

机器人在牙体牙髓病学领域的研究进展

刘倩如 胡景昱 吴昊 刘利军

内蒙古医科大学第四附属医院牙体牙髓科 包头 014000

[摘要] 牙体牙髓病学作为口腔医学的一个重要分支，其科研和临床工作随着机器人技术的引入而迈入了一个新的发展阶段。本文综述了机器人技术在牙体牙髓领域的研究进展，特别关注其在根管治疗和根尖手术中的应用。机器人技术以其操作的高效性、治疗的精确性以及执行任务的稳定性，在牙体牙髓疾病的诊断和治疗中展现出显著优势。文章详细讨论了机器人在视觉引导、物理辅助操作、微型机器人自动化治疗等方面的作用，并探讨了其在实际应用中可能遇到的局限性，如高昂的成本和操作复杂性，为未来的研究方向和实际应用提供参考。

[关键词] 机器人；牙体牙髓；根管治疗；根尖手术

[中图分类号] R781.05 **[文献标志码]** A **[doi]** 10.7518/gjkq.2026117



本文链接

OSID 码

Research progress on robots in endodontics

Liu Qianru, Hu Jingyu, Wu Hao, Liu Lijun

Dept. of Cariology and Endodontics, the Fourth Affiliated Hospital of Inner Mongolia Medical University, Baotou 014000, China

Correspondence: Liu Lijun, Email: 761079080@qq.com

[Abstract] Endodontics as an important branch of dentistry has entered a new stage of development in research and clinical practice with the introduction of robotic technology. This study reviews the research progress of robotic technology in the field of endodontics, with a particular focus on its applications in root canal treatment and apical surgery. Robotic technology has demonstrated significant advantages in the diagnosis and treatment of endodontic diseases due to its operational efficiency, treatment precision, and stability in task execution. The study comprehensively discusses the roles of robots in visual guidance, physical assistance, and automated treatment using micro-robots. It also explores the potential limitations in practical applications, such as high costs and operational complexity. The review aims to provide references for future research directions and practical applications.

[Key words] robot; endodontics; root canal treatment; apical surgery

牙体牙髓病科疾病是口腔健康领域中最常见的问题之一，不仅会影响咀嚼和语言功能，还可能引起剧烈疼痛或组织肿胀。传统的治疗方法如根管治疗和根尖手术，面临着操作复杂、视野受限和治疗时间长等挑战。随着人工智能和机器学习技术的进步，机器人技术在牙体牙髓领域的应用逐渐成为研究热点，它们能够提供精确的解剖

结构分析、提高治疗效率，并减少并发症风险^[1-3]。近年来，机器人技术在牙体牙髓病科的应用取得了显著进展，包括根管治疗的视觉引导与模拟^[2,4-5]、物理辅助操作^[3,6-7]、微型机器人在根管消毒中的创新应用^[8-10]及根尖手术的微创引导^[11-13]。这些技术的发展不仅提高了治疗的精确性和安全性，还为牙体牙髓病科的临床实践带来了革命性的变化。据市场调查研究^[14]显示，牙体牙髓病科预计将成为机器人技术市场份额增长最快的领域之一。

本文旨在综述机器人技术在牙体牙髓领域新

[收稿日期] 2025-06-23; **[修回日期]** 2025-10-21

[第一作者] 刘倩如，医师，硕士，Email: liuqrchn@163.com

[通信作者] 刘利军，主任医师，硕士，Email: 761079080@qq.com

的应用进展,包括根管治疗和根尖手术中的应用,探讨这些技术的优势、局限性、发展水平以及未来的改进空间,为牙体牙髓病科疾病的诊疗技术提供科学参考。

1 口腔机器人的特点

医学背景下的“机器人”通常被定义为能够自动执行一系列复杂动作的机器,尤其是计算机可编程的机器,通常设计用于执行可以提高精度、减少疲劳和提高可预测性的任务^[15]。口腔机器人集避免静态导航的物理限制、动态导航的实时反馈和使用机械臂精确操作的优势于一体^[16-17],可以为口腔科医生提供物理(触觉)和视觉引导。机器人利用基于术前规划的导航系统,通过先进的三维成像系统和增强现实技术,为医生提供了清晰的操作视野,这种技术使得医生能够在治疗过程中实时观察到重要解剖结构^[18],以进行更精确的操作。机器人的机械臂提供了超越自由手的高精确度和稳定性,进一步提高了治疗的安全性^[6]。此外,机器人通过人工智能技术进行自动诊断分析,使得手术方案更加个性化^[19]。与传统手术相比,机器人辅助手术能够减少创伤,缩短患者的恢复期^[20-21]。机器人的使用减轻了医务人员的工作量,减少了医生的职业暴露风险,机器人辅助也可以帮助更多的新手学习者在早期教育阶段安全地进行手术^[22],为医疗行业的进步提供了强大的技术支撑。

尽管机器人技术已日渐成熟,但还是存在一定的故障发生率^[23]。因此研究人员还需进一步更新和完善系统,提高其安全性。对于牙科学生和经验丰富的口腔医生来说,在经过反复练习后才能真正掌握其使用^[24],这些因素都一定程度上限制了口腔机器人的发展。此外,机器人的安装较复杂,生产成本昂贵,后续维护费用、人力成本也居高不下,必然会导致患者就医成本的大幅增加。为了推动该技术在临床实践中的广泛应用,仍需持续的研究和不断的技术优化。

2 机器人在根管治疗中的研究进展

2.1 机器人的视觉引导与物理辅助研究进展

根管治疗是牙髓病治疗中用于处理感染牙齿的主要手段,但这个过程既耗时又高度依赖于医

生的临床技巧。在实施根管治疗时,可能会出现由于人为失误导致的侧穿或过度扩大根管等问题^[25]。为了减少失败的根管治疗中的医源性因素,Dong^[4]于2003年尝试开发了一种计算机规划系统并提出了一种用于自动根管治疗的多功能微型机器人,该系统可以与机器人相匹配,规划根管器械的运动和更换顺序,通过系统控制执行自动治疗程序,包括根管探查、预备和清理,以进行高效、可靠的根管治疗。同时,该团队还开发了一个计算机程序,用于从2D牙科X线片构建计算机3D根管模型,使临床医生能够有效地理解、诊断和快速记录问题,并准确地预备和清理根管。随着数字化技术的进步,基于图像的术前规划显著提高了手术的精确度。这一发现推动了研究人员探索能够根据图像或扫描数据执行精确任务的机器人设备。Toosi等^[5]为了提高医生对根管治疗程序的掌握,同时确保患者安全,开发了一款根管治疗触觉虚拟现实模拟器。这款模拟器通过图形和触觉交互技术,通过模拟K锉在根管治疗中预备根管的过程,不仅提升了治疗的可视化程度,还增强了医生的技术熟练度,以减少治疗并发症的发生。Gulrez等^[2]评估了一种视觉引导的根管治疗机器人系统,并为该系统设计了专门的视觉引导控制器模型。这种视觉控制器辅助牙体牙髓科医生在治疗中精确引导根管器械的运动,通过在线监测和定位控制,有效预防根尖组织损伤和其他根管治疗并发症,进一步提升了治疗的安全性和成功率。

随着对机器人视觉反馈技术研究的不断深入,其在根管治疗中的应用范围逐渐拓展,涵盖了从术前模拟规划到实时监测与定位等环节。这些技术的应用极大地提升了医生对根管治疗过程的直观感知能力,但是也面临影像分辨率及实时性有待提高,多模态数据融合技术仍处于发展阶段等问题。展望未来,视觉引导技术有望在以下方向取得突破:1)将个性化导航与人工智能技术相结合,基于患牙的解剖特征实现动态路径规划,从而进一步提升治疗的精准性;2)通过多学科协同合作,联合生物材料学、纳米技术等领域,开发能够实时监测根管内情况的智能成像系统,为根管治疗提供更全面的支持;3)增强现实技术与动态导航系统的结合有望实现解剖信息的立体可视化呈现,为医生提供更直观的手术引导。这些技术的演进将有力推动根管治疗向精准化、智能化

的方向发展。

研究人员不仅利用视觉辅助机器人系统改善治疗效果,还致力于运用机械臂技术来进一步提升治疗的精确度。在根管治疗过程中,医生长时间握持工具可能导致手部疲劳和颤抖,这不仅影响手术精度,还可能增加口腔内损伤的风险。为了解决这一问题,Ortiz Simon等^[3]开发了第一个机电一体化系统来协助口腔医生操作器械。通过施加力量,机械臂可让医生在备洞时以平稳而精确的动作操纵工具,从而降低因疲劳而导致的医源性损伤的风险。2020年,Ivashchenko等^[6]报道了一项关于基于KUKA LBR4+的工业运动学机械手在口腔手术中的应用研究。该机械手作为一个连续连接的运动体结构,允许的误差范围仅为 ± 0.05 mm,能够实现7个自由度的精确控制;研究结果显示:该机械手在手术过程中能够以更精确的速度控制手术工具(精确度是人工操作的4倍),并且其偏离规范化轨迹的能力优于人类操作者3.3倍。Cheng等^[7]介绍了用于根管治疗的机器人DentiBot。该机器人在没有视觉反馈的情况下,通过集聚力和扭矩传感器来监控根管和锉之间的接触。此外,DentiBot还能够控制根管锉的操作精度和速度,从而防止器械分离。这些研究成果展示了机械臂技术在提高牙科手术精确度方面的潜力,为未来的自动化治疗提供了新的可能性。然而,量产机电一体化设备的缺点包括体积大、重量重,这通常会使得手术程序复杂化。这些缺点迫使开发人员寻求用于口腔科实践的专用机电一体化设备的新架构^[6]。

当前的口腔种植机器人结合了视觉引导与机械臂操作的双重优势,使术者能够直观感受到器械与组织之间的相互作用力,并获得清晰的术野及关键解剖结构的信息,从而精准地控制手术器械操作,最大程度减少对周围组织的损伤^[26],显著提升了治疗过程的精准度、安全性以及稳定性。随着机器人技术的不断进步,其在牙体牙髓治疗中的应用也开始受到关注。例如,Wang等^[27]使用自主机器人(autonomous robotic, ATR)系统对1名出现症状性根尖周炎和疼痛的患者进行了精确且微创的根管再治疗。ATR系统可实现精确而高效的桩移除,术后3个月的X线片显示愈合令人满意。该治疗证明了ATR系统从再治疗牙齿中移除纤维桩的准确性和有效性,同时最大限度地缩短了手术时间并避免了过多的组织去除。随着技

术的日益成熟,机器人有望在各类口腔疾病的治疗中得到广泛应用,继而推动牙体牙髓治疗技术向更高层次发展。

在其他方面,Nelson等^[28]还开发了一款“器械选择与递送机器人”,该机器人通过预设的程序,能够根据医生的具体需求自动选取并递送医疗器械。研究数据显示,该机器人的应用能够节省4.4%的手术操作时间,以及减少13.56 min的工具准备和清洁时间。这一智能系统不仅优化了手术台的整洁度,还显著提升了治疗的效率。目前的研究和临床实践仍然相对有限,先前的研究已经证明了机器人在牙体牙髓领域的临床可行性,其中大部分是体外研究或病例报告,这些研究为机器人的安全性和有效性提供了初步证据。

2.2 微型机器人在根管治疗中的研究进展

研究^[29-30]表明,根管消毒不彻底是根管治疗失败和根尖周炎持续存在的主要原因。由于微生物生物膜的顽固性、复杂的根管解剖结构、器械操作过程中的牙本质碎屑以及冲洗液流动性有限,有效、精确、彻底的根管消毒变得更加具挑战性^[31]。微型机器人能够精确定位感染区域并投放药物,同时具备可回收性和可生物降解性,这使其成为有效捕捉、消灭和清除细菌的理想选择^[32]。与传统机器人不同,微型机器人以其独特的优势,在微观层面上辅助医生对根管系统进行彻底的根管消毒。最近,已有研究人员证明了使用磁场驱动的微型机器人对目标生物膜定位的可能性。Baabeer等^[8]将氧化铁纳米粒子通过受控磁场形成聚集的微群,这些微群能够在根管系统内导航,同时破坏生物膜并检索微生物信息,以使用微生物DNA分析检测病原体。该团队还将氧化铁纳米粒子整合到3D打印的软螺旋体中,这些螺旋体可以被精确地驱动到根管的根尖1/3处,与3%次氯酸钠相比,聚集的微群机器人对混合物种生物膜的杀灭活性更高。此外,将遮光剂整合到螺旋体中为使用射线成像进行实时跟踪提供了机会,而加入额外的化学物质则使可控的方式装载、运输和现场释放药物成为可能。Hwang等^[9]在这一领域也取得了进展,他们研发的具有磁催化功能的抗菌机器人,可按设定的路径进行根管预备,利用磁力驱动和纳米技术,应用带有氧化铁纳米颗粒的机器人组件消灭细菌和破坏生物膜,分解生物膜胞外多糖基质,并去除碎裂的生物膜碎片,旨在彻底根除生物膜,防止其再生感染。除实际可操

作性外,治疗后如何安全移除这些机器人也是个重要的问题。Dasgupta等^[10]的实验不仅在现场演示了外部操纵磁驱动螺旋纳米机器人在牙本质小管内运动,证明了其可以进入牙本质小管深处或根管内特定区域以清理细菌或输送治疗药物,还进一步证明了如何使用旋转和振荡磁场的组合从牙本质中去除纳米机器人,为根管治疗的安全性和有效性提供了额外的保障。微型机器人系统通过有效地破坏和消除生物膜,在克服当前消毒方法的局限性方面显示出巨大的前景。除了根管消毒之外,这些系统还提供有针对性的药物输送和样本检索功能。今后的研究应进一步探索微型机器人在临床应用的稳定性和可重复性,为这一前沿技术向市场化和临床应用的转化奠定科学基础。

3 机器人在根尖手术中的研究进展

近年来,口腔手术机器人成为口腔医学领域的又一项重大创新,并促进了微创手术的进步。目前已有部分学者将口腔手术机器人应用于根尖手术,得益于机械臂的高精度控制,机器人不仅能准确定位根尖并微创截根,还能有效规避手术风险,缩短手术时间^[32-33]。目前,使用口腔手术机器人进行牙体牙髓治疗的研究较少。苏航等^[11]利用三维打印牙颌模型进行体外模拟,探讨了自由手、静态导板和口腔手术机器人辅助下显微根尖手术的操作准确性和手术时间,结果显示:手术机器人组起点偏差、终点偏差和角度偏差[分别为(0.37±0.11)、(0.37±0.10) mm, 0.71°±0.17°]均显著小于静态导板组[分别为(0.59±0.14)、(0.65±0.18) mm、2.64°±0.75°],且2组均显著小于自由手组[分别为(1.37±0.31)、(1.10±0.21) mm, 9.84°±3.15°]。静态导板组手术时间(1.20±0.03) min显著少于手术机器人组(2.18±0.03) min,且2组均显著少于自由手组(8.70±3.15) min。研究表明,口腔手术机器人辅助显微根尖手术可提高临床医师操作的准确性。静态导板组时间更短,提示手术机器人操作流程(如路径规划、校准)仍需优化。Liu等^[12]使用ATR(雅客智慧口腔手术机器人)进行了显微根尖手术,术后即刻效果良好。同年,郭亚霖等^[13]完成了1例口腔手术机器人辅助难治性慢性根尖周炎根尖切除术,在口腔手术机器人辅助下的2颗牙根尖切除手术在30 min内顺利完成,术后3、

6月、1年后复查预后良好,患者无不适。这些病例不仅证明了机器人在根尖手术中的高精度和高效率,最大限度地减少人为错误的可能性,还为个性化微创治疗疑难根尖周疾病提供了新思路。但是当前该技术仍存在一些局限性,主要体现在高昂的研发与维护成本、复杂的技术操作流程,以及缺乏大样本临床数据验证系统可靠性等方面。展望未来,优化操作流程是重要的发展方向,其次,增强现实技术与手术机器人系统相结合,有望为根尖手术提供更直观、详尽的手术视野^[34],从而进一步提高手术成功率。

4 小结

随着机器人技术的不断发展和成熟,口腔医生日益增长的需求推动着其与根管治疗的整合^[35],牙体牙髓病学领域也随之迎来了革命性的变化。机器人技术已经发展了包括视觉引导、机电一体化系统、微型机器人自动化治疗及手术机器人在内的多个方面,显著提高了根管治疗的精确度和效率,拓展了医生的视野,并为临床实践提供了更安全的平台。然而,该技术在实际应用中仍面临诸多挑战,未来的发展需进一步突破技术瓶颈并优化应用场景。

具体总结如下。1) 机器人系统的研发、生产及维护成本高昂,操作流程较为繁琐,技术复杂性高,限制了其在临床中的广泛应用。为此,可通过降低生产成本、提升机器人技术的可及性、缩短学习周期,并在实时影像分辨率、多模态数据融合及微型机器人回收等方面进一步改进,惠及更多患者。2) 部分设备体积庞大,难以适应狭小的口腔操作空间,且对复杂解剖结构的动态适应性不足。未来可通过优化机器人架构设计,进一步缩小设备体积。同时结合人工智能、纳米技术与生物材料学,开发实时监测系统及可降解微型机器人,提升根管治疗的精准性。此外,将增强现实技术与机器人系统相结合,实现术中实时路径修正,以增强对复杂病例的适应性。3) 多数相关研究集中在体外实验或小样本病例报告层面,缺乏大样本临床数据验证系统的可靠性和长期疗效。今后应重点推动大样本随机对照试验,建立机器人辅助治疗的操作规范和疗效评价标准,促进该技术的临床转化与广泛应用。

随着机器人技术的持续迭代与成本可控性提

升, 机器人辅助治疗有望引领牙体牙髓病学迈向更高层次的精准化、微创化与智能化, 为患者提供更高效、安全的诊疗方案, 成为医生和医学生宝贵的辅助工具, 为临床实践与科研探索开辟全新路径。

利益冲突声明: 作者声明本文无利益冲突。

5 参考文献

- [1] Liu C, Liu YC, Xie R, et al. The evolution of robotics: research and application progress of dental implant robotic systems[J]. *Int J Oral Sci*, 2024, 16(1): 28.
- [2] Gulrez T, Shahid AK, Sana U, et al. Visual guided robotic endodontic therapeutic system[C]//2010 International Conference on Information and Emerging Technologies. IEEE, 2010: 1-6.
- [3] Ortiz Simon JL, Martinez AM, Espinoza DL, et al. Mechatronic assistant system for dental drill handling[J]. *Int J Med Robot*, 2011, 7(1): 22-26.
- [4] Dong J. Rule-based planning for automated endodontic treatment: from dental radiography, three-dimensional computer modeling to tool selection and path control[D]. New York: Columbia University, 2003.
- [5] Toosi A, Arbabtafti M, Richardson B. Virtual reality haptic simulation of root canal therapy[J]. *Appl Mech Mater*, 2014, 666: 388-392.
- [6] Ivashchenko AV, Fedyaev IM, Yablokov AE, et al. Robot-assisted and robotic systems used in dentistry[J]. *Biomed Eng*, 2020, 53(5): 322-326.
- [7] Cheng HF, Li YC, Ho YC, et al. Force-guided alignment and file feedrate control for robot-assisted endodontic treatment[C]//2022 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS). IEEE, 2022: 1841-1847.
- [8] Babeer A, Oh MJ, Ren Z, et al. Microrobotics for precision biofilm diagnostics and treatment[J]. *J Dent Res*, 2022, 101(9): 1009-1014.
- [9] Hwang G, Paula AJ, Hunter EE, et al. Catalytic antimicrobial robots for biofilm eradication[J]. *Sci Robot*, 2019, 4(29): eaaw2388.
- [10] Dasgupta D, Peddi S, Saini DK, et al. Mobile nanobots for prevention of root canal treatment failure[J]. *Adv Healthc Mater*, 2022, 11(14): e2200232.
- [11] 苏航, 赵文博, 李昕茹, 等. 口腔手术机器人辅助显微根尖手术操作准确性和手术时间的体外模型研究[J]. *中华口腔医学杂志*, 2024, 59(8): 816-822.
- Su H, Zhao WB, Li XR, et al. An *in vitro* model study of the accuracy and operation time of oral surgery robot-assisted endodontic microsurgery[J]. *Chin J Stomatol*, 2024, 59(8): 816-822.
- [12] Liu C, Liu X, Wang X, et al. Endodontic microsurgery with an autonomous robotic system: a clinical report[J]. *J Endod*, 2024, 50(6): 859-864.
- [13] 郭亚霖, 牛群文, 齐泽秋, 等. 口腔手术机器人辅助难治性慢性根尖周炎根尖切除术一例[J]. *中华老年口腔医学杂志*, 2024, 22(1): 47-50.
- Guo YL, Niu QW, Qi ZQ, et al. A case report of apical resection for refractory chronic apical periodontitis assisted by dental surgical robot[J]. *Chin J Geriatr Dent*, 2024, 22(1): 47-50.
- [14] 高墨含. 基于医疗机器人在外科手术和口腔医疗领域的应用看其未来发展[J]. *机器人技术与应用*, 2024(3): 3-7.
- Gao MH. Exploring the future development of medical robots through their applications in surgical and dental fields[J]. *Rob Tech Appl*, 2024(3): 3-7.
- [15] Thai MT, Phan PT, Hoang TT, et al. Advanced intelligent systems for surgical robotics[J]. *Adv Intell Syst*, 2020, 2(8): 1900138.
- [16] Bolding SL, Reebye UN. Accuracy of haptic robotic guidance of dental implant surgery for completely edentulous arches[J]. *J Prosthet Dent*, 2022, 128(4): 639-647.
- [17] Wu YQ, Wang F, Fan SC, et al. Robotics in dental implantology[J]. *Oral Maxillofac Surg Clin North Am*, 2019, 31(3): 513-518.
- [18] Pislă D, Bulbucan V, Hedesiu M, et al. A vision-guided robotic system for safe dental implant surgery[J]. *J Clin Med*, 2024, 13(21): 6326.
- [19] Liu Y, Xie R, Wang LF, et al. Fully automatic AI segmentation of oral surgery-related tissues based on cone beam computed tomography images[J]. *Int J Oral Sci*, 2024, 16(1): 34.
- [20] Alemzadeh K, Raabe D. Prototyping artificial jaws for the robotic dental testing simulator[J]. *Proc Inst Mech Eng H*, 2008, 222(8): 1209-1220.

- [21] Kazanzides P, Fichtinger G, Hager GD, et al. Surgical and interventional robotics: core concepts, technology, and design[J]. IEEE Robot Autom Mag, 2008, 15(2): 122-130.
- [22] Frieberg H, Winter JM, Engström O, et al. Robot-assisted microsurgery—what does the learning curve look like[J]. JPRAS Open, 2024, 42: 33-41.
- [23] 郑晓娟, 李志文, 李艳, 等. 自主式口腔种植机器人术中常见故障及应对策略[J]. 机器人外科学杂志, 2024, 5(5): 898-902.
- Zheng XJ, Li ZW, Li Y, et al. Common failures and solving strategies in autonomous dental implant-robot-assisted surgeries[J]. Chin J Rob Surg, 2024, 5(5): 898-902.
- [24] Wang WY, Zhuang MJ, Li SS, et al. Exploring training dental implant placement using static or dynamic devices among dental students[J]. Eur J Dent Educ, 2023, 27(3): 438-448.
- [25] 刘丹丹, 赵文迪, 牛菊, 等. 机器人在口腔医学中的应用进展[J]. 华西口腔医学杂志, 2020, 38(1): 90-94.
- Liu DD, Zhao WD, Niu J, et al. Recent progress of robots in stomatology[J]. West China J Stomatol, 2020, 38(1): 90-94.
- [26] 何昊, 叶子健, 舒畅. 血管介入手术机器人系统关键技术及研发现状[J]. 中国普通外科杂志, 2021, 30(12): 1477-1484.
- He H, Ye ZJ, Shu C. Essential techniques and current research situation in robotic endovascular systems[J]. China J Gen Surg, 2021, 30(12): 1477-1484.
- [27] Wang J, Huang J, Zhang PF, et al. Use of an autonomous robotic system for removal of fiber posts during endodontic retreatment: a clinical report[J]. J Prosthet Dent, 2024: S0022-3913(24)00518-3.
- [28] Nelson CA, Hossain SM, Al-Okaily A, et al. A novel vending machine for supplying root canal tools during surgery[J]. J Med Eng Technol, 2012, 36(2): 102-116.
- [29] Fabricius L, Dahlén G, Sundqvist G, et al. Influence of residual bacteria on periapical tissue healing after chemomechanical treatment and root filling of experimentally infected monkey teeth[J]. Eur J Oral Sci, 2006, 114(4): 278-285.
- [30] Nair PR. On the causes of persistent apical periodontitis: a review[J]. Int Endod J, 2006, 39(4): 249-281.
- [31] Boutsoukis C, Arias-Moliz MT. Present status and future directions-irrigants and irrigation methods[J]. Int Endod J, 2022, 55(Suppl 3): 588-612.
- [32] Zhong WJ, Handschuh-Wang S, Uthappa UT, et al. Miniature robots for battling bacterial infection[J]. ACS Nano, 2024, 18(47): 32335-32363.
- [33] Isufi A, Hsu TY, Chogle S. Robot-assisted and haptic-guided endodontic surgery: a case report[J]. J Endod, 2024, 50(4): 533-539.e1.
- [34] 王铭含, 陈语, 杜慧江, 等. 增强现实在达芬奇手术机器人系统中的应用进展[J]. 机器人技术与应用, 2025(1): 53-56.
- Wang MH, Chen Y, Du HJ, et al. The application progress of augmented reality in the da vinci surgical robotic system[J]. Rob Tech Appl, 2025(1): 53-56.
- [35] Ahmad P, Alam MK, Aldajani A, et al. Dental robotics: a disruptive technology[J]. Sensors (Basel), 2021, 21(10): 3308.

(本文编辑 王姝)