

## 机器人手术系统在心脏外科手术中的应用

张帅朋<sup>1</sup>, 张成鑫<sup>1</sup>, 王 嵘<sup>2</sup>

(1. 安徽医科大学第一附属医院心脏大血管外科 安徽 合肥 230022; 2. 中国人民解放军总医院第六医学中心  
心血管病医学部成人心脏外科 北京 100853)

**摘要** 随着外科手术微创化的发展, 达芬奇机器人手术系统已被应用于多种心脏外科手术。该系统融合了人工智能的研究成果, 具有 3D 高清术野、动作缩放、机械臂灵活、震颤过滤、操作稳定、创伤小等优点, 且能缓解医护人员疲劳。外科手术机器人为心脏外科手术的快速化、精准化、微创化提供了新的思路和途径, 代表了微创心脏外科的发展方向。但达芬奇机器人手术系统作为通用型腔镜手术机器人, 在心外科的应用也面临系统复杂、操作时间长、缺乏触觉反馈、总体费用昂贵等不足和挑战。本文主要阐述了达芬奇机器人手术系统在心脏外科领域应用的优势、安全性、有效性及在推广、应用过程中存在的问题, 并对其未来的发展前景进行了展望, 期望可以为机器人手术系统在心脏外科的应用提供帮助。

**关键词** 机器人手术系统; 心脏外科手术; 微创手术

**中图分类号** R654 **文献标识码** A **文章编号** 2096-7721 (2021) 06-0439-12

## Application of robotic surgery system in cardiac surgery

ZHANG Shuai-peng<sup>1</sup>, ZHANG Cheng-xin<sup>1</sup>, WANG Rong<sup>2</sup>

(1. Department of Cardiovascular Surgery, the First Affiliated Hospital of Anhui Medical University, Hefei 230032, China;  
2. Department of Adult Cardiovascular Surgery, the Sixth Medical Center, Chinese PLA General Hospital, Beijing 100853, China)

**Abstract:** With the development of minimally invasive surgery, Da Vinci surgical system has been applied to a variety of cardiac surgeries. By integrating the latest AI technology, it has the advantages of 3D high-definition field, motion scaling, flexible manipulator, tremor filtering, stable operation, less trauma and so on. Surgical robot not only provides new ideas and ways

收稿日期: 2021-04-29 录用日期: 2021-06-04

Received Date: 2021-04-29 Accepted Date: 2021-06-04

基金项目: 安徽省高校自然科学基金 (KJ2019A0246)

Foundation Item: Natural Science Foundation of Anhui Universities (KJ2019A0246)

通讯作者: 张成鑫, Email: zhangchengxin@ahmu.edu.cn; 王嵘, Email: wangrongd@126.com

Corresponding Author: ZHANG Chengxin, Email: zhangchengxin@ahmu.edu.cn; WANG Rong, Email: wangrongd@126.com

引用格式: 张帅朋, 张成鑫, 王嵘. 机器人手术系统在心脏外科手术中的应用 [J]. 机器人外科学杂志 (中英文), 2021, 2 (6): 439-450.

Citation: ZHANG S P, ZHANG C X, WANG R. Application of robotic surgery system in cardiac surgery [J]. Chinese Journal of Robotic Surgery, 2021, 2 (6): 439-450.

of speed, precision and minimally invasive surgery for cardiac surgery, but also represents the development direction of minimally invasive cardiac surgery. However, as a universal endoscopic surgical robot, Da Vinci surgical system also faces shortcomings and challenges in cardiac surgery, such as complicated system, prolonged time of operation, lacking of tactile feedback, high cost and so on. This paper mainly expounds the advantages, safety and effectiveness of the application of Da Vinci surgical system in the field of cardiac surgery, and the difficulties in its popularization and application were also analyzed. The development of robot-assisted surgical system in cardiac surgery in the future is also prospected. It is expected that this paper can provide help for the application and promotion of robotic surgery system in cardiac surgery.

**Key words** Robotic surgery system; Cardiac surgery; Minimally invasive surgery

达芬奇机器人手术系统是由美国 Intuitive Surgical 公司研发并在外科手术中得到广泛应用的外科手术机器人, 于 1999 年获得欧盟 CE 市场的认证, 2000 年获得美国食品和药物管理局 (FDA) 的正式批准被应用于临床。与传统腔镜手术的入路相同, 达芬奇机器人也是通过肋间开孔进入胸腔, 保留了胸骨的完整性。但是其在人体工程学、人工智能和 3D 成像等方面的技术革新, 使其较腔镜具有了更多方面的优势。主要包括: ①手术过程坐姿操作, 大幅度减轻了术者疲劳感; ②床旁机械臂具有 7 个自由度, 动作更精准, 并具有滤抖功能, 提高了操作的稳定性; ③立体成像技术可以提供三维手术视野, 显著提高手术精准度。此外, 在 2010 年达芬奇机器人集成了近红外系统, 将荧光成像技术应用到机器人微创手术中, 实现了对血管解剖结构可视化和对吻合口血流灌注的评估<sup>[1]</sup>, 以上优势促使其在外科领域得到了广泛应用。但是, 近二十年来的发展状况表明, 达芬奇机器人手术系统在心脏外科的推广应用并不理想, 其手术耗时长、费用高、操作缺乏触觉反馈等局限性日益凸显。本文就达芬奇机器人手术系统在心脏外科手术的应用历史与现状进行了文献回顾与总结, 同时对机器人心脏外科手术的安全性和有效性做出了客观评价。

目前达芬奇机器人手术系统在心脏外科主要应用于冠状动脉旁路移植术和二尖瓣手术,

此外, 在房间隔缺损修补、心脏肿瘤切除、肥厚性梗阻型心肌病的纠正等方面也有应用。

## 1 机器人手术系统在冠状动脉旁路移植术中的应用

1998 年, Loulmet D 等<sup>[2]</sup>首次报道采用达芬奇机器人手术系统完成小切口微创冠脉搭桥和全机器人内窥镜下冠状动脉旁路移植术 (Totally endoscopic coronary artery bypass, TECAB), 术后早期冠状动脉造影显示 2 例接受机器人辅助冠状动脉搭桥术 (Robot-assisted coronary artery bypass, RACAB) 和另外 2 例接受 TECAB 的患者桥血管均通畅, 术后随访 6 个月均未发现相应并发症, 从而开启了机器人微创心脏外科的新纪元。随着机器人设备和技术的进步, 机器人手术系统在微创冠状动脉旁路移植术中的应用主要为机器人辅助获取乳内动脉的机器人辅助冠状动脉搭桥术 (RACAB) 和全机器人内窥镜冠状动脉搭桥术 (TECAB) 两大类。

RACAB 是在机器人辅助下获取乳内动脉, 并通过左胸前外侧小切口行与冠状动脉吻合。手术方法是在患者全身麻醉下, 仰卧位, 左胸略微抬高, 右肺单肺通气, 左肺排空, 在左肺塌陷的情况下, 在腋前线的第 5 肋间放置一个摄像端口, 器械口放置在左锁骨中线外侧的第 3 和第 7 肋间, 这些端口的插入应始终在摄像机视野下进行, 这些端口与手术机器人的手臂相

连，采用 30° 向上的视角获取乳内动脉（Internal mammary artery, IMA）。机器人电刀插入右侧，机器人抓钳插入左侧仪器端口。外科医生在操作台上远程控制摄像机，并使用脚踏板从控制台激活电凝刀。乳内动脉可以用带蒂或骨骼化的方式采集，需要注意使用低功率电凝，特别是在选择骨骼化获取的情况下。移植物获取后，切除心包外脂肪，打开心包。使用机器人摄像机可以识别目标血管上的操作区，并为小切口手术选择合适的切口位置；若行 TECAB 手术，则在目标靶血管放置阻断带，作缺血耐受实验后引入稳定器，切开左前降支（Left anterior descending artery, LAD），用 U 型夹将左乳内动脉（Left internal mammary artery, LIMA）和 LAD 间断吻合，或用 Gore-Tex 缝线作连续缝合。采用多普勒流量计测定 IMA 流量，术后行冠脉 CT 血管造影（CT angiography, CTA）或冠状动脉造影评价血管的通畅率。

美国胸外科学会成人心脏手术数据库（STS-ACSD）显示，2006~2012 年机器人辅助冠状动脉旁路移植术（Coronary artery bypass grafting, CABG）的数量有所增加，而非机器人辅助 CABG 相比，围手术期死亡率并无差异<sup>[3]</sup>。此外，另外一篇关于传统 CABG、全腔镜下 CABG 和机器人辅助下 CABG 的 Meta 分析结果显示，机器人在冠脉搭桥术中的应用不会增加死亡率、脑血管事件或再次血运重建干预率<sup>[3-4]</sup>。2019 年 Chieh-Shou Su 等<sup>[5]</sup>对 638 例多支冠状动脉疾病患者进行了研究，比较了机器人辅助 CABG 与冠状动脉支架置入术（Percutaneous coronary intervention, PCI）在治疗冠状动脉疾病（Coronary artery disease, CAD）患者中的临床效果。两组的住院死亡率、远期死亡率以术后心肌梗死、卒中的发生率均相似，但机器人辅助 CABG 组再次血运重建干预的发生率较低，

这对于手术风险较低的 CAD 患者来说，机器人辅助 CABG 可能是一种替代 PCI 的安全有效的治疗方法。Bonatti J 等<sup>[6]</sup>对过去 25 年中 1 762 例接受机器人辅助 CABG 的患者回顾分析发现，机器人辅助 CABG 主要应用于 LAD 单只病变（85.5% 的为单支病变血管重建），LIMA 获取时间平均为（57.0 ± 35.4）min，总手术时间为 4h，术中转换开胸手术率为 6.6%，出血、死亡率和中风率各为 0.4%；住院时间为（5.4 ± 1.6）d。同时有报道表明接受机器人辅助 CABG 术后的 5 年生存率高达 94%<sup>[7]</sup>。机器人手术系统为微创 CABG 提供了 3D 高清视觉、可放大的手术视野及更好的操作灵活性。有两项研究<sup>[8-9]</sup>发现 LIMA 和 RIMA（Right internal mammary artery, RIMA）的获取时间基本相同，这一事实可能也表明机器人辅助下双侧 IMA 获取比较便捷。Giamb Bruno V 等<sup>[10]</sup>一项为时 18 年的单中心研究发现接受机器人辅助 CABG 的 605 例患者，其手术死亡率仅为 0.3%。在机器人心脏外科手术中由于通过小切口开胸的吻合过程更直接，可以使用经典的手术器械，所以相对于 TECAB，机器人辅助 CABG 被更多的外科医生所接受。

全机器人内窥镜下冠状动脉旁路移植术包括心脏停跳 TECAB 和心脏不停跳 TECAB，整个旁路移植术包括 IMA 获取、心包切开和吻合口缝合都是使用手术机器人进行的。2006 年在美国开展的多中心临床试验结果显示，85 例 TECAB 患者无死亡和卒中，术后 3 个月桥血管通畅率和再干预率与正中开胸手术相当<sup>[11]</sup>。基于该研究成果，美国食品与药品管理局正式批准达芬奇机器人外科手术系统可应用于冠状动脉旁路移植术。在 Bonatti J 的研究中<sup>[6]</sup>，1999~2019 年 1 678 例接受 TECAB 的患者中平均移植数量为 1.2 ± 0.3，总手术时间为（5.3 ± 0.8）h，累计中转开胸率为 10.3%，术后出血修复率 3.4%，

卒中发生率 1.0%，围手术期死亡率 1.3%。包括 LAD 在内的多支血管病变 TECAB 也在逐年增加，其占比为 27.8%。在 Bonaros N 等<sup>[12]</sup> 一项多中心研究中，LIMA 获取时间为 (55 ± 19) min，RIMA 获取时间为 32min。Jegaden O<sup>[13]</sup> 和 Balkhy H H<sup>[14]</sup> 报道的术后 3 年生存率分别为 96% 和 95.5%，甚至多项研究均<sup>[15-17]</sup> 报道了围手术期和随访期间均无死亡病例。Kitahara H 等<sup>[18]</sup> 对 1999~2018 年接受机器人辅助下微创冠状动脉旁路移植术 (Robotically assisted minimally invasive direct coronary artery bypass, RMIDCAB) 和 TECAB 的 4 000 例患者进行了回顾分析 (其中 RMIDCAB 组 2 396 例；TECAB 组 1 604 例)，RMIDCAB 组术后早期 (<1 个月)、中期 (<5 年) 和远期 (>5 年) 的平均通畅率分别为 97.7%、96.1% 和 93.2%，TECAB 分别为 98.8%、95.8% 和 93.6%，机器人辅助冠状动脉搭桥术的移植通畅率与传统方法报道的结果相当，这都表明 TECAB 是一种安全有效的治疗方法。需要注意的是，TECAB 在最初阶段仅应用于单支血管病变，现在越来越多地进行双侧 IMA 移植。三支和四支旁路移植术的 TECAB 已经有报道<sup>[19-20]</sup>。Balkhy H H 等研究显示，在不停跳 TECAB 多支血管移植组和单支血管移植组的平均住院时间分别为 (3.07 ± 1.20) d 和 (2.81 ± 1.40) d；术后移植血管通畅率分别为 95.6% 和 94.9%；两组的全部死亡率是 1.45%，多支血管移植组的术后死亡率 2.0%，单支血管移植组的术后死亡率为 0.7%，多血管 TECAB 与单血管 TECAB 相比，死亡率、住院时间、中期主要不良心脏事件和移植物流通率没有显著差异，这都表明多支血管移植在机器人心脏不停跳 TECAB 中是可行的，效果良好<sup>[14]</sup>。多数的研究都表明了 TECAB 的术后并发症拥有低水平的 MACCE (Major adverse cardiac

and cerebrovascular event)<sup>[5, 9, 11, 15-17, 21-24]</sup>。

此外，对于包括 LAD 在内的多支血管病变还可以选择 TECAB 结合 PCI 的技术<sup>[25]</sup>。

尽管有足够的临床结果表明 TECAB 的安全性，但机器人冠状动脉旁路移植术在心脏外科的整体接受度仍然很低。Cavallaro P 等<sup>[26]</sup> 通过对国家数据库的回顾性分析，从 2008~2010 年，484 128 例 CABG 患者中仅有 0.4% 采用了机器人手术方法，这突显出机器人手术的使用率很低，主要原因可能是其显著陡峭的学习曲线、较长的手术时间、较高的团队建设水平和昂贵的成本投入。关于学习曲线，TECAB 类似于传统微创冠状动脉旁路移植术 (Minimally invasive direct coronary artery bypass, MIDCAB) 程序，单个外科医生和团队需要上百例的重复手术才可以达到较高的手术水平<sup>[27-28]</sup>。最近有研究描述了机器人搭桥手术在术中术式转换的大体情况<sup>[29]</sup>。在 21 世纪初，接受机器人搭桥手术患者中几乎每 2 例就会发生一例术式的转换，但在过去几年，术式转换率很好地下降到了 5% 以下。在所有 MIDCAB 中，机器人体外循环冠状动脉搭桥术是最复杂、技术要求最高的。然而，从手术创伤性的角度来看，它是组织损伤最小的冠状动脉搭桥手术。最近的一项研究<sup>[30]</sup> 阐述了如何进行正确的设备操作和团队训练，并判定新型外科机器人的应用是该领域未来发展的方向。对机器人硬件的投资、对外科医生及其团队的长期培训，以及手术团队所有成员之间的相互协调仍是当下的讨论热点。

## 2 机器人手术系统在二尖瓣手术中的应用

1998 年，Carpentier A 等<sup>[31]</sup> 完成了首例达芬奇机器人辅助下二尖瓣成形术。1999 年，Falk V 等<sup>[32]</sup> 报道的机器人二尖瓣成形术的成



功率达到 90%。2002 年美国食品药品监督管理局基于全美 10 个医学中心 112 例患者成功接受达芬奇机器人二尖瓣手术的结果，正式批准该系统应用于二尖瓣手术。如今，机器人辅助二尖瓣手术已经取得了长足的进步，可以在更短的时间内对更多不同的二尖瓣病变进行手术。

然而，直接比较机器人二尖瓣手术和传统方法进行二尖瓣手术的文献数量并不是很多。2006 年，Murphy D 等<sup>[33]</sup>对 127 例患者实施了机器人辅助下完全内窥镜二尖瓣修复术，成功率达到了 94%。术后 98 例患者被纳入随访，在随后的 8.1 个月时间里，96.9% 的患者未发生 1 级以上的二尖瓣反流，2 级以上二尖瓣反流的发生率也仅为 3.1%。有项研究<sup>[34]</sup>选取 540 例患者接受机器人二尖瓣手术，结果显示机器人辅助下二尖瓣成形术具有较高的修复率和较低的胸骨切开中转率。另外一项包含 300 例患者的单中心实验结果显示<sup>[35]</sup>，300 例患者接受了机器人二尖瓣修复术，术后 30d 死亡率及远期死亡率分别为 0.7% 和 2.0%，所有患者均不需要中转胸骨切开，术后超声心动图显示轻度反流为 1.0%、中度反流 1.0%、重度反流 0.0%；相关术后并发症卒中患者 2 例（0.7%），短暂性脑缺血发作患者 2 例，心肌梗死患者 3 例（1.0%），术后出血再次手术的患者 7 例（2.3%），平均住院天数为（5.2 ± 4.2）d，16 例（5.3%）患者需要再次手术，平均随访（815 ± 459）d，二尖瓣轻度反流 66 例（23.6%）、中度反流 15 例（5.4%）、重度反流 6 例（2.2%）；5 年 Kaplan-Meier 生存率为 96.6% ± 1.5%。Suri R 等<sup>[36]</sup>和 Mihaljevic T 等<sup>[37]</sup>的 2 项研究也都展现出机器人二尖瓣手术不错的近期手术效果。

将机器人二尖瓣手术与其他二尖瓣手术技术进行比较，可以发现机器人二尖瓣手术具有明显优势。在一项关于 759 例二尖瓣后叶脱垂修补术的研究中<sup>[38]</sup>，将机器人手术入路与全胸

骨切开、部分胸骨切开入路以及右前外侧小切口入路的手术效果进行了比较，结果表明，虽然以上几种术后神经系统、呼吸系统和泌尿系统并发症相似，但机器人组房颤和胸腔积液的发生率较低，这有助于减少住院时间。值得注意的是，机器人组的手术时间也最长，手术时间中位数为 387min，比全胸骨切开、部分胸骨切开和前外侧小切口开胸术分别多 109min、110min 和 60min（ $P < 0.0001$ ）。另外一项对 745 例二尖瓣脱垂修复的研究<sup>[36]</sup>还发现，机器人组比开胸二尖瓣手术组的主动脉阻断时间（75min Vs 35min， $P < 0.001$ ）和灌注时间（101min Vs 40min， $P < 0.001$ ）更长。同样，一项对 1 650 例患者的 Meta 分析表明<sup>[39]</sup>，在 6 项回顾性研究中，机器人方法比传统的胸骨切开术改善了围手术期的结果。Meta 分析结果显示接受机器人二尖瓣手术的患者围手术期存活率较高（机器人组 Vs 传统手术组：0.8% Vs 2.4%）；两组之间卒中和再手术的发生率无统计学差异；接受机器人二尖瓣手术的患者体外循环时间和主动脉阻断时间 [标准平均差分别为 2.05（95% CI: 1.23~2.87； $P < 0.00001$ ）和 3.03（95% CI: 0.84~5.23； $P < 0.007$ ）] 更长；住院时间和 ICU 住院时间未见显著差异。然而，需要注意的是，当最大的研究被移除时，死亡率差异将不再显著，这表明这些影响因素的有效性尚未得到充分证实。目前关于机器人二尖瓣手术与传统二尖瓣手术结果比较的证据有限，Meta 分析的结果应谨慎解读，因为它只包括回顾性研究，未涉及随机研究，这意味着其结果可能反映了不均衡的患者基线特征。在缺乏大型随机试验的情况下，目前观察到的机器人二尖瓣手术的益处也可能是两个治疗组之间的不同患者队列造成的，已报道的研究在一定程度上具有倾向性，而且许多接受机器人二尖瓣手术的患者更年轻、更

健康, 预计任何手术方法都能做得很好。目前的文献不足以对机器人二尖瓣手术的益处和并发症得出准确的结论, 因此, 进行大规模的随机对照研究非常有必要。

近年来, 机器人在二尖瓣手术中的应用指征也得以逐渐拓广。克利夫兰诊所对 1 000 例接受机器人二尖瓣手术的患者进行了研究<sup>[40]</sup>, 所有病例均采用标准的机器人辅助修复技术, 矫正后叶脱垂的技术包括三角形或矩形瓣叶切除 (74%)、滑动技术 (27%)、折叠式瓣膜成形术 (6.5%) 和置入聚四氟乙烯 (PTFE) 腱索 (24%); 前叶脱垂采用 PTFE 置入 (80%) 和腱索移位术 (8.2%) 治疗; 对于双叶修复 (16%), 除了修复后叶和前叶外, 还使用了缘对缘缝合的 Alfieri 缝合操作 (8.8%) 和连合部缝合成形术 (69%), 所有的瓣膜修复均用 2-0 聚酯线缝合, 并植入一个标准长度的瓣环成形带。术后及时超声心动图显示 99.7% 的二尖瓣修补患者未发生二尖瓣反流或轻度二尖瓣反流, 出院前超声心动图显示 97.9% 的患者二尖瓣轻微反流。有 1 例患者住院死亡 (0.1%), 14 例患者 (1.4%) 发生卒中; 卒中风险从最初 500 例患者的 2% 下降到第 2 个 500 例患者的 0.8%。这表明机器人辅助二尖瓣修补术是矫治二尖瓣返流的一种有效、安全的方法, 其手术死亡率和术后并发症发病率低, 瓣膜修复率接近 100%。在 2019 年, 梅奥诊所的另一项关于 603 例接受机器人二尖瓣手术患者的研究表明<sup>[41]</sup>, 机器人二尖瓣成形术的手术适应证不影响手术的近期疗效。2017 年, Loulmet D F 等<sup>[42]</sup>报道了应用心包补片技术治疗 Barlow 病合并双叶脱垂和瓣环钙化的机器人二尖瓣成形术。Loulmet D F 的另外一项研究<sup>[43]</sup>进一步证明了全机器人内窥镜下二尖瓣成形术治疗 Barlow 病瓣环钙化的安全性和有效性。未来更小的器械将实现更小的切口, 进一步提高

机器人手术的灵活性, 并改善可视化的程度, 通过将超声心动图图像叠加在机器人手术图像上, 结合三维超声心动图和建模软件可以进一步方便手术。

### 3 机器人技术在心脏外科其他方面的应用

机器人技术最常应用于二尖瓣修复和冠状动脉血运重建, 但也有许多研究介绍了机器人手术系统在其他心脏手术中的应用。目前, 机器人手术系统在成人房间隔或室间隔缺损、心房黏液瘤和肥厚性梗阻型心肌病 (Hypertrophic obstructive cardiomyopathy, HOCM) 的外科治疗方面应用相对较多, 在主动脉瓣置换、房颤治疗、心尖起搏导线植入方面也有相应的报道。

#### 3.1 房间隔缺损修补术

2001 年, Touraca L 等<sup>[44]</sup>首次使用机器人外科手术系统辅助房间隔缺损 (Atrial septal defect, ASD) 修补, 并取得成功。随后 Argenziano M 等<sup>[45]</sup>的病例系列研究显示, 接受 ASD 修补的机器人组、胸骨正中切开组和小切口微创组的 ICU 停留时间和总住院时间并无明显差异; 而回归正常工作生活所用的时间, 机器人组为 (40.2 ± 30.2) d, 小切口微创组为 (45.6 ± 27.9) d, 胸骨切开组为 (51.7 ± 40.2) d。虽然住院时间不变, 但机器人技术降低了手术创伤, 加速了术后恢复, 提高了生活质量。Morgan J<sup>[46]</sup>和 Sepúlveda E<sup>[47]</sup>的报道也得出了类似的结论。最近的一项关于 242 例先心病患者接受外科机器人手术治疗的单中心研究结果表明<sup>[48]</sup>, ASD 患者占比 74.7%, 术后结果显示平均体外循环时间 (89.5 ± 30.0) min, 主动脉阻断时间 (44.9 ± 22.3) min; 0.8% 的患者需要中转更大的胸廓切口; 术后卒中、心脏不良事件、肺部并发症和再次手术探查的发生

率分别为 0.4%、2.4%、4.1% 和 0.8%；平均住院天数为  $(3.5 \pm 1.1)$  d。由此得出结论在青少年和成人患者中，机器人辅助 ASD 修补术是安全、有效的，可以替代传统的、微创的内窥镜手术。

在国内，解放军总医院高长青院士带领的团队率先采用达芬奇机器人进行全机器人心脏不停跳下房间隔缺损修补术<sup>[49]</sup>，这使机器人房间隔缺损修补术无须阻断升主动脉，简化了全机器人手术过程，手术效果更加安全可靠。需要注意的是，许多房间隔缺损修补术是在年轻、身体状况良好的患者身上进行的，因为机器人辅助手术的小切口和更快的恢复时间对这类患者更具吸引力，也可能正是这一倾向性选择导致了机器人 ASD 修补术的有利效果。另一方面，有关机器人 ASD 修补术和传统 ASD 修补术相比较的大型随机实验仍然欠缺，需要进行进一步的大型随机实验来证明机器人 ASD 修补术在不同人群中的远期效果，进一步推广机器人 ASD 修补术的应用。

### 3.2 心房黏液瘤

心房黏液瘤每年的发病率约为 0.00005%<sup>[50]</sup>。目前已有较多的机器人切除心房黏液瘤的研究报道。2005 年，Murphy D 等<sup>[51]</sup>首先报道了机器人辅助左心房黏液瘤切除并获得成功，所有患者在术后 4d 出院，3 周后开始正常活动。Moss E 等<sup>[52]</sup>对 STS 数据库的回顾性分析结果显示，在心房黏液瘤切除术中应用机器人技术是可行的，与非机器人方法相比，具有出血量少、机械通气时间短、ICU 停留时间短、术后住院时间短等优点。YANG M<sup>[53]</sup>和 Schilling J<sup>[54]</sup>的研究也都证实了机器人辅助手术无任何严重的手术并发症，两组患者的手术成功率都接近 100%。Moss E<sup>[52]</sup>的一项更大规模的对比研究显示，与传统的胸

骨切开入路相比，机器人辅助切除心房黏液瘤可以缩短重症监护病房和住院总时间，并且对手术输血的需求更低。在国内，高长青院士率先报道了经左房入路黏液瘤切除<sup>[55]</sup>，所有患者均成功切除，无手术死亡、卒中或其他并发症，所有患者顺利出院，随访 1~18 个月，未见肿瘤复发或房间隔漏，由此可见，使用达芬奇手术系统切除心房黏液瘤是可行、有效、安全的。

### 3.3 肥厚性梗阻型心肌病

关于 HOCM 的外科治疗，相对于从主动脉切口入路，经左心房穿过二尖瓣的机器人入路可以更直接到达室间隔，并可以避免可能对主动脉瓣膜造成的损伤。2014 年，Khalpey Z 等<sup>[56]</sup>报道了 1 例在接受过酒精消融术后反复出现左心室流出道梗阻症状的患者，采用侵入性较小的经左心房机器人辅助下室间隔肥厚肌切除术，术后患者预后良好。2017 年，Chitwood W<sup>[57]</sup>基于使用达芬奇遥控系统进行二尖瓣修复术的丰富经验，正式提出一种机器人辅助下跨二尖瓣手术的方法，在乳头肌松解或复位的基础上进行广泛的二尖瓣间隔切除，即左心房入路对特发性肥厚性主动脉间隔下梗阻进行了间隔肌切除术。2020 年，Kumar C J A 等<sup>[58]</sup>在技术方面详细介绍了机器人经二尖瓣间隔肌切除术和乳头肌重定位联合或不联合二尖瓣成形术治疗 HOCM 的可行性。虽然目前还需要更多的研究来评估机器人辅助下肥厚型梗阻性心肌病外科治疗相关并发症的发生率，但机器人辅助技术可作为 Morrow 手术的一种可替代治疗方案。

### 3.4 其他心脏手术

虽然机器人二尖瓣手术现在很常见，但到目前为止，使用机器人在主动脉瓣上进行手术的情况仍然很少。目前机器人辅助主动脉瓣置换术（Aortic valve replacement, AVR）有一些病



例报道和成功小病例系列研究<sup>[59-60]</sup>。在最近的一篇综述中, Balkhy H 等<sup>[61]</sup>阐述了机器人辅助 AVR 的可行性和安全性, 但是这种手术在当前经导管 AVR 蓬勃发展的时代中仍无法占据主导地位。机器人手术系统还成功地被应用于切除主动脉瓣乳头状纤维母细胞瘤<sup>[61-63]</sup>。另外, 无论是否同时进行二尖瓣手术, 内镜下机器人辅助心房颤动消融治疗的安全性和远期疗效已得到众多研究人员的肯定<sup>[64-65]</sup>。除此之外, Derose J 等<sup>[66]</sup>首次对机器人手术系统辅助左心室外膜起搏导线植入进行报道。Mair H 等<sup>[67]</sup>对 3 种不同方式下的心外膜导联放置术进行了比较, 分别是经胸左外侧小切口、胸腔镜辅助、机器人辅助, 结果显示所有患者均可成功放置导联, 未出现不良反应, 3 种技术无明显差异。最近一项关于再次机器人二尖瓣手术的研究, 在最初 1 853 例接受机器人二尖瓣手术的患者中 50 例 (2.9%) 患者进行了二次机器人二尖瓣手术, 接受再次机器人手术的患者中未见从机器人入路中转为胸骨切开入路, 术后无死亡或卒中病例, 再次机器人手术组中仅有 1 例 (2%) 发生严重的术后并发症, 这说明当由经验丰富的机器人手术团队进行二次机器人手术时, 再次机器人二尖瓣手术是有效、安全的<sup>[68]</sup>。另外一项研究也证实了再次机器人二尖瓣手术的安全性和有效性<sup>[69]</sup>。Suematsu Y 等<sup>[70]</sup>的研究表明了全机器人辅助小儿动脉导管未闭及血管环修复的可行性。Onan B 等<sup>[48]</sup>的研究也证实了机器人技术可以安全有效地实施与多种先天性心脏病, 在青少年患者中, 机器人心脏外科手术可以替代传统手术和微创胸腔镜手术, 且并发症的发生率在可以接受范围内。机器人手术系统用于心肌桥的切开也有报道<sup>[71]</sup>。

显而易见, 随着医疗技术的发展, 微创机器人心脏手术的使用范围将继续扩大, 在可预

见的未来, 微创机器人心脏手术在心脏外科手术中的占比将逐渐增加。

## 4 总结

达芬奇机器人手术系统虽然需要更长的手术时间, 但其在心脏外科手术中的应用已被证明是安全有效的。与传统方法相比, 机器人手术系统可以带来更短的住院时间和更少的并发症, 且术后死亡率和并发症发生率都较低, 可与开放手术相媲美, 甚至更低。机器人辅助心脏手术拥有已被证实的微创优势, 与传统开胸手术相比, 更适合应用于心脏手术领域。同时, 尚需进一步的多中心随机对照试验来进一步证明其有效性、可行性和安全性。

## 参考文献

- [1] 朱成章, 张维胜, 杜斌斌, 等. 达芬奇手术系统荧光成像技术在结直肠外科手术中的应用进展 [J]. 机器人外科学杂志 (中英文), 2020, 1(5): 332-337.
- [2] Loulmet D, Carpentier A, D'attellis N, et al. Endoscopic coronary artery bypass grafting with the aid of robotic assisted instruments[J]. The Journal of Thoracic and Cardiovascular Surgery, 1999, 118(1): 4-10.
- [3] Whellan D J, Mccarey M M, Taylor B S, et al. Trends in robotic-assisted coronary artery bypass grafts: a study of the Society of Thoracic Surgeons Adult Cardiac Surgery Database, 2006 to 2012[J]. The Annals of thoracic surgery, 2016, 102(1): 140-146.
- [4] WANG S, ZHOU J, CAI J F. Traditional coronary artery bypass graft versus totally endoscopic coronary artery bypass graft or robot-assisted coronary artery bypass graft-meta-analysis of 16 studies[J]. European Review for Medical & Pharmacological Sciences, 2014, 18(6): 790-797.
- [5] SU C, SHEN C, CHANG K, et al. Clinical outcomes of patients with multivessel coronary artery disease treated with robot-assisted coronary artery bypass graft surgery versus one-stage percutaneous coronary intervention



- using drug-eluting stents[J]. *Medicine*, 2019, 98(38): e17202.
- [6] Bonatti J, Wallner S, Crailsheim I, et al. Minimally invasive and robotic coronary artery bypass grafting—a 25-year review[J]. *Journal of Thoracic Disease*, 2021, 13(3): 1922–1944.
- [7] Endo Y, Nakamura Y, Kuroda M, et al. The utility of a 3D endoscope and robot-assisted system for MIDCAB[J]. *Annals of thoracic and cardiovascular surgery: official journal of the Association of Thoracic and Cardiovascular Surgeons of Asia*, 2019, 25(4): 200–204.
- [8] Derose J, Balaram S, Ro C, et al. Mid-term results and patient perceptions of robotically-assisted coronary artery bypass grafting[J]. *Interactive cardiovascular and thoracic surgery*, 2005, 4(5): 406–411.
- [9] Halkos M, Liberman H, Devireddy C, et al. Early clinical and angiographic outcomes after robotic-assisted coronary artery bypass surgery[J]. *The Journal of thoracic and cardiovascular surgery*, 2014, 147(1): 179–185.
- [10] Giambruno V, Chu M, Fox S, et al. Robotic-assisted coronary artery bypass surgery: an 18-year single-centre experience[J]. *The international journal of medical robotics + computer assisted surgery : MRCAS*, 2018, 14(3): e1891.
- [11] Argenziano M, Katz M, Bonatti J, et al. Results of the prospective multicenter trial of robotically assisted totally endoscopic coronary artery bypass grafting[J]. *The Annals of thoracic surgery*, 2006, 81(5): 1666–74; discussion 1674–1675.
- [12] Bonaros N, Schachner T, Lehr E, et al. Five hundred cases of robotic totally endoscopic coronary artery bypass grafting: predictors of success and safety[J]. *The Annals of thoracic surgery*, 2013, 95(3): 803–812.
- [13] Jegaden O, Wautot F, Sassard T, et al. Is there an optimal minimally invasive technique for left anterior descending coronary artery bypass?[J]. *Journal of cardiothoracic surgery*, 2011, 6(1): 37.
- [14] Balkhy H H, Nisivaco S, Kitahara H, et al. Robotic Multivessel Endoscopic Coronary Bypass: Impact of a Beating-Heart Approach With Connectors[J]. *The Annals of thoracic surgery*, 2019, 108(1): 67–73.
- [15] Bonatti J, Schachner T, Bonaros N, et al. Effectiveness and safety of total endoscopic left internal mammary artery bypass graft to the left anterior descending artery[J]. *The American Journal of cardiology*, 2009, 104(12): 1684–1688.
- [16] Mishra Y, Wasir H, Rajneesh M, et al. Robotically enhanced coronary artery bypass surgery[J]. *Journal of robotic surgery*, 2007, 1(3): 221–226.
- [17] Balkhy H, Wann L, Krienbring D, et al. Integrating coronary anastomotic connectors and robotics toward a totally endoscopic beating heart approach: review of 120 cases[J]. *The Annals of thoracic surgery*, 2011, 92(3): 821–827.
- [18] Kitahara H, Nisivaco S, Balkhy H. Graft Patency after Robotically Assisted Coronary Artery Bypass Surgery[J]. *Innovations (Philadelphia, Pa.)*, 2019, 14(2): 117–123.
- [19] Bonatti J, Wehman B, de Biasi A, et al. Totally endoscopic quadruple coronary artery bypass grafting is feasible using robotic technology[J]. *The Annals of thoracic surgery*, 2012, 93(5): e111–e112.
- [20] Bonatti J, Lee J, Bonaros N, et al. Robotic totally endoscopic multivessel coronary artery bypass grafting: procedure development, challenges, results[J]. *Innovations (Philadelphia, Pa.)*, 2012, 7(1): 3–8.
- [21] de Cannière D, Wimmer-Greinecker G, Cichon R, et al. Feasibility, safety, and efficacy of totally endoscopic coronary artery bypass grafting: multicenter European experience[J]. *The Journal of thoracic and cardiovascular surgery*, 2007, 134(3): 710–716.
- [22] Srivastava S, Barrera R, Quismundo S. One hundred sixty-four consecutive beating heart totally endoscopic coronary artery bypass cases without intraoperative conversion[J]. *The Annals of thoracic surgery*, 2012, 94(5): 1463–1468.
- [23] Wiedemann D, Bonaros N, Schachner T, et al. Surgical problems and complex procedures: issues for operative time in robotic totally endoscopic coronary artery bypass grafting[J]. *The Journal of thoracic and cardiovascular surgery*, 2012, 143(3): 639–647.e2.
- [24] Schachner T, Bonaros N, Wiedemann D, et al. Predictors, causes, and consequences of conversions in

- robotically enhanced totally endoscopic coronary artery bypass graft surgery[J]. *The Annals of thoracic surgery*, 2011, 91(3): 647–653.
- [25] Kiaii B, McClure R, Kostuk W, et al. Concurrent robotic hybrid revascularization using an enhanced operative suite[J]. *Chest*, 2005, 128(6): 4046–4048.
- [26] Cavallaro P, Rhee A, Chiang Y, et al. In-hospital mortality and morbidity after robotic coronary artery surgery[J]. *Journal of cardiothoracic and vascular anesthesia*, 2015, 29(1): 27–31.
- [27] Oehlinger A, Bonaros N, Schachner T, et al. Robotic endoscopic left internal mammary artery harvesting: what have we learned after 100 cases?[J]. *The Annals of thoracic surgery*, 2007, 83(3): 1030–1034.
- [28] CHENG N, GAO C, YANG M, et al. Analysis of the learning curve for beating heart, totally endoscopic, coronary artery bypass grafting[J]. *The Journal of thoracic and cardiovascular surgery*, 2014, 148(5): 1832–1836.
- [29] Göbölös L, Ramahi J, Obeso A, et al. Robotic totally endoscopic coronary artery bypass grafting: systematic review of clinical outcomes from the past two decades[J]. *Innovations (Philadelphia, Pa.)*, 2019, 14(1): 5–16.
- [30] Bonatti J, Wallner S, Winkler B, et al. Robotic totally endoscopic coronary artery bypass grafting: current status and future prospects[J]. *Expert review of medical devices*, 2020, 17(1): 33–40.
- [31] Carpentier A, Loulmet D, Aupècle B, et al. Computer assisted open heart surgery. First case operated on with success[J]. *Comptes rendus de l'Academie des sciences. Serie III, Sciences de la vie*, 1998, 321(5): 437–442.
- [32] Falk V, Autschbach R, Krakor R, et al. Computer-enhanced mitral valve surgery: toward a total endoscopic procedure[J]. *Seminars in thoracic and cardiovascular surgery*, 1999, 11(3): 244–249.
- [33] Murphy D, Miller J, Langford D. Endoscopic robotic mitral valve surgery[J]. *The Journal of thoracic and cardiovascular surgery*, 2007, 133(4): 1119–1120.
- [34] Nifong L, Rodriguez E, Chitwood W. 540 consecutive robotic mitral valve repairs including concomitant atrial fibrillation cryoablation[J]. *The Annals of thoracic surgery*, 2012, 94(1): 38–42; discussion 43.
- [35] Chitwood W, Rodriguez E, Chu M, et al. Robotic mitral valve repairs in 300 patients: a single-center experience[J]. *The Journal of thoracic and cardiovascular surgery*, 2008, 136(2): 436–441.
- [36] Suri R, Burkhart H, Daly R, et al. Robotic mitral valve repair for all prolapse subsets using techniques identical to open valvuloplasty: establishing the benchmark against which percutaneous interventions should be judged[J]. *The Journal of thoracic and cardiovascular surgery*, 2011, 142(5): 970–979.
- [37] Mihaljevic T, Pattakos G, Gillinov A, et al. Robotic posterior mitral leaflet repair: neo-chordal versus resectional techniques[J]. *The Annals of thoracic surgery*, 2013, 95(3): 787–794.
- [38] Mihaljevic T, Jarrett C, Gillinov A, et al. Robotic repair of posterior mitral valve prolapse versus conventional approaches: potential realized[J]. *The Journal of thoracic and cardiovascular surgery*, 2011, 141(1): 72–80.e1–4.
- [39] Cao C, Wolfenden H, Liou K, et al. A meta-analysis of robotic vs. conventional mitral valve surgery[J]. *Annals of cardiothoracic surgery*, 2015, 4(4): 305–314.
- [40] Gillinov A, Mihaljevic T, Javadikasgari H, et al. Early results of robotically assisted mitral valve surgery: analysis of the first 1000 cases[J]. *The Journal of thoracic and cardiovascular surgery*, 2018, 155(1): 82–91.e2.
- [41] Maltais S, Anwer L, Daly R, et al. Robotic Mitral Valve Repair: Indication for Surgery Does Not Influence Early Outcomes[J]. *Mayo Clinic proceedings*, 2019, 94(11): 2263–2269.
- [42] Loulmet D, Koeckert M, Neuburger P, et al. Robotic mitral repair for Barlow's disease with bileaflet prolapse and annular calcification using pericardial patch technique[J]. *Annals of cardiothoracic surgery*, 2017, 6(1): 67–69.
- [43] Loulmet D, Ranganath N, Neragi-Miandoab S, et al. Advanced experience allows robotic mitral valve repair in the presence of extensive mitral annular calcification[J]. *The Journal of thoracic and cardiovascular surgery*, 2019. DOI: 10.1016/j.jtcvs.2019.10.099.

- [44] Torracca L, Ismeno G, Alfieri O. Totally endoscopic computer-enhanced atrial septal defect closure in six patients[J]. *The Annals of thoracic surgery*, 2001, 72(4): 1354–1357.
- [45] Argenziano M, Oz M, DeRose J, et al. Totally endoscopic atrial septal defect repair with robotic assistance[J]. *The heart surgery forum*, 2002, 5(3): 294–300.
- [46] Morgan J, Peacock J, Kohmoto T, et al. Robotic techniques improve quality of life in patients undergoing atrial septal defect repair[J]. *The Annals of thoracic surgery*, 2004, 77(4): 1328–1333.
- [47] Sepúlveda E, Ibáñez A, Baeza C, et al. Robotic mitral valve repair and closure of atrial septal defect. Report of 13 procedures[J]. *Revista medica de Chile*, 2019, 147(10): 1303–1307.
- [48] Onan B, Onan I. Early results of robotically assisted congenital cardiac surgery: analysis of 242 patients[J]. *The Annals of thoracic surgery*, 2020. DOI: 10.1016/j.athoracsur.2020.10.028.
- [49] 杨明, 高长青, 肖苍松, 等. 全机器人心脏不停跳下房间隔缺损修补术 [J]. *中华胸心血管外科杂志*, 2011, 26(7): 395–397.
- [50] Owers C, Vaughan P, Braidley P, et al. Atrial myxomas: a single unit's experience in the modern era[J]. *The heart surgery forum*, 2011, 14(2): E105–109.
- [51] Murphy D, Miller J, Langford D. Robot-assisted endoscopic excision of left atrial myxomas[J]. *The Journal of thoracic and cardiovascular surgery*, 2005, 130(2): 596–597.
- [52] Moss E, Halkos M, Miller J, et al. Comparison of endoscopic robotic versus sternotomy approach for the resection of left atrial tumors[J]. *Innovations (Philadelphia, Pa.)*, 2016, 11(4): 274–277.
- [53] YANG M, YAO M, WANG G, et al. Comparison of postoperative quality of life for patients who undergo atrial myxoma excision with robotically assisted versus conventional surgery[J]. *The Journal of thoracic and cardiovascular surgery*, 2015, 150(1): 152–157.
- [54] Schilling J, Engel A, Hassan M, et al. Robotic excision of atrial myxoma[J]. *Journal of cardiac surgery*, 2012, 27(4): 423–426.
- [55] GAO C, YANG M, WANG G, et al. Excision of atrial myxoma using robotic technology[J]. *The Journal of thoracic and cardiovascular surgery*, 2010, 139(5): 1282–1285.
- [56] Khalpey Z, Korovin L, Chitwood W, et al. Robot-assisted septal myectomy for hypertrophic cardiomyopathy with left ventricular outflow tract obstruction[J]. *The Journal of thoracic and cardiovascular surgery*, 2014, 147(5): 1708–1709.
- [57] Chitwood W. Robotic trans-atrial and trans-mitral ventricular septal resection[J]. *Annals of cardiothoracic surgery*, 2017, 6(1): 54–59.
- [58] Kumar C J A, Marc Gillinov A, Smedira N, et al. Robotic trans-mitral septal myectomy and papillary muscle reorientation for HOCM combined with or without mitral valve repair: Technical aspects-How we do it[J]. *Journal of cardiac surgery*, 2020, 35(11): 3120–3124.
- [59] Folliguet T, Vanhuyse F, Magnano D, et al. Robotic aortic valve replacement: case report[J]. *The heart surgery forum*, 2004, 7(6): E551–553.
- [60] Folliguet T, Vanhuyse F, Konstantinos Z, et al. Early experience with robotic aortic valve replacement[J]. *European journal of cardio-thoracic surgery : official journal of the European Association for Cardio-thoracic Surgery*, 2005, 28(1): 172–173.
- [61] Balkhy H, Lewis C, Kitahara H. Robot-assisted aortic valve surgery: state of the art and challenges for the future[J]. *The international journal of medical robotics + computer assisted surgery : MRCAS*, 2018, 14(4): e1913.
- [62] Murphy E. Robotic excision of aortic valve papillary fibroelastoma and concomitant maze procedure[J]. *Global cardiology science & practice*, 2012, 2012(2): 93–100.
- [63] Woo Y, Grand T, Weiss S. Robotic resection of an aortic valve papillary fibroelastoma[J]. *The Annals of thoracic surgery*, 2005, 80(3): 1100–1102.
- [64] Ju M, Huh J, Lee C, et al. Robotic-assisted surgical ablation of atrial fibrillation combined with mitral valve surgery[J]. *The Annals of thoracic surgery*, 2019, 107(3): 762–768.
- [65] Rillig A, Schmidt B, Di Biase L, et al. Manual versus robotic catheter ablation for the treatment of atrial

- fibrillation: the man and machine trial[J]. JACC. Clinical electrophysiology, 2017, 3(8): 875-883.
- [66] Derose J, Belsley S, Swistel D, et al. Robotically assisted left ventricular epicardial lead implantation for biventricular pacing: the posterior approach[J]. The Annals of thoracic surgery, 2004, 77(4): 1472-1474.
- [67] Mair H, Jansens J, Lattouf O, et al. Epicardial lead implantation techniques for biventricular pacing via left lateral mini-thoracotomy, video-assisted thoracoscopy, and robotic approach[J]. The heart surgery forum, 2003, 6(5): 412-417.
- [68] Murphy D, Moss E, Miller J, et al. Repeat robotic endoscopic mitral valve operation: a safe and effective strategy[J]. The Annals of thoracic surgery, 2018, 105(6): 1704-1709.
- [69] Cheng W, Fontana G, De Robertis M, et al. Is robotic mitral valve repair a reproducible approach?[J]. The Journal of thoracic and cardiovascular surgery, 2010, 139(3): 628-633.
- [70] Suematsu Y, Mora B, Mihaljevic T, et al. Totally endoscopic robotic-assisted repair of patent ductus arteriosus and vascular ring in children[J]. The Annals of thoracic surgery, 2005, 80(6): 2309-2313.
- [71] Alima M, Vanden Eynden F, Preumont N, et al. Robotic-assisted surgical myotomy in a 27-year-old man with myocardial bridging of the left anterior descending coronary artery[J]. Interactive cardiovascular and thoracic surgery, 2010, 11(2): 185-187.

## · 简 讯 ·

### 《机器人外科学杂志（中英文）》征稿及 2022 年征订启事

《机器人外科学杂志（中英文）》（Chinese Journal of Robotic Surgery, 简称 CJRS）是由中国出版集团主管，世界图书出版公司主办，中国医师协会医学机器人医师分会和中国抗癌协会腔镜与机器人外科分会等协办的国内公开发行的机器人外科学学术期刊（CN 10-1650/R, ISSN 2096-7721）。旨在刊载机器人外科学领域新进展、新成果、新技术，促进机器人外科学的应用和发展，推动学术交流，提高我国在该领域的科研、临床水平和国际影响力。

本刊倡导理论与实践相结合，提高与普及相结合，并实行严格的专家审稿制度，依据稿件学术质量，公平、客观地取舍稿件。初设述评、论著、综述、基础研究、病案报道、专栏、讲座、教学、护理、最新动态等栏目。本刊为双月刊，大 16 开本，图随文走，全彩印刷，定价 50 元，全年 6 期（300 元），可直接向本刊编辑部订阅（户名：世界图书出版西安有限公司；开户行：工商银行西安市北大街支行；账号：3700 0205 0924 5232 147）。

**本刊对录用论文免费快速发表，不收取作者任何费用，也未授权或委托任何个人或网站受理作者投稿，谨防诈骗。**

**投稿方式：1、官网投稿系统：[www.jqrwxzz.com](http://www.jqrwxzz.com)；2、编辑部信箱：[jqrwxzz@163.com](mailto:jqrwxzz@163.com)。编辑部电话：029-87286478。**

本刊编辑部