

基于领航-跟随策略的跟随 AGV 协同控制方法

楼航飞,武星,陈华,楼佩煌

(南京航空航天大学 机电学院,江苏 南京 210016)

摘 要:针对大部件自动化搬运等应用需求,采用领航-跟随编队策略实现跟随 AGV 跟随领航 AGV 的协同运行。建立全向 AGV 的运动学模型;在领航-跟随架构下研究了跟随 AGV 的队形误差模型;采用 Lyapunov 反演法,提出一种基于领航-跟随策略的跟随 AGV 协同控制方法。仿真和实验结果验证了该控制方法的可行性和有效性。

关键词:协同控制;领航-跟随策略;Lyapunov 方法;跟随 AGV

中图分类号:TP391.9 **文献标识码:**A **文章编号:**1671-5276(2020)06-0095-03

Coordinated Control Method of Follower AGV Based on the Leader-follower Strategy

LOU Hangfei, WU Xing, CHEN Hua, LOU Peihuang

(College of Mechanical and Electrical Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: Aiming at the application such as large components automated transportation, the leader-follower formation strategy is used to implement the coordinated operation of the follower AGV following the leader AGV. The kinematic model of the omnidirectional AGV is established. Then the formation deviation of the follower AGV is studied under Leader-follower architecture. And then, a coordinated control method of follower AGV based on the Leader-follower formation strategy is proposed by using the Lyapunov method. By simulation and experiment, the feasibility and effectiveness of this control method are verified.

Keywords: coordinated control; Leader-follower strategy; Lyapunov method; follower AGV

0 引言

随着工业智能化物流水平的不断提高,受限于尺寸、结构、承载方式等因素,单 AGV 已难以满足大部件自动化输送需求。以大型航空件运送为例,传统的车间级运输仍采用人力或牵引车^[1]。与此同时,协同运作的多智能体系统在感知、监控、运作等诸多方面,表现出了更优于单智能体系统的信息多样性和运作灵活性^[2-3]。为解决单 AGV 运载能力的受限问题,构建多 AGV 的协同运作系统,可以极大地提高 AGV 的配置优化,进一步扩大 AGV 的应用场景。

大部件的协同运载关键在于多 AGV 系统运行的同时还能保持稳定的队形。在目前的多智能体队形保持方法中,领航-跟随(Leader-follower)策略因可靠性高、扩展性好成为被广泛采用的一种多机器人队形保持方法^[4]。结合现代控制方法及感知方式,诸多国内外研究者进行了 Leader-follower 策略下大物件运载应用的研究^[5-6]。

Leader-follower 策略下的多 AGV 协同运行方式,需要跟随 AGV 具备较高的控制自主性,其关键在于对跟随 AGV 控制方法的研究。在全向 AGV 运动学的基础上,本文结合 Leader-Follower 策略,提出了一种面向多 AGV 协同运行的跟随 AGV 协同运动控制方法。

1 全向 AGV 运动学模型

麦克纳姆轮的全向 AGV 具有多自由度的特点,更能满足多 AGV 协同运动的高精度运动控制及队形保持的需求。本文的全向 AGV 采用四麦克纳姆轮对称分布,各轮偏置角 α_i 为 45° 。令 R 为麦克纳姆轮的半径, W 和 L 分别为轮子轴线到 AGV 中心 x 及 y 方向的距离。 v_x 、 v_y 、 ω_z 分别为 AGV 中心 x 、 y 方向的分速度及 AGV 中心绕 z 轴旋转的角速度,则各轮角速度与各方向速度分量的运动学方程如下:

$$\begin{bmatrix} \omega_1 \\ \omega_2 \\ \omega_3 \\ \omega_4 \end{bmatrix} = J \begin{bmatrix} v_x \\ v_y \\ \omega_z \end{bmatrix} = \frac{1}{R} \begin{bmatrix} 1 & 1 & -L-W \\ -1 & 1 & L+W \\ -1 & 1 & -L-W \\ 1 & 1 & L+W \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_x \\ v_y \\ \omega_z \end{bmatrix} \quad (1)$$

2 基于 Leader-follower 的跟随 AGV 队形保持协同运动控制分析

图 1 中: R_l 、 R_f 、 R_d 分别为领航 AGV、跟随 AGV 及跟随 AGV 期望位置;广义坐标系 XOY 下中心点坐标分别为

基金项目:国家自然科学基金项目(61973154);国防基础科研计划(JCKY2018605C004);南京航空航天大学研究生创新基地(实验室)开放基金项目(kfjj20180507)

第一作者简介:楼航飞(1995—),男,浙江金华人,硕士研究生,研究方向为智能制造及自动化控制、多智能体协同控制。

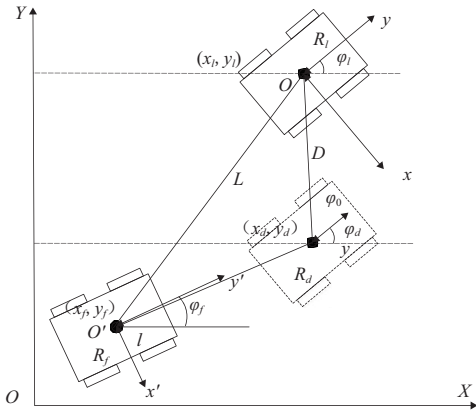


图1 Leader-follower 策略协同运动控制示意图

(x_l, y_l) 、 (x_f, y_f) 、 (x_d, y_d) ； L 为领航AGV与跟随AGV之间的距离； D 为队形距离期望值； $\varphi_l(t)$ 、 $\varphi_f(t)$ 、 $\varphi_d(t)$ 分别为领航AGV、跟随AGV及跟随AGV期望位置的航向角，令 $\varphi_l(t) = \varphi_d(t)$ 。根据几何坐标关系有：

$$\begin{cases} x_d(t) = x_l(t) - D \cos[\varphi_l(t) + \varphi_0] \\ y_d(t) = y_l(t) - D \sin[\varphi_l(t) + \varphi_0] \\ \varphi_d(t) = \varphi_l(t) \end{cases} \quad (2)$$

则 R_d 相对于 R_f 的偏差为：

$$\begin{cases} e_x(t) = x_d(t) - x_f(t) \\ e_y(t) = y_d(t) - y_f(t) \\ e_\varphi(t) = \varphi_d(t) - \varphi_f(t) \end{cases} \quad (3)$$

将式(2)代入式(3)可得跟随AGV R_f 相对于期望位置 R_d 的实时偏差为：

$$\begin{cases} e_x(t) = x_l(t) - D \cos[\varphi_l(t) + \varphi_0] - x_f(t) \\ e_y(t) = y_l(t) - D \sin[\varphi_l(t) + \varphi_0] - y_f(t) \\ e_\varphi(t) = \varphi_l(t) - \varphi_f(t) \end{cases} \quad (4)$$

偏差转化到跟随AGV坐标系 $x'O'y'$ ：

$$\begin{pmatrix} e_{x2}(t) \\ e_{y2}(t) \\ e_{\varphi2}(t) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \sin \varphi_f(t) & -\cos \varphi_f(t) & 0 \\ \cos \varphi_f(t) & \sin \varphi_f(t) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} e_x(t) \\ e_y(t) \\ e_\varphi(t) \end{pmatrix} \quad (5)$$

对式(5)求导可得跟随AGV R_f 相对于期望位置 R_d 的偏差变化率：

$$\begin{cases} \dot{e}_{x2}(t) = v_{xl}(t) + D \cos[\varphi_l(t) + \varphi_0 - \varphi_f(t)] \omega_l(t) + e_{y2}(t) \omega_f(t) - v_{xf}(t) \\ \dot{e}_{y2}(t) = v_{yl}(t) + D \sin[\varphi_l(t) + \varphi_0 - \varphi_f(t)] \omega_l(t) - e_{x2}(t) \omega_f(t) - v_{yf}(t) \\ \dot{e}_{\varphi2}(t) = \omega_l(t) - \omega_f(t) \end{cases} \quad (6)$$

依据上述偏差变化，设计跟随AGV运动学控制模型如下：

$$\begin{cases} v_{xf}(t) = v_{xl}(t) + D \cos[\varphi_l(t) + \varphi_0 - \varphi_f(t)] \omega_l(t) + k_1 e_{x2}(t) \\ v_{yf}(t) = v_{yl}(t) + D \sin[\varphi_l(t) + \varphi_0 - \varphi_f(t)] \omega_l(t) + k_2 e_{y2}(t) \\ \omega_f(t) = \omega_l(t) + k_3 e_{\varphi2}(t) \end{cases} \quad (7)$$

其中： $k_1 > 0, k_2 > 0, k_3 > 0; e_{\varphi2} \in (-\pi, \pi)$ 。

定义Lyapunov函数如下：

$$V = \frac{e_{x2}^2 + e_{y2}^2}{2} + (1 - \cos e_{\varphi2}) \quad (8)$$

有 $V \geq 0$ ，当且仅当 $e_{x2} = e_{y2} = e_{\varphi2} = 0$ 时， $V = 0$ 。将式(8)求导并代入式(5)及式(6)，得

$$\dot{V} = e_{x2} \dot{e}_{x2} + e_{y2} \dot{e}_{y2} + k_3 e_{\varphi2} \sin e_{\varphi2} = -k_1 e_{x2}^2 - k_2 e_{y2}^2 - k_3 e_{\varphi2} \sin e_{\varphi2} \leq 0$$

因此，设计的控制模型具备Lyapunov稳定性。式(7)中， $v_{xl}(t)$ 、 $v_{yl}(t)$ 、 $\omega_l(t)$ 为领航AGV的运动速度； $e_{x2}(t)$ 、 $e_{y2}(t)$ 、 $e_{\varphi2}(t)$ 为跟随AGV相对于期望位置的偏差。

3 仿真分析

采用Matlab软件对跟随AGV的运动控制模型进行曲线转弯路径仿真分析验证。领航AGV及跟随AGV的起始位姿坐标分别为 $e_l(0) = (0, 0, 0)^T$ 、 $e_f(0) = (-2, 2, 0)^T$ ；两车之间的期望距离和角度分别为 $\sigma_d = 1$ m和 $\varphi_d = 0$ rad；控制器的参数 $k_1 = 1.5, k_2 = 0.8, k_3 = 0.01$ ，结果如图2-图7所示。图2、图3分别为跟随AGV在 x 轴和 y 轴方向的跟踪速度。图4为跟随AGV的转角速度变化；图5-图7分别为跟随AGV在 x, y 方向误差及角度偏差。

在图2-图4中，6~8 s时曲线运动段转角及转角速度变化引起了跟随AGV响应速度突变；13 s后跟随AGV的 x, y 方向速度及转角速度收敛回队形保持的预期速度，说明了跟随AGV具备良好的速度跟踪性。由图5-图7可知，在4~6 s跟随AGV的初始 x, y 轴距离误差及初始转角误差快速收敛于0；6~12 s由转角速度变化引起转角误差

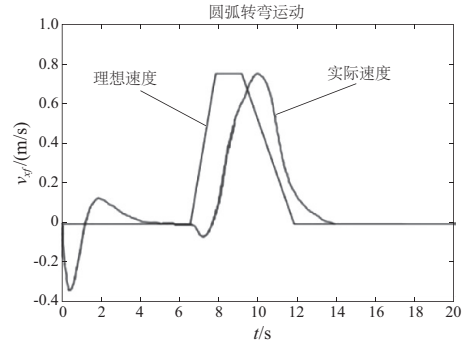


图2 跟随AGV的x方向速度

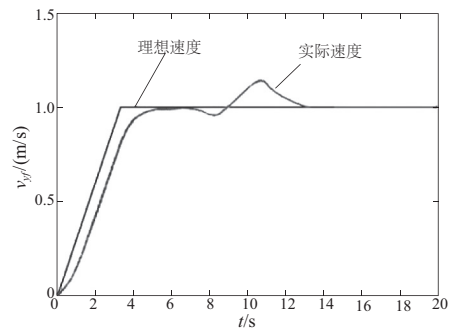


图3 跟随AGV的y方向速度

和 x, y 轴距离误差突变波动，但最终在13 s收敛于0，并以

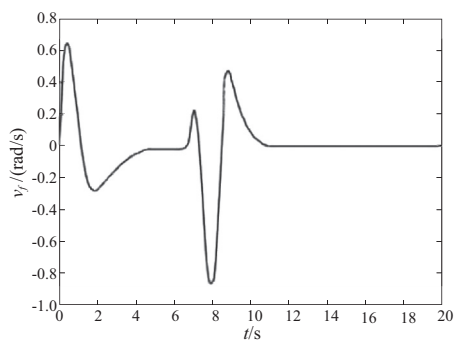


图4 跟随AGV转角速度

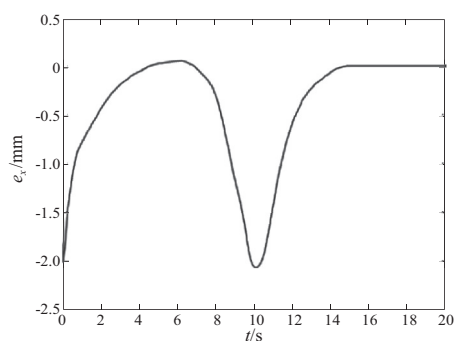


图5 跟随AGV的x轴方向误差

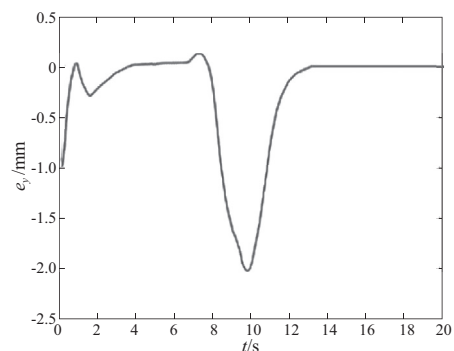


图6 跟随AGV的y轴方向误差

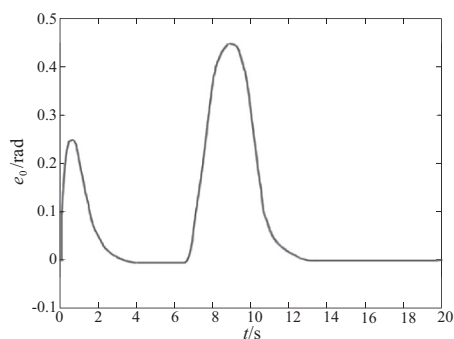


图7 跟随AGV转角误差

稳定状态继续运行,说明跟随AGV能稳定地跟随领航AGV。

4 实验分析

在图9所示的双全向AGV平台上对上述跟随AGV控制模型进行实验验证。设置领航AGV与跟随AGV组成双AGV协同搬运一长形物件,领航AGV采用视觉导引的路径跟踪方法^[7]。跟随AGV与期望位置的距离、角度偏差由跟随AGV上的位移传感器和角度传感器采集相对领航AGV的偏差后解算得到。电机编码器获得轮子转速,并由AGV的正逆运动学方程求得AGV的速度。实验路径如图8所示,实验场景实物如图9所示。图9(a)为直线路径的运行场景,图9(b)为圆弧路径跟随AGV的运行场景。

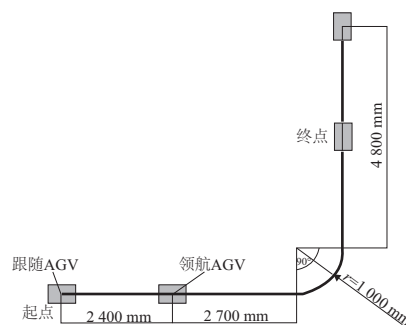


图8 双AGV的实验路径图

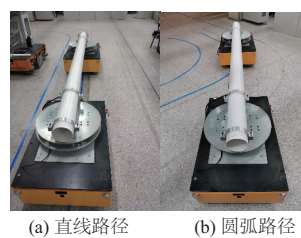


图9 双AGV实物运行图

运行时,设置领航AGV起始段、圆弧段、终点段的速度分别为0.5m/s、0.3m/s和0.5m/s。路径跟踪中姿态角偏差和位置偏差分别为跟随AGV当前位置与期望位置的角度偏差和距离偏差,跟随AGV队形内相对期望位置的距离偏差和角度偏差实时变化如图10所示。

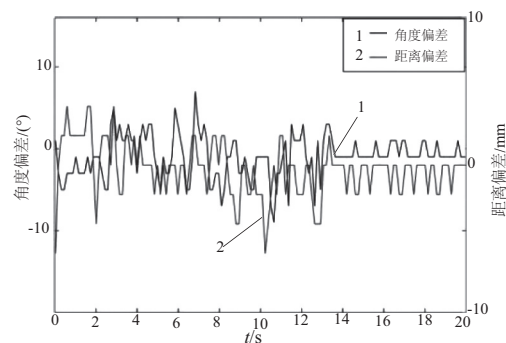


图10 队形控制的距离偏差和角度偏差

(下转第105页)

2) 采用耦合的 FEM/BEM 法,计算单管火焰筒结构在热声载荷下的应力响应,分析结果发现,在不同温度及相同声压级下,第 1 阶固有频率必然会激发结构的响应峰值,并且峰值随温度的升高先减小后增大。单管火焰筒结构热声载荷下应力响应分析表明:同一声压级下,随着温度的升高,结构的最大应力值先减小再增大,危险点的位置也因温度的不同而发生变化;在相同温度时,结构所受最大应力随声压级的增加而增大。

参考文献:

- [1] 杨玖. 随机声激励下火焰筒振动响应分析方法研究[D]. 南京:南京航空航天大学,2017.
- [2] 沙云东. 航空薄壁结构在随机声载荷作用下的振动响应研究[D]. 沈阳:东北大学,2006.
- [3] VAICAITIS R. Nonlinear response and sonic fatigue of national aerospace space plane surface panels[J]. Journal of Aircraft, 1994,31(1): 10-18.
- [4] CHEN R X, MEI C. Finite element nonlinear random response of beams to acoustic and thermal loads applied simultaneously[C]. La Jolla, CA: AIAA/ASME/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics and Materials Conference, 34th, 1993.
- [5] DHAINAUT J M, GUO X Y, MEI C, et al. Nonlinear random

response of panels in an elevated thermal-acoustic environment[J]. Journal of Aircraft, 2003,40(4): 683-691.

- [6] 杨雄伟,李跃明,耿谦. 基于混合 FE-SEA 法的高温环境飞行器宽频声振特性分析[J]. 航空学报,2011(11): 1851-1859.
- [7] 沙云东,艾思泽,赵奉同,等. 高速热流下薄壁结构声振响应分析及寿命预估[J]. 航空学报,2019(11): 1-15.
- [8] 沙云东,魏静,高志军,等. 热声激励下金属薄壁结构的随机疲劳寿命估算[J]. 振动与冲击,2013,32(10): 162-166.
- [9] 沙云东,胡翼飞,胡增辉. 薄壁结构高温随机振动疲劳分析方法有效性验证[J]. 推进技术,2018,39(6): 1386-1395.
- [10] 沙云东,郭小鹏,张军. 基于应力概率密度和功率谱密度法的随机声疲劳寿命预估方法研究[J]. 振动与冲击,2010,29(1): 162-165.
- [11] 沙云东,王建,赵奉同,等. 热声载荷下薄壁结构振动响应试验验证与疲劳分析[J]. 航空动力学报,2017,32(11): 2659-2671.
- [12] SHA Y D, GAO Z J, XU F, et al. Influence of thermal loading on the dynamic response of thin-walled structure under thermo-acoustic loading[J]. Advanced Engineering Forum, 2011, 2(3): 876-881.

收稿日期:2019-11-06

(上接第 97 页)

由图 10 可知,前 4 s 由于初始队形偏差存在,跟随 AGV 纠偏,距离偏差和角度偏差上下波动。在 4~6 s 时偏差渐进收敛于 0 点。6~12 s 时领航 AGV 在圆弧路径上运动,此时跟随 AGV 产生侧向 x 方向及角度方向偏差,纠偏运动使得此阶段跟随 AGV 角度偏差和距离偏差波动较大,但其数值整体仍能控制在较小的范围内。12 s 后领航 AGV 走出圆弧段进入直线段,跟随 AGV 的偏差波动减小,协同运行进入稳定状态。综上所述,设计的跟随 AGV 协同运动控制算法可使跟随 AGV 稳定、有效地跟随领航 AGV 运行。

5 结语

基于领航-跟随(Leader-follower)策略,本文提出并实现了一种跟随 AGV 的协同运动控制方法。对 Leader-follower 架构下的全向移动跟随 AGV 队形偏差模型进行分析,结合 Lyapunov 反演法,获得了一种跟随 AGV 协同运动控制方法。仿真及实验验证了本文所述的跟随 AGV 协同运动控制方法具有良好的运行稳定性和协调性。本文基于领航-跟随编队策略的跟随 AGV 协同控制方法的实现,进一步拓展了 AGV 的应用场景,为多 AGV 的协同控制提供了具有参考价值的基础。

参考文献:

- [1] 姚定,余晶,黄翔,等. 基于全向移动与多点柔性支撑的飞机大部件运输技术[J]. 南京航空航天大学学报,2012,44(增刊): 73-78.
- [2] TANG Z, OZGUNER U. Motion planning for multitarget surveillance with mobile sensor agents[J]. IEEE Transactions on Robotics, 2005,21(5): 898-908.
- [3] BEARD R W, LAWTON J, HADAEIGH F Y. A coordination architecture for spacecraft formation control[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2001,9(6): 777-790.
- [4] HAN Q, REN S, LANG H, et al. Bearing-based localization for leader-follower formation control[J]. PLoS One, 2017,12(4): e0175378.
- [5] WU X, ZHANG Y, ZOU T, et al. Coordinated path tracking of two vision-guided tractors for heavy-duty robotic vehicles[J]. Robotics and Computer-integrated Manufacturing, 2018,53: 93-107.
- [6] YAMAGUCHI H, AI N, KAWAKAMI A. Control of two manipulation points of a cooperative transportation system with two car-like vehicles following parametric curve paths[J]. Robotics and Autonomous Systems, 2015,63: 165-178.
- [7] 钱晓明,朱立群,楼佩煌,等. 基于位姿状态的全向运行型 AGV 路径跟踪优化控制方法[J]. 农业机械学报,2018,49(4): 20-26.

收稿日期:2019-11-11