

人工智能与机器人先进技术丛书

# 仿壁虎 机器人技术

Bionic Gecko Robot Technology

俞志伟 著




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

人工智能与机器人先进技术丛书

# 仿壁虎机器人技术

俞志伟 著

 **北京理工大学出版社**

BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

## 内 容 简 介

本书介绍了国内外爬壁机器人研究现状,以壁虎为仿生对象,仿生设计了基于干黏附技术的仿壁虎机器人,重点开展了仿壁虎机器人系统设计及其运动学分析、步态规划及其运动仿真、脚趾结构设计及其黏附性能分析、空间仿壁虎机器人姿态调控、着陆碰撞、爬壁运动仿真、负表面稳定黏附运动控制等方面的研究,最终实现了基于干黏附技术的仿壁虎机器人在90°和180°光滑表面的稳定黏附爬行。

本书是第一本关于干黏附仿壁虎机器人的专著,分别从结构设计、步态规划、运动仿真、运动控制和实验测试方面进行了系统性研究工作的总结。本书适合从事仿生机器人研究的科学工作者阅读,对相关足式爬壁机器人研究具有一定的指导和借鉴价值。

版权专有 侵权必究

---

### 图书在版编目(CIP)数据

仿壁虎机器人技术/俞志伟著. —北京:北京理工大学出版社,2021.4  
ISBN 978-7-5682-9719-6

I. ①仿… II. ①俞… III. ①仿生机器人-设计-研究 IV. ①TP242

中国版本图书馆CIP数据核字(2021)第065945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/三河市华骏印务包装有限公司

开 本/710毫米×1000毫米 1/16

印 张/14.75

责任编辑/封雪

字 数/235千字

文案编辑/封雪

版 次/2021年4月第1版 2021年4月第1次印刷

责任校对/周瑞红

定 价/66.00元

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

苏联第一颗人造卫星发射成功，标志着人类开启了太空新纪元。航天科技深刻地改变了人类的生活方式，更代表着国家的科技实力和综合国力，关系到国家经济利益和国防安全，也影响着世界各国的空间安全观。航天在轨服务技术指通过人、机器人或两者协同在空间完成航天器故障检测、维修、延寿，以及执行特殊任务的空间操作，主要包括在轨检测维护、在轨装配、空间捕获和后勤支持等服务任务。

我国计划将于2022年前后建成空间站，预计在轨运营十年以上，开启中国“大航天”序幕，随着国际空间站的退役，预计到2024年我国将成为全球唯一拥有空间站的国家。而美国太空探索技术公司（SpaceX）的马斯克提出“星链”（Starlink）计划，设计由1.2万颗卫星组成，从太空“直接向美国或全球”提供高速互联网接入服务。“星链”计划的推进必将引起新一轮全球性的太空装备竞赛。如何延长航天器的使用寿命，提升卫星的工作性能，消除由人造设备引发的空天危机，对科学界来说已迫在眉睫。随着航天事业的不断发展，在轨航天器数量的增多，未来在轨维护的工作量也越来越大。因此，在航天应用需求背景下，研制具有机动性强、成本低、小型化、可移动特点的新概念空间在轨服务机器人势在必行。

目前国内外空间在轨服务机器人主要采用机械手臂操作模式，该模式针对小型化的在轨服务空间机器人而设计，若采用带机械手臂的小型自由飞行空间机器人，依靠飞行虽可移动从而扩展了运动范围，但在变轨调姿等操控上需消耗有限的燃料，机械臂作业时，需要夹持航天器表面，一方面有可能不易夹持，另一方面也可能造成夹持表面损坏，且姿态控制难度还将大大增加，因此

不适用于长期在轨服务。

为解决这些问题，本书提出了一种“黏附寄生”的新型空间在轨服务机器人，该机器人具有小型化、轻量化、低成本、运动范围大的特点，可采用干黏附方式稳定黏附到航天器的太阳翼、太阳帆、薄膜天线等大面积柔弹性表面上，并能在航天器上自主爬行，完成空间检测维护或特种操作任务，以保障航天器的稳定运行，延长其使用寿命和降低经济成本。为研制干黏附方式的新概念在轨服务机器人，我们需要向自然界其他生物学习。在亿万年的演化中，壁虎获得了可靠黏附、易脱附的能力，拥有在空间三维表面（从地面、墙面到天花板）无障碍运动的能力。壁虎的空间三维表面无障碍运动能力，依赖于脚掌的特殊微纳结构，这种生长在足底的数十万根多级分枝的、直径几十到一百多纳米、长几百微米的刚毛末梢与固体表面形成亚纳米距离的接触，依靠分子间的范德华力（van der Waals force）实现干黏附。早在2000年，Autumn在*Nature*发表关于壁虎黏附机制的研究成果，发现壁虎大量柔软的刚毛上的黏附力累积可达 $10\text{ N/cm}^2$ 。这种依靠分子间的范德华力的干黏附方式，区别于传统的静电、真空、磁吸附、湿黏附方式，更适用于空间微重力环境下固体间的黏附，能够保证在轨服务机器人稳定黏附在目标航天器上。因较多航天器外表面不具备抓附对接条件，与传统空间机器人机械臂抓取操作相比，以干黏附方式爬行的在轨服务机器人具有结构轻巧、运动灵活自由、方便操控等优点，也比自由飞行的空间机器人节省用于姿态调控的能耗，这种足式干黏附爬行机器人具有运动灵活和长期黏附寄生的优点。因此，各国研究者开展了仿壁虎黏附材料研究，并尝试应用在各种仿壁虎机器人上，如美国斯坦福大学的Cutkosky等人研制出了仿壁虎机器人Stickybot，其脚掌上拥有由弹性材料制成的人造刚毛，利用分子间的范德华力与墙壁黏附，实现了 $90^\circ$ 爬壁运动，但还不具备负表面等全空间运动能力。

本书介绍了国内外爬壁机器人研究现状，分析了仿壁虎机器人特点；以壁虎为仿生对象，仿生设计基于干黏附技术仿壁虎机器人，建立了仿壁虎机器人单腿的运动学模型，分析仿壁虎机器人正/逆解运动学方程；分析大壁虎的爬行步态，基于MATLAB开发设计了一种针对脚掌姿态和落点位置参数可调的仿生步态规划方法；仿生设计了多种新型脚趾结构，并对脚趾结构进行受力分析，开展了不同脚趾结构和运动模式下最大法向黏附力测试；设计了空间仿壁虎机器人的尾巴，使机器人在模拟微重力下可以通过尾巴来调节自身姿态；设计三维力传感器，分析了仿壁虎机器人在接触面上碰撞时的碰撞力对其运动稳定性的影响因素，开展空间仿壁虎机器人碰撞着陆实验；开展了仿壁虎机器人在 $90^\circ$ 墙面和 $180^\circ$ 负表面的稳定运动控制，最终实现了全空间表面黏附运动

控制，验证了仿壁虎机器人运动控制对不同倾斜度表面的适应能力。

本书结合空间在轨服务机器人的应用背景与需求，为解决小型空间在轨服务机器人面临的问题而研制的全空间运动干黏附仿壁虎机器人，有望可长期稳定附着在航天器上，具有移动检测和维修功能，将在航天领域有广泛的应用前景，具有重要的现实意义。

本书在国家重点研发计划（2019YFB1309600）和国家自然科学基金（52075248，51475230，51105201）项目资助下开展科学研究，在此感谢国家科学技术部和国家自然科学基金委员会的支持。在本书撰写过程中，得到了南京航空航天大学相关部门的热情帮助，还得到了许多同仁的支持，在此特别感谢我的博士生导师王立权教授，是他培养我从事仿生机器人研究，奠定了我的学术研究基础；感谢南航博士后合作导师戴振东教授，给予仿生所平台和研究机会，将我引入仿壁虎机器人研究方向；感谢国外合作导师 Simon X. Yang 的悉心指导；感谢与我一起从事仿壁虎机器人研究的学生（石叶、杨斌、宫俊、阮鹏和张晓峰等）。值本书即将出版之际，谨向所有关心、帮助、支持过我的领导、专家、同事、朋友、家人表示衷心的感谢！

俞志伟  
2021年3月于南京

# 目 录

第 1 章 绪论 .....	001
1.1 仿壁虎机器人简介 .....	002
1.2 仿壁虎机器人研究现状 .....	004
1.2.1 国内外爬壁机器人研究现状 .....	004
1.2.2 国外仿壁虎机器人研究现状 .....	008
1.2.3 国内仿壁虎机器人研究现状 .....	015
1.3 仿壁虎机器人的发展趋势 .....	018
1.4 本章小结 .....	019
第 2 章 仿壁虎机器人系统设计及其运动学分析 .....	021
2.1 引言 .....	022
2.2 足式步行机器人的结构设计 .....	023
2.2.1 腿机构的基本要求和足数选择 .....	023
2.2.2 驱动方式 .....	024
2.3 壁虎骨骼结构的仿生研究 .....	025
2.3.1 仿壁虎机器人的自由度设计 .....	026
2.3.2 壁虎黏附系统介绍 .....	027
2.3.3 仿壁虎机器人整机结构简介 .....	027
2.3.4 仿壁虎机器人自主黏/脱附脚掌原理分析 .....	030

2.4	运动学基础	032
2.4.1	位姿变换	032
2.4.2	仿壁虎机器人坐标系建立	033
2.5	仿壁虎机器人运动学分析	034
2.5.1	仿壁虎机器人运动学正解分析	034
2.5.2	仿壁虎机器人运动学逆解分析	036
2.6	本章小结	041
第3章	仿壁虎机器人步态规划及运动仿真	043
3.1	引言	044
3.2	足式机器人步态规划方法	045
3.2.1	足式机器人步态研究进展	045
3.2.2	步态描述的基本定义	045
3.3	仿壁虎机器人步态规划研究	047
3.3.1	身体运动的规划	049
3.3.2	腿部运动的规划	050
3.4	仿壁虎机器人运动仿真实验	051
3.4.1	步态规划程序架构设计	051
3.4.2	主要功能模块的设计	052
3.4.3	程序界面的设计与实现	053
3.4.4	各功能模块程序实现	055
3.4.5	爬壁步态规划的仿真分析	062
3.5	本章小结	067
第4章	仿壁虎机器人脚趾结构设计及其黏附性能分析	069
4.1	仿壁虎机器人关键黏附部件概述	071
4.1.1	干黏附材料微观结构	072
4.1.2	不同厚度基底的干黏附材料与镜面接触面积占比	073
4.2	黏附材料性能测试	075
4.2.1	宽度与法向黏附力的关系	076
4.2.2	宽度与切向黏附力的关系	076
4.2.3	黏附材料的黏附区域	077
4.2.4	基底材料厚度与各向异性力关系	078
4.2.5	黏附模型	079

4.3	仿壁虎脚趾结构设计及受力分析	081
4.3.1	仿壁虎机器人脚趾结构设计	081
4.3.2	仿壁虎机器人脚趾结构受力分析	082
4.4	仿壁虎脚掌最大法向黏附力测试	083
4.4.1	实验设计及平台搭建	083
4.4.2	仿壁虎脚掌预压力黏附性能测试实验	085
4.5	本章小结	088
第5章	空间仿壁虎机器人的姿态调控研究	089
5.1	仿壁虎机器人控制系统概述	090
5.1.1	机器人控制系统架构	090
5.1.2	空间仿壁虎机器人控制系统设计要求	091
5.2	空间仿壁虎机器人控制系统硬件设计	091
5.2.1	主控芯片概述	092
5.2.2	主控芯片最小系统电路	093
5.2.3	电源供电部分电路	094
5.2.4	通信部分电路	096
5.2.5	舵机控制接口电路	097
5.2.6	控制系统电路板布局布线原则	098
5.3	空间仿壁虎机器人控制系统软件设计	099
5.3.1	嵌入式实时操作系统介绍	100
5.3.2	控制系统启动程序	101
5.3.3	驱动程序	101
5.3.4	uC/OS-III 嵌入式操作系统的移植	104
5.4	姿态传感器简介	105
5.4.1	姿态传感器的规格及性能指标	106
5.4.2	姿态传感器工作原理	107
5.4.3	姿态传感器通信协议结构	108
5.5	驱动和测距模块简介	110
5.5.1	尾部电动机驱动模块	110
5.5.2	测距传感器模块	111
5.6	空间仿壁虎机器人姿态调控数学模型	113
5.6.1	空间仿壁虎机器人姿态调控仿真	113
5.6.2	空间仿壁虎机器人姿态调控样机	115

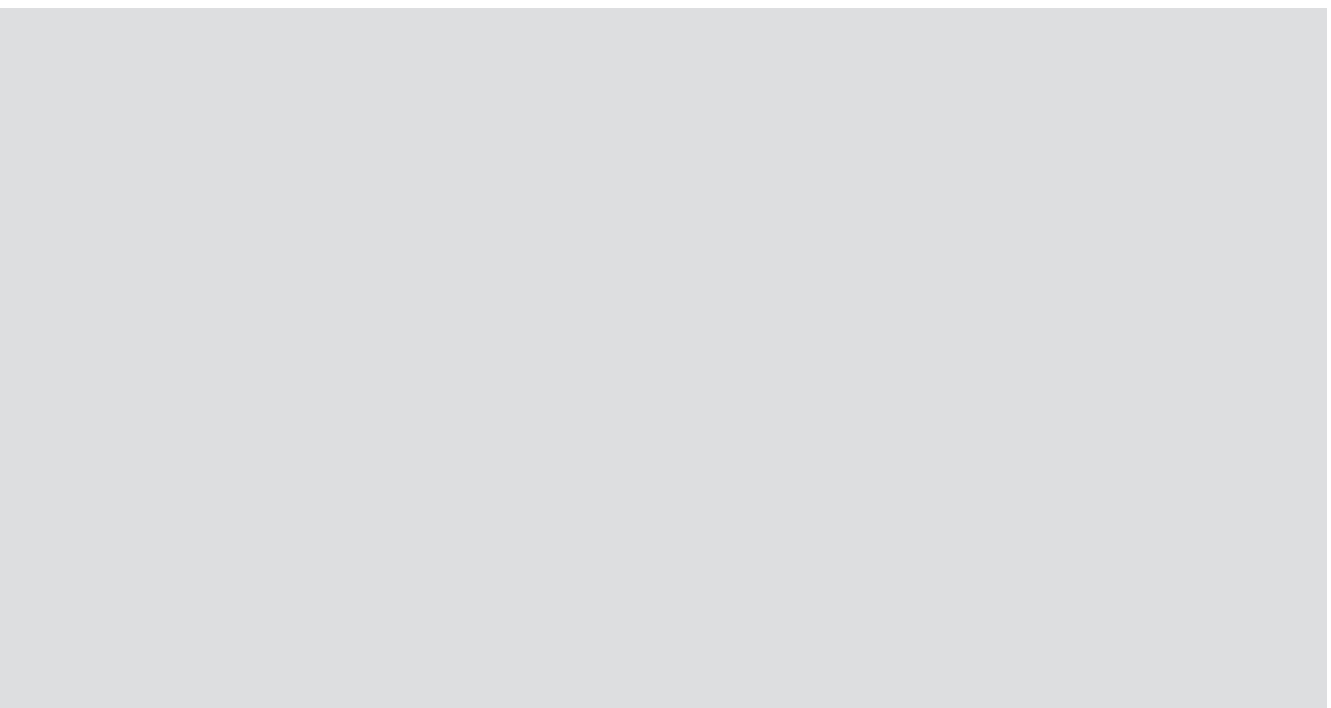
5.6.3	空间仿壁虎机器人转动惯量估算 .....	116
5.6.4	空间仿壁虎机器人外界扰动量估算 .....	118
5.7	空间仿壁虎机器人姿态调控策略 .....	119
5.7.1	空间仿壁虎机器人姿态调整方法 .....	119
5.7.2	空间仿壁虎机器人姿态调控算法 .....	120
5.7.3	空间仿壁虎机器人姿态调控策略 .....	120
5.7.4	空间仿壁虎机器人姿态调控实验 .....	122
5.8	本章小结 .....	123
<b>第6章</b>	<b>空间仿壁虎机器人着陆碰撞研究 .....</b>	<b>125</b>
6.1	引言 .....	126
6.2	小型三维力传感器设计 .....	127
6.2.1	传感器结构设计及原理 .....	128
6.2.2	弹性体应变计算 .....	131
6.2.3	传感器有限元分析结果 .....	132
6.2.4	静态标定与解耦分析 .....	133
6.3	传感器测量电路设计 .....	138
6.3.1	放大器电路部分 .....	139
6.3.2	电源部分 .....	140
6.4	仿壁虎机器人单腿黏附力控制方法 .....	141
6.4.1	生物壁虎垂直墙面的足端反力分析 .....	141
6.4.2	仿壁虎机器人力控制策略 .....	143
6.4.3	仿壁虎机器人单腿刚度控制 .....	145
6.4.4	仿壁虎机器人单腿力跟踪实验 .....	147
6.5	仿壁虎机器人碰撞黏附行为分析 .....	149
6.5.1	壁虎在接触面上的碰撞黏附行为分析 .....	150
6.5.2	仿壁虎机器人在接触面上的碰撞黏附运动分析 .....	151
6.6	仿壁虎机器人脚掌与接触面间的碰撞黏附测试 .....	152
6.6.1	实验平台设计与搭建 .....	152
6.6.2	仿壁虎机器人单脚掌碰撞黏附性能测试实验 .....	153
6.7	仿壁虎机器人负表面原地碰撞测试 .....	159
6.8	机器人碰撞动力学分析 .....	161
6.9	仿壁虎机器人碰撞实验 .....	162
6.10	本章小结 .....	166

第 7 章 仿壁虎机器人爬壁运动仿真分析 .....	169
7.1 仿壁虎机器人黏附力控制的半实物仿真 .....	170
7.1.1 Simulink 及 SimMechanics 概述 .....	170
7.1.2 机器人动力学模型的建立 .....	172
7.1.3 黏附力模型的建立 .....	174
7.2 运动仿真 .....	180
7.2 仿壁虎机器人黏附运动实验 .....	184
7.3 仿壁虎机器人 90°爬壁运动实验 .....	185
7.4 仿壁虎机器人 90°爬壁力反馈实验 .....	189
7.5 本章小结 .....	192
第 8 章 仿壁虎机器人负表面稳定黏附运动控制 .....	193
8.1 仿壁虎机器人负表面运动控制策略分析 .....	195
8.1.1 仿壁虎机器人静力学分析 .....	195
8.1.2 仿壁虎机器人姿态调控策略 .....	197
8.1.3 仿壁虎机器人运动步态规划 .....	200
8.2 仿壁虎机器人负表面运动实验 .....	202
8.2.1 仿壁虎机器人负表面黏附运动仿真 .....	202
8.2.2 仿壁虎机器人负表面黏附运动实验 .....	205
8.3 本章小结 .....	208
第 9 章 总结和展望 .....	209
9.1 主要研究工作总结 .....	210
9.2 未来研究工作展望 .....	212
参考文献 .....	213



## 第 1 章

# 绪 论



## | 1.1 仿壁虎机器人简介 |

机器人是自动控制机器（Robot）的俗称，自动控制机器包括一切模拟人类行为或思想及模拟其他生物的机械。当代工业中，机器人也指能自动执行任务的人造机器装置，用以取代或协助人类工作。伴随着传感技术、控制论、机构学和计算机等学科的发展，机器人已不只是代替劳动力的工具。人类在探索太空、开发海洋、军事与反恐等方面需求的增加，使得对机器人的性能提出了更高的要求<sup>[1]</sup>。我国从1987年实施国家“863”高技术研究发展计划以来，把智能机器人确立为自动化领域研发的主体之一，在特种机器人、机器人应用工程、机器人基础学科等方面取得很大成绩。其中非结构环境下的机器人是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的重要标志之一。

为研究适应非结构环境的机器人，科学家的目光转向自然界，希望能从中得到灵感和启发，经过万亿年进化，大部分陆上动物为适应复杂多变的环境，选择足式结构作为其运动机构。足式运动机构具有越障能力强、地面适应性好、鲁棒性好以及运动方式多等优势，因此足式运动机构成为非结构环境机器人的优选结构，其中具有全方位三维空间无障碍的爬壁足式机器人在空间探索、反恐、航空航天器表面检测等方面具有广泛和迫切的需求<sup>[2]</sup>。与其他运动机构系统（例如轮式运动系统）相比，足式机器人在结构设计、控制等方面

更为复杂,而自然界中动物对环境具有很强的适应性,我们可在仿生结构、机构运动和运动控制等方面进行仿生研究。

仿生学(Bionics)是20世纪60年代出现的一门综合性边缘科学,它由生命科学与工程学科相互渗透、相互结合而成,通过学习、模仿、复制和再造生物系统的结构、功能、工作原理及控制机制,来改进现有的或创造新的机械、仪器、建筑和工艺过程。仿生学将有关生物学原理应用到对工程系统的研究与设计中,尤其对当今日益发展的机器人科学起到巨大的推动作用。在35亿年的进化过程中,生物发达灵巧的运动机构和机敏的运动模式,成为机器人技术创新发展的源泉之一。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而制造的机器人系统。科学家们向生物学习,创造出了众多高性能的仿生机器人,如机器鱼、机器蛇、机器蝇等。

爬壁机器人是移动机器人的一个重要分支,又叫作壁面移动机器人,可在垂直墙壁攀爬并完成工作<sup>[3]</sup>。根据结构的不同,主要将爬壁机器人分为以下几种:轮式爬壁机器人、履带式爬壁机器人、轨道式爬壁机器人以及足式爬壁机器人。轮式爬壁机器人运动速度快、稳定性好,但运动环境有限;履带式爬壁机器人结构简单、易操控、负载能力较强,但不易转弯,且能耗高、壁面适应性差;轨道式机器人稳定可靠易控制,但不够灵活;足式爬壁机器人的足端结构以生物足部为原型,足端吸附材料可根据需求选用磁铁、吸盘或者干黏附材料等,该类机器人运动依靠多足轮流吸附与脱落,越障能力较强且环境适应性较好,但其结构相对复杂、速度慢、控制难。

足式机器人环境适应性好、越障能力强、运动方式多变,成为特种机器人的首选运动机构。而仿生足式爬壁机器人因其具有全方位三维空间无障碍运动能力,在反恐反劫机、空间探索、航天器表面检测等领域具有更为广泛而又迫切的需求<sup>[4-6]</sup>。对于足式爬壁机器人而言,非连续约束时脚掌黏/脱附往复交替形成的足式机器人变约束状态,以及各关节的冗余驱动导致的受力不平衡,增加了机器人关节驱动的额外能耗,影响了爬壁机器人运动的稳定性。与墙面运动相比较,负表面运动的稳定性要求更高,对冗余驱动下运动和力协调控制要求更高,因此爬壁足式机器人实现负表面运动具有更高的难度和挑战性,也是真正实现空间三维表面无障碍运动的关键技术突破点。爬壁足式机器人的进一步发展面临着很多科学和技术问题,涉及爬壁足式机器人的仿生机构设计、多关节冗余驱动下的运动稳定性、运动协调控制等问题,需要进一步深入系统研究。

壁虎等生物可以轻松在竖直表面甚至倒置表面上任意爬行,因此研究工作者常常将这些生物作为仿生对象,以期研制出可实现三维空间无障碍运动的仿生机器人。国内外相关研究人员已经对大壁虎的黏附机理等方面做了大量的研究<sup>[7-9]</sup>。

研制出的各种爬壁机器人在民用、军事、航天上具有广泛的用途，因而越来越受到人们的重视。但传统爬壁机器人的吸附原理和移动机理与真实壁虎还有一定差距，限制了其应用环境和工作范围，而壁虎的吸附原理和移动方式为突破传统爬壁机器人的限制提供新的思路，因而仿壁虎爬壁机器人成为一个新的研究方向。

壁虎脚掌具有范德华力的干黏附方式，具有各向异性特点，在与接触表面黏附时表现为单向黏附力较大而反方向黏附力较小，同时黏附力的方向性也使仿壁虎机器人在空间表面的运动更复杂。与常规的磁、负压或者正压吸附方式不同，具有范德华力的干性黏附方式可以不受黏附对象和环境介质的影响，能解决好空间表面黏附运动稳定性和运动协调问题。研制出具有各向异性的干黏附性能的仿壁虎机器人，对实现航空器、航天器外部表面检测等功能具有特殊的应用前景。

具有各向异性的干黏附性能的仿壁虎机器人，是爬壁机器人的重要分支，能够在垂直墙壁上黏附爬行运动，它可以作为特种环境下作业的一种自动机械装置，因此它能被应用于很多场合。例如在反恐行动中能够替代人完成监控恐怖分子的行动。仿壁虎机器人能够完成危险环境下的清洗作业，例如高楼的清洗和墙面的喷涂、核反应堆的清洗。仿壁虎机器人有着很强的运动灵活性，具有广阔的发展前景。本书介绍研制具有各向异性的干黏附性能的仿壁虎机器人，围绕仿生结构设计、运动学和动力学分析、运动步态规划和稳定运动控制等关键技术点进行深入研究。研制出基于干黏附技术的仿壁虎机器人，不仅能够实现仿壁虎机器人三维空间表面的运动、拓展其运动范围，更能减小空间失重环境下惯性力扰动，在航空航天领域具有特殊的应用前景。通过实验验证不同情况下自主黏/脱附脚掌的黏附性能，实现仿壁虎机器人在光滑负表面的稳定爬行，可以更好地揭示大壁虎负表面稳定协调运动机理，促进仿壁虎机器人的负表面稳定协调运动的实现，将在机器人技术领域产生重要的理论意义和应用价值。

## | 1.2 仿壁虎机器人研究现状 |

### 1.2.1 国内外爬壁机器人研究现状

仿壁虎机器人的研究主要在两个方面，一方面是黏附机理，另一方面是驱

动方式。因为仿生对象壁虎出色的爬壁能力，所以该项研究主要针对爬壁机器人开展。爬壁机器人因具备能够在垂直表面上实现稳定运动的出色能力，受到各行各业的关注与重视。目前为止，爬壁机器人广泛应用于造船业、建筑业、核工业、石化企业以及消防部门等领域<sup>[10-11]</sup>。

爬壁机器人一般具备这两个基本功能，即吸附功能和移动功能。爬壁机器人有以下几类：

(1) 按吸附方式分类，爬壁机器人主要有电磁、负压吸附、推力吸附、干黏附和湿黏附等类型。各种吸附类型的特点如表 1.1 所述。

表 1.1 爬壁机器人不同吸附类型的比较

吸附类型	优 点	缺 点
电磁	控制方便，稳定性高，无噪声	需要壁面导磁，耗电
负压吸附	受壁面材料影响小，技术成熟	需壁面光滑，需真空泵且有噪声
推力吸附	各种壁面均可	技术不成熟，能耗和噪声大
干黏附	对壁面要求小，无噪声	黏附材料加工难度大且易损耗
湿黏附	受壁面材料影响小，无噪声	技术不成熟，对壁面要求高

(2) 按结构分类，爬壁机器人主要有吸盘式、车轮式、履带式 and 仿生足式等。它们的优缺点如表 1.2 所述。

表 1.2 爬壁机器人不同结构的比较

结构类型	优 点	缺 点
吸盘式	能跨越小障碍	移动速度慢，能源供给需求大
车轮式	移动速度快，控制灵活	维持一定的吸附力较困难
履带式	结构和控制简单，壁面适应性强	只能在平坦表面运行
仿生足式	较强越障能力，适应各种地形	控制复杂

(3) 按驱动方式分类，爬壁机器人主要有气缸驱动和电动机驱动两种。

比较常见的磁吸附式机器人由电动机驱动而真空式机器人由气缸驱动。气缸和电动机驱动都有质量大的缺点，难以减小机器人自重，另外它们的效率较低且能耗大。为解决这些问题，机器人可以采用舵机或超声电动机等驱动，具有输出力矩大、体积小、控制方便和精度高等优点。

目前国内已经出现多种不同的爬壁机器人<sup>[12-20]</sup>，这些爬壁机器人主要基

## 仿壁虎机器人技术

于真空吸附和螺旋桨推力方式<sup>[12]</sup>。中国科学院沈阳自动化研究所、上海交通大学、上海大学、哈尔滨工业大学和北京航空航天大学等单位对爬壁机器人做了大量研究。哈尔滨工业大学在爬壁机器人方面的研究开始比较早，其主要成果有壁面爬行遥控检查机器人、CLR - I型和CLR - II型壁面清洗机器人、除渣及测厚爬壁机器人、水冷壁清扫机器人和微声爬壁机器人等，其中用于高楼壁面清洗的真空吸附式爬壁机器人如图1.1(a)所示<sup>[13]</sup>，图1.1(b)为微声爬壁机器人，它采用负压吸附式：微型风扇将机器人体内的空气吹出，在壁面上实现吸附，前进移动由四轮实现，另外还可以在外部装机械手臂，该机械手臂可抓持无线麦克风、摄像头等设备，应用前景广泛。

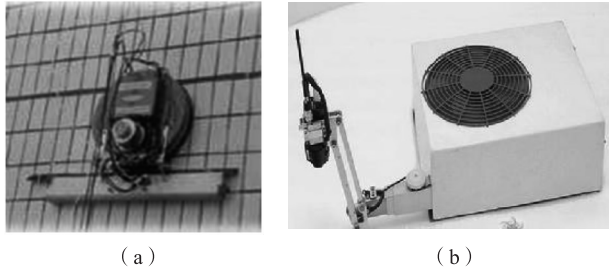


图 1.1 哈尔滨工业大学研制的爬壁机器人<sup>[13]</sup>

(a) 真空吸附式爬壁机器人；(b) 微声爬壁机器人

中国科学院沈阳自动化研究所研制出一种蠕虫式两足爬壁机器人 Strider，如图1.2所示，它采用微小型真空吸附方式<sup>[14,15]</sup>。Strider由并排布置的两腿、左右两足、腰部以及4个转动关节组成，由两个电动机驱动（每条腿上各有一个驱动电动机），运动方式为跨步行走，可以实现类似于人腿的交错运动。

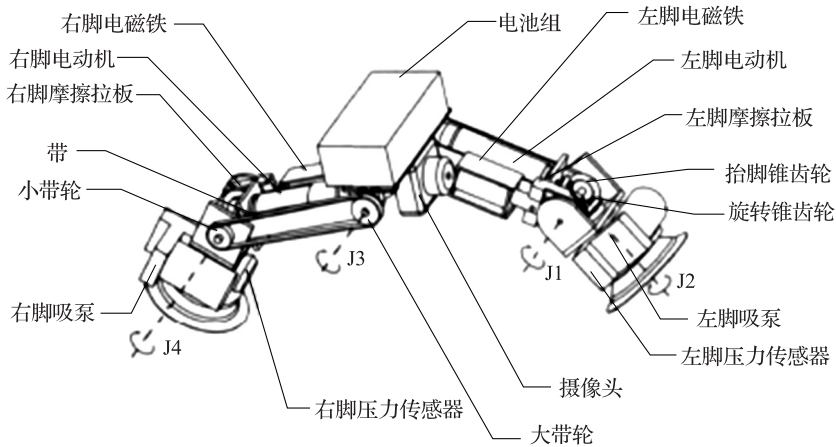


图 1.2 Strider 机器人的结构<sup>[14,15]</sup>