

Development of Novel Roboticized Rock Abrasion Tool

Bin Li¹, Jinguo Liu¹, Yuechao Wang¹, Shugen Ma^{1,2}, Haili Gong¹, Guowei Zhang¹

¹⁾ State Key Laboratory of Robotics, Shenyang Institute of Automation, CAS, 114 Nanta Street, Shenyang, 110016 China

(E-mail: libin@sia.ac.cn; liujingou@sia.ac.cn; ycwang@sia.ac.cn)

²⁾ COE Research Institute, Ritsumeikan University, Shiga-ken 525-8577. Japan

(Email: shugen@fc.ritsumeai.ac.jp)

Abstract—A roboticized rock abrasion tool is considered to replace the geologist's rock hammer to remove dusty and weathered surfaces of the rock. A roboticized rock abrasion tool with three degrees of freedom has been developed in this paper. Planetary transmission system is used in the grinding driving system with two inputs (rotation motor and revolution motor) and two outputs (grinding wheel and cutting brush). The third actuator is to feed the grinding system. Abrasion experiments have been made to testify the feasibility. System abrasion experiments on the prototype of the lunar rover have been made to testify the function of the roboticized rock abrasion tool.

Keywords—roboticized, rock, abrasion tool

新型机器人化岩石研磨器的研究

李斌¹ 刘金国¹ 王越超¹ 马书根^{1,2} 龚海里¹ 张国伟¹

¹⁾ 中国科学院沈阳自动化研究所机器人学重点实验室 沈阳 110016

²⁾ 日本立命馆大学 COE 研究机构 滋贺 525-8577

摘要 机器人化岩石研磨器可以用来代替地质学家的岩石锤，去除岩石表面的风化层。本文研制了一种三自由度的机器人化岩石研磨器。研磨机构采用行星传动，具有双输入（旋转电机和绕转电机）和双输出（研磨轮和去屑刷），研磨轮具有进给功能，可实现不同深度的研磨。在石膏板上进行了研磨实验，验证了研磨的可行性。在月球车原理样机上进行了无人研磨作业实验，验证了机器人化岩石研磨器的功能和实用性。

关键词 机器人化，岩石，研磨器

1. 引言

由于外星球表面环境异常恶劣以及现有科学技术水平的限制，人类很难亲临外星球表面去探测，所以采用无人遥控或自主的星球探测机器人开展外星球表面探测是一种有效的方法[1-2]。使用星球探测机器人及其携带的有效载荷来识别着陆地点的地质学记录，可以评估外星球过去的历史环境形成条件和一些大土被的形成和进化。由于太空风化和陨石撞击过程能够改变岩石表面的组织和结构，从而破坏外星球内部岩石形成条件的证据。因而星球探测机器人有效载荷中必须携带一种能够磨穿风化层岩石外表，

并裸露出下面新的岩石外表的工具，这种工具称为岩石研磨器。其主要目标就是去掉岩石表面的物质，暴露出岩石内部，从而其他仪器能够对岩石内部进行分析研究。因此，岩石研磨器的研究对外星球表面探测至关重要[1-5]。我国已启动了月球探测工程，未来还要进行火星探测及其它星球探测，岩石研磨器的研究可为我国未来的外星球探测提供技术储备和支持[5-9]。

美国研制的勇气号火星车于2004年1月登陆火星，并使用安装在车载机械臂上的岩石研磨器，成功地完成了岩石表面的物质去除工作，保证了火星表面岩石成分分析工作的顺利完成，这是目前国际上第一台用于外星球表面探测的岩石研磨器[1]。国内在岩石研磨器方面的研究工作处于起步阶段，本文在分析岩石研磨器工作要求的基础上，

中国科学院方向性项目（资助号：05A1050101）

中国空间技术研究院基金项目（资助号：05W1040101）

设计并研制出了一种三自由度机器人化岩石研磨器样机，并在月球车原理样机上进行了实验验证。

2. 岩石研磨器的组成

在用于无人星球探测车时，岩石研磨器将安装在机械臂的末端。当需要进行研磨作业时，机械臂携带岩石研磨器运动，将岩石研磨器放置于目标岩石表面上的工作位置，然后岩石研磨器进行研磨作业。研磨作业完成后，机械臂携带岩石研磨器撤离目标岩石。

一般情况下，为了工作方便，岩石研磨器与机械臂一起放置于星球探测车车体外壁上（如美国研制的勇气号火星车和机遇号火星车）。因为外星球（如月球和火星）的温度变化范围很大（例如，月球表面温度为 -180°C — 150°C ），所以岩石研磨器中的电子元器件需要进行环境温度控制，以保证岩石研磨器能正常工作。由于运载能力和运载成本的限制，无人星球探测车的重量受到制约，无法对岩石研磨器与机械臂进行整体环境温度控制。岩石研磨器由研磨机构和控制器两部分组成，如将两部分集成在一起，第一会增加机械臂的负载，第二会增加机械臂末端研磨器的体积，第三需要为岩石研磨器增加环境温度控制装置，基于上述原因，我们将岩石研磨器分成两部分，一部分为研磨机构，安装在机械臂的末端；另一部分为控制器，安装在星球探测车车体内部，可利用车体内部的环境温度控制装置来提供控制器正常工作的条件。研磨器的组成框图如图1所示。

3. 研磨机构的设计

3.1 研磨器工作要求分析

用于外星球表面探测的岩石研磨器需要具备的功能主要有，

(1) 研磨功能：

能够在岩石表面进行研磨，将岩石表面的物质去除。

(2) 进给功能：

使研磨表面能深入岩石中，便于更好地进行就位探测作业。

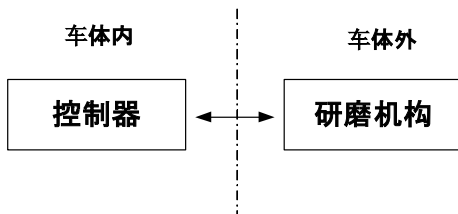


图1 研磨器组成框图

(3) 定位功能：

具有在岩石表面定位的能力，保证研磨作业时研磨面不会发生偏移。

3.2 结构设计

为实现研磨作业，我们设计的机器人化岩石研磨器的研磨机构如图2所示，其中，a. 外罩；b.接触传感器；c. 碟形翼；d. 含支撑传感器的支点；e. 去屑刷；f. 研磨轮。

该机器人化岩石研磨器共有三个自由度，其中一个自由度是让两个研磨轮高速旋转，每个研磨轮均有两个钻石牙齿，当研磨头旋转时，能够切出一个研磨头形状的圆形区域。另一个轮有一个刷子，这个刷子能够辅助从新鲜的地表去除岩石碎屑。另一个自由度是让两个研磨轮各以另一个为中心缓慢转动，扫过两个切断区，与旋转轴关联的刷子把岩石碎屑推出到新鲜地表区域的周围。第3个自由度将全部的研磨头移至岩石，让它贯穿所指定的深度。固定在碟形翼上的2个含支撑传感器的支点，可完成研磨器的定位，确保研磨作业时研磨面不会发生偏移。

研磨机构采用行星传动，具有双输入（旋转电机和绕转电机）和双输出（研磨轮和去屑刷），如图3(a)所示，其中，a. 旋转电机；b. 绕转电机；c. 齿轮 z1；d. 齿轮 z2；e. 研磨轮齿轮 z4；f. 齿轮 z3；g. 去屑刷齿轮 z7；h. 齿轮 z6；i. 齿轮 z5。旋转电机为直流微电机，其输出轴上固定有齿轮 z1，齿轮 z1 通过齿轮 z2 带动齿轮 z3，齿轮 z3 带动齿轮 z4 和齿轮 z7，实现驱动研磨轮和去屑刷绕自身轴快速自转；绕转电机为直流微电机，带有一套行星减速齿轮，其输出轴固定有齿轮 z5，通过齿轮 z5 带动齿轮 z6，实现驱动研磨轮和去屑刷绕研磨器心轴公转。研磨机构的传动原理如图3(b)所示。

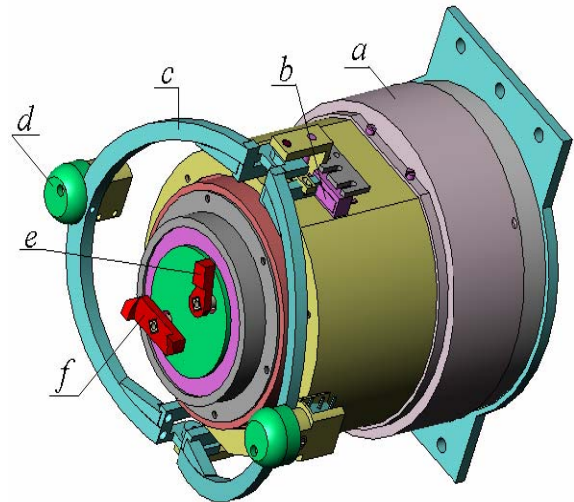
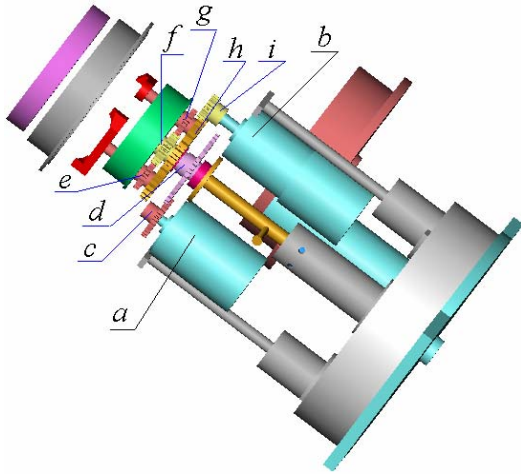
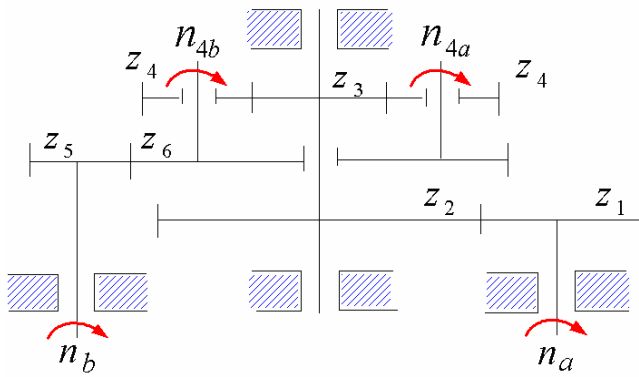


图2 三自由度研磨机构三维立体图



(a) 内部结构



(b) 传动原理

图3 研磨机构

根据图 3(b), 旋转电机输出的传动比是

$$n_2 = -\frac{z_1}{z_2} n_a \quad (1)$$

其中, n_a 旋转电机的速度, n_2 齿轮 2 的速度, z_1 为齿轮 1 的齿数, z_2 为齿轮 2 的齿数。

齿轮 z_3 和 齿轮 z_2 同心, 且在同一根轴上, 所以

$$n_3 = n_2 \quad (2)$$

其中, n_3 齿轮 3 的速度。

绕转电机输出的传动比是

$$n_6 = -\frac{z_5}{z_6} n_b \quad (3)$$

其中 n_b 为绕转电机的速度, n_6 为齿轮 6 的速度, z_5 为齿轮 5 的齿数, z_6 为齿轮 6 的齿数。

行星齿轮转动系的速度关系是

$$\frac{n_3 - n_6}{n_{4a} - n_6} = -\frac{z_4}{z_3} \quad (4)$$

$$\frac{n_3 - n_6}{n_{4b} - n_6} = -\frac{z_4}{z_3} \quad (5)$$

由式 (1) 到式 (5) 可得,

$$n_{4a} = n_{4b} = n_6 + (n_3 - n_6) \left(\frac{z_3}{z_4} \right) = \left(1 + \frac{z_3}{z_4} \right) n_6 - \frac{z_3}{z_4} n_3 \quad (6)$$

其中, n_{4a} 为研磨轮速度, n_{4b} 为去屑刷速度。

式(6)可以简化为

$$n_{4a} = n_{4b} = \frac{z_3 z_1}{z_4 z_2} n_a - \left(1 + \frac{z_3}{z_4} \right) \frac{z_5}{z_6} n_b \quad (7)$$

根据式(7), 输出速度是两个输入速度的组合; 研磨轮的速度和去屑刷的速度, 由两个电机的输入速度共同控制。在岩石研磨过程中, 研磨轮以高速旋转(速度范围是 3000rpm-6000rpm), 以低速绕转(速度范围是 0.2rpm-10rpm)。速度关系的设定主要来源于实际研磨实验。

4. 控制系统设计

研磨器控制系统由主控单元、研磨轮旋转控制器、研磨轮绕转控制器、研磨轮进给控制器、支撑传感器、接触传感器等组成, 如图 4 所示。

主控单元是研磨器控制系统的中枢, 同时也是研磨器控制系统与机械臂控制器监控平台的通信接口。其作用是规划研磨器的各种运动和研磨作业, 与机械臂控制器通信协调, 利用机械臂来完成研磨器的放置、撤离工作; 接触传感器用来测量研磨器是否与目标岩石可靠地接触; 支撑传感器用来测量研磨器是否与目标岩石可靠地支撑。

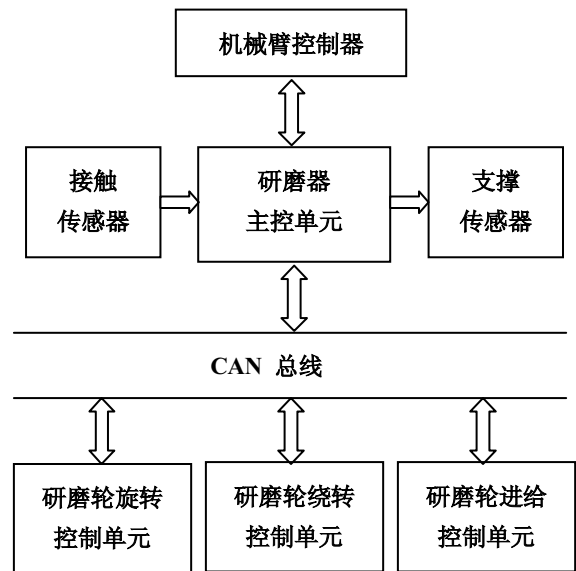


图4 研磨器控制系统原理框图

研磨轮旋转控制单元用来控制研磨轮的旋转运动。研磨轮绕转控制单元用来控制研磨轮的绕转运动。研磨轮进

给控制单元用来控制研磨轮的进给运动。主控单元与研磨轮旋转控制单元、研磨轮绕转控制单元、研磨轮进给控制单元之间通过 CAN 总线进行命令和数据的传送。

研磨轮旋转控制单元、研磨轮绕转控制单元和研磨轮进给控制单元采用模块化设计，无论从硬件还是从软件来看，它们的结构是完全一样的。其作用只是简单地接受主控单元的指令，并通过串口控制电机。这样，如果单个模块出现故障，可以将其隔离出整个控制系统，或者迅速更换。

控制软件采用集中式控制，这种方法具有功能集中，容易实现的特点。整体的体系结构分为两层，如图 5 所示。

上层为行为规划层，其功能是根据研磨指令进行研磨机构控制参数的计算、工作状态判断和控制参数传送。控制参数包括研磨轮的旋转速度、研磨轮的绕转速度和研磨轮的进给速度。工作状态判断包括给定控制参数是否在正常值范围之内、控制参数是否传送到位和下层执行单元是否工作正常。控制参数传送主要是分别向底层研磨轮旋转控制单元、研磨轮绕转控制单元和研磨轮进给控制单元传送研磨轮旋转速度、研磨轮绕转速度和研磨轮进给速度等控制参数。下层是行为层，仅根据规划层传递的指令代码完成底层的伺服控制和信息采集功能。采集得到的信息并不在行为层进行处理，而是交给规划层进行集中处理。

5. 研磨器样机实验

根据上述设计，我们研制出了一台三自由度机器人化岩石研磨器，如图 6 所示。

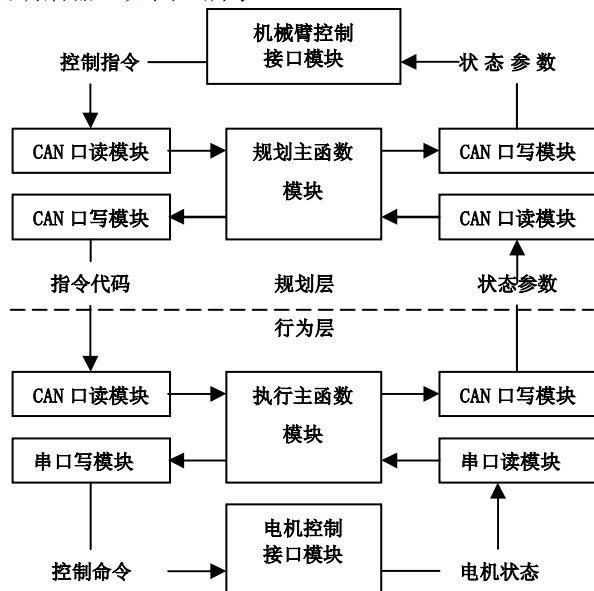


图 5 软件结构图



图 6 三自由度机器人化岩石研磨器样机

该研磨器样机的主要性能指标如下，

- (1) 质量：0.8kg
- (2) 尺寸： $\varphi 90\text{mm} \times 130\text{mm}$
- (3) 研磨区域直径： $\varphi 45\text{mm}$
- (4) 自由度：3
- (5) 进给量：5mm
- (6) 功率：18 W

5.1 研磨性能实验

由于石膏板表面平整，质地较软，取材方便，便于做实验，所以，我们选择石膏板作为研磨对象。为了测试研磨机构的性能，在石膏板上对研磨机构进行了实验。实验平台由钻床改装而成，它是一个立式钻床，钻压的动作可以自动或由手杆摇动，如图 7 所示。在实验中，我们把它当作研磨机构的可调基座。图 8 的两组实验中，旋转电机的速度相同，而绕转电机的速度不相同，研磨面的形状是一个直径为 45 mm 的圆环。



图 7 研磨性能实验平台



(a) 低速比(400) (b) 高速比(2000)

图8 研磨实验结果

图8(a)中, 旋转电机的速度是4000 r/min, 而绕转电机的速度是10 r/min(速度比是400); 图8(b)中, 旋转电机的速度是4000 r/min, 而绕转电机的速度是2 r/min(速度比是2000)。研磨进给的速度均为0.02 mm/s, 实验时间均为5 min。研磨实验结果表明, 绕转电机在低速时得到的研磨表面质量优于在高速时得到的研磨表面质量, 研磨机构能进行可靠的磨削。

5.2 研磨器系统实验

为测试机器人化岩石研磨器的性能, 在月球车原理样机上, 研磨器直接安装在车载机械臂的前端, 如图9所示。

当进行研磨作业时, 机械臂携带研磨器运动到目标岩石表面, 并将研磨器定位在作业目标的表面, 研磨器与目标岩石的接触是通过两个研磨头外部的支点来完成, 环绕在研磨头前的环状物, 能够校正两个垂直轴与目标岩石表面的方位, 一旦机械臂压紧岩石, 研磨轮就开始旋转, 由Z轴驱动器缓慢的移向岩石表面并直到接触岩石。位置编码器监控穿入过程, 并进行研磨过程的闭环控制。

研磨器系统实验结果表明, 研磨器在机械臂的辅助下, 可以完成无人自主研磨作业。

6. 结论

在本文的研究工作中, 我们研制了一台三自由度机器

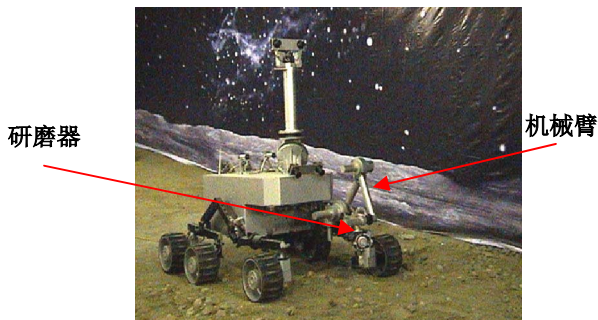


图9 研磨器系统实验平台



图10 研磨器系统实验

人化岩石研磨器样机, 研磨性能实验和系统实验验证了机器人化岩石研磨器方案的可行性和研磨器的基本功能。今后, 在研磨牙材料的选取、研磨机构的优化和控制技术等方面还要进行深入的研究。本文的研究工作为未来的机器人化岩石研磨器工程样机研制奠定了基础。

参考文献

- [1] Myrick T, Chau J J, Carlson L, et al. The RAT as a rock physical properties tool. In: Proceedings of AIAA Space 2004 Conference and Exhibit/AIAA 2004-6096. USA: American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2004. 1—11
- [2] Glass B, Cannon H, Hanagud S, et al. Drilling automation for subsurface planetary exploration. In: Proceedings of the iSAIRAS 2005 Conference. Netherlands: ESA Publications Division, 2005
- [3] Akbari A A, Higuchi S. Autonomous tool adjustment in robotic grinding. J Mater Process Tech, 2002, 127(2): 274—279
- [4] Wang Y T, Jan Y J. Path planning for robot-assisted grinding processes. In: Proceedings of IEEE International Conference on Robotics and automation. Seoul: IEEE, 2001. 331—336
- [5] Liu J G, Wang Y C, Li B, Ma S G. Kinematics analysis of a robotic rock grinder. Chinese Science Bulletin, 2007, 52(3): 3299-3304
- [6] Hood M, Alehossein H. A development in rock cutting technology. Int J Rock Mech Min Sci, 2000, 37(1): 297—305
- [7] 韩静, 邓宗全, 吴湘哈. 月球取岩器的结构设计与运动分析. 机械工程师, 2005, 6: 70—72
- [8] 欧阳阳远. 月球探测进展与我国的探月行动(上). 自然杂志, 2005, 27(4): 187—190, 198
- [9] 欧阳阳远. 月球探测进展与我国的探月行动(下). 自然杂志, 2005, 27(5): 253—257