

颈动脉超声作为功能性血流动力学监测的研究进展

缪静¹, 侯明^{2*}

¹青海大学, 青海 西宁

²青海大学附属医院, 青海 西宁

收稿日期: 2022年7月15日; 录用日期: 2022年8月10日; 发布日期: 2022年8月17日

摘要

准确判断容量状态及容量反应性是危重症患者液体治疗的关键。颈部多普勒超声作为新兴功能性血流动力学监测方法, 因其即时、可重复性强的优点, 逐渐受到重症医师的关注。本文从容量状态及容量反应性监测的必要性出发, 概述颈总动脉校正血流时间和峰流速呼吸变异率的生理意义及临床应用价值。使无创颈总动脉超声参数判断容量反应性的方式能够在将来更好地应用于急诊室及重症监护室, 从而减少导管相关血流感染及优化医疗资源管理。

关键词

功能性血流动力学监测, 容量反应性, 校正血流时间, 峰流速

Research Progress of Carotid Artery Doppler Ultrasound as a Means of Functional Hemodynamic Monitoring

Jing Miao¹, Ming Hou^{2*}

¹Qinghai University, Xining Qinghai

²Qinghai university Affiliated Hospital, Xining Qinghai

Received: Jul. 15th, 2022; accepted: Aug. 10th, 2022; published: Aug. 17th, 2022

Abstract

Accurate determination of volume status and fluid responsiveness is the key to fluid therapy in

*通讯作者。

critically ill patients. As an emerging method of functional hemodynamic monitoring, Carotid Doppler ultrasound has gradually attracted the attention of critical care physicians because of its advantages of immediate and reproducibility. Starting from the necessity of volume status and fluid responsive monitoring, this paper summarizes the physiological significance and clinical application value of the carotid corrected flow time and respirophasic variation in carotid artery blood flow peak velocity. The method of determining fluid response by noninvasive carotid Doppler ultrasound can be better applied to emergency rooms and intensive care units in the future, thereby reducing invasive catheter related blood stream infection and optimizing the management of medical resources.

Keywords

Functional Hemodynamic Monitoring, Fluid Responsiveness, Corrected Flow Time, Blood Flow Peak Velocity

Copyright © 2022 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 功能性血流动力学监测与临床液体决策

1.1. 血流动力学监测的必要性

循环衰竭的危重症患者因其病理生理的复杂性,往往需要精准、实时的血流动力学评估。准确的容量判断是液体治疗的关键。容量过多引起静水压升高,导致器官水肿,影响器官功能的恢复,而容量不足则会引起循环不稳定,组织低灌注,导致器官功能衰竭。在休克复苏早期强调的是充足的容量复苏,避免组织低灌注,但到了休克恢复期,则强调反向容量复苏,需要主动进行脱水治疗,减轻组织水肿,促进器官功能恢复。

功能性血流动力学监测(functional hemodynamic monitoring, FHM)能够通过直接测量心脏每搏输出量(stroke volume, SV)或其替代指标评估机体对前负荷变化做出的心血管反应,判断此时 Frank-Starling 曲线的斜率,当双心室处于曲线上分支时,患者心功能储备充足,可充分液体复苏;但对于已接近 Frank-Starling 曲线平台区域的休克患者,此时心功能代偿已耗尽,容量反应性差,过多的液体摄入可进一步恶化心功能,造成肺循环和(或)体循环静脉淤血,因此在治疗过程中动态应用功能性血流动力学监测,并以此对异常的血流动力学做出定性、定量的评价,区别容量状态异常、心脏收缩舒张功能障碍、血管麻痹等原因,从而选择治疗方向[1]。

1.2. 模拟补液:被动抬腿试验

被动抬高双腿试验(passive leg raising, PLR)一直以来是处理循环衰竭的一项急救措施。重症医师逐渐意识到液体过负荷的危害,而 PLR 恰好能够模拟补液,大约将 300 毫升左右的静脉血从下半身转移至右心房,血流动力学影响快速可逆,多数患者可以完全耐受。并且在基于每搏量呼吸变化的液体反应指标不能使用的情况下,PLR 仍能保持可靠,因此 PLR 作为功能性血流动力学监测方法,可以通过改变前负荷状态的方法来预测容量反应性[2]。在进行 PLR 时,首先将患者上半身抬高 45°,保持半卧位、静息状态约 10 分钟,再将上半身放平且下肢抬高约 45°,操作过程中胸腹平面与下肢间的角度不变。近年来,PLR 作为一项可逆的补液方式,在临床上普遍受用,即根据 PLR 前后 SV 或 SV 替代指标的变化,从而判断此时机体的容量反应性,对临床补液提供部分依据。

1.3. “延伸的听诊器”：床旁超声检查

液体治疗具有双向性, 在缺乏足够血流动力学监测的情况下, 无法评估其确切利弊。早期识别机体容量缺失及组织灌注不足, 选择恰当的补液时机、清除氧债至关重要[3]。有创的肺动脉导管和脉搏指示连续心输出量监测技术目前是重症监护室中血流动力学监测的金标准, 但出于安全性和临床实用性的考虑, 微创或无创心输出量监测的代替指标逐渐受到重视[4]。近年来, 床旁超声检查(Point of care ultrasound, POCUS)逐渐发展为血流动力学监测的有效工具, 成为 FHM 中重要的一员。

重症经食管心脏超声(transesophageal echocardiography for critical care, TEECC)因其成像稳定和准确性高的特点在动态指导血流动力学管理方面显示出较大的优势。多项研究证实食管多普勒超声在监测心输出量方面具有很高的有效性, 与肺热稀释法具有高度临床一致性, 是容量状态的可靠预测指标[5] [6]。早在 1977 年, 一项里程碑式的随机对照研究证实食管多普勒超声测量降主动脉校正血流时间(corrected flow time, FTc)联合 SV 动态变化指导股骨骨折术后液体管理[7], 以 FTc 小于 0.35 秒为低血容量阈值, 反复给予液体治疗以达到最佳 SV, 结果显示实验组住院时间减少 39%。此外, 对于应用体外膜肺氧合(ECMO)、心肺复苏术后、俯卧位通气患者的血流动力学管理也具有一定的可行性, 也可联合呼气末阻断试验等进行容量反应性的判定。

然而 TEECC 作为侵入性操作具有一定的风险, 针对操作的流程和结果的判读都要求动态精准的专业技术支持, 无法广泛应用于急诊室、抢救室等。而颈总动脉作为主动脉的二级分支, 且位置表浅、超声图像质量高、测量可靠性及重复性较好的特点, 通过计算颈总动脉校正血流时间(Carotid corrected flow time, ccFT)及峰流速变异率(Δ carotid artery blood flow peak velocity, Δ Vpeak-ca)结合 PLR 有望成为急症、危重症患者血流动力学判断的有效工具。

2. 颈总动脉多普勒超声

2.1. 浅述颈总动脉多普勒波形

颈总动脉的测量是一个较新概念, 国内目前对其正常范围及临床应用的研究较少。颈总动脉多普勒血流频谱能够提供收缩期峰值流速(PSV)、舒张末期最低流速(EDV)、阻力指数(RI)等。通过测量和计算获取 ccFT 和 Δ peak-ca。颈总动脉与主动脉流出道具有相似的血流特性, 其波形从动脉收缩的上升支到动脉波形的压力峰值, 逐渐到收缩动脉压力波形的降支, 直到因主动脉关闭, 血管内压力小幅度上升出现重搏波切迹, 最后出现舒张期波形。从收缩上行冲程(图 1: A 点)开始到重搏切迹低谷处(图 1: B 点)的距离称为血流时间(flow time, FT)或射血时间(systolic ejection time, ST), 校正心率变异性后, 称为校正血流时间(FTc), 反映了心脏收缩的持续时间, 其持续时间的变化考虑与 SV 变化相关[8] [9]; 将一个完整波形所持续的时间(图 1: C 点至 D 点)称为循环时间(cardiac cycle time, CT), 即一次心动周期时间; 动脉波形顶点的流速称为峰流速, 并且存在呼吸变异, 将其最高点称为收缩期最大峰流速(Vpeak MAX), 将最低点称为收缩期最小峰流速(Vpeak MIN)。通过公式计算颈总动脉峰流速变异率(Δ Vpeak-ca = $2 \times (V_{\text{peak MAX}} - V_{\text{peak MIN}}) / (V_{\text{peak MAX}} + V_{\text{peak MIN}}) \times 100\%$); 目前主要应用 Wodey's 公式(ccFT = FT + 1.29 × (HR - 60))计算 ccFT, 能够更好地校正心率的影响。

2.2. 从生理学角度出发: ccFT

Kenny 等人通过对健康志愿者 17,822 个心动周期进行分析, 发现 ccFT 在正常血容量状态下变异系数为 3.6%; 而通过下体负压模拟失血状态至最低耐受性低血压时的 ccFT 的变异系数为 4.6%。因此在使用颈动脉超声作为临床干预前后的功能性血流动力学评价指标时, 考虑到 ccFT 的生理变异性, 至少需要纳入 6 个波形周期并取平均值, 从而减少误差[10]。

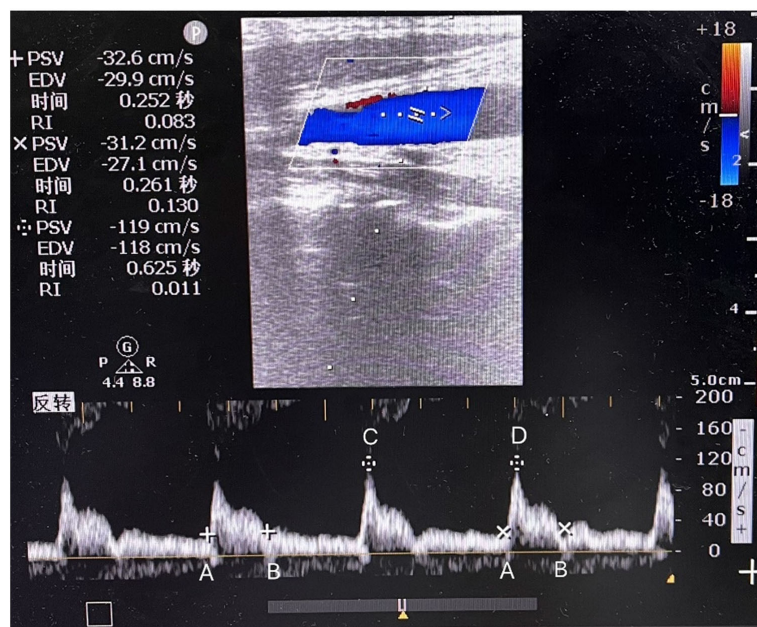


Figure 1. Common carotid artery Doppler waveform: Distance AB: Carotid flow time; Distance CD: Cardiac cycle time

图 1. 颈总动脉多普勒波形: A 点到 B 点的距离为收缩时间(FT); C 点到 D 点的距离为循环时间(CT)

健康人群平均 ccFT 为 325.18 ± 22.15 毫秒, 左右侧 ccFT 测量值没有统计学差异。心率是 ccFT 的独立影响因素, 而女性心率通常比男性快 10 次/分, 故研究发现男性平均 ccFT 为 319.88 ± 21.62 毫秒, 女性为 330.18 ± 21.61 毫秒, 这考虑是心率差别导致的结果, 也可能是由于此研究使用了 Bazett's 公式, 导致心率的不完全校正引起不同性别的 ccFT 差异[11]。相比之下 Wodey's 公式能够更好地校正心率对 FT 的影响[12], 而重症个体往往存在交感神经兴奋, 可能导致个体间心率差别较大, 故建议采用 Wodey's 公式进行心率校正。值得一提的是, PLR 引起的 ccFT 平均变化在不同性别样本之间没有显著差异, 也就是说可以通过 PLR 前后的 ccFT 变化预测容量反应性。

2.3. 校正血流时间的临床意义

FTc 通常被认为与前负荷正相关, 远不止此, 它也是一个很好的全身血管阻力的指标, 与全身血管阻力及后负荷负相关。在临床判断上不可将 FTc 与前负荷孤立对应, 需要考虑到外周血管阻力和后负荷的影响[13]。例如, 应用血管活性药物或心力衰竭等其他原因导致全身血管阻力增加, 即使前负荷不变时, FTc 也会缩短, 故在判断时务必考虑外周阻力和后负荷的因素。当双心室处于 Frank-Straling 曲线的平坦段时, 依据缩短的 FTc 盲目补液大概率无法增加心输出量, 反而发生容量过负荷, 导致肺水肿、静脉系统充血、血管渗漏等不良后果。

也就是说前负荷、后负荷、心肌收缩力都是影响 SV 的因素, 均与 FTc 相关, 而外周血管阻力又将影响后负荷, 成为间接影响因素。因此面对缩短的 FTc 往往需要结合峰流速(Vpeak)进行综合判断[14]。Vpeak 和心肌收缩力相关, 当后负荷增加或心力衰竭时, SV 降低, 会导致 Vpeak 降低, 收缩期波形上升速度变慢, FTc 缩短, 故出现多普勒血流频谱波峰幅度降低, 波形变窄。所以 FTc 缩短往往需要结合 Vpeak, 判断是单纯的前负荷不足导致的 FTc 缩短, 还是合并后负荷增加所致。临床上通常可以联合 PLR 或补液试验来监测每搏量变化引起的 FTc 及 ΔV_{peak} 变化, 从而做出容量状态及容量反应性的初步评估。因此临

床判断尤为重要, 正如物极必反的原理, 过低或过高的容量状态, 都可能导致氧供需失衡、组织灌注不足, 最终导致机体失代偿。

3. ΔV_{peak} 与 ccFT 的临床意义

3.1. 预测容量反应性的价值

早期临床上采用静态指标评估血容量, 例如中心静脉压(CVP)、肺动脉楔压(PAWP)均以压力的形式反映心脏前负荷, 并不能精确地反映机体的容量状态。故目前主要推荐使用动态指标评估容量状态。

测量 ΔV_{peak} -ca 是确定机械通气患者液体反应性的一种简单而可靠的方法。Song 等人纳入 40 例需要进行冠状动脉搭桥手术的机械通气患者, 发现颈总动脉峰流速呼吸变异率(ΔV_{peak})和桡动脉 PPV 与扩容后每搏量指数(SVI)显著增加有关[15], 受试者特征曲线下面积(AUROC)分别为 0.85 (95% CI 0.72~0.97) 及 0.75 (95% CI 0.59~0.90)。预测液体反应性的最佳阈值分别为 11% (敏感性 85%, 特异性 82%)及 13% (敏感性 74%, 特异性 71%)。此外有研究表明当血容量不足时, 血流的会优先分布于颈动脉等大血管, 故相较于桡动脉作为外周动脉, ΔV_{peak} -ca 预测容量反应性的价值高于桡动脉 ppv, 尤其适用于脉压差增高的患者, 并且不同测量者之间一致性良好。但是和其他基于心肺交互作用的动态指标一样, ΔV_{peak} -ca 也不适用于自主呼吸、心率失常、严重瓣膜病及动脉狭窄的患者。

近年来, ccFT 不断被证实与容量状态的变化相关。Barjaktarevic 等人以 PLR 后无创心输出量监测 SV 增加大于 10%界定容量反应性阳性, 结果表明对于休克患者而言, PLR 后 ccFT 增加 7 ms 为截断值预测存在液体反应性, 具有 97%的阳性预测值和 82%的准确性, 并且自主呼吸、高呼吸频率、高呼气末正压对 ccFT 的影响均不大, 这说明 ccFT 对微小的容量状态变化也具有敏感性[16]。一项前瞻性队列研究发现 79 名志愿者平均基线 ccFT 为 320 ms, 平均献血 452 ml 后 ccFT 降至 299 ms, 在进行 PLR 后 ccFT 增加约 23 ms, 也就是说 PLR 大约可以将 ccFT 恢复至献血前水平[17]。Blehar 等人纳入了 56 名需要静脉补液的脱水患者[18], 发现在平均输液量为 1110 ml 的情况下, FTc 从基线的 299 ms 提高到输液后的 340 ms, ccFT 较基线增加 14.9%。一项前瞻性研究纳入了 93 名终末期肾脏病的患者, 通过血液透析平均液体清除量为 2409 ml, 在透析前平均 ccFT 为 345.07 ms, 透析后 ccFT 显著下降, 平均为 307.77 ms, 平均下降 10.04%。并且血液透析排出的液体量与 FTc 的变化之间存在统计学上显著的负相关关系, ccFT 与血管内容量的损失之间存在直接相关性[19]。

3.2. 颈部多普勒超声临床操作

因人工操作超声探头带来的额外误差, 如探头放置角度、对动脉的压迫程度等, 一般建议由专业培训后的医师进行相关操作, 并且进行三次测量取平均结果。超声操作主要如下: 以高频线阵探头置于一侧甲状软骨下方, 尽量减少探头对局部皮肤的压迫。首先以横轴显示颈总动脉及颈内静脉, 90°转动探头, 将探头置于颈总动脉分叉下 2 cm 处以纵轴显示颈总动脉靠近锁骨段图像, 取样角度 $< 60^\circ$, 取样框倾斜角度与血管走行一致, 多普勒超声获取颈总动脉血流频谱。最近, 颈部穿戴式多普勒超声贴片逐渐引起重症医师的兴趣, 能够准确、全程记录波形变化, 也能应用于颈部疾病的持续监测[20]。

4. 展望

功能性血流动力学评估作为重症患者液体治疗的前提, 其目标是优化组织氧供, 避免容量状态的误判导致错误的临床决策。超声测量 ΔV_{peak} -ca 和 ccFT 作为评估容量反应性有潜力的代替指标, 值得在临床上应用和推广。但是因其判断容量反应性的阈值在国内研究较少, 未来仍需更多的研究去证实。

参考文献

- [1] Vincent, J.L. (2019) Fluid Management in the Critically Ill. *Kidney International*, **96**, 52-57. <https://doi.org/10.1016/j.kint.2018.11.047>
- [2] Monnet, X., Marik, P. and Teboul, J.L. (2016) Passive Leg Raising for Predicting Fluid Responsiveness: A Systematic Review and Meta-Analysis. *Intensive Care Medicine*, **42**, 1935-1947. <https://doi.org/10.1007/s00134-015-4134-1>
- [3] Marik, P.E., Farkas, J.D., Spiegel, R. and Weingart, S. (2019) POINT: Should the Surviving Sepsis Campaign Guidelines Be Retired? Yes. *Chest*, **155**, 12-14. <https://doi.org/10.1016/j.chest.2018.10.008>
- [4] Shi, R., Monnet, X. and Teboul, J.L. (2020) Parameters of Fluid Responsiveness. *Current Opinion in Critical Care*, **26**, 319-326. <https://doi.org/10.1097/MCC.0000000000000723>
- [5] Dark, P.M. and Singer, M. (2004) The Validity of Trans-Esophageal Doppler Ultrasonography as a Measure of Cardiac Output in Critically Ill Adults. *Intensive Care Medicine*, **30**, 2060-2066. <https://doi.org/10.1007/s00134-004-2430-2>
- [6] Hammoudi, N., Hékimian, G., Laveau, F., Achkar, M., Isnard, R. and Combes, A. (2017) Three-Dimensional Transoesophageal Echocardiography for Cardiac Output in Critically Ill Patients: A Pilot Study of Ultrasound versus the Thermodilution Method. *Archives of Cardiovascular Diseases*, **110**, 7-13. <https://doi.org/10.1016/j.acvd.2016.04.009>
- [7] Sinclair, S., James, S. and Singer, M. (1997) Intraoperative Intravascular Volume Optimisation and Length of Hospital Stay after Repair of Proximal Femoral Fracture: Randomised Controlled Trial. *BMJ*, **315**, 909-912. <https://doi.org/10.1136/bmj.315.7113.909>
- [8] Kim, D.H., Shin, S., Kim, N., Choi, T., Choi, S.H. and Choi, Y.S. (2018) Carotid Ultrasound Measurements for Assessing Fluid Responsiveness in Spontaneously Breathing Patients: Corrected Flow Time and Respiratory Variation in Blood Flow Peak Velocity. *British Journal of Anaesthesia*, **121**, 541-549. <https://doi.org/10.1016/j.bja.2017.12.047>
- [9] Pare, J.R., Liu, R., Moore, C.L. and Safdar, B. (2016) Corrected Flow Time: A Noninvasive Ultrasound Measure to Detect Preload Reduction by Nitroglycerin. *The American Journal of Emergency Medicine*, **34**, 1859-1862. <https://doi.org/10.1016/j.ajem.2016.06.077>
- [10] Kenny, J.S., Barjaktarevic, I., Mackenzie, D.C., et al. (2021) Carotid Doppler Measurement Variability in Functional Hemodynamic Monitoring: An Analysis of 17,822 Cardiac Cycles. *Critical Care Explorations*, **3**, e0439. <https://doi.org/10.1097/CCE.0000000000000439>
- [11] Hossein-Nejad, H., Banaie, M., Davarani, S.S. and Mohammadinejad, P. (2017) Assessment of Corrected Flow Time in Carotid Artery via Point-of-Care Ultrasonography: Reference Values and the Influential Factors. *Journal of Critical Care*, **40**, 46-51. <https://doi.org/10.1016/j.jcrc.2017.03.009>
- [12] Mohammadinejad, P. and Hossein-Nejad, H. (2018) Calculation of Corrected Flow Time: Wodey's Formula vs. Bazett's Formula. *Journal of Critical Care*, **44**, 154-155. <https://doi.org/10.1016/j.jcrc.2017.10.046>
- [13] Singer, M. (2006) The FTc Is Not an Accurate Marker of Left Ventricular Preload. *Intensive Care Medicine*, **32**, 1089-1091. <https://doi.org/10.1007/s00134-006-0157-y>
- [14] Schober, P., Loer, S.A. and Schwarte, L.A. (2009) Perioperative Hemodynamic Monitoring with Transesophageal Doppler Technology. *Anesthesia & Analgesia*, **109**, 340-353. <https://doi.org/10.1213/ane.0b013e3181aa0af3>
- [15] Song, Y., Kwak, Y.L., Song, J.W., Kim, Y.J. and Shim, J.K. (2014) Respiratory Carotid Artery Peak Velocity Variation as a Predictor of Fluid Responsiveness in Mechanically Ventilated Patients with Coronary Artery Disease. *British Journal of Anaesthesia*, **113**, 61-66. <https://doi.org/10.1093/bja/aeu057>
- [16] Barjaktarevic, I., Toppen, W.E., Hu, S., et al. (2018) Ultrasound Assessment of the Change in Carotid Corrected Flow Time in Fluid Responsiveness in Undifferentiated Shock. *Critical Care Medicine*, **46**, e1040-e1046. <https://doi.org/10.1097/CCM.00000000000003356>
- [17] Mackenzie, D.C., Khan, N.A., Blehar, D., et al. (2015) Carotid Flow Time Changes with Volume Status in Acute Blood Loss. *Annals of Emergency Medicine*, **66**, 277-282.e1. <https://doi.org/10.1016/j.annemergmed.2015.04.014>
- [18] Blehar, D.J., Glazier, S. and Gaspari, R.J. (2014) Correlation of Corrected Flow Time in the Carotid Artery with Changes in Intravascular Volume Status. *Journal of Critical Care*, **29**, 486-488. <https://doi.org/10.1016/j.jcrc.2014.03.025>
- [19] Hossein-Nejad, H., Mohammadinejad, P., Lessan-Pezeshki, M., Davarani, S.S. and Banaie, M. (2015) Carotid Artery Corrected Flow Time Measurement via Bedside Ultrasonography in Monitoring Volume Status. *Journal of Critical Care*, **30**, 1199-1203. <https://doi.org/10.1016/j.jcrc.2015.08.014>
- [20] Kenny, J.S. (2021) Functional Hemodynamic Monitoring with a Wireless Ultrasound Patch. *Journal of Cardiothoracic and Vascular Anesthesia*, **35**, 1509-1515. <https://doi.org/10.1053/j.jvca.2021.01.040>