

# 生物机械 工程导论

王裕清 邓乐 李建中 编著

Introduction to  
Biomechanical  
Engineering



机械工业出版社  
CHINA MACHINE PRESS



**Introduction to Biomechanical Engineering**

# 生物机械工程导论

王裕清 邓乐 李建中 编著



机械工业出版社

本书构建了生物机械工程学科的基本框架,系统地论述了生物机械工程学科领域的基本内容,尤其注重其基本概念、基本理论和基本方法,特别注意对各种学术观点的兼收并蓄,努力反映该学科领域的最新成果。

全书共5篇18章:第1篇为生物机械工程基础;第2篇为人工器官;第3篇论述人体检测与信息处理;第4篇为仿生学与医用机器人;第5篇为生物机械设计,特别对生物机械的现代设计方法进行了介绍。

本书可供医学专业、仪器设备专业、医疗器械行业以及从事生物机械设计、开发、制造的技术人员学习参考,也可作为生物医学工程、医学影像、医疗器械、测控仪器与测控技术、机械工程及其自动化专业研究生和本科生的教材或教学参考书。

## 图书在版编目(CIP)数据

生物机械工程导论/王裕清等编著. —北京,机械工业出版社,2006.2

ISBN 7-111-18384-3

I. 生… II. 王… III. 生物工程:机械工程—研究  
IV. ①Q81②TH

中国版本图书馆CIP数据核字(2006)第009798号

机械工业出版社(北京市百万庄大街22号 邮政编码100037)

策划编辑:曾红

责任编辑:曾红 版式设计:冉晓华 责任校对:张莉娟 程俊巧

封面设计:陈沛 责任印制:洪汉军

北京京丰印刷厂印刷

2006年3月第1版·第1次印刷

169mm×239mm·17.25印张·670千字

0 001—4 000册

定价:38.00元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

本社购书热线电话(010)68326294

编辑热线电话(010)68351729

封面无防伪标均为盗版

# 序

生物机械工程是综合了生物学、医学和工程学的理论和方法发展起来的边缘性、交叉性学科，是生物医学工程学的重要组成部分。虽然它作为一门独立学科发展的历史不长，但由于其在保障人类健康、疾病预防、诊断、治疗、康复等方面所起的巨大作用，以及对于推动医学科学现代化方面的巨大贡献，它已成为现代医学的重要内容和支撑技术，它的发展符合现代科学技术的发展规律和发展方向，反映出现代科学技术综合化的发展趋势。

生物机械工程学的研究是以应用基础性研究为主，其领域十分广泛，并且随着科学技术的进步不断扩展。就现阶段而言，生物机械工程学的研究内容主要涉及生物学、生物力学、生物材料学、机械学、仿生学、电子学、计算机与信息科学、控制理论以及人工器官、生物检测与信息处理、治疗与康复的工程方法学等。

生物机械工程学的研究与应用已在生物医学工程学等领域发挥了巨大的作用，是国内外学者们研究的热点之一，而且已经取得了丰富的成果。但是，据笔者所知，国内尚没有系统地反映这些内容的专著。河南理工大学王裕清教授等所撰写的《生物机械工程导论》一书，构建了生物机械工程学的基本框架，填补了这方面的国内空白，倍感欣慰。这本书及时反映了生物机械工程领域的最新成果，特别是作者近几年的研究成果，相信这些内容一定能为国内同行提供有益的参考。

本书的特点，首先是在叙述过程中注重工程概念，用尽可能少的数学工具描述设计思想和工程技术；其次，内容丰富而精练，涵盖了生物机械工程领域几乎所有的方面，同时兼顾了医学、生物医学工程学、电学和机械工程等不同领域的读者。另外，在生物机械设计篇中，论述了人机工程设计和其他现代设计理论与方法，这些也是近年生物机械工程领域研究的重点方向。

本书是我国目前出版的第一部全面介绍生物机械工程学科的专著。相信这本书能够引起更多从事这方面研究的同行的兴趣，以推动我国生物机械工程研究活动的开展，推动相邻学科的发展。

中国科学院 院士 熊有伦  
华中科技大学教授

2005年12月10日

# 前 言

由于现代科学技术尤其是生物医学工程的迅速发展,机械工程与生物医学工程及其他技术结合越来越紧密,重要性日益明显,这就促进了“生物机械工程学”这门学科的产生和发展。

机械工程向生物医学工程领域的渗透,以及与电子技术、计算机技术的结合,使医疗设备、器械越来越向宜人化、拟人化、智能化、自动化方向发展,这是现代医疗仪器设备的主要特征。这种结合不是多因素的简单堆积,而是有机融合,从而赋予医疗仪器设备、器械优良的性能和多样的功能。实现这种有机融合的重要媒介之一就是生物机械工程学。

应该指出,到目前为止,我国生物机械工程学研究的深度和广度,与国外都有一定的差距。作者认为其主要原因首先是机械工程与生物医学工程的相互渗透意识还不普及;其次是未能普遍认识到二者结合的重要意义;再者国内缺乏较全面系统阐述生物机械工程学知识体系的著作。为机械工程和生物医学工程领域的读者,特别是年轻读者,介绍目前生物机械工程研究的新动向以及必要的基础知识,正是作者写作本书的初衷。

本书构建了生物机械工程学的基本框架,力求在阐明生物机械工程的基本概念、基本知识与基本方法的基础上,紧密结合生物医学工程实际,沟通和加强生物医学工程与机械工程学科知识之间的联系和融合。

本书着重阐述了生物机械工程基础、人工器官、人体检测与信息处理、仿生学与医用机器人、生物机械设计等内容,包含了生物机械工程学学科的主要内容。

作为涵盖多学科专业知识的著作,本书尽量从基本概念、基本知识入手,阐述上尽量通俗易懂,避免不必要的数学推导和深奥的医学专业知识,以利于具有不同知识背景的读者阅读。

本书可供医学专业、仪器设备专业以及从事生物机械设计、开发、制造的技术人员学习参考,也可作为生物医学工程、医学影像、医疗器械、测控仪器与测控技术、机械工程及其自动化专业研究生和本科生的教材或教学参考书。

本书是由王裕清教授主持,与邓乐博士、李建中教授等合作集体讨论、分工执笔,最后由王裕清教授定稿。在本书的成书过程中,郑征副教授、张登攀博士、韩素敏硕士协助做了不少工作,并撰写了部分章节。有幸得到中国科学院院士、华中科技大学熊有伦教授的支持和鼓励,并在百忙之中为本书作序。国际医学生物工程科学院院士、中国协和医科大学生物医学工程系杨子彬教授和天津大

学精密仪器及光电子工程学院徐可欣教授对本书的出版提出了许多宝贵的建议。本书的出版还得到了河南省重点学科的资金和机械工业出版社的支持与帮助，作者一并表示衷心感谢。

值得指出的是，我们参考了国内外学者的有关研究成果，在此表示衷心感谢。

生物机械工程学是一门新兴和交叉学科，限于作者的水平，本书中许多问题有待进一步研究。因此，书中不妥之处在所难免，希望读者不吝赐教。

作 者

2006年3月

# 目 录

序  
前言

## 第 1 篇 生物机械工程基础

<b>第 1 章 绪论</b> .....	2
1.1 生物机械工程的概 念 .....	2
1.1.1 生物机械工程概念的提出、背景及意义 .....	2
1.1.2 生物机械工程与传统意义的机械工程的联系与区别 .....	3
1.1.3 生物机械工程的任务和发展目标 .....	4
1.2 生物机械工程的地位 .....	4
1.3 生物机械工程的主要研究领域 .....	5
1.4 生物机械工程发展的基本条件与主要趋势 .....	8
1.4.1 发展生物机械工程的基本要求 .....	8
1.4.2 生物机械工程的主要发展趋势 .....	9
<b>第 2 章 人体系统及理论</b> .....	11
2.1 人体系统工程及人体组成 .....	11
2.1.1 人体系统的概念 .....	11
2.1.2 人体系统综合分析 .....	11
2.2 人体数学模型 .....	14
2.2.1 基于 B 样条曲面的人体模型 .....	15
2.2.2 基于 Hanavan 人体模型的无支撑运动数学模型 .....	19
2.2.3 基于 L-E 法和铰分解法的人体运动数学模型 .....	22
2.3 人体光学特性 .....	27
2.3.1 人体组织对自然辐射光的光学特性 .....	27
2.3.2 人体组织的自发射光 .....	32
2.4 人体电学特性 .....	34
2.4.1 细胞电活动和电特性 .....	34
2.4.2 人体组织和器官的电阻抗与电活动图 .....	42
2.5 人体机械特性 .....	49
2.5.1 人体转动惯量分析 .....	50
2.5.2 人体的振动特性 .....	53

<b>第3章 生物力学基础</b> .....	63
3.1 生物力学概述 .....	63
3.1.1 发展历史 .....	63
3.1.2 背景和需要 .....	64
3.2 生物力学的力学基础 .....	65
3.2.1 运动和力 .....	65
3.2.2 连续介质力学基础 .....	65
3.2.3 本构关系——流变学的主题 .....	75
3.2.4 生物流体力学基础 .....	82
3.3 活组织力学性质 .....	94
3.3.1 骨的力学性质 .....	95
3.3.2 软组织的力学性质 .....	95
3.3.3 关节软骨的力学性质 .....	99
3.3.4 生物粘弹性流体 .....	104
3.4 肌肉力学基础 .....	107
3.4.1 骨骼肌、心肌和平滑肌 .....	107
3.4.2 骨骼肌的微结构和收缩机理 .....	108
3.4.3 Hill 方程和 Hill 模型 .....	109
<b>第4章 生物材料学</b> .....	117
4.1 生物材料学概述 .....	117
4.2 天然生物材料 .....	118
4.2.1 结构特征 .....	118
4.2.2 类型 .....	118
4.2.3 天然生物材料的研究应用举例 .....	119
4.3 生物医用材料 .....	121
4.3.1 生物医用材料性能的要求 .....	121
4.3.2 生物医用材料类型 .....	121
4.3.3 材料反应和宿主反应 .....	127
4.3.4 生物医学材料应用研究举例 .....	128
4.4 仿生和组织工程材料 .....	129
4.4.1 仿生结构材料 .....	129
4.4.2 仿生智能材料 .....	130
4.4.3 组织工程材料 .....	131
4.5 生物相容性评价与生物学环境 .....	134
4.5.1 引言 .....	134
4.5.2 生物安全性 .....	134
4.5.3 生物功能性 .....	135



4.5.4 生物学环境 .....	137
-------------------	-----

## 第2篇 人工器官

<b>第5章 人工器官概述</b> .....	146
5.1 人工器官置换 .....	146
5.2 人工器官的发展历史和类型 .....	146
5.2.1 人工器官的发展历史 .....	146
5.2.2 人工器官的类型 .....	147
<b>第6章 呼吸、循环系统的人工器官</b> .....	149
6.1 人工心肺机 .....	149
6.2 人工心脏瓣膜 .....	149
6.2.1 概述 .....	149
6.2.2 人工心脏瓣膜的基本条件 .....	150
6.2.3 发展概况 .....	151
6.3 心脏起搏器 .....	153
6.3.1 心脏起搏器概述 .....	153
6.3.2 心脏起搏器模式和功能 .....	154
6.3.3 心脏起搏器电极和能源 .....	156
6.3.4 临床应用的现状 .....	157
6.4 人工心脏及心室辅助 .....	158
6.4.1 概述 .....	158
6.4.2 基本组成 .....	159
<b>第7章 血液净化、泌尿、免疫系统的人工器官</b> .....	164
7.1 人工肾脏 .....	164
7.2 人工血液 .....	164
7.2.1 人工血液的基本要求 .....	165
7.2.2 人工血液的种类 .....	165
7.3 人工肝脏 .....	168
7.3.1 概述 .....	168
7.3.2 组合型人工肝支持系统 .....	169
7.4 人工胰脏 .....	172
7.5 人工血管 .....	173
7.5.1 概述 .....	173
7.5.2 复合血管 .....	173
<b>第8章 运动、感觉系统的人工器官</b> .....	177
8.1 人工关节与假肢 .....	177
8.1.1 人工关节 .....	177

8.1.2 假肢 .....	184
8.2 人工耳蜗 .....	193
8.2.1 概述 .....	193
8.2.2 CI系统的工作原理与结构 .....	193
8.2.3 CI系统的语音处理方法 .....	196
8.2.4 影响CI效果的关键因素 .....	200
8.2.5 展望 .....	201
8.3 电子鼻与电子舌 .....	201
8.3.1 概述 .....	201
8.3.2 生物嗅觉和味觉 .....	201
8.3.3 电子鼻和电子舌及其应用 .....	201
8.4 人工皮肤 .....	202
<b>第3篇 人体检测与信息处理</b>	
<b>第9章 人体信息检测概述 .....</b>	<b>204</b>
9.1 生物医学信息 .....	204
9.1.1 生物信息的检测与处理 .....	204
9.1.2 人体的特征与人体医学检测的特点 .....	208
9.2 人体医学检测的类型 .....	211
9.2.1 人体医学检测的范围和分类 .....	211
9.2.2 各种生物医学测量概述 .....	213
9.3 生物医学检测系统的结构和工作方式 .....	216
9.3.1 基本构成 .....	216
9.3.2 工作方式 .....	219
9.4 医学检测系统的特征与分类 .....	220
9.4.1 医学仪器的主要技术特征 .....	220
9.4.2 医学检测系统的特殊性 .....	223
9.4.3 典型医学参数 .....	224
9.4.4 医学仪器的分类 .....	225
9.5 生物电位基础 .....	226
9.5.1 细胞电位 .....	226
9.5.2 生物电阻抗 .....	231
9.5.3 生物电位 .....	233
<b>第10章 检测传感器 .....</b>	<b>240</b>
10.1 医用传感器 .....	240
10.1.1 医用传感器的分类和特点 .....	240
10.1.2 有源传感器 .....	241

10.1.3 无源传感器 .....	246
10.2 医用电极 .....	252
10.2.1 电极的基本特性 .....	252
10.2.2 体表电极 .....	254
10.2.3 体内电极 .....	258
10.2.4 其他电极 .....	260
10.2.5 电极的选择与使用 .....	261
10.3 生物传感器 .....	263
10.3.1 概述 .....	263
10.3.2 分类 .....	264
10.3.3 利用生物物质的生物传感器 .....	265
10.3.4 以生物系统为模型的生物传感器 .....	274
10.3.5 以生物系统为对象的生物传感器 .....	275
10.3.6 基于表面等离子共振的生物传感器 .....	279
10.3.7 生物传感器的发展趋势 .....	284
10.4 生物芯片 .....	285
10.4.1 生物芯片的类型及制作技术 .....	285
10.4.2 生物芯片作用原理 .....	288
10.4.3 生物芯片的性能及用途 .....	289
10.4.4 生物芯片信号检测系统 .....	290
10.4.5 问题与展望 .....	291
10.5 仿生传感器 .....	292
10.5.1 生物膜与生物的感觉功能 .....	292
10.5.2 嗅觉器官与气体传感器 .....	292
10.5.3 仿生化学传感器 .....	293
<b>第 11 章 人体检测相关技术及应用 .....</b>	<b>298</b>
11.1 人体生理参数检测 .....	298
11.1.1 循环系统各种量的测量与流量传感器 .....	298
11.1.2 人体运动的测量与力学量传感器 .....	300
11.1.3 体温的测量与温度传感器 .....	301
11.1.4 血液中离子浓度的测量与化学传感器 .....	302
11.1.5 测量系统 .....	302
11.2 信息融合技术的应用 .....	303
11.2.1 概述 .....	303
11.2.2 多传感器信息融合技术基础 .....	303
11.2.3 多传感器信息融合实例 .....	308
11.2.4 多传感器集成融合在生物医学检测中的应用 .....	309
11.3 生物电磁学测量 .....	312

11.3.1 概述 .....	312
11.3.2 国内外发展现状 .....	313
11.3.3 热点问题 .....	318
11.4 远程医疗系统 .....	322
11.4.1 发展概况 .....	322
11.4.2 远程医疗的定义和组成 .....	323
11.4.3 远程医疗的目的和意义 .....	324
11.4.4 远程医疗的支撑技术 .....	325
11.4.5 国内外远程医疗的研究现状 .....	326
11.4.6 发展前景及面临的问题 .....	331
<b>第 4 篇 仿生学与医用机器人</b>	
<b>第 12 章 仿生学</b> .....	<b>334</b>
12.1 仿生学概述 .....	334
12.2 仿生学的研究内容和方法 .....	335
12.2.1 与仿生学有关的领域 .....	335
12.2.2 仿生学的研究内容 .....	335
12.2.3 仿生学的研究方法 .....	336
12.3 仿生学在生物机械工程中的应用 .....	337
12.3.1 信息仿生 .....	337
12.3.2 控制仿生 .....	338
12.3.3 化学仿生 .....	339
12.3.4 整体仿生 .....	340
<b>第 13 章 医用机器人</b> .....	<b>342</b>
13.1 机器人技术概述 .....	342
13.1.1 机器人定义 .....	342
13.1.2 机器人进化 .....	343
13.1.3 机器人学的结构 .....	344
13.1.4 机器人与人类的关系 .....	344
13.2 医用机器人 .....	345
13.2.1 医用机器人的内容 .....	345
13.2.2 医用机器人的特点 .....	347
13.2.3 医用机器人发展的必要条件 .....	348
13.3 医疗外科机器人 .....	349
13.3.1 概述 .....	349
13.3.2 医疗外科机器人系统的分类及特点 .....	350
13.3.3 医疗外科机器人的发展回顾 .....	351

13.3.4 医疗机器人实例 .....	357
13.3.5 热点与展望 .....	359
13.4 社会福利机器人 .....	361
13.4.1 概述 .....	361
13.4.2 护理机器人系统 .....	364
13.5 微驱动机器人系统 .....	367
13.5.1 微生物体显微操作的要求 .....	367
13.5.2 用于显微操作的微驱动机器人系统结构 .....	368
13.5.3 研制工作中遇到的问题 .....	369
13.6 其他仿生机器人系统 .....	371
13.6.1 步行机器人 .....	371
13.6.2 仿蛇系统 .....	373
13.6.3 人工脑 .....	376
13.6.4 自主机器人 .....	380
13.6.5 进化机器人 .....	384

## 第 5 篇 生物机械设计

第 14 章 生物机械设计概述 .....	388
14.1 设计的基本过程 .....	388
14.1.1 设计的概念 .....	388
14.1.2 设计的内涵 .....	389
14.1.3 设计的一般程序 .....	390
14.2 生物机械设计原则 .....	394
14.2.1 生物机械的设计原则 .....	394
14.2.2 生物机械的一般技术条件 .....	395
14.2.3 生物机械发展展望 .....	397
14.3 现代设计方法概述 .....	398
14.3.1 设计面临的形势 .....	398
14.3.2 现代设计的概念 .....	399
14.3.3 现代设计方法的基本内容 .....	401
14.3.4 现代设计方法的特点 .....	401
14.3.5 现代设计理论简介 .....	402
14.4 常用现代设计方法简介 .....	406
14.4.1 优化设计 .....	406
14.4.2 可靠性设计 .....	406
14.4.3 工业造型设计 .....	407
14.4.4 计算机辅助设计 .....	408

14.4.5 概念设计 .....	409
<b>第 15 章 生物机械人机工程设计 .....</b>	<b>412</b>
15.1 概述 .....	412
15.1.1 人机设计的概念 .....	412
15.1.2 人机设计的研究内容 .....	413
15.1.3 人机设计的研究方法 .....	414
15.2 人的因素 .....	416
15.2.1 人体测量和人体尺寸 .....	417
15.2.2 人体力学和人体动作 .....	420
15.2.3 人体感觉器官的功能和特性 .....	424
15.3 生物机械显示装置设计 .....	433
15.3.1 显示装置的分类 .....	434
15.3.2 视觉显示装置 .....	434
15.3.3 仪表设计的基本原则 .....	436
15.3.4 刻度指针式仪表设计 .....	437
15.3.5 数字式仪表设计 .....	442
15.3.6 仪表的布局与排列 .....	444
15.3.7 信号灯 .....	445
15.3.8 图形和符号 .....	447
15.3.9 荧光屏显示设计 .....	448
15.4 生物机械操纵装置设计 .....	451
15.4.1 操纵装置类型 .....	451
15.4.2 操纵装置选择 .....	451
15.4.3 操纵装置人机工程设计 .....	452
15.5 生物机械操纵与显示装置组合设计 .....	459
15.5.1 位置相合性 .....	459
15.5.2 运动方向相合性 .....	460
15.5.3 操纵-显示比 .....	460
15.6 手握式器械设计 .....	461
15.6.1 手握式工具设计原则 .....	462
15.6.2 把手设计 .....	462
15.6.3 把手设计实例 .....	463
<b>第 16 章 生物机械安全设计 .....</b>	<b>464</b>
16.1 生物机械安全设计基本概念 .....	464
16.1.1 生物机械的本质安全 .....	464
16.1.2 生物机械安全设计的目的 .....	466
16.1.3 由生物机械引起的危害 .....	467

16.2 生物机械安全设计基本内容	468
16.2.1 安全设计的主要内容	469
16.2.2 可靠性设计	470
16.2.3 维修性设计	474
16.3 生物机械的电气安全设计	477
16.3.1 电流的生理效应	477
16.3.2 产生电击的因素	479
16.3.3 电击防护措施	482
<b>第 17 章 生物机械创新设计</b>	<b>486</b>
17.1 生物机械创新设计概念	486
17.1.1 创新设计与常规设计的关系	486
17.1.2 创新设计过程	488
17.1.3 创新设计特点	488
17.2 生物机械创新设计技法	489
17.2.1 智力激励法	489
17.2.2 检核目录法	490
17.2.3 组合法	492
17.2.4 特性、缺点、希望列举法	494
17.2.5 反向发明法	496
17.2.6 类比-联想技法	497
17.2.7 模仿法	498
17.2.8 置换思维法	501
17.2.9 调查研究法	501
<b>第 18 章 生物机械设计实例</b>	<b>504</b>
18.1 医疗器械的人机工程设计	504
18.1.1 乳腺癌检测仪人机工程设计要求	504
18.1.2 检测仪结构方案人机工程设计	505
18.2 假肢的计算机辅助设计	507
18.2.1 假肢接受腔计算机辅助设计	507
18.2.2 假肢接受腔计算机辅助制造系统	509
18.2.3 数控加工中心	510
18.3 钴-60 辐照装置安全设计	510
18.3.1 安全控制系统	511
18.3.2 安全防护措施	512
18.4 内窥检查机器人移动机构创新设计	514
18.5 机器人机械系统的并行设计	515
18.5.1 机器人机械系统的设计特点	516

---

18.5.2 机器人机械系统并行设计的模式探讨 .....	516
18.6 基于反求设计技术的口腔修复 CAD 系统 .....	519
18.6.1 基于反求设计的口腔修复 CAD/CAM 系统 .....	519
18.6.2 口腔修复反求设计技术 .....	521
18.6.3 口腔修复 CAD 系统 .....	522
18.7 人工心脏叶轮泵的 CAD/CAM .....	524
18.7.1 叶轮泵结构和运动机理 .....	525
18.7.2 叶轮泵设计要点 .....	525
18.7.3 泵叶轮叶片 CAD .....	525
18.7.4 泵叶轮叶片 CAM .....	526
参考文献 .....	528



# 第 1 篇

## 生物机械工程基础