

# 基于组合趋近律的差速 AGV 高精度路径跟踪技术研究

张沪松,楼佩煌,朱立群,钱晓明,潘天宇

(南京航空航天大学 机电学院,江苏 南京 210016)

**摘要:** 为了提高 AGV 路径跟踪的精度和稳定性,针对最常用的差速 AGV 系统,先将系统离散化,得到离散 AGV 系统状态方程,再结合指数趋近律和变速趋近律两种趋近律进行滑模控制,提出了一种基于组合趋近律的离散 AGV 系统滑模控制方法,优化 AGV 小车在小偏差下路径跟踪的效果。通过工厂应用测试,在对接最大允许误差 5 mm 的测试条件下,验证了该方法可以避免 AGV 小车路径跟踪时起始摆动大和高频抖动的缺点,实际测得车身横向摆动误差 < 5 mm。

**关键词:** 差速 AGV; 路径跟踪; 滑模控制; 趋近律

**中图分类号:** TP424 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-5276(2019)06-0186-05

## Study of High Precision Path Tracking Technology of Differential AGV Based on Combined Reaching Law

ZHANG Husong, LOU Pei Huang, ZHU Liqun, QIAN Xiaoming, PAN Tianyu

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

**Abstract:** To improve the accuracy and stability of AGV path tracking, in this paper, the discrete system state equation is established for the differential AGV system most commonly used. Then, based on the combination of exponential reaching law and variable rate reaching law, the sliding mode control method is put forward, then the results in AGV differential path tracking are optimized. In the application in the factory and under the maximum allowable error 5 mm of the work station docking, this control method can be used to optimize the large initial swing problem and the high frequency jitter of AGV path tracking. The actual lateral swing error of AGV is less than 5 mm.

**Keywords:** differential AGV; path tracking; sliding mode control; reaching law

## 0 引言

近年来,物料输送行业在智能制造的大背景下发展迅猛,自动导引车(automated guided vehicle, AGV)越来越多地被应用到零部件装配、快递分拣、码头装卸等需要频繁输送物料的领域<sup>[1]</sup>。在零部件装配线中,AGV 需要在巡线过程中和机床、工位或者机械手等进行高精度对接,而且受到场地空间的限制,允许 AGV 通过的路径也可能很狭窄,因此,AGV 运行的精确性和稳定性对物料输送的效率至关重要。

本文对双轮差速 AGV 在小偏差情况下建立运动学模型,提出了一种基于组合趋近律的差速 AGV 运动学滑模控制方法来改善 AGV 路径跟踪的效果。滑模控制是指在动态过程中,根据 AGV 当前状态,按预先设计的“滑动模态”来运动。滑模控制的优点是响应速度快,物理实现简单和对被控对象参数和扰动不敏感,非常适合 AGV 的控制。武星等提出了一种基于双视野窗口的鲁棒特征识别与路径跟踪方法,减小导引路径直线拟合的计算误差<sup>[2]</sup>;闫茂德等提出了一种反演设计和自适应滑

模控制结合的方法,可以实现全局渐近轨迹跟踪控制<sup>[3]</sup>,但是仅局限于仿真验证;李娜等将滑模控制应用到轮式移动机器人的动力学控制中,目的是消除小扰动下的机器人抖振<sup>[4]</sup>。与上述方法不同的是,本文是在运动学范畴内针对差速 AGV 的轨迹跟踪和路径优化问题,用基于组合趋近律的滑模控制方法来研究,并给出试验论证。本文的研究仅限于差速 AGV 的运动学范畴,不涉及动力学领域内的问题。

## 1 差速驱动 AGV 运动学模型

本文的研究对象是差速驱动 AGV。规定左右两轮速度差为  $2\Delta v$ ,建立如图 1 的运动学模型<sup>[5]</sup>,其中  $\Sigma x'O'y'$  为笛卡儿坐标系, $\Sigma xOy$  为随动参考系,导引标线与  $y$  轴的夹角为角度偏差  $e_\theta$ ,规定当路径的切线方向顺时针转向  $y$  轴时  $e_\theta > 0$ ,反之则角度偏差  $e_\theta < 0$ 。当 AGV 在导引标线的左侧时  $e_d < 0$ ,当 AGV 在导引标线的右侧时  $e_d > 0$ 。

因嵌入式控制特性,本文对系统模型进行离散化。设状态为  $k$  时的 AGV 角度偏差为  $e_\theta(k)$ ,距离偏差为  $e_d(k)$ ,经过一个控制周期  $T$  后到达状态  $k+1$ ,此时 AGV 的角度

**基金项目:** 江苏省重点研发计划项目(BE2016004-3);南京航空航天大学研究生创新基地(实验室)开放基金项目(kfj20170510)

**作者简介:** 张沪松(1993—),男,江苏泰州人,硕士研究生,主要从事智能制造、嵌入式控制和 AGV 研究。

偏差为  $e_\theta(k+1)$ , 距离偏差为  $e_d(k+1)$ 。在一个控制周期中, AGV 绕其瞬心转过的角度为  $T\omega$ , 由图 1 经几何分析可以得到:

$$\begin{cases} e_\theta(k+1) = e_\theta(k) + \frac{2T\Delta v(k)}{D} \\ e_d(k+1) = e_d(k) - vTe_\theta(k) - v \frac{\Delta v(k)}{D} T^2 \end{cases} \quad (1)$$

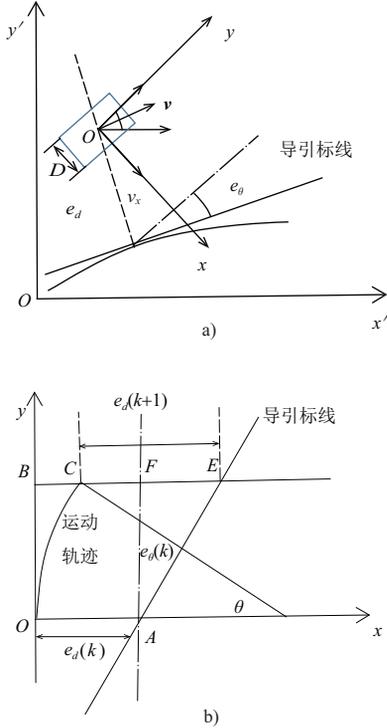


图 1 路径跟踪 AGV 运动学建模

将式(1)改为线性形式:

$$\begin{bmatrix} e_\theta(k+1) \\ e_d(k+1) \end{bmatrix} = A \begin{bmatrix} e_\theta(k) \\ e_d(k) \end{bmatrix} + B\Delta v(k) \quad (2)$$

## 2 离散系统的 AGV 轨迹跟踪滑模控制方法

由式(2), 令  $x(k+1) = [e_\theta(k+1), e_d(k+1)]^T, x(k) = [e_\theta(k), e_d(k)]^T$ , 得小偏差下的 AGV 系统的离散状态方程为:

$$x(k+1) = Ax(k) + B\Delta v(k) \quad (3)$$

其中:  $A = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ vT & -1 \end{bmatrix}$  为 AGV 的状态系数矩阵,  $B = \begin{bmatrix} \frac{2T}{D} & -\frac{vT^2}{D} \end{bmatrix}^T$  为速度差控制量系数方程;  $\Delta v(k)$  为 AGV 的速度差控制量。此时 AGV 的切换函数为:

$$s(k) = Cx(k) = C \begin{bmatrix} e_\theta(k) \\ e_d(k) \end{bmatrix} \quad (4)$$

其中: 系数矩阵  $C = [c_1, c_2], c_2 = 1.0$ , 显然此切换函数为 AGV 偏差状态的线性组合。离散滑模控制考虑的基本问题和连续系统一样, 即稳定性、存在性和可达性<sup>[6]</sup>。

## 2.1 离散 AGV 系统的准滑动模态

本文研究的对象即 AGV 轨迹跟踪的偏差状态, 存在切换面  $s(x) = s(x_1, x_2, \dots, x_n)$  使得 AGV 的偏差状态被此切换面分成  $s > 0, s < 0$  两部分。

如图 2 所示, 切换面上的运动有 3 种形式<sup>[7]</sup>: 当点 N 从切换面的两侧趋近于切换面时, 该点为停止点; 当点 M 从切换面附近向两侧运动时, 该点为起始点; 当点 K 从切换面的一侧穿到另一侧时, 该点为普通点。而嵌入式控制器由于存在指令周期<sup>[8]</sup>, 实际的运动过程不是连续的, 使得滑动模态在理想偏差状态的某一  $\Delta$  领域内上下波动, 该模态为系统的准滑动模态。定义如下包含切换面  $s = 0$  的切换带。

$$S^\Delta = \{x \in R^n \mid -\Delta < s(x) = C(x) < +\Delta\} \quad (5)$$

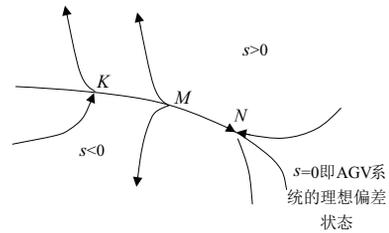


图 2 3 种点在切换面上的状态

图 3 是 AGV 轨迹跟踪控制准滑动模态。在有限的时间内达到切换面  $s = 0$ , 称为理想准滑动模态; 在切换带  $[-\Delta, \Delta]$  内涌动, 并且每一步均穿过切换面  $s$ , 称为非理想准滑动模态。

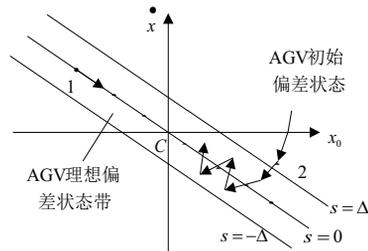


图 3 离散 AGV 系统的准滑动模态

## 2.2 离散 AGV 系统滑模的存在性、可达性和不变性

对于连续时间系统的滑模控制, 其滑动模态存在的条件为<sup>[9]</sup>:

$$\lim_{s \rightarrow 0^+} s < 0, \lim_{s \rightarrow 0^-} s > 0 \quad (6)$$

上式等价于:

$$ss < 0 \quad (7)$$

对于离散系统而言, 达到条件为:

$$[s(k+1) - s(k)]s(k) < 0 \quad (8)$$

式(8)仅为离散 AGV 系统理想偏差状态到达的必要条件。为了使 AGV 轨迹跟踪时在任意的初始偏差状态下最终都能趋于稳定, 由李雅普诺夫稳定定理可知, 离散 AGV 系统到达理想偏差状态的条件为:

$$s^2(k+1) < s^2(k) \quad (9)$$

当控制周期  $T$  较小时,系统的滑模存在和到达的条件为:

$$\begin{aligned} [s(k+1)-s(k)] \operatorname{sgn}(s(k)) < 0, \\ [s(k+1)+s(k)] \operatorname{sgn}(s(k)) > 0 \end{aligned} \quad (10)$$

对于本文受非完整约束的 AGV 系统,假设  $Ef(k)$  为 AGV 系统受到的干扰,  $\Delta Hx(k)$  为 AGV 系统参数的不确定性,对于离散 AGV 系统,则有:

$$\begin{aligned} \mathbf{x}(k+1) &= \mathbf{H}\mathbf{x}(k) + \Delta\mathbf{H}\mathbf{x}(k) + \mathbf{B}\mathbf{u}(k) + Ef(k) \text{ 即} \\ \begin{bmatrix} e_\theta(k+1) \\ e_d(k+1) \end{bmatrix} &= \mathbf{H} \begin{bmatrix} e_\theta(k) \\ e_d(k) \end{bmatrix} + \Delta\mathbf{H} \begin{bmatrix} e_\theta(k) \\ e_d(k) \end{bmatrix} + \mathbf{B}\Delta\mathbf{v}(k) + Ef(k) \end{aligned} \quad (11)$$

其中:  $\mathbf{H}$  是离散系统下差速 AGV 的状态系数矩阵,和非离散系统中的  $\mathbf{A}$  数值相等。若系统参数的不确定性和干扰满足下式:

$$\Delta\mathbf{H} = \tilde{\mathbf{B}}\tilde{\mathbf{H}}, E = \tilde{\mathbf{B}}\tilde{\mathbf{E}} \quad (12)$$

其中  $\tilde{\mathbf{H}}, \tilde{\mathbf{E}}$  是不确定的,式(11)可改写为下式:

$$\begin{bmatrix} e_\theta(k+1) \\ e_d(k+1) \end{bmatrix} = \mathbf{H} \begin{bmatrix} e_\theta(k) \\ e_d(k) \end{bmatrix} + \tilde{\mathbf{B}} \begin{bmatrix} \tilde{\mathbf{H}} \begin{bmatrix} e_\theta(k) \\ e_d(k) \end{bmatrix} + \Delta\mathbf{v}(k) + \tilde{\mathbf{E}}f(k) \end{bmatrix} \quad (13)$$

由式(13)不难发现,对 AGV 系统参数的不确定性和干扰,无论是离散还是连续系统均是不变的,且其充要条件为式(11)。

### 3 基于组合趋近律离散差速 AGV 系统的滑模控制研究

在滑模控制中,滑模控制的可达性只保证了系统从初始状态经过有限步一定能够达到滑模面,而基于趋近律的控制方法在趋近的过程中对运动轨迹做出一定的约束,使 AGV 按照给定的趋近律达到滑模面。趋近律的概念是由高为炳教授提出的,其数学表达式为<sup>[10]</sup>:

$$\dot{s} = -\varepsilon \operatorname{sign}(s) - f(s) \quad (14)$$

对式(14)中的  $f(s)$  选择不同的表达式,可得到不同的趋近率,常用的有以下几种<sup>[11]</sup>:

1) 指数趋近律:

$$\dot{s} = -\varepsilon \operatorname{sign}(s) - qs \quad \varepsilon > 0, q > 0 \quad (15)$$

2) 等速趋近律:

$$\dot{s} = -\varepsilon \operatorname{sign}(s) \quad \varepsilon > 0 \quad (16)$$

3) 变速趋近律:

$$\dot{s} = -\varepsilon \|x\|_1 \operatorname{sign}(s) \quad (17)$$

其中  $\|x\|_1 = \sum_{i=1}^n |x_i|$  为系统状态范数。

4) 幂次趋近律:

$$\dot{s} = -\varepsilon |s|^\rho \operatorname{sign}(s) - ks \quad \varepsilon > 0, 1 > \rho > 0 \quad (18)$$

对于上述的几种趋近律都满足达到性  $ss < 0$ <sup>[10]</sup>,通过选取适当的趋近律函数及参数,就可以使被控对象按照给定的路径达到滑模面,从而实现运动轨迹的优化和系统动态性能的改善。

### 3.1 离散 AGV 系统的指数趋近律

对式(15)所示的连续系统指数趋近律,将其离散化并结合前文设计的 AGV 轨迹跟踪系统的切换函数式(4)可得离散 AGV 系统的指数趋近律:

$$\begin{aligned} \frac{s(k+1)-s(k)}{T} &= -\varepsilon \operatorname{sign}(s(k)) - qs(k) \\ s(k+1) - s(k) &= -\varepsilon T \operatorname{sign}(s(k)) - qTs(k) = \\ &= -\varepsilon T \operatorname{sign} \left( \mathbf{C} \begin{bmatrix} e_\theta(k) \\ e_d(k) \end{bmatrix} \right) - qT \mathbf{C} \begin{bmatrix} e_\theta(k) \\ e_d(k) \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (19)$$

其中:  $k > 0, \varepsilon > 0, 1 - qT > 0, 1 - \varepsilon T > 0$ ;  $T$  为 AGV 系统的控制周期;  $e_\theta(k), e_d(k)$  分别为  $k$  时刻的角度偏差和距离偏差。式(19)满足离散系统的滑模控制存在和到达条件式(11),指数趋近率的 AGV 偏差状态的相轨迹如图 4 所示。

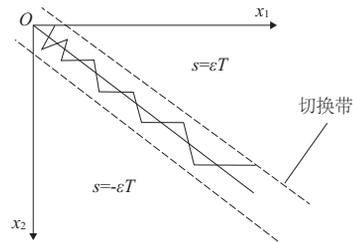


图 4 AGV 偏差状态的指数趋近律相轨迹

设 AGV 进行轨迹跟踪时期望的轨迹位置指令为  $\rho(k)$ , 其变化率为  $d\rho(k)$ , 令  $\mathbf{G} = [\rho(k); d\rho(k)]$ ,  $\mathbf{G}_1 = [\rho(k+1); d\rho(k+1)]$ , 用线性外推预测的方法结合离散 AGV 系统切换函数、控制律和指数趋近律,  $\mathbf{C}_e = [c, 1]$ ,  $c$  为常数, 可得基于指数趋近律的离散 AGV 系统轨迹跟踪的控制律为:

$$\begin{aligned} \Delta\mathbf{v}(k) &= (\mathbf{C}_e \mathbf{B})^{-1} (\mathbf{C}_e \mathbf{G}_1 - \mathbf{C}_e \mathbf{A} \mathbf{x}(k) - s(k) - ds_1(k)) = \\ &= (\mathbf{C}_e \mathbf{B})^{-1} (\mathbf{C}_e \mathbf{G}_1 - \mathbf{C}_e \mathbf{A} \begin{bmatrix} e_\theta(k) \\ e_d(k) \end{bmatrix} - \mathbf{C} \begin{bmatrix} e_\theta(k) \\ e_d(k) \end{bmatrix} - ds_1(k)) \end{aligned} \quad (20)$$

其中:  $\mathbf{C}_e = [c, 1]$ ,  $c$  为常数,  $ds_1(k) = -\varepsilon T \operatorname{sign}(s(k)) - qTs(k) = -\varepsilon T \operatorname{sign} \left( \mathbf{C} \begin{bmatrix} e_\theta(k) \\ e_d(k) \end{bmatrix} \right) - qT \mathbf{C} \begin{bmatrix} e_\theta(k) \\ e_d(k) \end{bmatrix}$ 。

对于指数趋近律,由式(20)和图 4 可知:

$$\begin{aligned} \text{当 } s(k) \rightarrow 0^+ \text{ 时, } s(k+1) &= -\varepsilon T \\ \text{当 } s(k) \rightarrow 0^- \text{ 时, } s(k+1) &= \varepsilon T \end{aligned} \quad (21)$$

式(21)和图 4 说明在 AGV 的滑模控制中,AGV 进行轨迹跟踪控制时状态偏差保持稳态时,其偏差状态的抖动幅度和符号函数的增益正相关,故取较小的增益系数有利于降低 AGV 轨迹跟踪时的抖动。

### 3.2 离散 AGV 系统的变速趋近律

连续系统的变结构控制的变速趋近律为:

$$\dot{s} = -\varepsilon \|x\|_1 \operatorname{sign}(s) \quad (22)$$

将上述变速趋近律应用到离散 AGV 系统的滑模轨迹跟踪控制中,其相应的离散形式为:

$$s(k+1) - s(k) = -\varepsilon T \|x(k)\|_1 \operatorname{sign}(s(k)) =$$

$$-\varepsilon T \left\| \begin{bmatrix} e_\theta(k) \\ e_d(k) \end{bmatrix} \right\|_1 \text{sign} \left( C \begin{bmatrix} e_\theta(k) \\ e_d(k) \end{bmatrix} \right) \quad (23)$$

设 AGV 进行轨迹跟踪时的轨迹位置指令为  $\rho(k)$ , 位置指令的变化率为  $d\rho(k)$ ,  $\rho(k+1)$  和  $d\rho(k+1)$  采用线性外推的方法进行预测。结合离散 AGV 系统切换函数、控制律和式(22)可得基于变速趋近律的离散 AGV 系统轨迹跟踪的滑模控制律为:

$$\begin{aligned} \Delta v(k) &= (C_e B)^{-1} (C_e G_1 - C_e A x(k) - s(k) - ds_2(k)) = \\ &= (C_e B)^{-1} \left( C_e G_1 - C_e A \begin{bmatrix} e_\theta(k) \\ e_d(k) \end{bmatrix} - C \begin{bmatrix} e_\theta(k) \\ e_d(k) \end{bmatrix} - ds_2(k) \right) \end{aligned} \quad (24)$$

其中  $ds_2(k) = -\varepsilon T \|x(k)\|_1 \text{sign}(s(k)) =$

$$-\varepsilon T \left\| \begin{bmatrix} e_\theta(k) \\ e_d(k) \end{bmatrix} \right\|_1 \text{sign} \left( C \begin{bmatrix} e_\theta(k) \\ e_d(k) \end{bmatrix} \right)。$$

AGV 轨迹跟踪变速趋近律满足离散滑模的存在性和可达性,由式(24)可知:

$$\begin{aligned} \text{当 } s(k) \rightarrow 0^+ \text{ 时, } s(k+1) &= -\varepsilon T \left\| \begin{bmatrix} e_\theta(k) \\ e_d(k) \end{bmatrix} \right\|_1 \\ \text{当 } s(k) \rightarrow 0^- \text{ 时, } s(k+1) &= \varepsilon T \left\| \begin{bmatrix} e_\theta(k) \\ e_d(k) \end{bmatrix} \right\|_1 \end{aligned} \quad (25)$$

变速趋近律的 AGV 轨迹跟踪滑模控制的相轨迹如图 5 所示,过原点的射线  $s = \varepsilon T \|x(k)\|_1$  和射线  $s = -\varepsilon T \|x(k)\|_1$  组成了 AGV 控制系统的理想偏差状态带,且  $s=0$  被包含其中。切换带的宽度即 AGV 理想偏差状态带的宽度为:

$$2\Delta = 2\varepsilon T \|x(k)\|_1 \quad (26)$$

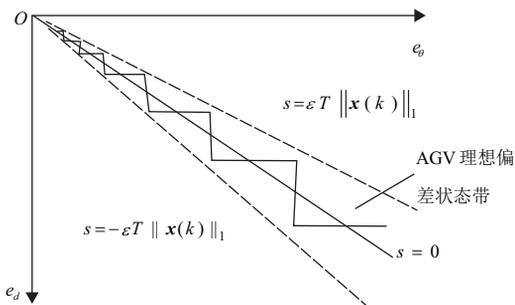


图 5 AGV 偏差状态的变速趋近律相轨迹

由式(26)和图 5 可知,控制周期  $T$  变大时系统的抖动变大,切换带的夹角随之变大。AGV 在轨迹跟踪进入理想偏差状态带后,穿越切换面的幅度和  $\|x(k)\|_1$  成比例,而系统最终能稳定于原点。但变速趋近律的缺点是刚开始时  $\|x(k)\|_1$  较大,AGV 系统的偏差状态有大幅度的抖动。

### 3.3 基于滤波器的组合趋近律离散 AGV 系统轨迹跟踪的滑模控制

组合趋近律是指在滑模运动刚开始时利用指数趋近律,在 AGV 稳定时利用变速趋近律。采用组合趋近律能够避免 AGV 轨迹跟踪刚开始时偏差的大幅度抖动以及轨迹跟踪稳定时偏差的高频抖动。

取一正实数  $\delta_0$  为滑模控制的切换阈值,当  $\|x(k)\|_1 \geq \delta_0$  时,AGV 控制系统采用指数趋近律控制函数,当  $\|x(k)\|_1 < \delta_0$  时,采用变速趋近律控制函数。 $\delta_0$  取值过大,指数趋近律的作用变小,起始抖动的问题会明显<sup>[12]</sup>, $\delta_0$  取值过小,可能产生大幅度的穿越抖动<sup>[13]</sup>。由式(20)和式(24)可得到系统的组合趋近律控制函数式(27)所示。

$$\Delta v(k) = \begin{cases} (C_e B)^{-1} (C_e G_1 - C_e A [e_\theta(k), e_d(k)]^T - C [e_\theta(k), e_d(k)]^T - ds_1(k)) & \|x(k)\|_1 \geq \delta_0 \\ (C_e B)^{-1} (C_e G_1 - C_e A [e_\theta(k), e_d(k)]^T - C [e_\theta(k), e_d(k)]^T - ds_2(k)) & \|x(k)\|_1 < \delta_0 \end{cases} \quad (27)$$

由于本系统存在不可避免的过程干扰和图像采集的噪声<sup>[14]</sup>,因此在上文组合趋近律的基础上,采用离散 Kalman 滤波器对系统的干扰和噪声进行滤波。在式(3)的基础上,增加 AGV 过程噪声  $g(k)$  和测量噪声  $m(k)$ ,  $\Delta v_e(k)$  为被控对象的实际输出,则式(3)的离散系统方程可写为:

$$\begin{cases} [e_\theta(k), e_d(k)]^T = A [e_\theta(k-1), e_d(k-1)]^T + B(\Delta v(k) + g(k)) \\ \Delta v_e(k) = C [e_\theta(k), e_d(k)]^T + m(k) \end{cases} \quad (28)$$

AGV 轨迹跟踪控制采用式(27)。设离散 Kalman 滤波器算法如下<sup>[15]</sup>:

$$\begin{cases} K_k = P_{k/k-1} C^T (C P_{k/k-1} C^T + R_m)^{-1} \\ P_k = (I - K_k C) P_{k/k-1} \\ P_{k/k-1} = A P_{k-1} A^T + B Q B^T \\ [e_\theta(k), e_d(k)]^T = A [e_\theta(k-1), e_d(k-1)]^T + \\ K_k (\Delta v_e(k) - C A [e_\theta(k-1), e_d(k-1)]^T) \end{cases} \quad (29)$$

式中:  $K_k$  为系统的增益矩阵;  $I$  为单位矩阵;  $P_k$  为估计误差协方差矩阵;  $P_{k/k-1}$  为预测误差协方差矩阵;  $A$ 、 $B$ 、 $C$  如前所述;  $R_m$  为正定矩阵,代表系统测量噪声  $m(k)$  的方差阵;  $Q$  为非负定矩阵,代表 AGV 运行的过程噪声  $g(k)$  的方差阵。只要给定初值  $x(0)$  和  $P_0$ ,根据  $k$  时刻被控对象的实际输出  $\Delta v_e(k)$ ,即可得到  $k$  时刻 AGV 轨迹跟踪的偏差状态值  $x(k)$ 。滤波后被控对象的输出为:

$$\Delta v_e(k) = C x(k) = C [e_\theta(k), e_d(k)]^T \quad (30)$$

## 4 验证与分析

为了验证理论分析的可行性,在某机械制造车间内进行 5 d 的 8 h 连续测试。测试内容为 AGV 跟踪一段半径 80 cm 的圆弧和 2 条直线段,在工位 A、B 与固定货架对接。测试条件如图 6 所示,导引蓝线线宽为 2 cm,工位内的限行宽度 72 cm,AGV 与工位货架的对接通过 AGV 顶升货架上的锥形销来实现,顶升对接的最大允许误差为 5 mm。测试中使用的 AGV 为南京航空航天大学自主研发的视觉导引差速驱动 AGV,车身整体宽度为 70 cm。初始位姿为  $[35 \text{ mm}, 1^\circ]$  的实际运行轨迹曲线如图 7 所示。控制器参数如表 1 所示。不同运行参数的试验结果如表 2 所示。



图 6 差速 AGV 在工厂实际测试环境

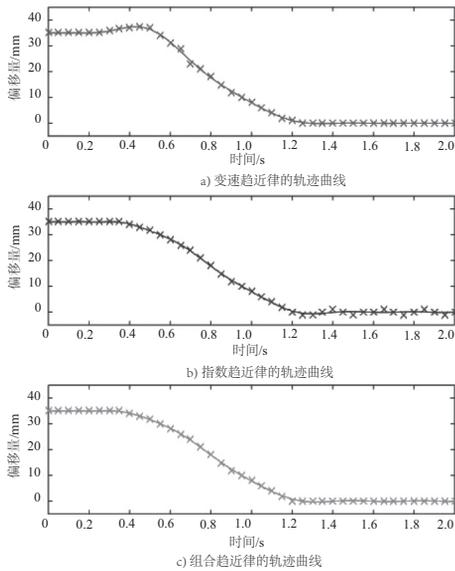


图 7 不同趋近律的 AGV 运行轨迹曲线对比

表 1 AGV 控制器的部分控制参数表

参数	$c$	$\varepsilon$	$q$	$Q$	$R_m$	$\delta_0$
数值	20	5	30	1	1	0.6

表 2 不同运行速度试验结果

负载/kg	运行速度/(m/s)	实测巡线摆动幅度/mm	实测与工位对接误差/mm
300	0.2	<3	<3
300	0.4	<4	<4
300	0.6	<4	<5
300	0.7	<5	<5

巡线跟踪需要较高的精度和稳定性<sup>[16]</sup>, 试验结果显示, 采用基于组合趋近律的滑模控制的 AGV 运行稳定、巡线准确, 过弯和循直线均未出现异常摆动, 实际测得巡线最大摆动幅度<5 mm, 满足对接最大允许误差 5 mm。AGV 可以通过顶升机构自主完成上料和下料, 满足工厂实际生产的要求。

## 5 结语

本章针对 AGV 的轨迹跟踪运动控制问题, 提出了基于滤波器的组合趋近律离散滑模控制。首先根据 AGV 的运动学模型, 建立了系统的离散状态方程, 然后提出了基

于组合趋近律的滑模控制, 当  $\|x(k)\|_1 \geq \delta_0$  时选择指数趋近律, 当  $\|x(k)\|_1 < \delta_0$  选择变速趋近律, 这样就同时避免了指数趋近律最后不能趋近于原点的问题和变速趋近律刚进入理想偏差状态带时偏差抖振幅度较大的问题。为了避免系统的外界干扰和噪声, 在组合趋近律的基础上加入 Kalman 滤波算法。经过实际工厂试验, 试验结果证明 AGV 在 0.2 m/s~0.7 m/s 的速度区间内路径跟踪稳定无明显抖动, 最大横向摆动<5 mm, 工位对接准确, 满足工厂实际生产的要求。

## 参考文献:

- [1] HONG Yanguo, FENG Liu, RU Yu, et al. Regional path moving horizon tracking controller design for autonomous ground vehicles [J]. Science China(Information Sciences), 2017, 60(1):1-7.
- [2] 武星, 沈伟良, 楼佩煌, 等. 视觉导引 AGV 鲁棒特征识别与精确路径跟踪研究[J]. 农业机械学报, 2016, 47(7):48-52.
- [3] 闫茂德, 吴青云, 贺昱曜. 非完整移动机器人的自适应滑模轨迹跟踪控制[J]. 系统仿真学报, 2007, 19(3):579-581.
- [4] 李娜. 轮式移动机器人的建模与运动控制[D]. 西安: 西安理工大学, 2016.
- [5] 孟庆鑫, 王晓东. 机器人技术基础[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 2006.
- [6] DING Fuguang, ZHANG Tan, WANG Chenglong. Trajectory tracking control of air cushion vessel based on sliding mode control[C]. Chengdu: 第 35 届中国控制会议, 2016.
- [7] ZHAO Yao, SHENG Yongzhi, LIU Xiangdong. Sliding mode control based guidance law with impact angle constraint[J]. Chinese Journal of Aeronautics, 2014, 27(1):145-152.
- [8] 史恩秀. 轮式移动机器人的运动控制及定位方法研究[D]. 西安: 西安理工大学, 2006.
- [9] SARPTURK S Z, ISTEFANOPULOSY, KAYNAKO. On the stability of discrete-time sliding mode control system. IEEE Transactions on Automatic Control, 1987, 32(10):930-932.
- [10] 高为炳. 离散时间系统的变结构控制[J]. 自动化学报, 1995, 21(2):154-161.
- [11] MEXGHANI Ben, ROMDHANE Neila, DAMAK Tarak. Adaptive terminal sliding mode control for rigid robotic manipulators [J]. International Journal of Automation and Computing, 2011, 8(2):215-220.
- [12] 毛亮亮, 周凯, 王旭东. 永磁同步电机变指数趋近律滑模控制[J]. 电机与控制学报, 2016(4):106-111.
- [13] ZHANG Hailong, WANG Enrong, ZHANG Ning. Semi-active sliding mode control of vehicle suspension with magneto-rheological damper[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2015, 28(1):63-75.
- [14] KANWAL Naveed, ZEASHAN H, KHAN. Adaptive path tracking control design for a wheeled mobile robot[C]. Beijing: 2017 3rd IEEE International Conference on Control Science and Systems Engineering (ICCSSE), 2017.
- [15] BRIAN D, O. ANDERSON. Optimal filtering[M]. New York: Dover Publications, 2005.
- [16] H. Martínez-Barberá, D. Herrero-Pérez. Autonomous navigation of an automated guided vehicle in industrial environments[J]. Robotics and Computer Integrated Manufacturing, 2010, 26:296-311.

收稿日期: 2018-08-13