

磁成像技术 及其 临床应用

郑以勤
姜宗义
小谷诚
编著



人民卫生出版社

磁共振技术 及其 临床应用

郑以勤 姜宗义 小谷 诚
编著



人民卫生出版社

图书在版编目(CIP)数据

磁成像技术及其临床应用/郑以勤等编著. - 北京:
人民卫生出版社, 2001. 2

ISBN 7-117-04196-X

I. 磁… II. 郑… III. 磁共振-成像 IV. R445.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2000)第 87541 号

磁成像技术及其临床应用

14745/08

编 著: 郑以勤 等

出版发行: 人民卫生出版社 (中继线 67616688)

地 址: (100078) 北京市丰台区方庄芳群园 3 区 3 号楼

网 址: <http://www.pmph.com>

E-mail: pmph@pmph.com

印 刷: 北京市博雅印刷厂

经 销: 新华书店

开 本: 787×1092 1/16 印张: 10.25 插页: 6

字 数: 222 千字

版 次: 2001 年 3 月第 1 版 2001 年 3 月第 1 版第 1 次印刷

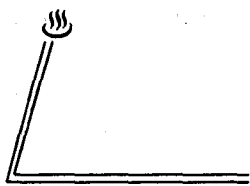
印 数: 00 001—5 000

标准书号: ISBN 7-117-04196-X/R·4197

定 价: 24.50 元

著作权所有, 请勿擅自用本书制作各类出版物, 违者必究

(凡属质量问题请与本社发行部联系退换)



前言

生物磁学是一门新兴学科。

一般来说，一门学科所包含的内容和研究对象不是一成不变的，而是随着整个科学的发展而逐渐演化，在演化的过程中，只有那些及时发现其他学科提供的新理论、新技术和新工艺，并又及时采纳为本学科所用，才可能在学科丛林中更有所建树和发展，才可能使本学科永远充满生命活力。生物磁学就是这样一门充满生命活力的学科。

电和磁像是一对连体的孪生姐妹，1791年意大利科学家L. Galvani提出了生物电的概念，1887年检测出心电，1930年发现脑电，以后逐渐发现肌电、胃电、眼电、耳电、鼻腔电、神经电位、细胞膜电位等，并研究指出基因链实际为电子链的本质，进而证明一切生命的存在及其活动，都有电的参与或伴有电荷的产生、转运、传递、聚集和疏散。正因为如此，人们通过各种手段和方法，在宏观和微观领域里，通过观察、测试和计算电荷和电位的变化，作为反映生命体征的重要参数，辅助医生诊断疾病，从而揭示生命现象，探索生命本质。

生物电的研究和临床应用之所以如此被重视并长久不衰，除其重要性、直观性外，最重要的原因是电信号检测的简易性和测试仪器相对比较简单。

尽管生物磁的发现与生物电的发现仅相差数年，而真正对人体磁场进行测定却是在1963年，也就是距离人体心电测量80年以后的事了。具体应用相差如此长的时间，恐怕主要原因在于生物磁测量与“电信号拾取的简易性和测试仪器相对比较简单”的优点恰恰相反，由于相对巨大的地球磁场无处不在，而生物磁信号又如此微弱（脑磁信号相当于地磁场的是十亿分之一），给测量带来难以逾越的困难。但现在之所以又重新被重视、被宠爱，几乎完全得益于另一个学科——超导技术的移植和利用。

1911年荷兰物理学家卡梅林-昂纳斯（Kamerling-onnes）首次发现超导现象，1957年巴丁（Bardeen）、库柏（Cooper）、施瑞弗（Schriffer）

提出超导微观理论 (BCS 理论), 1961 年发现磁通量子化, 1962 年从理论上预言了约瑟夫逊效应。这些发现和理论成就为超导量子干涉仪 (SQUID) 的研制奠定了物质基础。1970 年前后 D. Cohen、J. E. Zimmerman 等先后报道应用 SQUID 进行生物磁场 (包括人体磁场) 的测量。三十年来以 SQUID 为代表的磁成像技术在增加检测线圈数量、提高抗干扰能力和高温超导方面取得一系列技术突破, 从而使生物磁测量技术获得突飞猛进的发展, 目前的脑磁图仪已达到 300 多个通道。

从广义上讲生物磁学的研究内容应包括两个部分, 一是生物机体自身或被诱发产生的磁场, 二是磁场引起的生物效应。前者是指生物机体不同层次产生的磁场: 有器官水平的脑磁图、心磁图和肺磁图等; 有细胞水平的细胞磁场以及分子的生物大分子和过渡金属元素的分子磁化率等, 对这些自身或被诱发产生的磁场进行特性、产生机制、测定方法、临床应用的研究; 后者是指生物体不同层次对磁场的反应及其机制的研究。

“磁成像技术及其临床应用”实际只摘取生物磁学的一部分, 介绍以 SQUID 为代表的人体器官自身或被诱导磁场检测设备的原理与技术, 以及应用这些设备在肺磁图、心磁图和脑磁图检测中获得的最新临床结果和大量的典型病例, 并给出与其他传统方法所得结果的比较分析, 同时也从理论上汇集并阐述了顺、逆问题的主要理论成果。它不但提供一种新的生物信息来源, 同时又开辟一种以体内活动电荷为研究对象的新的建图方法, 特别是脑磁图由于具备检测的特殊优点, 克服脑电图许多本身的缺点, 从而给出许多脑磁图所独有的、鲜为人知的结果, 并通过实例着重指出与现代测量技术 MRI、多道脑电图、ECT 等联合应用, 具有更重要的临床意义和研究价值。

21 世纪的发展前沿科学中, 生命科学的任务之一是解决、破译脑的奥秘, 其意义和影响将远远超出生物医学的范畴, 而变成人类有待探索的最重要的命题之一, 而脑磁图的发现和不断完善, 必将成为解决此项任务最强有力的工具。

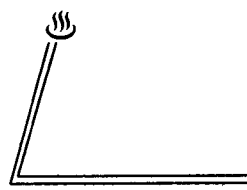
到 20 世纪 90 年代最后一年, 我国尚无引进 SQUID 设备, 对磁图研究或许刚刚起步, 因此本书的编写具有前瞻性意义, 相信将对我国生物磁学的研究、磁图用于临床诊断以及生物磁检测设备的研制开发产生裨益。

本书的编写得到日本、中国一些研究单位、公司和许多教授、学者支持和帮助, 在此一并表示深切的谢意!

由于学科新、技术新、理论深、设备复杂, 编者的实践经验少, 因此在编写过程中其缺点和不足之处难以避免, 敬请读者指正。

编 者

2000 年 6 月



目 录

第一章 生物磁场测定的概况	1
1.1 生物磁场测定的由来	1
1.1.1 人体电测定的简单历史	1
1.1.2 人体磁场的最初的测定	1
1.2 生物磁场产生的原因和种类	2
1.3 生物磁场测定的特点	5
1.4 生物磁场研究的内容	7
1.5 人体磁场测定与医学进步	7
1.6 人体磁场的检测方法	8
1.7 SQUID 磁强计的发明和进步	10
第二章 磁强计的基本原理和磁通的检测特性	12
2.1 常用磁强计的种类和特性	12
2.2 磁通门式磁强计	13
2.3 SQUID 磁强计	13
2.3.1 超导状态的产生	14
2.3.2 超导环的结构类型	14
2.3.3 超导环的特性	15
2.3.4 超导环的电流和电压特性	19
2.4 SQUID 磁强计的工作原理	21
2.4.1 dc-SQUID 型	21
2.4.2 rf-SQUID 型	26
2.5 磁场检测线圈	26
2.6 高温超导体 SQUID 磁强计	28
2.7 磁场屏蔽装置的进展	28
2.7.1 磁场屏蔽室的制作原理	29

2.7.2 高温超导体磁场屏蔽室	29
第三章 肺磁场与肺磁图	31
3.1 肺磁场测定的目的	31
3.2 肺内粉尘测定的原理和特点	32
3.3 肺磁场测定简易装置的组成	33
3.3.1 磁化器	34
3.3.1.1 肺内积蓄粉尘的磁化方法	34
3.3.1.2 肺磁场检测专用磁化器	36
3.3.2 实用磁通门式磁强计	37
3.3.2.1 磁通门式磁强计的感度校正	38
3.3.2.2 磁通门式磁强计检测探头的构造和种类	39
3.3.2.3 磁通门式磁强计的工作原理	39
3.3.3 可移动检查床	42
3.3.4 检测装置的电子系统	43
3.3.5 检测环境的校正	44
3.4 肺内粉尘量的测定	44
3.4.1 体表面肺磁场的测定法	46
3.4.2 肺磁场的缓和曲线	46
3.4.3 空气中粉尘含量的测定	47
3.4.4 肺磁场的检测专用车	47
3.5 肺磁图在肺功能判断方面的应用	47
3.5.1 缓和曲线的利用	48
3.5.2 二次磁化特性的利用	48
3.5.3 肺内粉尘排出量的测定	48
3.5.4 吸烟对粉尘排出的影响	49
3.6 肺内蓄积粉尘量测定的必要性	49
3.7 尸检肺的肺磁图测定结果	51
3.7.1 病例1 KS矽肺结核	51
3.7.2 病例2 KK石棉肺	51
3.7.3 病例3 GA硅肺	52
3.7.4 病例4 TT石棉肺	52
3.7.5 病例5 M. T肺癌+尘肺	53
3.7.6 病例6 S. T心肌梗死	53
3.7.7 病例7 H. M原发性心肌病	53
3.8 关于肺磁场测定在临床应用的讨论	54
3.8.1 肺磁场测定的临床效果	54
3.8.2 肺磁场测定装置使用中的问题	56

3.9 关于肺磁场的逆方向问题.....	56
3.9.1 逆问题解析的理论值计算(顺方向)	56
3.9.2 逆方向问题的解析方法.....	58
3.9.2.1 最小二乘法.....	59
3.9.2.2 平滑法.....	61
3.9.2.3 假设分布法.....	63
第四章 心磁场与心磁图	67
4.1 心脏电磁现象的基础.....	67
4.2 心脏的电流源.....	69
4.3 心脏的生物电产生的磁场.....	72
4.3.1 心脏的生理学基础.....	72
4.3.2 心脏的电力源与心磁图.....	73
4.4 心磁图研究的发展历程.....	74
4.5 心磁图的记录与分析方法.....	74
4.5.1 心磁图记录方法.....	74
4.5.2 心磁图的测定部位.....	74
4.5.3 心磁图分析方法.....	74
4.5.3.1 等磁场图.....	74
4.5.3.2 二维平面向量分布.....	75
4.5.3.3 方框图形表示法.....	76
4.5.3.4 三维网状图示法.....	76
4.5.3.5 向量心磁图.....	76
4.6 正常心磁图.....	77
4.6.1 P波	78
4.6.2 QRS波群	79
4.6.3 T波.....	81
4.7 心房负荷增大.....	82
4.7.1 左房负荷增大.....	82
4.7.2 右房负荷增大.....	83
4.8 心室负荷增大.....	84
4.8.1 右室负荷增大.....	84
4.8.2 左室负荷增大.....	85
4.9 T波 ST段异常的诊断	86
4.9.1 左室负荷增大在T波 ST段的早期诊断	87
4.9.2 心绞痛的T波 ST段表现.....	88
4.10 心肌梗死	89
4.10.1 心肌损伤的综合向量	89

4.10.2 心肌梗死的综合向量	90
4.10.3 心肌缺血的综合向量	91
4.11 束支传导阻滞	94
4.11.1 左束支传导阻滞	94
4.11.2 右束支传导阻滞	95
4.12 预激综合征	96
4.13 期前收缩	97
4.14 胎儿心磁图	98
4.15 心磁图与心电图比较	99
4.15.1 心磁图的优点	99
4.15.2 心磁图的不足之处	100

第五章 脑磁场与脑磁图 103

5.1 脑磁图的概念	104
5.1.1 脑磁图的产生	104
5.1.2 脑磁图检测的分类	104
5.1.3 脑磁场的发生源	105
5.1.4 脑磁图的特异性	107
5.2 脑磁场信号的处理	108
5.2.1 消除噪声	108
5.2.2 数值化处理 (A/D 转换)	109
5.2.3 磁场发生源的解析	110
5.2.4 可视化表现形式	110
5.2.4.1 时间系列波形法	110
5.2.4.2 等磁场图表示法	110
5.2.4.3 MRI 图像上的重合显像法	110
5.3 脑磁场的计算	111
5.3.1 脑磁场的顺问题	112
5.3.2 边界要素法	112
5.3.2.1 直接法和间接法	112
5.3.2.2 间接法概要	113
5.3.2.3 直接法概要	115
5.3.3 有限要素法	117
5.4 自发性脑神经活动产生的磁场	121
5.4.1 α 波	121
5.4.2 癫痫的棘波	122
5.5 外界刺激产生的诱发磁场	124
5.5.1 躯体感觉诱发脑磁场	124

5.5.1.1 短潜伏期应答与峰值	126
5.5.1.2 长潜伏期应答反应	127
5.5.1.3 定常应答	129
5.5.2 听觉诱发脑磁场	130
5.5.2.1 听性脑干的磁应答反应	130
5.5.2.2 听觉诱发磁场的临床应用	131
5.5.3 嗅觉诱发脑磁场	131
5.5.4 味觉刺激的脑磁应答反应	133
5.6 脑磁场测定对人脑的高级功能分析	134
5.6.1 脑磁图在认识汉字和杂乱图案上的差异	134
5.6.2 脑磁场对汉字与日语假名刺激的应答	135
5.6.3 脑磁场对汉字词组和线条图案刺激的应答	136
5.6.4 精神性旋转诱发脑磁图的信号源的推定	137
5.6.5 短期记忆时脑磁图	139
5.7 脑磁场检测的临床应用	140
第六章 人体磁学研究的未来	143
6.1 生物磁学的研究现状	143
6.2 人体磁现象的磁场强度与频率	143
6.3 人体及体内物质与磁场效应的关系	144
6.4 脑磁图新的解析法	145
6.4.1 SAM 解析法	145
6.4.2 SAM 对癫痫异常波的分析结果	145
6.4.3 SAM 法对默读的脑磁图分析结果	146
6.5 用 MRI 图像表现偶极子电流的分布	146
6.6 今后的展望	147
汉英名词对照	149

1.1 生物磁场测定的由来

1.1.1 人体电测定的简单历史

生物电是在 1780 年被意大利的一位解剖学家和生理学家 L. Galvani 发现的。他在杠杆一端铁钩子上钩了一块青蛙肉，伴随着风吹而晃动的青蛙肉，当它与铁片接触的一瞬间肌肉发生收缩。L. Galvani 由这一现象而受到启发，首次发现了生物电。

人体心脏产生的生物电在 1887 年被学者 A. Waller 首次检出。1901 年，W. Einthoven 用弦线电流计成功地测定了人体的心脏产生的周期性电压。从那时起，到 90 年后的今天，再也不是用电流计诊断心脏病的时代了。

最早发现脑的生物电的是英国的学者 Caton。1875 年，他在兔子和猿猴的脑内首次发现了脑产生的电流。发现人类脑的生物电的是德国的精神、神经生理学者 H. Berger，他在 1930 年发现了脑的 α 波和 β 波。人们当时对他的业绩并没有太高的评价，直到 1934 年他的研究再次发表后，引起了意大利的生理学家 D. A. Adrian 的重视，并给予高度的评价。当时脑波的研究是用弦线电流计来进行的。随着电子工业的发展，由电子真空管制成的较高感度的脑电图机发明以后，兴起了对脑的电生理学的研究，开始进行多种脑波的测定。那时的脑电图机的体积大而笨重。到了 60 年代前后，半导体工业的迅速发展，用半导体制成的脑电图机又被发明了，它体积小、重量轻、而且灵敏度高、图像清晰。从此，用脑电图诊断脑部疾患的方法在临床上得到广泛应用。

1.1.2 人体磁场的最初的测定

用电压计对人体电场进行测定的历史已很长，但是对人体磁场的测定

的历史却只有 30 年左右,还处于发展中。因为人体的磁场信号相当微弱,测定难度大。但是,伴随着现代化科学技术的发展,用微弱磁场测定法通过对人体磁场的检测,来对临床疾病进行诊断以及脑的生理功能的分析研究,世界上很多国家都在进行中。

现在,心电图和脑电图在临床检查上,仍然是必不可少的简单、快速、便宜的诊断手段。众所周知,人体是一个导体,体内有电流的流动。根据电学理论可知,有活动电流就必定有磁场产生。因此,体内的活动电流就必定伴有各个脏器的磁场产生,这一事实很早就被科学家推定出来。根据这一理论,科学家开始在犬的心脏里插进磁场检测线圈,进行了首次的生物心脏磁场的测定,以后又对人体产生磁场的各种脏器进行了测定。但是,由于人体产生的磁场非常的微弱,一般是测不到的。

现代化科学技术的进步和发展,产生了越来越多的新知识和新学问,在自然科学界里新的学科、新的分支也随之不断形成。近几年来具有代表性的就是超电导技术(超电导量子干涉仪: Surperconduction Quantum Interference Device, 简称 SQUID)在医学领域的广泛应用,已逐渐被人们重视。

科学家利用超电导技术,在 30 年前就研制成了超高灵敏度的磁场强度检测仪(又称 SQUID 磁强计);用这种磁强计才有可能测定生物体产生的微弱磁场。从此,科学家们开始了对生物磁场测定的研究,并利用生物磁学现象来解释、分析人体器官脏器的若干生理功能现象,这样一个独立的新学科就从此诞生了,即生物磁场计测。越来越多地科学家、医学工作者正在深入地研究,利用这种微弱磁场测定的方法来诊断人体某些疾病,近年来,这种诊断手段也渐渐地被越来越多的临床医师掌握和应用,如可用于心血管内科、脑神经外科、妇产科、小儿科、眼科以及职业病科等。

世界上最早开始对人体产生的磁场测定是 1963 年。美国的两个学者在人体的胸壁上放着绕了 200 万圈的大型通电线圈,用来测定由心脏产生的磁场,从而首次创造了人体最初的心磁图检测纪录。随着电子技术的进步,在 1967 年,美国麻省理工学院(简称: MIT)的 D. Cohe 开始在磁场屏蔽室内,用反馈放大器制成的磁场检测器进行了人体脑和心脏磁场的测定。大约在 1970 年前后, SQUID 磁强计被发明出来。使磁场检测器的磁检测灵敏度上升 10 万倍以上,1972 年, D. Cohen 开始在磁场屏蔽室内用 SQUID 磁强计,对人体心脏、脑、肺等脏器产生的磁场进行初次的测定。^[1,2]

1.2 生物磁场产生的原因和种类

由电磁学理论可知,磁场的产生可分两类。一类是由磁铁而产生的磁场,如图 1-1 所示在磁铁周围有磁场产生。另一类是由电流产生的磁场,即电磁场。当电线有电流通过时,根据右手定则可知,在它的周围必定有如图 1-2 所示一定方向的磁场产生。两种磁场尽管发生源不同,其本质完全相同。

由人体产生的磁场称为生物磁场,同样也可分为两种,一种是体内细胞膜内外的离子运动形成的生物电流(如图 1-3)而产生的磁场,称为变动磁场,心脏、手腕、眼、脑等都可产生。另一种是由于自然界含有铁性成分及某些磁性物质经呼吸道吸入或经消化道食入人体内而在体外形成的磁场,称为定常磁场。如在某些钢铁工厂从事电焊、翻

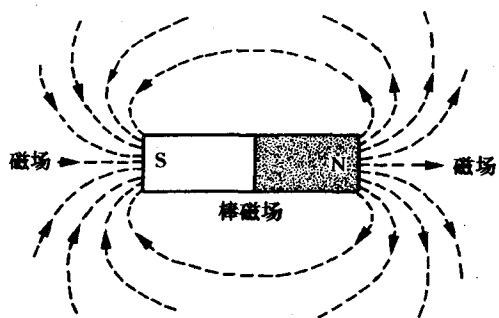


图 1-1 条形磁铁

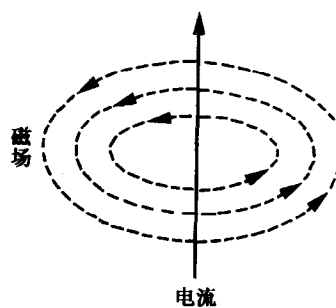


图 1-2 通电电线

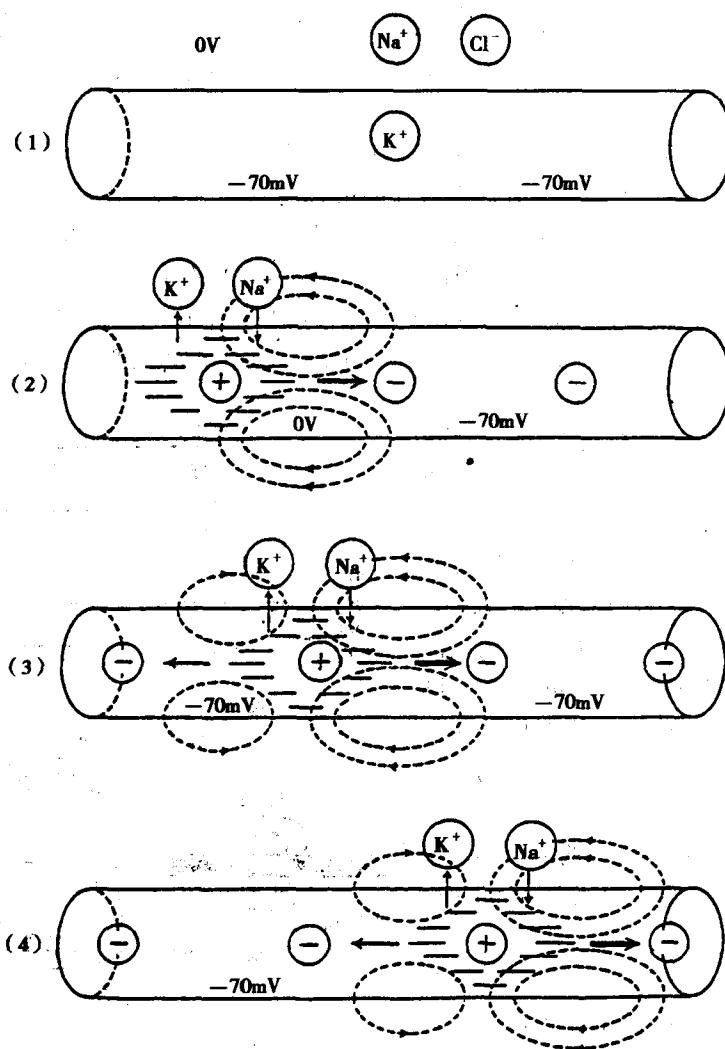


图 1-3 神经细胞内的兴奋和生物电传导

砂作业的工人，他们的工作环境（车间）里的空气中悬浮着含有一定的微量磁性物质的粉尘，这些粉尘随着呼吸进入肺，随着时间的延长，积蓄在肺里的粉尘就越多，从而形成临床上被称为粉尘肺的疾病。还有当人们吃了铁罐头装的食品后，胃肠中也会残留下与食物一起进入的磁性物质（开罐头时落下的微小颗粒被食入），这些微小铁颗粒就像地球上的某些磁性物质一样，当在外部强磁场的作用下可被磁化，形成类似于磁铁的物质，在体外形成磁场，即定常磁场。例如：肺、胃、肠和肝脏等产生的磁场。除此以外，也有人认为人类的脑组织可自生磁性物质，目前此结论尚未得到专家们的肯定。但是，某种细菌和鲑鱼类可自生磁性物质的现象已被证明，这种细菌被称为走磁性细菌，它在培养时可产生大量的纯强磁性物质 Fe_3O_4 ，日本东京农工业大学的松本是教授一直在进行这项研究。

体内生物电流的产生原理可用脑的神经细胞为例说明。人们已知神经系统是由无数的神经纤维（细胞）组成，图 1-3 所示的是一个神经纤维（细胞）的一部分，神经纤维之间有细胞膜相隔，在细胞外液中的 Na^+ 离子浓度高于细胞内液，而 K^+ 离子的浓度则相反。

一般在稳定的情况下，细胞膜内外的电位差是 -70mV ，形成内负外正，生理学上称静息电位。当引入冲动时，细胞膜内外的电位差发生变化，神经纤维膜上的 Na^+ 泵开放，大量的 Na^+ 向膜内流动的同时又伴随着 K^+ 的外流，当膜内电压达到 30mV 时，神经纤维的兴奋达到高峰期，此时膜内外电压差在 0.1V 左右变化，这时我们称它为动作电位。动作电位的电流是以峰状波出现，膜内的兴奋部位电压达到 30mV ，而未兴奋部位的膜内电压仍然是 -70mV 。动作电位把电流从膜内的兴奋部位向非兴奋部位传导，并且通过细胞膜→细胞外液→再返回膜内，形成无限循环式传导通路。实际上， Na^+ 向膜内流动过程是对细胞膜的充电过程，在被充电部分的膜的内外电位差在 30mV 以下时，此处膜上的 Na^+ 通道开放，让 Na^+ 向膜内流动，直至兴奋为止，如此反复进行，活动电流依次在膜的两侧传播，兴奋部位如图 1-3 (1)、(2)、(3)、(4) 那样从左向右，对称性扩展，神经纤维的生物电流方向也就像图 1-3 那样从左向右流动，前方未兴奋部位和兴奋末期部位的电流总是小于前方正处于兴奋期部位的电流。

另一方面，我们来看看如图 1-3 (3)、(4) 所示的膜内电流是怎样流动的。由上述可知，膜内的兴奋部位最高电压是 30mV ，而在它的两侧邻近部分

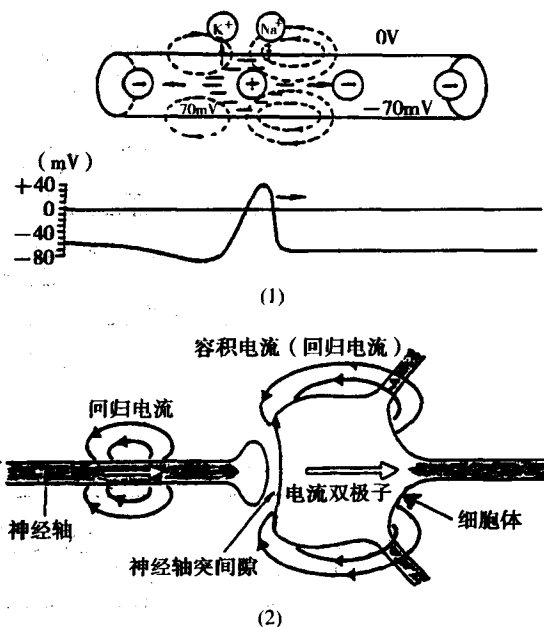


图 1-4 一根神经纤维内的电压分布和活动电流

(未兴奋部分)的电压却只有 -70mV 。因此,电流不得不向两个方向流动,但是它的大小却不同。为了更清楚地说明这一点,请看图 1-4 (1) 膜内的电压分布情况。细胞膜的内部活动电流是由动作电位的大小而决定的。在图 1-4 (1) 里可见,兴奋向右扩展,其向前的兴奋部分即前部的电流大于后部的兴奋后期的电流(在生理学上被称为负后电位,是由膜内 K^+ 的外流被阻止而形成)。这里所指的电流仅指在兴奋时的很小一段范围内流动的电流,它是由一对(正、负)点电荷构成的电荷系,从电学角度被称为电流偶极子,见图 1-4 (2)。

1.3 生物磁场测定的特点

由于电流是连续的,如上所述,神经细胞膜内的电流偶极子形成的电流是通过细胞膜 $\rightarrow$ 细胞外液 $\rightarrow$ 再返回膜内而无限循环的过程。在膜的外侧流动的电流被称为回归电流或称容积电流。放大来看,其电流如图 1-5 (a) 所示,这一根神经纤维产生的磁场是由少量的电流偶极子和大量的回归电流产生的磁场。由于计算特别复杂,此处省略不谈。如图 1-5 (b) 可见,回归电流呈放射状流出和流进,此电流有个向量和存在,其大小相等、方向相反。由电学理论可知,放射状的流进和流出的电流在远场而产生的磁场正好相互抵消。在任何一点上的磁场强度(H)的代数和均为零。根据这个特点在测定人体磁场时,对体内流动着的生物电流,在很多场合下不考虑上述回归电流的影响。因此,对兴奋着的神经细胞的位置确定就变得比较简单、容易,而且可以说测定脑磁场比测定脑电波更为容易。即脑细胞对回归电流产生的放射状磁场的影响我们忽略不计,并且垂直于头颅表面的磁场也不受回归电流的影响。由于这个特点,在大多数场合下,我们将与头颅表面垂直的磁场作为细胞内的偶极子产生的磁场来考虑,因此我们所说脑磁场测定实际上就是测定与头颅表面垂直成分的电流偶极子产生的磁场。测定时我们规

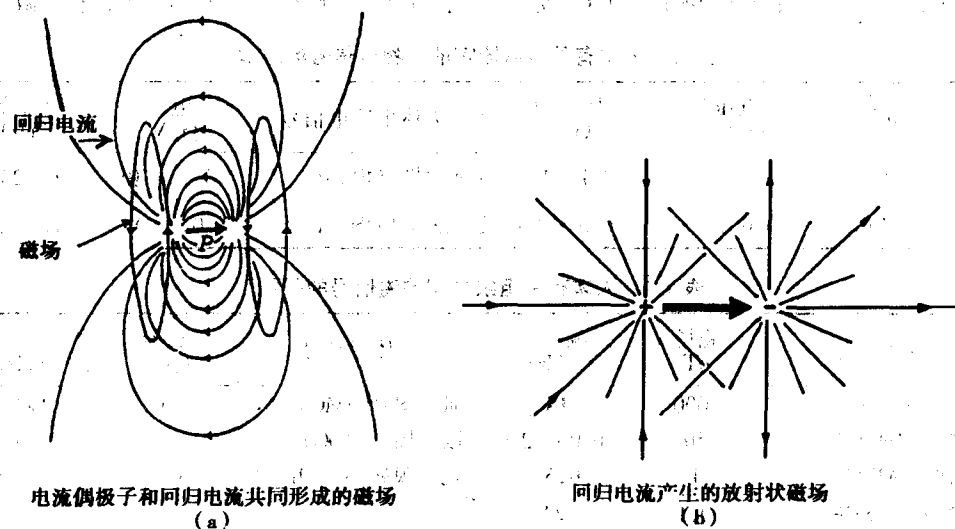
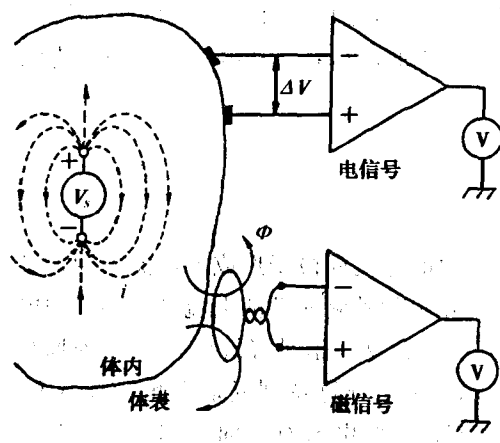


图 1-5

定，在一个电流偶极子的情况下，它的位置误差允许在数毫米以内。

为了获得体内信息，进行生物电信号及磁信号的测定是多年来被人们利用的一种手段。那么他们在检测上又有什么不同呢？为了容易理解还是先看图 1-6，图中所示的是体内信号检测系统的模式。图左侧是心脏的心肌细胞，或看成是脑的神经细胞，它表示



V_s : 人体信号源, i : 电流分布, Φ : 磁力线, ΔV : 电压差

图 1-6 人体信号检测系统的模式图

了体内的生物电流的分布状况，也可视为生物电的发源地，在人体磁场检测中我们称它为人体的信号源。生物电通过体内组织流到体表，若在体表安放两个电极，那么在两个电极之间就可测到一个电位差，这个电压经过放大后，就是人们所测定的生物电信号，它包括偶极子和回归电流，这就是心电图原理。在电流的周围必定有磁场存在，上面已讨论。因此，在离体表很近的地方，若放置一个磁场感应器的话，那么，它就可得到该处的磁信号，也就是人体的体内磁场信号。

以测定人体电信号为代表的广为人知的方法是心电图和脑电图，它的电压约为数 $\mu V \sim mV$ 。心电图和脑电图记录了心脏、脑

的内部发生的生物电现象的时间经过，即成为我们得到的电信号，根据它的变化，已被人们广泛用来进行心脏和脑的疾病诊断。表 1-1 显示的是人体有关组织器官的生物电信号的强弱。

现在我们再来看看体内产生的磁场情况。由于心脏或脑的活动电流产生的磁场被检测的结果就称为心磁图（第四章里讨论）或脑磁图（第五章里讨论），这些信号要比电信号更弱，它仅为环境磁场的数 10 万分之一至数千万分之一以下。因此，这样微弱的

表 1-1 人体有关组织器官的生物电信号的强弱

人体生物电信号	电压 (mV)	频率数 (Hz)	人体生物电信号	电压 (mV)	频率数 (Hz)
心电图 (ECG)	1	0.1~200	肌电图 (Ebro)	0.01~10	10~2000
脑电图 (EEG)	0.001 -	0.5~200	视网膜电图 (ERG)	0.1~1	DC - 20

表 1-2 人体有关组织器官的磁信号的强弱

人体磁信号	磁场 (pT)	频率数 (Hz)	人体磁信号	磁场 (pT)	频率数 (Hz)
肺磁图 (MPG)	5000	DC	肌磁图 (MMG)	10	DC -
心磁图 (MCG)	50	0.05~200	眼磁图 (MOG)	10	DC
脑磁图 (MEG)	1	0.5 -	视网膜磁图 (MRG)	0.1	0.1~30
诱发磁场 (SEF, VEF, AEF)	0.1	DC -			

* SEF 躯体感觉刺激, VEF 光刺激, AEF 听觉刺激

磁信号只能用超高敏感度的磁场检测装置,即超电导干涉量子磁场检测仪简称 SQUID (在第二章里讨论)来测定。表 1-2 是人体有关组织器官的生物磁信号的强弱。

1.4 生物磁场研究的内容

生物磁场研究的内容包括生物磁场的测定和磁场与生物的关系。前者属本书讨论的主要对象。在生物磁场里若根据磁场起源的不同又可分为:

内因性磁场:如心磁图、脑磁图、眼磁图和肌磁图等,这些相当于上述的体内神经细胞产生的生物电流而形成的磁场。

外因性磁场:自然界、空气中的磁性物质经呼吸道吸入,或经消化道食入人体内而产生的磁场,如肺磁图和胃磁图。

生物磁场效应:在生物体周围,如皮肤、血管和器官脏器的表面,外加直流或交流磁场后、人体组织在这个磁场的作用下而发生的生物学和生理学方面的功能性的变化,被称为磁场生物效应。人们利用磁场生物效应已制成多种磁疗仪器,简单的有磁石穴位粘贴胶布、磁手套、磁化水杯、磁枕、磁性腹带和电磁血流计等,复杂的有现在临床上已被广泛应用的磁共振装置等。

本文所指的生物磁场测定的范围,仅是对由人体产生的磁场进行检测。现在,科学家们已对人类心磁图、肺磁图和脑磁图的检测作了最基础的研究。它与心电图、脑电图比较,不仅仅是体表电流的变化,更多的是反映脏器深部的生物电现象,以非接触性、非侵袭性、非损伤性、无任何不良反应和副作用的检测手段来获得最正确、最精确的生物体的体内信息。再由磁场特性而得到的一系列数值的体征指标中,寻找出适用于临床的指标,从而提高临床诊断率,以最大程度减少病人的痛苦,以最小的范围减少对机体的损伤是我们从事这项研究的目的。就目前来说,磁检测对人体产生的不良反应还未见报道。

1.5 人体磁场测定与医学进步

随着医学科学的发展,现代化医疗器械不断涌现,它们被用于临床诊断,从而取代了古老的医学诊断方法,这是医学与现代工程技术结合的产物、是对临床医学的实际贡献。就拿最简单的心脏听诊来说,古代的胸部听诊法,是医生用自己的耳朵直接紧贴于病人的胸壁上来听取病人的心音变化。直到 1816 年,法国的医学博士雷奈克(Laenne. R. T. H)用厚纸卷成圆筒状,把圆筒的一端放在病人的胸壁的心脏部位,另一端紧贴自己的耳朵。结果发现听到的心音较原来的直接听诊更为清楚,而且还能辨别呼吸音。雷奈克博士据此设计了世界第一个木质听筒,命名为听诊器(stethoscope)。100 多年以来,听诊器的式样经过不断改进,从筒状到可弯曲自然的细管,从单耳到双耳,材料也不断更新,从木质到硅胶,一直到现在的多功能电子听诊器,它的每一点进步都与理工学科的发展和向医学界的渗透有密切的关系,从而推动临床诊断学的进步,为临床诊断提供了更可靠的依据。自生物电的发现以后,便出现了能测量它的心电图机、脑电