

DOI: 10.13288/j.11-2166/r.2021.14.006

思路与方法

从触觉的频率和阈值特性探讨寸口脉象特征

史宇兵¹, 杨洪义¹, 袁瑞华²✉

1. 陕西中医药大学整合医学研究院, 陕西省咸阳市秦都区世纪大道, 712046; 2. 陕西中医药大学真实世界临床研究院

[摘要] 寸口脉脏腑配位学说是中医脉诊的重要基础。基于韦伯-费希纳定律, 结合触觉的频率和阈值特性构建了脉诊中触觉感知的初步模型, 并通过应用该模型对临床采集到的动脉血压数据进行频域和时域处理和结果比较, 以此解释诊脉操作和传感器测量两种情况下所得脉象的差别。发现由于触觉的频率和阈值特性的影响, 诊脉时不同的按压指力下产生的脉象有很大变化, 而采用传感器测量脉象时则无此变化, 从而解释了传统中医脉诊和现代脉诊学应用传感器测量二者间产生脉象认识差异的原因。依据所构建的触觉感知模型进行处理所得的寸关尺部轻取、中取、重取的脉象符合传统中医理论中对于各部脉象特点的论述。

[关键词] 脉象; 寸口; 触觉; 频率特性; 阈值特性

脉诊作为中医望、闻、问、切四诊中的一个重要环节, 在中医临床诊断过程中发挥着重要作用。现代脉诊学的发展更为脉诊的理论和实践注入了新活力^[1]。尽管脉诊用于中医临床诊断已有两千多年的历史, 但目前对于寸口脉的寸关尺脏腑配位问题仍存在争议。有研究指出, 左右寸关尺能够详细指示全身各器官和组织的生理病理状况^[2-6]; 另有研究认为, 寸关尺的脏腑配位学说缺乏科学根据^[7-8]; 还有研究用传感器实测了寸关尺不同部位的脉搏, 发现各部位测到的脉搏并没有可见差别^[9-11], 认为根据寸口处脉象鉴别各脏腑的疾病存在合理性问题。本研究从触觉感知的频率和阈值特性角度, 将传统中医临床脉诊中所描述的寸口处脉象定量化描述, 并与传感器采集到的脉象进行比较, 从而对寸口脉象特征进行探讨。

1 诊脉中触觉的频率和阈值特性

中医临床实践中在寸、关、尺各部位分别诊察到清晰脉象所需要的按压指力是有差别的, 寸部到尺部所需按压指力依次增大, 即寸部宜轻取, 关部可中取, 尺部需重取。基于此, Wang 等^[9]指出人的神经感知中存在韦伯-费希纳定律, 该定律指出

感觉末梢的敏感度随刺激强度的增加而降低^[12]。诊脉中, 当指端对寸口处施加按压力时, 存在一个对应于该按压力大小的指端触觉阈值 (或称为临界分辨率), 低于该阈值的脉搏信号变化将不能被诊脉者的触觉所感知到。同时指端触觉的阈值随着指端按压指力的增大而增大, 低于该阈值的脉搏信息都随之被触觉感知所遗漏, 所以所诊察到的脉象随之变化。我们将这种现象称为触觉的阈值特性。而采用传感器测量脉象时, 传感器的灵敏度则不会随着测量头处接触力情况而有明显的变化, 所以传感器测到的各部脉象没有差别。

具体到与诊脉相关的触觉感知, 根据韦伯-费希纳定律, 触觉感知的阈值 δx 和触觉作用力 x 的大小成正比, 即

$$\delta x = c \cdot x \quad (1)$$

公式 (1) 中诊脉操作中所施加的按压作用力 x 越大, 指端触觉的阈值 δx 也越大, 即需要更大的临界触觉力变化才能产生触觉感知, 也就是说指端触觉的灵敏度越低。脉搏波信号的频谱中, 各次谐波的幅值随着谐波频率的增加而降低, 所以采用不同力度的按压作用力, 就会由于触觉阈值的变化而捕捉到不同频宽的频率分量。不同频宽的脉搏波频率分量组合就会形成不同的脉象。

对该问题的具体分析还涉及触觉的频率特性。有研究^[13-14]检索了关于人的触觉的文献并总结指

基金项目: 陕西省中医药管理局委托办事经费项目 (141020001); 陕西省中医药管理局科研课题 (政策类研究课题) (2019-WT003)

✉ 通讯作者: yuanrh62@163.com, 13572930211

出, 人的触觉主要通过四种感受器来获得感知: 分布在表层皮肤可对 3 ~ 40 Hz 外界刺激快速响应的 Meissner 小体、分布在皮肤深层可对 40 ~ 500 Hz 以上刺激快速响应的 Pacinian 小体、分布在表皮基底细胞之间对 0.4 ~ 30 Hz 外界刺激慢速响应的 Merkel 细胞、以及位于真皮内对 100 ~ 500 Hz 以上外界刺激慢速响应的 Ruffini 小体。人的脉搏波中各次谐波的幅值按频率由低到高接近指数衰减, 其中的有效谐波频宽为前 20 次谐波^[15-17]。按照正常心率为 72 次/min 计算, 有用信号的频宽为 $f = 20 \times 72 / 60 = 24$ Hz, 小于 30 Hz, 所以对脉诊有直接影响的应该是上述四种感受器中的 Meissner 小体和 Merkel 细胞。本研究假定这两种感受器在其作用范围内是线性感受器, 即感受到的信号强度与原触觉刺激信号的强度呈完全的线性关系。另外, 虽然既往研究^[14]提出这两种感受器一个是快速响应一个是慢速响应, 考虑到脉搏波信号的周期性, 这里将这两种感受器的作用合并考虑为一个快速响应线性感受器, 而不计其响应速度的差别。

2 基于临床介入实测的血压数据进行的寸口脉象研究

2.1 基于传感器测量的血压数据采集

本研究基于既往一项关于主动脉狭窄患者血流分析的研究^[18-19], 采用了其中临床介入测量得到的主动脉血压数据。该研究涉及 14 例病情轻重不同的主动脉狭窄患者, 在患者平静呼吸情况下, 通过计算机数据采集系统记录了大约 1 min 的经股动

脉导管介入测量得到的升主动脉和腹主动脉处的血压数据。本研究使用了其中的升主动脉血压数据。采集到的数据经过量程标定和单位转换, 再根据每个心脏周期的峰值和谷值将整个数据序列划分为单独的心脏周期, 然后采用统计处理, 依据峰值、谷值、周期、平均值、收缩期血压上升梯度等指标, 剔除其中偏离各指标的平均值较远的波形周期。对保留下的各周期的波形进行归一化和平均化处理, 从而得到每个患者在一个心脏周期的代表性升主动脉血压波形^[18]。由于上臂动脉和主动脉弓的解剖位置较近, 上臂动脉的几何形状较规则且分枝简单, 临床上常用上臂肱动脉和桡动脉处的血压来代表心脏出口的升主动脉处的血压。另外, 主动脉狭窄患者的动脉狭窄部分常发生在主动脉弓中后端及其下游, 对升主动脉和上臂动脉之间的血压传递关系影响不大。因此, 上述既往研究中采集到的升主动脉处的血压可以作为本研究所需的桡动脉处血压波形的近似。本研究主要选取其中 1 例代表性数据进行分析处理, 但分析过程和结论同样适用于其余的病例。

2.2 基于触觉的频率和阈值特性进行数据处理

本研究基于触觉的频率和阈值特性构建了脉诊中触觉感知的初步模型, 如下所述。图 1 是应用该模型对临床采集到的动脉血压数据进行处理的过程。将患者的动脉血压波形数据进行时域到频域的傅里叶变换, 得到脉搏波的频率成分:

$$P(\omega) = \frac{1}{T} \int_0^T P(t) \cdot e^{-j\omega t} dt \quad (2)$$

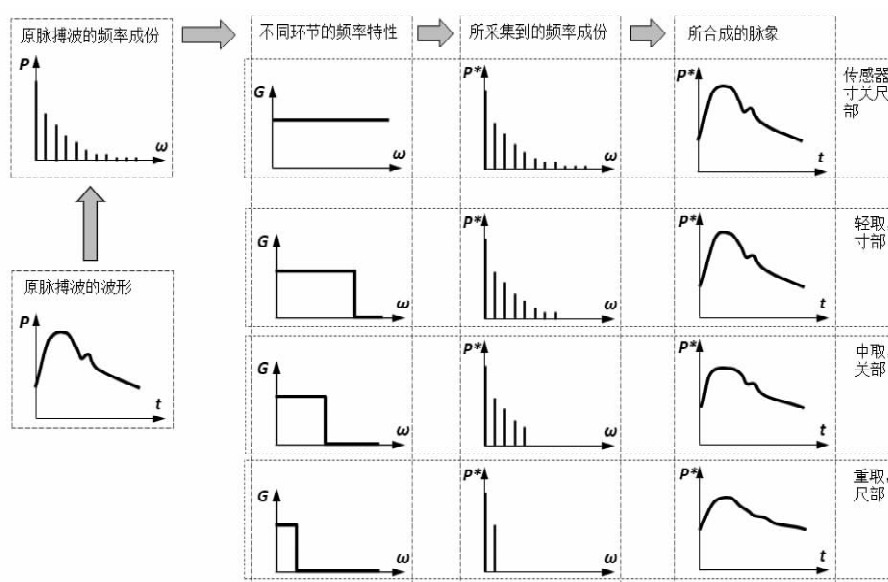


图 1 基于触觉的频率和阈值特性处理动脉血压数据的过程示意图

公式 (2) 中 $P(t)$ 为原脉搏波的时域波形, $P(\omega)$ 为其频域分布。考虑在不同的按压指力下, 人的神经感知功能存在着频宽和感受阈值的差别, 具体表现为如图 1 中不同环节的频率特性栏所示的滤波器特性 $G(\omega)$ 。采用传感器测量时, 由于传感器的频宽远远大于脉搏波的频宽, 所以相应的环节频率特性表示为理想线性全通环节:

$$G(\omega) = 1 \quad (3)$$

对寸关尺部相应轻取、中取和重取时, 触觉特性表现为具有不同带宽的理想线性低通滤波器:

$$G(\omega) = \begin{cases} 1 & \omega \leq \omega_n \\ 0 & \omega > \omega_n \end{cases} \quad (4)$$

公式 (4) 中 ω_n 为对应于不同按压指力时的触觉感知带宽。这些不同环节 $G(\omega)$ 作用于患者的脉搏波信号时, 就会相应采集到不同的频率成分分布:

$$P^*(\omega) = P(\omega) \cdot G(\omega) \quad (5)$$

经过傅里叶反变换得到不同的合成脉象, 以反映诊脉者不同指力下所感受到的脉象的变化:

$$P^*(t) = \frac{1}{2\pi} \int_0^\infty P^*(\omega) \cdot e^{j\omega t} d\omega \quad (6)$$

如前所述, 在动脉压力波形的傅里叶频谱中, 实际对波形影响较大的是前 20 次谐波, 而更高次谐波分量的幅值非常小以至于可以忽略不计^[15-17]。因此本研究考虑 20 次谐波以下的频率分量。当采用传感器测量时, 传感器的频宽特性不会随接触力而改变, 所以不论诊察寸关尺哪一部, 传感器都能采集到脉搏波的所有频率成分, 所以可以复现出患者的原脉搏波波形。而诊脉者诊脉时, 由于前述触觉的频率和阈值特性随按压指力变化, 所得脉象会随之变化。本研究作为初步研究, 将这些谐波分为三组。考虑第 8 次以上谐波缺失 [对于 $G(\omega)$ 取 $\omega_n = 2\pi \cdot 8/T$] 对应脉诊轻取手法诊察寸部脉的情况, 第 5 次以上谐波缺失 (取 $\omega_n = 2\pi \cdot 5/T$) 对应中取手法诊察关部脉的情况, 第 2 次以上谐波缺失 (取 $\omega_n = 2\pi \cdot 2/T$) 对应重取手法诊察尺部脉的情况。定性的脉象差别如图 1 中所合成的脉象所示。

2.3 基于触觉的频率和阈值特性所得脉象与传感器测量所得脉象的比较

基于上面介绍的方法和模型, 对 14 例主动脉狭窄患者的动脉血压数据进行处理, 得到了在不同的按压指力下所感受到的模拟脉象。以 1 例典型患者为例, 图 2 为该典型例子中原脉搏波波形的传感器测量结果, 图 3 为基于上述触觉的频率和阈值特

性模型进行处理所得的不同按压指力下的寸口处脉象。通过比较, 可以发现寸部轻取所得脉象相比于传感器测量到的脉象有细微差别, 而关部中取和尺部重取所得的脉象从波形的形状和幅值上与传感器测得的脉象有明显的差异。

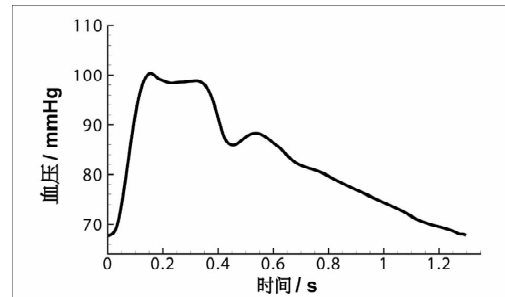
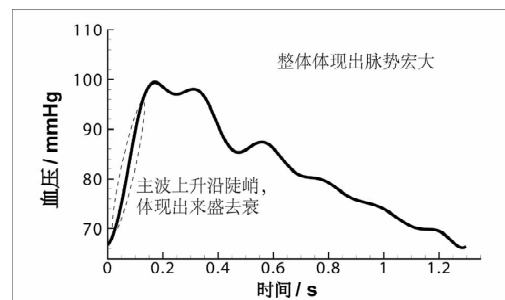
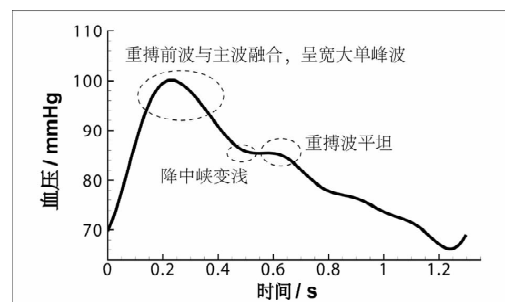


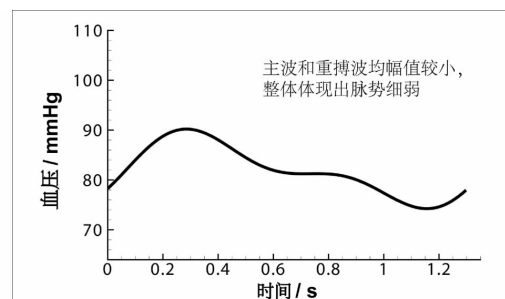
图 2 传感器测量到的寸口脉象



a 寸部脉象



b 关部脉象



c 尺部脉象

图 3 基于触觉的频率和阈值特性所得的寸口脉象

李中梓所著《诊家正眼》指出“肝脉弦, 心脉钩, 脾脉代, 肺脉毛, 肾脉石。”寸部的心脉和肺脉具有钩和毛的特点。其中, 钩脉指脉象洪大,

来盛去衰,如《素问·玉机真脏论篇》云“夏脉者,心也,南方火也,万物之所以盛长也,故其气来盛去衰,故曰钩。”毛形容脉象的轻虚而浮,也就是浮脉,如《素问·玉机真脏论篇》云“其气来,毛而微,此谓不及。”王冰注“其脉来,轻虚以浮,故曰毛。”如图 3a 所示,基于触觉的频率和阈值特性模型模拟得到的寸部脉象,相比于关部和尺部脉象,其主波上升沿陡峭,更好地体现了来盛去衰的特点;其整体也更能体现出脉势宏大的特点。加之寸部脉是轻取所得,所以符合了心脉和肺脉钩和毛的特点。关部的肝脉具有弦的特点。弦脉指端直而长、指下挺然、如按琴弦的脉象,如《素问·玉机真脏论篇》云“端直以长,故曰弦”。有研究^{[1]200}进一步结合脉象图实例,对弦脉的特点表述为“重搏前波抬高,与主波接近或融合,呈宽大的单峰波,降中峡抬高,重搏波平坦或为负值”。从图 3b 的关部模拟脉象可以看到,此处重搏前波和主波融合,呈现出宽大单峰波的特点,另外,波形的降中峡变浅,重搏波平坦。尺部的肾脉具有石的特点。《难经·十五难》曰“冬脉石者,肾北方水也,万物之所藏也,盛冬之时,水凝如石,故其脉之来,沉濡而滑,故曰石。”图 3c 中,尺部模拟脉象的主波和重搏波幅值均较小,整体体现出脉势细弱的特点,加上尺部脉是重取(即沉取)所得,所以符合肾脉石的特点。

3 从触觉频率和阈值特性探讨寸口脉象

中医传统理论认为脉象是气和血共同作用所产生的脉的状态变化^{[1]26-28}。基于此,对脉象的物理研究应该考虑经络和血流两方面的因素。当前对脉象的物理研究基本上是从表征血流的脉搏波的传输及变化的角度来认识的^{[1]1-16}。现代医学基于血流动力学和脉搏波的理论,往往认为寸口处范围不过数厘米,相对于数米长的脉搏波波长,寸关尺部位的脉搏波波形响应应该不存在差别^[7-8],并有传感器测量的结果予以验证^[9-11]。应用传感器在寸关尺部所采集到的数据是相同的,并不符合中医经典著作中对于寸关尺处“肝脉弦,心脉钩,脾脉代,肺脉毛,肾脉石”的不同脉象响应的描述。

从血流动力学和脉搏波的理论来看,寸关尺部的血管内脉搏波响应不存在明显差别,但是寸口部的解剖结构造成切脉时三部的最适指端按压力存在差异。人的神经系统感知存在着一定的频宽和阈值特性,在不同的按压指力下,神经感知的阈值是不

同的。结合脉搏波信号在频域表现出的指数衰减特征,诊脉者采用不同的按压指力时就会感受到血管内血压变化所蕴含的不同频率范围的脉搏搏动信息,从而产生不同的切脉感受。具体地说,从寸部到关部到尺部,因为血管的皮下深度依次增加,所需的最适切脉按压力逐渐增大,切脉时在三部的触觉阈值也随之增大(即触觉灵敏度下降),这就相当于指端触觉在三部切脉时表现为不同频域带宽的滤波器,选择性地采集到血压变化中脉搏波信号不同部分的生理病理信息。寸部血管较浅,所需切脉按压力小,切脉时触觉的灵敏度最大,感受到的生理病理信息范围较大,包括了脉搏波中基频至较高频的信号部分。尺部血管较深,所需切脉按压力大,切脉时触觉的灵敏度最小,感受到的生理病理信息范围也较小,对应于脉搏波中基频至低频的信号部分。关部的情况居于寸尺二者的中间。与此不同,传感器在不同的按压力度下其频率响应都是一致的,不存在人的神经系统感知的这些精细变化,所以其产生的脉搏波的寸关尺部波形也自然是一致的,除了不同指力引起传感器与皮肤接触面的变化所产生的波形幅值改变。这就解释了为什么传统中医脉诊和现代脉诊学通过传感器测量会形成不同的脉象认识。作为对该观点的检验,本研究通过数学模型分析和比较了传感器测量所得脉象和诊脉时轻取、中取、重取所得脉象,发现寸部轻取所得脉象相对于传感器测量到的脉象有细微差别,而关部中取和尺部重取所得的脉象从波形的形状和幅值上与传感器测得的脉象有明显的差异。由此验证了上述解释在逻辑上的正确性。

关于寸关尺部脉象各自对应的不同触觉感知频宽,本研究从触觉感知理论上进行了论述并进行了概念性划分,然后将其用于触觉感知的数学模型以进行三部脉象的定量分析。但是,模型中使用的具体的触觉感知频宽数值并非一成不变的。一方面,因为人的差异,包括不同的诊脉者即使进行同样的切脉操作时也会存在切脉力度的差异和个人触觉灵敏度的差异,不同的患者其寸口部的皮肤和血管组织性状存在差异从而影响所需的按压力,甚至同一患者在不同生理病理状态下其寸口部的组织性状也存在差异。另一方面,目前学术界缺乏对于不同按压指力所对应的触觉阈值的定量研究,因此本研究对于不同按压指力引起触觉阈值及触觉感知频宽变化的过程采取了简化描述。为了进一步提高对于脉诊中触觉感知特性的建模,后续的研究中一方面需

要考虑诊脉者和患者的个体差异,将本研究所开发的模型先个体化标定参数然后再使用;同时需要针对本研究中的简化处理,结合最新的神经生理学研究成果进行模型的深化和提高,从精确性和可靠性等方面进一步改进模型。

本研究发现运用所开发的模型模拟出的寸关尺部脉象很好地符合了传统中医脉诊学说中心脉钩、肺脉毛、肝脉弦、肾脉石的论述,由此可以对于传统脉诊理论中的寸关尺部脉象特点的论述给出一个物理上的初步解释。这对于阐明传统脉诊理论的内涵,推动临床和基础中医学研究具有促进作用。但是,本研究还不能深入解释中医脉诊理论中寸关尺三部和五脏六腑的具体配位关系,比如寸部脉象为什么表征的是心和肺的生理病理状态,而不是肾和膀胱的,也就是说,寸部脉象的频率响应是怎样对应于心 and 肺,而不是肾和膀胱的疾病状态的。Wang 等^[9]研究提出,脉搏波的前十二个频率分量与十二经脉之间存在彼此一一对应的表征关系和共振现象,以此来解答寸关尺三部和五脏六腑的具体配位关系问题。该观点还存在问题,需要对其进行进一步研究。

另外,在诊脉过程中,不可避免地会涉及诊脉者的主观感觉和判断,在客观性方面劣于传感器测量,所以有些研究中出现了以传感器测量为标准来评价医师诊断偏差的情况。传感器测量研究具有更好的可重复性和客观性,但是中医脉诊理论中对于脉象的描述,并不是指通常研究中所考察的寸口处的脉搏波响应波形。更确切地说,脉诊理论中描述的真实脉象应该是指切脉时脉搏的物理变化在诊脉者头脑中所形成的主观感受。其中诊脉者的触觉感知和运用脉诊理论进行判断是建立真实脉象认识的必要信息处理环节;血管中脉搏波状态本身仅仅是形成真实脉象认识的原始资料和信息,并不是用来判断疾病状态的真实脉象本身。因此,传感器测量得到的原始数据很好地满足了客观性要求,但还未经触觉感知处理和运用脉诊理论进行判断,距真实脉象还有很大差异;本研究中经由触觉感知得到的寸关尺三部不同脉象,是上述原始数据经进一步处理形成的半成品数据,其客观性有所下降但是更趋近于真实脉象,有待于最终运用脉诊理论进行判断而产生真实脉象认识。脉诊客观性研究中,应当避免直接对传感器测量到的原始脉搏波数据进行基于脉诊理论的解读。建议今后更多地研究触觉感知和

思维认知如何影响脉诊过程,在此基础上,对来自传感器的原始数据先进行模拟触觉感知和思维认知过程的数据处理,再参照脉诊理论进行脉象解读。

4 结语

本研究基于触觉感知的频率和阈值特性,对临床动脉血压数据进行了频域和时域处理,发现诊脉时不同的按压指力产生的脉象有很大变化,从而解释了传统中医脉诊和现代脉诊学应用传感器测量产生脉象认识差异的原因。研究还发现依据触觉的频率和阈值特性模型进行处理所得的寸关尺部轻取、中取、重取的脉象很好地符合了传统中医理论中对于各部脉象特点的论述。

参考文献

- [1] 费兆馥. 现代中医脉诊学 [M]. 北京: 人民卫生出版社, 2003.
- [2] 范建忠. 一脉诊病 [M]. 太原: 山西科学技术出版社, 2013: 51 - 54.
- [3] 王光宇. 王光宇精准脉诊带教录 [M]. 2 版. 北京: 中国科学技术出版社, 2016: 61 - 87.
- [4] 许跃远. 大医脉神 [M]. 太原: 山西科学技术出版社, 2010: 31 - 58.
- [5] 刘静波. 试论脉诊与人体的对应关系及指导意义 [J]. 中国中医基础医学杂志, 2003, 9(12): 59 - 61.
- [6] 齐向华. 系统辨证脉学培训教程 [M]. 北京: 人民军医出版社, 2013: 33 - 36.
- [7] 邢玉瑞, 牛溪苑. 寸口脉脏腑配位推演方法研究 [J]. 中医杂志, 2013, 54(12): 991 - 993.
- [8] 冯向荣, 冯久荣, 张小荣. 论脉与脏腑相配合的学说 [J]. 湖南中医药导报, 2002, 8(5): 222 - 226.
- [9] WANG YL, WANG SH, JAN MY, et al. Past, Present, and Future of the Pulse Examination (mài zhěn) [J]. J Tradit Complement Med, 2012, 2(3): 164 - 185.
- [10] DE SÁ FERREIRA A, LOPES AJ. Pulse waveform analysis as a bridge between pulse examination in Chinese medicine and cardiology [J]. Chin J Integr Med, 2013, 19(4): 307 - 314.
- [11] CHUNG YF, HU CS, YEH CC, et al. How to standardize the pulse-taking method of traditional Chinese medicine pulse diagnosis [J]. Comput Biol Med, 2013, 43(4): 342 - 349.
- [12] NICHOLLS JG. 神经生物学 [M]. 杨雄里, 译. 北京: 科学出版社, 2014: 391 - 392.
- [13] DAHIYA RS, METTA G, VALLE M, et al. Tactile sensing-from humans to humanoids [J]. IEEE Trans Robotics, 2010, 26(1): 1 - 20.
- [14] 曹建国, 周建辉, 缪存孝, 等. 电子皮肤触觉传感器

- 研究进展与发展趋势 [J]. 哈尔滨工业大学学报, 2017, 49(1): 1-13.
- [15] 张永会, 高长青, 王嵘. 脉搏波分析方法及其应用 [J]. 北京生物医学工程, 2019, 38(3): 319-326.
- [16] WEI CC, HUANG CM, LIAO YT. The exponential decay characteristic of the spectral distribution of blood pressure wave in radial artery [J]. Comput Biol Med, 2009, 39(5): 453-459.
- [17] TSAI YN, HUANG YC, LIN SJ, et al. Different harmonic characteristics were found at each location on tem radial pulse diagnosis by spectrum analysis [J]. Evi Based Complement Alternat Med, 2018, 2018: 9018271. doi: 10.1155/2018/9018271.
- [18] SHI Y, VALVERDE I, LAWFORD PV, et al. Patient-specific non-invasive estimation of pressure gradient across aortic coarctation using magnetic resonance imaging [J]. J Cardiol, 2019, 73(6): 544-552.
- [19] BROWN AG, SHI Y, MARZO A, et al. Accuracy vs. computational time: translating aortic simulations to the clinic [J]. J Biomech, 2012, 45(3): 516-523.

Discussion on Characteristics of Radial Pulse Manifestation from the Perspective of Tactile Frequency and Threshold

SHI Yubing¹, YANG Hongyi¹, YUAN Ruihua²

1. Institute of Integrative Medicine, Shaanxi University of Chinese Medicine, Xianyang, 712046; 2. Institute for Real-world Clinic, Shaanxi University of Chinese Medicine

ABSTRACT Radial pulse and *zang-fu* (脏腑) organs coordination theory lays a good foundation for pulse diagnosis in traditional Chinese medicine (TCM). The tactile perception model of pulse diagnosis was initially established under Weber-Fechner Law and by considering the characteristics of the tactile frequency and threshold. The frequency-domain and time-domain processing of clinical data on arterial blood pressure was managed through the established model, and the results were compared to explain the differences between palpation and sensor measurement conditions in pulse manifestation. It was found that pulse manifestation changed with finger pressure during pulse diagnosis, which was affected by the characteristics of tactile frequency and threshold, but there was no such change when the sensor was used to measure the pulse, thereby explaining the difference between palpitation-based TCM pulse diagnosis and sensor measurement-based modern pulse diagnosis in understanding pulse manifestations. The pulse manifestations established through the tactile perception model were found to be in line with the characteristics of *cun-guan-chi* (寸关尺) under lifting, pressing and searching methods described by the TCM theory.

Keywords pulse manifestation; radial pulse; tactile sensation; frequency characteristics; threshold characteristics

(收稿日期: 2021-01-06; 修回日期: 2021-04-25)

[编辑: 邓媛]