中国现代普通外科进展
Chin J Curr Adv Gen Surg
2025年11月 第28卷 第11期 Nov. 2025 Vol. 28 No. 11

解剖性肝切除：从三维虚拟规划到实时导航

丁向民 柏斗胜 蒋国庆 金圣杰 张弛 王谦 周保换 刘仁杰 王敖青

扬州大学附属苏北人民医院 肝胆中心 （江苏 扬州 225001）

【摘要】精准、微创、安全、个体化是肝脏外科的发展方向，实现此目标的关键在于基于门静脉流域的解剖性肝切除。该手术的成功高度依赖医师对复杂肝内管道及肿瘤空间位置的精准认知。传统二维影像与术中肉眼观察、触诊在提供空间精度上存在局限。因此，结合术前三维重建、虚拟规划与术中实时导航的技术体系，已成为实现高质量解剖性肝切除的必备手段。尽管成效显著，现有技术仍面临三维重建仍需人机交互、术中肝形变配准困难、吲哚菁绿穿透性不足等问题。未来，智能化三维重建、新型荧光导航材料及数字孪生等前沿技术，有望成为这些难题的解决方案。

【关键词】解剖性肝切除•三维重建•术前规划•实时导航
【中图分类号】R735.8
【文献标识码】A DOI: 10.3969/j.issn.1009-9905.2025.11.006
【文章编号】1009-9905(2025)11-0870-04

肝脏外科是朝着精准、微创、安全、个体化方向发展的，而基于门静脉流域的解剖性肝切除（anatomical hepatectomy, AH）是实现精准肝切除目标的基石[1]，其技术关键是依据解剖结构，以肝段/肝叶为单位，预先处理目标区域的入肝血管，随后沿由此产生的缺血或染色的解剖界面离断肝实质[2]，旨在实现肿瘤的根治性切除、最大化保留功能性肝组织、提高手术安全性。AH要求外科医师对患者高度个体化、结构复杂的肝内管道解剖的空间位置具备精准的认知。传统二维影像学及术中肉眼观察、触诊难以提供高精度的空间信息，随着数字医学的发展，AH的实现高度依赖术前三维手术规划与术中实时导航技术的结合[3]。本文将重点探讨术前三维重建和术中导航的整合应用及未来发展趋势。

1 术前三维重建，制定精准手术规划

重建良好三维模型通常采用薄层动态增强CT或MRI数据。这些数据能清晰捕捉动脉期、门静脉期、肝静脉期及胆道信息，为精准建模提供可靠依据。然而，若患者在检查中呼吸配合欠佳，存在肝内动静脉瘘，肿瘤压迫邻近血管等异常情形，则可能影响数据采集质量，影响重建效果[4]。

在高质量数据基础上，采用医学影像处理软件对数据进行分割与提取。具体而言，需对肝脏、肿瘤、静脉、动脉和胆管等重要结构进行处理，并对各组件进行装配，最终生成一个高度还原真实世界的个体化肝脏三维模型。该模型能够精确呈现肿瘤大小、数量及与周围重要血管结构的空间关系，且施术者可多角度交互操作，为手术的可切除性评估提供重要参考依据。此外，三维重建技术还能准确识别解剖变异，既降低了术中损伤的风险，又使施术者摆脱了对复杂解剖图谱的记忆依赖[5]。

基于三维模型，施术者可进行精准虚拟手术规划。首先，根据肿瘤累及肝段，可明确需要离断的目标肝蒂，这是实现肝段血流控制的关键步骤。然后，借助肝脏流域模拟图，可精确界定需要切除的肝实质区域，并同时保证必要的肿瘤切缘[6]。具体操作策略取决于手术入路：若采用肝门入路，需规划如何安全、高效地解剖肝门部结构，暴露目标肝蒂；若采用肝实质入路，则需规划最优的离断路径和平面，以确保沿着缺血/染色线进行精准切割，同

[基金项目] 国家自然科学基金项目（82373034）
[通信作者] 柏斗胜，E-mail: bdsno1@163.com

时保护段间静脉。在肝切除安全性评估中，剩余功能性肝体积（functional liver remnant volume，FLRV）评估也是重要一环。三维模型凭借其在精确体积测量方面的优势，能够提供FLRV的可靠数据[7]。结合肝功能及肝储备功能试验，有助于判断FLRV是否满足手术安全，降低术后肝衰竭风险。

总之，三维模型可在术前评估手术风险，包括肿瘤与血管的毗邻关系、解剖结构异常及FLRV是否接近临界值。基于这些评估结果，为患者优化手术入路、精确规划切除范围、预先设计血管重建方案等，能显著减少突发事件发生，避免决策延误，有效提升手术安全性。

2 术中实时导航，辅助手术精确实施

尽管术前有完善的手术规划，但在实际手术中，肝脏的形态和位置易受到牵拉、离断操作的影响，会产生显著的形变和移位。这使得术前规划与术中所见之间存在偏差。为了弥合这种偏差，确保断肝的精准性，术中实时导航显得不可或缺。目前，临床实践中采用多种导航方案，包括术中超声（intraoperative ultrasound, IOUS）、实时虚拟超声（real-time virtual sonography, RVS）、吲哚菁绿（indocyanine green, ICG）荧光导航和增强现实/混合现实（augmented reality/mixed reality, AR/MR）导航等，这些技术手段各具特色，同时也有一定局限性。

2.1 IOUS IOUS是肝脏手术中重要的实时导航工具。利用IOUS，可探查肝内管道、肿瘤边界，并在断肝过程中持续观察并调整手术路径，确保精准实现术前规划。此外，IOUS可引导深部病灶或肝蒂的定位穿刺或活检，显著提升手术效率。术中超声造影能定位术前影像遗漏的小病灶[8]及有效评估有无残留病灶，提供关键的术中决策信息。新一代声学造影剂利用恶性肿瘤内缺乏Kupffer细胞的原理，微小病灶在库否期表现为充盈缺损，从而得以清晰显现[9]。

然而，IOUS的准确性高度依赖操作者的经验和技能。与CT、MRI等影像技术相比，IOUS图像分辨率较低，可能会出现误判。因此，在临床应用中，需要综合考虑IOUS的优缺点，才能为患者提供最佳的治疗方案。

2.2 RVS RVS技术将超声与CT、MRI等高分辨率影像实时融合，充分发挥CT/MRI在空间上的显示优势，同时结合超声实时性，实现这两种影像的同屏显示，既能辨别宏观解剖结构又能观察局部变化，提升了治疗的精准性[10]。该技术已应用于引导肝切除、肝脏射频消融和乳腺病变的识别[11]。

RVS在引导肝切除方面有如下技术优势。（1）弥补了IOUS局限：IOUS虽可实时成像，但对深在、直径<1 cm或等回声病灶的识别能力有限，RVS可以通过图像融合提高病灶检出率[12]；（2）手术导航功能：RVS允许医师在术前标记关键解剖结构，在术中通过影像融合实时引导手术过程，提升手术安全性。已有临床报道，使用RVS导航顺利完成右三肝切除的复杂手术，术后无肝衰竭或围手术期死亡案例[13]。在肝包虫病手术中，RVS也可与PET-CT相结合，明确病灶活性区域，实现精准切除[14]。此外，RVS还可联合ICG染色，弥补术中ICG荧光随着时间推移而弥散及穿透深度受限的缺点，实现全程荧光加RVS实时导航，精确引导肝实质离断，提高了手术安全性[15]。

尽管RVS具有上述优势，但临床应用中仍有一些局限。首先，RVS受肝脏形变影响：由于术中器械牵拉、游离肝脏等因素，肝脏位置、形态会发生改变，导致出现配准偏差。可采用局部配准策略，即以门静脉分叉、主要肝静脉分支、镰状韧带等稳定解剖标志作为配准基线，从而提高目标区域的匹配精度[16]。其次，RVS操作复杂，术中需多次校正，延长手术时间。未来，RVS需简化操作，增强自动识别能力，使其更贴合临床需求。

2.3 ICG荧光导航 ICG荧光导航原理基于ICG体内代谢途径：静脉注射后，ICG迅速与血浆蛋白结合，随后被肝细胞高效摄取，最终经胆道排出体外。手术中使用波长750～810 nm近红外光照射肝脏组织，激发ICG产生约830 nm的荧光信号。此信号被成像系统捕获，并在显示器上实时显示，从而实现肝内结构的可视化导航。

该技术主要通过以下两种方法实现导航。（1）正染法[17]：在超声引导下，将ICG直接注射至拟切除肝段的Glisson鞘内。这导致拟切除的肝组织产生强荧光，而保留区相对暗淡，从而清晰界定切除边界。（2）反染法[18]：先阻断目标肝段的肝蒂，再静脉注射ICG。结果正常肝组织显影，而缺血的切除区呈现为暗区，以此分隔解剖边界。此外，ICG荧光导航也用于识别肿瘤及微小病灶：正常肝组织可有效排空ICG，而肝癌或转移灶因缺乏功能性胆管导致ICG滞留而显影。该应用能够灵敏地检出术前影像学遗漏的表浅微小癌灶，为早期干预提供依据。

该技术局限性在于荧光穿透深度[19]。ICG荧光在肝组织中的穿透深度有限，通常深仅5～10 mm。

因此，对于位置较深（>10 mm）的肿瘤，其荧光信号会被表层肝组织吸收，导致显影模糊或无法显现，限制其应用。

2.4　AR/MR　AR/MR 导航技术是通过空间计算将虚拟三维模型精准叠加至真实手术，实现解剖结构透视化，达到精准导航目的[20]。与 3D 打印技术相比，AR/MR 优势明显。首先，该技术呈现三维图像的缩放、旋转操作是无菌的，不会污染手术野；其次，该技术不受三维打印材料的限制[21]；再者，AR/MR 的透视呈现技术是三维打印技术不能达到的。2022 年《增强与混合现实技术在腹腔镜复杂性肝切除术中应用的中国专家共识》中推荐 AR/MR 用于复杂性肝切除的导航，可使解剖精度提升[22]。祝文等[23]针对右半肝肿瘤患者 FLRV 不足的情况，在 AR/MR 导航下进行缩小右半肝切除，所有患者均成功完成手术，术中血管识别率为 100%。同样，马春阳等[24]在 AR/MR 导航下进行复杂肝切除术，导航组手术时间、中位出血量、术中输血量及术后并发症率均好于对照组。在《增强与混合现实技术联合吲哚菁绿分子荧光影像导航腹腔镜肝段、亚肝段切除术中国专家共识（2023 版）》中建议术中结合 ICG 荧光成像，可实时标记肝段边界及肿瘤范围，形成“三维模型-腹腔镜影像-ICG 荧光”三重校验机制，提升定位精度[25]。当然，AR/MR 技术仍遇到肝形变适配问题，这需开发非刚性配准算法提升准确性[26]。未来还需探索与机器人手术平台的更好结合，实现自动配准[27]。

3　未来发展

三维可视化和术中导航技术的进步，为解剖性肝切除术提供了强有力的保障。目前该技术体系虽取得显著成效，但仍存诸多困难，如三维重建的准确性、肝脏形变配准难、ICG 穿透性不足等问题。随着三维重建软件版本升级、新型荧光导航材料、数字孪生等前沿技术发展，有望有效应对当前面临的困难。

3.1　三维重建软件　早期重建软件版本主要依赖医师/技师根据 CT 影像进行手动或半自动分割，过程耗时且高度依赖经验，手动分割难以精准勾勒微小或模糊的解剖结构。目前主流的三维重建软件版本，可依据 CT/MRI 影像进行快速构建，但重建模型的准确性仍需校验和确认[28]。未来的版本可采用多模态融合技术[29]，智能整合 CT、MRI 多序列乃至 PET-CT 等影像信息，生成更全面的三维模型，这对于乏血供肿瘤及复杂胆道病变的评估具有明显优势。

3.2　近红外Ⅱ区荧光成像　近红外Ⅱ区（second near-infrared, NIR-Ⅱ）荧光成像技术利用波长 1000～1700 nm 的长波长光进行激发与成像[30]。相较于近红外Ⅰ区，NIR-Ⅱ荧光显著提升了组织穿透深度（可达厘米级），并大幅降低了组织散射。图像对比度与分辨率提升，有助于更精准地识别肿瘤边界与血管分布，为术中导航提供更精准的可视化依据，从而提高手术的安全性。

3.3　数字孪生　数字孪生（digital twin, DT）是将更多相关数据进行整合，包括三维解剖结构、生物力学特性、生理参数（血流动力学）等数据，从而构建反映患者个体化特征的多维度、高仿真、可交互的数字仿真映射体[31]。在术前阶段，DT 可通过模拟不同血管阻断方案，预测残肝血流分布及功能，优化手术决策；同时，可用于虚拟手术规划，实时计算 FLRV 及脉管损伤风险。术中，DT 基于有限元分析实时解析压力、位移等数据，动态预测肝脏因牵拉或切割产生的变形，并同步更新孪生体解剖状态，实现精准导航。清华大学开发的肝脏 DT 导航系统，与手术机器人组合可实现精准肝肿瘤消融[32]。复旦大学附属中山医院应用 DT 可以缩短手术时间，提升手术的安全性和精准度[33]。术后，通过对比虚拟方案与实测结果，可预测并发症风险及患者恢复趋势[34]。将来，DT 可实现从术前规划、术中导航到术后预后评估的全周期精准化管理。

4　结语

未来，在虚实交融的三维模型与智能导航系统的助力下，解剖性肝切除术的精准化将实现质的飞跃。三维重建与精度得到更显著提升，为术前评估提供可靠依据。同时，NIR-Ⅱ荧光成像技术突破组织穿透深度的限制，为术中导航提供更精准的可视化支持。此外，DT 通过整合多维度数据，构建高仿真虚拟模型，进一步优化手术决策与执行流程。这些先进技术的深度融合应用，将极大提升肝脏手术的安全性、精准性和可及性，实现“规划即所得、所见皆真实、操作必精准”的目标。

参　考　文　献

[1] 达选博，莫建涛，黄晶晶，等. 三维数字成像手术计划系统在精准肝切除术中的应用[J]. 中国现代普通外科进展，2021，24（4）：257-261，266. DOI: 10.3969/j.issn.1009-9905.2021.04.002.

[2] 李相成，江王杰. 解剖性肝切除的沿革[J]. 外科理论与实践，2020，25（1）：20-24. DOI: 10.16139/j.1007-9610.2020.01.005.

[3] Salirrosas O, Harandi H, Vega EA, et al. Laparoscopic caudate resection: How to safely manage the Spiegel/IVC interface[J]. Ann Surg Oncol, 2024, 31(5): 2. DOI: 10.1245/s10434- 024-14994-7.

[4] 张语微，方驰华.数字智能化诊疗技术在复杂性肝癌研究现状[J].中华实验外科杂志，2024，41(10)：2162-2166. DOI: 10.3760/cma.j.cn421213-20240212-01011.

[5] 丁向民，柏斗胜，蒋国庆，等.三维重建技术在肝脏外科的应用进展[J].中国现代普通外科进展，2022，25(6)：461-464. DOI: 10.3969/j.issn.1009-9905.2022.06.011.

[6] 田广磊，侯梅华，陈伦华，等.3D虚拟手术规划技术联合腹腔镜小肝癌切除术对患者预后的影响观察[J].肝胆外科杂志，2023，31(1)：33-37. DOI: 10.3969/j.issn.1006-4761.2023.01.010.

[7] 郭智辈，唐文才，李小华，等.CT三维重建在原发性肝癌肝脏切除术前肿瘤体积评估中的应用[J].肝脏，2021，26(9)：1003-1006，1010. DOI: 10.3969/j.issn.1008-1704.2021.09.016.

[8] 方晶晶，王金波，应立平.吲哚菁绿荧光导航结合术中B超在腹腔镜下肝多发微小病灶切除中的应用[J].现代实用医学，2021，33(9)：1144-1146. DOI: 10.3969/j.issn.1671-0800.2021.09.009.

[9] 秦琼，文荣，白秀梅，等.基于示卓安超声造影Kupffer期的深度学习预测肝细胞癌微血管侵犯的研究[J].肿瘤影像学，2024，33(4)：432-441. DOI: 10.19732/j.cnki.2096-6210.2024.04.014.

[10] Takeshi T, Satoshi N, Daisuke B, et al. Enhanced recognition confidence of millimeter-sized intrahepatic targets by real-time virtual sonography[J]. J Ultrasound Med, 2023, 42(8): 1789-1797. DOI: 10.1002/jum.16199.

[11] 张倩，李志艳，陈曦，等.超声造影融合虚拟导航技术引导肝肿瘤消融治疗的疗效分析[J].解放军医学院学报，2022，43(2)：163-167. DOI: 10.3969/j.issn.2095-5227.2022.02.008.

[12] Minami Y, Kudo M. Ultrasound fusion imaging technologies for guidance in ablation therapy for liver cancer[J]. J Med Ultrason, 2020, 47(2): 257-263. DOI: 10.1007/s10396-020-01006-w.

[13] Pu CS, Wu TT, Wang Q, et al. Feasibility of novel intraoperative navigation for anatomical liver resection using real-time virtual sonography combined with indocyanine green fluorescent imaging technology[J]. Biosci Trends, 2024, 30(6): 484-490. DOI: 10.5582/bst.2023.01265.

[14] 赵之明，尹注增，潘立超，等.多模态影像融合导航在肝切除治疗复杂泡型肝包虫病中的初步应用[J].中华医学杂志，2020，100(44)：3525-3528. DOI: 10.3760/cma.j.cn112137-20200327 -00957.

[15] 蒲昌盛，吴田田，师稳再，等.实时虚拟超声术中导航联合吲哚菁绿荧光显像技术在解剖性肝段切除手术中的应用研究[J].中华肝胆外科杂志，2023，29(5)：333-338. DOI: 10.3760/cma.j.cn113884-20230227-00056.

[16] Akinori M, Junichi A, Yoshikuni K, et al. Simulation and navigation liver surgery: an update after 2,000 virtual hepatectomies[J]. Review Glob Health Med, 2020, 31(5): 298-305. DOI: 10.35772/ghm.2020.01045.

[17] 汤玉鹏，黄尧，曾建兴，等.超声引导下术前经皮门静脉穿刺吲哚菁绿正染法在腹腔镜解剖性肝S8段切除术中的应用[J].中华肝胆外科杂志，2024，30(12)：881-885. DOI: 10.3760/cma.j.cn113884-20240721-00221.

[18] 王晓颖.腹腔镜解剖性肝切除术中荧光染色意外及对策[J].中国实用外科杂志，2022，42(9)：1001-1004. DOI: 10.19538/j.cjps.issn1005-2208.2022.09.11.

[19] 陈思远.抗体偶联ICG用于肝癌诊断与治疗的初步研究[D].厦门：厦门大学，2019.

[20] 方驰华，田捷，张鹏，等.数字医学技术在肝胆胰外科的应用：20年历史回顾与未来展望[J].中华外科杂志，2021，59(10)：807-811. DOI: 10.3760/cma.j.cn112139-20210405-00159.

[21] 李映安，晋云，王峻峰.混合现实技术在肝胆胰外科中的应用[J].中国现代普通外科进展，2022，25(12)：964-966. DOI: 10.3969/j.issn.1009-9905.2022.12.009.

[22] 中华医学会外科学分会肝脏外科学组，中华医学会数字医学分会，中国医师协会肝癌专业委员会，等.增强与混合现实技术在腹腔镜复杂性肝切除术中应用的中国专家共识[J].中华外科杂志，2022，60(6)：517-523. DOI: 10.3760/cma.j.cn112139-20220328-00127.

[23] 祝文，曾小军，项楠，等.增强现实与混合现实导航技术在三维腹腔镜缩小右半肝切除术中的应用[J].中华外科杂志，2022，60(3)：249-256. DOI: 10.3760/cma.j.cn112139-20210918-00447.

[24] 马春阳，周益龙，李怀亮，等.混合现实术中导航技术联合三维可视化技术在复杂性肝癌切除术中的应用[J].中华医学杂志，2019，99(4)：279-283. DOI: 10.3760/cma.j.issn.0376-2491.2019.04.008.

[25] 中华医学会外科学分会肝脏外科学组，中华医学会数字医学分会，中国研究型医院学会数字智能化外科专业委员会，等.增强与混合现实技术联合吲哚菁绿分子荧光影像导航腹腔镜肝段、亚肝段切除术中国专家共识(2023)[J].中华外科杂志，2023，61(11)：929-936. DOI: 10.3760/cma.j.cn112139-20230720-00019.

[26] Uchida Y, Taura K, Nakao M, et al. A clinical pilot study of resection process map: a novel virtual hepatectomy software to visualize the resection process, case series[J]. Int J Surg, 2019, 71(11): 36-40. DOI: 10.1016/j. ijsu.2019.09.002.

[27] 郑涵，张军伟，张婷，等.增强现实导航在腹腔镜和机器人辅助肝脏手术中的应用现状[J].中华外科杂志，2023，61(5)：430-435. DOI: 10.3760/cma.j.cn112139-20221012-00435.

[28] 郭新宇，胡伟，潘泓，等.基于AI三维重建技术的全髋关节置换术在成人髋关节发育不良中的疗效观察[J].河北医学，2024，30(6)：1014-1020. DOI: 10.3969/j.issn.1006-6233.2024.06.026.

[29] 李政良，徐亚明，李凤菊，等.多模态影像融合技术在肝内胆管癌诊断与治疗中的应用价值[J].影像研究与医学应用，2020，4(11)：27-28.

[30] 刘子豪，党慧萍，闫立峰，等.近红外二区荧光靶向探针在肝癌体内显像的应用研究[J].中华实验外科杂志，2024，41(7)：1479-1482. DOI: 10.3760/cma.j.cn421213-20231204-00392.

[31] Zhang K, Zhou HY, Baptista-Hon DT, et al. Concepts and applications of digital twins in healthcare and medicine[J]. Patterns (N Y), 2024, 5(8): 101028.

[32] 李羽壮.全国首个精准肝脏外科决策多模态智能体发布[EB/OL]. 2024-11-22. http://https://medical.sciencenet.cn/sbhtml-news/2024/11/370247.shtm.

[33] 复旦大学附属中山医院.数字孪生智慧医院白皮书[EB/OL]. 2023-07. https://www2. deloitte. com/content/dam/Deloitte/cn/Documents/life-sciences-health-care/deloitte-cn-consulting-smart-hosiptal-zh-230811.pdf.

[34] 王桢絮，张波，顾莺，等.数字孪生技术在医疗领域的应用进展[J].中国医疗器械信息，2023，29(9)：77-81. DOI: 10.3969/j.issn.1006-6586.2023.09.021.

（收稿日期：2025-06-23）