

# Simulation about the Dynamic of Nonlinear System by Using Visual Function of MFC\*

Lisi Liang, Yongfeng Wang, Jin Liu, Jiqian Zhang<sup>#</sup>

College of Physics and Electronic Information, Anhui Normal University, Wuhu  
Email: #zhangcdc@mail.ahnu.edu.cn

Received: May 2nd, 2012; revised: Jun. 28th, 2012; accepted: Jul. 10th, 2012

**Abstract: Objective:** To study the dynamics behavior in some nonlinear system, such as cardiac system et al., by using VC language programming, with the help of the strong drawing function of MFC module. **Methods:** Firstly, the view function of MFC module is used in this paper, and control parameters of complex system are set to be different buttons in panel of program, thus the evolution course of the complexity dynamics induced by parameters can be obtained easily by clicking a button; Secondly, we could easily observe the complex phase diagram or fractal in detail, by dragging a enlarging/minifying button in panel; Finally, different evolution results under different conditions could be observed in real-time, by adding appropriate mouse response effect. **Results:** We mainly studied the dynamic process of cardiac sinoatrial node system by using view function of MFC, observing the regulation effects of external stimuli on the pacemaking activity behavior, and dynamic tracking the evolutionary process and conduction of membrane voltage under different parameters. To reveal the inherent relationship and mechanism between environmental disturbance and arrhythmia by comparing the simulation results with experimental data. **Conclusion:** By using MFC for simulation, it has convenient scalability, intuitionistic visual effects, as well as convenient local amplification function etc. The simulation process could be operated intuitively and conveniently, so it will be useful for building a 3D heart model, and help us further study the dynamics process of cardiac pacemaking in the future.

**Keywords:** Nonlinear Systems; MFC Module; View Simulation; Dynamic Evolution

## 利用 MFC 的视图功能对非线性体系进行仿真模拟\*

梁立嗣, 王永丰, 刘 瑾, 张季谦<sup>#</sup>

安徽师范大学物理与电子信息学院, 芜湖  
Email: #zhangcdc@mail.ahnu.edu.cn

收稿日期: 2012 年 5 月 2 日; 修回日期: 2012 年 6 月 28 日; 录用日期: 2012 年 7 月 10 日

**摘 要: 目的:** 本文采用 VC 语言编程, 借助 MFC(Microsoft Foundation Classes)模块强大的绘图功能, 用于仿真模拟心脏等复杂非线性体系的动力学过程。**方法:** 首先, 利用 MFC 程序模块整合的视图开发功能, 将复杂体系各控制参量设置为面板上不同按钮, 通过点击按钮观察复杂体系动力学过程随控制参数变化的情况; 其次, 通过添加放大或缩小功能按钮, 可以方便地观察复杂相图的局部分形细节; 再者, 添加恰当的鼠标响应效果, 可以实时观察不同条件下的动态演化效果。**结果:** 利用视图仿真重点研究了心脏体系窦房结组织搏动过程, 实时观察外界环境刺激对其起搏活动的调控作用, 动态跟踪不同参数条件下, 膜电压产生及传导的演化过程。通过仿真模拟与实验数据对比, 揭示环境扰动与心律失常之间的内在联系及作用机制。**结论:** 将 MFC 用于视图仿真, 具有方便的可扩展性、直观形象的可视化效果、便利的局部放大功能等优点。模拟过程既直观形象, 又方便明了, 便于将来构建心脏等复杂系统的三维模型, 进一步研究心脏的搏动过程。

\*基金项目: 国家自然科学基金理论物理专款项目(11047017), 安徽省自然科学基金(2009KJ099B)。

<sup>#</sup>通讯作者。

**关键词：**非线性系统；MFC 模块；视图仿真；动态演化

## 1. 引言

随着计算机技术和并行计算方法的快速发展，非线性系统复杂动力学过程的控制与应用研究已成为自然科学技术和社会科学研究领域的一个热点。非线性科学目前所涉及的六个主要研究领域，即混沌、分形、模式形成、孤立子、元胞自动机和复杂系统，涵盖各种各样的尺度的系统，涉及以任意速率运动的对象，不仅在理论上，而且在实用上都具有十分重要价值<sup>[1]</sup>。

众所周知，具有自相似特征的分形现象在自然界是普遍存在的，因此分形几何又称为描述大自然的几何学。典型的分形集有 Mandelbrot 集和 Julia 集，其中曼德勃罗特集出自迭代公式： $z_{n+1} = z_n^2 + c$  ( $c$  为复数)，从该公式出发所绘制的图形中，只要计算的点足够多，这种梦幻般的美丽图案具有无穷无尽的细节和自相似性。不管把图案放大多少倍，都能显示出更加复杂的局部结构<sup>[2]</sup>。

研究表明，动力学系统的稳定定常态除平衡、周期、准周期各态外，还有另一种重要的状态——混沌态，即确定性系统由于对初态敏感性而产生的随机状态。因而在一般意义的分岔现象中，系统参量跨越分岔值导致系统中定态的转化可能是多种多样的：从一种平衡到另一种平衡，振动到混沌，准周期到混沌，混沌到准周期，甚至混沌到另一种混沌等等。人们发现，分岔和混沌等非线性现象广泛存在于电子学、物理学、化学、生物学以及技术科学、社会科学等各个领域，混沌及其混沌控制在电子系统、保密通信、数据加密、故障诊断等众多领域中得到了广泛的应用<sup>[1]</sup>。

近年来，对于混沌现象及其控制的研究，越来越引起人们的关注。作为非线性映射分岔和混沌现象的理论研究和应用实践的通用范例，洛伦兹系统、平方映射与 Logistic 映射等系统是人们了解分岔和混沌现象的简单而实用的例子。随着对蔡氏电路研究不断深入，借助于非线性电路是研究混沌及混沌同步应用的重要途径之一，在理论模拟和实践方面不断取得进展时，人们也不断开拓新的应用领域，如在通信、生理学、化学反应过程等方面不断产生新的技术构想，并有望很快成为现实<sup>[3-6]</sup>。

另外，目前在医学临床上，对于心律失常等心血管疾病，人们通常采用药物、电除颤、射频消融等手段进行治疗<sup>[7]</sup>，但由于对其内在的致病机理缺乏足够的了解，因此无法从根本上解决这一世界性的难题。在理论上，随着计算机科学、非线性动力学、心肌细胞动作电位数模型的完善，计算机建模仿真已成为从细胞水平上研究心脏生理和病理不可替代的一种方法和手段。不仅可以用于指导实验研究，完成试验中一些难以进行的工作，更重要的是可以对细胞电生理活动进行定量的描述，并获得动作电位、心电图谱的一些有价值的信息<sup>[8-22]</sup>。

当然，目前采用的数学模型，虽然可以用于研究心脏的电生理和力学特性，但这些模型大多不是动态模型，因此尽管能够获得心脏体系的一些生理病理信息，但不能形象直观地获得即时变化信息，特别是由于心脏体系的结构复杂性，影响心脏动力学的内外因素较多，因而在模型中控制其动力学过程的参数也较多，因此，这些静态模型的模拟就无法形象观察到不同参数变化的动态作用效果，其心电仿真的准确性也有待于提高。

由上可见，要形象直观了解这些复杂非线性体系的动力学过程及随外界控制条件的变化，探讨其内在的作用机制，需要借助于新的手段和方法才行。鉴于此，本文借助于 VC 程序中所集成强大的面向对象的可视化集成编程系统-MFC 模块，利用 VC 语言编程，进行仿真模拟，一方面通过视图仿真，可以动态地观察其动力学随时间的演化过程，对其复杂的演化过程有一个直观形象的感性了解；另一方面，可以方便地改变不同的控制条件，探讨其动力学过程随外界控制条件而变化的规律和作用机制。

## 2. 方法简介

VC 编程软件具有框架自动生成、灵活方便的类管理、代码自由编写扩充和界面设计集成交互操作、可开发多种程序等优点，并且通过简单的设置就可使其生成的程序框架支持数据库接口和 3D 控制界面等等。而其中的基础类库 MFC 即 Microsoft Foundation Classes，包含了许多已经定义好的对象类库，其派生

类功能也十分强大。特别是利用其中类库的视图功能，用于仿真模拟，可以方便地动态观察复杂系统的动力学过程，获得直观形象的演化效果。

本文中，具体利用 VC 编程时，我们充分利用 Windows 操作系统提供的标准控件，适当地构建标准化窗口和对话框，用于添加人机交互元素。利用控件对象的可编程性，将用 VC 编写的非线性系统的程序添加到对话框中，并利用 MFC 提供封装控件的类，将多个体系的程序模块封装到整个程序系统之中。例如，可以将各非线性系统的控制参量设置为控制面板上的相应按钮；利用 MFC 的 CAnimateCtrl 类，将程序运行的结果(如细胞膜电压、系统状态量随时间变化的序列)显示为连续的 AVI 视频剪辑，以便观察动态演化过程；利用 CScrollBar 类设置滚动条，可以实现连续扩大或缩小图片的大小，以便观察诸如分形图片的微小细节，直观了解分形现象的自相似特征。

本文先演示 Mandelbrot 集和 Julia 集等体系的仿真结果，然后重点研究窦房结细胞体系，利用 MFC 模块强大的视图功能，借助于函数作图和分析功能等图形技术，构造多种参数变化的动态心肌 - 窦房结耦合模型，这样既可以保存计算结果进行分析判断，又可以直接运行程序画出耦合体系膜电压的演变图像，进行即时动态跟踪观察，直接验证相关的结果。

### 3. 结果与讨论

首先，框架面板设置。我们利用 MFC 建立一个对话框面板，作为程序运行及图形展示的窗口。在面板左侧添加相应按钮，每个按钮对应于某一非线性体系，在编程时，将动作响应与程序代码关联起来，独立完成相应的仿真功能。当切换到该系统的按钮时，整个界面显示为相应系统的控制界面，面板上显示与该系统各个控制参数相关的按钮，在跳出的对话框中可以设置控制参数值(如图 1 所示)，然后点击 OK 按钮，程序即开始运行。

其次，图形区域设置。我们在右侧建立一个图像显示区域，当程序开始运行后，即可将系统随时间演化的结果实时显示在该区域内。例如，点击面板左侧第 2 个按钮“Mandelbrot”，设置好对话框中相应的参数后，在编程对  $z = z_0^2 + c$  迭代运算时，设置相应的颜色，点击 ok 后，得到如图 2 所示曼德波罗集的分形图片<sup>[1]</sup>。

第三，放大功能设置。为了能方便地观察非线性体系的分形结构，在编程过程中，我们利用 MFC 模块的类库，设置图片的放大和缩小功能：这可以通过三种方式来实现：设置鼠标特效，利用鼠标滚轮的连续滚动来改变图片的大小；设置滑块，通过鼠标上下拖动滑块来调节放大倍率；设置放大镜功能，可改变

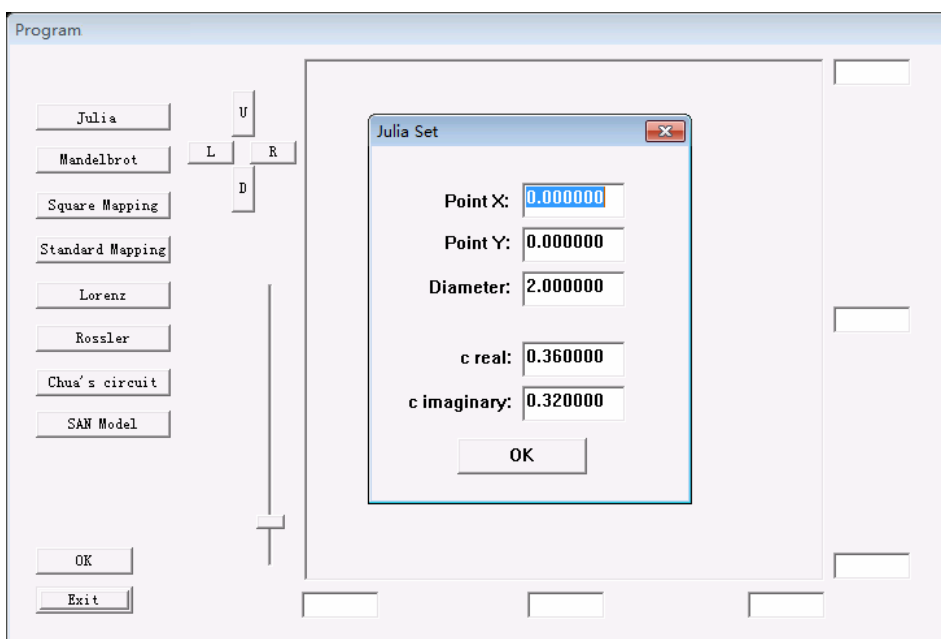


Figure 1. The operator panel interface of the program  
图 1. 程序的操作面板示意图

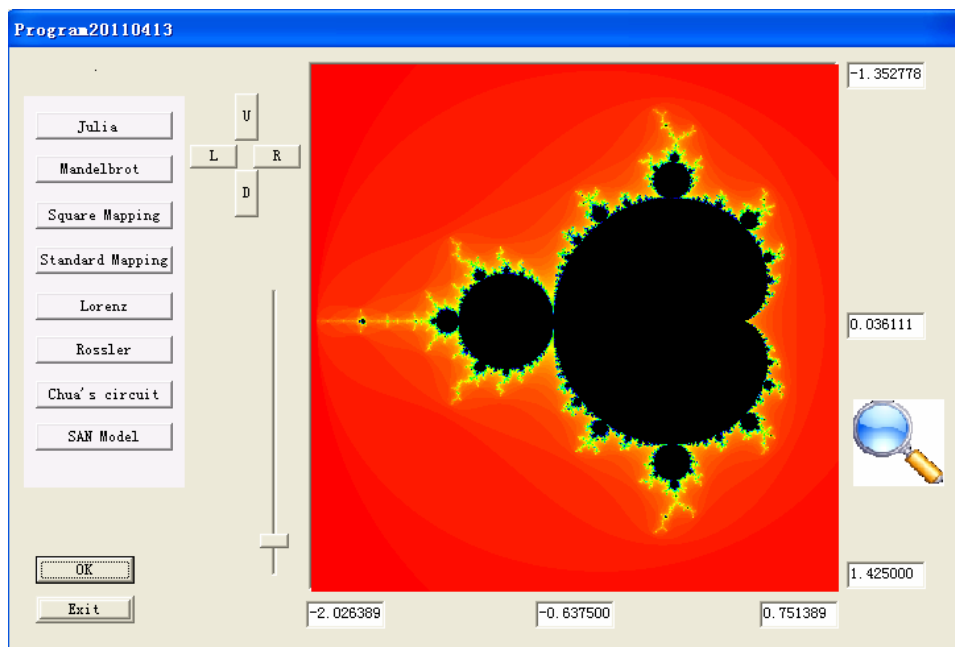


Figure 2. Plot of Mandelbrot set  
图 2. Mandelbrot 集示意图

图形中任意区域的大小，从而方便地观察分形图片中局部微小细节，直观了解分形现象的局部与整体的自相似特征。如图 3 所示的 Julia 集，可以用鼠标移动放大镜到图中红色小圆圈区域，点击若干次后，可在右下角得到放大的图形，可以看出该微小的局部放大后，仍然与整体极为相似。

第四，动态视图设置。观察非线性体系某些参量随时间的演化过程，有助于充分理解复杂体系的动力学特征和演化规律，利用 MFC 的强大的绘图功能可以满足这一目的。Lorenz 系统是描述大气系统演化规律的非线性体系，该体系能产生奇怪吸引子。如图 4 所示，我们选中面板中第五个按钮，点击确定后，可以观察到该体系所产生奇怪吸引子，若要跟踪吸引子的形成过程，则只需要切换到动态演示按钮 Animation，就可以方便地观察体系随时间的演化过程，右下图显示 Lorenz 系统的两个变量  $x, z$  随时间演变形成奇怪吸引子的动态过程，红色圆点表示时间起点，箭头表示将要跳转的方向。从图中我们可以直观形象地了解到，洛伦兹体系随着时间的推移，其状态参量在两个吸引子之间不断地随机跳变，直观又形象，观察过后就会对该体系的演变过程有一个客观的、深刻的了解。

第五，重点考察窦房结细胞体系。利用 MFC 模块强大的视图功能，借助于函数作图和分析功能，构

造多种参数变化的动态心肌 - 窦房结耦合模型，这样既可以保存计算结果进行分析判断，又可以直接运行程序画出耦合体系膜电压的演变图像，进行即时动态跟踪观察，直接验证相关的效果。

本文采用心肌 - 窦房结二维耦合实验模型，该模型利用兔子心脏的窦房结、心房组织切片所构建<sup>[8,9,11]</sup>。将整个切片处理为由窦房结、心房、结缔组织等细胞构成  $375 \times 45$  的二维耦合网络模型，其中每个格点表示一个细胞。其中单个心肌细胞满足如下动力学方程<sup>[8]</sup>：

$$C_m \frac{dV}{dt} = -(I_{Na} + I_{Ca,L} + I_{CaT} + I_K + I_{NaK} + I_{NaCa} + I_{to} + I_{st} + I_{K,ACH}) \quad (1)$$

其中  $V$  是细胞的膜电压， $C_m$  是膜电容， $t$  是时间。右侧是细胞膜上各类通道电流之和，选取满足方程(1)的细胞为基本单元构建成如下二维耦合体系：

$$C_m^a(i, j) \frac{dV^a(i, j)}{dt} = -I_{tot}^a(i, j) - D \times \nabla^2 V^a(i, j)$$

$$g_{Na}^a(i, j) = \frac{[65 - C_m^a(i, j)] g_{Na,c} + [C_m^a(i, j) - 20] g_{Na,p}}{45} \quad (2)$$

格点  $(i, j)$  表示每个细胞的空间位置，上标“a”可分别表示窦房结或心房细胞， $g^a$  表示细胞之间的连接电导。

利用 MFC 的视图功能对非线性体系进行仿真模拟

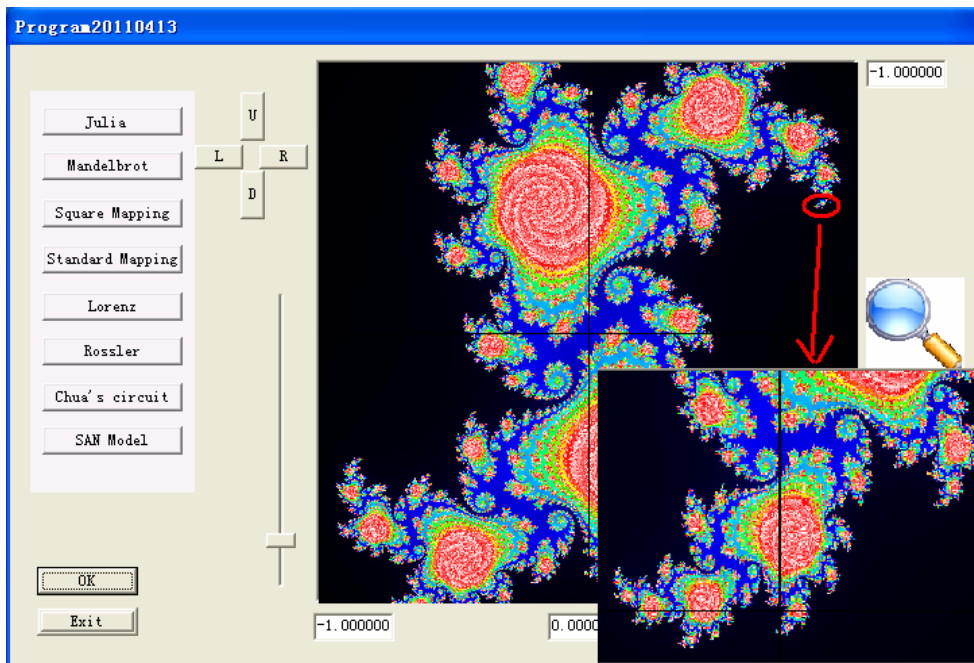


Figure 3. The Julia set and its amplification diagram for local details  
图 3. Julia 集及局部放大图

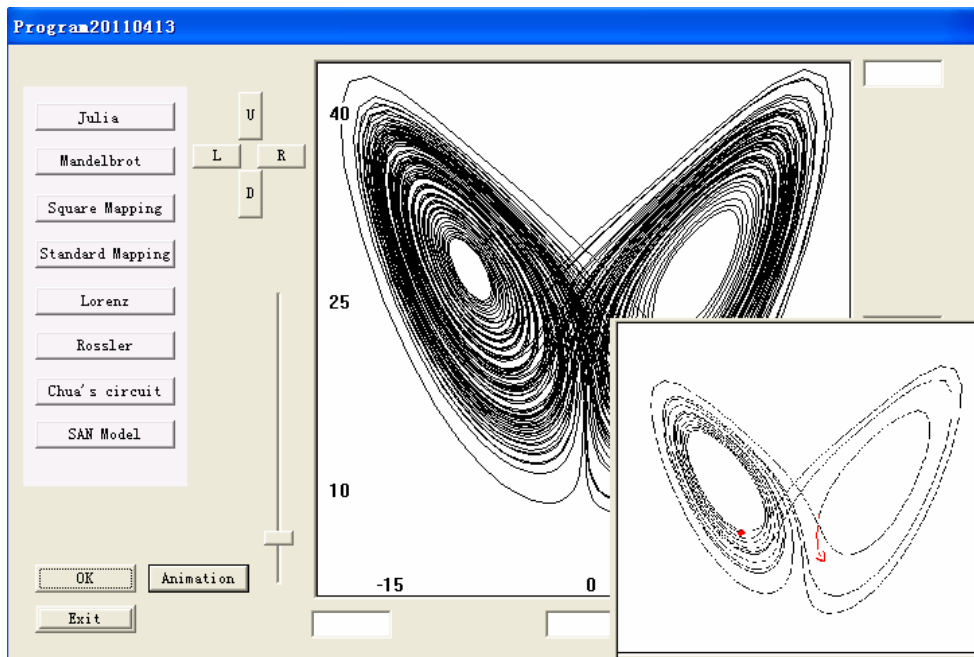


Figure 4. The strange attractors of Lorenz system and its dynamic demo  
图 4. Lorenz 体系的奇怪吸引子及动画演示

$D$  是间隙连接的扩散系数, (2)式第一公式右侧第二项表示细胞之间的扩散耦合项, 每一个细胞与四个最邻近的细胞相耦合。公式中各电流和参数的含义与取值可详细参见文献<sup>[8-10,13]</sup>。

从描述细胞耦合体系的方程来看, 影响体系动力

学行为的参量非常之多, 它们彼此之间的关系也较复杂, 因此整合众多参数的作用效果, 利用 VC 语言编程进行视图仿真, 实时观察就很有必要, 并且形象直观, 方便明了。

模拟过程中, 对方程(2)用五点差分法进行数值积



分, 选取时间步长为  $5 \times 10^{-5}$  s, 积分时间为  $3 \times 10^5$  个时间步长。记录二维耦合体系中间一条线上各细胞的通道电流、膜电压并计算相应的振荡周期, 然后进行相关分析。同时, 我们将各种参数设置为程序运行控制界面上的各种按钮, 例如, 各种膜电流的电导参数、细胞之间的耦合强度、乙酰胆碱浓度、细胞分布方式、记录数据、图像显示方式等等。另外, 我们还加上一些鼠标响应效果, 以便更加方便的观察程序运行过程中体系动力学过程随控制参量变化的不同情况。

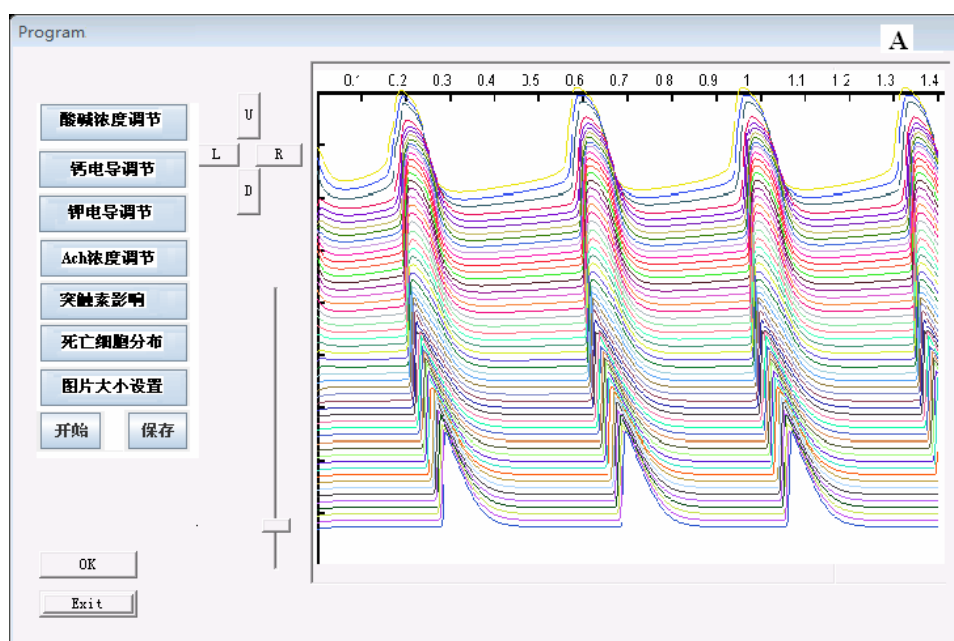
本文中, 我们对上述模型做几点改进, 在功能面板上设置相应的按钮对应于体系不同的控制参数, 在模拟中为考察由窦房结所发出的搏动信息向心房肌细胞传播过程(如图 5(A)左侧面板所示), 选取耦合体系中间部位记录线上的细胞进行模拟分析研究。

选中面板上“SAN Model”窦房结细胞模型, 点击“开始”按钮, 在跳出的对话框中, 我们可以根据需要设置不同的参数条件, 当程序运行过程中, 在右侧图像显示区域, 可以观察到不同时刻记录线上各细胞的电位随时间演变的过程。如图 5(A)所示。图中的每一条曲线代表耦合体系中的某个细胞的电位大小随时间的变化情况, 横坐标表示时间值(时间的长度可以调节)。图像的左侧从上到下分别表示中心窦房结、边缘窦房结、心房所在位置, 图中波峰高度表示膜电压大小。例如当模型中所有参数均为正常值时, 观察到各细胞动作电位随时间正常振荡。

如果要考察细胞老龄化对窦房结搏动功能的影响, 则可如下设置: 保持大部分参数正常值, 而设置一定比例的死亡细胞并呈现不同的分布, 可以观察到许多有趣的演化过程。当细胞死亡比例小于 15% 时, 细胞电位传导正常。例如, 当死亡细胞数目过多, 超过该比例时, 则可以观察到由窦房结发出的搏动信号向边缘窦房结细胞传导, 但传至心房细胞位置处时, 无法继续向下传播了, 即出现传导阻滞状态, 产生死振现象, 这一模拟的结果与临床数据相吻合, 如图 5(B) 所示。

另外, 利用 VC 编程, 还可以模拟调控其它参数时体系的动力学演变情况: 例如, 考虑了老龄化因素对钠电流的影响; 通过调整通道电流的控制参数加入了基因突变的作用; 设置 K 电导/钙电导控制参数引入酸碱浓度或突触素对窦房结起搏活动的影响; 甚至我们可以引入外界刺激, 控制 Ach 浓度的变化, 模拟神经系统对窦房结体系的调控作用效果, 发现外界低频信号刺激可以减轻体系的信号传导阻滞症状, 从而使得窦房结组织从死振状态恢复到正常振动状态(数据图未给出)。

不仅可以实时观察动态演化过程, 我们还可以随时保存模拟计算的结果, 以便做进一步的对比分析, 以上这些措施, 将有助于从细胞分子水平上揭示窦房结异常搏动产生的内在机制, 为临床上治疗心律失常提供一定的理论指导。



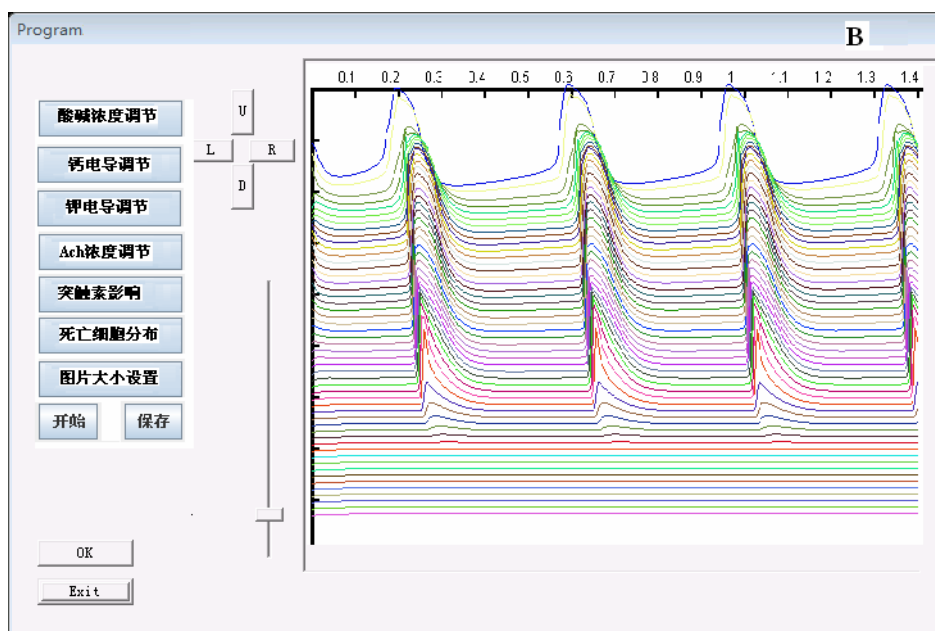


Figure 5. The evolution diagram of the action potential for the cells in the SAN-atrial tissue. The horizontal axis indicates the timeline and the vertical axis indicates the spatial location. From top to bottom, the coupling system from the center SAN to the periphery of SAN and atrium. Each curve corresponds to the evolution graph of action potential in a cell. (A) shows the normal temporal and spatial variation; (B) shows that the conduction block phenomenon appears when the action potential transfers from the center of the SAN to atrium

图 5. 窦房结 - 心房组织中各细胞的动作电位随时间演变过程示意图。横轴表示时间轴，纵轴表示空间位置，从上向下表示耦合体系中从中心窦房结 - 边缘窦房结 - 心房。每条曲线对应一个细胞的动作电位随时间演化图。(A)图表示正常时空变化图；(B)图表示动作电位从中心窦房结传向心房时出现传导阻滞现象

#### 4. 结论

综上所述,我们可以利用 VC++的基础类 MFC 模块实用的功能和界面,用于计算机模拟仿真,特别是在探讨非线性体系动力学行为方面,MFC 模块有许多优点: 1) 方便的扩展性,可以将多个非线性系统整合到同一个软件系统中,设置不同的按钮与其对应,进行对比分析; 2) 局部放大功能,可以设置放大滚动条,用鼠标拖动即可实现连续放大或缩小,便于观察复杂图形的局部细节; 3) 直观明了的动态视图效果,观察非线性体系某些参量随时间的演化过程,有助于充分理解复杂体系的动力学特征和演化规律。

由此可见,利用 VC 编程,借助于 MFC 模块强大的视图功能,我们可以通过改变面板上不同参数,实时观察到体系动力学演变的动态变化情况。特别地,有助于探讨耦合体系在某些参数在极端条件下的行为,用以指导实验研究,完成实际试验中一些难以进行的工作。从而利用仿真手段,对一些复杂的模型、假说进行验证、预测。例如,我们可以利用模拟结果对细胞电生理活动进行定量的描述,并获得动作电位、心电图谱的一些有价值的信息,可对现有的心肌

细胞动作电位数模型加以完善。为将来实时动态模拟三维的乃至整体心脏的搏动过程,仿真心电随各种控制参量的动态演变提供前期准备。

#### 5. 致谢

感谢国家自然科学基金理论物理专款项目(11047017); 安徽省自然科学基金(2009KJ099B)。

#### 参考文献 (References)

- [1] 陆同兴. 非线性物理概论[M]. 北京: 中国科学技术大学出版社, 2002.
- [2] P. Liu, S. T. Liu. Control and synchronization of Julia sets in coupled map lattice. Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation, 2011, 16(8): 3344-3355.
- [3] G. W. Yan, L. Ruan. Lattice Boltzmann solver of Rossler equation. Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation, 2000, 5(2): 64-68.
- [4] 叶昕, 张茂青, 周纯. 蔡氏电路的仿真研究[J]. 电工电气, 2009, 4: 48-51.
- [5] X. W. Liu, T. P. Chen. Boundedness and synchronization of y-coupled Lorenz systems with or without controllers. Physica D: Nonlinear Phenomena, 2008, 237(5): 630-639.
- [6] 陈春磊, 张季谦, 梁立嗣, 马文洋, 张恒贵. 利用 Java 编程对窦房结系搏动过程进行视图仿真[J]. 中国心脏起搏与心电生理杂志, 2012, 2(2): 156-159.
- [7] 郭成军, 吕树铮, 陈韵岱等. 应用磁导航技术遥控标测和消

- 融治疗快速性心律失常[J]. 中国心脏起搏与心电生理杂志, 2007, 21(4): 319-323.
- [8] H. G. Zhang, Y. Zhao, M. Lei, H. Dobrzynski, J. H. Liu, A. V. Holden and M. R. Boyett. Computational evaluation of the roles of  $\text{Na}^+$  current,  $I_{\text{Na}}$ , and cell death in cardiac pacemaking and driving. *American Journal of Physiology—Heart and Circulatory Physiology*, 2007, 292(1): H165-H174.
- [9] H. G. Zhang, J. H. Liu and A. V. Holden. Computing the age-related dysfunction of cardiac pacemaker. *Computing in Cardiology*, 2006, 33: 665-668.
- [10] T. D. Butters, O. V. Aslanidi, S. Inada, M. R. Boyett, J. C. Hancock, M. Lei and H. G. Zhang. Mechanistic links between  $\text{Na}^+$  channel (SCN5A) mutations and impaired cardiac pacemaking in sick sinus syndrome. *Circulation Research*, 2010, 107(1): 126-137.
- [11] M. E. Mangoni, J. Nargeot. Genesis and regulation of the heart automaticity. *Physiological Reviews*, 2008, 88(3): 919-982.
- [12] 臧伟进, 陈莉娜, 于晓江. 迷走神经对心室功能的调控机制研究进展[J]. *生物物理学报*, 2005, 57(6): 659-672.
- [13] H. G. Zhang, A. V. Holden, D. Noble and M. R. Boyett. Analysis of the chronotropic effect of acetylcholine on sinoatrial node cells. *Journal of Cardiovascular Electrophysiology*, 2002, 13(5): 465-474.
- [14] J. Q. Zhang, A. V. Holden, O. Monfredi, M. R. Boyett and H. G. Zhang. Stochastic vagal modulation of cardiac pacemaking may lead to erroneous identification of cardiac “chaos”. *Chaos*, 2009, 19(2): Article ID: 028509.
- [15] S. S. Demir, J. W. Clark and W. R. Giles. Parasympathetic modulation of sinoatrial node pacemaker activity in rabbit heart: A unifying model. *American Journal of Physiology—Heart and Circulatory Physiology*, 1999, 276: 2221-2244.
- [16] 宿燕岗, 王蔚, 柏瑾, 葛均波. 磁悬浮列车对心脏起搏系统的影响[J]. *中国心脏起搏与心电生理杂志*, 2010, 24(1): 16-19.
- [17] M. Miller, V. Beach, C. Mangano and R. A. Vogel. Positive emotions and the endothelium: Does joyful music improve vascular health? *Circulation*, 2008, 118: S\_1148.
- [18] 王军, 唐丽萍, 钱斐鸿等. 窦性心率震荡检测方法学重复性和稳定性研究[J]. *中国心脏起搏与心电生理杂志*, 2010, 24(4): 333.
- [19] W. Hua, et al. Incidence of sudden cardiac death in China: Analysis of regional populations. *American College of Cardiology Foundation*, 2009, 54(12): 1110-1118.
- [20] C. H. Luo, Y. Rudy. A dynamic model of the cardiac ventricular action potential. I. Simulations of ionic currents and concentration changes. *Circulation Research*, 1994, 74(6): 1071-1096.
- [21] D. Noble, A. Varghese, P. Kohl, et al. Improved guinea-pig ventricular cell model incorporating a diadic space,  $I_{\text{kr}}$  and  $I_{\text{ks}}$ , and length and tension dependent processes. *Canadian Journal of Cardiology*, 1998, 14(1): 123-134.
- [22] E. Colleen, P. Clancy and Y. Rudy. Linking a genetic defect to its cellular phenotype in a cardiac arrhythmia. *Nature*, 1999, 400(6744): 566-569.