
上海交通大学

SHANGHAI JIAO TONG UNIVERSITY

学士学位论文

BACHELOR'S THESIS



论文题目：复杂地形下智能行走小车足部的
设计、分析、制作与测试

学生姓名：刘璘

学生学号：516020910128

专 业：钱学森班-机械工程

指导教师：孟祥慧 教授

学院(系)：机械与动力工程学院

上海交通大学

本科生毕业设计（论文）任务书

课题名称：复杂地形下智能行走小车足部的设计、分析、制作与测试

执行时间：2019 年 12 月 至 2020 年 6 月

教师姓名：孟祥慧 职称：教授

学生姓名：刘璘 学号：516020910128

专业名称：钱学森班-机械工程

学院(系)：机械与动力工程学院

毕业设计（论文）基本内容和要求：

高性能移动机器人或智能行走小车作为机器人领域的一个分支，在灾难搜救、星球探测、军事侦察、矿山开采等非结构化环境中，都具有广泛的应用前景。但是，现有的移动机器人不兼具在野外环境下翻越陡峭障碍物和快速通过平坦路面的能力。针对这一现状，本项目计划研发一款智能行走小车，该智能行走小车能够在携带一定重量的物品基础上，实现在包含平地和陡坡的复杂地形下进行自主行走和障碍跨越的功能。

上述任务由三名同学协作完成，其中刘璘的任务包括：

1. 文献调研：调研现有移动越障机器人或智能行走小车的移动方式以及攀爬越障的足部装置，分析各种结构的优缺点和适用场景。
2. 足部机械结构设计：面向陡峭斜坡的环境，拟采用足式智能行走小车，刘璘对足部进行针对性设计，在足底增加自适应地形的钩爪，增强机器人攀附在陡坡上的能力。
3. 足部分析改进：对足部进行三维建模、静力学分析和动力学分析，在此基础上改进原有设计方案。
4. 电控设计：使用单片机编写足部控制程序，实现在野外环境下翻越陡峭障碍物和快速通过平坦路面的功能。
5. 制作和测试：购买所需材料并进行加工装备，制作智能行走小车，搭建实验平台，进行测试，验证智能行走小车野外环境越障能力。改进设计，进行迭代。

毕业设计（论文）进度安排：			
序号	毕业设计（论文）各阶段内容	时间安排	备 注
	文献调研	2019.11-2019.12	
	足部机械结构设计	2019.12-2020.01	
	足部分析改进和电控设计	2020.01-2020.02	
	材料购买、加工、装配和制作	2020.02-2020.04	
	测试和验证	2020.03-2020.04	
	论文撰写和答辩	2020.04-2020.06	

课题信息：

课题性质：设计☒ 论文☐

课题来源*：国家级☐ 省部级☐ 校级☐ 横向☒ 预研☐

项目编号 2020131

其他 上汽通用泛亚汽车技术中心

指导教师签名： 王祥梦

2019年12月19日

学院（系）意见：

同意

院长（系主任）签名： 张宁

2019年12月26日

学生签名： 刘琳

2019年12月19日

上海交通大学 毕业设计（论文）学术诚信声明

本人郑重声明：所呈交的毕业设计（论文），是本人在导师的指导下，独立进行研究工作所取得的成果。除文中已经注明引用的内容外，本论文不包含任何其他个人或集体已经发表或撰写过的作品成果。对本文的研究做出重要贡献的个人和集体，均已在文中以明确方式标明。本人完全意识到本声明的法律结果由本人承担。

作者签名：



日期：2020 年 6 月 16 日

上海交通大学 毕业设计（论文）版权使用授权书

本毕业设计（论文）作者同意学校保留并向国家有关部门或机构送交论文的复印件和电子版，允许论文被查阅和借阅。本人授权上海交通大学可以将本毕业设计（论文）的全部或部分内容编入有关数据库进行检索，可以采用影印、缩印或扫描等复制手段保存和汇编本毕业设计（论文）。

保密☐，在____年解密后适用本授权书。

本论文属于

不保密☒。

（请在以上方框内打“√”）

作者签名：



指导教师签名：



日期： 2020 年 6 月 16 日

日期： 2020 年 6 月 16 日

复杂地形下智能行走小车足部的设计、分析、制作与测试

摘要

智能行走小车,作为许多功能性机器人的移动载体,是军事侦察、灾难营救、矿产勘探、星球探测等领域机器人的研发基础。目前相关研究热点集中在如何将智能行走小车的运动范围从人工的结构化场景,拓展到野外等非结构化场景中去。

本文分析了现有智能行走小车的移动方式和攀爬机器人的攀爬原理,总结了各种机器人的环境适应能力。足式移动机器人对复杂地形适应能力最强,但无法攀爬陡峭斜坡。如果将微刺式攀爬机构应用于其足部,可以增强其足部抓附力,拓展足式机器人的应用范围。为此,本文结合微刺攀爬的技术,完成了针对四足机器人的微刺攀爬足的工程设计,并运用理论方法和有限元方法对其机械结构进行了校核和改进。在此基础上,加工制造了微刺攀爬足部样机,进行了攀爬足攀附能力的实验和整机测试,装备有攀爬足的四足机器人可在 60° 粗糙斜面上稳定附着,验证了微刺攀爬足设计的可行性。

研究表明,本文提出的微刺攀爬足在粗糙表面可以提供足够的抓附力,使得足式行走小车在粗糙斜面实现稳定攀附,为复杂地形下智能行走小车的设计和研究奠定了基础。

关键词: 智能行走小车, 微刺式攀爬机构, 足式机器人, 仿生抓附, 复杂地形

THE DESIGN, ANALYSIS, FABRICATION AND TEST OF THE FOOT OF INTELLIGENT WALKING VEHICLE FOR COMPLEX TERRAIN

ABSTRACT

As the mobile carrier of many functional robots, intelligent walking vehicle is the research and development basis of robots in the fields of military reconnaissance, disaster rescue, mineral exploration and planetary exploration. At present, relevant studies focus on how to extend the motion range of intelligent walking car from artificial structured scenes to wild and unstructured scenes.

This paper analyzed the existing mobile mechanisms of intelligent walking vehicle and the climbing principles of climbing robot, then summarizes the environmental adaptability of all these kinds of robots. Among them, foot mobile robot has the strongest adaptability to complex terrain, but it is unable to climb steep slopes. If apply the microspine climbing mechanism to its foot, the grasp force can be enhanced and its application range can be expanded. For this purpose, the engineering design of microspine climbing foot for quadruped robot was completed in this paper based on the technology of microspine climbing, and its mechanical structure was checked and improved by theoretical method and finite element method. On this basis, we fabricated the prototype of microspine climbing foot. Experiment of the climbing ability of one spiny foot and a test of the quadruped robot equipped with spiny feet were carried out. The robot can be stably attached to a 60° rough slope, which verified the effectiveness and reliability of the microspine climbing foot.

The research shows that the proposed method can provide sufficient grasping force on rough surface, enabling the walking vehicle to achieve stable climbing on the rough slope, and laying a foundation for the design and research of intelligent walking vehicle in complex terrain.

Key words: intelligent walking vehicle, microspine climbing mechanism, legged robot, bionic cling, complex terrain

目 录

摘要	3
ABSTRACT	4
第一章 绪论	1
1.1 课题背景和研究意义	1
1.2 课题研究现状	1
1.2.1 智能行走小车移动机构的研究现状	1
1.2.2 爬壁机器人攀爬机构的研究现状	6
1.2.3 研究现状总结	9
1.3 课题研究内容	9
第二章 粗糙壁面与微刺接触机理研究	11
2.1 昆虫足部微刺形态研究	11
2.2 微刺与粗糙斜面接触建模与分析	12
2.2.1 球面接触模型	12
2.2.2 抓附成功判别条件	13
2.2.3 抓附效果影响因素	13
2.3 粗糙表面特征与数值仿真	14
2.4 微刺成功攀附概率计算	15
2.5 本章小结	17
第三章 微刺攀爬足部机械设计	18
3.1 柔性微刺爪的设计与分析	18
3.1.1 昆虫足部柔性结构	18
3.1.2 柔性微刺爪结构设计	18
3.1.3 微刺爪柔度矩阵建模与分析	19
3.2 驱动机构设计	20
3.2.1 微刺运动轨迹分析	20
3.2.2 连杆驱动机构设计	20
3.2.3 弹性传动机构设计	21
3.3 整体设计	21
3.4 本章小结	22
第四章 微刺攀爬足部分分析与校核	23
4.1 微刺平均载荷分析	23
4.2 微刺的理论校核	24
4.2.1 微刺的三种失效情况	24
4.2.2 微刺的强度校核	25
4.2.3 微刺的刚度校核	25

4.2.4 粗糙点的脱落失效	25
4.3 微刺失效情况的 Ansys 仿真	27
4.4 本章小结	28
第五章 微刺攀爬足部制作与实验测试	30
5.1 微刺攀爬足部制作	30
5.2 不同粗糙度下微刺攀爬足抓附性能实验	31
5.2.1 抓附力测试实验台搭建	31
5.2.2 抓附力测试实验和结果	32
5.3 装配微刺攀爬足的四足机器人测试	33
5.3.1 兼容微刺攀爬足的四足机器人结构	33
5.3.2 野外攀爬测试	34
5.4 本章小结	35
第六章 总结与展望	36
6.1 总结	36
6.2 未来与展望	36
参考文献	38
谢辞	40

第一章 绪论

1.1 课题背景和研究意义

近几十年来,机器人技术的发展,不仅彻底改变了传统的制造业,而且引发了人类社会生活的深刻变革。首先是大量固定基座的机器人出现,在许多工业制造的场合中承担起一些重复性、繁重性、危险性的工作,使得工业生产的效率得到大大提高。而后,随着机构学、SLAM 技术、自动控制理论和人工智能领域的突破和创新,具有通过传感器感知外部和自身状态,实现自主移动功能的智能行走小车开始出现,并逐渐应用于房屋清洁、医疗保健、餐饮服务、互动娱乐等人工结构化环境中,成为人们日常生活中不可或缺的一部分。

目前,智能行走小车已经能够胜任大部分人工结构化环境下的作业,然而社会发展对于智能行走小车提出了更高的要求。越来越多的应用场景出现,使得智能行走小车需要面对更加复杂的地形。如地震废墟中遇险人员的搜救工作、小行星的地表探测工作、野外复杂地形下的军事侦察工作等非结构化场景下的作业,要求智能行走小车具有更强的地形适应能力和灵活性,例如要具备在起伏地面上行走、翻越各种障碍物、爬越陡坡等能力。

为了增强智能行走小车对复杂地形的适应能力,研究者对行走小车的移动机构进行了创新,在轮式机器人之后,履带式、足式和轮足式行走机器人相继出现,不断拓宽小车的应用范围。轮式小车在较平坦的路面具有高效的行进形式,穿越障碍物的能力较弱,但通过特殊的底盘或悬架设计可以提高越障能力。履带式小车对各种地形都有较强的适应能力,但其缺点是重量大、能耗大。足式和轮足式小车从仿生学的角度出发,使用支腿作为移动载体,具有最强的灵活机动性能,能够通过各种凹凸不平路面以及高低起伏的障碍物,但足式机器人的机械结构和控制策略最为复杂。

总的来看,足式行走小车具有最强的环境适应性,但其足部多为一些弹性有机材料,主要起减震作用,而无法提供足够的摩擦力或抓附力使足式小车攀爬上较为陡峭的斜坡。

爬壁机器人实现较强抓附力的方案为增强足式机器人攀爬能力提供了启示。爬壁机器人是一类通过特殊攀爬机构实现在竖直壁面运动的机器人,其主要的攀爬方式有磁吸附式、真空吸附式和微刺式。磁吸附式是通过磁铁产生吸附力,一般用于爬壁壁面为钢铁等磁性物质的应用场景,如油罐检查、船舶除锈等。负压吸附式机构通过吸盘与壁面形成密闭腔体,然后抽取腔体的空气形成负压,利用大气压力将机器人压紧在壁面上,但是这种攀爬机构对于壁面光滑度要求较高。微刺式攀爬机构是一种仿生学机构,其主要是模拟昆虫足部的微刺或者猫科动物爪子的攀爬机理,利用仿生钩爪抓附住壁面的粗糙部位,提供使机器人攀附在壁面上的抓附力。微刺式攀爬机构对攀爬壁面的要求较低,适用于野外非结构化环境。

综上所述,本课题计划以研发能执行复杂地形下探测和救援任务的智能行走小车为目标,在总结现有智能行走小车的特点和存在问题的基础上,设计一种针对四足行走小车的仿生微刺式攀爬足,以增强现有足式行走小车对于粗糙表面的抓附能力,最终使行走小车兼具快速通过平坦路面、翻越小型障碍物以及攀爬陡峭的粗糙硬质岩壁的功能,有效提升行走小车对于各种野外地形的适应能力,拓宽行走小车的应用范围。

1.2 课题研究现状

1.2.1 智能行走小车移动机构的研究现状

智能行走小车作为许多功能性机器人的移动模块,在军事侦察、灾难营救、矿产勘探、星球探测等应用场景中,都具有广泛的前景。

按照移动机构不同,智能行走小车主要可分为:轮式、履带式、足式和轮足复合式四类,这些移动机构各有优劣。轮式小车可通过平坦路面和小型障碍物,在结构化场景应用较多。

履带式机器人具有相对强的环境适应能力,稳定性好,因为接地面积大,所以抓地能力很强,但它的其缺点是运行速度慢、磨损快、能耗大。足式或轮足式机器人具有很高的灵活机动性能,通过仿生的迈步动作可跨过各式各样的障碍物,此外轮足式机器人还可以通过轮子进行快速移动,但是它们的缺点是结构和控制策略比较复杂。

(1) 轮式机器人

轮式机器人一般用于平坦路面,但也可以通过使用特殊的悬架系统增强其地形适应能力。轮式机器人可以分为被动越障式和主动越障式。

被动越障轮式机器人主要借助轮子和障碍物之间的摩擦力和阻力实现悬架的抬升,达到越障的目的。这种越障方式能够减少电机的使用数量,降低控制难度。但是其越障能力也有限,一般情况下障碍物的高度不能超过轮子的直径。

中国科学技术大学范明聪等^[1]提出了一种高机动性能的被动轮式越障机器人,其机械结构如图 1.1 所示,这款机器人在四轮基础上增加了一个前导轮,并通过双摇杆机构与车身相连,前导轮在遇到障碍物时,由于阻力而产生向上的运动,跨过障碍物。此外车身悬架采用平行四边形机构,容易通过被动变形适应起伏不平的地形。

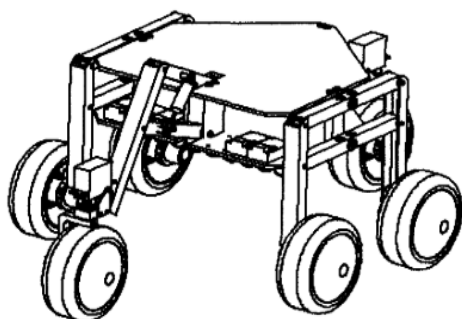


图 1.1 中科大被动轮式越障机器人^[1]

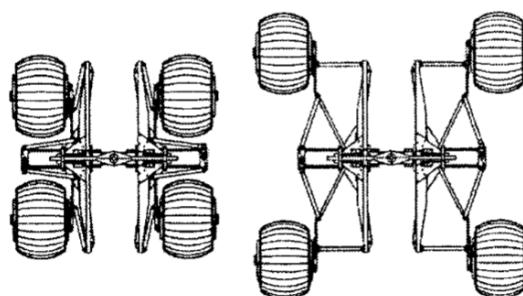


图 1.2 Nomad 变形底盘^[2]

CMU 的 Rollins E 等^[2]开发的 Nomad 机器人,通过使用可以改变形状的底盘结构提高了崎岖路面的稳定性。这种底盘由连杆机构组成,可在折叠和展开两种状态切换,底盘折叠时,轮子较为紧凑,可以通过较窄的缝隙;底盘展开时,可达到 $2.2\text{m} \times 2.4\text{m}$ 的尺寸,整体结构更加稳定,推进力更强,可以在起伏不平的地面行进,它可以爬上最大 35° 的斜坡,越过最高为 55cm 的物体。

主动越障轮式机器人的设计方案一般是在四轮小车的基础上增加支撑轮,通过改变支撑轮的悬架形态而改变车体重力的分布情况,从而使车轮依次翻过障碍物。这种机器人的越障高度可大于车轮直径,在行星探测车上具有广泛的应用。日本航宇中心和梅基大学等研制的 Micro5^[3]行星车是典型的主动越障轮式机器人,其车轮直径仅为 10cm ,但却能通过支撑轮变形登上 15cm 的台阶,或者克服 40° 的陡坡。Micro5 在通常的四轮结构上,增加了一个中间的支撑轮,如图 1.3 所示。支撑轮不提供行进的动力,只在需要翻越障碍物时,通过转动变形,使得前轮和后轮能够贴紧障碍物表面。

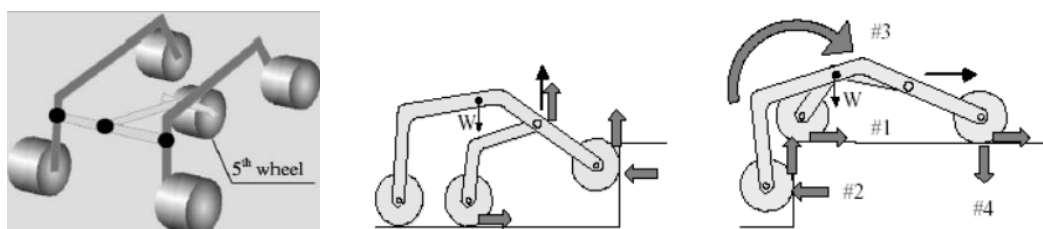


图 1.3 Micro5 越障示意图^[3]

美国 JPL 的 Rocky 系列^[4]小型漫游车,是一种六轮主动越障小车。这个系列的探测车的悬架系统分为主摇臂和副摇臂。通过主摇臂和副摇臂之间的相对摆动,可以改变轮子相对位

置，达到贴合起伏不平路面的功能。其越障过程如图 1.5 所示。



图 1.4 Sojourner 漫游车^[4]

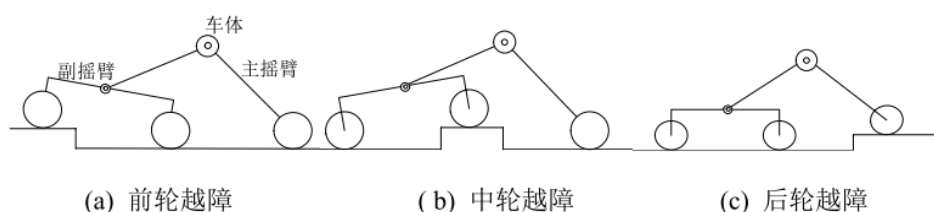


图 1.5 六轮摇臂机器人越障原理^[5]

(2) 足式机器人

足式机器人地形适应能力非常强，能跨过的障碍物，但是能量效率比较低，且整体结构和控制策略复杂。足式机器人在非结构化的复杂地形中具有广阔的应用潜力，许多研究致力于通过设计和控制机器来实现这些潜力，目前足式机器人在使用各种驱动方法和控制策略的动态移动能力方面取得了卓有成效的进步。

Boston Dynamics 的大狗机器人^[6]和 IIT 的 HyQReal 四足机器人^[7]，使用了液压驱动系统，执行机构响应速度非常快、惯量小、功率密度和扭矩密度高，可以负载很大的载荷。得益于头部的各种传感器的协调作用，大狗机器人拥有卓越的稳定性，能够应对各种崎岖的地形与冲击作用力，保持身体平衡。

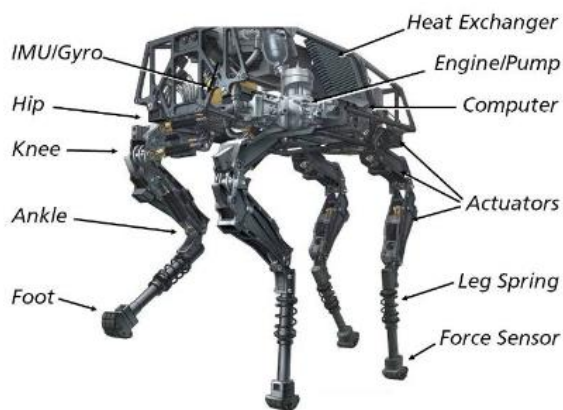


图 1.6 Boston Dynamics 大狗机器人^[6]



图 1.7 HyQReal 机器人^[7]

ETH 的 M Hutter 等^[8]设计的 ANYmal 是一款四足机器人，具有出色的机动性和动态运

动能力。因为这只 30 公斤重、0.5 米高的机器狗采用了新型的柔性关节模块，所以它的扭矩可控制，而且在奔跑或跳跃时，对冲击性负载有非常强的鲁棒性。该驱动器的控制带宽超过 70Hz，抗干扰能力强。ANYmal 可以执行步行步态，中等速度的小跑，并且能够执行特殊的动作，如站起来或爬非常陡峭的楼梯。

MIT Biomimetic Robotics Lab 研发了知名的 Cheetah 系列机器人。其中 Cheetah3^[9] 机器人利用量身定制的机械设计，使得动态运动的控制策略大大简化，能够完成快速的奔跑以及灵活的跳跃动作。通用平衡与运动控制器被嵌入到模块化控制架构中，该架构允许机器人通过反应性步态调整来处理意料之外的地形干扰，而无需外部传感器或先前的环境知识。



图 1.8 ETH 的 ANYmal 机器人^[8]



图 1.9 MIT 的 Cheetah3 机器人^[9]

国内也有类似的研究，如浙江大学“绝影”机器人^[10]。上海交大高峰教授团队的新型六足机器人“青雅”等^[11]。



图 1.10 浙江大学绝影机器人^[10]

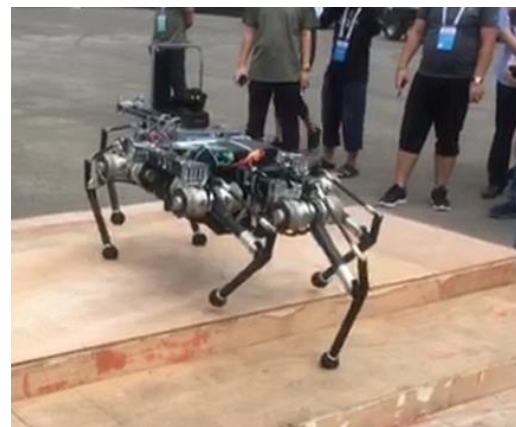


图 1.11 上海交大青雅机器人^[11]

(3) 履带式机器人

履带式机器人环境适应能力相对较强，因为履带接地面积大，所以抓地能力强，稳定性好，但它也具有运行速度慢、磨损快、能耗大的缺点。目前，履带式机器人被广泛用于军事侦察、灾难救援、生化勘测、事故处理等方面。

Packbot^[12] 是美国 iRobot 实验室研制的系列军用机器人，具有体积小、重量轻、便于运输等特点，适合在狭窄地方使用。Packbot 在一般履带小车的基础上增加了一个辅助臂，该辅助臂可帮助它从颠覆状态恢复正常。它的履带为二段式设计，通过履带变形可以贴合起伏表面，增强抓地能力。在这些设计的帮助下，Packbot 能够轻松通过小型障碍物，能够爬上最高 50° 坡度楼梯。由于出色的机动性能，它被广泛用于军事侦察和勘测任务。

图 1.12 Packbot 510 机器人^[12]图 1.13 灵蜥-B 型排爆机器人^[13]

国内也有许多关于履带式机器人的研究。如图 1.13 所示是由我国自主生产的“灵蜥-B”型排爆机器人，采用三段履带式设计，其最快速度可达 30 m/s，能够爬上 40°斜坡和楼梯，翻越 40cm 高的障碍以及 50cm 宽的沟壑，其搭载的机械臂可以提起 15 公斤的重物，自带电源可以续航 4 小时^[13]。

(4) 轮足复合式机器人

轮足复合式小车根据足的数量，可分为两足、四足、六足等类型。其兼具了足式移动机构和轮式移动机构的优点，具有更广泛的应用前景。

波士顿动力的 Handle 机器人^[14]是目前世界上最先进的两足轮足复合式机器人之一。Handle 机器人的腿只有两个自由度，并且足端安装了驱动轮，这样可以降低控制难度，降低驱动和加工的成本。Handle 机器人能够通过弯曲膝关节来改变重心高度以及位姿，提高轮式移动方式在不同路况下的通过能力。它还具有超强的弹跳能力，垂直起跳高度能达到 1.2m。

图 1.14 波士顿动力 Handle 机器人^[14]图 1.15 北理工哪吒机器人^[15]

北京理工大学研制出了一款名为“哪吒”的并联式四足轮足式机器人^[15]。如图 1.15 所示，这款机器人腿部为并联结构，底部安装有主动轮。其足式移动能力较差，主要依靠轮式运动，并联腿起到类似悬架的作用。当遇到大型障碍物时，通过并联腿调整轮子间距以及机身高度实现跨越。它可以最快 8.3m/s 的速度运动，可以爬上 25°左右的陡坡。

日本工业大学的 Endo G 等^[16]开发了一种四足的轮足复合型的移动机器人 Roller-Walker。该机器人足部为可翻转的被动轮，当被动轮处于图 1.16-a 状态，机器人可以进行四足行走，当处于图 1.16-b 状态，机器人可以通过类似于滑冰的动作行进。采用这种方式，可以大幅提升续航能力，但是无法快速行进。

日本大阪大学的 Takubo T 等^[17]研制了一种轮足复合机器人 ASTERISKH，这款机器人

具有上下对称的六只足，每条腿采用四自由度结构，因此具有很大的灵活度。该机器人还可只用四只足进行行走，冗余的两只足可以作为机械臂使用，进行简单的抓取操作。其足部为主动轮，可以实现平坦路面的快速移动，也可以使用迈步的方式跨越障碍，对复杂地形有很强的适应能力。

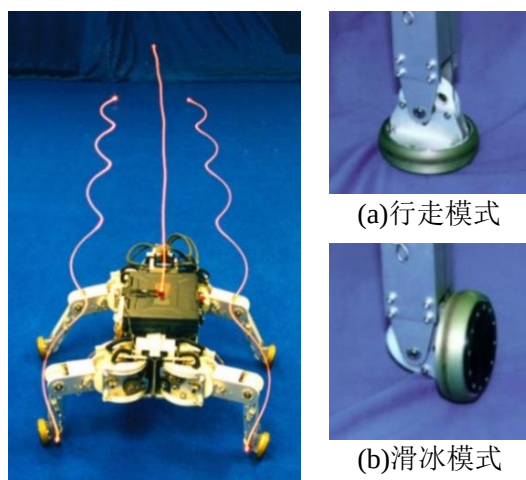


图 1.16 日本工业大学 Roller-Walker^[16]

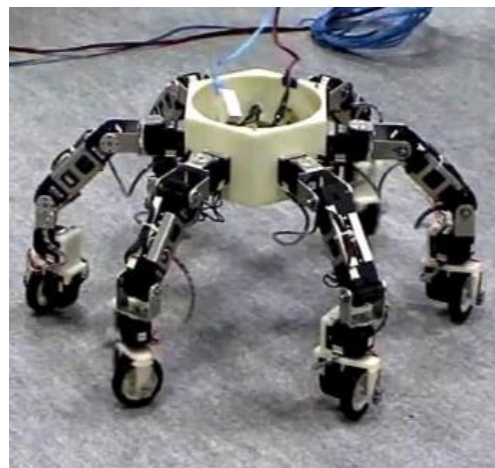


图 1.17 日本大阪大学 ASTERISKH^[17]

1.2.2 爬壁机器人攀爬机构的研究现状

攀爬机器人的常见攀爬机构主要分为气吸式、磁吸式以及微刺式。

(1) 微刺式攀爬机构

微刺式攀爬机构是一种仿生式的设计，适合于粗糙硬质的表面，包括岩石、混凝土、砖块等。这种机构模仿了一些趾段带有微刺或利爪的昆虫和哺乳类动物，如蜘蛛、猫、狗等。主要原理是靠微刺插入硬质粗糙表面的孔洞。

斯坦福大学研制的 Spinybot^[18]可以在不使用吸力或粘合剂的情况下攀爬混凝土、灰泥、砖块和砖石墙。该方法的灵感源自于在一些爬行昆虫如蜘蛛身上观察到的机制，涉及到在其足部表面的微刺阵列。这些微刺阵列被应用于机器人的脚趾上。Spinybot 可以攀爬各种平坦的外墙，携带与自身重量相等的负载，而且消耗能量很少。



图 1.18 Stanford 的 Spinybot^[18]



图 1.19 波士顿动力 RISE V3^[21]

波士顿动力公司在 Spinybot 研究的基础上,也推出过基于微刺攀爬原理的 RISE 系列爬壁机器人^{[19], [20], [21]}。其中 2009 年推出的 RISE V3^[21]机器人是一款具备动态、高速攀爬均匀圆柱体能力的攀爬机器人。该机器人重量为 5.4 公斤,主体长度 70 厘米,尾部长 28 厘米,它能以 21 厘米/秒的速度快速攀爬一根木制电线杆。它的爪子使用手术针头制成,足够坚硬和锋利,可以穿透木头。在攀爬时,前爪环绕圆柱木杆,爪子角度朝内并略微向下,后爪角度向下直刺木头,产生向上的推力。



图 1.20 Digbot 机器人^[22]



图 1.21 JPL 的 LEMUR 机器人^[23]

美国凯斯西储大学 Daltorio 团队研发的 Digbot 机器人是一款六足爬行的微刺式攀爬机器人^[22]。其每个足端都具有微刺,且踝关节具有弹簧,可以使微刺被动地进行重定向从而刺入壁面的空隙。它依靠足部向内的抓紧力来增强对于表面的附着。机器人能够承载的法向拉力与足部抓紧力成正比,因此可通过增加抓紧力达到任何需要的附着力要求。

NASA JPL 研制的 LEMUR^[23]最早是为了火星探测的需求而研制。这是一种能在垂直、悬垂和倒置岩面上自由攀爬的攀岩机器人,可应用于火星上的极端地形或微重力物体上的持续移动。机器人用层次排列的微刺抓住岩石。微刺阵列是由锋利的钩和灵活的元件组成的柔性的机构,允许钩独立地移动,并抓住岩石表面。LEMUR IIB 机器人有超过 250 个微刺分布在 16 个足中。每个足的每个趾也可以独立移动,以适应更大的厘米级粗糙表面。LEMUR 的研究团队在多种岩石类型上进行了单爪拉力试验,在粗糙岩石上,单爪可以在任何方向上支撑机器人的整体质量(10kg)。

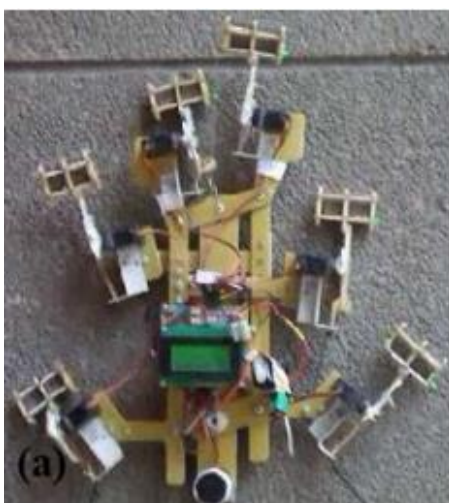


图 1.22 哈工程攀爬机器人^[24]

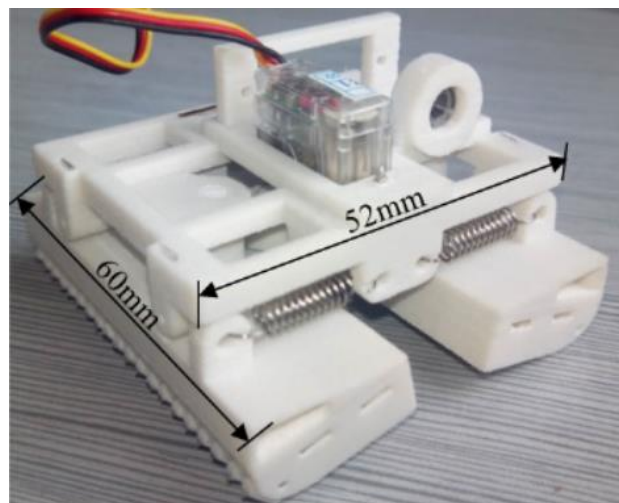


图 1.23 中科院两足攀爬机器人^[25]

近年来,国内也有一些研究涉足微刺式攀爬机器人。2011 年哈尔滨工程大学的陈东良等^[24]研发了一种对称六足结构的爬壁机器人,其每个足上都有多个锋利的爪刺,可以在粗糙墙面上移动。2015 年中国科学院的刘彦伟等^[25]研制了一款两足爬壁机器人。该机器人足部是一个带有微刺的对抓夹持装置,可以抓附在包括天花板在内的垂直和倒置粗糙表面,通过两只足交替抓附,以类似尺蠖步态运动。

(2) 负压吸附式攀爬机构

负压吸附式的基本原理是在吸附装置的两侧产生压力差,利用外侧的空气压力把装置在压紧在物体表面,从而产生较大的静摩擦力。负压吸附式还可以细分为:低真空度负压吸附、高真空度负压吸附以及螺旋桨推压吸附^[26]。

低真空度负压吸附和高真空度负压吸附都需要使用吸盘等装置与攀爬壁面形成腔体,然后抽取腔体中的空气产生负压。两者的区别是,低真空度负压由风机产生,由于风机抽气能力有限,一般只能产生较小的吸附力,而且由于风机旋转会产生很大的噪音,因此应用范围比较局限;高真空度负压由真空泵产生,真空泵抽气效果好,而且噪音小,适合作为机器人的攀爬机构。这两种吸附方式的缺点是吸盘与壁面需要形成近似密闭的腔体,因此对表面光滑度的要求较高,采用这种技术的机器人一般用于攀爬玻璃、瓷砖等光滑墙面。典型的有哈工大研发的尺蠖型磁吸附机器人^[27],其足部吸附装置为吸盘,通过微形真空泵在吸盘与壁面间形成负压使得机器人能够吸附于墙面。

负压吸附用于野外环境的困难在于,第一,无论是气吸的哪种方式,都必须持续不断地消耗能量,这对于野外移动机器人的续航是一个较大的挑战。第二,野外环境下的附着面更加不规则,会降低气吸的效率。

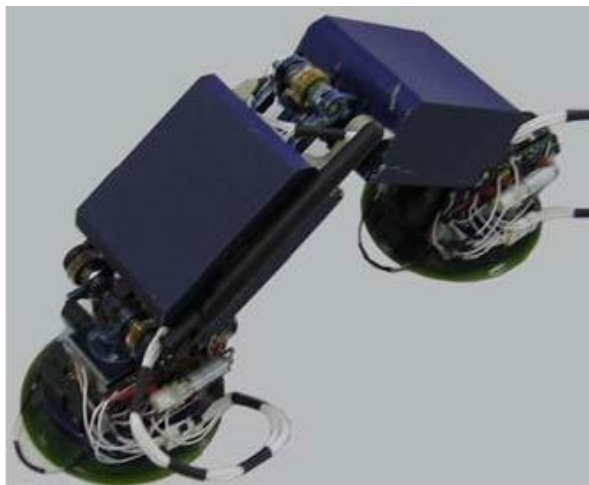


图 1.24 哈工大真空吸附式机器人^[27]



图 1.25 REST I 机器人^[29]

(3) 磁吸式攀爬机构

磁吸附式攀爬机构的基本原理是利用磁源与导磁体的磁力,将装置吸紧在物体表面上,从而产生较大的静摩擦力。根据磁源的种类,磁吸附的攀爬机构可以细分为电磁式和永磁式两种^[28]。电磁式攀爬机构可以产生很大的吸附力,且吸附力大小可以根据需求进行调节,但是能耗较大。永磁式攀爬机构使用永磁铁吸附导磁体,由于永磁铁磁力随距离衰减很快,因此抗干扰能力较差,一般用于平整的导磁表面。典型的磁吸附机器人有 Grieco 等^[29]研发的 REST I 机器人,该机器人足部装有电磁铁,可以提供很强的吸附力,可以负载至少 100kg 的重量。

相对而言,磁吸附式攀爬机构可以提供最大的负载能力,且结构简单,易于集成,但其缺点也十分明显,即只适用于导磁性表面,因此这种方式主要用于油罐车检测,船体除锈等领域。

1.2.3 研究现状总结

智能行走小车是机器人领域的一个重要分支,对智能行走小车的研究为许多机器人的运动模块奠定了基础。综合智能行走小车移动机构的研究现状可以发现,智能移动小车已经能在大多数人工结构化和部分非结构化地形中顺利工作,进一步拓展智能行走小车在非结构化场景中的应用范围,实现其对野外复杂地形的适应是主要研究方向之一。总而言之,智能行走小车移动机构的发展趋势有:

- (1) 使智能行走小车能够适应更多复杂地形是相关研究的主流。
- (2) 将智能行走小车与其他机器人技术进行复合是提高性能的重要策略。
- (3) 从仿生学获得启发是智能行走小车技术的一个研究方向。

同时,目前已有的智能行走小车在野外环境中运行还存在着一些问题:

(1) 在环境适应能力方面,现有的智能行走小车通过轮式、履带式、足式等多种移动机构来实现对复杂地形的适应。其中轮式具有在较为平整的路面上移动速度快、效率高等优点,但是难以适应野外的崎岖路面;履带式在松软地面通过性能好,越障平稳性高,但速度较慢、功耗较大;足式行走小车已经能够克服大多数复杂地形,但是现有足式机器人足部主要起减震功能,而抓附能力有限,因此无法攀越较陡的野外硬质粗糙表面。

(2) 在运动步态方面,为了适应在陡峭斜坡攀爬的需求,足式移动小车需要具有很低的重心。而一般足式机器人的运动步态是支撑腿交替迈步跨越崎岖路面和障碍物,其机身主体与地面始终保持一段距离,这与攀爬功能的实现相互矛盾。为了实现足式行走小车对多种地形的兼容,除了现有的直立运动步态之外,还需要设计一种低重心的匍匐运动步态。匍匐运动步态的运动规划方法以及直立运动步态到匍匐运动步态的步态转换策略是有待研究的问题。

1.3 课题研究内容

如何增强智能行走小车对复杂非结构化场景的适应能力,是智能行走小车领域的一个重要课题。基于此,本文以执行复杂环境下的探测和救援任务为目标,实现复杂地形下足式智能行走小车足部微刺攀爬机构的设计与制作,并对微刺攀爬足的攀附性能与稳定性开展实验研究。本文的主要内容如下:

第1章主要介绍课题研究的背景、意义和内容,首先指出社会发展对智能行走小车提出了更高的要求,特别是在复杂非结构化场景下,智能行走小车的环境适应性能有待提高。接着,综述了现有智能行走小车移动机构以及攀爬机器人攀爬机构的研究现状,指出,足式机器人拥有很强的越障能力,但一般的足部设计无法攀爬陡峭粗糙表面,而采用微刺式的攀爬机构改进足部设计有望解决这一问题。最后,总结了课题研究的意义,并且给出了论文的主要内容和总体结构。

第2章主要分析了粗糙壁面和微刺接触的机理。本章从仿生学角度出发,在研究昆虫足部微刺与粗糙斜面相互作用的基础上,提出微刺斜面的球面接触模型,并利用该模型,分析得到抓附成功的判别条件,以及斜面坡度、微刺尖端半径、表面粗糙度等因素对抓附效果的影响。然后,使用计算机模拟了随机粗糙表面,通过统计学方法估计了一次随机抓附的成功概率。

第3章主要介绍微刺攀爬足的机械结构设计。首先研究了自然界中昆虫足部的柔性结构,说明柔性结构对攀爬爪的重要性。其次提出了微刺爪的刚柔复合设计方案,并基于柔度矩阵进行了建模改进。接着介绍了微刺爪驱动机构的设计,以及用于减小冲击载荷的弹性传动机构。最后介绍了微刺攀爬足的整体设计。

第4章对微刺攀爬足关键零件进行了分析与校核。首先分析了微刺攀爬足在壁面攀爬的受力情况,得出微刺承受的平均载荷。进一步研究了微刺接触失效的三种情况,对每种情况分别进行了理论分析,校核了微刺的强度和刚度。最后,使用 Ansys 对微刺壁面接触进行了静力学仿真,仿真结果与理论计算结果符合较好,均符合使用要求。

第5章主要介绍微刺攀爬足的样机制作和实验测试过程。本章首先给出微刺攀爬足的加工流程。接着搭建了抓附力测试实验平台,设计并制作了粗糙度递增的粗糙表面用于实验。通过实验验证了微刺攀爬足具有良好的抓附效果,并通过比较不同粗糙度下的实验数据,给

出了最适合攀爬的粗糙度范围。最后，对装配有攀爬足的四足机器人进行了测试，达到了使用要求。

第 6 章为总结与展望。总结了本文的研究成果，并对未来的研究方向进行展望。

图 1.26 示了本文第 2 至 5 章的结构框架。

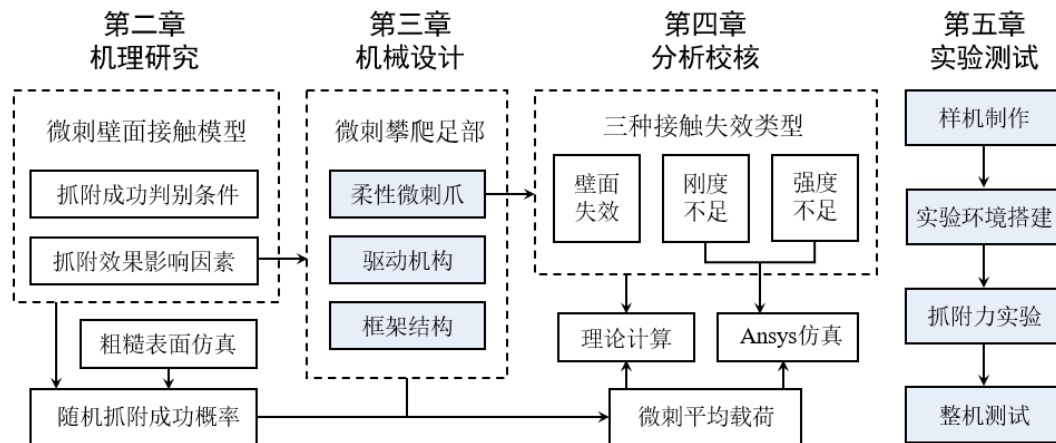


图 1.26 本文的技术框架

第二章 粗糙壁面与微刺接触机理研究

2.1 昆虫足部微刺形态研究

微刺攀爬机构是从自然界中的昆虫、猫科动物等的攀爬能力中得到启发而提出的，其中微刺与粗糙壁面的接触作用是抓附力的直接来源，因此研究粗糙壁面与昆虫微刺的接触机理对高性能微刺设计具有重要的指导意义。

在自然界中，一些昆虫能够在粗糙的竖直表面上停靠，得益于其足端的倒刺或者爪刺。这些倒刺或爪刺在昆虫足部普遍存在，例如金龟科甲虫^[30]，其足端有粗壮的爪刺，除此之外，在其胫节末端还有许多细长倒刺。攀爬的过程中，这些微刺结构与壁面粗糙点位形成机械锁定，或者直接刺入柔软的壁面，提供较大的抓附力。

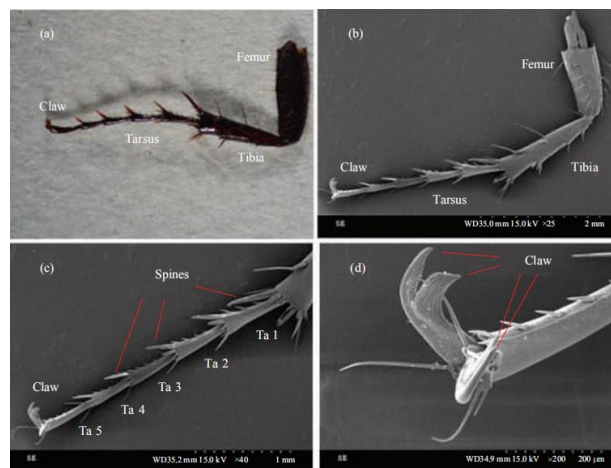


图 2.1 东方绢金龟足部微刺与爪刺图^[30]

为了适应不同的种类的粗糙表面，昆虫进化出了种类繁多的微刺形态，如图 2.2 所示。总的来看，昆虫的足端爪刺可以分为单齿爪、双齿爪和附齿爪三大类。其中，单齿爪仅适用于攀爬地面和粗糙树干，附齿爪和双齿爪具有更多的抓附结构，可以在更加光滑的叶面上或者花朵上爬行。

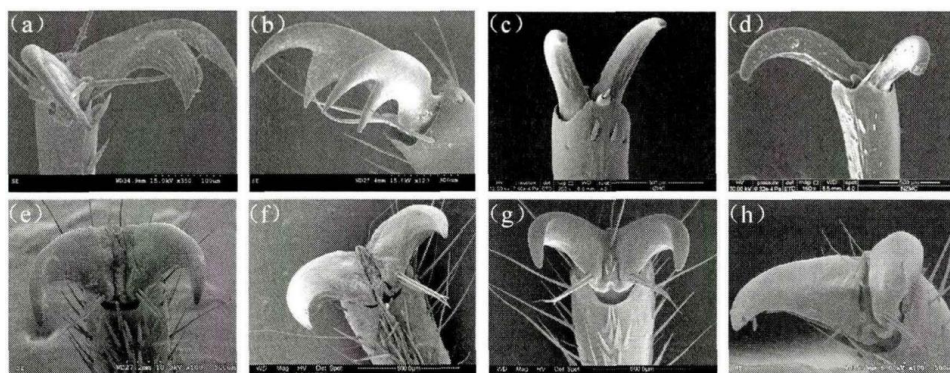


图 2.2 多种昆虫足部爪刺微观形态图^[31]

不仅如此，相同种类的爪刺也会由于尺寸的细微差异而产生不同的攀附效果。中国科学技术的刘彦伟对多种昆虫爪刺的尺寸进行了研究^[32]。多栖于树叶等光滑表面的金龟科昆虫和生活在树干上的蝉科昆虫均为双齿爪，但是金龟科昆虫拥有较大的爪长/体长比值，

而在蝉科昆虫身上这个比值要小得多,这可能是由于较细长的爪刺能够附着在更微小的粗糙部位,在光滑表面表现出更好的攀爬效果。而在金龟科内部,爪刺的尺寸与昆虫的体型也有一定关联。研究表明爪刺长度与昆虫身长大致呈正相关,而爪长/身长比值与身长呈负相关关系,这可能是因为爪刺长度增加有助于提高爪刺的攀爬效果,但是过长的爪刺强度较低,因此随着昆虫体型的增加,爪刺尺寸有限制地增大。

综上所述,为了攀爬粗糙壁面,昆虫进化出了形态各异的微刺结构,这些微刺通过与壁面粗糙位置形成机械锁合提供对身体的支撑力。一般情况下,足部的微刺越多攀爬能力越强。通过观察昆虫的爪刺尺寸,发现较长的微刺攀爬能力强,但是长微刺也面临强度不够的风险,需要加粗微刺来保证其可靠性,因此应当有所权衡地设置微刺的尺寸。对昆虫足部微刺的研究为接下来设计微刺攀爬足提供了一定依据。

2.2 微刺与粗糙斜面接触建模与分析

2.2.1 球面接触模型

南航戴振东教授^[33]在研究金龟科甲虫足端爪刺的基础上,提出了微刺与水平粗糙面接触的简化模型,如图 2.3 所示。该模型将微刺尖端和表面凸起简化成半径为 r 和 R 的球形截面,两截面以 α 的接触角进行接触, F 为微刺向后推动的力, W 为昆虫收到重力在该微刺的分力, N 为表面对微刺的法向支撑力, f 为接触面的摩擦系数, h 为球形粗糙点中心到表面的距离。通过建立受力平衡方程可分析微刺动力、微刺尖端尺寸和接触表面粗糙度之间的关系。

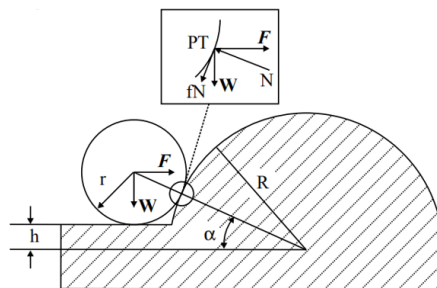


图 2.3 微刺与水平粗糙表面球面接触模型^[33]

受到水平地面的接触模型的启发,本章节提出了微刺与粗糙斜面接触的半球模型,假设微刺只受到机器人整体重力的分力作用,示意图和受力分析如图 2.4 所示。其中, α 为斜面倾斜角度; θ 为接触点法向与斜面垂线之间的夹角,即接触角; W 为重力在微刺尖端的分力; N 为斜面对微刺尖端的支持力; F_N 为粗糙点对微刺的法向支持力; F_f 为粗糙点与尖端之间的摩擦力。根据摩擦力的方向,可以将接触模型分为两种情况: (A) 摩擦力方向朝外,此时 $\theta > \alpha$; (B) 摩擦力方向朝内,此时 $\theta < \alpha$ 。

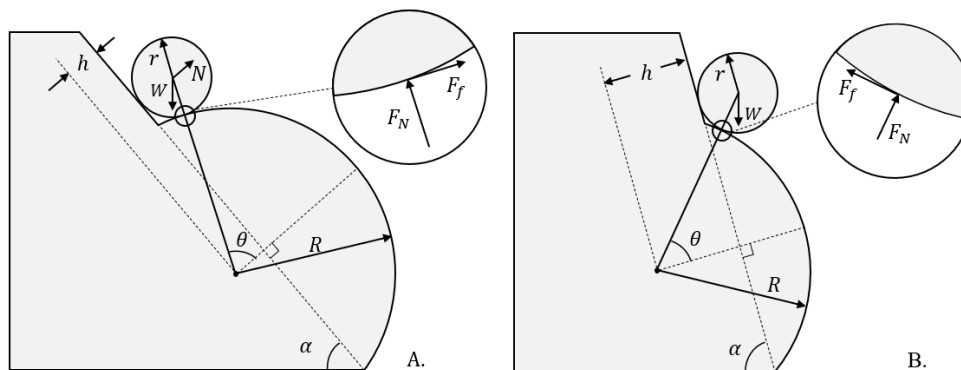


图 2.4 微刺与倾斜粗糙表面接触模型

2.2.2 抓附成功判别条件

对于情况(A)，根据受力平衡以及物理关系，可以得到：

$$W \sin \alpha = F_N \sin \theta - F_f \cos \theta \quad (2.1)$$

$$-W \cos \alpha + N = -F_N \cos \theta - F_f \sin \theta \quad (2.2)$$

$$F_f \leq \mu F_N \quad (2.3)$$

$$\theta > \alpha \quad (2.4)$$

此时，微刺尖端嵌入斜面与粗糙凸点组成的凹槽内，不具有向外滑动的趋势，因此可认为在这种情况下，只要壁面凸点不脱落，微刺一定能够稳定抓附于壁面。

对于情况(B)，根据受力平衡关系列得如下方程：

$$W \sin \alpha = F_N \sin \theta + F_f \cos \theta \quad (2.5)$$

$$-W \cos \alpha = -F_N \cos \theta + F_f \sin \theta \quad (2.6)$$

$$F_f \leq \mu F_N \quad (2.7)$$

$$\theta < \alpha \quad (2.8)$$

假设 μ' 使得下式成立：

$$F_f = \mu' F_N \quad (2.9)$$

则由公式(2.5)/(2.6)并消去 W 和 F_N 并化简，可得：

$$\tan \alpha = \frac{\tan \theta + \mu'}{1 - \mu' \tan \theta} \quad (2.10)$$

$$\tan(\alpha - \theta) = \mu' \leq \mu \quad (2.11)$$

也即：

$$\theta \geq \theta_{min} = \alpha - \arctan \mu \quad (2.12)$$

综合考虑情况(A)和(B)可知，若要使得微刺能够稳定攀附与避免粗糙部位，需要壁面粗糙点位法向量与斜坡垂线夹角 θ 满足式(2.12)，该式即是抓附成功判别条件。

2.2.3 抓附效果影响因素

在式(2.12)中， θ_{min} 是能够实现稳定抓附的最小接触角， θ_{min} 越小，则壁面上满足抓附成功判别条件的位置就越多，越有利于机器人的攀爬。

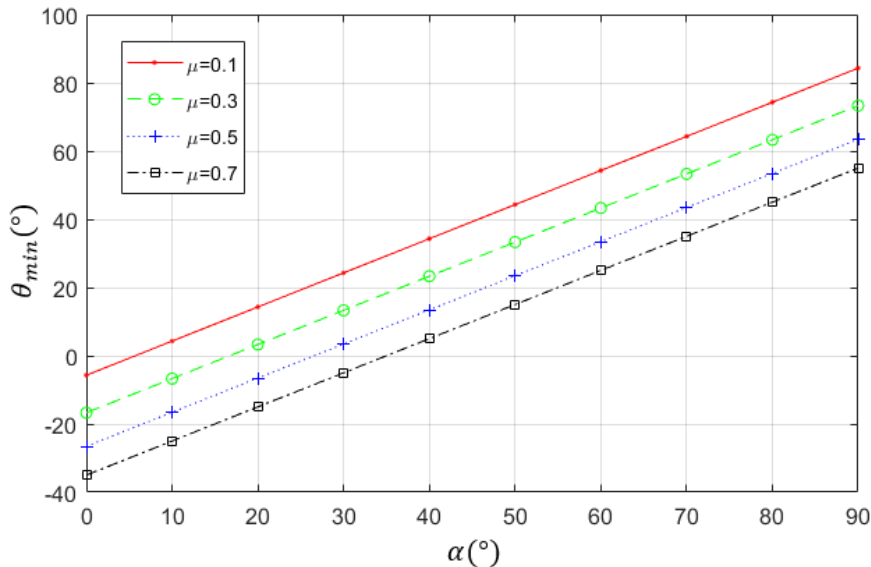


图 2.5 最小可抓附摩擦角度与坡度、摩擦因数的关系

θ_{min} 受到斜度 α 和粗糙度 μ 的共同影响,如图 2.5 所示,随着坡度的增大,最小接触角度也不断增大,说明在陡峭斜坡上更难实现稳定抓附,而增大摩擦因数可以减小最小接触角度,提高壁面的可抓附性。

接触角 θ 越大,越有利于形成稳定抓附,而接触角 θ 由微刺尖端半径 r 、粗糙点半径 R 和粗糙点圆心到表面距离 h 决定,满足公式(2.13)。如图(2.6)所示,接触角随微刺尖端无量纲半径 r/R 的增大而减小,随粗糙点位无量纲高度 $(R-h)/R$ 的增大而增大。

$$\cos \theta = \frac{r+h}{r+R} = 1 - \frac{(R-h)/R}{r/R+1} \quad (2.13)$$

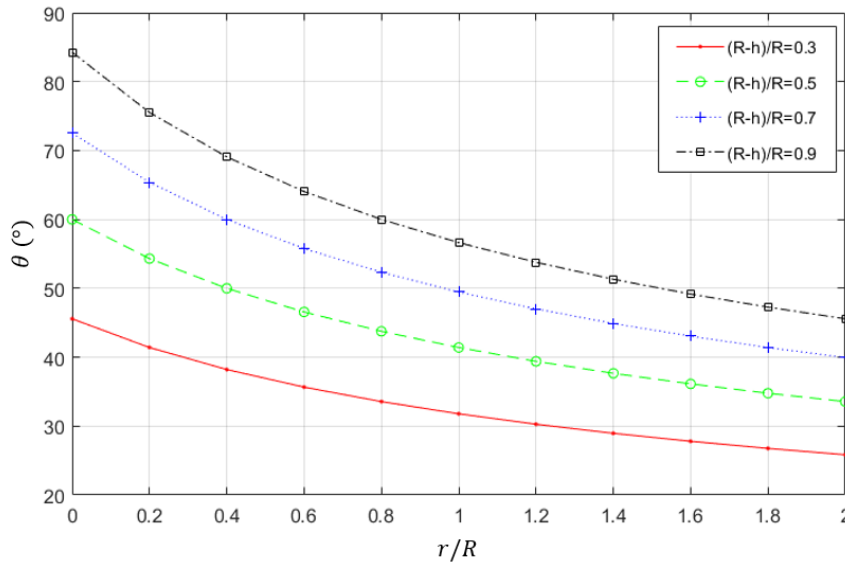


图 2.6 摩擦角与 r/R 、 $(R-h)/R$ 的关系

综上所述,通过建立微刺尖端与粗糙斜面接触模型,得出了成功抓附的判别条件。依据该条件,分析微刺和粗糙斜面参数对攀爬效果的影响,可以得到下列结论:

- (1) 斜面坡度 α 越小或者表面摩擦因数越大,则最小可抓附接触角 θ_{min} 越小,满足条件的粗糙点越多。
- (2) 斜面粗糙度越大,则粗糙点半径 R 和表面粗糙点高度 $(R-h)$ 较大,微刺容易实现稳定抓附。
- (3) 在斜面粗糙度一定时,微刺尖端半径 r 越小,则接触角 θ 越大,越有利于形成摩擦自锁。

2.3 粗糙表面特征与数值仿真

以上对于微刺与粗糙表面接触的建模分析只考虑了粗糙表面的单个粗糙点位的特征,而对微刺表面接触机理的研究,离不开对粗糙表面整体的分析。从微观角度考察粗糙表面,可以将粗糙表面看成由许多连续的波峰与波谷组成,单个波峰波谷统称为一个轮廓单元;从宏观上来看,所有的轮廓单元的尺寸参数符合一定的统计规律,由此可以定义一些统计量作为表达粗糙表面整体特征的特征参数。

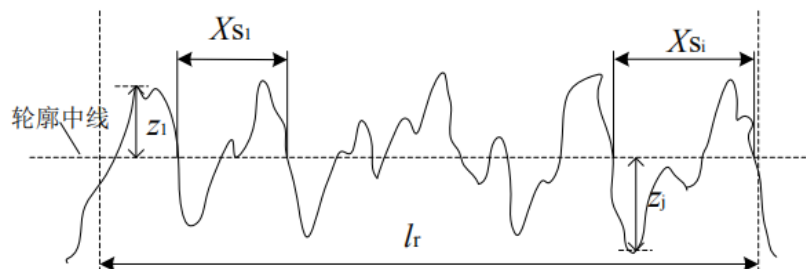


图 2.7 粗糙表面特征示意图^[34]

在 Alan T 等人的研究中^[18], 表面粗糙度 R_a 和表面单元平均间距 S_m 是表征粗糙表面特性的主要参数。 R_a 是波峰波谷偏离中心线的程度, 表示表面的平整程度; S_m 是相邻波峰波谷之间的平均距离, 表示粗糙点的密集程度。王贝的研究中^[34]给出了这两个参数的计算方法。如图 2.7 所示, l_r 是一段粗糙表面的二维截面, X_{Si} 表示第 i 个轮廓单元与下一个轮廓单元之间的间距, Z_j 表示第 j 个轮廓单元的峰值与中心线之间的距离。则表面粗糙度 R_a 和表面单元平均间距 S_m 可由下式得到:

$$R_a = \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n |Z_j| \quad (2.14)$$

$$S_m = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |X_{Si}| \quad (2.15)$$

为了研究连续粗糙表面与微刺的相互作用, 需要得到具有一定表面粗糙度和单元平均间距的粗糙表面数据。一种方法是直接使用激光扫描仪等仪器进行测量, 另一种手段是利用计算机进行数值仿真。已有研究表明^{[35], [36]}, 现实生活中的许多粗糙表面的高度都符合高斯分布的统计特性, 且粗糙表面的轮廓满足指数自相关函数关系。因此, 利用随机过程模型, 计算机可以方便快速地对粗糙表面进行数值模拟, 为粗糙表面光线散射、表面摩擦和润滑机理等研究提供参考数据。

线性滤波法是产生随机粗糙表面的常用算法, 该算法首先进行采样点的频域滤波, 接着使用逆傅里叶变换得到仿真高度值^{[37], [38]}。本文采用线性滤波算法模拟随机粗糙表面, 考虑机器人的实际工况为野外粗糙表面, 将表面参数设置为粗糙度 $R_a = 3\text{mm}$, 表面轮廓单元平均间距 $S_m = 10\text{mm}$, 使用计算机仿真结果如 2.8 所示, 生成的粗糙壁面数据是 2.5 小节微刺成功攀附概率计算的基础。

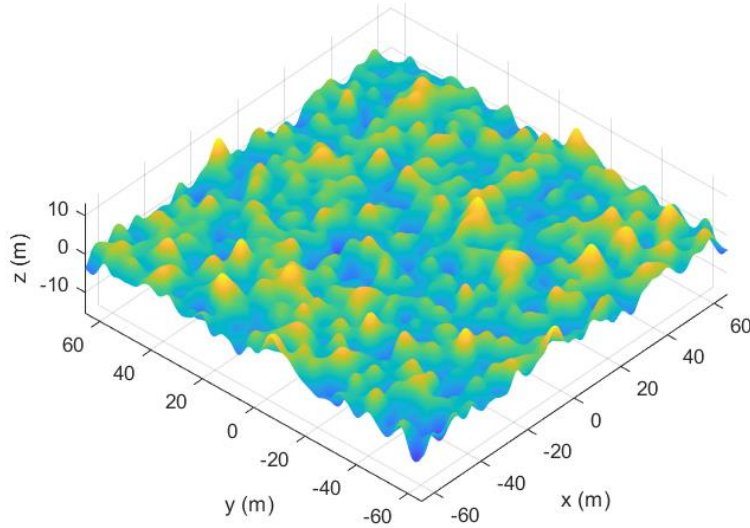


图 2.8 计算机模拟随机粗糙地面

2.4 微刺成功攀附概率计算

在昆虫的每一个足都有许多个微刺, 一般来说, 微刺数量越多, 昆虫的攀爬能力越强, 如 2.1 节中所述, 双齿爪和附齿爪比单齿爪能攀爬更光滑的表面。但是攀爬能力与微刺数量并不是严格的正比关系, 随着微刺数量的增加, 攀爬能力的增幅应该不断减小。这是由于足部承载力的直接因素并不是微刺数量, 而是成功攀附的微刺数量。

在一次攀附过程中, 昆虫的足部首先靠近壁面直至微刺与壁面接触, 然后足部向下滑动一段距离, 使得一些微刺钩住壁面上的凸起或嵌入凹坑以产生抓附力, 然而, 有许多微刺并不能在足部的滑动行程中抓到这样的抓附点, 因此这部分微刺无法提供抓附力。本文将抓附过程中成功抓附微刺数量占总微刺数量的比例定义为微刺成功攀附的概率 p , 该参数为 4.1 节估计一个多微刺足部抓附力的依据。

在微刺足参数和粗糙表面条件一定时, 多次抓附试验中 p_i 的平均数趋近于一固定值, 因

此可采用蒙特卡罗方法估计微刺成功攀附的概率真值。使用计算机模拟一次抓附过程，从上一节中得到随机粗糙表面上任取一个二维截面，假设微刺尖端从该段轮廓上滑过，由于微刺尖端具有一定半径，微刺无法与壁面上的每一个点接触，例如半径非常小的微坑，因此考虑使用微刺尖端球心的轨迹描述微刺的滑动过程。如图 2.9 所示的是随机取出的二维粗糙表面以及微刺尖端模拟滑过产生的球心轨迹。

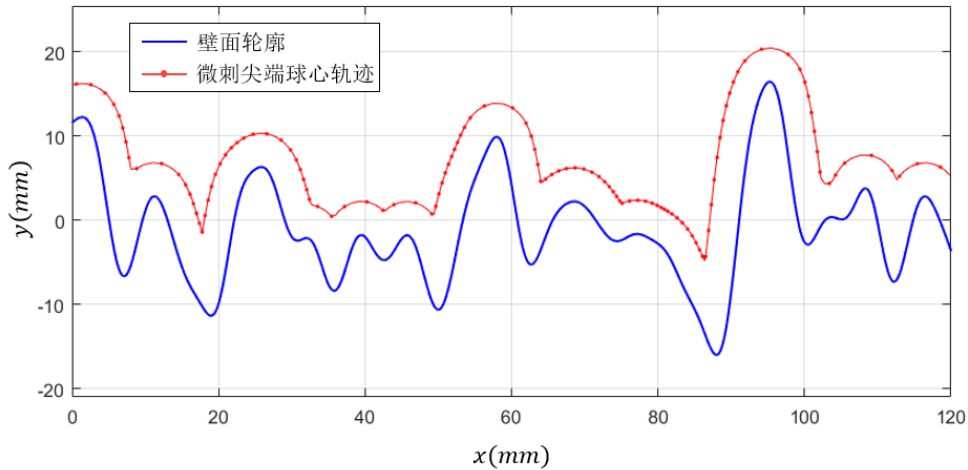


图 2.9 二维粗糙表面及微刺尖端球心轨迹

微刺尖端球心轨迹上每一个点的法向代表了微刺在该接触位置受到壁面的支持力 F_N 的方向，也即接触点法向。因此可以求出接触角 θ ，进而根据可抓附点判别公式(2.12)，判断该接触位置能否实现稳定抓附。找出球心轨迹上所有的可抓附位置，如图 2.10 所示，可抓附段长度占总长度的 7.09%。

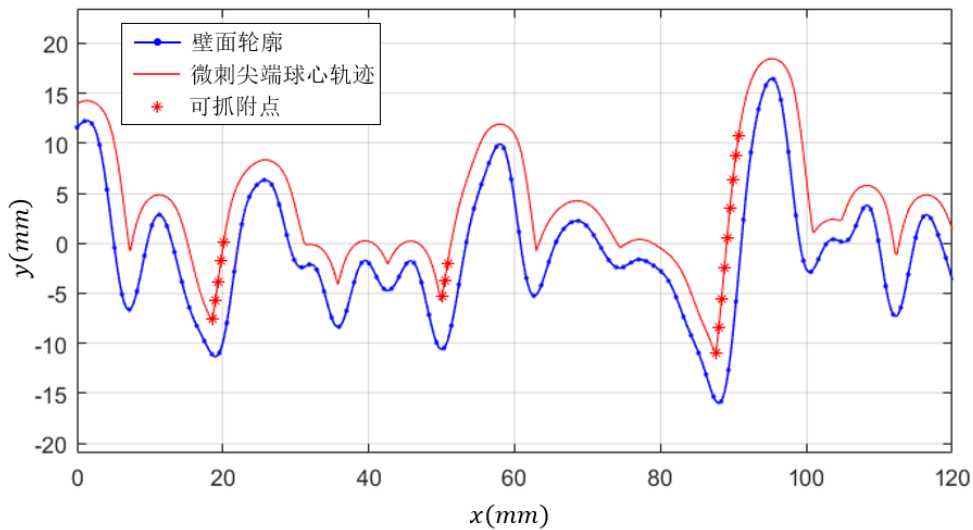


图 2.10 二维壁面可抓附点

假设微刺接触壁面的起始接触点满足均匀分布，并且在起始接触点后以准静态向下滑动一段距离，假设为 15mm，在这段距离中若包含可抓附点即判定微刺抓附成功。使用长度为 15mm 的滑动窗口遍历整段轨迹，统计成功抓附占总尝试次数的比例即为该段二维粗糙面的成功攀附概率 p_i ，多次随机采样取平均值即可得到成功攀附的概率 p ，本文取微刺尖端半径 $r = 0.25\text{mm}$ ，共进行了 100 采样试验，最终求得抓附成功概率为：

$$p = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n p_i = 52.0\% \quad (2.16)$$

2.5 本章小结

(1) 本章从仿生学角度出发,研究了昆虫足部微刺与粗糙表面的相互作用,分析了微刺数目、微刺尺寸对攀爬效果的影响,为攀爬足的设计提供依据。

(2) 提出了微刺斜面接触模型,通过分析受力平衡关系,得出抓附成功判别条件。并根据该模型,分析了斜面坡度、微刺尖端半径和壁面粗糙颗粒半径等因素对抓附效果的影响。

(3) 研究了粗糙表面的特征,并基于计算机仿真生成了随机的粗糙表面。

(4) 结合可抓附判别条件与仿真随机粗糙表面数据,估计了微刺在粗糙斜面上准静态滑动一段距离能够形成稳定抓附的概率,为平均载荷的计算奠定基础。

第三章 微刺攀爬足部机械设计

3.1 柔性微刺爪的设计与分析

3.1.1 昆虫足部柔性结构

对于可攀爬粗糙表面的昆虫，其足部末端一般都存在柔性跗节链^[39]，这种柔性跗节链由多个刚性的跗分节串联而成，每个跗分节之间由柔性薄膜连接，通过一根肌腱牵引末端跗分节使得跗节链向内弯曲，如图 3.1 所示，A 为大黄蜂跗节链的示意图，共有 5 节跗分节，B、C 为跗分节连接方式示意图，D、E 为末端爪刺连接方式示意图，F 展示了跗节链弯曲抓紧的动作。

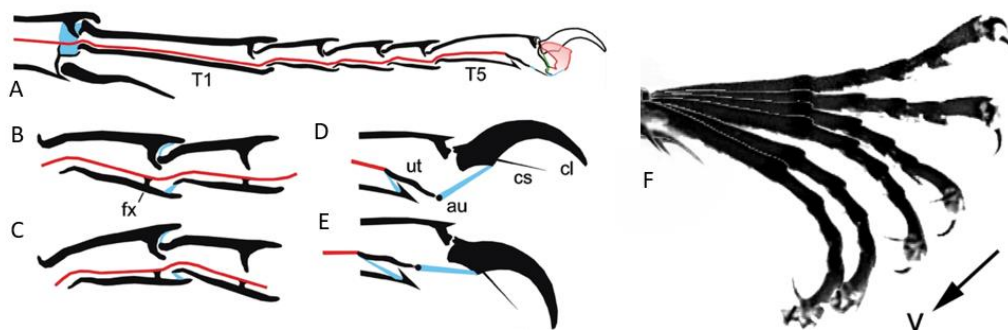


图 3.1 大黄蜂跗节链结构与抓附动作示意图^[40]

昆虫的柔性跗节链使得足部微刺可以贴紧各种复杂的表面。Gladun D 等^[40]研究了具有不同附着结构类型的四种昆虫在攀爬过程中接触形成和释放的整体运动学，发现柔性跗节链不仅可以使得昆虫足部抓紧平面，还可以变形贴合各种直径的植物茎杆，是昆虫适应复杂表面的关键。

3.1.2 柔性微刺爪结构设计

柔性微刺爪作为微刺的载体，是微刺能否充分发挥抓附作用的关键。从昆虫的柔性跗节链中得到启发，柔性微刺爪可以由若干刚性构件与柔性连接件组合而成。为了适应复杂多地形中攀爬的需求，对微刺爪提出了如下设计要求：

(1) 单个微刺爪体积小，易于阵列布置，如设计成薄片状，可通过并排层叠布置构成紧凑的微刺阵列，提高微刺的密度。

(2) 每个微刺爪上具有 1~2 个微刺，微刺固定在刚性构件上，固定微刺的刚性构件与微刺爪主框架之间通过柔性件连接，使得微刺在纵向具有较大的自由度，以便贴合起伏的表面。

(3) 固定微刺的刚性构件之间通过柔性件连接，保证微刺之间具有一定独立性，从而避免两个微刺相互干扰。当一个微刺成功抓附后，另一个微刺仍然具有活动空间，可以继续滑掠过粗糙表面寻找可抓附的部位。

(4) 刚性件和柔性件应当合理布局，使得尽可能多的微刺可与表面有效接触，载荷可以均匀分布在每一个微刺上，避免应力集中于某个微刺引起结构破坏。

根据以上设计要求，使用 SolidWorks 设计了柔性微刺爪模型，如图 3.2 所示。微刺爪整体呈薄片状，便于层叠布置，形成微刺阵列。该微刺爪包含三个刚性构件，分别是主框架、内侧爪趾和外侧爪趾，每个爪趾上都固定着一个微刺，爪趾和主框架之间以及爪趾之间都通过弹性连接件连接在一起，保证微刺具有一定的独立性。最左侧弹性件刚度较小，当一个微

刺爪的微刺钩住壁面粗糙点位后，微刺爪的主框架仍然可以随着弹性体的变形，移动一段距离，避免阻碍相邻微刺爪的运动。纵向弹性连接件较长，刚度较小，使得两个微刺在 y 方向上具有较大的柔度，可以更好地贴合起伏表面。

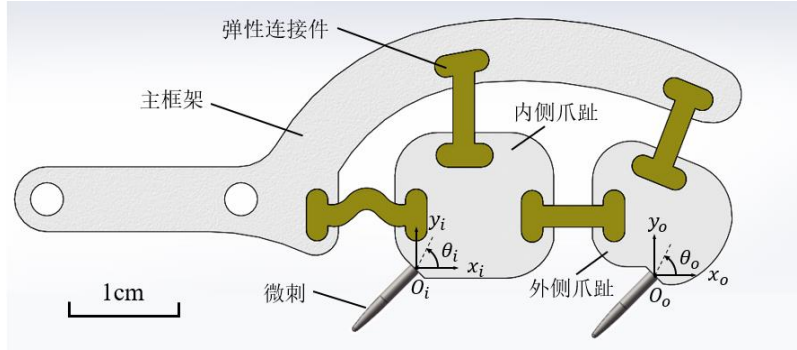


图 3.2 微刺爪设计

3.1.3 微刺爪柔度矩阵建模与分析

本文的微刺爪设计中，每个微刺爪包含了 2 根微刺，因此微刺的独立性将极大地影响攀爬效果。为了进一步改进微刺爪构件的布局，需要分析微刺与周围构件的耦合关系，然而这种耦合关系并不能用现有的物理量来描述。

考虑到微刺在受到力作用时的位移可以间接反映出周围构件对微刺的影响，因此本文提出使用 3 阶柔度矩阵对微刺的平移和旋转柔度建模，通过分析柔度矩阵对构件布局进行改进。柔度矩阵 C 具有如下的形式：

$$C = \begin{bmatrix} c_{xx} & c_{xy} & c_{x\theta} \\ c_{yx} & c_{yy} & c_{y\theta} \\ c_{\theta x} & c_{\theta y} & c_{\theta\theta} \end{bmatrix} \quad (3.1)$$

满足：

$$\begin{bmatrix} x \\ y \\ \theta \end{bmatrix} = C \begin{bmatrix} F_x \\ F_y \\ M \end{bmatrix} \quad (3.2)$$

对于一个在壁面上滑动寻找刺入点的微刺来说，要达到较好的抓附效果，其柔度矩阵应该具备如下特征：

(1) c_{yy} 应该较大，这样当爪趾按压在表面上时，微刺可以通过 y 方向运动来贴合起伏的表面而不会产生很大的法向力。但是 c_{yy} 不能太大，否则在微刺爪脱离时，微刺不能有效跟随爪的运动，导致不能有效地从壁面上脱离，甚至可能被卡在壁面的微坑中。

(2) c_{xx} 应该尽量大一点，因为大的柔度可以使得每个微刺在壁面上伸展的行程大一点，从而增加了每个微刺在下移过程中抓到粗糙点的可能性。若 c_{xx} 不够大，当爪外部的微刺钩住一个粗糙点时，同一个爪的另一个微刺的运动范围将受到限制，从而导致无法找到有效的抓附点。

(3) c_{yx} 应该尽量小一点，最好为负数，以保证在微刺在 x 方向的拉伸不会导致微刺在 $+y$ 方向的回缩。同时， $c_{\theta x}$ 、 $c_{\theta y}$ 也应该很小，最好略微为负，这样微刺在 x 和 y 方向的位移不会伴随在 xy 平面上的逆时针旋转，因为逆时针旋转可能会使得微刺过早脱离。

考虑到微刺爪的柔度难以通过实验测量，本文使用 Ansys 仿真测定了微刺根部位置，如图 3.2 中 O_i 、 O_o ，在 F_x 、 F_y 方向力和 z 方向力矩作用下的位移和旋转，以此来估计其柔度矩阵。经过多次改进，最终微刺爪的柔度矩阵如表 3.1 所示，基本符合了上述要求。

表 3.1 改进后微刺爪柔度矩阵

外部微刺:	内部微刺:
$\begin{bmatrix} 2.5360 & -0.3916 & 0.2379 \\ 0.1110 & 0.9794 & 0.0219 \\ 0.2179 & -0.0249 & 0.0314 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 1.6927 & -0.8961 & 0.1489 \\ -0.5525 & 1.2529 & -0.0878 \\ 0.1516 & -0.1355 & 0.0238 \end{bmatrix}$
单位:	柔度矩阵:
$\begin{bmatrix} \text{mm/N} & \text{mm/N} & \text{mm/Nmm} \\ \text{mm/N} & \text{mm/N} & \text{mm/Nmm} \\ \text{rad/N} & \text{rad/N} & \text{rad/Nmm} \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} c_{xx} & c_{xy} & c_{x\theta} \\ c_{yx} & c_{yy} & c_{y\theta} \\ c_{\theta x} & c_{\theta y} & c_{\theta\theta} \end{bmatrix}$

3.2 驱动机构设计

3.2.1 微刺运动轨迹分析

微刺攀爬足在四足机器人攀爬陡坡的过程中提供必要的附着力,是拓展智能行走小车适用环境的关键部分。如第 2 章所述,微刺攀爬足式一种仿生机构,起到类似于猫爪或带有倒刺的昆虫足部的作用。通过观察这些动物足的抓附动作,可以将微刺攀爬足抓附粗糙表面的过程大致划分成三个阶段:

(1) 落足阶段:微刺攀爬足在整个腿部的带动下以平行于壁面的姿态靠近壁面,直到足跟接触地面并为机器人整体提供一定的支撑力。

(2) 抓附阶段:带有微刺的爪收紧,微刺先从悬浮状态以近似垂直于壁面的轨迹下落直至接触壁面。然后微刺继续沿着平行于壁面的轨迹滑动,由于表面起伏不定,柔性连接件会产生形变使微刺不断调整角度和位置,寻找可抓附点,在可抓附的微坑或凸起处形成锁定,为攀爬足提供抓附力。

(3) 脱附阶段:微刺爪沿着原轨迹抬起,之前锁定的微刺解锁脱附,此时微刺攀爬足可以整体抬起以执行下一步运动。

综上所述,微刺攀爬足包含固定的足跟部分以及可活动的微刺爪,其中足跟为固定部分,负责产生支持力;微刺爪为活动部件,用于产生抓附力。微刺爪上固定有多个微刺,其预期的运动轨迹应该使得微刺先垂直接触壁面,再沿壁面滑行一段距离。

3.2.2 连杆驱动机构设计

微刺攀爬足作为四足行走机器人的足部组件,应当具备体积紧凑、结构简单、稳定性好的特点,因此其驱动机构也应当符合上述要求。

四连杆机构在各种机械中应用十分广泛,它结构简单、易于制造。此外,四连杆机构运动时,连杆上的点将描绘复杂的封闭曲线,称为连杆曲线^[41],连杆曲线的形式随着点的移动和杆长变化而变化,连杆曲线的多样性使得四连杆机构能够用于实现各种运动轨迹。因此,四连杆机构适合作为微刺攀爬足的驱动机构。

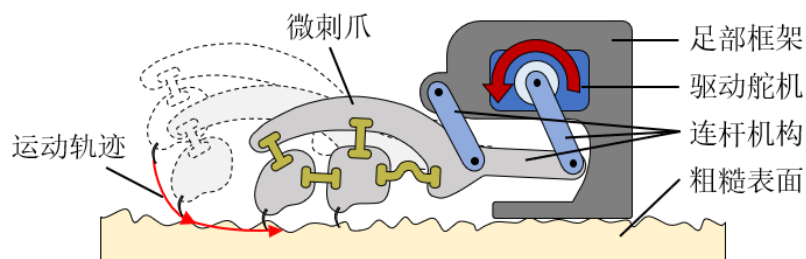


图 3.3 四连杆机构实现微刺运动轨迹示意图

本节利用四连杆机构实现 3.2.1 小节中叙述的微刺运动轨迹，如图 3.3 所示，两根摇杆一端连接在足部框架上，另一端与微刺爪的柄相连。足部框架上固定有一驱动舵机，驱动器的带动使得微刺爪由张开逐渐抓紧。在这个过程中，外侧微刺沿着如图红线所示的轨迹运动，首先从悬空状态贴紧壁面，然后沿着壁面向下滑动一段距离，寻找可以抓附的粗糙位置。这种运动轨迹使得微刺在壁面具有较长的滑动距离，可以增大微刺成功找到抓附点的可能性，从而提高微刺攀爬足的整体抓附力。

3.2.3 弹性传动机构设计

当微刺爪抓紧时，微刺沿着一定轨迹运动，直至触碰到硬质可抓附点而停止运动。相对应的，驱动舵机一开始为空载状态，然后随着多个微刺抓附成功，受到越来越大的阻力而停止转动。如果从空载运动到停止的过程在很短的时间内完成，那么驱动器和连杆机构可能受到一个很大的冲击载荷，从而大大影响整体的使用寿命。

为了减小微刺爪在抓附过程的冲击载荷，考虑将舵机与驱动摇杆之间的传动方式改为弹性传动。如图 3.4-a 所示为弹性传动结构的爆炸视图，3.4-b 为其局部剖视图。从图中可以看出，弹性传动机构由舵机架、扭簧和驱动摇杆组成。其中舵机架与舵机输出端直接相连，舵机架与驱动摇杆之间通过扭簧传动。当微刺爪接触地面阻力增大时，扭簧会逐步屈服，舵机承受的载荷缓慢增大，直到舵机停止转动。这种设计在保证足够抓附力的前提下，延长了驱动机构从空载到满载的时长，避免了结构件因为突然增大的阻力而折断。

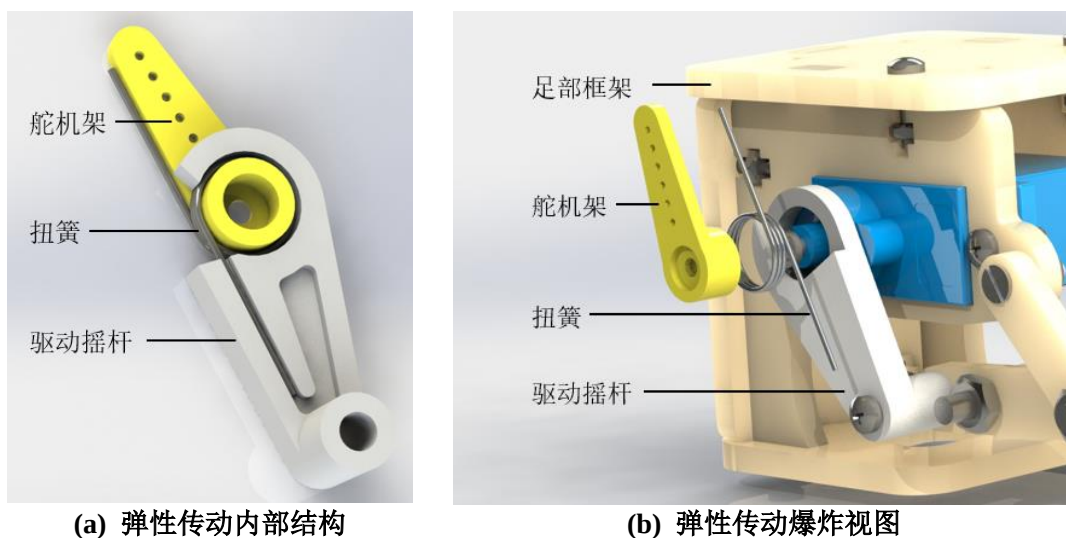


图 3.4 弹性传动机构

3.3 整体设计

微刺攀爬足的整体设计如图 3.5 所示。总体上，微刺攀爬足形如动物的爪子，由足部框架、驱动机构以及微刺爪阵列组成。

足部框架预留了用于固定在四足移动机器人足部的接口，是微刺攀爬足的固定部分。框架底部类似动物的足跟，在爬行迈步时首先着地，起到支撑机器人重量的作用。框架的所有构件均为简单板件，可以方便地使用亚克力板切割制造。

连杆驱动机构以足部框架为支点，一边连接微刺爪阵列，是微刺攀爬足的活动部分。这部分在舵机的驱动下，可实现微刺爪抓附和释放的动作。舵机输出的力矩首先传入弹性传动机构，再输入到微刺爪阵列中，有效地减少了冲击载荷对机构寿命的影响。微刺爪阵列由多个微刺爪用两根限位轴串联堆叠在一起，可以根据实际攀爬抓附力的需求，通过调整框架宽度来增减微刺爪的数量。连杆部分可以使用亚克力板切割制造；微刺爪的构件和驱动摇杆由于形状较为复杂，考虑使用 3D 打印技术制造。

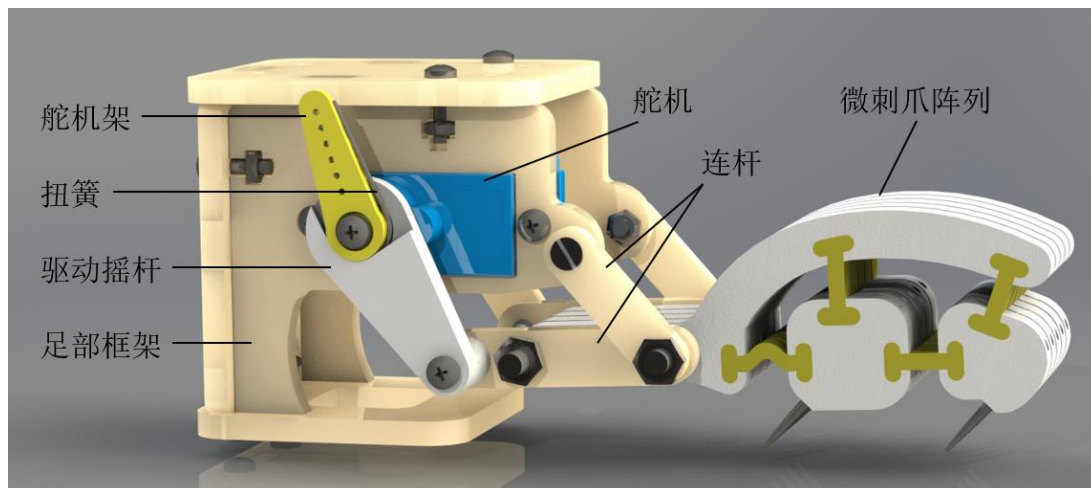


图 3.5 微刺攀爬足整体设计

3.4 本章小结

(1) 基于对自然界中昆虫足部柔性结构的观察，论证柔性对攀爬爪的重要性。提出了柔性微刺爪的刚柔复合设计方案，接着使用柔度矩阵对微刺进行了建模，通过调整柔度矩阵，对初步设计中的微刺爪构型进行改进。

(2) 分析了微刺攀爬足攀爬过程，将其分为落足、抓附、脱附三个阶段。进一步分析得出抓附和脱附阶段微刺爪的运动轨迹，基于此设计了四连杆驱动机构实现该轨迹，并通过加入弹性传动机构降低冲击载荷对结构寿命的影响。

(3) 完成了微刺攀爬足的整体设计，将其分为足部框架、驱动机构和微刺爪阵列三个部分，介绍了各个部分的功能和加工方案。

第四章 微刺攀爬足部分分析与校核

4.1 微刺平均载荷分析

作为直接与壁面接触提供抓附力的零件,微刺的性能是否满足载荷要求是需要重点关注的问题。机器人在攀爬陡峭岩壁时,微刺攀爬足与壁面的相互作用力可如图 4.1 分析。从微刺攀爬足受力图 A 可以看出,足部通过足跟与地面的直接接触抵消重力在垂直于岩壁方向的分力,通过微刺爪的抓附力与脚后跟的摩擦力抵消重力沿着壁面的分力。局部视图 B 示意了单个微刺受到壁面的作用情况,微刺尖端受到壁面的法向支持力 F_N 以及沿接触点切线方向的摩擦力 F_f ,这两个力的合力 F 抵消重力沿斜面的方向的分力。蓝色粗线标记了微刺可抓附成功的位置,这些点位表面法向量与斜面垂线之间的夹角 θ 满足 2.2 节中推导出的微刺成功抓附判别条件,因此可与微刺形成摩擦自锁。

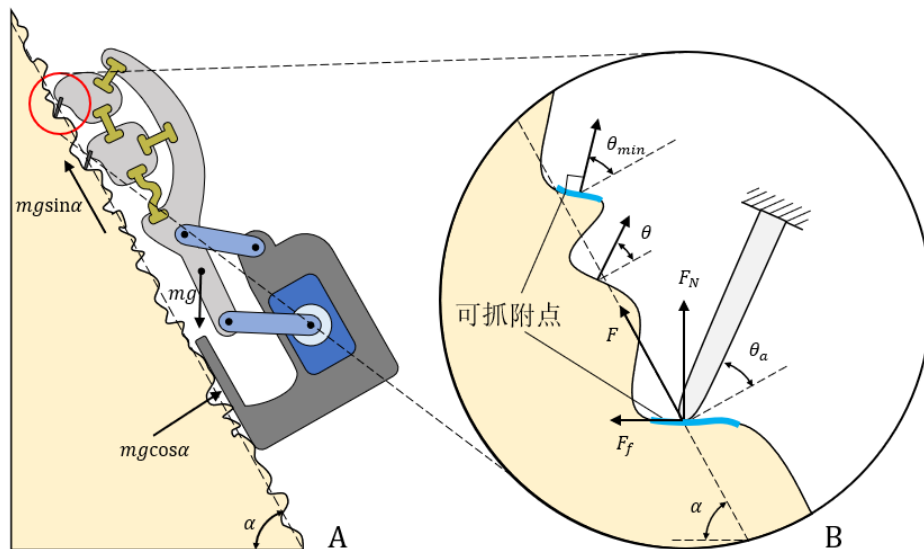


图 4.1 微刺攀爬足爬壁分析示意图

若忽略足跟部分受到的摩擦力,则每根微刺的平均载荷可由式 4.1 估计:

$$F = \frac{mgsina}{np} \quad (4.1)$$

其中:

- m —— 小车总质量;
- α —— 陡坡坡度;
- n —— 微刺总数;
- p —— 微刺抓附成功的概率。

公式(4.1)中的小车总质量、微刺总数和陡坡坡度都可以方便地测量得到,而微刺抓附成功的概率 p 在 2.4 节中已经通过统计学方法估算得到,约为 52.0%。假设陡坡坡度 $\alpha = 65^\circ$,则微刺平均载荷力为小车质量 m 和微刺总数 n 的函数。图 4.2 表明了微刺平均载荷 F 随 m 、 n 变化的规律,质量 m 越大,微刺数 n 越小,则 F 越大。因此,若想要降低微刺的载荷,可以考虑增加微刺总数或者减轻小车的重量。

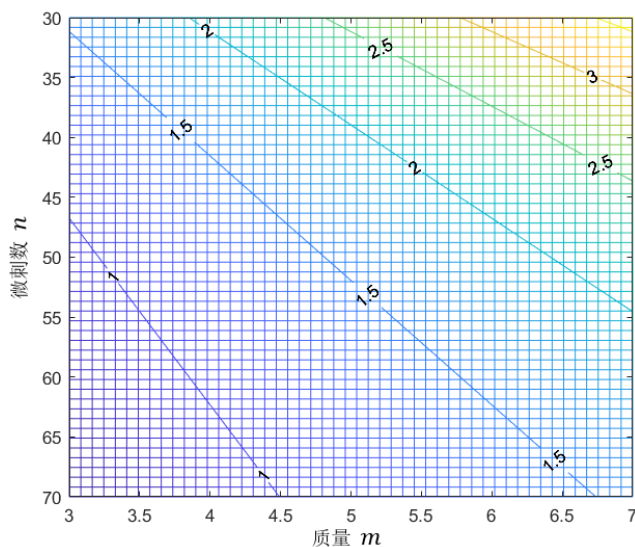


图 4.2 微刺平均载荷 F 随 m 、 n 变化的规律

根据本文第五章中四足机器人的设计参数，每只微刺攀爬足有 10 根微刺，考虑到同时只会有三只足着地，所以取 $n=30$ ， $m=3.122\text{kg}$ ，在这种情况下，根据式(4.1)计算得到微刺的平均载荷为 $F=1.78\text{N}$ 。该估计值将作为微刺校核的依据。

4.2 微刺的理论校核

4.2.1 微刺的三种失效情况

在载荷过大时，微刺与粗糙壁面形成的机械锁定有可能发生失效。具体而言，造成接触失效的原因有三种：

- (1) 微刺强度不足，根部弯曲应力过大而破坏失效；
- (2) 微刺刚度不足，尖端弯曲变形过大而导致脱附；
- (3) 微刺抓附的壁面微凸体受到外力过大发生结构性脱落。

在突出的粗糙位置，容易发生第 3 种失效，而凹陷的粗糙位置容易发生第 1、2 两种失效。为了分析微刺与壁面接触失效的三种原因，单独对微刺进行受力分析，结果如图 4.3 所示。

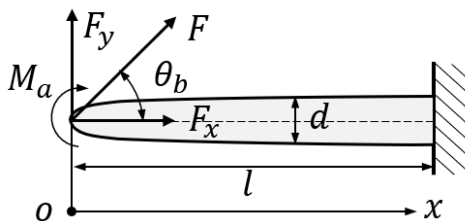


图 4.3 微刺受力分析图

其中：

- F —— 微刺尖端受到的外力，假设为 2N ；
- F_x —— F 在 x 方向的分力；
- F_y —— F 在 y 方向的分力；
- θ_b —— F 与 x 轴的夹角，满足 $\theta_b = 90^\circ - \theta_a$ ， θ_a 为微刺方向角；
- l —— 微刺长度，本文的设计取 8mm ；
- d —— 微刺直径，本文的设计取 1mm ；
- M_a —— 应用卡式定理添加的假象力矩。

4.2.2 微刺的强度校核

微刺根部发生弯曲应力失效是因为强度不够。本模型中的微刺可以看作一个悬臂梁，其处于同时受到横向力和轴向力的压弯组合变形状态，最大应力发生在根部距离中性轴最远的点上。可以根据材料力学中的叠加原理，分别求出压应力和弯曲应力的值，然后求和计算出最大应力，具体公式如下：

$$\sigma_{max} = \frac{F_y l y_{max}}{I_z} + \frac{F_x}{A} = \frac{32Fl \sin \theta_b}{\pi d^3} + \frac{4F \cos \theta_b}{\pi d^2} \quad (4.2)$$

其中：

- y_{max} —— 中性轴与梁边缘的距离， $y_{max} = \frac{d}{2}$ ；
 I_z —— 梁截面的惯性矩，对于圆形截面， $I_z = \frac{\pi d^4}{64}$ ；
 A —— 梁的截面积。

将该式应用在本文的模型上，可以求得弯曲应力的最大值，如式(4.3)。求得的最大应力为 117.04MPa，远小于结构钢的许用应力 235MPa，说明钢制微刺的强度符合使用需求。

$$\sigma_{max} = \frac{32Fl \sin \theta_b}{\pi d^3} + \frac{4F \cos \theta_b}{\pi d^2} = 117.04 \text{ MPa} < [\sigma] \quad (4.3)$$

4.2.3 微刺的刚度校核

微刺壁面接触的第二种失效情况是微刺末端刚度不够，导致发生过度的弯曲变形而脱附。材料力学中的卡氏定理可用于计算这种情况下梁的弯曲和转动变形。为了求解末端的转角 β ，在末端施加一个假象力矩 M_a 。由此可得梁上力矩的分布以及力矩分布对 M_a 的偏导数：

$$M(x) = M_a + xF_y \quad (4.4)$$

写出悬臂梁的应变能为：

$$U = \int_0^l \frac{F_x^2}{2E_s A} dx + \int_0^l \frac{M^2(x)}{2E_s I_z} dx \quad (4.5)$$

根据卡氏第二定理，弹性杆件的应变能 U 对某一广义力求偏导，则该偏导等于弹性杆件在这一广义力下的位移。因此，对将应变能 U 对 M_a 求偏导，即为微刺的末端转角：

$$\beta = \frac{\partial U}{\partial M_a} = \int_0^l \frac{F_x}{E_s A} \frac{\partial F_x}{\partial M_a} dx + \int_0^l \frac{M(x)}{E_s I_z} \frac{\partial M(x)}{\partial M_a} dx = \frac{F_y l^2}{2E_s I_z} \quad (4.6)$$

同理可求微刺的末端挠度：

$$U = \int_0^l \frac{F_x^2}{2E_s A} dx + \int_0^l \frac{(xF_y)^2}{2E_s I_z} dx = \int_0^l \frac{(F_y \tan \theta_a)^2}{2E_s A} dx + \int_0^l \frac{(xF_y)^2}{2E_s I_z} dx \quad (4.7)$$

$$y_s = \frac{\partial U}{\partial F_y} = \int_0^l \frac{F_y \tan^2 \theta_a}{E_s A} dx + \int_0^l \frac{x^2 F_y}{E_s I_z} dx = \frac{F_y l \tan^2 \theta_a}{E_s A} + \frac{F_y l^3}{3E_s I_z} \quad (4.8)$$

将本文的微刺参数代入式(4.6)，(4.8)，可以求得末端转角和末端挠度的理论计算值：

$$\beta = \frac{F_y l^2}{2E_s I_z} = \frac{32Fl^2 \sin \theta_b}{E_s \pi d^4} = 0.0046 \text{ rad} = 0.2636^\circ \quad (4.9)$$

$$y_s = \frac{F_y l \tan^2 \theta_a}{E_s A} + \frac{F_y l^3}{3E_s I_z} = 2.4657 \times 10^{-2} \text{ mm} \quad (4.10)$$

从理论计算结果可以看出，不管是末端挠度还是末端转角，数量级都非常小，说明本文设计的微刺爪在正常载荷下，微刺变形量微乎其微，并不会导致过度的弯曲变形。事实上，由于微刺爪各个构件之间使用柔软的有机材料连接，攀爬时总是弹性连接件优先发生形变，而且弹性连接件变形导致的微刺末端偏转角度比微刺本身变形产生的转角要大得多。因此，比起微刺的形变，弹性件的过度形变才是导致这一类脱附的主要因素，而后者，在 3.1.3 小节中已经用柔度矩阵建模的方法进行了分析与改进。

4.2.4 粗糙点的脱落失效

微刺与粗糙表面形成的机械锁定不仅会由于微刺的破坏或形变而分离，同时也会由于粗糙表面性质的突变而失效。这类突变通常是壁面微凸体因承受不住微刺施加的力而发生松动

或者脱落。有关混凝土材料表面的接触损伤和破坏，或具有较弱基质和硬质晶体的岩石的破坏的文献一般从赫兹应力分布开始讨论。赫兹应力分布指出，两球体相互挤压接触时，最大的压应力位于接触中心处，可表示为：

$$p_{max} = \frac{3F_N}{2\pi c^2} = \left(\frac{6F_N E^2}{\pi^3 R^2} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (4.11)$$

其中：

$$c = \left(\frac{3F_N R}{4E} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (4.12)$$

$$\frac{1}{E} = \frac{1-\nu_s^2}{E_s} + \frac{1-\nu_a^2}{E_a} \quad (4.13)$$

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{r_s} - \frac{1}{r_a} \quad (4.14)$$

字母下标 s 与 a 分别代表尖钩末端与微凸体，各符号的含义如下：

- $\nu_{s/a}$ —— 每种材料的泊松比；
- $E_{s/a}$ —— 每种材料的弹性模量；
- $r_{s/a}$ —— 尖端半径和壁面凹坑半径；
- c —— 接触面的半径；
- F_N —— 施加在接触点的法向力。

在微刺尖端半径一定，且岩壁为花岗岩的条件下，利用此式可以得到 p_{max} 和表面凹坑半径 r_a 的关系，如图 4.4 所示。

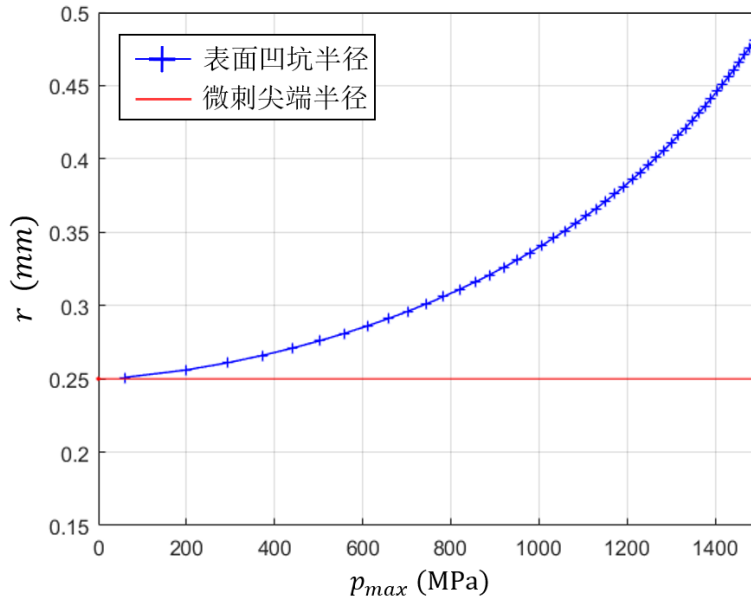


图 4.4 表面最大压应力与凹坑半径的关系

当凹坑半径远大于尖钩半径时，如 0.5mm，则壁面最大压应力会达到 1500MPa，远远超过花岗岩的抗压强度 200MPa~300MPa，因此花岗岩表面会被破坏，微刺尖端刺入壁面形成半径更小的凹坑，而应力值也逐渐降低到低于花岗岩的抗压强度，最终形成稳定接触。

在突出的粗糙位置，还可能会因为剪切应力过大而使得凸起的粗糙点脱落。花岗岩的抗剪强度 τ 大概为 18MPa~27MPa。若横向载荷 F 为 2N，则要保证粗糙点不发生剪切破坏，凸起粗糙点的最小半径可由式 4.15 计算得到，根据模拟得到的粗糙壁面，绝大多数凸起粗糙点半径大于该值，因而对于花岗岩壁面，发生剪切失效的概率很小。

$$r_{min} = \sqrt{\frac{F}{\pi\tau}} = 0.188mm \quad (4.15)$$

4.3 微刺失效情况的 Ansys 仿真

有限元仿真是机械设计过程中对关键构件进行强度、刚度校核的重要手段，它的原理是使用许多简单而又相互作用的单元去近似真实世界中的物体，这样就可以将具有无限未知量的真实系统用有限数量的参数来进行逼近，将无法求解的复杂实际问题转换成可以求解的线性代数问题。

在上一节中，已经对微刺的失效情况进行了理论计算分析，本节将进一步使用有限元仿真的方式，再次对微刺壁面接触时的应力应变等情况进行分析，并与理论计算结果相互对照，验证微刺在实际工况下的可靠性。

首先使用 SolidWorks 进行单个微刺与粗糙壁面接触模型的建模，可以根据实际要求对模型进行简化，如图 4.5-a 所示，将粗糙壁面简化为一个微凸体，而微刺仅考虑从爪趾延伸出的部分。接着将三维模型导入 Ansys Workbench 中进行仿真的前处理工作。第一步是设置微刺和微凸体的材料属性，将微刺设置为结构钢，微凸体设置为花岗岩，其材料的详细属性如表 4.1 所示。

表 4.1 微刺壁面接触模型材料属性

名称	密度[kg/m ³]	杨氏模量[MPa]	泊松比	屈服强度[MPa]	抗拉强度[MPa]
结构钢	7850	2×10^5	0.3	250	460
花岗岩	2900	5.92×10^4	0.197	13.6	13.6

第二步是划分网格，有限元模型网格的质量将决定仿真结果的精度和计算规模的大小。由于接触位置应力较为复杂，为了得到更为准确的结果，将接触表面的网格尺寸设置得较小，并且将网格过渡选项 Transition 设置为 Slow 使得网格尺寸变化更加平缓。划分网格时采用四面体网格，最终的绘制结果如图 4.5-b 所示。

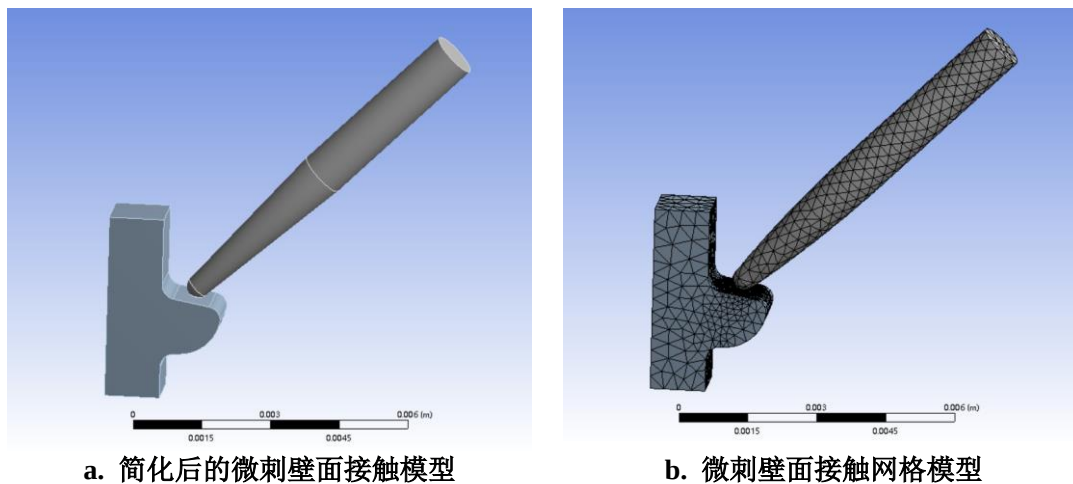


图 4.5 微刺壁面接触 Ansys 仿真模型

第三步是施加载荷。由之前的分析可得，微刺的平均载荷的上限值大约为 1.78N，考虑在仿真软件中模拟载荷为 2N 的情况。首先为微凸体添加固定约束，同时约束微刺根部的转动自由度，然后在微刺顶端施加竖直向下的载荷力，模拟微刺固定于爪趾上，并随爪子向下运动接触微凸体的过程。

最后进行模型的求解，求解结果如图 4.6 所示，图 a 为应力云图，从图中可以看出，微刺的应力分布基本与悬臂梁假设一致，应力大致在中性线两侧呈对称分布，最大应力值出现在微刺根部最外侧，大小为 110.10MPa。图 b 为总变形云图，可以看出，微刺尖端由于受到

微凸体阻碍而位移量最小，微刺根部位移量最大，为 $2.511 \times 10^{-2} \text{mm}$ 。图 c 为应变云图，应变分布与应力云图类似，最大应变为 1.55×10^{-3} 。图 d 为微刺的挠曲线，从中提取出数据进行后处理分析，可以得到微刺末端的转角为 0.2696° ，挠度为 $2.4736 \times 10^{-2} \text{mm}$ 。仿真结果与理论计算结果的比较如表 4.2 所示，理论计算结果与仿真结果较为接近，验证了理论分析的正确性，进一步说明微刺的性能符合使用要求。

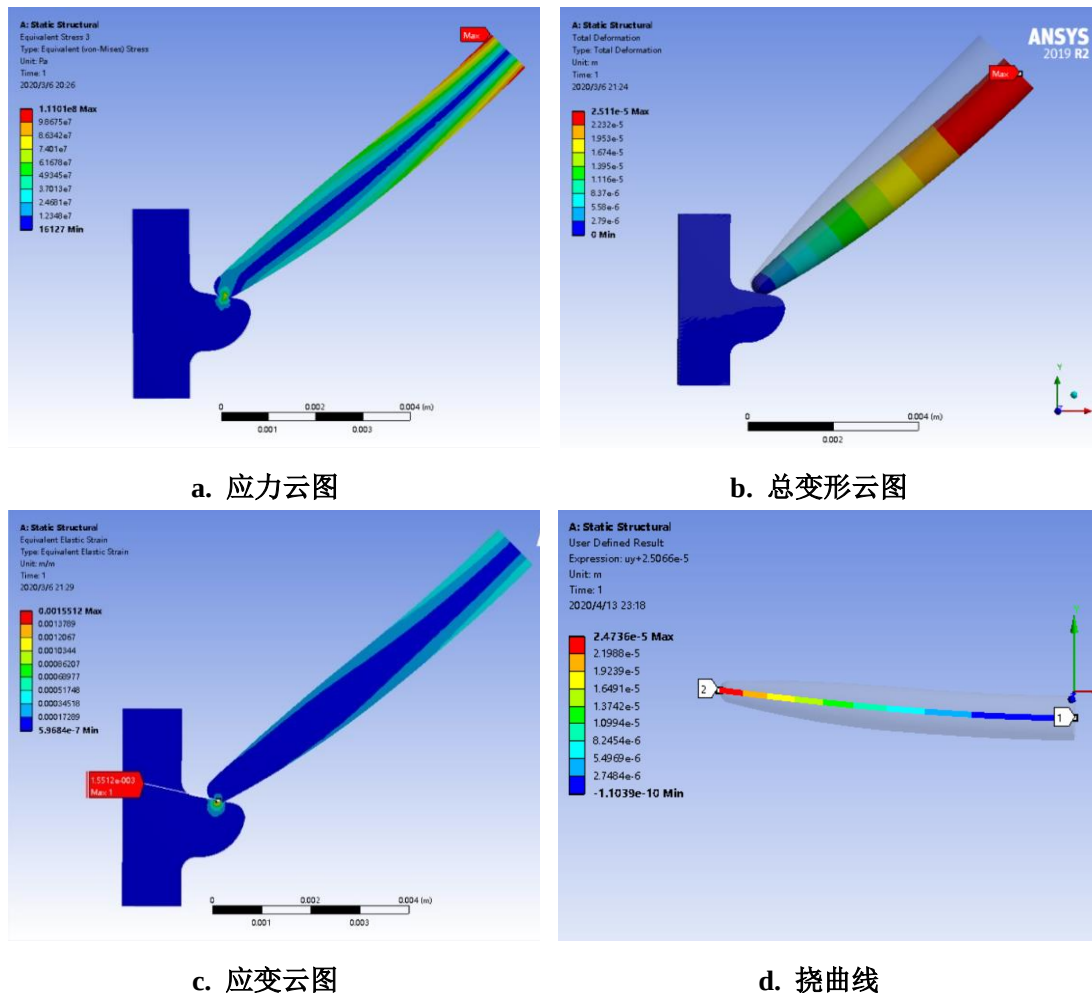


图 4.6 微刺壁面接触 Ansys 仿真结果

表 4.2 微刺爪理论分析结果与仿真结果对比

名称	理论结果	仿真结果	绝对误差	相对误差[%]
最大应力[MPa]	117.04	111.10	5.94	5.1
末端转角[°]	0.2636	0.2696	0.0060	2.3
末端挠度[μm]	24.657	24.736	0.079	0.3

4.4 本章小结

(1) 本章首先分析了微刺攀爬足在攀爬斜面时的整体受力，在 2.4 节微刺抓附成功概率结论的基础上，推导了单个微刺受到平均载荷的计算公式，分析了降低载荷的策略，并根据四足机器人真实参数估计了微刺的平均载荷。

(2) 分析了微刺壁面锁定失效的三种情况，使用材料力学的理论分析了微刺在正常工况下的最大应力、最大末端挠度和转角，完成了微刺的强度和刚度校核，分析了壁面粗糙点位破坏的可能性。

(3) 使用有限元方法对微刺壁面接触模型进行了静力学仿真，得出了微刺在正常工况下的应力、挠度、转角的分布，仿真结果与理论计算结果相吻合，验证了理论计算结果和微刺攀爬足正常使用的可靠性。

第五章 微刺攀爬足部制作与实验测试

5.1 微刺攀爬足部制作

微刺攀爬足的整体制造工艺流程如图 5.1。足跟框架的作用是提供支撑力，并且作为驱动器以及连杆的固定支点。框架的零件由亚克力板通过激光切割得到，每块板材之间通过榫卯以及螺栓固定。如图 5.2 所示为足跟框架实物图。

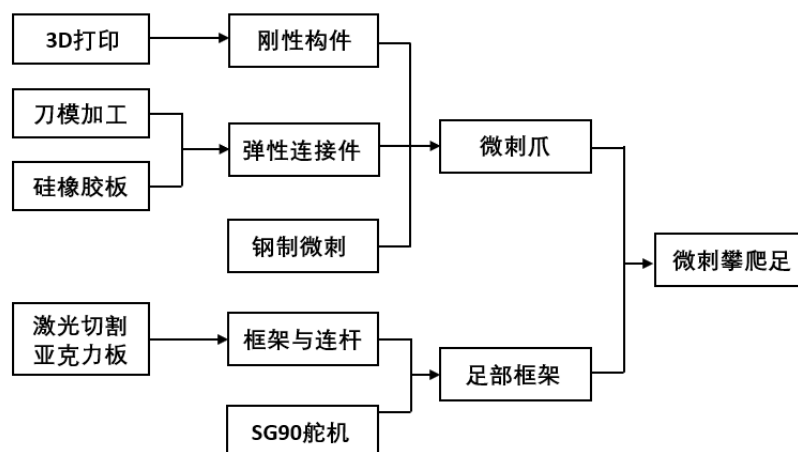


图 5.1 微刺攀爬足部加工工艺流程

微刺爪类似动物爪，是由多个刚性部分、柔性部分以及微刺组成的。对于这种混合材料的零件，斯坦福大学改进了形状沉积制造技术（SDM），使其可将硬质材料和软质材料一体成型^[42]。这可以加工出精细的刚柔混合结构，但对工艺的要求很高。为了使微刺爪易于加工，本文将刚性部分和柔性部分分别加工，然后进行拼装。其中，刚性构件形状较为复杂，且需要预留出微刺孔，所以采用 3D 打印技术制造；弹性连接件需要具有一定弹性，采用雕刻刀模从硅橡胶板上冲压得到；最后将钢制微刺嵌入爪趾的孔中。微刺爪实物如图 5.3 所示。

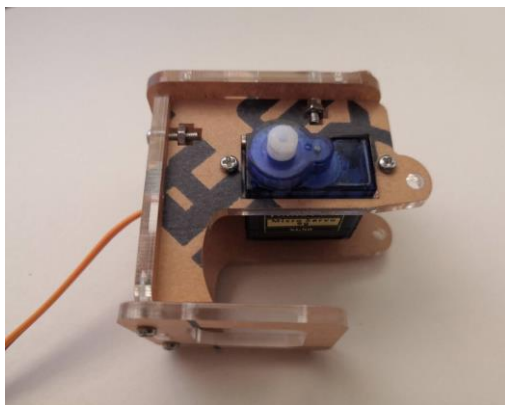


图 5.2 足部框架实物图

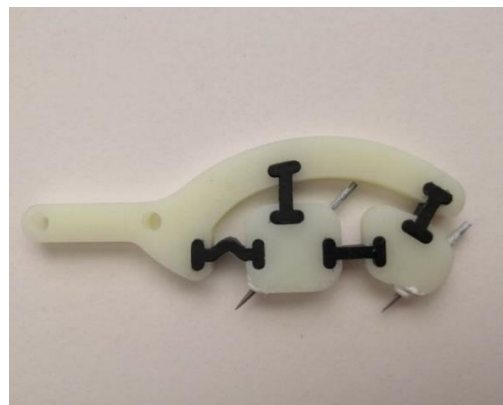


图 5.3 微刺爪实物图

驱动机构为四连杆机构，且舵机架与摇杆之间采用弹性传动。如图 5.4，驱动摇杆需要留有内嵌扭簧的凹槽，整体形状较为复杂，考虑使用 3D 打印加工，其余连杆采用亚克力板切割加工。



图 5.4 弹性传动机构实物图

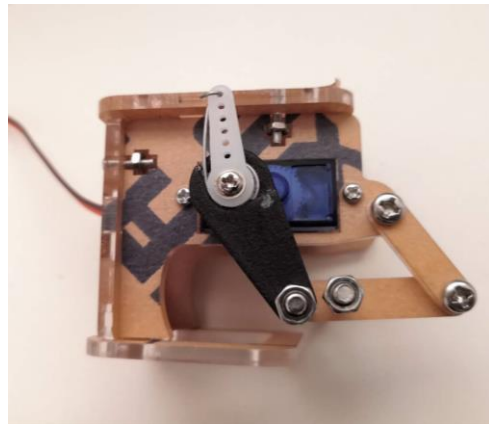


图 5.5 四连杆驱动机构实物图

将上述零部件进行装配，即可得到微刺攀爬足，如图 5.6 为微刺攀爬足实物图，图 5.7 为微刺攀爬足攀附竖直粗糙岩壁的效果，可以看出攀爬足在不承载额外重物的情况下，能够稳定抓附在竖直岩壁上。

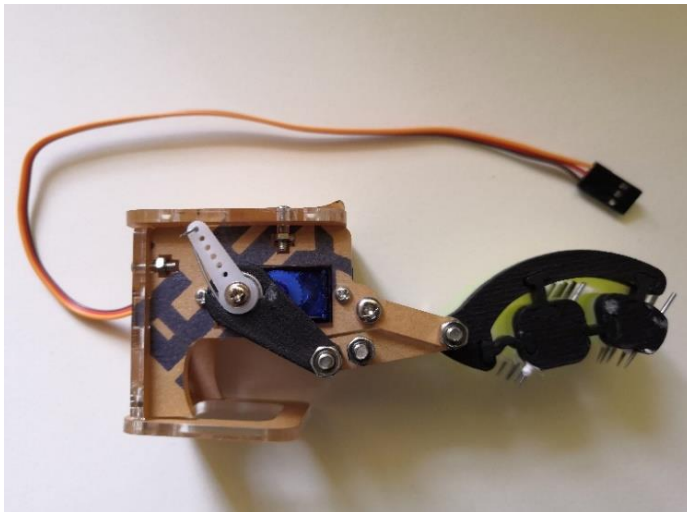


图 5.6 微刺攀爬足实物图

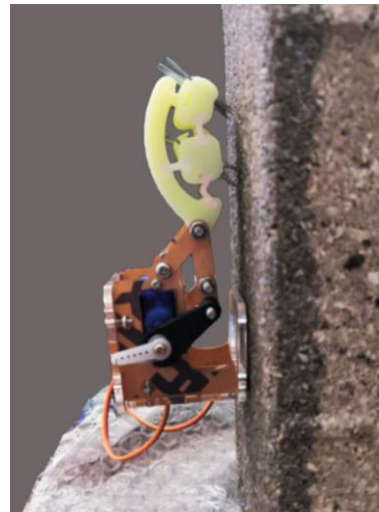


图 5.7 攀爬足攀附竖直墙壁

5.2 不同粗糙度下微刺攀爬足抓附性能实验

5.2.1 抓附力测试实验台搭建

为了测试微刺攀爬足的抓附性能以及其在不同粗糙度表面下应用的表现，本节进行了抓附力测试实验。微刺攀爬足通常工作在倾斜表面上，此时它受的重力可分解为垂直于壁面方向的分力和沿壁面向下的分力，根据这个原理，可以将微刺攀爬足放置于水平粗糙表面上，然后通过施加正压力和水平拉力来模拟攀爬时的受力情况。相对于直接在斜面上进行测试，在水平面进行实验操作更为简便，能够得到更准确的实验结果。

实验平台搭建如图 5.8 所示，在粗糙表面水平放置，微刺攀爬足置于粗糙表面上方，在足上端固定一质量为 500g 的砝码，将足压紧在一块 10cm × 10cm 的粗糙面上，微刺攀爬足后方是拉力传感器，通过 Arduino 控制微刺攀爬足的抓紧与释放。

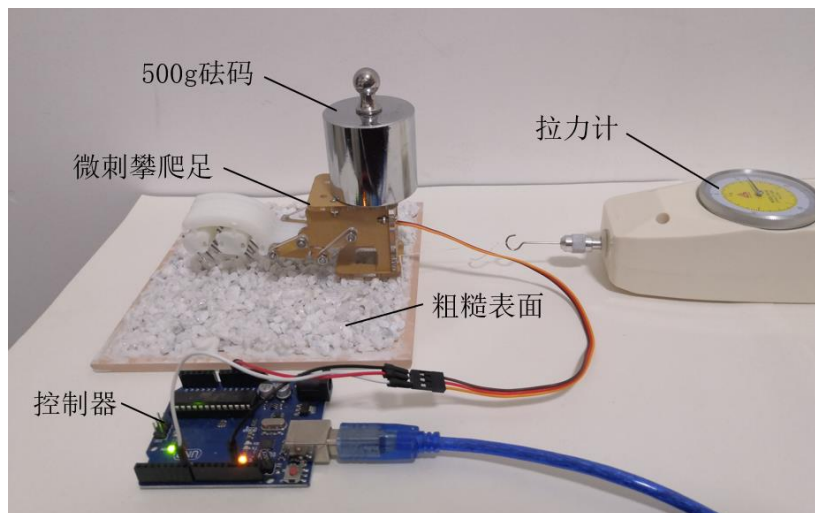


图 5.8 抓附力测试实验平台

为了研究不同粗糙度对抓附性能的影响，本实验还设置了不同粗糙度的对照组。粗糙表面使用石英砂均匀粘合在一块瓷砖上制成，改变石英砂的粒度即可控制表面粗糙度。本实验共设置了 4 种粗糙度的表面，分别使用 30 目、20 目、10 目、5 目的石英砂制成，它们的粗糙度逐渐增大，如图 5.9 所示。目数是物料粒度的一种单位，意为筛网的 1 英寸(25.4mm)长度中所具有的网孔个数，目数越小，则物料粒度越大。

表 5.1 不同目数的筛孔直径

目数 (目)	筛孔直径 (mm)
30	0.60
20	0.90
10	2.00
5	4.00

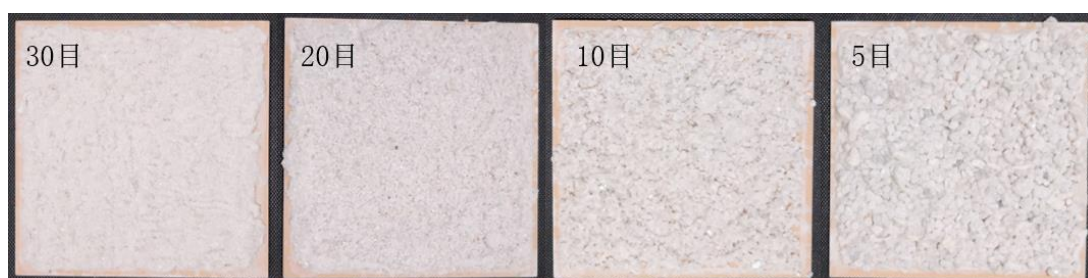


图 5.9 不同目数粗糙表面

5.2.2 抓附力测试实验和结果

抓附力测试实验时，首先将微刺攀爬足置于粗糙表面上，通过控制器使爪子抓紧，将拉力传感器设置为峰值保持模式，然后用水平力拉动攀爬足。随着拉力缓慢增加，微刺攀爬足会从稳定抓附状态开始逐渐脱附，并且在水平面上滑动一段距离，而拉力传感器会记录这个过程中的最大拉力，这个力即为最大抓附力。在爪子放松的状态下也进行上述操作，作为对照组。对于每种实验条件都进行 5 次实验，排除偶然因素的干扰。通过更换不同粗糙度的表面，可以得到微刺攀爬足在不同表面下抓紧和放松状态的抓附力数据，以此分析攀爬足的适

用范围。

如图 5.10 所示，是微刺攀爬足释放和抓附状态的最大抓附力与目数的关系图。比较释放状态和抓附状态的数据，可以看出当微刺攀爬足处于释放状态时，最大抓附力处于一个较低的水平，都在 5N 左右。这是由于攀爬足仅有足跟与粗糙表面接触提供摩擦力，而足跟底面为一个平面，它产生的摩擦力较小，且对表面粗糙度的变化不敏感。而抓附时可承载的最大拉力都得到显著的提升，且在 10 目粗糙表面上最大拉力的提升幅度最大，从原来的 4.2N 升高到了 16.3N，这证明有一些微刺成功刺入了壁面的缝隙，提供了额外的抓附力。

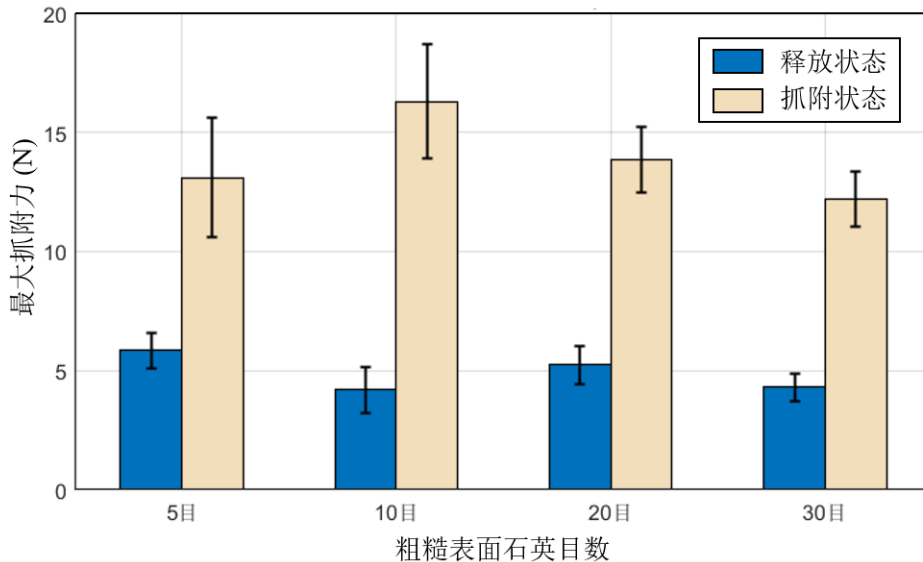


图 5.10 攀爬足释放和抓附状态的最大抓附力与目数关系

对比不同目数粗糙表面下抓附状态的数据，可以看出，在目数为 30 目、20 目、10 目的粗糙表面下，最大抓附力呈现递增趋势，这与式(2.13)的分析一致，接触角随微刺尖端无量纲半径 r/R 的减小而增大，因此满足微刺可抓附条件的可能性增大，抓附力提高。

但是，当表面粗糙度继续增大达到 5 目，也即粗糙点平均颗粒半径为 4mm 时，抓附力不升反降，这可能是由于粗糙颗粒半径增大导致单位长度上可攀附点数目减少，许多微刺在行程内无法找到可攀附点，因此无法形成有效抓附，致使总体抓附力下降。从图中还可以看出随着粗糙度的不断增大，抓附状态下抓附力多次试验数据的标准差逐渐增大，这可能也是由于单位长度上可攀附点数量的减少，使得微刺抓附的容错率降低，有效抓附的数量在一个较大的范围内波动，因此抓附力的波动也较大。

总体来看，在不同的粗糙表面下，微刺攀爬足都能够有效提高足部的抓附力。通过对比各组实验数据，可以看出微刺攀爬足在粗糙颗粒为 10~20 目，也即粗糙点直径为 0.9~2.0mm 的粗糙表面下能取得最高的抓附力，而真实的混凝土地面、野外岩石壁面等表面的粗糙度也大致处于这个量级。

5.3 装配微刺攀爬足的四足机器人测试

5.3.1 兼容微刺攀爬足的四足机器人结构

本课题设计了一款可搭载微刺攀爬足的四足机器人，用于微刺攀爬足的实际测试。其腿部采用当前较为常见的四足机器人的构型，即串联三自由度设计，包含髋关节的 pitch 和 roll 自由度，以及一个膝关节的 pitch 自由度。考虑到腿部的设计要和攀爬足的大小相匹配，而攀爬足的大小约为 30mm×40mm×70mm。为了充分利用空间，在设计上把微刺攀爬足嵌入小腿下部的内侧，而考虑到在平地上行走时，必须由足端支撑地面保护微刺攀爬足，因此小腿的长度不能低于 100mm。为了使得攀爬爪子能较好地嵌入小腿内侧，小腿的宽度也不能低于 40mm，设计时以此为大致尺寸依据。其整体结构如图 5.11 所示，微刺攀爬足装配在其小腿内侧。

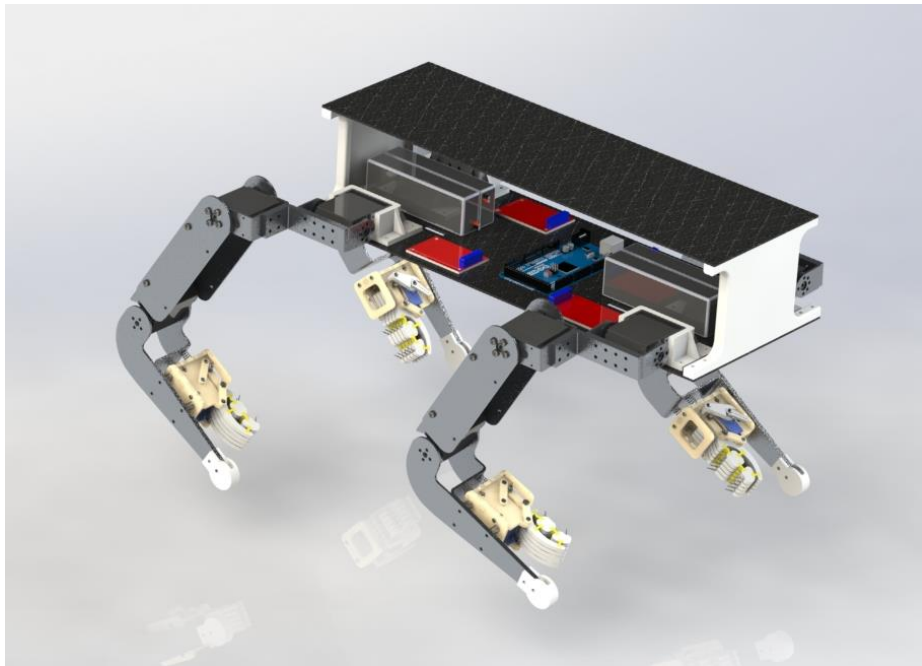


图 5.11 兼容微刺攀爬足的四足机器人结构

5.3.2 野外攀爬测试

我们在四足机器人的样机上进行了测试。图 5.12 展示了附着在树干上的效果，图上的树皮表面大约与地面成 60° 夹角；图 5.13 展示了附着在约 45° 硬质岩石表面上的效果，在两种条件下都实现了稳定抓附。



图 5.12 附着于树干的效果



图 5.13 附着于硬质岩壁的效果

5.4 本章小结

(1) 本章首先提出了微刺攀爬足的加工工艺流程，介绍了足部框架、微刺爪、传动机构等组件的制造过程，并完成了样机的制作。

(2) 为了验证微刺攀爬足的抓附性能以及其在不同粗糙度表面的实用效果，搭建了微刺攀爬足抓附力测试的实验平台，并设计制作了不同粗糙度的表面进行实验，作为对比实验。

(3) 在不同粗糙度下测量了攀爬足的最大抓附力，实验结果表明，攀爬足可有效提高抓附力，并且一定范围内增大表面粗糙度可以增大抓附力，但是超过一定限度后，由于单位长度粗糙点数目减少，导致抓附力下降。微刺攀爬足最适于在表面颗粒直径为 0.9~2.0mm 的粗糙表面上使用，与真实野外岩石壁面等环境一致。

(4) 对装备微刺攀爬足的四足机器人进行野外攀爬测试，机器人能够攀附于 60° 的粗糙树皮表面以及约 45° 硬质岩石表面。

第六章 总结与展望

6.1 总结

目前,智能行走小车大多采用轮式结构,虽然能够在平整路面上高速行进并且具有较高的能量效率,但是难以应对野外崎岖路面,因此无法适应野外环境。近年来兴起的足式机器人相比于轮式具有更好的地形适应性,但是面对较为陡峭的硬质粗糙壁面仍然难以通行,尤其是高度达到数倍于机器人自身尺度的巨型障碍。针对这一不足,本项目从仿生学角度出发,设计并制作一款适用于四足行走机器人的微刺攀爬足,增强四足行走机器人的足部抓附力,使其既能以平地行走步态快速通过较为平坦的路面,又能够以攀爬步态在野外陡峭的硬质粗糙表面上行进。

本文详细描述了微刺攀爬足的设计、制造与实验过程。具体工作如下:

(1) 提出微刺粗糙斜面接触模型,深入分析微刺抓附壁面的机理。结合自然界中昆虫足部微刺的作用机理,本文提出微刺粗糙斜面接触模型,该模型将微刺尖端与壁面粗糙点的接触简化为球面接触,可以很好的解释微刺壁面接触并形成机械锁定的原理。在此基础上,本文推导了微刺在斜面上抓附成功的判定条件,以及微刺在壁面滑动一定行程中抓附成功的概率。通过对该模型的进一步分析,还得到了微刺尖端半径、粗糙点半径、粗糙点高度、斜面坡度等因素对攀爬效果的影响,对微刺爪的设计提供依据。

(2) 设计了一种用于增强四足机器人足部抓附力的微刺攀爬足。微刺攀爬足由微刺爪、驱动机构、框架组成。本文从昆虫足部柔性跗节链得到启发,设计了一种柔性微刺爪,该微刺爪由刚性构件和柔性连接件复合而成,包含两根微刺,当微刺与壁面接触时,它的柔性部分会发生形变从而使微刺贴合复杂的表面。驱动机构为连杆机构,具有简单可靠的优点,并且添加弹性传动机构,减小了冲击载荷。经过整体设计模型的运动仿真发现,这种设计完全可以实现攀爬足预期的抓附运动轨迹。

(3) 对微刺攀爬足关键零部件进行了校核分析。本文通过对微刺攀爬足整体受力的分析,得到了正常攀爬状态下每根微刺承受的平均载荷。在此基础上,分别通过理论与仿真的办法,计算了微刺的最大应力和最大形变,两种方法所得结果相互印证,证明了本文的设计完全能够满足承载要求。

(4) 制作了微刺攀爬足样机,并通过实验验证了方案的可行性。本文提出了一种低成本且有效的微刺攀爬足加工工艺流程,按照该流程制作了样机。通过实验测量了微刺攀爬足抓附在不同粗糙表面下的抓附力,实验结果表明,微刺攀爬足能够有效增强足部的抓附力,且能在一般的野外粗糙表面取得良好的抓附效果。另外,还对装备有微刺攀爬足的四足机器人进行了测试,测试中四足机器人可以稳定抓附在陡峭岩壁和树干上,达到了预期的目标。

6.2 未来与展望

足式机器人凭借着较强的地形适应能力,近年来受到了极大关注,关于拓展四足机器人对复杂地形适应性的研究也有了长足的进步。对于本文提出的能够增强四足机器人足部抓附能力,使其能够攀爬陡峭岩壁的微刺攀爬足来说,后续的工作还有以下几个方面值得进一步探索:

(1) 对微刺攀爬足的结构设计进行改进,提高微刺爪的独立性。微刺攀爬足包含一个微刺爪阵列,在攀爬过程中,各个微刺爪需要有足够的自由度才能够贴合攀附表面上的凹凸不平之处。目前的设计主要是依靠微刺爪内部爪趾与框架之间的弹性材料来实现微刺对壁面的被动柔顺贴合,而微刺爪框架还是互相固定在一起。未来的研究中,可以通过结构设计,在微刺爪层面也增加一定的柔顺度,则微刺攀爬足可以更好地贴合粗糙表面,进一步提高微刺攀爬装置中微刺的抓附成功率。

(2) 改进现有设计,通过对置或环形布置微刺攀爬阵列,研发全向微刺攀爬足。现有

微刺攀爬足为了适应布置在四足机器人足部的要求,需要具备体积小、结构简单可靠的特点,因此只实现了提供单向抓附力的功能。后续的研究中,可以通过将已有的微刺爪对置或者环形布置实现周向抓附力。然后,改进结构减小整体体积,最终将单向微刺攀爬足改进为全向攀爬足。装备有全向攀爬足的四足机器人将有可能在竖直表面甚至倒置表面上实现稳定抓附和自由行走。

(3) 针对微刺攀爬足特点改进四足机器人腿部构型,实现主动贴合。本文中提到,通过微刺爪的柔性结构,能够使得微刺以被动的方式贴合抓附于表面上的凹凸不平之处,实现良好的抓附效果。由于本文中采用的四足机器人每条腿仅有三个自由度,按照本文中腿的构型,在攀爬状态下,小腿缺乏俯仰转动的自由度,因此只能依靠爪子的柔顺结构实现较小范围的被动柔顺。未来的研究中,可以在四足机器人小腿上增加一个自由度,或者在小腿与爪子的连接处增加驱动,在计算机视觉或力控的辅助下,对凹凸不平的攀附表面实现主动柔顺贴附,能进一步提高微刺攀爬足的抓附效果。

参考文献

- [1] 范明聪,吴月华,许旻,等.高机动性越障机器人运动学分析与轨迹控制研究[J].光学精密工程,2004(z1):194-197.
- [2] Rollins E, Luntz J, Foessel A, et al. Nomad: A Demonstration of the Transforming Chassis[C]// IEEE International Conference on Robotics & Automation. IEEE, 1993.
- [3] Kubota T, Kuroda Y, Kunii Y, et al. Small, light-weight rover "Micro5" for lunar exploration[J]. Acta astronautica, 2003, 52(2/6): 447-453.
- [4] Richard Volpe, J. Balaram, Timothy Ohm, Robert Ivlev. The Rocky 7 Mars Rover prototype. Proc. IROS, 1996: 1558-1564.
- [5] 尚建忠. 空间探测机器人移动机构及系统研究[D]. 华中科技大学, 2006.
- [6] Marc Raibert, Kevin Blankespoor, Gabriel Nelson, et al. BigDog, the Rough-Terrain Quaduped Robot[J]. 2008.
- [7] Claudio, Semini, Victor, et al. Design of the Hydraulically Actuated, Torque-Controlled Quaduped Robot HyQ2Max[J]. IEEE/ASME Transactions on Mechatronics, 2017.
- [8] Marco Hutter, Christian Gehring, Dominic Jud, etc. ANYmal - a highly mobile and dynamic quadrupedal robot[C] 2016 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS). IEEE, 2016.
- [9] Bledt G, Powell M J, Katz B, et al. MIT Cheetah 3: Design and Control of a Robust, Dynamic Quaduped Robot[C]// IEEE International Conference of Intelligent Robots (IROS) 2018. IEEE, 2018.
- [10] 新一代四足机器人发布具备跑步及上下台阶能力[J]. 起重运输机械, 2018(12): 16.
- [11] Mao L, Gao F, Tian Y, et al. Novel method for preventing shin-collisions in six-legged robots by utilising a robot-terrain interference model[J]. Mechanism and Machine Theory, 2020, 151.
- [12] 邵晟宇. PackBot 机器人系统简介[J]. 医疗卫生装备, 2016, 37(09): 46.
- [13] 范路桥, 姚锡凡, 祁亨年, 等. 排爆机器人的研究现状及其关键技术[J]. 机床与液压, 2008(06): 144-148.
- [14] <https://www.bostondynamics.com/handle>
- [15] <http://www.bit.edu.cn/xww/lgxb21/149122.htm>
- [16] Endo G, Hirose S. Study on Roller-Walker. Multi-mode Steering Control and Self-contained Locomotion[J]. Journal of the Robotics Society of Japan, 2000, 18(8): 1159-1165.
- [17] Takubo T, Arai T, Inoue K, et al. Integrated Limb Mechanism Robot ASTERISK[J]. 2006.
- [18] Asbeck A, Kim S, Cutkosky M, et al. Scaling hard vertical surfaces with compliant microspine arrays[J]. The International journal of robotics research, 2006, 25(12): 1165-1179.
- [19] Saunders A, Goldman D, Full R, et al. The RiSE Climbing Robot: Body and Leg Design[C]. SPIE Defense&Security Symposium, Unmanned Systems Technology, 2006.
- [20] Spenko M J, Haynes G C, Saunders J A, et al. Biologically inspired climbing with a hexapedal robot[J]. Journal of Field Robotics, 2008, 25(4-5): 223-242.
- [21] Khripin A, Khripin A, Rizzi A, et al. Rapid Pole Climbing with a Quadupedal Robot[C]. IEEE International Conference on Robotics and Automation, IEEE, 2009: 2767-2772.
- [22] Diller E. Design of a Biologically-Inspired Climbing Hexapod Robot for Complex Maneuvers[J]. 2010.
- [23] Parness A, Frost M, Thatte N, et al. Gravity-independent Rock-climbing Robot and a Sample Acquisition Tool with Microspine Grippers[J]. Journal of Field Robotics, 2013, 30(6): 897-915.
- [24] Chen D L, Zhang Q L, Shao Z. Design and Realization of a Flexible Claw of Rough Wall Climbing Robot[J]. Advanced Materials Research, 2011, 328-330: 388-392.
- [25] Liu G, Liu Y, Wang X. Design and Experiment of a Bioinspired Wall-Climbing Robot Using Spiny Grippers[C]. IEEE International Conference on Mechatronics and Automation, IEEE, 2016: 665-670.
- [26] 吴善强,李满天,孙立宁.爬壁机器人负压吸附方式概述[J].林业机械与木工设备, 2007(02): 10-11.
- [27] 李满天.微小型尺蠖式壁面移动机器人的研究[D].黑龙江:哈尔滨工业大学, 2006.

- [28] 徐壮. 磁吸附式爬壁机器人的设计与研究[D]. 华北电力大学, 2018.
- [29] Grieco J C, Prieto M, Armada M, et al. A six-legged climbing robot for high payloads[C]// Control Applications, 1998. Proceedings of the 1998 IEEE International Conference on. IEEE, 1998.
- [30] Liu Y, Sun S, Wu X, et al. A Wheeled Wall-Climbing Robot with Bio-Inspired Spine Mechanisms[J]. 仿生工程学报(英文版), 2015, 012(001):17-28.
- [31] 边欣. 26 种蝉类及甲虫足跗节超微形态的研究[D]. 2013.
- [32] 刘彦伟. 爪刺式爬壁机器人仿生机理与系统研究[D]. 2015.
- [33] Dai Z, Gorb S N, Schwarz U. Roughness-dependent friction force of the tarsal claw system in the beetle *Pachnoda marginata* (Coleoptera, Scarabaeidae)[J]. Journal of Experimental Biology, 2002, 205(Pt 16):2479-2488.
- [34] 王贝. 钩爪抓取式粗糙壁面攀爬机器人建模与研究[D]. 2017.
- [35] 闫克丁. Gauss 型随机粗糙面仿真研究[C]// 全国光学工程博士生论坛. 2012.
- [36] 陈辉, 胡元中, 王慧, 等. 粗糙表面计算机模拟[J]. 润滑与密封, 2006, 000(010):52-55, 59.
- [37] Y. Z, Hu, and, et al. Simulation of 3-D random rough surface by 2-D digital filter and fourier analysis[J]. International Journal of Machine Tools & Manufacture, 1992.
- [38] Patir N . A numerical procedure for random generation of rough surfaces[J]. Wear, 1978, 47(2):263-277.
- [39] Frantsevich L, Gorb S. Structure and mechanics of the tarsal chain in the hornet, *Vespa crabro* (Hymenoptera: Vespidae): implications on the attachment mechanism[J]. Arthropod Structure & Development, 2004, 33(1):77-89.
- [40] Gladun D, Gorb S N. Insect walking techniques on thin stems[J]. Arthropod Plant Interactions, 2007, 1(2):77-91.
- [41] 杨可桢, 程光蕴, 李仲生. 机械设计基础[M]. 高等教育出版社, 2006.
- [42] Mark R. Cutkosky, Sangbae Kim. Design and Fabrication of Multi-Material Structures for Bioinspired Robots. 2009, 367(1894):1799-1813.

谢辞

转瞬之间，我在上海交通大学的第四个学年就要过去，回顾这段非凡的旅程，有太多的事值得铭记，有太多的人值得感恩。

首先，由衷地感谢孟祥慧老师在本课题进展过程中对我们小组的悉心指导和精心关怀。孟祥慧老师学识渊博、治学严谨、诲人不倦，从开题、中期再到最后结题的半年时间里，孟老师与我们保持着频繁的沟通和交流，让我们受益良多，可以说我们每一次克服难题，都离不开孟老师的帮助。在此向孟老师表示衷心的感谢，并祝愿老师工作顺利，身体健康。

其次感谢我的队友，宋奉隆和胡杰民同学。作为最亲密的战友，我们一起熬夜奋战，讨论问题，两位同学给我的毕设工作提出了很多优秀的建议，让我的研究工作能够更加顺利地推进。宋奉隆同学陪我度过了许多快乐的游戏时光，为严肃的毕设工作增添了几分乐趣。另外，本课题的顺利结题也离不开他们出色的工作，感谢他们的努力付出。

我还要特别感谢我的父母，因疫情原因，我不得不在家中完成大部分的毕设工作，在这段时间里，他们为我提供了最好的后勤保障，让我能够心无旁骛地进行研究与实验。也要感谢我的女朋友，她的陪伴让我度过了一段充实而有意义的科研时光。

最后，我想感谢疫情之下的白衣天使，感谢危难时刻仍然坚守在岗位上的交通警察、环卫工人、外卖小哥、志愿者们……他们的勇敢与奉献，保卫了我们的正常生活，也让我国抗击疫情的战争逐渐迎来了曙光，向他们致以最崇高的敬意！

THE DESIGN, ANALYSIS, FABRICATION AND TEST OF THE FOOT OF INTELLIGENT WALKING VEHICLE FOR COMPLEX TERRAIN

In recent decades, the development of robot technology has not only completely changed the traditional manufacturing industry, but also brought about profound changes in people's life. First of all, a large number of robots with fixed bases appeared, which undertook some repetitive, heavy and dangerous work in many industrial manufacturing occasions, thus greatly improving the efficiency of industrial production. Then, with the breakthroughs and innovations in the field of mechanism theory, SLAM technology, automatic control and artificial intelligence, the intelligent walking car, which can realize autonomous moving by sensing the external state and its own state through the sensor, began to appear and gradually applied to lots of artificial structured environment, such as house cleaning, health care, restaurant service and interactive entertainment. Now it has become an indispensable part of people's daily life.

At present, intelligent walking car is able to cope with most of the tasks in the artificial structured environment. However, social development has put forward higher requirements for intelligent walking cars. More and more application scenes appear, requiring the intelligent walking car to face more complex terrain. The search and rescue work of people in danger in earthquake ruins, the surface detection work of asteroids, the military reconnaissance work in the field under complex terrain and other unstructured scenarios require the intelligent walking vehicle to have better terrain adaptability and flexibility, specifically, it is necessary to have the ability to walk on undulating ground, climb over various obstacles and climb steep slopes.

In order to enhance the adaptability of intelligent walking vehicle to complex terrain, researchers have made innovations in the mobile mechanism of walking vehicle. After the wheeled robot, crawler, foot and wheel-foot walking robots have appeared one after another, constantly expanding the application range of the vehicle. The wheeled car has a highly efficient travelling form on a relatively flat road surface, but has a weak ability to cross obstacles. Some researches improved wheeled car by using special chassis or suspension design, but it is not enough. Crawler trolleys have strong adaptability to all kinds of terrains, but their disadvantages are heavy weight and high energy consumption. Based on bionics principles, foot type and wheel-foot type robots use the supporting leg as the mobile carrier, which has the strongest flexibility and manoeuvrability, and can pass through undulating roads and various obstacles. However, the mechanical structure and control strategy of foot type robots are the most complex.

Generally speaking, the foot type walking car has the strongest environmental adaptability, but its feet are mostly made of some elastic organic materials, which mainly play the role of shock absorption. However, it cannot provide enough friction force or grasping force to allow the foot robots climb the steep slope.

The scheme of the wall climbing robots to achieve strong grasping force provides some enlightenment for enhancing the climbing ability of the foot robot. Wall climbing robot is a kind of robot which can move on the vertical wall through special climbing mechanism. The main climbing methods are magnetic adsorption, vacuum adsorption and microspine. Magnetic adsorption climbing device uses magnet to generate adsorption force, generally used in the scenes which robots need to climb the wall of steel of other magnetic material, such as oil tank inspection, ship rust removal, etc. The negative pressure adsorption mechanism forms a closed cavity with a suction cup and the wall surface, then extracts the air from the cavity to form a negative pressure, and make use of the atmospheric pressure to compress the robot on the wall surface. However, this kind of climbing mechanism has high requirements for wall smoothness. The microspine climbing mechanism is a kind of bionic mechanism, which mainly imitates the tiny spines on the feet of insects or the claws of cats. It grasps the rough parts of the wall surface with the bionic hook claws

and provides grasping force for the robot to climb on the wall surface steadily. The microspine climbing mechanism has lower requirements on the climbing surface and is suitable for use in the wild unstructured environment.

Therefore, this project aims at carrying out detection and rescue tasks in a complex environment, and realizes the design, analysis and fabrication of the foot of the intelligent walking vehicle in a complex terrain. Starting from the bionics point of view, to overcome the deficiency of quadruped robot that it cannot climb the steep hard surface, this project mainly designs and fabricates a microspine climbing foot suitable for quadruped walking robot. It can enhance the grasp force of quadruped's foot, so that the quadruped can not only walk quickly through a relatively flat road with an upright gait, but also move on the steep hard rough surface with a climbing gait.

This paper describes in detail the design, fabrication and experimental process of the climbing foot with microspines. The specific work is as follows:

1) Proposed a model which describes the contact of the spine and coarse inclined surface and analysed the principle of the microspine clinging the rough surface.

Inspired by the principle of insect foot spines in nature, this paper proposes a contact model for the spines and the rough inclined surface. This model simplifies the contact between the tip of the spines and the rough surface of the wall into spherical contact, which can well explain the principle of the contact between the surface and the spines, and the formation of mechanical locking. On the basis of this, the paper deduces the successful grasp condition under which the microspine can form an effective locking with the inclined surface, and then the probability of success of a random grasp by microspine is estimated. Through the further analysis of the model, the influence of tip radius, rough point radius, rough point height, slope and other factors on the climbing effect was also obtained, which provided a basis for the design of the microspine claw.

2) A microspine climbing foot was designed to enhance the grasp force of the quadruped robot's foot.

The foot is composed of the spine claw, driving mechanism and frame. Inspired by the flexible tarsal chain of the insect foot, this paper designed a kind of flexible microspine claw, which is composed of rigid components and flexible connectors, and contains two tiny spines. When the microspine contacts the wall surface, its flexible part will be deformed so that the microspine can fit the complex surface. The driving mechanism is a linkage mechanism, which is simple and reliable, and the elastic transmission mechanism is added to reduce the impact load. Through the movement simulation of the overall design model, it is found that this kind of design can completely realize the expected grasping movement trajectory of the climbing foot.

3) The key parts of the climbing foot were checked and analysed.

In this paper, we carried on the analysis to the force condition of the climbing foot when it is clinging to the rough wall, and the average load of each microspine under the normal climbing state is obtained. On this basis, the maximum stress and the maximum deformation of the microspine are calculated by methods of theory and simulation respectively, and the results obtained by the two methods are mutually verified, proving that the design of this paper can completely meet the load bearing requirements.

4) A prototype of the climbing foot with microspine was made, and the feasibility of the scheme was verified by experiments.

In this paper, a low cost and effective process flow for the microspine climbing foot is proposed, and a prototype was made according to the process. We conducted a series of experiments, and the grasping force of the microspine climbing foot under different rough surfaces was measured. The experimental results showed that the microspine climbing foot can effectively enhance the grasping force of the foot and obtain good grasping effect in the general rough surface in the field. In addition, a quadruped robot equipped with the microspine climbing foot was tested. In the test, the quadruped robot was able to hold onto steep rock walls and tree trunks steadily, achieving the desired goal of the project.