

先天性心脏病的三维超声心动图：欧洲心血管影像学会/美国超声心动图学会专家共识

John Simpson, MBChB, MD, FESC, Leo Lopez, MD, FASE, Philippe Acar, MD, PhD, Mark K. Friedberg, MD, FASE, Nee S. Khoo, MBChB, H. Helen Ko, BS, ACS, RDMS, RDCS, RCCS, FASE, Jan Marek, MD, PhD, FESC, Gerald Marx, MD, FASE, Jackie S. McGhie, Folkert Meijboom, MD, David Roberson, MD, FASE, Annemien Van den Bosch, MD, PhD, Owen Miller, BMed, and Girish Shirali, MBBS, FASE, *London, United Kingdom; Miami, Florida; Toulouse, France; Toronto, Ontario and Edmonton, Alberta, Canada; New York, New York; Boston, Massachusetts; Rotterdam and Utrecht, The Netherlands; Chicago, Illinois; and Kansas City, Missouri*

中文翻译：清华大学第一附属医院 王廉一

中文校对：华盛顿大学医疗中心 王玉

三维超声心动图（3DE）在先天性心脏病（CHD）患者的管理中越来越重要，特别是术前计划，导管介入的指导和心功能评估。由于良好的声窗和技术的非侵入性，3DE 越来越多地用于儿童。本文的目的是针对 3DE 在先心病的最佳应用提供一个综述，包括技术因素、图象定位、不同病变中的应用、术中指导与功能评估。（*J Am Soc Echocardiogr* 2017; 30:1-27.）

关键词：欧洲心血管影像学会, 美国超声心动图学会, 推荐, 三维超声心动图、先天性心脏病

一、简介

三维超声心动图（3DE）在先天性心脏病（CHD）患者的管理中越来越重要，特别是术前计划，导管介入的指导和心功能评估。由于良好的声窗和技术的非侵入性，3DE 越来越多地用于儿童。本文的目的是针对 3DE 在先心病的最佳应用提供一个综述，包括技术因素、图象定位、不同病变中的应用、术中指导与功能评估。

二、3DE 成像技术

探头

3DE 和探头技术的进步已被详细描述¹⁻³，上世纪 90 年代始，有平行处理能力的矩阵探头的发展让实时 3DE 成为可能^{4, 5}。新生代 3D 探头越来越小巧几乎媲美二维超声心动图（2DE）探头。小型高频婴幼儿 3DE 探头的出现（2-7 MHz）提高了空间和时间分辨率，对心率快的小婴幼儿尤佳^{6, 7}。同样，小型化促成了成人三维经食管超声心动图（TEE）探头的发展⁸。

数据流

理想来说，3DE 探头应该能生成不次于 2DE 探头的二维图像。一些 3D TEE 探头可以实现这一点，但经胸 3DE 探头的 2D 图像质量仍然不如质量精良的专用 2D 探头。高频小儿 3DE 探头与相应的 2DE 探头比较差异最为明显。因此，使用组合 2DE-3DE 探头在较小的患者并不是常规。生产商建议，目前的三维 TEE 探头用于体重 > 30 公斤的病人，一些小儿心脏病医师将其用于更小的患者。操作者应该留意特定探头生产厂家的建议，在任何患者中，要权衡用较大探头引起的口咽、食道损伤的并发症风险与所带来的附加 3DE 诊断价值。对身体太小不能容纳 3D TEE 探头的患儿，术中心外膜经胸 3DE 探头成像是可行的替代⁹。

数据采集模式

先心病的三维超声心动图成像，特别是针对瓣膜病变和复杂病变时，良好的空间分辨率和时间分辨率是首要的。根据不同临床需求，矩阵探头具有不同的数据采集方式。例如，在评估右室双出口时，整合房室瓣、室间隔和大动脉在一起的综合信息是临床决策所必须，而测量一个孤立 VSD 的大小并不需要这样的扩展视野。虽然不同模式的确切配置和命名在不同供应商各异，但其特征有共通之处。

2D 同时多平面模式 目前矩阵探头允许成像平面 360° 电子旋转，还可以同时显示能在水平及侧向电子转向的多个 2D 成像平面。切割平面显示于投影上，缺点是时间分辨率降低¹⁰。用途包括房间隔缺损

(ASD) 大小和边缘长度的评价¹¹, VSD 的大小和形状, 房室瓣的形态及反流 (图 1 A B), 流出道和半月瓣。

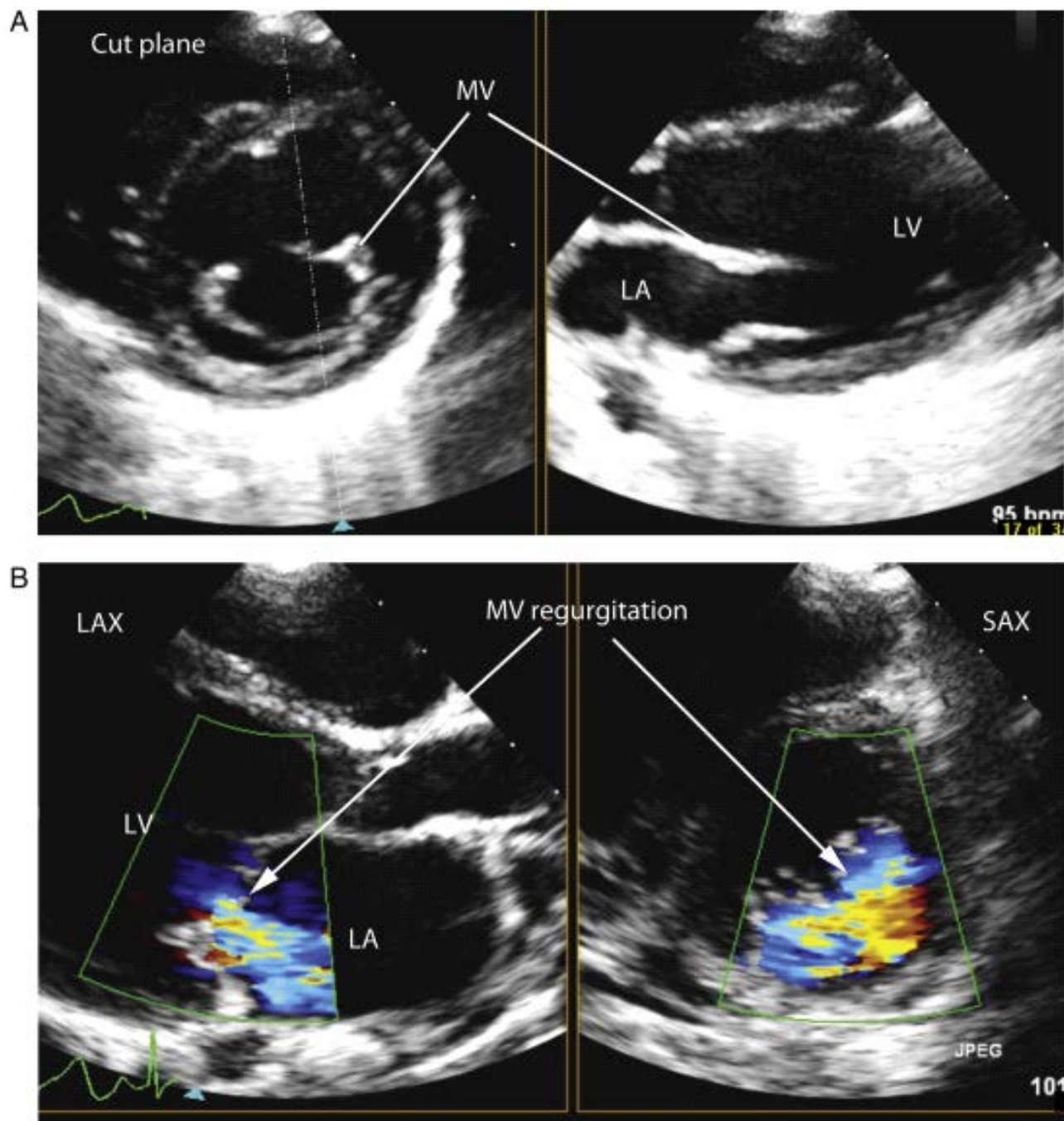


图 1: 交叉平面成像 (A) 经胸超声心动图显示二尖瓣的交叉平面成像, 用户定义截面 (虚线和三角形) 显示的二尖瓣短轴切面 (左图) 和相应的长轴观 (右图)。(B) 二尖瓣返流的交叉平面成像, 让返流束精确定位在长轴切面 (左图) 和短轴视图 (右图)。切割平面由三角形表示。LA, 左心房; LAX, 长轴; LV, 左心室; MV, 二尖瓣; SAX, 短轴。

实时 3DE 模式 实时 3DE 能显示一个可调的锥体容积，最大限度地减少儿童不能合作的问题，因为在相邻的亚容积之间没有潜在的‘缝合’伪像影响。增加感兴趣区大小会降低帧频，而有限的视野不利于显示复杂先心病不同结构的相互关系，后者对于决策是至关重要的。一些生产商有进一步的 3D 模式，允许操作者选择感兴趣区，但帧频相对较低，特别是开启彩色血流成像时。这种模式主要用在导管介入治疗，特别是 ASD，VSD，和房室瓣。根据系统不同，可以调整厂商设置，允许操作者以牺牲线密度为代价优先提高容积率，从而实现较高的时间分辨率，但较低的空间分辨率。

心电门控的多心动周期采集。目前的成像技术下，ECG 门控多心动周期图像采集常用于小儿 3DE 检查，因为它能获得大视场且具有足够的时间分辨率。然而，电子“拼接”的数据量超过 2-6 个心跳可能会产生伪像，与病人呼吸或运动有关，特别是在年幼的儿童。在全麻机械通气下的孩子这不是问题，因为机械通气可以暂时暂停，在睡眠或镇静时问题也不大。虽然单心动周期容积采集已经推出，但有限的时间分辨率在心率快的小婴幼儿不够用，除非感兴趣区小允许缩小成像角或感兴趣区相对静态。

3DE 彩色多普勒。3DE 彩色多普勒可以添加到上述任何成像方式。与 2DE 一样，开启彩色血流多普勒会降低时间分辨率。根据感兴趣区大小，对于房室瓣等快速移动的结构可达到的帧频可能过低。一些厂商可能会允许用户牺牲空间分辨率优先时间分辨率以获取可接受的帧频。另一种方法是使用心电门控多心动周期采集来获取可接受的帧频。

3DE 采集基本原则

3DE 先心病成像采用与成人相同的探头和超声系统，此外增加了适合成像婴儿和儿童的高频探头。侧重儿童或成人先心病相关，一般要点总结如下。在所有患者中，必须认真进行 2D 图像质量优化以保证 3DE 数据质量。在儿童超声穿透不是问题时，应尽可能使用高频 3DE

探头，缩小图像扇角只包括感兴趣区。轴向分辨率比水平及侧向分辨率高，因此可根据评估病变的不同优化探头扫查位置。例如，二尖瓣可以从心尖或胸骨旁扫查以显示两组瓣叶及瓣下装置¹²。在显示生成的 3D 图像前综合查看多个平面的图像尤为重要，有助于避免误诊。有关 3DE 伪像的全面综述已出版可供参考¹³。

相对静止的心脏结构成像，如 ASD 和 VSD，因为时间分辨率足够，可以采用实时 3DE 或 3DE 局部放大模式。对于拥有薄瓣膜的较小患者，采集和后处理中的增益设置特别重要，减少可能会阻碍可视化的“噪声”（图 2a 和 b），同时注意避免增益不足造成的“孔”或其他伪像。3DE 采集的增益设置一般略高于常规二维增益，因为可在后处理时减小增益以优化图像，而如果采集过程中使用的增益太小，后处理时增益的增加也不能恢复图像的不充分显示部分。这对瓣膜等纤薄结构影响尤其明显。

先心病 3DE 图像的显示，特别是瓣膜结构，需要特别考虑，此外个性化的倾斜或旋转来显示感兴趣区也有帮助（图 3A 和 B）。先心病的 3D 显示模式类似于普通成人 3D 模式，包括

(i) 体积渲染，(ii) 表面渲染，(iii) 多平面重建图像（MPR）显示^{14,15}。容积绘制数据集可以以电子方式进行细分，让操作者从所需的任何角度在多个切面切割心脏，显示感兴趣的心脏结构。这在先心病患者手术或治疗干预前尤其有用。表面渲染以实行特征呈现结构或器官的外表，主要用于观察心脏结构的大小、形状和功能¹⁶。此模式的分析软件包括半自动和全自动心内膜边界检测以定量左心室（LV）和 RV 功能^{17,18}，以及用于量化瓣膜功能的半自动二尖瓣瓣叶运动检测，两者都可能受到先心病时出现的异常心室形态或瓣膜形态的限制。

MPR 模式让 3DE 数据以四屏图显示，通过切割三维数据集成用户可调整的三个平面（矢状面，冠状面和横向）实现。MPR 平面的调整方法见在线补充说明 PowerPoint 1。显示常规 2DE 不能显示的切面可以帮助理解复杂结构，并方便许多先心病如 ASD、VSD 大小的测量。瓣口面积、有效瓣口面积、返流的流颈面积都可以通过调整切面进行测量，避免不恰当的缩短或倾斜测量。¹⁹⁻²¹

未来方向

单心动周期采集中时间分辨率的提高或改进拼接伪像的后处理软件将会提高 3DE 在较小患儿的应用。

可分析异常形态的瓣膜和腔室的软件包也将让先心病患者的 3DE 检查受益。

建议

3DE 应根据患者量身定制。婴幼儿和心外膜 3DE 检查应使用小巧高频的 3DE 探头。如果病人大小允许，3D TTE 不足以提供计划治疗所需的影像信息时，应考虑 3D TEE 检查。

三、图像显示及定位

儿童和先心病的超声心动图评估已有公布的标准，包括 TTE²²、TEE²³、和定量²⁴。最近发表的文献确定了使用三维超声心动图的成人标准¹⁴，但后者明确排除对于先心病的应用。在先心病患者中，病人心脏位置、内脏位置、心内连接、和空间排列都可能是异常的，与获得性心脏病相比，这是一个重大挑战。三维超声心动图方便了心脏间隔和房室瓣的正面投影成像²⁵，可

00 在 z 平面旋转到任意方向。如果用钟面比喻 z 平面的旋转，就是通过图像顺时针或逆时针方向转动实现解剖正确定位（见在线补充数据，演示 1）。如果可能，应保留相邻的解剖标志以协助定位。超声心动图评价先心病患者往往辅以其他成像方式，包括磁共振成像（MRI）、计算机断层扫描（CT）和血管造影。为了获得最大价值，三维图像的定位应该是一致的、直观的，比如用生理解剖的方法来显示图像²⁶，将心脏投影在人体直立的相同方向。用这种方法，上方的结构会显示在图像的最上方。这种解剖正确的方法是与 MRI 和 CT 的投影图像一致的^{26,27}。解剖定位的应用可以通过特殊举例来说明。

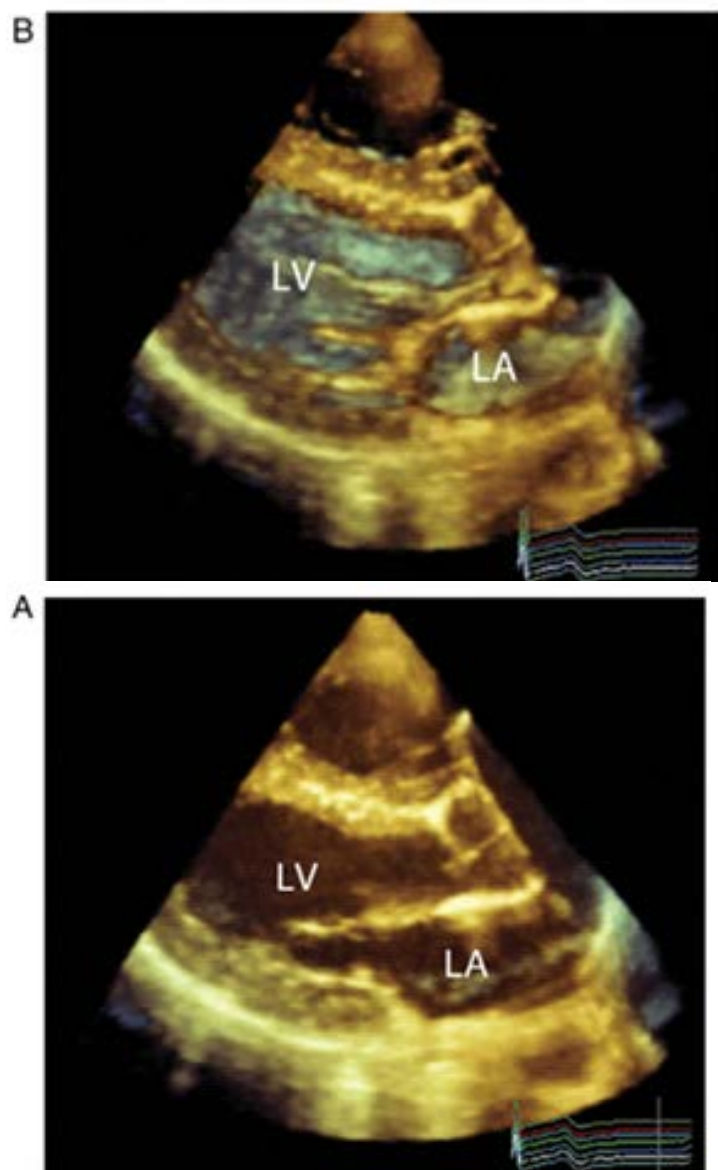


图 2 增益设置对三维图像的影响。(A) 经胸左心室长轴切面增益设置过高。左心房和左心室的腔内不透明，因此图像中没有深度感。(B) 适当减少增益，去除腔内噪声后远场结构可见。在这个例子中，远场结构的颜色编码为蓝灰，近场编码为亮黄棕色。LA，左心房；LV，左心室。

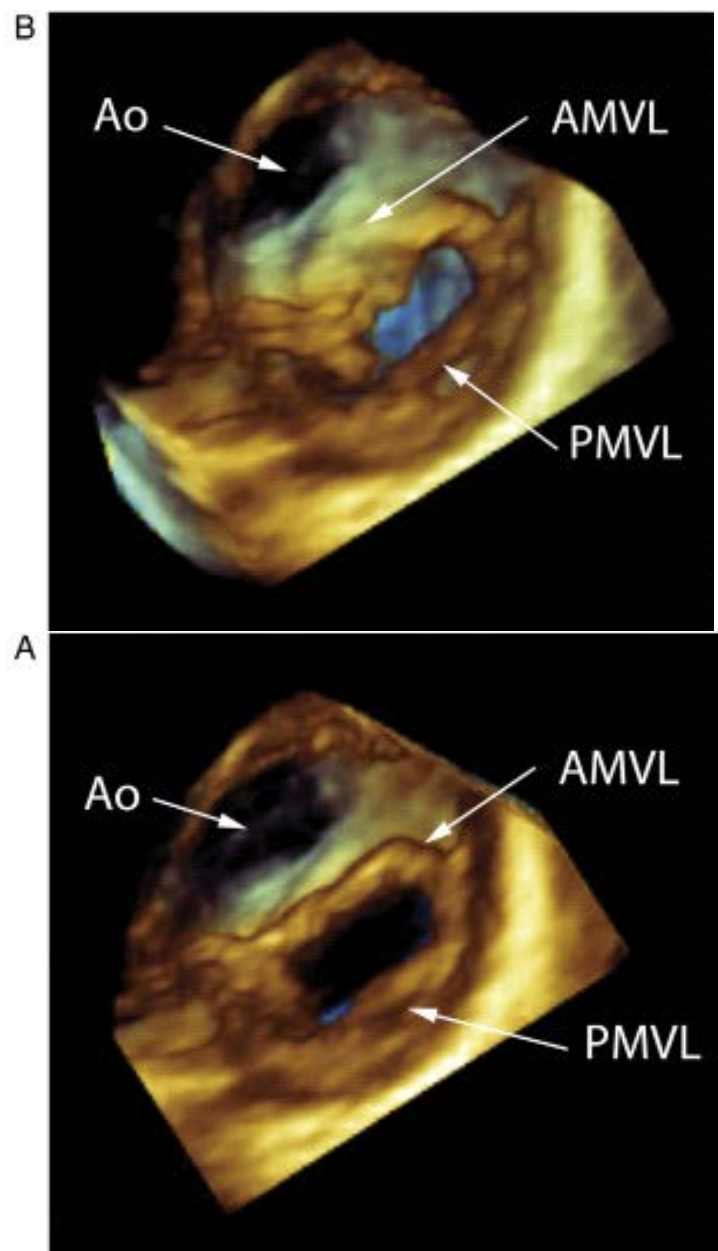


图 3 经胸 3DE 的二尖瓣的视图 (A) 心室面观的正常二尖瓣。直接正面观察二尖瓣使前叶和后叶的前瓣缘与位于远场的主动脉同时可见。(B) 与图 A 类似投影, 图像稍作旋转可以观察二尖瓣前叶的长度。这有助于该区域异常病变的成像, 如二尖瓣裂或房室间隔缺损时的桥叶显示。AMVL, 二尖瓣前叶; Ao, 主动脉; PMVL, 二尖瓣后叶。

房间隔

房间隔可以分别从左右心房显示。从右心房投影可以观察到一些重要标志, 如上腔静脉、下腔静脉、升主动脉、三尖瓣、卵圆窝和冠状窦口。优选的解剖图像定位是上腔静脉置于图像最上端, 三尖瓣置于房间隔的右侧 (图 4)。

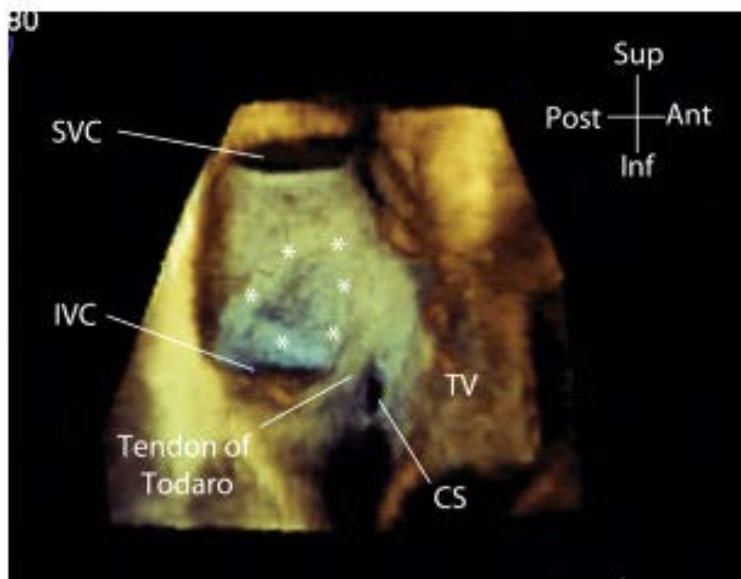


图 4 正常房间隔。经食管 3DE 从右心房角度看房间隔。图像依解剖定位，所以上腔静脉和下腔静脉分别显示于图像的最上和最下。此图由 3D TEE 在四个心动周期采集使用全容积成像。星号标识卵圆窝边缘。CS，冠状窦；IVC，下腔静脉；SVC，上腔静脉；TV，三尖瓣。

室间隔

室间隔可以分别从右室侧或左室侧观察。按照传统，室间隔各部分以去掉右室游离壁后从右室侧观察的方式命名。依照解剖定位模式，心脏的膈缘显示在图像最低处，右室心尖位于图像右侧，右室流出道显示在图像最上方，这样，重要的标志性结构如三尖瓣、调节束及隔缘肌小梁都会按解剖显示于适当位置（图 5A）。同样，左室侧室间隔也可以按解剖投影（图 5B）显示，同时包含室间隔和左室流出道。

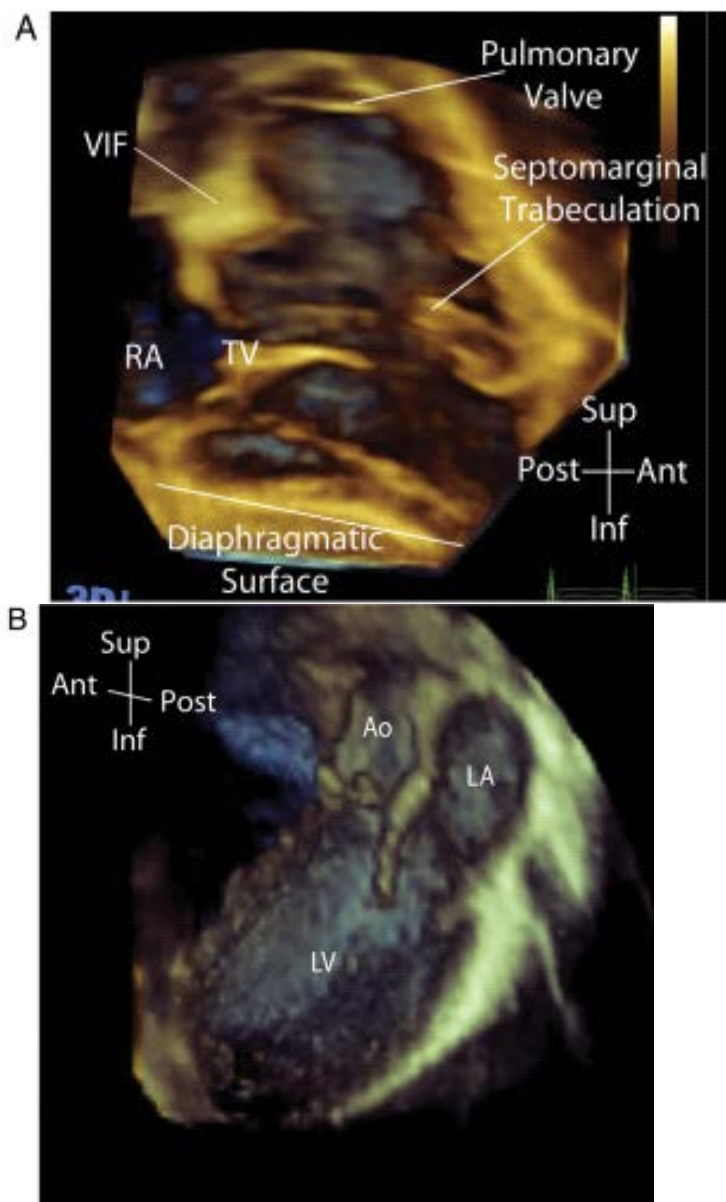


图 5 (A) 经胸 3DE 图像的正常室间隔右室面。右室游离壁已经后处理切掉。很容易识别看到重要的解剖标志, 包括三尖瓣、室上嵴, 和隔缘肌小梁 (隔束)。这种类型的视图可用于所有室间隔缺损类型的投照。(B) 左侧观正常室间隔。经胸 3DE 胸骨旁长轴得到全容积三维超声心动图数据集。左心室的游离壁已切断, 可从左室腔直视室间隔。可以显示光滑的左室壁。Ao, 主动脉; LA, 左心房; LV, 左心室; RA, 右心房; TV, 三尖瓣; VIF, 室上嵴。

房室瓣

先天性心脏病时, 左侧房室瓣不一定是双叶瓣的二尖瓣, 右房室瓣也不一定是三尖瓣。无论瓣膜的形态如何, 还是从心室或心房面直视, 生成的 3D 图像, 通过旋转要使心脏的膈面永远显示在最下方 (图 6A 及 B)。这意味着, 在房室隔缺损时, 上桥叶将显示于图像最上方, 下桥叶显示于最下侧 (图 7)。

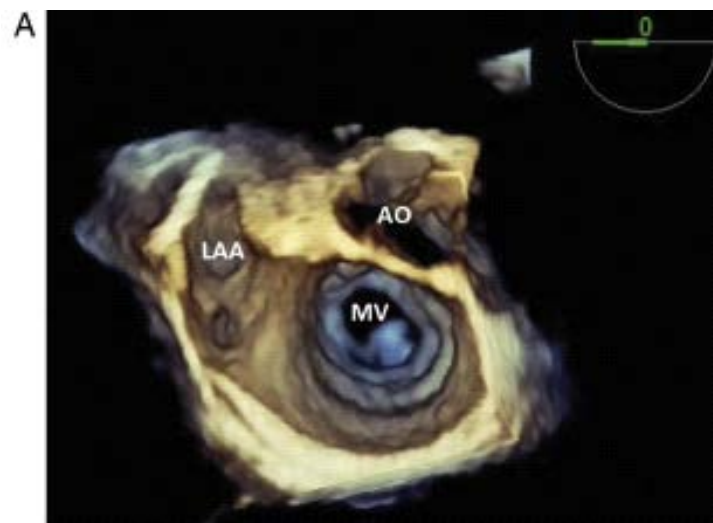
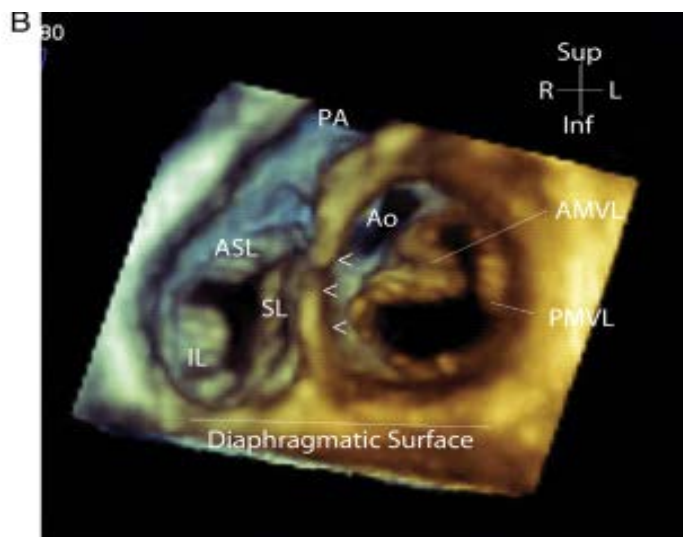


图 6 (A) 经食管 3DE 的二尖瓣心房侧观。二尖瓣、主动脉瓣、左心耳从心房面按解剖方位可见。如果二尖瓣环看成是一个钟面，主动脉瓣位于二尖瓣的二点方向。(B) 经食管 3DE，二尖瓣和三尖瓣心室侧观瓣。从心室方面看二尖瓣和三尖瓣按解剖方位显示。主动脉位于二尖瓣的十点位置。三尖瓣的后叶、隔叶及前叶以及弧线形的室间隔按解剖方位可见。AMVL，二尖瓣前叶；Ao，主动脉；ASL，三尖瓣前叶；IL，三尖瓣后叶；LAA，左心耳；MV，二尖瓣；PA，肺动脉；PMVL，二尖瓣后叶；SL，三尖瓣隔叶。

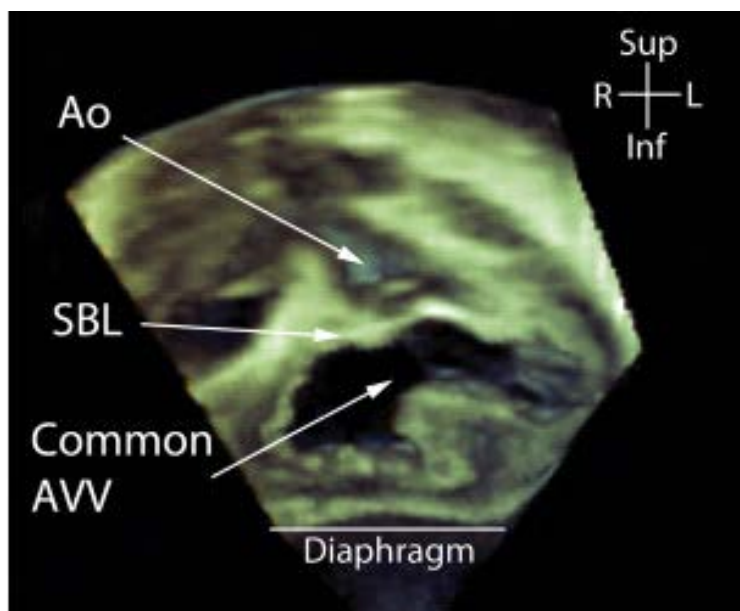


图 7 经胸 3DE 房室间隔缺损直视。剑下切面，完全房室间隔缺损的心室侧直视图。景深意味着共同房室瓣的上桥叶及远场主动脉得以显示。Ao，主动脉；AVV，房室瓣；SBL，上桥叶。

主动脉瓣和肺动脉瓣

先天性心脏病时，主动脉和肺动脉的形态、位置和通畅与否均不能假定。因此，这些瓣膜的投照显示是依照正常瓣膜的标准解剖格式。例如，主动脉瓣投影可从升主动脉观或从左室流出道观。左冠瓣、右冠瓣、无冠瓣及相应的主动脉窦使用与 2DE 完全一致的传统命名。

主动脉瓣优选定位示例见（图 8），肺动脉瓣采用类似方法。

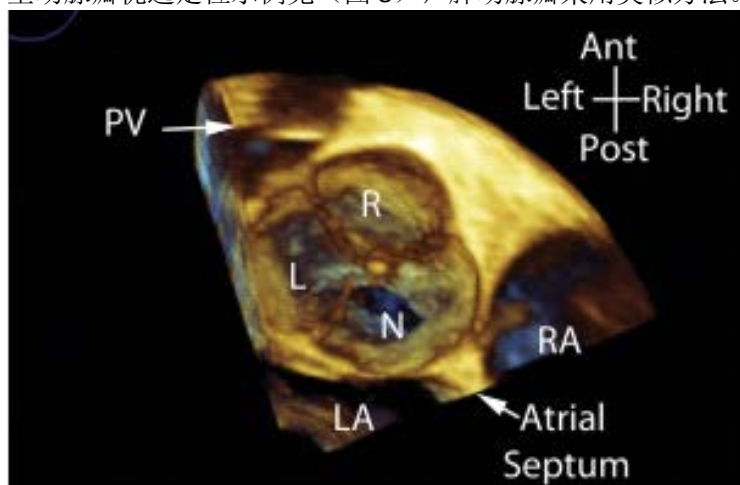


图 8 正常主动脉瓣直视。经食管 3DE 从主动脉侧俯视主动脉瓣。L，左冠瓣；镗；LA，左心房；N，无冠瓣；PV，肺动脉瓣；R，右冠瓣；RA，右心房。

复杂心脏连接异常

当心内的主要连接是异常时，以解剖方式显示图像尤为重要，将异常心内结构以尽可能接近实际空间位置的方式显示。准确理解心内结构关系直接影响手术方式。

外科学角度显示心脏

术语手术视角已被用来描述最接近术中外科所见三维投照。这个术语有其具体考虑，特别是在对比“解剖”视图时。解剖视图投射，是按照人体直立，而外科手术视野是按照病人仰卧位，主手术医师从右侧对病人进行手术。效果是解剖直视的右侧心房或心室间隔当以外科视野视图时要逆时针旋转 90 度（图 9）。房室瓣的心房侧视图通常又称为外科视野显示，即使外科医生可能采取不同的入路修复

有问题的瓣膜。例如，真正二尖瓣的手术视野是病人仰卧，通过房间隔进入左心房。而 3DE 投射是切掉心房后部，通过旋转整个数据集进入解剖位置实现房室瓣直视。在实践中，我们的偏好解剖定位，因为这与 MRI 和 CT 扫描投照一致，同时知道手术所见可能不同。3D 数据集常见操作的视频演示和本文档一起提供（见在线补充数据，演示 1）。

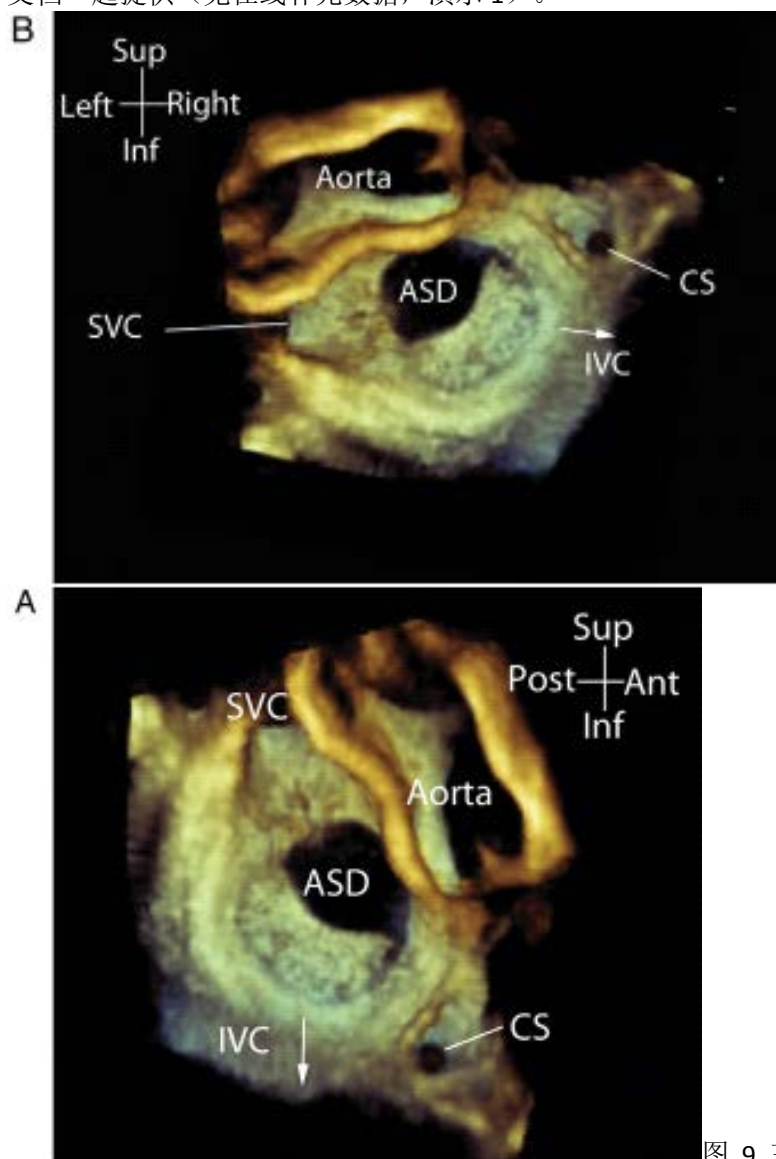


图 9 三维 TEE 显示房间隔缺损的手术视野与解剖投照。(A) 右侧观察房间隔缺损，解剖定位显示上腔静脉位于最上面，下腔静脉位于图像最下端。(B) 从右心房角度看房间隔缺损的手术视野，类似病人仰卧从右侧看缺陷的方式。这相当于解剖投影 90 度逆时针旋转。CS，冠状窦；IVC，下腔静脉；SVC，上腔静脉。

未来的发展方向

对于 CT 血管造影、MRI 已经可用的定位标记，也需用于 3DE 的技术上，例如，图像的真正左/右或上/下方向。这应该与标记重要的解剖结构一起实现，以提高数据处理时复杂先心病的显示。融合成像让 3DE 数据可以与其他方式的数据（透视、CT 和 MRI 检查）共同注册，将允许三维图像自动解剖定位，并显示超声可能无法访问的区域。广泛实施将需要跨厂商、成像模式和平台的共同注册。

建议

推荐使用解剖图像显示法，因为它反映了空间结构的真实位置，与 MRI 和 CT 等其他成像方式一致。间隔和房室瓣的直视面应作为重要标识并按正确的解剖方向旋转。手术视野应限于显示解剖外科医生会感兴趣的区域。

四、不同先天性心脏病的最佳超声投影

二维超声心动图的标准成像切面是结合解剖限制和可行的声窗得来，已发表的标准即是以此为基准。²² 三维超声心动图通过后处理分析所获容积的内部结构，所以受限制较少。由此推论尽管图像从不同的超声心动图窗口获取，感兴趣的结构后处理后可以得到类似的显示。然而，影响 2DE 成像的物理学原理同样适用于 3DE。为此，为最优显示感兴趣的结构，有相应的最佳数据采集方法。一般建议是显示不同的感兴趣区域选取可实现的最佳声窗。这包括：

- (i) 二维超声心动图清晰显示感兴趣区
- (ii) 尽可能声束正交入射感兴趣结构的平面
- (iii) 包含临床相关邻近结构
- (iv) 优化容积的宽度和深度

例如，获取显示 ASD 的三维数据集的最好声窗是剑突下，因为从这个角度投照声束与房间隔平面正交。TEE 检查时声窗调整的灵活性较小，但比 TTE 更高的图像质量做出弥补²⁸。

虽然图像质量是感兴趣区分析和良好三维重建的核心，3DE 和 2DE 有重要区别。例如，二维超声用胸骨旁左室长轴（PLAX）和胸骨旁短轴（PSAX）评价膜周部室间隔缺损（pmVSD），因为缺损在图像近场，且血流多普勒的角度好。而 3DE 在直视缺损面和描绘相邻结构上特别有用。PLAX 和 PSAX 因为在近场能得到的图像宽度有限所以不太适合 3DE。剑突下和修正的心尖切面由于 VSD 是图像的中心并具有更宽的扇角，所以能更好显示相邻的结构。这种量身定制的方法也用于复杂病变的成像，如右室双出口时房室瓣、室间隔和流出道都必须纳入一个 3DE 容积中²⁹。

表 1 总结了常见先心病的最优 TTE 切面和 3D TEE 的用处。

但是，无关成像平面，3DE 的技术限制都持续存在。主动脉瓣和肺动脉瓣是菲薄且快速运动的结构。这些往往通过 3D TTE 使用 PLAX 和 PSAX 成像，声束入射角度让单个瓣叶的整体显示质量并不好，尤其是瓣体结构。如果患者足够大能容纳 TEE 探头，这个问题可以通过 3D TEE 检查克服。

建议

不同先天性心脏病变的最佳超声投影

声束入射角度应根据不同感兴趣区调整，理想角度应与相关结构正交。

3DE 感兴趣的区大小应以优化时间和空间分辨率来调整。

	剑突下	心尖	PLAX	PSAX	3D-TEE
房间隔					
ASD	+++	+（修正切面）	+（修正切面）	+（修正切面）	+++
SV ASD	+++	-			+++
房室连接					
AVSD	+++	+++	++ (LAVV)	+(LAVV)	+++
Ebstein 畸形/ 三尖瓣发育不良	+++	++（前倾）	+	++	+
二尖瓣腱索	-	+（较小患	+++	++	+++

		儿)			
双孔二尖瓣	++	++	+	++	++
MVP	-	++	+++	++	+++
降落伞二尖瓣	++	++	++	++	++
二尖瓣上隔膜	-	++	+++	+	+++
室间隔					
mVSD(除外前部)	+++	++	+	+	++
膜部 VSD	+++	+	+	+	++
双动脉下 VSD	++	-	++ (向 PA 倾斜)	+	++
流出道					
主动脉瓣	-	+	++	++	+++
肺动脉瓣	-	+	-	+	++
右室双出口	+++	+	-	+	+

ASD, 房间隔缺损; AVSD, 房室间隔缺损; LAVV, 左房室瓣; MV, 二尖瓣; MVP, 二尖瓣脱垂; mVSD, 肌部室间隔缺损; PA, 肺动脉; PLAX, 胸骨旁长轴; PSAX, 胸骨旁短轴; SV, 静脉窦; TV, 三尖瓣; VSD, 室间隔缺损。

五、3DE 对不同先天性心脏病变的附加价值

在先心病应用 3DE 的文献涵盖了包括房室瓣、房室隔、室间隔和流出道的各种病变。随着技术的进步提高三维技术应用也增多, 但不同医院对该技术的采用有很大差异。关注的核心是与二维超声心动图或其他成像方式相比, 它所增加的额外诊断信息。目前尚无与三维超声心动图应用相关的操作成功率、患病率或死亡率的随机试验。然而, 3DE 已在临床需要提供额外诊断信息的基础上被纳入实践。表 2 及表 3 列出我们对 3DE 评估主要病变的附加价值的共识。不同的病变及附加信息的摘要及有关的主要参考文献也包括在表内。3DE 具有重大作用的病变类型主要是瓣膜病变及房、室间隔的缺损(见在线补充数据, 附录 1, 演示文稿 1)。3DE 对复杂先心病应用的很好的例子是右室双出口患者的决策, 尤其考虑到 VSD 的大小和位置, 以及大动脉的相对位置(图 10A-D, 在线补充数据, 视频 1A-D)。景深增强 VSD 相对于大动脉的位置和大小的可视性, 图像投照是从右室及心尖侧所见, 这是二维超声心动图不能实现的。

建议

3DE 对不同先天性心脏病变的附加价值。推荐使用 3DE 评价瓣膜病变、间隔缺损和心脏连接的复杂畸形。3DE 应该视为一种技术补充而不是替代二维超声心动图评价先心病。

兴趣区	3D 模式	所获信息 (I) 评价 (C)	推荐强度
房间隔	GS/CFM TTE/TEE	I: 缺损的大小/数目/形态/位置 C: 对于多发缺损、需放置多个装置、残余分流、螺旋形缺损价值高	复杂病变及残余分流 强烈推荐 单个中央型缺损中度推荐 PFO 低度推荐 11,11,28,30-33
三尖瓣异常	GS/CFM TTE/TEE	I: 瓣叶形态 腱索支持 描述反流束 C: 反流机制/严重程度	高 34-39

二尖瓣	GS/CFM TTE/TEE	I: 瓣叶形态 腱索支持 描述反流束 C: 反流机制/严重程度	复杂病变强烈推荐 其他病变低度推荐 43-48
室间隔	GS/CFM TTE/TEE	I: 缺损的大小/数目/形态/ 位置 C: 多发缺损、特殊位置缺 损或考虑介入封堵时价值 高	复杂病变强烈推荐 其他病变低度推荐 43-48
左室流出道	GS/CFM TTE/TEE	I: 主动脉瓣下梗阻及主动 脉瓣的形态 C: 明确梗阻和/或反流的 机制	高 19,49,50
主动脉瓣	GS/CFM TTE/TEE	I: 主动脉瓣测量 瓣叶形态 反流机制 C: 3D TTE 成像主动脉瓣叶 较困难, 推荐 3D TEE	高, 尤其术中超声时 21,51,52
主动脉弓	GS/CFM TTE	I: 主动脉弓形态及大小 C: 受探头大小及声窗限制 可能成像困难	低/中 53
右室流出道	GS/CFM TTE/TEE	I: RVOT 形态及显示梗阻位 置 C: 对比 2DE 获益存疑	低/中 54,55
肺动脉瓣	-	I: PV 形态及功能 C: 观察 PV 形态可能优于 2DE	低 54,55
分支肺动脉	-	未常规应用	无

CFM, 彩色血流显像; GS, 灰阶; TEE, 经食管超声心动图; TTE, 经胸超声心动图

异常心脏连接	3D 模式	所获信息 (I) 评价 (C)	推荐强度
体静脉	-	未常规应用	无
肺静脉异位引流	-	未常规应用	无
房室间隔缺损	GS/CFM TTE/TEE	I: 房间隔侧及室间隔侧缺损大 小 瓣叶形态及腱索支持 描述反流 双侧心室发育不平衡时瓣膜 C: 提高瓣膜大小的测量, 腱索 支持, 房室瓣及心室的相对大 小	高 9,40,41,56-59
房室连接不一致	GS/CFM TTE/TEE	I: 二、三尖瓣的形态及功能 室缺的位置及大小	高 60,61

		双侧心室流出道 C:有助于评估 Senning/Rastelli 手术的可行性, 帮助室缺定位	
简单大动脉转位	-	未常规应用	无
复杂大动脉转位	GS/CFM TTE/TEE	I:二、三尖瓣的形态及功能 室缺的位置及大小 双侧心室流出道 C: Rastelli, Nikaidoh 及大动脉调转手术的可行性评估	高 62,63
法洛四联症	GS/CFM TTE	I: VSD 大小/位置, RVOT 解剖 C: 指出需要特别关注的地方, 如室缺位置或 RVOT 解剖术后右室容量的进一步评估	低
共同动脉干	GS/CFM TTE/TEE	I:动脉干瓣膜形态/反流 C: 婴儿无常规指征 较大患者可用 TEE 看动脉干瓣膜形态/反流	强推荐较大患者看共同动脉的瓣膜 婴儿低推荐
右室双出口	GS/CFM TTE	I: 房室瓣关系 VSD 大小和位置 大动脉的相对位置 C: 对指导合适类型的手术有较高价值	高 29.63

六、使用 3DE 指导导管介入治疗

三维 TEE 是一种快速有用的成像技术用以评估导管为先心病干预措施, 包括 ASD^{11,28,30-33,64-68} 和 VSD^{43-45,68-70} 的介入封堵。3D TEE 是对 2D TEE 的补充而非取代, 这两种方式均用来评估缺损和相邻的边缘, 残缘大小和结构。3DE 对于不规则或不对称形状缺损特别有帮助, 而这在 2DTEE 通过旋转探头依然不足以评估真实大小。直视缺损允许更精确地识别相邻的结构, 比单独 2D TEE 好, 尤其对于复杂病变。较小的患者通常是在全麻下进行 3D TEE 检查, 前提是患者足够大能容纳三维 TEE 探头。目前厂家建议患者最低体重 30 公斤。介入治疗时间有限, 因此, 快速、简单、最最后处理的实时 3D 采集模式往往是最有效的。一些中心青睐在操作开始时先做三维全容积采集获取整个感兴趣区的高分辨率全貌, 而后使用实时集中成像技术。必须得到病变特定的目标视图, 这将在随后的章节中讨论。用直视成像来显示相关解剖和介入装置也被持续使用。除了提供 3D 视图, MPR 成像可以定量和显示介入干预中的图像¹⁹ (图 10)。

ASD 器械封堵

当心脏解剖合适时经导管装置继发孔型 ASD 封堵已成为首选治疗方法^{71,72}。准确评估房间隔缺损类型、大小、位置、缺口数量和形状、残缘大小 (图 11) 对正确的病人选择、设备选择和配置是必要的。有必要详细分析装置位置、配置、锚固、残余分流, 以及装置与主动脉、二、三尖瓣、上、下腔静脉和肺静脉的关系 (图 11)。3DE 通常有助于这些特征更好显示, 有时也是唯一的显示工具^{30,31,64-67,73}。

通过 3D TEE 食道中段水平选择感兴趣区获得实时三维图像, 经右心房直视图往往能显示继发孔 ASD 介入治疗的所需的关键特征。如果实时聚焦三维图像采集的帧频太低, 需要做全容积三维成像。深胃底经双侧腔静脉的矢状视图切面能最佳显示房间隔长度和下缘, 能提供良好视野方便监测装置的布控。使用 MPR 四图显像格式对精确测量房间隔缺损最佳, 但测量渲染图像也是个另外一个选择 (图 10)。彩色多普勒血流分析残余分流的位置、大小和机制用彩色实时三维或双平面成像最好。也有报道应用经胸 3DE 技术剑突下切面指导 ASD 封堵^{73,74}。

VSD 器械封堵

VSD 经导管装置封堵术已经成为肌部室缺和膜周室缺除外科手术外之外的另一种替代治疗⁷⁵⁻⁸¹。与 2DE 相比，3DE 的优势是更好观察 VSD 的形状、大小和位置，以及膜部瘤及其周围结构^{43,44,46,68-70}。从 RV 和 LV 面直视室间隔可以在心尖四腔心通过实时 3D（图 12）或 ECG 门控全容积采集来快速实现。介入设备硬件和设备部署的监测能在额面四腔视图中看到（图 12）。装置到位后，实时 3DE、交叉平面，或加用彩色多普勒的 MPR 成像都是评估介入结果的最佳方法。

3D TEE 指导的其他应用：已用于基于导管的 Fontan 手术开窗关闭⁸²，主动脉窦瘤破裂封堵⁸³，冠状动脉瘘封堵^{84,85}，人工瓣周漏⁸⁶⁻⁸⁸，心房调转板障漏或梗阻^{89,90}，房间隔跨隔穿刺⁹¹，和双心室起搏器同步性评价和导线放置⁹²。最近，开发出 10F 大小具有 60* 15°扇角的心内 3DE 探头。早期的工作证明能显示房、室间隔、主动脉瓣、二尖瓣及心耳并指导治疗⁹³⁻⁹⁵。

未来发展方向

3DTEE 探头小型化可用于较小病人以及自动化的改进是未来的可能发展方向。3D 心内探头的引入将提供 3DE TEE 的一个替代方法。随着介入干预更加复杂化，结合透视、三维旋转血管造影、心脏 MRI，和 CT 血管造影的三维融合成像可能有更广应用。

建议

建议使用 3DE 引导导管介入封堵：选择 ASD 及 VSD，特别是多发及形状不规则缺损，或残留分流。

在导管介入先心病时，建议实时三维成像观察导管、输送系统和设备。

建议 3DE 协助导管介入治疗先心病时，使用 3DE 测量缺损（MPR 或 3D 渲染成像法）。

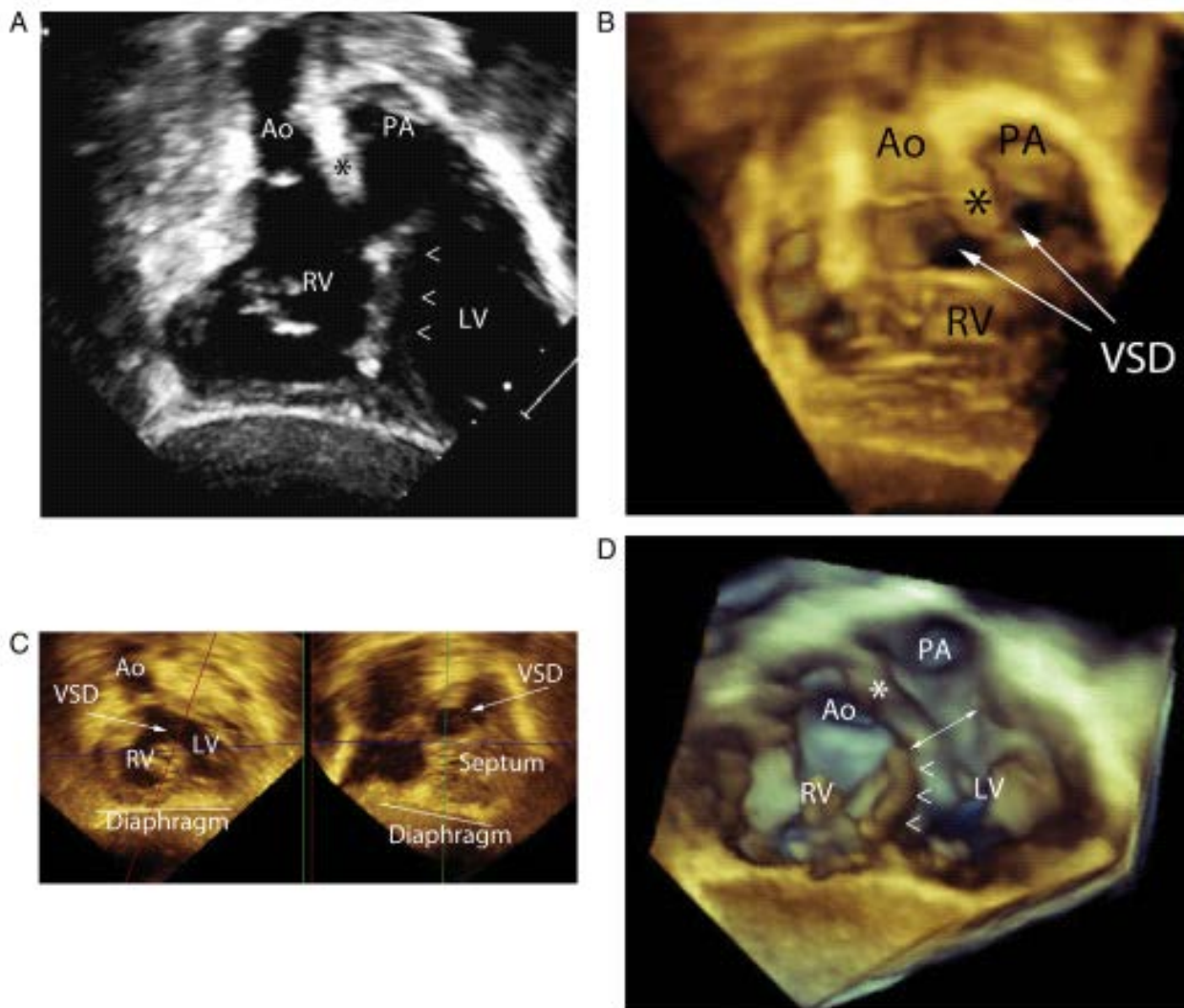


图 10 右心室双出口患者经胸 3DE，剑突下切面多心动周期门控图像采集。（A）右心室双出口二维超声心动图剑下观察。室间隔平面由箭头显示（<<），主动脉和肺动脉之间的流出部间隔由星号显示。注意室间隔缺损不可视，因为流出部间隔完全位于右心室内，室间隔平面在此图像平面的后方。（B）同一病人的剑下的三维超声图像。主动脉与肺动脉被流出部间隔（*）隔开。由于 3D 图像提供的景深，室缺的边缘清晰可见。这在临床上非常重要，因为室间隔缺损的大小和位置可以决定是否作为外科修复的一部分能将主动脉隔入左心室。（C）MPR 成像显示室间隔缺损和主动脉的关系。红色平面对应右侧的室间隔缺损直视图像。这允许准确测量室间隔缺损的大小。（D）经心尖所获 3D 渲染图像。左右心室以短轴显示。箭头（<<）显示室间隔、双头箭显示室间隔缺损。此投影的景深显示室间隔缺损的位置、流出部间隔（*）、以及大动脉的相对位置。Ao，主动脉；LV，左心室；PA，肺动脉；RV，右心室。

七、三维超声心动图评估心室容积和心功能

先心病患者的 RV 和 LV 的评估有许多挑战，包括心脏位置异常、异常连接、间隔缺损、非收缩补丁材料、和异常负荷状态。这些困难是通用因素基础上额外的，如足够的时间分辨率以精确确定整个心动周期的心室容积。除此之外，先心病心室几何形态可能远不同于正常心室的几何结构，

以此为基础设计的软件包分析算法可能无效。尽管如此，3DE 已被应用于先心病，因为评估心脏容积和功能正在被越来越多地用于病人治疗管理⁵⁴，而主观评价并不可靠⁹⁶。

右心室的三维超声心动图评价

RV 大小和功能的评估在临床实践中是非常重要的，特别是在 Fallot 三联症（TOF）和其他利用右室-肺动脉外管道术后，RV 的测量影响肺动脉瓣置换的时机。RV 位置紧随胸骨后让成像声窗变得复杂，过了幼儿期后肋下成像往往又不够。突出的肌小梁让心内膜边界划定更复杂，正常 RV 几何形状在矢状面上呈三角形、冠状面呈新月形。流入和流出道也位于不同的成像平面。所有这些阻碍使用超声捕获整个 RV，也无法使用简单的几何公式来计算右室体积和射血分数。3DE 做容积评估有潜在的优势，因为它对心室形状做几个假设。三种 3DE 技术已被应用于测量右心室容积和 EF，即盘形求和、半自动边界检测，和以知识为基础的重建。

1、盘形求和。半自动的盘形求和的方法在概念上最可比 MRI 分析，已通过水移位法⁹⁷和 MRI⁹⁸在儿童得到验证。这种方法在健康儿童中可行性好（表 4），虽然最近的研究显示在老年患者中可行性 <60%⁹⁹。虽然与 MRI 所得 RV 容积有很好相关性，3DE 的价值偏低⁹⁸。盘形总和法保留了一些在先心病时可能位置异常或缺如的标记^{18、113}。不幸的是，盘形求和的方法已被一些软件包删除，从而去除了与 MRI 最接近的方法。

2、半自动边界检测。这是最常见的 3DE 评估 RV 容积和 EF 的方法。获取全容积三维数据

集后分割成四腔心、矢状面、冠状面视图（图 13A）。定义关键右室和左室解剖标志，在每个切面上手动勾勒舒张末期和收缩末期轮廓以构建 RV 动态多面体模型（图 13A 和 B）。在健康成人中，这种方法可行^{101、102}；容积和 EF 测量与 MRI 相关性很好，虽然 3DE 的容积测值较 MRI 低（表 4）。3DE 采集时间明显短于 MRI（5 分钟相比 20 分钟）^{17、106}。在健康成人和儿童，观察者内和观察者间的可靠性好^{98、101}（表 4），但在成人功能不全者，3DE 与 MRI 相关性不好（表 4）^{103、109}。

成人法洛三联症矫治术后，收缩末期容积（ESV）、舒张末期容积（EDV）¹⁰⁴⁻¹⁰⁶和 EF 与 MRI 相关良好，但 3DE 所得容积与 MRI 相比较小（表 4）¹⁰⁵。不同技术之间的个体差异可能很明显，有较宽的统一性限制。对于重度扩张的右室，3DE 和 MRI 之间的差距尤其明显，此时要在单一的容积采集中纳入整个 RV 尤其困难，特别是右室流出道^{105、106、108、114}。观察者内、观察者间、以及实验-再实验的可信性因研究而异，但总体能接受（表 4）^{104、106、107}。在儿童左心发育不良综合征患者，3DE 在系列随访中重复性好¹¹⁵。然而，3DE 测量比 MRI 平均低 30%，较小的患者差异更大，所以这些技术不能交互使用¹¹⁶。大多数发表的 RV 数据是在正常成人多心动周期门控采集的全容积 3DE 数据¹⁰⁰。最近，已有研究采用成人单心动周期门控采集 3DE 数据评价 RV 容积和功能¹¹²。可行性（96.7%）、与 MRI 的相关性和统一性非常好。但是，时间分辨率的降低让它在年幼及心率快的患者应用仍有问题。

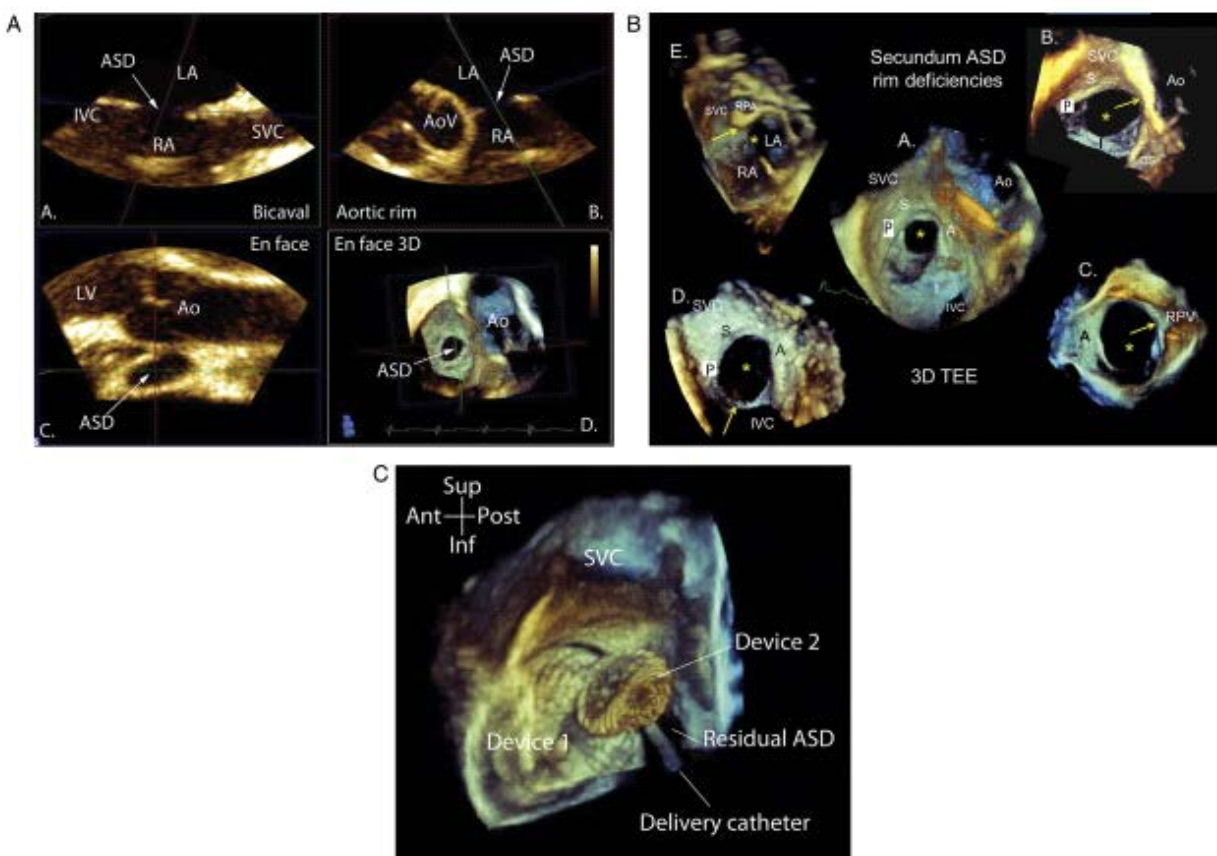


图 11 **A** 继发孔房间隔缺损 MPR 图像的 3D TEE 投照。蓝色平面包括缺损的边缘（A 和 B），它定义了（C）中显示的直视投影和渲染视图（D）。缺损的边缘可以在 MPR 图像或渲染图像测量。**B** 3DE TEE 渲染图显示房间隔缺损的形态、大小及不同部位缺损的边缘(*)。有缺损边缘的区域标有箭头。缺损边缘显示各缘量充分（A），缺损的主动脉边缘（B），缺损的右肺静脉缘（C），缺损下腔静脉缘（D），和上腔静脉缘（E）。图像（A）、（B）和（D）为从右房侧观察，图像（C）从左心房侧观察。图像（E）房间隔切开视图，使房间隔的嵴及缺损上缘可见。**C** 实时 TEE 3DE 图像显示放置封堵器关闭残余继发孔房间隔缺损。这个 3D 投影从左心房方面显示出两个封堵器的相对位置，残余缺损和传送导管。

A, 前; Ao, 主动脉; AoV, 主动脉瓣; ASD, 房间隔缺损; I, 下; IVC, 下腔静脉; LA, 左房; LV, 左室; MPR, 多切面重建; P, 后; RA, 右房; RPV, 右上肺静脉; S, 上; SVC, 上腔静脉。

3、基于知识的三维重建。 知识为基础的 3D 重建是从一系列使用磁跟踪系统获取的二维图像评价 3D RV 容积（图 14）¹¹⁷。在图像上标有 RV 解剖标识，使用病灶特异性 MRI 数据库做参考进行互联网处理。这项技术已在儿童 TOF 修补术后患者与 MRI 做验证对比¹¹⁰⁻¹¹⁸。结果偏差、观察者内部和观察者间的可靠性好，基于知识的三维重建略优于半自动化边界检测法。在成人体循环右室¹¹¹⁻¹¹⁹和肺动脉高压患者，数值与 MRI 对比一致性良好¹²⁰⁻¹²¹。知识为基础的 3D 重建的局限性包括必须有能追踪的超声探头、病人在整个研究中必须保持不动。

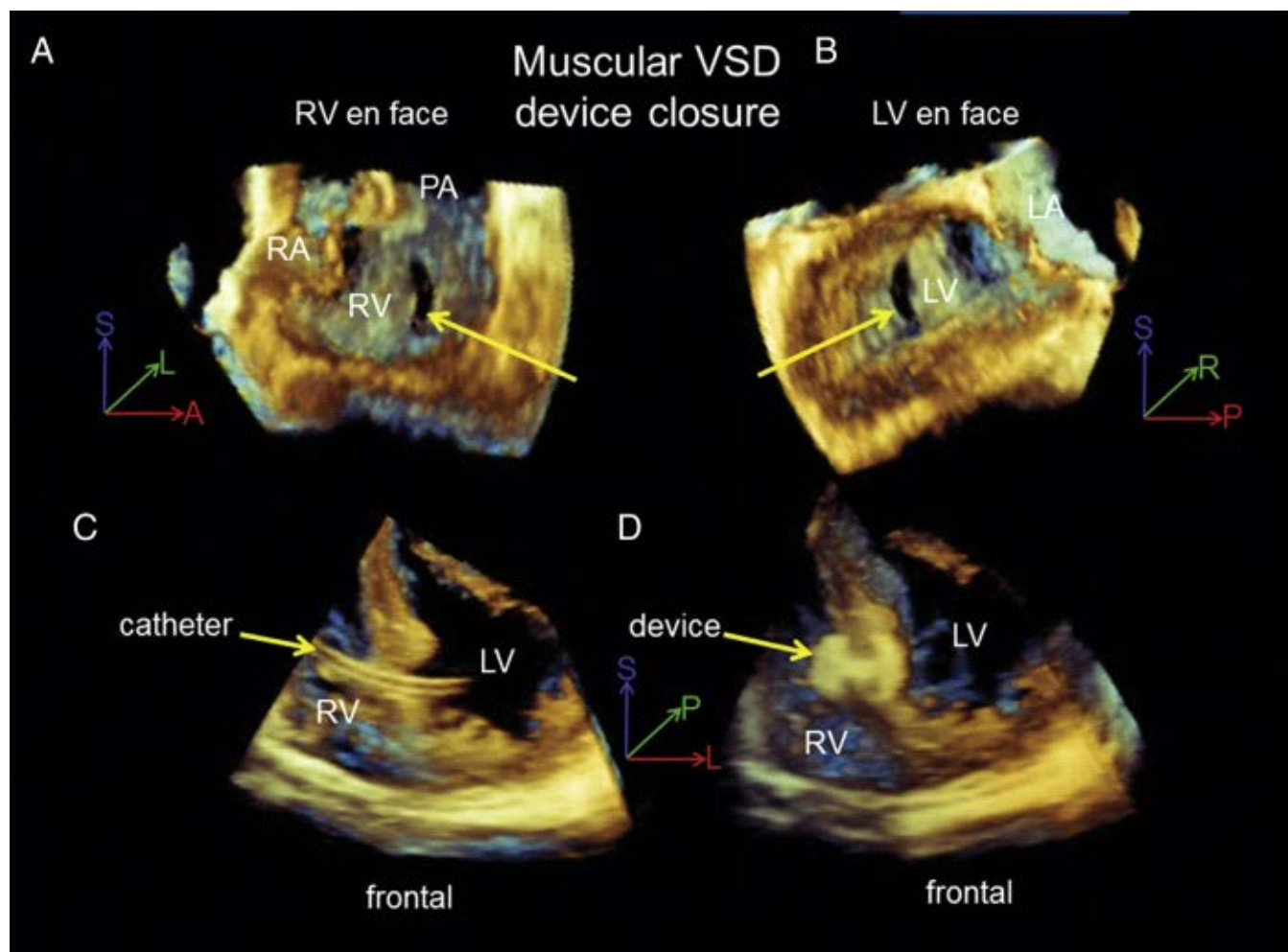


图 12 3DE 允许直视室间隔缺损以提供缺损的位置、大小、和邻近结构的信息。本例为 3D TEE 检查图。肌部室缺分别从右室侧 (A) 和 (B) 左室侧观察。3DE 能协助心导管 (C) 和封堵装置的放置 (D)。在 A 和 B 图中, VSD 以箭头标记。A, 前; L, 左; LA, 左心房; LV, 左室; P, 后; PA, 肺动脉; R, 右; RA, 右心房; RV, 右心室; S, 上。

3DE 评价左室

先心病患者左室容积和功能的可靠评估非常重要。2DE 在先心病有明显的限制因素, 不同于 3DE, 2DE 关于左室形状的假设在这个人群中经常无效。因此, 三维超声心动图能大大有助于左室容积、功能和左心室质量的评价。

1、分析方法。三维超声心动图的数据集是从心尖或修正的探头声窗位置获得, 包括整个左室容积, 除非左室严重扩张, 通常是可行的。目前的软件需要在整个心动周期跟踪左室心内膜, 因此, 依赖于足够的图像质量和声窗。供应商通常显示用于定义心内膜边界的参考切面 (图 15) 以及左室本身的“外壳” (图 16)。目前的跟踪算法包含用户定义关键参考点, 然后半自动跟踪心内膜, 但操作者可以手动覆盖初始自动选择的心内膜边界¹²²。

虽然存在心内膜分界的困难的及左室形状各异, 使用 MRI 做金标准对照, 已有应用 3DE 在成人及儿童准确测定左室的容积和功能的报道。与成人相比, 在心率高、左室容积小的儿童仍可能出现潜在错误, 抵消了高图像的质量的优势。3DE 与 MRI 有很好的可比性, 但 95 个研究 3055 例先心病荟萃分析显示 LVEDV 和 LVESV 测值 3DE 明显低于 MRI¹²³。虽然 3DE 和 MRI 所测值不能交互使用, 3DE 在先心病所测左室容积有很好的可重复性, 所以可以用来进行系列随访。在儿童和成人先心病患者的验证研究见表 5^{98, 113, 125, 126, 129, 130}。在儿童患者, 3DE 的准确性和可重复性比 M 型或二维辛普森双平面法更好, 也

和对儿童 2DE 一样有很好可行性^{127, 131}。虽然左室容积更小、心率更快¹¹³，这些发现也在新生儿和婴幼儿与 MRI 比较中得到证实，

2、左室质量。3DE 在儿童患者评价左室质量已与 2DE 和 M 型方法比较¹³²。在年龄较小的患者，因其在正常儿童年龄群的可及性，M 型方法依然是最普遍使用的技术^{133, 134}。3DE 方法的基础是通过心外膜容积减去心内膜容积得到心室质量。3DE 测值与 MRI 相关良好，观察者间和观察者内变异低¹³⁵，但一致性范围较大^{98, 113, 125, 129}，因此在先心病患者使用 3DE 评估左室质量的临床应用尚有待建立。

3、三维超声心动图评价左心室内不同步

3DE 捕获整个 LV 容积的能力为评估左室整体和局部功能提供了机会（图 16）。心室同步性以心肌各节段达到最小收缩容积所需时间比心动周期长度的标准差表示 [收缩不同步指数 SDI]¹³⁶。儿童和青少年 SDI 的正常值较成人低^{137, 138}。3DE 估计左心室不同步的可重复性，心肌 16 段法对比 12 段或 6 段法更好¹³⁹。3DE 已被用来在川崎病儿童¹⁴⁰及扩张型心肌病患者证明左心室不同步增加，显示 16 段 SDI 与 3DE EF 值及二维超声心动图是缩短分数呈负相关¹⁴¹。3DE 也在三尖瓣闭锁 Fontan 术后患者发现左心室不同步¹⁴²，以及在先心病患者中节段性室壁运动异常发生率较高¹⁴³。当前软件包根据左室中心轴定义左室局部运动异常，这对某些左室异常形态的先心病患者有一定的局限性。在左室功能差的病人测量不同步时会有更多困难，因为一些心肌节段处于低运动幅度，难以准确测定曲线的最小收缩容积¹⁴⁴。使用三维超声心动图作为工具来量化评价先心病人的电机械不同步，当缺乏明显证据时需要谨慎。

超声方法及参考	人群	例数	可行性 (%)	EDV 与 MRI 的相关性/一致性	ESV 与 MRI 的相关性	EF 与 MRI 的相关性	EDV 平均差	重复性(EDV) COV (%), ICC (%)或一致性范围(mL)	试验 - 复试验
盘形法									
Lu 等 ⁹⁸	健康儿童	20	85	r = 0.98	r = 0.96	r = 0.89	3.2±7.0 mL	Intra: 2.1±6.5.3% Inter: 5.4±6.9.2%	
Renella 等 ⁹⁹	正常人及先心病	70	58	-	-	-	-	Intra: -1.9 mL (-5.1 to 1.3) Inter: -2.0 mL (-6.0 to 2.1)	-0.50 (-3.5 to 2.5)
半自动边界识别法									
Maffessanti 等 ¹⁰⁰	健康成人	540	94	-	-	-	-	观察者内 COV 2-8.6% 观察者间 COV 7-15%	-
Tamborini 等 ¹⁰¹	健康成人	245	94	-	-	-	-10ml	Intra: 0.6±5.1 Inter: 0.9±20.3	0.2±6.9
Leibundgut 等 ¹⁰²	心功能不全成人	100	92	r = 0.84	r = 0.83	r = 0.72	-10ml	Intra: ICC 0.93 Inter: ICC 0.95	
Jenkins 等 ¹⁰³	心功能不全成人	54	93	r = 0.6	r = 0.55	r = 0.78	-3±10 mL	Intra: r = 0.94, 1 ± 3 mL Inter: r = 0.76, 0 ± 10	r = 0.91, 0 ± 5
Dragulescu 等 ¹⁰⁴	先心病儿童	70 (36 有 MRI)	91	r = 0.98	r = 0.98	r = 0.85	18.2 ±17.8	Intra: COV 5.4 Inter: 8	
Khoo 等 ¹⁷	先心病儿童	54	52	r = 0.91	r = 0.9	r = 0.76	-19.3±6.14	Inter: ICC 0.97, 11.6±7.0	
Grewal 等 ¹⁰⁵	先心病成人	25		r = 0.88	r = 0.89		-9%, max 34%	Inter: 10%	
Van der Zwaan 等 ^{106,107}	先心病成人	62	81	r = 0.93	r = 0.91	r = 0.74	34 mL LOA -32 to 99	Intra:1±12	7%

Iriart 等 ¹⁰⁸	TOF 术后成人	34	92	r = 0.99 ICC = 0.99	r = 0.98 ICC = 0.98	r = 0.86 ICC = 0.85	18.7 ±12.2	Inter: 0.4±0.3	
Grapsa 等 ¹⁰⁹	正常成人+PAH	80		r = 0.75 -3.7 mL LOA 52.6 mL	r = 0.74	-1.3% LOA 12.5		Inter: ICC 0.89	10.6%
知识基础上的重建									
Dragulescu 等 ¹¹⁰	TOF 儿童	30	100	r = 0.99	r = 0.99	-	2.5±3.7 mL	Intra r = 0.997 Inter: r = 0.995	
Dragulescu 等 ¹⁰⁴	TOF 儿童(40有MRI)	70	98	r = 0.99	r = 0.99	r = 0.94	6.6±10.7	Intra: COV 3.4 Inter: COV 3.8	
Kutty 等 ¹¹¹	青春期及成人并循环右室	15	100	r = 0.80	r = 0.82	r = 0.86	-4.3%	Intra: 3.2% Inter: 4.6%	
单心动周期全容积采集									
Zhang 等 ¹¹²	正常及心衰成人	61	96.7	r = 0.97 Bias: 2.16 LOA: 15.1	r = 0.96 Bias: 2.6 LOA: 15.8	r = 0.71 Bias: 0.86 LOA: 16	2	Intra: ICC 0.97 Inter: ICC 0.97	EDV ICC 0.96, 平均差-1.7

Bias, LOA, Bland–Altman 分析评估两种方法的偏差及一致性范围; COV, 变异系数; EDV, 舒张末容积; EF, 射血分数; ESV, 收缩末容积; ICC, 组内相关系数; Inter, 观察者间; Intra, 观察者内; MRI,核磁共振成像; PAH, 肺动脉高压; RV, 右心室

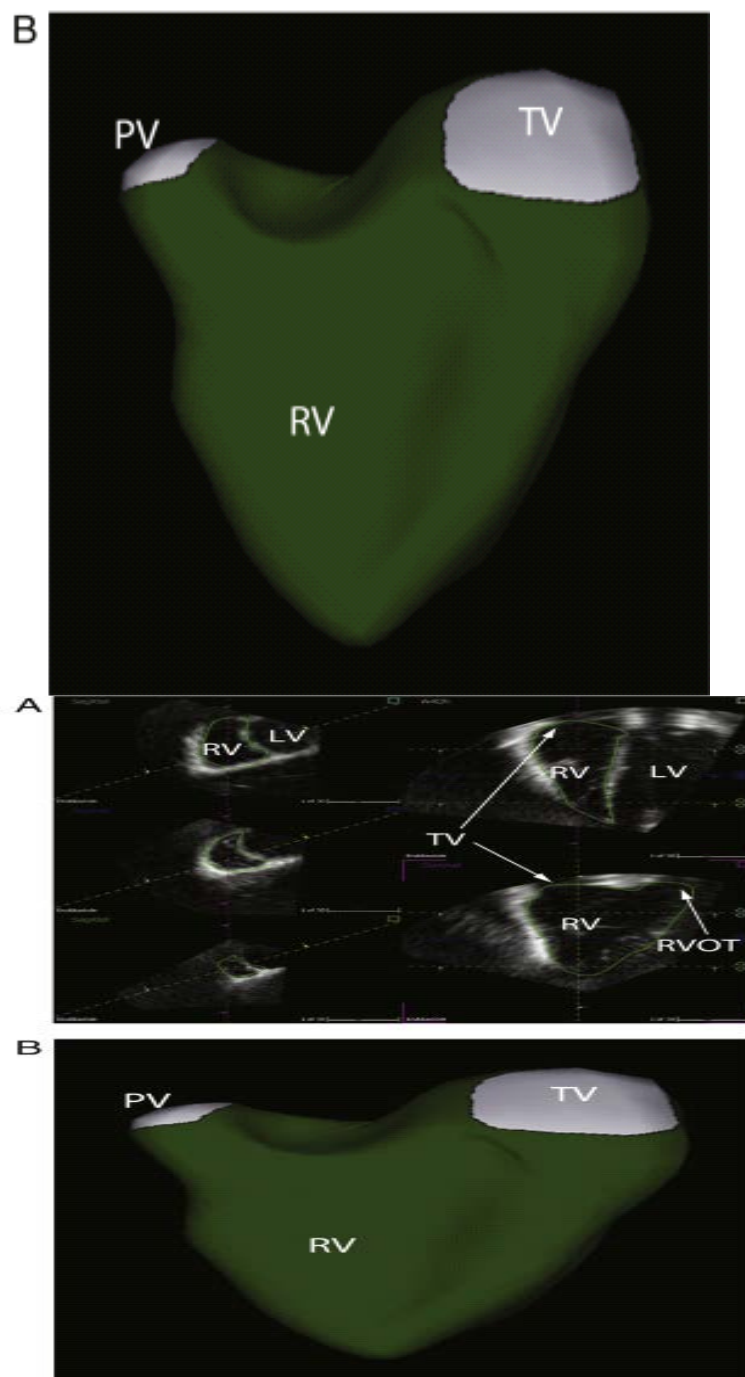


图 13 经胸 3DE 右心室容积测量。(A) 右心室专用软件分析包是根据用户定义的参考点和心内膜边界的半自动跟踪。绿色线显示基准面的心内膜边界，包括矢状面（左）、心尖投影（右上）以及带角度的冠状面（右下）。(B) 一旦用户定义的参考平面确定，可以产生一个代表性右心室的模型，其边界界定 EDV、ESV。LV，左心室；RV，右心室；RVOT，右室流出道；TV，三尖瓣。

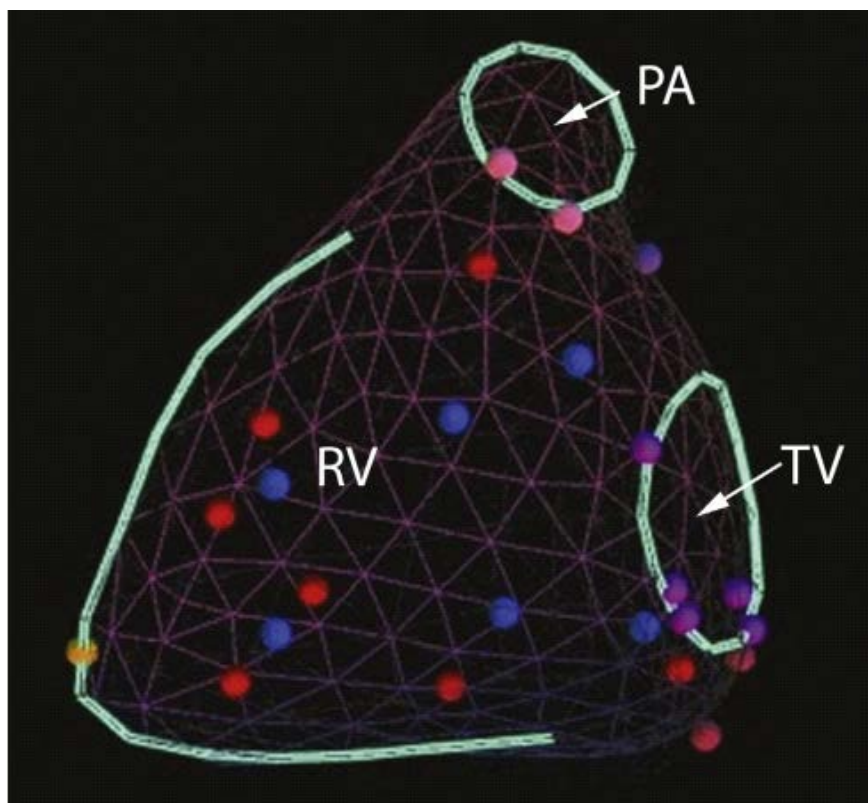


图 14 基于知识重建的 RV 容积计算。这种技术使用定义的协议和跟踪探头，在经胸 2DE 右室不同角度投照图上放置参考点。每个点（红，蓝，紫，粉，橙）代表一个特定的参考点。信息上传到一个有特定疾病图谱的服务器，完成轮廓和体积生成从而得到完整的容积重建。PA，肺动脉；RV，右心室；TV，三尖瓣。

4、左室三维室壁追踪。三维室壁跟踪技术的最新进展允许从单一左室体积进行心肌形变的三维评估（图 17）。3D 技术比 2D 应变技术有一个潜在的优势，是能避免由于平面运动而造成的跟踪丢失¹⁴⁵。这允许纵向、径向、周向的半自动分析和从单一容积获取三维应变。此外，LV 体积、EF、LV 扭曲和扭转可以从同一容积计算出。这种技术的主要限制仍然是时间分辨率和纳入整个 LV 的可行性。最近的文献报告了儿童和青少年的正常值^{146, 147}，但它目前仍然是一个研究工具，这种分析在心脏病患者管理中的地位有待建立。

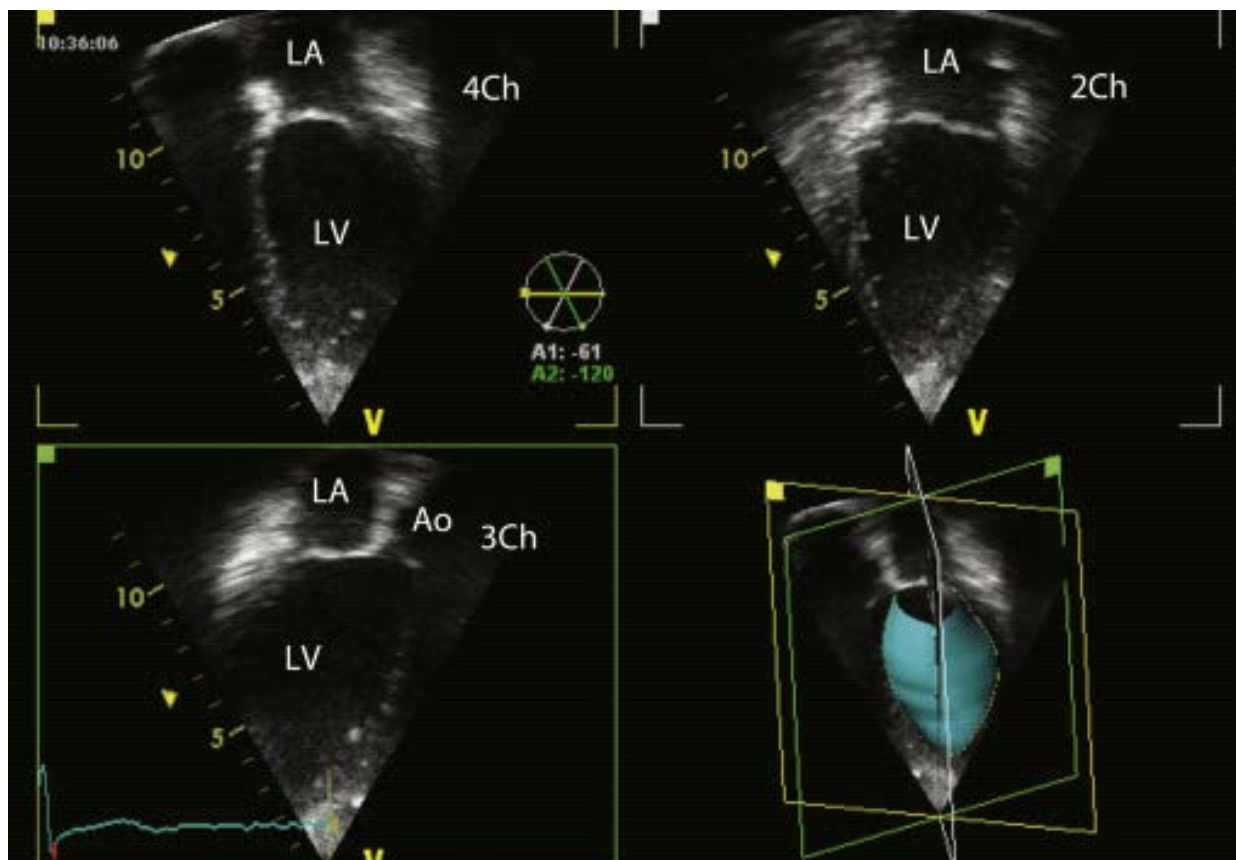


图 15 左心室三平面视图。这一视图允许心尖四腔、两腔和三腔视图的同时可视，以及由三个参考平面定义的心内膜边界所取得的容积。Ao，主动脉；LA，左心房；LV，左心室。

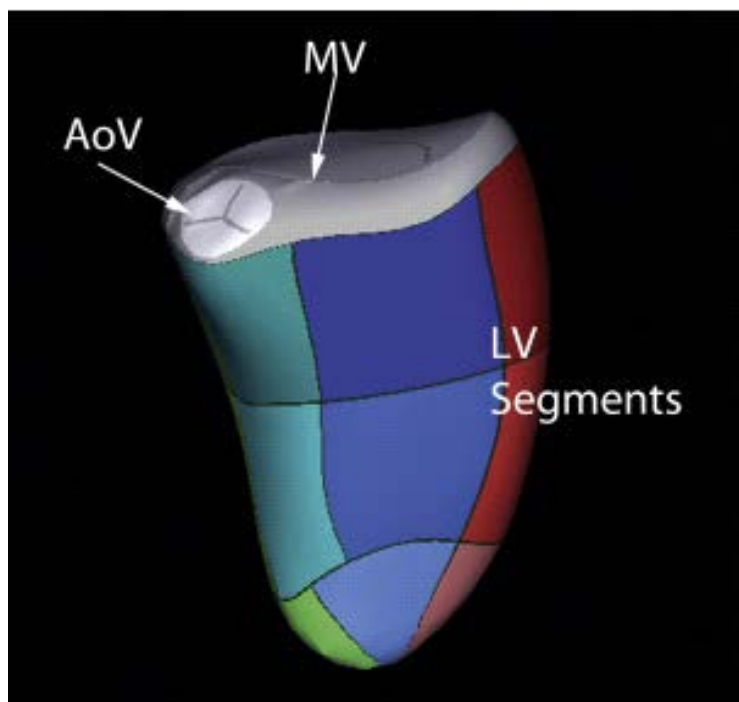


图 16 左室节段观。三维超声心动图在跟踪左心室心内膜的基础上能用来评估 LV 体积、射血分数和同步。标准左室分段法用于彩色编码左室基底段、中段及心尖段。大多数软件算法假设中轴是从二尖瓣到心尖，所以此类分析还没有验证能否用于更复杂的心室形状。AoV，主动脉瓣；MV，二尖瓣。

功能性单心室的评估

心功能不全是功能性单心室的重要远期并发症。基于盘总和方法的 3DE 是可行的，可媲美 MRI^{18, 124}。半自动边界检测已在发育不全综合征患者应用到系列 RV 容积和射血分数评价中¹¹⁵，但与 MRI 相比，右室容积存在系统性低估¹¹⁶，这种差异趋势可能反映出半自动方法 3DE 未能包含右室内膜面的肌小梁、几何限制、并没有包括整个心室。

未来方向

技术解决方案，比如多个 3DE 容积融合可以协助在评价右室功能时获取整个右室腔¹⁴⁸。希望能有右室容积盘计算的半自动方法，同样也希望有特殊设计的分析软件，包括能在正常和异常心脏中识别特别解剖标志。如果能有针对不同身体大小的的大样本研究，得出左右心室容积和质量的正常值，那么临床实践中这些测量就能替代二维超声心动图。针对先心病异常心室，如果能有自动化、可重复性好的算法能提供不依赖于几何形状的能力分析，将会提高它在临床随访中的应用。

建议

先心病心室容积和功能的评价 3DE 测量心室容积和 EF 值可重复性好。

与 MRI 比，3DE 所测心室容积存在系统性低估，因此不建议这些值交互使用。

目前该技术在临床实践中的应用受阻主要是因为缺少从婴儿到成人的正常值。

为正常左室和右室设计的软件在评估验证前不能应用于先心病的异常心室。

盘形求和的半自动算法受几何形状影响最小，应该应用于侧重异常形态心室的后处理软件中。

表 5 先心病患者及儿童已公布的 3DE 与 MRI 结果比较数据									
超声方法	人群	例数	可行性 (%)	EDV 与 MRI 的相关性/一致性	ESV 与 MRI 的相关性	EF 与 MRI 的相关性	LV 质量	EDV 平均差	重复性 (EDV)
盘形求和法									
Altman 等 ¹²⁴	功能性单心室儿童及成人	12		r = 0.98	r = 0.98	均差 4.4±10%	均差 5.8±19g	2.9±8.1 mL	
Soriano 等 ¹⁸	功能性单心室的儿童	29	93	r = 0.96	r = 0.94	r = 0.64	r = 0.84	-3.8 ±13 mL	Intra: ICC 0.99 Inter: ICC 0.97
Friedberg 等 ¹¹³	先心病儿童	35		r = 0.96	r = 0.90	r = 0.75	r = 0.93	0.49±2.6 mL	Intra: ICC 0.98 Inter: ICC 0.97
半自动边界识别法									
Bu 等 ¹²⁵	健康儿童	19		r=0.97	r=0.97	r=0.86	r=0.97	6.83±9.66 mL	Intra: 2.9 6 3.0% Inter: 7 6 5%
van den Bosch ^{41,95}	先心病成	32, 22	91	r = 0.95	r = 0.97	r = 0.88	r = 0.94		Intra: ICC 0.96

	人								Inter: ICC 0.92 Inter: ICC 0.99
Riehle 等 ¹²⁶	先天性心脏病及青年	12		r = 0.99	r = 0.93	r = 0.69		4.11±5.16 mL	Intra: 0.4 6 5.3% Inter: 3.3 6 4.3%
Lu 等 ¹²⁷	健康儿童	19		r = 0.96	r = 0.93	r = 0.88	r = 0.98	6.93± 9.71 mL	Intra: 1.0 6 5.2% Inter: 3.2 6 3.8%
Laser 等 ¹²⁸	健康儿童及 TOF 儿童	49		r = 0.95	r = 0.91				Intra: ICC 0.99 Inter: ICC0.98
Poutanen 等 ¹²⁹	健康儿童	30		r = 0.80	r = 0.88	r = 0.20	r = 0.81	4.0±19.6 mL	Intra: ICC 0.92 Bias:1.0±13.0 Inter: ICC 0.83 Bias: 4.7±17.6
Ylanen 等 ¹³⁰	心脏解剖结构正常儿童	71		r = 0.88	r = 0.83	r = 0.12		24±32 mL	Intra: ICC 0.98 Inter: ICC 0.88

Bias, LOA, Bland-Altman 分析评估两种方法的偏差及一致性范围; EDV,舒张末容积; EF, 射血分数; ESV, 收缩末容积; ICC, 组内相关系数; Inter, 观察者间; Intra, 观察者内; LV, 左心室; MRI, 核磁共振成像。

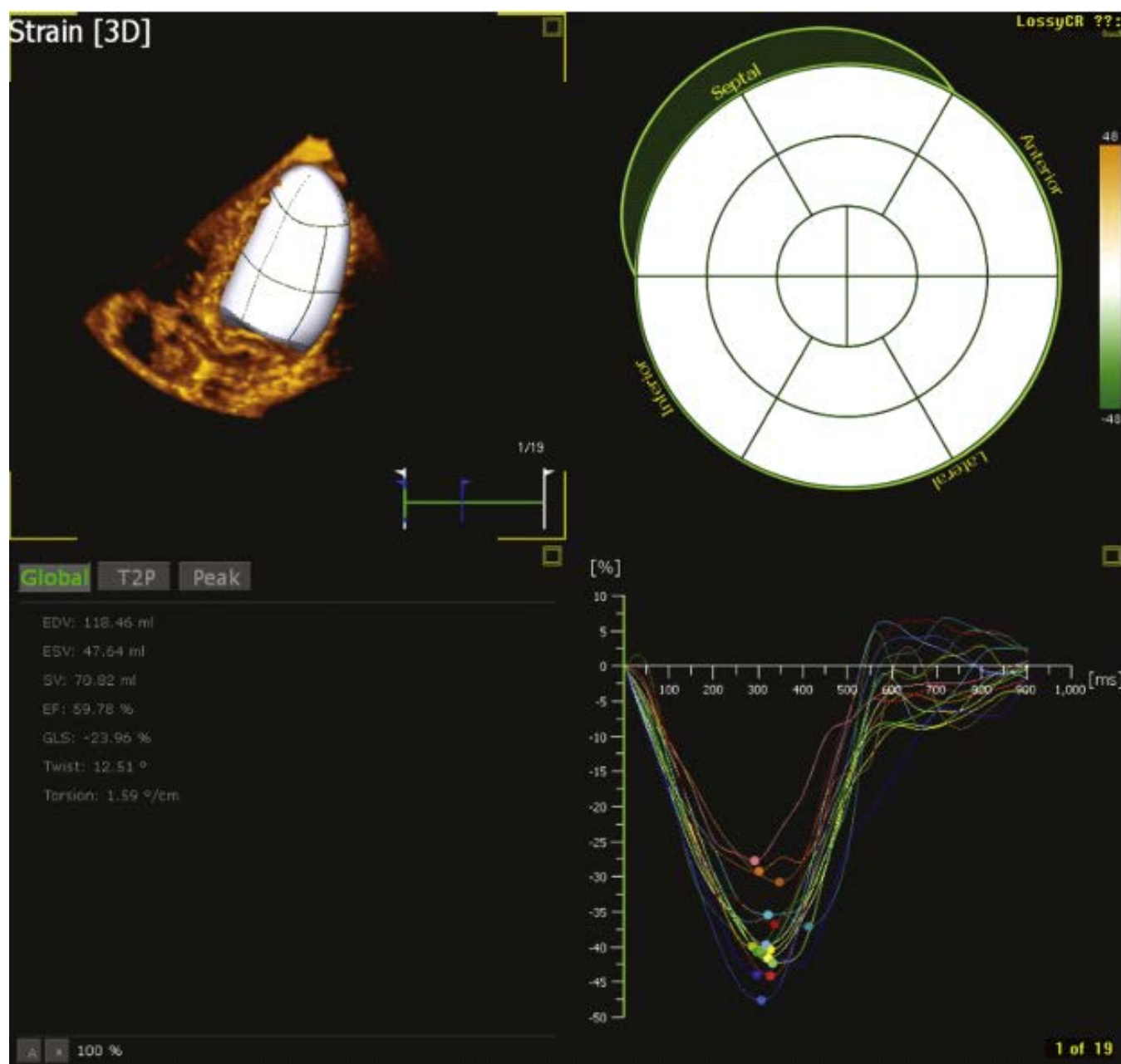


图 17 室壁跟踪三维变形分析。部分软件采用三维容积追踪左心室心肌而不是简单的心内膜边界。可以从单个容积成像中分析整个左心室的变形、扭转和旋转。该技术的局限是时间分辨率比二维超声心动图低。

八、3DE 评价先心病的房室瓣和动脉瓣的功能

三维超声心动图评价先心病房室瓣是该技术在临床最常见的一种应用^{149, 150}。3DE 能提供瓣膜大小、形态和运动的全面信息。三维彩色血流多普勒的应用可显示房室瓣膜反流区域，包括大小、形状和反流口数。

房室瓣

房室瓣解剖的评估

三维超声心动图评价先心病的房室瓣是基于外科手术前更好的观察房室瓣反流和理解其机制的需要。房室瓣的功能是一个复杂的互动，包括心房收缩¹⁵¹、瓣环形状、收缩和运动¹⁵²⁻¹⁵³、瓣叶大小及形态¹⁵⁴⁻¹⁵⁵及其张量的强度变化¹⁵⁶⁻¹⁵⁷，腱索的长度和张力以及乳头肌收缩和位置¹⁵⁸⁻¹⁵⁹，心室协调和收缩¹⁶⁰⁻¹⁶¹也影响房室瓣功能。三维超声心动图评价侧重于瓣环、瓣叶、腱索和乳头肌，因为这些房室瓣的构成成分可通过目前的外科技术操纵或修复。虽然三维超声心动图在先天性定量评价房室瓣已在房室间隔缺损有报道¹⁵⁹⁻¹⁶²和定量评价三尖瓣在左心发育不良综合征¹⁵⁸⁻¹⁶³有报道，但它还不是常规临床实践的一部分。市售的定量软件经常假设正常的房室瓣形态和后天性疾病，使其在先天性中的有效性降低。目前，通过三维超声心动图评价房室瓣反流多为定性评价⁴¹并针对个人瓣膜解剖而异。对先心病的临床转归影响尚无数据，但该技术可以影响手术方式¹⁶⁴。

房室瓣反流的定量

二维超声评价房室瓣反流的严重程度已被证明在成人中可以指导治疗¹⁶⁵，尽管存在观察者之间的明显差异¹⁶⁶。2DE 定量评估瓣膜返流在成人已有指南¹⁶⁷⁻¹⁶⁸，但没有儿童的²⁴。重复性差、形态异常瓣膜结果的准确性、复杂的返流束形态诸如椭圆形或直线形的反流口和多个反流束、有效反流口面积(EROA)计算等方面，与定性评估相比并没有表现出明显优越性¹⁶⁹⁻¹⁷¹。没有相对于不同病人或瓣膜大小的 EROA 参考值可用，这对有先天性瓣膜异常的生长期患者的结果解读是一个显著限制。3DE 类似于 MRI 的瓣膜返流评估方法非常令人鼓舞¹⁷²⁻¹⁷⁴，但要求没有明显心室间分流。3DE 定量测量先心病房室瓣关闭不全缩流束面积是一种很有前途的方法，测量相对简单，在大多数 3DE 导航软件都可用。3DE 获取彩色成像数据集后，临床医生可以在 MPR 导航模式下直接测量垂直于返流的缩流面积。成人人群的多个验证研究显示 3DE 所测二尖瓣反流的缩流束面积与 MRI 计算的 EROA 及返流分数之间有很好的相关性及可重复性¹⁷⁵，在儿科和先心病患者仍需要进一步的验证。

3DE 定量评价主动脉瓣及肺动脉瓣狭窄和反流

主动脉瓣 超声心动图在主动脉瓣疾病研究中的核心作用在儿科/先心病和成年临床实践中均已明确建立²⁴⁻¹⁷⁶⁻¹⁷⁷，正如前面所讨论的，3DE 可以定义瓣膜形态、估计左室体积和质量。多普勒得出的跨瓣压差是流量依赖的，准确测量主动脉瓣有效瓣口面积在临床上非常重要。这在儿童尤其重要，因为潜在的测量误差连续方程法在儿童并不建议使用²⁴，可以调整 MPR 图像确保直视瓣口，在儿童直接测量主动脉瓣狭窄的有效瓣口面积²¹⁻¹⁷⁸。没有儿童主动脉瓣瓣口面积的正常临界值可用，因为它受主动脉瓣大小的影响，后者和孩子的大小相关。已发表的文献中曾经提到过一个较大范围年龄和身体大小的正常主动脉瓣面积¹⁷⁹，但这些正常值是使用旋转探头而不是目前的实时 3DE 技术所测。因此，在儿科人群中通过勾勒求积测主动脉瓣膜面积是可行的，但尚缺乏资料评价这些测量对干预时机或预后的影响。主动脉瓣反流的超声心动图定量评价在几篇文献有述²⁴⁻¹⁷⁶⁻¹⁷⁷，标准测值包括左室大小、返流或缩流束内径，以及主动脉舒张期血流反向。最近的成人工作使用 3DE 彩色成像估测基于 3DE 的缩流束大小，与二维超声心动图和 MRI 结果对比非常令人鼓舞¹⁸⁰⁻¹⁸¹，这种技术尚未在儿科或先天性人群中得到验证。主动脉瓣疾病患者的外科计划涉及主动脉根部大小的定量，有证据表明在儿童 3DE 更加精确⁵¹，3DE 自动测量在成人已得到验证¹⁸²。

肺动脉瓣 肺动脉瓣狭窄的评估在儿童和成人先心病患者通常是基于多普勒所测跨瓣压差²⁴。使用 2DE 获得肺动脉瓣的直视图可能具有挑战性，这阻碍了使用有效肺动脉瓣瓣口面积定义狭窄。3DE 可以通过实时 3DE、剪裁多心动周期全容积成像、或通过交叉平面技术帮助获取肺动脉瓣直视图。肺动脉瓣关闭不全是许多先心病患者的重要并发症，尤其是 TOF 修复后或右室肺动脉外管道连接患者。最近发表的文章⁵⁴⁻¹¹⁴⁻¹⁸³强调三维超声心动图定量评估右室的大小和功能的重要性。3DE 评估肺动脉返流依然属于半定量，虽然有公布的数据使用 3DE 测量 EROA¹⁸⁴，它没有被采纳到先心病的临床实践，也没有与心脏 MRI 的对比验证。

建议

房室瓣 推荐使用 3DE 观察房室瓣、乳头肌和腱索来帮助术前规划。

推荐使用 3DE 评估反流的位置、大小、形态、反流束数目及反流口面积。

在儿童和青少年中测量 EROA 尚需在一个广泛的瓣膜病理基础上进行验证，在此之前该测量不足以推荐用于房室瓣关闭不全的量化评估及决定瓣膜修理或更换的时机。房室瓣解剖和瓣膜功能的后处理评估软件应谨慎使用，因为它可能是在正常瓣膜解剖的基础上工作。

动脉瓣 推荐使用 3DE 评估主动脉瓣和肺动脉瓣的形态。推荐使用 3DE 进行瓣环、动脉根部及有效瓣口面积的测量。

3DE 彩色成像定量评估半月瓣反流程度尚有待验证。

九、三维超声心动图的培训

培训的要求和建议是先心病超声心动图立场声明和指南不可或缺的组成部分¹⁸⁵⁻¹⁸⁷。目前尚无先心病的 3DE 提议出台，欧洲先心病超声心动图认证流程目前也不包括 3DE¹⁸⁸。培训和教育在增加 3DE 的应用方面发挥了关键作用，特别是其提高效果的能力¹⁸⁹。毋庸置疑 3DE 在进入临床常规使用的过程中存在学习曲线并需要特殊培训。

3DE 的机器和探头类似于 2DE。但在学习方法上有一些根本的区别。在 2DE，获取的二维图像是唯一可以被解释的图像，培训的一个核心组成部分是适当获取不同平面的图像，它们在很大程度上是预定义的。相反，3DE 涉及具有广泛后处理潜力的三维数据采集。培训 3DE 必须涉及开发和提高获得最优 3DE 数据集的方法和后处理容量数据集的能力，以显示心脏的形态或量化心室功能。必须学会瓣膜及间隔的直视，以及其他只有通过 3DE 才能显示的复杂心脏畸形的细节。虽然这些结构和视角对外科医生、病理学家和其他熟练掌握心脏解剖的人来说非常熟悉，对那些没有类似参照的人却很有挑战。帮助弥合这一差距的方法之一是开发教育项目和出版物，包括将描述多种先心病的病理标本照片和 3DE 图像并列对照学习⁶⁰。

图像获取培训必然涉及在课堂或临床背景中目标的实时扫描。虽然它提供了真实的学习经验，但实际过程中有局限性，包括班级规模、合作对象的可获得性与广泛的疾病状态，繁忙的临床设置，以及相关的隐私问题。过去的几年中，2D TEE 和 TTE 模拟教具已可用，但 3DE 模拟器仍缺乏¹⁹⁰⁻¹⁹¹。

后处理培训主要采用工作室的模式，涉及包含广泛疾病谱的数据集操作¹⁹²，这种类型的训练要求集各种先心病的高质量 3DE 数据集、大量的便携式电脑以及供应商专用软件。三维培训的一个挑战一直是数据采集和后处理用户界面的频繁修改¹⁸⁹。虽然在仪器改进过程中这可以预料，但用户界面的频繁变化会对 3DE 的应用起到消极影响，用户界面的稳定和厂商之间的一致性会大大有助于开发好用的培训工具。

进一步的思考是 3DE 在不同的中心的使用及在认证和培训项目之间应用的显著差异性。在北美没有儿科心脏病学专科医师 3DE 教育培训的公布指南¹⁸⁵，无创影像学的高级专科医师培训的修订指南只是含糊地提及 3DE 的经验¹⁹³，3DE 培训目前不是欧洲先心病超声心动图认证的一部分。3DE 从指南到操作与解读标准的不足从而导致 3DE 具体培训标准的缺乏。本文件应提供更多 3DE 的未来培训框架结构。

至于训练应采取何种形式，参加 3DE 图像采集和后处理的正式培训课程对了解不同的 3D 模式和后处理软件至关重要。按照既定的培训计划，参加培训的超声技师和心脏病医师应该继续建立自己的二维超声心动图核心技能。在假定 3DE 广泛应用的基础上，许多专门致力于超声心动图影像的培训学员应该能够在他们单位获得数据采集及后处理的进一步经验。评估应以能力为基础，但完成至少 50 例不同先心病例容积成像的采集和后处理（混合 TTE / TEE）似乎是合理的。能力应包括心脏形态的评估以及定量左室容积和 EF。如果一个中心不能提供大量的 3DE 容积成像案例，那么应该在高容量的中心接受 3-6 个月的训练。对于更高级别的医生如需在手术过程中及导管室应用要求，需要更高级别的快速采集和后处理技能，一般需要较上述要求更多的经验和培训。应用 3DE 在 RV 或形状异常的心室也需要更进一步的培训和经验。3DE 的师资培训者将从有多年 3DE 图像获取和后处理经验评估心脏结构和功能的心脏病学家中选取。希望此文的建议，比如有关图像方向的例子，可以帮助开发既能用于学员也能用于培训教师的结构程序。

未来方向

应修改超声心动图模拟器，将 3DE 采集培训包括在内。全面发展基于仿真的教育资源将需要一个有广泛病理状态的大的三维数据集的库。培训后处理应包括网络可用的 3DE 分析软件并结合包括各种先心病病变 3DE 数据集的在线图书馆。为了开发这样的图书馆，针对 DICOM 数据集的匿名工具，包括去除 DICOM 图像中的抬头和患者数据是必不可少的。

建议

3DE 的培训 3DE 的培训应该是先心病超声心动图培训整体的一部分。这包括 3DE 的应用指征以及对外科和介入手术的附加价值和指导作用。

培训应该包括 3DE 数据集的采集和后处理以展示对心脏形态的评估和定量心功能评价的能力。

操作者应学习识别和评价 3DE 独有的一些视角，包括瓣膜和间隔的直视图。

用户界面的一致性和制造商之间术语的一致性将有助于开发好用的非专有培训工具。

十、三维超声心动图进展

过去十几年来带来了 3DE 令人振奋的进步，受益于技术进步的许多方面是为先心病患者量身定制。我们期待着探头设计和计算机后处理的进步以及新方法的研究，如帧重组¹⁹⁴和合成图像^{148、195、196}，将在视野、心内膜边界的定义、时间分辨率的增强和心室内分流方面带来好处。三维打印^{197、198}和全息显示的进步对临床实践中更好的观察、理解和利用三维超声心动图数据提供了保证。

新的心室容积测量、三维变形、瓣膜形态、瓣膜功能和流量的评价应该得到验证和自动化，从而获得在较大范围年龄和体型变化下可靠正常值的出版。这些改进不应仅限于左心结构，需要全面包括右心及先天性异常心室和瓣膜。所有这些测量都需要与其他成像技术对比进行重复性和准确性的可靠的评估。

3DE 技术对病人预后影响的评估仍然是一个挑战。当前许多 3D 技术采用特设方式下解决具体的临床挑战，如先心病的外科修复或介入治疗的指导，但没有对预后影响的可靠分析。心室容积、心肌变形和心功能的 3DE 定量评估应该催生更多研究来证明 3DE 是否可以作为预后结果的替代评判。

技术进步和 3DE 在临床实践中的使用增加将更加注重三维超声心动图培训和教育的方法学改进。这需要在研究和开发阶段得到匹配，通过改进 3DE 图像采集和分析的软件界面，包括适当情况下提高自动化程度来改善工作流程和降低观测者间的误差。

本文由 2014 – 2016 年 EACVI 科学文献委员会成员及外部评审者审阅。

EACVI 审阅者包括：Prof. Gilbert Habib, Prof. Thor Edvardsen, Dr. Vittoria Delgado, Prof. Erwan Donal, Dr. Denisa Muraru, Associate Professor Kristina Haugaa, Dr. Raphael Rosenhek, Dr. Jose Ribeiro, Dr. Xavier Iriart.

本文由 2015 – 2016 年 ASE 指南和标准委员会成员审阅，2015 – 2016 年 ASE 理事会及外部审阅者审阅。

ASE 审阅者包括 Deborah A. Agler, RCT, RDCS, FASE, Federico M. Asch, MD, FASE, Merri L. Bremer, EdD, RN, EDCS, ACS, FASE, Benjamin Byrd, MD, FASE, Hollie D. Carron, RDCS, FASE, Frederick C. Cobey, MD, FASE, Meryl Cohen, MD, FASE, Patrick Collier, MD, PhD, FASE, Mary Corretti, MD, FASE, Adam Dorfman, MD, FASE, Benjamin Eidem, MD, FASE, Fadia Makarem Ezzeddine, RT, RCS, FASE, Craig Fleishman, MD, FASE, Neal Gerstein, MD, FASE, Yvonne E. Gilliland, MD, FASE, Lanqi Hua, RDCS, FASE, Allan L. Klein, MD, FASE, Joe R. Kreeger, ACS, RCCS, RDCS, FASE, Roberto M. Lang, MD, FASE, Stephen H. Little, MD, FASE, Sunil Mankad, MD, FASE, Rick Meece, RDCS, RCS, RCIS, FASE, Tasneem Naqvi, MD, FASE, Maryellen H. Orsinelli, RN, RDCS, FASE, Andy Pellett, PhD, RCS, RDCS, FASE, Patricia A. Pellikka, MD, FASE, Michael Quartermain, MD, FASE, Vera H. Rigolin, MD, FASE, Brad J. Roberts, ACS, RCS, FASE, Vandana Sachdev, MD, FASE, Anita Sadeghpour, MD, FASE, Elaine Shea, ACS, RCS, RCCS, FASE, Roman M. Snieciński, MD, FASE, Raymond F. Stainback, MD, FASE, Cynthia Taub, MD, FASE, Neil J. Weissman, MD, FASE, Susan E. Wiegers, MD, FASE。

公告和声明：本报告是由 EACVI 及 ASE 为会员惠制的参考资料。该报告只包含建议因此不应作为医疗实践决策的唯一基础或纪律处分任何员工的根据。本报告所载声明及建议主要是根据专家的意见而不是比科学验证的数据。EACVI 和 ASE 没有表达或默示保证本报告中信息的完整性或准确性，包括适销性保证或为特定目的适宜性。EACVI 或 ASE 都不会对您、您的病人或其他第三方基于此信息作出的任何决定或行动负责。您对这些信息的使用也不构成源自 EACVI / ASE 的医疗建议，或创建任何源自 EACVI / ASE 和您的病人或其他人之间的医患关系。

十一、补充材料

本文相关的补充材料可在此处找到 <http://dx.doi.org/10.1016/j.echo.2016.08.022>

参考文献

1. Hung J, Lang R, Flachskampf F, Shernan SK, McCulloch ML, Adams DB, et al. 3D echocardiography: a review of the current status and future directions. *J Am Soc Echocardiogr* 2007;20:213-33.
2. Lang RM, Badano LP, Tsang W, Adams DH, Agricola E, Buck T, et al. EAE/ASE recommendations for image acquisition and display using three-dimensional echocardiography. *Eur Heart J Cardiovasc Imaging* 2012;13:1-46.
3. Dekker DL, Piziali RL, Dong E. A system for ultrasonically imaging the human heart in three dimensions. *Comput Biomed Res* 1974;7:544-53.
4. von Ramm OT, Smith SW. Real time volumetric ultrasound imaging system. *J Digit Imaging* 1990;3:261-6.
5. Sheikh K, Smith SW, von Ramm O, Kisslo J. Real-time, three-dimensional echocardiography: feasibility and initial use. *Echocardiography* 1991;8: 119-25.
6. Simpson JM. Real-time three-dimensional echocardiography of congenital heart disease using a high frequency paediatric matrix transducer. *Eur J Echocardiogr* 2008;9:222-4.
7. Acar P, Abadir S, Paranon S, Latcu G, Grosjean J, Dulac Y. Live 3D echocardiography with the pediatric matrix probe. *Echocardiography* 2007; 24:750-5.
8. Sugeng L, Shernan SK, Salgo IS, Weinert L, Shook D, Raman J, et al. Live 3-dimensional transesophageal echocardiography. Initial experience using the fully-sampled matrix array probe. *J Am Coll Cardiol* 2008; 52:446-9.
9. Rawlins DB, Austin C, Simpson JM. Live three-dimensional paediatric intraoperative epicardial echocardiography as a guide to surgical repair of atrioventricular valves. *Cardiol Young* 2006;16:34-9.
10. McGhie JS, Vletter WB, de Groot-de Laat LE, Ren B, Frowijn R, van den Bosch AE, et al. Contributions of simultaneous multiplane echocardiographic imaging in daily clinical practice. *Echocardiography* 2014;31: 245-54.
11. McGhie JS, van den Bosch AE, Haarman MG, Ren B, Roos-Hesselink JW, Witsenburg M, et al. Characterization of atrial septal defect by simultaneous multiplane two-dimensional echocardiography. *Eur Heart J Cardiovasc Imaging* 2014;15:1145-51.
12. Kutty S, Colen TM, Smallhorn JF. Three-dimensional echocardiography in the assessment of congenital mitral valve disease. *J Am Soc Echocardiogr* 2014;27:142-54.
13. Faletra FF, Ramamurthi A, Dequarti MC, Leo LA, Moccetti T, Pandian N. Artifacts in three-dimensional transesophageal echocardiography. *J Am Soc Echocardiogr* 2014;27:453-62.
14. Lang RM, Badano LP, Tsang W, Adams DH, Agricola E, Buck T, et al. EAE/ASE recommendations for image acquisition and display using threedimensional echocardiography. *J Am Soc Echocardiogr* 2012;25:3-46.
15. Fenster A, Parraga G, Bax J. Three-dimensional ultrasound scanning. *Interface Focus* 2011;1:503-19.
16. Pandian NG, Roelandt J, Nanda NC, Sugeng L, Cao QL, Azevedo J, et al. Dynamic three-dimensional echocardiography: methods and clinical potential. *Echocardiography* 1994;11:237-59.
17. Khoo NS, Young A, Occleshaw C, Cowan B, Zeng ISL, Gentles TL. Assessments of right ventricular volume and function using threedimensional echocardiography in older

children and adults with congenital heart disease: comparison with cardiac magnetic resonance imaging. *J Am Soc Echocardiogr* 2009;22:1279-88.

18. Soriano BD, Hoch M, Ithuralde A, Geva T, Powell AJ, Kussman BD, et al. Matrix-array 3-dimensional echocardiographic assessment of volumes, mass, and ejection fraction in young pediatric patients with a functional Journal of the American Society of Echocardiography Volume 30 Number 1 Simpson et al 21 single ventricle: a comparison study with cardiac magnetic resonance. *Circulation* 2008;117:1842-8.

19. Bharucha T, Ho SY, Vettukattil JJ. Multiplanar review analysis of threedimensional echocardiographic datasets gives new insights into the morphology of subaortic stenosis. *Eur J Echocardiogr* 2008;9:614-20.

20. Bharucha T, Sivaprakasam MC, Roman KS, Vettukattil JJ. A multiplanar three dimensional echocardiographic study of mitral valvar annular function in children with normal and regurgitant valves. *Cardiol Young* 2008; 18:379-85.

21. Bharucha T, Fernandes F, Slorach C, Mertens L, Friedberg MK. Measurement of effective aortic valve area using three-dimensional echocardiography in children undergoing aortic balloon valvuloplasty for aortic stenosis. *Echocardiography* 2012;29:484-91.

22. Lai WW, Geva T, Shirali GS, Frommelt PC, Humes RA, Brook MM, et al. Guidelines and standards for performance of a pediatric echocardiogram: a report from the Task Force of the Pediatric Council of the American Society of Echocardiography. *J Am Soc Echocardiogr* 2006;19: 1413-30.

23. Ayres NA, Miller-Hance W, Fyfe DA, Stevenson JG, Sahn DJ, Young LT, et al. Indications and guidelines for performance of transesophageal echocardiography in the patient with pediatric acquired or congenital heart disease: report from the task force of the Pediatric Council of the American Society of Echocardiography. *J Am Soc Echocardiogr* 2005; 18:91-8.

24. Lopez L, Colan SD, Frommelt PC, Ensing GJ, Kendall K, Younoszai AK, et al. Recommendations for quantification methods during the performance of a pediatric echocardiogram: a report from the Pediatric Measurements Writing Group of the American Society of Echocardiography Pediatric and Congenital Heart Disease Council. *J Am Soc Echocardiogr* 2010;23:465-95.

25. Nanda NC, Kisslo J, Lang R, Pandian N, Marwick T, Shirali G, et al. Examination protocol for three-dimensional echocardiography. *Echocardiography* 2004;21:763-8.

26. Anderson RH, Razavi R, Taylor AM. Cardiac anatomy revisited. *J Anat* 2004;205:159-77.

27. Simpson J, Miller O, Bell A, Bellsham-Revell H, McGhie J, Meijboom F. Image orientation for three-dimensional echocardiography of congenital heart disease. *Int J Cardiovasc Imaging* 2012;28:743-53.

28. Pushparajah K, Miller OI, Simpson JM. 3D echocardiography of the atrial septum: anatomical features and landmarks for the echocardiographer. *JACC Cardiovasc Imaging* 2010;3:981-4.

29. Pushparajah K, Barlow A, Tran V-H, Miller OI, Zidere V, Vaidyanathan B, et al. A systematic three-dimensional echocardiographic approach to assist surgical planning in double outlet right ventricle. *Echocardiography* 2013;30:234-8.

30. Roberson DA, Cui W, Patel D, Tsang W, Sugeng L, Weinert L, et al. Three-dimensional transesophageal echocardiography of atrial septal defect: a qualitative and quantitative anatomic study. *J Am Soc Echocardiogr* 2011;24:600-10.

31. Ojala T, Rosenthal E, Nugent K, Qureshi S, Simpson J. Live 3D echocardiography to guide closure of residual ASD. *JACC Cardiovasc Imaging* 2013;6:523-5.
32. Roberson DA, Cui VW. Three-dimensional transesophageal echocardiography of atrial septal defect device closure. *Curr Cardiol Rep* 2014;16:453.
33. Saric M, Perk G, Purgess JR, Kronzon I. Imaging atrial septal defects by real-time three-dimensional transesophageal echocardiography: step-by-step approach. *J Am Soc Echocardiogr* 2010;23:1128-35.
34. Acar P, Abadir S, Roux D, Taktak A, Dulac Y, Glock Y, et al. Ebstein's anomaly assessed by real-time 3-D echocardiography. *Ann Thorac Surg* 2006;82:731-3.
35. Hadeed K, Hascoet S, Dulac Y, Peyre M, Acar P. Tethering of tricuspid valve resulting from aberrant tendinous cords mimic Ebstein's anomaly, three-dimensional echocardiography approach. *Echocardiography* 2014;31:E136-7.
36. Booker OJ, Nanda NC. Echocardiographic assessment of Ebstein's anomaly. *Echocardiography* 2015;32(Suppl. 2):S177-88.
37. Badano LP, Agricola E, De Isla LP, Gianfagna P, Zamorano JL. Evaluation of the tricuspid valve morphology and function by transthoracic real-time three-dimensional echocardiography. *Eur J Echocardiogr* 2009;10:477-84.
38. Kutty S, Colen T, Thompson RB, Tham E, Li L, Vijarnsorn C, et al. Tricuspid regurgitation in hypoplastic left heart syndrome: mechanistic insights on tricuspid valve tethering and relationship with outcomes. *Circ Cardiovasc Imaging* 2014;7:765-72.
39. van Noord PT, Scohy TV, McGhie J, Bogers AJJC. Three-dimensional transesophageal echocardiography in Ebstein's anomaly. *Interact Cardiovasc Thorac Surg* 2010;10:836-7.
40. Kutty S, Smallhorn JF. Evaluation of atrioventricular septal defects by three-dimensional echocardiography: benefits of navigating the third dimension. *J Am Soc Echocardiogr* 2012;25:932-44.
41. Takahashi K, Mackie AS, Rebeyka IM, Ross DB, Robertson M, Dyck JD, et al. Two-dimensional versus transthoracic real-time three-dimensional echocardiography in the evaluation of the mechanisms and sites of atrioventricular valve regurgitation in a congenital heart disease population. *J Am Soc Echocardiogr* 2010;23:726-34.
42. Bharucha T, Anderson RH, Lim ZS, Vettukattil JJ. Multiplanar review of three-dimensional echocardiography gives new insights into the morphology of Ebstein's malformation. *Cardiol Young* 2010;20:49-53.
43. Acar P, Abdel-Massih T, Douste-Blazy M-Y, Dulac Y, Bonhoeffer P, Sidi D. Assessment of muscular ventricular septal defect closure by transcatheter or surgical approach: a three-dimensional echocardiographic study. *Eur J Echocardiogr* 2002;3:185-91.
44. Charakida M, Qureshi S, Simpson JM. 3D echocardiography for planning and guidance of interventional closure of VSD. *JACC Cardiovasc Imaging* 2013;6:120-3.
45. Chen FL, Hsiung MC, Nanda N, Hsieh KS, Chou MC. Real time three-dimensional echocardiography in assessing ventricular septal defects: an echocardiographic-surgical correlative study. *Echocardiography* 2006;23:562-8.
46. Acar P, Abadir S, Aggoun Y. Transcatheter closure of perimembranous ventricular septal defects with Amplatzer occluder assessed by real-time three-dimensional echocardiography. *Eur J Echocardiogr* 2007;8:110-5.
47. Sivakumar K, Singhi A, Pavithran S. Enface reconstruction of VSD on RV septal surface using real-time 3D echocardiography. *JACC Cardiovasc Imaging* 2012;5:1176-80.

48. Mercer-Rosa L, Seliem MA, Fedec A, Rome J, Rychik J, Gaynor JW. Illustration of the additional value of real-time 3-dimensional echocardiography to conventional transthoracic and transesophageal 2-dimensionalechocardiography in imaging muscular ventricular septal defects: doesthis have any impact on individual patie. *J Am Soc Echocardiogr* 2006;19:1511-9.
49. Marechaux S, Juthier F, Banfi C, Vincentelli A, Prat A, Ennezat P-V. Illustration of the echocardiographic diagnosis of subaortic membrane stenosis in adults: surgical and live three-dimensional transoesophagealfindings. *Eur J Echocardiogr* 2011;12:E2.
50. Shirali GS. Three dimensional echocardiography in congenital heartdefects. *Ann Pediatr Cardiol* 2008;1:8-17.
51. Noel CV, Choy RM, Lester JR, Soriano BD. Accuracy of matrix-arraythree-dimensional echocardiographic measurements of aortic root dilation and comparison with two-dimensional echocardiography in pediatric patients. *J Am Soc Echocardiogr* 2012;25:287-93.
52. Martin R, Hasco€et S, Dulac Y, Peyre M, Mejean S, Hadeed K, et al. Comparison of two- and three-dimensional transthoracic echocardiographyfor measurement of aortic annulus diameter in children. *Arch CardiovascDis* 2013;106:492-500.
53. Hlavacek A, Lucas J, Baker H, Chessa K, Shirali G. Feasibility andutility of three-dimensional color flow echocardiography of the aorticarch: The “echocardiographic angiogram”. *Echocardiography* 2006;23:860-4.
54. Valente AM, Cook S, Festa P, Ko HH, Krishnamurthy R, Taylor AM, et al.Multimodality imaging guidelines for patients with repaired tetralogy of22 Simpson et al *Journal of the American Society of Echocardiography*January 2017fallot: a report from the American Society of Echocardiography: developed in collaboration with the Society for Cardiovascular MagneticResonance and the Society for Pediatric Radiology. *J Am Soc Echocardiogr* 2014;27:111-41.
55. Anwar AM, Soliman O, van den Bosch AE, McGhie JS, Geleijnse ML, tenCate FJ, et al. Assessment of pulmonary valve and right ventricularoutflow tract with real-time three-dimensional echocardiography.*Int J Cardiovasc Imaging* 2007;23:167-75.
56. Bharucha T, Sivaprakasam MC, Haw MP, Anderson RH, Vettukattil JJ.The angle of the components of the common atrioventricular valve predicts the outcome of surgical correction in patients with atrioventricularseptal defect and common atrioventricular junction. *J Am Soc Echocardiogr* 2008;21:1099-104.
57. Faletra FF, Nucifora G, Ho SY. Real-time 3-dimensional transesophagealechocardiography of the atrioventricular septal defect. *Circ CardiovascImaging* 2011;4:e7-9.
58. van den Bosch AE, Ten Harkel D-J, McGhie JS, Roos-Hesselink JW,Simoons ML, Bogers AJJC, et al. Surgical validation of real-time transthoracic 3D echocardiographic assessment of atrioventricular septal defects.*Int J Cardiol* 2006;112:213-8.
59. van den Bosch AE, van Dijk VF, McGhie JS, Bogers AJJC, Roos-Hesselink JW,Simoons ML, et al. Real-time transthoracic three-dimensional echocardiography provides additional information of left-sided AV valve morphology afterAVSD repair. *Int J Cardiol* 2006;106:360-4.

60. Shirali G, Simpson JM. Pediatric Aspects of Three-Dimensional Echocardiography. In: Lang RM, Shernan SK, Shirali GS, Mor-Avi V, editors. *Comprehensive Atlas of 3D Echocardiography*. First. Philadelphia: Lippincott, Williams and Wilkins; 2012.
61. Abadir S, Leobon B, Acar P. Assessment of tricuspid regurgitation mechanism by three-dimensional echocardiography in an adult patient with congenitally corrected transposition of the great arteries. *Arch Cardiovasc Dis* 2009;102:459-60.
62. Kottayil BP, Sunil GS, Kappanayil M, Mohanty SH, Francis E, Vaidyanathan B, et al. Two-ventricle repair for complex congenital heart defects palliated towards single-ventricle repair. *Interact Cardiovasc Thorac Surg* 2014;18:266-71.
63. Del Pasqua A, Sanders SP, De Zorzi A, Toscano A, Iacobelli R, Pierli C, et al. Impact of three-dimensional echocardiography in complex congenital heart defect cases: the surgical view. *Pediatr Cardiol* 2009;30:293-300.
64. Acar P, Saliba Z, Bonhoeffer P, Aggoun Y, Bonnet D, Sidi D, et al. Influence of atrial septal defect anatomy in patient selection and assessment of closure with the Cardioseal device: a three-dimensional transoesophageal echocardiographic reconstruction. *Eur Heart J* 2000;21:573-81.
65. Abdel-Massih T, Dulac Y, Taktak A, Aggoun Y, Massabuau P, Elbaz M, et al. Assessment of atrial septal defect size with 3D-transesophageal echocardiography: comparison with balloon method. *Echocardiography* 2005;22:121-7.
66. Taniguchi M, Akagi T, Kijima Y, Sano S. Clinical advantage of real-time three-dimensional transesophageal echocardiography for transcatheter closure of multiple atrial septal defects. *Int J Cardiovasc Imaging* 2013;29:1273-80.
67. Bhaya M, Mutluer FO, Mahan E, Mahan L, Hsiung MC, Yin W-H, et al. Live/real time three-dimensional transesophageal echocardiography in percutaneous closure of atrial septal defects. *Echocardiography* 2013;30:345-53.
68. Cheng TO, Xie M-X, Wang X-F, Wang Y, Lu Q. Real-time 3-dimensional echocardiography in assessing atrial and ventricular septal defects: an echocardiographic-surgical correlative study. *Am Heart J* 2004;148:1091-5.
69. van den Bosch AE, Ten Harkel D-J, McGhie JS, Roos-Hesselink JW, Simoons ML, Bogers AJJC, et al. Feasibility and accuracy of real-time 3-dimensional echocardiographic assessment of ventricular septal defects. *J Am Soc Echocardiogr* 2006;19:7-13.
70. Hsu J-H, Wu J-R, Dai Z-K, Lee M-H. Real-time three-dimensional echocardiography provides novel and useful anatomic insights of perimembranous ventricular septal aneurysm. *Int J Cardiol* 2007;118:326-31.
71. Butera G, Biondi-Zoccai G, Sangiorgi G, Abella R, Giamberti A, Bussadori C, et al. Percutaneous versus surgical closure of secundum atrial septal defects: a systematic review and meta-analysis of currently available clinical evidence. *Euro Intervention* 2011;7:377-85.
72. Du ZD, Hijazi ZM, Kleinman CS, Silverman NH, Larntz K. Comparison between transcatheter and surgical closure of secundum atrial septal defect in children and adults: results of a multicenter nonrandomized trial. *J Am Coll Cardiol* 2002;39:1836-44.
73. Chen FL, Hsiung MC, Hsieh KS, Li YC, Chou MC. Real time three-dimensional transthoracic echocardiography for guiding Amplatzer septal occluder device deployment in patients with atrial septal defect. *Echocardiography* 2006;23:763-70.
74. Roman KS, Nii M, Golding F, Benson LN, Smallhorn JF. Images in cardiovascular medicine. Real-time subcostal 3-dimensional echocardiography for guided percutaneous atrial septal defect closure. *Circulation* 2004;109:e320-1.

75. Lock JE, Block PC, McKay RG, Baim DS, Keane JF. Transcatheter closure of ventricular septal defects. *Circulation* 1988;78:361-8.
76. Knauth AL, Lock JE, Perry SB, McElhinney DB, Gauvreau K, Landzberg MJ, et al. Transcatheter device closure of congenital and postoperative residual ventricular septal defects. *Circulation* 2004;110:501-7.
77. Butera G, Carminati M, Chessa M, Piazza L, Micheletti A, Negura DG, et al. Transcatheter closure of perimembranous ventricular septal defects: early and long-term results. *J Am Coll Cardiol* 2007;50:1189-95.
78. Carminati M, Butera G, Chessa M, De Giovanni J, Fisher G, Gewillig M, et al. Transcatheter closure of congenital ventricular septal defects: results of the European Registry. *Eur Heart J* 2007;28:2361-8.
79. Butera G, Chessa M, Carminati M. Percutaneous closure of ventricular septal defects. State of the art. *J Cardiovasc Med (Hagerstown)* 2007;8:39-45.
80. El Said HG, Bratincsak A, Gordon BM, Moore JW. Closure of perimembranous ventricular septal defects with aneurysmal tissue using the Amplatzer Duct Occluder I: lessons learned and medium term follow up. *Catheter Cardiovasc Interv* 2012;80:895-903.
81. Lucas V. Closure of perimembranous ventricular septal defects with aneurysmal tissue using the Amplatzer Duct Occluder I. *Catheter Cardiovasc Interv* 2012;80:904.
82. Giannakoulas G, Thanopoulos V. Three-dimensional transesophageal echocardiography for guiding percutaneous fontan fenestration closure. *Echocardiography* 2014;31:E230-1.
83. Raslan S, Nanda NC, Lloyd L, Khairnar P, Reilly SD, Holman WL. Incremental value of live/real time three-dimensional transesophageal echocardiography over the two-dimensional technique in the assessment of sinus of valsalva aneurysm rupture. *Echocardiography* 2011;28:918-20.
84. Esper SA, Fink R, Rhodes JF, Harrison JK, Mackensen GB. A coronary artery fistula successfully closed with the precise guidance of three-dimensional echocardiography. *J Cardiothorac Vasc Anesth* 2014;28:194-5.
85. Mishra J, Puri HP, Hsiung MC, Misra S, Khairnar P, Laxmi Gollamudi B, et al. Incremental value of live/real time three-dimensional over two-dimensional transesophageal echocardiography in the evaluation of right coronary artery fistula. *Echocardiography* 2011;28:805-8.
86. Singh P, Manda J, Hsiung MC, Mehta A, Kesanolla SK, Nanda NC, et al. Live/real time three-dimensional transesophageal echocardiographic evaluation of mitral and aortic valve prosthetic paravalvular regurgitation. *Echocardiography* 2009;26:980-7.
87. Cavalcante JL, Rodriguez LL, Kapadia S, Tuzcu EM, Stewart WJ. Role of echocardiography in percutaneous mitral valve interventions. *JACC Cardiovasc Imaging* 2012;5:733-46.
88. Alli OO, Hsiung MC, Guvenc T, Neill J, Elguindy M, Ahmed MI, et al. Incremental value of three-dimensional transesophageal echocardiography over the two-dimensional technique in percutaneous closure of aortic paraprosthetic regurgitation. *Echocardiography* 2014;31:1154-8. *Journal of the American Society of Echocardiography* Volume 30 Number 1 Simpson et al 23
89. Cua CL, Kollins K, Roble S, Holzer RJ. Three-dimensional image of a baffle leak in a patient with a mustard operation. *Echocardiography* 2014;31:E315-6.
90. Soriano BD, Stout KK, Cailles CD, Jones TK. Transcatheter closure of an atrial redirection baffle leak. *Ann Pediatr Cardiol* 2009;2:85-6.

91. Faletra FF, Nucifora G, Ho SY. Imaging the atrial septum using real-time three-dimensional transesophageal echocardiography: technical tips, normal anatomy, and its role in transseptal puncture. *J Am Soc Echocardiogr* 2011;24:593-9.
92. Doring M, Braunschweig F, Eitel C, Gaspar T, Wetzel U, Nitsche B, et al. Individually tailored left ventricular lead placement: lessons from multimodality integration between three-dimensional echocardiography and coronary sinus angiogram. *Europace* 2013;15:718-27.
93. Fontes-Carvalho R, Sampaio F, Ribeiro J, Gama Ribeiro V. Three-dimensional intracardiac echocardiography: a new promising imaging modality to potentially guide cardiovascular interventions. *Eur Heart J Cardiovasc Imaging* 2013;14:1028.
94. Maini B. Real-time three-dimensional intracardiac echocardiography: a nearly single-center experience. *J Invasive Cardiol* 2015;27:E5-12.
95. Silvestry FE, Kadakia MB, Willhide J, Herrmann HC. Initial experience with a novel real-time three-dimensional intracardiac ultrasound system to guide percutaneous cardiac structural interventions: a phase 1 feasibility study of volume intracardiac echocardiography in the assessment of patients with structural heart disease undergoing percutaneous transcatheter therapy. *J Am Soc Echocardiogr* 2014;27:978-83.
96. Bellsham-Revell HR, Simpson JM, Miller OI, Bell AJ. Subjective evaluation of right ventricular systolic function in hypoplastic left heart syndrome: how accurate is it? *J Am Soc Echocardiogr* 2013;26:52-6.
97. Hoch M, Vasilyev NV, Soriano B, Gauvreau K, Marx GR. Variables influencing the accuracy of right ventricular volume assessment by real-time 3-dimensional echocardiography: an in vitro validation study. *J Am Soc Echocardiogr* 2007;20:456-61.
98. Lu X, Nadvoretskiy V, Bu L, Stolpen A, Ayres N, Pignatelli RH, et al. Accuracy and reproducibility of real-time three-dimensional echocardiography for assessment of right ventricular volumes and ejection fraction in children. *J Am Soc Echocardiogr* 2008;21:84-9.
99. Renella P, Marx GR, Zhou J, Gauvreau K, Geva T. Feasibility and reproducibility of three-dimensional echocardiographic assessment of right ventricular size and function in pediatric patients. *J Am Soc Echocardiogr* 2014;27:903-10.
100. Maffessanti F, Muraru D, Esposito R, Gripari P, Ermacora D, Santoro C, et al. Age-, body size-, and sex-specific reference values for right ventricular volumes and ejection fraction by three-dimensional echocardiography: a multicenter echocardiographic study in 507 healthy volunteers. *Circ Cardiovasc Imaging* 2013;6:700-10.
101. Tamborini G, Marsan NA, Gripari P, Maffessanti F, Brusoni D, Muratori M, et al. Reference values for right ventricular volumes and ejection fraction with real-time three-dimensional echocardiography: evaluation in a large series of normal subjects. *J Am Soc Echocardiogr* 2010;23:109-15.
102. Leibundgut G, Rohner A, Grize L, Bernheim A, Kessel-Schaefer A, Bremerich J, et al. Dynamic assessment of right ventricular volumes and function by real-time three-dimensional echocardiography: a comparison study with magnetic resonance imaging in 100 adult patients. *J Am Soc Echocardiogr* 2010;23:116-26.
103. Jenkins C, Chan J, Bricknell K, Strudwick M, Marwick TH. Reproducibility of right ventricular volumes and ejection fraction using real-time three-dimensional echocardiography: comparison with cardiac MRI. *Chest* 2007;131:1844-51.

104. Dragulescu A, Grosse-Wortmann L, Fackoury C, Mertens L. Echocardiographic assessment of right ventricular volumes: a comparison of different techniques in children after surgical repair of tetralogy of Fallot. *Eur Heart J Cardiovasc Imaging* 2012;13:596-604.
105. Grewal J, Majdalany D, Syed I, Pellikka P, Warnes CA. Three-dimensional echocardiographic assessment of right ventricular volume and function in adult patients with congenital heart disease: comparison with magnetic resonance imaging. *J Am Soc Echocardiogr* 2010;23:127-33.
106. van der Zwaan HB, Helbing WA, McGhie JS, Geleijnse ML, Luijnenburg SE, Roos-Hesselink JW, et al. Clinical value of real-time three-dimensional echocardiography for right ventricular quantification in congenital heart disease: validation with cardiac magnetic resonance imaging. *J Am Soc Echocardiogr* 2010;23:134-40.
107. van der Zwaan HB, Geleijnse ML, Soliman OII, McGhie JS, WiegersGroeneweg EJA, Helbing WA, et al. Test-retest variability of volumetric right ventricular measurements using real-time three-dimensional echocardiography. *J Am Soc Echocardiogr* 2011;24:671-9.
108. Iriart X, Montaudon M, Lafitte S, Chabaneix J, Reant P, Balbach T, et al. Right ventricle three-dimensional echography in corrected tetralogy of Fallot: accuracy and variability. *Eur J Echocardiogr* 2009;10:784-92.
109. Grapsa J, O'Regan DP, Pavlopoulos H, Durighel G, Dawson D, Nihoyannopoulos P. Right ventricular remodelling in pulmonary arterial hypertension with three-dimensional echocardiography: comparison with cardiac magnetic resonance imaging. *Eur J Echocardiogr* 2010;11:64-73.
110. Dragulescu A, Grosse-Wortmann L, Fackoury C, Riffle S, Waiss M, Jaeggi E, et al. Echocardiographic assessment of right ventricular volumes after surgical repair of tetralogy of Fallot: clinical validation of a new echocardiographic method. *J Am Soc Echocardiogr* 2011;24:1191-8.
111. Kutty S, Li L, Polak A, Gribben P, Danford DA. Echocardiographic knowledge-based reconstruction for quantification of the systemic right ventricle in young adults with repaired D-transposition of great arteries. *Am J Cardiol* 2012;109:881-8.
112. Zhang QB, Sun JP, Gao RF, Lee AP-W, Feng YL, Liu XR, et al. Feasibility of single-beat full-volume capture real-time three-dimensional echocardiography for quantification of right ventricular volume: validation by cardiac magnetic resonance imaging. *Int J Cardiol* 2013;168:3991-5.
113. Friedberg MK, Su X, Tworetzky W, Soriano BD, Powell AJ, Marx GR. Validation of 3D echocardiographic assessment of left ventricular volumes, mass, and ejection fraction in neonates and infants with congenital heart disease: a comparison study with cardiac MRI. *Circ Cardiovasc Imaging* 2010;3:735-42.
114. Selly J-B, Iriart X, Roubertie F, Mauriat P, Marek J, Guilhon E, et al. Multivariable assessment of the right ventricle by echocardiography in patients with repaired tetralogy of Fallot undergoing pulmonary valve replacement: a comparative study with magnetic resonance imaging. *Arch Cardiovasc Dis* 2015;108:5-15.
115. Kutty S, Graney BA, Khoo NS, Li L, Polak A, Gribben P, et al. Serial assessment of right ventricular volume and function in surgically palliated hypoplastic left heart syndrome using real-time transthoracic three-dimensional echocardiography. *J Am Soc Echocardiogr* 2012;25:682-9.

116. Bell A, Rawlins D, Bellsham-Revell H, Miller O, Razavi R, Simpson J. Assessment of right ventricular volumes in hypoplastic left heart syndrome by real-time three-dimensional echocardiography: comparison with cardiac magnetic resonance imaging. *Eur Heart J Cardiovasc Imaging* 2014;15:257-66.
117. Hubka M, Bolson EL, McDonald JA, Martin RW, Munt B, Sheehan FH. Three-dimensional echocardiographic measurement of left and right ventricular mass and volume: in vitro validation. *Int J Cardiovasc Imaging* 2002;18:111-8.
118. Sheehan FH, Kilner PJ, Sahn DJ, Vick GW, Stout KK, Ge S, et al. Accuracy of knowledge-based reconstruction for measurement of right ventricular volume and function in patients with tetralogy of Fallot. *Am J Cardiol* 2010;105:993-9.
119. Moroseos T, Mitsumori L, Kerwin WS, Sahn DJ, Helbing WA, Kilner PJ, et al. Comparison of Simpson's method and three-dimensional reconstruction for measurement of right ventricular volume in patients with complete or corrected transposition of the great arteries. *Am J Cardiol* 2010;105:1603-9.
120. Bhawe NM, Patel AR, Weinert L, Yamat M, Freed BH, Mor-Avi V, et al. Three-dimensional modeling of the right ventricle from two-dimensional transthoracic echocardiographic images: utility of knowledge-based reconstruction in pulmonary arterial hypertension. *J Am Soc Echocardiogr* 2013;26:860-7. 24 Simpson et al *Journal of the American Society of Echocardiography* January 2017
121. Leary PJ, Kurtz CE, Hough CL, Waiss M-P, Ralph DD, Sheehan FH. Three-dimensional analysis of right ventricular shape and function in pulmonary hypertension. *Pulm Circ* 2012;2:34-40.
122. van den Bosch AE, Robbers-Visser D, Krenning BJ, Voormolen MM, McGhie JS, Helbing WA, et al. Real-time transthoracic three-dimensional echocardiographic assessment of left ventricular volume and ejection fraction in congenital heart disease. *J Am Soc Echocardiogr* 2006;19:1-6.
123. Shimada YJ, Shiota T. A meta-analysis and investigation for the source of bias of left ventricular volumes and function by three-dimensional echocardiography in comparison with magnetic resonance imaging. *Am J Cardiol* 2011;107:126-38.
124. Altmann K, Shen Z, Boxt LM, King DL, Gersony WM, Allan LD, et al. Comparison of three-dimensional echocardiographic assessment of volume, mass, and function in children with functionally single left ventricles with two-dimensional echocardiography and magnetic resonance imaging. *Am J Cardiol* 1997;80:1060-5.
125. Bu L, Munns S, Zhang H, Disterhoft M, Dixon M, Stolpen A, et al. Rapid full volume data acquisition by real-time 3-dimensional echocardiography for assessment of left ventricular indexes in children: a validation study compared with magnetic resonance imaging. *J Am Soc Echocardiogr* 2005;18:299-305.
126. Riehle TJ, Mahle WT, Parks WJ, Sallee D, Fyfe DA. Real-time three-dimensional echocardiographic acquisition and quantification of left ventricular indices in children and young adults with congenital heart disease: comparison with magnetic resonance imaging. *J Am Soc Echocardiogr* 2008;21:78-83.
127. Lu X, Xie M, Tomberlin D, Klas B, Nadvoretzkiy V, Ayres N, et al. How accurately, reproducibly, and efficiently can we measure left ventricular indices using M-mode, 2-dimensional, and 3-dimensional echocardiography in children? *Am Heart J* 2008;155:946-53.

128. Laser KT, Bunge M, Hauffe P, Argueta JRP, Kelter-Klopping A, Barth P, et al. Left ventricular volumetry in healthy children and adolescents: comparison of two different real-time three-dimensional matrix transducers with cardiovascular magnetic resonance. *Eur J Echocardiogr* 2010;11:138-48.
129. Poutanen T, Ikonen A, Jokinen E, Vainio P, Tikanoja T. Transthoracic three-dimensional echocardiography is as good as magnetic resonance imaging in measuring dynamic changes in left ventricular volume during the heart cycle in children. *Eur J Echocardiogr* 2001;2:31-9.
130. Ylänen K, Eerola A, Vettenranta K, Poutanen T. Three-dimensional echocardiography and cardiac magnetic resonance imaging in the screening of long-term survivors of childhood cancer after cardiotoxic therapy. *Am J Cardiol* 2014;113:1886-92.
131. Balluz R, Liu L, Zhou X, Ge S. Real time three-dimensional echocardiography for quantification of ventricular volumes, mass, and function in children with congenital and acquired heart diseases. *Echocardiography* 2013;30:472-82.
132. Poutanen T, Jokinen E. Left ventricular mass in 169 healthy children and young adults assessed by three-dimensional echocardiography. *Pediatr Cardiol* 2007;28:201-7.
133. Foster BJ, Mackie AS, Mitsniefes M, Ali H, Mamber S, Colan SD. A novel method of expressing left ventricular mass relative to body size in children. *Circulation* 2008;117:2769-75.
134. Khoury PR, Mitsniefes M, Daniels SR, Kimball TR. Age-specific reference intervals for indexed left ventricular mass in children. *J Am Soc Echocardiogr* 2009;22:709-14.
135. van den Bosch AE, Robbers-Visser D, Krenning BJ, McGhie JS, Helbing WA, Meijboom FJ, et al. Comparison of real-time three-dimensional echocardiography to magnetic resonance imaging for assessment of left ventricular mass. *Am J Cardiol* 2006;97:113-7.
136. Kapetanakis S, Kearney MT, Siva A, Gall N, Cooklin M, Monaghan MJ. Real-time three-dimensional echocardiography: a novel technique to quantify global left ventricular mechanical dyssynchrony. *Circulation* 2005;112:992-1000.
137. Cui W, Gambetta K, Zimmerman F, Freter A, Sugeng L, Lang R, et al. Real-time three-dimensional echocardiographic assessment of left ventricular systolic dyssynchrony in healthy children. *J Am Soc Echocardiogr* 2010;23:1153-9.
138. Ten Harkel ADJ, Van Osch-Gevers M, Helbing WA. Real-time transthoracic three dimensional echocardiography: normal reference data for left ventricular dyssynchrony in adolescents. *J Am Soc Echocardiogr* 2009;22:933-8.
139. Ojala T, Mathur S, Vatanen A, Sinha MD, Jahnukainen K, Simpson J. Repeatability and agreement of real time three-dimensional echocardiography measurements of left ventricular mass and synchrony in young patients. *Echocardiography* 2015;32:522-7.
140. Yu Y, Sun K, Xue H, Chen S, Yang J. Usefulness of real-time 3-dimensional echocardiography to identify and quantify left ventricular dyssynchrony in patients with Kawasaki disease. *J Ultrasound Med* 2013;32:1013-21.
141. Baker GH, Hlavacek AM, Chessa KS, Fleming DM, Shirali GS. Left ventricular dysfunction is associated with intraventricular dyssynchrony by 3-dimensional echocardiography in children. *J Am Soc Echocardiogr* 2008;21:230-3.
142. Ho P-K, Lai CTM, Wong SJ, Cheung Y-F. Three-dimensional mechanical dyssynchrony and myocardial deformation of the left ventricle in patients with tricuspid atresia after Fontan procedure. *J Am Soc Echocardiogr* 2012;25:393-400.
143. Raedle-Hurst TM, Mueller M, Rentzsch A, Schaeffers H-J, Herrmann E, Abdul-Khaliq H. Assessment of left ventricular dyssynchrony and function using real-time 3-dimensional

echocardiography in patients with congenital right heart disease. *Am Heart J* 2009;157:791-8.

144. Sonne C, Sugeng L, Takeuchi M, Weinert L, Childers R, Watanabe N, et al. Real-time 3-dimensional echocardiographic assessment of left ventricular dyssynchrony: pitfalls in patients with dilated cardiomyopathy. *JACC Cardiovasc Imaging* 2009;2:802-12.

145. Wu VC-C, Takeuchi M, Otani K, Haruki N, Yoshitani H, Tamura M, et al. Effect of through-plane and twisting motion on left ventricular strain calculation: direct comparison between two-dimensional and three-dimensional speckle-tracking echocardiography. *J Am Soc Echocardiogr* 2013;26:1274-81.e4.

146. Kaku K, Takeuchi M, Tsang W, Takigiku K, Yasukochi S, Patel AR, et al. Age-related normal range of left ventricular strain and torsion using three-dimensional speckle-tracking echocardiography. *J Am Soc Echocardiogr* 2014;27:55-64.

147. Zhang L, Gao J, Xie M, Yin P, Liu W, Li Y, et al. Left ventricular three-dimensional global systolic strain by real-time three-dimensional speckle-tracking in children: feasibility, reproducibility, maturational changes, and normal ranges. *J Am Soc Echocardiogr* 2013;26:853-9.

148. Yao C, Simpson JM, Schaeffter T, Penney GP. Multi-view 3D echocardiography compounding based on feature consistency. *Phys Med Biol* 2011;56:6109-28.

149. Said SM, Dearani JA, Burkhart HM, Connolly HM, Eidem B, Stensrud PE, et al. Management of tricuspid regurgitation in congenital heart disease: is survival better with valve repair? *J Thorac Cardiovasc Surg* 2014;147:412-7.

150. Yamagishi S, Masuoka A, Uno Y, Katogi T, Suzuki T. Influence of bidirectional cavopulmonary anastomosis and concomitant valve repair on atrioventricular valve annulus and function. *Ann Thorac Surg* 2014;98:641-7.

151. Swanson JC, Krishnamurthy G, Kvitting J-PE, Miller DC, Ingels NB. Electromechanical coupling between the atria and mitral valve. *Am J Physiol Heart Circ Physiol* 2011;300:H1267-73.

152. Salgo IS, Gorman JH, Gorman RC, Jackson BM, Bowen FW, Plappert T, et al. Effect of annular shape on leaflet curvature in reducing mitral leaflet stress. *Circulation* 2002;106:711-7.

153. Nii M, Roman KS, Macgowan CK, Smallhorn JF. Insight into normal mitral and tricuspid annular dynamics in pediatrics: a real-time three-dimensional echocardiographic study. *J Am Soc Echocardiogr* 2005;18:805-14.

154. Ando M, Takahashi Y. Variations of atrioventricular septal defects predisposing to regurgitation and stenosis. *Ann Thorac Surg* 2010;90:614-21. *Journal of the American Society of Echocardiography* Volume 30 Number 1 Simpson et al 25

155. Kanani M, Elliott M, Cook A, Juraszek A, Devine W, Anderson RH. Late incompetence of the left atrioventricular valve after repair of atrioventricular septal defects: the morphologic perspective. *J Thorac Cardiovasc Surg* 2006;132:640-6.

156. Krishnamurthy G, Itoh A, Swanson JC, Miller DC, Ingels NB. Transient stiffening of mitral valve leaflets in the beating heart. *Am J Physiol Heart Circ Physiol* 2010;298:H2221-5.

157. Swanson JC, Krishnamurthy G, Itoh A, Kvitting J-PE, Bothe W, Craig Miller D, et al. Multiple mitral leaflet contractile systems in the beating heart. *J Biomech* 2011;44:1328-33.

158. Takahashi K, Inage A, Rebeyka IM, Ross DB, Thompson RB, Mackie AS, et al. Real-time 3-dimensional echocardiography provides new insight into mechanisms of tricuspid valve

- regurgitation in patients with hypoplastic left heart syndrome. *Circulation* 2009;120:1091-8.
159. Takahashi K, Mackie AS, Thompson R, Al-Naami G, Inage A, Rebeyka IM, et al. Quantitative real-time three-dimensional echocardiography provides new insight into the mechanisms of mitral valve regurgitation post-repair of atrioventricular septal defect. *J Am Soc Echocardiogr* 2012;25:1231-44.
160. Ypenburg C, Lancellotti P, Tops LF, Bleeker GB, Holman ER, Pierard LA, et al. Acute effects of initiation and withdrawal of cardiac resynchronization therapy on papillary muscle dyssynchrony and mitral regurgitation. *J Am Coll Cardiol* 2007;50:2071-7.
161. Bharucha T, Khan R, Mertens L, Friedberg MK. Right ventricular mechanical dyssynchrony and asymmetric contraction in hypoplastic heart syndrome are associated with tricuspid regurgitation. *J Am Soc Echocardiogr* 2013;26:1214-20.
162. Takahashi K, Guerra V, Roman KS, Nii M, Redington A, Smallhorn JF. Three-dimensional echocardiography improves the understanding of the mechanisms and site of left atrioventricular valve regurgitation in atrioventricular septal defect. *J Am Soc Echocardiogr* 2006;19:1502-10.
163. Nii M, Guerra V, Roman KS, Macgowan CK, Smallhorn JF. Three-dimensional tricuspid annular function provides insight into the mechanisms of tricuspid valve regurgitation in classic hypoplastic left heart syndrome. *J Am Soc Echocardiogr* 2006;19:391-402.
164. Colen TM, Khoo NS, Ross DB, Smallhorn JF. Partial zone of apposition closure in atrioventricular septal defect: are papillary muscles the clue. *Ann Thorac Surg* 2013;96:637-43.
165. Kusunose K, Cremer PC, Tsutsui RS, Grimm RA, Thomas JD, Griffin BP, et al. Regurgitant volume informs rate of progressive cardiac dysfunction in asymptomatic patients with chronic aortic or mitral regurgitation. *JACC Cardiovasc Imaging* 2014;8:14-23.
166. Thomas N, Unsworth B, Ferenczi EA, Davies JE, Mayet J, Francis DP. Intraobserver variability in grading severity of repeated identical cases of mitral regurgitation. *Am Heart J* 2008;156:1089-94.
167. Zoghbi WA, Enriquez-Sarano M, Foster E, Grayburn PA, Kraft CD, Levine RA, et al. Recommendations for evaluation of the severity of native valvular regurgitation with two-dimensional and Doppler echocardiography. *J Am Soc Echocardiogr* 2003;16:777-802.
168. Lancellotti P, Moura L, Pierard LA, Agricola E, Popescu BA, Tribouilloy C, et al. European Association of Echocardiography recommendations for the assessment of valvular regurgitation. Part 2: mitral and tricuspid regurgitation (native valve disease). *Eur J Echocardiogr* 2010;11:307-32.
169. Choi J, Heo R, Hong G-R, Chang H-J, Sung JM, Shin SH, et al. Differential effect of 3-dimensional color Doppler echocardiography for the quantification of mitral regurgitation according to the severity and characteristics. *Circ Cardiovasc Imaging* 2014;7:535-44.
170. Prakash A, Lacro RV, Sleeper LA, Minich LL, Colan SD, McCrindle B, et al. Challenges in echocardiographic assessment of mitral regurgitation in children after repair of atrioventricular septal defect. *Pediatr Cardiol* 2012;33:205-14.
171. Biner S, Rafique A, Rafii F, Tolstrup K, Noorani O, Shiota T, et al. Reproducibility of proximal isovelocity surface area, vena contracta, and regurgitant jet area for assessment of mitral regurgitation severity. *JACC Cardiovasc Imaging* 2010;3:235-43.
172. Thavendiranathan P, Liu S, Datta S, Walls M, Nitinunu A, Van Houten T, et al. Automated quantification of mitral inflow and aortic outflow stroke volumes by three-

dimensional real-time volume color-flow Doppler transthoracic echocardiography: comparison with pulsed-wave Doppler and cardiac magnetic resonance imaging. *J Am Soc Echocardiogr* 2012;25:56-65.

173. Ge S, Bu L, Zhang H, Schelbert E, Disterhoft M, Li X, et al. A real-time 3-dimensional digital Doppler method for measurement of flow rate and volume through mitral valve in children: a validation study compared with magnetic resonance imaging. *J Am Soc Echocardiogr* 2005;18:1-7.

174. Lu X, Nadvoretskiy V, Klas B, Bu L, Stolpen A, Ayres NA, et al. Measurement of volumetric flow by real-time 3-dimensional Doppler echocardiography in children. *J Am Soc Echocardiogr* 2007;20:915-20.

175. Maragiannis D, Little SH. 3D vena contracta area to quantify severity of mitral regurgitation: a practical new tool? *Hellenic J Cardiol* 2013;54:448-54.

176. Lancellotti P, Tribouilloy C, Hagendorff A, Moura L, Popescu BA, Agricola E, et al. European Association of Echocardiography recommendations for the assessment of valvular regurgitation. Part 1: aortic and pulmonary regurgitation (native valve disease). *Eur J Echocardiogr* 2010;11:223-44.

177. Vahanian A, Alfieri O, Andreotti F, Antunes MJ, Baron-Esquivias G, Baumgartner H, et al. Guidelines on the management of valvular heart disease (version 2012). *Eur Heart J* 2012;33:2451-96.

178. Cognet T, Seguela P-E, Thomson E, Bouisset F, Lairez O, Hascoët S, et al. Assessment of valvular surfaces in children with a congenital bicuspid aortic valve: preliminary three-dimensional echocardiographic study. *Arch Cardiovasc Dis* 2013;106:295-302.

179. Poutanen T, Tikanoja T, Sairanen H, Jokinen E. Normal mitral and aortic valve areas assessed by three- and two-dimensional echocardiography in 168 children and young adults. *Pediatr Cardiol* 2006;27:217-25.

180. Perez de Isla L, Zamorano J, Fernandez-Golfin C, Ciocarelli S, Corros C, Sanchez T, et al. 3D color-Doppler echocardiography and chronic aortic regurgitation: a novel approach for severity assessment. *Int J Cardiol* 2013;166:640-5.

181. Ewe SH, Delgado V, van der Geest R, Westenberg JJM, Haack ML, Witkowski TG, et al. Accuracy of three-dimensional versus two-dimensional echocardiography for quantification of aortic regurgitation and validation by three-dimensional three-directional velocity-encoded magnetic resonance imaging. *Am J Cardiol* 2013;112:560-6.

182. Calleja A, Thavendiranathan P, Ionasec RI, Houle H, Liu S, Voigt I, et al. Automated quantitative 3-dimensional modeling of the aortic valve and root by 3-dimensional transesophageal echocardiography in normals, aortic regurgitation, and aortic stenosis: comparison to computed tomography in normals and clinical implications. *Circ Cardiovasc Imaging* 2013;6:99-108.

183. Festa P, Ait-Ali L, Minichilli F, Kristo I, Deiana M, Picano E. A new simple method to estimate pulmonary regurgitation by echocardiography in operated fallot: comparison with magnetic resonance imaging and performance test evaluation. *J Am Soc Echocardiogr* 2010;23:496-503.

184. Pothineni KR, Wells BJ, Hsiung MC, Nanda NC, Yelamanchili P, Suwanjutha T, et al. Live/real time three-dimensional transthoracic echocardiographic assessment of pulmonary regurgitation. *Echocardiography* 2008;25:911-7.

185. Sanders SP, Colan SD, Cordes TM, Donofrio MT, Ensing GJ, Geva T, et al. ACCF/AHA/AAP recommendations for training in pediatric cardiology. Task force 2:

pediatric training guidelines for noninvasive cardiac imaging endorsed by the American Society of Echocardiography and the Society of Pediatric Echocardiography. *J Am Coll Cardiol* 2005;46:1384-8.

186. Mertens L, Seri I, Marek J, Arlettaz R, Barker P, McNamara P, et al. Targeted neonatal echocardiography in the neonatal intensive care unit: practice guidelines and recommendations for training. *Eur J Echocardiogr* 2011;12:715-36.

187. Mertens L, Helbing W, Sieverding L, Daniels O. Guidelines from the Association for European Paediatric Cardiology: standards for training in paediatric echocardiography. *Cardiol Young* 2005;15:441-2.

188. Mertens L, Miller O, Fox K, Simpson J. Certification in echocardiography of congenital heart disease: experience of the first 6 years of a European process. *Eur Heart J Cardiovasc Imaging* 2013;14:142-8. 26 Simpson et al *Journal of the American Society of Echocardiography* January 2017

189. Pellikka PA, Douglas PS, Miller JG, Abraham TP, Baumann R, Buxton DB, et al. American Society of Echocardiography Cardiovascular Technology and Research Summit: a roadmap for 2020. *J Am Soc Echocardiogr* 2013;26:325-38.

190. Bose RR, Matyal R, Warraich HJ, Summers J, Subramaniam B, Mitchell J, et al. Utility of a transesophageal echocardiographic simulator as a teaching tool. *J Cardiothorac Vasc Anesth* 2011;25:212-5.

191. Jelacic S, Bowdle A, Togashi K, VonHomeyer P. The use of TEE simulation in teaching basic echocardiography skills to senior anesthesiology residents. *J Cardiothorac Vasc Anesth* 2013;27:670-5.

192. Jenkins C, Monaghan M, Shirali G, Guraraja R, Marwick TH. An intensive interactive course for 3D echocardiography: is “crop tillyou drop” an effective learning strategy? *Eur J Echocardiogr* 2008;9:373-80.

193. Srivastava S, Printz BF, Geva T, Shirali GS, Weinberg PM, Wong PC, et al. Task force 2: pediatric cardiology fellowship training in noninvasive cardiac imaging. *J Am Coll Cardiol* 2015;66:687-98.

194. Perrin DP, Vasilyev NV, Marx GR, del Nido PJ. Temporal enhancement of 3D echocardiography by frame reordering. *JACC Cardiovasc Imaging* 2012;5:300-4.

195. de Vecchi A, Gomez A, Pushparajah K, Schaeffter T, Nordsletten DA, Simpson JM, et al. Towards a fast and efficient approach for modelling the patient-specific ventricular haemodynamics. *Prog Biophys Mol Biol* 2014;116:3-10.

196. Gomez A, De Vecchi A, Jantsch M, Shi W, Pushparajah K, Simpson J, et al. 4D blood flow reconstruction over the entire ventricle from wall motion and blood velocity derived from ultrasound data. *IEEE Trans Med Imaging* 2015;34:2298-308.

197. Olivieri LJ, Krieger A, Loke Y-H, Nath DS, Kim PCW, Sable CA. Three-dimensional printing of intracardiac defects from three-dimensional echocardiographic images: feasibility and relative accuracy. *J Am Soc Echocardiogr* 2015;28:392-7.

198. Samuel BP, Pinto C, Pietila T, Vettukattil JJ. Ultrasound-derived three-dimensional printing in congenital heart disease. *J Digit Imaging* 2015;28:459-61.