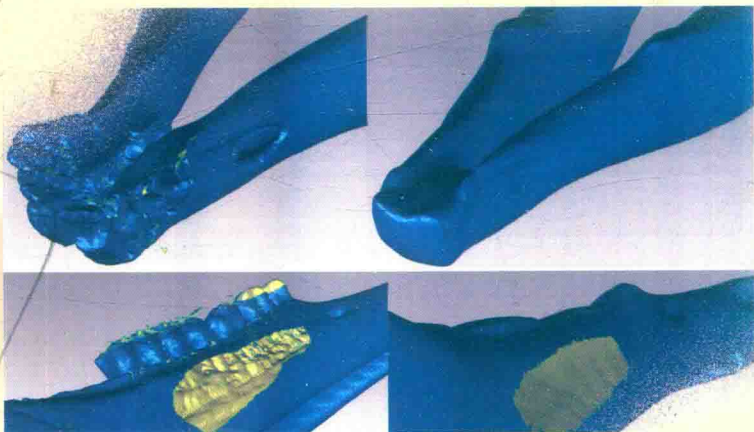


Fangshengxue jiqi  
Gongcheng Yingyong

# 仿生学及其 工程应用

周祖鹏 刘旭锋 甘良棋 编著



华中科技大学出版社  
<http://www.hustp.com>

Fangshengxue jiqi  
Gongcheng Yingyong

# 仿生学及其 工程应用

周祖鹏 刘旭锋 甘良棋 编著

常州大学图书馆  
藏书章



华中科技大学出版社

<http://www.hustp.com>

中国·武汉

## 内 容 简 介

本书首先介绍了仿生设计的相关背景,并对国内外仿生设计的研究现状及未来的发展方向进行了阐述。其次,分别对具有特殊弹跳能力的蝗虫、跳甲和具有水下运动能力的蚯蚓、泥鳅的特殊生理结构进行了机理分析和基于其机理的仿生设计。同时对狷羚下颚骨化石的特殊生理结构进行了建模和分析,以揭示其进化机理。最后,运用生命周期评价方法对基于仿生设计的产品进行了生命周期评价,以说明仿生设计所具有的更符合可持续发展的本质特点。

本书可以作为工科专业博士、硕士研究生和本本科生的教材,也可以供其他研究仿生学和生命周期评价的学者参考。在工程领域,本书还可以为从事仿生产品结构优化的工程人员提供一种新的设计方法。

### 图书在版编目(CIP)数据

仿生学及其工程应用/周祖鹏,刘旭锋,甘良棋编著. —武汉:华中科技大学出版社,2019.7  
ISBN 978-7-5680-5183-5

I. ①仿… II. ①周… ②刘… ③甘… III. ①工程仿生学 IV. ①TB17

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2019)第 140504 号

### 仿生学及其工程应用

周祖鹏 刘旭锋 甘良棋 编著

Fangshengxue Jiqi Gongcheng Yingyong

策划编辑:万亚军

责任编辑:万亚军

封面设计:原色设计

责任监印:周治超

出版发行:华中科技大学出版社(中国·武汉)

电话:(027)81321913

武汉市东湖新技术开发区华工科技园

邮编:430223

录 排:武汉三月禾文化传播有限公司

印 刷:武汉科源印刷设计有限公司

开 本:710mm×1000mm 1/16

印 张:8 插页:2

字 数:104千字

版 次:2019年7月第1版第1次印刷

定 价:38.00元



华中出版

本书若有印装质量问题,请向出版社营销中心调换  
全国免费服务热线:400-6679-118 竭诚为您服务  
版权所有 侵权必究

# 前 言

在美国华盛顿州立大学做博士后期间,在导师 Charles Pezeshki 教授的引导下,笔者开始对仿生学和仿生设计产生兴趣。回国后,与德国波恩大学的 Helmut Schimtz 教授在甲虫的热传感器工作机理方面开展了合作研究,创造性地将工程中常用的有限元分析方法应用到甲虫的盘状热感知器的热感知机理分析中,获得了较为满意的结果。接下来,邀请了西班牙的 Jord 和 Josep 两位博士后到桂林电子科技大学开展合作研究。合作研究的主要内容是娃娃鱼和牛科动物的三维重构以及机构有限元分析,其目的是通过以上分析来研究其结构的进化机理。笔者所在团队在产品的生命周期评价领域也做了大量的研究工作,能定量而客观地评价产品的绿色度。

本书首先介绍了仿生设计的相关背景,并对国内外仿生设计的研究现状及未来的发展方向进行了阐述。其次,分别对具有特殊弹跳能力的蝗虫、跳甲和具有水下运动能力的蚯蚓、泥鳅的特殊生理结构进行了机理分析和基于其机理的仿生设计。同时对狷羚下颚骨化石的特殊生理结构进行了建模和分析,以揭示其进化机理。最后,运用生命周期评价方法对基于仿生设计的产品进行了生命周期评价,以说明仿生设计所具有的更符合可持续发展的本质特点。本书可以作为工科专业博士、硕士研究生和本科生的教材,还可以供其他研究仿生学和生命周期评价的学者参考。在工程领域,本书也可以为从

事仿生产品结构优化的工程人员提供一种新的设计方法。

本书的主要创新点和应用价值在于系统地分析了不同类型生物的特殊结构,并巧妙地将工科领域常用的有限元分析方法应用到生物体结构的功能分析中来,解决了过去传统的分析方法无法解决的问题。另外,本书将生命周期方法与仿生设计有机地结合在一起,用定量的评价指标来说明仿生设计较之传统设计的优点。因此,本书具有学科交叉和学科融合的特点,全书既不拘泥于生物学,也不是简单的工程分析,这也许就是本书的难能可贵之处。

总之,科学技术的发展给我们带来了很多便利,但是,过度的工业化和信息化也存在一些弊端。在特定的时间点上,人类要学会回头看,重新寻找亿万年前祖先的生存和生产方式。实际上,仿生学就是向自然学习,回归自然,回归原始,最终将获得意想不到的收获。

本书由周祖鹏、刘旭锋、甘良棋编著。周祖鹏负责全书的整体布局、撰写和修改工作,刘旭锋负责各个章节的整理和修改工作,林永发和唐玉华分别负责第3章和第5章的撰写工作。在本书撰写过程中,甘良棋、董智鹏、张晓东、裴雨蒙、蒋开云、鹿浪和王义华等研究生协助笔者做了大量资料收集和整理工作。同时,本书的出版得到了桂林电子科技大学专著出版基金的资助。在此一并表示感谢。

由于水平有限,加之时间仓促,书中难免存在不足之处,敬请广大读者批评指正。

周祖鹏等

2018年11月于桂林

# 目 录

第 1 章 仿生设计 .....	(1)
1.1 仿生设计概述 .....	(1)
1.2 仿生设计的研究现状 .....	(3)
1.2.1 地面仿生机器人 .....	(4)
1.2.2 水下仿生机器人 .....	(7)
1.2.3 空中仿生机器人 .....	(11)
1.3 仿生设计的目的和意义 .....	(12)
第 2 章 仿生对象观测与机理分析 .....	(14)
2.1 蝗虫的观测及弹跳机理分析 .....	(14)
2.1.1 结构观察 .....	(14)
2.1.2 弹跳机理分析 .....	(16)
2.2 跳甲的观测及弹跳机理分析 .....	(19)
2.2.1 结构观察 .....	(19)
2.2.2 弹跳机理分析 .....	(20)

<b>第 3 章 昆虫弹跳过程数学模型建立及计算</b>	(24)
3.1 弹跳模型	(24)
3.2 弹跳模型计算	(26)
3.2.1 蝗虫弹跳模型计算	(26)
3.2.2 跳甲弹跳模型计算	(29)
<b>第 4 章 仿生弹跳机器人设计及运动仿真分析</b>	(32)
4.1 引言	(32)
4.2 仿生蝗虫弹跳机器人	(33)
4.2.1 总成设计	(33)
4.2.2 弹跳机械部分设计	(34)
4.2.3 工作过程	(38)
4.3 仿生跳甲机器人	(39)
4.3.1 总成设计	(39)
4.3.2 弹跳机械部分设计	(40)
4.3.3 工作过程	(42)
4.4 仿生弹跳机器人设计方案确定	(43)
4.4.1 机构势能释放方式比较	(43)
4.4.2 弹跳腿部结构比较	(44)
4.4.3 设计方案确定	(44)
4.5 仿生弹跳机器人运动分析与计算	(45)
4.5.1 齿轮组结构分析与传动计算	(45)
4.5.2 偏心轮结构分析与传动计算	(46)

4.5.3	弹跳腿结构分析与传动计算 .....	(47)
4.5.4	弹跳过程分析与计算 .....	(49)
4.6	仿生弹跳机器人整体结构 .....	(52)
<b>第5章</b>	<b>仿生水下机器人设计 .....</b>	<b>(54)</b>
5.1	引 言 .....	(54)
5.2	蚯蚓的特征及运动机理分析 .....	(55)
5.2.1	蚯蚓的特征分析 .....	(57)
5.2.2	蚯蚓的运动机理分析 .....	(58)
5.3	泥鳅的特征及运动机理分析 .....	(58)
5.3.1	泥鳅的特征分析 .....	(59)
5.3.2	泥鳅的运动机理分析 .....	(60)
5.4	仿生蚯蚓水下机器人 .....	(61)
5.4.1	拱泥头设计 .....	(62)
5.4.2	前进转向机构设计 .....	(63)
5.4.3	支撑机构设计 .....	(64)
5.4.4	工作原理 .....	(64)
5.5	仿生泥鳅水下机器人 .....	(66)
5.5.1	结构设计 .....	(66)
5.5.2	工作原理 .....	(68)
5.6	两种水下仿生机器人设计方案的比较 .....	(69)
<b>第6章</b>	<b>古生物建模及有限元分析 .....</b>	<b>(71)</b>
6.1	引言 .....	(71)

6.2	古生物的建模 .....	(72)
6.2.1	等阈值面显示法 .....	(72)
6.2.2	多阈值面显示法 .....	(74)
6.2.3	特定结构提取法 .....	(75)
6.2.4	综合实例 .....	(77)
6.3	古生物模型的优化 .....	(80)
6.4	古生物模型的有限元分析 .....	(82)
<b>第7章</b>	<b>仿生弹跳机器人的生命周期评价 .....</b>	<b>(88)</b>
7.1	引言 .....	(88)
7.2	目标与范围的定义 .....	(89)
7.3	清单分析 .....	(90)
7.4	影响评价 .....	(93)
7.5	结果解释 .....	(98)
<b>第8章</b>	<b>仿生水下机器人的生命周期评价 .....</b>	<b>(100)</b>
8.1	引言 .....	(100)
8.2	目标与范围的确定 .....	(101)
8.3	清单分析 .....	(103)
8.4	影响评价 .....	(106)
8.5	结果解释 .....	(113)
<b>参考文献</b>	<b>.....</b>	<b>(115)</b>

# 第1章 仿生设计

## 1.1 仿生设计概述

仿生学是研究生物的特殊结构及运动机理,为科学技术提供新的设计理念和工作方式的一种技术科学。该学科的问世,拓展了人类的技术界限,展现了其未来无限的发展潜力,通过模仿生物的特殊结构和机理可以研发出各种新技术。仿生设计是仿生学的进一步发展和延续,是仿生学从原型到设计上的实现,其研究成果通过科学技术的转化进入了人类生活。通过对产品的外观进行仿生设计,可提高产品的美感和立体感,满足消费者的个性化需求和多样性要求。仿生设计能提高企业产品的市场占有率,有效节约企业成本,增加效益。人类至今还无法实现一些生物所具有的特殊结构,而仿生学就可以利用生物本身所具有的特殊结构来实现技术上的转化。例如:人类通过借鉴海豚的身体结构及运动机理进行潜艇设计;人类通过研究苍蝇的楫翅及眼睛,成功研制了导航仪和蝇眼透镜;人类利用蝇眼透镜制造的蝇眼相机,一次就能照出几百张不同视角的照片。

提出理论模型,进行数学仿真是仿生学的主要研究方法,主要包括以下三个阶段。首先是对生物进行研究与分析,将分析得到的信息简化,建立一个生物模型;其次是将生物模型进行数学分析并转化

为数学模型；最后是将数学模型在技术上变成实物模型。经过不断实践、改善、再实践的重复过程，才能让模型更加符合实际需求。该模拟结果使得已有的生物模型与生物原型有所不同，在某些方面甚至超过了生物样本。因此，仿生学的研究表现出无限的活力，其发展和成就将为全世界科技发展做出巨大贡献。

仿生机器人是机器人技术与仿生技术融合的产物，它涉及工程力学、智能控制、仿生学、计算机科学、传感技术及生物学等多个学科。它具有传统机器人的优点，将生物的运动机理作为机器人运动控制的理论模型，以提高机器人的运动能力和效率。采用仿生学原理设计，研发新装备、材料和仿生过程，是近年来快速发展的仿生机器人的基本研究思路。随着工业化不断发展，出现了许多新型的地面仿生机器人、水下仿生机器人和空中仿生机器人。如仿生壁虎机器人、仿生蛇形机器人、仿生螃蟹机器人、仿生龙虾机器人、仿生蜘蛛机器人、仿生飞蛾机器人、仿生飞蠓机器人、纳米蜂鸟侦察无人机、仿生蜻蜓机器人等。仿生机器人在动力设计、控制形式、结构设计上有许多一致性，为机器人的研究提供了更多设计理念及灵感。

机器人是工业化快速发展的产物。工业机器人在现代工业生产中的重要性越来越明显。仿生学与机器人设计的结合成为现代机器人设计研究领域的热点。仿生学是分析及模仿自然界中某类生物的特征及特有的某类机理，或某种行动方式的系统科学。仿生机器人的研究内容是对自然界中生物具备的某种性能或特定行为机理进行模仿，将该特有结构、运动机理、行为方式机理等特征应用于仿生机器人设计，由此启发设计出具备大自然中某类生物的外部形状或特有机能的机器人系统。

仿生设计主要通过通过对生物个体及系统的结构、性状、原理、行为及相互作用进行研究得到认识成果，从而为工程技术提供新的方法。设计本身就是为了满足社会需求而进行的一系列的创造性思维活

动,通过这种活动将人类所掌握的各种先进科技转化为生产力。模仿也是人类最基础的思维活动之一,对生物进行模仿的根本目的就是为设计提供新的设计思想。仿生学的研究一般可分为以下三步。首先,对生物原型和生物机理进行研究分析;其次,对生物模型进行数学建模;最后,依据所建的数学模型做出可进行工程实践的实物模型。

仿生设计的发展主要经历了以下三个阶段。① 原始探索阶段,主要是对生物原型的原始模仿,该阶段主要靠人力驱动,如我国古代工匠鲁班模仿草的相关结构设计出人工锯齿。② 宏观仿形与运动仿生阶段,主要是利用机电系统实现生物的行走、跳跃、飞行等功能,在一定程度上能够进行人为控制。③ 机电系统与生物性能进行部分融合阶段,如能够像人的皮肤一样进行感知的仿生材料。仿生机器人当前所步入的阶段是结构与生物特性一体化的类生命系统,以仿生脑与仿生神经为代表的前沿方向更加注重其生物自我感知及控制的特性。

## 1.2 仿生设计的研究现状

地面仿生机器人主要是指模仿陆地生物的生物特性而设计制作的机器人。陆地生物种类繁多,按行进结构可划分为:无足行进,主要指蛇类;双足行进,主要指人类;多足行进(包括四足及四足以上),有壁虎、狗、牛等四足动物,也有蚂蚁、蟑螂等六足动物,以及蜈蚣等多足动物。此外,因蚂蚱、袋鼠等动物具有很强的跳跃能力,故对采用跳跃方式行进动物进行仿生也是地面仿生机器人研究的一个重要组成部分。

## 1.2.1 地面仿生机器人

### 1. 仿人机器人

仿人机器人以人为仿生对象,对人体结构、运动方式、感知及判断的机理和过程进行模仿。这类机器人具有一定的人的特征,如行走、感知、操作、学习、推理等,甚至具有情感交流的能力。仿人机器人所面对的是人类工作生活的环境,这些环境通常是非结构的,实现这些功能必须借助仿生学、人工智能、计算机及材料等学科知识以及传感及驱动等技术。仿人机器人的发展主要有简单行走、低智能化、高智能化几个阶段,其实现的功能从简单的模仿行走发展到能由自身感知外界环境并作出调整以完成复杂任务。

有关仿人机器人的研制工作始于 20 世纪 60 年代末,该阶段主要侧重行走功能的实现及一定程度的控制。日本早稻田大学研制的 WAP、WL 以及 WABOT 系列机器人可实现基本的行走功能。1986 年,郑元芳博士研制出美国第一台双足步行机器人 SD-1 以及其改进版本 SD-2。自进入 21 世纪以来,传感技术及智能控制技术方面的发展使具有一定感知系统的仿人机器人得以实现。这类机器人可通过相应的传感系统获取外界环境的简单信息,并由自身的智能控制系统做出简单的判断并调整动作。这使得仿生机器人的运动更加流畅。例如本田公司研发的“ASMIO2000”机器人除具有人的外观外,还能够预测下一个动作以提前改变重心。这使得其转弯时的步行动作连续流畅。索尼公司的“QRIO”机器人首次实现了仿人机器人的跑动。实现诸如站立、上下楼梯、跑步、做操等复杂动作的仿生机器人主要有法国的“BIP2000”机器人、索尼公司的“SDR”系列机器人、日本 JVC 公司研制的“J4”机器人、韩国的“HUBO”机器人等。此外,本田公司于 2011 年发布的“ASIMO2011”机器人,综合了视觉和触觉的物体识别技术,可进行细致作业,还可依据人类的声音、手势等指

令做出相应动作,并具备了基本的记忆与辨识能力。2013年,美国波士顿动力公司研制的“ATLAS”机器人具备人类简单的识别、判断以及决策功能,具有很好的应急避障能力,能从高处跳下稳定落地,能单腿站立,可调整步态以避免陷阱,能在侧面受到较重撞击时保持平衡不跌倒。该公司于2018年发布的最新“ATLAS”系列机器人已经能够进行后空翻、跑酷等运动,其另一款用于美国军方防护服性能检验用的机器人“PETMAN”,灵活度高且在一定程度上已具有人类的生理特性:能够调控自身的体温、湿度和排汗量,以模拟人类生理学中的自我保护功能。

仿人手臂及手指是仿人机器人的另一重要研究方向,从开始对外观形状的模仿实现简单运动发展到现在的运动感知一体化。仿生人手已经能实现抓取等细微操作。美国加利福尼亚大学 Tomovic 等于1962年设计的“BELGRADE”被认为是世界上最早的灵巧手,能实现简单动作。Salisbury 等于1982年设计的“STANFORD/JPL”仿生人手引入了位置、触觉、力等传感功能,开创了多指手实际抓取操作的先河。2010年,德国宇航中心(DLR)研制的手-臂联合系统“HASY”机械手臂,共有21个自由度,是第一个采用仿生学关节进行手指设计的多指灵巧手,手指关节的运动模仿人手进行面接触滑动,不是单纯的转动,这使其运动特性与人类手指的运动特性更加接近。

## 2. 弹跳机器人

为了使弹跳机器人可以通过崎岖不平、粗糙的地面,Rhodri Armour 设计出 Jollbot 和 Glumper 两款仿生弹跳机器人。Jollbot 主要是由金属弹簧构成的一个直径为 300 mm 的球体,可以跨越障碍的高度为 0.18 m;Glumper 呈八面体形,具有四条腿,每条腿包括两个长 500 mm 的碳纤维管和一个装有扭转弹簧的膝关节,可以跨越高 1.17 m 的障碍物。这两款机器人分别具备滚动和滑动的运动方式。在机器人向轻量化发展过程中,已有研究人员设计出一款高度为 50 mm、

质量为 7 g 的弹跳机器人。该机器人可以跨越障碍物的高度超过自身高度的 27 倍,其结构主要在于把弹性元件用于四杆连接腿的连接,使其具备强大的弹跳力。该机器人的起跳角及起跳力可在合适范围内调整。还有研究人员以跳蚤为仿生对象,设计了一种具备弹跳功能的机器人,并在分析跳蚤的弹跳机理后对该机理模仿建模及仿真,开发出控制该机器人弹跳高度的系统。

胡胜海等研究设计出一种特有的弹簧与阻尼结合系统,并应用于弹跳机器人脚掌部与地面形成的关系中,脚掌部的自身转动会使脚尖形成一个自由度,从而使得整体系统发生欠驱动。柴辉等设计研究出一款基于齿轮与六变杆机构、具有间歇式弹跳功能的机器人,具有可改变储蓄能量和可调整角度的功能,并可以自行翻转复位。柏龙等设计了一种用于行星表面探测工作环境的弹跳机器人,该机器人具有间隙式弹跳特征,模仿袋鼠的弹跳机理,具有杆长可控的非对称齿轮与六杆仿袋鼠弹跳机构。卢松明等受到蝗虫脚掌的主要几何形态与材料特征启发,研制出一种花瓣型结构的仿生脚掌结构,运用有限元方法对该仿生结构进行了接触力学和抓地性能分析。张雪峰等基于生物狗腿部跟腱生物力学特征,结合高速高机动性四足机器人运动需求和高速运动地面冲击扰动特性,设计了一种仿生物狗腿部跟腱的刚-柔复合四足机器人单腿结构模式,可跨越宽度为 1175.53 mm、深度为 680 mm、高度为 114.98 mm,并实现 20 mm 连续竖直高度弹跳。李哲等设计了一种气动弹跳腿,基于弹跳腿在接触地面阶段气缸上下腔压力差的特性实现弹跳功能,在弹跳离地时,有利于减缓系统振动和减少能量损失。张小飞等设计了一种弹跳运动与轮式运动相结合的弹跳式两轮机器人,由一个三杆弹簧弹跳机构实现弹跳运动。张军等设计了一种可实现滚动和弹跳两种运动方式的可折叠轮式弹跳机器人 Fold Jumper,样机可实现 0.2 m 的跨越高度,水平弹跳距离为 0.1 m,其滚动的速度为 6.5 cm/s。王申江等

将单腿弹跳机器人简化成一个三杆模型,运用参数化优化方法对弹跳过程中各阶段各关节的运动轨迹进行了优化,并达到每个阶段的最优关节轨迹。

### 1.2.2 水下仿生机器人

近年来仿生设计成为机械领域的研究热点。人类通过模仿生物的结构及运动机理,设计出了许多种新型、智能化微型仿生机器人。随着河流水位上升、湖泊淤泥沉积等自然环境的改变,沉船事故的不断发生,需要投入更多的人力进行清淤及救援工作。为了改善交通环境,保障航运的通畅,降低人工作业的危险度,减少人工作业工作量,出现了各种类型的水下机器人。如微管道机器人、仿蛇形机器人、钻泥机器人、蠕动爬行机器人等。水下仿生机器人在动力设计、运动结构、控制形式等方面各有特点,为水下机器人的实用化奠定了基础。

水下仿生机器人近些年来一直受到许多国家的青睐,这是因为它在许多方面有着重要的应用,对一个国家的经济、军事等方面的发展起着重要的作用。海底蕴藏着巨大的贵重矿产资源,但是海底条件恶劣,状况复杂,水下仿生机器人因其具有良好的环境适应性逐渐成为探索海洋的重要工具。水下仿生机器人是能够在水下移动,具有触觉和视觉系统,可通过无线控制或者通过手动操作去完成水下作业任务的装置。水下机器人分为两类:一种是有线控制水下机器人,又名遥控水下机器人(remotely operated vehicle, ROV),通常有脐带缆;另一种是无缆水下机器人,即自动水下机器人(autonomous underwater vehicle, AUV),自备电源,利用控制系统实现自我控制。水下机器人能够替代传统潜水技术探查难以到达的区域或深度,并执行相应的水下任务。随着陆地资源不断枯竭,有能力的国家开始将目光移向了海洋资源,各个国家开始争相研究海洋资源,进一步促

进了水下机器人的发展。此外,许多国家都设立了相应的水下仿生机器人研究中心,研制新型的水下仿生机器人,并将其应用到民用及军用方面。比较著名的研究机构有美国伍兹霍尔海洋研究所、美国麻省理工学院的水下机器人研究所、英国海事技术中心、美国海军研究生院、中国科学院沈阳自动化研究所、葡萄牙波尔图大学、日本东京大学机器人应用实验室等。国际上许多研究机构及大学不断研究水下生物体的运动机理及其特有的结构功能,以此为基础,开发出许多新型水下仿生机器人。在人类探索海洋的过程中,水下仿生机器人将会成为一个不可或缺的工具。

我国仿生研究相对于国外来说起步较晚,近年来在国家科研项目的推动下,从开始模仿国外研究成果发展到在某些领域与国外齐头并进的阶段。在水下仿生机器人领域走在前列的主要有国防科技大学、北京航空航天大学、哈尔滨工程大学、中国科学院沈阳自动化研究所、哈尔滨工业大学等。国防科技大学 2009 年研制的水下仿生机器人“COWNOSE RAY I”的前进速度能达到  $0.13 \text{ m/s}$ ,同时能以  $0.15 \text{ m/s}$  的速度后退。北京航空航天大学开发的水下机器鱼“ROBOFISH”是一个平面六关节机构,在水中游动的速度可达到  $0.6 \text{ m/s}$ ,仿造鲨鱼的体形,将电池及信息发送部分安装在鱼头内部,利用安装在鱼尾内部的 6 个伺服电动机作为动力源。由北京航空航天大学研制的“SPC-II”仿生机器鱼在水中游动的速度可达  $1.5 \text{ m/s}$ ,可持续在水下工作  $2\sim 3 \text{ h}$ ,并且已经应用到了水下考古。北京航空航天大学研发的仿生牛鼻鲢由布置在身体两侧的 3 对鳍条驱动,每个鳍条通过伺服电动机驱动,在水中测试的样机速度可达  $0.26 \text{ m/s}$ 。

北京航空航天大学一直专注于昆虫飞行研究,通过实验、计算、数学仿真来研究昆虫行走、停止、转向等动作的实现机理。哈尔滨工程大学研发的两栖仿生机器蟹能够在平坦的地面上实现前后左右行进及转弯等动作,并可以跨越高  $30 \text{ mm}$  的障碍物;在水中运动时,则需