

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2017.02.004

爬壁打磨机器人轻量化设计研究

叶宇峰¹, 夏立¹, 项智¹, 蔡刚毅¹, 潘柏松^{2*}

(1. 浙江省特种设备检验研究院, 浙江 杭州 310020; 2. 浙江工业大学 机械工程学院, 浙江 杭州 310014)

摘要:针对大型容器焊缝及热影响区域人工打磨存在效率低、一致性差等问题,根据打磨工艺要求对打磨过程进行了打磨效果及影响因素分析等工艺研究,基于打磨工艺的研究结果对爬壁打磨机器人进行了功能和性能需求分析,建立了总功能图和具体功能原理模型,通过对比分析各功能原理解确定了爬壁打磨机器人的结构方案,详细研究了爬壁打磨机器人的关键结构并进行了样机打磨试验。结果表明:空载转速 4 000 r/min、正压力 10 N 为打磨工艺的最佳参数值;爬壁打磨机器人打磨效率为 1.12 m²/h,打磨后壁面呈现镜面效果,粗糙度 $Ra \leq 25 \mu\text{m}$,达到了设计要求,具有较高的工程应用价值。

关键词:爬壁机器人;大型压力容器;打磨工艺;打磨效果;结构方案

中图分类号:TH122;TP242

文献标志码:A

文章编号:1001-4551(2017)02-0119-06

Light-weight design about the wall-climbing and polishing robots

YE Yu-feng¹, XIA Li¹, XIANG Zhi¹, CAI Gang-yi¹, PAN Bai-song²

(1. Zhejiang Province Special Equipment Inspection and Research Institute, Hangzhou 310020, China;

2. College of Mechanical Engineering, Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310014, China)

Abstract: Aiming at the problems of low efficiency and poor consistency about artificial grinding in the wall surface weld and heat affected zone of large containers, the polishing effect and influence factors of grinding process were analyzed according to the grinding process requirements. Then the requirement analysis was based on the research result, the general function diagram and functional principle model were established. The structure scheme was designed through the comprehensive comparison of principle solution to general function. The key structure of the wall climbing robot was researched in detail and the grind experiments was carried out. The results indicate that when the no-load speed is 4 000 r/min and positive pressure is 10 N, the polishing process achieve the best; the grinding efficiency of the robot is 1.12 m²/h, the polished wall has mirror effect and the roughness Ra is less than 25 μm which have meet the design requirements, this research have high engineering application value.

Key words: wall-climbing robots; large pressurized vessel; grinding process; grinding effect; structural scheme

0 引言

大型压力容器在高压、腐蚀等恶劣环境下工作,极易出现壁面焊缝开裂等缺陷,从而导致安全事故,因此需要定期检测。对容器进行安全检测前,需要对壁面焊缝和热影响区域进行打磨,以达到检测要求。

目前,对大型容器进行打磨主要采用危险性高、耗

时长、效率低等缺点的人工方式,基于爬壁机器人进行打磨、检测尚未在大型容器检测行业推广。爬壁机器人(Wall Climbing Robot)是指结合吸附技术和移动技术的、能够在壁面上灵活运动,并携带一定的设备执行特定任务的运动载体,在很多领域都有广泛的应用^[1]。

基于运动方式,爬壁机器人可分为四大类型。

收稿日期:2016-09-22

作者简介:叶宇峰(1968-),男,浙江宁波人,主要从事工业压力容器无损检测的研究。E-mail: xsa4567@163.com

通信联系人:潘柏松,男,博士,教授,博士生导师。E-mail: panbsz@zjut.edu.cn

四肢型爬壁机器人利用四肢躯干带动整体运动,表面适应性和灵活性好,但结构和步态控制复杂、运行速度缓慢^[2]。与四肢型爬壁机器人相比,轮式和履带式爬壁机器人的机械结构和控制系统简单可靠,能快速连续运动,但是表面适应性和运动灵活性较差^[3]。框架滑动爬壁机器人将滑动框架和不同吸附相结合,具有结构简单、可靠吸附等优点,存在结构庞大、运动空间受限等问题^[4]。轨道拉绳式爬壁机器人则存在应用领域比较狭窄等缺点^[5]。从吸附方式来看,爬壁机器人主要有基于磁力吸附^[6]、负压吸附^[7]、仿生吸附^[8]、化学吸附^[9]等,各自存在优、缺点。

本研究针对人工方式打磨大型压力容器存在的效率低、打磨效果差等问题,进行打磨效果影响因素分析,基于打磨工艺研究开展爬壁打磨机器人的研制,确定机器人的结构方案,并进行样机打磨实验。

1 打磨工艺研究

1.1 打磨工艺要求

本研究涉及的爬壁打磨机器人,其主要应用对象为大型钢制压力容器,用于无损检测的前道打磨工序。根据 JB-40730.4-2005《承压设备无损检测》关于磁粉检测规定:对于带检测的工件表面不得有油脂、铁锈、氧化皮或其他粘附磁粉的物质;打磨后待检测的表面粗糙 $Ra \leq 25 \mu m$,露出金属光泽。

1.2 打磨效果影响因素分析

针对压力容器焊缝及热影响区域打磨除锈,宜采用无纺布磨光类磨具。打磨过程中影响打磨受力和打磨效果的因素很多,经过分析得到主要的影响因素有主轴旋转速度、打磨头进给速度、打磨正压力。

因此,打磨实验的响应变量和影响因素变量的关系表示如下:

$$Y = f(X) \quad (1)$$

式中: Y —响应变量, $Y = \{y_1, y_2, y_3\}$, y_1 —抛光效果, y_2 —进给方向受力, y_3 —打磨扭矩; X —影响因素变量, $X = \{x_1, x_2, x_3\}$, x_1 —打磨正压力, x_2 —主轴旋转速度, x_3 —进给速度。

1.3 打磨实验方案

为了研究打磨实验响应变量和影响因素变量的关系,本研究搭建了以万能试验机为主体的实验装置(打磨实验方案如图1所示),利用试验机上的传感器测出打磨头的受力,利用试验机上的上下拉伸进给,模

拟磨削进给。

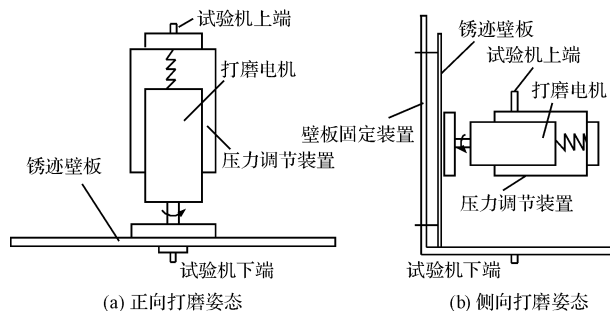


图1 打磨实验方案

打磨实验流程如下:

(1)采用正向打磨姿态如图1(a)所示,壁板下端和试验机下端连接,压力调节装置上端和实验机上端连接。打磨电机开启,带动打磨头旋转。万能试验机下行,压力调节装置内的弹簧压缩产生压力,压力大小可直接从传感器中得出。达到预期压力后,万能拉压试验机停止下行,并用机械结构锁住弹簧变形,即锁定了预期要达到的正压力。

(2)调整到侧向打磨姿态如图1(b)所示,打磨头贴紧打磨壁面后固定打磨支架,放松锁紧机构(即保证第一步设定的压力)。打磨头旋转,拉压试验机提供打磨进给速度,利用拉压试验机的传感器读取打磨进给力的大小。

打磨实验需测量正压力、进给力、进给速度参数外,还需要测量打磨电机转速,打磨电机实际功率等。正压力、进给力、进给速度可以通过万能试验机测得,打磨电机转数通过转速测量仪测定,打磨电机功率通过功率测量仪测定。打磨后壁面的粗糙度检测则是通过表面粗糙度比较样板完成。

1.4 打磨实验结果分析

打磨实验过程图如图2所示,打磨效果的实验结果如图3所示,通过和表面粗糙度比较板相比可知,4块板露出金属光泽表面粗糙度均小于 $Ra25 \mu m$ 。

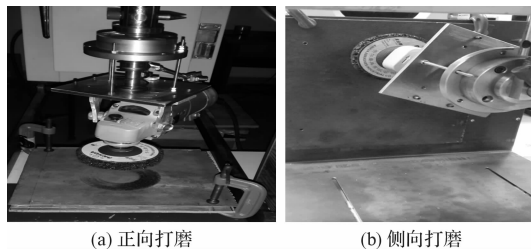


图2 打磨实验过程

为了更好地比较打磨效果,本研究将这4块典型打磨后的表面分为4类(打磨效果的实验结果如图3所示):图3(a)效果差,磨具效果范围内出现若干金属

光泽;图3(b)效果一般,磨具效果范围内金属光泽明显,但分布不均;图3(c)效果较好,磨具效果范围内金属光泽明显,整体均打磨出光泽,但部分朦胧;图3(d)效果好,磨具效果范围内金属光泽明显,打磨均匀。

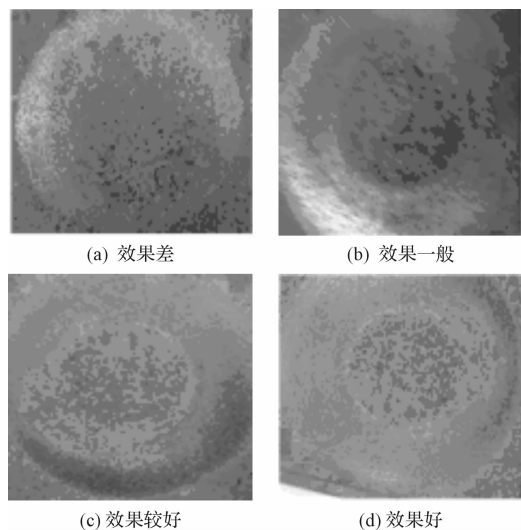


图3 打磨效果的实验结果

本研究利用非接触式转速测量仪可测得空载和实际转速的关系,通过调节不同转速,同时将打磨头的正压力分为5 N,10 N,15 N,20 N,25 N,分别观察不同组合下的打磨效果,如表1所示(注:①打磨效果对应上述四类;②空载转速是指未接触表面时的转速,实际打磨时会略低于空载转速;③打磨时间均为10 s)。

表1 不同空载转速和不同正压力下的打磨效果

正压力/N	不同空载转速/(r·min ⁻¹)下的打磨效果				
	2 000	3 000	4 000	5 000	6 000
5	1	1	2	4	4
10	1	2	3	4	4
15	1	2	3	4	失效
20	2	2	3	失效	失效
25	失效	3	4	失效	失效

从表1可以得到出打磨正压力越大,打磨效果越理想;打磨转速越大,打磨效果越理想。实验得到的结果和常识判断相一致。打磨进给力 F_a 随进给速度 V_a 的变化图如图4所示,可以看出进给速度越小,进给力也越小、且打磨头转速越大则进给力越小。结合表1,可以得到空载4 000 r/min(打磨时的实际转速为3 197 r/min)、正压力为10 N时,受到的扭矩和进给较小,同时打磨效果也较理想,此种情况下电机功率为151.5 W。

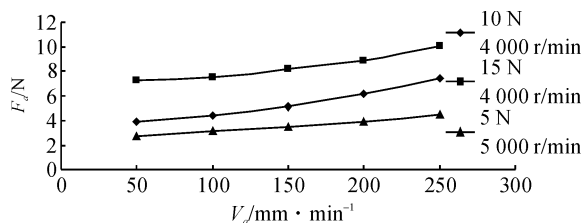


图4 进给力随进给速度的变化曲线

2 爬壁打磨机器人方案设计

2.1 爬壁打磨机器人需求分析

爬壁打磨机器人需携带打磨设备,沿着焊缝方向运动历遍容器,对壁面焊缝以及焊缝热影响区域进行表面的除漆,除杂质的打磨作业。针对罐体的特殊工作环境和工作内容,经调研,确定爬壁打磨机器人的主要功能与性能需求有:

(1)通过 $\phi 500$ mm的人孔,单道打磨宽度为200 mm,越障高度为3 mm。

(2)机器人在罐壁工作时,应可靠地吸附在球罐内、外表面,且吸附力不易过大。

(3)机器人应能沿焊缝移动,并能从纵环焊缝转到到横环焊缝,能对指定区域范围实现打磨(具体参数如1.4节)。

(4)基于图像拍摄,实现小车运动和打磨过程的远端传输和监控,便于操作。

(5)机器人移动速率为0~3 m/min,沿着焊缝方向运动的偏移量每米不能超过5 mm。

2.2 功能原理设计

爬壁打磨机器人设计过程中,需要明晰机器人的功能原理模型。爬壁打磨机器人完成打磨作业过程,接受控制信号,利用外界提供的能量,将球罐壁面的焊缝以及热影响区域打磨出金属光泽,同时产生附带的不必要的残屑。爬壁打磨机器人的总功能模型图如图5所示。

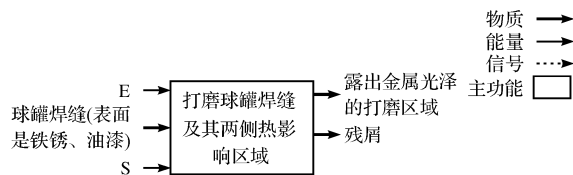


图5 爬壁打磨机器人总功能模型图

本研究将爬壁打磨机器人的总功能分解为吸附壁面、驱动机器人、机器人转向、固定机器人、移动打磨工具、控制打磨力等基本功能元,并确定各功能元工艺动作组合来完成总功能任务;同时,信号和能量转换作为机械系统实现主要功能的辅助

功能,体现了机器人的控制系统流程。具体功能结构如图 6 所示。

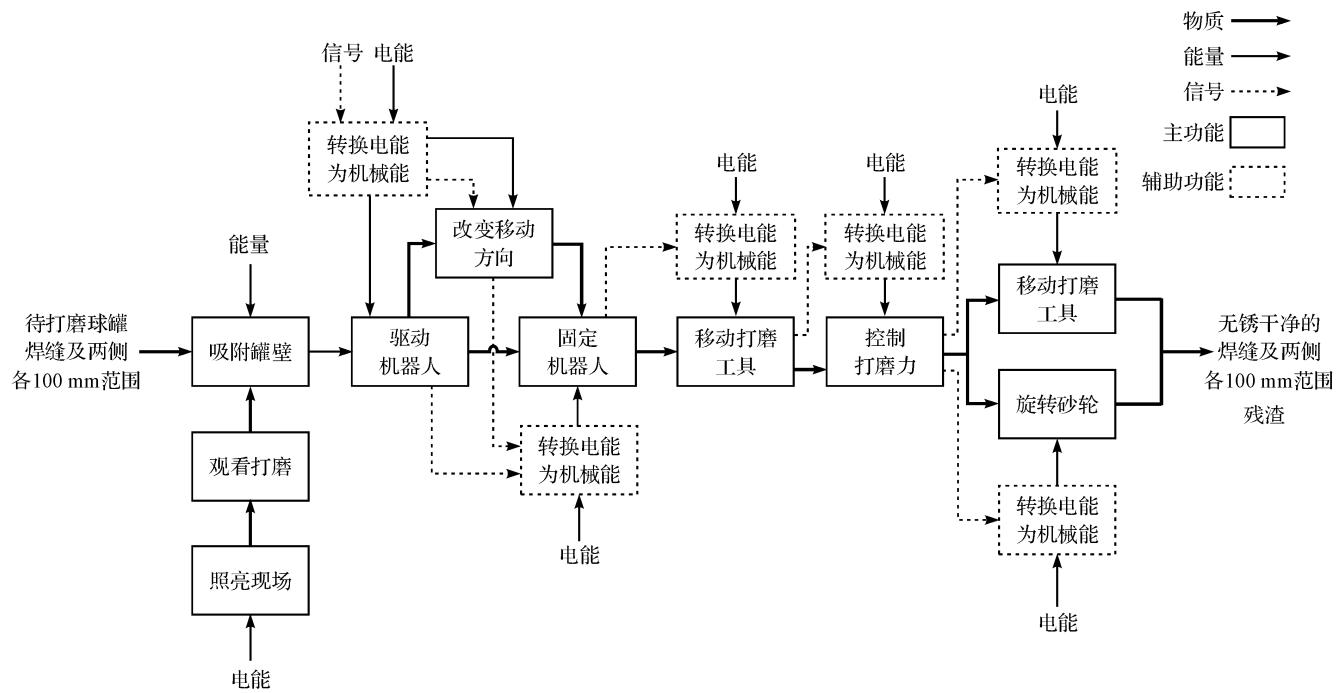


图 6 爬壁打磨机器人功能结构图

2.3 功能原理解析

确定具体各子功能元及其组合顺序后,还需要针对实际应用,分析比较相同功能元不同原理解的优劣性。下面对爬壁打磨机器人中的主要功能,如吸附功能、爬行功能、打磨功能进行不同原理解析的分析。

(1) 吸附功能原理

爬壁机器人吸附方式主要有磁力吸附、负压吸附、机械吸附、化学吸附等四大主要类型。不同吸附方式对比如表 2 所示。

针对大型钢制压力容器磁基壁面,且壁面的曲率较小,表面积宽广的特点。结合表 2 中不同吸附方式的优、缺点比较,可以得出永磁吸附是较为合理的选择。因为永磁吸附在磁基壁面吸附力大,且具有安全可靠、无需能量消耗的优点。

(2) 爬行功能原理

爬壁机器人的运动方式有轮式、履带式、四肢式、框架式四大主要类型。不同运动方式对比如表 3 所示。大型压力容器壁面宽广,只需要跨越 3 mm 的焊缝余高的越障要求。轮式和履带式均有运动速度较快、结构简单等特点。但履带运动方式存在转向灵活性差和转向功耗较大等缺点。笔者结合表 3,合理选择轮式作为爬壁打磨机器人的运动方式。

表 2 不同吸附方式对比

吸附方式	优点	缺点
磁力吸附	吸附力大,稳定可靠,吸附结构简单,吸附过程无能量消耗。	与吸附面的分离困难,吸附对象单一需为磁基壁面。
负压吸附	吸附力大,应用对象宽广。	结构复杂,体积较为庞大,可靠性能差。
仿生吸附	吸附力大,安全性好,越障能力强。	结构复杂,应用对象要求特殊,需攀附凸起物,或嵌入缝隙中。
化学吸附	吸附过程能耗低。	吸附过程缓慢,载荷小,对表面要求严格。

表 3 不同运动方式对比

运动方式	优点	缺点
轮式	运动能力好,结构简单,操控性能好。	接触面积小,越障能力差。
履带式	承载能力大,运动稳定性好,对壁面适应力好。	需要张紧机构,结构庞大,转向性能差。
四肢式	越障能力强,适应性好。	结构复杂,控制难度大,运动速度慢。
框架式	机械结构简单,可靠的吸附力保证。	结构庞大,运动不连续,运动速度缓慢。

(3) 打磨功能原理结构

爬壁打磨机器人在压力容器表面工作时,爬行过程会遇到焊缝和其他凸起的障碍,因此需要控制打磨头升降,来避免打磨头碰撞。同时,完成热影响局部的打磨需要控制打磨头在同一水平面在移动。因此本研

究需要一定的结构来完成打磨头3个自由度的移动同时完成主轴的需要的旋转运动。实现这样功能的原理解,主要有关节型机械臂和直角坐标机械臂结构。

考虑到打磨头高速旋转,关节型机械臂的悬臂结构,容易造成强烈的抖动。因此,直角坐标机械臂结构相比而言较为合理。

2.4 爬壁打磨机器人结构方案

本研究通过分析打磨爬壁机器人的基本需求、功能需求、性能需求,推断出机器人需要实现的功能。通过比较不同的功能原理解,从而选择得到符合要求的最佳功能原理解。初步得到爬壁打磨机器人的总功能原理组合:由永磁吸附、车轮式运动方式、框架式打磨头移动结构等几部分构成,其三维图如图7所示。

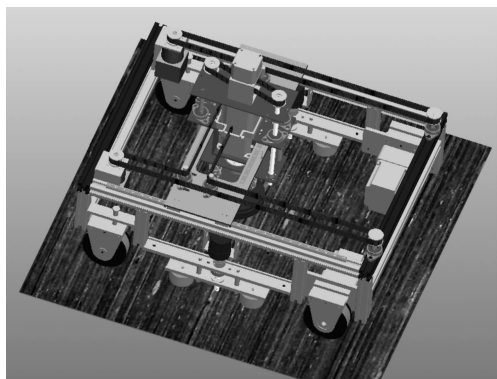


图7 打磨机器人整体三维图

3 爬壁打磨机器人的关键结构设计

3.1 吸附磁轮结构设计

爬壁机器人爬行在垂直壁面上时,所需要的吸附力和驱动力最大,其力学模型如图8所示。

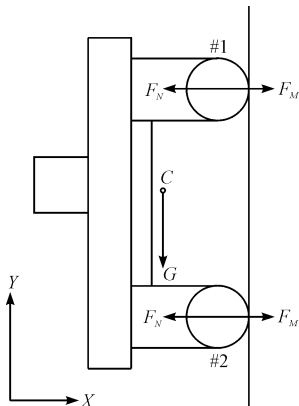


图8 爬壁打磨机器人力学分析模型

为确保爬壁机器人不会从壁面滑脱下来,忽略推导过程,每个磁轮所需的磁吸附力需要满足:

$$F_m \geq \frac{G \cdot h}{2L} + \frac{G}{4\mu} \quad (2)$$

式中: F_m —磁轮吸附力, G —爬壁机器人的重力, h —爬壁机器人重心离壁面的垂直距离, L —前后磁轮跨度, μ —磁轮与壁面的摩擦系数。

具体磁轮设计见文献[10]。

3.2 打磨头平面移动机构设计

传统的平面两坐标的移动结构多采用直线模组结构^[11],不适用于打磨机器人爬壁对轻巧的要求。因此,本研究设计的平面的二自由度的移动机构如图9所示。通过控制机架上的两个步进电机,带动导向架和打磨电机安装架,从而实现平面内的移动。

打磨头运动简图如图9所示,当左、右步进电机同步轮的转速为 ω_1 和 ω_2 时,打磨电机安装架的运动速度为:

$$\begin{cases} v_x = (\omega_1 + \omega_2)R \\ v_y = (\omega_1 - \omega_2)R \end{cases} \quad (3)$$

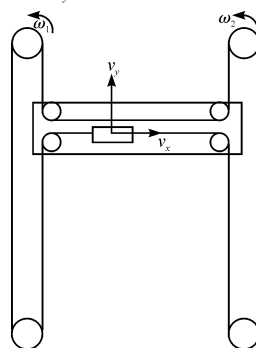


图9 打磨头运动简图

相比传统丝杠螺母组成的直线模组而言,在完成相同的任务情况下,重量大大减少。同时,同步带是柔性结构,在过载时保护了打磨头。

3.3 实验及结果分析

爬壁打磨机器人的实际样机如图10所示,机器人的框架结构由铝型材连接而成,样机完成后的总重量为12.9 kg,长、宽、高分别为500 mm,402 mm,303.5 mm,符合设计要求。

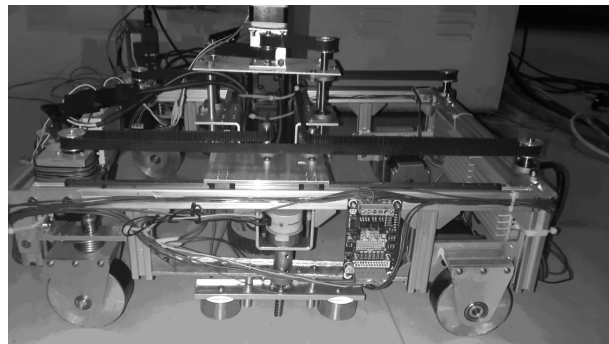


图10 爬壁打磨机器人样机

样机打磨实验在实验壁面上进行,由实验可得,爬壁机器人的打磨效率为 $1.12 \text{ m}^2/\text{h}$,打磨后壁面呈现镜面效果如图 11 所示,粗糙度 $Ra \leq 25 \text{ }\mu\text{m}$ 。



图 11 爬壁机器人打磨效果

4 结束语

本研究进行了打磨工艺研究,并基于打磨工艺研究开展爬壁打磨机器人的研制。结果表明,打磨过程中打磨正压力及打磨转速越大,打磨效果越理想。其次得出了空载转速 4000 r/min 、正压力 10 N 为打磨工艺的最佳参数值。为了满足打磨机器人的设计需求,确定了结构方案,详细研究了爬壁打磨机器人的关键结构和技术。样机打磨试验表明,设计的机器人打磨效率为 $1.12 \text{ m}^2/\text{h}$,打磨后壁面粗糙度 $Ra \leq 25 \text{ }\mu\text{m}$,呈现镜面效果,达到设计要求。

参考文献 (References):

- [1] 熊 雕,刘玉良.履带式爬壁机器人受力分析与稳定性仿真研究[J].机电工程,2015,32(7):929-937.
- [2] ROCHAT F, BEIRA R, BLEULER H, et al. Tremo: an inspection climbing inchworm based on magnetic switchable device [C]// International Conference on Climbing and Walking Robots. Paris: Springer Berlin Heidelberg Press, 2011,415-422.
- [3] SHANG J, BRIDGE B, SATTAR T, et al. Development of a climbing robot for inspection of long weld lines[J]. *Industrial Robot: An International Journal*,2008,35(3): 217-223
- [4] SOUTO D, FAINA A, DEIBE A, et al. A robot for the unsupervised grit-blasting of ship hulls[J]. *The International Journal of Advanced Robotic Systems*,2012,9(82):1-16.
- [5] WANG W, TANG B, ZHANG H, et al. Robotic cleaning system for glass façade of high-rise airport control tower[J]. *Industrial Robot: An International Journal*, 2010, 37(5):469-478.
- [6] GRIECO J, PRIETO M, ARMADA M, et al. A six-legged climbing robot for high payloads [C]// The International Conference on Control Applications. Trieste: Springer Berlin Heidelberg Press,1998:446-450.
- [7] YOSHIDA Y, MA S. Design of a wall-climbing robot with passive suction cups[C]// The International Conference on Robotics and Biomimetics. Tianjin: IEEE Press,2010:1513-1518.
- [8] MAEMPEL J, KARGUTH A, GORB N, et al. Inspirat: a biologically inspired small climbing robot for the inspection of linear structures in semi-structured technical environment [C]// International Symposium on Adaptive Motion of Animals and Machines. Ohio: Springer Berlin Heidelberg Press,2008:45-53.
- [9] WILTSIE N, LANZETTA M, IAGNEMMA K. A controllably adhesive climbing robot using magnetorheological fluid [C]// International Conference on Technologies for Practical Robot Applications. Woburn: IEEE Press,2012:91-96.
- [10] 潘柏松,张 晋,魏 凯,等.基于 Halbach 阵列爬壁机器人永磁轮吸附单元的设计与优化[J].浙江工业大学学报,2015,43(4):393-397.
- [11] 孙金凤,石 建.瓷砖墙壁攀爬机器人结构系统研究[J].机械,2016(8):66-70,80.

[编辑:李 辉]

本文引用格式:

叶宇峰,夏 立,项 智,等.爬壁打磨机器人轻量化设计研究[J].机电工程,2017,34(2):119-124.

YE Yu-feng, XIA Li, XIANG Zhi, et al. Light-weight design about the wall-climbing and polishing robots[J]. *Journal of Mechanical & Electrical Engineering*, 2017,34(2):119-124.

《机电工程》杂志;http://www.meem.com.cn