

[研究·设计]

DOI:10.3969/j.issn.1005-2895.2021.03.008

阀体搬运自动导向车轨迹跟踪控制

孔宁宁, 朱海清, 李天津

(江南大学机械工程学院, 江苏无锡 214122)

摘要:为解决阀体搬运自动导向车 AGV 在移动过程中, 由于质心偏移而出现移动偏离既定轨迹的问题, 课题组在建立 AGV 运动学模型的基础上, 基于改进切换函数, 设计了滑模变结构轨迹跟踪控制器; 在此基础上, 引入了基于 Lyapunov 函数的反馈控制律, 得到了一种新型轨迹跟踪控制器。仿真结果表明: 所设计的控制器在对目标轨迹实现精确跟踪的同时, 实现了位姿误差的快速收敛, 具有良好的抗干扰能力。

关键词: 自动导向车; 轨迹跟踪; 质心偏移; 改进切换函数; Lyapunov 函数

中图分类号: TP24; TH132 **文献标志码:** A **文章编号:** 1005-2895(2021)03-0049-05

Trajectory Tracking Control of AGV for Valve Body Handling

KONG Ningning, ZHU Haiqing, LI Tianjing

(School of Mechanical Engineering, Jiangnan University, Wuxi, Jiangsu 214122, China)

Abstract: In order to solve the problem that the automatic guided vehicle (AGV) for valve body handling deviates from the given trajectory due to the centroid deviation in the process of moving, a sliding mode variable structure trajectory tracking controller was designed by the research group based on the AGV kinematics model and improved switching function. On this basis, the feedback control law based on Lyapunov function was introduced, and a new trajectory tracking controller was obtained. The simulation results show that the designed controller can track the target trajectory accurately and achieve the fast convergence of pose error, and has good anti-jamming ability.

Keywords: AGV (Automatic Guide Vehicle); trajectory tracking; centroid deviation; improved switching function; Lyapunov function

安全阀作为一种防超压保护装置, 是承压设备内必不可少的安全附件, 每年至少需要校检一次。安全阀规格种类多, 口径从 DN8 到 DN500 不等, 质量大的安全阀接近 1 t, 然而大多数办公用房内无法装备行车等吊装设备, 因此常常使用阀体搬运 AGV 搬运安全阀。由于阀体搬运 AGV 的非完整特性, AGV 在移动过程中, 会出现车体质心位置与几何中心不完全重合的现象, 这会导致 AGV 在移动过程中偏离既定轨迹。因此提高 AGV 的底层轨迹跟踪控制能力有助于其实现更高层次的任务。

为了实现 AGV 精确地轨迹跟踪, 国内外学者采取了多种控制方法, 取得了许多重要的研究成果。目前

主流的控制方法有 PID 控制、Backstepping 控制、滑模控制及智能控制等^[1-7]。但是很多研究都是在 AGV 无质心偏移的理想状态下设计的控制律, 对质心偏移下的 AGV 轨迹跟踪控制研究相对较少。然而自动导引小车处在非结构化的环境中, 会有各种外部干扰等不确定性因素, 因而很多应用在确定模型基础上的控制方法很难实现预期的控制效果^[8]。课题组针对运动学模型下质心偏移的阀体搬运 AGV, 基于改进切换函数, 设计了滑模变结构控制器; 在此基础上, 引入了基于 Lyapunov 函数的反馈控制律, 得到了一种新型轨迹跟踪控制器, 最后应用 MATLAB/Simulink 软件对控制器进行了仿真实验验证。

收稿日期: 2020-09-26; 修回日期: 2021-04-09

第一作者简介: 孔宁宁(1996), 男, 山东邹城人, 硕士研究生, 主要研究方向为机电一体化及特种机器人。E-mail: kn5945@126.com

1 AGV 的结构及运动学模型

1.1 阀体搬运 AGV 的系统结构

研究对象是课题组设计的阀体搬运 AGV,其结构如图 1 所示。该设备主要由车体、承载装置、控制系统、安全防护系统、运动系统和传感检测系统构成。AGV 的运动系统由 2 个同轴驱动轮和若干个起平衡作用的万向轮组成,采用差速驱动的方式驱动车体转向。

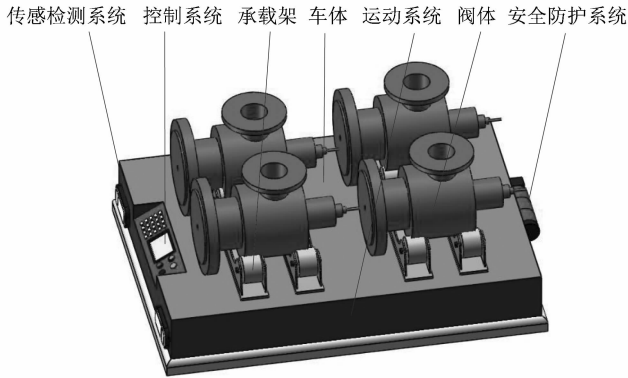


图 1 阀体搬运 AGV 结构示意图

Figure 1 Structure diagram of AGV valve body handling

1.2 AGV 的运动学建模

阀体搬运 AGV 运动学模型如图 2 所示。该模型是在 AGV 质心和几何中心不重合的非理想状态下建立的,AGV 的运动状态可由 D 点坐标反映。 d 为 AGV 质心 c 与几何中心 D 之间的距离。

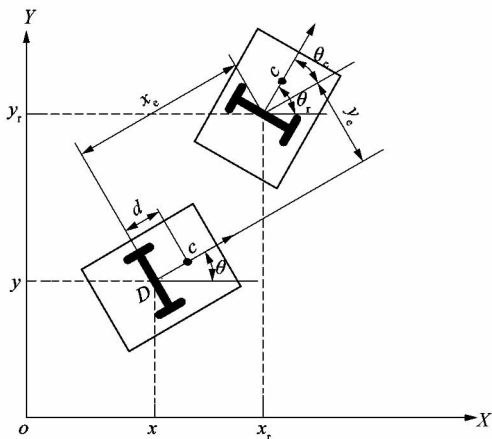


图 2 AGV 运动模型示意

Figure 2 Schematic diagram of AGV motion model

设实际位姿 $P = (x, y, \theta)^T$, 控制输入 $q = (v, w)^T$ 。其中: (x, y) 为车体几何中心 D 点坐标; v 为线速度; w 为角速度; θ 为机器人运动方向和 X 轴夹角。

因此阀体搬运 AGV 的运动学模型为

$$\dot{P} = \begin{bmatrix} \dot{x} \\ \dot{y} \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & -d \sin \theta \\ \sin \theta & d \cos \theta \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} v \\ w \end{bmatrix}. \quad (1)$$

设理想位姿 $P_r = (x_r, y_r, \theta_r)^T$, 速度指令 $q_r = (v_r, w_r)^T$ 。从 P 移动到 P_r 所产生的误差 $P_e = (x_e, y_e, \theta_e)^T$ 。因此,位姿误差方程为

$$P_e = \begin{bmatrix} x_e \\ y_e \\ z_e \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta & 0 \\ -\sin \theta & \cos \theta & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_r - x \\ y_r - y \\ \theta_r - \theta \end{bmatrix}. \quad (2)$$

对式(2)求导并结合式(1),可得位姿误差微分方程:

$$\dot{P}_e = \begin{bmatrix} \dot{x}_e \\ \dot{y}_e \\ \dot{\theta}_e \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} y_e \omega - v + v_r \cos \theta_e - d \omega_r \sin \theta_e \\ -x_e \omega - d \omega + v_r \sin \theta_e + d \omega_r \cos \theta_e \\ \omega_r - \omega \end{bmatrix}. \quad (3)$$

由式(3)所建立的质心偏移下阀体搬运 AGV 的运动学位姿误差微分方程,通过设计合适的控制输入 $q = (v, w)^T$, 无论 AGV 初始状态时的误差是多少,在输入 q 的作用下从实际位姿移动到理想位姿时产生的误差 P_e 有界且收敛,即

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \| (x_e, y_e, \theta_e) \| = 0.$$

2 跟踪控制器的设计

2.1 切换函数的设计

引理:对任意 $x \in R$ 且 $|x| < \infty$, 有

$$\varphi(x) = x \sin(\arctan x) \geq 0,$$

当且仅当 $x = 0$ 时“=”成立^[9]。根据此引理,设 $x_e =$

$$\frac{\omega}{\sqrt{1 + \omega^2}} \cdot y_e, \text{ 考察 Lyapunov 函数, 即}$$

$$V_y = \frac{1}{2} y_e^2.$$

$$\begin{aligned} \text{假设 } \theta_e = -\arctan(v_r y_e), \text{ 有 } \dot{V}_y &= y_e \dot{y}_e = y_e (-x_e \omega - d \omega + v_r \sin \theta_e + d \omega_r \cos \theta_e) \\ &= -\frac{y_e^2 \omega^2}{\sqrt{1 + \omega^2}} - d \omega y_e - v_r y_e \cdot \sin(\arctan(v_r y_e)) + d \omega_r y_e \cos(\arctan(v_r y_e)) \\ &\leq -\frac{y_e^2 \omega^2}{\sqrt{1 + \omega^2}} - d \omega y_e - v_r y_e \sin(\arctan(v_r y_e)) + d \omega_r y_e \\ &= -\frac{y_e^2 \omega^2}{\sqrt{1 + \omega^2}} - v_r y_e \sin(\arctan(v_r y_e)) + d y_e \dot{\theta}_e. \end{aligned}$$

$$\text{又 } \dot{\theta}_e = -\frac{v_r + y_e}{1 + (v_r y_e)^2} \leq 0, \text{ 所以 } \dot{V}_y \leq 0.$$

由以上结论,设计切换函数:

$$s = \begin{bmatrix} s_1 \\ s_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x_e - \frac{\omega}{\sqrt{1+\omega^2}} \cdot y_e \\ \theta_e + \arctan(v_r y_e) \end{bmatrix}. \quad (4)$$

因此,当 s_1, s_2 趋于 0 时,可以实现 x_e 收敛到 $\frac{\omega}{\sqrt{1+\omega^2}} y_e$, θ_e 收敛到 $-\arctan(v_r y_e)$, 于是 y_e 可以收敛到 0, 由此可以推出 x_e 和 θ_e 最终都会趋于 0。

2.2 新型轨迹跟踪控制器

取等速趋近律 $\dot{s} = -\varepsilon \operatorname{sgn}(s)$ 。其中, ε 为大于 0

$$\dot{s} = \begin{bmatrix} \dot{s}_1 \\ \dot{s}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\varepsilon_1 \frac{s_1}{\sqrt{1+s_1^2}} \\ -\varepsilon_2 \frac{s_2}{\sqrt{1+s_2^2}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \dot{x}_e - \frac{\dot{\omega}}{(\sqrt{1+\omega^2})^3} y_e - \frac{\omega}{\sqrt{1+\omega^2}} \dot{y}_e \\ \dot{\theta}_e + \frac{\partial \alpha}{\partial v_r} \dot{v}_r + \frac{\partial \alpha}{\partial y_e} \dot{y}_e \end{bmatrix}. \quad (6)$$

代入式(3)经整理得:

$$\begin{bmatrix} v \\ \omega \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} y_e \omega + v_r \cos \theta_e - d \omega_r \sin \theta_e - \frac{\dot{\omega}}{(\sqrt{1+\omega^2})^3} y_e - \frac{\omega}{\sqrt{1+\omega^2}} \dot{y}_e + \varepsilon_1 \frac{s_1}{\sqrt{1+s_1^2}} \\ \frac{\omega_r + \frac{\partial \alpha}{\partial v_r} \dot{v}_r + \frac{\partial \alpha}{\partial y_e} (v_r \sin \theta_e + d \omega_r \cos \theta_e) + \varepsilon_2 \frac{s_2}{\sqrt{1+s_2^2}}}{1 + \frac{\partial \alpha}{\partial y_e} (x_e + d)} \end{bmatrix}. \quad (7)$$

现引入 Lyapunov 反馈控制律:

$$\begin{bmatrix} v_b \\ \omega_b \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} k_2 [x_e + d(1 - \cos \theta_e)] \\ k_1 v_r (y_e - d \sin \theta_e) + k_3 \sin \theta_e \end{bmatrix}. \quad (8)$$

式中: k_1, k_2 和 k_3 为正常数。

得到新型轨迹跟踪控制律:

$$\begin{bmatrix} v_n \\ \omega_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} y_e \omega + v_r \cos \theta_e - d \omega_r \sin \theta_e - \frac{\dot{\omega}}{(\sqrt{1+\omega^2})^3} \cdot y_e - \frac{\omega}{\sqrt{1+\omega^2}} \cdot \dot{y}_e + \varepsilon_1 \frac{s_1}{\sqrt{1+s_1^2}} + k_2 [x_e + d(1 - \cos \theta_e)] \\ \frac{\omega_r + \frac{\partial \alpha}{\partial v_r} \dot{v}_r + \frac{\partial \alpha}{\partial y_e} (v_r \sin \theta_e + d \omega_r \cos \theta_e) + \varepsilon_2 \frac{s_2}{\sqrt{1+s_2^2}}}{1 + \frac{\partial \alpha}{\partial y_e} (x_e + d)} + k_1 v_r (y_e - d \sin \theta_e) + k_3 \sin \theta_e \end{bmatrix}; \quad (9)$$

其中: $\frac{\partial \alpha}{\partial v_r} = \frac{y_e}{1 + (v_r y_e)^2}$; $\frac{\partial \alpha}{\partial y_e} = \frac{v_r}{1 + (v_r y_e)^2}$ 。

3 仿真实验

为验证课题组设计的控制律式(9)的有效性,在 MATLAB/Simulink 环境下,针对圆轨迹进行仿真。取控制器参数 $\varepsilon_1 = \varepsilon_2 = 50, k_1 = 10, k_2 = 24, k_3 = 10$, 质心偏移量 $d = 0.3 \text{ m}$ 。设置初始位姿误差为 $[3, 0, 0]$, $v_r = 1.0 \text{ m/s}, w_r = 1.0 \text{ rad/s}$ 。

仿真结果图 3~6 表明,课题组所设计的控制律能够很好地实现轨迹跟踪效果,位姿误差在不到 5 s 的时间里均能平稳地进入稳态并逐渐收敛到 0。

的常数。

为了消除移动机器人从初始状态切换到滑模平面出现的抖振,现将 $\operatorname{sgn}(s)$ 替换为 s 型连续函数

$\frac{s}{\sqrt{1+s^2}}$ 。于是有:

$$\dot{s}_i = -\varepsilon_i \frac{s_i}{\sqrt{1+s_i^2}}, i = 1, 2. \quad (5)$$

令 $\alpha = \arctan(v_r y_e)$, 由式(4)~(5)可得:

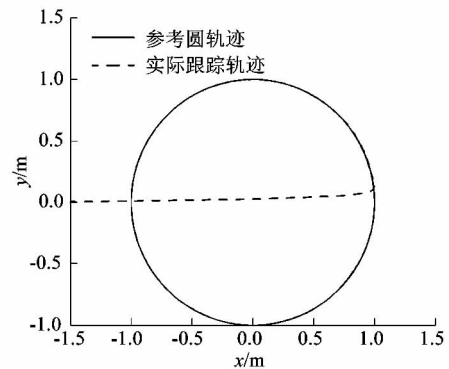


图3 轨迹跟踪

Figure 3 Trajectory tracking

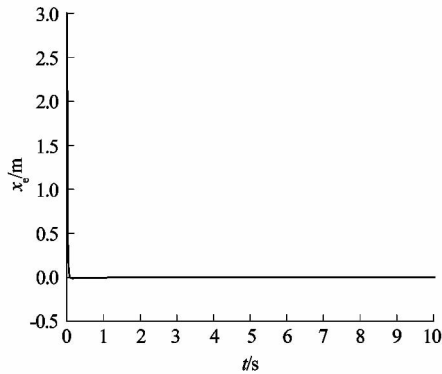
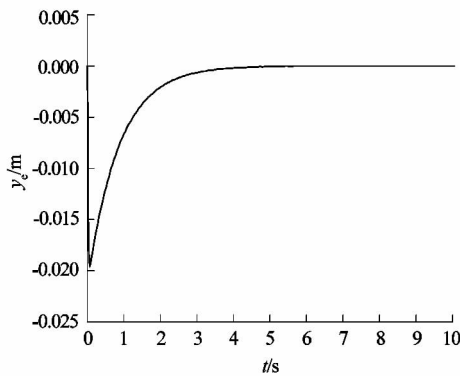
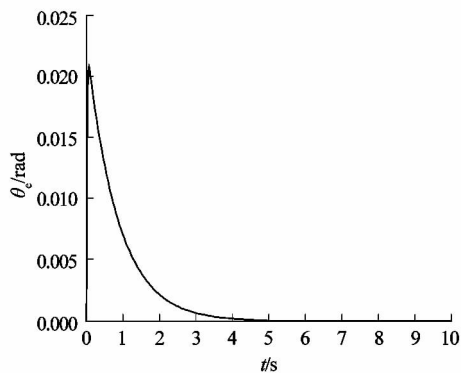
图4 x 轴方向误差Figure 4 Axis error in x direction图5 y 轴方向误差Figure 5 Axis error in y direction

图6 航向角误差

Figure 6 Heading angle error

为突出控制律式(9)的优势,同样设置初始位姿误差为 $[3, 0, 0]$, $v_r = 1.0 \text{ m/s}$, $w_r = 1.0 \text{ rad/s}$, 取上节同样的参数, 质心偏移量 $d = 0$ 。对参考文献[10]中的控制律和课题组设计的控制器进行仿真对比。

从图7和图8的对比可以看出,采用课题组所设计的控制律可以更精确地实现对目标轨迹的跟踪。图9~11表明在课题组设计的控制律的作用下, x 轴方向误差收敛速度比文献[10]中提前了1 s左右, y 轴方向和航向角误差均提前了3 s左右,并且能够更加精确地达到预期目标。

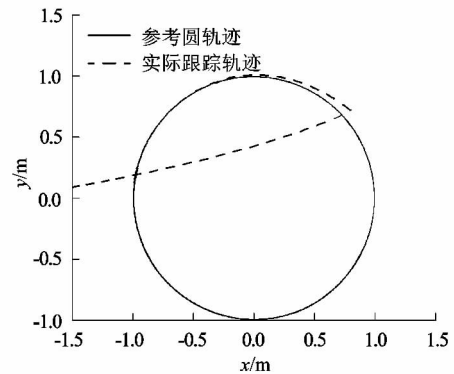


图7 参考文献[10]中控制器

Figure 7 Controller in reference [10]

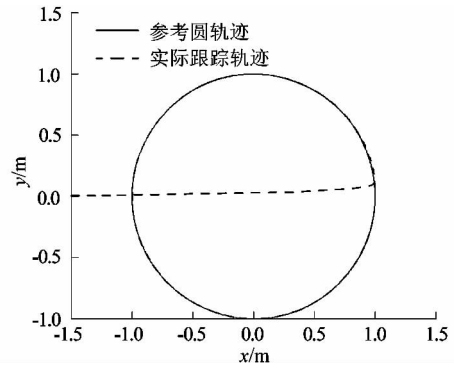
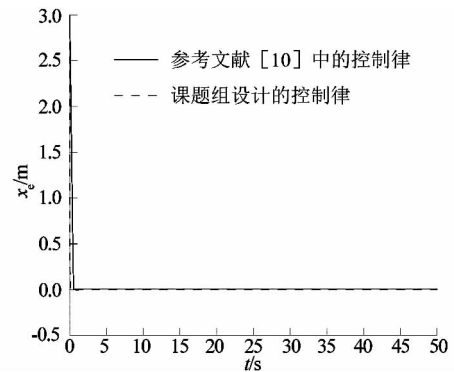


图8 本设计中的控制器

Figure 8 Controller designed in this paper

图9 x 轴方向误差Figure 9 Axis error in x direction

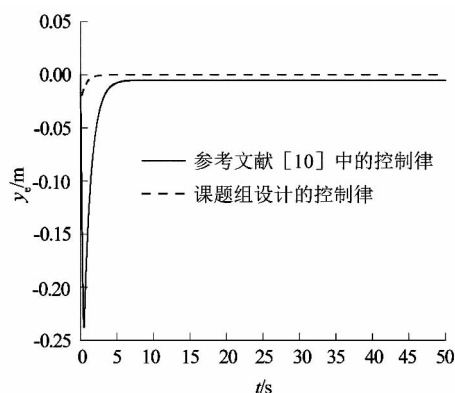
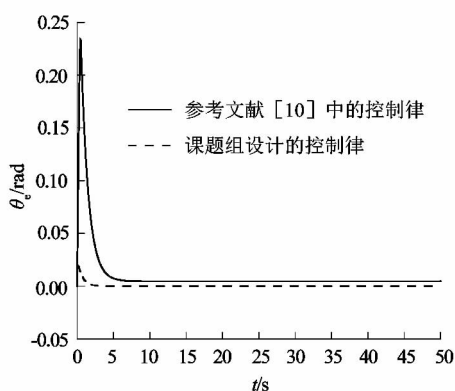
图 10 y 轴方向误差Figure 10 Axis error in y direction

图 11 航向角误差

Figure 11 Heading angle error

4 结语

课题组针对质心偏移的阀体搬运 AGV 运动学模型,在改进滑模切换函数的基础上,引入了基于 Lyapunov 函数的反馈控制律,提出的新型轨迹跟踪控制律计算简单,有效的提高了阀体搬运 AGV 的轨迹跟踪精度,使其移动轨迹能够平滑快速地逼近目标轨迹,

具有很强的鲁棒性和稳定性,为其它质心偏移的轮式移动机器人轨迹跟踪控制器的设计提供了参考。未来如何优化控制算法中的参数将是今后研究的一个重点。另外本研究中的控制器是基于 AGV 运动学模型设计的,有关动力学特性对质心偏移 AGV 轨迹跟踪的影响还有待进一步研究。

参考文献:

- [1] 赵涛,刘明雍,周良荣. 移动机器人的轨迹跟踪控制新方法[J]. 火力与指挥控制,2010,35(11):33-34. DOI:10.3969/j.issn.1002-0640.2010.11.010.
- [2] 吴青云,闫茂德,贺显曜. 移动机器人的快速终端滑模轨迹跟踪控制[J]. 系统工程与电子技术,2007,29(12):2127-2130. DOI:10.3321/j.issn:1001-506x.2007.12.030.
- [3] 俞亚杰,罗印升,宋伟. 一种改进的非完整轮式移动机器人轨迹跟踪控制方法[J]. 机床与液压,2017,45(11):44-47. DOI:10.3969/j.issn.1001-3881.2017.11.010.
- [4] 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. DOI:10.3969/j.issn.1000-2758.2018.04.004.
- [5] KUMAR U, SUKAVANAM N. Backstepping based trajectory tracking control of a four wheeled mobile robot[J]. International Journal of Advanced Robotic System,2008,5(4):35-39.
- [6] 孙棣华,崔明月,李永福. 具有参数不确定性的轮式移动机器人自适应 backstepping 控制[J]. 控制理论与应用,2012,29(9):1198-1204.
- [7] 赵欣洋,刘志远,王化玲,等. 基于多寡次趋近律的驱鸟机器人路径跟踪控制研究[J]. 重庆理工大学学报(自然科学版),2019,33(12):82-88. DOI:10.3969/j.issn.1674-8425(z).2019.12.012.
- [8] 冯轩. 120t AGV 框架车轨迹跟踪控制研究[D]. 秦皇岛:燕山大学,2019:39-55.
- [9] 刘金琨. 滑模变结构控制 MATLAB 仿真[M]. 2版. 北京:清华大学出版社,2012:264.
- [10] 潘天宇,楼佩煌,朱立群,等. 基于 Backstepping 的改进等速趋近律 AGV 滑模轨迹跟踪控制方法[J]. 计算机集成制造系统,2020,26(4):930-938. DOI:10.13196/j.cims.2020.04.007.