

主 编 李祥明 副主编 吴玉磊 王 蕾

电磁辐射与 电磁环境 监督管理

Dianci Fushe yu
Dianci Huanjing
Jiandu Guanli

中国环境出版集团

电磁辐射与电磁环境监督管理

主 编 李祥明

副主编 吴玉磊 王 蕾



中国环境出版集团·北京

图书在版编目 (CIP) 数据

电磁辐射与电磁环境监督管理/李祥明主编. —北京: 中

国环境出版集团, 2019.3

ISBN 978-7-5111-3918-4

I. ①电… II. ①李… III. ①电磁环境—环境监测
IV. ①X21

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2019) 第 026894 号

出版人 武德凯
责任编辑 陈雪云
责任校对 任 丽
封面设计 宋 瑞



更多信息, 请关注
中国环境出版集团
第一分社

出版发行 中国环境出版集团
(100062 北京市东城区广渠门内大街 16 号)
网 址: <http://www.cesp.com.cn>
电子邮箱: bjgl@cesp.com.cn
联系电话: 010-67112765 (编辑管理部)
010-67112735 (第一分社)
发行热线: 010-67125803, 010-67113405 (传真)

印 刷 北京建宏印刷有限公司
经 销 各地新华书店
版 次 2019 年 3 月第 1 版
印 次 2019 年 3 月第 1 次印刷
开 本 787×1092 1/16
印 张 23.25
字 数 440 千字
定 价 75.00 元

【版权所有。未经许可, 请勿翻印、转载, 违者必究。】

如有缺页、破损、倒装等印装质量问题, 请寄回本社更换

《电磁辐射与电磁环境监督管理》

编委会

主 编 李祥明

副主编 吴玉磊 王 蕾

编 委 李祥明 吴玉磊 王 蕾 袁久林 李兆轶

赵永超 谢 威 高 峰 姜 姝 李 俊

前 言

人类的生产、生活离不开电，因此也摆脱不了因电而产生的电磁辐射的困扰。

在人类产生之前就有自然界的电现象，自从人类认识电到人工发电并利用电能，再到当今电气化、信息化时代，人类绝对离不开电。从广义上讲，有电的场所就存在电磁辐射，这是不以人的意志为转移的，无论用电的目的如何。从环境保护和人体健康角度看，电磁辐射是一种能量流污染，伴有电磁辐射项目运行时，在达到利用目的的同时，应尽量减小电磁辐射对环境和公众的影响。多少年来，环境保护行政主管部门和伴有电磁辐射项目的建设单位一直在寻求既保障伴有电磁辐射项目正常运行，又控制好项目产生的电磁辐射不致对环境和公众造成不可接受影响的结合点，致力于电磁环境保护。另外，公众的电磁环境意识越来越高，特别是近 20 年来，由于广播电视、移动通信和输变电工程建设与发展，以及城市的扩大，使原本在郊区的广播电视塔变为城中塔，移动通信基站、变电站、高压线等伴有电磁辐射的设施随处可见，致使公众电磁辐射信访、投诉量居高不下，电磁环境纠纷时有出现，生态环境主管部门的监督管理、行政许可难度加大，建设运行单位在选址、建设和运行方面也遇到一些棘手的新问题。

防治电磁辐射污染、加强电磁环境保护是生态环境主管部门的神圣职责，生态环境主管部门和环保人为此一直在不懈努力。近几年，由于简政放权，伴有电磁辐射建设项目的审批由原来的二级（国家和省级生态环境主管部门）审批，改为部分项目调整委托下放到地市级生态环境主管部门审批。由于地市级生态环境主管部门缺乏机构编制和专业人员，加之工作头绪多、任务重，对于伴有电磁辐射建设项目的监管、审批颇感为难，本书就是为解决这一问题编写的，力求尽量解决基层生态环境主管部门人员在监管、审批工作中遇到的管理问题和技术问题。为此本书编写力求内容通俗易懂、叙述简明扼要，对象分类清楚、重点相对独立，尽力做到以用施学、理论与实例相结合。

本书适于广大生态环境主管部门从事电磁环境保护与监管工作人员阅读，特别适于基层生态环境主管部门人员阅读，也是从事伴有电磁辐射建设项目环境影响评价机构人员和验收监测单位人员的读物，同时也可作为高校相关专业学生的学习参考书。

全书共分为3篇、9章，包含电磁辐射基本知识、电磁辐射物理量、天线基本知识、电磁环境监督管理等内容。全书由山东省辐射环境管理站研究员李祥明主编、统稿和审定；山东省核与辐射安全监测中心吴玉磊、王蕾作为副主编参加本书的编写并负责校核；山东省核与辐射安全监测中心袁久林、李兆轶、高峰和山东省波尔辐射环境技术中心赵永超、谢威、姜姝及济南市第五人民医院李俊参加本书编写。在本书编写过程中，虽然经过反复斟酌推敲，但由于时间紧迫，经验不足，知识面窄，难免存在不足之处，希望广大读者提出宝贵意见，供再版时修订完善。

编 者

2018年5月

目 录

第 1 篇 电磁辐射基本知识

第 1 章 电的基本知识	3
1.1 电的概念	3
1.2 描述电的几个物理量	12
第 2 章 电磁场与电磁感应	20
2.1 静电场	20
2.2 磁场	42
2.3 电磁感应	45
2.4 电介质与磁介质	54
2.5 麦克斯韦电磁理论和电磁波	57

第 2 篇 电磁辐射物理量与天线

第 3 章 电磁辐射及其物理量	70
3.1 电磁辐射的概念	70
3.2 电磁辐射物理量	71
3.3 分贝的有关知识	77
3.4 电磁辐射场区分类	90
3.5 电磁辐射污染源	95

3.6 电磁辐射及其危害 101

第 4 章 天线 117

4.1 天线的作用 118

4.2 天线的类型和图例 119

4.3 天线的基本原理 120

4.4 天线的主要参数 137

4.5 天线性能参数举例 153

第 3 篇 电磁环境监督管理

第 5 章 广播电视发射系统 161

5.1 基本知识 162

5.2 申报登记 212

5.3 行政许可 217

5.4 竣工验收 225

5.5 监督检查 232

5.6 投诉处理 233

第 6 章 通信、雷达及导航发射系统 234

6.1 移动通信发射系统 234

6.2 雷达发射系统 286

第 7 章 工业、科研、医疗高频设备 305

7.1 基本知识 305

7.2 相关法规与标准 308

7.3 监督管理 310

第 8 章 高压输变电系统..... 313

 8.1 基本知识..... 313

 8.2 相关法规与标准..... 328

 8.3 监督管理..... 344

第 9 章 交通运输电气化系统..... 351

 9.1 电气化铁道..... 351

 9.2 高铁牵引供电系统..... 352

 9.3 高铁产生电磁辐射机理..... 356

 9.4 高铁电磁辐射环境影响..... 357

参考文献..... 359

第 1 篇

电磁辐射基本知识

人类最早发现的电现象是摩擦起电现象。在公元前 600 年前后的古希腊文化鼎盛时期，贵族妇女外出都有一种习惯，那就是喜欢穿着柔软的丝绸服装，佩戴琥珀首饰，这成为当时的一种时尚。但是令人困扰的是，在户外光彩夺目的琥珀首饰表面总是附着一层灰尘，无论外出前擦得多么干净。对于这一共性的困惑，无法解释发生的原因。后来，希腊人泰勒斯开始研究这一神奇的现象。他仔细观察，注意到挂在女士身上的琥珀首饰随人走动不断晃动，频繁摩擦身上的丝绸面料，他回到家里用琥珀制品在丝绸面料上反复摩擦，停放一会儿，结果发现琥珀制品表面出现一些细小的灰尘。有时拿着摩擦过的琥珀制品靠近细小灰尘，发现灰尘会吸附到琥珀制品的表面。经过多次实验，泰勒斯发现用丝绸摩擦过的琥珀确实具有吸引灰尘、绒毛、麦秆等轻小物体的能力。于是，他把这种不可理解的力量叫作“电”。

人类对电的认识与利用的脚步从来没有停息。1660 年，居里克建造了世界上第一台转动摩擦发电机，不过产生的是静电，没有多大实用价值。1799 年，意大利物理学家伏特发现，把任何潮湿物体放在两个不同金属之间都会产生电流。1800 年，伏特发明了世界上第一块电池。1821 年，英国的科学家戴维和法拉第发明了一种叫电弧灯的电灯。这种电灯用炭棒作灯丝，虽然能发出亮光，但光线刺眼，寿命短。1831 年，法拉第发现当磁铁穿过一个闭合线路时，线路内就会有电流产生，这个效应叫电磁感应，是法拉第最伟大的一个发现。进而他又发明了世界上第一台能产生连续电流的发电机，以后的发电机都是根据同样的电磁感应原理制成的。从此人类进入了电器应用时代，各种实用电器开始纷纷涌现。1879 年，爱迪生试用了 6 000 多种材料，试验了 7 000 多次，终于发现可以用棉线作灯丝，足足亮了 45 小时灯丝才被烧断，这是人类第一盏有实用价

值的电灯。爱迪生经进一步试验发现用竹丝作灯丝效果很好，灯丝耐用，灯泡可亮 1 200 小时。此后，电灯开始进入寻常百姓家。1882 年，在纽约曼哈顿地区投运的珍珠街发电厂被称为世界最早的发电厂，它拥有 6 台 120 kW 的蒸汽机发电机组。中国最早的发电厂也是 1882 年建成的，它是英国人在上海租界设立的上海电光公司。

人们认识了电，也能人工产生电，随之也认识到一切带电导体、用电器和电器设备周围均存在电磁场，这些电磁场在特定条件下就是电磁辐射。特别是在当今信息社会，广播电视、无线通信事业的发展，无线信息发射设施的普及与覆盖，伴随而来的电磁辐射对环境也造成电磁污染。

为更好地理解电磁辐射的概念、性质和机理，本篇将介绍电的基本知识和电磁场及电磁感应的基本知识。

第 1 章 电的基本知识

1.1 电的概念

在我们现实生产生活中，电已被视为理所当然的事物。我们在生产、生活中所使用的越来越多的特定工具与电的关系越来越密切，电给人类带来了文明与进步，不过取得电并不像打开电源开关那样轻松愉快。

在很早以前，人类就用毛制品擦拭琥珀来得到电。在自然界，乌云的底部聚集了超负荷的电子，这些电子受地面正离子的吸引，在云中会突然产生雷电，形成冲向地面的电子流，从而产生了闪电。

以上两种现象是人类最早对电的认识，那么究竟什么是电，电有哪些种类，又有什么特性，这是我们应当知晓的常识。

1.1.1 什么是电

1.1.1.1 电是一种自然现象

电是一种粒子，电压（即电势差）起着推动（自由）电子定向移动的作用，而只有导体里才有足够可以自由移动的电子，这也是为什么导体能很好地导电的原因。电子在移动过程中就会产生各种形式的能，所有电器就是使用这些能的工具或设备。

电又是一种自然现象。电是像电子和质子这样的粒子之间产生排斥和吸引力的一种属性。它是自然界存在的四种基本相互作用（万有引力、电磁相互作用、弱相互作用和强相互作用）之一。电或电荷有两种：一种叫作正电，另一种叫作负电。通过实验我们发现带电物体同性相斥、异性相吸，吸引力或排斥力都遵守库仑定律。

1.1.1.2 人类认识电的过程

(1) 摩擦起电（静电）

在中国，古人认为电的现象是阴气与阳气相激而生成的，《说文解字》有“电，阴阳激耀也，从雨从申”。《字汇》有“雷从回，电从申。阴阳以回薄而成雷，以申泄而为电”。在古籍《论衡》（Lun Heng，约公元1世纪，即东汉时期）一书中曾有关于静电的记载，当琥珀或玳瑁经摩擦后，便能吸引轻小物体，也记述了以丝绸摩擦起电的现象，但古代中国对于电并没有太多了解。图 1-1 是古老的摩擦起电机。

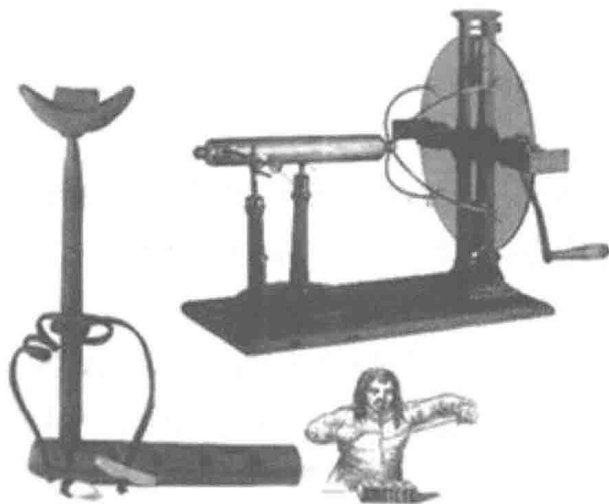


图 1-1 古老的摩擦起电机

公元前 600 年前后，希腊的哲学家泰勒斯（Thales，640—546 B.C.）就知道琥珀的摩擦会吸引绒毛或木屑，这种现象称为静电（static electricity）。而英文中的电（electricity）在古希腊文的意思就是“琥珀”（amber）。

(2) 电荷移动（电流）

18 世纪时西方开始探索电的种种现象。美国的科学家富兰克林（Benjamin Franklin，1706—1790 年）认为电是一种没有重量的流体，存在于所有物体中。当物体得到比正常分量多的电就称为带正电；若少于正常分量，就被称为带负电，所谓“放电”就是正电流向负电的过程，这个理论并不完全正确，但是正电、负电两种名称则被保留下来。从此人类对“电”的观念大大加强。

富兰克林做了多次实验，并首次提出了电流的概念，1752 年，他在一个风筝实验中，将系上钥匙的风筝用金属线放到云层中，被雨淋湿的金属线将空中的闪电引到手指与钥

匙之间，证明了空中的闪电与地面上的电是同一回事。

(3) 库仑作用（静电力）

之后，人类对电不断加深认识，渴求对电了解得更多些，特别是在定量研究方面不断深入。1767 年蒲力斯特里（J.B.Priestley）、1785 年库仑（C.A.Coulomb，1736—1806 年）发现了静态电荷间的作用力与距离成反平方的定律，奠定了静电的基本定律。

(4) 电磁感应（电磁场）

在 1800 年，意大利的伏特（A.Volta）用铜片和锡片浸于食盐水中，并接上导线，制成了第一个电池，他首次提供连续性的电源，堪称现代电池的元祖。1831 年，英国的法拉第（M. Faraday）利用磁场效应的变化，展示感应电流的产生。1851 年，他又提出物理电力线的概念，这是首次强调从电荷转移到电场的概念，为以后人类认识和研究电场奠定了观念性的基础。

1865 年，苏格兰的麦克斯韦（J. C. Maxwell）提出了电磁场理论，这一理论的核心是提出了位移电流的观念，指出磁场的变化能产生电场，而电场的变化能产生磁场。麦克斯韦预测了电磁波辐射的传播存在，而在 1887 年，德国的赫兹（H.Hertz）用实验证实了电磁波的存在，同时证实了光含有电磁波的性质，启发了科学家们对光和电的重新认识，开辟了无线电时代的新纪元，为意大利科学家马可尼的无线电发明铺平了道路。后来麦克斯韦将电学与磁学整合成一种理论——电磁理论，同时证明光是电磁波的一种。

(5) 电的粒子性（电子带负电）

麦克斯韦电磁理论的发展也针对微观方面的现象做出解释，并指出电荷的分裂性而非连续性的存在，1895 年，罗伦兹（H.A.Lorentz）假设这些分裂性的电荷是电子（electron），而电子的作用是由麦克斯韦电磁方程式的电磁场来决定的。1897 年，英国的汤姆生（J.J.Thomson）证实这些电子的电性是带负电性。而 1898 年伟恩（W.Wien）在观察阳极射线的偏转中发现带正电粒子的存在。

(6) 波粒二相性

19 世纪以前，人类一直用自然界中存在的粒子与波来描述“电”的世界，但 19 世纪以后量子学说的出现，使得原本构筑的粒子世界再次受到考验。海森堡（Werner Heisenberg）所提出的“测不准原理”认为一个粒子的移动速度和位置不能被同时测得，电子不再是可数的颗粒，也不是绕着固定的轨道运行。

1923年,德布罗意(Louis de Broglie)提出当微小粒子运动时,同时具有粒子性和波动性,称为“波粒二相性”,而薛定谔(Erwin Schrodinger)用数学的方法,以函数来描述电子的行为,并且用波动力学模型得到电子在空间存在的概率分布,根据海森堡“测不准原理”,我们无法准确地测到它的位置,但可以测得在原子核外每一点电子出现的概率。在波耳的氢原子模型中,原子在基态时的电子运动半径,就是在波动力学模型里电子最大出现概率的位置。

1.1.2 电的分类

对于电的分类,不同的面向有不同的分类方法。

1.1.2.1 根据电荷运动状态分类

根据电荷运动的状态不同,将电分为静电和电流。

(1) 静电

静电是指静止的、不按一致方向运动的电荷。所有不同材质的物体(或物质)由于摩擦或离合而起电。人们在日常生活中经常能感受到静电的存在,如冬季从身上脱下毛衣时会产生静电火花,并能听到放电的声音;用化纤布料摩擦玻璃棒后,该玻璃棒会吸附微小物质;汽车行驶后,车体带电,手触有不适感觉,等等。

静电会给人们的生产、生活带来一些麻烦。如油库、炸药库等易燃易爆场所可能由于静电打火而引起燃烧或爆炸,大规模集成电路生产车间或电子器件可能由于静电而使这些集成电路或电子器件受到破坏等。但是静电也可被用于人们的生活中,如静电复印机、静电除尘、静电喷涂、高压静电种子处理等。

(2) 电流

电流是定向移动电荷产生的。电流是重要的能源之一,电流可以产生动力,在工业社会、文明社会,人们都离不开电流,它是一切电气设备的能源。

1.1.2.2 根据电荷时域变化分类

电荷有规律运动时就形成电流,根据其运动方向和大小是否随时间的变化,可将电分为直流电和交流电。

(1) 直流电

直流电就是大小和方向不随时间而变化的电流(或电压),又叫恒定电流。直流电的电荷在一个电路中沿着不变的方向流动,所通过的电路称直流电路。直流电路是由直

流电源和电阻构成的闭合导电回路,在该电路中形成恒定的电场,在电源外正电荷经电阻从高电势处流向低电势处;在电源内,靠电源的非静电力的作用克服静电力,再从低电势处到达高电势处。如此循环,就构成了闭合的电流。所以,在直流电路中,电源的作用是提供不随时间变化的恒定电动势,为在电阻上消耗的焦耳热补充能量。

日常生活中,电池提供的电流就是直流电;各种电瓶提供的电流也是直流电。直流输电的容量大、稳定性好、控制调节灵活。直流电源有化学电池、燃料电池、温差电池、太阳能电池、直流发电机等。直流电主要应用于各种电子仪器、电解、电镀、直流电力拖动等方面。

在比较简单的直流电路中,电源电动势、电阻、电流以及任意两点电压之间的关系可根据欧姆定律及电动势的定义得出。复杂的直流网络可根据基尔霍夫方程组求解。它包括节点电流方程和回路电压方程两部分,前者指出,对于任一节点(3个或3个以上支路的交点),流入和流出节点的各电流的代数和为零,这是恒定条件的要求;后者指出,对于任一闭合回路(网格),各部分电压降的代数和为零,这是静电场环路定理的结果,两者构成了完备的方程组。

测量直流电路中电流、电压、电阻、电源电动势等物理量的仪表称为直流仪表。常用的有电流计、安培计、伏特计、电桥、电位差计等。

(2) 交流电

交流电简称“交流”。一般指大小和方向随时间作周期性变化的电压或电流。交流电最基本的形式是正弦电流,即电流随时间变化的曲线为正弦曲线,有时也叫正弦波。我国交流电供电的标准频率规定为 50 赫兹(Hz)。交流电随时间变化的形式可以是多种多样的。不同变化形式的交流电其应用范围和产生的效果也是不同的。图 1-2 是几种常见的交流电的波形。

在我们的日常生产、生活中,以正弦交流电应用最为广泛,且其他非正弦交流电一般都可以经过数学处理后,化为正弦交流电的叠加。交流电所要讨论的基本问题是电路中的电流、电压关系以及功率(或能量)的分配问题。由于交流电具有随时间变化的特点,因此产生了一系列区别于直流电路的特性。在交流电路中使用的元件不仅有电阻,而且有电容元件和电感元件,使用的元件多了,现象和规律就复杂了。

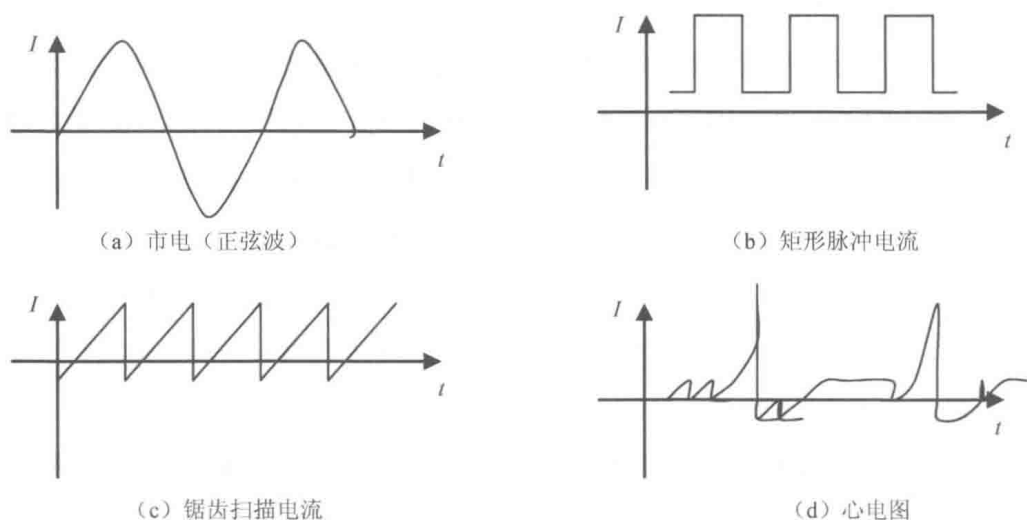


图 1-2 几种交流电的波形

①交流电的频率和周期 频率是表示交流电随时间变化快慢的物理量。即交流电每秒钟变化的次数叫频率，用符号 f 表示。它的单位为周/秒 (c/s)，常用赫兹表示，符号是 Hz，简称周或赫。例如，市电是 50 周的交流电，其频率即为 $f=50\text{ Hz}$ (即 50 c/s)。对较高的频率还可使用千周 (kHz) 和兆周 (MHz) 作为频率的单位。

1 千赫兹 (kHz) = 1 000 赫兹 (Hz) = 1 000 周/秒

1 兆赫兹 (MHz) = 1 000 千赫兹 (kHz) = 1 000 000 赫兹 (Hz) = 1 000 000 周/秒

例如，我国第一颗人造地球卫星发出的信号频率是 20.009 MHz ，即它发出的是每秒钟变化 20.009×10^6 次的交变信号。

交流电随时间变化的快慢还可以用周期这个物理量来描述。交流电变化一次所需要的时间叫周期，用符号 T 表示。周期的单位是秒。显然，周期和频率互为例数，即

$$f=1/T \text{ 或 } T=1/f$$

例如，频率为 50 Hz 的市电，其周期为 $T=1/f=1/50=0.02\text{ s}$ ；频率为 20 MHz 的信号，其周期为 $T=1/f=5 \times 10^{-8}\text{ s}$ 。

由此可见，交流电随时间变化越快，其频率 f 越高，周期 T 越短；反之，频率 f 越低，周期 T 越长。

②正弦交流电的表示 交流电的变化规律符合正弦波时称此种交流电为正弦交流电。正弦交流电流的表示式为