

文章编号:1000-582X(2003)12-0051-04

# 基于分形盒维数检测 QRS 波群定位方法\*

罗小刚,彭承琳,郑小林,李晴辉

(重庆大学生物工程学院生物力学与组织工程教育部重点实验室,重庆 400044)

**摘要:**应用分形盒维数检测理论,对心电信号的分形特征进行了研究,结果显示不同格子尺度下检测到的覆盖信号盒子数与格子尺寸之间存在密切的对数线性关系,这表明心电信号也具有分形特性。同时,研究过程中还发现当采用一个时间窗来对信号进行检测时,在心电信号中 QRS 波群位置检测到的分维较大。而且这种差异很显著。在这个发现的基础上,提出了基于分形盒维数检测的心电信号 QRS 波群定位方法,经实际应用表明该算法速度较快,并能有效去除干扰,可用于心电信号特征点的实时检测中。

**关键词:**分形;盒维数;心电信号;波形检测

**中图分类号:**R318.04

**文献标识码:**A

在心电信号(ECG)的自动识别过程中,定位 QRS 波群在 ECG 片段上的位置具有重要意义,它为后续的心电波形的模板匹配分类过程、自动诊断过程提供了依据,是整个心电图自动诊断过程中的关键一环,目前检测心电信号中 QRS 波群位置已经有很多方法<sup>[1-3]</sup>,但这些方法有的虽检测速度较快,但准确度不高<sup>[2]</sup>,有的虽较准确却不能做到实时检测<sup>[3-4]</sup>。笔者根据心电信号形态上的自相似性,采用分形盒维数理论来探测心电信号的维数,并由此检测定位 QRS 波群,应用在开发的心电工作站软件上,取得了令人满意的效果。

## 1 QRS 波群的分形特性

维数是几何对象的一个重要特征量。所谓维数,就是指确定几何对象中一个点的位置所需的独立坐标的数目,或者说独立方向的数目。在平直的欧氏几何空间中,维数总是整数,如点是零维、线是一维、面为二维、体是三维等,而在分形几何中,一个几何对象的维数则不一定是整数,可以是其它正实数。分形很难用明确的数学语言来描述,一般来说,分形可看作一些简单空间上,如  $R^d$ 、 $C$ 、 $\hat{C}$  之上的一些“复杂”的点的集合,这种集合具有某些特殊性质,首先它是所在空间的紧支集,并且具有下面列出的典型的几何性质<sup>[5-6]</sup>:1) 分形集都

具有任意小尺度下的比例细节,或者说它具有精细的结构;2) 分形集不能用传统的几何语言来描述,它既不是满足某些条件的点的轨迹,也不是某些简单方程的解集;3) 分形集具有某种自相似的形式,可能是近似的自相似或者统计的自相似;4) 分形集的“分形维数”,严格大于它相应的拓扑维数;5) 在大多数情况下,分形集由非常简单的方法定义,可能以变换的迭代产生。事实上,严格的分形只存在于理论研究之中。实际应用中,满足上述大部分性质的几何图形,就可以称该几何图形具有分形的特性。

现在来看一个典型的混叠有干扰的 ECG 片段,如图 1 所示,从该 ECG 片段中可看出,它具有自相似的特性,符合分形的某些特点,并可推测其维数应是位于 1 ~ 2 之

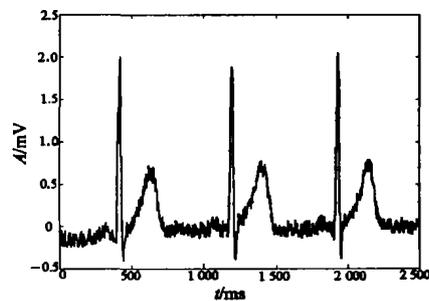


图 1 混叠有干扰的心电片段

\* 收稿日期:2003-08-12

作者简介:罗小刚(1974-),男,贵州凯里人,重庆大学讲师,博士,主要从事生物医学信号采集处理、医学仪器技术教学及科研工作。

间的一个实数。为了验证这一猜想,笔者采用了分形几何学中常用的盒维数检测方法。

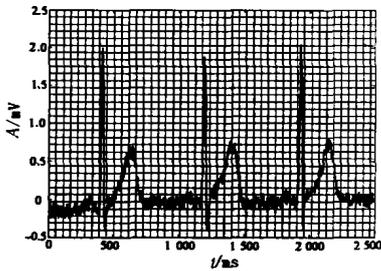
### 2 盒维数的定义及检测方法

严格的分形盒维数定义如下<sup>[6-7]</sup>:

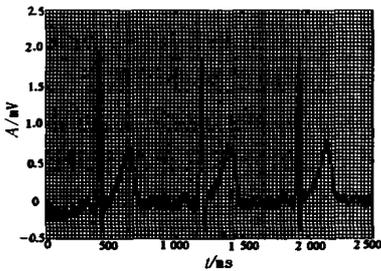
设  $F$  是  $R^n$  的非空有限子集,  $N_\delta(F)$  是覆盖  $F$  的直径至多为  $\delta$  的集的个数。 $F$  的盒维数定义为:

$$\dim_B F = \lim_{\delta \rightarrow 0} \frac{\ln N_\delta(F)}{-\ln \delta} \quad (1)$$

在实际的计算中,针对图1中的ECG信号检测,采用边长为  $\delta$  的小正方形来填充整个ECG信号所在平面区域  $F$ ,通过计数这些  $\delta$  充分小的正方形覆盖  $F$  的个数  $N_\delta(F)$ ,则盒维数是当  $\delta \rightarrow 0$  时  $N_\delta(F)$  递增的对数比例,其计算方式如图2所示:



(a)  $\delta = 1/32$



(b)  $\delta = 1/64$

图2 不同边长情况下的盒维数检测

表1 不同尺度下的  $\ln N_\delta(F)$  与  $-\ln \delta$

$\delta$	1/32	1/36	1/40	1/44	1/48	1/52	1/56	1/60	1/64
$-\ln \delta$	3.466	3.584	3.689	3.784	3.871	3.951	4.025	4.094	4.159
$N_\delta(F)$	140	162	183	207	233	260	288	315	344
$\ln N_\delta(F)$	4.942	5.089	5.209	5.333	5.451	5.561	5.663	5.752	5.841
回归方程	$\ln N_\delta(F) = 0.412 + 1.304 * (-\ln \delta)$								

由图2(a)与图2(b)及式(1)可求出该ECG片段的盒维数为1.297,为了验证  $\ln N_\delta(F)$  与  $-\ln \delta$  之间的线性关系,笔者求出了各种较小的  $\delta$  尺度下的  $\ln N_\delta(F)$  与  $-\ln \delta$  的值列入表1中,将这些值作图所得的直线如图3。通过回归检验,线性相关度  $R = 0.9973 > 0.8982$  (显著性水平 = 0.001,  $n = 9$  时),线性关系非常显著,这说明 ECG 片段的分形维数是客观存在的。它等于回归所得直线的斜率,此处约为 1.142。该分形维数则反映了受检心电信号的复杂程度,是一个拓扑不变量。基于心电信号的分形特点,由于分形的局部与整体具有自相似的性质,在不同的宏观具有一定长度的心电片段上,也必然可以检测到分形维数的存在,由于每一心电片段中包含的信号性质有一定差别,检测到的分形维数必然也是随它所在的空间位置摆动,笔者把这种在一定窗内检测到的信号称为“局部分形维”。由于心电信号是关于时间的幅度变化,因此在心电信号检测中,采用的是时间窗,只要将检测到的局部分形维数与原始心电信号序列相对应,找出它们之间的对应关系,就可以利用分形维数来定义心电信号中特征波形所在的位置。借鉴一些采用分形处理脑电<sup>[8]</sup>、声音<sup>[9]</sup>等信号的成功经验,笔者提出了基于盒维数检测的QRS定位算法。

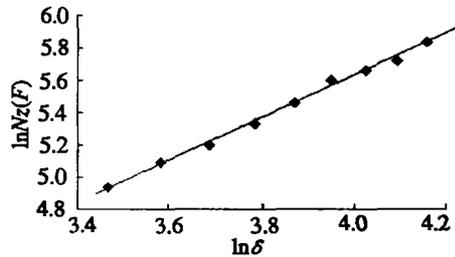


图3  $-\ln \delta$  与  $\ln N_\delta(F)$  回归直线

### 3 QRS 波盒维数检测定位算法

在 QRS 波的定位检测时,借用时频分析中的加窗方法,采用定长度的时窗来检测包含在窗内的心电信号的盒维数,在检测过程中,由于检测所得到的

$\ln N_\delta(F)$  与  $-\ln \delta$  线性关系比较显著,且检测盒维数的目的只是为了定性地判断心电信号序列在各个时间窗上分形维数的变化关系,而不必要定量精确研究,因而检测中只要保证检测中划分的网格直径  $\delta$  具有宏观上的小尺度就可满足要求。经反复数值实验,分别采用网格子集的直径为:

$$\delta_1 = \frac{\text{Max}(S') - \text{Min}(S')}{\text{Max}(S) - \text{Min}(S)} = \frac{0.2 \text{ mV}}{\text{Max}(S) - \text{Min}(S)} \quad (2)$$

$$\delta_2 = \frac{\text{Max}(S'') - \text{Min}(S'')}{\text{Max}(S) - \text{Min}(S)} = \frac{0.25 \text{ mV}}{\text{Max}(S) - \text{Min}(S)} \quad (3)$$

式中  $S', S''$  分别为两个高频干扰源干扰幅度  $A$  的大小, 一般为估计值。上式中分式的分子为经验上高频干扰信号的最大幅度, 这主要是考虑到心电信号干扰的高频成分如肌电、工频等具有频率高且幅值低的特点, 为了防止这些高频低幅成分对检测结果的影响, 检测中选取的网格子集直径  $\delta$  的尺度应大于这些干扰的最大幅度。这里取的值为 0.2 mV 与 0.25 mV, 分母为整个时间片段内心电信号的最大信号与最小值之差, 这样处理的好处是可以将信号的高频干扰成分去除, 降低了干扰信号对检测结果的影响, 相当于对信号作了一次非线性滤波处理。

检测中所取的时间窗大小十分重要, 取得太大, 不能有效地区分 QRS 复合波和心电图上的特征波形, 取得太小则使检测结果波动太大而失去意义。实际的检测中, 取 QRS 复合波的上限为 90 ms。为了提高检测效率, 时窗长度取 QRS 波群的一般宽度即 90 ms。则在如图 1 的 ECG 段上, 检测到的盒维数在整个时间片段上的变化如图 4。从图 4 可看出, 心电信号片段上 QRS 波群所在位置的盒维数较大, 平均约为 1.472 维, 其余位置上的盒维数较小, 约为 1 ~ 1.134 维, 以平面上的拓扑维 2 为计算基准, 在 QRS 波群所在位置和非 QRS 波群所在位置它们之间的相对差距按式(4) 计算:

$$C = \frac{F_{\text{QRS}} - 2}{|F_{\text{NQRS}} - 2|} \times 100 \quad (4)$$

式中  $F_{\text{QRS}}$  为 QRS 波群处的局部分维,  $F_{\text{NQRS}}$  为非 QRS 波群位置处的局部分维。由式(4) 可计算得局部分维差距范围为: 64% ~ 89%, 是十分显著的, 这说明盒维数检测法的确可以用于 ECG 信号的 QRS 波群检测。

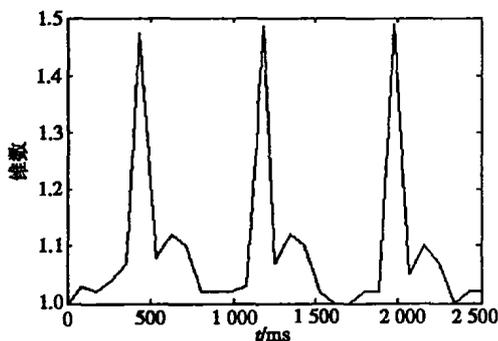


图 4 图 1 中 ECG 片段的盒维数检测结果

基于前面的分析, 笔者在设计“心电工作站”软件 QRS 探测算法中, 成功地采用了图 5 的检测算法实现了 QRS 波群的快速定位, 经临床实际应用显示, 该算法具有计算速度快、精度较高的优点, 适合用于对 QRS 波形检测速度要求较高如监护仪、心电向量环实时显示等的场合。

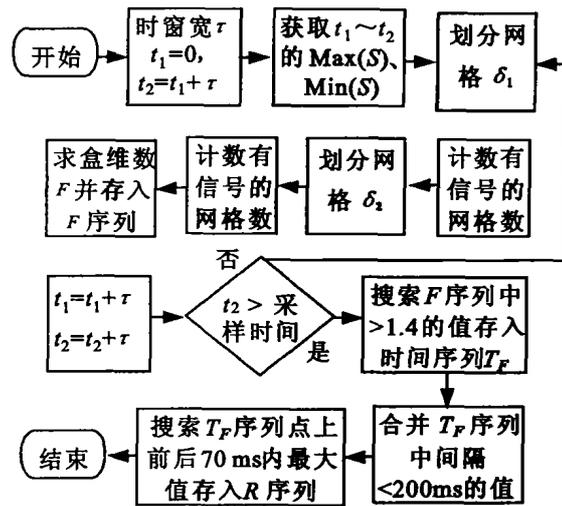


图 5 盒维数法探测 QRS 波群的系统流程图

## 4 结 论

QRS 波群的定位检测是心电信号自动分析的基础, 笔者基于分形理论, 首次采用盒维数检测方法对心电信号的分形特征进行了分析, 实验结果表明, 心电信号具有分形结构, 其盒维数平均约为 1.3 维, 其中位于 QRS 波群所在位置的盒维数与非 QRS 波群位置的盒维数差异显著, 利用该性质, 实现了心电信号 QRS 波群的快速定位检测。

## 参考文献:

- [1] 肖咏梅, 陈杭. 心电自动分析技术[J]. 生物医学工程学杂志, 2000, 13(7): 339 - 342.
- [2] JIA PUPAN, TOMPKINS W J. A real-time QRS detection algorithm[J]. IEEE Trans Biomed Eng, 1985, 32(3): 230 - 243.
- [3] SHUBHA KADMBE. Wavelet transform-based QRS complex detector[J]. IEEE Trans On BME, 1999, 46(7): 838 - 848.
- [4] PARK K L, LEE K J, YOON H R. Application of a wavelet adaptive filter to minimize distortion of the ST-segment[J]. Med Biol Eng Comput, 1998, (36): 581 - 586.
- [5] 江惠坤. 一类分形曲面的精细计盒维数公式[J]. 应用数学学报, 2001, 14(3): 339 - 343.
- [6] 李启凯, 张跃, 褚武扬. 一维分形曲线与分维测量[J]. 中国电视学与图象分析, 1998, 3(3): 182 - 185.

- [7] DUBUC B, QUINIOU J F, TRICOT C. Evaluating The fractal dimension of profiles [J]. *Physical Review*, 2002, 39 (3):1 500 - 1 511.
- [8] ROSCHKE J, ALDENHOFF J. The dimensionality of human  $\delta$  electroencephalograms during sleep [J]. *Biological Cybernetics*, 1994, 64(7):307 - 314.
- [9] SAVANAL S, NAKAGAWA M. The fractal properties of vocal sounds and their application in the speech recognition model chaos sounds and their application in the speech recognition model chaos solitons and fractals [J]. *Application in Science and Engineering*, 1996, 7(11):1 825 - 1 831.

## The Location Algorithm of QRS Waves Based on Fractal Box Dimensions Detection Methods

LUO Xiao-gang, PENG Cheng-lin, ZHENG Xiao-lin, LI Qing-hui

(Key Laboratory for Biomechanics & Tissue Engineering under the State Ministry of Education, College of Bioengineering, Chongqing University, Chongqing 400044, China)

**Abstract:** We research fractal characteristics of ECG signal, and find that it is logarithmic linear relationship between the boxes number covering signal and box scale. It is shown that ECG signal have some characteristics. Further more, we discover that fractal dimensions at QRS site are higher than others when using a time windows to detect signal. Based on this foundation, we raise a location algorithm of QRS waves which is based on fractal boxes dimension detection methods. The application results of this algorithm show that it can get rid of noise in ECG effectively with high speed, so this algorithm can be used in real time detection of ECG signal.

**Key words:** fractal; box dimensions; ECG signal; wave detection

(编辑 李胜春)

(上接第 50 页)

## The Influence on the Strength of Cement Mortars by Emulsified Epoxy

CHEN You-zhi, LI Fang-xian, WANG Hong-xi

(College of Materials Science, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China)

**Abstract:** The influence on the strength of cement mortars by adding emulsified epoxy is studied, and epoxy resin polymer cement mortars with excellent performances are made up through modifying ordinary Portland cement with emulsified epoxy and micro - fine slag. The microstructure of the epoxy resin polymer cement materials are studied and their action and mechanism are discussed by means of modern detection measures such as SEM, XRD. The experimental results indicate cement mortars modifying emulsified epoxy and micro - fine slag have higher compressive strength and flexible strength. The series effects of water - reducing, density, pozzolanicity, filling and solidification cross linking through the action together of epoxy organism and micro - fine slag can endow cement - based materials with perfect mechanic performance. The main hydration products in the system are C - S - H gel and micro - crystal hydrated calcium aluminate. When epoxy resin is solidified, the organism is network. No  $\text{Ca}(\text{OH})_2$  has been found.

**Key words:** emulsified epoxy; modification; cement mortar; strength

(编辑 李胜春)