

·方法介绍·

高效建立牙齿三维有限元模型

刘镇章¹ 袁小平²

(1.广州大学机械与电气工程学院机电工程系 广州 510006;

2.泸州医学院附属口腔医院正畸科 泸州 646000)

[摘要] 有限元分析法应用于口腔研究首先需要建立计算机口腔模型,目前的文献对建模的过程没有做详细的阐述。本文运用高端的建模与分析软件,以建立一个牙齿计算机模型为例,阐述一种高效建立有限元分析模型的基本思路和方法,为从事医学有限元分析法相关研究的科研人员提供参考。

[关键词] 正畸; 有限元分析法; 牙齿模型

[中图分类号] R 78 [文献标志码] B [doi] 10.3969/j.issn.1673-5749.2012.02.011

A method for the construction of a 3D finite element model with higher efficiency Liu Zhenzhang¹, Yuan Xiaoping². (1. Faculty of Mechanical & Electric Engineering, School of Mechanical Engineering, Guangzhou University, Guangzhou 510006, China; 2. Dept. of Orthodontics, The Affiliated Hospital of Stomatology, Luzhou Medical College, Luzhou 646000, China)

[Abstract] The construction of a dental model is a prerequisite for finite element method(FEM) analysis in orthodontics, however so far no research has focused on the detailed discussion of the modeling process. This study adopted the higher level modeling and finite element analysis software package to construct one tooth model with higher efficiency and precision, and intended to demonstrate the basic rationale of a FEM modeling process. It is expected this study be a guide for the researchers in this field.

[Key words] orthodontics; finite element method; tooth model

1970 年,有学者将有限元法(finite element method, FEM)最先引入口腔力学的二维研究中^[1],之后随着计算机硬件和软件技术的发展,逐渐由最初的二维分析扩展至三维分析,同时也在口腔正畸领域进行了多个方面的研究,如正畸与牙周膜的相关性^[2-3]、多个牙齿的移动^[4-8]、正畸治疗周期^[9]、牙根吸收的风险评估^[10]、种植体的支抗^[11-13]、咬合应力的分析^[14-16]等等,然而,这些研究都没有对口腔模型的具体建立过程做出过详细的阐述说明。

有学者^[17]建立了单个牙齿的有限元模型,但由于存在数据损失,所建模型还需计算机辅助设计(computer aided design, CAD)软件修复完善。本文运用最新版本的医学建模软件 Mimics 14.0,通过罩编辑与罩布尔运算,配合高集成度的有限元分析平台 Ansys Workbench 2.0 高效建立牙齿三维有限元模型。所建模型无需 CAD 软件修补,

更能真实反应患者牙齿的状况。本文将对如何建立口腔有限元模型进行描述,以期为人们应用 FEM 提供一定的参考。

1 技术步骤

建立口腔三维有限元模型的过程主要有以下 2 个技术步骤:1)运用 CT 技术获取样本(如人体头颅、牙齿)空间数据信息,运用 Mimics 14.0 对其进行几何重建,生成样本的计算机模型;2)将生成的计算机模型输入至有限元分析软件 Ansys Workbench 2.0,并赋予模型材料属性,以做进一步的口腔力学分析。本文以建立单个牙齿的三维有限元模型为例阐述建模过程,建模技术路线如图 1 所示。

1.1 CT 数据建立三维模型

图 1 中的步骤 3 为关键的处理方法,通过罩编辑与罩布尔运算,可以完整地提取牙齿的三维模型而无需通过 CAD 软件进行再处理,提高了建模效率与精度。下面对罩编辑与罩布尔运算的思路作一介绍,基本思路如图 2 所示。

[收稿日期] 2011-01-05; [修回日期] 2011-12-28

[作者简介] 刘镇章(1983—),男,广东人,博士

[通讯作者] 袁小平, Tel: 0830-3105880

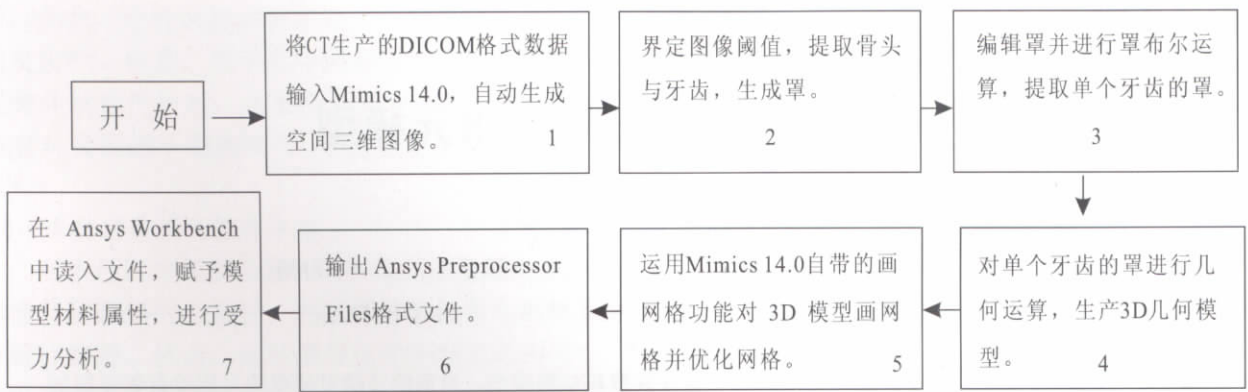


图 1 医学 FEM 模型建模技术路线
Fig 1 Flowchart of medical FEM modeling process

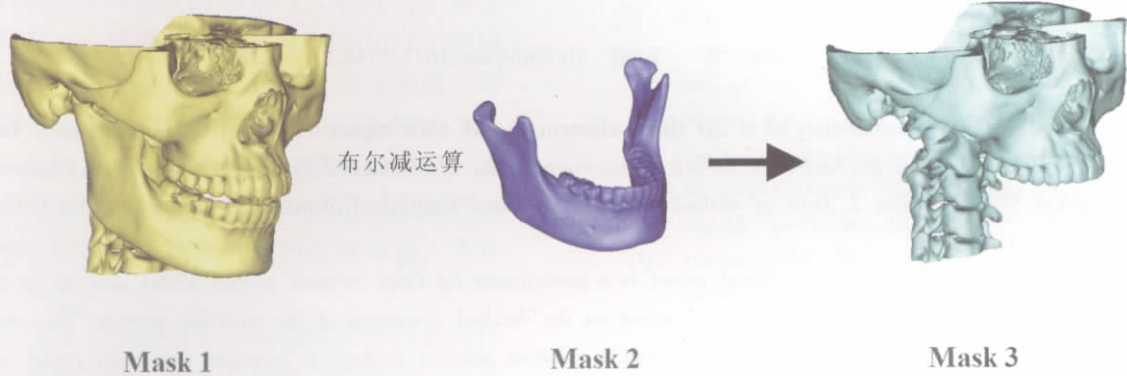


图 2 提取牙齿三维模型的基本思路
Fig 2 Rationale of generating a 3D tooth model

如图2所示,令界定了图像阈值后提取的头颅与牙齿模型整体设定为Mask1,复制Mask1并命名为Mask2。对Mask2进行罩编辑(擦除操作)去掉上颌骨部分。对Mask1、Mask2进行罩布尔减运算,亦即 $Mask1 - Mask2 = Mask3$ (运算后新罩),所得Mask3为上颌骨的三维模型。如此类推,对Mask3进行罩编辑以及罩布尔运算:首先复制Mask3生成新罩,然后在新罩中进行擦除操作,去掉上颌第三磨牙;将Mask3与去掉了第三磨牙后的新罩进行罩布尔减运算,便可得到单独的第三磨牙三维模型。初步画分网格的第三磨牙模型与经过网格优化后的三维模型如图3所示。完成网格优化的牙齿三维模型便可输入有限元分析软件中,进行口腔力学分析。

1.2 模型输入有限元分析软件

Ansys Workbench在读入Mimics生成的前处理文件并经过参数设置后,便可对牙齿进行受力分析。在读入文件后,分以下3个步骤设置相关参数:1)对模型赋予材料属性,即设置牙齿的弹性模量与泊松比;2)对模型定义约束,在单个牙齿的分析中,定义牙根部分自由度为零(即牙根部

分固定);3)定义加载力的位置、大小与方向。

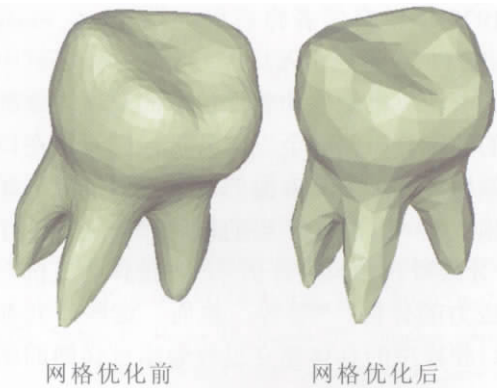
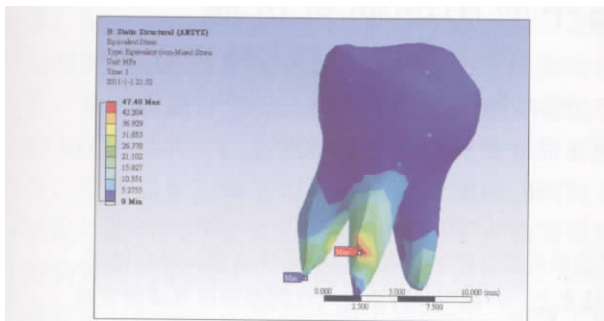


图 3 牙齿三维 FEM 模型
Fig 3 A 3D tooth FEM model

设置以上参数后,单个牙齿的受力分析结果如图4所示。图中颜色云图代表第三磨牙牙根固定时,在牙冠处施加一横向力下,牙齿的应力分布情况。值得注意的是,Mimics 14.0能利用自带的“图像灰度-组织力学材料性质”关系,根据三维图像的不同灰度值对已划分网格的模型进行材质分配,这个功能对赋予各种不同骨材料属性非常有用,例如可对骨质疏松的骨进行非均匀材料的分配。在Mimics中对模型赋予了材料属性并划

分网格后，将模型输入 Ansys Workbench，可省略上述参数设置步骤中的第一步，在完成第二、三步骤的设置后便可对模型进行受力分析。



图中颜色云图代表不同的冯米斯应力值。

图 4 牙齿模型在 Ansys Workbench 2.0 中的受力分析结果
Fig 4 Analysis of a 3D tooth model in Ansys Workbench 2.0

2 技术特点

1)避免CAD 软件的介入，尊重原始数据。将 CT 数据输入 Mimics 后，通过仔细的罩编辑与罩布尔运算便可生成完整的牙齿三维模型，无需再次利用 CAD 软件修补模型，牙齿模型能够充分反映患者牙齿的真实状况。并且由于整个建模过程无需 CAD 软件的介入，与常规建模方法相比，建模时间大为缩短，显著提高了建模效率。

2)减少数据转换次数，避免数据损失，提高建模精度。与常规的方法相比，由于数据无需再次输入、输出 CAD 软件，牙齿的模型数据仅在 Mimics 14.0 与 Ansys WorkBench 2.0 间传递了一次，避免了因多次数据转换造成的数据损失，保证了建模的精确度。

3)高版本软件的使用提高了建模效率。本文采用的 Mimics 14.0 为目前较高版本的医学有限元建模软件，此软件的建模能力较之旧版本有显著提高，能一次界定阈值并在 CT 数据中准确提取头颅与牙齿数据；另一方面，罩编辑、罩布尔运算以及生成三维几何实体所消耗的运算时间较之前期版本显著缩短。而 Ansys WorkBench 2.0 又为前沿有限元分析软件，高度集成的图形交互界面能方便地设置各种仿真参数，且使用简便。运用 Mimics 14.0 与 Ansys WorkBench 2.0 建立三维有限元模型，在熟悉软件操作流程的前提下，研究员可以在半个工作日内完成建模与分析工作。

3 小结

在 Mimics 14.0 中导入 CT 数据并界定了图像阈值后，通过罩编辑与罩布尔运算，无需再使用

CAD 软件进行修补，可得到真实反映患者牙齿状况的三维数字模型，同时避免模型在输入、输出 CAD 软件过程中的数据损失，提高了建模精度与效率。由于 Ansys WorkBench 2.0 是一个高度集成的 FEM 分析平台，可对复杂的口腔模型进行力学分析，使 FEM 的分析更加贴近临床需要。

4 参考文献

- [1] Middleton J, Jones ML, Wilson AN. Three-dimensional analysis of orthodontic tooth movement[J]. J Biomed Eng, 1990, 12(4) 319-327.
- [2] Cattaneo PM, Dalstra M, Melsen B. The finite element method :A tool to study orthodontic tooth movement[J]. J Dent Res, 2005, 84(5) 428-433.
- [3] Viecilli RF, Katona TR, Chen J, et al. Three-dimensional mechanical environment of orthodontic tooth movement and root resorption[J]. Am J Orthod Dentofacial Orthop, 2008, 133(6) :791.e11-791.e26.
- [4] Kojima Y, Fukui H. Numerical simulation of canine retraction by sliding mechanics[J]. Am J Orthod Dentofacial Orthop, 2005, 127(5) 542-551.
- [5] Kojima Y, Fukui H. A numerical simulation of tooth movement by wire bending[J]. Am J Orthod Dentofacial Orthop, 2006, 130(4) 452-459.
- [6] Kojima Y, Mizuno T, Umemura S, et al. A numerical simulation of orthodontic tooth movement produced by a canine retraction spring[J]. Dent Mater J, 2007, 26(4) : 561-567.
- [7] Field C, Ichim I, Swain MV, et al. Mechanical responses to orthodontic loading :A 3-dimensional finite element multi-tooth model[J]. Am J Orthod Dentofacial Orthop, 2009, 135(2) :174-181.
- [8] Kim T, Suh J, Kim N, et al. Optimum conditions for parallel translation of maxillary anterior teeth under retraction force determined with the finite element method[J]. Am J Orthod Dentofacial Orthop, 2010, 137(5) 639-647.
- [9] Qian Y, Fan Y, Liu Z, et al. Numerical simulation of tooth movement in a therapy period[J]. Clin Biomech : Bristol, Avon, 2008, 23(Suppl 1) S48-S52.
- [10] Hohmann A, Wolfram U, Geiger M, et al. Correspondences of hydrostatic pressure in periodontal ligament with regions of root resorption :A clinical and a finite element study of the same human teeth[J]. Comput Methods Programs Biomed, 2009, 93(2) :155-161.
- [11] 张扬, 张丹, 冯翠娟. 微小种植体正畸支抗生物力学的三维有限元分析[J]. 上海口腔医学, 2005, 14(3) 281-283.
- [12] Jiang L, Kong L, Li T, et al. Optimal selections of or-

- Experimental study in dogs[J]. *Plast Reconstr Surg*, 1997, 100(7) :1635-1647.
- [10] Ascherman JA, Marin VP, Rogers L, et al. Palatal distraction in a canine cleft palate model[J]. *Plast Reconstr Surg*, 2000, 105(5) :1687-1694.
- [11] Mitsugi M, Ito O, Alcalde RE. Maxillary bone transportation in alveolar cleft-transport distraction osteogenesis for treatment of alveolar cleft repair[J]. *Br J Plast Surg*, 2005, 58(5) :619-625.
- [12] Liou EJ, Chen PK, Huang CS, et al. Interdental distraction osteogenesis and rapid orthodontic tooth movement : A novel approach to approximate a wide alveolar cleft or bony defect[J]. *Plast Reconstr Surg*, 2000, 105(4) :1262-1272.
- [13] Yamashita DD, Gross J, Yen SL, et al. Combining orthodontic tooth movement with distraction osteogenesis to close cleft spaces and improve maxillary arch form in cleft lip and palate patients[J]. *Am J Orthod Dentofacial Orthop*, 2005, 127(2) :224-232.
- [14] Dolanmaz D, Durmus E, Karaman AI, et al. Management of alveolar clefts using dento-osseous transport distraction osteogenesis[J]. *Angle Orthod*, 2003, 73(6) :723-729.
- [15] Cao M, Ding Y, Liu Y, et al. Periodontal tissues changes in tooth-borne distraction osteogenesis : An experimental study of closure of wide alveolar bonedefects in dogs[J]. *Br J Oral Maxillofac Surg*, 2009, 47(2) :111-115.
- [16] Cano J, Campo J, Morenol A, et al. Osteogenic alveolar distraction : A review of the literature[J]. *Oral Surg Oral Med Oral Pathol Oral Radiol Endod*, 2006, 101(1) :11-28.
- [17] Rachmiel A. Treatment of maxillary cleft palate : Distraction osteogenesis versus orthognathic surgery—part one : Maxillary distraction[J]. *J Oral Maxillofac Surg*, 2007, 65(4) :753-757.
- [18] Polley JW, Friede H, Figueroa AA, et al. Long-term skeletal stability after maxillary advancement with distraction osteogenesis using a rigid external distraction device in cleft maxillary deformities[J]. *Plast Reconstr Surg*, 2004, 114(6) :1382-1392.
- [19] Iida S, Yamashiro T, Yagi T, et al. Maxillary anterior segmental distraction osteogenesis with the dynaform system for severe maxillary retrusion in cleft lip and palate [J]. *Plast Reconstr Surg*, 2007, 120(2) :508-516.
- [20] Bevilacqua RG, Ritoli EL, Kang C, et al. Midmaxillary internal distraction osteogenesis : Ideal surgery for the mature cleft patient[J]. *Plast Reconstr Surg*, 2008, 121(5) :1768-1778.
- [21] Hidding J, Breier M. Distraction-osteogenesis of the maxilla[J]. *Int J Oral Maxillofac Surg*, 1997, 26(Suppl 1) :76.
- [22] Vyas RM, Jarrahy R, Sisodia M, et al. Bone-borne palatal distraction to correct the constricted cleft maxilla[J]. *J Craniofac Surg*, 2009, 20(3) :733-736.
- [23] Minami K, Mori Y, Tae KG, et al. Maxillary distraction osteogenesis in cleft lip and palate patients with skeletal anchorage[J]. *Cleft Palate Craniofac J*, 2007, 44(2) :137-141.
- [24] Block MS, Cervini D, Chang A, et al. Anterior maxillary advancement using tooth-supported distraction osteogenesis[J]. *J Oral Maxillofac Surg*, 1995, 53(5) :561-565.
- [25] Block MS, Akin R, Chang A, et al. Skeletal and dental movements after anterior maxillary advancement using implant-supported distraction osteogenesis in dogs[J]. *J Oral Maxillofac Surg*, 1997, 55(12) :1433-1440.
- [26] Liu C, Hou M, Liang L, et al. Sutural distraction osteogenesis (SDO) versus osteotomy distraction osteogenesis (ODO) for midfacial advancement : A new technique and primary clinical report[J]. *J Craniofac Surg*, 2005, 16(4) :537-548.

(本文编辑 王姝)

(上接第179页)

- thodontic mini-implant diameter and length by biomechanical consideration : A three-dimensional finite element analysis[J]. *Adv Eng Softw*, 2009, 40(11) :1124-1130.
- [13] Sung SJ, Jang GW, Chun YS, et al. Effective en-masse retraction design with orthodontic mini-implant anchorage : A finite element analysis[J]. *Am J Orthod Dentofacial Orthop*, 2010, 137(5) :648-657.
- [14] Gomes de Oliveira S, Seraidarian PI, Landre J Jr, et al. Tooth displacement due to occlusal contacts : A three-dimensional finite element study[J]. *J Oral Rehabil*, 2006, 33(12) :874-880.
- [15] Borcic J, Anic I, Smojver I, et al. 3D finite element model and cervical lesion formation in normal occlusion and in malocclusion[J]. *J Oral Rehabil*, 2005, 32(7) :504-510.
- [16] Pilecikiene G, Surma A, Barauskas R, et al. Finite element analysis of stresses in the maxillary and mandibular dental arches and TMJ articular discs during clenching into maximum intercuspation, anterior and unilateral posterior occlusion[J]. *Stomatologija*, 2007, 9(4) :121-128.
- [17] 朱强, 汪大林, 周毅, 等. 逆向工程建模法在种植修复的有限元研究中的应用[J]. *第二军医大学学报*, 2010, 31(3) :335-337.

(本文编辑 张玉楠)