

多体柔性永磁吸附爬壁机器人*

桂仲成 陈强 孙振国

(清华大学先进成形制造教育部重点实验室 北京 100084)

摘要:为实现永磁间隙吸附式爬壁机器人在复杂空间曲面上的可靠吸附与灵活运动,在分析爬壁机器人复杂空间曲面运行须解决的关键问题的基础上,基于爬壁机器人的多体动力学仿真和样机试验,设计了采用多体柔性吸附系统的间隙吸附式爬壁机器人,即爬壁机器人由轮式移动机构和吸附系统组成,吸附系统安装在轮式移动机构的底盘上,且和壁面是非接触的。吸附系统由多个相互独立的吸附装置构成,每个吸附装置通过具有2转动自由度的连接机构和轮式移动机构连接,并由被动的万向滚动轮部分或完全支撑在壁面上,各吸附装置在吸附力的作用下可自调节相对于壁面的位姿。对多体柔性吸附系统的曲面适应性进行优化。仿真及试验结果表明,多体柔性吸附爬壁机器人可自适应壁面形貌和曲率的变化,它在表面是复杂空间曲面的壁面上运行时的吸附和运动性能接近在平整壁面上运行时的相应性能,吸附可靠且运动灵活。

关键词:爬壁机器人 永磁吸附 复杂曲面自适应

中图分类号: TP242.3

Wall Climbing Robot Employing Multi-body Flexible Permanent Magnetic Adhesion System

GUI Zhongcheng CHEN Qiang SUN Zhenguo

(Key Laboratory for Advanced Materials Processing Technology, Ministry of Education, Tsinghua University, Beijing 100084)

Abstract: To insure reliable adhesion and agile movement of the wall climbing robot (WCR) of gapped permanent magnetic adhesion type system on complex curved surface, key problems needed to be solved when the robot runs on such surfaces are analyzed. Then the scheme of WCR applying multi-body flexible adhesion system is put forward. WCR is composed of a wheeled locomotion mechanism and an adhesive system, and the adhesive system is mounted on the chassis of the wheeled locomotion mechanism and non-contact with the wall's surface. The adhesive system is made up of several separate adhesive devices, each adhesive device is connected to the wheeled locomotion mechanism through a mechanism with 2 rotating degrees of freedom and is partly or fully supported by several omnidirectional free-rolling wheels when running on the wall's surface, then each adhesive device can adjust its posture relative to the wall's surface due to the adhesive force. Multi-body dynamics simulation is conducted to design the WCR, the prototypes are manufactured to test the design, and the performance of adhesive system's self-adaptation to curved surface is optimized. Results of simulation and experiments indicate that the WCR can adapt to the change of curvature and shape of the wall surface automatically, the robot's performance of adhesion and mobility running on complex spatial curved surfaces is close to corresponding its performance on flat surfaces, which means that the robot is capable of running with large payload and good mobility on complex spatial curved surfaces.

Key words: Wall climbing robot Permanent magnetic adhesion Complex curved-surface self-adaptation

0 前言

大型水轮机叶片表面是复杂三维空间曲面^[1],

受磨蚀破坏叶片的主要特征为:表面曲率及形貌变化的不规则性、蜂窝或鱼鳞状待修蚀面分布的不确定性和蚀孔深度的不一致性。传统的采用永磁车轮或永磁履带方式^[2-4]的爬壁机器人,永磁车轮式爬壁机器人运动灵活,但负载能力较差;永磁履带式爬壁机器人负载能力强,但运动灵活性特别是转向灵活性差。永磁车轮式及履带式爬壁机器人受水轮

* 国家高技术研究发展计划(863 计划, 2007AA04Z258)和高校博士点基金(20060003069)资助项目。20070603 收到初稿, 20071203 收到修改稿

机叶片复杂空间曲面及蚀面恶劣状况的影响,难以保证磁轮或永磁履带与叶片表面的稳定、可靠接触与吸附,永磁车轮式及履带式爬壁机器人在水轮机叶片表面运行时,其负载能力和运动灵活性不能得到保证,因而不能直接在大型水轮机叶片坑内修复作业中使用。

桂仲成等^[5]提出了一种间隙吸附式爬壁机器人方案,即机器人采用非磁性轮式移动机构,吸附系统安装(连接)在轮式移动机构底盘上且和壁面是非接触的,吸附系统和壁面之间的间隙由轮式移动机构控制。初步试验结果表明,该机器人既可以达到履带技术的磁能利用率要求,又具备磁轮技术的运动灵活性,还能够克服叶片蚀面状态的不确定性对吸附稳定性和可靠性的影响。

为进一步实现间隙吸附式爬壁机器人在复杂空间曲面上的可靠吸附和灵活运动,本文研究了可对壁面形貌和曲率变化自适应的爬壁机器人方案和规律。

1 复杂空间曲面运行关键问题分析

将爬壁机器人在复杂空间曲面上的运行状态和在平整壁面上的运行状态(图 1a)对比发现,在图 1b 所示情况下,由于永磁体工作间隙变大,机器人吸附能力、负载能力显著减小;在图 1c 所示的情况下,由于永磁体的工作间隙变小,机器人和壁面吸附力急剧增加,运动阻力增大,对驱动能力、机器人结构刚度和强度的要求增强。吸附力的剧烈变化给爬壁机器人的结构设计带来很大困难,对爬壁机器人负载能力和运动灵活性也产生较大的负面影响。因此为提高爬壁机器人对壁面形貌及曲率变化的自适应能力,实现其在复杂空间曲面上可靠吸附和灵活运动,如何减小机器人运行过程中吸附系统与作业壁面之间的吸附力的变化范围是必须解决的关键技术问题。

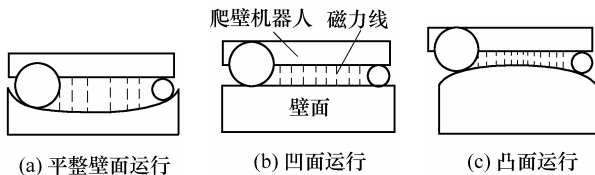
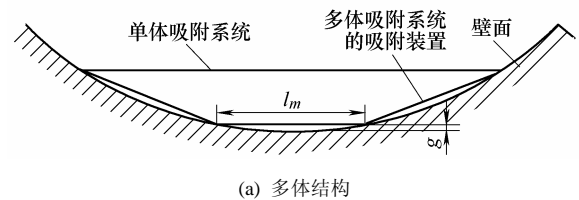


图 1 爬壁机器人在空间曲面上的三种典型状况示意图

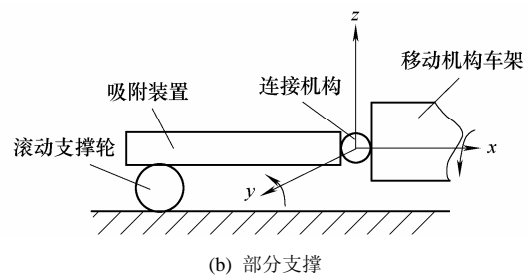
2 多体柔性吸附爬壁机器人方案

为解决吸附系统在曲面上运行受曲面形貌及曲率变化影响大、间隙变化范围大造成的吸附力变化

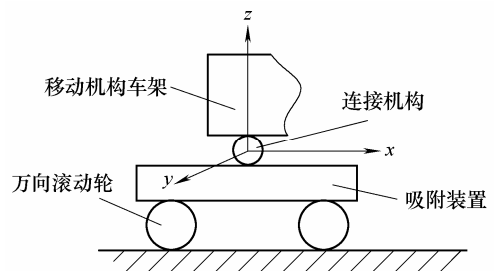
剧烈问题,本文提出爬壁机器人采用基于内力(磁吸附力)约束的多体柔性吸附方案:将尺寸较大的单体吸附系统分解为多个尺寸较小的吸附装置构成的多体吸附系统(图 2a),同时,每个吸附装置通过具有一定转动自由度的连接机构和轮式移动机构连接(这使得每个吸附装置均具有一定的自由度,且连接机构自由度数为吸附装置自由度数),并由满足承载能力要求的被动万向滚动轮部分支撑(图 2b)或完全支撑(图 2c)在壁面上,则吸附装置在吸附力的作用下可自调节相对于壁面的位姿,图 2b、2c 中 y 轴所指方向为垂直于纸面方向。由图 2a 可知多体柔性吸附较单体吸附方案的间隙变化明显减小,且只要吸附装置尺寸 l_m 大小合适,就可以保证间隙变化的最大值 g 在允许范围内。



(a) 多体结构



(b) 部分支撑



(c) 完全支撑

图 2 多体柔性吸附原理示意图

采用多体柔性吸附方案爬壁机器人的一种结构原理示意(俯视图)如图 3 所示,爬壁机器人吸附系统由 3 个吸附装置组成,包括对称布置在移动机构驱动轮对称轴线两侧的两个主吸附装置以及 1 个辅助吸附装置。主吸附装置的一端通过具有一定自由度的连接机构和移动机构车架连接,另一端由两个万向滚动轮支撑在壁面上,对称布置在驱动轮对称轴线两侧,平整壁面运行时吸附力等效作用中心位于两驱动轮对称轴线上。辅助吸附装置通过具有

定自由度的连接机构和移动机构车架连接，由 3 个万向滚动轮支撑在壁面上，起保持机器人不绕两驱动轮对称轴线翻转，保证自身稳定性的作用。

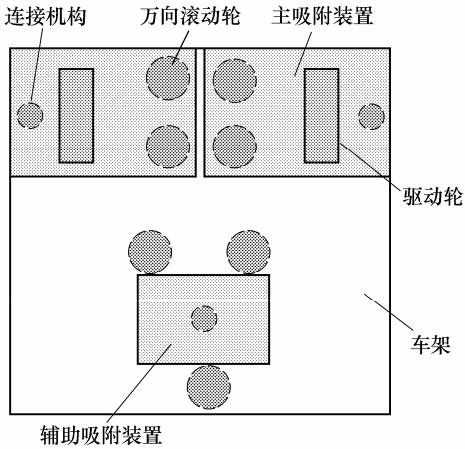


图 3 多体柔性吸附方案爬壁机器人结构原理示意图

多体柔性吸附爬壁机器人设计的关键是，合理设计吸附装置的自由度以使吸附装置在吸附力的作用下可自主调节相对于壁面的位姿，即保证吸附装置所有滚动支撑轮始终和壁面接触，吸附装置上磁体工作间隙由 3 个间隙控制点决定。对于主吸附装置，间隙控制点为 1 个主吸附装置和移动机构车架连接点及两个万向滚动轮支撑点；对于辅助吸附装置，间隙控制点为 3 个万向滚动轮支撑点。

3 爬壁机器人多体动力学仿真

多体柔性吸附爬壁机器人是一个多自由度系统，且由于它在叶片表面运行，力及载荷的作用复杂多变。本文采用 ADAMS 虚拟样机技术建立爬壁机器人的动力学模型，分析爬壁机器人曲面自适应对吸附装置自由度的要求，并进行了样机试验验证。

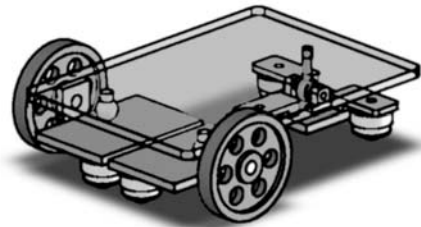
3.1 基于 ADAMS 的虚拟样机模型

爬行机器人动力学分析虚拟样机模型包括运行壁面环境及爬壁机器人模型、机器人车轮与壁面相互作用模型、爬行机器人载荷及吸附力模型、爬壁机器人驱动模型。

3.1.1 运行环境及爬壁机器人模型

运行壁面环境模型采用三峡电站混流式水轮机叶片的实际三维模型，分析结果表明，叶片表面形貌和曲率变化大，最小曲率半径约 1.5 m，是一种典型的复杂空间曲面。爬行机器人模型包括移动机构、主吸附装置、辅助吸附装置等子模型。根据叶片、爬壁机器人结构及尺寸，运用 Solidworks 及 ADAMS 创建各部件的仿真模型，在 ADAMS 中完成装配，所建立的采用图 3 所示方案的爬壁机器人模型、爬

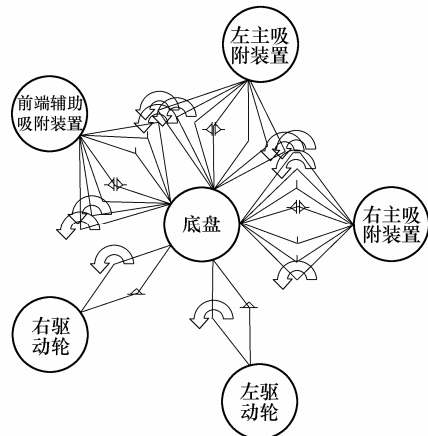
壁机器人和在叶片表面运行的模型及爬壁机器人各部件连接拓扑关系分别如图 4a~4c 所示。两驱动轮均通过具有 1 个转动自由度的圆柱铰和车架连接；吸附装置通过具有 3 个转动自由度的球铰和车架连接，仿真时可通过对球铰某个转动自由度的运动施加约束以模拟具有两个转动自由度的连接机构^[6]。



(a) 爬壁机器人模型



(b) 爬壁机器人在叶片表面运行模型



(c) 爬壁机器人各部件拓扑关系

图 4 运行环境及爬壁机器人模型

3.1.2 机器人车轮与壁面相互作用模型

机器人车轮和壁面间的相互作用采用基于冲击函数法的接触力进行模拟，参数如表 1 所示；车轮和壁面间的摩擦采用库仑摩擦规范，参数如表 2 所示。

冲击函数法将两物体之间的接触力定义为

$$F_c = \begin{cases} 0 & q > q_1 \\ k(q_1 - q) - F & q \leq q_1 \end{cases} \quad (1)$$

表1 接触力参数(冲击函数法)

参数	数值
接触刚度 $k/(MN \cdot mm^{-1})$	1.0
阻尼系数 $c/(N \cdot mm^{-1})$	10.0
接触力指数 e	2.2
阻尼项完全作用激活距离 d/mm	0.05
接触力触发距离 q_1/mm	0.1

表2 摩擦力参数(库仑摩擦规范)

参数	数值
静摩擦因数 f_s	0.6(左、右驱动轮)
动摩擦因数 f_d	0.5(左、右驱动轮) 0.05(万向滚动轮)
静摩擦转换速度 $v_s/(mm \cdot s^{-1})$	0.1
动摩擦转换速度 $v_d/(mm \cdot s^{-1})$	1.0

$$F_d = c\dot{q} \times \text{STEP}(q, q_1 - d, 1, q_1, 0)$$

即

$$F_d = \begin{cases} c\dot{q} & q \leq q_1 - d \\ c\dot{q} \rightarrow 0 & q_1 - d < q \leq q_1 \\ 0 & q > q_1 \end{cases} \quad (2)$$

式中, q 为两物体接触过程中的真实距离, \dot{q} 为接触体相对于目标体的速度, q_1 为决定接触力是否激活的触发距离, k 为接触刚度, e 为接触力指数项, 其值根据文献[7]的推荐选取 F_d 为接触过程中的阻尼力, STEP 函数符合 ADAMS 中的相关定义^[6], c 为阻尼系数, d 为阻尼项完全作用激活距离, 即在距离 d 内阻尼力从 0 增加为 $c\dot{q}$ 。

3.1.3 爬壁机器人载荷及吸附力模型

爬壁机器人载荷及吸附力采用空间力进行模拟。由于仅分析爬壁机器人在吸附力作用下对曲面的适应情况, 为了简化仿真模型, 设定爬壁机器人载荷为 0, 且忽略重力对爬壁机器人运行的影响(设定重力加速度为 0)。主、辅吸附装置和壁面间吸附力均取 1 kN, 作用在吸附装置几何中心, 垂直于吸附面。

3.1.4 驱动系统模型

通过对左右驱动轮速度的设定, 实现爬壁机器人在叶片表面的各种运动(直线行驶、转向行驶)。例如, 设定左右驱动轮在 0~1 s 内的速度如图 5 所示, 则在 0.1~0.3 s 内爬壁机器人是直线行驶, 在 0.6~1.0 s 内爬壁机器人是原地转向行驶。

3.2 曲面自适应仿真及结果分析

研究爬壁机器人曲面自适应需要分析各滚动支撑轮和壁面的接触状况, 这可根据滚动支撑轮和壁面间接触力的测量结果进行判断: 接触力为 0 表示轮和壁面处于非接触状态, 反之则轮和壁面处于接触状态。

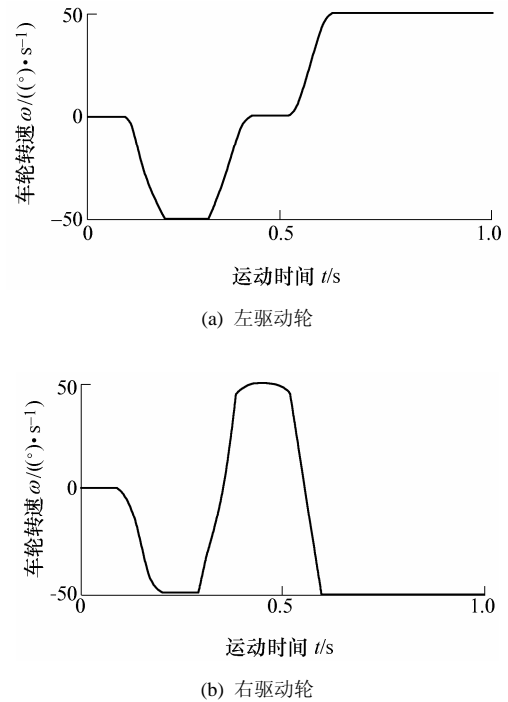


图5 驱动轮速度随时间变化图

根据仿真结果可知, 吸附装置仅具有 1 个转动自由度, 无法保证所有滚动支撑轮均和叶片表面接触, 不能控制吸附装置上磁体工作间隙变化在允许范围内; 若吸附装置具有图 2b 所示的绕 x 和 y 轴的 2 转动自由度, 则吸附装置在吸附力的作用下可自调节相对于叶片的位姿, 所有滚动支撑轮均始终和叶片接触, 可控制吸附装置上磁体工作间隙变化在允许范围内。另外, 若吸附装置具有图 2b 或图 2c 所示的绕 x 、 y 及 z 轴的 3 转动自由度, 则吸附装置位姿存在不确定性, 即当爬壁机器人在叶片表面相同区域运行时, 其吸附装置相对于移动机构的位姿是不确定的。

图 6 可以说明当柔性吸附系统的 2 个吸附装置具有图 2b、2c 中所示的绕 x 和 y 轴 2 转动自由度时爬壁机器人对壁面的自适应情况。

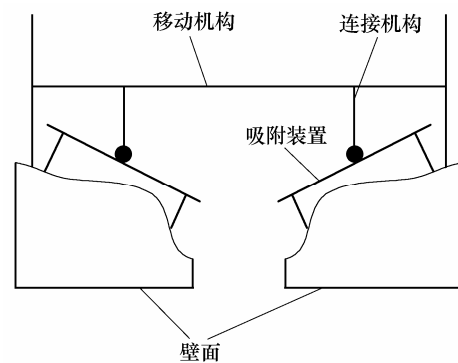


图6 爬壁机器人曲面自适应示意图

4 多体柔性吸附系统曲面适应性优化

多体柔性吸附爬壁机器人的吸附装置可自调节相对于壁面位姿以适应壁面形貌和曲率的变化，较单体吸附系统壁面适应性增强。另外，研究表明，吸附装置间隙控制点(即支撑点及吸附装置和移动机构连接点)和磁体的相对空间关系也会影响吸附系统的曲面适应性，本节进一步研究了可提高多体柔性吸附系统曲面适应性的规律。

4.1 优化准则

定义

$$i = \frac{F_{\max}}{F_{\min}} \tag{3}$$

式中， F_{\max} 为吸附装置和壁面间的最大吸附力， F_{\min} 为吸附装置和壁面间的最小吸附力。

吸附装置曲面适应性的优化任务是，在吸附装置上永磁体分布一定的情况下，寻找最优的间隙控制点布置方案以获得最小的 i 值。

4.2 优化结果

将间隙控制点的布置对吸附装置吸附力的影响进行分析。例如，对于图 7 所示的吸附装置：间隙控制点可为图 7a 所示的 4 个点(方式 1)，也可为图 7b 所示的 3 个点(方式 2)或图 7c 所示位置的 3 个点

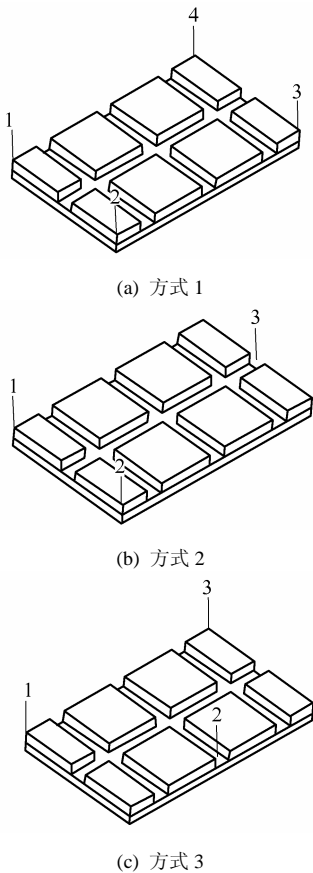


图 7 间隙控制点的布置示意图

(方式 3)。吸附装置在曲率半径为 1.5 m 的凹凸柱面上运行时，最大吸附力及最小吸附力的有限元分析结果如表 3 所示。

表 3 曲面吸附力计算结果

间隙控制点方式	最大吸附力 F_{\max}/N	最小吸附力 F_{\min}/N	优化值 i
1	3 470	1 291	2.67
2	2 851	1 423	2.00
3	2 477	1 674	1.48

根据分析结果可知，为提高吸附装置曲面适应性，吸附装置永磁体和间隙控制点的相对空间关系设计应满足下列要求：当吸附装置在曲面上运行时，永磁体及间隙控制点的布置应使所有永磁体的平均工作间隙接近于平面设定工作间隙。

4.3 曲面适应效果分析

图 8a 所示吸附装置尺寸为 11.5 cm×58.5 cm×2 cm，图 8b 所示吸附装置尺寸为 11.5 cm×19.5 cm×2 cm，即图 8b 所示吸附装置相当于 3 个图 8a 所示吸附装置的串联。设定吸附系统和壁面间的最小允许间隙为 2 mm，若爬壁机器人吸附系统采用图 8a 的单体结构，计算得 $i=155$ ；若爬壁机器人采用由 3 个图 8b 所示吸附装置构成的多体柔性吸附系统，计算得 $i=1.48$ 。分析结果表明，爬壁机器人采用多体柔性吸附系统，则它在曲面上运行时受壁面形貌及曲率变化的影响大幅降低，曲面适应性显著提高。

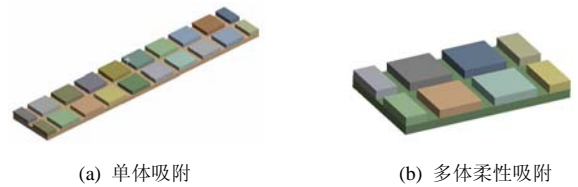


图 8 单体吸附和多体柔性吸附比较分析模型

5 爬壁机器人样机试验

为了验证多体柔性爬壁机器人的曲面自适应性，研制了图 9 所示的三种原理样机。

图 9a 所示爬壁机器人样机吸附装置仅具有图 2b、2c 中所绕 x 轴的 1 转动自由度，试验结果表明，吸附装置支撑轮仅能在一个圆环形面内运动，吸附装置仅能适应一个方向上的曲率变化。当爬壁机器人在圆柱面上运行时，一旦吸附装置允许的转动方向和柱面的主曲率方向不一致，爬壁机器人吸附装置滚动支撑轮就不能同时和壁面接触，吸附系统和壁面间的吸附力变化范围大，这使其在复杂空间曲面上运行时机器人的负载能力不能保证。

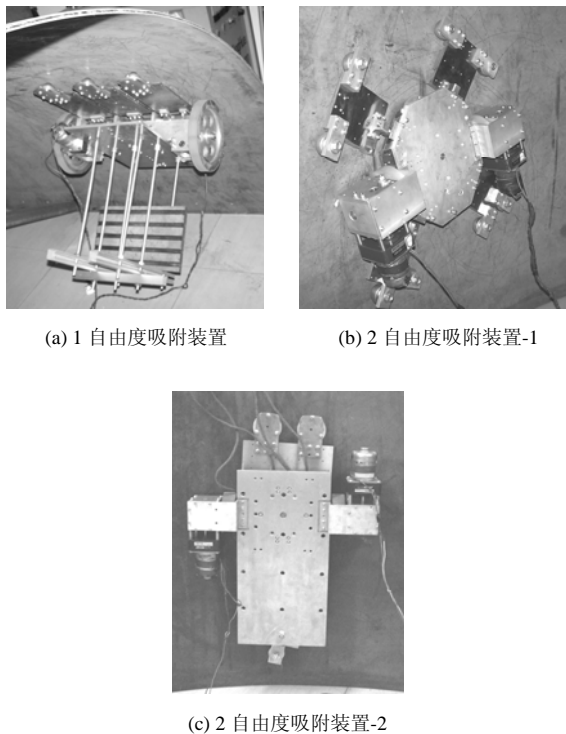


图 9 多体柔性吸附爬壁机器人样机试验

图 9b、9c 所示爬壁机器人样机中吸附装置具有图 2b、2c 中所示的绕 x 、 y 轴的 2 转动自由度。试验结果表明, 吸附装置支撑轮可在一个球形的曲面内运动, 在可模拟叶片表面工况的曲面上全位置、全姿态运动时吸附装置在磁吸附力作用下可自调节相对于壁面位姿, 吸附装置所有滚动支撑轮均能和壁面保持接触状态, 机器人在曲面壁面上运行时的吸附和运动性能接近在平整壁面上运行时的相应性能, 可实现在复杂空间曲面上的可靠吸附和灵活运动。

6 结论

(1) 多体柔性吸附爬壁机器人的吸附系统可自调节相对于避免位姿以适应壁面形貌和曲率的变化。

(2) 为进一步提高吸附装置曲面适应性, 吸附装置永磁体和间隙控制点的相对空间关系设计应满足下列要求: 当吸附装置在曲面上运行时, 永磁体及间隙控制点的布置应使所有永磁体的平均工作间隙接近于平面设定工作间隙。

(3) 多体柔性吸附爬壁机器人在曲面壁面上运行时的吸附和运动性能接近在平整壁面上运行时的相应性能, 可实现在复杂空间曲面上的可靠吸附和灵活运动。

参 考 文 献

- [1] 桂仲成, 王胜华, 陈强, 等. 混流式水轮机叶片建模与分析[J]. 大电机技术, 2006(5): 36-40.
GUI Zhongcheng, WANG Shenghua, CHEN Qiang, et al. Modeling and analysis of a Francis turbine blade[J]. Large Electric Machine and Hydraulic Turbine, 2006(5): 36-40.
- [2] SLOCUM A, LANG J, AWTAR S, et al. Magnetically preloaded wheels[C]//The 4th International Conference of the European Society of Precision Engineering and Nanotechnology, 2004, Glasgow. Glasgow: European Society for Precision Engineering and Nanotechnology, 2004, 335-336.
- [3] JIANG Lipai, JIAO Xiangdong, XUE Long, et al. Flexible magnetic wheel type intelligent welding robot for spherical tank[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2002, 15(2): 173-176.
- [4] 马兆瑞, 潘际奎, 张琥, 等. 无导轨全位置爬行弧焊机器人在造船中的应用[J]. 电焊机, 2006, 36(3): 16-18, 26.
MA Zhaorui, PAN Jiluan, ZHANG Hu, et al. Application of trackless autonomous crawling all-position arc welding robot in shipbuilding[J]. Electric Welding Machine, 2006, 36(3): 16-18, 26.
- [5] 桂仲成, 陈强, 孙振国, 等. 爬壁机器人永磁吸附装置优化设计[J]. 电工技术学报, 2006(11): 40-46.
GUI Zhongcheng, CHEN Qiang, SUN Zhenguo, et al. Optimization of permanent-magnetic adhesion device for wall-climbing robot[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2006(11): 40-46.
- [6] 陈立平, 张云清, 任卫群, 等. 机械系统动力学分析及 ADAMS 应用教程[M]. 北京: 清华大学出版社, 2005.
CHEN Liping, ZHANG Yunqing, REN Weiqun, et al. Dynamic analysis of mechanical system and tutorial of ADAMS application[M]. Beijing: Tsinghua University Press, 2005.
- [7] 尚建忠, 罗自荣, 张新访. 2 种轮式月球车悬架方案及其虚拟样机仿真[J]. 中国机械工程, 2006, 17(1): 49-52.
SHANG Jianzhong, LUO Zirong, ZHANG Xingfang. Two kinds of wheeled Lunar rover suspension scheme & their virtual prototype simulation[J]. China Mechanical Engineering, 2006, 17(1): 49-52.

作者简介: 桂仲成, 男, 1979 年出生, 博士研究生。主要研究方向为特种加工机器人。

E-mail: gzc03@mails.tsinghua.edu.cn