

基于反步设计法的四轮移动机器人运动控制研究

吴洪兵

(金陵科技学院机电工程学院, 江苏 南京 211169)

摘要: 为了对复杂环境下四轮移动机器人的运动进行控制, 根据其运行原理, 建立了四轮移动机器人的数学模型。考虑到复杂环境下四轮移动机器人的运行特点, 基于反步设计法的运动控制规律, 对四轮移动机器人的硬件系统和软件系统进行设计, 以此来提高复杂环境下对四轮移动机器人的运动控制。

关键词: 反步设计; 四轮移动机器人; 控制律; 鲁棒控制; 轨迹跟踪

中图分类号: TP24

文献标识码: A

文章编号: 1672-755X(2021)03-0034-08

Research of Motion Control System for Four-wheel Mobile Robot Based on Backstepping Design Method

WU Hong-bing

(Jinling Institute of Technology, Nanjing 211169, China)

Abstract: In order to control the movement of the four-wheel mobile robot in a complex environment, this paper establishes a mathematical method of the four-wheel mobile robot based on the operating principle of them. This paper considers the operating characteristics of the four-wheel mobile robot in a complex environment, and designs the hardware system and software system of the four-wheel mobile robot, based on the control law of the backstepping design method. This can improve the motion control of the four-wheel mobile robot in complex environment.

Key words: backstepping design; four-wheel mobile robot; control law; robust control; track tracking

移动机器人已经成为工业智能制造领域不可或缺的智能化设备^[1]。为了很好地实现机器人的自动性, 人们对机器人的灵敏度及自主性要求严格, 要求机器人可以在一段范围内稳定地移动、完成指定的工作, 并提高机器人对环境的适应性。所以, 近些年移动机器人特别是智能移动机器人成为机器人领域研究的重点之一, 机器人技术研究的重点从固定式机器人转向非结构化环境中的自主移动平台和机器人^[2-4]。

轮式移动机器人各系统之间存在强约束、高耦合、强非线性的特性。国内外有许多科研人员在理论层面对四轮移动机器人进行了深入的探索。轮式移动机器人的控制问题一直受到人们的广泛关注, 有文章针对四轮移动机器人在复杂地面行驶时的情况, 提出了通过一种新的轮心建模法来构造机器人的运动学模型^[5]。文献[6]以人工智能和机器人视觉为基础, 为无人看守的变电站提供了巡检机器人定位导航的策略。在轮式移动机器人轨迹跟踪研究中, 参数的设置尤其关键。文献[6]提出的自适应跟踪控制措施, 通

收稿日期: 2021-04-13

基金项目: 金陵科技学院高层次人才科研启动基金(jit-b-201627)

作者简介: 吴洪兵(1968—), 男, 江苏淮安人, 研究员级高级工程师, 博士, 江苏省“333”高层次人才, 主要从事故障诊断、机电一体化技术、机电综合控制技术等方面的研究。

过与传统的 PID 控制进行比较,可以很好地解决参数不确定时出现的问题。在复杂的三维平面环境下,文献[7]为了提高机器人工作的稳定性,采用遗传算法得到最适合的规避障碍的参数。文献[8]提出了导向角的概念,并将其与拉格朗日运动学模型中的角度和横向误差反推法相结合,具体讲解了硬件和软件的模块化构造,并仔细探讨了这个体系结构的机器人运动学模型和规避障碍的算法。文献[9]针对变电站智能化提出了机器人视觉导航方案。

总体而言,尽管近年来研究者在四轮移动机器人的开发和实践方面取得了丰硕的成果,但四轮移动机器人执行环境复杂且不确定,导致四轮移动机器人的移动控制变得不稳定,因而研究四轮移动机器人的运动控制来提高运动精度非常重要。本文基于反步设计法的相关理论建立了四轮移动机器人的数学模型,在环境简单、运行情况已知的情况下,根据运动学模型对四轮移动机器人运动轨迹进行跟踪控制。

1 四轮移动机器人的运动控制原理

1.1 运动学模型

本文采用的四轮移动机器人模型中,4个车轮都是驱动轮,且两两之间互不影响。在由四轮移动机器人和大地形成的闭环体系中,四轮移动机器人和外界之间最初等的作用为轮子和大地的作用。图1是四轮移动机器人模型的坐标表示。 XOY 构成的是广义坐标系; xoy 是局部坐标系,原点为四轮移动机器人的质心。四轮移动机器人质心在广义坐标系上的坐标是 (x, y) ; θ 为局部坐标系的 x 轴与广义坐标系的 X 轴的角度,它可以表示机器人的位姿角。设 v_i 为每个车轮的线速度, ω_i 为对应车轮的角速度。得到四轮移动机器人的运动学模型:

$$\dot{q} = S(q)\eta \quad (1)$$

只要改变 η 就可以改变四轮移动机器人的 q 。四轮移动机器人的控制变量是驱动电机的转速,所以需要 η 转变成 $[v_L \quad v_R]^T$ 以便进行控制:

$$\begin{cases} v = \frac{(v_L + v_R)}{2} \\ \omega = \frac{(v_L - v_R)}{b} \end{cases} \quad (2)$$

式中, b 为车轮之间距离的二分之一。可得:

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{\cos\theta}{2} & \frac{\cos\theta}{2} \\ \frac{\sin\theta}{2} & \frac{\sin\theta}{2} \\ \frac{1}{b} & -\frac{1}{b} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_L \\ v_R \end{bmatrix} \quad (3)$$

轮式移动机器人的运动均可分解为直线与圆周运动,因此本文只需要分析直线与圆周运动。在车体结构完全对称、路面无障碍且车体不滑动的条件下进行以下分析。

1.2 直线运动

四轮移动机器人执行直线运动时,根据车体角速度 ω 的不同可分为两种。当 $\omega=0$ 时,四轮移动机器人只做平动,没有自转;当 $\omega \neq 0$ 时,四轮移动机器人既有平动,又有自转。

如图1所示,四轮移动机器人直线运动的起点为 P_1 ,其位姿为 (x_1, y_1, θ_1) ,车体的运动速度为 v 。

1.3 圆周运动

在圆周运动过程中,四轮移动机器人的速度 $\dot{x}, \dot{y}$ 一直改变。图2为四轮移动机器人的圆周运动示意图。

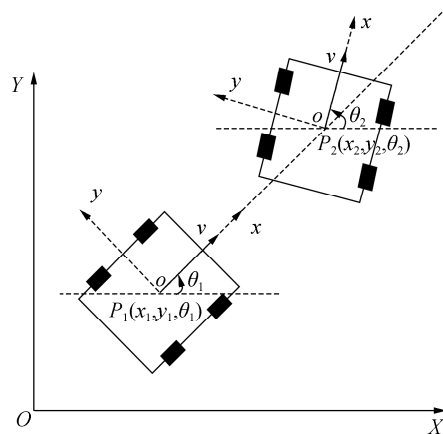


图1 四轮移动机器人运动示意图

图 2 中,假设四轮移动机器人做圆周运动,圆的半径是 r 。所以,在任意时刻 t ,四轮移动机器人车体的速度为:

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = v \sin\left(\frac{vt}{r} - \delta\right) \\ \dot{y}(t) = v \cos\left(\frac{vt}{r} - \delta\right) \end{cases} \quad (4)$$

式中, δ 为车体所在位置和圆心的连线与 X 轴的夹角。

1.4 动力学模型

动力学模型研究的是物体动态方程的建立,是一组描述物体运动和驱动力之间动态特性的数学方程。其中,四轮移动机器人的动力学模型表示的是速度和驱动电机力矩之间的作用关系,可以用式(5)表示:

$$\begin{cases} M(q)\ddot{q} + V(q, \dot{q})\dot{q} + F(q) + G(q) + \tau_d = B(q)\tau - A^T(q)\lambda \\ A(q)\dot{q} = 0 \end{cases} \quad (5)$$

式中: q 为所研究力学体系的广义坐标; $M(q)$ 为正定对称的惯性矩阵; $V(q, \dot{q})$ 为哥氏力和向心力矩阵; $F(q)$ 为摩擦力; $G(q)$ 为重力; τ_d 为未知的扰动向量; $B(q)$ 为输入变换矩阵; $\tau = [\tau_L \quad \tau_R]^T$ 为转矩输入矢量,有时等于驱动电机转矩; λ 为约束力向量,是 $A(q)\dot{q} = 0$ 时特殊的内部向量。

对时间求导可得:

$$\dot{q} = S(q)\eta + S(q)\dot{\eta} \quad (6)$$

不考虑重力和别的扰动因素,可得四轮移动机器人动力学模型:

$$\dot{\eta} = \overline{M}^{-1}(q)[\overline{B}(q)\tau - \overline{V}(q, \dot{q})\eta - \overline{F}(q, \dot{q}) - \tau_d] \quad (7)$$

进而推导出:

$$M_r(q) = \mu \frac{amg}{2} [\text{sgn}(\dot{y} - a\dot{\theta}) - \text{sgn}(\dot{y} + a\dot{\theta})] + f_r \frac{bmg}{2} [\text{sgn}(\dot{x} - b\dot{\theta}) - \text{sgn}(\dot{x} + c\dot{\theta})]$$

式中, m 为四轮移动机器人整体的重量; a, b, c 为待定系数,由系统硬件情况确定; g 为重力加速度; sgn 为阶跃函数。

2 基于反步设计法的移动机器人运动控制策略设计

2.1 反步设计法

反步设计法是一种递归设计方法,它将每个子系统 $\dot{x}_i = x_{i+1} + f_i(x_1, \dots, x_i)$ 中的 x_{i+1} 看成是虚构的控制变量,利用虚构的反馈 $x_{i+1} = a_i$ ($i = 1, \dots, n-1$),让之前的状态逐渐趋于稳定,但一般都不存在 $x_{i+1} = a_i$,所以加入误差变量,使得 x_{i+1} 与 a_i 能够逐渐相等,以使系统稳定。

首先,根据虚拟反馈变量定义 n 个误差变量。然后,对所有的子系统都编写一个 Lyapunov 函数,让所有状态变量都能够逐渐稳定。第一步,对 e_1 求导,可得:

$$\dot{e}_1 = x_2 + f_1(x_1) = -e_1 + x_1 + x_2 + \dot{f}_1(x_1) \quad (8)$$

定义 $V_1 = \frac{1}{2}e_1^2$,令 $\alpha_1 = -x_1 - f_1(x_1) \triangleq \tilde{\alpha}_1(e_1)$,可得:

$$\begin{cases} \dot{e}_1 = -e_1 + e_2 \\ \dot{e}_2 = x_3 + f_2(x_1, x_2) - \frac{\partial \tilde{\alpha}_1}{\partial e_1} e_1 \triangleq x_3 + \tilde{f}_2(e_1, e_2) \\ \dot{V}_1 = -e_1^2 + e_1 e_2 \end{cases} \quad (9)$$

这里,如果 $e_2 = 0$,即 $\alpha_1 = -x_1 - f_1(x_1)$,由式(9)可以得出 e_1 渐进稳定。但一般情况下, $e_2 \neq 0$,所以需要引入一个虚拟控制量 α_2 ,使得误差 e_2 能够渐进稳定。

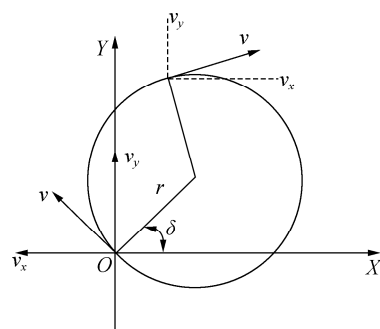


图 2 四轮移动机器人圆周运动示意图

第二步,定义 $V_2 = \frac{1}{2}e_2^2 + V_1$, 令 $\tilde{\alpha}_2 \triangleq -e_1 - e_2 + \tilde{f}(e_1, e_2)$, 即可得出:

$$\begin{cases} \dot{e}_1 = -e_1 + e_2 \\ \dot{e}_2 = -e_1 - e_2 + e_3 \\ \dot{e}_3 = x_4 + f_3(x_1, x_2, x_3) - \sum_{i=1}^2 \frac{\partial \tilde{\alpha}_2}{\partial e_i} \dot{e}_i \triangleq x_4 + \tilde{f}_3(e_1, e_2, e_3) \\ \dot{V}_2 = -e_1^2 - e_2^2 + e_1 e_2 \end{cases} \quad (10)$$

与第一步相同,如果 $e_3 = 0$, 从式(10)中可得出 e_1, e_2 是渐进稳定的。但是一般来说 $e_3 \neq 0$, 所以需要引入虚拟控制量 α_3 , 这样误差 $e_3 = x_3 - \tilde{\alpha}_3$ 就变得渐进稳定。以此办法继续, 得到函数和控制量。

第 i 步中, 定义函数和虚拟控制量如下:

$$\begin{cases} V_i = \frac{1}{2}(e_1^2 + \dots + e_i^2) \\ \tilde{\alpha}_i = -e_{i-1} - e_i + \tilde{f}_i(e_1, \dots, e_i) \end{cases} \quad (11)$$

$$\begin{cases} \dot{e}_i = e_{i+1} + \tilde{\alpha}_i(e_1, \dots, e_i) + \tilde{f}_i(e_1, \dots, e_i) = -e_{i-1} - e_i + e_{i+1} \\ \dot{V}_i = -(e_1^2 + \dots + e_i^2) + e_i[e_{i+1} + \tilde{\alpha}_i(e_1, \dots, e_i) + \tilde{f}_i(e_1, \dots, e_i)] \\ \quad = -(e_1^2 + \dots + e_i^2) + e_i e_{i+1} \end{cases} \quad (12)$$

由式(12)可得:

$$\begin{cases} \dot{e}_n = x_n + f_n(x_1, \dots, x_n) + u - \sum_{i=1}^{n-1} \frac{\partial \tilde{\alpha}_{n-1}}{\partial e_i} \dot{e}_i \triangleq \tilde{f}_n(e_1, \dots, e_n) + u \\ \dot{V}_n = -(e_1^2 + \dots + e_{n-1}^2) + e_{n-1} e_n + e_n[\tilde{f}_n(e_1, \dots, e_n) + u] \end{cases} \quad (13)$$

选用反馈控制律

$$u = \tilde{\alpha}_n(e_1, \dots, e_n) = -e_{n-1} - e_n - \tilde{f}_n(e_1, \dots, e_n) \quad (14)$$

由式(13)、(14)可得:

$$\begin{cases} \dot{e}_n = -e_{n-1} - e_n \\ \dot{V}_n = -(e_1^2 + \dots + e_n^2) \end{cases} \quad (15)$$

因此, 误差随着指数规律逐渐稳定, 非线性系统也随指数规律逐渐稳定。反步设计法实质上是一种从前向后的递归设计方法, 以完成对系统的跟踪。设计时, 经过迭代技术逐步设计 Lyapunov 函数, 引入静态的补偿, 通过前面的子系统控制才可以变得稳定。

2.2 基于反步设计法的四轮移动机器人轨迹跟踪控制律设计

四轮移动机器人轨迹跟踪控制就是使四轮移动机器人逐渐完成轨迹跟踪。全局位姿误差表示在全局坐标中参考轨迹和实际轨迹的差值, 由此能看出以局部坐标为参考的误差表达式。

$$\mathbf{e}_q = \begin{bmatrix} e_x \\ e_y \\ e_\theta \end{bmatrix} = \mathbf{T}_e(\mathbf{q}_r - \mathbf{q}) = \begin{bmatrix} \cos\theta & \sin\theta & 0 \\ -\sin\theta & \cos\theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_r - x \\ y_r - y \\ \theta_r - \theta \end{bmatrix} \quad (16)$$

以上解析表明, 轨迹跟踪控制的本质就是设计一个速度控制律以满足运动学模型, 让其在 $t \rightarrow \infty$ 时, $\mathbf{e}_q = 0$ 。

式(16)描述了具有局部位置误差的轨迹跟踪闭环控制系统, 求导能够得到四轮移动机器人位姿误差的微分方程:

$$\dot{\mathbf{e}}_q = \begin{bmatrix} \dot{e}_x \\ \dot{e}_y \\ \dot{e}_\theta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \omega e_y + v_r \cos e_\theta - v \\ -\omega e_x + v_r \sin e_\theta \\ \omega_r - \omega \end{bmatrix} \quad (17)$$

根据反步设计法的控制思想, 所有子系统都要设计 Lyapunov 函数, 再通过 Lyapunov 函数的稳定性来判断并得到四轮移动机器人轨迹跟踪控制律。

设控制系统的一般解为 $X(t) = \Phi(t; X_0, t_0)$, 设 X_e 为系统任意一个平衡点, 假定一个以 X_e 为中心、 ϵ 为半径的 n 维球域 $S(\epsilon)$, 总是可以找到一个相同的以 X_e 为中心、 $\delta(\epsilon, t_0)$ 为半径的 n 维球域 $S(\delta)$, 让 $S(\delta)$ 球域内的任意一个系统状态轨迹 $\Phi(t; X_0, t_0)$ 在 $t \geq t_0$ 的所有时间内, 都不会跑出 $S(\epsilon)$ 球域, 则称系统的平衡状态 X_e 是 Lyapunov 稳定的。

设运动学控制律的 Lyapunov 函数是:

$$V_1 = \frac{1}{2}e_x^2 + \frac{1}{2}e_y^2 + 1 - \cos e_\theta \quad (18)$$

对式(18)按照时间变量求导可得:

$$\dot{V}_1 = e_x \dot{e}_x + e_y \dot{e}_y + \sin e_\theta * \dot{e}_\theta = e_x(\omega e_y + v_r \cos e_\theta - v) + e_y(-\omega e_x + v_r \sin e_\theta) + \sin e_\theta * (\omega_r - \omega) \quad (19)$$

控制量设计为:

$$\begin{aligned} v &= V_r \cos e_\theta + k_1 e_x \\ \omega &= \dot{\theta}_r + e_y V_r + k_2 \sin e_\theta \end{aligned} \quad (20)$$

式中, $k_1 > 0, k_2 > 0$ 。所以有:

$$\dot{V}_1 = -k_1 e_x^2 - k_2 \sin^2 e_\theta \leq 0 \quad (21)$$

即 Lyapunov 稳定。

2.3 轨迹跟踪控制的策略优化

系统构建的模型总是存在着不确定性。不确定性有两类:一类来源于系统的外部,表现为不可预测干扰;另一类来源于系统内部,通常是由于对系统运行规律的认识不清导致模型与真实系统之间存在误差。对四轮移动机器人数学模型进行综合分析,能够知道机器人属于非常繁杂的非线性系统。

2.3.1 鲁棒控制

假设对象属于一个集合,给定一个控制器,如果该控制器使每个对象的对象集合都具有某种特性,则表示该控制器具有鲁棒性。鲁棒控制的函数能够让系统对所有扰动因素都有鲁棒性。

2.3.2 鲁棒轨迹跟踪控制设计

如图 3 所示,假设以局部坐标系为参考的跟踪误差是 $e_q = [e_x \ e_y \ e_\theta]^T$, 四轮驱动的四轮移动机器人跟踪控制问题可以看作是通过控制输入变量 U 而控制误差的系统, $\lim_{t \rightarrow \infty} \|e_q\| = 0$ 。

在上文分析的四轮移动机器人数学模型的基础上,系统的轨迹跟踪控制结构如图 4 所示,利用反步法设计四轮驱动的四轮移动机器人的模型,最后完成鲁棒轨迹跟踪控制。

1) 动力学控制律设计。四轮移动机器人的动力学模型简化后变成:

$$\dot{\eta} = -\overline{M}^{-1}(q)[\overline{V}(q, \dot{q})\eta + \overline{F}(q, \dot{q}) + \tau_d] + \overline{M}^{-1}(q)\overline{B}(q)\tau \quad (22)$$

参考速度记为 $[v_r \ \omega_r]^T$, 则动力学跟踪误差为:

$$e_\eta = [e_v \ e_\omega]^T = [v_r - v \ \omega_r - \omega]^T \quad (23)$$

设动力学控制器的 Lyapunov 函数如下:

$$V_2 = V_1 + \frac{1}{2}e_v^2 + \frac{1}{2}e_\omega^2 \quad (24)$$

对式(24)进行时间求导得:

$$\begin{aligned} \dot{V}_2 &= \dot{V}_1 + e_v \dot{e}_v + e_\omega \dot{e}_\omega \\ &= e_v \left(\dot{v}_r + \frac{\tau_{vd}}{m} - \frac{F_{rx}(q)}{m} - \frac{\tau_L}{mr} - \frac{\tau_R}{mr} \right) + e_\omega \left(\dot{\omega}_r + \frac{\tau_{\omega d}}{l} - \frac{1}{l} + \frac{b\tau_L}{lr} - \frac{b\tau_R}{lr} \right) \end{aligned} \quad (25)$$

设定控制律为:

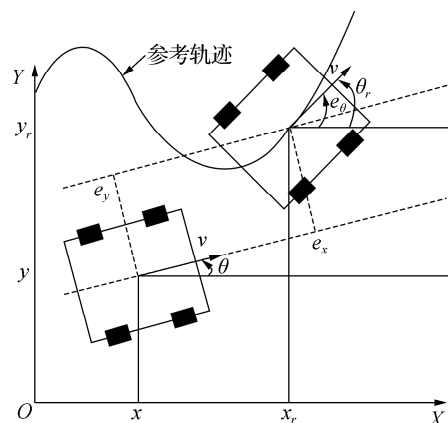


图 3 跟踪轨迹误差

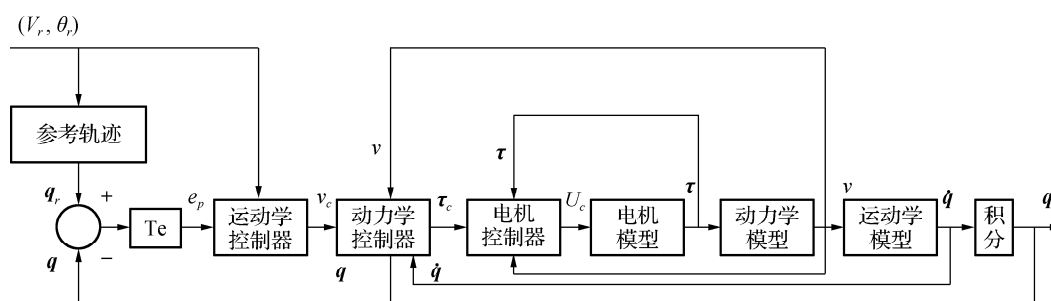


图 4 轨迹跟踪控制器的结构

$$\begin{cases} \tau_L = \frac{mr}{2} \left[\dot{v}_r + k_3 e_v - \frac{1}{m} \rho_v(\tau) \operatorname{sgn} e_v \right] - \frac{lr}{2b} \left[\dot{\omega}_r + k_4 e_\omega - \frac{1}{l} \rho_\omega(\tau) \operatorname{sgn} e_\omega \right] \\ \tau_R = \frac{mr}{2} \left[\dot{v}_r + k_3 e_v - \frac{1}{m} \rho_v(\tau) \operatorname{sgn} e_v \right] + \frac{lr}{2b} \left[\dot{\omega}_r + k_4 e_\omega - \frac{1}{l} \rho_\omega(\tau) \operatorname{sgn} e_\omega \right] \end{cases} \quad (26)$$

将式(26)代入式(25)能够得出:

$$\dot{V}_2 = \dot{V}_1 - k_3 e_v^2 - k_4 e_\omega^2 - \frac{1}{m} e_v [\rho_v(\tau) \operatorname{sgn} e_v - \tau_{vd}] - \frac{1}{l} e_\omega [\rho_\omega(\tau) \operatorname{sgn} e_\omega - \tau_{\omega d}] \leq \dot{V}_1 - k_3 e_v^2 - k_4 e_\omega^2 \leq 0 \quad (27)$$

2) 驱动电机控制律设计。将动力学控制器的输出作为期望力矩, 记作 $[\tau_{Lr} \quad \tau_{Rr}]^T$, 则驱动转矩误差为:

$$\mathbf{e}_r = [e_{rL} \quad e_{rR}]^T = [\tau_{Lr} - \tau_L \quad \tau_{Rr} - \tau_R]^T \quad (28)$$

设电机控制器的 Lyapunov 函数如下:

$$V_3 = V_2 + \frac{1}{2} e_{rL}^2 + \frac{1}{2} e_{rR}^2 \quad (29)$$

对式(29)进行时间求导得:

$$\begin{aligned} \dot{V}_3 &= \dot{V}_2 + e_{rL} \dot{e}_{rL} + e_{rR} \dot{e}_{rR} \\ &= \dot{V}_2 + e_{rL} \left(\dot{\tau}_{Lr} - \frac{2knU_L}{L} + \frac{R_{\tau_L}}{L} + \frac{2knk_e v}{L} - \frac{2knk_e b}{L} - D_L \right) + \\ &\quad e_{rR} \left(\dot{\tau}_{Rr} - \frac{2knU_R}{L} + \frac{R_{\tau_R}}{L} + \frac{2knk_e v}{L} + \frac{2knk_e b}{L} - D_R \right) \end{aligned} \quad (30)$$

能够得出:

$$\dot{V}_3 = \dot{V}_2 - k_5 e_{rL}^2 - k_6 e_{rR}^2 - \dot{e}_{rL} [\rho_D(\tau) \operatorname{sgn} \dot{e}_{rL} - D_L] - \dot{e}_{rR} [\rho_D(\tau) \operatorname{sgn} \dot{e}_{rR} - D_R] \leq \dot{V}_2 - k_5 e_{rL}^2 - k_6 e_{rR}^2 \leq 0 \quad (31)$$

当且仅当 $e_p = e_v = e_\omega = 0$ 时, $\dot{V}_3 = 0$, 由 Lyapunov 定理能够看出式(31)可以让系统逐渐稳定。

3 基于反步设计法的四轮移动机器人的运动控制系统设计

3.1 基于反步设计法的四轮移动机器人运动控制总体方案

驱动执行模块为四轮移动机器人运动功能最重要的部分, 分为驱动器与电机两块。驱动器的功能是将控制信号转换为驱动信号, 该驱动信号可以控制电机的位置、速度和转矩。伺服驱动闭环控制框如图 5 所示。

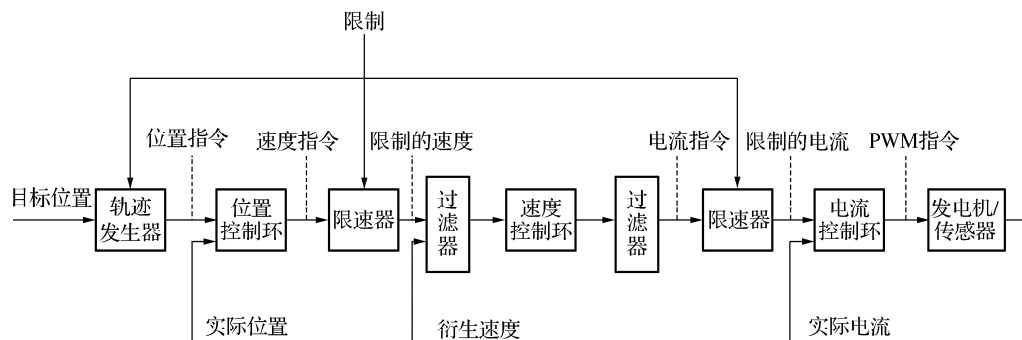


图 5 伺服驱动闭环控制框

通过四轮移动机器人控制信号使伺服电机的速度控制模块组成最简易的闭环运动控制系统,从而完成对电机电矩、转速和位移的控制。在这个过程中,伺服驱动器不仅是驱动器,也是使执行机构一直稳态运行的维稳器。所以,能将其看作是四轮移动机器人运动控制系统的底层下位机。

主控制器模块的作用就是接受来自传感器的信息,再将人机交互模块的指令结合到运动分析中。分析结果通过网络总线传输给指定的驱动执行机构,这样就形成两级分布的控制系统结构。

3.2 基于反步设计法的四轮移动机器人运动控制软件设计

基于反步设计法的四轮移动机器人系统是一种全新的分布式计算技术,它的结构(图 6)和网络结构很像,将基于反步设计法的四轮移动机器人智能体当成它的基本节点,并且节点之间互不影响。

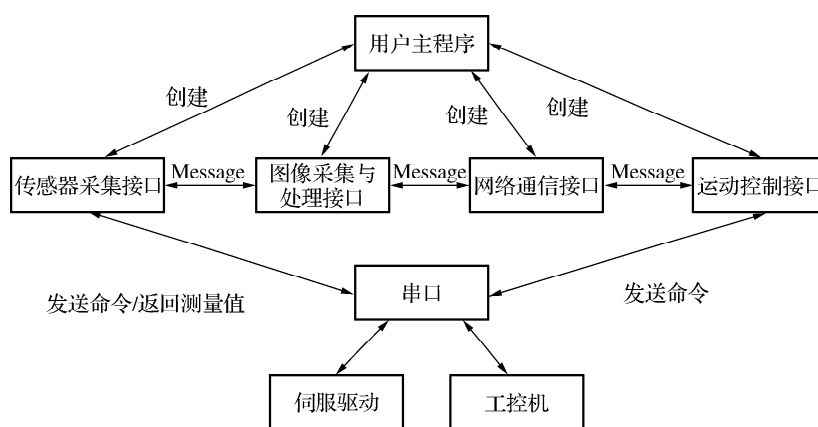


图 6 基于反步设计法的四轮移动机器人系统构架

基于反步设计法的四轮移动机器人的运动控制最重要的就是控制 4 个电动机的转速,运动控制系统在该机器人的运动表现中起着重要作用。根据上述总体方案,软件系统设计也对应地分成如图 6 所示的几个模块。

4 基于反步设计法的四轮移动机器人的运动轨迹跟踪控制仿真分析

4.1 直线轨迹跟踪

选择直线作为系统的参考轨迹。参考轨迹的起始位姿是 $(0, 0, \pi/3)$,参考速度 $\eta_r = [v_r \quad \omega_r]^T = [1.4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \quad 0 \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1}]^T$,基于反步设计法的四轮移动机器人的起始位姿是 $(0, 0, 0)$ 。

轨迹跟踪仿真结果如图 7 所示。从图中可以看出,从 $(3 \text{ cm}, 6 \text{ cm})$ 开始基于反步设计法的四轮移动机器人的运动可以跟踪直线参考轨迹。证明上文设计的控制律可以实现直线轨迹跟踪。

4.2 圆形轨迹跟踪

选择圆作为系统的参考轨迹。参考轨迹的起始位姿是 $(1, 1, \pi/2)$,参考速度 $\eta_r = [v_r \quad \omega_r]^T = [1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \quad 1 \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1}]^T$,基于反步设计法的四轮移动机器人的起始位姿是 $(0, 0, 0)$ 。

轨迹跟踪仿真结果如图 8 所示。从图中可以看出,基于反步设计法的四轮移动机器人的运动轨迹最终能够很好地跟踪到参考圆的轨迹。证明上文设计的控制律可以实现圆轨迹跟踪。

综合以上仿真结果能够得出结论:基于反步设计法的四轮移动机器人运动控制方法能够逐渐实现轨迹跟踪,位姿误差能够趋于 0,说明基于运动学模型设计的控制律是有效的。

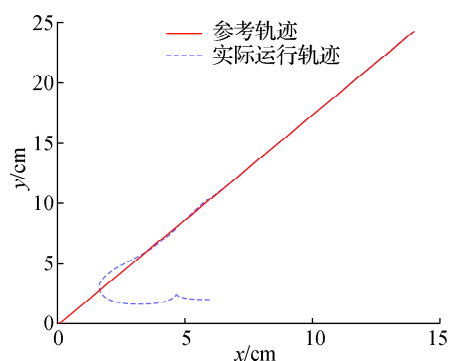


图7 直线轨迹跟踪结果

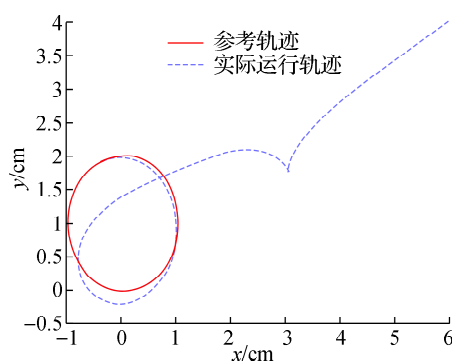


图8 圆形轨迹跟踪结果

5 结 语

基于反步设计法的四轮移动机器人的运行环境具有复杂性。本文考虑到某些不确定因素与外部环境的影响,综合运动学、动力学及驱动电机模型,以基于反步设计法的四轮移动机器人为研究对象,研究了其运动控制。主要从四轮移动机器人的运动系统入手,对其轨迹跟踪控制律进行研究,设计了基于反步法的鲁棒轨迹跟踪控制方法,以此来提高四轮移动机器人在复杂环境下的稳定性。国内对四轮移动机器人的控制研究近年来主要集中在运动学上,但是在大多数情况下,动力学问题不容忽视。本文的目的是分析和设计包括运动学和动力学在内的移动机器人的控制算法,具有一定的创新性。

参考文献:

- [1] 肖献强,程亚兵,王家恩,等. 轮式移动机器人路径跟踪控制方法研究[J]. 机械设计与制造,2021(1):256-258,262
- [2] 姜延欢,杨永军,李新良,等. 轮式移动机器人自主导航计量评价现状[J]. 计测技术,2021(2):81-86
- [3] TAHERI H,ZHAO C X. Omnidirectional mobile robots,mechanisms and navigation approaches[J]. Mechanism and Machine Theory,2020,153:103958
- [4] TAHERI H,XIA Z C. SLAM:definition and evolution[J]. Engineering Applications of Artificial Intelligence,2021,97(5):104032
- [5] 陈滢,陈炜,杨贺贺,等. 基于 backstepping 方法的两轮移动机器人轨迹跟踪控制[J]. 天津理工大学学报,2021(3):1-7
- [6] LIANG X W,WANG H S,CHEN W D,et al. Adaptive image-based trajectory tracking control of wheeled mobile robots with an uncalibrated fixed camera[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology,2015,23(6):2266-2282
- [7] 张伟,龚娇龙,张惠芳,等. 基于视觉导航的变电站智能巡检机器人的研究[J]. 陕西电力,2015(6):63-66
- [8] LEFEBER A A J. Tracking control of nonlinear mechanical systems[M]. Berlin:Springer International Publishing,2014:213-244
- [9] YANG Z,LU W T,YAO Z,et al. Neuroadaptive backstepping tracking control of robotic manipulators considering actuator dynamics[C]. Tsingtao:CCDC,2015:465-470

(责任编辑:湛 江)