

第一章 泌尿男生殖系统解剖与超微结构：从经典解剖到数字化手术解剖

第一章 泌尿男生殖系统解剖与超微结构：从经典解剖到数字化手术解剖

本章导言

在微创外科、机器人手术及精准诊疗技术飞速发展的当下，解剖学已完成从传统大体器官“平面图”到数字化、三维化“实时导航系统”的跨越式进化。本章打破传统解剖学“罗列结构、背诵名词”的枯燥范式，以临床手术决策为核心导向，深度整合血管解剖变异、功能神经精准分布及多模态影像学特征，构建“术前可规划、术中可识别、术后可评估”的立体解剖知识体系。其核心目标是帮助外科医生将解剖知识直接转化为手术操作能力，为实现肿瘤根治、功能保留与并发症控制的精准外科目标奠定解剖学基础。

1.1 泌尿男生殖系统的经典解剖框架

精准外科手术的前提，是建立统一、精准的解剖“空间坐标系”。经典解剖框架是构建这一坐标系的基础，需重点掌握核心器官的正常结构与临床常见变异，以及筋膜、间隙所界定的关键解剖平面。

1.1.1 核心器官构成与临床变异

泌尿男生殖系统的核心器官呈串联式或协同式功能分布，各器官的解剖特征直接决定手术入路选择、操作要点及风险防控重点，其中临床变异是导致手术并发症的重要诱因，需重点关注。

- **肾脏 (Kidney)**：肾脏位于脊柱两侧的腹膜后间隙，左右各一，呈蚕豆形。其解剖学习的核心在于**肾门 (Hilus)**的结构排布——肾门是肾动脉、肾静脉、肾盂、神经及淋巴管进出肾脏的门户，正常解剖排布为“肾静脉在前、肾动脉居中、肾盂在后”，这一排布规律是术中定位肾门结构的重要依据。从临床手术视角，肾脏最需警惕的是血管变异：约25%~30%的人群存在**多支肾动脉**（即除主肾动脉外，存在1支或多支起源于腹主动脉的副肾动脉）或**肾动脉早分支**（主肾动脉在到达肾门前即分出肾段动脉）。此类变异在供肾获取手术中可能导致供肾血供损伤，在肾

部分切除术中则易因遗漏变异血管而引发术中大出血，是肾脏手术前必须通过影像学检查明确的关键内容。此外，肾脏的肾段划分（如上段、上前段、下前段、下段、后段）也具有重要临床意义，肾段动脉的独立供血特征为肾部分切除术的“精准段切”提供了解剖基础。

- **输尿管 (Ureter):** 输尿管是连接肾脏与膀胱的肌性管道，全长约25~30cm，直径约2~3mm，全程走行于腹膜后间隙，按解剖部位可分为腹段、盆段和壁内段。其核心解剖特征是存在三个生理性狭窄，分别位于肾盂与输尿管连接处、输尿管跨越髂血管分叉处、输尿管壁内段，这三个狭窄部位是尿路结石易滞留的关键区域，也是术中疏通尿路时需重点保护的部位。从临床手术安全角度，输尿管盆段的走行需格外关注：在跨越髂血管分叉后，输尿管沿盆腔侧壁下行，男性靠近输精管壶腹外侧，女性位于子宫动脉下方（“桥下流水”关系），此区域在盆腔肿瘤根治术、剖宫产等手术中极易因解剖层次不清而受损，一旦损伤可导致尿漏、输尿管狭窄等严重并发症，是盆腔手术的“高危解剖区”。
- **前列腺 (Prostate):** 前列腺位于膀胱颈下方，包绕尿道起始部，是男性特有的器官，其解剖学习的核心是McNeal分区（即解剖性分区）。该分区将前列腺分为外周带（PZ）、移行带（TZ）、中央带（CZ）和尿道周围带（PZ），各分区的临床意义截然不同：**外周带**位于前列腺背侧及外侧，占前列腺体积的70%左右，是前列腺癌的高发区域（约70%~80%的前列腺癌起源于此），因此前列腺穿刺活检时需重点覆盖外周带；**移行带**位于尿道周围，占前列腺体积的5%~10%，是良性前列腺增生（BPH）的主要发生部位，增生的移行带可压迫尿道导致排尿困难，也是经尿道前列腺电切术（TURP）的主要切除目标区域；中央带位于移行带与外周带之间，较少发生病变；尿道周围带则围绕尿道，病变少见。此外，前列腺的毗邻结构（前方为耻骨联合，后方为直肠，上方为膀胱颈）也决定了手术入路的选择，如经直肠前列腺穿刺、经尿道前列腺手术、耻骨后前列腺根治术等均基于其毗邻解剖特征设计。
- **其他核心器官:** 膀胱位于盆腔前部，空虚时呈三棱锥体形，充盈时可上升至下腹部，其壁由黏膜、黏膜下层、肌层（逼尿肌）和浆膜层构成，膀胱三角区（两侧输尿管口与尿道内口连线围成）是膀胱肿瘤、炎症的好发部位，术中需重点检查；睾丸、附睾及输精管构成男性生殖系统的核心传导通路，睾丸位于阴囊内，其血供来自睾丸动脉，神经支配与精索相伴行，精索内的输精管是精子运输的关键管道，在精索静脉曲张手术、输精管结扎术或复通术中，需精准识别并保护相关结构。

1.1.2 筋膜、间隙与解剖平面

泌尿男生殖系统周围的筋膜与间隙是外科手术的“天然解剖界面”，精准识别这些结构可实现手术的“层次化分离”，减少对周围组织的损伤，同时也是肿瘤根治性切除的重要边界。

- **Gerota 筋膜（肾筋膜）：** 是包裹肾脏、肾上腺及肾周脂肪囊的致密结缔组织筋膜，分为前层和后层，两层在肾脏外侧融合，内侧分别附着于脊柱和腹主动脉、下腔静脉周围。Gerota筋膜是肾脏手术的“天然边界”，在肾癌根治术或肾部分切除术中，沿Gerota筋膜外分离可避免损伤腹膜及腹腔内器官，同时也能完整切除肾周脂肪囊（肾癌根治的必要组成部分）；而在肾外伤手术中，Gerota筋膜的完整性可阻止血肿扩散，其破裂与否也是判断手术干预必要性的重要依据。
- **Denonvilliers 筋膜：** 是位于前列腺、精囊与直肠之间的纤维结缔组织筋膜，起源于直肠膀胱陷凹的腹膜反折处，向下延伸至尿生殖膈。该筋膜是前列腺与直肠之间的“屏障结构”，在根治性前列腺切除术中具有关键意义：准确识别并沿Denonvilliers筋膜与前列腺包膜之间的平面分离，可避免损伤直肠黏膜（减少术后直肠瘘的风险），同时也能完整切除精囊及前列腺周围的潜在肿瘤组织；若分离层次过深（突破Denonvilliers筋膜），则可能损伤直肠壁，过浅则可能残留肿瘤组织，因此该筋膜的识别是前列腺根治术的核心操作要点之一。
- **Retzius 间隙（耻骨后间隙）：** 是位于耻骨联合后方、膀胱前方的潜在间隙，其边界为：前方为耻骨联合及腹直肌下段，后方为膀胱前壁及前列腺包膜，两侧为闭孔内肌筋膜。该间隙是机器人辅助前列腺切除术、膀胱肿瘤根治术、压力性尿失禁吊带手术等盆腔手术的“核心入路门户”——通过切开腹直肌前鞘，进入Retzius间隙后，可游离膀胱前壁及前列腺前侧，暴露手术视野。间隙内的主要结构为脂肪组织及丰富的静脉丛（耻骨后静脉丛），术中需注意止血，避免因静脉丛损伤导致大出血。此外，Retzius间隙的解剖层次清晰度与患者体型（如肥胖患者脂肪过多）、既往手术史（如盆腔手术导致的粘连）密切相关，直接影响手术难度。
- **其他重要间隙：** 除上述核心间隙外，输尿管周围间隙（输尿管与周围组织之间的疏松结缔组织间隙）是输尿管手术的关键分离平面，沿此间隙分离可避免损伤输尿管血供；肾周间隙（Gerota筋膜与肾实质之间的间隙）内充满脂肪组织，是肾脏缓冲保护的重要结构，术中沿肾周间隙分离可减少肾实质的损伤。

1.2 手术应用解剖：控血、保功能与防损伤

手术应用解剖是连接经典解剖与临床操作的桥梁，其核心目标是解决手术中的三大关键问题：控制出血、保护器官功能、预防周围组织损伤。这部分知识是外科医生的“手术生存指南”，需重点掌握血管与神经的精准解剖及术中处理技巧。

1.2.1 血管解剖与出血控制

泌尿男生殖系统血供丰富，且血管变异较多，术中出血是最常见的紧急情况，因此精准掌握血管解剖特征、提前规划止血策略是手术成功的关键。

- **肾血管系统：** 肾脏的血供主要来自肾动脉（起源于腹主动脉，平第1~2腰椎高度发出），肾静脉则汇入下腔静脉（左肾静脉较长，需跨越腹主动脉前方，易受压迫

导致“胡桃夹综合征”)。从手术视角, 肾血管解剖的核心关注点包括: ①**副肾动脉**: 约25%的人群存在副肾动脉, 多起源于腹主动脉或肾动脉主干, 常见于肾脏上极或下极, 其供血区域虽小, 但在肾部分切除术中若未提前识别并阻断, 可能导致术中大出血或术后肾残端出血; ②**肾段动脉**: 肾动脉在肾门内分为前支和后支, 进一步分为5个肾段动脉, 各段动脉独立供血, 无吻合支, 因此在肾部分切除术中, 可通过精准阻断肿瘤所在肾段的动脉, 减少术中出血, 同时最大程度保护其余肾段的功能; ③**肾静脉属支**: 肾静脉的属支(如肾上腺静脉、精索内静脉)在肾门周围分布复杂, 术中游离肾静脉时需避免损伤, 尤其是左肾静脉的精索内静脉属支, 损伤后可能导致精索静脉曲张。此外, 在肾癌根治术中, 需遵循“先结扎肾动脉、后结扎肾静脉”的原则, 避免因先结扎静脉导致肾动脉血反流, 引发大出血。

- **盆腔静脉丛 (Santorini 丛)**: 是位于前列腺、精囊及膀胱周围的静脉网络, 由双侧髂内静脉的属支吻合而成, 具有血管壁薄、分支繁多、位置表浅的特点, 是盆腔手术中最易发生大出血的区域之一。该静脉丛与前列腺包膜紧密相邻, 在根治性前列腺切除术、膀胱肿瘤根治术等手术中, 分离前列腺周围组织时极易损伤此静脉丛, 导致汹涌出血。随着机器人手术技术的发展, 10-15倍的放大视野可清晰显示静脉丛的分支结构, 使“直视下精确缝扎”成为可能——术中可通过电凝止血、可吸收线缝扎等方式逐步处理静脉丛分支, 避免盲目电凝导致的血管撕裂。此外, 术前评估患者的凝血功能、术中控制血压(避免高血压导致静脉丛充血)也是预防该区域出血的重要措施。
- **输尿管血管系统**: 输尿管的血供呈节段性, 腹段输尿管血供主要来自肾动脉、腹主动脉分支, 盆段输尿管血供主要来自髂内动脉分支。这种节段性血供特征要求术中游离输尿管时避免过度牵拉或剥离其表面的结缔组织(输尿管系膜), 否则可能导致输尿管缺血坏死, 引发术后尿漏或输尿管狭窄。在输尿管重建手术中, 需确保吻合口处有充足的血供, 必要时可保留输尿管周围的脂肪组织以保护血供。

1.2.2 神经解剖与功能保护

泌尿男生殖系统的神经支配与排尿功能、勃起功能等关键生理功能密切相关, 术中精准保护神经是提升患者术后生活质量的核心要求, 尤其是在前列腺癌、膀胱癌等根治性手术中, 神经保护的质量直接决定患者术后的功能恢复情况。

- **神经血管束 (NVB)**: 是控制男性勃起功能的核心结构, 由自主神经(交感神经和副交感神经)、血管(阴茎海绵体动脉分支)及结缔组织构成, 左右各一, 位于前列腺后外侧的Denonvilliers筋膜与前列腺包膜之间的间隙内, 沿前列腺侧缘向下延伸至阴茎根部。在根治性前列腺切除术中, NVB的保护是决定患者术后能否恢复勃起功能的关键: 传统开放手术因视野限制, 较难精准识别NVB, 易导致损伤; 而机器人手术的放大视野可清晰显示NVB的解剖走行, 使“筋膜内切除”成为可能——即沿前列腺包膜与NVB之间的疏松结缔组织平面分离, 完整保留NVB的

结构完整性。根据肿瘤分期的不同，可选择单侧或双侧NVB保留：对于低危前列腺癌（肿瘤局限于前列腺内、无包膜侵犯），可尝试双侧保留；对于高危肿瘤（可疑包膜侵犯），则需权衡肿瘤根治与功能保留的利弊，必要时牺牲单侧NVB以确保肿瘤完整切除。

- **控尿相关神经与结构：** 术后控尿功能的恢复依赖于尿道括约肌的完整性及相关神经的正常支配。尿道膜部是尿道括约肌（横纹肌）的主要分布区域，位于前列腺下方、尿生殖膈之间，其周围的神经支配主要来自阴部神经的分支。在前列腺根治术或膀胱颈手术中，需重点保护尿道膜部及周围的括约肌结构：①避免过度游离尿道膜部，防止括约肌缺血或损伤；②术中保留膀胱颈的完整性（必要时行膀胱颈重建），维持尿道与膀胱的正常解剖关系；③避免损伤阴部神经分支，该神经损伤可导致括约肌收缩功能障碍，引发尿失禁。此外，膀胱逼尿肌的神经支配（来自盆神经丛的副交感神经）也需注意保护，术中过度牵拉膀胱或损伤盆神经丛，可能导致逼尿肌功能障碍，引发术后排尿困难。
- **肾脏相关神经：** 肾脏的神经支配来自肾丛（交感神经为主），主要调节肾血管收缩及尿液生成。在肾脏手术中，过度牵拉肾门或损伤肾丛，可能导致术后肾血管痉挛，影响肾功能恢复，因此术中需轻柔操作，避免对肾门区域的过度刺激。

机器人视角再定义：在10-15倍放大视野下，医生可清晰识别“阿弗隆层”(Aphrodite's veil) ——这是一层位于前列腺包膜与NVB之间的超薄疏松结缔组织层，是筋膜内神经保护切除的关键解剖标志。沿此层分离可在完整切除前列腺的同时，最大程度保留NVB的结构与功能，显著提升患者术后勃起功能恢复率。

1.3 影像解剖：从 CT/MRI 到脑中三维重建

在精准医疗时代，影像解剖已不再是“静态照片”，而是手术规划的“核心底片”。通过多模态影像学检查（CT、MRI、超声等），可将解剖结构、病变位置、血管神经分布等信息整合为可视化图像，为术前规划、术中导航及术后评估提供精准依据。

1.3.1 功能与分子影像对应

传统影像学主要显示解剖结构，而功能与分子影像可进一步提供病变的生理功能、代谢状态等信息，实现“解剖-功能”双重定位，为精准诊疗提供更全面的依据。

- **多参数磁共振成像 (mpMRI)：** 是前列腺疾病诊断的“金标准”，通过T2加权成像（T2WI）、弥散加权成像（DWI）、动态对比增强成像（DCE-MRI）等多个参数的组合，可精准识别前列腺病变的位置、大小及侵犯范围。从解剖对应角度，mpMRI可清晰显示前列腺的McNeal分区，明确病变位于外周带（提示前列腺癌可能性大）还是移行带（提示良性前列腺增生可能性大）；通过PI-RADS评分（前列腺影像报告和数据库系统）可量化病变的恶性可能性，为临床决策提供依据。更重要的是，mpMRI可提供精准的解剖坐标，为“磁共振-超声融合认知融合穿刺”提

供导航——即通过将术前mpMRI图像与术中超声图像进行融合，精准定位可疑病变区域，提高前列腺癌穿刺的阳性率，避免盲目穿刺导致的漏诊或过度穿刺。

- **前列腺特异性膜抗原正电子发射计算机断层显像 (PSMA PET-CT)：**是前列腺癌分子影像诊断的核心技术，通过注射标记PSMA的放射性示踪剂，可特异性结合前列腺癌细胞表面的PSMA，实现对肿瘤组织的精准定位。从解剖应用角度，PSMA PET-CT在前列腺癌生化复发（术后PSA升高但常规影像未发现明确病灶）的诊断中具有不可替代的价值：可精准识别直径5mm以下的微小转移淋巴结或骨转移灶，并明确其解剖位置（如盆腔、腹膜后、骨骼等），为后续的挽救性治疗（如挽救性放疗、手术切除转移灶）提供精准的解剖导航。此外，在初诊高危前列腺癌患者中，PSMA PET-CT可明确肿瘤是否存在远处转移，为判断能否行根治性手术提供关键依据。
- **肾脏CT血管造影 (CTA)：**是肾脏手术术前评估的核心影像检查，可清晰显示肾动脉、肾静脉的解剖结构及变异情况，包括主肾动脉的起源、走行、分支，副肾动脉的数量、起源及供血区域，肾静脉的属支及与周围血管的关系等。通过CTA图像的三维重建，可构建肾脏血管的立体模型，帮助医生术前规划手术入路、确定血管阻断策略（如肾段动脉阻断的位置、范围），避免术中因血管变异导致的大出血。对于肾癌患者，CTA还可明确肿瘤与肾血管的关系（如肿瘤是否侵犯肾动脉、肾静脉或下腔静脉），为判断肿瘤分期及手术可行性提供依据。

1.3.2 术前解剖评分系统

术前解剖评分系统是将影像解剖信息量化的工具，通过对病变与关键解剖结构的位置关系进行评分，可客观评估手术难度，指导手术方案的选择，提高手术的安全性与有效性。

- **R.E.N.A.L. 评分：**是针对肾脏肿瘤的术前解剖评分系统，旨在量化肿瘤与肾门、集合系统的解剖关系，为肾部分切除术的手术难度评估及方案选择提供依据。该评分系统包含5个维度，每个维度1~3分，总分3~12分：①R (Radius, 肿瘤最大径)：≤4cm为1分，4~7cm为2分，>7cm为3分；②E (Exophytic/endophytic, 肿瘤突出程度)：完全突出肾实质为1分，部分突出为2分，完全内生为3分；③N (Nearness to collecting system or renal sinus, 肿瘤与集合系统/肾窦的距离)：>7mm为1分，4~7mm为2分，<4mm为3分；④A (Anterior/posterior, 肿瘤位置)：位于肾脏前方为1分，后方为2分；⑤L (Location relative to polar lines, 肿瘤相对于肾极线的位置)：位于肾极线之间为1分，累及上极或下极为2分，跨极分布为3分。根据总分可将手术难度分为低危 (3~6分)、中危 (7~9分)、高危 (10~12分)：低危肿瘤可行常规肾部分切除术；中危肿瘤需谨慎规划手术入路及血管阻断策略；高危肿瘤则需权衡保肾手术的可行性，若肿瘤侵犯范围过大、保肾难度极高，可考虑肾全切术。

- **前列腺癌术前解剖评分（如CAPRA评分）：** 虽不完全局限于解剖因素，但包含肿瘤与前列腺包膜的关系、是否侵犯精囊等解剖相关指标，可综合评估前列腺癌的侵袭性及手术难度。对于评分较高（提示肿瘤侵犯风险高）的患者，术前需通过mpMRI等影像检查进一步明确肿瘤的解剖侵犯范围，判断是否可行根治性手术，或是否需要术前新辅助治疗（如内分泌治疗）以缩小肿瘤体积，降低手术难度。

1.4 微创与机器人手术导向解剖

微创与机器人手术的核心优势在于“精准、微创、视野清晰”，但也对医生的解剖认知提出了新的要求——需适应术中视角的重构、器械操作的限制，建立“微创视角下的解剖认知”。本节重点阐述微创与机器人手术中特有的解剖视角、操作平面及关键定位标志。

1.4.1 视角重构

传统开放手术多为“直视下”操作，视角与解剖学教科书的图示基本一致；而微创（腹腔镜、机器人）手术需通过穿刺孔置入器械及摄像头，术中视角发生显著重构，原本深藏的解剖结构被“放大、移位”，需重新建立解剖标志与手术操作的对应关系。

- **头低脚高位（Trendelenburg 体位）：** 是盆腔微创手术（如机器人辅助前列腺切除术、膀胱肿瘤根治术）的标准体位，患者头部降低、脚部抬高，使腹腔内的肠管因重力作用向上回纳，从而暴露盆腔底部的前列腺、膀胱、输尿管下段等解剖结构。在此体位下，医生的视角从传统的“平视”变为“俯瞰”，盆腔内的解剖标志（如内环口、输精管、脐动脉索、闭孔神经）成为定位关键结构的核心依据：①内环口是精索或子宫圆韧带穿出腹壁的部位，其内侧即为Retzius间隙的边界；②输精管从附睾尾部出发，沿盆腔侧壁上行，在前列腺后外侧与精囊汇合，是定位精囊及NVB的重要标志；③脐动脉索是胚胎时期脐动脉的遗迹，位于膀胱前壁两侧，沿其分离可进入Retzius间隙，是游离膀胱前壁的重要解剖参照。此外，头低脚高位还可使盆腔静脉丛因重力作用处于相对塌陷状态，减少术中出血。
- **单孔机器人（SP）手术的视角挑战：** 单孔机器人手术是微创外科的更高阶形式，所有器械及摄像头通过单一穿刺孔（通常位于脐部）进入体内，与传统多孔机器人手术相比，其视角与操作难度均显著增加。核心挑战在于：传统多孔手术的器械呈“三角测量”关系，操作稳定、视野清晰；而单孔手术的器械通过同一通道进入，轴线平行，交叉操作空间有限，易出现“器械打架”的情况。这就要求医生重新建立“狭窄空间内的解剖认知”：①需更依赖解剖标志的精准识别，如通过尿管的走行定位盆腔侧壁的血管神经；②需调整操作手法，通过器械的旋转、摆动替代传统的推拉动作，实现解剖结构的游离；③需借助机器人手术系统的“EndoWrist”（内腕）功能，在狭窄空间内完成精细操作（如缝合、结扎）。此外，单孔手术的视角更接近“中心视角”，解剖结构的前后、深浅关系需通过摄像头的微调及放大功能进一步明确，避免因视角偏差导致的组织损伤。

- **肾脏微创手术的视角调整：** 肾脏微创手术（如腹腔镜/机器人肾部分切除术）多采用侧卧位或俯卧位，摄像头从侧腹壁或腰背部穿刺进入，视角与开放手术的“腹侧入路”截然不同。术中需以Gerota筋膜为标志，沿其表面分离进入肾周间隙，通过肾门血管的走行（肾静脉在前、肾动脉居中）定位肾门结构。由于视角的限制，术中需多次调整摄像头角度，确保清晰显示肿瘤与肾段动脉、集合系统的关系，避免因视野盲区导致的血管或集合系统损伤。

1.4.2 微创视角下的关键解剖标志

在微创视角下，部分传统解剖标志可能被遮挡或移位，需重点关注以下“特异性解剖标志”，以确保手术操作的精准性：

- **脐动脉索：** 是Retzius间隙游离的“导航标志”，沿脐动脉索向膀胱方向分离，可精准进入膀胱前壁与耻骨联合之间的间隙，避免损伤膀胱或盆腔静脉丛。
- **闭孔神经：** 位于盆腔侧壁的闭孔内肌表面，是盆腔手术的“危险标志”——术中损伤闭孔神经可导致大腿内侧肌肉麻痹、疼痛。在机器人前列腺切除术或盆腔淋巴结清扫术中，需以闭孔神经为边界，在其内侧进行操作，避免器械过度牵拉或电凝损伤神经。
- **肾下极脂肪囊：** 是肾脏微创手术中定位肾下极的重要标志，肾下极脂肪囊通常较厚，且与Gerota筋膜粘连疏松，沿其分离可快速找到肾下极，进而向肾门方向游离，避免迷失解剖方向。

1.5 数字化解剖：从“看懂”到“预演”

数字化技术的发展使解剖学从“静态认知”升级为“动态模拟”，通过三维重建、数字孪生、增强现实（AR）、混合现实（MR）等技术，可构建患者个体化解剖模型，实现手术的“术前预演、术中导航”，进一步提升手术的精准性与安全性。

1.5.1 三维重建与数字孪生

三维重建是数字化解剖的基础，通过对患者的CT、MRI等薄层扫描数据进行处理，利用AI算法或专业软件（如Mimics、3D Slicer）构建泌尿男生殖系统的三维解剖模型，实现“个体化解剖可视化”。

- **核心价值：** ①术前评估：可清晰显示肿瘤与肾脏、输尿管、血管、神经的空间位置关系，尤其是对于存在血管变异（如多支肾动脉、副肾动脉）的患者，三维模型可直观展示变异血管的起源、走行及与肿瘤的关系，帮助医生提前规划手术入路、确定血管阻断的位置及范围；②手术预演：医生可通过三维模型进行虚拟手术操作，模拟肿瘤切除、血管结扎、器官重建等过程，预判手术中可能遇到的困难（如血管遮挡、肿瘤侵犯集合系统），提前制定应对策略；③医患沟通：三

维模型可直观地向患者及家属展示病情及手术方案，提高沟通效率与患者的理解度。

- **数字孪生技术：** 是三维重建的进阶形式，通过将患者的解剖数据与手术器械、手术流程相结合，构建“全流程数字孪生模型”。该模型不仅可模拟解剖结构，还可模拟手术器械的操作轨迹、组织的力学特性（如肾脏实质的弹性、筋膜的张力），使手术预演更接近真实手术场景。例如，在肾部分切除术中，数字孪生模型可模拟肾动脉阻断后肾脏的缺血范围，以及肿瘤切除后肾残端的缝合效果，帮助医生优化手术方案，减少术后并发症。此外，通过3D打印技术可将数字孪生模型转化为实体模型，医生可在术前通过实体模型进行触摸、解剖练习，进一步提升对个体化解剖结构的认知。

1.5.2 增强现实（AR）与混合现实（MR）术中导航

AR与MR技术将术前数字化解剖模型与术中实时视野相结合，实现“术中透视”效果，帮助医生精准识别埋藏在组织内的关键结构，解决微创手术中“视野受限、解剖结构隐蔽”的问题。

- **增强现实（AR）导航：** 通过将术前三维重建的解剖模型（如肾脏血管、肿瘤边界、输尿管走行）投影到术中腹腔镜或机器人手术的监视器上，使医生在观察实时手术视野的同时，可同步看到叠加的数字化解剖标志。例如，在肾部分切除术中，AR导航可将肾段动脉的走行、肿瘤边界清晰地叠加在肾脏实质表面，帮助医生精准找到肿瘤边缘，避免切除过多正常肾组织，同时确保彻底切除肿瘤；在输尿管重建手术中，AR导航可显示输尿管的走行及与周围血管的关系，帮助医生精准吻合输尿管，减少尿漏风险。
- **混合现实（MR）导航：** 较AR技术更进一步，通过MR眼镜将数字化解剖模型与真实手术场景直接叠加，医生无需通过监视器，即可在手术视野中直接“看到”埋藏在组织内的关键结构（如血管、神经、肿瘤）。例如，在前列腺根治术中，MR导航可将NVB的走行、前列腺包膜的边界直接叠加在患者盆腔内，医生可通过MR眼镜实时观察NVB的位置，精准进行筋膜内分离，最大程度保护NVB功能；在盆腔淋巴结清扫术中，MR导航可显示淋巴结的分布区域，帮助医生精准识别并切除转移淋巴结，避免遗漏或过度清扫。
- **技术优势与应用前景：** AR与MR导航的核心优势在于“实时融合”，可弥补术前影像与术中实际解剖结构可能存在的偏差（如术中组织移位），提高手术的精准性。随着技术的不断成熟，未来有望实现“动态导航”——即通过术中实时影像（如术中超声、术中CT）更新数字化模型，使导航更贴合术中实际情况。此外，AR/MR导航还可用于外科医生的培训，帮助年轻医生快速建立立体解剖认知，提升手术操作能力。

1.6 本章小结：面向精准医疗的解剖学新范式

在微创、机器人手术及精准诊疗的时代背景下，泌尿外科医生所需掌握的解剖学已不再是传统的“静态名词集合”，而是一套由临床解剖、影像解剖、手术平面解剖和数字解剖共同构成的“四维解剖体系”。这一全新范式以临床需求为核心，将经典解剖知识与影像学技术、数字化技术、手术操作深度融合，实现了从“看懂解剖”到“用活解剖”的转变。

临床解剖是基础，为手术操作提供核心的解剖层次与结构识别依据；影像解剖是桥梁，将病变与解剖结构精准对应，为术前规划提供可视化依据；手术平面解剖是关键，适配微创与机器人手术的视角重构，确保术中操作的精准与安全；数字解剖是进阶，通过三维重建、AR/MR导航等技术实现手术预演与实时导航，进一步提升手术的精准性与可重复性。

这套新范式的核心目标是实现“肿瘤彻底切除、功能完美保留、并发症极低化”的精准外科理念，是泌尿外科医生应对复杂疾病、提升手术质量、改善患者预后的唯一基石。未来，随着数字化技术的不断发展，解剖学将进一步向“个性化、动态化、智能化”方向进化，为精准医疗提供更强大的支撑。