DOI: 10.3901/JME.2021.03.049

可自适应变曲率立面的分体柔性爬壁 机器人设计与分析*

王 洋 张小俊 张明路 孙凌宇
(河北工业大学机械工程学院 天津 300130)

摘要: 为解决传统爬壁机器人在复杂大型金属立面上的变曲率自适应问题,以履带与曲面的有效接触为出发点,分析在自适应曲面运动时履带式移动构型的姿态变化规律,提出一种基于分体柔性履带移动与间隙式永磁吸附的自适应爬壁机器人;建立多状态下移动模型,分析机器人在变曲率立面移动及焊缝越障过程中利用自身姿态变化实现自适应的运动特性;构建间隙式永磁吸附模型,利用参数化仿真分析了壁厚、磁隙等对吸附能力的影响;通过样机平台试验表明,机器人能以合理的运动姿态实现在变曲率立面上的大负载灵活可靠运动,具有较好的变曲率自适应能力及越障能力。

关键词: 爬壁机器人; 姿态调整; 自适应; 变曲率立面; 分体柔性

中图分类号: TP242

Design and Analysis of Split-flexible Wall-climbing Robot with Adaptive Variable Curvature Facade

WANG Yang ZHANG Xiaojun ZHANG Minglu SUN Lingyu
(School of Mechanical Engineering, Hebei University of Technology, Tianjin 300130)

Abstract: In order to solve the adaptive problem of variable curvature of traditional wall climbing robots on complex and large metal facades. The effective contact between the track and the surface as the starting point, the law of attitude change of caterpillar movement configuration in adaptive surface motion is analyzed. A self-adaptation wall-climbing robot is proposed, which based on split-flexible track movement and clearance permanent magnet adsorption. The multi-state motion model is built, and the self-adaptation motion characteristics of the robot are analyzed, by using itself posture change in the process of moving on the variable curvature facade and crossing the barrier of the weld. Clearance permanent magnet adsorption model is constructed, and the influence of wall thickness and magnetic gap on the adsorption capacity is analyzed by means of parametric simulation. Through the test of prototype platform, it is shown that the robot can move flexibly and reliably under large loads on the facade with variable curvature with reasonable motion posture, and has good ability of adapting variable curvature and overcoming obstacles.

Key words: wall-climbing robot; attitude adjustment; self-adaptation; variable curvature facade; split-flexible

0 前言

因具备有效的壁面吸附与移动特性,爬壁机器人可通过搭载多种运维检测设备,实现机器替人的高空立面作业任务,在石化、船舶、风电等经济发

展与国防建设领域有着广阔的应用前景^[1-6]。变曲率自适应能力作为改善爬壁机器人立面运动性能的关键问题,是机器人在曲率多变的大型复杂金属立面作业规划中运动灵活性与路径准确性的核心保障,根源上制约着机器人的推广应用。因而,变曲率自适应问题长久以来一直是爬壁机器人研究领域关注的焦点,众多国内外学者针对该问题开展了深入研究,并取得丰硕成果^[7-9]。

目前,爬壁机器人普遍采用永磁轮式或永磁履

* 国家重点研发计划(2018YFB1309401)、河北省自然科学基金重点(E2018202338)和河北省科学技术厅—河北工业大学科技创新战略(20180603)资助项目。20200507 收到初稿,20200820 收到修改稿

带式等一体式刚性体结构设计, 因其相对固化的结构特性, 难以适应变曲率等复杂立面形貌特征, 仅能在较为平整的壁面上吸附与移动^[10]。为此, 学者们分别基于多体式设计思想与柔性力学原理, 提出了适用于变曲率立面的爬壁机器人^[11-12]。基于多体式设计方法的自适应爬壁机器人主要采用将两个刚性体机器人通过铰链等方式串接起来, 利用彼此及立面三者之间的空间约束关系, 实现整体姿态的调整, 改善变曲率复杂立面的适应能力。如崔钟伟等^[13-14]利用机械臂串接两个刚性移动本体, 面向大型曲面焊缝修补作业提出双体轮式爬壁机器人; SEO 等^[15-16]采用被动定向柔性接头串接两组履带机构而成的双体履带爬壁机器人, 可在复杂多角度曲面进行移动。采用多体式设计方式虽然提高了机器人在变曲率立面上的适应能力, 但因其结构体增多, 串接长度增加, 势必导致转弯半径增加, 运动避障过程中灵活性降低, 致使复杂立面的运动规划难度增大。基于柔性力学原理的自适应爬壁机器人主要是将机器人的部分刚性结构替换为柔性材料。当机器人结构内部多力耦合的平衡状态因曲率变化而改变时, 柔性材料会发生形变产生柔性力, 促使机器人内部达成新的力态平衡, 进而以姿态变化实现对变曲率立面的自适应运动。如 MAHMOUD 等^[17-18]将一种柔软的弹性体作为移动底盘, 以增加机器人对大曲率立面的适应能力。采用柔性材料的自适应爬壁机器人姿态灵活、运动控制简便, 对曲率变化响应迅速, 但其力态平衡极易受到负载、吸附力等其他因素的影响, 导致柔性材料形变不易控制, 无法满足机器人在复杂壁面运动稳定性的需求。此外, 还有利用机构形变实现对曲率适应的研究, 如 LIU 等^[19-20]利用四连杆机构的变形特性, 实现八足爬壁机器人在单一曲率曲面上的简单运动。但此种方法仍无法满足在复杂变曲率立面上灵活的运动需求。

综上所述, 现有的变曲率自适应方法普遍基于机器人相对固化的结构设计, 以增加结构姿态灵活性为出发点, 依据机器人内外部耦合受力与结构约束关系跟随曲率变化的特性实现对变曲率复杂立面的自适应运动。但姿态的自适应变化会对机器人的运动灵活性与稳定性产生负面影响, 这与改善机器人复杂立面运动性能的初衷相违背。因此, 如何在单体机器人结构基础上, 探索适应曲面运动状态的姿态变化规律, 研究稳定可控的结构姿态设计方法, 对提升爬壁机器人复杂立面运动性能具有重要意义, 然而目前仍缺乏相关深入研究。

针对上述问题, 本文区别传统设计方法, 通过

机器人在曲面各运动状态时姿态变化规律的分析, 基于分体柔性设计理念, 提出一种姿态稳定易控的新型自适应履带爬壁机器人; 以风电塔筒的变曲率外立面结构为参照, 分析机器人在复杂立面多运动状态中, 自身姿态角度跟随立面特征参数的灵活变化特性; 构建永磁吸附模型, 针对曲面自适应运动中, 磁隙等变化对吸附能力的影响, 进行有限元参数化仿真分析; 并通过样机自适应运动性能测试对设计方法与构建的模型进行合理性验证。

1 曲面运动姿态变化规律

因自身结构特性, 轮式、足式等移动构型在立面运动中与壁面接触面积小、接触不稳, 存在易打滑、稳定性差等缺点。固选取与壁面接触面积较大、运动稳定较高的履带式移动构型进行设计分析。机器人的立面运动都是由纵向移动、横向移动、原地转弯这三种基本运动状态任意组合而成。传统一体式履带机器人在曲面运动时, 会因自身结构固化, 如图 1, 与曲面难以产生有效接触, 导致运动失效。当以保证履带与曲面的可靠接触为出发点时, 如图 2 所示, 纵向运动中两侧履带轴线需要跟随曲率变化形成一定夹角; 横向移动中履带需要产生柔性形变以保证与曲面的贴合; 转弯运动中履带需要产生俯仰动作才能顺应曲面的起伏。即两侧履带需要具备相对独立的姿态灵活性及适度可控的柔性变形, 才能实现整机对曲面的自适应灵活运动。因此, 如何在保证机器人完整性与平稳性的前提下, 实现履带之间相对独立的运动姿态变化, 同时与永磁吸附结构相配合, 是实现机器人变曲率自适应的关键。

图 1 一体式履带机器人在曲面的运动姿态

图 2 自适应履带机器人在曲面的运动姿态

2 分体柔性自适应爬壁机器人

为实现履带之间能以相对独立的运动姿态适应曲率变化, 本文提出的爬壁机器人(图 3)采用分体柔性自适应运动形式: 即将履带固接在同一车体上的

一体式构型, 分解为两个相对独立的运动吸附模块。该模块集履带移动、间隙式永磁吸附、驱动传动结构、张紧结构于一体(图 4), 并通过连接模块与平衡模块相连接。连接模块具有翻转与俯仰两个自由度(图 5)。机器人整体是左右对称结构, 重心在机器人中轴线上。平衡模块由于万向轮的支撑作用, 时刻保持机器人重心与壁面间的相对稳定, 在曲面负载运动过程中不会随着壁面曲率起伏发生扭转、倾覆等姿态变化(图 6)。

图 3 变曲率自适应爬壁机器人整体结构

1. 运动吸附模块 2. 万向支撑轮
3. 平衡模块 4. 连接模块 5. 电气控制盒

图 4 运动吸附模块结构示意图

1. 直角减速器 2. 交流伺服电动机 3. 履带 4. 壁板 5. 张紧结构
6. 主动轮 7. 基带 8. 永磁单元 9. 压带轮 10. 转轴 ω_3 11. 从动轮

图 5 连接模块结构示意图

图 6 平衡模块示意图

这样的设计方式, 使得机器人在平衡模块万向轮的支撑下保持了与曲面的相对稳定。两侧的运动吸附模块因连接模块的联结作用, 可牵制彼此的移动, 实现差速转弯等灵活运动。同时, 又因连接模块的翻转与俯仰自由度, 保持了彼此姿态变化的相对独立。使得机器人在曲面纵向与转弯运动中, 能以姿态变化实现对曲面的适应, 如图 7a、7b 所示。此外, 间隙式永磁吸附结构是通过转轴固定于模块上, 同样可借助吸附力方向跟随曲率变化的特点, 实现姿态变化, 跟永磁结构刚性固定的压带轮便可在吸附力作用下迫使履带产生柔性变形。此时, 因曲率半径变化导致与壁面接触的履带长度改变, 可通过张紧机构中弹簧被动压缩, 调整上半部履带长度进行补偿。保证履带稳定可靠的同时, 实现曲面自适应横向运动, 如图 8a、8b 所示。

图 7 机器人曲面自适应运动

图 8 履带自适应柔性变形

3 变曲率立面自适应运动特性

由于复杂立面具有曲率多变、障碍凸起等结构特征, 对机器人的运动性能提出较高要求。固以风电塔筒外立面结构参数为例, 对分体柔性自适应爬壁机器人在变曲率自适应与越障自适应过程中的运动特性进行分析。

3.1 变曲率自适应运动

风电塔筒外表面圆周曲率半径 r 随高度增加而减小, 变化范围在 1~2.5 m 之间, 机器人能以不同的姿态实现对曲率范围内壁面的自适应运动。因机器人机构为对称设计, 下面仅对单侧运动吸附模块的姿态变化开展分析。

(1) 纵向运动: 机器人姿态如图 9 所示, 平衡模块中心点 B 在万向轮支撑作用下与曲面中心 O 保持相对固定, 履带中心 A 跟随曲率 r 变化, 绕翻转轴 ω_1 的中心 O_1 旋转 α_1 角度, 则 α_1 的表达式为

$$\alpha_1 = \pi - \beta - \gamma \quad (1)$$

式中, β 为 $\angle AO_1O$ 大小, γ 为 $\angle BO_1O$ 大小。

根据几何关系, β 、 γ 均可表达为曲率半径 r 的三角函数

$$\tan \beta = \frac{h_1 + r}{l_1} \quad (2)$$

$$\tan \gamma = \frac{h_2 + r}{l_2} \quad (3)$$

式中, h_1 、 h_2 为 A 、 B 距壁面的法线距离; l_1 为 AO_1 长度, l_2 为 BO_1 长度。

根据式(1)~(3)可得 α_1 关于曲率半径 $r \in [1, 2.5]$ 的函数为

$$\alpha_1 = \pi - \arctan \frac{h_1 + r}{l_1} - \arctan \frac{h_2 + r}{l_2} \quad (4)$$

图9 纵向运动中机器人姿态示意图

图10 横向运动中机器人姿态示意图

(2) 横向运动: 图10为在塔筒固定高度做横向环绕塔筒运动, 曲率半径 r 为定值。由于磁吸附力 F_m 始终是沿壁面的法线方向, 即指向曲面圆心 O , 吸附模块可绕转轴 ω_3 中心 O_3 被动旋转 α_3 角度。履带在压带轮正压力的作用下发生柔性形变, 始终与曲面保持接触。

根据几何关系, α_3 与可表达为 r 的三角函数

$$\alpha_3 = \arcsin \frac{l_3}{h_3 + r} \quad (5)$$

式中, C 点为两吸附模块转轴中心连线的中点, α_3 为点 O_3 沿曲面法线方向与竖直方向形成的夹角, l_3 为 CO_3 长度, h_3 为 O_3 距壁面的法线距离。根据式(4)、(5), 可得机器人在变曲率塔筒壁面纵向与横向运动时, 姿态角 α_1 、 α_3 分别随曲率半径 r 变化的曲线如图11所示。

(3) 转弯运动: 两侧履带同速反向绕平衡模块中心点 B 旋转 $\theta = \pi/2$, 机器人由纵向运动姿态变

为横向运动姿态。过程中, 中间平台中心点 B 依旧相对壁面保持固定, 但因曲面起伏及曲率变化, 两侧运动吸附模块姿态上产生俯仰及翻转运动, 即 ω_1 、 ω_2 均参与姿态变化。

图11 纵向及横向运动时姿态角度变化情况

图12为转弯运动中翻转轴 ω_1 角度 α_1' 变化示意图。在固定坐标系 $B-XYZ$ 下, 初始位置 $\theta = 0$, D 为履带中心 A 在 X 轴的投影; 机器人以 B 为中心点, 绕 Y 轴旋转 θ 角后, D' 为 A 在 X 轴的投影, O_1' 为 O_1 的投影。以曲面中心 O 为圆心, 半径 $R_1 = (r + h_1)$ 的 $\widehat{AE}$ 即为点 A 的运动路径在 $B-XY$ 面的投影, E 为 $\widehat{AE}$ 与 Y 轴交点, 距曲面距离为 h_1 。 D' 在 $\widehat{AB}$ 的投影 A' 为旋转 θ 角后, 履带中心 A 的投影。

图12 转弯运动中转轴 ω_1 角度变化示意图

得转轴 ω_1 跟随机器人转弯 θ 角的变化角度

$$\alpha_1' = \arcsin \frac{h_{11}'}{l_1} \quad (6)$$

式中, h_{11}' 为 $A'D'$ 长度, 即转弯 θ 角后, A 距 $B-XZ$ 面的距离。

根据几何关系, 可求得

$$l_{BD} = l_2 + l_1 \cdot \cos \alpha_1 \quad (7)$$

$$l_{BD'} = l_{BD} \cdot \cos \theta \quad (8)$$

$$h_{11}' = (r + h_2) - \sqrt{(r + h_1)^2 - (l_{BD'})^2} \quad (9)$$

式中, l_{BD} 为 B 、 D 两点距离, $l_{BD'}$ 为 B 、 D' 两点距离, α_1 为 $\theta = 0$ 时转轴 ω_1 的旋转角度。

根据式(4)及式(7)~(9)代入式(6), 可得, 转弯

运动时, 翻转轴 ω_1 的旋转角度 α_1' 随 $\theta \in [0, \frac{\pi}{2}]$ 及 $r \in [1, 2.5]$ 的变化情况。由 13 可知, 随着旋转 θ 的增加, α_1' 角度逐渐减小; 随着曲率半径 r 的增加, α_1' 的变化范围也逐渐减小。

图 14 为转弯运动中翻转轴 ω_2 角度 α_2' 变化示意图。在固定坐标系 $B-XYZ$ 下, 初始位置 $\theta=0$ 时, D 、 D_{31} 、 D_{32} 分别为履带中心 A 及两个吸附模块转轴中心 O_{31} 、 O_{32} 在 X 轴的投影, θ_2 为 BD_{31} 、 BD_{32} 与 X 轴的夹角。 D' 、 D_{31}' 、 D_{32}' 分别为原地转弯 θ 角后, A 、 O_{31} 、 O_{32} 在 X 轴的投影。因 A 、 O_{31} 、 O_{32} 三点距壁面高度一致, 固 $\widehat{AE}$ 为其三点运动轨迹在 $B-XY$ 面的投影, A' 、 O_{31}' 、 O_{32}' 为三点在 $\widehat{AE}$ 的投影。

图 13 转弯运动中翻转角 α_1' 跟随 θ 及 r 的变化情况

图 14 转弯运动中转轴 ω_2 角度变化示意图

则可利用 O_{31} 、 O_{32} 两点距 $B-XZ$ 面的高度差, 求得翻转轴 ω_2 角度 α_2' 的表达式

$$\alpha_2' = \arcsin \frac{h_{32} - h_{31}}{2l_3} \quad (10)$$

式中, h_{31} 、 h_{32} 分别为 $O_{31}'D_{31}'$ 、 $O_{32}'D_{32}'$ 的长度, l_3 为 DD_{31} 长度。

根据几何关系, 可求得

$$l_{BD_{31}} = l_{BD_{32}} = \sqrt{l_{BD}^2 + l_3^2} \quad (11)$$

$$\theta_2 = \arctan \frac{l_3}{l_{BD}} \quad (12)$$

$$l_{BD_{31}'} = l_{BD_{31}} \cdot \cos(\theta + \theta_2) \quad (13)$$

$$l_{BD_{32}'} = l_{BD_{32}} \cdot \cos(\theta - \theta_2) \quad (14)$$

$$h_{31} = (r + h_2) - \sqrt{(r + h_1)^2 - (l_{BD_{31}'})^2} \quad (15)$$

$$h_{32} = (r + h_2) - \sqrt{(r + h_1)^2 - (l_{BD_{32}'})^2} \quad (16)$$

将式(4)、(7)、(11)~(16)代入式(10), 可得, 转弯运动时, 俯仰轴 ω_2 的旋转角度 α_2' 随 $\theta \in [0, \frac{\pi}{2}]$ 及 $r \in [1, 2.5]$ 的变化情况。

由图 15 可知, r 一定时, 随着 θ 的增加, α_2' 先增加后减小, 在 $\theta = \pi/4$ 时, α_2' 达最大值。随着 r 的增加, 曲面愈发平缓, α_2' 的变化范围减小, 即运动吸附模块俯仰的幅度降低。

图 15 转弯运动中俯仰角 α_2' 跟随 θ 及 r 的变化情况

3.2 越障自适应运动

复杂立面存在大量横纵焊缝凸起。对此, 机器人能在保障吸附的同时, 借助间隙式吸附结构的旋转自由度 ω_3 实现对障碍焊缝的跨越。如图 16 所示, 机器人上爬过程中, 第一组永磁吸附结构的前端压带轮在吸附力与牵引力作用下, 接触并跨越焊缝后, 永磁体与壁面之间的间隙保证了焊缝不会与永磁体接触, 后端压带轮再完成跨越障碍。同理, 第二组吸附结构通过焊缝, 完成整机越障。过程中, 履带始终能够保持与壁面的良好接触, 不会因焊缝凸起, 导致机器人打滑脱落, 进而实现稳定可靠的立面焊缝自适应越障运动。

图 16 自适应越障示意

1. 壁面 2. 焊缝 3. 压带轮 4. 永磁体

4 永磁吸附模型设计仿真

当机器人自适应曲率变化的同时, 永磁体与壁面之间的磁隙会发生变化, 导致吸附力改变。此外, 不同的金属立面的厚度不一, 也会对吸附力产生影响。因此, 需结合壁面结构参数分析运动过程中吸附力的变化情况。

4.1 间隙式永磁吸附结构磁路设计

本机器人共包含 4 组永磁吸附结构, 为保证机器人较高的载重自重比, 永磁体材料特性与磁路设计应满足以下原则。

(1) 永磁体应具备单位体积内较大的磁能。

(2) 由于爬壁机器人是单侧附壁, 永磁体磁路设计时应实现磁感线的单侧汇聚, 减少漏磁。

(3) 受限于整机体积与质量, 吸附结构应满足吸附力需求的同时, 具备体积小、质量轻等结构特性。

基于以上设计原则, 选择稀土永磁材料钕铁硼 (NdFeB), 因其磁能积大、稳定性高、工作温度范围大、韧性较强等优异的磁力特性, 现已被广泛使用, 选择 NdFeB 磁铁的具体牌号为 N48, 其参数如表 1 所示。

表 1 NdFeB-N48 主要参数

参数	数值
剩磁感应强度 B_r/mT	1 380~1 420
矫顽力 $H_{cb}/(\text{kA/m})$	923
最大磁能 $B_{h\max}/(\text{kJ/m}^3)$	366~390
工作温度 $T_w/^\circ\text{C}$	<80

永磁吸附结构采用纯铁材质的轭铁及两块尺寸相同的 N48 永磁铁, 导磁性壁面材质选用 Q235 钢, 按照如图 17 所示的方式布置, 两磁铁的充磁方向相反, 永磁吸附单元整体纵深 48 mm, 截面参数如表 2 所示, 壁面面积无限大 (W_s 无限大)。

图 17 永磁吸附模型示意图

表 2 永磁体结构参数(mm)

结构参数	初始值
轭铁宽度 W_y	60
轭铁厚度 H_y	12
N48 永磁体宽度 W_m	28
N48 永磁体厚度 H_m	20
两永磁体间距 W_g	4

4.2 永磁吸附模型参数化仿真分析

采用 ANSYS Electronics 软件中永磁分析模块对设计的永磁吸附结构进行磁场有限元分析。图 18a 为磁感线分布图, 磁感线在轭铁、永磁体、导磁壁面及气隙间构成了闭合回路, 仅在永磁体两侧有少量漏磁。图 18b 为磁场强度分布, 在永磁结构上侧区域磁场强度为 0, 绝大部分磁场主要汇聚在永磁体与导磁壁面之间, 吸附力也随着磁场强度在该区域达到最大。

(a) 磁感线矢量分布图

(b) 磁场强度分布图

图 18 永磁吸附结构磁力仿真

机器人在变曲率曲面运动过程中, 壁面曲率变化、机器人转弯、越障等运动均会改变永磁体与导磁壁面间的气隙厚度, 进而对吸附力产生影响。设定仿真模型中仅改变永磁体与导磁壁面间气隙 H_g , 壁面厚度 H_s 为 5 mm, 如图 19a 所示。吸附力会随着气隙的增加而发生骤降, 在气隙达到 6 mm 时, 吸附力下降幅度变缓。因此, 在结构设计中, 要根据吸附力需求, 合理限制气隙间距的变化范围, 避免因气隙增大引起吸附力骤降, 导致机器人在壁面打滑甚至坠落。

导磁壁面厚度变化会改变其对磁通的饱和程度, 进而对吸附力产生影响。设定仿真模型中气隙间距 H_g 为 3 mm, 壁面厚度 H_s 变量趋势范围为 1~15 mm, 吸附力变化曲线如图 19b 所示。吸附力会随着壁厚的增加而增加, 当壁厚达到 5 mm 时, 受限于永磁体磁能大小, 磁路会达到饱和状态, 吸附力也稳定在 592 N 左右, 不再增加。因此, 要根据极限条件下的吸附力需求, 进行间隙式永磁模块的参数设计。

图 19 永磁吸附模型参数化仿真

5 变曲率壁面自适应运动试验

机器人选用交流伺服电动机, 型号为 LS-AMP-SB02ADK3, 配备型号为 ZPLE-060 的直角减速器, 履带选取 14M 圆弧齿同步带。为了平衡机器人质量与结构强度之间的关系, 大部分材质选取铝

合金, 局部受力较大的转轴等部件为不锈钢。图 20 为分体柔性自适应爬壁机器人样机及其负载能力测试, 样机参数见表 3。机器人两侧的运动吸附模块分别搭载 18 kg 重物, 用以测试机器人的负载能力。

同时, 搭建变曲率壁面测试平台。该平台以 1:1 的比例仿照风电塔筒顶部结构参数, 材质为 Q235 钢, 高度 3 m, 顶端半径 1 m, 厚度 10 mm, 底端半径 1.3 m, 厚度 20 mm。

图 20 样机及负载能力测试

表 3 样机试验参数

项目	规格
机身尺寸/ $\left(\frac{\text{长}}{\text{mm}} \times \frac{\text{宽}}{\text{mm}} \times \frac{\text{高}}{\text{mm}}\right)$	625×573×303
质量/kg	25
最大负载/kg	36
载重自重比	1.44
可适应最小曲率半径/m	1m
最大越障/(mm×mm)	5×10

5.1 永磁吸附力试验测试

利用拉力试验机测试永磁吸附模块的吸附能力。通过安装定制夹具, 将钢板与永磁模块分别固定在试验机底座与上部移动端。通过试验机电控系统调整移动端的上下位移, 来实现钢板与永磁模块间气隙大小 H_g 的变化。再通过更换不同厚度 H_s 的钢板进行同样的吸附力测试。最后, 将测试的吸附力数据进行汇总, 可得吸附力试验结果。

在试验过程中吸附力会引起厚度过小的钢板发生形变, 影响测试结构准确性。固钢板厚度选取

图 21 吸附力测试

3 mm、5 mm、7 mm、9 mm, 相应的吸附力试验值如图 21 所示。当气隙小于 5 mm 时, 壁面厚度的增加会引起吸附力的增加, 但当气隙大于 5 mm 时, 壁面厚度对吸附力的影响微乎其微, 这与图 19b 的仿真结果一致。同时, 将壁厚 5 mm 时的仿真值(图 19a)与试验值比较, 相同气隙下, 仿真值会略高于试验值, 这可能是因为永磁模块实体的漏磁要比仿真模型更多, 实体结构设计有待进一步优化。

5.2 变曲率壁面自适应运动试验测试

将机器人置于变曲率壁面测试平台上, 测试多运动状态下的自适应运动能力, 同时在各转轴上安装角度传感器, 用以采集分析机器人自适应运动过程中姿态角度的变化情况, 测试结果如下。

(1) 试验 I: 当机器人做纵向运动时, 中间平衡模块在万向支撑轮作用下时刻保持稳定, 两侧运动吸附模块借助连接模块的翻转轴 ω_1 , 调整自身姿态, 实现自适应变曲率纵向运动, 如图 22a 所示。

(2) 试验 II: 当机器人做横向运动时, 平衡模块与两侧运动吸附模块的相对姿态持平, 由于吸附力方向始终指向曲面圆心, 则固定于转轴 ω_3 的吸附模块跟随曲率变化旋转, 调整自身姿态, 压带轮迫使履带发生柔性变形, 保持与壁面的稳定有效接触, 实现自适应变曲率横向运动, 如图 22b 所示。

图 22 变曲率立面纵向及横向自适应运动

图 23 纵向及横向运动试验中姿态角度变化情况

在纵向与横向运动时, 机器人随着曲率半径逐渐由 1 m 增大至 1.3 m, 翻转轴 ω_1 的转角 α_1 由 12.3° 降至 9.5° , ω_3 的转角 α_3 由 6.2° 降至 4.8° , 如图 23 所示。

(3) 试验 III: 机器人做原地转弯运动时, 两侧

履带跟随曲面起伏及曲率变化, 由纵向姿态原地转弯 $\theta = \pi/2$ 后呈横向姿态, 如图 24a~24d 所示。试验中分别在曲率半径 r 为 1.1 m, 1.15 m, 1.2 m, 1.25 m 的壁面位置测得翻转角 α_1 与俯仰角 α_2 跟随转弯角度 θ 的变化曲线如图 24e、24f 所示, 同图 14、15 比较可得, 样机在自适应变曲率立面的转弯运动符合理论分析的姿态变化特性。

图 24 变曲率立面原地转弯自适应运动

(4) 试验 IV: 通过一定角度的倾斜运动, 来检验机器人在壁面运动中的灵活性。机器人由纵向姿态原地旋转 $\theta = \pi/4$, 中间平台保持稳定, 两侧运动吸附模块跟随曲面起伏, 姿态上产生翻转、俯仰动作。随着倾斜向上运动, 壁面曲率半径逐渐减小, 如图 25a~25c 所示, 翻转角 α_1 与俯仰角 α_2 跟随曲率半径 r 的变化情况如图 25d 所示。试验表明, 机器人能以稳定的姿态实现自适应变曲率倾斜运动。

(5) 试验 V: 当机器人做焊缝越障运动时, 机器人整体姿态不变, 两组间隙式永磁吸附模块, 在吸附力作用下, 利用转轴 ω_3 及永磁间隙, 可顺次完成对焊缝的被动跨越, 实现壁面焊缝自适应越障, 如图 26 所示。

图 25 变曲率壁面 45° 倾斜自适应运动

图 26 壁面焊缝自适应越障运动

综上试验证明, 针对复杂变曲率立面研制的分体柔性爬壁机器人, 在面对立面曲率变化及焊缝障碍时, 能够利用自身姿态的被动自适应运动特性, 实现在变曲率立面上全方位多角度的大负载高可靠性灵活运动。

6 结论

(1) 针对改善爬壁机器人在大型复杂金属立面上运动性能的需求, 提出并研制了一种对变曲率立面具有自适应运动能力的爬壁机器人。该机器人采用间隙式永磁吸附与分体柔性履带移动方式, 利用结构间相对自由度, 能够根据壁面曲率变化而调整自身运动姿态, 实现对立面曲率变化的自适应。

(2) 结合风电塔筒变曲率外立面结构参数, 采用理论分析与数值仿真方法, 分析了机器人多种运动状态下, 自身姿态角度跟随曲率变化的趋势。同时, 也分析了自适应焊缝越障过程中的姿态变化情况。

(3) 基于大负载高可靠性的需求, 设计了永磁吸附模型并进行了参数化仿真, 分析了在曲率变化过程中, 气隙及壁厚等参数对吸附力的影响。

(4) 测试结果表明: 该机器人在稳定壁面吸附的同时, 能够通过自身机构的及时调整以灵活多变的运动姿态在曲率多变的大型金属立面上实现大负载稳定可靠的灵活运动, 亦具有适度越障能力。

参 考 文 献

- [1] ROSS B, BARES J, FROMME C. A semi-autonomous robot for stripping paint from large vessels[J]. The International Journal of Robotics Research, 2003, 22(7-8): 617-626.
- [2] KAIDI Z, XUYAN H, PAN C, et al. Research on the adhesion characteristic of climbing robot feet with bionic gecko microarray for spacecraft based on DEM[C]// Proceedings of the 2017 3rd International Conference on Control, Automation and Robotics (ICCAR). Nagoya, Japan: IEEE, 2017: 206-211.
- [3] 薛胜雄, 任启乐, 陈正文, 等. 磁隙式爬壁机器人的研制 [J]. 机械工程学报, 2011, 47(21): 37-42.
XUE Shengxiong, REN Qile, CHEN Zhengwen, et al. Design on magnetic gap adhesion typed crawler[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2011, 47(21): 37-42.
- [4] 衣正尧, 弓永军, 王祖温, 等. 新型船舶壁面除锈爬壁机器人动力学建模与分析[J]. 机械工程学报, 2010, 46(15): 23-30.
YI Zhengyao, GONG Yongjun, WANG Zuwen, et al. Dynamic modeling and analysis on a new type wall-climbing robot for ship wall rust removal[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2010, 46(15): 23-30.
- [5] WU M, PAN G, ZHANG T, et al. Design and optimal research of a non-contact adjustable magnetic adhesion mechanism for a wall-climbing welding robot[J]. International Journal of Advanced Robotic Systems, 2013, 10(63): 1-9.
- [6] WU X G, YAN W X, FU Z, et al. New mechanism to pass obstacles for magnetic climbing robots with high payload, using only one motor for force-changing and wheel-lifting[J]. Industrial Robot: An International Journal, 2011, 38(4): 372-380.
- [7] GO T, OSAWA T, NAKAMURA T. Proposed locomotion strategy for a traveling-wave-type omnidirectional wall-climbing robot for spherical surfaces[C]// Proceedings of the 2015 IEEE International

- Conference on Robotics and Biomimetics (ROBIO). Zhuhai, China: IEEE, 2015: 2223-2228.
- [8] GO T, OSAWA T, OGAWA T, et al. Development of traveling wave type omnidirectional wall climbing robot using permanent magnetic adhesion mechanism and proposal of locomotion strategy for the robot[C]// Proceedings of the 2014 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics(AIM). Besançon, France: IEEE, 2014: 1000-1005.
- [9] LIU Y, SHIN M, JEONG K, et al. Dry adhesion optimization design for a wall-climbing robot based on experiment[C]// Proceedings of the 2014 11th International Conference on Ubiquitous Robots and Ambient Intelligence (URAI). Kuala Lumpur, Malaysia: IEEE, 2014: 216-219.
- [10] XU Z, XIE Y, ZHANG K, et al. Design and optimization of a magnetic wheel for a grit-blasting robot for use on ship hulls[J]. Robotica, 2015, 1-17.
- [11] 桂仲成, 陈强, 孙振国. 多体柔性永磁吸附爬壁机器人[J]. 机械工程学报, 2008, 44(6): 177-82.
- GUI Zhongcheng, CHEN Qiang, SUN Zhenguo. Wall climbing robot employing mulit-body flexible permanent magnetic adhesion system[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2008, 44(6): 177-82.
- [12] TAVAKOLI M, MARQUES L, ALMEIDA A T D. OmniClimber: An omnidirectional light weight climbing robot with flexibility to adapt to non-flat surfaces[C]// Proceedings of the 2012 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems(IROS). Vilamoura, Algarve, Portugal: IEEE, 2012: 280-285.
- [13] 崔宗伟, 孙振国, 陈强, 等. 两端吸附式焊缝修形爬壁机器人研制[J]. 机器人, 2016, 38(1): 122-128.
- CUI Zongwei, SUN Zhenguo, CHEN Qiang, et al. Wall climbing robot based on two-end adsorption for weld seam amending[J]. Robot, 2016, 38(1): 122-128.
- [14] 崔宗伟, 孙振国, 张文增, 等. 爬壁机器人高效焊缝修形方法[J]. 清华大学学报, 2014, 54(9): 1127-1130.
- CUI Zongwei, SUN Zhenguo, ZHANG Wenzeng, et al. Efficient weld bead shaping method for a wall-climbing robot[J]. J. Tsinghua Univ., 2014, 54(9): 1127-1130.
- [15] SEO T, SITTI M. Tank-like module-based climbing robot using passive compliant joints[J]. IEEE-ASME Transactions on Mechatronics, 2013, 18(1): 397-408.
- [16] SEO T, SITTI M. Under-actuated tank-like climbing robot with various transitioning capabilities[C]// Proceedings of the 2011 IEEE International Conference on Robotics and Automation(ICRA). Shanghai, China: IEEE, 2011: 777-782.
- [17] TAVAKOLI M, VIEGAS C, MARQUES L, et al. OmniClimbers : Omni-directional magnetic wheeled climbing robots for inspection of ferromagnetic structures[J]. Robotics and Autonomous Systems, 2013, 61(9): 997-1007.
- [18] TAVAKOLI M, VIEGAS C, MARQUES L, et al. OmniClimber-II: An omnidirectional climbing robot with high maneuverability and flexibility to adapt to non-flat surfaces[C]// Proceedings of the 2013 IEEE International Conference on Robotics and Automation(ICRA). Karlsruhe, Germany: IEEE, 2013: 1349-1354.
- [19] LIU Y, KIM H, SEO T. AnyClimb: A new wall-climbing robotic platform for various curvatures[J]. IEEE-ASME Transactions on Mechatronics, 2016, 21(3): 1812-21.
- [20] LIU Y, LEE D, KIM H, et al. Compliant wall-climbing robotic platform for various curvatures[C]// Proceedings of the 2015 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems (IROS). Hamburg, Germany: IEEE, 2015: 532-537.

作者简介: 王洋, 男, 1991 年出生, 博士研究生。主要研究方向为特种机器人, 爬壁机器人系统。

E-mail: wangyang07081bj@163.com

张小俊(通信作者), 男, 1980 年出生, 博士, 教授, 硕士研究生导师。主要研究方向为特种机器人技术, 智能机器人技术。

E-mail: xjzhang@hebut.edu.cn