



# (12)发明专利申请

(10)申请公布号 CN 110558969 A

(43)申请公布日 2019.12.13

(21)申请号 201910840005.8

(22)申请日 2019.09.06

(71)申请人 电子科技大学

地址 611731 四川省成都市高新区(西区)  
西源大道2006号

(72)发明人 姚文坡 尧德中

(74)专利代理机构 成都虹盛汇泉专利代理有限公司 51268

代理人 王伟

(51)Int.Cl.

A61B 5/024(2006.01)

A61B 5/00(2006.01)

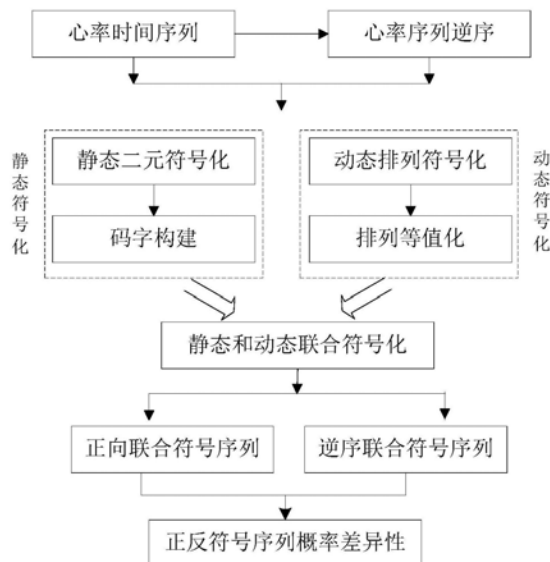
权利要求书2页 说明书6页 附图2页

## (54)发明名称

基于静态和动态联合符号化的心率时间不可逆分析方法

## (57)摘要

本发明公开了一种基于静态和动态联合符号化的心率时间不可逆分析方法,该方法包括对心率信号的时间序列进行逆序处理,分别对正序和逆序心率信号进行静态二元符号化和动态排列符号化处理,构成静态和动态结合的心率联合符号类型,并分别计算所有符号类型的概率分布,进而计算对应符号的概率差异性,并量化心率时间不可逆指标。本发明采用符号化方法简化心率时间不可逆分析中的概率估计,同时考虑了心率的全局静态和局部动态的符号动力学信息,更加全面地提取了心率序列的结构化和动力学特征,在没有破坏两种动力学信息的前提下有效地结合了静态和动态的符号动力学信息,有效地提高了心率的非线性分析效果。



1. 一种基于静态和动态联合符号化的心率时间不可逆分析方法, 其特征在于, 包括以下步骤:

S1、对心率信号的时间序列进行逆序处理, 得到对应的逆序时间序列;

S2、对步骤S1中的心率时间序列及对应的逆序时间序列进行静态二元符号化处理, 得到心率的静态符号序列和对应的逆序符号序列;

S3、对步骤S1中的心率时间序列及对应的逆序时间序列进行向量重构及动态排列符号化处理, 得到心率的等值排列类型;

S4、根据步骤S3中的向量重构对步骤S2中的心率的静态符号序列进行码字构建;

S5、将步骤S4得到的静态码字与步骤S3得到的等值排列类型相结合, 构成静态和动态结合的心率联合符号类型;

S6、统计心率时间序列及对应的逆序时间序列的所有符号类型并计算其概率分布;

S7、计算心率时间序列及对应的逆序时间序列的所有符号的概率差异性, 并量化心率时间不可逆指标。

2. 如权利要求1所述的基于静态和动态联合符号化的心率时间不可逆分析方法, 其特征在于, 所述步骤S2包括以下分步骤:

S21、计算步骤S1中的心率时间序列及对应的逆序时间序列的均值;

S22、判断心率时间序列及对应的逆序时间序列中的心率时间是否大于步骤S21得到的均值; 若是, 则将心率时间符号化为1; 若否, 则将心率时间符号化为0。

3. 如权利要求2所述的基于静态和动态联合符号化的心率时间不可逆分析方法, 其特征在于, 所述步骤S3包括以下分步骤:

S31、对步骤S1中的心率时间序列及对应的逆序时间序列构建多维的延迟向量;

S32、对每个向量元素按照上升的趋势进行排列, 利用元素的原始坐标向量构建原始向量的排列类型;

S33、判断向量中是否包含等值元素; 若是, 则将等值元素按照出现的次序进行排列, 并将对应等值元素的坐标更改为对应等值状态组中最小值, 更新等值排列类型; 若否, 则等值排列类型不变。

4. 如权利要求3所述的基于静态和动态联合符号化的心率时间不可逆分析方法, 其特征在于, 所述步骤S4中静态和动态结合的心率联合符号类型表示为:

$$c = \{s', \pi'\}$$

其中,  $c$  为心率联合符号类型,  $s'$  为码字构建后的静态符号序列,  $\pi'$  为更新后的等值排列类型。

5. 如权利要求4所述的基于静态和动态联合符号化的心率时间不可逆分析方法, 其特征在于, 所述步骤S6计算心率时间序列及对应的逆序时间序列中各个符号类型的概率表示为:

$$p(s_i) = p(c_i, \pi_i)$$

$$p(s_{-i}) = p(c_{-i}, \pi_{-i})$$

其中,  $p(s_i)$  为心率时间序列中各个符号类型的概率,  $p(s_{-i})$  为逆序时间序列中各个符号类型的概率。

6. 如权利要求5所述的基于静态和动态联合符号化的心率时间不可逆分析方法, 其特

征在于,所述步骤S7计算心率时间序列及对应的逆序时间序列的所有符号的概率差异性表示为:

$$Ys\langle p(s_i), p(s_{-i}) \rangle = p(s_i) \frac{p(s_i) - p(s_{-i})}{p(s_i) + p(s_{-i})}$$

其中,  $Ys\langle p(s_i), p(s_{-i}) \rangle$  为心率时间序列及对应的逆序时间序列的所有符号的概率差异性。

7. 如权利要求6所述的基于静态和动态联合符号化的心率时间不可逆分析方法,其特征在于,所述步骤S7量化心率时间不可逆指标表示为:

$$TIR = \sum_i Ys\langle p(s_i), p(s_{-i}) \rangle = \sum_i p(s_i) \frac{p(s_i) - p(s_{-i})}{p(s_i) + p(s_{-i})}$$

其中, TIR为心率时间不可逆指标。

## 基于静态和动态联合符号化的心率时间不可逆分析方法

### 技术领域

[0001] 本发明属于统计物理学非线性特征分析以及符号时间序列分析领域,具体涉及一种基于静态和动态联合符号化的心率时间不可逆分析方法。

### 背景技术

[0002] 心率信号是多个生理系统交互作用生成的典型复杂信号,非线性分析方法有助于提取心率中传统线性方法无法分析的动力学特征,为理解心脏系统生理、病理状态提供有价值的信息。时间不可逆是有效的心率非线性分析方法,时间可逆是指系统序列的统计特征随着时间逆序的不变性。对心率时间不可逆的分析需要计算序列联合概率的差异性,这在现实复杂系统信号的分析中并非易事,因此心率时间不可逆的量化多采用代替的概率估计方法或是序列简化方法。由于符号时间序列分析在简化概率估计、提高抗噪声性能方法的优势,并且能够提取系统的符号动力学信息,在心率时间不可逆分析中受到广泛的关注和应用。

[0003] 简化心率时间不可逆分析的符号化方法可分为静态法和动态法,其中静态法采用全局的区间分割法,而动态法则是利用序列元素之间的局部动态关系。静态和动态符号化都能够有效地提取心率信号中的符号动力学信息,但是由于两种符号化方法采用的序列转化方式不同,因此获得的心率符号序列中静态和动态的动力学信息也不相同。当前符号化时间不可逆分析是基于单独的静态或是动态的符号化方法,无法同时获得心率系统全局和局部的动力学特征,因此对动力学系统的非平衡的分析并不全面。

### 发明内容

[0004] 本发明的主要目的在于提供一种基于静态和动态联合符号化的心率时间不可逆分析方法,旨在解决既有方法中存在的以上技术问题,实现有效提高心率信号非线性特征提取分析的效果。

[0005] 为实现上述目的,本发明提供一种基于静态和动态联合符号化的心率时间不可逆分析方法,包括以下步骤:

[0006] S1、对心率信号的时间序列进行逆序处理,得到对应的逆序时间序列;

[0007] S2、对步骤S1中的心率时间序列及对应的逆序时间序列进行静态二元符号化处理,得到心率的静态符号序列和对应的逆序符号序列;

[0008] S3、对步骤S1中的心率时间序列及对应的逆序时间序列进行向量重构及动态排列符号化处理,得到心率的等值排列类型;

[0009] S4、根据步骤S3中的向量重构对步骤S2中的心率的静态符号序列进行码字构建;

[0010] S5、将步骤S4得到的静态码字与步骤S3得到的等值排列类型相结合,构成静态和动态结合的心率联合符号类型;

[0011] S6、统计心率时间序列及对应的逆序时间序列的所有符号类型并计算其概率分布;

[0012] S7、计算心率时间序列及对应的逆序时间序列的所有符号的概率差异性,并量化心率时间不可逆指标。

[0013] 进一步地,所述步骤S2包括以下分步骤:

[0014] S21、计算步骤S1中的心率时间序列及对应的逆序时间序列的均值;

[0015] S22、判断心率时间序列及对应的逆序时间序列中的心率时间是否大于步骤S21得到的均值;若是,则将心率时间符号化为1;若否,则将心率时间符号化为0。

[0016] 进一步地,所述步骤S3包括以下分步骤:

[0017] S31、对步骤S1中的心率时间序列及对应的逆序时间序列构建多维的延迟向量;

[0018] S32、对每个向量元素按照上升的趋势进行排列,利用元素的原始坐标向量构建原始向量的排列类型;

[0019] S33、判断向量中是否包含等值元素;若是,则将等值元素按照出现的次序进行排列,并将对应等值元素的坐标更改为对应等值状态组中最小值,更新等值排列类型;若否,则等值排列类型不变。

[0020] 进一步地,所述步骤S4中静态和动态结合的心率联合符号类型表示为:

$$[0021] \quad c = \{s', \pi'\}$$

[0022] 其中,c为心率联合符号类型,s'为码字构建后的静态符号序列, $\pi'$ 为更新后的等值排列类型。

[0023] 进一步地,所述步骤S6计算心率时间序列及对应的逆序时间序列中各个符号类型的概率表示为:

$$[0024] \quad p(s_i) = p(c_i, \pi_i)$$

$$[0025] \quad p(s_{-i}) = p(c_{-i}, \pi_{-i})$$

[0026] 其中, $p(s_i)$ 为心率时间序列中各个符号类型的概率, $p(s_{-i})$ 为逆序时间序列中各个符号类型的概率。

[0027] 进一步地,所述步骤S7计算心率时间序列及对应的逆序时间序列的所有符号的概率差异性表示为:

$$[0028] \quad Ys\langle p(s_i), p(s_{-i}) \rangle = p(s_i) \frac{p(s_i) - p(s_{-i})}{p(s_i) + p(s_{-i})}$$

[0029] 其中, $Ys\langle p(s_i), p(s_{-i}) \rangle$ 为心率时间序列及对应的逆序时间序列的所有符号的概率差异性。

[0030] 进一步地,所述步骤S7量化心率时间不可逆指标表示为:

$$[0031] \quad TIR = \sum_i Ys\langle p(s_i), p(s_{-i}) \rangle = \sum_i p(s_i) \frac{p(s_i) - p(s_{-i})}{p(s_i) + p(s_{-i})}$$

[0032] 其中,TIR为心率时间不可逆指标。

[0033] 本发明的有益效果是:本发明采用符号化方法简化心率时间不可逆分析中的概率估计,同时考虑了心率的全局静态和局部动态的符号动力学信息,更加全面地提取了心率序列的结构化和动力学特征;在心率静态和动态符号化的结合过程中,将两种符号序列的码字相连接,在没有破坏两种动力学信息的前提下有效地结合了静态和动态的符号动力学信息;同时,在动态的排列符号化过程中,考虑了心率信号中存在的等值状态以及等值状态

对时间不可逆分析的影响,进而采用了等值排列方法;从而有效地提高了心率的非线性分析效果。

### 附图说明

[0034] 图1是本发明的基于静态和动态联合符号化的心率时间不可逆分析方法流程图;

[0035] 图2是本发明中向量重构示意图;

[0036] 图3是静态、动态与静态和动态联合符号化心率时间不可逆分析的对比图。

### 具体实施方式

[0037] 为了使本发明的目的、技术方案及优点更加清楚明白,以下结合附图及实施例,对本发明进行进一步详细说明。应当理解,此处所描述的具体实施例仅用以解释本发明,并不用于限定本发明。

[0038] 本发明实施例的主要解决方案为:

[0039] 如图1所示,一种基于静态和动态联合符号化的心率时间不可逆分析方法,包括以下步骤:

[0040] S1、对心率信号的时间序列进行逆序处理,得到对应的逆序时间序列;

[0041] S2、对步骤S1中的心率时间序列及对应的逆序时间序列进行静态二元符号化处理,得到心率的静态符号序列和对应的逆序符号序列;

[0042] S3、对步骤S1中的心率时间序列及对应的逆序时间序列进行向量重构及动态排列符号化处理,得到心率的等值排列类型;

[0043] S4、根据步骤S3中的向量重构对步骤S2中的心率的静态符号序列进行码字构建;

[0044] S5、将步骤S4得到的静态码字与步骤S3得到的等值排列类型相结合,构成静态和动态结合的心率联合符号类型;

[0045] S6、统计心率时间序列及对应的逆序时间序列的所有符号类型并计算其概率分布;

[0046] S7、计算心率时间序列及对应的逆序时间序列的所有符号的概率差异性,并量化心率时间不可逆指标。

[0047] 在本发明的一个可选实施例中,上述步骤S1设定长度为L的心率时间序列 $y(t) = \{x(1), x(2), \dots, x(L)\}$ ,对心率信号的时间序列进行逆序处理,得到对应的逆序时间序列,表示为 $y(-t) = \{x(L), \dots, x(2), x(1)\}$ 。

[0048] 在本发明的一个可选实施例中,上述步骤S2采用二元符号化方法对心率时间进行静态符号化处理,即对步骤S1中的心率时间序列 $y(t)$ 及对应的逆序时间序列 $y(-t)$ 进行静态二元符号化处理,得到心率的静态符号序列 $S(i)$ 和对应的逆序符号序列 $S(-i)$ 。

[0049] 上述步骤S2具体包括以下分步骤:

[0050] S21、计算步骤S1中的心率时间序列 $y(t)$ 及对应的逆序时间序列 $y(-t)$ 的均值;二者的均值相同,表示为 $\mu$ ;

[0051] S22、判断心率时间序列及对应的逆序时间序列中的心率时间 $x(t)$ 是否大于步骤S21得到的均值 $\mu$ ;若是,则将心率时间符号化为1;若否,则将心率时间符号化为0;

[0052] 上述判断过程可以表示为:

$$[0053] \quad S(i) = \begin{cases} 1, & x(t) > \mu \\ 0, & x(t) \leq \mu \end{cases}$$

[0054] 在本发明的一个可选实施例中,上述步骤S3采用等值排列法对心率时间进行动态符号化处理,即对步骤S1中的心率时间序列 $y(t)$ 及对应的逆序时间序列 $y(-t)$ 进行动态排列符号化处理,通过向量重构得到心率的等值排列类型 $\pi'$ 。

[0055] 上述步骤S3具体包括以下分步骤:

[0056] S31、对步骤S1中的心率时间序列及对应的逆序时间序列构建多维的延迟向量;

[0057] 本实施例中,对步骤S1中的心率时间序列 $y(t)$ 及对应的逆序时间序列 $y(-t)$ 按照图2示出的方式进行向量重构,心率时间序列 $y(t)$ 重构的多维延迟向量为 $\{x(t), x(t+\tau), \dots, x(t+(m-1)\tau)\}$ ,其中 $m$ 为维度、 $\tau$ 为延迟,逆序时间序列 $y(-t)$ 重构的多维延迟向量为 $\{x(-t), x(-t+\tau), \dots, x(-t+(m-1)\tau)\}$ 。

[0058] S32、对每个向量元素按照上升的趋势进行排列,利用元素的原始坐标向量构建原始向量的排列类型;

[0059] 本实施例中,根据步骤S31构建的多维延迟向量中的心率向量元素按照升序进行排列,即 $x(j_1) \leq x(j_2) \leq \dots \leq x(j_m)$ ,排列类型表示为 $\pi = (j_1, j_2, \dots, j_m)$ 。

[0060] S33、判断向量中是否包含等值元素;若是,则将等值元素按照出现的次序进行排列,并将对应等值元素的坐标更改为对应等值状态组中最小值,更新等值排列类型;若否,则等值排列类型不变。

[0061] 本实施例中,本发明对心率等值元素处理,将等值元素按照出现次序依次排列,例如向量中出现双等值和三等值状态,分别为 $x(j_i) = x(j_{i+1})$ 和 $x(j_1) = x(j_{1+1}) = x(j_{1+2})$ ,即

$$[0062] \quad x(j_i) < x(j_2) < x(j_i) = x(j_{i+1}) < \dots < x(j_1) = x(j_{1+1}) = x(j_{1+2}) < x(j_m)$$

[0063] 此时心率的排列类型为 $\pi = (j_1, j_2, j_{i+1}, j_{i+1}, \dots, j_1, j_{1+1}, j_{1+2}, j_m)$ ,将等值元素的坐标改为对应等值状态组中的最小值,即 $(j_i, j_{i+1})$ 改为 $(j_i, j_i)$ , $(j_1, j_{1+1}, j_{1+2})$ 改为 $(j_1, j_1, j_1)$ ,则等值排列类型更新为:

$$[0064] \quad \pi' = (j_1, j_2, j_i, j_i, \dots, j_1, j_1, j_1, j_m)$$

[0065] 在本发明的一个可选实施例中,上述步骤S4根据步骤S3中的向量重构对步骤S2中的心率的静态符号序列进行码字构建,表示为:

$$[0066] \quad s' = \{s_i, s_{i+\tau}, \dots, s_{i+(m-1)\tau}\}$$

[0067] 在本发明的一个可选实施例中,上述步骤S5通过静态码字和动态排列类型联合的方式将全局和局部的符号动力学相结合,根据步骤S4得到的静态码字与步骤S3得到的等值排列类型构成静态和动态结合的心率联合符号类型,表示为:

$$[0068] \quad c = \{s', \pi'\} = \{s_i, s_{i+\tau}, \dots, s_{i+(m-1)\tau}, j_1, j_2, j_i, j_i, \dots, j_1, j_1, j_1, j_m\}$$

[0069] 其中, $c$ 为心率联合符号类型, $s'$ 为码字构建后的静态符号序列, $\pi'$ 为更新后的等值排列类型。

[0070] 在本发明的一个可选实施例中,上述步骤S6统计心率时间序列及对应的逆序时间序列的所有符号类型,计算心率时间序列及对应的逆序时间序列中各个符号类型的概率表示为:

$$[0071] \quad p(s_i) = p(c_i, \pi_i)$$

$$[0072] \quad p(s_{-i}) = p(c_{-i}, \pi_{-i})$$

[0073] 其中,  $p(s_i)$  为心率时间序列中各个符号类型的概率,  $p(s_{-i})$  为逆序时间序列中各个符号类型的概率。

[0074] 在本发明的一个可选实施例中, 上述步骤S7考虑到心率符号序列中的空符号, 即有些符号类型不存在, 空符号类型对应的概率为0, 不利于正反符号序列概率差异性的计算, 因此为了有效地量化时间不可逆, 采用基于减法的差异性比较参数  $Y_s$ , 计算心率时间序列及对应的逆序时间序列的所有符号的概率差异性表示为:

$$[0075] \quad Y_s\langle p(s_i), p(s_{-i}) \rangle = p(s_i) \frac{p(s_i) - p(s_{-i})}{p(s_i) + p(s_{-i})}$$

[0076] 其中,  $Y_s\langle p(s_i), p(s_{-i}) \rangle$  为心率时间序列及对应的逆序时间序列的所有符号的概率差异性。

[0077] 并求和得到心率的时间不可逆TIR, 表示为:

$$[0078] \quad TIR = \sum_i Y_s\langle p(s_i), p(s_{-i}) \rangle = \sum_i p(s_i) \frac{p(s_i) - p(s_{-i})}{p(s_i) + p(s_{-i})}$$

[0079] 其中,  $i$  为正反序列对应符号的序号, TIR为心率时间不可逆指标。

[0080] 本发明的测试数据为采集自公共数据库PhysioNet心率信号, 两组健康心率数据集来自‘Fantasia’数据库, 包括20名年轻 ( $25.8 \pm 4.3$ 岁, 年龄范围21至34岁) 和20名老年人 ( $74.5 \pm 4.4$ 岁, 年龄范围68至85岁) 心率信号。健康受试者经过严格筛查, 在时长120分钟心电图采集过程中处于仰卧静息状态, 并且观看迪士尼电影‘Fantasia’。数据采样频率为250Hz, 其中‘f1\*’数据集采用16bit模数转换, ‘f2\*’采用12bit。验证的依据是心率调节相关的复杂度丢失理论, 即心率调节系统的复杂度处于动态变化中, 健康年轻机体的心率调节能力处于最佳的状态, 具有高度的动态非线性特征, 随着年龄的增加, 老年人心率调节功能有所降低, 适应能力减弱, 心率的动力学特征也随之降低。

[0081] 健康年轻和老年心率的静态、动态和静动结合的符号化时间不可逆如图3所示。当  $m=3$  时, 如图(a)所示, 静态二元符号化的时间不可逆方法不能正确地识别健康和老年心率的非线性特征(年轻心率的  $Y_s$  低于老年心率), 动态排列法 ( $p=0.068 > 0.05$ ) 和静动结合 ( $p=0.034$ ) 的时间不可逆可以正确地表征心率调节中的生理特征, 其中静态动态联合符号化的时间不可逆能够显著地区分两种心率。当  $m=4$  时, 如图(b)所示, 三种方法都能够有效地提取健康年轻和老年心率的非线性特征, 即分析结果满足复杂度丢失理论。从统计检验角度看, 静态二元时间不可逆无法有效地区分年轻和老年心率 ( $p=0.245 > 0.05$ ), 动态排列 ( $p=0.020$ ) 和静动结合 ( $p=0.012$ ) 的时间不可逆都能够显著地区分两类心率 ( $p < 0.05$ ), 而且静态动态联合符号化的分析效果最佳。另外, 从图3中可以看出, 年轻和老年心率的静动结合的时间不可逆都高于两种单独符号化时间不可逆的结果, 表明静态和动态符号的结合能够更好地提取动力系统的不可逆特征。通过对健康年轻和老年心率的非线性特征分析可以看出, 静态和动态联合符号化的时间不可逆分析可有效地提高非线性提取和分析的效果。

[0082] 本领域的普通技术人员将会意识到, 这里所述的实施例是为了帮助读者理解本发明的原理, 应被理解为本发明的保护范围并不局限于这样的特别陈述和实施例。本领域的普通技术人员可以根据本发明公开的这些技术启示做出各种不脱离本发明实质的其它各

种具体变形和组合,这些变形和组合仍然在本发明的保护范围内。

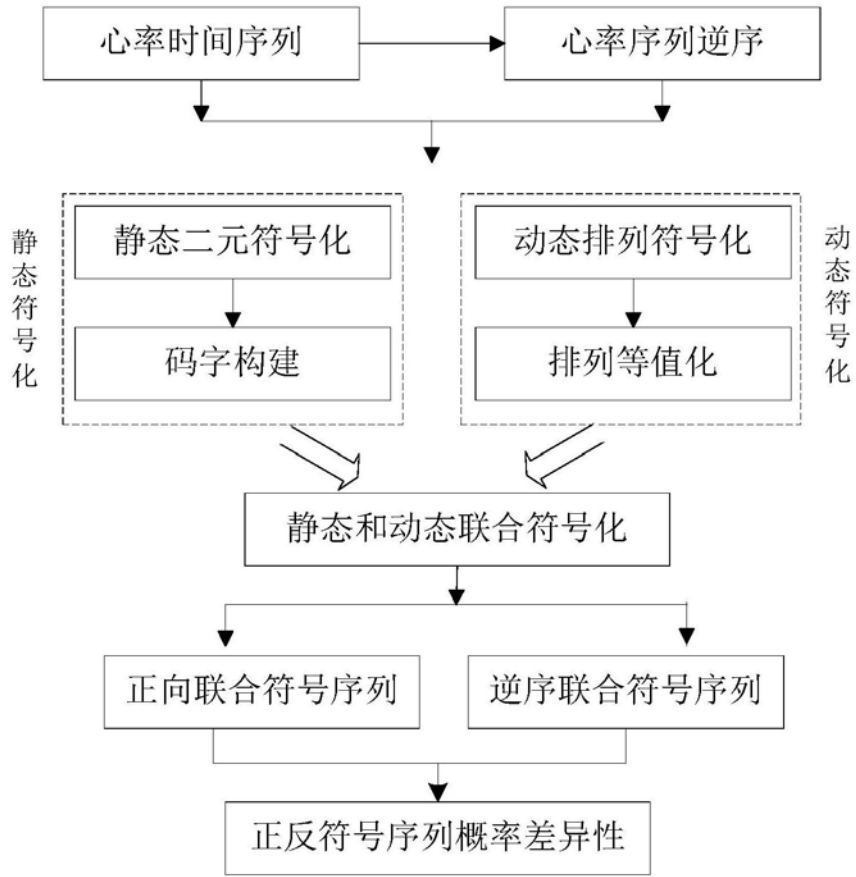


图1

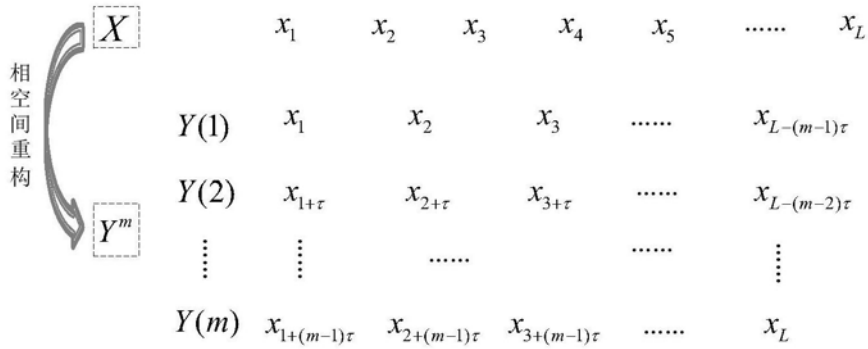


图2

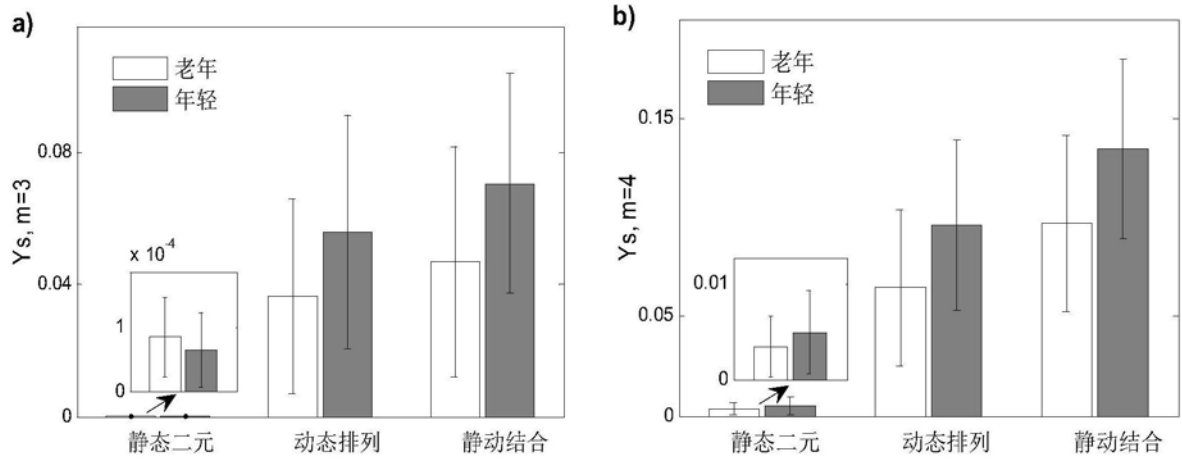


图3

专利名称(译)	基于静态和动态联合符号化的心率时间不可逆分析方法		
公开(公告)号	<a href="#">CN110558969A</a>	公开(公告)日	2019-12-13
申请号	CN201910840005.8	申请日	2019-09-06
[标]申请(专利权)人(译)	电子科技大学		
申请(专利权)人(译)	电子科技大学		
当前申请(专利权)人(译)	电子科技大学		
[标]发明人	尧德中		
发明人	姚文坡 尧德中		
IPC分类号	A61B5/024 A61B5/00		
CPC分类号	A61B5/024 A61B5/72		
代理人(译)	王伟		
其他公开文献	CN110558969B		
外部链接	<a href="#">Espacenet</a> <a href="#">SIPO</a>		

摘要(译)

本发明公开了一种基于静态和动态联合符号化的心率时间不可逆分析方法，该方法包括对心率信号的时间序列进行逆序处理，分别对正序和逆序心率信号进行静态二元符号化和动态排列符号化处理，构成静态和动态结合的心率联合符号类型，并分别计算所有符号类型的概率分布，进而计算对应符号的概率差异性，并量化心率时间不可逆指标。本发明采用符号化方法简化心率时间不可逆分析中的概率估计，同时考虑了心率的全局静态和局部动态的符号动力学信息，更加全面地提取了心率序列的结构化和动力学特征，在没有破坏两种动力学信息的前提下有效地结合了静态和动态的符号动力学信息，有效地提高了心率的非线性分析效果。

