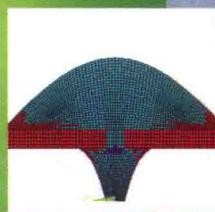


虚拟手术系列专著

人体组织有限元模型 构建、分析及辅助医疗

王沫楠 著



科学出版社

虚拟手术系列专著

人体组织有限元模型构建、分析 及辅助医疗

王沫楠 著

北 京

内 容 简 介

本书以人体组织有限元模型构建、分析及辅助医疗为核心内容,详细叙述有限单元法在人体组织建模中的应用、人体组织有限元模型构建方法、股骨有限元模型、骨折愈合仿真模型、股骨颈骨折内固定方式优选系统、股骨假体结构与材料性能的多目标优化、关节软骨有限元模型、骨骼肌有限元模型等研究内容。本书在建立股骨胞元理论力学模型、基于血液供给条件和力学环境的骨折愈合仿真、辅助医疗软件设计、基于模糊物元法的假体多目标优化等方面的介绍具有创新性,解决了人体组织有限元模型构建、分析及辅助医疗研究领域遇到的诸多关键问题,通过基础理论描述与应用实例分析相结合的叙述方式,能为计算机辅助医疗相关方向的研究者提供切实的帮助。

本书适合从事人体组织建模、虚拟手术、计算机辅助医疗、医疗软件设计、医疗机器人等领域教学、科研与开发的教师、学生和研发人员等阅读。

图书在版编目(CIP)数据

人体组织有限元模型构建、分析及辅助医疗/王沐楠著. —北京: 科学出版社, 2017.6

(虚拟手术系列专著)

ISBN 978-7-03-053520-7

I. ①人… II. ①王… III. ①人体组织学—有限元—结构模型—研究 IV. ①R329

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2017) 第 136011 号

责任编辑: 阙 瑞 / 责任校对: 贾娜娜
责任印制: 张 倩 / 封面设计: 蓝正设计

科学出版社出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码: 100717

http: //www.sciencep.com

新科印刷有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2017 年 6 月第 一 版 开本: 720 × 1000 1/16

2017 年 6 月第一次印刷 印张: 15 1/4

字数: 295 000

定价: 86.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

前 言

传统的手术培训方式是口述、演示，缺点是培训周期长、培训效果差；或者通过动物、尸体试验完成手术培训，缺点是培训成本昂贵，无法重复利用，备受社会争议。传统的手术规划方式是通过二维医学图像测量和简化的数学模型计算，凭借经验和病史确定是否需要手术、如何进行手术，缺点是手术成功率低。如何利用有效的方法解决目前面临的问题？而该方法能够帮助医生通过无限次试验去找到降低手术风险、提高手术质量的影响因素和有效办法。解决途径是通过应用计算机仿真技术结合生物力学原理、有限元方法建立数字化仿真模拟系统。核心技术是人体组织有限元模型构建与分析，核心技术可以分解为几何建模、网格划分、骨组织有限元模型、关节软骨有限元模型、骨骼肌有限元模型、皮下脂肪组织有限元模型等。

本书提出构建人体组织生物力学模型有限元仿真平台，设计的人体组织几何建模算法、网格划分算法、骨生物力学有限元分析算法、关节软骨生物力学有限元分析算法、肌肉生物力学有限元分析算法，既能够真实再现人体组织力学特性又能够通过自主编程实现仿真计算，开辟了计算机辅助医疗新的有效途径。通过构建人体组织有限元模型，能够针对不同患者进行个性化的测试与分析，帮助医生进行外科诊断；利用分析数据帮助医生制定合理的手术方案，选择最佳手术路径，减小手术损伤，减少邻近组织损害和提高手术成功率；人体组织有限元模型能够作为仿真试验平台，进行多次重复试验研究，节省费用，避免人道主义争议；在股骨颈骨折内固定方式优选、假体优化设计等方面实现了临床应用，在理论研究成果与临床应用方面均有突破。

本书在介绍有限单元法在人体组织建模中的应用等基础研究背景的基础上，详述人体组织有限元模型的主要形式，包括骨组织有限元模型、关节软骨模型、骨骼肌有限元模型、骨折愈合有限元模型、股骨颈骨折内固定方式有限元分析、假体优选，涉及简化数学模型、线弹性模型、超弹性模型、弹塑性模型、黏弹性模型，首次提出利用胞元理论模型构建非线性各向异性人体骨组织生物力学模型，通过自主编程实现有限元模型仿真，发现了比传统经验模型更精确的骨组织建模方法，并进行了试验验证与模型评价。建立了肌肉组织的非线性超弹性生物力学模型并通过自主编程实现力学模型的有限元仿真计算。首次在骨折愈合过程仿真中引入三维骨折模型和 21 条模糊规则，并在 Visual Studio 环境下实现程序编译，

仿真结果数据全部分布在试验数据平均偏差范围内,骨折愈合模型在精确性方面具有优势。首次利用有限元方法结合模糊物元法进行多目标优化进而实现对股骨假体的材料匹配方案的优选,帮助医生依据专门患者 CT (computed tomography) 图像选择最佳股骨假体结构和材料。

本书共分为 8 章:第 1 章有限单元法在人体组织建模中的应用;第 2 章人体组织有限元模型构建与分析;第 3 章 MATLAB 环境下股骨生物力学建模及有限元仿真;第 4 章基于模糊逻辑和有限元方法的骨折愈合仿真;第 5 章面向临床应用的股骨颈骨折治疗方案优选系统实现;第 6 章基于结构与材料性能综合评价的股骨假体优选;第 7 章关节软骨生物力学模型的建立及其有限元验证;第 8 章骨骼肌的生物力学建模及其有限元解算。

本书的出版得到了国家自然科学基金项目(编号 61272387, 61572159)、教育部新世纪优秀人才支持计划(编号 NCET-13-0756)、黑龙江省杰出青年科学基金(编号 JC201302)、黑龙江省留学回国人员科技项目择优资助(重点项目)的支持。杨宁、张凯参与了第 5 章的编写工作,杨宁、孙磊、李长青参与了第 6 章的编写工作,李鹏程、王磊参与了第 7 章的编写工作。

由于作者水平有限,书中难免存在不足之处,敬请读者批评指正。

作 者

2017 年 1 月

目 录

前言

第 1 章 有限单元法在人体组织建模中的应用	1
1.1 有限单元法的基本概念	1
1.2 有限单元法的解题步骤	2
1.3 有限元软件的发展趋势	3
1.4 有限单元法在人体组织建模中的应用实例	4
1.5 小结	20
参考文献	20
第 2 章 人体组织有限元模型构建与分析	24
2.1 人体结构三维数字模型的建立	24
2.2 人体三维数字模型数值模拟的数学-力学原理	26
2.3 人体组织超弹性力学行为有限元分析	33
2.3.1 国外生物组织超弹性研究简介	33
2.3.2 弹性问题的基本理论与有限元数值实现	35
2.3.3 超弹性问题的有限元解法	38
2.3.4 程序介绍——Newton-Raphson 迭代法	41
2.4 小结	42
参考文献	42
第 3 章 MATLAB 环境下股骨生物力学建模及有限元仿真	44
3.1 股骨生物力学模型	44
3.1.1 股骨生物力学模型的建立方案	44
3.1.2 股骨表观密度非均匀分布模型	46
3.1.3 股骨各向异性力学模型	49
3.2 股骨有限元模型	54
3.2.1 股骨几何模型	54
3.2.2 股骨网格划分	56
3.2.3 股骨弹性模量赋值	57
3.3 MATLAB 环境下股骨有限元分析及仿真结果评价	60
3.3.1 MATLAB 仿真环境	60

3.3.2	MATLAB 环境下股骨有限元仿真及仿真结果评价	62
3.4	小结	68
	参考文献	68
第 4 章	基于模糊逻辑和有限元方法的骨折愈合仿真	70
4.1	力学调控的组织分化愈合模型	70
4.1.1	骨的结构及骨折愈合	70
4.1.2	骨折力学生物学	73
4.1.3	骨功能适应性	75
4.1.4	骨折愈合仿真算法	76
4.2	力学模型的有限元解算及骨间动度分析	79
4.2.1	骨痂各向同性力学模型	80
4.2.2	骨折力学模型的有限元解算	81
4.2.3	调控组织分化的力学激励	85
4.2.4	骨折外固定力学加载	87
4.3	骨痂组织分化的生物学调控	89
4.3.1	生物组织浓度的状态变量	89
4.3.2	初始条件及边界条件设定	90
4.3.3	模糊控制组织分化模型建立	90
4.4	骨折愈合模拟仿真分析及验证	96
4.4.1	骨折有限元网格模型建立	97
4.4.2	骨折愈合模拟的程序实现	99
4.4.3	骨折愈合模拟数值验证	101
4.4.4	骨间稳定性对愈合的影响分析	104
4.4.5	血液敏感性分析	105
4.5	小结	106
	参考文献	107
第 5 章	面向临床应用的股骨颈骨折治疗方案优选系统实现	109
5.1	基于 VC++ 的 ANSYS 二次开发技术	110
5.1.1	ANSYS 二次开发技术简介	110
5.1.2	基于 Visual C++ 的 ANSYS 二次开发技术简介	111
5.1.3	软件系统的总体设计和流程分析	113
5.2	股骨颈骨折内固定有限元参数化建模	115
5.2.1	股骨颈参数化有限元模型的建立	115
5.2.2	股骨颈骨折内固定有限元模型的建立	118
5.2.3	选择单元类型与定义材料属性	120

5.2.4 股骨的网格划分	124
5.2.5 股骨颈骨折内固定的约束与载荷处理	125
5.2.6 股骨颈骨折内固定的求解	126
5.2.7 批处理图片的生成	127
5.2.8 评价准则的设定	128
5.3 股骨颈骨折虚拟手术优选系统的开发	129
5.3.1 欢迎界面闪屏的实现	129
5.3.2 患者基本信息获取输入模块	130
5.3.3 内固定方式获取输入模块	133
5.3.4 ANSYS 批处理实现模块	136
5.3.5 ANSYS 分析结果获取输入模块	137
5.3.6 ANSYS 批处理结果优选模块	138
5.4 股骨颈骨折虚拟手术优选系统的应用	142
5.4.1 建立参数化的有限元模型	142
5.4.2 有限元解算	143
5.4.3 ANSYS 批处理结果的获取	144
5.4.4 ANSYS 批处理结果显示与优选	144
5.5 小结	145
参考文献	146
第 6 章 基于结构与材料性能综合评价的股骨假体优选	148
6.1 股骨假体结构设计	148
6.1.1 髋关节简介	149
6.1.2 股骨假体研制过程中存在的问题	150
6.1.3 股骨假体内轮廓线的提取	151
6.1.4 股骨假体建模	154
6.1.5 股骨假体的虚拟装配	157
6.2 常用股骨假体材料及性能对比	158
6.2.1 生物医学金属材料	159
6.2.2 生物陶瓷材料	159
6.2.3 复合材料	160
6.2.4 股骨假体材料性能对比	160
6.3 股骨假体有限元仿真分析	161
6.3.1 股骨头有限元模型建立	162
6.3.2 三种股骨头模型对髋关节影响分析	165
6.3.3 股骨假体应力和变形分析	167

6.3.4 股骨假体疲劳寿命分析	172
6.4 股骨假体性能评价方法	176
6.4.1 股骨假体性能评价指标	176
6.4.2 股骨假体优选方法与评价模型	179
6.5 股骨假体优选及优选流程	181
6.5.1 股骨假体优选	181
6.5.2 定制式股骨假体优选流程	183
6.6 小结	185
参考文献	185
第7章 关节软骨生物力学模型的建立及其有限元验证	187
7.1 静态髋关节生物力学模型的建立	188
7.1.1 髋关节三维力学模型建立	188
7.1.2 模型参数的确定	190
7.1.3 单足静立状态髋关节模型方程	191
7.2 静态髋关节生物力学模型的验证	193
7.2.1 模型验证方法的确定	193
7.2.2 有限元分析理论及计算	194
7.3 髋关节有限元模型的建立	199
7.3.1 有限元模型流程	199
7.3.2 股骨-髋臼几何建模	200
7.3.3 不同 CE 角的髋关节几何建模	202
7.3.4 关节软骨几何建模	202
7.3.5 几何模型的修正与优化	203
7.4 髋关节有限元分析	206
7.4.1 有限元模型的生成	206
7.4.2 边界条件与载荷设定	207
7.4.3 应力计算分析	207
7.5 髋关节生物力学模型的评价	209
7.5.1 生物力学模型评价指标	209
7.5.2 生物力学模型评价	209
7.5.3 静态髋关节力学模型临床意义	213
7.6 小结	214
参考文献	215
第8章 骨骼肌的生物力学建模及其有限元解算	217
8.1 肌肉组织的生物力学建模	217

8.1.1 肌肉组织的结构及其生物力学特性	217
8.1.2 肌肉组织的非线性超弹性模型	219
8.2 肌肉组织模型的有限元解算	220
8.2.1 材料非线性问题	220
8.2.2 有限元三维网格单元	225
8.2.3 几何非线性问题	227
8.3 小结	234
参考文献	234

第1章 有限单元法在人体组织建模中的应用

有限单元法是一种广泛应用于工业研究领域的分析工具。在医学领域，有限元模型可以帮助人们更好地研究人体的生物力学特点。人体具有非常复杂的结构，利用有限元软件的建模功能，可以建立三维人体结构模型，并把通过材料力学方法测量的生物力学材料特性赋予此模型，在计算机中建立起虚拟的“试验标本”，然后对模型进行试验条件仿真（几何约束、固定载荷、冲击载荷、温度特性等），模拟拉伸、弯曲、扭转、三点弯、抗疲劳等力学试验条件，通过求解可以获得该虚拟对象与试验标本类似的生物力学指标，例如，对象的刚度、任意部位的结构变形、应力/应变分布、内部能量变化、极限破坏等变化情况。有限元研究具有试验方法无法比拟的优势：它可以根据需要产生无数个各种各样的标本，同一个标本在虚拟计算中可进行无数次加载或组合而不会被损坏，标本也可以进行修正以方便模拟任何病理状态。有限元模型也可以提供试验不能得到的正常生理信息，例如，椎间盘和椎骨的应力分布。

1.1 有限单元法的基本概念

在实际工程中，对许多力学问题或场问题，人们已经得到了它们应当遵循的基本方程（常微分方程或偏微分方程）和相应的定解条件。弹性力学告诉我们，一般的固体力学问题需要满足几何关系、物理关系和平衡方程（或运动方程）。能用解析的方法求出精确解的只是方程性质比较简单、几何边界相当规则的少数问题。大多数的实际工程问题，或由于几何边界比较复杂，或由于问题的某个或某些方面表现为非线性，很难得到解析解。对于这类问题，工程和研究人員经常采用两种方法来解决。一种方法就是引入简化假定，将相对复杂的问题简化为可以通过解析方法求解的简单问题。这种方法的局限性是显而易见的，因为过多的简化可能导致不精确甚至错误的结果。另一种方法就是借助计算机利用数值方法求解。目前，数值解法已成为解决工程问题的最重要的方法之一。

在所有数值解法中，有限差分法是人們较早普遍采用的数值方法。借助于有限差分技术，人們能够比较容易地得到一些复杂问题的解。目前，这一方法仍然被广大科研和工程人員采用。但是，当遇到复杂的几何形状和边界条件时，有限差分法解的精度受到限制，甚至发生求解困难。

随着电子计算机的飞速发展和广泛应用,一种新的功能强大、适用范围广泛的数值方法——有限单元法出现了。“有限单元法”(finite element method, FEM)这一名称最早是由 Clough^[1]在 1960 年的一篇关于平面弹性问题的论文中提出的。其实,有限单元法最初是在 20 世纪 50 年代作为处理固体力学问题的一种方法出现的,它是结构分析矩阵方法的一个分支。据文献记载,早在 1943 年 Courant^[2]就应用了“单元”,他在求解 St.Venant 扭转问题时,将杆的横截面剖分为三角形“单元”,假设翘曲函数在三角形单元中呈线性分布。在 Courant 之后 10 多年,这一方法逐渐流行起来。

Besseling^[3]于 1963 年将有限单元法和传统的里茨(Ritz)法比较后指出,有限单元法是里茨法的另一种形式,其试函数就是分片插值函数,在单元上解析,在整个域上仅满足连续的条件。试函数的这一改进,使有限单元法比普通的里茨法更灵活,适应性更强。目前,有限单元法在工程界获得了广泛的应用,已成为杰出的工程分析工具。

我国学者对有限单元法的创建和发展也有不少贡献。著名学者冯康^[4]在 1965 年提出的“基于变分原理的差分格式”,就是有限单元法。卞学鑽^[5]指出,对某些边值问题,有限单元法和有限差分法得出的方程组是一致的。

1.2 有限单元法的解题步骤

对于有限单元法,其解题步骤可归纳为^[6]以下几部分。

(1) 建立积分方程:根据变分原理或方程余量与权函数正交化原理,建立与微分方程初边值问题等价的积分表达式,这是有限单元法的出发点。

(2) 区域单元剖分:根据求解区域的形状及实际问题的物理特点,将区域剖分为若干相互连接、不重叠的单元。区域单元划分是采用有限单元法的前期准备工作,这部分工作量比较大,除了给计算单元和节点进行编号和确定相互之间的关系,还要表示节点的位置坐标,同时还需要列出自然边界和本质边界的节点序号和相应的边界值。

(3) 确定单元基函数:根据单元中节点数目及对近似解精度的要求,选择满足一定插值条件的插值函数作为单元基函数。有限单元法中的基函数是在单元中选取的,由于各单元具有规则的几何形状,在选取基函数时可遵循一定的法则。

(4) 单元分析:将各个单元中的求解函数用单元基函数的线性组合表达式进行逼近;再将近似函数代入积分方程,并对单元区域进行积分,可获得含有待定系数(即单元中各节点参数值)的代数方程组,称为单元有限元方程。

(5) 总体合成:在得出单元有限元方程之后,将区域中所有单元有限元方程按一定法则进行累加,形成总体有限元方程。

(6) 边界条件的处理: 一般边界条件有三种形式, 分为本质边界条件(狄利克雷边界条件)、自然边界条件(黎曼边界条件)、混合边界条件(柯西边界条件)。对于自然边界条件, 一般在积分表达式中可自动得到满足。对于本质边界条件和混合边界条件, 需按一定法则对总体有限元方程进行修正满足。

(7) 解有限元方程: 根据边界条件修正的总体有限元方程组, 是含所有待定未知量的封闭方程组, 采用适当的数值计算方法求解, 可求得各节点的函数值。

1.3 有限元软件的发展趋势

纵观当今国际上有限元软件的发展情况, 可以看出有限元分析方法的一些发展趋势。

(1) 与 CAD (computer aided design) 软件的无缝集成。当今有限元分析软件的一个发展趋势是与通用 CAD 软件的集成使用, 即在用 CAD 软件完成部件和零件的造型设计后, 能直接将模型传送到 CAE (computer aided engineering) 软件中进行有限元网格划分并进行分析计算, 如果分析的结果不满足设计要求则重新进行设计和分析, 直到满意为止, 从而极大地提高了设计水平和效率。为了满足工程师快捷地解决复杂工程问题的要求, 许多商业化有限元分析软件都开发了和著名的 CAD 软件的接口。有些 CAE 软件为了实现和 CAD 软件的无缝集成而采用了 CAD 的建模技术。

(2) 更为强大的网格处理能力。有限单元法求解问题的基本过程主要包括: 分析对象的离散化、有限元求解、计算结果的后处理三部分。由于结构离散后的网格质量直接影响到求解时间及求解结果的正确性与否, 近年来各软件开发商都加大了其在网格处理方面的投入, 使网格生成的质量和效率都有了很大的提高, 但在有些方面却一直没有得到改进, 如对三维实体模型进行自动六面体网格划分和根据求解结果对模型进行自适应网格划分, 除了个别商业软件做得较好, 大多数分析软件仍然没有此功能。

(3) 由求解线性问题发展到求解非线性问题。随着科学技术的发展, 线性理论已经远远不能满足设计的要求, 许多工程问题如材料的破坏与失效、裂纹扩展等仅靠线性理论根本不能解决, 必须进行非线性分析求解, 例如, 薄板成形就要求同时考虑结构的大位移、大应变(几何非线性)和塑性(材料非线性); 而对塑料、橡胶、陶瓷、混凝土及岩土等材料进行分析或需考虑材料的塑性、蠕变效应时则必须考虑材料非线性。众所周知, 非线性问题的求解是很复杂的, 它不仅涉及很多专门的数学问题, 还必须掌握一定的理论知识和求解技巧, 学习起来也较为困难。为此国外一些公司花费了大量的人力和物力开发非线性求解分析软件。它们的共同特点是具有高效的非线性求解器、丰富而实用的非线性材料库, 同时具有隐式和显式两种时间积分方法。

(4) 由单一结构场求解发展到耦合场问题的求解。有限元分析方法最早应用于航空航天领域, 主要用来求解线性结构问题, 实践证明这是一种非常有效的数值分析方法。而且从理论上也已经证明, 只要用于离散求解对象的单元足够小, 所得的解就可以足够逼近于精确值。现在用于求解结构线性问题的有限元方法和软件已经比较成熟, 发展方向是结构非线性、流体动力学和耦合场问题的求解。例如, 由于摩擦接触而产生的热问题, 金属成形时由于塑性功而产生的热问题, 需要结构场和温度场的有限元分析结果交叉迭代求解, 即“热力耦合”的问题。当流体在弯管中流动时, 流体压力会使弯管产生变形, 而管的变形又反过来影响到流体的流动……这就需要对结构场和流场的有限元分析结果交叉迭代求解, 即所谓“流固耦合”的问题。由于有限元的应用越来越深入, 人们关注的问题越来越复杂, 耦合场的求解必定成为有限元软件的发展方向。

(5) 程序面向用户的开放性。随着商业化的提高, 各软件开发商为了扩大自己的市场份额, 满足用户的需求, 在软件的功能、易用性等方面花费了大量的投资, 但由于用户的要求千差万别, 不管他们怎样努力也不可能满足所有用户的要求, 因此必须给用户一个开放的环境, 允许用户根据自己的实际情况对软件进行扩充, 包括用户自定义单元特性、用户自定义材料本构(结构本构、热本构、流体本构)、用户自定义流场边界条件、用户自定义结构断裂判据和裂纹扩展规律等。

(6) 软件开发强强联合。根据有限元软件在装备行业的应用情况, 有限元软件之间的强强联合必将更加有效地推进有限元技术的应用, 随着数值模拟软件的商业化和软件公司开发方向的专业化, 各数值模拟软件公司将会出现强强联合的局面, 以解决复杂装备产品的设计制造难题, 关注有限元的理论发展, 采用最先进的算法技术, 扩充软件的功能, 提高软件性能以满足用户不断增长的需求, 是有限元软件开发商的主攻目标, 也是其产品持续占有市场, 求得生存和发展的根本之道。

1.4 有限单元法在人体组织建模中的应用实例

近年来, 有限单元法在生物医学工程领域已经有了广泛的应用, 根据研究工作的性质, 有限单元法在生物医学工程中的应用大致可分为有限元方法应用理论、生物试验仿真、有限元建模等几个方面, 根据研究工作的对象, 有限单元法在生物医学工程中的应用大致可分为人体组织有限元模型构建与分析、医疗器械的力学性能评价与优化设计两个方面。有限单元法在人体组织建模中的应用应包括: 人体骨组织有限元模型、人体软组织有限元模型(可进一步细分为人体肌肉组织有限元模型、人体皮下脂肪组织有限元模型、人体皮肤、肌腱、韧带、神经、血

管等有限元模型)、人体关节软骨有限元模型、血液有限元模型等。按照建模步骤的不同,有限单元法在人体组织建模中的研究工作主要分布于几何建模算法的研究、网格划分算法的研究、人体组织本构方程的研究、力学平衡方程的求解方法研究,更进一步的扩展研究还包括人体组织变形算法研究、人体组织切割算法研究和可视化方面的研究。

1. 有限单元法在头部建模中的应用

经颅电刺激(transcranial electrical simulation, TES)的头部三维有限元模型对于理解脑区的电势、电流分布及TES作用机制具有重要意义。为了给TES仿真提供更精确和真实的头部三维实体有限元模型,利用真实成人头部CT(computed tomography)影像数据,通过三维图像重建、逆向工程计算及有限元网格划分,对包括脑组织、脑脊液、颅骨和头皮的4层人体头部组织进行有限元实体模型构建(图1.1)^[7]。

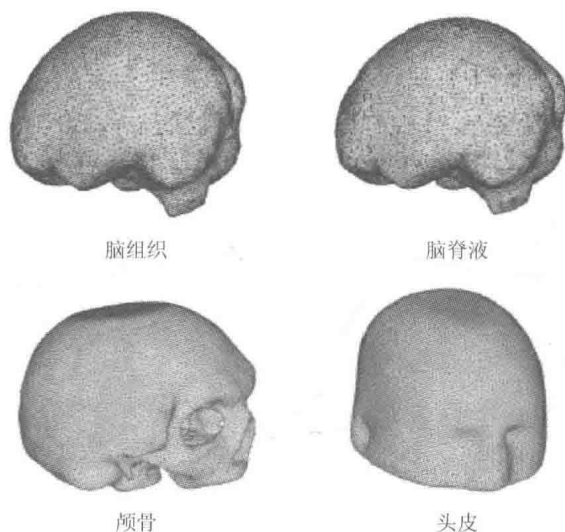


图 1.1 人体头部组织有限元模型

随着计算机技术的不断发展,数学模型逐渐成为研究头颈部损伤生物力学的重要工具。有限元模型在创伤性脑损伤生物力学机理研究中得到日益广泛的应用,迄今为止,研究人员已经建立了各种各样的有限元模型。例如,法国的ULPM (University of Louis Pasteur Model)^[8]、美国的WSUBIM (Wayne State University Brain Injury Model)^[9]、瑞典的KTH (Kungliga Tekniska Hogskolan)^[10]、爱尔兰的UCD-BTM (University College Dublin Brain Trauma Model)^[11]、新加坡国立大学等建立的头部有限元模型(图1.2)^[12]。这些有限元模型经试验验证后,进行碰撞载荷条件下的颅内压力和脑组织应力应变分析,对颅脑损伤机理

具有重要的参考价值。

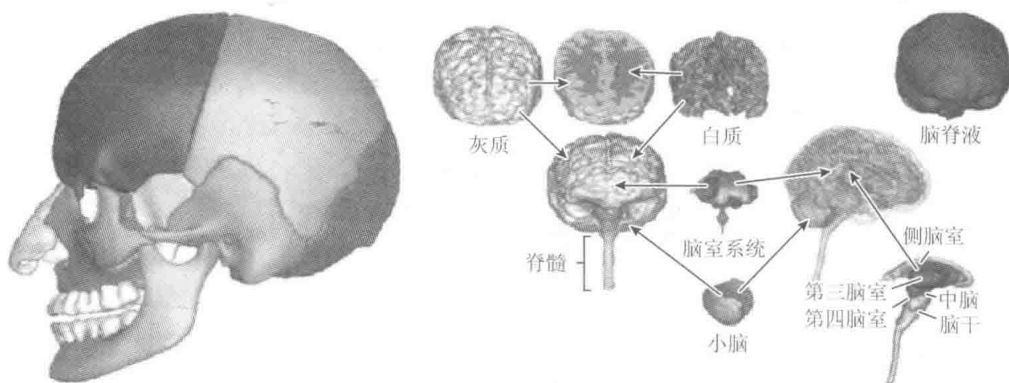


图 1.2 新加坡国立大学等建立的头部有限元模型

2. 有限单元法在颌面部建模中的应用

采集第 2 代中国数字化人体“男性第 23 号”头颅 CT 图像、咀嚼肌 MRI (magnetic resonance imaging) 图像及双侧颞下颌关节盘 MRI 图像, 构建数字化颌面部结构模型 (图 1.3) [13]。

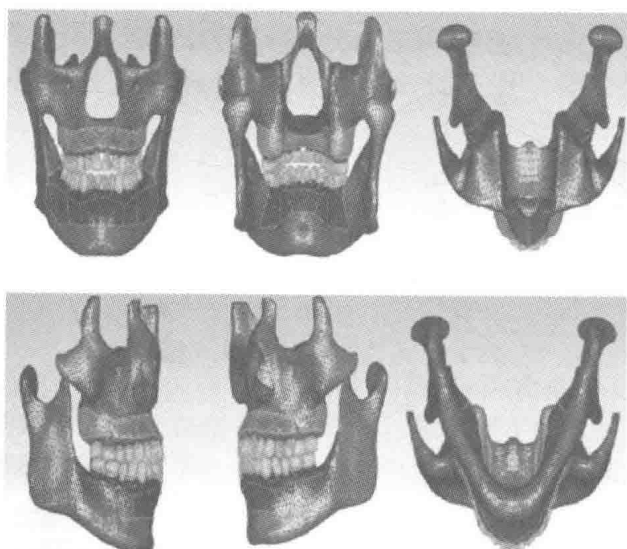


图 1.3 无缝连接的颌骨与牙槽骨精细模型

3. 有限单元法在脊柱建模中的应用

脊柱有限元模型最早提出于航空医学及结构设计领域, 主要用于评价基座

弹射冲击力如前方或侧方冲击力对飞行员的影响、结构分析的矩阵方法研究等。自从1974年Belytschko等^[14]在脊柱研究领域内提出有限单元法的应用后,有限元在脊柱生物力学的研究方面方兴未艾。为了更好地模拟脊柱运动的生理情况,Liu等^[15]于1975年提出了三维有限元模型,他们将髓核与纤维环作为同一标准来考虑。随着脊柱有限元研究的进一步深入,Lin等^[16]在上述基础上将纤维环和髓核赋予不同的材料常数,但对其附件未进行详细分析。鉴于此,1979年,Hakim等^[17]建立了腰椎有限元三维模型并计入了后部结构。包括棘上韧带和棘间韧带等,研究关节突在轴向加载运动中的传递作用。Goel等^[18]基于CT图像构建腰椎有限元模型,突破了传统的脊柱组成结构研究,从有限元分析中选取单元模式,赋予不同的材料常数建立模型,以便于分析当腰椎前屈、后伸和扭转时的椎体应力,使有限元的分析更为精细。2006年,Rohlmann等^[19]在前人研究的基础上加上肌肉有限元模型模拟人体运动的有效性,使得有限元模型更为详细具体。

腰椎滑脱可以是先天性腰椎发育不良,也可以是后天性获得。后天性腰椎滑脱主要是因各种机械性应力引起的,如外伤、剧烈运动等。50岁以后由于腰椎的退行性改变,也常容易诱发腰椎滑脱。Jebaseelan等^[20]提出腰椎三维有限元模型可以通过矢状面和冠状弯曲响应分析应用于青少年不良习惯引起的腰椎滑脱的研究,从应力机制方面验证青少年可以克服不良习惯避免腰椎滑脱。在骨质疏松症方面,Imai等^[21]提出通过有限元分析可以研究骨质疏松对老年妇女腰椎应力的影响。McDonald等^[22]通过开发多尺度有限元模型,证实骨质疏松性腰椎椎体压缩骨折的力学机制集中于全椎体和内部核心骨小梁。Kopperdahl等^[23]开展了不同年龄相关性骨质疏松椎体的抗压强度和刚度研究。Wagnac等^[24]通过胸腰椎有限元模型研究航天员在特殊大气环境下脊柱的运动、应力情况等,提出有限元模型在航天员活动中的应用价值。鲍春雨和刘晋浩^[25]提出,通过建立腰椎节段三维有限元模型以预防运动员在剧烈运动过程中的腰椎损伤,且近年来,有限元胸腰椎模型研究已在体育运动领域逐渐开展。另外,如将有限元模型应用于胸腰椎段材料力学的研究与应用,并利用有限元模型结合材料力学,为生物力学、医学等领域服务,有限元分析逐渐成为诸多科学领域的研究热点。图1.4为武汉大学建立的成年人腰椎-骨盆三维有限元模型^[26]。图1.5为正常人体胸腰段(T12-L2)运动节段的三维有限元模型。该模型能够实现运用有限元方法模拟腰椎爆裂骨折的过程,观察腰椎在轴向压缩载荷作用下松质骨内的应力分布情况^[27]。图1.6基于CT图像结合图像处理及有限元分析软件采用六面体网格建立完整的人体腰椎L4-L5活动节段三维有限元模型^[28]。