

基于 Lognormal 函数的脉搏波分解可行性研究

王璐¹, 陈雪玮², 郝丽玲², 徐礼胜^{2,3}
(1. 东北大学 计算机科学与工程学院, 辽宁 沈阳 110169; 2. 东北大学 医学与生物信息工程学院, 辽宁 沈阳 110169;
3. 沈阳东软智能医疗科技研究院有限公司, 辽宁 沈阳 110167)

摘 要: 探讨利用 Lognormal(对数正态)函数构建血流流量波进行脉搏波分解的可行性. 研究对象为 23 名健康在校大学生, 利用无创主动脉搏搏分析仪(AtCor Medical SphygmoCor)获取无创主动脉搏搏波形. 分别利用 Lognormal 函数和三角波函数构建血流波形, 采用阻抗分析技术将主动脉搏压力波形分解为前向波和反向波并计算反射幅度(RM_{log} , RM_{tri})、反射指数(RI_{log} , RI_{tri}), 然后对参数进行 Bland-Altman 法分析和回归分析. 两种方法计算的 RM, RI 一致性良好, 其回归方程分别为: $RM_{log} = 1.009RM_{tri} - 0.007$, $RI_{log} = 1.008RI_{tri} - 0.004$; RM_{log} 和 RM_{tri} 显著相关($r = 0.999$; $P < 0.001$), RI_{log} 和 RI_{tri} 显著相关($r = 0.999$; $P < 0.001$), 且从波形上分析, 基于 Lognormal 函数的脉搏波分解较三角波更好. 因此, 基于 Lognormal 函数对主动脉搏压力波形分解是可行的, 而且效果优于三角波函数分解的结果.

关 键 词: 脉搏波; 波形分解; 阻抗分析; 回归分析
中图分类号: TP 274 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-3026(2019)12-1695-05

Feasibility Research of Pulse Wave Decomposition Based on Lognormal Function

WANG Lu¹, CHEN Xue-wei², HAO Li-ling², XU Li-sheng^{2,3}
(1. School of Computer Science & Engineering, Northeastern University, Shenyang 110169, China; 2. School of Medicine & Biological Information Engineering, Northeastern University, Shenyang 110169, China; 3. Neusoft Research of Intelligent Healthcare Technology, Co., Ltd., Shenyang 110167, China. Corresponding author: XU Li-sheng, E-mail: xuls@bmie.neu.edu.cn)

Abstract: The feasibility of decomposing pulse wave was evaluated by constructing the blood flow wave based on the Lognormal function. Twenty-three healthy subjects were studied and their noninvasive aortic pulse waves were acquired by using a noninvasive aortic pulse analyzer (AtCor Medical SphygmoCor). The Lognormal function and the triangle function are applied respectively for constructing the blood flow wave, and aortic pressure waveform is decomposed into forward and backward waves by means of the impedance analysis. The reflection parameters including reflection amplitude (RM_{log} , RM_{tri}) and reflection index (RI_{log} , RI_{tri}) are then calculated. Meanwhile, these parameters are analyzed by the Bland-Altman method and the regression analysis. The estimation of RM and RI has high consistency for these two methods, and their regression equations are $RM_{log} = 1.009RM_{tri} - 0.007$ and $RI_{log} = 1.008RI_{tri} - 0.004$, respectively. RM_{log} has significantly positive correlation with RM_{tri} ($r = 0.999$; $P < 0.001$), and RI_{log} has significantly positive correlation with RI_{tri} ($r = 0.999$; $P < 0.001$). Therefore, it is feasible to decompose the aortic pressure waveform based on the Lognormal function and the performance is better than that of the triangle function.

Key words: pulse wave; wave decomposition; impedance analysis; regression analysis

脉搏波蕴含着丰富的人体生理和病理信息^[1], 历来受到中外医学界的广泛重视并且已经成为中西医共同研究的热点^[2]. 脉诊作为一种无创检测手段与方法, 虽然得到了一定的应用, 但传统脉诊法具有极大的个人主观性以及脉象诊断的模糊性, 这些长期影响着脉诊的发展^[3], 所以脉诊的客观化和数字化对中医的现代化具有重要意义^[4].

现代医学对于脉搏波的研究已经相当深入. 目前的研究主要是基于表征脉搏波传播特性的脉搏波传播速度 (PWV) 和表征脉搏波反射特性的增强指数 (AI)^[5]. 但是脉搏波传播速度 PWV 测量不方便, 增强指数 AI 不仅受幅值的影响而且还受反射时间的影响^[6]. 反射幅度 (RM) 和反射指数 (RI) 有更明确的生理意义且不受时间的影响, 也可以反映脉搏波信息^[7]. 郭睿等已经证明血流动力学参数如波速和反射系数作为具有生理病理意义的特征参数能有效区分平、弦、滑脉^[8]. 因此有效地获取 RM 和 RI 对中医的现代化研究具有重大意义.

1 资料与方法

1.1 研究对象

研究对象共 23 人(男性 15 人, 女性 8 人), 年龄在 21 ~ 28 岁之间 (24.4 岁 ± 1.6 岁). 所有研究对象均无心血管疾病, 且自愿参加数据采集. 受试者基本资料如表 1 所示.

表 1 受试者基本信息		
Table 1	Basic information of the subjects	
参数	均值 ± 标准差	范围
年龄	24.40 ± 1.62	21 ~ 28
身高/m	1.72 ± 0.07	1.57 ~ 1.86
体重/kg	64.04 ± 10.13	45 ~ 80
BMI/(kg·m ⁻²)	21.59 ± 2.45	17.04 ~ 26.18
心率	61.60 ± 7.45	47.3 ~ 74.0

1.2 主要仪器与研究方法

数据采集步骤: 受试者取仰卧位, 用鱼跃牌水银血压计测量受试者肱动脉收缩压 (SBP) 和肱动脉舒张压 (DBP). 血压测完后, 使用 AtCor Medical 公司的无创主动脉搏搏分析仪 (SphygmoCor) 采集左侧桡动脉脉搏波, 采样频率为 128 Hz. 利用实测的桡动脉脉搏波通过传递函数重建出中心动脉脉搏波. 每位受试者连续测量 3 组有效数据.

1.3 主动脉血流波形的获取

本研究用肱动脉舒张压 DBP 和平均动脉压 MAP 标定主动脉脉搏波形, 主动脉脉搏波形面积的平均值标定为肱动脉的 MAP. 标定完成后, 利用波形二阶导数, 即二阶导数波形的局部最大值, 确定主动脉压力波形的切迹点 (notch) 和反射点. 如图 1 所示, 分别为主动脉压力波和中心动脉二阶导数波形.

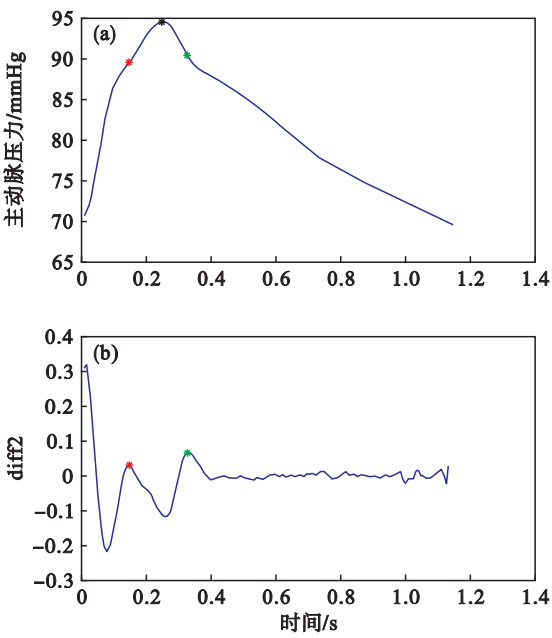


图 1 脉搏波及其特征点
Fig. 1 Pulse wave and its feature points
(a)—主动脉压力波; (b)—中心动脉二阶导数波形.

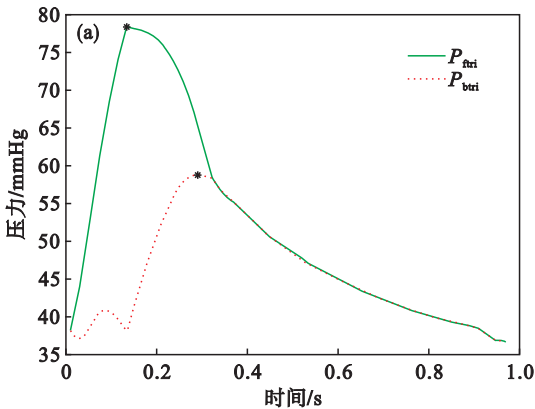
Westerhof 等^[9-10]已经证明用三角波来构建主动脉血流波形是可行的. 三角波的特征点与主动脉压力波形的特征点存在如下关系: 三角波的起点、峰值点和终点分别对应主动脉压力波形的起点、反射点和切迹点. 通过该对应关系, 可用三角波函数拟合主动脉流量波, 得到最佳拟合函数. 同时, 利用主动脉压力波形 $P(t)$ 和构建的三角流量波形 $Q(t)$ 计算主动脉的输入阻抗 $Z_{in}^{[11]}$, $Z_{in} = \text{fft}(P(t)) / \text{fft}(Q(t))$, 其中 fft 表示快速傅里叶变换. 选取输入阻抗的 3 ~ 10 次谐波幅值的平均值来估计特征阻抗 $Z_c^{[12]}$, 根据阻抗分析得到主动脉前向压力波 $P_f(t)$, 反向压力波 $P_b(t)$, 反射幅度 RM 和反射指数 RI 的计算公式为^[9,11]

$$\left. \begin{aligned} P_f(t) &= \frac{P(t) + Z_c \times Q(t)}{2}; \\ P_b(t) &= \frac{P(t) - Z_c \times Q(t)}{2}. \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

$$RM = P_b/P_f; RI = P_b/(P_f + P_b). \quad (2)$$

本文分析了现有脉搏波分解方法, 提出用

Lognormal(对数正态)函数来构建主动脉血流波形,并利用 Lognormal 函数构建出的流量波和主动脉压力波形计算主动脉前向压力波 $P_f(t)$,反向压力波 $P_b(t)$,反射幅度 RM 和反射指数 RI. Lognormal 函数的特征点与主动脉压力波形的特征点存在如下关系:Lognormal 函数波的起点、峰值点和终点分别对应主动脉压力波形的起点、反射点和切迹点. 通过该对应关系,可用 Lognormal 函数拟合主动脉流量波,找到最佳拟合波形.



2 实验结果

2.1 波形分析法

分别用三角流量波和 Lognormal 流量波对 23 名受试者的主动脉压力波进行分解. 结果显示由三角流量波进行脉搏波分解时所得到的前向压力波和后向压力波会有三角波的痕迹,如图 2a 所示, P_{ftri} 曲线出现类似三角形顶点,而由 Lognormal 流量波分解时不会出现此种现象,如图 2b 所示.

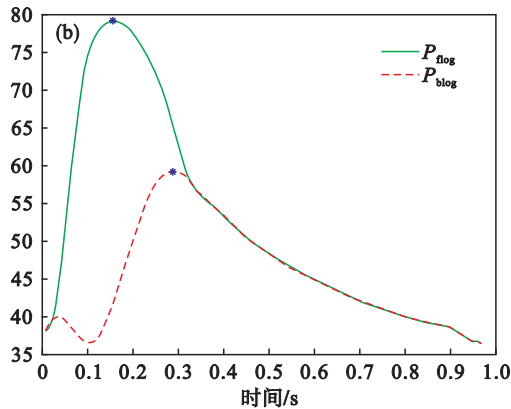


图 2 主动脉脉搏波波形分解示意图

Fig. 2 Schematic diagram for aortic pulse wave decomposition

(a)—三角流量波的分解结果; (b)—Lognormal 流量波的分解结果.

因为在实际状态下人体的前向压力波和后向压力波是不会有三角波的痕迹的,所以从波形上分析,利用 Lognormal 函数对脉搏波的分解较三角波更好.

2.2 三角波与 Lognormal 函数构建流量波计算参数的相关性分析

根据三角流量波形与 Lognormal 函数流量波形分别对主动脉压力波进行分解并按照式(2)计算出参数值,将用 Lognormal 流量波计算的参数 RM_{log} 和 RI_{log} 与三角流量波计算的参数 RM_{tri} 和 RI_{tri} 进行配对 t 检验,其结果见表 2. 结果显示,用 Lognormal 函数构建流量波对脉搏波分解后计算的参数与用三角流量波计算的参数比较, RM, RI 两者间均高度相关且无显著统计学差异 ($r > 0.8$; $P > 0.05$).

表 2 三角流量波、Lognormal 函数计算的参数配对 t 检验分析
Table 2 The paired t -test analysis of the parameters of triangular and Lognormal flow wave

参数	相关系数	检验统计量 t	P 值
RM_{log} & RM_{tri}	0.999	0.658	0.513
RI_{log} & RI_{tri}	0.999	0.470	0.640

2.3 三角波与 Lognormal 函数构建流量波计算参数的回归分析

采用 SPSS11.9 统计分析软件对 Lognormal 流量波计算的参数 RM_{log} 和 RI_{log} 分别与三角流量波计算的参数 RM_{tri} 和 RI_{tri} 进行回归分析,建立的回归方程为:① $RM: RM_{log} = 1.009RM_{tri} - 0.007$; ② $RI: RI_{log} = 1.008RI_{tri} - 0.004$. 其中 RM_{log} 与 RM_{tri} 以及 RI_{log} 与 RI_{tri} 之间的回归关系图如图 3 所示.

2.4 三角波与 Lognormal 函数构建流量波计算参数的 Bland – Altman 图示法比较

将以上无显著统计学差异的参数 RM_{log} 与 RM_{tri} , RI_{log} 与 RI_{tri} 进行 Bland – Altman 作图分析并对比. 如图 4 所示,两参数 Bland – Altman 图中 95% 以上散点分别在 $(-0.0037, 0.0040)$ 与 $(-0.0013, 0.0013)$ 即均值 ± 1.96 标准差范围内. 结果显示利用 Lognormal 函数构建流量波计算出的参数和三角波构建流量波计算出的参数一致性良好.

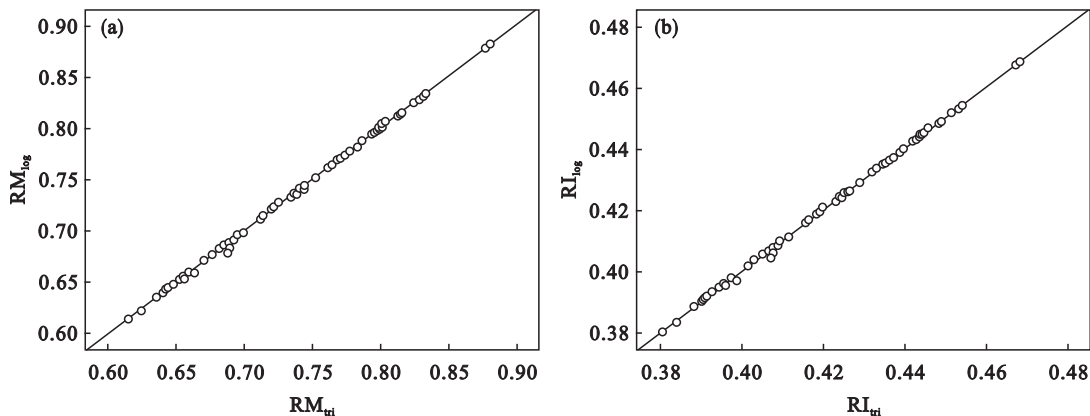


图 3 两种方法计算的 RM,RI 关系图
Fig. 3 Relation between RM and RI calculated by the two methods
(a)—RM 关系图; (b)—RI 关系图.

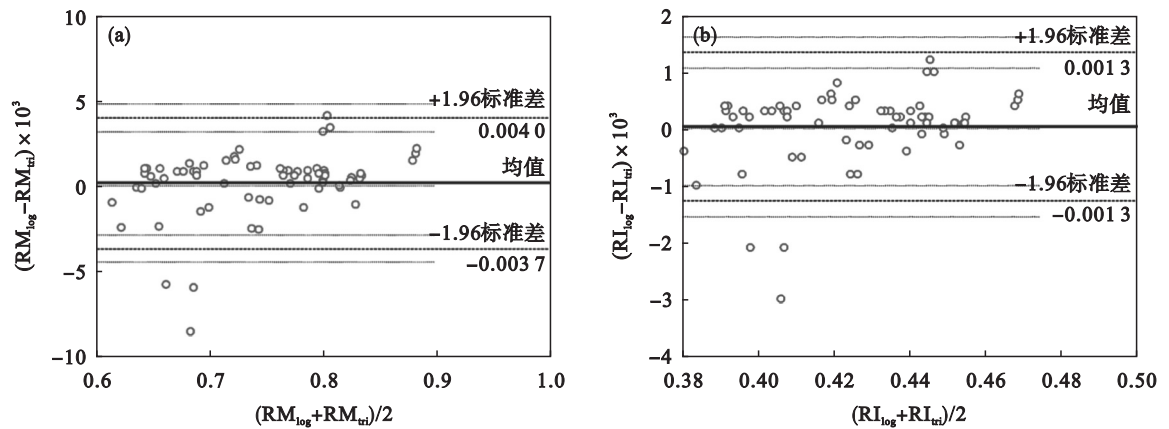


图 4 反射参数 Bland – Altman 分析对比
Fig. 4 The Bland-Altman analysis on the reflection parameters
(a)—反射幅度 RM_{log} 和 RM_{tri} ; (b)—反射指数 RI_{log} 和 RI_{tri} .

3 结 论

在本研究中,同时用 Lognormal 函数和三角波构建流量波对中心动脉压力波形分解并计算参数,比较二者的相关性,以及计算的参数线性回归关系与一致性,从而证明利用 Lognormal 函数构建流量波对脉搏波分解的可行性. 本研究通过对 23 例受试者的分析,发现 Lognormal 计算的参数反射幅度 RM_{log} 和反射指数 RI_{log} 可以由三角波函数计算的参数反射幅度 RM_{tri} 和反射指数 RI_{tri} 经线性回归方程估算;用 Lognormal 函数构建流量波形对主动脉压力波进行分解所计算的参数比用三角波构建流量波形对主动脉压力波进行分解所计算的效果更好.

本研究的一个不足之处是样本人群较集中,分布不全面,且没有深入分析利用 Lognormal 函

数和三角波构建流量波对中心动脉压力波分解的效果优劣. 因此未来研究将致力于分析两种方法进行脉搏波分解的效果.

参考文献:

[1] 赵海,窦圣昶,李大舟,等. 基于 Lognormal 函数的脉搏波数学建模[J]. 东北大学学报(自然科学版),2016,37(2): 169 – 173.
(Zhao Hai, Dou Sheng-chang, Li Da-zhou, et al. Mathematical modeling of pulse wave based on Lognormal function [J]. Journal of Northeastern University (Natural Science), 2016, 37 (2): 169 – 173.)
[2] Xu L, Meng Q H, Shi C, et al. Quantitative analyses of pulse images in traditional Chinese medicine [J]. Medical Acupuncture, 2008, 20 (3): 175 – 189.
[3] 张永亮. 基于桡动脉波形分析的心血管功能评估方法研究 [D]. 合肥: 中国科学技术大学, 2012.
(Zhang Yong-liang. Assessment of cardiovascular function based on pulse wave analysis of radial artery [D]. Hefei: University of Science and Technology of China, 2012.)
[4] Xu L S, Wang K Q, Zhang D, et al. Objectifying researches

on traditional Chinese pulse diagnosis [J]. *Informatica Medica Slovenica*,2003 ,8(1) :56 – 63.

[5] 王超臣,杨学智,张建,等. 高血压患者脉搏波参数与脉搏波传导速度的相关性研究[J]. 现代生物医学进展,2014, 14(23) :4459 – 4462.

(Wang Chao-chen, Yang Xue-zhi, Zhang Jian, et al. Correlative research on the parameters of pulse wave conduction velocity of patients with hypertension [J]. *Progress in Modern Biomedicine*, 2014, 14 (23) : 4459 – 4462.)

[6] Mitchell G F, Tardif J C, Arnold J M O, et al. Pulsatile hemodynamics in congestive heart failure[J]. *Hypertension*, 2001 ,38(6) :1433 – 1439.

[7] Wang K L, Cheng H M, Sung S H, et al. Wave reflection and arterial stiffness in the prediction of 15-year all-cause and cardiovascular mortalities: a community-based study [J]. *Hypertension*,2010,55(3) :799 – 805.

[8] 郭睿,王忆勤,燕海霞,等. 基于血液动力学原理的中医脉搏波特征提取与识别[J]. 中西医结合学报,2010,8(8) : 742 – 746.

(Guo Rui, Wang Yi-qin, Yan Hai-xia, et al. Feature extraction and recognition of traditional Chinese medicine pulse based on hemodynamic principles [J]. *Journal of Chinese Integrative Medicine*,2010,8(8) :742 – 746.)

[9] Westerhof B E, Guelen I, Westerhof N, et al. Quantification of wave reflection in the human aorta from pressure alone: a proof of principle [J]. *Hypertension*, 2006 , 48 (4) : 595 – 601.

[10] Westerhof N, Stergiopulos N, Noble M I M. Wave separation and waveform analysis [M]//Snapshots of hemodynamics. Cham; Springer International, 2019 :175 – 183.

[11] 叶骏,张永亮,胡福松,等. 基于单个颈动脉压力波形获取主动脉脉搏波速度的可行性研究[J]. 北京生物医学工程, 2016(2) :198 – 202.

(Ye Jun, Zhang Yong-liang, Hu Fu-song, et al. Feasibility study on aortic pulse wave velocity obtained from single carotid pressure waveform [J]. *Beijing Biomedical Engineering*,2016(2) :198 – 202.)

[12] Segers P, Rietzschel E R, De Buyzere M L, et al. Noninvasive (input) impedance, pulse wave velocity, and wave reflection in healthy middle-aged men and women[J]. *Hypertension*, 2007 ,49(6) :1248 – 1255.