

多臂机器人在单孔机器人辅助胸腔镜手术中的应用及进展

陈军^{1, 2}, 李小刚², 罗洞波¹(1. 新疆医科大学附属肿瘤医院胸外二科 新疆 乌鲁木齐 830000; 2. 巴音郭楞蒙古自治州人民医院胸外科
新疆 库尔勒 843000)

摘要 近 30 年来, 胸外科已迈入微创外科时代, 单孔胸腔镜技术逐渐受到广泛的推广与应用, 并成为主流术式。达芬奇机器人手术系统的问世使得微创外科术者能够获取更高清的手术视野和更加精准灵活的操作, 因而越来越为广大术者青睐。近年来, 有学者尝试结合二者优势, 使用多臂机器人开展单孔机器人辅助胸腔镜手术 (U-RATS), 并取得了较为理想的疗效。本文结合既往研究, 对 U-RATS 在胸外领域的应用及进展展开综述。

关键词 单孔胸腔镜手术; 机器人辅助胸腔镜手术; 微创胸外科

中图分类号 R655 **文献标识码** A **文章编号** 2096-7721 (2025) 05-0706-08

Application and advances of the multi-arm robot in uniportal robot-assisted thoracoscopic surgery

CHEN Jun^{1, 2}, LI Xiaogang², LUO Dongbo¹

(1.No.2 Department of Thoracic Surgery, Xinjiang Medical University Affiliated Tumor Hospital, Urumqi 830000, China; 2.Department of Thoracic Surgery, People's Hospital of Bayingolin Mongolian Autonomous Prefecture, Korla 843000, China)

Abstract Over the past three decades, thoracic surgery has entered the era of minimally invasive thoracic surgery, with uniportal thoracoscopic techniques being widely adopted and established as a mainstream surgical approach. The introduction of Da Vinci robotic surgical system enables minimally invasive surgeons to obtain more high-definition surgical field and more precise and flexible operation, which is increasingly favored by the majority of surgeons. In recent years, some scholars have attempted to combine the advantages of the two, using a multi-arm robot to carry out uniportal robot-assisted thoracoscopic surgery (U-RATS), and achieved more satisfactory results. The application and advances of U-RATS in thoracic surgery in the light of previous studies is summarized in this paper.

Key words Uniportal Thoracoscopic Surgery; Robot-assisted Thoracoscopic Surgery; Minimally Invasive Thoracic Surgery

在外科领域, 更少的手术创伤是外科医生和患者共同的愿望。20 世纪 90 年代初, 电视辅助胸腔镜手术 (Video-assisted Thoracoscopic Surgery, VATS) 的发展使胸外科迈入微创胸外科 (Minimally Invasive Thoracic Surgery, MITS) 时代。2004 年, Rocco G 等人报道了首例单切口 VATS 肺楔形切除术^[1-3]。2011 年, 西班牙的 Gonzalez-Rivas D 进一步发展了该技术, 并成功应用于肺叶切除术和纵隔淋巴结切除术^[4-5]。目前, 单孔电视辅助胸腔镜手术 (Uniportal Video-

assisted Thoracoscopic Surgery, U-VATS) 几乎能够完成其他 MITS 方法能完成的全部手术, 包括支气管袖状切除术、血管成形术、隆突切除和重建以及气管手术等。随着胸外科的迅猛发展, U-VATS 已从一项新技术发展成为广受欢迎的多孔胸腔镜手术的有效替代方案^[6-8], 在欧洲和亚洲更是被广泛应用并形成了相应的专家共识^[9-11]。然而单孔胸腔镜手术器械僵直, 需在一个长 3~5 cm 的切口同时置入摄像头和所有器械, “筷子效应” “围栏效应” “支点效

基金项目: 自治区区域协同创新专项项目 (科技援疆计划) (2024E02061)

Foundation Item: Regional Collaborative Innovation Special Project for Xinjiang (Science and Technological Aid Programme to Xinjiang) (2024E02061)

引用格式: 陈军, 李小刚, 罗洞波. 多臂机器人在单孔机器人辅助胸腔镜手术中的应用及进展 [J]. 机器人外科学杂志 (中英文), 2025, 6(5): 706-713.

Citation: CHEN J, LI X G, LUO D B. Application and advances of the multi-arm robot in uniportal robot-assisted thoracoscopic surgery[J]. Chinese Journal of Robotic Surgery, 2025, 6(5): 706-713.

通讯作者 (Corresponding Author): 罗洞波 (LUO Dongbo), Email: 13999891258@139.com

应”明显，导致学习曲线长，术者操作和扶镜手暴露术野难度陡增，尤其在处理左肺上叶血管时^[12-18]。机器人辅助手术是医学领域一项革命性、创新性的技术，因具有3D高清视野、自动滤除外科医生手震颤、可转弯腕式器械等优势^[19-20]，提高了手术的精准性和灵活性，广受胸外科医生青睐。2002年Melfi F M等人^[21]开展了首例机器人辅助肺切除术，此后20年里，其在胸外科领域的应用越来越广泛，目前已成为胸外科两大微创术式之一。然而与单孔VATS相比，传统机器人辅助胸腔镜手术(Robot-assisted Thoracoscopic Surgery, RATS)需做3~5个切口，既不美观，也不符合微创理念，部分患者难以接受。为进一步减少手术入路所致创伤，近年来多位学者运用多臂机器人开展了单孔机器人辅助胸腔镜手术(Uniportal Robot-assisted Thoracoscopic Surgery, U-RATS)，本文将对U-RATS的应用展开综述。

1 术中常用器械

规范并合理使用各类手术器械是确保手术安全与高效的关键。外科医生需熟练掌握常用器械的特点与性能，结合手术类型和自身技术特点选择合适的器械，以提升操作灵活性和流畅度，从而提高手术效率与安全性。能量器械与外科技术进步密切相关，其显著提高了手术效率并减少了术中出血，尤其在微创手术中，掌握能量器械特性已成为外科医生的必修课。在机器人辅助胸外科手术中，能量装置主要用于解剖组织（包括肺韧带、淋巴结、血管周围和支气管周围组织等）以及凝固和分割小血管。RATS术中常用器械包括电凝钩、单极电凝剪刀、马里兰电凝分离钳、无创单孔抓钳、单孔窗式双极电凝抓钳、无创单孔抓钳、持针器、超声刀。其中马里兰电凝分离钳独特的尖头、弧形鸟嘴状设计，能完成分离、抓持、牵拉、凝闭血管、离断、游离血管、放置血管吊带、简单缝合、打结等操作，功能全面，减少了更换器械的次数，不仅提高了手术安全性和效率，还减少了机械臂数量，从而节省手术费用，因此广受术者喜爱，许多术者将其作为右手主操作器械^[22-23]。

热损伤是能量器械最常见的附带损伤。瑞士苏黎世大学的Hefermehl L J等人^[24]研究了几种机器人辅助手术中常用能量器械的横向温度扩散，

结果表明：单极仪器在功率60 W、作用时间为1 s时的平均（扫描电子显微镜）临界热扩散距离为3.5 mm，作用时间为2 s时的临界热扩散距离为20 mm；双极器械在功率60 W和作用时间1 s时的平均临界热扩散距离为2.2 mm，在2 s时为3.6 mm；超声刀在成功凝固直径达5 mm的血管终止信号时的平均临界热扩散距离为2.9 mm。由此可见，单极器械的热扩散效应最高，其次是双极器械和超声刀，而双极器械与超声刀的热扩散相当。在手术中，尤其是在对高温相对敏感的神经周围操作时，在注意保持安全距离的同时，选择马里兰双极钳等新型手术器械可降低相关副损伤的风险。HONG Z Q等人^[25-26]比较了在达芬奇机器人辅助胸腔镜纵隔肿瘤切除术及肺癌手术中使用马里兰电凝分离钳和电凝钩的疗效，结果表明：与使用电凝钩组相比，使用马里兰电凝分离钳组患者的手术时间、术后引流时间、住院时间更短，术中出血、术后引流总量更少，CRP、IL-6、IL-8、TNF- α 水平升高幅度更低；在肺癌手术中，通过比较两组患者术中和术后并发症，发现马里兰电凝分离钳组的术中淋巴结碎裂、术后乳糜漏和术后进食呛咳的发生率明显低于电凝钩组。为了安全高效地使用能量器械，本文总结了各种器械的特性（见表1）。

2 打孔策略及机械臂布局技巧

近30年来，VATS技术的应用使胸外科迈入微创化、精准化的时代，胸腔镜经历了从多孔向单孔的转变，目前U-VATS在欧洲和亚洲已成为主流术式^[6-8]。机器人手术系统因具有更佳的可视化、灵活的腕式器械以及主刀手震颤滤过系统而广受胸外科术者青睐。在单臂机器人手术系统上市前，单孔胸腔镜手术的先驱们利用为多孔道手术设计的达芬奇Xi系统，开创性地进行了U-RATS^[30-35]。

2.1 混合U-RATS打孔策略及机械臂布局技巧 在无法获取机器人专用切割缝合器的条件下，2021年我国学者杨运海等人^[30]描述了一种使用腔镜切割缝合器进行混合U-RATS的手术方法，即使用达芬奇Xi手术系统和胸腔镜切割缝合器，在第4肋间腋中线开一长约4 cm的切口，30°的摄像臂放置于切口背侧，紧挨着放置另外两个机械臂，两个机械臂在胸腔内交叉放置以便于操作，助手通过

表 1 机器人辅助胸外科手术中常用能量器械

Table 1 Commonly used energy instruments in robot-assisted thoracic surgery

器械	作用机理	优点	缺点	适用范围
单极电凝钩	通过电极尖端集中的电流来加热与其接触的组织，实现组织的分离和凝固，发挥切割与止血作用。需连接负极板（分散电极），工作时人体作为电流回路的一部分，导致体内电流流向不确定，增加了电外科损伤风险	灵活，精巧，凝血效果好，操作效率高。可进行挑、推、勾、掏、离断等动作	对组织进行推拨等操作时易造成副损伤，具有热传导作用，行神经解剖时应慎用，以防发生热损伤；易产生烟雾，影响手术视野，尤其在狭小空间操作时。当患者体内有金属植入物、心脏起搏器、助听设备等时，需在厂家或相关专业医生指导下使用，或改用双极电凝	用于解剖胸膜和血管鞘膜、胸膜粘连烙断、清扫淋巴结、小血管凝固离断、局部止血等操作，在肺癌手术中应用广泛。在食管癌手术中主要用于打开纵隔胸膜，暴露食管固有动脉
电铲	相当于开放手术中的电刀，作用机理同电凝钩	通过精巧的切、凝、推、拨等操作，锐性解剖各种组织结构。熟练者通过小步快进，可提高切除效率，缩短手术时间	对初学者而言，电铲使用难度大，容易误伤血管，导致术中意外出血，因此应慎重使用。当患者体内有金属植入物、心脏起搏器、助听设备等时，需在厂家或相关专业医生指导下使用，或改用双极电凝	用于解剖胸膜和血管鞘膜、凝闭小血管、点状止血、清扫淋巴结、切除肺组织等
单极剪刀	单极手术弯剪的工作头为弯曲切削刃设计，又称为热剪。工作机理同单极设备	可进行切割、锐性分离、电切电凝等操作。不带电时行锐性分离，可减少神经热损伤	单极手术弯剪必须与尖端盖附件（热剪头端绝缘保护套管）一起使用。因无法压迫器官，止血能力较弱。封闭淋巴管的能力有限，可能会增加术后渗出 ^[27]	在腹、盆腔手术中应用广泛，也可用于胸腔手术的精细解剖操作，如食管癌手术中双侧喉返神经链的解剖、胸腔乏血管粘连的游离处理等
马里兰双极钳	钳头尖锐，有弧度，钳体窄，为单孔锯齿设计，钳口仅在尖端彼此接触。双极仪器的两个电极都安装在仪器上，通常位于远端或靠近远端，因此电路中只包括位于两个电极之间的组织，电流只流经目标区域，降低了电外科损伤风险 ^[28]	可进行抓持、牵拉、分离、钳闭、离断、结扎和简单缝合操作。锐性解剖，止血效果好	切割速度慢，在肺部手术中，马里兰双极钳通常与电钩或电铲交替配合使用，以提高手术效率。通过马里兰钳夹组织电凝后快速拉开组织来分离组织，组织较厚时效果较差，初学者需要足够训练后方能适应撕扯动作	用于束状组织结构的锐性游离，如喉返神经的解剖暴露。可用于血管、支气管、纵隔胸膜的游离及淋巴结清扫、血管吊带放置等精细操作。可进行结扎和简单的缝合操作
超声刀	超声波发生器将电能转换为超声波频率的机械能，使手柄尖端的金属刀头产生机械性振荡并与组织摩擦生热，结合向两边传导的组织张力，从而形成切力切开组织。超声刀头的设计兼具钝（绝缘面）、锐（工作面）双重特点	可进行剪、断、推、切、挑、剥、剔、戳、拨等动作 ^[29] 。止血效果好，产生烟雾小，具有组织气化及空洞化效应，利于解剖。热辐射作用小	机器人超声刀与普通超声刀类似，不具有机器人器械的灵活性，旋转自由度小，为一次性耗材，应用成本高。在游离神经组织及气管膜部时需注意安全距离，以免造成热损伤	用于处理直径 5 mm 以下弹力层丰富的血管。在胸部肿瘤手术中淋巴结清扫效率相对较高，因此常用于食管癌和胸腺肿瘤切除手术

剩余靠近腹侧的切口空间进出器械。此后这种使用胸腔镜切割缝合器与达芬奇 Xi 手术系统开展的单孔机器人辅助手术即被定义为混合 U-RATS。上海肺科医院赵德平等人^[36]报道了一种新的机械臂布局：在腋后线第 5 肋间开一长 4~5 cm 的切口，术中一般选择 3 个机械臂（1、2、3 号臂或 2、3、4 号臂）。通常将 2 号臂作为摄像臂放置在切口上缘，一个机械臂放在 2 号臂附近，另一个使用电凝钩的机械臂则靠近切口下缘，两个机械臂以不同深度伸入胸腔，以减少套管之间的干扰。助手利用两个机械臂之间的空隙，用卵圆钳或吸引器协助暴露，在断支气管、血管时将切口下缘的机械臂撤出，以腾出空间便于助手进出腔镜切割缝合器。2024 年 1 月，新疆肿瘤医院罗洞波团队综合了 Gonzalez-Rivas D 及杨运海等

学者的手术优点，使用 3 臂法开展混合 U-RATS，切口位于腋前线和腋中线第 6~7 肋间，左手辅助操作器械为有孔双极钳，右手主操作器械为马里兰双极钳。这种组合减少了器械更换次数，提高了手术效率，同时因减少机械臂使用数量而降低了费用，目前已开展手术 100 余例，均取得了良好的围手术期疗效。

2.2 纯 U-RATS 打孔策略及机械臂布局技巧 机器人辅助手术具有独特的优势，已被证实可以取得与成熟的 VATS 相当的围手术期结果和长期疗效^[37-38]。在单臂机器人手术系统上市前，为了融合机器人辅助手术与单孔胸腔镜手术的优势，自 2021 年 9 月起，U-VATS 的先驱者 Gonzalez-Rivas D^[39]通过改造达芬奇 Xi 手术系统开展了一系列 U-RATS：术中使用机器人专用切割缝合器，切口位于腋前线和腋中线第

6~7 肋间，右肺中叶切口略向前，左肺下叶切口略向外侧，袖式肺叶切除术时建议取第 5~6 肋间切口，如果进行混合 U-RATS（使用非机器人腔镜切割缝合器），切口可放在第 4 或第 5 肋间水平，以便助手进出切割缝合器^[36, 40]。摄像臂位于切口最后方，中间臂和前面臂为机械臂，两个机械臂在胸腔内相互交叉。为了腾出更多的空间，除了摄像头套管接密封接口（用于保护摄像头）外，其余套管均不接密封接口。右侧胸腔手术时使用 2 号臂（摄像机）、3 号臂（左手器械）和 4 号臂（右手器械），左侧胸腔手术时使用 1 号臂（左手器械）、2 号臂（右手器械）和 3 号臂（摄像机），定位激光器对准皮肤切口上部的后方位置，肺袖状切除缝合时则将相机置于中央，机械臂置于两侧（如图 1）。

Manolache V 等人^[41]报道了剑突下单孔机器人辅助纵隔肿瘤切除术的手术方法：于剑突下取一约 3 cm 的纵向切口，切除剑突并放置环形切口保护器，用手套确保密封并充入 CO₂，将套管插入手套的手指上，并用胶带或不可吸收缝线密封。使用 1、2、3 号臂，将 30° 摄像机放于 2 号或 3 号臂上，其余两个机械臂放置左手或右手器械。2024 年日本的 Watanabe H 等人^[42]报告了经肋间隙入路切除纵隔肿瘤的 U-RATS 方法：患者采用双腔气管插管全麻，取侧卧位，于腋中线第 5、第 6 或第 7 肋间开一约 4 cm 的皮肤切口，使用切口保护器。将达芬奇 Xi 手术系统置于患者背侧，定位激光器设置在切口后部上方，取消距离患者最远的机械臂，无需 CO₂ 充气。纵隔肿瘤切口和体位选择应根据肿瘤的大小、位置

和侵袭性综合决定。对于前纵隔肿瘤，通常采用侧卧位或仰卧位；剑突下入路是进行全胸腺或扩大胸腺切除术的最佳术式，对于胸腺瘤合并肌无力的患者，该术式更便于进行扩大胸腺切除及纵隔脂肪淋巴组织清扫；胸腺部分切除术可采用侧卧位侧胸入路；上纵隔、中纵隔和后纵隔肿瘤可取侧卧位行侧胸入路切除，但来源于后纵隔的神经源性哑铃状肿瘤则需采用俯卧位后入路切除，必要时需联合骨科、神经外科进行手术^[43-44]。基于临床实践，Gonzalez-Rivas D 等人^[39]提出将纯 U-RATS 定义为：通过单个肋间切口进行的机器人辅助胸外科手术，术中不使用肋骨撑开器，使用机器人摄像头、机器人解剖器械、机器人胸腔镜器械和机器人切割缝合器。纯 U-RATS 与混合 U-RATS 的主要区别见表 2。

表 2 纯 U-RATS 与混合 U-RATS 的比较		
Table 2 Comparison of pure U-RATS and hybrid U-RATS		
项目	纯 U-RATS	混合 U-RATS
代表术者	Gonzalez-Rivas D ^[39]	杨运海 ^[30] 、赵德平 ^[36]
切口部位	腋前线 and 腋中线第 6~7 肋间，袖式肺叶切除术时建议取第 5~6 肋间切口	腋中线第 4 肋间或第 5 肋间
特点	使用机器人专用切割缝合器，费用相对较高，对助手依赖少，要求较低，可减少助手器械与机械臂的碰撞。助手主要负责辅助暴露及取出标本等操作，休息时间多，手术时间相对较短	使用腔镜切割缝合器，在无法获取机器人专用切割缝合器时亦可开展，费用相对较低，对助手依赖多，要求具有一定的 VATS 操作经验，对助手要求相对较高，助手器械与机械臂易发生碰撞。助手负责辅助暴露、使用切割缝合器离断支气管血管及取出标本等操作，手术时间相对较长

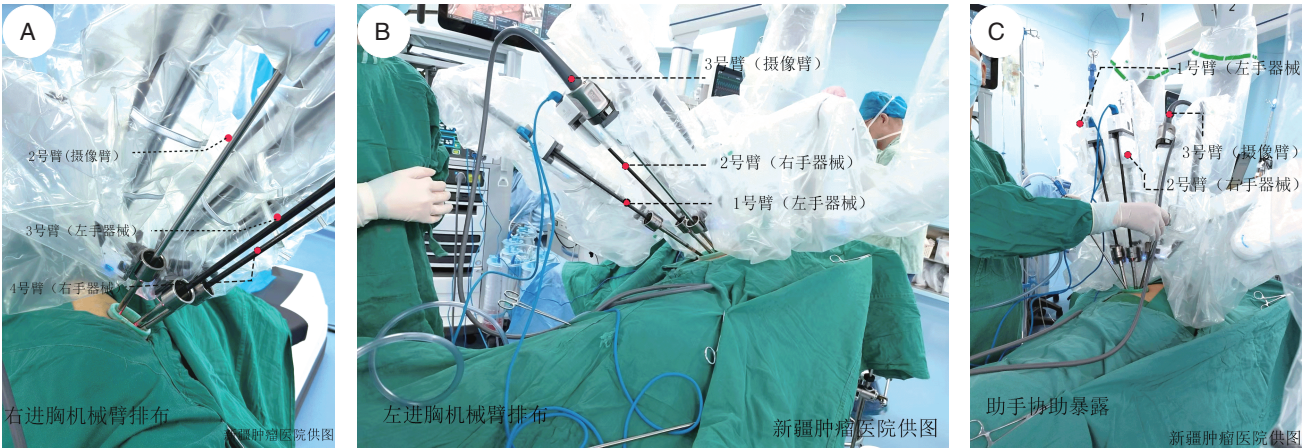


图 1 混合 U-RATS 机械臂布局
Figure 1 Hybrid U-RATS robotic arm layout
注：A. 右进胸布局；B. 左进胸布局；C. 助手协助

3 U-RATS 在肺外科的应用

基于“微创与加速康复外科”理念，国内外学者不断创新与探索并成功将单孔胸腔镜理念应用到机器人辅助肺外科手术中。2021年杨运海等人^[30]报道了世界首例使用腔镜切割缝合器进行的混合 U-RATS 肺叶切除术，手术用时约 90 min，患者术后恢复顺利，于术后第 3 天出院。2023 年上海肺科医院蒋雷等人^[45]报道了一项混合 U-RATS 肺切除术与双孔机器人辅助（Biportal Robot-Assisted Thoracoscopic Surgery, B-RATS）肺切除术围手术期疗效的回顾性对照研究，共纳入 109 例患者。研究结果显示：两组患者住院时间、术后并发症发生率等围手术期结果相当，平均手术时间分别为 124.1 min 和 103.6 min ($P=0.049$)，术中平均失血量分别为 131.7 mL 和 143.1 mL，术后平均住院时间分别为 3.83 d 和 3.05 d ($P=0.037$)，术后第 1 天胸腔引流量分别为 230.9 mL 和 207.1 mL，术后第 1 天 VAS 评分为 3.83 分和 4.57 分 ($P=0.018$)，其中 7 例患者转为胸腔镜手术（混合 U-RATS 组 2 例，中转率 6.89%；B-RATS 组 5 例，中转率 6.25%），6 例术中输血（混合 U-RATS 组 1 例，术中输血率 3.44%；B-RATS 组 5 例，术中输血率 6.25%），无病例转为开放手术，两组患者均无围手术期死亡。2023 年 Paradela M 等人^[46]采用倾向性评分匹配法对 U-RATS 与 U-VATS 进行对照研究，共纳入 136 例患者。研究结果显示：两组患者手术时间、术中并发症发生率、中转开胸率、ICU 住院时间、总住院时间、再次干预率和围手术期死亡率均无明显差异，两组均无手术死亡病例。在并发症方面，U-VATS 组出血较常见，U-RATS 组心律失常较常见；U-VATS 组清扫的淋巴结数量明显低于 U-RATS 组（13.7 个 *vs.* 17.6 个， $P=0.007$ ），术后并发症发生率高于 U-RATS 组（28% *vs.* 9%， $P=0.004$ ），胸腔引流时间长于 U-RATS 组（3.9 d *vs.* 2.6 d， $P=0.034$ ）。2023 年 Manolache V 等人^[47]一项 U-RATS 肺切除术与多孔 RATS 肺切除术的多中心对照研究提示，两组在淋巴结清扫与中转开胸率方面无明显差异，但 U-RATS 组中位手术时间（136 min *vs.* 150 min， $P=0.0001$ ）和中位术后住院时间（4 d *vs.* 5 d， $P<0.0001$ ）更短。2023 年 Gonzalez-Rivas D 等人^[40]报道了 30 例袖状肺叶切除术（含双

袖式和隆突重建手术）的围手术期结果，手术时间为（178±5.5）min，术后住院时间为（6.6±0.5）d，除 1 例高危患者术后因 ARDS 死亡外，其余患者围手术期效果极佳。U-RATS 融合了单孔胸腔镜和机器人手术系统的优点，基于现有研究，可认为其在解剖性肺切除术中是安全可行的，手术效果与传统方法相当。甚至有学者认为，基于目前研究及单臂机器人手术系统的可及性，达芬奇 Xi 手术系统是通过单个肋间切口进行机器人辅助解剖性肺切除术的最佳平台^[46, 48-49]。

4 U-RATS 在纵隔外科的应用

纵隔肿瘤的特点是瘤种多样化，不同纵隔区域好发的瘤种不同。后纵隔多为神经源性肿瘤，中纵隔常见为淋巴瘤、心包囊肿、支气管囊肿等，前纵隔则好发胸腺瘤、畸胎瘤。由于纵隔内解剖空间狭小，尤其是前纵隔与上纵隔，对需要广泛切除的胸腺肿瘤或者体积较大的肿瘤来说，传统胸腔镜手术器械灵活性欠缺，学习曲线长，手术视野暴露困难，难度陡增^[50]。而机器人手术系统的灵活器械和三维立体视野弥补了普通胸腔镜手术设备的不足，使得常规胸腔镜下难以完成的微创手术得以顺利实施，提高了纵隔外科常规手术的便利性、流畅性和安全性。2001 年日本的 Yoshino I 等人^[51]首次报道了机器人辅助纵隔肿瘤切除术的成功实施，开启了纵隔肿瘤机器人辅助微创治疗的新时代。剑突下入路双侧膈神经、双侧心膈角脂肪组织显露更清晰，使用 6~8 mmHg 的 CO₂ 后可将胸骨后至纵隔的距离增加超过 1 cm，从而改善视野，利于左右无名静脉的显露，且术后疼痛较肋间入路减轻，因此被认为是前纵隔肿瘤，尤其是胸腺瘤合并重症肌无力最理想的术式^[48, 52-53]。2023 年 Manolache V 等人^[41]报道了 1 例使用达芬奇 Xi 手术系统为 52 岁胸腺瘤患者成功实施经剑突下 U-RATS 的案例，并详细介绍术式要点，该患者手术顺利，术后未见任何手术并发症。2024 年日本的 Watanabe H 等人^[42]报道了一组使用达芬奇 Xi 手术系统进行纵隔肿瘤切除术的病例，所有病例手术均成功实施并取得了良好的围手术期效果。新疆肿瘤医院胸外科团队目前也尝试使用达芬奇 Xi 手术系统开展了十余例 U-RATS 纵隔肿物切除术，均取得了满意的手术效果。结合本团队经验及现有

文献,本团队认为 U-RATS 用于纵隔肿瘤切除术可取得满意疗效,应被视为一种安全、可行的手术选择,但关于 U-RATS 纵隔肿瘤切除术的近期及远期疗效仍需大型随机对照研究进一步论证。

5 U-RATS 最新研究进展

基于微创外科理念,近年来融合了单孔理念与机器人辅助手术优势的达芬奇 SP 手术系统应运而生。达芬奇 SP 手术系统器械臂包含 4 个器械驱动器,用于控制全腕 3D 高清摄像机和 3 个多关节器械,4 条柔性臂通过 1 个直径 2.5 cm 的套管进入人体内。套管内的器械具备模拟人类手腕和手肘的全方位旋转能力,以便在人体狭窄间隙内执行精细手术操作^[54-55]。由于 SP 手术系统套管尺寸为 2.5 cm,难以在狭窄的肋间隙中安装套管,因此探索者们认为通过剑突下(前纵隔肿瘤切除术的首选)或肋下间隙(肺切除术的首选)进行手术最为适合^[48, 56]。2019 年 Gonzalez-Rivas D 等人^[48]报道了达芬奇 SP 手术系统问世后的临床前经验,使用 SP 手术系统在实验室对尸体进行剑突下或肋下入路纵隔肿瘤切除术及肺叶切除术,首次在尸体层面论证了两种手术入路的可行性。2019 年韩国学者 Park S Y 等人^[56]在 3 具尸体上开展的纵隔及肺切除术临床前实验也论证了剑突下和肋下入路的可行性。2024 年韩国学者 Lee J H 等人^[57]开展了一项使用达芬奇 SP 手术系统进行胸外科手术的回顾性研究,该研究纳入 115 例患者,术式涵盖胸腺切除术、纵隔肿物切除术、解剖性肺切除术(包括肺叶切除术和肺段切除术)、食管切除术和食管黏膜下肿瘤剥除术,全部患者均采用肋下(用于肺、食管、后纵隔肿瘤手术)或剑突下(用于胸腺和前纵隔肿瘤切除术)入路,肋下入路取 60°~70°侧卧位,剑突下入路取仰卧位,以便于必要时中转手术。该研究中无中转开胸或胸骨劈开病例,1 例患者转为胸腔镜手术,2 例患者增加额外切口;2 例患者术后并发症超过 IIIa 级,因此术者认为使用达芬奇 SP 手术系统进行 RATS 在胸外科各个领域都是可行和安全的,包括解剖性肺切除术和食管切除术等复杂手术。然而达芬奇 SP 手术系统也存在一些不足,例如缺乏专用切割缝合器,需使用腔镜下切割缝合器;无法使用超声刀、套管直径远大于肋间宽度等;最大工作长度为

27 cm,在一些身高较高的患者中可能存在操作盲区(例如剑突下入路上纵隔手术);为给器械三角定位提供足够的空间,达芬奇 SP 手术系统要求套管尖端与目标病灶之间的距离至少为 10 cm,这一要求使该系统的应用范围受到一定限制^[23]。近年来,多款国产机器人及单臂机器人已陆续上市,已有文献报道其在泌尿外科、普外科等领域的应用安全、可行^[58-64],但目前仍缺乏大型随机对照研究论证,且缺乏在胸外科领域应用的相关研究。但相信随着单臂机器人手术系统的不断进步和创新,其在应用中的问题将逐步得以解决,其在胸外科的应用一定会越来越广泛。

6 总结与展望

综上所述,以达芬奇机器人手术系统为代表的 RATS 具有诸多传统开放及胸腔镜手术无法比拟的优势,而兼具单孔理念与机器人辅助手术优势的 U-RATS 的安全性及可行性已被研究证实。目前多臂机器人手术系统装机数量庞大,更新单臂机器人手术系统尚需时日且成本昂贵,因此在当前情况下,使用多臂机器人开展 U-RATS 仍是拟开展 U-RATS 术者的最佳选择。随着单臂机器人技术的不断突破,未来使用单臂机器人手术系统进行 U-RATS 必将成为主流。目前这一技术应用面临的主要问题是缺乏专用于胸外科的机器人手术系统及相应手术器械,以及机器人辅助手术费用昂贵且多为自费。随着器械的不断改进,具有胸外科特点的单臂机器人手术系统或器械模块的研发,以及国产机器人手术系统的上市并打破该领域的技术垄断,这些问题终将以完美解决。术中超声影像定位技术、支气管定位磁导航、三维影像重建技术、虚拟现实和增强现实技术等先进技术与机器人手术系统的完美融合将会成为未来发展趋势,这些技术的突破必定使机器人手术系统功能更加多样化、智能化,不仅能为术者提供更真实的感观体验和触觉感受,还能进一步提高手术的安全性。当代,人工智能是各领域的研究热点,开发具有深度学习功能的人工智能手术机器人可能是新一代单臂机器人手术系统的研发方向之一,在为术者提供个性化的手术方案指导和术中导航的同时,也为提升手术质量及手术安全提供了保障。随着先进的通信技术与机器人手术系统的完美

结合, 跨越千里的远程手术已经实现, 待这一技术成熟并广泛应用否, 将在一定程度上缓解我国医疗资源分布不均衡的问题。相信通过工程师与外科医生的跨学科合作与研发, 科技的发展与创新必将助推这些美好愿景的实现。

利益冲突声明: 本文不存在任何利益冲突。

作者贡献声明: 陈军负责数据收集, 设计论文框架, 起草并撰写论文, 论文修改; 李小刚负责论文修改, 绘制图表; 罗洞波负责拟定写作思路, 指导撰写文章并最后定稿。

参考文献

- [1] Rocco G, Martin-Ucar A, Passera E. Uniportal VATS wedge pulmonary resections[J]. *Ann Thorac Surg*, 2004, 77(2): 726–728.
- [2] Matsuura N, Igai H, Ohsawa F, et al. Uniport vs. multiport video-assisted thoracoscopic surgery for anatomical lung resection-which is less invasive?[J]. *J Thorac Dis*, 2021, 13(1): 244–251.
- [3] LI T, XIA L, WANG J, et al. Uniportal versus three-port video-assisted thoracoscopic surgery for non-small cell lung cancer: a retrospective study[J]. *Thorac Cancer*, 2021, 12(8): 1147–1153.
- [4] Gonzalez-Rivas D, de la Torre M, Fernandez R, et al. Single-port video-assisted thoracoscopic left upper lobectomy[J]. *Interact Cardiovasc Thorac Surg*, 2011, 13(5): 539–541.
- [5] Gonzalez-Rivas D, Paradela M, Fieira E, et al. Single-incision video-assisted thoracoscopic lobectomy: initial results[J]. *J Thorac Cardiovasc Surg*, 2012, 143(3): 745–747.
- [6] Sihoe A D L. Transition from multiportal video-assisted thoracic surgery to uniportal video-assisted thoracic surgery... and evolution to uniportal robotic-assisted thoracic surgery?[J]. *Ann Cardiothorac Surg*, 2023, 12(2): 82–90.
- [7] Maqueda L B, Falcon R, Tsai C Y, et al. Current role of uniportal video-assisted thoracic surgery for lung cancer treatment[J]. *J Clin Transl Res*, 2020, 6(4): 135–144.
- [8] Siu I C H, Ng C S H. The future of the uniportal approach[J]. *Ann Cardiothorac Surg*, 2023, 12(1): 46–48.
- [9] Hirai K, Usuda J. Current status and issues of uniportal video-assisted thoracic surgery in Japan[J]. *J Vis Surg*, 2020, 6: 27.
- [10] HAN D P, CAO Y Q, WU H, et al. Uniportal video-assisted thoracic surgery for the treatment of lung cancer: a consensus report from Chinese Society for Thoracic and Cardiovascular Surgery (CSTCVS) and Chinese Association of Thoracic Surgeons (CATS)[J]. *Transl Lung Cancer Res*, 2020, 9(4): 971–987.
- [11] Bertolaccini L, Batirel H, Brunelli A, et al. Uniportal video-assisted thoracic surgery lobectomy: a consensus report from the Uniportal VATS Interest Group (UVIG) of the European Society of Thoracic Surgeons (ESTS)[J]. *Eur J Cardiothorac Surg*, 2019, 56(2): 224–229.
- [12] Berzenji L, Wen W, Verleden S, et al. Minimally invasive surgery in non-small cell lung cancer: where do we stand?[J]. *Cancers (Basel)*, 2023, 15(17): 4281.
- [13] Mazzei M, Abbas A E. Why comprehensive adoption of robotic assisted thoracic surgery is ideal for both simple and complex lung resections[J]. *J Thorac Dis*, 2020, 12(2): 70–81.
- [14] Paladini P, Meniconi F, Ghisalbetti M, et al. Review of the learning curve of video-assisted thoracic surgery & robotic-assisted thoracic surgery lobectomies—similarities and differences[J]. *Curr Chall Thorac Surg*, 2021. DOI: 10.21037/cts-20-75.
- [15] de Rezende B B, Assumpção L R, Haddad R, et al. Characteristics of the learning curve in robotic thoracic surgery in an emerging country[J]. *J Robot Surg*, 2023, 17(4): 1809–1816.
- [16] Power A D, D' Souza D M, Moffatt-Bruce S D, et al. Defining the learning curve of robotic thoracic surgery: what does it take?[J]. *Surg Endosc*, 2019, 33(12): 3880–3888.
- [17] Meacci E, Nachira D, Zanfrini E, et al. Uniportal VATS approach to sublobar anatomic resections: literature review and personal experience[J]. *J Thorac Dis*, 2020, 12(6): 3376–3389.
- [18] 匡必婧, 张静, 牛玲莉, 等. 单孔胸腔镜技术的临床应用及学习曲线[J]. *中国胸心血管外科临床杂志*, 2021, 28(7): 826–829.
- [19] JIN R S, ZHENG Y Y, YUAN Y, et al. Robotic-assisted versus video-assisted thoracoscopic lobectomy: short-term results of a Randomized Clinical Trial (RVlob Trial)[J]. *Ann Surg*, 2022, 275(2): 295–302.
- [20] 贾昱欣, 张亚杰, 李鹤成. 机器人在胸外科的应用现状与进展[J]. *机器人外科学杂志 (中英文)*, 2022, 3(5): 367–375.
- [21] Melfi F M, Menconi G F, Mariani A M, et al. Early experience with robotic technology for thoracoscopic surgery[J]. *Eur J Cardiothorac Surg*, 2002, 21(5): 864–868.
- [22] Eguchi T, Miura K, Hamanaka K, et al. Adoption of robotic core technology in minimally invasive lung segmentectomy: review[J]. *J Pers Med*, 2022, 12(9): 1417.
- [23] Ismail M, Waterhouse B R, Colman A, et al. The transition to uniportal robotic surgery in the second decade of uniportal surgery[J]. *Ann Cardiothorac Surg*, 2023, 12(2): 96–101.
- [24] Hefermehl L J, Largo R A, Hermanns T, et al. Lateral temperature spread of monopolar, bipolar and ultrasonic instruments for robot-assisted laparoscopic surgery[J]. *BJU Int*, 2014, 114(2): 245–252.
- [25] HONG Z Q, BAI X D, SHENG Y N, et al. Efficacy of using Maryland forceps versus electrocoagulation hooks in da Vinci robot-assisted thoracoscopic mediastinal tumor resection[J]. *World J Surg Oncol*, 2023, 21(1): 184.
- [26] HONG Z Q, BAI X D, SHENG Y N, et al. Efficacy of using Maryland forceps versus electrocoagulation hooks in RATS lung cancer surgery: a propensity score-matched study[J]. *Ann Surg Oncol*, 2023, 30(9): 5923–5929.
- [27] Hirahara N, Matsubara T, Hayashi H, et al. Features and applications of energy devices for prone robot-assisted minimally invasive esophagectomy: a narrative review[J]. *J Thorac Dis*, 2022, 14(9): 3606–3612.
- [28] Homma T. Advances and safe use of energy devices in lung cancer surgery[J]. *Gen Thorac Cardiovasc Surg*, 2022, 70(3): 207–218.
- [29] 李国新. 超声刀在腹腔镜胃肠手术中的使用技巧[J]. *中华胃肠外科杂志*, 2013, 16(10): 919–921.
- [30] YANG Y H, SONG L W, HUANG J, et al. A uniportal right upper lobectomy by three-arm robotic-assisted thoracoscopic surgery using the da Vinci (Xi) Surgical System in the treatment of early-stage lung cancer[J]. *Transl Lung Cancer Res*, 2021, 10(3): 1571–1575.
- [31] Gonzalez-Rivas D, Bale M, Bosinceanu M L, et al. Uniportal robotic-assisted thoracoscopic surgery right upper lobectomy for aspergilloma[J]. *Ann Cardiothorac Surg*, 2023, 12(2): 142–143.
- [32] Motas N, Manolache V, Bosinceanu M L, et al. Uniportal robotic-assisted thoracic surgery anatomic segmentectomies[J]. *Ann Cardiothorac Surg*, 2023, 12(2): 133–135.
- [33] Gonzalez-Rivas D, Koziej P H, Sediqi S, et al. Uniportal hybrid robotic-assisted right upper sleeve lobectomy in an 83-year-old patient with severe pulmonary hypertension[J]. *Ann Cardiothorac Surg*, 2023, 12(2): 136–138.
- [34] Gonzalez-Rivas D, Essa R A, Motas N, et al. Uniportal robotic-assisted thoracic surgery lung-sparing carinal sleeve resection and reconstruction[J]. *Ann Cardiothorac Surg*, 2023, 12(2): 130–132.
- [35] Gonzalez-Rivas D, Bosinceanu M, Manolache V, et al. Uniportal fully robotic-assisted bronchovascular sleeve bilobectomy[J]. *Ann Cardiothorac Surg*, 2023, 12(2): 144–146.
- [36] E H R, YANG C L, WU J, et al. Hybrid uniportal robotic-assisted thoracoscopic surgery using video-assisted thoracoscopic surgery staplers: technical aspects and results[J]. *Ann Cardiothorac Surg*, 2023, 12(1): 34–40.
- [37] Kent M S, Hartwig M G, Vallières E, et al. Pulmonary Open, Robotic, and Thoracoscopic Lobectomy (PORTaL) study: an analysis of 5721 cases[J]. *Ann Surg*, 2023, 277(3): 528–533.

- [38] Kent M S, Hartwig M G, Vallières E, et al. Pulmonary Open, Robotic, and Thoracoscopic Lobectomy (PORTaL) study: survival analysis of 6646 cases[J]. *Ann Surg*, 2023, 277(6): 1002–1009.
- [39] Gonzalez-Rivas D, Manolache V, Bosinceanu M L, et al. Uniportal pure robotic-assisted thoracic surgery-technical aspects, tips and tricks[J]. *Ann Transl Medicine*, 2023, 11(10): 362.
- [40] Gonzalez-Rivas D, Bosinceanu M, Manolache V, et al. Uniportal fully robotic-assisted sleeve resections: surgical technique and initial experience of 30 cases[J]. *Ann Cardiothorac Surg*, 2023, 12(1): 9–22.
- [41] Manolache V, Gonzalez-Rivas D, Bosinceanu M L, et al. Uniportal robotic-assisted thoracic surgery for mediastinal tumors[J]. *Ann Cardiothorac Surg*, 2023, 12(2): 139–141.
- [42] Watanabe H, Ebana H, Suzuki J, et al. Uniportal robotic-assisted thoracic surgery for mediastinal tumor resection via the lateral intercostal approach: a surgical technique and our ingenuity[J]. *J Vis Surg*, 2024. DOI: 10.21037/jovs-23–30.
- [43] Okazaki M, Shien K, Suzawa K, et al. Robotic mediastinal tumor resections: position and port placement[J]. *J Pers Med*, 2022, 12(8): 1195.
- [44] Matsumura Y, Yamaguchi H, Watanabe K, et al. Lateral- or prone-position video-assisted thoracic surgery for dumbbell-type posterior mediastinal tumors: pros and cons[J]. *Indian J Thorac Cardiovasc Surg*, 2022, 38(4): 430–433.
- [45] NING Y, CHEN Z G, ZHANG W T, et al. Short-term outcomes of uniportal robotic-assisted thoracic surgery anatomic pulmonary resections: experience of Shanghai Pulmonary Hospital[J]. *Ann Cardiothorac Surg*, 2023, 12(2): 117–125.
- [46] Paradela M, Garcia-Perez A, Fernandez-Prado R, et al. Uniportal robotic versus thoracoscopic assisted surgery: a propensity score-matched analysis of the initial 100 cases[J]. *Ann Cardiothorac Surg*, 2023, 12(1): 23–33.
- [47] Manolache V, Motas N, Bosinceanu M L, et al. Comparison of uniportal robotic-assisted thoracic surgery pulmonary anatomic resections with multiport robotic-assisted thoracic surgery: a multicenter study of the European experience[J]. *Ann Cardiothorac Surg*, 2023, 12(2): 102–109.
- [48] Gonzalez-Rivas D, Ismail M. Subxiphoid or subcostal uniportal robotic-assisted surgery: early experimental experience[J]. *J Thorac Dis*, 2019, 11(1): 231–239.
- [49] Park S Y, Lee J H, Stein H, et al. Initial experience with and surgical outcomes of da Vinci single-port system in general thoracic surgery[J]. *J Thorac Dis*, 2022, 14(6): 1933–1940.
- [50] 中国医师协会医学机器人医师分会胸外科专业委员会筹备组. 机器人辅助纵隔肿瘤手术中国专家共识 (2019 版) [J]. *中国胸心血管外科临床杂志*, 2020, 27(2): 117–125.
- [51] Yoshino I, Hashizume M, Shimada M, et al. Video-assisted thoracoscopic extirpation of a posterior mediastinal mass using the da Vinci computer enhanced surgical system[J]. *Ann Thorac Surg*, 2002, 74(4): 1235–1237.
- [52] Suda T, Hachimaru A, Tochii D, et al. Video-assisted thoracoscopic thymectomy versus subxiphoid single-port thymectomy: initial results[J]. *Eur J Cardiothorac Surg*, 2016, 49 Suppl 1: i54–58.
- [53] WU L, LIN L, LIU M, et al. Subxiphoid uniportal thoracoscopic extended thymectomy[J]. *J Thorac Dis*, 2015, 7(9): 1658–1660.
- [54] Bertolo R, Garisto J, Gettman M, et al. Novel system for robotic single-port surgery: feasibility and state of the art in urology[J]. *Eur Urol Focus*, 2018, 4(5): 669–673.
- [55] Gosrisirikul C, Don Chang K, Raheem A A, et al. New era of robotic surgical systems[J]. *Asian J Endosc Surg*, 2018, 11(4): 291–299.
- [56] Park S Y, Stein H, Heo S Y. Preclinical, cadaveric study of the application of da Vinci single port system in thoracic surgery[J]. *J Thorac Dis*, 2019, 11(12): 5586–5591.
- [57] Lee J H, Park T H, Kim H K. Robotic thoracic surgery using the single-port robotic system: Initial experience with more than 100 cases[J]. *J Thorac Cardiovasc Surg*, 2024, 168(6): 1513–1522.
- [58] 任常, 张可欣, 孙大为. 国产机器人在妇科单孔腹腔镜手术中的应用 [J]. *中国临床新医学*, 2024, 17(6): 607–611.
- [59] Boal M, Di Giasole C G, Tesfai F, et al. Evaluation status of current and emerging minimally invasive robotic surgical platforms[J]. *Surg Endosc*, 2024, 38(2): 554–585.
- [60] LIU Y X, WANG Y L M, WANG C L, et al. Comparison of short-term outcomes of robotic-assisted radical colon cancer surgery using the Kangduo surgical robotic system and the da Vinci Si robotic System: a prospective cohort study[J]. *Int J Surg*, 2024, 110(3): 1511–1518.
- [61] ZHANG Z Y, LI Z Y, XU W F, et al. Robot-assisted radical nephroureterectomy using the KangDuo Surgical Robot-01 System versus the da Vinci System: a multicenter prospective randomized controlled trial[J]. *Int Braz J Urol*, 2024, 50(6): 727–736.
- [62] FAN S B, HAO H, CHEN S L, et al. Robot-assisted laparoscopic radical prostatectomy using the KangDuo surgical robot system vs the da Vinci Si robotic system[J]. *J Endourol*, 2023, 37(5): 568–574.
- [63] LI X S, XU W F, FAN S B, et al. Robot-assisted partial nephrectomy with the newly developed KangDuo surgical robot versus the da Vinci Si surgical system: a double-center prospective randomized controlled noninferiority trial[J]. *Eur Urol Focus*, 2023, 9(1): 133–140.
- [64] GU L Y, YIN C L, JIA T Y, et al. Robotic surgery in China[J]. *Innovation (Camb)*, 2023, 4(5): 100499.

收稿日期：2024-09-14

编辑：张笑嫣

郑重声明

本刊唯一官方投审稿邮箱：jqrwxzz@163.com。作者收到关于支付版面费或者收集个人信息等邮件时，请务必先通过官方渠道核实发件人身份。论文返修期间或者录用后，本刊编辑若需要与作者沟通稿件相关事项，会通过编辑工作邮箱与之联系。

返修稿件邮箱分别为，刘静凯：jqrwxzz_ljk@163.com；魏小艳：jqrwxzz_wxy@163.com；张笑嫣：jqrwxzz_zxy@163.com；赵敏：jqrwxzz_zm@163.com；崔明璠：jqrwxzz_cm@163.com；魏新珂：jqrwxzz_wxk@163.com。敬请广大作者与读者周知并相互转告，谨防上当受骗。如有疑问，可拨打编辑部电话（029-87286478）核实真伪。

本刊编辑部