

人体生物磁场检测技术及其医学临床应用*

严登俊¹ 李伟¹ 钱春发²

(1 河海大学电气学院 南京 210098; 2 南京脑科医院脑磁图诊断科 南京 210029)

摘要:人体生物磁场中含有丰富的有关人体内部器官与组织的信息,测量人体生物磁场的微弱信号有助于医学临床对疾病的诊断与治疗。本文在介绍人体生物磁场特性的基础上,系统阐述了人体生物磁场测量中的关键技术,包括:磁屏蔽技术、空间鉴别技术、和信噪比问题,并详细论述了超导量子干涉仪的工作原理和工作特性,最后结合医学临床的典型应用,论证了研究人体生物磁检测技术对有效提高人类医疗保健水平和生活质量的重要性。

关键词:生物电磁场;弱磁检测;脑磁图;磁导航;SQID

中图分类号:Q64 **文献标识码:**A **文章编号:**1673-6273(2007)03-0425-04

Measurement for Body Bio-magnetism and Its Clinical Application*

YAN Deng-jun¹, LI Wei¹, QIAN Chun-fa²

(1 Department of Electrical Engineering, Hehai University;

2 Department of MEG Nanjing Brain Hospital, Nanjing, Jiangsu, China)

ABSTRACT: The detailed information on tissues and organs inside human body can be obtained by measuring the bio-magnetic field outside human body, which attributes to diagnosis and therapy in clinic. Based on introducing about the human body bio-magnetism, three key technologies are analysed: magnetic screen technology, space differentiation technology, and signal to noise ratio performance. The theory and characteristic of Superconducting Quantum Interface Device (SQID) is also expounded. The importance of measurement on human body bio-magnetism is approved by illustrating the technology's clinical application.

Key words: Bio-electromagnetic field; measurement; magneto encephalogram; magnetic navigation; SQID

Chinese Library Classification(CLC): Q64 **Document code:** A

Article ID: 1673-6273(2007)03-0425-04

前言

人体的生物磁场中包含有人体内部各种组织以及器官的多种信息,对人体的生物磁场进行测量,结合各种反演算法,和知识数据库,可以获得有关人体内部状态,即健康的或疾病的信息,其效果超出了通过测量人体的生物电进行疾病诊断的效果。而且对人体生物磁场的测量完全是无创的、无接触性的,远远方便于对人体生物电的测量。近几十年来,对人体生物磁场检测技术的研究已取得了令人瞩目的成就,尤其是随着核磁共振、脑磁图、磁导航等先进技术的临床应用,对人体生物磁场进行临床检测已经成为一个重要的医学手段,为一些疑难杂症的诊断和外科手术提供有力的技术支持。

本文在介绍了人体自身生物磁场特性的基础上,系统阐述了与人体生物磁检测有关的微弱磁场信号检测技术,即磁屏蔽技术、空间鉴别技术和信噪比优化技术,并着重讨论了超导量子干涉仪的工作原理。最后结合医学临床应用案例,论证了生物磁检测技术的重要性。

1 人体磁场特点

人体生物磁场的场源有两类^[1,2],一类是内因性磁场,即体内组织自身的磁场。体内细胞膜内外的离子运动产生的磁场,

例如人体器官心脏、大脑、眼肌等等,这类生命活动中的生物电产生的磁场。通过现代科技手段,可以清楚地显示,人体表面有大量不同程序的粒子流向外辐射,构成人体表面的“磁图”。一般认为,这种人体表面的粒子流,主要是生物电流并由其形成生物磁场。现代分子生物学已大量揭示,人体细胞与其他物质一样,是具有一定磁性的微型体。另外机体组织部分生物材料中含有顺磁物质,如血红蛋白中的 Fe,维生素 B12 中的 Co,血蓝蛋白和肝铜蛋白中的 Cu,以及 V, Mn, Mo 等过渡族元素,这些顺磁性物质也是人体内因性磁场的重要组成部分。

另一类是自然界侵入人体的外源性铁磁物质,即含有一些磁性体的物质,经呼吸道吸入或经消化道食入到人体内而在体外产生的磁场,这类磁场称为外因性磁场。如在一些金属铁矿采掘的工人,他们工作环境的空气中悬浮着含有一定的磁性物质的微小颗粒,这些颗粒随着呼吸而进入人体肺部,时间越长,积累在肺部的微小颗粒就会越多。这些微小颗粒在外部强磁场的作用下会被磁化,形成类似于磁铁的物质,从而在体外形成磁场,如胃、肺和肝脏产生的磁场。

总的说来,人体生物磁场的信号是很微弱的(表 1),一般为地球磁场的 10^{-6} 倍。另外,由于我们生活在一个电磁污染严重的社会中,常见都市电磁噪声一般为人体生物磁场的 10^3 倍

* 基金项目:国家自然科学基金资助 50577016

作者简介:严登俊,(1969-),工学博士,副教授,硕士生导师。

主要研究方向:电磁场、数值计算、电力系统控制 E-mail: D.J.Yan@hotmail.com djyan@hhu.edu.cn

联系方式:河海大学电气学院 严登俊 13851995526

(收稿日期:2006-12-08 接收日期:2006-12-28)

(表 1),所以对人体生物磁场进行测量,意味着从百万倍的强磁噪声环境检测出微弱磁信号,必需特殊的技术和设备。

表 1 人体生物电磁场数量等级

Table 1 The order of human bio-electromagnetic field

	磁场源 magnetic source	磁场强度 magnetic intensity
人体内部磁场 Inside magnetic	肺部 lung	10^{-4}
	腹部 belly	10^{-8}
	心脏 heart	10^{-6}
	脑磁 brain-magnetic	10^{-8}
人体外部磁场 outside magnetic	脑皮质 brain cortex	10^{-9}
	地磁场 geomagnetic field	10^{-1}
	磁暴引起的波动 fluctuate resulted from magnetic storm	$10^{-5} \sim 10^{-3}$
	都市电磁噪声 city electromagnetic noise	10^{-3}

2 常用磁场检测技术

前面已提及,人体产生的磁场相当微弱,要在比它强的多的地球磁场和磁场噪声的环境中测定它就非常困难。因此,在对微弱磁场进行检测时,首要技术难题是如何从高强度高干扰的电磁环境中检测出微弱信号。在实际人体磁场测定中,必须考虑在除去地球磁场和磁场噪声的干扰后才能进行。磁场噪声是指人体处于周围环境中各种机器的电机在运转中的电流及各种用电设备产生的电流所产生的磁场,磁场噪声约 $10^{-7}T$,地球磁场约为 $10^{-5}T$ 。

临床上,测量人体磁场时,涉及到三方面技术:磁屏蔽、空间鉴别、和分辨率问题。磁屏蔽和空间鉴别技术,用于对付外源性磁场干扰;提高仪器分辨率,即信噪比问题,就是设法提高仪器灵敏度和降低仪器自身的噪声,包括热噪声和 Barkhusen 噪声。近年来,国外的微弱磁场检测技术发展很快,典型代表是超导量子干涉仪(SQUID),其分辨率已能达到 $10^{-11}G$,并已被成功地应用于脑磁图检测、心磁图检测和磁导航设备中^[2-4]。

2.1 磁屏蔽技术

磁屏蔽技术有两类,即针对恒定磁场和低频磁场的铁磁屏蔽,和针对时变磁场的涡流屏蔽。

在铁磁屏蔽中,一般采用高磁导率的材料做成屏蔽体,如坡莫合金和镍铁钼合金,成本相当昂贵。在江苏省脑科医院建成的脑磁图检查室,光屏蔽体就花了千万元人民币。

铁磁屏蔽效率的计算公式如下^[1]:

$$S = \begin{cases} 1.3\mu t/d & \text{单屋球形屏蔽体} \\ (1.3\mu t/d_w)^2 / (1-d_i^2/d_o^2) & \text{双层球形屏蔽体} \end{cases} \quad (1)$$

式(1)中, μ 物质磁导率, t 屏蔽体厚度, d 屏蔽体直径, d_w, d_i, d_o 分别为双层屏蔽体的平均直径、内径和外径。

在涡流屏蔽中,一般采用高电导率材料做成屏蔽体,外界的时变磁场,尤其是高频交变磁场,在屏蔽体中将感应产生涡旋电流,理想的状态是涡流产生的磁场能完全抵消外源交变磁场,达到将外界干扰磁场完全屏蔽的效果。屏蔽效果,取决于材料的电导率和外源干扰场的交变频率。

加拿大 VSM 公司生产的脑磁图屏蔽室有两层^[5],即一层金属板,一层铝板。金属板的导磁率非常高,用来屏蔽室外的低频噪声($<10Hz$),铝板主要通过涡流屏蔽室外的高频噪声($>10Hz$)。

上述措施并不能完全屏蔽外源场的干扰,在实际检测中,还必须结合下面的空间鉴别技术,以完全排除外源性磁场的干扰。

2.2 空间鉴别

利用磁屏蔽技术,并不能保证完全将外源场屏蔽掉,空间鉴别技术则是利用两个反向串接的线圈,检测磁场的梯度。其理论依据是:磁场梯度随着距离的增加而迅速衰减(如图 1)。因此磁场梯度计只对近场源信号敏感,而对远场源信号不敏感,所以磁场梯度计又被称为近视眼(Myopic)。现实中,对于地球磁场和距离较远的磁噪声源,即远场源,在两个线圈处的磁场强度变化很小,近似均匀的,由于两个线圈是反向串接的,所以远场源在这两个线圈中产生的磁通大小相等,方向相反,整体效果为零;而近场源产生的磁场在这两个线圈处分布不均,整体效果非零。利用这个特性,探测线圈能把近场源产生的信号鉴别出来,对外源磁场有更好的抑制作用。在复杂环境下,为追求更好的效果,有时还采用三阶梯度计^[2,5]。

另外,磁场梯度计对噪声的衰减环随着频率的增加而增加(如图 2),由于周围环境电磁噪声多以高频为主要成分,所以梯度计还能有效抑制周围电磁噪声。

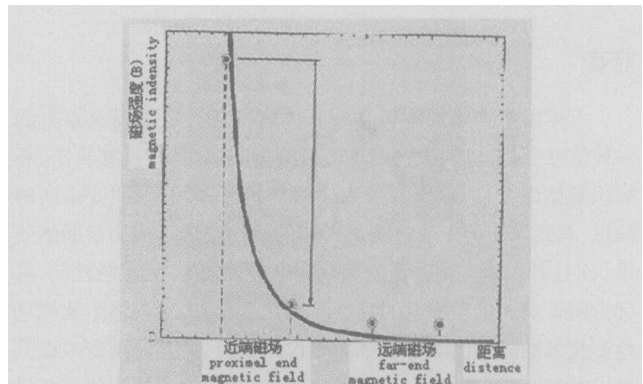


图 1 梯度计磁场梯度与距离关系曲线

Fig.1 Curve on relation between gradiometer and distance

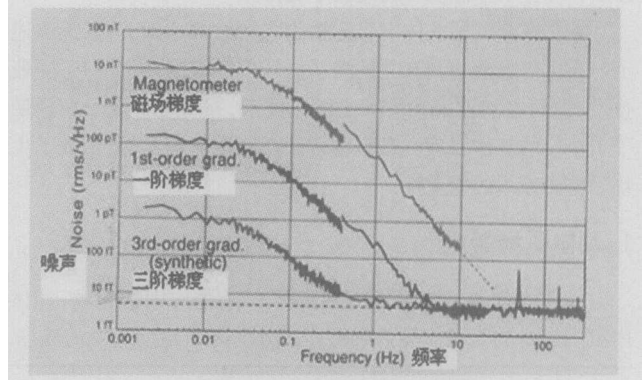


图 2 梯度计磁场梯度与频率关系曲线

Fig.2 Curve on relation between gradiometer and frequency

2.3 信号分辨率

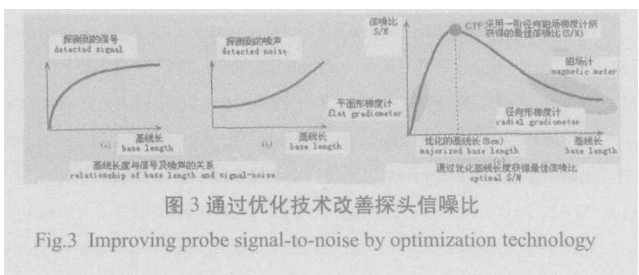
目前常用的精密磁强计主要有两类^[4]:一类用于测量小样

品或弱磁性物质的磁性,如振动样品磁强计、超导量子干涉器件磁强计、交变梯度磁强计、和提拉样品磁强计;另一类是用于测量空间弱磁场或五体表面磁场,如磁通门磁强计、波薄膜电阻磁强计、和超导量子干涉磁强计等。目前,在医学临床上,普遍采用基于约瑟夫逊效应的超导量子干涉仪检测人体发出的微弱磁场信号。

约瑟夫逊效应是检测微弱磁信号的理论基础^[5]。1962年,约瑟夫逊在剑桥读研究生期间发现,在一个超导-绝缘-超导结(SIS)上,只有当电压大于一定值时才能有电流流过。约瑟夫逊根据BCS理论进一步预言,超导电流可以穿过绝缘层,只要电流不超过某临界值,电流穿过绝缘层时不会产生电压。倘若加电压,电流反而停止并产生高频振荡,得到高频交流电。1963年美国贝尔实验室的罗威尔等人运用实验证实了约瑟夫逊的预言,在1973年,约瑟夫逊获得了诺贝尔奖。

基于约瑟夫逊效应(超导隧道效应, Josephson Efficacy)的超导量子干涉仪(SQUID, Superconducting Quantum Interface Device)是目前世界上公认的检测微弱电磁信号有效技术^[6,7],市场上,用最好的低温超导体材料制成的SQUID分辨率已接近了量子力学测不准的水平,已经被成功地用于人体磁场,诸如心磁、脑磁等微弱磁信号的检测中。SQUID中的约瑟夫结(Josephson Junction)对磁场的灵敏度随着约瑟夫结面积增大而增大,但是其开关速度却随着结面积的增大而减小。为解决这一矛盾,通常将两个或多个约瑟夫结通过一个超导圆环串连起来。

影响仪器设备分辨率的另一个因素是探头噪声,即热噪声和 Barkhusen 噪声,制造出低噪声和高灵敏度的特测设备,永远是检测行业面临的技术问题。在加拿大VSM公司生产的脑磁图设备中,通过优化基线长度得到最佳的信噪比。现实环境中,信号强度随着基线长度的增加而降低,而噪声电平则随着基线长度增加而增加。通过反复实验,得到了一个最佳的信噪比,如图3。



3 临床应用

医学临床上,通过检测人体磁场获得的信息,明显详细于对人体生物电进行检测得到的信息,典型的应用有脑磁图、心磁图、肺磁图和肌磁图。肺磁图主要用于检测人体肺部的外界废尘的沉积量,为某些职业病的鉴定提供医学技术支持。肌磁图用于判断人体肌肉受伤情况,对于职业运动员有重要意义。脑磁图和心磁图主要用于疾病病灶的定位,为外科手术提供导航作用,如图4,5。

3.1 脑磁图

癫痫是由于脑部疾病导致皮层异常放电引起的一种发作

性疾病,我国现有癫痫病人1000多万人,发病率在8%左右,每年新增发病人数35万人。目前通过正规用药,可以最大限度地减少癫痫发作。但是,由于抗癫痫药物的毒副作用较大,长期服药患者往往难以承受,对儿童来说,频繁发作会影响到脑神经系统发育,造成记忆力下降,对患儿心理健康有较大影响,所以手术根治癫痫一直是国内神经外科专家学者们集中攻坚的重要课题。

在江苏省南京脑科医院,以脑磁图、视频脑电、磁共振三大检查为基础,建立了癫痫术前综合定位模式,病灶定位误差小于2毫米,使手术治愈率大大提高。“脑磁图”是目前搜寻癫痫位的最先进设备和最重要手段,它能将脑皮层的神经元电活动产生的磁信号记录下来并将其融合于磁共振图像上,可以确定癫痫放电的起源部位即癫痫灶,同时还可以确定脑的重要功能区。目前医院已开展了十余例癫痫手术治疗,手术效果比传统方法有明显的提高。

脑磁图检查主要适应症:各种类型的癫痫,脑良性或恶性肿瘤,脑血管病(中风),帕金森病,老年性痴呆,偏头痛,幻听,幻视,脑外伤,精神分裂症,强迫症,抑郁症,自闭症,植物人等等。脑磁图的医学应用还包括:癫痫诊断和致痫灶手术前定位,神经外科手术前大脑功能区定位,缺血性脑血管病预测和诊断,精神病和心理障碍疾病的诊断,外伤后大脑功能的评估和鉴定,司法鉴定和测谎应用,语言、视觉、听觉、体感诱发等的研究。

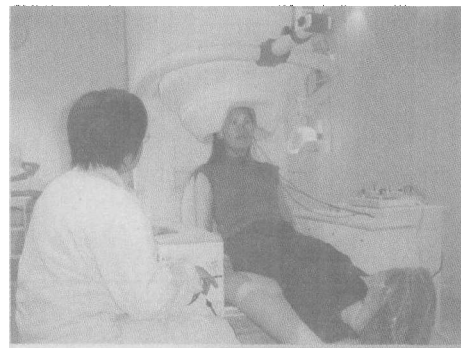


图4 脑磁图临床应用

Fig.4 The clinical application of magnetoencephalogram

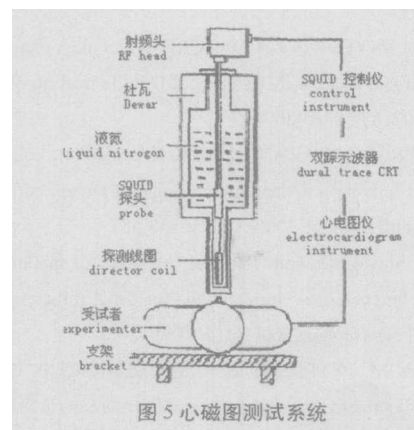


图5 心磁图测试系统

Fig.5 The test system of magnetocardiogram

3.2 心磁图

2006年1月7日,由Siemens公司制造的磁导航心血管介

入系统在江苏省人民医院心脏科正式投入使用。磁导航心血管介入系统是全球最先进的介入治疗技术,对于心脏领域两大难题—心房颤动和冠状血管全闭塞病变(CTO)的治疗有着革命性的意义。目前全球只有 20 余家最大的心脏中心拥有此技术,主要分布在美国和欧洲。基于心磁图测量的磁导航系统在介入心脏病诊断和治疗上具有许多优越性,能帮助临床医生解决目前介入心脏病学上的许多难题。该系统用于冠心病介入治疗、心律失常介入治疗及双心室起搏治疗,与常规消融导管相比,磁性导管更易抵达心脏的四个腔室,其导航精确,导管移动灵活,改变了手术方法学,扩展了手术适应症,可大大提高手术成功率,减少手术医生及患者的 X 射线受量。此外,还有减少手术创伤,提高手术安全性,节省消耗品使用等优点。

4 结论

人体生物磁场中含有丰富的人体内部组织健康状态的信息,对人体微弱生物磁场进行测量有助于医学临床对疾病的诊断与治疗。生物磁学研究是一门迅速发展的交叉学科,也是一门学术理论研究、实验检测技术和工程应用并重的学科。在短短数十年间,生物磁学检测技术在医学临床应用方面经历了 X 射线、CT 检查、核磁共振、到目前人体生物磁检测的飞跃发展历程。在继续完善心、脑方面应用的基础上,未来的应用范围将会进一步扩大,如老年痴呆、帕金森病、以及肿瘤细胞的早期检测等,还可见被用于新生儿早期疾病的筛查中,对于提高人类的健康水平有重要意义,有着美好的应用前景。

参考文献(References)

- [1] 宋效先,王晓燕,李树德,等.人体磁场信息的医学价值[J].张家口医学院学报,2002,19(5):57-58
SONG XIAOXIAN, WANG XIAOYAN, LI SHUDE, et al. Medical value of biomagnetic field in human body[J]. Journal of Zhangjiakou medical college, 2002,19(5):57-58
- [2] 杨文修,李正明.生物医学物理概论[M].天津科技翻译出版公司.天津,1993
YANG WENXIU, LI ZHENGMING. Panorama of biomedical physics[M]. Tianjin: Tianjin science translation publishing company, 1993
- [3] 曾映波,任超世.生物磁测量方法和应用[J].国外医学生物医学工程分册,1995,18(4):228-235
CENG YINGBO, REN CHAOSHI. Biomagnetism measuring method and application[J]. Biomedical Engineering Foreign Medical Science, 1995, 18(4):228-235
- [4] 陈海英.精密磁强计的发展现状与应用[J].精密仪器,2000(6):5-7
CHEN HAIYING. Precision magnetometer state and application[J]. Precision instrumental, 2000(6):5-7
- [5] VSM Med. Tech. Ltd. 脑磁图常见问题及解答, www.vsmmedtech.com. 2006
VSM Med. Tech. Ltd. FAQ on magnetoencephalogram, www.vsmmedtech.com.2006
- [6] 陈林,李敬东,唐跃进,等.超导量子干涉仪发展和应用现状[J].低温物理学报,2005,11,27(5):657-661
CHEN LIN, LI JINGDONG, TANG YUEJIN, et al. Development and application of Superconductor Quantum Interferometer Device [J]. Journal of low temperature physics, 2005,11,27(5):657-661
- [7] 丁红胜,陈赛华,张利华,等.高温直流超导量子干涉器心磁图仪的研制[J].北京科技大学学报,2006,9,28(9):863-866
DING HONGSHENG, CHEN GENGHUA, ZHANG LIHUA, et al. Development of high temperature SQUID magnetocardiogram [J]. Journal of Beijing science and technology university, 2006, 9,28(9):863-866
- [9] 磁导航系统亚太培训中心落户江苏省人民医院, jscdh.365heart.com
Magnetic navigation system training center located Jiangsu people hospital, jscdh. 365heart.com
- [6] HE A G, TAN L H, TANG Y, et al. Modulation of neural connectivity during tongue movement and reading [J]. HumBrain Map, 2003, 18: 222-232
- [7] BURTON H, SNYDER A Z, CONTURO TE, et al. Adaptive changes in early and late blind: a fMRI study of Braille reading [J]. J Neurophysiol, 2002, 87 (1): 5892-607
- [8] SOBEL N, PRABHAKARAN V, ZHAO Z, et al. Time course of odorant induced activation in the human primary olfactory cortex[J]. Journal of Neurophysiology, 2000, 83(1): 537-551
- [9] Krishnan S, Slavin MJ, Tran TT, et al. Accuracy of spatial normalization of the hippocampus: implications for fMRI research in memory disorders[J]. Neuroimage, 2006, 31(2):560-71
- [10] HAMPSON M, PETERSON B S, SKUDLARSKI P. Detection of Functional Connectivity Using Temporal Correlations in MR Images[J]. Hum Brain Map, 2002, 15:247-262
- [11] BAKER RS, ANDERSEN AH, MORECRAFT RJ, et al. A functional magnetic resonance imaging study in patients with benign essential blepharospasm [J]. J Neuroophthalmol, 2003, 23(1): 112-115
- [12] KANTARCI K, PETERSEN RC, BOEVE BF, et al. DWI predicts future progression to Alzheimer disease in amnesic mild cognitive impairment[J]. Neurology, 2005, 64: 902-904
- [13] WANG HL, YUAN HS, SHU L, et al. Prolongation of T-2 relaxation times of hippocampus and amygdala in Alzheimer's disease[J]. Neurosci Lett, 2004, 363: 150-153
- [14] DICKERSON BC, SALAT DH, GREVE DN, et al. Increased hippocampal activation in mild cognitive impairment compared to normal aging and AD[J]. Neurology, 2005, 65: 404-11
- [15] KRISHNAN S, SLAVIN MJ, TRAN TT, et al. Accuracy of spatial normalization of the hippocampus: Implications for fMRI research in memory disorders[J]. Neuro-Image, 2006, 31: 560-71
- [16] LIU HL, LIAO WT, FANG SY, et al. Correlation between temporal response of fMRI and fast reaction time in a language task [J]. Magn Reson Imaging, 2004, 22: 451-455

(上接第 424 页)