

爬壁机器人翻越焊缝过程动力学建模研究

朱世强^{1,2} 高振飞¹ 宋伟^{1,3} 杜镇韬¹ 李存军⁴ 郑妙娟²

(1. 浙江大学海洋电子与智能系统研究所, 舟山 316021; 2. 之江实验室, 杭州 311121;

3. 西南交通大学轨道交通运维技术与装备四川省重点实验室, 成都 610031;

4. 舟山市质量技术监督检测研究院, 舟山 316021)

摘要: 用于远洋渔船外板除锈的爬壁机器人在进行壁面作业时需要翻越焊缝, 采用充气轮的爬壁机器人在翻越焊缝后会出现轮胎压缩量的减小, 导致磁铁气隙增大、磁铁吸附力减小, 从而削弱爬壁机器人的负载能力, 降低了壁面行走可靠性, 为此对爬壁机器人翻越焊缝的动力学过程进行研究。首先, 将驱动轮轮胎简化为弹簧阻尼器, 建立爬壁机器人翻越焊缝过程的动力学模型, 并将驱动轮的翻越焊缝过程划分为不同的阶段; 其次, 利用数值方法求解该动力学模型, 分析不同胎压下驱动轮翻越焊缝过程中爬壁机器人的运动状态; 最后, 进行了爬壁机器人翻越焊缝过程试验, 结果表明, 机器人翻越焊缝过程的试验结果与数值仿真结果基本一致, 验证了本文所建动力学模型的正确性与合理性。

关键词: 爬壁机器人; 充气轮; 磁吸附; 焊缝; 动力学建模

中图分类号: TP24 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2020)12-0377-07

OSID:



Dynamics Modelling of Process of Surmounting Weld Seam by Wall-climbing Robot

ZHU Shiqiang^{1,2} GAO Zhenfei¹ SONG Wei^{1,3} DU Zhentao¹ LI Cunjun⁴ ZHENG Miaojuan²

(1. Institute of Marine Electronics and Intelligent Systems, Zhejiang University, Zhoushan 316021, China

2. Zhijiang Laboratory, Hangzhou 311121, China

3. Technology and Equipment of Rail Transit Operation and Maintenance Key Laboratory, Sichuan Province, Southwest Jiatotong University, Chengdu 610031, China

4. Zhoushan Institute of Calibration and Testing for Quality and Technology Supervision, Zhoushan 316021, China)

Abstract: A wall-climbing robot can be used for the rust removal task of fishing vessels. And the robot is inevitably required to surmount weld seam when operating on the hull plate. For the wall-climbing robot with inflatable wheels and suspended magnet, the compression of the tires is decreased after surmounting weld seam, which leads to an increase in the air gap between the magnet and the hull plate with a following decrease in the magnetic adsorption force. Thus the load capacity of wall-climbing robot is weakened, which affects the reliability of wall-walking. In order to solve the problems mentioned above, a research on the dynamic process of the wall-climbing robot surmounting weld seam was carried out. Firstly, based on the drive-wheel tires simplified as spring dampers, a dynamics model of the wall-climbing robot surmounting weld seam was established, and the weld-seam surmounting process of the drive-wheel was divided into different stages. Secondly, a numerical method was proposed to solve the dynamics model. Meanwhile, the motion state of the wall-climbing robot with different values of tire pressure when surmounting weld seam was analyzed. Finally, experiment was carried out and the experimental results were basically consistent with the numerical simulation ones, which verified the rationality and correctness of the established dynamics model.

Key words: wall-climbing robot; inflatable wheel; magnetic adsorption; weld seam; dynamics modelling

收稿日期: 2020-02-28 修回日期: 2020-03-23

基金项目: 西南交通大学轨道交通运维技术与装备四川省重点实验室开放课题(2019YW002)、浙江省市场监督管理系统质量技术基础建设项目(20190132, 20200133)和舟山市定海区科技计划项目(2020C41001)

作者简介: 朱世强(1966—), 男, 教授, 博士生导师, 主要从事特种机器人与服务机器人研究, E-mail: sqzhu@zju.edu.cn

通信作者: 宋伟(1984—), 男, 副教授, 博士, 主要从事爬壁机器人、海洋仿生机器人和液压传动与控制研究, E-mail: weisong@zju.edu.cn

0 引言

远洋渔业是现代农业的重要组成部分,远洋渔船是支撑远洋渔业发展的重要装备。远洋渔船通常需要长时间在海面上作业,船体外板不可避免地受到锈蚀危害,不但导致渔船使用寿命缩短,还将严重威胁渔民的生命财产安全。因此,定期对渔船外板进行除锈作业十分必要^[1]。爬壁机器人作为一种高效、安全的除锈作业工具,已逐渐被应用于船体外板的锈蚀清理工作^[2-11]。

目前,用于除锈的爬壁机器人多采用充气轮与悬挂磁铁的吸附爬壁轮结构^[10-12],其轮胎压缩量与磁吸附力之间存在复杂的非线性耦合关系。轮胎压缩量变化将直接影响磁吸附力,进而影响爬壁机器人的负载能力和壁面行走可靠性^[10]。在船舶外板除锈作业过程中,爬壁机器人需要翻越焊缝,在翻越焊缝后轮胎压缩量会减小,从而导致磁铁气隙增大、磁吸附力减小,削弱了爬壁机器人的负载能力,产生打滑、倾覆等壁面行走失效现象。因此,研究船舶除锈爬壁机器人的焊缝翻越过程和轮胎压缩量的变化特性,对于完善爬壁机器人设计方法、提高爬壁机器人作业的可靠性都具有重要意义。

现有关于焊缝翻越过程的研究多针对刚性轮磁吸附爬壁机器人^[13-21],通常不需考虑轮胎压缩量的影响,尚未见针对充气轮磁吸附爬壁机器人的相关研究。文献[13]建立了爬壁机器人越障时的静态模型,用以评估爬壁机器人对壁面障碍物的翻越能力,并基于该模型确定了不同尺寸障碍物下爬壁机器人的不打滑条件。利用 ADAMS 软件,文献[18]建立了爬壁机器人翻越焊缝过程的动力学仿真模型,获得了翻越过程中磁吸附力的变化曲线。然而,相较于刚性轮,充气轮具有更大的轮胎压缩量,与磁吸附力之间存在复杂的非线性耦合关系,其焊缝翻越过程的数学模型更为复杂。

针对上述问题,本文对爬壁机器人翻越焊缝过程动力学建模进行研究。首先,阐述爬壁机器人的轮系结构;其次,建立爬壁机器人翻越焊缝过程的动力学模型;然后,利用该动力学模型进行爬壁机器人翻越焊缝过程的数值仿真;最后,设计试验获取数据,与数值仿真结果进行对比分析,以验证动力学模型的正确性。

1 轮系结构

除锈爬壁机器人如图 1 所示,其轮系左右对称布置。图 2^[10]是爬壁机器人的单侧轮系结构,共包含 2 个驱动轮。其中, D 为磁铁的初始气隙^[10], u 是

轮胎在接触面处的径向位移(压缩量),磁铁的实际工作气隙 $\Delta = D - u$, F_{n11} 、 F_{n12} 为单侧两个驱动轮的轮胎与壁面的支撑力。



图 1 除锈爬壁机器人

Fig. 1 Wall-climbing robot for ship rust removal

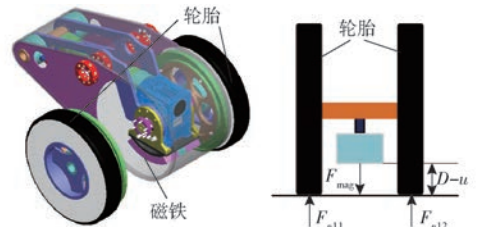


图 2 爬壁机器人轮系结构

Fig. 2 Wheel structure of wall-climbing robot

2 翻越焊缝动力学建模

爬壁机器人在翻越焊缝过程中,焊缝抬高驱动轮,引起磁铁气隙变大,造成磁铁吸附力降低。相较于驱动轮,从动轮(图 3)主要用于支撑机器人,其在越障过程中对上述过程的贡献较小,故仅针对驱动轮的焊缝翻越过程开展研究。

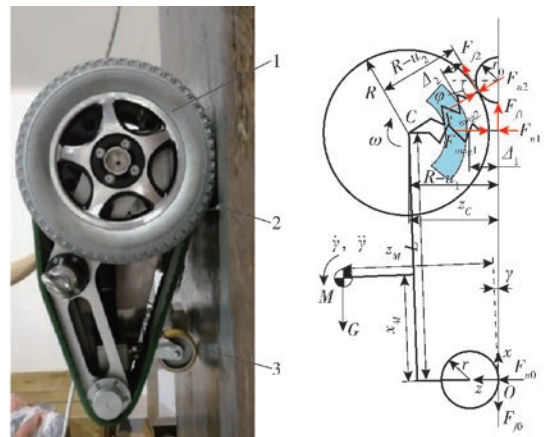


图 3 爬壁机器人翻越焊缝示意图

Fig. 3 Schematic of wall-climbing robot surmounting weld seam

1. 驱动轮 2. 焊缝 3. 从动轮

图 3 为爬壁机器人翻越焊缝示意图。其中,用一个半径为 r_0 的半圆来模拟焊缝,分别用半径为 R 和 r 的圆来模拟驱动轮和从动轮。为了方便描述,在从动轮与壁面接触点 O 处建立坐标系 xOz , x 轴平行于壁面, z 轴方向垂直于壁面。 (x_M, z_M) 为爬壁机

机器人质心 M 的坐标; G 为机器人重力; L 为驱动轮与从动轮的间距; z_c 为驱动轮中心 C 与壁面的垂直距离; γ 为爬壁机器人相对于点 O 的转动角; ω 为驱动轮角速度。

图4描述了爬壁机器人翻越焊缝过程的4个临界状态^[22]。其中,驱动轮在与壁面接触处的径向位移为 u_1 ,支撑力与摩擦力分别为 F_{n1} 、 F_{f1} ,磁铁与壁面间的气隙为 Δ_1 ,产生的磁吸附力为 F_{mag1} ;驱动轮在与焊缝接触处的径向位移为 u_2 ,支撑力与摩擦力分别为 F_{n2} 、 F_{f2} ,此时支撑力方向与壁面法线方向的夹角为 φ ,磁铁与焊缝间的气隙为 Δ_2 ,产生的磁吸附力为 F_{mag2} 。如图4a所示,驱动轮刚好接触焊缝,此时 $u_1 > 0, u_2 = 0$;如图4b所示,驱动轮刚好离开壁面, $u_1 = 0, u_2 > 0$;如图4c所示,驱动轮再次接触壁面, $u_1 = 0, u_2 > 0$;如图4d所示,轮胎刚好离开焊缝, $u_1 > 0, u_2 = 0$ 。

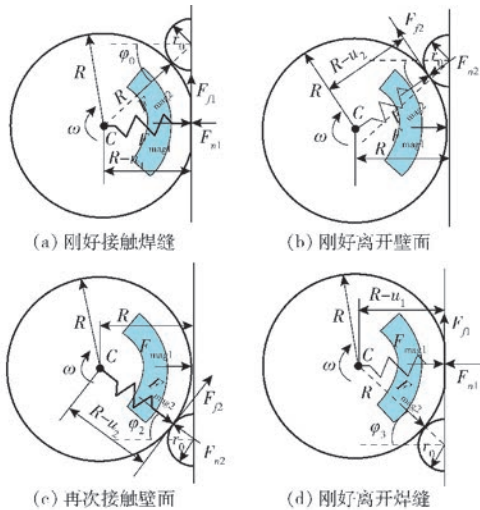


图4 驱动轮翻越焊缝的4个临界状态

Fig. 4 Four critical states of drive wheel surmounting weld seam

据此,可以将爬壁机器人翻越焊缝过程分为以下5个步骤:①驱动轮接触焊缝前,此时 $u_1 > 0, u_2 = 0$ 。②驱动轮接触焊缝且未离开壁面,此时 $u_1 > 0, u_2 > 0, \varphi \geq 0$ 。③驱动轮接触焊缝且离开壁面,此时 $u_1 = 0, u_2 \geq 0$ 。④驱动轮接触壁面且未离开焊缝,此时 $u_1 > 0, u_2 > 0, \varphi < 0$ 。⑤驱动轮接触壁面且离开壁面,此时 $u_1 > 0, u_2 = 0$ 。

根据上述描述,翻越焊缝过程可以分解为爬壁机器人沿着壁面的平动和绕着从动轮的转动^[23-24]。为了便于分析,做如下假设:①轮胎与焊缝之间为纯滚动。②翻越过程中未发生打滑。③轮胎与垂直壁面、焊缝之间产生的径向位移彼此互不影响。

爬壁机器人翻越焊缝过程运动学微分方程可表示为

$$\begin{cases} J\ddot{\gamma} = 2(F_{n1} - F_{mag1})l_1 + Gl_2 + 2[(F_{n2} - F_{mag2})\cos\varphi + F_{f2}\sin\varphi]l_3 + 2[(F_{n2} - F_{mag2})\sin\varphi - F_{f2}\cos\varphi]l_4 \\ M\ddot{h} = 2F_{f1} + 2F_{f2}\cos\varphi - G - F_{f0} \end{cases} \quad (1)$$

其中

$$\varphi = \varphi_0 - \omega t$$

$$\begin{cases} l_1 = L\cos\gamma - (R - r)\sin\gamma \\ l_2 = x_M\sin\gamma + (z_M - r)\cos\gamma \\ l_3 = L\cos\gamma - (R - r)\sin\gamma + (R - u_2)\sin\varphi \\ l_4 = r_0\cos\varphi \end{cases} \quad (2)$$

式中 F_{f0} ——从动轮摩擦力

t ——爬壁机器人行走时间

M ——爬壁机器人质量

φ_0 ——驱动轮刚接触焊缝时支撑力与壁面法线方向的夹角

h ——爬壁机器人沿 x 正方向爬行的高度

方程(1)、(2)中,由于焊缝半径 r_0 尺度非常小,并且从动轮处的摩擦力是数值较小的滚动摩擦力,所以 l_4 与 F_{f0} 在计算时忽略不计。同时,角度 γ 很小,可认为 $\gamma \approx \sin\gamma = \frac{z_c - R}{L}$ 。则方程(1)可表示为

$$\begin{cases} \frac{J}{L}\ddot{z}_c = 2(F_{n1} - F_{mag1})l_1 + Gl_2 + 2[(F_{n2} - F_{mag2})\cos\varphi + F_{f2}\sin\varphi]l_3 \\ M\ddot{h} = 2F_{f1} + 2F_{f2}\cos\varphi - G \end{cases} \quad (3)$$

方程(3)中,一些变量随驱动轮相对于焊缝的位置而变化,很难直接测量。 F_{mag1} 和 F_{mag2} 是与磁铁气隙 Δ_1 、 Δ_2 有关的数值($\Delta_1 = D - u_1, \Delta_2 = D - u_2$),其可通过试验获得。

为了模拟 F_{n1} 和 F_{n2} ,将驱动轮的轮胎看作一个弹簧阻尼器^[25],其与壁面接触时弹性系数为 k_1 、阻尼系数为 c_1 ,其与焊缝接触时弹性系数为 k_2 、阻尼系数为 c_2 。存在

$$\begin{cases} F_{n1} = k_1u_1 + c_1\dot{u}_1 \\ F_{n2} = k_2u_2 + c_2\dot{u}_2 \end{cases} \quad (4)$$

当驱动轮未接触焊缝与接触焊缝时,方程(3)中, z_c 与 h 满足以下关系

$$z_c = \begin{cases} R - u_1 & (u_2 = 0) \\ (R - u_2 + r_0)\cos\varphi & (u_2 > 0) \end{cases} \quad (5)$$

$$h = \begin{cases} (R - u_1)\omega t & (u_2 = 0) \\ -(R - u_2 + r_0)\sin(-\omega t) & (u_2 > 0) \end{cases} \quad (6)$$

考虑到方程(3)中摩擦力对模型的影响,假设轮胎与焊缝、壁面间的摩擦因数都为 μ ,且驱动轮提供的摩擦力与接触的正压力线性相关,则

$$\begin{cases} F_{\beta 1} \leq \mu F_{n1} \\ F_{\beta 2} \leq \mu F_{n2} \\ F_{\beta 1}/F_{\beta 2} = F_{n1}/F_{n2} \end{cases} \quad (7)$$

3 数值仿真

3.1 翻越焊缝模型数值求解

由于用于描述爬壁机器人翻越焊缝过程的方程(3)难以获得解析解,故提出一种数值求解算法对驱动轮中心 C 距壁面的垂直距离 $z_C(t_i)$ 与爬行高度 $h(t_i)$ 进行迭代计算,如图5所示。

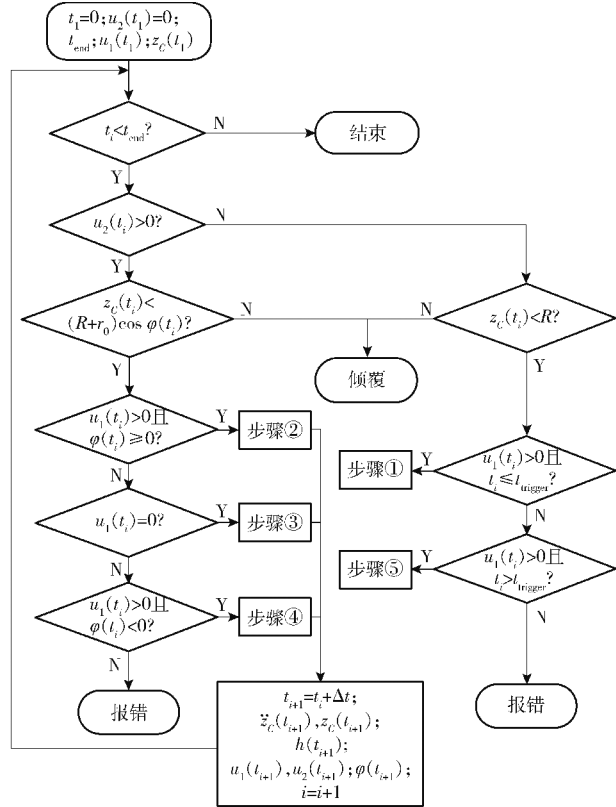


图5 数值求解算法流程图

Fig.5 Numerical algorithm

根据几何关系,当驱动轮接触焊缝前后机器人不发生倾覆的条件分别是 $z_C(t_i) < R$, $z_C(t_i) < (R+r_0)\cos\varphi(t_i)$ 。求解过程中,首先根据每次的迭代结果 $z_C(t_i)$ 来判断机器人是否脱离壁面而发生倾覆。当未发生倾覆时,将进一步计算 $u_1(t_i)$ 、 $u_2(t_i)$ 与 $\varphi(t_i)$,依据2节步骤①~⑤的进入条件,判断爬壁机器人处在翻越焊缝过程的阶段,并代入该阶段的微分方程。算法引入 $t_{trigger}$ 作为驱动轮接触焊缝的时间,计算将在 t_{end} 时终止。最终可以获得爬壁机器人运动状态随时间的变化规律。

3.2 模型数值求解的输入条件

爬壁机器人的运动微分方程(3)中的部分参数如表1所示。参照文献[11-12],数值计算设定机器人驱动轮角速度为 0.45 rad/s 。另外, F_{mag1}

可以通过试验获得, F_{mag2} 可以通过仿真获得,如图6所示。

表1 爬壁机器人参数

Tab.1 Parameters of wall-climbing robot

参数	数值
M/kg	70
$J/(\text{kg}\cdot\text{mm}^2)$	6.212×10^6
x_M/mm	202
z_M/mm	146
L/mm	430
R/mm	165
r/mm	50
D/mm	18.5

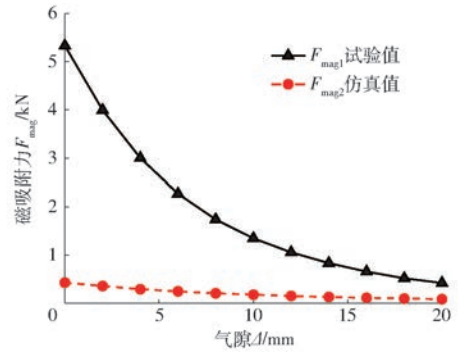


图6 磁吸附力曲线

Fig.6 Magnetic adsorption curve

除了上述数据之外,模型数值求解还需要获得轮胎特性数据。轮胎特性数据是重要的输入条件,但通常轮胎^[10]出厂数据不包含径向变形数据,所以本文通过试验来获得弹性系数 k_1 、 k_2 与阻尼系数 c_1 、 c_2 。图7为轮胎在壁面与焊缝处的径向变形试验,压力机以 $v_b = 10\text{ mm/min}$ 的速度采集胎压 0.28 、 0.32 MPa 下轮胎在不同压缩量时的 F_{n1} 、 F_{n2} ,然后采用中点公式法获得相邻数据的中点斜率,弹性系数计算式为

$$k_i(u_i + \Delta u_i/2) = (F_{ni}(u_i + \Delta u_i) - F_{ni}(u_i))/\Delta u_i \quad (i=1,2) \quad (8)$$

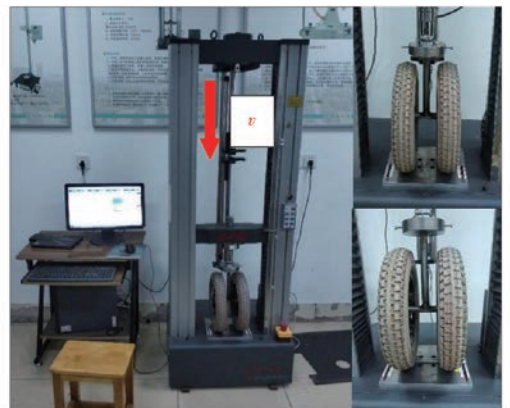


图7 轮胎在壁面与焊缝处的径向变形试验

Fig.7 Radial deformation test of tire at wall and weld

如图 8 所示,在壁面处 k_1 与 u_1 呈线性关系,在焊缝处 k_2 的值可近似为一个常数。同时,根据式(4)获得轮胎阻尼系数计算式为

$$\sum_{j=1}^N (F_{ni,a}(j) - F_{ni,b}(j)) = c_i \sum_{j=1}^N (v_a(j) - v_b(j)) \quad (i = 1, 2) \quad (9)$$

式中 $F_{ni,b}(j)$ ——测试速度 v_b 时轮胎的支撑力
 $F_{ni,a}(j)$ ——测试速度为 v_a 时轮胎的支撑力 (图 9)
 N ——试验数据数量

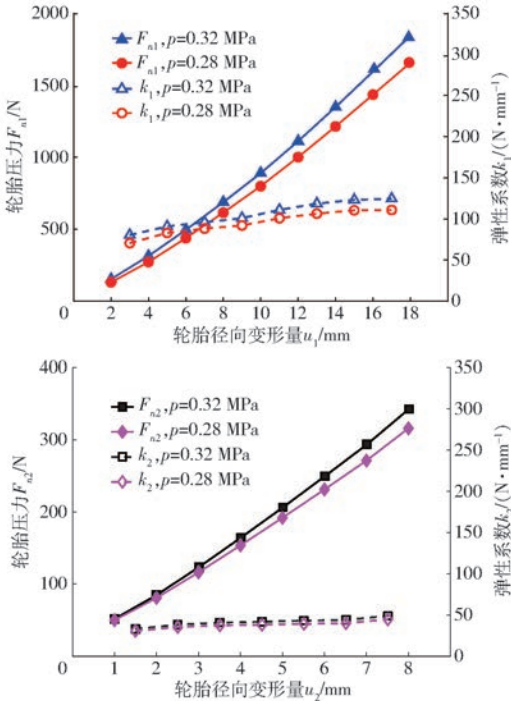


图 8 轮胎在壁面与焊缝处的弹性系数和轮胎压力变化曲线

Fig. 8 Spring constant of tire at wall and weld

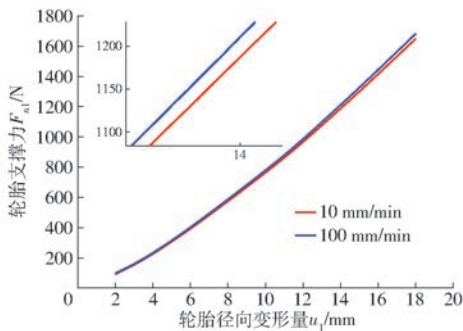


图 9 轮胎支撑力曲线

Fig. 9 Tire pressure curves

并结合 $v_a = 100 \text{ mm/min}$ 速度下的测试数据,求解得到轮胎径向变形的阻尼系数。

通过上述方法,可以得到轮胎的弹性系数和阻尼系数如表 2 所示。

另外,根据国际船级社协会 IACS 的规范,船舶外板焊缝的余高小于 6 mm,本研究将设定爬壁机器

表 2 轮胎的弹性系数和阻尼系数

Tab. 2 Spring constant and damping constant of tire

参数	胎压/MPa	
	0.28	0.32
$k_1/(\text{N}\cdot\text{mm}^{-1})$	$2.874u_1 + 66.57$	$3.266u_1 + 73.02$
$k_2/(\text{N}\cdot\text{mm}^{-1})$	37.99	41.51
$c_1, c_2/(\text{N}\cdot\text{s}\cdot\text{mm}^{-1})$	21	

人所翻越的焊缝半径 r_0 为 6 mm。考虑到实际爬壁机器人翻越焊缝过程中磁铁可能撞击壁面发生磨损^[18],仿真过程中假设轮胎在与壁面、焊缝接触处的径向位移小于磁铁的初始气隙 D ,规定在数值求解时 u_1, u_2 小于 14 mm。

3.3 仿真结果分析

参数 $R - z_c$ 可以用来表示不接触焊缝时驱动轮相对于壁面的压缩量,当其表示接触焊缝的压缩量时,该值实际上包含了焊缝高度的影响。为便于与试验数据对比分析,选用 $R - z_c$ (下文简称驱动轮压缩量) 与爬行高度 h 两个参数来表述机器人的运动状态。

通过 Matlab 编写程序对翻越焊缝过程的数学模型进行数值求解,可以得到胎压 0.28、0.32 MPa 时的数值计算结果如图 10 所示。整个仿真时间设为 30 s。其中,爬壁机器人在 0~7.5 s 时保持静止;爬壁机器人从 7.5 s 开始运动,驱动轮以角速度 ω 向上爬行;驱动轮在 15 s 时接触焊缝,到 17 s 时完成焊缝翻越;25 s 时爬壁机器人停止运动。

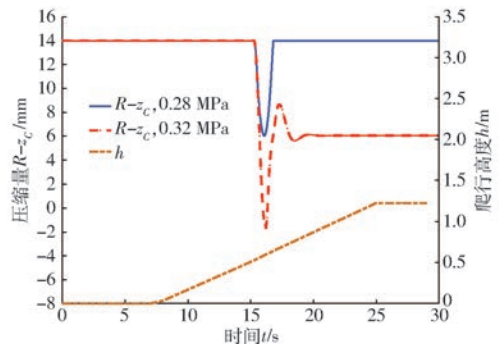


图 10 数值仿真结果

Fig. 10 Numerical simulation results

由图 10 可知,当驱动轮接触焊缝时,驱动轮被焊缝抬高壁面,磁铁气隙增大而磁铁吸附力降低,故驱动轮压缩量减小,到焊缝顶端时轮胎压缩量达到最小,即 16 s 时的状态。之后,随着驱动轮越过焊缝顶端而接近壁面,轮胎压缩量开始增大,磁铁气隙减小而磁铁吸附力增大,最终驱动轮完成焊缝翻越,驱动轮压缩量也达到一个稳定值。然而,轮胎压缩量在翻越焊缝后可能出现减小现象。如,胎压 0.32 MPa 在翻越焊缝后的驱动轮压缩量稳定在了 6 mm,而其相比翻越前减少了 8 mm,必然导致磁铁吸附力的大量衰减。

相较于胎压 0.28 MPa, 胎压 0.32 MPa 下驱动轮的最小压缩量发生在驱动轮达到焊缝顶端时, 为 -2 mm。实际上, 此时驱动轮压缩量包含了焊缝高度。完成焊缝的翻越后, 胎压 0.28 MPa 下驱动轮在 17 s 恢复初始压缩量, 而胎压 0.32 MPa 下驱动轮压缩量发生振荡, 在 20 s 左右才达到稳定值。基于对仿真结果的分析可以发现, 胎压高, 动态过程时间越长, 驱动轮压缩量越容易衰减且衰减量越大, 这必然导致爬壁机器人的负载能力下降且容易发生打滑、倾覆等失效。

4 试验验证

4.1 翻越焊缝试验

为了验证上述数学模型, 搭建的试验场景如图 11 所示。其中, 利用余高平均值为 6.85 mm 的钢条(图 11a)来模拟焊缝, 利用拉线式位移传感器(图 11b)采集爬壁机器人的爬行高度, 利用激光测距传感器(图 11c)分别获得两侧驱动轮实时的驱动轮中心与壁面的垂直距离。所有传感器采集的数据将发送到计算机(图 11d)存储并处理。

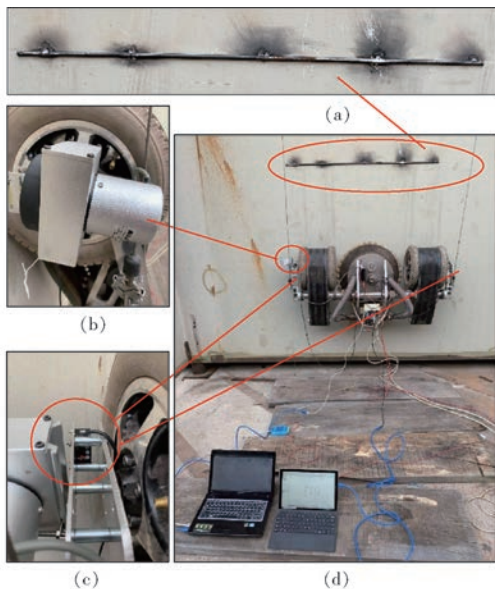


图 11 爬壁机器人焊缝翻越试验

Fig. 11 Experiment of wall-climbing robot surmounting weld seam

4.2 试验结果分析

试验选取 0.28、0.32 MPa 两个胎压工况, 其结果如图 12 所示。其中, 由于数学模型与实际物理模型的差异, 试验结果与仿真结果存在一定的偏差; 左、右两侧轮系试验数据的不同, 则是由壁面平整度、轮胎性质差异、安装误差等原因导致。

如图 12a 所示, 胎压为 0.28 MPa 的试验结果与仿真结果的趋势基本一致, 存在可以接受的偏差。而当胎压为 0.32 MPa 时, 驱动轮从焊缝顶点继续运

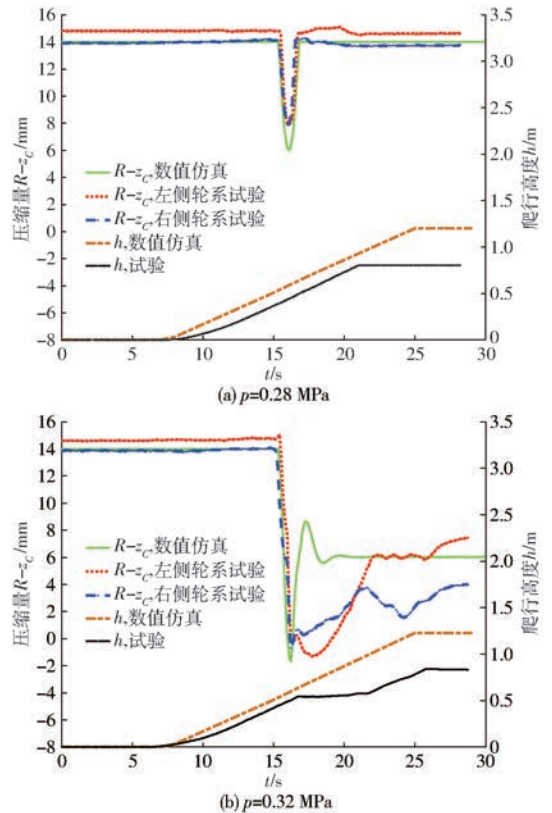


图 12 数值仿真与试验对比

Fig. 12 Comparison between numerical simulation and experiment results

动过程的试验结果与仿真结果存在较大的差异, 即 17~22 s 间的曲线(图 12b)。此时, 由于轮胎实际的阻尼系数较大, 驱动轮压缩量的实际恢复速度缓慢且其数值小于仿真值, 导致该过程中轮胎实际支撑力减小, 爬壁机器人发生打滑现象。22 s 后, 驱动轮压缩量恢复、轮胎支撑力增大, 爬壁机器人停止打滑, 并继续爬行直至 26 s 后停止运动。

根据上述分析, 可知爬壁机器人翻越焊缝的数值仿真结果与试验结果基本一致, 验证了本文提出的爬壁机器人翻越焊缝过程动力学模型的合理性。

5 结论

(1) 将爬壁机器人翻越焊缝运动过程分解为机器人沿着壁面平动和绕从动轮转动两部分, 建立了爬壁机器人翻越焊缝过程动力学模型。

(2) 基于对爬壁机器人翻越焊缝过程的研究, 提出了求解爬壁机器人翻越焊缝过程动力学模型的算法, 从而获得了模型仿真结果, 从机理上解释了爬壁机器人翻越焊缝过程中出现的轮胎压缩量减小、负载能力下降、打滑、倾覆等现象。

(3) 进行了爬壁机器人翻越焊缝过程试验, 试验结果验证了爬壁机器人翻越焊缝过程的动力学模型的正确性与合理性, 为爬壁机器人设计和优化提供了技术支撑。

参 考 文 献

- [1] 郑建丽, 谌志新. 钢质渔船腐蚀特点[C]//2013年中国水产学会学术年会, 2013:241.
ZHENG Jianli, SHEN Zhixin. The characteristic of corrosion research on the steel fish vessel[C]//2013 Annual Conference of Chinese Fisheries Society, 2013:241. (in Chinese)
- [2] WANG Z, ZHANG K, CHEN Y, et al. A real-time weld line detection for derusting wall-climbing robot using dual cameras[J]. *Journal of Manufacturing Processes*, 2017, 27:76-86.
- [3] HU S, PENG R, HE K, et al. Structural design and magnetic force analysis of a new crawler-type permanent magnetic adsorption wall-climbing[C]//2017 IEEE International Conference on Information and Automation (ICIA). IEEE, 2017.
- [4] 毛进宇. 履带式船舶除锈爬壁机器人设计及分析[D]. 哈尔滨: 哈尔滨理工大学, 2017.
MAO Jinyu. Design and analysis of tracked wall-climbing robot for ship derusting[D]. Harbin: Harbin University of Science and Technology, 2017. (in Chinese)
- [5] ALBITAR H, DANDAN K, ANANIEV A, et al. Underwater robotics: surface cleaning technics, adhesion and locomotion systems[J]. *International Journal of Advanced Robotic Systems*, 2016, 13(1):1-15.
- [6] HOWLADER M D O F, SATTAR T P. Design and optimization of permanent magnet based adhesion module for robots climbing on reinforced concrete surfaces[M]//*Intelligent systems and applications*. Springer, Cham, 2016: 153-171.
- [7] 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*, 2017, 35(3): 712-728.
- [8] DANDAN K, ALBITAR H, ANANIEV A, et al. Confined spaces: cleaning techniques and robot-based surface cleaning[J]. *American Scientific Research Journal for Engineering, Technology and Science*, 2016, 22(1): 210-230.
- [9] 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. (in Chinese)
- [10] 姜红建. 面向船舶除锈机器人的磁吸附爬壁轮优化设计[D]. 杭州: 浙江大学, 2018.
JIANG Hongjian. Optimization design of magnetic wall-climbing wheel for ship rust removal robot[D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2018. (in Chinese)
- [11] 宋伟, 姜红建, 王滔, 等. 爬壁机器人磁吸附组件优化设计与试验研究[J]. *浙江大学学报(工学版)*, 2018, 52(10):6-13.
SONG Wei, JIANG Hongjian, WANG Tao, et al. Optimization design and experimental research on magnetic components for wall-climbing robot[J]. *Journal of Zhejiang University(Engineering Science)*, 2018, 52(10):6-13. (in Chinese)
- [12] SONG W, JIANG H, WANG T, et al. Design of permanent magnetic wheel-type adhesion-locomotion system for water-jetting wall-climbing robot[J]. *Advances in Mechanical Engineering*, 2018, 10(7): 1687814018787378.
- [13] FAN J, YANG C, CHEN Y, et al. An underwater robot with self-adaption mechanism for cleaning steel pipes with variable diameters[J]. *Industrial Robot*, 2018, 45(2):193-205.
- [14] 许天启. 可壁面过渡磁轮爬壁机器人吸附稳定性与驱动特性研究[D]. 南京: 东南大学, 2015.
XU Tianqi. Research on adhesion stability and crossing-corner driving characteristics of magnetic wheel wall-climbing robot[D]. Nanjing: Southeast University, 2015. (in Chinese)
- [15] 刘继刚, 唐东林, 贾品元. 轮式超声波检测爬壁机器人稳定性分析[J]. *机械设计与研究*, 2016, 32(5): 25-30.
LIU Jigang, TANG Donglin, JIA Pinyuan. Design and adsorption stability analysis of wall climbing robot based on wheeled magnetic adsorption for ultrasonic detection[J]. *Machine Design & Research*, 2016, 32(5): 25-30. (in Chinese)
- [16] 唐东林, 龙再勇, 袁波, 等. 永磁吸附轮式爬壁机器人受力及功耗分析[J]. *机械科学与技术*, 2019, 38(4):13-20.
TANG Donglin, LONG Zaiyong, YUAN Bo, et al. Analysis of mechanics and power consumption of wall-climbing robot with permanent magnet adsorption wheel[J]. *Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering*, 2019, 38(4):13-20. (in Chinese)
- [17] MATSUMURA Y, SHIBA T, ITO S, et al. Development of magnetic bridge inspection robot aimed at carrying heavy loads[J]. *International Journal of Robotic Engineering*, 2018, 3(2): 010.
- [18] 张小松. 轮式悬磁吸附爬壁机器人研究(应用研究型)[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2012.
ZHANG Xiaosong. Research on wall-climbing robot of wheel-shaped suspended magnetic adsorption(applied research)[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2012. (in Chinese)
- [19] 闻靖, 顿向明, 缪松华, 等. 变磁力吸附爬壁机器人的结构设计及爬越焊缝特性[J]. *机器人*, 2011, 33(4):405-410.
WEN Jing, DUN Xiangming, MIAO Songhua, et al. Structure design and weld seam surmounting characteristic of a wall-climbing robot with variable magnetic adsorption force device[J]. *Robot*, 2011, 33(4):405-410. (in Chinese)
- [20] FISCHER W, TACHE F, SIEGWART R. Magnetic wall climbing robot for thin surfaces with specific obstacles[C]//*Field and Service Robotics*. Springer, Berlin, Heidelberg, 2008: 551-561.
- [21] TACHE F, FISCHER W, SIEGWART R, et al. Compact magnetic wheeled robot with high mobility for inspecting complex shaped pipe structures[C]//2007 IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. IEEE, 2007: 261-266.
- [22] 药晓江, 高峰, 周煜, 等. 可变直径轮全地形车辆越障性能分析[J/OL]. *农业机械学报*, 2013, 44(2):6-11.
YAO Xiaojiang, GAO Feng, ZHOU Yu, et al. Analysis of obstacles climbing performance for diameter-variable wheel all-terrain-vehicle[J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2013, 44(2):6-11. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20130202&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2013.02.002. (in Chinese)
- [23] 贺继林, 任常吉, 吴航, 等. 八轮四摆臂无人机动平台越障性能分析与试验[J/OL]. *农业机械学报*, 2019, 50(1):367-373.
HE Jilin, REN Changji, WU Kang, et al. Investigation on obstacle-surmount performance for eight-wheel unmanned ground vehicle with four swing arms[J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2019, 50(1):367-373. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20190142&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2019.01.042. (in Chinese)
- [24] 张硕, 姚建涛, 许允斗, 等. 形态可重构移动机器人行走机构设计与分析[J/OL]. *农业机械学报*, 2019, 50(8):418-426.
ZHANG Shuo, YAO Jiantao, XU Yundou, et al. Design and analysis of moving mechanism of shape reconfigurable mobile robot[J/OL]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2019, 50(8):418-426. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20190847&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2019.08.047. (in Chinese)
- [25] WILHELM A, MELEK W, HUISSOON J, et al. Dynamics of step-climbing with deformable wheels and applications for mobile Robotics[C]//*Intelligent Robots and Systems*, 2007. IROS 2007. IEEE/RSJ International Conference on. IEEE, 2007.