

普通高等教育“十三五”规划教材

国家自然科学基金青年科学基金项目 (61501034)

仿生机械概论

Introduction to Biomechanics

◎ 罗 霄 罗庆生 编著



仿生机械概论

罗 霄 罗庆生 编著



北京理工大学出版社

BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

内 容 简 介

仿生机械是指人们通过模仿生物的形态、结构、组织、材料、生活习性、运动特点、调节机制和控制原理来设计、制造出的功能更强、效率更高并具有生物特征的机械。研究仿生机械的科学称为仿生机械学,它以力学和机械学为基础,与生物学、工程学、电子技术、控制论等相关学科相互渗透、相互融合,是一门涉及多专业范畴的边缘性学科,也是一门涉及多技术领域的综合性学科。它主要对生物机制和生物现象进行力学研究,对生物体结构、形态、动作或功能进行工程分析和仿生设计,其研究内容和应用范围非常深邃与广泛。本书共有9章,具体包括绪论、仿生机械学的基本概念、仿生机械学的基础知识、仿生机械结构分析、生物运动特性分析、仿生机械运动学分析、仿生机械动力学分析、仿生机械运动机理及控制方法、仿生机械创新设计的原理与方法。本书详尽介绍了仿生机械学的基本概念、基础知识、理论方法、关键技术及实际应用,全面反映出国内外仿生机械学研究和应用的最新进展情况及其成果,是一部系统、全面、详实、准确的仿生机械学著作和教材。本书可作为普通高等院校机械设计及理论、机械电子工程、机械制造及自动化等机械类专业的本科生和研究生教材,也可作为从事仿生机械技术、机器人技术研究和应用的科研人员的学习参考用书。

版权专有 侵权必究

图书在版编目(CIP)数据

仿生机械概论/罗霄,罗庆生编著. —北京:北京理工大学出版社,2019.1

ISBN 978-7-5682-6384-9

I. ①仿… II. ①罗…②罗… III. ①仿生机构学-高等学校-教材 IV. ①TH112

中国版本图书馆CIP数据核字(2018)第221385号

出版发行/北京理工大学出版社有限责任公司

社 址/北京市海淀区中关村南大街5号

邮 编/100081

电 话/(010)68914775(总编室)

(010)82562903(教材售后服务热线)

(010)68948351(其他图书服务热线)

网 址/http://www.bitpress.com.cn

经 销/全国各地新华书店

印 刷/

开 本/787毫米×1092毫米 1/16

印 张/23

字 数/540千字

版 次/2019年1月第1版 2019年1月第1次印刷

定 价/59.00元



责任编辑/王玲玲

文案编辑/王玲玲

责任校对/周瑞红

责任印制/李志强

图书出现印装质量问题,请拨打售后服务热线,本社负责调换

前言

在自然界中，广大生物通过物竞天择和长期进化，已对自然环境产生了高度的适应性。它们的协调、适应、感知、决策、指令、反馈、运动、控制等机能组织和器官结构远比人类所制造的机械装置更为完善与合理。随着近代生物学和相关学科的发展，人们发现生物在姿态变化、能量转换、控制调节、信息处理、方位辨别、路径导航和环境感知等方面有着人类难以企及的长处。生物们所具有的优势使得人们开始虚心向其学习。

人类模仿生物的外部形态和内部结构去设计与制造各种机械装置已有十分悠久的历史。然而，在很长一段时间内，人们对生物与机器和机械之间到底存在什么共同之处还缺乏深入的认识，因而相关的研究工作及技术成果大多局限在对生物形体的简单模仿上。直到 20 世纪中叶，由于科学技术的发展和社会文明程度的提高，人们迫切要求机械装置应该具有高度的适应性和可靠性，而以往的机械装置无论在功能上，还是在性能上，都难以满足这些要求，因此人类必须寻找更为合适的设计理论和更加理想的技术途径。

人们可以看到，当今在自然界生存和繁衍的无数生物都是经过亿万年漫长的优胜劣汰存续下来的，长期的进化使得它们拥有合理和优化的形态特征与结构特点，以及神奇的生理功能、灵活的运动特性、良好的环境适应能力，因而成为人们建设现代文明世界的各种技术思想和发明创造产物的取之不竭、用之不尽的知识宝库和灵感源泉。自从仿生机械学诞生以来，人们重视学习和模仿生物体的结构、形态、功能和相关原理，以便设计出各种功能更强大、性能更优异、运作更高效并具有某些生物特征的机械装备。

虽然人类在仿生机械学的研究和运用方面取得了许多成就，但这仅是人类向生物学习的万里长征中的第一步。这是因为，如果我们把传统机械称之为一般机械的话，仿生机械就应该是指添加有人类智能的一类机械。众所周知，在物理性能方面，一般机械比人类的体力强出许多，但与人类的智力差距甚远。因此，如果能把人类与机械各自的优势巧妙结合起来，就有可能使一般机械进化为仿生机械。从这一角度出发，我们可以认为仿生机械应该既具有优良的“体能”，又具有优秀的“智能”，可以进行高效的运动、复杂的感知、巧妙的控制，完成人们期望的作业使命。因此，

利用生物丰富多彩的外部形态和千奇百巧的内部结构,以及复杂多变的机体技能,来发展仿生机械技术,将是推动人类社会物质文明建设的一个重要课题与发展方向。

人们不仅要研究生物系统在进化过程中逐渐形成的特殊结构和优越机能,更要大力揭示其组织结构的原理,评定其机能关系、适应方法、存活方式和自我更新的手段。把生物系统优越的形态、结构、机能和原理与各种现代科学技术及方法结合起来,人类就可能“青出于蓝而胜于蓝”,得到在某些性能上比自然界形成的生物体系更为完善的仿生机械。

本书作者在仿生机械领域有着多年的研发经验和丰硕的研究成果,在仿生机械相关课程的教学上也有着多年的实战经验。然而,遗憾的是,在以往仿生机械相关课程的教学过程中,存在仿生机械学的基本概念、仿生机械学的基础知识、仿生机械的结构分析、仿生机械的运动分析、仿生机械动力学分析、仿生机械运动机理及控制方法等仿生机械基础理论知识不足,在与实用技术有机结合过程中,缺乏理论知识的系统学习等问题;另外,由于理论知识介绍较少,在仿生机械创新设计典型实例介绍中,难以系统性地将理论创新与技术创新进行无缝连接。因此,本书作者在认真分析课程理论知识组成、学生上课情况反馈及社会需求的基础上,开展了本书的撰写工作。

本书共有9章,具体包括绪论、仿生机械学的基本概念、仿生机械学的基础知识、仿生机械结构分析、生物运动特性分析、仿生机械运动学分析、仿生机械动力学分析、仿生机械运动机理及控制方法、仿生机械创新设计的原理与方法。本书的编写立足于仿生机械基础理论知识与实际应用技术的无缝连接与有机结合,既注重基础理论和基本方法的系统学习,又强调专业知识和实用技术的综合应用,重视反映当今仿生机械技术发展的新动向和新成就,力求体现仿生机械技术的先进性和实用性,以使本书成为一部系统、全面、详实、准确的仿生机械学著作和教材,使其既可以作为普通高等院校机械设计及理论、机械电子工程、机械制造及自动化等机械类专业的本科生和研究生教材,也可以作为从事仿生机械技术、机器人技术研究和应用的科研人员的学习参考用书。

本书由罗霄、罗庆生担任主编,蒋建锋、李铭浩、乔立军等人分别参与了本书主要章节的写作;吴帆、徐嘉、黄麟、高剑锋、黄焱崧、牛锴、钟心亮等人分别参与了本书主要应用案例的研究。

在本书研究和写作的过程中,得到了北京理工大学有关部门的热情帮助,还得到业界许多同人的无私支持。值本书即将付印出版之际,谨向所有关心、帮助、支持过我们的领导、专家、同事、朋友表示衷心的感谢!

目 录

CONTENTS

第1章 绪论	001
1.1 仿生机械学的诞生与发展	001
1.1.1 仿生机械学的诞生	001
1.1.2 仿生机械学的发展	002
1.2 仿生机械学的研究内容与研究方法	004
1.2.1 仿生机械学的研究内容	004
1.2.2 仿生机械学的研究方法	005
1.3 仿生机械学的研究热点与发展趋势	007
1.3.1 仿生机械学的研究现状与研究热点	007
1.3.2 仿生机械学的发展趋势	009
1.4 本书主要内容与教学要求	010
1.5 思考与练习	011
第2章 仿生机械学的基本概念	012
2.1 生物的启迪	012
2.1.1 生物不同凡响的探测能力	012
2.1.2 生物别具一格的伪装能力	012
2.1.3 生物出类拔萃的通信能力	014
2.2 仿生的源泉	015
2.2.1 片流膜的发明	015
2.2.2 人造手的由来	017
2.2.3 生物鳃与人工鳃	018
2.2.4 青蛙眼和电子眼	019
2.3 仿生的基本概念	020
2.3.1 仿生学定义	020
2.3.2 仿生学研究内容	021

2.4 机构学与仿生机构	032
2.4.1 机构学基本概念	032
2.4.2 机构学研究内容	040
2.4.3 机构运动分析	040
2.4.4 机构运动图解分析法	042
2.4.5 机构运动解析分析法	045
2.4.6 仿生机构基本概念及主要研究内容	045
2.5 机械学与仿生机械	045
2.5.1 机械学基本概念	045
2.5.2 机械学研究内容	046
2.5.3 机械学与仿生机械学的关系	046
2.6 思考与练习	046
第3章 仿生机械学的基础知识	049
3.1 仿生设计学	049
3.1.1 仿生设计学概述	049
3.1.2 仿生设计学的诞生与发展	049
3.1.3 仿生设计学的内容与方法	053
3.1.4 仿生设计学的实际应用	056
3.2 仿生工程学	057
3.2.1 仿生工程学概述	057
3.2.2 仿生工程学的诞生与发展	058
3.2.3 仿生工程学的内容与方法	058
3.2.4 仿生工程学的实际应用	062
3.3 仿生材料学	063
3.3.1 仿生材料学概述	063
3.3.2 仿生材料学的诞生与发展	064
3.3.3 仿生材料学的内容与方法	066
3.3.4 仿生材料学的实际应用	069
3.4 仿生制造学	070
3.4.1 仿生制造学概述	070
3.4.2 仿生制造学的诞生与发展	070
3.4.3 仿生制造学的内容与方法	072
3.4.4 仿生制造学的实际应用	076
3.5 思考与练习	077
第4章 仿生机械结构分析	079
4.1 仿生机械结构分析概述	079
4.1.1 仿生机械结构特性	079

4.1.2 仿生机械结构的研究内容	080
4.2 仿生手臂式机器人典型机械结构分析	081
4.2.1 仿生关节机器人机械结构分析	081
4.2.2 工业机器人手臂机械结构分析	083
4.2.3 工业机器人手腕机械结构分析	090
4.2.4 工业机器人手部机械结构分析	097
4.2.5 仿生多指灵巧手机械结构分析	103
4.3 仿生腿足式机器人典型机械结构分析	107
4.3.1 仿生腿足式机器人概述	107
4.3.2 仿生腿足式机器人基本组成	112
4.3.3 仿生腿足式机器人机构特点	120
4.4 仿生机械常用材料	130
4.4.1 仿生机械本体材料	130
4.4.2 仿生机械结构材料	130
4.4.3 仿生机械轻质材料	132
4.4.4 仿生机械刚性材料	136
4.4.5 仿生机械抗振材料	137
4.5 思考与练习	138
第5章 生物运动特性分析	139
5.1 生物运动特性分析概述	139
5.2 鸟类运动规律分析	139
5.2.1 鸟类运动规律的研究与探索	139
5.2.2 鸟类的特质	140
5.2.3 鸟类的飞翔	141
5.2.4 鸟类的习性和动作	145
5.3 鱼类运动规律分析	148
5.3.1 鱼类运动规律的研究与探索	148
5.3.2 鱼类的体形	148
5.3.3 鱼类的运动	151
5.3.4 鱼类的沉浮	154
5.3.5 鱼类的游泳	154
5.4 兽类运动规律分析	158
5.4.1 兽类四肢的结构	158
5.4.2 兽类的运动规律	159
5.5 两栖类和爬行类运动规律分析	173
5.5.1 两栖类运动规律分析	173
5.5.2 爬行类运动规律分析	176

5.6 昆虫类运动规律分析	178
5.7 人类运动规律分析	183
5.7.1 人的起源	183
5.7.2 人的进化	185
5.7.3 人体运动特点分析	188
5.7.4 人类运动规律分析	190
5.8 思考与练习	195
第6章 仿生机械运动学分析	197
6.1 仿生机械运动学分析概述	197
6.2 复数极矢量法	197
6.2.1 复数矢量的定义	198
6.2.2 复数矢量的表示	198
6.2.3 复数矢量的微分	199
6.2.4 基于复数极矢量法的平面机构运动学分析	200
6.2.5 基于复数极矢量法的空间机构运动学分析	202
6.3 直角坐标系矢量法	205
6.4 坐标变换矩阵法	206
6.4.1 连杆坐标系	207
6.4.2 连杆变换	208
6.4.3 机器人运动学	209
6.5 旋转变换张量法	210
6.5.1 旋转变换张量	210
6.5.2 采用旋转变换张量法求解机器人正运动与逆运动	210
6.6 对偶数矩阵法	212
6.7 机器人的运动分析	213
6.7.1 机器人正运动学分析实例	213
6.7.2 机器人逆运动学求解实例	215
6.8 机器人的微分运动	218
6.8.1 微分平移与微分旋转	218
6.8.2 微分运动等价变换	220
6.9 思考与练习	222
第7章 仿生机械动力学分析	225
7.1 仿生机械动力学分析概述	225
7.1.1 研究目的	225
7.1.2 研究方法	225
7.2 动力学分析的数学方法	226
7.2.1 牛顿-欧拉法	226

7.2.2 拉格朗日法	227
7.3 机械手动力学方程的建立与简化	228
7.3.1 预备知识	228
7.3.2 机械手动力学方程的建立	232
7.3.3 机械手动力学方程的简化	237
7.3.4 应用举例	239
7.4 思考与练习	245
第8章 仿生机械运动机理及控制方法	249
8.1 仿生机械运动机理概述	249
8.1.1 仿生机械运动测定方法	249
8.1.2 人的步行运动机理研究	251
8.1.3 蛇的伸缩运动机理研究	252
8.2 仿生机械运动控制机理概述	254
8.3 仿生机械运动控制的方法	256
8.3.1 机器人的位置控制	257
8.3.2 机器人的速度控制	258
8.3.3 机器人的力(力矩)控制	258
8.3.4 机器人的示教—再现控制	260
8.4 机械手的运动控制算法	261
8.4.1 简易位置控制算法——空间单元法	261
8.4.2 运动轨迹控制算法	265
8.4.3 速度控制法	268
8.5 思考与练习	271
第9章 仿生机械创新设计的原理与方法	272
9.1 仿生机械创新设计概论	272
9.1.1 仿生机械创新设计的含义	272
9.1.2 仿生机械创新设计的特点	273
9.1.3 仿生机械创新设计的方法	274
9.2 仿生机械创新设计的基本原理	274
9.2.1 仿生机械创新设计的组合原理与运用	274
9.2.2 仿生机械创新设计的变异演化原理与运用	279
9.2.3 仿生机械创新设计的反求原理与运用	284
9.3 仿生机械创新设计的实际案例——四足机器人结构设计	285
9.3.1 四足机器人结构设计概述	285
9.3.2 四足机器人运动参数的仿生学分析	287
9.3.3 四足机器人腿部结构参数的分析与确定	292
9.3.4 四足机器人腿部结构设计	306

9.3.5 机器人髋关节及大腿组件设计	310
9.3.6 机器人膝关节及小腿组件设计	313
9.3.7 机器人腿部侧摆组件设计	319
9.3.8 机器人液压系统及其他元器件选型	323
9.3.9 机器人单腿整体结构设计	325
9.3.10 四足机器人整体结构设计	328
9.3.11 四足机器人结构的受力分析	329
9.4 思考与练习	341
参考文献	343

第 1 章

绪 论

1.1 仿生机械学的诞生与发展

1.1.1 仿生机械学的诞生

仿生机械 (bio-simulation machinery) 是指人们模仿生物的形态、结构、材料, 运动机制和控制原理, 设计制造出的功能更强、效率更高并具有生物特征的机械。研究仿生机械的科学称为仿生机械学, 它是人们在 20 世纪 60 年代末期以力学和机械学作为基础^[1], 与生物学、工程学、电子技术、控制论等相关学科相互渗透与融合而形成的一门新兴边缘学科^[2,3], 也是一门涉及诸多研究领域、既古老又年轻的综合性学科。它主要对生物机制和生物现象进行力学研究, 对生物体结构、形态、动作或功能进行工程分析和仿生设计, 以帮助人们制造出结构更好、性能更佳、质量更小、效率更高的智能机械装备, 其研究内容和应用范围非常深邃与广泛, 主要集中在各种专用机械手和现代机器人领域。

15 世纪欧洲文艺复兴时期, 意大利著名科学家、发明家、画家达·芬奇认为人类可以模仿鸟类飞行, 并绘制了扑翼机的结构示意图 (见图 1-1)。19 世纪时, 世界上出现了不同类型的单翼和双翼滑翔机。1903 年, 美国莱特兄弟发明了依靠人类提供的动力装置进行飞行的飞机 (见图 1-2)。

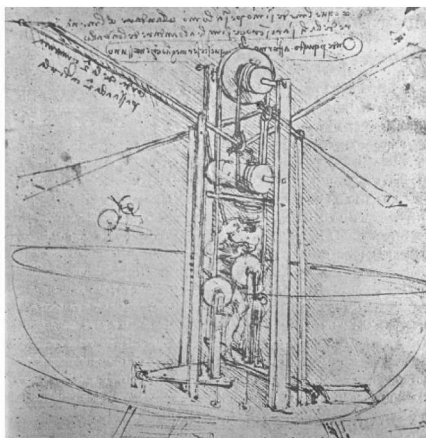


图 1-1 扑翼机结构示意图

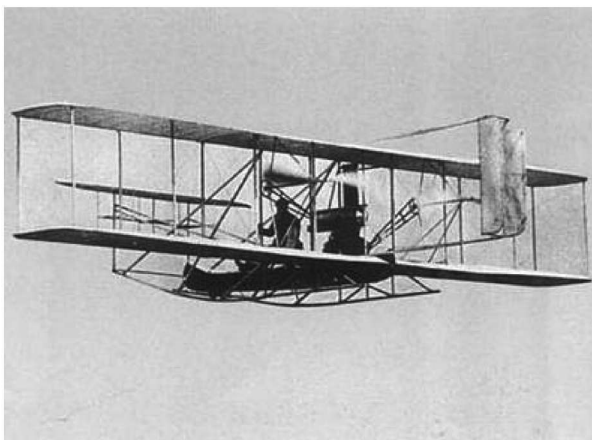


图 1-2 莱特兄弟发明的飞机

人类模仿生物的外部形态和内部结构去设计与制造各种机械及其装置已有十分悠久的历史。然而，在很长一段时间内，人们对于生物与机器之间到底存在什么共同之处还缺乏深入的认识，因而大多局限在对生物形体上的简单模仿方面。直到 20 世纪中叶，由于科学技术的发展，人们迫切要求机械装置应该具有高度的适应性和可靠性，而以往的各种机械装置无论在功能上，还是在性能上，都远远不能满足这些要求，因此人类必须寻找合适的设计理论和理想的技术途径。

在自然界中，生物通过物竞天择和长期进化，已对自然环境具有了高度的适应性^[4]。它们的感知、决策、指令、反馈、运动等机能组织和器官结构，远比人类所制造的机械装置更为完善与合理。随着近代生物学的发展，人们发现生物在能量转换、控制调节、信息处理、方位辨别、路径导航和环境探测等方面有着人类难以企及的长处。生物们所具有的优势使得人们开始虚心向其学习。近代生物学和控制论的出现奠定了机器与生物可以进行类比的理论基础。1960 年 9 月，在美国召开了全球第一届仿生学讨论会，会议提出了“生物原型是新技术的关键”的论题，从而确立了仿生学学科，以后又进一步形成了许多仿生学的分支学科。1970 年，日本人工手研究会主办了第一届生物机构讨论会，确立了生物力学和生物机构学两个学科，并在此基础上形成了仿生机械学。由于借助于仿生机械学，人们能设计出在形态、结构、功能、材料等各个方面更加合理的机械系统，因而近年来仿生机械学越来越受到人们的重视与青睐。

1.1.2 仿生机械学的发展

当今在自然界生存和繁衍的千万种生物都是经过亿万年漫长的优胜劣汰进化过程发展而来的，长期的进化使它们拥有最合理和最优化的形态特征和结构特点，以及神奇的生理功能、灵活的运动特性、良好的环境适应能力，因而成为人们建设现代文明世界的各种技术思想和发明创造产物的取之不竭、用之不尽的知识宝库和灵感源泉。自从仿生机械学诞生以后，人们重视学习和模仿生物体的结构、形态、功能和相关原理，以便设计出各种功能更强大、性能更优异、运作更高效并具有某些生物特征的机械装备。

目前，人们根据仿生机械的功能特征与应用领域，将其分为几大类，其中包括仿生承力

机械、仿生抓取机械和仿生移动机械。仿生承力机械主要是指人们借鉴生物体静态承力结构的相关原理,进行仿生设计而获得的各种承力装置^[5],其可以帮助人们实现节省原材料、增加整体或局部强度、提高稳定性等目的。例如,人们仿照马蹄的结构特点,进行仿生设计而研制成功的抗冲击承力装置。仿生抓取机械主要是指人们模仿生物抓取功能及其结构特点^[6,7],进行仿生设计而获得的各种抓取装置,包括在现代工业和相关领域得到广泛应用的各种各样机械手。仿生移动机械则主要是指人们模仿生物体运动的力学原理和结构特点,进行仿生设计而获得的各种行走或移动装置,包括足式移动、轮式移动、蠕动式移动、履带式移动等形式的仿生机器人。

例如,各种动物的前肢从外形和功能上看虽然不尽相同,但其内部构造却基本一致。两栖类、爬行类、鸟类和哺乳类动物的前肢骨骼都是由肱骨、前臂骨、腕骨和指骨组成的。人的上肢具有较高的操作性、灵活性和适应性^[8]。人的一个上肢有32块骨骼,由50多条肌肉驱动^[9]。肩关节、肘关节、腕关节一共构成27个空间自由度。其中,肩和肘关节有4个自由度,以确定手心的位置;腕关节有3个自由度,以确定手心的姿态。手由肩、肘、腕确定位置和姿态,为了实现手的各种精巧、复杂的动作,还要依靠多关节的五指和柔软的手掌来协同工作。手指由26块骨骼构成20个自由度,因此手指可以完成各种精巧操作^[10]。在这么多自由度的协调配合下,肌肉在瞬间运动时可发出很大的力量,最大出力与自重之比远较人类制造的任何机器都高得多。肌肉的控制机构具有多重自动控制机构和安全机构,从脑部来的指令可以到达手的各个部分。虽然目前人类制造的机械手从工程技术上实现这样的机能特征和信息处理还很困难,但机械手正朝着与人的上肢功能接近的方向发展。

又例如,为了提高移动机械对环境的适应性,扩大人类在海底、极地、矿区、星球和沼泽等条件下的活动空间,需要研究和模拟生物的步行机构和步态特性。动物的运动多是通过多关节足来实现的,因此动物足的形态机能、运动控制、姿体稳定等是人们进行仿生机械学中有关步行机研究的关键。

模仿鸟类、昆虫和鱼类的形态特征和构造特点,研制各种适宜在空中、水下活动的机械系统,是仿生机械学的重要内容。自然界中能飞的动物种类接近全部动物的3/4,其中占主要地位的有600多种鸟类和35万多种昆虫。这些飞行动物为人类改进飞机性能和制造新型飞行器提供了天然的设计原型。鸟类和昆虫的某些特殊机能,如蚊蝇和蜜蜂等昆虫灵活机动的陡然起飞、翻转翼翼的高频振动、光面悬垂和空中定位等,都是现代飞行器难以望其项背的。但也正是生物们所具有的高强飞行本领,引导着人们不断探索、不断创新,发展着人类自身的飞行事业。

鲸、海豚和各种鱼类经过亿万年的进化,形成了适应水中环境的多姿体形。其中有适于快速航行的纺锤形,适于水底缓慢运动的平扁形,适于穿入泥土或石洞间的圆筒形。脊鳍阔大的剑鱼速度可达110 km/h,并能在几秒之内就可达到全速游动。鱼类除了有适于航行的形体外,还有特殊的推进和沉浮机能。人们根据水生动物尾鳍摆动式推进系统的生物力学原理,设计出一种摆动板推进系统^[11]。它不仅可以使船只十分灵活地转弯和避开障碍,还可以顺利地通过浅水域或沙洲而不搁浅^[12]。僧帽水母用感觉细胞控制浮囊内的气体,使身体自由沉浮;金枪鱼依靠自主控制体内的一种生理化学反应而灵活沉浮。人类根据这些原理研制成潜水艇的沉浮系统^[13]。乌贼的体形虽然和鱼类不太相同,但其运动器官十分完善,它靠收缩腹肌把外套膜中的水从喷嘴迅速射出,借此推进身体前进。人类根据这个原理设计出

喷水船^[14,15]。

虽然仿生机械学的研究和运用取得了许多成就，但这仅是人类向生物学习的万里长征中的第一步。这是因为如果把传统的机械称为一般机械，那么仿生机械就应该是指添加有类智能的一类机械^[16]。众所周知，在物理性能方面，一般机械比人类的体力强出许多，但与人类的智力差距甚远。因此，如果能把人类与机械各自的优势巧妙结合起来，就有可能使一般机械进化为仿生机械。从这一角度出发，我们可以认为仿生机械应该既具有优良的“体能”，又具有优秀的“智能”，可以进行高效的运动、复杂的感知、巧妙的控制，完成人们期望的作业使命。因此，利用生物丰富多彩的外部形态和千奇百巧的内部结构，以及复杂多变的机体技能，来发展仿生机械技术，将是推动人类社会物质文明建设的一个重要方向。

人们不仅要研究生物系统在进化过程中逐渐形成的特殊结构和优越机能，更要大力揭示其组织结构的原理，评定其机能关系、适应方法、存活方式和自我更新的手段。把生物系统优越的形态、结构、机能和原理与各种现代科学技术及方法结合起来，人类就可能“青出于蓝而胜于蓝”，得到在某些性能上比自然界形成的生物体系更为完善的仿生机械。

1.2 仿生机械学的研究内容与研究方法

1.2.1 仿生机械学的研究内容

仿生机械学是一门以力学或机械学为基础，综合了生物学、医学及工程学等多个学科在内的新兴边缘学科^[17]，它既把工程技术应用于医学、生物学，又把医学、生物学的知识应用于工程技术。它包含着对生物现象进行力学研究，对生物的运动、动作进行工程分析，并把这些成果根据社会的需求付之商品化和实用化。

从系统的角度进行分析，可把仿生机械学的研究内容归纳如下：

(1) 生物材料力学和机械力学

以各种动物的骨或软组织（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；还可根据骨骼、肌肉系统力学的研究，对骨和肌肉的相互作用等进行分析^[18]。另外，生物的形态研究也是一大热门。因为生物的形态经过亿万年的不断进化，往往已形成最佳结构，如人体骨骼系统具有最少材料、最大强度的构造形态，可以通过最优论的观点来学习、模拟、仿造工程结构系统。

(2) 生物流体力学

生物流体力学主要涉及生物的循环系统^[19]。关于血液动力学等的研究已有很长的历史，但仍有许多问题尚未解决，特别是因为它的研究与心血管疾病的关系十分密切，已成为一门备受关注的学科，人们期望通过对生物流体力学的研究提升对心血管疾病的防治水平。

(3) 生物运动学

生物的运动十分复杂，因为它与骨骼和肌肉的力学现象、感觉反馈及中枢控制牵连、交织在一起。虽然各种生物的运动或人体各种器官的运动测定与分析都是重要的基础研究，但在仿生机械学中，目前特别重视人体上肢运动及步行姿态的测定与分析，因为人体上肢运动机能非常复杂，而下肢运动分析对动力学研究十分典型。这对人体康复工程的研究也有极大的帮助。

(4) 生物运动能量学

生物的形态是最优的,同样,尽可能减少能量的消耗也是生物的基本原则。从运动能量消耗最优性的特点出发对生物体的运动形态、结构和功能等进行分析、研究,特别是对有关能量的传递与变换开展研究是很有意义的。

(5) 康复工程学

康复工程学的研究内容包括动力假肢、电动轮椅、病残者专用环境控制系统等的研究与开发,涉及许多学科和共性技术。比如,对于动力假肢,只有在解决了材料、能源、控制方式、信号反馈与精密机械等各种问题之后才能完成,并且这些装置还要作为一种人-机系统进行评价、试用,走向实用化的道路是非常艰难和异常曲折的。

(6) 机器人工程学

机器人工程学的研究内容是把生物学的知识应用于工程领域的典型范例,其目的—是省力;二是在宇宙、海洋、原子能生产、灾害现场等异常环境中帮助和代替人类进行作业。机器人不仅要具有精确移动功能的人造手足,还要有灵敏的感觉反馈功能及高度的人工智能。目前研究热点为人造手、步行机械、三维物体的声音识别等。

1.2.2 仿生机械学的研究方法

仿生机械是仿生学研究成果与机械技术有机融合的产物。从机械科学的角度来看,仿生机械是机械科学发展的高级阶段。生物所具备的一些优良特性为仿生机械的设计提供了许多有益的参考与借鉴,使仿生机械可以从生物体上学习如何提高自身的适应性、多样性、灵活性、鲁棒性和可靠性。仿生机械按照其工作环境,可分为陆地仿生机械、空中仿生机械和水下仿生机械等几大类别^[20]。此外,还有一些研究机构研究出水陆两栖机器人、水空两栖机器人和地空两栖机器人等具有综合用途的仿生机器人。仿生机械同时具有生物和机械的特点,已经逐渐在反恐防暴、太空探索、抢险救灾等不适合由人来承担任务的环境中凸显出良好的应用前景。

根据仿生机械学的研究内涵,仿生机械学的研究方法可分为以下五种:

(1) 运动机理仿生

运动机理仿生是仿生机械学研发的前提,而进行运动机理仿生的关键在于运动机理的数理建模^[21]。在具体研究过程中,应首先根据研究对象的具体技术要求,选择性地研究某些生物的结构与运动机理;然后借助高速摄影或录像设备,结合解剖学、生理学和力学等学科的相关知识,建立所需运动的生物模型,并在此基础上进行数学分析和抽象,提取出内部的关联函数,建立仿生数学模型;最后利用各种机械、电子、化学的方法与手段,根据抽象出的数学模型加工出仿生研究的软、硬件模型。

(2) 控制机理仿生

控制机理仿生是仿生机械研发的基础。要适应复杂多变的工作环境,仿生机械必须具备强大的导航、定位、控制等方面的能力^[22];要实现多个机器人间的无缝配合,仿生机械必须具备良好的群体协调控制能力;要解决复杂的任务,完成自身的协调、完善及进化,仿生机械必须具备精确和开放的系统控制能力。因此,对于今天的仿生机械学研究人员来说,如何设计核心控制模块与网络,以完成自适应、群控制、类进化等一系列问题,已经成为其在仿生机械研发过程中必须面对的首要难题。

(3) 信息感知仿生

信息感知仿生是仿生机械研发的核心^[23]。为了适应未知的工作环境,代替人完成危险、有害、单调、困难的工作任务,仿生机械必须具备包括视觉、听觉、嗅觉、接近觉、触觉、力觉、滑觉等多种感觉在内的强大的感知能力。单纯感测信号并不复杂,也不困难,重要的是要充分理解信号所包含的有价值的信息。因此,必须全面运用各时域、频域的分析方法和智能处理工具,充分融合各传感器的信息,相互补充,才能从复杂的环境噪声中迅速提取出人们所关心的正确的敏感信息,并克服信息冗余与冲突造成的困难,提高反应的迅速性,并确保决策的科学性。

(4) 能量代谢仿生

能量代谢仿生是仿生机械研发的关键。生物的能量转换效率最高可达 100%,肌肉把化学能转变为机械能的效率也接近 50%,这远远超过了目前人们所使用的各种工程机械;另外,肌肉还可自我维护、长期使用。因此,要缩短能量转换过程,提高能量转换效率,建立易于维护的代谢系统,就必须重新回到生物原型,模仿生物直接把化学能转换成机械能的能量转换过程。

(5) 材料合成仿生

材料合成仿生是仿生机械研发的重点。许多仿生材料具有无机材料无可比拟的特性,如良好的生物相容性和力学相容性,并且生物合成材料时技能高超、方法简单。所以,材料合成仿生的研究目的,一是学习生物的合成材料方法,生产出高性能的材料;二是制造有机元器件。因此,仿生机械的建立与最终实现并不仅仅依赖于机、电、液、光等无机元器件,还应结合和利用仿生材料所制造的有机元器件。

归根结底,仿生机械学的研究方法就是通过从生物所具备的科学合理的外部形态、精妙结实的内部结构、灵活多变的机体技能那里获得启发、产生创意、提炼模型、进行模拟。其研究程序大致分为以下三个阶段:

第一个阶段是对生物原型开展深入细致的研究。根据研究目标或应用需求提出具体的课题,将研究所得的生物资料进行整理和简化,吸收对研究目标和技术要求有益的内容,取消与研究目标和技术要求无关的因素,得到经过筛选的生物模型;第二个阶段是将生物模型提供的资料进行数学分析,使其内在规律和深层联系得以抽象化,再用数学语言把生物模型“翻译”成具有一定意义的数学模型;第三个阶段是运用相关学科与领域中的知识和技术将所得数学模型变成可进行工程实验的实物模型。

应当指出,在开展仿生机械学的研究过程中,人们需要的不是对生物外部形态、内部结构、机体机能的全盘照搬或简单模仿,而是在仿生研究过程中必须有所发现、有所创新、有所前进。经过实践→认识→再实践→再认识的多次重复,才能使仿生研究出来的东西真正符合科学研究与生产实际的需要。这样仿生研究出来的结果,将使最终建成的人造设备与生物原型有所不同,在某些方面甚至会赶上或超过生物原型的性能水平。例如,今天的人造飞机在许多方面都超过了鸟类的飞行能力;电子计算机在复杂的计算中要比人的计算迅速而可靠。AlphaGo 机器人以压倒性优势战胜世界围棋冠军李世石就是明证。

还应当指出,仿生机械学的基本研究方法使它具有一个突出的特点,就是整体性。从仿生机械学的整体来看,它把生物看成是一个能与内外环境进行联系和控制的复杂系统^[24]。其任务就是研究复杂系统内部各组成部分之间的相互关系,以及整个系统的行为和状态。生