

第 1 章

防雷技术基础



1.1 概述

人类对雷电的探索从很早就开始了。早在两千多年前,《庄子》中就有“雷霆”的描述。东汉时期的王充将雷电的认识提高到了理性,认为雷电是一种自然现象。到了明代,沈括、方以智等科学家从科学上进一步解释了雷电熔物现象。

不仅如此,在中国,关于雷电防护的实践也很早就开始了,古籍中关于建筑工程避雷的记载也十分丰富。南北朝的孟奥《北征记》中有如下记述:“凌云台南角一百步,有白石室,名避雷室。”又有盛弦之《荆州记》中记述:“湖阳县春秋蓼国,樊重之邑了,重母畏雷,为立石室,以避之,悉之文石为阶砌,至今犹存。”书中谈及的白石、文石,据分析应该属于绝缘性能较好的石块。

从我国传统的五行、八卦学说解释,八卦中“震”卦为“雷”。八卦与方位相结合时,则有“南离、北坎、东震、西兑”的规定,又有“南属东雀、北属玄武(龟蛇)、东属青龙、西属白虎”的说法,认为“雷从龙”,这样,中国古人们就把“雷”与“龙”联系起来。为了避免建筑物被雷击,就必须建造避雷设施,就要安装“镇龙”设施。我国古建筑上有许多称为“镇龙”的设施实际上是避雷装置。

这些“镇龙”装置与近代避雷针的避雷原理相同。我国一些古塔的尖端常常涂一层有色金属膜,采用容易导电的材料与直通到地下的塔心柱相连,柱下端又与储藏金属的“龙窟”相连。还有许多古建筑物的屋顶有一种被称为“龙”的装饰物,它的头仰向天空,张着嘴,向上伸出的舌头是一根尖锐的金属芯子,另一端和埋藏在地下的物体相连,这样能将雷电引到地底下而不损坏建筑物,如图 1-1 所示。另外,在许多古塔和宫殿上设置“鸱尾”,在屋顶上设置动物状的瓦饰,在高大殿宇中常设有“雷公柱”之类的避雷柱,这些设施都与大地相通,形成了良好的导电通道。

雷公柱(宋代称柁杆)在宋、元、明、清代的建筑物中广泛使用,如图 1-2 和图 1-3 所示。雷公柱是我国古代在建筑上进行避雷实践的应用典型。它一般用于庑殿建筑屋脊两端太平梁之上,以支顶脊栿挑出部分的柱子,或用于攒尖建筑斗尖部位的悬空柱。这种装置

有 3 种形式：一是亭、阁上的宝顶及佛塔的塔刹，下面设置雷公柱；二是牌坊之类的建筑，在高架柱处设置雷公柱；三是殿堂的顶上，在屋脊两端的正吻下面设置雷公柱。古代匠人懂得，建筑物的这些部位都是最易受雷击的地方。今天我们知道，殿堂屋顶上的正吻是房屋的最高处，而且是尖端，所以最易被雷击。避雷的做法是，正吻触雷后，其电流便沿正吻内的雷公柱、太平梁、角梁、沿柱等引向地面。若是楼阁、亭子、佛塔等建筑，则由顶上的火珠、宝珠、宝顶等接受雷电，由雷公柱传至柱，引入地下。



图 1-1 古代建筑中动物状的瓦饰起到避雷作用



图 1-2 宋式簇角梁构架

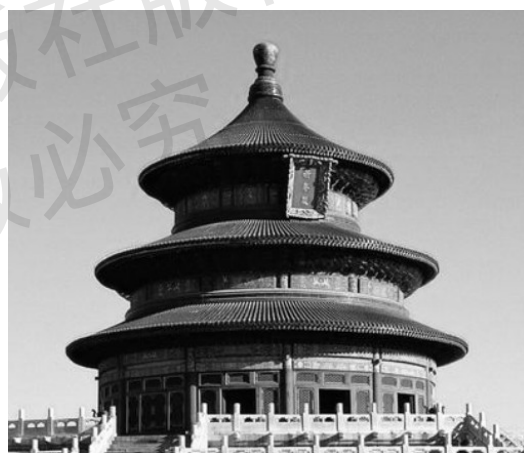


图 1-3 北京祈年殿，殿顶为“雷公柱”

雷公柱是中国古代应用最为广泛的避雷装置，为了达到良好的泄流效果，雷公柱、沿柱、角梁等这些构件不能用一般的木材，所用的木材有楠木、格木、松、柏等（这些木材都有较好的导电性），有的也用金属（铜、铁等）。例如，北京昌平时长陵的棱恩殿上用的是楠木；广西容县的真武阁上用的是格木，即铁力木。虽然古人知道可用合适的材料来完成对雷电的防护，也在实践中寻找到了雷电防护的基本方法与技术，这些技术与后来富兰克林所说的避雷方法基本一致，但由于受到当时的科技水平和对雷电认识的局限性，终究没有建立起我国古代防雷的技术体系。

18 世纪，美国科学家富兰克林通过“岗亭”和“风筝”试验提出了以避雷针保护建

筑物的理论和方法。富兰克林于1750年7月给Collinson的一封信中提出了避雷针的设想。他说,既然尖导体可以把一个离它很远的带电体上的电荷释放掉,避免它对其他物体产生电击,那么尖导体“对于人类可能有些用处”。于是他建议将一根上端尖锐并涂有防锈层的铁杆安装在房屋的最高处,并用导线接在它的下端沿着墙壁直通到地下;在海船上则把铁杆固定在桅杆顶端,用导线连接向下直通入水中。不久,俄国的M·B·罗蒙诺索夫、L·B·黎赫曼也重复了“风筝”试验,试验结果也证实了富兰克林的理论。他们通过大量的试验建立了雷电学说,认为雷击是云层中大量阴电荷和阳电荷迅速中和而产生的现象;并且创立了避雷理论,发明了避雷针。至此,人类对于雷电的防护进入了快速发展时期。

富兰克林奠定了防雷技术的基础,到目前为止,直接雷击的防护依然脱离不了富兰克林时代雷电防护技术的特征。但随着社会电气化与信息化程度的提高,电力与信息的传送受到雷电的严重威胁。雷电的高电压、大电流和瞬时性,强大的闪电产生静电场、电磁场和电磁辐射,以及雷电波侵入、地电位反击等严重干扰通信系统和各种电子设备的正常工作,会在一定范围内对微电子设备造成破坏。因此,雷电成灾的情况发生了新的变化,由直接雷击发展为与间接雷击共同作用。正如国际电工委员会(IEC)指出:“雷电,高科技的天敌”。因此,为了防止雷电对电子与电气系统的干扰和破坏,针对雷电的入侵形式,在传统防雷技术的基础上,出现了以防止雷电电磁脉冲、雷电感应与雷电波侵入为特征的新防雷技术与方法,也就是我们所说的现代防雷技术。

人类社会的发展改变了人类生存的环境。特别是近年来,雷电灾害愈加频繁,究其原因有以下几点:一是从自然气候的变化来说,全球气候的变化,导致极端天气现象出现的频率与强度均在增加,强雷暴天气经常出现;二是人类活动改变了雷电灾害的载体性质,如高楼、铁塔、远程输电线路等高耸建筑物与设施的存在,增加了直接雷击的接闪条件与概率;三是电气电子系统几何级数的增加也导致雷电感应与雷电电磁脉冲(LEMP)可以随时随地造成系统的损坏。间接雷击的影响日趋频繁、信息化对社会生活的渗入使雷电灾害损失扩大,都导致雷电灾害发生的频率越来越高,损失也越来越大,传统的富兰克林避雷针技术已不能对现代智能建筑和电子电气系统提供全方位的保护。同时,雷电危害的入侵形式也因此发生了巨大的变化,由原来的雷击点的直接破坏,如雷击建筑物造成的爆裂、损坏,向雷电感应所产生的雷云下大片区域内的雷电波侵入及感应高压引起的线路、设备的闪络故障演变。因此,现代防雷技术必须综合考虑、层层设防。

“防雷”并非是预防雷电的发生,而是给雷电能量的泄放开渠筑坝。一方面为雷电流提供一条流入大地的低阻通道,不使它冲击被保护的建筑物和设备;另一方面也为被保护设备筑起电磁能量的防护屏障,从空间和线路上隔离雷电流的间接影响。当然,为了达到理想效果,相关的技术和方法总是结合在一起综合应用的,这些措施的简要概况如图1-4所示。

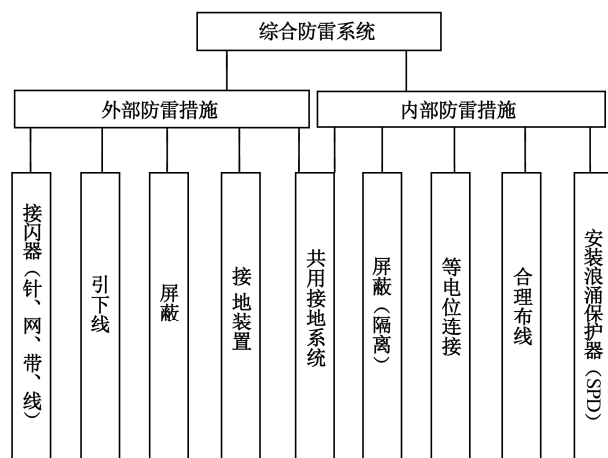


图 1-4 现代防雷技术应用体系

任何雷电防护理论都是在一定的物理条件下建立的，科学技术的发展正在改变着我们身边的物理条件，使防雷理论的发展经历了机械时代、电气时代和电子信息时代三个阶段。

1.1.1 机械时代雷电防护技术

从 18 世纪开始到 20 世纪初，由于社会生产与生活方式变迁不大，以及大气电学的理论发展缓慢，这个时期的防雷技术以防直接雷击为主，防护手段就是富兰克林发明避雷针加接地线。这个时期防雷的主要目的是防止雷电直接击在建构物上而产生高电位的电效应、热效应和机械效应危害。

机械时代防雷的主要方法是用避雷针防雷，又称富兰克林法，这是 18 世纪 50 年代由美国著名物理学家富兰克林发明的方法，他通过著名的风筝试验，知道了雷电实际是天空雷云电场对地放电的现象。基于此，富兰克林提出应用避雷针高出被保护物的高度使雷云下的电场发生畸变，从而将雷电流吸引到避雷针上，通过引下线导入大地，使被保护对象免遭雷电闪击。

如图 1-5 所示为避雷针（接闪竿）防雷示意。避雷针可提供一个雷电只能击在避雷针上，但不能破坏以它为中心的伞形保护区。同样的原理，避雷带（接闪带）提供的是一个屋脊形的保护区。这个保护伞或区所张开的角度受针或带的设置高度、雷电强度及其他参数的影响，有的采用 30° ，有的采用 45° 或 60° ，尽管关于保护角的计算公式很多，但保护角如何确定一直是富兰克林防雷理论的最大困扰。这个困扰在于理论的不完善性、实践中的不完全性。避雷针实质是引雷针，它使雷电触击其上而使建筑物得以保护，当雷击避雷针或避雷带时，由于引下线的阻抗，强大的雷电流可能会造成避雷系统产生高电位，对地电压可达相当高的数值，以至于造成接闪器及引下线向周围设备跳火反击，从而导致火灾或人身伤亡事故。另外，强大的雷电流泄入大地，在接地极周围形成跨步电压的危险也是不容忽视的。

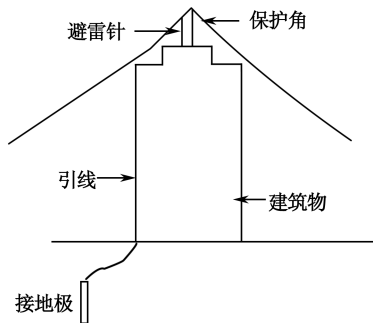


图 1-5 避雷针防雷示意

1.1.2 电气时代防雷技术

20 世纪初，由于电信业、电力业的发展，雷电产生的危害越来越显著，防雷技术不仅要保护建筑物，还要保护电信与输电线路及建筑物内部由继电器、晶体管等组成的电气设备，雷电防护技术走向电气时代。电气时代防雷的主要目的如下：

- (1) 防止雷电直接击在建筑物上而产生电效应、热效应和机械效应危害；
- (2) 防止雷电以金属导线或金属管道为通道，以雷电波的形式侵入建筑物内，危害室内人身安全和毁坏设备。

此时的防雷方法主要有法拉第笼防雷法、避雷器防雷法等，其原理如下。

1. 法拉第笼防雷法

法拉第笼防雷法利用钢筋或铜带把建筑物包围起来，如图 1-6 所示。

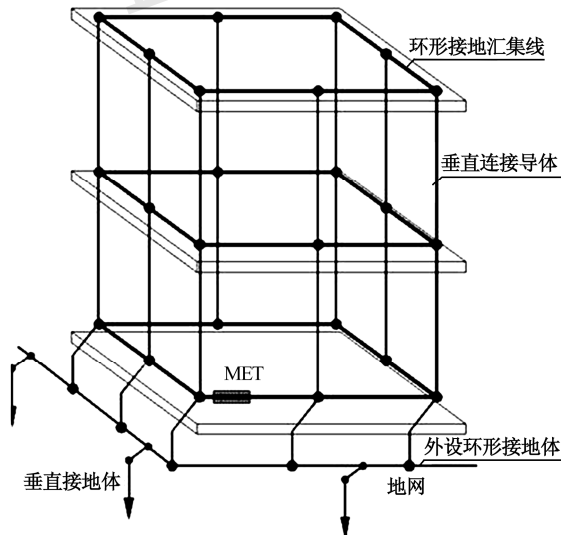


图 1-6 法拉第笼防雷法示意

法拉第笼防雷法的出发点是建筑物被垂直与水平的导体包围起来,形成一个法拉第保护笼。但建筑物有通道和对外的空隙,不能做到天衣无缝,并且法拉第保护笼不能使建筑物的拐角处避免雷击。近年来,用得较多的防雷方法是避雷针防雷法和法拉第笼防雷法混合使用。

2. 避雷器防雷法

避雷器用来保护设备不受雷电波入侵的损害。其防雷原理如下:通过间隙击穿达到对地放电的目的。避雷器必须与被保护设备并联,如图 1-7 所示。

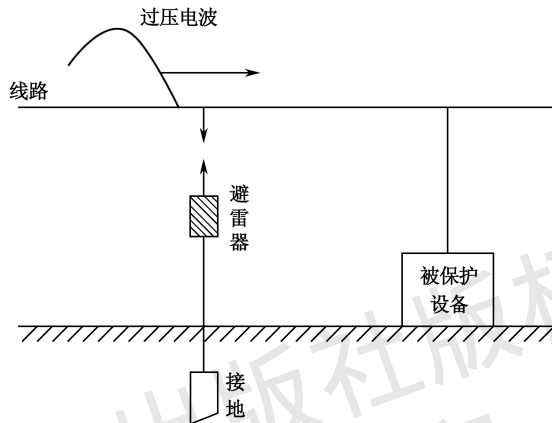


图 1-7 避雷器连接示意

避雷器的间隙击穿电压比被保护的设备绝缘的击穿电压低。在正常工作电压时,避雷器间隙不会被击穿,形成对地的开路,当雷电波沿导线传来,出现危及被保护设备的过电压时,避雷器很快被击穿,对地放电,使大量的电荷都泄入地中,从而限制了被保护设备过电压,起到保护设备的作用;过电压过去以后,间隙能迅速灭弧,使被保护设备工作正常。避雷器也可采用波导元件,让有用信号波与雷电波信号分开,有用信号进入接收装置,而让雷电波对地放电,使大量的电荷泄入地中,起到保护设备的作用。

1.1.3 电子信息时代防雷技术

20 世纪 70 年代后,由于电子信息、航天技术的发展,半导体集成技术和微电子技术的普遍应用,导致雷电的电磁干扰、闪电脉冲的危害越来越严重。因此,防雷技术逐渐由电气时代向电子信息时代迈进。电子信息时代防雷的主要目的表现在以下几个方面。

- (1) 防止雷电直接击在建构物上产生电效应、热效应和机械效应危害。
- (2) 防止雷电以金属导线或金属管道为通道,以雷电波的形式侵入建构物内,危害室内人身安全和毁坏设备。
- (3) 防止因雷雨云闪电时,强大的脉冲电流使云中电荷与地面中和,从而引起静电场

的强烈变化,导致附近导体上感应出与先导通道符号相反电荷产生的高电位对电子设备和易燃易爆场所的危害。

(4) 防止雷电的电磁场感应危害,当雷电流在微秒级时间内,从零变化到几十千安,在其周围空间中产生瞬变的强电磁场,线路上感应电动势会造成危害;同时闪电可辐射从频率为几赫兹的极低频率直到几千兆赫兹的特高频率,当被保护物距离雷电较近时,主要受静电感应影响;当被保护场距离雷电较远时,主要受电磁辐射的影响,轻则干扰信号线、天线等无线电通信,重则损坏仪器设备、引起易燃易爆场所产生火花,甚至发生爆炸。

电子信息时代的防雷方法主要有对雷电流进行分流、泄流和阻断雷电波入侵,以及对保护设备进行屏蔽、等电位等防雷技术及其综合应用。

人类还不可能完全控制雷电,但是经过长期的摸索与实践,已积累了很多有关防雷的知识和经验,形成了一系列对防雷行之有效的方法和技术,这些方法和技术对各行各业行之有效地预防雷电灾害具有普遍的指导意义。

1. 接闪

接闪是指在一定范围内出现的闪电(直接雷击)不能任意选择放电通道,而只能按照人们事先设计的防雷系统及规定通道将能量泄放到大地中去。用来接闪的装置称为接闪器。在国家标准《建筑物防雷设计规范》中说明:接闪竿、接闪带(线)、接闪网是直接接受雷击的装置,统称为接闪器。

在建筑物外部防雷中,通过接闪器接闪后,强雷电流通过规定通道泄入地面,可有效防止雷电流对建筑物自身的损毁;同时,在接闪后泄流的过程中,要注意防雷电感应。外部屏蔽可阻止雷电流产生的强烈电磁场对处在相邻位置的人或物造成伤害。雷电感应还会对建筑物内部的电子、电气设备及人身造成损害,因此,要在电子和电气设备线路前加装电涌保护器,防止瞬态过电压沿线路击毁设备。

到了20世纪,人们开始认识到雷电感应的危害。1914年,德国人W. Peterson提出了接地避雷线(接闪线)防雷的理论;后来美国人F. W. Peek和W. W. Lewis也认识到对电力线路的威胁不仅来自雷电直击,还有雷电感应。直到20世纪30年代后期,人类才取得共识:对应100kV以上的供电线路,避雷线是防避直击雷的基本保护措施,其功能类同接闪竿。

接闪带是指在平顶房屋顶四周女儿墙或坡顶屋的屋脊、屋檐上装上金属带作为接闪器,并把它与大地进行良好的连接即可得到较好的避雷效果。

接闪网是指利用钢筋混凝土结构中的钢筋网进行雷电保护,必要时可以添加辅助的接闪网,因此,接闪网又称暗装接闪网。

2. 均压

接闪装置在捕获雷电时,引下线立即升至高电位,会对防雷装置周围尚处于低电位的导体产生旁侧闪络,使其电位升高,进而对人员和设备构成危害。为了减少这种闪络危险,最简单的办法是采用均压环:将处于低电位的导体等电位连接起来,一直到接地装置。如

果金属设施、电气装置和电子设备与防雷系统的导体，特别是接闪装置的距离达不到规定的安全要求时，则应该用导线把它们与防雷装置进行等电位连接。这样在闪电电流通过时，可保证导电部件之间不产生有害的电位差，不发生旁侧闪络放电。完善的等电位连接还可以防止闪电电流入地造成的地电位升高所产生的反击。

3. 接地

防雷接地就是让已经进入防雷装置的闪电能量泄放入大地。良好的接地才能有效地降低引下线上的电压，避免发生反击。过去有些规范要求电子设备单独接地，目的是防止电网中杂散电流或暂态电流干扰设备的正常工作。20世纪90年代之前，通信导航装备以电子管器件为主，采用模拟通信方式，模拟通信对干扰特别敏感。为了抗干扰，通信导航装备都采取电源与通信接地分开的办法。现在，防雷工程领域不提倡单独接地。在IEC标准和ITU相关标准中都不提倡单独接地，美国标准IEEE Std1100—1992也不建议采用任何一种所谓分开的、独立的、计算机的、电子的或其他大地接地体作为设备接地导体的一个连接点。接地是防雷系统中最基础的环节，如果接地不好，所有防雷措施的防雷效果将都不能发挥出来。

4. 分流

分流就是在一切从室外来的线路（包括电力电源线、电话线、信号线、天线的馈线等）与接地线之间并联电涌保护器。当线路上产生的过电压波沿着这些线路进入室内或设备时，电涌保护器的电阻突然降低到最低值，近于短路，将雷电流分流入地。

采用分流这一防雷措施时，应特别注意电涌保护器性能参数的选择，因为附加设施的安装会影响防雷装置的性能。例如，信号电涌保护器的接入应不影响系统的传输速率；天馈电涌保护器在通带内的损耗要尽量小；若使用在定向设备上，要求不能导致定位误差。

5. 屏蔽

屏蔽就是用金属网、箔、壳、管等导体把需要保护的物体遮挡起来，阻隔闪电电磁场从空间入侵。

6. 浪涌保护

浪涌保护是指在雷雨时为应对雷电流击中输电线路而形成的过电压在线路传播时，可通过电涌保护器中的非线性元件将瞬态过电压限制住，并将电涌电流分别泄入大地，从而使电子和电气设备得以保护。

7. 躲避

躲避是指雷雨来临时，关掉运作的设备，截断电流进线，将天线及馈线连接到接地装置。成功的躲避需要一套可靠的雷电探测预警系统，选址应避开容易落雷的特殊地点。

以上防雷方法，必须根据当地闪电的规律，灵活选用。

1.2 雷电流的特性

雷电破坏作用与雷电流强度、能量及其波形有密切的关系。每次雷击电流的大小和波形差别很大,不同雷击闪电种类的放电差别更大。雷电流具有电流的一般特性,但峰值高、陡度大、持续时间短是雷电流的一大特征。

带负电荷的雷雨云向大地放电为负闪击,带正电荷的雷雨云向大地放电为正闪击。雷雨云对大地放电多为负闪击,其电流峰值以 $10\sim 50\text{kA}$ 居多。

通常一次雷电包括 $3\sim 4$ 次以上的放电过程,一般第一次放电(回击)电流最大,正闪击的电流比负闪击的电流大,其电流峰值往往在几十千安以上。

根据 IEC 62305、GB 50057 等规范的定义,对于模拟雷电流的波形有两大类,一类是模拟直接雷击电流波形,另一类是模拟雷电感应电流波形。例如,直接雷击电流 $10/350\mu\text{s}$ 波形,感应雷击电流 $8/20\mu\text{s}$ 波形。

如图 1-8 所示,先由纵轴满刻度的 10%、90% 和 100% 做三条平行于横轴的直线,前两条平行线与波形曲线的头部两个交点做一条直线,该直线与第三条平行线和横轴分别相交于两点,波头时间用 T_1 表示。为了定义波长时间,再由纵轴上 50% 刻度做横轴的平行线,该平行线与波尾部分相交,由交点向下引垂线与横轴相交,得到波长时间,用 T_2 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计为 T_1/T_2 , 这里 T_1 和 T_2 一般采用 μs 作为单位。雷电波形在工程上有重要的应用,诸如试验室的雷电模拟、工程计算等。

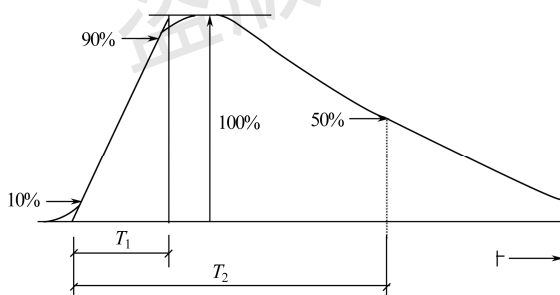


图 1-8 雷电流波形的表示方法

1.2.1 雷电流工程模型

常用的雷电流工程模型有如下几种。

1. TL 模型

TL 模型(传输线模型)是 Uman 和 Mclain 于 1969 年提出的雷电流模型,该模型认为通道中无转移电荷分布。直到现在该模型在国内外仍然有广泛的应用。

传输线模型认为,主放电发生后,电流从先导通道的底部以一定的速度沿通道无衰减向上传播,通道被认为是理想的传输线。通道电流表达式为

$$\begin{cases} i(z',t) = i(0,t - z'/v) & z' \leq vt \\ i(z',t) = 0 & z' > vt \end{cases} \quad (1.1)$$

其中, z' 表示电流高度, v 表示回击速度。对于 TL 模型而言,其远处辐射电场及其导数与地表电流之间的关系式为

$$\begin{cases} i(0,t) = -(2\pi\epsilon_0 c^2 r/v)E(r,t+r/c) \\ \frac{di(0,t)}{dt} = -\frac{2\pi\epsilon_0 c^2 r}{v} \frac{dE(r,t+r/c)}{dt} \end{cases} \quad (1.2)$$

但是,式(1.2)只有当大地电导率无限大、电场为完全辐射场时才有效,这样就可以通过测量峰值电流和峰值电流导数、电场导数得到回击速度。TL 模型的优点是能够使回击电流在回击顶端的数值为 0,实现电流连续性;不足之处在于模型认为通道中无转移电荷分布,只有在大地为理想导体、电场为完全辐射场时才能利用公式进行电流和电场峰值或其导数值与回击速度之间的换算。

式(1.2)假设回击速度 v 是常数,由于该模式要求以相同的电流传播通过任一高度,所以,在回击传播期间,在回击通道内没有电晕出现。如图 1-9 所示为这一模型电流的特征。

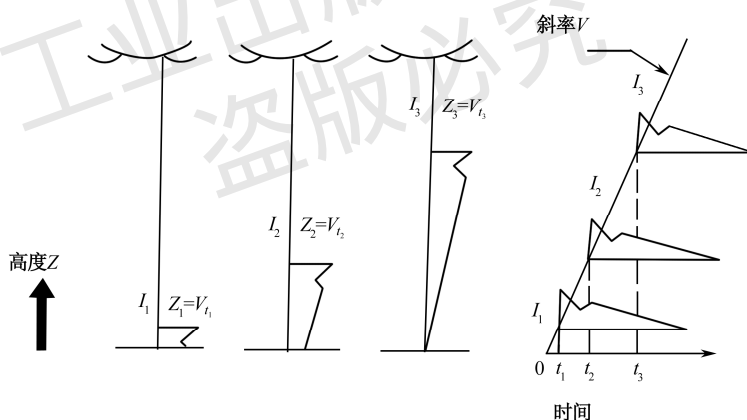


图 1-9 传输线模式 (Lin 等, 1980)

Lin 等(1980)根据试验资料对上面两个模式进行了检验,发现对于随后闪击,上述两个模式并不合适。为此, Lin 提出了一个新的闪击模式,即 Lin 模式。该模式存在三个电流分量,具体如下。

(1) 在回击波顶部向上传播的爆发性脉冲电流:具有回击波的速度,但速度不易确定,假定为一常数 10^8m/s 。

(2) 均匀电流 I_u : 在静电场中,闪电直线步跃区,为确定电流 I_u ,在近闪电发生区测

量电场变化 $\frac{dE}{dt}$ ，则由下式可计算得到 I_u ，即

$$I_u = -\frac{2\pi\epsilon_0(H^2 + D^2)^{\frac{3}{2}}}{H} \frac{dE(D,t)}{dt} \quad (1.3)$$

式中， D 是闪电与观测站之间的距离， H 是随后闪击通道的高度。

(3) 电晕电流：电晕电流是由储存于先导通道内的电荷径向向内和向下移动引起的。可以将电晕电流想象为沿通道分布的若干电流源。每当回击峰值脉冲电流达到源高度时，电流源转向。在每个高度上，进入通道的电晕电流是相等的，但其大小随高度呈指数下降。

2. MTLE 模型

由于 TL 模型不认为有净电荷从先导通道中被汲出、中和，所以，用 TL 模型计算长时间的场不切实际。Nucci 等对 TL 模型进行了修订，把回击期间电晕电荷分布、静电荷汲出和中和考虑进模型，于 1988 年提出了 MTLE 模型，即改进的传输线模型。该模型认为通道电流随通道高度呈指数衰减，从而引入了衰减系数 $e^{-z'/\lambda}$ 。回击通道电流 $i(z',t)$ 表示为

$$\begin{cases} i(z',t) = e^{-z'/\lambda} i(0,t-z'/v) & z' \leq vt \\ i(z',t) = 0 & z' > vt \end{cases} \quad (1.4)$$

式中， λ 是电流衰减常数，根据 Lin 等的试验数据，通常取 2000m。由于 Nucci 等考虑到净电荷从先导通道中汲出、中和过程（从回击波前通过开始，持续到由此产生的电晕电流到达大地为止），故在 MTL 中引入了高度衰减常数 λ_c 。

Rakov 等也对 TL 模型进行了修订，提出了 MTLL 模型。该模型将雷电回击电流看作在放电通道底部注入了一个特定的基电流，该电流沿着通道向上传播，形成回击电流，且电流按线性规律衰减，雷电通道电流的时空分布 $i(z,t)$ 由通道基电流 $i(0,t)$ 和波前向上传播的速度 v 确定。模型认为通道电流随通道高度呈线性衰减，从而引入了衰减系数 $1-z'/H$ 。回击通道电流 $i(z',t)$ 为

$$\begin{cases} i(z',t) = (1 - \frac{z'}{H}) i(0,t-z'/v) & z' \leq vt \\ i(z',t) = 0 & z' > vt \end{cases} \quad (1.5)$$

式中， z' 表示电流高度， H 为雷电放电通道的高度， v 表示回击速度， t 表示时间。

3. TCS 模型

Heidler 于 1985 年提出了 TCS 模型（行波电流源模型），该模型认为电流沿通道以光速向上传播，其不合理之处在于电荷不可能被瞬时吸收到雷击头。

TCS 模型假设主放电以一定速度向上传播。当主放电波头到达通道中的点 z' 时，该点的电荷在瞬时产生放电，放电电流无衰减地以光速向上传播。 z' 处产生的电流在经过时间 $t = z'/c$ 后到达地面，即

$$\begin{cases} i(z',t) = i(0,t+z'/c) & z' \leq vt \\ i(z',t) = 0 & z' > vt \end{cases} \quad (1.6)$$

当 TCS 模型中的放电电流以无限大的速度向上传播时，TCS 模型得到的结果和 BG

模型得到的结果一致。同样，TCS 模型中也存在波头处电流不连续的情况。

4. DU 模型

结合 TCS 模型和 MULS 模型，Diendorfer 和 Uman 在 1990 年提出了 DU 模型。DU 模型采用 TCS 模型的基本思想，即通道在先导阶段积累的电荷在主放电波头到达时放电，该放电电流以光速向下传播。该放电不像 TCS 模型中那样瞬时完成，而是以指数衰减的形式进行。另外，DU 模型将通道电流分成两部分：①通道中心电荷产生的快速放电电流（时间常数较小）；②通道外层电荷产生的电晕电流（时间常数较大）。即

$$\begin{cases} i(z',t) = i(0,t+z'/c) - i(0,z'/v^*)e^{-(t-z'/v)/t_D} & z' \leq vt \\ i(z',t) = 0 & z' > vt \end{cases} \quad (1.7)$$

1.2.2 雷电通道底部电流模型

对于不同的雷电流工程模型，通道基电流的模型可以是相同的。常用的雷电通道底部的电流模型有三种，即双指数函数模型、霍得勒（Heidler）函数模型、脉冲函数模型。

1. 双指数函数模型

Bruce 和 Golde（1941）提出了地闪回击电流的双指数表达式，如果梯级通道内的电荷量为 Q ，在单位时间内回击顶端中和的电量为 α/Q ，则

$$dQ = -\alpha Q dt \quad (1.8)$$

式中， α 取决于通道内的电荷密度和通道值，对式（1.8）积分得

$$Q_t = Q_0 e^{-\alpha t}$$

式中， Q_0 是 $t=0$ 时刻梯级通道内总的电荷量，有回击发生后来自云闪内的向下电荷在回击顶端处对闪电电流产生贡献，则电荷量的衰减为

$$Q'_t = Q'_0 e^{-\beta t}$$

在回击通道顶端总的荷电变化率为

$$I_t = \frac{d}{dt}(-Q_t + Q'_t) = \alpha Q_0 e^{-\alpha t} - \beta Q'_0 e^{-\beta t}$$

若 $t=0$ ， $I_t=0$ ，则有

$$I_t = I_0(e^{-\alpha t} - e^{-\beta t})$$

双指数函数是 1941 年由 Bruce 和 Golde 提出的，其表达形式十分简单，便于进行微分和积分运算，而且能够反映出测得的通道底部电流的主要参数。在国际电报电话咨询委员会（CCITT）的推荐防雷标准中，双指数函数作为雷电流理论计算的表达式。其表达式如下：

$$i(0,t) = \begin{cases} 0 & t < 0 \\ \frac{I_0}{\eta} [e^{-\alpha t} - e^{-\beta t}] & t \geq 0 \end{cases} \quad (1.9)$$

式中, 常数量 η 表示雷电流峰值计算的修正因子; β 表示雷电流波头时间的倒数, 即雷电流的电流波形上升时间因子; 同理, α 为雷电流波尾时间的倒数, 即雷电流波形衰减因子; 雷电流的峰值用 I_0 表示。在计算中即可选取 $\alpha = 1/\tau_2$, $\beta = 1/\tau_1$, 雷电流的峰值可以按照计算需要选取, 这里选取雷电流峰值 I_0 为 20kA。

2. 霍得勒函数模型

霍得勒函数模型是霍得勒于 1985 年提出来的, 该模型具有优于双指数函数的特点, 它在 $t=0$ 时刻的电流导数为 0, 与观测到的第一回击电流的波形是一致的。10 阶霍得勒函数已经成为国际电工委员会 (IEC) 关于雷电流解析表达式的标准 (1995 年), 在各种关于雷电流的计算中都有广泛的应用, 其解析表达式如下:

$$i(0, t) = \left(\frac{I_0}{\eta} \right) [k_s^n / (1 + k_s^n)] e^{(-t/\tau_2)} \quad (1.10)$$

式中, 常数量 η 表示雷电流峰值计算的修正因子, 取 $\eta \approx 1$ 。雷电流的峰值用 I_0 表示, $k_s^n = t/\tau_1$, $n=10$ 。此波形比较符合雷电流的实际规律, 在目前的雷电流计算中具有较为广泛的应用, 对于 10/350 μ s 和 8/20 μ s 两种波形都比较适用。

3. 脉冲函数模型

在雷电流的相关计算中, 云地闪电的放电过程一般可以看成如下过程: 一根垂直于地面的长直导线, 雷电流从底部开始以一定的速度向云层运动。根据这个过程建立的导线模型, 可以相对简单地计算出雷电流底部通道周围的电磁场表达式, 在该表达式中可以发现, 雷电流产生的电场即为电流相对时间 t 的积分。但是根据前面列出的雷电流的双指数函数模型表达式, 可以发现对于雷电流的双指数函数表达式而言, 在 $t=0$ 时, 其相对 t 的一阶导数是不连续的, 而霍得勒函数模型的积分表达式又比较模糊。为了便于电磁场计算, 有人提出了用式 (1.11) 来表达雷电流的波形, 即雷电流的脉冲函数模型。

$$i(0, t) = \begin{cases} 0 & t < 0 \\ \frac{I_0}{\eta} [1 - e^{(-t/\tau_1)}]^n e^{(-t/\tau_2)} & t \geq 0 \end{cases} \quad (1.11)$$

式中, 峰值修正因子 $\eta = (1 - t_a)^n t_a^{\tau_1/\tau_2}$, $t_a = \tau_1 / (\tau_1 + n\tau_2)$ 。容易证明 $\frac{di(0, t)}{dt}$ 在 $t=0$ 时为 0, 且连续可导。

将式 (1.11) 中的 $[1 - e^{(-t/\tau_1)}]^n$ 展开, 可以得到

$$[1 - e^{(-t/\tau_1)}]^n = \sum_{k=0}^n \frac{(-1)^k n!}{k!(n-k)!} e^{(-kt/\tau_1)} \quad (1.12)$$

脉冲函数展开式 (1.12) 中, 当 $k=0$ 时, 其所得的表达式决定了脉冲函数的衰减程度。

1.2.3 闪电的电荷量

闪电电荷是指一次闪电中正电荷与负电荷中和的数量。这个数量直接反映一次闪电放出的能量，也就是一次闪电的破坏力。闪电电荷的多少是由雷云带电情况决定的，存在很大的随机性。大量观测数据表明，一次闪电放电电荷 Q 可从零库仑到 1000 多库仑。然而，在一次雷击中，在同一地区它们的数量分布符合概率的正态分布。第一次负闪击的放电量在 10~20 库仑者居多。

雷云是否会向大地发生闪击，由几个基本因素决定，其一是云层电荷量，其二是它对大地的电场强度。当雷云与大地之间的电位梯度 $\frac{du}{dt}$ ，也就是电场强度达到大气的击穿电场时就会发生闪击，闪击一旦发生，云地之间即发生急剧的电荷中和。

雷电之所以破坏性很强，主要是因为它把雷云的电场能量在几十微秒内释放出来，瞬间功率巨大。但可计算，每次闪击释放的能量只相当于燃烧几千克石油所放出的能量而已。

1.2.4 雷电波频谱

雷电波频谱是研究防雷的重要依据。从雷电波频谱结构可以获悉雷电能量在各频段的分布，从而可以估算通信系统频带范围内雷电冲击的幅度和能量大小，进而确定防护措施。在电力系统建筑防雷工程中，了解雷电频谱分布，也可以优化设计方案，明确防护内容，达到经济合理、安全可靠的目的。

虽然各种雷电波形总体轮廓相似，但是每一次雷电闪击的电流（电压）波形仍存在很大的随机性。

1.2.5 闪电的分类

闪电主要是根据闪电的出现位置、形状、声音和危害等方面进行分类的。

根据闪电发生的空间位置，主要可分为晴天闪电和雷云闪电两类，其中雷云闪电又包括云内闪电、云际闪电和云地闪电。

根据闪电是否发出声音，可分为有声闪电和无声闪电。

根据闪电发生的形状可分为线状闪电、带状闪电、片状闪电、枝状闪电及球形闪电。

1.3 雷电的气候特征参数

(1) 雷暴季节：雷暴季节是指一年中雷暴发生的月份，而与这些月份中雷暴发生的天数无关，仅粗略地反映全年雷暴活动的季节分布和强度。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:雷暴持续期是指一年中初雷日期与终雷日期之间的天数,在一定程度上反映了全年雷电活动的强弱程度。平均雷暴持续期是雷暴持续期的多年平均结果,代表了一年中可能发生雷暴的平均持续天数,粗略地反映了全年雷电活动强弱的多年平均情况。

(3) 雷暴月:雷暴月是指该月中发生过雷电,而不论该月中发生过几天雷电。年雷暴月是指一年中的雷暴月数,平均年雷暴月是指年雷暴月的多年平均结果,它十分粗略地反映了全年雷电活动强弱的多年平均情况。

(4) 雷暴日:雷暴日是指该天中发生过雷暴的次数,而不论该天雷电发生的持续时间。月雷暴日是指一个月中的雷暴天数,在一定程度上较好地反映了全月雷电活动的强弱程度;季雷暴日是指一个季度中的雷暴天数,在一定程度上较好地反映了整个季度雷电活动的强弱程度;年雷暴日是指一年中的雷暴天数;平均月雷暴日是指月雷暴日的多年平均结果,在一定程度上较好地反映了全月雷电活动强弱的多年平均情况;平均季雷暴日是指季雷暴日的多年平均结果,平均年雷暴日是指年雷暴日的多年结果。

(5) 雷暴时:雷暴时是指该小时内发生过雷暴的次数,月雷暴时、季雷暴时、年雷暴时是指在相应时期内发生过的雷暴时数,分别代表了月、季、年的雷电活动强弱程度。平均月雷暴时是指月雷暴时的多年平均结果,逐时年雷暴时数是指某一小时内的全年中的雷暴时数。

(6) 落雷密度:落雷密度是指在某一时期内某一地区在单位面积上的落雷次数,其单位通常是次/平方千米/年。

1.4 我国的雷电活动规律

1.4.1 我国的雷电分布特征

根据年平均雷暴日这一雷电参数,雷电活动从季节来讲,以夏季最活跃,冬季最少;从地区分布来讲,赤道附近最活跃,随纬度升高而减少,极地最少。

我国地形复杂,东西南北经纬度跨越很大,雷电分布也相差很大。在我国,东经 105° 以东地区的年平均雷暴日数随纬度的降低而递增,但长江以北地区这一变化规律趋势不明显,而长江以南地区这一变化规律较为明显。例如,我国东北地区的年平均雷暴日数为 $30\sim 40$ 天;长江两岸地区的年平均雷暴日数略有增如,为 $40\sim 50$ 天;而两广地区的年平均雷暴日数则递增至 $70\sim 100$ 天。另外,海南省中部地区的年平均雷暴日数超过 120 天,近期资料达 130 多天,是我国年平均雷暴日数最多的地区。

东南沿海地区的年平均雷暴日数低于同纬度离海岸稍远地区的雷暴日数。江湖流域、河谷平原的年平均雷暴日数往往也低于同纬度其他地区的数值。这是由于上述地区受水面

影响,使下半年近地层气温偏低,不利于形成可产生强烈对流运动的不稳定层结,从而使年平均雷暴日数偏少。

新疆、甘肃和内蒙古的广大沙漠和戈壁滩地区,以及青海省柴达木盆地等地区,因气候干旱,年平均雷暴日数较少,一般不超过 10 天,为我国平均雷暴日数最少的地区。

地势较高、地形较复杂的山丘地区,其年平均雷暴日数往往高于同纬度其他地区的数值。例如,青藏高原和云贵高原西部等山区,其年平均雷暴日数比同纬度内陆地区的数值多 20~40 天。

由此可见,我国年平均雷暴日数具有南方多于北方、山地多于平原、内陆多于沿海地区和江湖流域,以及潮湿地区多于干旱地区的地理分布特征。

1.4.2 雷击的选择

同一地区的不同地点,雷电的活跃程度是不一样的,对大量雷灾事故的统计和试验证明,雷击的地点和建筑物遭受雷击的部位是有一定规律的,这些规律称为雷击的选择性。我国的雷击事故统计表明,雷击发生在靠近河、湖、池、沼和潮湿地区的占 23.5%,发生在靠近大树、杉篙、旗杆者占 15%,在靠近烟囱、收音机天线、电视机天线受击者占 10%,此外,发生在稻田和导电性良好的土壤交界地带的也占 10%,球雷事故占 5%。

当闪电先导通道向下窜至距地面或建筑物顶端 20~30m 时,在雷云下方的物体尖顶(或尖端)处发生主放电,把雷云与大地间的气隙击穿。在地面突出物上方发生回闪放电的概率最大,因为在地面导体尖端处附近聚集的导电粒子最多,那里的电场最强。因此,突出地面越高的物体越易遭雷击。

通常雷击受下列因素的影响。

1. 与地质构造有关,即与土壤的电阻率有关

如果土壤中的电阻率分布不均匀,则土壤电阻率小的地方易受雷击,而电阻率较大且岩石含量较多的土壤被雷击中的机会就小得多;在不同电阻率的土壤交界地带易受雷击。雷击经常发生在有金属矿藏的地区、河岸、地下水出口处、山坡与水面(或水田)接壤地区。这是由于在雷电先导的放电过程中,土壤中的先导电流沿着电阻率较小的路径流通;而电阻率较大的岩土表面只是被带电荷的雷云感应积聚了大量与雷云相对应的异性电荷。

由于电阻率小的土壤导电性好,所以,易于为雷电流提供低阻抗通路,如大型盐场、河床、池沼、苇塘等,坐落于这些地区的建筑物易遭受雷击。土壤电阻率有突变的地点,如岩石与土壤的交界处、山坡与稻田的交界处,雷击多落于土壤或稻田处。地下埋有金属导电矿床(如金属矿)处和金属管线较密集处更易落雷。

2. 与地面上的设施情况有关

凡是有利于雷云与大地建立良好放电通道的设施更易受雷击,这是影响雷击选择性的因素。在旷野中,即使建筑物并不是很高,但由于它比较孤立、突出,因此,建筑物

也比较容易遭受雷击。

从烟囱冒出的热气柱和烟气有时含有导电粒子和游离气团，它们比一般空气易于导电，就等于加高了烟囱的高度，这也是烟囱易于遭受雷击的原因之一。

建筑物的结构、内部设备情况对雷电发展也有关系：金属结构的建筑物、内部有大量金属物体的厂房或内部经常潮湿的房屋具有良好的导电性能，因此比较容易遭受雷击；此外，大树、枯老的树木、输电线、高架电线及其他高架金属管道等也容易遭受雷击。

3. 地形和地物条件

从地形来看，凡是有利于雷云形成和相遇条件的地形更易遭受雷击。我国大部分地区山地的东坡、南坡较北坡、西北坡更易受雷击，山中的平地较峡谷更易受雷击。从建筑物所处地理位置来看，建筑物群中的高耸建筑物和空旷地区的孤立建筑物较易引雷。对靠山和临水的地区，临水一面的低洼潮湿地点和山口或风口的特殊地形构成的雷暴走廊地带易受雷击。

从地物看，铁路集中的枢纽和终端、高压输电线架空线路转角处由于容易产生大量感应电荷，从而易遭雷击。

4. 建筑物结构及其所附属构件条件

建筑物结构材料所能积蓄电荷量的多少直接影响建筑物接闪的频率。当建筑物结构中，如墙、板、梁、柱、基础内的钢筋较多时，容易积累大量电荷。另外，金属屋顶、金属构架、电梯间和水箱等也是积蓄大量电荷的部位。此外，附属在建筑物上的突出物，如电视天线、旗杆、屋顶金属柱杆等都容易接闪。建筑物上部排气的烟道、透气管、天窗和工厂排出导电性法埃的烟囱及废气管等也容易接闪。建筑物内部安装的大型金属设备和通入建筑物内的架空和地下金属管线等都可以积蓄大量电荷。

雷灾事故的历史资料统计和研究证明，雷击部位是有一定规律的。容易遭受雷击的部位如下。①平屋面和坡度 $\leq \frac{1}{10}$ 的屋面：檐角、女儿墙和屋檐；②坡屋度 $> \frac{1}{10}$ 且 $< \frac{1}{2}$ 的屋面：屋角、屋脊、檐角和屋檐；③坡度 $> \frac{1}{2}$ 的屋面：屋角、屋脊和檐角；④建（构）筑物屋面突出部位，如烟囱、管道、广告牌等。

1.5 雷电的危害

对于云与云之间的放电，其破坏作用主要体现在对飞行物和无线通信的影响，对地面的建筑物和人畜的安全基本没有影响。而云对地放电（包括对地面建筑物）对人类的影响是巨大的，其破坏作用主要是雷电流引起的，它的危害基本可划分为如图 1-10 所示的类型。

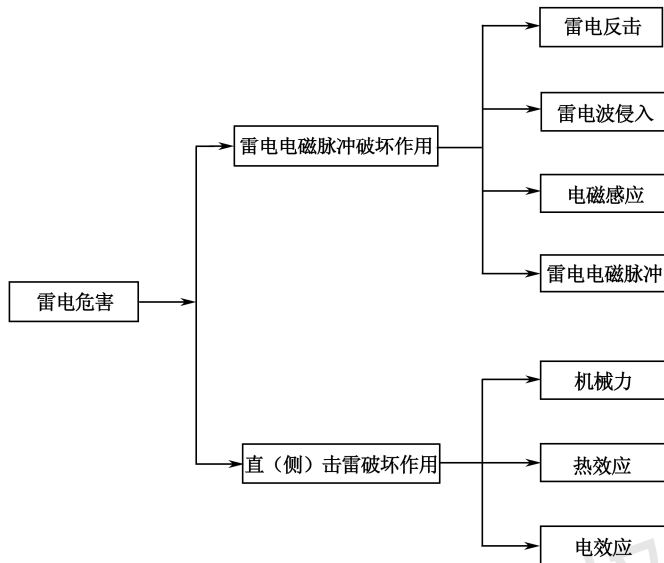


图 1-10 雷电危害的基本类型

1.5.1 直击雷的破坏作用

1. 热效应作用

雷电热效应的破坏作用是由于雷电流很大，通过时间又短，所以，被雷击的物体将产生大量热量。尽管时间很短，但通道的温度可高达 $6000\sim 10000^{\circ}\text{C}$ ，甚至更高。强大的雷电流通过被雷击的物体时会产生很高的温度而发生熔化、汽化或燃烧现象，可以使体积较小的金属熔化。许多新技术设备受损，特别是微电子技术产品，如大规模和超大规模集成电路接口和模块的损坏，是闪电电流的热效应所致。

2. 机械效应作用

闪电击中地面物，闪电电流产生焦耳—楞次热效应，被击物缝隙中的气体在雷电流作用下剧烈膨胀、水分急剧蒸发而引起被击物爆裂。

3. 电动力效应作用

由物理学可知，在载流导体周围空间存在磁场，在磁场中的载流导体会受到电磁力的作用。导体受到的电磁作用力称为电动力。这种电动力作用时间极短，远小于导体的机械振动周期，根据安培定律推理可知，凡拐弯的导体或金属构件，在拐弯部分将受到电动力作用，它们之间的夹角越小，受到的电动力越大。导体在它的作用下常出现炸裂、劈开的现象。

1.5.2 雷电电磁脉冲的破坏作用

1. 雷电反击

当防雷装置接受雷击时,雷电流沿着接闪器、引下线和接地体流入大地,并且在它们上面产生很高的电位。如果防雷装置与建筑物内外电器设备、电线或其他金属管线的绝缘距离不够,它们之间就会产生放电现象,这种情况称为“反击”。反击的发生,可能引起电气设备绝缘被破坏、金属管道被烧穿,甚至会引起火灾、爆炸及人身伤亡事故。

地电位反击是指防雷地网与电子设备的地网(如直流工作地、交流工作地、安全保护地)不共网时,在雷击发生时,雷电流在不同地网上产生的电位差可达数百千伏瞬时冲击电压,使电子设备的内外电位差可达几十至几百千伏,从而损坏这些设备。

为了防止雷电反击的发生,应使防雷装置与建筑物金属体间隔一定距离,使它们之间间隙的闪击电压大于反击电压。在条件限制而无法达到间隔尺寸时,应把防雷装置金属体和建筑物金属体用金属导线连接起来,使它们成为等电位体而避免发生闪击。

2. 雷电波侵入

雷电波侵入是指直接雷击或雷电感应能量从金属管道和电力线、通信电缆、无线天线等金属引入线引入建筑物内发生闪击而造成的雷击事故。高电位沿导线输入是用电设备被雷击的主要原因。高电位引入造成的雷击事故占雷击事故的大多数,所以,凡是有金属引入线装置的地方,都必须对高电位输入加以防备。

3. 电磁感应

由于雷电流有极大峰值和陡度,在它周围的空间出现瞬变电磁场,处于这个瞬变电磁场之中的导体会感应出电动势。假如一个 $5\text{m}\times 5\text{m}$ 的开口金属框,在雷电流峰值为 100kA 时,距离雷击点 200m 处也可以感应到 1kV 左右的电压。微电子设备内一个很小的开口金属环,在紧急避雷针引下线处放置,当雷电流通过引下线入地时,在小金属环开口处可感应出高达数千伏的高电压,足以破坏附近的电子器件。所以,在机房内布置设备时,设备应远离建筑物外墙主筋和引下线放置。装有电子设备的金属柜体、通信设备机架、铝保金门窗、防静电地板、吊顶金属龙骨等应接地良好。

4. 雷电电磁脉冲(LEMP)

雷电电磁脉冲在三维空间对一切电子设备发生作用,无论是先导通道或回击通道中闪击产生的瞬变电磁场,还是闪电进入地上建筑物防雷装置后所产生的瞬变电磁场,都会在一定空间范围内产生电磁作用,它可以是脉冲电磁感应,也可以是脉冲电磁辐射。这种雷电电磁脉冲既可以在闭合的金属回路产生感应电流,也可以在不闭合的导体回路产生感应电动势,由于其瞬变时间极短,所以,感应电压可以很高,导致发生空气电离以致产生电火花。

国外曾做过试验,磁脉冲感应强度达 0.03 高斯,计算机会出现误操作;磁脉冲感应强度达 0.75 高斯,计算机器件会出现假性损坏;磁脉冲感应强度达 2.4 高斯,计算机器件

会出现真正损坏。LEMP 传输途径有两类：一类是空间传输的辐射干扰，另一类是通过各种管道和导体的传导干扰。

1.5.3 雷电危害的新变化

1. 受灾面扩大

雷电危害从电力、建筑这两个传统领域扩展到几乎所有领域，尤其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，雷电的受灾行业面扩大了。

2. 从三维空间入侵

从直接雷击和过电压波沿线传输变为脉冲电磁场从三维空间入侵到建筑物的任何角落，造成雷电灾害，因而防雷工程已从防直击雷、雷电感应扩展到防雷电电磁脉冲的影响，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增加

雷击对象本身的直接经济损失有时并不太大，但由此产生的间接经济损失和影响却难以估计。雷灾的主要对象已集中在微电子器件设备上，科学技术的发展使得人类社会的生产状况和生活方式发生了改变。