

基于脉搏波的动脉硬化检测及其远程实现

成志霞, 刘杰

(北京交通大学计算机与信息技术学院, 北京 100044)

摘要: 在全球范围内, 动脉硬化性心血管疾病已成为危害人类健康并导致死亡的最严重疾病之一, 严重威胁到人类的生命健康。脉搏波中包含大量的人体生理和病理信息, 通过深入了解脉搏波产生机理, 分析脉搏波波形特征, 提取出相关表征动脉硬化的心血管参数, 可以在很大程度上实现对心血管疾病的早期预防和判断, 降低心血管疾病的发病率。通过设计动脉硬化远程监测系统, 实现对脉搏波的远程传输和分析, 使得用户可以随时检测动脉硬化相关参数, 并查阅历史检测结果, 极大地方便了用户需要。本研究具有较高的应用价值和临床意义。

关键词: 生物医学工程学; 心血管参数; 脉搏波; 动脉硬化; 远程

中图分类号: R318 文献标识码: A 文章编号: 1674-2850(2015)11-1111-06

Detection of arteriosclerosis based on pulse wave and the realization of remote

CHENG Zhixia, LIU Jie

(School of Computer Science and Information Technology, Beijing Jiaotong University, Beijing 100044, China)

Abstract: On a global scale, cardiovascular disease has become a hazard to human health and causes one of the most serious diseases of death, seriously threatening human life and health. Pulse wave contains numerous physiological and pathological information. Deep understanding of the mechanism of pulse wave, analysis of the characteristics of the wave shape and extraction of the cardiovascular parameters associated with arteriosclerosis can realize preliminary diagnosis and precaution of cardiovascular disease and reduce the morbidity of it to a large extent. In this paper, by designing the remote monitoring system of arteriosclerosis, through the data transmission and the analysis of pulse signals, a great deal of convenience is provided to the patients by the service of extracting the cardiovascular parameters associated with arteriosclerosis anytime and referring to the history of the testing results. This study has a high application value and clinical significance.

Key words: biomedical engineering; cardiovascular parameters; pulse wave; arteriosclerosis; remote

0 引言

2014年8月8日, 国家心血管病中心在京发布《中国心血管病报告 2013》^[1], 该报告显示, 2012年我国心血管病死亡率为 255:100 000. 在城市居民疾病死亡构成中占 41.1%, 在农村占 38.7%, 平均每 5 例死亡中就有 2 例死于心血管病, 死亡率居各种疾病之首。心血管病已成为我国面临的重大公共卫生问题。

动脉硬化是众多心血管疾病发生的生理和病理基础^[2], 是引起心血管疾病的主要原因, 尽管慢性心

作者简介: 成志霞 (1988—), 女, 硕士研究生, 主要研究方向: 医学信号处理

通信联系人: 刘杰, 教授, 主要研究方向: 医学图像处理 and 医学信号处理. E-mail: 1497969617@qq.com

血管疾病在发病早期没有明显症状，但人体动脉血管的血管阻力、血管弹性等一系列反映血管功能的生理参数已经悄然发生改变，若能及早发现这些生理特性的变化，预警疾病发生的危险程度，就可以为早期医学干预有效预防心血管疾病提供可靠依据，从而降低心血管疾病的发病率和死亡率^[3]。

大量医学研究和临床统计显示，心血管血流参数的变化，首先反应在脉搏波的波形中^[4]，这是因为脉搏波由心脏开始向动脉系统传播时，不仅要受到心脏本身的影响，同时也会受到流经各级动脉及分支中各种生理因素的影响，使动脉波中包含有极丰富的心血管系统生理病理信息，其波形特征变化是评价人体心血管系统生理病理状态的重要依据。

1 脉搏波基础理论

1.1 脉搏波产生机理

脉搏波是心脏的搏动（振动）沿动脉血管和血流向外周传播而形成的。心脏是一个持续不断的振源，心室收缩时，血液快速射入主动脉致其基部压力骤增而膨胀；心室暂未射血时，主动脉基部压力下降，管壁弹性回缩，则恢复至原来位置。如此，主动脉管壁就因心室的舒缩而有节律地受迫振动。这种振动能沿弹性血管向末梢传播而形成脉搏波（横波）^[5]。在传播过程中，必然要受到血管壁弹性、血管周围阻力、血液黏度等因素的影响，从而使脉搏波形发生变化。

1.2 脉搏波波形特征

一个完整的脉搏波波形有 A, B, C, D 4 个重要特征点^[6]，其包含升支和降支。如图 1 所示，A 称作主波，B 称作潮波，C 称作重搏波峰，D 称作重搏波谷，OA 是主波上升支，OO' 是脉搏波周期，这个脉搏波曲线的变化体现了人体的生理病理变化。

1.2.1 OA 段波形简介

脉搏波形的上升支，是由于在动脉壁忽然扩展的时候，左心室射血，动脉血压快速升高，形成管壁扩张^[7]。O 点是心脏射血期的开始点，反映收缩期末血管内的压力和容积，A 点是主动脉压力最高点，反映动脉内压力与容积的最大值。心输出量、射血速度和阻力是影响上升支的幅度和斜率的主要因素，一般用脉搏波波形上升的斜率和幅度表示，心输出量较多、射血速度较快、主动脉弹性越小、阻力越小，则斜率较大，波幅较高；反之，则斜率较小，波幅较低。

1.2.2 AD 段波形简介

下降支的前段，是由于在心室射血的后面阶段，射血速度开始降低，造成主动脉流向周围的血量大于流进主动脉的血量，大动脉由扩张变成回缩，动脉血压逐步变低这个过程造成的^[8]。B 点是左心室射血停止点，是反射波的波峰点，也叫潮波波峰，反映动脉血管的张力、顺应性和外周阻力的大小。D 点是潮波波谷点，即心脏收缩与舒张的分界点，主要反映外周阻力的大小。

1.2.3 DO' 段波形简介

下降支的后段，也叫重搏波，是由于心室扩张，动脉血压不断降低，主动脉内血液向心室方向反流形成的^[9]。反映主动脉的功能状况，血管弹性和血液流动状态。

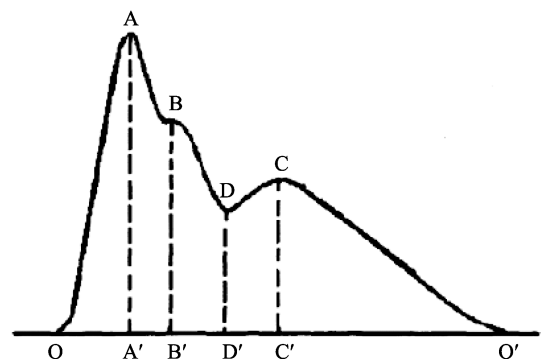


图 1 完整脉搏波波形
Fig. 1 Complete pulse waveform

1.3 动脉硬化对脉搏波的影响

大量临床研究证明, 人的脉搏波的波形特征随着一些生理因素, 例如血液黏度、血管弹性、血管周围阻力的变化而呈规律性变化^[10], 如图 2 所示。

正常人: 主波高且窄, 重搏波比潮波明显, 动脉弹性较好, 血管周围阻力比较低。

轻度动脉硬化: 在主波后潮波不断升高, 重搏波变得不太明显, 动脉弹性适中, 血管周围阻力也适中。

中度动脉硬化: 在主波后潮波变得明显, 重搏波和主波融合, 重搏波变得不太明显, 动脉弹性比较差, 血管外周阻力也比较差。

重度动脉硬化: 主波和潮波有不同程度的融合, 重搏波和潮波也有不同程度的融合, 动脉弹性表现很差, 血管外周阻力也很差。

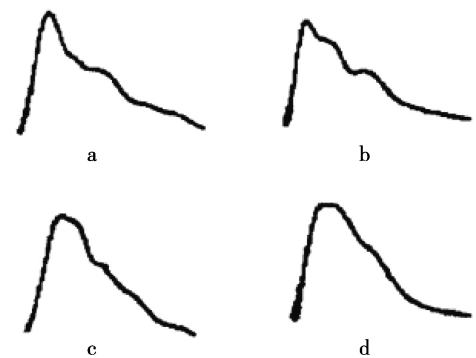


图 2 人体动脉硬化不同程度的典型脉搏波

Fig. 2 Typical human arteriosclerosis pulse wave in different degrees

a—正常人; b—轻度动脉硬化; c—中度动脉硬化; d—重度动脉硬化

a-Normal; b-Mild atherosclerosis; c-Moderate atherosclerosis; d-Severe atherosclerosis

2 动脉硬化相关参数及其计算

2.1 表征动脉硬化的相关参数介绍

1) 每搏输出量 (SV): 指一次心搏, 一侧心室射出的血量, 简称搏出量, 是衡量心功能的重要指标。影响搏出量的基本因素有心肌收缩性, 心肌收缩的协调、顺应性, 心率, 动脉血压等。

2) 外周阻力 (TPR): 指左心室每搏输出的血液通过外周血管网络到达中心静脉压力等于 0 处所遇到阻力的总和, 包括主动脉阻力、肌性动脉阻力、毛细血管网和静脉阻力相互串连的总阻力值。其反映体循环血管各部阻力的综合, 具有很高的临床意义。外周阻力的升高是外周血管功能和结构改变的结果。血压增高, 外周血管阻力随之增高, 血压长期持续增高, 会促进血管粥样硬化病变的发生和发展。

3) 动脉顺应性 (AC): 动脉内血液压力改变一个单位时所对应动脉体积的相应变化量^[11]。动脉顺应性下降的动脉壁改变往往早于临床症状的出现, 通过对动脉顺应性的检测, 可以早期发现动脉硬化, 并对其程度进行评估, 有利于减少心血管病的发生率。

4) 血液黏性 (V): 血液流变学的基本指标, 是指血液分子间的内摩擦力, 血液黏度越高, 越易引发心脑血管疾病。

2.2 表征动脉硬化的相关参数计算方法

2.2.1 脉搏波波形特征量 K 值的提取

由脉搏波产生和传播的机理可知, 随着血管阻力和动脉弹性等生理变化, 脉搏波波形特征变化首先反映在脉搏波波形面积的变化上, 为了能以一个简单的特征量来描述上述的变化, 北京工业大学罗志昌教授等^[12]提出了一个以脉图面积变化为基础的脉搏波波形 K 值, 其定义为

$$K = (P_m - P_d) / (P_s - P_d), \quad (1)$$

其中,

$$P_m = 1/T \times \int_0^T P(t) dt, \quad (2)$$

其中, P_m 为平均动脉压, 等于一个心动周期中脉搏压力 $P(t)$ 的平均值; P_s 和 P_d 分别为收缩压和舒张压, 具体如图 3 所示。

由此可知, K 值的大小取决于脉搏波的周期波形图面积, 是一个无量纲的值。不同生理病理状态下脉搏波波形和面积都会有很大变化, 这个变化可用 K 值来表示。目前的研究在计算 K 值时, 多采用周期脉搏波形的峰值、谷值和幅值的平均值来代替定义中的 P_s , P_d 和 P_m 的数值^[13], 这里 P_m 的计算采用的是积分形式, 而非简单的 P_s , P_d 的平均。具体计算方法为

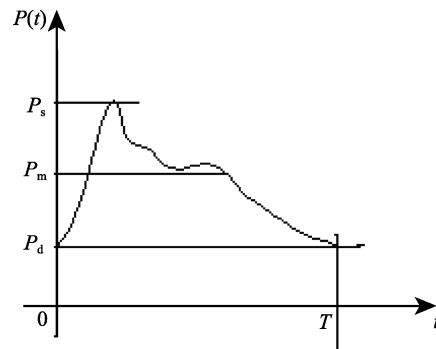


图3 K 值的定义
Fig. 3 Definition of K value

1) 将采集程序传入的脉搏波信号序列取全长, 并将 20%~80% 部分 (时间) 的序列分离出来, 防止不必要的干扰;

2) 对分离出的序列遍历, 找出最大值和最小值。具体来说, 某个采样点 \geq 前一个点的值且 \geq 后一个点的值, 则为最大值的点, 类似方法获得最小值所在的点;

3) 将所有最大值所在的点, 去掉首尾各一个之后遍历, 同时比对最小点序列中最近相邻的前后点, 确定每一个周期的起止;

4) 根据起止点、最大值点, 得到该周期信号的 P_s , P_d , $\text{Sigma}(P)$, 即离散化的积分值, 再除以采样点时间宽度, 即得 P_m 。

由脉搏波波图面积提取的特征量 K 值, 能从宏观上描述出脉搏波波形变化的平均特征, 能体现人体心血管系统中最为重要的一些生理参数如血管外周阻力、血管壁弹性和血液黏性等生理因素的变化, 并且可以用 K 值进行量化, 这有着重要的医学应用价值^[14]。由于特征信息减少到只有一个特征量, 简单易记, 生理意义明确, 且变化很有规律, 临床医生易于接受, 因而可作为心血管临床检查的一个重要生理指标。特征量 K 值检测方便, 检测结果的重复性和稳定性较好, 这为临床上心血管血流参数的无损检测提供了一个简单易行的方法。

2.2.2 基于 K 值计算相关心血管参数

通过脉搏特征 K 计算的部分心血管参数^[15]如下:

1) 每搏输出量 (SV), 单位为 mL.

$$SV = 0.283 / K^2 \times T \times (P_s - P_d), \quad (3)$$

其中, T 为脉搏波周期; P_s 为收缩压; P_d 为舒张压。

2) 每分输出量 (CO), 1 min 内左心室输出的血量, 单位为 mL.

$$CO = SV \times 60 / T. \quad (4)$$

3) 外周阻力 (TPR), 单位为 Pa·s/mL.

$$TPR = P_m / CO. \quad (5)$$

4) 动脉顺应性 (AC), 单位为 mL/mmHg.

$$AC = SV / (P_s - P_d). \quad (6)$$

5) 血液黏性 (V), 单位为 Pa·s.

$$V = K \times 11.43. \quad (7)$$

3 远程实现

由于动脉硬化的发病主体主要是中老年人, 且多行动不便, 因此, 实时简便快捷的检测方法更符合

病人需要^[16]。基于此, 这里提出一个实现动脉硬化远程检测的方案。主要流程如图 4 所示。

1) 采集端: 使用 C#开发多线程程序, 采集设备将信号发送到计算机, 先保存在内存链表中, 再传递至窗口主线程实现波形绘制, 当点击上传数据时, 程序根据读卡器接口程序段读取用户身份信息连同采集脉搏信息, 与采样结果一起封装上传。传输过程基于 TCP/IP 协议。

2) 服务端: 为耦联了网页服务端的 Java 应用程序, 主要完成对采集程序上传数据的读取、解析、保存及后处理。Java 服务端开启指定端口, 不断监听来自网络的基于

TCP/IP 协议的连接请求。当请求被识别后连接成功创建, 服务端程序不断读取采集程序上传的信号数据直到全部读取完毕。随后 Java 服务端将数据保存。保存完成后, 分析程序对数值序列进行自动分析。在切分出每一个单独的脉搏波后, 根据设备的采样设定时间间隔, 将波形幅值进行积分, 计算基本参数, 并相应的计算其他状态结果。

3) 客户端: 接收来自指定服务端的数据, 并保存、显示供用户随时查阅。

由此可知, 用户只需采集脉搏信号, 点击上传, 便可随时查询结果, 十分方便快捷。

4 结论

随着经济水平的发展、饮食结构的改变、生活节奏的加快、生活压力的增大以及人口迅速老龄化, 心血管病已成为我国面临的重大公共卫生问题, 防治工作刻不容缓^[17]。这里较详细地阐述了脉搏波的产生机制及脉搏波与动脉硬化的关系, 并提出一个切实可行的方案, 实现动脉硬化的远程监测。下一步将集中采集年长的以及有心血管疾病的受试者, 并根据计算的参数对动脉硬化程度进行分级, 使本研究成果更具实用价值。

[参考文献] (References)

- [1] 中国心血管病报告 2013[R]. 北京: 国家心血管病中心, 2013.
Report on cardiovascular diseases in China[R]. Beijing: National Center for Cardiovascular Diseases, China, 2013. (in Chinese)
- [2] 崔公让. 动脉硬化闭塞症[M]. 北京: 人民军医出版社, 2012.
CUI G R. Arteriosclerosis occlusion[M]. Beijing: People's Military Medical Press, 2012. (in Chinese)
- [3] 赵学玲. 基于脉搏波的无创心血管检测技术若干关键问题的研究[D]. 天津: 天津大学, 2009.
ZHAO X L. A study on some key problems of noninvasive cardiovascular detection technology based on pulse wave[D]. Tianjin: Tianjin University, 2009. (in Chinese)
- [4] MITCHELL G F, LACOUREIERE Y, OUELLET J P, et al. Determinants of elevated pulse pressure in middle-aged and older subjects with uncomplicated systolic hypertension: the role of proximal aortic diameter and the aortic pressure-flow relationship[J]. *Circulation*, 2003, 108(13): 1592-1598.
- [5] 陈春晓, 刘建业, 王惠南. 无创心血管功能测试诊断仪的研究[J]. 生物医学工程学杂志, 2003, 20 (1): 125-128.
CHEN C X, LIU J Y, WANG H N. The research of noninvasive cardiovascular diagnosis and test instrument[J]. *Journal of Biomedical Engineering*, 2003, 20(1): 125-128. (in Chinese)
- [6] URQUIZA S, DESIMONE H, CONI M. Prediction of human arterial pulse wave shape changes in aging and hypertension[C]//

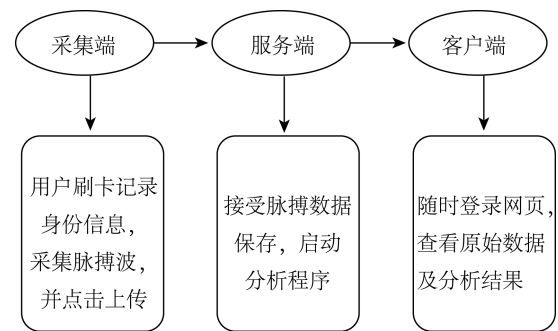


图 4 远程监测动脉硬化流程

Fig. 4 Process of remote monitoring of arteriosclerosis

- Proceedings of the 3rd International Conference on Computer Simulations in Biomedicine. Southampton, UK: WIT Press, 1995: 131-135.
- [7] 张大祥. 脉搏图象分析[M]. 北京: 高等教育出版社, 1981.
ZHANG D X. Pulse image analysis[M]. Beijing: Higher Education Press, 1981. (in Chinese)
- [8] WILKINSON I B, HALL I R, MacCALLUM H, et al. Pulse-wave analysis: clinical evaluation of a noninvasive, widely applicable method for assessing endothelial function[J]. *Journal of the American Heart Association*, 2002, 22: 147-152.
- [9] 王培勇, 刘娟. 人体动脉硬化检测系统的研究与设计[J]. *北京生物医学工程*, 2014, 32 (1): 67-82.
WANG P Y, LIU J. Research and design of arteriosclerosis examination system[J]. *Beijing Biomedical Engineering*, 2014, 32(1): 67-82. (in Chinese)
- [10] WANG J J, PARKER K H. Wave propagation in a model of the arterial circulation[J]. *Journal of Biomechanics*, 2004, 37(4): 457-470.
- [11] 刘应新. 基于袖带内脉搏波的动脉顺应性检测[D]. 济南: 山东大学, 2009.
LIU Y X. Arterial compliance testing based on the pulse wave in the cuff[D]. Jinan: Shandong University, 2009. (in Chinese)
- [12] 罗志昌, 张松, 杨文鸣, 等. 脉搏波波形特征信息的研究[J]. *北京工业大学学报*, 1996, 22 (1): 71-79.
LUO Z C, ZHANG S, YANG W M, et al. Research on the information of pulse wave characteristics[J]. *Journal of Beijing University of Technology*, 1996, 22(1): 71-79. (in Chinese)
- [13] 罗志昌. 人体脉搏波波形参数与生理参数间关系的理论和实验研究[J]. *北京工业大学学报*, 1988, 14 (2): 8-34.
LUO Z C. Theoretical and experimental study on the pulse contour parameter of human body and the relationship between physiological parameters[J]. *Journal of Beijing University of Technology*, 1988, 14(2): 8-34. (in Chinese)
- [14] 孙万蓉, 孙肖子. 人体脉搏图信号特征点的自动提取及参数计算[J]. *数据采集与处理*, 1989, 4 (增): 83-84.
SUN W R, SUN X Z. Automatic extraction and parameter calculation of human pulse signal feature points[J]. *Journal of Data Acquisition & Processing*, 1989, 4(Suppl.): 83-84. (in Chinese)
- [15] 张昭朝. 基于 LabVIEW 的多生理参数采集及处理系统研究[D]. 北京: 北京交通大学, 2008.
ZHANG Z C. The study of acquisition and processing system of multiple physiological parameters based on LabVIEW[D]. Beijing: Beijing Jiaotong University, 2008. (in Chinese)
- [16] 危小军, 廖伟, 廖祥中. 心脑血管疾病防治的社区医疗模式初探[J]. *医学与哲学*, 2006, 27 (8): 60-61.
WEI X J, LIAO W, LIAO X Z. Initial exploration on the community medical treatment mode of prevention and cure of the cardiovascular disease and cerebrovascular disease[J]. *Medicine and Philosophy*, 2006, 27(8): 60-61. (in Chinese)
- [17] 李琛, 谢江柳. 高血压病患者心血管功能变化特点的研究[J]. *中国医药*, 2012, 7 (8): 931-933.
LI C, XIE J L. Study of cardiac function in patients with essential hypertension[J]. *China Medicine*, 2012, 7(8): 931-933. (in Chinese)