

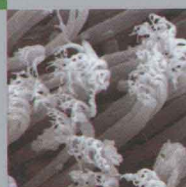


国防特色学术专著·机械工程

壁虎运动仿生的生物力学基础

戴振东 吉爱红 著

Biomechanical Base for
Bioinspiration of Gecko Locomotion



哈尔滨工业大学出版社

北京航空航天大学出版社 北京理工大学出版社
哈尔滨工程大学出版社 西北工业大学出版社

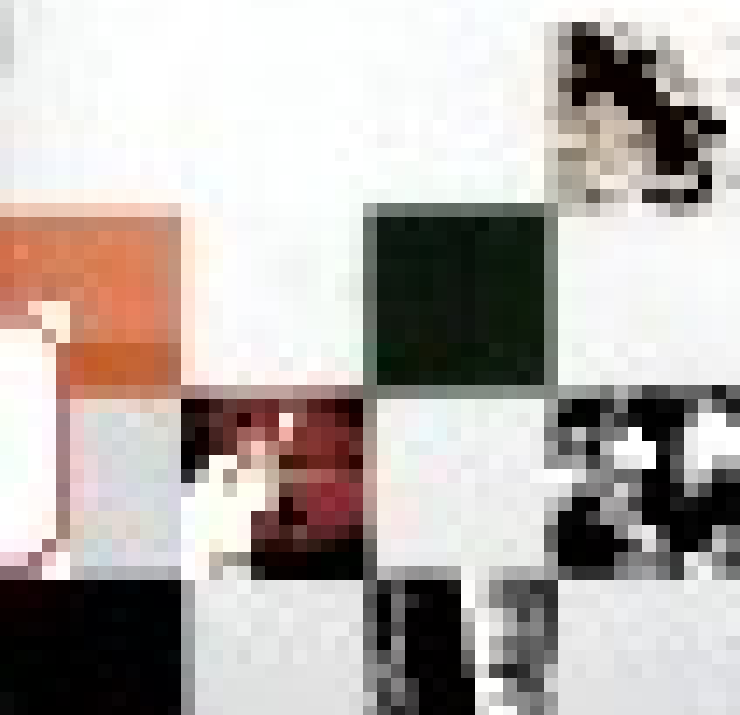


中国体育科学 · 2006(1)

运动生物力学基础

2006-01-01 16

Biomechanical Basis for
Interpretation of Exercise Performance



中国体育科学
2006(1) 16
中国体育科学
2006(1) 16



国防特色学术专著·机械工程

壁虎运动仿生的生物力学基础

戴振东 吉爱红 著

哈尔滨工业大学出版社

北京航空航天大学出版社 北京理工大学出版社
哈尔滨工程大学出版社 西北工业大学出版社

内容简介

对生物系统内在规律性的认识,是开展仿生研究的基础和出发点。本书侧重研究壁虎运动相关的生物学基础及壁虎的运动力学。壁虎的生物学基础包括壁虎的基本生物学信息、壁虎运动骨骼-肌肉系统及其与运动相关的感知和神经系统等。运动力学的研究包括运动行为和运动反力研究两个方面。为开展壁虎运动力学研究,研制了壁虎运动步态实验系统及壁虎运动接触反力测试系统。利用上述系统,研究了壁虎在水平地面、垂直墙面和天花板表面运动步态与运动反力。为具有全空间运动能力的仿壁虎机器人提供设计依据。

本书可作为运动生物力学专业用书,也可作为动物运动仿生与机器人研究参考书。

图书在版编目(CIP)数据

壁虎运动仿生的生物力学基础/戴振东著. —哈尔滨:
哈尔滨工业大学出版社,2011.8
ISBN 978-7-5603-3376-2

I. ①壁… II. ①戴… III. ①仿生-生物力学
IV. ①Q811.6

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2011)第 168117 号

壁虎运动仿生的生物力学基础

戴振东 吉爱红 著
策划编辑 王桂芝
责任编辑 费佳明

*

哈尔滨工业大学出版社出版发行
哈尔滨市南岗区复华四道街 10 号(150006) 发行部电话:0451-86418760 传真:0451-86414749
<http://hitpress.hit.edu.cn>

哈尔滨市石桥印务有限公司 各地书店经销

*

开本:787mm×1092mm 1/16 印张:6.25 字数:155 千字
2011 年 8 月第 1 版 2011 年 8 月第 1 次印刷 印数:1 500 册
ISBN 978-7-5603-3376-2 定价:25.00 元

前 言

运动是动物的基本特征,很多陆地动物选择了腿足结构作为运动机构。这种自然演化的机构与轮式运动系统相比具有高度的环境适应性,无论是平坦的草地、陡峭的山崖、蜿蜒曲折的林中小道,还是松软的沙丘,腿足动物都具有很好的通过性和运动灵活性。腿足结构成为保障这类动物生存和种族延续的重要技能。采用腿足机构的运动系统更加适合于没有道路的环境,这使得腿足机器人在复杂环境下具有优良的运动能力。

壁虎脚底分布的数十万根刚毛使之能够产生很强的吸附力,从而使其具有其他动物所没有的“飞檐走壁”、甚至倒挂在天花板上运动的能力。近年来,关于壁虎黏附机制的研究取得了突破性的进展,并已证明范德华力是产生黏附的主要物理机制,数十万直径几百纳米至几微米,长度 100 多微米的多级分叉的刚毛形态是保证刚毛和基底充分接触的形态结构基础。受此启发,人们研制了各种仿壁虎刚毛结构,目前已经能够产生 10 倍于天然壁虎刚毛阵列的黏附力。然而仿壁虎机器人的运动能力和壁虎相比依然有很大的差距,究其原因,我们对壁虎运动中的力学规律知之甚少。而这方面还没有一本专门的著作加以论述和总结,本书的目标是通过总结近年来我们在壁虎运动的生物学基础、壁虎运动力学等方面的工作和相关的仿生研究,把我们的经验和经历展现给大家,起到抛砖引玉的作用,为仿生科学与工程研究的进一步繁荣,为我国正在开展的经济发展的转型,贡献微薄之力。

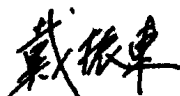
本书所包含的内容是南京航空航天大学仿生结构与材料防护研究所及其校外合作者多年相关工作的总结,是集体智慧的结晶和凝练。在此,我们深切缅怀北京大学孙久荣教授,书中的不少研究工作是在我们和孙教授跨学科的思想碰撞中进行的,特别是有关壁虎运动神经系统和环境感知的研究,是在孙教授的直接指导和参与下完成的。我的博士研究生吉爱红、张昊、李宏凯、王周义等参与了本书的部分研究工作,一些硕士研究生也协助完成了相关的实验,这里对他们一并表示感谢。

该项研究工作得到了国家自然科学基金委员会、科技部 863 计划和 973 计划、教育部博士点基金的研究经费支持,固体润滑国家重点实验室也给予了大力支持。

在这项研究上所取得的进展离不开母校南京航空航天大学在科研用房、交叉团队组建、学科建设经费等方面所给予的大力支持,使得本人所带领的研究团队成为第一批进入学科特区、专门致力于科学研究的团队。对学校给予的支持和厚爱,难以言谢,唯有努力工作、创造骄人的业绩,才能回报母校。

路漫漫其修远兮,吾将上下而求索!

南京航空航天大学
仿生结构与材料防护研究所



2011 年 6 月 9 日于南京石竹居

目 录

第1章 概 述	1
1.1 仿生学与运动仿生	1
1.2 仿生机器人	2
1.3 动物运动及运动力学	5
第2章 壁虎运动的生物学基础	10
2.1 壁虎的种类及分布	10
2.2 壁虎的运动骨骼系统及机构学	11
2.3 壁虎运动驱动系统——肌肉分布	12
2.3.1 壁虎肌肉分布	12
2.3.2 讨论	17
2.4 壁虎脚底刚毛的结构及黏附机制	17
2.5 壁虎运动相关的感知和外周神经系统	19
2.5.1 壁虎四肢外周神经的解剖结构	19
2.5.2 外周神经对壁虎脚趾运动的支配	20
2.5.3 外力作用下壁虎脚趾感觉信息的传入	21
第3章 壁虎运动力学测试系统与设备	25
3.1 仿生运动步态研究进展	25
3.2 壁虎运动步态实验系统与设备	26
3.2.1 四足动物运动步态与步态参数	26
3.2.2 步态实验系统与设备	27
3.3 接触力学研究进展	28
3.4 壁虎运动接触力学测试系统与设备	32
3.4.1 接触力学测试主要设备	32
3.4.2 三维力传感器设计	32
3.4.3 三维力传感器标定	36
3.4.4 三维力传感器阵列	39
3.4.5 信号调理与数据采集	42
第4章 壁虎在水平地面/垂直墙面/天花板表面运动步态	45
4.1 实验过程	45
4.2 实验数据处理	46
4.2.1 SigmaScan 软件	46
4.2.2 步态参数定义	47
4.3 壁虎运动步态	47
4.3.1 运动步态周期	47

4.3.2	关节角度的周期性变化·····	51
4.3.3	关节角度相图分析·····	56
4.3.4	关节角度变化分析与讨论·····	58
第5章	壁虎在水平地面/垂直墙面/天花板表面运动反力 ·····	60
5.1	实验对象·····	60
5.2	实验过程及数据处理·····	61
5.2.1	实验过程·····	61
5.2.2	数据筛选和整理·····	61
5.3	壁虎水平地面运动反力·····	64
5.3.1	单个脚掌运动反力·····	64
5.3.2	前后脚掌运动反力对比·····	68
5.4	壁虎垂直墙面运动反力·····	70
5.4.1	单个脚掌运动反力·····	70
5.4.2	前后脚掌运动反力对比·····	73
5.5	壁虎天花板表面运动反力·····	76
5.5.1	单个脚掌运动反力·····	76
5.5.2	前后脚掌运动反力对比·····	79
5.6	壁虎运动脚掌作用分析·····	82
5.6.1	水平面运动脚掌的作用·····	83
5.6.2	垂直墙面运动脚掌的作用·····	84
5.6.3	天花板表面运动脚掌的作用·····	86
5.6.4	水平地面/垂直墙面/天花板表面运动脚掌作用对比·····	87
参考文献	·····	88

第1章 概述

1.1 仿生学与运动仿生

仿生的实质是人类向自然学习并加利用的过程。善于学习是人类的生存、进化和发展的重要特征,也是人类成为万物之灵的先决条件。因此人类进化的历史也是仿生的历史,仿生所涉及的领域也是多样的。本书主要讨论运动仿生,特别是和壁虎的运动行为相关的仿生问题。

运动是动物捕食、逃逸、生殖、繁衍等行为的基础。在约 35 亿年的进化和竞争中,许多动物发展了与其生存环境相适应的运动方式和特点。如猎豹可在短时间内加速到每小时 80 公里;猿猴具有在树上攀缘、树间跳跃的能力;如壁虎、蜘蛛、苍蝇、蝗虫等演化了能够在各种各样的表面上运动的能力^[1]。

人类对生物的模仿学习伴随着整个人类文明的发展过程。目前一般以 1960 年在美国 Dayton 空军基地召开的首届仿生研讨会作为现代仿生学的诞生,不少学者把 Steel 先生提出的 Bionics 作为“仿生学”的英文。实际上,“仿生学”在国外还有 Biomimetics, Bio-inspiration 等不同的表述,其内涵也有差异,“仿生学”在德文中用 Bionik,中文常用“仿生学”。

仿生学是生命科学与工程技术学科相结合的一门交叉学科。通过学习、模仿、复制和再造生物系统的结构、功能,来改进、提高现有系统的性能或创造新的系统。以增强人类对自然的适应和改造能力,产生巨大的社会效益。

仿生学涉及的学科领域十分广泛。在机械学^[2,3]、材料学^[4,5]、包装学^[6]、交通学^[7]、建筑学^[8]等学科都有广泛的应用。仿生学的研究主要从形态仿生和功能仿生两个方面开展研究。具体来说,仿生学的研究主要包括以下方面:

(1)结构仿生。研究生物体的构造,设计或创造出类似生物体或类似生物体部分结构的机械装置,以通过结构的相似性达到功能的相似。

(2)信息仿生。主要包括感官仿生、细胞内和细胞间通信仿生、动物间通信仿生和智能仿生等方面。如根据昆虫复眼的结构特点研制成功的多孔径光学系统装置,易于搜索目标,已在国外一些重要武器系统中应用。

(3)控制仿生。包括生物体内稳态调控、肢体运动控制、动物的定向系统、生态的涨落等。如根据动物的神经网络分布,派生出的人工神经网络用于计算机系统的控制。

(4)化学仿生。研究生物体内的一些特殊的化学过程,如酶的催化作用、生物膜的选择性等。萤火虫可将化学能直接转变成光能,且转化效率几乎为 100%,而普通电灯的发光效率只有 6%。科学家根据萤火虫的发光原理制成的冷光源可将发光效率提高十几倍,大大节约了能量。

(5)力学仿生。主要是关于动物飞行、运动力学的研究。蜻蜓通过翅膀振动可产生不同

于周围大气的局部不稳定气流,并利用气流产生的涡流来使自己上升。科学家据此原理研制成功了直升机。在通常情况下,一项特定的仿生研究可能会包括上述部分甚至全部的仿生研究,如仿生机器人的研究。

1.2 仿生机器人

仿生机器人是仿生学的最主要的应用领域之一,涉及结构、材料、功能、控制以及系统等多个方面。仿生机器人就是模仿自然界中生物的精巧结构、运动原理和行为方式等的机器人系统。国内外已经和正在研制的有仿蝴蝶^[9]、苍蝇^[10]等的飞行机器人;仿蛇^[11,12]、六足昆虫^[13](图 1.1)、蜘蛛^[14](图 1.2)、壁虎^[15]、蛙^[16]等的陆上机器人;仿鱼^[17~19]、螃蟹^[20]、蚯蚓^[21,22]等的水下或水陆两用机器人等。仿生机器人的研究主要集中在机器人的微型化、机器人仿形、生物机器人等领域^[23]。

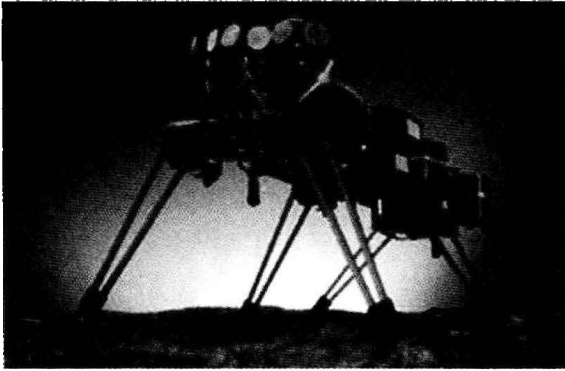


图 1.1 能感知地形变化并调整步态的六足爬行机器人 Genghis^[13]

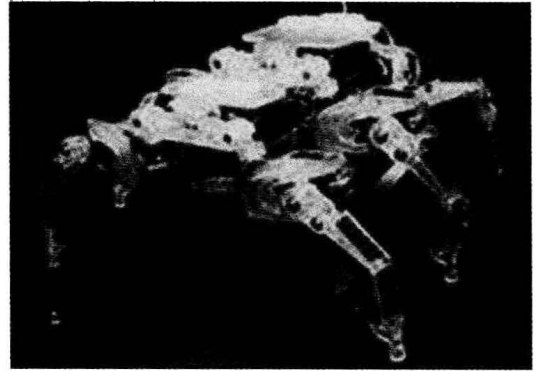


图 1.2 机器蜘蛛 Spider-bot 能跨越障碍攀登岩石^[14]

其中,全空间固体表面无障碍运动仿生机器人是研究/研制在非结构化、未知环境下能够实现正、零和负表面(以地球外法线为正,对应地面、墙面和天花板)等全空间固体表面无障碍运动的(Three Dimensional-terrain Obstacle Free, TD OF)机器人。该类机器人是特种机器人的一个重要分支,代表当今世界最重要的高技术之一。它集计算机、微电子、传感、自动控制等技术于一身,已成为衡量一个国家科技水平和综合国力的重要标志^[24]。TD OF 机器人在反恐、救援、首脑保卫、特种侦察等公共和国家安全领域、狭小空间检测、城市市容服务等行业具有广泛而迫切的需求^[25~30],是国内外广泛关注的国家关键技术^[31],属于发达国家限制出口的技术之一。

TD OF 机器人包涵两层含义:

(1)传统意义上的仿生机器人,即在机构、步态、控制、驱动、环境感知及信息融合等方面受动物运动行为的启示,设计研制的人造移动平台系统(简称仿生机器人)。

(2)在神经信息学层次上的仿生机器人,国内外有人称为生物机器人。指利用动物固有的运动、动力、感知和神经控制系统,从动物神经系统的若干环节入手,通过对动物运动神经信息(运动神经指令)的修改和干预,对其运动行为进行干预和控制而实现的自然移动平台系统(简称生物机器人)。

两类机器人包含着大量共性的基础科学问题和相似的关键技术,性能上有高度的互补性。仿生机器人可用于生物体难于存活的环境,如有毒、放射性、高低温或真空环境;生物机器人运动灵活、隐蔽性好,不存在能源问题。相对于身体尺寸而言,壁虎、蜘蛛、昆虫等动物的相对较快的运动速度、强的负载能力、高度的灵敏性,使它们成为 TDOF 机器人研究的理想模型。生物学家们从比较生物学的角度深入研究理解壁虎、蜘蛛、昆虫等动物的爬行基本规律,工程师们则从动物运动的过程中获得设计灵感,进一步提高 TDOF 机器人和其他复杂系统的性能。如美洲蟑螂 (*Blaberus discoidalis*) (图 1.3) 的爬行速度为 $1 \sim 1.5 \text{ m/s}$,相当于每秒钟爬过自身身体长度 50 倍的距离,并且可以在不需要降低爬行速度情况下,轻松翻过相当于自身质心高度 3 倍的障碍物^[32,33]。科学家们正在以蟑螂作为机器人的设计原型,设计了具有优越机动性能的机器人^[34,35]。壁虎是能够“飞檐走壁”的动物的典型代表。在具有 TDOF 能力的动物中,大壁虎 (*Gekko gecko*) (图 1.4) 体重最大(可达 150 g,平均 100 g)、运动速度最快(可达 1.5 m/s)、负重能力最强(天花板上可达体重的 5 倍)^[36]。



图 1.3 美洲蟑螂(*Blaberus discoidalis*)^[32,33]

大壁虎爬 10 层楼,仅需 20 s。负重能力远大于通信设备($<10 \text{ g}$,有效距离 5 km)、视觉传感器($<15 \text{ g}$,300 万像素)和电源(40 ~ 50 g)重量的总和。无论是仿生机器人还是生物机器人,大壁虎都是开展仿生研究的理想模型,能够满足作为反恐侦察和特种侦察的承载和速度需要^[37](图 1.5)。关于壁虎在各类表面上的附着机理的研究,近年来成为科学家们关注的热点^[38,39]。



图 1.4 大壁虎(*Gekko gecko*)^[36]



图 1.5 仿壁虎机器人 Stickbot^[37]

目前,TDOF 仿生机器人在零表面和负表面上爬行时的附着方式主要有四种方式:磁吸附、真空吸附、化学吸附和静电吸附^[40~43]。这些吸附方式各自适用于特定的表面。机器人采用磁吸附方式附着时,附着表面的材料必须是导磁性的材料;而对于依靠真空吸附的机器人,

在比较粗糙表面上接触时,因密封效果较差,吸附能力会大幅度下降;依靠静电吸附的机器人要求附着表面具有导电性,而且静电吸附力比较小,一般只能应用于微小型 TDOF 仿生机器人;依靠化学吸附的机器人长期工作时,由于化学粘胶容易老化,影响附着性能。所以上述四种附着方式的应用都具有其局限性。例如,在人造卫星表面工作的机器人,由于没有大气压的作用,与卫星表面的吸附连接不能依靠真空吸附;卫星上有大量电磁敏感设备,也不能依靠磁力吸附。自然界中很多动物具备 TDOF 运动能力,揭示这类动物的黏附机制,进而研究/研制一种具有对各种环境和各种表面良好适应的吸附机构是十分必要的。

TDOF 生物机器人研究涉及动物运动神经网络的结构、动物运动神经信号对动物运动行为的调控和神经信息的编码与解码等大量基础科学问题。因此动物运动行为的制导,与测控技术、微机电系统、计算机及信息科学高度发展并相互融合有密切关系。1995 年 Kuwana 等研究了蟑螂运动的人工干预,将铂电极植入蟑螂的探须触觉感受器,通过红外传感器遥控在体内的微处理器产生模拟信号,控制蟑螂向特定方向运动(图 1.6)^[44]。

2002 年老鼠运动行为的人工制导引起轰动^[45]。在老鼠身上安装微处理器,将刺激电极植入鼠大脑部快感区和触觉感受区,在 500 m 外遥控老鼠完成转弯、前行、爬树、跳跃等动作(图 1.7)。这种人工制导的老鼠携带微型摄像机,可用来完成坍塌建筑物下的搜救任务。美国军方 DARPA(Defense Advanced Research Projects Agency)的有控制的生物系统计划(the Controlled Biological Systems Program)资助了“思维控制机器战士”的研究^[46],拟利用生物控制技术,由脑内植入电极的士兵远距离操控机器人在战场上作战。目前已实现了用猴子的脑电信号指挥机械手运动的功能。此外美国军方耗资 10 亿美元正在研究如何将摄像机安装到蝗虫的身体上,通过遥控信号,让其充当飞行间谍,刺探敌方情报^[47]。南京航空航天大学仿生结构与材料防护研究所也先期开展了“壁虎运动人工制导的基础研究”,取得许多第一手资料^[48,49]。研究/研制 TDOF 生物机器人需要了解具有 TDOF 能力的动物在附着表面上的黏附-脱附机理,揭示动物能够“飞檐走壁”的秘密,实现对 TDOF 生物机器人的有效控制。

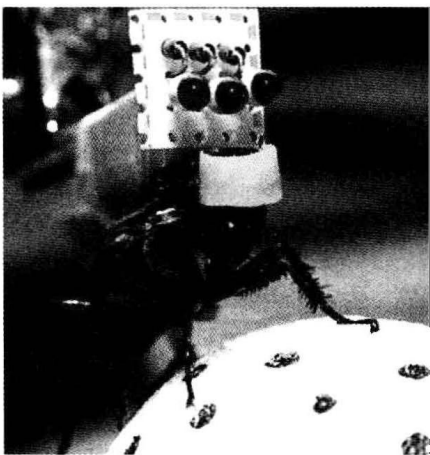


图 1.6 蟑螂运动行为的人工制导^[44]



图 1.7 老鼠运动行为的人工制导^[45]

因此,无论是仿生机器人还是生物机器人,具备 TDOF 运动能力的条件是能够实现在各种环境下各种表面可靠的黏附。而现代非结构环境下的机器人在运动平稳性、灵活性、健壮性、

环境适应性及能源利用效率等方面远远落后于动物^[50]。造成这种差异的主要原因之一是人类对动物运动的规律性认识不够全面、深入。例如机器人步态规划往往以身体平衡条件设计,机器人脚掌和地面间的摩擦(切向力)多数仅作为驱动力考虑。而实际上甚至6足的蟑螂在快速运动时也会采用双足跳跃的单自由度运动模式。所以从运动仿生的角度,必须开展壁虎、蜘蛛、昆虫等微小动物的骨骼系、肌肉与神经分布相关的解剖学研究;与动物的接触黏附相关的接触力学、运动机构、动物脚掌黏附机制及其与仿生机器人相关的黏附脚掌的仿生制造技术研究;与动物运动神经系统及其运动神经信息内容相关的研究^[1]。

1.3 动物运动及运动力学

动物在各种环境下的运动是形态学和生理学的主要研究内容。生物学家从事整合比较生物学角度研究,以理解动物在不同的尺度、不同的身体的形态、不同的生存环境(陆地、空中和水下)等条件下运动时的相似性和区别。动物运动的综合性研究包括肌肉、骨骼、神经、呼吸和循环等生理系统的研究。目前,生物学家已经发现了关于动物运动几个一般性的原理。Dickinson 给出了关于动物运动整体性研究的综述^[50],包括从两足动物到多足动物在陆上的漫步和快跑、空中的飞行、水下游动时的能量的储存和交换机制;动物运动时的力学作用机制,如侧向力虽然无推动动物前进的作用,但却增加了动物运动时的稳定性、灵活性、健壮性、环境适应性;动物运动的控制机制,多模态的传感器前馈和反馈命令形成了快速的预反应系统;肌肉在运动中的多功能作用机制,即肌肉在运动过程中具有启动、制动、弹簧、支撑的功能。关于动物运动的综合研究显示了动物的身体各个部分如何组合成一个高效的运动系统,同样显示了作为一个有机的整体,各个部分相互间的作用。

人和有足动物有两类运动姿态(图 1.8)。人、狗、马和大象等大多数哺乳动物为竖立姿态(upright posture),壁虎、蜘蛛、昆虫等为平卧姿态(sprawled posture)。平卧姿动物运动时相比竖立姿动物会产生更大的侧向力,所以运动过程中更具稳定性和机动灵活性^[51]。关于动物运

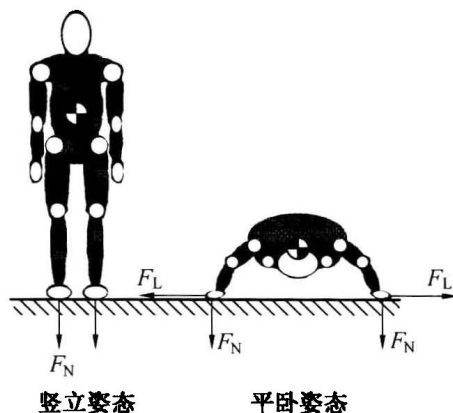


图 1.8 竖立姿态和平卧姿态^[52]

动力的作用机制,随着时间和空间的变化,不同种类动物有着不同的力学作用模型(图 1.9)。快跑的人和小跑的狗的接触反力的合成矢量通过每条腿的髌(肩)部,以尽可能减

少关节处的作用力矩；每一个运动周期中，始终是制动相位紧接在推进相位后（图 1.9(a)）。多足类动物漫步时，身体的重心支撑在刚性腿的顶部，类似一个倒置的单摆，身体的动能和重力势能在一个运动周期内交替变化（称为倒摆模型）。当腿足类动物快跑时，腿的作用类似弹簧，在制动相位时压缩，动能和重力作为弹性势能被储存；在推进相位时弹回，弹性势能释放

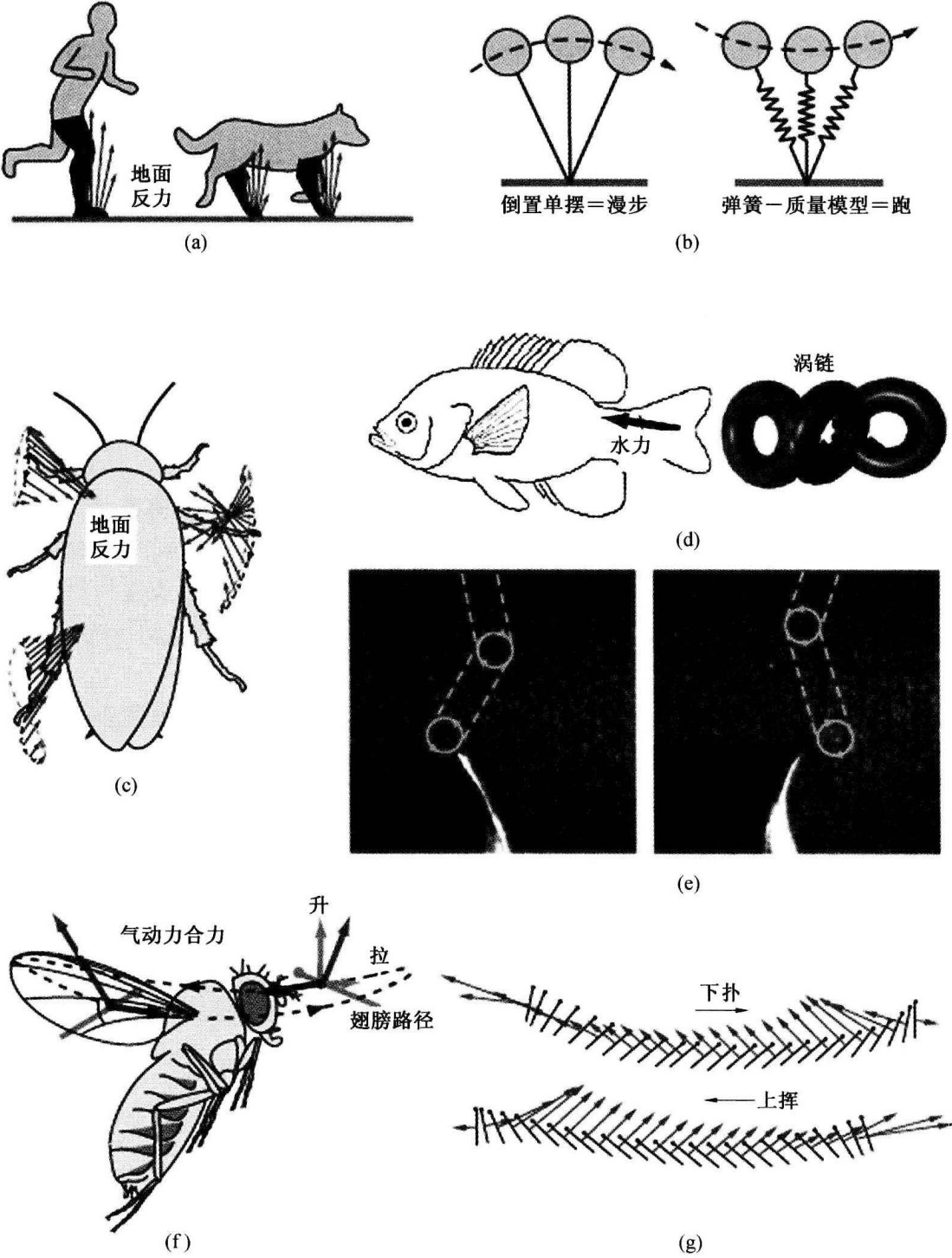


图 1.9 动物运动时的力学作用机制^[50]

(图 1.9(b))。以一个向前快跑的蟑螂为例,后腿的接触反力将身体向前推进,前腿的接触反力却将身体向相反方向推,中间腿的接触反力在运动周期的前半程将身体向后推,在运动周期的后半程将身体向前推进(图 1.9(c))(称为弹簧-质量模型)。鱼在水中游动时,鱼鳍前后摆动。鱼鳍的每一次摆动,都会产生一个圆环状的漩涡,该漩涡与鱼鳍上次摆动产生的漩涡相连,从而产生一系列交替的漩涡。每个漩涡代表了鱼施加给水的动量。通过计算水流的速度,可以计算出鱼游动时的水力大小(图 1.9(d))。图 1.9(e)为太阳鱼游动时激起漩涡时的水流速度的数字化速度点图。图中鱼头方向朝下,两个图像分别显示了漩涡开始时和漩涡结束时的水流速度,通过该两个点图可以重构出鱼游动时激起的漩涡,圆环状漩涡。果蝇盘旋飞行时,以一个很大的升角前后扑动,产生空气动力(图 1.9(f))。在一个扑翅周期中,翅膀快速下扑时身体背侧上抬,上扑时身体腹侧上抬。图 1.9(g)中的上图表示下扑时翅膀的动作为从左向右,下图表示上扑时翅膀的动作为从右向左。深色线显示了果蝇翅膀扑动的每一个瞬时位置,浅色线显示了翅膀在每个瞬时位置时对应的空气动力的大小和方向。

传统上,动物与地面的作用力称为地面反力(ground reaction forces,记为 GRF)。具有 TDOF 能力的动物在正、零和负表面上运动时,无论采用何种黏附机理,将接触面对脚掌的作用力称为表面反力(surface reaction forces,简称 SRF)。表面反力可以分解为法向力(normal force, F_N)、轴向力(fore-aft force, F_F)和侧向力(lateral force, F_L)(图 1.10)。法向力 F_N 反映了动物运动过程中重力在各条腿上的分布(图 1.10(a)),对于苍蝇、蜜蜂、壁虎等具有 TDOF 运动能力的动物来说,法向力反映了其在天花板、墙面上运动时黏附力的大小;轴向力 F_F 沿着动物身体轴线方向,反映了动物运动过程中的加速和减速(图 1.10(a),(b));侧向力 F_L 垂直身体轴向,在动物转弯运动中起到很大的作用(图 1.10(b))。了解动物运动的接触反力,有助于理解动物运动力学,从而进一步理解动物的运动机理。

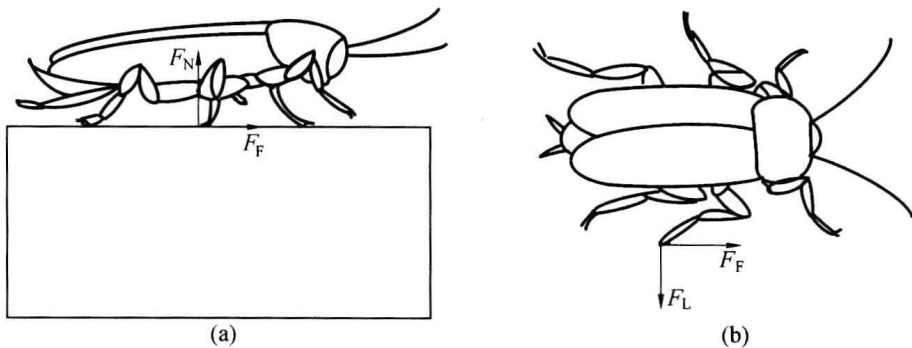


图 1.10 接触反力的定义

对壁虎、蜘蛛、昆虫等具有 TDOF 运动能力的动物而言,除了研究运动力学,其在天花板、墙壁(尤其是光滑壁面)上的附着机理,也是科学家们的研究热点。动物用来实现在壁面上附着的器官主要有三种:爪子、光滑爪垫和刚毛爪垫(图 1.11)。

在粗糙表面上动物使用爪子附着,爪子的附着能力与表面粗糙度、爪子尖端几何形状和尺寸及附着表面的摩擦系数有关^[52]。在光滑表面上动物使用光滑爪垫或刚毛爪垫,Spolenak 总结了光滑爪垫和刚毛爪垫端部接触单元的形状^[53](图 1.12)。如臭虫(*Pyrhocoris apterus*)的

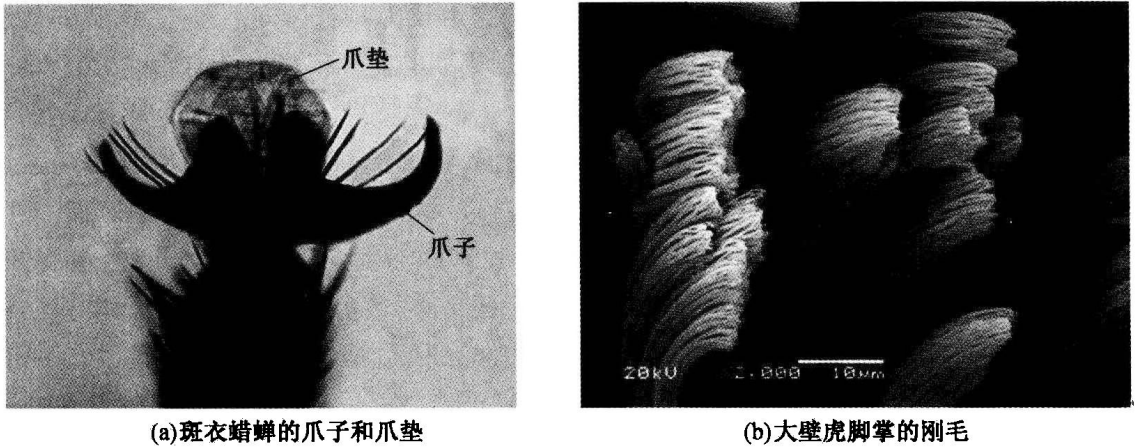


图 1.11 动物的附着器官

光滑爪垫(图 1.12(a)); 蝗虫(*Tettigonia viridissima*)的附垫表面(图 1.12(b)); 苍蝇(*Myathropa florea*)的足部纤毛(图 1.12(c)); 苍蝇(*Calliphora vicina*)的爪垫上的刚毛(图 1.12(d)); 甲虫(*Harmonia axyridis*)第二跗节上的刚毛(图 1.12(e)); 甲虫(*Chrysolina fastuosa*)第二跗节上的刚毛(图 1.12(f)); 雄性甲虫(*Dytiscus marginatus*)的前足跗节垂直侧面上的杯形吸盘(图 1.12(g))。光滑爪垫软且可变形,如蟑螂、蜜蜂、蝗虫、斑衣蜡蝉和臭虫的爪垫,这类爪垫与接触表面的附着力以表皮与附着表面之间的分泌液膜为介质^[54]。刚毛爪垫覆盖有较长的可变形刚毛^[55,56],如某些甲虫、苍蝇、蜘蛛、壁虎的爪垫(图 1.13)。这类刚毛易弯曲,从而能够与表面形成众多的微接触区。Peressadko 和 Gorb 认为刚毛尖端部位总体上是平的,构成端部接触单元,其尺寸随动物质量的增加而降低^[57]。如金龟子的单元尺寸为 7 μm ,苍蝇为 1 ~ 2 μm ,壁虎为 10 ~ 100 nm。刚毛爪垫的附着力取决于端部接触单元的数量和与附着表面产生紧密接触的能力。具有 TDof 运动能力的动物依靠冗余的附着机构,不仅能够粗糙的表面上附着,也能附着在光滑的表面。如蝗虫同时具有爪子和光滑爪垫,而壁虎同时具有爪子和刚

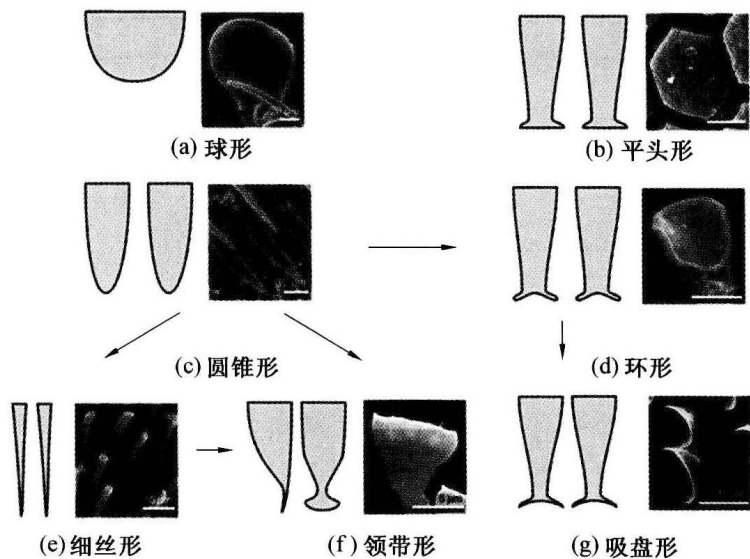


图 1.12 动物光滑爪垫和刚毛爪垫的形状^[53]

毛爪垫^[58]。

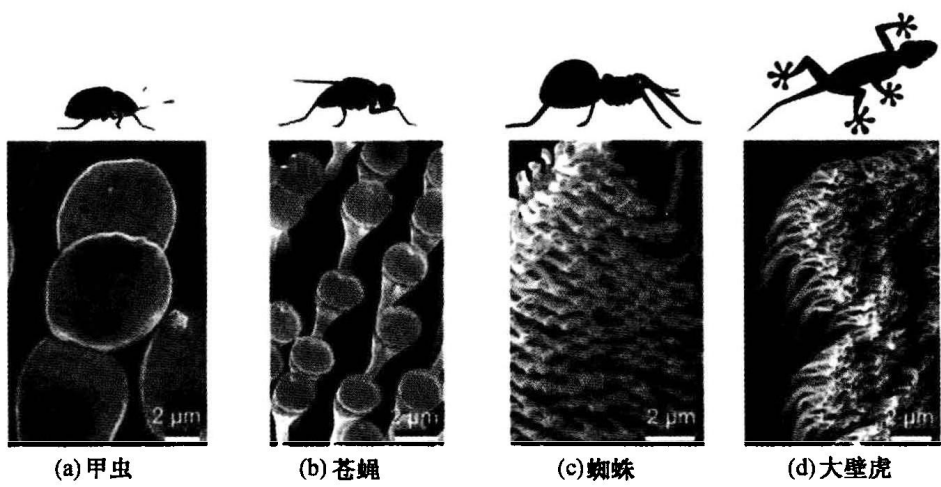


图 1.13 几种动物刚毛爪垫的纳米尺度结构^[55,56]

关于具有 TDOF 能力的动物的附着机理的研究已经超过两千年^[59]。多年来,人们提出了多种假说解释壁虎、蜘蛛、昆虫等动物在零、负表面附着机理,如粘性液膜、微吸盘、静电吸力等。通过实验研究,其中某些假说已经被否定,目前得到普遍认可的附着机制是由于分泌物与附着表面产生的毛细吸附力 (capillary force) 或由于分子间的作用力 (van der waals force) 而引起的附着^[55]。2000 年, Autumn 等在排除其他附着机理(表 1.1)的基础上,提出了大壁虎能够在墙面、天花板上附着是基于分子间的作用力即 van der waals 力的假说,并用单根刚毛的附着实验证明了该假说^[61,62]。随后建立了相应的理论模型,通过计算得到的结果与实验测得的结果相符,进一步证明了该假说^[59,62]。2005 年, Huber 等在不同气体湿度环境和不同的化学表面条件下,测试了大壁虎单根刚毛的黏附力,发现环境湿度对刚毛的黏附力有很大的影响,从而认为毛细吸附力对大壁虎的附着也有很大的贡献^[63]。我们在实验中发现,壁虎脚掌的黏附还有未被充分认识的方面,相关研究正在进一步开展。

表 1.1 动物的附着机制

附着机制	被排除的原因
摩擦力	黏附力远大于摩擦力
吸盘	刚毛在真空中也能附着
毛细吸附	壁虎脚掌没有分泌黏性物质的腺体
微锁合	通常发生在粗糙表面,而大壁虎能在光滑表面附着
静电引力	X 射线照射或离子化的环境刚毛仍能附着

第2章 壁虎运动的生物学基础

对生物系统内在规律性的认识,是开展仿生研究的基础和出发点。事实上,人们对生物系统的认识远远落后于仿生工程需要。这是因为对同一个生物体,不同领域的学者关注的重点是不同的,所采用的研究方法和手段也是不同的。生物学家更多地关注分类、生殖、特征特性等关乎种族的问题;医学和药学研究者关注其药学功能及其对医疗的作用;仿生研究则会从不同的特殊功能角度提出问题。对壁虎的研究也是一样,动物学家关注分类等问题^[64],中医中药学关注其药用价值^[65]和治疗效果^[66],物理学家关注壁虎是如何黏附到墙面和天花板上的^[49],本书侧重研究壁虎的运动行为及其和运动相关的生物学问题。2.1节回顾大壁虎的分类等基本的生物学信息;2.2节研究壁虎运动骨骼系统,它是运动机构的基础;2.3节研究壁虎运动的驱动系统——肌肉的分布;2.4节回顾壁虎黏附刚毛的结构及其黏附机制的研究;2.5节研究运动相关的感知和神经系统。

2.1 壁虎的种类及分布

壁虎,爬行纲(Reptilia),蜥蜴目(Lacertiformes),壁虎科(Gekkonidae),壁虎属(Gekko)^[64],是具有三维空间无障碍(TDOF)运动能力的动物中体重最大的动物。壁虎属动物主要特征为头骨的骨片扁薄,眶后骨消失或与后额骨愈合,因而造成眼窝与颞窝彼此相通;头较大、头背无对称排列的大鳞,背被粒鳞,上有较规则排列的疣鳞;眼大,覆有透明膜,瞳孔直立;雄性具有肛前孔或股孔,指趾上具扩大的攀瓣,不纵分;卵生,一次产卵两个,白色椭圆形。该属动物在世界上有25种,在我国分布有10种^[67],如大壁虎(*Gekko gecko*)(图2.1(a))、多疣壁虎(*Gekko japonicus*)(图2.1(b))等。

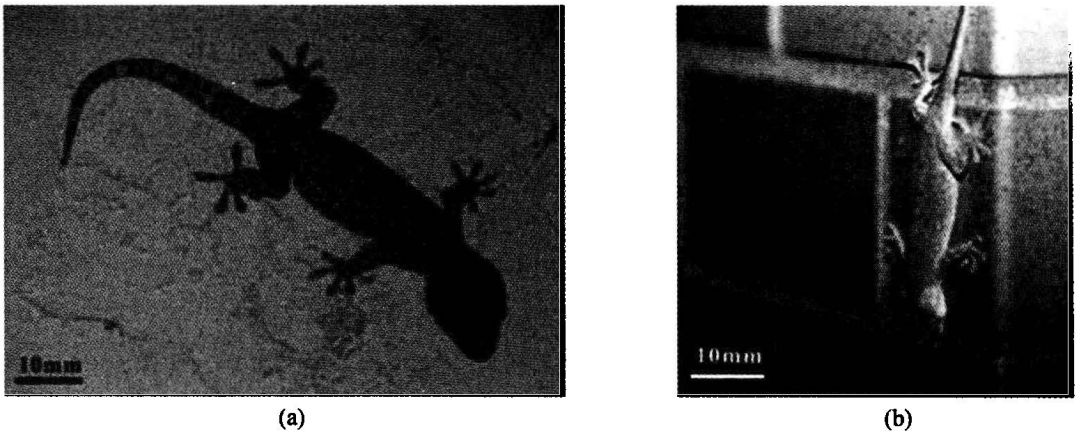


图2.1 大壁虎和多疣壁虎^[64]

大壁虎(*Gekko gecko* Linnaeus),又名蛤蚧,分布于我国云南、广西、广东等省区,为国家二级保护动物,在越南、印度尼西亚等地也有分布,栖息于峰峦陡峭、暴露岩石、植物稀少的石山