

双人体耦合心电场被动式人体静电探测器中的电旋转效应分析

张燕, 徐立新

北京理工大学机电学院, 北京 100081

摘要 静电探测器是通过检测目标的静电场而获得目标信息的探测器, 利用静电场原理对目标进行探测的人体探测器是人体探测技术的重要应用。本文重点讨论利用介电泳技术对双人体耦合心电场的探测问题, 并对电旋转检测效应进行分析与仿真。首先阐述了电旋转效应原理; 其次分析了双人体耦合心电场特性及该电场中弧形四项检测电极的电场, 并计算与之对应的介电泳力与转矩; 最后利用有限元方法对检测电场及介电泳力进行建模与仿真。仿真结果清晰展示了 3 种特殊角度下的电旋转效应, 与理论分析相一致。

关键词 人体探测; 介电泳; 电旋转; 双人体心电耦合电场; 四项电极

中图分类号 P412

文献标识码 A

doi 10.3981/j.issn.1000-7857.2012.04.005

The Electrorotation Effect of Passive Electrostatic Detection System for Double Human Body Coupling Heart Electric Field

ZHANG Yan, XU Lixin

School of Mechatronic Engineering, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China

Abstract Electrostatic human body detector is a detector which is able to obtain the target information through catching up the electrostatic field of the target. It plays an important role in the human body detection technology. Based on dielectrophoresis theory, the detection of the coupling heart electric field between the operator and the detected living human is focused on; in the meanwhile, the electrorotation effect involving this problem is analyzed. Firstly, the electrorotation effect, which belongs to dielectrophoresis theory, is described. Then, the double human body coupling heart electric field and the electrorotation four-pole arch electrode structure which generates detective electric field, are analyzed. Finally, the finite element method is used to simulate and calculate the detective electric field. Simulation result clearly demonstrates electrorotation effect at three special angles. The conclusion is consistent with the theory and is one of significant studies on the passive electrostatic human body detection technique.

Keywords human body detection; dielectrophoresis; electrorotation; double human body coupling heart electric field; four-pole electrode

0 引言

双人体耦合心电场被动式人体静电探测器是利用处于探测器与被探测者耦合心电场中的电旋转效应来探测阻隔物后的人体目标, 是介电泳理论在静电探测领域的新应用。该技术在单兵侦察、伤员救援、特种监视、公共安全等领域均有重要应用。

利用各项技术对人体心跳信号进行探测的目标探测器研制是近年来人体探测技术的研究热点。美国是该技术的“领头羊”, 早在 2001 年, 美国佐治亚技术研究所就将多普勒

雷达技术与高速信号处理技术相结合, 研制出了“手电筒式雷达”系统^[1]。2007 年, 美国夏威夷大学研制的“生命阅读器”无线雷达使用了 MIMO 多普勒雷达技术, 它能穿透墙体准确探测众多活体目标的心跳, 作用距离约为 15m。2011 年 4 月, 美国泰林克斯公司研制出了一种毫米波雷达, 名为“美洲豹 20-H”, 该项技术利用低功率雷达, 可以探测到目标人体的心跳, 有效距离达 19.81m^[2]。国内, 第四军医大学于 2004 年研制出了雷达式“生命探测仪”, 实现了非接触、远距离人体生命探测, 有效距离可达 30—50m, 标志着中国首次研制出穿墙雷

收稿日期: 2011-10-11; 修回日期: 2011-12-08

作者简介: 张燕, 博士研究生, 研究方向为目标指向探测识别, 电子信箱: yzhcindy@gmail.com; 徐立新 (通信作者), 教授, 研究方向为目标探测与毁伤控制, 电子信箱: lxxu@bit.edu.cn

达。2011年,国防科技大学开发了一款名为 Radar Eye 的穿墙探测雷达,这是一种微功率冲激脉冲雷达系统,其高重复频率能提供较好的实时性,迅速跟踪人体特征目标^[3]。值得注意的是,目前低频电磁人体探测技术主要是利用雷达技术探测人体心跳产生的低频电磁波,判断人体存在与否,利用静电原理对人体心脏电场进行定位的隔墙探人技术却为数不多。美国宾夕法尼亚州的 Wind Gap 探测系统公司 1996 年研制出“探人器”,该装备可以探测人体产生的静电场,探测距离高达 120—140m。国内,北京理工大学机电工程与控制国防科技重点实验室从 2004 年开始从静电探测的角度开展了隔墙探人技术的研究,该研究能够拓宽高新技术在人体探测中的应用,增强中国在人体探测技术领域的竞争力。

本文重点讨论利用介电泳技术探测双人体心电耦合电场的问题,并对电旋转检测电场进行分析与仿真。文中首先阐述了属于介电泳理论范畴的电旋转效应原理;其次分析了双人体耦合心电场特性及匹配电场中的电旋转弧形四项检测电极电场,并计算与之对应的介电泳力与转矩;最后利用有限元方法对检测电场进行模拟。仿真结果清晰展示了 3 种特殊角度下电旋转效应,且与理论分析相一致。本文为以双人体耦合心电场为探测目标的人体探测系统建立了有效的探测模型,对人体探测技术的进一步研究具有重要意义。

1 双人体耦合心电场

1.1 人体心电向量环与心电信号

对整个人体而言,心脏很特别,它所产生的电场形态也很特殊。心脏由几个部分的心肌组成,每个部分的心肌又由大量的心肌细胞组成;心脏某个部分心肌进入兴奋后,组成该心肌的大量心肌细胞开始不同程度地进入除极与复极状态。单个心肌细胞电偶极矩的大小和方向各有所异,且随时间变化;把同一时刻几个不同方向大小各异的心电向量综合叠加成一个向量,就代表该时刻整个心脏的综合心电向量。因此,若除极与复极过程中心肌细胞等效电偶极子所形成的 n 个瞬时极化向量为 $\mathbf{P}_s (s=1, 2, \dots, n)$, 则整个心脏等效为一个电偶极子,其电偶极矩为瞬时综合心电向量 \mathbf{M}^0 , 即

$$\mathbf{M} = \sum_{s=1}^n \mathbf{P}_s \quad (1)$$

人的心脏兴奋是特殊的传导系统,整个心脏兴奋和恢复可大致分为心室兴奋、心房兴奋和心室恢复 3 个有序的传导过程,每个过程的每个时刻心脏偶极子对应的瞬时心电向量的方向和大小都随时间发生变化,将这些瞬时向量的顶端连接起来就组成了空间心电向量环。图 1 为标有 4 个典型兴奋瞬间的 3 个空间心电向量环形成的示意图。其中,1 瞬间为心房开始兴奋时所产生的瞬时综合心电向量,2 瞬间为心室中隔兴奋所产生的瞬时综合心电向量,3 瞬间为左右心室同时兴奋时所产生的较大瞬时综合心电向量,4 瞬间为右心室兴奋完毕后左心室独立兴奋产生的瞬时综合心电向量,如图 1(a) 所示。整个心脏变化全过程的心电向量环可分为心室兴

奋形成的 QRS 向量环、心房兴奋形成的 P 向量环和心室恢复形成的 T 向量环,如图 1(b) 所示。空间心电向量经过两次投影形成心电图,第一次投影为在额面、横面和侧面上形成的平面心电向量环,第二次投影为把向量心电图投影到各导联轴上形成标量心电图 (Electrocardiogram, ECG), 如图 1(c) 所示。综合三部分便是人体心电信号的形成过程。

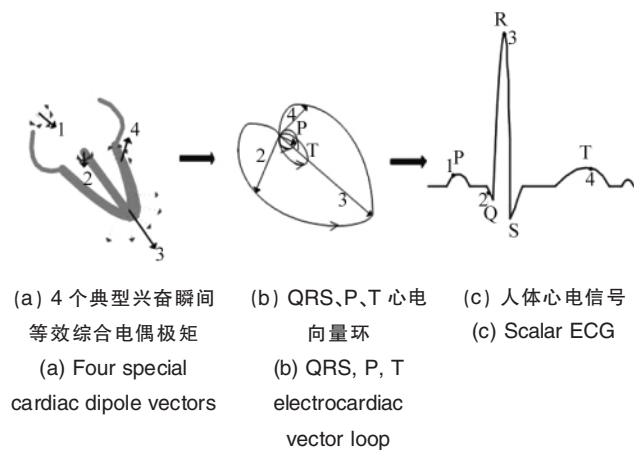


图 1 心电信号的形成

Fig. 1 Establishment of electrocardiosignal

由图 1 可以看出,每一次心跳过程中,心脏电偶极矩呈周期性变化,且心脏电偶极矩在 QRS 环、P 环和 T 环的某一时刻达到最大值。由心电图理论可知,这一最大值经投影为 ECG 的 3 个典型波形的 3 个极值点,可将这一特性运用于人体探测技术,获得有效的探测效果。

1.2 双人体心脏耦合电场模型

人体的心脏可视为被容积导体包围的电偶极子,其对外所建立的心电场中,瞬时电场强度与电势的分布遵从电偶极子电场与电势的分布特点。电偶极子产生的电场中,到距离电偶极子 r 处的任一点的电势 φ 为^[4]

$$\varphi = \frac{\mathbf{P} \cdot \mathbf{r}}{4\pi\epsilon r^3} \quad (2)$$

其中, \mathbf{P} 为电偶极子的电偶极矩矢量, ϵ 为相对介电常数。该点的电场强度 \mathbf{E} 为

$$\mathbf{E} = -\nabla\varphi = \frac{1}{4\pi\epsilon} \left[\frac{3\mathbf{P} \cdot \mathbf{r}}{r^5} \mathbf{r} - \frac{\mathbf{P}}{r^3} \right] \quad (3)$$

由式(2)、式(3)可见,心电偶极子产生的电势和电场强度随着距离的增大而迅速衰减,衰减速度分别是距离的平方和立方倍,单个人体心电信号的探测效果因此受该因素的干扰。由于建立在探测者和被探测者之间的双人体心电场模型不是两对电偶极子产生电场的简单叠加,而是相位耦合和振幅耦合的,同时也是部分相干和部分同构的,因此建立在二者之间的探测过程可以减少距离的影响,可以认为这是一种与单人探测目标相互感应的高倍放大的电场模型。这种电场模型可以通过介电泳现象产生的介电泳力与力矩得到量化的宏观表述。基于双人体耦合心电场的被动式探人系统具有远距离“搜索”人类信号的优点,因而具有重要的研究意义。

图2 为基于该理论的探测过程示意图。

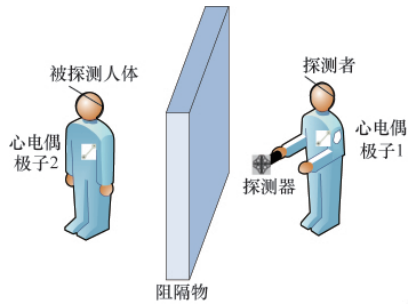


图2 双人体耦合心电场人体探测过程
Fig. 2 Process of the operator detection for locating a hidden person

2 双人体耦合心电场被动式人体静电探测器中的电旋转效应

2.1 电旋转理论

电旋转效应属于介电泳理论范畴。介电泳是指中性电介质粒子由于在非均匀电场中被极化而受力产生的定向移动现象,介电泳技术是生物颗粒检测、分离、聚合等操控的主要手段。电旋转效应就是悬浮颗粒在旋转电场中产生的定向转动,它被更多地用在筛选、监测和测量等领域^[6]。本文利用电旋转效应进行人体心脏电场的探测,属于生物分离技术的逆向应用过程。典型的电旋转效应电极结构是四片中心轴对称的电极,四项电极上分别施加相位差为 90°的正弦信号,如图 3 所示。

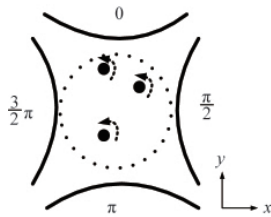


图3 用于电旋转效应的四项电极结构

Fig. 3 Four-pole electrode for creating a ROT phenomenon

悬浮颗粒能够在中心轴对称四项电极形成的圆形旋转电场中发生旋转效应。圆形区域的电场 E_r 为^[8]

$$E_r = E_x \cos(\omega t + \varphi_x) a_x + E_y \cos(\omega t + \varphi_y) a_y \quad (4)$$

其中, E_x 与 E_y 是 x 与 y 方向上的外加电场分量; a_x 和 a_y 是 x 与 y 方向上的单位矢量; φ_x 和 φ_y 是 x 与 y 方向上的相位差; ω 为正弦信号的角频率。动态旋转电场被分离为 360 帧,用于 360° 旋转电场静态分析。该电场导致中性粒子旋转的转矩表达式为

$$\Gamma = -4\pi\epsilon_m r^3 \text{Im}(f_{CM}) (\text{Re}[E] \times \text{Im}[E]) \quad (5)$$

其中, f_{CM} 为克劳修斯因子, $\text{Re}[E]$ 与 $\text{Im}[E]$ 分别为电场矢量的实部与虚部分量。

2.2 处于双人体耦合心电场中的电旋转效应

由于心电图信号为周期信号,且正常人体心电图信号特

性大致相同,可利用这一性质进行区分其他物种的人体探测。在模拟探测双人体耦合心电场的过程中,为了匹配电极接收到的心电信号与运用电旋转效应,首先将心电图信号具有峰值的 QRS 波、P 环和 T 环提取出来,通过电压比较器将其转换为方波信号,而后将方波信号调制为正弦信号,该正弦信号应与原始的心电图信号典型波形的波峰幅值与周期一致。

在探测过程中,双人体耦合心电场产生的心电信号被形成电旋转效应的四电极相邻电极接收,电压信号在特定时刻的角频率相位差恰好为 $\pi/2$, 对角电极的电信号相同。实验过程中,该电压信号被直接施加在四项电极上。中性粒子此时受电旋转效应,其旋转转矩与介电泳力分别为

$$\Gamma = -4\pi\epsilon_m r^3 \text{Im}(f_{CM}(\omega)) E_x E_y \sin(\varphi_x - \varphi_y) a_x \times a_y \quad (6)$$

$$F = 2\pi\epsilon_m R^3 \text{Re}[f_{CM}(\omega)] |\nabla |E_r|^2 \quad (7)$$

其中, r 为颗粒半径, ϵ_m 为悬浮溶液介电常数, f_{CM} 为克劳修斯因子, $\sin(\varphi_x - \varphi_y)$ 为双人体心电耦合电场形成心电信号经转换后的具有相位差的正弦信号。从式(6)可以看出,该转矩大小与电压信号 x 与 y 方向上的相位差有关,而不与外加电场成简单的正比关系。

值得注意的是,中性粒子在受电旋转效应转动时,也同时受到不均匀电场产生的介电泳力影响而摆动。这种摆动在电极的边界会比较明显,导致粒子运动的速度与方向改变,但不足以影响粒子运动的大致趋势。

3 建模与仿真

本文采用有限元方法对处于双人体耦合心电场的电旋转效应进行计算,采用 COMSOL 多电场耦合软件进行建模与仿真。仿真过程中中性电介质选取聚苯乙烯微球,其直径为 517nm,相对介电常数 $\epsilon_r = 2.3 \times 10^{-11} \text{F/m}$,溶液的相对介电常数 $\epsilon_m = 7.08 \times 10^{-10} \text{F/m}$;被计算的环形电极的内半径为 100nm,施加在电极上的信号为正峰值 $V_m = 9.5 \text{V}$ 正弦电压信号。

图 4 为进行电旋转的四项弧形电极模型搭建,图 5—图 7 为计算得出的电场矢量与介电泳力分布图,其中施加在四项电极上的电势变化相位差分别为 $\pi/6, \pi/3$ 和 $\pi/2$ 。从 6 幅图可以看到,不同相位差情况下,旋转电场的电场强度不同,在相位差为 $\pi/3$ 时非均匀性最大,且值达最大,微粒受介电泳

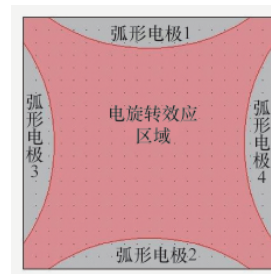


图4 四项弧形电极电旋转效应模型
Fig. 4 Four-pole arch electrode for creating a ROT phenomenon model

力也最大;在相位差为 $\pi/2$ 时非均匀性最小,且值达最小,微粒受介电泳力也最小。通过以上分析可知,中性颗粒在不同电场情况下的电旋转转矩与所受介电泳力不相同,且与电场

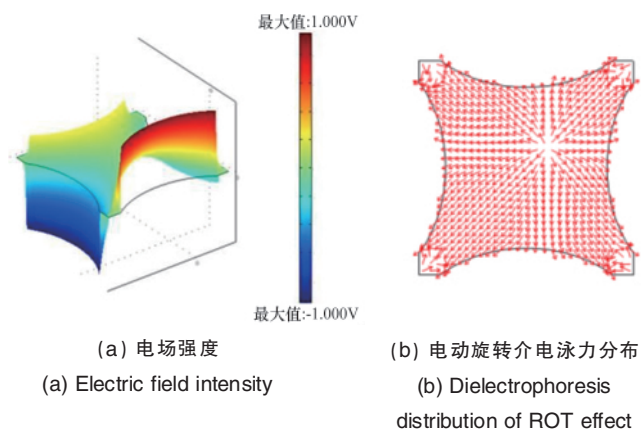


图 5 相位差为 $\pi/6$ 时耦合心电场电动旋转效应
Fig. 5 Coupling heart electric field ROT effect with $\pi/6$ phase separation

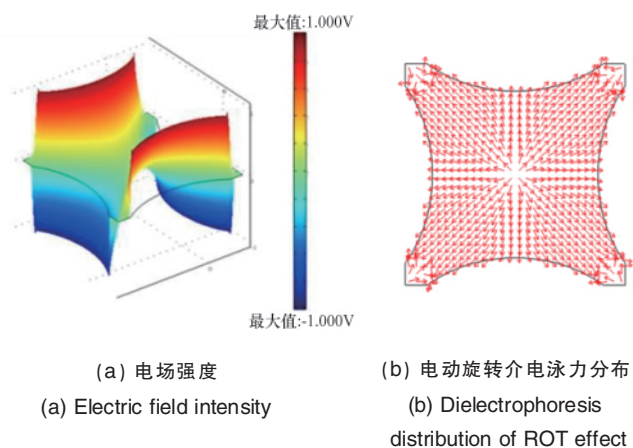


图 6 相位差为 $\pi/3$ 时耦合心电场电动旋转效应
Fig. 6 Coupling heart electric field ROT effect with $\pi/3$ phase separation

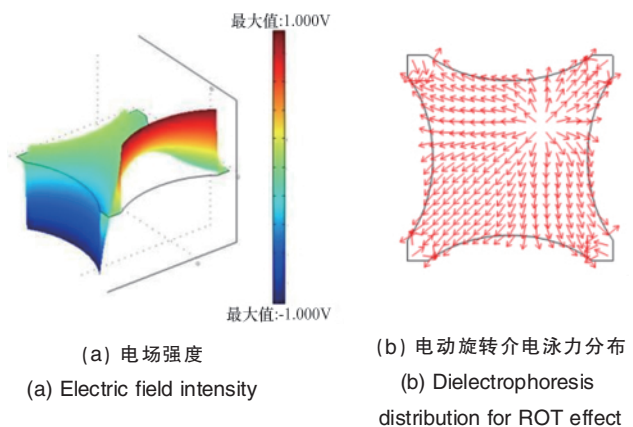


图 7 相位差为 $\pi/2$ 时耦合心电场电动旋转效应
Fig. 7 Coupling heart electric field ROT effect with $\pi/2$ phase separation

有正比关系。综合介电泳力的影响,在相位差 $\pi/3$ 时旋转效应最明显,效果最好。

4 结论

分析以上建模与仿真结果可知,用于生物颗粒分离的电旋转效应可在双人体耦合心电场中作用,从而达到对该目标电场进行检测的效果。在此理论上,利用有限元方法对电场进行仿真,可以得到有效的旋转电场与电动旋转介电泳力。由此可见,首先,双人体耦合心脏电场可以引起电旋转效应;其次,在双人体心电信号转换为具有特征值的正弦信号且具有一定的相位差时,弧形四项电极所形成的电旋转效应不同,相位差在 $\pi/3$ 时效果最明显。在系统设计过程中,对环形电极的陷状沟道放置陶瓷压电灵敏器件,通过检测沟道的粒子变化量,可将微观效应宏观表出。本文为以人体心脏为探测目标的人体探测系统提出了一种有效的静电探测方法,对人体探测技术的进一步研究具有重要意义。

参考文献 (References)

- [1] 韩磊. 平面分层多介质中静电探测技术研究[D]. 北京: 北京理工大学, 2006.
Han Lei. Study of the electrostatic field detecting technology in the layered plane multi-medium[D]. Beijing: Beijing Institute of Technology, 2006.
- [2] 沙鹰. 美洲豹 20-H 机器人 [OL]. [2011-08-05]. <http://www.ydxx.cn/Portal/viewnews-21501>.
Sha Ying. Leopards 20-H robot[OL]. [2011-08-05]. <http://www.ydxx.cn/Portal/viewnews-21501>.
- [3] 易大方. 穿墙雷达人体探测技术的新进展 [J]. 电讯技术, 2009, 49(10): 88-92.
Yi Dafang. *Telecommunication Engineering*, 2009, 49(10): 88-92.
- [4] 范少光, 汤浩. 人体生理学[M]. 北京: 北京大学医学出版社, 2006.
Fan Shaoguang, Tang Hao. Human physiology [M]. Beijing: Peking University Medical Press, 2006.
- [5] 潘志达. 医学物理学[M]. 北京: 科学出版社, 2007.
Pan Zhida. *Medicophysics*[M]. Beijing: Science Press, 2007.
- [6] Pohl H. Dielectrophoresis [M]. New York: Cambridge University Press, 1978.
- [7] Michael P H. Computer aided analysis of conditions for optimizing practical electrorotation[J]. *Phys Med Biol*, 1998, 43: 3639-3648.

(责任编辑 马宇红,代丽)

《科技导报》征集“封面文章”

为快速反映我国最新科技研究成果,《科技导报》拟利用刊物最显著位置——封面将最新科研成果第一时间予以突出报道。来稿要求:研究成果具创新性或新颖性;反映该领域我国乃至世界前沿研究水平;可以图片形式予以反映,图片美观、清晰、分辨率超过 300dpi;文章篇幅不限,要说明研究的背景、方法、取得的结果,以及结论。在线投稿:www.kjdb.org。