

普通高等教育“十三五”规划教材

Biomechanics

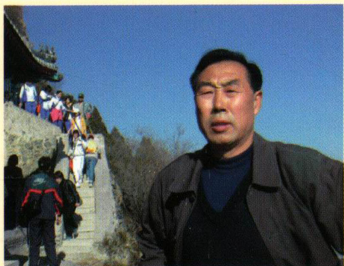
Biomechanics

仿生机械学

张春林 赵自强 主编



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



张春林：北京理工大学教授，博士生导师，机械设计及理论学科学术带头人，全国机械原理教学研究会副理事长，北京机械原理研究会理事长。长期从事机械设计及理论学科的教学与科研工作。主编的《机械创新设计》、《机械工程概论》和《机械原理》、《机械原理》（英汉双语）教材被评为普通高等教育“十一五”国家级规划教材，“十二五”普通高等教育本科国家级规划教材；主编的研究生教材《高等机构学》被评为北京市精品教材。主持或参加教育部、北京市、北京理工大学的教学改革立项课题多项，主持或参加国防科工委、总装备部以及其它各类科研课题多项，在国内外学术刊物或学术会议上发表论文100多篇，其中多篇被EI收录；获国家专利多项。

普通高等教育“十三五”规划教材

仿生机械学

主编 张春林 赵自强

参编 张颖 司丽娜 赵嘉珩



机械工业出版社

本书第一篇为仿生学综述,包括生物的分类与进化、植物及其运动特性、动物及其运动特性。在此基础上,介绍仿生学的主要研究内容,如模仿动物运动特性的机械仿生,模仿生物感官与信息传递特性的信息与控制仿生,模仿生物特殊功能的化学仿生、电子仿生,模仿生物特殊结构的建筑仿生以及模仿人体器官的医学仿生等。第二篇介绍机械学基础,如动物肢体结构的机械运动简图表示方法以及自由度计算,仿生机构的运动与动力分析等。最后,第三篇介绍动物在陆地步行、跳跃与爬行,空中飞行与水中游动的运动机理以及仿生设计理论与方法,还介绍了人体肢体运动的仿生及假肢,形成了从仿生学基础、机械学基础到仿生机械设计的完整仿生机械学体系。

本书具有科学性、知识性、科普性、趣味性、启发性和应用性,可供高等学校研究生和本科生使用,也可作为相关工程技术人员的参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

仿生机械学/张春林,赵自强主编. —北京:机械工业出版社,2018.4
普通高等教育“十三五”规划教材
ISBN 978-7-111-59048-4

I. ①仿… II. ①张… ②赵… III. ①仿生机构学-研究生-教材
IV. ①TH112

中国版本图书馆CIP数据核字(2018)第018745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:余 皞 责任编辑:余 皞 李 超 任正一

责任校对:王 延 封面设计:张 静

责任印制:李 昂

河北鹏盛贤印刷有限公司印刷

2018年4月第1版第1次印刷

184mm×260mm·16印张·394千字

标准书号:ISBN 978-7-111-59048-4

定价:49.80元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

电话服务

服务咨询热线:010-88379833

读者购书热线:010-88379649

网络服务

机工官网:www.cmpbook.com

机工官博:weibo.com/cmp1952

教育服务网:www.cmpedu.com

金书网:www.golden-book.com

封面无防伪标均为盗版

前言

创新是一个民族进步的灵魂，是国家兴旺发达的不竭动力。一个国家的创新能力决定了它在国际竞争和世界总格局中的地位，因此，我国正在为创建一个国家创新体系而努力。国家创新体系包括知识创新系统、技术创新系统、知识传播系统和知识应用系统。其中，知识创新系统的核心部分是国家科学研究机构和研究型的大学；技术创新系统的核心部分是企业；知识传播系统的核心部分是高等教育系统以及职业培训系统；知识应用系统的主体则是企业和社会，主要是知识和技术的应用。

仿生学则是通往创新的重要途径，为人类的创新活动提供创新思维的灵感和方法，已经为科学技术的发展和人类社会的发展做出了重大贡献。

在全人类的文明史中，我国最早涉及仿生学的应用。我们的汉字就是典型的仿生结果。汉字是象形文字，其实就是模仿生物界各种形状的文字，经过多年的演化，形成了现在的汉字。因此，中国人很早就留下了模仿自然界植物与动物特征的痕迹。我们的祖先巢氏模仿鸟类在树上筑巢，以躲避凶猛动物的攻击；相传在春秋战国时期的鲁班借鉴草叶的齿形边缘，制造出木锯，推动了木材加工及木质建筑的发展；据《韩非子》记载，鲁班曾用竹木作鸟“成而飞之，三日不下”。古人通过对水中鱼类的观察与模仿，伐木凿船，做成鱼形的船体，仿照鱼的胸鳍和尾鳍制成双桨和单橹，由此实现了水上自由航行，促进了水上交通的发展；我国河北省的赵州桥和西北地区的窑洞，采用了承受外力很强的拱形设计，这些都是典型的仿生学的具体应用。但人类早期的仿生研究是在长期生产实践活动中进行的，没有形成仿生学的基本理论与方法。

仿生学正式诞生于1960年9月，在美国俄亥俄州的戴顿召开的第一次世界仿生学会议中，美国的生物学家J. E. 斯梯尔把仿生学定义为“模仿生物原理来建造技术系统，或者使人造技术系统具有或类似于生物特征的科学”，并将这一新兴的科学命名为“Bionics”。1963年，我国学者将“Bionics”译为“仿生学”。通过研究生物体的结构、功能和性能机理，并将这些机理移植于工程技术之中，发明性能更加优越的仪器、装置或机器，创造新技术，是研究仿生学的主要目的。

随着生物科学技术的飞速发展，其他科学技术学科的科技人员逐渐发现了模仿自然界的生物可以提供许多更好的设计思想并能解决许多技术问题，因此在仿生学的基础上，分别在机械工程领域、建筑工程领域、医学领域、化学工程领域、电子工程领域、材料工程领域、信息工程领域、控制领域等许多学科开展了仿生的研究，促进了仿生学的迅速发展和与其他学科的交叉、渗透与融合，并形成了许多分支，仿生学已经成为推动科学技术发展的强大动力和连接生物科学与技术科学之间的桥梁。

作为一门独立的学科，仿生学就是模仿生物的科学。从生物学的角度来说，仿生学属于“应用生物学”的一个分支；从工程技术方面来看，仿生学根据对生物系统的研究，为设计和建造新的技术设备提供了新原理、新方法和新途径。进入21世纪后，仿

生学取得了快速发展,并形成了许多分支,如仿生化学、仿生电子学、仿生机械学、仿生建筑学、仿生信息学、仿生昆虫学、仿生材料学、仿生医学等。其中,发展最迅速、影响力最大、应用最广泛的是仿生机械学,如仿生机器人已经成为世人皆知的智能化仿生机械。

为了科学技术的发展与时俱进,很多高等工科学校的本科生或研究生都开设了仿生机械学的课程,有些大学还将仿生机械学列入学科研究方向,各种具体的仿生机器人的研究论文涉及面非常广泛,研究仿生学的学校和教师也非常多。但是,反映仿生机械学内容的相关书籍却很少,更缺少相应的教科书。主要原因是仿生机械学是21世纪新兴的学科,对该学科还没有形成广泛的共识。另外,仿生机械学涉及生物学、植物学、动物学、力学、化学、物理学、建筑学、医学、机械学、材料学、计算机科学、传感器技术、电子技术、信息与控制学等多学科的知识,编写覆盖这样庞大知识体系的教材难度很大,且编写体系与内容的选择也是一个巨大的挑战,存在很大的难度。

考虑到社会的需求以及我们在从事仿生学、生物力学和机械学领域中的科研与教学经历,我们决定尝试编写“仿生机械学”。

1. 编写指导思想

系统性、知识性、趣味性、新颖性、科普性和应用性相结合是编写本书的指导思想。在格式上力求图文并茂。

(1) 系统性 本书力求从生物学基础知识、仿生学基础知识、机械学基础知识到各种仿生机械的设计与分析,形成一个完整的仿生机械学的新体系。

(2) 知识性 本书第一篇从生物进化、植物分类及其运动特性,动物分类及其运动特性开始,阐述人类模仿这些动植物特性对人类社会的贡献,进而论述仿生学学科的诞生以及仿生学的分类,使读者得到一个完整的仿生学和仿生机械学的基本概念。第二篇的内容为学习仿生机械学打下基础,主要介绍机械学的基本知识:为了把待模仿动物的肢体结构用机构简图来描述,就必须首先学习机构以及机构运动简图的绘制,这一过程是把动物肢体结构机械化的过程,是学习仿生机械的根本。为模仿动物的运动,必须对仿生机械的肢体实施控制,而计算机构自由度则是控制仿生机械协调运动的依据;此外,还要学习机构的运动分析和受力分析,全面了解仿生机械的运动特性和力学特性,这是仿生机械能否实用的基本标准。第三篇则介绍具体的仿生机械的设计与分析,如模仿陆地上的步行动物的运动、爬行动物的运动以及跳跃动物的运动,模仿天上飞的鸟类以及昆虫类的飞行运动、模仿水中游动动物的运动,形成从陆地动物、海洋动物到空中飞行动物的完整的仿生机械设计与分析内容。最后,结合人体结构与损伤修复,介绍模仿人体关节、上肢与下肢的设计机理与方法,完善仿生机械学的内容。全书不仅自成系统,还特别突出、加强了知识性内容。

(3) 趣味性 为了突出趣味性,本书在知识性的基础上,加强了具有科普性的趣味内容。比如,动物按其运动形态分为步行动物、有腿爬行动物和走行动物,它们之间的异同点在哪里?如何区别它们的运动差别呢?本书给予详细说明。走行动物是指步行肢向下垂直于动物身体,如马、牛、羊等,它们是依靠四肢支承体重的,它们的迈步称为走行,如同人类的行走一样。有腿爬行动物的肢体由身体两侧向外伸出。如鳄鱼、蜥蜴、蚂蚁等动物,由于它们的腿向身体外侧伸出,不能长期支承其体重,迈步时只能肚

皮着地，分担腿部的承受力，故称为爬行动物。这类爬行动物和前述走行动物都是依靠腿的迈步实现运动的，故统称为步行动物。爬行动物又分为三类：有腿爬行动物（蜥蜴等）、有足爬行动物（尺蠖等）和无足爬行动物（蛇类等），对它们的运动机理进行分析，具有知识性和趣味性。又比如，国外文献记载人体有 206 块骨骼，中国研究人员发现中国人只有 204 块骨骼，差异在何处呢？经过大量反复研究，发现中国人的小脚趾骨有两个关节，而欧美人有 3 个关节，正好相差两块骨骼。后来又发现日本人与中国人一样，同样有 204 块骨骼。又如本书中提到的仿生学遐想中人类冬眠问题，既是遐想，但又具有前瞻性和趣味性。总之，本书的趣味性内容与知识性、科学性内容相结合，但又与课程内容密切相关，增强了本书的可读性。

(4) 新颖性 仿生机机械学的内容极其复杂，涉及植物学、动物学、仿生学、医学、机械学、控制理论、信息科学等大量一级学科的交叉知识，且找不到类似文献，如何编排本书的体系与内容，成为最大挑战。本书提出了生物学基础、机械学基础和仿生机机械设计分析的总体结构体系；具体内容包括植物及其运动特性，动物及其运动特性，模仿动植物结构与运动的仿生学，动物的结构与运动的机械化描述以及运动自由度的计算，肢体运动分析与受力分析，模仿地上跑的、天上飞的、水里游的仿生机机械设计等。从内容和体系都比较新颖完整，是我国第一部全面介绍仿生机机械学的书籍。

本书除介绍国内外的最新研究进展外，还介绍了作者的观点与研究成果，如提出了主动关节和被动关节的概念。机器人手臂关节需要关节电动机驱动，称为主动关节；而人类肢体上的仿生人工关节，则称为被动关节。这是因为该类人工关节由肌肉驱动，所以和主动关节的设计有很大的不同。如肩关节是 3 个自由度的球面副，在主动关节设计中，就不能采用 3 个自由度的球面副，或采用 1 个单自由度的转动副，或采用 2 个单自由度的转动副组合代替，其原因是很难控制球面副的 3 个转动。但是，在被动肩关节中，就必须采用 3 个自由度的球面副，因为从肩胛骨到肱骨之间由肌肉群驱动。鉴于上述原因，在主动球面关节的设计中，本书采用 3 个自由度的空间并联机构代替肩关节或髋关节的球面副；在仿生机机械鱼的鱼鳍设计中，大都采用单自由度摆动关节结构，本书提出了逼真的模仿鱼鳍运动的 2 个摆动副组合设计方案。

(5) 科普性 本书略去了仿生机机械的动力学设计、传感系统以及计算机控制算法等比较复杂的课程内容，保留了动物运动形态的机械化描述以及运动分析与设计等仿生机机械学的基本内容，内容编排涉及面宽，具有很好的仿生机机械学的科学普及性，很多人都能看懂，也具有可读性。

(6) 应用性 学习就是为了用。本书突出各类动物运动特征的仿生设计，并给出相应的仿生设计实例，以适合仿生机机械学的研究内容和具体的实际应用。

2. 体系与内容

仿生机机械学涉及仿生学和机械学，而仿生学又涉及生物学、植物学及动物学。因此，本书的体系是在介绍生物学、植物学以及动物学的基础上，再介绍仿生学基础知识，然后介绍机械学的基础知识，最后介绍仿生机机械设计与分析。形成生物学、植物学、动物学、仿生学、机械学和仿生机机械学的体系。

本书内容除去绪论外，分为三篇，第一篇为仿生学综述，主要介绍仿生学的基础知识，包括生物分类与进化，植物及其运动特性、动物及其运动特性；介绍仿生学的基本

概念及分类,包括电子仿生、信息与控制仿生、机械仿生、化学仿生、建筑仿生、医学仿生以及生物界的奇特现象与仿生等内容。本篇内容主要体现知识的科普性和趣味性。第二篇为机械学基础,主要介绍机械的基本知识、机构运动简图的绘制、机构自由度的计算、自由度与控制、机构运动分析、机构受力分析以及机构设计方法等内容,其目的是把动物结构用机构简图来表示,然后计算其自由度,进行运动与动力分析,把动物结构机械化,用机械学的知识解决动物的组成与运动等问题。本篇内容主要说明仿生学向仿生机械学过渡中的基本知识。第三篇为仿生机械设计与分析,主要介绍模仿动物步行的仿生机械步态分析、腿部结构与设计、步行的稳定性等;介绍模仿动物爬行的仿生机械运动原理及其设计、模仿鸟类及昆虫飞行的仿生机械运动原理及其设计;介绍模仿鱼类和其他动物在水中游动的仿生机械运动原理及其设计;介绍仿生机械关节以及仿生机械假肢的设计与分析等。本篇内容是本书的重点内容,涉及各类仿生机械的设计与分析。

3. 一些说明

1) 本书在介绍生物学、植物学、动物学的基本知识时,没有严格按照它们的分类进行说明,而是按照与仿生学相关的内容进行大幅度的简化与归纳,为介绍仿生学综述奠定基础。例如:本书中的爬行动物就没有按照动物学的分类去讨论,而是按照腿足特性将爬行动物分为三类:有腿爬行动物(蜥蜴、鳄鱼等具有典型的关节腿)、有足类爬行动物(尺蠖等蝶蛾幼虫,没有典型的关节腿,只有露出体外的足)和无足类爬行动物(蛇、蚯蚓等,没有腿和足),有足类爬行动物是作者的命名,是否适合动物学家的分类尚不得而知,但这样的分类法从仿生机械学的观点看是清楚的。

2) 在介绍机械学基础知识时,重点突出动物结构的机构简图的绘制,自由度的计算,按机构简图进行运动分析、受力分析,以及机构的尺度设计等内容,为生物体的机械设计奠定理论与方法基础。由于仿生机械的运动主要是依靠连杆机构完成的,所以连杆机构(含闭链和开链机构)是机械学基础的主体内容。

3) 第三篇仿生机械设计与分析是本书的重点内容,主要是模拟动物的运动特性进行仿生设计,如各类动物的陆地步行、爬行、空中飞行、水中游动的仿生设计及相应的仿生机械。

4) 仿生研究不能照搬生物原型,主要是从中吸取设计思想和创新灵感,否则会走弯路。如扑翼结构的飞行器永远不如固定翼飞行器飞得快、飞得高、飞得远。因此,本书在用机构简图描述动物形体结构时,往往进行适度简化,以简化机械结构和便于进行控制。这是人类在进行仿生研究中得到的宝贵经验。

5) 生物种类繁多,对应的仿生机械种类很多,本书不能面面俱到,只能涉及典型动物的仿生设计及其仿生装置。

6) 关于仿生学中的一些名词,本书给予了一定的说明。由于仿生学是一门新兴学科,涉及的内容极其广泛,故有很多词语的表达有很多的不同论述,容易引起误解。如力学仿生与仿生力学、医学仿生与仿生医学、电子仿生与仿生电子学、建筑仿生与仿生建筑学、机械仿生与仿生机械学等许多用语大都是混用的,极易引起误解。仿生机械与机械仿生也是混用的词汇,本书对这些术语做了界定,说明这些提法是有区别的。

7) 本书在绪论中增加了仿生学遐想,虽然只是一点点遐想,但遐想有助于创新思

维的培养与提高。这里提出遐想的目的仅仅是为了启发读者，不是空想，而是通往创新之路的途径。

8) 仿生机械学包含的知识面极其广泛，从植物学、动物学、生物学、仿生学、力学，再到机械学，很难把一些从表面上看去互不相关的内容融合在一起，从而形成一个完整的仿生机械学新体系。虽然很多学校开设了仿生机械学课程，但没有教材，只有个别的电子课件。各个课件内容都围绕某一具体的仿生机械进行讨论，各说各话，难以发现它们的体系与普适内容。编者思考良久后，拟订出本书的编写体系。确定编写体系后，又遇到内容的编排问题，如严格按照植物学和动物学介绍它们的组成与分类，则对于非生物专业的人员来讲，过于烦琐和专业，一般不易看懂。所以本书将这些内容按照仿生机械学认知规律进行改编。同样的道理，对机械学基础也进行了简化，以适合非机械专业的学生学习。

9) 本书的编写过程是编者边写作、边学习、边研究、边提高的过程。在编写过程中，编者也明白了以前许多不明白、不清楚的地方。譬如说，吃了多年的鲤鱼，竟然不知道有多少鱼鳍！哪里是偶鳍？哪里是奇鳍？为何鱼尾附近的肉好吃？原来鱼的游动主要摆动身体的后 $1/3$ 的部分，当然肌肉发达就好吃。又例如，鸟类上下扇动翅膀则可前进飞行，而蜻蜓类的昆虫上下扇动翅膀则不能向前飞行，通过学习空气动力学才弄清楚。为了弄清楚鱼类摆动尾鳍引起的反卡门涡街现象，需要研究流体力学的基本知识。这样类似边学习、边研究、边提高的例子很多，编者在书中都有论述。

10) 在仿生机械设计与分析的内容中，有些内容是团队的研究与探索对象，仅供参考。

参加本书编写的有：张春林（前言、绪论、第三章、第四章）、张颖（第一章、第二章）、赵自强（第五章、第六章、第七章）、司丽娜（第八章、第九章）、赵嘉珩（第十章）。全书由张春林和赵自强任主编并负责统稿。

机械工业出版社为本书的构思、编写以及出版提供了大力帮助与支持，在此表示感谢。

总之，由于编写难度大、编写时间长，且涉及多学科知识的融合，加之编者水平有限，难免存在错误、疏漏之处，敬请广大读者批评指正。

编者

CONTENTS

目 录

前言		第二节 仿生机械学的研究内容、目的与意义	4
绪论	1	第三节 仿生遐想	10
第一节 仿生学概述	1		

第一篇 仿生学综述

第一章 生物学基础	14	第一节 仿生学及其研究内容	47
第一节 生物及其分类	14	第二节 电子仿生	51
第二节 生物的多样性	17	第三节 信息与控制仿生	54
第三节 生物的进化	19	第四节 机械仿生	56
第四节 植物及其运动特性	22	第五节 化学仿生	64
第五节 动物及其运动特性	30	第六节 建筑仿生	65
第六节 仿植物机器人综述	42	第七节 医学仿生	68
第二章 仿生学简介	47	第八节 动物界的奇特现象与仿生	72

第二篇 机械学基础

第三章 机械结构学基础	78	演化	107
第一节 机械的基本概念及组成	78	第三节 平面连杆机构的基本性质	110
第二节 运动链与机构	80	第四节 平面连杆机构的设计	114
第三节 机构运动简图	88	第五节 平面连杆机构的运动分析	121
第四节 机构自由度的计算	91	第六节 平面开链机构的设计与分析	132
第五节 机构的结构分析	99	第五章 机械力学基础	137
第四章 机械运动学基础	105	第一节 力分析概述	137
第一节 机械运动学概述	105	第二节 平面闭链机构的力分析	139
第二节 平面连杆机构的基本类型及		第三节 平面开链机构的力分析	143

第三篇 仿生机械设计与分析

第六章 仿动物步行的机械及其设计	148	第四节 仿生机械蛇及其设计	178
第一节 步行机械概述	148	第八章 仿动物飞行的机械及其设计	187
第二节 步行机械的腿及其设计	149	第一节 飞行动物概述	187
第三节 步行机械的步态分析	156	第二节 飞行机理简介	193
第四节 仿生步行机械系统的运动方程	162	第三节 昆虫的飞行与仿生设计	195
第五节 仿生跳跃机械的设计与分析	167	第四节 鸟类的飞行与仿生设计	199
第七章 仿动物爬行的机械及其设计	171	第九章 仿动物水中游动的机械及其设计	205
第一节 爬行动物概述	171	第一节 水中游动的动物概述	205
第二节 仿生机械尺蠖及其设计	175	第二节 游动机理分析	208
第三节 仿生机械蚯蚓及其设计	176		

第三节	仿生机械鱼的设计与分析	211	第一节	概述	225
第四节	仿生机械水母的设计与分析	217	第二节	仿生关节的设计与分析	230
第五节	仿生机械墨鱼的设计与分析	221	第三节	仿生人体上肢的设计与分析	235
第十章	仿人体组织结构的机械及其 设计	225	第四节	仿生人体下肢的设计与分析	241
			参考文献	246

绪 论

第一节 仿生学概述

一、仿生学的概念与诞生

自古以来，自然界的生物就是人类各种技术思想、工程设计及发明创造的源泉。种类繁多的生物在严酷的自然生存环境中，经过优胜劣汰和长期的不断进化，形体大小、身体颜色、体内器官、外部结构以及性能不断完美，逐渐适应生存环境的变化，从而能够生存和发展。人类不仅善于观察和认识生物，而且还运用人类所独有的思维和设计能力学会了模仿生物，并制作相应的工具。相传早在大禹治水时期，我国古代劳动人民观察鱼在水中通过鳍和尾巴的摆动而前进、倒退和转弯，他们就模仿鱼的身体形状凿木为船，在船边架桨，船尾置舵，增强了船的动力和灵活性，掌握了使船转弯的方法。这样，即使在波涛滚滚的江河中，人们也能驾驶船只自如航行。看到鸟儿展翅在空中自由飞翔，鲁班曾用竹木做鸟“成而飞之，三日不下”（据《韩非子》记载），这是人类最早制作的扑翼机。15世纪初，达·芬奇设计了世界上第一架符合技术规程的扑翼机；1878年英国伦敦博览会上首次展示了英国人哈尔格莱夫制作的带有发动机的扑翼机和德国人李林塔尔研制的带有小型发动机的扑翼机。这些模仿生物构造和功能的发明与尝试，是人类仿生学的先驱，也是仿生学的萌芽。

人类仿生的行为虽然早有雏形，但是在20世纪40年代以前，人们并没有自觉地把生物作为设计思想和发明创造的源泉。科学家对于生物学的研究也只停留在描述生物体精巧的结构和完美的功能上。而工程技术人员更多地依赖于他们的聪明才智、辛苦的研究，进行着人工发明，很少有意识地向生物界学习。

在利奥那多·达·芬奇研究鸟类飞行造出第一个飞行器400年之后，人们经过长期反复的实践，终于在1903年发明了飞机，人类实现了飞上天空的梦想。由于不断改进，飞机不

论在速度、高度和飞行距离上都超过了鸟类，显示了人类的智慧和才能。但是在继续研制飞行速度更快的飞机时，碰到一个难题，就是机翼发生了空气动力学中的颤振。当飞机飞行时，机翼发生有害的振动，飞行越快，机翼的颤振越强烈，甚至使机翼折断，造成飞机坠毁和人员的伤亡。飞机设计师们为此花费了巨大的精力研究消除有害的颤振现象，经过长时间的努力才找到解决这一难题的方法，即在机翼前缘的远端上安放一个配重装置，这样就把有害的颤振消除了。可是，昆虫早在三亿年以前就飞翔在空中了，它们的翅膀也毫不例外地受到颤振的危害，经过长期的进化，昆虫早已成功地解决了翅膀颤振的问题。生物学家在研究蜻蜓翅膀时，发现在每个翅膀前缘的上方都有一块深色的角质加厚区，并称之为翼眼或翅痣。如果把翼眼去掉，蜻蜓的飞行就变得荡来荡去。实验证明，正是翼眼的角质组织使蜻蜓飞行的翅膀消除了颤振的危害。假如设计师们先向昆虫学习翼眼的功用，获得有益于解决颤振的设计思想，就可缩短解决颤振的时间，避免长期的探索和人员的牺牲了。而近期的研究表明，蜻蜓的翅膀处有大量血管分布，并通向翼眼，利用进出血量的多少来控制翼眼的质量大小，从而可以消除不同频率下的颤振现象，这为完全消除飞机机翼的颤振提供了很好的设计思想。

该事例发人深省，也使设计人员受到了很大的启发。早在地球上出现人类之前，各种生物已经在自然界中生活了亿万年，它们为生存而斗争的长期进化中，获得了与大自然相适应的能力。生物在进化过程中形成的极其精确和完善的机体与特性，使它们具备了适应内外环境变化的能力。生物具有许多卓有成效的本领，如体内的生物合成、能量转换、信息的接收和传递、灵巧的运动、对外界的识别、导航、定向计算等，显示出许多机器所不可比拟的优越之处。

随着生产的需要和科学技术的发展，从 20 世纪 50 年代以来，人们已经认识到生物系统是开辟新技术的重要途径之一，开始自觉地把生物作为各种技术思想、设计原理和发明创造的源泉。人们用化学、物理学、数学、机械学以及技术模型对生物系统开展着深入的研究，促进了生物学的极大发展，对生物体内功能机理的研究也取得了迅速的进展。此时模拟生物不再是引人入胜的幻想，而成为了可以做到的事实。生物学家和工程师们积极合作，开始将从生物界获得的知识用来改善旧的或创造新的工程技术产品。生物学开始跨入各行各业的技术革新和技术革命的行列，而且首先在自动控制、航空、航海等军事部门取得了成功，于是生物学和工程技术学科结合在一起，互相交叉渗透，逐渐孕育出一门新生的学科——仿生学。

仿生学作为一门独立的学科的诞生，一般以 1960 年全美第一届仿生学学术讨论会的召开为标志。

1960 年 9 月，美国空军航空局在俄亥俄州的戴顿召开了第一次世界仿生学会议，美国的斯梯尔为新兴的科学命名为“Bionics”，1963 年我国将“Bionics”译为“仿生学”。斯梯尔把仿生学定义为“模仿生物原理来建造技术系统，或者使人造技术系统具有或类似于生物特征的科学”。简言之，仿生学就是模仿生物的科学。确切地说，仿生学是研究生物系统的结构、特质、功能、能量转换、信息控制等各种优异的特征，并把它们应用到技术系统，改善已有的技术设备，或创造出新的技术设备、建筑构型以及自动化装置等。从生物学的角度来说，仿生学属于应用生物学的一个分支；从工程技术方面来看，仿生学根据对生物系统的研究，为设计和建造新的技术设备提供了新原理、新方法和新途径。仿生学能为人类提供最可靠、最灵活、最高效、最经济的接近于生物系统的技术系统，为人类造福。仿生学的研

究内容极其丰富多彩，因为生物界本身就包含着成千上万种类，它们具有各种优异的结构和功能供各个行业进行研究。

二、仿生学的分类

从广义角度出发，仿生学是研究自然界中各种生物系统的结构、特质、功能、能量转换、信息传递与控制等各种优异的特征，从而设计、创造出新型的技术系统，服务于人类社会的一门学科。

从狭义角度出发，由于仿生学研究内容很广泛，研究内容的分类方法很难统一，但大体上有如下分类方法。

第一种分类方法，把仿生学分为：力学仿生、分子仿生、能量仿生、信息与控制仿生等。

力学仿生：研究并模仿生物体总体结构与精细结构的静力学性质，以及生物体各组成部分在体内的相对运动和生物体在环境中运动的动力学性质。例如：建筑领域模仿贝壳修造的大跨度薄壳建筑及模仿股骨结构建造的立柱，既消除了应力集中区域，又可用最少的建筑材料承受最大的载荷。军事上模仿海豚皮肤的沟槽结构，把人工海豚皮包敷在船舰外壳上，可减小航行湍流和水流的摩擦阻力，提高航行速度。

分子仿生：研究与模拟生物体中酶的催化作用、生物膜的选择性、通透性、生物大分子或其类似物的分析和合成等。例如：在搞清森林害虫舞毒蛾性引诱激素的化学结构后，合成了一种类似有机化合物，在田间捕虫笼中用 $1 \times 10^{-7} \mu\text{g}$ ，便可诱杀雄虫。

能量仿生：研究与模仿生物器官发光、发电现象，肌肉直接把化学能转换成机械能等生物体中的能量转换过程等。美国犹他大学的研究人员发现人体的新陈代谢过程中，几乎所有的活体微生物都用葡萄糖来制造能量。于是研制出了一种用糖做燃料、用天生拥有能量转化属性的酶做催化剂的生物电池。

信息与控制仿生：研究与模拟生物的感觉器官、神经元与神经网络以及高级中枢的智能活动等生物体中的信息处理过程。例如：根据象鼻虫视动反应制成的自相关测速仪，可测定飞机着陆速度；根据蜚鱼复眼视网膜的工作原理，研制成功可增强图像轮廓、提高反差，从而有助于模糊目标检测的一些装置。

在生物学界，把仿生学列入生物学的分支。因此上述分类方法侧重于生物科学，生物科技人员经常采用这种分类方法。

第二种分类方法，把仿生学分为：电子仿生、信息与控制仿生、机械仿生、化学仿生、建筑仿生、医学仿生等。这种分类方法侧重各学科门类，生物学界之外的工程技术人员容易接受这种分类方法。

关于仿生学的分类，目前没有统一的方法。有的文献把分子仿生与能量仿生的部分内容称为化学仿生，而把信息和控制仿生的部分内容称为神经仿生。

实际上，两大分类方法并无本质差别。例如：研究与模仿生物体的器官发光与发电现象，前者列入能量转换仿生，后者列入化学仿生或电子仿生；模仿生物体的运动，前者列入力学仿生，后者列入机械仿生。模仿壳状建筑，前者列入力学仿生，后者列入建筑仿生；模仿生物体的神经网络，前者列入神经仿生，后者列入医学仿生。仿生细胞学的内容前者列入分子仿生，后者列入化学仿生。不同的分类方法并不影响仿生学的研究与进展，所以仿生学的分类还处于仁者见仁、智者见智的阶段。由于编者的工程背景，本书采用了第二类分类方法安排仿生学的基本内容。

另外,关于仿生学分支的称呼问题也需要加以解释,如仿生细胞学与细胞仿生、仿生机械学与机械仿生、仿生医学与医学仿生、仿生电子学与电子仿生、仿生力学与力学仿生等。实际上,称呼的不同,其含义是不相同的。例如:植物仿生与仿生植物有本质不同,仿生植物是模仿自然界的植物,用聚酯、塑料等材料设计、制造出外形形似的无生命力的植物,如假花、假草之类,用于美化环境。植物仿生学是模仿自然界的植物特性,如茎干结构、根系特点,叶片功能等,探讨设计新产品的理论与方法。机械仿生是指用机械手段去模仿生物体的结构、功能以及运动特性等,其目的是设计出新颖的仿生机械产品。而仿生机械学则是指模仿生物体结构、特性以及运动相关的机械学的理论与方法,其目的是为设计具体的仿生机械提供理论与方法的指导,两者有很大的差别。该解释也适合其他仿生学的分支。

仿生学的研究内容是极其丰富多彩的,因为生物界本身就包含着成千上万的种类,它们具有各种优异的结构和功能供各行各业来进行研究。自从仿生学问世以来,仿生学的研究得到迅速的发展,且取得了很大的成果。例如:航海部门对水生动物运动的流体力学的研究,航空部门对鸟类、昆虫飞行的模拟,工程建筑对生物力学的模拟,无线电技术部门对于神经细胞、感觉器官和神经网络的模拟,计算机技术对于脑的模拟以及人工智能的研究等都取得了很大的成绩。近些年又出现了新的分支,如人体的仿生学、分子仿生学和宇宙仿生学等。

总之,从模拟微观世界的分子仿生学到宏观的宇宙仿生学,仿生学包括了更为广泛的内容。而当今的科学技术正处于各种不同的自然学科高度综合和互相交叉与渗透的新时代,对生物学的发展也起了极大的促进作用。在其他学科的渗透和影响下,生物科学的研究在方法上发生了根本的转变;在内容上也从描述和分析的水平向着精确和定量的方向深化。而生物学的发展又以仿生学为渠道向各种自然科学和技术科学输送宝贵的资料和丰富的营养,加速了科学的发展。因此,仿生学的科研显示出无穷的生命力。这也是我国高等学校正在掀起对仿生学进行广泛研究的主要原因。

第二节 仿生机械学的研究内容、目的与意义

一、仿生机械学的内容

仿生机械学是仿生学中的一个分支,主要工作是研究用机械装置或机电装置模仿生物体的结构与运动特性,从而设计出类似生物的机电装置,服务于人类社会,促进人类社会的发展。本书的内容从生物学基础、仿生学综述和机械学基础出发,重点论述仿生机械设计的基本理论和基本方法,如仿动物步行的机械、仿动物爬行的机械、仿动物飞行的机械、仿动物在水中游动的机械、仿昆虫的微小机械等,为设计仿生机械开拓设计思路、提供创新思想,以及设计新型机械等奠定理论基础。

主要内容有:

第一章的生物学基础中,介绍生物及其分类、生物的多样性、生物的进化、植物及其运动特性、动物及其运动特性的基本知识以及仿植物机器人综述,目的是提供动植物的基本知识,为了解仿生学做预先准备工作。

第二章的仿生学简介中,介绍仿生学及其研究内容、电子仿生、信息与控制仿生、机械仿生、化学仿生、建筑仿生、医学仿生、动物界的奇特现象与仿生的基本概念,提供了仿生学的基本知识。

第三章的机械结构学基础中,介绍机械的基本概念及组成、运动链与机构、机构运动简

图、机构自由度的计算、机构的结构分析等基本知识，为动物肢体的机械化描述奠定理论基础。

第四章的机械运动学基础中，介绍机械运动学、平面连杆机构的基本类型及演化、平面连杆机构的基本性质、平面连杆机构的设计、平面连杆机构的运动分析、平面开链机构的设计与分析等基本知识，为设计仿生机械奠定理论基础。

第五章的机械力学基础中，介绍力分析的概念、平面闭链机构的力分析、平面开链机构的力分析，为分析仿生机械的力学性能奠定理论基础。

第三篇仿生机械设计与分析是本书重点内容，按动物运动形态进行分类描述。第六章内容为仿动物步行的机械及其设计，主要介绍步行机械腿、步态分析、步行机械系统的运动方程等内容；第七章内容为仿动物爬行的机械及其设计，主要介绍仿生机械尺蠖、仿生机械蚯蚓及仿生机械蛇的设计；第八章内容为仿动物飞行的机械及其设计，主要包括飞行机理介绍、昆虫的飞行与仿生设计以及鸟类的飞行与仿生设计等；第九章内容为仿动物水中游动的机械及其设计，主要包括游动机理分析、仿生机械鱼的设计与分析、仿生机械水母的设计与分析、仿生机械墨鱼的设计与分析等；第十章内容为仿人体组织结构的机械及其设计，主要内容有人体关节的仿生设计、人体上肢的仿生设计以及人体下肢的仿生设计。

仿生机械学的内容极其广泛，如以骨骼或软组织（肌肉、皮肤等）作为研究对象，通过模型实验方法，测定其应力、变形特性，求出力的分布规律，对骨和肌肉的相互作用等进行分析研究，设计人工骨骼和人工肌肉；研究人体的血流动力学、分析治疗人类的心血管疾病等大量内容没有涉及，仅从动物的运动形态出发进行仿生机械细节设计，从生物学、仿生学、机械学的基本知识，再到天上飞的、地上跑的、水里游的各种动物的运动进行机械仿生设计以及人体仿生假肢的设计，内容丰富。

二、研究仿生机械学的目的与意义

人类要从生物系统中获得启示，首先需要研究生物和技术装置是否存在着共同的特性。1940年出现的调节理论，将生物与机器在一般意义上进行对比，到1944年，一些科学家已经明确了机器和生物体在通信、自动控制与统计力学等一系列的问题上都是一致的。生物体和机器之间确实有很明显的相似之处，这些相似之处可以表现在对生物体研究的不同水平上。由简单的单细胞到复杂的神经系统，都存在着各种调节和自动控制的生理过程。我们可以把生物体看成是一种具有特殊能力的机器，和其他机器的不同就在于生物体还有适应外界环境和自我繁殖的能力。也可以把生物体比作一个自动化的工厂，它的各项功能都遵循着力学的定律；它的各种结构协调地进行工作；它们能对一定的信号和刺激做出定量的反应，而且能像自动控制一样，借助于专门的反馈联系组织以自我控制的方式进行自我调节。例如：我们身体内恒定的体温、正常的血压、正常的血糖浓度等都是肌体内复杂的自动控制系统进行调节的结果。控制论的产生和发展，为生物系统与技术系统的连接架起了桥梁，使许多工程人员自觉地向生物系统去寻求新的设计思想和原理。于是出现了这样一个趋势，工程师为了和生物学家在共同合作的工程技术领域中获得成果，就主动学习生物科学知识。

仿生学也被认为是与控制论有密切关系的一门学科，而控制论主要是将生命现象和机械原理加以比较，进行研究和解释的一门学科。

大家知道，机械是一个国家发展国民经济的命脉，机械发展水平就代表了一个国家的强大程度，现代人的生活与工作已经离不开机械。设计、研制新机械是工程技术人员的永恒任务。借助生物的一些特性设计新机械逐渐成为设计人员寻求灵感与创新的重要途径。因此，