

心电信号自动识别技术现状与展望

马瑞青 蔡云鹏

(中国科学院深圳先进技术研究院 深圳 518055)

摘 要 心电信号自动识别技术是信号处理及模式识别领域的热点研究课题, 是在现代医学健康领域中进一步应用心电诊断技术的基础。文章围绕心电信号自动识别技术的发展历史、研究现状、关键技术及存在问题展开了讨论, 并对以后的研究趋势做出展望。

关键词 心电信号自动分析; 数字滤波; QRS 波群; 小波变换

中图分类号 Q 334 **文献标志码** A

Present Status and Prospect of ECG Signal Automatic Detection

MA Ruiqing CAI Yunpeng

(Shenzhen Institutes of Advanced Technology, Chinese Academy of Sciences, Shenzhen 518055, China)

Abstract The research of ECG(Electrocardiograph) automated detection and diagnosis has been a hot topic in the signal processing and pattern recognition fields and a basis of adopting ECG. In this paper, the history and current state of ECG signal automatic detection were reviewed and the key technologies as well as existing problems were discussed. Finally, a prospect is given on the future trends of the technology.

Keywords ECG signal automatic detection; digital filtering; QRS complex; wavelet transform

1 引 言

心脏疾病是威胁人类健康的主要疾病之一, 长期以来, 医学界乃至学术界将这一领域作为重要课题进行研究。心电图(Electrocardiograph, ECG)是心肌发生激动时产生的微弱电流所引起的人体体表的电位变化, 具有频率、振幅、相位和时间差等要素, 蕴含着反映心脏节律及其电传导的丰富生理和病理信息, 为诊断心脏疾病和功能障碍变化提供了重要的参考价值。正常人的心电图

由 P 波、QRS 波群、T 波和 U 波、P-R 段、S-T 段、P-R 间期和 Q-T 间期组成(如图 1 所示)。由于心电信号能从不同方面反映心脏的工作状态, 在一定程度上可以客观反映心脏的生理状况, 因此正确分析心电信号并提取心电信号的特征参数对心脏疾病的诊断和治疗具有重要的医学意义^[1]。

传统的心电信号识别方法通常是医生凭借临床经验对心电图进行分析来诊断疾病, 有时候需要阅读长达数小时的心电数据, 很容易造成医生的视觉疲劳, 再加上肉眼观察的精度易存在偏差, 造成误诊的可能性很大。另一方面, 由于病

收稿日期: 2014-3-31

作者简介: 马瑞青, 研究助理, 研究方向为面向中风病人的数据挖掘; 蔡云鹏(通讯作者), 博士, 教授, 硕士研究生导师, 研究方向为生物信息学、机器学习和进化计算, E-mail: yp.cai@siat.ac.cn。

态心电图种类繁多、变异极大, 同种病理不同患者的心电图, 甚至同一患者不同时刻的心电图都存在较大差异, 通常需要医生具有丰富的临床经验和专业知识才能做出正确判断^[2]。但不管哪种方法都需要医生给病人做出诊断结果, 这就导致了不同程度的延迟并可能耽误治疗, 因此就有了计算机辅助心电信号自动识别和诊断系统的出现。

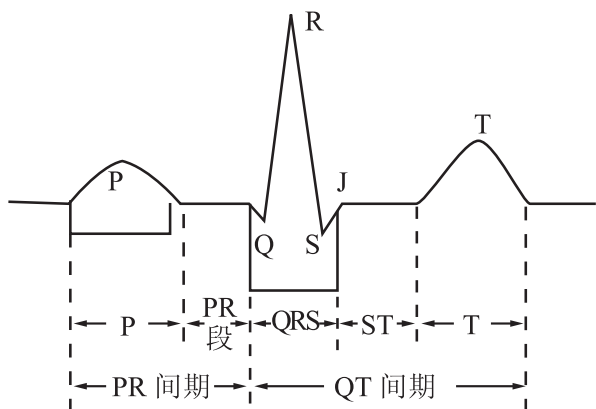


图1 正常心电波形

Fig. 1. Normal ECG signal

心电信号的自动识别和诊断是目前医学领域的研究热点之一, 它将不仅减少医师的工作量, 还会提高诊断速度, 将有利于促进医疗事业的发展和提高人类健康水平。心电信号的自动分析研究始于二十世纪五十年代, 1957 年美国的 Pipberger 采用模拟电路开发出第一个区分正常和异常心电图的程序, 该程序能识别出每一个周期波形, 但不能自动识别出 P、QRS 和 T 波的起始点。随后, 1961 年 Pipberger 等^[3]采用 Frank 导联体系, 研制出了第一个导联心电图分析程序。1962 年 Caceres 等相继开发了常规 12 导联心电图分析程序, 该程序可利用所测的 ECG 参数进行波形模式识别。最初的心电自动分析只是进行简单的波形识别, 1966 年 Staples 等提出了采用分支数逻辑进行心电图的自动识别, 由此开启了心电图自动诊断及其相关算法的研究。从七十年代开始, 一些心电自动分析的程序开始在临床中应用。八十年代随着微处理器技术的发展, 心电

自动识别技术在信号处理速度和精度上有了较大的提高, 并促进了心电图机的发展。九十年代开始, 心电自动分析算法逐渐成为医学领域研究的热点, 随着数字信号处理技术的发展, 很多经典老算法的精度已不能满足研究的需要, 因此研究人员开始探索将新的应用于心电信号分析的算法, 其中最具有代表性的是小波分析。目前, 已有的心电自动分析系统的诊断精度还不能与最好的心电专家的诊断精度相比^[4]。强大的心电信号自动分析系统可以准确、快速地判别出心律失常心电图, 但它诊断的多样化和精确化还有很大的提升空间。

2 心电信号自动识别技术的研究现状

心电信号自动识别是指在采集到 ECG 信号的基础上, 通过对其处理提取心脏的波形信息和特征参数来获得心脏工作状态的相关信息, 然后利用这些信息和特征参数分析、判断心电信号的类型及所对应的疾病类型或健康水平, 进而可以预测心脏状态和健康状况。

2.1 心电信号自动识别的流程

心电信号自动识别的内容大致包括四个方面: (1) 读取心电信号; (2) 心电信号的预处理; (3) 心电算法的确定和特征点的提取; (4) 波形分类及诊断结果。其流程图见图 2 所示。

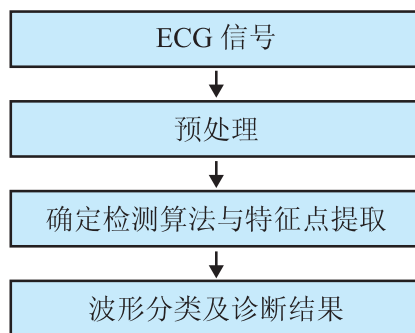


图2 心电信号自动分析流程图

Fig. 2. Flow chart of ECG signal automatic analysis

2.2 心电信号预处理技术的研究

心电信号预处理技术主要研究的是心电信号中的噪声干扰问题。常规心电信号是毫伏级别,频率在 0.05~100 Hz,属于低频、低幅信号。心电信号预处理的目的在于消除原始信号中的噪声干扰,以有利于进行心电信号特征的提取。

从体表测得的 ECG 信号,所受到的干扰主要有六种:工频干扰、基线漂移、肌电干扰、电极接触噪声、运动干扰和放大电路内部噪声等^[5,6]。为了增强心电信号的有用成分,除了提高心电记录仪的硬件抗干扰能力外,还必须对心电信号进行数字滤波。心电信号的预处理技术包括了各种经典的数字滤波方法及各种现代信号处理方法^[7,8],概括起来可以分为三大类:经典的数字滤波器方法、自适应滤波器方法和以小波变换、数学形态学及神经网络为代表的现代高新技术滤波器方法。

目前,对高频噪声、工频干扰和基线漂移的滤波方法研究得较多,技术也比较成熟。但对于由设备引起的心电伪迹和人为移动引起的剧烈抖动,尚没有能完全有效消除的方法,这类噪声相对较少,而且研究实验主要分析信号好的 ECG 信号,因此未作为研究的重点。

2.3 心电信号自动识别算法的研究

心电信号自动识别主要是对心电波形和特征参数进行提取,以此来分析疾病的类型。

在心电周期信号中,QRS 波群的幅度最大,特征最为明显,因此对 QRS 波群的检测是 ECG 检测的重点。同时在 QRS 波群的检测中,R 波的检测又是关键。一般来说,心电信号的自动分析都是在定位了 R 波之后,再分析 ECG 的其他细节。目前,QRS 波群检测的方法主要有时域分析法^[9]、模版匹配法^[10]、神经网络法^[11]和小波变换法^[12,13]等。之前的 QRS 检测以时域分析最为常见,其思想是对滤波后的心电信号经过若干变换后提高 QRS 波群的成分,进而采用阈值方法

进行判断^[14],这主要是因为 R 波的幅度和斜率较大。由于高大的 P 波、T 波的存在,当 QRS 波群幅度很小时,如果阈值设置得过高或过低,就会造成漏检或误检。目前,较好的波形检测算法一般采用可变阈值以提高检测准确率。Pan 等^[15]首先采用带通处理的方法抑制基线漂移和高频干扰,然后对信号差分,并对差分信号进行平方运算和移动窗口积分,若差分信号和积分信号同时各自满足一定的阈值条件,则认为检测到一个 QRS 波群。

近年来,随着小波分析、神经网络、分形理论及非线性滤波技术为代表的现代信号处理方法的发展和完善,利用这些信号处理技术进行 QRS 波群的检测已成为新的研究热点。Sahambi 等^[16,17]采用高斯函数的一阶导数作为小波基,然后基于小波变换模极大值的原理,检测了 QRS 波群、P 波和 T 波的起止点位置。该算法能很好的检测叠加有模拟基线漂移和高频噪声的心电信号,而且还检测到了 QRS 宽度、P 波、T 波宽度、P-R 间期、S-T 段和 Q-T 间期等。丁哨卫等^[18]将小波分析与自适应匹配滤波技术相结合实现 QRS 波群的检测,有效地提高了检测准确率和检测速度。

除了 QRS 波群的检测外,还有 QRS 波群起点及终点、P 波、T 波起点及终点和间期计算等的检测。由于 P 波和 T 波的幅度小、斜率特征不明显,因此对 P 波、T 波的准确检测还有待进一步完善,这也是 ECG 波形检测的难点。已存在的 P 波、T 波检测算法大致分为两类:一是窗口搜索法,即首先找到 R 波的位置,然后以 R 波为主,在其前和其后的某个区域内分别确定一个搜索窗口,在这个窗口内通过特定的检测方法检测 P 波、T 波;二是对消法,即对消掉占有较大能量成分的 QRS 波群和其他噪声成分,以突出 P 波和 T 波,便于特征提取。Sasikala 等^[19]对小波变换的尺度的研究中,在确定的 R 波位置前后的

一定窗口范围内进行 P 波和 T 波的检测, 其本质类似于基于差分的斜率方法, 但对于 P 波、T 波低平及双向等的情况容易出错。在 Senhadji 等^[20]研究中, 采用 LMS 自适应滤波器检测 P 波, 首先是对先前检测到的 QRS-T 波群进行自适应抵消, 然后在剩余的信号中检测 P 波, 这种方法能很好地检测到 P 波, 且对 QRS 波群形态变化比较敏感, 同时 P 波的检测也主要依赖于 QRS 波群的定位。

目前, 与 QRS 波群的检测相比, P 波和 T 波的检测方法还不够成熟, 造成这方面的原因不仅与其检测算法的本身有关, 还跟研究的基础相关。如目前的 MIT-BIH 数据库仅对 R 波及其类型进行了标注, 而对 P 波和 T 波的检测暂时缺乏统一的定量评测数据库。

3 心电信号自动识别存在的问题

目前, 心电自动识别的方法仍处在研究阶段, 很多方面不够完善, 故未能达到临床应用的要求。在目前的心电数据分析中, 只有少量的心电是由计算机自动分析完成的。如美国每年约有 800 万例应用计算机自动分析, 仅占全部心电数据分析的 10%; 在日本, 每年约有 100 万例, 仅占全部心电数据分析的 5%^[21]; 通过中国医疗在线网可知: 国内外产品, 例如通用电气医疗公司、西门子医疗公司, 还有国内领先的迈瑞公司提供的心电监护仪, 功能多数是心电信号显示、常用参数显示、曲线回放、对异常波形进行报警及显示 S-T 段趋势图等。医院较多采用心电图检查和监护, 且仅仅是供医生观察心电图是否正常。

造成计算机自动分析较少在临床应用的原因在于波形的测量与识别的困难。目前波形的检测算法主要是 QRS 波群的检测, 而对 P 波、T 波、各个波段起止点以及 S-T 段的检测还没有很好的

方法, 相关的参考文献也很少。因为心房的除极和复极不像心室那样明显, 所对应的波形圆钝, 幅度较弱, 不容易被检测出来。另外心房肥大也会导致 P 波双向、高耸等的情况, 但对于 QRS 波群可能没有影响。如果不能有效地检测出 P 波, 就不能很好的确定 P 波形态, 进而不能对病情做出准确的诊断。山东大学的楚阳^[22]基于小波多分辨率分析的理论, 在不同尺度上选取模极大值, 进行相应的处理, 能够检测出 R 波、QRS 波群、P 波和 T 波, 但对 S 波终点和 T 波起点的检测不够准确。若 QRS 波群呈现多个 S 波, 或者 T 波形态有直立、倒置、低平或双向等情况, 都会影响 S-T 段的正确判断。之前对 S-T 段的检测, 采用比较成熟的 J+X 检测法, 但是其精确度不是很高。朱侃杰^[23]对楚阳的方法进行了改进, 他将每个导联中所有的心拍进行叠加后获得 S-T 段, 在改进的过程中, 他发现叠加后心拍的起始点和终点很少出现重合。赵传敏^[24]在对心电信号的分类中, 先利用非负矩阵分解实现心电信号的降维, 然后用支持向量机^[25]对四种信号正常窦性信号、右束支阻滞、室性早搏和起搏信号进行分类, 提高了分类的正确率, 但是支持向量机在分类上只能区分出这四种心电信号, 还需要对其改进, 以便分类出更多的信号种类。通常研究的心电信号的特征参数 R-R 间期、T 波宽度的个性比较强, 没有统一标准, 这些特征参数的正常值与异常值的区分阈值会随着被测者的不同而有所不同, 这样就造成的参数提取的难度。比如 R-R 间期的正常范围在 0.63~1.5 s, 如果被测者剧烈运动后, 则可能超出正常范围。

另外心电信号的采集存在很多干扰、噪声和伪迹等, 这种情况加大了特征参数的提取难度, 同时也降低了波形特征的准确率。目前的心电信号自动分析技术只能识别出有限的、非常典型的几种心律失常类型的心电, 且准确率不是很高, 离临床医生的诊断要求还有一定的距离, 所以没

有得到广泛的应用。

4 结束语

心电图对人类健康具有十分重要的参考价值,对心电信号自动识别技术的研究已成为热点课题之一。心电信号已有几十年的应用历史,心电工作站也一直处在不断的研究发展中。随着各种心电信号算法的大量涌现,心电自动分析系统在性能上得到了很大提高,心电综合检测产品的性能、功能也日趋完善。相信随着技术的发展和算法的成熟,心电信号自动识别能为心脏病,甚至其他疾病的诊断和治疗做出更卓越的贡献。

参 考 文 献

- [1] 黄宛. 临床心电图学(第五版) [M]. 北京: 人民卫生出版社, 1998: 6-10.
- [2] 高彩红. 心电信号临床信息的自动识别研究 [D]. 镇江: 江苏大学, 2010.
- [3] 张作生, 李江安, 李新育. 心电自动测量与分析 [J]. 上海生物医学工程, 1996, 17(1): 3-6.
- [4] 董明. 心电图自动分析的新趋势 [J]. 国外医学: 生物医学工程分册, 1998, 21(1): 121-125.
- [5] Escalona QJ, Mitchell RH, Balderson DE, et al. Fast and reliable QRS alignment technique for high-frequency analysis of signal-averaged ECG [J]. Medical and Biological Engineering and Computing, 1993, 31(Suppl.): S137-S146.
- [6] Jané R, Rix H, Caminal P, et al. Alignment methods for averaging of high-resolution cardiac signals: a comparative study of performance [J]. IEEE Transactions on Biomedical Engineering, 1991, 38(6): 571-579.
- [7] 皇甫堪, 陈建文, 楼生强. 现代数字信号处理 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2003.
- [8] 杨福生, 吕扬生. 生物医学信号的处理和识别 [M]. 天津: 天津科技翻译出版公司, 1997.
- [9] Farrell RM, Xue JQ, Young BJ. Enhanced rhythm analysis for resting ECG using spectral and time-domain techniques [C] // Computers in Cardiology, 2003, 30: 733-736.
- [10] Sun Y, Chan KL, Krishnan SM. Characteristic wave detection in ECG signal using morphological transform [J]. BMC Cardiovascular Disorders, 2005, 5(1): 7-19.
- [11] Shyu LY, Wu YH, Hu W. Using wavelet transform and fuzzy neural network for VPC detection from the Holter ECG [J]. IEEE Transactions on Biomedical Engineering, 2004, 51(7): 1269-1273.
- [12] Kohler BU, Henning C, Orglmeister R. The principles of software QRS detection [J]. IEEE Engineering in Medicine and Biology Magazine, 2002, 21(1): 42-57.
- [13] Addison PS. Wavelet transforms and the ECG: a review [J]. Physiological Measurement, 2005, 26(5): 155-199.
- [14] Chen HC, Chen SW. A moving average based filtering system with its application to real-time QRS detection [C] // IEEE Computers in Cardiology, 2003, 30: 585-588.
- [15] Pan JP, Tompkins WJ. A real-time QRS detection algorithm [J]. IEEE Transactions on Biomedical Engineering, 1985, 32(3): 230-236.
- [16] Sahambi JS, Tandon SN, Bhatt PK. Using wavelet transforms for ECG characterization: an on-line digital signal processing system [J]. IEEE Engineering in Medicine and Biology Magazine, 1997, 16(1): 77-83.
- [17] Sahambi JS, Tandon SN, Bhatt RK. Quantitative analysis of errors due to power-line interference and base-line drift in detection of onsets and offsets in ECG using wavelets [J]. Medical and Biological Engineering and Computing, 1997, 35(6): 747-751.
- [18] 丁峭卫, 张作生. 基于自适应小波变换的 QRS 波检测算法 [J]. 中国科学技术大学学报, 1998, 28(5): 580-586.
- [19] Sasikala P, Wahidabanu RSD. Robust R peak and QRS detection in electrocardiogram using wavelet transform [J]. International Journal of Advanced Computer Science and Applications, 2010, 1(6): 48-53.
- [20] Senhadji L, Wang F, Hernandez AI. Wavelets extrema representation for QRS-T cancellation and P wave detection [C] // IEEE Computers in Cardiology, 2002: 37-40.
- [21] 肖咏梅, 陈杭. 心电自动分析技术 [J]. 生物医学工程学杂志, 2003, 17(3): 339-342.
- [22] 楚阳. ECG 信号特征检测和自动分析的研究 [D]. 济南: 山东大学, 2010.
- [23] 朱侃杰. 心电图特征参数获取技术及其应用 [D]. 上海: 华东师范大学, 2011.
- [24] 赵传敏. 基于多特征选择的心电信号自动分类算法研究 [D]. 镇江: 苏州大学, 2012.
- [25] Zhu JC, Shen M, Zhu KJ. An electrocardiogram classification method based on cascade support vector machine [C] // 2011 4th International Conference on Biomedical Engineering and Informatics, 2011: 1640-1644.