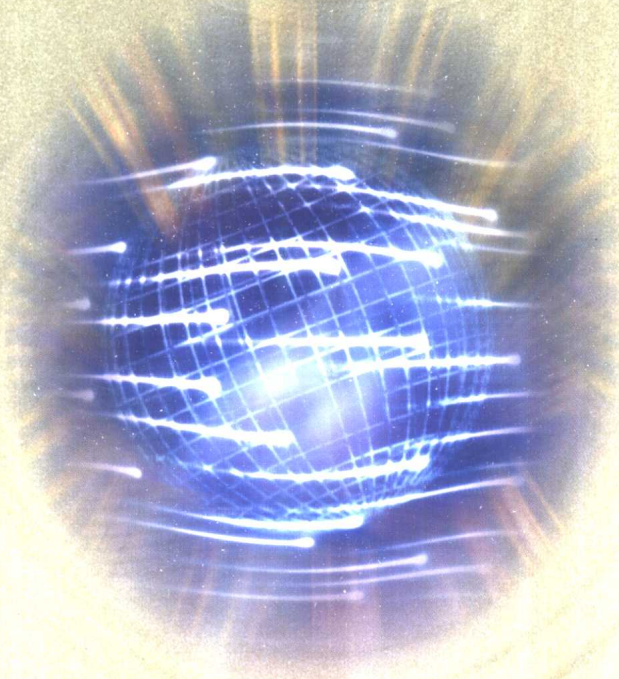


电磁兼容理论与应用技术丛书

电磁生物效应

DianCi ShengWu XiaoYing

刘亚宁 主编



北京邮电大学出版社
www.buptpress.com

《电磁兼容理论与应用技术丛书》

电磁生物效应

主 编 刘亚宁

副主编 郭 鹤 高敏纲 吕英华

编 者 (以姓氏笔画为序)

王保义	王晓武	任冬青	刘军叶
吴彦卓	孙 诚	陈 涛	曲润江
郝晓红	柳 霞	温 健	曹丽华
席小莉	屠学民	魏 明	

北京邮电大学出版社

·北京·

内 容 简 介

近年来,电磁兼容的概念已悄然渗透到了生物医学和生态学的领域。本书介绍了电磁辐射对人体各器官系统的生物效应,并从环境电磁辐射对人体各层次局部小电磁兼容系统施行骚扰的概念出发,介绍了电磁生物效应的机理、应用和防护。为便于理解人体内外环境的电磁兼容,还简述了生物电和电生理知识;同时介绍了生物芯片中的电磁场,以供有关人士参考。

图书在版编目(CIP)数据

电磁生物效应/刘亚宁主编. - 北京:北京邮电大学出版社,
2001

(电磁兼容理论与应用技术丛书)

ISBN 7-5635-0502-4

I. 电… II. 刘… III. 人体-电磁辐射-生物辐射效应
IV. X591

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2001)第 091512 号

电磁生物效应

主 编 刘亚宁

责任编辑 刘 洋

*

北京邮电大学出版社出版发行

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

北京忠信诚胶印厂印刷

*

850 mm × 1 168 mm 1/32 印张 11.25 字数 290 千字

2002 年 1 月第 1 版 2002 年 1 月第 1 次印刷

印数: 1—5 000 册

ISBN 7-5635-0502-4/TN·201 定价: 23.00 元



电磁兼容一般指电气及电子设备在共同的电磁环境中能执行各自功能的共存状态，即要求在同一电磁环境中的上述各种设备都能正常工作又互不干扰，达到“兼容”状态。现在电磁兼容科技工作者又进一步探讨电磁环境对人类及生物的危害影响，学科范围已不仅限于设备与设备间的问题，而进一步涉及到人类本身，因此一些国内外学者也把电磁兼容学科称作“环境电磁学”。

当前，在有限的时间、空间及有限的频谱资源条件下，各种电气及电子设备的数量迅速增加，而家用电器的运用，更使这些设备遍及千家万户，用电设备密集程度越来越大，空间电磁环境恶化已成定局。特别是我国即将加入世界贸易组织，更需加强我国在国际市场上的竞争能力，为此，电磁兼容知识亟待宣传普及，同时研究开发电磁兼容新技术，采取行之有效的防护措施，以便使国人在高度享受物质文明及精神文明的同时，仍能确保社会生产生活能够得到良性的持续发展。

有鉴于此，北京邮电大学出版社及时组织我们编写了这套《电磁兼容理论与应用技术丛书》。丛书计有五个分册。第一分册主要对电磁环境、电磁兼容技术及相关学术组织机构作了简要的总体介绍，并对工频场的电磁兼容问题进行了深入的分析。第二分册主要是电磁兼容设计方面的内容，在介绍了电磁兼容基本原理的基础上，提出如何对设备产品进行电磁兼容预测，对可能出现的各种干扰进行了分析，并提出抑制干扰的各项措施。第三分册重点介绍了电磁兼容的试验场地、测量设备、测量仪器及详尽

的测量方法，对测量设备的计量校准及测试误差分析也进行了阐述。第四分册主要介绍国内外各项现行电磁兼容标准以及规范，对认证组织机构也有介绍。第五分册专就电磁环境对人类及生态的危害影响及相关防护措施进行了系统的论述。

该丛书由高攸纲教授任主编，由郭鹞及白同云两位教授任副主编，由他们对丛书的内容章节，进行了统一安排和审订。

丛书理论结合实际，可供大专以上水平的科技人员阅读参考，也可供电磁兼容研究领域的本科生及研究生用作辅助教材。

高攸纲

2001年3月

前 言

人体是对内外电磁骚扰都敏感的容积导体。

首先,人体是最精妙复杂的电磁兼容系统。在皮肤包裹的有限空间内,各器官有序地工作又不相互干扰,体现了时域和频域上的高度兼容。心电、脑电等是人体内部的电磁场,以动作电位为传导信号的神经系统,构成了庞大的信息网络,在感受周围环境改变的同时还控制着躯体运动及腺体分泌等生理活动,其精确与协调程度是任何机器人都无法比拟的。战斗英雄麦贤得在弹片击中大脑额叶的情况下,依然准确地操纵轮机达一小时之久,除顽强的意志外,也不得不惊叹神经系统的电磁兼容能力。拳头大的心脏里,分布着特化了的电兴奋传导系统,维持着正常的心动周期和全身的血液循环。一旦人体电磁兼容状态被破坏,即出现生理功能和生活质量的降低。在病理情况下,机体内的电活动也会成为电磁骚扰源,人体内部较常见的是传导耦合的电磁骚扰。比如多发性硬化症:起电绝缘作用的神经髓鞘破坏脱失后,造成沿神经纤维转导的电兴奋“泛化”或阻滞,引起了各种的症状;大脑神经元电兴奋的反复地、过度地超同步发放,即是癫痫;心脏的异位和异常电兴奋造成了心律不齐以至致命的心室纤颤;神经衰弱症也是兴奋的泛化,注意力反而不集中。人体内部也可能存在着感应耦合的电磁骚扰。很多精神分裂症患者脑电图的高幅低频 α 波减少,而低幅高频的 β 波增多,反映出脑电活动中,电磁波相干程度的改变。

本书简要地介绍了生物电及电生理,主要是使读者对人体这个敏感的电磁兼容系统有个基本的了解;此外,在心电脑电测量

过程中信号的提取与干扰的消除，都涉及了电磁骚扰问题。可以说，电生理和生物电磁学的专家们早就在跟电磁兼容打交道了。

除了直接接触电以外，人体主要是通过感应耦合来对周围环境的电磁骚扰产生生物效应。早在工频和射频等电磁场披头盖脸地冲击以前，生命已经跟环境的低频电磁场兼容了亿万年了，骨骼中主要成份骨胶质和晶体无机磷灰石，都具有压电特性，机体与环境电磁场相适应并利用它促进骨骼发育，而“电磁饥饿”时易脱钙；不少生物利用机体内的磁敏物质来确定方向。第二次世界大战后期，很多从事雷达和通讯等作业的军事人员出现失眠、心慌、记忆力衰退等神经衰弱症状，人类开始觉悟到电磁场（波）对人体的损伤性负效应。随着用电设备密度和强度的日益增加，人们逐渐发现了电磁骚扰与白内障、心血管疾病和血液病等有一定关系，投入不少的人力和物力来研究电磁生物效应。本书从系统、器官和细胞等层次水平上介绍了电磁辐射的种种生物效应。

人们也有意识地对机体的电磁兼容系统进行积极主动的“电磁骚扰”。核磁成像、电疗磁疗，微波治疗以及心脏起搏器除颤器等技术，就是利用外部电磁场与人体相互作用来实施诊断治疗的。核磁共振，电子自旋共振和生物芯片则是在分子和细胞水平上的电磁干涉。电磁场（波）在生物学中的应用，也是本书内容之一。

对于磁场的生物效应，应该给予特殊的关注。一则由于电磁互生的固有性质，交流电场中的磁的作用不可忽略；二则跟电场相比较，磁场较少被人体或动物本身所干扰，培养细胞和动物、人体组织具有相同的吸收磁辐射的能力。特别是工频磁场的生物效应，应该深入探讨。

“人间正道是沧桑”。任何事物的发展过程都是螺旋式上升，波浪式前进的。最先可能是道高一尺，魔高一丈。用电设备的剧增，人体遭遇到前所未有的环境电磁骚扰。然而“风物长宜放眼

量”，随着对电磁生物效应的深入理解和防护措施的有力贯彻，必将是魔高一尺，道高一丈，电磁场可以更有效地为我们的物质文明及精神文明建设服务。本书还介绍了电磁生物效应的可能的机理，计量方法和防护标准。

本书是理工学科和生物医学学科的人士分工协作完成的，是学科交叉的产物。既然是交叉，就免不了重迭，尤其是电磁生物效应的有关内容。但因学科领域不同，看问题的角度也就不会一样。所以部分重迭的内容，我们也呈献给读者。

第四军医大学的郭鹄教授，是我国电磁辐射生物学的开拓者。以多年的工作为基础，郭教授率该校放射医学的教师和研究生们编写了第2章；北京邮电大学的高攸纲和吕英华教授，对电磁损伤的防护，一直给予高度的关注，第5章由吕、高二位教授编写；王保义、孙诚、柳霞、屈学民和刘亚宁编写了第3章；刘亚宁、鄧晓红和陈涛同志负责编写的是第6章；第1章、第4章和第7章由刘亚宁编著。最后由刘亚宁统编成书。

高攸纲、郭鹄教授组织了中国电子学会电磁兼容分会的电磁辐射生物学专业委员会，有力地指导了有关学术活动；王保义教授对生物电磁学和本书都作了可贵的贡献；高攸纲和吕英华教授给予了电磁生物效应的工作很多支持和帮助。借此对上述教授表示感谢和敬意。

作者感谢国家自然科学基金会信息科学部对有关工作的一贯支持。

由于水平有限，时间仓促，错误与遗漏之处难免，敬请斧正。

刘亚宁

2001年11月

目 录

1

绪 论

- 1.1 生命——物质、能量和信息的有序运动 2
- 1.2 弱的相互作用和亚稳态 3
- 1.3 站在物理学的高度看问题 4

2

电磁波与电磁波生物效应

- 2.1 电磁波的生物效应 11
 - 2.1.1 平战时机体可接触到的电磁波 11
 - 2.1.2 瞬间电磁脉冲 15
 - 2.1.3 电磁波生物效应 20
 - 2.1.4 电磁波生物效应机理 34
- 2.2 电磁波对神经系统的效应 48
 - 2.2.1 电磁脉冲对学习记忆相关指标的影响 48
 - 2.2.2 电磁辐射对学习记忆相关指标的影响 49
- 2.3 电磁波对心血管系统的生物效应 51
 - 2.3.1 流行病学调查 51
 - 2.3.2 动物实验方面 56
 - 2.3.3 对心肌组织细胞的影响 59

2.3.4	对酶类的影响	61
2.3.5	EMP 对心血管系统的生物效应	63
2.4	电磁波对免疫系统的效应	66
2.4.1	非电离辐射对 T,B 淋巴细胞的作用	67
2.4.2	非电离辐射对 NK 细胞的作用	72
2.4.3	非电离辐射对巨噬细胞的作用	72
2.5	电磁波对昼夜节律的影响	74
2.5.1	电磁辐射对昼夜节律的影响	74
2.5.2	电磁脉冲的生物效应与昼夜节律	77
2.6	电磁场与细胞周期、细胞凋亡	79
2.6.1	电磁场诱导凋亡	79
2.6.2	电磁场影响细胞周期变化	80
2.6.3	电磁场引起细胞凋亡、周期改变的可能机制	81
2.7	静电场与人体静电	81
2.7.1	静电产生机理	82
2.7.2	人体带电方式	84
2.7.3	静电场的测量	86
2.7.4	静电防护	90
2.7.5	静电场生物效应与临床应用	92

3

电磁场(波)在生物医学中的应用

3.1	连续波及脉冲电磁场在生物医学中的应用	93
3.1.1	连续波电磁场在生物医学中的应用	93
3.1.2	脉冲电磁场在生物医学中的应用	98
3.2	微波的基础理论与医学应用	101
3.2.1	微波基本理论	101
3.2.2	微波生物效应	113

3.2.3	微波的热效应	117
3.2.4	微波的非热效应	119
3.2.5	微波用于治疗恶性肿瘤	121
3.2.6	分米波和毫米波的医生物学应用	124
3.3	心律失常的射频消融治疗的原理	126
3.3.1	射频消融治疗的物理学和医学基础概况	126
3.3.2	射频消融的临床应用	134
3.4	磁场在理疗学上的应用	135
3.4.1	磁疗的物理基础	136
3.4.2	磁疗器械	144
3.4.3	磁疗方法	147
3.4.4	磁疗的作用机制与治疗作用	150
3.4.5	磁疗的临床应用	155
3.5	磁共振成像基本原理	157
3.5.1	磁共振成像原理入门	158
3.5.2	弛豫	161
3.5.3	磁共振成像序列	162
3.5.4	磁共振频谱分析	180
3.5.5	磁共振设备	182
3.6	电子自旋共振原理及应用	184
3.6.1	原 理	184
3.6.2	ESR 的应用	191

4

电磁场(波)生物效应的机理

4.1	有关的物理学基础知识	194
4.2	非热效应的几种理论和假说	197
4.3	从生物医学角度看电磁生物效应	202

5

电磁辐射生物效应研究中的计算方法和安全防护标准

5.1	射频电磁场对人体的影响	214
5.1.1	电磁辐射对人体作用的特殊性	214
5.1.2	电磁辐射热效应的作用原理	216
5.2	电磁辐射热效应标准	223
5.2.1	电磁辐射热效应标准制定方法	223
5.2.2	电磁辐射热效应标准	226
5.2.3	电磁辐射热效应的防护	229
5.3	电磁辐射的危害效应	232
5.3.1	中短波电磁场辐射的危害	232
5.3.2	微波辐射对人体的危害性	232
5.4	电磁辐射生物防护容许值标准	234
5.5	毫米波的生物学作用	243
5.6	微波电磁场的防护	244

6

生物电及人体电生理

6.1	细胞膜与膜电位	249
6.1.1	生物膜-脂双层的流动镶嵌结构(液晶模型)	249
6.1.2	细胞兴奋与可兴奋细胞	251
6.1.3	细胞膜对离子的通透性	251

6.2	细胞电位及其生物电的测量	256
6.2.1	细胞电位记录技术	257
6.2.2	微电极技术	259
6.2.3	微电极放大器	261
6.2.4	干扰及其消除	261
6.2.5	细胞电位记录和分析	262
6.2.6	人体皮肤电位的测量和方法	263
6.2.7	生物大分子的电导率和生物半导体	266
6.2.8	生物磁学	267
6.3	心脏的生物电及心电图	268
6.3.1	心肌兴奋与心脏生物电	268
6.3.2	心动周期与心脏节律性	269
6.3.3	正常心电图及各波形成机理	270
6.3.4	心电图测量原理	272
6.3.5	心电图的临床含义	276
6.4	脑电现象	277
6.4.1	大脑皮层电活动的生物及物理基础	277
6.4.2	大脑皮层电活动的特征	297
6.4.3	大脑皮层的电位变化	298
6.4.4	脑的高级功能	298
6.4.5	脑电图	303
6.4.6	诱发脑电图的测定及意义	312
6.4.7	脑地形图的测定及其意义	314
6.5	血液的电特性	316

7

生物芯片中的电磁场

7.1	什么是生物芯片	322
7.2	生物芯片的种类	324
7.3	生物芯片中的电磁场	325
7.4	生物芯片的应用前景	334
参考文献		336

1 绪 论

人体这个局部的电磁兼容系统,正面临着环境电磁骚扰的挑战。

人们有意识地利用电磁场(波)为生产生活服务,又无意识地暴露其中而受到伤害。电磁辐射好似一束带刺的玫瑰,她所奉献的物质文明绚丽多彩;日新月异;但人类在享用的同时,也必须提防被刺扎着。随着社会的发展,环境中的电磁辐射量(能量密度)会呈几何级数式增长。有人把电磁污染称为除空气、水、噪声污染以外的第四类污染。而且是看不见、听不着、尝不出、闻不到的污染。生物电磁学(Bioelectromagnetics)就是研究从直流到远红外的电场、磁场和电磁与生物系统相互作用的科学,它的最终任务就是趋利避害,发扬光大其有利的正效应。躲避防护其有害的负效应。对于有害的负效应,我们既不能麻木不仁,掉以轻心;又不能谈虎色变,画地为牢,束缚自己的发展。为达此目的,就必须对电磁辐射的生物效应机理有个确切的把握。遗憾的是,各国学者做了多年的探索,提出过不少解释机理的模型、假说以至理论,但都有待于可靠的重复实验予以确认。同时对于已有的实验和实验现象的可信度及解释,也各有见解,在某些问题上肯定和否定的意见并存,比如移动电话触发脑部癌的问题。前苏联与美国的电磁安全标准相差很大,也反映出认识上的巨大差异。此外,由于生命现象固有的复杂性,使现有的生物知识难以深入地理解电磁辐射的生物效应。人们为此感到困惑是不足为怪的。很多机理都涉及到生命运动中物质、能量和信息的相互作用、相互转换的基本过程,是个大谜。比如,物理学中的相干的相互作用在生物体中是否存在,

在什么层次上和水平上存在,及其与生理活动和新陈代谢之间的调控关系等等。能对其中一两个问题解释清楚都是很大的贡献。要想深入研究,就必须认真学习新理论、新技术、发现新问题。

1.1 生命——物质、能量和信息的有序运动

贝时璋院士指出:“什么是生命活动?根据生物物理的观点,无非是自然界三个量综合运动的表现,即物质、能量和信息在生命系统中无时无刻地变化,这三个量有组织、有序的活动是生命的基础”。“有组织”和“有序”是各层次自由度的降低,即进入了低维度的相位空间,或者说是处于时域和频域的相对简并状态,为协同性和相干性行为提供了必要的时空结构。“有序”这个概念,不单单是指物质结构上的有序,同时还包括了能量和信息在流向、整合和调节方面的有序。这种广义的有序必须靠与环境进行物质、能量和信息的交换来维持,才能保证生命处于远离平衡态(或称不可逆)的稳态过程中。

信息的必要前提之一,是减少对某一预期结果的无知;或者说是某种“不确定性”的消除。而信号则是信息的物质载体和信息传递的物理过程。对生物体来说,电磁辐射本身就可能是一种物理信号;另一方面电磁辐射又影响着生物信息传递,如影响细胞膜的膜电位、离子通透和膜介导的信号转导等等。著名物理学家薛定谔提出:“生命的基本问题是信息问题。”信息控制着生物的物质与能量代谢以及生长发育。登高望远,需要更深刻地理解电磁辐射对信息过程的生物效应。

电磁场(波)与生物相互作用时,其效应与作用在非生命体上的效应并不完全一样。机体有针对环境涨落变化的自稳定缓冲机制。如可兴奋的细胞(神经与肌肉)膜两侧的电位差(膜电位)为

60 ~ 100 mV, 相当于 10^7 V/m 的强电场, 如此大的场足以使很多无机材料击穿, 但细胞却可以利用此电位差(膜电位)执行离子通透、兴奋传导、能量合成和传递功能。细胞膜是由双层脂类分子组成的有序的介电结构, 其上嵌有离子通道和受体等蛋白质。膜电位使膜上的组分更充分地极化, 并产生相干电振荡。外来的电磁场(波)能够对细胞膜产生明显的效应是不难理解的。可以想象, 电磁场(波)生物效应中的相干性和协同性等, 都跟有序有关。

1.2 弱的相互作用和亚稳态

跟电离辐射不同, 本书所谈及的电磁辐射生物效应涉及的能量很低, 远达不到造成物质电离的水平, 属于弱的相互作用。但事实表明电磁辐射确实带来明显的生物效应, 我们应该从弱的相互作用角度去理解这些效应。前国际生物物理学学会常务理事林克椿教授指出: “弱的相互作用是分子与原子间的另一类相互作用, 虽然在数值上比强的相互作用小得多, 但在维持生物大分子的二、三、四级结构中起重要作用。正因为其为弱作用, 因此破坏这种作用或者使原子或基因重新排列时耗费的能量较小, 因而具有重要的生理功能意义。”生命体内分子之间, 分子之内及功能基因之间有很多这样的弱的相互作用, 如氢键、范德华力、离子及偶极子之间的相互作用等。这种弱相互作用的作用能一般小于 1 eV (而电离辐射能达 10^4 eV)。但这种弱的相互作用可能正是电磁场(波)的作用点, 即电磁骚扰的能量可以影响这种弱的相互作用, 影响分子的二、三、四级结构和有序性, 进而产生生物效应。

著名的神经生物物理学家郭爱克教授指出: “生命系统是由大量冗余的亚稳态构成, 这些亚稳态又是以树样方式(群中有群, 一群又一群)递阶相关的。”这些递阶相关的大量亚稳态, 赋予了生命