

# 纵轴流脱粒分离装置功耗分析与试验\*

李耀明 唐忠 徐立章 赵湛 李洪昌

(江苏大学现代农业装备与技术省部共建教育部重点实验室, 镇江 212013)

**【摘要】** 为准确获取纵轴流脱粒分离装置在水稻脱粒中的功耗特性,借助扭矩传感器、信号采集卡及工控机测控系统在纵轴流滚筒转速为 850 r/min、钉齿间距为 100 mm、脱粒间隙为 25 mm、草谷比为 2.6、喂入量为 7 kg/s 条件下,于室内台架上进行了水稻脱粒功耗测定试验。通过对水稻脱粒过程中功耗特性的分析,提取水稻脱粒的瞬间功耗,得知钉齿纵轴流滚筒的空载功耗为 10.93 kW、脱粒功耗为 36.94 kW、机械效率为 69.62%。采用单因素试验对影响钉齿纵轴流滚筒总功耗及籽粒损失率(夹带损失率和未脱净损失率)的齿间距、脱粒间隙、滚筒转速、草谷比及喂入量进行室内台架试验研究,分析了单个因素对钉齿纵轴流滚筒总功耗和籽粒损失率的影响情况。

**关键词:** 纵轴流滚筒 联合收获机 功耗分析 试验

**中图分类号:** S225.3 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2011)06-0093-05

## Power Analysis and Experiment on Longitudinal Axial-threshing Unit Test-bed

Li Yaoming Tang Zhong Xu Lizhang Zhao Zhan Li Hongchang

(Key Laboratory of Modern Agricultural Equipment and Technology, Ministry of Education and Jiangsu Province, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China)

### Abstract

In order to accurately obtain power characteristics of longitudinal axial-threshing unit test-bed, rotary torque sensors, signal acquisition card and industrial computer control system were used to measure the power of rice threshing with the drum rotate speed of 850 r/min, inter-tooth space of 100 mm, threshing clearance of 25 mm, straw-grain ratio of 2.6, feeding capacity of 7 kg/s. Instantaneous power was obtained by analyzing the power of rice threshing process characteristics. The results showed that the idle power of spike tooth longitudinal axial-threshing drums was 10.93 kW; the threshing power was 36.94 kW; mechanical efficiency was 69.62%. The experiment of power influencing factors, such as feeding capacity, inter-tooth space, straw-grain ratio, drum rotate speed and threshing clearance, was conducted on the longitudinal axial-threshing unit test-bed to analysis the threshing power characteristics and threshing performance.

**Key words** Longitudinal axial-threshing drum, Combine harvester, Power analysis, Experiment

### 引言

切纵流脱粒分离装置是联合收获机的重要组成部分。在不增大联合收获机宽度的情况下,增加纵轴流脱粒分离装置的长度,具有脱粒分离时间更长、分离凹板面积更大、脱粒性能更好且分离更干净等

优点。国外学者对联合收获机的切纵流脱粒分离装置进行了相关研究,一些国外大型联合收获机生产企业已研制出切流与单(双)纵轴流组合式全喂入联合收获机<sup>[1-5]</sup>。我国联合收获机上切纵流脱粒分离装置的研究还处于起步阶段,国内部分学者对切流滚筒和纵轴流滚筒进行了脱粒理论与试验研

收稿日期: 2010-07-28 修回日期: 2010-10-19

\* 国家高技术研究发展计划(863计划)资助项目(2010AA101402)和江苏省农业装备与智能化高技术研究重点实验室资助项目(BM2009703)

作者简介: 李耀明,教授,博士生导师,主要从事现代农业机械设计及理论研究, E-mail: ymli@ujs.edu.cn

究<sup>[6-8]</sup>。但纵轴流脱粒分离装置功耗在整机功耗中占有很大比例,已成为制约联合收获机上切纵流脱粒分离装置向大喂入量、高性能及高效率发展的瓶颈。

国内外学者对脱粒分离功耗进行了相关研究,卡那沃斯基等根据实验用动量定理对轴流滚筒上总工作阻力的功耗进行研究;赵匀等通过对联合收获机脱粒滚筒动力平衡的研究,对郭略契金院士提出的轴流滚筒理论公式进行了改进和完善;张认成等用变质量系统的基本原理对轴流滚筒的功耗进行研究,建立了比较完善的轴流滚筒的功耗模型;李耀明等对纵轴流脱粒分离装置的小麦脱粒试验进行了功耗试验测定<sup>[9-11]</sup>。这些研究对提高联合收获机上切纵流脱粒分离装置的脱粒性能、降低脱粒功耗具有十分重要的意义。

本文对联合收获机上的纵轴流脱粒分离滚筒的功耗特性进行分析,利用扭矩传感器、工控机及信号采集卡测控系统对水稻脱粒功耗进行记录,提取脱粒过程中的瞬时功耗,并对影响纵轴流滚筒功耗及籽粒损失率的影响因素进行室内台架试验研究。

## 1 纵轴流脱粒分离装置

### 1.1 纵轴流滚筒结构

纵轴流脱粒分离装置主要由纵轴流滚筒、栅格凹板及顶盖等组成,纵轴流滚筒采用可变式结构,滚筒轴与固定槽钢通过辐盘与轮毂连为一体,脱粒元件通过半圆头方颈螺栓安装在固定槽钢上,更换不同脱粒元件,改变脱粒元件在固定槽钢上的位置,可获得各种脱粒元件的组合和排列,纵轴流滚筒的主要结构如图1所示。

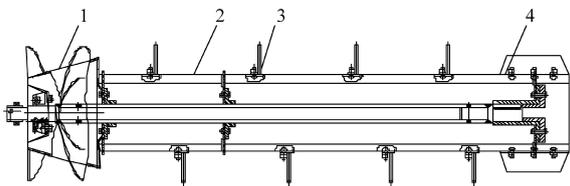


图1 纵轴流滚筒结构示意图

Fig.1 Schematic diagram of longitudinal axial-threshing drum

1. 螺旋喂入头 2. 固定槽钢 3. 钉齿脱粒元件 4. 排草板

### 1.2 纵轴流脱粒分离装置结构参数及物料特性

纵轴流滚筒直径  $D$  为 556 mm,总长  $L$  为 3 390 mm,脱粒元件高  $h$  为 100 mm,脱粒间隙  $\delta$  为 25 mm,栅格凹板包角  $\varphi$  为  $180^\circ$ ,顶盖导向板导角  $\theta$  为  $63.5^\circ$ ,螺旋喂入头为 3 头螺旋,钉齿脱粒元件在纵轴流滚筒上排列数  $N_c$  为 6 排,排列螺旋头数  $N_r$  为 3 头。

水稻品种为武 2645,籽粒平均千粒质量为 28 g,

平均株高为 1 050 mm,籽粒平均含水率为 25%,茎秆平均含水率为 68%,成熟状态。

## 2 纵轴流滚筒功耗分析

### 2.1 空载功耗

纵轴流滚筒空载功耗  $P_k$  指在空载条件下维持纵轴流滚筒特定转速时的功耗,由轴承内摩擦和空气对滚筒旋转的阻力功耗等组成。由文献[12~13]可知,纵轴流滚筒空载功耗  $P_k$  可表示为

$$P_k = A_r \omega + B_r \omega^3 \quad (1)$$

式中  $\omega$ ——纵轴流滚筒角速度

$A_r, B_r$ ——阻力系数

由式(1)得纵轴流滚筒在空载时受到的阻力矩为

$$M_k = A_r + B_r \omega^2 \quad (2)$$

### 2.2 脱粒功耗

由于在  $\Delta t$  时间内,进入脱粒空间的水稻流量等于流出脱粒空间的水稻流量,否则脱粒室内就会发生断流或堵塞。因此,在水稻连续均匀喂入时,可假设水稻是在脱粒空间内作定常连续流动。由文献[12~13]可知,纵轴流滚筒脱粒功耗可表示为

$$P_c = \xi \frac{qv^2}{1-f} \quad (3)$$

式中  $q$ ——单位时间水稻喂入量

$v$ ——纵轴流滚筒圆周速度

$f$ ——水稻通过脱粒间隙时的综合搓擦系数

$\xi$ ——修正系数

纵轴流滚筒在脱粒平衡状态(即水稻在均匀连续喂入时),根据力矩平衡条件可得

$$M_r - M_k - \xi \frac{qvR}{1-f} = J_r \frac{d\omega}{dt} \quad (4)$$

式中  $M_r$ ——动力供给纵轴流滚筒的扭矩

$J_r$ ——纵轴流滚筒转动惯量

$t$ ——脱粒时间

$R$ ——纵轴流滚筒半径

在式(4)两边同时乘以  $\omega$ ,可得

$$(M_r - M_k) \omega - \xi \frac{qv^2}{1-f} = J_r \omega \frac{d\omega}{dt} \quad (5)$$

由式(1)~(5)整理可得

$$P_r - (A_r \omega + B_r \omega^3) - \xi \frac{qv^2}{1-f} = J_r \omega \frac{d\omega}{dt} \quad (6)$$

式中  $P_r$ ——动力供给纵轴流滚筒的功耗

(1)当  $q=0$  时,即未喂入水稻之前或停止水稻喂入时,由式(6)可得

$$P_r - A_r \omega - B_r \omega^3 = J_r \omega \frac{d\omega}{dt} \quad (7)$$

动力供给纵轴流滚筒的功耗用来克服纵轴流滚

筒的空载功耗,并使纵轴流滚筒增速,随转速增高阻力矩增大, $\omega$ 增大到一定值后 $M_r - M_k = 0$ ,则 $d\omega/dt = 0$ , $\omega$ 保持稳定,即 $P_r - A_r\omega - B_r\omega^3 = 0$ 。

(2)当 $q$ 为常量时,即水稻均匀连续喂入时,则 $d\omega/dt = 0$ ,纵轴流滚筒运转平衡,由式(6)可得

$$P_r - A_r\omega - B_r\omega^3 - \xi \frac{qv^2}{1-f} = 0 \quad (8)$$

### 2.3 机械效率

当水稻均匀连续喂入时,在 $t$ 时间内纵轴流滚筒脱粒的机械效率为

$$\eta = \frac{\int_0^t P_c(t) dt}{\int_0^t P_k(t) dt + \int_0^t P_c(t) dt} \quad (9)$$

## 3 钉齿纵轴流滚筒功耗试验

为分析钉齿纵轴流滚筒的脱粒功耗情况,对钉齿间距为100 mm、脱粒间隙为25 mm、纵轴流滚筒转速为850 r/min、草谷比为2.6、喂入量为7 kg/s的水稻进行脱粒功耗室内台架试验,试验重复2次取平均值。

试验时称取84 kg水稻,均匀铺放在12 m × 1 m的输送带上,输送带以1 m/s的速度连续均匀喂入(即7 kg/s的水稻喂入量,喂入持续时间为12 s)。均匀铺放在输送带上的试验水稻经螺旋输送器和输送槽进入切流初脱分离装置进行初脱分离,然后在强制喂入轮的作用下喂入纵轴流脱粒分离装置进行复脱分离,茎秆从尾部排草口排出,脱出混合物通过栅格凹板进入接料盒内。

纵轴流滚筒由变频调速电动机独立驱动,采用可以测量扭矩、转速及功耗的HAD-CYB-803S型扭矩传感器(测量精度为±0.25% FS,频率响应时间100 μs)。钉齿纵轴流滚筒脱粒功耗曲线如图2所示。

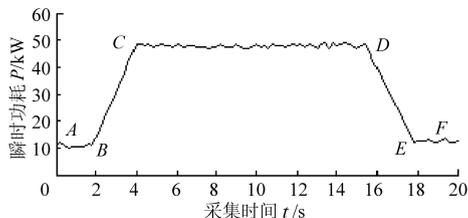


图2 纵轴流滚筒脱粒功耗曲线

Fig. 2 Power curve of longitudinal axial-threshing drum

从图2可得,纵轴流滚筒的功耗曲线轮廓呈梯形,空载功耗和脱粒功耗曲线均较稳定。

(1)AB段,水稻喂入量为零( $q = 0$ ),纵轴流滚筒转速 $n$ 稳定在850 r/min且 $d\omega/dt = 0$ ,通过扭矩传感器测得纵轴流滚筒空载功耗 $P_k = 10.93$  kW,功

耗曲线是一条水平线。

(2)BC段,水稻均匀连续喂入( $q = 7$  kg/s),纵轴流滚筒脱粒分离负荷逐渐增大,纵轴流滚筒转速 $n$ 从850 r/min下降到828 r/min,纵轴流滚筒从空载状态到满载脱粒状态的时长 $t_{BC} = 2.198$  s。

(3)CD段,水稻均匀连续喂入( $q = 7$  kg/s),纵轴流滚筒转速 $n$ 稳定在828 r/min且 $d\omega/dt = 0$ ,则 $P_r = A_r\omega + B_r\omega^3 + \xi \frac{qv^2}{1-f}$ ,动力提供的功耗与纵轴流滚筒空载功耗和脱粒功耗相平衡。通过扭矩传感器测得满载纵轴流滚筒脱粒分离总功耗为47.87 kW,由于纵轴流滚筒空载功耗 $P_k = 10.93$  kW,则纵轴流滚筒脱粒功耗 $P_c = 36.94$  kW。CD段的时长为纵轴流滚筒满载持续脱粒工作时长,即 $t_{CD} = 11.463$  s。

(4)DE段,水稻喂入量为零( $q = 0$ ),随着纵轴流滚筒负荷逐渐减小,纵轴流滚筒转速 $n$ 从828 r/min上升到850 r/min。DE段内时长为纵轴流滚筒从满载脱粒状态到空载状态的时长,即 $t_{DE} = 2.244$  s。

(5)EF段,水稻喂入量为零( $q = 0$ ),纵轴流滚筒转速 $n$ 稳定在850 r/min,回到空载状态。脱粒分离结束后纵轴流滚筒空载功耗 $P'_k = 13.02$  kW。纵轴流滚筒在脱粒结束后的空载功耗略大于水稻喂入前空载功耗,即 $P'_k > P_k$  ( $P'_k - P_k = 2.09$  kW,占总功耗的4.37%),主要原因是脱粒结束后茎秆在纵轴流滚筒轴、槽钢及脱粒元件上有缠绕现象,加大了纵轴流滚筒的质量,增加了纵轴流滚筒转动的摩擦阻力。

由此可得,钉齿纵轴流滚筒脱粒前空载功耗 $P_k = 10.93$  kW,脱粒结束后空载功耗 $P'_k = 13.02$  kW,脱粒功耗 $P_c = 36.94$  kW,钉齿纵轴流滚筒脱粒分离机械效率为69.62%。

## 4 钉齿纵轴流滚筒脱粒功耗的主要影响因素

对钉齿纵轴流滚筒脱粒功耗进行单因素试验。试验条件为:纵轴流滚筒的脱粒间隙为25 mm,钉齿间距为100 mm,滚筒转速为850 r/min,草谷比为2.6,喂入量为7 kg/s。试验某一个因素的变化对纵轴流滚筒脱粒分离总功耗及脱粒性能的影响时其他因素均不变。

### 4.1 齿间距

齿间距对纵轴流滚筒脱粒分离总功耗、夹带损失率及未脱净率的影响如图3所示。

由图3可以看出,随着纵轴流滚筒上钉齿排列的齿间距增大,脱粒分离功耗逐渐减小,夹带损失率和未脱净损失率急剧增大。当钉齿间距为80 mm时,纵轴流滚筒总功耗最高为51.87 kW,夹带损失最低为0.21%,未脱净损失最低为0.03%。当齿间

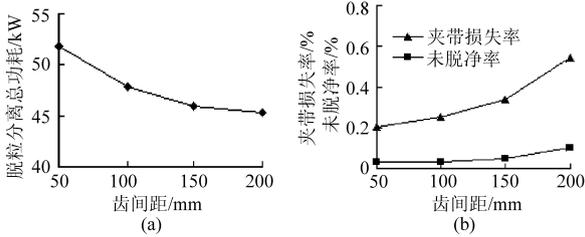


图3 脱粒分离总功耗及籽粒损失率随齿间距变化曲线

Fig.3 Variation curves of power and loss with different pitches

(a) 脱粒分离总功耗 (b) 夹带损失率和未脱净率

距增大到 200 mm 时,纵轴流滚筒总功耗最小为 45.28 kW,夹带损失率增大到 0.57%,未脱净损失增大到 0.12%。由于钉齿间距的增大,滚筒转动时钉齿对水稻的作用齿数减少,脱粒过程中受到的阻力减小,功耗相应减小。齿数的减少对水稻茎秆的脱粒分离作用也相应减弱,因此夹带损失和未脱净损失增加。

#### 4.2 脱粒间隙

脱粒间隙对纵轴流滚筒脱粒分离总功耗、夹带损失率及未脱净率的影响如图 4 所示。

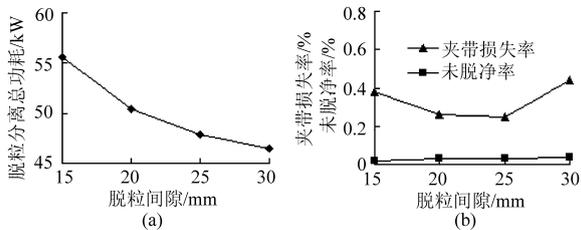


图4 脱粒分离总功耗及籽粒损失率随脱粒间隙变化曲线

Fig.4 Variation curves of power and loss with different clearances

(a) 脱粒分离总功耗 (b) 夹带损失率和未脱净率

由图 4 可以看出,脱粒间隙为 15 mm 时,纵轴流滚筒总功耗最大为 55.62 kW,籽粒夹带损失也较大,脱粒间隙越小茎秆被压缩得越密实,随着脱粒间隙增大,茎秆在脱粒空间内的茎秆物料层密度减小,脱粒分离过程中阻力减小,纵轴流滚筒功耗减小。当脱粒间隙增大到 30 mm 时,功耗最小为 46.52 kW,但籽粒脱粒分离不彻底,夹带损失增高到 0.44%。当脱粒间隙为 20 ~ 25 mm 时,纵轴流滚筒功耗在 50.46 ~ 47.87 kW,夹带损失最小为 0.25%。

#### 4.3 滚筒转速

滚筒转速对纵轴流滚筒脱粒分离总功耗、夹带损失率及未脱净率的影响如图 5 所示。

由图 5 可以看出,随着纵轴流滚筒转速的增加,纵轴流滚筒脱粒分离的总功耗增加,籽粒损失率略有减小。纵轴流滚筒转速在 850 ~ 950 r/min 时,滚筒脱粒分离功耗为 47.87 ~ 50.24 kW,夹带损失率为 0.25% ~ 0.21%,未脱净率均为 0.03%。由于纵

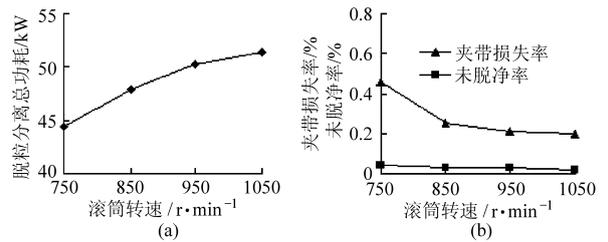


图5 脱粒分离总功耗及籽粒损失率随滚筒转速变化曲线

Fig.5 Variation curves of power and loss with different speeds

(a) 脱粒分离总功耗 (b) 夹带损失率和未脱净率

轴流滚筒转速的提高,加快了茎秆沿滚筒运动速度,减少茎秆在机内的停留时间,加强了钉齿对茎秆的打击与分离作用,从而引起脱粒分离功耗的增加,籽粒损失率的降低。

#### 4.4 草谷比

草谷比对纵轴流滚筒脱粒分离总功耗、夹带损失率及未脱净率的影响如图 6 所示。

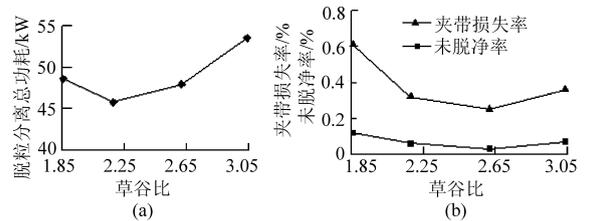


图6 脱粒分离总功耗及籽粒损失率随草谷比变化曲线

Fig.6 Variation curves of power and loss with different grain-straws

(a) 脱粒分离总功耗 (b) 夹带损失率和未脱净率

由图 6 可以看出,草谷比为 2.17 ~ 2.62 时,纵轴流滚筒的功耗为 45.76 ~ 47.88 kW,夹带损失率为 0.32% ~ 0.25%,未脱净率为 0.06% ~ 0.03%。草谷比为 1.86 ~ 2.17 时,喂入茎秆较短,籽粒所占比例较高,脱粒分离的籽粒量大。草谷比在 2.62 ~ 3.04 时,喂入茎秆较长,纵轴流滚筒在脱粒中所受的阻力较大,籽粒分离的难度高,从而增大了脱粒分离的功耗和籽粒的损失率。

#### 4.5 喂入量

喂入量对纵轴流滚筒脱粒分离总功耗、夹带损失率及未脱净率的影响如图 7 所示。

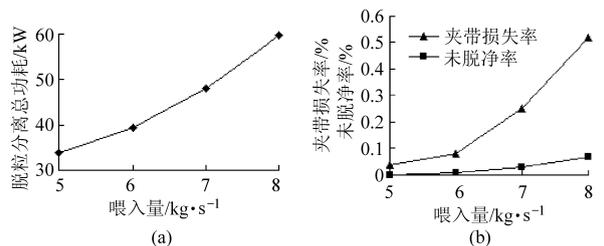


图7 脱粒分离总功耗及籽粒损失率随喂入量变化曲线

Fig.7 Variation curves of power and loss with different feeds

(a) 脱粒分离总功耗 (b) 夹带损失率和未脱净率

由图7可以看出,纵轴流滚筒的功耗、夹带损失率及未脱净率都随喂入量增加而迅速增加。由于喂入量的增加使脱粒分离的负荷增大。因此,当喂入量为5~6 kg/s时,纵轴流滚筒功耗为33.85~39.33 kW,夹带损失率为0.04%~0.08%,未脱净率接近零,此时功耗和损失率较低。当喂入量达到7 kg/s时,纵轴流滚筒功耗为47.87 kW,夹带损失率为0.25%,未脱净率达到0.03%。当喂入量增大到8 kg/s时,纵轴流滚筒功耗为59.68 kW,夹带损失率为0.52%,未脱净率为0.08%,此时功耗和籽粒损失都较大。

## 5 结论

(1)对脱粒分离过程中不同阶段的功耗模型进

行分析,并通过旋转扭矩传感器、信号采集卡及工控机测控系统准确测定纵轴流脱粒分离装置上钉齿纵轴流滚筒脱粒的瞬间功耗特性。

(2)纵轴流滚筒在齿间距为100 mm、脱粒间隙为25 mm、纵轴流滚筒转速为850 r/min、草谷比为2.6、水稻喂入量为7 kg/s条件下,测得钉齿纵轴流滚筒空载功耗为10.93 kW、脱粒功耗为36.94 kW、机械效率为69.62%。

(3)通过对影响纵轴流滚筒脱粒功耗的单因素试验,得出纵轴流滚筒脱粒分离时受齿间距、脱离间隙、滚筒转速、草谷比、喂入量等因素的影响,通过调整相关参数可以降低纵轴流滚筒脱粒分离总功耗并减少籽粒损失。

## 参 考 文 献

- 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.
- Baruah D C, Panesar B S. Energy requirement model for a combine harvester, part 1: development of component models[J]. Biosystems Engineering, 2005, 90(1): 9~25.
- Baruah D C, Panesar B S. Energy requirement model for a combine harvester, part 2: Integration of component models[J]. Biosystems Engineering, 2005, 90(2): 161~170.
- Anil J, Guruswamy T, Desai S R, et al. Effect of cylinder speed and feed rate on the performance of thresher[J]. Journal of Agricultural Sciences, 1998 (4): 1120~1123.
- Miu P I, Kutzbach H D. Mathematical model of material kinematics in an axial threshing unit [J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2007, 58(2): 93~99.
- 衣淑娟,陶桂香,毛欣. 组合式轴流脱分装置动力学仿真[J]. 农业工程学报, 2009, 25(7): 94~97.  
Yi Shujuan, Tao Guixiang, Mao Xin. Dynamic simulation of assembled axial flow threshing and separating device [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2009, 25(7): 94~97. (in Chinese)
- 徐立章,李耀明,李洪昌,等. 纵轴流脱粒分离-清选试验台的研制[J]. 农业机械学报, 2009, 40(12): 87~91.  
Xu Lizhang, Li Yaoming, Li Hongchang, et al. Development on test-bed of longitudinal axial threshing-separating-cleaning unit[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(12): 87~91. (in Chinese)
- 孟繁昌,庞凤斌,叶耘,等. 联合收获机水稻收获性能对比试验[J]. 农业机械学报, 2005, 36(5): 141~143.  
Meng Fanchang, Pang Fengbin, Ye Yun, et al. Comparative tests of harvesting performance on rice[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2005, 36(5): 141~143. (in Chinese)
- 赵匀. 试论联合收获机的脱粒滚筒的动力平衡问题[J]. 农业机械学报, 1984, 15(4): 34~45.  
Zhao Yun. Theoretical analysis of dynamic equilibrium of threshing cylinder in a harvesting combine[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 1984, 15(4): 34~45. (in Chinese)
- 张认成,桑正中. 轴流脱粒滚筒功耗模型的研究[J]. 农业工程学报, 1999, 15(4): 121~125.  
Zhang Rencheng, Sang Zhengzhong. Research on the power consumption model of axial threshing cylinder[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 1999, 15(4): 121~125. (in Chinese)
- 李耀明,乔明光,徐立章,等. 纵轴流复脱分离装置设计与试验[J]. 农业机械学报, 2009, 40(11): 50~54.  
Li Yaoming, Qiao Mingguang, Xu Lizhang, et al. Development and performance experiments on axial rethreshing with axial feeding[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(11): 50~54. (in Chinese)
- 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: 547.
- 卡那沃依斯基 C Z. 收获机械[M]. 曹崇文,吴春江,柯保康,等,译. 北京: 中国农业机械出版社, 1982: 435.