

（一）项目简介

随着科技的进步，人类对月球的探索已经不再是简单的观测和表面探测，而是逐渐深入到对月球地质结构、资源分布以及潜在生命迹象的研究。月球土壤作为月球表面的重要组成部分，蕴含了丰富的科学信息。

由于月球几乎没有大气层，月球表面长期受到微陨石的冲击及太阳风粒子的注入，太阳风粒子的注入月壤富含稀有气体组分。因此，高效、精准地采集月球土壤样本，对于推动月球科学研究的深入发展具有重要意义。

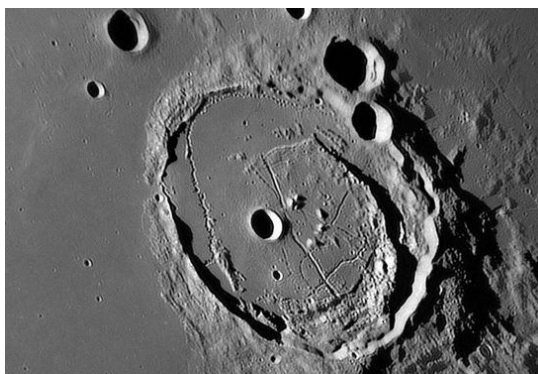


图 1.1 月球土壤

相较于美苏两国，中国探月工程起步较晚但迅猛发展，截至目前为止，我国已完成嫦娥五号软着陆，采集月壤成果显著，为未来我国建立月球基地提供坚实基础。近期，中国嫦娥六号的发射也是构建月球科研站的至关重要的一环，继嫦娥六号发布以后，嫦娥七号、八号也相继执行，成为我国乃至国际月球科研站的重点。国际月球科研站预计 2028 年前后建成基本型，开展月球环境探测和资源利用实验验证。



图 1.2 嫦娥五号采集月壤机器人

然而，在**有预期的未来事件**当中我们可以发现，月壤采集机器人具有以下问题：

（1）安全问题：复杂地形采集月壤机器在使用过程中存在一定的安全风险，如机器在崎岖不平的地形下容易翻倒，机器的传感器和采集设备也容易受到外界干扰而失灵，需要进行安全措施和保护措施。传统采集方式依赖于宇航员的手动操作存在较高的安全风险。

(2) 对地形的适应性不强：由于月球表面环境复杂，在不同场景下测绘可能有不同的特点和要求，现有的履带机器人对复杂地形的适应性较差，导致机器人在复杂地形的作业环境下移动效率不高。

(3) 采集效率不高：传统的月球采集方式往往依赖于宇航员的手动操作或固定式采集设备，这种方式效率低下。目前月壤采集无法实现不同位置的采集方案，迫切需要高机动性以及高响应机器灵活采集，提高效率。由于松软的月球土壤、凹凸不平的坑洞和微小的重力等复杂地貌状态导致采集困难，自适应能力不足，也难以排屑。采集需要一定的自适应机制以及排屑能力。

本项目开发一种结合了特种先进机器人技术和月球探测需求的创新设备，**机械鲁棒性强、地形适应能力强、搭载特种碰撞自适应钻进系统、路径识别以及复杂地形重建**的采集月壤全向轮机器人。其全向轮设计使得机器人在月球表面能够灵活移动，上层设计钻进系统，适配机器视觉以及改良算法，以适应各种复杂地形，而采集土壤的功能则满足了科学研究和资源利用的需求。

(二) 研究目的

1.月球深入探索的迫切需求

月球作为围绕地球公转的唯一自然卫星，其重要性不言而喻。人类对月球的探索从未停止。早在六十年以前，美苏两国相继踏上了人类探月征途；21 世纪后，各国家也都在进行对外太空的探索活动。地球上资源危机也使得对地外星球的探索更为迫切。为了更好地了解星球的演化历史，不仅需要对表层土壤以及岩石进行科学分析，深层的土壤或者岩石更具有科学分析的价值。星球钻取探测采样能够在获得星球地层以下样本的同时保留其原始信息。

因此，目前钻取采样已经成为星球探测中一种行之有效的方法。随着科学技术的进步，月球探测任务也愈来愈复杂、深入。松软的月球土壤、凹凸不平的坑洞和微小的重力等复杂的月球地貌状态给月基装备的自主巡航与正常作业带来很大麻烦，急需相关设备能够在复杂月球能够精确、高效地采集月球表面的土壤样本，显著提高采样效率和质量。

2.传统月球采集方式的局限性

人类不断探索月壤采集设备以及相关方式，美国 Apollo 系列实施的月面采样计划均由宇航员手动操作完成，其配备有专用钻取采样设备，用敲入的方法，将岩芯管打入月表深处进行采样，或采用手持式回转冲击电动钻进行钻取任务。

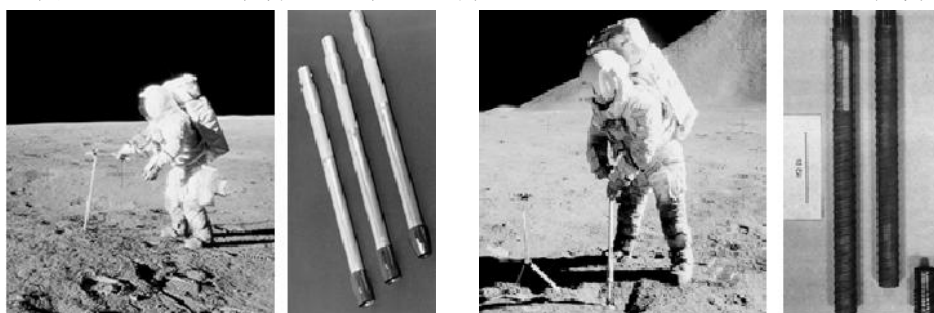


图 2.1 美国 Apollo 系列载人登月采样钻具

我国采集月壤成功的**嫦娥五号无法在月面移动**，故采用是钻表异构采样设计。由此可见，依赖于宇航员的手动操作的传统月球采集方式，会受到人类能力和装备的限制，无法完全发挥自动化和智能化技术的优势。而且宇航员在月球表面的活动受到时间、体力等因素的限制，采集速度和效率都较低，同时存在较高的安全隐患。同时，开展**月面可移动设备**的研究进行月壤采集是未来月球探索的必然趋势。

3.传统路径规划的局限性

由于天文学的“潮汐锁定”现象，月球正面能够接收到的信号极其微弱。在信号微弱的复杂环境下，月球机器人在进行探索时有可能会面临目标调整、路径重构、碰撞规避的问题，这就要求规划的路径能够妥善处理非结构化信息，适应复杂地形变化，并综合考虑路径长度、安全性和效率。月球表面地貌丰富多样，包括裂谷、陨石坑、山脉等。在这样复杂的地形下，月球机器人常常难以准确感知地面摩擦力，从而导致月球机器人的轮胎与地面之间出现滑移。而在月球机器人的自主导航中，滑移导致运动预测不准确，能源浪费以及路径偏离目标的挑战。

全向轮月球采集土壤机器人将复杂地形与全局路径规划、自主避障结合，采用了基于滑移预测的双层路径规划算法，能够更好地适应月球的复杂环境。

4.国际月球基地建立的长远需求

早在 2022 年 11 月，国家航天局公布了我国探月工程四期、深空探测任务后续规划。探月工程四期嫦娥六号任务计划于 2024 年上半年实施，拟在月球背面采样返回；嫦娥七号任务拟于 2026 年前后发射，计划开展月球南极的环境与资源勘查，并为国际月球科研站建设奠定基础；嫦娥八号计划将在 2028 年前后实施发射，届时，嫦娥八号和嫦娥七号将组成我国月球南极的科研站基本型。国际月球科研站预计 2040 年前建成完善，开展日地月空间环境探测及科学实验，并建成鹊桥通导遥综合星座，服务载人登月、火星、金星等深空探测。

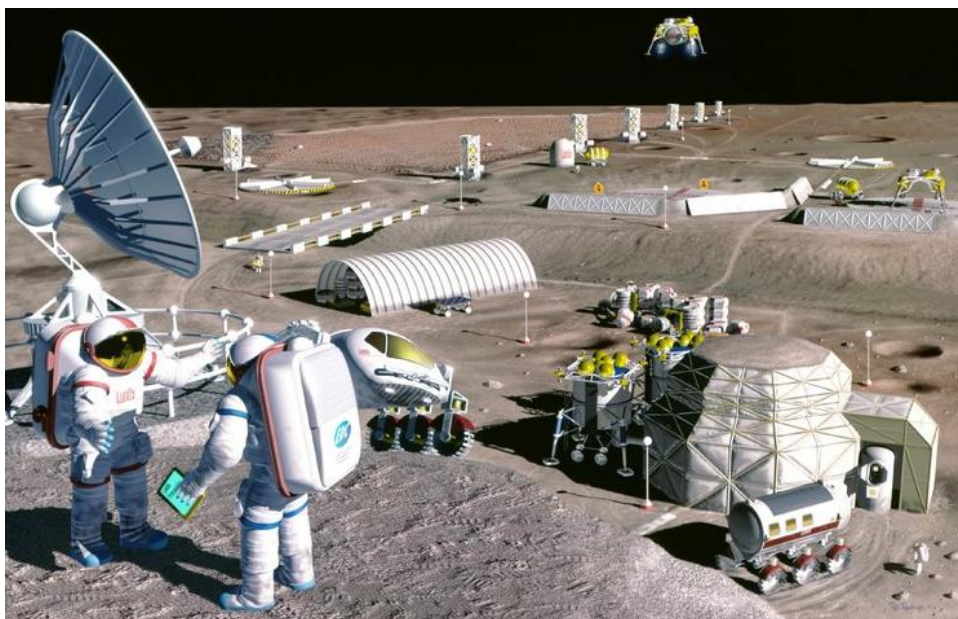


图 2.2 国际月球科研站构想图

因此，在月球中国南极科研站的蓝图下，月球车进行探测和资源原位利用成为

重中之重。本项目面向未来月球科研基地的宏大规划，致力于轻小型、高机动性、智能化的月壤采集机器人研发，助力我国探月工程迈向新高度。

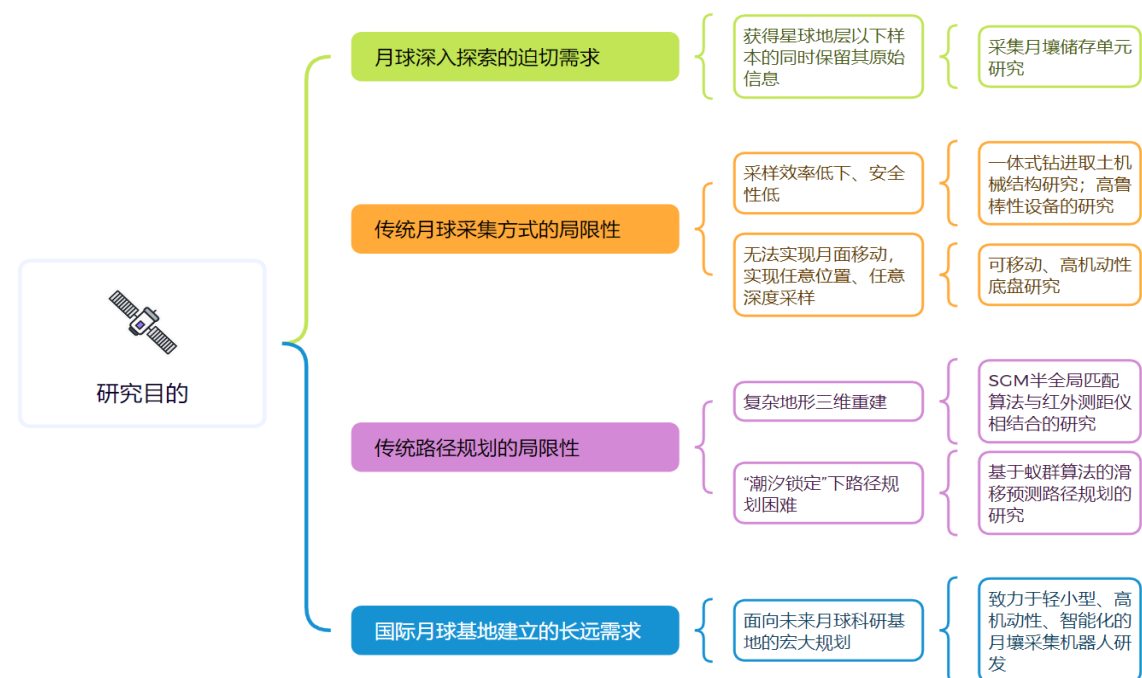


图 2.3 研究目的综述图

（三）研究内容

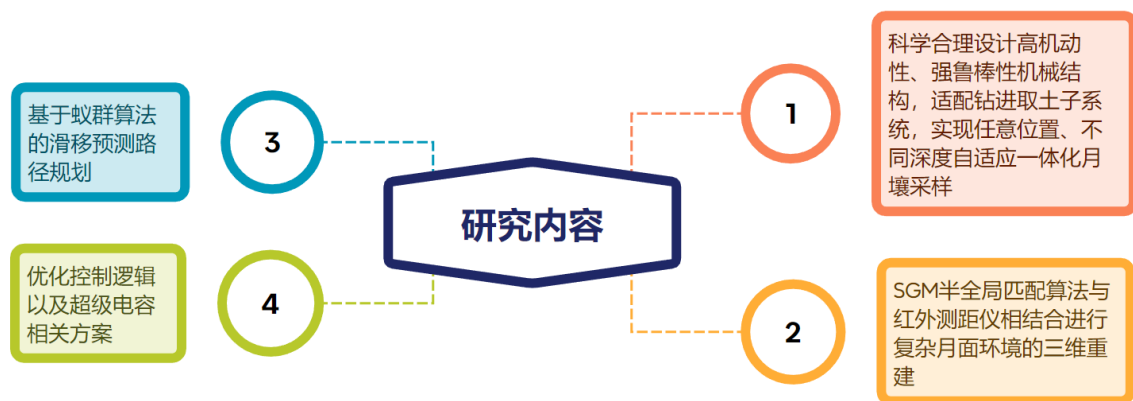


图 3.1 研究内容综述图

1、研究如何设计高鲁棒性、机动性的机械结构

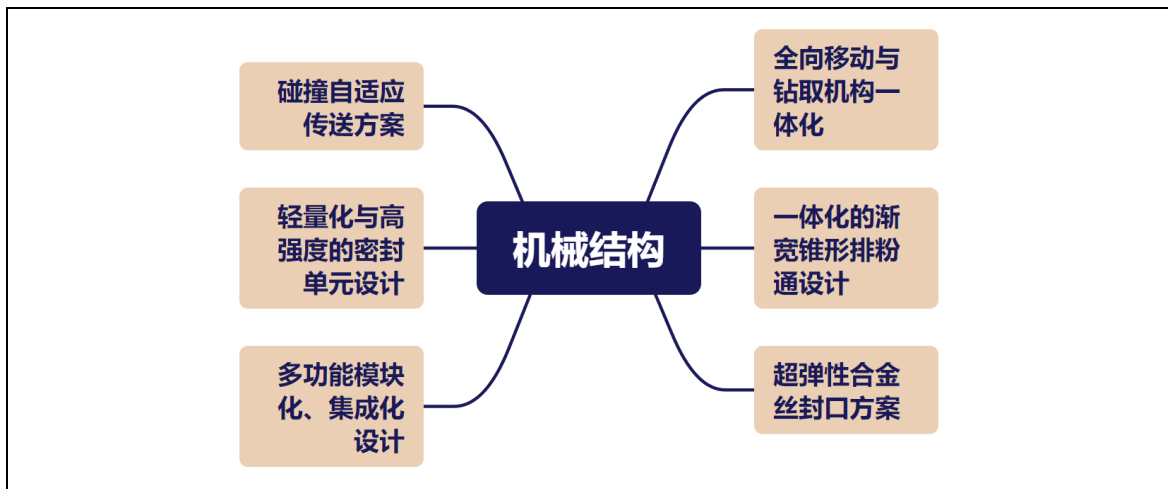


图 3.2.1 机械结构研究综述图

(1) 全向移动与钻取机构一体化：研究如何设计基于全向轮底盘一体化机械钻取机构，如何通过底盘的移动和子系统的 z 轴运动，实现月面任意位置、不同深度的月壤采样。

(2) 渐宽锥形排粉槽通道设计：为有效提升了排粉能力和采样效率，研究如何科学设计一体化的排粉通道。

(3) 超弹性合金丝封口方案：为简单可靠地实现取样软袋的封口，研究如何科学设计封口方案，确保了取样过程中土样不会掉落。

(4) 碰撞自适应传送方案：为实现封装容器的平稳传送，考虑到低重力环境对样品传送的影响，研究如何设计一种具备碰撞自适应能力的传送方案。

(5) 轻量化与高强度的密封单元设计：为确保系统能够适应月球表面的极端温度环境，同时保证结构的强度和刚度，研究如何科学轻量化设计。

(6) 多功能模块化设计：研究如何模块化设计，使整个系统各单元之间功能明确、相互独立，便于维护和升级，使其具备多种工作模式，可适应不同的采样需求和环境条件。

2、研究如何基于机器视觉对月球复杂地形进行三维重建

采用 SGM 半全局匹配算法与红外测距仪相结合进行三维重建，红外测距仪得到的深度值能够矫正视差图匹配结果，使重建结果具有较高的准确性，同时双目视觉匹配得到的视差图使重建视野更广。

3、研究如何进行采集月壤的路径规划

采用基于蚁群算法的滑移预测路径规划方案，能够基于对坡向的滑移的预测规划全向轮月球车的路线，且能应对出现未知障碍物等环境发生的变化，通过 MATLAB 月面虚拟仿真验证路径规划可行性。

4、研究如何优化控制逻辑以及开发超级电容方案

基于正、逆运动解算，利用前馈双环 PID 优化逻辑控制，增加限幅和一阶低通滤波处理，不断优化升级逻辑方案，提升算法鲁棒性。对于现有超级电容优化升级，分为 boost 模块、电容均衡模块以及电容控制模块等模块化规划升级。

（四）国、内外研究现状和发展动态

4.1 月球土壤采集机器人总体研究现状

1969 年 7 月 20 日，人类首次踏上月球，这是人类探索太空的一次伟大进步，其中，所带回来的月球土壤样品成为了关于月球最为珍贵的东西。人类历史上，第一次从地外天体钻取采样是由前苏联完成的。Luna 系列采样探测器竖直分力控制，以固定回转钻速实现月面钻进。

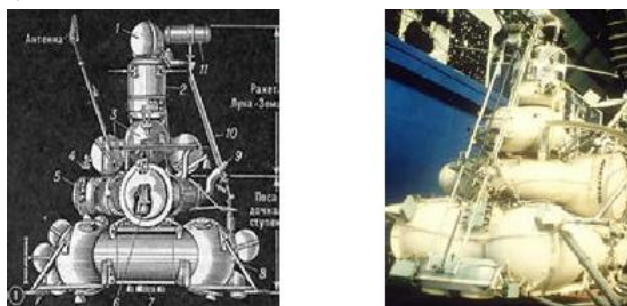


图 4.1.1 前苏联 Luna 系列采样探测器

中国嫦娥五号执行迄今为止我国最复杂的航天任务，采集月球土壤。

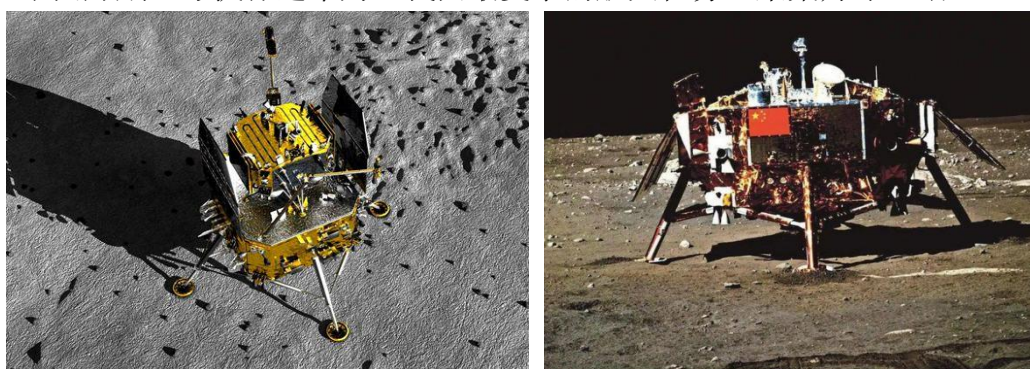


图 4.1.2 嫦娥五号月球车

在国内，随着航天技术的迅速发展，月球探测和采样任务成为了重要的研究方向。科研机构成功设计并制造出多款月壤采集机器人样机，具备良好的越障能力和稳定性，可以适应月面的复杂地形。研究团队在控制系统方面取得了显著进展，实现了机器人的自主导航、路径规划以及土壤采集等功能的精确控制。

在国外，特别是美国、欧洲等航天大国，月球土壤采集机器人的研究起步较早，技术也相对成熟。研究团队在的智能化方面取得了较大进展，通过应用人工智能、机器学习等技术，实现了机器人的自主决策和协同作业能力，为后续的科研工作提供了宝贵的数据支持。

4.2 钻取机械研究现状

随着星球环境研究深入、土壤环境恶化，土壤取样科研工作变得尤为重要。因此，钻进取芯技术也在不断创新和完善。近年来，国内土壤表面钻进取芯技术已经取得了显著进展，在设备研发、技术应用和数字化改造等方面都取得了重要成果。

国内已经涌现出一批从事土壤修复和环境钻探的企业和机构，在土壤取样和钻进取芯技术方面进行了大量的研究。哈尔滨工业大学^[1]在月表钻进取芯机械技术领域取得了显著的成果，成功研发出了月表钻进取芯机械，并在模拟月球环境的试验中取得了良好的效果。

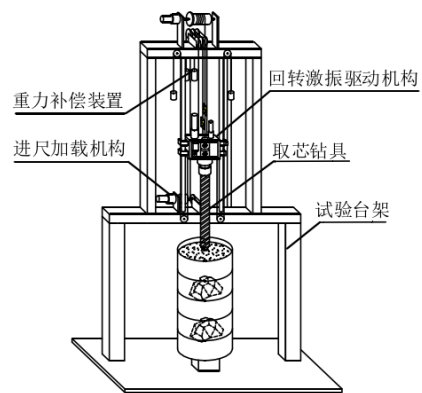


图 4.2.1 采样平台示意图

其次，在新型钻取技术方面，国内也在不断探索新的方法和手段。例如，中国地质调查局^[2]开发的声波钻进技术在国内得到了广泛应用。高精度测量技术，被应用于土壤取样和钻进取芯过程中，提高了检测的准确性和可靠性。



图 4.2.2 螺旋形取心钻头

同时，国内还在积极探索土壤环境调查钻探设备的创新。例如，回转钻机、直推静压式钻机、冲击式钻机等不同类型的钻机在土壤取样和钻进取芯中得到了新应用。其能够根据不同的土壤条件进行灵活调整，确保取样的准确性和代表性。北京空间飞行器总体设计部^[3]多家研究所参与了月表钻进取芯机械技术的研发，成功研制出了钻进取芯机械，并在多次探月任务中得到了实际应用。中国航天科技集团有限公司（CASC）多家研究所和企事业单位均参与了月表钻进取芯机械技术的研发，成功研制出了适用于月球环境的钻进取芯机械。

最后，数字化改造也为土壤表面钻进取芯技术的发展带来了新的机遇。利用传感器、数据采集设备等技术，可以实时收集和处理土壤取样和钻进取芯过程中的数据，提高数据的准确性和效率。同时，借助大数据分析、人工智能等技术，可以对取样数据进行深研究，为土壤样本分析提供科学依据。

4.3 双目视觉匹配算法研究现状

双目视觉非神经网络匹配方法大多依据像素的单个或多个特性进行，可分为：

（1）局部匹配算法

局部匹配算法中具有更低的复杂度和运行速度;局部匹配算法仅依据像素或像素区域的相关特性进行匹配,算法实现简单,但容易受噪声、纹理的影响,算法的鲁棒性低。因此,针对上述问题有学者提出 census 变换^[4]和采用不同尺度的匹配特征^[5]的方法,利用和增强算法的特征表达,以增强算法对噪声、光照等影响的鲁棒性。

（2）半全局匹配算法

2005 年, Hirschmuller^[4]提出了半全局立体匹配算法, 基于像素、互信息的匹配成本来补偿输入图像的辐射差异, 基于动态规划对多个方向的代价进行寻优和代价聚合, 得到最终预测的视差。顾梦娇^[5]等人提出了一种基于半全局立体匹配算法与 Census 算法结合的改进算法, 能够显著减小匹配时间。宋坤^[6]等人提出一种 SGM 算法结合泛洪填充和中值平滑的视差优化算法, 能够减少图像的噪声, 提高视差图的匹配精度。

（3）全局匹配算法

全局匹配算法时间复杂度却明显提高了。常见的全局匹配算法有: 动态规划算法 (DP)、图割算法 (GC) 和置信度传播算法 (BP)^[7,8,9]。全局匹配算法利用了图像全局的特性得到精度的提高, 但是由于是最大范围的搜索, 在无相关性的匹配中耗时较长。

4.4 路径规划算法研究现状

未来拟解决的月面路径规划算法目前已有广泛研究, 路径规划算法可以根据对地形环境信息的已知程度和规划的求解范围将其分类为以下部分:

（1）基于图搜索的规划算法

基于图搜索的规划算法搜索效率过低。目前由于算法的递进式搜索机制限制, 在月面大范围路径规划问题中还是存在搜索速度过慢, 应对月面未知环境能力较差的问题。

（2）基于启发式优化的规划算法

周兰凤^[10]等人提出了一种基于蚁群算法的滑移预测路径规划方法, 针对月球表面环境引入基于滑移预测的综合代价函数, 并提高了收敛速度。然而, 启发式算法目前不同的优化机制使算法缺乏统一完整的理论体系, 同时算法规划出的路径缺乏最优性保证且在大规模问题时收敛困难, 因此难以直接应用到月面大范围路径规划问题当中。

（3）基于采样的路径规划算法

基于采样的规划方法避免了对环境空间的遍历搜索, 使其可以适用于高维空间或复杂环境下的路径规划问题。基于其灵活的采样集规划机制使其可以解决复杂环境或高维空间中的规划问题, 由于其随机采样的规划机制会导致路径非最优且不平滑, 在对月面轨迹质量要求高的场景难以适用。

4.5 仍存在的问题

月球表面地貌丰富多样，欲对其信息进行三维获取，已有的文献多用神经网络或 SGM 算法，因其样本量大训练计算时间长，不适用于月球上实时地形检测。由于全局匹配算法在无相关性的匹配中耗时较长，局部匹配算法容易受噪声、纹理的影响，算法的鲁棒性低。因此，本项目采用的半全局匹配算法更适用于月面复杂地形。

基于图搜索的规划算法存在搜索效率过低，搜索速度过慢，应对月面未知环境能力较差的问题。基于启发式优化的规划算法在大规模问题时收敛困难，因此难以直接应用到月面大范围路径规划问题当中。基于采样的路径规划算法导致路径非最优且不平滑，在对月面轨迹质量要求高的场景难以适用。基于学习的规划方法存在复杂场景下训练困难，表现不稳定等问题。

在可预见的未来事件中，国际月球科研站将不断进展完善，势必需要经过遥控制的可移动的月壤采集机器人，自动化、一体化、集成性以及人机交互性更加完善。

（五）创新点与项目特色

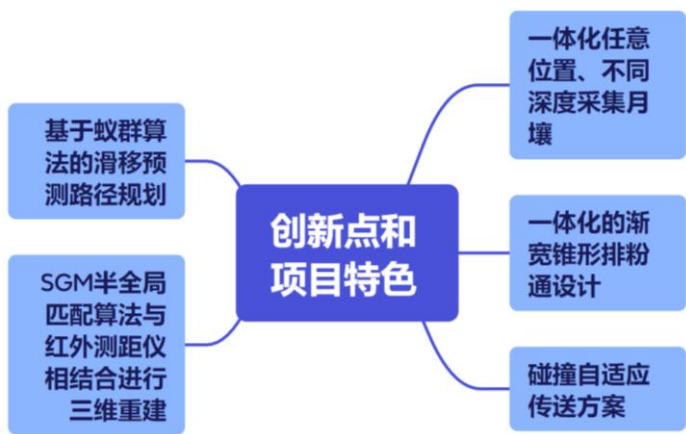


图 5.1 创新点与项目特色

1.创新点：

（1）本高灵敏性高响应性独立悬挂系统的全向轮机器人创新实现月面**任意位置、不同深度**的月壤采样；创新设计了一体化的**排粉通道**，有效提升了排粉能力和采样效率；利用**弹性驱动和重力**作用，设计了一种具备**碰撞自适应能力**的传送方案，实现了封装容器的平稳传送，为月球采集土壤机器人的正常工作以及良好性能提供强鲁棒性的机械基础。

（2）本项目采用的基于蚁群算法的**滑移预测路径规划**方案，提高了收敛速度，能够基于对坡向的滑移的预测规划全向轮月球车的路线，且能应对出现未知障碍物等环境发生的变化，基于**双目视觉非神经网络**的视觉识别以及基于虚拟三维月表环境**改进的遗传算法**进行复杂月球表面的路径规划，使月球采集土壤机器人具有

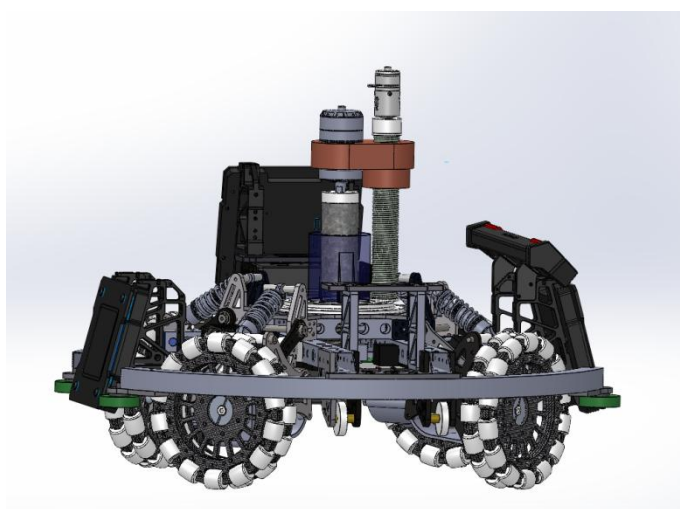
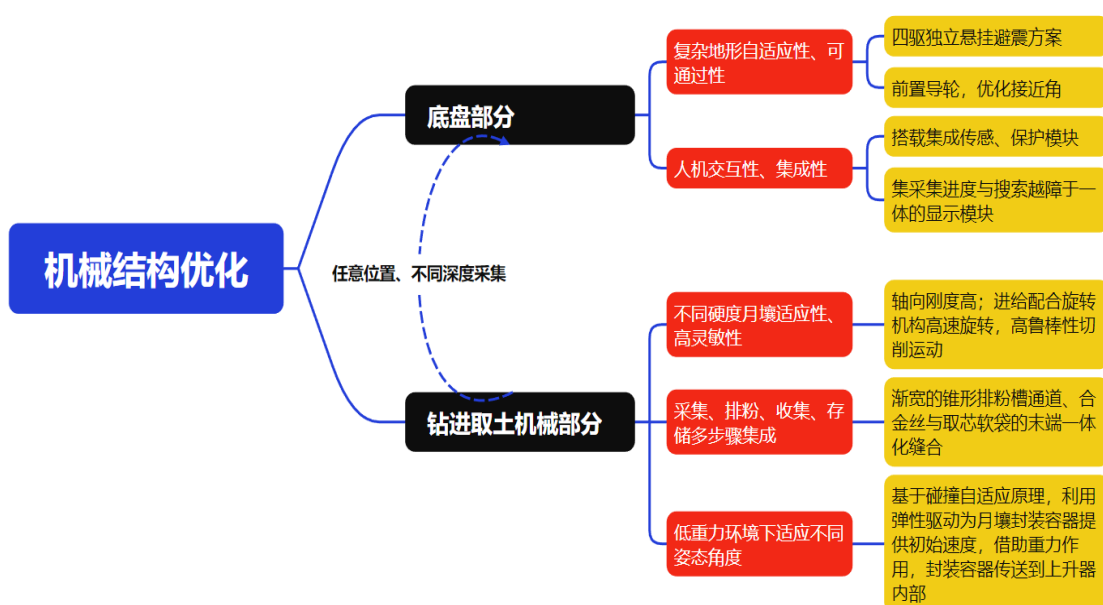
自主路径规划能力，同时交互界面使人机交互能力增强。

2.项目特色：

本项目依托中南大学电工电子实训创新基地，融合贯彻中南大学软体机器人创客空间的研究理念，具有实战经验，有国际视野，并将学科竞赛优秀成果与相关科研思想转化，且多学科交叉融合，将高鲁棒性高性能机器人设计制造融入当下时代热点，为未来探月发展以及太空探测提供一份新思路。

（六） 技术路线、拟解决的问题及预期成果

6.1 机械结构优化



6.1.1 机械底盘结构设计

面对复杂的月球表面地形，月球车的通过性以及鲁棒性尤为重要，底盘作为机器人越障功能以及复杂地形攀爬性能的主要体现，尤为重要。本项目底盘机械结构以“井”字梁为主体结构，依托铝合金质量轻、力学性能良好的优良特性，连接主要板件使用碳纤维，同样具有强度高且轻的特性。轮组设计部分，利用避震器以及平行四边形连杆机构设计，使其具有复杂地形以及起伏路段通过性，前置导轮使其对于高坡度路段、台阶具有通过性，接近角为 35° 。

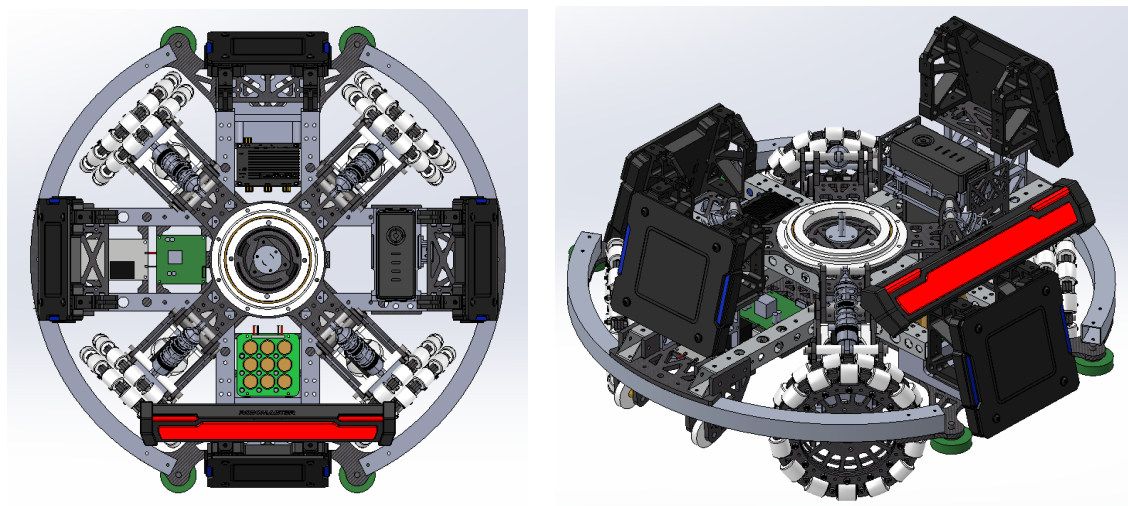


图 6.1.3 机器人底盘结构

该底盘搭载集成传感、保护模块，集采集进度与搜索越障于一体的显示模块、主控模块、电源管理模块、超级电容模块，为适配月球采集土壤以及搜索越障等多功能。

(1)集成传感、保护模块：该模块使用错层、环绕车体的四组独立装甲板构成，内置所需传感器，能对四周信息进行搜索、实时反馈；错层及安装一定斜度处理可以对车体周围不同高度的信息维度更全面地实时检测。同时，其包围车体内部，将车体核心装置以及采集装置进行保护，防止因复杂环境造成的外部侵袭。

(2)集采集进度与搜索越障于一体的显示模块：显示模块有三种颜色可以切换：红、蓝、紫，对应于全向轮月球车的不同功能与进度。切换红色时，表示其正在进行采集土壤工作，相当于“进度条”，先切换为满条红色，随着进度的进行逐渐褪成一半，进行完后为空进度条。蓝色进度条为搜索信息以及自主避障过程进行时的显示颜色。紫色对应着紧急情况，若机器人发生故障或者中途突发紧急情况时为紫色闪灭交替。

6.1.2 机械轴系设计

(1) yaw 轴设计

yaw 轴安装上层子钻进系统，其原理为 GM6020 直流无刷电机带动上层子钻进系统旋转运动，由于上层轴向载荷较大且同时旋转进给，具有径向载荷，因此利用角接触球轴承，其特点是可以同时承受径向和轴向载荷的联合载荷，限制轴的两方面的轴向位移。与双向推力球轴承相比，这种轴承极限转速较高，接触角为 32°

度，刚性好，可承受倾覆力矩大，适用于采集土壤系统中高强度作业。下图为 yaw 轴轴系设计截面图。

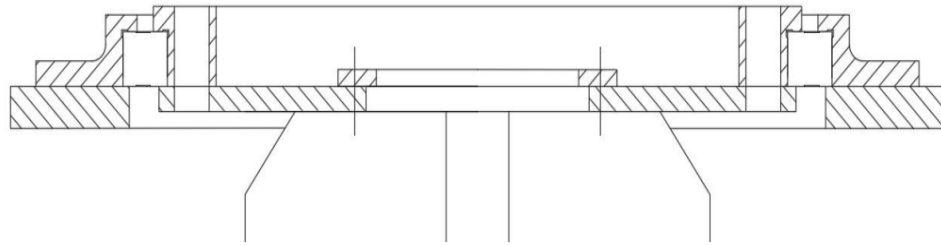


图 6.1.4 yaw 轴轴系设计截面图

（2）轮组轴系设计

对于轮组设计，我们考虑使用基于平行四连杆机构的四驱独立悬挂，自适应悬挂给底盘布局设计带来了很大困难，且悬挂系统复杂，难以装配及维护，重量也较重；独立悬挂可以提供给底盘设计更大的灵活度，整体重量也较轻，能使机器人面对复杂地形时拥有更强的抓地能力。电机通过梅花联轴器传递大扭矩驱动全向轮，同时轮组呈圆形圆周分布，不仅使月面通过性强，同时具有高机动性，为上层子系统旋转进给运动采集月壤减少阻力。



图 6.1.5 轮组设计图

6.1.2 钻进取土机械系统设计

本项目所采用的钻取子系统设计灵感来源于嫦娥五号无人月球探测器。由于**嫦娥五号无法在月面移动**，故采用是钻表异构采样设计：为得到z方向上指定深度的月表剖面样品，使用“回转”、“冲击”和“回转+冲击”三种模式，选用双排钻牙阶梯构型，自由切换多种参数，以适应多种月壤工况，并且使用双管单动-柔性内翻方式实现剖面取芯；因月表不确定性因素较多，科学家并不知道探测器落点是坚硬的岩石还是松软的月壤，嫦娥五号设计了 4 自由度机械臂来获取一个扇形区域内多点分布的月壤样品，采用铲状挖取机构和瓣状旋转机构进行表面取样。

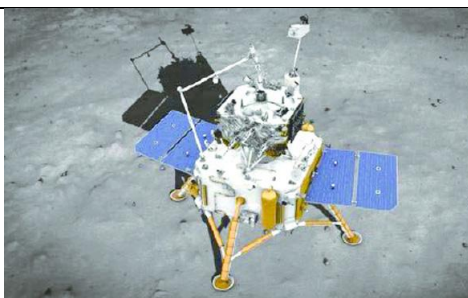


图 6.1.6 嫦娥五号采集月壤图

与嫦娥五号不同，本全向轮月壤采集机器人具有灵活移动的底盘以及高稳定性的机械结构，因此无需设计钻取和表取两种不同机构，只需设计机械钻取机构，通过底盘的移动和子系统的 z 轴运动实现月面任意位置、不同深度的月壤采样。

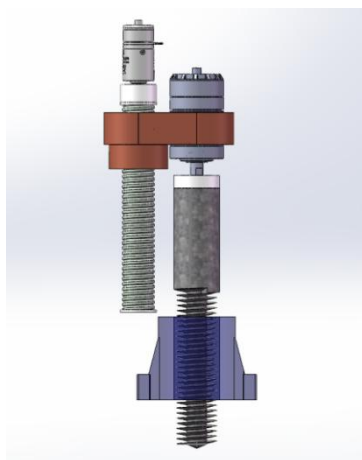


图 6.1.7 钻进机械设计图

这套钻取子系统具备钻进能力强、排粉能力强、月壤适应性强三大基本功，其又分为驱动单元、钻进单元和存储密封单元三个单元，系统构成如图所示。

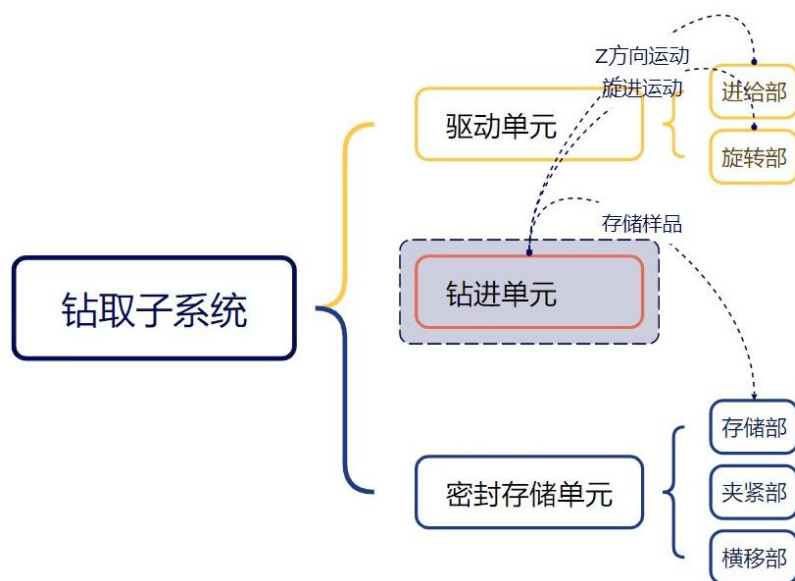


图 6.1.8 钻进子系统构成图

驱动单元由进给部和旋转部构成；存储密封单元由存储部、夹紧部和横移部组成；进给部由滚珠丝杠、联轴器、进给电机组成，联轴器传递电机运动和扭矩，带动滚珠丝杠将回转运动转化为直线运动，从而实现与螺母相连的钻进单元的进给运动。此设计轴向刚度高，对不同硬度月壤有良好的适应性；其运动灵敏，精度高，利于实现不同深度月壤的采样；摩擦损失小，传动效率高且寿命长，维护简单。旋转机构由联轴器、旋转动力单元和钻具等组成，在进给的同时，旋转机构高速旋转，实现切削运动。

同时，我们为钻进单元设计了**渐宽的锥形排粉槽通道**，使其与钻杆排粉槽紧密相连，形成了一体化的排粉通道。通过精心匹配钻杆模型并优化相关参数，我们显著提升了整个系统的排粉能力。为确保在提取过程中取得的土样不会掉落，系统巧妙地运用了开放式构型的“8”字形超弹性合金丝作为封口方案。这种合金丝与取芯软袋的末端实现了一体化缝合，依靠其弹性收缩力，实现了既简单又可靠的封口效果。一旦月球车钻取的样品被封装进软袋，它们将被放入环形封装容器内，随后被运送至上升器的顶端。

针对低重力环境下不同姿态角度对样品传送可能产生的不利影响，我们设计了一种具备**碰撞自适应**能力的传送方案。该方案利用弹性驱动为月壤封装容器提供初始速度，随后借助重力作用，使带有三级导向锥角的封装容器沿着固定的导向结构平稳地传送到上升器内部。这一方案无需额外的续送机构，既简单又可靠，能在不同姿态下实现封装容器的精准传送。密封单元能够自动承接并封装月球样品，确保它们得到妥善的密封保存。该单元由主体框架、密封容器组件、盖体组件以及开合机构组件等多个部分组成。主体框架采用镂空轻量化设计，上面分布着用于转移的棘齿和导向条。钛合金和铝合金材料的选择，不仅使其能够适应月球表面的极端温度，还保证了结构的强度和刚度，同时最大限度地减轻了整体重量。

6.2 硬件方案

6.2.1 超级电容设计方案

超级电容介于电池和电容之间，其极大的容量完全可以作为电池使用。相比于采用电化学原理的电池，其充放电过程完全没有涉及物质的变化，其具有充电时间短、使用寿命长、温度特性好、节约能源和绿色环保等特点。超级电容可以在月球恶劣环境下，用作装置的电力平衡电源，提供超大电流的电力；其启动效率和可靠性都比传统的蓄电池高，可作为启动电源以及储能能源。超级电容的整体拓扑图如图所示：

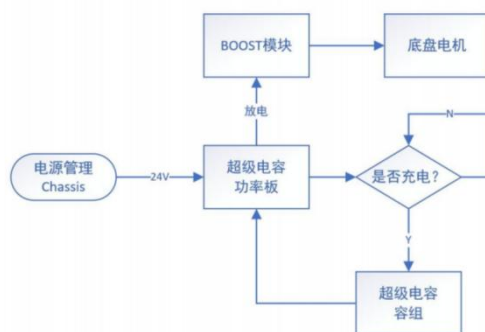


图 6.2.1 超级电容整体拓扑示意图

超级电容整体设计分不同模块介绍：

1.boost 模块

本部分电路以 LM5122 芯片为核心进行搭建,基于峰值电流模式控制。电流模式控制提供了固有的线路前馈，逐周期电流限制，并简化了环路补偿。两个坚固的 N 沟道 MOSFET 栅极驱动器具有自适应空载时间控制，可以实现更高的效率。同时一个内部电荷泵可实现高侧同步开关的 100% 占空比（旁路运行）。180° 相移时钟输出可实现简单的多相位交错配置可以实现低压关断保护功能。

该 BOOST 模块将功率板输出给底盘的电压稳定提升至 26V，且效率高达 96%左右。当输入为 8V 电压时也可实现该升压功能。此外 PCB 使用铝基板，具有良好的散热能力。原理图如图所示。

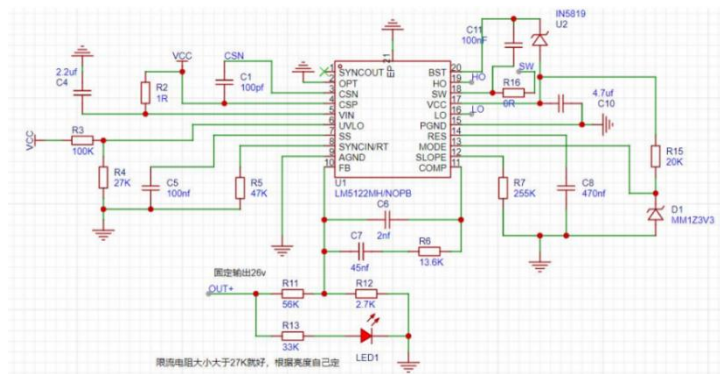


图 6.2.2 boost 模块原理图

2.超级电容均衡部分

电容容组部分选用 9 个 60F 电容，能量约为 1968J。超级电容组各包括 9 个 60F 电容，每个超级电容器配置独立的电压控制，主要通过飞度电容转移多余能量完成。该均衡电路由自举电路，飞度电容组，互补 PWM 发生装置以及一个降压电路构成。

其中，EG2132 为大功率 MOS 驱动芯片，构成自举电路，使高低端 MOS 分别导通，超级电容组 通过飞度电容(下图中的 C3)与 CAP 交换能量，达到均衡目的。采用 GP9303 芯片作为互补 PWM 的发生芯片，为 EG2132 提供信号。将整个电容组的总电压作为降压芯片的输入电压，降压后给 EG2132 供电，使得只有

充到一定电压后才开始均衡，减少能量损耗。

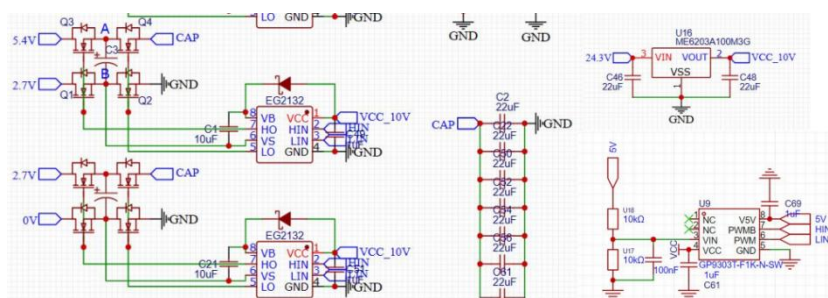


图 6.2.3 电容均衡模块原理图

3. 超级电容控制部分

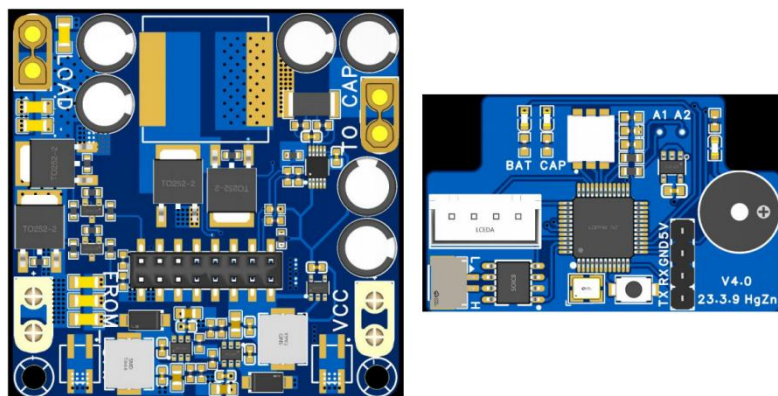


图 6.2.4 电容控制部分 PCB 图

①将 STM32H750 芯片换成 STM32G474RET6,具有 HRTIM。而 HRTIM 最显著的特点就是可以倍频到最大的 32 倍, G474 可以达到 5.44GHZ, 满足该电容功率板的要求。又可以通过 CAN 总线与机器人主控板进行通信, 使用单环 PID 对拓扑电路进行恒压、恒流以及恒功率的控制。该芯片性能优越, 非常适合用于制作电源模块。

②NMOS 的驱动芯片改为 UCC27211D, 仍使用 BUCK 拓扑进行电容充电, 且经过多次测试, 充电效率维持在 95%左右。

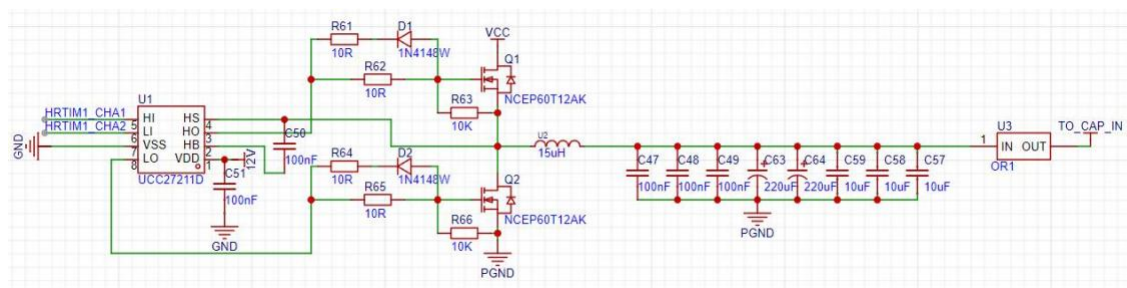


图 6.2.5 NMOS 逻辑原理图

③电容与电池的供电路径切换改为使用背对背 PMOS 进行控制,可以实现反向电流阻断和反极性保护的作用。原理图如图所示。

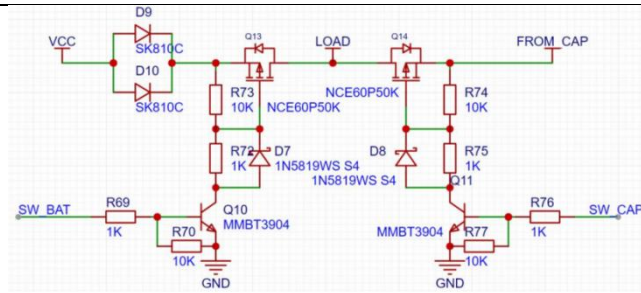
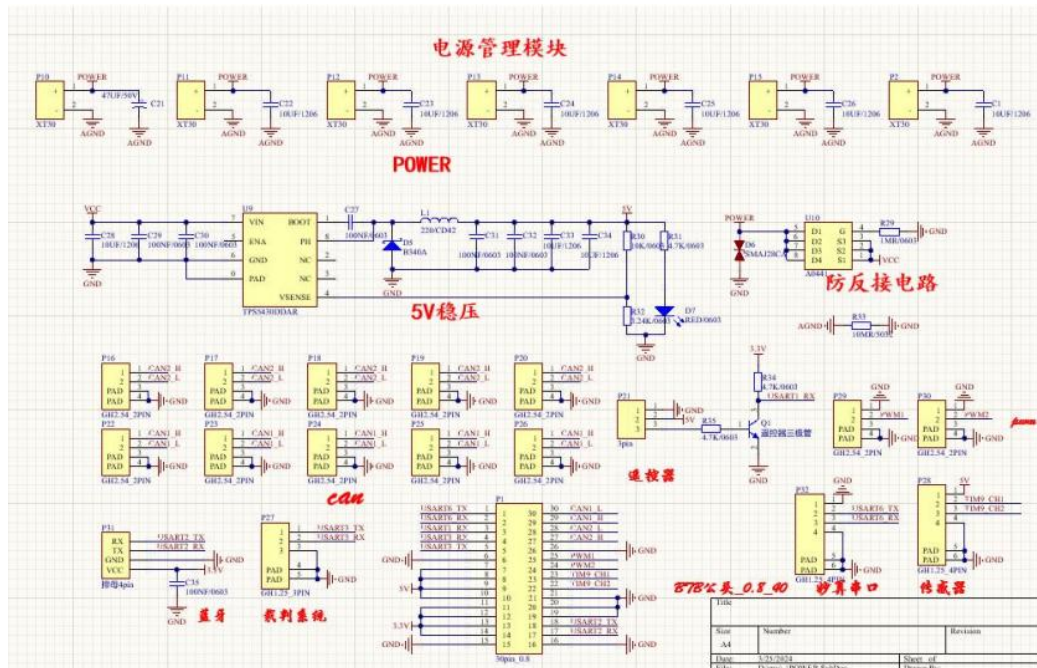


图 6.2.6 超级电容供电路径原理图

④对于采样模块,仍选用 INA226 芯片,通过芯片的 I2C 模块与其通信,检测电容充电和功率板输入的电压、电流和功率的值,以此做到更好的控制。

⑤继续采用性能优越的 LM5050 芯片搭建理想二极管电路用于防止超级电容容组的倒灌,反向升压烧毁电路。

6.2.1 核心控制板设计方案



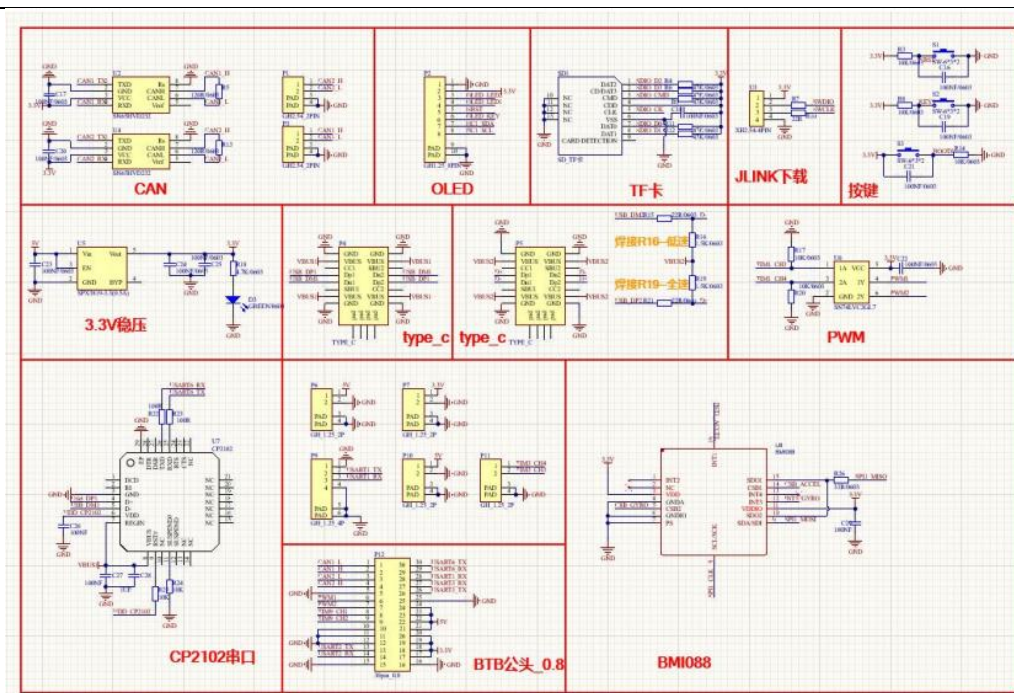


图 6.2.9 核心控制板原理图

核心控制板采用上下双层设计，中间通过一组插口组合，底板负责转接部分 can 线路和电源线路，而上板则主要负责控制电路等，对于机器人的主要功能有：

- （1）电源底板兼具分电板功能，为各设备供电提供了充足的接口；
- （2）电源底板上单独设计使用 TPS5430 搭建 BUCK 电路获取 5V 电源，通过板对板 30pin 连接器与上主控板连接，再通过 LDO 降至 3.3V 供芯片使用；
- （3）设有 USB 转 TTL 模块与 USB 虚拟串口，方便主控板与 MINIPC 进行通讯；
- （4）设有两个 can 芯片，将设备平均分配到两个 can 总线上，通过 can 通讯实现对电机等设备的控制与板间通讯，实现对机器人整体不同运动部分地控制；
- （6）引出芯片串口，实现与电源管理模块的通讯以及在轮腿平衡步兵中通过 TTL 转 rs485 模块控制关节电机；
- （7）设有 bmi088 陀螺仪位姿传感器，反馈上层角度，以及平衡步兵在运动过程当中的姿态数据；

6.3 机器人逻辑控制

6.3.1 运动模型

根据机械原理，机构的原动件数应该等于机构的自由度，下面对全向轮小车进行运动学分析，建立运动学模型。在全向轮小车的运动学分析中，逆运动学分析是指已知小车的运动状态求解四个车轮对应的电机的转速。

为了易于说明，其中 XOY 为大地坐标系， XOY 为小车的基坐标系。先对图中的符号进行说明：

表 6.3.1 全向底盘基坐标系符号说明

符号	说明及单位
v_x	小车前向移动速度(m/s)
v_y	小车侧向移动速度(m/s)
ω	小车角速度 (rad/s)
r	车轮半径(m)
v_{ix}	第 i 个车轮的线速度
v_{ir}	第 i 个车轮与地面接触的辊子的线速度(m/s)
$v_{i\omega}$	小车的转动在第 i 个车轮产生的速度分量(m/s)
α_i	第 i 个车轮的中心与 O' 的连线与 x' 轴的速度分量(m/s)
β_i	第 i 个车轮的辊轴与 x' 轴的夹角(rad)
l	车轮中心与 O' 的距离(m)
l_x	前后两车轮的距离的一半(m)
l_y	左右两车轮的距离的一半(m)

6.3.2 逆运动模型

对于任一车轮而言，其运动状态为 v_{ix}, v_{iy} 两者共同决定。由于小车是刚体，则小车的运动状态和车轮的运动状态应该一致。而车体的运动状态又由 v_x, v_y, ω 三者决定。则

在 x' 方向有

$$v_x + v_{i\omega} \cos\left(\frac{\pi}{2} + \alpha_i\right) = v_{ix} + v_{ir} \cos \beta_i \quad (6.3.1)$$

在 y' 方向有

$$v_y + v_{i\omega} \sin\left(\frac{\pi}{2} + \alpha_i\right) = v_{ir} \sin \beta_i \quad (6.3.2)$$

且

$$\begin{cases} v_{ix} = \omega_i r \\ v_{i\omega} = \omega l \end{cases} \quad (6.3.3)$$

联立(1)(2)(3)可得

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & -l \sin \alpha_i \\ 0 & 1 & l \cos \alpha_i \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_x \\ v_y \\ \omega \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \beta_i & r \\ \sin \beta_i & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_{ir} \\ \omega_i \end{bmatrix} \quad (6.3.4)$$

即

$$\begin{bmatrix} v_{ir} \\ \omega_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \beta_i & r \\ \sin \beta_i & 0 \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} 1 & 0 & -l \sin \alpha_i \\ 0 & 1 & l \cos \alpha_i \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_x \\ v_y \\ \omega \end{bmatrix} \quad (6.3.5)$$

可化简为

$$\omega_i = -\frac{1}{r}[-1 \cot \beta_i l(\sin \alpha_i + \cos \alpha_i \cot \beta_i)] \quad (6.3.6)$$

同理，对于四个轮子

$$\begin{bmatrix} \omega_1 \\ \omega_2 \\ \omega_3 \\ \omega_4 \end{bmatrix} = -\frac{1}{r} \begin{bmatrix} -1 & \cot \beta_1 & l(\sin \alpha_1 + \cos \alpha_1 \cot \beta_1) \\ -1 & \cot \beta_2 & l(\sin \alpha_2 + \cos \alpha_2 \cot \beta_2) \\ -1 & \cot \beta_3 & l(\sin \alpha_3 + \cos \alpha_3 \cot \beta_3) \\ -1 & \cot \beta_4 & l(\sin \alpha_4 + \cos \alpha_4 \cot \beta_4) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_X \\ v_Y \\ \omega \end{bmatrix} \quad (6.3.7)$$

假设各夹角为 45 度,参数 α_i, β_i 可取

$$\begin{aligned} \alpha_1 &= \frac{3}{4}\pi, \quad \beta_1 = -\frac{1}{4}\pi \\ \alpha_2 &= \frac{1}{4}\pi, \quad \beta_2 = \frac{1}{4}\pi \\ \alpha_3 &= -\frac{1}{4}\pi, \quad \beta_3 = -\frac{1}{4}\pi \\ \alpha_4 &= -\frac{3}{4}\pi, \quad \beta_4 = \frac{1}{4}\pi \end{aligned}$$

代入(6.3.7)式，得

$$\begin{bmatrix} \omega_1 \\ \omega_2 \\ \omega_3 \\ \omega_4 \end{bmatrix} = \frac{1}{r} \begin{bmatrix} 1 & 1 & -(l_X + l_Y) \\ 1 & -1 & -(l_X + l_Y) \\ 1 & 1 & (l_X + l_Y) \\ 1 & -1 & (l_X + l_Y) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_X \\ v_Y \\ \omega \end{bmatrix} \quad (6.3.8)$$

其中

$$\begin{cases} l_X = l \cos \frac{\pi}{4} \\ l_Y = l \sin \frac{\pi}{4} \end{cases} \quad (6.3.9)$$

所以

$$\begin{aligned} \omega_1 &= \frac{1}{r}[v_X + v_Y - \omega(l_X + l_Y)] \\ \omega_2 &= \frac{1}{r}[v_X - v_Y - \omega(l_X + l_Y)] \\ \omega_3 &= \frac{1}{r}[v_X + v_Y + \omega(l_X + l_Y)] \\ \omega_4 &= \frac{1}{r}[v_X - v_Y + \omega(l_X + l_Y)] \end{aligned} \quad (6.3.10)$$

6.3.3 正运动模型

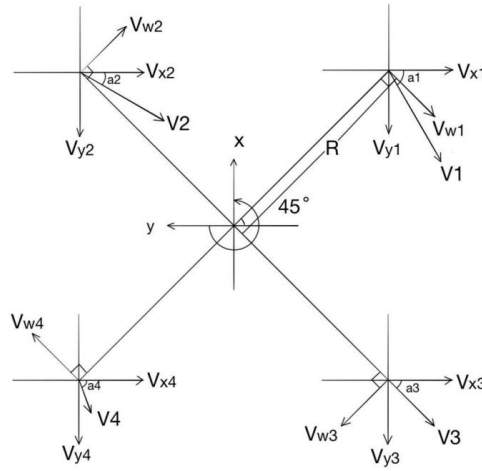


图 6.3.1 底盘的矢量运算角度示意图

与逆运动学分析相反，正运动学分析是指已知四个车轮对应的电机转速。求解小车的运动状态。令式(6.3.8)中的系数矩阵为 T ，即

$$T = \frac{1}{r} \begin{bmatrix} 1 & 1 & -(l_x + l_y) \\ 1 & -1 & -(l_x + l_y) \\ 1 & 1 & (l_x + l_y) \\ 1 & -1 & (l_x + l_y) \end{bmatrix} \quad (6.3.11)$$

则式(6.3.8)可以写为

$$\begin{bmatrix} \omega_1 \\ \omega_2 \\ \omega_3 \\ \omega_4 \end{bmatrix} = T \begin{bmatrix} v_x \\ v_y \\ \omega \end{bmatrix} \quad (6.3.12)$$

两边同时左乘 T^T ，可得

$$T^T \begin{bmatrix} \omega_1 \\ \omega_2 \\ \omega_3 \\ \omega_4 \end{bmatrix} = T^T T \begin{bmatrix} v_x \\ v_y \\ \omega \end{bmatrix} \quad (6.3.13)$$

由于 $\text{rank}(T^T T) = \text{rank}(T) = 3$ ，所以，矩阵 T^T 存在逆矩阵。那么，两边同时乘 $(T^T T)^{-1}$ ，可得

$$\begin{bmatrix} v_x \\ v_y \\ \omega \end{bmatrix} = \frac{r}{4} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & -1 & 1 & -1 \\ -1 & -1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega_1 \\ \omega_2 \\ \omega_3 \\ \omega_4 \end{bmatrix} \quad (6.3.14)$$

所以最终求得

$$\begin{aligned} v_x &= \frac{r}{4}(\omega_1 + \omega_2 + \omega_3 + \omega_4) \\ v_y &= \frac{r}{4}(\omega_1 - \omega_2 + \omega_3 - \omega_4) \\ \omega &= \frac{r}{4(l_x + l_y)}(-\omega_1 - \omega_2 + \omega_3 + \omega_4) \end{aligned} \quad (6.3.15)$$

6.3.4 优化 PID 算法与前馈控制的控制逻辑

实践经验告诉我们，传统的简单串级 PID 算法已无法满足对机器人稳定的控制，更别说在月球执行精密的任务，所以我们基于传统的 PID 算法进行了优化与改进:将路径规划得到的期望速度转换为各个轮子的速度指令，并通过 C620 电调发送给每个轮子的驱动系统，通过前馈双环 PID 来各轮组进行控制。

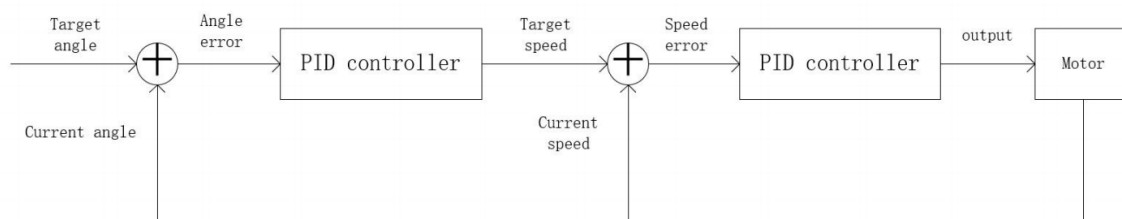


图 6.3.2 底盘的控制逻辑框图

在 PID 控制本身上，我们改为使用梯形积分，令积分项更贴近实际。同时采用微分先行,除去可能在微分项计算时引入阶跃量的目标值，减少在目标值变化时带来的噪声。除反馈控制系统之外，本项目我们引入了**前馈控制系统**。在理论计算中可以看到，引入前馈可以有效提高系统的响应速率上限。传统的 PID 反馈控制的带宽上限往往低于目标响应，在未引入前馈控制系统前，电机在跟随目标角度时，即使电机可以稳定在末态目标值，但在响应过程中仍然有肉眼可见的系统延迟，因此提高响应是电控做运动控制无法回避的重要问题。

$$Ge(s) = \frac{Ts^2 + (1 - KfK)s}{Ts^2 + (KpK + 1)s + KiK}$$

在自动控制原理中，引入前馈使系统的零点被影响，而原系统的极点保持不变可以有效的减少系统延迟，当前馈环节与被控对象呈倒数关系时，误差传递函数达到零点甚至可以将其完全消除。本项目尝试阶段的前馈补偿模型计算时仅仅将两个时刻的目标值进行差分运算，然后与反馈计算值简单加和即可输出控制。

$$u(t) = Kf \times \frac{dtarget}{dt}$$

为了提高控制系统的鲁棒性，我们对前馈控制系统的输出信号做出**限幅和一阶低通滤波处理**。可以看到，输出信号的毛刺大量减少，同时原本的电机因不合理输出导致的噪声被明显消除，同时系统延迟被大大减少。

鉴于该算法结构简单，参数调整方便，鲁棒性强，控制精度高，系统延迟低，因此作为本项目机器人运动控制初步算法。

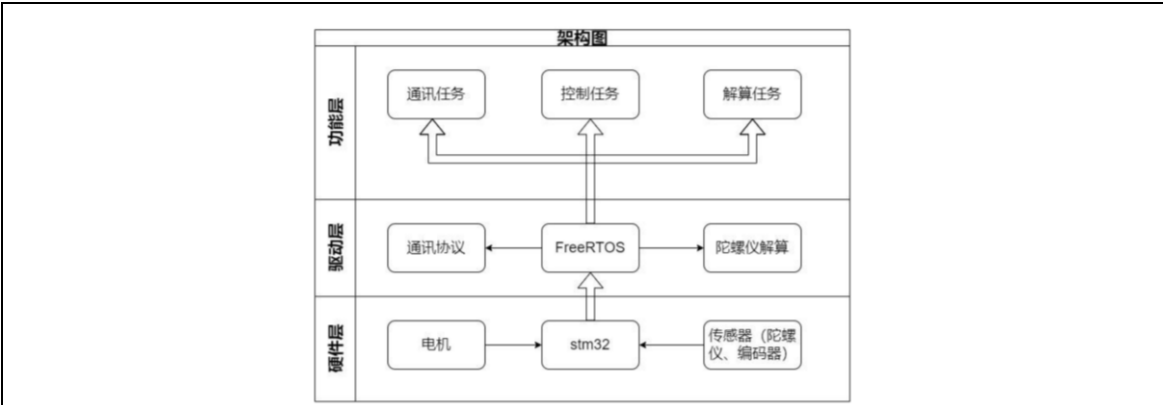


图 6.3.3 整车的控制逻辑框图

6.4 基于机器视觉的自主导航与测距避障功能的研究

6.4.1.月面地形地貌的三维信息的获取

本项目介绍的全向轮月球车采用红外测距与改进后的 SGM 算法相结合的方式地形重建。全向轮月球车配备双目相机与主动红外测距传感器，利用左右相机得到的两幅校正图像找到左右图片的匹配点，结合红外测距的结果，根据几何原理进行三维重建。

（1）通过红外测距传感器探测障碍物进行预识别

红外测距传感器包含红外发射器与 CCD 检测器，红外线发射器会发射红外线，红外线在障碍物上会发生反射，CCD 检测器接收反射的光线之后，得到接收发射与接收的时间差的数据，进而计算出障碍物的距离。传感器与地面水平成 15 度角，并实时对相邻时间内的距离变化进行分析。若测得距离增大，则为下坡，若超过全向轮的爬坡能力则视为凹陷障碍。同理若测得距离减小，则为上坡，若超过全向轮的爬坡能力则视为凸起障碍。

（2）基于 SGM 算法的测距方案

在红外测距传感器的预识别探测到障碍物之后，再调用 SGM 算法进行地形重建，可以大大节约运算时间。SGM(Semi-Global Matching)，通过构建能量函数，按照动态规划算法的方式，通常从待聚合的点的上下左右四个方向的代价进行聚合，增加聚合的准确性的同时平衡了时间计算，获得比局部算法更高的精度。使用的 SGM 算法介绍如下：

首先基于分层互信息(HMI)计算 SGM 的代价，然后采用半全局立体匹配算法，即找到每个像素的最优视差使得整体能量最小，能量函数如下所示：

$$E(D) = \sum_p (C(p, D_p) + \sum_{q \in N_p} P_1 T[|D_p - D_q| = 1] + \sum_{q \in N_p} P_2 T[|D_p - D_q| > 1])$$

其中， $C(p, D_p)$ 代表基于互信息的代价计算项，后两项指的是当前像素 p 和其邻域内所有像素 q 之间的约束。如果 q 和 p 的视差只差 1，那么以 P_1 为惩罚项，如果大于 1，则以 P_2 为惩罚项，即为正则化约束，可以保证视差图平滑并保持图像边缘。

惩罚参数 P_1 与 P_2 由红外测距传感器测得的距离数据进行迭代优化,首先保持 $P_2>P_1$,若在测距关键点得到的深度图的距离大于红外测距传感器测得的距离,则略微降低 P_1 ,反之亦然。

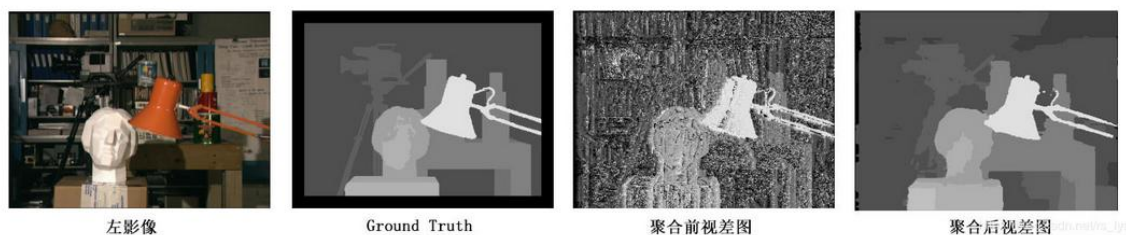


图 6.4.1 SGM 改进算法效果示例

得到视差图后,即可根据几何关系对障碍周围的地形进行建模,计算最优路径规划。对于红外测距仪测量的关键点,将深度值直接应用到对应的像素点及其邻域,并使用加权平均将其周围的深度信息与 SGM 提供的深度信息融合。将重建得到的三维地图传入本地数据备份中储存,可以避免重复建图,同样能提高运行效率。

6.5 拟解决的问题

(1) **一体化钻取机构的实现:** 钻取机构刚度以及鲁棒性需进行模拟月壤实地测试;月面复杂环境下、低重力条件影响下,需进行钻取子系统对底盘运动的扰动性分析;同时,月壤具有不可预测与不可控性,需提高钻取机构对于不同粒径土壤的防卡能力。

(2) **月面地形地貌的三维信息的获取的实现:** 目前采用的红外测距与改进后的 SGM 算法相结合的方式地进行地形重建,期望利用左右相机,通过相机标定得到的两幅校正图像找到左右图片的匹配点,结合红外测距的结果,根据几何原理进行三维重建。

(3) **自主路径规划的实现:** 目前研究基于蚁群算法的滑移预测路径规划方案,提高了收敛速度,能够基于对坡向的滑移的预测规划全向轮月球车的路线。目前解决方案是基于 MATLAB 对当前方案进行实际测试,如果不能达到相应的路径规划效果,可能需要采用其他算法或者改良目前算法进行代替。

6.6 预期成果

(1) 基本功能

月壤采集全向轮机器人具有自主导航、高效采集和远程控制的优势,可以在极大提高采集效率的同时降低安全风险。

(2) 科研效益

推动探索土壤环境调查钻探设备的创新,以及数字化结合的创新改造。不断驱动路径规划与复杂地形重建的深入问题,攀登高性能复杂机器的顶峰。

(3) 学术成果

不断改进研发,并制作样机,进行仿真模拟,同时尝试发表论文和申请发明专利

利及软件著作权。

（4）国际视野

国际月球科研站预计 2040 年前建成完善，开展日地月空间环境探测及科学实验，面向未来月球科研基地的宏大规划，致力于轻小型、高机动性、智能化的月壤采集机器人研发，助力我国探月工程迈向新高度。