

无托槽隐形矫治纠正异常咬合曲线的研究进展

马淞阳, 王云霁*

重庆医科大学附属口腔医院正畸科, 口腔疾病与生物医学重庆市重点实验室, 重庆市高校市级口腔生物医学工程重点实验室, 重庆

收稿日期: 2025年1月11日; 录用日期: 2025年2月4日; 发布日期: 2025年2月12日

摘要

无托槽隐形矫治器施力于牙齿, 使其恢复至正常的位置, 最终牙齿在正确排列关系下建立平衡、稳定的咬合状态。咬合曲线是连接相关牙尖而形成的连续曲线, 分为Spee曲线和Wilson曲线, 是评价咬合和排齐整平效果的重要指标, 但临床中缺乏准确、便捷的评价工具。近年来, 口腔数字化已经覆盖了口腔诊疗的全流程, 人工智能技术在信息分析中逐渐起到中流砥柱的作用, 且正畸与人工智能呈现深度结合的趋势。本文将对咬合曲线的测量方法及目前无托槽隐形矫治后咬合曲线变化的研究现状进行综述。

关键词

无托槽隐形矫治, 咬合曲线, Spee曲线, 人工智能

The Progress of Invisalign Treatment for Modification Abnormal Occlusal Curves

Songyang Ma, Yunji Wang*

Chongqing Municipal Key Laboratory of Oral Biomedical Engineering of Higher Education, Chongqing Key Laboratory of Oral Disease and Biomedical Sciences, Department of Orthodontics, Stomatological Hospital of Chongqing Medical University, Chongqing

Received: Jan. 11th, 2025; accepted: Feb. 4th, 2025; published: Feb. 12th, 2025

Abstract

The clear aligner exerts force on the teeth, causing them to return to their normal positions, ultimately establishing a balanced and stable occlusion state for the teeth in the correct arrangement. The occlusal curve is a continuous curve formed by connecting the relevant cusps, and it is divided into the Spee curve and Wilson curve, which is an important indicator for evaluating occlusion and

*通讯作者。

alignment, but there is a lack of accurate and convenient evaluation tools in clinical practice. In recent years, digitalization has covered the entire process of dental treatment, and artificial intelligence technology has played an increasingly pivotal role in information analysis, and there is a trend of deep integration between orthodontics and artificial intelligence. This paper will review the measurement methods of occlusal curves and the current research status of the changes in occlusal curves after clear aligner treatment.

Keywords

Invisalign, Occlusal Curve, Curve of Spee, Artificial Intelligence

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 前言

错颌畸形(malocclusion)作为一个世界各国聚焦的公共卫生问题,可对儿童甚至成年患者造成身心上的伤害,据近期的报道,我国大陆地区近一半的儿童患有错畸形,并且患病率呈现明显的上升趋势[1]。全球的其余地区,错颌畸形也一直是困扰青少年的一大问题[2]。虽然社会经济不断发展、物质生活不断丰富,但是仅仅 42.78%的儿童认为正畸治疗是需要的[3]。因此错颌畸形的预防宣传仍不到位,有很大提升空间。

遗传、表观遗传、功能和环境因素在错颌畸形的产生中可发挥作用[2],在多种因素的作用下,经过复杂的机制,错颌畸形患者的牙、颌、颅面部的发育出现异常。龋及其并发症是为儿童寻求牙科治疗的最常见原因,广泛的未经治疗的龋齿及其并发症,如牙齿疼痛,直接导致咀嚼或不对称咀嚼减少,改变功能性咬合接触的分布[4][5]。长期单侧咀嚼可能导致面部生长发育受损,导致咬合不正和牙齿面部畸形[6]。乳牙和错合牙的牙髓和根尖周病变,同样可以引起错合畸形[7]。婴幼儿由于一些潜在的反射、缺乏喂养以及恐惧或不愉快,经常有无意识的口腔习惯,这些口腔习惯也常常是错合畸形的病因,如吮吸习惯、舌习惯、咬唇习惯、口呼吸、咬硬物、单侧咀嚼习惯等[8]。牙外伤(dental trauma)在儿童人群中极为高发,活跃的儿童很容易跌倒并意外地撞到坚硬的物体上而出现前牙外伤,牙外伤与错畸形之间也具有显著的相关性[9]。可以通过正畸治疗得到改变的因素为以下:功能因素(例如舌头、嘴唇、脸颊和咀嚼肌的功能障碍)和环境因素(例如乳汁或恒牙过早脱落、牙齿创伤)[10][11]。

错合畸形及其治疗会导致疼痛(例如颞下颌关节疾病以及牙齿和牙龈创伤)、影响言语和咀嚼。错合畸形也能够对患者呼吸道产生影响,某些颅面解剖学特征引起的错合畸形可能与睡眠呼吸障碍有关,影响儿童的健康[12]。往往患者正畸治疗或手术治疗后呼吸道体积、截面面积能得到有效改善,因此,在一定程度上错合畸形属于上呼吸道狭窄的病因[13]。在心理健康方面,错合畸形会影响患者的心理健康和神经的发育,医师应当对此类患者更加关注、采取有效的随访措施[14]。

矢状平面上,通常可根据通过头影测量的结果来将错颌畸形患者分类为不同的垂直骨面型或矢状骨面型:矢状骨面型的划分,是根据上下颌骨的相对位置关系,即 ANB 角,分为骨性 I 类、骨性 II 类、骨性 III 类[15];至于不同的垂直骨面型患者是根据下颌下缘的陡度(SN-MP 角)来划分的,分为正常型、高角型、低角型。根据 Gonca 的报道,虽然不同垂直骨面型错颌畸形患者骨小梁结构有显著差异,但是仅一处骨皮质厚度受影响[16]。然而,根据苗珂馨的报道,不同垂直骨面型错颌畸形患者的牙槽骨结构不同,

SN-MP 角越大, 牙槽骨可能就会更狭窄、薄弱, 高角型患者在矫治过程当中, 应当控制好牙根的移动, 避免骨缺损的发生[17]。所以, 关于不同垂直骨面型患者牙槽骨特征的观点还存在争议。

牙合是指上下颌牙齿发生接触的现象或接触关系, 包括静止和运动时的接触状态[18]。咬合曲线分为纵合曲线和横合曲线, 纵合曲线又分为上颌的补偿曲线和下颌的 Spee 曲线, 正畸治疗中咬合曲线是近些年来研究人员的关注热点。适宜的 Spee 曲线深度是正常牙合六项标准之一, 改善错合畸形患者的异常咬合曲线是正畸治疗的适应症, 建立平衡、稳定的咬合状态是临床治疗的目标, 因为正畸治疗具有从根本上改变静态和功能性咬合关系的能力[19]。

从二十世纪末隐形矫治推出, 无托槽隐形矫治技术不断发展。无托槽隐形矫治技术拥有诸多优点, 例如透明美观、舒适卫生、摘戴自如、个性化矫治等[20]。基于隐形矫治技术的特色, 以及人们的高品质生活的追求, 隐形矫治技术在临床当中得到了更为广泛的应用[21]。此外, 近年来, 随着隐形矫治材料性能的持续优化、软件设计的更新发展和临床技术的不懈探索, ClinCheck 软件在预测牙齿移动方面展现出可行性, 隐形矫治技术逐渐成为移动矫治牙的首选[22]。但是, 以往的研究主要集中于传统固定矫治, 目前国内外关于隐形矫治中咬合曲线的研究相对缺乏。

在检查、诊断、方案设计、疗效评估等是错合畸形治疗中的关键环节, 其中模型分析和影像测量作为不可或缺的一部分, 发挥着重要作用。常用于正畸的影像设备包括 CBCT、X 光机、面扫描仪等, 临床医生可以通过这些设备产出的二维或三维影像对患者的状况进行细致、全面的评估, 同时不断发展的影像检查设备也满足了临床医生更高的需求[23] [24]。但是, 临床医师精力有限, 检查、诊断的工作量繁琐, 并且病患数量多, 这些均是临床工作中困扰医师的问题。幸运的是, 随着人工智能的不断发展, 在过去的 25 年中, 口腔领域对信息技术的使用显著增加, 并帮助降低了成本、时间、对人类专业知识的依赖以及医疗错误, 并且口腔正畸领域中人工智能的运用也不断推广、深入, 有关人工智能在口腔正畸中检查、诊断和治疗设计中的运用也均有报道。人工智能分为两大类: 符号人工智能(Symbolic AI)和机器学习(machine learning)。在机器学习中, 模型从示例中学习, 而不是从人类建立的一组规则中学习, 通过混合使用统计和概率工具, 机器可以从以前的模型中学习, 并在引入新数据时改进它们的行为。深度学习(Deep learning, DL)是机器学习的一个子领域, DL 可计算出给定输入的特定特征, 医生可以使用有关疾病的现有数据来训练机器, 以计算以前从未见过的患者的诊断或预后预测[25]。近期根据 Murphy 的研究, 人工智能经过深度学习后, 可以完成牙尖标志点的自动定点, 成功测算了 30 例隐形矫治患者的前牙的运动方式[26]。这项研究中所应用的人工智能技术与 Murphy 之前发表的文章中用到的相类似[27], 再次证明了人工智能的可靠性、便捷性。所以, 面对不断扩大的临床数据量和日新月异的口腔数字化技术, 人工智能在口腔正畸临床工作中必将得到更加广阔的运用。

作为当下热门的正畸治疗技术, 隐形矫治有用传统固定矫治无法媲美的优点, 而且隐形矫治由于其自身的数字化特点, 需要临床医生将人工智能引入以提高临床工作效率, 这是与口腔正畸、人工智能的发展相适应的。

2. 咬合曲线的分类

咬合曲线是连接口腔中相应牙齿的牙尖而形成的曲线, 分为横合曲线和纵合曲线。

Spee 曲线(Curve of Spee)是由 Ferdinand Graf von Spee 于 1890 年首次描述的一种解剖学曲率[28], 这条矢状向的曲线又称为下颌的纵骀曲线, 由下颌牙弓中的下切牙切端起始, 经下尖牙牙尖与前磨牙和磨牙的颊尖相连接而形成的一条凹向上的曲线[29]。根据 Kumar 的报道, Spee 曲线可以发挥生物力学功能, 保持牙齿最大程度的接触, 增加咀嚼效率, 抵抗咬合力。此外, Spee 曲线可以防止咬合力不平衡所致的牙齿倾斜, 并可能与正畸治疗后复发有关[30]。

补偿曲线(Compensating curve)是连接上颌切牙的切缘, 尖牙的牙尖、前磨牙及磨牙的颊尖, 呈一条凸向下的曲线, 是上颌的纵𪙇曲线。此曲线的前段较平, 后段从第一磨牙的近中颊尖起逐渐向上弯曲, 称补偿曲线, 与 Spee 曲线相吻合, 同属于 Monson 球面的一部分[31]。上颌补偿曲线与下颌 Spee 曲线相协调, 支撑着强劲的咀嚼肌肉, 保证了牙弓的稳定性[32]。

横合曲线又称为 Wilson 曲线, 是连接两侧同名磨牙的颊尖、舌尖形成一条凸向下的曲线, 上颌两侧磨牙在牙槽中的位置均略向颊侧倾斜, 使舌尖的位置低于颊尖。同样, 在下颌可以形成凹向上的横𪙇曲线[33]。对于修复患者牙列形态来说, Wilson 曲线的曲度增加可改善牙弓的横向不足[34], 是下颌后牙修复的重要参考依据[35]。随着年龄的改变、牙齿的磨耗, 咬合曲线会发生变化, 正畸医生应当给予关注, 诱导咬合曲线向利于个体咬合的方向发展。

3. 咬合曲线测量方法

传统的咬合曲线测量仪器包括直尺、游标卡尺以及 Broadrick 的咬合平面分析仪, 但是此类工具的可重复性和可操作性差, 现已较少使用[36]。随着口腔数字化的发展, 临床医师可以使用口扫描仪扫描患者的口腔或石膏模型以获得 3D 牙列模型, 再在相应软件上进行测量。值得注意的是, 人工智能可以代替研究人员手动选择解剖标志点并自动完成相应数据的处理[26], 极大程度地提升了效率, 但是目前还没有人工智能运用于咬合曲线的测量。所以, 出于提高科研效率及扩展人工智能运用的目的, 在咬合曲线测量时引入人工智能是符合实际需求的。

近期, 在测量 Spee 曲线深度时, 学者们一般将下颌双侧第二磨牙的远中颊尖和中切牙近中接触点连接, 此平面定义为𪙇平面, 测量第一磨牙近中颊尖至此平面的垂直距离, 即为单侧 Spee 曲线深度, 取双侧的平均值为整个牙弓的 Spee 曲线深度[37] [38]。

补偿曲线和 Spee 曲线相吻合, 同属于都是 Monson 球面上的曲线, 基于此, 安晓飞使用 Spee 曲线的深度来代表补偿曲线曲度[39]。但是, 若将同侧的上颌第二磨牙的近、远中颊尖和第一磨牙的远中颊尖相连接从而得到补偿曲线, 再用此段曲线的半径或弦长来代表其曲度, 这种方法会更加直观[40], 并且, 由于数字化技术的引入, 该方法的使用将更加高效。然而, 有关正畸治疗后补偿曲线变化的研究缺乏, 定义补偿曲线曲度的方法还有待统一。

在 CBCT 图像上, Barrera 做出上颌磨牙最大咬合接触处的冠状切面, 利用磨牙长轴倾斜的角度大小来代表 Wilson 曲线的曲度。同样是利用角度大小代表 Wilson 曲线的曲度, Golshah 将一侧上颌磨牙的近中颊尖和近中舌尖相连接形成直线, 同样的连接另一侧形成磨牙的近中颊尖和近中舌尖所在的直线, 上述两直线的交角即代表 Wilson 曲线的曲度[41]。与此不同的是, Goh 提出了利用线性距离代表 Wilson 曲线曲度的方法: 首先通过连接双侧第二磨牙的远中颊尖和中切牙近中切缘形成上颌牙列的咬合平面, 然后分别测量第一和第二前磨牙以及第一和第二磨牙的近中颊尖、近中舌尖至此平面的距离。Wilson 曲线的曲度计算方法为上述近中颊尖至平面的距离减去近中舌尖至此平面的距离[33]。所以, 关于 Wilson 曲线曲度的测量仍存有争议, 需要后续有关专家的商讨以求统一。

4. 咬合曲线正畸治疗前后变化

正常 Spee 曲线的深度应该为 2 mm [42], 其深度在安氏 II 类错合患者中最深, 是 II 类患者的特征之一[43], 在安氏 II 类一分类中深度平均为 2.8 mm, 而在安氏 II 类二分类则高达 4.3 mm [44]。过深的 Spee 曲线通常伴随深覆合, 除此之外, 肌肉的平衡会紊乱, 最终咬合功能的平衡受到影响[30]。因此, 过深的 Spee 曲线是正畸当中必须解决的问题。隐形矫治主要是通过压低前牙、升高后牙或两种方法相结合来纠正 Spee 曲线[38], 在此过程中也可以配合使用支抗钉、II 类牵引等措施来辅助矫正[37]。在 Rozzi 的研究

中, ClinCheck 中预设控制倾斜度同时绝对压低下前牙 2.1 mm 来纠正 Spee 曲线, 30 名骨性 I 类或骨性 II 类患者隐形矫治过后, 下前牙最终被压低了 1.8 mm, Spee 曲线深度减少了 2.2 mm, 与固定矫治无明显差异[38]。在 Goh 选取的 42 名安氏 I 类或 II 类受试者中, ClinCheck 上预测的 Spee 曲线深度比实际深度高出 0.55 mm, 预测的平均精度只有 35%, 第一磨牙处的精度最低[37]。目前, 有关隐形矫治 Spee 曲线效果的报道大多样本少, 且少有根据患者垂直骨面型来进行分组, 所以未来需要进行更多关于隐形矫治后不同垂直骨面型患者 Spee 曲线变化的研究。

补偿曲线在全口义齿修复中多被提及, 不同补偿曲线的全口义齿发挥的力学作用不同, 对缺牙的牙槽嵴压应力不同。正常补偿曲线的全口义齿作用下, 大部分骨组织呈现低应力水平、受压均衡, 利于组织健康[32]。因此, 正常的补偿曲线是正畸治疗的目标, 应当进行更多关于治疗前后补偿曲线变化的研究, 为正畸临床提供依据。

Wilson 曲线的变化是横向维度的变化, 隐形矫治可以通过扩弓实现牙弓横向维度的变化, 治疗后的 Wilson 曲线会发生改变[45], 并且 Wilson 曲线可以作为扩弓后牙弓稳定性的判断标准[32]。扩弓过程中牙齿发生唇舌向的移动会导致骨开窗、骨开裂, 同时牙槽骨也会产生高度的变化[46]。在隐形矫治安氏 II 类患者过程中, 压低下前牙是关键[47], 但是压低、内收前牙以及缺乏对牙根的控制都有可能引起牙槽骨缺损[48]。根据 Goh 的报道, 由于隐形矫治器缺乏对牙根的控制, 下颌第一磨牙矫治后 Wilson 曲线会较 ClinCheck 所预测更为平坦[33]。此外, 根据 Lim 的报道, 在上颌, 同样由于缺乏对牙根转矩的控制, 隐形矫治后 Wilson 曲线的变化也较难预测[49]。但是, 由于样本量较少, 仍需要有更多样本的研究, 用于明确隐形矫治对 Wilson 曲线的纠正效果。

5. 总结与展望

由于错颌畸形患者的咬合曲线存在异常, 有效的咀嚼效率有赖于正常的咬合曲线, 所以正畸治疗不仅要解决美观的问题, 咬合也是治疗前后应当关注的重点。在提倡高效、准确的临床背景下, 数字化在正畸治疗中越来越重要。隐形矫治由于其数字化特征, 其与人工智能结合是未来的发展趋势。基于以上背景, 未来关于咬合曲线的话题有待深入到隐形矫治中。

基金项目

重庆市科卫联合医学科研资助项目(编号: 2021MSXM114)。

参考文献

- [1] Lin, M., Xie, C., Yang, H., Wu, C. and Ren, A. (2019) Prevalence of Malocclusion in Chinese Schoolchildren from 1991 to 2018: A Systematic Review and Meta-Analysis. *International Journal of Paediatric Dentistry*, **30**, 144-155. <https://doi.org/10.1111/ipd.12591>
- [2] Alhammadi, M.S., Halboub, E., Fayed, M.S., Labib, A. and El-Saaidi, C. (2018) Global Distribution of Malocclusion Traits: A Systematic Review. *Dental Press Journal of Orthodontics*, **23**, 40.e1-40.e10. <https://doi.org/10.1590/2177-6709.23.6.40.e1-10.onl>
- [3] 黄红亮, 秦燕军, 陈慧霞, 等. 儿童错畸形与正畸治疗意识的流行病学调查[J]. *江苏医药*, 2015, 41(9): 1022-1024.
- [4] Fontana, M., Eckert, G.J., Katz, B.P., Keels, M.A., Levy, B.T., Levy, S.M., et al. (2023) Predicting Dental Caries in Young Children in Primary Health Care Settings. *Journal of Dental Research*, **102**, 988-998. <https://doi.org/10.1177/00220345231173585>
- [5] Singh, A. and Purohit, B. (2021) Is Malocclusion Associated with Dental Caries among Children and Adolescents in the Permanent dentition? A Systematic Review. *Community Dent Health*, **38**, 172-177.
- [6] Zou, J., Meng, M., Law, C.S., Rao, Y. and Zhou, X. (2018) Common Dental Diseases in Children and Malocclusion. *International Journal of Oral Science*, **10**, Article No. 7. <https://doi.org/10.1038/s41368-018-0012-3>
- [7] Mariela Rodriguez Cordeiro, M. and Jose de Carvalho Rocha, M. (2005) The Effects of Periradicular Inflammation and

- Infection on a Primary Tooth and Permanent Successor. *Journal of Clinical Pediatric Dentistry*, **29**, 193-200. <https://doi.org/10.17796/jcpd.29.3.5238p10v21r2j162>
- [8] Grippaudo, C., Paolantonio, E.G., Antonini, G., Saulle, R., La Torre, G. and Deli, R. (2016) Association between Oral Habits, Mouth Breathing and Malocclusion. *Acta Otorhinolaryngologica Italica*, **36**, 386-394. <https://doi.org/10.14639/0392-100x-770>
 - [9] Kramer, P.F., Pereira, L.M., Ilha, M.C., Borges, T.S., Freitas, M.P.M. and Feldens, C.A. (2017) Exploring the Impact of Malocclusion and Dentofacial Anomalies on the Occurrence of Traumatic Dental Injuries in Adolescents. *The Angle Orthodontist*, **87**, 816-823. <https://doi.org/10.2319/041417-258.1>
 - [10] D'Onofrio, L. (2019) Oral Dysfunction as a Cause of Malocclusion. *Orthodontics & Craniofacial Research*, **22**, 43-48. <https://doi.org/10.1111/ocr.12277>
 - [11] Saghiri, M.A., Eid, J., Tang, C.K. and Freag, P. (2021) Factors Influencing Different Types of Malocclusion and Arch Form—A Review. *Journal of Stomatology, Oral and Maxillofacial Surgery*, **122**, 185-191. <https://doi.org/10.1016/j.jormas.2020.07.002>
 - [12] Hansen, C., Markström, A. and Sonnesen, L. (2021) Sleep-Disordered Breathing and Malocclusion in Children and Adolescents—A Systematic Review. *Journal of Oral Rehabilitation*, **49**, 353-361. <https://doi.org/10.1111/joor.13282>
 - [13] Fountoulaki, G. and Thurzo, A. (2022) Change in the Constricted Airway in Patients after Clear Aligner Treatment: A Retrospective Study. *Diagnostics*, **12**, Article 2201. <https://doi.org/10.3390/diagnostics12092201>
 - [14] Koskela, A., Neittaanmäki, A., Rönnerberg, K., Palotie, A., Ripatti, S. and Palotie, T. (2020) The Relation of Severe Malocclusion to Patients' Mental and Behavioral Disorders, Growth, and Speech Problems. *European Journal of Orthodontics*, **43**, 159-164. <https://doi.org/10.1093/ejo/cjaa028>
 - [15] Fernandez, C.C.A., Pereira, C.V.C.A., Luiz, R.R., Vieira, A.R. and De Castro Costa, M. (2017) Dental Anomalies in Different Growth and Skeletal Malocclusion Patterns. *The Angle Orthodontist*, **88**, 195-201. <https://doi.org/10.2319/071917-482.1>
 - [16] Gonca, M., Gunacar, D.N., Kose, T.E. and Beser, B. (2023) Evaluation of Trabecular Bone and Mandibular Cortical Thickness in Adults with Different Vertical Facial Types. *Oral Surgery, Oral Medicine, Oral Pathology and Oral Radiology*, **135**, 282-293. <https://doi.org/10.1016/j.oooo.2022.09.006>
 - [17] 苗珂馨, 王雪妮, 肖婷婷, 等. 不同垂直骨面型成人骨性Ⅱ类错(牙合)患者上颌尖牙冠根角及周围骨结构的锥形束CT测量[J]. 郑州大学学报(医学版), 2023(4): 568-572.
 - [18] 于世宾. 关于“牙合”、“颌”字的规范使用说明[J]. 实用口腔医学杂志, 2023, 39(6): 789.
 - [19] Clark, J.R. and Evans, R.D. (2001) Functional Occlusion: I. A Review. *Journal of Orthodontics*, **28**, 76-81. <https://doi.org/10.1093/ortho/28.1.76>
 - [20] Liu, L., Song, Q., Zhou, J., Kuang, Q., Yan, X., Zhang, X., et al. (2022) The Effects of Aligner Overtreatment on Torque Control and Intrusion of Incisors for Anterior Retraction with Clear Aligners: A Finite-Element Study. *American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics*, **162**, 33-41. <https://doi.org/10.1016/j.ajodo.2021.02.020>
 - [21] Putrino, A., Barbato, E. and Galluccio, G. (2021) Clear Aligners: Between Evolution and Efficiency—A Scoping Review. *International Journal of Environmental Research and Public Health*, **18**, Article 2870. <https://doi.org/10.3390/ijerph18062870>
 - [22] 李俊霖, 肖立伟. 隐形矫治技术推磨牙远移机制与疗效的研究进展[J]. 国际口腔医学杂志, 2022, 49(1): 109-115.
 - [23] Kamburoğlu, K. (2015) Use of Dentomaxillofacial Cone Beam Computed Tomography in Dentistry. *World Journal of Radiology*, **7**, 128-130. <https://doi.org/10.4329/wjr.v7.i6.128>
 - [24] Hou, X., Xu, X., Zhao, M., Kong, J., Wang, M., Lee, E., et al. (2022) An Overview of Three-Dimensional Imaging Devices in Dentistry. *Journal of Esthetic and Restorative Dentistry*, **34**, 1179-1196. <https://doi.org/10.1111/jerd.12955>
 - [25] Bichu, Y.M., Hansa, I., Bichu, A.Y., Premjani, P., Flores-Mir, C. and Vaid, N.R. (2021) Applications of Artificial Intelligence and Machine Learning in Orthodontics: A Scoping Review. *Progress in Orthodontics*, **22**, Article No. 18. <https://doi.org/10.1186/s40510-021-00361-9>
 - [26] Murphy, S.J., Lee, S., Scharm, J.C., Kim, S., Amin, A.A., Wu, T., et al. (2023) Comparison of Maxillary Anterior Tooth Movement between Invisalign and Fixed Appliances. *American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics*, **164**, 24-33. <https://doi.org/10.1016/j.ajodo.2022.10.024>
 - [27] Lee, S., Wu, T., Deguchi, T., Ni, A., Lu, W., Minhas, S., et al. (2022) Assessment of Malalignment Factors Related to Invisalign Treatment Time Aided by Automated Imaging Processes. *The Angle Orthodontist*, **93**, 144-150. <https://doi.org/10.2319/031622-225.1>
 - [28] Spee, F.G., Biedebach, M.A., Hotz, M. and Hitchcock, H.P. (1980) The Gliding Path of the Mandible along the Skull. *The Journal of the American Dental Association*, **100**, 670-675. <https://doi.org/10.14219/jada.archive.1980.0239>

- [29] Proffit, W.R., *et al.* (2018) Contemporary Orthodontics-E-Book: Contemporary Orthodontics-E-Book. Elsevier Health Sciences.
- [30] Tamizharasi, S. and Senthil Kumar, K. (2012) Significance of Curve of Spee: An Orthodontic Review. *Journal of Pharmacy and Bioallied Sciences*, **4**, 323-328. <https://doi.org/10.4103/0975-7406.100287>
- [31] Marshall, S.D., Kruger, K., Franciscus, R.G. and Southard, T.E. (2019) Development of the Mandibular Curve of Spee and Maxillary Compensating Curve: A Finite Element Model. *PLOS ONE*, **14**, e0221137. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0221137>
- [32] 郭子源, 谢文婷, 李文龙, 等. Spee 曲线在口腔正畸领域的应用及研究进展[J]. 国际口腔医学杂志, 2021, 48(1): 90-95.
- [33] Goh, S., Dreyer, C. and Weir, T. (2023) The Predictability of the Mandibular Curve of Wilson, Buccolingual Crown Inclination, and Transverse Expansion Expression with Invisalign Treatment. *American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics*, **163**, 109-116. <https://doi.org/10.1016/j.ajodo.2021.09.020>
- [34] Lorente, C., Lorente, P., Perez-Vela, M., Esquinas, C. and Lorente, T. (2020) Quad-Helix Compression to Decompensate Molar Inclination Prior to Skeletal Expansion. *Journal of Orofacial Orthopedics*, **81**, 142-149. <https://doi.org/10.1007/s00056-019-00212-7>
- [35] Lee, J., Choi, S., Kwon, T., Kang, K. and Kim, S. (2019) Three-Dimensional Analysis of Tooth Movement in Class II Malocclusion Treatment Using Arch Wire with Continuous Tip-Back Bends and Intermaxillary Elastics. *The Korean Journal of Orthodontics*, **49**, 349-359. <https://doi.org/10.4041/kjod.2019.49.6.349>
- [36] 肖沛, 俞燕芳, 杨海萍, 等. Spee 曲线在正畸中的研究进展[J]. 口腔医学, 2023, 43(4): 365-370.
- [37] Goh, S., Dreyer, C. and Weir, T. (2022) The Predictability of the Mandibular Curve of Spee Leveling with the Invisalign Appliance. *American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics*, **162**, 193-200. <https://doi.org/10.1016/j.ajodo.2021.04.034>
- [38] Rozzi, M., Tiberti, G., Mucedero, M. and Cozza, P. (2022) Leveling the Curve of Spee: Comparison between Continuous Archwire Treatment and Invisalign System: A Retrospective Study. *American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics*, **162**, 645-655. <https://doi.org/10.1016/j.ajodo.2021.06.020>
- [39] 安晓飞, 白乐康, 牛光良. 不同补偿曲线上的颌全口义齿下支持组织的应力分布[J]. 口腔颌面修复学杂志, 2012, 13(4): 215-218.
- [40] 田春融. 补偿曲线的曲度与弦斜度的商榷[J]. 哈尔滨医科大学学报, 1982(3): 60.
- [41] Golshah, A., Rezaei, N. and Heshmati, S. (2020) Buccolingual Inclination of Canine and First and Second Molar Teeth and the Curve of Wilson in Different Sagittal Skeletal Patterns of Adults Using Cone-Beam Computed Tomography. *International Journal of Dentistry*, **2020**, 1-8. <https://doi.org/10.1155/2020/8893778>
- [42] Andrews, L.F. (1972) The Six Keys to Normal Occlusion. *American Journal of Orthodontics*, **62**, 296-309. [https://doi.org/10.1016/s0002-9416\(72\)90268-0](https://doi.org/10.1016/s0002-9416(72)90268-0)
- [43] Sayar, G. and Oktay, H. (2019) Assessment of Curve of Spee in Different Malocclusions. *European Oral Research*, **52**, 127-130. <https://doi.org/10.26650/eor.2018.475>
- [44] Ahmed, I., Nazir, R., Gul, E.E., *et al.* (2011) Influence of Malocclusion on the Depth of Curve of Spee. *Journal of the Pakistan Medical Association*, **61**, 1056-1059.
- [45] Tien, R., Patel, V., Chen, T., Lavrin, I., Naoum, S., Lee, R.J.H., *et al.* (2023) The Predictability of Expansion with Invisalign: A Retrospective Cohort Study. *American Journal of Orthodontics and Dentofacial Orthopedics*, **163**, 47-53. <https://doi.org/10.1016/j.ajodo.2021.07.032>
- [46] Jäger, F., Mah, J.K. and Bumann, A. (2017) Periodental Bone Changes after Orthodontic Tooth Movement with Fixed Appliances: A Cone-Beam Computed Tomographic Study. *The Angle Orthodontist*, **87**, 672-680. <https://doi.org/10.2319/102716-774.1>
- [47] Li, Y., Xiao, S., Jin, Y., Zhu, C., Li, R., Zheng, Y., *et al.* (2023) Stress and Movement Trend of Lower Incisors with Different IMPA Intruded by Clear Aligner: A Three-Dimensional Finite Element Analysis. *Progress in Orthodontics*, **24**, Article No. 5. <https://doi.org/10.1186/s40510-023-00454-7>
- [48] Jiang, T., Wang, J.K., Jiang, Y.Y., Hu, Z. and Tang, G.H. (2021) How Well Do Integrated 3D Models Predict Alveolar Defects after Treatment with Clear Aligners? *The Angle Orthodontist*, **91**, 313-319. <https://doi.org/10.2319/042220-342.1>
- [49] Lim, Z.W., Weir, T. and Meade, M.J. (2023) The Predictability of Maxillary Curve of Wilson Leveling with the Invisalign Appliance. *Journal of the World Federation of Orthodontists*, **12**, 207-212. <https://doi.org/10.1016/j.ejwf.2023.05.008>