

引文格式:

邓新平, 郑定昌, 廖尚頔, 等. 年龄对利用脉搏波估计心率和心率变异性的准确性的影响 [J]. 集成技术, 2022, 11(6): 57-66.

Deng XP, Zheng DC, Liao SD, et al. The impact of age on the accuracy of heart rate and heart rate variability estimation using pulse wave [J]. Journal of Integration Technology, 2022, 11(6): 57-66.

年龄对利用脉搏波估计心率和心率变异性的准确性的影响

邓新平¹ 郑定昌² 廖尚頔³ 陈 霏^{3*} 李光林^{1*} 林宛华^{1*}

¹(中国科学院深圳先进技术研究院 深圳 518055)

²(考文垂大学健康与生命科学学院智慧医疗研究中心 考文垂 CV1 2HF)

³(南方科技大学电子与电气工程系 深圳 518055)

摘要 由于测量简便, 脉搏波被广泛用于替代心电计算心率和心率变异性, 但其准确性颇受争议。该文探讨了年龄对利用脉搏波估计心率和心率变异性准确性的影响, 实验招募了 100 名年龄广泛分布在 20~71 岁的健康者, 同步采集静息脉搏波和心电图, 利用脉搏波相邻峰值点的时间间隔序列, 计算受试者的瞬时心率和心率变异性, 并将其与利用心电相邻两个 R 波峰值点计算的心率/心率变异性(金标准)进行对比, 计算利用脉搏波估计心率和心率变异性的误差。实验结果表明, 心率估计误差在 40 岁以下的年轻人中较小(标准差在 0.3 搏/min 左右), 在 40 岁以上的中老年人中较大(标准差在 0.7 搏/min 左右), 时域的心率变异性参数的规律类似。因此, 即使在静息条件下, 利用脉搏波峰值点计算老年人的心率/心率变异性也要谨慎对待。

关键词 脉搏波; 心率; 心率变异性; 脉率; 脉率变异性

中图分类号 R 318 文献标志码 A doi: 10.12146/j.issn.2095-3135.20220701001

The Impact of Age on the Accuracy of Heart Rate and Heart Rate Variability Estimation Using Pulse Wave

DENG Xinping¹ ZHENG Dingchang² LIAO Shangdi³ CHEN Fei^{3*} LI Guanglin^{1*} LIN Wanhua^{1*}

¹(Shenzhen Institute of Advanced Technology, Chinese Academy of Sciences, Shenzhen 518055, China)

²(Research Centre for Intelligent Healthcare, Faculty of Health and Life Sciences, Coventry University, Coventry CV1 2HF, UK)

³(Department of Electrical and Electronic Engineering, Southern University of Science and Technology, Shenzhen 518055, China)

Corresponding Authors: f.chen@sustech.edu.cn; gl.li@siat.ac.cn; wh.lin@siat.ac.cn

收稿日期: 2022-07-01 修回日期: 2022-09-01

基金项目: 国家自然科学基金青年基金项目(61901461)

作者简介: 邓新平, 硕士研究生, 研究方向为生理信号采集与分析; 郑定昌, 教授, 研究方向为医学智能系统与信号处理; 廖尚頔, 硕士研究生, 研究方向为生理信号采集与分析; 陈霏(通讯作者), 教授, 研究方向为医学信号处理, E-mail: fchen@sustech.edu.cn; 李光林(通讯作者), 研究员, 研究方向为医学智能系统与信号处理, E-mail: gl.li@siat.ac.cn; 林宛华(通讯作者), 副研究员, 研究方向为医学智能系统与信号处理, E-mail: wh.lin@siat.ac.cn。

Abstract Due to the ease of measurement, pulse wave has been widely used as a substitute of electrocardiogram to calculate heart rate and heart rate variability in the wearable medical field. However, its accuracy is controversial. To explore the impact of age on the accuracy of heart rate and heart rate variability estimation using pulse wave, 100 healthy people with a wide age distribution at 20~71 were recruited. The resting pulse wave and electrocardiogram were collected synchronously, the instantaneous heart rate and heart rate variability were calculated using the time interval sequence of adjacent peak points of the pulse wave, and were compared with those calculated from the adjacent R wave peak points of the electrocardiogram (gold standard), the error in estimating heart rate and heart rate variability using pulse wave was calculated. Results showed that the estimation error of heart rate was smaller in young people under 40 ages (with standard deviation of about 0.3 bpm), and slightly larger in middle-aged and elderly people over 40 years old (with standard deviation of about 0.7 bpm). The time domain heart rate variability parameters showed a similar pattern. This study suggests that the use of pulse wave peaks to calculate heart rate/heart rate variability in elderly people should be treated with caution even under resting conditions.

Keywords pulse wave; heart rate; heart rate variability; pulse rate; pulse rate variability

Funding This work is supported by National Natural Science Foundation of China Youth Foundation Project (61901461)

Ethical Statement The study received ethical permission from the Faculty Research Ethics Panel at Anglia Ruskin University (FMSFREP/17/18 205), and all subjects gave their written informed consent

1 引 言

心率和心率变异性(连续心脏跳动时间间隔的变化),是自主神经系统的一种无创动态指标,能够反映心脏自主神经系统、压力状态等信息,可进一步应用于心律失常识别、心理状态评估、疲劳程度评估等,是心血管死亡的独立危险因素,具有广泛的临床应用前景。在临床上,通过心电相邻两个 R 波峰值点的时间差来表示心跳节拍间隔,用以计算瞬时心率和心率变异性,但心电的检测至少需要 3 个电极。而脉搏波的测量更为简便,被广泛应用于手表、手机、耳机、眼镜等可穿戴设备中——通过光电、压力等传感器在外周浅表血管检测血液容积或血管压力变化,然后利用各种微型传感器或新型柔性传感器获取数据。一般地,每个心搏在外周血管都有一个对应的脉搏,因此,在可穿戴和远程医疗领域,脉搏波被

广泛用于替代心电计算心率和心率变异性。

然而,脉搏的节律与心跳的节律是否完全匹配,能否用脉搏波代替心电计算心率/心率变异性颇受争议。相关学者调研了不同场景下,利用脉搏波估计心率/心率变异性的准确性。有研究认为,脉搏波心率变异性并不总是心电心率变异性的有效替代^[1],特别是在非静止状态下或在不健康的受试者中^[2-3]。心电 R 波到脉搏波到达外周的时间受许多因素的影响,如心室心肌的机电耦合、射血前期、脉搏波传输时间、动脉血压提高组织血容量的时间等,这些因素本身受自主神经活动、呼吸、血管运动和局部循环调节剂(如 NO)的影响,因此,心电 R 波到脉搏波到达外周的时间是变化的,使得脉率和心率之间存在不一致性^[1,4]。脉搏波与心电心率变异性一致性受生理因素(如血流动力学变化、体位变化^[5]、心血管疾病、呼吸模式^[1]、运动^[6]等)、

心理因素(如精神压力^[7])、环境因素(如温度变化^[8])以及技术因素(算法^[9])的影响。据 Constant 等^[10]报道, 在植入心脏起搏器的受试者中, 即使在人工起搏器中设置恒定的心率, 且在心电中未观察到心率变异性, 脉搏波却显示心率变异性, 包括常见的低频和高频成分。本课题组先前的研究表明, 刺激条件如运动等会降低脉搏波与心电的心率变异性一致性, 特别是高频成分^[6]。Logier 等^[11]指出, 脉搏波与心电图的心率变异性在短时变化参数上差异较大, 如高频功率。Heathers^[12]指出脉搏波与心电的心率变异性高频功率的关系可能受局部血管变化的影响。也有研究认为, 心电的 R 波和脉搏波都反映了心脏的周期性跳动, 所以脉率和心率应该相等^[13], 脉率变异性可作为心率变异性的替代物^[14]。本课题组先前的研究表明^[6], 处于静息状态的健康年轻受试者, 利用脉搏波和心电计算的心率变异性的一致性较好。但在年龄分布更为广泛的人群中, 静息脉率与心率是否一致尚不清楚。

为进一步探讨年龄对利用脉搏波估计心率和心率变异性的准确性的影响, 本文招募了100名静息状态下年龄分布较广泛的健康者, 对比分析利用指尖脉搏波和心电计算的心率/心率变异性。

2 方 法

招募 100 名年龄分布较广泛(20~71 岁)的健康者参加实验, 同步采集静息指尖脉搏波和心电。经预处理后, 检测心电 R 波峰值点, 用连续 R 波峰值点之间的心搏间期序列计算心率/心率变异性, 并以此为金标准。检测脉搏波最大峰值点, 用连续峰值点之间的脉搏间期序列计算心率/心率变异性(下文表示为脉率/脉率变异性)。计算心率和脉率误差的均值±标准差, 分析两者的误差和误差绝对值在不同年龄段的组间统计差异, 计算心率和脉率的相关系数, 并进行线性回

归分析和 Bland Altman 一致性分析。

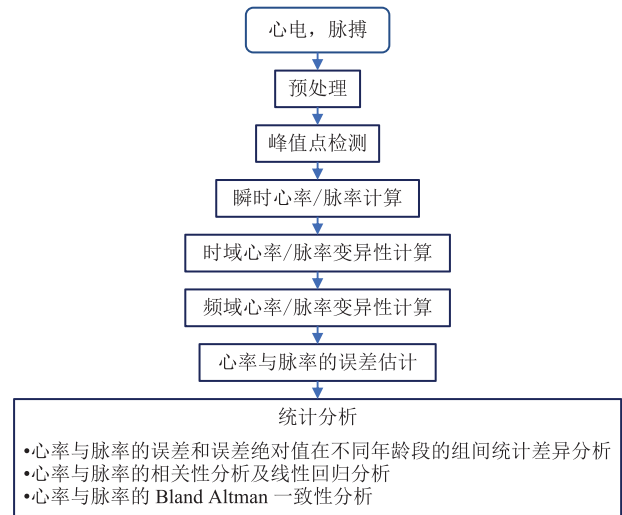


图 1 实验分析流程图

Fig. 1 Flow chart of the experimental analysis

2.1 数据采集与预处理

招募 100 名年龄(44±14)岁血压正常、无心血管疾病史的受试者参加实验, 年龄为 20~71 岁, 包括 20~29 岁、30~39 岁、40~49 岁、50~59 岁和 60 岁以上 5 个年龄组, 每组 20 名受试者。数据采集前, 受试者平卧休息 5 min, 然后将脉搏波传感器安装在受试者右手食指指尖, 连续同步记录 2 min 心电和手指脉搏波, 采样频率为 2 500 Hz。

首先, 使用[0.05,35]Hz 的四阶巴特沃斯带通滤波器对心电信号进行预处理, 去除高频噪声; 其次, 进行小波变换消除低频基线漂移: 采用 11 层 Daubechies 8 小波分解, 将包含低频漂移分量的第 11 层小波分解近似系数替换为 0; 再次, 根据新系数对信号进行重构, 得到去噪后的心电信号; 最后, 使用巴特沃斯带通滤波器预处理脉搏波信号, 并进行小波变换, 带通频率设置为[0.05,10]Hz, 其他参数与心电信号预处理参数相同。

2.2 心率/心率变异性的计算

2.2.1 特征点的检测

将心电的 R 波峰值点和脉搏波的峰值点定义为一个心跳周期内的幅度最大值点; 心搏/脉

搏间期定义为两个连续峰值点之间的时间间隔。图2为一例典型的峰值点示意图,包括心搏/脉搏间期和心搏/脉搏间期序列。R波峰值点的检测采用3次B样条小波变换,R波峰值点对应于 2^3 尺度下小波变换的模极大值和极小值之间的过零点^[15]。脉搏波的峰值点对应于R波峰值点之后一段时间内的幅度极大值点。本实验中所有的峰值点都经人工校验核对,在分析过程中,去除心律失常信号,保留正常心搏信号。

2.2.2 瞬时心率的计算

心率,即每分钟的心跳次数,计算公式如下:

$$HR=60/IBI \quad (1)$$

其中, HR 为心率; IBI 为心搏间期。

2.2.3 时域心率变异性参数的计算

3个时域心率变异性的参数为:正常心搏的标准差(Standard Deviation of Normal to

Normal R-R Intervals, SDNN),连续心搏的均方差的平方根(Root Mean Square of Successive Differences between Normal Heartbeats, RMSSD)和连续正常心搏间期的平均真实变化率(Average Real Variability, ARV),计算公式如下^[16]:

$$SDNN=\sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (IBI_i - \overline{IBI})^2}{N-1}} \quad (2)$$

$$RMSSD=\sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^{N-1} (IBI_{i+1} - IBI_i)^2} \quad (3)$$

$$ARV=\frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N |IBI_{i+1} - IBI_i| \quad (4)$$

其中, N 为心搏间期时间序列的总样本量。

2.2.4 频域心率变异性参数的计算

首先,对于每个心搏间期时间序列,本实验采用3次样条插值方法进行重采样,以获得均

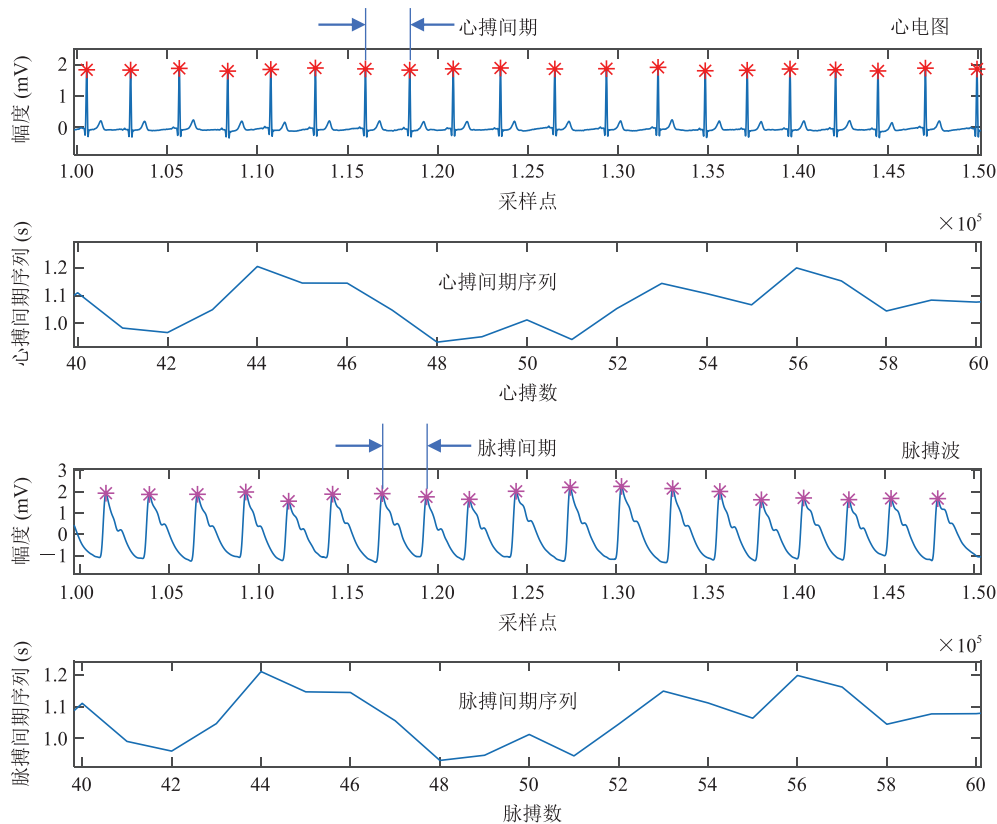


图2 心电的R波峰值点、心搏间期、脉搏波峰值点和脉搏间期示意图

Fig. 2 Diagram of the ECG R wave peak, cardiac interval, pulse wave peak, and pulse interval

匀的采样信号, 采样率为 10 Hz。其次, 将每个时间序列减去该心搏间期时间序列的平均值, 以去除直流分量。再次, 本实验利用 256 点快速傅里叶变换方法计算心搏间期时间序列的功率谱, 对心率变异性进行频域分析, 并对相应频段内功率 (ms^2) 的绝对值进行积分, 分别计算出心率变异性在低频 (Low Frequency, LF) 和 高频 (High Frequency, HF) 段的功率成分。最后, 计算归一化低频功率 (normalized Low Frequency, LFn), 即低频功率除以低频功率和高频功率之和再乘以 100%; 计算归一化高频功率 (normalized High Frequency, HFn), 即高频功率除以低频功率和高频功率之和再乘以 100%; 计算低频功率与高频功率之比 (Low to High-frequency Power Ratio, LHR)^[16]。表 1 为心率变异性在时域和频域的参数定义。

表 1 心率变异性参数的定义

Table 1 Definition of heart rate variability parameters

	参数	定义
	SDNN	心搏间期的标准差
时域	RMSSD	连续心搏间期均方差的平方根
	ARV	连续心搏间期的平均真实变异性
频域	LF	低频功率(0.04~0.15 Hz)
	HF	高频功率(0.15~0.4 Hz)
	LFn	归一化低频功率
	HFn	归一化高频功率
	LHR	低高频功率比

2.3 误差的估计和统计分析

计算脉搏波的脉率/脉率变异性与心电图的心

率/心率变异性对应参数的差值, 以评估利用脉搏波进行心率/心率变异性估计的误差, 计算差异的均数±标准差。利用非配对的学生 t 检验, 分析误差和误差的绝对值在不同年龄段的组间统计差异。计算心率和脉率的 Pearson 相关系数, 并进行线性回归分析和 Bland Altman 一致性分析。

3 结果

表 2 为常见的人口统计学分析, 由表 2 可知, 随着年龄的增加, 血压略微升高。

3.1 脉率与心率的误差

图 3 为不同年龄段利用脉搏波估计心率的误差柱状图。由图 3 可知, 所有年龄段的平均误差均较小(基本在 0 附近, 即系统偏差较小)。相较而言, 40 岁以下的年轻人误差标准差较小(20~29 岁: 0.32 搏/分钟 (beats per minute, bpm); 30~39 岁: 0.38 bpm), 40 岁以上的中老年人误差标准差较大(40~49 岁: 0.73 bpm; 50~59 岁: 0.69 bpm; 60 岁以上: 0.69 bpm)。在各个年龄段组间, 误差无显著统计差异(均值差异不大, 在 0 附近), 但误差的绝对值在 20~29 岁和 40~49 岁、20~29 岁和 50~59 岁、20~29 岁和 60 岁以上; 在 30~39 岁和 40~49 岁、30~39 岁和 50~59 岁、30~39 岁和 60 岁以上均存在显著统计差异 ($P < 0.001$) (标准差差异稍大), 在 20~29 岁和 30~39 岁组之间无显著差异。

表 2 人口统计学分析

Table 2 Demographic analysis

	年龄 (岁)	收缩压 (mmHg)	舒张压 (mmHg)	心率 (bpm)	
	20~29 岁	25±2	115±8	67±5	73±22
	30~39 岁	35±3	116±9	72±8	67±10
	40~49 岁	44±3	117±9	71±9	64±9
	50~59 岁	54±3	122±11	74±7	67±13
	60 岁以上	65±4	130±11	76±6	67±9

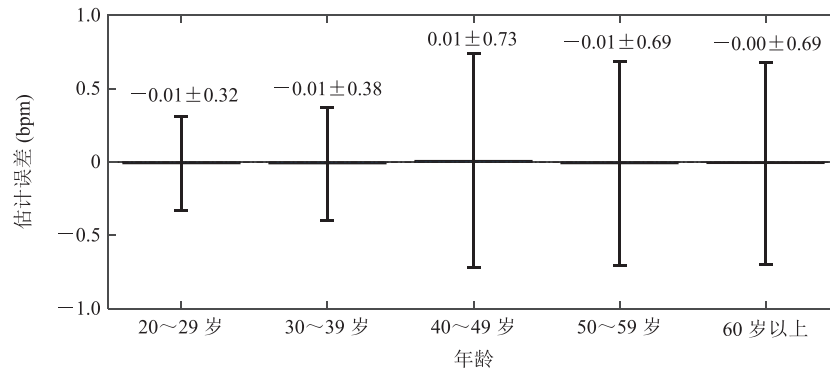


图3 心率估计误差(均值±标准差)

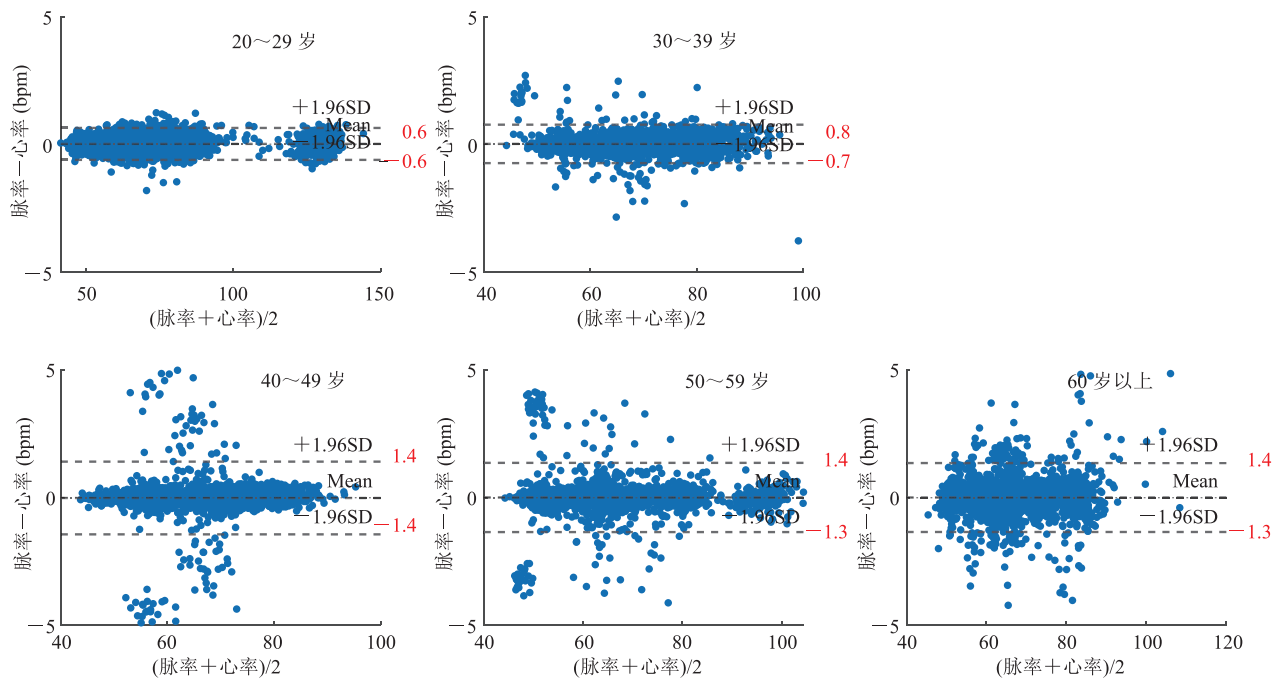
Fig. 3 Heart rate estimation error (mean \pm standard deviation)

图4 脉率与心率的一致性分析图

Fig. 4 Bland Altman plots of pulse rate and heart rate

图4为心率与脉率的Bland Altman一致性分析图，与图3的结果类似，40岁以下的年轻人脉率与心率的一致性较好，差值分布较集中，误差较小，只有5%的点误差超过0.6~0.8 bpm；40岁以上的中老年人脉率与心率的一致性稍差，差值分布较分散，误差较大，有5%的点误差超过1.3 bpm，部分点的误差可达5 bpm。

图5为脉率与心率的相关性分析及一元线性回归分析结果。由图5可知，脉率与心率的相关

性较高(0.99以上)，究其原因，可能是本实验受试者为健康人，且信号在静息条件下进行采集。所有群体的心率与脉率散点图均集中在回归线 $Y=X$ 附近，但40岁以下的年轻人分布更为集中，40岁以上的中老年人分布较为离散。

3.2 脉率变异性与心率变异性的误差

图6为不同年龄段的心率变异性(包括时域参数: SDNN、ARV和RMSSD; 频域参数: LF、HF、LFn、HF、LHR)估计误差的均值方

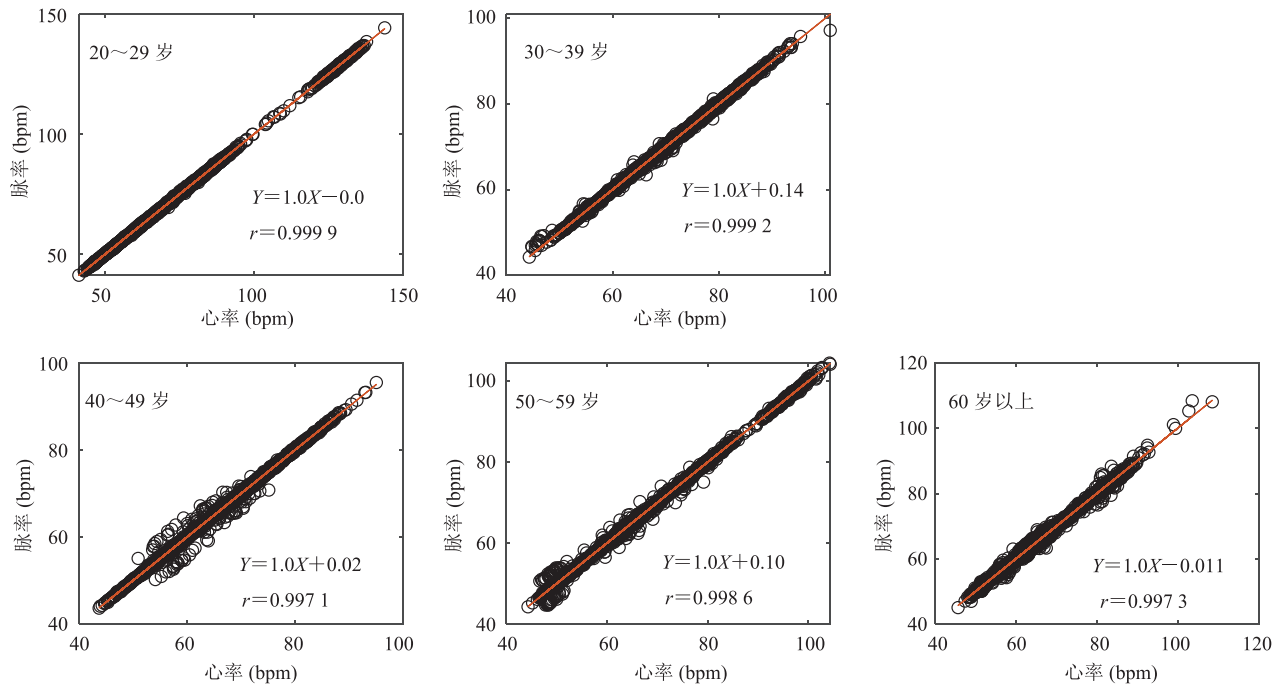


图5 脉率与心率的相关性及一元线性回归分析图

Fig. 5 Correlation and univariate linear regression analysis graph of pulse rate and heart rate

差柱状图。由图6可知,时域的心率变异性参数(SDNN、RMSSD、ARV)表现出与心率类似的规律,即40岁以下年轻人的估计误差较小,40岁以上中老年人的估计误差较大;频域的心率变异性参数则未观察到一定的规律。

4 讨论与分析

4.1 本文主要发现

本文探讨了年龄对利用脉搏波估计心率和心率变异性的准确性的影响。试验招募了年龄广泛分布在20~71岁的100名健康者,在静息状态下对其数据进行采集,分析了利用脉搏波峰值点计算的心率/心率变异性在不同年龄段的误差,结果表明:

(1)与利用心电计算的心率/心率变异性相比,利用脉搏波峰值点计算的心率/心率变异性在40岁以下的年轻人群中误差标准差较小(0.3 bpm左右),在40岁以上的中老年人中误

差标准差较大(0.7 bpm左右),时域的心率变异性参数(SDNN、RMSSD、ARV)表现出类似规律,但频域的心率变异性参数无明显规律。

(2)40岁以下的年轻人脉率与心率的一致性较好,误差较小(20~29岁年龄组中只有5%的点误差超过0.6 bpm,30~39岁年龄组中只有5%的点误差超过0.8 bpm);40岁以上的中老年人脉率与心率的一致性稍差,误差稍大,有5%的点误差超过1.3 bpm,部分点误差可达5 bpm。

4.2 生理解释

与年轻人相比,中老年人利用脉搏波估计心率/心率变异性的误差较大,可能是潜在的供血问题缘故。脉搏波是由心输出量产生的前向波(由心脏向外周血管传播)和由外周血管阻力产生的反射波(由外周血管向心脏传播)叠加而成,如图7所示。血管弹性影响反射波的返回时间,在血管弹性较高的青年受试者指尖记录脉搏波中,返回的反射波主要叠加在前向波的下降支上,如图7(a)所示,此时,其最大峰值点仅由前向波

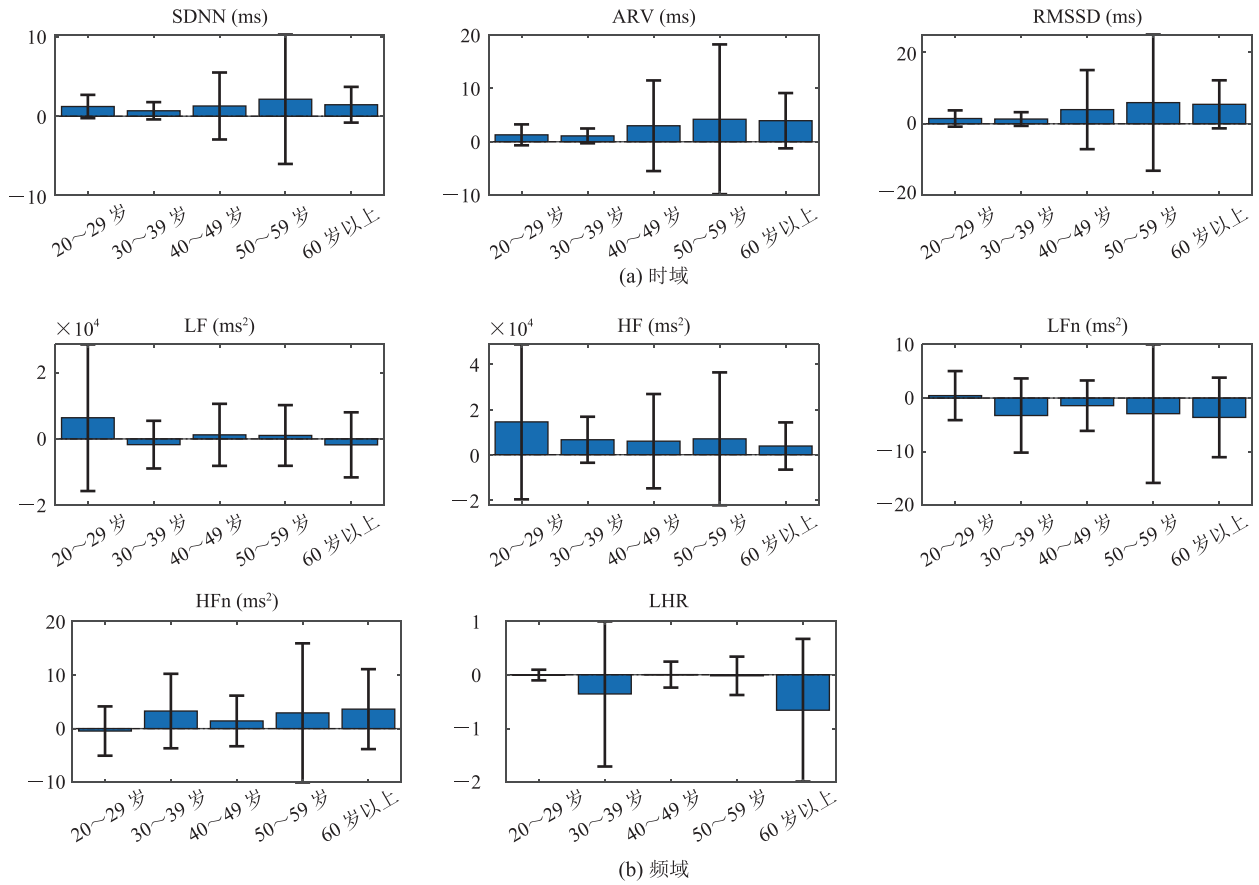


图 6 心率变异性估计误差 (均值 ± 标准差)

Fig. 6 Estimation error of heart rate variability (mean ± standard deviation)

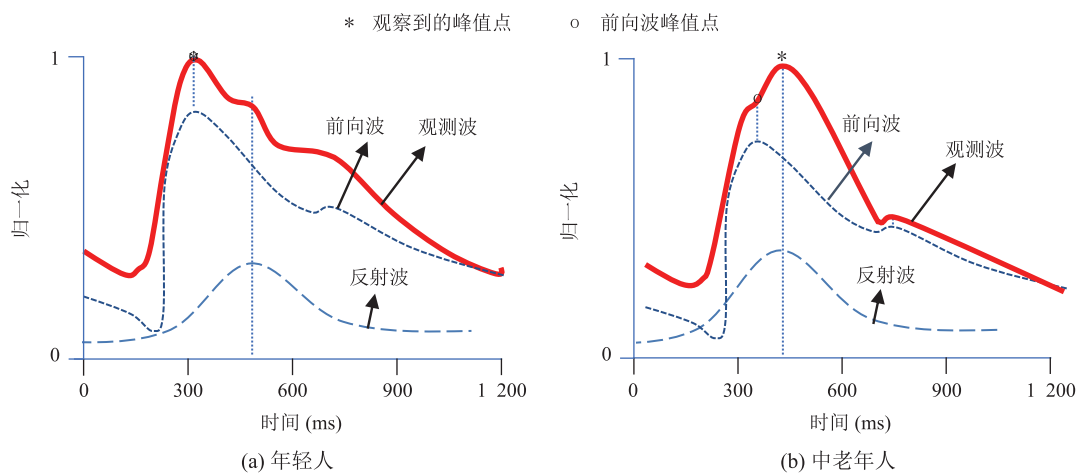


图 7 年轻人与中老年人的脉搏波组成对比

Fig. 7 Pulse wave composition of young and old people

决定，等同于前向波峰值点，代表真实的心跳节律。但在血管弹性较差的中老年受试者的记录脉

搏波中，较早返回的反射波叠加在前向波的上升支上，如图 7(b)所示，最大峰值点随之增加并且

向右移动, 偏离前向波峰值点, 此时, 最大峰值点受反射波的影响, 不能反映心跳节律, 其可能是利用最大峰值点估计心率结果存在争议的重要原因之一。上述内容分析了在静息条件下, 中老年人群体利用脉搏最大峰值点与利用心电 R 波峰值点计算心率/心率变异性时产生差异的较大原因。

已有研究调研了动脉硬化随年龄增长的变化情况。Lu 等^[17]通过对 80 415 名健康受试者进行分析发现, 血管弹性的量化指标——臂踝脉搏波传导速度, 其随着年龄增长的斜率在 40 岁左右以前较小, 在 40 岁左右以后较大。AlGhatrif 等^[18]通过对 111 名健康受试者分析发现, 主动脉脉搏波传导速度在 40 岁左右前上升较慢, 在 40 岁左右以后上升较快。提示 40 岁前血管衰老速度较缓慢, 40 岁后血管衰老速度加快。本文也通过相关实验发现, 利用脉搏波峰值点计算的心率/心率变异性, 在 40 岁以下的年轻人群中误差较小, 在 40 岁以上的中老年人群中误差稍大, 该结果进一步说明, 血管弹性可能是利用脉搏波峰值点计算心率/心率变异性时产生误差的因素。

4.3 讨论

利用脉搏波的峰值点估计心率/心率变异性是目前常用的方法, 本文通过研究发现, 年龄对利用脉搏波估计心率的准确性有一定影响。事实上, 除本文分析的血管弹性因素影响利用脉搏波估计心率的准确性外, 其他因素如生理因素(呼吸、运动等)^[19]、病理因素(房颤、血管疾病等)^[20]、技术因素(心率估计的算法)^[9]等都会对利用脉搏波估计心率的准确性产生影响。本实验发现, 心律失常(如室上性早搏节律)病人利用脉搏波峰值点估计心率误差可达 20 bpm。有一些病人(如房颤患者)虽然有心跳, 但不能形成有效的泵血而形成脉搏, 其心率往往大于脉搏, 称之为脉搏短促, 此时, 该病人的心率和脉搏是不相同的。国内外学者从技术层面修正利用脉搏波估计心率的误差, 通过算法提高脉率与心率的一致

性。例如, 利用一阶导脉搏波的峰值点、二阶导脉搏波的峰值点估计心率^[21]。Antink 等^[22]提出了一种利用连续局部区间估计器的方法, 基于自相关函数的第一个最大值的位置估计心动周期, 提高了利用脉搏波估计心率变异性的准确性和稳健性。在本课题组前期的研究中也提出了一种基于高斯拟合识别前向波峰值点的检测方法, 利用前向波峰值点估计心率, 可减少血管弹性因素的影响, 提高利用脉搏波估计心率变异性的准确性, 在血管近端(耳朵)和血管远端(指尖), 年轻人和中老年人记录的脉搏波中, 心率/心率变异性的估计精度均较高^[9]。

5 结论

综上所述, 本文从生理分析和计算方法的角度出发, 分析了利用脉搏波估计心率/心率变异性产生误差的原因。受血管弹性因素影响, 即使是静息条件, 在中老年人群中, 利用脉搏波峰值点替代心电 R 波峰值点, 计算心率/心率变异性也要谨慎对待, 需要更先进的算法提高利用脉搏波计算心率/心率变异性的准确性。虽然脉率/脉率变异性不一定反映与心率/心率变异性完全相同的信息, 但其包含的外周血管信息, 可能具有更多的临床价值^[1]。

参考文献

- [1] Mejia-Mejia E, May JM, Torres R, et al. Pulse rate variability in cardiovascular health: a review on its applications and relationship with heart rate variability [J]. *Physiological Measurement*, 2020, 41(7): 07TR01.
- [2] Rapalis A, Petrėnas A, Šimaitytė M, et al. Towards pulse rate parametrization during free-living activities using smart wristband [J]. *Physiological Measurement*, 2018, 39(5): 055007.
- [3] Georgiou K, Larentzakis AV, Khamis NN, et al. Can wearable devices accurately measure heart rate

- variability? A systematic review [J]. *Folia Medica*, 2018, 60(1): 7-20.
- [4] Schafer A, Vagedes J. How accurate is pulse rate variability as an estimate of heart rate variability? A review on studies comparing photoplethysmographic technology with an electrocardiogram [J]. *International Journal of Cardiology*, 2013, 166(1): 15-29.
- [5] Pernice R, Javorka M, Krohova J, et al. Reliability of short-term heart rate variability indexes assessed through photoplethysmography [C] // *Proceedings of the 2018 40th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society*, 2018: 5610-5613.
- [6] Lin WH, Wu D, Li CY, et al. Comparison of heart rate variability from PPG with that from ECG [C] // *Proceedings of the International Conference on Health Informatics*, 2014: 213-215.
- [7] Giardino ND, Lehrer PM, Edelberg R. Comparison of finger plethysmograph to ECG in the measurement of heart rate variability [J]. *Psychophysiology*, 2002, 39(2): 246-253.
- [8] Shin H. Ambient temperature effect on pulse rate variability as an alternative to heart rate variability in young adult [J]. *Journal of Clinical Monitoring and Computing*, 2015, 30(6): 939-948.
- [9] Lin WH, Zheng DC, Li GL, et al. Investigation on pulse wave forward peak detection and its applications in cardiovascular health [J]. *IEEE Transactions on Biomedical Engineering*, 2022, 69(2): 700-709.
- [10] Constant I, Laude D, Murat I, et al. Pulse rate variability is not a surrogate for heart rate variability [J]. *Clinical Science*, 1999, 97(4): 391-397.
- [11] Logier R, De Jonckheere J, Dassonneville A, et al. Comparison of pulse rate variability and heart rate variability for high frequency content estimation [C] // *Proceedings of the 2018 38th Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society*, 2016: 936-939.
- [12] Heathers JAJ. Smartphone-enabled pulse rate variability: an alternative methodology for the collection of heart rate variability in psychophysiological research [J]. *International Journal of Psychophysiology*, 2013, 89(3): 297-304.
- [13] Kiran kumar C, Manaswini M, Maruthy KN, et al. Association of heart rate variability measured by RR interval from ECG and pulse to pulse interval from Photoplethysmography [J]. *Clinical Epidemiology and Global Health*, 2021, 10: 100698.
- [14] Vescio B, Salsone M, Gambardella A, et al. Comparison between electrocardiographic and earlobe pulsephotoplethysmographic detection for evaluating heart rate variability in healthy subjects in short- and long-term recordings [J]. *Sensors*, 2018, 18: e844.
- [15] 林宛华, 汪家旺, 杨涛, 等. 正交小波变换的快速算法在心电 QRS 波检测中的应用 [J]. *中国医学物理学杂志*, 2008, 25(6): 903-910.
Lin WH, Wang JW, Yang T, et al. Detection of ECG QRS wave using fast arithmetic of orthogonal wavelet transforms [J]. *Chinese Journal of Medical Physics*, 2008, 25(6): 903-910.
- [16] Camm AJ, Malik M, Bigger JT, et al. Heart rate variability-standards of measurement, physiological interpretation, and clinical use [J]. *Circulation*, 1996, 93(5): 1043-1065.
- [17] Lu Y, Pechlaner R, Cai JJ, et al. Trajectories of age-related arterial stiffness in Chinese men and women [J]. *Journal of the American College of Cardiology*, 2020, 75(8): 870-880.
- [18] AlGhatrif M, Lakatta EG. The conundrum of arterial stiffness, elevated blood pressure, and aging [J]. *Current Hypertension Reports*, 2015, 17(2): 12.
- [19] Mejia-Mejia E, Budidha K, Abay TY, et al. Heart rate variability (HRV) and pulse rate variability (PRV) for the assessment of autonomic responses [J]. *Frontiers in Physiology*, 2020, 11: 00779.
- [20] Hoog Antink C, Mai Y, Peltokangas M, et al. Accuracy of heart rate variability estimated with reflective wrist-PPG in elderly vascular patients [J]. *Scientific Reports*, 2021, 11(1): 8123.
- [21] Peng RC, Zhou XL, Lin WH, et al. Extraction of heart rate variability from smartphone photoplethysmograms [J]. *Computational and Mathematical Methods in Medicine*, 2015, 2015: 516826.
- [22] Antink CH, Leonhardt S, Walter M. Local interval estimation improves accuracy and robustness of heart rate variability derivation from photoplethysmography [C] // *Proceedings of the Annual International Conference of the IEEE Engineering in Medicine and Biology Society*, 2018: 3558-3561.