

【文章编号】 1004-7220(2003)04-0222-04

# 心脏表面的动作电位

刘深泉, 范涛

(华南理工大学理学院应用数学系, 广州 510640)

**【摘要】** 目的 研究心肌组织动作电位形成的波形结构, 方法 应用心肌组织的模型计算和心脏 Cmiss 软件的图形分析方法进行研究。结果 得到心脏表面的螺旋波和破碎螺旋波, 心肌内部的环形回卷波等理论结果, 这些数值结果详细描述了心肌动作电位的变化规律。结论 本研究的数值结果与激发介质的实验现象一致。

**【关键词】** 心肌组织; 动作电位; 螺旋波; 回卷波

**【中图分类号】** R 318.04; R 331.3<sup>+</sup>8

**【文献标识码】** A

心脏心肌组织的电位变化十分复杂<sup>[1,2]</sup>。这类电信号由心肌细胞引起, 通过记录犬心脏表面的电位, 得到动作电位的变化可形成环形波, 而这种环形波与心房扑动有关, 类似的螺旋波形出现在兔心房中。深入的分析表明, 这种电位波形在心肌内部不断移动, 并且可能导致波形破碎。一种流行的观点是<sup>[3,4]</sup>, 心脏内部的波形破碎可以影响心脏的节律, 引起心脏纤维性颤动, 严重时可导致正常心脏的人突然死亡。这类心脏疾病在工业化国家特别严重。由于关系人体的心脏健康, 对此类现象的研究显得特别重要。在心肌组织的研究中, 实验证实心肌具有激发介质的特性<sup>[1,2]</sup>。其特点是, 心肌受到小的扰动时, 心肌本身很快恢复到静息状态, 心肌受到超过某一临界值的扰动时, 心肌会出现长时间的激发状态, 然后再恢复到平衡状态。因为心肌动作电位形成的机制与一般激发介质机制一致<sup>[5]</sup>, 从而在理论上抽象为方程(1)描述<sup>[4]</sup>。

模型(1)中  $u$  为快变量, 模拟心肌动作电位,  $v$  为慢变量。理论分析表明, 激发介质波前曲面的法向速度和平均曲率具有线性关系<sup>[2]</sup>附加 Neumann 边界条件, 数值结果表明<sup>[6]</sup>, 平面具有螺旋波形及其破碎, 空间具有回卷波及其扭曲的结构, 这些数值结果解释了激发介质的实验结果。本文对方程(1)进行数值分析, 将计算的平面螺旋波、破碎螺旋波, 三维回卷波及其扭曲等结构, 粘贴放在心脏表面和心脏内部, 理论上模拟心脏心肌组织动作电位的变化。

## 数值计算

心肌动作电位的波形表示为空间某一区域, 该激发区域包含两个曲面<sup>[2]</sup>。从静息态跳跃到激发态的边界曲面称为波前, 从激发态恢复到激发态的边界曲面称为波后。实际观察到的波形, 是指方程(1)中动作电位  $u$  在某一范围的变化区域。方程组(1)的数值分析有很多方法<sup>[1]</sup>。这里的计算采用 Barkley 设计的软件 Ezspiral 和 Ezscroll<sup>[7]</sup>, 对应单扩散的 Bar-Eiswirth 模型<sup>[8]</sup>。

**【收稿日期】** 2003-01-14

**【基金项目】** 国家自然科学基金资助项目(批准号: 19902005)

**【作者简介】** 刘深泉(1964-), 男, 副教授, 主要研究领域: 生物力学、心肌组织、心脏节律、神经传导编码、DNA 结构等。

**【通讯作者】** 刘深泉, Tel: (020)87114815, E-mail: mashqiu@scut.edu.cn

$$\begin{cases} \frac{\partial u}{\partial t} = \nabla^2 u + \epsilon^{-1} u(1-u)(u - \frac{v+b}{a}) \\ \frac{\partial v}{\partial t} = u - v \end{cases} \quad (1)$$

对方程(1)的计算,有二维和三维两种情形。对平面情形,这里计算采用文献<sup>[8,9]</sup>提出的隐式欧拉差分格式的算法,变量  $u, v$  的初始条件取常数,在矩形  $[0, 40] \times [0, 40]$  附加 Neumann 边界条件,时间步长取  $t_s = 0.8$ ,每个方向分点个数为 121,常数参数  $a = 0.5, b = 0.01, \epsilon = 1/50$ ,变量范围  $0.1 < u < 1$  表示心机的激发状态。

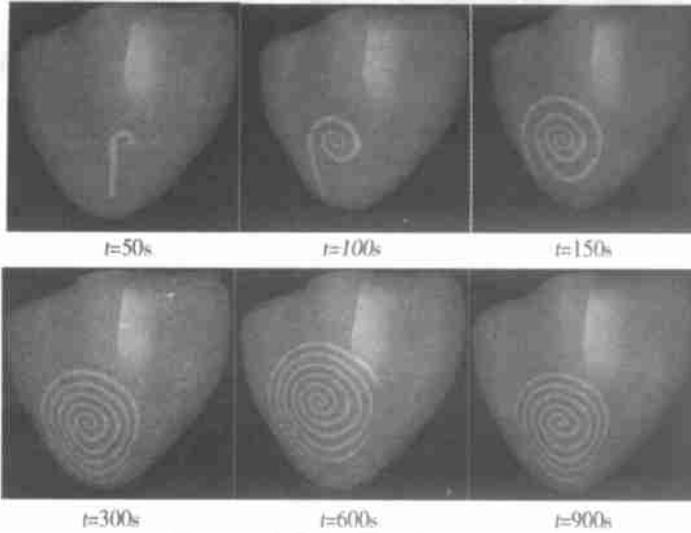


图 1 心肌组织表面的螺旋波

Fig. 1 The spiral waves on the surface of cardiac tissue.

图 1 看到的是心脏表面动作电位的波形,随固定时间  $t$  变化得到的图案,图形显示螺旋波在心脏心肌表面的旋转变化。螺旋波的图形计算在 Linux 系统下进行,用截图工具截下,存成普通的图形文件。红色心脏模型的图形用 Cmiss 软件<sup>[10]</sup>获得,该软件的心脏模型数据可以生成 vml 格式的三维心脏图形,这里采用的是 Cosmo play。在心脏的 vml 数据里面把螺旋波的图形作为贴图,即可得出图 1 心脏表面的螺旋波变化。若不粘贴在心脏模型中,单独计算的波形结果和浅盘中 BZ 反应或阿米巴细菌聚集的实验完全一致<sup>[5,6]</sup>。

若将参数  $\alpha$  增大,取  $\alpha = 0.75$ ,其它参数和初始条件不变,水平和垂直方向分点个数仍取 121,类似图 1 的图形处理方法,得到图 2。它表示心脏心肌表面的螺旋波出现破碎时的变化规律。同样,若不粘贴在心脏模型中,这些波形可以出现在浅盘中的 BZ 反应或阿米巴细菌聚集的实验<sup>[5,6]</sup>。这样我们用数值方法不仅解释了激发介质的部分实验结果,而且再现了心脏表面动作电位螺旋波破碎的变化。

图 1 和图 2 得到的螺旋波及其破碎图形。其中螺旋波破碎的情形具有重大意义,反映在心肌组织上,一种观点是,心肌内部的螺旋破碎波形可导致心动过速,严重导致心脏纤维性颤动,危及人的生命<sup>[3,4]</sup>。这里数值结果只说明一定条件下,心肌组织表面,具有螺旋波及其破碎的结构。但出现螺旋波破碎的条件比较复杂,一般波形破碎的条件与激发介质的回复曲线有关<sup>[11]</sup>。碎波形如何影响心脏节律,具有重大意义,但仍然需要研究。

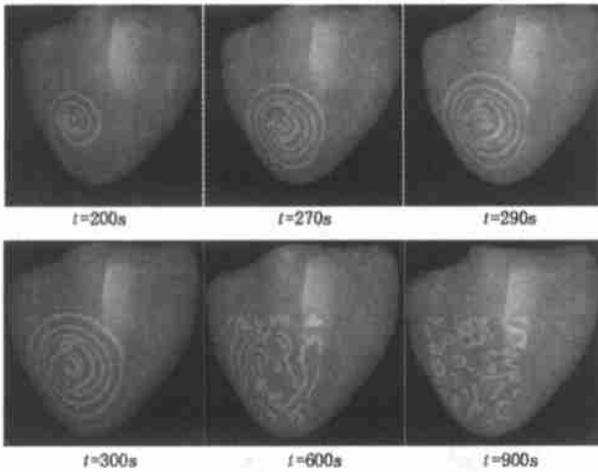


图 2 心肌组织表面螺旋波的破碎

Fig. 2 The spiral breakup wave on the surface of cardiac tissue.

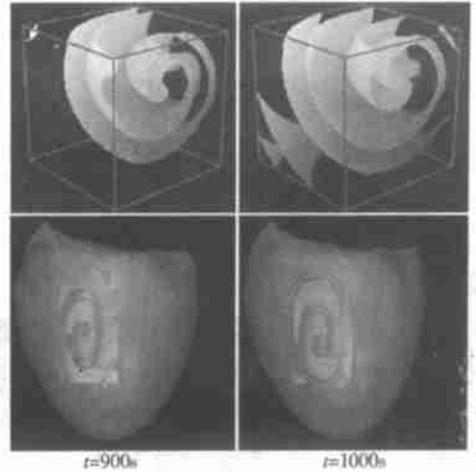


图 3 模型计算的波形(上图)和心肌组织回卷波的波形(下图)

Fig. 3 The wave of the model (upper picture) and the scroll wave in the cardiac tissue (down picture).

对三维情形,仍利用上面的算法,初始条件取常数,在立体  $[0, 30] \times [0, 30] \times [0, 30]$  附加 Neumann 边界条件,参数  $a = 0.8$ ,  $b = 0.01$ ,  $\epsilon = 1/50$ , 时间步长  $t_s = 0.8$ , 每个方向分点个数为 41, 波形的激发态仍用  $0.1 < u < 1$  描述, 得到动作电位的波形随时间  $t$  变化的空间波形。图 3 首先将 Linux 下计算得到的回卷波数据文件变换为 vrm1 格式, 此格式的回卷波数据和用 Cmiss 软件获得心脏模型数据同时显示, 得到图 3。

图 3 的波形结构实际模拟了心脏心肌内部动作电位的变化。虽然实验很难得到心脏心肌组织的精细实验结果, 但这里数值实验给出了心脏电位对应波形的空间变化规律。图形看到, 空间的波形图案十分复杂, 阐明动作电位回卷波的变化机理比较困难。若和激发介质 BZ 反应比较, 这样的回卷波形图案, 在试管内 BZ 反应的实验中可以看到<sup>[12]</sup>。

## 结 论

本文利用数值方法, 理论得到心脏心肌组织动作电位的波形。这里的波形结构形式, 心脏心肌表面包括螺旋波、螺旋波的破碎, 心脏心肌内部得到回卷波的结构。这些数值结果与激发介质的实验现象一致, 由于心脏心肌组织具有同样的激发介质机理, 从而数值实验说明心脏心肌动作电位的结构变化。但动作电位螺旋波形破碎产生的条件, 回卷波形的变化规律等理论问题, 螺旋波形和回卷波形对心脏节律的影响等实际问题, 特别是破碎波形与心脏纤维性颤动的关系等, 这里没有涉及, 仍需进一步研究。

## 【参考文献】

- [ 1 ] 奥佩著, 高天祥, 高天礼译, 心脏生理学—从细胞到循环 [ M ], 北京: 科学出版社, 2001.
- [ 2 ] Winfree A T, The Geometry of Biological Time [ M ]. Second Edition. Springer, 2000.
- [ 3 ] Gray R, Jalife J. Mechanisms of cardiac fibrillation [ J ], Science, 1994, 270: 1222—1225.
- [ 4 ] Winfree AT. Electrical turbulence in three-dimensional heart muscle [ J ], Science, 1994, 266: 1003—1006.
- [ 5 ] Hofer T, Sherraff JA and Maini PK. Cellular pattern formation during dictyostelium aggregation [ J ]. Phys D, 1995, 85, 425—444.

(下转第 228 页)

- [2] 陶祖莱. 生物流体力学[M]. 第一版. 北京: 科学出版社, 1984; 75—80, 298—460.  
 [3] 柳兆荣. 心血管流体力学[M]. 第一版. 上海: 复旦大学出版社, 1986; 213—256.  
 [4] [日] 冈小天著. 生物流变学[M]. 第一版. 北京: 科学出版社, 1980; 464—520.  
 [5] Chandrasekhar S. Hydrodynamic and Hydromagnetic Stability[M]. New York: Dover Publication, Inc., 1982; 9—21.  
 [6] De Chant L.J. A perturbation model for the oscillatory flow of a Bingham plastic in rigid and periodically displaced tubes[J]. Trans ASME, J Biomech Eng. 1999, 121(5): 502—504.

## RADIAL DISTRIBUTION OF TEMPERATURE, PRESSURE AND VELOCITIES FOR THE OSCILLATORY FLOW IN ARTERY

YAO Li

(Staff Room of Physics, Nantong Medical College, Jiangsu Nantong 226001, China)

**Abstract: Objective** To investigate the radial distribution of temperature for the oscillatory flow in artery, and its relationship with other mechanical quantities. **Methods** Considering oscillatory flow as the first-order terms, the equations of motion on the basis of Boussinesq's approximation can be treated by perturbation theory. **Results** The equations of oscillatory flow including temperature are derived, and the radial distributions of temperature, pressure and velocities for the oscillatory flow in artery are obtained. **Conclusion** (1) The distributions of temperature and velocities are closely related to oscillatory frequency, the amplitude of the temperature fluctuation is inverse proportional to oscillatory frequency. (2) With the increasing of the oscillatory frequency, the gradient of temperature and velocities is mainly restricted in the near-wall layers. (3) The distributions of temperature and axial velocity are comparable.

**Key words:** Oscillatory flow; Temperature; Pressure; Velocity; Distribution

(上接第 224 页)

- [6] Winfree AT. Persistent tangled vortex rings in generic excitable media[J], Phys D, 1995, 84: 126—132.  
 [7] Dwight Barkley, exspir and ezscroll[CP/OL], <http://www.maths.warwick.ac.uk/~barkley/ez-software.html> 2002.  
 [8] Bar M, Eiswirth M, Turbulence due to spiral break-up in a continuous excitable media[J]. Phys Rev E, 1993, 48: 1635—1637.  
 [9] Dowle M, Mantel RM, and Barkley D. Fast simulations of waves in three-dimensional excitable media[J]. Int J Bif Chaos 1997, 11(7): 2529—2546.  
 [10] The Bioengineering Institute, CMISS[CP/OL], <http://www.bioeng.auckland.ac.nz/cmiss/cmiss.php> 2002.  
 [11] Panfilov AV, Three-dimensional organization of electrical turbulence in the heart[J], Phys Rev E, 1999, 59(5): 6251—6254.  
 [12] Keener JP. The dynamics of three-dimensional scroll waves in excitable media[J]. Phys D 1988, 31: 269—276.

## THE ACTION POTENTIAL OF HEART SURFACE

LIU Shen-quan, FAN Tao

(Department of Applied Mathematics, South China University of Technology, Guangzhou 510640, China)

**Abstract: Objective** The purpose of this study is to investigate the wave structure of cardiac tissue generated by action potential. **Methods** The used methods are numerical analysis of the cardiac model and Cmiss software of Graph tools. **Results** We obtain the spiral wave and its breakup on the surface of heart and the scroll wave in cardiac tissue. These theoretic results describe the changing of the action potential of cardiac tissue in detail. **Conclusion** The studying simulation results here identify with the experiment phenomena of excitable media.

**Key words:** Cardiac tissue; Action potential; Spiral waves; Scroll waves.