

# 高精度达芬奇手术机器人在复杂及特殊部位肝切除中的临床应用评价

黄奕鹏, 黎程\*

暨南大学附属广东省第二人民医院肝胆胰疝外科, 广东 广州

收稿日期: 2026年2月11日; 录用日期: 2026年3月4日; 发布日期: 2026年3月12日

## 摘要

随着“精准外科”理念的深入人心和微创技术的迭代升级, 达芬奇机器人手术系统(Da Vinci Surgical System)已从早期的探索性应用逐步走向成熟, 成为肝脏外科领域处理复杂病例的重要利器。相比于传统腹腔镜技术, 达芬奇机器人凭借其裸眼3D高清视野、EndoWrist仿真手腕的灵活操作以及独特的震颤过滤技术, 有效突破了腹腔镜在深部狭窄空间操作的局限。本文系统回顾了近期国内外的多中心大样本研究、荟萃分析及专家共识, 深入剖析了达芬奇机器人(涵盖Xi及SP系统)在大范围肝切除、特殊困难部位(如右后叶、尾状叶、中央区)切除、巨大肝肿瘤处理以及恶性肿瘤(如肝细胞癌、结直肠癌肝转移)根治中的应用现状、技术优势及肿瘤学获益。研究表明, 机器人手术在减少术中出血、降低中转开腹率、提高R0切除率及改善长期生存预后方面具有显著优势。此外, 文章还从卫生经济学评价、模拟培训体系构建、手术团队协作模式及围术期加速康复等维度进行了全面探讨, 并对单孔机器人等前沿技术的发展前景进行了展望, 旨在为临床外科医生提供参考。

## 关键词

达芬奇机器人, 肝切除术, 大范围肝切除, 肝细胞癌, 单孔机器人, 微创外科, 精准医疗

## Evaluation of the Clinical Application of the High-Precision Da Vinci Surgical System in Hepatectomy for Complex and Special Liver Segments

Yipeng Huang, Cheng Li\*

Department of Hepatobiliary, Pancreatic and Hernia Surgery, Guangdong Second Provincial General Hospital, Jinan University, Guangzhou Guangdong

\*通讯作者。

文章引用: 黄奕鹏, 黎程. 高精度达芬奇手术机器人在复杂及特殊部位肝切除中的临床应用评价[J]. 临床医学进展, 2026, 16(3): 2008-2017. DOI: 10.12677/acm.2026.163989

## Abstract

With the concept of “precision surgery” deeply rooted in people’s hearts and the iterative upgrade of minimally invasive technology, the Da Vinci Surgical System has gradually matured from the early exploratory application, and has become an important weapon in the field of liver surgery to deal with complex cases. Compared with the traditional laparoscopic technology, Da Vinci robot effectively breaks through the limitations of laparoscopic operation in deep narrow space by virtue of its naked-eye 3D high-definition vision, flexible operation of EndoWrist simulated wrist and unique tremor filtering technology. This paper systematically reviews the recent multi-center and large-sample research, meta-analysis and expert consensus at home and abroad, and deeply analyzes the application status, technical advantages and oncology benefits of Da Vinci robot (covering Xi and SP systems) in large-scale liver resection, resection of special difficult parts (such as right posterior lobe, caudate lobe and central area), treatment of huge liver tumors and radical treatment of malignant tumors (such as hepatocellular carcinoma and liver metastasis of colorectal cancer). Research shows that robotic surgery has significant advantages in reducing intraoperative bleeding, reducing the rate of conversion to laparotomy, increasing the rate of R0 resection and improving the long-term survival prognosis. In addition, the article also makes a comprehensive discussion from the dimensions of health economics evaluation, simulation training system construction, operation team cooperation mode and perioperative accelerated rehabilitation, and looks forward to the development prospect of cutting-edge technologies such as single-hole robot, so as to provide reference for clinical surgeons.

## Keywords

Da Vinci Robot, Hepatectomy, Extensive Hepatectomy, Hepatocellular Carcinoma, Single-Hole Robot, Minimally Invasive Surgery, Precision Medicine

Copyright © 2026 by author(s) and Hans Publishers Inc.

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

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



Open Access

## 1. 引言

肝脏是人体最大的实质性脏器,其解剖结构极其复杂,不仅拥有门静脉与肝动脉双重血供系统,还密布着变异较多的胆道网络。长期以来,肝脏外科手术一直是腹部外科中技术难度极高、风险极大的手术,而如何在保证根治性切除病灶的同时最大程度保留剩余肝功能、减少手术创伤,始终是外科医生追求的目标[1]。自20世纪90年代初首例腹腔镜肝切除术(Laparoscopic Liver Resection, LLR)问世以来,微创技术经历了从局部切除到半肝切除,再到活体供肝切取的发展历程[2]。然而,在面对涉及第二、第三肝门、下腔静脉旁及尾状叶等复杂解剖部位的手术时,传统腹腔镜技术的局限性日益凸显:二维平面视野缺乏深度感知,显著增加了术者判断立体解剖关系的难度和误损伤风险;长直器械的操作自由度受限及支点效应限制了操作角度,难以在狭窄空间内完成精细的缝合与打结[3];此外,反向操作的非直观性也显著延长了外科医生的学习曲线[4]。

达芬奇机器人手术系统(Robotic Liver Resection, RLR)的临床应用,推动肝脏微创外科进入了“数字化”与“智能化”的新阶段[5]。该系统并非简单的器械升级,而是对手术操作模式的根本性优化。通过

提供放大 10~15 倍的高清三维视野, 显著增强了术野的立体感和清晰度, 使术者能够辨识直径 1 mm 以下的微细血管和神经[6]; 其拥有 7 个自由度且可 540° 旋转的 EndoWrist 仿真手腕, 具有超越人手关节的灵活性, 使得在肝后隧道、肝静脉根部等狭窄空间的解剖操作更加精准、便利[7]; 更为关键的是, 系统内置的先进算法可滤除人手生理性震颤, 将大幅度的操作指令转化为微米级的精准动作[8]。这些技术突破使得机器人手术在处理复杂肝切除时, 不仅具备了开腹手术的精准性与安全性, 同时保留了微创手术的低创伤优势。本文将结合最新的循证医学证据, 系统评价达芬奇机器人在复杂及特殊部位肝切除中的临床价值。

## 2. 达芬奇机器人手术系统的技术演进与优势

### 2.1. 从 Si 到 Xi: 技术迭代带来的临床优势

达芬奇手术机器人系统在过去二十年间经历了从标准版、S、Si 到 Xi 系统的多次技术迭代。目前主流应用的第四代达芬奇 Xi 系统并非简单的硬件升级, 而是针对腹部复杂外科手术痛点进行的系统性重构。相比于早期的 Si 系统, Xi 系统在肝脏外科的应用中展现出了决定性的技术优势, 主要体现在视觉成像系统、机械臂悬吊结构以及智能辅助功能三个维度[9]。

首先是视觉系统的革命性突破。Xi 系统的内窥镜设计摒弃了 Si 系统必须依赖专用摄像孔的限制, 采用了“跳跃式”设计, 即镜头可以安装在任意一个机械臂上, 且所有机械臂均兼容 8 mm 器械。这种设计结合 3D 双目成像技术, 使得术者可以根据手术进程灵活调整视野角度[10]。例如, 在右半肝切除中, 术者可以在处理第一肝门时使用中央视野, 而在转向第二肝门或处理肝后下腔静脉时, 迅速将镜头切换至侧方机械臂, 从而获得最佳的观察角度, 彻底消除了复杂解剖区域的视觉盲区。此外, 集成的 Firefly 荧光显影技术(基于吲哚菁绿 ICG)已成为机器人肝切除的“标配”导航工具。通过术中开启近红外光模式, 系统可提供两种导航策略: 一是利用肿瘤组织对 ICG 排泄障碍的特点进行“正显影”, 实时界定肿瘤边界, 探测微小卫星灶; 二是利用目标肝段门静脉染色后的“负显影”技术, 清晰显示缺血线(Demarcation Line), 从而引导术者沿解剖平面进行精准的肝段或亚肝段切除, 显著提高了 R0 切除率[11]。

其次是机械臂悬吊装置与操作性能的优化。Xi 系统采用了全新的悬吊门架(Boom)设计, 机械臂更加细长、关节布局更加紧凑, 且具备更广阔的活动范围, 支持多象限手术操作而无需移动床旁台车。这一改进极大地减少了术中机械臂相互碰撞(Collision)的发生率, 解决了 Si 系统在进行广泛肝周韧带游离时常见的器械冲突问题。同时, 系统内置的震颤过滤(Tremor Filtration)和运动缩放(Motion Scaling)功能得到了进一步算法优化。运动缩放允许术者将手部的大幅度动作(如 5 厘米)按比例(如 3:1 或 5:1)转化为机械臂末端的微小移动(如 1 厘米)。在贴近门静脉主干、肝短静脉或胆道进行高风险剥离时, 这种极其稳定的操作特性有效消除了生理性手颤带来的干扰, 使得精细解剖的安全性显著提升, 从而降低了因血管误损伤导致不可控出血的风险, 为高难度肝脏手术的微创化提供了技术保障[12]。

### 2.2. 程序化操作: Xi 系统的布孔与切除策略

技术的先进性需要标准化的操作流程来承载。回顾性研究总结出了一套适用于 Xi 系统的程序化肝切除策略, 极具推广价值。针对右半肝及扩大右半肝切除, 创新性地提出了“反 L 型”布孔策略: 即在右侧腋前线肋缘下、锁骨中线平脐、腹直肌外缘及左侧锁骨中线平脐依次布置机械臂 Trocar。这种布局充分利用了 Xi 系统机械臂活动范围大的特点, 不仅符合人体工程学, 还能有效避免机械臂与患者髌骨或肋弓的干涉[6]。

在具体的断肝环节, 提出了“三叉戟”切除模式。这一模式的核心在于机械臂功能的动态分配: 4 号臂通常持握超声刀或血管闭合器, 优先负责肝门部血管的精细解剖与离断; 随后切换至 2 号臂, 配合左

手(3号臂)进行肝实质的离断。这种模式下,三条机械臂如同三叉戟般协同工作,既能保持稳定的牵引暴露,又能实现高效的切割止血。此外,利用1~2个辅助孔引入吸引器及电凝设备,由第一助手负责保持术野清晰(吸除烟雾与积血),主刀与助手的默契配合使得手术流程如同流水线般顺畅。这种程序化操作显著缩短了手术时间,减少了术中频繁更换器械的困扰,是机器人肝切除术走向标准化的重要一步[13]。

### 3. 复杂肝切除术式的临床评价与疗效分析

#### 3.1. 大范围肝切除(Major Hepatectomy)的安全性评价

大范围肝切除(定义为切除 $\geq 3$ 个Couinaud肝段)因切除体积大、断面宽、涉及大血管处理,一直被视为衡量微创手术水平的关键标准。在传统腹腔镜下,大范围肝切除面临着出血控制难、气体栓塞风险高、中转开腹率居高不下等痛点[14]。一项纳入4822例患者的国际多中心倾向性评分匹配(PSM)研究为机器人手术的优势提供了坚实的证据。研究显示,机器人组(R-MH)的术中平均出血量仅为200.0 mL,显著低于腹腔镜组(L-MH)的300.0 mL ( $P = 0.012$ )。更具临床意义的是,R-MH组的中转开腹率降至5.1%,不足L-MH组(11.9%)的一半( $P < 0.001$ ) [15]。

这一结果的背后是机器人对出血控制能力的质的飞跃。在处理肝静脉破裂或门静脉分支撕裂等紧急情况时,机器人机械臂可以迅速、精准地完成缝合修补,而无需像腹腔镜那样依赖压迫止血或被迫中转开腹[16]。荟萃分析进一步证实,机器人手术显著降低了术后严重并发症(Clavien-Dindo  $\geq$  III级)的发生率(OR 0.64)。这意味着,尽管机器人手术的设备成本较高,但其通过减少并发症、避免中转开腹所带来的隐形收益(如减少重症监护时间、输血量及二次手术风险)是巨大的[17]。

#### 3.2. 困难部位切除: 征服“盲区”与“禁区”

肝脏的右后叶(S6/S7段)和尾状叶(S1段)因位置深在、被肝实质包围且紧邻下腔静脉,曾被视为腹腔镜手术的“盲区”。研究表明,在机器人辅助下,术者可以利用机械臂的“蛇形”灵活性,轻松绕过肝脏边缘,直达肝脏后方进行“上挑式”或“侧向”解剖。这种非直线操作能力使得术者能够清晰暴露并结扎汇入下腔静脉的肝短静脉,从而安全地游离右肝,实施解剖性的S6/S7段切除,且无需广泛游离肝周韧带,减少了副损伤[7]。对于尾状叶与中央区切除,尾状叶作为“肝脏的背侧盲区”,解剖极其复杂。机器人的多角度灵活性允许术者在狭小的第三肝门空间内进行精细剥离,精准处理左右尾状叶门静脉支及下腔静脉前方的肝短静脉[18]。有报道指出,机器人中央肝切除术(Central Hepatectomy)展示了其在保留功能性肝体积方面的独特价值。对于位于S4、S5、S8段的中央型肿瘤,传统手术往往需要切除大范围的正常肝组织(如半肝切除),而机器人技术可以在不阻断入肝血流的情况下,精准剔除中央区肿瘤,最大程度保留了肝脏储备功能,这对于合并肝硬化或需后续化疗的患者至关重要[19]。

#### 3.3. 巨大肝肿瘤( $\geq 10$ cm)的处理策略

直径超过10 cm的巨大肝肿瘤(Huge Liver Tumors)长期以来被视为微创肝切除术的相对禁忌证,其核心挑战在于显著的“占位效应(Occupying Effect)”。巨大的瘤体往往占据了绝大部分腹腔操作空间,导致气腹建立困难且有效操作间隙极度狭小。在传统腹腔镜手术中,术者常陷入“无处下刀”的窘境,且在翻转肝脏进行游离时,极易因挤压导致瘤体破裂出血,或压迫第一、第二肝门及下腔静脉,诱发严重的血流动力学波动(如回心血量骤减导致的低血压)。然而,一项纳入971例巨大肿瘤患者的国际多中心倾向性评分匹配(PSM)研究中,深刻揭示了达芬奇机器人系统在这一极限领域的独特优势,即通过机械臂的“第三只手(Third Arm)”效应实现“空间突围”。

具体而言,达芬奇系统的第3号机械臂(通常由主刀医生直接控制)可以作为一个极其稳定、灵巧且不

知疲倦的“内部拉钩”。在巨大肿瘤与周围脏器(如胃、十二指肠或横结肠)之间的狭窄间隙中,第3臂能提供持续、恒定且力度可控的向上提拉或侧向推挡,从而在肿瘤与大血管(如门静脉主干、肝下腔静脉)之间强行创造出一个稳定的“操作三角区(Triangle of Traction)”。这种暴露能力远优于腹腔镜手术中依赖助手不稳定的扶镜或被动牵拉。得益于这种稳定的内牵引和机器人 EndoWrist 手腕的多角度灵活性,术者能够更容易地实施“前入路(Anterior Approach)”切肝策略。该策略的核心在于改变了传统“先游离肝周韧带、后离断肝实质”的顺序,转而采取“先离断肝实质、最后处理韧带”的路径。这意味着术者可以在不翻转、不挤压巨大瘤体的情况下,先行精准离断肝内血管和胆管,待肿瘤血供完全阻断且与肝脏主体分离后,再从从容处理肝周韧带。这一策略最大限度地减少了术中因翻转肝脏导致的医源性肿瘤破裂(Tumor Rupture)和癌细胞经门静脉系统的挤压播散(Squeeze Effect)。研究数据证实,在这一高难度组别中,机器人手术实现了与小肿瘤切除相当的围术期安全性,且并未增加术中输血率和死亡率,充分证明了其在处理复杂空间占位病变时的技术优越性[20]。

## 4. 恶性肿瘤治疗的长期肿瘤学获益与机理探讨

### 4.1. 原发性肝细胞癌(HCC): 从技术成功到生存获益

微创手术治疗恶性肿瘤的终极目标不仅是切除病灶,更是延长患者生存期。长期以来,关于微创手术是否会因挤压肿瘤导致微转移的争议一直存在。一项多中心研究为机器人手术在 HCC 治疗中的肿瘤学价值提供了强有力的背书。该研究对比了 647 例 HCC 患者的长期随访数据,结果显示:RLR 组实现了更高的 R0 切除率(98.9% vs 93.1%),且平均手术切缘宽度达到了 10 mm,显著优于腹腔镜组的 5 mm。

更重要的是,RLR 组的 5 年无复发生存率(RFS)高达 46.8%,显著优于 LLR 组的 24.0% ( $P = 0.04$ )。这一生存获益的生物学机理可能源于机器人手术对“无接触原则(No-Touch Technique)”的完美执行。凭借机械臂的精细操作,术者可以更容易地实施“Glisson 蒂优先”的阻断策略,即先离断肿瘤供血血管,再进行肝实质离断,从而最大限度地减少了术中因挤压肿瘤导致癌细胞通过门静脉系统播散的风险[21]。此外,机器人手术的精准性也减少了对正常肝组织的缺血再灌注损伤,有利于保护患者的抗肿瘤免疫微环境。

### 4.2. 结直肠癌肝转移(CRLM): 复杂背景下的精准清扫

随着结直肠癌肝转移(CRLM)治疗模式向“以手术为核心的综合治疗”转变,绝大多数患者在行肝切除术前均经历了多周期的以奥沙利铂(Oxaliplatin)或伊立替康(Irinotecan)为基础的新辅助化疗。这种系统性治疗在缩小肿瘤的同时,也不可避免地对肝脏实质造成了病理损伤:奥沙利铂常诱发肝窦阻塞综合征(SOS),导致肝脏充血、肿胀,术中呈现“蓝肝(Blue Liver)”外观,且极易渗血;而伊立替康则常导致非酒精性脂肪性肝炎(CASH),使肝组织质地变得像豆腐一样酥脆易碎,呈现“黄肝(Steatohepatitis)”外观。在这一复杂的病理生理背景下进行肝切除,对外科技术提出了极高的要求。研究聚焦于这一特殊群体,通过对比机器人与腹腔镜手术的疗效发现,机器人组在手术时间(155.4 min vs 184.5 min)和术中出血量(205.5 mL vs 352.8 mL)上均显著优于传统腹腔镜组,且中转开腹率更低[22]。

这一优势的取得,源于机器人技术对肝脏的极致呵护与精准操作能力。CRLM 患者往往存在多个散在的转移灶,且面临术后复发需再次手术的可能,因此“保留肝实质的局部切除(Parenchyma-Sparing Hepatectomy, PSH)”成为首选术式。机器人仿真手腕的灵活性使得术者能够对分布在不同肝段(特别是 S7、S8 等困难部位)的多个转移灶进行逐个、精准的“挖掘式”切除(Wedge Resection),而无需为了暴露便利进行大范围的解剖性半肝切除,从而最大限度地保留了残肝体积(Future Liver Remnant, FLR)。此外,针对化疗后质地脆、界面不清的肝脏,机器人系统内置的震颤过滤功能发挥了关键作用。它允许术者紧贴肝静脉或格林鞘(Glissonian Sheath)进行毫厘不差的解剖,完成复杂的血管骨骼化清扫(Skeletonization)。即

便在肝脏充血水肿、视野渗血的情况下, 3D 高清视野也能帮助术者清晰辨识微细的血管结构, 结合双极电凝的精准点状止血, 有效避免了因盲目大块钳夹导致的肝实质撕裂。更重要的是, 机器人系统支持术中超声探头(TilePro 技术)的无缝集成, 术者可以在控制台内以“画中画”形式实时查看超声图像, 精准定位那些化疗后在宏观视野下消失的“隐匿病灶(Disappearing Liver Metastases)”, 确保切缘阴性(R0 切除), 从而显著降低了术后切缘复发的风险[22]。这使得机器人手术成为 CRLM 多学科综合治疗(MDT)模式中, 衔接化疗与康复的最佳外科手段。

## 5. 前沿技术: 单孔(SP)机器人的崛起与挑战

随着微创外科理念从“微创(Minimally Invasive)”向“无瘢痕(Scarless)”或“极致微创”演进, 手术器械的革新成为了推动学科发展的核心动力。传统的达芬奇 Xi 或 Si 系统虽然在精细操作上登峰造极, 但其标准化的“4 机械臂 + 1 辅助孔”布局仍需在腹壁留下 5 个切口, 这在追求美容效果和减轻腹壁创伤方面仍有局限。最新一代达芬奇 SP 系统(Single Port)的问世, 标志着机器人手术正在经历一场从“多孔”到“单孔”的物理形态革命。该系统通过一个直径仅 2.5 cm 的单孔套管, 即可同时置入 3 条多关节蛇形机械臂和 1 个全高清 3D 摄像头, 真正实现了经脐部自然腔道或单一微小切口的复杂手术操作[23]。

在临床应用层面, 尽管 SP 系统目前的主战场仍集中在泌尿外科(如前列腺癌根治)和经口头颈外科, 但在肝胆胰外科领域的探索性应用已初露锋芒。综述研究指出, SP 系统独特的双关节(肘部与腕部)设计, 使其能够在狭窄的深部空间内实现有效的三角测量(Triangulation), 从根本上克服了传统单孔腹腔镜(LESS)器械相互碰撞的“筷子效应”[24]。目前的临床证据显示, 对于胆囊切除、肝囊肿开窗引流以及解剖位置相对表浅的肝左外叶切除术, SP 系统展现出了极佳的可行性[25]。其核心优势在于极简的腹壁创伤, 患者术后的疼痛评分(VAS)显著降低, 且切口隐藏于脐孔内, 美容满意度大幅提升, 符合现代患者对生活质量的极致追求。

然而, 我们也必须客观审视 SP 系统在复杂肝切除中面临的严峻挑战。学者通过对初期临床数据的深入剖析, 指出了制约 SP 系统在肝脏外科普及的三大物理瓶颈。首先是机械臂牵引力度的不足。SP 系统的蛇形机械臂为了适应单孔进出, 设计得极为纤细且柔性较大, 这导致其末端的抓持力和刚性显著弱于 Xi 系统的刚性机械臂。在处理由于肝炎后肝硬化导致质地坚硬的肝脏, 或者需要翻转直径超过 10cm 的巨大肿瘤时, SP 机械臂往往难以提供稳定的术野暴露, 甚至可能出现器械“疲软”现象。其次是专用断肝能量器械的缺失。截至目前, SP 系统尚未配备集成的超声外科吸引刀(CUSA)或高能血管闭合系统, 这使得在肝实质离断这一关键步骤中, 术者往往不得通过增加一个辅助孔(Plus One Port)来引入传统腹腔镜器械, 这在一定程度上削弱了“单孔”的初衷。最后, 单孔固定的支点效应限制了器械在大范围术野中的展开角度, 使得其在进行诸如右半肝切除等需横跨整个上腹部的操作时, 难以形成宽阔的操作三角[26]。因此, 未来的技术突破将依赖于材料学的进步以增强机械臂刚性, 以及专用微型化断肝器械的研发。在此之前, “单孔 + 1 辅助孔”的混合模式或许是 SP 系统在肝脏外科过渡期的最佳解决方案。

## 6. 培训体系、团队协作与患者经济考虑

### 6.1. 从经验到数据: 模拟训练与技能量化评估体系的构建

机器人手术虽然消除了人手生理震颤并提供了 3D 视野, 但其缺乏触觉反馈(Haptic Feedback)且手眼分离的操作逻辑与传统开放或腹腔镜手术截然不同, 这客观上形成了一条陡峭的学习曲线。为了保障患者安全, 建立一套标准化、数据化且客观的培训与准入体系迫在眉睫。一项极具开创性的研究, 为这一问题提供了科学的解决方案。研究者利用达芬奇手术模拟器(Da Vinci Skills Simulator, DVSS)对 27 名不同资历的外科医生进行了系统测试, 并采集了涵盖器械移动距离、操作时间、动作经济性及主副手切换频

率等海量客观数据。

通过这些机器生成的客观数据与行业公认的专家主观评分(GEARS 量表, 包含深度感知、双手协调性等指标)进行相关性分析, 研究发现二者呈现高度正相关。基于此, 研究团队构建了精准的线性回归预测模型(GEARS 总分 =  $14.09 + 0.44 \times \text{DVSS 总分}$ ) [27]。这一模型的建立具有深远的临床教学意义: 它意味着教学医院可以不再单纯依赖带教专家的主观印象, 而是可以通过模拟器的客观评分来设定手术准入的“及格线”。这种量化评估机制不仅为机器人手术资质授权(Credentialing)提供了可量化的科学依据, 还能通过数据反馈帮助年轻医生精准识别操作短板, 从而显著缩短学习曲线, 降低临床试错成本。

## 6.2. 团队协作的重塑：第一助手与医护一体化的核心价值

机器人手术是典型的高技术密集型团队作业, 主刀医生脱离无菌区在控制台操作的模式, 使得床旁第一助手(First Assistant)和洗手护士的作用被空前放大。回顾 130 例消化系统肿瘤手术的经验, 深刻剖析了第一助手角色定位。在机器人手术中, 助手不再是简单的“拉钩者”, 而是手术流程的“规划者”和“执行者”。术前, 助手需根据患者体型及肿瘤位置, 设计个性化的 Trocar 布局(如采用“W”型或“反L”型布局), 以从物理上规避机械臂碰撞; 术中, 助手承担着暴露视野、吸除烟雾积血、更换器械以及在紧急出血时进行压迫止血的核心任务。主刀与助手的默契配合(如“主刀进、助手退”的动态空间管理)是保障手术流畅、缩短麻醉时间的关键[28]。

与此同时, 研究将视角延伸至围术期护理模式的变革。传统的护理模式往往与医疗过程割裂, 而“医护一体化”模式强调医生与护士共同参与术前访视、术中配合及术后查房的全过程。研究数据显示, 在肝癌术后放疗患者中实施该模式, 能显著提升患者的心理韧性, 有效降低癌因性疲乏(CRF)评分。在加速康复外科(ERAS)路径中, 医护一体化的协同效应尤为明显, 它确保了从术前预康复、术中体温保护到术后早期下床活动方案的一致性, 从而显著提升了患者的生存质量(QOL) [29]。

## 6.3. 卫生经济学的悖论与支付政策的破局

尽管达芬奇机器人手术在临床疗效和微创优势上毋庸置疑, 但高昂的费用仍是限制其在我国广泛普及的现实壁垒。基于真实世界数据的研究显示, 达芬奇手术组的次均住院总费用显著高于传统腹腔镜组及开腹组。通过成本结构分析发现, 虽然机器人手术通过减少并发症缩短了平均住院日(ALOS), 从而降低了药费和床位费, 但这些节省的费用尚不足以抵消由高昂的设备折旧、开机费及专用耗材带来的成本增加[30]。

特别是在当前按疾病诊断相关分组(DRG)支付方式改革的背景下, 单一病种的支付标准往往依据历史平均费用制定。若无特殊的政策倾斜, 开展高成本的机器人手术可能导致医院面临亏损的运营压力, 这在很大程度上抑制了新技术的临床推广。然而, 如果从社会经济学的宏观视角审视, 机器人手术带来的术后快速康复、劳动力快速重返社会以及因精准切除带来的复发率降低, 实际上降低了长期的社会间接医疗成本。因此, 卫生行政部门和医保局在制定政策时, 应考虑制定科学的“新技术除外支付”政策或设立“创新技术调节系数”。即在 DRG 分组之外, 对手术机器人等有明确临床获益的创新技术进行单独核算或给予加成支付, 以平衡技术创新与医疗控费的关系, 让优质医疗资源真正惠及广大患者。

## 7. 机器人手术的局限性、特有并发症与平衡性评价

尽管达芬奇机器人系统在复杂肝切除中展现出无可比拟的视觉与操作优势, 但作为一项新兴的医工交叉技术, 其固有的物理缺陷及衍生的特有并发症仍需引起外科医生的足够警惕。在全面评价其临床价值时, 必须引入平衡、客观的视角。

首先, 触觉反馈(Haptic Feedback)的完全缺失是机器人手术目前最大的软肋。在传统开腹或腹腔镜手术中, 术者可以通过手指或器械的阻力反馈来感知肝脏质地、肿瘤边界及血管的搏动。而达芬奇系统目

前仅能依靠术者的“视觉触觉(Visual Haptics)”——即通过观察组织的形变来间接判断张力。在处理伴有严重肝硬化、质地脆弱的肝脏时, 缺乏真实触觉极易导致机械臂牵拉过度, 造成肝包膜撕裂或静脉撕脱大出血; 在夹闭或缝合微小胆管时, 也易因用力不当导致缝线切割组织或打结断裂[31]。

其次, 机器人系统存在视野外损伤(Out-of-View Injuries)与特有热损伤的隐患。由于机器人的 3D 镜头视野相对固定且放大倍数极高, 其“管状视野”使得操作区之外的机械臂处于盲区。当多条机械臂在狭小的腹腔内同时运作时, 非主操作臂可能在术者视野外与肠管、膈肌发生盲目碰撞。更危险的是, 能量器械(如单极电剪、双极电凝)在视野外若被误触激发, 或因器械绝缘层老化产生漏电, 极易造成难以察觉的肠管隐匿性热损伤, 导致严重的术后迟发性肠穿孔[32]。

在循证医学评价方面, 机器人手术并非在所有指标上均优于腹腔镜, 多项研究报道了其“非劣效性”甚至“阴性结果”。在相对简单的肝脏局部切除或左外叶切除中, 机器人手术往往暴露出手术时间更长(主要因装机与机械臂对接耗时)和成本高昂的劣势。一项针对巨大肝肿瘤的多中心倾向性评分匹配研究表明, 虽然机器人组在操作灵活性上具有优势, 但在总体并发症发生率、术中输血率及围术期死亡率等核心指标上, 与腹腔镜组相比并无统计学差异( $P > 0.05$ )。此外, 针对左外叶切除等非复杂肝切除病例的国际多中心研究亦指出, 机器人与传统腹腔镜在术后住院时间、胆漏发生率及主要并发症发生率上表现出高度的一致性(阴性结果)。这些“非劣效”或“无显著差异”的报道提醒我们, 机器人手术的临床获益并非无限延伸, 其真正的价值在于解决传统微创技术的技术瓶颈(如大范围肝切除、困难部位重建), 而非盲目替代所有腹腔镜常规手术。因此, 严格把握手术适应证, 是实现机器人技术效能最大化的关键。

## 8. 结语

综上所述, 达芬奇机器人手术系统在肝脏外科的临床应用已完成了从“可行性验证”到“优越性确立”的历史性跨越。现有高质量循证医学证据表明, 该技术并非单纯的器械升级, 而是对手术操作逻辑的根本性重塑。它通过“三叉戟”切除模式的程序化操作、利用“第三只手”突破巨大肿瘤的空间限制、以及凭借极致的震颤过滤技术在化疗损伤肝脏中完成精细解剖, 成功解决了传统腹腔镜在深部复杂解剖(如尾状叶、右后叶)及极限病理状态下的难点。更具深远意义的是, 其对“无接触原则”的精准执行已转化为实质性的长期肿瘤学获益, 显著提升了肝恶性肿瘤患者的无复发生存率“见表 1”。

**Table 1.** Summary of clinical and prognostic outcomes comparing Da Vinci robotic and traditional laparoscopic liver resection  
**表 1.** 达芬奇机器人与传统腹腔镜在不同类型肝切除术中的临床疗效及预后对比汇总

研究人群与术式特点	样本量 (RLR/LLR)	手术时间(min)	术中出血量 (mL)	总体或主要并发症发生率	关键肿瘤学指标或特殊结果(R0 率/生存率/中转率)
大范围肝切除(多中心大样本 PSM)	841/841	RLR 普遍较长或相当(因装机耗时)	200.0 vs 300.0 ( $P = 0.012$ )	主要并发症( $\geq$ III 级): 7.7% vs 10.6% ( $P = 0.01$ )	中转开腹率显著降低: 5.1% vs 11.9% ( $P < 0.001$ )
$\geq 10$ cm 巨大肿瘤(多中心 PSM)	165/451	286.0 vs 240.0 ( $P < 0.001$ , RLR 较长)	250.0 vs 150.0 (无显著统计学优效性)	总体并发症: 25.2% vs 23.7% ( $P = 0.46$ , 无统计学差异)	结果呈非劣效性: RLR 组提供强牵引, 两者在术后死亡率和恢复上无显著差异。
原发性肝细胞癌(HCC)(多中心 PSM 预后分析)	323/324	/	/	无显著差异	肿瘤学获益显著: R0 切除率: 98.9% vs 93.1%; 5 年 RFS: 46.8% vs 24.0% ( $P = 0.04$ )

续表

结直肠癌肝转移(CRLM)(单中心回顾性对比)	25/28	155.4 vs 184.5 (P < 0.05, RLR 更短)	205.5 vs 352.8 (P < 0.05)	住院时间(天): 4.5 vs 6.3 (P < 0.05)	中转开腹例数: 1例 vs 9例; 提示RLR在化疗受损肝脏清扫中具优势。
左外叶切除(多中心简单术式对比)	160/160	145.0 vs 120.0 (RLR 略长)	50.0 vs 100.0 (RLR 出血更少)	总体并发症: 9.4% vs 14.4% (P = 0.226, 阴性结果)	术后住院时间无差异; 但RLR中转率极低(0.6% vs 5.6%, P = 0.020)

然而, 我们亦应清醒地认识到, 机器人手术的普及仍面临多维度的挑战: 任何技术的演进均具有双刃剑效应。当前机器人手术在展现巨大优势的同时, 仍存在不容忽视的固有局限性与特有并发症风险: 例如, 触觉(力觉)反馈的缺失要求主刀医生必须高度依赖视觉代偿, 这在一定程度上增加了牵拉撕裂或隐匿性热损伤的隐患; 而在有限的腹腔空间内, 多机械臂间的相互干涉(碰撞)及戳孔相关的腹壁创伤, 亦是对团队配合与穿刺布局的特有考验。此外, 单孔(SP)系统在处理复杂病例时的物理力学局限尚待材料学突破; 高昂的设备与耗材成本在 DRG 支付体系下对医院运营提出了严峻考验; 且标准化的技能量化准入体系仍需在更多中心推广。

肝脏外科正迈向“数字化”与“智能化”融合的新纪元。随着人工智能(AI)辅助的手术路径规划、增强现实(AR)术中实时导航技术的落地, 以及国产手术机器人竞相上市, 高精准的机器人手术将不再是少数顶级中心的“特权”, 而将下沉为惠及更广大肝脏疾病患者的“普惠技术”。在政策引导与技术迭代的双重驱动下, 达芬奇机器人必将重塑肝脏外科的诊疗规范, 引领学科向着更加精准、微创、高效的未来进发。

## 参考文献

- [1] 宋添力, 屠佳, 刘绪, 等. 传统外科手术及达芬奇机器人在外科肝癌手术中的研究进展[J]. 中国临床研究, 2025, 38(7): 1115-1118.
- [2] Goh, B.K.P., Han, H.S., Chen, K.H., *et al.* (2023) Defining Global Benchmarks for Laparoscopic Liver Resections: An International Multicenter Study. *Annals of Surgery*, 277, e839-e848.
- [3] 刘忠铭, 李佑, 龚建平. 达芬奇手术机器人在肝胆外科中的应用[J]. 腹腔镜外科杂志, 2015, 20(7): 556-560.
- [4] 李军, 房爱玲. 达芬奇智能手术机器人的概况及临床应用[J]. 中国医疗器械信息, 2019, 25(16): 32-33.
- [5] 陈燕凌, 蔡欣然, 陈江枝, 等. 达芬奇机器人手术系统在肝切除手术中的应用[J]. 机器人外科学杂志(中英文), 2021, 2(2): 133-142.
- [6] 张伟刚, 周迪远, 孙鼎, 等. 达芬奇机器人 Xi 系统在肝切除术中的应用[J]. 肝胆胰外科杂志, 2023, 35(4): 198-203+229.
- [7] 周啸阳, 孙敏. 达芬奇机器人在肝脏后上段切除的研究进展[J]. 世界复合医学, 2022, 8(9): 189-194.
- [8] 马志刚, 孟塬, 阿不都外里·阿不都如素力, 等. 达芬奇机器人手术系统在肝胆胰外科手术中的应用体会[J]. 新疆医学, 2020, 50(11): 1134-1138.
- [9] 黄德阳, 郭纪旭, 陆世鏊, 等. 达芬奇机器人在肝胆胰外科复杂手术中的应用[J]. 微创医学, 2025, 20(1): 6-12.
- [10] Minamimura, K., Aoki, Y., Kaneya, Y., Matsumoto, S., Arai, H., Kakinuma, D., *et al.* (2024) Current Status of Robotic Hepatobiliary and Pancreatic Surgery. *Journal of Nippon Medical School*, 91, 10-19. [https://doi.org/10.1272/jnms.jnms.2024\\_91-109](https://doi.org/10.1272/jnms.jnms.2024_91-109)
- [11] Chong, Y., Prieto, M., Gastaca, M., Choi, S., Sucandy, I., Chiow, A.K.H., *et al.* (2023) An International Multicentre Propensity Score Matched Analysis Comparing between Robotic versus Laparoscopic Left Lateral Sectionectomy. *Surgical Endoscopy*, 37, 3439-3448. <https://doi.org/10.1007/s00464-022-09790-x>
- [12] 朱沙俊, 黄龔, 郭青松, 等. 达芬奇机器人系统下肝切除 16 例分析[J]. 南通大学学报(医学版), 2020, 40(6): 555-557.

- [13] Liu, R., Abu Hilal, M., Besselink, M.G., Hackert, T., Palanivelu, C., Zhao, Y., *et al.* (2024) International Consensus Guidelines on Robotic Pancreatic Surgery in 2023. *Hepatobiliary Surgery and Nutrition*, **13**, 89-104. <https://doi.org/10.21037/hbsn-23-132>
- [14] Ruzzenente, A., Valle, B.D., Poletto, E., Syn, N.L., Kabir, T., Sugioka, A., *et al.* (2023) Sub-Classification of Laparoscopic Left Hepatectomy Based on Hierarchic Interaction of Tumor Location and Size with Perioperative Outcomes. *Journal of Hepato-Biliary-Pancreatic Sciences*, **30**, 1098-1110. <https://doi.org/10.1002/jhbp.1323>
- [15] Liu, Q., Zhang, W., Zhao, J.J., Syn, N.L., Cipriani, F., Alzoubi, M., *et al.* (2023) Propensity-Score Matched and Coarsened-Exact Matched Analysis Comparing Robotic and Laparoscopic Major Hepatectomies: An International Multicenter Study of 4822 Cases. *Annals of Surgery*, **278**, 969-975. <https://doi.org/10.1097/sla.0000000000005855>
- [16] 孙岩. 达芬奇机器人、腹腔镜与开腹右肝肿瘤切除短期疗效分析[D]: [硕士学位论文]. 青岛: 青岛大学, 2022.
- [17] 曹润五. 达芬奇机器人辅助下与腹腔镜下进行大范围肝切除术的荟萃分析[D]: [硕士学位论文]. 西宁: 青海大学, 2025.
- [18] 张斌, 徐旖旎, 任旋磊, 等. 达芬奇机器人系统在扩大肝右后叶切除术中的应用[J]. 现代实用医学, 2024, 36(9): 1159-1161.
- [19] Birgin, E. and Rahbari, N.N. (2025) Robotic Central Hepatectomy. *Annals of Surgical Oncology*, **32**, 7252-7253. <https://doi.org/10.1245/s10434-025-17872-y>
- [20] Cheung, T., Liu, R., Cipriani, F., Wang, X., Efanov, M., Fuks, D., *et al.* (2023) Robotic versus Laparoscopic Liver Resection for Huge ( $\geq 10$  cm) Liver Tumors: An International Multicenter Propensity-Score Matched Cohort Study of 799 Cases. *Hepatobiliary Surgery and Nutrition*, **12**, 205-215. <https://doi.org/10.21037/hbsn-22-283>
- [21] Di Sandro, S., Centonze, L., Ratti, F., Russolillo, N., Conci, S., Gringeri, E., *et al.* (2025) Robotic vs Laparoscopic Resection for Hepatocellular Carcinoma: Multicentric Propensity-Score Matched Analysis of Surgical and Oncologic Outcomes in 647 Patients. *Updates in Surgery*, **77**, 1451-1462. <https://doi.org/10.1007/s13304-025-02293-z>
- [22] 任昊桢, 汤宁, 王帅, 等. 机器人肝切除术与腹腔镜肝切除术治疗结直肠癌肝转移的对比研究[J]. 肝胆胰外科杂志, 2021, 33(2): 70-74.
- [23] 常浩生, 严力, 赵之明, 等. 达芬奇单孔机器人在外科手术中的应用及前景[J]. 腹腔镜外科杂志, 2022, 27(8): 628-630.
- [24] Celotto, F., Ramacciotti, N., Mangano, A., Danieli, G., Pinto, F., Lopez, P., *et al.* (2024) Da Vinci Single-Port Robotic System Current Application and Future Perspective in General Surgery: A Scoping Review. *Surgical Endoscopy*, **38**, 4814-4830. <https://doi.org/10.1007/s00464-024-11126-w>
- [25] Choi, Y.J. and Yu, Y. (2026) Current Status of Single-Port Robotic Surgery in Hepatobiliary and Pancreatic Surgery: Technical Aspects of Review. *Annals of Surgical Treatment and Research*, **110**, 19-25. <https://doi.org/10.4174/ast.2026.110.1.19>
- [26] Guadagni, S., Comandatore, A., Furbetta, N., Di Franco, G., Bechini, B., Vagelli, F., *et al.* (2024) The Current Role of Single-Site Robotic Approach in Liver Resection: A Systematic Review. *Life*, **14**, Article 894. <https://doi.org/10.3390/life14070894>
- [27] 梁渝靖, 崔皓鑫, 李阳辉, 等. 基于达芬奇手术模拟器评分的机器人技能全面评价预测模型研究[J]. 机器人外科学杂志(中英文), 2025, 6(6): 1031-1035.
- [28] 崔鸿斌, 马斌, 马臻, 等. 达芬奇机器人操作系统中第一助手协作经验分析: 基于 130 例消化系统肿瘤手术的回顾性研究[J]. 兰州大学学报(医学版), 2024, 50(11): 30-38.
- [29] 程美玲, 彭琴, 李琳, 等. 医护一体化在达芬奇机器人辅助肝癌术后放疗患者中的应用研究[J]. 机器人外科学杂志(中英文), 2024, 5(4): 704-709.
- [30] 姚红宇, 王怡. DRG 支付方式改革下医疗新技术对住院费用影响研究: 以达芬奇手术机器人为例[J]. 中国卫生经济, 2026, 45(1): 31-34.
- [31] Franz, M., Arend, J., Bollensdorf, A., Lorenz, E., Rahimli, M., Stelter, F., *et al.* (2025) The Impact of Indocyanine Green on Tumor Visualization and Procedural Adjustment in Minimally Invasive Liver Surgery. *Langenbeck's Archives of Surgery*, **410**, Article No. 143. <https://doi.org/10.1007/s00423-025-03712-w>
- [32] Wikiel, K.J., Bollinger, D., Montero, P.M., Jones, T.S., Robinson, T.N. and Jones, E.L. (2023) Stray Energy Injury during Robotic versus Laparoscopic Inguinal Hernia Repair: A Randomized Controlled Trial. *Surgical Endoscopy*, **37**, 8771-8777. <https://doi.org/10.1007/s00464-023-10331-3>