doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2024.03.041

温室电动拖拉机旋耕稳定性时序分析与前馈 PID 控制方法研究

杨杭旭[1,2]　周　俊[1]　齐泽中[1]　孙晨阳[1]　赖国梁[1]

(1.南京农业大学工学院,南京 210031;2.金华职业技术学院机电工程学院,金华 321017)

摘要:针对温室小型农机对地面平整度敏感,微小的地面起伏便会造成机具俯仰的情况,基于课题组已开发的温室电动拖拉机,将基于时间序列分析的角度预测方法引入前馈 PID 控制(Angle prediction and feedforward PID,APF-PID),解决了温室旋耕作业中因机具俯仰而出现的响应性差、耕深不稳定和功率突变的问题。建立了温室电动拖拉机旋耕作业的功率模型,并建立了俯仰角-耕深的转换矩阵,得到了旋耕系统实际耕深的转换值;采用时间序列分析预测机身俯仰角,并作为旋耕系统的扰动输入;结合耕深的转换值和预测得到的扰动,采用 APF-PID 控制器调节旋耕系统的提升机构,将旋耕机维持在目标耕深;在温室内未旋耕和已旋耕的两种地块进行实车试验。结果表明:俯仰角时序预测模型的相关系数可达 0.983 2;APF-PID 控制的控制性能优于 PID 控制,在目标耕深 6 cm 的测试路面中,APF-PID 在两种试验地块上的平均耕深分别为 6.47 cm 和 6.44 cm,均方根误差为 0.80 cm 和 0.72 cm,绝对平均误差为 0.67 cm 和 0.58 cm,耕深稳定性系数为 89.95% 和 91.30%,消耗的总能量较 PID 控制分别降低 4.18% 和 19.13%,较好地实现了温室电动拖拉机旋耕稳定性控制,满足温室作业需求。

关键词:电动拖拉机;温室;旋耕作业;稳定性控制;前馈 PID;角度预测

中图分类号:S219.4　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-1298(2024)03-0412-09　　**OSID**:

Rotary Tillage Stability of Greenhouse Electric Tractor Based on Time Series Analysis and Feedforward PID

YANG Hangxu[1,2]　ZHOU Jun[1]　QI Zezhong[1]　SUN Chenyang[1]　LAI Guoliang[1]

(1. *College of Engineering*, *Nanjing Agricultural University*, *Nanjing* 210031, *China*
2. *College of Mechanical and Electrical Engineering*, *Jinhua Polytechnic*, *Jinhua* 321017, *China*)

Abstract: In response to the sensitivity of greenhouse small agricultural machinery to ground flatness, small ground undulations can cause the equipment to pitch. Based on the greenhouse electric tractor developed by the research group, the method based on time series analysis was introduced into angle prediction and feedforward PID control (APF-PID) to solve the problems of poor responsiveness, unstable tillage depth, and sudden power changes caused by equipment pitch in greenhouse rotary tillage operations. Firstly, a power model for greenhouse electric tractor rotary tillage operation was established, and a conversion matrix between pitch angle and tillage depth was established to obtain the conversion value of the actual tillage depth of the rotary tillage system. Secondly, time series analysis was used to predict the pitch angle of the aircraft body and serve as disturbance input for the rotary tillage system. Then, combining the conversion value of tillage depth and the predicted disturbance, the APF-PID controller was used to adjust the lifting mechanism of the rotary tillage system, and the rotary tiller was maintained at the target tillage depth. Finally, actual vehicle experiments were conducted on two types of plots in a greenhouse, one without rotary tillage and the other with rotary tillage. The results showed that the correlation coefficient of the pitch angle time series prediction model can reach 0.983 2, the control performance of APF-PID control was superior to that of PID control. In the test road surface with a target

收稿日期:2023-09-21　修回日期:2023-12-27

基金项目:国家重点研发计划项目(2016YFD0701003)、江苏省现代农机装备与技术示范与推广项目(NJ2021-36)和金华市重点科技计划项目(2022-1-075)

作者简介:杨杭旭(1983—),男,博士生,金华职业技术学院副教授,主要从事电动拖拉机驱动控制研究,E-mail:yanghx83@126.com

通信作者:周俊(1974—),男,教授,博士生导师,主要从事智能农业装备研究,E-mail:zhoujun@njau.edu.cn

tillage depth of 6 cm, the average tillage depth of APF－PID on two test plots was 6.47 cm and 6.44 cm, with root mean square errors of 0.80 cm and 0.72 cm, absolute average errors of 0.67 cm and 0.58 cm, and tillage depth stability coefficients of 89.95% and 91.30%, respectively. The total energy consumption was reduced by 4.18% and 19.13% compared with that of PID control, which effectively achieved the stability control of greenhouse electric tractor rotary tillage and met the requirements of greenhouse operations.

Key words: electric tractor; greenhouse; rotary tillage; stability control; feedforward PID; angle prediction

0　引言

随着中国农村产业结构的调整,设施农业得到迅速发展,已位居世界之首[1],正逐步成为促进农村经济发展和农民增收的新兴支柱产业。当今社会处于“碳达峰,碳中和”以及绿色节能环保的大背景下[2],现代农业对生产效率、环境保护、绿色节能方面提出了更高的要求。本课题组已开发一款用于温室作业的小型电动履带拖拉机,并进行了相关试验与验证[3]。但在实际温室作业中,拖拉机会受到路面不平度的影响[4-6],造成机具起伏不定、耕作不稳定的现象,给温室电动拖拉机功耗优化、作业稳定等研究带来了巨大的挑战。因此如何准确控制拖拉机悬挂,根据温室路面不平度带来的扰动,实时稳定耕作深度,是进行拖拉机减振控制、耐久性分析和耕深稳定性分析等相关性能研究中亟待解决的问题。

传统的拖拉机悬挂高度调节主要有力调节、位调节、力位综合调节等方式[7-9]。杜巧莲[10]设计了基于多种传感器的电液耕深调节系统,根据作业时的牵引阻力来判断农机具的入土深度,进而调节悬挂高度,尽管在不平路面上有较好的调节效果,但不适用于土壤比阻较大的路面。谢斌等[11]根据悬挂机构的几何关系和倾角传感器的测量值,间接测量出实际耕深,但未根据路面不平度对耕深进行相应控制。鲁植雄等[12]提出了一种模糊控制器用于电液悬挂的耕深控制方法,但其主要依赖耕深传感器和阻力传感器对犁耕作业深度进行调节,由于旋耕刀辊的旋转会对阻力传感器产生影响,因此该方法并不适用于旋耕作业。夏俊芳等[13]提出了一种基于车身俯仰角和悬挂转角的耕深监控方法,有效解决了旋耕作业时的耕深测量问题,但缺少对旋耕功率的监控。以上研究多集中在耕深的监控及被动控制等方面,但在实际作业中,悬挂的调节与因地表不平整、拖拉机俯仰而造成的耕深变化之间具有一定的滞后性,因此需对由地面造成的耕深扰动进行补偿,提高耕深控制的响应性。吕昊暾等[14]设计了一种用于果园作业平台调平的前馈控制器,解决了果园环境中平台不稳定的问题,但其主要研究了静态调平,对动态过程(如耕作)中的角度变化缺少深入分析。XIE 等[15-16]通过前馈控制器对地面不平度带来的干扰进行补偿,解决了联合收获机割台与地面高度误差过大的问题。文献[17－18]针对大功率拖拉机的耕深力位综合调节进行了优化,但大功率拖拉机对于路面平整度的变化感知较为迟钝,且其主要研究基于土壤比阻的力位综合控制,不适用于温室小型农机的旋耕作业。夏衍等[19]开发了一套用于悬挂式深松机的耕深监控装置,但其主要针对耕深的测量进行研究,并未提及耕深控制。

上述成果是针对农业生产过程中的耕作、姿态调整等方面的研究,主要应用于燃油拖拉机和轮式拖拉机[20-21],针对温室电动拖拉机俯仰旋耕稳定性的研究较少,特别是针对旋耕能耗的相关性研究中,更是鲜有针对温室路面特性的研究。针对温室作业机械的运动姿态受土壤路面不平度影响会产生随机性、不确定性和时变性等特点[22],难以获得精确的拖拉机姿态模型等问题,本文以温室电动旋耕机为研究对象,提出将基于时间序列分析的角度预测方法引入温室电动拖拉机的耕深前馈 PID 控制中(Angle prediction and feedforward PID, APF－PID),以期为温室电动拖拉机旋耕作业稳定性、能量优化提供理论依据。

1　试验平台与模型建立

1.1　温室电动拖拉机

温室电动拖拉机平台主要由行走电机、控制柜、激光雷达、电池箱、机罩、PTO 电机、悬挂机构、底盘等组成(图 1);底盘主要包括履带行走机构、差减速器总成、制动器总成;电池箱布置在底盘中间位置,为平台提供动力;行走电机布置在平台前部,通过皮带将动力传递到带轮,带动平台前进;PTO 电机布置在平台尾部,动力经减速器、带轮传递到作业机械。

1.2　拖拉机功率模型

1.2.1　行走功率

拖拉机的履带行走机构主要用于牵引后方旋耕机组前进,其主要由行走电机进行驱动。因此,拖拉

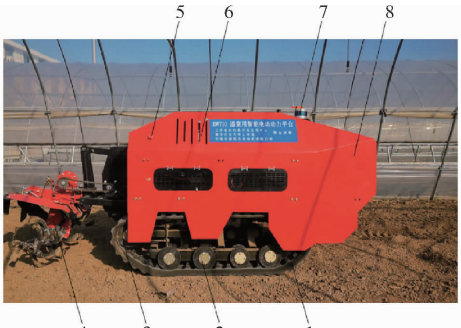


图 1 电动拖拉机主要结构图

Fig. 1 Main structure of electric tractor

1. 履带 2. 承重轮 3. 导向轮 4. 旋耕机总成 5. 急停按钮 6. 控制柜 7. 激光雷达 8. 机罩

机的行走功率可采用牵引功率进行计算,计算式为

$$N_1 = UI_1 = \frac{F_T v_x}{3.6} \tag{1}$$

式中 N_1——牵引功率,W

U——电池电压,V

I_1——行走电机电流,A

F_T——拖拉机牵引力,N

v_x——机组前进速度,m/s

1.2.2 旋耕功率

影响拖拉机旋耕作业功率的因素主要有耕深、前进速度、刀辊转速以及土壤参数等。由于影响旋耕功耗的因素较多,旋耕功率通常可采用经验公式进行简单计算,计算式[23]为

$$N_2 = UI_2 = \frac{1}{\eta} B \frac{h}{100} v_x \left[p_0 + \frac{(\pi Rn/30)^2}{2} \delta \right] \tag{2}$$

式中 N_2——牵引功率,W

I_2——旋耕电机电流,A

h——耕深,cm

B——耕宽,取 0.8 m

η——旋耕机传动功率,取 0.8 ~ 0.9

p_0——旋耕土壤比阻,N/m^2

R——刀辊半径,m

n——刀辊转速,r/min

δ——耕前土壤密度,kg/m^3

1.3 耕深调节模型

忽略各铰链处的间隙,将温室电动拖拉机悬挂提升机构视为刚性系统,则悬挂机构在作业时的运动学简图如图 2a 所示。

根据图 2 中的几何关系,在点 A、B、D 分别建立 $oxyz$、$o_1x_1y_1z_1$、$o_2x_2y_2z_2$ 坐标系,将图 2a 中的悬挂机构简化为三连杆机构,如图 2b、2c 所示。因此,旋耕机旋转中心在 $oxyz$ 上的坐标 $\boldsymbol{E}$ 可表述为

$$\boldsymbol{E} = {}^{B}_{A}\boldsymbol{T}\,{}^{D}_{B}\boldsymbol{T}\boldsymbol{E}' \tag{3}$$

其中 $$\boldsymbol{E}' = c[\cos(\theta_3 - \pi) \quad \sin(\theta_3 - \pi)]^{\mathrm{T}} \tag{4}$$

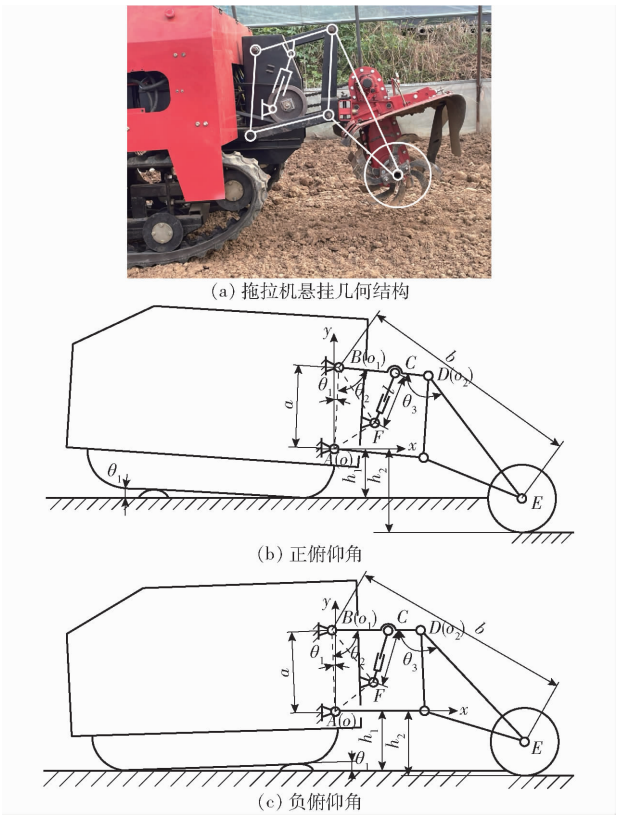


图 2 温室电动拖拉机耕深分析

Fig. 2 Analysis of plowing depth of electric tractor

$$ {}^{D}_{B}\boldsymbol{T} = \begin{bmatrix} \cos\left(\theta_2 - \frac{\pi}{2}\right) & -\sin\left(\theta_2 - \frac{\pi}{2}\right) & 0 \\ \sin\left(\theta_2 - \frac{\pi}{2}\right) & \cos\left(\theta_2 - \frac{\pi}{2}\right) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & b \end{bmatrix} \tag{5}$$

$$ {}^{B}_{A}\boldsymbol{T} = \begin{bmatrix} \cos(-\theta_2) & -\sin(-\theta_2) & 0 \\ \sin(-\theta_2) & \cos(-\theta_2) & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & a \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \tag{6}$$

$$\theta_2 = \arccos \frac{l_{AB}^2 + l_{BF}^2 - l_{AF}^2}{2 l_{AB} l_{BF}} + \arccos \frac{l_{BC}^2 + l_{BF}^2 - l^2}{2 l_{BC} l_{BF}} \tag{7}$$

式中 $\boldsymbol{E}'$——点 E 在坐标系 $o_2x_2y_2z_2$ 上的坐标

${}^{D}_{B}\boldsymbol{T}$——坐标系 $o_2x_2y_2z_2$ 到坐标系 $o_1x_1y_1z_1$ 的转换矩阵

${}^{B}_{A}\boldsymbol{T}$——坐标系 $o_1x_1y_1z_1$ 到坐标系 $oxyz$ 的转换矩阵

a——点 A、B 间的直线距离,m

b——点 B、E 间的直线距离,m

c——点 D、E 间距离

l——提升液压缸总长度,cm

θ_2——上拉杆与上下拉点连线之间的夹角,(°)

θ_3——上拉杆与刀辊旋转中心连线之间的夹角,(°)

旋耕机实际耕深 h 为

$$h = h_2 - h_1 \tag{8}$$

其中
$$h_1 \approx \begin{cases} h_H & (\theta_1 \leqslant 0°) \\ h_H + L\sin\theta_1 & (\theta_1 > 0°) \end{cases} \tag{9}$$

式中　h_1——三点悬挂下拉点与路面垂直距离，cm

h_2——三点悬挂下拉点与旋耕机最低点的垂直距离，cm

h_H——三点悬挂下拉点与履带接地面的距离，cm

θ_1——拖拉机俯仰角，(°)

基于式(7)，采用 Matlab R2019a 绘制提升液压缸总长度与 θ_2 的关系曲线，如图 3 所示。

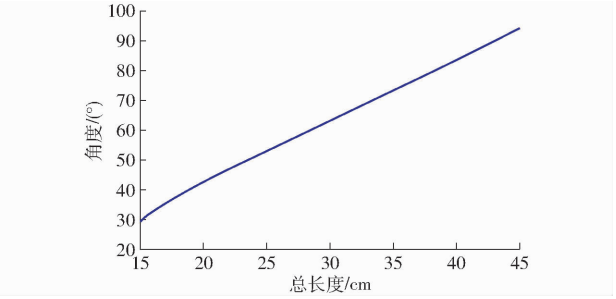


图 3　θ_2 与液压缸总长度关系

Fig. 3　Relationship between θ_2 and total length of hydraulic cylinder

2　基于 APF－PID 的耕深控制器

2.1　基于时间序列的俯仰角预测

2.1.1　模型结构识别

采用自回归滑动平均模型来预测试验平台的俯仰角变化，计算式为

$$y_t = \begin{bmatrix} \phi_1 \\ \phi_2 \\ \vdots \\ \phi_p \end{bmatrix}^{\mathrm{T}} \begin{bmatrix} y_{t-1} \\ y_{t-2} \\ \vdots \\ y_{t-p} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \lambda_1 \\ \lambda_2 \\ \vdots \\ \lambda_q \end{bmatrix}^{\mathrm{T}} \begin{bmatrix} u_{t-1} \\ u_{t-2} \\ \vdots \\ u_{t-q} \end{bmatrix} + u_t \tag{10}$$

式中　u_t——白噪声

ϕ_i——自回归参数

λ_i——移动平均参数

p——自回归过程阶数

q——移动平均过程阶数

y_t——模型输出

时间序列是由序列自身迟滞及模型拟合残差迟滞构成的多项式，阶数(p,q)是决定模型结构的唯一参数。阶数的识别方法一般有两种：自相关函数(ACF)和偏自相关函数(PACF)。这两种方法是识别 ARMA 模型最有效的方法。可以采用两种函数的截尾性质来判断该模型的类型[24]，如表 1 所示。

表 1　时间序列 ACF 和 PACF 的一般特征

Tab. 1　General characteristics of time series ACF and PACF

模型	ACF(p,q)	PACF(p,q)
AR	衰减趋于 0	p 阶后截尾
MR	q 阶后截尾	衰减于 0
ARMR	q 阶后衰减趋于 0	p 阶后衰减于 0

2.1.2　模型结构定阶

使用自相关函数和偏自相关函数的截尾来判断模型为 ARMA 模型时，并不能确定 p 和 q 的阶数，为了比较精确地确定 p 和 q 的阶数，就必须与常用的定阶准则联合应用。如今应用最为广泛的是 AIC (Akaike information criterion) 和 BIC (Bayesian information criterion)准则。由于 AIC 准则是现有数据拟合模型最好的评价指标，因此本研究采用 AIC 准则作为评价模型的定阶准则。AIC 准则函数为

$$\mathrm{AIC}(p,q) = N\ln\sigma_a^2 + 2(p+q+1) \tag{11}$$

式中　σ_a^2——样本的残差方差

N——样本个数

AIC 定阶需要在一定范围进行阶数搜索，并对每次搜索得到的模型计算 AIC 信息量[25]，直至某阶 AIC(p,q)最小即为最佳阶数。

2.2　前馈 PID 控制器

由于本文控制对象为不带积分部件的液压比例阀，因此采用位置式 PID 算法，即

$$u(n) = K_P e(n) + K_I \sum_{i=0}^{n} e(i) + K_D(e(n) - e(n-1)) \tag{12}$$

式中　$u(n)$——n 时刻控制器输出电压，V

$e(n)$——n 时刻拖拉机耕深误差，cm

K_P——比例环节系数

K_I——积分环节系数

K_D——微分环节系数

电动拖拉机作业平台具有较大的惯性与迟延，采用前馈 PID 控制器可以直接对干扰进行补偿，及时消除干扰的影响，提高控制精度。

APF－PID 由 PID 控制器、俯仰角预测和前馈补偿 3 部分组成。控制原理如图 4 所示。当电动拖拉机作业平台行驶在平整度差的温室路面时，

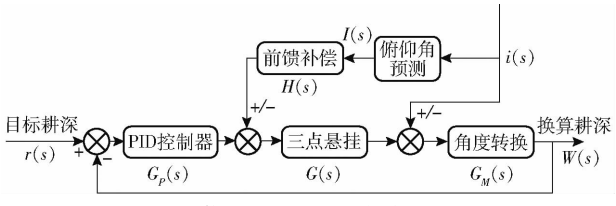


图 4　耕深 APF－PID 控制原理图

Fig. 4　Principle of APF－PID control for plowing depth

固接在机身的 IMU(惯性测量单元)检测到机身俯仰角的变化,预测模型根据历史信息将下一时刻的预测值传递至前馈 PID 控制器中并进行分析处理,输出模拟信号调节比例阀开口,从而控制悬挂液压缸升降。并且,根据当前的液压缸伸长量以及机身俯仰角实时换算实际的耕深,最终实现耕深的精准调节。

系统误差为

$$e(s)=r(s)-[(I(s)H(s)+e(s)G_P(s))G(s)+i(s)]G_M(s) \tag{13}$$

式中 $e(s)$——系统误差

$r(s)$——系统输入

$G(s)$——三点悬挂传递函数

$i(s)$——俯仰角测量输入

$I(s)$——俯仰角预测值

$H(s)$——前馈补偿传递函数

$G_P(s)$——PID 调节传递函数

$G_M(s)$——角度转换传递函数

为了消除系统误差,即 $e(s)=0$,则前馈补偿环节的传递函数为

$$H(s)=\frac{r(s)-i(s)G_M(s)}{G_M(s)I(s)G(s)} \tag{14}$$

尽管在实际使用中无法完全消除系统误差,但可以将误差降低到可接受的范围,在不影响系统稳定性的前提下,使耕深调节的稳定性得到很大提升。

3 实车试验

3.1 试验场地

在江苏省南京市江宁区谷里街道某温室(南京市江宁区,118.669 15°E,31.864 97°N)的试验田进行旋耕稳定性控制试验。试验平台如图 1 所示,采用西门子 S7-200CPU226CN 模拟量模块以及模拟量拓展模块 EM232、EM235CN 为控制核心,其中模拟量模块用于采集电流和电压信号,上位机采用 Matlab/Simulink R2019a 与 PLC 通过 RS485 协议进行通信,采样频率 10 Hz。电机电压和电流通过直流变压器(杭州美控自动化技术有限公司,型号:MIK-DZU,量程:0~150 V)和直流电流变送器(杭州美控自动化技术有限公司,型号:MIK-DZI,量程:0~150 A/0~100 A)进行测量,电机转速可通过电机驱动器的反馈信号获得,根据采集到的信号,计算试验过程中的总能量,计算式为

$$Q=\frac{1}{3\,600f}\sum_{i=1}^{k}U_i(I_{1i}+I_{2i}) \tag{15}$$

式中 Q——旋耕作业消耗总能量,W·h

f——上位机采样频率,Hz

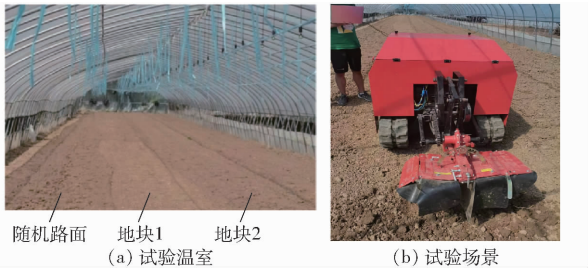
k——试验总采样点数

U_i——i 时刻电压信号,V

I_{1i}——i 时刻行走电机电流,A

I_{2i}——i 时刻 PTO 电机电流,A

试验场地如图 5 所示。



(a) 试验温室 (b) 试验场景

图 5 试验场地

Fig. 5 Test site

在图 5 的温室环境中,选取两种地块作为测试路面,其中地块 1 为未旋耕路面,地块 2 为已旋耕路面。测试路面长 30 m,使用含水率测量仪(浙江托普云农科技股份有限公司,型号:TZS-1K-G,精度:相对百分误差小于 3%)和坚实度测量仪(浙江托普云农科技股份有限公司,型号:TJSD-750-11,量程:0~7 922 kPa,精度:±5%)以五点法每隔 1.5 m 测量试验路面坚实度和含水率。测量结果如图 6 所示。惯性测量单元(荷兰 XSENS 公司,型号:MTi-300,最大采样频率 400 Hz)水平固接于车身上,可以实时测量拖拉机俯仰角。

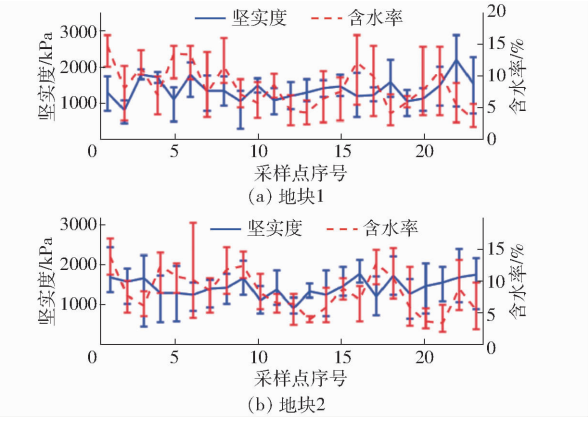


图 6 测试路面的土壤参数

Fig. 6 Soil parameters of testing road surface

3.2 俯仰角预测试验

初始采集得到的数据可能包含趋势性或周期性等因素,若原始序列中的统计特征会随时间推移而发生变化,则可采用差分法去除原始序列中的非平稳因素,直至通过平稳性检验[26],可采用 Matlab R2019a 中的 Adftest 函数和 Kpsstest 函数进行平稳性检验。在图 5 所示的温室内选取未耕作的随机路面进行俯仰角时间序列的平稳性检验,测得的序列如图 7 所示,平稳性检验结果如表 2 所示。由于实

际过程中对于非季节时间序列，ARMA(p,q)过程的最高阶数一般不会超过 2，因此计算 2 阶附近的 ARMA 模型的 AIC 数值，计算结果如表 3 所示。

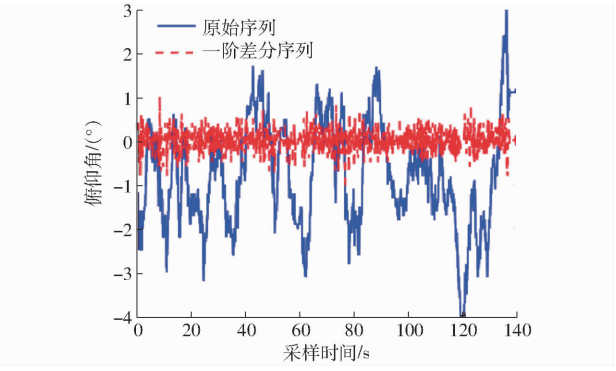


图 7　俯仰角信号一阶差分序列

Fig. 7　First order differential sequence of pitch angle signal

表 2　实测数据平稳性检验结果

Tab. 2　Stability test results of measured data

序列	Adftest	Kpsstest
原始序列	1	1
一阶差分序列	1	0

注：Adftest 为 1 且 Kpsstest 为 0 即为通过平稳性检验。

表 3　不同阶次的 AIC 计算结果

Tab. 3　AIC results of different orders

阶次	AIC 值	阶次	AIC 值
(1,2)	−5 512.2	(2,2)	−5 409.2
(2,1)	−5 513.9	(3,2)	−5 341.0

由图 7 可得，电动拖拉机在未耕作的随机路面激励下行驶的姿态为非平稳随机过程，差分处理后的行驶姿态为平稳随机过程。差分后序列 ACF 与 PACF 值的计算结果如图 8 所示。根据表 3 中的 AIC 计算结果，选取最小数值对应的阶次作为模型的最终参数。因此本研究采用 ARMA(2,1)对俯仰角进行预测，预测结果如图 9 所示。

从图 9 可以看出，预测值与实测值之间的相关系数 r 为 0.983 2，可以很好地预测温室电动拖拉机俯仰角的动态变化，具有较高的准确性。因此，所建模型输出精度满足 APF－PID 控制器前馈环节的要求，在后续试验中可以作为旋耕系统的扰动输入。

3.3　旋耕稳定性试验

3.3.1　试验参数选取

根据课题组已有的研究结果[3]，选取前进速度 v_x、旋耕深度 h、旋耕机刀辊转速 n 作为试验因素，设计正交试验。因素水平表如表 4 所示。

以测试地块上试验所消耗的总能耗作为评价指标，正交试验的结果如表 5 所示，A、B、C、E(空列)为因素水平值。将表 5 中正交试验的结果进行极差分析，结果如表 6 所示，其中 R 值越大，说明该作业参数对评价指标影响越明显。由表 6 可知，3 个作业参数对能耗的影响由大到小依次为前进速度、刀辊转速、旋耕深度(耕深)，这与文献[27]中的结果略有差距，但前进速度和刀辊转速对能耗的影响权重相同，根据正交试验设计及式(2)，同时结合表 2 和图8中的结果，由于正交试验过程中未对旋耕深

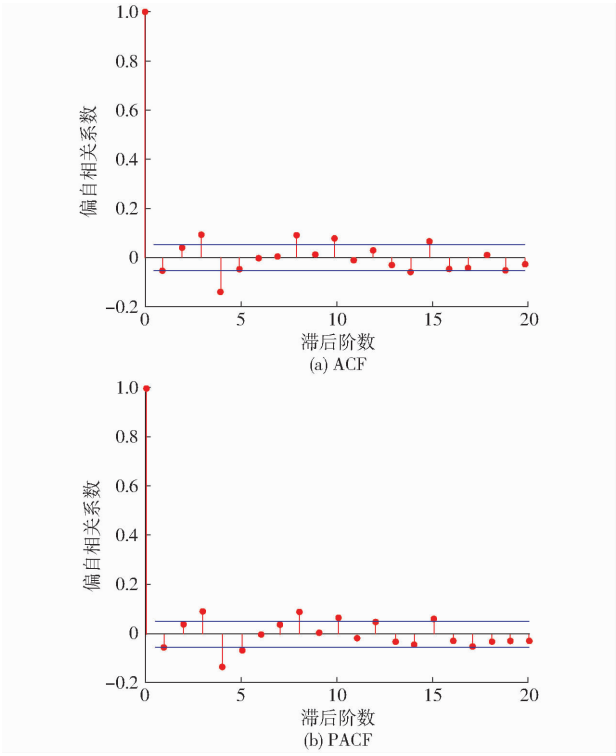


图 8　差分序列 ACF 和 PACF

Fig. 8　Differential sequence ACF and PACF

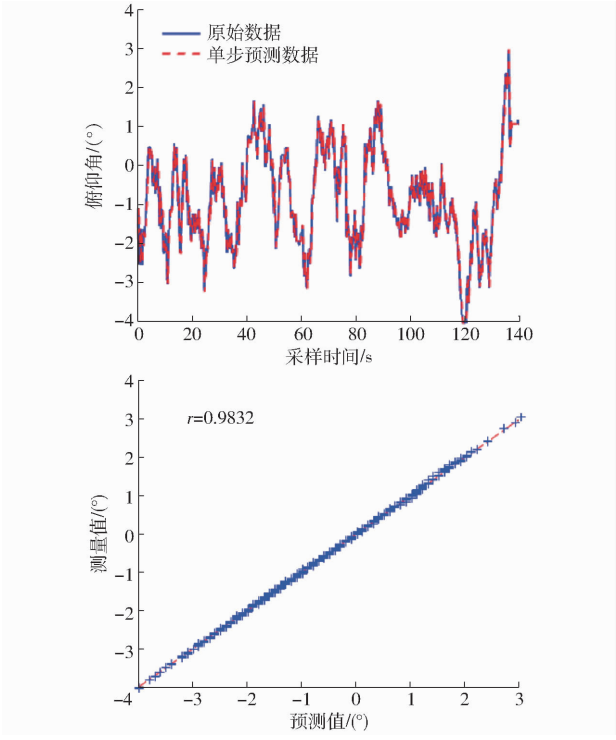


图 9　实测数据 ARMA(2,1)预测效果

Fig. 9　ARMA (2,1) prediction effect of measured data

表 4 试验因素水平

Tab. 4 Factors and levels of test

水平	因素		
	v_x/(m·s^{-1})	n/(r·min^{-1})	h/cm
1	0.10	150	4
2	0.13	170	6
3	0.16	190	8

表 5 试验结果

Tab. 5 Results of test

试验序号	因素				地块 1 能耗/(W·h)	地块 2 能耗/(W·h)
	A	B	C	E		
1	1	1	1	1	669.66	275.08
2	1	2	2	2	538.49	415.72
3	1	3	3	3	746.38	467.24
4	2	1	3	2	355.87	319.40
5	2	2	1	3	355.27	715.22
6	2	3	2	1	454.32	560.91
7	3	1	2	3	321.80	244.22
8	3	2	3	1	442.94	333.86
9	3	3	1	2	454.32	350.19

表 6 极差分析

Tab. 6 Range analysis

项目		A	B	C	E
地块 1	K_1	1 954.53	1 347.34	1 479.25	1 566.92
	K_2	1 165.46	1 336.70	1 314.61	1 346.68
	K_3	1 219.06	1 655.02	1 545.19	1 423.45
	R	789.07	318.32	230.58	220.24
地块 2	K_1	1 158.04	838.70	1 340.49	1 169.85
	K_2	1 595.53	1 464.80	1 220.85	1 085.31
	K_3	928.27	1 378.34	1 120.50	1 426.68
	R	667.26	626.10	219.99	341.37

度进行稳定控制,地面的起伏使得作业耕深处于不断变化的过程中,最终导致耕深对能耗的影响权重最低。因此,在实际旋耕作业中,需要进行旋耕稳定性控制,以减少旋耕功率的波动,提高作业效率。极差法分析结果直观地表示了各作业参数影响消耗能量的权重,根据表 6,在前进速度和刀辊转速中选取能耗最低的水平作为旋耕稳定性试验的作业参数,耕深则参考温室旋耕作业需求进行选择,最终结果如表 7 所示。

表 7 试验参数选取结果

Tab. 7 Selection results of test parameters

地块	v_x/(m·s^{-1})	n/(r·min^{-1})	h/cm
1	0.13	170	6
2	0.16	150	6

3.3.2 温室试验

为了验证 APF-PID 算法在温室作业中的实用性及鲁棒性,在图 5 所示的路面上分别进行耕深稳定性的实车试验,试验路面长 30 m。在实车试验中,采用无控制和 PID 控制作为对照组,APF-PID 控制作为试验组。根据 3.3.1 节试验结果,电动拖拉机平台以表 7 中的作业参数通过地块 1 和地块 2。图 10为每隔 1.5 m 测量旋耕机刀辊两侧的耕深,两种路面的耕深测量结果如图 11 所示。试验中采集到的部分总功率如图 12 所示。将采集到的数据输入 Matlab R2019a,计算对照组和试验组的均值、均方根误差(RMSE)以及绝对平均误差(MAE),统计结果如表 8 所示。



图 10 耕深测量

Fig. 10 Measurement of tillage depth

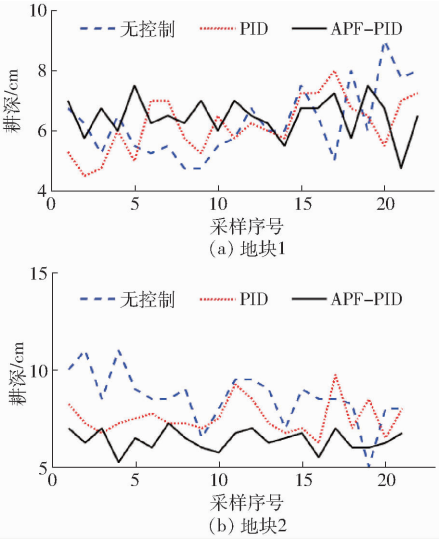


图 11 实车试验耕深测量结果

Fig. 11 Depth measurement results of real vehicle test

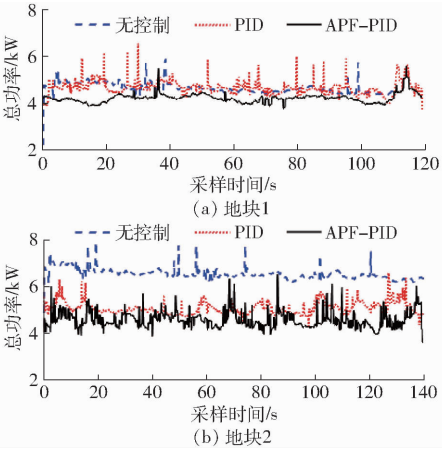


图 12 实车试验总功率测量结果

Fig. 12 Total power measurement results of real vehicle test

表 8　实车试验统计结果

Tab. 8　Statistical results of real vehicle tests

参数	地块 1			地块 2		
	无控制	PID	APF－PID	无控制	PID	APF－PID
平均功率/W	5 337. 8	5 348. 7	5 127. 4	5 218. 2	4 537. 5	4 289. 4
能耗/(W·h)	176. 6	177. 1	169. 7	220. 8	201. 8	163. 2
平均耕深/cm	6. 28	6. 20	6. 47	8. 49	7. 60	6. 44
耕深标准差/cm	1. 13	0. 91	0. 65	1. 33	0. 88	0. 56
耕深均方根误差/cm	1. 17	0. 93	0. 80	2. 90	1. 83	0. 72
耕深绝对平均误差/cm	0. 90	0. 80	0. 67	2. 68	1. 60	0. 58
耕深稳定性系数/%	82. 01	85. 32	89. 95	84. 33	88. 42	91. 30

由图 11 和图 12 可以看出，采用 APF－PID 控制的旋耕稳定性明显优于无控制和 PID 控制，其耕深较为平稳且更加接近目标值，总体的功率消耗也相对更低。由表 8 可以看出，相同工况下采用 APF－PID 控制所消耗的总能量更低，在地块 1 上较无控制和 PID 控制分别降低 3. 91%、4. 18%，在地块 2 上则分别降低 26. 09%、19. 13%。因此，可认为本文提出的控制方法能够有效降低旋耕作业的能耗。此外，实车试验中所设置的目标耕深为 6 cm，对比表 8 中耕深均方根误差，可得采用 APF－PID 控制方法更接近于目标耕深，且满足 GB/T 5668－2017《旋耕机》中所规定的耕深稳定性系数大于 85%。APF－PID 控制方法较地块 1 对照组的耕深稳定性系数分别提升 8. 83%、5. 15%，较地块 2 对照组分别提升 7. 63%、3. 15%。此外，结合表 6 中的结果，无控制的耕深稳定性较差，说明正交试验中的实际耕深难以维持在设定值，故造成了耕深对能耗影响的权重较低，因此在探讨耕深和能耗之间的关系应采用实际耕深。综合分析表 8，可认为本文提出的基于 APF－PID 的温室电动旋耕稳定性控制方法能够稳定耕深，减少因路面不平整、机身俯仰造成的功率突变，进而降低能耗、改善作业质量，可为电动拖拉机综合能耗优化提供研究思路。

4　结论

(1)采用时间序列分析方法建立了温室电动拖拉机俯仰角预测模型，解决了温室小型拖拉机俯仰扰动的计算与预测问题，为旋耕稳定性提供理论基础。

(2)结合拖拉机俯仰扰动，采用 APF－PID 控制器对旋耕作业进行稳定性控制。在温室内的未旋耕路面上采用该方法较无控制和 PID 控制可分别减少能耗 3. 91%、4. 18%，在温室内的已旋耕路面上可分别减少能耗 26. 09%、19. 13%。

(3)试验耕深测量结果表明，采用本文方法所得的耕深均方根误差分别为 0. 80、0. 72 cm，绝对平均误差为 0. 67、0. 58 cm，耕深稳定性系数分别为 89. 95% 和 91. 30%，均满足旋耕作业需求。

(4)针对温室电动拖拉机对路面平整度敏感而造成的旋耕作业不稳定的情况，本文提出的 APF－PID 旋耕稳定性控制方法，能有效减少旋耕作业的能耗以及提高耕深稳定性。

参　考　文　献

[1]　王玉军，张本华. 温室技术的现状及发展趋势[J]. 农机化研究，2008，30(1)：249－251.
WANG Yujun, ZHANG Benhua. The current situation and developing trend of greenhouse technology[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2008, 30(1): 249－251. (in Chinese)

[2]　傅翠晓，庄珺，郑奕. 碳达峰、碳中和领域关键技术评估分析[J]. 新能源科技，2023，4(1)：6－11.
FU Cuixiao, ZHUANG Jun, ZHENG Yi. Evaluation and analysis of key technologies in the fields of carbon peaking and carbon neutrality[J]. New Energy Technology, 2023, 4(1): 6－11. (in Chinese)

[3]　吴永栓，孙晨阳，周学剑，等. 小型履带自走式电动多功能作业平台的设计及试验[J]. 湖南农业大学学报(自然科学版)，2019，45(6)：664－668.
WU Yongshuan, SUN Chenyang, ZHOU Xuejian, et al. Design and test of the small size crawler-type self-propelled electric multifunctional operation platform[J]. Journal of Hunan Agricultural University (Natural Sciences), 2019, 45(6): 664－668. (in Chinese)

[4]　SINGH V P, MUKHERJEE A, RAJIV K, et al. Community sensor network for monitoring road roughness using smartphones [J]. Journal of Computing in Civil Engineering, 2017, 31(3): 1－29.

[5]　LI J, GUO W C, ZHAO Q, et al. Study on road roughness identification based on four typical neural networks [J]. Automotive Engineering, 2020, 42(1): 100－107.

[6]　JIANG J, SEAID M, MOHAMED M S, et al. Inverse algorithm for real-time road roughness estimation for autonomous vehicles [J]. Archive of Applied Mechanics, 2020, 90: 1333－1348.

[7] 罗锡文,单鹏辉,张智刚,等. 基于推杆电动机的拖拉机液压悬挂控制系统[J]. 农业机械学报,2015,46(10):1 - 6.
LUO Xiwen, SHAN Penghui, ZHANG Zhigang, et al. Electrohydraulic hitch control system for tractor based on linear actuator [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(10):1 - 6. (in Chinese)
[8] 李庆,罗锡文,汪懋华,等. 采用倾角传感器的水田激光平地机设计[J]. 农业工程学报,2007,23(4):88 - 93.
LI Qing, LUO Xiwen, WANG Maohua, et al. Design of a laser land leveler for paddy field[J]. Transactions of the CSAE, 2007, 23(4): 88 - 93. (in Chinese)
[9] 胡炼,林潮兴,罗锡文,等. 农机具自动调平控制系统设计与试验[J]. 农业工程学报,2015,31(8):15 - 20.
HU Lian, LIN Chaoxing, LUO Xiwen, et al. Design and experiment on auto leveling control system of agricultural implements [J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(8):15 - 20. (in Chinese)
[10] 杜巧莲. 拖拉机液压悬挂耕深电液控制系统设计与试验[J]. 农业机械学报,2008,39(8):62 - 65.
DU Qiaolian. Design and experiment on the control system of electro-hydraulic plow depth of tractor hydraulic hitch mechanism [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2008, 39(8):62 - 65. (in Chinese)
[11] 谢斌,李皓,朱忠祥,等. 基于倾角传感器的拖拉机悬挂机组耕深自动测量方法[J]. 农业工程学报,2013,29(4):15 - 21.
XIE Bin, LI Hao, ZHU Zhongxiang, et al. Measuring tillage depth for tractor implement automatic using inclinometer[J]. Transactions of the CSAE, 2013, 29(4):15 - 21. (in Chinese)
[12] 鲁植雄,郭兵,高强. 拖拉机耕深模糊自动控制方法与试验研究[J]. 农业工程学报,2013,29(23):23 - 29.
LU Zhixiong, GUO Bing, GAO Qiang. Study on auto-control method and experiment for tractor depth based on fuzzy control [J]. Transactions of the CSAE, 2013, 29(23):23 - 29. (in Chinese)
[13] 夏俊芳,李栋,刘国阳,等. 基于角度检测的拖拉机悬挂耕深电液监控系统研究[J]. 农业机械学报,2021,52(8):386 - 395.
XIA Junfang, LI Dong, LIU Guoyang, et al. Design and test of electro-hydraulic monitoring device for hitch tillage depth based on measurement of tractor pitch angle[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021,52(8):386 - 395. (in Chinese)
[14] 吕昊暾,胡召田,于泳超,等. 果园高位作业平台自动调平前馈 PID 控制方法[J]. 农业工程学报,2021,37(18):20 - 28.
LÜ Haotun, HU Zhaotian, YU Yongchao, et al. Feedforward PID control method for the automatic leveling of an orchard high-position operation platform[J]. Transactions of the CSAE, 2021, 37(18): 20 - 28. (in Chinese)
[15] XIE Y M, ALLEYNE A, GREER A, et al. Fundamental limits in combine harvester header height control[J]. Journal of Dynamic Systems Measurement and Control, 2013, 135(3): 1 - 8.
[16] XIE Y M, ALLEYNE A. A robust two degree-of-freedom controller for systems with both model and measurement uncertainty [J]. Control Engineering Practice, 2014, 25: 55 - 65.
[17] 王素玉,刘站,李瑞川,等. 基于土壤比阻的大功率拖拉机变权重力位综合控制研究[J]. 农业机械学报,2018, 49(2): 351 - 357.
WANG Suyu, LIU Zhan, LI Ruichuan, et al. Variable weight force-position mixed control of high-power tractor based on soil specific resistance[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(2): 351 - 357. (in Chinese)
[18] 杨俊茹,李宁,李瑞川,等. 基于滑模变结构的拖拉机耕深控制方法与试验研究[J]. 农机化研究,2022,44(8):238 - 243.
YANG Junru, LI Ning, LI Ruichuan, et al. Research on control method and experiment of tractor plough depth based on sliding mode variable structure[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2022, 44(8):238 - 243. (in Chinese)
[19] 夏衍,李军伟,单坤山. 悬挂式深松机耕深监控装置开发与试验[J]. 农业装备与车辆工程,2022,60(12):97 - 100.
XIA Yan, LI Junwei, SHAN Kunshan. Development and test of tillage depth monitoring device of suspension subsoil machine [J]. Agricultrual Equipment and Vehicle Engineering, 2022, 60(12):97 - 100. (in Chinese)
[20] 邵明玺,辛喆,江秋博,等. 拖拉机后悬挂横向位姿调整的模糊 PID 控制[J]. 农业工程学报,2019,35(21):34 - 42.
SHAO Mingxi, XIN Zhe, JIANG Qiubo, et al. Fuzzy PID control for lateral pose adjustment of tractor rear suspension[J]. Transactions of the CSAE, 2019, 35(21): 34 - 42. (in Chinese)
[21] 陈君梅,赵祚喜,陈嘉琪,等. 水田激光平地机非线性水平控制系统[J]. 农业机械学报,2014,45(7):79 - 84.
CHEN Junmei, ZHAO Zuoxi, CHEN Jiaqi, et al. Design of nonlinear leveling control system for paddy land leveler[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(7):79 - 84. (in Chinese)
[22] 赵润茂,胡炼,罗锡文,等. 基于时序的水田平地机俯仰角预测建模与试验[J]. 农业工程学报,2018,34(11):34 - 39.
ZHAO Runmao, HU Lian, LUO Xiwen, et al. Modelling and verification for pitch angle of leveler machine in paddy fields based on time series analysis[J]. Transactions of the CSAE, 2018, 34(11):34 - 39. (in Chinese)
[23] 中国农业机械化科学研究院. 农业机械设计手册[M]. 北京:中国农业科学技术出版社,2007.
[24] CRYER J D, CHAN K S. Time series analysis: with applications in R[M]. Berlin: Springer Science & Business Media, 2008.
[25] 龚啸. 基于 ARMA 递推算法的电力系统低频振荡模式在线辨识研究[D]. 重庆:重庆大学, 2012.
GONG Xiao. Research on online identification of low-frequency oscillation modes in power systems based on ARMA recursive algorithm[D]. Chongqing: Chongqing University, 2012. (in Chinese)
[26] 杨叔子,吴雅,轩建平. 时间序列分析的工程应用[M]. 武汉:华中科技大学出版社, 2007.
[27] 吴永栓. 温室用电动遥控履带作业平台设计[D]. 南京:南京农业大学,2021.
WU Yongshuan. Design of electric remote control crawler operation platform for greenhouses [D]. Nanjing: Nanjing Agricultural University, 2021. (in Chinese)