

# 生物医学工程学

主 编 常向荣 陈俊英

西南交通大学出版社  
· 成都 ·

# 前 言

生物医学工程学是运用自然科学和工程技术的原理和方法,研究人的生理、病理过程,揭示人体的生命现象,并从工程角度解决防病治病问题的一门综合性学科。我国科学家顾方舟在《中国生物医学工程的今天与明天》中写道:“生物医学工程学是这样一门学科:它把人体各个层次上的生命过程看作是一个系统的状态变化的过程;把工程学的理论和方法与生物学、医学的理论和方法有机地结合起来去研究这类系统状态变化的规律,并在此基础上,应用各种工程技术手段,建立适宜的方法和装置,以最有效的途径,人为地控制这种变化,以达到预定的目标。”

20世纪50年代以来,随着电子学、材料学、工程力学、信息科学和电子计算机等多个学科的进步,并在医学和生物学领域广泛应用,生物医学工程学科才逐渐形成和发展起来。电子学的渗入使心电、脑电、心脏起搏器、B超等逐步应用于临床;与材料科学的结合,成功研制出如人工关节、人工心脏瓣膜、血管支架等人体功能辅助材料以及卫生保健材料;工程力学原理的应用,使人们能够定量研究人体力学性能、细胞流变特性等,不仅有助于对人体生理、病理过程的了解,而且还能为人工器官的设计和制造提供科学依据。

生物医学工程学涉及的专业基础知识内容繁多,包括物理学、化学、生物学、医学、数学、材料学、力学、信号处理、图像处理等。各高校生物医学工程专业偏重点不同。在有限的教学时数内,对教学内容进行合理取舍,相对全面地介绍生物医学工程基础的知识,可为学生进一步深入学习专业课程打下基础。编者结合近年来的教学和科研经验,最后完成了这本导论性质的书。

本书以生物医学工程学的基本原理、应用技术为主要内容。全书共8章,第1章绪论;第2章生物力学,主要包括骨力学、软组织力学、细胞流变学;第3章生物医用材料,主要从生物医用材料的界面关系、医用无机材料、高分子材料、金属材料的性能和医学应用进行阐述;第4章人工器官,包括人工关节、人工肺、心脏瓣膜与血管支架、组织工程人工器官等;第5章生物医学数学模型,包括经典数学模型、医学统计模型、模糊数学模型的医学应用;第6章生物医学传感器基础,从材料学角度分析各种传感器及其医学应用,包括敏感材料与传感器、生物传感器信号转换器等基本原理;第7章生物医学测量基础,包括人体自身的电、磁场的特性及应用,外加能量对人体的作用机理,常见的电与非电量测量方法;第8

章医学成像基础，概述了常规医学成像原理。本书用较大篇幅讲述了生物医学材料及相关技术的应用，同时兼顾生物医学工程专业其他学科方向。

西南交通大学生物医学工程系的老师在本书编写的过程中给予了支持和帮助，在此表达由衷的感谢。本书内容跨度大，虽经过多方努力，仍存在不足之处，恳请业内专家和广大读者不吝赐教。

编者

2019年3月

# 目 录

第 1 章 绪 论 .....	1
1.1 生物医学工程学的发展历史 .....	1
1.2 什么是生物医学工程学 .....	2
1.3 生物医学工程学的主要研究内容 .....	5
1.4 生物医学工程学的现状与发展趋势 .....	9
第 2 章 生物力学 .....	11
2.1 生物力学概论 .....	11
2.2 生物力学基础 .....	14
2.3 骨骼肌肉生物力学 .....	21
2.4 肌肉生物力学 .....	27
2.5 细胞-分子生物力学 .....	28
2.6 心血管生物力学 .....	43
2.7 其他组织器官力学 .....	46
2.8 应力和生长 .....	51
第 3 章 生物医用材料 .....	53
3.1 生物医用材料概论 .....	53
3.2 生物医用材料性能要求 .....	56
3.3 生物医用材料的消毒与灭菌 .....	67
3.4 无机非金属生物医用材料 .....	67
3.5 金属生物医用材料 .....	75
3.6 高分子生物医用材料 .....	80
3.7 生物医用材料的发展趋势 .....	89
第 4 章 人工器官 .....	91
4.1 人工器官概述 .....	91
4.2 心血管系统人工器官 .....	93
4.3 呼吸系统人工器官 .....	103
4.4 泌尿系统人工器官 .....	107
4.5 分泌系统人工器官 .....	111

4.6	消化系统人工器官	113
4.7	运动系统人工器官	115
4.8	组织工程人工器官	118
第 5 章	生物医学数学模型	124
5.1	数学与生物医学结合	124
5.2	经典数学及其模型	128
5.3	医学统计数学及其模型	136
5.4	模糊数学及其模型	147
5.5	生物医学大数据及应用	149
第 6 章	生物医学传感器基础	154
6.1	生物医学传感器概述	154
6.2	敏感材料	159
6.3	物理量的测量	168
6.4	生物传感器信号转换器	172
6.5	生物芯片检测技术	186
第 7 章	生物医学测量与控制基础	190
7.1	生物医学测量概述	190
7.2	生物体电场测量	193
7.3	人体的磁场特性	204
7.4	其他物理量的测量	210
7.5	人体生化参数测量	213
7.6	光对人体的生理效应	219
第 8 章	医学成像基础	223
8.1	X 射线物理基础及其医学应用	224
8.2	超声波物理基础及超声成像	235
8.3	磁共振成像	245
8.4	放射性核素成像	253
参考文献		261

# 第1章 绪论

生物医学工程学 (Biomedical Engineering, BME) 是包含多种技术并相互交叉融合的一门学科。它综合了生物学、医学与工程学的理论和方法, 研究生命体的构造、功能、状态和变化, 研究新材料、新技术、新仪器设备, 用于防病、治病、保护人类健康和提高医学水平。其涉及科学领域广泛, 除生物学、医学外, 还有电子学、现代计算机技术、化学、高分子、力学、近代物理学、光学、放射学、精密机械等学科。纵观医学发展史, 可以清楚地看到科学技术、工程的手段始终伴随并推动它的发展。工程师对跨学科的认识, 并开展相关研究, 将医学与工程学整合起来进行有机结合, 极大地促进了生物医学工程学的发展。

## 1.1 生物医学工程学的发展历史

在整个人类对疾病与自身的探索过程中, 人们不断尝试用工程技术方法服务于医学。相传古有“伏羲制九针”一说, 现存较早的古籍《黄帝内经》首次记载了有关九针的论述, 这是我国利用工程技术服务于人类的先例。16 世纪, 意大利医学家桑克托留斯 (Sanctorius) 把伽利略发明的温度计加以改良并用于医疗中, 用它来测量病人的体温, 作为诊断疾病的依据。1816 年, 法国名医雷奈克 (Lenex) 用一本薄笔记本卷成圆筒, 发明了听诊器。1905 年, 俄国人尼古拉·特洛特科夫发明了裹臂式血压测量方法。

显微镜的发明和使用, 大大扩充了人类的视野。17 世纪, 列文虎克 (Lee Wenhock) 发明了光学显微镜, 推动了解剖学向微观层次发展, 使人们不但可以细致了解人体解剖结构, 而且可以进一步观察研究其细胞形态结构的变化。随着光学显微镜的出现, 医学领域相继诞生了细胞学、组织学、细胞病理学, 从而将医学研究提高到细胞形态学水平。普通光学显微镜的分辨能力只能达到微米 ( $\mu\text{m}$ ) 级水平, 难以分辨病毒及细胞的超微细结构、核结构、DNA 等大分子结构。20 世纪 60 年代出现的电子显微镜, 使人们能观察到纳米 (nm) 级的微小个体, 研究细胞微结构。随着科学技术发展, 扫描探针显微镜 (Scanning Probe Microscope, SPM) 的放大倍数可以达到 10 亿倍, 可以直接观察物质的分子和原子, 这就为人类对微观世界的进一步探索提供了有利的工具。

纵观人类医疗体系发展史, 远古时期人们对疾病的认识与诊治往往借助于对神灵的礼拜与祷告, 巫医利用巫术进行诊治。治病材料借助于植物或动物, 这些治病术士或巫师们通过观察疾病的性质、凭借经验形成了原始医学。16 世纪文艺复兴时期, 开始了疾病测量时代, 对人体的研究从经验或定性到定量。20 世纪中期, 信息技术、计算机、工程制造快速发展,

使得医疗器械发展突飞猛进。工程学与医学交叉的重要历史事件如表 1.1 所示。

表 1.1 工程学与医学交叉的典型历史事件

时间	历史事件
1592 年	伽利略发明温度计、脉搏计
1676 年	列文虎克发现细菌等微生物
1894 年	荷兰生理学家爱因托芬发明心电图记录仪
1895 年	德国物理学家伦琴发现 X 射线
1927 年	Drinker 发明呼吸机
1940 年	美国医师和生理学家安烈·考尔南德和迪金森·查理兹研制了右心导管，开创了右心导管术
1942 年	超声医学诊断仪在临床应用
1953 年	沃森和克里克发现脱氧核糖核酸 (DNA) 结构
1956 年	Anger 发明伽马照相机
1958 年	第一个人工心脏植入式心脏起搏器临床应用
1963 年	美国数学家 Cormack，将图像重建理论应用于放射医学，促进 CT 发明
1972 年	英国豪斯费尔德发明了 X 射线计算机断层扫描仪 (X-CT)
20 世纪 80 年代	单光子发射性计算机断层成像 (SPECT)
20 世纪 80 年代	正电子发射性断层成像 (PET)
20 世纪 80 年代	磁共振成像快速发展
1997 年	伊索在比利时布鲁塞尔完成了第一例腹腔镜手术，成为 FDA 批准的第一个清创手术机器人
2012 年	谷歌公司发布一款 Google glass，可穿戴电子产品在接下来几年内大量出现
近年来	精准医疗：通过基因检测确诊疾病；利用基因技术研制针对基因修复的靶向药物进行治疗
近年来	人工智能：医疗机器人，智能药物开发，智能诊疗，智能影像识别，智能健康管理等

现如今，我们可以清楚地看到，科学技术的发展对医疗卫生行业产生了巨大影响。智慧医疗离人们的生活越来越近。基于科技基础上的移动医疗与可穿戴设备正深入人们的生活，将会成为未来就医新模式。这些先进医疗仪器、技术都是医学工程研究成果的应用，它们显著提高了临床医学诊断和治疗水平，有力地促进着医学科学的发展，并加速了医学科学的现代化。

## 1.2 什么是生物医学工程学

### 1.2.1 生物医学工程学的内涵

生物医学工程学可以描述为：“综合运用现代自然科学和工程技术的原理、方法，从工程

学的角度,在多种层次上研究生物体,特别是人体的结构、功能和其他生命现象,揭示和论证生命运动的规律,深化对生命系统的认识,提供防病、治病、人体功能辅助及卫生保健的人工材料、制品、装置和系统的新兴交叉学科。”几乎所有工程学科和基础学科都可以与生物医学相结合,用以研究人类生理学、组织与器官的病理学,提供治疗与预防的最佳手段。

生物医学工程的主要任务是以临床医学为对象,以数、理、化、生等学科为基础,融材料、电子、机械、化工、计算机信息、力学为一体,为临床诊断、治疗和预防疾病做出巨大的贡献。生物医学工程学从理论研究到创新应用,其工作包括了研究、开发、实现和运行。生物医学工程师有一个重要作用,就是发现医疗保健系统中目前还存在哪些可用现有工程技术解决的问题和需求。生物医学工程专业主要培养三类人才:医疗保健系统的临床工程师;工业界的生物医学设计工程师;研究型科学家。临床工程师和设计工程师是“解题人”,他们为医学工作人员提出的问题提供知识和技术服务。生物医学工程设计工程师通过考察生物学和医学某些前沿领域问题,自己寻找和确定先进技术可以发挥作用的地方,自己提出问题,然后解决问题,并开发出完备的产品服务于人类,则称为“技术企业家”。生物医学工程师必须熟练掌握工程技术专业知识,同时学到足够多的生物医学基础知识。生物医学工程基础的学习将为你今后的研究做铺垫。

## 1.2.2 生物医学工程学的研究领域和基本任务

### 1.2.2.1 生物医学工程学的主要研究领域

生物医学工程和其他工业领域一样,很难用单一学科专业完成研究工作,根据目前国内外生物医学工程学研究发展趋势,大致可归纳为以下几个研究领域。

#### 1. 医学测量

医学测量包括生物电测量和非电量测量。生物电测量需要用到各种电极,主要有心电、脑电、眼电、肌电、胃电等。非电量需要用各种传感器,先将各物理量转换为电量,然后进行信号处理。主要有声、振动的测量;流量、流速的测量;位移、压力测量;化学、生物化学测量;放射线测量;超声测量;生物磁测量;高、低温度测量等。信号通过传感器转换为电信号,利用高共模抑制比的采集装置,将信息放大处理、显示,以服务于医生。

#### 2. 医学信息、传递和处理

医学信息学是对生物医学信息、数据和知识存储、检索并有效利用,并在卫生管理、临床掌控和知识分析过程中做出决策和解决问题的学科。主要任务是借助于医学科学研究中获得的知识,开发和评估有关获取、处理和解释病人数据的方法和系统。应用领域主要包括电子病例、生物信号分析、临床支持系统、医学决策系统、医院信息管理系统、卫生信息资源、图像识别和处理、生物医学数据的处理和传递等。

#### 3. 功能辅助和修复

功能辅助和修复包括人工器官、智能假肢、感官辅助装置、器官保存以及人体各系统模拟装置等。主要研究模拟人体器官的结构和功能,用人工材料和电子技术制成部分或全部替代人体自然器官的机械装置和电子装置,当人体器官病损而用常规方法不能医治时,使用人

工制造的器官来取代或部分取代病损的自然器官，补偿或修复或辅助其功能。

#### 4. 生物刺激及治疗

生物刺激及治疗设备包括电磁场治疗仪器，心脏起搏器、心脏除颤仪，紫外线、可见光、红外线治疗仪器，超声治疗仪器，放射线治疗仪器，激光及等离子体治疗仪器，高温、低温治疗设备，高压氧治疗设备，水疗设备，负离子发生器，以及各种康复治疗设备等。

#### 5. 生物医学材料与器件

生物医学材料和器件包括自然生物材料、医用高分子材料、医用金属材料、医用非金属材料，及其制品等。生物材料是研制人工器官及一些重要医疗技术的物质基础，每一种新型生物材料的发现都会引起人工器官及医疗技术的飞跃。

#### 6. 医疗器械及装置

医疗器械和装置主要覆盖了医用电子仪器（心电图仪、脑电图仪、多参数监护仪等）、临床检验类仪器、医学成像设备（X射线成像、B型超声影像学、磁共振成像、放射性核素成像、红外成像等）、康复工程等医疗仪器或装置。

### 1.2.2.2 生物医学工程学的基本任务及层次

生物医学工程学的基本任务是运用工程技术手段，研究和解决生物学和医学中的有关问题。首先需要完成对生命的探讨，而生命的活动可分为若干层次。作为生物医学工程研究的主体，人体更是一个多层次的庞大系统。从微观上看，有分子层次、细胞层次；从宏观来看，有整体、群体以至于环境；在二者之间，有组织层次、器官层次、系统层次等。因此，概括地说，可以将生物医学工程学分为三个层次，即整体层次、器官与组织层次以及微观层次。

在整体层次上，可将人体与周围的环境看作一个整体。主要研究有人体与外界环境的热量交换、质量交换、动量交换（即力学的作用），有声、光、电、热、味的信息交换，有环境对于人体的作用，有人与生活环境及工作环境的相互关系，有人对于环境的能动作用等。

器官和组织层次是目前生物医学工程的主要对象与研究主体。生物医学工程的主要内容，如生物力学、生物材料、生物信号、人工器官、控制、建模、康复、组织工程等都发生在这一层次。

在微观层次上，是指细胞和细胞以下如分子、大分子等为对象的生物医学工程研究内容。细胞生物力学、分子生物力学、组织工程等可划入这一范畴。

### 1.2.3 生物医学工程学的特点

（1）生物医学工程学具有新兴、综合、交叉与边缘科学的特点。

说它新兴，是因为它在近几十年才从医学中独立出来，形成一门独立学科。当代高新科技的飞速发展，为它提供了强有力的理论与实践基础。特别是它的发展结合了生命科学、信息科学、能源科学、电子学、当代力学、环境科学以及当代工程学。例如，致力于生物传感器开发的生物医学工程师可能会与开发假肢的工程师联合，以便研究检测和利用生物电信号驱动假肢的方法。再比如致力于临床生化检验自动化的工程师也许会与那些开发专家系统的

工程师合作,以便设计专家系统,辅助临床检验医生根据检验结果做出诊断。这也体现了新兴、综合、交叉的边缘学科特点。

(2) 医学和其他学科的发展互为动力。

生物医学工程学一方面为医学、生物学提供技术设备,另一方面又为医学和生物学的发展开辟新路。例如,人工心脏瓣膜的成功研制,把风湿性心脏病的治疗提高到一个新的高度,每年挽救了数以万计的人的生命;人工关节用于置换、修复、替代失掉功能的天然关节,使每年数以百万计的人免于残缺;膜式人工肺的开发,不仅使心胸手术得以进行,而且使得体外呼吸辅助和体外循环成为可能。医学的高速发展也向工程学提出了新的要求,为工程学不断开创新的课题,促进了科学技术新方法、新理论的出现。

(3) 生物医学工程是社会效益与经济效益的综合。

医学是一门公益事业,其重在社会效益。而工程的目的,就是以最低的成本最有效地解决问题。生物医学工程则是二者必然的结合。生物医学工程领域是各国竞相发展的高科技领域。

## 1.3 生物医学工程学的主要研究内容

生物学是研究生命现象的科学;医学是解决人类防病治病,保护人民健康的科学;工程技术是研究创造新材料、新工艺、新技术、新仪器设备的科学。

从目前发展来看生物医学工程学学科分类有两种趋势。

一是以应用范畴为依据的学科分类,可分为医学工程(Medical Engineering)、临床工程(Clinical Engineering)、康复工程(Rehabilitation)、环卫工程(Environmental Engineering)、中医工程(the Engineering of Chinese Traditional Medicine)。

二是以学科专业为依据的学科分类,大致可分为生物力学(Biomechanics)、医用材料(或生物材料 Biomaterial)、人工器官(Artificial Organs)、生物信息(Bioinformation)、生物控制(Biocybernetic)、生物传感器(Biosensors)、生物反馈(Biofeedback)、生物能量与质量传递(Bioenergy and Mass Transfer)、医学电子(Medical Electronics)、医学仪器及装备(Medical device & Instrument)、人工智能(Artificial Intelligence)、医用超声(Medical Ultrasound)、医用激光(Medical Laser)、辐照医学(Medical Radiation)、核医学(Nuclear Medicine)、医学图像处理(Medical Image Processing)以及医学物理(Medical Physics)等。

### 1. 生物力学

生物力学是研究生物体与力学关系的学科。生物力学在20世纪60年代才作为一门独立的学科兴起,然而人们对生命过程和生物学中的力学问题的关注和研究却有很长的历史了。生物力学包括的内容非常广泛,涉及生物分子、细胞、组织、器官、系统、生物个体、个体与环境、生物群体甚至生物体与整个宇宙的关系及运动。所以当前生物力学可分为分子生物力学、细胞生物力学、组织生物力学、器官力学、系统力学、人与环境生物力学、生物流体力学等。

骨、牙和其他硬组织生物力学的发展,已提供了丰富的生物体运动及受力的知识;循环

流体力学和呼吸力学大大地推动了心血管系统和呼吸系统的研究与疾病诊疗；体内各部分之间、体内与体外的动量、热量和质量的传递，已为新陈代谢等生理过程提供了定量的解释，为疾病的治疗和组织及器官的替代物奠定了基础；细胞力学的建立，使生物力学向微观发展，从细胞、分子水平上揭示生命体的运动规律；人工器官的力学研究，为进一步发展更高级的人工替代物奠定了理论基础；此外，生物力学在循环系统的动力学原理，心脑血管疾病防治，人工心脏瓣膜、人工关节、细胞应力与生长及组织工程等方面也取得较大成果；随着生物材料的发展，材料本身的力学特性以及材料在生物体内的力学性能，也成为生物力学的重要研究领域。

## 2. 生物材料学

生物材料学研究的对象是用于治疗、诊断和替代生命体的组织与器官的全部或部分功能，目前生物材料已成功地应用于人工骨与关节，医用导管、人工肾、人工心脏瓣膜、人工植入物（如血管类），齿科材料，药物释放载体等。常用材料有生物陶瓷、记忆合金、骨水泥、高分子中空纤维、聚氨酯、硅橡胶、生物梯度材料、生物降解材料、细胞与人工材料结合的杂化材料（组织工程活性材料）等。除了人工材料以外，也可以是天然的，如胶原、甲壳素等，或者是这些天然材料与人工材料相结合的材料，还可以是有生命的生物活性分子、细胞，或是活体组织与无生命功能材料（或杂化材料），或组织工程材料。

生物材料学研究涉及无机化学、有机化学、高分子化学、无机材料学、有机材料学、高分子材料学、金属材料学、生理解剖学、病理学、药理学、内外科学等。

## 3. 组织工程学

20世纪80年代末期发展起来的组织工程学，是应用生命科学和工程学原理和方法去认识动物的正常和病态组织结构与功能的关系，设计、构造、改良、培育、保养活组织，研制生物替代物，用以修复和重建器官的结构，维持与改善组织器官的一门新兴边缘学科，是综合细胞生物学、材料科学、生物化学、生物力学、移植学、临床医学等学科的交叉领域。组织工程学的出现为现代医学的发展与进步开辟了一个新领域。组织工程学带动了组织工程材料和仿生人工器官的出现。组织工程材料是利用组织工程技术将生物相容性材料作为骨架（或载体）和生物机体材料（如细胞、基因和生长因子）合成具有生命力的生物替代材料，用于制备组织工程化的组织与器官。应用组织工程技术研制的“真正的”仿生活性组织和人工器官，使人工器官的“活的”备件置换式的梦想成为可能。

## 4. 人工器官

广义上讲，人工器官是人造的或人工合成的可以部分或全部地、短期或长期地、体内或体外地用于替代人体自然器官的装置。迄今为止，人体各个生理系统的大多数器官（大脑和少量器官除外）都有了人工替代物。狭义上讲，只有那些替换了原自然器官的位置，并能发挥其全部功能的人造装置才能称得上是真正的人工器官。目前使用与开发的人工器官多是广义的人工器官。狭义的人工器官还仅是人们的愿望和未来努力的方向。

人工器官有很多分类方法，按人体系统分，可将其分为心血管人工器官、呼吸系统人工器官、泌尿系统人工器官、消化系统人工器官、感觉系统人工器官、运动系统人工器官、神经系统人工器官、生殖系统人工器官等。按功能分类，可将人工器官分为支持运动功能的、支持

血液循环功能的、支持呼吸功能的、具有血液净化功能的、支持消化功能的、支持排尿功能的、具有内分泌功能的、支持生殖功能的、具有神经传导功能的、具有感觉功能的人工器官等。

研究与开发人工器官,除了生物材料和生物力学的内容以外,还要涉及生命体的电、磁、热等信号,这些信号的识别、处理、反馈对于人工器官的开发是至关重要的。

### 5. 生物医学传感器

生物医学传感技术是把生物体的各种物理的、化学的生理活动信息,转换成与之有确定函数关系的电信息的变换技术,是拾取人体信息的测量装置的核心。生物医学传感技术常用的传感器大体分为三类,即物理型、化学型、生物型传感器。

生物医学传感技术已广泛地应用于基础医学、临床医学和生物医学工程的研究中,具有知识密集、可靠性高、工艺精细等特点。未来的生物医学传感器是向着微系统、多参数、智能化等方向发展,其应用涉及床边监测、在体监测、无损监测、细胞内监测、仿生传感器、基因探测等。化学传感器、酶电极、离子电极、气体电极、DNA 芯片等是现代传感器研究的新领域,它们有助于将人体生物分子变化的信息与传统的电子电路、电光混合电路、微电子技术等结合起来,以实现医疗仪器的自动化、智能化。

### 6. 生物医学信号检测、处理与识别

生物医学信号检测、处理与识别是研究生命原理和生物医学工程的主要手段之一。生物医学信号检测是对生物体中包含的生命现象、状态、性质和成分等信息进行检测和量化的技术。生物医学信号的特点:噪声强、信号弱。生物医学信号处理是从被干扰和噪声淹没的信号中提取有用的生物医学信息特征,需要借助于低噪声电子器件和高共模抑制比的差动放大电路,进行信号检测,并利用计算机信号处理技术进行弱信号提取。

研究主要集中在三个方面:一是使用高精密器件,降低传感器与放大器的固有噪声,尽量提高信噪比;二是研制适合弱信号检测的原理,并能满足特殊需要的器件;三是研究并采用各种弱信号检测技术和计算机算法。

### 7. 生物医学图像

生物医学图像研究分为医学成像和图像处理。成像主要是借助物理、机械和电子计算机把人体医学信息以图像的形式呈现出来。图像处理主要是借助计算机数字图像处理技术,对图像进行识别、分割、分类、解释与分析等,更利于医生做出判断。医学成像上按大类分主要有 X 射线成像、超声成像、磁共振成像、放射性同位素成像、红外热成像、内窥镜成像、显微图像、电阻抗成像等。每一大类成像都有其适合领域,它们通过互补、融合,更好地提供人体诊断信息。医学图像处理是计算机图像处理在医学上的应用,主要内容有数字图像的形成、医学数字图像处理系统的基本组成、医学图像的数据源、图像与视觉、图像的数据结构及基本统计特征、图像运算与变换、图像增强与应用、图像恢复及几何校正、图像的编码、图像分析、图像的几何尺寸测量与医学图像的重建、医学图像的 DICOM 结构等。

### 8. 生物系统的建模与控制

生物系统各个层次上的系统建模、仿真、辨识与控制,无论是传统的生物医药领域还是新兴的基因调控领域,大量的复杂现象都需要进行精确的定量描述。传统的方法是进行大量的重复试验来获取数据,从中寻找统计规律,可以充分利用这些数学、计算机工具,首先对

生物医药、基因调控中的生物信息进行储存、检索、分析、处理，再综合考虑建立数学模型，通过对数学模型的理论分析和数值计算，后为医疗诊断和生物医药的研制提供相关解决方案。生物系统建模和控制已广泛应用在人体循环系统、神经系统、呼吸系统、免疫系统和流行病学研究等方面。

### 9. 物理因子的生物效应及治疗作用

物理治疗是康复医学中的一个重要组成部分，它包括物理因子治疗技术和运动治疗技术。物理因子治疗指利用天然或人工物理因子，如采用声、光、电、磁、辐射等手段作用于人体，以提高健康水平，预防和治疗疾病，恢复或改善身体功能与结构、活动以及参与能力，达到康复目的的治疗方法，已成为药物和手术治疗以外的重要治疗手段。放射性疗法、超声碎石、体外反搏、激光治疗等已在临床广泛应用。

### 10. 医疗器械

医疗器械是基于多学科、高新技术综合的产物，涉及机械、光学、电子、信息、材料等学科。医疗器械产业是事关人类生命健康的多学科交叉、知识密集、资金密集型的高新技术产业，其发展水平代表了一个国家的综合实力与科学技术发展水平。

### 11. 中医工程

应用现代科技手段使中医理论、临床诊治手段科学化、现代化。中医诊疗设备主要分为诊断和治疗两类。中医诊断设备有脉象仪、舌象仪、经穴探测仪、腹诊仪、呼吸动度检测仪、面诊仪、闻诊仪、耳诊仪等。中医治疗仪器是根据中医辨证的结果，利用中医的治疗原则提供相应的治疗参数，并在中医辨证施治的过程中发挥临床治疗作用的仪器如电针仪、灸疗仪和经络导平仪等。

### 12. 生化工程

将生物技术的实验室成果经工艺及工程开发，成为可供工业生产的工艺过程，常称为生化工程。生化工程是生物工程的重要组成部分，包括底物或营养液的准备、预处理、转化以及产品的分离、精制等工程和工艺问题。一般把发酵工程、动植物细胞的大规模培养、酶工程、生化反应工程、生物分离工程（下游工程）、生物功能元件（如酶电极）以及生物过程中的控制和优化都包括在生化工程之内。

大剂量生物反应器研究与设计已取得很大进展。生物反应器是利用酶或生物体（如微生物）所具有的生物功能，在体外进行生化反应的装置系统，是一种生物功能模拟机，如发酵罐、固定化酶或固定化细胞反应器等。基因工程又称基因拼接技术和 DNA 重组技术，是以分子遗传学为理论基础，以分子生物学和微生物学的现代方法为手段，将不同来源的基因（DNA 分子），按预先设计的蓝图，在体外构建杂种 DNA 分子，然后导入活细胞，以改变生物原有的遗传特性，获得新品种，生产新产品。基因工程技术为基因的结构和功能的研究提供了有力的手段。

### 13. 医学领域相关的其他内容

#### (1) 心脑血管辅助装置的研究。

当前心脑血管病仍是威胁人类生命健康的一大杀手，防治心脑血管病仍是现代医学首要

任务之一。心脏起搏装置不仅治疗心脏传导障碍有效,而向多功能起搏、除颤、埋植式自动电复律等方面发展。血管内窥镜干预技术、心室辅助装置(VAD)、人工心脏瓣膜防钙化、长寿命生物瓣、全碳质机械瓣、人工血管、心脏骤停的急救装置、脑血管病的介入诊疗装置等都是当前研究的重点。

#### (2) 新型肿瘤检测、治疗装置。

开发新型有效、有助于尽早发现、诊断和治疗癌症的装置仍是目前生物医学工程研究的重点。利用影像学方法检测癌症,在早期发现癌症方面有一定限制。急需开展探测癌症诊断的新途径、新方法,新型癌症检测仪器以及癌症治疗装置的研究,如通过对癌干细胞的研究,已经研制出癌症疫苗、特效药、抑制剂等。

#### (3) 医学人工智能和医学专家系统。

人工智能是计算机科学的一个分支,涉及的领域包括语音识别、图像识别、机器人、专家系统等。信息化和医疗数据的规模和质量推动了医疗健康的进步和发展。人工智能在医疗大数据领域的参与度非常高。相比人脑,人工智能的优越性在于可以更高效地处理海量数据,迅速找到一些特征和规律。在图像识别上,人工智能的优越性表现得特别突出。人工智能可以利用庞大的医学知识库和数据库,建立医生的临床辅助决策系统,帮助医生进行诊断。

#### (4) 无创或微创诊疗技术。

为了减少诊疗中出现的损伤,现代医学从“有创”到“无创”是人类医学发展的必然趋势与永恒追求。这一诊疗技术的发展与介入医学的关系密切,它是以影像学为诊断基础,利用导管等技术,在影像监视下对一些疾病进行非手术治疗,也可以在影像监视下,利用导管等技术,取得组织学、细菌学、生理和生化资料,以明确器官病变性质。

#### (5) 康复医疗装置。

康复医学和预防医学、保健医学、临床医学并称为“四大医学”,它是一门以消除和减轻人的功能障碍,弥补和重建人的功能缺失,设法改善和提高人的各方面功能的医学学科,也就是功能障碍的预防、诊断、评估、治疗、训练和处理的医学学科。康复医疗装置为健康身体,恢复伤残功能,发挥越来越大的作用,市场需求量大。

#### (6) 意外事故的防护装置。

当前研制防护创伤保护人身安全的急救技术,是仅次于防治心脑血管病、癌症的又一重要领域。如高速保护系统,冲击力保护装置,加速度保护装置,高压、低压环境的安保,高温、低温环境的安保技术都是生物医学工程中出现的课题,值得重视。

以上所列只是生物医学工程应用的部分方面,生物医学工程师可以发挥才干和技能的领域还有很多。

## 1.4 生物医学工程学的现状与发展趋势

### 1. 科学问题——从单因素向多因素问题转变

生命体是一个庞大的网络系统,生命体各组分间有广泛的相互作用,并受心理、社会、环境等外界因素的刺激和干扰。如意识形成、肿瘤形成、免疫与遗传疾病等,皆是生命体内

因与外因相互关联、相互作用的结果。生命和疾病的多样性、复杂性决定了医学科学问题的多因素、复杂化属性。如当前高速发展的生物组学，在基因组学基本构建完成的基础上，由此发展出转录组学、蛋白质组学、代谢组学等领域，更加趋于复杂化和网络化。

## 2. 研究模式——从学科交叉走向学科聚合

近代生物医学发展经历了三次飞跃。第一次是以分子生物学的创立与发展为标志；第二次是以基因组的创立和发展为标志；我们正经历着第三次革命，是以生命科学与数理化和工程学的融合发展为标志，预示着科学聚合已成为当前生物医学领域研究模式的主要趋势。科学聚合是在学科交叉的基础上，以某一学科为主体，通过组建多学科背景的研究团队，它将打破学科之间固有的隔阂，将各学科资源有机整合，从而将发挥出比传统学科交叉更为突出的作用。在未来各学科将呈现系统化、整体化的融合发展。

## 3. 科学工具——生物医学与计算机科学融合发展

计算科学的迅猛发展将人类带入信息社会，信息技术已经覆盖到社会和科技的各个领域，计算机与生物医学的融合发展成为当前生物医学的一个显著特征。依靠计算机辅助医学诊断设备、三维图像重构、辅助药物设计、生物组学和数学医学等方面取得了跨越式进步。诊疗、研究模式发生根本性的改变。

医学大数据将改变传统的医学思维。现代医学的三个研究方法：循证医学，其核心思想是在医疗决策中将临床证据、个人经验与患者的实际状况和意愿三者相结合。临床证据主要来自大样本的随机对照临床试验和系统性评价或荟萃分析。转化医学，其核心是在从事基础医学发现的研究者和了解患者需求的医生、以及卫生工作者之间建立起有效的联系，特别集中在分子基础医学研究向最有效和最合适的疾病预防诊断、治疗和预防模式的转化。精准医学，通过基因组、蛋白质组等组学技术和医学前沿技术，对于大样本人群与特定疾病类型进行生物标记物的分析与鉴定、验证与应用，从而精确寻找到疾病的原因和治疗的靶点，并对一种疾病不同状态和过程进行精确分类，最终实现对于疾病和特定患者进行个性化精准治疗的目的，提高疾病诊治与预防的效益。这三种医学研究方法，其模式都遵从由局部到整体，从研究个体器官，再到考虑人体综合情况的医学科学。现在大数据提供新的科学途径，通过大数据看人体，人本身是一个整体，是一个复杂的生理大数据库，器官之间动态平和协调工作，从来不是孤立的，医学大数据能够很好地推动新的科学认知。

## 第2章 生物力学

生物力学 (Biomechanics) 是以力学的理论和方法研究生物和人体结构及功能的科学, 是力学与生物学、生理学、医学等多种学科相互结合、相互渗透而形成的交叉学科。它从生物个体、组织、器官到细胞和分子等不同层次研究应力与运动、变形、流动及生长的关系。正如现代生物力学创始人冯元桢教授所指出的: “生物力学帮助我们了解生命, 启发我们观察自然、设计和制造各种设备以改善我们的生活质量, 它是生物学和工程科学一个重要的组成部分。” 只有掌握了生物力学的基本原理, 才能更好地理解人体的生理功能, 才能更深入地探索某些疾病的发病机制。

生物力学的兴起是以现代医学的需要和生物医学工程的发展为背景的。例如, 通过解剖生理学的发展, 人们逐渐认识到动脉粥样硬化总是发生在动脉弯曲、分枝部位, 显然动脉粥样硬化与血流动力因素有关; 癌症药物治疗效率不高的根源是病灶部位药物输运的生理障碍。这些研究都涉及力学与生物学的有机结合。生物力学研究的问题有人体各系统、器官、组织、细胞结构和功能中的力学问题, 人体运动时的力学问题, 植物生物力学问题等。各种生物肌体及其系统的复杂性和特异性使生物力学领域涵盖的研究范围非常广泛, 包括生物材料、心血管和呼吸系统的生物力学、材料的特性、医用植入物与机体之间的相互作用、生物组织 (如肿瘤等) 的热传输和物质传输、调节新陈代谢和随意运动的生物控制系统、人体步态分析的运动学和动力学应用等。本章着重介绍骨骼肌肉生物力学、循环系统生物力学、细胞-分子生物力学、心血管生物力学及其应用等。

### 2.1 生物力学概论

#### 2.1.1 生物力学简介

在人类文明发展进程中, 科学家们早已对人体生命过程中出现的力学问题进行探索。英国生理学家哈维 (William Harvey, 1578—1657), 首次在静脉中发现有瓣膜, 认为瓣膜的作用是阻止血液从心脏流离出来, 提出静脉的功能是血流回心脏。他用绵羊的心脏计算血液流量每小时搏出量 245.4 kg, 尽管他没有发现毛细血管, 还不知道静脉和动脉之间怎么连接, 推定必有一个循环系统存在。哈维提出心脏流体力学中的连续性原理, 从理论上论证了血液循环的存在, 被认为是第一位生物力学家。直到 1661 年, 马尔皮基 (Maloighi, 1628—1694) 在解剖青蛙时, 在蛙肺中看到了微循环的存在, 证实了哈维的论断。

博雷利 (Giovanni Alqonso Borelli, 1608—1678) 是意大利的数学家、物理学家和生理学家, 他对动物运动力学特别有兴趣, 出版了两卷《论动物运动》的专著。他用杠杆和力学的基本原理分析肌肉的作用, 讨论了人体运动时的力学问题。

英国物理学家、生物学家胡克 (Robert Hooke, 1635—1703) 创立了胡克定律, 阐明了弹性材料的应力与应变之间的关系, 并在生物学中最先使用“细胞”这个词。

英国生理学家黑尔斯 (Reverend Stephen Hales, 1677—1761) 测量了马的动脉血压, 并且寻求血压与失血的关系, 解释了心脏泵出的间歇流如何转化成血管中的连续流, 他在血液流动中引进了外周阻力概念, 并指出: 产生这种阻力的主要部位在细血管处, 他还估计出左心室收缩压, 以及主动脉血流速度为 0.5 m/s。

杨 (Thomas Young, 1773—1829) 是英国医生和物理学家, 提出了弹性力学中的杨氏模量。他证明了光的波动原理, 他设计了测定红细胞大小的装置。他研究了在直管和弯管里的液体流动, 以及在弹性管上搏动波的传播, 然后将这些规律应用到人体动脉上, 论述了脉搏传播的速度和动脉血管弹性关系。他还建立了关于声带发声的弹性力学理论。

亥姆霍兹 (Hermann von Helmholtz 1821—1894) 是德国科学家, 他研究非常广泛, 包括光学、声学、热力学、电动力学、生理学、医学, 还包括神经传导速度的测量、肌肉收缩的产热等。

泊肃叶 (Poi-seuille, 1799—1869) 法国生理学家, 仔细观察血液在血管中的流动, 建立了 Poiseuille 定律, 是黏性流体力学发展的基石。

克罗赫 (Krogh, 1874—1949) 丹麦生理学家, 建立了微循环力学, 并获得 1922 年诺贝尔生理学奖。

沃尔夫 (Julius Wolff, 1836—1902) 为德国医生, 他提出了著名的骨重建的“Wolff 定律”。他假设骨重建时被优化, 以最小的质量提供最大的强度, 认为骨将改变内部结构以影响外部的强制力和负荷, 进而证明了松质骨和应力轨迹之间精确的相似性。

冯元桢 (Yuan-Cheng Fung) 1981 年出版了第一本生物力学经典教材《生物力学: 活组织的力学性质》, 1984 年出版了《生物动力学: 血液循环》, 1990 年出版了《生物力学——运动、流动、应力和生长》。

生物力学的兴起, 从发展的进程来看, 20 世纪 60 年代中期至 70 年代是生物力学开创和奠基阶段, 其特点是将力学方法和生理学、病理学、解剖学等方法相结合, 研究组织和器官层次上的生命现象。80 年代至 90 年代初, 生物力学进入细胞范围, 从医学、生物医学工程, 扩展到生化工程、生物技术、细胞生物学等新的领域。90 年代以来, 生物力学研究深入到细胞分子水平, 逐渐形成了一个新兴学科“生物力学”。近年来特分子生物力学的突破性成就, 极大促进了学科的发展。

### 2.1.2 生物力学研究领域

(1) 如果按照力学经典的分类方法, 生物力学可分为固体生物力学和流体生物力学。固体生物力学包括骨、关节生物力学, 软组织生物力学, 器官生物力学, 运动生物力学, 生物摩擦学等; 流体生物力学包括血流动力学, 血液流变学和生物流变学, 心血管系统生物力学,