



SHENG WU
DIAN CI XUE
GAI LUN

李绎熙 牛中奇

生物电磁学概论

西安电子科技大学出版社

Q64
L26

360929

生物电磁学概论

李缉熙 牛中奇



西安电子科技大学出版社

1990

DY76/07

内 容 简 介

本书讨论电磁场与生物系统相互作用所涉及的一系列问题。

全书共分六章。第一章概述电磁场与生物系统的相互关系和二者的相互影响。第二、三两章讨论生物组织的电特性及其测量方法，生物电磁学中的电磁剂量学基本理论以及测量和计算方法并选集了若干实用资料。第四、五两章叙述电磁场在生物的不同层次上产生的效应及其效应机理，其中既有公认的结论，也有尚未定论的探索。第六章介绍正在发展中的实际应用。

本书可作为生物电子学、生物医学工程学有关专业的教材或参考书，也可供从事环境电磁工程和医学研究人员以及相应专业高年级学生参考。

生物电磁学概论

李缉熙 牛中奇

责任编辑 夏大平

西安电子科技大学出版社出版发行

西安电子科技大学印刷厂印刷

各地新华书店经销

开本 850×1168 1/32 印张 12 16/32 字数 306 千字

1990 年 6 月第 1 版 1990 年 6 月第 1 次印刷 印数 1-1 400

ISBN7-5606-0131-6/TN·0046

定价：2.95 元

前 言

随着科学技术的发展，人们不断改变着生物包括人类本身所赖以生存、进化的环境。近年来，越来越多的实验说明，电磁场对生物会产生作用。因而电磁环境的改变，势必对生物特别是对人类产生影响。人们对此已经进行了一系列重要的研究，并逐渐形成了一门新的边缘学科——生物电磁学。但由于这一问题超越了我们按传统定义的各类学科的边界，属于多学科交叉的领域，因而并未引起广泛的重视和开展更为深入的研究。实际上，这一领域所涉及的问题是如此重要，以致一旦对其有所了解，生物学家、医学家（包括兽医学）、公共卫生研究和管理人员、城市规划和建筑专家、研究和生产及使用各种射频设备的工程技术人员与工人，乃至广大人民群众都会十分关注。遗憾的是目前有关这一领域的基本知识和研究情况，仅散见于各种文献资料之中，对于人们系统地了解目前的进展和存在的问题及其有关的基础知识，存在一定困难。因此，兼顾生物医学和工程学人员的基础现状，编写一本系统介绍这一领域的专著，在地球上人口越来越拥挤、电磁能应用越来越广泛的今天，不仅是必要的，而且是紧迫的。本书就是为此目的而编写的。

生物电磁学是一门新兴边缘学科，正处于不断发展之中，许多内容并不成熟。在此领域内，存在大量未经可靠重复的实验发现以及未经实验证实的机理解释和理论假说。正是这些尚不成熟的问题，展示了一个广阔而诱人的研究领域，在激励着人们为之而不断探索。因此本书不是、也不可能完全像一般教科书那样，只讲述已经成熟的内容。这也许是日前一些新兴学科的特点。本书内容既包括已经成熟的有关基础知识，也包括正在研究而尚未

定论的问题；既介绍电磁场与生物系统的宏观相互作用——生物学效应及其相应的实验结果，也介绍微观相互作用——效应机理及其相应的理论分析；既有生物电磁学研究方法，也有目前资用的实用数据；既涉及生物医学知识，也涉及工程技术问题。因此它可供对生物电磁学有兴趣的多学科人员阅读，也可供有关专业的教师和学生参考。在阅读本书时，读者可根据自己不同基础和需要，作适当取舍。

本书第一、二、三、六章由李缉熙执笔，第四、五章由牛中奇执笔。

本书取材主要来自国外文献资料。加上我们在完成国家自然科学基金研究项目过程中的体会，摘其要者编写而成。本领域所涉及的具体内容相当广泛，特别是各种实验资料非常丰富，但限于篇幅，不可能完全囊括。加上我们水平有限，错误和遗漏在所难免，恳请读者予以指正。

最后我们对生物电磁学领域的著名学者，美国华盛顿州立大学 A. W. Guy, Utah 大学 O. M. Gandhi 和加拿大 M. A. Stuchly 教授提供的宝贵资料和帮助表示感谢。浙江医科大学姜槐教授，中国科学院杨根元高级工程师也提供了宝贵资料，在此一并致谢。

编 者

1989 年 9 月

目 录

第一章 绪论

1.1 环境和电磁环境	2
1.2 电磁场与生物系统的相互作用概述	4
1.3 生物电磁学研究的内容	16

第二章 生物组织的电特性及其测量

2.1 生物组织的传导特性	18
2.2 电介质物理基础简介	25
2.3 生物物质的介电特性	45
2.4 生物组织电特性的测量	77

第三章 生物电磁剂量学

3.1 电磁剂量学概述	125
3.2 理论剂量学	137
3.3 实验剂量学	215

第四章 射频电磁场的生物学效应

4.1 对生物大分子和细胞的作用	221
4.2 对染色体的作用及致突变效应	229
4.3 与癌的关系	231
4.4 对动物生殖、生长和发育的影响	233
4.5 在神经系统上的效应	236
4.6 对内分泌系统的影响	247
4.7 对造血和免疫系统的影响	254
4.8 微波的听觉效应	261
4.9 对眼睛的作用	266
4.10 对人体的影响	273

4.11 射频生物学效应实验的要素	274
第五章 射频电磁场生物学效应机理	
5.1 热效应和非热效应概述	276
5.2 粒子对膜的穿透理论	278
5.3 生物系统中的相干电振荡理论	285
5.4 射频能量的谐振效应理论	292
5.5 跨膜离子的回旋谐振理论	315
5.6 微波听觉效应机理	326
5.7 强场作用的克尔效应和珠链效应理论	352
第六章 生物电磁学应用研究	
6.1 射频辐射卫生标准研究	355
6.2 医学应用研究	373
主要参考文献	383

第一章 绪 论

今天的科学已经能够证明，现在我们所熟悉的生命形式，是经过亿万年的漫长时间，由单细胞形式逐渐进化而成的。无疑，这种进化受到了环境的影响，因为生命进化过程就是在一定环境下进行的。生命现象在其进入大陆和空气之前首先在海里发生，就是因为水能为最初的生命过程提供最好的环境。任何生命形式如植物、动物和人，都经受过环境的严酷检验，只有那些高度发展和最能适应的物种才得以保存下来。这种为生存的斗争，不仅要反抗其他动物、植物，甚至同一种类的其他成员的作用，还要反抗自然因素，如水、火、冷、热等的作用。总之，生物的生存、生长、繁殖和进化与环境有着十分密切的关系：一方面，环境条件促成了生物的各种功能系统的形成和完善，同时也说明环境条件的改变，可对生物造成短期的或长期的影响。

随着科学技术和现代工业的发展，大大提高了人们的生活水平和改造自然的能力，但是同时也不断改变着人们所赖以生存的自然环境。现在人们已越来越清楚地看到，再也不能不顾破坏自然环境的严重后果盲目地发展工业了。因为科学技术的发展，归根结底是造福于人类，而自然环境的破坏，对生物包括人类的危害程度是无法估量的。于是环境保护就作为一个不可避免的问题，提到了人们面前。

当提到环境保护时，人们首先想到的是那些看得见的环境污染因素，诸如垃圾、污水、空气烟尘等。实际上还有许多因素在不断污染着水和空气，或直接作用于人，危害人们的健康，但人们不能立即察觉，其危害也不立即显露。因此，在科学研究的基础上，考察所有可能对生物特别是对人产生影响的可见的和不可

见的环境因素是十分必要的，不管这些因素是自然的还是人为的，因为它们共同创造了一切生物必须生存其中的环境。

1.1 环境和电磁环境

地球上所有生物都要受到非常复杂的环境条件的影响。这种复杂的环境条件及其相互关系用方块图形式示于图 1.1-1。

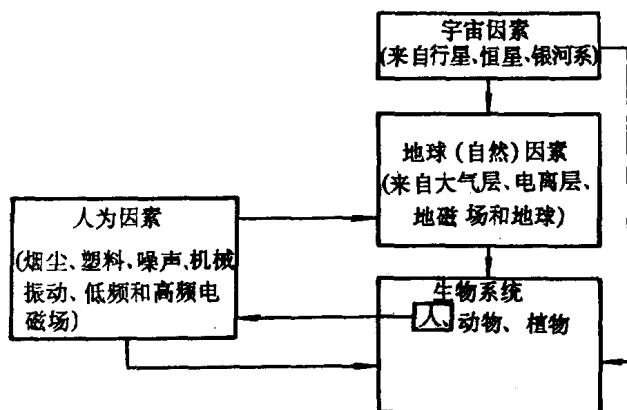


图 1.1-1 生物系统的环境条件及其相互关系

所有作用于生物系统的环境因素，可以分作三大部分：来自地球外(宇宙)的、来自地球的和人为的。地球外的因素是指起源于宇宙而又直接或间接作用于生物的那些因素。例如从太空向地球发出的多种形式的辐射：太阳风(微粒辐射)，X射线、紫外辐射、可见光、红外辐射、高频和低频电磁辐射，以及其它宇宙射线。地球因素包括由大气层起源的所有与气象有关的因素(空气压力，温度，固态、液态和气态的水等)、地球磁场和电场(大气层电场、空气离子、空间电荷、传导电流、运流电流，电晕放电，由雷暴产生的电磁信号等)、从地壳及其内部发出的气体(如

硫磺蒸气)和硬辐射(由放射性物质从地下发出的辐射)以及地球表面的机械振动等。人为因素包括由生产活动产生的废气(如硫化物)和废水,塑料,噪声,机械振动以及由电磁能应用而产生的各种电磁场等等。必须看到所有上述各种因素都不是孤立的,它们之间要产生相互作用。例如来自太空的辐射要在地球大气层中引起非常复杂的二次和三次过程而产生相应的二次和三次产物。太阳发出的微粒辐射要影响地磁场分布,而地磁场又使太阳风改变方向。人为因素不仅影响地球上的物理化学过程,而且某些因素如大气污染还将影响宇宙因素对地球的直接作用。由上面对生物环境的简单描述可见,上述三类环境因素都对生物系统施以作用,而这三类因素之间又发生相互作用。于是存在两个相互连接的环:一个从生物系统到生产过程再回到生物系统;另一个从生物系统经由生产过程到地球自然条件再回到生物系统。此外还有宇宙过程作用于生物系统的两条路径:一是从宇宙到生物系统的直接路径,一是经由地球到生物系统的间接路径。应该指出,上面仅仅简单描述了生物所处的客观物质环境。但是事实上,人以至所有生物都处于一定的社会环境中,很明显,环境因素特别是人为因素与社会环境是密切相关的。例如社会制度、人们的知识和管理水平乃至道德标准,都直接和间接地影响着自然环境。因此当把生物和环境视作一个整体系统时,整个系统变得十分复杂。因而环境保护和治理是一个大的系统工程。作为基础,必须研究各种环境因素对生物特别是对人所产生的影响。本书不涉及环境工程问题,也不全面研究各种物理化学因素对生物的作用,而着重研究电磁因素对生物的作用。

由上面的介绍可知,无论是在宇宙因素、地球因素中还是在人为因素中,都包含有电磁因素。事实上,我们正生活在一个复杂的电磁环境中,受到不断变化和增强着的各种电磁场的包围。人造纤维衣服和绝缘鞋底的鞋面上集积的电荷,足以在数厘米范

围内引起火花放电；窗帘、地毯上的电荷也会影响空气离子的平衡；带电物体的移动，引起空间电荷分布改变，从而产生低频电场起伏；室内各种电器的运转及其电源引线、床头电话机的电铃电流，都会在其周围产生电磁场；户外的高压输电线路、城市的电气交通系统，也会产生极强的电场或磁场，由于其周围物体如车辆的移动，又会引起场的不规则起伏；各种广播和通信网，使空间弥漫着各种频率的电磁波，随着广播和通信的发展，空间电磁场强度也日益增大；在研究、生产和使用各种电子设备(如雷达、微波通信机、微波理疗机等)的实验室、工厂和台站内，以及电磁能各种工业应用(高频焊接、冶炼、干燥、塑料封装等)的作业现场，有关从业人员更是受到高强度电磁场的长期照射。随着电磁能和电磁波应用的不断发展，空间的电磁场强度无疑会日益增大，于是一个尖锐的问题提到了人们的面前：这些电磁场对生物特别是对人是否产生影响或产生何种影响？为了回答这个问题，一门新的边缘学科——生物电磁学就应运而生了。研究表明，一定的电磁场确可产生一定的生物学效应。在一定条件下，电磁场的生物学效应会对人的健康带来危害，因而需要防护；但有时又可以利用某种效应来治疗疾病。目前这种研究还有待进一步深入。为了全面说明生物电磁学研究的内容和方法，下面我们将在简单介绍电磁场和生物活体的基本特性的基础上，对电磁场和生物系统的相互作用作一般讨论。

1.2 电磁场与生物系统的相互作用概述

1.2.1 电磁场的基本特性

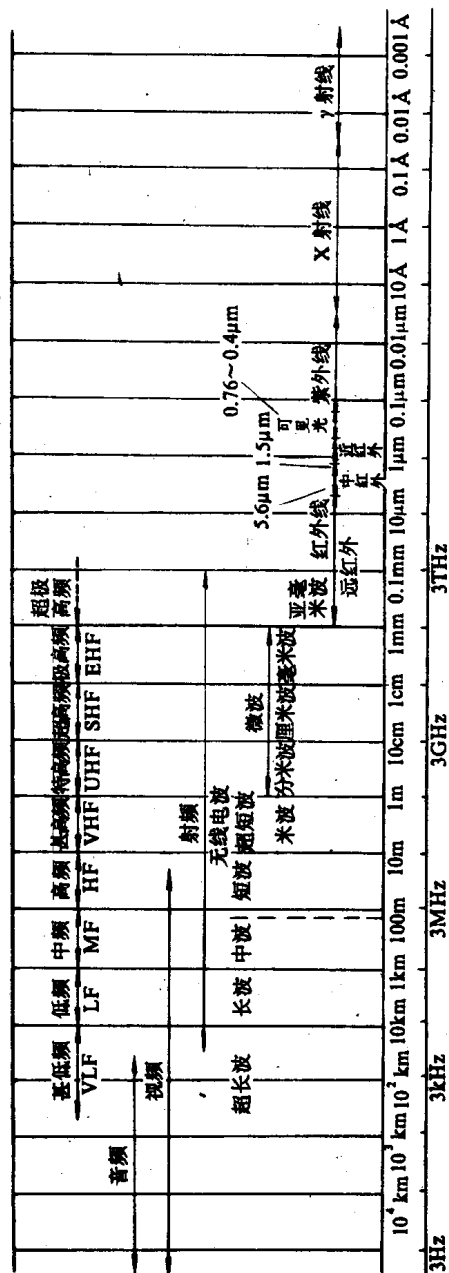
本节只介绍电磁场与生物体相互作用有关的某些特性。

电磁场是一种特殊形态的物质。不随时间变化的宏观静电荷产生宏观静电场，恒定电流(作恒速运动的电荷)产生静磁场。在

这种静态情况下，电场和磁场可以单独存在。随时间变化的电荷(必伴有随时间变化的电流)产生时变电磁场。在时变条件下，电场和磁场相互激发而形成电磁波，所以电磁波就是电场波和磁场波的组合。它们携带着能量和信息在空间传播。电磁场的基本特性是对电荷具有作用力，即电磁场对任何带电粒子(电子、质子、正负离子)或由它们组成的系统(如分子，包括生物分子)具有电磁力作用。通过这一作用，场力使带电粒子、系统运动或使系统变形、转动或振动。通过这一过程，一部分电磁能将转化为带电粒子或系统的动能或位能。

在生物环境中，绝对静止的场是不存在的，一般都是随时间作或快或慢和不同方式的变化。利用傅里叶方法，总可以把这些随时间作任意变化的电磁场分解为许多不同频率的简谐场，或称为不同频率的简谐电磁波。电磁波频率由低到高组成整个电磁波谱，如图 1.2-1 所示。电磁波的空间分布也可能是十分复杂的。我们也可将这种空间分布复杂的波看作许多传播方向不同的均匀平面电磁波的叠加。所以实际环境里的时变电磁场，一般可看作许多不同频率不同传播方向的平面波叠加。因此，单色(单一频率)平面电磁波的特性就成为研究电磁场对物质作用的基础。

所谓均匀平面波，是指沿确定方向传播，其等相位面为无限大平面，且在等相位面上的场强处处相等的电磁波。在空气中，这种波的电场 E 和磁场 H 均垂直于传播方向，且 E 也垂直于 H 。在垂直于传播方向的任一固定平面上，任一给定时刻，各点 E 、 H 的大小和方向均相同。但不同时刻， E 、 H 的大小和方向可以不同，或者说固定点上 E 、 H 的大小和方向可以随时间变化。空间固定点上， E 的取向随时间变化的方式(或 E 的矢端轨迹)称为波的极化。如果随时间变化， E 的矢端轨迹为直线，则称为线极化波。平面波也可以是圆极化波或椭圆极化波，这两种极化波都可分解为两个线极化波。因此，在研究电磁波对生物体



注: 1 Å = 10⁻¹⁰ m.

图 1.2-1 电磁波谱

作用时，又经常采用单一频率的线极化均匀平面波。图 1.2-2 为一个沿 z 方向传播、沿 x 方向极化的线极化单色平面波在某一固定时刻的电、磁场分布图。随时间增加，整个波形向 z 方向传播。在垂直于传播方向的单位面积上传递的电磁功率为

$$S = E \times H (\text{W} / \text{m}^2)$$

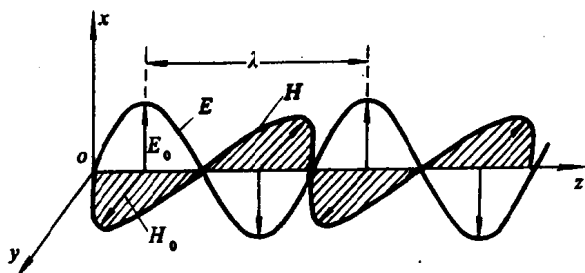


图 1.2-2 均匀平面波

由图 1.2-2 可以看出，如果平面波在某种物质中传播，场对物质的直接作用是使物质中任一固定点上的带电粒子受力，由于波是向前行进的，故所受的力将以一定频率不断地改变着大小和方向，即该粒子将以波的频率作强迫振动。但是光频以下的电磁辐射属于非电离辐射或低能辐射，其量子能量较小 ($< 1.8 \times 10^{-5} \text{ eV}$)，故不足以使物质分子产生电离。

所有电磁波在自由空间都以相同速度 ($3 \times 10^8 \text{ m/s}$) 传播，但同一频率的波在不同物质中以不同的速度传播，因而同一频率的波在不同物质中的波长也不相同 ($\lambda = v/f$)。研究表明，电磁波在生物体内的传播速度仅比真空中光速低一个数量级，而比生物化学反应速度和生物电传导速度要高两个数量级以上。因此可以认为电磁场对生物体内电磁场所及各点的作用是同时发生的。由图 1.2-2 还可以看出，如果有一均匀物体受电磁波照射，而物体

的尺寸远小于电磁波在该物质内的波长，则电磁场在物体各点的瞬时强度可以认为是相同的，或者说作用是均匀的。如果物体尺寸与波长可比，或者远大于波长，则即使物体是均匀的，电磁场在物体各点的瞬时强度也是不同的，因而作用是不均匀的。

当电磁波射向不同物质的界面时，会产生波的反射和折射。一部分能量由界面反射回第一种物质，一部分能量透过界面进入第二种物质。图 1.2-3 是平面波由空气斜入射到表面为无限大平面的高损耗媒质的情况。由于媒质的高损耗，透射波近似地垂直于界面传播。由于透射波在媒质中的能量转化，随着波的传播，

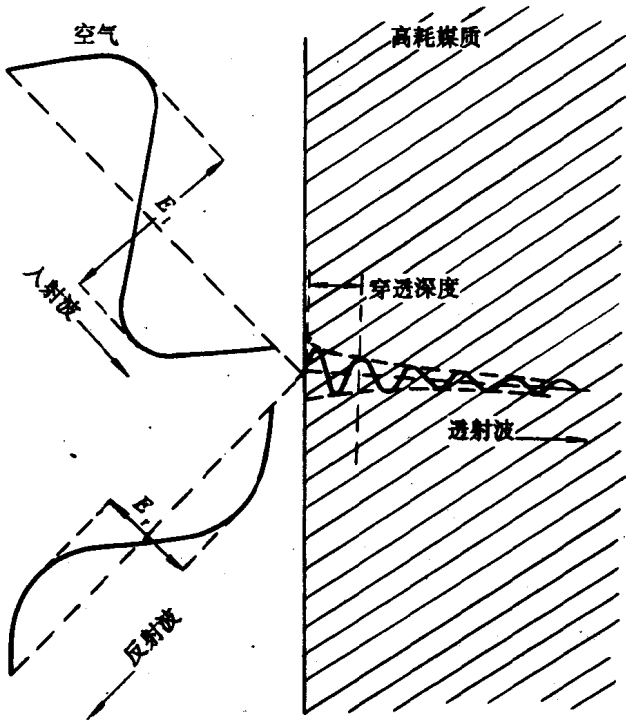


图 1.2-3 平面波入射到有耗介质

其强度逐渐减小。电磁波衰减的速率，可用穿透深度描述。穿透深度 δ 定义为：功率衰减到表面处的 13.5% (即 $1/e^2$) 的深度。这就是说在表面与深度 δ 之间，透射波功率的 86.5% 被媒质吸收 (转化为其它形式的能量)。这也意味着进入有耗媒质足够的距离 (例如 $> 2\delta$)，电磁场强度就很小了。穿透深度的大小取决于波的频率和媒质性质。频率一定时，波对不同媒质的穿透深度不同；同一媒质，不同频率电磁波的穿透深度也不同。此外，透射功率对于入射功率的比例，既与入射角度有关，也与媒质性质有关。上面介绍的是平面波入射到无限大平面的理想情况。实际的生物体都是体积有限、形状不规则、结构不均匀的物体 (例如人体)，此时，生物体成为电磁波的散射体，情况变得更为复杂。研究电磁场与生物体相互作用时，显然只有进入生物体内的场和电磁能才能和生物体发生作用。但由于电磁波的特性和生物体的复杂性，生物体在一定的电磁波作用下，体内的场分布及吸收的电磁功率，取决于诸多因素：频率，极化 (电场 E 相对于生物体长轴的取向)，生物体的尺寸、形状和内部结构，以及生物体周围的条件 (如地面影响和其它反射体的存在)。因此，同一生物体在不同条件下 (只要上述诸因素中有一个不同)，体内场分布和吸收功率就不同；不同生物体在同一条件下也不相同。在研究电磁场对生物系统的作用时，了解电磁场在生物体内的分布规律及生物体吸收的电磁功率是十分重要的。这将在第三章详细讨论。

1.2.2 生物系统的电磁特性

我们这里所说的生物系统是指有生命活性的系统，即从单个细胞、生物分子，到生物组织和器官，以及由各种组织和器官构成的肌体，乃至生物群体。由于电磁场的基本特性是其对电荷具有力的作用，进而产生能量转换，因此在研究电磁场和生物系统相互作用时，必须了解生物系统本身的电磁特性。

对于生命起源和生命活动本质,人们至今仍不很清楚。在生命活动中,生物活体自身电磁场和电磁波的形成、运动规律及其所起的作用,至今也无定论。但生物活体的某些电磁特性和电磁现象,是可以利用现有的物理学和生物学知识来加以分析并用实验方法来进行测量的。构成任何生物活体的空间结构的,仍是处于不同状态的物质,即由含带电粒子的原子、分子组成。在生命活动和生命系统结构中,起决定作用的力也是各种表现形式的电磁力。从微观上看,各种生物组织的分子内部存在着很强的电场,而且在分子线度范围内改变位置时,场强的变化非常剧烈。虽然这种微观场决定着物质的物理化学特性,但这种场用现有的电生理技术是无法测量的。可测量的仅是在一定体积(含有 10^{12} 个分子或更多分子的体积)内微观场的空间平均值。因此,生物组织的宏观电磁特性,仍可用宏观参数导磁率 μ 、介电常数 ϵ 和电导率 σ 来表示。研究表明,除少数鸟类的组织以外,所有生物组织都是非磁性的,即相对导磁率 $\mu_r = 1$,故通常只考虑其电特性。由于各种生物组织的电特性各不相同,因此,即使把生物体视作一个无活性的静止系统,也是电特性的非均匀结构(关于各种生物组织的电特性将在第二章详细讨论)。某些生物组织可能是各向异性的(例如脑白质的电导率即与电流流经神经纤维的方向有关^[2])。生物系统中也存在着类似半导体二极管、三极管的非线性特性(关于生物系统中的非线性电动力学问题,已有不少研究报导^{*})。上述这些特性,是从物理学观点来研究生物系统对外加电磁场的响应所必须予以考虑的。

另一方面,生物活体又和通常的一块非生命物体根本不同。

* 参阅文献 W.Ross Adey, Albert. F.Lawrence, Nonlinear Electrodynamics in Biological System, Plenum Press, New York and London, 1984.