



本科毕业设计（论文）

粗糙表面抓附式固定机构设计及研究

**Design and research of gripping and attaching
immobility mechanism on rough surface**

学 院: 机械与电子控制工程学院

专 业: 机械工程

学生姓名: 霍嘉赫

学 号: 19221338

指导教师: 李晔卓

北京交通大学

2023 年 6 月

学士论文版权使用授权书

本学士论文作者完全了解北京交通大学有关保留、使用学士论文的规定。特授权北京交通大学可以将学士论文的全部或部分内容编入有关数据库进行检索，提供阅览服务，并采用影印、缩印或扫描等复制手段保存、汇编以供查阅和借阅。

(保密的学位论文在解密后适用本授权说明)

学位论文作者签名: 霍嘉赫 指导教师签名: 李峰章

签字日期: 2023 年 5 月 30 日 签字日期: 2023 年 5 月 31 日

中文摘要

本文基于“钩爪攀附式”的固定机理，提出了一种抓附式固定机构和机器人运动链系统，实现了在粗糙表面抓附锁紧并固定的设计目标。本文的主要工作如下：

基于设计目标和现有研究，选择合适的固定机理，对钩爪微刺与粗糙表面接触模型进行了理论分析，得到了微刺锁定的表面参数要求。提出一种带有旋转限位功能的微刺分支臂，采用线性独立被动伸缩的微刺结构，利用虚功原理对连杆参数进行了优化求解，同时提出一种分层式变半径绞盘传动系统，实现了变拉力的张紧效果。

给出固定机构的抓附分离流程，对整机抓附效果进行评估，求出机构的实际运动范围和单钩点的可达空间，以及机构在不同形状的抓附表面的适用范围。对关键零部件进行 CAD 建模和 Ansys 有限元分析，校核强度并验证结构设计的可靠性，并在 Adams 中建立了虚拟样机进行仿真试验，验证了机构的运动可行性。

将固定机构作为末端执行器，与 4R 运动链组成了机器人系统，进行结构设计和驱动选型并给出闭环控制方案，通过仿真验证了机器人系统的步态。制作实物样机并进行试验，达到了预期的抓附固定效果。

本文最后拓展性地探索了抓附式固定机构与 4R 运动链组成的机器人系统的结构设计、驱动选型与闭环控制方案，提高了本课题的创新性与实际应用价值。

关键词：固定机构；微型钩刺；抓附固定；分级被动约束

ABSTRACT

This paper proposes a grasping-type immobility mechanism and a robot motion chain system based on the "hook-claw attachment" immobility principle, which achieves the design goal of grasping and locking on rough surfaces. The main work of this paper is as follows:

Based on the design goal and existing research, a suitable immobility principle is selected, and the contact model between the hook-claw microspines and the rough surface is theoretically analyzed, and the surface parameter requirements for microspine locking are obtained. A microspine branch arm with a rotation limit function is proposed, which adopts a linearly independent passive telescopic microspine structure, and the link parameters are optimized by using the principle of virtual work. At the same time, a layered variable-radius winch transmission system is proposed, which realizes the tensioning effect of variable tension.

The grasping and separation process of the immobility mechanism is given, and the grasping effect of the whole machine is evaluated. The actual motion range of the mechanism and the reachable space of a single hook point are obtained, as well as the applicability range of the mechanism on different shapes of grasping surfaces. The key components are modeled by CAD and analyzed by Ansys finite element method, and the strength is checked and the reliability of the structure design is verified. A virtual prototype is established in Adams for simulation test, which verifies the feasibility of the mechanism motion.

The immobility mechanism is used as an end effector, and a robot system composed of a 4R motion chain is proposed. The structure design and drive selection are carried out and a closed-loop control scheme is given. The gait of the robot system is verified by simulation. A physical prototype is made and tested, which achieves the expected grasping immobility effect.

Finally, this paper explores the structure design, drive selection and closed-loop control scheme of the robot system composed of the grasping-type immobility mechanism and the 4R motion chain in an extended way, which enhances the innovation and practical application value of this topic.

KEYWORDS: Immobility mechanism; Micro-spines; Hook-claw attachment; Hierarchical passive constraint

目 录

中文摘要	i
ABSTRACT	ii
目 录	iii
1. 绪论	1
1.1 研究背景及研究意义	1
1.2 国内外研究现状	2
1.2.1 机械抓附式	2
1.2.3 材料贴附式	8
1.2.4 电磁吸附式	9
1.2.5 正负气压式	10
1.3 研究内容	12
1.3.1 机械结构设计	13
1.3.2 理论分析仿真	13
1.3.3 样机实验验证	13
1.4 研究方案	13
1.4.1 理论基础	13
1.4.2 研究方法	14
1.4.3 研究步骤	16
1.5 章节安排	17
1.6 本章小结	17
2. 固定机构设计与分析	18
2.1 钩爪攀附机理	18
2.2 固定机构理论设计	20
2.2.1 微刺分支臂设计	20
2.2.2 传动系统设计	25
2.3 本章小结	28
3. 固定机构抓附效果分析	29
3.1 抓附过程	29
3.2 抓附力分析	30
3.3 抓附表面分析	33

3.4 本章小结.....	36
4. 有限元分析与虚拟样机仿真.....	37
4.2 Ansys 有限元分析	37
4.2.1 CAD 建模	37
4.2.2 有限元分析	39
4.3 Adams 运动仿真.....	43
4.3.1 仿真环境简介	43
4.3.2 抓附式固定机构仿真.....	44
4.3.3 机器人测试系统简述.....	46
4.3.4 整机运动学仿真.....	48
4.4 本章小结.....	51
5. 样机工程设计与试验	52
5.1 样机结构设计	52
5.1.1 驱动电机选型	52
5.1.2 微刺舱设计	54
5.1.3 传动系统结构设计	55
5.1.4 微刺分支臂设计	56
5.1.5 整体样机装配及实验	57
5.1.6 机器人系统方案设计	62
5.2 控制系统设计	62
5.2.1 舵机控制方案	63
5.2.2 机器人系统控制架构	64
5.3 本章小结	64
6. 总结与展望	65
6.1 经济性与环保性分析	65
6.2 全文总结	66
6.3 未来展望	67
参考文献	68
致 谢	72
附 录	73

1. 緒论

1.1 研究背景及研究意义

自上世纪 60 年代开始，移动机器人技术得到不断发展进步，其应用范围逐渐覆盖了地面、空中和水下多种工作环境，乃至外太空^[1]。移动机器人按照运动方式可分为：轮式移动机器人、腿足式移动机器人、游弋式机器人、履带式移动机器人和爬行机器人等；爬行机器人按照攀爬表面不同主要分为爬壁机器人、爬杆机器人和爬树机器人等。爬壁机器人把地面移动机器人技术与表面抓附固定技术进行融合，可在大倾角表面上附着运动，并能携带工具完成特定作业任务，大大扩展了机器人的应用环境范围；爬杆、爬树机器人则将固定机构或末端抓手固定在攀爬对象表面，结合一定步态完成攀爬动作，以代替人们从事危险工作。此类爬行机器人由移动机构主体和固定机构构成，根据固定机理可将其分为负压吸附、干性黏附、电磁吸附、钩爪攀附等。固定机构不同的固定机理不仅决定其适用于何种表面，还在很大程度上影响机构的适应性、复杂度、负载能力和应用范围：负压吸附在爬壁机器人上应用广泛，对壁面具有一定的适应性，但需携带气泵、涡轮等装置，结构复杂^[2]；依靠范德华力的干式吸附无需外界供能，适用于光滑、无粉尘脏污的表面^[3]；电磁吸附法借助永磁体来完成固定，载荷能力高^[4]，但仅限工作于铁磁性表面。

上述三类吸附方式在面对粗糙度较大、凹凸不平的表面表现不佳，为解决此问题，国内外学者在基于仿生学的基础上，模拟昆虫、蜘蛛等自然界生物的钩爪抓附机理，提出一系列基于微型钩刺的仿生机构：攀爬机器人 Rise^[5]、爬壁机器人 SpinybotII^[6]等。此类机构均借助自身重力来给钩刺与粗糙表面的凹凸施加压力来产生足够的摩擦力，进而完成钩附锁紧。显而易见，若是在重力较小的外太空环境中，或是受到垂直壁面的外力时，均有可能会发生抓附失效的现象。为解决此问题，美国航空航天局在分析了人类探索外太空小行星的情况后提出一种微刺夹爪手^[7]，通过对固定在岩石表面的微刺施加压力来使其克服低重力造成的影响，但存在制造困难、运动周期长等缺点。为解决此问题，提高钩爪抓附效率和机构对表面的适应性，特提出一种可应用于复杂、极端环境的固定机构，希望该机构具有在岩块、树干表面上的固定能力，并对其设计和固定的实现过程进行研究和分析，最终将其抓附固定于上述粗糙表面完成特定运动与任务。

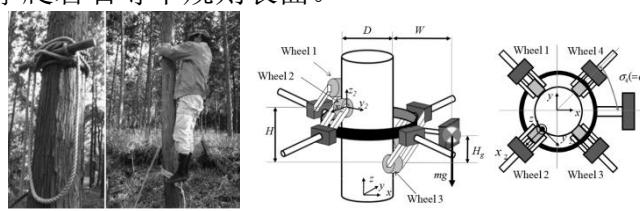
1.2 国内外研究现状

本课题所研究的固定机构是指工作于树干、墙壁岩块等粗糙复杂表面上的机器人末端执行装置，因此针对爬树(杆)、爬墙和攀岩机器人所使用的固定机构进行重点介绍并分类总结。与普通的地面移动机器人不同，攀爬机器人主要工作在倾斜或者垂直的表面上，需要额外的装置或夹具提供一部分接触力来支持身体保持平衡、完成运动。1966 年第一台爬壁机器人问世于日本，随后英国、美国、西班牙等国均开展了针对攀爬机器人的研究工作，上世纪 80 年代，我国的高校院所逐步开始在此方面的研究，取得了长足的发展进步，研制了众多优秀的攀爬机器人。此类机器人根据固定机构所产生的力的种类不同，可细化为机械抓附式、材料贴附式、电磁吸附式以及正负气压式，其中机械抓附式又分为环绕锁紧式、机械夹持式和钩爪攀附式，材料贴附式则以壁虎足端为灵感并借助干性黏附材料完成固定，电磁吸附式通过电流或磁体位置来控制吸附磁力，正负气压式则通过真空吸盘或气体动力来对机构施加外力与表面进行贴紧。现针对不同的固定附着方式分类来进行总结分析。

1.2.1 机械抓附式

1. 环绕锁紧式

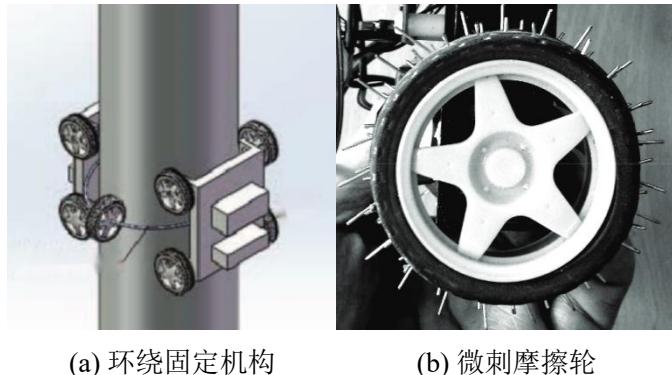
环绕锁紧式机器人的固定机构通过机械自锁、紧固装置或者多组环绕布置的摩擦轮等装置来与攀爬杆、树木表皮等接触面上产生摩擦力来抵消重力影响。此原理最简单常见的应用是传统伐木工人爬树所用的绳索工具^[8]，如图 1-1(a)所示。2008 年至 2013 年，日本岐阜大学的 Kawasaki 等受到此自锁原理启发，设计出一款新型爬树修剪机器人“Pruning robot”^[9,10]，其固定机构部分如图 1-1(b)所示。固定机构由四个主动轮以规则的间隔围绕构成，其中一对位于机架上侧，另一对位于机架下侧。根据环绕锁紧式的原理，机构自锁要求机器人的质心位于树干外侧，同时为了避免机器人从树上滑落，摩擦主动轮与树干摩擦因数当足够大。此类固定机构能依靠自重完成自锁，能耗低，适合固定在圆柱形状的表面，但在多边形表面的固定力较弱，且无法适应较为复杂的弯曲树木环境或是攀爬岩石等不规则表面。



(a) 传统爬树工具 (b) Pruning robot 的固定机构

图 1-1 新型爬树修剪机器人^[9,10]

2014 年浙江大学的 Ren 等^[11]在其设计的一款简单轻便的轮式爬树机器人中使用了环绕固定机构，如图 1-2(a)所示。该机构由两辆对置的小车和夹持装置组成，在滚动摩擦轮上加入了阵列排布的微刺以增加与树干表面的摩擦力，如图 1-2(b)所示。夹持装置由两个半圆挠性臂与两个滚轮构成。该固定机构通过摩擦轮上的微刺提供足够的贴附力防止机构坠落，对称布置增强了机构的稳定性和可靠性，但其对变直径的表面固定效果差，对环境的适应性不强。



(a) 环绕固定机构 (b) 微刺摩擦轮

图 1-2 轮式爬树机器人^[11]

2. 机械夹持式

机械夹持式的固定机构通过夹爪等构件对表面施加一对封闭的平衡力来产生摩擦力以抵消自身重力并平衡负载。华南理工大学的江励等^[12,13]于 2016 年研制出一款双爪式爬杆机器人，采用了夹爪式固定机构，如图 1-3 所示。该夹持器采用三级传动方式，第一级为小型谐波减速器传动，第二级为涡轮蜗杆传动，第三级为平行连杆机构传动，当其与圆形杆件接触时，4 个线接触可转化为 4 个点接触，符合夹持力封闭的条件，能平衡掉负载与自重。该机构能实现自锁并可承载一定的载荷，但缺点是加持表面半径与夹持效果受到机构尺寸限制，适应性差。



图 1-3 夹爪式力封闭固定机构^[13]

2022 年 4 月哈尔滨工业大学的 Ma 等^[14]提出一款压电堆驱动的仿蟹爪固定机构“Crabbott”，如图 1-4 所示。“Crabbott”的固定机构形如蟹爪，可以对不同形状的物体产生夹紧力，其由一个凸形爪和一个凹形爪构成，两个爪的内部有统一的锯齿形状，这种结构增强了它对不同物体的夹紧能力。夹爪可适应不同横截面尺寸的爬行杆，预紧螺母使“Crabbott”具有自锁能力。当压电堆未通电时，预紧螺母在夹爪上施加预紧力以实现夹紧状态。当压电叠堆通电时，输出位移由柔性张拉机构放大并传递到夹爪

以实现打开状态。该机构虽具有体积小、负载重量比高和分辨率高等优点，但柔性铰链的设计在一定程度上降低了机构的刚度。

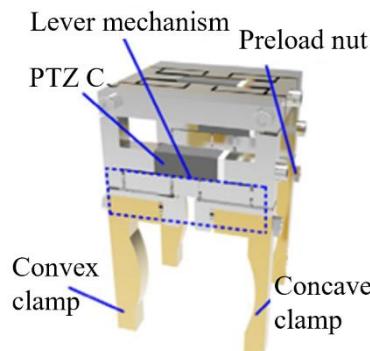


图 1-4 仿蟹爪夹持固定机构^[14]

2022 年 10 月 Ban^[15]等针对速生林修剪提出的一款攀爬机器人“Monkeybot”与其采用的推杆轮夹持机构如图 1-5 所示。此固定机构由推杆、连接框架和夹紧轮构成，通过保持推杆气缸的恒定压力使夹紧轮与树干之间的接触力保持稳定，以实现对不同直径树木的自动夹紧。该夹持机构自重较大，虽能适应树木直径在一定范围内的变化，但运动原理限制其无法实现大幅转向或变更路径的运动。

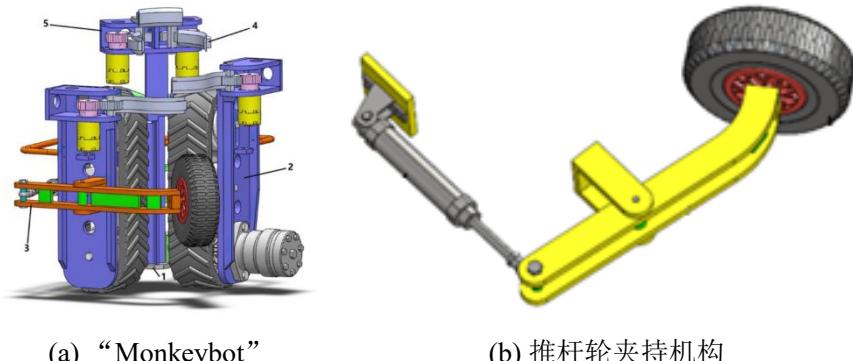


图 1-5 速生林修剪机器人^[15]

3. 钩爪攀附式

爪是自然界最常见的固定装置^[16]。许多种类的昆虫、爬行动物、鸟类和哺乳动物可以通过爪在复杂的粗糙表面上完成附着并固定。Dai 等^[17]证明了当昆虫所攀爬的表面粗糙度远超过钩爪的尺寸时，甲虫可以使用爪与表面粗糙结构产生机械互锁。国内外学者据此原理研究开发出一系列的钩爪攀附式固定机构，并对其设计过程进行分析研究^[16,18-23]。

2005 年，Asbeck 等人^[6]设计出一款可以攀爬粗糙硬质墙面的机器人“Spinybot”，其夹爪固定机构如图 1-6 所示。每个夹爪包含 10 个相同的平面柔顺机构，采用快速原型制作工艺“形状沉积制造”进行制造，可将柔性、刚性材料耦合在一起，所得结构可以近似为弹性多杆机构。柔性件弯曲提供弹性和粘性阻尼，与微型钢制弹簧相比，

此设计允许更大的延伸而不会出现故障。与鸟爪不同，该固定机构的末端微刺在抓持过程中不需要穿透表面，而是利用表面上的凹凸不平之处完成抓握与锁定。对于粗糙表面，限制抓握力的主要因素是末端微刺和凹凸小块的机械强度，而对于稍光滑的表面，此类机构的固定能力会大打折扣。最终此机构可在不使用额外吸附力或粘合剂的情况下固定在平坦、坚硬的垂直表面，例如混凝土、砖块、灰泥。但同时需要保证机构距离表面足够近，且该机构产生的抓握力在机构的平面法线方向较弱，无法形成力闭合，固定力的稳定性不足。

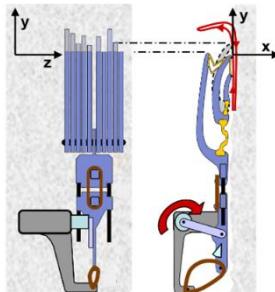


图 1-6 Spinybot II 的固定钩爪^[6]

2008 年斯坦福大学的 Spenko 等人^[24]依据昆虫仿生学提出一款六足攀爬机器人 Rise，如图 1-7 所示。Rise 使用的固定机构与之前的 Spinybot 类似，平行阵列排布有相同的平面钩爪机构。钩爪末端是没有顺应性的坚硬的指甲状结构，通过与攀爬表面的凹凸产生机械互锁，同时也可用于穿透树皮或者柔软表面进行抓附固定。此类机构的特点是末端金属钩刺与机构基底之间具有可调节的顺应性构件，来完成对粗糙表面的固定作业。最终该固定机构能固定在混凝土外墙上并完成爬升任务，缺点是功率/质量比不高，且无法适应表面的形状，此外，单一固定机构只能抵抗单向剪切力，无法形成力闭合，稳定性较差。

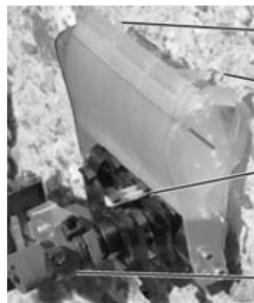


图 1-7 Rise 机器人的固定机构^[24]

2011 年至 2017 年，美国航空航天局 A. Parness 等人^[7,25-31]针对外太空小行星探测、样本采集的应用领域研发出一款名为“LEMUR3”的四足机器人，其采用的固定钩爪如图 1-8(a)所示。足端的固定机构为圆周阵列排布的微型钩刺舱，由两个驱动器控制 DC 电机、行星减速器与绞盘机构利用钢丝分别独立完成钩爪收紧与回收两个动作。为适应不同形状的石块表面，采用一种“分级顺从”的被动约束机理：机构底座 10 厘米

量级的运动约束→钩刺舱的厘米级约束→钩爪内部柔性件的毫米级约束。如图 1-8(b)所示，一枚刚柔耦合的钩爪内嵌有三根钩刺，增大钩爪与地面的抓附力。最终实验结果为此钩爪攀附手可抵抗 189.5N 的垂直提升力或 281.4N 的切向力。该机构的优点是夹持力大，可承受较高的负载，固定效果稳定性强。缺点是钩刺与钩爪固连，无法适应更微小的凹凸，复杂的传动系统导致机构的固定时间较长，而且因为钢缆给单个钩爪舱上提供的分离力不会直接施加到微刺上，导致机构在分离过程中容易失败，末端微刺磨损消耗大。

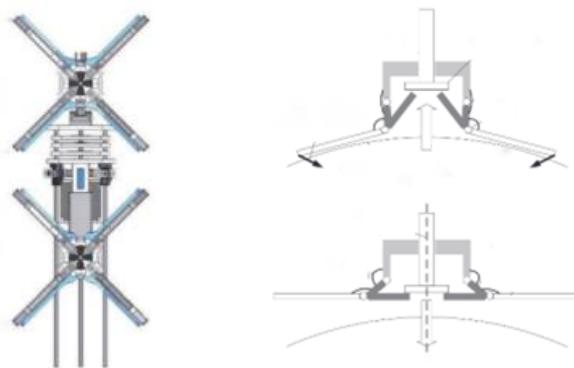


(a) 钩爪攀附手

(b) A microspine with 3 hooks

图 1-8 “LEMUR3” 攀岩机器人的钩爪手^[27]

2011 年，香港中文大学徐扬生院士团队受到尺蠖启发，在其研制的新型灵活爬树机器人“Treebot”^[32,33]中介绍了一种全方位的固定机构，该机构能在大范围的曲率范围内固定在树木表面，使 Treebot 能够紧固在树干和树枝上并完成爬行运动。全向固定机构由四个相隔 90 度的钩爪构成，如图 1-9(a)所示。每个爪由一组双连杆机构组成，并在尖端安装有钢针，剖面视图如图 1-9(b)所示。夹爪的固定与松弛由线性电机驱动推板和连杆关节处的弹簧来实现，并通过钢针的穿透来实现固定机构的夹持力。由于机构通过预紧弹簧来提供固定所需的夹持力，因此可以实现零能耗的静态固定。此外，4 个环绕式的爪的运动是相互独立的，允许各自以不同的角度移动，提高了对表面的适应性和夹持固定的稳定性。该固定机构具有轻便、灵活稳定和适应性好的特点，但同时存在夹持力较小、负载较低等缺陷。



(a) Treebot 全向固定夹爪

(b) 机构剖面图

图 1-9 灵巧爬树机器人 Treebot^[32]

2018 年，Nagaoka K^[34]设计了一款被动微刺固定机构，可实现在极端地形上的自由攀爬固定，如图 1-10(a)所示。2021 年，Kentaro Uno 等人^[35]针对此机构进行了优化设计，

提高了机构可达性与夹持性能，将其命名为“HubRobo”，如图 1-10(b)所示。该被动微刺夹爪可夹持悬崖壁上的粗糙岩石表面，固定在夹爪上的微刺使其能够被动和自适应地锁定粗糙表面的微观凹凸并完成固定。此固定机构由六个钩爪部分组成，这些钩爪部分连接到夹持器内部的预紧弹簧，在机构底座上呈径向排列。当机构底部受到外力被迫和地表接触，阵列夹爪张开并与表面贴紧。为了实现更有效的夹持状态，在机构中安装了一个悬挂夹持机构，使其能够有效地将拉紧力（或分离力）转换为夹持力。通过伺服电机拉动钩爪末端的尼龙绳可释放固定机构的夹爪完成分离。预紧弹簧使其能够在不消耗动力的情况下有效地保持其在表面上的固定状态。此机构质量轻且固定效果好，但由于其固定力取决于微刺与表面凹凸的机械强度和预紧弹簧的性能，在一定程度上限制了固定效果。

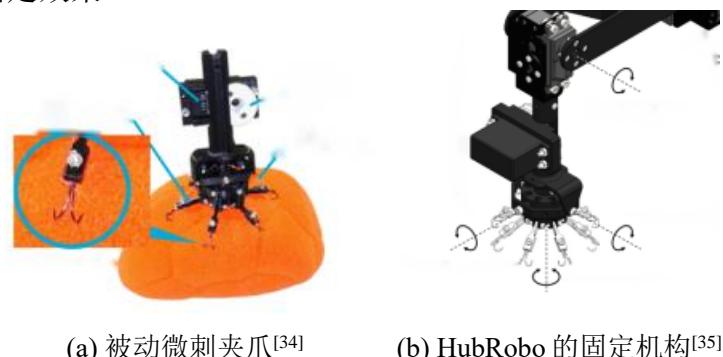
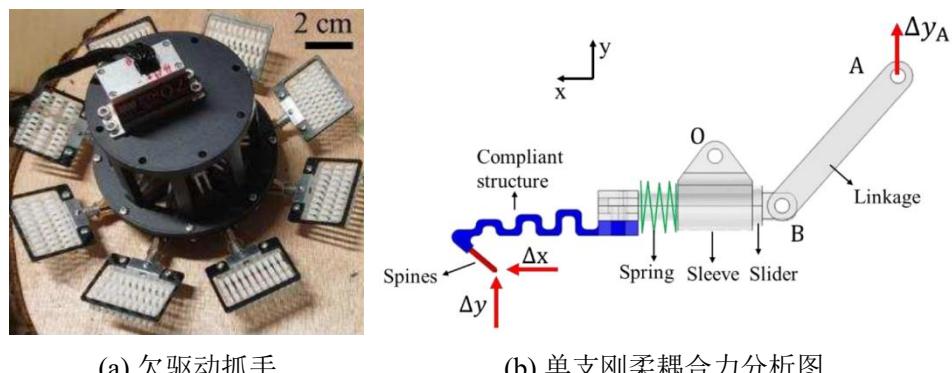


图 1-10 历代被动微刺机构^[34,35]

2022 年 Zi 等^[16]受到甲虫钩爪灵感启发，为四足攀岩机器人的足端设计出一款多刺夹爪固定机构，如图 1-11(a)所示。此固定机构四个多刺的钩爪和传动系统组成，钩爪以相隔 90°环状排列，总重量为 352 克，用于附着在岩石等不规则的粗糙表面上。如图 1-11(b)所示，每个钩爪的机构一侧布置有 10 个线性约束的微刺，线性约束的微刺可在法线方向上产生更大的变形以适应复杂的地形。此外，高密度的排布可以提高机械锁定的成功率，在单个分支上采用四杆机构将分离力直接作用于微刺，降低分离失败的概率。传动系统由单枚伺服电机、特制收放绞盘、弹性尼龙构件和柔性轴组成。通过固定和分离的运动序列，该固定机构可提供较大的夹持力并表现出对地形良好的适应性，但复杂的传动系统显著增加了夹具的尺寸和重量，微刺的耐久度问题也是未来要解决的问题。

图 1-11 四足攀岩机器人的抓附机构^[16]

2023 年，清华大学的 Li^[36]等人提出了一种新型的欠驱动仿生微刺抓手，如图 1-12 所示，可附着在不规则、粗糙的壁面上。微刺夹爪由阵列排布的 80 枚微刺和欠驱动连杆机构组成，整个机构通过丝杠螺母传动，能够在法向和切向抓附中适应亚毫米级粗糙度和厘米级的凹凸表面。单支钩爪采用刚柔耦合+被动适应的机理，刚性的钩刺+柔性结构可适应一定范围内的表面落差或者凹凸，单枚驱动电机通过弹性构件实现八个分支的各向异性，以便更好地贴附到表面上。该微刺抓手可附着在不同弯曲程度的粗糙砖面、花岗岩和树干上，可抵抗 60N 以上的法向抓持力和 30N 以上的切向抓附力。

图 1-12 欠驱动自适应抓手^[36]

1.2.3 材料贴附式

壁虎可以自由攀爬垂直墙面，其借助足端末梢上的分层微纤维产生范德华力，进而产生干性粘附将其固定在墙面上^[31]。随着壁虎粘附机理的揭示，诸多学者制备出了多种类型的粘合材料^[32-35]。该种材料在附着过程中展示出优异的抗剪切性能，而该过程没有任何能量消耗。现对基于此原理的固定机构进行分析总结。

2008 年，美国斯坦福大学的研究人员^[37]以壁虎脚趾末端结构为灵感，在仿生壁虎机器人 Stickybot III 中设计了干性黏附的固定机构，如图 1-13 所示，为保持更完全的接

触，足端在运动时会扭曲 15°。该机构无需任何额外能量输入，仅通过在机构接触面上涂抹的合成纤维干粘合剂即可完成固定效果，但载荷必须均匀分布到机构平面上，防止力集中或是力矩使机构发生倾覆，在面对粗糙不平整的表面时表现不佳。



图 1-13 Stickybot III 的黏附固定机构^[37]

2011 年，Michael P. Murphy 等人针对攀附光滑平面设计了一款爬墙机器人“Waalbot II”^[38]，如图 1-14 所示。受壁虎攀爬机制的启发，该爬墙机器人采用仿壁虎纤维贴合剂、被动剥离机制和力感应设计来提高整体的固定表现，能够在较粗糙表面和光滑表面上完成固定并按照设定好的步态进行运动。但固定力不具有全方位的稳定性，只能抵抗剪切力，不能承受机构平面法线的外加拉力。同时“Waalbot II”缺乏壁虎具有的自清洁功能，无法实现在肮脏的地面上行走而不污染纤维贴附部分。



图 1-14 Waalbot II 粘性固定机构^[38]

1.2.4 电磁吸附式

2011 年 Markus Eich 等人^[39]设计出一款名为 MINOAS 用于船舰检测的轻质量磁攀爬机器人，如图 1-15 所示。两侧运动轮各装有 50 枚钕磁铁提供固定力，且每对磁体的磁场方向相反，以增加附着力。机构的尾部设计为弹性磁力贴附，额外加装第三块钕磁铁以增加稳定性和粘附力。该装置贴附力大，控制简单，具有一定的适应性。但缺点是无法控制吸附力大小，工作空间仍为铁磁性表面。



图 1-15 磁攀爬机器人 MINOAS 的固定机构^[39]

2022 年, Zhu 等^[40]设计了一款基于多磁体同轴旋转的紧凑型轻便磁性固定机构, 如图 1-16 所示。该固定机构包括两层多个扇形永磁体, 其中上层可以相对于下层进行同轴旋转, 可以通过旋转到特定角度来在固定和松弛状态之间切换, 并且可以通过改变该旋转角度来近似线性地控制吸附力, 可将其作为在钢结构中工作的机器人的固定平台。该固定机构结构小巧、控制方案简单, 磁力固定状态下能够实现自锁, 但其工作空间要求具有铁磁性而且机构的旋转磁体不影响到其他组件工作。

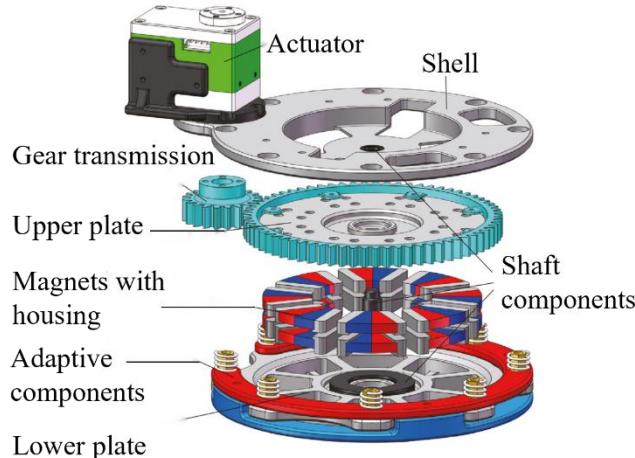


图 1-16 多磁体同轴旋转固定机构^[40]

1.2.5 正负气压式

1. 正压固定式

此类机构借助高速旋转的螺旋桨产生空气推力将机构压紧在表面上。该方法虽不要求工作平面的粗糙度, 但对表面平整度要求高, 适用于墙壁、屋顶等表面。主要研究工作有 2018 年 Rohith M 等人^[41]设计的与四轮车配合使用的正压固定机构, 如图 1-17(a)所示。它可通过调整转速来实现压紧力的大小调控, 但无法与曲面等复杂环境完成正压固定, 适应性差; Zhou 等人^[42]于 2018 年提出的旋流吸附固定装置, 如图 1-17(b)

所示。该装置利用空气旋流产生惯性效应产生负压并保持吸附力，它可以在不与墙壁接触的情况下工作，摩擦阻力较小，但装置必须和表面保持一定距离才能发挥作用。

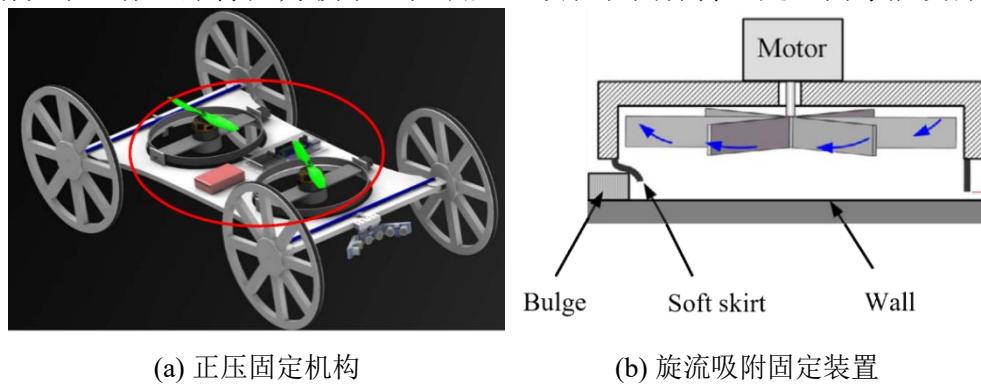


图 1-17 正压贴附装置^[41,42]

2. 负压固定式

负压原理主要是借助真空吸盘来与平面完成固定过程。此类方法适用于光滑整洁的平面，例如瓷砖、玻璃或漆面等。有许多学者依据此原理设计了一系列的负压固定机构：2009 年，Wang 等^[43]为攀爬玻璃幕墙的毛毛虫机器人设计了吸附模组，如图 1-18(a)所示；2018 年，Avadhoot Sinkar 等人^[44]设计了一种具有形状记忆合金驱动的负压固定装置，如图 1-18(b)所示。该组织具有轻质量、小体积和低驱动噪音等优点。2022 年 Miguel Hernando 等人^[45]在模块化自主机器腿上使用了真空吸盘，如图 1-18(c)所示，它可使机器人附着在不同类型的工作表面上。2022 年 Shi 等人^[46]设计实现了一种用于变曲率表面固定的主动柔顺吸附装置，如图 1-18(d)所示，该装置能够在具有可变曲率的大型复杂部件的表面上稳定地吸附，吸附力大，且对于弯曲的平面具有一定的适应性。

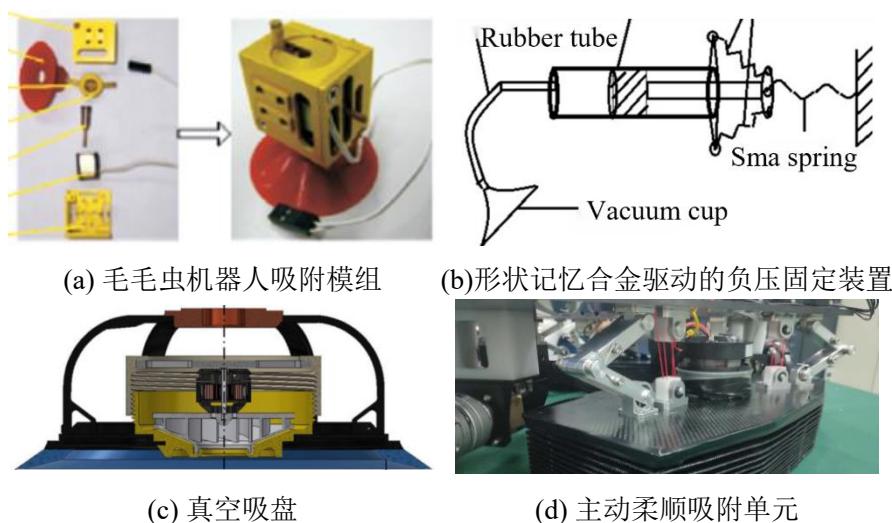


图 1-18 负压吸附装置^[43-46]

综上叙述分析，上述固定机构由于固定机理不同，对环境的要求、特点与优劣区分较为明显：真空吸附爬壁机器人要求表面光滑，运动效率较低；干性黏附机器人破

坏性小但不适用于潮湿有水或有尘土的环境表面；电磁吸附机器人的工作空间则局限于铁磁性表面；钩爪攀附机器人的能耗低，机身小，要求表面具有一定的粗糙度。

考虑到本课题所研究的固定机构的应用场景为树干、岩石等复杂的粗糙表面，故在此类表面上电磁吸附、正负气压式固定机构因为物理机制的原因不再适用。仿壁虎式的干性黏附机构通常在光滑的表面上工作，粗糙表面不仅会带来较大磨损，而且在自我清洁和接触面积减小方面存在缺点^[47]。故针对该类粗糙的自然介质表面，主要考虑机械抓附式的固定机构。针对上述所有机构中可适应粗糙表面（树皮、岩石等复杂环境）的固定机构进行比对分析。结果如表 1-1 所示：

表 1-1 机械抓附式固定机构性能对比

机构类型	负载能力	能耗	适应性	复杂度	刚度	耐久度
环绕锁紧式	差	低	差	低	良	高
机械夹持式	良	高	良	低	良	高
钩爪攀附式	优	中	优	高	优	中

优一良一差，高一中一低

根据上表调研结果及研究目标综合分析，拟设计一种固定机构，在保证夹持力能满足要求的前提下尽可能降低能耗并简化传动系统减轻机构自重。希望该固定机构能攀附固定在角砾岩、浮岩、玄武岩和树木表皮等复杂粗糙表面^[7]上。因树木形状、岩石表面几何参数的多样性，固定机构需对此表现出一定的适应性与在不同表面下夹持的稳定性。因此，本研究以“钩爪攀附式”为固定机理，提出一种能适应不同复杂环境、夹持稳定性好效率高且传动系统简单的抓附式固定机构。

1.3 研究内容

本文基于“钩爪攀附”的固定机理提出一款以微刺机械锁定为基础，并结合简化传动、分级顺从等参数要求的固定机构，该机构由单个电机驱动，控制简单，在各运动关节处设置被动约束，来实现更高的适应性。在具有大抓附力，运行效率高的优点的同时能达到在粗糙表面上的固定效果以及具有一定的地形适应性。

本文首先对固定机构进行钩刺分支设计和运动学分析优化，在此基础上对其夹持性能、适应表面要求进行系统分析，进而完成传动系统和固定机构的全面设计分析，并完成机构结构力学的有限元分析，进行多刚体动力学仿真分析，最终制作样机并进行实验，完成机构结构设计及图纸。

1.3.1 机械结构设计

首先进行文献调研，总结介绍了各种爬行机器人的研究背景与实际意义，然后依据机器人末端装置不同的固定原理进行分类，分析目前固定机构研究领域存在的问题和各类机构的不足之处。结合此固定机构能够适应不同的粗糙表面并完成贴附的设计要求，确定新的机构主体构型与设计方案，计算机构的空间自由度，设计传动系统并完成整机结构和图纸绘制。若选择进行实物制作，应考虑对社会、人与自然的影响，从工作原理、技术性能和经济效益等方面对所提出的设计方案进行可行性分析。并在毕业论文相关章节中对所选结构、方案及总体进行经济性分析和评价，同时对上述诸因素进行考虑的分析及评价。

1.3.2 理论分析仿真

对机构进行理论分析，得到固定机构的工作表面要求；将模型简化并保留基本运动约束进行多刚体动力学仿真，得到关键驱动参数，为制作样机提供理论指导；对钩刺与表面接触部分进行力学分析，针对关键受力件进行有限元仿真，校核刚度和强度。

1.3.3 样机实验验证

在得到关键驱动参数后进行市场调研并完成驱动电机选型，根据设计要求与经济性、环保性需求选择合适的材料成型工艺，制作样机并装配。随后利用微控制器来控制电机运动使机构完成固定抓附、主动分离流程，选取符合要求的抓附表面进行样机实验，测得期望的数据并结合仿真结果验证其在机器人系统中的可行性。

1.4 研究方案

1.4.1 理论基础

本课题重点运用到机械原理、机械设计、材料力学、理论力学及机器人学等相关理论知识，以及三维建模虚拟仿真、有限元分析和 SolidWorks 建模等重要技术。

机械原理包括平面机构整体和单独构件、运动副的运动、自由度计算与动力学分析，以及机械的平衡、机器运转和速度波动的调节、平面机构的力分析。

机械设计通过对机械原理和机构的力、力矩分析等进行零件参数设计，作为机器人设计一项重要工作，运用机械设计相关知识，根据移动机器人的要求设计合理有效

的完整结构方案。

材料力学研究零件结构材料在外加载荷作用下产生的应力应变，并对强度、刚度等参数进行计算校核，研究材料稳定和材料破坏的学科。运用材料力学，可以分析所设计机械结构各部分强度，刚度是否符合要求，以在满足性能要求的前提下达到设计的安全、健康、可持续发展。

理论力学通常分为三个部分：静力学、运动学与动力学。静力学研究作用于物体上的力系的简化理论及力系平衡条件；运动学只从数理模型角度研究物体几何运动特性而不涉及物体的受力；动力学则研究物体机械运动与物体受力的关系。合理正确的力学分析有助于进行简单的选型和模型的大致尺寸估算。

机器人大学是了解掌握机器人的基本原理和建模方法，借助机器人大学可建立系统完整的理论体系，为我们实际设计符合性能要求的完整机械体统打下必要的知识基础。围绕课程的重点内容，设计了包括机器人运动与动力学、驱动与位姿轨迹控制、机构力控制、智能控制等课程内容，为我们设计移动机器人提供了强大的数学武器。

三维建模虚拟仿真技术是机器人设计的一个重要组成部分，借助相应参数化建模软件建立三维模型并对其进行动静性能分析，对虚拟模型进行迭代优化，指导最终的实物样机实验。

有限元分析是指利用极限与离散的方法对真实物理系统进行模拟。该方法借助极限的数学思想，利用数量较多但简单的小单元体，对单元之间的相互作用和自身特性进行定义，可在一定程度上模拟真实物理环境。通过正确应用有限元分析，可在仿真虚拟模型而不是物理原型样机上有效地执行设计迭代，得到最终符合要求的设计方案。

SolidWorks 建模分析有助于依据已有设计建立对应的参数化三维模型，并对模型进行应力应变分析、动力学分析等关键步骤的计算与校验。

1.4.2 研究方法

本文在设计仿真制造实验全过程中采取理论、仿真及实验研究相结合的研究方法。

(1) 根据设计要求，基于查阅的文献与所学知识，设计出机构大致草拟构型，确定机构的驱动手段、连接方式等基本问题。此过程既离不开对已有机构的合理参考与借鉴，也不能缺少创新性的思考，设计出来的机构需满足最基本的功能需求，并在此基础上进行进一步的分析与计算。

(2) 通过建立数学模型的方法初步验证方案的合理性与可行性，以此来选择合适的结构参数。固定机构的设计参数主要包括微刺的几何尺寸、排布方式和约束类型、机构分级约束的布局等，通过数理模型分析夹持力的特点、变化趋势与夹持稳定性，评估机构对不同抓附粗糙表面环境的适应性和夹持可靠性与负载能力。最后将优化目标

设定为优化函数，通过优化设计参数来达到最优的设计效果。

(3) 通过 Fusion360 建立三维模型并在 Adams 中搭建虚拟样机仿真平台，验证机构设计方案和运动可行性，完善机构设计与运动控制方案。

(4) 依据仿真实验的结果和搭建好的三维模型进行实物样机的制造、装配。考虑材料成型工艺、公差配合、粗糙度和强度刚度等因素，选取合适的成型工艺进行样机制造。依据设计目标与运动特点选取合适的控制方案，建立样机实验平台，进行样机实验、数据测量和总结对比分析。

1.4.3 研究步骤

对于本抓附式固定机构设计与研究课题，采用先进行设计，再通过虚拟样机仿真验证，最后改进调整的总体思路。首先，完成机构的大致构型与总体方案设计，然后进行具体的参数化设计与数理模型建立和分析。借助三维模型绘制来针对设计方案进行仿真分析，根据仿真结果对所得固定机构的结构件进行改进与调整，力求能更好地兼顾各方面的要求，最终制作零件及样机并进行实验。整体步骤如流程图 1-19 所示。

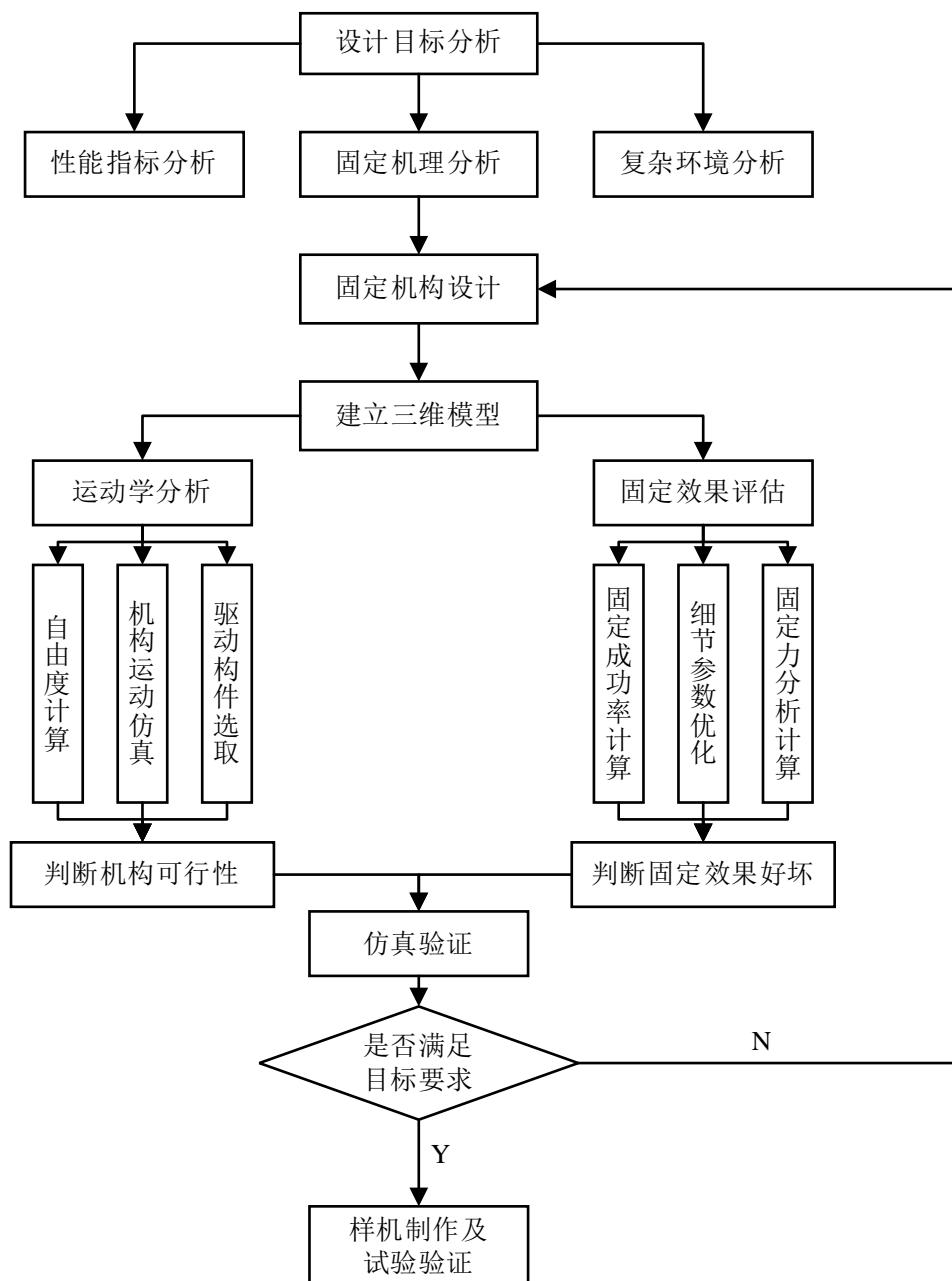


图 1-19 设计流程

1.5 章节安排

本论文分为六章，各章节安排如下：

第一章：绪论。介绍并总结目前存在的攀爬机器人其末端使用的固定机构的研究现状，根据不同工作表面对其分类，分析其存在的不足之处，明确研究内容并确定研究方案与步骤，提出通过“钩爪攀附式”的固定机理，设计适应性好、传动系统简单的抓附式固定机构的研究目标。

第二章：机构设计与分析。基于已有抓附式固定机构的设计方案，提出带有旋转限位机构的微刺分支臂和单驱动的多层次变半径绞盘，求解连杆臂的参数并给出变半径绞盘的设计方案。

第三章：抓附性能分析。分步展示了固定机构的抓附与分离过程，对单分支臂和整体固定机构进行抓附力建模分析，给出单一钩点的可达空间、机构运动限制，在此基础上对抓附表面进行分类并给出对各类抓附表面的几何特性要求。

第四章：有限元分析与仿真实验。选取关键零部件建立 CAD 模型，借助 Ansys 完成有限元分析和强度校核。利用 Adams 软件对抓附式固定机构进行虚拟样机仿真实验，验证了机构的运动可行性。提出一种机器人系统测试运动链，进行步态规划并完成仿真实验。

第五章：实物样机验证。依据仿真数据和前文分析结果，选取驱动件、标准件与材料成型方法进行样机制造与搭建。选取合适的抓附表面测试验证样机设计方案。

第六章：全文对固定机构的设计研究的总结与展望。

1.6 本章小结

本章是全文的绪论，对现存的攀爬机器人末端固定机构的国内外研究现状做了简洁综述，阐述了不同工作表面下各类机构的优劣之处，提出并明确了本课题的研究内容和方案。

本章确定了机构的固定机理为“钩爪攀附式”，综合其他种类固定机构的优点，为下文提出的抓附式固定机构提供了理论基础和研究方法：按照各模块分别进行机构构型设计，对参数进行优化计算；对固定机构的抓附效果进行理论分析；进行有限元分析、运动仿真，校核验证设计方案的可靠性、可行性。

最后本章对整篇论文进行了工作介绍和章节安排。

2. 固定机构设计与分析

2.1 钩爪攀附机理

根据上一章节对各种抓附固定机构的总结分析，结合本课题应用背景与设计目标，确定选用“钩爪攀附式”的运动机理作为主要设计思路。现对此类固定锁紧机制进行理论建模与计算。

钩刺在自然界非常常见，体型较大的动物例如猫、浣熊等可将手爪刺入树木和树皮表面来进行攀爬运动，体型较小的昆虫、节肢动物则利用腿足末端的微小倒刺捕捉粗糙表面凹凸并完成自身的固定或自由运动，无需穿透表面^[6]。对于较硬的抓附表面，例如岩石、坚硬树皮等不可破坏表面，依靠微刺与粗糙凸起的摩擦力完成自锁固定；而较软的表面，如软木、泡沫板等通过钩刺刺入来实现抓附。前者的固定力和稳定性较好，后者的固定机理在机体尺寸、微刺材料的磨损消耗和节能的方面更具优势。

2018 年，Xu 等^[48]对粗糙平面进行轮廓模拟，绘制了任意粗糙壁面上的凸形曲线并按照周期进行划分为 a、b、c 三种，如图 2-1 所示。b、c 曲线轮廓存在容纳钩爪的沟槽样凸起，在认为不破坏突起的前提下可保持夹持稳定，因此仅需对 a 样式曲线进行分析。

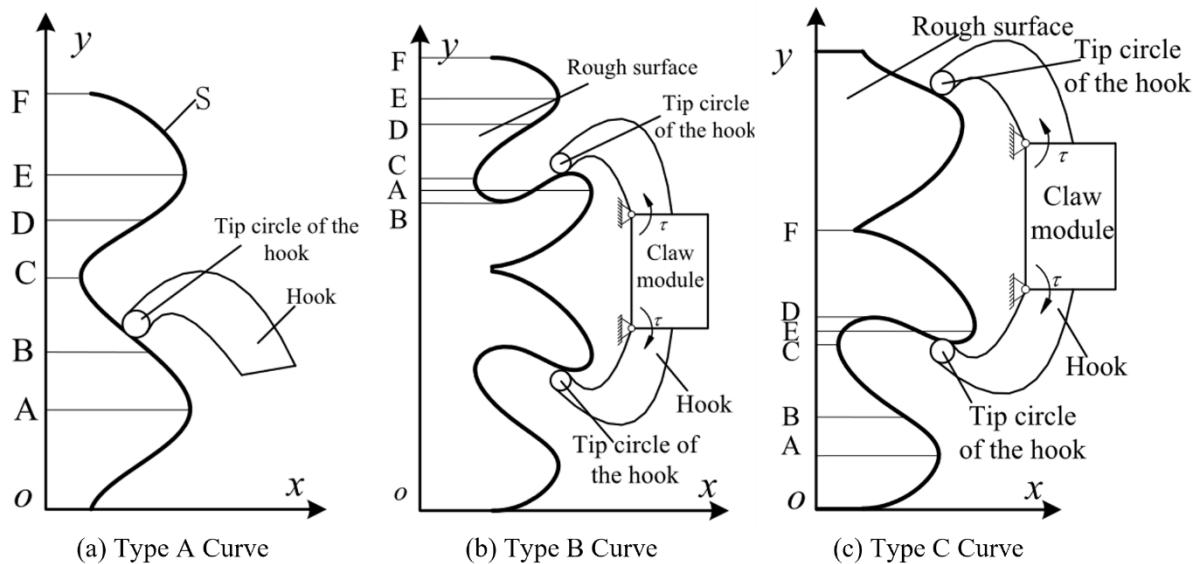


图 2-1 凸凹曲线轮廓^[48]

Asbeck 等人^[6]将尖刺-凸面接触模型视为刺与斜坡的点接触，平面理论模型如图 2-2(a)所示。Wang 等^[49]从钩刺失效方向出发对钩刺尖端进行受力分析，但未综合所有受力给出自锁条件。故本节针对微刺自锁较为通用的条件进行了分析计算。设刺尖与粗糙表面的摩擦系数为 μ ，斜坡投影与水平线的夹角为 α ，施加给微刺框架的外力 F 与水平方向夹角 β ，单根微刺受到沿刺入方向的压力 F_s 与平面法线夹角为 ϕ ，受力分析见

图 2-2(b)所示。下式给出给出自锁的力表达方程组：

$$\begin{cases} f = \mu(F_s \cos \phi - F \sin(\alpha - \beta)) \\ f + F_s \sin \phi > F \cos(\alpha - \beta) \end{cases} \quad (2-1)$$

当摩擦系数 μ 、外力方向角 β 、微刺刺入角 ϕ 和接触面倾角 α 满足如下条件时，可认为尖刺与粗糙表面实现自锁：

$$\begin{cases} \mu > \mu' \\ \mu' = \frac{F \cos \theta - F_s \sin \phi}{F_s \cos \phi - F \sin \theta} \end{cases} \quad (2-2)$$

其中 $\theta = \alpha - \beta$ ，命名为外界参数角， μ' 为保持自锁的最小摩擦系数。

为进一步探究外界参数角、微刺刺入角等因素对机构自锁的影响，选择一定范围内的摩擦因数绘制出 μ' 与 θ 、 F 及 F_s 的关系图像，如图 2-3 所示。从图像可得，随着 F/F_s 比值的不断增大，在其他条件不变的情况下，机构自锁所需的最小摩擦系数不断减小，同时也可通过降低刺入角 ϕ 与参数角 θ 来降低机构对表面摩擦系数的要求。若其他物理环境给定，此结论对施加给框架的外力 F 的方向和外界参数提出了要求，为下一步的机构设计指导了方向。

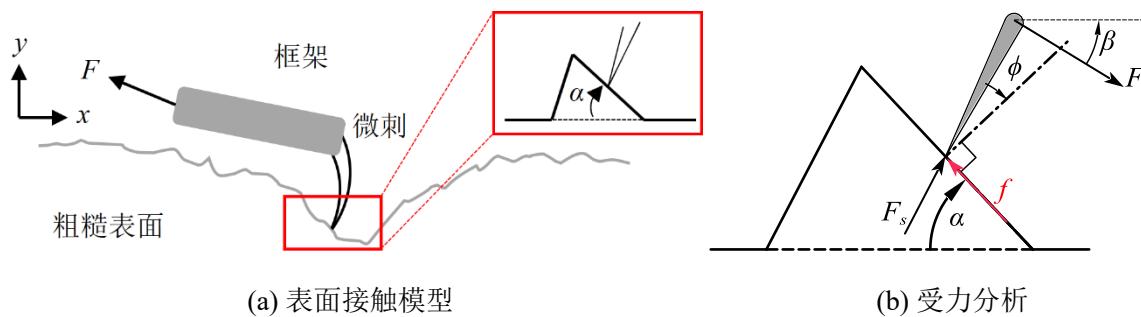


图 2-2 微刺-粗糙表面模型与受力分析

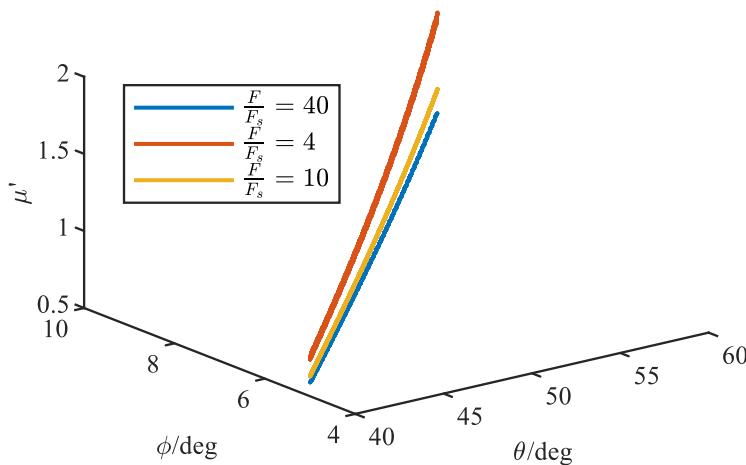


图 2-3 最小摩擦系数 μ' 和 ϕ 、 θ 、 F/F_s 的关系

2.2 固定机构理论设计

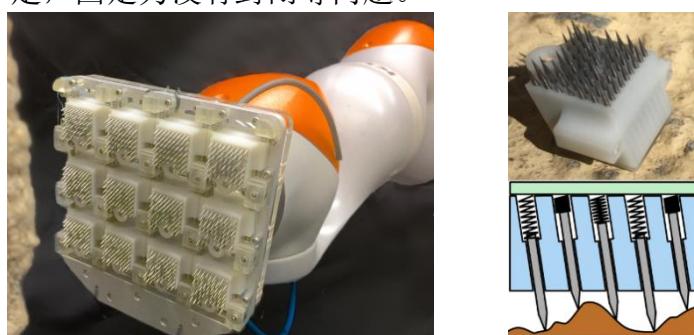
为表述清晰,本节将固定机构拆分为带有微刺阵列的分支臂和由单电机驱动的绞盘传动系统来进行设计,先从原理层面进行选型设计,而后在参数层面进行理论计算,选取最优机构参数,最后给出整体机构设计方案。

2.2.1 微刺分支臂设计

1. 微刺的阵列排布

自微刺抓附的固定机理被提出后，众学者提出了各式各样的微刺排布方式。KIM^[50]等人在爬壁机器人的足端使用了五根独立运动的脚趾，每个趾上有两个被动约束的钩刺，形成一个具有较大挠曲的结构。美国航空航天局的 Parness 等人^[7]提出了一种刚柔耦合的钩刺，采用形状沉积制造的成型工艺，将钩刺嵌入刚性件并与柔性件耦合，能承受较大的力。但类似刚柔一体成型的部件不仅制造困难，而且钩刺之间无法产生位移，没有对不同的凹凸密度做出优化适应，将二者一并记为方案 1。

为解决上述传统机构的问题, Wang^[49,51]等为辅助人类攀岩提出一种高密度线性排布的微刺手掌, 如图 2-4(a)所示, 装载于机械臂末端, 用于移动混凝土等不规则表面物体。微刺掌掌线性排布有 12 个独立的微刺模块, 每一个模块及其剖视如图 2-4(b)所示。每个模组上的钩刺密度达到 19 g/cm^3 , 与长挠曲的其他设计不同, 线性且独立被动适应的伸缩钩刺可更好地适应地形与抵抗剪切力, 记为方案 2。微刺与接触面的法线夹角为 15° , 因此机构在施加的外力在 15° 以内都能够稳定抓附, 也暴露出此机构对法向力的承载能力的不足, 固定力没有封闭等问题。

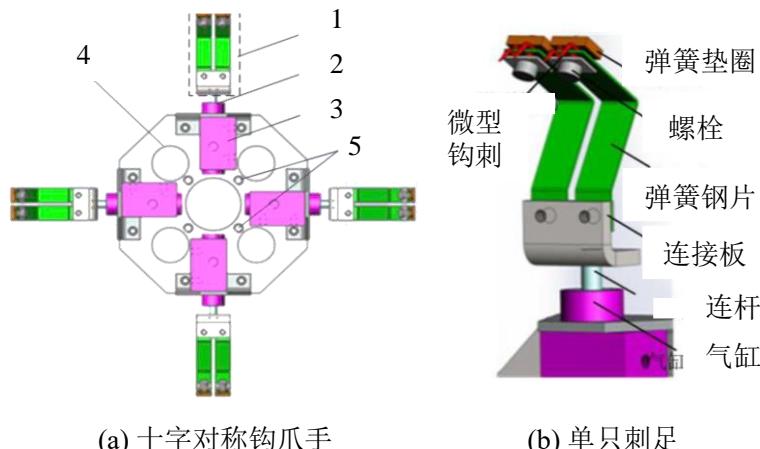


(a) 微刺掌 (b) 微刺模块及剖视图

图 2-4 微刺手掌和单个微刺模块^[51]

固定力的封闭问题可通过设计对称机构来提供稳定的夹持力。南京邮电大学的王贝^[52]设计了一款十字对称布置的钩爪手，如图 2-5(a)所示。每个刺足由独立控制的气缸和连杆完成伸展与回缩，借助可被动形变的弹簧钢片可适应粗糙壁面的不同凹凸，具体结构如图 2-5(b)所示。此种圆周阵列式的钩爪排布设计能使机构有效固定在垂直壁面

上并抵抗振动，不易出现滑落、侧翻等现象，对切向载荷和法向载荷都具有较好的适应效果。第一章提及的清华大学的 Li^[36]等人设计的欠驱动自适应抓手和此机构有异曲同工之妙，不同点在于后者采取单电机驱动，由柔性打印件来充当被动适应模块，一并记为方案 3。



(a) 十字对称钩爪手

(b) 单只刺足

图 2-5 微刺手掌和单个微刺模块^[52]

微刺排布方案不计其数，但可给出以下较为明显的结论：

- (1) 圆周阵列排布的刺爪可提供较为稳定的抓附力，进而固定在粗糙表面上。
- (2) 相较于刚柔耦合的固定钩刺设计，线性排布且能独立伸缩的微刺对粗糙表面可表现出更好的适应性。

按照叙述顺序，总结微刺机构的各个性质并对方案 1~3 进行分析。结果如表 2-1 所示，方案 1、2 的负载能力较好，但由于微刺的单向排布方式，导致其能抵抗较大的剪切力，且对外力的方向有角度限制。三类机构都使用了柔性件来适应粗糙表面，但线性排布、独立运动的微刺表现更佳。若考虑到实际制造工艺问题，刚柔耦合的方案 1 是最为困难的。综合所有因素考虑，暂无机构可同时满足设计需求，故有必要提出一种结合线性独立伸缩微刺、阵列排布钩爪的微刺排布方式。

表 2-1 微刺排布方案比较

排布方案	负载能力	稳定性	表面适应性	制造难度
方案 1	高	低	中	高
方案 2	高	低	优	中
方案 3	中	高	中	低

优—良—差，高—中—低

初步拟定的微刺排布方式如图 2-6 所示，此方案整体采取 90° 圆周阵列，每个单元由两个微刺舱组成，可延粗糙表面方向被动伸缩。每个舱内置软弹簧连接的微刺 10 枚，按照 2*5 的矩阵线性排布。

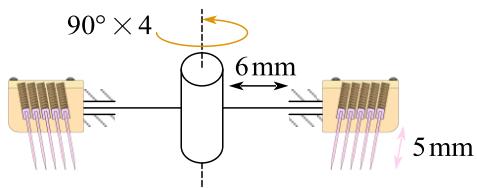


图 2-6 微刺分布方案

2. 微刺一分支连接机构设计

2013 年, Parness 等人^[27]在其设计的攀岩多刺夹爪中使用了带有压缩弹簧的连接机构, 主要由转动副和圆柱副构成, 记为连接机构 1。其模型图与原理图分别如图 2-7(a)、(b)所示。通过主动施加分离力与抓附力来抬起/压紧微刺框架, 进而实现被动分层约束。但实验结果表明, 每次固定分离周期时间长, 且存在 5% 的概率会有钩刺被遗留在粗糙表面的内部凹陷处, 造成抓附与分离流程失败。



图 2-7 连接机构 1

Pi 等人^[16]分析了此现象出现的情况, 认为是分离力直接作用于框架上, 再传递给微刺而导致分离失败。为改善此情况, Pi 提出一种连杆机构, 改变了分离力的施加方向与微刺刺入的夹角, 限定了微刺框架的线性伸缩距离。Li^[36]等设计的连杆机构如图 2-8 所示, 在机构 1 的基础上将圆柱副替换为简单可靠的移动副, 以适应连杆的驱动方式, 但在适应性上有所不足。

综合以上三种机构, 选定可改善钩刺分离情况的连杆机构来传递分离和抓附力, 同时在钩刺框架与主体连接处添加旋转副来连接二者。为防止机构过度运动造成紊乱, 对旋转副添加 ±30° 的运动约束, 限位原理和连接机构如图 2-9(a)、(b)所示。

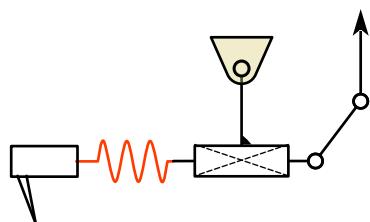


图 2-8 连杆驱动的连接机构

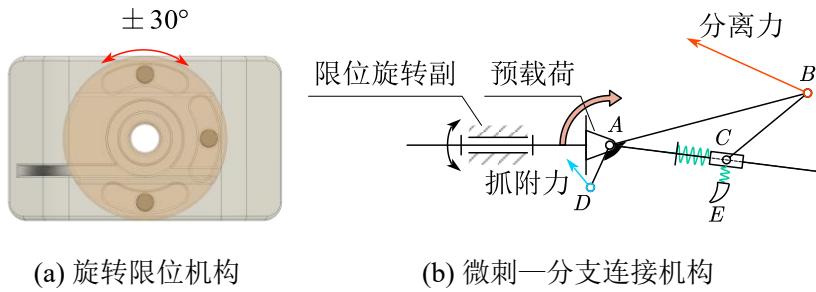


图 2-9 拟选机构方案

该机构的自由度可通过此公式计算：

$$F = d(n - g - 1) + \sum_{k=1}^g f_k + v - \xi \quad (2-3)$$

其中： F —— 机构自由度；

d —— 机构空间阶数；

n —— 构件数量(包括机架)；

g —— 运动副的数目；

f_k —— 运动副自由度；

v —— 冗余约束数目；

ξ —— 局部自由度；

本章设计的连接机构可拆分为平面机构和空间机构，总体自由度可由公式(2-3)计算，机构自由度为 3。

由于仅对杆 DAB 添加驱动，因此该机构是一个欠驱动系统，每只微刺分支臂由一个张拉机构驱动。与 Pi^[16]从增大切向力与法向力之比来设计尺寸参数不同，本文通过参数计算与机构设计，以期更高的尖刺抓附锁定和抬升成功率。

在固定机构的分离过程中，旋转限位机构在复位弹簧的作用下归位，此时可视为一个平面机构，构建静力分析模型如图 2-10 所示。 F_d 是驱动机构施加给连杆结点 A 的驱动力，将微刺末端的力沿全局坐标系进行分解计算，具体过程如下：

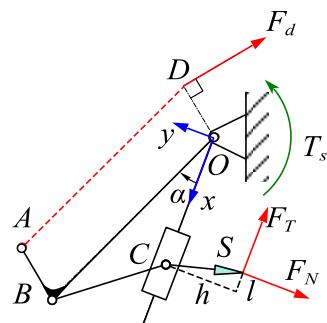


图 2-10 单刺的接触力分析

在单分支的坐标系 xOy 中，输入力矩的虚功可表示为：

$$\delta W_{in} = -F_d \| \mathbf{R}_{OD} \| \delta \alpha \quad (2-4)$$

微刺末端 S 的接触力输出虚功可写作：

$$\delta W_{out} = F_s \cdot \delta \mathbf{R}_{OS} \quad (2-5)$$

式中 $\mathbf{R}_{OS} = \|\mathbf{R}_{OC}\| \mathbf{i} - l \mathbf{i} - h \mathbf{j}$, $\|\mathbf{R}_{OC}\|$ 可通过几何关系求得：

$$\|\mathbf{R}_{OC}\| = \|\mathbf{R}_{OB}\| \cos \alpha - \sqrt{\|\mathbf{R}_{BC}\|^2 - \|\mathbf{R}_{OB}\|^2 \sin^2 \alpha} \quad (2-6)$$

将向量 \mathbf{R}_{OS} 对 α 进行微分可得：

$$\delta \mathbf{R}_{OS} = \frac{d \mathbf{R}_{OS}}{d \alpha} \delta \alpha = \rho \delta \alpha \mathbf{i} \quad (2-7)$$

其中 ρ 为 $\|\mathbf{R}_{OS}\|$ 对 α 的导数：

$$\rho = \frac{\sin \alpha \cos \alpha}{\sqrt{\|\mathbf{R}_{BC}\|^2 - \|\mathbf{R}_{OB}\|^2 \sin^2 \alpha}} \|\mathbf{R}_{OB}\|^2 - \|\mathbf{R}_{OB}\| \sin \alpha \quad (2-8)$$

代入输出虚功表达式中，得到：

$$\delta W_{out} = (F_T \mathbf{i} + F_N \mathbf{j}) \cdot \rho \delta \alpha \mathbf{i} = F_x \rho \delta \alpha \quad (2-9)$$

根据 $\delta W_{in} + \delta W_{out} = 0$ ，可得到：

$$\begin{cases} F_T = \frac{F_d \|\mathbf{R}_{OD}\|}{\rho} \\ F_N = \frac{F_d \|\mathbf{R}_{OD}\| - F_T h}{\|\mathbf{R}_{OC}\| - l} \end{cases} \quad (2-10)$$

在 2.1 小节中，给出了不同摩擦因数下尖刺一斜面自锁的理论条件 $\mu > \mu'$ ，考虑到

优化目标： $\text{minimize} \left(\left| \frac{F_T}{F_N} - \frac{l}{h} \right| \right)$ ，应确定机构参数的约束，具体约束表达式如下：

$$\begin{cases} \frac{F_T}{F_N} = \frac{F_d \|\mathbf{R}_{OD}\| (\|\mathbf{R}_{OC}\| - l)}{\rho (F_d \|\mathbf{R}_{OD}\| - F_T h)} < \frac{\mu + \tan \alpha_s}{1 - \mu \tan \alpha_s} \\ \|\mathbf{R}_{OB}\|_{min} \leq \|\mathbf{R}_{OB}\| \leq \|\mathbf{R}_{OB}\|_{max} \\ \|\mathbf{R}_{BC}\|_{min} \leq \|\mathbf{R}_{BC}\| \leq \|\mathbf{R}_{BC}\|_{max} \\ \alpha_{min} \leq \alpha \leq \alpha_{max} \end{cases} \quad (2-11)$$

为防止混淆，式中 α_s 为钩刺斜面倾角。

利用 Matlab 进行数值模拟，设定微刺刺入角 $\phi = l/h = \arctan(10^\circ)$ ，求得机构参数的最优解为 $\|\mathbf{R}_{OB}\| = 60.8 \text{ mm}$, $\|\mathbf{R}_{BC}\| = 30.8 \text{ mm}$, $\alpha = 14.5^\circ$ 。

2.2.2 传动系统设计

在传动系统的设计问题上，如何用尽量少的驱动单元来达到对不同粗糙表面更好的抓附固定效果一直是难点。首先对目前已有机构的传动系统进行总结：攀岩机器人 LEMUR3^[7]的攀爬爪上配有电机驱动的绞盘，分别用多根绳索和拉伸弹簧来抬起或下压钩爪，在表面完成适应性抓附固定。该方案需要一枚电机来驱动绞盘收紧钩爪，三枚电机用于分离钩爪与表面，系统复杂笨重且耗时长。

Lam 等^[32]设计的其灵活爬树机器人中借助一枚线性电机来抬升钩爪，关节处的预载弹簧将钩爪固定在树木表皮上。此方案设计轻便，控制简单，但仅靠弹簧的回复力来完成钩附，固定力大小有限。Nagaoka K^[34]等人在其提出的极端攀爬机器人的足端用到一种简单的张拉式固定夹爪，如图 2-11 所示。机器人的腿部给末端钩爪施加压力，令其钩张开并发生滑动，在抓附到合适的凹凸后腿部施加反向力，钩爪锁紧，整个过程额外需要一台电机用绳索将所有钩爪拉离表面。此方案能源消耗少，控制简单，但攀附锁紧完成后仅能承受延表面外法线的拉力，可移植性较差。

综上分析得知，传动系统的收紧力应由电机产生，能在钩爪端输出较大的夹持力；采用单电机的驱动特殊设计的绞盘，将分离/抓附绳索互相反向绕于其上，对绞盘的轮廓进行改良，达到变拉力的效果。

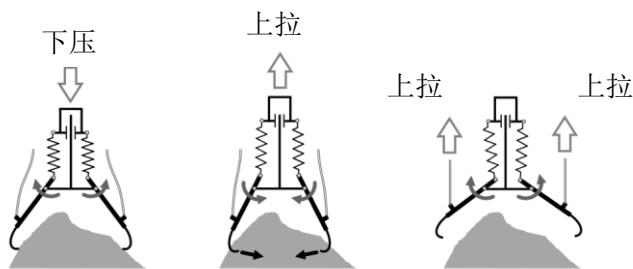


图 2-11 张拉式固定夹爪

为表述清晰，下文把传动系统分为绞盘设计与单驱动两个部分进行论述。

1. 单驱动模块

为减轻机身自重，降低控制难度，增加可靠性，拟选用单枚电机通过正反转来完成钩爪的抬升与附着。在三维建模软件 Fusion 360 中建立起部分原理样机，标注如图 2-12 所示。黑色直线、曲线分别代表分离绳索的张紧状态和松弛状态，绿色直线、曲线则代表抓附绳索的张紧状态和松弛状态，末端均连有拉簧，来被动适应不同角度下的拉伸距离。由于绞盘每层设计的较为单薄，为稳妥起见，每层绳索仅缠绕 1~2 圈，有效收紧或释放圈数为 3/4。因此有必要针对绞盘边缘和抓附索、分离索的固结点的两个距离进行理论分析，为每段绳索的截取长度提供理论参考。

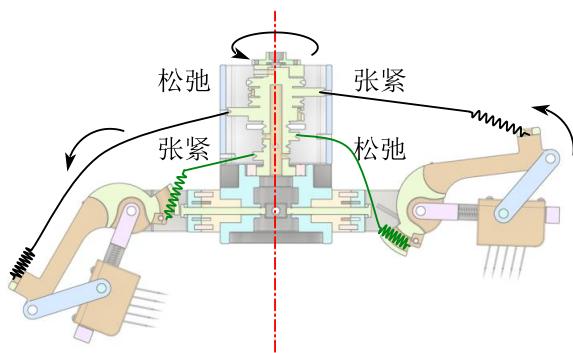


图 2-12 单驱动模型示意图

为简化计算过程，从模型剖视图中抽象出数学模型，将坐标系原点设立在转动副轴心处。如图 2-13 所示， A 、 B 、 C 三点共线，连杆(线段 AC)在绕转动副(B 点)在 zoy 面内旋转的同时可绕 y 轴在空间旋转到达 $A'C'$ ， P_1 、 P_2 分别是分离索和抓附索靠近驱动的固定端点，二者均位于 zoy 面内。

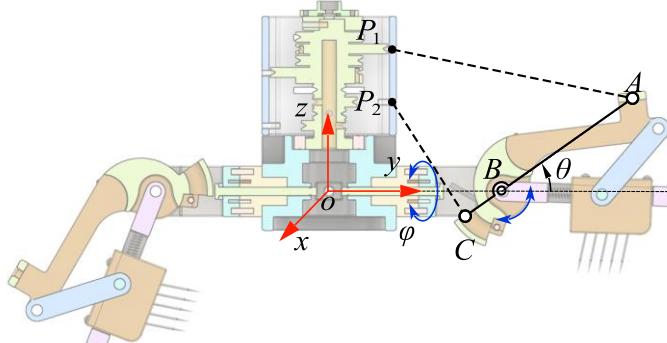


图 2-13 距离求解模型

设不动点 P_1 、 P_2 和 B 的空间坐标向量表示为： $[x_{p_1} \ y_{p_1} \ z_{p_1}]^T$ 、 $[x_{p_2} \ y_{p_2} \ z_{p_2}]^T$ 和 $[x_B \ y_B \ z_B]^T$ ，线段 AB 、 BC 的长度分别为 l_{AB} 、 l_{BC} 。

首先，点 A 绕轴心 B 逆时针旋转 θ ，得到的坐标为：

$$\begin{cases} x_A = x_B \\ y_A = y_B + l_{AB} \cos \theta \\ z_A = z_B + l_{AB} \sin \theta \end{cases} \quad (2-12)$$

接着，点 A 绕 y 轴旋转 φ ，得到 A' 的变换过程表示为： $A' = R_y(\varphi)A$ ，其中：

$$R_y(\varphi) = \begin{bmatrix} \cos \varphi & 0 & \sin \varphi \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \varphi & 0 & \cos \varphi \end{bmatrix} \quad (2-13)$$

整理得：

$$A' = \begin{bmatrix} x_B \cos \varphi + (z_B + l_{AB} \sin \theta) \sin \varphi \\ y_B + l_{AB} \cos \theta \\ -x_B \sin \varphi + (z_B + l_{AB} \sin \theta) \cos \varphi \end{bmatrix} \quad (2-14)$$

类似地，可推导出 C' 的坐标表示：

$$C' = \begin{bmatrix} x_B \cos \varphi + (z_B - l_{BC} \sin \theta) \sin \varphi \\ y_B - l_{BC} \cos \theta \\ -x_B \sin \varphi + (z_B - l_{BC} \sin \theta) \cos \varphi \end{bmatrix} \quad (2-15)$$

计算向量 $A'P_1$ 、 $C'P_2$ 的 2-范数 $\|A'P_1\|_2$ 、 $\|C'P_2\|_2$ 即可得到距离。在三维模型中测量参数信息标并列于表 2-2 中：

表 2-2 参数信息(单位:mm)

参数名称	坐标或范围
B	(0, 62.00, 0)
P_1	(0, 23.80, 49.60)
P_2	(0, 23.80, 30.80)
φ	$[-\pi/6, \pi/6]$
θ	$[-\pi/3, \pi/4]$
l_{AB}	58.00
l_{BC}	15.30

在 Matlab 中建立数学模型，绘制出向量长度 $\|A'P_1\|_2$ 、 $\|C'P_2\|_2$ 随各旋转参数的变化关系如图 2-14 所示：

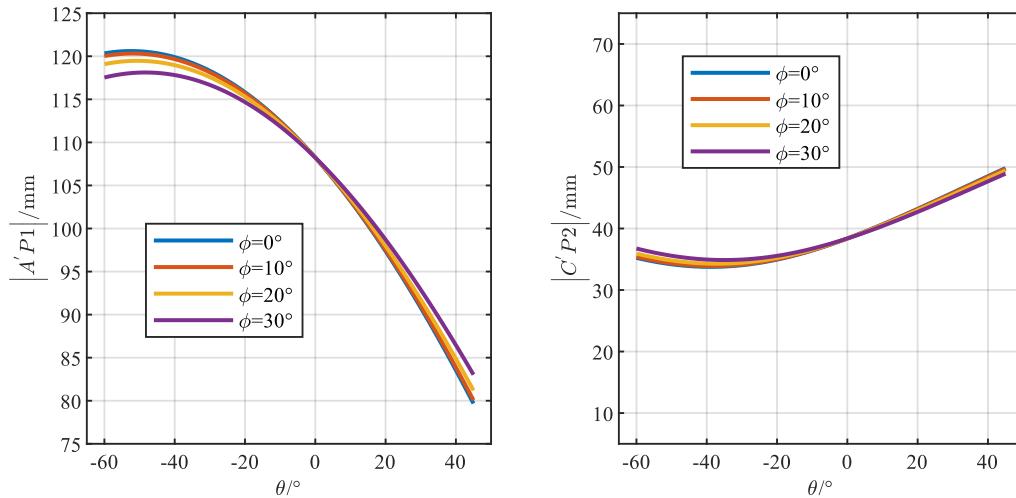


图 2-14 不同 ϕ 值下各距离随 θ 变化关系

分析图像不难得出随着 θ 的不断增大， $\|A'P_1\|_2$ 逐渐减小， $\|C'P_2\|_2$ 先略变小后增大，由于机构绕 y 轴运动具有对称性，只需对 ϕ 取一半数目的正值即可。 ϕ 对距离的影响

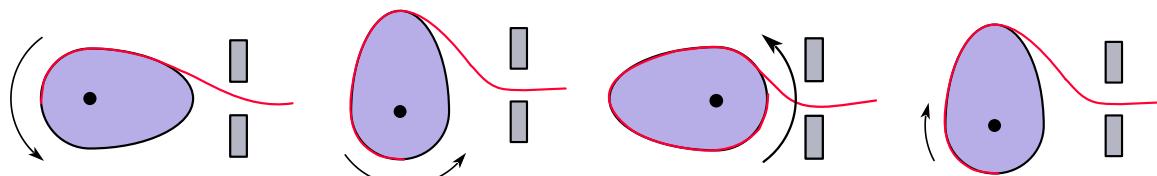
响小于 5mm，故 θ 为主要影响因素，最终可得出以下结论：

$$\begin{cases} 79.68 \leq \|A'P_1\|_2 \leq 120.61 \\ 33.77 \leq \|C'P_2\|_2 \leq 49.82 \end{cases} \quad (2-16)$$

理论部分计算完成，分离索长度极差 41 mm，抓附索长度极差 16 mm，故绞盘的大轮廓线与小轮廓线的比例应等于 41/16。

2. 绞盘设计

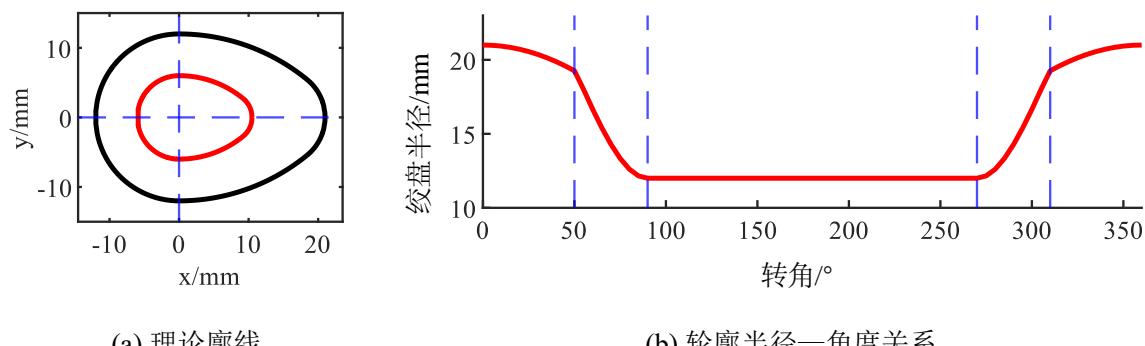
传统的圆形截面绞盘在第二圈时会出现半径增大而降低收紧力的情况，因此提出一种变截面半径的凸轮样绞盘，对其绳索的收放过程进行设计，运动流程如图 2-15 所示。



(a) 预紧, 绳索卡入槽中 (b) 电机转动, 绳索收紧 (c) 收紧力达到最大 (d) 电机反转, 恢复初态

图 2-15 绞盘运动流程

若要使用单驱动来完成全运动流程，则须满足在缠绕收紧绳索的过程中要释放分离绳索，反之亦然。图 2-16(a)为大小廓线的理论图像，对其轮廓半径的变化过程进行测算，结果如图 2-16(b)所示，从中算得收紧力理论放大比为 1.75。



(a) 理论廓线

(b) 轮廓半径—角度关系

图 2-16 理论廓线与轮廓半径变化图像

2.3 本章小结

本章首先对钩爪攀附式的运动机理进行分析与计算，得出尖刺—斜面自锁的条件；然后对比选取线性约束且独立伸缩的圆周阵列微刺排布方式，接着提出一种带有旋转限位的连接机构，并以增大微刺分离成功率为目对尺寸参数进行最优化求解，而后提出一种单驱动的绳传动系统，借助变半径绞盘达到变拉力的张紧效果。

3. 固定机构抓附效果分析

3.1 抓附过程

本文设计的抓附式固定机构由传动系统和四组圆周排布的微刺分支臂组成，传动系统主要包括单枚驱动电机、凸轮绞盘和八根张紧绳索，微刺分支臂按照功能可拆分为驱动件、传递件与微刺模块。如图 3-1 所示，粗糙表面的抓附固定总流程共分为五个步骤：

- (a) 四个微刺钩爪在扭簧回复力作用下处于初始状态，对置钩爪夹角较小，呈现环绕式的姿态；
- (b) 驱动电机正向转动，分离绳索逐渐缠绕到各自层级的变半径绞盘凹槽内，黑色虚线箭头表示此时绳索张紧，带动驱动件和整个微刺分支臂沿着黄色箭头方向转动，扩大夹角为下一步抓附提供足够的空间。
- (c) 驱动电机反向转动，分离绳索从绞盘凹槽内释放，此时整个分支臂在扭簧回复力的作用下被动贴附在粗糙表面上，无需复杂的控制。电机继续转动，抓附索收紧进一步增大机构的抓附力。
- (d) 电机转动至小半径区域，此时红色箭头表示的抓附力达到峰值，使驱动连杆带动连接杆挤压微刺框架，微刺阵列沿黄色箭头方向搜寻可抓附锁定的凸峰或凹陷，此时固定机构完成抓附。
- (e) 在完成抓附运动流程后电机开始反转，抓附索从各自层级的凹槽脱离，分离索开始缠绕到绞盘上进行抬升钩爪，到达钩爪的上极限位置后停止，为下一次的抓附固定做准备，整个固定机构运动流程完毕。

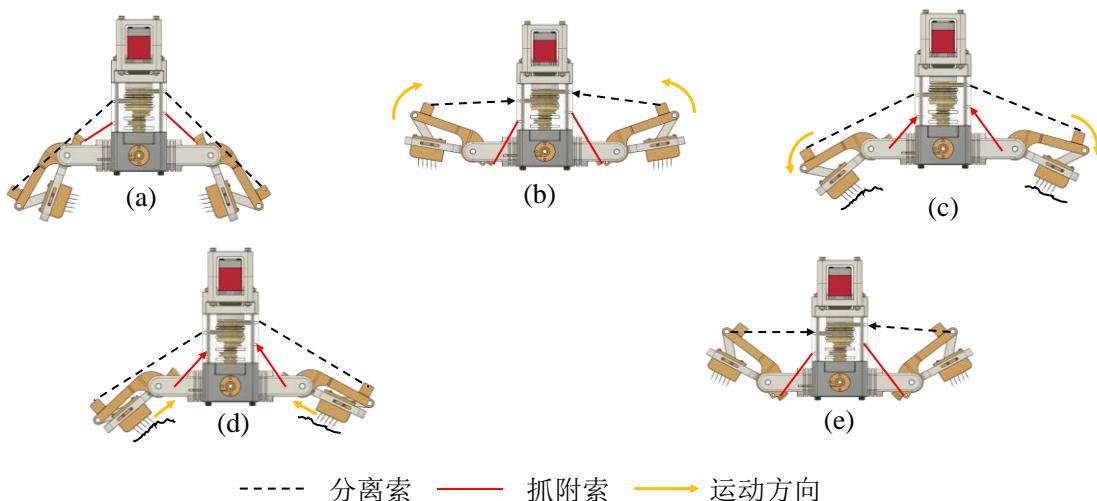


图 3-1 抓附运动流程

(a) 初始姿态 (b) 钩爪抬升分离 (c) 微刺被动贴附 (d) 微刺贴紧表面滑动完成锁定 (e) 极限分离姿态

3.2 抓附力分析

为验证微刺分支臂的设计具有实际应用价值，本小节以钩刺阵列对抓附力进行分析计算。在三维空间中对加入了旋转限位模块的单部分连接机构建立静力模型，如图 3-2 所示。 T_s 、 T_r 表示对应关节处的被动扭矩， F_s 是抓附绳索提供的张力， F_{xo} 、 F_{zo} 为支座反力，整体静力平衡方程可写作：

$$\begin{bmatrix} \varphi \cdot k_\varphi + \sum F_{yi} d_i \\ (68.7^\circ - \theta) \cdot k_\theta + F_s d_s + \sum F_{zi} l_i + \sum F_{xi} d_i \\ F_{xo} + \sum F_{xi} \\ F_{zo} + \sum F_{zi} \end{bmatrix} = \mathbf{0} \quad (3-1)$$

将 F_T 与 F_N 通过平面旋转变换代入公式(2-18)得到：

$$\begin{cases} \sum (F_{Ti} \cos \theta + F_{Ni} \sin \theta) = -F_{xo} \\ \sum (F_{Ni} \cos \theta - F_{Ti} \sin \theta) = -F_{zo} \end{cases} \quad (3-2)$$

若不考虑压缩弹簧的形变，可用合力 F_T 替代 $\sum F_{Ti}$ ， $\sum F_{Ni}$ 同理。将公式(2-10) 中得到的结果代入，可得：

$$\begin{cases} F_{xo} = -\frac{F_s d_s + k_\theta \theta'}{\frac{d\mathbf{R}_{OE'}}{da}} \cos \theta - \frac{(F_s d_s + k_\theta \theta') - F_T}{\|\mathbf{R}_{OB}\| - l} \sin \theta \\ F_{zo} = \frac{F_s d_s + k_\theta \theta'}{\frac{d\mathbf{R}_{OE'}}{da}} \sin \theta - \frac{(F_s d_s + k_\theta \theta') - F_T}{\|\mathbf{R}_{OB}\| - l} \cos \theta \end{cases} \quad (3-3)$$

其中 θ' 表示扭簧的扭转角， $\mathbf{R}_{OE'}$ 代表微刺阵列作用力的中心，其位置可通过下式确定：

$$E' = \sum F_{xi} d_i / \sum F_{xi} \quad (3-4)$$

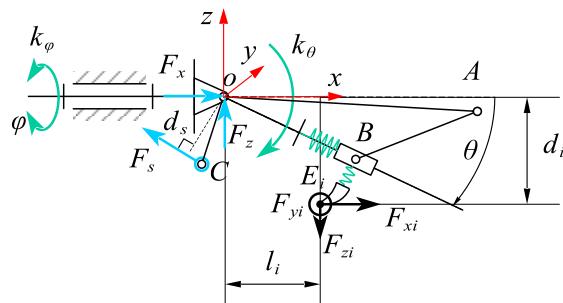


图 3-2 静力模型

在整机模型中对夹持力螺旋进行建模分析，按照逆时针对微刺机构阵列进行编号与力求解。模型力分析如图 3-3 所示，每个分支上存在支反力和抓附力矩，整个机构在三个方向均可承受一定程度的外力，旋转限位机构在接触末端可提供绕 z 轴的扭矩，保护尖刺不被过大的剪切力折断。四个分支上的抓附力矩均由扭簧的回复力与相同的张紧力构成，会随着抓附表面略有差异。

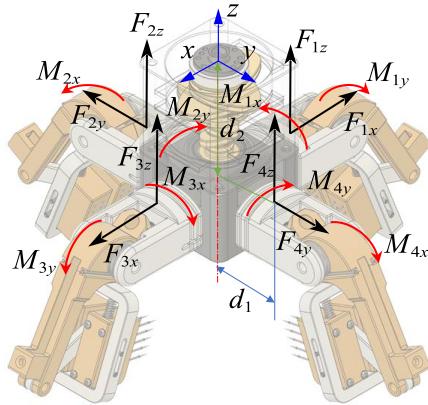


图 3-3 整机夹持效果分析

最终，整体机构的夹持力分析由下式给出，其中 ϕ_i 为每个限位机构的扭转角，三个方向的支反力可由式(2-19)算得， x 与 y 方向的扭矩由支反力、弹簧扭矩及绳索张紧力相互耦合构成，由于支反力已知，故应对后两部分的耦合扭矩进行分析计算。

$$\begin{pmatrix} F_x \\ F_y \\ F_z \\ M_x \\ M_y \\ M_z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} F_{1x} - F_{3x} \\ F_{4y} - F_{2y} \\ F_{1z} + F_{2z} + F_{3z} + F_{4z} \\ M_{2x} - M_{4x} + F_{4z}d_1 - F_{2z}d_1 + F_{4y}d_2 - F_{2y}d_2 \\ F_{1z}d_1 - F_{3z}d_1 + M_{3y} - M_{1y} + F_{1x}d_2 - F_{3x}d_2 \\ k_\varphi(\phi_4 + \phi_1 + \phi_3 - \phi_2) \end{pmatrix} \quad (3-5)$$

单分支臂的耦合驱动力矩分析如图 3-4 所示， $R(\omega)$ 表示驱动轴转过 ω 角度时电机输出扭矩的力臂， d_s 为抓附力 F_s 的力臂，以此求得分支受到的耦合力矩：

$$M_x = \frac{T_s}{4R(\omega)} d_s \cdot \eta + 2k_\theta \cdot (68.7^\circ - \theta) \quad (3-6)$$

式中 T_s 为驱动电机扭矩，初选 $2.45 \text{ N} \cdot \text{m}$ ， η 传递效率=95%，扭力弹簧劲度系数 $k_\theta = 5.6 \text{ N} \cdot \text{mm}/^\circ$ 。分析此模型可得到当微刺滑块完成锁定后，图中绿色的拉力弹簧发生形变来提供拉力，弹簧的劲度系数不能过小，由上述计算可推算出最小劲度系数为 6.13 N/mm ，代入所有模型数据，绘制出抓附力矩如图 3-5 (a)所示。与之类似，电机反转提供的分离力矩可由下式计算：

$$M_x' = F_p d_p \cdot \eta - 2k_\theta (68.7^\circ - \theta) \quad (3-7)$$

其中 F_p 与 F_s 计算较为类似，代入相应数据绘出分离力矩与 θ 的关系如图 3-5 (b) 所

示。由于力矢量 \mathbf{F}_p 在旋转过程中会与力矩作用点 B 重合导致出现“死点”，无法作用到钩爪上使其分离，故应重新约束机构 θ 的下限，设新约束范围为 $[\theta_{min}, 45^\circ]$ ，最小值由下列等式给出：

$$\mathbf{R}_{AB}(\theta_{min}) \cdot \mathbf{R}_{BP} = -\|\mathbf{R}_{AB}\|_2 \cdot \|\mathbf{R}_{BP}\|_2 \quad (3-8)$$

最终给出单支钩爪的转角 θ 的范围为 $[-42.2^\circ, 45^\circ]$ 。

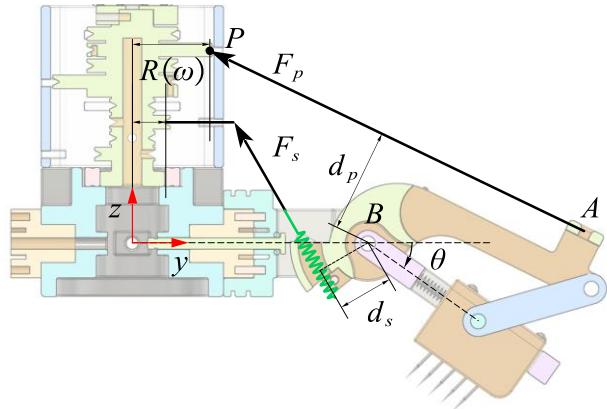


图 3-4 驱动力矩分析

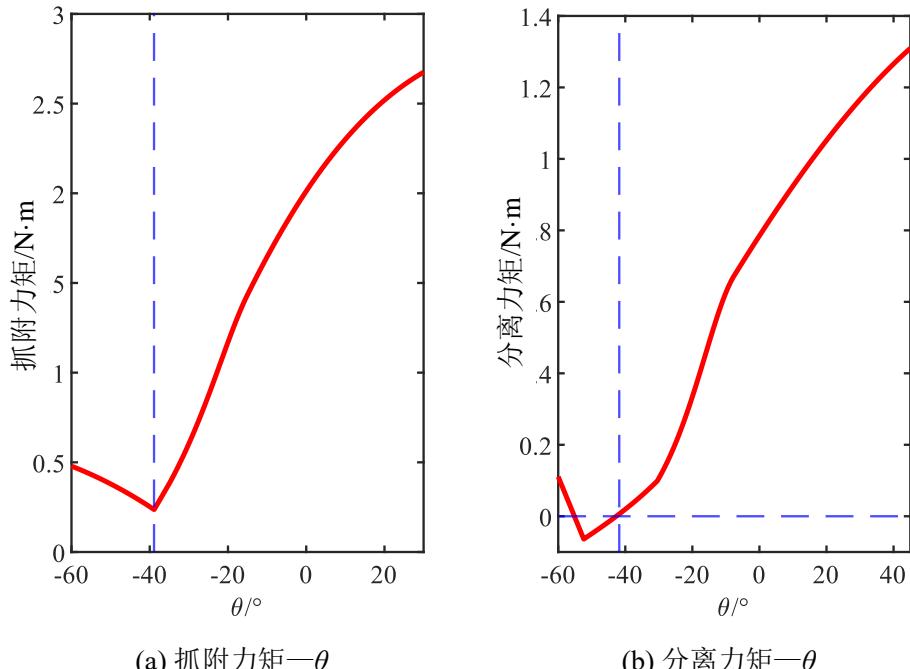


图 3-5 驱动力矩与 θ 的关系

3.3 抓附表面分析

本固定机构采用抓附原理来实现在粗糙表面的固定效果，受到运动机理、物理环境和模型大小等因素限制，需给出机构适用的表面工况与几何参数。取对置的钩爪组合，对其进行几何分析，相关参数及坐标系表示如图 3-6 所示。

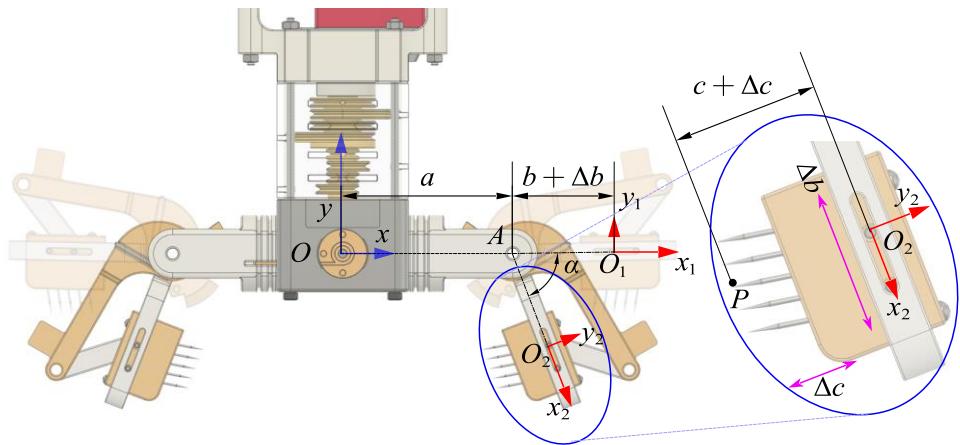


图 3-6 钩刺几何学分析

为简化计算，坐标系 xOy 建立在机构对称轴与转动副轴线相交点处，每个分支绕转动副最大转角为 α ，微刺框架可沿 O_1x_1 方向滑动 Δb 距离，每根微刺可沿 O_2y_2 方向独立滑动 Δc 距离，设微刺阵列中点 o_2P 的齐次位置矢量表示为 $[0 \ -c -\Delta c \ 1]^T$ ，则 o_2P 可通过以下齐次变换得到：

$${}^o_2P = \begin{bmatrix} 1 & 0 & a + b + \Delta b \\ 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \alpha & \sin \alpha & -(b + \Delta b)(1 - \cos \alpha) \\ -\sin \alpha & \cos \alpha & -(b + \Delta b)\sin \alpha \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} {}^o_2P \quad (3-9)$$

式中 $a=62\text{mm}$, $c=4.5\text{mm}$, $\Delta c=5\text{mm}$, $b=36\text{mm}$, $\Delta b=-5.5\text{mm}$, $0 < \alpha < 42.2^\circ$ ，绘制出不同滑动距离下的点 P 的运动轨迹如图 3-7 所示。分析图像可得点 P 到 O 的距离最大值 98.46mm，最小值 82.92mm。由于不同表面形状会影响固定效果，因此下面对机构抓附表面的大体轮廓进行分类计算。

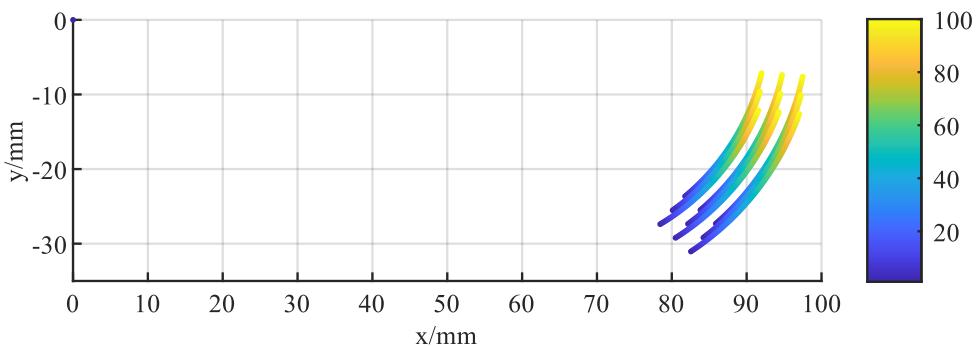


图 3-7 点 P 运动轨迹范围

1. 圆柱面

钩爪的对称式抓附固定对置钩爪与圆形截面抓附方式 1 如图 3-8(a)所示, 机构满足如下闭环表达式:

$$\mathbf{R}_{OM} + \mathbf{R}_{MP} + \mathbf{R}_{PA} + \mathbf{R}_{AO} = \mathbf{0} \quad (3-10)$$

从中求出半径的表达式为：

$$R = \frac{\|\mathbf{R}_{AO_2}\|_2 \sin \theta - \Delta y}{1 - \cos \alpha} \quad (3-11)$$

其中

$$\tan\left(\frac{\alpha}{2}\right) = \frac{\|\mathbf{R}_{AO_2}\|_2 \sin\theta - \Delta y}{\|\mathbf{R}_{OA}\|_2 + \|\mathbf{R}_{AO_2}\|_2 \cos\theta} \quad (3-12)$$

由公式(2-25)可推得 $\|\mathbf{R}_{PQ}\|_2$ 取值范围为 $[78.4, 97.5]$ ， $0 < \theta \leq 42.2^\circ$ 进而得到圆截面半径 R 的最小半径为 125.4 mm。随着分支臂的伸展，半径逐渐增大至无穷，可近似认为接触面变为平面。注意到机构自身尺寸限制了蓝色理论圆弧距离原点 O 的最小距离 Δy 需大于 14 mm，即： $\|\mathbf{R}_{AO_2}\|_2 \sin \theta - (R + c + \Delta c)(1 - \cos \theta) > 14 \text{ mm}$ ，经验算半径范围约束符合此条件。

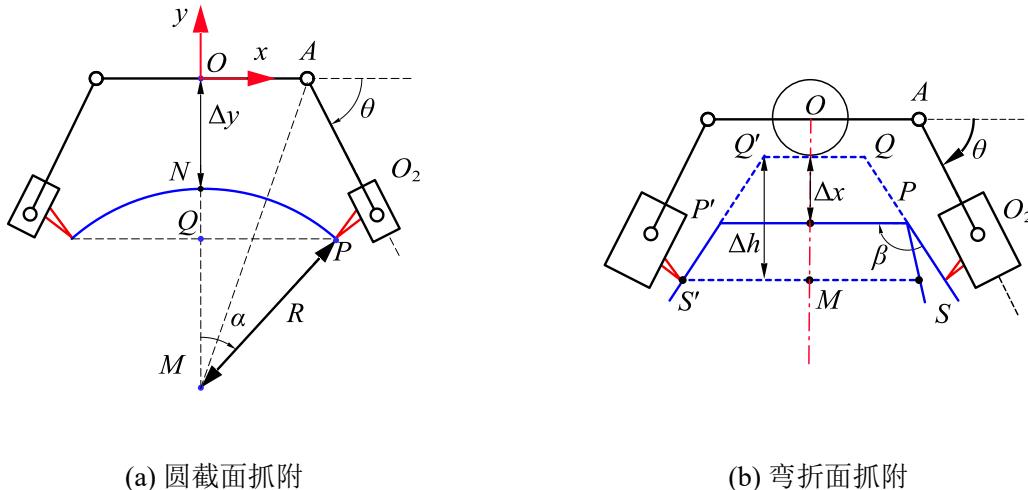


图 3-8 对置钩爪的二维抓附

2. 弯折面

对置钩爪还可抓附于梯形截面的圆台上，如图 3-8(b)所示， SS' 位于目标钩刺顶点处，某一位置 PP' 长度可表示为： $\|R_{PP'}\|_2 = \|R_{SS'}\|_2 - 2\|R_{QN'}\|_2 \tan(\beta - \pi/2)$ 。根据几何与运动约束可求得 PP' 最小值为 71.4 mm，当分支臂逐渐旋转至水平，弯折面 $S'P'PS$ 趋近于平面。

3. 粗糙平面

相比较于前两种不规则表面，钩爪抓附平面时需要对表面微凸或凹陷进行微观层

面的作用分析。如图 3-9 所示，假设单独一根钩刺在驱动扭矩 T_s 与贴附力 F_s 的作用下被动锁定在第 i 个凹陷中完成钩附，钩刺两侧存在微型凸起。由于表面摩擦系数、凸起的几何尺寸和机械强度等多种因素均会影响抓附效果，故传统的算术平均粗糙度和均方根粗糙度不适合直接用于描述抓附成功率。Pi 等^[16]采用在一个采样周期内对每完整凸峰的跨度与深度的均值来描述抓附表面的粗糙特征，该理论在本节中可描述为：

$$\left\{ \begin{array}{l} R_h = \frac{1}{5} \sum_{i=1}^5 h_i \\ R_l = \frac{1}{5} \sum_{i=1}^5 l_i \end{array} \right. \quad (3-13)$$

对于基于钩爪攀附式的固定机构而言，微刺尺寸越小越好^[52]，但过小的微刺会造成机械强度的不足，在本设计中微刺末端直径取 $100\mu\text{m}$ ，可适应较大范围内的粗糙表面。考虑锁定在粗糙表面上的微刺阵列，整体沿凸起跨度方向滑动的距离小于 Δb ，每根微刺的运动范围同样受到限制，沿凸峰深度方向不超过 Δc 。理论上相邻两个可用凸峰的平均跨度距离 R_h 应小于 Δb ，平均深度差值 $R_l - R_i$ 小于 Δc 。

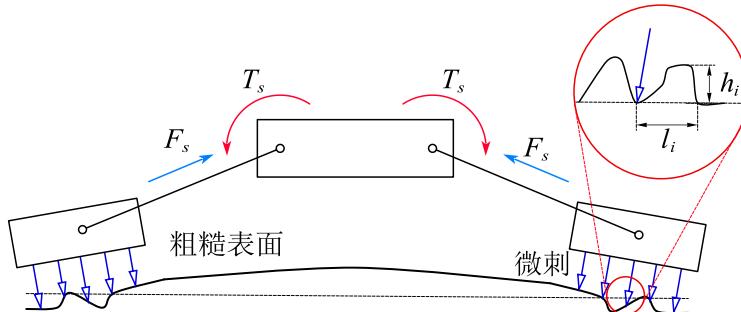


图 3-9 平面微凸分析

在完成对平面对置钩爪的几何分析后，对整机机构在圆柱面的抓附固定进行力学分析，建立模型如图 3-10 所示。 G_1 为远离抓附表面的机身部分重力，包括舵机、传动系统等； G_2 为贴附部分机身重力，包括底座、四组微刺分支臂等。 O 为底座中心， d_1 为重力力臂， $T_1 \sim T_4$ 为各分支臂抓附扭矩，对应支持力 $F_{N1} \sim F_{N2}$ 和摩擦力 $f_1 \sim f_4$ 。给出如下抓附力方程组：

$$\left\{ \begin{array}{l} G_1 + G_2 < \sum_{i=1}^4 f_i \\ G_1 d_1 < f_2 \| \mathbf{R}_{AO_2} \|_2 \sin \theta_2 + f_1 \| \mathbf{R}_{AO_1} \|_2 \sin \theta_1 + T_3 - T_4 \\ f_i = \mu F_{Ni} \end{array} \right. \quad (3-14)$$

式中 $\mu = 1.5$ ， $G_1 = 2.94\text{N}$ ， $G_2 = 3.43\text{N}$ ， $d_1 = 76\text{mm}$ 。从式(3-14)分析可得若当机构上下夹爪呈现对称状态，则重力产生的倾覆力矩仅由摩擦力力矩抵消，且后者与各 θ 在 $(0, \pi/2)$ 范围内呈正相关，故应验证在 θ 取上极限位置时是否可以完成抓附固定即可。

代入数据得重力倾覆力矩 $G_1 d_1 = 0.15 \text{ N} \cdot \text{m}$ ，摩擦力矩 $2f_2 \| \mathbf{R}_{AO_2} \|_2 \sin \theta = 1.34 \text{ N} \cdot \text{m}$ ，合重力 $G_1 + G_2 = 6.37 \text{ N}$ ，摩擦力之和为 249 N ，符合抓附方程要求。

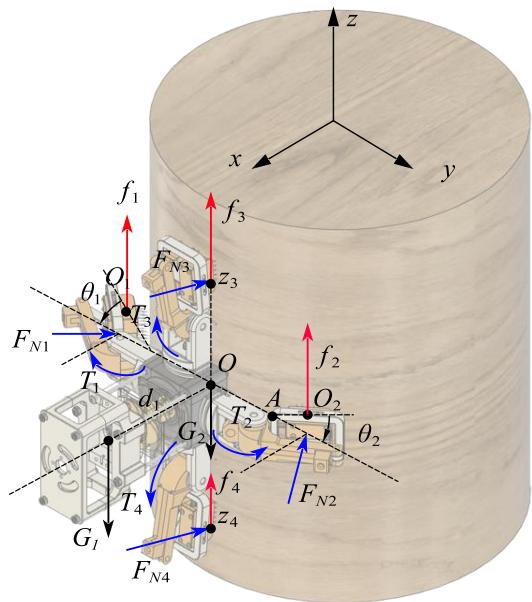


图 3-10 整机抓附模型

3.4 本章小结

本章首先提出了抓附固定机构的工作流程，然后以钩刺阵列对整体抓附几个进行抓附力的建模分析，并求解出机构运动范围和抓附、分离力矩图像。最后按照抓附表面的几何形状进行分类，给出机构抓附点的可达范围，分别求出各类表面的适用工况和几何参数，根据力学模型给出稳定抓附的极限位置判定依据，验证了抓附表面范围计算结果的合理性。

4. 有限元分析与虚拟样机仿真

本章首先使用 Ansys 进行有限元分析，模拟机构工作时的物理情况，对零件的结构设计进行分析并得出结论。随后使用 Adams 进行运动仿真。

在完成对固定机构分支臂、传动系统的理论计算与设计后，首先根据杆件参数、轮廓比例等进行关键部件的三维建模，然后定义材料、添加约束载荷等，进行有限元分析，验证设计可靠性。最后建立整机模型并进行多动力体仿真，得到固定机构的夹持效果、负载能力等仿真分析结果。

4.2 Ansys 有限元分析

本小节由建立 CAD 模型与有限元仿真两部分构成，首先从整体固定机构中选取关键零部件进行参数化建模，而后根据固定机构不同的抓附状态添加约束与最大载荷，定义材料、划分网格并进行有限元仿真最终得出相应结论。

4.2.1 CAD 建模

该模型在 Fusion360 软件中进行参数化建模，最终得到的固定机构整体由 4 只圆周径向分布的分支臂与中心放置的绳驱动凸轮绞盘构成。现选取关键驱动部件凸轮绞盘、传递张紧力的驱动连杆和 30° 旋转限位构件进行建模与载荷分析。

1. 凸轮绞盘

传动系统由一枚电机驱动，输出的扭矩由凸轮绞盘控制绳索的张紧传递给驱动连杆。每组驱动连杆的抓附点与分离点连接与分别与两根绳索连接，为保证每组钩爪能独立被动依附在表面上，凸轮绞盘采用分层堆叠式设计，八根张拉索缠绕在各自层的凸轮沟槽内。依据之前对被驱动杆的两个连接点的几何分析，分离层凸轮廓线有效周长与抓附层比例应接近 41/16，绘制出分离层几何廓线如图 4-1(a)所示。整段闭合曲线由四段圆弧相切环绕而成，点 A 为 \widehat{BC} 圆心，坐标(14mm,0)， $R_{DE} = 12\text{ mm}$ ， $R_{BC} = 7\text{ mm}$ ， \widehat{BE} 与 \widehat{CD} 关于 x 轴对称，曲线周长可由下式计算：

$$C = 2R_{BE}\theta_1 + \pi R_{OE} + R_{AB}\theta_2 \quad (4-1)$$

代入数据求得分离层廓线周长 90.02 mm ，类似可得到抓附层廓线周长为 36.01 mm 。二者有效缠绕长度为周长的一半，均略大于各自绳索长度极差，符合要求。按照此截面轮廓绘制出的凸轮绞盘模块三维模型如图 4-1(b)所示，外壳在每层凸轮对应高度处开有引导沟槽用于控制绳索运动，凸轮轴共与八根绳索连接并缠绕(绳索未画出)，穿出对应的槽口最后连接到驱动杆件上完成运动。

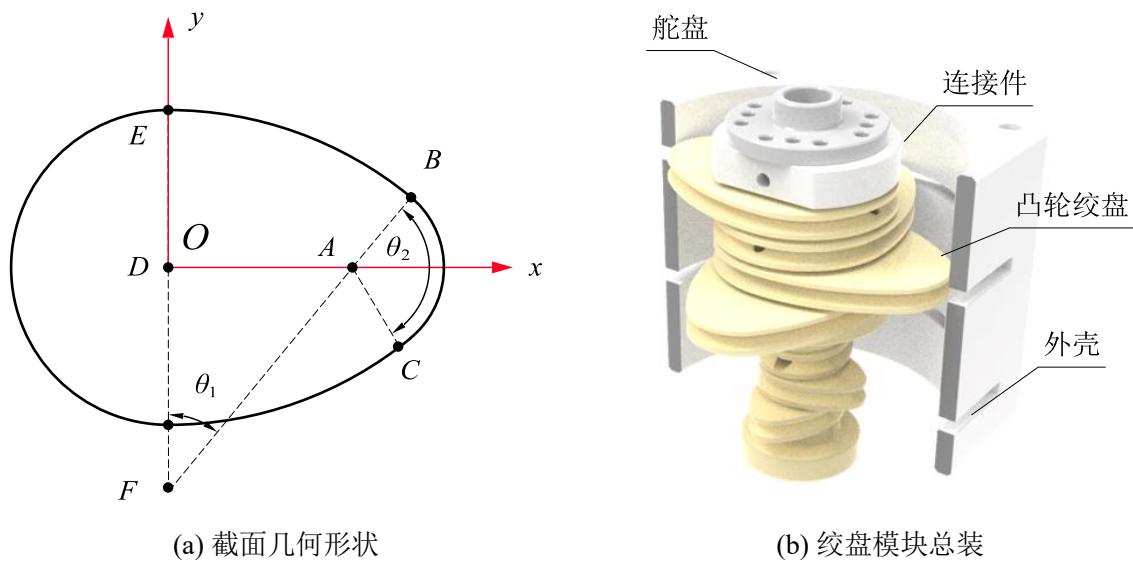


图 4-1 凸轮绞盘 CAD 模型

2. 驱动连杆

固定机构的每只钩爪的张紧力由驱动杆件进行传递，其关键尺寸参数可从式(2-11)中求出，如图 4-2(a)所示， $OB=60.8 \text{ mm}$ ， $OC=30.8 \text{ mm}$ ， $\angle BOC=14.5^\circ$ ， $\triangle OBC$ 初始位型被完全定义。根据抓附力分析结果选取扭簧与其他构件，绘制出三维模型如图 4-2(b)所示，一组分支臂由驱动连杆、传递连杆、可沿底座滑动的微刺模块以及被动贴附扭簧组成，驱动杆件的 A、D 点由对应层级凸轮牵拉的绳索控制，通过传递连杆作用完成对整个分支臂模块的下压或提拉。

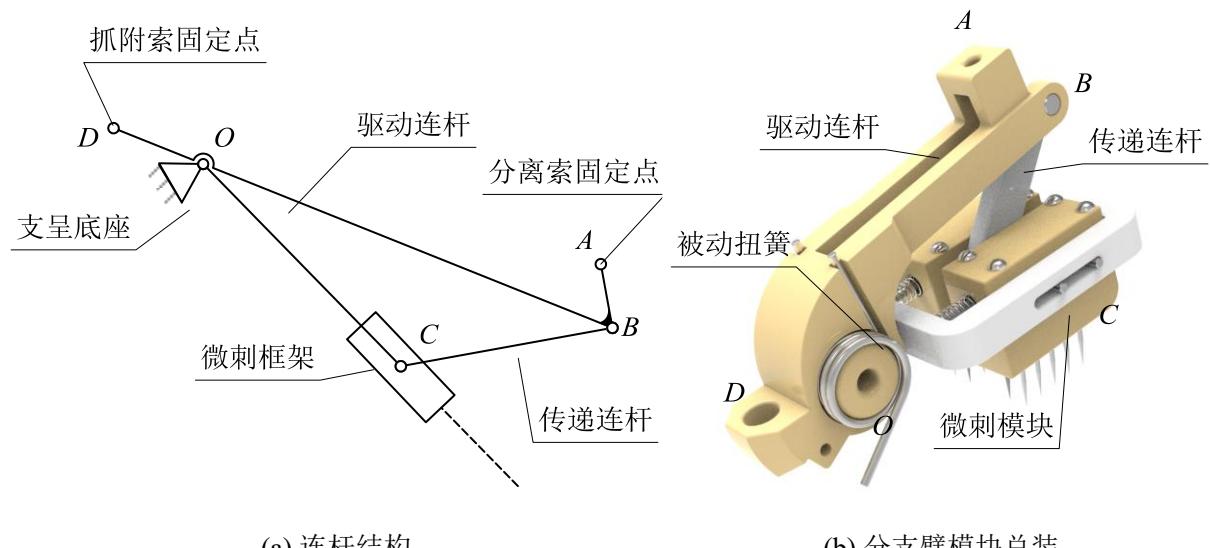
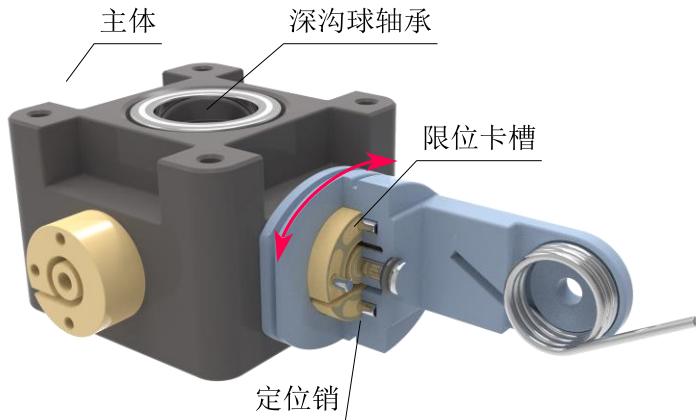


图 4-2 驱动连杆 CAD 模型

3. 限位机构

本设计方案在机构主体与分支臂的连接处采用带有限位功能的旋转副，采用被动扭簧来完成自适应贴附和自动归位。如图 4-3 所示，通过三个限位卡槽与定位销的滑动

配合实现相对于初始状态顺逆时针 30° 的旋转限位。由于该部分机构需要提供整个分支臂的支反力和扭簧的回复力，采用将整个黄色构件包覆式的设计，令底面直接与主体接触，达到更好的稳定效果。



4.3 旋转限位机构

4.2.2 有限元分析

有限元分析借助极限与离散化思想，通过将一个连续的物理系统进行离散化并划分为有限数目的几何单元体，借助数学函数来描述每个单元体内部的物理量，通过单元之间的节点连接起来，形成一个整体的近似模型。这种方法的优点是可以处理任意形状和材料的问题，在制作实物之前提高设计效率和质量，节省实验成本和时间。

在完成对关键零部件的三维模型建立后，由于其受力情况和结构较为复杂，影响到整个机构能否完成设计要求，从节约成本和时间的角度出发，对其进行有限元分析。此过程主要包括三维模型建立、单元材料定义、模型网格划分、边界条件约束和载荷施加以及求解和后处理。

1. 几何建模

由于在 Ansys 软件中直接进行布尔建模较为繁琐，故采用 Fusion 360 建立模型并简化后再导入至 Ansys 中生成几何体进行后续操作的方案。4.2.1 小结中已对三个重要部件进行了理论分析和参数化精细建模，现对其进行适当的模型简化，在保证结果可靠的前提下减少软件运算量，提高效率。去除修饰圆角、倒角后的有限元分析模型如图 4-4 所示，在保留了机构主体和添加载荷的几何特征前提下被尽可能简化。

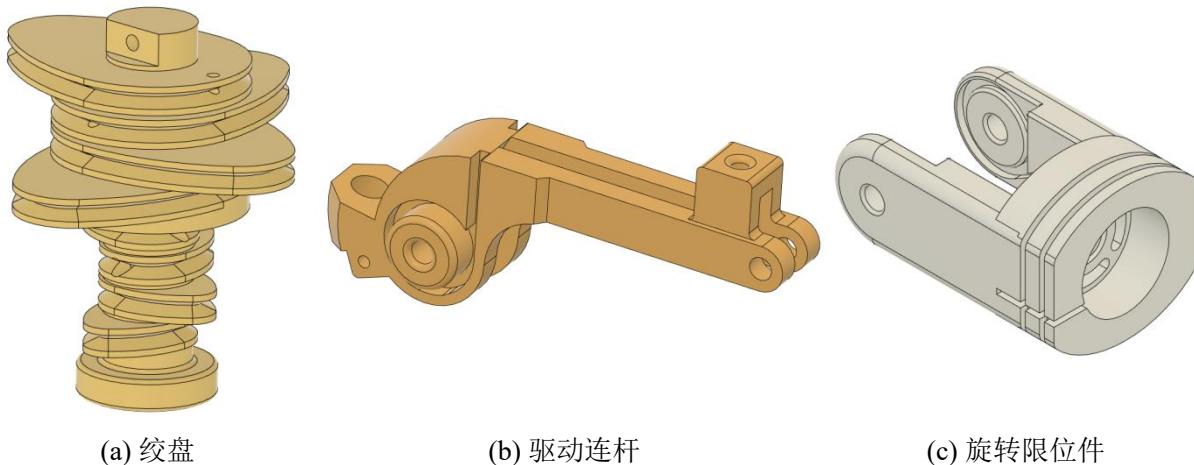


图 4-4 有限元分析模型

2. 材料定义

仿真模型材料初选 9400 树脂，具体材料参数如表 4-1 所示。

表 4-1 树脂 9400 机械性能参数

硬度	拉伸强度	弯曲强度	冲击强度	断裂强度	泊松比
79MPA	47MPA	69MPA	26J/m ²	40MPA	0.41

3. 网格划分

该组零部件模型整体尺寸较小，长宽厚比例适中，单元类型选取六面体单元 Solid45 对模型进行离散与网格划分，单元尺寸为 1mm，此类单元体可退化为四面体，最终各零件的有限元模型如图 4-5 所示。



图 4-5 网格划分结果

4. 边界条件与载荷

网格划分完毕后，根据每个零件的实际工况给出各自的边界约束条件与外力载荷。

(1) 绞盘

分析前文给出的抓附固定机构运动流程，可得在抓附过程和分离过程中的绞盘分别存在两种不同的静载荷施加情况。如图 4-6 所示，绞盘在分离工作状态下由上面四层变半径凸轮凹槽承受沿切向的拉力，由前文分析 $F = 0.25T_{servo}/d$ ，可求得 $F_1 = 51N$ ，

$F_2 = 100\text{N}$ 。边界条件设置为对轴内孔的六自由度刚性约束。

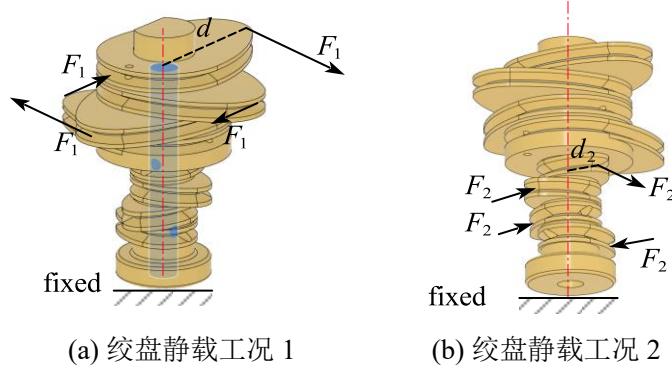


图 4-6 各静载下的绞盘分析模型

(2) 驱动杆件

此构件的边界约束条件与外力载荷如图 4-7 所示，按照固定机构绞盘的抓附流程可分为两种工作情况，依据前文对传动系统的力分析结果，分别施加水平方向的力 F_1 和与弧相切的力 F_2 ，大小分别为 51N 和 100N，与绞盘传动系统提供的张紧力相同。边界条件设置如图中红色箭头所示，设置为对轴孔内壁的六自由度的刚性约束。

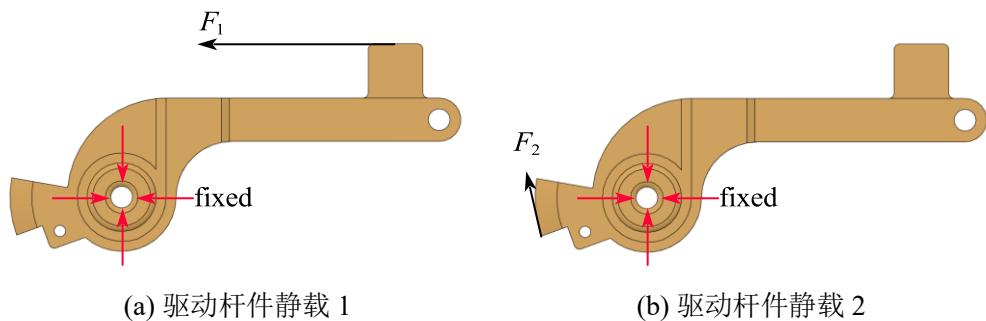


图 4-7 各静载下的驱动杆件分析模型

(3) 旋转限位件

如图 4-8 所示，在固定机构的抓附全流程中，旋转限位件一直受到两个对称大小的转矩作用，该转矩存在最大值 $2.56\text{N}\cdot\text{m}$ ，将此最大扭矩设定为静载荷进行有限元分析。边界条件如图中红色箭头所示，沿径向为内孔壁设置六自由度刚性约束。

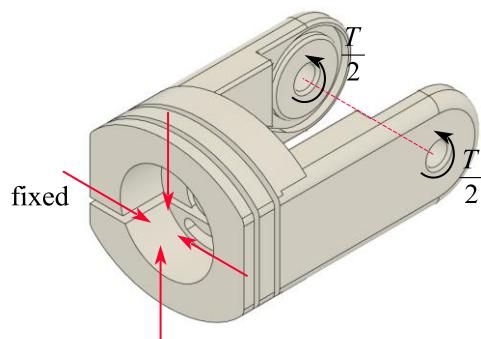


图 4-8 旋转限位件静载分析模型

5. 分析结果

单静载工况的旋转限位件的有限元分析结果如图 4-9 所示，应力最大值 13.4MPA，偏离位移最大 0.16mm。树脂 3D 打印成型工件属于脆性材料，断裂强度 40MPA，取安全系数 S=2，对其进行强度校核计算如下：

$$\sigma_{mx1} = 1.34 \times 10^7 \text{ N/m}^2 < \sigma_p = \frac{\sigma_{lim}}{S} = \frac{4 \times 10^7 \text{ N/m}^2}{2} = 2 \times 10^7 \text{ N/m}^2 \quad (4-2)$$

考虑到加工工艺精度，0.16mm 的位移可认为该工件符合设计要求。

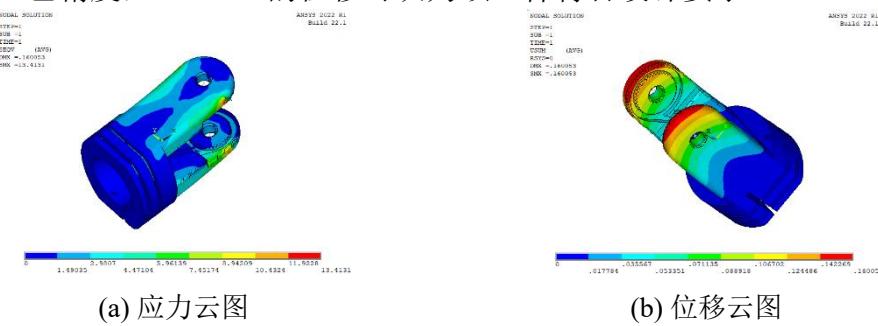


图 4-9 旋转限位件分析结果

驱动连杆的有限元分析结果包含抓附和分离两种静载下的应力与位移数值，如图 4-10 所示，当对机构施加分离静载时，杆件出现最大变形与应力，据公式(4-2)对其进行强度校核，安全系数取 2，结果显示符合设计要求。对于两种工况下最大位移出现在相似位置的现象可解释模型的刚性约束施加在转轴处，外加扭矩使杆件整体产生微小旋转变形。

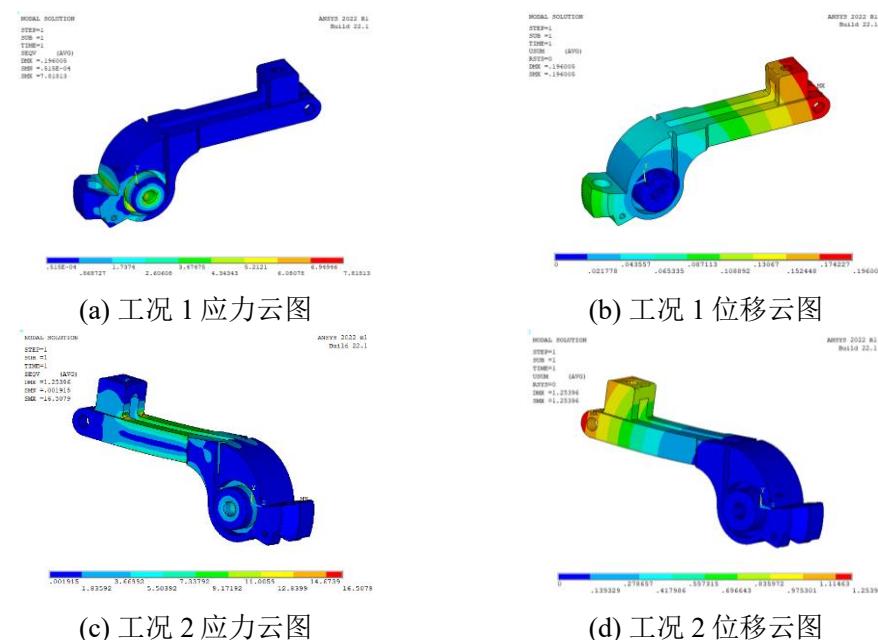


图 4-10 不同工况下的驱动杆件分析结果

抓附、分离两种工况下的分层绞盘有限元分析结果如图 4-11 所示，最大应力

7.1MPa, 位移 0.045mm, 取安全系数 S=2, 根据公式(4-2)对其进行强度校核, 结果表明该零件在抓附、分离两种工况下符合设计要求。

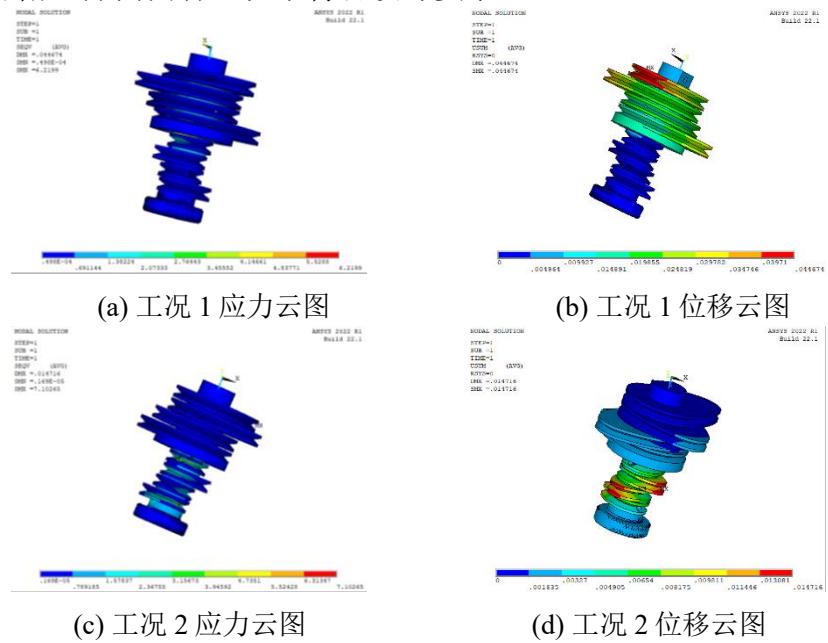


图 4-11 各工况下的绞盘分析结果

4.3 Adams 运动仿真

4.3.1 仿真环境简介

本节基于 MSC 公司开发的 Adams 软件针对机构动力学进行仿真分析, 该软件通过搭建与实际相符的物理环境, 可验证所设计机构的可行性, 同时可得到机构运动参数或作用力、驱动力曲线。该软件配有与主流建模软件的文件接口, 弥补了自身建模能力不足的缺点, 大大提升了效率, 有助于缩短设计周期并节约成本。该软件相关界面如图 4-12 所示。

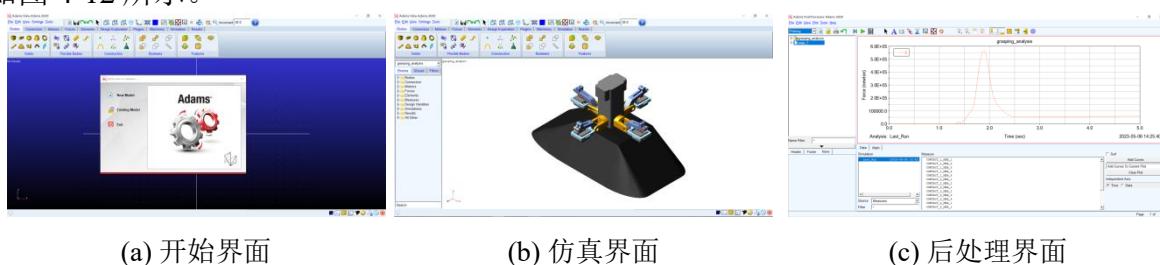


图 4-12 Adams 工作界面

本文在 4.2 小节对分层式变半径绞盘、驱动连杆和旋转限位机构三个关键零件进行了基于 Ansys 的有限元仿真, 验证了结构设计的可行性和安全性, 同时获得了合适的物理材料、标准件选型和其他机构参数。本节运动仿真分为两部分, 首先验证此抓附式

固定机构分支臂被动抓附的运动原理，而后将其作为机器人系统的末端执行器进行运动学仿真，评估整体表现并优化机构设计。

4.3.2 抓附式固定机构仿真

1. 仿真流程介绍

在进行仿真前，首先在 SolidWorks 中建立机构模型，对各零件设置装配约束和初始位置设定，保存为“.sldasm”装配体文件。而后将其导出为“.x_t”格式的交换文件并导入 Adams 软件，对各零部件逐一设置材料、质量、关节约束和接触力等参数。与有限元分析的模型简化不同之处是，相对位置不变的多个零件可合并实体作为一个零件进行仿真，紧固件、标准件等可隐藏并替换为等效质量。具体流程如图 4-13 所示。

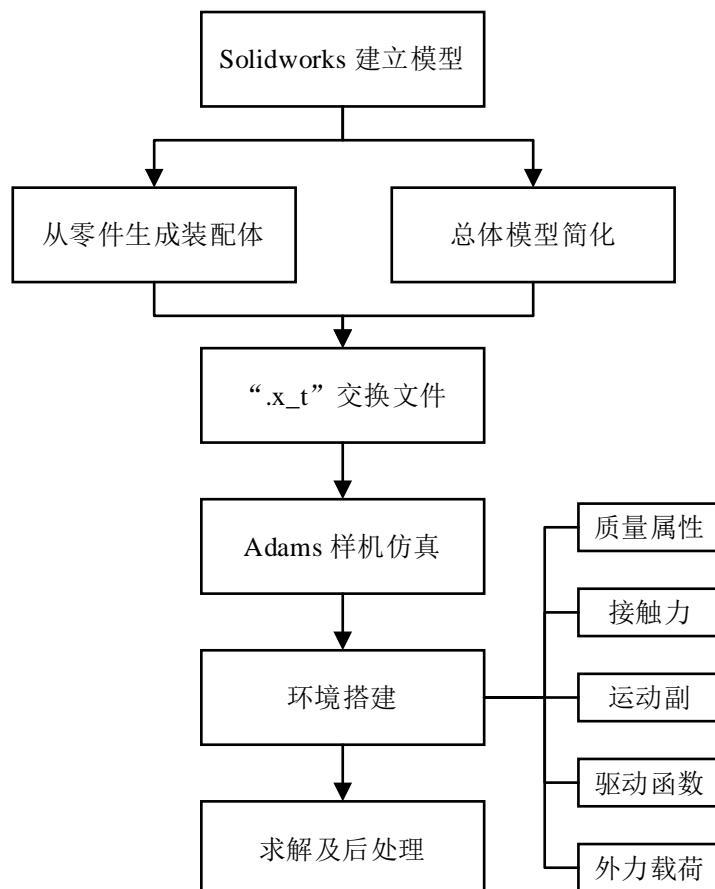


图 4-13 Adams 仿真步骤

2. 仿真模型及环境搭建

在 Solidworks 软件中搭建出简化的抓附原理样机如图 4-14(a)所示，阵列微刺结构用适当的阻尼参数来代替，传动系统根据精细模型进行等效质量替代。抓附表面由两个四棱柱相交并圆滑过渡组合而成。设定机构初始位姿后导入至仿真软件中，给不同部件添加颜色以便于区分，仿真软件内平滑渲染的模型如图 4-14(b)所示。

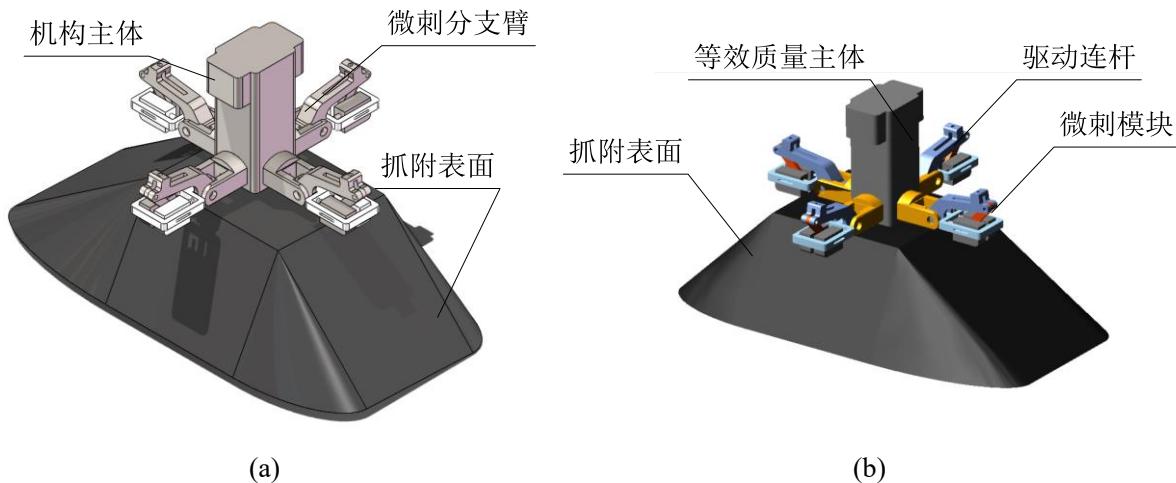


图 4-14 简化样机模型

本仿真参数选取单位如表 4-2 所示，包括长度、质量、力、步长等。

表 4-2 仿真参数单位

参数模块	参数	单位
仿真单位	长度	mm
	质量	kg
	力	N
	扭矩	N·mm
	时间	s
	角度	deg
	步长	0.1
	加速度	kg·m/s ²

将模型导入至 Adams 后由于各零部件约束关系丢失，应重新给各关节处添加运动副，本模型的运动约束包括固定副、旋转副和移动副。为更好模拟真实情况，设置模型的密度为 $1.3\text{g}/\text{cm}^3$ ，添加全局重力与零部件接触力，具体参数如表 4-3 所示。

表 4-3 仿真参数

参数名称	参数	取值
全局重力	方向	Y-
	大小	-9.80665
库仑摩擦力	动摩擦因数	1.8
	静摩擦因数	1.5
刚体接触力	法向力类型	碰撞
	刚度	5×10^3
	力指数	2.2
	阻尼	10
	穿透深度	0.5
仿真参数	仿真分类	默认
	积分求解器	GSTIFF
	积分格式	I3
	校正	原始
	步长	0.1

在完成仿真参数的设置后按照 3.1 小结对抓附过程的步骤规划进行关节驱动函数的

设置。选取 Adams 软件内部封装的“STEP”函数来驱动旋转副，“STEP”函数通式可写作 $\text{STEP}(t, t_0, h_0, t_1, h_1)$, 其中 t 为驱动函数的自变量, 从区间 (t_0, h_0) 到 (t_1, h_1) 生成平滑的数据控制点。每个 STEP 函数初始值均从零开始, 多个 STEP 函数满足累加性。图 4-15 所示的驱动函数图像展示了两个独立运动的分支臂驱动角度随时间的变化。

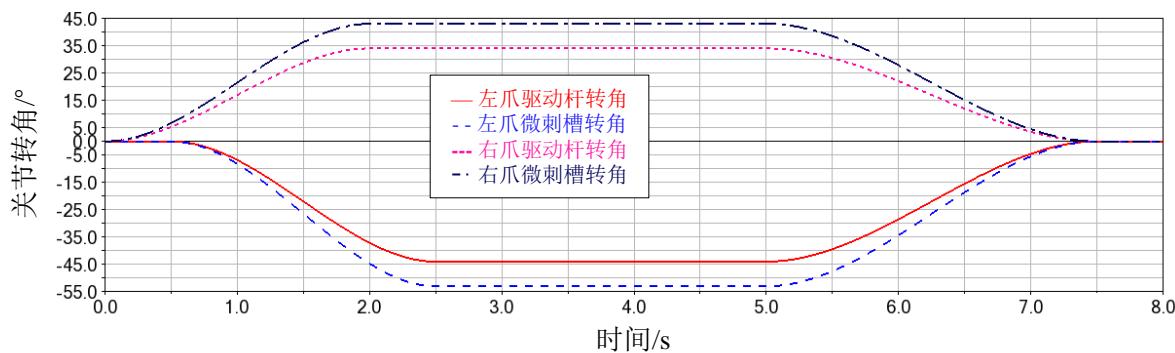


图 4-15 分支臂驱动函数

3. 仿真结果与后处理

依照前文设定的抓附流程给四组分支臂分别设置运动驱动, 设定好仿真时间和步长后进行虚拟样机实验, 仿真过程如图 4-16 所示, 图中红色箭头表示微刺模块与抓附表面的接触碰撞力。实验结果表明机构可按照设定工作流程完成在复杂粗糙表面的抓附, 仿真实验验证了机构的运动可行性。

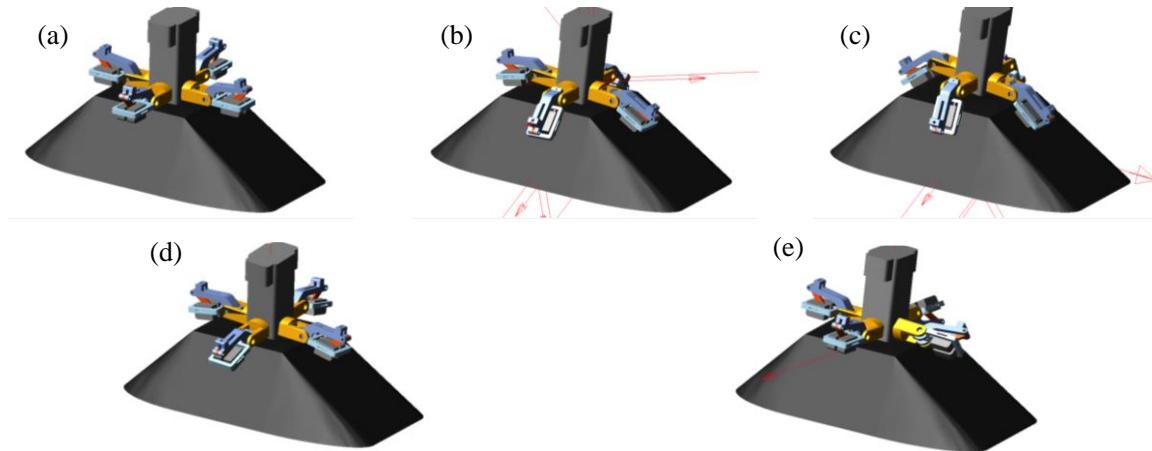


图 4-16 仿真抓附流程

(a) 仿真开始 (b) 钩爪初次接触到表面 (c) 钩爪抓紧表面完成锁定 (d) 钩爪离开表面 (e) 仿真结束

4.3.3 机器人测试系统简述

上节验证了此固定机构的可行性和可靠性, 机构能完成在粗糙表面上的抓附锁定。为进一步探索本研究目标的实际应用价值, 需要将其作为整个机器人系统的末端执行器进行实验验证。江励^[13]等人基于尺蠖运动模式提出了一款双爪模块攀爬机器人

“Climbot”，如图 4-17 所示，该机器人由两种模块和五个旋转副连接而成。



图 4-17 双爪攀爬机器人

本小节在此基础上提出一种四自由度的运动链作为机器人测试系统主体，在支链两端配有钩爪式固定装置，分别作为顶爪和底爪，机构简图如图 4-18 所示。此类抓附固定机构在不增加夹持机构的尺寸前提下具有更大的夹持半径，在表面抓附方面具有更好的适应性。

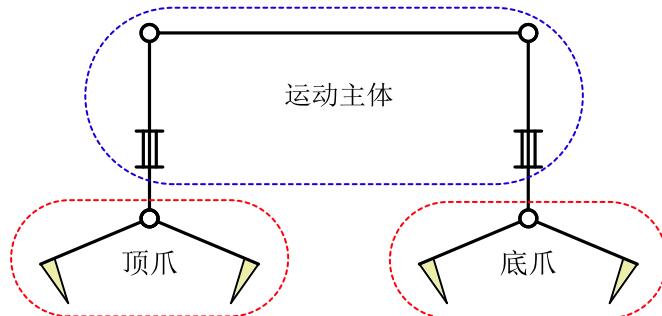


图 4-18 测试系统机构简图

针对此机构在不同的工作环境下设计出两种翻转运动步态，如图 4-19 所示，当系统环境沿 x 方向较为狭窄时，整个运动链可进行“上下颠倒式”运动，顶爪和底爪轮流将身体固定抓附于爬行杆上并进行 180° 的颠倒运动；如图 4-20 所示，当工作环境沿 y 轴方向较为狭隘的时候，整个机构可仅在 zox 平面内按照“左右翻转式”的运动步态完成机身的上下爬行。

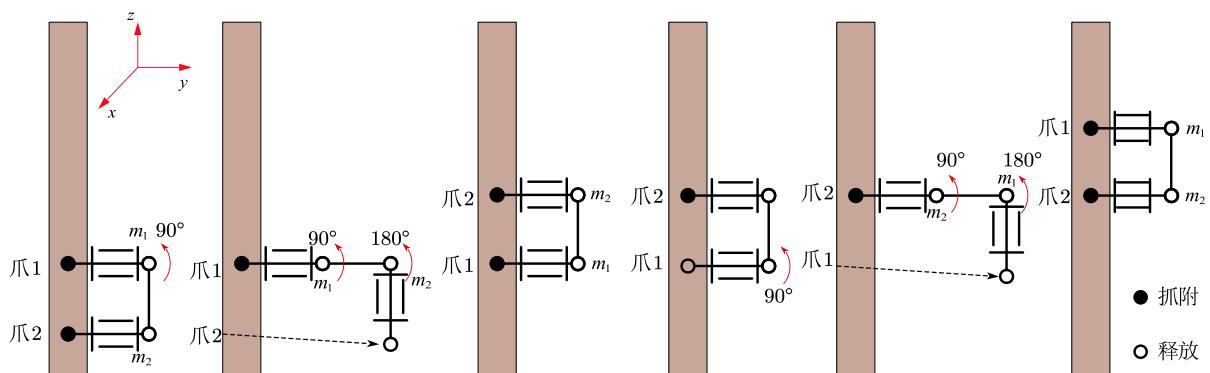


图 4-19 上下颠倒式步态

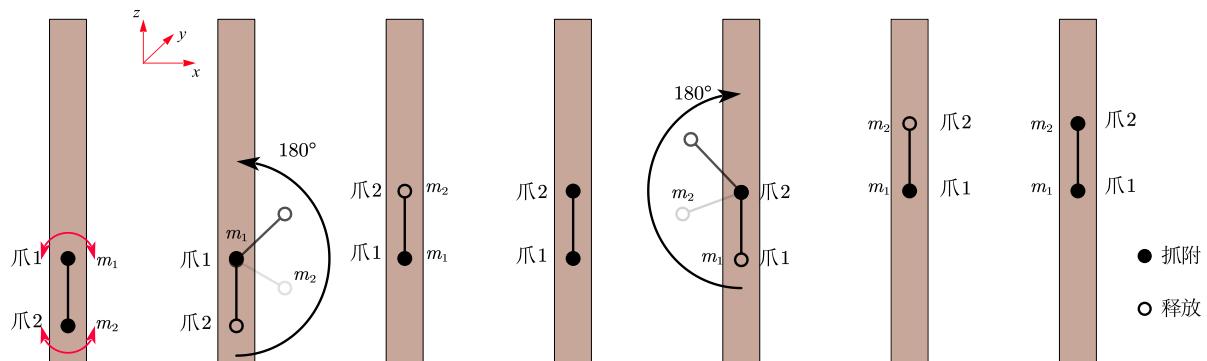


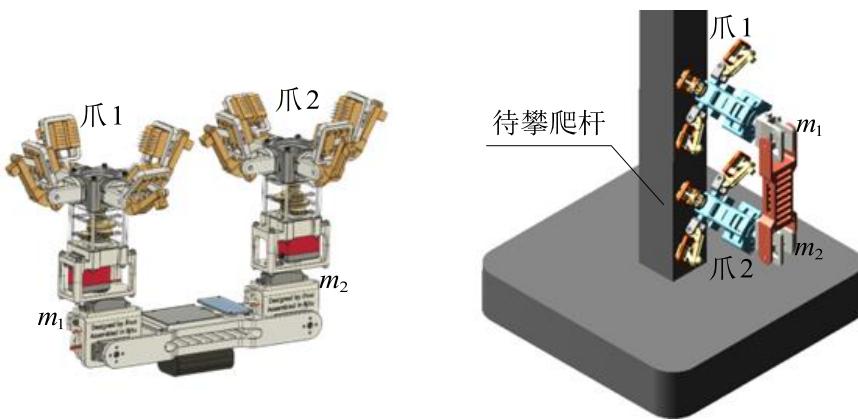
图 4-20 左右翻转式步态

上述两种步态可适用于存在不同空间限制的环境，但经仿真实验后发现，与此抓附式固定机构组合成的机器人系统在以“上下颠倒式”步态攀爬杆件时会被纵向分支臂阻碍而使机身跌落，因此后续针对“左右翻转式”步态进行仿真验证。

4.3.4 整机运动学仿真

1. 模型建立及导入

在确定了机器人运动构型并完成步态规划后，在 Fusion 360 中建立整机模型。如图 4-21(a)所示，控制模块和电源模块集成在中间最长的杆件上，四枚电机与相应构件组成运动链，两端连接有钩爪式固定机构，将其命名为爪 1 和爪 2，对应扭转驱动电机名称为 m_1 、 m_2 。对其进行简化后导入 Adams 仿真平台，整机系统和待攀爬杆件如图 4-21(b)所示。



(a) 样机模型

(b) 仿真模型与测试环境

图 4-21 样机模型与仿真模型

2. 仿真参数与驱动设置

对导入的模型重新添加运动副约束，添加接触力、驱动函数等仿真参数设置，相关数据如表 4.3 所示。

表 4.3 整机仿真参数

参数模块	参数	取值/单位
全局重力	方向	X-
	大小	-9.80665
库仑摩擦力	动摩擦因数	10
	静摩擦因数	3S
刚体接触力	法向力类型	碰撞
	刚度	1.5×10^4
	力指数	2.2
	阻尼	10
	穿透深度	0.1

与单独的固定机构进行仿真的操作类似，对应的运动副由“STEP”运动函数进行驱动，如图 4-22 所示为一组分支臂的驱动连杆和微刺框架的驱动函数图像，二者变化趋势相同，二者峰值之差在模型中体现为在微刺贴附于表面后驱动杆件继续下压来完成锁紧抓附。

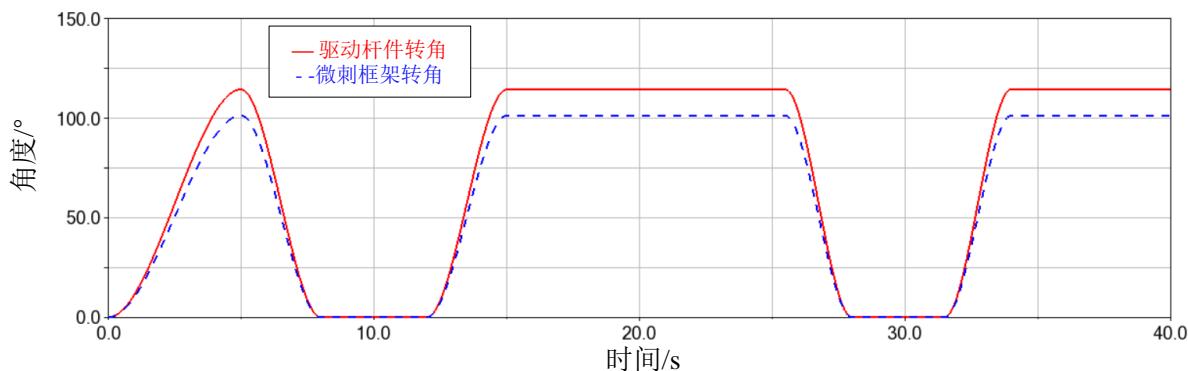


图 4-22 单组分支臂驱动函数

3. 仿真结果及后处理

按照“左右翻转”的步态对虚拟样机进行驱动设置并进行仿真，样机在 40s 的仿真时间运动了两个完整的步态周期。前 20s 内具体的攀爬仿真结果如图 4-23 所示。

图 i: 仿真初始状态，顶爪、底爪未与杆件抓握。

图 ii: 运动步态第一步，顶爪、底爪二者被动抓附于杆件上，将机身固定。

图 iii: 第二步，顶爪保持抓握、底爪从抓附表面释放。

图 iv-图 v: 第三步，整机保持顶爪抓持点不动，将机身与底爪逆时针转动 180 度完成翻转，此时底爪质心高出顶爪。

图 vi: 第四步，在底爪转动完毕后在杆件上进行被动抓附，将机身固定，此时整机质心垂直上升理论距离应等于转动半径的距离 240mm。

图 vii-图 x: 底爪处在较高位置，保持其在表面的抓附固定，顶爪在下侧完成从表面剥离、绕底爪抓附中心逆时针旋转 180 度并在新抓附点实现被动固定，至此完成顶爪-底爪交替抓附并翻转运动的步态仿真。

图 xi-图 xii: 底爪张开, 绕顶爪顺时针 180 度旋转, 后续过程与前图类似, 不再一一列出。

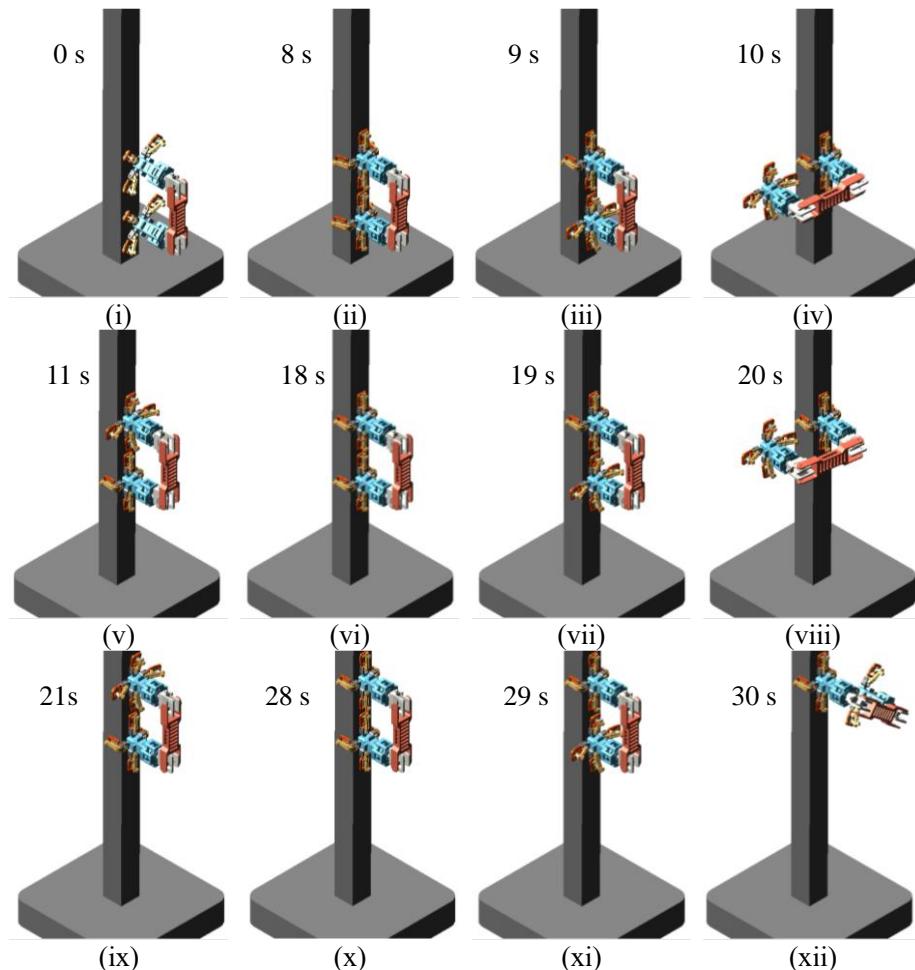


图 4-23 左右攀爬仿真结果

对机构仿真结果进行分析, 取橙色杆件质心进行位移的 y 值分量进行测量。如图 4-24 所示, 得出该装有钩爪式固定机构的机器人系统在 40s 内可向上攀升 963mm。对质心平移速度铅锤分量进行测量, 由于仿真环境的问题会出现不合理的峰值, 对其进行巴特沃斯滤波处理得到速度曲线, 如图 4-25 所示, 平均速度为 24mm/s。

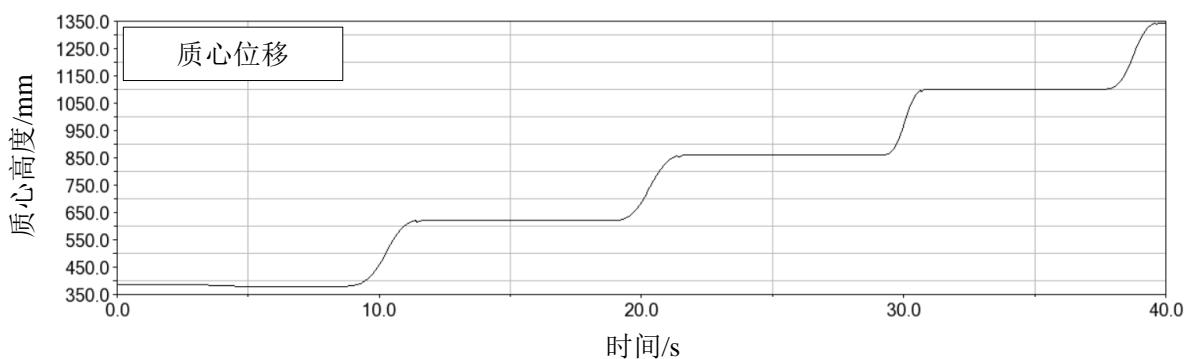


图 4-24 质心位移曲线

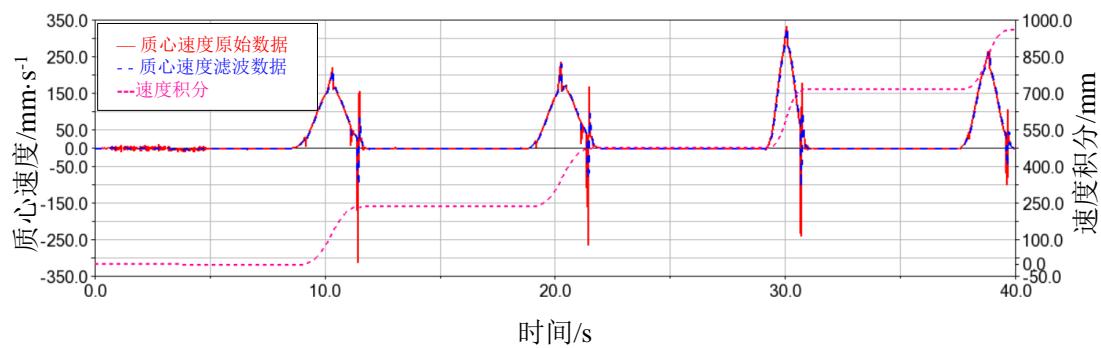


图 4-25 质心速度曲线

4.4 本章小结

本章节对关键零部件进行初步 CAD 建模，按照抓附流程设置不同载荷对零件进行 Ansys 有限元分析，验证了关键零件的可靠性；在 Solidworks 软件建立原理样机和机器人系统并在 Adams 中进行了虚拟样机仿真实验，验证了机构运动机理的可行性，得到了仿真结果，为下一步样机试验提供了理论指导。

5. 样机工程设计与试验

本文在第四章建立了抓附式固定机构的 CAD 模型并对其进行有限元分析和虚拟样机仿真，验证了固定机构结构件的可靠性和机构运动的可行性。本章将参考仿真数据结果进行驱动件选型，按照部分功能分类进行整机结构设计、给出样机装配方案，最后完成原理样机的制造与装配，开展样机试验并给出结论。

5.1 样机结构设计

5.1.1 驱动电机选型

此抓附式固定机构由单枚电机控制，通过分层式变半径的绞盘控制四组分支臂的抓附与抬升。根据对固定机构抓附效果的分析论证，由于此方案设计的绞盘无需连续周转，综合考虑尺寸、扭矩和成本因素，选取达盛公司的数字舵机，型号 DS3225MG，外观如图 5-1 所示。



图 5-1 DS3225MG

固定机构驱动舵机的具体尺寸质量、工作参数如表 5-1 所示，采用脉冲宽度波进行角度控制，堵转扭矩最高可达 $24.5 \text{ kgf}\cdot\text{cm}$ 。

表 5-1 数字舵机参数

参数名	参数值	参数名	参数值
外观尺寸	$20.0*49.5*47.5\text{mm}$	堵转扭矩(5V)	$21 \text{ kgf}\cdot\text{cm}$
电机质量	60 g	堵转扭矩(6.8V)	$24.5 \text{ kgf}\cdot\text{cm}$
工作电压	4.8~8.4 V	空载转速	$0.15\text{sec}/60^\circ$
驱动方式	PWM	脉宽范围	500~2500 μsec
可控角度	270°	运动精度	3 μsec

除去控制固定机构的单枚电机外，在整机运动支链中有四处转动副需要添加驱动，在 Adams 仿真结果中对关节运动角度进行测量，结果如图 5-2 所示，关节扭转角度范围在 $(-180^\circ, 180^\circ)$ 内，由此运动具有周期性，关节运动范围可缩小至 $(0, 180^\circ)$ 。此外，该驱动电机应具有角度保持功能，使机器人系统保持抓附状态完成其他动作。

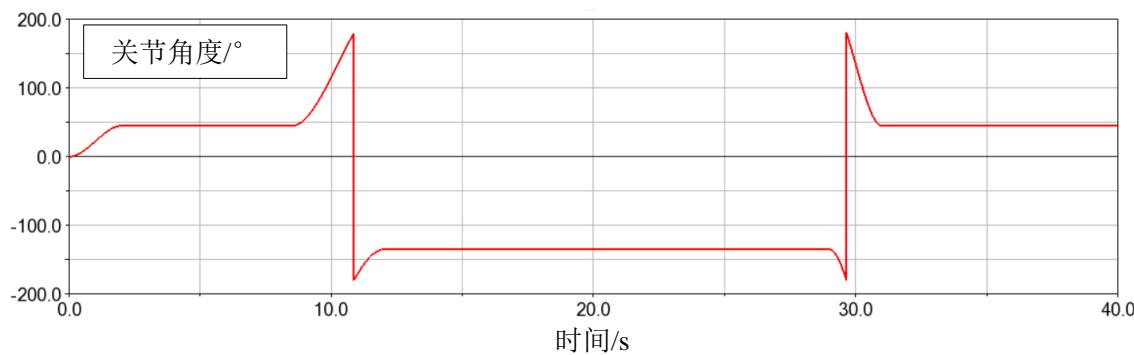


图 5-2 关节角度变化曲线

机器人系统采用对称式步态进行运动，对单个运动关节扭矩进行测量，结果如图 5-3 所示，滤波后的扭矩峰值出现在顶爪、底爪向上旋转至与地面平行部分的时刻，分别为 $2440 \text{ N}\cdot\text{mm}$ 、 $2708 \text{ N}\cdot\text{mm}$ ，考虑到此处关节电机承受负载较大，选择达盛公司的数字舵机，型号 DS5160MG，此舵机外观如图 5-4 所示。

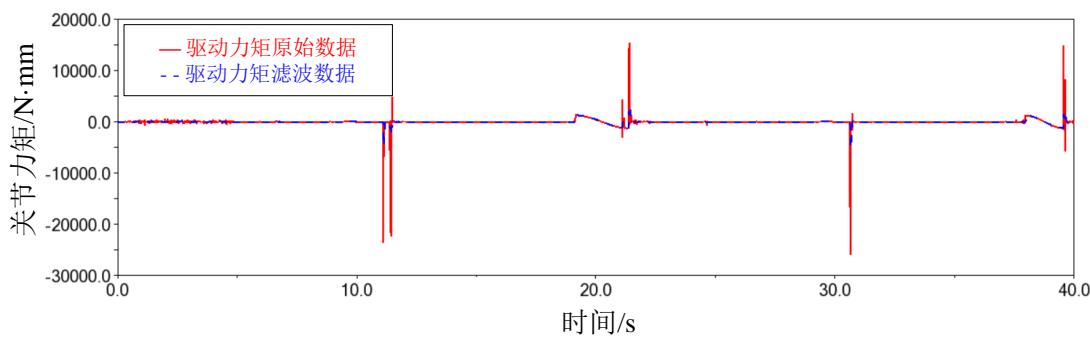


图 5-3 关节驱动扭矩



图 5-4 DS5160

该数字舵机相关参数如表 5-2 所示，最大堵转扭矩 $70 \text{ kgf}\cdot\text{cm}$ ，可控角度为 180° 。

表 5-2 关节舵机参数

参数名	参数值	参数名	参数值
外观尺寸	$30*48*65\text{mm}$	堵转扭矩(5V)	$65 \text{ kgf}\cdot\text{cm}$
电机质量	158 g	堵转扭矩(6.8V)	$70 \text{ kgf}\cdot\text{cm}$
工作电压	$4.8\sim8.4 \text{ V}$	空载转速	$0.17\text{sec}/60^\circ$
驱动方式	PWM	脉宽范围	$500\sim2500 \mu\text{sec}$
可控角度	180°	运动精度	$3 \mu\text{sec}$

5.1.2 微刺舱设计

1. 模型设计

此固定机构末端的微刺舱由阵列微刺结构、定位销与外壳和顶盖组成，爆炸装配如图 5-5 所示，在每根微型钢针底部装有柱状平台来增大与压缩弹簧的接触面积，钢针在受到法向外力后会挤压末端固定在顶盖上的压簧，来实现被动且独立的伸缩效果。横向定位销可充当移动副的滑块，将整个微刺舱固定在滑槽上，纵向定位销则用于约束被动压簧(未画出)的运动方向，防止压簧意外弹出。

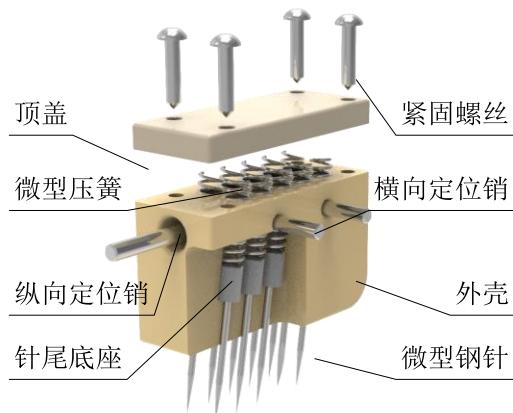


图 5-5 微刺舱

2. 样机制造

微刺舱结构件采用光固化树脂 3D 打印成型工艺制作，表面光洁度高，无需过多的后期打磨处理。紧固件选用 M2×8 自攻螺丝，微型压缩弹簧尺寸为 $0.2 \times 2 \times 8\text{mm}$ (线径×外径×长度)，横向定位销尺寸 $M1.8 \times 8\text{mm}$ ，纵向定位销尺寸 $M2 \times 16\text{mm}$ ，微型钢针针体直径 0.7mm ，针尖直径 $100\mu\text{m}$ 。最终此部分样机如图 5-6 所示。

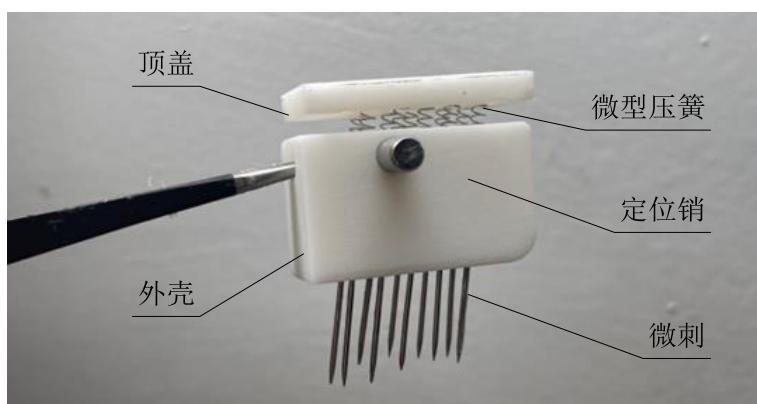


图 5-6 微刺舱实物

5.1.3 传动系统结构设计

1. 模型设计

此固定机构的传动系统由驱动舵机、分层式变半径绞盘、外壳以及相应连接构件组成。如图 5-7 所示，紫色的舵机固定件通过紧固螺栓与外壳、底座连接，舵机倒置，舵盘与变半径绞盘连接，并通过轴承来减少摩擦力。外壳按照绞盘不同层高在对应位置开有引导槽口，底座上阵列有四个分支臂连接件，作为旋转限位机构的固定部分。

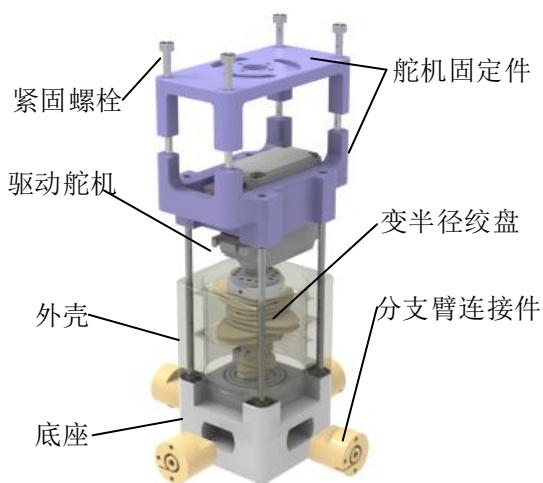


图 5-7 传动系统装配渲染图

2. 样机制作

传动系统所有结构件均采用树脂 3D 打印，驱动电机选取 DS3225MG 数字舵机，紧固件选用四根 M3×100 mm 螺栓，选用 M1×5 mm 自攻螺丝将牵拉绳索固定到绞盘对应位置处，轴承选用 25×17×4 mm 深沟球轴承，装配方案为热装配，在构件耐热温度上限内加热底座进行装配，四个连接件采用带有卡销的定位销轴，尺寸为 3×35 mm。此部分装配样机如图 5-8 所示。

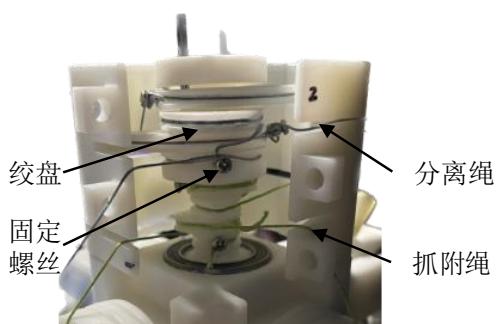


图 5-8 传动系统实物

5.1.4 微刺分支臂设计

本文设计的微刺分支臂包括旋转限位机构和微刺连杆臂，现按此分类对两个模块分别进行结构设计。

1. 旋转限位机构

固定机构的微刺分支臂通过旋转限位机构与主体连接，该旋转机构主要由运动结构件、固定结构件和扭簧组成。如图 5-9 所示，将固定件拆离并旋转以展示模块内部结构。固定件内部开有用于定位的装配孔和固定扭簧的凹槽，运动件的内孔恰可容纳固定件并绕定位销轴在一定范围内旋转，添加橡胶垫圈弥补装配误差，增强机构运动的稳定性。

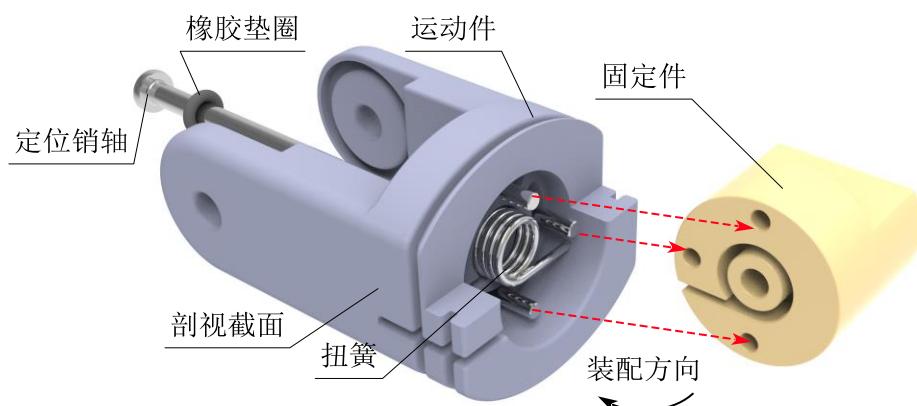


图 5-9 旋转限位装置内部结构

选取树脂作为材料进行 3D 打印成型工艺进行样机制作，三根定位销尺寸为 M2×8，扭簧选择 1×8 mm×6×180°(线径×外径×圈数×角度)，二者材料均为不锈钢，橡胶垫圈尺寸 3×6 mm(内径×外径)，该旋转限位模块实物样机如图 5-10 所示。



图 5-10 旋转限位装置实物

2. 微刺连杆臂

微刺连杆臂包主要由驱动杆、连接杆、镜像对称的两组微刺舱、滑槽、扭簧和压簧以及横纵向定位销构成。如图 5-11 所示，当微刺舱滑槽固定作为机架时，整个装置

构成一个四连杆机构，横向定位销在滑槽内受到运动约束，纵向定位销与压缩弹簧可使微刺舱在分支臂抬升时自动归位。

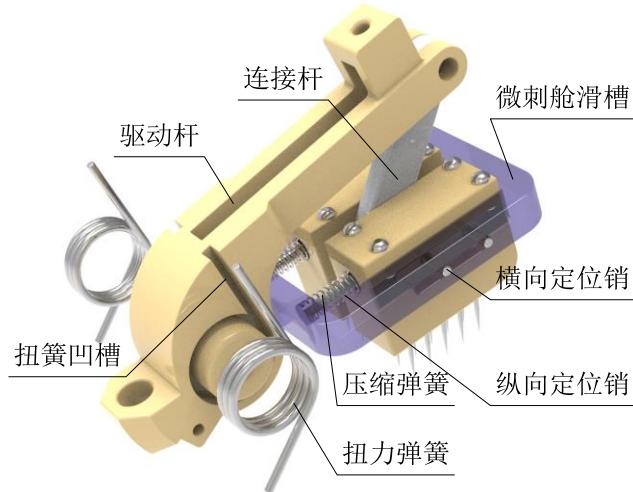


图 5-11 连杆臂

本模块选取树脂 9400 材料进行 3D 打印成型工艺制作原理样机，压缩弹簧参数为 $0.5 \times 4 \times 15\text{mm}$ (线径×外径×长度)，扭簧选择 $1.5 \times 16\text{ mm} \times 3 \times 120^\circ$ (线径×外径×圈数×角度)，二者材料均为不锈钢，该连杆臂实物样机如图 5-12 所示。

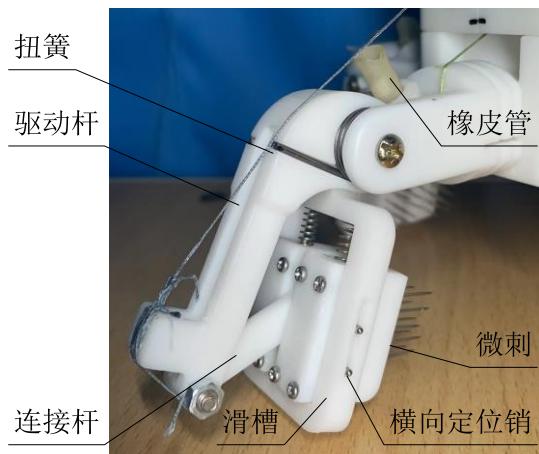


图 5-12 连杆臂实物

5.1.5 整体样机装配及实验

前四节对驱动件进行了选型并按照不同功能分模块进行了机构设计和样机制作，本节将设计总体模型并制作最终实物样机。装配渲染效果如图 5-13 所示，固定机构主要由主体、传动系统和微刺结构组成，绿色箭头表示机构运动关节。

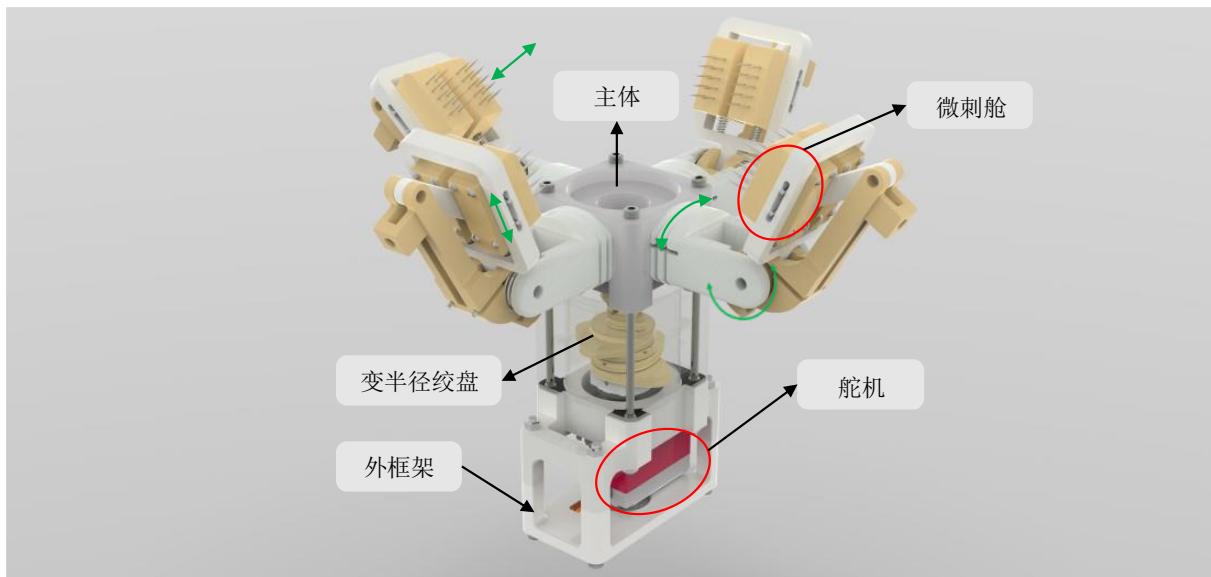


图 5-13 样机装配渲染效果

实物样机如图 5-14 所示，装配完毕的样机由四组阵列排布的微刺分支臂、传动系统和驱动电机构成。总体尺寸 $250 \times 170 \text{ mm}$ ，重量 600 g。

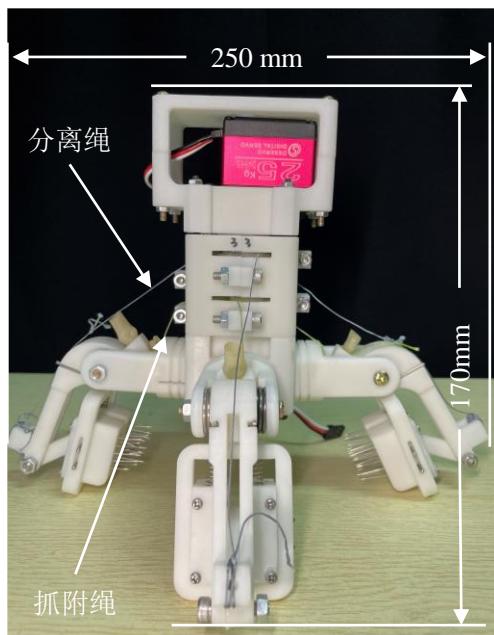


图 5-14 实物样机

样机实验分为单微刺分支臂抓附与整机抓附两部分。如图 5-15 所示，单组微刺夹爪在粗糙表面上的抓附可分为扭簧被动贴附(开始抓附)、抓附力矩施加(抓附完毕)、开始分离以及分离结束四个步骤。

- (a) 微刺初次接触至粗糙表面，由扭簧变形量提供扭矩，完成初步接触与抓附；
- (b) 施加抓附力矩，驱动杆下压连接杆，带动微刺舱向后滑移，压缩弹簧产生形变，同时微刺阵列进一步与表面贴合，此时抓附力达到最大，完成表面抓附。

(c) 微刺开始分离，传动系统撤去抓附力矩，此时微刺舱在压缩弹簧的作用下恢复原位，微刺从表面凹凸中脱离。

(d) 机构施加分离力矩，微刺分支臂被拉离表面，并留出安全距离，此时整个抓附固定并分离的运动过程结束。

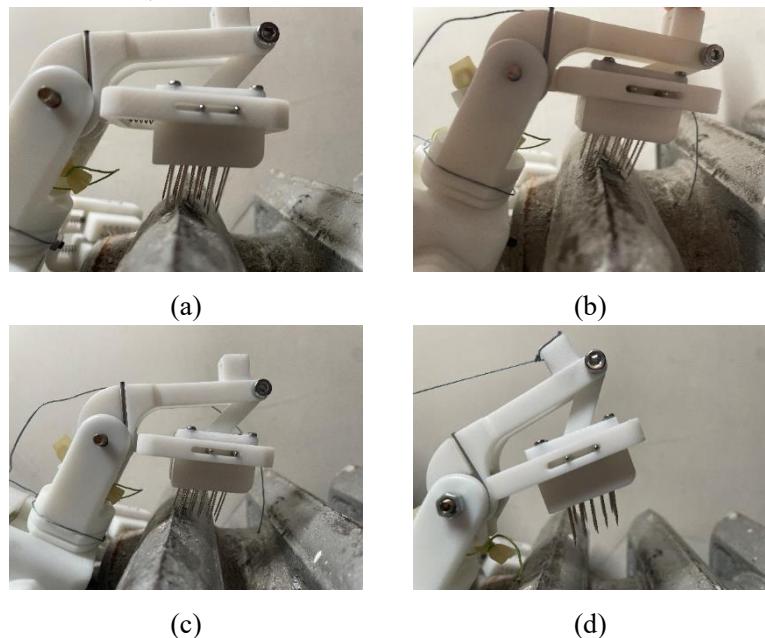


图 5-15 单爪抓附试验

(a) 开始抓附 (b) 抓附完毕 (c) 开始分离 (d) 抓附结束

单夹爪在不规则的粗糙表面上按照给定的被动贴附、主动抓附流程完成了抓附试验，验证了单支爪的被动分层原理，下面进行整机的实地抓附试验。

抓附表面选择多孔岩石 ab 两个点位与柳树树干，现按表面分类进行样机实验。

多孔岩石抓附点位 a 试验如图 5-16 所示。如图 5-16(a)所示，处于分离状态的机构准备实施抓附，由操作员手持辅助保持稳定。另从图 5-16(b)可得出机构左右侧爪弯曲角度不同，表明机构可自主适应不同形状的接触表面并完成锁紧。

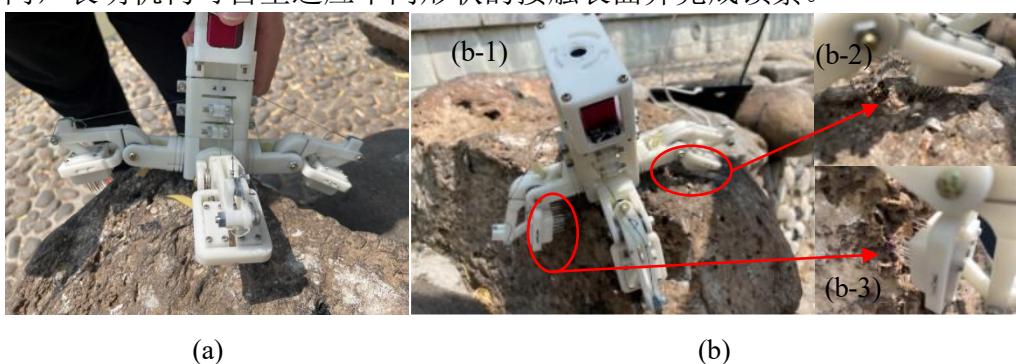


图 5-16 多孔岩石表面 a 抓附试验

(a) 固定机构四爪抬起，准备抓附多孔岩石 (b) 抓附效果图

(b-1) 整体抓附固定状态 (b-2) 右爪刺抓附细节 (b-3) 左爪刺抓附细节

对此固定机构在岩石表面 b 处抓点进行抓附试验，并对其进行步骤拆分，具体流程如图 5-17 所示，现对其依次进行分析介绍。

机构初始状态如图 5-17(a)所示，固定机构通过传动系统输出分离力 F 抵抗扭矩 T 将夹爪上拉，准备进行表面抓附。第二步如图 5-17(b)所示，传动系统驱动电机转动，分离绳索开始松弛，撤去分离力 F ，扭矩 T 将夹爪下压与表面初次接触，微刺顺次独立被动压缩以适应接触表面。第三步如图 5-17(c)所示，电机继续转动，释放分离绳索，进一步收紧抓附绳索。此时绞盘输出的抓附力达到峰值，抓附完成。从细节图可看出微刺发生弯曲变形，可对机构抓附效果产生的不良影响和避免方法进一步探究。结束状态如图 5-17(d)所示，电机反向转至初始状态，输出分离力抵抗扭矩 T 将夹爪上拉离开表面，抓附-分离流程结束。

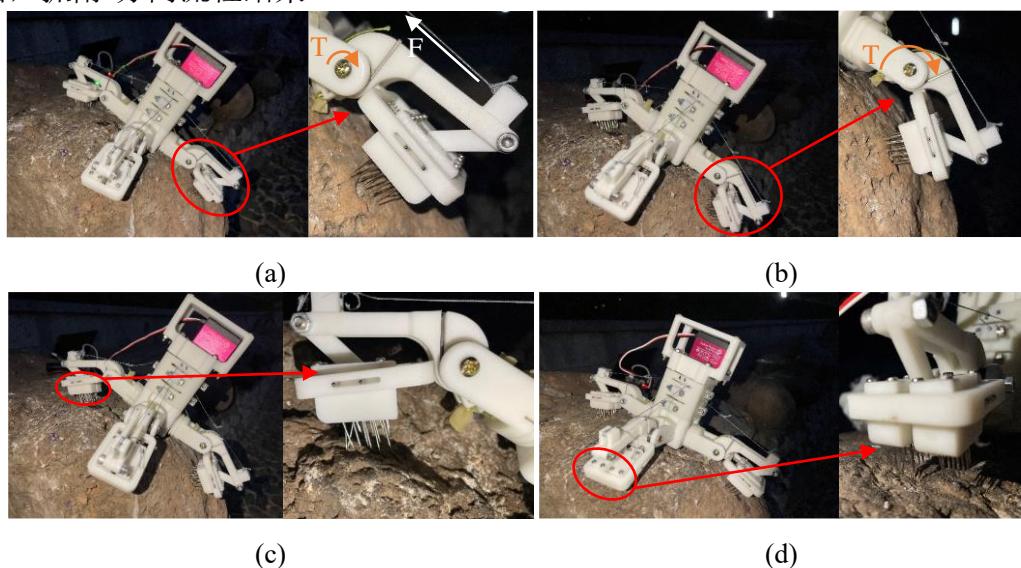


图 5-17 多孔岩石表面 b 抓附试验

(a) 准备抓附 (b) 夹爪被动贴附 (c) 抓附完成 (d) 微刺分离

粗糙柳树表皮抓附试验流程及结果如图 5-18 所示。图 5-18(a) 所示为样机实验平台，包括试验样机和包括上位机在内的控制驱动模块。图 5-18(b) 机构四爪张开，呈准备状态；图 5-18(c) 机构在扭簧驱动下与表面首次接触，随后电机转动，加大抓附力并承受 0.3kg 负载完成抓附固定，依次由图 5-18(c)、(d) 展示。图 5-18(f) 展示了钩刺出现的一种弯曲变形情况，可在后续进行改进，对钩刺强度和失效情况进行计算。



图 5-18 粗糙树皮抓附试验

(a) 实验平台 (b) 初始状态 (c) 被动贴附 (d) 主动抓附 (e) 完成抓附 (f) 失效情况

从上述样机实验结果中可总结出以下几点结论：

- (1) 微刺与粗糙表面作用强度是限制机构固定效果的主要因素。在保证抓附表面自身强度的前提下，微刺可捕捉到的表面凹坑数量和二者锁定的可靠性会显著影响抓附力的大小；
- (2) 微刺自身的机械强度影响机构抓附使用寿命。受到成本与时间限制，本样机微刺模组选取 ABS92601 镀镍大头钉加工制造而成，可选用性能更加优异的材料代替。此外，减小微刺暴露长度与全长之比可增加微刺的抗剪、抗弯性能，进一步提升抓附固定效果；
- (3) 四组径向均布的支爪在样机实验中体现出一定的独立适应能力，在本机构中通过抓附绳索末端连接的弹力绳实现。但也因此抓附力的大小受限于弹力绳的劲度系数和机构尺寸，且每组支爪转角差无法过大，后续通过对传动系统添加扭矩限制机构来提高支爪的独立抓附性能。

5.1.6 机器人系统方案设计

在完成对抓附式固定机构的所有设计研究后，考虑到机构的应用价值，本文拓展性地针对前文提出的4R运动支链主体进行模型设计，具体结构如图5-19所示。四个转动副处均装有DS5160驱动舵机，控制模组和电池模组与主体相连。

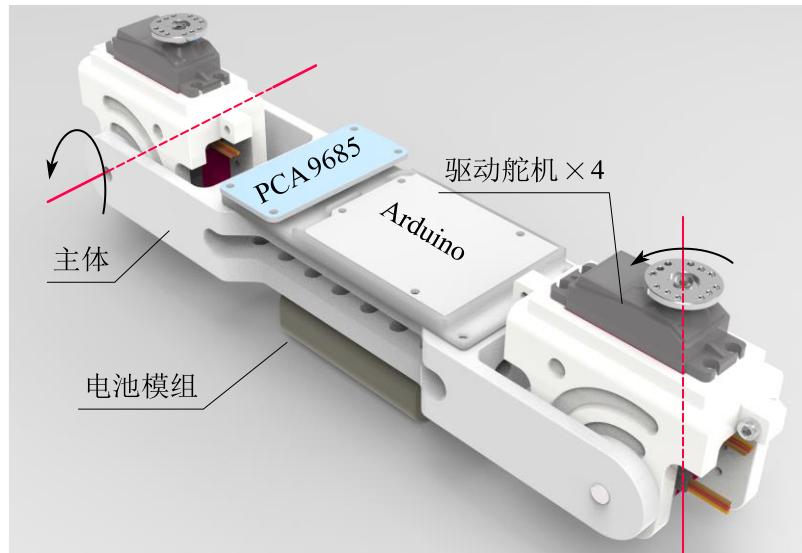


图 5-19 4R 运动链

将4R运动链末端与两组相同的抓附式固定机构进行装配，机器人系统总装配渲染效果如图5-20所示。



图 5-20 总装渲染图

5.2 控制系统设计

在完成对固定机构和机器人的模型结构设计、装配后，需要对舵机和整个运动链进行控制。本节按照从底层到顶层的顺序进行控制系统的架构设计。

5.2.1 舵机控制方案

1. 控制原理

此方案选用的舵机采用脉冲宽度调制来进行控制，(英文 Pulse-Width Modulation，缩写 PWM)，其控制原理可解释为在周期为 20ms 的时基脉冲中高电平部分的占比可与舵机转角呈线性对应关系，高电平持续范围可从 0.5ms 增值 2.5ms，对应舵机从初始位置转至极限位置。

2. 控制系统

Arduino 是包含各自型号的开发板(Uno、Micro、Mega 等)和对应开发环境(Arduino IDE)一款简单可靠、功能丰富的开源电子平台。控制系统选取 Uno R3 型号的控制板与编程软件 Arduino IDE(Version 2.0.4)，编程平台界面和开发板实物和如图 5-21 所示。开发板尺寸 $68.6 \times 53.4\text{mm}$ ，重 25g，可通过 USB 接口为微处理器 ATmega328P 进行 5V 供电，UNO 上共有 14 个数字 IO 接口，6 个模拟输入接口，其中包含可输出 PWM 波的六个引脚，支持 SPI、I2C 等多种通信协议。IDE 内部提供功能丰富的库函数可供调用，例如 setup()、delay()、serial()等函数和本次用到的 Adafruit_PWM_Servo_Driver.h 外部平台函数库文件。

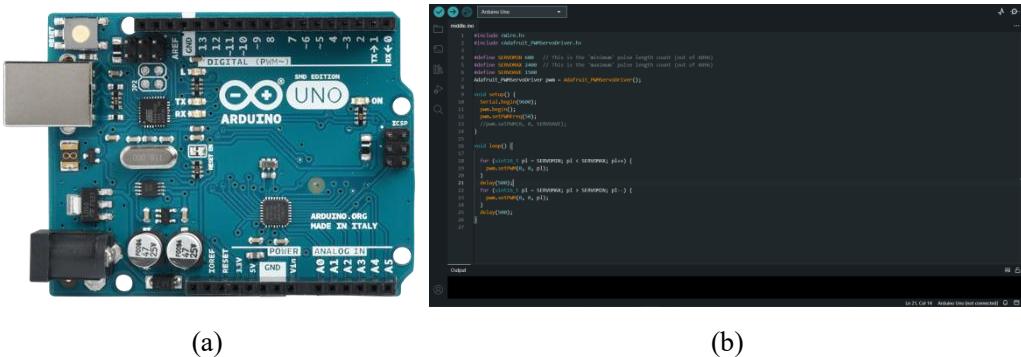


图 5-21 开发板 UNO 与 IDE 界面

由于机器人系统共有 6 枚数字伺服舵机需要 PWM 波形进行控制，单独的 UNO 开发板无法满足要求，需另配备舵机控制板。选取如图 5-22(a)所示的舵机控制板，每个 PWM 输出具有 12 位分辨率，每组 PWM 输出引脚由 5V 电源线、GND 地线和信号输出引脚构成，占空比可从 0 至 100%进行调节，从而控制每路舵机角度。舵机控制板与 UNO 开发板可通过 I2C 进行通信，二者独立供电，具体硬件控制系统如图 5-22(b)所示。

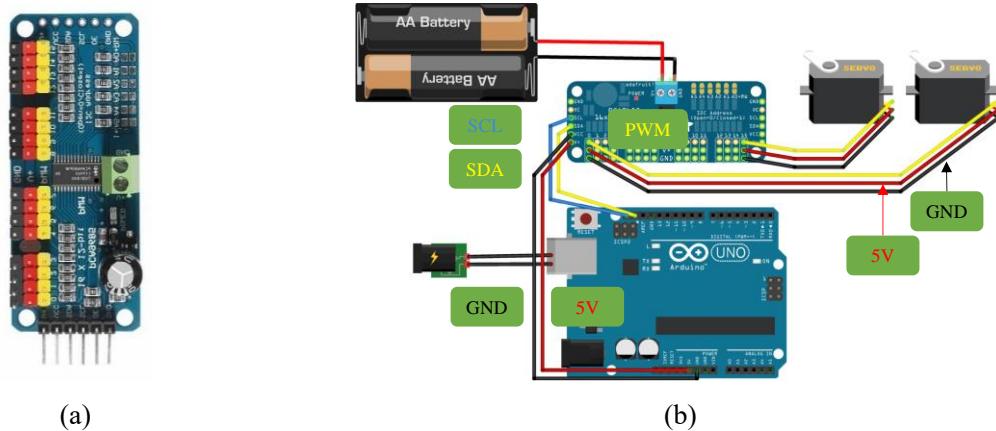


图 5-22 舵机控制板与硬件接线

5.2.2 机器人系统控制架构

机器人系统闭环控制结构如图 5-23 所示，用户在开发环境中编写控制程序，利用 I2C 通信与 PCA9685 控制板输出 PWM 波对舵机进行角度控制，使机构完成运动并实现固定抓附，为实现更好的控制效果，采用力传感器和陀螺仪对机构运动进行测量来完成闭环反馈控制，传感器输出的数值经过一定的算法来改变舵机输出角度。

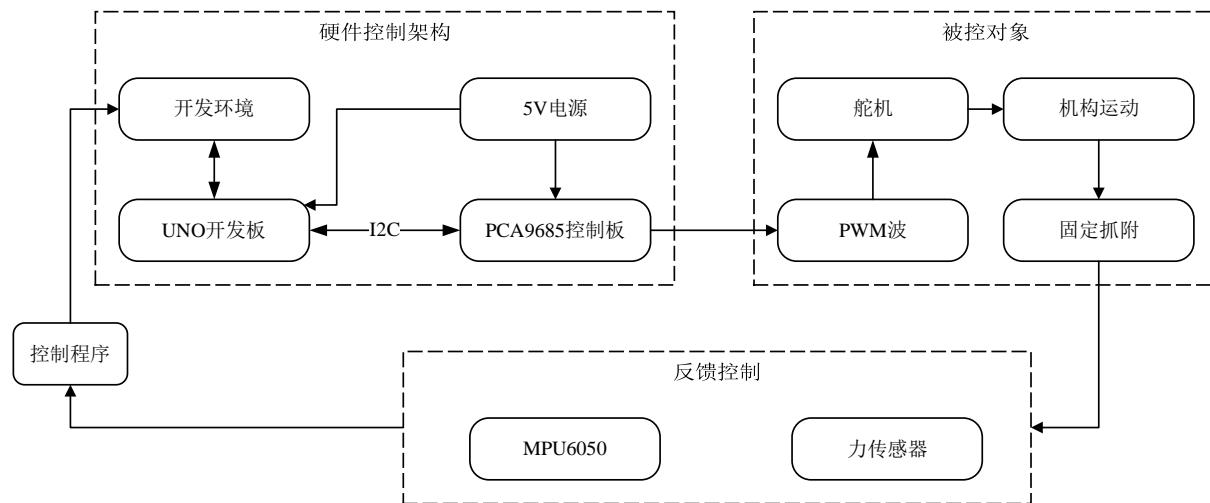


图 5-23 闭环控制架构

5.3 本章小结

本章综合前文机构设计与仿真分析结果，首先进行了样机的结构设计和实物制作，包括微刺舱、传动系统与单组分支臂。然后完成样机装配，选取多种粗糙表面并进行抓附固定试验，实验表明机构可实现被动适应抓附。最后给出了 4R 运动链的结构设计方案和机器人系统硬件接线与闭环控制架构，有助于未来进一步提升机器人系统。

6. 总结与展望

6.1 经济性与环保性分析

产品经济性表现在产品自身的经济性和产品使用过程的经济性，前者与制造者有关，也是本文需考虑的重点。产品的环保性主要指制造过程、工作过程中对人与自然造成的影响。下面从产品结构与制造方面阐述产品经济性与环保性。本课题在社会意义上可培养学生的创新工程设计能力与独立思考和探索能力，有助于为社会培养所需要的人才技术。对于法律、文化意义方面，本课题不涉及道德、伦理等方面，符合相关国家法律法规。

本文按照简单功能叠加为复杂功能的设计理念，最终产品在保证功能的前提下结构尽可能简单，减少数量。采用模块化设计的同时增加标准件在整体装配中的数目占比，降低维护、替换和制造成本。使用液态树脂材料 3D 打印成型工艺制作样机，成本较低，比其他 3D 打印工艺更易于打造复杂几何形状，平滑度较好，制造速度快，且具有防水性，制造过程中产生的有毒有害物质被控制在较低范围内，在专业人员操作的情况下对人和自然比较友好。本文所提出的抓附式固定机构在设计过程中在实现设计要求的功能基础上尽可能减轻整机结构件质量，在结构件弯折处均有 0.5mm 圆角，不会割伤使用者；机器人系统主要构件采用镂空进行减重，减少打印材料的消耗，增加了机构的便携性。本机仅采用单电机进行驱动，减少了对能源的损耗和控制硬件成本。

本文提出的固定机构所需软硬件成本如表 6-1 所示。整机结构件采用树脂材料 3D 打印成型，制造过程无毒无害，且无废气排出；舵机堵转扭矩 2.5N·m，工作电压 5v-6.8v，不会对人体造成机械性或电击伤害；总成本控制在¥800 以内，且该固定机构可反复试验，仅需更换钢针模组或意外断裂的尼龙绳，二者替换成本均可控制在小范围内，符合经济性与环保性要求。

表 6-1 固定机构成本明细

物料	成本	物料	成本
3D 打印件	¥300	舵机控制板	¥25
数字舵机	¥80	Arduino 开发板	¥190
紧固件	¥20	钢针	¥3
弹簧	¥80	电子连接线	¥5
尼龙绳	¥10	深沟球轴承	¥5

6.2 全文总结

本文提出了一种粗糙表面抓附式固定机构，通过单电机驱动的分层式变半径绞盘和独立线性伸缩的微刺结构实现了在粗糙表面的抓附固定，并将其搭载于机器人系统中完成了攀爬运动。

本文主要完成工作如下：

1. 提出一种钩爪攀附式的抓附固定机构：

- (1) 基于线性排布的被动伸缩微刺单元体，提出抓附更稳定的周向阵列排布方案；
- (2) 提出一种微刺分支臂，包括可自动复位的旋转限位机构和连接机构，后者以分离效率最大化为目标求解设计参数；
- (3) 提出单驱动分层式变半径绞盘，借助张拉机构达到变拉力的效果。

2. 固定机构的抓附效果分析评估

- (1) 基于分层被动约束的微刺抓附原理，提出一种机构完成抓附固定的全运动流程方案；
- (2) 对固定机构进行力学建模分析，探索出此机构的运动限制，得到了抓附、分离力矩的理论图像和理论载荷；
- (3) 对机构可抓附表面建立接触模型，得到了单一刺尖的可达空间，并依据几何形状分类求出了各类表面的适用范围。

3. 仿真分析与样机结构设计、实验

- (1) 对固定机构关键部件进行 CAD 建模和有限元分析，验证了固定机构结构件的安全性与可靠性。在此基础上建立仿真模型并进行多动力体仿真，验证了机构的可行性；
- (2) 提出一种 4R 运动链，与固定机构结合作为机器人系统进行步态规划和运动仿真，得到了机身质心位移、速度和驱动力矩等结果；
- (3) 进行整体样机和机器人系统结构设计，给出控制方案，制作了一台固定机构的实物样机并进行试验，达到了预期效果。

6.3 未来展望

本文提出的抓附式固定机构在一定程度上完成了设计目标，为使其具有更好的适应性和可移植性，仍需进一步的探索研究，具体展望如下：

- (1) 在微刺夹爪末端集成功力传感器，通过传感器数据与微控制器通信，构成反馈控制系统更好的控制机构的抓附力与抓附效果。
- (2) 改进固定机构的夹爪排列方式，使其能够适应机器人系统的多种攀爬步态。将固定机构与移动平台集成，拓展应用范围。可引入决策控制、路径优化算法给予整体系统更优良的表现。
- (3) 采取模块化可替换的夹爪设计方案弥补微刺磨损的缺点，进一步简化传动系统方案，减轻抓附机构的自重。
- (4) 针对样机实验出现的微刺折弯失效问题和微刺—表面作用强度进行研究分析，提升抓附机构的固定可靠性与耐用度。

参考文献

- [1] 谭民, 王硕. 机器人技术研究进展[J]. 自动化学报, 2014, 39(7): 963-972.
- [2] Shi X, Xu L, Xu H, et al. A 6-DOF humanoid wall-climbing robot with flexible adsorption feet based on negative pressure suction[J]. Mechatronics, 2022, 87: 102889.
- [3] Spenko M. Making contact: a review of robotic attachment mechanisms for extraterrestrial applications[J]. Adv. Intell. Syst., 2023, 5(3): 2100063.
- [4] Nansai S, Mohan R. A survey of wall climbing robots: recent advances and challenges[J]. Robotics, 2016, 5(3): 14.
- [5] Spenko M J, Haynes G C, Saunders J A, et al. Biologically inspired climbing with a hexapedal robot[J]. J. Field Robot., 2008, 25(4-5): 223-242.
- [6] Asbeck A T, Kim S, Cutkosky M R, et al. Scaling hard vertical surfaces with compliant microspine arrays[J]. Int. J. Robot. Res., 2006, 25(12): 1165-1179.
- [7] Parness A, Frost M, Thatte N, et al. Gravity-independent rock-climbing robot and a sample acquisition tool with microspine grippers: microspine rock climbing robot[J]. J. Field Robot., 2013, 30(6): 897-915.
- [8] Ueki S, Kawasaki H, Ishigure Y, et al. Development and experimental study of a novel pruning robot[J]. Artif. Life Robot., 2011, 16(1): 86-89.
- [9] Haruhisa Kawasaki, Suguru Murakami, Hideki Kachi, et al. Novel climbing method of pruning robot[C]//2008 SICE Annual Conference. Chofu: IEEE, 2008: 160-163.
- [10] Ishigure Y, Hirai K, Kawasaki H. A pruning robot with a power-saving chainsaw drive[C]//2013 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation. Takamatsu, Kagawa, Japan: IEEE, 2013: 1223-1228.
- [11] Ren D, Yang S, Yan G, et al. Study on a Novel Wheel Type Tree-Climbing Robot[C]//2014 Seventh International Symposium on Computational Intelligence and Design. Hangzhou, China: IEEE, 2014: 150-153.
- [12] Jiang Li. Grasping performance analysis of a biped-pole-climbing robot[J]. J. Mech. Eng., 2016, 52(3): 34.
- [13] 江励. 双手爪式模块化仿生攀爬机器人的研究[D]. 华南理工大学, 2012.
- [14] Xuefeng M, Liu Y, Junkao L, et al. Crabbot: a pole-climbing robot driven by piezoelectric stack[J]. IEEE Trans. Robot., 2022, 38(2): 765-778.
- [15] Ban Y, Lyu K, Ba S, et al. Monkeybot: a climbing and pruning robot for standing trees in fast-

- growing forests[J]. *Actuators*, 2022, 11(10): 287.
- [16] Zi P, Xu K, Tian Y, et al. A mechanical adhesive gripper inspired by beetle claw for a rock climbing robot[J]. *Mech. Mach. Theory*, 2023, 181: 105168.
- [17] Dai Z, Gorb S N, Schwarz U. Friction of the beetle claw system[J].
- [18] Ji A, Zhao Z, Manoonpong P, et al. A bio-inspired climbing robot with flexible pads and claws[J]. *J. Bionic Eng.*, 2018, 15(2): 368-378.
- [19] Wang W, Li X, Wu S, et al. Effects of pendular waist on gecko's climbing: dynamic gait, analytical model and bio-inspired robot[J]. *J. Bionic Eng.*, 2017, 14(2): 191-201.
- [20] Lynch G A, Clark J E, Lin P C, et al. A bioinspired dynamical vertical climbing robot[J]. *Int. J. Robot. Res.*, 2012, 31(8): 974-996.
- [21] Matthew R, Lund H, Yoshida K. A bio-inspired compliant claw for arboreal locomotion in microgravity environments[C]//2010 IEEE/SICE International Symposium on System Integration. Sendai, Japan: IEEE, 2010: 114-119.
- [22] Ding J, Su H, Nong W, et al. An inchworm-inspired soft robot with combined functions of omnidirectional steering and obstacle surmounting[J]. *Ind. Robot Int. J. Robot. Res. Appl.*, 2022.
- [23] Fengyu X, Xingsong W, Xiuping L. Modeling method for wall-climbing robot based on grasping claws[C]//2012 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation. Chengdu, China: IEEE, 2012: 1663-1668.
- [24] Spenko M, Cutkosky M, Majidi C, et al. Foot design and integration for bioinspired climbing robots[C]//Gerhart G R, Shoemaker C M, Gage D W. Defense and Security Symposium. Orlando (Kissimmee), FL, 2006: 623019.
- [25] Parness A, Evans T, Raff W, et al. Maturing microspine grippers for space applications through test campaigns[C]//AIAA SPACE and Astronautics Forum and Exposition. Orlando, FL: American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2017.
- [26] Parness A, Abcouwer N, Fuller C, et al. LEMUR 3: a limbed climbing robot for extreme terrain mobility in space[C]//2017 IEEE International Conference on Robotics and Automation (ICRA). Singapore, Singapore: IEEE, 2017: 5467-5473.
- [27] Parness A, Frost M, Wiltsie N, et al. Gravity independent climbing robot: technology demonstration and mission scenario development[C]//AIAA SPACE 2013 Conference and Exposition. San Diego, CA: American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2013.
- [28] Parness A. Anchoring foot mechanisms for sampling and mobility in microgravity[C]//2011 IEEE International Conference on Robotics and Automation. Shanghai, China: IEEE, 2011: 6596-6599.
- [29] Parness A, Frost M. Microgravity coring: a self-contained anchor and drill for consolidated rock[C]//2012 IEEE Aerospace Conference. Big Sky, MT: IEEE, 2012: 1-7.

- [30] Parness A, Frost M, Boston P, et al. Rock climbing robot for exploration and sample acquisition at lava tubes, steep slopes, and cliff walls[J]. 2012, 1679: 4128.
- [31] Parness A, Frost M, Thatte N, et al. Gravity-independent mobility and drilling on natural rock using microspines[C]//2012 IEEE International Conference on Robotics and Automation. St Paul, MN, USA: IEEE, 2012: 3437-3442.
- [32] Lam T L, Xu Y. A flexible tree climbing robot: treebot - design and implementation[C]//2011 IEEE International Conference on Robotics and Automation. Shanghai, China: IEEE, 2011: 5849-5854.
- [33] Lam T L, Xu Y. Climbing strategy for a flexible tree climbing robot—treebot[J]. IEEE Trans. Robot., 2011, 27(6): 1107-1117.
- [34] Nagaoka K, Minote H, Maruya K, et al. Passive spine gripper for free-climbing robot in extreme terrain[J]. IEEE Robot. Autom. Lett., 2018, 3(3): 1765-1770.
- [35] Uno K, Takada N, Okawara T, et al. HubRobo: a lightweight multi-limbed climbing robot for exploration in challenging terrain[C]//2020 IEEE-RAS 20th International Conference on Humanoid Robots (Humanoids). Munich, Germany: IEEE, 2021: 209-215.
- [36] Li X, Chen W, Li X, et al. An underactuated adaptive microspines gripper for rough wall[J]. Biomimetics, 2023, 8(1): 39.
- [37] Hawkes E W, Ulmen J, Esparza N, et al. Scaling walls: applying dry adhesives to the real world[J]. 7.
- [38] Murphy M P, Kute C, Mengüç Y, et al. Waalbot II: adhesion recovery and improved performance of a climbing robot using fibrillar adhesives[J]. Int. J. Robot. Res., 2011, 30(1): 118-133.
- [39] Eich M, Vogelete T. Design and control of a lightweight magnetic climbing robot for vessel inspection[C]//2011 19th Mediterranean Conference on Control & Automation (MED). Corfu, Greece: IEEE, 2011: 1200-1205.
- [40] Zhu H, Lin Z, Yan J, et al. Compact lightweight magnetic gripper designed for biped climbing robots based on coaxial rotation of multiple magnets[J]. Robot. Auton. Syst., 2022, 155: 104164.
- [41] M. R, Vigneshwaran S, Mattoo H. Design and development of semi-autonomous wall climbing robot mechanism[C]//2018 2nd International Conference on Micro-Electronics and Telecommunication Engineering (ICMETE). Ghaziabad, India: IEEE, 2018: 314-317.
- [42] Zhou Q, Li X. Experimental investigation on climbing robot using rotation-flow adsorption unit[J]. Robot. Auton. Syst., 2018, 105: 112-120.
- [43] Wang W, Wang K, Zhang H. Crawling gait realization of the mini-modular climbing caterpillar robot[J]. Prog. Nat. Sci., 2009, 19(12): 1821-1829.
- [44] Sinkar A, Pandey A, Mehta C, et al. Design and development of wall climbing hexapod robot with

- SMA actuated suction gripper[J]. Procedia Comput. Sci., 2018, 133: 222-229.
- [45] Hernando M, Gambao E, Prados C, et al. ROMERIN: a new concept of a modular autonomous climbing robot[J]. Int. J. Adv. Robot. Syst., 2022, 19(5): 172988062211234.
- [46] Shi Y, Gong Z, Tao B, et al. An active compliance adsorption method for climbing machining robot on variable curvature surface[J]. IEEEASME Trans. Mechatron., 2022: 1-10.
- [47] Gillies A G, Lin H, Henry A, et al. Gecko toe and lamellar shear adhesion on macroscopic, engineered rough surfaces[J]. J. Exp. Biol., 2013: jeb.092015.
- [48] Xu F, Meng F, Jiang Q, et al. Grappling claws for a robot to climb rough wall surfaces: Mechanical design, grasping algorithm, and experiments[J]. Robot. Auton. Syst., 2020, 128: 103501.
- [49] Wang S, Jiang H, Cutkosky M R. Design and modeling of linearly-constrained compliant spines for human-scale locomotion on rocky surfaces[J]. Int. J. Robot. Res., 2017, 36(9): 985-999.
- [50] Kim S, Asbeck A T, Cutkosky M R, et al. SpinybotII: climbing hard walls with compliant microspines[J]. 6.
- [51] Wang S, Jiang H, Cutkosky M R. A palm for a rock climbing robot based on dense arrays of micro-spines[C]//2016 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS). Daejeon, South Korea: IEEE, 2016: 52-59.
- [52] 王贝. 钩爪抓取式粗糙壁面攀爬机器人建模与研究[D]. 南京邮电大学, 2017.

致 谢

文行至此，万千思绪，难以言表。处于人生转折点的我，憧憬与不舍交织，欢欣与感伤共存。在本科生涯结束之际，谨以此段致谢纪念我的大学生活，那是在上园村三号度过的一段小有遗憾的美好时光。

二〇一九年盛夏，我作为河北省的录取分数线考入北京交通大学，结识了与我相伴同行四年的五位舍友。总是被我叫错名字的炳君和远彬，沉稳可靠的琪尧，与我互相督促的志豪，以及我的下铺与挚友李光南。我不会忘记六个人在文音湖夕阳下的合影，也不会忘记每年一起庆祝的生日宴。你们五位给予了我最美好的宿舍氛围，我们聚是一团火，散是满天星。

二〇二二年深秋，我在李晔卓老师课题组内选择了自己的毕业设计题目。从选题、开题、中期至初稿、定稿，李晔卓老师、滕新宇师兄、赵子铭师兄、王春海师兄等人对我每一次组内汇报、答辩、设计稿和论文都进行了事无巨细的指导和帮助，感激之情溢于言表。无以为报，只期待本文最终不辜负你们的苦心孤诣。

自始至终，生我养我的父母一直是我最坚实的后盾，支持着我走完大学四年。犹记得父亲对我的告诫：“学习如同登山，越是向上走，越是人迹罕至，但风景会更加壮丽。”每当我被学业所困，母亲便会叫我一起外出散步，以至于我现在仍会选择在困顿之时外出散心。父母之恩情重如泰山，惟愿我长大的速度，能快过父母老去的速度。

除此之外，我的恋人高若彤，是她在我推免、毕业期间一直陪伴着我，给予了我莫大的帮助和自信。同时也是她让我学会与自己和解，放下心中的负担去做自己，一起奔赴更好的未来。

多年以后，面对人生的下一个转折点，我将会回想起二〇一九年入学报到的那个遥远的下午。

附录

附录 A 工程图纸

