

文章编号:1004-7220(2014)04-0334-05

儿童切牙整体移动诱导方案的验证和评价

朱春芳, 何炳蔚

(福州大学 机械工程及自动化学院, 福州 350108)

摘要: **目的** 对切牙整体移动的儿童诱导方案进行可行性、有效性分析和评价,估算和分析牙齿表面所受力的大小、方向以及位置。**方法** 采用CT扫描一个正畸儿童患者的下颌,由此建立下颌切牙、牙周膜、牙槽骨的三维实体模型。然后,通过有限元软件Abaqus计算得到牙周膜外表面的初始应变分布,并将牙周膜外表面的正应变作为牙移动的外部骨重建激励,模拟分析连续更换两次诱导器的诱导效果。**结果** 牙齿的每周移动量约为0.27 mm,1个诱导周期即1个月移动的总位移量约为1 mm,与实际临床上诱导的效果吻合。**结论** 本研究结果验证了儿童诱导器对切牙的整体移动具有可行性,为临床的诱导方案制定和优化提供了参考。

关键词: 诱导; 下颌切牙; 牙周膜; 整体移动; 应变

中图分类号: R 318.01 **文献标志码:** A

Verification and evaluation on induction scheme for bodily movement of incisor in children

ZHU Chun-fang, HE Bing-wei (School of Mechanical Engineering and Automation, Fuzhou University, Fuzhou 350108, China)

Abstract: **Objective** In order to analyze and evaluate the feasibility and effectiveness of induction scheme for bodily movement of incisor in children, the size, orientation and position of the force on tooth surface were estimated and analyzed. **Methods** The orthodontic jaw from a child was scanned to establish the 3D solid model including mandibular incisor, periodontal ligament and alveolar. Initial strain distributions on outer surface of the periodontal ligament were calculated by software Abaqus, and then the positive strain as the stimulation of the tooth movement was used to simulate the induced effects from the inducer which was changed twice in succession. **Results** The rate of orthodontic tooth movement was about 0.27 mm per week, and the total displacement during an induction period was about 1 mm per month, showing it was in accordance with the real induced effects in clinic. **Conclusions** The present study proved the feasibility of induction scheme for bodily movement of incisor in children and provided reference for formulation and optimization of induction scheme in clinic.

Key words: Induction; Mandibular incisor; Periodontal ligament; Bodily movement; Strain

儿童下颌切牙整体移动的诱导过程,是通过利用诱导器的变形产生一个作用在牙齿上的力,促使牙齿周围软组织(牙周膜)和骨组织发生一定的生物学效应(组织的吸收、增生),从而达到诱导的目的。因此,诱导力的方向、大小以及力量的分布和持续时间都会直接影响牙周组织反应,进而影响牙槽

骨组织的吸收和重建的速度。儿童诱导器与活动矫治器一样,不是附着于牙齿表面进行施力的刚性生活体,这就造成诱导器与牙齿之间极为复杂的相互作用方式。另外,诱导器本身具有复杂的形状,贴合于牙齿表面对牙齿施加诱导力,诱导力可以作用在牙冠表面的任何一处,很难确认其确切的作用力部

收稿日期:2013-07-09; 修回日期:2013-08-15

基金项目:福建省教育厅项目(JA11010),福建省科技厅项目(2012Y4007)。

通信作者:何炳蔚,教授, E-mail:mebwhe@fzu.edu.cn。

位以及产生何种力量和力矩。儿童诱导器是根据儿童牙齿生长特点设计制造而成,诱导器作用下的生物力学研究未见报导,现有的无托槽隐形矫正器大都应用在成人身上,主要致力于临床研究^[1-4],对隐形矫正器作用下牙颌组织的力学研究还很有限^[5-10],而且还停留在首次佩戴情况下对牙颌组织初始应力分析的状态。国内外有关牙齿在牙槽骨中动态移动过程的研究十分有限^[11-14],并且这些分析对几何模型、材料特性和诱导时间做了大量的简化。Bourauel 等^[12]的研究包括牙齿的所有移动类型,并分析了不同牙齿的移动情况;但是,在其研究中进行大量简化,牙齿、牙周膜作为一个可以旋转的并且几何简化为一椭圆抛物面形实体,与真实情况相差很大。实际上,几何形状和材料特性对牙周膜和牙槽骨的应力、应变分布有很大的影响,决定着牙槽骨的重建以及牙齿的移动。

文献[11-12]中提出用数值模型来模拟牙槽骨重建的模型。这些数值模型的理论基础都是根据 Wolff 定律提出来的。Wolff 定律一般考虑的是一个静态状态,诱导器施加的载荷作用在牙齿上,间接作用于牙周膜,影响骨组织的结构。骨重建可以分为 2 种类型^[15-16]:(1)外部骨重建。用来描述牙齿移动的位移变化过程,即牙齿在受载荷作用下,材料都为常数时,外部几何发生的变化。(2)内部骨重建。用来调控牙齿在受到正畸载荷作用时其周围牙槽骨骨密度的重新分布。

考虑到骨重建的 2 种类型都会发生,但外部骨重建决定了外部几何的变化和牙齿移动的速度,牙齿及其牙颌组织通过牙槽骨的骨重建发生移动,没有改变牙颌的整体外观形状。为了研究整个诱导过程牙齿移动的速度,本文利用外部骨重建原理模拟儿童下颌切牙整体移动的诱导过程,假设牙周膜外法线方向为正方向,牙周膜外表面发生正应变即牙槽骨吸收,负应变即牙槽骨增生。通过编程得到牙槽骨每周期的吸收量以及牙齿移动的方向;以牙齿移动后的位置重新建立模型,再次计算牙周膜的应变分布,作为下一阶段的初始状态;分析连续更换两次儿童诱导器的作用效果以及牙颌组织应力变化,对临床的诱导方案的可行性和有效性进行评价。

1 材料与方法

1.1 牙颌组织的有限元建模

以下颌切牙唇舌向整体移动的女性儿童为研究

对象,建立下颌牙齿及牙周组织的三维有限元模型。利用螺旋 CT (Siemens sensation16, Siemens 公司,德国,扫描电流 200 mA,扫描电压 120 kV,扫描层间距 0.5 mm,像素 512 × 512) 对儿童下颌进行扫描,扫描数据经由图片存档及通信系统 (picture achieving and communication system, PACS) 以 DICOM 格式直接存储;利用 Mimics 软件读取 CT 图像数据,手动调整图像的视图方向呈现轴状面、冠状面、矢状面的 3 个视图,根据骨组织的灰度值不同调整阈值,然后经过图像分割、编辑、补洞处理,去除边缘杂点和冗余数据,区域增长,3D 计算建立牙颌组织的三维模型;将模型存储为 STL 格式的文件,导入 Geomagic Studio 软件中进行模型的修正和三维 NURBS 曲面拟合,从而建立牙齿及牙槽骨的三维有限元模型。在 Geomagic Studio 软件中,通过软件的模型增厚功能将牙体向外增厚 0.25 mm^[17],由此获得牙周膜的三维模型。

1.2 牙颌组织的材料特性

经有限元软件 Abagus 自动网格划分后各模型的单元、节点数,以及实验中各组织材料的弹性模量 E 和泊松比 ν 见表 1^[6],均假设为各向同性、均质连续的线弹性体材料。

表 1 牙颌组织的材料参数

Tab. 1 Material parameters of the dental tissues

	E/MPa	ν	单元数	节点数
下颌切牙	19 600	0.3	38 601	7 707
牙周膜	0.668	0.45	37 787	9 684
牙槽骨	1 370	0.3	129 434	25 233

1.3 诱导力的选择

施加一个舌唇方向的水平矫治力,作用在离牙冠顶部 5 mm 处,大小 $F_y = -0.98 \text{ N}$ ^[8,18] 和一个防止牙齿倾斜转动的力偶,大小 $M_x = -2 \text{ N} \cdot \text{mm}$,力偶的数值取决于诱导力以及诱导力对阻抗中心的力矩大小。在此载荷作用下,牙周膜外表面的正应变分布均匀,儿童下颌切牙趋向于整体移动。

1.4 牙颌组织边界条件设定以及相互作用的定义

下颌切牙牙槽骨的远中面和近中面的 6 个自由度被约束,为固定不动模型,需要特别注意牙齿和牙周膜以及牙周膜和牙槽骨之间的相互作用,这对牙

周膜上应力和应变分布影响很大。在 Abaqus 里设置牙齿-牙周膜和牙周膜-牙槽骨之间为绑定约束, 由于牙齿变形很小, 故给牙齿设置一个刚体约束。载荷、边界条件和相互作用的设定如图 1 所示。

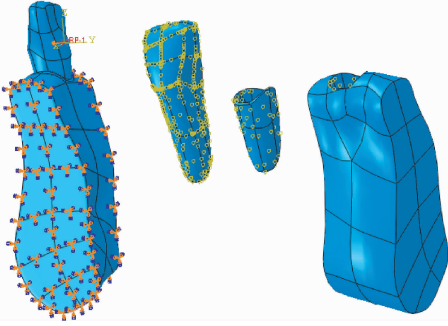


图 1 牙颌组织的载荷、边界条件和相互作用情况
Fig. 1 Loads, boundary conditions and interactions of the mandibular incisors

1.5 建立连续更换牙套动态分析的数值模型

正畸理论中争论的焦点是力的大小与牙齿移动速率的相互关系。相关研究表明, 应力值在一定的范围内, 牙槽骨骨面吸收的应力与牙移动速率成线性关系。Quinn 等^[19] 研究发现, 应力与移动速度成线性关系, 当应力达到一定值时移动速度恒定。Bourauel 等^[12] 研究表明, 牙周膜的应变在 0.03% ~ 0.30% 范围引起牙槽骨重建; 且 Ren 等^[20] 研究发现, 正畸力作用下尖牙的移动平均的最大速率为 0.29 mm/周。儿童下颌切牙整体移动的速度与应变的关系如图 2 所示。

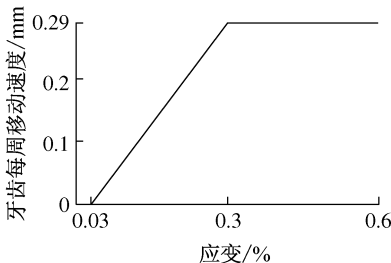


图 2 应变与牙齿移动速度的关系
Fig. 2 Relationship between strain magnitude and tooth velocity

儿童下颌切牙整体移动的诱导过程如图 3 所示。

2 试验结果和分析

由 Abaqus 软件分析可得 2 个诱导周期(8 周)

下颌切牙的移动速度(见图 4)。第 1 次佩戴诱导器使下颌切牙沿 Y 轴负方向整体移动量为 1.048 mm, 第 2 次佩戴诱导器使下颌切牙沿 Y 轴负方向整体移动量为 0.992 mm, 这和临床研究中一次佩戴儿童诱导器下颌切牙整体移动 1 mm^[21] 的结果相吻合。在一个诱导周期里, 随诱导时间的增加, 牙齿移动的速度变慢; 在整个诱导过程中, 最快的牙齿移动速度出现在第 1 周, 达到了 0.274 mm/周, 最慢的牙齿移

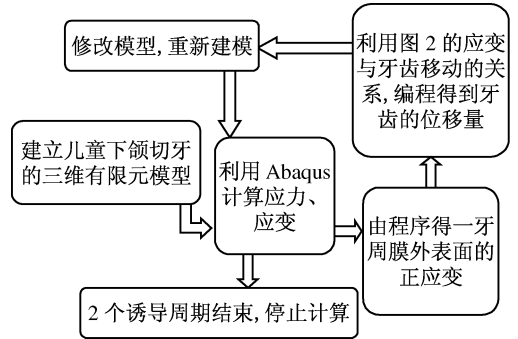


图 3 诱导过程的流程图
Fig. 3 Flow chart of the induction process

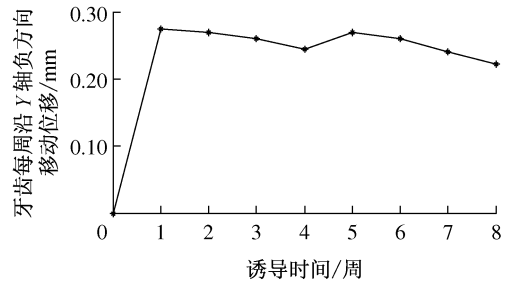


图 4 牙齿每周移动的速度
Fig. 4 Tooth movement rate in corresponding weeks

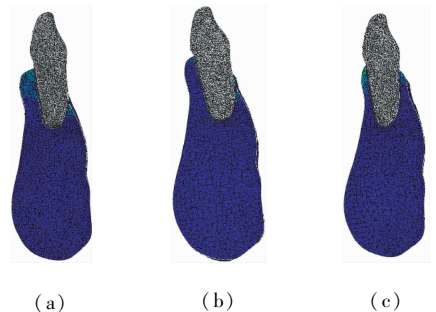


图 5 儿童下颌切牙诱导开始(a)、第 1 个诱导周期结束(b)和第 2 个诱导周期结束(c)时的切牙位置
Fig. 5 Position of mandibular incisor at the beginning of incisor induction (a), the end of first induction cycle (b), and the end of second induction cycle (c) in children

动速度出现在第8周,速度为0.222 mm/周。这个趋势基本符合牙齿典型移动的3个阶段:初始阶段、滞缓阶段和滞缓后阶段。整个诱导过程中骨组织改建一直在进行,牙齿在牙槽骨中的位置持续变化。图5所示为下颌切牙在第1个诱导周期开始、第1个诱导周期结束、第2个诱导周期结束时的位置变化。

在此载荷作用下,各阶段牙周膜应力的分布如图6所示。下颌切牙整体移动的应力在牙周膜上分布比较均匀,在牙周膜的嵴顶处有较少的局部的应力集中。第1次佩戴诱导器开始时牙周膜上最大、最小应力分别为27.9、6.1 kPa;结束时牙周膜上最大、最小应力分别为22.1、4.5 kPa;第2次佩戴诱导器开始时牙周膜上最大、最小应力分别为25、5.6 kPa;结束时牙周膜上最大、最小应力分别为19、4.5 kPa。在诱导过程中,根中部阻力中心附近的牙周膜应力较小,根尖和颈缘的牙周膜应力相对集中;随着诱导时间的增大,对应的牙周膜应力变小,颈缘的牙周膜应力衰减的最快,根中次之,根尖最慢,牙周膜应力在最大和最小值之间的差值逐渐变小。

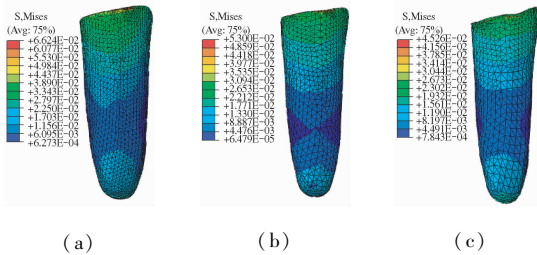


图6 儿童下颌切牙诱导开始(a)、第1个诱导周期结束(b)和第2个诱导周期结束(c)时牙周膜应力分布情况

Fig. 6 Stress distributions on periodontal ligament at the beginning of incisor induction (a), the end of first induction cycle (b), and the end of second induction cycle (c) in children

3 讨论

由于儿童下颌组织的实际三维模型极其复杂,以及诱导器对牙齿的反作用力是由诱导器和儿童下颌组织的形状和接触位置所决定,诱导力可以作用在牙冠表面的任何一处,故很难利用诱导器实现对牙齿的完全平移,牙齿的移动都会伴随着或多或少的转动。因此,本文在连续更换2次诱导器后,下颌切牙绕X、Y、Z轴旋转的总角度分别为0.8°、0.65°、0.33°。

诱导器和牙冠表面相互作用极其复杂,作用在牙冠表面的力应该是多个区域,且方向多变,但临床上佩戴诱导器在近中和远中方向的移动量很少,施加的载荷在X和Z方向上的分量可以简化为0,故本文将多个部分的均布载荷近似简化为一个舌唇方向的集中力和一个防止倾斜转动的力偶。唐娜等^[7]对上颌牙体的隐形矫正中施加载荷简化为点加载,王凡等^[8]在研究无托槽隐形矫正器使尖牙整体移动下的生物力学中将模型的加载等效为一个集中力和一个力偶,这和本文对诱导器作用下力系的简化一致。另外,儿童诱导器本身具有一定的刚度,在刚开始佩戴的时候会出现瞬间应力很大,随着诱导时间的增加,牙齿的移动和诱导器的应力松弛,诱导力会慢慢趋向于平稳。图6中牙周膜应力在最大和最小值之间的差值随诱导时间增大而逐渐变小,说明牙齿的移动使得应力分布更加均匀合理。

牙槽骨由皮质骨和松质骨组成,皮质骨是牙槽骨外表面部分,儿童下颌切牙的皮质骨厚度特别薄,而且唇侧和舌侧厚度差别很大。目前的研究现状缺乏皮质骨与松质骨相结合的几何形状的数据资料,而不区分皮质骨和松质骨的假设不足以对结果产生太多有意义的影响,故本研究中对牙槽骨使用松质骨的材料参数。如果要将牙槽骨设计为区分不同骨结构成分,可以更接近实际;但是在此基础上编译骨重建模拟模型时,需要分别模拟骨模型内层、外层的骨重建,并要把内外层骨重建的关系连接整合起来,这在目前条件下是难以达到的。

4 结语

儿童诱导器是一种引导儿童牙齿合理生长的装置,诱导器作用下的生物力学研究鲜见报道,这阻碍了其进一步的推广和应用。本文利用外部骨重建的方法,分析连续更换诱导器下牙移动过程中的应力分布和变化规律,对临床的诱导方案进行验证和可行性分析,为制定诱导方案提供参考。

参考文献:

- [1] Womack WR, Day RH. Surgical-orthodontic treatment using the Invisalign system [J]. J Clin Orthod, 2008, 42 (4): 237-245.

- [2] Brezniak N, Wasserstein A. Root resorption following treatment with aligners [J]. *Angle Orthod*, 2008, 78 (6) : 1119-1124.
- [3] Boyd RL. Complex orthodontic treatment using a new protocol for the Invisalign appliance [J]. *J Clin Orthod*, 2007, 41(9) : 525-547.
- [4] Kassas W, Al-Jewair T, Preston CB, *et al*. Assessment of Invisalign treatment outcomes using the ABO Model Grading System [J]. *J World Fed Orthodont*, 2013, 2(2) : e61-64.
- [5] 白玉兴, 王邦康. 无托槽隐形矫治技术——口腔正畸的机遇与挑战[J]. *华西口腔医学杂志*, 2007, 25(6) : 521-524.
- [6] 窦宁, 郭晓宁, 何炳蔚. 隐形矫正器作用下牙颌组织的生物力学实验分析[J]. *医用生物力学*, 2008, 23(6) : 454-458.
Dou N, Guo XN, He BW. Biomechanics experimental analysis on dental cast under orthodontic forces with Invisaligner [J]. *J Med Biomech*, 2008, 23(6) : 454-458.
- [7] 唐娜, 赵志河, 王军, 等. 无托槽隐形矫治技术生物力学效应的有限元法研究[J]. *医用生物力学*, 2010, 25(6) : 399-406.
Tang N, Zhao ZH, Wang J, *et al*. Biomechanical effects of bracketless appliance technology: A finite element method study [J]. *J Med Biomech*, 2010, 25(6) : 399-405
- [8] 王凡, 白玉兴, 祁鹏, 等. 无托槽隐形矫治尖牙整体移动的生物力学研究[J]. *医用生物力学*, 2007, 22(2) : 133-136.
Wang F, Bai YX, QP, *et al*. Biomechanical study of canine bodily movement distally with invisible bracketless appliance [J]. *J Med Biomech*, 2007, 22(2) : 133-136.
- [9] 周洁珉, 白玉兴, 郝玮. 无托槽隐形矫治技术远中移动磨牙效果的三维分析与评价[J]. *北京口腔医学*, 2011, 19(3) : 157-159.
- [10] 孟宪撤, 李洪发, 全健, 等. 隐形矫治器与固定矫治器治疗轻度错胎畸形的对比研究[C]//第十四次国际颌面生长发育与功能研讨会论文集, 北京: [s. n.], 2012.
- [11] 钱英莉, 樊瑜波, 刘展. 一个治疗周期内尖牙倾斜移动过程模拟的应力分析[J]. *四川大学学报*, 2007, 39(6) : 66-70.
- [12] Bourauel C, Vollmer D, Jäger A. Application of bone remodeling theories in the simulation of orthodontic tooth movements [J]. *J Orofacial Orthop*, 2000, 61 (4) : 266-279.
- [13] Marangalou JH, Ghalichi F, Mirzakouchaki B. Numerical simulation of orthodontic bone remodeling [J]. *Orthodont Wave*, 2009, 68(2) : 64-71.
- [14] Kojima Y, Fukui H. A numerical simulation of tooth movement by wire bending [J]. *Am J Orthod Dentofacial Orthop*, 2006, 130(4) : 452-459.
- [15] Jacobs CR, Levenston ME, Beaupré GS, *et al*. Numerical instabilities in bone remodeling simulations: The advantages of a node-based finite element approach [J]. *J Biomech*, 1995, 28(4) : 449-459.
- [16] Beaupré GS, Orr TE, Carter DR. An approach for time-dependent bone modeling and remodeling theoretical development [J]. *J Orthop Res*, 1990, 8(5) : 651-661.
- [17] Coolidge ED. The thickness of the human periodontal membrane [J]. *J Am Dent Assoc*, 1937, 24 : 1260-1270.
- [18] 钱英莉, 樊瑜波, 蒋文涛. 正畸力作用下牙齿移动的生物力学[J]. *医用生物力学*, 2003, 18(3) : 189-192.
Qian YL, Fan YB, Jiang WT. Biomechanical research on tooth movements [J]. *J Med Biomech*, 2003, 18(3) : 189-192.
- [19] Quinn RS, Yoshikawa DK. A reassessment of force magnitude in orthodontics [J]. *Am J Orthod*, 1985, 88 (3) : 252-260.
- [20] Ren Y, Maltha JC, Van t Hof MA, *et al*. Optimum force magnitude for orthodontic tooth movement: A mathematic model [J]. *Am J Orthod Dentofacial Orthop*, 2004, 125 (1) : 71-77.
- [21] Boyd RL. Esthetic orthodontic treatment using the Invisalign appliance for moderate to complex malocclusions [J]. *J Dent Educ*, 2008, 72(8) : 948-967.