

引用格式:徐祖恩,张国良,朱凌峰,等. 钢箱梁裂纹检测机器人受力分析与运动控制研究[J]. 工业建筑, 2026, 56(5): 232-238. XU Zuen, ZHANG Guoliang, ZHU Lingfeng, et al. Research on the Force Analysis and Motion Control of a Crack Inspection Robot for Steel Box Girders[J]. Industrial Construction, 2026, 56(5): 232-238 (in Chinese). DOI:10. 3724/j. gyjzG26040802

钢箱梁裂纹检测机器人受力分析与运动控制研究

徐祖恩¹ 张国良² 朱凌峰¹ 王 峥² 秦 泉¹ 郭 健^{2,3}

(1. 浙江沪杭甬高速公路股份有限公司, 杭州 310016; 2. 西南交通大学桥梁智能与绿色建造全国重点实验室, 成都 610031;
3. 浙江大学海洋学院, 杭州 310000)

摘 要 针对钢箱梁疲劳裂纹人工检测存在效率低、风险高及定量能力不足等问题, 开展了面向钢箱梁裂纹检测的磁吸附式爬壁机器人受力分析与运动控制研究。结合钢箱梁顶板与横隔板裂纹巡检需求, 设计了搭载涡流检测设备的爬壁机器人, 确定了整机尺寸、负载能力、运行速度等关键参数。建立了机器人的静力学与动力学模型, 分析了其在钢板表面的最小磁吸附力需求及驱动转矩要求。基于 Webots 平台, 对机器人在不同负载及焊缝障碍条件下的运动过程进行了仿真分析。结果表明: 该机器人能够实现横隔板与顶板之间的连续运动; 随着负载增加, 机器人在横隔板上的起速时间延长、速度波动加剧, 而在顶板上的运动相对平稳; 在越过焊缝时, 机器人速度出现短时波动, 俯仰角随负载增加而明显增大, 但整体仍保持较好的通过能力与运动稳定性。

关键词 钢箱梁; 裂纹检测; 磁吸附式爬壁机器人; 受力分析; 运动控制

Research on the Force Analysis and Motion Control of a Crack Inspection Robot for Steel Box Girders

XU Zuen¹ ZHANG Guoliang² ZHU Lingfeng¹ WANG Zheng² QIN Xiao¹ GUO Jian^{2,3}

(1. Zhejiang Expressway Co., Ltd., Hangzhou 310016, China; 2. State Key Laboratory of Bridge Intelligent and Green Construction, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China; 3. Ocean College, Zhejiang University, Hangzhou 310000, China)

Abstract: To address the low efficiency, high risk, and limited quantitative capability of manual inspection for fatigue cracks in steel box girders, a study was conducted on the force analysis and motion control of a magnetic wall-climbing robot for crack inspection. According to the crack inspection requirements for deck plates and diaphragms, a wall-climbing robot equipped with an eddy current testing device was designed, and key parameters including overall dimensions, payload capacity, and operating speed were determined. Static and dynamic models of the robot were established to analyze the minimum magnetic adhesion force and driving torque required on steel plate surfaces. Based on the Webots platform, simulations were carried out to investigate the robot's motion under different payload and weld obstacle conditions. The results showed that the robot could move continuously between the diaphragm and deck plate. As the payload increased, the start-up time on the diaphragm became longer and speed fluctuation became more pronounced, while the motion on the deck plate remained relatively stable. When crossing a weld, short-term speed fluctuations occurred, and the pitch angle increased significantly with the rising payload. Overall, the robot still maintained good obstacle-crossing capability and motion stability.

Keywords: steel box girder; crack inspection; magnetic wall-climbing robot; force analysis; motion control

第一作者: 徐祖恩, 硕士, 正高级工程师, 主要从事桥梁养护研究。

通信作者: 郭健, guoj@vip.163.com。

收稿日期: 2026-04-08

0 引言

钢箱梁因具有自重轻、跨越能力强和施工效率高等优点,在大跨桥梁中得到了广泛应用^[1]。然而,在长期重载交通、复杂应力状态、初始焊接缺陷及服役环境等多因素共同作用下,钢箱梁易产生疲劳裂纹,严重威胁桥梁运营安全^[2-3]。目前,我国钢箱梁裂纹检测仍以人工巡检为主,存在作业效率低、劳动强度大和安全风险高等问题。随着钢桥智能检测和移动机器人技术的发展,采用具备稳定附着和自主移动能力的磁吸附式爬壁机器人开展裂纹自动化巡检,已成为提升检测效率、保障作业安全和推动钢桥智能运维的重要发展方向^[4-6]。

近年来,磁吸附式爬壁机器人在钢桥检测中的研究不断增多。Nguyen等^[7]研制了适用于复杂钢结构的两轮磁吸附爬壁机器人,提高了机器人在平面、曲面及边缘、拐角等区域的通行能力。La等^[8]将四轮磁吸附移动平台与视觉检测、三维重建技术结合,为结构检测和机器人导航提供了支持。李心诚等^[9]针对磁轮式机器人在顶板、横隔板及壁面过渡过程中的失稳问题,开展了动力学建模、仿真分析和样机试验研究。陈伟乐等^[10]面向钢箱梁内部复杂环境,提出了融合激光雷达与视觉感知的履带式巡检机器人系统,实现了病害自动巡检与空间定位。总体来看,现有研究已在机器人结构设计、运动稳定性分析和检测功能集成等方面取得了一定进展。但现有裂纹检测研究多采用图像采集结合深度学习的方法,普遍存在机器人负载能力有限、检测精度不足以及难以获得裂纹长度和深度等定量信息的问题。

在路径规划和运动控制方面,现有研究主要集中在复杂壁面通过、轨迹生成和地面遥控操作等方面。Wang等^[11]设计了四永磁轮式爬壁机器人,提高了机器人对钢桥表面螺栓、台阶及凹凸角等障碍的通过能力。Pagano等^[12]提出了面向混凝土结构检测的负压吸附履带式爬壁机器人,实现了复杂壁面上的稳定移动。Song等^[13]针对钢箱梁内部多平面和90°凹角过渡等工况,提出了基于多激光测距定位和预瞄跟踪的路径规划与控制方法,实现了稳定转向和连续巡检。虽然这些研究在路径生成、轨迹跟踪和运动控制等方面取得了一定进展,但针对钢箱梁裂纹检测场景下顶板与横隔板典型巡检路径的仿真建模、路径规划和运动控制研究明显不足。

针对上述问题,本文以钢箱梁顶板与横隔板裂

纹巡检需求为背景,构建了典型巡检场景,建立了磁吸附式爬壁机器人的静力学和动力学模型,并基于Webots平台开展运动控制与稳定性仿真分析,以期对钢箱梁裂纹自动化巡检机器人的设计与应用提供参考。

1 工程背景与钢箱梁裂纹分布特征

西堠门大桥主跨1650 m,是舟山跨海大桥项目的重要组成部分,通车时是世界上主跨最大的钢箱梁悬索桥,也是世界上首座分体式钢箱梁悬索桥。桥面系为正交异性钢桥面板,由顶板、U形肋及横隔板等构件焊接而成。该体系具有自重轻、刚度大和施工便捷等优势,被广泛应用于大跨桥梁中^[14]。

1.1 西堠门大桥钢箱梁裂纹病害特点

钢箱梁在服役过程中,长期遭受车辆荷载、风致振动以及其他环境因素共同作用,在一些焊缝应力集中区域会产生疲劳裂纹。据2019—2021年的桥检报告可知,U肋对接焊缝是开裂最为严重区域,其统计结果如图1所示。裂纹主要集中于跨中重载车道上方区域,左幅多见于17号U肋,右幅集中于20号、26号U肋。该现象与跨中区域在车辆荷载反复作用下弯曲应力水平较高、焊接细节处应力集中更显著有关,因此更易产生疲劳裂纹。

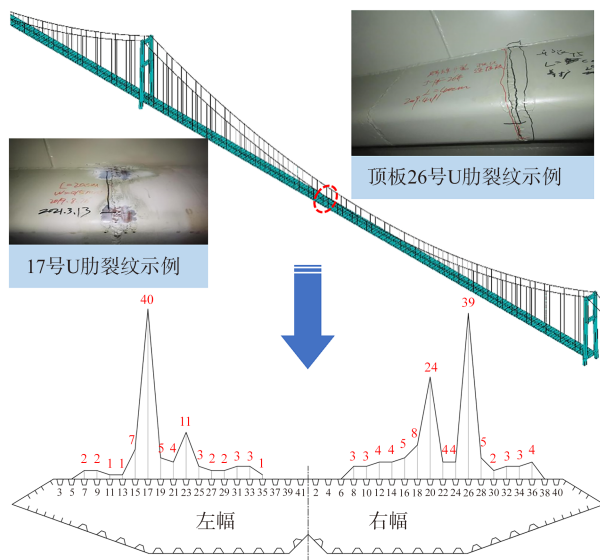


图1 2019—2021年西堠门大桥U肋对接焊缝裂纹数量统计
Fig. 1 Statistics of crack numbers in U-rib butt welds of Xihoumen Bridge from 2019 to 2021

1.2 典型裂纹位置与开裂特征

系统的疲劳试验研究和大量工程实践均表明,正交异性钢桥面板(Orthotropic Steel Deck, OSD)疲

劳开裂主要发生在以下关键构造部位^[15-16]:1)顶板与纵肋焊接处;2)纵肋对接处;3)弧形开口处;4)过焊孔处;5)顶板与横隔板焊接处;6)竖向加劲肋与顶板焊接处。这些典型疲劳裂纹的开裂位置和特征如图2所示。

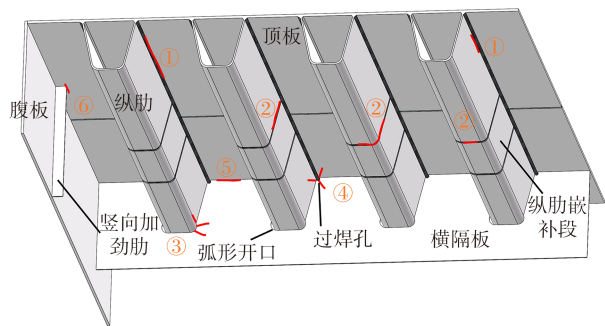


图2 OSD典型裂纹位置
Fig. 2 Typical crack locations in OSD

由此可知,钢箱梁疲劳裂纹多分布于U肋对接焊缝、顶板与横隔板连接处等典型焊接细节区域,且相关部位空间狭窄、构造复杂,传统人工检测方式存在效率低、风险高和定量能力不足等问题。为提高钢箱梁裂纹检测的自动化与智能化水平,有必要研发能够适应顶板、横隔板及其过渡区域复杂环境的爬壁检测装备。

2 检测机器人总体设计

为尽量减少人工作业,实现钢箱梁疲劳裂纹检测的自动化和一体化。本项目团队设计了涡流检测设备搭载磁吸附爬壁机器人的检测装置,通过自主规划路径,进行精准的裂纹检测并记录裂纹特征数据。该装置的设计参数见表1。

表1 爬壁机器人设计参数 Table 1 Design parameters of the wall-climbing robot						
整机尺寸/ mm	机器人自重/N	最大负载质量/ kg	最大速度/ (m·s ⁻¹)	越障能力	防水等级	适应能力
480×280×276	274.4	10	0.3	高6 mm 焊缝	IP65	立面、负面、 直角(阴角)

检测机器人的外形尺寸为480 mm×280 mm×276 mm,前后轴距为360 mm,左右轮距为205 mm,橡胶轮半径为75 mm,具体尺寸详见图3。永磁体分别布置在车身底部的前后两侧,另外,在车头和车尾位置同样布置了永磁体。四个车轮分别由四个伺服电机控制,组成四轮差速,可以灵活地控制机器人在原地转向。

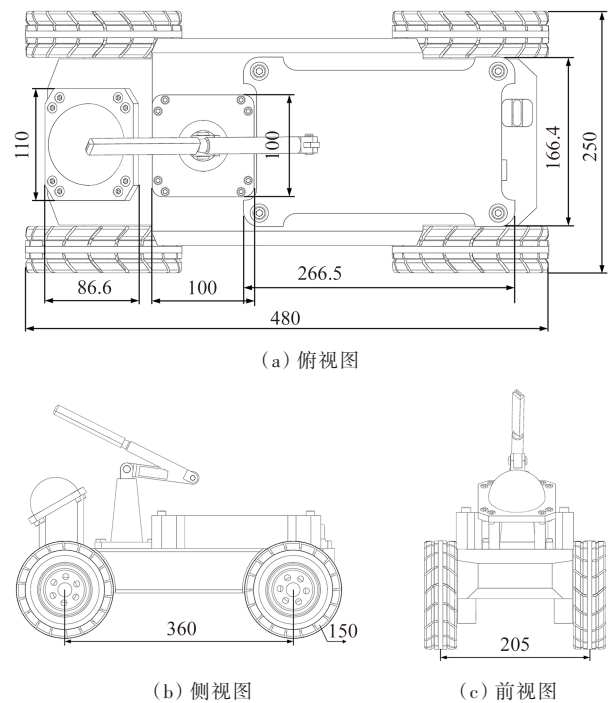


图3 检测机器人尺寸 mm
Fig. 3 Dimensions of the inspection robot

3 磁吸附与受力分析

爬壁机器人通过磁吸力吸附于钢结构表面,使机器人可以吸附于钢箱梁的不同位置。为保证机器人安全作业,吸附力必须足够大以实现全方位运动和作业。但过大的磁力也会增加移动阻力,带来额外的能量消耗,甚至无法移动^[17]。因此,需要分析机器人所需的最小磁吸附力以及工作时所需的转动扭矩。

3.1 静力学分析

该机器人共设计有四块磁铁,分别位于车身后侧以及底板前后位置处。为便于分析,将其受力简化成图4所示。则力的平衡方程为:

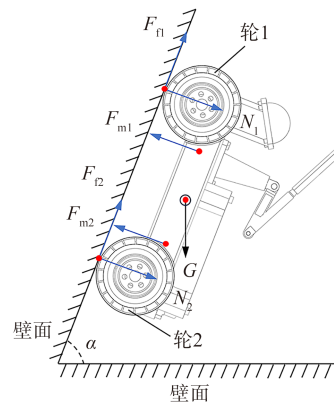


图4 机器人静止状态受力分析
Fig. 4 Force analysis of the robot in a static state

$$\begin{cases} \sum F_{fi} + G \sin \alpha = 0 \\ \sum N_i + G \cos \alpha - \sum F_{mi} = 0 \end{cases} \quad (1)$$

式中: G 为机器人的重力; F_{fi} ($i=1, 2, 3, 4$) 为各轮的滚动摩擦力; F_{mi} 为各轮的磁吸附力; N_i 为壁面对各轮的支持力; α 为壁面之间的夹角。若静摩擦系数为 μ , 可以得到:

$$F_{fi} = \mu N_i \quad (2)$$

当 $\alpha=0^\circ$ 时, 机器人位于顶板下方, 此时吸附力需大于自重, 联立式(1)、(2)可得 $\sum F_{mi} > G$; 当 $\alpha=90^\circ$ 时, 机器人位于横隔板/腹板上, 此时机器人与壁面的摩擦力需大于自重, 即 $\sum F_{mi} > G/\mu$ 。机器人总重力 $G=28 \text{ kg} \times 9.8 \text{ N/kg}=274.4 \text{ N}$ 。参考文献[18]及类似钢结构行走机器人研究, 带涂层钢表面与橡胶轮之间的静摩擦系数可取 $\mu=0.35$ 作为初始估算值。需要指出的是, 该参数受涂层类型、表面粗糙度、锈蚀和潮湿状态影响较大, 工程应用中宜通过实测加以修正。由式(2)可知, μ 减小时, 满足防滑要求所需的最小磁吸附力将明显增大。则根据上式分析可得出所需总的最小磁吸附力 $\sum F_{mi}$ 为 784 N 。

3.2 动力学分析

为突出驱动力矩主要影响因素, 本文动力学建模中作如下假设: 机器人车体视为刚体, 四轮与车体之间无相对运动, 平整钢板表面行驶时轮荷分配近似均匀, 不考虑车体俯仰、侧倾及越障冲击引起的瞬态轮荷转移效应。故该模型主要适用于顶板和横隔板表面的平稳行驶工况; 并且其动力学结果为下一步的机器人结构优化、电机选型以及运动控制提供理论依据。对于越障和显著非匀速工况, 其动态特性通过第4节仿真进一步分析。

爬壁机器人在钢结构表面运动时, 其身上的其余构件不发生相对移动, 可将其看作是一个移动的整体^[19], 如图5所示。XYZ为惯性参考坐标系, $X_c Y_c Z_c$ 为机器人的局部坐标系, 点 C_0 为重心(假设与几何中心重合)。当四个轮子的速度一致时, 机器人在钢箱梁内部做直线运动, 假设速度方向与水平方向的夹角为 β , 爬行壁面与水平方向的夹角为 α 。当爬壁机器人在钢箱梁内部爬行时, 四轮驱动力不仅要克服车轮与壁面间的滚动摩擦力和机器人重力沿运动方向的分量, 还要额外提供车身的平动惯性力以及轮子的转动惯性力。由此, 可建立机器人运动的动力学方程为:

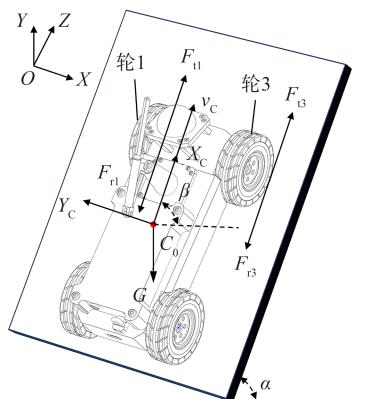


图5 机器人爬行状态受力分析

Fig. 5 Force analysis of the robot in a climbing state

$$\sum F_{di} - \sum F_{fi} - G \sin \beta \sin \alpha = m \dot{v}_c + \frac{4J\dot{\omega}}{R} \quad (3)$$

式中: F_{di} ($i=1, 2, 3, 4$) 为各个轮子的驱动力; F_{fi} 为滚动阻力; m 为机器人的总质量; v_c 为移动速度; J 为车轮的转动惯性矩; ω 为车轮的角速度。

当机器人在横隔板上运动时, α 和 β 均为 90° , 由式(3)可得机器人车轮的动力学表达式为:

$$F_{d1} = \left(m \dot{v}_c + \frac{4J\dot{\omega}}{R} + \sum F_{fi} + G \right) / 4 \quad (4)$$

滚动阻力 F_{fi} 是由轮子和接触面的变形及能量损失而产生的, 其与车轮和壁面间的正压力成正比, 即:

$$F_{fi} = \mu_r N_i \quad (5)$$

式中: μ_r 为滚动摩擦系数。

由3.1节静力学分析可知 $N_i = F_{mi}$, 则:

$$F_{d1} = \left(m \dot{v}_c + \frac{4J\dot{\omega}}{R} + \mu_r \sum N_i + G \right) / 4 \quad (6)$$

由式(6)可以得出机器人在钢箱梁内部爬行时单个车轮所需驱动力矩 T , 其他3个车轮的 T 相等且均为:

$$T = \left[\left(m \dot{v}_c + \frac{4J\dot{\omega}}{R} + \mu_r \sum F_{mi} + G \right) R \right] / 4 \quad (7)$$

式中: T 为单个车轮的驱动力矩。

通过分析爬壁机器人在钢箱梁内部结构表面吸附时的静力学分析以及运动时的动力学建模, 可以从理论上明确机器人的最小吸附力需求及驱动力矩要求, 为后续运动控制与稳定性分析提供基础。

4 运动控制与稳定性分析

通过上述静力学与动力学分析, 可以从理论上明确爬壁机器人在钢箱梁内部运动时所需的最小

磁吸附力及驱动力矩,为机器人结构参数设计、电机选型和控制策略制定提供了依据。后续研究中将结合样机试验或更细化的驱动系统模型,对理论驱动力矩与实际输出结果做进一步对比分析。然而,理论分析主要反映理想受力条件下的力学需求,机器人在实际巡检过程中仍会受到负载变化、构件姿态差异以及焊缝障碍等因素影响。为进一步验证机器人在典型巡检场景中的运动性能,基于Webots平台开展运动控制与稳定性仿真分析。

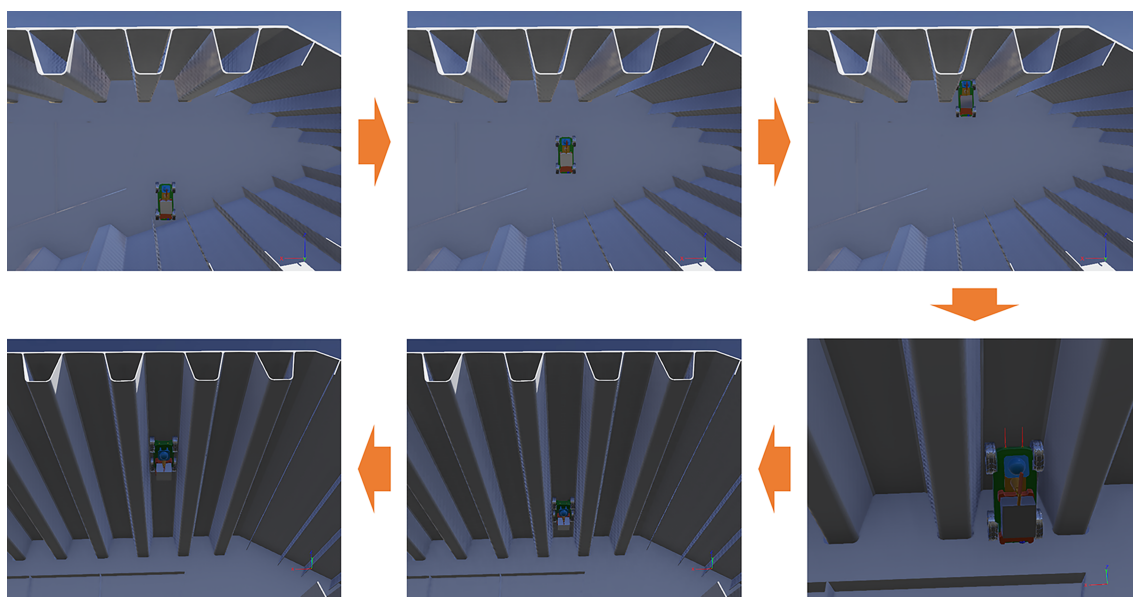


图6 横隔板至顶板运动仿真

Fig. 6 Simulation of the movement from the diaphragm to the deck plate

图7中不同负载质量工况下的速度曲线整体呈现“起步加速—速度调整—趋于稳定”的变化特征,但横隔板与顶板工况下的稳定过程存在明显差异。图7(a)为机器人在不同负载下沿横隔板竖直向上爬行的速度变化曲线,初始速度为0.23 m/s。可以看出,随着负载增加,机器人达到稳定速度所需时间整体延长,速度波动也有所增大,尤其在起步和加速阶段表现更为明显。这表明横隔板立面运动对机器人的驱动能力、附着稳定性以及抗扰动能力提出了更高要求。当负载质量逐步增大至10 kg和10.2 kg时,虽然机器人仍可实现向上爬行,但起速时间明显变长,如果进一步增大负载,车轮则会打滑甚至有往下坠落的风险。图7(b)则是在顶板上运动,给定初始速度为0.25 m/s,不同负载下机器人均能在较短时间内进入稳定运行状态。这说明机器人在顶板表面运动时受重力方向影响较小,系统运行更平顺。

4.1 机器人负载仿真

为分析不同负载条件下爬壁机器人的运动稳定性,本文设置了负载质量为0,5,7.5,10,10.2 kg五种工况,分别对机器人在横隔板和顶板上的爬行过程进行了仿真研究。由图6可知,机器人能够在90°过渡场景中的连续附着与平稳过渡,完成由横隔板向顶板区域的连续运动。这说明所设计机器人及其控制方式能够满足横隔板与顶板典型巡检路径的通行要求。

4.2 机器人越障仿真

同样地,钢箱梁内部巡检环境中,焊缝、对接头及局部不平顺区域会对爬壁机器人的行走稳定性产生明显影响^[20]。因此,有必要对机器人在典型焊缝障碍条件下的越障过程进行仿真分析,以评估其通过能力及运动稳定性。

本文在两条U肋之间构建了弧形凸起实体,用以模拟钢箱梁顶板典型对接焊缝,并开展越障运动仿真,仿真场景如图8所示。机器人沿既定路径匀速行驶,通过焊缝障碍区域时,记录其速度及姿态角变化过程,得到的结果分别如图9和图10所示。通过对越障过程中运动参数的时程响应分析,可进一步评价机器人在焊缝扰动作用下的动态稳定性。

由图9可知,机器人在接近并跨越焊缝障碍时,整体速度出现一定幅值的波动。图中速度曲线总体呈现接近障碍时下降、跨越后恢复的变化特征。当车轮与焊缝接触时,轮-面接触条件发生突变,导

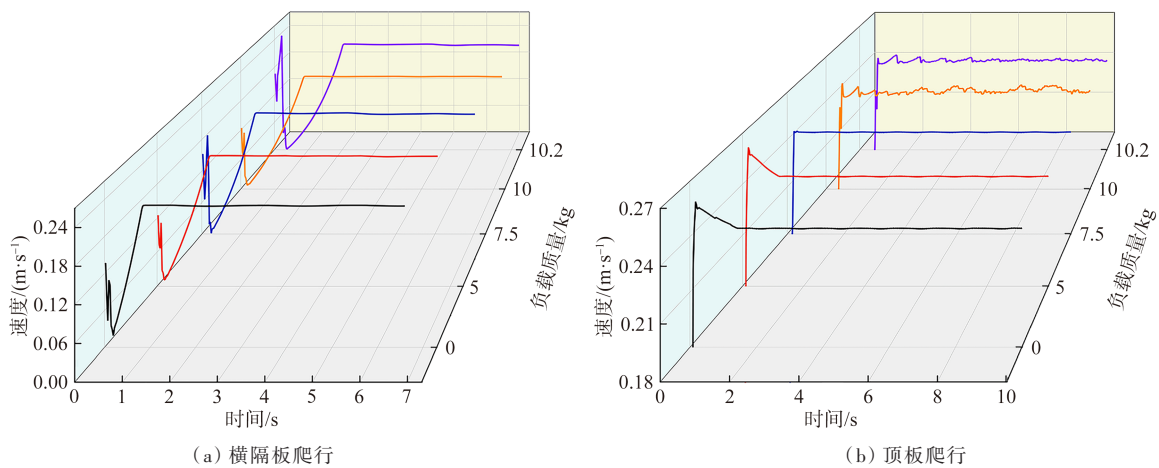


图7 不同负载下机器人的运动速度

Fig. 7 Robot movement speeds under different payloads

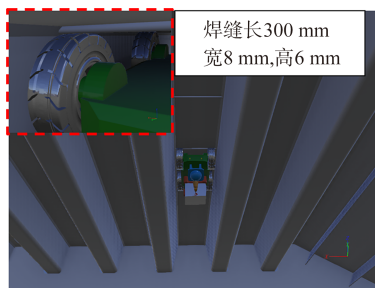


图8 机器人越障仿真

Fig. 8 Robot obstacle-crossing simulation

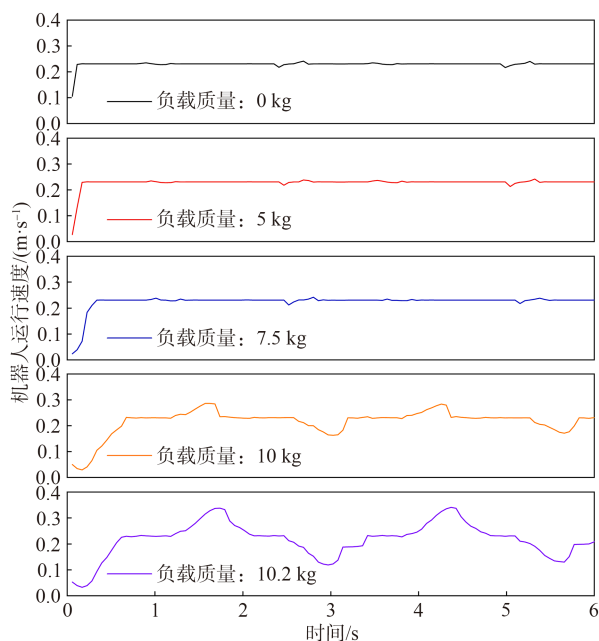


图9 越障过程中机器人速度变化曲线

Fig. 9 Velocity curves of the robot during obstacle crossing

致驱动力部分用于克服局部障碍引起的附加阻力,因此机器人速度会出现短时下降;当车轮逐步越过焊缝后,速度又逐渐恢复至原有稳定水平。另外,

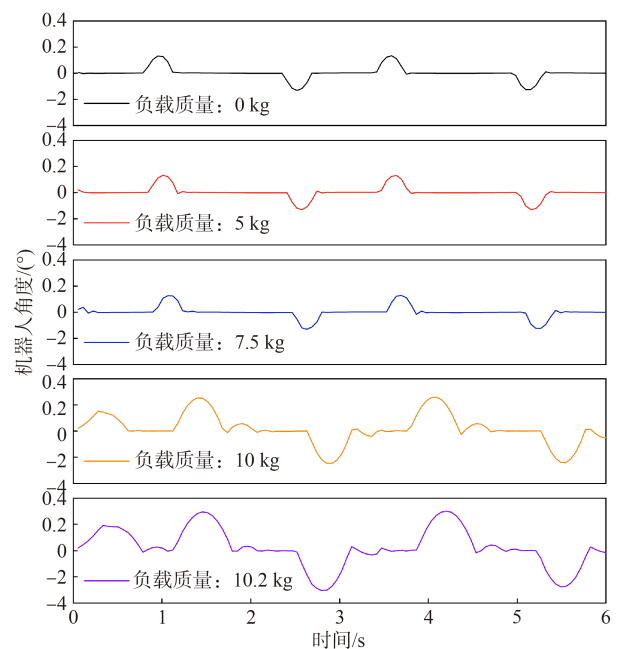


图10 越障过程中机器人角度变化曲线

Fig. 10 Angle curves of the robot during obstacle crossing

随着负载质量的增加,机器人运动速度的波动幅度也就越大,这说明焊缝障碍会对机器人运动连续性产生瞬时扰动。

由图10可知,在越障过程中,不同负载下机器人的俯仰角均出现了明显的阶段性波动,表明焊缝障碍对机器人前后方向姿态具有直接影响。图中俯仰角曲线呈现出较为明显的峰谷交替特征,这与前后车轮依次接触、跨越焊缝时车体前后端的交替抬升与回落过程相对应。整体来看,0~7.5 kg工况下俯仰角波动幅值相对较小;随着负载质量增大至10 kg和10.2 kg,俯仰角的波动幅值明显增加,局部起伏更为

剧烈,反映出高负载条件下机器人在越障过程中受到的姿态扰动更强,车体前后方向的动态响应更加显著。这说明负载增加会削弱机器人越过焊缝时的姿态稳定性,使其更容易产生前后俯仰波动。

5 结束语

本文面向钢箱梁裂纹自动化检测需求,围绕磁吸附式爬壁机器人的总体设计、受力分析与运动控制开展了系统研究。结合钢箱梁顶板、横隔板及焊缝障碍等典型巡检场景,建立了机器人静力学与动力学分析模型,并基于Webots平台对不同负载及越障工况下的运动性能进行了仿真验证。主要结论如下:

1)结合钢箱梁疲劳裂纹的典型分布位置与巡检需求,完成了磁吸附式裂纹检测机器人的总体方案设计,明确了整机尺寸、负载能力、速度范围及越障能力等关键参数,为钢箱梁内部自动化巡检装备的构建提供了基础。

2)通过对机器人开展静力学与动力学分析,得到了其在顶板和横隔板等不同工况下的最小磁吸附力需求及驱动转矩要求,为机器人结构设计、电机选型及运动控制策略制定提供了理论依据。

3)通过对机器人在不同负载和焊缝障碍条件下的运动仿真分析表明,机器人能够在横隔板与顶板表面连续运动并跨越典型焊缝障碍;随着负载增加,机器人在横隔板工况下达到稳定速度所需时间延长,速度波动幅度增大,而在顶板工况下运动相对更平稳;在较大负载下,俯仰角扰动进一步增强,后续仍需优化控制参数与执行机构,以提高复杂工况下的运行稳定性。

另外,本文研究主要基于理论建模与Webots仿真分析,尚未开展样机试验验证。后续将结合实物样机开展钢板附着、立面行走及典型焊缝越障试验,并进一步验证本文所建模型和控制参数的适用性。

参考文献

- [1] 郭健,张国良,黄健,等.大跨钢箱梁疲劳裂纹探测识别技术发展对比研究[J/OL].中国公路学报,2026[2026-03-04].
https://link.cnki.net/urlid/61.1313.u.20260304.0952.002.
- [2] GUO J, HANG D, ZHU X J. Prediction of crack propagation in U-rib components based on the Markov chain[J]. Journal of Bridge Engineering, 2020, 25(10): 04020089.
- [3] GUO J, ZHANG X W, CUI Y H. Estimation of fatigue parameters and life prediction for orthotropic steel deck based on reverse Markov theory[J]. Journal of Structural Engineering, 2025, 151(5): 04025037.
- [4] NGUYEN S T, LA H M. A climbing robot for steel bridge inspection[J/OL]. Journal of Intelligent & Robotic Systems, 2021, 102(4) [2021-07-05]. https://doi.org/10.1007/s10846-020-01266-1.
- [5] TAO B, GONG Z Y, DING H. Climbing robots for manufacturing[J]. National Science Review, 2023, 10(5): nwad042.
- [6] LI B, USHIRODA K, YANG L, et al. Wall-climbing robot for non-destructive evaluation using impact-echo and metric learning SVM[J]. International Journal of Intelligent Robotics and Applications, 2017, 1(3): 255-270.
- [7] NGUYEN S T, LA K T, LA H M. Agile robotic inspection of steel structures: a bicycle-like approach with multisensor integration[J]. Journal of Field Robotics, 2024, 41(2): 396-419.
- [8] LA H M, DINH T H, PHAM N H, et al. Automated robotic monitoring and inspection of steel structures and bridges[J]. Robotica, 2019, 37(5): 947-967.
- [9] 李心诚,傅中秋,树加凯,等.正交异性钢桥面板磁轮式攀爬机器人的结构动态设计与优化[J].中南大学学报(自然科学版),2025,56(6): 2236-2247.
- [10] 陈伟乐,朱尧于,黎啸宇,等.履带式钢箱梁内部巡检机器人病害检测系统[J].中国公路学报,2026,39(1): 99-112.
- [11] WANG R, KAWAMURA Y. Development of climbing robot for steel bridge inspection[J]. Industrial Robot: An International Journal, 2016, 43(4): 429-447.
- [12] PAGANO D, LIU D. An approach for real-time motion planning of an inchworm robot in complex steel bridge environments[J]. Robotica, 2017, 35(6): 1280-1309.
- [13] SONG W, WANG Z, WANG T, et al. A path tracking method of a wall-climbing robot towards autonomous inspection of steel box girder[J]. Machines, 2022, 10(4): 10040256.
- [14] 郭健,钟陈杰,吴继烟,等.西堠门大桥涡激振动特征分析[J].工程力学,2023,40(增刊1): 39-45.
- [15] XIAO Z G, YAMADA K, YA S, et al. Stress analyses and fatigue evaluation of rib-to-deck joints in steel orthotropic decks[J]. International Journal of Fatigue, 2008, 30(8): 1387-1397.
- [16] YA S, YAMADA K, ISHIKAWA T. Fatigue evaluation of rib-to-deck welded joints of orthotropic steel bridge deck[J]. Journal of Bridge Engineering, 2011, 16(4): 492-499.
- [17] XUE J M, CHEN J Y, STANCU A, et al. Spatial trajectory tracking of wall-climbing robot on cylindrical tank surface using backstepping sliding-mode control[J]. Micromachines, 2023, 14(3): 548.
- [18] TAKADA Y, ITO S, IMAJO N. Development of a bridge inspection robot capable of traveling on splicing parts[J]. Inventions, 2017, 2(3): 22.
- [19] JIANG Z, ZHAO Z, CHEN B, et al. Design and analysis of a passive adaptive wall-climbing robot based on five-bar mechanisms[J]. Ocean Engineering, 2024, 298: 117140.
- [20] LI J, WU J Y, TU C L, et al. Spatial positioning robotic system for autonomous inspection of LPG tanks[J]. Industrial Robot: the International Journal of Robotics Research and Application, 2023, 50(1): 70-83.