

一种双导联融合心电 QRS 波检测算法

朱晓君¹, 杨红官¹, 刘 健²

1. 湖南大学物理与微电子科学学院, 湖南 长沙 410082; 2. 北京科技大学计算机与通信工程学院, 北京 100083

【摘要】目的: 心电图的检测与分析是临床上诊断心血管疾病的主要依据, QRS 波是心电信号中最重要的特征波, 它的准确检测是心电信号自动分析的前提和基础。为了提高单导联检测 QRS 波的灵敏度和准确率, 本文提出一种新的双导联融合心电 QRS 波检测的算法。**方法:** 原始心电信号通过单导联预检波进行 QRS 波定位后, 由双导联决策方法来决定采用单导联检波还是双导联融合检波。单导联检波直接采用第一或第二导联检测结果; 双导联融合检波由双导联融合方法和导联判断规则判别。以窗时间为时间单位, 不断更新双导联决策算法。本算法包括方差、幅值、模板匹配以及阈值比较等方法。**结果:** 采用 MIT-BIH 心律失常数据库的 48 组两导联心电记录进行验证, 统计得到平均灵敏度和准确率分别为 99.87%、99.81%。其漏检数和误检数比第一导联分别降低了 23.26%、18.27%, 比第二导联分别降低了 88.21%、95.11%。**结论:** 本算法实时高效地提高单导联 QRS 波检测的灵敏度和准确率, 且优于部分算法的检测结果, 因而在心电信号自动分析中具有良好的应用前景和较高的实用价值。

【关键词】 双导联; QRS 波检测; 决策方法; 融合检波; 模板匹配

【DOI 编码】 doi:10.3969/j.issn.1005-202X.2015.01.017

【中图分类号】 TP391.9

【文献标识码】 A

【文章编号】 1005-202X(2015)01-68-05

A QRS Complex Detection Algorithm of Two-lead ECG Signal

ZHU Xiao-jun¹, YANG Hong-guan¹, LIU Jian²

1. School of Physics and Microelectronics Science, Hunan University, Changsha 410082, China; 2. School of Computer and Communication Engineering, University of Science and Technology Beijing, Beijing 100083, China

Abstract: Objective Detection and analysis of Electrocardiogram (ECG) are the major basis for clinical diagnose of cardiovascular disease. As the most important feature wave of ECG signal, the accurate detection of QRS complex defining is an important prerequisite and foundation for automated ECG analysis. In order to improve the sensitivity and specificity of the single-lead QRS detection, a new algorithm of detecting two-lead QRS complex is proposed. **Methods** The original ECG is detected by each lead with single-lead QRS detecting rule, and determined to do single-lead examination or two-lead fusion examination by two-lead decision algorithm. Examination of single-lead adopts first-lead or second-lead detection, while fusion examination of two-lead is decided by two-lead fusion method and lead judge rule. The two-lead decision algorithm is updated constantly with the unit of time window. This algorithm concludes a few methods, such as variance, amplitude, template matching, threshold comparison, and so on. **Results** The algorithm is evaluated by 48 ECG records of two leads in the MIT-BIH arrhythmia database, and the achieved scores indicate high performance: 99.87% sensitivity and 99.81% specificity for QRS detection. And the false negative and false position in the algorithm are reduced by 23.26% and 18.27% respectively compared to the first lead, which is reduced by 88.21% and 95.11% respectively relative to the second lead. **Conclusion** The experiment shows that the algorithm can improve sensitivity and specificity of single-lead QRS detection in real-time and it outperform some published results of other detection algorithms. Thus the algorithm has a good application potential and high practical value in automated ECG analysis.

Key words: two-lead; QRS detection; decision algorithm; fusion examination; template matching

【收稿日期】 2014-08-19

【基金项目】 国家自然科学基金(61173149);北京市青年英才计划项目。

【作者简介】 朱晓君(1990-),女,福建南平人,硕士研究生,主要研究方向为电子与通信工程,医学信号处理。

前言

心电图(ECG)是用波形来记录心脏电活动的,是现代医学用以分析和诊断心血管疾病的重要手段之一。一组心电图波群代表着一个心动周期发生的电活动。

动,由五个波形组成,分别以 P、Q、R、S 和 T 表示,中间三个字母 Q、R 和 S 归为一个单元,称为 QRS 波^[1]。在心电信号的自动分析与检测中,QRS 波的检测是关键因素之一。

近年来,单导联检测 QRS 波群已经有多种实用有效的方法,并逐渐走向成熟。如阈值差分法^[2]、滤波器法^[3]、小波变换分析方法^[4,5]、高阶统计方法^[6]等。但心电信号在采集过程中,部分信号幅度过小或受噪声影响较大,导致单导联检测 QRS 波存在一定的误检和漏检。双导联 ECG 信号 QRS 波检测方法,可综合两个导联的 QRS 信息,提高检测性能。

Moraes 等^[7]采用两种检测算法分别定位双导联心电信号的 R 波,通过 QRS 信息的互补来提高正确率。Christov 等^[8]提出一种更准确的判别门限来检测双导联 ECG 信号的 QRS 波。Huang 等^[9]使用独立联合小波熵(CWS)融合双导联的 QRS 信息。张龙飞等^[10]以决策融合阈值为判别门限完成多导联 QRS 波实时检测。上述方案无单导联信号质量评估,而是直接双导联或多导联检测。当某个导联心电信号质量高,仍采用两个或多个导联检测,导致算法效率和检测准确率降低。

本文提出一种双导联融合心电 QRS 波检测的算法。在单导联 QRS 波检测的基础上,通过双导联决策方法来决定采用第一导联检波、第二导联检波还是双导联融合检波。其中,双导联融合检波由双导联融合方法和导联判断规则判别。

1 双导联融合心电 QRS 波检测算法

双导联融合 QRS 波检测算法结构如图 1 所示。

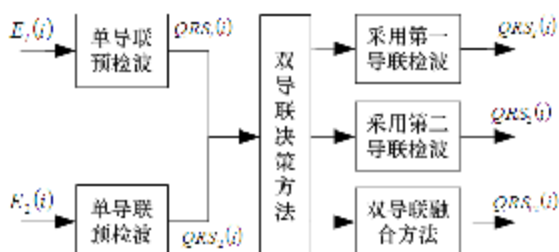


图 1 算法结构

Fig.1 The Construction of the Proposed Algorithm

(1) 单导联预检波: 两个导联 ECG 信号 $E_1(i)$ 、 $E_2(i)$ 分别经过单导联预检波,找到对应的 QRS 波: $QRS_1(i)$ 、 $QRS_2(i)$ 。

(2) 双导联决策方法: $QRS_1(i)$ 、 $QRS_2(i)$ 通过双导联决策方法后,分三种情况:第一导联检波、第二导联检波和双导联融合检波。

(3) 双导联融合方法:若两个导联检测结果相同,则认为成功定位 R 点;否则,通过导联判断规则来检测 QRS 波。

1.1 单导联预检波

单导联预检波包括心电信号预处理和 QRS 波检测。心电信号预处理,是指滤除基线漂移、肌电干扰、工频干扰等噪声。基线漂移属于低频干扰信号,可通过高通滤波器滤除;肌电干扰频率主要集中在高频部分,可通过低通滤波器滤除;工频干扰频率为 50 Hz/60 Hz,可通过 50 Hz/60 Hz 陷波滤波器滤除。设计一个 5 Hz 到 11 Hz 带通滤波器^[11]可有效地滤除干扰信号。

QRS 波是心电信号中形态特征最明显、最容易被检测到的一段波形。单导联检测 QRS 波已有多种实用有效算法,本文采用的是差分阈值法^[12]。

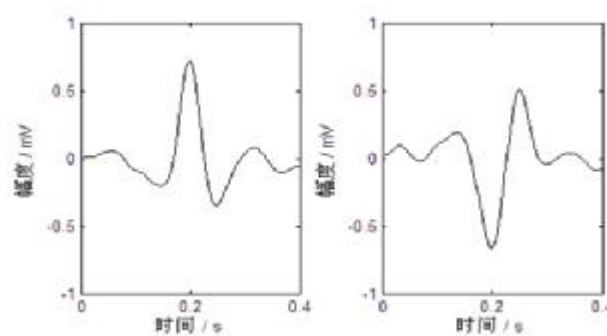


图 2 QRS 波模板

Fig.2 Templates of QRS Complex

1.2 双导联决策方法

ECG 信号的方差,可评估信号质量^[12]。本文采用部分信号方差与整体信号方差平均值的比值来评估信号。该值越接近于 1, ECG 信号质量越高,反之亦然。

部分未滤除的带内噪声和较小的 QRS 波振幅都会影响单导联 QRS 波的检测,而双导联决策方法能减弱此影响。双导联决策方法的主要思想为:两个导联的心电信号质量相差较大,采用质量好的导联的检波结果;不然,进行双导联融合检波。具体步骤为:

a 选取窗时间,窗时间太大会降低 QRS 波检测的正确率;而窗时间过小会冗余计算。经反复实验,窗时间选为 10 s,效果最佳。

b 如果双导联 ECG 信号满足式(1)或式(2),直接采用第一导联检测结果且更新第一导联方差,式(3)为更新公式,转到步骤 e。否则,转入 c。

$$|1 - \text{VarW1}/\text{Var1}| < |1 - \text{VarW2}/\text{Var2}| - 0.2 \quad (1)$$

$$\text{VarW2} < \text{ThVar} \quad (2)$$

$$\text{Var1} = \frac{7}{8} \text{Var1} + \frac{1}{8} \text{VarW1} \quad (3)$$

其中, VarW1 为第一导联在窗时间内的方差, Var1 为第一导联方差(初始值为 VarW1), VarW2 为第二导联在窗时间内的方差, Var2 为第二导联方差(初始值为 VarW2), ThVar 为方差阈值。

c 由式(4)或式(5)权衡两个导联的 ECG 信号,若成立,则采纳第二导联检波结果,并根据(6)式更新

Var2, 转到 e。若不成立, 转入 d。

$$|1 - \text{VarW2}/\text{Var2}| < |1 - \text{VarW1}/\text{Var1}| - 0.2 \quad (4)$$

$$\text{VarW1} < \text{ThVar} \quad (5)$$

$$\text{Var2} = \frac{7}{8} \text{Var2} + \frac{1}{8} \text{VarW2} \quad (6)$$

d 采用双导联融合方法(在 1.3 中详细介绍)。在两个 ECG 信号符合式(7)与式(8)的情况下, 更新 Var1 和 Var2。转入 e。

$$|1 - \text{VarW1}/\text{Var1}| \leq 0 \quad (7)$$

$$|1 - \text{VarW2}/\text{Var2}| \leq 0 \quad (8)$$

e 增加一个窗时间, 返回到 b, 直到心电信号结束。

1.3 双导联融合方法

当两个导联心电信号质量相当时, 采用双导联融合方法来检测 QRS 波。双导联 ECG 信号通过双导联融合检波后, 存在 5 种可能: 两个导联均检测到 QRS 波、第一导联成功检测、第一导联误检、第二导联成功检测以及第二导联误检, 如图 3 所示。

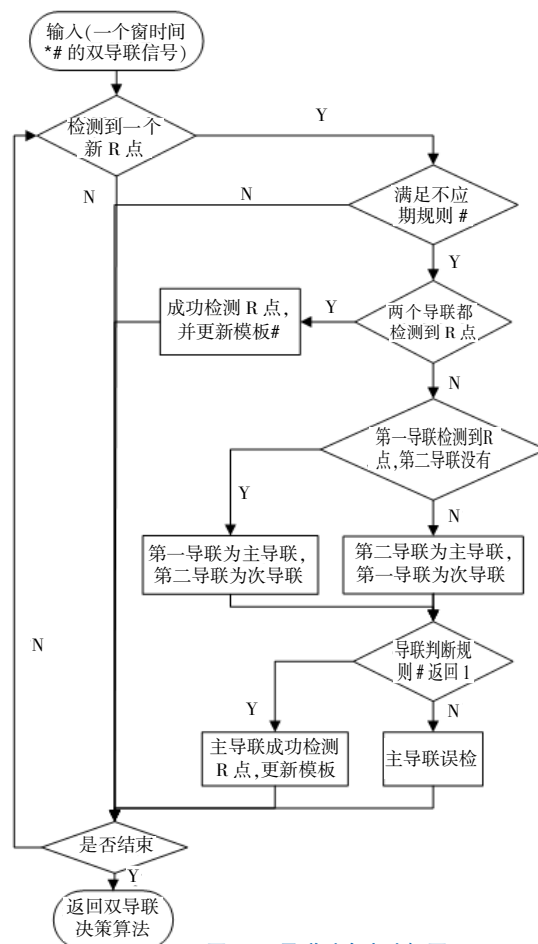


图3 双导联融合方法框图

Fig.3 Block Diagram of Two-lead Fusion Method

下面为图3中带#号名词解释:

窗时间*: 假设上一个窗时间采用单导联(双导联融合)检波且下一个窗时间为双导联融合(单导联)检波。此时, 在两个窗时间的交叉处会出现漏检的现

象。为此, 窗时间* 在窗时间的基础上往前增加 0.25s。

不应期规则: 在 R 点附近 200ms 内不会出现 QRS 波。

模板: 每个导联有两个模板, 分别为 QRS 波向上和 QRS 波向下, 如图 2 所示。取 R 点前 200ms 到后 200ms 的波形为模板, 记为 Temp。更新公式为:

$$\text{Temp} = \frac{7}{8} \text{Temp} + \frac{1}{8} \text{NewTemp} \quad (9)$$

其中, NewTemp 表示最新检测为 R 点附近的 400ms 的 ECG 波形。

导联判断规则: 检测主导联是成功定位 QRS 波, 还是误检, 在 1.4 中将会详细介绍。

当检测到一个新的 QRS 波时, 满足不应期条件下, 分三种情况: 两个导联均检测到 QRS 波, 表示成功定位 R 点; 第一导联找到 QRS 波而第二导联未找到, 第一导联为主导联, 第二导联为次导联; 第二导联找到 QRS 波而第一导联未找到, 第二导联为主导联, 第一导联为次导联。主导联和次导联通过导联判断规则来确定主导联成功定位 R 点或误检。再返回检测下一个 QRS 波。

在不满足不应期的情况下, 继续检测下一个 QRS 波。当窗时间* 结束, 返回双导联决策方法。

1.4 导联判断规则

在导联判断规则中, 假设主导联找到 R 点的时刻为 t, 主导联和次导联都取 t 附近的 400 ms (t-200 ms, t+200 ms) 的波形为准 ECG 波形。对于一个准 ECG 波形, [t-50 ms, t+50 ms] 为 QRS 区间, (t-200 ms, t-50 ms) 和 (t+50 ms, t+200 ms) 为非 QRS 区间。QRS 区间的方差大, 而非 QRS 区间的方差较小。

下面为导联判断的 3 个规则, 若均不满足, 返回 1; 否则, 返回 0:

规则 1: $a_1 < 3.5$, 或者 $a_1 < 5$ 且 $a_2 < 1.5$ 。其中, a_1 、 a_2 分别为主、次导联的 QRS 区间方差与非 QRS 区间方差之比。

规则 2: 计算式(10), $\text{Coe} < \text{Th1}$, 或 $\text{Max1} < 0.13 \text{ mV}$ 。

$$\text{Coe} = r_1 \cdot \frac{\text{Max1}}{\text{Max2}} + r_2 \cdot a_1 + r_3 \cdot a_2 \quad (10)$$

其中, r_1 为 0.2, r_2 为 0.4, r_3 为 0.4, Max1、Max2 分别为主、次导联 QRS 区间最大振幅。

规则 3: $\text{TCoe} > \text{Th2}$, TCoe 根据式(11)计算得到, 为主导联的准 ECG 波(HW)与 QRS 波同向模板(TW)的匹配系数^[13]。

$$\text{TCoe} = \frac{|\sum |HW| - \sum |TW| |}{\sum |TW|} \quad (11)$$

2 实验结果与分析

本算法的研究和分析过程中, 采用 MIT-BIH 心律失常数据库。由 48 组两导联心电记录组成, 其中, 每个记录为 30 min, 采样率为 360 Hz。第一导联为校正的 II 导联, 第二导联为校正 V1 导联(偶尔会有

表 1 本算法的检测结果

Tab.1 The Detection Results of This Algorithm

Record	TP	FN	FP	Se(%)	Sp(%)
100	1899	0	0	100.00	100.00
101	1521	0	3	100.00	99.80
102	1819	0	0	100.00	100.00
103	1727	0	0	100.00	100.00
104	1855	0	0	100.00	100.00
105	2143	9	38	99.58	98.26
106	1694	0	0	100.00	100.00
107	1781	1	0	99.94	100.00
108	1474	4	80	99.73	94.85
109	2097	0	0	100.00	100.00
111	1773	1	0	99.94	100.00
112	2108	0	0	100.00	100.00
113	1504	0	0	100.00	100.00
114	1601	0	0	100.00	100.00
115	1635	0	0	100.00	100.00
116	2013	1	1	99.95	99.95
117	1282	0	0	100.00	100.00
118	1913	0	0	100.00	100.00
119	1659	0	0	100.00	100.00
121	1557	1	0	99.94	100.00
122	2051	0	0	100.00	100.00
123	1264	3	0	99.76	100.00
124	1365	0	0	100.00	100.00
200	2162	3	2	99.86	99.91
201	1489	31	0	97.96	100.00
202	1864	4	0	99.79	100.00
203	2459	20	17	99.19	99.31
205	2198	0	0	100.00	100.00
207	1594	0	0	100.00	100.00
208	2415	18	6	99.26	99.75
209	2516	0	2	100.00	99.92
210	2184	17	2	99.23	99.91
212	2282	0	0	100.00	100.00
213	2697	0	0	100.00	100.00
214	1876	0	0	100.00	100.00
215	2792	0	0	100.00	100.00
217	1840	3	2	99.84	99.89
219	1769	0	2	100.00	99.89
220	1692	0	0	100.00	100.00
221	2016	2	1	99.90	99.95
222	2112	0	10	100.00	99.53
223	2195	1	0	99.95	100.00
228	1700	0	2	100.00	99.88
230	1856	0	0	100.00	100.00
231	1275	0	0	100.00	100.00
232	1482	0	2	100.00	99.87
233	2558	0	0	100.00	100.00
234	2288	0	0	100.00	100.00
Total	91046	119	170	99.87	99.81

V5、V2 以及 V4 导联,本文统称为 V1 导联)。

检测算法评价指标为:灵敏度 $Se=TP/(TP+FN)$ 和准确率 $Sp=TP/(TP+FP)$, 其中,TP 为正确检测 QRS 波的个数;FP 为误检个数;FN 为漏检个数。

取 $ThVar=100$, $Th1=1$, $Th2=0.3$ 。本算法使用 M-ATLAB 作为实现平台,去除每条记录的前 5 分钟数

据,融合 II 导联和 V1 导联的仿真结果如表 1 所示,Se 和 Sp 分别为 99.87%,99.81%。采用单导联检测 QRS 波算法^[10-11]分别检测 II 导联和 V1 导联,得到 II 导联的总计 FN 和 FP 分别为:155 和 208;V1 导联的总计 FN 和 FP 分别为:1009 和 3475。本文算法较单独 II 导联的 FN 降低了 23.26%,FP 降低 18.27%,比单独 V1 导联的 FN 降低了 88.21%,FP 降低了 95.11%。显而易见,本算法降低了单导联的 FN 和 FP。

表 2 为本算法与不同算法 QRS 波检测结果的对比。结果显示,本算法的灵敏度略低于文献^[3]和文献^[9],准确率却为最高。

表 2 不同算法检测结果的对比

Tab.2 Comparison of Different Detection Methods

Method	Total	FN	FP	Se(%)	Sp(%)
Zhang Y et al.[2]	116137	285	373	99.75	99.68
Zhang F et al.[3]	24663	23	78	99.91	99.68
Yang J et al.[4]	55609	90	187	99.84	99.66
Huang B et al.[9]	173549	201	473	99.88	99.73
This method	91165	119	170	99.87	99.81

3 结论

本文详细介绍了一种双导联融合心电 QRS 波检测的算法,基于差分阈值法检测单导联 QRS 波,通过方差、幅值、模板匹配以及阈值比较等方法进行双导联融合。实时性好,采用窗时间不断更新检测结果。适用性广,可用于多导联融合 QRS 波检测,只需从多导联中选择两个信号质量最优的导联,再检测双导联 ECG 信号的 QRS 波。双导联融合之前采用单导联信号评估,提高算法效率和 QRS 波检测精度。实验数据采用 MIT-BIH 心律失常数据库,结果表明,本算法能提高单导联 QRS 波检测的灵敏度和准确率,且优于部分 QRS 波检测算法。

【参考文献】

- [1] Durston S. 袖珍心电图解读[M]. 刘刚,郭继鸿. 北京:人民军医出版社,2011: 69-70.
- [2] Durston S. Portable ECG interpretation [M]. Liu G, Guo JH. Beijing: People's Military Medical Press, 2011: 69-70.
- [3] 张毅,谭刚,罗元. 基于 ADT 与回溯重检的 QRS 波实时检测算法[J]. 华中科技大学学报(自然科学版),2013, 41(S1): 375-378.
- [4] Zhang Y, Tan G, Luo Y. A real-time QRS detection algorithm based on adaptive dual-threshold and search-back[J]. J Huazhong Univ Sci and Tech (Natural Science Edition), 2013, 41(S1): 375-378.
- [5] Zhang F, Wei Y, Lian Y. Frequency-response masking based filter bank for QRS detection in wearable biomedical devices [C] //Proc of IEEE International Symposium on Circuits and Systems. Taipei, Taiwan: IEEE Press, 2009: 1473-1476.
- [6] 杨杰,张胜,余顺等. 一种基于二次样条母小波函数的心电 QRS 复合波检测算法[J]. 中国医学物理学杂志,2013, 30(2): 4036-4040.
- [7] Yang J, Zhang S, Yu S, et al. A quadratic spline mother wavelet function based ECG QRS detection algorithm [J]. Chinese Journal of Medical Physics, 2013, 30(2): 4036-4040.

而且可以简化装置的结构设计和制作,缩短研制周期。本装置与现有装置相比,压力控制精度高,在制备缺血性视网膜损伤模型时模型之间差异小,重复性好。压力控制和时间控制是自动进行的,可将实验人员从机械,重复的操作过程中解脱出来。能同时制造多个模型,大大的提高了工作效率。本装置操作简单,使用方便,结构简单,制造容易,使用安全,成本低。

【参考文献】

- [1] 陈钦进,管怀进,解正高,等.台式血压计监测大鼠急性高血压模型建立过程中的眼内压[J].中国眼耳鼻喉科杂志,2007,7(4):211-213.
- Chen QJ, Guan HJ, Xie ZG, et al. Monitoring of intraocular pressure with a sphygmomanometer during the process of establishment of rat model of acute intraocular hypertension[J]. Chinese Journal of Ophthalmology and Otolaryngology, 2007, 7(4): 211-213.
- [2] 杨新光,李健民.大鼠实验性高血压视网膜缺血再灌注损伤模型的建立及其机制[J].第四军医大学学报,2002,23(2):126-129.
- Yang XG, Li JM. Study on ischemia reperfusion retinal damage of experimental ocular hypertension rats [J]. Journal of the Fourth Military Medical University, 2002, 23 (2): 126-129.
- [3] 宋锦春,苏东海,张志伟.液压与气压传动[M].北京:科学出版社,2006:335-336.
- Song JC, Su DH, Zhang ZW. Hydraulic and pneumatic transmission [M]. Beijing: Science Press, 2006: 335-336.
- [4] 胡永建.一种基于PID算法的气压控制技术[J].测控技术,2011,30(8):60-63.
- Hu YJ. A pneumatic control technology based on PID algorithm [J]. Measurement & Control Technology, 2011, 30(8): 60-63.
- [5] 王玉芳,盛晓岩,刘颖.压力控制器气路控制模型研究[J].计测技术,2009,29(2):11-13.
- Wang YF, Sheng XY, Liu Y. Research on pneumatic circuit control model of pressure-controller [J]. Metrology & Measurement Technology, 2009, 29(2): 11-13.
- [6] 王清波,马超,王敬党.时间继电器在控制回路中的应用[J].制造业自动化,2006,28(12):63-64.
- Wang QB, Ma C, Wang JD. Usage of time relay in the control circuit [J]. Manufacturing Automation, 2006, 28(12): 63-64.

(上接第71页)

- [5] 姚成,司玉娟,郎六琪,等.基于小波提升的ECG去噪和QRS波识别快速算法[J].吉林大学学报(工学版),2012,42(4):1037-1043.
- Yao C, Si YJ, Lang LQ, et al. Fast algorithm of ECG denoising and QRS wave identification based on wavelet lifting [J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2012, 42(4): 1037-1043.
- [6] 唐艳,汤井田.应用高阶统计方法实现R波的检测[J].中国医学物理杂志,2005,22(6):739-741.
- Tang Y, Tang JT. Detection of ECG's R-wave based on high order statistics [J]. Chinese Journal of Medical Physics, 2005, 22 (6): 739-741.
- [7] Moraes JC, Freitas MM, Vilani FN, et al. A QRS complex detection Algorithm using electrocardiogram leads [C]//Proc. of Computers in Cardiology. Memphis, USA: IEEE Press, 2002: 205-208.
- [8] Christov II. Real time electrocardiogram QRS detection using combined adaptive threshold [J]. Biomedical Engineering Online, 2004, 3: 1-9.
- [9] Huang B, Wang Y. Detecting QRS complexes of two-channel ECG signals by using combined wavelet entropy [C]//Proc. of the 3rd IEEE ICBBE. Beijing, China: IEEE Press, 2009: 1-4.
- [10] 张龙飞,张跃.一种多导联QRS波实时检测算法[J].计算机工程,2011,37(16):282-284.
- Zhang LF, Zhang Y. Real-time detection algorithm of multi-lead QRS wave [J]. Computer Engineering, 2011, 37(16): 282-284.
- [11] Hamilton P, Curley M. Open Source ECG Analysis Software [EB/OL]. (2003-04-24). <http://www.eplimited.com/>.
- [12] Sungho OH. A new quality measure in electrocardiogram signal [D]. Florida USA: University of Florida, 2004.
- [13] Krasteva V, Jekova I. QRS template matching for recognition of ventricular ectopic beats [J]. Annals of Biomedical Engineering, 2007, 35(12): 2065-2076.