

基于功率监测的联合收割机喂入量预测方法

刘元元¹ 刘卉¹ 尹彦鑫^{2,3*} 安晓飞^{2,3}

(1. 首都师范大学 信息工程学院, 北京 100048;

2. 国家农业智能装备工程技术研究中心, 北京 100097;

3. 北京农业智能装备技术研究中心, 北京 100097)

摘要 针对联合收割机喂入量主要基于人工经验调控,受人为因素影响较大的问题,分析割台螺旋输送机功率模型,对螺旋输送机功率和喂入量的关系进行研究;开发基于CAN总线通信联合收割机割台工况嵌入式监测系统,对联合收割机工况进行实时监测。结果表明:1)螺旋输送机功率和喂入量具有数学关系;2)本研究设计的联合收割机割台工况嵌入式监测系统运行可靠,能够实时采集联合收割机工况信息;3)对试验数据回归分析,得到了螺旋输送机功率和喂入量的数学表达式,其相关系数为 $R^2=0.9099$,表明监测割台螺旋输送机功率预测喂入量是可行的。

关键词 联合收割机; 螺旋输送机功率; 喂入量预测; 嵌入式系统; CAN总线

中图分类号 S225 **文章编号** 1007-4333(2017)11-0157-07 **文献标志码** A

Feeding assessment method for combine harvester based on power measurement

LIU Yuanyuan¹, LIU Hui¹, YIN Yanxin^{2,3*}, AN Xiaofei^{2,3}

(1. College of Information Engineering, Capital Normal University, Beijing 100048, China;

2. National Engineering Research Center for Intelligent Agricultural Equipment, Beijing 100097, China;

3. Beijing Research Center for Intelligent Agricultural Equipment, Beijing 100097, China)

Abstract The feeding rate prediction of combine harvester was greatly influenced by artificial experience and artificial factors. The power of header screw conveyer theoretically was analyzed intensely through torsion analysis to reveal the dynamic law between the feeding rate of combine harvester and the power consumption of header screw conveyer. An on-line monitoring system was developed based on CAN bus technology to collect the real-time dynamic data of screw conveyer. Experiments were conducted to verify developed model based on the real-time data. The result demonstrated and verified that: 1) The model between the feeding rate and power of header screw conveyer could be described as mathematical relationship. 2) The on-line monitoring system was realizable to collect working data of combine harvester in real time. 3) Regression analysis of real-time data showed that the power of screw conveyor and the feeding rate was a mathematic expression ($R^2 = 0.9099$). In conclusion, it was feasible to predict feeding rate by monitoring screw conveyer power consumption.

Keywords combine harvester; screw conveyer power; feeding rate prediction; embedded system; CAN bus

联合收割机喂入量是影响谷物收获作业性能的重要参数,作业中若喂入量大于额定喂入量,会造成收割机切割输送、脱粒分离及清选系统的工作部件

超负荷工作,发生堵塞,甚至导致机械故障;若喂入量小于额定喂入量,则会降低联合收割机的作业效率,影响作物收割作业。目前,联合收割机喂入量主

收稿日期: 2016-10-02

基金项目: 国家“863”高技术研究发展计划项目(2013AA102308); 北京市科技计划课题(D161100003216001); 北京市农林科学院青年科研基金(QNJJ201529)

第一作者: 刘元元, 硕士研究生, E-mail: liuyuanyuancnu@163.com

通讯作者: 尹彦鑫, 助理研究员, 主要从事机电一体化技术研究, E-mail: yinyx@nrcita.org.cn

要基于人工经验进行调控,受人为因素影响较大。因此,对联合收割机喂入量进行精准监测或预测以及设计开发相关的实时监控系統具有重要现实意义。

针对联合收割机喂入量实时监测,国内外已开展了许多理论研究及方法实践。这些研究针对喂入量与收割机脱粒分离系统的关系,设计了相关试验平台和系统,给出了对应的试验方法和结果^[1-7];但联合收获机作业起始于割台,经切割处理后的谷物通过喂入搅龙与过桥输送至脱粒分离系统需要一定的时间,通过监测脱粒分离系统功耗调控喂入量存在较大的时间滞后,难以解决因喂入量过大引起的脱粒效率低或部件堵塞等问题,因此需要开展喂入量与割台作业部件性能参数之间关系模型的研究。

本研究拟分析联合收割机切割输送机动力学模型,分析螺旋输送机功率与喂入量的关系,建立一种通过监测割台螺旋输送机功耗预测喂入量的方法;构建基于嵌入式技术的联合收割机工况在线监测系统,对联合收割机工况进行实时监测,并对田间试验数据分析处理,对螺旋输送机功耗与喂入量的试验数据进行拟合,验证通过监测联合收割机割台螺旋输送机功耗预测喂入量方法的可行性。

1 割台螺旋输送机建模与喂入量预测方法

1.1 割台螺旋输送机功率分析

联合收割机割台螺旋输送器的主要作用是将割台切割器切割后的农作物进行碾压并旋转输送至输送槽。在割台螺旋输送机工作时,发动机分配给割台螺旋输送器的总功率为^[5]:

$$N_P = M_P \omega \quad (1)$$

式中: M_P 为发动机传给割台螺旋输送器的动力矩, $N \cdot m$; ω 为割台螺旋输送机角速度, m/s 。依据式(1),若已知输送机转矩和转速,则可以计算螺旋输送器的总功率。根据能量守恒原理,总功率 N_P 可分解为:

$$N_P = N + N' \quad (2)$$

式中: N 为割台螺旋输送机所需的功率, W ; N' 为机械传动损耗功率, W 。割台螺旋输送机工作时所受阻力最终转化为阻力矩,传递到螺旋输送机轴上,因此割台螺旋输送机所需的功率 N 可表示为:

$$N = M_{KP} \omega \quad (3)$$

式中: M_{KP} 为割台螺旋输送机工作时的阻力矩, $N \cdot m$ 。割台螺旋输送机工作时所需功率 N 由2部

分组成:割台螺旋输送机空载时功率 N_0 和有效功率 N_T :

$$\begin{aligned} N &= N_0 + N_T \\ N_0 &= M_0 \omega \\ N_T &= M_T \omega \end{aligned} \quad (4)$$

式中: M_0 为割台螺旋输送机空载转矩, $N \cdot m$; M_T 为割台螺旋输送机有效转矩, $N \cdot m$ 。依据式(3)和(4)可得:

$$M_{KP} = M_0 + M_T \quad (5)$$

结合式(2)可知,当割台螺旋输送机转速一定时,空载功率一定,发动机传给割台螺旋输送器的总功率 N_P 主要受有效功率 N_T 影响。

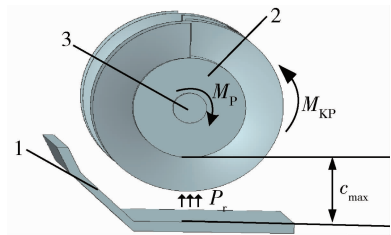
1.2 割台螺旋输送机动力学模型分析

割台螺旋输送器的机械结构和动力输入与轴流滚筒有一定的相似性,因此可借鉴轴流滚筒的模型进行动力学分析^[5]。

割台螺旋输送机对农作物主要是挤压与摩擦作用,如图1所示,为了克服摩擦力和挤压力,割台螺旋输送机有效转矩为^[5]:

$$M_T = \frac{1}{2} FD \quad (6)$$

式中: F 为谷物对割台螺旋输送机螺旋滚筒的摩擦力, N ; D 为割台螺旋输送机螺旋滚筒直径, m 。从能量守恒的角度分析割台螺旋输送机工作过程中各环节的能量变化,割台螺旋输送机工作时的转矩与发动机输入的有效转矩相等。结合式(5)和(6),可以得出割台螺旋输送机工作时的转矩主要受滚筒摩擦力影响。



1. 底板; 2. 螺旋输送机; 3. 传动轴

1. Baseboard; 2. Screw conveyor; 3. Drive shaft

M_P , 发动机传给割台螺旋输送器的动力矩, $N \cdot m$; M_{KP} , 割台螺旋输送机工作时的阻力矩, $N \cdot m$; c_{max} , 作物自然铺放厚度, m ; P_r , 台螺旋输送机对作物的正向挤压力, N 。

M_P , torque of the screw conveyor provided by engine, $N \cdot m$; M_{KP} , working torque of the screw conveyor, $N \cdot m$; c_{max} , crop natural laying thickness, m ; P_r , the forward extrusion of the screw conveyor on crop, N 。

图1 螺旋输送机受力分析

Fig. 1 Force analysis on screw conveyor

1.3 割台螺旋输送机有效转矩形成分析

当作物进入割台螺旋输送器和底板间隙后,会受到割台螺旋输送器和底板的挤压。由割台螺旋输送器的形状可看出,作物在间隙中挤压程度是不同的。割台螺旋输送机对作物的正向挤压力 P_r 为^[3]:

$$P_r = k_p \left[\frac{c_{\max}}{c} \right] \quad (7)$$

式中: c 为割台螺旋输送机与底板的间隙,m; k_p 为常数; c_{\max} 是一定体积的作物铺放在底板上的自然厚度,m,可用喂入量和作物密度表示^[5]:

$$c_{\max} = \frac{q}{\rho v \omega} \quad (8)$$

式中: q 为割台螺旋输送机喂入量,kg/s; ω 为割台螺旋输送机底板长度,m; ρ 为作物的密度,kg/m³; v 为割台螺旋输送机工作时谷物移动的平均速度,m/s。若考虑在特定的试验田,则联合收割机喂入量计算公式为:

$$q = \rho \bar{v} \Delta t \quad (9)$$

式中: ρ 为试验田农作物密度,kg/m³; \bar{v} 为联合收割机平均行车速度,m/s; Δt 为行驶时间,s。

谷物的茎、叶和籽粒与输送机之间的摩擦因素是不同的,取摩擦因素为籽粒、叶和茎综合作用的有效摩擦因数 f ,则作物对割台螺旋输送器的摩擦力 F 为:

$$F = f P_r \omega D \quad (10)$$

由式(8)、(9)和(10)得到摩擦阻力 F 为:

$$F = f k_p \frac{q}{\rho c v} D \quad (11)$$

结合式(6)和(10)得:

$$M_T = \frac{1}{2} f k_p \frac{q}{\rho c v} D^2 \quad (12)$$

式中,输送机工作时谷物移动的平均速度 v 可由式(13)计算。

$$v = \frac{k_s v_0 + k_t v_t}{2} \quad (13)$$

式中: v_0 为谷物喂入初速,m/s,主要受联合收割机行车速度 \bar{v} 影响; v_t 为割台螺旋输送机线速度,m/s; k_s, k_t 为相关系数。

1.4 螺旋输送机功率与喂入量的关系

已知输送机线速度 v_t 与角速度 ω 的关系公式:

$$v_t = r \omega \quad (14)$$

式中: r 为输送机半径,m; ω 为输送机角速度,rad/s。由式(12)、(13)和(14)得:

$$q = M_T \left(\frac{\rho c k_t r}{f k_p D^2} \omega + \frac{\rho c k_s}{f k_p D^2} v_0 \right) \quad (15)$$

由式(15)可知,其他参数(作物湿度和作物密度)一致时,割台螺旋输送机功率 M_T 与喂入量 q 为正相关,因此,可以通过检测割台螺旋输送机功率预测联合收割机的喂入量。

2 螺旋输送机功耗监测系统设计

2.1 监测系统总体设计

为配合田间试验,本研究设计了工况数据监测系统,主要监测螺旋输送机转矩、转速及收割机实时车速。检测系统总体方案见图 2,系统包括传感器单元、数据采集传输及远程监测 3 个部分。系统采用 CAN 总线通信,由总线节点完成数据采集,并将数据发送到监测终端,监测终端接收到数据后经由 2.4 GHz 无线射频模块将数据传输到远端 PC 机,完成远程监测和数据存储^[8-20]。

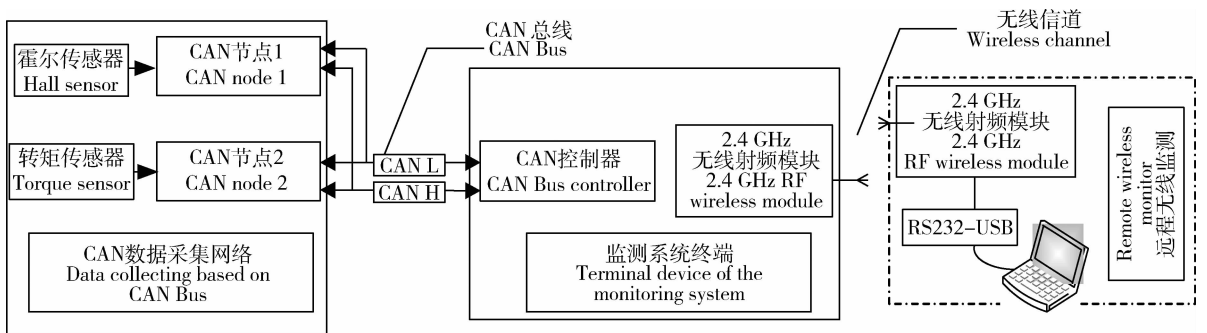


图 2 割台螺旋输送机功耗监测系统结构

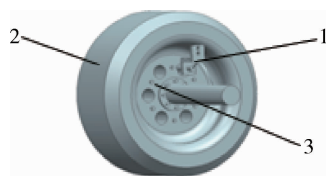
Fig. 2 Structure diagram of the monitoring system for header screw conveyor

2.2 传感器单元

在本研究中需要对联合收割机实时车速信号和

割台螺旋输送机转矩转速信号进行采集;系统采用霍尔传感器将车速信号转换为脉冲信号,CAN 节点

1 将脉冲信号数据上传到监测终端。传感器安装示意图见图 3。

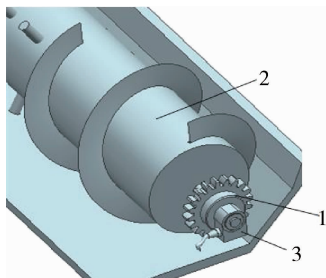


1. 霍尔传感器; 2. 收割机前轮; 3. 感应磁铁
1. Hall sensor; 2. Front wheel of harvester; 3. Magnet

图 3 霍尔传感器安装结构示意图

Fig. 3 Installation diagram of hall sensor

转矩传感器安装在割台螺旋输送机主动轴上, 可以同时完成转矩信号和转速信号的测量, 并输出实时数据到 CAN 节点 2, 由 CAN 节点 2 将数据上传到监测终端(图(4))



1. 转矩传感器; 2. 割台螺旋输送机; 3. 转矩传感器信号转换模块
1. Torque sensor; 2. Header screw conveyor; 3. Signal convertor of torque sensor

图 4 转矩传感器安装示意图

Fig. 4 Installation diagram of torque sensor

2.3 CAN 数据采集节点和无线监测终端设计

监测系统由 CAN 数据采集节点和无线监测终端 2 部分组成。CAN 数据采集节点采用基于 STM32F103 的嵌入式系统, 包括 STM32F103 最小系统、信号转换系统、电源系统等。节点 1 连接霍尔传感器; 节点 2 连接转矩传感器。

无线监测终端基于 STM32F103 的嵌入式系统, 集成 CAN、SD 卡模块、LCD 显示模块, 通过 CAN 接口与监测系统的 CAN 总线数据采集节点进行通讯; 无线终端采用 2.4 GHz 射频模块, 无线模块与终端通过 UART 接口连接, 监测终端结构如图 5 所示。

2.4 监测系统软件设计

监测系统软件设计包括监测终端软件设计和 CAN 总线数据采集节点软件设计。

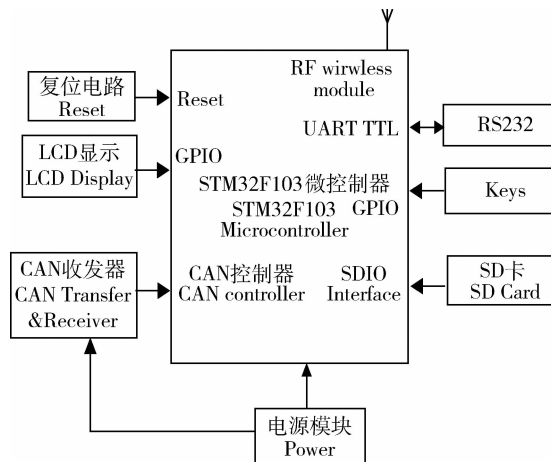


图 5 系统无线监测终端结构图

Fig. 5 Hardware structure diagram of wireless monitoring terminal

监测终端软件架构采用基于 $\mu\text{C}/\text{OS-II}$ 嵌入式操作系统的多任务程序架构。具体包括 CAN 消息接收处理任务、CAN 数据返回任务、系统数据显示任务、系统数据保存任务、系统数据周期发送任务。数据接收任务接收数据, 并按照一定格式进行数据封装。数据保存任务负责解析和处理 CAN 消息。终端软件采用节点优先级设计, 以防止不同优先级节点发生数据冲突。

系统 CAN 总线数据采集节点软件的流程包括数据采集、处理和发送。节点 1 通过定时器输入捕获通道完成霍尔传感器脉冲信号采集, 并通过 CAN 控制器发送到 CAN 总线上, 同时更新 LCD 显示; 系统节点 2 通过 UART2 接收转矩转速数据, 并通过 CAN 控制器发送到 CAN 总线上, 同时更新 LCD 显示。

3 喂入量预测方法田间试验与验证

3.1 试验条件与方法

为验证本研究喂入量预测方法, 于 2016-06-15 在北京市小汤山国家精准农业示范基地进行小麦收获试验; 工况在线监测系统安装在谷王 TB60 (4LZ-6B) 型联合收割机上。

试验前, 在试验地块中选取 5 处小麦进行标定。称重每平方米内小麦的平均质量, 作为测试面积内小麦的作物密度参量 ρ 。对于同一块麦田中, 可视作物含水率和作物密度为常量。

试验过程中, 联合收割机的有效行驶距离为 80 m, 收割机分别以不同的速度进行匀速收割试

验,并控制麦茬高度一致;监测系统无线发送数据帧频率设定为 50 Hz,波特率设定为 115 200 bit/s。采用安装有远程无线接收模块的 PC 对本监测系统运行状态进行监测并存储试验数据,结果见表 1。

3.2 数据处理及试验分析

不考虑作物含水率和密度的影响的情况下^[16-17],联合收割机的车速决定了喂入量的大小。在重点研究割台螺旋输送机功率和喂入量的关系的基础上,取多组试验数据进行处理。

每组试验喂入量计算方法:依据式(9)及车速(表 1)和小麦密度计算得到喂入量。每组试验输送机功率数据计算方法:依据式(1)得到输送机功率:

$$N = 2\pi M\omega' / 60\ 000 \quad (16)$$

式中: M 为螺旋输送机转矩, $N \cdot m$; ω' 为螺旋输送机

器转速, r/min 。依据式(16),利用表 1 试验数据计算得到螺旋输送机功率数据。

由式(15)可知,在一定条件下(作物密度与含水率一定)螺旋输送机功率与喂入量有线性关系;利用 Origin 数据处理软件,对螺旋输送机功率数据和喂入量数据进行线性拟合,拟合结果为式(17),喂入量与螺旋输送机功率拟合回归曲线见图 6,相关系数 $R^2 = 0.909\ 9$ 。

$$y = 10x - 3.75 \quad (17)$$

综上,割台螺旋输送机功率与喂入量之间具有线性关系,可以通过检测螺旋输送机功率预测喂入量大小,研发的基于 CAN 总线的联合收割机割台工况监测系统可为联合收割机喂入量监测提供有效技术手段。

表 1 采用在线监测系统得到的小麦收割试验数据

Table 1 Field test results of wheat harvest adopting the on-line monitoring system

| 螺旋输送机转速/ (r/min) Screw conveyer speed | 转矩/(N·m) Torque | 车速/(m/s) Vehicle speed | 喂入量/(kg/s) Feeding rate | 输送机功率/kW Power of screw conveyer |
|---|--------------------|---------------------------|----------------------------|--|
| 170 | 30.23 | 0.556 | 1.601 | 0.538 |
| 175 | 29.83 | 0.584 | 1.680 | 0.547 |
| 175 | 29.70 | 0.575 | 1.654 | 0.543 |
| 175 | 29.55 | 0.584 | 1.680 | 0.540 |
| 176 | 30.20 | 0.600 | 1.750 | 0.558 |
| 178 | 33.66 | 0.898 | 2.580 | 0.629 |
| 178 | 32.00 | 0.862 | 2.479 | 0.615 |
| 178 | 31.85 | 0.837 | 2.407 | 0.596 |
| 179 | 31.50 | 0.800 | 2.301 | 0.593 |
| 180 | 31.00 | 0.630 | 1.823 | 0.585 |
| 180 | 30.50 | 0.643 | 1.850 | 0.558 |
| 180 | 31.00 | 0.662 | 1.904 | 0.564 |
| 180 | 31.50 | 0.675 | 1.941 | 0.573 |
| 180 | 30.00 | 0.743 | 2.140 | 0.583 |
| 180 | 31.00 | 0.764 | 2.243 | 0.592 |
| 180 | 31.20 | 0.815 | 2.344 | 0.589 |
| 180 | 29.70 | 0.672 | 1.933 | 0.561 |
| 185 | 30.59 | 0.688 | 1.979 | 0.577 |
| 185 | 33.00 | 0.890 | 2.560 | 0.654 |

注:小麦密度为 1.219 kg/m²。

Note: The density of wheat is 1.219 kg/m².

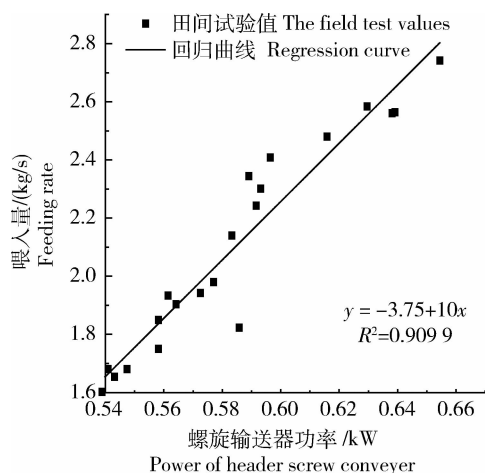


图6 喂入量与螺旋输送机功率关系回归曲线

Fig. 6 The result of data fitting for the feeding rate and power of header screw conveyer

4 结论

本研究分析了割台螺旋输送机扭矩和功率的关系,并设计研发了联合收割机工况监测系统;为验证本研究喂入量预测方法,设计了田间小麦收割试验。结合理论分析结果及试验数据处理结果得到以下结论:

1)在一定条件下,螺旋输送机实时功率与喂入量之间的关系为正向相关;

2)设计的联合收割机工况监测系统,能够实现工况数据采集、无线传输和远程数据监测与存储;

3)田间试验数据处理结果表明割台螺旋输送器和喂入量具有线性关系,相关系数为 $R^2 = 0.9099$,同时表明监测螺旋输送机功率预测喂入量方法的可行性。

参考文献 References

[1] 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 J, Li Y M, Ji B B. Study on measurement method of combine feed quantity[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Machinery*, 2006, 37(12): 76-78 (in Chinese)

[2] 唐忠,李耀明,徐立章,庞靖,李洪昌.切纵流联合收割机小麦喂入量预测的实验研究[J].农业工程学报,2012,28(5):26-31
Tang Z, Li Y M, Xu L Z, Pang J, Li H C. Experimental study on wheat feed rate of tangential-axial combine harvester[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2012, 28(5): 26-31 (in Chinese)

[3] 卢文涛,张东兴.谷物联合收获机脱粒滚筒功耗模型研究[J].农机化研究,2012(12):44-47
Lu W T, Zhang D X. Research on the power consumption model of threshing cylinder [J]. *Journal of Agricultural Mechanization Research*, 2012(12): 44-47 (in Chinese)

[4] 卢文涛,刘宝,张东兴,李晶.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 W T, Liu B, Zhang D X, Li J. Experiment and feed rate modeling for combine harvester [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2011, 42(S): 82-85 (in Chinese)

[5] 卢文涛,邓志刚,张东兴,高海涛,尤惠媛.谷物联合收割机喂入量模型研究[J].农机化研究,2013(10):129-132
Lu W T, Deng Z G, Zhang D X, Gao H T, You H Y. Combine feed rate modeling research [J]. *Journal of Agricultural Mechanization Research*, 2013(10): 129-132 (in Chinese)

[6] 季彬彬.基于模糊神经网络的联合收割机喂入量预测系统研究[D].镇江:江苏大学,2005
Ji B B. Research of predictive system for feed quantity of combine base on fuzzy neural network[D]. Zhenjiang: Jiangsu University, 2005 (in Chinese)

[7] 张成文,吴崇友,王素珍,石磊,汤庆,王刚.联合收割机脱粒滚筒负荷建模与试验[J].中国农机化学报,2013,34(3):97-111
Zhang C W, Wu C Y, Wang S Z, Shi L, Tang Q, Wang G. Experiment and threshing cylinder load modeling for combine harvester [J]. *Journal of Chinese Agricultural Mechanization*, 2013, 34(3): 97-111 (in Chinese)

[8] 梁学修,陈志,张小超,伟利国,李伟,车宇.联合收割机喂入量在线监测系统设计与试验[J].农业机械学报,2013,44(增刊2):1-6
Liang X X, Chen Z, Zhang X C, Wei L G, Li W, Che Y. Design and experiment of on-line monitoring system for feed quantity of combine harvester [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2013, 44(S2): 1-6 (in Chinese)

[9] 介战,罗四倍,周学健.基于LabVIEW的联合收割机水稻喂入量遥测实验[J].农业工程学报,2009,25(增刊2):87-91
Jie Z, Luo S B, Zhou X J. LabVIEW-based telemetering experiments of rice feed quantity for combined harvester [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2009, 25(S2): 87-91 (in Chinese)

[10] 魏新华,李耀明,陈进,宋寿鹏,顾建,左志宇,倪军.联合收割机工作过程智能监控装置的系统集成[J].农业工程学报,2009,25(增刊2):56-60
Wei X H, Li Y M, Chen J, Song S P, Gu J, Zuo Z Y, Ni J. System integration of working process intelligent monitoring and controlling devices for combine harvester [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2009, 25(S. 2): 56-60 (in Chinese)

[11] 罗四倍,介战.无线数据采集和虚拟仪器在喂入量测量中的应用[J].河南科技大学学报:自然科学版,2011,31(5):72-75
Luo S B, Jie Z. Application of wireless data acquisition and

- virtual instrument techniques to measure of combine feed quality[J]. *Journal of Henan University of Science and Technology: Natural Science*, 2011, 31(5): 72-75 (in Chinese)
- [12] An X F, Meng Z J, Wu G W, Li L W, Wei X L. Development of grain yield monitoring system based on CAN bus technology [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2015, 31(S2): 262-266
- [13] 陈度, 王书茂, 康峰, 祝青园, 李晓华. 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 D, Wang S M, Kang F, Zhu Q Y, Li X H. Mathematical model of feeding rate and processing loss for combine harvester [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2011, 27(9): 18-21 (in Chinese)
- [14] 潘静, 邵陆寿, 王轲. 水稻联合收割机喂入密度检测方法[J]. *农业工程学报*, 2010, 26(8): 113-116
Pan J, Shao L S, Wang K. Detection method on feed density for rice combine [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2010, 26(8): 113-116 (in Chinese)
- [15] 尹彦鑫, 郑永军, 成智华, 谭彧, 王书茂. 少免耕播种机牵引阻力远程监测系统[J]. *农业工程学报*, 2014, 30(6): 1-8
Yin Y X, Zheng Y J, Cheng Z H, Tan Y, Wang S M. Tractive resistance remote monitor system for no-tillage seeder [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2014, 30(6): 1-8 (in Chinese)
- [16] 介战, 苟新建, 李广志, 貌建华. 谷物喂入量台架当量测试与分析[J]. *洛阳工学院学报*, 1998, 19(2): 32-36
Jie Z, Gou X J, Li G G, Mao J H. Equivalent measuring and analysis of grain feed quantity [J]. *Journal of Luoyang Institute of Technology*, 1998, 19(2): 32-36 (in Chinese)
- [17] 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 Z, Zhou X J. 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)
- [18] 张传帅, 张天蛟, 张漫, 刘刚, 王辉, 于亮亮, 李婷. 基于 WSN 的温室环境信息远程监测系统[J]. *中国农业大学学报*, 2014, 19(5): 168-173
Zhang C S, Zhang T J, Zhang M, Liu G, Wang H, Yu L L, Li T. Remote environmental monitoring system for greenhouse based on WSN [J]. *Journal of China Agriculture University*, 2014, 19(5): 168-173 (in Chinese)
- [19] 宣传忠, 陈智, 武佩, 王云利, 刘海洋, 马彦华. 北方草原风电场土壤风蚀无线监测系统研究[J]. *中国农业大学学报*, 2013, 18(4): 196-201
Xuan C Z, Chen Z, Wu P, Wang Y L, Liu H Y, Ma Y H. Study on wind erosion wireless supervision system of grassland wind farm in Northern China [J]. *Journal of China Agricultural University*, 2013, 18(4): 196-201 (in Chinese)
- [20] 郑世宇, 陈进, 李耀明. 联合收获机多传感器信号采集与数据处理系统[J]. *农业机械学报*, 2011, 42(增刊): 107-110
Zheng S Y, Chen J, Li Y M. Multi-sensor signals acquisition and data processing system for combine harvester [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2011, 42(S): 107-110 (in Chinese)

责任编辑: 刘迎春