

基于功率测量的联合收获机喂入量检测方法研究

孙意凡¹ 刘仁杰¹ 欧 颢² 张振乾¹ 张 漫¹ 李 寒²

(1. 中国农业大学现代精细农业系统集成研究教育部重点实验室, 北京 100083;
2. 中国农业大学农业农村部农业信息获取技术重点实验室, 北京 100083)

摘要: 为了准确分析联合收获机不同喂入量检测方法的精度,提出基于割台主动轴功率和倾斜输送机功率的2种喂入量检测方法。以河北冬小麦作为试验对象,以新疆-3型联合收获机为试验平台,进行了喂入量检测系统田间试验。喂入量检测系统包括割台主动轴扭矩传感器、倾斜输送机动力轴扭矩传感器、割台主动轴转速传感器和车载工控机等。对2种喂入量检测方法进行分析,根据试验数据分别建立计算模型,将2种方法的检测结果与实测结果进行对比,结果表明,基于割台主动轴功率的喂入量检测方法平均相对误差为19.6%,基于倾斜输送机功率的喂入量检测方法平均相对误差为16.1%。2种方法的检测精度在一定程度上能满足田间应用需求,基于倾斜输送机功率的喂入量检测方法检测精度稍高。

关键词: 联合收获机; 喂入量检测; 功率检测

中图分类号: S225.3 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2020)05-0118-06 OSID: 

Analysis and Comparison of Feed Rate Detection Methods of Combine Harvester Based on Power Detection

SUN Yifan¹ LIU Renjie¹ OU Hao² ZHANG Zhenqian¹ ZHANG Man¹ LI Han²

(1. Key Laboratory of Modern Precision Agriculture System Integration Research, Ministry of Education, China Agricultural University, Beijing 100083, China
2. Key Laboratory of Agricultural Information Acquisition Technology, Ministry of Agriculture and Rural Affairs, China Agricultural University, Beijing 100083, China)

Abstract: Power measurement is one of the important methods for the detection of feed rate of combine harvester. In order to more accurately analyze the accuracy of the feed rate detection methods at different positions, two feed rate detection methods and devices were designed based on power of header driving shaft and power of tilting conveyor. Winter wheat in Hebei Province was used as the test object, and Xinjiang-3 harvester was used as a test platform and a system test was performed. The feeding amount detection system included a header active shaft torque sensor, a tilting conveyor power shaft torque sensor, a header active shaft speed sensor, and an on-board industrial computer. Through field experiments, two feed rate detection methods were analyzed and compared, and the calculation models were established based on the test data. The test results showed that the relative error of the method based on the power of driving shaft of cutting table was 19.6%, and the relative error of the method based on power of tilting conveyor was 16.1%. The detection accuracy of both methods can meet the needs of field application to a certain extent. The detection accuracy of feed quantity based on power of inclined conveyor was slightly higher than that based on power of driving shaft of cutting table.

Key words: combine harvester; detection of feed rate; power detection

0 引言

联合收获机收获过程的损失率和工作效率与其

喂入量密切相关。因此,借助信息技术实时检测喂入量,对指导驾驶员完成收获作业、提高工作效率具有重要意义^[1-2]。目前,根据检测位置,收获机喂入

收稿日期: 2020-02-04 修回日期: 2020-03-01
基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFD0700300-2016YFD0700304)
作者简介: 孙意凡(1996—),男,博士生,主要从事联合收获机喂入量检测研究,E-mail: 243566273@qq.com
通信作者: 张漫(1975—),女,教授,博士生导师,主要从事农业电气化与自动化研究,E-mail: cauzm@cau.edu.cn

量的检测方法可分为：基于倾斜输送器的检测方法^[3-8]、基于脱粒滚筒的检测方法^[9-15]、基于割台主动轴的检测方法^[16-17]、基于螺旋输送器的检测方法^[18-20]等，检测参数主要集中在扭矩和功率。

谷物收获环境复杂，喂入量检测结果与试验环境密切相关。若试验时间、地点、环境不同，则试验结果不能准确反映检测方法之间的差异。从检测位置实时性的角度考虑，倾斜输送器、割台主动轴、螺旋输送器位于脱粒工序开始之前，在这些位置安装传感器，检测时间较早，能够为驾驶员提供更多的操作时间；在倾斜输送器、割台主动轴两种检测位置安装传感器，能够在保证实时性的基础上具有更好的工作稳定性；脱粒滚筒位于脱粒工序开始之后，在此位置安装传感器检测结果具有时间滞后性。从检测位置实用性的角度考虑，螺旋输送器空间狭小，不利于传感器安装，且工作环境较为恶劣，难以维持工作稳定性。从检测参数方面考虑，扭矩理论上能够更好地反映喂入量的变化，但检测过程中易受倾斜输送器角度、割幅宽度等不可控变量的影响；功率作为线性量，影响其检测精度的不可控变量较少，更能有效反映喂入量变化。因此，本文选取基于割台主动轴功率和倾斜输送器功率的喂入量检测方法进行试验系统设计，并对 2 种方法的检测精度进行比较。

1 材料与方法

1.1 喂入量检测方法

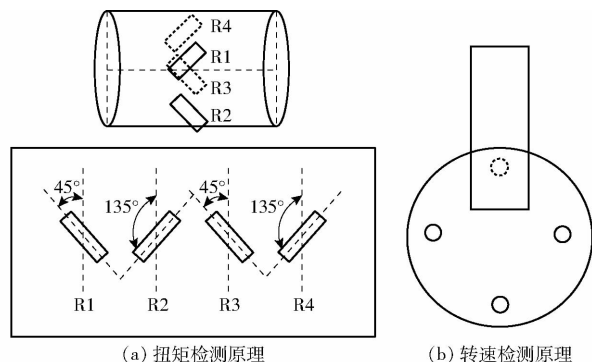
1.1.1 基于割台主动轴功率的喂入量检测方法

收获机工作时，作物由割台收割并喂入收获机，割台主动轴为整个收获机割台提供动力。因此，通过检测收获机主动轴的功率，建立收获机主动轴功率与喂入量之间的数学模型，进而实现喂入量的快速检测。该检测系统包括收获机主动轴扭矩传感器、主动轴转速传感器和车载工控机。

传感器检测原理如图 1 所示，扭矩传感器使用应变片组成惠更斯电桥，4 个应变片依次沿轴向 45° 和 135° 粘贴组成等臂全桥。当传动轴受到扭矩作用产生应变时，应变片随着主动轴表面伸长或缩短，电阻值产生变化，进而引起输出电压变化；通过对输出电压信号的测量得到割台主动轴扭矩 T_1 。

转速传感器通过霍尔效应进行检测。在割台主动轮的侧面粘贴磁钢，当磁钢经过霍尔元件时会产生霍尔效应形成脉冲信号，通过单位时间内记录的脉冲数和主动轮表面的磁钢数目计算割台主动轴的转速 n_1 。

采用 ZigBee 技术实现数据传输。应变电桥产生的电压信号经过放大、滤波后，经过 A/D 转换由



(a) 扭矩检测原理 (b) 转速检测原理

图 1 传感器检测原理图

Fig. 1 Schematic of sensor detection

传感器内的 ZigBee 模块传输至收获机驾驶室内的工控机。

通过检测收获机主动轴的扭矩 T_1 和转速 n_1 ，计算主动轴功率

$$P_1 = \frac{n_1}{9\,550} T_1 \quad (1)$$

1.1.2 基于倾斜输送器功率的喂入量检测方法

收获机工作时，喂入收获机的作物通过倾斜输送器送至脱粒滚筒处开始脱粒。通过测量倾斜输送器运送作物所消耗的功率，建立喂入量与该功率的数学模型，进而实现喂入量的实时检测。

新疆-3 型联合收获机倾斜输送器动力轴同时为倾斜输送器和割台主动轴提供动力，即倾斜输送器动力轴功率 P 等于割台主动轴功率 P_1 和倾斜输送器功率 P_2 之和。在倾斜输送器动力轴安装扭矩传感器检测得到动力轴扭矩 T_2 ；通过割台主动轴转速 n_1 和传动比 k 计算出倾斜输送器动力轴转速 n_2 ；再计算出倾斜输送器动力轴功率 P 。倾斜输送器功率 $P_2 = P - P_1$ 。

$$P = \frac{n_2 T_2}{9\,550} \quad (2)$$

$$n_2 = k n_1 \quad (3)$$

$$P_2 = \frac{k n_1 T_2 - n_1 T_1}{9\,550} = \frac{n_1}{9\,550} (k T_2 - T_1) \quad (4)$$

其中，扭矩检测原理和数据传输方式与割台主动轴功率检测系统相同。2 种不同测量方式的传感器安装位置如图 2 所示。主要传感器安装如图 3 所示。

1.2 试验设计

田间试验于 2019 年 6 月 17 日在河北省中国农业大学涿州试验站进行。以河北冬小麦作为试验对象，新疆-3 型联合收获机作为试验平台，将整个试验系统安装在收获机上，扭矩传感器采样频率为 20 Hz。在东经 115°85'6"~115°85'24"，北纬 39°46'17"~39°46'24"进行麦收试验。采集相同生长情况下 2 种测量方法的试验数据。收获机割幅为 2.36 m，试验

过程中,实际割幅为 2 m。整个试验过程中割台主动轴转速基本保持 $n_1 = 450 \text{ r/min}$,割台主动轴转速时域图如图 4 所示。倾斜输送机动力轴与割台主动轴间传动比 $k = 1.5$ 。

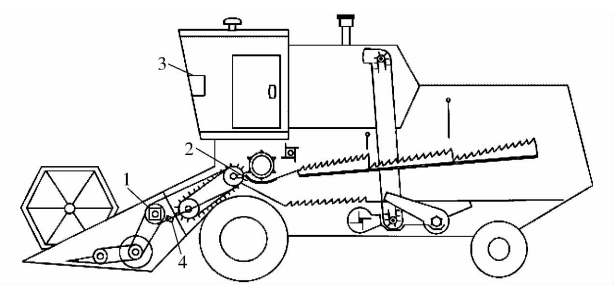


图 2 传感器安装位置图

Fig. 2 Position of sensor installation

1. 割台主动轴扭矩传感器 2. 倾斜输送机动力轴扭矩传感器
3. 车载工控机 4. 割台主动轴转速传感器



图 3 主要传感器安装实物图

Fig. 3 Physical installation diagram of main sensor

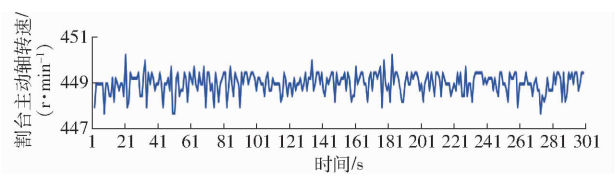


图 4 割台主动轴转速时域图

Fig. 4 Time-domain diagram of rotational speed of header driving shaft

1.3 数据分析处理

1.3.1 实际喂入量计算

实际喂入量与所收获的作物长势、含水率、收获机作业时的割幅宽度、割台高度以及速度有关。试验地块长势较为均匀,收获时含水率基本相同;通过计算单位面积作物质量 m 和单位时间内收获机收获的作物面积 S 得到实际喂入量 q 。单位时间内收获作物面积 S 可通过收获机的作业速度 v 和收获作物幅宽 d 计算。试验过程中,收获机割幅宽度 d 和割台高度 h 保持不变,则收获机作业速度 v 和单位

面积作物质量 m 成为影响喂入量的主要因素,可通过收获机作业速度 v 与单位面积作物质量 m 计算实际喂入量 q ,即

$$q = Sm = dvm \tag{5}$$

使用 GNSS 记录收获机的工作路径和工作速度。在收获机工作路径上根据收获机作业的割茬高度 h 取 3 块边长为 2 m 的方形区域按照收获机收获时的割台高度 h 进行人工取样称量,取平均值计算单位面积作物质量。

1.3.2 传感器信号处理

通过傅里叶变换得到倾斜输送机动力轴扭矩传感器和割台主动轴扭矩传感器电压信号的频域信息,找出信号集中的频段,采用巴特沃斯带通滤波器,对扭矩传感器信号进行滤波。

1.3.3 模型建立与验证

根据式(1)、(4)计算割台主动轴功率和倾斜输送机功率建立喂入量计算模型。由图 4 可知,整个试验过程中,割台主动轴转速 n_1 基本不变,可视为常量,计算过程中只需要分别建立割台主动轴扭矩 T_1 电压信号与实际喂入量(即作业面积与作物密度乘积)之间、倾斜输送机扭矩 $(kT_2 - T_1)$ 电压信号与实际喂入量之间的计算模型,对比检测结果。

随机选取 50 个数据点,通过最小二乘法建立一元线性回归方程,得到割台主动轴扭矩与实际喂入量、倾斜输送机扭矩与实际喂入量的关系式,随机选取 20 个数据点进行模型验证。

2 试验结果与分析

2.1 实际喂入量计算时域图

3 块边长为 2 m 的方形区域作物质量采集结果如表 1 所示,计算可知单位面积作物平均质量 m 为 0.62 kg/m^2 。

表 1 作物质量采集结果

Tab.1 Results of crop quality collection				kg
称量序号	区域 1	区域 2	区域 3	
1	2.34	2.64	2.42	
2	2.36	2.64	2.42	
3	2.34	2.64	2.40	
平均	2.35	2.64	2.41	

收获过程中收获机实际割幅宽度 d 为 2 m。通过 GNSS 对收获机工作过程中作业速度 v 进行记录,得到收获机作业速度时域图,如图 5 所示。

根据式(5)计算收获过程中收获机实际喂入量 q ,得到实际喂入量变化时域图,如图 6 所示。

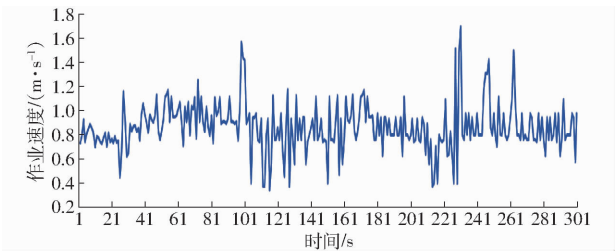


图5 收获机作业速度时域图

Fig.5 Time-domain diagram of speed of combine harvester

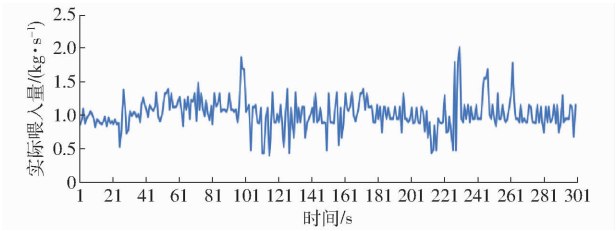


图6 收获机实际喂入量时域图

Fig.6 Time-domain diagram of actual feed rate of combine harvester

2.2 数据分析处理

经过傅里叶变换和频域分析,得到收获机工作产生的电压信号集中频段,作为带通滤波的截止频率。采用巴特沃斯带通滤波器,对倾斜输送机动力轴扭矩传感器和割台主动轴扭矩传感器电压信号进行滤波,通带截止频率分别为 5.5 ~ 6.5 Hz 和 7 ~ 8.5 Hz。滤波有效降低了噪声,减少了奇异点。滤波前后传感器信号时域图分别如图 7 和图 8 所示。

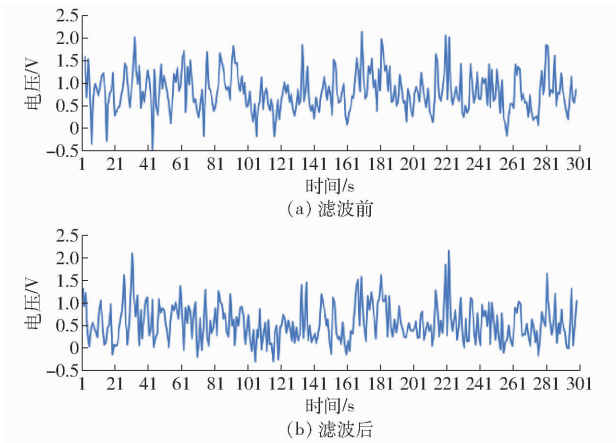


图7 割台主动轴扭矩传感器信号时域图

Fig.7 Time-domain diagram of torque sensor signal of header driving shaft

2.3 模型建立与验证

(1)割台主动轴扭矩与实际喂入量的关系

随机选取 50 个割台主动轴扭矩数据点,通过最小二乘法建立一元线性回归方程,得到割台主动轴扭矩与实际喂入量的关系式为

$$y_1 = 0.3404x + 0.5191 \quad (6)$$

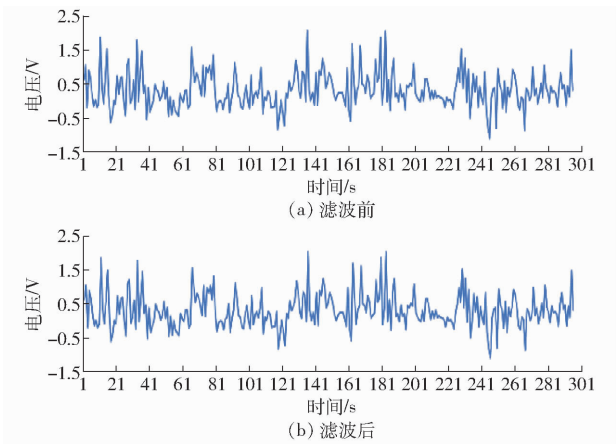


图8 倾斜输送机动力轴扭矩传感器信号时域图

Fig.8 Time-domain diagram of torque sensor signal of tilting conveyor power shaft

结果如图 9a 所示,再选取 20 个数据点作为验证,得到喂入量计算值与喂入量实际值 1:1 关系,见图 9b。由图可知,基于割台主动轴功率的喂入量检测方法决定系数 R^2 为 0.8325。

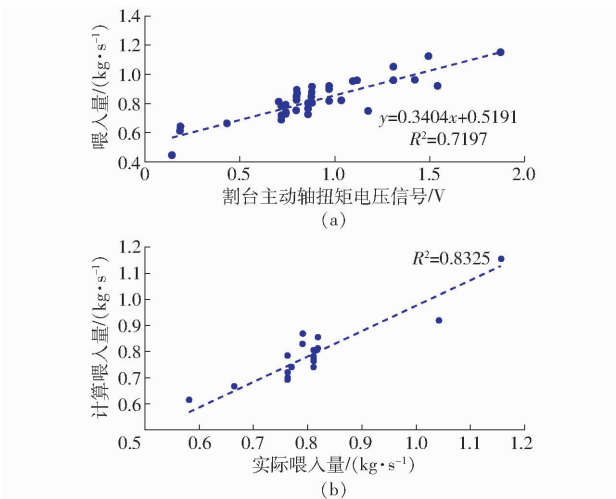


图9 基于割台主动轴功率的喂入量计算模型与验证

Fig.9 Calculation model and validation of feed rate based on driving shaft power of header

(2)倾斜输送机扭矩与实际喂入量的关系

随机选取 50 个倾斜输送机扭矩数据点,通过最小二乘法建立一元线性回归方程,倾斜输送机扭矩与实际喂入量的关系式为

$$y_2 = 0.8075x + 0.5956 \quad (7)$$

结果如图 10a 所示。再选取 20 个数据点作为验证,得到喂入量计算值与喂入量实际值 1:1 关系,见图 10b。可知基于倾斜输送机功率的喂入量检测方法决定系数 R^2 为 0.8492。

2.4 检测结果分析比较

将两种方法的检测结果与实测结果进行对比,结果如表 2 所示。基于割台主动轴功率的喂入量检

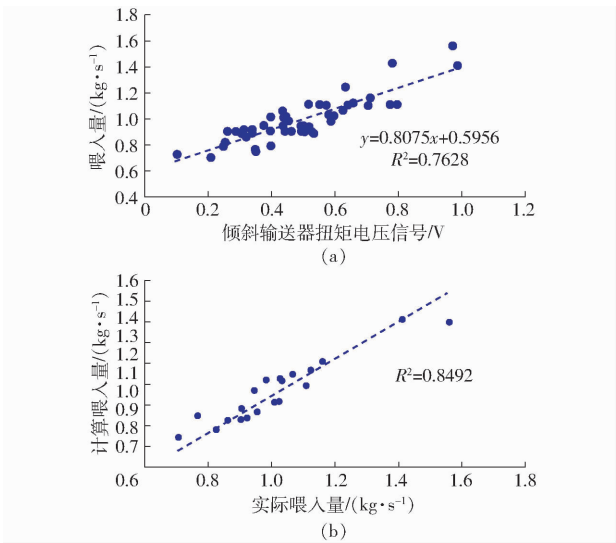


图 10 基于倾斜输送机功率的喂入量计算模型与验证
Fig. 10 Calculation model and validation of feed rate
based on power of tilting conveyor

测方法计算平均喂入量为 1.19 kg/s,平均相对误差为 19.6%;基于倾斜输送机功率的喂入量检测方法计算平均喂入量为 1.17 kg/s,平均相对误差为 16.1%。试验结果表明,基于倾斜输送机功率的喂入量检测方法,其精度稍高于基于割台主动轴的喂入量检测方法。

影响喂入量检测精度的原因有 2 方面:①由于收割机工作过程自身振动、颠簸等原因产生干扰信号无法被完全滤除。②田间单位面积作物质量无法保证绝对均匀,造成实际喂入量计算过程中存在误差。

表 2 检测精度对比

Tab.2 Comparison of detection accuracy

方法	实际喂入量/ (kg·s ⁻¹)	平均喂入量/ (kg·s ⁻¹)	平均绝对误差/ (kg·s ⁻¹)	平均相对 误差/%
基于割台主 动轴功率	1.20	1.19	0.236	19.6
基于倾斜输 送器功率	1.20	1.17	0.194	16.1

3 结论

(1)提出基于倾斜输送机功率和基于割台主动轴功率的 2 种喂入量检测方法,并进行了检测系统田间试验。试验结果表明,2 种检测方法都能在一定程度上反映喂入量的变化趋势,满足田间应用的需求。其中,基于倾斜输送机功率的喂入量检测方法在检测精度上稍高于基于割台主动轴功率的喂入量检测方法。

(2)由于田间作业环境较差,导致传感器的工作稳定性不足,难以实现长时间工作。信号采集和处理过程中滤波不充分是造成检测结果误差较大的原因之一。今后还需研究提高传感器工作稳定性的方法,增强采集电路的滤波效果,改进数据处理方法,进一步提高检测精度。

(3)收获机割台主动轴转速由发动机转速和中间传动比决定,试验过程中割台主动轴转速变化不大,虽简化了喂入量模型的计算过程,但无法反映不同转速下喂入量与功率的关系。

参 考 文 献

[1] 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 CSAE, 2011, 27(9): 18-21. (in Chinese)

[2] 介战.我国谷物随机损失率测试展望[J].农机化研究,2009,31(7):5-9.

[3] KRUSE J W. Microprocessor based combine ground speed controller[D]. West Lafayette: Purdue University, 1981.

[4] EDERVEEN J. Harvest more for harvester control[J]. Diesel Progress North American, 1982, 10:14-15.

[5] 介战,周学健.喂入量传感器测试模型研究[J].农业机械学报,2001,32(5):53-55.
JIE Zhan, ZHOU Xuejian. Study on mathematical model of feed quantity sensor measuring[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2001, 32(5):53-55. (in Chinese)

[6] 介战,罗四倍,周学建.基于 LabVIEW 的联合收割机水稻喂入量遥测试验[J].农业工程学报,2009,25(增刊 2):87-91.
JIE Zhan, LUO Sibe, ZHOU Xuejian. LabVIEW-based telemetering experiments of rice feed quantity for combined harvester [J]. Transactions of the CSAE, 2009, 25(Supp. 2): 87-91. (in Chinese)

[7] BRUCE A C, DANIEL J B. Automatic control initiation for a harvester: US20010021581[P]. 2004-12-28.

[8] 陈进,李耀明,季彬彬.联合收割机喂入量测量方法[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)

[9] 唐忠,李耀明,徐立章,等.切纵流联合收割机小麦喂入量预测的试验研究[J].农业工程学报,2012,28(5):26-31.
TANG Zhong, LI Yaoming, XU Lizhang, et al. Experimental study on wheat feed rate of tangential-axial combine harvester[J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(5):26-31. (in Chinese)

[10] 王新,付函,王书茂,等.收割机作业速度多目标控制模型的鲁棒优化设计[J].农业工程学报,2012,28(20):27-33.
WANG Xin, FU Han, WANG Shumao, et al. Robust optimal design of multi-objective control model of working speed for

- combine harvester [J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(20):27–33. (in Chinese)
- [11] JOHN S, MICHAEL P M, GARY W K. Combine feed rate sensors [J]. Transactions of the ASAE, 1985, 28(Supp.): 2–5.
- [12] 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(增刊): 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(Supp.): 82–85. (in Chinese)
- [13] 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)
- [14] 梁学修, 陈志, 张小超, 等. 联合收获机喂入量在线监测系统设计与试验[J/OL]. 农业机械学报, 2013, 44(增刊2): 1–6.
LIANG Xuexiu, CHEN Zhi, ZHANG Xiaochao, et al. Design and experiment of on-line monitoring system for feed quantity of combine harvester[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(Supp.2): 1–6. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=2013s201&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2013.S2.001. (in Chinese)
- [15] FRIESEN O H, ZOERB G C, BIGSBY F W. For combines: controlling feedrates automatically[J]. Agricultural Engineering, 1966, 47(8): 434–435.
- [16] 张振乾, 彭程, 孙意凡, 等. 联合收获机喂入量监测系统信号分析与处理[J/OL]. 农业机械学报, 2019, 50(增刊): 73–78.
ZHANG Zhenqian, PENG Cheng, SUN Yifan, et al. Signal analysis and processing of combine harvester feed rate monitoring system[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(Supp.): 73–78. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flagz=1&file_no=2019S012&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.S0.012. (in Chinese)
- [17] 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/OL]. 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/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(6): 85–92. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx?flag=1&file_no=20190609&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.06.009. (in Chinese)
- [18] VAN LOO J. An automatic feedrate control system for a combine harvester[D]. Netherlands, Wageningen: Wageningen Agricultural University, 1977.
- [19] 丁文才. 联合收获机喂入量检测方法和传感器研究[D]. 北京: 中国农业大学, 2011.
DING Wencai. Combine harvester feeding quantity detection method and sensor research [D]. Beijing: China Agricultural University, 2011. (in Chinese)
- [20] 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)