

用低滤波方法终止心脏组织中的螺旋波和时空混沌

潘飞 黎维新 王小艳 唐国宁

Terminating the spiral wave and spatiotemporal chaos in cardiac tissue using the low-pass filtering scheme

Pan Fei Li Wei-Xin Wang Xiao-Yan Tang Guo-Ning

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 64, 218202 (2015) DOI: 10.7498/aps.64.218202

在线阅读 View online: <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.218202>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn/CN/Y2015/V64/I21>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

非对称耦合两层可激发介质中的螺旋波动力学

[Dynamics of spiral waves in an asymmetrically coupled two-layer excitable medium](#)

物理学报.2015, 64(19): 198201 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.64.198201>

气体放电系统中多臂螺旋波的数值分析

[Numerical analysis on multi-armed spiral patterns in gas discharge system](#)

物理学报.2014, 63(22): 228201 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.228201>

两层耦合可激发介质中螺旋波转变为平面波

[Transformation of spiral wave to plan wave in the two layers of coupled excitable media](#)

物理学报.2014, 63(20): 208201 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.63.208201>

钾扩散耦合引起的心脏中螺旋波的变化

[Potassium diffusive coupling-induced the variation of spiral wave in cardiac tissues](#)

物理学报.2013, 62(19): 198201 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.62.198201>

时空调制对可激发介质螺旋波波头动力学行为影响及控制研究

[The influence of spatiotemporal modulation on spiral tip dynamics in excitable medium and its application for spiral control](#)

物理学报.2012, 61(15): 158202 <http://dx.doi.org/10.7498/aps.61.158202>

用低通滤波方法终止心脏组织中的螺旋波和时空混沌*

潘飞 黎维新 王小艳 唐国宁†

(广西师范大学物理科学与技术学院, 桂林 541004)

(2015年5月26日收到; 2015年6月23日收到修改稿)

通过让心肌细胞钠离子通道的触发门变量延迟打开, 使介质具有激发延迟能力, 介质延迟激发时间随控制电压和刺激频率增加而增加, 当控制电压超过一个阈值时, 延迟激发介质具有低通滤波作用: 低频波可以连续通过, 而高频波不能连续通过. 本文用 Luo-Rudy 相 I 模型研究了介质延迟激发对螺旋波和时空混沌的影响, 数值模拟结果表明: 当控制电压超过阈值时, 介质的延迟激发可有效消除螺旋波和时空混沌; 从小逐渐增大控制电压, 在钙最大电导率较小情况下, 延迟激发会导致介质激发性降低, 使螺旋波漫游幅度增大, 直至传导障碍导致螺旋波消失; 当钙最大电导率较大时, 延迟激发会导致螺旋波失稳变弱, 这样当控制电压增加到一定值时, 时空混沌可以演化成漫游螺旋波, 当控制参数被适当选取时, 观察到漫游幅度大的螺旋波漫游出系统边界消失现象, 继续增大控制电压将导致时空混沌直接消失.

关键词: 可激发介质, 螺旋波, 控制电压, 延迟激发

PACS: 82.40.Ck, 05.45.-a, 89.75.Kd

DOI: 10.7498/aps.64.218202

1 引言

心脏是人体循环系统中的动力, 心脏的功能是通过收缩和舒张来推动全身的血液循环. 当心脏出现心动过速、无节律跳动和室颤时, 心脏的功能将受到极大影响, 甚至危及生命. 研究表明: 心律不齐可能与心肌组织出现螺旋波有关^[1], 螺旋波失稳后破碎形成时空混沌是室颤的主要原因^[2], 除在心脏中观察到螺旋波外, 在一些物理^[3]、生物^[4]、化学等^[5]系统中也观察到螺旋波, 所以螺旋波动力学及其控制研究受到科技工作者极大兴趣^[6-12], 已经发现许多因素可对反应扩散系统中螺旋波动力学造成影响, 例如介质的激发性降低^[13], 介质不均匀^[14,15], 螺旋波耦合^[16], 钾扩散耦合^[17], 早期后去极化^[18]等, 并且提出了许多终止螺旋波和时空混沌的方法^[8,9,19,20]. 但是如何利用螺旋波和时空

混沌的特点来消除它们, 还有待深入研究, 以便在消除心脏中螺旋波和时空混沌中有效降低副作用.

众所周知, 神经细胞在一定条件下可以出现延迟激发, 最长延迟时间可达 10 s^[21], 心肌细胞同样也可以出现延迟激发^[22], 这种延迟激发会导致介质激发性降低. 本文采用 Luo-Rudy(L-R) 相 I 模型^[23] 研究了延迟激发对系统动力学的影响, 我们通过让钠通道的触发门变量 m 延迟打开来模拟心肌细胞的延迟激发, 发现这时介质具有低通滤波作用, 即介质只能连续通过低频波, 高频波不能连续通过. 螺旋波和时空混沌的平均频率都远高于正常心脏的工作频率, 因此当控制电压超过某个阈值时, 心脏中的螺旋波和时空混沌将自动消失, 由于这种消除螺旋波的方式利用到螺旋波和时空混沌的自身特点, 因此控制效果好, 副作用低. 下面先介绍模型, 然后介绍我们的模拟结果, 最后是结论.

* 国家自然科学基金 (批准号: 11165004, 11365003) 资助的课题.

† 通信作者. E-mail: tanguoning@sohu.com

2 模型

L-R相I心脏模型是Luo和Rudy于1991年提出的心室细胞膜间电压变化的数学模型,由于该模型简单,且能够较好的反映心肌细胞的动力学行为,被广泛应用于数值模拟研究,该模型动力学方程如下^[23]:

$$\frac{dV}{dt} = -\frac{1.0}{C_m}(I_{Na} + I_{si} + I_K + I_{K1} + I_{Kp} + I_b) + D\left[\frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2}\right]V, \quad (1)$$

式中 V 为膜间电压(单位: mV), t 为时间(单位: ms), $D = 0.001 \text{ cm}^2/\text{ms}$ 是扩散系数, $C_m = 1.0 \text{ }\mu\text{F}/\text{cm}^2$ 为细胞的膜电容, I 代表跨膜离子电流(单位 $\mu\text{A}/\text{cm}^2$), 其中快速内行钠离子电流 $I_{Na} = \bar{G}_{Na} \cdot m^3 \cdot h \cdot j \cdot (V - E_{Na})$, 慢速内行钙离子电流 $I_{si} = \bar{G}_{si} \cdot d \cdot f \cdot (V - E_{si})$, 背景电流为 I_b , 三种钾离子电流 I_K , I_{K1} 和 I_{Kp} 为外行电流, 其中 I_K 为含时钾离子电流, I_{K1} 为不含时钾离子电流, I_{Kp} 为平稳期钾离子电流. 在这些电流表达式中, \bar{G} 和 E 分别代表相应离子电流的最大电导率和能斯特平衡电位, m , h , j , d 和 f 是门变量, 除下面特别指出外, 各离子电流、门变量、离子浓度的表达式和使用参数均与文献^[23]一致. 当取钾离子的最大电导率 $\bar{G}_K = 0.705 \text{ mS}/\text{cm}^2$ 时, 如果钙最大电导率满足 $0 \leq \bar{G}_{si} \leq 0.043 \text{ mS}/\text{cm}^2$ 时, 系统可存在螺旋波; 如果 $\bar{G}_{si} > 0.043 \text{ mS}/\text{cm}^2$, 则系统中的螺旋波将由于失稳破碎而形成螺旋波湍流态(即时空混沌).

为在L-R相I模型中引入延迟激发, 我们按下列方式修改该模型中门变量 m 的表达式: 取控制电压为 V_c , 当 $V \leq V_c$ 时 $m = 0$, 当 $V > V_c$ 时, m 按正常规律变化(与文献^[23]给出的变化规律一致):

$$\frac{dm}{dt} = \alpha_m(1.0 - m) - \beta_m m, \quad (2a)$$

$$\alpha_m = \frac{0.32(V + 47.13)}{1.0 - e^{-0.1(V + 47.13)}}, \quad (2b)$$

$$\beta_m = 0.08 e^{-\frac{V}{11.0}}. \quad (2c)$$

在运用数值方法解方程(1)时, 固定取 $\bar{G}_K = 0.705 \text{ mS}/\text{cm}^2$, 选 \bar{G}_{si} 和控制电压 V_c 为可调参数, 取 $8.4 \times 8.4 \text{ cm}^2$ 大小的二维空间并离散化成 300×300 个格点, 即取空间步长 $\Delta x = \Delta y = \Delta = 0.028 \text{ cm}$, 取时间步长 $\Delta t = 0.02 \text{ ms}$, 使用无流边

界条件, 时间求导使用一阶欧拉向前差分法, 空间二阶导数采用中心差分方法.

为了了解延迟激发对螺旋波和时空混沌的影响, 我们定义平均膜间电压为

$$\bar{V} = \frac{1}{300^2} \sum_{i,j=1}^{300} |V + 84|, \quad (3)$$

当螺旋波和时空混沌消失时, \bar{V} 几乎为0, \bar{V} 规则变化对应系统处于螺旋波态, \bar{V} 不规则变化对应系统处于时空混沌态.

3 数值模拟结果

我们首先取钙的电导率 $\bar{G}_{si} = 0.02 \text{ mS}/\text{cm}^2$, 在一维的情况下研究控制电压 V_c 与介质(细胞)延迟激发的关系. 取一维介质包含300个格点, 为了避免外部刺激对细胞延迟激发的影响, 让左边1—119个格点所对应的这段介质不考虑延迟激发, 其余介质考虑延迟激发. 在左边界第一到第十个格点的区域加方波型外部刺激, 刺激周期为 T , 产生周期为 T 、向右传播的波列. 激发波从无延迟激发的介质进入有延迟激发的介质, 这样对于考虑延迟激发的这部分介质来说, 是由于格点 $i = 119$ 的振荡导致了波在其中传播, 它相当于波的振源, $i = 120, 121, 122, 123$ 这些格点到 $i = 119$ 的距离相当于它们到波源的距离, 对应的距离分别为 $\rho = \Delta, 2\Delta, 3\Delta, 4\Delta$. 显然在相同刺激周期和控制电压下, 到波源距离 ρ 不同的格点, 其延迟激发时间应有所不同. 在下面研究中, 我们在波向右传播过程中记录 $i = 120, 121, 122, 123$ 这四个格点的平均激发时间. 激发时间定义为: 从膜电压最小值 V_{\min} (静息态下)增加到 V_c 所需要的时间为激发时间, 平均激发时间是对一段时间内得到的激发时间求平均. 将 $i = 120, 121, 122, 123$ 这四个格点的平均激发时间分别减去一维介质不考虑延迟激发任意一个格点(例如 $i = 50$ 这个格点)的平均激发时间, 得到相应格点的延迟激发时间 τ .

图1给出了在不同刺激周期下 $i = 120, 121, 122, 123$ 这几个格点延迟激发时间 τ 随控制电压 V_c 的关系曲线, 从图1可以看出, 当 $V_c \leq -60 \text{ mV}$ 时, 各格点无延迟激发($\tau = 0$), 且与刺激周期无关, 对于 $V_c > -60 \text{ mV}$, τ 随 V_c 从0开始急剧增加. 图中没有给出 $V_c > -35 \text{ mV}$ 时的值, 是因为在这个控制

电压下波无法在考虑延迟激发的介质中传播. 从图1还可以看出:当 $V_c > -50$ mV时,在相同刺激周期下,延迟激发时间 τ 随 ρ 增加而延长;随着刺激频率的增加,各个格点的延迟激发时间 τ 也随之增加.数值结果表明:当刺激周期 T 分别等于200 ms,120 ms,90 ms和80 ms时,如果控制电压 V_c 分别

小于等于-35 mV, -36 mV, -37 mV和-38 mV,外部刺激产生的波能连续地从左边界传播到右边界,这时波周期与外部刺激周期一致,否则波不能连续通过考虑延迟激发的介质,说明延迟激发能阻止高频波顺利通过介质,而低频波不受影响,使介质起到低通滤波器作用.

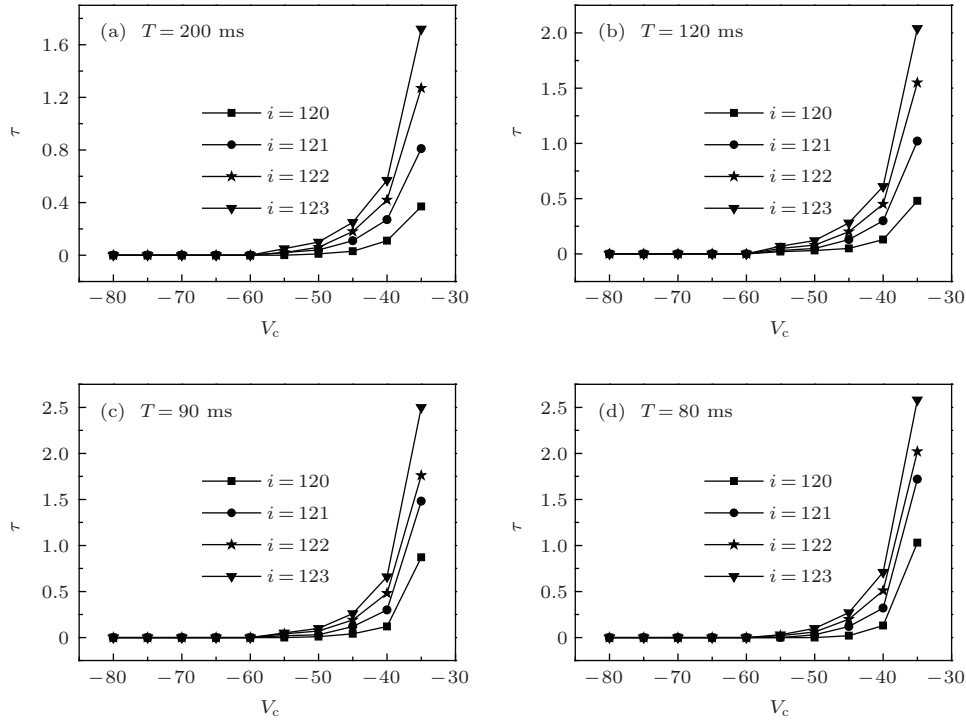


图1 在不同刺激周期 T 下 $i = 120, 121, 122, 123$ 这四格点延迟激发时间 τ 随控制电压 V_c 的关系曲线

Fig. 1. The time of excitation delay of the grid point i ($i = 120, 121, 122, 123$) versus the control voltage for different values of the stimulation period.

现在我们来研究二维介质延迟激发对螺旋波动力学的影响.我们在 $\bar{G}_{si} = 0.02$ mS/cm²和不考虑延迟激发情况下产生一个螺旋波初态,该螺旋波的周期(介质振荡的平均周期)约为45 ms,在 $t = 0$ 时刻开始考虑延迟激发(即加控制),将控制电压 V_c 从-84 mV逐渐增加到-30 mV,增幅为2 mV,观察螺旋波的变化.

数值模拟结果表明:当 $V_c \leq -42$ mV时,延迟激发不会导致螺旋波消失,当 $V_c \geq -40$ mV时,延迟激发将导致螺旋波直接消失.为了深入了解介质延迟激发对螺旋波影响,图2给出了在不同控制电压下平均膜电压 \bar{V} 随时间的变化曲线.从图2可以看出,随着控制电压的增加, \bar{V} 开始规则小幅变化,然后逐渐转变成无规则大幅变化,最后变成规则大幅变化.图2(a)对应螺旋波规则小幅漫游,图2(b)—(e)对应螺旋波大幅度漫游,如图3所示,

本文求波头方法与文献[24]一致.图2(f)显示 \bar{V} 直接衰减到0,表明螺旋波被抑制,它是由于传导障碍导致螺旋波直接消失.对比图2(f)与图1的结果,我们可以看出,在 $V_c = -35$ mV的情况下,周期为 $T = 200$ ms的低频平面波可以顺利在介质中传播,但是在控制电压达到 $V_c = -40$ mV后,高频螺旋波不能在介质中传播,介质的低通滤波作用消除了螺旋波.图2的结果说明:在小的钙电导下,随着控制电压的增加,介质激发性逐渐降低,导致螺旋波漫游幅度逐渐增大,直至螺旋波消失.

下面我们来研究二维介质延迟激发对时空混沌的影响,我们取 $\bar{G}_{si} = 0.05$ mS/cm²,将控制电压 V_c 从-84 mV逐渐增加到-30 mV,增幅为2 mV,观察时空混沌的变化.在介质中先产生时空混沌态,然后开始考虑延迟激发.数值模拟结果表明:当 V_c 在[-84, -50] mV范围取值时,延迟激发不改

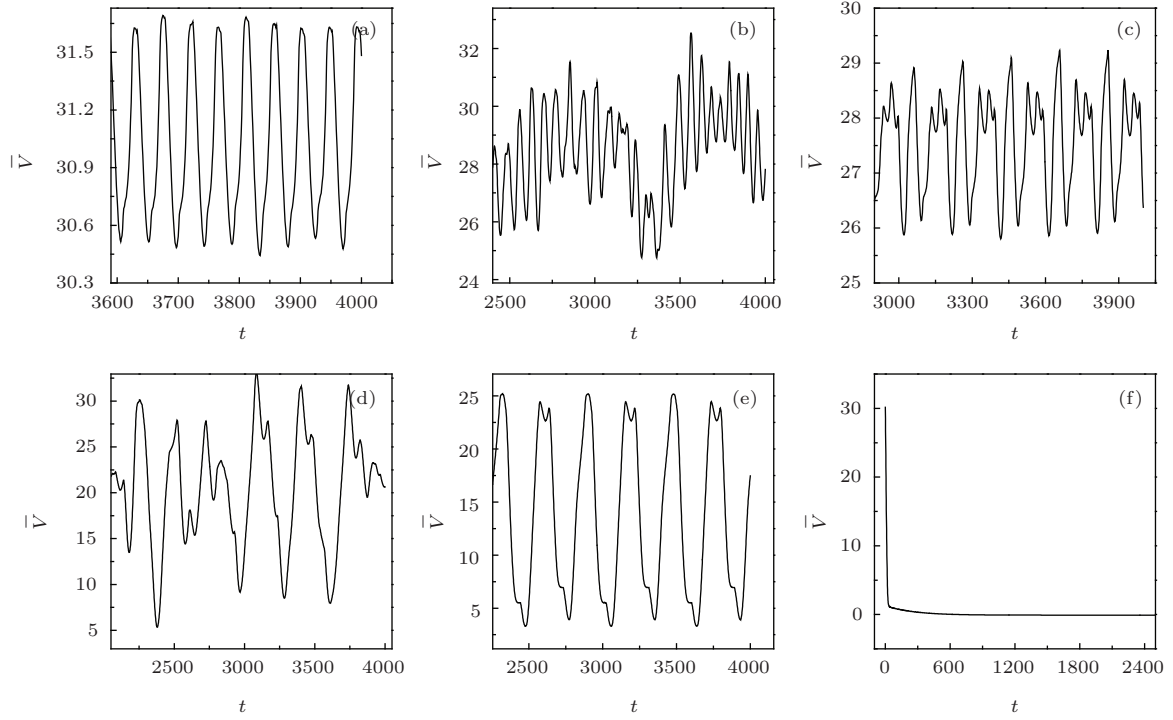


图2 在不同控制电压下平均膜电压 \bar{V} 随时间 t 的变化曲线 (a) $V_c = -60$ mV; (b) $V_c = -48$ mV; (c) $V_c = -46$ mV; (d) $V_c = -44$ mV; (e) $V_c = -42$ mV; (f) $V_c = -40$ mV

Fig. 2. Evolution of the average membrane potential for different values of control voltage: (a) $V_c = -60$ mV; (b) $V_c = -48$ mV; (c) $V_c = -46$ mV; (d) $V_c = -44$ mV; (e) $V_c = -42$ mV; (f) $V_c = -40$ mV.

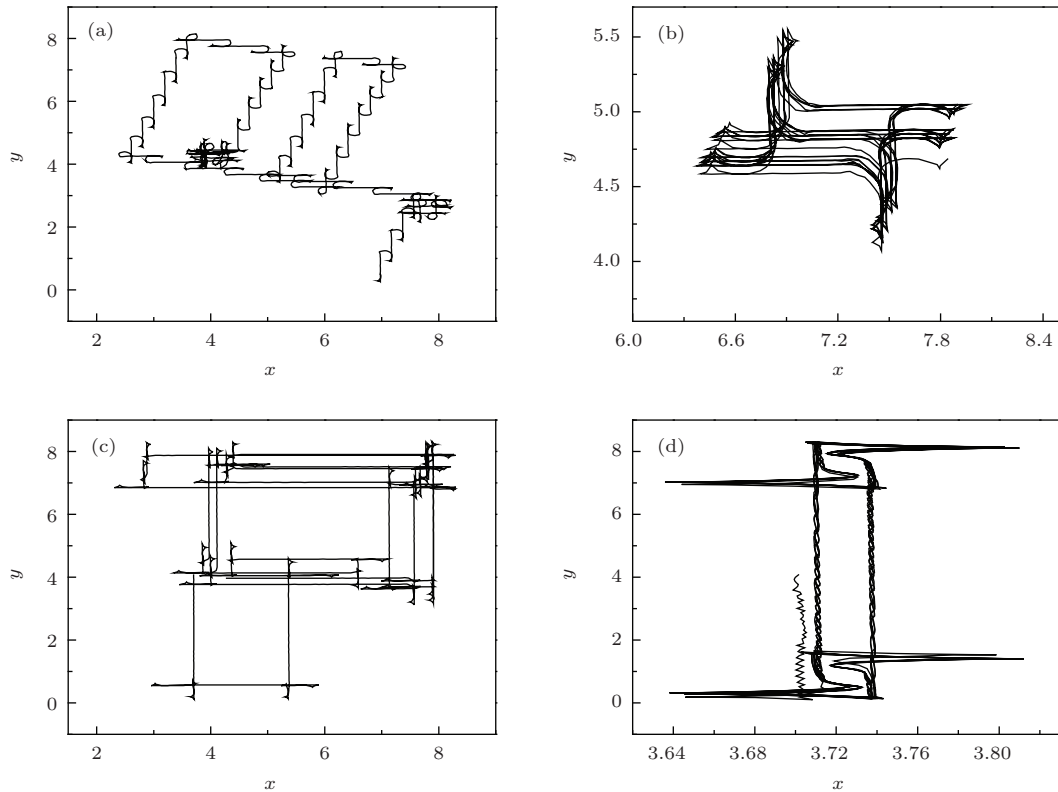


图3 不同控制电压下螺旋波波头轨迹图, 螺旋波的波头由相距 2 ms 的两个时刻的动作电位等高线 (等高线膜电压 $V = -35$ mV) 的交点来确定 (a) $V_c = -48$ mV; (b) $V_c = -46$ mV; (c) $V_c = -44$ mV; (d) $V_c = -42$ mV

Fig. 3. Tip trajectory of spiral waves for different control voltages. Tip trajectories of spiral waves were traced using the intersection point of successive contour lines of voltage corresponding to $V = -35$ mV measured every 2 ms: (a) $V_c = -48$ mV; (b) $V_c = -46$ mV; (c) $V_c = -44$ mV; (d) $V_c = -42$ mV.

变系统的时空混沌态; 当 V_c 在 $[-48, -46]$ mV 范围取值时, 延迟激发使系统自发从时空混沌态演化到螺旋波态, 最后螺旋波漫游出系统后消失; 当 V_c 在 $[-44, -40]$ mV 范围取值时, 延迟激发导致系统出现漫游螺旋波, 时空混沌演化成螺旋波的原因是: 介质的低通滤波作用消除了时空混沌中高频振荡成分, 保留了低频振荡成分, 这部分低频振荡以低频螺旋波形式出现; 对于 $V_c \geq -38$ mV, 时空混沌态由于传导障碍直接消失. 这表明当控制电压达到 $V_c = -38$ mV 后, 时空混沌不能顺利在介质中传播, 介质的低通滤波作用直接消除了时空混沌. 在 $\bar{G}_{si} = 0.05$ mS/cm² 下需要的最小控制电压高于螺旋波的 $V_c = -40$ mV 的原因是: 介质对低频外部刺激虽然会有 1:1 响应, 每个外部刺激都会在介质中产生一个波, 但是可能会出现交替现象. 例如在一维情况下, 周期 $T = 200$ ms 的连续外部刺激会导致格点的动作电位持续时间和振荡周期按长短交替变化, 但是格点平均振荡周期等于外部刺激周期. 对于高频外部刺激, 介质出现低频响应, 例如在 $T = 120$ ms 的情况下, 格点振荡周期与外

部刺激周期之比为 2:1, 也会出现交替现象. 正是介质会出现交替现象, 导致在时空混沌下, 介质各点振荡周期有大有小, 所以需要的最小控制电压高于螺旋波的 $V_c = -40$ mV. 为了进一步了解介质延迟激发对时空混沌影响, 图 4 给出了在不同控制电压下平均膜电压 \bar{V} 随时间的变化曲线, 从图 4(a) 可以看出, \bar{V} 不规则变化, 说明系统仍处于时空混沌态. 图 4(b) 显示 \bar{V} 经过几次振荡后衰减到 0, 这是因为在介质延迟激发作用下, 时空混沌先演化成螺旋波, 然后螺旋波漫游出系统后消失, 螺旋波消失过程如图 5 所示. 图 4(c) 显示 \bar{V} 作规则振荡, 这是因为时空混沌演化成漫游螺旋波的缘故, 螺旋波形成过程如图 6 所示. 图 4(d) 显示 \bar{V} 直接衰减到 0, 这是由于时空混沌因传导障碍直接消失. 上述结果表明: 在大的钙电导下, 随着控制电压的增加, 螺旋波不稳定性逐渐减弱, 导致时空混沌演化成漫游螺旋波, 说明在一定条件下延迟激发具有防止螺旋波破碎的作用. 当控制电压的增加超过一个临界值 (如 $V_c = -38$ mV) 后, 介质的低通滤波作用可消除时空混沌.

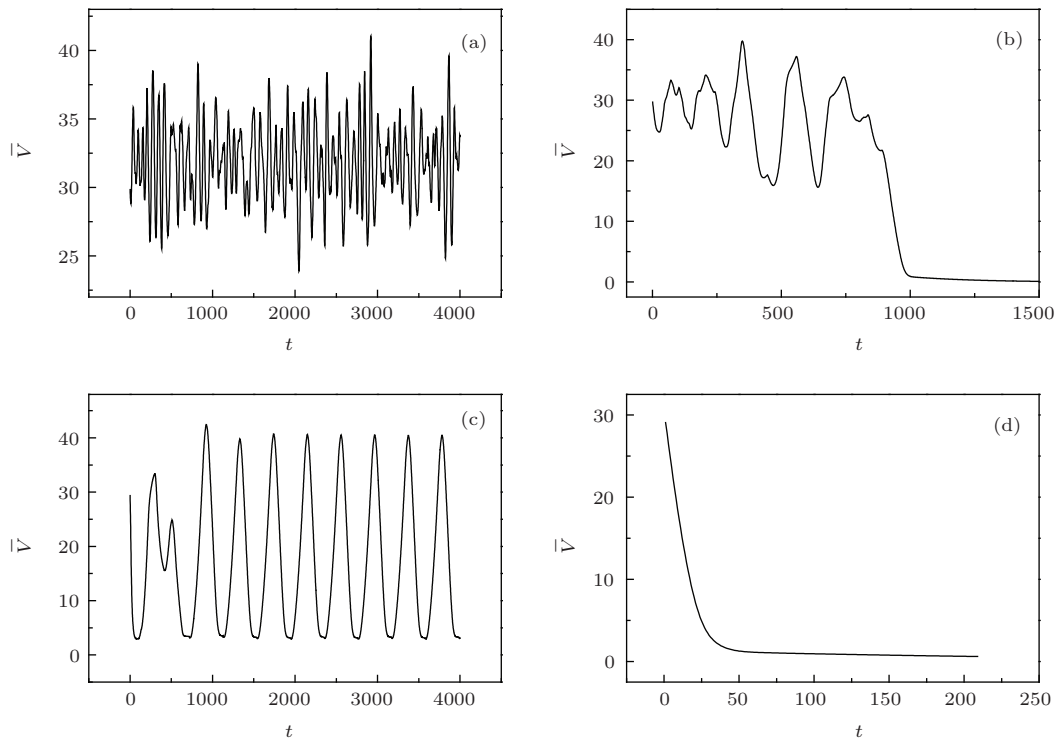


图 4 在不同控制电压下平均膜电压 \bar{V} 随时间 t 的变化曲线 (a) $V_c = -60$ mV; (b) $V_c = -46$ mV; (c) $V_c = -40$ mV; (d) $V_c = -38$ mV

Fig. 4. Evolution of the average membrane potential for different values of control voltage: (a) $V_c = -60$ mV; (b) $V_c = -46$ mV; (c) $V_c = -40$ mV; (d) $V_c = -38$ mV.

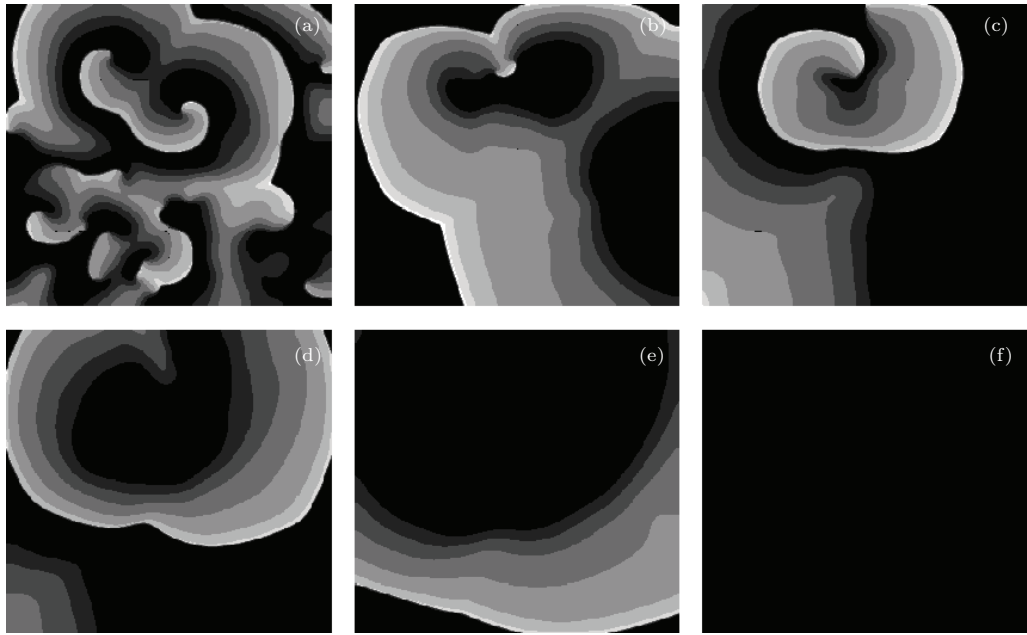


图5 在 $V_c = -48$ mV 情况下不同时刻的膜电压斑图 (a) $t = 2$ ms; (b) $t = 843$ ms; (c) $t = 1613$ ms; (d) $t = 1946$ ms; (e) $t = 2227$ ms; (f) $t = 2506$ ms

Fig. 5. Pattern of membrane potential V at different time moments for $V_c = -48$ mV: (a) $t = 2$ ms; (b) $t = 843$ ms; (c) $t = 1613$ ms; (d) $t = 1946$ ms; (e) $t = 2227$ ms; (f) $t = 2506$ ms.

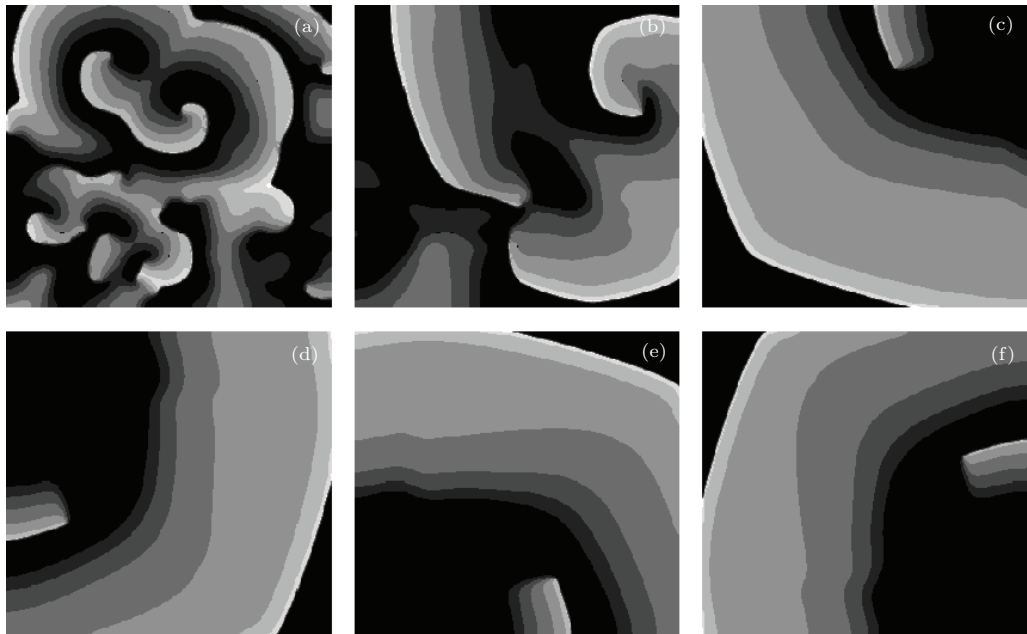


图6 在 $V_c = -40$ mV 下不同时刻的膜电压斑图 (a) $t = 2$ ms; (b) $t = 742$ ms; (c) $t = 800$ ms; (d) $t = 840$ ms; (e) $t = 893$ ms; (f) $t = 1600$ ms

Fig. 6. Pattern of membrane potential V at different time moments for $V_c = -40$ mV: (a) $t = 2$ ms; (b) $t = 742$ ms; (c) $t = 800$ ms; (d) $t = 840$ ms; (e) $t = 893$ ms; (f) $t = 1600$ ms.

4 结论与讨论

本文采用L-R相I模型研究了介质延迟激发对螺旋波和时空混沌的影响。我们发现: 1) 让细胞钠电流的门变量 m 延迟打开, 可导致介质延迟激

发; 介质延迟激发时间随控制电压增加而增加, 在相同刺激周期下, 格点延迟激发时间随格点到波源距离增加而增加; 当控制电压超过一个阈值(对于螺旋波情况 $V_c = -40$ ms, 对于时空混沌情况 $V_c = -38$ ms)后, 这种延迟激发可使介质具有低通滤波作用, 因此当选择适当的控制电压参数时, 利

用介质的延迟激发可有效消除螺旋波和时空混沌. 2) 增加控制电压, 在钙电导比较小时, 延迟激发可导致介质激发性降低, 使螺旋波漫游幅度增大, 直至螺旋波消失; 在钙电导比较大时, 延迟激发可导致螺旋波失稳逐渐减弱, 从而可导致时空混沌演化成漫游螺旋波, 特别是当控制电压 V_c 在 $[-48, -46]$ mV 范围取值时, 观察到时空混沌演化成漫游螺旋波, 最后螺旋波漫游出系统消失的现象. 在真实的心脏中, 也出现螺旋波漫游出系统消失情况^[1], 我们的结果有助于人们了解心脏中的螺旋波如何消失.

利用介质的延迟激发虽然可以有效消除螺旋波和时空混沌, 然而如何在真实的心脏系统中实现介质延迟激发, 仍有待研究. 目前人们已经能做到^[25]: 通过药物使心肌细胞具有对光敏感, 这时通过改变光的强度就可以改变细胞的激发性, 而且这种改变是可逆的. 随着生物工程技术的发展, 我们相信, 在不久的将来也能找到控制细胞延迟激发的药物, 使心脏中不会出现螺旋波和时空混沌.

参考文献

- [1] Davidenko J M, Pertsov A V, Salomonsz, Baxter W, Jalife J 1992 *Nature* **355** 349
- [2] Ouyang Q 2001 *Physics* **30** 30 (in Chinese) [欧阳颀 2001 物理 **30** 30]
- [3] Plapp B B, Egoif D A, Bodenschatz E 1998 *Phys. Rev. Lett.* **81** 5334
- [4] Huang X, Xu W, Liang J, Takagaki K, Gao X, Wu J 2010 *Neuron* **68** 978
- [5] Zaikin A N, Zhabotinsky A M 1970 *Nature* **225** 535
- [6] Liu G Q, Ying H P 2014 *Chin. Phys. B* **23** 050502
- [7] Deng M Y, Chen X Q, Tang G N 2014 *Chin. Phys. B* **23** 120503
- [8] Zhang H, Hu B, Hu G 2003 *Phys. Rev. E* **68** 026134
- [9] Yamazaki M, Honjo H, Ashihara T, Harada M, Sakuma I, Nakazawa K, Trayanova N, Horie M, Kalifa J, Jalife J, Kamiya K, Kodama I 2012 *Heart Rhythm*. **9** 107
- [10] Luengviriyaj J, Sutthiopad M, Phantu M, Porjai P, Kanchanawarin J, Müller S C, Luengviriyaj C 2014 *Phys. Rev. E* **90** 052919
- [11] Quail T, Shrier A, Glass L 2014 *Phys. Rev. Lett.* **113** 158101
- [12] Sutthiopad M, Luengviriyaj J, Porjai P, Tomapatanaget B, Müller S C, Luengviriyaj C 2014 *Phys. Rev. E* **89** 052902
- [13] Dai Y, Tang G N 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 3 (in Chinese) [戴瑜, 唐国宁 2009 物理学报 **58** 3]
- [14] Yuan G Y, Zhang H, Xu A, Wang G 2013 *Phys. Rev. E* **88** 022920
- [15] Weise L D, Panfilov A V 2012 *Phys. Rev. Lett.* **108** 228104
- [16] Nie H, Gao J, Zhan M 2011 *Phys. Rev. E* **84** 056204
- [17] Qiao C Q, Wang L L, Li W H, Tang G N 2013 *Acta Phys. Sin.* **19** 198201 (in Chinese) [乔成功, 王利利, 李伟恒, 唐国宁 2013 物理学报 **19** 198201]
- [18] Wei H M, Tang G N 2011 *Acta Phys. Sin.* **60** 030501 (in Chinese) [韦海明, 唐国宁 2011 物理学报 **60** 030501]
- [19] Tandri H, Weinberg S H, Chang K C, Zhu R, Trayanova N A, Tung L, Berger R D 2011 *Sci. Transl. Med.* **3** 102ra96
- [20] Morgan S W, Biktasheva I V, Biktashev V N 2008 *Phys. Rev. E* **78** 046207
- [21] Storm J F 1988 *Nature* **336** 379
- [22] Delmar M, Glass L, Michaels D C, Jalife J 1989 *Circ. Res.* **65** 775
- [23] Luo C H, Rudy Y 1991 *Circ. Res.* **68** 1501
- [24] Xie F, Qu Z L, Garfinkel A, Weiss J N 2001 *Am. J. Physiol. Heart Circ. Physiol.* **280** H1667
- [25] Magome N, Kanaporis G, Moisan N, Tanaka K, Agladze K 2011 *Tissue Engineering: Part A* **17** 21

Terminating the spiral wave and spatiotemporal chaos in cardiac tissue using the low-pass filtering scheme*

Pan Fei Li Wei-Xin Wang Xiao-Yan Tang Guo-Ning[†]

(College of Physical Science and Technology, Guangxi Normal University, Guilin 541004, China)

(Received 26 May 2015; revised manuscript received 23 June 2015)

Abstract

To cause the sodium ion activation gate of cardiomyocyte delay to open, the ability of excitation delay should be given to the medium. The time of excitation delay of the medium increases as the control voltage and frequency of stimulation increase. When the control voltage exceeds a threshold value, the medium with excitation delay has the property of low-pass filtering: low-frequency waves can continuously pass through the medium, whereas the high-frequency wave does not pass consecutively. In this paper, the effect of excitation delay of the medium on spiral waves and spatiotemporal chaos is investigated by using Luo–Rudy phase I model. Numerical simulation results show that when the control voltage exceeds the threshold value, the excitation delay of the medium can effectively eliminate the spiral wave and spatiotemporal chaos. When the control voltage gradually increases from a small value, at a small maximal conductance of calcium channel, the excitation delay could reduce the excitability of the medium, making the amplitude of the spiral wave meander increase until conduction failure results in the disappearance of the spiral wave. Under a large maximal conductance of calcium channel, the excitation delay can reduce the unstability of the spiral wave so that spatiotemporal chaos evolve into meandering spiral waves when the control voltage is large enough. The phenomenon that the spiral wave with a large meandering motion of its tip moves out of the system is observed when the control voltage is properly chosen. Further increase of the control voltage leads to the disappearance of spatiotemporal chaos.

Keywords: excitable medium, spiral wave, control voltage, excitation delay

PACS: 82.40.Ck, 05.45.-a, 89.75.Kd

DOI: [10.7498/aps.64.218202](https://doi.org/10.7498/aps.64.218202)

* Project supported by the National Natural Science Foundation of China (Grant Nos. 11165004, 11365003).

† Corresponding author. E-mail: tanguoning@sohu.com