。现在公布的雷电参数，大量的下行闪电资料。关于上行闪电，公布的资料较少，仅是近些年才有报导，在特别高的建(构)筑物，例如俄罗斯 ОСТАНКИНСКОЙ(哦斯坦金斯柯伊)电视塔(高 540m)频遭雷击，因而，进行了系统观测作了一些报导。据报道在其上每年发生约 30 次雷击，其中 90% 以上是上行闪电，下行闪电的雷击次数仍保持在 1 年中 $1\sim 2$ 次水平。看来高度超过 150m 的高凸出物体，下行闪电的雷击次数与高度关系不大。

由很高的接地建(构)筑物激发的上行先导，在雷电时间里，在其顶上具有电场急剧增大。上行先导自行呈现和稳步发展就决定着遭受雷击地方。在平原地方，上行闪电可击中高度 150m 以上物体。在山区，由地势尖端元件和高度不高的建(构)筑物激发雷击，所以森林就出这种情况。

在山区上行闪电具有很长时间连续电流和很大的转送电荷，都超过平原。在山区和平原的脉冲电流分量变化相差很小。时至今日，上行闪电电流和建(构)筑物高度之间尚未建立相关。因此，上行闪电参数及其他变化的评估，对任何气象地区和物体高度还是采用同一的。

由地向云传播速度约为光速的十分之几。流经被击物的雷电流幅值与定位高度、先导电荷相关。这就可能获得雷电流与击距(抛球半径或滚球半径)之间的挂钩，但有很多参数不“真知”，一般推断，目前世界上有很多不同的击距与雷电流之间的关系计算公式。作者曾列出了很多公式。通常情况下，雷电流愈大，击距愈长，如 200kA 以上，击距可能 200m 及以上，雷电流 $15\sim 20\text{kA}$ ，击距可能为 $20\sim 30\text{m}$ 。

雷击时，主放电过程中，通常在同一通道中多重放电，含有多个脉冲。这是雷云中存在着多个电荷中心形成的。在第一电荷中心完成上述放电过程之后，可能引起第二、第三……电荷中心向第一电荷中心通道放电，经其入地。因此，雷击放电含多重放电，含多个脉冲波(冲击波)，每个脉冲波(冲击波)相隔时间约 0.6ms 至 0.8s ，脉冲数目平均为 $2\sim 3$ 个，最多纪录到 42 个。后续放电，是沿着第一次放电(第一脉冲)的游离通道进行

的，自上向下顺利连续发展，没有先导的停歇现象，但主放电仍然是由下向上发展的。雷击多重放电总持续时间可达 1s，绝大多数的持续时间不超过 0.3s。通常来讲，主放电脉冲雷电流幅值和陡度 $\left(\frac{di}{dt}\right)$ ；第 1 次幅值比后续大，后续 $\left(\frac{di}{dt}\right)$ 比第一次大；脉冲波前是相当复杂形状。

防雷保护工程计算中，人为地进行加工处理，采用固定斜角波陡度来替代。实测放电脉冲幅值和陡度分散性很大。所以在防雷保护工程计算中采用第 1 脉冲和后续脉冲雷电流幅值和陡度不相关。现在，国际上对架空线路和变电所以及建筑物防雷保护计算中均应用第 1 脉冲和后续脉冲参数进行评估。

图 1.1 中所示的为负下行雷过程，图 1.1 (a) 为用高速摄像机拍得的光学照片描绘图，图 1.1 (b) 为相应的电流变化情况。

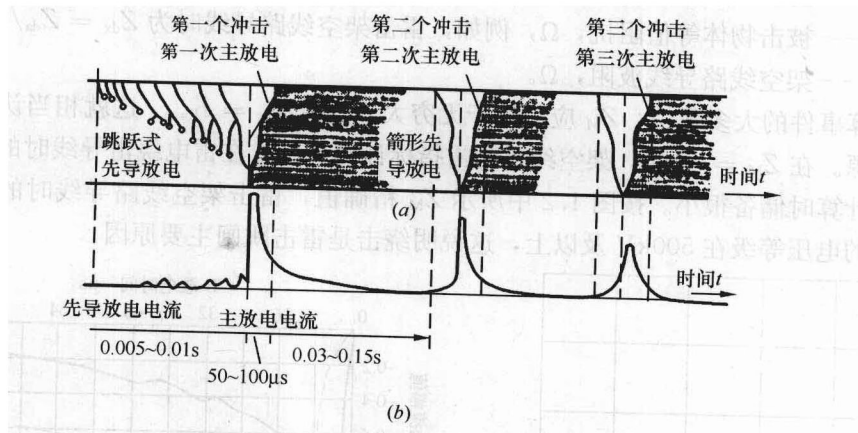


图 1.1 负雷云下行雷的过程

(a) 负雷云向下放电的光学照片描绘图；(b) 放电过程中雷电流的变化情况

正雷云的下行雷过程与上述过程基本相同，但下行正先导的逐级发展是不明显的，其主放电有时有很长的波头时间（几百微秒）和很长的波尾时间（几千微秒）。

先导放电首先由地面发生并向上发展到雷云的上行雷，一般是在当地面有高耸的突出物时，不论雷云极性的正负，都可能发生。负上行雷（此时雷云为正极性）的上行先导是逐级发展的，每级长度约 5~18m。从总体上说，无论正、负的上行先导到达雷云时，因雷云的导电性能不好，大部分并无主放电过程发生。

球雷是线状闪电时在切线方向上所形成的流动性发光球体。球雷的直径为 20cm 左右。球雷可能出现在天空中，也可能出现在地面附近，呈红、橙或黄色，常伴有嘶嘶声和特殊气味，存在时间可达 3s 以上，随风滚动，速度约 2m/s，最后会自动消失或遇到障碍物而爆炸。球雷可引起燃烧并使金属熔化，也可伤害人畜。防止球雷袭击的办法是关上门窗，或至少不形成穿堂风，以免球雷随风进入屋内。

1.2 雷电放电参数

雷电放电参数是雷电防护设计评估的重要依据，例如选择引流导体截面等。雷电放电参数包括主放电通道波阻、雷电流波形、雷电流幅值概率分布、雷电流陡度概率分布、雷

电极性、重复放电次数及对地输送的电荷量等。

1.2.1 主放电通道波阻

主放电阶段雷电通道阻抗不是常值，是随通道电流增大而减小。这参数以等值阻抗 Z_M 来表征，随雷电流幅值变化关系见图 1.2^[9]。

雷电通道阻抗计算值受流经被击物的雷电流幅值 I_{wt} 影响。 I_{wt} 可按下式计算：

$$I_{wt} = I_{R=0} \times \frac{Z_M}{Z_M + Z_{dx}} \quad (1.1)$$

式中， I_{wt} ——流经被击物体的雷电流幅值，kA；

$I_{R=0}$ ——流经良好接地物体的雷电流幅值，kA；

Z_M ——主放电阶段雷电通道阻抗， Ω ，见图 1.2；

Z_{dx} ——被击物体等值阻抗， Ω ，例如，雷击架空线路导线时为 $Z_{dx} = Z_{da}/2$ ；

Z_{da} ——架空线路导线波阻， Ω 。

在计算事件的大多数中， Z_M 应用等于无穷大，这时 $I_{wt} = I_{R=0}$ ，这就相当认为雷电通道是电流源。在 $Z_M = \infty$ 时，架空线路耐雷指标计算，给出在雷电绕击导线时的雷击导线跳闸次数计算时储备很小。按图 1.2 中所示 Z_M 精确值，雷击架空线路导线时的电流阈值计算获得的电压等级在 500kV 及以上，这说明绕击是雷击跳闸主要原因。

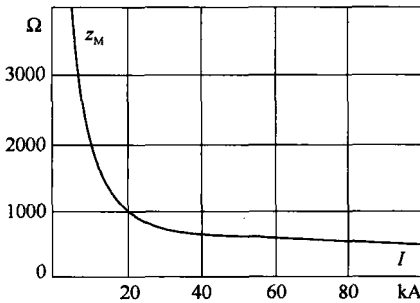


图 1.2 雷电通道等值阻抗与雷电流幅值之间的关系

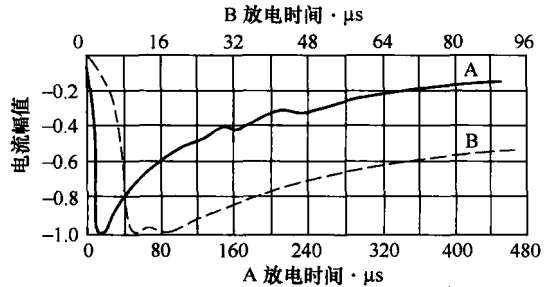


图 1.3 第一次负放电平均电流波形
A—完整波形；B—放大的波前

1.2.2 雷电流波形

世界各国测得的对地放电雷电流波形基本一致，多数是单极性重复脉冲波，少数为较小的负过冲，一次雷击放电过程常常包含多次先导至主放电的过程（分别第一次放电和随后放电）和后续电流。注意这点，对考核各种雷电保护器通流能力是很重要的。实际通过防雷保护器雷电流为一连串的几百微秒波长的脉冲。

K·贝格尔 (K·Berger) 等人在圣萨尔瓦托观测站测得大量雷电流波形图，图 1.3、图 1.4、图 1.5 分别为第一次负放电，正极性放电和随后负放电的电流波形，它们之间有明显的区别。第一次负放电电流波形较长，在峰值附近有明显的双峰，随后放电电流波形的波头较短，没有双峰，电流陡度远大于第一次放电（即第一次脉冲），而电流幅值约为第一次放电的一半。随后放电之后，约有一半存在连续的后续电流，至少持续 40ms，电流从数十安到 500A。

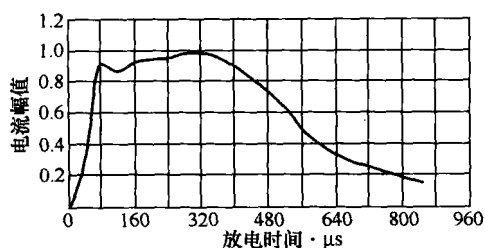


图 1.4 正极性放电电流波形

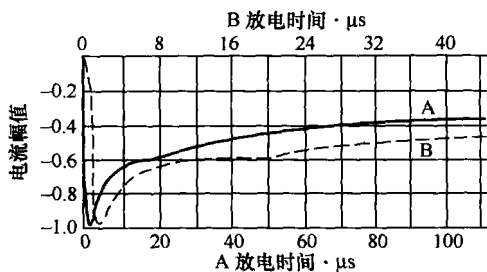


图 1.5 随后负放电平均电流波形

A—完整波形；B—放大了波前

典型的雷电流波形通常用双指数来描述

$$i(t) = I_M(e^{-\alpha t} - e^{-\beta t}) \quad (1.2)$$

式中, I_M 为雷电流(脉冲)幅值。

综合各国观测结果,一次雷击(闪电)有多次雷电流脉冲,一般 2~3 个,最多纪录到 42 个,多数是单极性的重复脉冲波,约 85% 的雷电流(脉冲)波头长度在 1~5 μs,平均为 2.6 μs。雷电流(脉冲)波长在 20~350 μs。所以在工程上选用,视其敏感性,例如,《交流电气装置的过电压保护和绝缘配合》DL/T 620—1997 中,在计算杆塔反击耐雷水平时采用雷电流波形为 2.6/50 μs,但在计算杆塔及反击时沿导线侵入变电所雷电波形,在闪络点导线上雷电波头近似直角波,与直击雷电流波头关系不大,主要是闪络截波,从偏严考虑,波尾较长,这样仅波头受沿导线传播时电晕衰减影响,波幅值不受影响。在考核保护器残压时用陡波头(0.9~1.1 μs);而考核保护器动作负载时,CIGRE WG33—11 的 1999 年报告中建议用 100/200 μs 波形来替现行的 8/20 μs。IEC/TC 81 建议用 10/350 μs 来考核。总之,雷电流波形选用视具体情况而定。又如,有的工程计算时采用指数波、余弦波、斜角波等等,这是数学运算方便关系。

《建筑物防雷设计规范》GB 50057 中规定的建(构)筑物首次雷击的雷电流波形和流过 I 级 SPD 的雷电流波形都假设为 10/350 μs。国内 10 多位(其中包括本书 4 位作者)著名防雷专家撰文质疑这个问题。对其存在的问题,作者简要剖析如下:

(1) 哪能不论首次雷击的雷电流幅值多大,一律假设波前时间(τ_f)为 10 μs,如 200 kA、100 kA、20 kA 都是 $\tau_f = 10 \mu s$ 。雷电流波前时间(τ_f)决定于火花放电通道长度,也就是说, τ_f 与雷电流幅值(I_M)有关。不可能 I_M 大小不同, τ_f 一律都是 10 μs。

(2) 雷电流陡度($\frac{di}{dt}$),在《建筑物防雷设计规范》GB 50057 条文说明示例中,告示人们,如雷电流幅值(I_M) 200 kA 时则($\frac{di}{dt}$) = $\frac{200}{10} = 20 \text{ kA}/\mu s$ 。固定波前时间(τ_f) 10 μs 不变。若 $I_M = 100 \text{ kA}$ 或 20 kA 时则($\frac{di}{dt}$) = $10 \text{ kA}/\mu s$ 或 $2 \text{ kA}/\mu s$ 。

事实不是这样的,雷电流陡度决定于:电子在跳跃中的运动速度和电磁波沿雷电先导通道传播速度以及在正跳跃和负跳跃中的电场强度之和。

在雷电实测到的波形，也不像《建筑物防雷设计规范》GB 50057 那样，用 I_M/τ_f 等于 $\left(\frac{di}{dt}\right)$ ，通常是用波前时间 (τ_f) 在 (0.1~0.9) 或 (0.3~0.9) 时段产生的 $\left(\frac{di}{dt}\right)$ 。

(3) 关于流过 I 级 SPD 的电流波形，雷电直击建（构）筑物或其进出架空线路而侵入流过 I 级 SPD 的电流波形，根本不可能仍是首次雷击的雷电流原型 10/350 μ s 波形。因为建（构）筑物内的电气系统、电子系统、接地系统是一个复杂电路网络，SPD 是配置在这个复杂网络中一个节点上，不论侵入的首次雷击的雷电流是何种波形，在建（构）筑物内的电气系统、电子系统、接地系统中任一节点上电压是振荡衰减波形。这是众多试验中被证实的事实。在美国住宅楼雷电防护系统人工引雷测试结果再次证实^[35]。

1.2.3 雷电流幅值概率分布

某一次雷击的电流幅值是随机的，对大量实测的雷电流幅值进行统计分析，可得其概率分布曲线。不同地区的雷电流幅值概率分布是不同的，这主要与地区的纬度、地形、地貌、气象和雷暴强度有关。

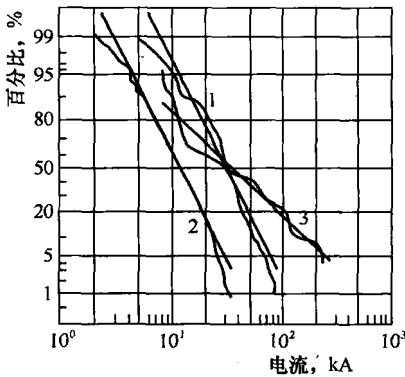


图 1.6 圣萨尔瓦托山总计 127 次雷击的雷电流幅值概率分布
1—第一次负放电；2—随后负放电；3—正放电

图 1.6 中所示是 K·贝格尔在圣萨尔瓦托山 (Mount san salvatore) 上记录到 101 次负极性放电和 26 次正极性放电第一次放电电流幅值（脉冲）的概率分布；图 1.7 中所示是 F·波波兰斯基 (F.Popolansky) 汇总了世界各地 624 次正、负极性第一次放电电流幅值（脉冲）的概率分布；图 1.8 中所示是 J·G·安德生 (J·G·Anderson) 综合美国观测结果的雷电流幅值的概率分布。由图可见，概率曲线遵循对数正态分布规律。

中国电力行业标准《交流电气装置的过电压保护和绝缘配合》DL/T 620—1997^[15]，综合了中国几十年观测结果，对雷暴日超过 20 的地区，雷电流幅值的概率分布推荐为：

$$\lg P = -I/88 \quad (1.3)$$

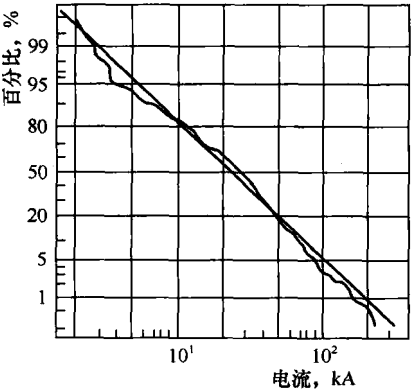


图 1.7 F·波波兰斯基 624 次正、负极性雷电流幅值概率分布

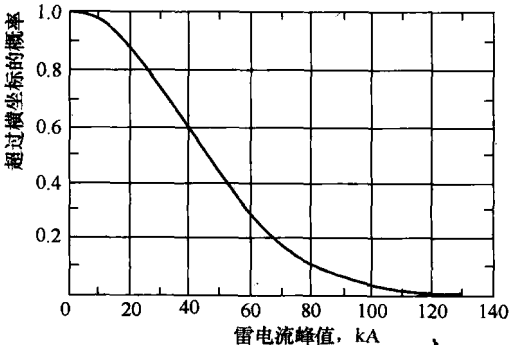


图 1.8 J·G·安德生综合美国观测的雷电流幅值概率分布