doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2020.09.003

# 农田平地机导航侧滑估计与自适应控制方法

景云鹏[1,2]　刘　刚[1,2]　金志坤[1,2]

(1.中国农业大学现代精细农业系统集成研究教育部重点实验室,北京 100083;
2.中国农业大学农业农村部农业信息获取技术重点实验室,北京 100083)

**摘要**:针对农田平地机在无人驾驶作业时因受地面侧滑影响而导致路径追踪控制精度降低的问题,提出一种基于牵引式农田平地机的导航侧滑估计与自适应控制方法。根据路径追踪时平地铲与拖拉机的位置关系,建立了牵引式农田平地机的运动学模型;基于运动学模型,提出了一种侧滑估计器,用来预测导航控制中车轮因侧滑产生的侧滑角,并计算出拖拉机的前轮转角控制率;采用改进的非线性函数构造方法对 PID 控制器的参数 $K_P$、$K_I$、$K_D$ 进行实时整定,实现了农田平地机自适应导航控制。田间试验表明,该方法使平地铲路径追踪的平均绝对偏差减小了 6.78 cm,标准偏差减小了 10.1 cm。与无侧滑估计和参数自适应的导航控制相比,本文方法提高了农田平地机的路径追踪精度,增强了导航控制系统对平地机的适应性和鲁棒性。

**关键词**:农田平地机;导航;侧滑估计;自适应控制;非线性整定

**中图分类号**:TP273$^+$.2　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-1298(2020)09-0026-08　　**OSID**:

# Adaptive Guidance Control Method with Sideslip Estimation for Land Leveler Pulling by Tractor

JING Yunpeng[1,2]　LIU Gang[1,2]　JIN Zhikun[1,2]

(1. *Key Laboratory of Modern Precision Agriculture System Integration Research*, *Ministry of Education*, *China Agricultural University*, *Beijing* 100083, *China*
2. *Key Laboratory of Agricultural Information Acquisition Technology*, *Ministry of Agriculture and Rural Affairs*, *China Agricultural University*, *Beijing* 100083, *China*)

**Abstract**: Sideslip phenomenon often occur when land leveler works in farmland environment, in order to reduce the influence of sideslip angle on path tracking accuracy, an adaptive guidance control method with sideslip estimation for land leveler pulling by tractor was proposed. According to the position relationship between forklift and tractor, the kinematic model of land leveler was established. A sideslip estimator based on the kinematic model was designed, which could predict the wheel slip angle due to sideslip during navigation control. Moreover, the front wheel angle control rate considering sideslip effect of tractor was calculated. Finally, an improved nonlinear function construction method was adopted to adjust the parameters of PID controller $K_P$, $K_I$ and $K_D$ in real time to realize the adaptive control of the farmland leveler. The results of fields test showed that the path tracking mean absolute lateral of the leveling shovel in this method was reduced by 6.78 cm, and the standard lateral of the leveling shovel in this method was reduced by 10.1 cm. Compared with the navigation control method with no sideslip estimation and parameters adaptive, this method can improve the path tracking accuracy and the adaptability and robustness of the navigation control system for the farmland leveler.

**Key words**: land leveler; guidance; sideslip estimation; adaptive control; nonlinear self-tuning

## 0　引言

在农业领域自动导航技术多用于农田生产过程[1],通过对拖拉机和平地铲的自动控制,实现农田平地机的自动导航,可大大降低操作者的工作强度,具有较高的研究开发价值。

收稿日期:2020-05-27　修回日期:2020-07-09
**基金项目**:国家重点研发计划项目(2017YFD0701100-2017YFD0701105)
**作者简介**:景云鹏(1995—),男,博士生,主要从事 GNSS 农机导航与农田平整技术研究,E-mail:963476694@qq.com
**通信作者**:刘刚(1966—),男,教授,博士生导师,主要从事农业电子信息技术研究,E-mail:pac@cau.edu.cn

国内外对农田平地机导航控制的研究较少，一些国外公司例如 Trimble 和 John Deere 研发了用于各种农业生产作业的导航系统，但缺少针对农田平地机导航系统的开发。国内学者多侧重于对平地导航路径进行规划设计。文献[2－3]根据地势分布，对平地导航的全局作业路径进行合理规划。文献[4]通过拉力传感器实时获取平地铲的负载，引导驾驶员辅助导航平地作业。与自动插秧机[5－6]、施肥机[7]和直播机等不同，农田平地机的自动导航不仅需要关注其导航行驶过程中平地铲的位姿变化，还应关注平地铲能否对事先规划好的农田平整路径进行有效追踪。目前，农田平地机的拖拉机与平地铲的连接模式主要分为三点悬挂式[8]和销轴连接的牵引式[9]2 种。牵引式农田平地机平地面积更大，铲车摆向灵活。

对于牵引式农机的导航系统，文献[10－11]通过建立农机具-拖拉机组合系统的动力学模型，提出相应的非线性导航控制器，同时也考虑了侧滑角对导航精度的影响。为了保证控制精度，这些研究在车辆和农机具连接处添加了横向控制器，增加了控制模型的参数。文献[12]对铰接摆杆式大功率拖拉机进行了转向仿真试验。文献[13－16]对铰接式无人驾驶车辆的系统建模、路径追踪算法、导航精度优化和避障进行了深入研究，为牵引式农田平地机自动导航研究提供了思路。农田平地机由拖拉机提供牵引动力，导航过程中通过控制拖拉机前轮转角和后车轮行驶速度的变化引导铲车驶入指定路线，这需要建立不同数学模型来描述平地机的运动状态。同时，在农田环境下，车轮侧滑产生的侧滑角会影响导航控制精度，因此必须考虑侧滑角的影响。针对以上问题，本文提出一种带有侧滑估计的自适应 PID 导航控制方法，旨在实现基于 GNSS 的农田平地机的自动导航，提高平地作业的路径跟踪精度。

## 1　牵引式农田平地机数学模型

### 1.1　路径追踪状态描述

牵引式农田平地机在平地作业过程中，通过控制拖拉机的行驶状态实现平地铲对规划路径的追踪，车轮与农田表面之间由于摩擦力的影响产生侧滑角。如图 1 所示，拖拉机与平地铲之间通过销轴进行连接，待追踪路径为曲线 $C$。以后轮轴的中心位置为研究点，得到拖拉机与追踪曲线的位置误差为 $d_{Te}$，平地铲与追踪曲线的位置误差为 $d_{Fe}$。拖拉机的前轮转向改变农田平地机的航向，前轮转角为 $\delta_T$，转向过程中产生的侧滑角为 $\beta_1$。拖拉机后轮为驱动轮，行驶速度为 $V_T$，路径追踪时产生的侧滑角为 $\beta_2$。行驶过程中，平地铲与拖拉机连接处的夹角为 $\varphi$，受到牵引力的作用，平地铲的行驶速度为 $V_F$，车轮产生的侧滑角为 $\beta_3$。

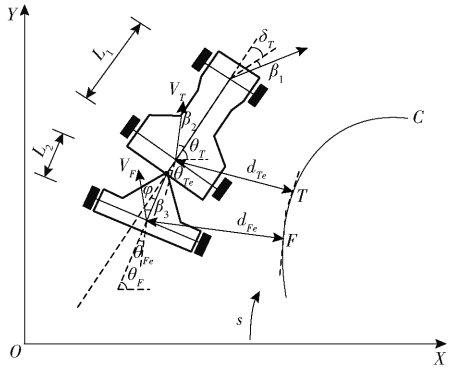


图 1　农田平地机路径追踪状态

Fig. 1　Path tracking of farmland leveler

### 1.2　运动学模型

对拖拉机和平地铲简化后的组合模型进行运动学分析，如图 2 所示。当农田平地机追踪至规划路径 $C$ 时，拖拉机和平地铲的追踪航向角分别为 $\theta_{Td}$ 和 $\theta_{Fd}$，追踪夹角为 $\varphi_d$。结合图 1 可知，追踪点 $T$ 和 $F$ 处的曲率半径分别为 $1/C(s_T)$ 和 $1/C(s_F)$，农田平地机的路径追踪目的在于实时地调整拖拉机的前轮转角 $\delta_T$ 和速度 $V_T$，使平地铲与曲线 $C$ 的横向误差 $d_{Fe}$ 趋于 0，航向误差 $\theta_{Fe}$ 趋于 0，拖拉机与平地铲的夹角趋于 $\varphi_d$。结合文献[17]，拖拉机的追踪误差方程可改进为

$$\begin{cases} \dot{s}_T = V_T \dfrac{\cos(\theta_{Te}+\beta_2)}{1-C(s_T)d_{Te}} \\ \dot{d}_{Te} = V_T \sin(\theta_{Te}+\beta_2) \\ \dot{\theta}_{Te} = V_T\left(\cos\beta_2 \dfrac{\tan(\delta_T+\beta_1)-\tan\beta_2}{L_1} - \dfrac{C(s_T)\cos(\theta_{Te}+\beta_2)}{1-C(s_T)d_{Te}}\right) \end{cases} \tag{1}$$

其中　　$\theta_{Te} = \theta_{Td} - \theta_T$

式中　$s_T$——$T$ 点沿曲线 $C$ 的坐标

$\theta_{Te}$——拖拉机航向追踪误差

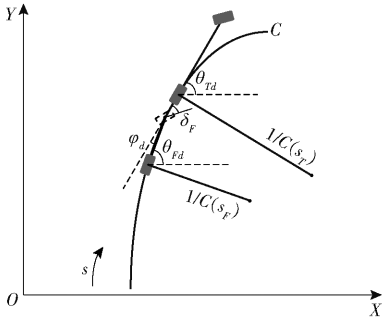


图 2　运动学模型

Fig. 2　Kinematic model

$C(s_T)$——$T$ 点曲率

$L_1$——拖拉机车轮轴距

$\theta_T$——拖拉机航向角

假设平地铲与拖拉机的连接处存在一个虚拟转向轮,平地铲行驶过程中不断地调整转向角 $\delta_F$,同理可得平地铲的追踪误差方程为

$$\begin{cases}\dot{s}_F = V_F\dfrac{\cos(\theta_{Fe}+\beta_3)}{1-C(s_F)d_{Fe}}\\ \dot{d}_{Fe} = V_F\sin(\theta_{Fe}+\beta_3)\\ \dot{\theta}_{Fe} = V_F\left(\cos\beta_3\dfrac{\tan\delta_F-\tan\beta_3}{L_2}-\dfrac{C(s_F)\cos(\theta_{Fe}+\beta_3)}{1-C(s_F)d_{Fe}}\right)\end{cases} \tag{2}$$

其中 $\theta_{Fe}=\theta_{Fd}-\theta_F$

式中 $s_F$——$F$ 点沿曲线 $C$ 的坐标

$C(s_F)$——$F$ 点曲率

$L_2$——平地铲车轮轴与连接处的距离

$\delta_F$——平地铲虚拟前轮的期望转角

$\theta_F$——平地铲航向角

夹角 $\varphi$ 与拖拉机航向角 $\theta_T$ 及平地铲航向角 $\theta_F$ 的变化有关,由空间位置关系可知

$$\dot{\varphi}=\dot{\theta}_F-\dot{\theta}_T=V_F\cos\beta_3\frac{\tan\delta_F-\tan\beta_3}{L_2}-V_T\cos\beta_2\frac{\tan(\delta_T+\beta_1)-\tan\beta_2}{L_1} \tag{3}$$

实际情况下平地铲的虚拟转向轮并不存在,理想转向角 $\delta_F$ 可由平地铲的追踪误差($d_{Fe}$,$\theta_{Fe}$)进行公式表达。分别将平地铲的状态变量和控制变量表示为 $\boldsymbol{A}=[a_1\quad a_2\quad a_3]^{\mathrm{T}}$ 和 $\boldsymbol{M}=[m_1\quad m_2]^{\mathrm{T}}$,式(2)的线性表示形式为

$$\begin{bmatrix}a_1\\a_2\\a_3\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}s_F\\d_{Fe}\\\tan(\theta_{Fe}+\beta_3)(1-C(s_F)d_{Fe})\end{bmatrix} \tag{4}$$

式中 $a_1$、$a_2$、$a_3$——状态变量对时间的导数

控制变量的线性形式为

$$\begin{bmatrix}m_1\\m_2\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}V_F\dfrac{\cos(\theta_{Fe}+\beta_3)}{1-C(s_F)d_{Fe}}\\\dfrac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}t}\tan(\theta_{Fe}+\beta_3)(1-C(s_F)d_{Fe})\end{bmatrix} \tag{5}$$

式中 $m_1$、$m_2$——控制变量对时间的导数

将式(4)中的 $a_2$、$a_3$ 对曲线坐标 $a_1$ 进行求导,可求得追踪误差(式(2))的链式表达[18-19]

$$\begin{cases}\dot{a}_2=\dfrac{\mathrm{d}a_2}{\mathrm{d}a_1}=a_3\\ \dot{a}_3=\dfrac{\mathrm{d}a_3}{\mathrm{d}a_1}=m_3=\dfrac{m_2}{m_1}\end{cases} \tag{6}$$

链式表达式(6)是线性的,可以将控制参数 $m_3$ 表达为

$$m_3=-K_da_3-K_\theta a_2\quad(K_d、K_\theta\in\mathbf{R}^+) \tag{7}$$

式中 $K_d$——横向误差 $d_e$ 的控制系数

$K_\theta$——航向误差 $\theta_e$ 的控制系数

结合式(6)、(7),可以得到

$$a_2''+K_da_2'+K_\theta a_2=0 \tag{8}$$

由式(4)、(8)可知,平地铲的横向误差 $d_{Fe}$ 和航向误差 $\theta_{Fe}$ 都收敛于 0。并将式(8)代入式(5)、(6),可以求得平地铲虚拟转向轮的控制率为

$$\delta_F=\arctan\left(\frac{L_2}{\cos\beta_3}\left(\frac{C(s_F)\cos\gamma}{\varepsilon}+\frac{\eta\cos^3\gamma}{\varepsilon^2}\right)-\tan\beta_3\right) \tag{9}$$

其中 $\gamma=\theta_{Fe}+\beta_3$

$$\eta=-K_dd_{Fe}-K_\theta\varepsilon\tan\gamma+C(s_F)\varepsilon\tan^2\gamma$$

$$\varepsilon=1-C(s_F)d_{Fe}$$

将式(9)和式(3)联立,可得

$$\dot{\varphi}=V_F\left(\frac{C(s_F)\cos\gamma}{\varepsilon}+\frac{\eta\cos^3\gamma}{\varepsilon^2}-\frac{2\sin\beta_3}{L_2}\right)-V_T\left(\cos\beta_2\frac{\tan(\delta_T+\beta_1)-\tan\beta_2}{L_1}\right) \tag{10}$$

由式(10)可知,夹角 $\varphi$ 作为路径追踪时关联拖拉机和平地铲的变量,其由平地铲的状态变量($s_F$,$d_{Fe}$,$\theta_{Fe}$)和拖拉机的控制变量($V_T$,$\delta_T$)共同决定。因此,联立式(10)、(1)可最终求得路径追踪下牵引式农田平地机的运动学模型

$$\begin{bmatrix}\dot{s}_T\\\dot{d}_{Te}\\\dot{\theta}_{Te}\\\dot{\varphi}\end{bmatrix}=\begin{bmatrix}\dfrac{\cos(\theta_{Te}+\beta_2)}{1-C(s_T)d_{Te}}\\\sin(\theta_{Te}+\beta_2)\\\cos\beta_2\dfrac{\tan(\delta_T+\beta_1)-\tan\beta_2}{L_1}-\dfrac{C(s_T)\cos(\theta_{Te}+\beta_2)}{1-C(s_T)d_{Te}}\\\cos\beta_2\dfrac{\tan\beta_2-\tan(\delta_T+\beta_1)}{L_1}\end{bmatrix}V_T+\begin{bmatrix}0\\0\\0\\\dfrac{C(s_F)\cos\gamma}{\varepsilon}+\dfrac{\eta\cos^3\gamma}{\varepsilon^2}-\dfrac{2\sin\beta_3}{L_2}\end{bmatrix}V_F \tag{11}$$

## 2 导航侧滑估计器

### 2.1 侧滑角计算

路径追踪过程中存在侧滑,会影响控制量的准确计算,降低导航追踪精度,实际工作时很难准确测量出侧滑角。因此基于自动控制理论的思想,建立侧滑估计器,以侧滑角为控制变量,农田平地机的追踪误差为状态变量。即通过不断地改变控制变量 $\boldsymbol{E}=[\beta_2\quad\beta_1\quad\beta_3]^{\mathrm{T}}$,使计算出的估计变量 $\boldsymbol{B}=[\bar{\theta}_e$

$\bar{d}_e$　$\bar{\varphi}]^{\mathrm{T}}$收敛于 GNSS 和传感器所测出的状态变量 $\boldsymbol{X}=[\theta_e \quad d_e \quad \varphi]^{\mathrm{T}}$。由于控制变量没有具体坐标，将农田平地机的运动学模型式(11)用非线性形式[20]表达为

$$\dot{\boldsymbol{B}}=f(\boldsymbol{B},\boldsymbol{E}) \tag{12}$$

考虑极限情况下侧滑角减小为 0，即农田平地机不发生侧滑，则式(12)可在控制变量$(\beta_2,\beta_1,\beta_3)$趋于 0 时进行行线性化

$$\dot{\boldsymbol{B}}=f(\boldsymbol{B},0)+\boldsymbol{D}\boldsymbol{E} \tag{13}$$

控制变量的预测矩阵 $\boldsymbol{D}$ 是由函数 $f(\boldsymbol{B},\boldsymbol{E})$对控制变量 $\boldsymbol{E}$ 求偏导后得到

$$\boldsymbol{D}=\frac{\partial f(\boldsymbol{B},0)}{\partial \boldsymbol{E}}=$$

$$\begin{bmatrix} V_T\cos\bar{\theta}_{Te} & 0 & 0 \\ \dfrac{V_T C(s_T)\sin\bar{\theta}_{Te}}{1-C(s_T)\bar{d}_{Te}}-\dfrac{V_T}{L_1} & \dfrac{V_T(\tan^2\delta_T+1)}{L_1} & 0 \\ \dfrac{V_T}{L_1} & -\dfrac{V_T(\tan^2\delta_T+1)}{L_1} & \lambda_1+\lambda_2+\lambda_3 \end{bmatrix} \tag{14}$$

其中

$$\lambda_1=-\frac{V_F C(s_F)\sin\bar{\theta}_{Fe}}{\varepsilon}$$

$$\lambda_2=-\frac{3V_F\eta\cos^2\bar{\theta}_{Fe}\sin\bar{\theta}_{Fe}}{\varepsilon^2}$$

$$\lambda_3=-\frac{2V_F}{L_2}$$

式(14)中，当横向偏差 $\theta_{Te}\neq\pi/2$，$d_{Fe}\neq 1/C(s_F)$且 $\lambda_1+\lambda_2+\lambda_3\neq 0$，则矩阵 $\boldsymbol{D}$ 可逆。侧滑估计器的目的是使估计变量 $\boldsymbol{B}$ 与测量变量 $\boldsymbol{X}$ 之间的误差 $\boldsymbol{R}$ 为 0($\boldsymbol{R}=\boldsymbol{B}-\boldsymbol{X}$)，误差的运动学方程可表示为

$$\dot{\boldsymbol{R}}=\boldsymbol{G}\boldsymbol{R}=f(\boldsymbol{B},0)+\boldsymbol{D}\boldsymbol{E}-\dot{\boldsymbol{X}} \tag{15}$$

偏差增益矩阵 $\boldsymbol{G}$ 为 Hurwitz 矩阵，定义了所估计的状态变量 $\boldsymbol{B}$ 向测量变量 $\boldsymbol{E}$ 的收敛时间[21]。测量变量 $\boldsymbol{X}$ 的值是等间隔的(取决于采集设备)，因此可得

$$\dot{\boldsymbol{X}}=\begin{bmatrix} \dfrac{d_e(k+1)-d_e(k)}{T} \\ \dfrac{\theta_e(k+1)-\theta_e(k)}{T} \\ \dfrac{\varphi(k+1)-\varphi(k)}{T} \end{bmatrix} \tag{16}$$

其中 $T$ 为采样周期。最终，通过状态变量和测量变量的不断收敛计算，可求得输入变量 $\boldsymbol{E}$(即农田平地机的侧滑角$(\beta_1,\beta_2,\beta_3)$)

$$\boldsymbol{E}=\boldsymbol{D}^{-1}(\boldsymbol{G}\boldsymbol{R}-f(\boldsymbol{B},0)+\dot{\boldsymbol{X}}) \tag{17}$$

侧滑估计的执行结构如图 3 所示，平地机的路径追踪过程中状态向量 $\boldsymbol{X}=[\theta_e \quad d_e \quad \varphi]^{\mathrm{T}}$持续的输入至侧滑估计器，计算得到的估计变量 $\boldsymbol{B}=[\bar{\theta}_e \quad \bar{d}_e \quad \bar{\varphi}]^{\mathrm{T}}$与状态向量形成反馈。侧滑估计过程中得到的侧滑角$(\beta_1,\beta_2,\beta_3)$传递至导航控制参与计算，同时转角控制率 $\delta_T$作为输入参量又参与侧滑估计，实现整个控制结构的闭合。

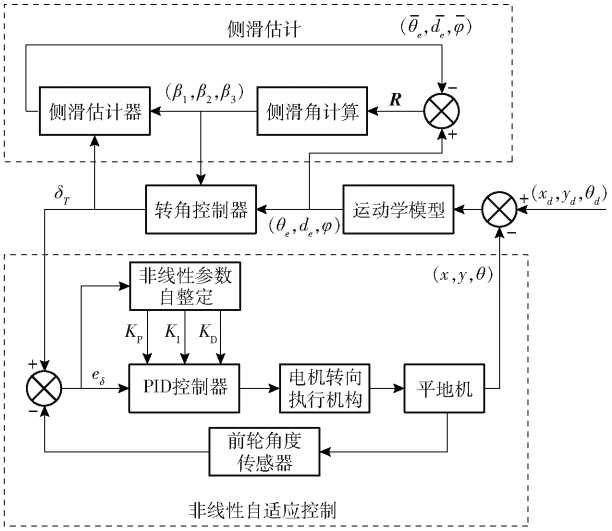


图 3　平地机导航的控制结构图

Fig. 3　Navigation control structure of land leveler

### 2.2　导航控制率

农田平地机路径追踪时拖拉机的行驶状态$(\theta_{Te},d_{Te},V_T)$和平地铲的行驶状态$(\theta_{Fe},d_{Fe},V_F)$作为输入变量，是可以通过测量和计算获得的。结合运动学模型，拖拉机的前轮期望转角 $\delta_T$作为平地机导航的控制输入，通过夹角 $\varphi$ 建立拖拉机与平地铲的联系。可将运动过程中平地铲相对于拖拉机横摆的曲率看作一阶惯性环节[22]

$$\dot{\varphi}=\frac{1}{T}(\varphi_d-\varphi) \tag{18}$$

将式(18)、(11)联立，可得到农田平地机的前轮期望转角

$$\delta_T=\arctan\left(\frac{L_1}{V\cos\beta_2}(\mu_1+\mu_2)+\frac{1}{T}(\varphi-\varphi_d)\right)-\beta_1 \tag{19}$$

其中

$$\mu_1=\frac{V_F\cos\gamma(C(s_F)\varepsilon+\eta\cos^2\gamma)}{\varepsilon^2}$$

$$\mu_2=\frac{V_T L_2\sin\beta_2-2V_F\sin\beta_3}{L_1 L_2}$$

其中采样周期 $T$ 取决于 RTK－GNSS 数据接收设备。$\varphi_d$为追踪至期望路径时平地铲与拖拉机之间的理想夹角，$\varphi_d=\theta_{Fd}-\theta_{Td}$。

## 3　非线性自适应 PID 控制

### 3.1　非线性参数整定

农田平地机路径追踪时，拖拉机的行驶方向由电机转向执行机构带动方向盘实现自动控制。非线

性自适应控制结构如图 3 所示,PID 控制器接收到误差输入信号,控制电机转向机构带动方向盘转动,调整拖拉机追踪时的航向。角度传感器实时地测量前轮转角的角度并与转角控制器求得的控制率 $\delta_T$ 比较,得到误差再输入至 PID 控制器,形成一个闭环控制系统。

PID 比例增益参数 $K_P$、积分增益参数 $K_I$ 和微分参数 $K_D$ 的选择会影响控制器适应性和鲁棒性,本文使用一种改进的非线性整定方法[23],以转角误差 $e_\delta(t)$ 为输入量,3 个增益参数为输出量,构造非线性整定函数

$$\begin{cases} K_P(e_\delta(t)) = a_P + b_P(1 - \mathrm{sech}(c_P e_\delta(t))) \\ K_I(e_\delta(t)) = a_I \mathrm{sech}(c_I e_\delta(t)) \\ K_D(e_\delta(t)) = a_D + \dfrac{b_D}{1 + c_D \exp(d_D e_\delta(t))} \end{cases} \tag{20}$$

式中 $a_P$、$b_P$、$c_P$——比例增益范围系数

$a_I$、$c_I$——积分增益范围系数

$a_D$、$b_D$、$c_D$、$d_D$——微分增益范围系数

### 3.2 自适应控制方法

如式(20)所示,范围系数(正实数)决定着增益的取值区间。当误差 $e_\delta(t) \to \infty$ 时,比例增益系数 $K_P$ 取最大值 $a_P + b_P$。当 $e_\delta(t) = 0$ 时,$K_P$ 取最小值 $a_P$。$b_P$ 为 $K_P$ 的变化区间,调整 $c_P$ 可调整 $K_P$ 的变化速率;积分增益参数 $K_I$ 的取值范围为(0, $a_I$),当 $e_\delta(t) = 0$ 时,$K_I$ 取最大值,$c_I$ 决定着 $K_I$ 变化速率;对于微分增益,$a_D$ 为 $K_D$ 的最小值,$a_D + b_D$ 为 $K_D$ 的最大值。当 $e_\delta(t) = 0$ 时,$K_D = a_D + b_D/(1 + c_D)$,调整 $d_D$ 可调整 $K_D$ 的变化速率。

随着转角误差 $e_\delta(t)$ 的实时计算,非线性自适应 PID 控制器的控制输入变量为

$$u(t) = K_P e_\delta(t) + K_I \int_0^t e_\delta(t)\mathrm{d}t + K_D(e_\delta(t), e_w(t)) \frac{\mathrm{d}e_\delta(t)}{\mathrm{d}t} \tag{21}$$

式中 $e_w(t)$——转角误差的变化速率

## 4 田间试验验证

### 4.1 试验平台与参数设定

农田平地机以 John Deere 5 - 904 型拖拉机为牵引动力,使用北京盛恒天宝公司生产的平地铲,两者通过销轴式半刚性连接,试验现场如图 4 所示。

使用上海华测导航公司的 GNSS 双天线导航定位系统测量农田平地机的运动状态,配置 1 个中绘 i70 型基站。移动端的 GNSS 双天线和接收机有 2 套:1 套 GNSS 定向、定位天线分别放置于拖拉机前后车轴的中心位置,测量拖拉机运动过程中的位置与航向信息;另 1 套 GNSS 定向天线放置于牵引连接处,GNSS 定位天线放置于平地铲后轮轴的中心位置,测量平地铲运动过程中的位置与航向信息。2 个定位测向接收机的型号都为 P3 - DT,其平面定位精度为 0.8 cm ± 1 mm,航向测量精度为 0.1°。用于接收 GNSS 天线传输的数据,接收频率设置为 5 Hz。采用北京通磁伟业公司生产的 WYT - 3I3D 型无触点角度传感器测量拖拉机的前轮转角,测量精度为 0.1°。配合自行设计的步进电机转向平台和导航控制器,实现平地路径的导航追踪控制。



图 4 农田平地机试验现场

Fig. 4 Experimental site of land leveler in field

农田平地机的拖拉机前后轴距为 2.3 m,拖拉机前轮轴长为 1.6 m,拖拉机的后轮轴长为 1.7 m,平地铲的宽度为 2.5 m,平地铲前后轴距为 2.7 m。通过前期的 Matlab/Simulink 仿真平台的调试,结合平地导航所使用的步进电机转向控制系统的特性[24-25],本文的电机导航系统响应追踪达到稳定时,非线性整定函数的比例增益范围系数 $a_P$、$b_P$、$c_P$ 分别为 1.2、2.5、0.2;积分增益范围系数 $a_I$、$c_I$ 分别为 2、0.5;微分增益范围系数 $a_D$、$b_D$、$c_D$、$d_D$ 分别为 0.5、1.5、4.5、0.3。再由手工试凑法,得出横向偏差系数 $K_d$ 为 1,航向偏差系数 $K_\theta$ 为 2 时导航控制系统的振荡最小。同时可得偏差增益矩阵为

$$\boldsymbol{G} = \begin{bmatrix} -3 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 \\ 0 & 0 & -0.5 \end{bmatrix} \tag{22}$$

### 4.2 田间平地机的导航试验

试验地点位于中国农业大学上庄实验站,选取 1 块收获玉米后旋耕过的农田,设定的追踪路径由 3 条直线与 2 条曲线组成。分别进行 3 次路径追踪试验:试验 1 导航控制方法带有侧滑估计器,但 PID 参数固定;试验 2 导航控制方法既有侧滑估计器,又进行非线性参数整定;试验 3 导航控制方法无侧滑估计器,且 PID 参数固定。

农田平地机 3 次试验的路径追踪效果如图 5 所示,为了符合农田平整时的作业条件,农田平地机的追踪起始点距离设定路线大于 1 m,拖拉机的行驶

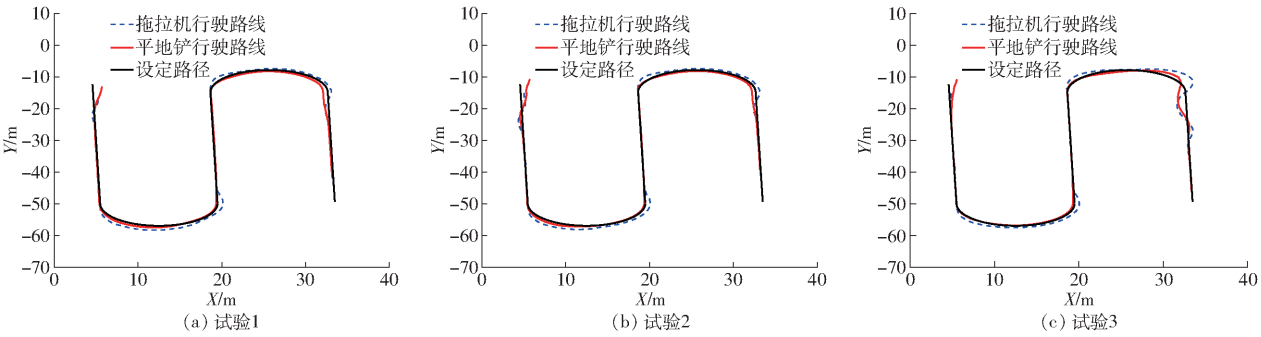


图 5　平地机路径追踪试验结果

Fig. 5　Path tracking experiments results for farmland leveler

速度控制为 1.05 m/s。分析图 6a 的路径追踪偏差变化，可知拖拉机与平地铲的路径追踪时间随着起始距离的变大而增加。当追踪路线由直线至曲线或曲线至直线过渡时，拖拉机实时地调整自身位置，牵引平地铲向规划路径行驶。使平地铲路径过渡时的偏差峰值小于拖拉机的峰值，平地铲的路径追踪误差快速下降。

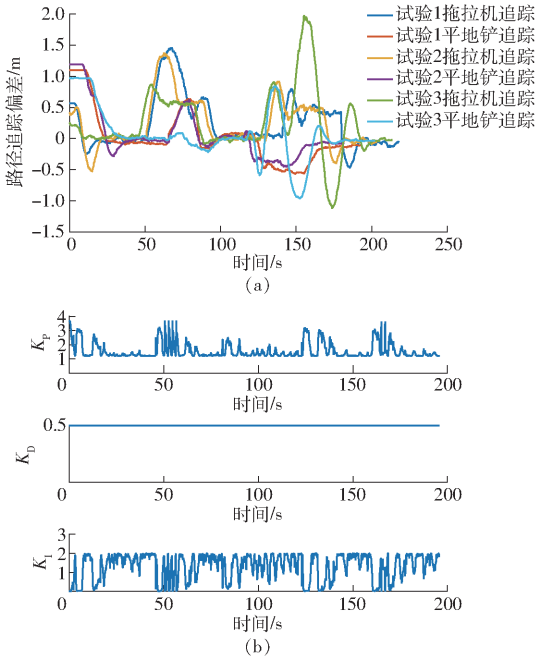


图 6　平地机路径追踪偏差与参数变化

Fig. 6　Changes of path tracking deviation and gain parameters for farmland leveler

农田路径追踪偏差结果如表 1 所示，可知试验 3 在不考虑侧滑角和参数自适应控制的情况下，拖拉机最大偏差达 1.976 8 m，标准偏差为 0.448 2 m，平地铲标准偏差为 0.326 4 m。这是由于拖拉机在追踪路线变换时发生侧滑，为牵引平地铲驶向规划路线不断调整自身航向，导致追踪偏差变大。试验 1 使用了本文设计的侧滑估计器，农田平地机在对第 2 条曲线至第 3 条直线路径进行追踪时，侧滑现象的影响减弱。拖拉机的标准偏差减小至 0.358 1 m，

**表 1　农田路径追踪偏差结果**

**Tab. 1　Deviation results of farmland path tracking**

m

| 试验序号 | 拖拉机的路径追踪 | | | 平地铲的路径追踪 | | |
|---|---|---|---|---|---|---|
| | 最大偏差 | 平均绝对偏差 | 标准偏差 | 最大偏差 | 平均绝对偏差 | 标准偏差 |
| 1 | 1.461 1 | 0.305 7 | 0.358 1 | 1.102 7 | 0.283 2 | 0.293 0 |
| 2 | 1.375 6 | 0.311 6 | 0.343 1 | 1.195 5 | 0.207 7 | 0.225 4 |
| 3 | 1.976 8 | 0.358 9 | 0.448 2 | 0.975 8 | 0.275 5 | 0.326 4 |

平地铲路径追踪的标准偏差减小至 0.293 0 m。试验 2 的路径追踪效果最为显著，拖拉机和平地铲路径追踪的标准偏差分别为 0.343 1 m 和 0.225 4 m，相比于试验 3，试验 2 中平地铲路径追踪的平均绝对偏差减小了 6.78 cm，标准偏差减小了 10.1 cm。试验 2 中增益参数 $K_P$、$K_I$、$K_D$ 的变化如图 6b 所示，表明本文提出的非线性自适应控制方法可以实时地根据输入转角误差，调整 PID 的 3 个增益数值。

路径追踪时的角度变化如图 7 所示，结合图 7a，在试验 2 的路径追踪过程中，导航控制器控制转向执行机构。使前轮转角快速地追踪至转角控制器计算的理论转角，表明本文所使用的非线性自适应控制方法可以很好地调整增益系数，增强了 PID 控制器对农田平地机导航控制系统的适应性和鲁棒性。同时从图 7b 可以看出，侧滑角峰值变化的时间区间与路径追踪误差峰值变化的时间基本一致。说明农田平地机在路径追踪的过程中，当追踪路径由直线向曲线路径变化时，平地机整体的航向角出现较大变化，此时侧滑的影响最为严重，证明本文提出的侧滑估计方法可以合理有效地预测平地机在田间路径追踪时的侧滑角。

## 5　结论

(1)建立了牵引式农田平地机的运动学模型，以横向偏差、航向偏差、车辆机具之间的夹角为输入量，提出了一种侧滑估计器，实时计算农田平地机进

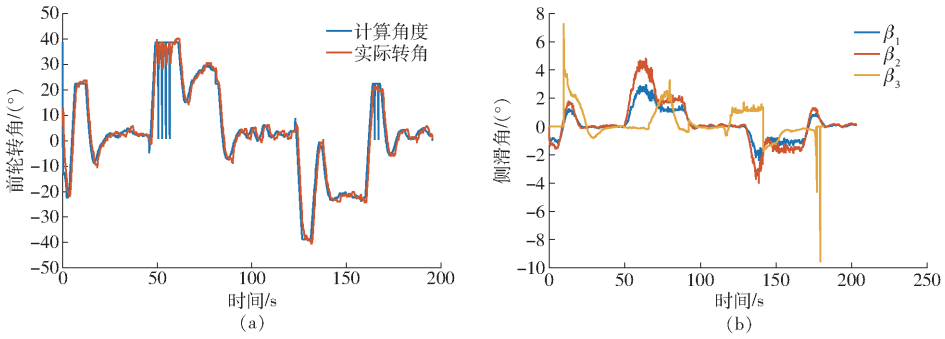


图 7 试验 2 路径追踪时的角度变化曲线

Fig. 7 Angles changes during path tracking in experiment 2

行路径追踪时产生的侧滑角,提高了导航控制率的计算精度。

(2)采用改进的非线性参数整定自适应 PID 控制方法,根据转角输入误差在线调整 PID 控制器的增益参数,使导航控制系统的适应能力得到提高。

(3)田间导航试验表明,相比于无侧滑估计与参数自适应的导航控制,带侧滑估计的自适应控制方法可以削弱侧滑对农田平地机路径跟踪的影响,增强了导航控制器对农田平地机系统的适应性和鲁棒性。当行驶速度为 1.05 m/s 时,平地铲路径追踪的平均绝对偏差减小了 6.78 cm,标准偏差减小了 10.1 cm。该方法有效解决了农田平地机路径追踪时平地铲对规划路径的准确跟踪问题,适用于无人驾驶的农田平整作业。

## 参 考 文 献

[1] 张漫, 季宇寒, 李世超, 等. 农业机械导航技术研究进展[J/OL]. 农业机械学报, 2020, 51(4):1 - 18.
ZHANG Man, JI Yuhan, LI Shichao, et al. Research progress of agricultural machinery navigation technology [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(4):1 - 18. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag=1&file_no=20200401&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2020.04.001. (in Chinese)

[2] 刘刚,李笑,康熙,等. 基于 GNSS 的农田平整自动导航路径规划方法[J/OL]. 农业机械学报,2016,47(增刊):21 - 29.
LIU Gang, LI Xiao, KANG Xi, et al. Automatic navigation path planning method for land leveling based on GNSS [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(Supp.):21 - 29. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag=1&file_no=2016s004&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.S0.004. (in Chinese)

[3] 刘刚,康熙,夏友祥,等. 基于 GNSS 农田平整全局路径规划方法与试验[J/OL]. 农业机械学报,2018,49(5):27 - 33.
LIU Gang, KANG Xi, XIA Youxiang, et al. Global path planning algorithm and experiment based on GNSS-controlled precise land leveling system [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(5): 27 - 33. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag=1&file_no=20180503&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.05.003. (in Chinese)

[4] 王岩,李宏鹏,牛东岭,等. GNSS 平地作业路径实时规划与导航方法研究[J/OL]. 农业机械学报, 2014, 45(增刊): 271 - 275.
WANG Yan, LI Hongpeng, NIU Dongling, et al. Real-time path planning and navigation in GNSS-controlled land leveling [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(Supp.): 271 - 275. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag=1&file_no=2014s144&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2014.S0.044. (in Chinese)

[5] 李革,王宇,郭刘粉,等. 插秧机导航路径跟踪改进纯追踪算法[J/OL]. 农业机械学报, 2018, 49(5): 21 - 26.
LI Ge, WANG Yu, GUO Liufen, et al. Improved pure pursuit algorithm for rice transplanter path tracking [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(5): 21 - 26. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag=1&file_no=20180502&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2018.05.002. (in Chinese)

[6] 冯慧敏,高娜娜,孟志军,等. 基于自动导航的小麦精准对行深施追肥机设计与试验[J/OL]. 农业机械学报, 2018, 49(4):60 - 67.
FENG Huimin, GAO Na'na, MENG Zhijun, et al. Design and experiment of deep fertilizer applicator based on autonomous navigation for precise row-following [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(4): 60 - 67. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag=1&file_no=20180407&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2018.04.007. (in Chinese)

[7] 白晓平,胡静涛,高雷,等. 农机导航自校正模型控制方法研究[J/OL]. 农业机械学报, 2015, 46(2):1 - 7.
BAI Xiaoping, HU Jingtao, GAO Lei, et al. Self-tuning model control method for farm machine navigation [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(2):1 - 7. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag=1&file_no=20150201&journal_id=jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2015.02.001. (in Chinese)

[8] 胡炼,杜攀,罗锡文,等. 悬挂式多轮支撑旱地激光平地机设计与试验[J/OL]. 农业机械学报, 2019, 50(8): 15 - 21.
HU Lian, DU Pan, LUO Xiwen, et al. Design and experiment on multi-wheel support laser land leveler hanging on tractor [J/

OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(8): 15 - 21. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag = 1&file_no = 20190802&journal_id = jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.08.002. (in Chinese)

[9] 李笑,李宏鹏,牛东岭,等. 基于全球导航卫星系统的智能化精细平地系统优化与试验[J]. 农业工程学报, 2015, 31(3): 48 - 55.
LI Xiao, LI Hongpeng, NIU Dongling, et al. Optimization of GNSS-controlled land leveling system and related experiments [J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(3): 48 - 55. (in Chinese)

[10] BACKMAN J, OKSANEN T, VISALA A. Navigation system for agricultural machines: nonlinear model predictive path tracking [J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2012, 82:32 - 43.

[11] ERKAN K, ERDAL K, HERMAN R, et al. Nonlinear modeling and identification of an autonomous tractor-trailer system [J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2014, 106:1 - 10.

[12] 张广庆,朱思洪,李伟华,等. 铰接摆杆式大功率拖拉机原地转向仿真与实验[J/OL]. 农业机械学报, 2012, 43(10): 25 - 30.
ZHANG Guangqing, ZHU Sihong, LI Weihua, et al. Simulation and experiment of in-situ steering of large wheel tractor with hinge swing link [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(10): 25 - 30. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_ abstract.aspx? flag = 1&file_no = 20121005&journal_id = jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2012.10.005. (in Chinese)

[13] 赵翾,杨珏,张文明,等. 农用轮式铰接车辆滑模轨迹跟踪控制算法[J]. 农业工程学报, 2015, 31(10): 198 - 203.
ZHAO Xuan, YANG Jue, ZHANG Wenming, et al. Sliding mode control algorithm for path tracking of articulated dump truck [J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(10):198 - 203. (in Chinese)

[14] 邵俊恺,赵翾,杨珏,等. 无人驾驶铰接式车辆强化学习路径跟踪控制算法[J/OL]. 农业机械学报, 2017, 48(3): 376 - 382.
SHAO Junkai, ZHAO Xuan, YANG Jue, et al. Reinforcement learning algorithm for path following control of articulated vehicle [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(3): 376 - 382. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag = 1&file_no = 20170348&journal_id = jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2017.03.048. (in Chinese)

[15] 孟宇,汪钰,顾青,等. 基于预见位姿信息的铰接式车辆 LQR - GA 路径跟踪控制[J/OL]. 农业机械学报,2018,49(6): 375 - 384.
MENG Yu, WANG Yu, GU Qing, et al. LQR - GA path tracking control of articulated vehicle based on predictive information [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018,49(6):375 - 384. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag = 1&file_no = 20180645&journal_id = jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2018.06.045. (in Chinese)

[16] 白国星,刘立,孟宇,等. 基于非线性模型预测控制的农用拖挂车避障控制器研究[J/OL]. 农业机械学报,2019, 50(4):356 - 362.
BAI Guoxing, LIU Li, MENG Yu, et al. Study of obstacle avoidance controller of agricultural tractor -trailers based on predictive control of nonlinear model [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019,50(4): 356 - 362. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag = 1&file_no = 20190441&journal_id = jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.04.041. (in Chinese)

[17] 张雁,李彦明,刘翔鹏,等. 水稻直播机自动驾驶模糊自适应控制方法[J/OL]. 农业机械学报,2018,49(10):30 - 37.
ZHANG Yan, LI Yanming, LIU Xiangpeng, et al. Fuzzy adaptive control method for autonomous rice seeder [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018,49(10):30 - 37. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? flag = 1&file_no = 20181004& journal_id = jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2018.10.004. (in Chinese)

[18] LENAIN R, THUILOT B, CARIOU C, et al. Adaptive and predictive path tracking control for off-road mobile robots [J]. European Journal of Control, 2007, 13(4):419 - 439.

[19] ROLAND L, BENOIT T, CHRISTOPHE C, et al. High accuracy path tracking for vehicles in presence of sliding: application to farm vehicle automatic guidance for agricultural tasks [J]. Auton Robot, 2006, 21(1):79 - 97.

[20] STEPHANT J, CHARARA A, MEIZEL D. Virtual sensor: application to vehicle sideslip angle and transversal forces [J]. In IEEE Trans. on Industrial Electronics, 2004, 53(2):278 - 289.

[21] HAN Xiongzhe, HAK-JIN K, CHAN W J, et al. Application of a 3D tractor-driving simulator for slip estimation-based path-tracking control of auto-guided tillage operation [J]. Biosystems Engineering, 2019, 178:70 - 85.

[22] 唐小涛,陶建峰,李志腾,等. 自动导航插秧机路径跟踪系统稳定性模糊控制优化方法[J/OL]. 农业机械学报,2018, 49(1):29 - 34.
TANG Xiaotao, TAO Jianfeng, LI Zhiteng, et al. Fuzzy control optimization method for stability of path tracking system of automatic transplanter [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(1): 29 - 34. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract. aspx? flag = 1&file_no = 20180103&journal_id = jcsam. DOI: 10.6041/j.issn.1000-1298.2018.01.003. (in Chinese)

[23] 高利. 位置伺服系统的一类非线性 PID 调节器设计[J]. 南方农机, 2019, 50(14):141.
GAO Li. Design of a nonlinear PID controller for position servo system [J]. South Agricultural Machinery, 2019, 50(14): 141. (in Chinese)

[24] 陈龙,吴斌方,张耀,等. 基于模糊 PID 控制的步进驱动系统研究[J]. 组合机床与自动化加工技术,2020(3):99 - 102.
CHEN Long, WU Binfang, ZHANG Yao, et al. Research on step drive system based on fuzzy PID control [J]. Modular Machine Tool & Automatic Manufacturing Technique, 2020(3):99 - 102. (in Chinese)

[25] 何昌俊, 杨自栋, 闫珍奇, 等. 基于 STM32 的步进电机动态加减速控制[J]. 轻工机械, 2020, 38(2):45 - 50.
HE Changjun, YANG Zidong, YAN Zhenqi, et al. Dynamic acceleration and deceleration control of stepper motor based on STM32 [J]. Light Industry Machinery, 2020, 38(2):45 - 50. (in Chinese)