

含斜坡扰动的轮式拖拉机路径跟踪控制方法

徐立鸿 陈戎泉 袁洪良
(同济大学电子与信息工程学院, 上海 201804)

摘要: 针对部分地区横向斜坡农田地形导致路径跟踪控制算法精度下降的问题,提出了一种包含路面坡度扰动的动力学模型与跟踪误差模型结合的轮式拖拉机行驶动态过程的控制模型,并基于此模型通过线性模型预测控制方法得到控制律,由于预测模型包含了坡度的影响,使得反馈校正能够提前补偿,有效改善了农机在坡地上的路径跟踪性能。考虑到农机在不同行驶阶段对于误差和稳定程度需求的不同,提出了自适应的模型预测方法,令 Q 、 R 值随动变化以应对不同的需求(随动变化指的是两者相对大小的变化而非绝对数值)。进行了预测区间与控制区间选择的试验,而后基于简单运动学模型的模型预测控制进行了有无自适应 Q 、 R 的对比试验,最后分别在固定斜坡角的横向斜坡路面上和在斜坡角连续变化的横向斜坡路面上进行了本文方法与基于简单运动学的模型预测控制方法对比试验。试验结果表明:自适应能显著提升控制效果;本文方法在横向斜坡路面上的路径跟踪表现明显优于基于简单运动学模型的方法,此外稳态时的稳定程度也有较大的提升。

关键词: 轮式拖拉机; 无人驾驶; 斜坡扰动; 路径跟踪; 自适应; 模型预测控制

中图分类号: TP273 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2023)11-0421-10 OSID: 

Path Tracking Control Method for Wheeled Tractors with Slope Disturbance

XU Lihong CHEN Rongquan YUAN Hongliang
(School of Electronic and Information Engineering, Tongji University, Shanghai 201804, China)

Abstract: A model for the dynamic process of wheeled tractor driving, which combined a dynamic model containing road slope disturbance and a tracking error model, to address the issue of reduced accuracy of path tracking control algorithms caused by lateral sloping farmland terrain in some regions was proposed. Based on this model, a linear model predictive control method was used to obtain the control law. As the predictive model included the influence of slope, which enabled feedback correction to be compensated in advance, effectively improving the path tracking performance of agricultural machinery on sloping land. Considering the different requirements for error and stability of agricultural machinery in different driving stages, an adaptive model prediction method was proposed, which allowed the Q and R values to vary dynamically to meet different needs. Here, the variation referred to the relative size of the two, rather than the absolute value. Experiments were conducted on the selection of prediction intervals and control intervals. Then, a comparative experiment was conducted on the model predictive control based on a simple kinematic model with or without adaptive for Q and R . Finally, comparative experiments were conducted with the proposed method and the model predictive control method based on simple kinematics on a fixed slope angle transverse slope road surface and a continuously changing slope angle transverse slope road surface, respectively. Experiments showed that adaptive control can significantly improve control effectiveness, the path tracking performance of the method proposed was significantly better than that based on simple kinematic models on lateral sloping roads, and the stability level was also significantly improved in steady-state.

Key words: wheel tractor; unmanned driving; slope disturbance; path tracking; adaptive; model predictive control

式中 m ——农机质量, kg
 v_x ——农机纵向速度, m/s
 β ——农机侧滑角, ($^\circ$)
 r ——农机偏航率, ($^\circ$)
 θ ——扰动斜坡角, ($^\circ$)
 $F_{y.f}$ ——农机前轮侧偏力, N
 $F_{y.r}$ ——农机后轮侧偏力, N
 I ——农机绕 z 轴转动惯量, $\text{kg}\cdot\text{m}^2$
 l_f ——农机前轴距, m
 l_r ——农机后轴距, m

农机前后轮侧偏力满足线性侧偏特性的条件, 可以表示为

$$F_{y.f} = C_f \alpha_f \tag{3}$$

$$F_{y.r} = C_r \alpha_r \tag{4}$$

其中
$$\alpha_f = \delta_f - \frac{l_f r}{v_x} - \beta \tag{5}$$

$$\alpha_r = \frac{l_r r}{v_x} - \beta \tag{6}$$

式中 C_f ——农机前轮侧偏刚度, N/rad
 C_r ——农机后轮侧偏刚度, N/rad
 α_f ——农机前轮侧滑角, ($^\circ$)
 α_r ——农机后轮侧滑角, ($^\circ$)

此外, 由于 β 为小角度, 因此可以线性化得到
$$v_y = v_x \beta \tag{7}$$

式中 v_y ——农机横向速度, m/s
将式(3)~(6)代入式(1)、(2), 即可解得农机含斜坡扰动的横向动力学模型

$$\dot{r} = -\frac{l_f^2 C_f + l_r^2 C_r}{I v_x} r + \frac{l_r C_r - l_f C_f}{I} \beta + \frac{l_f C_f}{I} \delta_f \tag{8}$$

$$\dot{\beta} = \left(\frac{l_r C_r - l_f C_f}{m v_x^2} - 1 \right) r - \frac{C_f + C_r}{m v_x} \beta + \frac{C_f}{m v_x} \delta_f - \frac{g \sin \theta}{v_x} \tag{9}$$

1.2 跟踪误差模型

路径跟踪模型示意图如图 4 所示: M 为农机质心在参考路径上的正投影点, s 为参考路径上初始点到点 M 的曲线坐标距离(图中粗实线部分), ρ 为参考路径曲率函数(与 s 有关), ψ_{real} 为农机真实方向角, ψ_{refer} 为由农机中心做参考路径切线的垂线得到的点上对应的参考方向角。

由图 4 可得
$$\dot{s} = \frac{1}{1 - \varepsilon \rho(s)} (v_x \cos \psi - v_y \sin \psi) \tag{10}$$

式中 $\rho(s)$ ——在点 M 处参考路径曲率, m^{-1}
 ψ ——农机航向角偏差, ($^\circ$)

因此, 根据几何关系可以得到路径跟踪误差的模型表达式

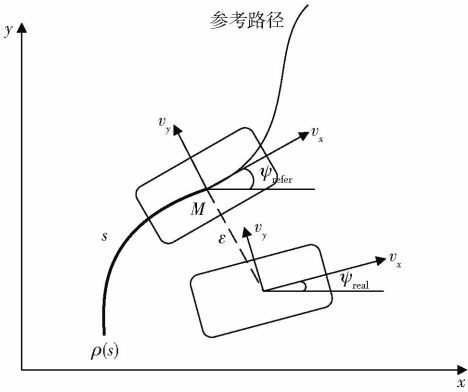


图 4 路径跟踪模型示意图
Fig. 4 Schematic of path tracking model

$$\dot{\varepsilon} = \begin{cases} -v_x \sin \psi - v_y \cos \psi & (\text{纵向速度左侧}) \\ v_x \sin \psi + v_y \cos \psi & (\text{纵向速度右侧}) \end{cases} \tag{11}$$

$$\dot{\psi} = r - v_x \rho(s) \tag{12}$$

农机航向角偏差为小角度, 因此可以认为 $\cos \psi \approx 1$ 。

在选定初始位置后, 出于简化计算考虑, 可在式(11)中根据初始位置取得固定参数, 后续仿真试验时取式(11)中的纵向速度右侧形式; 此外本文研究直线路径上行驶, 因此参考路径曲率为 0。表达式改写为

$$\dot{\psi} = r \tag{13}$$

1.3 农机行驶动态过程完整数学模型

综上, 得到最终的模型表达式为

$$\begin{cases} \dot{r} = a_{11} r + a_{12} \beta + b_1 \delta_f \\ \dot{\beta} = a_{21} r + a_{22} \beta + b_2 \delta_f + e \\ \dot{\varepsilon} = v_x \sin \psi + v_y \cos \psi \\ \dot{\psi} = r \end{cases} \tag{14}$$

其中
$$\begin{cases} a_{11} = -\frac{l_f^2 C_f + l_r^2 C_r}{I v_x} \\ a_{12} = \frac{l_r C_r - l_f C_f}{I} \\ a_{21} = \frac{l_r C_r - l_f C_f}{m v_x^2} - 1 \\ a_{22} = -\frac{C_f + C_r}{m v_x} \\ b_1 = \frac{l_f C_f}{I} \\ b_2 = \frac{C_f}{m v_x} \\ e = -\frac{g \sin \theta}{v_x} \end{cases} \tag{15}$$

定义变量为

$$\begin{cases} \mathbf{x}(t) = (r, \beta, \varepsilon, \psi) \\ \mathbf{u}(t) = \delta_f \end{cases} \tag{16}$$

2 路径跟踪控制设计

2.1 模型线性化

显然,以上得到的模型是非线性的,为了降低后续目标函数优化的难度,要对其进行线性化操作。考察其中需要进行线性化的部分,可以发现非线性的部分均为正弦项或者余弦项,而这些正弦项和余弦项下的角度均满足小角度条件,因此可以用泰勒展开式取一阶项的方式得到线性化结果,这里泰勒展开选取在某一任意点上展开,将模型简化表示为 $\dot{\mathbf{x}}=f(\mathbf{x},\mathbf{u})$ 形式,则该任意点的表达式和在该点的泰勒展开式为

$$\dot{\mathbf{x}}_r=f(\mathbf{x}_r,\mathbf{u}_r)$$
$$\dot{\mathbf{x}}=f(\mathbf{x}_r,\mathbf{u}_r)+\left.\frac{\partial f}{\partial \mathbf{x}}\right|_{\substack{\mathbf{x}=\mathbf{x}_r\\ \mathbf{u}=\mathbf{u}_r}}(\mathbf{x}-\mathbf{x}_r)+\left.\frac{\partial f}{\partial \mathbf{u}}\right|_{\substack{\mathbf{x}=\mathbf{x}_r\\ \mathbf{u}=\mathbf{u}_r}}(\mathbf{u}-\mathbf{u}_r)+R_r(\mathbf{x},\mathbf{u})\quad (17)$$

式中 $R_r(\mathbf{x},\mathbf{u})$ ——余项

两式相减,干扰项保留,于是可得增量表达式为

$$\dot{\tilde{\mathbf{x}}}=\mathbf{A}(t)\tilde{\mathbf{x}}+\mathbf{B}(t)\tilde{\mathbf{u}}+\mathbf{E}(t)\quad (18)$$

$$\mathbf{y}=\mathbf{C}(t)\tilde{\mathbf{x}}\quad (19)$$

其中

$$\tilde{\mathbf{x}}=\mathbf{x}-\mathbf{x}_r$$

$$\tilde{\mathbf{u}}=\mathbf{u}-\mathbf{u}_r$$

$$\mathbf{A}(t)\approx\begin{bmatrix}-\frac{l_f^2C_f+l_r^2C_r}{Iv_x}&\frac{l_rC_r-l_fC_f}{I}&0&0\\ \frac{l_rC_r-l_fC_f}{mv_x^2}-1&-\frac{C_f+C_r}{mv_x}&0&0\\ 0&v_x&0&v_x\\ 1&0&0&0\end{bmatrix}$$

$$\mathbf{B}(t)\approx\begin{bmatrix}\frac{l_fC_f}{I}\\ \frac{C_f}{mv_x}\\ 0\\ 0\end{bmatrix}\quad \mathbf{E}(t)\approx\begin{bmatrix}0\\ -\frac{g\sin\theta}{v_x}\\ 0\\ 0\end{bmatrix}$$

$$\mathbf{C}(t)=\begin{bmatrix}0&0&0&0\\ 0&0&0&0\\ 0&0&1&0\\ 0&0&0&1\end{bmatrix}$$

由此得到线性模型表达式,但该表达式是连续的,无法直接用于控制,因此还需要进一步进行离散化

$$\hat{\mathbf{x}}(k+1)=\mathbf{A}_{k,t}\hat{\mathbf{x}}(k)+\mathbf{B}_{k,t}\hat{\mathbf{u}}(k)+\mathbf{E}_{k,t}\quad (20)$$

$$\mathbf{y}(k+1)=\mathbf{C}_{k,t}\hat{\mathbf{x}}(k)\quad (21)$$

其中

$$\mathbf{A}_{k,t}=1+\mathbf{TA}(t)$$

$$\mathbf{B}_{k,t}=\mathbf{TB}(t)$$

$$\mathbf{E}_{k,t}=\mathbf{TE}(t)$$

式中 T ——采样间隔

基于式(20)、(21)就可以设计后续模型预测控制部分。

2.2 预测模型

本文采用差分量作为系统的控制量,因此定义

$$\mathbf{x}(k|t)=\begin{bmatrix}\hat{\mathbf{x}}(k|t)\\ \mathbf{u}(k-1|t)\end{bmatrix}\quad (22)$$

由此,新的状态空间表达式为

$$\mathbf{x}(k+1|t)=\tilde{\mathbf{A}}_{k,t}\mathbf{x}(k|t)+\tilde{\mathbf{B}}_{k,t}\Delta\mathbf{u}(k|t)+\tilde{\mathbf{E}}_{k,t}\quad (23)$$

$$\mathbf{y}(k|t)=\tilde{\mathbf{C}}_{k,t}\mathbf{x}(k|t)\quad (24)$$

其中

$$\tilde{\mathbf{A}}_{k,t}=\begin{bmatrix}\mathbf{A}_{k,t}&\mathbf{B}_{k,t}\\ \mathbf{O}_{m\times n}&\mathbf{I}_m\end{bmatrix}$$

$$\tilde{\mathbf{B}}_{k,t}=\begin{bmatrix}\mathbf{B}_{k,t}\\ \mathbf{I}_m\end{bmatrix}\quad \tilde{\mathbf{E}}_{k,t}=\begin{bmatrix}\mathbf{E}_{k,t}\\ \mathbf{I}_m\end{bmatrix}$$

$$\tilde{\mathbf{C}}_{k,t}=[\mathbf{C}_{k,t}\quad 0]$$

显然,当已知 t 时刻的状态量和输入增量时, $t+1$ 时刻的系统输出即可由式(23)得到。

而式(23)中的系数矩阵均可看作定值,与 k 无关,因此为方便书写,将矩阵表示为

$$\begin{cases}\tilde{\mathbf{A}}_{k,t}=\tilde{\mathbf{A}}_t\\ \tilde{\mathbf{B}}_{k,t}=\tilde{\mathbf{B}}_t\\ \tilde{\mathbf{E}}_{k,t}=\tilde{\mathbf{E}}_t\\ \tilde{\mathbf{C}}_{k,t}=\tilde{\mathbf{C}}_t\end{cases}\quad (k=1,2,\cdots,t+N-1)\quad (25)$$

系统在预测时域内的输出可以表示为

$$\mathbf{Y}(t)=\mathbf{Px}(t|t)+\mathbf{S}\Delta\mathbf{U}(t)+\mathbf{E}\quad (26)$$

其中

$$\mathbf{Y}(t)=\begin{bmatrix}\mathbf{y}(t+1|t)\\ \mathbf{y}(t+2|t)\\ \vdots\\ \mathbf{y}(t+N_p|t)\end{bmatrix}\quad \Delta\mathbf{U}(t)=\begin{bmatrix}\Delta\mathbf{u}(t|t)\\ \Delta\mathbf{u}(t+1|t)\\ \vdots\\ \Delta\mathbf{u}(t+N_c|t)\end{bmatrix}$$

$$\mathbf{P}=\begin{bmatrix}\tilde{\mathbf{C}}_t\tilde{\mathbf{A}}_t\\ \tilde{\mathbf{C}}_t\tilde{\mathbf{A}}_t^2\\ \vdots\\ \tilde{\mathbf{C}}_t\tilde{\mathbf{A}}_t^{N_p}\end{bmatrix}$$

$$S = \begin{bmatrix} \tilde{C}_t \tilde{B}_t & 0 & 0 & 0 \\ \tilde{C}_t \tilde{A}_t \tilde{B}_t & \tilde{C}_t \tilde{A}_t \tilde{B}_t & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \tilde{C}_t \tilde{A}_t^{N_p-1} \tilde{B}_t & \tilde{C}_t \tilde{A}_t^{N_p-2} \tilde{B}_t & \dots & \tilde{C}_t \tilde{A}_t^{N_p-N_c-1} \tilde{B}_t \end{bmatrix}$$
$$E = \begin{bmatrix} \tilde{C}_t \tilde{E}_t & 0 & 0 & 0 \\ \tilde{C}_t \tilde{A}_t \tilde{E}_t & \tilde{C}_t \tilde{A}_t \tilde{E}_t & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \tilde{C}_t \tilde{A}_t^{N_p-1} \tilde{E}_t & \tilde{C}_t \tilde{A}_t^{N_p-2} \tilde{E}_t & \dots & \tilde{C}_t \tilde{A}_t^{N_p-N_c-1} \tilde{E}_t \end{bmatrix}$$

2.3 滚动优化

采用的滚动优化形式为

$$\min J = \sum_{i=1}^{N_p} \| \mathbf{y}(t+i|t) - \mathbf{y}_{ref}(t+i|t) \|^2_Q + \sum_{i=1}^{N_c} \| \Delta \mathbf{u}(t+i-1|t) \|^2_R + \lambda \sigma^2 \quad (N_c < N_p) \tag{27}$$

式中 N_p ——预测区间
 N_c ——控制区间
 $\mathbf{y}$ ——预测中系统输出
 $\mathbf{y}_{ref}$ ——系统参考输出
 $\mathbf{Q}$ ——预测时域权重矩阵
 $\mathbf{R}$ ——控制时域权重矩阵
 σ ——松弛因子
 λ ——权重系数

$\mathbf{Q}$ 和 $\mathbf{R}$ 的取值决定了更偏重于跟踪精度还是输入稳定程度,在非稳态下希望能够有较小的跟踪误差,而在稳态下则变为需要更稳定的运行。

因此,本文提出自适应权重矩阵的方式进行 $\mathbf{Q}$ 和 $\mathbf{R}$ 的参数设置,因为影响目标函数优化效果的其实是 $\mathbf{Q}$ 和 $\mathbf{R}$ 主对角线系数相对大小,所以令 $\mathbf{Q}$ 和 $\mathbf{R}$ 主对角线系数相对大小在稳态与非稳态两种状态下进行改变可以动态地调节控制效果的侧重点。这里让系数呈现分段函数的形式,以农机横向误差作为判别的阈值来分段设置。例如在平面直线行驶时阈值设定为 0.050 m,具体判定是当横向偏差累计 10 次小于该阈值时,判断进入稳态,此时增大 $\mathbf{R}$ 的主对角线系数,以减小 $\Delta \mathbf{u}$ 的变化。对角阵 $\mathbf{Q}$ 和 $\mathbf{R}$ 主对角线上的系数可表达为

$$\lambda_Q = 10$$
$$\lambda_R = \begin{cases} 1 & (n < 10) \\ 100 & (n \geq 10) \end{cases} \tag{28}$$

式中 λ_Q —— $\mathbf{Q}$ 矩阵主对角线上的系数
 λ_R —— $\mathbf{R}$ 矩阵主对角线上的系数

n ——采样中横向偏差小于阈值的次数
此外,系统的物理意义决定了该目标函数需在以下约束条件下寻找最优解:

$$\begin{cases} \Delta U_{\min} \leq \Delta U_t \leq \Delta U_{\max} \\ \Delta U_{\min} \leq A \Delta U_t + U_t \leq \Delta U_{\max} \\ y_{\min}(t+k) \leq y(t+k) \leq y_{\max}(t+k) \end{cases} \tag{29}$$

式中 $\mathbf{A}$ ——系统矩阵

2.4 反馈校正

由上述滚动优化得到一系列控制区间的结果为

$$\Delta \mathbf{U}_t^* = [\Delta u_t^* \quad \Delta u_{t+1}^* \quad \dots \quad \Delta u_{t+N_c-2}^* \quad \Delta u_{t+N_c-1}^*]^T \tag{30}$$

式中 Δu_i^* ——预测 i 时刻的控制指令

取控制区间的第一个元素,与上一时刻的控制输入量相加,即得到实际的控制指令为

$$u(t) = u(t-1) + \Delta u_t^* \tag{31}$$

而后预测进入下一个时刻,对下一时刻重复如上步骤直到结束。

3 自适应效果和路径跟踪控制效果仿真验证

采用 Carsim-Simulink 联合仿真验证。控制器参数设置如下: $T=0.1$ s, $v_x=2$ m/s。仿真试验的农机参数参照纽荷兰的 T1404B 型拖拉机,农机参数如表 1 所示。

表 1 拖拉机参数
Tab.1 Tractor parameters

参数	$m/$ kg	$I/$ (kg·m ²)	$l_f/$ m	$l_r/$ m	$C_f/$ (N·rad ⁻¹)	$C_r/$ (N·rad ⁻¹)
数值	3 000	1 765	1.05	0.8	80 000	95 000

Carsim 包含车辆模型、路面模型、联合仿真接口和结果图线 4 部分,Simulink 界面包含 Carsim 的 S-Fuction、路径跟踪控制算法和整个系统的连接,两者的界面如图 5 所示。

仿真试验主要包含 3 部分:模型预测控制的预测区间与控制区间选取试验;自适应 $\mathbf{Q}$ 、 $\mathbf{R}$ 值的效果验证试验;本文路径跟踪控制算法的效果验证试验。

第 1 组试验是采用了控制变量的方法,控制一个参数不变,改变另一个参数,比较结果;第 2 组试验采用对比试验的方法,对含有自适应和不含自适应的路径跟踪控制进行对比试验;第 3 组试验采用对比试验的方法,首先对基于简单运动学的模型预测路径跟踪控制方法与本文的路径跟踪控制方法在 10°和 20°的横向斜坡上进行了 2 组对比试验,其次对基于简单运动学的模型预测路径跟踪控制方法与本文的路径跟踪控制方法在角度连续变化的横向斜

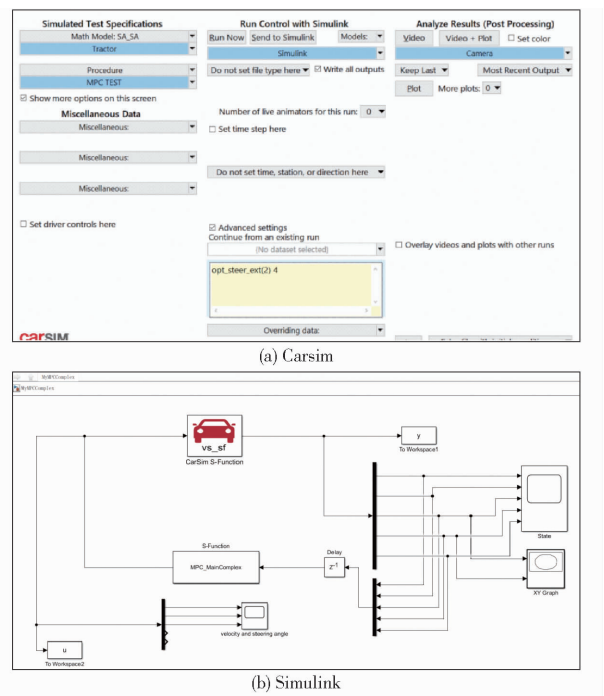


图 5 联合仿真界面
Fig. 5 Joint simulation interface

坡上进行 1 组对比试验。

3.1 预测区间与控制区间选择试验

预测区间和控制区间的设置需要进行试验来对比选择较优方案。其中预测区间的选择是在覆盖农机动态特性的前提下尽可能小,控制区间的选择是在低于预测区间且可以使系统稳定的前提下选择性能较优者。

出于简便考虑,农机的行驶路况选择在平地路面,采用的路径跟踪控制方法是基于本文模型的自适应 MPC 路径跟踪控制算法。

预测区间试验是择保持控制区间为 10 不变,改变预测区间为 10、20、30,结果如图 6 所示。

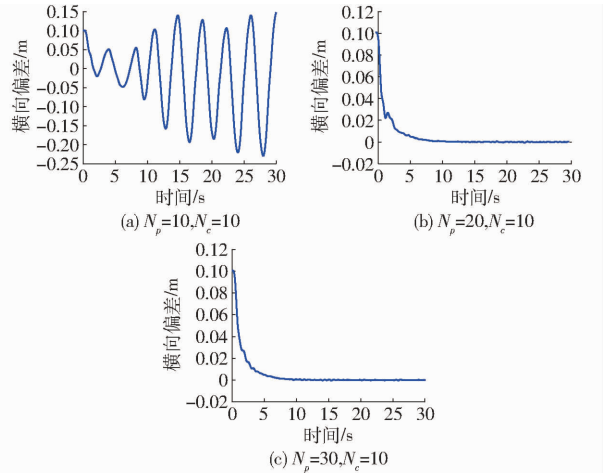


图 6 预测区间试验曲线

Fig. 6 Prediction interval experiment curves

从图 6 中可以看出:当预测区间取 10,控制结

果呈发散的状态,原因可能在于该预测区间长度过小,无法完整地覆盖农机运动时的动态特性,因此该值不可行;当预测区间取 20 时,控制结果基本收敛,产生些许超调,虽然相较于预测区间取 30 时超调会大一些,但是在可接受范围之内,基于减少计算量的考虑,认为取预测区间为 20 比较合适;当预测区间取 30 时,控制结果依旧收敛,产生些许超调,且相较于预测区间取 20 时超调要降低一点,但是并没有本质性的提升。因此认为取 20 是合适的。

控制区间实验是选择保持预测区间为 20 不变,改变预测区间为 5、10、15、20,结果如图 7 所示。

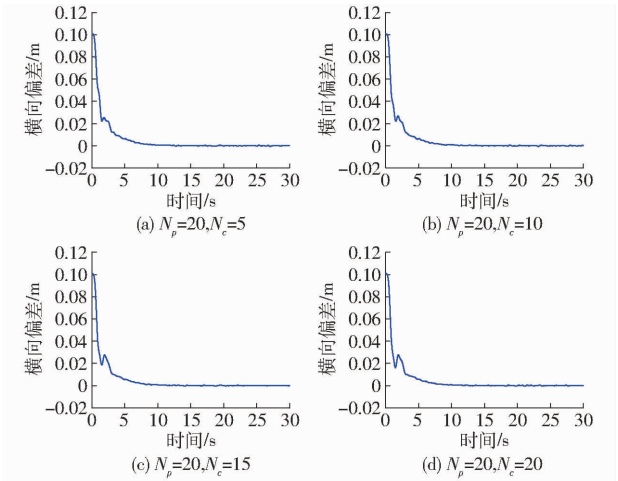


图 7 控制区间试验曲线

Fig. 7 Control interval experiment curves

由图 7 可以看出,在保持预测区间不变的情况下,控制区间的变化对于控制器跟踪的效果影响较小,区别在于较小的控制区间下系统的超调较小但是数据波动较明显,较大的控制区间下系统的超调较大但是稳态波动较小,所以这里出于折中的考虑选择控制区间取 10。因此有: $N_p=20, N_c=10$ 。

由于本文模型会受到横摆角度是否为小角度的影响,若初始状态下与目标路径距离过大可能导致模型失真,而实际行驶中绝大部分情况也是在目标路径附近开始行驶,因此本文模型是选择在距离初始位置较近处开始行驶。

3.2 自适应 Q、R 对比测试

无自适应的试验中取 Q 和 R 为定值,取值为 $\lambda_Q=1, \lambda_R=1$;而含自适应的试验中取 Q 为固定, R 为可变,具体权重取值见式(28)。出于方便考虑,这组试验将在直线水平的路面进行,路径跟踪控制方法依然是本文提出的方法。

从图 8 和图 9 可以看出,在不使用自适应 Q 和 R 时,农机路径跟踪误差较大,横向偏差绝对值最大值为 0.018 m,此外前轮转角动作幅度也较

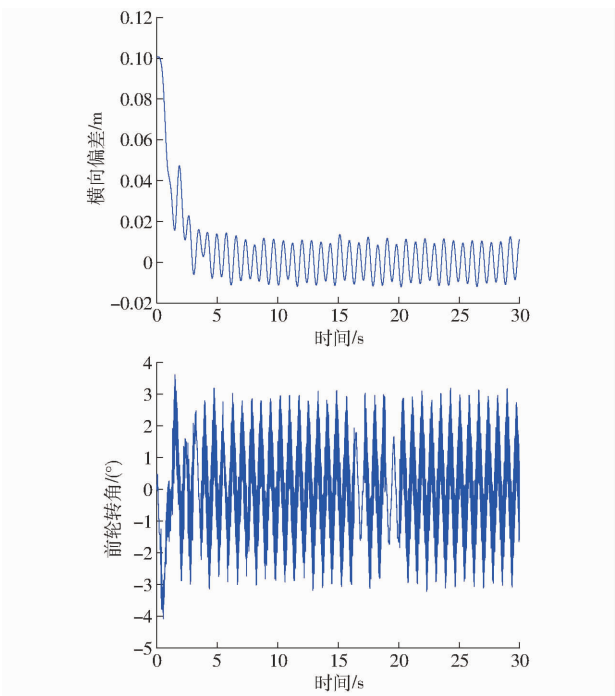


图 8 无自适应 Q 和 R 的试验曲线

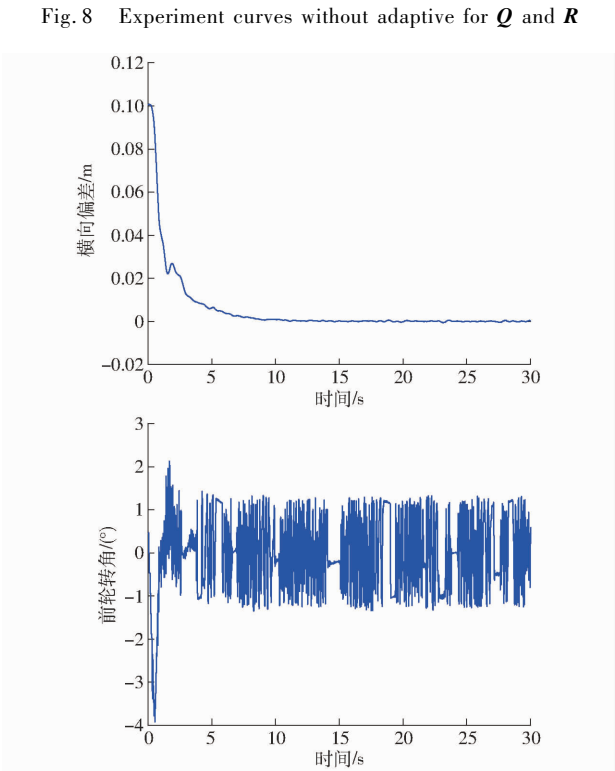


图 9 有自适应 Q 和 R 的试验曲线

Fig. 9 Experiment curves with adaptive for Q and R

大,稳态下前轮转角绝对值最大值大于 2° ;而使用自适应 Q 和 R 策略后,农机路径跟踪误差明显降低,横向偏差绝对值最大值为 0.002 m ,此外前轮转角动作幅度也较小,稳态下前轮转角绝对值最大值小于 2° 。因此,自适应 Q 和 R 的策略能有效提升模型预测控制的性能。

3.3 横向斜坡场景测试对比控制性能

进行 3 组对比试验,第 1 组选择在横坡角为 10°

的横坡上直线行驶,第 2 组选择在横坡角为 20° 的横坡上直线行驶,第 3 组在横坡角为 10° 的基础上加上正弦变化路面构造的坡度连续变化的横坡上直线行驶。对比基于简单运动学的模型预测控制路径跟踪算法和本文的路径跟踪控制算法。其中基于简单运动学的方法选择固定的权重 $\lambda_Q = 1, \lambda_R = 1$ 。本文的方法则是由本文模型推导得到的含横向斜坡扰动的自适应 MPC 路径跟踪控制。此外路面的附着系数选择常见农田的系数 0.6 。

简单运动学方法输入参数为航向角、 x 轴方向农机位置、 y 轴方向农机位置;本文提出的方法输入参数为侧滑角、偏航率、航向角、 x 轴方向农机位置、 y 轴方向农机位置。

数据平均值为取稳态内的一段数据,对每个数据取绝对值后求和,而后进行取平均。

3.3.1 10° 横向斜坡上对比试验

从图 10 中可以看出,基于简单运动学模型的模型预测控制在含有较小角度的横向斜坡扰动的道路上能够保持较稳定的运行,但是横向误差较大且航向角波动较大。稳态下,基于简单运动学的模型预测控制效果如下:横向偏差绝对值最大值为 0.063 m ,横向偏差绝对值平均值为 0.047 m ;航向角偏差绝对值最大值为 2.9° ,航向角偏差绝对值平均值为 0.9° 。相比较之下,本文路径跟踪控制方法

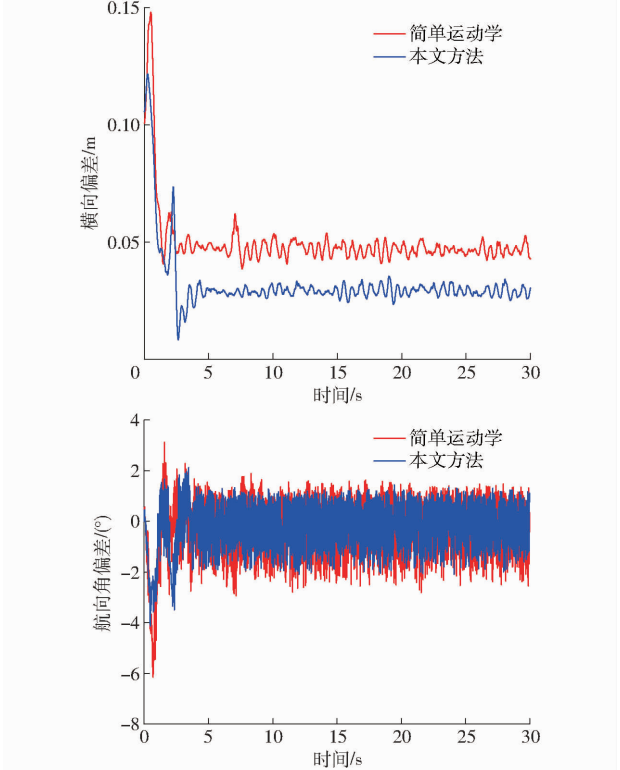


图 10 在 10° 横坡条件下两种方法的控制效果对比

Fig. 10 Comparison of control effects between two methods under 10° cross slope condition

在该路况下既可保持稳定运行,也可将横向误差和航向角的波动明显地降低。本文控制方法效果如下:横向偏差绝对值最大值为 0.036 m,横向偏差绝对值平均值为 0.029 m;航向角偏差绝对值最大值为 2.0°,航向角偏差绝对值平均值为 0.7°。

3.3.2 20°横向斜坡上对比试验

从图 11 中可以看出,当横向斜坡的角度增大时,基于简单运动学模型的模型预测控制路径跟踪方法的稳定性明显下降,且跟踪精度大幅降低、稳态波动大幅升高。这表明当横向斜坡的扰动较大时,简单运动学模型很难体现出农机运动的真实情况,因此才会出现当横向斜坡角度增大时控制效果大幅降低的结果。稳态下,基于简单运动学模型的模型预测控制效果如下:横向偏差绝对值最大值为 0.172 m,横向偏差绝对值平均值为 0.165 m;航向角偏差绝对值最大值为 4.2°,航向角偏差绝对值平均值为 1.3°。相比较之下,本文的路径跟踪控制方法依然能保持稳定运行,且跟踪精度的降低程度较小、稳态波动所受影响同样很小。这表明即使横向斜坡的扰动较大,本文的自动驾驶模型依然能够较好地体现农机运动的真实情况。稳态下,本文控制方法的控制效果如下:横向偏差绝对值最大值为 0.062 m,横向偏差绝对值平均值为 0.045 m;航向角偏差绝对值最大值为 2.3°,航向角偏差绝对值平均值为 0.6°。

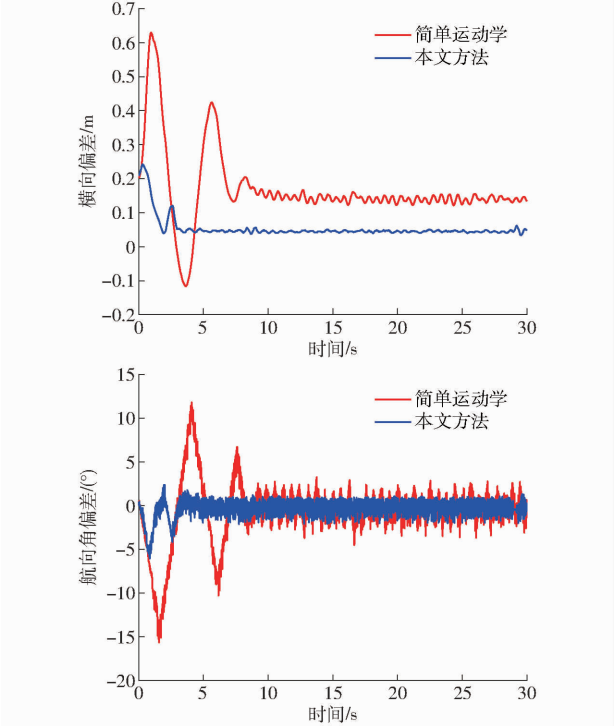


图 11 在 20°横坡条件下两种方法的控制效果对比
Fig. 11 Comparison of control effects between two methods under 20° cross slope condition

3.3.3 横坡角度连续变化的路面对比试验

本试验的路面是在斜坡角度为 10°的横向斜坡的基础上,在参考路径的横向与纵向添加路面缓慢正弦变化,从而构造出横坡角度连续变化的路面,具体在 Carsim 中的实现如图 12 所示。试验结果如图 13 所示。

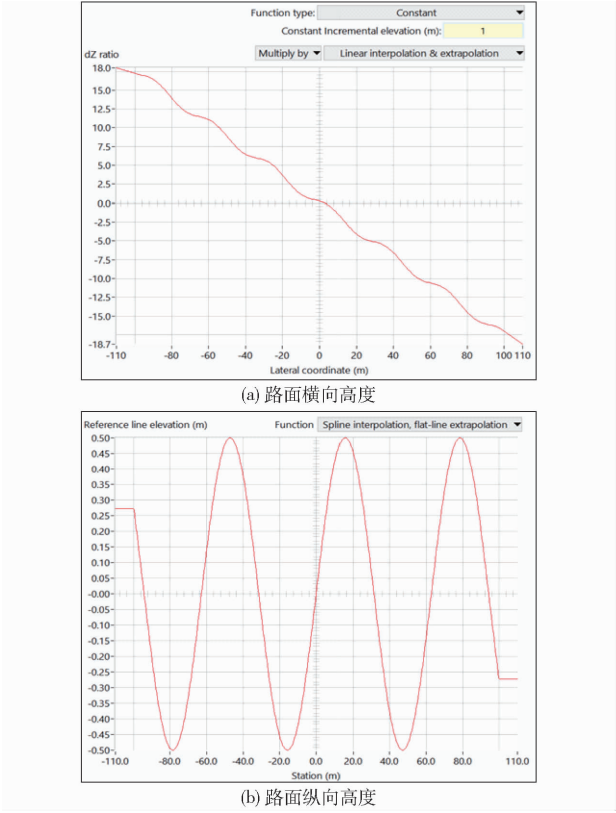


图 12 Carsim 中横坡角连续变化路面的构建结果
Fig. 12 Construction result of road surface with continuous changes in cross slope angle in Carsim

从图 13 中可以看出,当横向斜坡的角度连续变化时,基于简单运动学模型的模型预测控制虽然跟踪精度变化不大,但是稳态的波动幅度大幅升高。这表明当横向斜坡的斜坡角度连续变化时,基于简单运动学的模型预测控制难以使农机保持稳定的直线行驶。稳态下,基于简单运动学的模型预测控制的效果如下:横向偏差绝对值最大值为 0.068 m,横向偏差绝对值平均值为 0.045 m;航向角偏差绝对值最大值为 3.7°,航向角偏差绝对值平均值为 1.1°。相比较之下,本文的路径跟踪控制方法在横坡角度连续变化的情况下依然能保持稳定运行,且跟踪精度与稳态波动均无明显变化。这表明即使横向斜坡的扰动在一定的范围内变化,本文的自动驾驶模型依然能够较好地体现农机行驶的过程,具有较好的鲁棒性。稳态下,本文控制方法的控制效果如下:横向偏差绝对值最大值为 0.045 m,横向偏差绝对值平均值为 0.035 m;航向角偏差绝对值最大

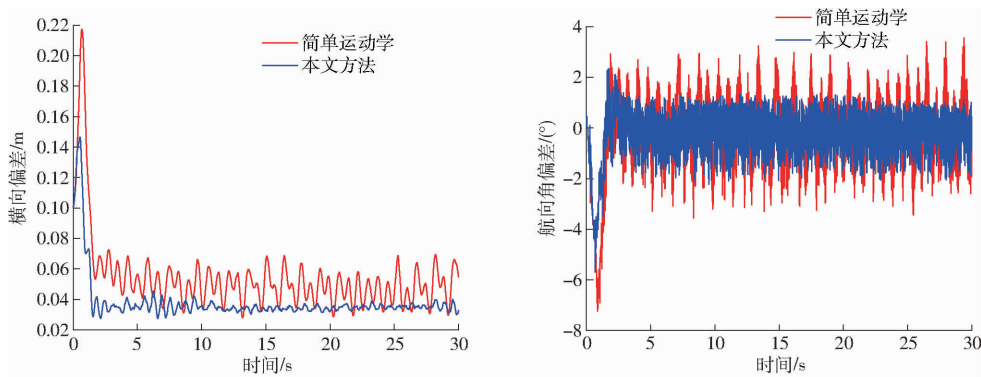


图 13 在横坡角连续变化条件下两种方法的控制效果对比

Fig. 13 Comparison diagrams of control effects of two methods under condition of continuous changes in cross slope angle

值为 2.2° , 航向角偏差绝对值平均值为 0.7° 。

4 结束语

提出了一种含斜坡扰动的农机自动驾驶动力学模型, 基于线性自适应 Q 和 R 的模型预测控制设计了控制算法。目的是通过提升模型精度和完善控制策略的方法使农机在自动驾驶过程中降低横向偏差和航向角偏差。试验结果表明: 首先, 自适应 Q 和 R 可以有效缓解稳态下的波动情况, 使得稳态下农机的前轮转角波动和横向误差大幅降低; 其次, 基于

本文模型的自适应模型预测控制在横向斜坡扰动的场景下表现良好。拖拉机在速度 2 m/s 下恒速行驶。本文提出的方法相较于基于简单运动学模型的方法: 横向斜坡角为 10° 时, 横向偏差绝对值和航向角偏差绝对值最大值分别降低 42% 和 31% ; 横向斜坡角为 20° 时, 横向误差绝对值和航向角偏差绝对值最大值分别降低 64% 和 45% ; 横向斜坡角在 10° 的基础上缓慢连续变化时, 横向误差绝对值和航向角偏差绝对值最大值分别降低 34% 和 41% 。综上, 仿真试验结果证明了本文模型和控制器设计性能良好。

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]. 农业机械学报, 2020, 51(4): 1–18.
ZHANG Man, JI Yuhao, LI Shichao, et al. Research progress of agricultural machinery navigation technology[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(4): 1–18. (in Chinese)
- [2] 刘成良, 林洪振, 李彦明, 等. 农业装备智能控制技术研究现状与发展趋势分析[J]. 农业机械学报, 2020, 51(1): 1–18.
LIU Chengliang, LIN Hongzhen, LI Yanming, et al. Research status and development trend analysis of intelligent control technology for agricultural equipment[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(1): 1–18. (in Chinese)
- [3] 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]. 农业机械学报, 2015, 46(2): 1–7.
BAI Xiaoping, HU Jingtao, GAO Lei, et al. Research on the self tuning model control method for agricultural machinery navigation[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015, 46(2): 1–7. (in Chinese)
- [4] LI Yunwu, SUN Hongwei, LIU Dexiong, et al. Autonomous navigation and path tracking control on field roads in hilly areas[J]. Journal of Sensors, 2019(20): 1–15.
- [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]. 农业机械学报, 2018, 49(5): 21–26.
LI Ge, WANG Yu, GUO Liufen, et al. Improved pure tracking algorithm for navigation path tracking of rice transplanter[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(5): 21–26. (in Chinese)
- [6] 白晓平, 孟鹏, 王卓, 等. 基于运动特性的农机导航控制方法[J]. 农业机械学报, 2021, 52(11): 21–27.
BAI Xiaoping, MENG Peng, WANG Zhuo, et al. Control method for navigation based on kinetic characteristics of agricultural machinery[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(11): 21–27. (in Chinese)
- [7] 胡炼, 关锦杰, 何杰, 等. 花生收获机自动驾驶作业系统设计与试验[J]. 农业机械学报, 2022, 53(9): 21–27.
HU Lian, GUAN Jinjie, HE Jie, et al. Design and experiment of automatic driving operation system for peanut harvester[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(9): 21–27. (in Chinese)
- [8] XU Guangfei, CHEN Meizhou, HE Xiangkun, et al. Path following control of tractor with an electro-hydraulic coupling steering system: layered multi-loop robust control architecture[J]. Biosystems Engineering, 2021, 209: 282–299.
- [9] 武涛, 李彦明, 徐长庚, 等. 基于滚动时域的无人水稻直播机运动状态估计[J]. 农业机械学报, 2022, 53(10): 36–43.
WU Tao, LI Yanming, XU Changeng, et al. Motion state estimation of unmanned rice direct seeding machine based on rolling time domain[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2022, 53(10): 36–43. (in Chinese)
- [10] LI Shichao, XU Hongzhen, JI Yuhao, et al. Development of a following agricultural machinery automatic navigation system[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2019, 158: 335–344.

- [11] GAO Feiyang, WANG Zhuo, BAI Xiaoping, et al. Design of row guidance control system for combine corn harvester[C]//2019 2nd International Conference on Information Systems and Computer Aided Education (ICISCAE), 2019.
- [12] LI Aiqin, XU Jiyang, MA Fei, et al. Design of quality control system for fighting machine operation based on Beidou navigation[J]. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science, 2020, 440(3):032046.
- [13] FANG Hao, FAN Ruixia, THUÏLOT B, et al. Trajectory tracking control of farm vehicles in presence of sliding[J]. Robotics & Autonomous Systems, 2006, 54(10):828–839.
- [14] CARIOU C, LENAIN R, THUÏLOT B, et al. Automatic guidance of a four-wheel-steering mobile robot for accurate field operations[J]. Field Robot, 2009, 26(6–7):504–518.
- [15] XUE Peilin, WU Yuan, YIN Guodong, et al. Path tracking of orchard tractor based on linear time-varying model predictive control[C]//2019 Chinese Control And Decision Conference (CCDC), 2019.
- [16] HILL A, LANEURIT J, LENAIN R, et al. Online gain setting method for path tracking using CMA-ES: application to off-road mobile robot control[C]//IROS 2020, 2020.
- [17] YAO Zhen, LIU Guohai, ZHANG Duo, et al. Path tracking control for four-wheel-independent-driven agricultural high clearance sprayer with new front-rear-dual-steering-axle[C]//2020 Chinese Automation Congress (CAC), 2020.
- [18] LIU Zhengduo, ZHENG Wenxiu, WANG Neng, et al. Trajectory tracking control of agricultural vehicles based on disturbance test[J]. International Journal of Agricultural and Biological Engineering, 2020, 13(2):138–145.
- [19] LIU Zhengduo, LÜ Zhaoqin, ZHENG Wenxiu, et al. Design of obstacle avoidance controller for agricultural tractor based on ROS[J]. International Journal of Agricultural and Biological Engineering, 2019, 12(6):58–65.
- [20] LUKASSEK M, VOLZ A, SZABO T, et al. Model predictive control for agricultural machines with implements[C]//2020 28th Mediterranean Conference on Control and Automation (MED), 2020.

(上接第 384 页)

- [12] 高云,陈震撼,王瑜,等. 多环境参数控制的猪养殖箱设计及箱内气流场分析[J]. 农业工程学报, 2019, 35(2):203–212.
GAO Yun, CHEN Zhenhan, WANG Yu, et al. Design for pig breeding chamber under multiple environment variable control and analysis of internal flow field[J]. Transactions of the CSAE, 2019, 35(2):203–212. (in Chinese)
- [13] XIE Q J, JI-QIN N, SU Z B. A prediction model of ammonia emission from a fattening pig room based on the indoor concentration using adaptive neuro fuzzy inference system[J]. Journal of Hazardous Materials, 2017, 325:301–309.
- [14] WANG Y, DONG H M, ZHU Z P, et al. CH₄, NH₃, N₂O and NO emissions from stored biogas digester effluent of pig manure at different temperatures[J]. Agriculture, Ecosystems and Environment, 2016, 217:1–12.
- [15] XIE Q J, JI-QIN N, LI E L, et al. Sequential air pollution emission estimation using a hybrid deep learning model and health-related ventilation control in a pig building[J]. Journal of Cleaner Production, 2022, 371:133714.
- [16] XIE Q J, JI-QIN N, BAO J. Correlations, variations, and modelling of indoor environment in a mechanically-ventilated pig building[J]. Journal of Cleaner Production, 2021, 282:124441.
- [17] ZHANG J, KONG F, ZHAI Z, et al. Development of wireless remote control electric devices for livestock farming environment [C]//2017 International Conference on Electronic Industry and Automation (EIA 2017), 2017.
- [18] 秦莉. 基于 STM32 猪舍环境监测系统的设计与实现[D]. 贵阳:贵州大学, 2018.
QIN Li. Design and implementation of fixed intelligent monitoring system for agricultural microclimate[D]. Guiyang:Guizhou University, 2018. (in Chinese)
- [19] 王斌,刘雪梅,张国强,等. 猪舍生态环境监测和清洁控制系统的设计[J]. 农业工程学报, 2020, 36(3):55–62.
WANG Bin, LIU Xuemei, ZHANG Guoqiang, et al. Design of control system for pig farm cleaning and ecological environment monitoring[J]. Transactions of the CSAE, 2020, 36(3):55–62. (in Chinese)
- [20] 谢秋菊,苏中滨,JI-QIN Ni,等. 密闭式猪舍多环境因子调控系统设计与调控策略[J]. 农业工程学报, 2017, 33(6):163–170.
XIE Qiuju, SU Zhongbin, JI-QIN Ni, et al. Control system design and control strategy of multiple environmental factors in confined swine building[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(6):163–170. (in Chinese)
- [21] XIE Q, JI-QIN N, BAO J, et al. A thermal environmental model for indoor air temperature prediction and energy consumption in pig building[J]. Building and Environment, 2019, 161:106238.
- [22] 谢秋菊,JI-QIN Ni,包军,等. 基于能质平衡的密闭猪舍内小气候环境模拟与验证[J]. 农业工程学报, 2019, 35(10):148–156.
XIE Qiuju, JI-QIN Ni, BAO Jun, et al. Simulation and verification of microclimate environment in closed swine house based on energy and mass balance[J]. Transactions of the CSAE, 2019, 35(10):148–156. (in Chinese)
- [23] 杨亮,刘春红,郭昱辰,等. 基于 EMD–LSTM 的猪舍氨气浓度预测研究[J]. 农业机械学报, 2019, 50(增刊):353–360.
YANG Liang, LIU Chunhong, GUO Yuchen, et al. Prediction of ammonia concentration in fattening piggery based on EMD–LSTM[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(Supp.):353–360. (in Chinese)
- [24] 吴繁森. 基于 ARM + OneNET 云平台的工厂车间环境监控系统设计[J]. 物联网技术, 2022, 12(11):15–17.
- [25] 中华人民共和国农业部. 规模猪场环境参数及环境管理:GB/T 17824.3—2008[S]. 北京:中国标准出版社, 2008.