



基于心电仿真模型 参数解的心电逆问题研究

Solution for Electrocardiographic Inverse Problem in
Terms of Heart Model Parameters

夏 灵



高等教育出版社

HIGHER EDUCATION PRESS



基于心电仿真模型 参数解的心电逆问题研究

Solution for Electrocardiographic Inverse Problem in
Terms of Heart Model Parameters

夏 灵



高等教育出版社
HIGHER EDUCATION PRESS

图书在版编目 (CIP) 数据

基于心电仿真模型参数解的心电逆问题研究 / 夏灵.
北京: 高等教育出版社, 2002. 6
ISBN 7-04-010317-6

I. 基... II. 夏... III. 心电图-研究
IV. R540.4

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2001) 第 086909 号

基于心电仿真模型参数解的心电逆问题研究

夏灵

出版发行	高等教育出版社	购书热线	010-64054588
社 址	北京市东城区沙滩后街 55 号	免费咨询	800-810-0598
邮政编码	100009	网 址	http://www.hep.edu.cn
传 真	010-64014048		http://www.hep.com.cn

经 销 新华书店北京发行所
排 版 高等教育出版社照排中心
印 刷 高等教育出版社印刷厂

开 本	850×1168 1/32	版 次	2002 年 6 月第 1 版
印 张	5.625	印 次	2002 年 6 月第 1 次印刷
字 数	130 000	定 价	9.60 元
插 页	1		

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题, 请到所购图书销售部门联系调换。

版权所有 侵权必究

作者简介



夏灵,男,1965年出生于浙江缙云,1987年毕业于浙江大学电机系工业自动控制专业,1987年至1990年在南京华东电子管厂工作,1990年至1996年在浙江大学生物医学工程系攻读硕士、博士学位,1996年获浙江大学工学博士学位,现任浙江大学生物医学工程系副教授,协助吕维雪教授指导博士生8名。1990年以来一直从事计算机心脏仿真建模及其应用方面的研究工作,对正常心脏的工作机制及心肌梗死、心肌缺血、预激综合征及各种心律失常等异常心脏的发病机制和电生理特征作了较深入的研究,在国内外高级刊物上已发表学术论文20多篇,博士论文《基于心电仿真模型参数解的心电逆问题研究》获1999年首届全国优秀博士论文奖。1997年以来承担了国家自然科学基金及浙江省自然科学基金项目各一项,目前在全国优秀博士论文专项基金的资助下从事心脏电生理模型与心脏力学模型相结合方面的开创性研究工作。

导师简介

吕维雪,男,1930年出生于上海,1951年毕业于浙江大学机械系,1955年至1958年在苏联进修获副博士学位,1978年晋升为教授,现任浙江大学生物医学工程、测试计量技术两学科的博士生导师。历任浙江大学副校长、研究生院院长、学位评定委员会主席,国务院学位委员会学科评议组仪器仪表组组长,国家教委科学技术委员会仪器仪表组组长,中国科学院技术科学部机械学科组成员,卫生部技术顾问等职

学科专长为生物医学工程、仪器仪表。早年留苏期间从事数控机床方面的研究,获苏联机械工业部科研成果奖和步进电机控制线路发明证书。1961年创建测试技术及自动化仪器专业,1977年创建生物医学工程专业,至今已指导博士生40多名,硕士生20余名,博士后近20名,发表论文200多篇,著有《机床的数字程序控制》、《曲线数字程序控制系统的设计》、《微处理机系统的设计开发与应用》、《定量生理学》、《医学图像处理》等专著

内 容 提 要

本书为作者博士学位论文,基于作者的研究,系统、详细地论述了一种新的心电逆问题研究方法——基于心电仿真模型参数解的心电逆问题研究,有自己独到的见解,在研究方法上也有新的突破。全书共包括以下几个方面的内容:(1)心电逆问题新方法研究;(2)心电仿真模型编辑器的开发;(3)心外膜电位与心电向量图的仿真研究。

可供相关研究人员参考使用。

中文摘要

以往的心电逆问题研究,要么从体表电位推断心脏的等效源,要么从体表电位分布推断心外膜电位分布。对于前者,由于心电源的等效方法有很多,人们事先很难知道该用哪一种等效方法,心电源可以这样假设,也可以那样假设。即使心电源假设得比较合理,由于存在数学上的病态特性,所求出的解也是很不准的,因此这种方法的实际应用意义不大。对于后者,只是从理论上讲,逆解得出的心外膜电位分布比体表电位分布具有更高的诊断分辨率,但由于逆解的不很准确性,真正将这种方法应用于临床的还没有见到。这两种研究方法的最大不足之处是没有将体表电位与心脏的电兴奋传播过程联系起来。

近年来心脏电兴奋传播仿真模型(心电正问题)的发展使得我们能够研究心脏电兴奋传播过程与体表电位之间的关系。将心电正问题与逆问题有机地结合起来就可产生一种新的心电逆问题研究方法,即我们所提出的基于心电仿真模型参数解的心电逆问题研究方法。在心电仿真模型中,心脏电兴奋传播过程是由一系列心脏电生理特性模型参数决定的,因此只要能从体表电位数据推知心电仿真模型参数,就可以确定心脏的电兴奋传播过程。这种方法的最大优越之处是从逆解得出的模型参数可以得知心脏病灶的定量信息(如病灶的位置、范围、程度等)。

本文的主要工作包括:

一、心电逆问题新方法研究

系统地介绍了现有心电逆问题研究的方法及其进展。在分析了以往逆问题研究方法的欠缺后,在国际上首先提出了一种基于心电仿真模型参数解的逆问题研究新方法,并给出了一个逆问题

研究新方法的研究方案。通过对 WPW 预激综合征心室内预激点定位的试验表明其逆解得出的预激点位置误差一般不超过 4.5 mm。通过在模型产生的体表电位数据中加噪声和电极位置偏移的方法来模拟实测的体表电位数据,试验结果表明体表电位数据在存有信噪比为 15 的噪声和电极位置最大偏移量不超过 10 mm 的情况下,逆解的稳定性良好。

二、心电仿真模型编辑器的开发

基于心电仿真模型参数解的逆问题研究新方法需要积累大量的有关体表电位与心脏状态之间关系的知识,因此需要进行大量的仿真研究。原 LFX 心电仿真模型对模型参数的设置是基于数据文件逐点进行的,既繁琐耗时,又易出错。因此我们开发了模型编辑器,以形象化的图形方式来对模型参数进行设置,并将参数编辑、仿真运算、结果显示集于一身,使心电仿真模型形成一个易于操作的系统软件。此外,我们还把它从 DOS 运行环境移植到 Windows 环境下,以利于今后实现该软件的进一步版本升级。

三、心外膜电位与心电向量图的仿真研究

这两者是 LFX 心电仿真模型的进一步发展。作者在国际上首先采用真实几何形状的心脏模型对心外膜电位进行了仿真研究,并提出利用仿真方法积累心外膜电位先验知识的思想,从而为基于心外膜电位的心电逆问题研究服务,以提高其逆解的精度。

Abstract

Previous electrocardiographic inverse problem studies have focused on deducing equivalent heart sources or reconstructing epicardial potentials from the measured body surface potentials. Many equivalent representations of the cardiac sources can be used. We do not know in advance which equivalent representation is more suitable, we can employ the equivalent representation in this way or in that way. Even if the employed equivalent representation is suitable for cardiac sources, the inverse solutions are not accurate because of the ill-posed nature of the inverse problem. So the inverse problem in terms of equivalent heart sources has little applicability. For the inverse problem in terms of epicardial potentials, theoretically, the reconstructed epicardial potentials' possess higher diagnosis resolution compared with the body surface potentials, however, the inverse solutions of this approach are also not accurate enough for clinical applications. The most shortcoming of these two approaches is that both of them have not related the body surface potentials to the excitation propagation process in the heart.

The developments of the excitation propagation - type heart models (forward problems) enable us to study the relationship between the body surface potentials and the excitation propagation of the heart. Combining the forward problem with the inverse problem can produce a new approach to the inverse problem, i. e. , solutions in terms of heart - torso model parameters, which were introduced by us for the first time in the world. In the heart - torso model, the heart excitation propagation depends on a set of model parameters,

so the heart excitation propagation should be determined if we can deduce the model parameters from the body surface potentials. The most important advantage of this approach is that the quantitative information of the heart disease (the position, the range and the serious degree of the focus, etc.) could be determined from examination of the recovered heart – torso model parameters.

The author has done the following research work:

1. Research work on electrocardiographic inverse problem

After reviewing the previous electrocardiographic inverse problem studies, the author introduced a new approach to electrocardiographic inverse problem studies, i. e. , solutions in terms of heart – torso model parameters, and designed a research scheme. To verify the validation of the new method, the author used the approach to localize the site of ventricular preexcitation with simulated body surface potential data in mimic patients with Wolff – Parkinson – White (WPW) syndrome. The inverse recovered preexcitation site was in close agreement with the true preexcitation site, usually the position error does not exceed 4.5 mm. The measured body surface potential data has been mimiced by adding noises and electrode position errors to the simulated body surface potential data. The results showed that the stability of the inverse solutions was satisfactory under the simulated body surface potential data with noises ($\text{SNR} \geq 15$) and the maximum electrode position error less than 10 mm.

2. Development of the heart – torso model editor

The new approach of electrocardiographic inverse problem required accumulating a huge amount of knowledge on the relationship between body surface potentials and the state of the heart. That

needed a lot of simulation experiments. To set the model parameters in the previous LFX heart – torso model, one must change the data file by a point – to – point method. That was very time consuming and mistakes were easy to be made. So we developed a model editor that employed the imaginal graphic mode to set the heart – torso parameters and combined with the functions of simulating and results displaying, and the heart – torso model turned out to be a convenient system software.

3. Simulation studies of epicardial potentials and vectorcardiogram

These were new developments of the LFX heart – torso model. Epicardial potentials have been simulated based on our heart – torso model. It was the first time in the world that used a realistic heart – torso model to simulate the epicardial potentials. The author suggested that people should use simulation method to accumulate a *priori* information of epicardial potentials, and then use it to improve the accuracy of the inverse solutions of the inverse problem in terms of epicardial potentials.

目 录

中文摘要	1
Abstract	1
第 1 章 心电逆问题研究的文献综述	1
第一节 心电逆问题的概念与特性	1
第二节 基于等效源的心电逆问题研究方法	2
第三节 基于心外膜电位的心电逆问题研究方法	8
第四节 心电逆问题研究的新进展	14
第五节 心电逆问题研究新方法的提出	15
第六节 课题的意义及本文的组成	16
第 2 章 心电仿真建模的电生理基础和数学物理基础	19
第一节 心电仿真建模的电生理基础	19
第二节 心电仿真建模的数学物理基础	24
第 3 章 LFX 心电仿真模型及其模型编辑器的开发	31
第一节 LFX Ver. 1.0 心电仿真模型	31
第二节 模型编辑器的开发	38
第三节 LFX Ver. 2.0 心电仿真模型	49
第 4 章 心电向量图仿真研究	64
第一节 心电向量图的概念与仿真研究背景	64
第二节 心电向量图的仿真方法	67

第三节	仿真结果	69
第 5 章	心外膜电位的仿真研究	77
第一节	心外膜电位仿真的意义与研究背景	77
第二节	心外膜电位的仿真方法	79
第三节	正常心脏心外膜电位的仿真结果	81
第四节	异常心脏心外膜电位的仿真结果	83FT
第五节	讨论	89
第 6 章	基于心电仿真模型参数解的心电逆问题研究新	
方法	91
第一节	新方法的提出及其基本原理	91
第二节	研究方案	94
第三节	匹配准则	96
第 7 章	基于神经网络的心脏疾病预诊断系统的研究	99
第一节	预诊断系统的组成结构与原理	99
第二节	一种基于多目标优化思想的改进 BP 网络 学习算法	104
第三节	基于 ECG 的心脏疾病类型识别系统	114
第四节	基于 BSPM 的心脏疾病“定位”参数识别系统	122
第五节	优化系统心脏模型参数初值的设置	132
第 8 章	心电逆问题研究新方法应用于预激综合征旁	
道定位的试验	133
第一节	试验方法	133
第二节	试验结果	136
第三节	讨论	146
第 9 章	总结与展望	149
后记	152
参考文献	156

第1章

心电逆问题研究的文献综述

第一节 心电逆问题的概念与特性

所谓心电逆问题是指从体表电位分布推断出心脏内的电活动情况。临床上广为应用的心电图诊断其实就是一种心电逆问题的求解过程,只不过它是一种基于经验知识的定性诊断,而我们这里所指的心电逆问题,则是根据体表电位的分布,人体的几何形状以及躯干容积导体的电磁特性,通过数学物理方法求得心脏电活动的定量解。

心电逆问题的一个重要特性是它不存在数学上的唯一解,只要心脏兴奋区域确定不了,心电源是不可能被唯一确定的,因为某封闭面内的心电源在其外部产生的心电场可能与等效单层或等效双层场源在该表面本身产生的心电场极为相似,这个困难可以通过等效心电源法来解决,其等效心电源参数可通过体表电位唯一确定,也可通过求心外膜电位方法来解决。

心电逆问题的第二个特性是病态特性(ill-posed),即解的不稳定性,哪怕输入有极小的噪声或扰动,其解就振荡得很厉害。参数越多,也即心电源搞得越复杂,其病态特性越严重。病态特性需

通过“正则化(regularization)”来解决,通常对心电源加上许多时间或空间的约束。

第二节 基于等效源的心电逆问题研究方法

一、单一固定偶极子解法

单一固定偶极子解法(single fixed-location dipole)构成了临床心电图向量图。心电源假设为一个幅值和方向均可变化而位置固定的电流偶极子 M 。模型只包含三个未知量,即 M 的三个笛卡尔坐标分量 M_x 、 M_y 、 M_z 。心电图向量图就是确定这三个分量的。

现在临床上应用的心电图向量图最早是 1956 年由 Frank^[1] 提出的。在没有噪声的情况下,在 i 导联测得的电位 Φ_i 等于理论上相应的电位 Φ'_i :

$$\Phi'_i = L_i \cdot M \quad (1-1)$$

其中 L_i 是导联向量。如果 L_i 的三个独立分量看做已知的话,则方程(1-1)能得到唯一解。Frank 用均匀性电解质槽模拟人体躯干得到相应的心脏偶极子的位置、表面电极位置及相应的导联向量。尽管方程(1-1)的逆解只需至少四个电极(三个独立导联),但要用七个电极确定躯干的解剖位置。偶极子分量的逆解要通过七个电极电位的线性组合来描述。很显然,对于不同的偶极子位置假设,其导联向量是不同的,因为导联向量是从计算 M 的逆解得到的。Frank 试图通过仔细选择表面电极的位置来减少 M 变化的可能。

McFee 和 Parungao^[2] 也尝试了通过选择对漂移不敏感的导联来补偿心动周期中 VCG 偶极子位置的漂移。McFee-Parungao 系统(也称为轴导联系统),也是利用均匀性躯干模型,因此当电流通过导联端流入或流出电解质槽时会产生同一个“导联场”。利用

亥姆霍兹互反规则,当记录 VCG 信号时,在统一导联场区域导联电压不会改变偶极子的位置。因此整个心动周期中所记录到的 VCG 就更精确。我们的计算机仿真结果也表明 McFee - Parungao 轴导联体系比 Frank7 导联体系来得精确(见本文“心电向量图仿真研究”一章)。

二、多极子系数解法

多极子系数解法(multipole coefficient)将心电源用有限的多极子电流源来表征(偶极子、四极子、八极子等),它们都处于同一原点(通常选在心脏中心)。只要求得这些极子的系数,就可以获得相应的等效心电源。

由于这些极子处于同一原点且多极子源的高阶次项没有生理特性,因此提出了用适当的多极子项来代表心脏主要偶极子特性及其分布特性的模型。由于最低阶次是一偶极子,所以多极子表达式能提供一种怎么样最好估计心脏偶极子的理论探索。研究表明用偶极子加上四极子可以更好地表征心脏等效源,而八极子以上的分量一般可以忽略。

多极子系数一般被作为其它逆解方法中的一个中间步骤来计算。

三、单一移动偶极子解法

单一移动偶极子解法(single moving dipole, SMD)首先由 Gabor 和 Nelson^[3]在 1954 年提出的。心电源用单个偶极子来等效,偶极子的位置、大小和方向均是可变的。一般有两种解法:一种是将多极子系数的计算只当作求逆过程的一个中间步骤(多极子系数法);另一种是试图直接减小体表电位测量值与 SMD 估计值之间的总平方残差(直接法)。多极子系数法由于存在截尾误差,因而是一种近似解法,但较常用;直接法,解更精确,但只有在预先知道 SMD 的正向传递系数的情况下才能解。

在多极子系数法中,由于多极子的原点改变时,偶极子项保持不变,而高阶次项是变化的。这说明多极子系数要在使四极子项最小的原点计算。这样偶极子项占优势,相应的原点就是该等效心脏偶极子在什么地方起作用的。在心动周期中,这个原点是自由移动的,实际上就是 SMD 解的结果。

直接法是寻找偶极子的大小和位置使体表电位测量值与估计值之间的二乘误差最小。残差由下式表示:

$$\eta_i = \Phi_i - \Phi'_i = \Phi_i - (L_{x_i}M_X + L_{y_i}M_Y + L_{z_i}M_Z) \quad i=1,2,\dots,N \quad (1-2)$$

式中 Φ_i 和 Φ'_i 代表诱导点 i 的电位测量值与估计值, N 是诱导点个数, L_{x_i} 、 L_{y_i} 、 L_{z_i} 是导联向量。求方程(1-2)的最小二乘误差解容易得出 M_X 、 M_Y 、 M_Z 。重复不同的偶极子位置,直至整个心动周期结束。该法计算量很大。

SMD 解法可用来研究急性心肌梗死和 WPW 预激综合征。Mirvis 和 Holbrook^[4] 计算了 ST 段的 SMD 位置,结果发现对于下壁梗死,其 SMD 位置在后壁尾部;对前壁梗死,其 SMD 位置向右移,与解剖位置大致对应。Gulrajani 等^[5] 研究了 28 例 WPW 病人并证实了预激波期间的 SMD 位置就是预激点位置,其轨迹就是附加通路。但由于用固定的躯干几何形状,心脏的位置与朝向也是固定的,因而 SMD 的位置与实际的位置有一定程度的不符合,它只能分离出预激点的大致位置:右边、后壁和左边。

四、双移动偶极子解法

当 SMD 模型明显不能满足要求时,双移动偶极子解法(two moving dipoles, TMD)可能是一个有用的心脏等效源模型。例如,在 QRS 中期,两个心室均出现兴奋波面,此时用 SMD 法会产生很大的误差,而一个偶极子反映一个心室特性的 TMD 模型可能会得到更好的解。

TMD 法也是由 Gabor 和 Nelson^[3] 首先提出的。与 SMD 方法