

联合收获机喂入量监测系统信号分析与处理

张振乾 彭程 孙意凡 刘仁杰 张漫 李寒
(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)

摘要: 为对联收获机喂入量的准确测量,降低作业环境和机器振动对测量精度的影响,对喂入量监测系统的扭矩信号、转速信号和GPS信号进行了分析与处理方法研究。根据GPS信号格式对其进行了有效信息提取、高斯投影变换和作业参数计算;根据转速脉冲信号计算转速,并对其进行插值;对扭矩信号进行了分析和双阈值滤波,对信号插值方法和降噪方法进行了对比测试。以田间采集喂入量信号为样本,对扭矩信号进行双阈值滤波、插值和降噪,对比了不同插值方法的预测效果和不同滤波方法的降噪效果。结果表明,在样本范围内,分段线性插值和自适应滤波效果优于其他方法,经信号处理后的喂入量测量平均相对误差为12.5%,在一定程度上能够满足联合收获机喂入量监测的实际需要。

关键词: 联合收获机; 喂入量; 信号处理; 插值; 降噪

中图分类号: S225.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2019)S0-0073-06

Signal Analysis and Processing of Combine Harvester Feedrate Monitoring System

ZHANG Zhenqian PENG Cheng SUN Yifan LIU Renjie ZHANG Man LI Han
(Key Laboratory of Modern Precision Agriculture System Integration Research, Ministry of Education, China Agricultural University, Beijing 100083, China)

Abstract: Aiming to achieve accurate measurement of the feedrate, reduce the influence of the working environment and the vibration interference of the combine harvester on the measurement accuracy of the feedrate, improve the practical effect of the feedrate monitoring system, and study the feedrate signal processing method, including torque signal filtering noise reduction, GPS signal analysis and operation parameters calculation and speed signal calculation and interpolation, taking the feedrate signal in the field as a sample, the threshold signal was filtered by double threshold, and the prediction effect of different interpolation methods and the noise reduction effects of different filtering methods were compared. The experimental results showed that the piecewise linear interpolation and adaptive filtering were better than other methods in the sample range. The average error of feedrate prediction after data processing was 12.5%, which can meet the actual needs of combine harvester feedrate monitoring to a certain extent.

Key words: combine harvester; feedrate; signal processing; interpolation; noise reduction

0 引言

喂入量是联合收获机的重要参数之一,直接反映其工作能力,高于或低于最佳喂入量都会增加联合收获机损失率^[1-3]。喂入量受作业速度、割幅宽度、作物品种、谷草比、作物含水率等因素影响而动态

变化,在作业时需要实时调整作业参数以保证最佳喂入量,因此对喂入量进行监测具有重要意义^[4-5]。

目前国内外对喂入量的监测主要集中在3个方面:①对螺旋推运器进行测量^[6-8],此方法具有最好的实时性,但是传感器需要专门定制,成本较高。②针对倾斜输送机进行测量^[9-14],主要测量其主动

收稿日期: 2019-04-22 修回日期: 2019-05-24
基金项目: 国家重点研发计划项目(2016YFD0700300-2016YFD0700304)
作者简介: 张振乾(1991—),男,博士生,主要从事联合收获机喂入量及谷物流量测量研究,E-mail: cauzzq@126.com
通信作者: 张漫(1975—),女,教授,博士生导师,主要从事精细农业及其支持技术研究,E-mail: cauzm@cau.edu.cn

轴扭矩或作物对倾斜输送器的压力,该方法在理想环境下精度较高,但未解决倾斜输送器角度随作业地块状况和割茬高度不断变化造成误差的问题。③对脱粒滚筒主动轴扭矩进行测量进而反映喂入量^[15-19],此方法难以应用在联合收获机上,且实时性不好。

以往研究中大多采用一元线性回归方法对喂入量进行计算,较少涉及对原始信号处理方法的研究,未消除田间振动对信号的影响。因此,本文对喂入量监测系统信号处理方法进行研究,以降低噪声影响,提高喂入量测量精度。

1 系统设计与信号处理方法

1.1 喂入量监测系统设计

喂入量监测系统总体结构设计如图 1 所示,系统由联合收获机信息感知模块、车载终端、服务器端和移动终端 4 部分构成。

信息感知模块由扭矩传感器、转速传感器和 GPS 模块组成,安装设计如图 2 所示。扭矩传感器安装在割台传动轴上,转速传感器固定在割台侧面, GPS 天线安装在驾驶室顶部。

车载终端将接收到的原始信号处理后,计算实时喂入量和其他作业信息,将信息在本地显示、存储,通过 4G 数据传输模块发送至服务器。车载终

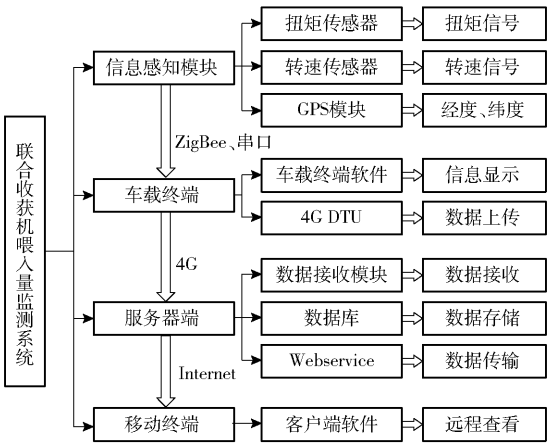


图 1 系统总体结构

Fig. 1 Overall system structure

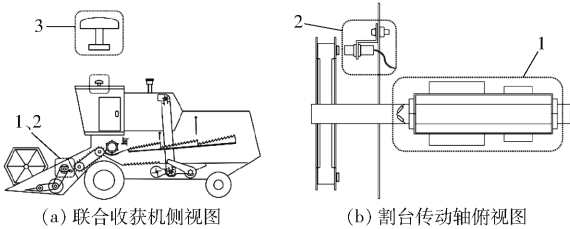


图 2 传感器安装设计

Fig. 2 Sensors installation design

1. 扭矩传感器 2. 转速传感器 3. GPS 天线

端和服务器端进行通信时,需要按照通信协议对信息进行打包,服务器端软件按照相应格式对每帧数据进行解析^[20-21]。上传数据帧格式定义如图 3 所示。

\$	ID	;	日期	;	时间	;	经度	;	纬度	;	GPS数据	;	速度	;	扭矩	;	转速	;	吸入量	CRC
----	----	---	----	---	----	---	----	---	----	---	-------	---	----	---	----	---	----	---	-----	-----

图 3 上传数据帧格式

Fig. 3 Format of upload data frame

每帧数据以“\$”为起始符,以“CRC”为校验结束,采用“;”作为分隔符,共包括 10 个字段。服务器端数据接收及存储模块接收数据后按照数据帧格式解析并存入 SQL Server 2008 数据库,数据库设计如表 1 所示。移动终端通过服务器 Webservice 读取数据库实现远程监测^[22]。

表 1 联合收获机作业信息

Tab. 1 Combine harvester information

字段名	字段类型	字段属性
ID	int	收获机 ID
DATE	date	作业日期
TIME	datetime	作业时间
GPS	char(100)	GPS 数据
LONGITUDE	numeric(18,9)	经度
LATITUDE	numeric(18,9)	纬度
SPEED	numeric(18,9)	作业速度
FADERATE	numeric(18,9)	喂入量
VOLTAGE	numeric(18,9)	扭矩
ROTATINGSPEED	numeric(18,0)	转速

1.2 信号处理方法

1.2.1 信号处理流程

喂入量计算公式为

$$F_p = kMn + b \tag{1}$$

式中 F_p ——喂入量计算值,kg/s
 M ——割台传动轴扭矩,N·m
 n ——割台传动轴转速,r/min
 k 、 b ——常数,由试验数据标定得到
计算喂入量需要获取准确的扭矩和转速。

将试验地块范围内作物视为生物特性均一,喂入量实测值计算公式为(割茬高度 25 cm,小麦密度 0.75 kg/m²)

$$F = 1.77V \tag{2}$$

式中 F ——实际喂入量,kg/s
 V ——作业速度,m/s

实际喂入量由作业速度计算得到,需要从 GPS 原始数据中计算实时速度等作业信息。

因此采用图 4 所示流程对信号进行处理。车载终端接收 GPS、扭矩和转速信号后,从 GPGGA 格式的 GPS 信号中提取需要的字段,将 WGS-84 坐标通过高斯投影转换为平面直角坐标,计算作业参数;对扭矩信号进行双阈值滤波和分段线性插值去除奇异值,通过自适应滤波进行降噪;根据转速脉冲信号计算转速,进行线性插值将频率提升至 5 Hz。

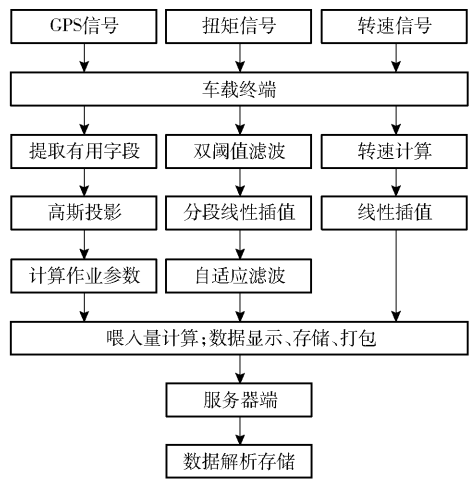


图 4 信号处理流程图
Fig. 4 Signal processing flow chart

1.2.2 GPS 信号处理

GPS 设备采用 GPGGA 格式信号输出,该格式每条信息共包括 17 个字段,其中第 2~6 个字段为需要提取的有用信息,分别为:UTC 时间(协调世界时)、纬度、纬度半球、经度、经度半球,采用图 5 流程对 GPGGA 格式数据进行有效信息提取。

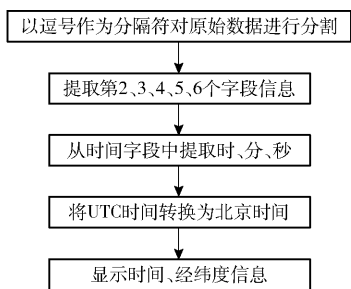


图 5 GPS 数据提取流程图
Fig. 5 GPS data extraction flow chart

提取的经纬度信息基于 WGS-84 坐标系,即世界大地坐标系,是为 GPS 全球定位系统建立的坐标系统,原点位于地球质心。在通过经纬度信息计算作业速度、行驶路程等信息时首先需要通过高斯投影将 WGS-84 坐标转换为平面直角坐标^[23]。

通过采集点的位置信息计算作业距离、速度和面积。假设联合收获机经过 n 个点 (X_1, Y_1) 、 (X_2, Y_2) 、 $\dots$ 、 (X_n, Y_n) ,则农机作业距离计算公式为

$$L = \sum_{i=2}^n \sqrt{(X_i - X_{i-1})^2 + (Y_i - Y_{i-1})^2} \quad (3)$$

根据 L 和割幅宽度 W 计算作业面积。假定联

合收获机满割幅作业,则作业面积 S 为

$$S = LW \quad (4)$$

若行进时间为 T ,则作业速度 V 为

$$V = L/T \quad (5)$$

1.2.3 转速信号处理

由于割台传动轴胶带轮侧面固定了 4 个磁钢,采用测频法获取到的数据为每秒钟接收到的脉冲数,即每秒钟经过霍尔传感器的磁钢数。转速信号与实际转速之间的换算关系为

$$R = 15n_0 \quad (6)$$

式中 R ——传动轴转速, r/min

n_0 ——车载终端接收到的转速信号,为单片机每秒钟接收到的脉冲数

由于采用测频法得到的转速信号频率为 1 Hz,因此需要将其配准至与扭矩传感器频率一致,即将转速频率经插值提升至 5 Hz。转速信号插值采用线性插值法。设需要插值的两点为 Y_1 、 Y_2 ,两点间插值 n 个点,分别是 Z_1 、 Z_2 、 $\dots$ 、 Z_n ,则

$$Z_n = Y_1 + \frac{n(Y_2 - Y_1)}{n + 1} \quad (7)$$

1.2.4 扭矩信号处理

割台传动轴扭矩信号如图 6 所示,从时域图可知信号含有较多噪声,从幅频图可知噪声主要分布在 0.5 Hz 以上频率范围且分布较为广泛。因此对扭矩信号首先进行双阈值滤波去除奇异值,对空缺点进行插值,再通过数字滤波方法进行降噪,提高喂入量测量精度。

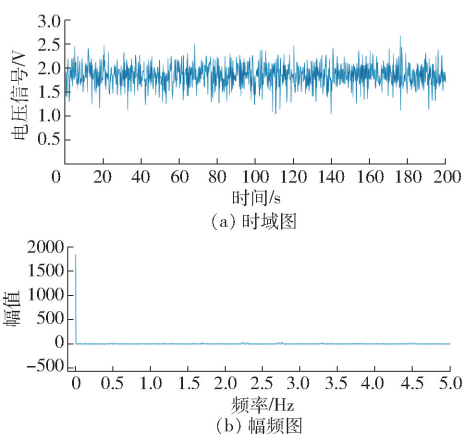


图 6 扭矩信号波形图

Fig. 6 Torque signal waveform

1.2.4.1 扭矩信号误差分析

由于田间作业环境恶劣,联合收获机系统复杂,扭矩测量中干扰因素导致测量误差,误差主要因素包括:

(1) 温度

由于联合收获机工作环境温度较高,高温会影

响应变片的灵敏系数,因此通过全桥电路消除温度带来的影响。采用 4 个相同的应变片粘贴在轴上组成电桥,得到输出信号为

$$U_0 = \left(\frac{R_1}{R_1 + R_2} - \frac{R_4}{R_3 + R_4} \right) U \quad (8)$$

式中 U_0 ——输出信号, V

U ——输出电压, V

$R_1 \sim R_4$ ——应变片 $R_1 \sim R_4$ 电阻, Ω

初始状态电桥处于平衡状态,此时 $R_1 = R_2 = R_3 = R_4$, $U_0 = 0$ 。当温度变化时,4 个应变片阻值分别产生变化量 ΔR_1 、 ΔR_2 、 ΔR_3 、 ΔR_4 ,则输出信号变化量为 ΔU_0 。则得出

$$U_0 + \Delta U_0 = \left(\frac{R_1 + \Delta R_1}{R_1 + R_2 + \Delta R_1 + \Delta R_2} - \frac{R_4 + \Delta R_4}{R_3 + R_4 + \Delta R_3 + \Delta R_4} \right) U \quad (9)$$

由于 $\Delta R \ll R$,可得

$$\Delta U_0 = \left(\frac{\Delta R_1}{R_1} - \frac{\Delta R_2}{R_2} + \frac{\Delta R_3}{R_3} - \frac{\Delta R_4}{R_4} \right) \frac{U}{4} \quad (10)$$

由于 4 个应变片为相同型号,其变化率应一致,有 $\Delta R_1 = \Delta R_2 = \Delta R_3 = \Delta R_4$,得 $\Delta U_0 = 0$,通过全桥电路消除了温度变化带来的影响。

(2) 传动轴弯矩

在联合收获机实际作业中产生弯矩的原因较多,包括负载端与动力端不同心、长期作业使传动轴产生弯曲、加装的扭矩传感器和轴自身重力作用等。弯矩带来的影响可由全桥电路互补作用予以消除^[24],将应变片以图 7 方式排列粘贴可消除扭振对信号产生的影响。

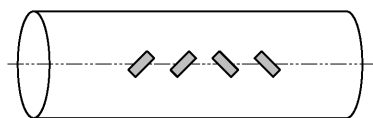


图 7 应变片粘贴方式

Fig. 7 Strain gauge attachment method

(3) 传动轴扭振

由于联合收获机系统及其工作环境较为复杂,割台传动轴的动力输入和负载扭矩不稳定导致轴角速度不断变化,轴随时间不断受到正负两个方向的应力,产生噪声信号。扭振带来的噪声可由数字滤波方法进行抑制。

(4) 发动机振动

割台未启动时,联合收获机主要振动来源于发动机,经测试发动机振动的影响较小,因此在本文中忽略其影响。

1.2.4.2 双阈值滤波与插值方法

联合收获机实际田间作业过程中传感器可能出

现奇异值,可使用双阈值滤波插值算法对信号进行预处理。超过阈值范围的数据被滤除后,需要通过插值对空缺点进行补充。在此选取 4 种插值方法进行插值,分别是:

(1) 分段线性插值:以每个空缺点前后两个点的平均值作为预测值。

(2) 双立方插值^[25]:使用 Cubic 插值函数进行插值,具体如下

$$U_i = [U_{i-1} - U_{i-2} - (U_{i-4} - U_{i-3})]t^3 + [2(U_{i-4} - U_{i-3}) - (U_{i-1} - U_{i-2})]t^2 + (U_{i-2} - U_{i-4})t + U_{i-3} \quad (11)$$

式中 U_i ——插值点

U_{i-4} 、 U_{i-3} 、 U_{i-2} 、 U_{i-1} ——奇异点前的 4 个点

t ——参数,取 $[0, 1]$

(3) 前值取代法:将奇异点前一点的值作为预测值。

(4) 平均值法:将奇异点前 4 个点的平均值作为预测值。

1.2.4.3 滤波降噪方法

由于扭矩信号中包含较多 0.5 Hz 以上频率的噪声,在此考虑采用数字滤波方法进行消除。采用 4 种经典滤波方法对其降噪效果进行对比,通过实际降噪效果对滤波器参数进行设置与调整,得到如下参数配置方案可最大程度实现预期降噪效果:

(1) 巴特沃斯低通滤波:阶数设置为 4,截止频率设置为 0.4 Hz。

(2) FIR 低通滤波:阶数设置为 8,频率点设置为 0:0.125:0.875,对于不同频率信号的预期幅度设置为 $[1 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0 \ 0]$ 。

(3) 移动平均滤波:窗口大小为 10。

(4) 自适应(LMS)滤波:LMS 算法滤波器阶数设置为 100,步长因子为 0.001,取空载信号中的 100 个离散信号点作为噪声样本。

2 试验设计及结果分析

2.1 试验设计

2.1.1 试验条件

联合收获机喂入量监测系统田间试验于 2018 年 6 月 22 日在中国农业大学涿州实验场进行。试验以中国收获机械总公司生产的新疆-2A 型自走式谷物联合收获机为平台,在田间作业状态下采集喂入量信号样本,对其中扭矩信号进行插值、滤波方法试验,旨在选出效果最好的插值、滤波方法。

2.1.2 插值方法

截取一段 1 000 个采样点长度的田间试验信

号,等距选取 100 个点作为假设的奇异点,将其人工去除。使用分段线性插值、双立方插值、前值取代法和平均值法对空缺处进行插值,计算预测值与实际值的平均相对误差、平均绝对误差和最大绝对误差,以此作为衡量插值方法效果的指标。

2.1.3 滤波方法

以 1 s 内的 5 个数据点为一个小区,小区内所有数据点电压之和作为一个信号值。从滤波后的信号中选取 20 个小区,以此 20 个值和对应的传动轴转速作为计算模型输入,喂入量实测值作为输出,进行线性回归,得到线性回归模型。另取 20 个小区作为验证数据,以验证数据为输入量,通过该模型计算喂入量,计算喂入量测量值和实际值的平均相对误差、平均绝对误差和最大绝对误差作为衡量滤波方法效果的指标。

2.2 插值预测结果

插值预测结果如表 2 所示。由表 2 可知,分段线性插值平均相对误差为 16.6%,平均绝对误差为 0.315 V,最大绝对误差为 0.452 V,在 4 种插值方法中插值效果最好,因此将其作为喂入量计算模型的插值方法。

表 2 插值方法预测结果

Tab.2 Interpolation method prediction result			
插值方法	平均相对 误差/%	平均绝对 误差/V	最大绝对 误差/V
分段线性插值	16.6	0.315	0.452
双立方插值	21.4	0.407	1.163
前值取代法	17.9	0.340	1.437
平均值法	27.6	0.524	0.902

2.3 滤波降噪方法试验结果

滤波降噪方法试验结果如表 3 所示。由表 3 可知,自适应滤波平均相对误差为 12.5%,平均绝对误差为 0.146 kg/s,最大绝对误差为 0.422 kg/s,在 4 种滤波方法中降噪效果最好,因此将其作为喂入量计算模型的滤波方法。

表 3 滤波降噪方法测试结果

Tab.3 Filtering method prediction result			
滤波方法	平均相对 误差/%	平均绝对误差/ (kg·s ⁻¹)	最大绝对误 差/(kg·s ⁻¹)
巴特沃斯	15.7	0.188	0.526
FIR	19.1	0.229	0.663
移动平均	17.6	0.211	0.435
自适应	12.5	0.146	0.422

本文喂入量信号经过处理后测量误差为 12.5%,主要原因一方面是扭矩传感器体积较大、重心较高,加剧了系统噪声;另一方面是收获机工作状况不稳定造成的干扰无法通过单一的滤波方法完全消除。在后续研究工作中考虑减小设备体积,采用多种滤波方法进行降噪,进一步提高测量精度。

3 结论

(1)对喂入量监测系统扭矩信号、转速信号和 GPS 信号进行了分析和处理方法研究。

(2)对扭矩信号不同插值方法进行了对比测试,结果表明分段线性插值效果最好,平均相对误差为 16.6%。

(3)对扭矩信号不同滤波降噪方法进行了对比试验,结果表明自适应滤波降噪效果最好,平均相对误差为 12.5%。

参 考 文 献

[1] PINGALI P L. Agricultural mechanization: adoption patterns and economic impact[J]. Handbooks in Agricultural Economics, 2007, 3(6):2779-2805.

[2] 刘同山. 农业机械化、非农就业与农民的承包地退出意愿[J]. 中国人口·资源与环境, 2016, 26(6):62-68. LIU Tongshan. Agricultural mechanization, nonfarm work and farmers' willingness to abdicate contracted land[J]. China Population, Resources and Environment, 2016, 26(6):62-68. (in Chinese)

[3] 陈度, 王书茂, 康峰, 等. 联合收获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)

[4] GROBLER W H, HOENL J, LUEHRMANN E, et al. Combine harvester: EP, EP0212185[P]. 1990.

[5] 陈金虎. 中国农业机械化发展存在问题分析与对策研究[D]. 荆州:长江大学, 2012. CHEN Jinhu. Analysis on China's agricultural mechanization development problems and research on countermeasures[D]. Jingzhou: Yangtze University, 2012. (in Chinese)

[6] VAN LOO J. An automatic feedrate control system for a combine harvester[D]. Wageningen: Agricultural University, 1977.

[7] 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)

- [8] 刘元元, 刘卉, 尹彦鑫, 等. 基于功率监测的联合收获机喂入量预测方法[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)
- [9] KRUSE, JAMES W. Microprocessor based combine ground speed controller[D]. West Lafayette: Purdue University, 1981.
- [10] EDERVEEN J. Harvest more for harvester control[J]. Diesel Progress North American, 1982, 10: 14–15.
- [11] 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)
- [12] 介战, 罗四倍, 周学建. 基于 LabVIEW 的联合收获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 Sabei, 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)
- [13] 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)
- [14] 唐忠, 李耀明, 徐立章, 等. 切纵流联合收获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)
- [15] FRIESEN O H, ZOERB G C, BIGSBY F W. For combines: controlling feedrates automatically[J]. Agricultural Engineering, 1966, 47(8): 434–435.
- [16] JOHN S, MICHAEL P M, GARY W K. Combine feedrate sensors[J]. Transactions of the ASAE, 1985, 28(Supp.): 2–5.
- [17] 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)
- [18] 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)
- [19] 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]. 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]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(Supp. 2): 1–6. (in Chinese)
- [20] 张超. 车载通讯服务器的设计与实现[D]. 长春: 吉林大学, 2015.
ZHANG Chao. The design and implementation of vehicular communication server[D]. Changchun: Jilin University, 2015. (in Chinese)
- [21] 李静林. 下一代网络通信协议分析[M]. 北京: 北京邮电大学出版社, 2010.
- [22] 张振乾, 刘仁杰, 张漫, 等. 基于移动终端的谷物产量实时监测平台设计[J]. 农业机械学报, 2017, 48(增刊): 35–39.
ZHANG Zhenqian, LIU Renjie, ZHANG Man, et al. Design and development of real-time monitoring platform for grain yield based on mobile terminal[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2017, 48(Supp.): 35–39. (in Chinese)
- [23] 沙莎. 基于 WSN 的农业信息监测平台设计与开发[D]. 北京: 中国农业大学, 2015.
SHA Sha. Design and development of an agriculture information monitoring platform based on WSN[D]. Beijing: China Agricultural University, 2015. (in Chinese)
- [24] 禹精达. 传动轴扭矩测量技术及精度分析[D]. 太原: 中北大学, 2012.
YU Jingda. The drive shaft torque measurement technology & precision analysis[D]. Taiyuan: North University of China, 2012. (in Chinese)
- [25] 陈红丽, 曹义亲. 边缘定向的双立方插值算法的研究与应用[J]. 计算机仿真, 2015, 32(4): 180–183.
CHEN Hongli, CAO Yiqin. Study and application on edge-directed CC interpolation[J]. Computer Simulation, 2015, 32(4): 180–183. (in Chinese)