·观点·述评·

口腔诊疗自动化技术与装置的应用现状与展望

张旭[1] 曹慧[2] 周永胜[3]

1.北京大学口腔医学院·口腔医院口腔医学数字化研究中心 国家口腔医学中心
口腔疾病国家临床医学研究中心 口腔生物材料和数字诊疗装备国家工程研究中心
颅颌面组织生物智造与修复再生北京市重点实验室
口腔数字医学北京市重点实验室，北京 100081；
2.内蒙古医科大学口腔医学院，呼和浩特 010051；
3.北京大学口腔医学院·口腔医院修复科 国家口腔医学中心
口腔疾病国家临床医学研究中心 口腔生物材料和数字诊疗装备国家工程研究中心
颅颌面组织生物智造与修复再生北京市重点实验室
口腔数字医学北京市重点实验室，北京 100081

[摘要] 口腔自动化技术与装置正逐步成为口腔医学数字化与智能化发展的重要组成部分。近年来，随着人工智能、机器人和先进制造等技术的持续进步，相关技术在口腔诊断、手术与治疗、口腔修复与正畸以及口腔护理与维护等领域的应用不断拓展，并在提高诊疗的精度、效率、一致性和可重复性方面显示出重要潜力。口腔诊疗自动化并非单一设备对人工操作的简单替代，而是建立在标准化数据采集、算法/规则决策与执行终端基础上的临床工作流优化过程。本文围绕口腔诊疗自动化技术与装置的主要应用场景，系统综述其研究与应用现状，分析不同技术路径的特点、适用范围及现实挑战，并对未来发展方向进行展望，以期为临床诊疗流程优化、相关技术转化与装备发展提供参考。

[关键词] 口腔诊疗； 自动化技术与装置； 人工智能； 数字化口腔医学； 口腔机器人

[中图分类号] R78 **[文献标志码]** A **[doi]** 10.7518/hxkq.2025517

本文链接 开放科学标识码

Current applications and future perspectives of automation technologies and devices in oral diagnosis and treatment

Zhang Xu[1], Cao Hui[2], Zhou Yongsheng[3]

1. Center of Digital Dentistry, Peking University School and Hospital of Stomatology & National Center of Stomatology & National Clinical Research Center for Oral Diseases & National Engineering Laboratory for Digital and Material Technology of Stomatology & Beijing Key Laboratory of Intelligent Biomanufacturing and Regeneration for Craniofacial Tissues & Beijing Key Laboratory of Digital Stomatology, Beijing 100081, China; 2. Stomatological College, Inner Mongolia Medical University, Hohhot 010051, China; 3. Dept. of Prosthodontics, Peking University School and Hospital of Stomatology & National Center of Stomatology & National Clinical Research Center for Oral Diseases & National Engineering Laboratory for Digital and Material Technology of Stomatology & Beijing Key Laboratory of Intelligent Biomanufacturing and Regeneration for Craniofacial Tissues & Beijing Key Laboratory of Digital Stomatology, Beijing 100081, China

Supported by: National Key Research and Development Program Project (2023YFB4605400); National Natural Science Foundation of China (82530030, 82572435)

Correspondence: Zhou Yongsheng, E-mail: kqzhouysh@bjmu.edu.cn

[收稿日期] 2025-12-30

[基金项目] 国家重点研发计划项目（2023YFB4605400）；国家自然科学基金（82530030，82572435）

[第一作者] 张旭，副研究员，博士，E-mail：zhangxulove@bjmu.edu.cn

[通信作者] 周永胜，教授，博士，E-mail：kqzhouysh@bjmu.edu.cn

[Abstract] Automation technologies and devices are becoming an increasingly important component of the digital and intelligent transformation of oral healthcare. With on-going advances in artificial intelligence, robotics, and advanced manufacturing, their applications have expanded across oral diagnosis, surgery and treatment, prosthodontics, and orthodontics, as well as oral care and maintenance. These technologies have shown considerable potential for improving diagnostic and therapeutic accuracy, efficiency, consistency, and reproducibility. Importantly, automation in oral healthcare should not be understood simply as the replacement of manual procedures by standalone devices. Rather, it represents the optimization of clinical workflows based on standar-dized data acquisition, algorithm- or rule-based decision-making, and dedicated execution platforms. This review summarizes the current research progress and clinical applications of automation technologies and devices in major oral healthcare scenarios and discusses the characteristics, application scope, and practical challenges of different technical routes. Future directions are also outlined to provide a reference for clinical workflow optimization, technology translation, and device development in oral healthcare.

[Key words] oral diagnosis and treatment; automation technologies and devices; artificial intelligence; digital dentistry; dental robots

口腔医学是一门高度依赖精细手工操作、临床经验和即时判断的学科。传统诊疗模式在很大程度上受制于口腔医师个人技能水平，在操作精度、流程一致性及质量可控性方面存在局限，导致诊疗结果存在差异大、流程长、效率低等问题[1]。这一问题在精细口腔修复与正畸、复杂种植及长效口腔健康维护等场景中尤为突出[1-3]。随着公众对高质量口腔诊疗服务需求的持续增长，传统体系已难以完全满足现代口腔医学对精细化、标准化和可复制化的诊疗需求。

近年来，计算机科学、人工智能、机器人技术、材料科学和先进制造等领域的快速发展，为口腔医学带来了新的数字化和智能化机遇[4-6]。在口内扫描、锥形束计算机断层扫描（cone-beam computed tomography，CBCT）、数字印模、三维建模及信息化平台等技术基础上，口腔诊疗对象和诊疗流程得以被更稳定地采集、表达和计算，推动口腔医学由经验驱动逐步转向数据驱动与流程优化[2,7]。在此基础上，自动化进一步将标准化数据采集、算法/规则决策和执行终端连接起来，使部分原本依赖人工完成的诊断分析、治疗规划、修复制造和护理维护任务实现程序化和规范化[4-5,8]。需要指出的是，口腔数字化技术、自动化技术与自动化装置并非同义概念，而是分别对应数据表达、程序化分析与执行载体等不同层级，相关概念及其边界将在后文进一步界定。总体而言，口腔自动化的发展已不再局限于单一设备，而是逐渐表现为算法、软件与硬件协同驱动的临床工作流重构[4-5]。尽管相关技术在诊断、手术、修复、正畸及护理等多个环节展现出提升精度、效率和一致性的潜力，但其临床落地仍面临系统集成复杂、证据等级不足以及伦理与监管边界有待明确等挑战[8-9]。

基于此，本文从口腔自动化技术与装置的相关概念出发，围绕口腔诊断自动化、手术与治疗自动化、口腔修复与正畸自动化以及口腔护理与维护自动化4个层面，系统梳理代表性技术与装置的关键技术构成、应用现状及成熟度特征，分析其在提升诊疗精度、效率和一致性方面的优势与局限，并讨论其在可靠性、安全性、多学科协同及临床转化方面面临的挑战，以期为后续口腔诊疗自动化系统的研发与应用提供参考（图1）。

1　口腔诊疗自动化技术与装置概述

口腔诊疗自动化技术与装置通常是指在口腔医学场景中，依托数字化数据采集、算法分析与程序化控制，对特定诊疗任务进行辅助决策或自动执行的相关技术、设备与系统，其载体可包括传感装置、控制系统、执行设备等组成部分[10-11]。其中，口腔数字化技术侧重于将口腔组织形态、病变信息、咬合关系及诊疗流程转化为可采集、可存储、可传输和可计算的数据对象，而自动化技术与装置则进一步在此基础上实现诊断分析、治疗规划、修复制造及护理维护等任务的程序化处理与物理执行。其核心目标在于降低对人工经验的依赖，提高诊疗效率、精确度、一致性和安全性[8,10,12]。

从技术构成来看，口腔诊疗自动化通常融合多模态感知、智能决策与执行终端等多学科技术，包括基于光学、X射线或三维成像的数据采集，基于机器学习（machine learning，ML）和深度学习

（deep learning，DL）的智能识别与决策算法，以及机械臂、微型执行器和数字化制造设备等执行单元[13-14]。例如，椅旁计算机辅助设计/计算机辅助制造（computer-aided design/computer-aided manufacturing，CAD/CAM）与3D打印设备可根据数字化印模和算法生成修复设计方案，自动完成修复体的加工与制作[6,15]。在家庭与预防场景中，部分智能电动牙刷、智能清洁系统也逐步具备一定的自适应控制与数据反馈功能[16]。需要指出的是，影像识别模型、辅助设计软件和大语言模型（large language models，LLMs）等更适合作为自动化系统中的算法层或决策层，而导航系统、机器人、CAD/CAM和3D打印设备等则更体现为自动化装置或自动化系统的执行载体[17]。



图 1　口腔诊疗自动化技术与装置的总体逻辑框架

Fig 1　Overall framework of automation technologies and devices in oral diagnosis and treatment

数字化与自动化系统不仅有助于提高操作精度和可重复性，还可通过流程重构减少就诊次数与操作时间，为提高基层医疗机构的服务能力和缩小地区差异提供技术支撑[2,12]。由此可见，口腔诊疗自动化技术与装置并非单一设备的孤立应用，而是在临床需求增长与技术持续迭代的共同驱动下，逐步形成由算法、软件与硬件协同支撑的临床工作流重构[8,10-11]。同时，不同技术在成熟度上存在明显差异，既包括已进入常规临床流程的数字化制造与护理终端，也包括仍处于临床探索或实验研究阶段的机器人及微/纳尺度自动化技术[5-6]。因此，下文将结合具体应用场景和技术成熟度，对其适用范围与转化潜力作进一步分析。

2　口腔诊断自动化技术与系统

传统口腔诊断流程高度依赖医师手工操作、临床经验和即时判断。例如，牙周探诊通常需要逐位测量牙周袋深度、松动度及附着丧失量，完整记录一次检查往往耗时15~30 min，不仅增加医师负担，也影响患者舒适性。与此同时，传统诊断结果依赖医师理论水平及操作经验，容易在不同医师及不同机构间产生显著差异[1]。随着人工智能与自动化技术的发展，口腔诊断正逐步由经验主导模式转向更高效率、标准化与可量化的工作流。需要指出的是，当前口腔诊断自动化更多表现为面向不同数据类型和任务的技术模块及初步系统形态，而非普遍成熟的一体化诊断系统。总体而言，现有研究主要围绕结构化数据分析、医学影像识别和文本问诊支持等方向展开，并在疾病识别、辅助决策及风险预测中展现出重要价值[18-20]。

2.1　ML在口腔癌、龋病与儿童口腔疾病诊断中的应用

ML作为人工智能（artificial intelligence，AI）的重要子领域，已在口腔癌、龋病和牙周疾病等自动化诊断中展现出较好潜力[21]。在口腔辅助诊断和风险预测相关场景中，传统ML方法通常更适用于样本量相对有限、变量结构较清晰的结构化数据分析，因此在分类预测、风险分层和预后判断等任务中具有一定优势[18]。

口腔鳞状细胞癌（oral squamous cell carcinoma，OSCC）是口腔颌面部最常见的恶性肿瘤之一，全球5年生存率依旧偏低[22-23]。研究[24]表明，

提高其早筛能力是降低死亡率的关键。多项研究[25]证实，高质量ML模型能够显著提高口腔癌的早期诊断能力，并在病理分类及预后预测中表现出良好性能。在外科治疗中，手术边缘的选择和界定至关重要。Buchakjian等[26]发现手术切缘阳性与OSCC复发率上升及生存率下降显著相关，而传统依赖视诊、触诊的术中边界判断存在局限和滞后性。多光谱自体荧光寿命成像（multispectral autofluorescence lifetime imaging，maFLIM）结合ML的计算机辅助检测系统能够量化发育异常组织和癌变组织差异，实现连续边缘自动识别[27]。

在识别牙齿异常、龋病和牙周疾病方面，ML也表现出很高的准确性[28]。Karhade等[29]使用Google Cloud AutoML构建儿童早期龋病预测模型，表现出良好的分类性能与临床应用潜力。AutoML技术简化了模型开发流程，使临床人员无需深度编程即可部署ML模型，有助于推进AI在口腔诊疗中的普及[30]。但需要注意的是，此类方法通常依赖特征工程和数据质量控制，其泛化能力及跨中心稳定性仍有待进一步验证[18]。因此，ML目前更适合作为口腔诊断自动化中的辅助诊断和风险预测模块，而非独立完成复杂临床判断的系统。

2.2　DL在口腔疾病识别与结构分析中的应用

DL作为ML的重要分支，在图像识别与语义分割任务中表现突出，已广泛应用于口腔黏膜病变、牙周病、牙体牙髓疾病及颞下颌关节（temporomandibular joint，TMJ）疾病的分析中[19,31-32]。相较于传统ML方法，DL更擅长处理影像和三维结构等高维数据，因此在口腔影像识别和结构分析相关模块中具有明显优势[19]。

Nieri等[33]研究显示，DL模型在识别口腔黏膜病变方面的敏感性明显高于口腔医学研究生，并达到接近人类专家水平。在TMJ疾病方面，多项研究[32,34]表明，DL模型可以在CBCT上高灵敏度和特异性地检测TMJ关节病，为缺乏专科经验的医师提供诊断支持，并提高客观性与一致性。此外，DL模型已被用于自动分割牙齿结构与牙槽骨形态，例如基于卷积神经网络（convolutional neural network，CNN）的DL模型可对牙齿全景X线片中牙齿位置、轮廓及牙齿组织的分割来预测牙槽骨丢失，从而用于牙周炎分期与治疗风险评估[35]。这些应用不仅提高诊断准确性，可促进口腔检查的标准化和自动化。

不过，DL对高质量标注数据依赖较强，其模型性能易受数据来源、图像质量和标注一致性的影响。同时，其“黑箱性”也限制了在高风险临床决策中的直接解释能力[36]。因此，当前DL更适合作为口腔诊断自动化中的影像识别与结构分析模块，而非脱离临床判断独立运行的决策主体。

2.3　大模型与智能问诊系统在口腔诊断中的应用

近年来，通用LLMs被引入口腔诊疗场景，并在诊断质量、治疗建议一致性和教育反馈等方面开展了初步验证。与ML和DL主要面向结构化数据或影像数据不同，LLMs更擅长处理病史采集、临床问答、知识整合和文本生成等任务，因此更适合应用于口腔智能问诊和文本辅助支持场景[20]。

Mendonça de Moura等[37]对4项智能诊断进行了横断面比较研究，发现ChatGPT 4.0和Bing在各种牙髓和牙周病变病例的诊断准确率最高，且在治疗方案建议方面最接近专家水平。另一项由Qutieshat等[38]开展的研究将109名牙科学生与ChatGPT进行牙髓诊断比较，结果显示ChatGPT在多个诊断任务中表现优于学生并在教育反馈中展示潜在价值。LLMs还被证明可辅助儿童牙科多任务诊断，包括多生牙、埋伏牙识别、龋病检测、牙菌斑识别等，并可用于骨龄评估、法医牙科学及健康管理流程[39]。这些研究提示，LLMs在口腔医学中具有较强的信息整合和语言交互能力，尤其适合用于智能问诊、文书辅助、健康宣教和教学反馈等文本密集型场景。

然而，LLMs目前仍面临知识更新滞后、结果可重复性不足、幻觉输出和责任归属不清等问题[20]。因此，现阶段其更适合作为口腔诊断自动化中的问诊与辅助支持模块，而不宜简单视为能够独立完成最终临床诊断的系统。

总体来看，ML、DL和LLMs在口腔诊断自动化中各具优势和适用范围。传统ML方法更适用于结构化数据分析与风险预测，DL更擅长影像识别、结构分析与自动分割，LLMs则在文本理解、知识整合和智能问诊方面显示出独特潜力[18-20]。当前口腔诊断自动化仍以模块化技术和初步系统形态为主，未来更有潜力的发展方向是多源数据融合下的智能诊断系统整合，而非单一模型性能的简单叠加。同时，其从实验研究走向广泛临床应用，仍需进一步解决数据标准化、跨中心泛化、模型可解释性以及伦理和监管边界等问题[18,20,36]。

3　口腔手术与治疗自动化技术与装置

在传统口腔手术与治疗过程中，操作精度在

很大程度上依赖医师基于临床经验所作出的主观判断，缺乏完全客观化和标准化的执行依据。尤其在术中视野受限、术区位置不佳或解剖结构复杂的情况下，医师的判断操作误差较大。口腔手术与治疗自动化技术与装置的发展，正是在这一背景下逐步兴起。其核心价值并不只是以机械执行替代人工操作，而是通过术前数字化规划、术中路径控制与执行终端协同，提高手术与治疗流程的标准化、一致性和稳定性。当前，该领域主要包括机器人辅助种植手术、微/纳机器人在根管治疗与感染控制中的探索，以及口腔颌面外科相关自动化技术与装置等方向[40-42]。需要指出的是，不同技术所处发展阶段差异明显，既包括已进入初步临床应用的机器人辅助手术，也包括仍主要处于实验研究阶段的前沿自动化技术。

3.1 机器人辅助种植手术

种植体的三维位置是影响长期成功率的核心因素，研究[43]表明，偏离修复引导位置会显著增加生物学与机械并发症风险。机器人辅助种植系统可基于CBCT数据完成术前虚拟规划，并结合路径执行实现高精度植入[40]。多项研究[44-45]证实，机器人辅助种植的入口点偏差、尖端偏差及角度偏差均显著优于自由手法或导板手术。例如，协作机器人（cobots）在口腔种植领域不断兴起，它们通过力控反馈与人机协作模式提升植入稳定性与操作一致性，植入定位误差可控制在亚毫米级[46]。

但需要强调的是，机器人辅助种植并非单纯依赖机械臂执行，而是建立在术前影像采集与虚拟规划、术中患者配准、路径引导与执行控制等多个环节基础上的系统性工作流[40,46]。换言之，其精度优势不仅来源于执行终端本身，也依赖于规划合理性、配准精度和术中稳定性。凭借这一特点，机器人尤其适用于无牙颌、骨量不足或临近下牙槽神经管等关键解剖结构的高风险病例，其可减少术中视野局限、手部颤动和疲劳造成的误差，从而提高手术安全性[40,47-48]。

近年来，自主式种植机器人（autonomous implant robots）在路径规划、实时导航和自动钻孔等方面发展较快，显示出进一步提高手术自动化水平的潜力[47]。然而，现阶段机器人辅助种植仍存在设备成本高、培训周期长、工作流整合复杂等局限[48-49]。更重要的是，其并未改变医师作为最终决策者和风险控制者的角色，而是使术者由单纯的操作执行者逐步转变为数字化规划者、系统操控者和异常情况处理者。因此，机器人在当前阶段更适合被视为增强术者能力的自动化装置，而非完全替代医师的自主手术系统。

3.2 微/纳机器人在根管治疗与感染控制中的应用

微生物生物膜和根尖周炎、根管感染及牙周病高度相关，其完整性直接影响根管治疗成败[50-51]。针对传统根管冲洗和消毒方式在复杂解剖区域中存在的局限，微型磁性机器人（magnetic microrobots）为根管感染控制提供了新的技术路径[52]。这些微型机器人可在外加磁场引导下进入难以触及的支管区域，针对特定位置的生物膜进行机械扰动、药物输送甚至生物膜回收，从而实现更高精度和更高可控的治疗作用[53-54]。

Babeer等[52]对牙体牙髓病学中的微机器人应用进行了系统梳理，指出以氧化铁纳米颗粒为构建单元的磁响应微机器人可在外加磁场驱动下于根管内形成可重构的微群体（microswarms），其产生的剪切力能够破坏根管壁及峡部的混合种生物膜，同时通过类过氧化物酶活性增强过氧化氢等药液的杀菌效果。在体外和离体模型中，这类微机器人在去除根管盲区生物膜方面已表现出优于常规次氯酸钠冲洗的效果，并可在磁场反向驱动下被回收，体现出良好的可控性和安全性[52-54]。

从更广泛的感染控制视角看，小尺度机器人在口腔、生物医用管腔及皮肤创面等部位的生物膜感染治疗中，已被证实能够实现精准定位、在位药物释放及多模态诊疗功能[55]。但必须明确的是，此类技术目前仍主要处于实验研究和转化早期阶段，尚未形成成熟临床工作流。更重要的是，其临床转化受限并不只是因为证据层级不足，还在于若干关键问题尚未解决[52,55]。在根管系统这类空间狭窄、分支复杂且充满液体的微环境中，装置的稳定驱动、精准到达和有效作用仍存在明显困难[50-53]。同时，尽管现有研究[52-55]在体外和离体模型中已显示出较好的生物膜清除能力，但其生物安全性、残留风险及回收可靠性仍需进一步验证。此外，相关系统与常规根管治疗流程的衔接仍不充分，临床操作复杂度和应用门槛较高[52,55]。因此，微/纳机器人未来的关键不仅在于提高清除生物膜的局部效果，更在于提升其可控性、安全性和临床兼容性。其后续发展仍需在生物相容性、可降解性、磁场安全控制、回收机制和临床操作复杂度等方面进一步优化。

3.3 口腔颌面外科相关自动化技术与装置

在口腔颌面外科领域，自动化技术与装置主要集中于2个方向，包括经口机器人辅助手术

（transoral robotic surgery，TORS）和机器人-激光联合正颌截骨。TORS通过经口路径引入机械臂和内镜，克服传统开放或经颈手术对咽旁、舌根和下咽等隐蔽解剖区域可视化不足的问题，减少切口和手术创伤[56]。这一方向体现了机器人系统在狭窄空间可视化、路径到达和微创操作方面的优势。

在正颌外科方面，Ebeling等[57]报道了全球首例采用机器人辅助激光技术实施LeFort Ⅰ型截骨的临床病例。此外，Köhnke等[58]对冷消融机器人引导激光骨切开系统（cold ablation robot-guided laser osteotome，CARLO）在中面部骨切开中的安全性与性能进行了多中心临床评价，结果显示该系统具有较好的可行性、安全性和精度，但也提示注册、设备操作和激光束焦点等因素仍会影响手术效率与切割精度。这些研究提示，机器人引导激光骨切开在减少器械接触、改善几何可控性及提高路径稳定性方面具有潜力，但其长期安全性、成本效益和广泛推广价值仍需进一步验证。

不过，与机器人辅助种植类似，口腔颌面外科自动化装置的价值并不只体现在末端执行精度上，还取决于术前设计、患者配准、器械稳定性、术中调整能力以及团队协同水平[56,58]。特别是在解剖结构复杂、术中需要灵活应变的情况下，系统适应性和术者介入能力仍然十分关键。此外，这类技术在推广过程中还受限于设备体积、术中空间适配性、学习曲线、安全验证和成本效益等因素[56,58]。总体来看，口腔颌面外科相关自动化装置已显示出较强的工程潜力，但目前更合理的定位仍是高精度外科操作的辅助与增强工具，而非替代手术团队完成独立决策与执行的自主系统。

总体而言，口腔手术与治疗自动化的发展重点不应仅理解为“机器替代人工”，而更应理解为通过数字化规划、精准控制和执行终端协同，提高手术与治疗流程的标准化、稳定性和可重复性[40,46,48]。不同技术在成熟度上存在明显差异，其中机器人辅助种植和部分颌面外科相关装置已进入初步临床应用阶段，而微/纳机器人等仍主要处于实验研究或概念验证阶段[40,48,52,55,58]。未来，该领域的发展关键不仅在于持续提高手术精度，更在于优化系统工作流、缩短学习曲线、明确人机协作边界，并建立更加充分的安全性和临床证据基础[40,46]。

4　口腔修复与正畸自动化技术与装置

随着数字化与自动化技术的持续发展，口腔修复与正畸领域已逐步形成“数据采集-智能设计-自动制造-随访监测”的一体化工作流程[59-60]。其中，数字化主要体现为口腔信息的采集、三维建模、可视化表达与虚拟模拟，而自动化则进一步表现为在数字化基础上，对设计、制造和部分监测环节进行程序化分析、自动生成与设备执行。通过口内扫描、CBCT、面部扫描、CAD/CAM、3D打印和人工智能算法等技术的协同应用，修复体与矫治装置的设计和制造正由经验驱动逐步转向数据与模型驱动[7,59-62]。相较传统手工流程，自动化技术与装置不仅有助于缩短治疗周期、减少复诊次数，也提高了设计与制造过程的一致性，为个体化治疗、远程沟通和动态随访提供了基础[61,63-64]。需要指出的是，该领域的自动化并非单纯体现为某一台设备的替代作用，而更表现为数字化设计、制造终端和临床工作流的系统整合。

4.1　口腔修复工作流程的数字化与自动化

口腔修复是自动化技术应用最为成熟的场景之一。依托口内扫描、CAD/CAM、3D打印以及人工智能等技术，口腔修复已逐步形成从数字印模获取、修复体设计到加工制造的连续自动化流程，并显著推动了“即来即做”的椅旁修复模式发展[59,64]。其中，口内扫描仪可获得高精度三维模型，替代传统印模和石膏模型，显著提升患者舒适性和数据可重复性[7]。这一环节本质上属于修复流程的数字化基础，即将口内信息转化为可建模、可计算和可传输的数字对象。系统综述表明，数字和混合工作流在可摘全口义齿制造中通常较传统流程更节省时间，成本效益也更优[64]。临床研究[65-66]表明，椅旁CAD/CAM系统可以在单次就诊中完成口内扫描、修复体设计以及数控切削或3D打印，从而显著减少复诊次数和椅旁操作时间并改善患者满意度。

从制造路径看，CAD/CAM切削与3D打印是当前口腔修复自动化中最具代表性的两类技术。前者属于减材制造，依托预制材料块进行加工，具有精度高、表面质量稳定、材料成熟度高等优势，因此目前仍是高精度固定修复体的重要主流路线。后者属于增材制造，在复杂结构成形、个体化设计自由度和制作效率方面具有明显优势，尤其适用于义齿基托、诊断模型及部分复杂修复构件的快速制造[62,66]。此外，有研究[67]显示3D打印义齿材料在机械性能和光学性能方面已取得较好进展。为更直观地比较2种自动化制造路径在技术特征和临床适用性方面的差异，表1对CAD/

CAM切削与3D打印进行了多维度归纳。需要进一步指出的是，CAD/CAM切削与3D打印虽然在制造原理和适应证上存在差异，但在迈向更高水平自动化制造时仍面临共性瓶颈[59]。二者均依赖数据采集、数字设计、制造执行和终末适配等连续环节，当前尚未形成完全稳定的闭环，误差仍可能在跨环节传递中累积[59,64]。同时，材料特性与加工参数高度耦合，比如切削中的材料去除策略和边缘完整性会影响成形质量，打印中的层厚、方向、聚合收缩和后处理同样影响尺寸稳定性与适配效果[62,65-67]。此外，后处理、适配调整和咬合精修等步骤仍部分依赖人工，这在一定程度上限制了全自动化流水线的形成。因此，未来的关键不仅在于比较2种路径的性能差异，更在于减少误差累积并提高制造质量的一致性与可预测性。总体而言，CAD/CAM切削与3D打印并非简单替代关系，而是在精度需求、材料体系和临床场景方面形成互补。前者更适合高精度、规范化固定修复，后者则在复杂结构和个体化制造方面更具潜力。

表 1 CAD/CAM切削与3D打印在口腔修复中的比较

Tab 1 Comparison between CAD/CAM milling and 3D printing in prosthodontics

比较维度	CAD/CAM切削	3D打印
制造方式	减材制造，基于预制材料块切削成形	增材制造，通过逐层堆积材料成形
常用材料	氧化锆、玻璃陶瓷、聚甲基丙烯酸甲酯、复合树脂等成熟材料	光固化树脂最常见，也可拓展至金属、陶瓷等
精度与稳定性	精度较高，尺寸稳定性较好	受层厚、打印方向和后处理影响较明显
表面质量	通常较好，后处理要求相对较低	常需清洗、固化、打磨等后处理
复杂结构成形	对复杂内凹、镂空和中空结构存在一定限制	在复杂几何结构和个体化成形方面更具优势
制作效率	适合单件高精度修复的快速加工	适合复杂构件和批量化模型制造
典型适应证	高精度固定修复体	义齿基托、诊断模型、导板及复杂个体化构件
临床定位	高精度固定修复的重要主流路线	复杂结构与个体化制造的重要发展方向

AI进一步推动了口腔修复设计环节的自动化。需要强调的是，修复体自动设计并非简单的软件自动生成，而是基于牙体形态、邻接关系、咬合接触、制备线识别、美学参数及历史病例数据库等信息进行的规则约束与数据驱动决策过程[68-69]。Aljulayfi等[68]综述指出，AI可辅助牙色选择、制备线识别、修复体设计和制造参数优化等环节。Alqutaibi等[70]则总结了机器人在牙体预备和义齿排牙等修复操作中的应用潜力。总体来看，口腔修复自动化的关键价值不仅在于缩短制作时间，更在于通过数据化设计和自动化制造提高修复质量的一致性与可预测性。

4.2 口腔正畸治疗与功能装置的自动化

口腔正畸领域的自动化主要体现在数字正畸与透明矫治治疗流程中。传统正畸通常需要手工取模、石膏模型分析、弯丝和手工排牙，诊断与治疗方案高度依赖医生经验，且治疗过程的可视化和量化程度有限。通过CBCT、面部扫描和口内扫描等技术构建三维颌面-牙列模型，软件可自动完成错𬌗分析、牙齿运动模拟和分阶段矫治器设计，治疗过程更易可视化与患者沟通[60-61]。其中，三维模型构建、虚拟分析和运动模拟主要体现为正畸工作流的数字化表达，而在此基础上进行自动分割、自动排牙、分阶段矫治器生成和制造，则更体现为自动化设计与执行。同时，3D打印技术与AI相结合，为个体化、自动化矫治器设计和制造提供了技术基础[71]。

在正畸数字化和自动化工作流中，牙齿分割是连接影像、三维建模与后续自动化设计的关键环节。基于DL的算法已在口内扫描数据上实现了高精度的自动分割与编号，可显著减少医生手工勾画时间，为自动化排牙和智能规划提供基础[72]。与修复设计类似，自动排牙和矫治器设计也并非单纯的几何生成过程，而是综合考虑牙列形态、邻接关系、咬合约束、移动路径和治疗目标等因素的自动化决策过程[60,73]。因此，正畸自动化的意义不仅在于提升设计效率，更在于提高治疗规划的可视化、标准化和可追踪性。

除透明矫治器外，功能性矫治装置也逐步引入自动化和智能监测理念。随机对照试验表明，个性化下颌前移装置（mandibular advancement device，MAD）可显著降低睡眠磨牙相关的肌肉活动，是成人睡眠磨牙和部分阻塞性睡眠呼吸暂停患者的有效干预手段之一[74-75]。此外，部分基于螺纹连接和物理弹性调节原理的功能装置在舒适性和动态调节能力方面显示出改进潜力[76]。总体而言，口腔正畸自动化的发展不仅提高了矫治器设计与制造的效率，也推动了治疗过程由经验判断

向数字量化和动态管理转变。

总体来看，口腔修复与正畸自动化已成为口腔医学中最具代表性的数字化工作流之一。相较于手术机器人等高复杂度自动化装置，该领域的部分技术路径已具备更高的临床成熟度，尤其在椅旁CAD/CAM、数字印模、透明矫治器设计和3D打印制造等方面已形成较为稳定的应用基础[62,71]。但其进一步发展仍需解决材料性能一致性、设计算法泛化能力、制造精度边界以及临床长期证据积累等问题。未来，修复与正畸自动化的发展方向将不仅是进一步提高制造速度，更在于实现从数字采集、智能设计到临床评价与远程随访的全流程协同优化[69,71,73,77]。

5　口腔护理与维护自动化技术与装置

传统口腔卫生护理主要依赖手动牙刷与牙线，不仅清洁盲区多、依从性差，对儿童、老年人及肢体功能受限者尤为不利。随着电动牙刷、口腔冲洗器以及集成传感器和算法的智能设备出现，口腔护理逐步从手工操作转向智能驱动，在菌斑控制、患者依从性和远程健康管理方面显示出优势[78-81]。与修复和正畸领域中数字化采集-建模-设计-制造的工作流不同，口腔护理与维护中的数字化主要体现在清洁行为、菌斑分布、使用频率和护理效果的感知、记录与反馈，而自动化则进一步表现为借助电动驱动、脉冲冲洗、智能控制或机器人执行，实现更稳定、可重复的清洁动作与维护过程。二者相互衔接，共同推动口腔护理由经验性日常行为向可监测、可反馈和可持续优化的健康管理模式转变[79-80]。

5.1　电动牙刷与口腔冲洗器的自动化清洁应用

电动牙刷是应用最广泛的护理型自动化装置之一。其通过振动/声波或旋转-振动驱动刷头，可在较短时间内覆盖更大牙面并提供更稳定的清洁强度[78]。Van Elslande[82]在9~22岁固定正畸和口腔卫生较差的患者中开展研究，使用带有微震动及针对性小刷头的电动牙刷干预9~14周后，牙菌斑堆积有效减少，提示智能电动牙刷对正畸高危人群具有明确获益。这说明，在护理场景中，自动化首先体现在对刷牙动作和清洁强度的标准化执行，而部分智能设备所具备的使用记录、压力反馈和行为提示功能，则体现了数字化监测在依从性管理中的作用[79,81]。

在邻面和龈下清洁方面，水牙线等口腔冲洗器可通过脉冲水流进入机械牙线难以到达的部位，并对牙龈产生一定按摩效应。随机对照试验表明，与单纯刷牙相比，“牙刷+水牙线”组合可显著降低牙龈出血指数和龈炎水平，并改善龈上菌斑微生态，厌氧致病菌比例下降，菌群向有利于健康的方向重塑[83]。在Ⅰ、Ⅱ期牙周炎患者中，居家水牙线作为洁治后的辅助措施，有助于维持6个月内的牙周健康[84]。针对固定正畸人群的临床研究[85-86]也显示，水牙线在减少托槽周围菌斑和炎症方面优于传统牙线。与此同时，北京大学口腔医院孙玉春团队构建了个性化多喷孔气-水混合喷射清洁装置，并在临床试验中证实其在邻接区的菌斑去除率可达59%，显著优于纯水喷射和受试者日常刷牙方案[87]。这些研究表明，护理自动化装置的价值不仅在于提升单次清洁效率，更在于通过更稳定、可重复的执行方式改善传统护理中的盲区问题；而若进一步结合传感、记录和反馈功能，则有望实现从清洁工具向数字化护理终端的延伸。

5.2　机器人化口腔清洁路径的探索

在电动牙刷和口腔冲洗器等相对成熟装置基础上，研究者开始进一步探索机器人化的口腔清洁路径。Mönnink等[88]构建了一种可感知接触力的协作型触觉机器人，其在体外模型上的清除菌斑效果与牙医手工操作相当，提示机器人有望承担耗时的口腔清洁任务，如护理机构或卧床患者的日常口腔护理。随后，Pieper等[89]将触觉机器人与AI结合，在智能识别菌斑分布下进行邻面清洁，显示出高效清洁性能。在这一方向中，数字化主要体现为对接触力、菌斑分布及清洁路径的感知与识别，自动化则体现为机器人对清洁动作的执行与调控，二者共同构成更高层级的智能护理雏形。

需要指出的是，这类机器人化清洁技术目前仍主要处于实验研究或早期探索阶段，其在真实临床和居家环境中的安全性、成本效益、操作便利性和用户接受度仍需进一步验证[88-89]。也就是说，机器人化清洁更适合作为口腔护理自动化的前沿发展方向，而不宜与电动牙刷、水牙线等已具有较成熟应用基础的装置等量并列。

总体来看，口腔自动化清洁装置不仅在清洁效率、精度和可重复性方面优于传统手工操作，更重要的是能覆盖清洁盲区，适配正畸患者、老年人和行动不便人群等不同场景，为长期口腔健康维护和减轻护理人力负担提供了重要技术支撑。

未来，其发展方向不仅在于进一步提升单一装置的清洁性能，更在于将数字化监测、行为反馈与自动化执行相结合，逐步形成面向长期口腔健康维护的智能化护理体系，同时减轻护理人力负担并提升特殊人群的口腔健康水平。

6 挑战与展望

口腔诊疗自动化技术与装置已逐步应用于多个环节，包括影像分析与辅助诊断、机器人辅助种植与部分手术操作、口腔修复与正畸的数字化设计制造以及居家口腔护理中的智能清洁设备等。总体来看，这些技术在提高诊疗精度、效率和一致性方面显示出一定潜力，并在部分场景下有助于减轻医护负担，改善患者体验，推动口腔医学从经验主导驱动逐步向数据和模型支持的工作模式转变[18,40,59]。但需要指出的是，不同技术的发展阶段和临床成熟度差异较大，目前多数应用仍处于局部优化或特定场景落地阶段，距离广泛、稳定和规范化应用仍有一定距离。

在口腔诊断环节，挑战主要集中于数据质量、模型泛化能力和可解释性。当前自动化诊断研究涉及结构化临床数据、影像数据和文本信息等多种来源，但不同中心之间的数据采集标准、标注质量和病例构成差异较大，限制了模型在跨设备、跨机构和跨人群中的稳定应用。尤其是DL和LLMs虽然在影像识别、智能问诊和文本支持中显示出较好潜力，但其“黑箱性”和结果波动性及幻觉输出问题仍使其难以脱离临床医师独立承担高风险诊断任务[18,36,90]。因此，未来诊断自动化的发展重点，不仅在于提升模型精度，更在于建立高质量数据体系、明确适用边界，并推动多模态诊断模块向可验证、可解释的人机协同系统转化。

在口腔手术与治疗环节，挑战则更多体现为系统复杂性、流程整合和人机协作边界。无论是机器人辅助种植，还是颌面外科相关自动化装置，其临床价值都不仅取决于末端执行精度，还依赖于术前规划、患者配准、术中稳定性和实时调整能力等完整工作流。与此同时，相关系统普遍存在设备成本高、培训周期长、学习曲线陡峭及团队协作要求高等现实问题[40,48,59]。对于微/纳机器人等前沿技术而言，虽然其在复杂感染控制和精细治疗中展现出独特潜力，但目前仍主要停留在实验研究和概念验证阶段，距离形成成熟临床路径尚有较大距离[41,55]。因此，该领域未来的关键不只是继续追求更高精度，更在于提高系统可操作性、优化临床工作流，并明确自动化装置在手术中是“增强术者”而非“替代术者”的合理定位。

在口腔修复与正畸环节，自动化的发展相对更为成熟，但仍面临设计逻辑、材料体系与制造精度协同优化的问题。当前数字化工作流已使修复体和矫治装置的设计制造显著提速，但自动化设计本质上仍依赖于解剖形态、邻接关系、咬合约束、美学参数和病例数据库等多重因素的综合决策，其泛化能力和临床适配性仍受病例复杂度和数据质量影响。与此同时，CAD/CAM切削与3D打印虽然分别在精度稳定性和复杂结构制造方面展现出优势，但材料性能一致性、加工误差控制、长期临床证据积累等问题仍制约其进一步推广[59-60,73]。因此，未来修复与正畸自动化的发展方向，应从单点设备优化进一步走向设计、制造、评价与随访协同的一体化数字工作流。

在口腔护理与维护环节，自动化技术与装置的优势更多体现在高频、长期和居家场景中的依从性提升与盲区覆盖。电动牙刷、水牙线和智能喷射清洁装置等已显示出较好的临床应用基础，但其长期效果仍受患者行为习惯、使用规范性和持续依从性影响。至于机器人化清洁路径和智能识别菌斑分布的护理装置，目前仍处于早期探索阶段，其在真实使用环境中的安全性、成本效益和用户接受度尚需进一步验证[78,85,88]。因此，护理自动化未来的发展重点不仅是提高单次清洁效果，更是结合行为监测、数据反馈和远程管理，形成面向特殊人群和长期口腔健康维护的智能护理体系。

除上述分场景问题外，口腔自动化的进一步发展还面临若干共性挑战。首先，高昂的设备购置与维护成本使先进技术仍主要集中于少数大型医疗机构，基层和社区场景的可及性不足。其次，人机协作中的责任划分、自动化决策的可解释性以及医疗风险归属等制度问题尚缺乏清晰回应，相关技术标准与监管规则仍待完善。再次，大规模临床数据、影像数据和行为数据被用于算法训练与系统优化时，隐私保护与数据安全将成为相关技术能否获得长期信任的关键前提[36,90]。此外，自动化时代对口腔医学人才也提出了新的要求，临床医师除专业操作能力外，还需逐步具备数字工作流理解、数据素养、设备协同及伦理法规意识等跨学科能力。

展望未来，口腔自动化的发展方向不应停留

于单点技术集成，而应走向可负担、可推广、可解释和可监管的系统化应用。一方面，随着算法优化、硬件小型化、制造成本下降以及临床证据的不断积累，相关技术与装置有望进一步进入基层与社区，缩小不同地区和机构之间的诊疗差距。另一方面，其角色也将逐渐从单纯替代手工操作，转变为医生提供标准化执行、客观量化和动态反馈支撑的平台，使口腔医生更多聚焦于诊疗规划、风险把关和人机协同决策。在更成熟的技术标准、伦理框架和监管体系支持下，口腔诊疗自动化技术与装置有望从局部探索逐步走向日常配置，成为推动口腔医学迈向精准化、智能化与均衡化的重要动力。

利益冲突声明：作者声明本文无利益冲突。

[参考文献]

[1] Gawali N, Shah PP, Gowdar IM, et al. The evolution of digital dentistry: a comprehensive review[J]. J Pharm Bioallied Sci, 2024, 16(Suppl 3): S1920-S1922.

[2] Bessadet M, Drancourt N, El Osta N. Time efficiency and cost analysis between digital and conventional workflows for the fabrication of fixed dental prostheses: a systematic review[J]. J Prosthet Dent, 2025, 133(1): 71-84.

[3] Schierz O, Hirsch C, Krey KF, et al. Digital dentistry and its impact on oral health-related quality of life[J]. J Evid Based Dent Pract, 2024, 24(1S): 101946.

[4] Mallineni SK, Sethi M, Punugoti D, et al. Artificial intelligence in dentistry: a descriptive review[J]. Bioengineering (Basel), 2024, 11(12): 1267.

[5] Bahrami R, Pourhajibagher M, Nikparto N, et al. Robot-assisted dental implant surgery procedure: a literature review[J]. J Dent Sci, 2024, 19(3): 1359-1368.

[6] Ebrahimi M, Shaikh H, Sichani HR, et al. Additive manufacturing for dentistry: a comprehensive review of techniques and applications[J]. Prog Mater Sci, 2026, 157: 101613.

[7] Eggmann F, Blatz MB. Recent advances in intraoral scanners[J]. J Dent Res, 2024, 103(13): 1349-1357.

[8] Gulati M, Anand V, Salaria SK, et al. Computerized implant-dentistry: advances toward automation[J]. J Indian Soc Periodontol, 2015, 19(1): 5-10.

[9] Rahim A, Khatoon R, Khan TA, et al. Artificial intelligence-powered dentistry: probing the potential, challenges, and ethicality of artificial intelligence in dentistry [J]. Digit Health, 2024, 10: 20552076241291345.

[10] Ramakrishnan K, Mary AV. Digital transformation and automation in dental clinics: current applications, challenges, and future perspectives[C]//2025 IEEE 6th International Conference in Robotics and Manufacturing Automation. Piscataway, NJ: IEEE, 2025: 101-106.

[11] Van Noort R. The future of dental devices is digital[J]. Dent Mater, 2012, 28(1): 3-12.

[12] Yang CJ, Chen MH, Lin KP, et al. Importing automated management system to improve the process efficiency of dental laboratories[J]. Sensors (Basel), 2020, 20(20): 5791.

[13] Kumar PR, Ravindranath KV, Srilatha V, et al. Analysis of advances in research trends in robotic and digital dentistry: an original research[J]. J Pharm Bioallied Sci, 2022, 14(Suppl 1): S185-S187.

[14] Luo Z, Li A, Unkovskiy A, et al. Accuracy of robotic computer-assisted implant surgery in clinical studies: a systematic review and meta-analysis[J]. BMC Oral Health, 2025, 25(1): 540.

[15] Martinez G, Huang K, Lou Y, et al. Innovative applications of AI and 3D printing in digital dentistry: enhancing accuracy and efficiency in dental care[C]//2024 International Conference on Identification, Information and Knowledge in the Internet of Things. Piscataway, NJ: IEEE, 2024: 237-242.

[16] Lim JN, Lee JY. Development of a personalized oral hygiene management system: home-based remote smart dental care platform[J]. J Dent Hyg Sci, 2024, 24(4): 249-258.

[17] Alotaibi KF, Kassim AM. A fully integrated system for digital dentistry workflow and manufacturing management[J]. J Adv Res Design, 2026, 139(1): 175-186.

[18] Sitaras S, Tsolakis IA, Gelsini M, et al. Applications of artificial intelligence in dental medicine: a critical review [J]. Int Dent J, 2025, 75(2): 474-486.

[19] Feher B, Tussie C, Giannobile WV. Applied artificial intelligence in dentistry: emerging data modalities and modeling approaches[J]. Front Artif Intell, 2024, 7: 1427517.

[20] Umer F, Batool I, Naved. Innovation and application of large language models (LLMs) in dentistry: a scoping review[J]. BDJ Open, 2024, 10(1): 90.

[21] Ferro A, Kotecha S, Fan K. Machine learning in point-

of-care automated classification of oral potentially malignant and malignant disorders: a systematic review and meta-analysis[J]. Sci Rep, 2022, 12(1): 13797.

[22] Gaêta-Araujo H, Alzoubi T, Vasconcelos KF, et al. Cone beam computed tomography in dentomaxillofacial radiology: a two-decade overview[J]. Dentomaxillofac Radiol, 2020, 49(8): 20200145.

[23] Thomas Robbins K, Triantafyllou A, Suárez C, et al. Surgical margins in head and neck cancer: intra- and postoperative considerations[J]. Auris Nasus Larynx, 2019, 46(1): 10-17.

[24] Baykul T, Yilmaz HH, Aydin U, et al. Early diagnosis of oral cancer[J]. J Int Med Res, 2010, 38(3): 737-749.

[25] Dixit S, Kumar A, Srinivasan K. A current review of machine learning and deep learning models in oral cancer diagnosis: recent technologies, open challenges, and future research directions[J]. Diagnostics (Basel), 2023, 13 (7): 1353.

[26] Buchakjian MR, Tasche KK, Robinson RA, et al. Association of main specimen and tumor bed margin status with local recurrence and survival in oral cancer surgery[J]. JAMA Otolaryngol Head Neck Surg, 2016, 142(12): 1191-1198.

[27] Duran-Sierra E, Cheng S, Cuenca R, et al. Machine-learning assisted discrimination of precancerous and cancerous from healthy oral tissue based on multispectral autofluorescence lifetime imaging endoscopy[J]. Cancers (Basel), 2021, 13(19): 4751.

[28] Joskowicz L. Computer-aided surgery meets predictive, preventive, and personalized medicine[J]. EPMA J, 2017, 8(1): 1-4.

[29] Karhade DS, Roach J, Shrestha P, et al. An automated machine learning classifier for early childhood caries[J]. Pediatr Dent, 2021, 43(3): 191-197.

[30] Shujaat S. Automated machine learning in dentistry: a narrative review of applications, challenges, and future directions[J]. Diagnostics (Basel), 2025, 15(3): 273.

[31] Luo D, Zeng W, Chen J, et al. Deep learning for automatic image segmentation in stomatology and its clinical application[J]. Front Med Technol, 2021, 3: 767836.

[32] Vinayahalingam S, Berends B, Baan F, et al. Deep learning for automated segmentation of the temporomandibular joint[J]. J Dent, 2023, 132: 104475.

[33] Nieri M, Serni L, Clauser T, et al. Diagnosis of oral cancer with deep learning. A comparative test accuracy systematic review[J]. Oral Dis, 2025, 31(8): 2368-2381.

[34] Rokhshad R, Mohammad-Rahimi H, Sohrabniya F, et al. Deep learning for temporomandibular joint arthropathies: a systematic review and meta-analysis[J]. J Oral Rehabil, 2024, 51(8): 1632-1644.

[35] Xue T, Chen L, Sun Q. Deep learning method to automatically diagnose periodontal bone loss and periodontitis stage in dental panoramic radiograph[J]. J Dent, 2024, 150: 105373.

[36] Rokhshad R, Ducret M, Chaurasia A, et al. Ethical considerations on artificial intelligence in dentistry: a framework and checklist[J]. J Dent, 2023, 135: 104593.

[37] Mendonça de Moura JD, Fontana CE, Reis da Silva Lima VH, et al. Comparative accuracy of artificial intelligence chatbots in pulpal and periradicular diagnosis: a cross-sectional study[J]. Comput Biol Med, 2024, 183: 109332.

[38] Qutieshat A, Al Rusheidi A, Al Ghammari S, et al. Comparative analysis of diagnostic accuracy in endodontic assessments: dental students vs. artificial intelligence[J]. Diagnosis (Berl), 2024, 11(3): 259-265.

[39] Rajinikanth SB, Rajkumar DSR, Rajinikanth A, et al. An overview of artificial intelligence based automated diagnosis in paediatric dentistry[J]. Front Oral Health, 2024, 5: 1482334.

[40] Huang S, Wang Z, Li M, et al. Current status and future perspectives of robot-assisted dental implant surgery[J]. Int Dent J, 2025, 75(3): 1608-1620.

[41] Babeer A, Bukhari S, Alrehaili R, et al. Microrobotics in endodontics: a perspective[J]. Int Endod J, 2024, 57(7): 861-871.

[42] Troise S, Arena A, Barone S, et al. Transoral robotic surgery in maxillofacial surgery: systematic review of literature on current situation and future perspectives[J]. Curr Probl Surg, 2024, 61(8): 101504.

[43] Nulty A. A literature review on prosthetically designed guided implant placement and the factors influencing dental implant success[J]. Br Dent J, 2024, 236(3): 169-180.

[44] Jia S, Wang G, Zhao Y, et al. Accuracy of an autonomous dental implant robotic system versus static guide-assisted implant surgery: a retrospective clinical study [J]. J Prosthet Dent, 2025, 133(3): 771-779.

[45] Khan M, Javed F, Haji Z, et al. Comparison of the positional accuracy of robotic guided dental implant place-

ment with static guided and dynamic navigation systems: a systematic review and meta-analysis[J]. J Prosthet Dent, 2024, 132(4): 746.e1-746.e8.

[46] Pimkhaokham A, Chow J, Pozzi A, et al. Computer-assisted and robotic implant surgery: assessing the outcome measures of accuracy and educational implications [J]. Clin Oral Implants Res, 2024, 35(8): 939-953.

[47] Liu C, Liu Y, 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.

[48] Bahrami R, Pourhajibagher M, Nikparto N, et al. Robot-assisted dental implant surgery procedure: a literature review[J]. J Dent Sci, 2024, 19(3): 1359-1368.

[49] 赵晓敏, 张莹, 高小波, 等 . 口腔种植机器人技术在下颌骨种植中的应用研究进展[J]. 机器人外科学杂志(中英文), 2025, 6(6): 1062-1068.
Zhao XM, Zhang Y, Gao XB, et al. Research progress on the application of dental implant robotic technology in mandibular implantation[J]. Chin J Robot Surg, 2025, 6(6): 1062-1068.

[50] Siqueira JF Jr, Silva WO, Romeiro K, et al. Apical root canal microbiome associated with primary and posttreatment apical periodontitis: a systematic review[J]. Int Endod J, 2024, 57(8): 1043-1058.

[51] Yang S, Meng X, Zhen Y, et al. Strategies and mechanisms targeting *Enterococcus faecalis* biofilms associated with endodontic infections: a comprehensive review [J]. Front Cell Infect Microbiol, 2024, 14: 1433313.

[52] Babeer A, Bukhari S, Alrehaili R, et al. Microrobotics in endodontics: a perspective[J]. Int Endod J, 2024, 57(7): 861-871.

[53] Tran HH, Jaruchotiratanasakul N, Xiang Z, et al. Nanozyme-shelled microcapsules for targeting biofilm infections in confined spaces[J]. Adv Healthc Mater, 2025, 14 (8): e2402306.

[54] Babeer A, Oh MJ, Ren Z, et al. Microrobotics for precision biofilm diagnostics and treatment[J]. J Dent Res, 2022, 101(9): 1009-1014.

[55] Tran HH, Watkins A, Oh MJ, et al. Targeting biofilm infections in humans using small scale robotics[J]. Trends Biotechnol, 2024, 42(4): 479-495.

[56] Troise S, Arena A, Barone S, et al. Transoral robotic surgery in maxillofacial surgery: systematic review of literature on current situation and future perspectives[J]. Curr Probl Surg, 2024, 61(8): 101504.

[57] Ebeling M, Scheurer M, Sakkas A, et al. First-hand experience and result with new robot-assisted laser LeFort-Ⅰ osteotomy in orthognathic surgery: a case report[J]. J Pers Med, 2023, 13(2): 287.

[58] Köhnke R, Chin SJ, Assaf AT, et al. Performance and safety evaluation of a cold ablation robot-guided laser osteotome (CARLO) in 28 midface osteotomies[J]. Sci Rep, 2024, 14(1): 27160.

[59] Abduo J, Rasaie V. Digital Workflows in prosthodontics [J]. Aust Dent J, 2025, 70(Suppl 1): S146-S158.

[60] Gracea RS, Winderickx N, Vanheers M, et al. Artificial intelligence for orthodontic diagnosis and treatment planning: a scoping review[J]. J Dent, 2025, 154: 105442.

[61] Ruiz DC, Mureșanu S, Du X, et al. Unveiling the role of artificial intelligence applied to clear aligner therapy: a scoping review[J]. J Dent, 2025, 154: 105564.

[62] Cioloca Holban C, Tatarciuc M, Vitalariu AM, et al. Three-dimensional printing and CAD/CAM milling in prosthodontics: a scoping review of key metrics towards future perspectives[J]. J Clin Med, 2025, 14(14): 4837.

[63] Zupancic Cepic L, Gruber R, Eder J, et al. Digital versus conventional dentures: a prospective, randomized crossover study on clinical efficiency and patient satisfaction [J]. J Clin Med, 2023, 12(2): 434.

[64] El Osta N, Bessadet M, Drancourt N, et al. Time efficiency and cost of fabricating removable complete dentures using digital, hybrid, and conventional workflows: a systematic review[J]. J Prosthet Dent, 2025, 133(5): 1194-1208.

[65] Ille CE, Jivănescu A, Pop D, et al. Exploring the properties and indications of chairside CAD/CAM materials in restorative dentistry[J]. J Funct Biomater, 2025, 16(2): 46.

[66] Zandinejad A, Floriani F, Lin WS, et al. Clinical outcomes of milled, 3D-printed, and conventional complete dentures in edentulous patients: a systematic review and meta-analysis[J]. J Prosthodont, 2024, 33(8): 736-747.

[67] Abdelfattah MY, Al Humayyani N, Alwthinani FK, et al. *In vitro* evaluation of the mechanical and optical properties of 3D printed vs CAD/CAM milled denture teeth materials[J]. Saudi Dent J, 2024, 36(9): 1227-1232.

[68] Aljulayfi IS, Almatrafi AH, Althubaitiy RO, et al. The potential of artificial intelligence in prosthodontics: a comprehensive review[J]. Med Sci Monit, 2024, 30: e944310.

[69] Schwendicke F, Mohammad Rahimi H, Tichy A. Artifi-

cial Intelligence in Prosthodontics[J]. Dent Clin North Am, 2025, 69(2): 315-326.

[70] Alqutaibi AY, Hamadallah HH, Alturki KN, et al. Practical applications of robots in prosthodontics for tooth preparation and denture tooth arrangement: a scoping review[J]. J Prosthet Dent, 2025, 134(2): 377.e1-377.e9.

[71] Khan MI, Laxmikanth SM, Gopal T. Artificial intelligence and 3D printing technology in orthodontics: future and scope[J]. AIMS Biophys, 2022, 9(3): 182-197.

[72] Cao L, van Nistelrooij N, Liu J, et al. Fully automated tooth segmentation and labeling for both full- and partial-arch intraoral scans using deep learning[J]. Int Dent J, 2025, 75(5): 100950.

[73] Preda F, Elshazly N, Jacobs R. AI-enhanced orthodontic treatment planning-a scoping review on evidence-based clinical application with commercial software overview [J]. J Dent, 2025, 163: 106112.

[74] Aarab G, Arcache P, Lavigne GJ, et al. The effects of mandibular advancement appliance therapy on jaw-closing muscle activity during sleep in patients with obstructive sleep apnea: a 3-6 months follow-up[J]. J Clin Sleep Med, 2020, 16(9): 1545-1553.

[75] Minakuchi H, Fujisawa M, Abe Y, et al. Managements of sleepbruxism in adult: a systematic review[J]. Jpn Dent Sci Rev, 2022, 58: 124-136.

[76] Bartolucci ML, Bortolotti F, Corazza G, et al. Effectiveness of different mandibular advancement device designs in obstructive sleep apnoea therapy: a systematic review of randomised controlled trials with meta-analysis[J]. J Oral Rehabil, 2021, 48(4): 469-486.

[77] Nordblom NF, Büttner M, Schwendicke F. Artificial intelligence in orthodontics: critical review[J]. J Dent Res, 2024, 103(6): 577-584.

[78] Zou Y, Grender J, Adam R, et al. A meta-analysis comparing toothbrush technologies on gingivitis and plaque [J]. Int Dent J, 2024, 74(1): 146-156.

[79] Maini V, Roy R, Gandhi G, et al. Artificial-intelligence-based smart toothbrushes for oral health and patient education: a review[J]. Hygiene, 2025, 5(1): 5.

[80] Kim J, Choi Y, Song Y, et al. Smartphone-based telemonitoring for better oral health with toothbrushes: 6-month randomized controlled trial[J]. J Med Internet Res, 2025, 27: e65128.

[81] Farhadifard H, Soheilifar S, Farhadian M, et al. Orthodontic patients' oral hygiene compliance by utilizing a smartphone application (Brush DJ): a randomized clinical trial[J]. BDJ Open, 2020, 6(1): 24.

[82] Van Elslande D. Use of an oscillating-rotating electric toothbrush and novel brush head to increase brushing motivation and reduce plaque among orthodontic patients[J]. Compend Contin Educ Dent, 2022, 43(3): f14-f19.

[83] Xu X, Zhou Y, Liu C, et al. Effects of water flossing on gingival inflammation and supragingival plaque microbiota: a 12-week randomized controlled trial[J]. Clin Oral Investig, 2023, 27(8): 4567-4577.

[84] Liu J, Zhou Y, Zhang L, et al. Effects of daily home-use water flossing as an adjunct to non-surgical periodontal therapy in the treatment of stage Ⅰ-Ⅱ periodontitis: a 6-month randomized controlled trial[J]. Clin Oral Investig, 2025, 29(12): 567.

[85] AlMoharib HS, AlAskar MH, AlShabib AN, et al. The effectiveness of dental water jet in reducing dental plaque and gingival bleeding in orthodontic patients: a systematic review and meta-analysis of randomized clinical trials[J]. Int J Dent Hyg, 2024, 22(1): 56-64.

[86] AlMoharib HS, Alqasem A, Almusfer G, et al. The effectiveness of water jet flossing and interdental flossing for oral hygiene in orthodontic patients with fixed appliances: a randomized clinical trial[J]. BMC Oral Health, 2024, 24(1): 498.

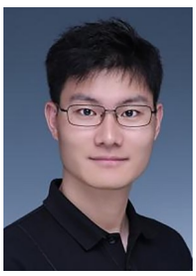
[87] Guo S, Gao L, Zhao J, et al. Development and clinical evaluation of a personalised whole-mouth plaque removal device based on air-water bubbly jets[J]. Transl Dent Res, 2025, 1(1): 100006.

[88] Mönnink C, Eich L, Haddadin S, et al. Dentronics: tooth cleaning with a tactile collaborative robot-an *in vitro* proof of concept[J]. Int J Comput Dent, 2023, 26(2): 167-174.

[89] Pieper L, Stiesch M, Eich L, et al. Interproximal tooth cleaning operated by a tactile robot. An *in vitro* analysis [J]. Int J Comput Dent, 2024, 27(3): 251-258.

[90] Ducret M, Wahal E, Gruson D, et al. Trustworthy artificial intelligence in dentistry: learnings from the EU AI Act[J]. J Dent Res, 2024, 103(11): 1051-1056.

·专家简介·



张旭，北京大学口腔医学院·口腔医院新体制助理教授、副研究员，博士研究生导师。中国机械工程学会生物制造工程分会委员，*Exploration*、*BMEMat*等期刊青年编委，入选北京市“高创计划”科技新星和青年人才托举工程等。目前主要从事异质组织界面的生物制造与功能重建研究，聚焦生物3D打印介导的口腔组织数字化再造与转化应用。主持国家自然科学基金面上项目、国家重点研发计划（课题）等项目。以第一作者（共同）/通信作者在*Science Advances*、*Trends in Biotechnology*、*Journal of Dental Research*等国际期刊发表论文30余篇，申请发明专利15项。曾获得2025年中华医学科技奖二等奖、2024中华口腔医学会科技奖二等奖、第49届日内瓦国际发明展金奖等奖项。



周永胜，北京大学口腔医学院·口腔医院党委书记，教授、主任医师，博士研究生导师；北京大学博雅特聘教授；口腔疾病国家临床医学研究中心主任、国家卫生健康委口腔数字医学重点实验室主任、中国医学科学院口腔数字医学重点实验室主任、颅颌面组织生物智造与修复再生北京市重点实验室主任；国家口腔医学中心副主任；口腔生物材料和数字诊疗装备国家工程研究中心副主任。入选长江学者特聘教授、国家百千万人才、国家“万人计划”教学名师、教育部新世纪优秀人才，系国家有突出贡献中青年专家、“十三五”“十四五”国家重点研发计划首席科学家，享受国务院政府特殊津贴，系首都科技领军人才、北京市先进科技工作者、中华口腔医学科技创新人物。兼任国务院学位委员会第8届口腔医学学科评议组召集人、中国牙病防治基金会副理事长。主要研究领域为口腔颌面组织缺损的生物再生性修复和数字化智能化仿生替代性修复与治疗，获教育部和中华医学会等科技成果奖9项。制定国际标准、行业标准、团体标准等30余项。系国家级一流本科课程负责人；教育部首批虚拟教研室带头人；获国家级教学成果奖1项、省部级教育成果奖6项；系国家级和省部级教学名师、北京市课程思政示范课程负责人和教学名师。

（本文编辑　杜冰）