

• 综述 •

鼻腔鼻窦精细化建模及其在精准手术设计中的应用展望

吴硕¹ 王培基² 谢迭来³ 张锦绣²

[关键词] 鼻腔鼻窦建模; 计算机流体力学; 虚拟手术; 精准医疗

doi:10.13201/j.issn.2096-7993.2020.10.021

[中图分类号] R765 [文献标志码] A

Fine modeling of nasal cavity and its application in precision surgical design

Summary In recent years, the research hotspot of rhinology is looking forward to effective method for changing the anatomical structure of nasal cavity and paranasal sinus. And it will build up the optimal relationship between airflow field and biological effects in rhinology surgency. Now in precise medical treatment, we are eager to find a more reasonable and optimized surgical method before operation, with the help of information technology and big data science. It will not only achieve the greatest biological effect, but also maximize the protection of the lateral wall of the nasal cavity, in order to eliminate the potential recurrence of sinusitis. This paper mainly includes three parts: status and trends of nasal cavity modeling, biomechanics research progress and progress in evaluation of nasal surgery. It is very helpful for promoting the applying of up-to-date model in precise surgical design.

Key words modeling of nasal cavity and paranasal sinus; computer fluid dynamics; virtual surgery; precision medicine

近年来,随着数字医学的快速发展及其与精准医疗的融合,临床手术学也正快速步入精准时代。针对患者个体手术方式、手术范围选择上的无法重复性,如何快速建立术区精准3D模型并完成术前分析、模拟不同手术方式后推演预后,进而优选出最佳手术方式及范围,从而形成一套为患者量身打造的个性化手术方案,是临床医学进入精准治疗时代面对的挑战。近年来,基于虚拟模型的精准手术辅助设计在外科手术中逐渐开展,并取得了积极效果,然而在耳鼻咽喉科、口腔科等临床应用中尚处于探索阶段^[1-2]。

20世纪70年代初期功能性鼻窦内镜手术开创以来,迅速得到鼻外科医生的公认与推广,逐渐成为慢性鼻窦炎的主要治疗方式^[3]。其获得的良好近期治愈率是不容置疑的,但其远期复发以及手术本身对鼻腔结构的改变引起鼻腔气流紊乱等相关问题,逐渐引起了诸多鼻科专家的密切关注。当前,鼻科精准手术研究热点致力于探索一类更为合理优化的方法,既能达到最大的生物学效应又最大限度地保留鼻腔外侧壁的保护功能,消除鼻窦复发隐患。在此过程中,如何基于CT数据精确构建鼻腔鼻窦模型、虚拟模拟术后鼻腔鼻窦流场和力场

来预判术后效果,逆向推演,进而筛选出最佳的个体化手术方案已成为临床应用的核心问题。

本文从鼻腔鼻窦建模发展现状及趋势、鼻腔鼻窦生物力学研究,及其对鼻科手术评估进展等方面进行综述,进而展望精细化鼻腔鼻窦模型在精准手术设计中的应用,为今后基于大数据人工智能对患者个体实施精准治疗提供帮助。

1 鼻腔鼻窦实体模型构建发展现状及趋势

从20世纪80年代初期,为研究鼻腔鼻窦内的气流状态,进一步揭示鼻腔鼻窦的生理功能,人们开始致力于研究怎样建立可靠的鼻腔模型。Hornung等(1987)为了解气流通过鼻腔的过程及在鼻腔各部分的分布情况,以尸体为模板建立了一个人体塑胶模型,这种塑胶模型虽然精确度较差,但通过向鼻腔模型内注入可探测的带有放射性的氦气,最终粗略获知通过鼻腔的气流以紊流状态为主,鼻腔中的气流主要经过鼻腔中、下部,鼻腔上部和嗅裂区域经过的气流很少,鼻腔气流的通气量越大,紊流成分越多,流速越慢。这种塑胶模型虽然无法真实还原鼻腔鼻窦内的精细结构,得到的实验数据结果有待推敲,但为人类探索鼻腔鼻窦解剖结构和鼻腔气流力场之间的关系奠定了基础。

后续大量学者开始尝试利用影像数据,试图从解剖学角度建立精准鼻腔模型,但由于鼻腔鼻窦内结构复杂且体积微小,如何获取准确影像数据成为了新的难点。部分学者通过建立尺寸放大且简化

¹ 中山大学附属第三医院耳鼻咽喉科(广州,510530)

² 中山大学物理与天文学院

³ 中山大学附属第三医院放射科

通信作者:吴硕, E-mail: wush68@sysu.edu.cn

了鼻窦的鼻腔模型,对鼻腔气流的速度、方向和分布进行了实验研究。

Hahn 等^[4]依据 1 例健康成年人的计算机射线断层扫描图建立了一放大 20 倍的右侧鼻腔模型,采用热线风速计对鼻腔模型内的特定位置吸气和呼气时的速度进行测量。研究结果显示:在健康成年人的鼻腔中,鼻腔内总鼻道和下鼻道气体流量大,嗅裂区气体流量少;在平静呼吸时,鼻腔内的气流分布情况不随通气量的改变而改变。Kelly 等^[5]根据影像数据构建扩大 2 倍比例的鼻腔模型,将失踪颗粒放入通过鼻腔的气体中,通过数字化颗粒成像测速仪方式检测通过鼻腔的气流。实验结果显示鼻腔气流在鼻瓣区流速最快,流体形式以层流为主涡流为辅。Schreck 等^[6]为研究鼻腔内的阻力变化与解剖结构之间的关系,依据 1 例健康成年人半侧鼻腔的 MRI 数据建立了一个放大 3 倍比例的鼻腔塑胶模型,通过实验认为:鼻腔中鼻瓣区阻力最大,而鼻瓣区气流形式复杂多变与气流的速度及鼻瓣区的解剖结构相关。

早期鼻科专家根据影像学数据建立的这些模型,由于人体鼻腔鼻窦结构微小复杂,其模型精确性受到了影像学发展条件的限制,且离体模型制作工艺发展落后,故仅能大致真实反映鼻腔鼻窦的解剖结构。同时,基于上述定性模型的体外测量方法存在的局限性等都不同程度地制约了鼻腔鼻窦气流的整体实验结果的精准性。目前可以确知,已有的不同放大倍数离体模型,虽然降低了模型制作工艺和测量方法的难度,但模型的简单放大必然导致模拟实验结果的失真。初步研究表明,基于影像学扫描数据所构建模型的精确性与扫描的层间距、层厚关系紧密,因此有必要寻找一种新的建模技术及全方位多维度的实验测量方式以实现鼻腔全局气流力场的精确分析。

2 鼻腔鼻窦数字化模型构建发展现状

随着计算机模拟技术与流体力学的快速发展,逐渐出现了基于计算流体力学(computational fluid dynamics, CFD)^[7-8]的鼻腔全局气流分析方法,用于研究鼻腔的呼吸与嗅觉生理机制、药物在鼻腔的分布与扩散等毒理药理学等。

随着影像学的快速发展,薄层螺旋 CT 的出现,获取的影像学图像数据越详细,利用三维重建软件最终重建得到的鼻腔鼻窦数字模型就越能够真实地反映出鼻腔鼻窦的解剖结构特征,与实际的人体鼻腔鼻窦结构轮廓有很好的相似性,为接下来进一步分析鼻腔结构与气流特点之间的关系提供了前提。进而利用流体动力学分析软件,可得到鼻腔不同部位的压强变化、温度、湿度变化以及鼻腔气流线图,直观反映出鼻腔气流场特点,进一步探究鼻腔的嗅觉功能、过滤功能、加温加湿等生理功

能的本质。

Martonen 等^[9-10]对健康成人的鼻腔、咽喉部进行三维重建,应用流体力学分析方法,通过研究不同通气量状态下对气流中颗粒沉积现象的影响,发现颗粒的沉积会随着气流流量、流速的增加而增加,与气流中颗粒的体积、重量无明确的相关性。通过实验还发现在通气量为 10 L/m 时颗粒主要沉积于鼻腔,当通气量超过 20 L/m 时,颗粒则主要沉积于鼻前庭,实现了人类对鼻腔过滤功能的初步认识。Buck 等^[11]同样从鼻腔生物力学角度对气味受体和嗅觉系统组织方式进行研究,最终揭示了人类嗅觉系统的奥秘,这也是近年来科学界对鼻腔生物力学相关研究最重要的认可。

3 鼻腔鼻窦建模与鼻科手术评估

Bockholt 等^[12]首次利用数值模拟计算技术对鼻外科手术的预后进行评估;Wexler 等^[13-14]通过对鼻甲切除术后鼻腔不同层面的温度和压力变化进行研究后发现,鼻甲部分切除后会引起鼻腔气流的紊乱,从而降低鼻腔的加温加湿功能;Lindemann 等^[15]对鼻窦根治术后患者的鼻腔气流参数进行了模拟研究;Wiesmiller 等^[16]对行鼻中隔偏曲矫正术加双下鼻甲部分切除术后患者的鼻腔气流情况及温度变化进行分析,实验结果表明,鼻腔鼻窦手术在清除病变和矫正鼻腔结构的同时在一定程度上也造成了鼻腔气流的紊乱,破坏了鼻腔的生理功能。

越来越多的鼻科专家认识到:功能性鼻窦内镜手术在清除病变的基础上不可避免地破坏了鼻腔外侧壁的结构,切除钩突及窦腔的开放在通常引流的同时,使得原来受到保护的各个鼻窦黏膜直接暴露于气流的冲击之下,导致含有多种致病因素及过敏原的气流直接进入各个鼻窦,加之鼻中隔偏曲矫正、鼻甲成型等鼻腔手术完全改变了人体自身为了维持鼻腔正常气流场、应对鼻腔结构不良而产生的一些自适应性变化,进而引起鼻腔气流场改变,鼻腔鼻窦的部分生理功能受到不同程度的破坏。同时,慢性鼻窦炎的远期复发问题以及某些术后鼻腔结构堪称完美但患者自身体验不佳,甚至极个别术后出现的形成原因复杂的“空鼻症”问题已经越来越多地引起广大鼻科学家的重视^[17-18]。

无论是基于实体模型还是数字化模型,建模的本质是为了进行气流场分析,了解鼻腔结构的改变对鼻腔生理功能的影响,明确手术对鼻腔鼻窦解剖结构改变的禁区。对于鼻科手术而言,在提高疾病治愈率的同时尽可能恢复鼻腔鼻窦生理功能,运用数字化技术实现患者病灶区的三维可视化是非常必要的,它将帮助医生完成数据精准测量、术前分析、手术模拟推演以及术后效果分析,为患者筛选出既能清除病灶又最大限度保留患者鼻腔鼻窦生

理功能的手术方案,指引医生高效地完成手术,避免术后并发症。在提高手术精度的同时,实现个性化精准手术^[19]。

4 未来鼻科精准医疗展望

随着医疗资源共享的数字化时代的来临,以每一个患者个体为中心,提供及时精确、有效的治疗方案,从而达到个体化治疗的目标,已成为医疗技术未来的发展使命。精准医疗涵盖多学科,从传统的预防医学、临床医学到如今的信息医学、生物力学等^[20]。要实现鼻科精准医疗,必须做到多学科融合,信息整合。

通过鼻腔鼻窦三维重建技术和计算流体力学进行数值模拟计算,可预测手术后鼻腔气流各项参数的改变,将其与手术后患者鼻腔结构的生物力学分析数据进行对比,通过人工智能对大宗样本数据的学习研究,探索如何通过改变鼻腔鼻窦解剖结构,引起气流力场变化,最终得到最佳生物效应,从而在未来实现针对不同患者利用人工智能分析,得出最佳手术范围,为实现个性化的鼻科精准医疗带来了希望。

参考文献

- [1] Schutte S, van den Bedem SP, van Keulen F, et al. A finite-element analysis model of orbital biomechanics [J]. *Vision Res*, 2006, 46(11):1724-1731.
- [2] Marro A, Bandukwala T, Mak W. Three-Dimensional Printing and Medical Imaging: A Review of the Methods and Applications [J]. *Curr Probl Diagn Radiol*, 2016, 45(1):2-9.
- [3] Stammberger H. Endoscopic endonasal surgery-concepts in treatment of recurring rhinosinusitis. Part I. Anatomic and pathophysiologic considerations [J]. *Otolaryngol Head Neck Surg*, 1986, 94(2):143-147.
- [4] Hahn I, Scherer PW, Mozell MM. Velocity profiles measured for airflow through a large-scale model of the human nasal cavity [J]. *Appl Physiol*, 1993, 75(5):2273-2287.
- [5] Kelly JT, Prasad AK, Wexler AS. Detailed flow patterns in the nasal cavity [J]. *Appl Physiol*, 2000, 89(1):323-337.
- [6] Schreck S, Sullivan KJ, Ho CM, et al. Correlations between flow resistance and geometry in a model of the human nose [J]. *Appl Physiol*, 1993, 75(4):1767-1775.
- [7] Lindemann J, Keck T, Wiesmiller K, et al. Nasal air temperature and air flow during respiration in numerical simulation based on multislice computed tomography scan [J]. *Am J Rhinol*, 2006, 20(2):219-223.
- [8] 王彤,周兵,张罗,等.慢性鼻-鼻窦炎患者鼻内镜手术前后鼻腔鼻窦流场特征变化 [J]. *临床耳鼻咽喉头颈外科杂志*, 2015, 22(11):558-562.
- [9] Martonen TB. Fine particle deposition within human nasal airways [J]. *Inhal Toxicol*, 2003, 15(4):283-303.
- [10] Zwartz GJ, Guilmette RA. Effect of flow rate on particle deposition in a replica of a human nasal airway [J]. *Inhal Toxicol*, 2001, 13(2):109-127.
- [11] Buck L, Axel R. A novel multigene family may encode odorant receptors: a molecular basis for odor recognition [J]. *Cell*, 1991, 65(1):175-187.
- [12] Bockholt U, Mlynski G, Muller W, et al. Rhino surgical therapy planning via endonasal airflow simulation [J]. *Comput Aided Surg*, 2000, 5(3):174-179.
- [13] Wexler D, Segal R, Kimbell J. Aerodynamic effects of inferior turbinate reduction: computational fluid dynamics simulation [J]. *Arch Otolaryngol Head Neck Surg*, 2005, 131(12):1102-1107.
- [14] Lindemann J, Keck T, Wiesmiller K, et al. Numerical simulation of intranasal air flow and temperature after resection of the turbinates [J]. *Rhinology*, 2005, 43(1):24-28.
- [15] Lindemann J, Brambs HJ, Keck T, et al. Numerical simulation of intranasal airflow after radical sinus surgery [J]. *Am J Otolaryngol*, 2005, 26(3):175-180.
- [16] Wiesmiller K, Keck T, Rettinger G, et al. Nasal air conditioning in patients before and after septoplasty with bilateral turbinoplasty [J]. *Laryngoscope*, 2006, 116(6):890-894.
- [17] Kim JK, Yoon JH, Kim CH, et al. Particle image velocimetry measurements for the study of nasal airflow [J]. *Acta Otolaryngol*, 2006, 126(3):282-287.
- [18] 刘迎曦,于申,孙秀珍,等.鼻腔结构形态对鼻腔气流的影响 [J]. *中华耳鼻咽喉头颈外科杂志*, 2005, 40(11):846-849.
- [19] 邱小平,王晋平,杨颖,等.影像导航在辨别额隐窝气房中的价值 [J]. *临床耳鼻咽喉头颈外科杂志*, 2016, 30(10):791-794,797.
- [20] Pitt GS. Cardiovascular precision medicine: hope or hype? [J]. *Eur Heart J*, 2015, 36(29):1842-1843.

(收稿日期:2019-08-20)