

DMC-PD cascade control method of the automatic steering system in the navigation control of agricultural machines

Lei Gao^{1,2,3}, Jingtao Hu^{1,2,3}, and Taochang Li^{1,2,3}

¹⁾ Shenyang Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences, Shenyang, Liaoning, China

²⁾ University of Chinese Academy of Sciences, Beijing, China

³⁾ CAS Key Laboratory of Networked Control System, Shenyang, Liaoning, China

{gaolei & hujingtao & litc}@sia.cn

Abstract—In the navigation control of agricultural machines, in order to improve the precision and response speed of the steering control system, an automatic steering control method based on DMC-PD cascade control was proposed. The model of automatic steering driving mechanism was built through analyzing the mechanism and electric control principle. The model of steering mechanism for agricultural machines was identified in time-domain according to dynamic response data. A steering control model was built by combining both models. Based on this model, adopted cascade control structure, the inner loop designed a DMC controller for steering angular velocity, and the outer loop designed a PD controller for steering angle. A steering angular velocity control simulation was taken by Matlab MPC toolbox, and an automatic steering control experiment was carried out in a YANMAR VP6 rice transplanter. The experimental result indicates, the absolute value of steering angle tracking error is 0.5° , and tracking delay is 0.25s. Therefore, the DMC-PD cascade control method can satisfy the requirement of automatic navigation control for agricultural machines.

Keywords—Agricultural machine, Steering control, Predictive control, Cascade control

农机导航中自动转向系统的 DMC-PD 串级控制方法研究

高雷^{1,2,3} 胡静涛^{1,2,3} 李逃昌^{1,2,3}

¹⁾ 中国科学院沈阳自动化研究所, 沈阳, 辽宁, 中国

²⁾ 中国科学院大学, 北京, 中国

³⁾ 中国科学院网络化控制系统重点实验室, 沈阳, 辽宁, 中国

摘要 为了提高农机导航中自动转向控制的精度和响应速度, 本文提出了基于 DMC-PD 串级控制的自动转向控制方法。对自动转向驱动机构进行机理建模, 对农机转向机构进行辨识建模, 两者结合建立了农机转向控制模型。在该模型基础上, 采用串级控制结构, 内环对转向角速度设计了 DMC 控制器, 外环对转向角设计了 PD 控制器。借助 Matlab 预测控制工具箱, 进行了转向角速度控制仿真实验, 并在洋马 VP6 插秧机上进行了自动转向控制实验。实验结果表明, 本文提出的 DMC-PD 串级转向控制方法, 转向角跟踪误差的绝对值平均值为 0.5° , 跟踪时延约为 0.25s, 能够满足农机自动导航控制的需求。

关键词 农机, 转向控制, 预测控制, 串级控制

1. 引言

农机自动导航产品已经成为国外农机产业中发展最为

迅速的部分^[1], 但国内对自动导航技术的研究起步较晚, 目前还停留在样机研制阶段, 相关的方法研究还在不断改

国家高技术研究发展计划(863 计划)资助项目(2013AA040403)

进优化中。转向控制器是农机自动驾驶系统的核心组成部分^[2]，转向效果直接影响到农机路径跟踪的精度^[3]，所以国内外学者对农机自动转向控制方法已经进行了较多研究。

目前自动转向控制方法主要分为三类：(1) PID 算法^[4-13]，针对自动转向系统中液压阀的非线性特性，可带有死区、饱和等非线性补偿；(2) 自适应 PID 算法^[14-16]，根据行驶速度、转向角偏差等在线调节 PID 参数，使用多组参数实现较多工况下的高精度控制；(3) 模糊控制算法^[17, 18]，以转向角、转向角速度、转向角偏差、航向角偏差等的组合作为模糊控制器的输入量，对自动转向系统模型的非线性、时变等特性具有较好的适应性。

对于 PID 算法和自适应 PID 算法，当农机转向系统随着轮胎-地面状况等发生较大改变时，控制精度会随着下降；模糊控制方法的鲁棒性较强，但难以同时达到较高的响应速度和控制精度。在串级控制系统结构中，副回路等效被控对象的时间常数通常比副对象的时间常数小很多，因而使对象的动态特性有了很大的改善，提高了控制系统的整体响应速度和控制精度^[19]。因此，本文提出了基于动态矩阵控制 (Dynamic Matrix Control, DMC) 和 PD 控制的串级自动转向控制方法。内环采用动态矩阵控制调节转向角速度，外环采用 PD 控制调节转向角度，在提高转向控制系统响应速度的同时，也具有较高的精度和鲁棒性。

2. 农机自动转向系统

2.1 典型农机自动转向系统结构

典型农机自动转向控制系统的结构^[1]如图 1 所示。在自动转向控制过程中，转向控制器接收导航控制器的转向角指令和转向角传感器的反馈数据，根据转向控制算法生成转向执行控制信号，从而控制转向驱动机构的动作，将受控农机的转向轮转动到转向角指令设定的角度。

由于农机自动驾驶是随动控制，且作业环境比较复杂，所以自动转向系统需要具有较快的响应速度、较高的精度及鲁棒性。

2.2 农机转向机构

以通常使用的轮式农机为例，典型农机转向机构的简化示意图如图 2 所示^[20]。

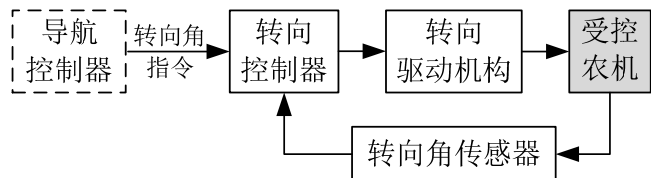


图 1 典型农机自动转向控制系统结构

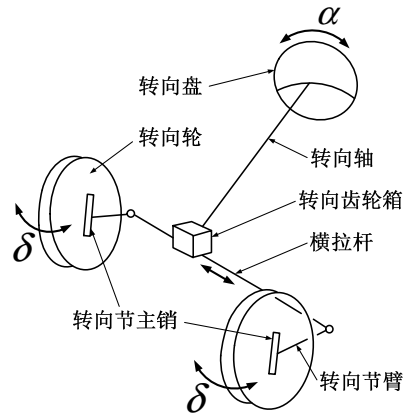


图 2 典型农机转向机构

转向过程为：转向盘的转动通过转向轴和转向齿轮箱传递给横拉杆，横拉杆通过转向节臂带动转向轮绕着转向节主销转动。

2.3 自动转向驱动机构

目前常见的农机自动转向驱动机构可以归纳为两大类：通过电机、齿轮（或链条、摩擦轮）等驱动农机转向杆转动的电机式和通过控制电液比例换向阀等驱动农机转向油缸动作的电液式。

本文以电机式自动转向驱动机构为研究对象。图 3 是作者自主设计开发的，采用步进电机、齿轮副等构成的一种典型电机式自动转向驱动机构^[21]。从动齿轮通过底部的安装螺纹固定安装在农机转向轴顶端，延长轴与从动齿轮固定连接，转向盘安装在延长轴顶端；主动齿轮与步进电机转轴相连，步进电机机体固定在壳体上；滚动轴承外圈固定在壳体上，内圈分别与从动齿轮、主动齿轮固定连接；壳体通过防转动结构与驾驶室主体结构固定连接。当步进电机受控转动时，通过传动比为 10:1 的齿轮副带动转向轴转动，从而驱动农机实现转向操作。

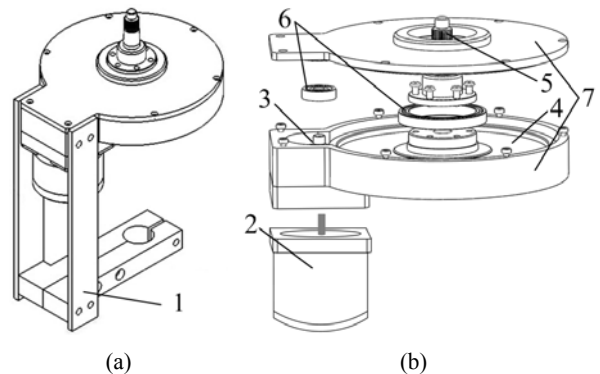


图 3 典型电机式自动转向驱动机构

(a) 整体外观图 (b) 主体结构图

1.防转动结构 2.步进电机 3.主动齿轮 4.从动齿轮 5.延长轴
6.滚动轴承 7.壳体

3. 农机自动转向系统建模

3.1 建模思想

由图 1 所示的典型农机自动转向控制系统结构可知，转向控制器的控制对象模型包括两部分：自动转向驱动机构模型和农机转向系统模型。对于自动转向驱动机构，我们通常容易获得相关的机械和控制参数，但是通常无法从厂家获取农机转向机构的详细结构参数，所以本文对自动转向驱动机构进行机理建模，对农机转向系统采用辨识建模的方法。

3.2 自动转向驱动机构建模

自动转向驱动机构中齿轮副的传动比记为 $a:1$ ，则电机转速和方向盘转动角速度之间的传递函数为：

$$\frac{\omega_{sw}(s)}{n(s)} = \frac{1}{a} \quad (1)$$

式中 ω_{sw} ——方向盘的转动角速度， $^\circ/s$ ；

n ——电机转速， $^\circ/s$ 。

步进电机的转速由调速频率信号控制。为便于建模，这里将调速频率信号记为带符号量，其正负符号用于控制步进电机的转动方向，为正时逆时针转动，为负时顺时针转动；其绝对值用于控制步进电机的转速，两者成比例关系。对于步进角为 b° 的步进电机，可以得到调速频率信号与转速之间的函数关系如下：

$$n = b \cdot u, -1000 \leq u \leq 1000 \quad (2)$$

式中 u ——控制量即调速频率信号，Hz。

由于步进电机的输出扭矩会随着转速的升高而降低，所以，为了保证自动转向驱动机构具有足够的扭矩，上式中限定调速频率信号的绝对值最大不超过 1000。

根据式(2)，可建立调速频率与电机转速的传递函数为：

$$\frac{n(s)}{u(s)} = b \quad (3)$$

3.3 农机转向系统建模

考虑到在农机自动驾驶控制过程中，转向角通常较小，所以这里以 $180^\circ/s$ 的角速度向转向轴输入 90° 的转动信号，来进行农机转向系统的动态响应特性测试。由于车辆转向系统在当前工作点及其附近邻域内可以近似用一个二阶系统进行描述^[22]，所以，这里将插秧机转向机构视作二阶系统进行时域辨识，得到的传递函数记为式(4)。

$$\frac{\delta(s)}{\theta(s)} = \frac{e}{s^2 + cs + d} \quad (4)$$

式中 δ ——转向角， $^\circ$ ；

θ ——方向盘转动角度， $^\circ$ ；

a, b, c ——系数，实数。

3.4 农机自动转向系统模型

方向盘转动角速度 ω_{sw} 与方向盘转动角度 θ 的关系为：

$$\theta(s) = \frac{1}{s} \omega_{sw}(s) \quad (5)$$

转向角速度 ω_w 与转向角 δ 的关系为：

$$\delta(s) = \frac{1}{s} \omega_w(s) \quad (6)$$

结合式(1)、(3)、(4)、(5)、(6)，可以得到转向系统的传递函数模型如式(7)所示，转向角速度与控制量输入的传递函数如式(8)所示：

$$G_1(s) = \frac{\delta(s)}{u(s)} = \frac{b \cdot e}{a \cdot s(s^2 + c \cdot s + d)} \quad (7)$$

$$G_2(s) = \frac{\omega_w(s)}{u(s)} = \frac{b \cdot e}{a(s^2 + c \cdot s + d)} \quad (8)$$

4. 农机自动转向系统 DMC-PD 串级控制方法

4.1 预测控制

预测控制是一种先进的计算机优化控制方法，它具有对模型精度要求低、控制综合质量好、鲁棒性强、在线计算方便等特点，可有效地克服过程的不确定性、非线性和关联性，并能方便地处理过程被控变量和操纵变量中的各种约束^[23]，已在炼油、化工、冶金和电力等复杂工业过程中得到了广泛的应用^[24]。

典型的预测控制器结构如图 4 所示，主要由预测模型、滚动优化、在线校正三部分构成。其中，预测模型根据被控制对象的历史测量信息和未来输入，预测对象未来的输出；滚动优化是一个随着时间的推移反复进行的优化过程，它通过使某一性能指标达到最优确定未来的控制作用；在线校正则根据系统的实际输出，不断对预测输出值做出修正，使基于模型的滚动优化利用了反馈信息，构成闭环优化。

预测控制的典型算法包括模型算法控制、动态矩阵控制、广义预测控制等，针对农机导航控制系统特点，本文采用易于在嵌入式平台上实现的 DMC 算法。

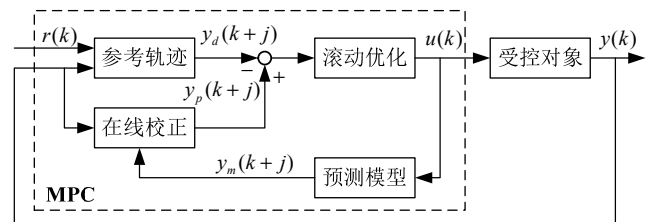


图 4 预测控制器结构

4.2 DMC-PD 串级控制器结构

在保证精度的前提下，为了加快对转向角指令的响应速度，本文引入转向角速度控制环节，设计了串级控制结构的转向控制器，如图 5 所示。其中，对如式(8)所示的内环转向角速度控制设计 DMC 控制器，而对于外环的转向角控制采用 PD 控制器。

4.3 转向角速度的 DMC 控制器设计

转向角速度的 DMC 控制回路如图 6 所示，控制对象的传递函数为 $G_2(s)$ ，控制器输入量为角速度设定值序列 $r(k)$ ，输出控制量为频率信号序列 $u(k)$ ，反馈量为检测到的实际角速度值 $y(k)$ 。

记 $G_2(s)$ 的阶跃响应模型为 $S(z^{-1})$ ，则

$$S(z^{-1}) = s_1 + s_2 z^{-1} + \dots + s_N z^{-N+1} \quad (9)$$

式中 z^{-1} —— 向后一步平移算子；
 N —— 模型取的长度。

k 时刻对未来 $k+j$ 时刻的预测输出为

$$y_m(k+j) = y_m(k+j-1) + S(z^{-1})\Delta^2 u(k+j-q) \quad (10)$$

式中 $y_m(i)$ —— i 时刻的预测输出；

Δ —— 差分算子， $\Delta = 1 - z^{-1}$ ；

$u(k)$ —— k 时刻的控制量；

q —— 系统延迟步数。

$y_m(k+j)$ 经在线校正后为

$$\begin{cases} y_p(k+j) = y_m(k+j) + y_e(k+j) \\ y_e(k+j) = \xi_{k+1} + \xi_{k+2} + \dots + \xi_{k+j} \end{cases} \quad (11)$$

式中 $y_p(i)$ —— i 时刻校正后的预测输出；

$y_e(i)$ —— 对 i 时刻的预测误差；

ξ_i —— i 时刻的平稳扰动输入信号。

这里将参考轨迹规划成一阶指数曲线的形式，从而得到柔化设定值序列（即期望输出值序列）。柔化轨迹的形成式如式(12)所示。

$$\begin{aligned} y_d(k+q+i) &= \alpha y_d(k+q+i-1) + (1-\alpha)r(k) \\ &= \alpha^i y_d(k+q) + (1-\alpha^i)r(k) \end{aligned} \quad (12)$$

式中 $y_d(k+j)$ —— 未来 j 时刻的柔化设定值；

$r(k+j)$ —— 未来 j 时刻的设定值；

α —— 柔化因子。

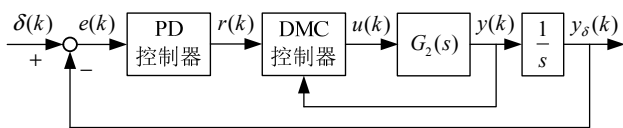


图 5 DMC-PD 串级控制器结构

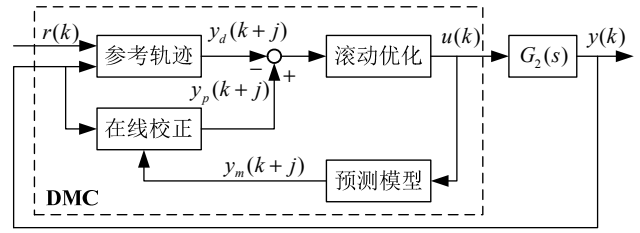


图 6 转向角速度控制框图

进行预测控制的目标是使实际输出值与期望输出值方差最小，并且控制量的波动尽量小，则目标函数如式(13)所示。

$$\begin{aligned} \min_{\Delta U} J &= \min_{\Delta U} E \left\{ \sum_{i=0}^{p-1} [(y_p(k+q+i) - y_d(k+q+i))^2 + \lambda (\Delta u(k+i))^2] \right\} \quad (13) \\ &= \min_{\Delta U} E[(Y_p - Y_d)^T (Y_p - Y_d) + \lambda \Delta U^T \Delta U] \end{aligned}$$

式中 λ —— 控制量变化量的权重；

Y_p —— 校正后预测输出向量；

Y_d —— 期望输出值向量；

ΔU —— 控制量增量向量。

式(13)在数学上等价于：

$$\begin{aligned} \min_{\Delta U} J &= \min_{\Delta U} [(Y_m - Y_d)^T (Y_m - Y_d) + \lambda \Delta U^T \Delta U] \\ &= \min_{\Delta U} [(Y^t + A\Delta U - Y_d)^T (Y^t + A\Delta U - Y_d) + \lambda \Delta U^T \Delta U] \end{aligned} \quad (14)$$

式中 Y_m —— 预测输出向量， $Y_m = Y^t + A\Delta U$ ；

Y^t —— 至当前时刻的初始值序列向量；

A —— 由式(9)中系数构成的 $p \times t$ 维矩阵，具体为

$$A = \begin{bmatrix} s_1 & 0 & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ s_t & s_{t-1} & \dots & s_1 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ s_p & s_{p-1} & \dots & s_{p-t+1} \end{bmatrix}$$

上式中 p 为预测前景， t 为控制前景。极小化目标函数

$$\begin{aligned} \text{数式(14), 令 } \frac{\partial J}{\partial \Delta U} = 0, \text{ 得到控制率如下, 其中 } I \text{ 为单位阵。} \\ \Delta U = (A^T A + \lambda I)^{-1} A^T (Y_d - Y^t) \end{aligned} \quad (15)$$

4.4 控制器参数确定与转向角速度控制仿真

本文采用图 3 所示的自动转向驱动机构，其中齿轮副的传动比为 10:1，所用步进电机的步进角为 1.8° ；自动转向控制的对象为洋马 VP6 插秧机，测试得到转向系统的动态响应特性如图 7 所示，进行时域辨识可得到传递函数如式(16)所示。

$$\frac{\delta(s)}{\theta(s)} = \frac{2.76}{s^2 + 5.19s + 26.32} \quad (16)$$

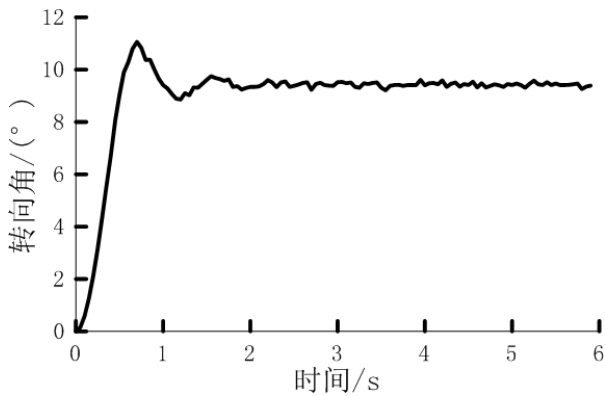


图7 插秧机转向系统动态响应曲线

根据上述条件,可以得到DMC控制对象的传递函数为

$$G_2(s) = \frac{0.5}{s^2 + 5.19s + 26.32} \quad (17)$$

利用Matlab中的MPC设计工具,进行转向角速度控制仿真。首先,向MPC设计工具导入控制对象 $G_2(s)$;然后进行仿真参数的确定,原则及数值如下:采样控制周期,这里根据控制系统实际情况,设为0.05s;预测前景 p ,应使预测时域包含式(9)的主要动态部分,这里取为20;控制前景 t ,对应于矩阵 A 的列数,由于在控制过程中需要计算逆矩阵 $(A^T A + \lambda I)^{-1}$,考虑到本文算法的运算平台是嵌入式处理器,且控制对象相对简单,所以 t 取1;控制量变化量的权重 λ ,这里取一个较小值0.05即可使得控制量的变化相对平缓;根据式(2),将控制量限定在-1000与1000之间,且控制量变化速率限定在-1000与1000之间;另外,为了提高转向控制的响应速度,这里柔化因子 α 取较大的值0.9。

图8和图9分别是上述参数下,在单位阶跃转向角速度给定情况下,MPC控制器的控制量变化情况和转向角速度跟踪效果。

由仿真结果可知,上升时间约0.35s,超调量约10%,响应速度较快,超调量在可接受范围内。

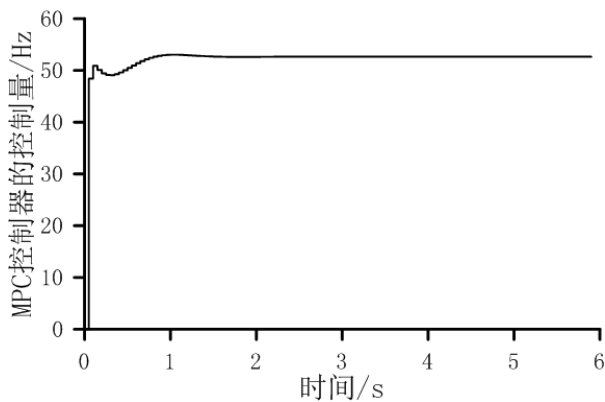


图8 转向角速度为单位阶跃给定时的控制量

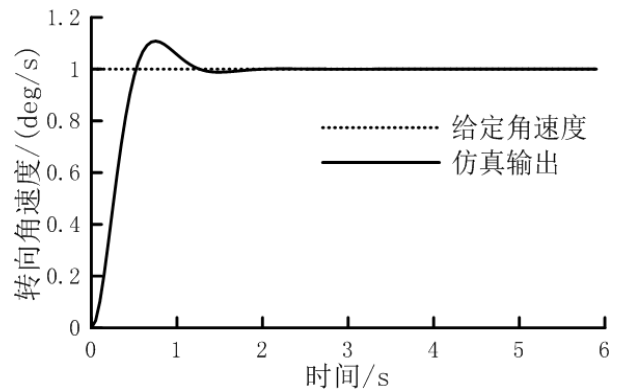


图9 转向角速度为单位阶跃给定时的跟踪曲线

5. DMC-PD 串级控制方法在农机导航系统中的应用

5.1 插秧机自动导航系统

图10所示为加装了作者自主设计开发的自动导航控制系统的洋马VP6插秧机。其中,电机式转向驱动机构串连安装在插秧机转向轴与转向盘之间,导航控制器、转向控制器、GPS定位模块等统一安装在集成控制箱内。转向角度和转向角速度通过安装在前轮内侧的转角编码器测算得到,航向角通过电子罗盘获得,田间计算机用于提供人机交互界面。

5.2 自动转向控制实验

以图10所示的插秧机自动导航系统为实验平台,在1.5m/s的行驶速度下,以5Hz采样后的1rad/s、幅值为 5° 的正弦函数作为转向角的给定序列,转向控制器工作频率20Hz。在确定了MPC控制器的基础上,调节PD参数,当 $k_p = 8.5, k_D = 1.1$ 时,得到的转向角控制效果较好。转向角跟踪曲线如图11所示,跟踪时延约为0.25s。对应的转

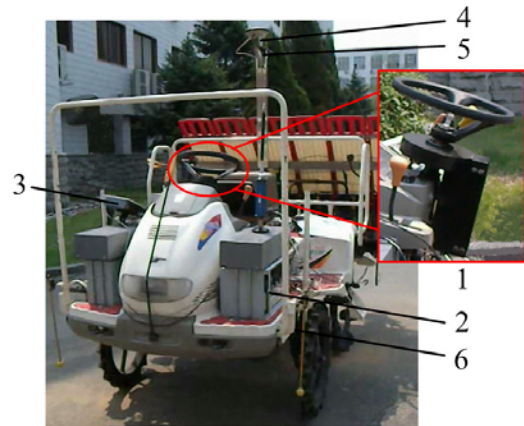


图10 插秧机自动导航系统

1.自动转向驱动机构 2.集成控制箱(含导航控制器、转向控制器、GPS定位模块等) 3.田间计算机 4.GPS天线 5.电子罗盘 6.转角编码器

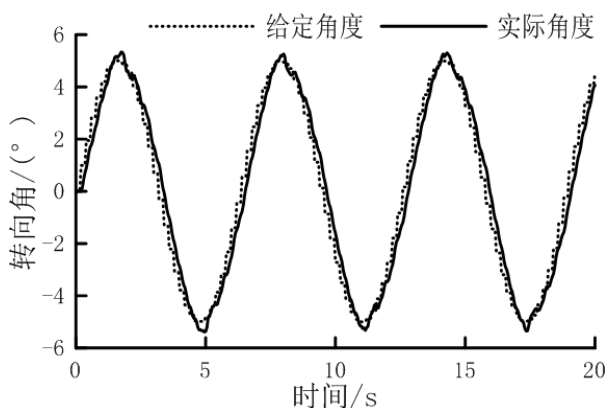


图 11 转向角为正弦给定时的跟踪曲线

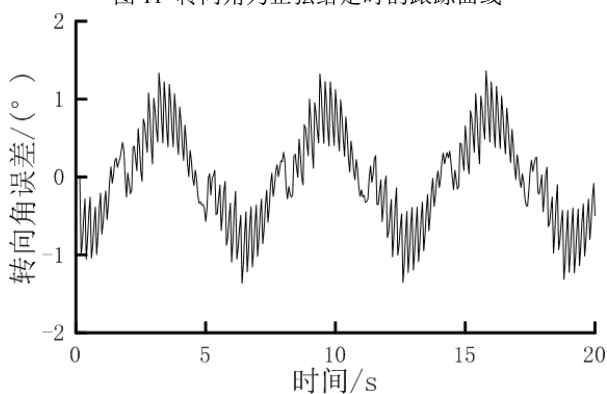


图 12 转向角为正弦给定时的跟踪误差
向角跟踪误差曲线如图 12 所示, 其中最大误差 1.36° , 误差的绝对值平均值为 0.5° 。

另外, 本文提出的方法已应用在插秧机直线路径跟踪控制实验中。实验在图 10 中所示的水泥路面上进行, 行驶速度为 1.5m/s 。图 13 是实验过程中的一段转向角指令跟踪效果曲线。由于插秧机在水泥路面上以较快速度行驶时, 车体震动幅度较大, 导致 GPS 定位误差增大, 所以该段路径跟踪过程中, 转向角指令的变化比较频繁。而本文提出的基于 DMC-PD 控制的自动转向控制方法, 能够快速、准确地实现该转向角指令序列的跟踪。

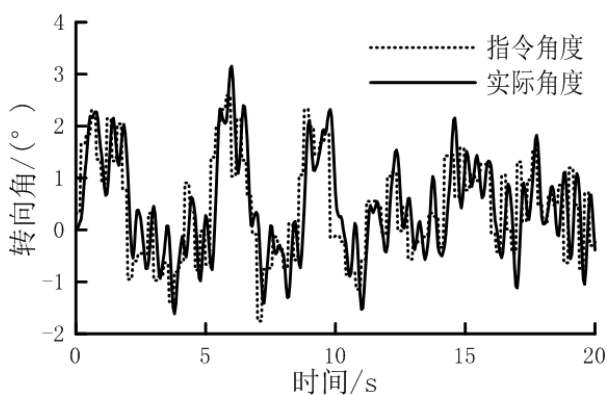


图 13 直线路径跟踪过程中转向角指令跟踪曲线

5.3 仿真与实验结果讨论

由上述实验可知, 本文提出的自动转向系统的 DMC-PD 串级控制方法, 转向角跟踪误差的绝对值平均值为 0.5° , 跟踪时延约为 0.25s , 且能够在实际自动导航控制过程中迅速、准确地跟踪转向角指令。

6. 结论

(1) 本文提出的自动转向系统的 DMC-PD 串级控制方法, 虽然多引入了一个控制器, 但可以对转向角速度进行优化调节, 在转向角调节精度较高的同时, 能够具有较快的响应速度, 使得转向控制系统的整体性能更佳。且由于采用了预测控制技术, 本控制方案对复杂田间环境的适应性较强。

(2) 相对于电液式转向驱动机构, 电机式转向驱动机构执行速度较慢, 在设计外环转向轮偏角 PD 控制器时, 需要选择较大的比例参数, 才能够保证自动转向控制的快速响应。

(3) 在进行农机转向机构的动态响应特性测试时, 由于需要避免路面条件改变、车辆振动等因素的干扰, 通常在农机静止情况下进行。但是, 由于农机静止时和行驶过程中的转向系统特性差别较大, 在进行转向控制器参数整定时, 应以行驶中的自动转向控制效果为判断标准。

参考文献

- [1] Y. Edan, S. Han, and N. Kondo, "Automation in Agriculture," in Springer Handbook of Automation, S. Y. Nof, Ed., ed: Springer Berlin Heidelberg, 2009, pp. 1095-1128.
- [2] J. F. Reid, Q. Zhang, N. Noguchi, et al, "Agricultural automatic guidance research in North America," Computers and Electronics in Agriculture, vol. 25, no. 1-2, pp. 155-167, Jan 2000.
- [3] 罗锡文, 张智刚, 赵祚喜, 等. 东方红 X-804 拖拉机的 DGPS 自动导航控制系统. 农业工程学报, 2009, 25(11): 139-145.
- [4] Z. Dong, Q. Zhang, and S. Han, "Control of an electrohydraulic steering system using a PID controller with a nonlinear compensation algorithm," in Proc. SPIE 4715, Unmanned Ground Vehicle Technology IV, Orlando, FL, 2002, pp. 87-95.
- [5] 陈文良. 拖拉机自动驾驶转向控制系统的研制; 中国农业大学, 2006.
- [6] 何卿, 高焕文, 李洪文, 等. 基于 DSP 的拖拉机电液转向控制系统. 农业机械学报, 2007, 38(5): 1-5, 10.
- [7] 何卿, 高焕文, 李洪文. 接触式拖拉机导航控制系统. 农业

机械学报, 2008, 39(1): 97-101.

- [8] 吴晓鹏, 赵祚喜, 张智刚, 等. 基于双闭环控制的拖拉机车轮转向控制系统设计; 2010 国际农业工程大会, 中国上海, 2010.
- [9] 刘兆祥, 刘刚, 籍颖, 等. 基于自适应模糊控制的拖拉机自动导航系统. 农业机械学报, 2010, 41(11): 148-152, 162.
- [10] 王泷, 刘刚, 刘兆祥, 等. 拖拉机智能导航转向控制方法研究与应用; 创新农业工程科技 推进现代农业发展——中国农业工程学会 2011 年学术年会, 中国重庆, 2011.
- [11] 胡炼, 罗锡文, 赵祚喜, 等. 插秧机电控操作机构和控制算法设计. 农业工程学报, 2009, 25(4): 118-122.
- [12] 连世江, 陈军, 贾海政, 等. 基于 PID 控制的拖拉机自动转向系统. 农机化研究, 2009, 31(6): 211-213.
- [13] 伟利国, 张权, 颜华, 等. XDNZ630 型水稻插秧机 GPS 自动导航系统. 农业机械学报, 2011, 42(07): 186-190.
- [14] D. Wu, Q. Zhang, and J.F. Reid, "Adaptive steering controller using a Kalman estimator for wheel-type agricultural tractors," *Robotica*, vol. 19, no. 5, pp. 527-533, 2001.
- [15] 张智刚, 罗锡文, 李俊岭. 轮式农业机械自动转向控制系统研究. 农业工程学报, 2005, 21(11): 77-80.
- [16] 纪朝凤, 刘刚, 周建军, 等. 基于 CAN 总线的农业车辆自动导航控制系统. 农业机械学报, 2009, 40(S1): 28-32.
- [17] Q. Zhang, "A generic fuzzy electrohydraulic steering controller for off-road vehicles," in *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering*, 2003, pp. 791-799.
- [18] 连世江, 陈军, 贾海政, 等. 基于模糊控制的拖拉机转向跟踪控制研究. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2009, 37(9): 224-228.
- [19] 刘金琨. 先进 PID 控制 MATLAB 仿真(第 3 版). 北京: 电子工业出版社, 2011.
- [20] M. Abe, *Vehicle Handling Dynamics: Theory and Application*: Butterworth-Heinemann, 2009.
- [21] L. Gao, J. Hu, X. Bai, et al, "Agro-machinery Automatic Navigation Control System Study for Precision Agriculture Applications," in *Proceedings of 2010 International Conference on Broadcast Technology and Multimedia Communication*, Chongqing, China, 2010, pp. 315-322.
- [22] 管欣, 李谦. 车辆转向系统动力学模型的车载辨识算法. 中国机械工程, 2002, 13(13): 21-23.
- [23] 丁宝苍. 预测控制的理论与方法. 北京: 机械工业出版社, 2008.
- [24] 杨世忠, 任庆昌. 基于在线优化的鲁棒模型预测控制. 信息与控制, 2013, 42(6): 742-749.