doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2013.S2.001

联合收获机喂入量在线监测系统设计与试验*

梁学修[1]　陈　志[2]　张小超[1]　伟利国[1]　李　伟[1]　车　宇[1]

(1. 中国农业机械化科学研究院土壤-植物-机器系统技术国家重点实验室, 北京 100083;
2. 中国机械工业集团有限公司, 北京 100080)

摘要: 在实时监测联合收获机谷物籽粒流量及纵轴流滚筒扭矩、转速的基础上,通过谷物籽粒流量及滚筒扭矩、转速与喂入量关系的理论分析与试验验证,推导出喂入量与谷物籽粒流量和纵轴流滚筒扭矩、转速之间的关系,设计了间接监测喂入量的方法与系统。试验结果表明:联合收获机喂入量在线监测误差保持在5%以内,监测系统工作稳定、可靠,能够达到田间在线监测的效果,具有较好的实用性。

关键词: 联合收获机　喂入量　监测系统　田间试验

中图分类号: S225.3　　**文献标识码**: A　　**文章编号**: 1000-1298(2013)S2-0001-06

Design and Experiment of On-line Monitoring System for Feed Quantity of Combine Harvester

Liang Xuexiu[1]　Chen Zhi[2]　Zhang Xiaochao[1]　Wei Liguo[1]　Li Wei[1]　Che Yu[1]

(1. *State Key Laboratory of Soil—Plant—Machine System Technology, Chinese Academy of Agricultural Mechanization Sciences, Beijing* 100083, *China*　2. *China National Machinery Industry Corporation, Beijing* 100080, *China*)

Abstract: An on-line monitoring system was designed, which monitored the longitudinal-axial drum torque, speed and cereal grain flow in combine harvester. Based on theoretical analysis and experimental verification, mathematical models between the feed quantity and three factors were built up. And an indirect way to determine the feed quantity of combine harvester was found. The field experimental results showed that the proposed on-line monitoring system worked steadily and reliably, and the monitoring error was within 5%.

Key words: Combine harvester　Feed quantity　Monitoring system　Field experiment

引言

联合收获机是一种多输入和输出变量的复杂动态系统。随着收割速度、割茬高度和割幅宽度的变化,送向收获机的作物喂入量也实时地发生变化,为了使联合收获机达到最佳的工作性能和最好的收割状态,作物喂入量的监测是必不可少的性能指标。喂入量是指单位时间内联合收获机加工的作物量。在保证收割质量的前提下,设计者和使用者都追求在额定喂入量范围内,提高工作效率[1~3]。

随着联合收获机大型化、智能化的发展,实时在线地显示喂入量的大小显得尤为重要。国内外专家对喂入量的测量都有一定的研究,并取得了一些成果,如介战等运用喂入量挤压力测试原理设计喂入量传感器;邵陆寿等通过水稻冠层密度图像光谱分析实时获取喂入密度;陈进等通过分析喂入主动轴扭矩与喂入量之间的数学关系间接测量喂入量;李耀明等进行过纵轴流分离装置功耗分析;国外哥略契金院士和普斯狄金教授研究过纵轴流滚筒功耗平衡方程等,但由于影响喂入量变化的因素较多,测量

收稿日期: 2013-07-02　修回日期: 2013-07-10

*国家高技术研究发展计划(863 计划)资助项目(2013AA040401)和"十二五"国家科技支撑计划资助项目(2011BAD20B04)

作者简介: 梁学修,助理工程师,主要从事自动控制与智能检测研究,E-mail: liangxuexiu0602@126.com

通讯作者: 张小超,研究员,博士生导师,主要从事精准农业智能装备研究,E-mail: zxc@mail.caams.org.cn

误差较大,至今喂入量的测量基本还处于理论及实验室研究阶段,没能进入实用阶段[4~12]。本文通过对联合收获机谷物籽粒流量、切纵轴流脱粒分离装置扭矩及转速的分析,设计一套喂入量田间在线监测系统,本研究基于滚筒扭矩、转速推测及经谷物籽粒流量与草谷比修正推算得到喂入量的方法,有效地克服以往方法测量误差大、难以实现的缺点,另外本研究的监测装置易于安装,使喂入量的监测便于实现。通过田间试验验证此系统工作稳定。

1 联合收获机喂入量在线监测系统

1.1 喂入量推导关系

分析可知联合收获机脱粒装置所需要的总功率为[11~12]

$$P = P_0 + P_c = \frac{Tn}{9\,550} \tag{1}$$

式中 P_0——消耗在脱粒过程中的功率,kW

P_c——空转阻力所消耗的功率,kW

T——滚筒扭矩,N·m

n——滚筒转速,r/min

空转阻力由滚筒轴承的摩擦和滚筒鼓风作用引起。空转功率主要决定于滚筒的转速,即

$$P_c = A\omega + B\omega^3 \tag{2}$$

式中 ω——纵轴流滚筒角速度

A、B——常数

谷物在进入脱粒滚筒脱粒时受到滚筒板条对作物的打击,在打击时间 Δt 内,打击力 F_1 的冲量等于质量为 Δm 的作物的动量的增量,即 $F_1\Delta t = \Delta mv$,由此得

$$F_1 = \frac{\Delta mv}{\Delta t} = qv \tag{3}$$

式中 q——联合收获机喂入量,kg/s

v——滚筒圆周速度,m/s

在脱粒时,除了击打力 F_1 外,还有将作物拉过滚筒与凹板间隙时的阻力 $F_2 = fF$, 因此作用在滚筒圆周上的合力为

$$F = F_1 + F_2 = qv + fF \tag{4}$$

由此可得

$$F = \frac{qv}{1-f} \tag{5}$$

式中 f——谷物与脱粒装置特性的比例系数

将式(5)两边乘以滚筒圆周速度,则可得质量为 q 的谷物脱粒时消耗的功率为

$$P_0 = \frac{qv^2}{1-f} \tag{6}$$

将式(2)、(5)代入式(1)中可得

$$P = \frac{qv^2}{1-f} + A\omega + B\omega^3 = \frac{Tn}{9\,550} \tag{7}$$

在本研究中滚筒半径 r 为已知量,滚筒转速 n、扭矩 T 是检测量,由 $v = r\omega$,$\omega = 2\pi n$ 及式(7)变形可得

$$q = \frac{(1-f)T}{38\,200\pi^2 r^2 n} - \frac{A(1-f)}{2\pi r^2 n} - \frac{2B\pi(1-f)n}{r^2} \tag{8}$$

整理可得

$$q = \alpha\frac{T}{n} - \beta\frac{1}{n} - \lambda n \tag{9}$$

式中 α、β、λ——常数

1.2 系统硬件设计

联合收获机喂入量在线监测系统主要包括纵轴流滚筒轴的扭矩和转速测量装置、谷物籽粒流量测量装置以及位置速度信息测量装置。其硬件系统采用 Microchip 公司生产的 PIC18F2580 作为系统 CAN 节点微控制器,最高运行频率可达 40 MHz,该芯片集成 CPU、时钟、看门狗、A/D 转换、定时/计数和 ECAN 等模块。其系统硬件结构图如图 1 所示。

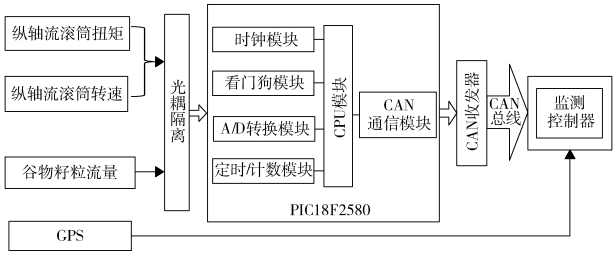

图 1 系统硬件框图

Fig. 1 Block diagram of system hardware

滚筒扭矩、转速信息,谷物籽粒流量信息和位置速度信息通过采集装置采集,然后经 CAN 总线将实时数据传到控制器,通过数据处理分析,在控制器显示屏上显示各个参数指标及实时喂入量。微控制器与车载计算机之间采用 CAN 总线进行组网连接,以提高系统通讯可靠性,简化布线[13]。

1.2.1 扭矩、转速测量装置

滚筒扭矩的测量是本文设计的重点,扭矩的测量采用的是特殊定制的应变式扭矩传感器,该扭矩传感器利用环形变压器非接触的传递能源,信号输出利用无线遥测的方法,克服了扭矩转角相位差、应变桥集流环、电池供电及无线电遥测的一系列问题,便于安装,精度高、抗干扰性强[14]。其安装方式使用两组联轴器,将带扭矩信号耦合器的传感器安装在动力源和负载之间,设计的扭矩传感器代替原有部件,从而使安装更加方便。其安装示意图如图 2 所示。

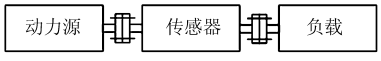

图 2 扭矩传感器安装示意图

Fig. 2 Schematic diagram of torque sensor installation

扭矩传感器设计为输出频率信号，在零负荷时为 10 kHz，输出频率与扭矩之间为线性关系。其现场安装图如图 3 所示。

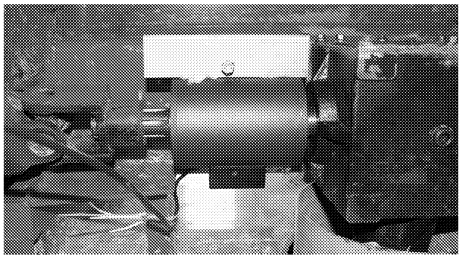

图 3　纵轴流滚筒扭矩传感器实物安装图

Fig. 3　Longitudinal axial-threshing drum installation diagram of torque sensor

设计了一种由接近开关传感器和测速齿轮获取滚筒转速的装置，如图 4 所示，当测速齿轮的齿接近传感器时即产生一个脉冲信号，通过计数器进行计数。在规定的时间周期 T（单位：s）内，测得脉冲数为 N_p，滚筒转速 n（单位：r/s）为

$$n = \frac{N_p}{iT} \tag{10}$$

式中　i——测速齿轮盘上齿的数量

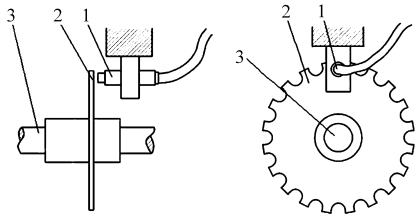

图 4　速度传感器安装示意图

Fig. 4　Schematic diagram of speed sensor installation

1. 接近开关　2. 测速齿轮　3. 旋转轴

1.2.2　谷物籽粒流量测量装置

谷物籽粒流量测量装置采用称量式测量，收获的谷物籽粒经提升螺旋输送器送到称量式谷物籽粒流量测量装置上，该装置通过三点支撑传感器，由测力传感器来计量谷物籽粒经过称量装置的实时质量[15]。该装置由直流电动机、力传感器和平胶传送器组成。其结构示意图如图 5 所示。

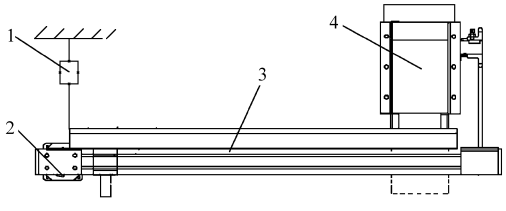

图 5　称量式谷物籽粒流量测量装置结构示意图

Fig. 5　Structural schematic of device for measuring grain mass flow

1. 测力传感器　2. 直流电动机　3. 平胶传送器　4. 出粮口

1.3　系统软件设计

联合收获机喂入量在线监测软件系统包括车辆位置信息解算、数据采集显示、数据融合分析处理、数据保存和回放等模块功能。车辆位置信息解算采用高精度 GPS 接收机，通过 GPS 提供的 GGA 与 RMC 数据，从 GGA 数据中提取经纬度、定位方式和定位卫星颗数等信息，从 RMC 数据中提取行走速度；数据采集模块完成纵轴流滚筒的扭矩和转速、谷物籽粒流量、GPS 等测量装置的信息采集；数据融合分析处理模块将所有数据进行融合分析处理，计算出喂入量与谷物籽粒流量及纵轴流滚筒扭矩、转速之间的关系，从而实时监测喂入量；数据保存和回放模块将实时采集的数据保存，用于以后的分析研究。图 6 为车载计算机监测软件操作界面。

图 6　软件操作界面

Fig. 6　Software operation interface

2　试验

2.1　室内试验

2.1.1　滚筒扭矩传感器的静态标定

试验开始前通过 JZ200 型扭矩传感器静校台进行标定，根据公式 $T = F'S$，式中 F'为垂直于扭矩传感器横截面轴的力，S 为力 F'到扭矩传感器横截面轴的距离。

对扭矩传感器进行标定，扭矩测量的精度检验，分别往静校台上加载不同质量的标准砝码，记录系统测量值，进行分析处理，得到扭矩传感器的测量误差。测量结果如表 1 所示。经过反复试验得传感器的静态误差达到 0.5 % 以内。

将扭矩传感器安装于联合收获机上，实现了滚筒扭矩的测量，动态性能好，有效地反映了滚筒扭矩的变化情况，为喂入量的推测提供了可靠的依据。

2.1.2　谷物籽粒流量试验室标定

系统采用四线电桥式力传感器测量谷物籽粒流量，其测量范围为 0 ~ 30 kg，线性度为 0.05%，输出灵

表 1 测量结果

Tab. 1 Measurement results

负载	正向/Hz		反向/Hz		误差
/N·m	加载	卸载	加载	卸载	/%
0	10.005	10.005	10.005	10.005	0
60	11.010	11.010	9.002	9.002	0
120	12.012	12.013	8.001	8.001	0.008
180	13.015	13.018	7.002	7.005	0.040
240	14.017	14.021	6.002	6.004	0.030
300	15.021	15.071	5.001	5.021	0.390

敏度为 1.0 ~ 2.0 mV/V,其测量精度为 0.2% 以内,完全符合设计要求。

将力传感器安装在试验室联合收获机试验台架进行谷物籽粒流量测量标定试验,试验中通过提升螺旋输送器均匀输送谷物籽粒到谷物流量测量装置上,试验过程中保证谷物籽粒流量的均匀,通过测其瞬时谷物流量和最终累积值来计算其精度。最终经过谷物籽粒流量测量装置的籽粒称量,与经传感器采集到的瞬时谷物籽粒流量累积计相比较,最终得到测量误差在 ±2% 以内。其试验数据如表 2 所示。

表 2 试验结果

Tab. 2 Measurement results

试验编号	测量值/kg	实际值/kg	误差/%
1	84.19	85	0.95
2	209.55	210	0.23
3	354.22	359	1.33
4	693.00	689	0.58

2.2 田间试验与结果

试验机型为福田雷沃切纵轴流联合收获机,该机型作业流程为:切割器将谷物割下,由倾斜输送槽的输送链耙将作物喂入到切流滚筒进行初脱分离,然后再经强制喂入轮将作物喂入到纵轴流滚筒进行复脱分离,茎秆从纵轴流滚筒尾部的排草口排出,籽粒、短茎秆及杂余等脱出混合物经凹板筛落入抖动板,再进入清选系统进行清选,并将清洁籽粒输送到粮箱。

试验时,收获机以固定的收获速度及一定割茬高度进行收获,对这一过程谷物籽粒流量、滚筒扭矩和转速进行监测,通过谷物籽粒流量测量装置采集到的实时谷物籽粒流量对采集到的喂入量值进行修正,运用式(9)推算出实时谷物喂入量。

2.2.1 田间标定试验

首先通过人工喂入的方法采用 5 种不同喂入量进行标定试验,将称重好的成熟水稻秧打捆后,人工均匀投入到联合收获机的内进行脱粒,通过喂入量在线监测系统测得纵轴流滚筒的扭矩与转速,并通过谷物籽粒流量测量装置采集到谷物籽粒实时流量,表 3 所示为田间试验一段时间内采集数据的平均值。

表 3 田间试验数据

Tab. 3 Field test results

喂入量	籽粒流量	纵轴流滚筒扭矩	纵轴流滚筒转速
/kg·s^{-1}	/kg·s^{-1}	/N·m	/r·min^{-1}
0	0	7.35	1 092
1.0	0.62	39.59	1 088
1.6	0.94	69.87	1 088
2.2	1.34	93.65	1 085
3.1	1.93	106.67	1 086

由表 3 可知,纵轴流滚筒克服空转阻力所需扭矩为 7.35 N·m,转速为 1 092 r/min,消耗的功率为 0.84 kW,随着喂入量的增加,纵轴滚筒轴扭矩变化较大,转速最大值与最小值之间相差 7 r/min,从整体出发也可以将其作为定值计算,取其平均值纵轴流滚筒转速为 1 087 r/min,纵轴流滚筒直径 D 为固定值 474 mm,从而得到纵轴流滚筒圆周速度 v 为 1 617.8 m/min,而纵轴流滚筒所消耗的脱粒功率和谷物籽粒流量随喂入量的增大而有明显的增加,从式(7)可以得到在滚筒圆周速度 v 和脱粒滚筒克服空转阻力所消耗的功率 P_j 一定的情况下,喂入量与谷物籽粒流量及纵轴流滚筒扭矩、转速之间的存在一定的关系,如式(9)所示,在本研究中将转速作为定值,可将公式简化为 $q = \alpha_1 T - \beta_1$,根据喂入量与谷物籽粒流量及纵轴流滚筒扭矩、转速关系。将表 3 数据代入公式中,利用最小二乘法确定其未知参数。

如图 7 所示喂入量与纵轴流滚筒扭矩之间的关系,最终得到其表达式为

$$q = 0.0286T - 0.2344 \tag{11}$$

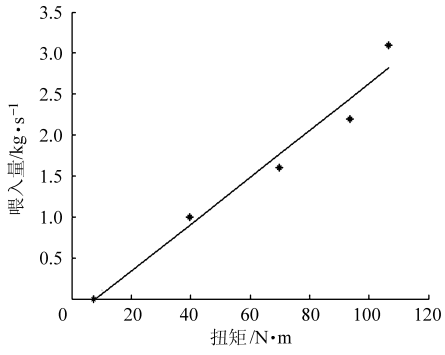

图 7 喂入量与纵轴流滚筒扭矩的关系

Fig. 7 Curves of feed quantity and torque

2.2.2 现场试验

田间试验于 2012 年 10 月份在黑龙江宝泉岭农场进行为其 17 d 的收获试验,收获的谷物为水稻,草谷比约为 1.6 左右,收获时水稻田较潮湿,联合收获机行走消耗功率较大,占总功率的 50% 左右[5],

在保证脱粒质量的前提下，联合收获机以 2.5 km/h 的收获速度，28 cm 的割茬高度下进行收获试验。水稻全部由机器插秧，水稻行距和苗间距是一定的，收割过程中保持某一割幅宽度和收获速度的情况下进行收获试验。部分的试验结果如图 8～10 所示。图 8、9 为联合收获机在田间收割时滚筒扭矩和转速随时间的变化曲线图。图 10 为经过数据分析处理在线监测到的联合收割预测喂入量和通过谷物籽粒流量与草谷比计算得到得喂入量比较曲线。

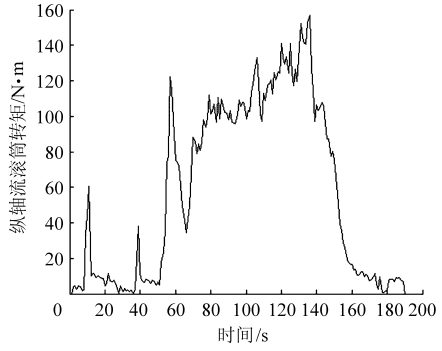

图 8　纵轴流滚筒转矩随时间变化曲线

Fig. 8　Relationship between torque and time

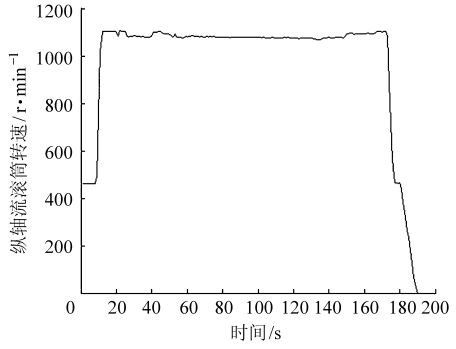

图 9　纵轴流滚筒转速随时间变化曲线

Fig. 9　Relationship between speed and time

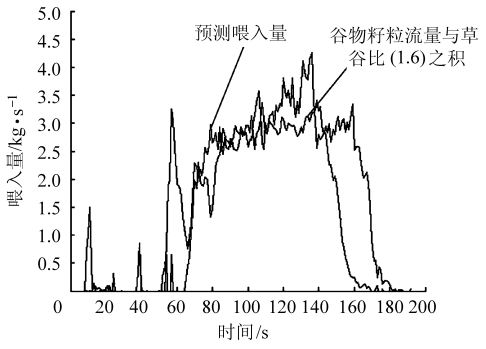

图 10　喂入量随时间变化曲线

Fig. 10　Relationship between feed quantity and time

图 8 中可以看出，收获过程中纵轴流滚筒扭矩较大且波动也较大，扭矩最大值为 156.97 N·m。工作中滚筒转速基本不变，最大转速与最小转速在 10 r/min以内（图 9）。从现场数据可知谷物籽粒流量波动性较大，最大值可达 2.35 kg/s；，收获过程中滚筒转速保持于某一转速基本不变，纵轴流滚筒平均转速为 1 085 r/min，从图中可以看出额定喂入量下喂入量的变化对滚筒转速影响不大；喂入量随时间的变化，其喂入量由式（11）及相应的数据处理得到，其波动幅度较大，此次收获过程喂入量最大值为 4.23 kg/s，平均喂入量为 2.97 kg/s，另外预测喂入量与谷物籽粒流量计算得到的喂入量变化趋势一致（图 10）。

2.2.3　结果讨论

（1）切流滚筒起初脱离及传递谷物的作用，纵轴流滚筒进行谷物复脱粒，是主要脱粒滚筒，从图 8 可以明显看到，工作时纵轴流滚筒扭矩较大。

（2）图 8、10 曲线的走势相似。从实际来看喂入量变化应提前与滚筒扭矩的变化，而从图中可以看出两者几乎是同时变化的，其原因是实际上测得的喂入量是进入脱粒滚筒内部的实时喂入量；水稻进入联合收获机后先进行脱粒，最后籽粒经提升螺旋输送器进入粮仓，如图 10 所示，两曲线间的峰值相差 6～10 s。在草谷比一定的情况下，谷物籽粒流量的大小在一定程度上显示了喂入量的大小，虽然在时间上有些滞后，但仍然可以对本试验结果起到验证、反馈和修正系数的作用。

（3）如图 8、10 曲线所示，曲线开始时有两处凸起，是由地面不平引起机械部件瞬间较大振动所致。

（4）由于田间水稻秸秆的测量难度比较大，尤其是瞬时量测量更为困难，试验采用收割之后人工收集秸秆测重，求其平均值与谷物籽粒流量整合求其喂入量来检测测量的精度，试验取得 3 组喂入量数据为 2.12、2.78 和 3.67 kg/s，通过系统监测采集的喂入量平均值分别为 2.06、2.69 和 3.8 kg/s，从而可以得到其测量误差在 5% 以内。

3　结论

（1）通过试验研究及数据显示，基于滚筒扭矩、转速推测及经谷物籽粒流量与草谷比修正推算得到喂入量的方法，具有很好的动态性能，有效地进行了喂入量的预测，有一定的实用性。

（2）田间试验对比得到联合收获机喂入量监测误差为 5% 以内，能够准确地测量喂入量的变化。

（3）通过田间重复试验，试验期间，监测准确，系统各装置运行稳定，使联合收获机驾驶员在田间收获时对机器性能有很直观的把握，提高了联合收获机的工作效率，并且有效地降低了因喂入量过大导致割台及滚筒堵塞的故障。

（4）谷物籽粒流量测量有效地对喂入量的测量进行了参数修正，使喂入量的在线监测更加可靠。

参 考 文 献

1 介战,朱永宁,李振华. 谷物随机喂入量定量测试技术研究[J]. 洛阳工学院学报,1990,11(3):43~48.
Jie Zhan,Zhu Yongning,Li Zhenhua. Study on quantitative measuring technique for random feed quantity of grain[J]. Journal of Luoyang Institute of Technology,1990,11(3):43~48. (in Chinese)

2 介战,刘红俊,侯凤云. 中国精准农业联合收割机研究现状与前景展望[J]. 农业工程学报,2005,21(2):179~182.
Jie Zhan, Liu Hongjun, Hou Fengyun. Research advances and prospects of combine on precision agriculture in China[J]. Transactions of the CSAE, 2005,21(2):179~182. (in Chinese)

3 Miu P I. Modeling and simulation of grain threshing and separation in axial threshing units, part II, application to tangential feeding[J]. Computers and Electronics in Agriculture,2008,60(1):105~109.

4 介战,苟新建,李广志,等. 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):32~35.
Jie Zhan,Gou Xinjian, Li Guangzhi,et al. Equivalent measuring and analysis of grain feed quantity[J]. Journal of Luoyang Institute of Technology,1998,19(2):32~35. (in Chinese)

5 介战,朱永宁,李建朝,等. 谷物联合收割机喂入量测试装置[J]. 粮油加工,1994(6):12~14.

6 王轲,邵陆寿. 基于镜头检测的成熟期水稻图像处理算法研究[J]. 安徽农业大学学报,2011,38(6):982~986.
Wang Ke,Shao Lushou. An algorithm study of image processing for mature rice based on shot detection[J]. Journal of Anhui Agricultural University, 2011,38(6):982~986. (in Chinese)

7 潘静,邵陆寿,王轲. 水稻联合收割机喂入密度检测方法初探[J]. 农业工程学报,2010,26(8):113~116.
Pan Jing,Shao Lushou,Wang Ke. Detection method on feed density for rice combine[J]. Transactions of the CSAE,2010,26(8):113~116. (in Chinese)

8 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)

9 李耀明,唐忠,徐立章,等. 纵轴流脱粒分离装置功耗分析与试验[J]. 农业机械学报,2011,42(6):93~97.
Li Yaoming,Tang Zhong ,Xu Lizhang,et al. Poweranalysis and experiment on longitudinal axial-threshing unit test-bed[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011,42(6):93~97. (in Chinese)

10 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)

11 卡那沃依斯基 C Z. 收获机械[M]. 曹崇文,吴春江,柯保康,译. 北京:中国农业机械出版社,1982.

12 卢里耶 A Б,格罗姆勃切夫斯基 A A. 农业机械的设计和计算[M]. 袁佳平,译. 北京:中国农业机械出版社,1983.

13 饶运涛,邹继军,王进宏,等. 现场总线 CAN 原理与应用技术[M]. 北京:北京航空航天大学出版社,2007.

14 李国林. 环形变压器供电的应变式扭矩传感器技术性能及应用[J]. 仪表技术与传感器,2000(6):44~45.

15 张小超,胡小安,张爱国,等. 基于称重法的联合收获机测产方法[J]. 农业工程学报,2010,26(3):125~129.
Zhang Xiaochao,Hu Xiaoan,Zhang Aiguo,et al. Method of measuring grain-flow of combine harvester based on weighing[J]. Transactions of the CSAE,2010,26(3):125~129. (in Chinese)