

· 特约述评 ·

数字化及数智化在无牙颌种植修复中的助力与破局

撒悦^{1,2,3} 蔡映琦^{1,2} 孙伊彤^{1,2} 赵茗宇^{1,2} 夏诗辞^{1,2}

1. 口腔系统重建与再生全国重点实验室, 口腔生物医学教育部重点实验室, 口腔医学湖北省重点实验室, 武汉大学口腔医学院, 武汉 430079;
2. 武汉大学口腔医院修复科, 武汉 430079;
3. 武汉大学口腔医院修复工艺科, 武汉 430079

[摘要] 数字化及数智化技术可助力优化无牙颌种植修复的临床工作流程, 在治疗全阶段显著提升精度、可预测性与效率。术前阶段, 通过获取患者数字化信息模型, 并结合人工智能驱动的规划系统开展数据整合, 能够个性化设计种植体位置与修复体形态, 进而实现精准的功能与美学匹配; 手术过程中, 采用静态种植导板、动态导航系统或种植机器人系统, 可有效提高手术精度, 最大限度降低患者创伤; 在即刻修复与最终修复阶段, 依托口内、口外扫描系统的数字化印模技术, 能精准获取无牙颌种植相关的种植体及软硬组织信息。其中, 人工智能辅助算法与改良口内扫描杆的应用, 可进一步提升患者舒适度, 提高椅旁工作效率。当遇到金属修复体伪影干扰时, 采用伪影校正算法或增加可识别标记点的方法, 均能提升虚拟数据拟合精度, 减少金属伪影对数据匹配的影响, 为数字化术前规划提供更可靠的数据支撑。针对翼板区倾斜种植等复杂无牙颌病例, 基于数字化三维建模的口腔种植机器人系统可实现种植体的高精度植入及术中动态校准, 从而提高修复的可预测性。目前, 数字化流程仍面临数据交互及操作规范不统一等问题, 但通过统一数据标准、整合全流程数智化平台并规范临床操作流程, 可为无牙颌种植修复的标准化与智能化应用提供技术基础。可以预见, 未来数字化及数智化技术将持续推动无牙颌种植修复领域的发展, 为患者提供更优质、高效、安全的种植修复方案。

[关键词] 数字化; 数智化; 无牙颌; 种植; 导板; 动态导航; 种植机器人

[中图分类号] R783.4 **[文献标志码]** A **[doi]** 10.7518/hxkq.2026.2025440



本文链接 开放科学标识码

Assistance and breakthrough of digitalization and intelligent digitalization in implant restoration of edentulous jaws

Sa Yue^{1,2,3}, Cai Yingqi^{1,2}, Sun Yitong^{1,2}, Zhao Mingyu^{1,2}, Xia Shici^{1,2}

1. State Key Laboratory of Oral & Maxillofacial Reconstruction and Regeneration, Key Laboratory of Oral Biomedicine Ministry of Education, Hubei Key Laboratory of Stomatology, School and Hospital of Stomatology, Wuhan University, Wuhan 430079, China; 2. Dept. of Prosthodontics, School and Hospital of Stomatology, Wuhan University, Wuhan 430079, China; 3. Dept. of Dental Technology, School and Hospital of Stomatology, Wuhan University, Wuhan 430079, China

Supported by: Special Fund for Basic Scientific Research Business Expenses of Central Universities (2042025YXB022)

Correspondence: Sa Yue, E-mail: sayue@whu.edu.cn

[Abstract] Digital and intelligent digital technologies can help optimize the clinical workflow of edentulous jaw implant restoration, significantly improving precision, predictability, and efficiency throughout all stages of treatment. In

the preoperative phase, by acquiring the patient's digital information model and integrating data with the assistance of an artificial intelligence-driven planning system, personalized design of implant positions and prosthesis morphologies can be achieved, thereby realizing accurate

[收稿日期] 2025-11-07

[基金项目] 中央高校基本科研业务费专项基金 (2042025YXB022)

[第一作者] 撒悦, 副教授, 博士, E-mail: sayue@whu.edu.cn

[通信作者] 撒悦, 副教授, 博士, E-mail: sayue@whu.edu.cn

functional and aesthetic matching. During the surgical procedure, the adoption of static implant guides, dynamic navigation systems, or implant robotic systems can effectively enhance surgical precision and minimize patient trauma to the greatest extent. In the immediate and final restoration phases, digital impression technology based on intraoral and extraoral scanning systems enables accurate acquisition of information regarding implants, as well as hard and soft tissues related to edentulous jaw implantation. Among these technologies, the application of AI-assisted algorithms and modified intraoral scan bodies can further improve patient comfort and chairside work efficiency. When encountering metal restoration artifact interference, the use of artifact correction algorithms or methods to increase identifiable marker points can both enhance the fitting precision of virtual data, reduce the impact of metal artifacts on data matching, and provide more reliable data support for digital preoperative planning. For complex edentulous cases, such as pterygoid implant placement, implant robotic systems based on digital three-dimensional modeling enable high-precision implantation with intraoperative dynamic calibration, thereby improving prosthetic predictability. Although challenges remain in data interoperability and standardization of clinical protocols, the integration of unified data standards, comprehensive intelligent platforms, and standardized workflows may facilitate the standardized and intelligent application of digital technologies in edentulous implant rehabilitation. It is foreseeable that in the future, digital and intelligent digital technologies will continue to drive the development of the edentulous jaw implant restoration field, providing patients with more high-quality, efficient, and safe implant restoration solutions.

[Key words] digitalization; intelligent digitalization; edentulous jaw; implant; guide; dynamic navigation; dental implant robot

牙齿缺失会显著影响患者生活质量,其中全牙列缺失的无牙颌患者受到的影响尤为明显。此类患者不仅会出现咀嚼功能丧失,还会伴随颜面部美观受损、发音功能障碍等问题,进而对其身心状态产生严重负面影响。近年来,多颗种植体支持的无牙颌固定义齿修复可显著提升义齿的固位力与稳定性,改善患者咀嚼功能并有效提高其生活质量,受到越来越多患者的认可。

传统无牙颌种植手术大多凭借医生经验,通过术中对解剖标志的判断,以自由手的方式植入种植体。随后再通过树脂夹板连接多颗种植体,采集种植体位置信息并利用开窗式托盘取模得到灌注模型,进而完成即刻修复或最终修复。一项系统性综述^[1]表明,在无牙颌种植修复中,夹板式印模法通过连接多个种植体转移杆,可以减少累积误差,其准确性高于非夹板式印模法。传统无牙颌种植修复方法虽然经大量临床病例验证有效,但仍然存在种植位点精准度不高、操作流程繁琐、患者张口时间长、体验感差等弊端。

伴随数字化及数智化技术的迅猛进步,医生可在术前更精准、轻松地获取口腔环境及颌骨信息,实现从种植体植入到修复设计、制作的全数字工作流程^[2]。数字化技术(digital technology)主要侧重于数据转化,将口腔组织物理形态转化为数字信息,通过扫描、建模等方式实现精准记录与标准化流程,例如口扫取模、静态种植导板设

计。数智化技术(digital intelligence technology)的核心是智能优化,其以数字化为基础,融合人工智能(artificial intelligence, AI)算法以实现数据驱动的智能决策与闭环优化,例如基于AI驱动的智能规划系统、动态导航及口腔种植机器人辅助手术。相较于传统修复方式,数字化技术在无牙颌种植修复领域的应用持续拓展,而数智化技术则是数字化的升级与闭环,两者的相辅相成不仅显著缩短临床操作时间、减轻患者就医不适感,更为无牙颌种植修复提供了全新的技术路径与解决方案。

1 数字化与数智化在无牙颌种植修复中的助力

1.1 精准的术前规划与设计

数字化技术为无牙颌种植修复的术前规划及设计提供了强大的技术支持。依靠术前的锥形束计算机断层扫描(cone beam computed tomography, CBCT)和口内扫描(intraoral scan, IOS),医生可获得患者全面的解剖数据和精准的三维数字模型。基于此,医生可精准规划种植体的位置、角度、深度等关键指标,从而有效规避传统手术中因医生经验判断而产生的误差。近年来,数字化技术稳步发展,在三维数据的基础上,还进一步增添引入4D虚拟患者及AI驱动的智能规划系统等数智化新技术,促进术前规划设计的全面升级。

4D 虚拟患者技术通过整合 CBCT 影像、IOS/面部扫描数据及颌运动数据，实现患者面部表情、咬合关系与解剖结构的动态融合建模^[3-4]。该技术以修复为导向，可同时满足功能与美学的双重需求，在术前即可完成种植体植入位置与修复体外形的个性化精准匹配^[5-6]，并能在无牙颌种植修复中支持多学科协同设计的实时可视化验证。这一技术提升了无牙颌种植术前规划的精准度与个性化水平^[7]。

基于 AI 驱动的智能规划系统通过整合 CBCT 和 IOS 数据后进行自动化分析，在实现高精度的种植术前规划上有极大潜力。一项体外研究^[8]对比了 AI 和人在单牙缺失模型上规划术前虚拟种植的结果，发现 AI 在规划最佳种植体位置和尺寸方面与人的规划高度一致。AI 选择的种植体尺寸为长度 11.7 mm±1.3 mm、直径 4.0 mm±0.3 mm，与人选择的长度 11.5 mm±1.3 mm、直径 4.2 mm±0.4 mm 非常相近。在手术规划的时间上，AI 可将时间缩短到 187 s±34 s，而人的时间为 406 s±68 s。这提示了 AI 在未来助力实施全牙弓种植修复工作的潜能，不过还需要进一步的前瞻性临床研究来验证其在不同临床情况下的适用性。

此外，有研究^[9]表明在无牙颌种植手术的骨支持导板设计过程中，可以通过 AI 技术对上下颌骨的 CBCT 图像进行自动骨分割，为无牙颌种植手术提供精确的解剖数据基础，使种植位置和角度的

规划更加高效和准确。实验结果显示，种植体植入的平台偏差为 1.24 mm，尖端偏差为 1.29 mm，偏差值在临床可接受的范围内，而在三维偏差分析中，上下颌种植体之间的差异无统计学意义。这表明，AI 技术作为辅助工具可在保证无牙颌种植手术的安全性和成功率的同时，显著提高导板设计的效率。

AI 技术还可与混合现实技术融合，使医生能够在术前规划阶段通过全息环境直观地把握患者解剖结构，规划种植体的位置、倾斜度和深度，显著提高规划的直观性和效率。研究^[10]表明，在全息环境中完成一例 36 牙与 46 牙位点的种植手术规划仅需用时 10 min，术前规划与术后实际种植体位置的精度测量结果显示，36 牙位点种植体颈部线性偏差为 0.31 mm，尖端偏差为 0.55 mm，种植体长轴角度偏差为 4.12°，46 牙位点种植体颈部偏差为 0.16 mm，尖端偏差为 0.44 mm，角度偏差为 4.66°，偏差皆在临床可接受范围内。AI 技术通过自动化影像分析与智能决策提高了规划的效率，并以足够的精度解决简单的病例，未来有望在无牙颌种植修复中发挥关键作用。

1.2 优化手术过程

在无牙颌种植修复中，使用静态种植导板、动态导航技术及种植机器人皆能有效辅助手术。种植手术数字化及数智化辅助技术特征见表 1。

表 1 种植手术数字化及数智化辅助技术特征

Tab 1 Features of digitalization and intelligent digitalization in implant surgery

项目	静态种植导板	动态导航技术	口腔种植机器人
核心操作流程	获取 CBCT 及口扫数据后进行手术规划，经 CAD/CAM 设计制作导板，术中验证导板贴合度，自由手操作下由金属套筒引导钻针路径	红外光学系统将 CBCT 影像与术区配准，实时追踪钻针路径，灵活修改手术方案，自由手进行手术	在动态导航的基础上增设机械臂，患者全程需佩戴口外标记物，由机械臂执行手术操作
术中灵活性	低	高	高
操作门槛	低	高	高
整体成本	低	高	高
患者舒适度	低	高	中
适用病例	骨条件良好的简单病例	解剖结构复杂、多植体、无牙颌等复杂病例	解剖结构复杂、多植体、无牙颌等复杂病例

注：CAD/CAM 为计算机辅助设计和计算机辅助制造 (computer aided design and computer aided manufacturing)。

静态种植导板现今在临床上广泛使用，临床医生对其操作方法已较成熟。但是整体程序较为繁琐，步步为营且环环相扣。患者在术前完成 CBCT 影像采集与口内扫描后，将数据融合以进行种植规划，再经 CAD/CAM 设计、3D 打印制作导板。手术开始前需先验证导板与口腔组织的贴合

度，确认无松动或移位之后，由导板金属套筒引导钻针路径。全程需严格遵循术前规划，无法根据术中实际情况随意调整，并且目前多数导板在备洞过程中的冷却问题仍未得到有效解决。此外，术中对患者张口度的要求较高，不适感相对较强。从术前准备到术中实施，任何环节的微小误差都

可能累积影响种植精度。但静态种植导板整体成本较低,只需在手术开始前简单消毒后即可使用,因此导板适用于骨条件良好、无需复杂调整、只需控制钻针方向和深度的病例。

动态导航技术的手术流程和临床操作指南与自由手操作一致,皆遵从逐级备洞、实时冷却的原则。通过红外光学追踪系统,将CBCT影像与实际手术场景精准配准,医生可同步获取种植体植入角度、深度的三维校准信息,实时追踪钻孔方向,还能根据实际情况灵活修改手术方案,且无需配套的工具盒,适合条件较复杂的病例。然而,受限于操作者对器械的熟悉程度,临床医生需要经过一定时间的培训,术前配准也要花费较长时间,且设备的投入成本较高。

口腔种植机器人在动态导航的基础上增加机械臂,其优劣势与导航系统相似,同样适用于全牙弓、多植体或高风险区域的植入。然而,机械臂移动和反应速度相比动态导航应用人类手臂较缓慢,对患者张口度和耐受性有更高的要求。尤其是接受无牙颌种植的患者,术中需要固定、全程佩戴标记物并延伸至口外,这也在一定程度上降低患者的舒适度,而且可能在术中发生形变导致精度降低,甚至遮挡视野导致发生并发症。

一项体外研究^[11]针对自由手、静态种植导板、动态导航系统及口腔种植机器人的手术精度进行对比,发现口腔种植机器人的精度最高,在入口偏差($0.48\text{ mm}\pm 0.18\text{ mm}$)、根部偏差($0.47\text{ mm}\pm 0.03\text{ mm}$)和角度偏差($0.53^\circ\pm 0.20^\circ$)等关键指标上均表现出最佳精度,显著优于其他3种方法。

1.2.1 静态种植导板在无牙颌种植手术中的应用

基于精准的术前规划,技师可设计并制作数字化种植导板。静态种植导板在无牙颌种植手术中能为医生提供精准引导,确保种植体植入的位置与角度精度,有效降低手术风险。不同类型的数字化导板可根据手术复杂程度及患者解剖条件发挥特定作用。

常见种植导板为树脂材质的单一结构。近年来,也可根据临床具体情况对其进行个性化改良。例如,带冲洗通道的3D打印种植导板在手术过程中可实现持续降温冷却,进一步提升手术安全性^[12]。组合式(堆叠样式)导板则适用于全牙弓修复手术,可以在一次手术中依次完整骨修整、植体定位和临时修复体就位^[13]。锥楔固定的金属堆叠式导板能进一步提高导板稳定性及重复定位的精准度,可用于需进行即刻负重的无牙颌患

者^[14]。金属导板相较于传统树脂导板具有更高的结构强度^[15],金属材质的刚性支撑也能提升导板稳定性;在无牙颌种植手术中,结合数字化规划可实现精准的无瓣植入操作^[16],有效减少无牙颌手术翻瓣范围。具体选择哪种需要结合无牙颌骨条件及手术复杂程度进行综合判定(图1~3)。

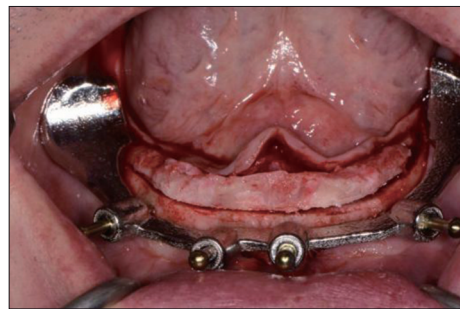


图1 金属截骨导板

Fig 1 Metal osteotomy guide

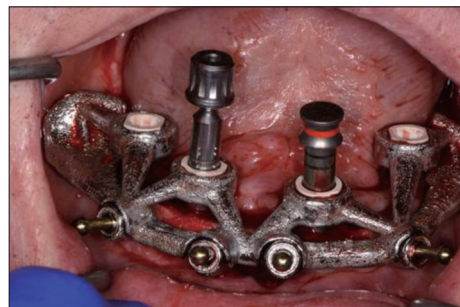


图2 金属种植导板,通过堆叠样式放在金属截骨导板上

Fig 2 The metal implant surgical guide is positioned in a stackable configuration on top of the metal osteotomy guide

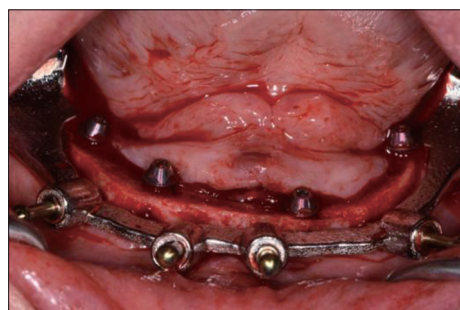


图3 在金属导板辅助下将种植体放置在合适的位点

Fig 3 Using the metal surgical guide, the implants are accurately positioned in the predetermined sites

1.2.2 动态导航辅助手术在无牙颌种植手术中的应用

动态导航技术借助运动追踪技术,将术前规划的种植体植入位置与角度实时叠加至手术区域,结合参考阵列实现三维可视化引导,从而保障手术的精准实施^[17]。该技术尤其适用于解剖结构复杂、精度要求高的无牙颌种植修复场景^[18]。

与种植导板相比,动态导航的便捷性主要体现在其高度灵活性上,不仅可在手术过程中实时调整种植方案^[17-18],还能与各类种植系统兼容,无需配置专用工具箱;同时,该技术无需依赖实体导板,既解决了患者开口度限制导板放置的问题,又能保证手术视野清晰。一项前瞻性临床研究^[19]发现,通过动态导航辅助进行无牙颌即刻种植或延期种植,整体颈部和尖端的偏差分别为 $1.17\text{ mm}\pm 0.57\text{ mm}$ 和 $1.30\text{ mm}\pm 0.62\text{ mm}$,整体角度的偏差为 $2.19^\circ\pm 1.26^\circ$,显示不论牙槽骨情况如何,动态导航技术均有助于提高准确性。

1.2.3 口腔种植机器人在无牙颌种植手术中的应用

口腔种植机器人通过智能动态控制实现种植体的高精度植入,对提升无牙颌种植手术的安全性与效率有极大的潜力。将AI技术、动态导航与机械臂融合构建智能手术系统,可实现种植路径的预规划、实施调整及力控植入,以提高复杂病例的手术精准度^[20-21]。研究^[22]表明,口腔种植机器人系统能够整合机器人智能、机器视觉、多传感器信息融合及三维图形可视化等核心技术,以术前CBCT及IOS数据为基础,在立体视觉传感器与力传感器的协同控制下,机械臂可依据术前规划方案,实时监测并完成种植窝洞制备及种植体植入操作。

相较于传统自由手种植手术,机器人辅助种植手术在安全性、时间效率及骨结合稳定性等方面均表现更优。一项病例报告^[23]发现,在口腔种植机器人辅助下可进行无牙颌的无翻瓣手术并实现即刻修复,冠向偏差、尖端偏差、角度偏差分别为 $0.91\text{ mm}\pm 0.43\text{ mm}$ 、 $1.01\text{ mm}\pm 0.45\text{ mm}$ 、 $1.21^\circ\pm 1.24^\circ$,均显著优于静态种植导板,并且在临床可接受范围内,这显示其在无牙颌微创即刻修复中的应用潜力。另一项为期1年的前瞻性队列研究^[24]显示,机器人辅助无牙颌种植术后种植体周组织(包括牙周袋深度、颊侧骨厚度和牙龈乳头—颊侧骨嵴峰值)均无显著骨吸收,在1年的随访期间保持稳定,提示良好的种植体骨结合稳定性。

1.3 提升修复体制作精度与效率

1.3.1 数字化印模制取

传统无牙颌种植修复的模型制取,多采用经典的开窗式—夹板式连接印模法。该方法虽准确可靠,但需预先制取初印模以制作个性化开窗托盘,再通过牙线或截断钢丝完成印模杆连接。此过程不仅操作流程繁琐,还会因患者长时间张口导致就医体验差。笔者团队^[25]在临床实践中,对

此进行改良,利用无牙颌种植导板制作个性化开窗印模托盘,并利用修复科常见的废旧金刚砂车针代替钢丝连接印模杆,有效地提升了临床操作效率。

近年来,随着数字化技术的发展,采用口外扫描技术(包括口外扫描和口外摄影测量系统)来制取无牙颌最终印模,可更快速、精准地获取口腔组织形态及种植体位置信息,高效、准确地完成无牙颌数据采集^[26-28]。多项研究^[29-31]表明,口外扫描技术的精度与效率能够满足数字化修复体的临床需求。

值得关注的是,为进一步优化临床流程、简化操作并提升可控性,改善患者就医体验,学者已开展无牙颌口内扫描技术的相关探索。由于扫描杆的分布方式及间距会影响扫描识别精度与结果准确性,可以通过优化扫描杆的几何形态来降低数据拼接误差,提高全牙弓扫描的空间精度。在一项体外研究^[32]中发现,扫描体的长度设计是影响扫描精度的关键因素。在扫描一组6个种植体模型时,使用高度相较标准设计扫描杆降低50%的新型短柱形扫描杆,其平均偏差为 $87\text{ }\mu\text{m}$,标准设计扫描杆的平均偏差为 $102\text{ }\mu\text{m}$,这提示将扫描杆的长度缩短之后,可以提高数字化种植体印模的准确性。另一项体外研究^[33]发现,当使用一种新型拱形延伸结构的扫描杆,其精密度均方根偏差的中位数为 $25.2\text{ }\mu\text{m}$,使用传统夹板式开窗印模的精密度均方根偏差的中位数为 $24.6\text{ }\mu\text{m}$,二者的结果相当。虽然当前证据主要来源于体外模型,但仍有其他研究^[34-35]显示,采用带有辅助几何结构或牙体修饰特征的新型扫描体,能强化多颗种植体间的定位稳定性及扫描连贯性,以降低空间误差,改善长跨距扫描效果,优化数字模型匹配度,提升无牙颌扫描算法的识别成功率与重复精度^[36-38],这都提示了新型扫描杆具有较大的临床应用潜力。

Revilla-León等^[27]通过实验对比了口外与口内摄影测量系统扫描无牙颌全牙弓种植体的精准度,结果显示口外系统在精度上优于口内系统,但所有系统的误差均低于临床阈值($50\text{ }\mu\text{m}$),故口内系统仍能满足临床应用要求。笔者在无牙颌临床病例中应用口内摄影测量系统,取得了满意的临床效果(图4、5)。优化后的无牙颌口内数字化印模采集方法,可为后续修复体制作提供高质量数据支撑,进而为无牙颌种植修复提供更高效、精准的解决方案。

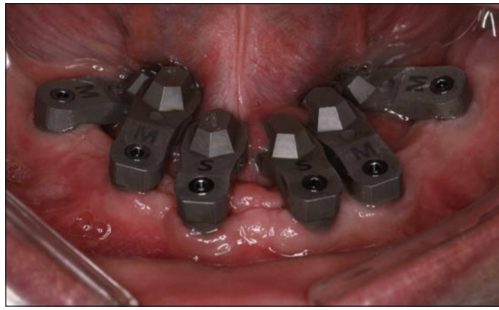


图 4 口内(下颌)安装TruAbutment扫描杆

Fig 4 TruAbutment scan bodies are attached to the mandibular implants

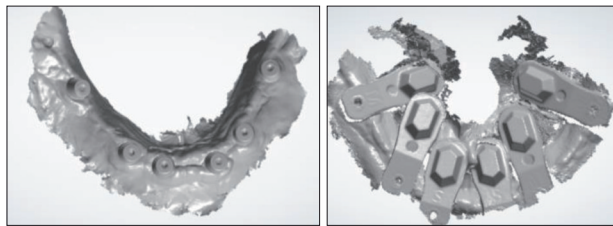


图 5 使用3Shape第五代口扫扫描仪获取口内扫描数据

Fig 5 Intraoral scanning data are acquired using a fifth-generation 3Shape intraoral scanner

值得注意的是, 如对无牙颌口内数字化印模采集时, 在扫描阶段开启AI辅助功能, AI自动对齐功能就会进行预扫描, 扫描杆在未完全完成扫描前就与AI自动对齐, 导致后续扫描基于错误的参考点而形成累积误差^[27]。这提示AI在无牙颌口内数字化印模制取时仍有很大进步空间, 目前仍然需要通过人工复查确保数据采集的可靠性。

1.3.2 修复体设计与制作流程优化

无牙颌种植术后经过数字化印模采集, 技师可在计算机端对数据进行分析与修复体设计, 并直接导入CAD/CAM系统进行加工^[39]。全数字化工作流程(fully digital workflow)规避了传统印模在材料变形、运输或模型翻制过程中可能引入的误差^[40]。一项45例种植体支持的全牙弓固定修复体的临床研究^[41]指出, 利用数字化工作流程制作的修复体均达到口腔修复学临床标准, 即修复体的被动就位边缘间隙 $\leq 50 \mu\text{m}$, 放射学评估无骨吸收或透射线间隙, 这表明数字化工作流程可稳定实现高精度修复。此外, 针对无牙颌即刻负重需求的患者, 开发的可堆叠导板结合CAD/CAM预制临时修复体的技术可实现“术前设计预制与术后即刻戴入”, 有效解决了因缺乏解剖标志而导致的数据配准难题, 进一步保障了修复精度^[40,42]。这样不仅大幅缩短患者等待时间、提升治疗效率, 还能改善患者就医舒适度^[43] (图6~8); 对于美学需

求较高的无牙颌患者, 数字化技术可预先可视化最终修复美学效果, 通过3D打印“加法制造”或CAD/CAM切割“减法制造”技术制备数字化样件供患者评估, 根据反馈及时调整优化, 待医、患、技三方达成共识后, 将最终方案应用于修复体制作。该数字化流程形成了设计与加工的闭环管理, 推动种植修复向智能化、个性化方向发展。

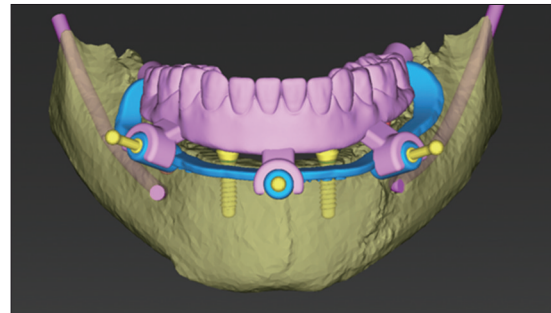


图 6 预先设计用于即刻负重的临时修复体

Fig 6 A provisional restoration for immediate loading is preoperatively designed

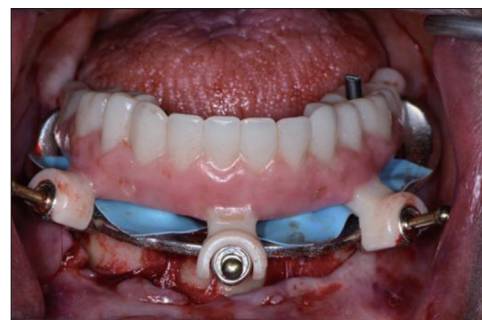


图 7 通过CAD/CAM切割得到PMMA临时修复体, 通过准确放置在截骨导板上确认就位

Fig 7 A PMMA provisional restoration is fabricated by CAD/CAM milling and its accurate fit is verified by positioning it on the osteotomy guide

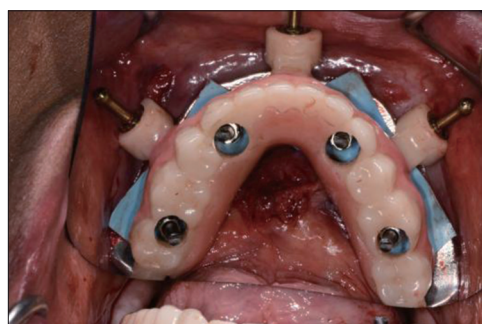


图 8 通过口内简单的“pick-up”形式完成对预制临时修复体的连接, 从而行使其即刻负重功能

Fig 8 The prefabricated provisional restoration is connected intraorally using a simple ‘pick-up’ procedure, allowing it to function as an immediate loading prosthesis

数字化技术贯穿无牙颌种植修复全流程，从术前检查、方案规划、手术实施，到修复体制作与戴入，各环节数据可实现有效整合与共享。医生在整个治疗过程中能够实时采集、分析治疗数据，并根据患者实际情况及时调整治疗方案，最终提升治疗效果，惠及患者。

2 无牙颌种植修复中数字化及数智化面临的挑战及解决方案

2.1 金属伪影问题及解决方法

在无牙颌种植修复中，若患者口腔内存在多单位金属修复体，会导致CBCT成像产生金属伪影，降低图像质量及数据准确性，进而干扰术前数字化规划与术中精准操作。为处理这一难题，有学者^[44]提出了基于投影域的金属伪影去除技术（projection-domain segmentation-based metal artifact reduction, PDS-MAR）。PDS-MAR针对投影域做精细化分割之后，再识别金属区域并重塑清晰图像，明显减少伪影干扰，并提升了软硬组织显示的效果。在PDS-MAR方法的基础上，有学者^[45]提出了“Hessian双编码网络模型”（Hessian-Inspired dual-encoding network, HIDE-NET），结合分段任意模型（segment anything model, SAM）的引导分割策略，在CBCT原始投影阶段就精准辨别金属结构并进行自适应的校正，从而明显减小伪影强度，改善密度均匀状况并提高图像信噪比。这些技术为无牙颌复杂病例里的术前数字化规划及术中导航提供了质量更高的影像数据辅助。

减少金属伪影的另一个思路为：通过增加可识别标记点提升虚拟数据拟合精度，降低金属伪影对数据匹配的干扰，保障种植规划的精准性。笔者团队^[46]提出在患者终末牙列周围角化黏膜区域增加匹配点，再通过CBCT与IOS数据拟合的方法，提高存在多单位金属修复体的终末牙列患者数字化种植规划的准确性。临床实践结果表明，该方法为解决金属伪影干扰问题提供了新的技术路径。

2.2 复杂病例的处理难题与创新方案

针对翼板区倾斜种植支持的无牙颌种植修复等复杂病例，传统自由手种植技术面临操作难度高、手术风险大、术区视野狭窄等诸多挑战，而数字化导板则面临患者张口度限制和导板就位困难的难题。种植机器人技术则为解决此类问题提供了全新途径。笔者团队^[47]曾报告了一种借助自

主口腔种植机器人系统的翼突种植上颌无牙颌修复方式。该方案通过数字化技术构建患者口腔精准三维模型，依托机器人系统实现种植体的高精度植入，显著提升了手术的精准度与稳定性，有效降低了手术风险。此外，数字化技术可对手术过程进行实时监测与动态调整，确保种植体的植入位置及角度与术前规划高度契合，进而实现理想的修复效果。

2.3 数据互作标准化的突破路径

数字化与数智化技术在无牙颌种植修复中还面临一些挑战，主要表现为全流程优化不足，不同数字化设备之间的数据和临床操作的标准尚未统一。这些问题会让诊疗的各个环节衔接不良，比如CBCT、口内扫描仪、导航系统设备之间的数据需要不断转换格式，可能导致效率不足且产生累积误差。而操作规范不统一则不利于技术普及。为解决这些问题，首先需统一数据使用的标准，推行DICOM、STL等国际通用格式及设备厂商开放接口协议。搭建覆盖全流程的数智平台，整合术前评估、术中引导、术后修复等环节并加入AI以进行质量控制，随时校验数据和规划的完整性、合理性。最后制定不同技术的操作手册，明确扫描参数、术中校准及术后评估的标准，通过培训和实际操作考核，统一操作规范并根据不同病例分型，制定标准的诊疗流程。

3 结论与展望

在无牙颌种植修复领域，数字化技术发挥着关键辅助作用。其通过精准的术前规划（如基于CBCT与IOS数据的种植体位置设计）、优化的手术流程（如动态导航或机器人辅助种植）、高精度修复体制作（如CAD/CAM系统驱动的修复体加工）及规范化治疗管理（如全流程数据整合与质量管控），显著提升了无牙颌种植修复的治疗效果、临床效率与预后可预测性，有效满足了患者在功能恢复、美学重建等方面的多样化需求。

数字化技术在无牙颌种植修复的应用中仍面临特定挑战：一是金属伪影干扰，当患者口腔存在多单位金属修复体时，易影响CBCT影像质量与数据准确性，进而干扰术前规划；二是复杂病例处理难度，如翼板区倾斜种植的场景，对数字化技术的精度与适应性要求更高；三是全流程优化不足，不同数字化设备间的数据兼容性、临床操作标准化程度仍需提升。针对这些问题，通过持

续的技术探索与创新,如研发低伪影成像技术(PDS-MAR、HDEN模型等)、开发专用口腔种植机器人系统、制定统一的无牙颌种植数字化数据交互标准等,相关挑战正逐步得到缓解。

未来,随着数字化及数智化技术的持续迭代与创新,其在无牙颌种植修复领域的应用将更趋广泛与深入。一方面,远程种植技术的发展将打破地域限制,通过数字化印模远程传输、远程术前规划指导等模式,使优质口腔种植医疗资源覆盖更多基层地区患者;另一方面,人工智能技术可通过对海量无牙颌种植临床数据的深度学习,进一步提升术前规划的精准度与个性化水平,为医生提供更具循证依据的治疗方案。

可以预见,数字化及数智化技术进步将持续推动无牙颌种植修复领域的发展,为患者提供更优质、高效、安全的种植修复服务,助力更多无牙颌患者重建健康美观的咬合功能,改善生活质量。正如“无论进步速度快慢,践行者始终走在未尝试者之前”,在数字化及数智化技术赋能无牙颌种植修复的进程中,每一次技术突破与临床创新,都将为该领域开辟新的发展机遇与空间。

利益冲突声明:作者声明本文无利益冲突。

[参考文献]

- [1] Papaspyridakos P, Chen CJ, Gallucci GO, et al. Accuracy of implant impressions for partially and completely edentulous patients: a systematic review[J]. *Int J Oral Maxillofac Implants*, 2014, 29(4): 836-845.
- [2] Gao YT, Zhao MY, Xia SC, et al. Knowledge structure and research hotspots on digital scanning for implant-supported complete-arch prosthesis: a bibliometric analysis[J]. *Heliyon*, 2024, 10(17): e36782.
- [3] Yuan Y, Liu Q, Yang S, et al. Four-dimensional superimposition techniques to compose dental dynamic virtual patients: a systematic review[J]. *J Funct Biomater*, 2023, 14(1): 33.
- [4] Lepidi L, Kim BC, Giberti L, et al. The 4D virtual patient: a proof of concept in digital dentistry[J]. *J Prosthet Dent*, 2025, 134(5): 1442-1445.
- [5] Wang J, Wu YL, Ma J, et al. A novel technique for implant-supported fixed complete rehabilitation based on a dynamic virtual patient[J]. *J Dent*, 2023, 137: 104649.
- [6] Li JY, Joda T, Revilla-León M, et al. Recommendations for successful virtual patient-assisted esthetic implant rehabilitation: a guide for optimal function and clinical efficiency[J]. *J Esthet Restor Dent*, 2024, 36(1): 186-196.
- [7] Pirc M, Wenk S, Peter D, et al. Four-dimensional (4D) virtual simulation for predicting soft tissue support and vertical dimension of occlusion in full-arch implant therapy—A proof of concept[J]. *J Dent*, 2025, 163: 106142.
- [8] Elgarba BM, Fontenele RC, Du XJ, et al. Artificial intelligence versus human intelligence in presurgical implant planning: a preclinical validation[J]. *Clin Oral Implant Res*, 2025, 36(7): 835-845.
- [9] Shalash M, Zohnee A. The application of artificial intelligence in full arch computer assisted implant surgery—A clinical study[J]. *Digit Dent J*, 2025, 1(1): 100005.
- [10] Mangano FG, Yang KR, Lerner H, et al. Artificial intelligence and mixed reality for dental implant planning: a technical note[J]. *Clin Implant Dent Rel Res*, 2024, 26(5): 942-953.
- [11] Zhao WB, Teng WW, Su YC, et al. Accuracy of dental implant surgery with freehand, static computer-aided, dynamic computer-aided, and robotic computer-aided implant systems: an *in vitro* study[J]. *J Prosthet Dent*, 2025, 134(6): 2416-2423.
- [12] Tuce RA, Neagu M, Pupazan V, et al. The 3D printing and evaluation of surgical guides with an incorporated irrigation channel for dental implant placement[J]. *Bioengineering*, 2023, 10(10): 1168.
- [13] Lan R, Marteau C, Mense C, et al. Current knowledge about stackable guides: a scoping review[J]. *Int J Implant Dent*, 2024, 10(1): 28.
- [14] Bai XY, Wu T, Zhu YX, et al. Cone-wedge anchored surgical templates for stackable metal guide: a novel technique[J]. *Int J Implant Dent*, 2024, 10: 27.
- [15] Alhazmi AA, Alharbi MT, Lahiq A, et al. Application of metallic guides and reverse scanning for full-mouth rehabilitation using implant-supported prostheses: a case report[J]. *J Prosthodont*, 2025, 34(8): 777-783.
- [16] di Giacomo GP, Cury PR, da Silva AM, et al. Surgical guides for flapless dental implant placement and immediate definitive prosthesis installation by using selective Laser melting and sintering for 3D metal and polymer printing: a clinical report[J]. *J Prosthet Dent*, 2024, 131(2): 177-179.
- [17] Yao YF, Yang RL, Lam W, et al. A modified workflow for dynamic navigation implant surgery in fully edentulous patients utilizing a customized patient tracking mo-

- dule[J]. *J Stomatol Oral Maxillofac Surg*, 2025, 126(4): 102292.
- [18] Wang NR. Comparison of dynamic navigation and static navigation systems in implant surgery: accuracy and application analysis[J]. *BIO Web Conf*, 2025, 174: 03006.
- [19] Pozzi A, Carosi P, Laureti A, et al. Accuracy of navigation guided implant surgery for immediate loading complete arch restorations: prospective clinical trial[J]. *Clin Implant Dent Rel Res*, 2024, 26(5): 954-971.
- [20] 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: 28.
- [21] 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.
- [22] Wang WX, Xu H, Mei DM, et al. Accuracy of the Yakebot dental implant robotic system versus fully guided static computer-assisted implant surgery template in edentulous jaw implantation: a preliminary clinical study[J]. *Clin Implant Dent Rel Res*, 2024, 26(2): 309-316.
- [23] Shu QY, Chen DP, Wang X, et al. Accuracy of flapless surgery using an autonomous robotic system in full-arch immediate implant restoration: a case series[J]. *J Dent*, 2024, 145: 105017.
- [24] Xie R, Liu YC, Wei HB, et al. Clinical evaluation of autonomous robotic-assisted full-arch implant surgery: a 1-year prospective clinical study[J]. *Clin Oral Implant Res*, 2024, 35(4): 443-453.
- [25] Rong R, Lin TY, Sa Y. Using an existing digital surgical guide and used burs as aids for a complete-arch implant impression[J]. *J Prosthet Dent*, 2022, 127(4): 664-666.
- [26] Gómez-Polo M, Cimolai A, Ortega R, et al. Accuracy, scanning time, and number of photographs of various scanning patterns for the extraoral digitalization of complete dentures by using an intraoral scanner[J]. *J Prosthet Dent*, 2024, 131(3): 521-528.
- [27] Revilla-León M, Gómez-Polo M, Drone M, et al. Accuracy of complete arch implant scans recorded by using intraoral and extraoral photogrammetry systems[J]. *J Prosthet Dent*, 2025, 134(6): 2508-2514.
- [28] Revilla-León M, Cascos R, Barmak AB, et al. Clinical accuracy of complete arch implant scans recorded by using a noncalibrated splinting technique, intraoral photogrammetry, and extraoral photogrammetry with snap-on markers[J]. *J Prosthet Dent*, 2025. DOI: 10.1016/j.prosdent.2025.09.012.
- [29] Srivastava G, Padhiary SK, Mohanty N, et al. Accuracy of intraoral scanner for recording completely edentulous Arches: a systematic review[J]. *Dent J*, 2023, 11(10): 241.
- [30] Sampaio-Fernandes MA, Pinto R, Almeida PR, et al. Accuracy of extraoral digital impressions with multi-unit implants[J]. *Appl Sci*, 2023, 13(15): 8769.
- [31] Abuduwaili K, Huang RX, Song JY, et al. Comparison of photogrammetric imaging, intraoral scanning and conventional impression accuracy of full-arch dental implant rehabilitation: an *in vitro* study[J]. *BMC Oral Heal*, 2025, 25: 753.
- [32] Anitua E, Lazcano A, Anitua B, et al. Influence of scan body geometry on the trueness of intraoral scanning[J]. *BDJ Open*, 2025, 11: 83.
- [33] Zhang TT, Yang B, Ge RH, et al. Effect of a novel 'scan body' on the *in vitro* scanning accuracy of full-arch implant impressions[J]. *Int Dent J*, 2024, 74(4): 847-854.
- [34] Wu HK, Wang J, Chen GH, et al. Effect of novel prefabricated auxiliary devices attaching to scan bodies on the accuracy of intraoral scanning of complete-arch with multiple implants: an *in-vitro* study[J]. *J Dent*, 2023, 138: 104702.
- [35] Ma HY, Cao J, Tang ZH, et al. Case report: accuracy analysis of a new scanning body for intraoral digital impressions in full-arch edentulous patients[J]. *Front Oral Health*, 2025, 6: 1528943.
- [36] Li YX, Fang H, Yan YW, et al. Accuracy of intraoral scanning using modified scan bodies for complete arch implant-supported fixed prostheses[J]. *J Prosthet Dent*, 2024, 132(5): 994.e1-994.e8.
- [37] Gianfreda F, Raffone C, Martelli M, et al. Conventional scan body vs. scan bodies with auxiliary geometric devices: an *in vitro* study for edentulous full-arch implant impressions[J]. *Front Oral Heal*, 2025, 6: 1574149.
- [38] Eldabe AK, Adel-Khattab D, Botros KH. Trueness of tooth modified scan bodies as a novel technique for edentulous full arch implant supported dental prosthesis: an *in vivo* prospective comparative study[J]. *BMC Oral Heal*, 2025, 25: 29.
- [39] Revilla-León M, Cascos R, Barmak AB, et al. Influence of an artificial intelligence-based application on the accuracy of complete arch implant scans recorded by using an intraoral scanner[J]. *J Prosthet Dent*, 2025, 134(6):

- 2471-2481.
- Feng X, Liu M, Song WE, et al. Efficacy of digital templates in edentulous implant placement: a retrospective study[J]. BMC Oral Heal, 2024, 24: 1503.
- [40] Martins J, Rangel J, de Araújo Nobre M, et al. A new full digital workflow for fixed prosthetic rehabilitation of full-arch edentulism using the all-on-4 concept[J]. Medicina, 2024, 60(5): 720.
- [41] Rustichini F, Romolini R, Salmi MC, et al. Implant-supported full-arch fixed dental prostheses manufactured through a direct digital workflow using a calibrated splinting framework: a retrospective clinical study[J]. J Dent, 2025, 154: 105605.
- [42] Auduc C, Douillard T, Nicolas E, et al. Fully digital workflow in full-arch implant rehabilitation: a descriptive methodological review[J]. Prosthesis, 2025, 7(4): 85.
- [43] Fu Y, Yin CL, Li SQ, et al. A full digital workflow to prefabricate an implant-supported interim restoration: case report and a novel technique[J]. Int J Implant Dent, 2022, 8: 55.
- [44] Lyu TL, Wu Z, Ma GG, et al. PDS-MAR: a fine-grained projection-domain segmentation-based metal artifact reduction method for intraoperative CBCT images with guidewires[J]. Phys Med Biol, 2023, 68(21): 215007.
- [45] Jiang C, Lyu TL, Ma GG, et al. CBCT projection domain metal segmentation for metal artifact reduction using hessian-inspired dual-encoding network with guidance from segment anything model[J]. Med Phys, 2025, 52(6): 3900-3913.
- [46] Rong R, Lv H, Sa Y. Single scanning of CBCT and intraoral scanning for guided implantation in terminal dentitions with multi-unit metal restorations: technical note [J]. J Stomatol Oral Maxillofac Surg, 2024, 125(6): 101784.
- [47] Lv H, Wu H, Hu L, et al. Pterygoid implant-based maxillary full-arch rehabilitation using an autonomous robot system: a case report[J]. J Prosthodont, 2025, 34(3): 232-239.

· 专家简介 ·



撒悦, 武汉大学和荷兰 Radboud University 双博士, 现为武汉大学口腔医院修复科副教授, 副主任医师, 硕士研究生导师, 兼任修复工艺科(口腔医学技术制作中心)负责人及党支部书记, 致力于推广“数智化”“数字化”医技结合。社会兼职为: 国际种植学会 ITI 专家组成员, 国际口腔重建基金会(中国区)委员, 中华口腔医学会修复专业委员会委员, 中国食品药品企业质量安全促进会特聘专家, 全国卫生产业企业管理协会数字化口腔产业分会专家委员会常务委员, 湖北省口腔美学专业委员会常务委员, 湖北省口腔修复专业委员会委员, 武汉市中青年医学骨干人才。主编《美学区单颗牙种植修复 ABCD 原则》《美学区即刻种植 9 个关键三角》《黏性骨块临床基础及应用》《前牙美学区间隙管理: 科学与临床实践》《口腔数字化修复技术》, 参编《口腔医学技术概论》《中国口腔数字化——从临床技术到病例精选》《口腔诊疗必备——数字化技术全流程详解》, 主译《磨牙区即刻种植精要》《口腔种植修复: 固定种植修复方案与技术》。主持多项国家省部级基金、武汉大学医学部“临床医学+X”青年拔尖项目、多中心研究课题和产学研横向课题, 以第一或通讯作者发表 SCI 论文 30 余篇。荣获口腔医学青年教师授课技能大赛全国一等奖、武汉大学口腔医院青年教师授课技能大赛第一名、全国修复学会最佳论文奖、教育部博士研究生学术新人奖等多项荣誉称号。

(本文编辑 李彩)