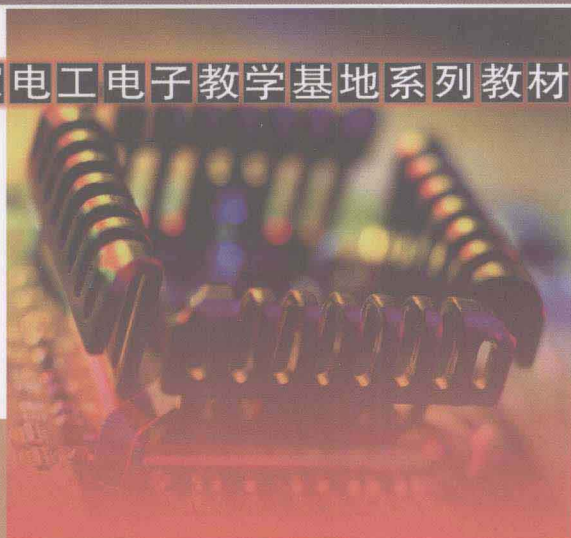
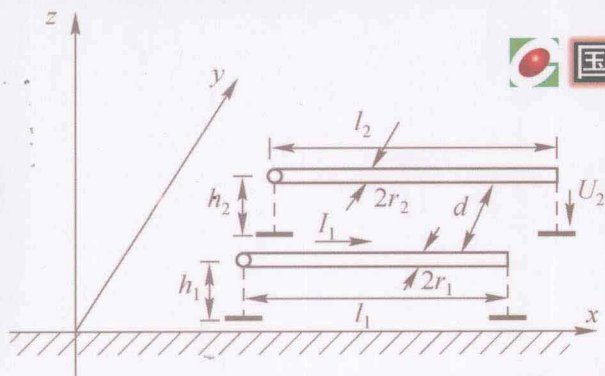




国家电工电子教学基地系列教材



电磁兼容 原理和应用

◎ 何 为 杨 帆 姚德贵 等 编著



清华大学出版社
<http://www.tup.tsinghua.edu.cn>



北京交通大学出版社
<http://press.bjtu.edu.cn>

国家电工电子教学基地系列教材

电磁兼容原理和应用

何 为 杨 帆 姚德贵 等编著

清华大学出版社

北京交通大学出版社

· 北京 ·

内 容 简 介

本书介绍电磁场的生物效应,以及电磁兼容分析的部分基础理论。在此基础上针对电力系统,特别是输变电系统的电磁兼容特点进行论述和讲解。

全书共8章,第1章介绍电磁场对人体和生物的影响,包括电磁场对生物正面和负面的影响,使读者对本书的内容产生兴趣。第2章介绍电磁干扰的基本类型和特性。第3章重点介绍如何防止和消除电磁干扰。第4章介绍常用的电磁干扰测量方法和工具。第5章介绍电磁兼容数值计算方法和预测。第6章介绍功能较为强大的电磁兼容仿真软件 IES-Coulomb。第7章介绍输变电设备的电磁环境和计算测量方法,并列出了一些作者的研究成果,以加深学生对输变电设备电磁环境的了解。第8章为特定电子装置的电磁干扰问题和消除方法。

本书可作为本科与研究生专业教材使用。

本书封面贴有清华大学出版社防伪标签,无标签者不得销售。

版权所有,侵权必究。侵权举报电话:010-62782989 13501256678 13801310933

图书在版编目(CIP)数据

电磁兼容原理和应用/何为等编著. —北京:清华大学出版社;北京交通大学出版社, 2008.12

ISBN 978-7-81123-464-0

(国家电工电子教学基地系列教材)

I. 电… II. 何… III. 电磁兼容性 IV. TN03

中国版本图书馆CIP数据核字(2008)第187753号

策划编辑:韩 乐

责任编辑:郭东青

出版发行:清华大学出版社 邮编:100084 电话:010-62776969

北京交通大学出版社 邮编:100044 电话:010-51686414

印刷者:北京东光印刷厂

经 销:全国新华书店

开 本:185×230 印张:15.25 字数:342千字

版 次:2009年3月第1版 2009年3月第1次印刷

书 号:ISBN 978-7-81123-464-0/TN·62

印 数:1~4 000册 定价:24.00元

本书如有质量问题,请向北京交通大学出版社质监组反映。对您的意见和批评,我们表示欢迎和感谢。

投诉电话:010-51686043, 51686008; 传真:010-62225406; E-mail: press@bjtu.edu.cn。

总 序

当今信息科学技术日新月异,以通信技术为代表的电子信息类专业知识更新尤为迅猛。培养具有国际竞争能力的高水平的信息技术人才,促进我国信息产业发展和国家信息化水平的提高,都对电子信息类专业创新人才的培养、课程体系的改革、课程内容的更新提出了富有时代特色的要求。近年来,国家电工电子教学基地对电子信息类专业的技术基础课程群进行了改革与实践,探索了各课程的认知规律,确定了科学的教育思想,理顺了课程体系,更新了课程内容,融合了现代教学方法,取得了良好的效果。为总结和推广这些改革成果,在借鉴国内外同类有影响教材的基础上,决定出版一套以电子信息类专业的技术基础课程为基础的“国家电工电子教学基地系列教材”。

本系列教材具有以下特色:

- 在教育思想上,符合学生的认知规律,使教材不仅是教学内容的载体,也是思维方法和认知过程的载体。
- 在体系上,建立了较完整的课程体系,突出了各课程内在联系及课程群内各课程的相互关系,体现微观与宏观、局部与整体的辩证统一。
- 在内容上,体现现代与经典、数字与模拟、软件与硬件的辩证关系,反映当今信息科学与技术的新概念和新理论,内容阐述深入浅出、详略得当。增加工程性习题、设计性习题和综合性习题,培养学生分析问题和解决问题的素质与能力。
- 在辅助工具上,注重计算机软件工具的运用,使学生从单纯的习题计算转移到基本概念、基本原理和基本方法的理解和应用,提高了学习效率 and 效果。

本系列教材包括:

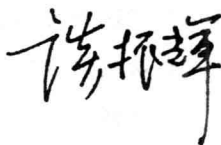
《基础电路分析》、《现代电路分析》、《电路分析学习指导及习题精解》、《模拟集成电路基础》、《信号与系统》、《信号与系统学习指导及习题精解》、《模拟电子技术》、《电子测量技术》、《微机原理与接口技术》、《电路基础实验》、《电子电路实验及仿真》、《数字实验一体化教程》、《数字信息处理综合设计实验》、《电路基本理论》、《现代电子线路》(含上、下册)、《电工技术》、《电磁兼容原理和应用》。

本系列教材的编写和出版得到了教育部高等教育司的指导、北京交通大学教务处及电子与信息工程学院的支持,在教育思想、课程体系、教学内容、教学方法等方面获得了国内同行们的帮助,在此表示衷心的感谢。

北京交通大学

“国家电工电子教学基地系列教材”

编审委员会主任

A handwritten signature in black ink, appearing to read '谈振' (Tang Zhen), written in a cursive style.

2009年1月

前 言

随着超高压、特高压电网的建设和电力系统内部大量采用新技术，在电力系统中的电磁兼容性问题越来越突出，其突出问题主要体现在：电磁环境的恶化导致输变电设备建设受到来自周边群众的怀疑和抵制；大量二次设备采用了数字化设备控制和全自动无人值守，加大了设备抗干扰能力的风险。这些问题的出现要求现代电气工程教育必须补充新的电磁兼容知识。而传统的电气工程教育没有对电磁兼容进行系统、有针对性地设置课程，因此电气工程本科、研究生乃至博士生教育需要一本针对性强的电磁兼容教材。

本教材是在作者多年讲授研究生和本科生选修课程基础上，结合电力系统电磁兼容的科学研究成果，汇集而成的本科高年级、研究生研究指导书和教材。希望在介绍一些电磁兼容的基础理论上，针对电力系统，特别是输变电系统的电磁兼容特点进行论述和讲解。主要包括：第1章介绍电磁场对人体和生物的影响，目的是让读者知道电磁场对生物正面和负面的影响，使读者对本书的内容产生兴趣，继而从人到设备自然过渡，定义电磁兼容的含义和对设备的影响的基本面；第2章介绍电磁干扰的基本类型和特性；第3章则重点介绍如何防止和消除电磁干扰；第4章介绍常用的电磁干扰测量方法和工具；第5章介绍电磁兼容数值计算方法和预测，重点是有限元法；第6章则选择了一个我们认为功能较为强大的电磁兼容仿真软件进行详细介绍，以期读者了解成熟的商业软件和在电磁兼容计算中的用法；第7章介绍输变电设备的电磁环境和计算测量方法，也列出了一些作者的研究成果，以加深学生对输变电设备电磁环境的了解；最后一章为特定电子装置的电磁干扰问题和消除方法。

总之，本书是一本全面而又特别针对电力系统电磁兼容的书，可以作为教材，也可以作为研究指导用书。在用做教材时可以根据本科生、硕士生和博士生的不同要求选择不同章节。

本书由何为、杨帆、姚德贵（河南电力试验研究院高级工程师）主编，李永明编写了第4章和第5章的部分内容，张占龙编写了第3章的部分内容。

作 者
2009.1

于重庆大学输配电装备与系统安全及新技术国家重点实验室

目 录

第 1 章 生物和电气设备的电磁兼容性	1
1.1 磁场对人与生物的影响	1
1.1.1 地磁场的生物效应	1
1.1.2 极弱磁场的生物效应	2
1.1.3 恒定强磁场的生物效应	3
1.1.4 交变磁场的生物效应	4
1.1.5 磁场对生物组织和器官的效应	4
1.1.6 关于人体接触磁场的安全问题	6
1.2 高频电磁波对人和生物体的影响	8
1.2.1 微波的生热效应原理	8
1.2.2 微波对人体的热效应	10
1.2.3 微波的非热效应	13
1.2.4 微波的生物效应和医学应用	13
1.2.5 微波对人和动物生理功能的影响	14
1.2.6 微波在生物体内能量分布的理论计算	16
1.3 低频强电场对人和生物的影响	18
1.3.1 输变电走廊的工频场强分布特点	18
1.3.2 高压输变电设备电磁污染对人体健康的危害	19
1.3.3 输电线及变电站电磁辐射影响人体及生物健康的典型事例	19
1.4 电力设备的电磁干扰与电磁兼容性	20
1.4.1 电力系统电磁兼容	20
1.4.2 电力二次设备电磁干扰	21
1.4.3 电磁兼容的基本定义和分类	22
习题	23
第 2 章 电磁干扰基本类型与特性	24
2.1 传导干扰	24
2.2 传导路径和路性干扰	25
2.2.1 电路性干扰耦合模型	25
2.2.2 共模干扰与异模干扰	28
2.3 电路性耦合干扰的计算	31

2.3.1	电路性耦合干扰的分频特性	31
2.3.2	电路性干扰的实例计算	32
2.4	电容性耦合干扰	34
2.4.1	电容性耦合的模型	34
2.4.2	电容性耦合的频率特性	34
2.4.3	电容性耦合干扰的计算	35
2.5	电感性耦合干扰	37
2.5.1	电感性耦合的模型	37
2.5.2	电感(磁)耦合干扰的计算	38
2.6	电容性耦合与电感性耦合的综合与区分	39
2.6.1	电容性耦合与电感性耦合的综合考虑	39
2.6.2	电容性耦合与电感性耦合的区分	41
2.7	辐射干扰	41
2.7.1	辐射源	42
2.7.2	单元电偶极子的电磁场	42
2.7.3	单元磁偶极子的电磁场	44
2.7.4	单元偶极子的阻抗	45
2.8	实际导体的辐射源等效	47
2.8.1	实际长线型导体的辐射源等效	47
2.8.2	实际导体回路的辐射源等效	48
2.8.3	辐射耦合途径	48
	习题	50
第3章	电磁干扰的防护和抑制	51
3.1	接地与搭接	52
3.1.1	接地与搭接定义	52
3.1.2	接地的分类	53
3.1.3	搭接方法与类型	58
3.1.4	地环路干扰及其抑制方法	58
3.1.5	良好搭接与不良搭接	62
3.1.6	搭接的有效性	63
3.2	隔离	64
3.2.1	隔离变压器	65
3.2.2	光电耦合器	66
3.3	屏蔽	67
3.3.1	静电屏蔽	67

3.3.2	磁屏蔽	69
3.3.3	电磁屏蔽	72
3.3.4	电磁屏蔽效能	72
3.3.5	多层屏蔽	75
3.3.6	薄膜屏蔽	75
3.3.7	不均匀屏蔽理论	78
3.3.8	屏蔽设计的综合考虑	79
3.4	滤波	82
3.4.1	滤波的基本概念	82
3.4.2	滤波器的特性与分类	83
3.4.3	反射式滤波器	84
3.4.4	低通滤波器	86
3.4.5	低通滤波器的选择	89
3.4.6	滤波器的安装	89
	习题	91
第4章	电磁兼容测量与仪器	92
4.1	电磁兼容测量的内容	92
4.1.1	电磁干扰测量的内容	92
4.1.2	电磁敏感度测量的内容	92
4.1.3	电磁兼容预测量和标准测量	93
4.2	测量的一般过程	93
4.3	测量环境	95
4.3.1	开阔试验场地	95
4.3.2	屏蔽室	96
4.3.3	电波暗室	97
4.3.4	GTEM 小室	100
4.4	测量仪器	101
4.4.1	测量接收机	102
4.4.2	频谱分析仪	104
4.4.3	测量用天线	104
4.4.4	电源阻抗稳定网络(人工电源网络)	107
4.4.5	信号源	107
4.4.6	功率放大器	108
4.4.7	一些测量附件	108
4.5	无线工频电磁场测量系统	109

4.5.1	测量系统工作原理	109
4.5.2	系统硬件部分	110
4.5.3	系统软件部分	111
4.5.4	无线工频电磁测量分析系统测试实验	112
4.6	高压变电站工频电磁环境评测和防护	115
4.6.1	测试方法	115
4.6.2	测试数据与分析	117
	习题	120
第5章	电磁兼容数值计算方法和预测	121
5.1	电磁兼容常用计算方法	121
5.1.1	解析法	121
5.1.2	近似法	121
5.1.3	数值法	122
5.2	有限元法	123
5.2.1	Ritz 法	123
5.2.2	有限元法的实施步骤	124
5.3	矩量法	126
5.3.1	矩量法的数学基础——加权余量法	126
5.3.2	基函数 $\{N\}$	128
5.3.3	权函数 $\{W\}$ 的选取	130
5.4	边界元法	132
5.4.1	边界方程	133
5.4.2	h_k 和 g_k 的计算	133
5.4.3	拐点问题的处理	137
5.5	时域有限差分法	137
5.5.1	时域有限差分法的基本原理	139
5.5.2	时域有限差分法的实施步骤	140
5.6	模拟电荷法	141
	习题	141
第6章	IES-Coulomb 电场仿真分析软件	143
6.1	软件算法和求解方法的设置	143
6.1.1	算法选择	143
6.1.2	网格剖分	146
6.2	计算举例	146
6.2.1	平行板电容器电场分析	146

6.2.2 高压输电绝缘子电场计算结果	156
习题	160
第7章 输电线路和变电设备的电磁环境	161
7.1 输电线路简介	161
7.1.1 我国架空型输电线路的现状	161
7.1.2 架空输电线路的结构	162
7.2 输电线路工频电磁场	165
7.2.1 高压输电线路的电磁环境制约特高压电建设	165
7.2.2 高压输电线路的工频电磁场测量分析	166
7.2.3 输电线工频电磁场计算方法	170
7.2.4 输电线电场的计算实例	172
7.2.5 输电线磁场的计算实例	176
7.3 高压输电线电场逆问题研究及其应用	180
7.3.1 逆问题的数学抽象与病态特性	180
7.3.2 输电线工频电场逆问题	182
7.4 变电站内工频电磁场测量分析	185
7.4.1 高压变电站内工频电磁场环境	185
7.4.2 变电站工频电场仿真计算	190
7.5 干式空心电抗器工频磁场环境	192
7.5.1 仿真与测量结果对比	194
7.5.2 不同排列下空心电抗器的磁场环境	196
7.5.3 三相电抗器组安装方式对磁场的影响	199
习题	203
第8章 数字电路中的干扰与抑制	204
8.1 D/A 转换电路的干扰与抑制	204
8.2 微控系统内的干扰与抑制	209
8.2.1 干扰源	209
8.2.2 不同干扰的抑制措施	210
8.3 高速集成电路电磁兼容性	215
8.3.1 高速电路设计中的问题	215
8.3.2 波的传播与反射	216
8.3.3 消除阻抗反射的措施	217
8.3.4 合理地解决阻抗匹配问题	218
8.4 高频电路中的信号串扰问题	219
8.4.1 数字信号的开关状态对传输线性能的影响	222

8.4.2 高频线路设计中的电磁辐射	225
8.4.3 印制板的电磁兼容性的设计与解决	227
习题	229
参考文献	230

第1章 生物和电气设备的电磁兼容性

大千世界里,生物体(包含人)和维持世界现代生活运转的大量工具、设备构成了现代社会。随着现代社会中电气、电子设备和系统的广泛应用,它们在运行中伴随着电磁能量的转换,导致大量宽频谱的电磁信号充满整个人类生存空间,构成了极其复杂的电磁环境,对人类生存的环境也造成了新的影响。这就使得人们不得不考虑这样一个问题:电磁环境越来越复杂,如何保证我们在这个复杂的电磁环境下身体机能不会受到危害;如何才能提高现代电子、电气设备和系统在其中的适应能力,使其能相互正常工作而不导致性能降低。这就出现了所谓的电磁兼容问题。电磁兼容是指生物体、设备或系统在其所处的电磁环境中能正常工作且不对该环境中任何事物构成不能承受的电磁干扰的能力。而电磁干扰是指任何可能引起装置、设备或系统性能降低或者对有生命或无生命物质产生损害作用的电磁现象。电磁现象是伴随着我们现代生活的一种无法回避的事实,由此,电磁干扰也是普遍存在的;但是,这种干扰一旦引起装置、设备或系统性能降低或者对有生命或无生命物质产生损害作用,就必须引起我们高度重视,并加以研究。

由此,分析和解决电磁兼容问题,其本质乃须了解电磁干扰发生的类型及特点,然后才能采取合理的、有针对性的措施来达到电磁兼容的目的。本书首先要介绍的就是生物和电气设备的一些电磁兼容性基础知识。

1.1 磁场对人与生物的影响

磁场生物效应的研究,近年来在国内外得到蓬勃发展。从目前已有的实验资料看,磁场的生物效应种类繁多,性质各异。电磁场在频率较低时可以分为电场与磁场。电场对人与生物的影响主要集中在超、特高压设备四周,在后面有专门的讨论,本节主要讨论磁场对人和生物的影响。磁场可以分为强磁场与弱磁场,弱磁场主要是地磁场。

1.1.1 地磁场的生物效应

地磁场是地球上始终存在的一种生物和人的环境物理因素。在生物长期演化过程中,已经适应了这一环境因素的影响,有些生物还利用地磁场发挥一定的生理功能。但当地磁场发生剧烈变化时,人、动物及植物会出现生理状态的改变。

1. 生物的向磁性和导航作用

一些生物体内存在着能感知地磁场的器官。如鸽子、猴、鳗鱼和蜗牛等,它们可借助地磁场进行定向和导航。1981年,Wiltschko等的实验表明,地磁场是鸽子“认家”的第一定向源;而太阳则是有经验的鸽子“认家”的第二定向源。科学研究发现,在蜜蜂、鸽子和海豚体内有 Fe_3O_4 颗粒。如太平洋海豚头部硬脑膜组织中发现强磁性物质,其天然剩磁矩达 $2 \times 10^{-9} \text{ T/cm}^3$,并能容易退磁,具有软磁特性。经初步研究认为, Fe_3O_4 可能是导航磁传感器,其磁矩与地磁作用后会发生相互作用。再如发现蜜蜂腹部含铁颗粒和铁蛋白,以非晶氧化铁状态存在。每只蜜蜂的感生磁矩约 $2 \times 10^{-6} \text{ emu}$ 单位,相当于 $2.2 \times 10^{-8} \text{ g}$ 的 Fe_3O_4 。

一些细菌具有沿地磁方向游动的本领,即向磁性。1975年,科学家发现一些海水中的细菌群体有“磁列”,在电镜下可看到两列不透明的晶体,每列长约500 nm。近年来研究又确定了这些磁性颗粒是 Fe_3O_4 ,微粒尺寸约50 nm,正好大于超顺磁性临界尺寸,而小于多畴的临界尺寸(80~120 nm),所以可构成单畴永磁体,适应它们的厌氧性或微氧性要求。这种分析已被在美国(北半球)、新西兰(南半球)和赤道区的细菌游动方向所证实。

研究细菌的向磁性有以下意义:可以从研究磁与生物作用阐明某些生物行为;可利用细菌制造单畴磁粉;用细菌回收铁可比化学方法提高效率2万~4万倍。近年来,在人体中也发现有强磁物质富集处。经电镜和磁测量确定,在人鼻窦壁有一层铁质层。它并非来源于环境污染,据推测可能有三种功能:①是人体内存储铁的组织;②与人体进化中逐步消退的磁感觉有关;③有助于骨的生长和复原。

2. 地磁场变化引起的生物效应

地磁场具有周期性的变化,受太阳黑子活动(磁暴)的强烈影响,这些变化对生物和人体的生理状态有一定作用。在不同地区的研究者都发现,一些生物和人的生理节律多呈现与地磁场有协调和同步的相关性。例如,有人发现雌性鼠肝中糖元的周日变化与地磁倾角变化 ΔD 有正相关性。不少研究发现,在太阳发生磁暴期间,由于地磁场有较强烈变化,对人的精神和生理、病理有一定影响。例如,德国一城市对5年中68次强磁暴期间的死亡率、发病率和神经错乱症的统计学研究表明,二者之间有较明显的相关性。我国在对原发性高血压患者血压受磁暴影响的研究中,研究者观测了230例高血压患者,发现:在烈性磁暴期间,停药或治疗组的收缩压、舒张压和平均压都逐日下降;但低磁暴和静磁日无明显变化和差异。此外,地磁场的年周期变化中,每年3—4月和9—10月是地磁变化的峰值期。该期间,包括血压在内的人体生理、神经和体液的变化规律也与此相似。

1.1.2 极弱磁场的生物效应

在航天飞行和宇宙空间研究中,由于人类生活在地球磁场中,但人要进入的宇宙空间环境

磁场比地磁场的强度还要弱得多。如行星际磁场约为 5×10^{-9} T, 月球和一些行星表面磁场也在 $10^{-9} \sim 10^{-7}$ T 范围内, 研究极弱磁场的生物效应是宇宙医学的一个内容。在高质量的磁屏蔽室内, 用特殊设计亥姆霍兹 (Helmholtz) 型磁场线圈系统和电子伺服系统, 可制造模拟空间磁场的环境。

各种生物或生物组织的极弱磁场效应很不相同。例如, 把鸡的胚胎组织放在约 5×10^{-9} T 磁场中培养 4 d 后, 对胚胎大小和发育都未见影响; 但把小白鼠放在约 $(1.0 \pm 0.5) \times 10^{-7}$ T 磁场中饲养一年后, 小白鼠的寿命缩短 6 个月, 而且不能再生育。实验观察到, 海军人员在极弱磁场中 ($\leq 5 \times 10^{-8}$ T) 的反应, 在 14 d 中未观测到生理和心理上的明显变化, 但视觉的临界闪光融合频率 (即此频率的闪光, 人眼看来觉得是一种稳定的光) 有所下降。

1.1.3 恒定强磁场的生物效应

强磁场一般指 0.01 T 以上的磁场。它可分为恒定均匀强磁场和梯度磁场两种类型。研究恒定强磁场的生物效应, 必须同时考虑磁场强度、梯度和作用时间等诸因素。

1. 恒定均匀强磁场的生物效应

实验报道, 把细菌放置于强度高于 1.4 T 的恒定均匀磁场中, 能抑制其生长。把海胆卵放在 10 ~ 14 T 的超导体强磁场中, 经过 2 h, 观察到其早期分裂受到显著的延迟。把果蝇放在不同强度的均匀恒定磁场中, 当强度为 0.01 ~ 0.15 T 时, 形态上的畸变不显著; 强度增加到 0.3 ~ 0.4 T 时, 畸变率就迅速增加。这表明, 对某种生物要引起明显的某种效应, 需要一定的临界场强——阈值。把小白鼠长期饲养在约 0.4 T 均匀磁场中, 其肝脏氧化酶活性变化, 尿中 Na^+ 和 K^+ 含量显著增加, 肾上腺也发生病理变化; 但如放在 10 ~ 14 T 的更强磁场中 1 h, 却没有明显的异常变化。这表明, 生物效应不但与场强有关, 而且与作用时间长短有关。故采用磁场强度与时间乘积——磁场作用剂量, 来表示对生物的影响 (单位用 Gh 或 Th)。对人的血凝速率的研究表明, 把红细胞分别置于 0.005 T、0.04 T、0.5 T 磁场中, 其凝集速率分别增加了 21%、25% 和 30%。

2. 恒定梯度磁场的生物效应

梯度场对生物的影响更为显著。例如, 把果蝇放在 10 ~ 14 T 均匀磁场中 1 ~ 2 h 未见显著变化, 但把果蝇的蛹或虫放在梯度约为 0.9 T/mm、强度为 2.2 T 的不均匀场中, 1 小时龄的果蝇蛹几分钟后便死亡, 5% ~ 10% 的成虫呈现严重的羽翅反常和体态畸变。实验报道, 把移植有肿瘤的小白鼠放在梯度约 0.1 T/cm、强度 0.24 ~ 0.45 T 不均匀磁场中饲养, 肿瘤增长缓慢, 到 15 天后便停止增长, 到第 22 天肿瘤开始缩小 (这时未加磁场处理的小白鼠却因肿瘤长大而死亡), 到第 27 天, 肿瘤便完全消失。这一有意义的实验为医治肿瘤提供了另一种物理治疗方法的可能性。

1.1.4 交变磁场的生物效应

交变磁场比恒定磁场的生物效应要复杂得多,因为生物体电磁感应发生了附加涡电流效应,该涡电流则会产生一系列的附加物理效应,比如热和粒子流的改变。

在交变磁场中,人会发生磁闪光效应,即人头部或眼睛受到 0.01 T 以上磁场刺激时,或恒定磁场电流接通和断路的瞬间,人眼会产生光感觉现象。磁闪光强度和特性,与交变磁场频率有关。当频率在 20 ~ 30 Hz 时,闪光效应最显著。研究提示,这是由于视网膜受交变磁场作用,进而产生生物电流所引起的。用青蛙视网膜做实验,在 0.02 T 以上、频率 20 Hz 的交变磁场中,用微电极可记录到视网膜神经节的电活动,发生电位变化对磁场变化的延迟时间是 5 ms,而对光刺激的延迟时间是 85 ms (Lovsund, 1981),所以应用交变磁场刺激视网膜较光刺激反应时间更短。交变磁场可抑制大肠杆菌的生长。把培养在 0℃ 磷酸盐缓冲液中的大肠杆菌分别放置于 60 Hz、0.002 T 和 600 Hz、0.002 T 的交变磁场中,再用电镜观察,显示一些细菌的细胞壁破裂,这可能是由于鞭毛在交变电磁力作用下断裂引起的 (Raman, 1981)。将 YC-8 淋巴瘤细胞放置在 200 Hz 振荡磁场中,发现其生长加快;但将它们放在 60 Hz 的旋转磁场中,生长却变慢了;在 50 Hz、0.02 T 的交变磁场中,生长也变慢了,其机理尚不清楚。在 50 Hz、0.02 T 的交变磁场中,能增加小鼠和大鼠对感染的抵抗力,表现为血中的类固醇提高和白细胞数目增加。把豚鼠饲养在 50 Hz、0.02 T 的交变磁场中数周,发现许多器官的生理功能有改变,但在一个多月后,这些变化可以复原。

1.1.5 磁场对生物组织和器官的效应

1. 磁场对心血管系统的作用

1984 年,国内报道了磁场对正常人血及凝血系统的影响研究,研究者从磁场对治疗血小板减少性紫癜、再生障碍性贫血有一定疗效出发,为探索其机理,分别用正常人全血样品置于 0.05 T 的恒定和交变磁场中 30 min,然后测定白陶土部分凝血活酶时间 (KPTT)、凝血酶原时间 (PT)、凝血酶时间 (TT) 和红细胞压积、全血黏度。结果表明,恒定和交变磁场作用后均能使 KPTT 明显缩短。研究者认为磁场有增强内源凝血第一阶段某些酶的活性,促进凝血因子活化,加强凝血因子复合物凝血活性的功能,所以外加磁场对内源凝血系统有影响,但不会引起凝血障碍和发生凝血等现象。1987 年,另一实验研究了旋转磁场对全血黏度的影响。从实验结果出发,研究者认为旋转磁场对血液黏度有降低效果,而且比一些常用活血化淤药效果更加显著。

国外学者将成年鼠放置在 1.5 T 的磁场中 5 h 后,心电图各波并未发现反常。1987 年国内有一例关于磁场对蟾蜍心功能影响的报告。研究者用旋转磁场分别作用于相当于人的足三

里等穴位处,结果表明,心率无明显变化,但心搏幅度有显著改变,磁场作用于足三里和曲池穴处使心搏幅度增大,作用于内关处使心搏幅度减小。用旋转磁场作用于离体心脏时,使心搏幅度和心输出量减小。为了解一些诊断和治疗用磁场对心脏功能有无伤害作用,1982年,Polson报道,用上升时间很短的磁场作用于小鼠,从心电图未发现明显变化。研究者认为用核磁共振磁场对心脏不能产生直接的损害作用。1984年国内报道了旋转磁场和振动对大鼠心率和药物麻醉作用影响的实验。研究者分析结果认为,所用旋转磁场对心电频率及药物麻醉作用未见有显著影响,但振动却使药麻作用时间延长并加快麻醉作用。

2. 磁场对消化器官的作用

近年来国内报道了一些磁场对胃肠功能影响的实验。1984年,报道了对家兔小肠运动影响的观测:研究者用旋转磁场(平均强度 $0.08 \sim 0.1 \text{ T}$)在距动物腹壁 0.2 cm 处作用,结果表明,家兔小肠的运动振幅和频率都受到明显的抑制。1987年,报道了磁场对鼠肠蠕动和吸收功能影响的观测,研究者用旋转磁场(0.15 T)在动物腹部处理 20 min ,发现能明显地增快小鼠小肠和豚鼠结肠的蠕动;但过快的蠕动会在药物作用下减慢,并可促进肠管对水和盐的吸收。1985年,报道了用磁化的口服补液盐(MORS)对鼠胃肠推进功能影响的观测,结果表明,口服磁化补液盐具有抑制胃肠推进运动的作用。研究者认为,可能是磁化补液盐深液酸碱度变化和游离钙离子的减少,使胃肠平滑肌活动减弱。

3. 磁场对其他器官和系统的作用

磁场是否有明显的镇痛作用?1983年国内报道了磁场对小鼠实验性疼痛反应的影响。研究者用永磁片($0.15 \sim 0.25 \text{ T}$)贴敷于小鼠大腿外侧,分别用热饭、热烫、醋酸和电刺激引起疼痛,再测量疼痛的反应时间,结果发现,磁场对上述刺激引发的疼痛有镇痛效果,且随着磁场强度增大而效果增强。研究者认为,镇痛主要对慢性钝痛有效。其机制可能是磁场降低了感觉神经末梢对外界刺激的感应性,减小了感觉神经冲动的传导。1987年,国内有人进行了磁场对脑电波影响的观测。研究者选择神经衰弱症状者为对象,用 0.18 T 的永磁片置于受试者脑部,通过检测脑电波发现,安放磁片后,有典型的慢活动的脱电波出现,而 α 波和 α 节律消失。研究者认为,这反映了磁场能促进入睡,并且有镇静作用。为了了解磁场是否确有消炎作用及其消炎机理,1987年国内报道了磁场对炎症介质致炎作用影响的研究结果。研究者选用了四种能促进渗出同时又强烈致痛的炎症介质,将其注入大鼠足皮下,以排水容积法测定其肿胀水平指标,用旋转磁场(平均强度 0.13 T)处理其足部。实验结果表明,旋转磁场有非常明显的降低炎症介质的致炎作用,对徐缓激肽、前列腺素 E_2 、组织胺和五羟色胺介质的致炎作用,其消肿效率分别为 -62.5% 、 -54% 、 -55% 和 -54% 。研究者认为,磁场作用表现在能阻御急性渗出过程和促进肿胀吸收过程。