

全喂入花生捡拾收获机喂入量建模与试验

王申莹, 胡志超*, 吴 峰, 于昭洋, 曹明珠, 高学梅

(农业农村部南京农业机械化研究所, 南京 210014)

摘 要: 为解决中国全喂入花生捡拾收获机作业时因喂入量波动导致作业性能下降甚至出现机械故障, 而花生捡拾收获机喂入量相关基础研究又缺失的问题, 该文以团队前期所研制的 4HLJ-3000 型全喂入花生捡拾收获机为研究对象, 提出了基于捡拾台动力输入轴扭矩的喂入量监测方法。通过对捡拾台进行动力分析, 得出了捡拾台动力输入轴扭矩和喂入量的数学模型。利用捡拾台动力输入轴转速、扭矩和功率等工况数据监测存储分析管理系统进行了扭矩和喂入量的道路监测试验。对试验结果进行了线性函数、幂函数、指数函数和二次函数拟合回归分析, 结果表明二次函数模型拟合度较高, 其决定系数 R^2 为 0.990。对二次函数拟合曲线进行分析, 结果表明, 当喂入量小于等于 3.0 kg/s 时, 随着喂入量的增加扭矩缓慢增加; 当喂入量大于 3.0 kg/s 时, 随着喂入量的增加, 扭矩急剧增加, 且转速随之降低。模型验证试验的结果表明, 所建立的二次函数模型具有较好的准确性, 绝对偏差率范围为 0.42%~2.43%, 平均偏差率为 1.40%, 且喂入量越大, 偏差率越大。对喂入量和扭矩的函数模型进行了田间试验, 结果表明, 扭矩偏差率范围为 1.90%~3.58%, 平均偏差率为 2.65%。研究结果可为全喂入式花生及其他作物捡拾收获机结构优化设计及喂入量的智能测控提供参考。

关键词: 农业机械; 建模; 试验; 花生; 全喂入收获机; 捡拾台; 喂入量; 扭矩

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2019.23.004

中图分类号: S225.7

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2019)-23-0029-08

王申莹, 胡志超, 吴 峰, 于昭洋, 曹明珠, 高学梅. 全喂入花生捡拾收获机喂入量建模与试验[J]. 农业工程学报, 2019, 35(23): 29—36. doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2019.23.004 <http://www.tcsae.org>

Wang Shenyang, Hu Zhichao, Wu Feng, Yu Zhaoyang, Cao Mingzhu, Gu Fengwei, Gao Xuemei. Modeling and experiment of feeding rate for full-feed peanut pickup harvester[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2019, 35(23): 29 — 36. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2019.23.004 <http://www.tcsae.org>

0 引 言

花生是世界油料生产和贸易中仅次于大豆的油料作物和经济作物之一, [1-3]。2017 年, 中国花生种植面积 $4.61 \times 10^6 \text{ hm}^2$, 产量 $1.71 \times 10^7 \text{ t}$, 分别位居世界前列。但中国花生收获机械化水平较美洲国家相对滞后, 大部分花生种植区仍以半机械化和分段收获为主[4-8], 2017 年, 中国花生机械化收获水平仅为 39.72%^[9]。现有的花生捡拾收获机的设计多参考国外技术或借鉴稻麦联合收获机相关技术, 专业的研究比较少, 故障率高、作业性能质量不理想, 严重制约了花生产业的发展。喂入量的监测和控制是花生捡拾收获机设计中关键技术之一, 各个部件的工作性能均与喂入量密切相关。收获时若喂入量小于设计喂入量, 会降低收获机的作业效率, 增加收获成本; 若大于设计喂入量, 则会造成收获机后续输送、脱粒分

离及清选等部件的作业性能下降, 当喂入量远超过各工作部件的承受能力时, 将会出现拥堵现象甚至出现机械故障。

国外对农作物联合收获机喂入量方面的研究起步早, 但多集中在稻麦联合收获机方面^[10-15], 对花生收获机喂入量的研究较少(因为国外花生品种多为蔓生形, 收获时花生果秧相互交织在一起类似地毯, 喂入量相对均匀稳定)。Robert^[16]通过一定的控制算法改变稻麦收获机的行走速度稳定滚筒负荷, 从而获得稳定的喂入量。Miosz^[17]对稻麦收获损失率及喂入量进行了研究, 建立了收割机作业速度控制模型。Gomez-Gil 等^[18]利用 GPS 技术和颗粒重量传感器及田间试验, 建立了谷物联合收割机喂入量和作业速度的数学模型。Bajema 等^[19]设计了马铃薯收获机 2 级传输装置, 并根据第二级输送装置所承受的负载量控制收获机的前进速度。

中国花生收获机械的研究多集中在半喂入联合收获机整机设计与试验研究^[20-23]、花生挖掘收获机的研制^[24-26]、花生收获机摘果、清选和自动控制等关键部件的设计优化研究^[27-31]以及花生捡拾联合收获机捡拾器的结构与试验优化^[32-35]。目前, 中国花生捡拾收获机喂入量的大小主要凭借驾驶员的经验调控, 针对全喂入花生捡拾收获机喂入量的学术研究鲜有报道, 喂入量的相关研究多集中在稻麦联合收获机方面。李耀明等^[36]研究了谷物

收稿日期: 2019-07-20 修订日期: 2019-10-16

基金项目: 中央级公益性科研院所基本科研业务费专项“覆膜种植花生秧蔓饲料化利用关键技术与装备研发”(S201916); 国家重点研发计划“花生智能化高效联合收获关键技术与装备研发”(2016YFD0702102); 国家现代农业花生产业技术体系收获机械化岗位(CARS-13-收获机械化岗位)。

作者简介: 王申莹, 助理研究员, 主要从事农业机械装备设计及机电液一体化技术和虚拟仿真技术研究。Email: 465499517@qq.com

※通信作者: 胡志超, 研究员, 博士生导师, 主要从事土下果实生产机械化技术与装备研究。Email: nfzhongzi@163.com

联合收获机喂入量与脱粒滚筒凹板筛后侧油缸压力和脱粒分离总损失的关系。陈进等^[37]借助试验台对谷物联合收获机倾斜输送机喂入主动轴扭矩与喂入量的关系进行了研究。刘元元等^[38]分析了谷物联合收割机割台螺旋输送机动力学模型,对螺旋输送机功率和喂入量的关系进行了研究。卢文涛等^[39]设计了谷物联合收获机脱粒滚筒液压无级变速系统,并通过台架试验得出了喂入量与油缸压力之间的关系方程。陈度等^[40]对稻麦联合收割机喂入量和收获损失的影响因素进行了分析,建立了喂入量与收获过程损失的数学模型。介战等^[41]研究了一种由喂入量挤压力测试原理、喂入量测试模型建立和当量喂入量测试方法组成的 GPS 联合收获机随机喂入量实时测试的理论和技術。张振乾等^[42]设计了基于谷物联合收割机割台传动轴扭矩的喂入量监测系统,并建立了喂入量预测模型。尤惠媛等^[43]基于谷物联合收获机脱粒滚筒无级变速液压缸油缸压力设计了喂入量模糊控制系统。

本文旨在前期研制的全喂入花生捡拾收获机的基础上设计一种喂入量测量方法,建立捡拾台动力输入轴扭矩与喂入量的数学模型,以期花生捡拾收获机自动控制研究提供理论基础和技术参考,主要研究内容包括:1)分析全喂入花生收获机捡拾台动力输入轴扭矩与喂入量间的数学模型;2)设计一种全喂入花生收获机喂入量监测系统和方法;3)通过试验分析喂入量和输入轴扭矩的具体函数关系。

1 捡拾台总体结构与工作原理

前期所研制的 4HLJ-3000 型全喂入花生捡拾收获机捡拾台结构如图 1 所示,主要由限深轮、压秧杆、滑板、捡拾弹齿、螺旋输送器等组成。主要完成花生秧果捡拾、推送集中并向后输送等作业。其传动系统如图 2 所示,其动力由捡拾台动力输入轴(3)提供,动力经传动链带动螺旋输送机轴(2)旋转,再经捡拾器驱动链(8)和 3 个张紧轮(4、5、1)带动捡拾器轴(7)的旋转,并实现螺旋输送器和捡拾器的反向转动。捡拾台动力输入轴和螺旋输送机轴的传动比 $i_1=1.0$,螺旋输送机轴和捡拾器轴的传动比 $i_2=3.5$ 。捡拾台主要参数如表 1 所示。

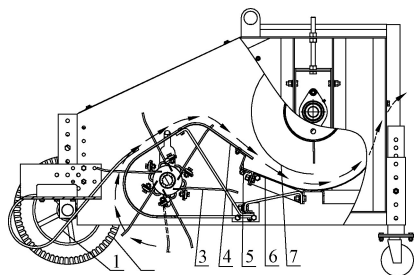


图 1 捡拾台结构示意图
Fig.1 Diagram of pickup bench structure

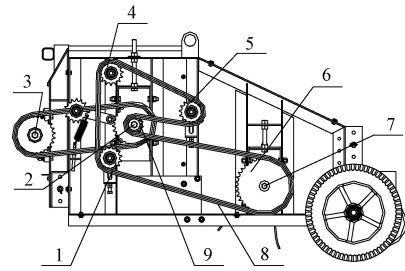


图 2 捡拾台传动系统示意图
Fig.2 Schematic of pickup bench transmission system

表 1 捡拾输送装置主要参数
Table 1 Main parameters of pickup conveyor

参数 Parameters	数值 Values
捡拾台尺寸 (长×宽×高) Pickup table size (length×width×height)/ (mm×mm×mm)	3 000×1 500×800
限深轮高度调节范围 Depth-limited wheel height adjustment range/mm	-100~100
配套动力 Supporting power/kW	2.4
捡拾台动力主轴额定转速 Rotation speed of pickup table power input shaft (r·min ⁻¹)	165

工作时,花生秧果在旋转捡拾弹齿的带动及与压秧杆的相互作用下沿着滑板进入到螺旋输送机,在螺旋输送器的旋转聚拢作用下,花生秧果被聚集到中间并传送给后续输送装置,运动路径如图 1 中箭头所示。

2 捡拾台动力输入轴扭矩监测方法

2.1 捡拾台动力分析

收获作业时,捡拾台的动力分析如图 3 所示。

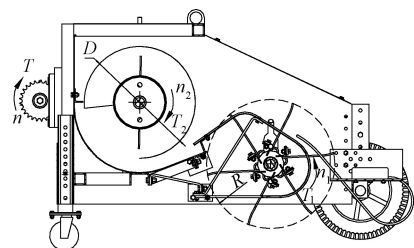


图 3 捡拾台动力分析
Fig.3 Dynamic analysis of pickup bench

由图 3 可知,捡拾台总功率为

$$P=Tn/9\,550 \quad (1)$$

式中 P 为捡拾台动力输入轴的总功率, kW; T 为捡拾台动力输入轴扭矩, N·m; n 为捡拾台动力输入轴转速, r/min。

设链轮与输送链以及轴承之间的功率损失为 P_0 , 根据能量守恒原理, 总功率 P 可分解为

$$\begin{cases} P = P_0 + P_1 + P_2 \\ P_1 = T_1 n_1 / 9550 \\ P_2 = T_2 n_2 / 9550 \\ P_0 = T_0 n / 9550 \end{cases} \quad (2)$$

式中 P_1 为捡拾器轴的功率, kW; T_1 为捡拾器轴的扭矩, N·m; n_1 为捡拾器轴的转速, r/min; P_2 为螺旋输送机轴的功率, kW; T_2 为螺旋输送机轴的扭矩, N·m; n_2 为螺旋输送机轴的转速, r/min; T_0 为链轮与输送链以及轴承之间因摩擦引起的扭矩, 为常数, N·m。

捡拾器捡拾的花生果秧为自然铺放状态, 花生果秧与滑板之间的摩擦力比较小, 可忽略; 捡拾器轴主要受到由于花生果秧重力引起的扭矩。近似认为花生果秧集中作用在捡拾弹齿端部, 则

$$T_1 = \rho L h v_0 g R \quad (3)$$

$$q = \rho L h v_0 \quad (4)$$

式中 ρ 为花生果秧自然铺放密度, kg/m³; L 为捡拾台宽度, m; h 为花生果秧自然铺放厚度, m; v_0 为收获机前进速度, m/s; g 为重力加速度, m/s²; R 为捡拾弹齿回转半径, m; q 为喂入量, kg/s。

由式 (3) 和式 (4) 可知

$$T_1 = q g R \quad (5)$$

花生果秧经捡拾器捡起并传送到螺旋输送机后, 在螺旋输送机挤压、推送的作用下被输送到后续输送装置。螺旋输送机不仅受到垂直于螺旋叶片表面的花生果秧重力的作用, 还受到沿螺旋叶片切向摩擦阻力 F_f 的作用。该摩擦阻力 F_f 和花生果秧与螺旋叶片间的挤压力 F_r 成正比^[36]。取花生荚果、花生叶和茎秆与螺旋输送机之间的综合摩擦系数为 f , 则

$$T_2 = q g D / 2 + F_f D / 2 \quad (6)$$

$$F_f = f F_r \quad (7)$$

参考文献[36]和[44]可知, 挤压力 F_r 与花生果秧受挤压程度有关, 且有

$$F_r = K_p (C_{\max} / \delta)^N \quad (8)$$

$$C_{\max} = q \lambda / [(1 + \lambda) \rho v_s w] \quad (9)$$

式中 K_p 为系数; C_{\max} 为非谷粒物料自然铺放厚度, mm; δ 为螺旋叶片与凹板之间的间隙, mm; N 为一实数; λ 为果秧质量比; v_s 为果秧在螺旋输送机中的平均线速度, m/s; w 为螺旋输送机宽度, m, 即等于捡拾台宽度 L 。

由式 (5) ~ 式 (8) 可知

$$T_2 = \frac{1}{2} g D q + \frac{1}{2} f K_p D \left[\frac{\lambda}{\rho \delta v_s w (1 + \lambda)} \right]^N q^N \quad (10)$$

由式 (1)、式 (2)、式 (4) 和式 (9) 以及上述传动比可知捡拾台总功率 P 为

$$\begin{aligned} P = & \frac{T_0 n}{9550} + \frac{1}{19100} (7R + D) g q n \\ & + \frac{1}{19100} f K_p D n \left[\frac{\lambda}{\rho \delta v_s w (1 + \lambda)} \right]^N q^N \end{aligned} \quad (11)$$

将式 (1) 带入上式得

$$T = T_0 + \frac{1}{2} (7R + D) g q + \frac{1}{2} f K_p D \left[\frac{\lambda}{\rho \delta v_s w (1 + \lambda)} \right]^N q^N \quad (12)$$

由上式可知, 当其他参数 (花生果秧密度和果秧比) 一定、捡拾收获机稳定均匀喂入时, 捡拾台动力输入轴扭矩主要受喂入量的影响。上式可简化为

$$T = K_0 + K_1 q + K_2 q^N \quad (13)$$

式中 K_0 、 K_1 、 K_2 为常数。

2.2 监测系统

2.2.1 总体结构

为实时测量试验数据, 本文设计了花生捡拾台工况监测系统, 主要监测捡拾台动力输入轴转速、扭矩和功率。监测系统结构框图如图 4 所示, 系统主要由传感器单元、数据采集和数据存储分析 3 个部分组成。传感器单元把捡拾台动力输入轴扭矩和转速转换成频率信号, 数据采集模块将频率信号转换成扭矩、转速值显示, 并通过 RS485 总线和 RS485 转 USB 传送到计算机存储。

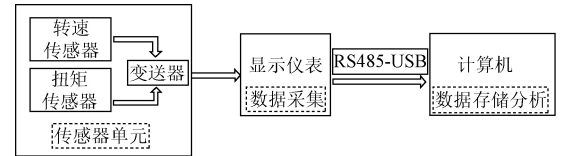


图 4 监测系统结构框图

Fig.4 Structure diagram of monitoring system

2.2.2 传感器单元

转矩转速传感器采用北京三晶联合科技有限公司生产的 SL06-2000AT 型扭矩传感器, 主要用来监测捡拾台总动力输入轴的转速和扭矩, 主要参数如表 2 所示。

表 2 传感器主要参数

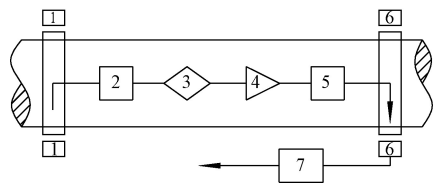
参数 Parameters	数值 Values
扭矩量程 Torque range/(N·m)	2 000
转速量程 Rotate speed range/(r·min ⁻¹)	0~2 500
扭矩精度 Torque accuracy/%	0.5
齿数 Number of teeth	60

采用应变电测原理测量扭矩, 将应变计粘贴在应变轴上, 当应变轴受扭力产生微小变形时, 应变计阻值发生相应变化。测量电桥由具有相同应变特性的应变计组成, 可将应变电阻的变化转化为电压信号的变化, 如图 5 所示。电源经能源输入耦合器耦合后传输到应变轴上, 再经稳压电路形成稳定电压。应变桥将应变轴的微小变形转化为电压信号, 并经放大器放大后送到 V/F 变换器, 再经输出信号耦合器和信号输出电路输出调频方波信号。

转速的测量采用光电开关码盘原理, 当测速码盘连续旋转时, 通过光电开关输出具有一定周期宽度的脉冲信号, 转速可根据下式计算得出

$$n' = 60 f_c / Z \quad (14)$$

式中 f_c 为实测转速输出频率值, Hz; Z 为传感器测速码盘齿数。



1. 能源输入耦合器 2. 稳压电路 3. 应变桥 4. 放大器 5. V/F 变换器 6. 输出信号耦合器 7. 信号输出电路
1. Input energy coupler 2. Voltage regulator circuit 3. Strain bridge 4. Amplifier 5. V/F converter 6. Output signal coupler 7. Signal output circuit

图 5 扭矩测量原理框图

Fig.5 Block diagram of torque measurement principle

传感器的安装方法为：将捡拾台动力输入轴剪断分为 2 个半轴，传感器通过两端的内外花键安装在 2 个半轴中间。

2.2.3 数据采集

数据采集采用北京三晶联合科技有限公司生产的转矩转速测试仪。该采集仪可实时监测显示捡拾台动力输入轴的扭矩、转速，并可设定扭矩、转速的小数点位置，同时通过计算显示实时功率。该测试仪精度 0.1%，外供电源 12VDC，转速输入脉冲 1~20 000 Hz，扭矩输入脉冲 5~15 kHz，扭矩变送 4~20 mA，转速变送 4~20 mA，RS485 数据输出。

2.2.4 数据存储分析

数据存储分析软件采用与数据采集控制器配套的 M400 数据采集管理软件。该软件可实时显示扭矩、转速和功率曲线及数值，亦可存储历史数据和曲线，并可调出任意时刻的曲线和数据。

3 喂入量与输入轴扭矩模型的试验与验证

3.1 试验设备与材料

为了确定喂入量与捡拾台动力输入轴扭矩的数学模型，利用 4HLJ-3000 型花生捡拾联合收获机在河南省驻马店市进行了道路收获试验。其它试验器材有标杆、秒表、卷尺、电子秤等。

试验花生品种为皖花 2 号，种植模式为单垄双行，土壤为沙壤土，垄距平均为 800 mm，株距平均为 260 mm，花生株高平均在 400 mm，每株平均结果 16 颗，产量 7 500 kg/hm²。花生果秧采用市场上常见的 5HZ-175 型花生挖掘收获机挖掘后，放在田间自然晾晒 3 d，花生秧含水率为 20%~30%。

3.2 试验方法

参照 GB/T5262-2008《农业机械试验条件测定方法的一般规定》和 NY/T 2204-2012《花生收获机质量评价技术规范》，试验分别测定全喂入花生捡拾收获机不同工作条件下的扭矩、转速、前进速度及喂入量。在花生试验田内随机选取 9 个小区进行试验，每个小区长度为 20 m，宽度为花生捡拾联合收获机作业幅宽。为方便试验观测、降低试验成本，人工将每个小区内花生果秧收集并按照挖掘收获后田间的状态（小区内花生挖掘收获后呈现的长度、宽度和铺放厚度）将花生果秧重新铺放到水泥道路上。每次试验待收获机发动机转速达到额定转速进

入稳定状态后再进行收获试验。应用 M400 数据采集管理软件对试验过程中的捡拾台动力输入轴转速和扭矩进行实时监测，选取每个试验小区扭矩、转速动态曲线达到稳定后的时间段作为测定时间，将此时间段内每 0.5 s 的扭矩和转速数值导出，分别取此时间段内扭矩和转速的平均值。用秒表监测试验时间，计算出每次试验的平均前进速度。每次试验后，将掉落的花生秧果、集秧箱中花生秧及粮仓中的花生荚果进行称重，结合每次试验所用的时间计算出每次试验的平均喂入量。为减小误差，试验重复 3 次，结果取均值。试验情况如图 6 所示。



图 6 道路试验情况

Fig.6 Road test situation

3.3 试验结果与分析

扭矩、转速、前进速度及喂入量的试验结果如表 3 所示。

表 3 道路试验结果
Table 3 Road test results

试验序号 Test No.	扭矩 Torque/(N·m)	转速 Rotate speed/ (r·min ⁻¹)	前进速度 Forward speed/ (m·s ⁻¹)	喂入量 Feeding rate/(kg·s ⁻¹)
1	50.206	162.179	0.51	2.324
2	78.054	160.861	0.99	4.254
3	52.706	177.235	0.84	2.352
4	47.220	180.512	0.88	2.046
5	46.500	173.938	0.94	2.184
6	55.454	173.182	0.88	2.212
7	72.818	167.102	0.92	3.934
8	61.494	164.956	0.86	3.012
9	158.958	152.789	1.18	6.038

应用 SPSS 数据处理软件对表 3 中的扭矩和喂入量进行拟合回归分析。参考文献[40]，利用线性函数、幂函数、指数函数和二次函数对试验数据进行拟合分析，拟合曲线如图 7 所示。

从拟合结果可知，二次函数的 R² 值最高，说明试验所得的二次函数模型对该样机的拟合精度较高，即在联合收获机工作稳定、喂入均匀、作物状态（密度和铺放厚度）基本一致时，捡拾台动力输入轴扭矩与喂入量的二次函数模型与前述理论分析得出的数学模型式（13）吻合度较高。

由图 7 二次函数拟合曲线可以看出，当喂入量小于 3 kg/s 时，随着喂入量的增加扭矩增加比较缓慢，因为该样机的设计喂入量为 2 kg/s，喂入量的小幅增加，主要是由于花生果秧重量的增加导致捡拾器轴和螺旋运输器轴的扭矩小幅增加，增加幅度尚在捡拾台的容许范围内。

但当喂入量大于 3 kg/s 时，随着喂入量的增加，扭矩急剧增加，这是因为喂入量的大幅增加，导致螺旋输送机中花生果秧层厚增加，物料层和螺旋输送机凹版之间的挤压作用显著增大，摩擦阻力快速增加，导致扭矩急剧增加。同时，由表 3 分析可知，随着喂入量的大幅增加，动力输入轴转速也随之降低，这是因为螺旋输送机的摩擦阻力矩过大，而捡拾台能提供的最大功率一定，转速就会降低，导致花生果秧无法及时的向后输送，堆积在螺旋输送机中，物料层厚进一步增大，转速进一步降低，直至堵塞卡死。这也解释了实际收获过程中，短暂的喂入量过大导致的捡拾台堵死，甚至造成捡拾台动力输入轴安装轴承断裂现象发生的原因。

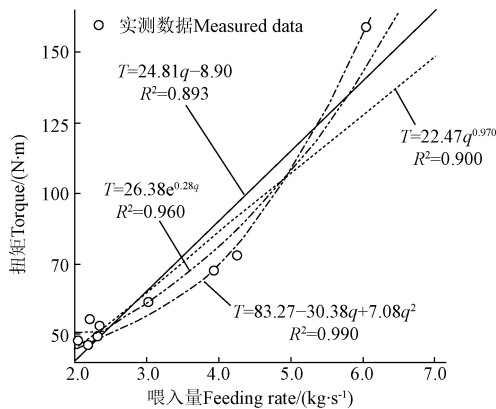


图 7 喂入量与扭矩不同关系模型拟合结果

Fig.7 Fitting results of relational models for feeding rate and Torque

3.4 模型验证

为了检测建立的数学模型的正确性，本文按照上述试验方法和数据提取方法对建立的喂入量与捡拾台动力输入轴扭矩数学模型式（20）进行了 5 次验证性试验。验证试验结果如表 4 所示。

表 4 验证试验结果

Table 4 Verification test results

试验序号 Test No.	前进速度 Forward speed/(m·s ⁻¹)	喂入量 Feeding rate/(kg·s ⁻¹)	计算扭矩 Calculated torque/(N·m)	实测扭矩 Measured torque/(N·m)	偏差率 Deviation rate/%
1	0.62	2.366	51.024	50.812	0.42
2	0.77	2.172	50.685	49.992	1.39
3	0.81	3.553	64.706	65.368	1.01
4	0.93	4.462	88.673	87.153	1.74
5	1.22	5.547	132.598	135.898	2.43
平均值 Mean					1.40

从表 4 可以看出，实测捡拾台动力输入轴扭矩与数学模型计算值的偏差率。验证试验结果表明，根据道路监测试验样本建立的喂入量与动力输入轴扭矩的二次函数模型具有较好的准确性，绝对偏差率范围为 0.42%~2.43%，平均偏差率为 1.40%。同时，从表 4 可以看出，喂入量越大，偏差率越大，说明随着喂入量的增加，捡拾台动力输入轴扭矩变化的不确定性增加，拟合的二次函数模型准确性降低。

3.5 田间验证试验

为了检验建立的二次函数数学模型在田间实际收获时的适应性和正确性，按照上述试验方法和数据提取方法于 2018 年 10 月在河南省驻马店市汝南县马乡镇进行了田间试验。试验花生品种、种植模式、田间状态及挖掘收获方式等与道路试验相同。挖掘后晾晒 5 d，此时花生植株含水率为 18%~25%。田间试验如图 8 所示，结果如表 5 所示。



图 8 田间试验

Fig.8 Field test

表 5 田间试验结果

Table 5 Field test results

试验序号 Test No.	前进速度 Forward speed/(m·s ⁻¹)	喂入量 Feeding rate/(kg·s ⁻¹)	计算扭矩 Calculated torque/(N·m)	实测扭矩 Measured torque/(N·m)	偏差率 Deviation rate/%
1	0.54	2.176	50.687	49.742	1.90
2	0.68	2.672	52.643	51.375	2.47
3	0.87	3.612	65.907	63.626	3.58
平均值 Mean					2.65

从表 5 可知，田间试验的扭矩偏差率范围为 1.90%~3.58%，平均偏差率为 2.65%。且实测扭矩较计算扭矩偏小，这可能是因为田间试验的花生果秧在收获前晾晒时间较道路试验的长，为 5 d，花生果秧含水率降低，果秧任性降低，脆性升高；收获时，花生果秧易折断，不易缠绕，所需扭矩减小。

4 讨论

1) 本文所研究的花生捡拾收获机喂入量与捡拾台动力输入轴扭矩的数学模型是通过水泥道路试验的方式所得，花生果秧状态与田间挖掘收获机自然铺放的有一定程度的不同，且联合收获机道路行走和田间行走存在一定差别，这对监测试验结果会有一定的影响。但田间试验表明，虽然田间试验的扭矩偏差率较道路试验有所增大，但偏差率依然小于 3.0%，拟合的二次函数模型仍具有较高的准确性，对后续花生捡拾收获机的智能测控及优化设计具有较好的指导作用。

2) 由于花生收获季节的限制，本文仅对河南驻马店皖花 2 号花生品种进行了试验，且果秧晾晒天数（即果秧含水率）对扭矩的偏差率有一定的影响，试验结果具有一定的局限性，后续研究可加强对花生主产区不同花生品种不同晾晒天数的监测试验，以优化喂入量和扭矩之间的函数关系，获得更精确的数学模型。

5 结 论

以前期所研制的 4HLJ-3000 型全喂入花生联合收获机为研究对象,对捡拾台进行了动力分析,得出了捡拾台动力输入轴扭矩和喂入量的数学模型。并设计了捡拾台动力输入轴转速、扭矩和功率等工况数据监测存储分析管理系统。

1) 通过捡拾台动力输入轴扭矩和喂入量的道路监测试验和数据拟合回归分析,得出扭矩和喂入量的二次函数模型为 $T=83.27-30.38q+7.08q^2$,且当喂入量小于等于 3 kg/s 时,随着喂入量的增加扭矩增加比较缓慢;当喂入量大于 3 kg/s 时,随着喂入量的增加,扭矩急剧增加,且转速也随之降低。

2) 模型验证试验结果表明,所建立的二次函数模型具有较好的准确性,偏差率范围为 0.42%~2.43%,平均偏差率为 1.40%;田间试验结果表明,偏差率范围为 1.90%~3.58%,平均偏差率为 2.65%;且喂入量越大,偏差率越大。该研究可为全喂入花生捡拾收获机以及其他作物喂入量的智能测控及优化设计提供理论基础和技术参考。

【参 考 文 献】

- [1] 陈中玉,高连兴,Chen Charles,等.中美花生收获机械化技术现状与发展分析[J].农业机械学报,2017,48(4): 1-21.
Chen Zhongyu, Gao Lianxing, Chen Charles, et al. Analysis on technology status and development of peanut harvest mechanization of China and the united states[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(4): 1-21. (in Chinese with English abstract)
- [2] Chapin J W, Thomas J S. Peanut money-maker production guide 2015[R]. South Carolina: National Peanut Board, 2015.
- [3] Fletcher S M, Chen C, Zhang P, et al. Competitiveness of peanuts: United States versus China[R]. Georgia: University of Georgia, 2009.
- [4] Jaime C N. Current status and strategies for harvest mechanization of peanut in Mexico[J]. SSRG International Journal of Agriculture & Environmental Science (SSRG-IJAES), 2015, 2(1): 7-15.
- [5] 高连兴,陈中玉,Charles Chen,等.美国花生收获机械化技术衍变历程及对中国的启示[J].农业工程学报,2017, 33(12): 1-9.
Gao Lianxing, Chen Zhongyu, Charles Chen, et al. Development course of peanut harvest mechanization technology of the United States and enlightenment to China[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2017, 33(12): 1-9. (in Chinese with English abstract)
- [6] 姚礼军,胡志超,王申莹,等.花生收获机收获台研究现状与关键技术分析[J].江苏农业科学,2016,44(12): 33-38.
- [7] 王冰,胡志超,彭宝良,等.半喂入四行花生联合收获机弹指筛结构运行参数优化[J].农业工程学报,2017, 33(21): 20-28.
Wang Bing, Hu Zhichao, Peng Baoliang, et al. Structure operation parameter optimization for elastic steel pole oscillating screen of semi-feeding four rows peanut combine harvester[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2017, 33(21): 20-28. (in Chinese with English abstract)
- [8] Antiaobong E A, Bhattarai K R. Growth trends and sources of output growth for oil palm and groundnut production in Nigeria (1961-2007)[J]. Trends in Agricultural Economics, 2012, 5(3): 96-103.
- [9] 中华人民共和国农业部. 2018 中国农业机械化年鉴[M]. 北京: 中国农业科学技术出版社, 2018.
- [10] Coers B A, Burke D J, Cooper W F, et al. Harvester feed rate control with tilt compensation[P]. US6592453, 2003.
- [11] John S, Michael P M, Gary W K. Combine feed rate sensors[J]. Transactions of the ASAE, 1985, 28(Supp.): 2-5.
- [12] Ederveen J. Harvestmore for harvester control[J]. Diesel Progress North American, 1982, 10: 14-15.
- [13] Kruse J W. Microprocessor Based Combine Ground Speed Controller[D]. West Lafayette: Purdue University, 1981.
- [14] Friesen O H, Zoerb G C, Bigsby F W. For combines: Controlling feedrates automatically[J]. Agricultural Engineering, 1966, 47(8): 434-435.
- [15] Van Loo J. An Automatic Feedrate Control System for a Combine Harvester[D]. Wageningen: Wageningen University, 1977.
- [16] Robert J A. Combine harvester rotorload control[P]. US6036597, 2000.
- [17] Miosz T. Quality of combine-harvester performance as affected by construction of selected threshing-separating assemblies[J]. Problemy Inzynierii Rolniczej, 1994, 2(4): 23-34.
- [18] Gomez-Gil J, Lopez-Lopez L J, Navas-Gracia L M, et al. The spatial low-pass filtering as an alternative to interpolation methods in the generation of combine harvester yield maps[J]. Applied Engineering in Agriculture, 2011, 27(6): 1087-1097.
- [19] Bajema R, Nitzel D R. Ground-crop harvester control system[P]. US6068059A, 2000.
- [20] 尚书旗,李国莹,杨然兵,等.4HQL-2 型全喂入花生联合收获机的研制[J].农业工程学报,2009,25(6): 125-130.
Shang Shuqi, Li Guoying, Yang Ranbing, et al. Development of 4HQL-2 type whole-feed peanut combine[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2009, 25(6): 125-130. (in Chinese with English abstract)
- [21] 胡志超,彭宝良,尹文庆,等.4LH2 型半喂入自走式花生联合收获机的研制[J].农业工程学报,2008,24(3): 148-153.
Hu Zhichao, Peng Baoliang, Yin Wenqing, et al. Design of 4LH2 type half-feed and self-propelled peanut combine[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2008, 24(3): 148-153. (in Chinese with English abstract)
- [22] Afshin A M, Shamsollah A, Hossein N, et al. Comparing of peanut harvesting loss in mechanical and manual methods[J]. International Journal of Advanced Biological and Biomedical Research (IJABBR), 2014, 2(5): 1475-1483.
- [23] 杨然兵. 4HQL-2 型花生联合收获机主要装置的设计与试验研究[D]. 沈阳: 沈阳农业大学, 2009.
Yang Ranbing. Study on Design Principle and Tests for Main Parts of 4HQL-2 Peanut Combine[D]. Shenyang: Shenyang Agricultural University, 2009. (in Chinese with English abstract)

- [24] 胡志超, 陈有庆, 王海鸥, 等. 振动筛式花生收获机的设计与试验[J]. 农业工程学报, 2008, 24(10): 114—117.
Hu Zhichao, Chen Youqing, Wang Haiou, et al. Design and experimental research on vibrating type peanut harvester[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2008, 24(10): 114—117. (in Chinese with English abstract)
- [25] 孙庆卫, 王延耀, 徐志瑞, 等. 花生分段收获机的应用现状及进展分析[J]. 农机化研究, 2012, 34(1): 234—237.
Sun Qingwei, Wang Yanyao, Xu Zhirui, et al. Application situation and progress analysis of peanuts piecewise harvest machine[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2012, 34(1): 234—237. (in Chinese with English abstract)
- [26] 胡志超, 王海鸥, 彭宝良, 等. 4HLB-2 型花生联合收获机起秧装置性能分析与试验[J]. 农业工程学报, 2012, 28(6): 26—31.
Hu Zhichao, Wang Haiou, Peng Baoliang, et al. Performance analysis and experiment on operation process of plant lifting device in 4HLB-2 type peanut combine harvester[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2012, 28(6): 26—31. (in Chinese with English abstract)
- [27] Tseng C F, Lin W S. The processing and fracture analysis on transmission shafts of a peanut harvester[J]. Journal of Materials Processing Technology, 2008, 201(1/2/3): 374—379.
- [28] 王东伟, 尚书旗, 李想, 等. 花生联合收获机 L 型输送清选分离机构研究[J]. 农业机械学报, 2013, 44(增刊 2): 68—74, 51.
Wang Dongwei, Shang Shuqi, Li Xiang, et al. Type-L cleaning separation mechanism of peanut combine harvester[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(Supp.2): 68—74, 51. (in Chinese with English abstract)
- [29] Roberson G T, Jordan D L. RTK GPS and automatic steering for peanut digging[J]. Applied Engineering in Agriculture, 2014, 30(3): 405—409.
- [30] Balkcom K S, Arriaga F J, Balkcom K B, et al. Single-and twin-row peanut production within narrow and wide strip tillage systems[J]. Agronomy Journal, 2010, 102(2): 507—512.
- [31] 王伯凯, 胡志超, 吴努, 等. 4HJB-2A 花生摘果机的设计与试验[J]. 中国农机化, 2012(1): 111—114.
Wang Bokai, Hu Zhichao, Wu Nu, et al. Design and experiments of 4HJB-2A peanut picker[J]. Chinese Agricultural Mechanization, 2012(1): 111—114. (in Chinese with English abstract)
- [32] 刘洋成, 何珂, 王骞, 等. 4HJB-4A 花生捡拾摘果机设计与试验[J]. 农机化研究, 2019, 41(5): 121—126, 132.
Liu Yangcheng, He Ke, Wang Qian, et al. Design and experiment of 4HJB-4A peanut collecting and picking machines[J]. Agricultural Mechanization Research, 2019, 41(5): 121—126, 132. (in Chinese with English abstract)
- [33] 王东伟, 王延耀, 尚书旗, 等. 大型花生捡拾摘果收获机的研究与分析[C]//中国农业工程学会 2011 年学术年会论文集, 2011: 121—127.
- [34] 王东伟, 尚书旗, 韩坤. 4HJB-2 型花生捡拾摘果联合收获机的设计与试验[J]. 农业工程学报, 2013, 29(11): 27—36.
Wang Dongwei, Shang Shuqi, Han Kun. Design and test of 4HJB-2 harvester for peanut picking-up and fruit-picking[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2013, 29(11): 27—36. (in Chinese with English abstract)
- [35] 许涛, 沈永哲, 高连兴, 等. 基于两段收获的弹齿式花生捡拾机构研究[J]. 农业机械学报, 2016, 47(3): 90—97, 111.
Xu Tao, Shen Yongzhe, Gao Lianxing, et al. Spring-finger peanut pickup mechanism based on two-stage harvest[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016, 47(3): 90—97, 111. (in Chinese with English abstract)
- [36] 李耀明, 王建鹏, 徐立章, 等. 联合收获机脱粒滚筒凹板间隙调节装置设计与试验[J]. 农业机械学报, 2018, 49(8): 68—75.
Li Yaoming, Wang Jianpeng, Xu Lizhang, et al. Design and experiment on adjusting mechanism of concave clearance of combine harvester cylinder[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(8): 68—75. (in Chinese with English abstract)
- [37] 陈进, 李耀明, 季彬彬. 联合收获机喂入量测量方法[J]. 农业机械学报, 2006, 37(12): 76—78.
Chen Jin, Li Yaoming, Ji Binbin. Study on measurement method of combine feed quantity[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2006, 37(12): 76—78. (in Chinese with English abstract)
- [38] 刘元元, 刘卉, 尹彦鑫, 等. 基于功率监测的联合收割机喂入量预测方法[J]. 中国农业大学学报, 2017, 22(11): 157—163.
Liu Yuanyuan, Liu Hui, Yin Yanxin, et al. Feeding assessment method for combine harvester based on power measurement[J]. Journal of China Agricultural University, 2017, 22(11): 157—163. (in Chinese with English abstract)
- [39] 卢文涛, 刘宝, 张东兴, 等. 谷物联合收获机喂入量建模与试验[J]. 农业机械学报, 2011, 42(11): 82—85.
Lu Wentao, Liu Bao, Zhang Dongxing, et al. Experiment and feed rate modeling for combine harvester[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(11): 82—85. (in Chinese with English abstract)
- [40] 陈度, 王书茂, 康峰, 等. 联合收割机喂入量与收获过程损失模型[J]. 农业工程学报, 2011, 27(9): 18—21.
Chen Du, Wang Shumao, Kang Feng, et al. Mathematical model of feeding rate and processing loss for combine harvester[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2011, 27(9): 18—21. (in Chinese with English abstract)
- [41] 介战, 陈家新, 刘红俊. GPS 联合收获机随机喂入量模糊控制技术[J]. 农业机械学报, 2006, 37(1): 55—58.
Jie Zhan, Chen Jiaxin, Liu Hongjun. Research on fuzzy control of random feed quantity of GPS combine[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2006, 37(1): 55—58. (in Chinese with English abstract)
- [42] 张振乾, 孙意凡, 刘仁杰, 等. 联合收获机喂入量监测系统设计与试验[J]. 农业机械学报, 2019, 50(6): 85—92.
Zhang Zhenqian, Sun Yifan, Liu Renjie, et al. Design and test of feed rate monitoring system for combine harvester[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(6): 85—92. (in Chinese with English abstract)

- [43] 尤惠媛, 卢文涛. 联合收获机喂入量模糊控制系统研究[J]. 西北农林科技大学学报: 自然科学版, 2015, 43(5): 229—234.
You Huiyuan, Lu Wentao. Fuzzy control system for feed quantity of combine harvester[J]. Journal of Northwest A&F University: Natural Science Edition, 2015, 43(5): 229—234. (in Chinese with English abstract)
- [44] Huynh V M, Powell T, Siddall J N. Threshing and separating process—a mathematical model[J]. Transactions of the ASAE, 1982, 20(1): 65—73.
- [45] Miu P I. Applied modeling theory of material separation in combine harvesters[C]. Ottawa: ASAE, 2004: 4115—4125.

Modeling and experiment of feeding rate for full-feed peanut pickup harvester

Wang Shenyong, Hu Zhichao^{*}, Wu Feng, Yu Zhaoyang, Cao Mingzhu, Gu Fengwei, Gao Xuemei

(Nanjing Institute of Agricultural Mechanization, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, Nanjing 210014, China)

Abstract: In order to solve the problem of performance degradation and even mechanical failure caused by fluctuation of feeding rate during the operation of full-feed peanut combine harvester in China, and the lack of basic research on feeding rate of full-feed peanut combine harvester, the structure and working principle of the pickup bench of the 4HLJ-3000 full-feeding peanut combine harvester developed by the author team were analyzed in this paper. The pickup bench is mainly composed of limited depth wheel, pressure rod, slide plate, pickup elastic teeth and screw conveyor. Based on the analysis of structure and working principle, a monitoring method of feeding rate based on the torque of power input shaft of pickup bench was proposed. Through the force analysis of the pickup bench, the mathematical relationship between the power input shaft torque and the feeding rate of the pickup bench was obtained. A working condition monitoring system of the speed input, shaft speed, torque and power of the power input shaft was designed, and the system was mainly composed of sensor unit, data acquisition, and data storage analysis. The sensor unit converts the torque and speed of the power input axis of the pickup bench into frequency signals, and the data acquisition module converts the frequency signals into torque and speed values and displays them, and transmits them to the computer for storage and analysis through RS485 bus and RS485 to USB. The data of torque and rotate speed of pickup bench power input shaft, forward speed of pickup harvester and feeding rate were obtained in different operating conditions by road monitoring tests. Linear function, power function, exponential function and quadratic function fitting regression analysis were used to obtain the function indicated the change of feeding rate with various torque based on the test results. The results showed that the quadratic function model had higher fitting precision, and its determination coefficient was 0.990. The fitting curve of quadratic function was analyzed, and the results showed that when the feeding rate was less than 3kg/s, the torque increased slowly with the increase of feeding rate, while the torque increased sharply and the rotation speed decreased with the increase of feeding rate. The model verification experiments were proposed, and the results showed that the established quadratic function model had good accuracy. The absolute deviation rate ranged from 0.42% to 2.43%, and the average deviation rate was 1.40%. The deviation rate increased with increasing the feeding rate. The field experiments also proved that there was a quadratic function relationship between feed rate and torque, and the torque deviation rate ranged from 1.90% to 3.58%, and the average deviation rate was 2.65% compared with the calculated results. This study can provide reference for the optimization design of the structure of full-feeding peanut picker and other crop pickers and the intelligent measurement and control of feed rate.

Keywords: agricultural machinery; modeling; experiments; peanut; full-feed harvester; pickup bench; feeding rate; torque