

建筑物内电子设备的 防雷保护

张小青 编著



电子工业出版社

PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

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

建筑物内电子设备的防雷保护

张小青 编著

電子工業出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京·BEIJING

内 容 提 要

本书主要论述建筑物内电子设备与电子系统的雷电防护问题。全书共分十二章和一个附录,着重介绍了雷电放电特性与雷电参数、雷电暂态过电压与过电流的危害、电子设备的保护元件与保护电路、改善保护效果的方法和综合防护措施、防雷系统中雷电暂态过程的模拟与室内雷电脉冲电磁场的计算。在附录中,还较为详细地介绍了电子设备防雷保护装置的试验系统和测试技术。

本书适用于从事建筑防雷设计和电磁兼容人员、电子技术工作者阅读,也可作为高校电气与电子类有关专业的教材。

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,翻版必究。

图书在版编目(CIP)数据

建筑物内电子设备的防雷保护/张小青编著.-北京:电子工业出版社,2000.6

ISBN 7-5053-5932-0

I.建… II.张… III.房屋建筑设备:电器设备-防雷 IV.TU895

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2000)第 08076 号

书 名:建筑物内电子设备的防雷保护

编 著 者:张小青

责任编辑:魏永昌

特约编辑:邱 英

排版制作:电子工业出版社计算机排版室监制

印 刷 者:北京牛山世兴印刷厂

装 订 者:三河市路通装订厂

出版发行:电子工业出版社 URL:<http://www.phei.com.cn>

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:787×1092 1/16 印张:11.5 字数:310 千字

版 次:2000 年 6 月第 1 版 2000 年 6 月第 1 次印刷

书 号:ISBN 7-5053-5932-0
TN·1345

印 数:3000 册 定价:19.00 元

凡购买电子工业出版社的图书,如有缺页、倒页、脱页、所附磁盘或光盘有问题者,请向购买书店调换。

若书店售缺,请与本社发行部联系调换。电话 68279077

**北京市自然科学基金
资助出版**

序 言

雷电是一种壮观而又令人恐怖的自然天电现象。这不仅在于它能发出划破长空的闪光和震耳欲聋的雷鸣,更重要的是它会对人类的生产和生活造成巨大的影响。雷电威胁着人类的生命安全,常使建筑、电力、电子、通信和航空、航天等诸多部门遭受严重破坏。随着高新技术的迅猛发展,由雷击引起的灾害事故正呈现出上升的趋势。到目前为止,雷电作为一种强大自然力的爆发,尚无法有效地加以制止,人们力所能及的工作是设法限制雷击所造成的破坏作用,将雷击的危害减小到尽可能低的限度。长期以来,关于雷电防护的研究,一直是国内外电气与电磁兼容工作者共同关注的重要问题。

近年来,由于高层建筑的不断兴建和信息处理技术的日益普及,各种先进的电子设备广泛地配备于各类建筑物中。这些电子设备普遍存在着绝缘强度低、过电压和过电流耐受能力差、对电磁干扰敏感等弱点,一旦建筑物受到直接雷击或其附近区域发生雷击,雷电过电压、过电流和脉冲电磁场会通过供电线、通信线、接收天线、金属管道和空间辐射等途径侵入建筑物内,威胁室内电子设备的正常工作和安全运行。如果防护不当,这些雷害轻则使电子设备工作失灵,重则使电子设备永久性损坏,严重时还可能造成人员伤亡。因此,现代建筑防雷设计必须高度重视雷电电磁兼容性,完善建筑物内电子设备的雷电防护措施。

鉴于建筑物内电子设备雷电防护的重要性与迫切性,围绕着这个问题出版一本专著就显得十分必要,本书正是在这一方面作出尝试。在题材的选取上,本书将立足于我国电子设备防雷保护的实际情况,同时注意反映国外近年来的发展动向。在内容的安排上,本书既注重工程实用性,又兼顾必要的理论深度,力求从理论与实践的结合上对建筑物内电子设备的雷电防护问题进行系统的阐述。

本书共有十二章和一个附录,分五个部分讨论建筑物内电子设备与电子系统的雷电防护问题。第一部分介绍雷电放电过程、放电特性及其统计数据、雷电过电压、过电流和脉冲电磁场对室内电子设备的危害机理。第二部分介绍电子设备防雷的常用保护元件的工作原理、保护特性和技术性能。第三部分介绍电子设备与电子系统的雷电防护措施、保护电路的分析与设计、改善保护效果的方法。第四部分介绍建筑物防雷系统中雷电暂态分析方法和雷电脉冲电磁场在室内空间分布的数值模拟技术。第五部分(即附录)介绍防雷保护装置的试验方法和测试技术。

由于作者水平有限,书中谬误之处在所难免,作者恳切希望读者批评指正。

本书的出版得到了北京市自然科学基金和北京市跨世纪优秀人才工程专项基金的资助,作者谨向这些资助机构致以诚挚的感谢。

在本书的编写和出版过程中,还得到了魏寿松、王瑞林、王淑华、邱英、陈水明、熊文浩、张宇、谢源等同志的帮助,作者由衷地向他们表示谢意。

目 录

第一章 雷电放电过程与雷电放电特性	(1)
第一节 雷电放电过程	(1)
第二节 雷电参数	(2)
一、雷电日与雷电小时	(3)
二、地面落雷密度	(3)
三、雷电流波形	(3)
第三节 雷电流与雷电过电压的近似表示	(4)
一、雷电流幅值的累积概率	(4)
二、波头时间与波长时间	(5)
三、雷电流的等值波形	(6)
四、几种常用的雷电过电压波形及其近似表示式	(8)
第四节 能量与频谱	(10)
一、能量估算	(10)
二、频谱分析	(12)
第二章 雷电暂态过电压及其传输	(14)
第一节 暂态电位抬高	(14)
第二节 感应过电压	(16)
一、回路感应过电压	(16)
二、线路感应过电压	(16)
第三节 耦合与转移过电压	(19)
第四节 共模量与差模量	(21)
一、共模与差模电压和电流	(21)
二、产生共模暂态过电压的实例	(23)
第五节 暂态过电压波的传输	(24)
一、均匀传输线方程	(24)
二、波的折射和反射	(27)
三、波通过串联电感和旁过并联电容	(29)
第三章 气体放电管	(32)
第一节 结构简介	(32)
第二节 伏安特性	(33)
第三节 响应时间	(34)
第四节 限压电路	(35)
第五节 保护应用中存在的问题	(38)

一、时延脉冲及续流	(38)
二、状态翻转及短路反射	(39)
第六节 主要技术参数及使用选择	(40)
一、常用技术参数	(40)
二、使用选择	(41)
第四章 压敏电阻	(43)
第一节 结构简介	(43)
第二节 电气特性	(43)
一、伏安特性	(43)
二、等值电路模型	(44)
第三节 响应特性	(47)
第四节 压敏电阻参数及压敏电阻选择	(48)
一、压敏电阻的参数	(48)
二、压敏电阻的选择	(48)
第五节 压敏电阻的并联使用及与放电管的合用	(49)
一、并联使用	(49)
二、与放电管合用	(50)
第六节 压敏电阻的暂态能量及损坏形式	(51)
一、暂态能量估算	(51)
二、损坏形式	(53)
第五章 齐纳二极管与雷崩二极管	(54)
第一节 伏安特性	(54)
第二节 反向击穿	(55)
第三节 泄漏电流及响应时间	(55)
一、泄漏电流	(55)
二、响应时间	(58)
第四节 寄生电容及其减小方法	(58)
一、寄生电容	(58)
二、减小寄生电容的方法	(59)
第五节 箝位电压与脉冲功率	(60)
一、箝位电压	(60)
二、脉冲功率	(60)
第六节 噪音和损坏形式	(61)
一、噪音	(61)
二、损坏形式	(62)
第七节 暂态抑制二极管	(62)
一、保护性能	(62)
二、主要技术参数和选用要点	(63)
第八节 几种保护元件性能的比较	(63)

第六章 阻抗元件与滤波器	(66)
第一节 电阻元件	(66)
一、实际电阻元件	(66)
二、损坏形式	(66)
三、耐受能力	(67)
四、正温度系数电阻	(68)
第二节 电感元件	(68)
一、实际电感线圈	(68)
二、含铁氧磁芯的电感线圈	(69)
三、对电感线圈的要求	(70)
第三节 电容元件	(70)
一、实际电容器	(70)
二、击穿特性	(71)
第四节 熔断器	(71)
第五节 低通滤波器	(72)
一、简单低通滤波器	(72)
二、非线性滤波器	(73)
第七章 电源系统的保护	(75)
第一节 对保护装置的基本要求	(75)
第二节 配电变压器保护	(77)
第三节 交流电源的单级保护	(78)
第四节 交流电源的多级保护	(79)
第五节 含压敏电阻的低通滤波器	(81)
一、基本结构	(81)
二、改进结构	(82)
第六节 直流电源的保护	(83)
一、简单直流电源的保护	(83)
二、开关电源的保护	(84)
第八章 信号电路的保护	(85)
第一节 基本保护电路	(85)
一、放电管选择	(85)
二、雪崩二极管选择	(86)
三、电阻选择	(86)
第二节 平衡信号线路的保护	(87)
第三节 运算放大器的保护	(89)
一、反相放大器保护	(89)
二、同相放大器保护	(89)
三、放大器输出端保护	(90)
第四节 计算机通信接口保护	(91)

第五节 射频信号电路保护	(92)
第六节 电子设备信号线与电源线的保护配合	(93)
一、设备暂态共地法	(93)
二、暂态旁路法	(94)
第九章 减小寄生电感	(96)
第一节 寄生电感的危害	(96)
第二节 减小保护元件连接引线的寄生电感	(99)
一、缩短连接线	(99)
二、四端保护元件	(100)
三、面板贴装保护元件	(102)
第三节 减小保护装置接地引线的寄生电感	(102)
第四节 磁场耦合的限制	(105)
一、磁场耦合效应	(105)
二、抑制磁场耦合的措施	(106)
三、保护元件的合理设置	(106)
第五节 减小电容中的寄生电感	(108)
第十章 室内电子设备的综合防护	(110)
第一节 均压	(110)
第二节 接地	(111)
一、工作接地	(112)
二、安全接地	(114)
第三节 屏蔽	(114)
一、辐射屏蔽	(115)
二、室内屏蔽措施	(115)
三、仪器屏蔽	(117)
四、信号线和电源线屏蔽	(118)
第四节 光纤传输与光耦合器	(120)
第十一章 建筑物防雷系统中雷电暂态响应分析	(122)
第一节 防雷系统电气参数	(122)
一、电容参数	(122)
二、阻抗	(125)
三、不规则位置上分支导体参数计算	(128)
第二节 防雷系统的电路模型	(128)
一、分支导体的分段	(128)
二、耦合 π 型电路单元	(129)
第三节 常值参数模型的暂态计算	(131)
一、单个电容和电感的暂态离散化计算电路	(131)
二、耦合电容和电感的暂态离散化计算电路	(133)
三、节点电压方程的建立	(137)

第四节	考虑阻抗频变特性的暂态计算	(139)
第五节	算例	(140)
第十二章	建筑物内雷电暂态电磁场计算	(145)
第一节	基本方程	(145)
第二节	计算公式	(146)
第三节	数值算法	(149)
第四节	电气回路感应电压的计算	(152)
第五节	算例	(153)
附录	防雷保护装置的试验	(157)
一、	脉冲高电压的产生	(157)
二、	脉冲高电压的测量	(159)
三、	脉冲大电流的产生	(162)
四、	脉冲大电流的测量	(163)
五、	脉冲高电压和脉冲大电流的试验施加方式	(166)
六、	保护盲区问题	(169)

第一章 雷电放电过程与雷电放电特性

雷电放电是直接或间接造成许多灾害的根源。为了预防和限制雷害,就需要研究雷电放电过程和放电特性,掌握雷电放电特性的参数。由于雷电放电过程的复杂性,在防雷工程中,常采用反映雷电放电外部特性的参数来描述雷电放电过程,这些参数经过长期的观测与试验已经逐步积累起来,它们是进行防雷分析和防雷设计所必需的基本数据。

第一节 雷电放电过程

雷电放电是由于带电荷的雷云引起的。关于雷云带电原因的解释,目前假说较多,但尚未取得一致的共识。大多数雷电放电是在雷云与雷云之间进行的,只有少数是对地进行的,如图 1-1 所示。相对于云间放电而言,对地放电对地面物体具有更大的危害性。在对地放电中,雷电的极性是指雷云下行到达大地的电荷极性,根据大量的实测统计,80~90%的雷电具有负极性。雷云带有大量电荷,由于静电感应作用,在雷云下方的地面或地面上的物体将带上与雷云相反极性的电荷。当雷云中的电荷逐渐聚积达到一定的电荷密度时,其表面附近的电场强度足够大,于是就开始发生局部放电。图 1-2(a)是仿照负极性雷电放电的展开图照片,图 1-2(b)是放电时雷电流的变化图形。放电开始时,微弱发光通道以 $10^7 \sim 10^8 \text{ cm/s}$ 的平均速度以断续脉冲形式向地面伸长,这一阶段称为先导放电。每级的长度约为 $10\text{m} \sim 200\text{m}$,平均 25m ,各级间隔约 $10\mu\text{s} \sim 100\mu\text{s}$,平均 $50\mu\text{s}$ 。先导放电常表现为分支状,这些分支状的先导放电通道常只有一条放电分支能达到地面。在先导接近地面时,由于局部

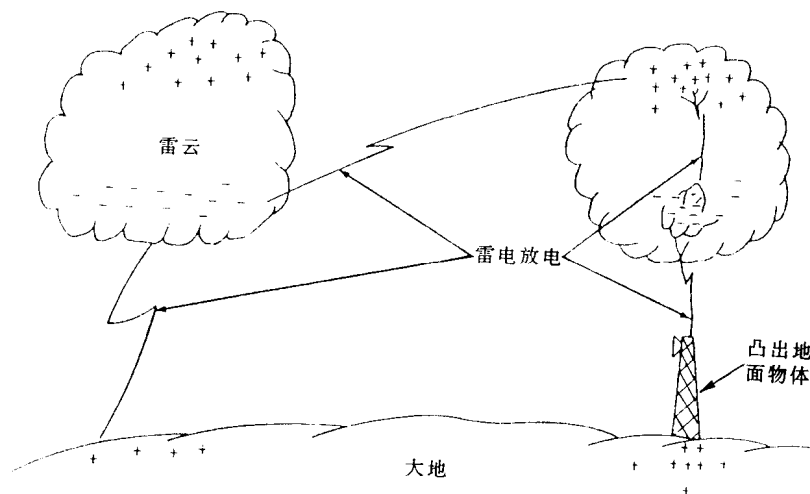


图 1-1 雷电放电的形成

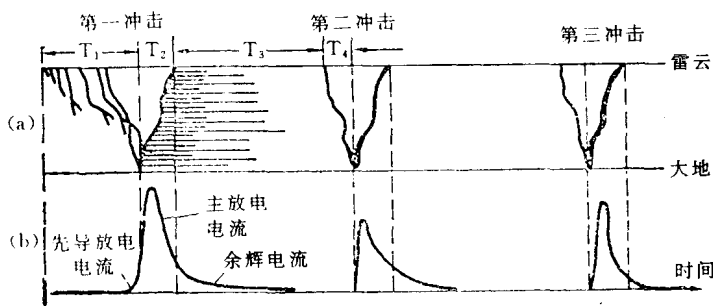


图 1-2 雷电放电的发展过程

展的速度约为 $0.05 \sim 0.5$ 倍光速, 平均 0.175 倍光速, 并伴随着数十到数百千安的高幅值雷电流。主放电通道到达雷云时就结束, 主放电持续时间约为 $50\mu\text{s} \sim 100\mu\text{s}$ 。此后就进入持续时间为 $0.05\text{s} \sim 0.15\text{s}$ 的间歇阶段, 在这一期间, 雷云中的残余电荷经原先的主放电通道向地面传播, 形成余辉阶段。余辉阶段对应的雷电流不大, 约为数百安培。在第一次放电过程完成之后, 还可能发生第二次或随后多次的放电, 这是因为雷云中存在着多个空间电荷聚焦中心。第一次放电, 主要是泄放了第一个电荷中心及

其已传播到先导通道中的负电荷。这时, 第一次放电过程虽已结束, 但雷云内两个电荷中心之间的流注放电已开始。因为第一次主放电通道仍然保持着高于周围大气的电导率, 由第二个或更多个电荷中心向第一个电荷中心的放电会借助于原先的放电通道发展, 其过程如图 1-3 所示, 依此类推, 就会出现多次重复的冲击放电。雷电放电约有 40% 具有重复性, 放电的次数一般为 $3 \sim 4$ 次, 最多可达 20 次。在第二次及后续的放电中, 先导都是自上而下连续发展, 相应的雷电流要比第一次放电时小, 一般不超过 30kA 。

正极性雷电放电过程与上述过程基本相同, 但下行正先导的逐级发展不明显, 其雷电流常比负极性的大。

第二节 雷电参数

在防雷设计中, 需要提出一些参数来描述雷电放电的特性。由于雷电放电与海拔、气象和地质等许多自然因素有关, 在很大程度上具有随机性, 因此, 描述雷电放电特性的这些参

空间场强的增加, 常可能在地面突出处出现正电荷的先导向天空发展, 称为迎面先导。当先导到达地面或与迎面先导会合后, 就开始从地面向雷云发展的主放电阶段。在主放电阶段中, 雷云与大地之间所聚焦的大量电荷发生强烈“中和”, 放出能量, 发出强烈的闪光和震耳的雷鸣。主放电发

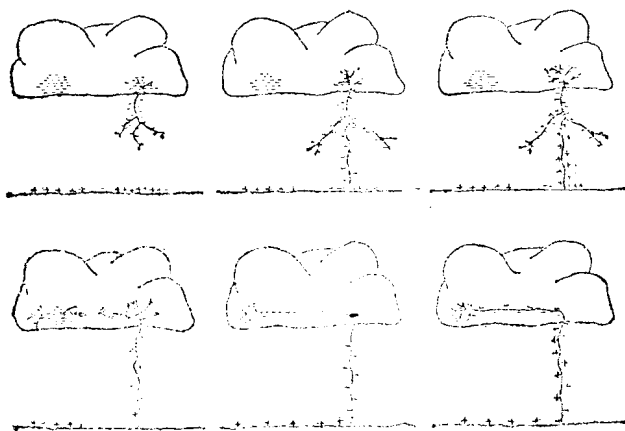


图 1-3 多重雷的放电发展过程

数也具有明显的统计性质。世界上许多国家都在其典型地区对雷电进行了长期的观测,积累了丰富的测量资料,并对此进行统计处理,得出了雷电参数的统计数据,这些数据主要包括雷电日与雷电小时、地面落雷密度和雷电流波形等。现分别加以介绍。

一、雷电日与雷电小时

为了表示不同地区雷电活动的频繁程度,通常利用每年平均雷电日为计量单位。雷电日的定义是:在一天内,只要听到雷声(一次或一次以上)就算一个雷电日。在不同年份观测到的雷电日数变化较大,一般是取多年的平均值,即年平均雷电日。我国各地年平均雷电日的大小与当地所处的纬度以及距海洋的远近有关,其详细分布请查阅《电力设备过电压保护设计技术规程》(SDJ7-79)。我国把年平均雷电日不超过 15 的地区叫做少雷区。超过 40 的叫多雷区,超过 90 的叫强雷区。为了区分不同地区每个雷电日内雷电活动的持续时间差别,也有的用雷电小时作为计算单位,即在一个小时内只要听到雷声(一次或一次以上)就算一个雷电小时,我国大部分地区一个雷电日大约为 3 个雷电小时。一些重要城市的年平均雷电日见表 1-1。

表 1-1 一些重要城市的年平均雷电日

城市名	年平均雷电日	城市名	年平均雷电日
北京	40	西安	20
上海	35	重庆	40
南京	38	南昌	60
天津	30	长沙	50
广州	90	福州	60
哈尔滨	80	兰州	25
沈阳	33	太原	40

二、地面落雷密度

对于雷电放电来说,云与云之间的放电次数远多于云对地放电次数,而上述雷电日或雷电小时对于这一事实没有加以区分。在防雷设计中,人们更为关注的是云对地放电。雷云对地放电的频繁程度,用地面落雷密度 γ 来表示。其定义是每个雷电日每平方公里上的平均落雷次数,我国过电压保护规程取地面落雷密度为 $\gamma = 0.015/\text{km}^2 \cdot \text{d}$ 。近年来,我国一些单位采用雷电定位系统测量表明,在大多数情况下, γ 的取值为 $0.09/\text{km}^2 \cdot \text{d} \sim 0.1/\text{km}^2 \cdot \text{d}$ 。实际上, γ 值与年平均雷电日数 T_d 有关。通常,当 T_d 增大时, γ 也随之增大,由于我国幅员辽阔, T_d 的变化也很大,很难取统一的一个值。因此,一些学者认为采用国际大电网会议 33 委员会 1980 年推荐的计算公式较为合理,该公式为:

$$N_g = 0.023 T_d^{1.3}$$

上式中的 N_g 为每平方公里地面落雷次数。在上式两边同除以 T_d , 得 γ 与 T_d 的关系:

$$\gamma = 0.023 T_d^{0.3}$$

三、雷电流波形

大量的观测表明,雷电流是具有单极性的脉冲波形。大约有 80 ~ 90% 的雷电流是负极性的。雷电放电大多数具有重复性,一次雷电平均约包括 3 次 ~ 4 次放电。图 1-4(a)是一

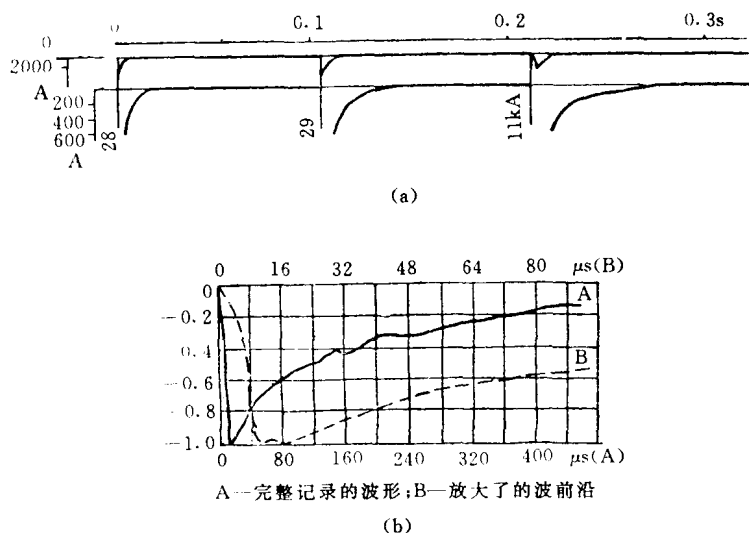


图 1-4 雷电流的实测波形

个含三次重复放电的记录。由于第一次放电的电流幅值最高,因此它对防雷设计至关重要。图 1-4(b)给出了一组负极性雷电第一次放电雷电流实测波形,其纵坐标是以电流最大值作为基值的比值。这里,波形 B (虚线)是对 10 次实测取平均而得到的,其时间范围取得较小,以侧重展示雷电流的波前部分;波形 A 则是对 88 次实测雷电流波形取平均而求得的,其时间范围取得较大,以反映雷电流波形的全貌。

第三节 雷电流与雷电过电压的近似表示

对于单极性的雷电流和雷电暂态过电压脉冲波形,通常采用幅值、波头时间和波长时间等三个参数加以描述,对于振荡型波形,还要附加上主振频率这个参数。以下将分别介绍几种常用的雷电流和雷电过电压的波形及相应的波形参数。

一、雷电流幅值的累积概率

雷电流幅值大小的变化范围很大,需要对大量的观测数据进行统计,才能得到其概率分布特性。对于年平均雷电日大于 20 的地区,我国传统采用以下经验公式来表示雷电流幅值累积概率:

$$\lg P = -\frac{I_m}{108} \quad (1-1)$$

上式中的 I_m 为雷电流幅值 (kA), P 表示雷电流幅值超过 I_m 的概率,上式对应于图 1-5 中的曲线 1。例如取 $I_m = 100$ kA,按曲线

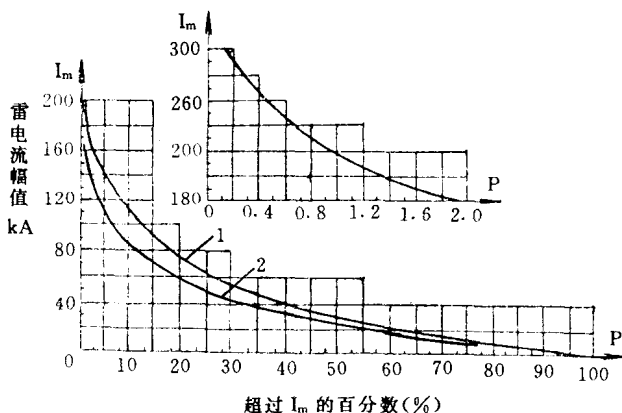


图 1-5 雷电流幅值的累积概率曲线

1 或式(1-1)可得 $P \approx 12\%$, 即每 100 次雷电放电大约有 12 次雷电流幅值超过 100kA。近些年来, 一些研究者根据新的观测统计结果, 提出应将式(1-1)修改为:

$$\lg P = -\frac{I_m}{88} \quad (1-2)$$

上式对应于图 1-5 中的曲线 2。对于年平均雷电日在 20 及以下地区(除陕南以外的西北地区以及内蒙古自治区的部分地区), 其雷电流幅值累积概率可按图 1-5 给定的 P 值查出 I_m 值后, 将 I_m 减半求得, 如果按曲线 1[或式(1-1)], 则有:

$$\lg P = -\frac{I_m}{54}$$

如果按曲线 2[或式(1-2)], 则有:

$$\lg P = -\frac{I_m}{44}$$

二、波头时间与波长时间

在防雷分析与设计中, 雷电脉冲波形的波头和波长时间必须有明确的定义, 对于几种常用的雷电脉冲波形来说, 它们波头和波长时间的定义方法是相同的, 差别仅在于确定波头时间的作图取点位置不同而已。现以一个雷电流波形波头与波长时间的作图确定为例, 说明这种定义方法。如图 1-6

所示, 先由纵轴上的 0.1、0.9 和 1.0 三个刻度分别作三条平行于横轴的平行线, 前两条平行线分别与波形曲线的波头部分相交于 A、B 两点, 过 A、B 两点作一条直线, 该直线与第三条平行线和横轴分别交于 C、D 两点, 由 C 点引横轴的垂线, 其垂足 E 点与 D 点之间的时间即定义为波头时间, 用 τ_f 表示。为了定义波长时间, 再由纵轴上 0.5 刻度

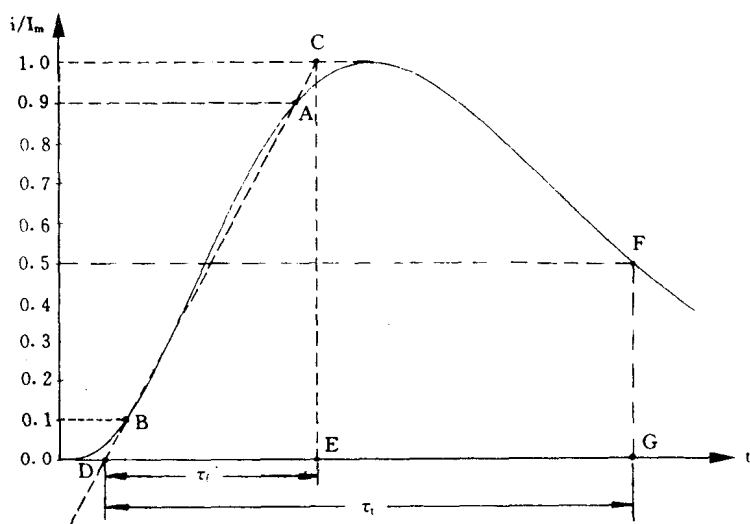


图 1-6 波头与波长时间定义的作图方法示意

作横轴的平行线, 该平行线与波形曲线的波尾部分相交于 F 点, 从 F 点引横轴的垂线, 其垂足 G 点与 D 点之间的时间即定义为波长时间, 用 τ_t 表示。由于波长时间也是波形曲线衰减到半幅值所需要的时间, 它习惯上也被称为半幅值时间。在定义了波头和波长时间后, 单极性雷电流脉冲波形可记为 τ_f/τ_t , 这里的 τ_f 和 τ_t 一般采用 μs 作单位。由雷电流提供的总电荷可按以下积分来计算:

$$Q = \int_0^{\infty} i(t) dt \quad (1-3)$$

对于建筑防雷设计来说, 一般是将雷击分为首次和后续雷击两种情况, 并规定相应的波

形参数,详见表 1-2。

表 1-2(a) 首次雷击的雷电流波形参数

波形参数	建筑物防雷类别		
	第一类	第二类	第三类
电流幅值 I_m (kA)	200	150	100
波头时间 τ_f (μ s)	10	10	10
波长(半幅值)时间 τ_f (μ s)	350	350	350
总电荷 Q (As)	100	75	50

表 1-2(b) 后续雷击的雷电流波形参数

波形参数	建筑物防雷类别		
	第一类	第二类	第三类
电流幅值 I_m (kA)	50	37.5	25
波头时间 τ_f (μ s)	0.25	0.25	0.25
波长(半幅值)时间 τ_f (μ s)	100	100	100

在表 1-2(a) 和 (b) 中,关于建筑物防雷类别的定义,请参见《建筑物防雷设计规范》(GB50057-94)。

应当指出,关于雷电流波形参数——幅值、波头和波长时间,已累积了各种实测数据,虽然基本规律大致接近,但具体数值却有差别,存在着一定的分散性。其原因主要来自两个方面:一是雷电放电本身的随机性受到各地气象、地形和地质等自然条件的诸多因素影响;二是测量手段和测量技术水平不同。

三、雷电流的等值波形

为了便于定量分析,在防雷设计中,需要将雷电流波形等值为几种可用解析式表达的波形,以进行工程计算。这些等值波形分别由下列形式给出。

1. 双指数波形

雷电流波形的双指数等值波形的表达式为:

$$i(t) = AI_m(e^{-\alpha t} - e^{-\beta t}) \tag{1-4}$$

上式中常数 A 、 α 和 β 由雷电流波形数据拟合确定。双指数等值波形如图 1-7 所示,它是由

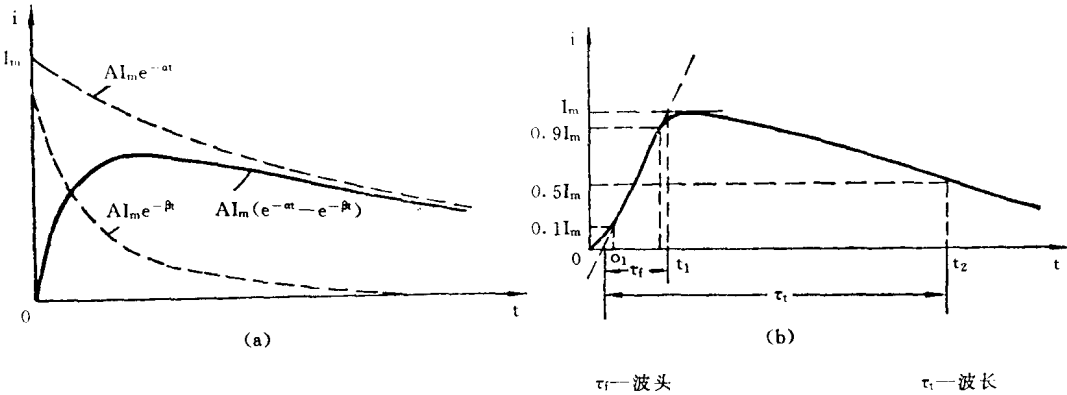


图 1-7 双指数等值波形

两个衰减速度不同的指数函数合成,对于常用的雷电流波形,一般有 $\beta \gg \alpha$ 。表 1-3 给出了几种常用雷电流波形的双指数表达式中的拟合常数。

表 1-3 几种常用雷电流波形的双指数表达式拟合常数

波形参数	拟合常数		
	A	$\alpha (\mu s^{-1})$	$\beta (\mu s^{-1})$
0.25/100 μs	1.002	7×10^{-3}	34
2.6/50 μs	1.058	1.5×10^{-2}	1.86
10/350 μs	1.025	2.05×10^{-3}	0.564

2. 等值斜角波

在防雷设计中,有时为了简化分析和计算,将雷电流用等值斜角波形加以表示,如图 1-8 所示,其波头上升陡度 a 由实际雷电流的波头时间 τ_f 和幅值 I_m 来确定:

$$a = \frac{1}{\tau_f} I_m$$

等值斜角波形的波尾部分可以是无限长,如图 1-8 (a)所示,也可以是以固定斜率(由波长时间 τ_r 确定)衰减,如图 1-8(b)所示。

3. 等值余弦波形

在侧重分析雷电流波头作用时,有时也可采用等值余弦波形来表示雷电流波形,这种等值余弦波形的表达式为:

$$i(t) = \frac{I_m}{2} (1 - \cos \omega_0 t)$$

上式中 ω_0 为等值角频

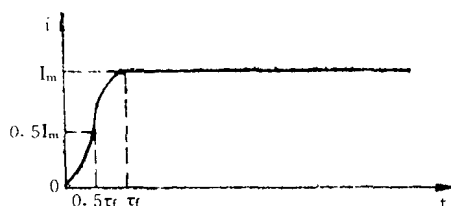


图 1-9 等值余弦波形

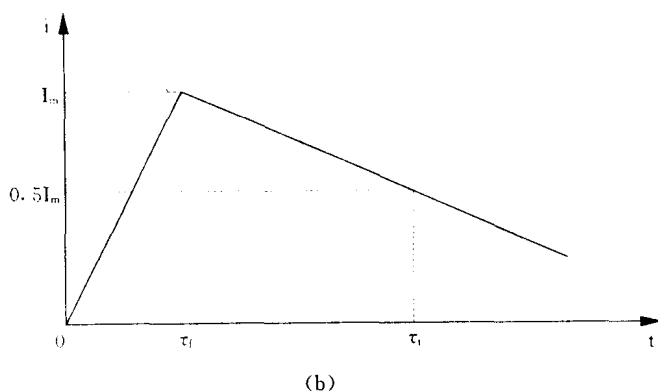
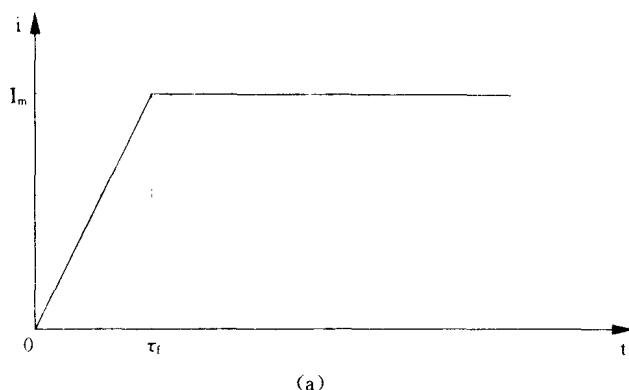


图 1-8 等值斜角波形

率,它与波头时间 τ_f 之间的关系为:

$$\omega_0 = \frac{\pi}{\tau_f}$$

等值余弦波形上的波头上升部分的最大陡度出现在 $t = \tau_f/2$ 处:

$$a_m = \left(\frac{di}{dt} \right)_{\max} = \frac{\omega_0 I_m}{2}$$

等值余弦波形如图 1-9 所示。