



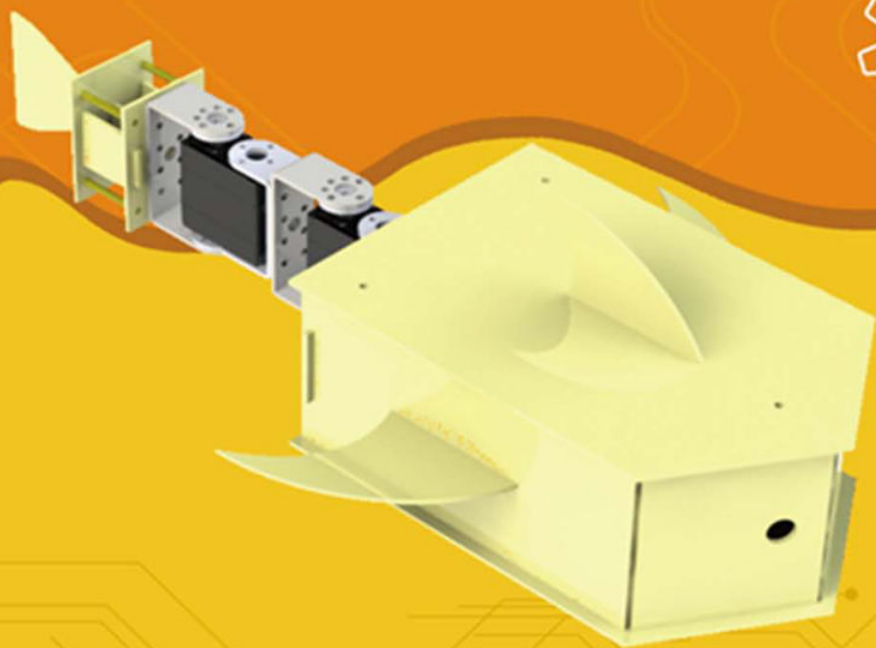
北京市科学技术委员会
科普专项经费资助



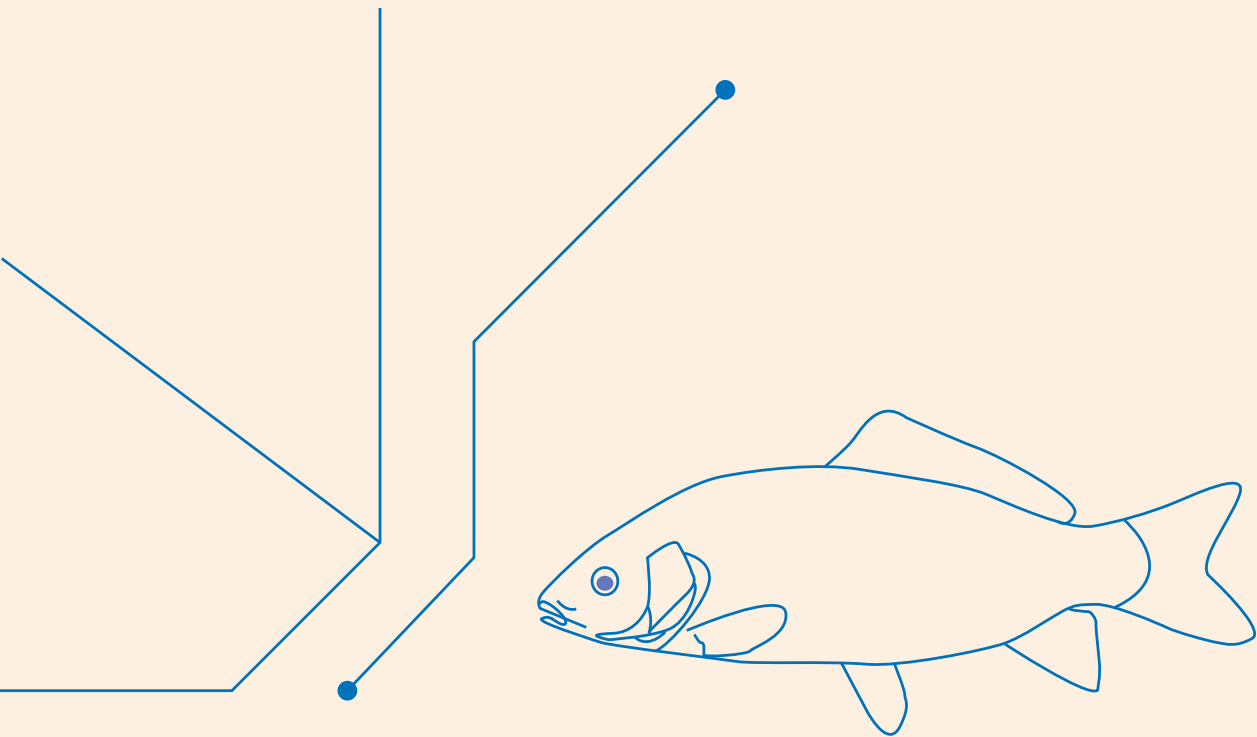
我的机器人创客教育系列

仿鱼机器人的 设计与制作

罗庆生 罗 霄 陈禹含 编著



 北京理工大学出版社
BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS



我的机器人创客教育系列

仿鱼机器人的设计与制作

罗庆生 罗 霄 陈禹含 ● 编著

 **北京理工大学出版社**
BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

版权专有 侵权必究

图书在版编目 (CIP) 数据

仿鱼机器人的设计与制作/罗庆生, 罗霄, 陈禹含编著. —北京: 北京理工大学出版社, 2019. 7

(我的机器人创客教育系列)

ISBN 978 - 7 - 5682 - 7268 - 1

I. ①仿… II. ①罗… ②罗… ③陈… III. ①仿生机器人 - 设计 - 青少年读物②仿生机器人 - 制作 - 青少年读物 IV. ①TP242 - 49

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2019) 第 142825 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 / 保定市中华美凯印刷有限公司

开 本 / 710 毫米 × 1000 毫米 1/16

印 张 / 14.25

字 数 / 270 千字

版 次 / 2019 年 7 月第 1 版 2019 年 7 月第 1 次印刷

定 价 / 57.00 元

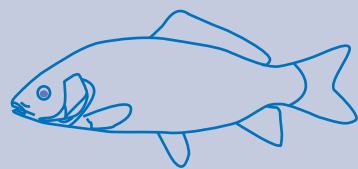
责任编辑 / 张慧峰

文案编辑 / 张慧峰

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



序 言

青少年是祖国的未来，科学的希望。以我国广大青少年为对象，开展规范性、系统性、引领性、全局性的科技创新教育与实践活动，让广大青少年通过这些活动，将理论研究与实际应用结合，将动脑探索与动手实践结合，将课堂教学与社会体验结合，将知识传承与科技创新结合，使广大青少年能有效提升创新兴趣，熟悉创新方法，掌握创新技能，增长创新能力，成为我国新时代的科技创新后备人才，意义重大，影响深远。

在形形色色的青少年科技创新教育与实践活动中，机器人科普教育、科研探索、科技竞赛别具特色，作用显著。这是因为机器人是多学科、多专业、多技术的综合产物，融合了当今世界多种先进理念与高新技术。通过机器人科普教育、科研探索、科技竞赛，可以使广大青少年在机械技术、电子技术、计算机技术、传感器技术、智能决策技术、伺服控制技术等方面得到宝贵的学习与锻炼机会，能够有效加深青少年对科技创新的理解能力，并提高其实践水平，让他们尽早爱科学、爱创新。

了解机器人的基本概念，学习机器人的基本知识，掌握机器人的设计与制作技巧，提升机器人的展演水平与竞技能力，将使广大青少年走近我国科技创新的最前沿，激发青少年对于科技创新尤其是机器人创新的兴趣与爱好，挖掘青少年开展科技创新的潜力，夯实青少年成为创新型、复合型人才的理论与技术基础。

“我的机器人创客教育系列”丛书重点讲述了仿人、仿蛇、仿狗、仿鱼、

仿蛛、仿龟等六种机器人的设计与制作，之所以选择了这六种仿生机器人作为本套丛书的主题，是出于以下考虑：在仿生学一词频繁在科研领域亮相时，仿生机器人也逐步进入了人们的视野。由于当代机器人的应用领域已经从结构化环境下的定点作业，朝着航空航天、军事侦察、资源勘探、管线检测、防灾救险、疾病治疗等非结构化环境下的自主作业方向发展，原有的传统型机器人已不再能够满足人们在自身无法企及或难以掌控的未知环境中自主作业的要求，更加人性化和智能化的、具有一定自主能力、能够在非结构化的未知环境中作业的新型机器人已经被提上开发日程。为了使这一研制过程更为迅速、更为高效，人们将目光转向自然界的各种生物身上，力图通过有目的的学习和优化，将自然界生物特有的运动机理和行为方式，运用到新型仿生机器人的研发工作中去。

仿生机器人是一个庞大的机器人族群，从在空中自由飞翔的“蜂鸟机器人”和“蜻蜓机器人”，到在陆地恣意奔跑的“大狗机器人”和“猎豹机器人”，再到在水下尽情嬉戏的“企鹅机器人”和“金枪鱼机器人”；从肉眼几乎无法看清的“昆虫机器人”到可载人行走的“螳螂机器人”，现实世界中处处都可看见仿生机器人的身影，以往只有在科幻小说中出现的场景正在逐步与现实世界交汇。

仿生机器人的家族成员们拥有五花八门的外观形貌和千奇百怪的身体结构，它们通过不同的机械结构、步态规划、行动特点、反馈系统、控制方式和通信手段模拟着自然界中各种卓越的生物个体，同时又通过人类制造的计算机、传感器、控制器以及其他外部构件，诠释着自己来自实验室的特殊身份。如今，这支源于自然世界和科学世界混合编组的突击部队正信心满满，准备在人类生活中大显身手。

时至今日，仿生机器人已经成为家喻户晓的“大明星”，每一款造型新颖、构思巧妙、功能独特、性能卓异的仿生机器人自问世之时起都伴随着全世界的惊叹和掌声，仿生机器人技术的迅速发展对全球范围内的工业生产、太空探索、海洋研究，以及人类生活的方方面面产生越来越大的影响。在减轻人类劳动强度，提高工作效率，改变生产模式，把人从危险、恶劣、繁重、复杂的工作环境和作业任务中解放出来等方面，它们显示出极大的优越性。人们不再满足于在展示厅和实验室中看到机器人慢悠悠地来回走动，而是希望这些超能健儿们能够在更加复杂的环境中探索与工作。

北京理工大学特种机器人技术创新团队成立于2005年，是在罗庆生教授和韩宝玲教授带领下，长期不懈地走在特种机器人科技创新探索、科研任务攻关道路上，充满创新能量、奋斗不息的一支标兵团队。该创新团队的主要研究领域为光机电一体化特种机器人、工业机器人技术、机电伺服控制技

术、机电装置测试技术、传感探测技术和机电产品创新设计等。目前已研制出仿生六足爬行机器人、新型特种搜救机器人、多用途反恐防暴机器人、新型工业码垛机器人、新型轮腿式机器人、新型节肢机器人、新型工业焊接机械臂、陆空两栖作战任务组、外骨骼智能健身与康复机、“神行太保”多用途机器人、履带式壁面清洁机器人、小型仿人机器人、“仿豹”跑跳机器人、先进综合验证车、仿生乌贼飞行机器人、履带式变结构机器人、制导反狙击机器人、新型球笼飞行机器人等多种特种机器人。该团队在承研某部“十二五”重点项目——新型仿生液压四足机器人过程中，系统、全面、详尽、科学地开展了四足机器人结构设计技术研究、四足机器人动力驱动技术研究、四足机器人液压控制技术研究、四足机器人仿生步态技术研究、四足机器人传感探测技术研究、四足机器人系统控制技术研究、四足机器人器件集成技术研究、四足机器人操控装备技术研究，在有关液压四足机器人的仿生研究、机构设计、结构优化、机械加工、驱动传感、液压伺服、系统控制、人工智能、决策规划和模式识别等高精尖技术方面取得一系列创新与突破，从而为本套丛书的撰写提供了丰富的资料和坚实的基础。

本套丛书的主创人员在开发高性能、多用途仿生机器人方面具有丰富的研制经验和深厚的技术积累，由罗庆生、韩宝玲、罗霄撰写的专著《智能作战机器人》曾获“第五届中华优秀出版物奖图书奖”称号，这是我国出版物领域中的三大奖项之一，表明其在科技领域，尤其是在机器人领域中的实力与地位。

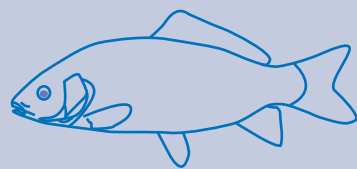
本丛书由罗庆生、罗霄担任主撰；蒋建锋、乔立军、王新达、陈禹含、郑凯林、李铭浩等人参与了本套丛书的研究与撰写工作，并担任各分册的主创人员。

在本套丛书的研究与写作过程中，得到了北京市教委、北京市科委等部门相关领导的极大关怀，得到了北京理工大学出版社的热情帮助，还得到了许多同仁的无私支持。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！

少年强则中国强，创新多则人才多。让机器人技术助圆我国广大青少年的“中国梦”！

作 者

2019年7月于北京



目 录

CONTENTS

第 1 章	仿生机器人的基本概念	1
1.1	生物的本领	1
1.1.1	不同凡响的探测能力	1
1.1.2	别具一格的伪装能力	2
1.1.3	出类拔萃的通信能力	4
1.2	生物的启迪	5
1.2.1	发人深省的对比	5
1.2.2	生物形态的妙用	8
1.3	仿生学的基本概念	11
1.3.1	什么是机器人	11
1.3.2	什么是仿生学	15
1.3.3	仿生机器人的特点、应用与发展	29
第 2 章	我能像鱼儿一样游泳	32
2.1	带你了解一下神奇的鱼儿	32
2.1.1	神奇的鱼儿	32
2.1.2	鱼类的体形	35
2.1.3	鱼类的一般运动	38
2.1.4	鱼类的沉浮	41

2.1.5 鱼类的游泳	42
2.2 给你讲讲我的历史	45
2.2.1 传统驱动方式的机器鱼	45
2.2.2 记忆合金驱动的机器鱼	47
2.2.3 电致动聚合物驱动的机器鱼	48
2.2.4 压电材料驱动的机器鱼	50
2.3 我的名字叫机器鱼	51

第3章 我身体的由来 53

3.1 我的能量源	53
3.1.1 鱼儿的心脏	53
3.1.2 仿鱼机器人的能量来源	54
3.1.3 锂离子电池	55
3.1.4 锂聚合物电池	63
3.1.5 镍氢电池	66
3.2 多彩的形态	71
3.2.1 体形和皮肤	71
3.2.2 骨骼系统	74
3.3 灵活的尾巴	77

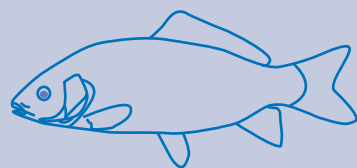
第4章 瞧瞧我的感官 81

4.1 大眼睛眨一眨	81
4.1.1 鱼儿的眼睛	81
4.1.2 机器鱼眼的视觉感知	83
4.2 鱼儿的耳朵有秘密	85
4.2.1 鱼儿的耳朵	85
4.2.2 机器鱼的姿态感知	86
4.3 我也有感觉	88
4.3.1 鱼类的嗅觉和味觉	88
4.3.2 仿鱼机器人用于化学物质感知	88

第5章 快把我制作出来吧 91

5.1 仿鱼机器人的设计工具	91
5.1.1 三维实体造型设计的基本内容	91
5.1.2 三维实体造型的基本软件	92

5.1.3 三维实体造型设计的基本步骤	95
5.2 仿鱼机器人的制作材料	106
5.2.1 塑料类材料	106
5.2.2 木材类材料	109
5.3 我的维护医生：制作工具	111
5.3.1 五金工具	111
5.3.2 切割设备	113
5.3.3 3D 打印机	116
5.3.4 测量工具	123
5.4 组装我的躯干	130
5.5 组装我的尾巴	132
5.6 帮我设计一个可爱的脑袋	134
5.7 拼到一起看一看	137
第 6 章 我能像鱼儿一样游泳	138
6.1 我的大脑	138
6.1.1 鱼类的脑和神经系统	138
6.1.2 仿鱼机器人的控制系统	141
6.1.3 仿鱼机器人的神经系统	151
6.2 我的控制系统	156
6.2.1 控制系统总体介绍	156
6.2.2 仿生机器人关键技术概述	159
6.3 调整姿态，让我游一游	199
6.3.1 鱼类游动的秘密	199
6.3.2 舵机控制鱼尾摆动	200
参考文献	202



第 1 章

仿生机器人的基本概念

1.1 生物的本领

1.1.1 不同凡响的探测能力

自然界中的各种生物通过物竞天择和长期进化，已对外界环境产生了极强的适应性，在能量转换、传感探测、运动控制、姿态调节、信息处理和方位辨别等方面还表现出了高度的合理性，已日益成为人类提升科学研究水平、开发先进技术装备的参照物和借鉴物。

当人们放眼周围的自然界时，常常会因生物们不同凡响的探测能力所震惊和倾倒。例如，研究人员发现鲨鱼在搜寻猎物时，其传感器官会采用一种新颖的热探测形式。这种热探测形式之所以新颖，就在于它与一般哺乳动物采用的热探测形式不同。哺乳动物通常会利用冷敏感离子通道将其身体周围的温度信

息转换成能够被热传感神经细胞接收的电信号。但鲨鱼则有所不同，其头部前方生有敏感的“电传感器”，每个“电传感器”由一束传感细胞和神经纤维组成，它们均位于充满胶体的小管中，而小管的开口由一个小孔通向鲨鱼身体表面。当鲨鱼身体周围的温度发生微小变化时，鲨鱼头部“电传感器”的细胞外胶体会发生明显的电压变化，这样，温度信息便无须冷敏感离子通道的情况下被转换成电信号，这种响应快捷、高效的探测形式，可帮助鲨鱼迅速找到可能提供丰富食物的热锋信息。

1.1.2 别具一格的伪装能力

自然界中的许多生物往往都有着自己独特的生存绝技，伪装术就是其中之一。漫长的进化和变异过程，为众多生物赢得了天生“伪装大师”的美称^[1]。生物们利用其自身结构和生理特性来“隐真示假”，与人类在军事斗争中采用的伪装术是异曲同工、殊途同归。

追根溯源，人类战争史以及由此产生的军事伪装术仅有数千年的历史，而形形色色的生物伪装术则伴随着物竞天择与适者生存的自然规律不断演化，有着与生物生命史一般久远的发展历程。尤其是隐身、拟态、干扰等生物伪装术花样繁多。

按照伪装方式的不同，生物伪装术大致可以分为隐身、拟态和干扰三类。

1. 隐身伪装术

所谓隐身其实就是“隐真”（见图1-1），有些生物会以外部自然环境为隐身基准，通过改变自身色调色彩，达到隐蔽自我、迷惑天敌或捕食猎物的目的。例如，生活在丛林里的变色龙就是通过采用掩护色，把自己的肤色调整得与四周环境的颜色一致，以避免猎物发现，从而有利于自己隐蔽前进和发起攻击^[2]。生物隐身伪装术可谓是人类军事隐身伪装术的灵感源泉，为人类军事隐身伪装术的发展提供了宝贵的参考与借鉴。



图1-1 隐身伪装术

2. 拟态伪装术

所谓拟态伪装其实就是“示假”（见图1-2）。在动物世界里，竹节虫的拟态伪装术可谓炉火纯青，完全能够以假乱真。当竹节虫趴在植物上时，其自身体形与植物形状十分吻合，能够装扮成被模仿的植物，或枝或叶，极其相似；同时，竹节虫还能根据光线、湿度和温度的差异来改变体色，让自身完全融入周围的环境中，使鸟类、蜥蜴、蜘蛛等天敌难以发现其存在。

3. 干扰伪装术

如果说隐身和拟态伪装还属于被动伪装范畴的话，那么乌贼施放烟幕避敌则是生物采用主动干扰方法实施伪装以求生存的典范（见图 1-3）。解剖实验表明，乌贼体内有一个专门用来存储黑色液体的“墨囊”，当乌贼遇到侵害时，就会从“墨囊”中喷出与自己形态相似的黑色浓液，悬浮在水中。当敌害碰到时，浓液会“爆炸”，并在周围形成一层浓黑的烟幕。



图 1-2 拟态伪装术



图 1-3 干扰伪装术

对生物伪装的研究以及由此而衍生的生物伪装技术，大大提高了人类军事伪装术的效能。与传统的伪装方法相比，生物伪装术主要有以下四个方面的优点：

(1) 取材简单。

自然界中的生物在进行合成代谢时，大都以随处可见的物质（如空气、水、植物和矿物质等）为原料，以阳光为能源，不仅原料成本低，而且取之不尽、用之不竭^[3]。

(2) 安全可靠。

抛开眼花缭乱的表征，生物伪装的实质就是生物化学反应，这类反应大多是在酶的催化作用下进行的，要求输入的能量少，反应条件缓和，工艺和设备简单，操作安全性好。

(3) 活性强劲。

生物分子通常具有复杂、精细的结构，这种结构往往会赋予生物分子特殊的活性，即所谓的“生物特异功能”，例如准确、敏感的感知能力，高效、迅速的搜索能力，牢固、可靠的黏结能力，等等。

(4) 结构紧凑。

生物系统中的信息码、功能模块、制造组装单元都是在分子水平上以完美方式自组装起来的，其结构比具有类似功能的人造光学或机械系统紧凑得多。

有关研究表明，当真假目标的数量达到一定比例时，成功的“隐真”和

“示假”相当于增加了 10 倍的兵力。由此可见，伪装在军事上的作用非同一般。生物在伪装上的招数，无疑为现代军事伪装开拓了新的研究思路，具有广阔的应用前景（见图 1-4）。



图 1-4 伪装在军事方面的应用

1.1.3 出类拔萃的通信能力

世界上没有一种动物能够真正单独地生活。动物之间相互联系有着自己独特的方式。例如，蚂蚁在集体生活时，靠特殊的“化学语言”保持联系。这种特殊的“化学语言”其实就是激素，它是由蚂蚁某一器官或组织分泌到体外的一种化学物质^[4]。蚂蚁在寻找食物时，会将这种激素散布在来回的路上，同伴们根据留下的气味，就知道去哪里觅食。一同前去的蚂蚁都散发出这种气味，使来往的道路成为“气味长廊”，成群的蚂蚁沿着这条长廊搬运食物、忙碌不息（见图 1-5）。蚂蚁还能利用气味辨别谁是同族，谁是异族。如果蚂蚁误入异族巢穴而被发现，其命运就非常可悲了。



图 1-5 蚂蚁集体觅食

猩猩靠声音互相联系。当一只猩猩看到树上结有果实时，它会大声呼啸，告知同伴前来分享；当猩猩遇到敌害时，它也会发出嚎叫，恳请同伴前来救援。

昆虫的鸣叫是为了吸引异性同类，或是对其他动物进行警告。蝉的腹部生有气室，气室的一边是鼓膜，气室中空气的流动使鼓膜发生振动而吱吱作响。蝗虫用后腿摩擦翅膀发出响声。蟋蟀则用双翅相互擦击发出叫声。

许多时候，动物接收信息靠的是眼睛，而比较容易被眼睛接收的是色彩和动作。雄孔雀开屏时展现绚丽多彩的羽毛，就是将缤纷的色彩作为信息引起雌孔雀的注意，同时也是对其他雄孔雀发出警告。

蜜蜂以婀娜多姿的舞姿为信号，与同伴进行联系。奥地利生物学家弗里茨经过细心的研究，发现蜜蜂舞蹈的秘密。蜜蜂的舞蹈主要有“圆舞”和“镰舞”两种形式。当工蜂外出回巢后，常做一种有规律的飞舞。如果工蜂跳“圆舞”，就是告诉同伴蜜源与蜂房相距不远，在 100 m 左右；如果工蜂跳“镰舞”，就是告诉同伴蜜源与蜂房相距较远。路程越远，工蜂跳的圈数就越多，频率也越快^[5]。

1.2 生物的启迪

1.2.1 发人深省的对比

1. 片流膜的发明

马克思·克雷默博士倚靠在轮船甲板的栏杆上，尽管大西洋的景色壮美无比，但却没有引起他的丝毫兴趣，唯有那群逐浪嬉戏的海豚始终牵引着他的视线。克雷默博士是一位学有专长、造诣深厚的德国科学家。第二次世界大战以前，他在德国航空研究中心领导着抗湍流的研究。这次，他应聘到美国海军某研究所工作。连日来，他一直注意着大西洋上的海豚，眼前这群游速达每小时 50 km 的海豚，伴随着轮船快速游行已有两个多小时，但看上去它们的动作依然是那样地潇洒自如、刚劲有力，没有丝毫倦意。克雷默博士对此产生了极大的兴趣。由于从事抗湍流研究工作已有多多年，他非常清楚与空中飞行物要经受气流产生的湍流阻力一样，在水中运动的物体同样也会经受水中湍流的强劲阻力。他不禁奇怪海豚是怎样抗击湍流而能高速游动的呢？虽然，海豚具有非常完美的流线形外形，头部和尾部狭尖而中间部分宽厚，耳壳和后肢都已退化消失，身长与厚度的比例十分合理，浑身光滑少毛，这些特点对海豚减少水中湍流阻力十分有利。然而，有人做过试验，航速为每小时 50 km 的轮船若拖着一

只与海豚身形相同、大小相仿的物体在海上航行，需要增加 2.6 匹马力。而眼前的海豚按其身躯大小来估计，本身是不可能产生那么大的驱动力的。海豚能在比空气密度大 800 倍的水中轻松地追随高速航行的轮船，必定有其奥妙之处。是不是海豚能以最小的动力来最大限度地使湍流变成片流呢？如果这个问题能搞清楚，那么对抗湍流的研究一定会有所帮助。

1956 年，克雷默博士终于得到了梦寐以求的海豚皮样张，立即对它进行了仔细研究。这张海豚皮厚度约为 1.55 mm，富有弹性和疏水性。经过切片，在显微镜下观察，可见其组织结构与其他脊椎动物的皮肤一样也是由表皮、真皮和由胶质纤维和弹性纤维交错的结缔组织组成。但与众不同的是，海豚的真皮层上面有许多小乳突，根据各部位比较，这些小乳突在额部和尾部特别发达，这些小乳突对抗湍流有什么作用呢？克雷默博士决心弄个明白。通过研究，他认为这些小乳突形成了很多微小的管道系统，在运动中能经受很大的压力，含有胶质纤维和弹性纤维交错的结缔组织，中间充满了脂肪，增加了海豚皮肤的弹性，皮肤的弹性和疏水性在很大程度上消除了水流由片流变成湍流的振动，并能使水分子集结成环状结构在海豚体表上滚动。众所周知，滚动摩擦的阻力是最小的，从而把水阻力大大地减少了，再加上海豚皮下肌肉能作波浪式运动，使富有弹性的皮肤在水的压力下灵活地变形，使其和水流的运动相一致，进而有效地抑制水流高速流经皮肤时产生的漩涡，这样一来，海豚即便在高速运动时，也能把水的阻力降低到最小限度。

据此，克雷默博士开始研制人造海豚皮。1960 年他在美国橡胶公司工作期间，用橡胶仿造海豚皮肤的结构研制出一种名叫“片流膜”的人造海豚皮（见图 1-6）。这种片流膜由三层组成：表层和底层都是光滑的薄层，中间的一层设置了许多容易弯曲的小突片，形成一种微细的管道系统，其内充满了富有弹性的液体，使片流膜具有弹性。后来克雷默博士将片流膜装配在潜水装置上进行试验，结果使湍流减少了 50%。此后，美国军方将这种片流膜安装在潜水艇的表面，取得了很好的效果，大大提高了潜水艇的航行速度。以后人们又将这种片流膜安装在输送石油的管道内壁上，同样显著提高了石油输送的效率。

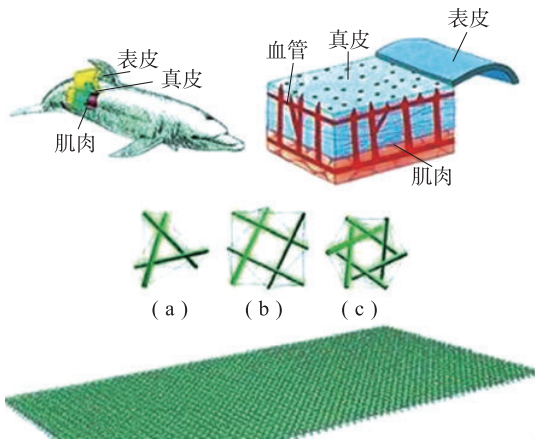


图 1-6 海豚皮与人造海豚皮

2. 青蛙眼和电子眼

电子蛙眼是电子眼的一种，其前部实际上就是一个摄像头，成像之后通过光缆传输到电脑设备显示和保存，它的探测范围呈扇状且能转动，这与蛙类的眼睛（见图 1-7）类似。

科学家根据蛙眼的原理和结构，发明了电子蛙眼。现代战争中，敌方可能发射导弹来攻击我方目标，这时我方可以发射反导弹截击对方来袭导弹，但敌方为了迷惑我方，又可能发射假导弹来扰乱我方的视线^[6]。在战场上，敌人的飞机、坦克、舰艇发射的真假导弹都处于快速运动之中，要克敌制胜，就必须及时把敌方真假导弹区别开来。如果我方能将电子蛙眼和雷达相配合，就可以像蛙眼一样，敏锐迅速地跟踪飞行中的真目标。



图 1-7 蛙眼

青蛙捕虫的本领十分高强，当有小虫从它眼前飞过，青蛙便一跃而起，以迅雷不及掩耳之势将小虫捕获。但令人惊异的是，青蛙那双凸起的眼睛，对静止的东西，却往往视而不见，即使有它最喜爱的苍蝇得在眼前，也不会引起它的注意。这种现象引起了科学家们的浓厚兴趣，对蛙眼的结构进行了仔细研究，发现蛙眼里面有四种神经细胞，也就是四种“检测器”。它们的形状、大小和树状突分支各不相同，每种细胞接受范围的大小和轴突传导信号的速度也各不相同。第一种神经细胞叫反差检测器，它能感觉运动目标暗色前后缘；第二种神经细胞叫运动凸边检测器，它对有轮廓的暗颜色目标的凸边产生反应；第三种神经细胞叫边缘检测器，它对静止和运动物体的边缘感觉最灵敏；第四种神经细胞叫变暗检测器，只要光的强度减弱了，它就立刻反应。蛙眼在这四种神经细胞的作用下，能把一个复杂图像分解成几种容易辨别的特征，然后传送到青蛙大脑的视觉中心，经过综合，就能看到原来的完整图像^[7]。

科学家们还对青蛙进行了特殊的实验研究。原来，蛙眼视网膜的神经细胞分成五类，一类只对颜色起反应，另外四类只对运动目标的某个特征起反应，并能把分解出的特征信号输送到青蛙大脑的视觉中枢——视顶盖。视顶盖上有四层神经细胞，第一层对运动目标的反差起反应；第二层能把目标的凸边抽取出来；第三层只看见目标的四周边缘；第四层则只管目标暗前缘的明暗变化。这四层特征就好像在四张透明纸上所画的不同图画，叠在一起，就是一个完整的图像。因此，在迅速飞动的各种形状的小动物里，青蛙可立即识别出它最喜

欢吃的苍蝇和飞蛾，而对其他飞动着的东西和静止不动的景物都毫无反应^[8]。科学家们根据蛙眼的视觉原理，已研制成功了一种电子蛙眼（见图1-8）。这种电子蛙眼能像真的蛙眼那样，准确无误地识别出特定形状的物体。把电子蛙眼装入雷达系统后，雷达抗干扰能力大大提高。这种雷达系统能够快速而准确地识别出特定形状的飞机、舰船和导弹等。特别是能够区别真假导弹，防止敌方以假乱真，破坏我方的作战计划。

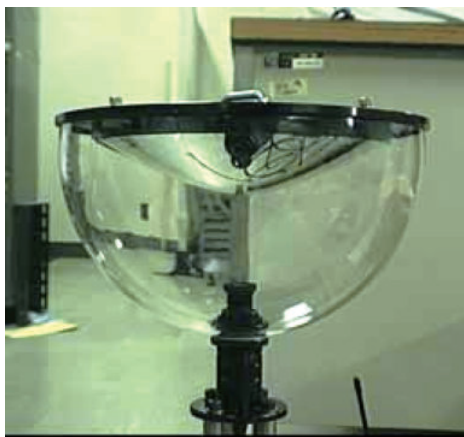


图 1-8 电子蛙眼

1.2.2 生物形态的妙用

1. 从猫的胡子谈起

养猫和爱猫的人都会觉得猫是一种温顺、可爱的小宠物。它们确实如此，但它们却属于一个特殊的动物科——猫科，这个科的成员还包括凶猛的狮子、老虎、豹子，等等。无论猫的生活地区、体形、外表有多大差异，猫都有一个共同之处，那就是它们的身体条件非常适合捕猎，它们都是技能高超的捕猎能手。猫有着锐利的眼睛、锋利的牙齿、带钩的尖爪、柔软脚垫，猫的视觉、听觉、嗅觉十分敏锐，甚至连猫嘴边的胡子都能帮助它敏捷地捕食。

猫的胡子根部生有极细的神经，触及物体时猫就能及时感觉到，所以猫的胡子是一个特殊的感觉器官。它伸展的面积与猫的身体一样宽，这就能使猫在黑暗、狭窄的通道中探测路径，摸清自己的身体是否可以通过。胡子能帮助猫在暗中感觉周围情况，如果猫的眼睛或耳朵都用不上时，胡子就能帮上大忙。平时走路、奔跑，猫也要靠着胡子感知周围的物体。特别是在捕鼠时，胡子可帮助猫探测鼠洞的宽度和深度，当胡子扫过老鼠的身体时，猫便能察觉老鼠的所在，从而帮助捕鼠。因此，胡子既是猫的“探测器”，又是猫的“计量仪”，可为猫提供很多方便。

许多其他的动物，特别是啮齿类动物，也有着触觉灵敏的胡子。鼯鼠除了在鼻子周围有一圈完整的胡子之外，末端还有着一串称之为爱默氏器的细微神经末梢。这些神经末梢的排列十分致密，可以与触须一起共同来识别洞穴中的空气碰到障碍物而产生的气流的方向和压缩波的方向。如果夜晚鼯鼠要出洞时，就以触须来试探洞穴外面的空气情况^[9]。星鼻鼯鼠的鼻尖周围有排列成星形的22个很小的裸露的肉质附属物，这是一种特异的超灵敏触觉器官，事实上，这种器官