

鼻腔手术对 OSAHS 患者治疗效果的数值分析

于申¹, 刘迎曦^{1,2}, 孙秀珍^{*2,1}, 苏英锋², 王莹¹

(1. 大连理工大学 工业装备结构分析国家重点实验室, 大连 116023;

2. 大连医科大学 附属二院耳鼻咽喉科, 大连 116023)

摘要:对3名伴有鼻阻塞的 OSAHS 患者术前术后的上气道结构包含软腭组织进行三维重构,采用数值模拟的方法研究这3名患者手术前后,上气道气流分布以及软腭的运动情况,分析鼻腔手术对 OSAHS 患者的治疗效果。3名患者手术后鼻腔通气程度均得已改善。两名轻度 OSAHS 患者手术后上气道阻力减小,软腭位移均比术前减小,这些变化均有助于减缓呼吸时气流受限情况。而第3名重度患者手术后上气道阻力和软腭位移反而增加,这将会进一步加重气道的阻塞程度。鼻部手术对 OSAHS 患者的治疗效果取决于上游鼻腔通气程度的改善能否对下游咽腔产生有益的影响。数值模拟结果与 PSG 监测结果及其主诉情况相符,与现阶段临床有关的研究结论相一致,能够间接反映术后气道通气程度以及打鼾症状是否改善,为进一步解决临床的疑难问题提供了理论依据。

关键词:鼻腔手术;阻塞性睡眠呼吸暂停低通气综合征;有限元;流固耦合

中图分类号:O351.2 **文献标志码:**A **doi:**10.7511/jslx201301007

1 引言

随着 OSAHS 病理生理研究的深入,发现除口咽外,上呼吸道其他部位的结构形态异常与 OSAHS 也有着密切的联系^[1]。临床研究发现鼻腔阻塞性疾病与 OSAHS 关系较为复杂,57% 的 OSAHS 患者伴随着鼻腔阻塞性病变^[2]。但是,目前鼻腔结构与 OSAHS 发病机制之间的关系尚不清楚^[3,4],通过鼻部手术治疗 OSAHS 的方法还存在争议^[5,6]。此方面的研究多采用问卷调查等主观评价方法,结合 PSG 等临床测量结果进行研究,临床上未取得较统一的结果。近年来,国内外学者开始采用数值模拟的方法,定量研究软腭或舌的结构形态和运动对咽腔气道压强分布的影响^[7,8],通过改变软组织的结构和材料属性预测多种治疗术式的效果^[9]。现有的相关研究一般都是建立在单例的简化的二维或部分简化的三维咽腔和软腭/舌流固耦合模型的基础上,与真实上呼吸道和软组织的解剖结构形态还有差距。本研究采用流固耦合方法研究鼻通气手术前后,鼻腔结构的变化对

OSAHS 上气道生物力学特性的影响。根据3例成人 OSAHS 患者行鼻腔手术前后的 CT 资料,建立术前术后真实的上气道和软腭模型,定量分析鼻腔结构改变对不同阻塞程度的 OSAHS 患者上气道气流场特性及软腭运动姿态的影响,为研究鼻腔结构在 OSAHS 发病机制中的作用以及客观评价鼻部手术治疗 OSAHS 的效果提供定量的参考依据。

2 志愿者的选取

患者资料 3例志愿者为成人 OSAHS 伴鼻阻塞的患者均为男性。志愿者1经内镜检查见双侧鼻腔:鼻中隔偏曲,双侧下鼻甲肥厚,双侧中鼻道狭窄。另两名志愿者经内镜检查双侧鼻腔见:鼻中隔偏曲,鼻道狭窄。3名志愿者均采用鼻腔结构矫正术,术后3~6个月对这3例患者进行跟踪随访,都做了CT的复查;第2名和第3名志愿者进行了PSG的监测。手术方案及手术前后的PSG监测结果列入表1。根据PSG诊断标准,术前志愿者1和2为轻度 OSAHS 患者,而志愿者3为重度患者。术后志愿者2的AHI(睡眠呼吸暂停低通气指数)和SaO₂(血氧饱和度)均得到了明显改善;而志愿者3术后AHI虽较术前降低,但是SaO₂并未提高。

收稿日期:2012-04-14;修改稿收到日期:2012-08-25.

基金项目:国家自然科学基金(10902022,11072055,11032008)资助项目.

作者简介:孙秀珍*(1954-),女,教授,博士生导师
(E-mail: sunxiuzhen001@163.com).

表1 3名患者采用的手术方案及PSG监测结果

Tab.1 Treatments and PSG results for three patients

病 例	年 龄	性 别	手术方案	术前 PSG		术后 PSG	
				AHI	最低 SaO ₂	AHI	最低 SaO ₂
1	51	男	鼻中隔偏曲矫正、双额筛上颌窦开放、和双下鼻甲骨折外移术	6.7	71%	—	—
2	34	男	鼻中隔偏曲矫正和双下鼻甲骨折外移术	8.6	90%	4.3	93%
3	56	男	鼻中隔偏曲矫正、双下鼻甲骨折外移和部分切除术	67.1	64%	50.5	60.5%

3 数值模拟

在呼吸过程中,空气运动可以诱发软腭的运动,而软腭的运动反过来影响空气的流动,采用流固耦合方法模拟两者的耦联作用。

模型建立 根据3名患者术前术后的CT资料,建立包括鼻腔、口腔、咽腔和喉腔的上气道模型和软腭模型,根据软腭的解剖结构,软腭模型包含了四对腭肌(腭帆提肌、腭帆张肌、腭舌肌、腭咽肌)在软腭两侧。6例模型经过网格收敛性分析后采用的节点数为250000—270000(流体区域),9000—17000(固体区域)。如图1所示,病例1术前术后的流固耦合模型,上气道为流体区域,软腭及四对腭肌为固体区域。为消除边界效应的影响,计算时将声门处向下进行延伸。

边界条件 流体场,设定一次呼吸潮气量 $Q_{\text{潮气量}}=600\text{ ml}$,呼吸周期为 $T=3\text{ s}$ 。依据鼻阻力仪测量得到的流量变化曲线大体为正弦曲线,呼吸时间比基本为1:1。前鼻孔与声门处设为入口和出口边界,吸气时前鼻孔为气流入口,声门处为气

流出口,呼气时设定相反。声门处设定速度边界条件:

$$v = Q/A$$

$$\text{而 } Q = Q_{\text{潮气量}} \int_0^{1.5} \sin \omega t dt$$

式中 Q 为气流率, ω 为角频率 $\omega=2\pi/3$, A 为声门处的面积。前鼻孔与外界直接相通,所以在前鼻孔处施加气压边界条件相对压强为 0 Pa ,计算时将上呼吸道的壁面视为无滑移边界($v_{\text{wall}}=0\text{ m/s}$)。

固体场,软腭最前端与硬腭相连,软腭两侧的四对腭肌分别直接或间接与骨性或软骨结构相连。因此,在软腭最前端及四对腭肌的末端设置固定条件即位移为零。上气道周围软组织通常假设为线弹性结构。软腭的弹性模量为 0.025 MPa ,泊松比为 0.42 ;侧面四对腭肌的弹性模量为 0.98 MPa ,泊松比为 $0.45^{[7,8,10-12]}$ 。

空气考虑为不可压缩的牛顿流体,流体模型的控制方程如下:

$$\rho \frac{\partial v_i}{\partial x_i} = 0 \quad (1)$$

$$\rho \frac{\partial v_i}{\partial t} + \rho v_j \frac{\partial v_i}{\partial x_j} = -\frac{\partial p}{\partial x_i} + \mu \frac{\partial^2 v_i}{\partial x_j \partial x_j} + \rho f_i \quad (2)$$

$$\sigma_{ij}^f = -p \delta_{ij} + \mu \left[\frac{\partial v_i}{\partial x_j} + \frac{\partial v_j}{\partial x_i} \right] \quad (3)$$

固体模型的运动方程和本构方程如下:

$$\rho \frac{\partial^2 u_i}{\partial t^2} = \sum_{j=1}^3 \frac{\partial \sigma_{ij}}{\partial x_j} + \rho f_i \quad (4)$$

$$\sigma_{ij} = \frac{E\nu}{(1+\nu)(1-2\nu)} \epsilon_{kk} \delta_{ij} + \frac{E}{(1+\nu)} \epsilon_{ij}$$

$$\epsilon_{ij} = \frac{1}{2} \left[\frac{\partial u_i}{\partial x_j} + \frac{\partial u_j}{\partial x_i} \right] \quad (5)$$

在流固交界面上需满足运动学条件和力连续性条件,即

$$v_i^f \cdot n = -v_i^s \cdot n, \sigma_{ij}^f \cdot n = -\sigma_{ij}^s \cdot n \quad (6,7)$$

式中,上标 f 和 s 分别为流体和固体, n 为流固交界面的法向方向。

4 模拟结果

通过术前术后CT以及所建模型比较,可以看出上气道几何结构的变化,3例患者鼻腔气道均比术前宽敞。病例1患者口咽以下的气道术后明显比术前宽敞,而病例2患者术后咽腔和喉腔与术前差别不大;但对于病例3的重度患者,术后腭咽部最狭窄处的宽度反而更为狭窄。

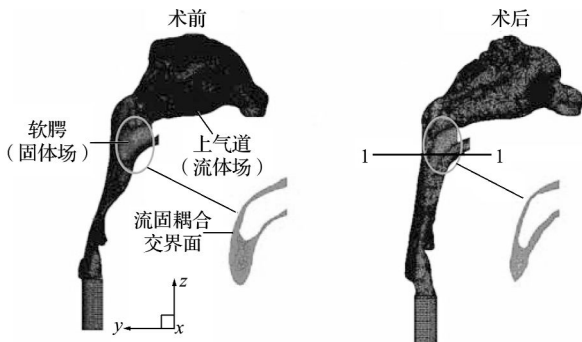


图1 患者1术前术后的上气道和软腭的流固耦合模型
Fig.1 Three-dimensional FSI model of upper airway and soft palate for patient 1

通过数值模拟可以得到上气道的气流、压强分布以及软腭运动情况,图 2 显示了模拟的一个呼吸周期中,病例 1 手术前后软腭后区咽腔(截面 1)的一点(P)的速度和压强,以及悬雍垂底部一点(P')的位移。从图 2 可以看出整个呼吸周期的变化趋势,术后无论压强、气流速度还是软腭位移都比术前减小了。病例 2 和病例 3 的计算结果随时间的变化规律与病例 1 类似,各变量类似正弦规律变化,但是具体的变化程度与病例 1 不同。

选择呼吸周期中吸气和呼气峰值时刻的结果进行分析,患者 1 和患者 2 手术后无论吸气还是呼气,上气道气流的最大速度明显降低,患者 3 术后气流的最大速度反而高于术前。

比较上呼吸道各部位手术前后压强的变化情况,如图 3 所示。病例 1 术后鼻腔的压差下降,但咽喉部的压差下降幅度更大,比术前降低了约 75%。

术后鼻阻力比术前降低,但其占整个上气道阻力的百分比从术前的约 30% 升高到 45%;鼻腔部分的主要气压降在鼻阈附近。对比正常的鼻腔气道情况,病例 1 术后鼻腔的通气情况恢复正常,咽腔的通气程度也得到了很好改善。病例 2 术后鼻腔的气压差明显降低,但术后口咽部的压强梯度与术前相似,上呼吸道压强降的下降主要受益于鼻腔结构的改善。病例 2 的 PSG 结果也显示由术前的轻度 OSAHS 转变为单纯性鼾症。这两例轻度患者通过鼻腔手术后,整个上气道的阻力均不同程度地降低,二者的呼吸暂停、低通气的状况均明显改善,患者主诉其白天嗜睡和夜间打鼾等主观症状也有好转。而病例 3 术后,鼻腔的气压差比术前降低,但是咽腔部位产生的气压差以及整体上气道的气压差均比术前增加,其 PSG 结果显示其症状并未改善。

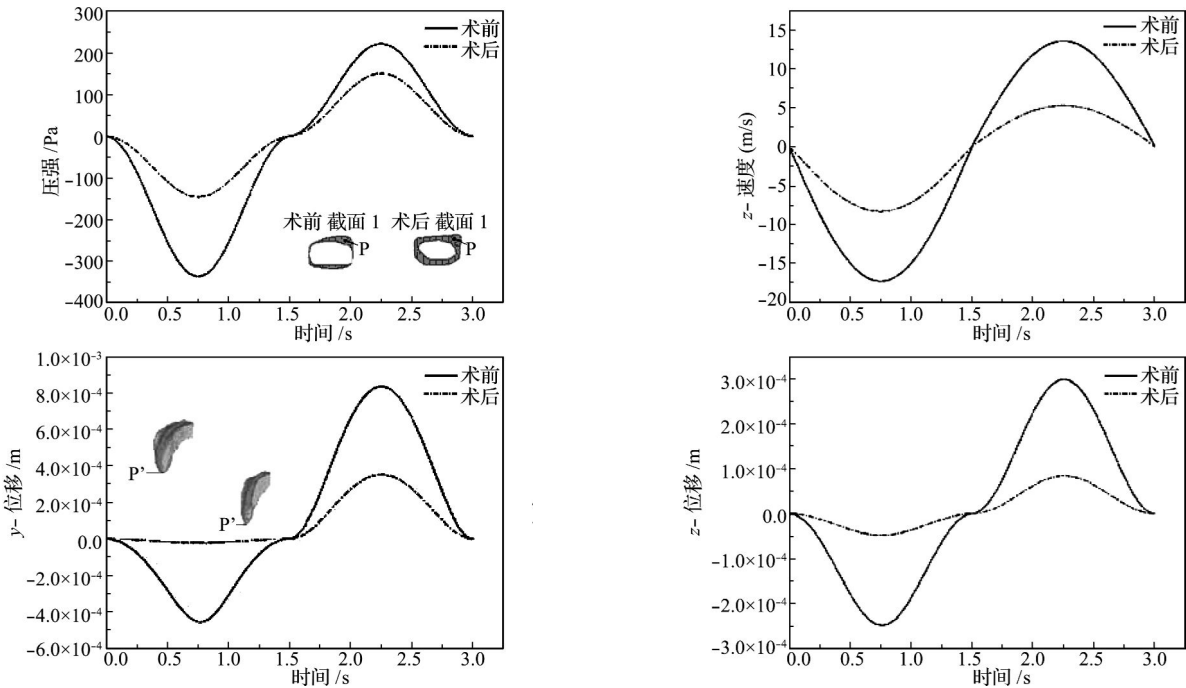


图 2 病例 1 手术前后一个呼吸周期中上气道流场的模拟结果
Fig. 2 Numerical simulation results in a respiratory circle before and after operation for patient 1

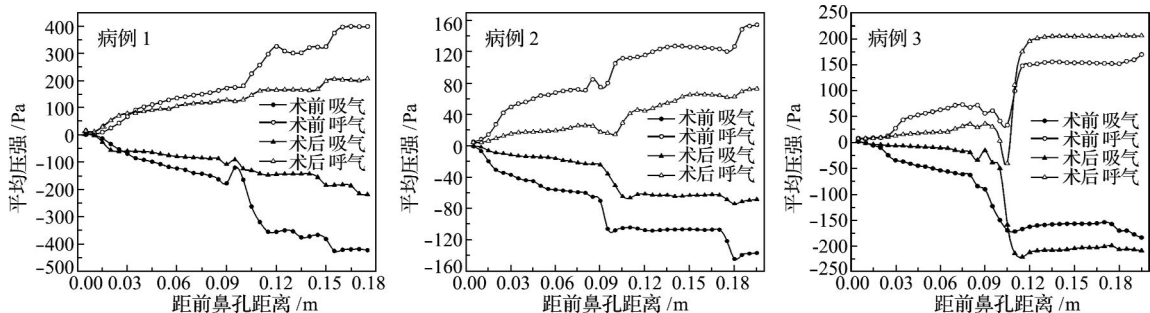


图 3 呼吸峰值时刻 3 名患者手术前后沿上呼吸道各截面的平均压强的变化
Fig. 3 Variation of average pressure at different axial locations for the peak inspiratory and expiratory flow rates between the preoperative and postoperative models for three patients

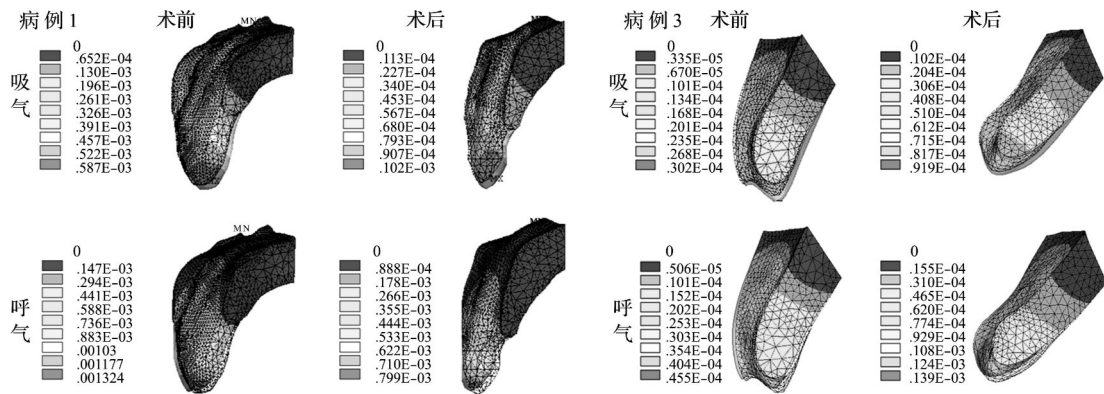


图4 软腭最初的位置(网格)以及吸气与呼气峰值时刻的各部位位移的分布

Fig. 4 Initial position (grids) and displacement distribution of soft palate after computation for the peak flow rates

从三维重建的模型中可以测量得到术前术后软腭距离咽后侧壁面的距离,表2列出的是该部位的最小值(气道的最小宽度)。病例1和病例2经鼻部手术后软腭距离咽后侧壁面的距离增大,术后咽腔扩大;而病例3术后咽腔区的狭窄程度反而比术前更为严重。

图4显示了病例1和3软腭在吸气及呼气峰值时刻的位移分布情况。3例患者手术前后软腭模型吸气时均趋向咽腔前侧壁面运动,而呼气时则趋向于咽腔后侧壁面。咽腔的结构会随着软腭的运动而发生变化。

病例1手术前后吸气相的软腭位移均很小。而术前在呼气过程中软腭的位移较大,最大位移约为1.3 mm,位于软腭尖端附近;咽腔部最狭窄处的气道宽度为1.52 mm(表2),该处软腭在呼气时向后的位移约为1 mm,此时由于软腭运动占据了气道原宽度的2/3,使得该部位的气道宽度仅余1/3;术后由于气道结构的改善,使得软腭位移减小,咽腔气道扩大,最狭窄处的宽度增至2.5 mm,改善了气流受限情况。病例2,术前术后呼气时的软腭位移远高于吸气过程,术前呼气时的软腭的最大位移约为吸气时的7倍。术前咽腔部最狭窄处的宽度为2.4 mm,呼气时软腭向后运动最大位移不到1 mm,由软腭运动引起的咽腔部的阻塞程度

表2 术前术后软腭距离咽腔后侧壁面的最小距离(单位:mm)

Tab. 2 Minimum distance between the soft palate and dorsal pharyngeal wall(unit:mm)

	病例1	病例2	病例3
术前	1.52	2.41	2.04
术后	2.51	4.53	1.75

没有病例1明显。术后吸气和呼气过程中,软腭的运动幅度都有所减小。病例3是重度 OSAHS 患者,术前和术后呼气相软腭位移均高于吸气相的,而术后软腭的位移比术前要大,大约增至术前的3倍,而术后咽腔最狭窄部位的宽度由术前的2 mm减少到1.75 mm。软腭位移增大和咽腔气道的变窄加重了气道狭窄程度。但是软腭的位移相对于咽腔气道的宽度而言很小,最大位移不到最狭窄处宽度的十分之一,因此软腭的位移对咽腔气道的影响程度并不明显。

5 讨论

所选的3例 OSAHS 患者手术前均伴有严重的鼻阻塞,根据各自气道阻塞的特点,采用不同的鼻腔手术方案,旨在通过矫正异常的鼻腔结构,扩大通气容积从而消除或减轻上呼吸道的阻塞情况。通过手术前后上气道结构特征的比较可知,所有患者手术后鼻道变得宽敞。而人体咽腔是一个无骨性支撑结构,会由于体位、生理状况等因素改变结构形态,因此术后咽腔的结构与术前不同。手术前,无论吸气还是呼气,整个上气道的气压差和最大压力梯度主要集中在软腭和口咽腔,气流的最高速度也出现在此区域,所以咽腔区是 OSAHS 患者睡眠时呼吸气流主要受限的部位^[13,14]。手术后改善了鼻腔阻塞状况,3名患者术后鼻腔的气压差都比术前降低,而口咽部气压差下降仅见病例1和病例2,病例3的口咽以及整个上气道的气压差反而高于术前。尽管术后鼻腔的气压差有了明显降低,但是由于术后咽腔区的截面积变得更窄,整个上气道气流受限程度并未改善。这说明鼻部手术只能对一部分 OSAHS 患者有治疗效果,而对另一部分

OSAHS患者有可能加重病情。

腭咽腔前壁为软腭,后壁为咽后壁,因此软腭的形态及位置是影响腭咽气道大小的重要因素^[15]。软腭肥厚或者软腭向后运动幅度过大都可能造成腭咽部的狭窄。而腭咽部的阻塞和狭窄是导致 OSAHS 最危险的因素^[13,14,16]。比较术前术后软腭的位移分布情况,病例 1 和病例 2 手术后咽腔气道结构改善,气流作用下软腭在咽腔中运动范围缩小,腭咽腔相对扩大,缓解腭咽部气流受限情况。而病例 3 经鼻部手术后,未能缓解腭咽部的阻塞情况,术后腭咽部的气流速度和压强梯度均增大,使得软腭在咽腔中的运动范围增大,但是软腭的位移相对于气道原始宽度而言很小,对腭咽气道阻塞程度的影响没有病例 1 和 2 那么明显。由此可以看出软腭的运动姿态是影响气道阻塞程度的重要因素之一。而病例 3 术后腭咽部压强梯度增大,该处气道内的气压急剧下降,从而增大管道内外压力的差值,最终有可能导致气道的塌陷,加重气道阻塞程度。此外,重度 OSAHS 患者常由于咽部的水肿、气道周围脂肪堆积等原因,造成咽腔扩张肌收缩力降低或者松弛(力学性质变化),也构成了气道塌陷和狭窄的危险因素。本文的数值模拟结果能够反映气道通气功能的情况,并与临床 PSG 监测结果对病情的判断,以及患者的主诉也相一致。

6 结 论

由上述结果可以看出,OSAHS 的发病与多种因素相关,鼻腔阻塞、软腭运动及腭咽腔狭窄等因素都可以造成下游气道内负压增大,从而引发气道坍塌或狭窄,使得气道阻塞程度加重。这种情况可能是一种因素为主引起,也可能是几种因素共同作用导致。除需整体考虑上气道结构性狭窄以及各部分气道结构之间复杂的联系外,还得考虑管壁本身的力学性质以及神经肌肉调控机制等因素的影响以及致病主要因素。所以鼻部手术对部分 OSAHS 患者不一定合适,具体要看上游鼻腔通气程度的改善能否对下游咽腔产生有益的影响。

参考文献(References):

- [1] 韩德民,叶京英.阻塞性睡眠呼吸暂停低通气综合征的外科治疗[J].中国耳鼻咽喉头颈外科,2005,12(6):611-614. (HAN De-min, YE Jing-ying. Surgical procedures for sleep apnea syndromes[J]. *Chinese Archives of Otolaryngology-Head and Neck Surgery*, 2005, 12(6):611-614. (in Chinese))
- [2] 李延忠,王 岩,王 欣.1500 例阻塞性睡眠呼吸暂停低通气综合征患者鼻阻塞性病变分析[J].山东大学学报(医学版),2006,44(3):273-279. (LI Yan-zhong, WANG Yan, WANG Xin. Analysis of nasal obstruction in 1500 patients with obstructive sleep apnea hypopnea syndrome[J]. *Journal of Shandong University (Health Sciences)*, 2006, 44(3):273-279. (in Chinese))
- [3] Kohler M, Bloch K E, Stradling J R. The role of the nose in the pathogenesis of obstructive sleep apnea [J]. *Current Opinion in Otolaryngology & Head and Neck Surgery*, 2009, 17(1):33-37.
- [4] Georgalas C. The role of the nose in snoring and obstructive sleep apnoea: an update [J]. *European Archives of Oto-Rhino-Laryngology*, 2011, 268(9):1365-1373.
- [5] Li H Y, Lin Y, Chen N H, et al. Improvement in quality of life after nasal surgery alone for patients with obstructive sleep apnea and nasal obstruction [J]. *Archives of Otolaryngology-Head & Neck Surgery*, 2008, 134(4):429-433.
- [6] Tosun F, Kemikli K, Yetkin S, et al. Impact of endoscopic sinus surgery on sleep quality in patients with chronic nasal obstruction due to nasal polyposis [J]. *Journal of Craniofacial Surgery*, 2009, 20(2):446-449.
- [7] Huang Y, White D P, Malhotra A. The impact of anatomic manipulations on pharyngeal collapse: results from a computational model of the normal human upper airway [J]. *Chest*, 2005, 128(3):1324-1330.
- [8] Chouly F, Van Hirtum A, Lagrèe P Y, et al. Numerical and experimental study of expiratory flow in the case of major upper airway obstructions with fluid-structure interaction [J]. *Journal of Fluids and Structures*, 2008, 24(2):250-269.
- [9] Huang Y, White D P, Malhotra A. Use of computational modeling to predict responses to upper airway surgery in obstructive sleep apnea [J]. *The Laryngoscope*, 2007, 117(4):648-653.
- [10] Xu C, Brennick M J, Dougherty L, et al. Modeling upper airway collapse by a finite element model with regional tissue properties [J]. *Medical Engineering & Physics*, 2009, 31(10):1343-1348.

- [11] Xia G, Tawhai M H, Hoffman E A, et al. Airway wall stiffening increases peak wall shear stress; a fluid-structure interaction study in rigid and compliant airways[J]. *Annals of Biomedical Engineering*, 2010, **38**(5):1836-1853.
- [12] Pan X, Qian Y, Yu J, et al. Biomechanical effects of rapid palatal expansion on the craniofacial skeleton with cleft palate; a three-dimensional finite element analysis[J]. *The Cleft Palate-Craniofacial Journal*, 2007, **44**(2):149-154.
- [13] Qureshi A, Ballard R D. Obstructive sleep apnea[J]. *Journal of Allergy and Clinical Immunology*, 2003, **112**(4):643-652.
- [14] Rama A N, Tekwani S H, Kushida C A. Sites of obstruction in obstructive sleep apnea[J]. *Chest*, 2002, **122**(4):1139-1147.
- [15] 温伟生, 胡敏, 柳春明, 等. 不同体位下软腭位置与腭后气道的相关性研究[J]. 军医进修学院学报, 2001, **22**(1):57-59. (WEN Wei-sheng, HU Min, LIU Chun-ming, et al. Relationship between soft palate and retropatal airway in different posture[J]. *Academic Journal of PLA Postgraduate Medical School*, 2001, **22**(1):57-59. (in Chinese))
- [16] 贝俊杰, 单云官, 张玉和, 等. 软腭与阻塞性睡眠呼吸暂停综合征[J]. 解剖与临床, 2003, **8**:120-122. (BEI Jun-jie, SHAN Yun-guan, ZHANG Yu-he, et al. Soft palate and sleep apnea syndromes[J]. *Anatomy and Clinics*, 2003, **8**(2):120-122. (in Chinese))

Numerical simulations for the curative effect of the nasal surgery on patients with OSAHS

YU Shen¹, LIU Ying-xi^{1,2}, SUN Xiu-zhen^{*2,1}, SU Ying-feng², WANG Ying¹

(1. State Key Laboratory of Structural Analysis for Industrial Equipment,
Dalian University of Technology, Dalian 116023, China;

2. Otorhinalaryngology Department, Dalian Medical University, Dalian 116023, China)

Abstract: The upper airway structure containing soft palate organizations of three OSAHS patients with nasal obstruction would be reconstructed to study the airflow distribution and movement of the soft palate before and after surgery using numerical simulation method. The curative effect would be analyzed for the nasal surgery on patients with OSAHS. The degree of nasal obstruction in three patients has been improved after surgery. For two patients with mild OSAHS, the resistance of upper airway and the displacement of soft palate decreases after surgery. These changes are contributing to the mitigation of the respiratory airflow limitation. For the third of patients with severe OSAHS, the resistance of upper airway and the displacement of soft palate actually increased after surgery, which will further increase the degree of airway obstruction. The curative effect of nasal surgery on patients with OSAHS depends on whether the improvement of nasal obstruction benefiting the pharynx. Numerical simulation results match the results of PSG test, chief complaint and clinical findings. It can indirectly reflect the degree of nasal patency and improvement of snoring symptoms which can provide a theoretical basis to solve the clinical problems.

Key words: Nasal surgery; OSAHS; Finite element method; Fluid-structure interaction