

含不对称摇椅弓的上颌矫治系统三维非线性有限元模型的构建

曾庆妍, 方志欣, 周 嫣, 唐 倩, 刘代斌

基金项目: 广西医药卫生项目(编号:桂卫 Z2015356)

作者单位: 520021 南宁, 广西壮族自治区人民医院口腔正畸科(曾庆妍, 方志欣, 周 嫣, 唐 倩); 541009 广西, 桂林医学院附属口腔医院(曾庆妍); 410000 湖南, 长沙市口腔医院(刘代斌)

作者简介: 曾庆妍(1987-), 女, 医学硕士, 主治医师, 研究方向: 口腔正畸学。E-mail: zengqingyanzqy@sina.com

通讯作者: 方志欣(1967-), 女, 医学硕士, 主任医师, 硕士研究生导师, 研究方向: 口腔正畸学临床及应用基础研究。E-mail: fangzx802@sina.com

[摘要] **目的** 构建包含不对称摇椅弓的上颌矫治系统三维非线性有限元模型, 为探讨不对称摇椅弓作用于牙列的生物力学机理奠定基础。**方法** 利用上颌骨及上牙列等 CT 扫描数据及托槽弓丝等实体数据, 通过运行三维有限元分析等专用软件, 建立包含上颌骨、牙列、托槽、不对称摇椅弓等在内的整体上颌三维非线性有限元模型。**结果** 建立了含不对称摇椅弓的上颌三维非线性有限元模型, 包含 160 514 个单元和 242 878 个节点。**结论** 建立的有限元模型具有较高的仿真度和良好的几何相似性, 为进一步探讨不对称摇椅弓矫治殆平面偏斜时作用于牙列的力学机理提供了良好的研究手段。

[关键词] 正畸; 生物力学; 上牙列; 不对称摇椅弓; 三维有限元分析

[中图分类号] R 783.5 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1674-3806(2020)11-1125-04
doi:10.3969/j.issn.1674-3806.2020.11.12

Construction of three-dimensional nonlinear finite element model of maxillary correction system with asymmetric rocking chair arch wire ZENG Qing-yan, FANG Zhi-xin, ZHOU Yan, et al. Department of Orthodontics, the People's Hospital of Guangxi Zhuang Autonomous Region, Nanning 530021, China

[Abstract] **Objective** To construct a three-dimensional(3D) nonlinear finite element model of maxillary correction system with asymmetric rocking chair arch wire, and to lay the foundation for further investigating the bio-mechanical mechanism of asymmetric rocking chair arch wire on the dentition. **Methods** Computed tomography(CT) scan data of maxilla and upper dentition, and the data of real items including bracket, arch wire and so on were used to construct a 3D nonlinear finite element model of the whole maxilla including the maxilla, dentition, brackets and asymmetric rocking chair arch wire through running special software such as 3D finite element analysis. **Results** The 3D nonlinear finite element model of maxillary correction system with asymmetric rocking chair arch wire was constructed. The model had a total of 160 514 units and 242 878 nodes. **Conclusion** The constructed finite element model has a high degree of simulation and good geometric similarity, which provides a good research method for further study of the mechanical mechanisms of asymmetric rocking chair arch wire acting on the dentition when the asymmetric rocking chair arch wire is used to correct the occlusal plane deflection.

[Key words] Orthodontics; Biomechanics; Upper dentition; Asymmetric rocking chair arch wire; Three-dimensional finite element analysis

殆平面偏斜在口腔正畸临床上比较常见, 可始发于牙颌畸形, 也可在矫治中由医源性因素导致。对于骨性的殆平面偏斜, 单纯正畸治疗效果比较局限。牙性的则可采用各种殆板配合牵引、片段弓、多曲方丝弓矫治技术及配合口外弓或微型种植支抗等矫治。但这些方法存在异物感强、刺激口腔黏膜、配合度要求高、弓丝弯制复杂和操作有创等问题^[1]。临床实践中发现不对称摇椅弓可有效矫治殆平面偏

斜,且能避免上述弊端,但其矫治的力学机制尚不明确。本文将 CT 技术与三维非线性有限元分析法相结合,对一名健康志愿者建立一个含不对称摇椅弓的上颌三维非线性有限元模型,为探讨不对称摇椅弓的矫治机理提供研究模型基础,现报告如下。

1 对象与方法

1.1 研究对象 健康成年志愿者,24 岁,女性,恒牙列个别正常殆,牙列完整,上牙列排列基本整齐,无间隙;牙冠解剖形态正常,无龋齿和牙周病。无正畸治疗史,无颌面部外伤史。牙颌面部不存在金属充填体或修复体。

1.2 建模方法

1.2.1 获取 CT 图像 志愿者取仰卧位,使用殆垫使其所有牙尖均无交错重叠。采用 64 排螺旋 CT 扫描仪(德国 Sensation Siemens 公司)以咬合平面为基准平面进行颌面部扫描,CT 数据保存为 DICOM 格式。

1.2.2 上牙列和上颌骨建模 应用医学影像处理软件 Mimics 15.0,对图像数据进行阈值分割,用动态区域增长方法选择牙齿和颌骨的阈值,保留上颌骨数据并移除牙列间伪影,处理好的上颌骨几何模型数据以 Stl 文件格式输出。然后应用 Geomagic Studio12.0 软件对模型中的空洞、毛刺及三角片等进行编修和降噪,使模型光滑并以 Stl 文件格式导出。

1.2.3 牙周膜建模 本研究选取牙周膜的厚度为 0.25 mm。使用 Geomagic Studio12.0 软件对已建好的上牙列牙根曲面模型抽壳 0.25 mm 形成曲面模型,然后与上颌骨进行布尔运算,得到牙周膜模型,以 Stl 文件格式导出。

1.2.4 托槽建模 参照标准 MBT 托槽系统的几何参数(托槽为杭州奥杰医疗器材有限公司产品,槽沟宽度为 0.022 英寸),利用 Solidworks 2011 软件建立托槽的三维实体模型。托槽的位置基本位于牙齿唇侧临床冠中心,个别牙位根据志愿者的个体化差异进行调整。

1.2.5 不对称摇椅弓建模 参照 0.457 mm×0.635 mm (0.018 英寸×0.025 英寸)不锈钢方丝的几何参数,应用 UG8.0 软件对国人直丝弓标准弓形图的上颌弓形进行扫描,形成一根数字化上颌平弓,参照既往研究^[2]构建摇椅弓模型的方法,形成摇椅弓,然后将其一半进行对称镜像翻转,形成深度分别为 2 mm、4 mm 和 6 mm 三种工作状态的不对称摇椅弓(见图 1)。弓丝的最高及最低点分别位于左右尖牙处。

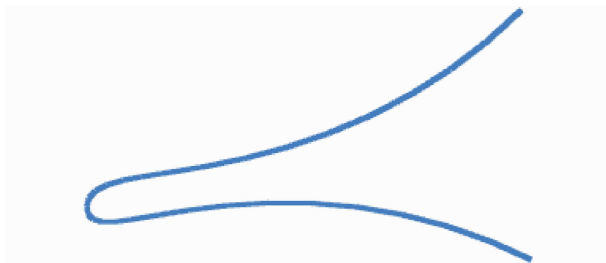


图 1 不对称摇椅弓实体模型

1.2.6 组装及网格划分 应用 Pro/Engineer Wildfire 5.0 软件,将建好的上颌牙列、上颌骨、牙周膜、唇侧托槽和不对称摇椅弓进行组装,再应用 ABAQUS6.12-1 软件中的前处理模块 Abaqus CAE 划分有限元网格,获得含不对称摇椅弓的上颌整体三维非线性有限元模型。

1.3 材料力学参数 参照既往研究^[3]设定材料的力学参数。

1.4 接触对设置 牙根与牙周膜、牙周膜与牙槽骨及牙齿与托槽间均定义为粘接关系,在加载后,各结构之间不会发生相对滑动。定义不对称摇椅弓的变形属于非线性几何大变形,定义托槽、牙齿、牙周膜和牙槽骨为可变形接触体,弓丝与各托槽之间为非线性接触关系,摩擦系数为 0.15^[4]。

2 结果

成功建立了含不对称摇椅弓的上颌三维非线性有限元模型(见图 2),该模型包含 160 514 个单元和 242 878 个节点。各子模型彼此独立,便于研究中进行组合和调整。

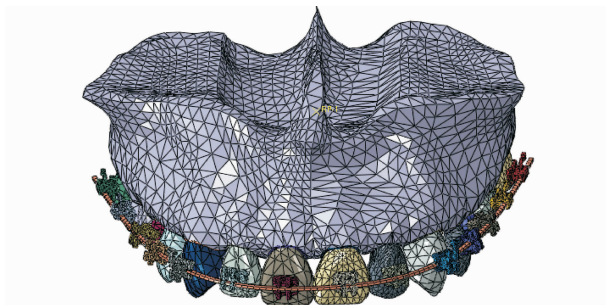


图 2 上颌矫治系统三维非线性有限元模型图

3 讨论

3.1 殆平面偏斜的矫治 不同的殆平面状态与错殆畸形类型关系密切^[5,6],学者们希望通过正畸治疗改变殆平面的状态,从而获得预期的矫治效果^[7,8]。有关殆平面的问题近年备受关注,而殆平面偏斜是临床中常见的另一种殆平面异常情况。殆平面偏斜一般分为骨性和牙性两种类型。骨性殆平面偏斜由于存在颌骨或颅面部骨的大小形态异常,单纯掩饰

性正畸治疗对其改善有限,所以较严重的骨性殆平面偏斜需要接受正畸-正颌联合矫治才能取得满意的疗效^[9]。但对于牙性或轻度骨性殆平面偏斜患者,由于偏斜的原因主要局限于牙齿或者齿槽突,而正畸力的作用范围是牙齿和齿槽突,故可通过正畸的方法进行矫正。临床中,对于牙性及轻度骨性殆平面偏斜的矫治方法较多,如多曲方丝弓矫治技术,通过对弓丝上的多个曲进行调整形成阶梯,可对殆平面偏斜进行有效矫治^[10]。但是弯制多曲弓丝耗时较长,弯制及调整较复杂,且对患者的口腔软组织激惹较大,口腔卫生维护也较困难。殆板配合颌间垂直牵引法在临床中也比较常用,此方法在矫治过程中需使用殆板,且殆板需要患者近 24 h 戴用,还需配合颌间垂直牵引,故其矫治效果非常依赖于患者的配合程度。口外弓是临床较常用的口外施力及增强支抗的方法,对于各种原因所致的单侧上颌后牙萌出过度导致的殆平面偏斜,口外弓非对称性牵引可取得较好的疗效,但也同样存在对患者配合度要求高的问题。依靠微种植体支抗压低或伸长牙齿纠正倾斜的殆平面是近年比较常用的方法^[11],微种植体支抗的应用可保护支抗,避免矫治力的反作用力对邻牙等造成不利影响,可提高矫治效率,对一些疑难病例的矫治可实现常规方法较难达到的矫治效果。但植入种植钉属于有创操作,存在可能的并发症及脱落的风险,从而使矫治方案难以实现。而前牙段的殆平面偏斜,常由于两侧牙齿萌出高度不一致或矫治不当导致,压低辅弓对此也有较好的疗效,此方法不需要挂牵引圈牵引,因此既不需依赖患者的配合,也避免了种植钉植入对患者的有创操作,但弓丝弯制也相对较复杂,口内存在多根弓丝,作用也较局限。不对称摇椅弓由于左右摇椅曲底部的位置相反,可对左右两侧牙齿同时产生相反的升高或压低作用^[12],从而达到快速矫治殆平面偏斜的目的。临床应用中发现其不但临床效果明显,且易于弯制,无需在弓丝上弯制特殊的加力曲,对患者口腔黏膜无激惹,不增加患者的口腔卫生维护负担。还可配合微型种植钉快速矫治复杂殆平面偏斜,减少单纯微型种植钉矫治复杂殆平面偏斜的种植钉数量,从而有效减少种植钉的风险,并减轻患者经济负担。但实践中也发现其可能对牙列后部产生不利影响,其力学机制尚不明了,目前对其治疗机理也缺乏深入的研究。

3.2 三维非线性有限元分析法的特点 正畸治疗过程中,牙齿受力移动并不简单等同于物理学意义

上的力施加于物体上的移动方式,还需考虑整个矫治系统间的接触与摩擦及组织之间的束缚。在牙齿的实际受力过程中,弓丝与托槽间的接触点及接触区域并不确定,故需使用非线性有限元法来模拟计算。非线性问题的求解过程比线性问题复杂,但分析的结果更接近临床实际^[13]。目前使用非线性有限元法建模分析正畸矫治力的研究相对较少^[14,15]。非线性设计除了接触非线性,还包括几何和材料非线性。本研究中不对称摇椅弓在加力过程中产生几何大变形,属于几何非线性。不锈钢弓丝属于材料非线性。采用非线性方法分析,计算的复杂性增加,但计算结果更真实准确,所建模型与临床实际切合度更高。有限元分析软件 ABAQUS6.12-1 同时具有线性和非线性分析能力,其非线性分析能力最为突出。在求解非线性问题时,具有非常明显的优势。鉴于 ABAQUS6.12-1 软件及非线性分析的特点,本研究采用该软件并进行上颌包含不对称摇椅弓矫治系统的非线性有限元模型的建模及分析。

3.3 包含不对称摇椅弓的上颌矫治系统三维非线性有限元模型的构建特点 在应用不对称摇椅弓矫治殆平面偏斜的过程中,不对称摇椅弓等矫治器与牙颌结构组成的矫治系统的变化非常复杂,因此,如何准确模拟临床实际成为三维非线性有限元建模时所考虑的主要问题。有限元法所建模型与临床的相似性决定了后期计算的准确与否。本研究使用 64 排螺旋 CT 的扫描数据来构建模型,具有以下优点:(1)获得的扫描数据和图像可多次重复使用;(2)骨断面 CT 影像变形较小,数据丰富,信息准确,能反映组织结构的细微差异;(3)扫描间距可以调节,能清晰真实地呈现各断面组织结构;(4)分辨率较高,能准确区分各组织结构,有利于参数分析和图像分割。因此,本研究数据在三维影像重建时,图像处理速度快,重建图像质量高,可以满足几何相似性的要求。年龄和个体差异等因素对牙周膜的厚度影响较大,而且其厚度在牙根的不同位置是不同的,一般根中部是生理性活动的支点,故根中部牙周膜最窄。同时牙周膜是软组织,属于非线性材料,因此,牙周膜具有黏弹性、异质性和各向异性的特征。但有学者将牙周膜设定为各向同性体和各向异性体两种情况进行对比,研究发现两者牙齿瞬间转动的中心位置无明显变化^[16]。因此,为简化计算分析,本研究参考大多数学者研究中所使用的方法^[17,18],以牙周膜为厚度均匀且各向同性的线弹性材料建模,厚度取 0.25 mm。本研究中摇椅弓及托槽等根据实体的真

实形态和尺寸建模,同样符合几何相似性要求。不对称摇椅弓的建模则参考既往研究^[2],采用分段折线单元,运用 ABAQUS6. 12-1 软件将弓丝与上颌矫治系统作为整体运动进行耦合。摇椅形弓丝参照临床中弓丝中点与中切牙托槽的位置关系及弓丝末端与颊面管末端的位置关系安放,并保持弓丝与托槽贴近。后期各牙齿的应力值和位移变化的计算分析通过摇椅弓的形变量转化为施加到牙齿的矢量值获得。由于本研究模型仍是用于牙齿初始移动的静力分析,故将各组织和材料均考虑为连续均质的、各向同性的弹性材料。上颌各牙齿与周围组织间紧密贴合,牙齿和托槽完全粘结,加载后无相对滑动,对临床状况模拟度高,保障了后期计算的准确性。

综上所述,本研究构建的三维非线性有限元模型确保了与生物实体真实结构的良好几何相似性,为下一步对不同深度不对称摇椅弓的加载力学分析奠定了基础。

参考文献

- 1 丁 寅. 正畸临床殆平面倾斜的预防与治疗[J]. 实用口腔医学杂志, 2004, 20(2):250-251.
- 2 吴 瑶. 不同深度 β 钛方丝摇椅弓对下颌牙垂直向受力影响的三维有限元研究[D]. 南昌:南昌大学,2011.
- 3 杨宝宽, 王 林, 严 斌, 等. 利用 MIMICS 和 CATIA 软件辅助建立包含方丝弓矫治器的上颌三维有限元模型[J]. 实用口腔医学杂志, 2010, 26(3):329-332.
- 4 陆史俊, 王震东, 倪晓宇, 等. 三段式片段弓技术打开咬合的三维非线性有限元模型的建立及生物力学分析[J]. 华西口腔医学杂志, 2013, 31(1):74-79.
- 5 Ćelar A, Tafaj E, Graf A, et al. Association of anterior and posterior occlusal planes with different Angle and skeletal classes in permanent dentitions; a lateral cephalometric radiograph study[J]. J Orofac Orthop, 2018, 79:267-276.
- 6 余星月, 吕冬梅, 田姍姍, 等. 颌底曲度与后牙殆平面倾斜度对矢状骨面型形成的影响[J]. 中国组织工程研究, 2020, 24(11):1659-1665.

- 7 Fushima K, Kitamura Y, Mita H, et al. Significance of the cant of the posterior occlusal plane in Class II division I malocclusions[J]. Eur J Orthod, 1996, 18(1):27-40.
- 8 方志欣, 周 嫣, 郭永明, 等. 安氏 I 类双颌前突患者矫治前后双殆平面的变化[J]. 中国临床新医学, 2014, 7(11):998-1000.
- 9 Reyneke JP, Bryant RS, Suuronen R, et al. Postoperative skeletal stability following clockwise and counter-clockwise rotation of the maxillomandibular complex compared to conventional orthognathic treatment[J]. Br J Oral Maxillofac Surg, 2007, 45(1):56-64.
- 10 闫伟军, 张欣泽, 庄 雷, 等. MEAW 技术治疗殆平面偏斜机制的有限元研究[J]. 中国美容医学, 2012, 21(9):1597-1600.
- 11 谢 琳, 陈 磊, 靳淑梅, 等. 微螺钉种植体支抗在牙性殆平面倾斜矫治中的临床应用[J]. 临床口腔医学杂志, 2011, 27(5):291-294.
- 12 李梦华, 王 威. 前牙区殆平面横向倾斜的临床研究[J]. 北京口腔医学, 2013, 21(4):209-211.
- 13 Koenig HA, Burstone CJ. Force systems from an ideal arch—large deflection considerations[J]. Angle Orthod, 1989, 59(1):11-16.
- 14 卢燕勤, 曾祥龙, 高雪梅. 牵引力大小对关闭间隙时滑动阻力影响的三维非线性有限元研究[J]. 中华口腔正畸学杂志, 2009, 16(4):207-210.
- 15 董 晶, 张哲湛, 周国良. 上颌第一磨牙远中移动时牙周膜应力分布的非线性三维有限元分析[J]. 上海口腔医学, 2015, 24(3):315-320.
- 16 Yettram AL, Wright KW, Houston WJ. Centre of rotation of a maxillary central incisor under orthodontic loading[J]. Br J Orthod, 1977, 4(1):23-27.
- 17 汤荟文, 回记芳, 郑文涛, 等. 不同角度上颌埋伏中切牙殆向牵引牙周应力分布的分析[J]. 现代口腔医学杂志, 2016, 30(1):16-19.
- 18 Luca L, Giuseppe S, Angela A, et al. 3D FEM comparison of lingual and labial orthodontics in en masse retraction[J]. Prog Orthod, 2014, 15(1):38-38.

[收稿日期 2020-05-12][本文编辑 余 军 吕文娟]

本文引用格式

曾庆妍, 方志欣, 周 嫣, 等. 含不对称摇椅弓的上颌矫治系统三维非线性有限元模型的构建[J]. 中国临床新医学, 2020, 13(11):1125-1128.