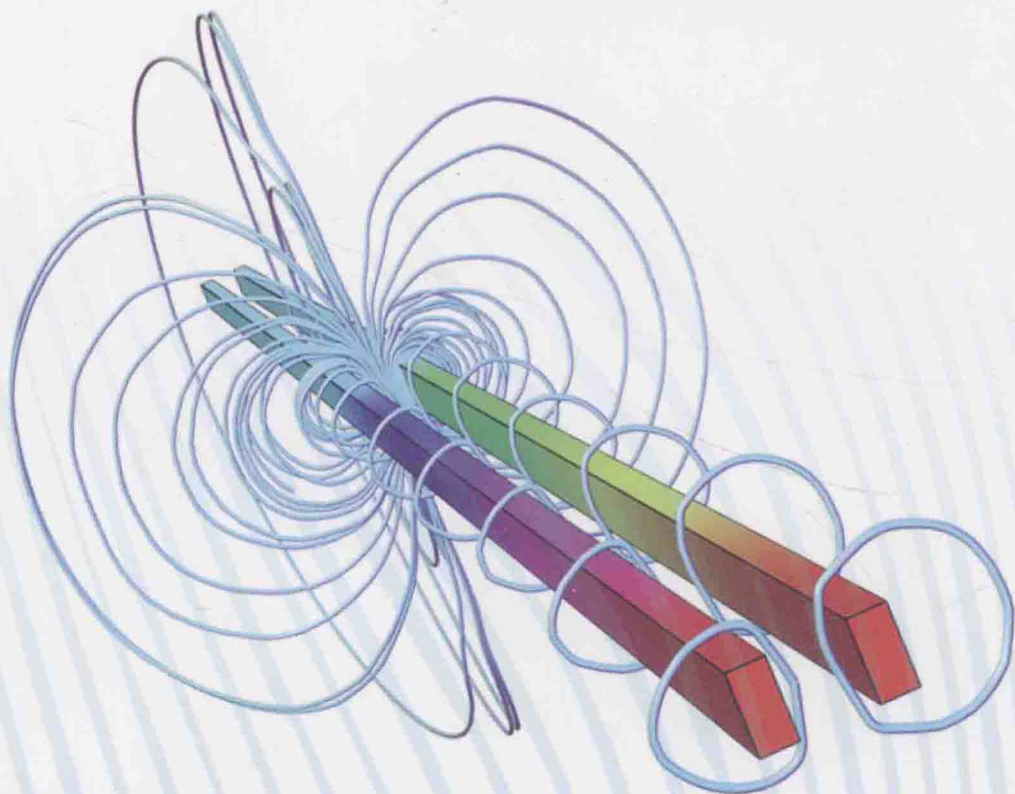


低频电磁场 职业健康

DIPIN DIANCICHANG YU ZHIYE JIANKANG

陈青松 李 涛◎主编

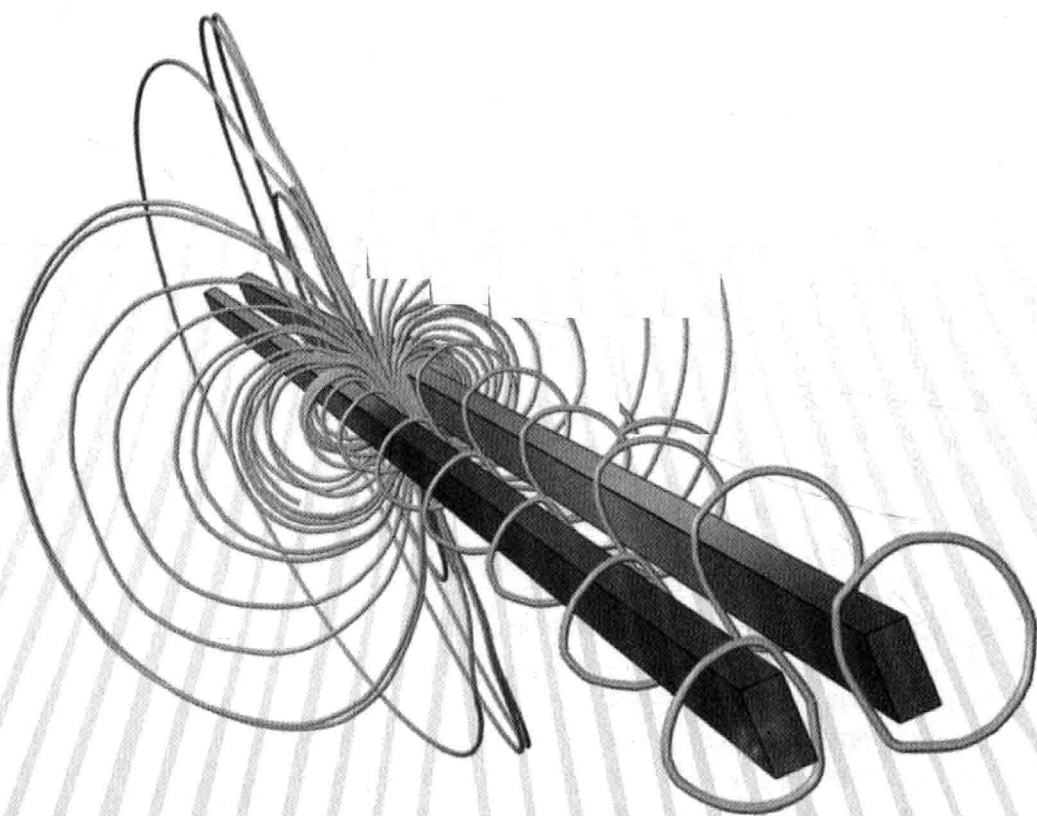


中山大学出版社
SUN YAT-SEN UNIVERSITY PRESS

低频电磁场 职业健康

DIPIN DIANCICHANG YU ZHIYE JIANKANG

陈青松 李 涛  主编



中山大学出版社
SUN YAT-SEN UNIVERSITY PRESS

· 广州 ·

版权所有 翻印必究

图书在版编目 (CIP) 数据

低频电磁场与职业健康/陈青松, 李涛主编. —广州: 中山大学出版社, 2015. 2
ISBN 978 - 7 - 306 - 05064 - 9

I. ①低… II. ①陈… ②李… III. ①电磁污染监测 IV. ①X837

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2014) 第 241104 号

出版人: 徐 劲

策划编辑: 曾育林

责任编辑: 曾育林

封面设计: 曾 斌

责任校对: 雨 川

责任技编: 何雅涛

电 话: 编辑部 020 - 84111996, 84113349, 84111997, 84110779

发行部 020 - 84111998, 84111981, 84111160

地 址: 广州市新港西路 135 号

邮 编: 510275 传 真: 020 - 84036565

网 址: <http://www.zsup.com.cn> E-mail: zdcbs@mail.sysu.edu.cn

印 刷 者: 广州市怡升印刷有限公司

规 格: 787mm × 1092mm 1/16 11.25 印张 263 千字

版次印次: 2015 年 2 月第 1 版 2015 年 2 月第 1 次印刷

印 数: 1 ~ 2000 册 定 价: 48.00 元

如发现本书因印装质量影响阅读, 请与出版社发印部联系调换

编 委 会

主 编：陈青松 李 涛
编 委：张 骁 徐国勇 张丹英 严茂胜 李宏玲
晏 华 朱 琨 李 霜 肖 斌 林瀚生
郎 丽 朱晓俊

作者简介



陈青松 男，1978 年生于湖北省利川市。博士，副主任医师，现任广东省职业病防治院物理因素监测所所长，国家卫生标准委员会职业卫生标准专业委员会委员，广东省职业健康协会物理因素专业委员会主任委员，全国职业病专业委员会青年委员会副主任委员，中山大学、南方医科大学和广东药学院硕士研究生导师。陈青松博士长期从事工作场所物理性职业有害因素识别、检测及评价工作，在日常业务工作中，不断推广职业卫生服务理念，创新和规范物理性职业有害因素的检测评价及质量控制方法，编制了各种物理性职业有害因素的检测评价规范，并在国内首次开展了噪声检测与评价室间比对。先后承担并完成了“100 kHz 以下电磁场职业接触限值及测量方法”、“可见光及近红外线职业接触限值及测量方法”、“职业性手臂振动病的诊断”等多项国家职业卫生标准制定修订项目。同时，还承担国家自然科学基金、广东省科技计划项目多项，发表论文四十余篇，并多次获奖。



李涛 男，1957 年生，中国疾病预防控制中心职业卫生与中毒控制所所长，主任医师，博士生导师。2009—2010 年度卫生部有突出贡献青年专家。国家卫生标准委员会职业卫生标准专业委员会主任委员、国家职业病诊断鉴定技术指导委员会职业病诊断技术指导组组长、WHO 职业卫生合作中心（北京）首席科学家；中华预防医学会理事、劳动卫生与职业病分会主任委员；中国职业安全健康协会常务理事、职业卫生专业委员会主任委员等；《工业卫生与职业病》杂志主编，《中华劳动卫生与职业病杂志》副总编，《环境与职业医学》副主编，《中国安全科学学报》等杂志编委。先后主持和参加国家多项科技攻关、社会公益以及重点基础研究项目；先后获得“中华预防医学奖”二等奖，“国家安全生产监督管理局安全生产科技成果”二等奖、“中国职业安全健康协会科技进步奖”第一、三等奖“及中华医学科技奖”三等奖。

前 言

随着电力的广泛运用，特别是工业上高电压和强电流的特殊要求，低频电磁场在生产和生活环境中可以说是无处不在。目前普遍认为，频率在 100 kHz 以上的射频辐射及微波对人体健康的影响主要表现为致热效应。频率在 100 kHz 以下时，电磁场的致热效应不明显，对机体的影响以主观感觉不良、神经肌肉刺激等非致热效应为主。自 Wertheimer 和 Leeper 报道低频电磁场接触与儿童白血病发病显著相关以来，低频电磁场的致癌性受到了国内外学者的广泛关注。1976 年以来，世界卫生组织（World Health Organization, WHO）组织全球六十多个国家致力于探讨 100 kHz 以下低频电磁场对健康的影响，并在 2007 年发布了其研究成果：确认了低频电磁场短期、高水平接触相关的急性健康影响，但指出低频电磁场致癌性等慢性健康影响仍不明确。

为控制低频电磁场的职业健康危害，国际非电离辐射防护委员会（International Commission on Non-Ionizing Radiation Protection, ICNIRP）、电气和电子工程师协会（Institute for Electrical and Electronic Engineers, IEEE）、美国政府工业卫生师协会（American Conference of Governmental Industrial Hygienists, ACGIH）、欧盟、日本等重要组织和国家从保护急性健康效应出发，制定了低频电磁场电场强度、磁场强度（磁通密度）和电流密度的短时接触限值，部分限值还规定了对特殊人群的卫生学要求（如心脏起搏器佩戴者）。我国目前也有较多电磁辐射的相关标准，但对 100 kHz 以下低频电磁场，公众暴露尚无限值，职业暴露也只有 50 Hz 工频电场的 8 h 职业接触限值。在检测方法上，也缺乏相应配套适用的标准。以至于职业卫生工作者正确识别、检测和评价低频电磁场的健康危害存在诸多困难。由此，笔者从 2008 年开始致力于 100 kHz 以下低频电磁场职业卫生标准的研究。在长期工作场所低频电磁场检测与评价工作基础之上，从国内外研究进展出发，结合我国之实际，先后完成了“100 kHz 以下电磁场职业接触限值”及“工作场



所 100 kHz 以下电磁场测量方法”两个国家职业卫生标准制修订项目。

为进一步在我国普及工作场所低频电磁场防控知识和技术，笔者依据前期研究结果，组织广东省职业病防治院（陈青松、张骁、徐国勇、张丹英、严茂胜、李宏玲、晏华、肖斌、林瀚生、郎丽）、中国疾病预防控制中心职业卫生与中毒控制所（李涛、李霜、朱晓俊）和北京森馥科技股份有限公司（朱琨）的专家和学者，从低频电磁场基本知识、低频电磁场与人体健康的关系、低频电磁场职业接触现状、低频电磁场职业接触限值及测量方法以及职业健康危险度评估及管理五个方面编写本书。旨在为职业卫生业务及科研工作者提供专业指导，同时对需要了解电磁场健康危害的公众也有很好的参考价值。

本书主要是笔者及研究团队前期研究成果的总结，而电磁场领域是一个发展非常快的领域。另外，因参加编写人员的知识面及水平有限，某些专业技术理论和实践存在一定的不足，希望读者多提宝贵意见，以便不断修正和提高。

陈青松 李 涛

2015 年 1 月 1 日

目 录

第一章 电磁场的基本知识	1
第一节 电场	1
一、电荷	1
二、电场及电场强度	2
三、电场线	3
四、电压	3
五、电场强度与电压的关系	4
第二节 磁场	5
一、磁场方向和磁感线	5
二、磁感应强度和磁场强度	6
第三节 电磁场与电磁波	6
一、电磁场及电磁波的产生	6
二、电磁场的特点	7
三、近区场和远区场	8
四、电磁辐射	8
第四节 低频、极低频电磁场	9
第五节 工频电磁场	12
第二章 低频电磁场与人体健康的关系	15
第一节 总论	15
一、电磁场生物效应作用机制假说	15
二、低频电磁场的健康效应	18
第二节 低频电磁场对神经系统的影响	20
一、低频电磁场对神经刺激和认知等方面的影响	20
二、低频电磁场对睡眠、精神行为和生命质量的影响	21
三、小结	25
第三节 低频电磁场对心血管系统的影响	32
一、低频电磁场对心血管功能的影响	32
二、低频电磁场对心血管电生理活动的影响	33
三、其他影响：机制研究	33
四、小结	34

第四节 低频电磁场对内分泌系统的影响	36
一、低频电磁场对褪黑激素的影响	36
二、低频电磁场对脑垂体激素的影响	43
三、低频电磁场对其他激素的影响	45
第五节 低频电磁场对生殖系统的影响	48
一、低频电磁场对女性生殖功能的影响	48
二、低频电磁场对男性生殖功能的影响	50
三、低频电磁场对后代的健康影响	50
四、低频电磁场对动物的影响：动物及其体外实验研究	51
第六节 低频电磁场对免疫系统的影响	55
一、低频电磁场对免疫器官形态的影响	56
二、低频电磁场对免疫细胞的影响	56
三、低频电磁场对免疫分子的影响	56
第七节 低频电磁场对机体及其他系统的影响	58
一、低频电磁场对骨骼肌肉的影响	58
二、低频电磁场对心脏的影响	58
三、低频电磁场对机体听力的影响	58
第八节 低频电磁场对肿瘤的影响	59
一、低频电磁场对白血病的影响	59
二、低频电磁场对乳腺癌的影响	66
三、低频电磁场对颅内肿瘤产生的影响	76
四、低频电磁场对其他肿瘤的影响	77
五、小结	78
第九节 低频电磁场的细胞生物学效应	79
一、低频电磁场对细胞结构与功能的影响	79
二、低频电磁场对细胞分化的影响	80
三、低频电磁场对细胞增殖的影响	82
四、低频电磁场对细胞信号转导的影响	82
五、低频电磁场对细胞基因表达的影响	84
六、低频电磁场对 DNA 的影响	86
七、低频电磁场对细胞凋亡的影响	87
八、低频电磁场对细胞癌变的影响	88
第三章 工作场所低频电磁场的现状及评估	93
第一节 发电企业	93
第二节 供电企业	98
一、一般情况	98
二、劳动定员	98

三、测量情况	100
第三节 汽车及零配件制造企业	105
第四节 电力运输行业	108
第五节 其他作业环境	113
一、电炉炼钢厂	113
二、配电柜	113
三、控制室及办公环境	113
第六节 WHO 对工作环境暴露的评估	114
一、磁场职业暴露的评估	114
二、电场职业暴露的评估	115
三、暴露评估结论	115
第四章 工作场所低频电磁场的接触限值及测量方法	116
第一节 低频电磁场的职业接触限值	116
一、ICNIRP 低频电磁场职业接触推荐水平	116
二、IEEE 低频电磁场最大容许接触水平	119
三、ACGIH 亚射频电磁场阈限值	119
四、日本时变低频电磁场职业接触容许值	119
五、我国低频电磁场职业接触限值	120
第二节 低频电磁场的测量	124
一、测量仪器	124
二、国内外低频电磁场测量方法的进展及分析	125
三、工作场所低频电磁场推荐测量方法	135
第五章 职业健康危险度评估及管理	139
一、健康危险度评估概述	139
二、职业健康危险度评估	140
三、低频电磁场职业健康风险评估	141
四、低频电磁场危险度管理	145
参考文献	146

第一章 电磁场的基本知识

电磁学是一门既古老又现代的科学。人类在公元前 500 多年就发现了电磁现象，但是电磁学的迅速发展和广泛应用还是在 18 世纪以后。18 世纪，人们通过对电和磁的定量研究，发现了许多重要的规律，例如法国物理学家库仑（Charles-Augustin de Coulomb, 1736—1806）发现了电荷间相互作用的规律。19 世纪，科学家们发现了电和磁的相互联系，电磁感应、电磁场、电磁波等理论得到不断的发展和广泛的应用。20 世纪，电磁学的应用得到了进一步的发展，广播、电视、电话等已成为人们生活不可缺少的一部分。

第一节 电 场

电场（electric field）是存在于电荷周围能传递电荷与电荷之间相互作用的物理场。它是电荷及变化磁场周围空间里存在的一种特殊物质。与通常的实物不同，它不是由分子、原子所组成，但它是客观存在的，电场具有通常物质所具有的力和能量等客观属性。电场的力的属性表现为电场对放入其中的电荷有作用力，这种力称为电场力；电场的能的属性表现为当电荷在电场中移动时，电场力对电荷做功（这说明电场具有能量）。

一、电荷

带正负电的基本粒子叫电荷（electric charge），带正电的粒子叫正电荷（表示符号为“+”），带负电的粒子叫负电荷（表示符号为“-”）。中学时我们都做过摩擦起电的试验，用丝绸摩擦过的玻璃棒带正电荷，用毛皮摩擦过的硬橡胶棒带负电荷。这是因为，在摩擦起电中，一个物体失去一些电子而带正电，另一个物体得到这些电子而带负电。摩擦起电不是创造了电荷，而是使物体中的正负电荷分开，并使电子从一个物体转移到另一个物体，在转移的过程中，电荷总量不变。

自然界存在的正负电荷具有同种电荷相互排斥，异种电荷相互吸引的特性。丝绸或毛皮摩擦过的玻璃棒能吸引纸屑（图 1-1），是因为摩擦使玻璃棒带有电荷，纸屑中的正、负电荷在这种

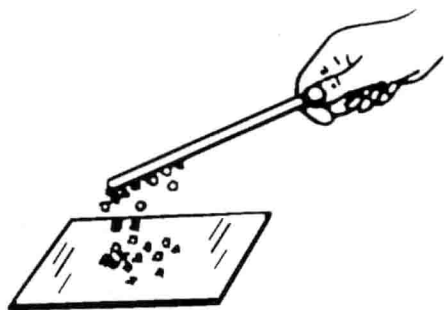


图 1-1 带电玻璃杯吸引纸屑

静电场中，按异性相吸、同性相斥的规律定向移动，从而被玻璃棒吸引。电荷间这种相互作用的电力叫做静电力或库仑力，遵守库仑定律原则。库仑定律是指真空中的两个点电荷之间相互作用的力，跟它们的电荷量的乘积成正比，跟它们的距离的二次方成反比，作用力的方向在它们的连线上。如果用 Q_1 和 Q_2 表示两个点电荷的电荷量，用 r 表示它们之间的距离，用 F 表示它们之间的相互作用力，则库仑定律的公式如下：

$$F = kQ_1 Q_2 / r^2 \quad (\text{公式 1-1})$$

注： k 为静电力常量， $k = 9.0 \times 10^9 \text{ Nm}^2/\text{C}^2$ （牛顿·平方米/平方库仑）。

二、电场及电场强度

只要有电荷存在，电荷的周围就存在着电场，电场的基本性质是它对放入其中的电荷有力的作用，这种力叫做电场力。如图 1-2 所示电荷 A 对电荷 B 的作用，实际上是电荷 A 电场对电荷 B 的作用，反之亦然。研究某个电场时，我们往往在电场中放入电荷量充分小的电



图 1-2 电荷间的相互作用

荷 q ，以避免其对研究电场的影响。由于不同的电荷 q 在被研究电场的同一点所受到的电场力 F 不同，仅用电场力的大小直接表示电场的强弱不合适。而被研究电场中，某点的电荷所受的电场力 F 与它的电荷量 q 比值恒定，我们常用 F/q 这个比值即电场强度 E 来表示电场的强弱。

$$E = F/q \quad (\text{公式 1-2})$$

电场强度的单位是伏特每米，符号是 V/m 。 $1 \text{ N/C} = 1 \text{ V/m}$ 。

由电场强度的定义和库仑定律，可以得出点电荷电场的场强公式。点电荷 Q 在真空中形成的电场中，在距离 Q 为 r 的 P 点的场强 E 的大小为

$$E = kQ/r^2 \quad (\text{公式 1-3})$$

电场强度是矢量，物理学中规定，电场中某点的场强的方向与正电荷在该点所受的电场力的方向相同，负电荷在电场中某点所受的电场力的方向与该点的场强方向相反。如果 Q 为正电荷， E 的方向就是沿着 PQ 的连线并背离 Q ；如果 Q 是负电荷， E 的方向就是沿着 PQ 的连线并指向 Q （图 1-3）。

如果几个点电荷同时存在，这时某点的场强等于各个电荷单独存在时在该点产生的场强的矢量和。例如图 1-4 中 P 点的场强，等于 $+Q_1$ 在该点产生的场强 E_1 和 $-Q_2$ 在该点产生的场强 E_2 的矢量和。

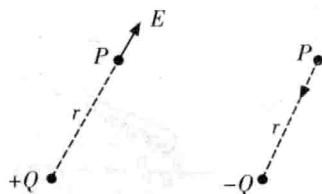


图 1-3 电场的方向

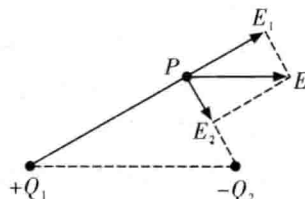


图 1-4 电场的叠加

三、电场线

为形象地描述场强的分布，在电场中人为地画出一些有方向的曲线，曲线上一点的切线方向表示该点电场强度的方向，这样的曲线叫做电场线。电场线的疏密程度与该处场强大小成正比。在没有电荷的空间，电场线具有不相交（包括相切）、不中断的特点。静电场的电场线还具有下列特性：电场线不闭合，始于正电荷（无穷近）止于负电荷（无穷远）；电场线垂直于导体表面；电场线与等势面垂直。感应电场的电场线具有下述特性：感应电场的电场线是闭合的，没有起点、终点；闭合的电场线包围变化的磁场。

图 1-5 画出了带有电荷的雷云与地面之间的电场线分布。在图 1-5 中，雷云带有负电荷，这些电荷吸引并在地面汇聚异性的正电荷。在雷云与大地之间，电场的分布是不均匀的。在地面突出物的尖端（如直立的人体头部或树木、房屋顶部）部位，正电荷的集聚较大，因此在这些部位电场线密度较大，代表着电场相对集中，电场的强度相对较高。这也就是为什么在雷雨天，人不宜直立站在空旷高处无遮蔽场所的原因。

高压架空电力线路下方，由于电力线直径很小（通常直径仅几厘米），因此电场的强度在空间的分布也是极不均匀的（图 1-6）。紧邻高压电线导体的局部部位，电场线高度密集，电场的强度很高，导致在恶劣天气条件下某些高电压导线周围的空气会产生“电”，发出“噓、噓”的电晕放电声；而离高压线越远处，电场线密度随着离高压导线的距离呈平方的倒数关系减小；在靠近地面时，电场线很疏且均匀、垂直指向地面，标志着邻近地面的电场的强度较低。

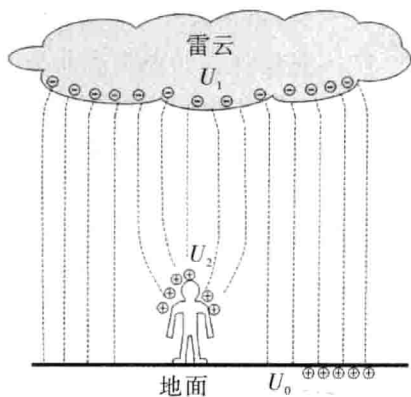


图 1-5 雷云与地面间的电场

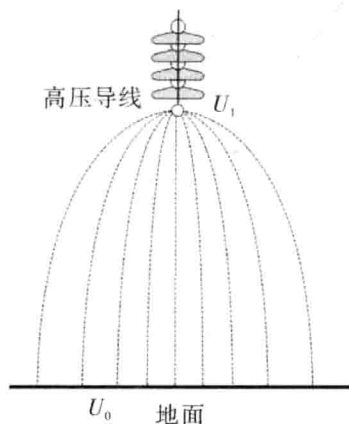


图 1-6 高压电力线下方地面
电场强度远低于邻近导线处

四、电压

电荷在电场中移动时，电场力做功，表现了电场能的属性。电荷 q 在电场中由一点 A 移动到另一点 B 时，电场力所做的功 W_{AB} 与电荷量 Q 的比值 W_{AB}/q ，叫做 A、B 两点间的电势差 U_{AB} 。

$$U_{AB} = W_{AB}/q \text{ 或 } W_{AB} = U_{AB} q \quad (\text{公式 1-4})$$

电势差也叫做电压。电压的单位是伏特，简称伏，符号是 V。如果 1 C 的正电荷在电场中由一点移动到另一点，电场力所做的功为 1 J，这两点间的电势差就是 1 V。即 $1 \text{ V} = 1 \text{ J/C}$ 。电场力所做的功可以是正值，也可以是负值，所以两点间的电势差也可以是正值或负值。日常工作中我们往往只关心两点间电势差的大小，不区分方向，这时取正值。

如果我们在电场中选择一个参考点，可以用电势差来定义电场中各点的电势 φ (V)。电场中某点的电势，等于单位正电荷由该点移动到参考点（零电势点）时电场力所做的功。有了电势的概念，就可以用电势的差值表示电势差。图 1-5 和图 1-6 中的雷云或高压线的电位为 U_1 ，而大地的电位 U_0 视为零值基准。此时雷云或高压线的电压即为 U_1 。

我国居民用电的电压是 220 V，这就是指电插座中的火线与零线间存在 220 V 电势差。按照用电规范，零线和大地是一个电位。所以，在民用供电系统中，火线与大地之间的电压（电势差）也应是 220 V，而通常工业用电、电动机等动力设备则需要 380 V（三相电源）电压。

为了能将电能输送到较远的距离，通常需要使用比民用供电电压（380 V/220 V）更高的电压。因此，我们的电力线路有 10 kV、35 kV、110 kV、220 kV、330 kV、500 kV、750 kV，甚至更高（特高压）的不同电压等级。这是指相应的交流工频电力系统，两相导线与相导线之间的标称电压（电势差）分别为 10 kV、35 kV 等。当然，还有直流输电系统，对地额定电压有正负 50 kV、100 kV、400 kV、500 kV，甚至更高（特高压）电压等级。

五、电场强度与电压的关系

电场强度是与电场对电荷的作用力相联系，电压是与电场力移动电荷做功相联系。在匀强电场中，沿场强方向的两点间的电压等于场强与这两点间距离的乘积。

$$U = Er \quad (\text{公式 1-5})$$

由此可见，在匀强电场中，场强在数值上等于沿场强方向每单位距离上的电压。

$$E = U/r \quad (\text{公式 1-6})$$

如把两块金属极板加上 220 V 民用电压，拉开到相距 1 m 的距离（图 1-7）。在相距 1 m 极板空间中，电场强度 E 就为 220 V/m（即 0.22 kV/m）。如果把极板拉近至相距 10 cm（即 0.1 m），那么电场强度 E 就达到 2.2 kV/m。

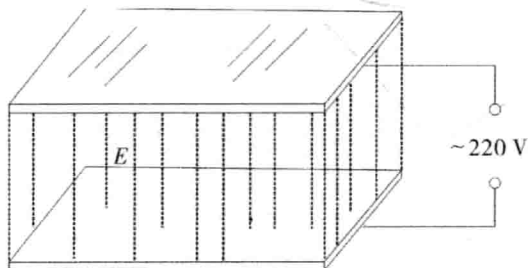


图 1-7 220 V 民用电压产生的电场强度

第二节 磁 场

磁场 (magnetic field) 是磁铁或电流周围存在的矢量场, 是由磁场强度与磁通密度表征的电磁场的组成部分。与电场一样, 磁场也是一个抽象概念, 是永磁体或电流周围存在的一种非基本粒子的物质形态。它通过对周围空间的运动电荷或其他磁体的相互作用而显现其存在。

一、磁场方向和磁感线

物理学中规定, 在磁场中的任何一点, 小磁针静止时北极所指的方向为该点的磁场方向。早先, 迈克尔·法拉第 (Michael Faraday, 1791—1867) 就曾在玻璃板上撒布铁粉, 并轻轻敲击振动, 使铁粉在永磁铁或电流导线周围排列成线状, 铁粉在磁场作用下形成的虚拟曲线被称为磁力线 (或磁感应线)。图 1-8 是应用现代科技手段建立的永磁铁周围磁性颗粒按磁力线方向有序排列的立体演示模型 (引自 <http://ylsh.mlc.edu.tw> 网站)。磁力是由于铁粉在磁场中受力, 按异性相引、同性相斥原理排列而形成。磁力线曲线簇是一组闭合曲线, 可作为磁场分布状况的一种图示工具。条形磁铁、马蹄形磁铁、长直的载电流导线以及载电流空心线圈周围形成的磁力线分别如图 1-9 所示。

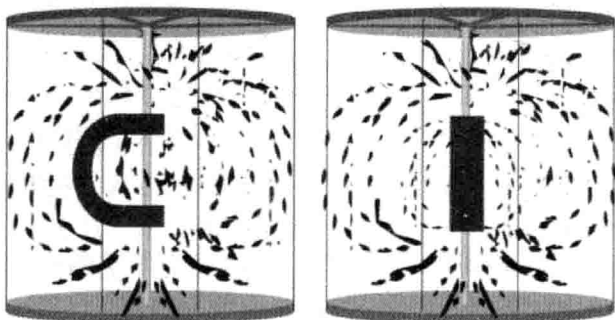


图 1-8 永磁铁的磁力线显示模型

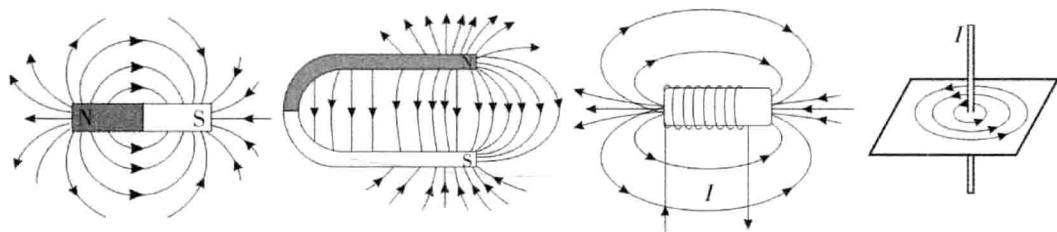


图 1-9 永磁铁及电流产生的磁力线

永磁铁在周围产生的磁场是大小、方向基本不随时间变化的恒定磁场, 通常称这种磁场为“静磁场”。电流在其周围产生的磁类型则取决于导线或线圈中通过的电流: 当导线中流过大小与方向不变的直流电时, 周围产生的是“静磁场”; 当导线中流过大小方向随时间周期变化的交流电时, 周围产生的磁场也是相应频率的低频交变磁场。

二、磁感应强度和磁场强度

磁场不仅具有方向性，其强弱也不同。磁场对其中的电流有磁场力的作用，通常称为安培力。实验表明，把一段通电直导线放在磁场里，当导线方向与磁场方向垂直时，电流所受的安培力最大；当导线方向与磁场方向一致时，电流所受的安培力最小，等于零；当导线方向与磁场方向斜交时，电流所受安培力在大小值之间。精确的实验表明，通电的导线在磁场中受到的安培力的大小，既与导线的长度 L 成正比，又与导线中的电流 I 成正比。

$$F = BIL \quad (\text{公式 1-7})$$

公式可转化为

$$B = F/IL \quad (\text{公式 1-8})$$

B 为磁感应强度（又称磁通密度），是在磁场中垂直于磁场方向的通电导线所受的安培力 F 与电流 I 和导线长度 L 的乘积的比值。比值越大，表示磁场越强。在国际单位制中，磁感应强度的单位是特斯拉，简称特，国际符号为 T， $1 \text{ T} = 1 \text{ N}/(\text{A} \cdot \text{m})$ 。地面附近地磁场的磁感应强度是 $0.7 \times 10^{-7} \sim 0.3 \times 10^{-4} \text{ T}$ ，永磁体的磁极附近的磁感应强度是 $1 \times 10^{-3} \sim 1 \text{ T}$ ，电机和变压器的铁心中的磁感应强度可达 $0.8 \sim 1.4 \text{ T}$ 。在人体所处的日常生活环境中，由于磁感应强度通常比永磁体附近小得多，因此感应强度的计量单位一般采用 T 的千分单位 mT 或更小的 μT 来计量（ $1 \text{ mT} = 10^{-3} \text{ T}$ ， $1 \mu\text{T} = 10^{-6} \text{ T}$ ）。

表征电流产生磁场大小的物理量还可以用磁场强度 H ，以安培每米（A/m）为计量单位。

$$B = \mu_0 H \quad (\text{公式 1-9})$$

式中， μ_0 是比例常数（磁导率）；在真空和空气以及非磁性（包括生物的）材料中， μ 的值为 $4\pi \times 10^{-7}$ ，单位是亨利每米（ H m^{-1} ）。出于防护目的而描述磁场时，只需用 B 或 H 中的一个物理量来说明。在英美等部分国家，磁感应强度仍常用非国际计量单位高斯（Gs）或毫高斯（mGs）来计量（ $1 \text{ mGs} = 0.1 \mu\text{T}$ ）。

第三节 电磁场与电磁波

在职业与环境卫生领域，“电磁场”指的是上述客观存在的电场和磁场的统称，在这个“场”中，生物机体受上述电场和磁场性质的影响，产生非致热效应。目前，普遍认为 100 kHz 以内的电磁场均以非致热效应为主，其相应卫生标准、环境控制标准与电磁源排放标准也是在这种电场和磁场影响的基础上制定的。当频率在 10 kHz 以上时，电磁场往往不以上述电场和磁场对机体起作用，而是以下述电磁波的形式传递能量，产生致热等效效应影响人体健康。

一、电磁场及电磁波的产生

英国科学家迈克尔·法拉第与俄国物理学家海因里希·楞次（Heinrich Friedrich

Lenz, 1804—1865) 通过导体回路实验得出电磁感应定律: 导体中电流的变化会使周围空间产生变化的磁场, 磁场的变化会使线圈导体感应出变化的电场。迈克尔·法拉第发现电磁感应现象 33 年后, 英国物理学家麦克斯韦 (James Clerk Maxwell, 1831—1879) 在 1865 年分析、总结前人对电磁现象研究成果的基础上, 提出了经典电磁场理论, 并于 1865 年正式发表了描述电磁场的一组完整方程式, 提出电磁感应定律不仅适用于导体回路, 也适用于空间任意“假想回路”。他预言了空间电磁波的存在, 突破性地把电磁感应定律的应用从导体回路拓展到了空间领域, 从而成为无线电通信的奠基人。变化的磁场产生电场, 变化的电场产生磁场, 这是麦克斯韦理论的两大支柱。按照这个理论, 变化的电场和磁场总是相互联系的, 形成一个不可分离的统一的场, 这就是电磁场。电场和磁场只是这个统一的电磁场的两种具体表现。

从麦克斯韦的电磁场理论可知, 如果在空间某处发生了变化的电场, 就会在空间引起变化的磁场, 这个变化的电场和磁场又会在较远的空间引起新的变化的电场和磁场。这样, 变化的电场和磁场并不局限于空间某个区域, 而要由近及远向周围空间传播开去。电磁场这样由近及远的传播, 就形成了电磁波。研究表明, 要有效地向外界发射电磁波, 振荡电路必须具有如下特点: 要有足够高的振荡频率。理论的研究表明, 振荡电路向外界辐射能量的本领, 即单位时间内辐射出去的能量, 与频率的四次方成正比。频率越高, 发射电磁波的本领越大; 振荡电路的电场和磁场必须分散到尽可能大的空间, 才能有效地把电磁场的能量传播出去。我们在生活中熟知的中、短波调幅, 调频电台无线广播信号, 移动通信 (手机) 信号, 电视视听信号, 遥感卫星通信, 雷达等, 都是以电磁场 (或电磁波) 的形式在空间进行能量传播的。

二、电磁场的特点

根据麦克斯韦的电磁场理论, 电磁波中的电场和磁场互相垂直, 电磁波在与二者均垂直的方向上传播。图 1-10 表示了做正弦变化的电场或磁场所引起的电磁波在某一时刻的波的图像。波峰表示在该点的电场强度 E 或磁感应强度 B 在正方向具有最大值, 波谷表示在该点的电场强度 E 或磁感应强度 B 在反方向具有最大值。两个相邻的波峰 (或波谷) 之间的距离等于电磁波的波长。在传播方向上的任一点, E 和 B 都随时间做正弦变化, E 的方向平行于 x 轴, B 的方向平行于 y 轴, 它们彼此垂直, 而且都跟波的传播方向垂直, 因此电磁波是横波。电磁波在空间以一定的速度传播, 其波长 λ 、频率 f (或周期 T) 和波速 c 之间的关系遵从波动的一般关系, 即

$$c = \lambda / T = \lambda f \quad (\text{公式 } 1-10)$$

在麦克斯韦发现电磁场理论二十多年后, 德国物理学家赫兹 (Heinrich Rudolf Hertz, 1857—1894) 在 1888 年第一次用实验证实了电磁波的存在。赫兹还测定了电磁波的波长和频率, 证实了电磁波在真空中的传播速度等于光在真空中的传播速度 $c = 2.99793 \times 10^8 \text{ m/s}$, 还证明了电磁波跟所有波动一样, 能产生反射、折射、衍射及干涉等现象。现在我们用的电磁场频率的单位赫兹 (Hz) 就是以他的名字命名的。电磁波的传播如图 1-10 所示。