

文章编号:1004-7220(2011)04-0361-06

建立基于映射的个性化颌面部六面体有限元模型

王靖斌¹, 孙 节³, 朱赴东², 王 莹¹, 廖胜辉², 朱形好¹

(1. 温州医学院附属第一医院 口腔颌面外科, 温州 325000; 2 浙江大学 计算机科学与工程学系, 杭州 310027;

3. 温州市瑞安人民医院 口腔科, 温州 325200)

摘要: **目的** 为患者建立个性化口腔颌面部整颌整形手术的六面体有限元网格模型。**方法** 首先使用半自动方法构建标准颌面部软组织的高质量六面体有限元网格模型, 然后采用一种基于映射的实例学习方法生成个性化患者的颌面部六面体网格模型。**结果** 能够方便地生成几何形状与患者形态高度一致的个性化六面体网格模型, 并尽可能保持体网格单元的角度和形状质量。**结论** 新的六面体网格建模方法能为生物力学分析提供高质量的六面体有限元网格输入, 在口腔颌面外科等多个学科均有很好的推广应用前景。

关键词: 映射; 六面体网格; 有限元方法; 建模; 颌面外科; 生物力学

中图分类号: R 318.01 **文献标志码:** A

Finite element modeling of individual maxillofacial hexahedron based on mapping method

WANG Jing-xiao¹, SUN Jie³, ZHU Fu-dong², WANG Yin¹, LIAO Sheng-hui², ZHU Xing-hao¹ (1. Department of Oral and Maxillofacial Surgery, First Affiliated Hospital of Wenzhou Medical College, Wenzhou 325000, China; 2. Department of Computer Science and Engineering, Zhejiang University, Hangzhou 310027, China; 3. Wenzhou Ruian People's Hospital, Wenzhou 325200, China)

Abstract: Objective To establish patient-specific hexahedral finite element mesh model for the maxillofacial surgery. **Methods** A standard and common hexahedral finite element mesh model for the face soft tissue was first built by semi-automatic procedure, and the an individual facial hexahedral mesh was then generated by an example learning method based on volumetric mapping. **Results** It was convenient to generate a high quality patient-specific hexahedral mesh with geometric shape feature and mesh element quality preserved as much as possible with this method. **Conclusions** The new hexahedral mesh modeling method can provide high quality hexahedral mesh input for biomechanics analysis with good application prospect in many fields such as oral and maxillofacial surgery.

Key words: Mapping; Hexahedral mesh; Finite element method; Modeling; Maxillofacial surgery; Biomechanics

颌面部正颌整形手术广泛用于颌面外科、整形外科、耳鼻喉科等^[1-2]。但是口腔颌面部是多个重要器官集中区, 手术的风险非常大。术前的手术规划, 特别是术后软组织变形结果的模拟非常重要, 可以为外科手术制定计划提供准确、可靠的参考信息。有

限元分析被公认为模拟软组织形变最有效的方法, 而有限元分析的关键是模型的建立, 其几何相似性、力学相似性、网格的划分直接影响计算的结果。

在网格类型上, 六面体网格在计算精度、划分数、抗畸变程度及重划分次数等方面比四面体网格

收稿日期: 2011-02-15; 修回日期: 2011-03-02

基金项目: 温州市科技局对外合作项目(H20080026), 温州医学院重大项目(YXYZD5), 浙江省教育厅科研项目(Y200804155)。

通讯作者: 朱形好, E-mail: zhuxinghao@hotmail.com。

具有明显优势^[3]。但是人体颌面部软组织是一个复杂的器官,包括很多重要的解剖结构,如口、鼻和眼部等特征区域,因此很难用一个完全自动过程构建高质量的颌面部软组织六面体模型。为解决这个难题,本文提出一种基于映射的实例学习方法,从标准的六面体模型生成个性化的六面体网格模型,其中的关键技术是建立一种新的具有一定保角保形性质的体网格参数化方法。

网格参数化方法是一种常用的映射方法,非常方便构建两个模型之间的一一映射关系,特别是保角参数化,具有保角保形的性质,是一种非常实用的映射方法。但多数研究一般只涉及对面网格的参数化研究,而对体网格的参数化研究非常少。对于面网格的保角参数化,映射函数的梯度场由2个共轭(即互相垂直)调和方向场组成^[4]。显然,如果可以构建体网格上3个的互相垂直的调和场生成映射函数,这样的映射函数应该同样具有保角保形的性质,可称之为体域上的体网格保角参数化。

1 材料和方法

1.1 建立标准六面体网格

本文先用半自动技术和手工修改的方法生成一个标准的颌面部软组织六面体模型,然后对于个性化颌面部软组织采用体网格参数化方法映射生成新的六面体有限元模型。

为建立标准的六面体网格,选取一个标准的人面部CT扫描数据重建三维模型,先使用两组半自动的交互平面在水平方向和垂直方向上进行切割,得到内外表面的四边形网格划分,并插值中间层生成基本的六面体网格,然后对口、鼻和眼部等特征区域进行手工交互修改网格拓扑和形状,如图1所示。为得到高质量的六面体网格,用户需要一定的专业知识,但是构造标准六面体网格的工作只需要进行一次,对后继输入的任意患者的个性化数据,可以使用下面介绍的基于调和场的参数化方法进行体域映射生成个性化模型。

1.2 基于调和场的体网格参数化

在模型上生成调和场,可以使用直接构造的方式,即在模型上选取一个区域为首端并标记相关约束点值为0,然后选取另一个区域为末端并标记约束点值为1,然后以其为边界条件求解一个拉普拉

斯方程 $\Delta f(x, y) = 0$ 得到调和标量场,模型内部各处的调和场值将从0渐变到1,然后从调和标量场求其梯度场可以得到对应的调和矢量方向场。

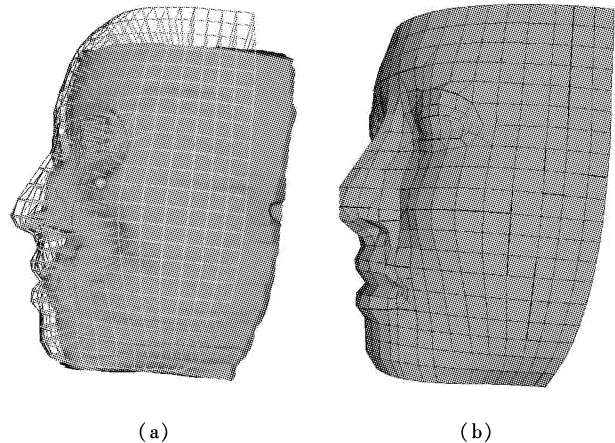


图1 标准六面体网格 (a) 六面体网格的线框模型叠加在内部骨骼模型上, (b) 六面体网格的实体模型

Fig.1 Standard hexahedral mesh (a) Wire frame model view of hexahedral mesh laid on internal bone model, (b) Solid model view of hexahedral mesh

对体网格生成调和标量场的关键是设置离散化拉普拉斯算子。对于四面体网格上的拉普拉斯方程,可定义顶点 i 处带体积权值的拉普拉斯算子为

$$\Delta f_i = \frac{1}{|\Omega_i|} \sum_{j \in N(i)} \left(\frac{1}{6} \sum_{k=1}^n l_k \cot \theta_k \right) (f_i - f_j) \quad (1)$$

式中: $|\Omega_i|$ 是顶点 i 的沃罗诺伊对偶单元的体积, $l_k = l_{pq}$ 是边 (i, j) 的对边 (p, q) 的长度, 角度 $\theta_k = \theta_{pq}$ 是边 (i, j) 所在的二面角。假设四面体网格有 N 个顶点, 则对整个四面体网格来说, 其拉普拉斯算子可以定义为

$$L_{ij} = \begin{cases} \sum_{v_k \in N(i)} w_{ik}, & \text{if } i = j \\ -w_{ij}, & \text{if } j \in N(i) \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (2)$$

则四面体模型上的拉普拉斯方程等价于如下的线性系统:

$$Lu = 0 \quad (3)$$

式中: $u = (u_0, u_1, \dots, u_{n-1})$ 即所求解的各四面体顶点处的调和标量值, 用一般常用的线性代数数值计算库即可求解。

对于颌面部整颌整形手术, 一般只需建立头面部肌肉和组织层, 可以选择单位体方体作为参数化

体域,并选取以下3个调和场方向:从左侧到右侧(U 方向)、从内到外(V 方向)和从下到上(W 方向),并由选取的边界约束条件确定,首端标记约束点值为0,末端为1。为了进行直观显示,系统将0~

1内的标量值对应到由红渐变至蓝色,如图2所示,显示了颌面部软组织每个方向上的首末端边界约束点及其对应调和场的分布。

对标准面部软组织模型的通用六面体网格计算

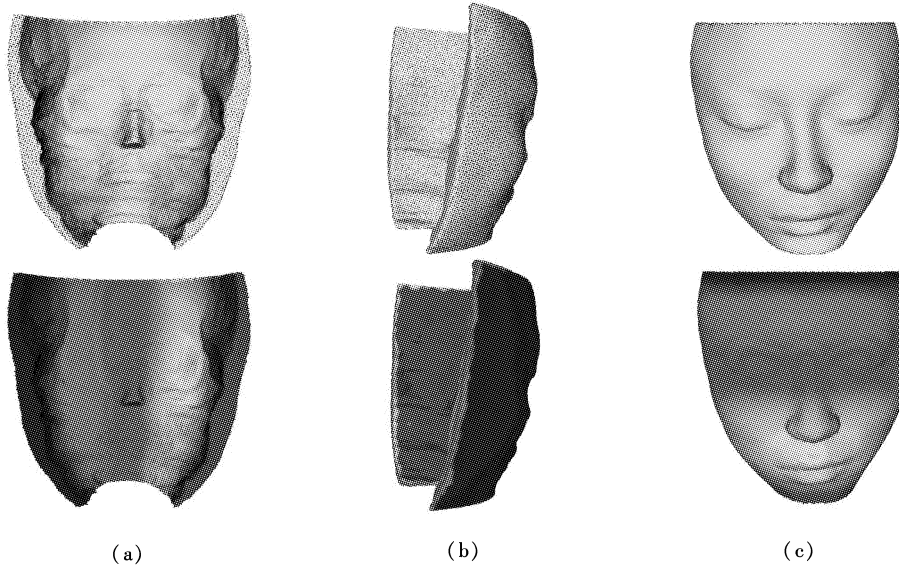


图2 U 、 V 、 W 三方向标记点分布及其对应调和场分布 (a)左右为 U 方向,(b)内外为 V 方向,(c)上下为 W 方向

Fig.2 Distribution of mark points at three directions U , V , W , and the corresponding harmonic fields (a) Left-right is U direction, (b) Internal-external is V direction, (c) Up-down is W direction

调和场时,先将其转化为一个临时的四面体网格,计算得到调和场后再将每个四面体网格点的调和场值赋与相应六面体网格点即可。

但是直接构造颌面部软组织的3个场并不能保证互相垂直,图3(a)显示了3个向量场在鼻子区域的局部共轭性,红圈标出了一些典型的共轭性比较差的单元。因此,需要对每个四面体单元内部进行共轭性修正:选择共轭性最好的方向向量作为参考向量,然后将第二向量投影到以参考向量为法向的平面内,并将参考向量与第二向量做叉乘获得第三向量。接下来,采用一个二次最优化过程使用目标函数 $\sum_j V_j \|\nabla u' - g_u^*\|^2$ 最小化,以从修正后的向量场 g_u^* 恢复对应标量场 u' :

$$u' = \operatorname{argmin}_u \sum_j V_j \|\nabla u' - g_u^*\|^2 \quad (5)$$

其求解等价于求解下面的线性泊松方程系统:

$$Lu' = G^T M g_u^* \quad (6)$$

式中: G 是全局的体网格梯度算子矩阵, M 是包含每个四面体体积的对角矩阵。

图3(b)显示从恢复后的标量场得到的梯度场向量,可以看到3种梯度向量之间的共轭性得到了有效的改善。

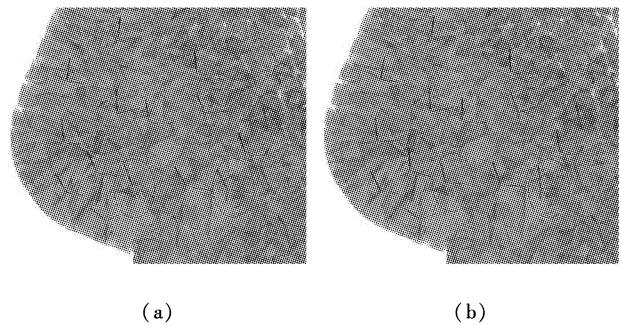


图3 梯度场共轭性修正(红、绿、蓝向量表示3个梯度场局部点处的方向向量) (a)修正前的局部梯度向量,(b)修正后的局部梯度向量互相垂直度提高

Fig.3 Conjugation improvement for gradient vector fields represented by red, green and blue vector (a) Gradient vector fields before improvement, (b) Gradient vector fields after improvement, local vectors are more close to perpendicular to each other

另外一个需要解决的问题是,由于每个人的口、鼻和眼部等解剖特征区域的相对大小和位置各不相同,需要在进行映射时使这些特征区域的网格单元能够正确映射到目标模型相应区域上。解决方法是在标准六面体模型和目标个性化模型上都加入相同解剖特征约束,可以采用交互平面或选点的方式指定。然后在线性系统(3)中加入值。图4(a)~(c)显示为标准面部软组织的通用六面体网格模型构造

的 U 、 V 、 W 3个方向标量场,其中绿色标记点为用户标记的解剖特征约束,图4(d)为最后得到的映射到标准参数域的六面体网格。需要特别指出的是,计算标准六面体网格模型的 U 、 V 、 W 3个方向标量场、和映射到标准参数域的六面体网格都只需要计算1次,然后将标准参数域六面体网格、和解剖特征约束点处的调和场值保存文件以备后面重复使用。

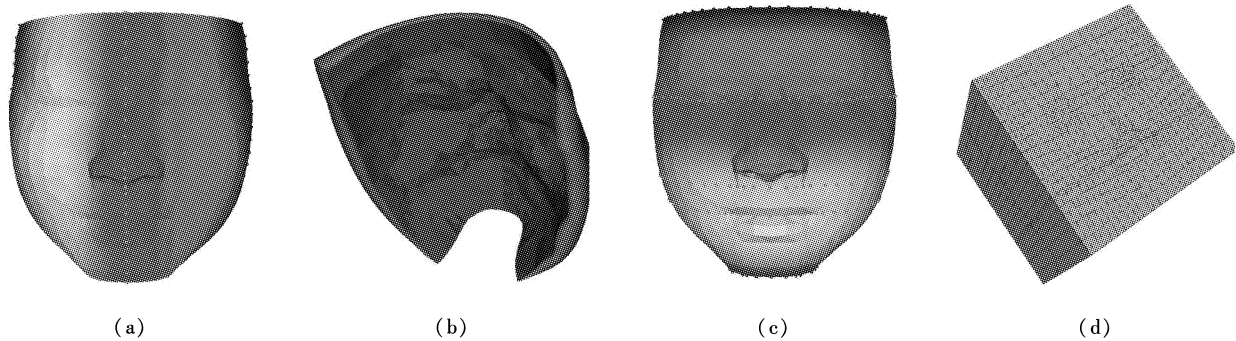


图4 标准六面体网格映射到立方体参数域 (a) 标准网格上的带中间对称约束的 U 方向调和场, (b) V 方向调和场, (c) 带解剖特征约束的 W 方向调和场, (d) 参数域六面体网格

Fig. 4 Map standard hexahedral mesh to cubic parameterization domain (a) U direction harmonic field with middle symmetric constraint on stand model, (b) V direction harmonic field, (c) W direction harmonic field with anatomical feature constraint, (d) Parameterization domain hexahedral mesh

1.3 映射生成个性化模型的六面体网格

对于新输入的任意个性化面部软组织模型,系统先根据用户交互标记的边界条件和解剖特征约束,被选为边界条件处的网格点赋值0或1,而个性化模型解剖特征约束点处的调和场值从标准六面体网格上对应的解剖特征约束点处的调和场值得到,将这些条件值代入系统方程(3)即可得到个性化模

型的体调和场,从而构造个性化模型的体域参数映射 Ψ 。图5显示了个性化模型的 U 、 V 、 W 3个方向标量场分布,以及解剖特征约束位置。接下来,系统利用个性化模型的参数化逆映射 Ψ^{-1} ,结合标准颌面部软组织的参数化模型自动生成个性化的六面体网格模型。

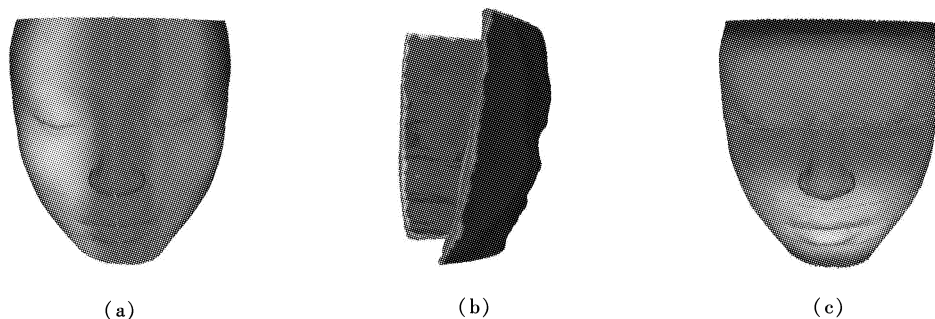


图5 个性化软组织体域参数化 (a) 个性化模型上的带中间对称约束的 U 方向调和场, (b) V 方向调和场, (c) 带解剖特征约束的 W 方向调和场

Fig. 5 Parameterization for individual soft tissue volume (a) U direction harmonic field with middle symmetric constraint on individual model, (b) V direction harmonic field, (c) W direction harmonic field with anatomical feature constraint

具体地说,对每个六面体网格的参数化顶点查找其所在的个性化参数四面体单元,并计算其相对位置的质心坐标,然后以质心坐标为权值,利用逆向映射计算原物理空间中的四面体单元顶点的线性插值组合。为了提高系统效率,每次搜索为对上一次找到的四面体邻域内广度优先搜索。计算得到每个网格点的新位置后,再直接用原来六面体网格模型的拓扑连接关系,即可生成几何形状与患者形态高度一致的个性化六面体网格。

3 结果

图 6(a) ~ (b) 显示了个性化软组织模型的六面体网格生成结果。与标准六面体网格相比,网格单元上的二面角扭曲误差平均为 6.8° ,90% 的扭曲在 10° 以内。同时实现了 Chabanas 等^[3,5] 采用的 Mesh Matching 方法达到结果。同样是映射标准六面体网格到个性化模型,如图 6(c) ~ (d) 所示。两种方法的对比统计结果见表 1。可以看到,基于

体网格参数化所映射生成的网格可以更好地保持输入模型的角度和形状特征,能有效地应用于面部软组织的生物力学分析中。

表 1 体网格单元二面角的变形统计

Tab.1 The dihedral angle distortions of the volumetric mesh deformation

变化角度的范围/ $(^\circ)$	变化角度范围内的网格单元比例/%	
	本文的方法	Mesh Matching
0 ~ 4	47.0	15.7
4 ~ 16	43.9	37.7
16 ~ 25	5.3	18.8
25 ~ 36	2.3	14.1
36 ~ 49	1.0	8.3
>49	0.5	5.4
最大值/ $(^\circ)$	57	98
平均值/ $(^\circ)$	6.8	18.6

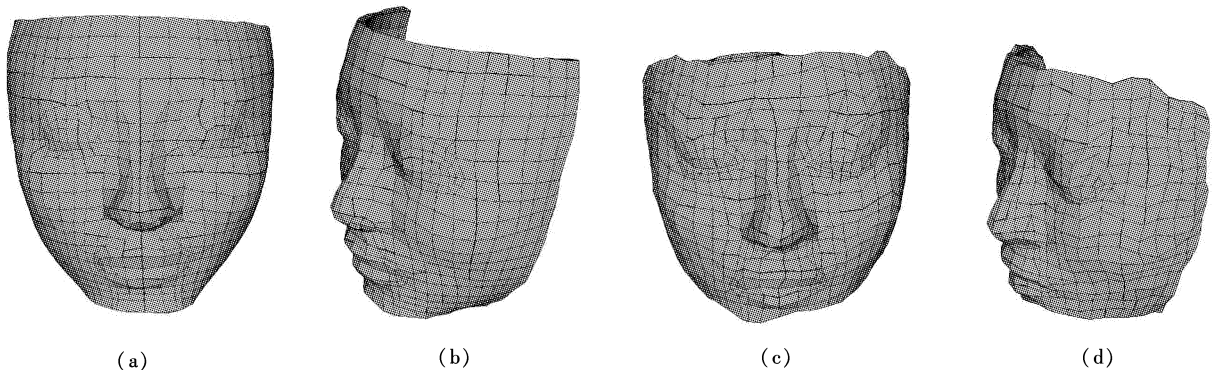


图 6 个性化软组织六面体网格生成 (a)(b)基于体网格参数化的映射结果,(c)(d)基于 Mesh Matching 方法的结果

Fig.6 The patient specific hexahedral mesh of individual facial soft tissue (a)(b) Using volumetric parameterization, (c)(d) Using Mesh-matching method

4 讨论

有限元建模通常采用四面体、六面体或二者混合单元。目前四面体网格的划分方法和有关商业化软件已渐成熟,而六面体网格由于其复杂的拓扑关系和与物体表面边界的一致性等方面的限制,直接成为分析大型复杂三维科学与工程问题的瓶颈。但六面体网格在计算精度、划分数量、抗畸变程度及重划分次数等方面比四面体网格具有明显优势。市场

上已有的六面体网格生成软件主要是为工业 CAD 模型生成有限元体网格而设计的,对于输入的面网格有各种格式限制和质量要求,如很多算法需要输入高质量的四边形网格、或者连续的样条曲面表示。而随着逆向工程和各种扫描设备的高速发展,现在更多的原始数据是各种离散的自由曲面(一般是三角面网格),如激光扫描模型、和从医学体数据重建的三维模型等等。如果要使用传统的基于 CAD 模型的体网格剖分算法,则需要大量的预处理和

模型转换,这会导致很多细节、精度的损失^[6]。

颌面部软组织解剖结构复杂,其中主要由肌肉、脂肪、腺体、皮肤及黏膜组成^[7-9]。表皮、真皮及皮下组织构成面部的皮肤主要部分。其中表皮厚约0.1 mm,主要由角化细胞组成;下方的真皮厚约0.5~4 mm,主要由弹性纤维组成,并决定了皮肤结构的弹性行为;皮下层主要由脂肪、纤维和黏膜组成,可在颅颌面骨表面轻微滑动。连接皮肤组织的肌肉组织非常复杂,支配面部表情及语言功能。例如影响唇组织变形的肌肉超过10个(口轮匝肌、上唇方肌、颊肌、下唇方肌、降口角肌、笑肌、颧大肌、颧小肌),大部分为双侧对称。对于这样复杂的模型,开发一种自动的网格划分器生成高仿真的六面体网格模型几乎是不可能的。一种可行的方案是先建立标准模型,然后进行基于映射的实例学习。其中,如何对体网格进行参数化以及寻找合适的映射使得对三维实体网格进行映射后保角保形,是使用映射方法获得良好网格划分的关键。

本文提出一种基于映射的实例学习方法从标准的六面体网格模型生成个性化的六面体网格模型。其中的关键技术是一种新的具有一定保角保形性质的体网格保角参数化方法。通过构造3个尽可能互相共轭的体调和场,并加入相应的解剖特征约束,能够方便地生成几何形状与患者形态高度一致的个性化六面体网格模型,并尽可能保持体网格单元的角度和形状质量,为生物力学分析提供高质量的六面体有限元网格输入。从标准模型映射变形生成个性化模型的思路对于其他复杂模型的生成有广泛借鉴作用。

参考文献:

- [1] 齐向东,秦建增,钟世镇. 整形外科的数字化研究[J]. 医用生物力学, 2006, 21(3): 203-207.
Qi XD, Qin JZ, Zhong SZ. Plastic surgery digital research [J]. J Med Biomech, 2006, 21(3): 203-207.
- [2] 杨斌,张添生,李晶,等. 颅面结构立体可视化和颅面整形手术仿真模拟的研究[J]. 中华医学美容美容杂志, 2001, 7(2): 79-82.
- [3] Chabanas M, Luboz V, Payan Y. Patient specific finite element model of the face soft tissues for computer-assisted maxillofacial surgery [J]. Med Image Anal, 2003, 7(2): 131-151.
- [4] Gu X, Yau ST. Global conformal surface parameterization [C]. // Proceedings of Eurographics Symposium on Geometry Processing. Germany: [s. n.], 2003: 127-137.
- [5] Couteau B, Payan Y, Lavalée S. The mesh-matching algorithm: An automatic 3d mesh generator for finite element structures [J]. J Biomech, 2000, 33(8): 1005-1009.
- [6] 孟宪龙,付文宇,顾兆勇,等. 可实现特殊网格划分的个性化动脉瘤实体模型的构建[J]. 医用生物力学, 2009, 24(4): 270-275.
Meng XL, Fu WY, Gu ZY, et al. Method of reconstruct patient-specific model of aortic arch aneurysm for particular demands on meshing [J]. J Med Biomech, 2009, 24(4): 270-275.
- [7] Fung YC. Biomechanics-Mechanical properties of living tissues [M]. 3rd ed. Berlin: Springer, 1993.
- [8] Maurel W, Wu Y, Thalmann NM, et al. Biomechanical models for soft tissue simulation [M]. Berlin: Springer, 1998.
- [9] Kauer M. Inverse finite element characterization of soft tissues with aspiration experiments [D]. Switzerland: Swiss Federal Institute of Technology, 2001.