

# 有限元分析在口腔生物力学中的应用

黄宇文

## Application of finite-element analysis in dental biomechanics

Huang Yu-wen

### Abstract

**BACKGROUND:** There are a lot of biomechanical problems in stomatology. Finite element method is an effective tool to numerically simulate the mechanical behavior of human; it has more wide application in the dental biomechanics.

**OBJECTIVE:** To summarize the research progress in the application of finite element method to solve biomechanical problems in orthodontics, prosthodontics, oral implantology, oral and maxillofacial surgery and other fields.

**METHODS:** A computer-based online search of PubMed and VIP databases was performed for articles related to the application of finite element method in dental biomechanics, published between January 1995 and October 2011, with the key words of "finite element analysis (FEA)", "oral cavity" and "biomechanics" in English and Chinese.

**RESULTS AND CONCLUSION:** The stress analysis of oral cavity structure, shape, load and mechanical properties of materials can be performed using finite element analysis; the stress value and displacement value of any part of the model can be gained and the solving process is rapid and accurate with the aid of a computer. The finite element analysis can reflect the stress distribution objectively, accurately and veritably; it provides the mechanical foundation for the research of relevant basic problems in the stomatology, the solution of clinical practical problems in the stomatology and the technical development of dental clinical practice; it provides reference for the further investigation of treatment of oral disease.

Huang YW. Application of finite-element analysis in dental biomechanics. Zhongguo Zuzhi Gongcheng Yanjiu. 2012;16(13):2423-2426. [http://www.crter.cn http://en.zglckf.com]

### 摘要

**背景:** 在口腔医学中存在着大量的生物力学问题,有限元法是对人体力学行为进行数值模拟的一种有效工具,其在口腔生物力学中的应用越来越广泛。

**目的:** 综述有限元法在解决口腔正畸、口腔修复、口腔种植、口腔颌面外科等领域生物力学问题的研究进展。

**方法:** 以“有限元分析;口腔;生物力学”为中文关键词,以“finite element analysis (FEA); oral cavity; biomechanics”为英文关键词。采用计算机检索 PubMed 数据库、维普数据库 1995-01/2011-10 有关有限元分析法在口腔生物力学领域应用的文章。

**结果与结论:** 有限元分析可以对口腔结构、形状、载荷和材料力学性能等进行应力分析,可获得模型任何部位的应力值和位移值,并借助计算机从而快速精确地求解,客观、准确、真实地反映应力的分布状况,为研究口腔医学中的有关基础性问题、解决口腔医学中的临床实际问题、发展口腔临床技术手段提供了力学基础,为进一步研究口腔疾病治疗方法提供参考和借鉴。

**关键词:** 有限元分析;口腔;生物力学;牙槽;三维

doi:10.3969/j.issn.1673-8225.2012.13.033

黄宇文. 有限元分析在口腔生物力学中的应用[J]. 中国组织工程研究, 2012, 16(13):2423-2426. [http://www.crter.org http://cn.zglckf.com]

Department of Stomatology, the First People's Hospital of Guangzhou, Guangzhou 510180, Guangdong Province, China

Huang Yu-wen, Attending physician, Department of Stomatology, the First People's Hospital of Guangzhou, Guangzhou 510180, Guangdong Province, China yiyuanyisheng@yeah.net

Received: 2011-12-10  
Accepted: 2012-01-11

## 0 引言

有限元分析法是一种求解连续介质力学问题的数值方法,起源于航空工程中的矩阵分析<sup>[1]</sup>。兴起于 20 世纪 50 年代末,它将连续的弹性体分割成有限个力学单元,组成单元集合体以代替原来的连续体,通过逐一研究每个单元的性质,从而获得整个弹性体的性质。因为它可以对结构、形状、载荷和材料力学性能等进行应力分析,可获得模型任何部位的应力值和位移值,并借助计算机从而快速精确地求解,所以近年来被广泛应用于口腔生物力学研究中<sup>[2]</sup>。有限元分析法能客观、准确、真实地反映应力分

布状况。

## 1 资料和方法

### 1.1 资料提取策略

检索人相关内容: 第一作者。

检索时间范围: 1995-01/2011-10。

关键词: 中文关键词为“有限元分析;口腔;生物力学”;英文关键词为“finite element analysis(FEA); oral cavity; biomechanics”。

检索数据库: PubMed 数据库、维普数据库。

### 1.2 纳入与排除标准

纳入标准: ①有限元分析法在口腔正畸中应用的相关文献。②有限元分析法在口腔修复中

广州市第一人民医院口腔科,广东省广州市 510180

黄宇文,男,1972 年生,广州市第一人民医院口腔科,主治医师,主要从事口腔综合、口腔颌面外科方面的研究。 yiyuanyisheng@yeah.net

中图分类号:R318  
文献标识码:B  
文章编号:1673-8225 (2012)13-02423-04

收稿日期: 2011-12-10  
修回日期: 2012-01-11 (20120110005/GW·LX)

应用的相关文献。③有限元分析法在口腔种植中应用的相关文献。④有限元分析法在口腔颌面外科中应用的相关文献

排除标准: 重复研究或 Meta 分析类文章。

1.3 对纳入文献的评价 经检索共查到相关文献 45 余篇, 经阅读标题、摘要、全文后, 排除内容重复、普通综述后筛选纳入 21 篇文献进行评价。

文献的类型主要包括有限元分析法在口腔正畸中的应用, 有限元分析法在口腔修复中的应用, 有限元分析法在口腔种植中的应用, 有限元分析法在口腔颌面外科中的应用类文献。

## 2 结果

2.1 有限元分析法在口腔正畸中的应用 口腔正畸过程是一个比较复杂的涉及生物力学、生物化学、分子生物学等各学科的理论<sup>[3]</sup>。错殆畸形的治疗原理是在错位牙或畸形颌骨上施加矫治力, 通过机体颌骨、牙周组织等不同部位、不同组织间内部产生的应力, 从而使牙颌系统产生生物学效应发生组织改建, 最后达到矫治的目的。口腔正畸的主要任务是移动牙位、排齐牙列、矫治错殆<sup>[4]</sup>。力是正畸医师惟一的良药, 因此生物力学原理的应用就显得尤为再要, 有限元分析法体现了其强大的功能。目前生物力学在正畸学中重点研究的是探讨矫治力传递所致应力分布和规律, 以探索矫治机制。三维有限元无法作为一种有效的手段, 可以逼真地建立三维牙体组织模型, 并赋予其生物力学材料特性, 使生物力学成为口腔正畸科的重要理论与临床技术基础<sup>[5]</sup>。在临床操作时, 为实现确定的矫治目标, 施加正确的矫治力提供参考。

Jeon 等<sup>[6]</sup>采用三维有限元法模拟当正畸力作用于上颌第一磨牙时, M/F 对牙周膜应力分布的影响, 并确定了牙整体移动时的 M/F。实验发现改变正畸力施加大小对牙周组织非常敏感。Shaw 等<sup>[7]</sup>建立的上颌中切牙模型可帮助研究不同牙齿移动类型时根尖区产生的机械力及其与牙骨质厚度的关系。

戴慧等<sup>[8]</sup>选择一副全口标准下颌仿真牙, 按正常牙弓的基本要求对牙进行排牙, 排牙完成后从下颌牙列中去除第一前磨牙。使用美国 GE 公司 Lightspeed16 排螺旋 CT 机扫描仿真牙, 采集容积数据, 扫描层厚 0.625 mm、层间隔 0.625 mm、重建间隔 0.3 mm。应用 Dicom 标准和 Mimics、UG、Geomagic studio 等软件, 再结合 ANSYS 三维有限元专用软件对下颌牙 CT 断层影像进行分析处理, 建立三维有限元模型。结果获得了 140 层下颌仿真牙的多排螺旋 CT 扫描断层影像数据, 利用所得数据建立了 258 834 个节点、420 016 个单元的带有种植体支抗的, 拔除两侧第一前磨牙的下颌组织三维

有限元模型。表明利用多层螺旋 CT 扫描数据建立种植体支抗滑动关闭拔牙间隙三维有限元模型, 可缩短建模时间, 提高建模效率和模型的精度。该模型的建立为在不同加载方式下种植体支抗滑动关闭拔牙间隙的应力分析提供了初步基础。

卢红飞等<sup>[9]</sup>采集 1 名健康女青年上颌前牙段及牙槽骨的螺旋 CT 扫描及原始数据, 通过三维模型修饰、划分网格等程序建立了一个上颌前牙段牙齿、牙周组织(牙周膜、皮质骨、松质骨)及矫治装置(弓丝、托槽)三合一的三维有限元模型。结果建立了上颌前牙段牙齿牙周矫治装置三合一的三维有限元模型, 划分的单元采用三棱锥四面体结构, 共生成 131 920 个单元, 194 321 个节点。将薄层 CT 技术和多种图像处理软件及三维建模方法相结合, 建立了精度较高的包括矫治系统(托槽、弓丝)的上颌前牙段及其牙周支持组织(牙周膜、皮质骨、松质骨)的三维有限元模型。该模型具有较好的几何相似性和力学相似性, 适当的将牙周膜简化成可以满足分析要求, 能较好模拟临床实际情况进行力学研究, 为进一步的生物力学分析和优化设计提供可靠的研究途径。

赵奎等<sup>[10]</sup>通过 64 排螺旋 CT 扫描, 获得颞下颌关节、下颌骨、下颌牙列截面影像的 DICOM 数据。采用 Mimics 软件、Geomagic Studi08.0 软件、Unigraphics NX 软件、Ansys1.0 软件相结合的方法, 建立了包括颞下颌关节、下颌骨、下颌牙齿及牙周膜的牙周膜牵张成骨术快速移动尖牙的三维有限元模型。结果显示实验建立了由 39 060 个单元, 76 103 个节点组成的牙周膜牵张成骨术快速移动尖牙的三维有限元模型, 还可据研究需要添加或删除组件。

2.2 有限元分析法在口腔修复中的应用 口腔修复的任务是按照正常的生理要求去恢复缺牙患者牙列缺损或缺失。如果能采用科学的方法, 有针对性地设计出合理的修复方案, 并在操作过程中准确地实施, 则可最大限度地减少牙齿医源性折裂, 显著提高修复后患牙的使用寿命<sup>[11]</sup>。

张并生等<sup>[12]</sup>采用三维有限元法, 分析下颌第一磨牙全瓷冠不同颈缘形态的应力分布规律, 旨在为全瓷冠的临床应用提供依据。结果显示, 全瓷冠承受垂直载荷时, 牙龈向主要产生压应力, 颊侧颈缘有张应力集中; 全瓷冠表面应力>冠内应力>制备体应力; 台肩型较凹面型全瓷冠的应力值小。由此提示, 临床制作全瓷冠时应设计台肩型, 冠颈缘厚度应在 0.5~1.0 mm 之间, 冠表面应高度抛光, 去除微裂纹, 以提高全瓷冠的抗折能力。

周国锋等<sup>[13]</sup>建立两种金沉积基底冠熔结镍铬桥体烤瓷桥(桥体固位部分分别设计为半包型和环状型)的三维有限元模型, 分别在桥体颌面中央窝轴向加载 200 N 垂直载荷和从桥体颊殆边缘嵴中央指向舌侧、与殆平面成 30°角方向加载 400 N 侧方载荷, 分析两种模型的应

力分布。结果两种烤瓷桥的应力分布基本相似,最大主应力集中区主要位于远中连接体。垂直加载时,半包型和环状型镍铬桥体的最大主应力分别为 24.17 MPa 和 24.85 MPa;侧方加载时,两者最大主应力分别为 42.83 MPa 和 42.69 MPa。垂直加载时和侧方加载时,金沉积基底冠的边缘区为最大主应力区。说明金沉积基底冠熔结镍铬桥体烤瓷桥的应力集中于连接体,金沉积基底冠边缘是薄弱区。

李长义等<sup>[14]</sup>建立下颌后牙固定义齿三维有限元模型,设计成 5 种连接体形式,在垂直载荷作用下,计算出其应力最大值。结果显示,连接体受力与面积成反比,面积越大,受力越小;当面积相等时圆形比椭圆形连接体受力小;当两侧连接体面积不等时,应力最大值发生在面积较小的一侧,且出现应力集中现象。说明固定义齿连接体应设计成为圆形,面积尽可能增大,各连接体之间面积大小相等。

**2.3 有限元分析法在口腔种植中应用** 种植义齿作为一个生物仿生器官,其行使咀嚼功能时所应具有的生物力学特性以及种植体与颌骨间的牢固骨整合成为本领域最为关注的研究焦点,对于种植的成功至关重要<sup>[15]</sup>。目前有限元分析法在口腔种植学中的应用是当前的研究热点之一。

周延民等<sup>[16]</sup>采用三维有限元法研究不同情况下的应力分布。结果显示最大应力值位于牙颈部,垂直载荷时应力分布均匀,斜向载荷时有应力集中,牙的应力值最大,硬骨板大于骨松质。牙周膜应力值最小,但颈部亦有应力集中现象。说明天然牙-种植体联合支持固定桥的天然牙基牙颈部应有充分的牙周支持组织、牙颈部及其周围支持组织是义齿使用寿命的关键之一;义齿颈部应有良好的自洁作用,防止形成继发性牙周炎。

胡建军等<sup>[17]</sup>采用三维有限元方法建模型,并进行计算、分析。结果显示,斜向载荷下种植体的最大应力值是天然牙的 2~2.5 倍,集中斜向载荷与分散斜向载荷下种植体最大应力值无明显差异,是垂直载荷下种植体最大应力值的 2~2.5 倍。集中垂直载荷下天然牙、种植体的最大应力值高于分散垂直载荷下的最大应力值。天然牙集中斜向载荷下最大应力值大于分散斜向载荷下的最大应力值。说明天然牙-种植体联合桥承受侧向力的能力弱,种植体应具有高强度,天然牙根应粗大,减小侧向力;集中载荷比分散载荷破坏作用大,桥体与基牙的颌面咬合接触点应分布均匀,建立多点咬合接触。

马攀等<sup>[18]</sup>利用 Pro/E 软件,Hypermesh 软件及 ABAQUS 有限元软件,建立 4 类种植体即刻负载的三维有限元模型,比较 3 种螺纹螺距(0.8, 1.6, 2.4 mm)在分别垂直和水平加载时对种植体初期稳定性的影响。结果显示,对不同螺纹螺距种植体来说,垂直加载和水平

加载时 0.08 mm 螺距螺纹种植体微动最小,2.4 mm 螺距螺纹种植体微动最大。表明螺纹的螺距对垂直相对位移有影响,对水平相对位移影响不大。随着螺距的增加,种植体对抗垂直向载荷的抵抗力减弱。水平加载时,螺纹的螺距对颈部微动影响不明显。

许琪华等<sup>[19]</sup>采用 ANSYS 有限元法进行线性结构静力分析。结果显示天然牙-种植体联合支持固定桥的应力集中于种植体的颈部;分散垂直加载时,增加天然基牙数目可降低天然牙-种植体联合桥中种植体颈部及其周围骨组织的应力值;分散斜向加载时,增加天然基牙数目,反而使种植体颈部及其周围骨组织的应力值增加。说明加载方向是影响应力分布的重要因素,增加天然基牙数目能改善联合桥种植体侧的应力分布,但必须要避免或最大限度地减小侧向力。

姜茂庆等<sup>[20]</sup>应用 pro/E 软件根据种植体相关参数,建立牙种植体、冠修复体、松质骨和皮质骨三维实体模型,利用自适应功能生成装配体,导入 Ansys Workbench 10.0CAE 软件中,进行单元划分建立有限元模型,应力加载后进行模型准确性的检测。结果:建立了包含真实螺纹种植体的下颌骨骨块三维有限元模型。表明应用 pro/E 软件自适应功能建立包含种植体的下颌骨骨块的三维有限元模型,为种植修复三维有限元分析提供了一种准确、灵活、快速的平台。

**2.4 有限元分析法在口腔颌面外科的应用** 口腔颌面部是人体的暴露部位,无论平时或战时,都易遭到损伤,因此,对于口腔颌面外伤的研究具有重要的临床和军事意义。由于颌面部解剖结构复杂,传统的研究方法往往因耗时、耗材,且不能重复,使得实验研究复杂化。有限元法在口腔颌面外科主要应用于骨折过程中颌骨受力的模拟和分析。薄斌等<sup>[21]</sup>建立下颌骨三维有限元模型,探讨撞击作用时下颌骨不同结构的应力分布规律、应力集中区域,并运用多元回归的方法研究了不同撞击参数与下颌骨应力水平间的数量关系,为阐明下颌骨撞击损伤的生物力学机制提供了参考依据。

### 3 讨论

生物力学与口腔医学融合、交叉形成的口腔生物力学以在口腔医学中研究基础性科学问题、解决临床实际问题、发展临床技术手段为主。在口腔医学二级学科中,如正畸科、修复科、种植科及口腔颌面外科等领域需解决的临床问题多涉及到生物力学内容,存在着大量的生物力学问题。有限元分析法较其他传统的实验应力分析方法有明显的优越性。对于特殊颌关系患者的种植修复治疗,应根据患者的实际情况制定特殊的治疗计划,其治疗常需要联合修复、正颌、正畸的方法进行颌重建,

这样口腔修复科医师、外科医师和正畸科医师的紧密配合对于缩短治疗时间和减少患者痛苦显得尤为重要。对于轻微颌关系不良的患者或不愿接受正颌治疗的患者,也可在修复阶段进行适当的调整或利用特殊的设计来完成修复。

#### 4 参考文献

- [1] 尹伟,李四群.口腔医学中有限元分析法模型的建立方法及其应用[J].国际口腔医学杂志,2007,34(2):125-130.
- [2] 郑诚功.骨科生物力学研究的发展与现状[J].医用生物力学,2007,22(4):326-327.
- [3] Atmaram GH,Mohamed H.Estimation of physiological stresses with a natural tooth considering fibrous PDL structure.J Dent Res.1981;60(5):873-877.
- [4] Clement R,Srhnelir PJ,Bramba HJ,et al.Quasi-automatic 3D finite element model generation for individual single-rooted teeth and periodontal ligament.Comput. Methods Progr Biol Med.2004;73(2):135-144.
- [5] 李群,王邦康,王春明,等.上中切牙桩核冠修复的三维有限元研究[J].口腔颌面修复学杂志,2003,4(3):147-151.
- [6] Jeon PD,Turley PK,Ting K.Analysis of stress in the periodontium of the maxillary first molar with a three-dimension finite element model.Am J Orthod Dentofacial Orthop.1999;115(3):267-274.
- [7] Shaw AM,Sameshima GT.Orthod Craniofac Res.2004,7(2):98-107.
- [8] 戴慧,漆剑频,李平,周义成等.MDCT在建立种植体支抗滑动关闭拔牙间隙三维有限元模型中的应用[J].2008,24(8):1264-1266.
- [9] 卢红飞,艾虹,麦志辉,等.牙齿牙周矫治装置三合一三维有限元模型的建立[J].中国组织工程研究与临床康复,2010,14(22):4010-4013.
- [10] 赵玺,米从波,居曼江·买买提,等.牙周膜牵张成骨术快速移动尖牙的三维有限元模型建立[J].中国组织工程研究与临床康复,2010,14(22):4014-4017.
- [11] Meijer JU,Kuiper JH,Starmans FJ,et al.Stress distribution around dental implants: influence of superstructure,length of implants,and height of mandible.J Prosthet Dent.1992;68(1):96-102.
- [12] 张并生,赵云凤,王华蓉.后牙全瓷冠的三维有限元分析[J].华西医科大学报,2000,31(2):147-148.
- [13] 周团锋,张桂荣,王海涛,等.两种金沉积基底冠熔结镍铬桥体烤瓷桥的三维有限元应力分析[J].中国口腔医学杂志,2008,43(6):352-355.
- [14] 李长义,荆洪阳.下颌后牙固定义齿连接体受力的三维有限元分析[J].天津医科大学学报,2002,8(1):90-91.
- [15] 李美华,王伟,董丽华,等.用三维有限元方法对单端固定桥进行应力分析[J].口腔医学纵横杂志,2000,16(3):197-199.
- [16] 周延民,张理生,夏连杰,等.天然牙一种植牙联合桥的牙及牙周组织的有限元分析[J].2000,26(5):504-505.
- [17] 胡建军,周延民,王志彪,等.不同载荷下天然牙一种植牙联合桥基牙应力分布[J].中国口腔种植学杂志,2001,6(1):17-19.
- [18] 马攀,刘洪臣,李德华,等.三种螺距对种植体初期稳定性影响的有限元研究[J].口腔颌面修复学杂志,2007,8(1):47-50.
- [19] 许琪华,韩栋伟,陈晔.不同基牙数目的天然牙一种植体联合支持同定桥种植体侧的应力分析[J].中国美容医学,2008,17(9):1345-1347.
- [20] 姜茂庆,李德华,孔亮,等.带凹槽螺纹种植体三维有限元模型的建立[J].口腔医学研究,2007,23(2):159-161.
- [21] 薄斌,周树夏,张明,等.颌面部撞击伤的生物力学研究[J].中华创伤杂志,2001,17(2):80-82.

#### Mesh 词表词汇实用例句：“牙修复体-Dental Prosthesis”

例句: Titanium and titanium alloys have biocompatibility, corrosion resistance, low cost and desirable physical and mechanical properties, such as low modulus, low thermal conductivity, high ductility, low density, and favorable microhardness, which make titanium and titanium alloys more attractive for dental prosthesis.

译文: 由于钛及钛合金具有弹性模量低、热导性低、延展性好、密度小、硬度适当等优良的机械性能和卓越的生物相容性、耐腐蚀性以及低廉的价格,因此,使钛及钛合金更适合于牙科修复。

|              |   |
|--------------|---|
| <b>英文主题词</b> | Dental Prosthesis   |
| <b>英文注释</b>  | An artificial replacement for one or more natural teeth or part of a tooth, or associated structures, ranging from a portion of a tooth to a complete denture. The dental prosthesis is used for cosmetic or functional reasons, or both. DENTURES and specific types of dentures are also available. (From Boucher's Clinical Dental Terminology, 4th ed, p244 & Jablonski, Dictionary of Dentistry, 1992, p643) |
| <b>中文主题词</b> | 牙修复体  |
| <b>中文注释</b>  | 一种用于1颗或多颗牙齿或部分牙齿或相关结构的人工替代物, 修复范围从部分牙齿到全口义齿。牙修复体用于美容或功能完善。义齿或特殊类型义齿也适用。(摘自波切尔著《临床牙科术语》, 第4版, 244页; 嘉布隆斯基著《牙医学词典》, 1992年, 643页)  |