

无创血流动力学心功能检测仪与心脏超声测量每搏输出量的一致性与相关性

王芳¹, 邓思萌¹, 田小平¹, 齐向龙¹, 宋飞¹, 庞乃栋², 李金喜¹, 高一群¹, 周红智¹, 田颖¹

¹哈特瑞姆心血管病医院, 山东 德州

²首都医科大学附属北京朝阳医院, 北京

收稿日期: 2025年9月21日; 录用日期: 2025年10月14日; 发布日期: 2025年10月20日

摘要

目的: 评估无创同步多频阻抗血流动力学仪(深圳依可YECO-A03)和心脏彩超(飞利浦Affiniti 70和EPIQ 7c, S5-1探头, 频率1.3~2.6/1.6~3.2 MHz)所测每搏输出量(stroke volume, SV)的一致性与相关性。方法: 同步采用超声与同步多频阻抗法对85例心血管疾病患者进行SV测量。若多频阻抗测量过程受到干扰, 则选取超声检测后最近的一段平稳数据进行对比分析。结果: 超声SV (US_SV)与同步多频阻抗法SV (YECO_SV)的线性回归方程为: $US_SV = 0.88 \times YECO_SV + 8.69$ ($R^2 = 0.51$)。平均百分比偏差为0.7%, 一致性限值(limits of agreement, LoA)为-19.5 mL至18.0 mL, 最大百分比误差(maximal percentage error, MPE)为26.8%。结论: 心脏超声二维Simpson法与同步多频阻抗法所测得的SV具有等效性, 在临床应用可互相替代。

关键词

每搏输出量, 无创血流动力学, 心脏超声, 同步多频生物电阻抗法

The Consistency and Correlation of Stroke Volume Measurements between Noninvasive Hemodynamic and Cardiac Monitor and Echocardiography

Fang Wang¹, Simeng Deng¹, Xiaoping Tian¹, Xianglong Qi¹, Fei Song¹, Naidong Pang², Jinxi Li¹, Yiqun Gao¹, Hongzhi Zhou¹, Ying Tian¹

¹HTRM Cardiovascular Hospital, Dezhou Shandong

²Beijing Chaoyang Hospital of Capital Medical University, Beijing

文章引用: 王芳, 邓思萌, 田小平, 齐向龙, 宋飞, 庞乃栋, 李金喜, 高一群, 周红智, 田颖. 无创血流动力学心功能检测仪与心脏超声测量每搏输出量的一致性与相关性[J]. 临床医学进展, 2025, 15(10): 1926-1932.

DOI: 10.12677/acm.2025.15102964

Received: September 21, 2025; accepted: October 14, 2025; published: October 20, 2025

Abstract

Purposes: To evaluate the consistency and correlation of stroke volume (SV) measurements between a noninvasive synchronized multi-frequency impedance cardiography (MF-ICG) device (YECO-A03, Shenzhen Yike) and echocardiography (Philips Affiniti 70 and EPIQ 7c with S5-1 probe, 1.3~2.6/1.6~3.2 MHz). **Methods:** SV was measured simultaneously by echocardiography and MF-ICG in 85 cardiovascular patients. If the MF-ICG measurement was interfered with, a stable segment immediately after the ultrasound measurement was selected for analysis. **Results:** The linear regression between ultrasound-derived SV (US_SV) and MF-ICG-derived SV ($YECO_SV$) was $US_SV = 0.88 \times YECO_SV + 8.69$ ($R^2 = 0.51$). The mean percentage bias was 0.7%, the limits of agreement (LoA) were -19.5 mL to 18.0 mL, and the maximal percentage error (MPE) was 26.8%. **Conclusions:** SV measurements obtained by echocardiography (2D Simpson's method) and synchronized multi-frequency impedance cardiography are equivalent and can be used interchangeably in clinical practice.

Keywords

Stroke Volume, Noninvasive Hemodynamics, Echocardiography, Multi-Frequency Impedance Cardiography (MF-ICG)

Copyright © 2025 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. 简介

每搏输出量(stroke volume, SV)与心输出量(cardiac output, CO)是无创血流动力学监测的基础参数,也是反映体循环状态的重要指标,在重症监护及心功能评估等领域具有重要意义。目前,SV与CO的测量技术包括有创热稀释法及多种无创方法,如阻抗法、脉搏波分析法、超声法、磁共振成像及计算机断层扫描等。其中,阻抗法与脉搏波分析法因其无创、可连续监测的特性而应用最为普遍,阻抗法在急性心衰的诊断过程中也得到了广泛认可[1],但其测量准确性一直备受关注[2][3]。

近年来,一种基于传统胸阻抗法技术革新的新型无创血流动力学监测技术问世。该技术引入现代通信理论与方法,旨在提升信噪比(signal-to-noise ratio, SNR)与测量准确性。本研究涉及的 YECO-A03 设备采用同步多频生物电阻抗法(multi-frequency impedance cardiography, MF-ICG),可同时向人体发送多个频率的交流电并测量相应的生物阻抗变化,以期减少个体组织差异性带来的影响,从而实现更精准的测量。该设备能够实时、连续监测血流动力学状态,但其准确性仍需大量临床数据予以验证。

在重症监护室(ICU)中,床旁心脏超声是评估 SV 的常用工具,可提供心脏结构与功能的详细信息。然而,超声测量 SV 通常基于单次心动周期,无法实现连续监测,且其结果易受患者状态稳定性及操作者经验的影响。相比之下,无创血流动力学监测仪操作简便,可实现实时动态监测[4][5],并能比超声更早地提示循环功能异常[6],为临床干预争取宝贵时间。尽管如此,无创监测仪在临床中的准确性仍需进一步验证。

2. 患者资料

哈特瑞姆心血管医院是一家以心律失常和心血管疾病诊疗为特色的专科中心,医院的核心技术领域

涵盖复杂心律，尤为注重影像学在精准心血管诊疗中的关键作用，构建了以高端影像设备为支撑、多学科专家协同(MDT)为核心的现代化诊疗体系。本研究经山东省德州哈特瑞姆心血管病医院伦理委员会批准，所有 85 名心血管疾病患者均签署了书面知情同意书。采集并确认了患者的性别、年龄、身高、体重、血压及身体质量指数(body mass index, BMI)等基本信息。患者的基础疾病与人口学特征详见表 1。

Table 1. Patients' baseline data and clinic characteristics [$\bar{x} \pm s$ /n (%)]

表 1. 患者基线资料与临床特征[$\bar{x} \pm s$ /n (%)]

项目	整体(85)	男性(49)	女性(36)
年龄(岁)	61.8 $\pm$ 13.0	62.5 $\pm$ 12.7	60.8 $\pm$ 13.6
身高(cm)	166.1 $\pm$ 7.8	170.2 $\pm$ 6.7	160.5 $\pm$ 5.6
体重(kg)	71.1 $\pm$ 13.6	73.7 $\pm$ 14.1	67.7 $\pm$ 12.2
体质指数(kg/m ²)	25.8 $\pm$ 4.3	25.4 $\pm$ 4.1	26.3 $\pm$ 4.5
收缩压(mmHg)	128.6 $\pm$ 15.7	130.7 $\pm$ 14.0	125.8 $\pm$ 17.6
舒张压(mmHg)	77.3 $\pm$ 10.6	78.4 $\pm$ 10.7	75.8 $\pm$ 10.3
高血压(%)	46 (54.1)	30 (35.3)	16 (18.8)
冠心病(%)	45 (52.9)	27 (31.8)	18 (21.2)
高脂血症(%)	23 (27.1)	10 (11.8)	13 (15.3)
糖尿病(%)	18 (21.2)	14 (16.5)	4 (4.7)
心房颤动(%)	16 (18.8)	10 (11.8)	6 (7.1)
冠脉搭桥术后(%)	6 (7.1)	4 (4.7)	2 (2.4)
心衰分级(NYHA II & III) (%)	7 (8.2)	5 (5.9)	2 (2.4)

纳入标准与排除标准：

纳入标准：年龄 20 至 85 岁的心血管疾病患者。

排除标准：(1) 妊娠或哺乳期妇女；(2) 合并血栓栓塞性疾病；(3) 心绞痛加拿大心血管学会(CCS)分级 IV 级或纽约心脏病协会(NYHA)心功能分级 IV 级；(4) 近 1 个月内发生急性脑血管事件；(5) 存在恶性心律失常；(6) 中度及以上主动脉瓣反流；(7) 合并急性或严重全身性感染；(8) 患有严重肝、肾疾病、恶性肿瘤或其他终末期疾病；(9) 存在明显出血倾向、高凝状态或严重血液系统疾病。

3. 方法

3.1. 同步多频阻抗法测量

测量前需清洁电极贴附部位的皮肤。将 4 个传感器沿腋中线平剑突水平分别放置于胸部两侧，另外 4 个传感器分别放置于颈部两侧锁骨上方。上下两对电极同步释放总强度为 0.6 Ma (RMS)、频率范围为 10~350 kHz 的同步多频交流电穿过胸腔，另外两对电极则接收各频率下的胸腔生物阻抗(thoracic multi-frequency bioimpedance, MF-ICG)信号。MF-ICG 信号与心电图(electrocardiogram, ECG)信号被同步采集。变化的 MF-ICG 信号(ΔZ)经高通滤波(排除呼吸波)和低通滤波(降低噪声)处理，以提升心脏信息质量。YECO-A03 基于同步多频同步测量，直接从各频率的 ICG 信号中获取左心室射血时间(left ventricular ejection time, LVET)与血流速度指数(velocity index, VI)这两个计算 SV 的关键参数；随后，结合中国人群生理特征改良传统的 Sramek-Bernstein 公式[7]计算 SV，并可进行时间平均。根据 SV、心率(heart rate, HR)和体表面积(body surface area, BSA)进一步计算每搏指数(stroke index, SI)、心输出量(CO)及心脏指数(cardiac index, CI)等参数。MF-ICG、ECG 波形及所有计算参数均实时显示于设备屏幕。

3.2. 心脏超声测量

经胸心脏彩超由两名训练有素的超声科医师执行，采用分段法对心脏解剖结构及生理功能进行全面形态学与血流动力学评估。检查遵循美国超声心动图学会指南，使用飞利浦 Affiniti 70 及 EPIQ 7c 心脏彩超仪，配以 S5-1 探头(频率 1.3~2.6/1.6~3.2 MHz)，获取所有重要心脏切面(包括标准心尖切面、胸骨旁切面及肋下切面)，以得到所有定性与定量参数。SV 采用二维超声双平面 Simpson 法计算，即通过单次测量左心室舒张末期容积(end-diastolic volume, EDV)与收缩末期容积(end-systolic volume, ESV)并求差(SV = EDV - ESV)得出。为贴近临床实际，超声医师仅选取其认为质量最佳的一次测量结果用于分析。

3.3. 测量流程

无创血流动力学监测需输入患者年龄、性别、身高、体重及无创血压等基本信息。监测自心脏超声定位时开始，持续至超声检查结束，并继续监测患者平静平卧状态 5 分钟。此流程旨在规避超声检查过程中可能对无创血流动力学监测造成的干扰(如患者移动、电极片受压等)。超声检查时，患者先取左侧卧位，后转为仰卧位。在整个 MF-ICG 监测过程中，嘱患者保持安静。检查结束后，收集两种仪器所测得的全部数据。

4. 统计学方法

采用线性回归分析评估两种方法测得 SV 的相关性，采用 Bland-Altman 分析法评估其一致性(包括计算偏差及 95%一致性限值) [8] [9]。统计学显著性水平设定为 $\alpha = 0.05$ (双尾检验) [8] [9]。本研究使用 Python 编程语言(版本 3.13.2)进行数据分析，主要依赖 pandas (版本 1.3.5)与 statsmodels (版本 0.14.5)库。

为平衡不同 SV 绝对值对误差分析的影响，采用百分比误差进行计算：

$$E_i = \frac{x_i - y_i}{x_i} \times 100\%, \text{或} F_i = \frac{x_i - y_i}{\frac{x_i + y_i}{2}} \times 100\%$$

实际数据证明这两者的差距不大，平均百分比误差 $\overline{F_i} = 0.55\%$ ($SD = 13.66\%$)，平均百分比误差 $\overline{E_i} = -0.36\%$ ($SD = 13.64\%$)。

5. 结果

YECO_SV，US_SV 分布由多频和超声得到。表 2 显示它们的统计特征，图 1 显示多频与超声的 SV 数据回归关系，方程为 $US_SV = 0.88 \times YECO_SV + 8.69$ ($R^2 = 0.51$)，表 3 显示 US_SV 与 YECO_SV 的相关性及与一致性评估结果。

采用 Bland-Altman 分析法评估两者差异，结果显示平均偏倚及 95%一致性范围[偏倚 $\pm$ (1.96 $\times$ 标准差)]，具体如图 2 所示。

Table 2. Statistics on the distribution characteristics of YECO_SV，US_SV

表 2. YECO_SV，US_SV 的分布特征统计

指标	YECO_SV	US_SV
均值 $\pm$ 标准差	66.21 $\pm$ 10.95	66.94 $\pm$ 13.50
最小值	46.8	45
最大值	96.84	114
极差	50.03	69

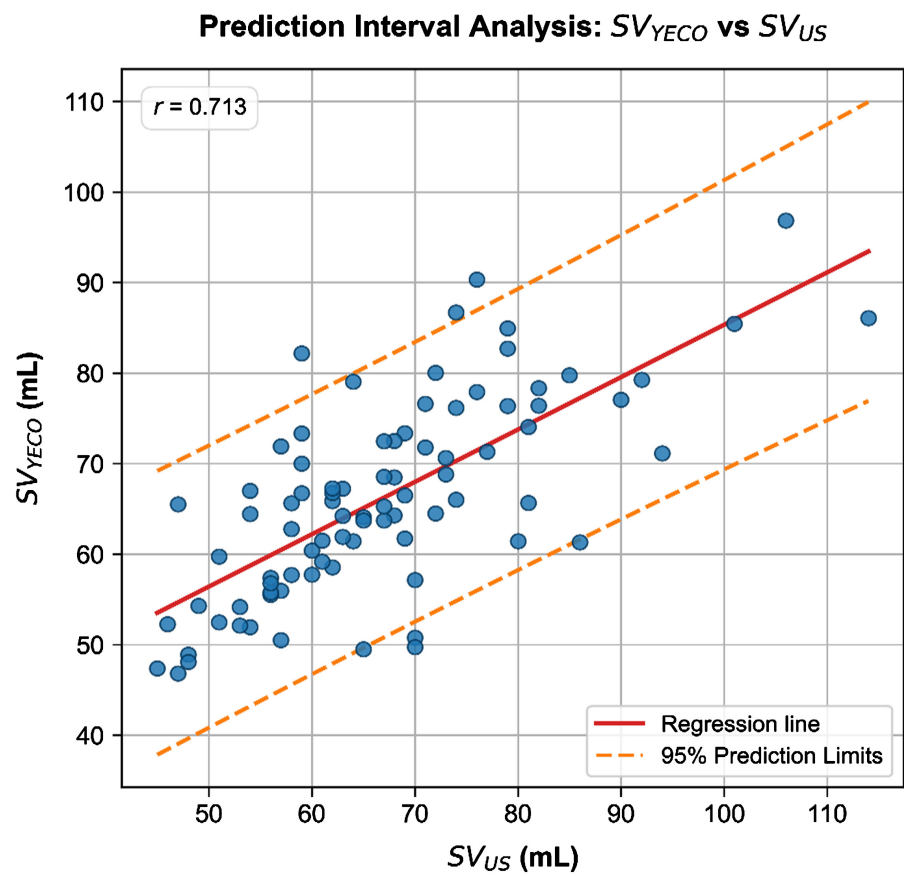
续表

第 25 百分位数	57.74	58
中位数	65.63	65
第 75 百分位数	73.34	74

Table 3. Correlation and bias of *US_SV* and *YECO_SV*

表 3. *US_SV* 与 *YECO_SV* 的相关性及偏差评估结果

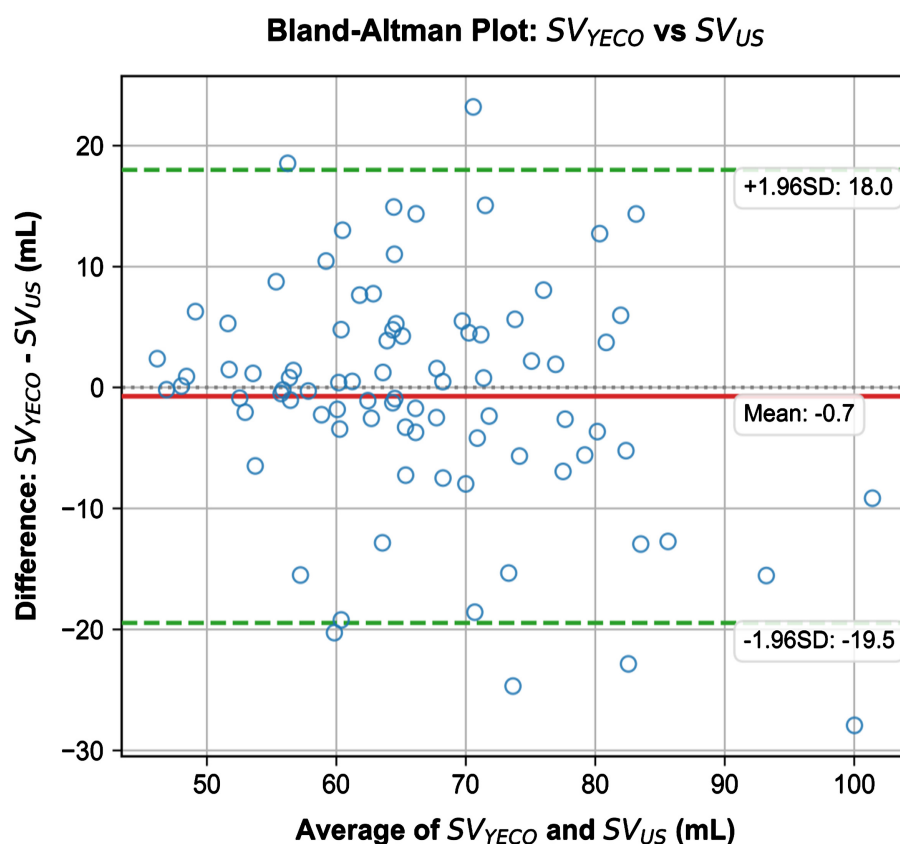
指标	值
相关系数	0.71
p 值	<0.001
偏倚(均数差)	-0.73 ml
偏倚的标准差	9.55 ml
95%一致限上限	17.99 ml
95%一致限下限	-19.45 ml



注释：虚线是 95%的置信区间。

Figure 1. Linear regression analysis of ultrasound SV (*US_SV*) and MF-ICG's SV (*YECO_SV*)

图 1. 超声 SV (*US_SV*)与同步多频阻抗法 SV (*YECO_SV*)的线性回归分析



注释：图中实线表示平均偏差，虚线表示 95%一致性限(LoA)。

Figure 2. Bland-Altman analysis of consistency of echo cardiac SV and MF-ICG SV

图 2. Bland-Altman 方法分析心脏超声 SV 与同步多频阻抗法 SV 的一致性

6. 讨论

生物阻抗法测量 SV/CO 的准确度一直受到医学界的关注[10]，生物阻抗法的改进型得到一些更多的鼓励信息[11]，多频同步阻抗法(MF-ICG)是一种新的方法，旨在提高 SV/CO 测量的准确度。本研究是通过 Bland-Altman 分析与线性回归评估了新型同步多频阻抗法(YECO-A03)与心脏超声(2D Simpson 法)测量 SV 的一致性与相关性。主要结果显示，两种方法测量 SV 的偏差较小(-0.73 mL)，相关性良好($r = 0.71$)，且最大百分比误差(MPE = 26.8%)低于 28.3%的临床可接受标准[12]。这表明两种无创方法在测量 SV 方面具有临床可接受的等效性，与近期其他类似研究结论一致[13]。

在心脏影像学领域，心脏磁共振成像(cardiac magnetic resonance, CMR)被视为左心室容积量化的金标准[13]-[15]。本研究选择超声作为对比方法，是基于其临床普及性及文献支持。如 Marzia Rigolli 等的荟萃分析[14]指出，超声测量 LVEDV 与 LVESV 虽存在系统误差，但因误差同相，其计算的射血分数(EF)及 SV 与 CMR 结果具有良好的一致性[13] [15]。

本研究存在若干局限性。首先，样本 SV 值分布范围相对集中(主要介于 50~80 mL)，在高值区间(80~110 mL)数据不足，可能影响回归模型及一致性评估的外推性。未来需补充更多高 SV 值样本以增强结论可靠性。其次，本研究为单中心研究，结果有待多中心数据进一步验证。最后，超声测量基于单次心搏，而 MF-ICG 可连续监测并取平均值。两种方法在时间分辨率上的本质差异，使得在患者血流动力学状态波动时，难以精确匹配对应心跳周期进行对比，此为方法学上的固有挑战。

尽管存在诸多的缺陷和局限性,初步的结果心脏超声二维 Simpson 法与同步多频阻抗法所测得的 SV 具有等效性,在临床应用中可互相替代。

参考文献

- [1] Müller, C. (2025) Impedance Cardiography in the Diagnosis of Congestive Heart Failure: A Systematic Review and Meta-Analysis. *Cureus*, **17**, e77461. <https://doi.org/10.7759/cureus.77461>
- [2] Sanders, M., Servaas, S. and Slagt, C. (2020) Accuracy and Precision of Non-Invasive Cardiac Output Monitoring by Electrical Cardiometry: A Systematic Review and Meta-Analysis. *Journal of Clinical Monitoring and Computing*, **34**, 433-460. <https://doi.org/10.1007/s10877-019-00330-y>
- [3] Schlöglhofer, T., Gilly, H. and Schima, H. (2014) Semi-Invasive Measurement of Cardiac Output Based on Pulse Contour: A Review and Analysis. *Canadian Journal of Anesthesia*, **61**, 452-479. <https://doi.org/10.1007/s12630-014-0135-8>
- [4] 张燕飞, 陈明秋, 王章星. 胸阻抗法无创心输出量监测在不同胎龄早产儿中的应用效果分析[J]. 特别健康, 2024(1): 113-114.
- [5] 汪高磊, 邢宇彤, 戚家峰, 等. 胸阻抗法对不同术式肺叶切除患者围术期心功能变化的评价[J]. 黑龙江医药科学, 2018, 41(3): 83-85.
- [6] 董伟. 胸阻抗法无创血流动力学监测评估 PPHN 患儿心功能的临床研究[D]: [博士学位论文]. 济南: 济南大学, 2019.
- [7] Bernstein, D.P. (1986) A New Stroke Volume Equation for Thoracic Electrical Bioimpedance. *Critical Care Medicine*, **14**, 904-909. <https://doi.org/10.1097/00003246-198610000-00017>
- [8] Bland, J.M. and Altman, D.G. (1986) Statistical Methods for Assessing Agreement between Two Methods of Clinical Measurement. *The Lancet*, **327**, 307-310. [https://doi.org/10.1016/s0140-6736\(86\)90837-8](https://doi.org/10.1016/s0140-6736(86)90837-8)
- [9] Bland, J.M. and Altman, D.G. (1999) Measuring Agreement in Method Comparison Studies. *Statistical Methods in Medical Research*, **8**, 135-160. <https://doi.org/10.1177/096228029900800204>
- [10] Jensen, L., Yakimets, J. and Teo, K.K. (1995) A Review of Impedance Cardiography. *Heart & Lung*, **24**, 183-193. [https://doi.org/10.1016/s0147-9563\(05\)80036-6](https://doi.org/10.1016/s0147-9563(05)80036-6)
- [11] Abdou, N., Rowisha, M., Elmahdy, H., Tolba, O., Shihab, N. and Elmesiry, A. (2025) FoCUS and Non-Invasive Hemodynamics Monitoring in Neonatal Sepsis. *European Journal of Pediatrics*, **184**, Article No. 456. <https://doi.org/10.1007/s00431-025-06283-6>
- [12] Critchley, L.A.H. and Critchley, J.A.J.H. (1999) A Meta-Analysis of Studies Using Bias and Precision Statistics to Compare Cardiac Output Measurement Techniques. *Journal of Clinical Monitoring and Computing*, **15**, 85-91. <https://doi.org/10.1023/a:1009982611386>
- [13] Guzzetti, E., Capoulade, R., Tastet, L., Garcia, J., Le Ven, F., Arsenault, M., et al. (2020) Estimation of Stroke Volume and Aortic Valve Area in Patients with Aortic Stenosis: A Comparison of Echocardiography versus Cardiovascular Magnetic Resonance. *Journal of the American Society of Echocardiography*, **33**, 953-963. <https://doi.org/10.1016/j.echo.2020.03.020>
- [14] Rigolli, M., Anandabaskaran, S., Christiansen, J.P. and Whalley, G.A. (2016) Bias Associated with Left Ventricular Quantification by Multimodality Imaging: A Systematic Review and Meta-Analysis. *Open Heart*, **3**, e000388. <https://doi.org/10.1136/openhrt-2015-000388>
- [15] Dele-Michael, A.O., Fujikura, K., Devereux, R.B., Islam, F., Hriljac, I., Wilson, S.R., et al. (2013) Left Ventricular Stroke Volume Quantification by Contrast Echocardiography—Comparison of Linear and Flow-Based Methods to Cardiac Magnetic Resonance. *Echocardiography*, **30**, 880-888. <https://doi.org/10.1111/echo.12155>