



## 内耳有限元模型的研究现状

周雷, 黄新生

引用本文:

周雷, 黄新生. 内耳有限元模型的研究现状[J]. 中国临床医学, 2021, 28(4): 695-698.

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.12025/j.issn.1008-6358.2021.20200316>

---

## 您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

### 3D打印聚乳酸/纳米级 $\beta$ -磷酸钙可吸收山羊颈椎融合器的生物相容性及生物力学评价

Biocompatibility and biomechanics study on novel 3D printed polylactic acid/nano-scale  $\beta$ -TCP degradable cervical fusion cage

中国临床医学. 2017, 24(4): 525-530 <https://doi.org/10.12025/j.issn.1008-6358.2017.20170675>

### 可降解锌合金冠状动脉支架研发进展

Research and development progress on biodegradable zinc-based coronary stents

中国临床医学. 2018, 25(5): 821-826 <https://doi.org/10.12025/j.issn.1008-6358.2018.20180052>

### 可溶性纤维介素2的免疫调节作用研究进展

Research progress on the role of soluble fibrinogen-like protein 2 in immunoregulation

中国临床医学. 2016, 23(5): 656-661 <https://doi.org/10.12025/j.issn.1008-6358.2016.20160296>

### 血小板致动脉粥样硬化作用机制的研究进展

Mechanisms of platelets induced atherosclerosis: research progress

中国临床医学. 2017, 24(4): 638-643 <https://doi.org/10.12025/j.issn.1008-6358.2017.20170016>

### 围术期液体治疗的研究进展

Research progress in perioperative fluid therapy

中国临床医学. 2016, 23(5): 677-680 <https://doi.org/10.12025/j.issn.1008-6358.2016.20160171>

DOI:10.12025/j.issn.1008-6358.2021.20200316

# 内耳有限元模型的研究现状

周 雷, 黄新生\*

复旦大学附属中山医院耳鼻咽喉头颈外科, 上海 200032

引用本文 周 雷, 黄新生. 内耳有限元模型的研究现状[J]. 中国临床学, 2021, 28(4): 695-698. ZHOU L, HUANG X S. Research status of inner finite element model[J]. Chinese Journal of Clinical Medicine, 2021, 28(4): 695-698.

**[摘要]** 内耳是一个充满液体的区域, 听觉、位置觉感受器位于其中。作为一个十分重要的感觉器官, 内耳内部的生物力学机制十分复杂。由于内耳位于坚硬的岩质骨中, 对其研究较为困难。因此, 通过医工交叉的方式, 创建生物力学模型, 并通过模型来研究内耳的生物力学机制, 是目前耳力学中一个热门领域。本文总结了近年来关于内耳有限元模型的研究现状, 以帮助相关领域的研究者形成总体认识。

**[关键词]** 内耳; 有限元分析; 生物力学; 膜迷路

**[中图分类号]** R 322.9<sup>+</sup>23 **[文献标志码]** A

## Research status of inner ear finite element model

ZHOU Lei, HUANG Xin-sheng\*

Department of Otorhinolaryngology Head and Neck Surgery, Zhongshan Hospital, Fudan University, Shanghai 200032, China

**[Abstract]** Inner ear is a region immersed with fluid, with hearing and position sensors located in it. As an important sensor organ, its biomechanics is very complicate. Due to the cortical bone that encloses the inner ear, the research of the inner ear is hard to perform. As a result, through the cooperation of physicians and engineers, studying the biomechanical mechanism of the inner *via* biomechanical models is currently a hot field in auricular mechanics. This article reviews the finite element model of the inner ear in recent years, in order to help researchers in this field have an overall understanding.

**[Key Words]** inner ear; finite element analysis; biomechanics; membranous labyrinth

内耳被包裹在颅底坚硬的岩质骨中, 难以在人体进行无损测量和试验。因此, 目前多数关于内耳的生物力学认识是通过实验动物和颞骨标本获得的<sup>[1]</sup>。Cooper等<sup>[2]</sup>在活体沙鼠耳蜗中发现, Corti器周围流体存在热点振动, 认为其可以优化听觉的调制现象。Ding等<sup>[3]</sup>通过建立膜迷路积水的豚鼠模型, 测量后发现膜迷路积水会导致中耳低频振动减弱。Cheng等<sup>[4]</sup>通过颞骨标本研究发现, 上半规管裂可能影响250 Hz以下低频的听力, 并认为该频段的听力检测结果可能有利于对上半规管裂的诊断。Alhussaini等<sup>[5]</sup>通过颞骨标本研究了不同程度的中耳积液对声刺激时耳蜗内流体压力的影响。

由于在颞骨和动物实验中改变变量及实际测试较困难, 学者们建立了各种数学模型来分析内耳

的生物力学机制。Rabbitt等<sup>[6]</sup>通过一系列数学模型分析了半规管、壶腹嵴、耳石器等结构的生理功能和病理机制。苏海军等<sup>[7]</sup>通过建立半规管、耳石器的广义分数阶黏弹性动力学模型并进行分析, 认为胶质层的黏弹性效应对耳石器官的动力影响起主要作用, 进而对Grant等<sup>[8]</sup>的经典耳石数学模型进行了改进。Iversen等<sup>[9]</sup>建立水平半规管的数学模型, 研究了该模型中内、外淋巴液的交互作用及在旋转运动时双腔流体中膜迷路的变形情况。Rajguru等<sup>[10]</sup>运用数学模拟方法, 发现变位实验诱发的眩晕程度与游离耳石的质量相关, 而到达最大反应的潜伏期则和耳石从壶腹运动到半规管最低点的时间有关。Ifediba等<sup>[11]</sup>用颞骨标本的连续切片建立了内耳的三维数学模型, 认为半规管的空间

**[收稿日期]** 2020-02-19 **[接受日期]** 2020-09-17

**[基金项目]** 国家自然科学基金(82000980), 上海市科学技术委员会基金(17411962200)。Supported by National Natural Science Foundation of China(82000980) and Fund of Shanghai Science and Technology Commission(17411962200)。

**[作者简介]** 周 雷, 硕士。E-mail: zhoule3293@126.com

\*通信作者(Corresponding author). Tel:021-64041990, E-mail: huang.xinsheng@zs-hospital.sh.cn

位置对其方向编码十分重要,而其管径和形状则影响较小。

数学模型计算量小,能模拟较为简单的局部生物力学响应,但难以用于模拟和研究复杂条件下的生物力学机制。而有限元方法能模拟复杂几何形态、超微结构特征和复杂的材料特性,越来越多的学者在运用有限元方法探索内耳流体的生理和病理现象。因此,为梳理内耳有限元模型的研究现状,本文对内耳有限元模型的研究进展进行总结和整理。

## 1 半规管及耳石器有限元模型

Kondrachuk 等<sup>[12]</sup>建立豚鼠的耳石器有限元模型并进行分析,认为轻微的内淋巴压力变化会导致明显的耳石膜移位。Shen 等<sup>[13]</sup>通过半规管和椭圆囊膜迷路的三维有限元模型发现,椭圆囊内淋巴阀门可能在梅尼埃病的发病中起一定作用;进一步通过建立双侧半规管有限元模型,模拟正弦变位刺激下,半规管内淋巴液的流动和壶腹嵴顶的变形及与眼震之间的量化关系<sup>[13]</sup>。Boselli 等<sup>[14]</sup>通过包含椭圆囊的水平管三维有限元模型研究半规管内淋巴液的纵向流动。Wu 等<sup>[15]</sup>建立豚鼠水平管的二维有限元模型,研究管内内淋巴液的流动和壶腹嵴的变形。

## 2 耳蜗有限元模型

Kim 等<sup>[16]</sup>建立包含外、中耳结构的直耳蜗有限元模型,并研究惯性骨传导的对称和非对称部分。Koike 等<sup>[17]</sup>建立包含中耳结构的直型耳蜗,发现外淋巴瘘使行波包络在外淋巴瘘的位置出现一个切迹,最大振幅也变小。Zhou 等建立简化的人整耳有限元模型,与外、中耳模型进行耦合后创建出简化耳蜗的整耳有限元模型<sup>[18]</sup>,并根据该模型研究中耳病变对耳蜗逆向激励的影响<sup>[19]</sup>,听骨链畸形对圆窗激励的影响<sup>[20]</sup>,外、中耳腔气体的存在对气导和骨导的影响等<sup>[21]</sup>。

Bai 等<sup>[22]</sup>通过  $\mu$ CT 扫描的颞骨标本,建立蜗轴的详细几何模型,并根据该模型,利用自编的 Python 算法获得听神经的传入神经纤维,并根据这个模型和实验测量结果研究耳蜗电极植入的相关参数。Zhang 等<sup>[23]</sup>通过包含螺旋形耳蜗的整耳有限元模型发现,圆窗逆向激励对基底膜的激励比卵圆窗来源的正向激励更有效;人工耳蜗植入电极会

导致基底膜高频听力的损失,但保留了部分低频听力。Böhnke 等<sup>[24]</sup>根据耳蜗的几何模型建立了螺旋形的耳蜗有限元模型,前庭结构并不包含在该模型中;并在此基础上研究骨传导相关机制,证实临床上镫骨切除会增强骨传导的现象。Gan 等<sup>[25]</sup>建立螺旋结构耳蜗的有限元模型,并据此分析耳蜗基底膜对频率信息的调制作用。

Handler 等<sup>[26]</sup>通过有限元模拟,对前庭植入电极参数进行优化。Santos 等<sup>[27]</sup>建立可用于前庭康复模拟的半规管有限元模型。Liu 等<sup>[28]</sup>建立具有单一流体结构耳蜗的整耳有限元模型。Kim 等<sup>[29]</sup>在 2014 年建立包含内耳流体域的整耳有限元模型,除半规管、前庭及耳蜗的外淋巴流体域外,尚包含螺旋形的基底膜结构,通过该模型进一步研究骨传导激励下基底膜 Hook 区域的重要性。简化的螺旋形耳蜗模型已经建立,并且模型中还包含半规管结构。

高保真度的豚鼠耳蜗三维有限元模型已建立,并被验证可用于研究豚鼠人工耳蜗电极植入的模拟。Plontke 等<sup>[30]</sup>运用豚鼠耳蜗的三维有限元模型,计算在圆窗给予甲泼尼龙后,药物在耳蜗内的扩散和分布。建立豚鼠耳蜗毛细胞纤毛结构的三维有限元模型,发现侧连接对位于较高纤毛上的机电转换离子通道有保护作用,使得同一个外毛细胞所承受的应力处在相似的水平。杨琳等<sup>[31]</sup>通过豚鼠耳蜗的组织切片建立豚鼠 Corti 器的二维有限元模型,发现静纤毛在不与盖膜直接接触时更容易受兴奋性刺激。

## 3 Corti 器的有限元模型

1996 年 Kolston 等<sup>[32]</sup>发表其建立的简化 Corti 器三维有限元模型,结果验证耳蜗盖膜和 Deiters 细胞的机械性对耳蜗放大器的影响。Duncan 等<sup>[33]</sup>通过建立耳蜗毛细胞的三维有限元模型发现,顶连接的应力与纤毛束的依次增高成比例。Cai 等<sup>[34]</sup>建立耳蜗横截面的二维有限元模型发现,耳蜗盖膜运动的径向分量与网状板相位的差异促进耳蜗底至耳蜗顶部的外毛细胞在适当频率处发生弯曲。Andoh 等<sup>[35]</sup>通过 Corti 器及其周围流体的二维有限元模型,并研究耳蜗流体的快波和慢波流动。Nam 等<sup>[36]</sup>建立 Corti 器及其周围流体的三维有限元模型发现,毛细胞的整体运动对纤毛变形较基底膜变形更有效。Zagadou 等<sup>[37]</sup>通过 Corti 器及其周围流体的三维有限元模型发现,如耳蜗放大器的许多非经

典模型所显示的,Corti 隧道提供了额外的纵向耦合源。

#### 4 研究现状和未来发展趋势分析

无论在广度还是深度上,有限元方法在内耳的生物力学机制研究方面均有较大发展。通过与实验相结合,极大地丰富了对内耳病理生理机制的认识。但无论是数学模型还是有限元模型,都主要集中于单独研究耳蜗或半规管的生物力学机制,也有文献<sup>[38]</sup>报道的内耳模型虽包含前庭和半规管的外形,但并没有同时建立分隔内外淋巴液的内耳膜性结构,及被其分隔开的半规管、椭圆囊和球囊等。目前尚未见半规管、前庭和耳蜗综合集成的、同时包含膜迷路和骨迷路的多腔流体结构的全耳有限元模型。因此,在内耳整体水平下的内、外淋巴液和膜迷路之间的交互作用便难以分析,例如膜迷路积水这样的病变类型。内耳的半规管通过前庭和耳蜗联合成一体,局部模型难以反映整体特性。因此,一个具有半规管、前庭和耳蜗结构,并包含骨迷路和膜迷路的全内耳生物力学模型十分必要。总之,构建完善的内耳模型将是未来的研究趋势。

由于人内耳整体长度为 2 cm 左右,相对于内耳整体尺寸,内耳膜迷路膜结构厚度仅为 2~3  $\mu\text{m}$ ,而球囊斑上的耳石膜也仅 15  $\mu\text{m}$  左右,为达到计算精度,将会对这一部分结构用更细密的网格表示,模型总体尺度跨越约 20 万倍。这对于建模和分析是一个考验,增加网格数量将需要更强大的计算能力,对工作站的要求较高。并且,网格的数量增加并不一定能够获得更精确的计算结果。因此,在建立这样的整体模型时,需要去平衡结构的复杂性和计算机运算能力间的矛盾,并选择合适的计算软件和算法来达到构建模型的目的。

因此,构建具有半规管、前庭和耳蜗结构,包含骨迷路和膜迷路的全内耳生物力学模型,并平衡内耳结构的复杂性和计算机运算能力是将来需要着重解决的问题和难点。

**利益冲突:**所有作者声明不存在利益冲突。

#### 参考文献

[1] MARNELL D, JABEEN T, NAM J H. Hydrostatic measurement and finite element simulation of the compliance of the organ of Corti complex[J]. *J Acoust Soc Am*, 2018, 143(2): 735.

[2] COOPER N P, VAVAKOU A, VAN DER HEIJDEN M. Vibration hotspots reveal longitudinal funneling of sound-evoked motion in the mammalian cochlea[J]. *Nat Commun*, 2018,9(1): 3054.

[3] DING C R, XU X D, WANG X W, et al. Effect of endolymphatic hydrops on sound transmission in live guinea pigs measured with a laser Doppler vibrometer[J]. *Neural plast*, 2016,2016: 8648297.

[4] CHENG Y S, RAUFER S, GUAN X, et al. Superior canal dehiscence similarly affects cochlear pressures in temporal bones and audiograms in patients[J]. *Ear Hear*,2020,41(4): 804-810.

[5] ALHUSSAINI M A, BANAKIS HARTL R M, BENICHOUX V, et al. Intracochlear pressures in simulated otitis media with effusion; a temporal bone study[J]. *Otol Neurotol*, 2018, 39(7):e585-e592.

[6] RABBITT R D, DAMIANO E R, GRANT J W. Biomechanics of the semicircular canals and otolith organs [M]. New York: Springer, 2004.

[7] 苏海军,徐明瑜. 耳石器官广义分数阶粘弹性动力学模型 [J]. *中国生物医学工程学报*, 2001, 20(1): 46-52. SU H J, XÜ M Y. Generalized visco-elastic model of otolith organs with fractional order [J]. *Chinese Journal of Biomedical Engineering*, 2001, 20(1): 46-52.

[8] GRANT W, CURTHOYS I. Otoliths-accelerometer and seismometer; implications in vestibular evoked myogenic potential (VEMP)[J]. *Hear Res*, 2017,353: 26-35.

[9] IVERSEN M M, RABBITT R D. Wave mechanics of the vestibular semicircular canals[J]. *Biophys J*, 2017,113(5): 1133-1149.

[10] RAJGURU S M, IFEDIBA M A, RABBITT R D. Three-dimensional biomechanical model of benign paroxysmal positional vertigo [J]. *Ann Biomed Eng*, 2004, 32(6): 831-846.

[11] IFEDIBA M A, RAJGURU S M, HULLAR T E, et al. The role of 3-canal biomechanics in angular motion transduction by the human vestibular labyrinth[J]. *Ann Biomed Eng*, 2007,35(7): 1247-1263.

[12] KONDRACHUK A V. Finite element modeling of the 3D otolith structure[J]. *J Vestib Res*, 2001, 11(1): 13-32.

[13] SHEN S, ZHAO F, CHEN Z, et al. Biomechanical analysis of angular motion in association with bilateral semicircular canal function[J]. *Biophys J*, 2020, 118(3):729-741

[14] BOSELLI F, OBRIST D, KLEISER L. Vortical flow in the utricle and the ampulla; a computational study on the fluid dynamics of the vestibular system [J]. *Biomech Model Mechanobiol*, 2013,12(2): 335-348.

[15] WU C, YANG L, DAI P, et al. Dynamic analysis of fluid-structure interaction of endolymph and cupula in the lateral semicircular canal of inner ear[J]. *J Hydrodynam B*,2011,23(6): 777-783.

- [16] KIM N, HOMMA K, PURIA S. Inertial bone conduction; symmetric and anti-symmetric components[J]. *J Assoc Res Otolaryngol*, 2011,12(3): 261-279.
- [17] KOIKE T, SAKAMOTO C, SAKASHITA T, et al. Effects of a perilymphatic fistula on the passive vibration response of the basilar membrane [J]. *Hear Res*, 2012, 283 (1-2): 117-125.
- [18] ZHOU L, FENG M, WANG W, et al. Study on the role of ossicular joint using finite element method[J]. *J Mech Med Biol*, 2016,16(04): 1650041.
- [19] ZHOU K, LIU H, YANG J, et al. Influence of middle ear disorder in round-window stimulation using a finite element human ear model[J]. *Acta Bioeng Biomech*, 2019, 21 (1): 3-12.
- [20] LIU H, ZHANG H, YANG J, et al. Influence of ossicular chain malformation on the performance of round-window stimulation; a finite element approach[J]. *Proc Inst Mech Eng H*, 2019,233(5): 584-594.
- [21] 赵禹, 张烽翔, 刘后广, 等. 外耳道与中耳腔对气传导及骨传导影响的人耳有限元模型研究[J]. *临床耳鼻咽喉头颈外科杂志*, 2019,33(3): 251-254,258. ZHAO Y, ZHANG Y X, LIU H G, et al. Human ear finite element model study of the effects of ear canal and middle ear cavity on air conduction and bone conduction[J]. *Journal of Clinical Otorhinolaryngology Head and Neck Surgery*, 2019,33(3): 251-254,258.
- [22] BAI S, ENCKE J, OBANDO-LEITÓN M, et al. Electrical stimulation in the human cochlea; a computational study based on high-resolution micro-CT scans[J]. *Front Neurosci*, 2019,13: 1312.
- [23] ZHANG X, GAN R Z. A comprehensive model of human ear for analysis of implantable hearing devices[J]. *IEEE Trans Biomed Eng*, 2011,58(10): 3024-3027.
- [24] BOHNKE F, ARNOLD W. Bone conduction in a three-dimensional model of the cochlea [J]. *ORL J Otorhinolaryngol Relat Spec*, 2006,68(6): 393-396.
- [25] GAN R Z, REEVES B P, WANG X. Modeling of sound transmission from ear canal to cochlea[J]. *Ann Biomed Eng*, 2007,35(12): 2180-2195.
- [26] HANDLER M, SCHIER P P, FRITSCHER K D, et al. Model-based vestibular afferent stimulation: modular workflow for analyzing stimulation scenarios in patient specific and statistical vestibular anatomy [J]. *Front Neurosci*, 2017,11:713.
- [27] SANTOS C F, BELINHA J, GENTIL F, et al. A computational framework to simulate the endolymph flow due to vestibular rehabilitation maneuvers assessed from accelerometer data[J]. *Comput Methods Biomech Biomed Engin*, 2018,21(6): 461-469.
- [28] LIU Y, LI S, SUN X. Numerical analysis of ossicular chain lesion of human ear[J]. *Acta Mech Sin*, 2009, 25 (2): 241-247.
- [29] KIM N, STEELE C R, PURIA S. The importance of the hook region of the cochlea for bone-conduction hearing[J]. *Biophys J*, 2014,107(1): 233-241.
- [30] PLONTKE S K, SIEDOW N, WEGENER R, et al. Cochlear pharmacokinetics with local inner ear drug delivery using a three-dimensional finite-element computer model[J]. *Audiol Neurootol*, 2007,12(1): 37-48.
- [31] 杨琳, 戴培东, 华诚, 等. 盖膜与内毛细胞静纤毛相互作用的生物力学分析[J]. *解剖学报*, 2009, 40(2): 283-287. YANG L, DAI P D, HUA C, et al. Mechanical analysis of interaction between tectorial membrane and inner hair cell stereocilia[J]. *Acta Anatomica Sinica*, 2009,40(2):283-287.
- [32] KOLSTON P J, ASHMORE J F. Finite element micromechanical modeling of the cochlea in three dimensions [J]. *J Acoust Soc Am*, 1996,99(1): 455-467.
- [33] DUNCAN R K, GRANT J W. A finite-element model of inner ear hair bundle micromechanics[J]. *Hear Res*, 1997, 104(1-2): 15-26.
- [34] CAI H, SHOELSON B, CHADWICK R S. Evidence of tectorial membrane radial motion in a propagating mode of a complex cochlear model[J]. *Proc Natl Acad Sci U S A*, 2004, 101(16): 6243-6248.
- [35] ANDOH M, WADA H. Prediction of the characteristics of two types of pressure waves in the cochlea: theoretical considerations [J]. *J Acoust Soc Am*, 2004, 116 (1): 417-425.
- [36] NAM J H, FETTIPLACE R. Force transmission in the organ of Corti micromachine[J]. *Biophys J*, 2010,98(12): 2813-2821.
- [37] ZAGADOU B F, MOUNTAIN D C. Analysis of the cochlear amplifier fluid pump hypothesis [J]. *J Assoc Res Otolaryngol*, 2012,13(2): 185-197.
- [38] YAO W J, CHEN Y Q, MA J W, et al. Numerical simulation on the dynamic behavior of the basilar membrane in the spiral cochlea[J]. *Biomed Res*, 2016, 27(3): 977-984.

[本文编辑] 王迪, 贾泽军