

水冷壁爬壁机器人路径跟踪研究

宋旋漩, 李静

(常州大学 机械工程学院, 江苏 常州 213100)

摘要: 准确的直线运动是水冷壁爬壁机器人完成磨损检测工作的前提, 为了保证其做直线运动, 设计了一种水冷壁爬壁机器人路径跟踪控制律; 通过建立爬壁机器人的运动学模型, 用摄像机采集水冷壁图像, 对图像处理并提取直线路径, 实现对其位姿的反馈, 再根据 Backstepping 跟踪算法设计路径跟踪控制律对机器人位姿进行控制, 同时采用 Lyapunov 稳定理论对控制律的收敛性进行验证, 最后通过 MATLAB 软件进行仿真实验, 仿真结果验证了控制律的有效性。

关键词: 爬壁机器人; 路径跟踪; Backstepping; Lyapunov; MATLAB

Research on Path Tracking of Water Wall Climbing Robot

Song Xuanxuan, Li Jing

(School of Mechanical Engineering, Changzhou University, Changzhou 213100, China)

Abstract: Accurate linear motion is the premise of the water-cooled wall climbing robot to complete the wear detection work. In order to ensure its linear motion, a water-cooled wall climbing robot path tracking control law is designed. In this paper, by establishing the kinematics model of the wall-climbing robot, the image of the water-cooled wall is captured by the camera, and the image is processed and the straight path is extracted to realize feedback on its posture. Then the path tracking control law is designed according to the Backstepping tracking algorithm to control the pose of the robot. At the same time, the convergence of the control law is verified by Lyapunov stability theory. Finally, the simulation experiment is carried out by MATLAB software. The simulation results verify the validity of the control law.

Keywords: wall-climbing robot; path tracking; backstepping; Lyapunov; MATLAB

0 引言

流化床锅炉水冷壁的磨损是锅炉的主要失效形式之一^[1-2], 为保证锅炉运行安全, 需要定期检测水冷壁的磨损程度。由于人工作业效率低且安全性系数低, 因此研制一种能自主检测水冷壁磨损的爬壁机器人是现在化工行业所急需的。

保证水冷壁爬壁机器人准确按照期望的直线路径运动是其研究的前提, 所以对其路径跟踪的研究是必不可少的。针对路径跟踪这类问题, 相关学者进行了大量研究并提出了各自的解决方案。蒋建东^[3]等提出了模糊控制的方法, 但模糊控制需要根据专家经验建立模糊规则, 若不能建立理想的模糊规则, 将影响其控制效果。张扬名^[4]等基于滑模控制方法来实现路径跟踪控制, 但由于滑模控制方法的特性使其存在“抖振”, 且无法避免, 实际控制效果不理想。

针对上述问题, 基于水冷壁爬壁机器人的运动学模型, 利用 Back-stepping 跟踪算法设计了一种水冷壁爬壁机器人路径跟踪控制律, 同时采用 Lyapunov 稳定理论对路径跟

踪控制律的收敛性进行验证, 通过对机器人速度大小的控制以及选择合适的参数, 保证其运动的稳定性。通过 MATLAB 软件进行仿真实验, 实验结果验证了该方法鲁棒性好, 自适应能力强。

1 水冷壁爬壁机器人结构

为了使水冷壁爬壁机器人能够完成磨损检测任务, 水冷壁爬壁机器人需具备三个基本功能: 吸附、运动和磨损检测功能。本实验研究的爬壁机器人采用永磁体吸附的吸附方式和履带式移动的移动方式。

如图 1 所示是水冷壁爬壁机器人的工作环境水冷管壁图。水冷壁是由钢制的水冷管焊接形成的密排管壁, 锅炉内燃烧形成的飞灰颗粒的高速冲刷会对水冷壁造成磨损, 所以需要定期检测其受磨损程度。



图 1 水冷管壁图

图 2 所示是水冷壁爬壁机器人三维图, 其本体由驱动机构, 永磁吸附机构, 超声波无损检测机构等组成。爬壁机器人通过装有特制永磁体的履带紧紧地吸附在水冷壁壁

收稿日期: 2018-12-21; 修回日期: 2019-01-09。

基金项目: 国家自然科学基金(61773078); 常州市科技支撑计划(CE20175040)。

作者简介: 宋旋漩(1995-), 男, 江苏镇江人, 硕士研究生, 主要从事机电一体化与爬壁机器人技术方向的研究。

面,驱动电机通过蜗轮蜗杆减速器带动链轮,链轮与链条啮合,从而使机器人沿着水冷管壁运动。

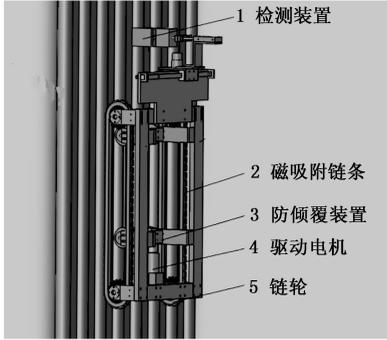


图 2 水冷壁爬壁机器人三维图

水冷壁爬壁机器人由左右两侧的驱动电机提供驱动力,由于电机本身的制造差异,导致两侧履带的速度不可能完全一致,致使机器人偏离期望路径^[5],从而影响了测量结果的可靠性。所以需要对爬壁机器人的路径识别及跟踪进行研究,动态地控制机器人的运行轨迹为期望的直线路径,保证磨损检测结果正确。

2 水冷壁爬壁机器人运动模型

根据水冷壁爬壁机器人机械结构与工作环境,为建立其空间运动模型,对爬壁机器人作出如下假设^[6]:

- 1) 在二维平面内运动;
- 2) 爬壁机器人为刚体;
- 3) 两侧履带完全一致,且中心线与运动方向垂直。

在以上假设的情况下,如图 3 所示,在 XOY 参考面上,点 $c(x_c, y_c)$ 为机器人质心坐标, θ 为机器人运动方向与参考坐标系 x 轴正向夹角,那么爬壁机器人的位姿可用 $P = [x_c, y_c, \theta]^T$ 来表示,再选择目标参考点 $k(x_k, y_k)$, d 为机器人质心 c 与目标参考点 k 的距离, α 为直线 CK 与机器人坐标系 y 轴的正向夹角。

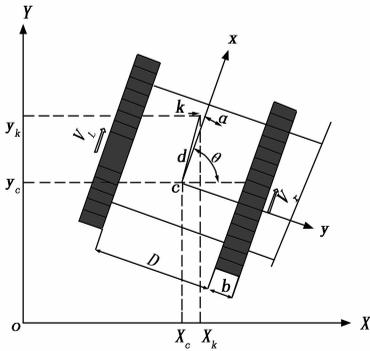


图 3 爬壁机器人运动示意图

由图 3 可得:

$$\begin{cases} x_k = x_c + d\cos(\alpha + \theta) \\ y_k = y_c + d\sin(\alpha + \theta) \end{cases} \quad (1)$$

对式 (1) 中的时间 t 求导可得:

$$\begin{cases} \dot{x}_k = \dot{x}_c - d\dot{\theta} \cdot \sin(\alpha + \theta) \\ \dot{y}_k = \dot{y}_c + d\dot{\theta} \cdot \cos(\alpha + \theta) \end{cases} \quad (2)$$

设左右履带理论速度分别为 v_L 和 v_R , 则:

$$\begin{cases} \dot{x}_c = \frac{1}{2} [v_R(1 - k_R) + v_L(1 - k_L)] \cos\theta \\ \dot{y}_c = \frac{1}{2} [v_R(1 - k_R) + v_L(1 - k_L)] \sin\theta \\ \dot{\theta} = \frac{v_R(1 - k_R) - v_L(1 - k_L)}{D + 2b} \end{cases} \quad (3)$$

其中: k_L 和 k_R 表示爬壁机器人的滑动率: $k_L = \frac{v_L - \dot{v}_L}{v_L}$,

$k_R = \frac{v_R - \dot{v}_R}{v_R}$, \dot{v}_L 和 \dot{v}_R 分别代表左右履带的绝对速度,在履带没有发生滑动的情况下,两侧履带的理论速度与绝对速度近似相等,即 $v_L = \dot{v}_L$, $v_R = \dot{v}_R$ 。

水冷壁爬壁机器人在实际工作过程中几乎不发生滑动的情况,可以将式 (3) 改写成下式:

$$\begin{cases} \dot{x}_c = \frac{1}{2} (v_R + v_L) \cos\theta \\ \dot{y}_c = \frac{1}{2} (v_R + v_L) \sin\theta \\ \dot{\theta} = \frac{v_R - v_L}{D + 2b} \end{cases} \quad (4)$$

结合式 (12) 和 (14) 可得:

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_k \\ \dot{y}_k \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{2} \cos\theta + \frac{d}{D + 2b} \sin(\alpha + \theta) & \frac{1}{2} \cos\theta - \frac{d}{D + 2b} \sin(\alpha + \theta) \\ \frac{1}{2} \sin\theta - \frac{d}{D + 2b} \cos(\alpha + \theta) & \frac{1}{2} \sin\theta + \frac{d}{D + 2b} \cos(\alpha + \theta) \\ -\frac{1}{D + 2b} & \frac{1}{D + 2b} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_L \\ v_R \end{bmatrix} \quad (5)$$

当点 K 取为点 C 时,爬壁机器人的运动学方程可写成如下:

$$\dot{P} = \begin{bmatrix} \dot{x}_c \\ \dot{y}_c \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{2} \cos\theta & \frac{1}{2} \cos\theta \\ \frac{1}{2} \sin\theta & \frac{1}{2} \sin\theta \\ -\frac{1}{D + 2b} & \frac{1}{D + 2b} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_L \\ v_R \end{bmatrix} \quad (6)$$

其中: P 表示爬壁机器人的位姿矩阵。

则爬壁机器人质心 C 处的速度可按下式表示:

$$\begin{bmatrix} v_c \\ \omega_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \\ -\frac{1}{D + 2b} & \frac{1}{D + 2b} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_L \\ v_R \end{bmatrix} = T \begin{bmatrix} v_L \\ v_R \end{bmatrix} \quad (7)$$

即:

$$\begin{bmatrix} v_L \\ v_R \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & -\frac{D+2b}{2} \\ 1 & \frac{D+2b}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_c \\ \omega_c \end{bmatrix} \quad (8)$$

结合式 (6) 和 (8), 水冷壁爬壁机器人的运动学方程也可以表示为:

$$\dot{P} = \begin{bmatrix} \dot{x}_c \\ \dot{y}_c \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta & 0 \\ \sin\theta & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_c \\ \omega_c \end{bmatrix} = H \begin{bmatrix} v_c \\ \omega_c \end{bmatrix} \quad (9)$$

3 水冷壁爬壁机器人路径识别及跟踪控制

根据上章得出的机器人空间位姿方程, 本章通过对实时图像的处理获得爬壁机器人实际空间运动轨迹, 利用 Backstepping 跟踪算法设计了一种通过调控速度控制位姿的路径跟踪控制律, 从而实现对爬壁机器人的直线路径跟踪。

3.1 水冷壁爬壁机器人路径识别

水冷壁爬壁机器人使用平行于水冷壁安装的摄像机实时拍摄水冷管壁图像, 并进行图像处理, 提取直线路径, 实现对爬壁机器人位姿的实时反馈。如图 4 所示为摄像机定位图, 其中 AB 为摄像机图像成像平面。

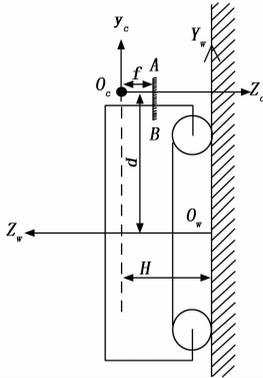


图 4 摄像机定位图

对图像的预处理首先将图像灰度化, 然后利用高斯滤波及图像二值化对图像进行预处理。图像预处理流程图如图 5 所示。

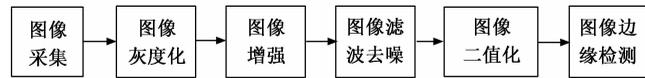


图 5 图像预处理流程图

将图像预处理以后, 通过 Hough 变换^[7]来获取图像导航参数, 提取直线路径。

利用函数 cvHoughLines2 () 在经过预处理的图像中识别出两条边界线, 当两条边界线被检测到之后, 再利用 OpenCV 中的 cvLine () 函数提取其中心线, 则提取的初始中心线即为爬壁机器人的期望直线路径。

水冷管壁图像处理如图 6 所示。其中 (a) 为对水冷管壁图像灰度处理; (b) 为进一步的滤波处理; (c) 为二值化处理; (d) 为边缘检测处理; (e) 为 Hough 检测处理;

(f) 为最后的直线路径提取。

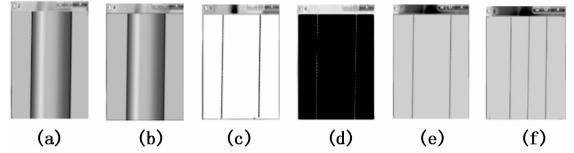


图 6 水冷管壁图像处理图

3.2 水冷壁爬壁机器人路径跟踪控制

本文水冷壁爬壁机器人路径跟踪控制律的设计在提取期望直线路径的基础上, 根据反向递推跟踪算法和 Lyapunov 稳定理论设计一种控制律 $U = [v_L \ v_R]^T$, 使爬壁机器人的路径跟踪在全局渐近稳定。

爬壁机器人位姿误差示意图如图 7 所示。

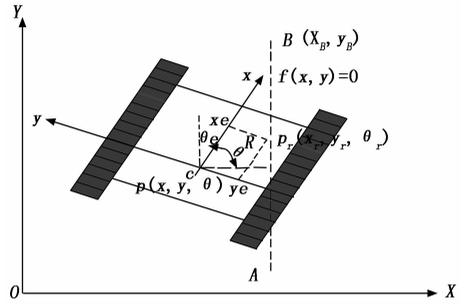


图 7 爬壁机器人位姿误差示意图

如图 7 所示, A 为机器人的初始出发点, B 作为目标点, 则 \overrightarrow{AB} 为爬壁机器人的期望直线路径, 用 $f(x, y) = 0$ 表示。

假设爬壁机器人从 A 点出发, 经过一定时间 Δt 后, 实际运动到 C 点, 此时爬壁机器人的位姿可以表示为 $p = [x \ y \ \theta]^T$, 运动速度可以用 $q = [v \ \omega]^T$ 表示。而理想运动状况下的爬壁机器人以恒定速度经 Δt 时间后沿 \overrightarrow{AB} 路径运动到 R 点, 则 R 点为机器人的参考点, 此时 R 点的参考位姿 $p_r = [x_r \ y_r \ \theta_r]^T$, 运动速度为 $q_r = [v_r \ \omega_r]^T$ 。

在爬壁机器人自身局部坐标系 xcy 下, 其实际位姿和参考位姿之间的误差, 即局部位姿误差 P_e , 通过以下坐标变换:

$$\begin{cases} x_r - x = x_c \cos\theta - y_c \sin\theta \\ y_r - y = y_c \cos\theta + x_c \sin\theta \\ \theta_r = \theta_r - \theta \end{cases} \quad (10)$$

可得到局部位姿误差:

$$P_e = \begin{bmatrix} x_c \\ y_c \\ \theta_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos\theta & \sin\theta & 0 \\ -\sin\theta & \cos\theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_r - x \\ y_r - y \\ \theta_r - \theta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (x_r - x) \cos\theta + (y_r - y) \sin\theta \\ (x - x_r) \sin\theta + (y_r - y) \cos\theta \\ \theta_r - \theta \end{bmatrix} \quad (11)$$

其中: R_c 为变换矩阵。

由式 (11) 可进而得出爬壁机器人的位姿误差微分方程^[8]为:

$$\dot{p}_e = \begin{bmatrix} \dot{x}_e \\ \dot{y}_e \\ \dot{\theta}_e \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} y_e \omega - v + v_r \cos \theta_e \\ -x_e \omega + v_r \sin \theta_e \\ \omega_r - \omega \end{bmatrix} \quad (12)$$

要控制爬壁机器人从初始点 A 沿 \overrightarrow{AB} 运动到目标点 B, 需要根据爬壁机器人当前实际位姿 $p = [x \ y \ \theta]^T$ 和理论参考位姿 $p_r = [x_r \ y_r \ \theta_r]^T$ 来确定爬壁机器人的速度 $q = [v \ \omega]^T$, 再根据式 (8) 计算得出合适的控制律 $U = [v_L \ v_R]^T$, 通过调控速度使局部位姿误差 p_e 收敛至零, 最终与期望路径一致。爬壁机器人位姿控制流程如图 8 所示。

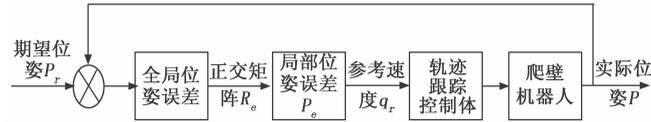


图 8 爬壁机器人位姿控制流程图

根据引理 1^[9]: 对于任意 $x (x \in \mathbb{R})$ 且满足 $|x| < \infty$, 有 $\varphi(x) = x \sin(\tan^{-1} x) \geq 0$, 当且仅当 $x = 0$ 时等号成立。

Barbalat^[10]引理: 设 $x: [0, \infty) \rightarrow \mathbb{R}$ 为一阶连续可导, 且当 $t \rightarrow \infty$ 时有极限, 则如果 $\dot{x}(t), t \in [0, \infty)$ 一致连续, 那么 $\lim_{t \rightarrow \infty} \dot{x}(t) = 0$ 。

由 Lyapunov 稳定性理论, 设系统的状态方程为:

$$\dot{x} = f(x, t) \quad (13)$$

其平衡状态为:

$$f(0, t) = 0 (t \geq t_0) \quad (14)$$

若存在函数 $V(x, t)$ 一阶偏导且连续, 并满足: (1) $V(x, t)$ 是正定的; (2) $\dot{V}(x, t)$ 是半负定的。则在状态空间原点, 系统的平衡状态是稳定的^[11]。

根据 Backstepping 跟踪算法研究设计爬壁机器人路径跟踪控制律, 具有全局收敛特性。针对误差变量 x_e , 构造虚拟反馈变量 \bar{x}_e :

$$\bar{x}_e = x_e - k_1 \sin(\arctan(\omega)) y_e \quad (15)$$

本文设计控制律的目的是在其控制输入的作用下使 x_e 趋近于 $k_1 \sin(\tan^{-1}(\omega)) y_e$, θ_e 趋于 0, 结合式 (12) 可得: $\dot{y}_e = -\omega x_e + v_r \sin \theta_e = -\omega x_e = -k_1 \omega \sin(\tan^{-1} \omega) y_e$, 其中 $k_1 > 0$, 由引理可知: $\varphi(\omega) = \omega \sin(\tan^{-1} \omega) \geq 0$, 当且仅当 $\omega = 0$ 时等号成立, 则 \dot{y}_e 为半负定一致连续函数。再由 Barbalat 引理可得, 当 $t \rightarrow \infty$ 时, $\lim_{t \rightarrow \infty} \dot{y}_e(t) = 0$, 即 y_e 间接受控并收敛于 0, 且若 $y_e \rightarrow 0$, 那么 $x_e \rightarrow 0$ 。

由此构造 Lyapunov 函数:

$$V = \frac{1}{2} \bar{x}_e^2 + \frac{1}{2} y_e^2 + 2 \left(1 - \cos\left(\frac{\theta_e}{2}\right) \right) \quad (16)$$

根据式 (16) 可得, $V \geq 0$, 当且仅当 $[x_e \ y_e \ \theta_e]^T = 0$ 时, $V = 0$ 。

对式 (15) 求导可得:

$$\begin{aligned} \dot{\bar{x}}_e &= \dot{x}_e - k_1 \cos(\tan^{-1}(\omega)) \frac{1}{1 + \omega^2} \dot{\omega} y_e - \\ &\quad k_1 \sin(\tan^{-1}(\omega)) \dot{y}_e \end{aligned} \quad (17)$$

再对式 (16) 进行求导, 则:

$$\dot{V} = \bar{x}_e \dot{x}_e + y_e \dot{y}_e + \dot{\theta} \sin\left(\frac{\theta_e}{2}\right)$$

$$\begin{aligned} \dot{V} &= \bar{x}_e (-v + v_r \cos \theta_e - k_1 \cos(\tan^{-1}(\omega)) \frac{1}{1 + \omega^2} \dot{\omega} y_e - \\ &\quad k_1 \sin(\tan^{-1}(\omega)) (-\omega x_e + v_r \sin \theta_e)) - \\ &\quad k_1 y_e^2 \omega \sin(\tan^{-1}(\omega)) + \sin\left(\frac{\theta_e}{2}\right) (\omega_r - \\ &\quad \omega + 2 y_e v_r \cos\left(\frac{\theta_e}{2}\right)) \end{aligned} \quad (18)$$

设 $t \in [0, +\infty)$, v_r 和 ω_r 都有界且不同时为 0, 则根据式 (18) 控制律可取为:

$$\begin{aligned} v &= v_r \cos \theta_e - k_1 \cos(\tan^{-1}(\omega)) \frac{1}{1 + \omega^2} \dot{\omega} y_e + \\ &\quad k_1 \sin(\tan^{-1}(\omega)) (-v_r k_1 \sin(\tan^{-1}(\omega)) \sin \theta_e + k_2 \bar{x}_e \\ \omega &= \omega_r + 2 y_e v_r \cos\left(\frac{\theta_e}{2}\right) + k_3 \sin\left(\frac{\theta_e}{2}\right) \end{aligned} \quad (19)$$

式 (19) 是根据 Lyapunov 构造的函数设计的控制律, 将其结合式 (12) 得到相关微分方程:

$$\begin{aligned} \dot{\theta} &= -2 y_e v_r \cos\left(\frac{\theta_e}{2}\right) - k_3 \sin\left(\frac{\theta_e}{2}\right) \\ \dot{y} &= -\left(\omega_r + 2 y_e v_r \cos\left(\frac{\theta_e}{2}\right) + k_3 \sin\left(\frac{\theta_e}{2}\right)\right) x_e + v_r \sin \theta_e \\ \dot{\omega} &= \dot{\omega}_r + 2(\dot{y}_e v_r + y_e \dot{v}_r) \cos\left(\frac{\theta_e}{2}\right) - \\ &\quad y_e v_r \sin\left(\frac{\theta_e}{2}\right) \dot{\theta}_e + \frac{1}{2} k_3 \cos\left(\frac{\theta_e}{2}\right) \dot{\theta}_e \end{aligned} \quad (20)$$

再把控制律 (19) 代入 (18), 整理可得:

$$\dot{V} = -k_1 y_e^2 \omega \sin(\tan^{-1}(\omega)) - k_2 \bar{x}_e^2 - k_3 \sin\left(\frac{\theta_e}{2}\right)^2 \quad (21)$$

k_1, k_2, k_3 皆为大于 0 的常数, 由引理 1 结合式 (12) 和 (15) 可得, $\varphi(\omega) = \omega \sin(\tan^{-1} \omega) \geq 0$, 显然 $\dot{V} \leq 0$, 所以函数 $V(t)$ 满足全局一致渐进稳定, 故函数 $V(t)$ 为连续可微正定且有界, 函数 \dot{V} 为负半定且一致连续, 由 Barbalat 引理可得, 当 $t \rightarrow +\infty$ 时, $\lim_{t \rightarrow \infty} \dot{V}(t) = 0$, 间接可得 $\bar{x}_e \rightarrow 0$ 和 $y_e^2 \omega \sin(\tan^{-1}(\omega)) \rightarrow 0$ 及 $\sin(\theta_e/2)^2 \rightarrow 0$, 由于 $\sin(\theta_e/2)^2 \rightarrow 0$, 即 $\theta_e \rightarrow 0$, 当 $\bar{x}_e \rightarrow 0$, 则 $\lim_{t \rightarrow \infty} x_e = k_1 \sin(\tan^{-1}(\omega)) y_e$ 。因为 v_r 和 ω_r 都有界且不同时为 0, 根据式 (19) 可得, ω 不恒等于 0, 且 $y_e^2 \omega \sin(\tan^{-1}(\omega)) \rightarrow 0$, 则 $y_e \rightarrow 0$, 反推可得 $x_e \rightarrow 0$ 。

综上所述, 利用 Lyapunov 函数设计的控制律使 p_e 有界, 即:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \|(x_e(t), y_e(t), \theta_e(t))^T\| = 0 \quad (22)$$

4 实验仿真与分析

通过 MATLAB 软件^[12]对所设计的路径跟踪控制律进行模拟仿真实验。

参考轨迹取为直线, 假设机器人的初始位姿 $P_A = (-0.3 \ 0.25\pi/12)$, 参考轨迹初始位姿 $P_B = (0.1, \pi/4)$, 期望速度为 $v_r = 0.4$ m/s, $\omega_r = 0$, 取参数 $k_1 = 1, k_2 = 3.5, k_3 = 3.5$, 经过多次实验后, 仿真结果如图 9 所示。仿真中

直线路径跟踪的位姿误差如图 10 所示。

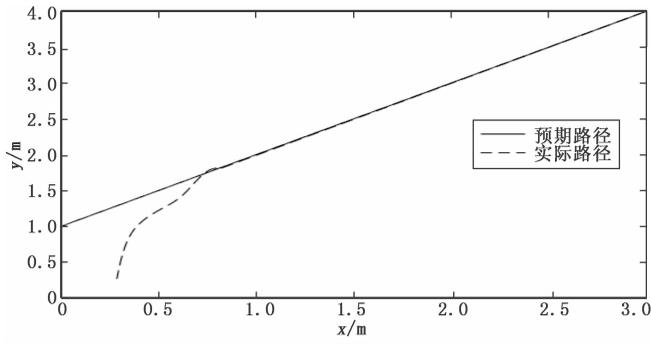


图 9 直线跟踪仿真

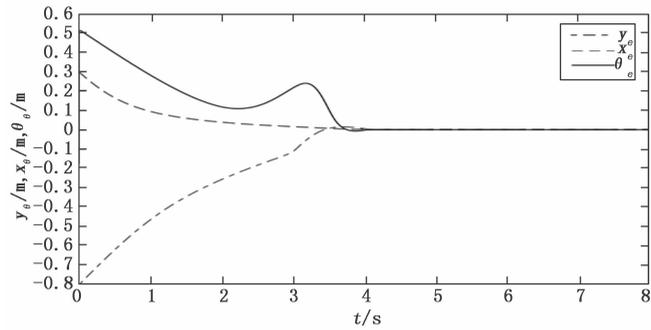


图 10 直线跟踪仿真的位姿误差

由仿真结果可以看出, 在所设计的控制律下, 水冷壁爬壁机器人能渐近跟踪给定的参考轨迹, 并在短时间内达到稳定, 验证了该控制律的可靠性。

5 结论

本文通过摄像机采集水冷管壁图像, 对图像的处理并提取导航信息参数, 实现了对水冷壁爬壁机器人直线路径的提取, 再利用 Backstepping 跟踪算法和 Lyapunov 稳定理论设计了一种水冷壁爬壁机器人路径跟踪控制律, 并利用

Matlab 软件进行了模拟仿真实验, 通过仿真结果可知该路径跟踪控制律合理可靠, 具有较高的应用价值。

参考文献:

[1] 马旭旭. 循环流化床锅炉水冷壁磨损分析及防护措施 [J]. 科技与创新, 2018 (14): 101-102.

[2] 王星海. 循环流化床锅炉水冷壁的磨损原因分析及防磨措施 [J]. 现代制造技术与装备, 2018 (5).

[3] 蒋建东, 张 钧, 李聪聪. 履带式移动机器人自主跟随算法研究 [J]. 浙江工业大学学报, 2017, 45 (4): 355-360.

[4] 张扬名, 刘国荣, 杨小亮. 基于滑模变结构的移动机器人轨迹跟踪控制 [J]. 计算机工程, 2013-5: 160-164.

[5] E Setijadi, Y Aniroh, VG Gradetsky, et al. Trajectory Tracking of a Wheeled Wall Climbing Robot Using PID Controller [A]. International Conference on Advanced Mechatronics [C]. 2015: 143-146.

[6] 武 星, 楼佩煌, 唐敦兵. 自动导引车路径跟踪和伺服控制的混合运动控制 [J]. 机械工程学报, 2011, 47 (3): 43-48.

[7] 周燕红, 范 红. 移动机器人视觉导航中基于 Hough 变换的直线检测与跟踪 [J]. 微计算机信息, 2012 (6): 129-130, 115.

[8] 任国华. 移动机器人轨迹跟踪与运动控制 [J]. 机械设计与制造, 2014 (3): 100-102.

[9] Urrea C. Path Tracking of Mobile Robot in Crops [J]. Journal of Intelligent & Robotic Systems, 2015, 80 (2): 193-205.

[10] 闵颖颖, 刘允刚. Barbalat 引理及其在系统稳定性分析中的应用 [J]. 山东大学学报 (工学版), 2007, 37 (1): 51-55.

[11] 杨 权. 智能小车的路径跟踪控制算法研究 [D]. 绵阳: 西南科技大学, 2014.

[12] 谢仕宏. MATLAB R2008 控制系统动态仿真实例教程 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2009.

(上接第 79 页)

表 1 精度测试结果对照表

	外部输入	测量显示	误差/%	备注
频率/Hz	50.000	50.001	0.002	
UA/V	57.700	57.699	-0.001	
UB/V	57.700	57.702	0.003	
UC/V	57.700	57.701	0.001	
IA/V	1.000	1.000	0	
IB/V	1.000	1.000	0	
IC/V	1.000	1.001	0.1	
UA_HARM/%	5	4.99	-0.2	谐波含有率%
UB_HARM/%	5	5.00	0	
UC_HARM/%	5	5.00	0	
IA_HARM/%	5	5.00	0	
IB_HARM/%	5	5.00	0	
IC_HARM/%	5	5.002	0.04	

指标均达到要求。收到良好的效果。电能质量控装置适用于所有非线性负荷电力客户。具有效具有广泛的推广价值,

参考文献:

[1] 沐 晖, 陆 达. 林基于 FPGA 的电能质量分析仪的设计与实现 [J]. 福建电脑, 2012 (2): 137-138.

[2] 肖湘宁. 电能质量分析与控制 [M]. 北京: 中国电力出版社, 2004.

[3] 刘 昊. 基于时域特性分析的电能质量分析与评估方法的研究 [D]. 中国矿业大学, 2009.

[4] 全球智能互联网研究院. QGDW 1650.3-1 监测终端与主站间通信协议 [Z] 2018. 10. 1.

[5] 刘海洋. 浅析大数据时代的存储可靠性增强技术 [Z]. 中科院微电子研究所汽车电子中心, 2017 (7): 28.