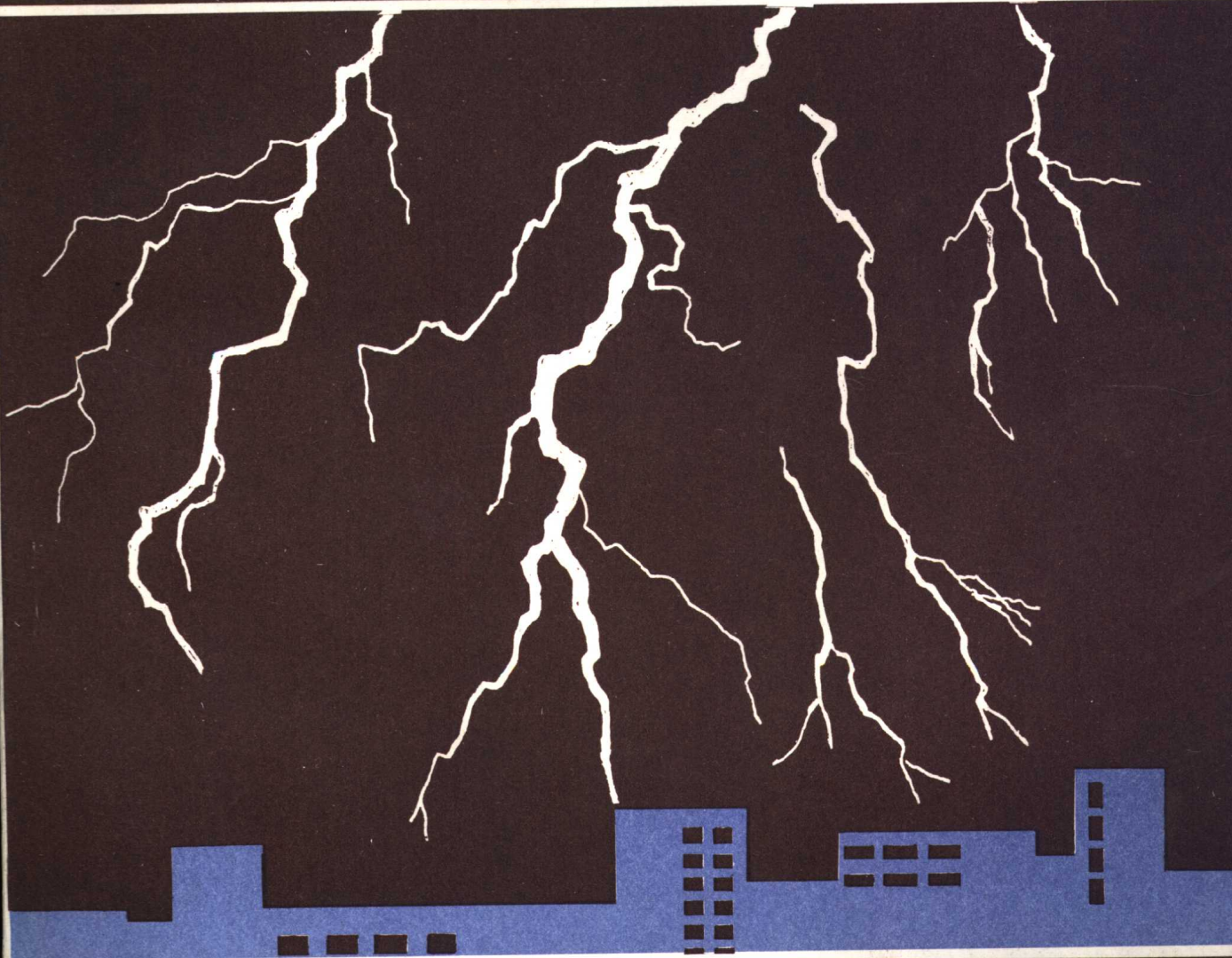


TU8/58-2

现代防雷技术基础

虞昊 臧庚媛 赵大铜 编著

气象出版社



现代防雷技术基础

虞昊 臧庚媛 赵大铜 编著

气象出版社

(京)新登字 046 号

内 容 简 介

雷电造成自然灾害的范围随社会经济的发展而日益扩大,特别是雷电电磁脉冲对各行各业广泛使用的微电子设备的破坏,使其可能影响到社会经济生活的各个方面。本书从雷电及雷电电磁脉冲防护科学技术的客观事实出发,科学地分析了其物理过程及防护原理,介绍了国际公认的防雷区域划分方法;对防雷系统的设计、实施、检测维护的基本知识和技术以及发展方向按照国内外正在形成共识的防雷系统工程的观点作了全面、系统、深入浅出的论述,内容包括建筑防雷、雷电电磁脉冲防护、接地工程、综合防雷系统设计、防雷装置安全检测、雷电探测、预警及防护产品的判识与选用等方面。此外,还介绍了最新的国际防雷技术标准(IEC-1024-1,1993)、国家标准《建筑物防雷设计规范》(GB50057-94)等有关技术规定并在每章之后列出了供读者详细查阅的参考文献目录。

本书可供从事各种防雷系统设计、检测、从事建筑电气设计、消防安全系统设计以及各行各业从事计算机网络、通信系统设计和维护的广大工程技术人员、管理人员阅读参考。清华大学音像出版社出版的《雷电及其防护》、《雷电电磁脉冲及其防护》、《避雷装置安全检测》等录像片可与本书配套使用,解说词也已收录在本书附录中。

现代防雷技术基础

虞 昊 臧庚媛 赵大铜 编著

责任编辑 潘根娣 终审 周诗健

封面设计 严 晨 责任技编 潘根娣 责任校对 赵大铜

气象出版社出版发行

(北京西郊白石桥路 46 号 100081)

北京海淀区清华园印刷厂印刷

开本: 787×1092 1/16 印张: 11.625 字数: 298 千

1995 年 9 月第一版 1995 年 9 月第一次印刷

印数: 1—3000 定价: 15.00 元

ISBN 7-5029-2046-3/P. 0768

第一章 绪 论

地球上的自然变异无时无刻不在发生,当这种变异给人类社会带来危害时,即构成自然灾害。自然灾害是人类过去、现在、将来所面对的最严峻的挑战之一。

雷电(Lightning)是一种大气自然现象,对人类社会而言,雷电有时也会造成自然灾害。人与自然总体上是协调发展的,这是社会进步的前提,雷电灾害的范围和表现形式在这一发展过程中也在发生变化,与此同时,雷电防护(Lightning Protection)科学技术也在人类认识自然、抵御自然灾害的过程中不断发展。

全球任何时刻大约有 2000 个地点遇上雷暴,平均每天约发生 800 万次闪电,每次闪电在微秒级的瞬间释放出约 $55\text{kW}\cdot\text{h}$ 的能量。我们生存的环境既被动地接受自然灾害的侵袭,又能动地为灾害的形成和发展提供条件。从久远的过去开始,雷电就对人类、人类赖以生存的自然资源和人类创造的物质文明构成巨大的威胁,例如,森林火灾有 50% 以上因雷电引发;人们居住生活的建筑物屡遭雷击破坏;电力、石化等工业设施常因雷击而发生灾难性事故。不难看出,雷电灾害的范围随社会经济发展而扩大,其表现形式随其范围扩大而复杂。

21 世纪的曙光已经临近,信息、生物、海洋、航天、能源、材料高技术的崛起将促进社会生产力的迅速发展。科技发展的各个领域具有很强的渗透力和扩散性,就雷电灾害和雷电防护科学技术而言,新世纪高科技的发展向我们预示着什么? 首先,作为高科技发展先导的信息技术的基础,微电子技术具有很高的态势和巨大的影响;其次,雷电或更确切地说伴随雷电产生的雷电电磁脉冲(Lightning Electromagnetic Pulse)对微电子设备潜伏着严重的不安全性,这是因为微电子设备只耐低压,对电磁脉冲特别敏感;因此,当现代社会越来越依赖通信、电子计算机等微电子设备时,雷电通过其对硅片上的奇迹——微电子设备的破坏作用影响到高技术的应用,其灾害影响可能波及到千家万户、社会经济生活各个方面。直击雷的声、光、电现象同时发生,击毁其放电通道上的建筑物、生命财产,容易理解也已有较可靠的防护技术和产品;雷电电磁脉冲以感应作用和过电压波等形式形成危害的成灾率更高、损失更大,往往悄然发生,是九十年代雷电灾害最显著的特征也是防护科学技术需要解决的最重要的课题之一。以中国气象部门为例,1992 年 6 月 22 日国家气象中心大型计算机网络、通信系统遭雷击,造成硬件损坏、通信中断;六个区域气象中心之中的广州区域中心计算机网络 1993 年 5 月遭雷击三次,1994 年 5 月 10 日又遭雷击,VAX6200 中断 38 小时;1994 年 7 月 5 日和 7 月 17 日成都区域中心计算机网络两次遭雷击,VAX4400 和 CD4680 机组成的网络瘫痪,只得启用备用系统,直接经济损失巨大。

因此,提高雷电防护科技水平势在必行。

防止雷击灾害,首先要分析雷电、雷电电磁脉冲的物理过程,认识其成灾规律,从而选用适当的防护器件、装置设计实施合理的雷电防护系统(Lightning Protection System)。

雷电防护系统的基本功能是保护生命和财产免遭雷电灾害或减小这种灾害的程度。经过二百多年的摸索和实践,人们得出这样一个基本结论:实现 LPS 的基本途径是提供

一个使雷电(包括雷电电磁脉冲)对地泄放的合理路径而不是任其随机地选择放电通道。其涵义是控制雷击能量的泄放或转换。

按照防雷区域(Lightning Environment Zone)的划分,LPS可分为外部(External)和内部(Internal)两部分。一般而言,建筑物防(直击)雷可归为ELPS,而LEMP的防护可归为ILPS。通常ELPS和ILPS并非相互独立的,就建筑物所处的空间、地理环境和其内部各种电气电子及机械设备不同而言,所需要的LPS往往很不相同,建筑物防雷设计应当为LEMP防护提供基础条件是应遵循的一条基本原则。实际操作往往是困难的,这里不仅仅是运用系统工程方法的问题,还存在科学管理和部门之间通力合作的问题。本书以下各章仅从技术方面讨论LPS。

建筑防雷装置包括接闪器、引下线和接地装置三部分,另外,建筑电气设计中的进出线保护也是重要的一部分。防雷系统的设计应根据建筑物的性质、结构和用途综合考虑闪、分流、均压、屏蔽、接地和布线等因素,并适当考虑经济、美观因素。避雷针(带、网)是常用的建筑防雷措施,现代高层建筑多采用暗装笼式防雷网,作为一般的建筑物防雷是足够了且符合经济、美观的原则。需要强调指出的是,一般建筑物没有严格的屏蔽要求,做屏蔽的目的是电子设备对LEMP防护的需要,屏蔽的有效性还取决于电源线、天馈线、信号线接口的防护措施,需要专门设计和施工。

LEMP防护是一项正在发展中的新技术,是本书将要讨论的重要内容之一。广义而言,微电子设备对LEMP干扰的防护与电磁兼容问题密切相关,因电磁干扰引起微电子设备误动作的问题十分复杂,本书主要讨论过电压波的防护问题;此外,业务大楼内的通信、计算机等设备遭直击雷的概率很小,在讨论LEMP引起过电压波的问题时一般也不考虑直击雷的因素。我们讨论的重点是与外线连接的含有固态元件的微电子设备的防护。因为连接了外线,LEMP才会进入设备内部或雷电经接地装置入地时引起地电位升高而反击设备。保护设计首先要弄清楚LEMP可能进入的路径,如天馈线路,网络信号线路、电源线路及接地线路等;其次要合理布线,采取屏蔽、阻断等措施。在电子系统建设时同步考虑LPS的建设是应遵循的一条基本原则,然而实际情况往往是系统投入运行又遭到雷击后才想到LPS,这不仅仅是科学管理和运用系统工程方法的问题,也是LPS设计技术上的需要,因为在系统建成之后重新改装、设计,不仅人力、物力浪费惊人,而且LPS的效果往往不满意。

接地是LPS中极为重要而又复杂的问题。接地装置的优劣不仅与接地电阻值(土壤电阻率)有关,还与接地方式有关;此外,还必须正确处理各种接地的关系,微电子系统的接地还需要考虑到防电磁干扰问题。接地装置应按接地目的而不是按接地电阻值设计是一条基本原则,系统正常工作是经常性需求而安全保护则是应付突发偶然事件的,二者需合理兼顾。实际工作中由于建筑物内的各种电子系统不可能是同期设计安装,因此,认真调查、分析接地现状十分重要。没有完善的接地,LPS就会变成“空中楼阁”。顺便指出,实际工作中LPS安全检测往往只测接地电阻值就下结论是很不科学的,仅就接地部分而言,了解各种接地关系是如何处理的、接地方式的设计都是十分必要的。

显然,一个设计合理的LPS能否发挥功效取决于防雷器件、装置的性能,识别其真伪并评估其性能价格比是非常重要的环节。在此特别强调指出,雷电的过程响应时间极短,

通常的过压保护器件因其响应时间滞后往往起不到保护作用;此外,就当今的技术水平和雷电防护对象的复杂程度而言尚无包罗万象的某一种产品就能解决一切问题,对此类包打天下的广告宣传,无需技术分析就可以推断其真伪。

本章多次提到系统工程一词,事实上,防雷工程的设计离不开系统工程的方法,或者说,我们以下各章将要讨论的内容是防雷系统工程的基本知识和技术。按此观点,我们把雷电探测、预警也作为本书内容之一。有些设施,如火箭、飞机在运动中难以安装完善的防雷装置,有些工作,如油罐注油不应在雷电活动时作业,通过雷电探测和预警,可以“惹不起就躲”。

中国幅员辽阔,地质地理条件复杂、雷电灾害横贯东西、纵布南北,但只要依靠科学技术,增强防灾减灾意识,雷电灾害不是不可抗拒的。

参 考 文 献

1. 国际防雷技术标准(IEC 1024-1-1,1993)。
2. 国标《建筑物防雷设计规范》(GB50057-94)。
3. “建筑物防雷及其运行经验”王时煦等,建筑电气,3期,1994年。
4. 国标《电子设备雷击保护导则》(GB7450-87)。
5. 王德言,避雷技术与避雷工程,四川中光防雷公司资料。
6. 罗学勤,通信设备的防雷技术,通信系统防雷技术文集。
7. 王健生,高楼中计算机的防雷及抗干扰,雷电与静电,1期,1989年。
8. 虞昊,臧庚媛等,现代科技设备防雷的物理基础,全国气象部门防雷工程技术交流会技术报告。
9. 美国《国家防火协会防雷法规》(NFPA78-1983)。

第二章 避雷和消雷的探索历史

第1节 对闪电的科学认识过程

人类最初是把闪电与鬼神相联系的；我国东汉哲学家王充(27—约97)可说是世界上最早用文字反对闪电神鬼说的唯物主义学者，但是他的认识仅是一种唯物主义的猜想，与科学认识尚有距离，后来北宋的沈括(1031~1095)、明代的方以智(1611~1691)等对闪电的认识基本上与王充相似，一千多年内，认识没有发展，这与整个科学的发展状况是相关的。

只有在电学有了一定的发展之后，方有了对闪电科学认识的条件。第一个把实验室中的电与自然界的闪电发生联想的人是曾任英国伦敦皇家学会馆长的 Francis Hauksbee，1706年他用玻璃棒摩擦带电，研究它的发光，看到静电放电产生的闪光与闪电相似，而发生了联想。这种猜测已接触到闪电的物理本质，可以认为是对闪电进入了科学认识之门，但这仍不能认为是对闪电有了科学认识，因为它尚没有建立在科学实验的论证上。第一个达到这一步的是美国杰出的科学家富兰克林(Benjamin Franklin 1706~1790)，他先是在实验室内进行一系列电学实验，论证了实验室内静电放电现象与天空闪电的种种类似性，以科学的理性思维探索闪电的本质。这一步工作是很有价值的，同一时代许多电学研究者也大量地进行类似的科学实验工作，其水平与富兰克林相差不多。可是富兰克林之卓越贡献和成就在于他又迈了决定性的一步，那就是把云中的闪电引到地面上来作实验检定，从科学实验上证明了自己的理性判断。他所设计的“岗亭”实验和著名的风筝实验，使许多科学家可以重复他的科学实验，一起来认识这个科学的判断：闪电就是静电产生的火花放电。

这一事实很值得重视，近百余年来中国科学之所以落后了，重要原因之一，就是我国学者的格物致知，缺乏科学思维的基本方法，即没有重视运用实验手段去变革物质世界，从中得出一些结果与主观的思维相统一。

第2节 避雷针的发明及其启示

在欧洲中世纪也有相当多的人把雷电当作神的意志，认为只能靠祈祷或者敲响教堂里的钟，才能避免闪电的袭击。1784年慕尼黑出版的一本书统计：33年内有386个教堂的尖顶遭雷击，共有103个教堂的司钟员在钟楼内敲钟时死于雷击。意大利威尼斯城的圣马可钟楼(Campanile of San Marco)从1388~1762年9次被毁于雷击。1718年4月14日 Brittany 城一夜之间24个教堂遭雷击，其中一个被彻底毁了，2名司钟员毙命。

在1750年5月《绅士杂志(Gentleman's Magazine)》的脚注中富兰克林已指出，用尖端导体来保护房屋。1751年富兰克林出版了著作《电的实验与观察》，指出：“关于尖端的

功能的知识,可以为人们利用来保护房屋、教堂、船等避免闪电袭击,其方法是在这些物体的最高顶上固定一支更高的镀金的磨尖铁棒,在其下端接一导线挂在建筑物外通到地下,对于船则是通到水中。”这书出版后,在欧洲大陆迅速流传,产生很大影响,不少人照他的见解进行实验。1752年9月他在自己家里装了一个特殊设计的避雷针,引下线从房内穿过,在房内这段线的中间断开,断头处各装上一个金属小铃,铃间相距6英寸(约15cm),在其间有一个用丝线挂起的钢球,雷雨云过屋顶时,感应的电荷可以通过铃与钢球间放电而形成通路,铃声显示出这种感应电流的情况。他长期观察这一装置,以了解云中的闪电和避雷针的性能,他在1753年出版的《Poor Richard's Almanack》一书中正式宣布了避雷针的发明,并作了详细的描述。

但是这个新事物在推广中仍免不了神学的阻碍,有人认为在教堂尖顶上装铁棒是亵渎上帝,不想装避雷针,而且把上百吨的军用炸药贮存在有拱顶的教堂大厅里,以求得上帝的保护,认为这是最安全的。1767年闪电击中了威尼斯一个贮放了几百吨炸药的教堂的拱顶,引起大爆炸,3000人丧生,威尼斯城大半被毁。1856年Rhodes岛一个教堂发生类似灾祸,4000人丧生。

还有另一种情况,由于科学上的错误认识而拒绝避雷针的,如东印度公司的理事会认为避雷针有产生高电位的危险,下令苏门答腊岛的上Malaga要塞拆去避雷针,1782年闪电点燃了要塞贮放的400桶炸药,造成巨灾。

但是更多的人欢迎并积极推广富兰克林发明的避雷针,取得了好效果。在德国汉堡,物理学家Johann Remarus首先给St. Jacobi教堂的尖塔顶上装了避雷针。意大利Giovanni Battista Torre于1752年6月23日率先在佛罗伦萨推广避雷针。

避雷针的发明,无论在哲学上、科学上还是在人类的经济生活上,都是一件重大的事,发明者不是在欧洲盛行电学研究的地方,而是在工业刚刚起步、电学刚刚传入的美洲,为一个刚刚涉足电学的印刷商人富兰克林所发明,这是颇值得后人深思的,这里有必然性的规律。前面已指出,在欧洲教会神学的思想控制较严,而美洲则正是美国独立运动兴起、摆脱英国统治之时。进步的思潮,使得哲学上拥护自然神论,承认自然界的存在及其规律性;在科学方法论上又吸取了欧洲文艺复兴后兴起的好传统,重视用实验手段去探索真理,富兰克林处在这种较好的社会环境中,又有他本人的好品质。他40岁时已是富有的印刷商,但出身清贫,与历史上另一位杰出人物法拉第相似,是在实践上奋斗成长的,在实验上有非凡的敏锐与执著,善于把理论思维和科学实践很好地结合起来。他又是一位热心公众事业的进步活动家,参加美国独立宣言的起草,创办美国第一个公共图书馆,晚年开始电学研究又是出于对人类的安全利益的考虑。40岁时才从欧洲大陆到美国来作摩擦起电演示的Spence那里了解到电学,并在这一年(1746)用Collinson从伦敦寄来的摩擦起电实验仪,开始了科学生涯。由于其目的性明确,不几年就赶上并超过当时的欧洲,在电学上做出许多学术上的成就,在深入了解了闪电的规律之后发明了避雷针。开始制作避雷针时,他是从研究尖端放电的认识出发,认为避雷针之所以能保护建筑物,是由于尖端放电产生的电荷可以中和云中的电荷。经过不断的实践和观察,他勇于修改自己的学说,1774年他很谨慎地指出:避雷针有双重作用,或者由于尖端放电而避免发生闪电,或者它把闪电导入地下,因此建筑物总是可以避免闪电的灾害。避雷针的英文原名是Lightning rod,或者叫

Lightning conductor,直译的话应为“闪电导体”,这里没有“避雷”这个意思。

近年国内有些文章提出:原来避雷针是引雷的,它只会造成灾祸,一般说来,富兰克林的避雷针应予废除。这种看法未免是种误解。富兰克林早在1774年已认识到并指明避雷针是引雷的,要做好引雷入地,从而保护建筑物,二百多年来全世界千百万建筑物的防雷实践证明富兰克林的避雷针确实起了防雷保护建筑的作用。

第3节 大气电学的发展

从上面说到的历史,已可看出,在发明避雷针的时候,人们已在想消灭雷电了。几乎在富兰克林发明避雷针的同时,1754年捷克科学家 Prokop Divisch 鉴于俄罗斯物理学家 Richmann 在研究雷电时死于雷击,他设计了一种“气象机器”,企图消灭雷电。近年还见到一本教科书竟称他是第一个发明避雷针的人,这是把历史事实弄混了,应该说,他倒是近年外国市场上曾流行一时的“消雷器”发明者的鼻祖,可是这位科学家的发明在实践上证明是失败了,不久就被人遗忘了,包括他的“气象机器”,其后二百多年里,防雷技术几乎进展不大,这是大气电科学的研究和理论认识的进展不大的必然结果。对自然界雷电的客观规律尚认识不清,而企图消灭雷电,那是不可能的。

富兰克林对闪电的认识只解决了定性问题,要跨入定量的认识,必须解决实验仪器和方法,整整一百多年,没有什么明显的进展。英国开尔文男爵(Lord Kelvin 即 William Thomson 1824~1907)是第一位对大气电学作出了重要贡献的学者,开创了定量研究闪电物理的工作,他对实验研究和理论探索都作出了关键性的贡献。他建议用气球携带仪器测量高空不同高度的电场,要考虑大气的导电性,要研究雨的起电机理,要用照相记录作为研究的一种方法。

20世纪20~30年代,大气电学开始有了长足的进展,几乎都是沿着开尔文提出的这些研究方向发展起来的。1903年 Walter 终于用移动照相法实现了开尔文的设想。1926年 Boys 设计出改进的拍闪电的照相机。Schonland 和 Collens 于1934年在南非首先拍得一批闪电照片,显示出闪电全过程及其特征,一直被人们奉为经典实验证据,沿用至今,这是一个重大突破,人们认识到闪电是由梯式先导开始的,闪电全过程包括有多次闪击放电。

1904年 Linke 首先用气球携带开尔文发明的滴水器作高空大气电场的探测。Simpson 于1937年和他的合作者用气球携带他研制的高空电流计取得空中大气电学量的连续记录,开始了雷暴内部电场的探测,并初步测知雷雨云中的电荷分布结构。Wilson 则利用他设计的毛细管静电计测量闪电时电场的垂直变化(1916、1920),由此推算出云中的电量和电荷分布。这两种重要方法沿用至今,使我们对雷雨云的电荷分布有了比较清晰的理解。

二次大战期间发展起来的无线电遥测技术、飞机的改进,为大气电场的探测创造了条件,用飞机穿入雷雨云中和利用地面无线电遥测,使人们对雷雨云的电结构、闪电发展的物理过程和雷电的起电机制的认识都大大进了一步,这才为人工控制雷电过程甚至消灭雷电创造了科学的基础。

第4节 防雷工程技术的发展

富兰克林发明避雷针之后,这一防雷工程技术延续了百余年毫无发展,不仅是由于人类对雷电的认识停滞不前,而且还由于实际需要没有变化,避雷针还未显出其局限性。

1876年贝尔发明电话,由于适应了社会的需要,发展极快,1880年仅美国就有了48,000台,架空的长导线出现了,它成为闪电袭击的新对象,为了防护电话通讯设备和人的安全,于是出现了第二种避雷装置——导电器,它实际上是一个火花隙,接在电话入户线路与大地之间,架空长导线上落雷产生的高电压,到达此处把火花隙击穿短路可从而泄流入地,不致进入户内伤害电话设备和人。这种新事物就是最原始的避雷器。

1887年伦敦筹资百万英镑建立供电公司,标志着电力供应由分散的一家一户发电转变为由中心电站集中供电的开始,输电网迅速扩展,高电压输电网的过电压保护和防雷就成为电力系统的极为重要的项目,于是19世纪90年代就有E. Tomson发明的磁吹间隙,以它保护直流电力设备,这可说是磁吹避雷器的前身。1901年德国制成串联线性电阻限流的角形间隙,可以说是阀型避雷器的前身。此后由于电力工业的大发展,电力系统成为建筑行业之后防雷需求最为迫切的部门,对雷电的研究,主要在这一行业进行。这里有两个重要原因:第一、电力系统需要研究过电压保护和高压绝缘问题,这与防雷的研究,在物理上是相似的,第二、为了研究的需要必须建立高电压实验室,因此为人工模拟雷电的实验研究提供了物质条件。所以20世纪中,电力系统高压实验室的研究为防雷作出了很重要贡献,今天我们关于雷电的认识,很多来源于这些研究结果。

富兰克林的年代只注意到直接雷击。那时雷电对建筑物的危害也只能是直击雷。20世纪电力工程才注意到感应雷的危害,德国W. Peterson于1914年提出用接地避雷线防雷的理论,后来美国F. W. Peek, W. W. Lewis也认为威胁线路绝缘的不仅是直击雷,还有感应雷。30年代末期大家已取得共识,100kV以上线路避雷线是防直击雷的基本保护装置。1925~1926年Peek第一个用“人工雷”研究避雷针的保护范围、雷云极性对保护系统的影响。1934年美国瓦斯和电力公司(AGE)开始用避雷针和避雷线保护变电所,由于避雷线的应用有效,在建筑物上出现了避雷带,50年代后又发展出笼式避雷网。

架空电线上直击雷和感应雷产生的过电压波沿线侵入建筑物内造成设备损坏、破坏房屋和人身伤亡等现象这是富兰克林年代所不可能见到的。这是科技发展带来的新的雷灾,当然富兰克林的避雷针无法对付它,需要一种完全不同的思路来防止这种雷灾,那就是在过电压波入建筑物之前把它导入地,为此而设计出来的避雷装置就是避雷器。1907年美国出现一种铝电解避雷器。1908年瑞士Moscicki提出用高压电容器把雷电流分流入地。1922年美国开始采用非游离气体以遮断续流的管型避雷器。50年代初,磁吹阀型避雷器问世。1968年日本松下电气公司研制出新一代的无间隙避雷器,它是一种金属氧化物非线性电阻。

70年代航天飞行器兴起,工程防雷出现新形势,1961年秋,意大利发生了“丘辟特”导弹武器的一系列雷击事故,引起军事部门的关注。1969年11月“土星V—阿波罗12”载人飞船起飞后激发闪电的雷击事故,更促进了世界许多国家注意并开始对航天系统和火箭

发射场的防雷研究。在此之前几乎大家都从未想到这个问题,只要看一看美国肯尼迪航天中心,日本的种子岛航天中心、中国的西昌火箭发射中心都座落在每个国家的特别多雷地区,就可知道了。1987年3月26日美国国家航天局(NASA)的大力神/半人马座火箭升空不久就失控,因为它离地面太近,不得不下指令爆炸掉这颗火箭及其携带的卫星,损失超过1亿,事后从碎片中调查,发现失控的起因是雷击穿了火箭。阿波罗系列登月火箭共遭到7次雷击。美国不得不集中一批国家重要部门和若干大学来联合研究尖端技术——航天系统的防雷工程,如NASA、联邦航空局(FAA)、肯尼迪航天中心(KSC)、美国空军、国家海洋大气管理局(NOAA)Langley研究中心,新墨西哥工业大学等,KSC自然成为实验研究防雷的最重要基地,Langley研究中心的科学家们用特制飞机携带专用仪器穿入雷暴云中探测,八年里被闪电击中700多次,从而取得大量宝贵的测量数据。

KSC还使用了尾部拖带金属丝的小火箭升空以引发闪电,这种以人工引雷进行研究的方法比高压实验室里的模拟雷电实验要好得多,类似于富兰克林的研究方法。中国科学院兰州高原大气物理所和中国人民解放军第二炮兵也进行过这种火箭引雷的研究,取得成功。经过十多年大规模的雷电研究,已开始掌握了有关尖端技术领域的防雷技术。

80年代以后,雷灾出现的特点,与以往有极大的不同,可以概括为:(1)受灾面大大扩展,从电力、建筑这两个传统领域扩到几乎所有行业部门,特别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、化工石油等等。(2)从二维空间入侵变为三维入侵。从闪电直击,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,因而防雷工程已从防直击雷、感应雷进入防雷电电磁脉冲(LEMP),前面是指雷电的受灾行业面扩大了,这儿是指雷电灾害的空间范围扩大了,例如1994年5月23日北京的一场雷雨,仅天安门附近就有四个重要部门同时受到雷灾而不是以往的一次闪电只一个建筑物受灾。(3)雷灾的经济损失和危害程度大大增加了,它袭击的对象本身的直接经济损失并不太大,而由此产生的间接经济损失和影响就难以估计,例如前面提到的闪电击穿火箭的部分外壳,仅一个很小的孔,使内部个别电子元件损坏,可是1.5亿美元的火箭及卫星则因此全部毁了。又如1994年湖南一家银行的微机因雷灾而毁坏,这些微机本身的价值不过几万元,但是由此产生的银行业务停止所导致的损失却超过几百万元。1989年青岛市黄岛油库雷击起火,则造成19人死亡,79人受伤,直接经济损失超过6000万元。1992年6月22日中国国家气象中心大楼落雷,计算机系统停止工作对全国气象预报所造成的影响,很难用数字衡量。(4)产生上述种种特点的根本原因,也就是关键性的特点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。微电子技术的应用广泛渗透到各种生产和生活领域促进社会经济的发展,这是大好事。但是微电子器件极端灵敏、它的这一特点又容易受到无孔不入的LEMP的作用,或者造成微电子设备的失控,或者是损坏。

因此,当我们广泛采用新技术,采用新的数字通信系统,使用微机操作控制的时候,雷灾也就跟踪而至。所以当今时代的防雷工作的重要性、迫切性、复杂性大大增加了。我们必须站到历史时代的新高度来重新认识现代的防雷技术问题。

第5节 消雷的探索

美国70年代极为昂贵重要的航天设备遭到雷灾,这一新形势使他们对消雷发生了兴趣,于是美国的“闪电消除公司(LEA)”应运而生,推出“消散阵系统(DAS)”,得到航天部门的广泛试用,英国的 Francis 和 Lewis 股份有限公司则用“消雷器(LSI)”的名称大批量生产。1973年 Snyder 引人注意地声称他的数千个尖端组成的阵列已获得成功,可以消雷。

其实这种多针板形式的消雷器并非什么新发明,与二百多年前 Prokop Divisch 发明的“气象机器”非常相似,在它之后21年 Lichtenberg 于1775年建议在房顶上挂起成串的带刺金属线来防护房屋不受雷击。可以说,这种企图利用大量尖端金属放电以中和云中电荷的想法,周期性地时起时落在历史上出现,但是都因失败而消声匿迹。而只有富兰克林的避雷针始终经受考验,被广泛沿用至今。究其原因,这些消雷器都消不了雷,而只起到引雷作用,与避雷针没有根本区别,可是它的构造复杂,价格较贵,市场经济的规律必然使它消亡。

雷电是一种概率性的现象,建筑受到雷击的概率较小,装上消雷器,几年之内,是看不出其实际效果的,国外航天部门组织过较长时间的观测与实验测定作出的结论是这些消雷器不能消雷。有些地方已累次出现挨雷击的事件至少说明消雷的效果是不确切的,航天部门在当初试用消雷器时期为防意外仍保持避雷针,配合避雷器以及其它各种行之有效的防雷措施。我国的火箭发射基地也类似国外试用过早期推出的某种消雷器,可是它不但未消雷,自身反倒挨雷击毁。

学习历史主要是为了吸取前人千百年的实践经验。人的生命有限,不能事事亲自实践之后作出抉择判断,何况雷电现象是概率性的自然现象,不经过很长的岁月,是不可能认识清楚的,所以必须尽可能吸取历史上的成功经验及失败教训,少走弯路。我国开始研究消雷器也是航天部门提出来,当时国外还对我国封锁,我们对世界上的科技进展所知甚少。改革开放以后我们渐渐得知外国的情况并派代表团到 KSC 考察,具体了解到这方面的情况,而我国火箭发射中心的实践也证明了国外同行得到的结论。

在科学史上,有不少失败了科研课题是有功的,他们为后来的科学发现奠定了功不可没的基础,“失败是成功之母”。最著名的例子就是热力学第一定律的建立,它是无数发明永动机的失败的总结。又如证明“以太”存在的实验,得出了否定的结论,可是它对相对论的建立却是有功的。所以,对于研究消雷器的工作应该用“一分为二”的观点去分析,从中吸取有益的东西,为以后的防雷技术作借鉴。

以往消雷器研究的失败,不等于消雷是不可能的。这只是说,以往的消雷器的原理不可能消除雷雨云中的电荷。如果根据雷电本身的规律,从而提出合理的方法,则消雷是可以做到的,近年,这方面的消雷研究已开始出现可喜的成果,学者们为这种研究起了一个学术名称,叫“人工影响大气过程”,有不少学者从失败中,不断总结,终于取得某些成功,开始引起重视,下面只简单举出几个方面:

(一)利用小火箭的人工引雷。这在火箭发射和野外重要作业上得到应用,把闪电引向

无害地点,消除上空的雷雨云的电荷,可以用来保证火箭的安全发射和野外施工。

(二)利用激光引雷,或者用激光在大气中建造电离通道,从而消除雷雨云中的电荷。日本关西电力公司和大阪大学等单位就已在二年前取得实验上的成功。

(三)在积雨中播撒冻结核抑制闪电,美国早在1965~1967年就作过大规模的对比试验,通过地面和飞机作业向积雨云大量播撒碘化银晶体,证明云中的闪电和云地闪次数显著减少。还影响到闪电的结构参数。

(四)播撒金属箔丝抑制闪电,美国于1965~1966年在亚利桑那州用飞机在云底下方大气电场大于 $3 \times 10^2 \text{V} \cdot \text{cm}^{-1}$ 的强电场区,均匀播撒大量金属箔丝,这些箔丝随上升气流进入云体,在几分钟内迅速在云中扩散开来,可看到云中出現电晕放电,10分钟后这一强电场区便消失了。关于它为什么可以消雷,请看第四章第6、8和11节就清楚了。

所以,随着科学技术的进一步发展,人工消雷是可以逐渐实现的。

参 考 文 献

1. R. H. Golde, *Physics of Lightning*, Academic Press Inc. Ltd, 1977.
2. 虞昊、臧庚媛、罗福山,电、静电、雷电防护,中国计量出版社,1993。
3. 周桂钿,天地奥秘的探索历程,中国社会科学出版社,1988。
4. 宋德生、李国栋,电磁学发展史,广西人民出版社,1987。
5. 陈毓芳、邹严肃,物理学史简明教程,北京师范大学出版社,1986。
6. M. A. Uman, *All About Lightning*, Dover Publications, Inc, 1986.
7. J. A. Chalmers, *Atmospheric Electricity*, Pergamon Press, 1957.
8. 孙景群,大气电学基础,气象出版社,1987。
9. 刘继,电气装置的过电压保护,电力工业出版社,1982。
10. Л. Г. Качурин,人工影响大气过程的物理基础,气象出版社,1994。
11. 郑健超,关于非常规的避雷方法,电力科学院(内部),1994。
12. 消雷,还是引雷,人民日报,1995年1月21日。

第三章 有关雷电的物理基础知识

第1节 事物的两种描述

自然界现象非常丰富多采,变化万千,不可捉摸,似乎神秘莫测。自从伽里略、牛顿等物理学家从力学现象开始,逐渐发展出系统的物理学以后,这个科学已成为中学、大学人人必学的课程,通过这门科学,人们感到自然界变得简单了,清楚了。许多自然现象不但可以理解,有规律可循,而且几乎都可以预测、预知。例如可以准确地预知何时发生日全蚀,何时会出现彗星,这种在古代视作灾难变异的天神意志的东西,竟可以极为准确无误地确知。迷信鬼神从此让位于科学,牛顿力学的巨大成功,以致著名科学家拉普拉斯宣称:只要给定“起始条件”,就可以把牛顿力学决定的微分方程解出来,预言太阳系的整个未来。近年来,由于计算机的应用和气象遥测的发展,气象的预报也达到令人满意的准确程度。所以学完物理的人大都产生一种信念:自然现象是可以用确定性方程描述的。我们用牛顿力学方程可以确定运动物体的轨道、速度等等。我们用气体状态方程可以确定大气的温度、压强的变化。我们用电学的一些定律可以确定电流的大小、接地的电阻、等等,总之,这都是对自然界的一种确定性的描述。

是不是所有自然现象都可以进行确定性描述呢?能确保万无一失吗?不!例如,水到 0°C 一定结冰,这是物理教科书告诉学生的确定性描述。的确,在我们日常生活中经常看到,它是没有例外的。可是在一定的条件下做实验,水的温度已低于 0°C 时,水仍为液态。称这种水为过冷水。在高空的云中,这种过冷水滴却是大量存在的。造成这种偏离确定性描述的定律的原因是:我们看到的宏观的物体的现象是大量分子的集体表现,它们集体的行踪不仅仅依赖于宏观的物理量温度,而且与微观的因素有关,要使自由运动的水分子组成固定结构形态,需要有初始的凝聚核心。

许多宏观物理现象都是大量微观粒子表现出来的集体行为,应该说这是大量粒子的统计平均的表现,当粒子数减少时,就会出现一些起伏变化的现象,当科学技术发展,测量仪器越来越灵敏、精确时,这种起伏变化就可以测量并显示出来。19世纪的物理学家在研究热学现象特别是气体分子的运动规律时,形成物理学的一个重要分支—统计物理学,运用数学中的概率统计来探讨大量气体分子的统计表现。所以,对自然界事物的描述又有了第二种描述法,即概率性的描述。在微观粒子数非常多时,这种概率性描述的结果就与以确定性描述的形式一样,可以确切断言宏观现象。至于在探讨微观物理现象时,只能用概率性的描述,不可能确知单个分子、原子和电子的运动轨迹、速度等等。

至于大气物理现象,就更不可能用确定性描述,主要原因可以归结为两方面:第一,大气现象与实验室研究的物理现象不同,不可能通过各种人为控制的办法找出确切无误的规律来,只能靠数量有限的局部地区的观测结果,作出统计归纳。这是一种统计得来的规律,它有一定的普遍适用的共性,近似地可以适用于各地区,但各地区物理条件不同,不完

全适用,有时可以有很大的差异。第二,大气现象受到各种自然因素的影响,因素多而复杂,并且变化不定,非人力可预知或控制,用学术语言说,就是随机性很大,因此大气现象出现的状态要受随机因素的制约。一些在实验室里用人工雷电进行的模拟雷电实验,没有这种随机因素,所以从实验室得出的所谓雷电的规律性认识或定律,应用到预言大自然里的雷电现象,有时就会有各种与实际不相符的结果。

由于大学物理课本几乎都是使用确定论的描述,使得人们习惯于使用确定论的概念思考,而一些探讨雷电的文章又常直接列出一些由实验室得出的公式、理论,容易使读者用确定论的概念去接受现成的结论、公式,而忽略了它的统计来源和它的局限性、近似性,这样就难免在防雷工作中造成失误。也给一些假借科学外衣推销不合格的防雷产品提供了条件,使用户上当受骗。所以,对于雷电现象,我们一定要注意到;只能用概率性描述法,只能运用概率的观点考虑问题。

第2节 概率统计基本知识

概率是对于一事件或实验结果的期待的定量化。它是这样来定义的:假定一个实验的一种结果是 A 。若在 N 次相同的实验中,期待结果为 A 的次数为 $NP(A)$,则 A 出现的概率为 $P(A)$ 。当 N 趋向无穷大时, $P(A)$ 的极限值就是真正的概率。作为一个重要的特例。一实验有 n 种不同的但又是平等的结果,其中有 m 种结果与事件 A 对应,则

$$P(A) = m/n \quad (3.1)$$

例如抛一个硬币,落地时可以正面朝上(令其为事件 A),也可以反面朝上,对于这一情况则 $P(A) = 1/2$ 。如果你抛 50 次,则正面出现的次数大概为 $50 \times 1/2 = 25$ 次左右,也可能是 20 次或 27 次、28 次,反正与 25 次比较接近。如果你抛 5000 次,则正面出现的次数就与 $5000 \times 1/2 = 2500$ 次非常接近了。

在雷电现象中,考虑一个建筑物三年之内会出现几次雷击,要找出它的规律性,只能运用概率统计,比方说它的高度为 100m,而这类高度的建筑每年的雷击概率与平均年雷暴日有关,在某一地区运用统计得出的概率假如为 $P(A) = 33\%$,这样就可估算出,这一高层建筑在三年时间里会遭到 1 次雷击。如果第一年已遭到雷击,那么,第二、第三年再遭雷击的可能性就比较小。那么,这个概率是怎么得出来的呢?绝对不是用什么理论推导出来的,而是根据长时间的实际观测的结果统计平均得到的,观测纪录的时间越长,观测的地区范围越广、对各种环境条件考虑得越具体、周到,这样得出的概率值越接近定义的概率,就比较有可信的价值。严格说,气象学范围从观测统计得出的所谓概率,决不是概率统计理论上所定义的 $P(A)$,而是另一个物理量。

在气象观测统计工作中,观测某一事件 A 出现 m 次,则称 m 为事件 A 出现的频数。若观测的总次数为 n 次,则这二个数的比值就称为事件 A 出现的频率或叫相对频数,用 f_A 表示:

$$f_A = \frac{m}{n} \quad (3.2)$$

常用百分数表示,当 $n \rightarrow \infty$ 时, f_A 的极限就是概率 $P(A)$ 了。但是一般的气象书刊中的文

章常常把 f_A 当作 $P(A)$ 考虑。就称 f_A 为概率了。这是我们在看文献资料 and 进行思考时必须注意的。运用这种概率估计雷暴的情况时,应该想到,实际发生的情况会与估算有差异,要注意到发生意外的可能。

下面介绍一个运用概率来考虑实际问题的例子。前面已经说明,雷击是小概率事件,安装消雷器的建筑只是城市中成千上万楼房中的极少数,因而遭到雷击的概率很小。对于小概率事件,如果事件的样本空间很小是不能得出确定结论的,因而可以知道某些商家根据若干安装消雷器后未发生雷击事件的事例证明消雷成功,这个结论是不可靠的。

下面简单介绍一些概率的性质:

(一)必然事件的概率等于 1,不可能事件的概率是 0。可能发生但并非必然发生的事件的概率必为

$$0 < P(A) < 1 \quad (3.3)$$

(二)若 \bar{A} 为 A 的对立事件即不是 A 事件出现,就必出现 \bar{A} 事件,则有

$$P(A) + P(\bar{A}) = 1 \quad (3.4)$$

(三)若 A, B 是相容事件,在 n 次试验中,事件 A 和 B 出现的频数分别为 $m(A)$ 及 $m(B)$, A, B 同时发生的频数为 $m(AB)$, 则 A, B 二事件至少有一件出现的概率应为

$$\begin{aligned} P(A + B) &= \frac{m(A)}{n} + \frac{m(B)}{n} - \frac{m(AB)}{n} \\ &= P(A) + P(B) - P(AB) \end{aligned}$$

(四)若 A_1, A_2, \dots, A_k 构成互不相容的完备事件群,则有

$$\sum_{i=1}^k P(A_i) = 1 \quad (3.6)$$

本书就只介绍与下面讨论防雷有关的一些概率知识。其它的就从略了。有兴趣者可参阅本章列出的参考资料。

第 3 节 电场和电位

在物理课本中讲电学时,一开始讲静电学,只考虑静止的电荷的电场,认定导体内是不可能存在电场的。电荷一存在,就在四周有电场了,根本不说明电荷是怎么产生的,电场是如何建立的,电场能量又是从何而来。

在课本上讲的是一种简化了、理想化了的情况,实际上绝对静止的电荷是没有的。我们现在对复杂的实际情况补充介绍。

任何一个静电荷,都有静电场,它的情况可以用电力线表示,如为正的点电荷,这些电力线都是以点电荷为出发点,辐射出去,一直到无限远,凡是电力线到达之处,都存在电场能量,能量密度为 $w = \frac{1}{2} \epsilon E^2$ 。

可以证明,静电荷或作恒速运动的电荷(即电流)不可能辐射电场和磁场,当然也就不能辐射能量。

现在要追究这些静止电荷、电场及能量的起源,就要联系实验来思索。最常见的电学演示是用手摇的 Wimshurst 起电机来起电,使一个绝缘支座上的金属球带上电。请注意,

它必同时产生正电和负电,两者数值必相等。这时电荷先是流动,最后才达到静止。或者更简单些,用毛皮与胶木棒摩擦起电,再把电给予演示用的金属球,这一过程也是同时产生等值的异号电荷。所以静电的来源实际上起源于中性的物体,靠做功,使物体的中性原子的电子与原子分离,从而产生等值而异号的电荷。在分离正、负电荷时必须做功,这个功转化为电场的能量。

在分离正、负电荷时,电荷始终有加速运动和减速运动,这时就会产生电磁辐射,正是这种电磁辐射,使电荷周围空间建立起电场、磁场,同时使电磁场贮有能量。

在电荷未达到静止(指所有电荷)之前,导体内始终存在电场,因此在探讨雷电现象或者考虑防雷工程时,绝对不可以把静电学里所说的“导体内电场强度为0”的成见带到这些实际问题中来!因为各处电荷并未静止不动!

第二要注意:电荷产生的电场的计算公式对于运动着的电荷能不能适用?一般说来是可以适用的,但是要计入电场的传播速度,这就是光在介质中的速度。

下面要着重讨论大学物理没有充分讲的有关电位的概念。电位概念的引入是从电场做功开始的。做功就需计算路程,就得有起点和终点。比较二个地点的电位高低,可以从电场的力在两个地点之间作的功来判断,可以很明确的定出两点间的电位差,却无法说出每一点的电位值。就如地势高低一样,只能看出高度差,却无法说出任何一点的高度,除非规定了海平面作为计算高度的共同参考标准。这时才可以说出一个山的海拔高度是多少了。

在静电学里为了计算的简便,规定无限远处作为电位的标准,认定无限远处的电位为0,这样所有的点的电位就都可以确定了。

可是在工程测量上就不可行,怎么找无限远处呢。所有测量电位的仪表都有两个探针,只能测两个探针位置之间的电位差。如果把大地的电位规定为0,作为共同参考标准,此时以一个探针与大地接触,另一个探针所接触的地点的电位就可以测得了。没有一个实验室不是以大地为立足点的,所以取大地电位为共同标准,非常方便。因此实际工作中,尤其是工程上都是公认为大地是0电位,任何物体对地的电位差,即电压,就等于它的电位。一般说来,如无特别的声明,就意味着:大地的电位被取作参考标准,取 $V_{地}=0$ 。

这样,有两个重要的概念上的问题需要着重说一说,第一个是怎么看待地球的带电?在下一章我们会讲到,地球是带有稳定不变的负电荷的,因此地面上处处存在电场,如果运用一般物理教科书中静电学的计算公式来讨论地球的带电问题的话,地球可以看作一个孤立带电导体球,它的电容 $C_{地}$ 是不难求得的,若把地球的带电量用 $-Q$ 表示,则地球的电位 $V_{地}$ 就极易算出来:

$$V_{地} = -Q/C_{地} \quad (3.7)$$

于是有些人就想不通了,工程实际上认为 $V_{地}=0$ 岂不是与静电学理论发生矛盾了。产生这种认识上的矛盾的根本原因是他们在运用书本上的静电学公式时忘掉了这些公式的先决条件,即它们隐含着—个规定:以无限远处的电位作为参考标准,取 $V_{\infty}=0$,这样才可得出(3.7)这个结论。相反,我们若选取大地的电位作为参考标准,取 $V_{地}=0$,则 $V_{\infty} \neq 0$ 而是

$$V_{\infty} = Q/C_{地} \quad (3.8)$$