

基于 Leader-follower 的自主车辆跟随控制器设计

李翰博^a, 刘 林^a, 田彦涛^{a,b}

(吉林大学 a. 通信工程学院; b 工程仿生教育部重点实验室, 长春 130022)

摘要: 为解决自主车辆的跟随控制中误差系统的稳定性问题, 基于 Leader-follower 法设计了车辆跟随控制器。对自主车辆进行运动学建模, 采用 Leader-follower 模型描述车辆跟随结构, 用 $L-\varphi$ 控制方法建立车辆跟随误差系统, 设计跟随车辆的速度控制器, 以实现跟随车辆对领航车辆的稳定跟随。通过 Matlab 仿真实验结果证明, 该控制器使误差最终收敛到 0, 能达到跟随控制的目的。

关键词: 自主车辆; Leader-follower 法; 误差系统; 速度控制器

中图分类号: TP242.6

文献标识码: A

Design of Following Controller for Autonomous Vehicle Based on Leader-Follower Strategies

LI Hanbo^a, LIU Lin^a, TIAN Yantao^{a,b}

(a. College of Communication Engineering;

b. Key Laboratory of Bionic Engineering of Ministry of Education, Jilin University, Changchun 130022, China)

Abstract: In order to solve the problem of the error system in the following control of autonomous vehicle, the following controller is designed based on Leader-follower strategies. The kinematic modeling is done. Leader-follower model is used to describe the following structure and $L-\varphi$ method is used to build error system. The speed controller for the follower is designed to achieve the objectives. Finally, the simulation is done by Matlab, the results show that the controller can make the error converge to zero so that it can achieve its goal.

Key words: autonomous vehicle; Leader-follower strategies; error system; speed controller

0 引 言

随着经济和科技高速发展, 车辆数量不断增加, 从而带来交通拥挤、交通事故、环境污染等一系列问题。如何使车辆以一定的组织方式编队运行成为亟需解决的问题, 其中最基本的就是车辆跟随控制。近年来, 多移动机器人技术已经在工业、农业和军事等领域得到了广泛应用, 其通过协作能完成单个机器人难以完成的任务^[1], 因此, 可以借鉴多机器人系统的协作方法以协调车辆间的行为, 解决车辆跟随控制问题。车辆跟随控制一般分为横向控制^[2]、纵向控制^[3]和横纵向综合控制^[4]3种。对于多机器人编队问题的研究主要有以下方法: Leader-follower 法^[5]、基于行为法^[6]、虚拟结构法^[7]和人工势场法^[8]等。1934年, 德国学者首先提出 Leader-follower 策略^[9], 并在出版的著作中详细描述了 Leader-follower 模型。Leader-follower 法在文献[10]中首次应用在机器人队形控制中。其主要有两种控制形式^[11]: $L-\varphi$ 控制和 $L-L$ 控制。 $L-\varphi$ 控制是使跟随者和领航者间的相对距离和角度达到给定值; $L-L$ 控制主要解决3个机器人

收稿日期: 2015-08-15

基金项目: 吉林大学“985”工程仿生科技创新平台基金资助项目

作者简介: 李翰博(1991—), 男, 吉林榆树人, 吉林大学硕士研究生, 主要从事多自主车辆系统控制与优化研究, (Tel) 86-15143083717 (E-mail) lhbju@163.com; 通讯作者: 田彦涛(1958—), 男, 吉林四平人, 吉林大学教授, 博士生导师, 主要从事复杂系统建模、优化与控制研究, (Tel) 86-13844889256 (E-mail) tianyt@jlu.edu.cn。

的相对位置控制问题,当跟随者和领航者间的相对距离达到给定值时,控制目的达成。

针对上述问题,笔者采用 Leader-follower 法解决自主车辆编队控制中的跟随控制问题。首先采用“自行车”模型进行自主车辆运动学建模,然后通过 $L-\varphi$ 控制对车队中的一组 Leader-follower 跟随关系进行建模,得到跟随控制误差系统,设计跟随车辆速度控制器。最后,使用 Matlab 进行两组不同初始情况的仿真实验,验证了所设计控制器的有效性。

1 模型描述

1.1 自主车辆运动学模型

自主车由后轮驱动,前轮转向,左右两侧质量分布均匀,采用“自行车”模型对其进行运动学建模(见图1)。其中 G 为自主车的质心,在全局坐标系中,其坐标为 (x,y) ; l 为前后车轴之间的距离, a,b 分别为质心到前、后轴之间的距离, θ 为前轮转向角, α 为航向角, v_u, v_w 分别代表自主车运动的纵向速度和横向速度。

自主车前、后轮与质心之间的关系可表示为

$$\begin{cases} x_1 = x - b\cos\alpha \\ y_1 = y - b\sin\alpha \end{cases} \quad \begin{cases} x_2 = x + a\cos\alpha \\ y_2 = y + a\sin\alpha \end{cases} \quad (1)$$

自主车属于车式移动机器人,满足下面的非完整约束^[12]

$$\begin{cases} \dot{x}_1 \sin\alpha - \dot{y}_1 \cos\alpha = 0 \\ \dot{x}_2 \sin(\alpha + \theta) - \dot{y}_2 \cos(\alpha + \theta) = 0 \end{cases} \quad (2)$$

将式(1)求导并代入式(2),得

$$\begin{cases} \dot{x} \sin\alpha - \dot{y} \cos\alpha + b\dot{\alpha} = 0 \\ \dot{x} \sin(\alpha + \theta) - \dot{y} \cos(\alpha + \theta) + a\dot{\alpha} \cos\alpha = 0 \end{cases} \quad (3)$$

以自主车纵向运动方向为 u 轴,横向运动方向为 w 轴建立坐标系,设自主车纵向运动速度为 v_u 、横向运动速度为 v_w ,自主车沿全局坐标系 x 方向和 y 方向的速度可表示为

$$\begin{cases} \dot{x} = v_u \cos\alpha - v_w \sin\alpha \\ \dot{y} = v_u \sin\alpha + v_w \cos\alpha \end{cases} \quad (4)$$

将式(4)代入式(3)整理,得

$$v_w = b\dot{\alpha} = \frac{b}{l}v_u \tan\theta \quad (5)$$

1.2 Leader-follower 结构

定义领航车辆为 V_l ,跟随车辆为 V_f ,它们构成的车队中典型的 Leader-follower 结构如图2所示。其中领航车和跟随车质心坐标分别为 (x_l, y_l) 和 (x_f, y_f) , L 为领航车与跟随车质心之间的距离; \mathbf{A} 为跟随车质心与领航车质心之间的方向向量; φ 为 L 与领航车车辆轴所构成的角度; θ_l, θ_f 分别为领航车和跟随车前轮偏角; α_l, α_f 分别为领航车和跟随车航向角。

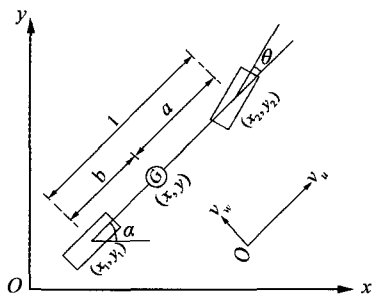


图1 自主车运动学模型
Fig.1 Kinematic model

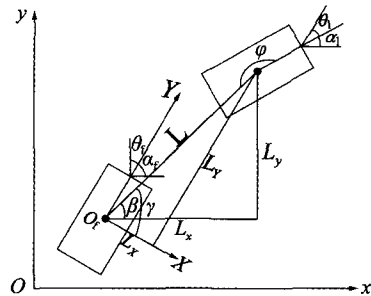


图2 Leader-follower 结构
Fig.2 Leader-follower structure

设 A 与 x 轴正方向所成角度为 β , 则领航车辆中轴与 A 之间的角度 φ 可表示为

$$\varphi = \beta + \pi - \alpha_l \quad (6)$$

将领航车和跟随车之间的相对距离 L 分解为 x 轴方向的 L_x 和 y 轴方向的 L_y

$$L = \sqrt{L_x^2 + L_y^2} \quad (7)$$

对式(7)求导, 得

$$\dot{L} = \frac{L_x \dot{L}_x + L_y \dot{L}_y}{L} \quad (8)$$

L_x, L_y 与两车位置关系可表示为

$$\begin{cases} L_x = x_l - x_f \\ L_y = y_l - y_f \end{cases} \quad (9)$$

对式(9)求导, 得

$$\begin{cases} \dot{L}_x = \dot{x}_l - \dot{x}_f \\ \dot{L}_y = \dot{y}_l - \dot{y}_f \end{cases} \quad (10)$$

将式(4)代入式(10), 得

$$\begin{cases} \dot{L}_x = v_{ul} \cos \alpha_l - v_{wf} \sin \alpha_l - v_{uf} \cos \alpha_f + v_{wf} \sin \alpha_f \\ \dot{L}_y = v_{ul} \sin \alpha_l + v_{wl} \cos \alpha_l - v_{uf} \sin \alpha_f - v_{wf} \cos \alpha_f \end{cases} \quad (11)$$

其中 v_{ul} 和 v_{wl} 分别为领航车辆的纵向速度和横向速度, v_{uf} 和 v_{wf} 分别为跟随车辆的纵向速度和横向速度。

将式(11)代入式(8), 得

$$\dot{L} = v_{ul} \cos(\beta - \alpha_l) + v_{wl} \sin(\beta - \alpha_l) - v_{uf} \cos(\beta - \alpha_l) - v_{wf} \sin(\beta - \alpha_l) \quad (12)$$

定义 $\gamma = -\frac{\pi}{2} + \varphi + (\alpha_l - \alpha_f)$, 并代入式(12), 得

$$\dot{L} = -v_{ul} \cos \varphi - v_{wl} \sin \varphi - v_{uf} \sin \gamma + v_{wf} \cos \gamma \quad (13)$$

对式(6)求导, 得

$$\dot{\varphi} = \frac{\dot{L}_y \cos \beta - \dot{L}_x \sin \beta}{L} - \dot{\alpha}_l \quad (14)$$

将式(11)代入式(14), 得

$$\dot{\varphi} = \frac{v_{ul} \sin \varphi - v_{wl} \cos \varphi - v_{uf} \cos \gamma - v_{wf} \sin \gamma}{L} - \frac{v_{wl}}{b} \quad (15)$$

1.3 车辆跟随误差系统

针对 L 和 φ 求其与期望距离 L_D 和期望航向角 φ_D 之间的误差比较复杂, 考虑将 L 分解为两个与 φ 有对应关系的分量, 只需保证这两个分量与期望值间的误差趋于零, 即可使系统保持稳定。由于建立的误差模型主要针对跟随车辆, 前面建立的坐标系对跟随车辆的角度不容易得到, 因此, 在建立误差系统前, 在原有坐标系基础上, 以跟随车辆纵向速度方向作为 Y 轴, 横向速度方向作为 X 轴, 建立的辅助坐标系 $XO_f Y$ 如图2所示。

在辅助坐标系中, 对跟随车辆分别在 X 轴、 Y 轴以及航向角建立位置误差如下

$$\begin{cases} e_x = X_D - X_f = L_D \cos \gamma_D - L \cos \gamma \\ e_y = Y_D - Y_f = L_D \sin \gamma_D - L \sin \gamma \\ e_\alpha = \alpha_l - \alpha_f \end{cases} \quad (16)$$

其中 γ_D 为 γ 的期望值, 式(16)可化为

$$\begin{cases} L_D \cos \gamma_D = e_x + L \cos \gamma \\ L_D \sin \gamma_D = e_y + L \sin \gamma \end{cases} \quad (17)$$

对式(16)求导, 得

$$\begin{cases} \dot{e}_x = \dot{L}_D \cos \gamma_D - L_D \sin \gamma_D (\dot{\varphi}_D + \dot{e}_\alpha) - \dot{L} \cos \gamma + L \sin \gamma (\dot{\varphi} + \dot{e}_\alpha) \\ \dot{e}_y = \dot{L}_D \sin \gamma_D + L_D \cos \gamma_D (\dot{\varphi}_D + \dot{e}_\alpha) - \dot{L} \sin \gamma - L \cos \gamma (\dot{\varphi} + \dot{e}_\alpha) \\ \dot{e}_\alpha = \frac{v_{wl}}{b} - \frac{v_{wf}}{b} \end{cases} \quad (18)$$

再将式(17)代入到式(18)中并进行化简, 得

$$\begin{cases} \dot{e}_x = \dot{L}_D \cos \gamma_D - L_D \sin \gamma_D \dot{\varphi}_D - \frac{1}{b} v_{wl} L_D \sin \gamma_D + \frac{1}{b} e_y v_{wf} + v_{ul} \sin e_\alpha + v_{wl} \cos e_\alpha - v_{wf} \\ \dot{e}_y = \dot{L}_D \sin \gamma_D + L_D \cos \gamma_D \dot{\varphi}_D + \frac{1}{b} v_{wl} L_D \cos \gamma_D - \frac{1}{b} e_x v_{wf} - v_{ul} \cos e_\alpha + v_{wl} \sin e_\alpha + v_{uf} \\ \dot{e}_\alpha = \frac{v_{wl}}{b} - \frac{v_{wf}}{b} \end{cases} \quad (19)$$

2 控制器设计

分析式(19)可知, 跟随车下一时刻的位置误差和角度误差, 不仅取决于上一时刻的跟随车辆与领航车辆的位置和角度误差, 还与跟随车辆的速度、角速度以及其与领航车辆之间的相对角度有关。为使跟随车辆与领航车辆组成的运动系统稳定, 给出跟随车辆的速度输入量如下

$$\begin{cases} v_{uf} = -k_1 e_y - \dot{L}_D \sin \gamma_D - L_D \cos \gamma_D \dot{\varphi}_D - \frac{1}{b} v_{wl} L_D \cos \gamma_D + v_{ul} \cos e_\alpha - v_{wl} \sin e_\alpha \\ v_{wf} = k_2 e_x + \dot{L}_D \cos \gamma_D - L_D \sin \gamma_D \dot{\varphi}_D - \frac{1}{b} v_{wl} L_D \sin \gamma_D + v_{ul} \sin e_\alpha + v_{wl} \cos e_\alpha + W \end{cases} \quad (20)$$

其中 $k_1 > 0$, $k_2 > 0$, W 为跟随车辆横向速度 v_{wf} 的补充项。

选取系统的 Lyapunov 函数为

$$V = \frac{e_x^2 + e_y^2}{2} + k_3 (1 - \cos e_\alpha) \quad (21)$$

其中 $k_3 > 0$, 可知 $V \geq 0$, 当且仅当 $e_x = e_y = e_\alpha = 0$ 时, $V = 0$ 。对式(21)求导, 得

$$\dot{V} = e_x \dot{e}_x + e_y \dot{e}_y + k_3 \dot{e}_\alpha \sin e_\alpha \quad (22)$$

将式(19)代入式(22), 得

$$\begin{aligned} \dot{V} = & e_x \left(\dot{L}_D \cos \gamma_D - L_D \sin \gamma_D \dot{\varphi}_D - \frac{1}{b} v_{wl} L_D \sin \gamma_D + \frac{1}{b} e_y v_{wf} + v_{ul} \sin e_\alpha + v_{wl} \cos e_\alpha - v_{wf} \right) + \\ & e_y \left(\dot{L}_D \sin \gamma_D + L_D \cos \gamma_D \dot{\varphi}_D + \frac{1}{b} v_{wl} L_D \cos \gamma_D - \frac{1}{b} e_x v_{wf} - v_{ul} \cos e_\alpha + v_{wl} \sin e_\alpha + v_{uf} \right) + \\ & \frac{k_3}{b} \sin e_\alpha (v_{wl} - v_{wf}) \end{aligned} \quad (23)$$

将式(20)代入式(23)中并整理, 得

$$\dot{V} = -k_1 e_y^2 - k_2 e_x^2 - e_x W + \frac{k_3}{b} \sin e_\alpha \left(\begin{aligned} & v_{wl} - k_2 e_x + \frac{1}{b} v_{wl} L_D \sin \gamma_D - v_{ul} \sin e_\alpha \\ & - v_{wl} \cos e_\alpha - \dot{L}_D \cos \gamma_D + L_D \sin \gamma_D \dot{\varphi}_D - W \end{aligned} \right) \quad (24)$$

为使系统在 $v_{ul} = 0$ 时仍能保持稳定, 以一个趋近于 0 的数 $-k_4$ ($k_4 > 0$) 代替式(24)中的 v_{ul} , 式(24)可化为

$$\dot{V} = -k_1 e_y^2 - k_2 e_x^2 - \frac{k_3 k_4}{b} \sin^2 e_\alpha - \left(e_x + \frac{k_3}{b} \sin e_\alpha \right) W + \frac{k_3}{b} \sin e_\alpha \left(\begin{aligned} & v_{wl} - k_2 e_x + \frac{1}{b} v_{wl} L_D \sin \gamma_D + k_4 \sin e_\alpha \\ & - v_{wl} \cos e_\alpha - \dot{L}_D \cos \gamma_D + L_D \sin \gamma_D \dot{\varphi}_D \end{aligned} \right) \quad (25)$$

由式(25)可知, 前 3 项 $-k_1 e_y^2 - k_2 e_x^2 - \frac{k_3 k_4}{b} \sin^2 e_\alpha \leq 0$, 设剩余部分为第 4 项 R , 则

$$R = - \left(e_X + \frac{k_3}{b} \sin e_\alpha \right) W + \frac{k_3}{b} \sin e_\alpha \left(\begin{matrix} v_{wl} - k_2 e_X + \frac{1}{b} v_{wl} L_D \sin \gamma_D + k_4 \sin e_\alpha \\ - v_{wl} \cos e_\alpha - \dot{L}_D \cos \gamma_D + L_D \sin \gamma_D \dot{\varphi}_D \end{matrix} \right) \leq \quad (26)$$

$$\left(|e_X| + \frac{k_3}{b} \right) |W| + \frac{k_3}{b} \left(2v_{wl} + k_2 |e_X| + \frac{1}{b} v_{wl} L_D + k_4 + \dot{L}_D + L_D |\dot{\varphi}_D| \right) = C$$

式(26)中, e_X 趋近于0, v_{wl} 和 L_D 均为给定值, 可设定 W 有界, 因此 R 一定有界, 即 $\dot{V} \leq -k_1 e_Y^2 - k_2 e_X^2 - \frac{k_3 k_4}{b} \sin^2 e_\alpha + C$, 可通过调节控制器中的参数保证系统稳定性, 选取 W 为如下形式

$$W = \frac{k_3}{b} \frac{2v_{wl} + k_2 |e_X| + \frac{1}{b} v_{wl} L_D + k_4 + \dot{L}_D + L_D |\dot{\varphi}_D|}{|e_X| + k_3/b} \quad (27)$$

从而设计跟随车辆的速度控制器为

$$\begin{aligned} v_{uf} &= -k_1 e_Y - \dot{L}_D \sin \gamma_D - L_D \cos \gamma_D \dot{\varphi}_D - \frac{1}{b} v_{wl} L_D \cos \gamma_D + v_{ul} \cos e_\alpha - v_{wl} \sin e_\alpha \\ v_{wf} &= k_2 e_X + \dot{L}_D \cos \gamma_D - L_D \sin \gamma_D \dot{\varphi}_D - \frac{1}{b} v_{wl} L_D \sin \gamma_D + v_{ul} \sin e_\alpha + v_{wl} \cos e_\alpha + \\ &\quad \frac{k_3}{b} \frac{2v_{wl} + k_2 |e_X| + \frac{1}{b} v_{wl} L_D + k_4 + \dot{L}_D + L_D |\dot{\varphi}_D|}{|e_X| + k_3/b} \end{aligned} \quad (28)$$

3 仿真实验

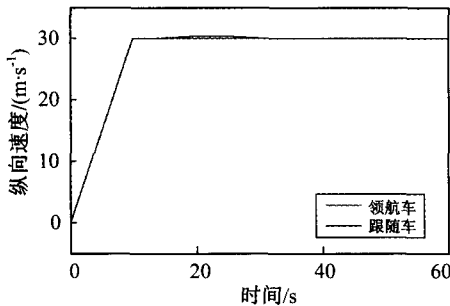
领航车辆初始位置(0,0), 跟随车辆车轴 $a = b = 2.5$ m, 控制器参数 $k_1 = 1.2$, $k_2 = 0.6$, $k_3 = 0.01$, $k_4 = 0.001$ 。领航车辆速度变化情况如表1所示。

表1 领航车辆速度变化情况

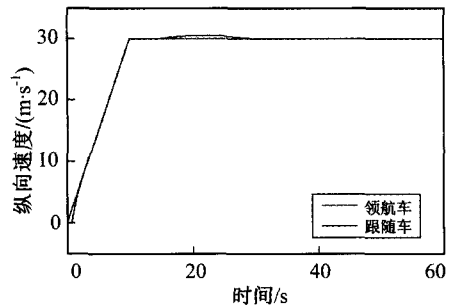
Tab.1 Speed of the leader

时间/s	$a_{ul}/(\text{m} \cdot \text{s}^{-2})$	$v_{ul}/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$	$a_{wl}/(\text{m} \cdot \text{s}^{-2})$	$v_{wl}/(\text{m} \cdot \text{s}^{-1})$
[0,10)	3	0~30	0	0
[10,15)	0	30	0	0
[15,20)	0	30	0.024	0~0.12
[20,25)	0	30	0	0.12
[25,30)	0	30	-0.024	0.12~0
[30,60]	0	30	0	0

进行两组仿真实验。第1组(无初始误差): 跟随车初始位置 $(-8.66, -5)$, $L_D = 10$ m, $\varphi_D = 7\pi/6$ rad, 初始误差 $e_{x0} = 0$, $e_{y0} = 0$, $e_{\alpha 0} = 0$; 第2组(有初始误差): 跟随车初始位置 $(-20, -15)$, $L_D = 20$ m, $\varphi_D = 7\pi/6$ rad, 初始误差 $e_{x0} = 5$ m, $e_{y0} = 2.68$ m, $e_{\alpha 0} = 0$ 。两车速度变化曲线如图3所示, 跟随车误差曲线如图4所示。



a 无初始误差情况下两车纵向速度



b 有初始误差情况下两车纵向速度

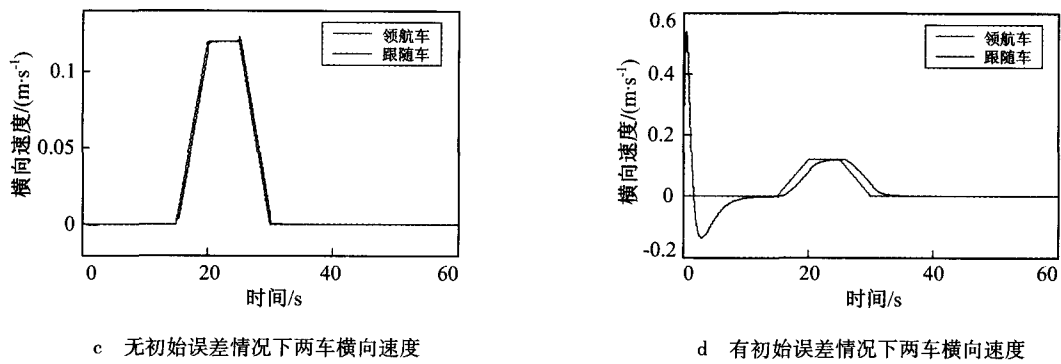


图 3 跟随车辆和领航车辆速度变化曲线

Fig.3 The speed curve of leader and follower

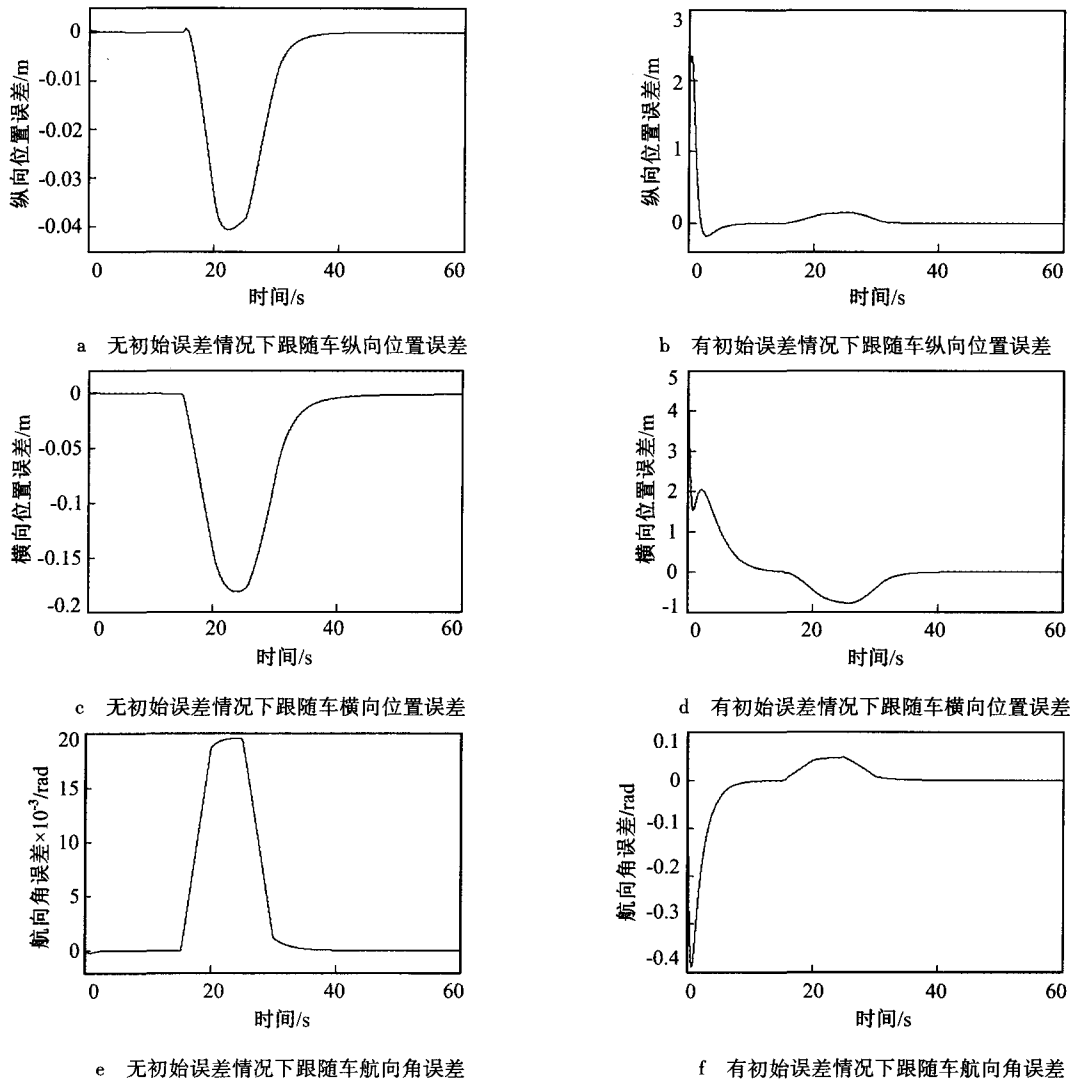


图 4 跟随车辆和领航车辆误差曲线

Fig.4 The error curve of follower and leader

在无初始误差情况下, 跟随车辆速度在开始阶段有一点波动, 之后随领航车辆变化, 二者基本一致 (见图 3a, 图 3b)。从图 4a、图 4c、图 4e 可以看出, 系统误差在 35 s 后基本趋近于 0 (见图 3c, 图 3d), 证明跟随车辆能稳定跟随领航车辆。在有初始误差情况下, 由于存在初始误差, 开始时跟随车辆速度有较大波动, 之后波动逐渐减弱, 到 35 s 后基本与领航车辆保持一致; 系统误差在 35 s 后基本趋近于 0 (见图 4d ~ 图 4f), 证明所设计控制器能对误差进行校正, 使跟随车辆稳定跟随领航车辆。

4 结 语

笔者研究了基于 Leader-follower 法的自主车辆跟随控制器的设计问题。采用“自行车”模型建立自主车辆运动学模型, Leader-follower 结构描述自主车辆的跟随控制问题, 通过 $L-\varphi$ 控制方法建立跟随误差系统并设计跟随车辆速度控制器。通过 Matlab 进行无初始误差和有初始误差的仿真实验结果证明, 该控制器可用于车辆跟随控制。

参考文献:

- [1] 刘小梅, 田彦涛, 杨茂. 基于博弈论的多机器人任务分配算法 [J]. 吉林大学学报: 信息科学版, 2010, 28(3): 256-263.
LIU Xiaomei, TIAN Yantao, YANG Mao. Game-Theory Based on Multi-Robot Task Allocation Algorithm [J]. Journal of Jilin University: Information Science Edition, 2010, 28(3): 256-263.
- [2] WANG G W, FUJIWARA N, BAO Y. Feed-Forward Multilayer Neural Network Model for Vehicle Lateral Guidance Control [J]. Advanced Robotics, 1997, 12(7/8): 735-753.
- [3] DARBHA S, RAJAGOPAL K R. Intelligent Cruise Control Systems and Traffic Flow Stability [J]. Transportation Research Part C: Emerging Technologies, 1999, 7(6): 329-352.
- [4] SWAROOP D, YOON S M. Integrated Lateral and Longitudinal Vehicle Control for an Emergency Lane Change Manoeuvre Design [J]. International Journal of Vehicle Design, 1999, 21(2/3): 161-174.
- [5] SHAO J, XIE G, WANG L. Leader-Following Formation Control of Multiple Mobile Vehicles [J]. IET Control Theory & Applications, 2007, 1(2): 545-552.
- [6] 杨帆, 刘士荣, 董德国. 编队控制中的机器人行为与基于服务的运动行为结构设计 [J]. 机器人, 2012, 34(1): 120-128.
YANG Fan, LIU Shirong, DONG Deguo. Robot Behavior and Service-Based Motion Behavior Structure Design in Formation Control [J]. Robot, 2012, 34(1): 120-128.
- [7] REN W. Consensus Seeking, Formation Keeping and Trajectory Tracking in Multiple Vehicle Cooperative Control [D]. Utah, USA: Department of Electrical and Computer Engineering, Brigham Young University, 2004.
- [8] 付帅, 刘淑华, 张之雅, 等. 基于改进人工协调场的多机器人运动编队 [J]. 吉林大学学报: 信息科学版, 2010, 28(2): 153-157.
FU Shuai, LIU Shuhua, ZHANG Zhiya, et al. Multi-Robot Formation Based on Artificial Coordinating Field [J]. Journal of Jilin University: Information Science Edition, 2010, 28(2): 153-157.
- [9] JOSE J R B. Leader-Follower Strategies for Multilevel Systems [J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 1978, 23(2): 244-255.
- [10] WANG P K C. Navigation Strategies for Multiple Autonomous Mobile Robots Moving in Formation [J]. Journal of Robotic Systems, 1991, 8(2): 177-195.
- [11] CHOI I, CHOI J, CHUNG W J. Leader-Follower Formation Control without Information of Heading Angle [C] // System Integration (SII), 2012 IEEE/SICE International Symposium on. [S.l.]: IEEE, 2012: 842-846.

(责任编辑: 张洁)