



罗庆生
罗 霄 编著

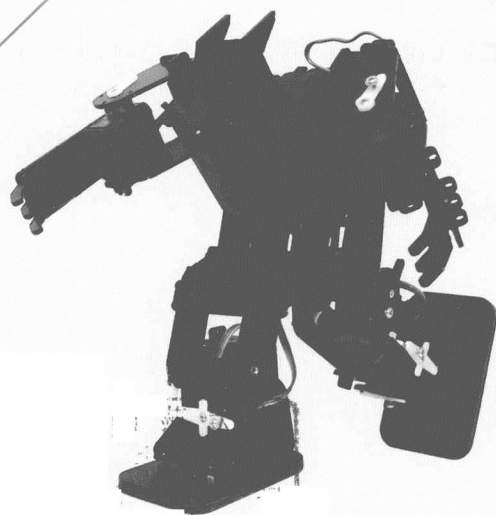
我的机器人

仿生机器人的设计与制作

MY ROBOT

DESIGN AND FABRICATION OF MINIATURE BIONIC ROBOT

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



我的机器人

仿生机器人的设计与制作

MY ROBOT

DESIGN AND FABRICATION OF MINIATURE BIONIC ROBOT

罗庆生 罗 霄 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

我的机器人：仿生机器人的设计与制作/罗庆生，罗霄编著. —北京：北京理工大学出版社，2016. 1

ISBN 978 - 7 - 5682 - 1724 - 8

I. ①我… II. ①罗… ②罗… III. ①仿生机器人 - 基本知识 IV. ①TP242

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2016) 第 002455 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 / 北京地大天成印务有限公司

开 本 / 787 毫米 × 1092 毫米 1/16

印 张 / 14.5

字 数 / 266 千字

版 次 / 2016 年 1 月第 1 版 2016 年 1 月第 1 次印刷

定 价 / 56.00 元

责任编辑 / 王玲玲

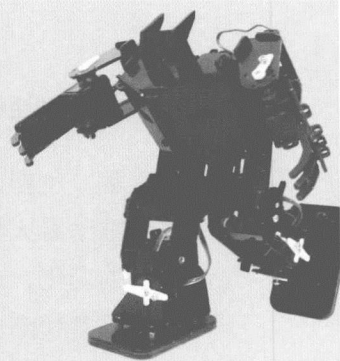
尹 暄

文案编辑 / 王玲玲

责任校对 / 周瑞红

责任印制 / 王美丽

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

FOREWORD

机器人是一种自动执行工作、完成预期使命的机器装置。它既可以接受人类临场的指挥，又可以运行预先编排的程序，还可以根据以人工智能技术制定的原则纲领自主行动。其任务是协助或取代人类在恶劣、危险、有害的环境或条件下从事单调、复杂、艰苦的各项工作。机器人技术作为 20 世纪人类伟大发明的产物，从 20 世纪 60 年代初问世以来，经历 50 多年的发展，现已取得突飞猛进的发展和持续创新的进步，已经成为当代最具活力、最有前途的高新技术之一。

2015 年 11 月 20 日，在“致 2015 世界机器人大会贺信”中国国家主席习近平同志指出：在人类发展进程中，诞生了大量具有里程碑意义的创新成果。巴比伦的计时漏壶、古希腊的自动机、中国的指南车等，就是古代人类创造的自动装置中的精妙之作。这些创造发明，源于丰富多彩的生产生活实践，体现了人类创造生活、利用自然的执着追求和非凡智慧。他还指出：当前，世界正处在新科技革命和产业革命的交汇点上。科学技术在广泛交叉和深度融合中不断创新，特别是以信息、生命、纳米、材料等科技为基础的系统集成创新，以前所未有的力量驱动着经济社会发展。随着信息化、工业化不断融合，以机器人科技为代表的智能产业蓬勃兴起，成为现时代科技创新的一个重要标志。中国将机器人和智能制造纳入了国家科技创新的优先重点领域，我们愿加强同各国科技界、产业界的合作，推动机器人科技研发和产业化进程，使机器人科技及其产品更好地为推动发展、造福人民服务。

2014 年 6 月 9 日，习近平主席出席中国科学院第十七次院士大会、中国工程院第十二次院士大会，就科技创新，尤其是“机器人革命”发表讲话。他表示，科技是国

家强盛之基，创新是民族进步之魂。自古以来，科学技术就以一种不可逆转、不可抗拒的力量推动着人类社会向前发展。从某种意义上说，科技实力决定着世界政治经济力量对比的变化，也决定着各国各民族的前途命运。而机器人技术领域的创新则是新一轮科技革命和产业变革的产物，将成为各国科技创新赛场上的“亮点”。习近平主席还说，“我看了一份材料，说‘机器人革命’有望成为‘第三次工业革命’的一个切入点和重要增长点，将影响全球制造业格局，而且我国将成为全球最大的机器人市场。国际机器人联合会预测，‘机器人革命’将创造数万亿美元的市场。”他表示，国际上有舆论认为，机器人是“制造业皇冠顶端的明珠”，其研发、制造、应用是衡量一个国家科技创新和高端制造业水平的重要标志。机器人主要制造商和国家纷纷加紧布局，抢占技术和市场制高点，我国将成为机器人的最大市场。习主席强调，我国不仅要把机器人水平提高上去，而且要尽可能多地占领市场。“这样的新技术新领域还很多，我们要审时度势、全盘考虑、抓紧谋划、扎实推进。”

正如习主席所说，科技创新就像撬动地球的杠杆，总能创造出令人意想不到的奇迹。当前机器人技术获得了井喷式的发展，是世界各国抢滩未来经济科技发展的重要时机，中国必须紧紧抓住并牢牢把握这一机遇，在创新的道路上迎头赶上、奋起直追、力争超越。

随着2016年的到来，我们已经迈过了21世纪里超过七分之一的历程。回顾过去，展望未来，我们心潮澎湃、浮想联翩。20世纪，人类取得了辉煌的成就，从量子理论和相对论的创立，脱氧核糖核酸双螺旋结构的发现，到原子能的和平利用，人类基因组图谱的绘制，世界科技发生了深刻的变革，并给世界科技和人类生活带来蓬勃前进的动力。尤其是机器人技术，尽管其问世的时间还不太长，但其在改变人类工作方式、提高企业生产效率、丰富人们日常生活、增强国家经济实力等方面表现出来的强劲势头不可阻挡。以工业机器人为例，其在经历了诞生—成长—成熟期后，已成为制造业中不可或缺的核心装备。目前，世界上有近百万台工业机器人正与工人师傅并肩战斗在各条战线上。而特种机器人作为机器人家族中的后起之秀，由于其功能多样、用途广泛而大有后来居上之势，各种仿人形机器人、资源勘测机器人、星球探险机器人、军用机器人、农业机器人、服务机器人、医疗机器人、娱乐机器人纷纷面世，并以飞快的速度和高超的技能向实用化迈进。

北京理工大学“特种机器人技术创新中心”是一支由中国著名机器人专家、教育部创新教学方法指导委员会委员、北京市教学名师、博士研究生导师罗庆生教授率领的科研团队，目前拥有博士生导师、教授、高工、博士等高素质成员30余人。团队多年来一直从事特种机器人的技术创新、产品研发、教育推广、市场普及等工作，在科学研究、技术创新、产品开发、成果转化、人才培养方面卓有建树。近年来，团队整合了全校多个相关学科的技术、人才和信息优势，成为一支在国内影响力很大、知名

度很高的攻关力量强大、研发经验丰富、各色人才汇集、满足市场需求的高新科技研发实体，并与一些企业建立起良好的产学研协作关系，推动着特种机器人技术及产品的不断进步。团队主要成员具有突出的科技攻关实力，在特种机器人涉及的各个研究领域有着深厚的学术造诣和丰富的实践经验，尤其在机器人结构设计技术、机器人运动学与动力学分析技术、机器人伺服控制技术、机器人多传感器与信息融合技术以及机器人群组网络通信技术方面有着多年的工作积累和科研经验。历年来，在承担国家“863”、“973”和一些省部级纵向课题研究过程中，团队成员更是大大提升了自身的理论水平和技术能力。

在带领北京理工大学特种机器人技术创新团队承担高新科技项目攻关的同时，罗庆生教授将教书育人、科研育人、创新育人作为自己责无旁贷的任务，辛勤工作在本科生教育第一线，并坚持不懈地探索创新型人才培养新模式，尤其是结合我国大学教育和中学教育的具体情况，以机器人技术为抓手，深入探索创新人才的培养模式，努力构建创新人才的培养体系。为使培养出来的学生成为创新型、复合型、通才型的人才，罗庆生教授在课堂教学中不断深化并发掘学生的创新潜力、激发学生的创新思维，始终将指导学生开展课外科技创新活动作为自己的份内工作，探索并实施了书本内外结合、课堂内外结合、校园内外结合、理论实际结合、继承创新结合、动脑动手结合的新型教学模式，并把这一模式贯彻到指导大学生、中学生开展课外科技创新活动中去。从课堂教学到指导学生课外科技创新，罗庆生教授深受同学们好评，于2010年与2014年两度获得北京理工大学“我爱我师”称号，并在2014年由北理工上万名师生参与的投票中获选为“感动北理，激励你我”先进模范称号。

在指导各创新团队开展课外科技创新活动的过程中，罗庆生教授始终坚持“大学生课外科技创新、毕业设计课题、实验室科研项目”三位一体的结合方式，提出了“以高带低、以硕带本”创新实践理论。创新团队中吸纳了来自全校范围中不同专业、不同年级的学生开展课外科技创新活动，以指导教师所在实验室、各学院大学生科技创新协会和基础教育学院创新基地为硬件，以创新团队中研究生成员和高年级本科生成员的研究经验、实验技能等为软件，软硬结合，为学生创新能力的培养提供全方位支持。在开展科技创新活动过程中，团队指导教师和管理团队群策群力、因势利导，帮助学生端正“做人、做事、做学问”的态度，帮助学生树立“创新增智、创新成才”的信心，敢于、善于面对创新实践过程中的各种困难，引导团队成员将浓厚的学习兴趣转化为生机勃勃的创造力。多年来，罗庆生教授所指导的学生课外科创团队获得20余项全国大学生科技竞赛最高奖，罗庆生教授成为全国大学生科技创新活动中最有影响力和知名度的指导教师之一。2012年10月，其指导本科生创新团队研制成功的新型节肢机器人，作为教育部、科技部联合推荐的全国高校唯一入选作品精彩亮相“科学发展 成就辉煌”大型图片实物展，向党的“十八大”成功召开献礼，轰动全

国，极大地鼓舞了全校师生。2014年10月，其指导的两件学生科创作品“基于人体工学的穿戴式增力套装”和“大角度矢量推进式水下多用途机器人”在第七届全国大学生创新创业年会上大放异彩，在学生代表评选的“我最喜爱的项目”与参会专家评选的“最佳创意项目”中均名列前茅，在两项投票中斩获“我最喜爱的项目”十佳第一名、第二名，同时获得“最佳创意项目”十佳第一名、第三名。2015年9月，其指导的学生科创作品“飞天灵蛛机器人”在第八届全国大学生创新创业年会上再创辉煌，在学生代表评选的“我最喜爱的项目”与参会专家评选的“最佳创意项目”中再度名列前茅，这是北京理工大学连续八年来在全国大学生创新创业年会中获得“十佳”项目称号，也在全国高校大学生科技创新活动中树立了一面旗帜，一面为培养创新型人才不懈努力的旗帜。

今天，机器人虽已广泛进入各行各业，开始大显身手，但人们，尤其是青少年们，常常还会对机器人存在神秘感，一些影视大片关于机器人的种种描述会使人们感到困惑，机器人是敌是友？这些困惑会引导人们发问：什么是机器人？机器人的基础知识有哪些？机器人的基本组成部分又有哪些？机器人的基本组成部分如何构成有机的整体？普通人能否设计或制作属于自己的机器人？

我们说机器人的出现与发展是社会进步和经济发展的必然结果，机器人是为了提高社会的生产水平和人类的生活质量而应运而生的，让机器人替人们去干那些人们不愿干或干不了、干不好的工作。在现实生活中，有些工作会对人体造成很大的伤害，如汽车制造厂里面的喷漆、焊接作业等；有些工作会对人们提出很高的要求，如生产流水线上的精密装配、重物搬运等；有些工作环境让人无法身临，如火山探险、深海探密、空间探索等；有些工作条件让人无所适从，如毒气弥漫、废水横流、辐射泄漏等；这些场合都是机器人大显身手的地方。以机器人代人，将人从繁重的体力劳动和辛苦的脑力劳动中解放出来已经成为一种不可逆转的趋势。我们——北京理工大学特种机器人技术创新团队的责任就是加快这一趋势的到来与实现。

本书是为解答人们，尤其是青少年们关于机器人的困惑而写的。本书由第1章小型仿生机器人的基本概念、第2章让你的机器人善运动——驱动系统、第3章让你的机器人会思考——控制系统、第4章让你的机器人有能量——电源系统、第5章让你的机器人能感知——传感系统、第6章让你的机器人懂沟通——通信系统、第7章制作你的小型仿生机器人、第8章小型仿生六足机器人的设计与制作、第9章小型仿生四足机器人的设计与制作、第10章小型仿人双足机器人的制作与装配、第11章小型仿生机器人的调试与编程，以及参考文献等章节组成。通过本书的系统讲述，能够让毫无专业背景的学习者逐步了解机器人的基础学科知识，掌握机器人的基本设计方法，熟悉机器人的基本制作技能，学会机器人的基本组装过程，最重要的一点就是能够让学习者亲手制作属于自己的小型仿生机器人，并通过创新编程方式，让机器人能运动、

会跳舞，还可参加创意演出，甚至搏击比赛，体验操控机器人的乐趣。

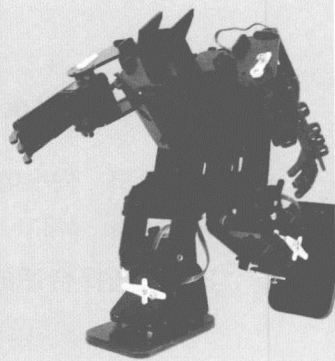
原中国工程院院长宋健同志曾经指出：“机器人学的进步和应用是 20 世纪自动控制最有说服力的成就，是当代最高意义上的自动化。”机器人技术综合了多专业、多学科、多领域的发展成果，代表了当代高新技术的发展前沿，它在人类生活应用领域的不断扩大正引起国际上重新认识机器人技术的作用。

“工欲善其事，必先利其器”。人类在认识自然、创新实践的过程中，不断创造出各种各样为人类服务的工具。作为 20 世纪自动化领域的重大成就，机器人已经和人类社会的生产、生活密不可分。世间万物，人是最宝贵的，人力资源是第一资源，这是任何其他物质不能替代的。我们的责任在于让机器人帮助人类把人力资源的优势尽量发挥。我们完全有理由相信，像其他许多科学技术的发明发现一样，机器人应该也一定能够成为人类的好助手、好朋友，让机器人技术帮助广大青少年真正成为创新型人才吧！

本书由罗庆生、罗霄担任主编著；葛卓、黄祥斌担任副编著；吴帆、张述玉、朱立松、徐峰、高博、赵明、刘广新、赵嘉珩、赵锐、王雪慧等人参与了本书部分内容的研究与撰写工作。

在本书研究与写作过程中，得到了北京理工大学相关部门的热情帮助，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！

编著者



目 录

CONTENTS

第1章	小型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	28
第2章	让你的机器人善运动——驱动系统	31
2.1	机器人常用驱动系统	32
2.1.1	直流无刷电动机	32
2.1.2	步进电动机	33

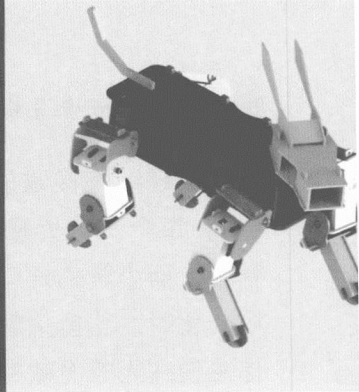
2.1.3	伺服电动机	34
2.1.4	舵机	35
2.2	选择合适的舵机	37
2.2.1	舵机的性能参数	37
2.2.2	舵机的驱动与控制	39
第3章	让你的机器人会思考——控制系统	41
3.1	机器人控制系统简述	42
3.1.1	机器人控制系统的基本组成	42
3.1.2	机器人控制系统的工作机理	43
3.1.3	机器人控制系统的主要作用	43
3.2	单片机控制技术简述	44
3.2.1	单片机的工作原理	44
3.2.2	单片机系统与计算机的区别	45
3.2.3	单片机的驱动外设	45
3.2.4	单片机的编程语言	46
3.3	DSP 控制技术简述	47
3.3.1	DSP 简介	47
3.3.2	DSP 的特点	48
3.3.3	DSP 的驱动外设	48
3.3.4	DSP 的编程语言	48
3.4	ARM 控制技术简述	50
3.4.1	ARM 简介	50
3.4.2	ARM 的特点	50
3.4.3	ARM 的驱动外设	51
3.4.4	ARM 的编程语言	51
第4章	让你的机器人有能量——电源系统	52
4.1	机器人电源系统简述	52
4.1.1	电源系统的基本组成	52
4.1.2	电源系统的工作机理	53
4.1.3	电源系统的主要作用	53
4.2	锂离子电池	54

4.2.1	锂离子电池的工作原理	54
4.2.2	锂离子电池的使用特点	55
4.2.3	锂离子电池的充放电特性	55
4.3	锂聚合物电池	57
4.3.1	锂聚合物电池的工作原理	58
4.3.2	锂聚合物电池的使用特点	59
4.3.3	锂聚合物电池的充放电特性	59
4.4	镍氢电池	60
4.4.1	镍氢电池的工作原理	60
4.4.2	镍氢电池的使用特点	61
4.4.3	镍氢电池的充放电特性	61
第5章	让你的机器人能感知——传感系统	63
5.1	机器人传感系统简述	64
5.1.1	传感器的定义和分类	64
5.1.2	传感器的基本组成	66
5.1.3	传感器的主要作用	66
5.2	机器人视觉系统概述	67
5.2.1	机器人视觉系统的基本组成	67
5.2.2	机器人视觉系统的主要作用与工作机理	71
5.3	视觉传感器	72
5.3.1	CCD与CMOS的工作原理	72
5.3.2	CCD与CMOS的优劣比较	74
5.4	测距传感器	75
5.4.1	测距传感器的分类	75
5.4.2	测距传感器的工作原理	76
5.5	触觉传感器	79
5.5.1	触觉传感器的分类	79
5.5.2	触觉传感器的工作原理	80
5.6	姿态传感器	83
5.6.1	姿态传感器的分类	83
5.6.2	姿态传感器的工作原理	84

第6章	让你的机器人懂沟通——通信系统	86
6.1	机器人通信系统简述	87
6.1.1	机器人通信系统的基本组成	87
6.1.2	机器人通信系统的工作机理	88
6.1.3	机器人通信系统的主要作用	89
6.2	机器人通信技术的分类	89
6.2.1	蓝牙无线通信技术	89
6.2.2	超带宽无线通信技术	93
6.2.3	ZigBee 无线通信技术	97
6.2.4	Wi-Fi 无线通信技术	102
6.2.5	2.4 GHz 无线通信技术	104
第7章	制作你的小型仿生机器人	107
7.1	小型仿生机器人的设计工具	107
7.1.1	三维实体造型设计的基本内容	107
7.1.2	三维实体造型设计的基本软件	108
7.1.3	三维实体造型设计的基本步骤	108
7.2	小型仿生机器人的制作材料	116
7.2.1	塑料类材料	116
7.2.2	木材类材料	117
7.3	小型仿生机器人的制作工具	118
7.3.1	五金工具	118
7.3.2	切割设备	119
7.3.3	3D 打印设备	120
7.3.4	测量工具	125
第8章	小型仿生六足机器人的设计与制作	128
8.1	仿生六足机器人的结构设计	129
8.1.1	仿生六足机器人自由度的确定	129
8.1.2	仿生六足机器人腿部结构的设计	130
8.1.3	仿生六足机器人躯干结构的设计	133
8.1.4	舵机选型与安装尺寸的确定	134

8.1.5	转动副配合与尺寸的确定	136
8.2	仿生六足机器人零件的加工	136
8.2.1	生成二维切割图纸	136
8.2.2	零件的切割加工	140
8.3	仿生六足机器人的装配	142
8.3.1	仿生六足机器人的单腿装配	142
8.3.2	仿生六足机器人躯干的装配	148
8.3.3	仿生六足机器人整体的装配	149
第9章	小型仿生四足机器人的设计与制作	151
9.1	仿生学研究 with 四足机器人运动参数的设计	151
9.2	仿生四足机器人腿部尺寸与自由度的分析	154
9.3	仿生四足机器人的结构设计	155
9.3.1	仿生四足机器人腿部结构的设计	155
9.3.2	仿生四足机器人躯干的设计	157
9.4	仿生四足机器人零件的加工	158
9.4.1	生成二维切割图纸	158
9.4.2	零件的切割加工	161
9.5	仿生四足机器人的装配	164
9.5.1	仿生四足机器人大腿节的装配	164
9.5.2	仿生四足机器人髌关节的装配	167
9.5.3	仿生四足机器人小腿节的装配	168
9.5.4	仿生四足机器人单腿的装配	170
9.5.5	仿生四足机器人躯干的装配	170
9.5.6	仿生四足机器人整体的装配	170
第10章	小型仿人双足机器人的制作与装配	174
10.1	仿人双足机器人的结构设计 with 制作	175
10.2	仿人双足机器人躯干的装配	177
10.3	仿人双足机器人上肢的装配	184
10.4	仿人双足机器人腿部的装配	190
10.5	仿人双足机器人整体的装配	197

第 11 章	小型仿生机器人的调试与编程	201
11.1	机器人主控制器简介	201
11.2	机器人的遥控调试	202
11.2.1	双足机器人遥控器功能介绍	203
11.2.2	设置初始姿态	205
11.3	编写小型仿人双足机器人的运动动作	208
11.3.1	小型仿人双足机器人的运动原理	208
11.3.2	小型仿人双足机器人动作程序的编写	209
11.3.3	小型仿人双足机器人动作的运行	211
参考文献		213



第 1 章

小型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，常常会被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^[1,2]。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来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，而小管的开口通过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，温度信息便在无需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，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^[3]。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。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样久远的发展历程。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^[4-6]。

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，以避免被猎物发现，从而有利于自己隐蔽前进和发起攻击。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^[7]。



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，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。

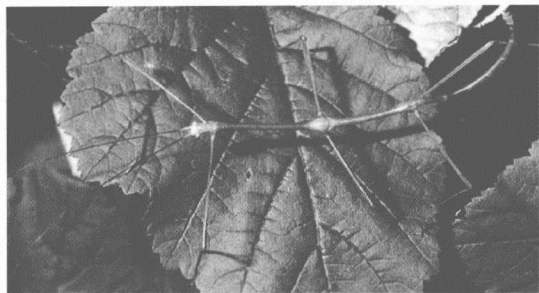


图 1-2 拟态伪装术



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^[8]：

(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，以阳光等为能源，不仅原料成本低，而且取之不尽、用之不竭。

(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的精细结构，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。

(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；当真假目标各被揭露 50% 时，相当于增加了 40% 的兵力；