

DOI: 10.3969/j.issn.1004-4949.2026.15.042

•综述•

## 数字化技术在口腔正畸领域的研究进展

马小萱, 杨浩田, 阮晓慧

(新疆医科大学第二附属医院口腔科, 新疆 乌鲁木齐 830000)

[摘要] 近年来, 数字化技术在口腔正畸诊断、治疗管理和临床服务等领域取得了显著进展。数字化影像学、虚拟矫治仿真技术、3D打印技术和人工智能技术等现代新兴技术手段突破了传统口腔正畸技术手段限制, 为精准化、个性化口腔正畸治疗提供了技术支持。本文对数字化技术在口腔正畸中的应用进行回顾, 分析相关技术的临床应用优势及难点, 并对其应用前景进行展望, 以期推动智能化精准口腔正畸学学科的发展。

[关键词] 数字化技术; 口腔正畸学; 3D打印; 人工智能

[中图分类号] R783.5

[文献标识码] A

[文章编号] 1004-4949 (2026) 15-0174-05

### Research Progress of Digital Technology in the Field of Orthodontics

MA Xiaoxuan, YANG Haotian, RUAN Xiaohui

(Department of Stomatology, the Second Affiliated Hospital of Xinjiang Medical University, Urumqi 830000, Xinjiang, China)

[Abstract] In recent years, digital technology has achieved remarkable progress in orthodontics diagnosis, treatment management and clinical services. Modern emerging technological approaches such as digital imaging, virtual orthodontics simulation technology, 3D printing technology and artificial intelligence technology have broken the limitations of traditional orthodontic techniques and provided technical support for precise and individualized orthodontic treatment. This paper reviews the application of digital technology in orthodontics, analyzes the clinical advantages and challenges of related technologies, and discusses its application prospects, so as to promote the development of intelligent and precise orthodontics.

[Key words] Digital technology; Orthodontics; 3D printing; Artificial intelligence

错颌畸形 (malocclusion) 是我国常见的口腔疾病之一, 调查显示<sup>[1]</sup>, 我国25 392名儿童与青少年的患病率达67.82%, 且治疗周期长、个体差异大, 对诊断精确性、方案可预测性和矫治器制造精度要求较高。传统正畸以石膏模型、二维X线影像和手工弯制为基础, 存在影像结构重叠与放大误差、模型不易保存、测量依赖医师经验、成型精度受手工技艺制约等局限。近十余年, 口内扫描、锥形束CT、计算机辅助设计与制造、增材制造和人工智能相继应用于正畸临床<sup>[2-4]</sup>, 其共同特点是将信息载体由实物模型和二维胶片转变为可量化、可复制、可远程传输的三维数据, 并将诊断、设计、制造与疗效评价整合为反馈迭代的

流程<sup>[3]</sup>。但技术可及性提高不等同于临床获益的确证, 现有文献多报道可行性与效率提升, 对测量效度、证据等级和适用范围的分析不足。本文按临床流程综述近年进展, 分析各项技术的证据强度、方法学局限与适用范围, 归纳制约转化的主要问题并提出研究方向。

### 1 数字化技术在口腔正畸诊断中的应用

1.1 数字化影像与牙颌模型采集 数字化X线摄影已基本取代胶片摄影, 其图像可作对比度调节与直接测量等后处理, 纳入DICOM体系后便于调阅与会诊; 但其空间分辨率并不优于胶片, 优势在于动态范围宽、对比度可调, 且探测器对过量曝

第一作者: 马小萱 (2000.1-), 女, 新疆和硕县人, 硕士, 主要从事口腔全科方面工作

通讯作者: 阮晓慧 (1979.3-), 女, 四川绵阳人, 硕士, 主任医师, 硕士生导师, 主要从事口腔全科方面工作

光宽容度较高,易致曝光参数上移(剂量漂移,dose creep),故降低剂量的潜力取决于机构是否建立相应的曝光参数规范与质量控制制度。牙骀模型的数字化则是诊断资料由实物向数据转变的另一环节。研究认为<sup>[5,6]</sup>,三维数字模型可在虚拟环境中完成模型测量、牙弓形态分析与诊断性排牙,且不受储存条件与模型磨损限制。然而数字模型能否替代石膏模型取决于几何精度,Vitai V等<sup>[7]</sup>的网状Meta分析显示,不同口内扫描仪的全牙弓扫描准确度差异显著,临床可接受阈值亦无公认标准。且多数研究在体外完成,未纳入唾液、软组织动度等在体因素,扫描路径与操作者经验的影响亦可能大于设备标称精度,故体外数据外推至临床应审慎。

**1.2 CBCT在正畸诊断中的应用** 牙根、颌骨与气道等深部结构的三维信息则有赖于CBCT。Francisco I等<sup>[3]</sup>认为,CBCT可清晰显示牙根形态与三维位置,有助于发现隐匿的牙根异常,降低牙根碰撞与吸收的风险;随着观察范围扩展至颅颌面整体,Savoldi F等<sup>[8]</sup>将其用于上气道、颞下颌关节与骨性畸形分析,其数据亦可作为智能分析的输入。Zhu M等<sup>[9]</sup>将其与卷积神经网络结合进行腭中缝成熟度分期,为上颌扩弓方式选择提供依据,与其他模态整合后信息维度更可扩展至四维。Feng Y等<sup>[10]</sup>将CBCT、下颌运动轨迹描记与面部扫描配准,构建了含时间维度的虚拟患者模型。但CBCT的应用需权衡信息增益与辐射负担,美国口腔颌面放射学会的立场声明指出其应逐例论证,不宜作为常规检查<sup>[11]</sup>。唇(颊)侧骨板厚度常接近或小于体素尺寸,受部分容积效应影响,骨开窗、骨开裂的检出率可被系统性高估;气道分割依赖阈值设定,并受头位、呼吸时相与舌位影响,静态容积不等于睡眠状态下的通气功能,故可提示狭窄部位但不能替代多导睡眠监测。上述结果均需结合临床解读,其效度仍待以治疗反应为终点验证。

**1.3 人工智能在正畸诊断分析中的应用** 影像与模型资料的数字化为算法分析提供了标准化输入。Chang Q等<sup>[12]</sup>基于高分辨率网络构建的头颅侧位片自动分析模型,其标志点定位效率与一致性优于人工描记。Tom á šik J等<sup>[4]</sup>的范围综述则总结了AI在面部分析、颅面测量与牙移动预测中的应用,认为其对复杂错骀畸形的诊断具有辅助价值。但现阶段AI的成熟度差异明显:定点、分割等感知

类任务因标注客观、数据规模较大,已接近临床可用水平;而拔牙决策、方案选择等决策类任务缺乏客观参考标准,其训练标签实质上是特定机构既往医师决策的集合,模型习得的是该群体的决策倾向而非最优解,故输出宜作参考而非依据。即使感知类任务,位于结构重叠区或软组织轮廓的标志点误差亦明显增大,而这类标志点对鉴别诊断与疗效评价尤为重要。

## 2 数字化技术在正畸治疗规划中的应用

**2.1 虚拟排牙与矫治目标可视化** 诊断资料的价值需通过治疗设计环节体现。苏晓霞等<sup>[13]</sup>报道治疗前的虚拟模拟可预演矫治效果、辅助优化方案;李彬等<sup>[14]</sup>认为数字化设计可根据个体牙颌条件形成个性化矫治器方案;而其是否实际影响决策,Hou D等<sup>[5]</sup>的前瞻性研究提供了初步证据:医师查看数字化排牙后约24%的病例发生实质性方案变更(如拔牙模式改变),对方案的信心亦显著提高。上述结果需作两方面分析。第一,虚拟排牙与疗效预测属不同概念:前者输出的是医师设定的治疗目标,即几何学意义上的理想终末位置;实际疗效则取决于牙周组织改建、矫治力衰减、附件设计与患者依从性等,而现有软件基本不含生物力学响应模型。第二,医师信心提高与决策正确性并无必然联系,此类研究缺乏方案优劣的客观标准。今后可将有限元分析与牙周膜本构模型引入排牙软件,使虚拟设计由目标表达向结果预测转变。

**2.2 数字化微笑设计** 面部与微笑美学同样是治疗目标的组成部分。Charavet C等<sup>[16]</sup>认为,数字化微笑设计(DSD)以照片和软件分析为基础,可为正畸、修复、牙周和外科医师提供共同的美学目标,将审美意图转化为可核对的参数。但现有文献以病例报告和概念验证为主,缺乏对照研究,美学疗效亦无公认的量化指标,故其提高疗效的结论仍属推论。

**2.3 虚拟正颌手术规划** 对于需正颌手术矫正的骨性错骀畸形,虚拟设计的对象由牙移动扩展至颌骨块的空间重定位。Kato RM等<sup>[17]</sup>指出AI辅助规划还可预测软组织变化。Friedrich C等<sup>[18]</sup>则认为数字化流程已覆盖正颌外科从诊断到个性化器械制造的各个环节。但其证据强度在硬、软组织两个层面并不一致:骨块移动的规划值与实现值一致性较好,因手术导板和个性化接骨板具有刚性约

束;软组织预测误差相对较大,在鼻唇区和颏部尤为突出,因多数算法基于线性弹性或质量-弹簧模型,未能充分反映软组织的非线性、各向异性与黏弹性,故临床沟通中宜将其界定为趋势性参考。

### 3 3D打印技术在口腔正畸中的应用

3.1 数字化模型与辅助装置制作 虚拟设计的结果须经制造环节转化为实体装置。报道显示<sup>[19]</sup>,3D打印可快速获得精度较高的牙骀模型。胡红艳等<sup>[20]</sup>指出,基于三维数字化模型的个性化流程可提高矫治器贴合度。但打印精度并非由标称层厚单一决定,而是打印工艺、构建方向、支撑设计与后处理等环节共同作用的结果;树脂模型还存在后固化收缩与蠕变,长期保存后用于热压膜矫治器制作可能引入不可忽视的偏差。

3.2 直接打印矫治器与新型材料 当增材制造的产物由模型、导板转变为直接承力的终端器械时,对材料与工艺稳定性的要求随之提高。Yordanova G等<sup>[21]</sup>报道了采用激光烧结金属打印制作个性化牙槽支抗装置的设计流程。Alkamees A<sup>[22]</sup>认为,形状记忆聚合物是直接打印矫治器材料的重要研发方向,并指出其环境负荷问题。Torkomian T等<sup>[23]</sup>的系统评价则从机械与化学性能、制造工艺、精度等方面比较了直接打印与热压膜矫治器。直接打印的理论优势在于可实现厚度的区域化调控与力值的按需分布,从而克服热压膜工艺等厚成型的固有限制。但现有证据主要来自体外力学与材料学研究,缺乏以牙移动实现率、疗程为终点的临床对照研究;光固化树脂的残余单体析出与细胞毒性、口内长期使用后的力值衰减以及废弃树脂的环境影响,均缺乏长期数据。

### 4 数字化技术在疗效评价与治疗过程管理中的应用

4.1 三维重叠与疗效量化 三维重叠配准为治疗前后的疗效比对提供了量化手段,而参考区的选择因治疗类型而异。Saif BS等<sup>[24]</sup>以腭皱襞为参考区配准,评价了无托槽矫治器上颌磨牙远移的效率。Elfouly D等<sup>[25]</sup>在CBCT中采用眶耳平面与骀平面向重叠评价磨牙移动及矢状向咽气道改变。Chen H等<sup>[26]</sup>则开发了基于深度学习的跨时相多模态融合系统,以降低重复检查的辐射负担。三维重叠使疗效评价由角度和线距的二维描述转变为逐牙位移矢量的三维量化,其效度取决于参考区

的稳定性。生长发育期患者不存在绝对稳定的参考结构,腭皱襞在上颌扩弓、前牙大量内收等治疗中亦不满足稳定性前提,以其为参考将系统性低估或高估牙移动量。

4.2 人工智能在疗程预测中的应用 疗程长短是患者最为关注的指标之一。Volovic J等<sup>[27]</sup>比较了多种机器学习模型对正畸疗程的预测能力,其误差多在临床可接受范围内,且线性模型不劣于复杂模型,提示当前预测主要依赖拔牙与否、初始拥挤度、年龄等少数强相关变量。更根本的限制在于,疗程在较大程度上由复诊间隔、医师习惯与患者依从性等非生物学因素决定,此类变量跨机构可迁移性差,故该类模型宜定位为本机构内部的排程与沟通工具。

4.3 远程正畸与依从性管理 依从性是影响疗程的重要因素。Wafaie K等<sup>[28]</sup>的系统评价显示,远程数字通信工具与佩戴监测传感器有助于实时掌握矫治器佩戴和口腔卫生状况,可提高依从性。但该结论受纳入研究异质性高、随访期短与霍桑效应的限制,患者知晓处于监测状态本身即可改变行为,难以区分改善源于监测技术抑或提醒行为。其价值应以复诊次数、疗程等终点衡量并纳入卫生经济学评价,而目前数据仍较缺乏。

### 5 现存问题与发展方向

5.1 研究证据方面的问题 综合上述研究可见3个共性问题,且并非数字化正畸所独有,在相当程度上反映了正畸学循证基础的整体状况。第一,研究设计以体外实验、回顾性分析与技术介绍为主,随机对照试验有限。隐形矫治领域中设计位移与实现位移的系统性差异<sup>[29]</sup>,即说明脱离临床终点的效率数据不足以支撑疗效结论。第二,报告规范尚不统一,精度指标定义不一、参考标准各异、测量方法披露不足,导致研究间难以合并分析。Koletsis D等<sup>[30]</sup>对正畸系统评价与Meta分析的方法学评估即发现其证据质量总体偏低甚至极低。人工智能类研究尤其缺乏对数据来源与失败病例的披露,模型多在单中心数据集上开发并完成内部验证,致使标称性能难以外推。第三,相当比例的研究由设备提供方支持或使用其专有软件完成测量,独立验证不足。Seehra J等<sup>[31]</sup>指出,正畸临床试验往往在产品上市并广泛使用之后才开展,常难以证实厂商宣称的优势,且利益冲突披露存在缺失;当研究者同时是使用者与评价

者,结果解读易受发表倾向影响,故对此类结论应结合独立数据审慎解读。

**5.2 技术转化方面的制约因素** 除证据层面外,数字化技术的推广还受经济、标准与法规三方面制约。其一为成本:设备购置、耗材、软件订阅与人员培训均需持续投入,对基层机构而言成本效益比往往是能否推广的决定因素。但Jermyn O等<sup>[32]</sup>的系统评价仅纳入16项正畸经济学评价,其中约69%存在严重方法学局限,反映出该领域经济学证据匮乏且质量不高,使机构难以就是否引入某项技术作出循证决策。其二为数据格式与互操作性:医学影像遵循DICOM标准,而三维表面数据多以STL、PLY、OBJ等格式存储;Hwang JJ等<sup>[33]</sup>指出,现行DICOM协议仅支持封装STL,尚不能兼容承载颜色、纹理信息的格式,致使扫描数据难以纳入既有PACS体系,厂商间的数据交换与跨中心复用亦受制约。其三为数据安全与监管责任:面部与口内扫描、CBCT数据具有高度可识别性,Jedlińska L等<sup>[34]</sup>基于《通用数据保护条例》(GDPR)的分析指出,口内扫描构成生物识别数据,属敏感个人信息,故在存储、云端计算与算法训练环节须落实去标识化与知情同意原则。

**5.3 技术发展方向** 今后研究可从4个方面推进:

①由几何学驱动转向生物力学驱动,将有限元分析与骨改建模型纳入方案设计,实现对牙移动速率与风险的个体化预测;②在Feng Y等<sup>[10]</sup>的基础上构建多模态融合的四维虚拟患者模型;③建立反馈式诊疗流程,将设计、执行、监测与调整整合为连续过程;④加强规范建设,制定数字化正畸的操作规范、精度检定方法与报告标准。

## 6 总结

数字化技术已应用于口腔正畸诊断、方案设计、矫治器制造与疗效评价的各个环节,其主要作用在于将依赖经验判断的定性过程转变为可量化、可追溯、可重复的数据驱动过程。但现阶段研究仍处于技术验证阶段,多数结论建立在体外实验或单中心回顾性数据之上,虚拟设计与实际疗效存在系统性偏差,成本效益、数据标准、隐私保护与监管责任等问题尚未充分解决。作为辅助手段,其作用的发挥仍以生物力学理论基础和临床判断为前提;开展以临床终点为导向的研究、通过建模提高疗效可预测性、通过标准建设保障数据互通与安全,是推动数字化正畸走向循

证应用的主要途径。

## [参考文献]

- [1]傅民魁,张丁,王邦康,等.中国25 392名儿童与青少年错颌畸形患病率的调查[J].中华口腔医学杂志,2002,37(5):371-373.
- [2]Cunha TMAD,Barbosa IDS,Palma KK.Orthodontic digital workflow:devices and clinical applications[J].Dental Press J Orthod,2021,26(6):e21spe6.
- [3]Francisco I,Ribeiro M P,Marques F,et al.Application of three-dimensional digital technology in orthodontics:the state of the art[J].Biomimetics (Basel),2022,7(1):23.
- [4]Tomášik J,Zsoldos M,Oravcová E,et al.AI and face-driven orthodontics:a scoping review of digital advances in diagnosis and treatment planning[J].AI,2024,5(1):158-176.
- [5]张浩,高洁,仇琨,等.数字化技术应用于口腔正畸学研究生病例分析教学中的初步探索[J].中国医药导报,2021,18(28):67-70.
- [6]Warnecki M,Nahajowski M,Papadopoulos MA,et al.Assessment of the reliability of measurements taken on digital orthodontic models obtained from scans of plaster models in laboratory scanners:a systematic review and meta-analysis[J].Eur J Orthod,2022,44(5):522-529.
- [7]Vitai V,Németh A,Sólyom E,et al.Evaluation of the accuracy of intraoral scanners for complete-arch scanning:a systematic review and network meta-analysis[J].J Dent,2023,137:104636.
- [8]Savoldi F,Dagassan-Berndt D,Patcas R,et al.The use of CBCT in orthodontics with special focus on upper airway analysis in patients with sleep-disordered breathing[J].Dentomaxillofac Radiol,2024,53(3):178-188.
- [9]Zhu M,Yang P,Bian C,et al.Convolutional neural network-assisted diagnosis of midpalatal suture maturation stage in cone-beam computed tomography[J].J Dent,2024,141:104808.
- [10]Feng Y,Zhan L,Sun X,et al.A fully digital workflow to register maxillomandibular relation using a jaw motion tracer for fixed prosthetic rehabilitation:a technical report[J].J Esthet Restor Dent,2023,35(7):1068-1076.
- [11]American Academy of Oral and Maxillofacial Radiology. Clinical recommendations regarding use of cone beam computed tomography in orthodontics.[corrected]. Position statement by the American Academy of Oral

- and Maxillofacial Radiology[J].*Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol*,2013,116(2):238-257.
- [12] Chang Q, Wang Z, Wang F, et al. Automatic analysis of lateral cephalograms based on high-resolution net[J].*Am J Orthod Dentofacial Orthop*,2023,163(4):501-508.
- [13] 苏晓霞,廖立,彭怡然,等.数字化整合教学法在口腔正畸头影测量教学中的应用[J].*医学教育研究与实践*,2021,29(5):769-772.
- [14] 李彬,段沛沛,白丁.数字化技术在口腔正畸诊疗中的应用[J].*口腔医学*,2021,41(1):71-75.
- [15] Hou D, Capote R, Bayirli B, et al. The effect of digital diagnostic setups on orthodontic treatment planning[J].*Am J Orthod Dentofacial Orthop*,2020,157(4):542-549.
- [16] Charavet C, Bernard JC, Gaillard C, et al. Benefits of Digital Smile Design (DSD) in the conception of a complex orthodontic treatment plan: a case report-proof of concept[J].*Int Orthod*,2019,17(3):573-579.
- [17] Kato RM, Parizotto JOL, Oliveira PHJ, et al. Artificial intelligence in orthognathic surgery: a narrative review of surgical digital tools and 3D orthognathic surgical planning[J].*J Calif Dent Assoc*,2024,51:2202444.
- [18] Friedrich C, Graw C, Kröplin J. A narrative review of present knowledge and digital approaches in orthognathic surgery[J].*Innov Surg Sci*,2024,9(4):175-179.
- [19] 王瑶,郑亨元,冯海,等.3D打印技术在口腔医学教学模型中的应用进展[J].*实用口腔医学杂志*,2024,40(2):289-296.
- [20] 胡红艳,罗武香,张丽丽.三维数字化牙颌模型在口腔正畸学中的应用[J].*全科口腔医学电子杂志*,2019,6(30):20-21.
- [21] Yordanova G, Chalyovski M, Gurgurova G, et al. Digital design of laser-sintered metal-printed dento-alveolar anchorage supporting orthodontic treatment[J].*Appl Sci*,2023,13:7353.
- [22] Alkhamees A. The new additive era of orthodontics: 3D-printed aligners and shape memory polymers-the latest trend-and their environmental implications[J].*J Orthod Sci*,2024,13:55.
- [23] Torkomian T, de la Iglesia F, Puigdollers A. 3D-printed clear aligners: an emerging alternative to the conventional thermoformed aligners?-a systematic review[J].*J Dent*,2025,155:105616.
- [24] Saif BS, Pan F, Mou Q, et al. Efficiency evaluation of maxillary molar distalization using Invisalign based on palatal rugae registration[J].*Am J Orthod Dentofacial Orthop*,2022,161(4):e372-e379.
- [25] Elfouly D, Dumu EJ, Madian AM, et al. The effect of different functional appliances on the sagittal pharyngeal airway dimension in skeletal class II: a retrospective study[J].*Sci Rep*,2024,14(1):19410.
- [26] Chen H, Qu Z, Tian Y, et al. A cross-temporal multimodal fusion system based on deep learning for orthodontic monitoring[J].*Comput Biol Med*,2024,180:109025.
- [27] Volovic J, Badirli S, Ahmad S, et al. A novel machine learning model for predicting orthodontic treatment duration[J].*Diagnostics*,2023,13(17):2740.
- [28] Wafaie K, Rizk MZ, Basyouni ME, et al. Tele-orthodontics and sensor-based technologies: a systematic review of interventions that monitor and improve compliance of orthodontic patients[J].*Eur J Orthod*,2023,45(4):450-461.
- [29] Bichu YM, Weir T, Zou B, et al. Clear aligner therapy concerns: addressing discrepancies between digitally anticipated outcomes and clinical ground realities[J].*Turk J Orthod*,2024,37(2):130-139.
- [30] Koletsi D, Fleming PS, Eliades T, et al. The evidence from systematic reviews and meta-analyses published in orthodontic literature: where do we stand?[J].*Eur J Orthod*,2015,37(6):603-609.
- [31] Seehra J, Pandis N, Fleming PS. Clinical evaluation of marketed orthodontic products: are researchers behind the times? A meta-epidemiological study[J].*Prog Orthod*,2017,18(1):14.
- [32] Jermyn O, Bister D, Jin H. Cost-effectiveness of orthodontics: a systematic review[J].*Eur J Orthod*,2022,44(5):566-577.
- [33] Hwang JJ, Jung YH. The need for DICOM encapsulation of 3D scanning STL data[J].*Imaging Sci Dent*,2018,48(4):301-302.
- [34] Jedlińska L, Jedliński M. 3D intraoral scan and diagnostic plaster model under General Data Protection Regulation: legal protection[J].*J Forensic Leg Med*,2023,95:102503.

收稿日期: 2026-7-14 编辑: 扶田