

卓越医见:手术机器人和机器人手术

DOI:10.13406/j.cnki.cyx.004046

多臂手术机器人肺切除布孔策略的优化与演进

陶绍霖,康珀铭,齐东东,张祖旺,刘 训,孙天宇,罗 艺,陈明丹,李洋云,徐 礼,杨显云,谭群友
(重庆医科大学附属大学城医院胸外科,重庆 401331)

【摘要】随着多臂手术机器人系统在全球胸外科的广泛应用,机器人辅助胸外科手术(robot-assisted thoracic surgery,RATS)已成为肺切除术的重要微创术式,尤其在肺叶和肺段切除中表现出优势。然而,其切口布局仍缺乏统一标准,直接影响术中操作自由度、视野显露及并发症风险。本文基于多中心循证证据与生物力学建模,系统解析RATS肺切除入路策略的优化路径。RATS根据操作模式分为全孔机器人手术(robotic portal-based lobectomy,RPL)和机器人辅助手术(robotic access-incision assisted lobectomy,RAL),并通过四字码命名法实现标准化描述。布孔设计需遵循腔内防撞、腔外防撞、全景视野、胸腔内杠杆定律及人机协作空间分区等生物力学原则,以平衡器械运动优化与团队协作效率。从早期混合式电视辅助胸腔镜手术(video-assisted thoracoscopic surgery,VATS)探查过渡模式,到4臂5孔、4臂4孔、3臂4孔等典型布局,布孔策略逐步向更微创、个体化

作者简介:陶绍霖,Email:taoshaolin2004@163.com,

研究方向:肺癌的基础和临床微创诊疗研究。

通信作者:谭群友,Email:tanqy001@163.com。

基金项目:国家自然科学基金面上资助项目(编号:82470497);

重庆市科卫联合医学科研项目面上资助项目(编号:2025MSXM142)。

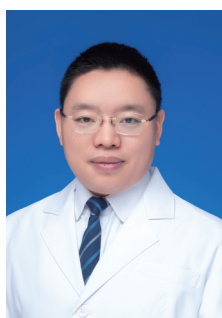
优先出版:https://link.cnki.net/urlid/50.1046.R.20260224.1636.006

(2026-02-25)

方向发展。当前国际主流倾向于全机器人4臂操作,而国内多采用助手辅助的3臂4孔模式,兼顾操作效率与经济性。单孔及减孔技术代表前沿探索,但仍面临器械干扰与应急处理局限。未来布孔策略将融合三维规划、人工智能与实时导航,实现从“经验依赖”向“标准化智能术式”的转型。

【关键词】机器人辅助胸外科手术;肺切除术;多臂手术机器人;布孔策略

【中图分类号】R61 **【文献标志码】**A



第一作者:陶绍霖,副主任医师,重庆市中青年医学高端人才,中国抗癌协会纵隔肿瘤专委会委员,中国抗癌协会胸腺肿瘤整合康复专委会委员,中国康复医学会外科快速康复专业委员会委员,重庆市医师协会胸外科医师分会副会长,重庆市中西医结合学会胸外科专业委员会委员,重庆市中西医结合学会肺结节精准治疗专业委员会委员,重庆市医学会胸心外科分会微创学组成员,重庆市抗癌协会肺癌专委会委员等,常年从事肺癌的基础和临床微创诊疗研究,围绕肺结节的早期精准微创外科治疗,主持开展系列新技术新业务研究,创新开展经前侧入路机器人辅助肺叶、肺段、支气管袖式切除治疗肺部疾病。以第一或共同第一作者发表论著26篇,其中SCI文章7篇,作为主要执笔人撰写中国专家共识2篇,主持省部级基金项目3项,参编书籍2部等。



通信作者:谭群友,临床医学博士,教授/主任医师,博士研究生导师,博士后合作导师,重庆市学术技术带头人,重庆英才·创新领军人才。国家级胸外科医疗质控中心专家、中国医师协会胸外科医师分会常委兼肺外科专家委员会副主任委员、中华医学会胸心外科分会胸腔镜学组副组长、重庆市医师协会胸外科医师分会荣誉会长等。主要研究领域包括肺癌的精准胸腔镜/机器人微创诊疗、人工智能技术在外科手术中应用等,在全国首批开展腔镜肺叶切除治疗肺癌,个人完成胸外科机器人手术全国领先。主持国家卫生行业科研专项分项目、国家自然科学基金、国家卫生健康委科研项目、重庆市基础与前沿研究重点项目、重庆市技术创新与应用发展项目等多项科研课题。以第一作者或通信作者在国内外高水平学术期刊发表论文150余篇,累计SCI文章超过55篇,IF 230多分,其中单篇最高IF=38.1。牵头撰写发布全国胸外科临床专家共识3个,参与撰写胸外科领域国际或全国专家共识23个。作为主要完成人获得军队医疗成果一等奖、重庆市科技进步一等奖中华医学科技二等奖等成果奖8项。

Optimization and evolution of port placement strategies for multi-arm robotic lung resection

Tao Shaolin, Kang Poming, Qi Dongdong, Zhang Zuwang, Liu Xun, Sun Tianyu, Luo Yi, Chen Mingdan,
Li Yangyun, Xu Li, Yang Xianyun, Tan Qunyou

(Department of Thoracic Surgery, University-Town Hospital of Chongqing Medical University)

[Abstract] With the global application of multi-arm robotic surgical systems in thoracic surgery, robot-assisted thoracic surgery (RATS) has become a major minimally invasive technique for lung resection, demonstrating particular advantages in lobectomy and segmentectomy. However, a standard for port placement is still lacking, which directly affects intraoperative instrument maneuverability, surgical field exposure, and complication risks. Based on multi-center evidence and biomechanical modeling, this article systematically analyzes the optimization pathway for port placement strategies in RATS lung resection. RATS procedures are classified according to their operational mode into robotic portal-based lobectomy and robotic access-incision assisted lobectomy, with standardized description facilitated by a four-character nomenclature. Port placement design must adhere to biomechanical principles, including intra- and extracorporeal instrument collision avoidance, panoramic visualization, the lever law within the thoracic cavity, and spatial zoning for human-robot collaboration, to balance instrument motion optimization and team efficiency. Evolving from early hybrid video-assisted thoracoscopic surgery exploratory transitional modes to typical layouts such as 4-arm 5-port, 4-arm 4-port, and 3-arm 4-port configurations, port placement strategies have progressively developed toward minimally invasive and patient-tailored approaches. Currently, the international mainstream tends to favor fully robotic 4-arm operations. While in China, the assistant-assisted 3-arm 4-port mode is more commonly adopted to balance operational efficiency and cost-effectiveness. Single-port and reduced-port techniques represent cutting-edge exploration but still face limitations such as instrument interference and constraints in emergency handling. Future port placement strategies will integrate three-dimensional planning, artificial intelligence, and real-time navigation for transition from an experience-dependent paradigm to standardized intelligent surgical techniques.

[Key words] robot-assisted thoracic surgery; lung resection; multi-arm surgical robot; port placement strategy

随着外科多臂手术机器人系统在全球的广泛应用,机器人辅助胸外科手术(robot-assisted thoracic surgery, RATS)因其精准操作与微创优势,已成为肺切除术的重要术式^[1-3]。尤其在肺叶/段切除领域,RATS降低了手术创伤,加速了康复^[4-6]。然而,多孔手术机器人系统的切口布局作为手术成功的关键技术环节,仍面临标准化不足的挑战^[7]。布孔需兼顾病灶位置、手术目标、术者经验及团队协作模式,其合理性直接影响术中视野暴露、器械操作自由度及并发症风险^[8]。目前布孔策略有三孔法、四孔法与五孔法的全孔机器人模式,亦有五孔到单孔的需要助手辅助的机器人辅助模式,尚无统一标准^[9-10]。因此,如何优化布孔设计以平衡机器人系统效能与团队协作效率,如何实现技术优势向临床普适性的转化,是RATS从“术者经验依赖”迈向“标准化智能术式”的必由之路。本文通过系统性的文献检索,对截至2025年7月关于机器人肺切除布孔策略的文献进行梳理。检索数据库包括PubMed、Web of Science、Embase、中国知网(China National Knowledge Infrastructure, CNKI)和万方数据。采用的关键词组合为:(“robotic” OR “robot-assisted”) AND (“thoracic surgery” OR “lung resection” OR “lobectomy”) AND (“port placement” OR “trocar placement” OR “docking”)。

文献纳入标准:临床研究、综述、荟萃分析及重要技术案例报告;排除标准:非中英文文献、仅包含动物实验或工程学研究的文章。通过对标题、摘要的筛选和全文阅读,最终纳入了本综述所引用的38篇核心文献。同时整合多中心循证证据与生物力学建模进展,系统解析机器人肺切除术入路策略的优化路径,为已经开展或即将开展机器人肺手术单位提供技术创新的理论基础。

1 多孔手术机器人系统术式界定与标准化命名

RATS是指一种完全依赖于内镜头与显示器系统呈现的视野下术者操控计算机介导的机械臂装置完成关键手术步骤的一种微创技术^[11]。RATS根据手术操作过程中是否完全依赖机械臂系统完成,抑或仍需助手通过辅助切口提供协助,分为全孔机器人手术(robotic port-based lobectomy, RPL)与机器人辅助手术(robotic access-incision lobectomy, RAL)^[12-15]。RPL通过注入胸腔内二氧化碳气体建立人工气胸,促进肺组织充分萎陷并推动膈肌下移,拓展胸腔内操作空间,同时增宽纵隔间隙以明晰解剖层面,让术野显露更优化,从而减少术中渗血、缩短手术时间,但仍然存在若术中遇

到较大血管意外出血时,持续的负压吸引可能导致胸腔压力骤降,诱发肺组织被动膨胀干扰操作,此外,术中能量器械使用时产生的烟雾量较大,偶尔需要暂停操作待烟雾消散后方可继续。RAL是指术中需要助手通过辅助切口,协助牵拉组织、显露视野、清除创面渗血渗液及胸腔内烟雾,同时便于吻合器使用及标本取出,学习曲线短,术中不需要频繁更换器械,更具灵活性,尤其适用于处理复杂病例,且减少机器人1个臂和器械的使用,相应减少部分费用,但是往往需要增加1个辅助切口,增加对胸壁组织的撑开、牵拉或切除。当前RATS的实施存在多样性,不管RPL,还是RAL,术中实际投入使用的机械臂数量仍有不同^[15]。因此,美国胸外科协会(American Association for Thoracic Surgery, AATS)基于规范和交流提出四字符命名方法。①首字符“R”:表示机器人(robotic)平台;②次字符:分别有“P”和“A”。“P”代表全孔机器人操作(portal),所有关键步骤由主刀通过控制台独立完成,无需助手介入;“A”代表辅助操作(assisted),部分步骤需床旁助手配合完成。③第三字符:标明肺切除类型,常见的有肺叶切除(lobectomy, L)、肺段切除(segmentectomy, S)、楔形切除(wedge, W)、全肺切除(pneumonectomy, P)和袖状肺叶切除(sleeve lobectomy, SL)。④第四位(数字):代表所使用的机械臂总数。例如:右肺下叶背段切除术,根据是否需要助手及使用机械臂的数量,标准命名可有RAS-3和RPS-4。

2 多孔手术机器人系统肺切除布孔的基本原则和生物力学基础

多孔手术机器人肺切除术的布孔策略本质是多自由度机械臂在有限胸腔容积内的运动优化问题,其核心目标在于建立空间排斥域与动态视觉锥体的协同平衡。这要求术者将胸腔视为具有生物力学特性的刚性-弹性复合腔隙,通过孔位的几何排布实现运动最优化,具体基本原则和要求如下。①腔内防撞:通过建立器械臂-镜头臂-助手器械的非共面运动轨迹,规避三维空间内的运动干涉。策略包括:三角矢量分离,即两操作臂孔间距 ≥ 8 cm构成基底,镜头孔居中形成顶点,构建稳定的操作金字塔^[16];120°黄金夹角(Si定律)^[17]:利用胸壁外凸弧度,使操作臂呈对向位(而非顺向位),将碰撞概率降至机械臂运动学极限;轴向正交约束:遵循“机械臂中轴线-镜头戳卡-靶器官”三点一线,确保器械推力矢量垂直作用于靶区平面。②腔外防撞:需规避机器人机械臂“大臂-小臂”关节的体外碰撞,策略包括:体外运动包络面控制,即通过调整机械臂底座方位,使体外关节活动域错开30°以上相位角;戳卡倾斜角补偿,即将戳卡轴向与胸壁法线呈15°~20°夹角,利用肋间隙弹性分散体外力矩。③全景视野:镜头孔位设计需满足胸腔穹顶效应的视觉需求。策略包括:动态视野锥体定理,即镜头孔应位于可覆盖

靶区及潜在出血风险域(如肺门、纵隔)的视野球面重心,其有效半径需 ≥ 20 cm;四象限覆盖法则:可通过调节30°镜头偏转角,实现上和下肺野、前和后纵隔的无盲区扫描,尤其保障下肺韧带与胸顶区的同步显影;景深-放大率耦合效应:靶区距离镜头10~15 cm时,可获得最大视野深度与10倍以上放大率的平衡点。④胸腔内杠杆定律:根据杠杆定律公式 $[A=k \times (L/D) \times d]$,胸壁弹性系数(k)、器械全长(L)和戳卡与靶区的距离(D)直接影响器械的末端位移精度(d)与体外臂振幅(A),当 D 增至15~20 cm时,体外臂振幅 A 减少40%,降低碰撞风险。故用于精细解剖,如血管、支气管裸化时,需要更高的末端位移精度,理想的戳卡位点应满足近靶区操作孔($D=10\sim 12$ cm),用于大范围活动、牵拉或缝合时,理想的戳卡位点应满足远靶区操作孔($D=18\sim 20$ cm)。⑤人机协作的空间分区:助手辅助孔需遵循前象限优先定律,助手器械与机器人臂呈60°~90°交角,形成操作-辅助双通道系统,减少助手器械和机械臂的相互干涉。同时,需要全兼顾肺门血管区域,术中若出现大出血等紧急事件,能确保器械快速抵达靶点。总之,既需要机械臂、器械及助手互不干扰,又需要镜头和器械覆盖整个胸腔^[18]。

3 多孔手术机器人系统肺切除布孔的起源和早期探索

自20世纪中叶以来,信息技术的迅猛发展推动了外科微创手术领域的持续进步。1997年,手术机器人首次被应用于胆囊切除术并获得成功,此后逐渐扩展至普通外科、妇科、泌尿外科及胸外科等多种手术领域^[3]。2002年,意大利Melfi FMA等^[19]首次报道了机器人辅助肺叶切除术,当时使用第一代达芬奇机器人手术系统(3臂系统),将镜头设计于腋中线第7肋间隙,并使用0°三维镜头,1个机械臂孔取于腋后线第6肋或第7肋间隙,并于腋前线第4肋间取3 cm长切口作为辅助操作孔,同时亦作为另一机械臂孔,置入机械臂器械,在机器人器械操作不适配时,作为常规内镜器械的进出通道,机器人床旁机械臂系统从背侧进入。5例患者均顺利完成肺手术,其中2例鳞癌行左肺下叶和右肺下叶患者中转小切口完成,无围手术期死亡,术中未发生与机械臂操作相关的技术事故,机械臂在所有操作(上、下、进、出等)中在理想手术区域内运动自如,所有患者对手术耐受良好,术后恢复顺利,所需镇痛药物较少。他们认为在严格选择的病例中并由经验丰富的胸外科医生操作时,利用机器人操控系统进行肺手术在技术上是可行的。同时,这一布孔策略亦是首次为机器人肺切除手术量身定制,极具开创性,其辅助操作孔的设计巧妙地融入了传统胸腔镜手术(video-assisted thoracoscopic surgery, VATS)技术,本质上是一种“混合式”或“半机器人”理念,弥补了早期机器人系统的功能局限性。

2006 年 Park BJ 等^[20]报道了 34 例机器人辅助肺叶切除术。该组病例成功完成 30 例, 4 例因术中情况中转开胸, 所有患者均实现 R₀ 切除, 无围手术期死亡。他们采用的布孔方案包括 2 个机械臂孔、1 个镜头孔以及 1 个长约 4 cm、未使用肋骨撑开器的辅助操作孔。他们首先借助传统 VATS 进行胸腔探查, 明确肿瘤位置、获取必要病理诊断、评估可切除性及机器人手术适用性, 并在 VATS 直视下初步规划并建立机器人戳卡孔位。镜头孔通常设于腋后线第 7 或第 8 肋间; 2 个机械臂孔分别位于肩胛下角后方与膈肌上方; 辅助操作孔的位置则根据目标肺叶灵活调整: 上叶切除时位于腋中线肺上静脉投影对应肋间, 中下叶切除时则降低 1 个肋间。完成孔位布局后, 撤除 VATS, 将床旁机械臂系统自患者背侧以与体轴约呈 45° 角推入并固定。随后连接机器人镜头与器械, 最终由机器人完成对肺门结构的精细解剖与分离。该策略的一大亮点在于其“VATS 探查先行, 机器人操作后继”的过渡模式。这一设计并非机械套用机器人技术, 而是充分利用 VATS 视野优势进行诊断与规划, 从而确保机器人操作适应证把握准确、孔位布局合理。后续随着手术机器人系统的迭代, 机械臂的增加, 器械的进步以及镜头的发展, 新的布孔策略层出不穷。

4 多孔手术机器人系统肺切除布孔的发展和成熟

随着第 2 代手术机器人系统 S(2006 年)、第 3 代系统 Si(2009 年) 及第 4 代系统 Xi(2015 年) 等的迭代更新, 其在机械臂灵活性、术中视觉系统和整体人机交互体验方面实现了一系列重要突破^[21]。机械臂设计更轻便灵活、运动范围扩大, 第 4 条臂也实现了更自然的系统集成; 视觉系统提升至高清乃至三维水平, 并通过与控制系统的整合大幅简化了操作流程; 同时, 医生控制台、脚踏布局及双控制台教学协作功能的引入, 进一步优化了手术体验与团队配合效率。这一阶段的技术发展为机器人手术在胸外科领域的快速推广奠定了坚实基础^[22]。随之而来, 肺切除手术的机器人端口布局策略也逐步脱离传统 VATS 模式, 呈现出更多样化、个性化及适应机器人设备特性的布孔理念与技术特点。

4.1 机器人辅助肺切除 4 臂 5 孔技术

在机器人肺切除技术的早期探索阶段, 普遍采用包含 1 个 3 cm 辅助切口及 4 个机械臂的操作配置。其中, 意大利 Veronesi 教授团队的系列工作为该技术的标准化与推广作出了重要贡献。该团队于 2010 年报道了 54 例早期肺癌患者的机器人肺叶切除术[robot-assisted lobectomy (4-arm technique), RAL-4], 所有病例均实现了 R0 切除和系统性淋巴结清扫, 其术后并发症发生率及淋巴结清扫数量与开胸手术相当, 且患者术后住院时间缩短, 体现出良好的围术期安全性和微创优势^[23]。在孔位设计方面, Veronesi 团队采用

的 4 臂 5 孔配置包括: 1 个位于腋中线第 7 肋间的镜孔(左侧手术时为避免心脏遮挡稍向后移 2 cm), 3 个机械臂孔分别位于腋前线第 6 肋间、肩胛线第 8 肋间及脊柱旁 2 厘米第 7 肋间, 另于锁骨中线外侧第 4 肋间设置约 3 cm 的辅助操作孔, 用于术中吸引、牵拉和置入缝合器等操作。机器人床旁系统自患者头侧进入, 患者取标准侧卧位折刀位, 行双腔气管插管单肺通气。2012 年, Pardolesi A 等^[24]进一步将 4 臂 5 孔技术(RAS-4)应用于解剖性肺段切除术, 成功完成 17 例手术, 无中转开胸、无重大术中并发症及围手术期死亡, 验证了该技术在肺段切除术中的安全性与可行性。该团队对端口布局进行了调整: 镜孔置于腋中线第 7 或 8 肋间, 左肺手术时镜孔更偏外侧; 器械臂孔分别设于腋后线第 8 肋间和腋前线第 7 肋间, 第四臂位于听诊三角区, 从而提升了后方肺段手术的操作便利性。该技术方法四臂协同增强了术者独立操控与牵拉暴露的能力, 降低了对助手的依赖, 同时布孔更为系统、重复性更高, 有助于缩短学习曲线, 目前仍有较多中心沿用该技术方法^[6]。然而, 4 臂 5 孔技术也存在一定局限性: 切口数量较多, 可能增加切口相关疼痛及肋间神经损伤的风险; 设备成本及维护费用较高; 术中需频繁调整机械臂位置, 对团队配合与流程优化要求较高。

4.2 机器人肺切除全孔道 4 臂 5 孔技术

在 4 臂 5 孔技术逐步成熟的基础上, 研究者开始充分运用四臂系统的特性, 进一步发展出全孔道机器人 4 臂 5 孔技术。2011 年, Cerfolio RJ 等^[25]系统报道了采用达芬奇 Si 系统施行肺叶切除术的全孔道 4 臂 5 孔方法, 所有手术均实现 R0 切除并完成系统性淋巴结清扫。该团队首次完整描述了此技术的操作流程, 对 RATS 的推广与标准化起到了重要推动作用。该技术中, 患者取标准侧卧位, 腰部折刀位以扩大肋间隙, 机器人床旁系统自患者头侧进入。其戳卡布局如下: 镜头孔位于腋中线第 7 肋间进入胸腔; 1 号机械臂孔位于锁骨中线第 7 肋间, 2 号机械臂孔位于腋后线第 7 肋间, 3 号机械臂孔位于肩胛下角后方第 7 肋间; 辅助操作孔则位于第 9 肋间锁骨中线与腋前线的中点位置。所有孔位依胸廓自然弧度呈弧形分布, 各孔间距保持至少 8 cm, 以确保机械臂在体内及体外移动时互不干扰。

该方法的核心优势在于实现了真正意义上的“主刀中心化”操作: 主刀医生通过控制台独立操控 3 个器械臂及 1 个镜头臂, 将对助手的依赖降至最低, 手术节奏、视野调节和器械操作完全由主刀 1 人掌控, 提高了手术的标准化与可预测性。四臂协同操作构建了良好的内外三角解剖关系, 有效避免器械干涉, 极大方便了组织牵引与对抗牵引, 使解剖层次更为清晰, 尤其在隆突下、主肺动脉窗等深部区域的淋巴结清扫中表现突出。此外, 该布局配合人工气胸可提供更佳操作空间, 有利于精细分离, 且切口更小、助手参与需求少, 至今仍被许多大型中心应用于复杂 RATS 手术, 如支气管袖式

切除、血管成形及双袖切除等^[21]。然而,该技术也存在一定局限:术中无法直接伸手入胸进行肺组织触诊;助手参与度低,可能影响团队协作培养;器械更换略显频繁;术中可能出现动脉血二氧化碳分压(partial pressure of arterial carbon dioxide, PaCO₂)升高;标本取出时仍须适当扩大辅助切口。

4.3 机器人肺切除全孔道4臂4孔技术

为进一步降低手术创伤并减少切口数量,研究者提出了4臂4孔技术,尝试在保留全孔机器人操作的前提下进一步微创化^[13]。韩国有关报道了12例采用4臂4孔机器人全孔道施行肺叶切除的病例。其孔位布局如下:镜孔位于第8肋间腋中线,3个机械臂孔分别位于第7肋间腋后线、第6肋间肩胛下线和第6肋间腋前线^[26]。该研究采用双套管技术:将1个8 mm套管置于1个12 mm辅助孔道内,术中维持二氧化碳(carbon dioxide, CO₂)人工气胸;机器人器械经8 mm戳卡操作,需取出淋巴结或填入纱布时则移去8 mm内套管,直接使用12 mm外套管通道。操作中使用5 mm胸腔抓钳、8 mm弯形双极剥离器及有孔双极抓钳,所有解剖、牵拉和血管分离等步骤均由主刀在控制台完成,助手仅承担极少辅助角色(如取标本或填塞纱布)。手术结束时,需将腋前线处的孔口延长至约4 cm以便取出标本。该组病例中,发生3例危及生命的术中事件(2例大出血,1例支气管撕裂),其中1例中转开胸。他们认为该技术不仅手术时间更长,且在术后早期结局及长期生存方面均未显示出优于传统VATS的明确优势。鉴于其安全性存疑,不建议将全孔道机器人4臂4孔肺叶切除术作为常规独立术式推广应用。总体来看,4臂4孔技术代表了机器人肺切除向更少切口发展的探索尝试,其在简化孔位布局的同时,也因操作空间受限、器械干扰风险增加及术中应急处理能力下降等问题,限制了其安全性与推广价值,临床应用局限,至今仅极少数单位开展。该结果也从侧面说明,单纯减少端口数量并非微创追求的终极目标,如何在操作便利性、安全性和创伤最小化之间取得平衡,仍是机器人肺切除孔位设计演进中的重要考量。

4.4 机器人辅助肺切除3臂4孔技术

在机器人肺切除手术不断推广和术者经验日益丰富的背景下,为提升手术流畅度、降低器械更换频率并简化流程,3臂4孔技术(即3个机器臂加1个助手辅助操作孔)逐渐发展并得到应用。该术式在维持机器人操作精准优势的同时,依托1名经验丰富的手术助手配合,协助完成器械更换、牵拉暴露、吸引及使用传统吻合器等关键任务,降低了手术成本,简化了操作流程,提高了手术效率。罗清泉教授团队^[16]报道了237例机器人辅助肺叶切除术[robot-assisted lobectomy (3-arm technique), RAL-3],他们均采用3臂4孔技术完成。其具体孔位布局为:镜孔位于腋后线第8肋间,两机械臂孔分别设于腋中线第7肋间及肩胛下线第9肋间,三孔间距保持在8~10 cm,辅助操作孔位于腋前线与腋中线之间第4肋

间(肺中叶手术选第3肋间)。所有血管及支气管离断步骤均由助手经辅助孔使用传统直线切割吻合器完成。该研究显示,与传统VATS手术相比,RAL-3技术在术中引流量、术后拔管时间及住院时间方面均优于VATS,且淋巴结清扫数目更多,而手术时间与中转开胸率则与VATS相当。研究者认为RAL-3是一种创伤更小、恢复更快、安全有效的肺叶切除技术。有研究则提出了“8-8-5-7”的3臂4孔布孔策略,即镜孔位于腋后线第8肋间,两器械臂孔分别置于腋前线第5肋间和肩胛线第8肋间,辅助孔设于腋中线第7肋间,床旁机械臂系统自患者头侧进入,助手位于患者腹侧^[27]。该布局将镜孔后置以获得更佳全景视野,器械臂孔则遵循三角操作原则排布,优化了器械运动效率与协调性。辅助孔长度为3 cm,便于助手进行吸引、牵拉及使用传统吻合器处理血管与支气管结构。该设计不仅提升了手术安全性及效率,更因避免使用昂贵的机器人专用吻合器,具备的卫生经济学优势,有助于机器人技术在更广泛医疗单位中的推广。其较低的中转开胸率也验证了该技术的可靠性。同年,有研究报道了67例机器人辅助支气管袖式肺叶切除术,亦采用3臂4孔技术,镜孔位于腋后线第7肋间,两机械臂孔分别设于腋前线第4肋间和肩胛下角下方第7肋间,并于腋后线第6肋间取3 cm辅助孔。所有手术均顺利完成,无中转开胸或围术期死亡,证实该技术在高难度支气管重建手术中同样安全可行^[28]。此后,有研究提出一种新型3臂4孔布局策略,即镜孔位于腋后线第6肋间,机械臂孔分别设于腋前线第3肋间和腋后线第8/9肋间,辅助孔位于锁骨中线第4肋间,机械臂系统自头肩侧进入^[29]。他们报道中转开胸率仅0.5%(1/180),无围术期死亡及严重并发症。他们指出镜孔置于第6肋间可获得与传统VATS相近的视野,有效避免主动脉弓或脊柱遮挡,更利于隆突下淋巴结的显露,有助于缩短学习曲线;辅助孔位于锁骨中线第4肋间,与VATS操作习惯一致,便于助手牵拉、使用吻合器及术中应急中转;各孔沿胸廓上下轴向排列,能最大限度利用胸腔上下径空间,减少器械臂与助手间的干扰。但该技术亦存在一定局限,如器械臂与肋骨形成一定角度,可能加重肋间神经及肌肉压榨损伤;此外,对于胸顶区病变或粘连严重者,可能存在视野与器械到达受限的问题。

综上,3臂4孔技术作为机器人肺切除走向成熟化、实用化的重要发展阶段,通过优化孔位布局与助手分工,在保证手术安全性和精准度的同时,提高了操作效率与经济性,为不同难度肺切除手术提供了可靠技术支持。

5 多臂手术机器人系统肺切除布孔的新尝试

5.1 机器人辅助肺切除3臂2孔技术

在机器人肺切除技术不断向微创化发展的趋势下,学者

们开始探索进一步减少切口数量的可行性。2021 年,有研究报道了一种新型经前侧入路的单操作孔机器人肺切除技术(RAL-3),共纳入 21 例患者,均采用 3 臂 2 孔布局,即腋前线第 4 肋间外侧作一长约 4 cm 切口,作为主操作孔,并兼作镜孔、左侧机械臂通道及助手操作孔;另于腋中线第 7 肋间作一约 0.8 cm 切口,作为右侧机械臂孔^[30]。机器人床旁系统自患者背侧头肩部进入。所有手术均顺利完成,无中转开胸及围手术期死亡。然而,该技术也存在明显局限性。其主要问题在于机械臂、镜头与助手器械之间缺乏合理的空间分布,视野与器械呈平行走向,彼此间易发生干扰,尤其在器械活动范围较大时更为突出。此外,助手在使用切割缝合器时需反复移出主操作孔中的机械臂,流程烦琐且影响手术连贯性。更值得注意的是,该布局下术区操作通道较为单一,若发生术中突发出血等紧急情况,缺乏足够的空间和路径供助手迅速介入处理,存在一定安全隐患。

目前,类似 3 臂 2 孔的机器人肺切除研究仍处于初步探索阶段,相关公开发表的文献较为有限。该技术代表了追求手术微创性的一种激进尝试,但其实用性与安全性尚需更多中心、更大样本量的研究予以验证。在当前技术条件下,其更适合作为高度选择性病例中的专家级术式,而非常规推广方案。

5.2 机器人辅助肺切除 3 臂单孔技术

在机器人肺切除手术不断向微创化推进的进程中,单孔技术代表了当前发展的前沿方向。2021 年,有研究报道了采用第 4 代达芬奇 Xi 手术系统完成单孔机器人右肺上叶切除的病例。该例患者取标准侧卧位,行双腔气管插管单肺通气,于腋中线第 4 肋间作一长约 4 cm 的单一切口,将机器人镜头孔、2 个机械臂孔及助手操作通道全部整合于此切口内^[31]。术中将镜头臂置于切口最上端,2 个机械臂依次安置于镜头左后方和右后下方,切口最下端预留为助手操作空间。机器人床旁系统自患者头侧略向后旋转推入,使机器人床旁系统中心柱与肋间隙走向平行,以此优化器械进入角度。手术顺利完成,无围手术期并发症。研究者认为,单孔机器人手术有望进一步减轻术后疼痛并加速患者康复,但其操作难度较高,对外科医生及整个团队均有极高要求。主刀医生需同时具备娴熟的 RATS 经验和丰富的 VATS 基础,且团队成员间需默契配合,器械护士也需熟悉单孔环境下器械的传递与更换流程。尽管通过精细的布局设计可在一定程度上缓解器械干扰,但所有操作器械与镜头均经同一狭小切口进入,彼此间的碰撞风险仍是一项主要技术挑战。此外,该技术对病例选择要求严格,更适用于体型适中、无严重胸膜粘连、肺门结构清晰的早期周围型肺癌患者;而对于肥胖、胸廓宽大、既往有胸腔感染史或需行全肺切除、支气管袖式成形等复杂手术的患者,单孔操作可能增加手术难度与风险^[32]。

总体而言,该案例是一项重要的技术展示,证明了即使基于当前多臂设计的机器人系统,经精心规划和操作也可完成单孔肺叶切除^[33-34]。然而,要真正实现单孔机器人手术的广泛应用,仍需依赖专为单孔操作设计的系统平台(如 da Vinci SP 系统^[35]、国产单孔蛇形臂机器人^[36]),其集成式内臂架构和灵活器械设计有望从根本上解决多器械冲突问题,提供更优的手术体验与操作安全性^[37]。目前,此类技术仍处于探索阶段,其临床适用性和疗效优势仍需更多高质量研究加以验证。

6 多臂手术机器人系统肺切除布孔的共同原则与发展动向

机器人肺叶切除术的孔位布局尚未形成统一的“金标准”,但近年来已呈现出明显的共同趋势和技术演进路径。2019 年美国 1 项针对 62 名外科医师的调研显示,90%(56/62)的术者倾向于使用 4 臂操作,其中 79%(44/56)结合人工气胸完成全机器人手术(RPL-4);仅 10%(6/62)选择 3 臂操作,且其中半数仍辅以人工气胸^[17]。尽管北美及欧洲专家倾向于全机器人 4 臂 5 孔法,但其仍面临对接时间与总手术时间较长、标本取出仍需扩大切口、助手参与度低等局限^[38]。

然而,在亚洲地区,特别是中国地区,随着 RATS 技术在国内的推广与术者经验的积累,为提高手术流畅度并控制成本,多数中心更广泛采用助手辅助下的 3 臂 4 孔法。该模式凭借助手的主动配合,减少了器械更换频率与机械臂间干扰,尤其适用于需频繁使用切割闭合器的复杂程序,从而在保证手术安全的前提下提升效率、降低费用。

在具体布局策略方面,尽管存在机构与术者间的差异,仍可识别出以下共同原则与发展动向:①低位与多肋间布孔成为共识:多数医师将器械臂与镜孔置于第 7、8 甚至第 9 肋间,以获得更佳肺门暴露并减少器械碰撞。其中镜孔置于第 7 或 8 肋间较为一致,后侧器械孔常较其他孔位降低 1~2 个肋间,为腔内吻合器操作留出空间。②四孔法结构成为全球主流:三机械臂加一辅助孔的模式因可有效平衡操作自由度与助手参与需求,减少器械更换次数,提升手术流畅性。③肺叶特异性与入路创新不断涌现:包括下叶切除选择第 9 肋间进镜以改善后纵隔暴露,中叶切除时将辅助孔前移至第 3 肋间;谭群友团队提出的“前侧入路”通过镜孔后移(第 6 肋间)与高位臂孔(第 3 肋间)设计,实现了与传统 VATS 视野的一致性,有助于缩短学习曲线。④三维规划与智能化设计初露头角:基于计算机断层扫描/核磁共振成像(computed tomography/magnetic resonance imaging,CT/MRI)三维重建的术前个体化孔位规划开始应用于复杂肺段切除,人工智能辅助布孔系统也在探索中,旨在进一步优化器械路径与三角操作布局。

7 多臂手术机器人系统肺切除布孔的争议与未来方向

目前,机器人肺切除的布孔策略呈现多样化,尚未形成统一的“金标准”。其核心争议在于如何在操作自由度、团队协作效率、经济成本与患者长期结局之间取得最佳平衡。国际实践中,全机器人4臂5孔法因操作自主性强、稳定性高而获广泛认可,但其对团队配合要求严苛,医疗成本也增加,限制了其推广。相比之下,国内广泛采用的机器人辅助3臂4孔模式,在维持操作精准度的同时,充分发挥助手在牵拉、吸引及使用吻合器等方面的作用,展现出良好的卫生经济学效益与临床适用性。该模式并非技术妥协,而是基于现实医疗条件的优化创新,实现了技术效能与成本控制的有机结合。在微创化进程中,单孔与减孔技术体现了对手术创伤最小化的追求。然而需明确,“切口最少”不等于“创伤最小”。过度减少孔数可能导致器械干扰加剧、操作空间受限及应急能力下降,从而增加手术风险甚至中转开胸概率。因此,布孔策略的优化必须在保障手术安全的前提下审慎推进。

展望未来,布孔设计将逐步从依赖术者经验转向数据驱动与智能决策。重点方向包括:①开展多中心大样本研究,系统评估不同布孔方式与患者结局(如慢性疼痛、生活质量、肺功能恢复)的关联,为术式选择提供高级别证据;②基于术前CT三维重建构建患者胸腔的数字化孪生模型,通过虚拟手术预演评估器械碰撞与操作三角合理性,实现“一人一策”的精准布孔;③融合人工智能与增强现实技术,开发布孔决策辅助系统,学习专家经验并提供个案推荐方案,术中通过实时影像导航确保规划精准执行。

尽管四臂系统在操作灵活性上具有理论优势,但其潜在的肋间神经损伤风险及相较于三臂系统的围术期获益,仍需前瞻性研究进一步验证。此外,“全机器人”无辅助孔模式虽适用于常规肺叶切除,但在支气管袖式成形、血管重建等复杂手术中,经验丰富的助手在暴露与应急处理中仍不可或缺。

综上所述,机器人肺切除布孔策略已从初期探索发展为融合解剖特点、团队协作与成本效益的个体化体系。在“三角分布、低位布局、肺叶适配”等原则指导下,已形成多种安全有效的布孔方案。随着临床证据的积累与工程技术的融合,孔位规划将进一步向精准化、标准化与智能化发展,持续提升其临床适用性与整体疗效。

利益冲突 所有作者声明不存在利益冲突

作者贡献声明 陶绍霖:文章构思,框架设计,文章撰写及返修;康珀铭、齐东东、张祖旺、刘训、孙天宇:文献检索、分析和解读;罗艺、陈明丹、李洋云、徐礼、杨显云:分段式文章内容归纳和整理;谭群友:研究总体指导与设计,对论文的知识性内容进行审阅

参 考 文 献

- [1] Kneuertz PJ, Villamizar N, Altorki NK, et al. Minimally invasive resection of non-small cell lung cancer after chemoimmunotherapy: a multicenter study in academic hospitals[J]. *J Thorac Cardiovasc Surg*, 2025;S0022-S5223(25)00637-3.
- [2] Gallina FT, Tajè R, Forcella D, et al. Short term outcomes of robotic surgery after neoadjuvant treatment for locally advanced NSCLC: a comparison with the open approach[J]. *Front Oncol*, 2025, 15:1579943.
- [3] Leitao MM Jr, Kreaden US, Laudone V, et al. The RECOURSE study: long-term oncologic outcomes associated with robotically assisted minimally invasive procedures for endometrial, cervical, colorectal, lung, or prostate cancer: a systematic review and meta-analysis[J]. *Ann Surg*, 2023, 277(3):387-396.
- [4] Velez-Cubian FO, Ng EP, Fontaine JP, et al. Robotic-assisted videothoroscopic surgery of the lung[J]. *Cancer Control*, 2015, 22(3):314-325.
- [5] Cerfolio RJ, Ghanim AF, Dylewski M, et al. The long-term survival of robotic lobectomy for non-small cell lung cancer: a multi-institutional study[J]. *J Thorac Cardiovasc Surg*, 2018, 155(2):778-786.
- [6] Wei B, Cerfolio RJ. Robotic lobectomy and segmentectomy: technical details and results[J]. *Surg Clin North Am*, 2017, 97(4):771-782.
- [7] Wei B, Eldaif SM, Cerfolio RJ. Robotic lung resection for non-small cell lung cancer[J]. *Surg Oncol Clin N Am*, 2016, 25(3):515-531.
- [8] Ma JL, Li XY, Zhao SF, et al. Robot-assisted thoracic surgery versus video-assisted thoracic surgery for lung lobectomy or segmentectomy in patients with non-small cell lung cancer: a meta-analysis[J]. *BMC Cancer*, 2021, 21(1):498.
- [9] Mattioni G, Palleschi A, Mendogni P, et al. Approaches and outcomes of robotic-assisted thoracic surgery (RATS) for lung cancer: a narrative review[J]. *J Robot Surg*, 2023, 17(3):797-809.
- [10] 罗清泉,王述民,李鹤成,等. 机器人辅助肺癌手术中国临床专家共识[J]. *中国胸心血管外科临床杂志*, 2020, 27(10):1119-1126. Luo QQ, Wang SM, Li HC, et al. Chinese expert consensus on robot-assisted pulmonary resections[J]. *Chin J Clin Thorac Cardiovasc Surg*, 2020, 27(10):1119-1126.
- [11] Cerfolio R, Louie BE, Farivar AS, et al. Consensus statement on definitions and nomenclature for robotic thoracic surgery[J]. *J Thorac Cardiovasc Surg*, 2017, 154(3):1065-1069.
- [12] Lazar JF, Spier LN, Hartman AR, et al. Standardizing robotic lobectomy: feasibility and safety in 128 consecutive lobectomies within a single healthcare system[J]. *Innovations*, 2017, 12(2):77-81.
- [13] Funai K, Kawase A, Takanashi Y, et al. Improved complete portal 4-port robotic lobectomy for lung cancer: Hamamatsu Method KAI[J]. *J Thorac Dis*, 2023, 15(3):1482-1485.
- [14] 陈玉龙,陈辉,徐峰,等. 全孔道人工气胸下四臂机器人肺

- 段切除术的临床应用[J]. 中国肺癌杂志, 2022, 25(11):797-802.
- Chen YL, Chen H, Xu F, et al. Port-only 4-arms robotic segmentectomy under artificial pneumothorax[J]. Chin J Lung Cancer, 2022, 25(11): 797-802.
- [15] 赵鑫,郝磊,朱丽静,等. 超声造影评价肺腺癌与肺鳞癌血流灌注特征的价值研究[J/OL]. 中华医学超声杂志(电子版), 2023, 20(11):1181-1185.
- Zhao X, Hao L, Zhu LJ, et al. Value of contrast-enhanced ultrasonography in evaluating blood perfusion characteristics of pulmonary adenocarcinoma and squamous cell carcinoma[J/OL]. Chin J Med Ultrasound (Electron Ed), 2023, 20(11):1181-1185.
- [16] Li JT, Liu PY, Huang J, et al. Perioperative outcomes of radical lobectomies using robotic-assisted thoracoscopic technique vs. video-assisted thoracoscopic technique: retrospective study of 1 075 consecutive p-stage I non-small cell lung cancer cases[J]. J Thorac Dis, 2019, 11(3):882-891.
- [17] Oh DS, Tisol WB, Cesnik L, et al. Port strategies for robot-assisted lobectomy by high-volume thoracic surgeons: a nationwide survey[J]. Innovations, 2019, 14(6):545-552.
- [18] Parini S, Massera F, Papalia E, et al. Port placement strategies for robotic pulmonary lobectomy: a narrative review[J]. J Clin Med, 2022, 11(9):2612.
- [19] Melfi FMA, Menconi GF, Mariani AM, et al. Early experience with robotic technology for thoracoscopic surgery[J]. Eur J Cardiothorac Surg, 2002, 21(5):864-868.
- [20] Park BJ, Flores RM, Rusch VW. Robotic assistance for video-assisted thoracic surgical lobectomy: technique and initial results[J]. J Thorac Cardiovasc Surg, 2006, 131(1):54-59.
- [21] Kent MS, Hartwig MG, 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.
- [22] Berzenji L, Yogeswaran K, Van Schil P, et al. Use of robotics in surgical treatment of non-small cell lung cancer[J]. Curr Treat Options Oncol, 2020, 21(10):80.
- [23] Veronesi G, Galetta D, Maisonneuve P, et al. Four-arm robotic lobectomy for the treatment of early-stage lung cancer[J]. J Thorac Cardiovasc Surg, 2010, 140(1):19-25.
- [24] Pardolesi A, Park B, Petrella F, et al. Robotic anatomic segmentectomy of the lung: technical aspects and initial results[J]. Ann Thorac Surg, 2012, 94(3):929-934.
- [25] Cerfolio RJ, Bryant AS, Skylizard L, et al. Initial consecutive experience of completely portal robotic pulmonary resection with 4 arms[J]. J Thorac Cardiovasc Surg, 2011, 142(4):740-746.
- [26] Yong P, Won S, Sik N, et al. Feasibility of four-arm robotic lobectomy as solo surgery in patients with clinical stage I lung cancer[J]. J Thorac Dis, 2017, 9(6):1607-1614.
- [27] Xu SG, Liu B, Meng H, et al. Technical points of the operative procedure for robotic-assisted lung resection and lymph node dissection[J]. Ann Transl Med, 2015, 3(7):97.
- [28] Jiao WJ, Zhao YD, Qiu T, et al. Robotic bronchial sleeve lobectomy for central lung tumors: technique and outcome[J]. Ann Thorac Surg, 2019, 108(1):211-218.
- [29] 李子杰,王尉,胡正飞. 机器人辅助复杂肾部分切除术实用手术技术与展望[J/OL]. 中华腔镜泌尿外科杂志(电子版), 2026, 20(1):22-33.
- Li ZJ, Wang W, Hu ZF. Practical surgical techniques and future perspectives of robot-assisted complex partial nephrectomy[J/OL]. Chin J Endourol (Electron Ed), 2026, 20(1):22-33.
- [30] 康珀铭,李青元,方春抒,等. 单操作孔机器人辅助肺切除术的可行性及安全性分析[J]. 中国胸心血管外科临床杂志, 2022, 29(4):430-435.
- Kang PM, Li QY, Fang CS, et al. Clinical analysis of the feasibility and safety of single utility port robot-assisted lung resection[J]. Chin J Clin Thorac Cardiovasc Surg, 2022, 29(4):430-435.
- [31] Yang YH, Song LW, 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.
- [32] Chen J, Chu JH, Gao YF, et al. Single-center retrospective study on the clinical application of multi-arm robotic-assisted uniportal video-assisted thoracic surgery[J]. J Rob Surg, 2025, 19(1):117.
- [33] Chen J, Yang YY, Gao YF, et al. Comparison of short-term outcomes between multi-arm uniportal and multiport robotic-assisted thoracoscopic surgery based on propensity score matching[J]. World J Surg Oncol, 2025, 23(1):224.
- [34] Vincenzi P, Lo Faso F, Eugeni E, et al. Uniportal robotic-assisted thoracoscopic surgery for early-stage lung cancer with the Da Vinci Xi: initial experience of two cases[J]. Int J Med Robot, 2023, 19(1):e2477.
- [35] 陶绍霖,陈大理,康珀铭,等. 单孔机器人辅助肺叶切除的动物实验[J]. 重庆医科大学学报, 2025, 50(2):250-253.
- Tao SL, Chen DL, Kang PM, et al. Animal experiment of single-port robot-assisted lobectomy[J]. J Chongqing Med Univ, 2025, 50(2):250-253.
- [36] Liang HR, Wang W, Zhang M, et al. Safety and feasibility of novel single-port robotic-assisted lobectomy/segmentectomy for lung cancer[J]. Ann Thorac Surg, 2025:S0003-S4975(25)00420-5.
- [37] Gonzalez-Rivas D, Bosinceanu M, Manolache V, et al. Uniportal fully robotic-assisted major pulmonary resections[J]. Ann Cardiothorac Surg, 2023, 12(1):52-61.
- [38] Merritt RE. Robotic segmentectomy[J]. Thorac Surg Clin, 2023, 33(1):43-49.

(收稿:2025-08-28;修回:2025-12-01;录用:2025-12-17)

(责任编辑:李青颖)

本文引用格式:

陶绍霖,康珀铭,齐东东,等. 多臂手术机器人肺切除布孔策略的优化与演进[J]. 重庆医科大学学报, 2026, 51(3):297-304.