

复杂干扰下的管沟机器人内外环滑模自抗扰控制

傅茂龙, 孟文, 孟祥印, 杨子懿, 罗锦泽

(西南交通大学 机械工程学院, 成都 610031)

摘要: 管沟机器人是一种运行在排水管道, 公路排水渠的欠驱动差分移动机器人, 针对管沟机器人在实际环境中受到的复杂环境干扰, 为了使管沟机器人具有更好的运动控制性能, 提出了一种内外环的滑模自抗扰控制方法; 首先对管沟受到的复杂环境干扰进行分析, 将管沟机器人受到的复杂环境干扰解耦成横向和纵向干扰, 建立出在干扰情况下的运动学模型; 依据理想运动学模型建立出外环的滑模控制器, 得出理想控制律, 依据干扰运动学模型建立扩张状态观测器, 观测出环境干扰数值, 从而建立内环的滑模控制器, 利用观测值修正外环的理想控制律; 同时利用 Lyapunov 稳定性原理对系统进行分析, 最后搭建了 Matlab 的 Simulink 模型进行仿真验证, 最终证明了所提出的方法具有较强的鲁棒性和运动控制性能。

关键词: 复杂环境干扰; 管沟机器人; 欠驱动差分移动机器人; 扩张状态观测器; 内外环滑模控制

Inner-outer Loop Sliding Mode Self-disturbance Rejection Control of Pipeline Inspection Robot Under Complex Interference

FU Maolong, MENG Wen, MEN Xiangyin, YANG Ziyi, LUO Jinze

(School of Mechanical Engineering, Southwest Jiaotong University, Chengdu 610031, China)

Abstract: A pipeline inspection robot is the under-actuated differential mobile robot that operates in drainage pipes and highway drainage channels. To improve its motion control performance affected by complex environmental disturbance in actual environments, a sliding mode self-disturbance rejection control method with inner and outer loops is proposed. Firstly, the complex environmental disturbances affecting the pipeline are analyzed and decoupled into lateral and longitudinal disturbances. Based on this, a kinematic model under the disturbance conditions is established. According to the ideal kinematic model, an outer loop sliding mode controller is built to obtain the ideal control law. Additionally, according to the disturbance kinematic model, a state observer based on the extended state is established to observe the environmental disturbance value. Then, an inner loop sliding mode controller is built to correct the outer loop ideal control law by using the observed values. The Lyapunov stability principle is used to analyze the system. Finally, the Matlab Simulink model of the system is constructed for the simulation verification. The results demonstrate that the proposed method has a strong robustness and motion control performance.

Keywords: complex environment interference; pipeline inspection robot; under-actuated differential mobile robot; extended state observer; inner-outer loop sliding mode control

0 引言

铁路涵洞, 公路排水渠和地下城市管网的排水管网发挥着至关重要的作用, 但是排水管沟的维护是一项艰巨且具有挑战性的任务, 利用机器人系统可以有效地解决该问题。管沟机器人也是一种轮式移动机器人 (WMR, wheeled mobile robot) 轮式移动机器人是一种经典的欠驱动系统, 一种经典的多输入多输出系统, 具有强耦合以及容易受到外界环境干扰的系统参数时变的自动控制系统^[1]。精准的控制是机器人完成复杂任务的基础, 由于机器人的 Brockett 约束条件的存在, 机器人无法获得连续可微, 线性时不变的控制系统^[2]。机器人的控制问题一直是近些年来热门问题, 并且也已经取得了一定的成果, 目前比较成

熟的一些控制方法有: 反步法控制^[3-4]; 反步法和模糊 PID 组合方法^[5-6]; 滑模变结构控制^[7-10], 模糊控制^[11], 神经网络控制^[12-13], 自适应控制^[14]等等。然而, 上述的这些控制方法, 都未考虑轮式移动机器人 (WMR) 的复杂环境扰动, 在实际的隧道管沟环境, 隧道管沟机器人有可能受到积水, 沉积物以及淤泥等情况, 会严重影响到隧道管沟机器人的运动控制性能。

现阶段为了解决上述的问题, 出现了一定的鲁棒控制方式: 文献^[15]提出了一种在打滑状态下的自适应控制, 利用 (RBF NN) 径向基函数, 逼近运动过程受到的滑动, 建立编队机器人的数学模型, 来适应滑动与不滑动的情况。文献^[16]针对机器人系统本身的特性, 提出具有约束状

收稿日期: 2023-03-05; 修回日期: 2023-04-07。

作者简介: 傅茂龙 (1998-), 男, 硕士研究生。

孟文 (1966-), 男, 博士, 副教授, 硕导。

通讯作者: 孟祥印 (1979-), 男, 博士, 副教授。

引用格式: 傅茂龙, 孟文, 孟祥印, 等. 复杂干扰下的管沟机器人内外环滑模自抗扰控制[J]. 计算机测量与控制, 2024, 32(1): 92-98.

态以及输入能力有限的机器人的自适应控制, 结合反步法设计出抗饱和的控制方法, 针对外界的扰动设计对应的自适应控制律, 最终证明了方法的有效性。文献 [17] 针对的是机器人本身所承受的载荷不确定的情况, 采取的是预测控制的方式, 整体机器人分为两个控制部分, 一部分是离线计算和在线调度的部分, 采用极大极小的鲁棒预测控制算法, 实现了对于机器人的跟踪控制, 证明了方法的有效性。尽管上述的方法能够在一定程度上抑制复杂环境以及机器人本身系统限制带来的影响, 也具有相对不错的系统性能, 但是上述的控制方式还是存在着一些问题: ① 自适应控制需要知道扰动的大致范围, 但实际情况无法获知; ② 对于预测控制, 需要实时计算更新速度等参量, 计算量会比较大。

对于以上的问题, 一些相关的学者提出了基于观测的思想, 利用观测到的机器人内部扰动以及外界环境扰动, 提前对扰动进行抑制, 设计出基于扰动观测器的控制律。因其观测器具有其他控制方式不具备的优点, 近些年也一直是研究的热点, 常用的扰动观测器有: 非线性指数扰动观测器; 扩张状态观测器^[18]; 慢时变干扰观测器; 广义的比例积分观测器; 文献 [19] 提出了一种基于扰动观测器的自适应跟踪控制方法, 重点是观测机器人的动力学方程中机器人内部干扰, 解决了模型中存在的 uncertain 问题, 利用观测值, 有效地提高了机器人整体性能。文献 [20] 提出了一种基于超螺旋干扰观测器的机器人控制方法, 首先基于反步法设计运动学控制律, 利用超螺旋干扰观测器观测得到的复合干扰, 配合设计的非线性滑模控制, 取得了不错的抗干扰能和跟踪性能; 文献 [1] 对比扰动建模与不建模的情况下的轨迹跟踪控制, 发现对干扰进行建模后比 PID 控制器误差更小。文献 [21] 提出了一种基于扩张状态观测器的线性自抗扰控制, 对机器人受到的总扰动进行观测, 再利用观测到的总扰动设计对应的 ADRC 控制器, 能够有效的抑制不确定因素对于机器人性能的影响, 使得机器人能够准确无误的跟踪上轨迹。

本文提出一种复杂环境干扰下的扩张状态观测器的内外环滑模变结构自抗扰控制方法。首先, 把复杂环境干扰解耦成横向与纵向的干扰, 在此基础上建立干扰下的管沟机器人的差分运动学模型。依据管沟机器人的运动学模型建立外环滑模变结构控制器, 引入非线性微分器, 求解出理想的速度与角速度控制律。设计扩张状态观测器估计机器人实际过程中受到的扰动, 利用扰动的估计值构建内环的滑模控制器, 修正外环的理论角速度与速度控制律。最后利用 Lyapunov 稳定性原理对闭环系统进行了稳定性分析, 同时搭建了 Matlab 的 Simulink 仿真实验平台, 对比三种不同的控制方法, 验证了控制方法的有效性和可靠性。

1 隧道管沟机器人差分驱动模型

如图 1 所示, 隧道管沟机器人左右两侧分别采用一个直流无刷电机进行控制, 故物理模型可以进一步简化, 如图 2 所示。

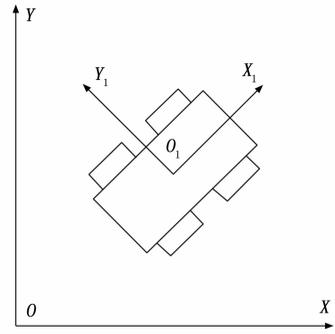


图 1 隧道管沟机器人物理模型

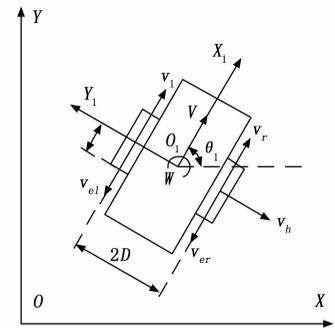


图 2 隧道管沟机器人简化物理模型

如图 2 所示, $(X \ Y \ O)$ 为全局的世界坐标系, 以隧道管沟机器人的物理几何中心作为移动坐标系的 $(X_1 \ Y_1 \ O_1)$ 的原点, X_1 作为隧道管沟机器人的横向轴, Y_1 作为机器人的纵向轴。图 2 中的 θ_1 代表了隧道管沟机器人的横向轴与世界坐标系 X 轴的夹角, 隧道管沟机器人的左右轮半径为 R , 左右两轮相距距离为 $2D$, 隧道管沟机器人的前进速度记为 V , 机器人的角速度记为 W 。隧道管沟机器人的左轮转速为 ω_l , 右轮转速为 ω_r 。将隧道管沟机器人所受到的复杂环境干扰解耦成为机器人左右轮的滑动扰动 v_{dl} 和 v_{dr} , 以及横向的扰动 v_{hl} 。

隧道管沟机器人的左右轮的线速度为 v_l 和 v_r , 依据增加复杂环境干扰的物理模型, 推出隧道管沟机器人的前进速度与角速度如下:

$$\begin{cases} V = \frac{1}{2}(v_r + v_l) + \frac{1}{2}(v_{dr} + v_{dl}) \\ W = \frac{v_r + v_l}{2D} - \frac{v_{dr} + v_{dl}}{2D} \end{cases} \quad (1)$$

依据上述公式以及解耦的复杂环境干扰, 推出机器人的运动学方程为:

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sin\theta & 0 \\ \cos\theta & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V \\ W \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} v_{hl} \sin\theta \\ -v_{hl} \cos\theta \\ 0 \end{bmatrix} \quad (2)$$

式中, $[x \ y \ \theta]^T$ 代表隧道管道机器人的状态, x 代表机器人的 X 轴位置, y 代表机器人 Y 轴位置, θ 代表机器人前进速度与 X 轴的夹角。

2 基于扩张状态观测器的内外环控制系统设计

2.1 外环速度滑模控制器设计

首先设计前进速度控制律 V , 定义理想的输入轨迹 $[x_d \ y_d]$, 目的是实现隧道管沟机器人的 x 跟踪理想的 x_d, y 跟踪理想的 y_d , 取误差方程为 $x_e = x - x_d, y_e = y - y_d$, 定义滑模面为: $s_1 = x_e, s_2 = y_e$, 则可以得到速度控制律如下:

$$\begin{cases} \dot{x} = -k_1 s_1 + \dot{x}_d \\ \dot{y} = -k_2 s_2 + \dot{y}_d \end{cases} \quad (3)$$

式中, $k_1 > 0, k_2 > 0$ 是滑模面参数。

依据上式, 即可推出理想的姿态角 θ_d 和速度控制律 V 如下:

$$\begin{cases} \theta_d = \arctan\left(\frac{\dot{y}}{\dot{x}}\right) \\ V = \frac{\dot{x}}{\cos(\theta_d)} \end{cases} \quad (4)$$

2.2 外环角速度滑模控制器设计

机器人的角速度控制器, 是由上式的姿态角 θ_d 和姿态角的微分 $\dot{\theta}_d$ 产生的, 为了确保整个闭环系统稳定, 需要保证机器人的 θ 以更快的速度跟踪 θ_d , 以至于不影响上式的控制器。本文选择的方式是角速度的收敛速度大于速度的收敛速度, 以便于达到预期的效果。

本文引入一个非线性的微分控制器, 因为在求解隧道管沟机器人的角速度控制律时, 需要对上式的 θ_d 进行求微分, 由于求导的过程较为复杂, 定义 $\theta_d = \sigma_1$, 采用如下的非线性微分器求解:

$$\begin{cases} \dot{\sigma}_1 = \sigma_2 \\ \dot{\sigma}_2 = -k_3 \cdot \text{sat}((\sigma_1 - \theta_d) + \frac{|\sigma_2|^2}{2k_3}, k_4) \end{cases} \quad (5)$$

式中, σ_1 是关于 θ_d 的跟踪信号; σ_2 是关于 $\dot{\theta}_d$ 的跟踪信号; k_3, k_4 是非线性微分器的参数; $\text{sat}(a, b)$ 有如下描述:

$$\text{sat}(a, b) = \begin{cases} \text{sign}(a) & a > b \\ \frac{a}{b} & a \leq b \end{cases} \quad (6)$$

式中, sign 是符号切换函数。

定义机器人姿态角的跟踪误差为: $\theta_e = \theta - \theta_d$ 设定角速度控制器的滑模面为: $s_3 = \theta_e$, 滑模面的趋近律为: $-\epsilon_1 s_3 - \epsilon_2 \text{sign}(s_3)$, 则可以推导角速度的控制律如下:

$$w = -k_5 s_3 - \epsilon_1 \text{sign}(s_3) + \dot{\theta}_d \quad (7)$$

式中, $k_5 > 0, \epsilon_1 > 0$ 是滑模面的参数。

综上所述, 从而保证机器人角速度 θ 能够快速跟踪上 θ_d 。

2.3 扩张状态观测器设计

重新定义机器人的跟踪误差如下:

$$\begin{cases} e_x = x - x_d \\ e_y = y - y_d \\ e_\theta = \theta - \theta_d \end{cases} \quad (8)$$

结合上述, 推导出如下的误差微分方程:

$$\begin{cases} \dot{e}_x = u_x + d_x - \dot{x}_d \\ \dot{e}_y = u_y + d_y - \dot{y}_d \\ \dot{e}_\theta = u_\theta + d_\theta - \dot{\theta}_d \end{cases} \quad (9)$$

式中, $u_x = V \cos \theta$ 代表轴的速度输入, $u_y = V \sin \theta$ 代表轴的速度输入, $u_\theta = W$ 代表机器人的角速度输入, $d_x = V_e \cos \theta + v_h \sin \theta$ 代表轴的干扰, $d_y = V_e \sin \theta - v_h \cos \theta$ 代表轴的干扰, $d_\theta = W_e$ 代表角速度的干扰。

上式中的 V_e 和 W_e 由如下表达式构成:

$$\begin{cases} V_e = \frac{1}{2}(v_{\sigma_r} + v_d) \\ W_e = \frac{1}{2D}(v_{\sigma_r} - v_d) \end{cases} \quad (10)$$

依据上述公式, 定义 $x_1 = e_x, x_2 = d_x, y_1 = e_y, y_2 = d_y, \theta_1 = e_\theta, \theta_2 = d_\theta$ 设计如下的扩张状态观测器 (ESO):

$$\begin{cases} \dot{\hat{x}}_1 = u_x + \hat{x}_2 - \dot{x}_d + \frac{\alpha_1}{\beta_1}(x_1 - \hat{x}_1) \\ \dot{\hat{x}}_2 = \frac{\alpha_2}{\beta_1}(x_1 - \hat{x}_1) \\ \dot{\hat{y}}_1 = u_y + \hat{y}_2 - \dot{y}_d + \frac{\alpha_3}{\beta_2}(y_1 - \hat{y}_1) \\ \dot{\hat{y}}_2 = \frac{\alpha_4}{\beta_2}(y_1 - \hat{y}_1) \\ \dot{\hat{\theta}}_1 = u_\theta + \hat{\theta}_2 - \dot{\theta}_d + \frac{\alpha_5}{\beta_3}(\theta_1 - \hat{\theta}_1) \\ \dot{\hat{\theta}}_2 = \frac{\alpha_6}{\beta_3}(\theta_1 - \hat{\theta}_1) \end{cases} \quad (11)$$

式中, $\hat{x}_1, \hat{x}_2, \hat{y}_1, \hat{y}_2, \hat{\theta}_1, \hat{\theta}_2$ 代表上述的 $x_1, x_2, y_1, y_2, \theta_1, \theta_2$ 的观测值, $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \alpha_4, \alpha_5, \alpha_6, \beta_1, \beta_2, \beta_3$ 作为观测器的观测增益参数。

设计观测器增益参数 $\alpha_1, \alpha_3, \alpha_5 > 0, \alpha_2, \alpha_4, \alpha_6 < 0, \beta_1, \beta_2, \beta_3 > 0$ 使得观测器系统的根轨迹全部位于复平面的左半边, 使得观测器收敛。

2.4 内环滑模变结构控制器设计

机器人内环的滑模控制是依据观测得到的 $\hat{x}_1, \hat{x}_2, \hat{y}_1, \hat{y}_2, \hat{\theta}_1, \hat{\theta}_2$, 修正外环控制器的理论速度和角速度。设计如下的滑模面:

$$\begin{cases} s_4 = x_1 \\ s_5 = y_1 \\ s_6 = \theta_1 \end{cases} \quad (12)$$

则设计的内环的控制律如下方程所示:

$$\begin{cases} u_x = -k_6 s_4 - f_x \\ u_y = -k_7 s_5 - f_y \\ u_\theta = -k_8 s_6 - f_\theta \end{cases} \quad (13)$$

式中, $f_x = x_2 - \dot{x}_d, f_y = y_2 - \dot{y}_d, f_\theta = \theta_2 - \dot{\theta}_d, k_6, k_7, k_8 > 0$ 是滑模控制器的参数。

3 控制系统稳定性分析

3.1 外环滑模控制器稳定性分析

依据上式的速度控制律方程, 已知滑模面为 $s_1 = x_e, s_2 = y_e$ 本小节以 x 为例子分析外环滑模控制器的稳定性, 假

定 x 状态的 Lyapunov 方程如下所示:

$$V_x = \frac{1}{2}s_1^2 \quad (14)$$

对 Lyapunov 方程进行求导, 得到如下公式:

$$\dot{V}_x = s_1 \dot{s}_1 = s_1(-k_1 s_1) = -k_1 s_1^2 \quad (15)$$

式中, k_1 是滑模控制器的增益, 当 $k_1 > 0$ 时, 任意时刻 $\dot{V}_x \leq 0$, 即可证明 x 的状态变量系统是稳定的。 y 的状态变量的系统分析方法和 x 类似, 即在相同的环境参数的假设下, 可以推断出 y 同样也是稳定的。

分析 θ 状态变量的角速度外环滑模控制器的稳定性, 依据上式可知滑模面为: $s_3 = \theta_e$, 定义如下的 Lyapunov 方程:

$$V_\theta = \frac{1}{2}s_3^2 \quad (16)$$

对上式进行求导, 可得如下方程:

$$\dot{V}_\theta = s_3 \dot{s}_3 = s_3(-k_3 s_3 - \epsilon_1 \text{sign}(s_3)) \quad (17)$$

式中, $\text{sign}(s_3)$ 为符号函数, 当 $s_3 \neq 0$ 时, $\text{sign}(s_3)$ 在接近 0 的范围内的可以近似看作如下方程:

$$\text{sign}(s_3) \approx \frac{s_3}{\epsilon} \quad (18)$$

式中, ϵ 是一个极小的正数

则对上式的 Lyapunov 求导结果变为如下:

$$\dot{V}_\theta = s_3 \left(-k_3 s_3 - \epsilon_1 \frac{s_3}{\epsilon} \right) = -k_3 s_3^2 - \frac{\epsilon_1}{\epsilon} s_3^2 = - \left(k_3 + \frac{\epsilon_1}{\epsilon} \right) s_3^2 \quad (19)$$

式中, $k_3 > 0, \epsilon_1 > 0, \epsilon > 0$ 能够确保在任意时刻 $\dot{V}_\theta \leq 0$, 通过利用 Lyapunov 的稳定性原理, 推断出该外环的滑模变结构控制器是稳定的。

3.2 扩张状态观测器稳定性分析

定义如下观测的误差方程:

$$\begin{cases} e_1 = x_1 - \hat{x}_1 \\ e_2 = x_2 - \hat{x}_2 \\ e_3 = y_1 - \hat{y}_1 \\ e_4 = y_2 - \hat{y}_2 \\ e_5 = \theta_1 - \hat{\theta}_1 \\ e_6 = \theta_2 - \hat{\theta}_2 \end{cases} \quad (20)$$

依据上述, 可以推出如下方程式:

$$\begin{cases} \dot{e}_1 = -\frac{\alpha_1}{\beta_1} e_1 + e_2 \\ \dot{e}_2 = -\frac{\alpha_2}{\beta_1^2} e_1 + \dot{x}_2 \\ \dot{e}_3 = -\frac{\alpha_3}{\beta_2} e_3 + e_4 \\ \dot{e}_4 = -\frac{\alpha_4}{\beta_2^2} e_3 + \dot{y}_2 \\ \dot{e}_5 = -\frac{\alpha_5}{\beta_3} e_5 + e_6 \\ \dot{e}_6 = -\frac{\alpha_6}{\beta_3^2} e_5 + \dot{\theta}_2 \end{cases} \quad (21)$$

上式方程可以改为: $\dot{E} = \bar{A}E + \bar{D}$, 其中 $E = [e_1 \ e_2 \ e_3 \ e_4 \ e_5 \ e_6]^T$, 通过设计 \bar{A} 矩阵满足 Hurwitz 条

件, 得出参数 $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \beta_1, \beta_2, \beta_3 > 0, \alpha_2, \alpha_4, \alpha_6 < 0$, 使得观测器收敛。

以下从 X 轴方向分析观测器的稳定性, Y 轴和角速度类似。

假设 $\xi_1 = (x_1 - \hat{x}_1)/\beta_1, \xi_2 = x_2 - \hat{x}_2$, 扰动的导数存在且有界 $|\dot{d}_x| \leq N$, 则可以将上述的误差方程改为:

$$\beta_1 \dot{\xi} = \vec{A}\xi + \beta_1 \vec{B}\dot{d}_x \quad (22)$$

式中, $\vec{A} = \begin{bmatrix} -\alpha_1 & 1 \\ -\alpha_2 & 0 \end{bmatrix}, \vec{B} = \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix}, \xi = [\xi_1 \ \xi_2]$.

定理 1: 对于任意给定的对称正定矩阵 Q , 存在对称正定矩阵 P , 满足如下的 Lyapunov 方程^[22]:

$$\vec{A}^T P + P \vec{A} = -Q \quad (23)$$

则可以定义观测器的 Lyapunov 方程为:

$$V_{(g)} = \beta_1 \xi^T P \xi \quad (24)$$

式中, $\xi = [\xi_1 \ \xi_2]$.

则可以推导出观测器 Lyapunov 方程导数如下:

$$\begin{aligned} \dot{V}_{(g)} &= \beta_1 \dot{\xi}^T P \xi + \beta_1 \xi^T P \dot{\xi} = \\ &(\vec{A}\xi + \beta_1 \vec{B}\dot{d}_x)^T P \xi + \xi^T P (\vec{A}\xi + \beta_1 \vec{B}\dot{d}_x) = \\ &\xi^T (\vec{A}P + P\vec{A})\xi + 2\beta_1 \xi^T P \vec{B}\dot{d}_x \leq \\ &-\xi^T Q \xi + 2\beta_1 P \vec{B} \|\xi\| |\dot{d}_x| \end{aligned} \quad (25)$$

并且有如下关系式:

$$\dot{V}_{(g)} \leq -\lambda_{\min}(Q)\xi^2 + 2\beta_1 NP \vec{B} \xi \quad (26)$$

假设 $\lambda_{\min}(Q)$ 为 Q 矩阵中最小的特征值, 由此可得 $\dot{V}_{(g)} \leq 0$ 的收敛条件为:

$$\|\xi\| \leq \frac{2\beta_1 N \|\vec{B}\|}{\lambda_{\min}(Q)} \quad (27)$$

由上式可知, 扩张状态观测器的收敛速度与参数 β_1 有关系, 随着 β_1 逐渐变小, 观测误差逐渐收敛至 0。

3.3 内环滑模变结构控制器稳定性分析

定理 2: 对于 $G: [0, \infty) \in \mathbb{R}$, 不等式方程 $\dot{G} \leq -aG + f, \forall t \geq t_0 \geq 0$ 的解为^[23]:

$$G(t) \leq e^{-a(t-t_0)} G(t_0) + \int_{t_0}^t e^{-a(t-\tau)} f(\tau) d\tau \quad (28)$$

式中, a 为任意的常数。

假设: 参数 $\tilde{s}_4 = s_4 - \hat{s}_4, \tilde{x}_2 = x_2 - \hat{x}_2, \Theta_{\max} \geq |-k_6 \tilde{s}_4 + \tilde{x}_2|$, 其中 Θ_{\max} 为观测误差的组值。

设计滑模面为: $s_4 = x_1$, 由上述可以推出:

$$u_x = -k_6 \tilde{s}_4 - \dot{\hat{x}}_2 + \dot{x}_d \quad (29)$$

选取 Lyapunov 函数为:

$$V_{(s_4)} = \frac{1}{2}s_4^2 \quad (30)$$

则可以推导出如下方程:

$$\begin{aligned} \dot{V}_{(s_4)} &= s_4 \dot{s}_4 = s_4(u_x + x_2 - \dot{\hat{x}}_d) = \\ &s_4(-k_6 \tilde{s}_4 - \dot{\hat{x}}_2 + \dot{x}_d + x_2 - \dot{\hat{x}}_d) = \\ &s_4[-k_6 \tilde{s}_4 + (x_2 - \hat{x}_2)] = -k_6 s_4^2 + s_4(-k_6 \tilde{s}_4 + \tilde{x}_2) \end{aligned} \quad (31)$$

依据上式可以推导出如下方程:

$$V_{(s_4)} \leq -k_6 s_4^2 + \frac{1}{2}(s_4^2 + \Theta_{\max}^2) \leq$$

$$-(2k_6 - 1)V_{(s_i)} + \frac{1}{2}\Theta_{max}^2 \quad (32)$$

依据定理 1 可以推出不等式方程 $-(2k_6 - 1)V_{(s_i)} + \frac{1}{2}\Theta_{max}^2$ 的解如下所示:

$$V_{(s_i)}(t) \leq e^{-(2k_6-1)(t-t_0)} V_{(s_i)}(t_0) + \frac{1}{2}\Theta_{max}^2 \int_{t_0}^t e^{-(2k_6-1)(t-\tau)} d\tau \leq e^{-(2k_6-1)(t-t_0)} V_{(s_i)}(t_0) - \frac{1}{2(2k_6-1)}\Theta_{max}^2(1 - e^{-(2k_6-1)(t-t_0)}) \quad (33)$$

当 $t \rightarrow \infty$ 时, 控制系统的收敛速度取决于滑模控制器和扩张状态观测器的参数。选取 $k_6 > 0.5$, 可以推出如下公式:

$$\lim_{t \rightarrow \infty} V_{(s_i)}(t) \leq \frac{1}{2(2k_6-1)}\Theta_{max}^2 \quad (34)$$

3.4 闭环控制系统稳定性分析

综合考虑扩张状态观测器与滑模变结构控制器的闭环系统, 设闭环系统的 Lyapunov 函数为: $V_{(q)} = V_{(g)} + V_{(s_i)}$, 则可以推导出如下方程:

$$\dot{V} \leq \frac{1}{2(2k_6-1)}\Theta_{max}^2 - \lambda_{\min}(Q)\xi^2 + 2\beta_1 NP\vec{B}\xi \quad (35)$$

闭环系统整体收敛速度取决于观测器参数与滑模控制参数, 选取合适参数使得闭环系统稳定。以上分析了 X 轴上 x 状态的稳定性, 剩下的 y, θ 控制器结构类似, 所以稳定性分析方法一致。

4 扩张状态观测器的内外环滑模自抗扰控制方法结构框图

本文设计了一个仿真对比实验, 以比较不同控制系统的性能表现。在实验中, 使用了三种不同的控制系统, 包括: PID 控制系统、不加观测器的滑模控制系统以及添加了扩张状态观测器的滑模控制系统。实验的框图如图 3 所示, 其中外环控制器得出理想的速度与角速度控制律, 并将这些控制律应用于系统中。同时, 扩张状态观测器用于观测系统所受到的扰动, 并将其反馈到系统中。内环的控制器通过观测到的扰动值对外环的速度与角速度进行修正, 从而保证整个控制系统的稳定性和鲁棒性。具体而言, 当系统受到外部扰动时, 扩张状态观测器能及时地检测到并反馈到内环的控制器中, 从而使控制器能够对速度和角速度进行实时调整, 以保证系统的性能表现。通过这样的仿真对比实验, 可以评估不同的控制系统的性能表现, 验证所提出算法的有效性。

5 仿真实验

为了验证本文提出的在复杂环境

干扰下使用扩张状态观测器的内外环滑模控制方法的有效性, 使用 Matlab 中的 Simulink 模块来搭建控制结构框图。在干扰仿真实验中, 首先引入不同程度的随机干扰信号, 然后对比测试了使用扩张状态观测器的内外环滑模控制方法和传统的 PID 控制方法在干扰环境下的表现差异, 进行仿真实验以验证控制方法的可行性。

本文选取的理想路径为: $x_d = t, y_d = \sin(0.5x_d) + 0.5x_d + 1$, 各个控制器模块的参数如表 1 所示。

表 1 控制器参数

模块	参数	数值
外环控制器	$[k_1 \quad k_2]$	$[0.4 \quad 0.4]$
	$[k_3 \quad \epsilon_1]$	$[0.4 \quad 0.3]$
扩张状态观测器	$[\alpha_1 \quad \alpha_2 \quad \beta_2]$	$[0.8 \quad -0.6 \quad 0.1]$
	$[0.8 \quad -0.6 \quad 0.1]$	$[\alpha_5 \quad \alpha_6 \quad \beta_5]$
	$[1.2 \quad -0.9 \quad 0.1]$	
内环控制器	$[k_6 \quad k_7 \quad k_8]$	$[12 \quad 12 \quad 15]$
PID 控制器	$[K_P \quad K_I \quad K_D]$	$[1.5 \quad 0.2 \quad 0.01]$

如图 4 所示, 图中展示了扩张状态观测器观测 (ESO) 的值, ESO 将机器人系统的输入和输出作为观测器的输入, 得出了对应的状态变量的观测值。可以看到观测器准确的观测出对应状态变量的值, 并且具有很好的精度, 能够有效地对管沟机器人状态进行监控。

如图 5 所示, 代表了管沟机器人的三个 X, Y, θ 状态变量, $(x_d \quad y_d \quad \theta_d)$ 是理想的机器人状态。以下是三个不同控制器的具体数值, $(x_1 \quad y_1 \quad \theta_1)$ 是不添加扩张状态观测器的滑模控制的状态变量, $(x_2 \quad y_2 \quad \theta_2)$ 是使用 PID 控制器的状态变量, $(x_3 \quad y_3 \quad \theta_3)$ 是添加 ESO 的滑模内外环自抗扰控制器的状态变量。

如图 6 所示, 图 6 代表隧道管沟机器人的实际位置,

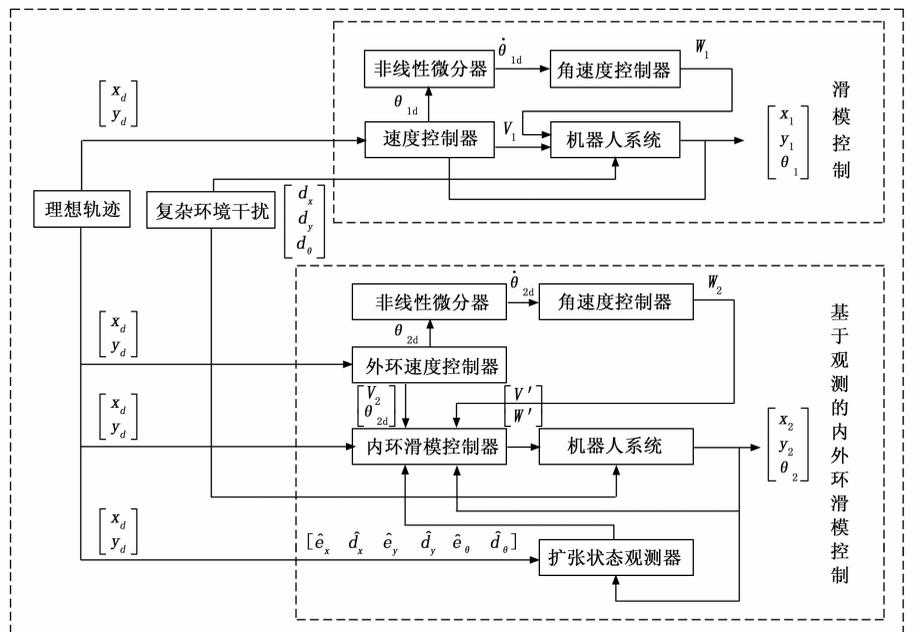


图 3 仿真实验框图

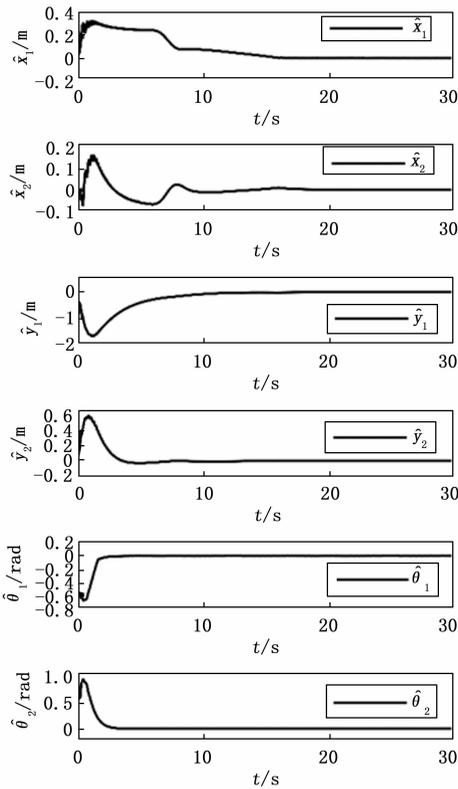


图 4 ESO 观测器观测状态变量值

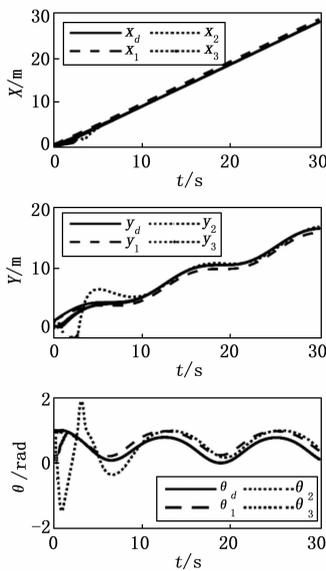


图 5 管沟机器人状态变量

图中 (x_d, y_d) 是理想的位置, (x_1, y_1) 是不添加扩张状态观测器的滑模控制器位置, (x_2, y_2) 是使用 PID 控制器的位置, (x_3, y_3) 是基于扩张状态观测器的内外环的滑模自抗扰控制的位置。

实验结果分析:

依据上述的实验结果, 可以推断出: 在这三种不同的控制方式下, 管沟机器人都表现出了不错的控制性能。但

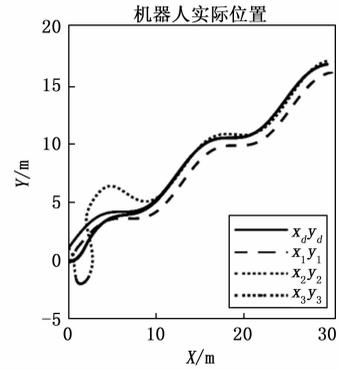


图 6 管沟机器人的实际位置

是因为扩张状态观测器能够实时的观测出机器人受到的干扰, 并且配内环的滑模控制器来修正外环的理想控制参量, 所以获得了更好的控制精度和性能。并且在仿真实验中, 基于扩张状态观测器的内外环滑模自抗扰控制对运动的轨迹和姿态角都获得了不错的控制效果。综上所述, 在实际的工作过程中, 当机器人的干扰条件和环境发生变化时, 设计的控制器依旧能够保持稳定的控制性能, 在实际工程环境中使用这种控制算法, 可以提高机器人的工作效率和鲁棒性, 助力机器人进行管沟巡检作业。

6 结束语

为解决管沟机器人在复杂干扰环境下的运动控制问题, 提出了一种基于扩张状态观测器的内外环滑模自抗扰控制方法。首先将复杂环境干扰解耦成横向和纵向的干扰参量, 并且在此基础上建立了受干扰的差分驱动运动模型。在受干扰差分运动学模型基础上, 建立了外环的滑模变结构控制器, 得出理想的速度和角速度控制律。在此同时, 建立起机器人系统的扩张状态观测器, 利用观测得到的扰动建立起内环的滑模控制器, 对外环的控制律进行修正, 增强系统的鲁棒性和运动控制精度。

利用 Lyapunov 稳定性原理分析系统, 证明了整个闭环系统的稳定性, 确保机器人系统稳定运行。同时在 Matlab 的 Simulink 中搭建了三种控制方式的仿真实验, 结果表明所设计出的扩张状态观测器的内外环滑模自抗扰控制方法具有更高的运动控制精度和更强的抗干扰性能, 能够更好的适应干扰环境下的控制需求。因此, 本文设计的控制方法具有较高的工程应用价值和研究意义。

参考文献:

[1] 王俊伟, 于新海, 温 荣, 等. 移动机器人建模和未建模扰动环境下的轨迹跟踪控制研究 [J]. 机床与液压, 2021, 49 (9): 21-27.
 [2] 于树友, 常 欢, 孟凌宇, 等. 基于扰动观测器的轮式移动机器人滚动时域路径跟踪控制 [J]. 吉林大学学报 (工学版), 2021, 51 (3): 1097-1105.
 [3] 刘成基, 陶玉帆, 郭思雯, 等. 倒立摆的自适应积分反步控制策略 [J]. 计算机应用研究, 2020, 37 (2): 452-455.

- [4] NGUYEN-THANH BINH, TUNG NGUYEN-ANH, NAM DAO-PHUONG, et al. An Adaptive Backstepping Trajectory Tracking Control of a Tractor Trailer Wheeled Mobile Robot [J]. *International Journal of Control, Automation and Systems*, 2019, 17 (2): 465–473.
- [5] 吴瑞明, 冯浩然, 傅 阳, 等. 基于模糊 PID 控制的差动 AGV 稳定性控制研究 [J]. *机床与液压*, 2022, 50 (6): 55–60.
- [6] THE-ANH MAI, DANG THAI-SON, DUONG DINH-TU, et al. A combined backstepping and adaptive fuzzy PID approach for trajectory tracking of autonomous mobile robots [J]. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 2021, 43 (3): 156.
- [7] 于华成, 艾自东. 基于终端滑模控制的移动机器人轨迹跟踪 [J]. *电子测量技术*, 2022, 45 (11): 78–82.
- [8] ZHAI JY, SONG Z B. Adaptive sliding mode trajectory tracking control for wheeled mobile robots [J]. *International Journal of Control*, 2019, 92 (10): 2255–2262.
- [9] WANG G, ZHOU CH, YU Y, et al. Adaptive sliding mode trajectory tracking control for WMR considering skidding and slipping via extended state observer [J]. *Energies*, 2019, 12 (17): 3305.
- [10] 王明明, 朱莹莹, 张 磊, 等. 麦克纳姆轮驱动的移动机器人自适应滑模控制器设计 [J]. *西北工业大学学报*, 2018, 36 (4): 627–635.
- [11] 马飞越, 周 秀, 倪 辉, 等. 基于区间二型模糊滑模的移动机器人轨迹跟踪控制 [J]. *科学技术与工程*, 2020, 20 (30): 12472–12477.
- [12] 刘杰超, 邓 琛, 丁大民, 等. 基于 MPLM-RBFNN 算法的移动机器人姿态控制方法 [J]. *传感器与微系统*, 2020, 39 (上接第 91 页)
- [13] LEE S, HWANGBO S, KIM J T, et al. Gain scheduling based ventilation control with varying periodic indoor air quality (IAQ) dynamics for healthy IAQ and energy savings [J]. *Energy and Buildings*, 2017, 153: 275–286.
- [14] 李 勇. 地铁车站环控系统控制模型研究 [J]. *建筑热能通风空调*, 2012, 31 (3): 13–16.
- [15] 贾 栋. 模糊 PID 在地铁环境控制系统中的研究和应用 [D]. 天津: 天津理工大学, 2018.
- [16] HEO S K, NAM K J, LOY-BENITEZ J, et al. A deep reinforcement learning-based autonomous ventilation control system for smart indoor air quality management in a subway station [J]. *Energy and Buildings*, 2019, 202: 109440.
- [17] NAM K J, HEO S K, LI Q, et al. A proactive energy-efficient optimal ventilation system using artificial intelligent techniques under outdoor air quality conditions [J]. *Applied energy*, 2020, 266: 114893.
- [18] 杨 福. 地铁车站动态空调负荷预测及节能调控分析 [D]. 南昌: 华东交通大学, 2021.
- [19] 温 倩. 地铁车站公共区通风空调系统节能优化研究 [D]. 西安: 西安建筑科技大学, 2021.
- (3): 68–71.
- [13] 马建伟, 石佳玉. 非完整约束移动机器人的轨迹跟踪控制 [J]. *计算机测量与控制*, 2017, 25 (3): 77–80.
- [14] 徐亦卿, 陆海澎. 基于扩张状态观测器的发动机转速双闭环自适应控制系统设计 [J]. *计算机测量与控制*, 2022, 30 (7): 123–128.
- [15] 彭 滔, 陆 群, 苏春翌. 打滑状态下的多移动机器人编队自适应控制 [J]. *控制理论与应用*, 2020, 37 (2): 439–445.
- [16] 郑文昊, 贾英民. 具有状态约束与输入饱和的全向移动机器人自适应跟踪控制 [J]. *工程科学学报*, 2019, 41 (9): 1176–1186.
- [17] 邢科新, 倪伟琦, 何德峰. 荷载不确定移动机器人视觉伺服系统鲁棒预测控制 [J]. *控制理论与应用*, 2022, 39 (2): 327–335.
- [18] 袁 帅, 陈家新, 周 宇. 基于扩张状态观测器的改进型积分滑模结构设计 [J]. *传感器与微系统*, 2021, 40 (6): 107–109.
- [19] WANG S, ZHAI JY. A trajectory tracking method for wheeled mobile robots based on disturbance observer [J]. *International Journal of Control, Automation and Systems*, 2020, 18 (8): 2165–2169.
- [20] 孔慧芳, 丁道远, 房 耀. 基于干扰观测器的移动机器人路径跟踪控制 [J]. *光电与控制*, 2021, 28 (12): 91–96.
- [21] 王会明, 张 扬, 王雪闯. 移动机器人的线性自抗扰控制设计与实验验证 [J]. *控制理论与应用*, 2022, 39 (7): 1289–1296.
- [22] 刘 豹, 唐万生. *现代控制理论* [M]. 北京: 机械工业出版社, 2006.
- [23] 刘金琨. *滑模变结构控制 MATLAB 仿真: 先进控制系统设计方法 (第 4 版)* [M]. 北京: 清华大学出版社, 2021.
- [20] LIU H, LEE S C, KIM M J, et al. Multi-objective optimization of indoor air quality control and energy consumption minimization in a subway ventilation system [J]. *Energy and Buildings*, 2013, 66: 553–561.
- [21] LI Q, LOY-BENITEZ J, HEO S K, et al. Flexible real-time ventilation design in a subway station accommodating the various outdoor PM10 air quality from climate change variation [J]. *Building and Environment*, 2019, 153: 77–90.
- [22] 陈炳文. 地铁环控系统控制方法优化研究 [D]. 西安: 长安大学, 2020.
- [23] 赵钰棠. 地铁列车调度策略研究 [D]. 兰州: 兰州交通大学, 2015.
- [24] 罗 佳. 地铁通风空调系统节能运行策略研究 [D]. 广州: 广州大学, 2015.
- [25] SEBORG D E, EDGAR T F, MELLICHAMP D A, et al. *Process dynamics and control* [M]. John Wiley & Sons, 2010.
- [26] SUNG S W, LEE J, LEE I B. *Process identification and PID control* [M]. John Wiley & Sons, 2009.
- [27] 王 晖. 南京地铁一号线南延线环控风机节能运行频率分析 [J]. *发电与空调*, 2014, 35 (2): 74–78.