

DOI: 10.13382/j.jemi.B2104788

# 基于 LQR 的联合收割机割台高度控制研究\*

刘青山 李川 魏新华 卢泽民 王爱臣

(江苏大学现代农业装备与技术教育部重点实验室 镇江 212013)

**摘要:**针对联合收割机作业过程中田间路面起伏影响割台高度进而导致割台高度测量难和喂入量波动等问题,提出基于双惯性传感器的联合收割机割台高度实时获取方法和基于线性二次调节器(linear quadratic regulator, LQR)的割台高度控制方法。通过两个惯性传感器分别测量联合收割机车身和倾斜输送机倾角实时求得割台高度,基于运动学和割台结构分析建立割台系统数学模型,通过选择性能函数求解线性二次型最优控制问题,得到割台高度控制的最优解,并根据最优解控制液压缸调节割台高度,使割台高度稳定在预设范围内。仿真结果表明,传统 PID 控制器跟踪含有随机噪声的阶跃信号时误差均方根为  $0.226^\circ$ ,而 LQR 控制器跟踪含有随机噪声的阶跃信号时误差均方根为  $0.133^\circ$ ,因此 LQR 控制器的动态性能优于传统 PID,可以提高割台高度的调控质量。

**关键词:** 联合收割机;割台高度;最优控制;线性二次型

**中图分类号:** TP273;S24 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.80

## Research on the header height control strategy of combine harvester based on LQR

Liu Qingshan Li Chuan Wei Xinhua Lu Zemin Wang Aichen

(Key Laboratory of Ministry of Education of Modern Agricultural Equipment and Technology, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China)

**Abstract:** Aiming at the problems that the fluctuation of field road affects header height of a combine harvester, it further results in the difficulty of measuring the header height and the fluctuation of feed quantity during the operation of a combine harvester, a real-time method for measuring the header height based on double inertial sensors and a method for controlling the header's height based on linear quadratic regulator (LQR) were proposed. The header height was obtained in real time by measuring the inclination angles of the combine body and the inclined conveyor with two inertial sensors. Mathematical model of the header system was established based on the kinematics and the structural analysis of the header. The optimal solution of the header height control was obtained by selecting the performance function to solve the linear quadratic optimal control problem. According to the obtained optimal solution, the hydraulic cylinder was controlled to adjust the header height, so that the header height was stable in the preset range. The simulation results showed that the root mean square error of traditional PID controller was  $0.226^\circ$  when tracking the step signal with random noise, while the root mean square error of the LQR controller was  $0.133^\circ$  when tracking the step signal with random noise. Therefore, the dynamic performance of the LQR controller is better than that of the traditional PID, confirming that the proposed method can improve the control quality of header height of a combine harvester.

**Keywords:** combine harvester; header height; optimal control; linear quadratic

收稿日期: 2021-10-08 Received Date: 2021-10-08

\* 基金项目:“十三五”国家重点研发计划(2019YFB131230201)、镇江市重点研发计划(NY2020006)、江苏省现代农机装备与技术示范推广项目(NJ2021-64, NJ2020-59)、江苏高校优势学科建设工程项目资助

## 0 引言

谷物联合收割机在作业时,作物由割台输送至收割机内部,割台高度的变化直接影响喂入量和割茬高度。在实际生产中收割机驾驶员为保持割茬高度的一致和喂入量的相对稳定,需对割台高度不断调整。但在农忙时节,收割机驾驶员精力有限和过分追求作业效率,导致手工调节误差较大。此外,由于部分田块路况复杂,致使车身起伏和割台高度波动,若割台调整不及时,可能导致在割台高度波动过程中部分低矮作物被漏割或割台撞击地面受损。割台高度的调控对保持割茬一致、降低机器故障率和维持作业负荷相对稳定具有重要意义。

割台高度的精确控制需要准确的割台高度测量信息。目前割台高度测量方法以接触式的机械仿形机构为主,通过传动机构将路面的起伏变化传递到角度传感器,再由传动机构的几何关系和角度传感器标定的角度值得到割台高度<sup>[1-3]</sup>。但该测量方法的机械组件较多,寿命有限,且易受田间泥块的干扰。为解决此问题,非接触式测量方法也被研究用于联合收割机割台高度测量。朱剑等<sup>[4]</sup>通过一组超声波传感器测量安装位置到地面的距离以获得割台高度,并通过 PID 算法消除测量误差,该割台高度测量方法简单、测量装置易安装,但易受田间石块和麦秸影响。廖勇等<sup>[5-6]</sup>提出利用位移传感器测量割台液压缸来检测割台高度,但未考虑田间地形变化导致的割台高度变化。伍渊远等<sup>[7]</sup>通过视觉识别与图像处理获取割茬高度,利用割茬高度间接获得割台高度,该方法可满足联合收割机自主作业实时性的要求,但测量系统标定过程中产生的误差会严重影响后续割茬高度测量的准确性。Liu 等<sup>[8]</sup>提出基于视频图像序列的空间分割方法定位作物,进而预测割台抬升的时间,但分割效果易受田间光照、阴影等影响。

割台高度控制方面,龙震寰等<sup>[9]</sup>采用增量式 PID 算法,根据目标割台倾角与实测割台倾角的偏差,设计了一套割台高度自适应调节系统。Xie 等<sup>[10-11]</sup>基于频域分析得出收割机割台及基本性能限制条件,建立简化的割台数学模型,通过定义状态空间方程、设计线性二次调节器(linear quadratic regulator, LQR)最优控制算法控制割台高度。胡焉为等<sup>[12]</sup>同样基于 LQR 设计了可调控割台俯仰、摆转的控制器,仿真表明该控制器可使割台适应车身在纵横两个方向上的起伏变化。Xie 等<sup>[13]</sup>使用前馈和反馈控制器的两种自由度控制设计控制器,但实际应用中有很多限制。Kassen 等<sup>[14]</sup>与庄肖波等<sup>[15]</sup>基于鲁棒反馈线性化方法,结合割台液压缸的电流参数,设计了割台高度调控策略,仿真结果表明控制误差小于传统 PID 控制。对比 LQR 与传统 PID 控制算法,LQR 适用于可线性化的

全状态反馈控制,对噪声具有较好的鲁棒性,稳态误差较小,但也存在动态响应速度较慢的缺点<sup>[16]</sup>。传统的 PID 控制方法动态响应速度较快,但平衡位置存在振荡现象,静态特性不理想<sup>[17]</sup>。由于联合收割机在作业过程中会产生大量噪声,因此本文选用鲁棒性较好的 LQR 作为控制算法。

针对现有收割机高度不易检测、割台高度难以快速准确调节等问题,本研究通过两个惯性传感器实时获取联合收割机割台高度,对收割机割台系统进行分析建模,建立收割机车身倾角与割台期望角度的关系,利用最优控制获取约束下的最优解,最后通过 Simulink 对控制效果进行仿真验证。

## 1 割台系统模型建立

联合收割机在行走过程中,当地面不平或经过田垄时,车身俯仰角度产生波动,进而影响割台高度,为建立车身俯仰角与割台高度的关系,对收割机的割台机构进行分析,结合实测参数和用户手册获取割台的数学模型。

简化收割机结构示意图如图 1 所示。本研究通过两个惯性测量单元(inertial measurement unit, IMU)分别测量收割机车身和割台的姿态,通过两个 IMU 所在平面的角度值计算割台高度。因收割机工作时机身震动,IMU 数据中含大量的低频噪声,可通过小波分析抑制数据中的不稳定分量,提高测量精度<sup>[18]</sup>。当收割机在田间作业或者跨越田垄时,实时测量车身俯仰角,车身俯仰角反映履带俯仰角,进而通过履带俯仰角变化计算割台高度变化。

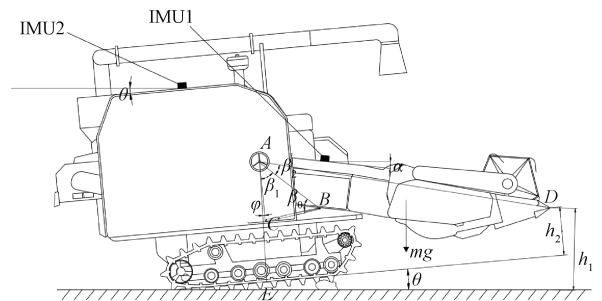


图 1 收割机结构示意图

Fig. 1 Schematic diagram of the structure of a combine harvester

如图 1 所示,IMU1 安装在割台倾斜输送机处,IMU2 安装在车身上方,车身和割台均视作刚体,IMU1 测得的倾斜输送机相对于水平面的角度为  $\alpha$ ,IMU2 测得车身俯仰角为  $\theta$ ,A 点为收割机割台绕机身旋转轴心,B 点为液压缸和割台连接点,C 点为液压缸和车身连接点,D 点为割台的前端, $l_{AE}$  为 A 点到收割机车身底部的垂直距离, $h_1$  为

割台前端到地面的垂直距离,  $h_2$  为车身水平状态下割台前端到车身底部的垂直距离。当车身水平时,  $h_1 = h_2$ , 当收割机上仰时, 各变量间的近似几何关系为:

$$l_{BC}^2 = l_{AC}^2 + l_{AB}^2 + 2l_{AC}l_{AB}\cos\beta_1 \quad (1)$$

$$\beta_1 = \frac{\pi}{2} - \theta - \alpha - \beta_2 - \varphi \quad (2)$$

$$\sin\beta_0 = \frac{l_{AC}\sin\beta_1}{l_{BC}} \quad (3)$$

其中,  $\varphi$  为  $l_{AE}$  和  $l_{AC}$  的夹角,  $\beta_0$  为  $l_{BC}$  和  $l_{BA}$  的夹角,  $\beta_1$  为  $l_{AC}$  和  $l_{AB}$  的夹角,  $\beta_2$  为  $l_{AD}$  和  $l_{AB}$  的夹角, 则车身水平状态下的割台前端到车身底部垂直距离  $h_2$  为:

$$h_2 = l_{AE} - l_{AD}\sin\alpha \quad (4)$$

设履带后轮到割台前端距离为  $l_1$ , 履带前轮到割台前端距离为  $l_2$ , 当收割机车身上仰时, 割台前端到地面的垂直距离  $h_1$  为:

$$h_1 = \frac{l_{AE} - l_{AD}\sin(\alpha + \theta)}{\cos\theta} + l_1\sin\theta \quad (5)$$

当收割机车身下俯时, 取  $\theta$  为俯仰角绝对值, 割台前端到地面的垂直距离  $h_1$  为:

$$h_1 = \frac{l_{AE} - l_{AD}\sin(\alpha - \theta)}{\cos\theta} - l_2\sin\theta \quad (6)$$

当收割机割台绕旋转中心点  $A$  做俯仰运动时, 近似动力学方程为:

$$Fl_{AB}\sin\beta_0 - \frac{1}{2}mgl_{AD}\cos\alpha - k\dot{\alpha} = J\ddot{\alpha} \quad (7)$$

其中,  $F$  为液压缸作用在割台上的力,  $m$  为割台质量,  $k$  为割台转动等效阻尼系数,  $J$  为割台的转动惯量。实际作业时, 地面起伏导致的车身俯仰角度和割台调整角度较小, 为简化计算, 对式 (7) 进行近似线性化处理<sup>[10]</sup>:

$$\Delta Fl_{AB}\sin\beta'_0 + F'P\Delta\alpha - \frac{1}{2}mgl_{AD}\cos\alpha'\Delta\alpha - k\Delta\dot{\alpha} = J\Delta\ddot{\alpha} \quad (8)$$

其中,  $\Delta F$  为割台液压缸的动力变化量,  $\beta'_0$  为割台处于平衡状态时的  $\beta_0$  角度,  $F'$  为液压缸处于平衡状态时的  $F$ ,  $\alpha'$  为割台处于平衡状态时的  $\alpha$  角度,  $\Delta\alpha$  为  $\alpha$  的变化量, 令  $\omega_1 = \alpha' + \theta$ ,  $P$  为关于  $\theta$  和  $\alpha'$  的系数:

$$P = \frac{l_{AB}l_{AC}\cos\omega_1}{l_{BC}} \quad (9)$$

对式 (5)、(6) 做近似线性化处理后可得车身上仰时期望割台角度调整量  $\Delta\alpha_d$  为:

$$\Delta\alpha_d = \frac{l_{AE} - l_{AD}\sin\omega_1 + l_1\sin\theta - h_{1d}}{l_{AD}\cos\omega_1} \quad (10)$$

车身下俯时期望割台角度调整量  $\Delta\alpha_d$  为:

$$\Delta\alpha_d = \frac{l_{AE} - l_{AD}\sin\omega_2 - l_2\sin\theta - h_{1d}}{l_{AD}\cos\omega_2} \quad (11)$$

其中,  $h_{1d}$  为预设的期望割台高度。为跟踪该期望割台高度, 在车身俯仰角为  $\theta$  时  $\alpha$  的调整量需为  $\Delta\alpha_d$ ,  $\theta$  由 IMU2 测量得到,  $\omega_2 = \alpha' - \theta$ 。显然  $\Delta\alpha_d$  是关于  $\theta$  的函数, 即当收割机俯仰角  $\theta$  变化时, 调整  $\Delta\alpha_d$  即可实现割台高度跟踪。选定状态变量、输出变量和输入变量如下所示:

$$\begin{cases} \mathbf{x}_0 = [\Delta\alpha \quad \Delta\dot{\alpha}]^T \\ \mathbf{y}_0 = \Delta\alpha \\ \mathbf{u}_0 = \Delta F \end{cases} \quad (12)$$

可得状态空间方程为:

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{x}}_0 = \mathbf{A}\mathbf{x}_0 + \mathbf{B}\mathbf{u}_0 \\ \mathbf{y}_0 = \mathbf{C}\mathbf{x}_0 \end{cases} \quad (13)$$

其中,

$$\begin{cases} \mathbf{A}_0 = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ \frac{F'P}{J} - \frac{mgl_{AD}\cos\alpha'}{2J} & -\frac{k}{J} \end{bmatrix} \\ \mathbf{B}_0 = \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{l_{AB}\sin\beta'_0}{J} \end{bmatrix} \\ \mathbf{C}_0 = [1 \quad 0] \end{cases} \quad (14)$$

为分析该状态空间模型和判断系统特性, 当车身处于水平状态, 即  $\theta = 0$  时, 通过实测估计收割机平衡状态 and 参考收割机各配件用户手册, 得到收割机平衡状态下各参数近似如表 1 所示。

表 1 联合收割机平衡状态下参数  
Table 1 Parameters of the balance state of the combine harvester header

参数	意义	数值
$l_1$	履带后轮到割台前端距离/m	3.98
$l_2$	履带前轮到割台前端距离/m	2.16
$l_{AD}$	割台转动点到割台前端距离/m	3.00
$l_{AC}$	割台转动点到液压缸与车身连接点距离/m	0.80
$l_{AB}$	割台转动点到液压缸与车身连接点距离/m	1.10
$l_{AE}$	割台转动点到车身底部的垂直距离/m	1.53
$m$	割台质量/kg	800
$J$	割台俯仰转动惯量/kg·m <sup>2</sup>	2 700
$\varphi$	$l_{AE}$ 与 $l_{AC}$ 的夹角/rad	0
$\beta_2$	$l_{AD}$ 与 $l_{AB}$ 的夹角/rad	0.26
$\alpha'$	平衡状态割台角度/rad	0.52
$F'$	平衡状态液压缸提供的力/N	4 300

将表 1 数据代入式 (14) 计算可得如下状态空间参数:

$$\begin{cases} \mathbf{A}_0 = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -3.299 & -0.031 \end{bmatrix} \\ \mathbf{B}_0 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0.000 \ 13 \end{bmatrix} \\ \mathbf{C}_0 = [1 \ 0] \end{cases} \quad (15)$$

可得系统可控性判别阵  $\text{rank}[\mathbf{B} \ \mathbf{AB}] = 2$ , 可观性判别阵  $\text{rank}[\mathbf{C}^T \ \mathbf{A}^T \ \mathbf{C}^T] = 2$ , 可知系统完全可控可观, 割台系统的等效开环传递函数为:

$$G(s) = \frac{0.000 \ 13}{s^2 + 0.031s + 3.299} \quad (16)$$

式(16)的根轨迹如图 2 所示, 由图可知系统的极点全部位于  $s$  左半平面, 即该线性系统稳定。

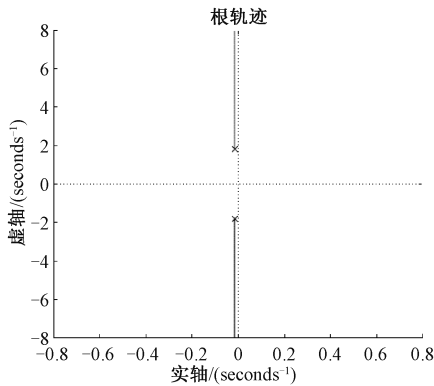


图 2 联合收割机割台系统的根轨迹图  
Fig. 2 Root locus diagram of the combine harvester header system

## 2 LQR 控制器设计

割台运动时液压缸需对割台施加作用力来控制割台高度变化, 若割台调控系统为线性, 则该最优控制可以归结为线性二次型问题, 若其中性能指标为状态和控制的二次型, 则可利用 LQR 最优控制算法求解最优解, 最终实现工程中便于使用的闭环最优反馈控制。对式(7)线性化后, 设定割台调控系统的性能指标为状态变量和控制变量的线性二次型函数, 定义性能指标  $J_1$  为<sup>[19-20]</sup>:

$$J_1 = \frac{1}{2} \int_0^{\infty} (\mathbf{e}^T \mathbf{Q} \mathbf{e} + \mathbf{u}^T \mathbf{R} \mathbf{u}) dt \quad (17)$$

其中,  $\mathbf{e}^T \mathbf{Q} \mathbf{e}$  与系统控制效果有关, 本割台调控系统可看作系统的输出变量  $\mathbf{y} = \Delta \alpha$  始终跟随  $\Delta \alpha_d$  变化, 误差  $\mathbf{e} = \Delta \alpha_d - \Delta \alpha$ ;  $\mathbf{u}^T \mathbf{R} \mathbf{u}$  表示系统消耗的控制能量,  $\mathbf{Q}, \mathbf{R}$  为半正定对称矩阵。当收割机行驶在颠簸地面时, IMU2 测得  $\theta$  变化进而计算期望值  $\Delta \alpha_d$ , 为使系统输出  $\Delta \alpha$  始终跟踪  $\Delta \alpha_d$  的变化, 将  $\mathbf{e} = \Delta \alpha_d - \Delta \alpha$  代入式(13), 同时选择

$$\begin{cases} \text{状态变量为 } \mathbf{x}_1 = [e \ \Delta \dot{\alpha}]^T, \text{ 得 } \mathbf{x}_1 \text{ 的状态空间方程为:} \\ \dot{\mathbf{x}}_1 = \mathbf{A}_1 \mathbf{x}_1 + \mathbf{B}_1 \mathbf{u} + \mathbf{D}_1 \end{cases} \quad (18)$$

代入数值得:

$$\begin{cases} \mathbf{A}_1 = \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ 3.299 & -0.031 \end{bmatrix} \\ \mathbf{B}_1 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0.000 \ 13 \end{bmatrix} \\ \Delta \alpha_d \mathbf{D}_1 = \begin{bmatrix} 0 \\ -3.299 \end{bmatrix} \end{cases} \quad (19)$$

将系统的输入变量  $\mathbf{u}$  取为状态变量  $\mathbf{x}_1$  的线性函数:

$$\mathbf{u} = \mathbf{v} - \mathbf{k} \mathbf{x}_1 = \mathbf{v} - [k_1 \ k_2] \begin{bmatrix} e \\ \Delta \dot{\alpha} \end{bmatrix} \quad (20)$$

其中,  $\mathbf{v}$  为参考输入向量, 用于调整系统平衡点, 将式(20)代入(18)可得状态反馈方程:

$$\dot{\mathbf{x}}_1 = (\mathbf{A}_1 - \mathbf{B}_1 \mathbf{k}) \mathbf{x}_1 + \mathbf{B}_1 \mathbf{u} + \mathbf{D}_1 \quad (21)$$

为使  $\Delta \dot{\alpha}$  状态变量快速收敛, 系统输出不作为主要考虑指标, 选择性能指标式(17)中的  $\mathbf{Q}, \mathbf{R}$  为:

$$\mathbf{Q} = \begin{bmatrix} 10^4 & 0 \\ 0 & 10^7 \end{bmatrix}, \mathbf{R} = 0.01 \quad (22)$$

使性能指标极小的近似最优控制的表达式为:

$$\mathbf{u}^*(t) = -\mathbf{R}^{-1} \mathbf{B}_1^T \mathbf{P} \mathbf{x}_1(t) \quad (23)$$

其中,  $\mathbf{P}$  为对称正定矩阵, 满足下列黎卡提代数方程:

$$\mathbf{P} \mathbf{A}_1 + \mathbf{A}_1^T \mathbf{P} - \mathbf{P} \mathbf{B}_1 \mathbf{R}^{-1} \mathbf{B}_1^T \mathbf{P} + \mathbf{Q} = 0 \quad (24)$$

代入数据后, 解得最优解为:

$$\mathbf{u} = \mathbf{v} - [k_1 \ k_2] \begin{bmatrix} e \\ \Delta \dot{\alpha} \end{bmatrix} = 10^4 \cdot \left( 2.537 \ 7 \alpha_d - [-0.002 \ 3.139] \begin{bmatrix} e \\ \Delta \dot{\alpha} \end{bmatrix} \right) \quad (25)$$

将  $\mathbf{e} = \Delta \alpha_d - \Delta \alpha$  代入式(25)后得:

$$\mathbf{u} = 10^4 \cdot \left( 2.539 \ 7 \Delta \alpha_d - [0.002 \ 3.139] \begin{bmatrix} \Delta \alpha \\ \Delta \dot{\alpha} \end{bmatrix} \right) \quad (26)$$

## 3 算法仿真与分析

为验证上述 LQR 控制器在不同情况下的控制效果, 根据式(13)、(18)、(26)使用 Simulink 搭建状态反馈仿真模型对上述 LQR 控制器进行仿真为对比控制效果, 根据式(16)所述开环传递函数搭建 PID 控制器, 搭建的模型如图 3 所示, PID 控制器及其各变种作为目前工业领域使用范围最广的控制器, 其根据偏差计算输出, 不依赖模型特性, PID 控制器的典型形式为:

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(t) dt + K_d \dot{e}(t) \quad (27)$$

图 3 所示模型中的 PID 控制器  $K_p$  选取为  $6 \times 10^4$ ,  $K_i$

选取为  $6.3 \times 10^4$ ,  $K_d$  选取为  $1.8 \times 10^4$ 。设定的跟踪目标信号分别为阶跃信号、含噪声阶跃信号和含噪声正弦信

号, 仿真结果如图 4、6 和 7 所示。

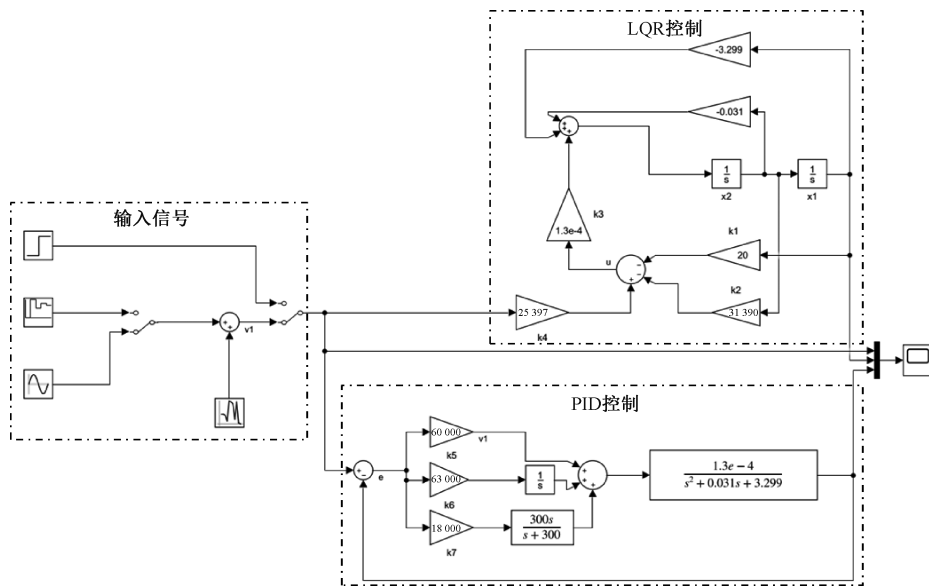


图 3 联合收割机割台控制系统仿真模型

Fig. 3 The simulation model of the control system of combine harvester header

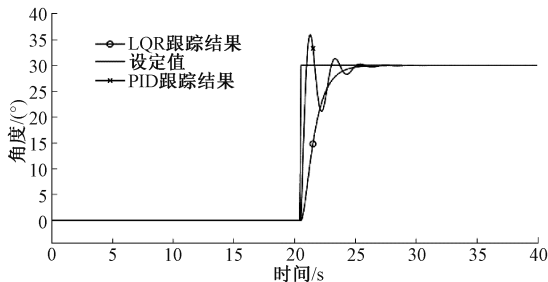


图 4 LQR 与 PID 控制的阶跃响应

Fig. 4 Step response of LQR and PID control

根据图 4 可以计算出 PID 控制器和 LQR 控制器跟踪阶跃信号的性能指标, 如表 2 所示。

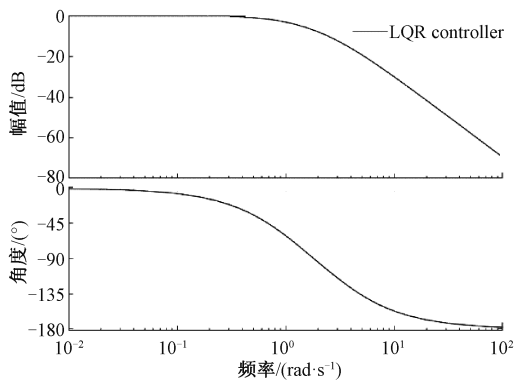
表 2 PID 控制器与 LQR 控制器的控制性能

Table 2 Control Performance of PID Controller and LQR Controller

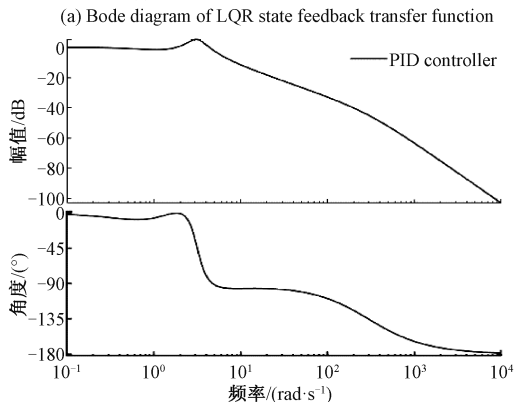
目标信号	控制器	上升时间/s	调节时间/s	超调量	稳态误差
阶跃信号	PID	0.47	4.30	19.80%	0
	LQR	7.35	3.99	0	0

从图 4 和表 2 可以看出, 当  $\Delta\alpha_d$  呈阶跃变化时, LQR 控制器可以准确无超调地跟踪目标信号, 且可以实现平滑的过渡。PID 控制器在面对目标信号的阶跃变化时, 在快速性和超调间无法兼顾。虽然 PID 控制器比 LQR 控制器响应更快, 但存在明显的超调振荡, 超调量达到 19.80%, 系统难以在短时间内稳定, PID 的超调现象从图 5 所示的伯德图也可以看出, 虽然 LQR 控制器和 PID 控制器在截止频率处有近似的相角裕度, 但 PID 控制器

在高频段出现的振荡造成了超调。



(a) LQR 状态反馈传递函数的伯德图



(b) PID 负反馈传递函数的伯德图

(b) Bode diagram of PID negative feedback transfer function

图 5 LQR 与 PID 控制器对应的伯德图

Fig. 5 Bode diagram of LQR and PID controller



此外,在面对含有噪声的目标信号时,LQR 控制器对噪声的抑制能力优于 PID 控制器,如图 6、7 和表 3 所示。图 6 和 7 中给定的目标信号含有随机高斯噪声,LQR 控制器在抑制噪声的同时能跟随设定值,几乎不存在超调,而 PID 控制器不仅超调震荡,其跟踪曲线中也存在对噪声的响应,LQR 反馈控制器的表现明显优于 PID 控制器,这也同样反映在 LQR 控制器的伯德图中,如图 5 所示 LQR 控制器伯德图中高频段的对数增益幅值小于同频段下 PID 控制器的对数增益,表明该系统对噪声干扰信号的抑制能力优于 PID 控制器。

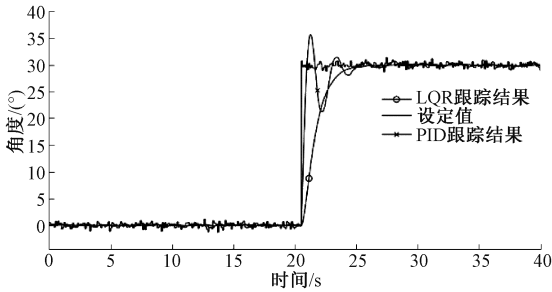


图 6 LQR 与 PID 控制的含噪阶跃响应

Fig. 6 Step response with noise under LQR and PID control

表 3 PID 控制器和 LQR 控制器高度误差均方根

Table 3 RMS of height error of PID and LQR

跟踪类型	控制器类型	均方根/(°)
阶跃信号	PID	0.092
	LQR	0.103
含噪阶跃信号	PID	0.226
	LQR	0.133

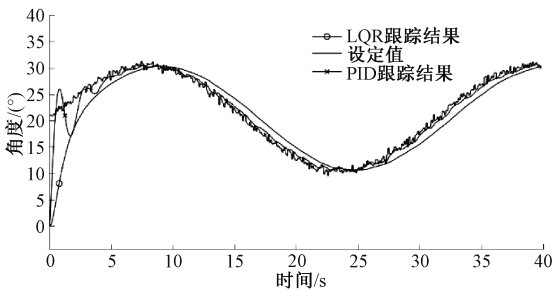


图 7 LQR 与 PID 控制的含噪正弦响应

Fig. 7 Noise-containing sinusoidal response of LQR and PID control

### 4 结 论

针对田间作业路面颠簸起伏影响收割机割台高度、割台高度不宜测量等问题,本文介绍一种割台高度检测和控制方法。通过在倾斜输送器和收割机车身上方安装 IMU,测量车身和倾斜输送机倾角获取割台高度。基于

运动学分析和割台结构建立割台系统数学模型,根据误差选择性能函数求解线性二次型最优控制问题,得到跟踪割台角度的控制最优解,最终使割台高度稳定在预设范围内。当  $\Delta\alpha_d$  为含噪下的阶跃和正弦曲线变化时,使用 Simulink 仿真对比传统 PID 的系统响应特性,仿真结果表明,该控制器的动态性能优于传统 PID,可以提高割台高度的调控质量。

### 参考文献

[ 1 ] 伟利国,车宇,汪凤珠,等. 联合收割机割台地面仿形控制系统设计及试验[J]. 农机化研究, 2017, 39(5):150-154.  
 WEI L G, CHE Y, WANG F ZH, et al. Design and experiment of the ground profiling control system of combine header [ J ]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2017,39(5):150-154.

[ 2 ] 耿爱军,张猛,张姬,等. 玉米收获机割台高度自动调控系统设计与试验[J]. 农业机械学报,2020,51(S2):118-125.  
 GENG AI J, ZHANG M, ZHANG J, et al. Design and experiment of automatic control system for corn header height [ J ]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2020,51(S2):118-125.

[ 3 ] NI Y, JIN C, CHEN M, et al. Computational model and adjustment system of header height of soybean harvesters based on soil-machine system [ J ]. Computers and Electronics in Agriculture, 2021, 183(16):105907.

[ 4 ] 朱剑,尹文庆,谢蓓. 基于嵌入式的电液比例控制系统在联合收割机割台高度控制中的应用[J]. 液压与气动,2012(1):83-86.  
 ZHU J, YIN W Q, XIE B. The application of embedded electro-hydraulic proportional control system for combine harvesters header height control [ J ]. Chinese Hydraulics & Pneumatics ,2012(1):83-86.

[ 5 ] 廖勇. 联合收割机割台高度自动调节系统的研究[D]. 长沙:湖南农业大学,2018.  
 LIAO Y. Research on the height adjustment system of combine header [ D ]. Changsha: Hunan Agricultural University,2018.

[ 6 ] 廖勇,向阳,吴明亮,等. 联合收割机割台高度自适应调节系统的设计与试验[J]. 湖南农业大学学报(自然科学版),2018,44(3):326-329.  
 LIAO Y, XIANG Y, WU M L, et al. Design and test of the adaptive height adjustment system for header of the combine-harvester [ J ]. Journal of Hunan Agricultural University (Natural Sciences), 2018,44(3):326-329.

[ 7 ] 伍渊远,尚欣,张呈彬,等. 自然光照下智能叶菜收获机作业参数的获取[J]. 浙江农业学报,2017,29(11):

1930-1937.

WU Y Y, SHANG X, ZHANG CH B, et al. Acquisition of operation parameters of intelligent leaf vegetable harvester under natural lighting [J]. Acta Agriculturae Zhejiangensis, 2017, 29(11): 1930-1937.

[8] LIU H, REIBMAN A R, AULT A C, et al. Video-based prediction for header-height control of a combine harvester [C]. 2019 IEEE Conference on Multimedia Information Processing and Retrieval (MIPR). IEEE, 2019: 310-315.

[9] 龙震寰, 向阳, 李亚军, 等. 基于倾角传感器的割台高度自适应调节系统 [J]. 中国农业大学学报, 2021, 26(11): 200-208.

LONG ZH H, XIANG Y, LI Y J, et al. Adaptive adjustment system of header height based on inclination sensor [J]. Journal of China Agricultural University, 2021, 26(11): 200-208.

[10] XIE Y M, ALLEYNE A G, GREER A, et al. Fundamental limits in combine harvester header height control [C]. American Control Conference. IEEE, 2013.

[11] XIE Y M, ALLEYNE A G, GREER A, et al. Header height control of a combine harvester system [C]. ASME 2010 Dynamic Systems and Control Conference, 2010.

[12] 胡焉为, 苗玉彬. 叶菜收割机割台高度控制策略 [J]. 东华大学学报 (自然科学版), 2018(4): 646-651.

HU Y W, MIAO Y B. Control strategy for leaf vegetable harvester header height [J]. Journal of Donghua University (Natural Science), 2018(4): 646-651.

[13] XIE Y M, ALLEYNE A. Two degrees of freedom control for combine harvester header height control [C]. Dynamic Systems and Control Conference. American Society of Mechanical Engineers, 2012, 45318: 539-547.

[14] KASSEN D, KELKAR A. Combine harvester header height control via robust feedback linearization [C]. Control Conference. IEEE, 2017.

[15] 庄肖波, 李耀明. 基于鲁棒反馈线性化的联合收获机割台高度控制策略 [J]. 农业机械学报, 2020, 51(11): 123-130.

ZHUANG X B, LI Y M. Header height control strategy of harvester based on robust feedback linearization [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2020, 51(11): 123-130.

[16] ARGENTIM L M, REZENDE W C, SANTOS P E, et al. PID, LQR and LQR-PID on a quadcopter platform [C]. 2013 International Conference on Informatics, Electronics and Vision (ICIEV). IEEE, 2013: 1-6.

[17] SUN L, GAN J. Researching of two-wheeled self-balancing robot base on LQR combined with PID [C].

2010 2nd International Workshop on Intelligent Systems and Applications. IEEE, 2010: 1-5.

[18] 刘春, 刘滔, 张海燕, 等. 小波变换法在姿态解算中的应用 [J]. 电子测量与仪器学报, 2021, 35(1): 183-190.

LIU CH, LIU T, ZHANG H Y, et al. Application of wavelet transform method in attitude calculation [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2021, 35(1): 183-190.

[19] HOUARI A, BACHIR I, MOHAME D K, et al. PID vs LQR controller for tilt rotor airplane [J]. International Journal of Electrical and Computer Engineering (IJECE), 2020, 10(6): 6309-6318.

[20] 陆军. 基于 PID 和 LQR 控制的两轮自平衡小车研究 [D]. 成都: 西南交通大学, 2012.

LU J. The research of two-wheel balance robot based on PID and LQR control theory [D]. Chengdu: Southwest Jiaotong University, 2012.

## 作者简介



**刘青山**, 2018 年于天津工业大学获得学士学位, 现为江苏大学硕士研究生, 主要研究方向为农业装备作业过程智能调控。

E-mail: lqs9096@qq.com

**Liu Qingshan** received his B. Sc. degree from Tianjin Polytechnic University in 2018. He is currently a M. Sc. candidate at Jiangsu University. His main research interest includes unmanned agricultural systems.



**李川**, 2020 年于常州工学院获得学士学位, 现为江苏大学硕士研究生, 主要研究联合收割机负荷监测与智能调控。

E-mail: god\_ream@163.com

**Li Chuan** received his B. Sc. degree from Changzhou Institute of Technology in 2020. He is currently a M. Sc. candidate at Jiangsu University. His main research interests include load monitoring and intelligent control of combine harvester.



**魏新华**, 1994 年于山东农业大学获得学士学位, 1997 年于中国农业大学获得硕士学位, 2008 年于东南大学获得博士学位, 现为江苏大学农业装备工程学院研究员, 主要研究方向为无人农机系统。

E-mail: wei\_xh@126.com

**Wei Xinhua** received his B. Sc. degree from Shandong Agricultural University in 1994, M. Sc. degree from China Agricultural University in 1997, and Ph. D. degree from Southeast University in 2008, respectively. Now he is a researcher at Jiangsu University. His main research interest includes unmanned agricultural systems.



**卢泽民**, 1988 年于江苏大学获得学士学位, 1994 年于江苏大学获得硕士学位, 现为江苏大学农业装备工程学院副教授, 主要研究方向为农业装备及其智能化与农业生物环境。

E-mail: luzm@ujs.edu.cn

**Lu Zemin** received his B. Sc. degree from Jiangsu University in 1988, M. Sc. degree from Jiangsu University in 1994. Now he is an associate professor in the College of Agricultural Equipment Engineering, Jiangsu University. His main research interests include agricultural equipment and its intelligence and agricultural biological environment.



**王爱臣** (通信作者), 2011 年于华中农业大学获得学士学位, 2017 年于浙江大学获得博士学位, 现为江苏大学农业装备工程学院副研究员, 主要研究方向为农机装备智能控制与农业机器人。

E-mail: acwang@ujs.edu.cn

**Wang Aichen** (Corresponding author) received his B. Sc. degree from Huazhong Agricultural University in 2011, and Ph. D. degree from Zhejiang University in 2017, respectively. Now he is an associate researcher in the College of Agricultural Equipment Engineering, Jiangsu University. His main research interests include intelligent control of agricultural equipment and agricultural robotics.