

# 切纵流联合收获机小麦夹带损失检测试验与分析

唐 忠, 李耀明<sup>\*</sup>, 赵 湛, 徐立章, 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:** 为及时获知切纵流联合收获机在田间收获时的夹带损失情况, 该文将切纵流联合收获机上的刀形齿切流滚筒、辅助喂入轮和钉齿纵轴流滚筒在实验室内建成切纵流脱粒分离试验台, 在 7 kg/s 小麦喂入量时进行脱粒分离性能试验, 测定脱出混合物中各成分的含量和纵向分布规律, 建立脱出混合物脱分系数矩阵, 求解出切纵流联合收获机上脱粒分离装置的脱分矩阵方程。利用阵列式聚偏氟乙烯 PVDF 压电薄膜传感器测量切纵流联合收获机田间收获时钉齿纵轴流滚筒下第 11 接料盒位置分离出的籽粒量, 运用脱分矩阵方程计算出夹带损失质量并与人工实测值进行比较。结果表明, 田间收获时运用 PVDF 压电薄膜传感器预测的夹带损失质量与人工实测值的误差为-4.82%~-5.87%。该研究可以对田间收获的籽粒夹带损失进行实时监控。

**关键词:** 收获机, 损失, 检测, 传感器, 脱粒分离

doi: 10.3969/j.issn.1002-6819.2012.01.003

中图分类号: S225.3

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2012)-01-0011-06

唐 忠, 李耀明, 赵 湛, 等. 切纵流联合收获机小麦夹带损失检测试验与分析[J]. 农业工程学报, 2012, 28(1): 11-16.

Tang Zhong, Li Yaoming, Zhao Zhan, et al. Test and analysis of wheat entrainment loss for tangential-longitudinal-axial combine harvester[J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(1): 11-16. (in Chinese with English abstract)

## 0 引 言

联合收获机在田间收获时, 不可避免地会产生籽粒夹带损失, 为减少籽粒夹带损失、保证收获质量以及提高生产效率, 在田间收获时驾驶员要凭经验及时对脱粒的负荷进行估计和控制<sup>[1-4]</sup>。传统测定籽粒夹带损失的方法常, 其劳动强度大、测定值不连续、测定次数有限, 不能为驾驶员提供实时的籽粒夹带损失情况。

为了能够连续、准确、实时地测定收获中籽粒损失情况, 早在 20 世纪 60 年代, 许多国家便开始研究联合收获机的籽粒损失检测传感器 (grain loss monitor), 目前, 英国、美国、俄罗斯、加拿大和德国等都已定有定型产品作为联合收获机的附件出售。国外损失检测传感器的类型主要有: 1) 单位时间籽粒损失检测传感器, 如美国 JD1075 型联合收获机籽粒损失检测传感器; 2) 单位面积籽粒损失检测传感器, 如加拿大 GM-30 型和丹麦 LH865 型籽粒损失检测传感器; 3) 籽粒损失率检测传感器, 如前苏联的 y II 3 型损失率检测传感器。国外先进的

联合收获机一般都安装有籽粒损失检测传感器, 如美国 John Deere 公司生产的 JD9660STS 型联合收获机, Case 公司生产的 Case2366IH 型联合收获机, 英国 Ferguson 公司生产的 Ferguson860 型联合收获机均已配备了籽粒损失检测传感器, 用来监视联合收获机收获中籽粒损失情况, 帮助驾驶员及时了解、掌握脱粒分离后籽粒损失的情况<sup>[5-14]</sup>。

国内对籽粒损失检测研究起步较晚, 成型的产品较少, 近年来国内部分学者已开始进行籽粒损失检测研究。介战等总结了国内外联合收获机谷物损失测试的发展和现状, 提出了将虚拟仪器技术应用于损失测试的设想<sup>[5]</sup>; 张小超等为提高籽粒损失传感器的减振与隔振性能, 设计了用于联合收获机谷物损失测量的阵列式 PVDF (polyvinylidene fluoride, 聚偏氟乙烯) 压电薄膜传感器<sup>[15]</sup>; 李耀明等通过对联合收获机脱粒滚筒排草口前部凹板下方的监测传感器采集的籽粒量信号进行研究, 发明了一种联合收获机夹带损失实时监测方法<sup>[16]</sup>, 并采用 PVDF 压电薄膜传感器对横轴流滚筒下水稻籽粒夹带损失进行了试验研究<sup>[17]</sup>; 以上对籽粒损失检测技术进行了相关研究, 但籽粒夹带损失检测技术仍不成熟, 国产联合收获机上仍未配备相关的夹带损失检测装置。

本文将切纵流联合收获机上的刀形齿切流滚筒、辅助喂入轮和钉齿纵轴流滚筒在试验室内建成切纵流脱粒分离试验台, 进行 7 kg/s 喂入量的小麦脱粒分离性能试验, 对切纵流脱粒分离装置脱出混合物分布特性和分布规律进行试验测定与分析, 通过脱分系数矩阵建立籽粒未脱分率、脱分杂余率、脱分籽粒率之间的脱分矩阵方

收稿日期: 2011-06-28 修订日期: 2011-10-26

基金项目: 江苏省科技支撑计划资助项目 (BE2011333); 江苏省研究生创新基金项目 (CXZZ11\_0549); 中国博士后科学基金 (20110490124); 江苏高校优势学科建设工程资助项目 (苏财教 (2011) 8 号)。

作者简介: 唐 忠 (1982-), 男, 四川内江人, 博士, 主要从事现代农业机械设计 & 理论研究。镇江 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, 212013。

※通信作者: 李耀明 (1959-), 男, 江苏张家港人, 博士, 教授, 博士生导师, 主要从事农业装备关键技术的基础理论及产品的开发研究。镇江 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, 212013。

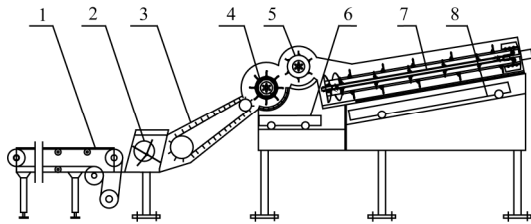
Email: ymli@ujs.edu.cn

程, 在切纵流联合收获机的纵轴流滚筒下布置阵列式 PVDF 传感器并进行田间试验检测, 利用脱出混合物的脱分矩阵方程计算出籽粒夹带损失, 并与人工检测值进行比较。通过安装籽粒夹带损失检测传感器能够帮助驾驶员及时了解、掌握联合收获机在田间作业时的籽粒夹带损失情况, 对提高收获效率和减少籽粒夹带损失具有十分重要的意义。

## 1 切纵流脱粒分离装置

### 1.1 切纵流脱粒分离试验台

将切纵流联合收获机上的刀形齿切流滚筒、辅助喂入轮和钉齿纵轴流滚筒在实验室内建成切纵流脱粒分离试验台, 切纵流脱粒分离试验台结构如图 1 所示。



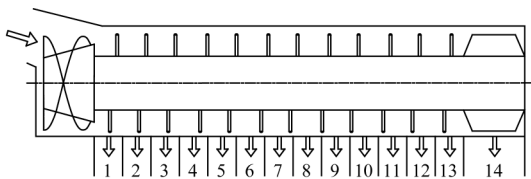
1. 输送带 2. 喂入搅拢 3. 输送槽 4. 切流滚筒 5. 辅助喂入轮  
6. 切流分离接料盒 7. 纵轴流滚筒 8. 纵轴流分离接料盒

图 1 切纵流脱粒分离试验台结构示意图

Fig.1 Schematic diagram of tangential-longitudinal-axial threshing-separating test device

切流滚筒直径为 552 mm, 滚筒长度为 1 125 mm, 凹板筛为栅格式, 凹板包角为 80°, 入口脱粒间隙为 25 mm, 出口脱粒间隙为 15 mm, 脱粒元件为刀形齿; 辅助喂入轮为闭式滚筒, 滚筒直径为 389 mm, 滚筒长度为 1 125 mm, 凹板筛为光板, 凹板包角 75°, 喂入间隙为 15 mm; 纵轴流滚筒直径为 556 mm, 滚筒长度为 3 390 mm, 凹板筛为栅格式, 凹板包角为 180°, 脱粒间隙为 20 mm, 脱粒元件采用钉齿; 试验时设定切流滚筒的转速为 850 r/min, 辅助喂入轮的转速为 1 200 r/min, 纵轴流滚筒的转速为 950 r/min, 输送带的速度为 1 m/s。切纵流脱粒分离试验台的工作原理和操作方法参见文献[18-19]。

沿纵轴流滚筒轴向均匀布置 13 组接料盒, 序号分别为 1、2、3...13, 钉齿纵轴流滚筒栅格凹板下接料盒布置如图 2 所示。



注: 箭头方向代表小麦物料进出方向; 1-13. 接料盒位置 14. 排草口

图 2 钉齿纵轴流滚筒分离接料盒布置示意图

Fig.2 Schematic diagram of separating materials boxes on spike-teeth longitudinal-axial drum

试验时, 均匀铺放在输送带上的试验小麦经喂入搅

拢和输送槽进入切流滚筒进行初脱分离, 然后在辅助喂入轮的辅助喂入作用下进入纵轴流滚筒进行复脱分离, 随后茎秆从尾部排草口排出, 脱出混合物透过栅格凹板进入到切流或纵轴流分离接料盒内。

### 1.2 试验物料

试验物料为扬麦 16, 小麦平均自然高度为 850 mm, 籽粒平均千粒质量为 34.8 g, 平均谷草比为 1: 1.32, 籽粒平均含水率为 11.28%, 茎秆平均含水率为 44.06%, 每组试验重复 3 次取平均值。

## 2 台架试验结果与分析

### 2.1 切纵流脱粒分离装置脱分试验

将刚从田间割下的试验小麦称取 91 kg 均匀铺放在 13 000 mm×1 000 mm 的输送带上, 输送带以 1 m/s 速度喂入, 即小麦以 7 kg/s 的喂入量均匀喂入。试验结束后将切流分离接料盒和纵轴流分离接料盒内的脱分物料进行人工处理, 计算出切流滚筒和纵轴流滚筒下的未脱分籽粒率、脱分杂余率及籽粒脱分率。设  $n$  表示接料盒序号, 取值范围为[1、2、3、...13],  $X_n$  表示籽粒未脱分率 (即物料被脱粒分离后, 在茎秆中含有的未被脱粒和未被分离的籽粒质量占总籽粒质量的百分比),  $Y_n$  表示脱分杂余率 (即脱粒分离出的杂余质量占茎秆总质量的百分比),  $Z_n$  表示脱分籽粒率 (即脱粒分离出的籽粒质量占总籽粒质量的百分比), 则计算得切纵流脱粒分离试验台的小麦脱分结果如表 1 所示, 纵轴流滚筒下 13 组接料盒内脱出混合物分布结果如表 2 所示。

表 1 切纵流脱粒分离试验台的脱粒分离结果  
Table 1 Threshing-separating result of tangential-longitudinal-axial threshing-separating test device

| 脱粒分离部件 | 未脱分率 $X_n$ | 脱分杂余率 $Y_n$ | 脱分籽粒率 $Z_n$ |
|--------|------------|-------------|-------------|
| 切流滚筒   | 59.78      | 4.14        | 40.22       |
| 纵轴流滚筒  | 0.28       | 10.87       | 59.5        |

从表 1 可见, 当喂入 91 kg 的小麦物料时, 其中籽粒总质量为 39.22 kg, 茎秆的总质量为 51.78 kg; 脱粒分离出的茎秆杂余质量占总茎秆质量的 15.01%, 即为 7.77 kg; 被脱粒分离出的总籽粒质量占喂入籽粒总质量的 99.72%; 籽粒夹带损失率为 0.28%, 即为 0.11 kg。刀形齿切流滚筒的初脱分率为 40.22%, 未脱分率为 59.78%; 钉齿纵轴流滚筒的复脱分率为 59.5%, 籽粒夹带损失率为 0.28%。

从表 2 可见, 当  $11 \leq n \leq 13$  时, 未脱分籽粒率为  $0.28\% \leq X_n \leq 0.69\%$ , 籽粒夹带损失率较小; 当  $10 \leq n \leq 13$  时, 脱分杂余率  $0.50\% \leq Y_n \leq 0.57\%$ , 脱分杂余含量相差较小且数值稳定; 当  $10 \leq n \leq 13$  时, 脱分籽粒率  $0.15\% \leq Z_n \leq 0.61\%$ , 脱分籽粒量较小; 当  $10 \leq n \leq 13$  时, 未脱分籽粒率与脱分籽粒率比值为  $1.77 \leq (X_n/Z_n) \leq 1.87$ 。

表 2 纵轴流脱粒分离滚筒脱出混合物的分布结果

Table 2 Distribution of mixture along longitudinal-axial threshing-separating drum

| 接料盒<br>序号 | 未脱分率<br>$X_n/\%$ | 脱分杂余率<br>$Y_n/\%$ | 脱分籽粒率<br>$Z_n/\%$ | 比值<br>$X_n/Z_n$ |
|-----------|------------------|-------------------|-------------------|-----------------|
| 1         | 53.37            | 0.97              | 6.41              | 8.33            |
| 2         | 41.27            | 1.06              | 12.1              | 3.41            |
| 3         | 25.22            | 1.52              | 16.05             | 1.57            |
| 4         | 18.64            | 1.13              | 6.58              | 2.83            |
| 5         | 11.1             | 1.03              | 7.54              | 1.47            |
| 6         | 7.17             | 0.91              | 3.93              | 1.82            |
| 7         | 4.38             | 0.80              | 2.79              | 1.57            |
| 8         | 2.85             | 0.71              | 1.53              | 1.86            |
| 9         | 1.69             | 0.63              | 1.16              | 1.46            |
| 10        | 1.08             | 0.57              | 0.61              | 1.77            |
| 11        | 0.69             | 0.53              | 0.39              | 1.77            |
| 12        | 0.43             | 0.51              | 0.26              | 1.65            |
| 13        | 0.28             | 0.50              | 0.15              | 1.87            |

2.2 脱出混合物脱分向量

建立向量 $[X_n, Y_n, Z_n]^T$ ，利用表 2 脱出混合物的含量写出切纵流脱粒分离装置的脱分向量为

$$[X_1, Y_1, Z_1]^T = [53.37, 0.97, 6.41]^T,$$

$$[X_2, Y_2, Z_2]^T = [41.27, 1.06, 12.1]^T,$$

$$[X_3, Y_3, Z_3]^T = [25.22, 1.52, 16.05]^T,$$

⋮

$$[X_{13}, Y_{13}, Z_{13}]^T = [0.28, 0.50, 0.15]^T.$$

由于脱粒滚筒对小麦进行脱粒分离时，籽粒的脱粒分离性能受茎秆和未脱分籽粒的影响，为找出脱出混合物沿滚筒轴向分布和成分之间的关系，假设脱出混合物中第  $n+1$  组向量与第  $n$  组向量存在以下关系

$$\begin{bmatrix} X_{n+1} \\ Y_{n+1} \\ Z_{n+1} \end{bmatrix} = A_n \begin{bmatrix} X_n \\ Y_n \\ Z_n \end{bmatrix} \quad (1)$$

其中， $A_n$  表示脱分系数矩阵；假设构造一个系数矩阵

$$A_n = \begin{bmatrix} 0 & 1 & a_n \\ b_n & 0 & 0.01 \\ c_n & 1 & 0 \end{bmatrix} \text{ 满足式 (1) 的矩阵脱分方程组，则式}$$

(1) 可表示为

$$\begin{bmatrix} X_{n+1} \\ Y_{n+1} \\ Z_{n+1} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & a_n \\ b_n & 0 & 0.01 \\ c_n & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_n \\ Y_n \\ Z_n \end{bmatrix} \quad (2)$$

其中， $n$  的取值范围为 $[1, 2, 3, \dots, 12]$ ；式中， $a_n$  为未脱分系数， $b_n$  为杂率分离系数， $c_n$  为籽粒分离系数。

利用式 (2) 可以展开成

$$\begin{cases} X_{n+1} = Y_n + a_n Z_n \\ Y_{n+1} = b_n X_n + 0.01 Z_n \\ Z_{n+1} = c_n X_n + Y_n \end{cases} \quad (3)$$

解得

$$\begin{cases} a_n = \frac{X_{n+1} - Y_n}{Z_n} \\ b_n = \frac{Y_{n+1} - 0.01 Z_n}{X_n} \\ c_n = \frac{Z_{n+1} - Y_n}{X_n} \end{cases} \quad (4)$$

则未脱分籽粒率与脱粒分离出的总籽粒率存在如下关系

$$X_n = \sum_{m=n+1}^{13} Z_m = \sum_{m=n+1}^{13} (c_m X_m + Y_m) = \sum_{m=n+1}^{13} c_m X_m + \sum_{m=n+1}^{13} Y_m \quad (5)$$

其中， $m$  为变量，取值范围为 $[1, 2, 3, \dots, 13]$ 。

2.3 小麦脱分系数矩阵

利用表 2 切纵流脱粒分离装置的脱出混合物试验结果，通过式 (4) 计算出刀形齿切流滚筒与钉齿纵轴流滚筒组合的脱粒分离装置脱分系数矩阵  $A_n$  的各参数  $a_n$ 、 $b_n$  及  $c_n$  的值，计算结果如表 3 所示。

表 3 刀形齿与钉齿切纵流滚筒组合脱分系数矩阵  $A_n$  值

Table 3 Matrix  $A_n$  of threshing-separating coefficients for tangential-longitudinal-axial threshing-separating device with knife-nail-tine

| $n$ 序号 | $a_n$ 计算值 | $b_n$ 计算值 | $c_n$ 计算值 |
|--------|-----------|-----------|-----------|
| 1      | 6.2871    | 0.0187    | 0.2085    |
| 2      | 1.9967    | 0.0339    | 0.3632    |
| 3      | 1.0667    | 0.0384    | 0.2006    |
| 4      | 1.5152    | 0.0517    | 0.3439    |
| 5      | 0.8143    | 0.0752    | 0.2613    |
| 6      | 0.8830    | 0.1061    | 0.2622    |
| 7      | 0.7348    | 0.1557    | 0.1667    |
| 8      | 0.6405    | 0.2157    | 0.1579    |
| 9      | 0.3879    | 0.3304    | -0.0118   |
| 10     | 0.1967    | 0.4851    | -0.1667   |
| 11     | -0.2564   | 0.7335    | -0.3913   |
| 12     | -0.8846   | 1.1567    | -0.8372   |

注： $a_n$  表示未脱分系数； $b_n$  表示杂率分离系数； $c_n$  表示籽粒分离系数

由于未脱分籽粒率  $X_{n+1}$  满足  $0 \leq X_{n+1} \leq 1$ ，由式 (3) 得  $0 \leq (Y_n + a_n Z_n) \leq 1$ ，则可变换为  $-(Y_n/Z_n) \leq a_n \leq [(1 - Y_n)/Z_n]$ ，由表 3 计算得  $-0.8846 \leq a_n \leq 6.2871$ 。

由表 3 可知脱分杂余率  $Y_{n+1}$  存在  $Y_{n+1} \geq 0.01 Z_n$ ，则由式 (4) 可得  $b_n = [(Y_{n+1} - 0.01 Z_n)/X_n] \geq 0$ ，且  $0.0187 \leq b_n \leq 1.1567$ ，由于  $\Delta(Y_{n+1} - 0.01 Z_n) < \Delta X_n$  (式中  $\Delta$  表示变化量符号)，则  $b_n$  值随着  $n$  的增加而逐渐增大。

由于当  $9 \leq n \leq 12$  时，存在  $Z_{n+1} \leq Y_n$ ，由于  $X_n \geq 0$ ，则  $c_n = [(Z_{n+1} - Y_n)/X_n] \leq 0$ ，由表 3 计算得  $-0.8372 \leq c_n \leq -0.0118$ 。

由表 2 和表 3 可得，当未脱分系数  $a_n < 0$  时，钉齿纵轴流滚筒下的籽粒夹带损失为  $0.28\% \leq X_n \leq 0.69\%$ ；杂率分离系数  $b_n$  随着  $n$  的增大而增大，当  $b_n \geq 0.3304$  时，钉齿纵轴流滚筒下的杂余含量为  $0.50\% \leq Y_n \leq 0.57\%$ ，脱分杂余含量相差较小且数值稳定；当籽粒分离系数  $c_n \leq -0.1667$  时，钉齿纵轴流滚筒下的籽粒分离率为  $0.15\% \leq Z_n \leq 0.61\%$ 。

由表 3 可得刀形齿切流滚筒与钉齿纵轴流滚筒组合的脱粒分离装置脱分系数矩阵为

$$A_1 = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 6.2871 \\ 0.0187 & 0 & 0.01 \\ 0.2085 & 1 & 0 \end{bmatrix}; A_2 = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 1.9967 \\ 0.0339 & 0 & 0.01 \\ 0.3632 & 1 & 0 \end{bmatrix};$$

$$A_3 = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 1.0667 \\ 0.0384 & 0 & 0.01 \\ 0.2006 & 1 & 0 \end{bmatrix}$$

$$A_{12} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & -0.8846 \\ 1.1567 & 0 & 0.01 \\ -0.8372 & 1 & 0 \end{bmatrix}$$

将表 3 脱分系数矩阵  $A_n$  的系数代入式 (2)，通过迭代计算可验证表 2 的结果，由此可得存在一个脱分矩阵方程 (2) 满足刀形齿切流滚筒和钉齿纵轴流滚筒组合的切纵流脱粒分离装置的纵轴流滚筒下脱出混合物分布规律。因此，式 (1) 和式 (2) 的假设完全成立。试验结果表明，在不同草谷比、喂入量 ( $\leq 7 \text{ kg/s}$ ) 和茎秆含水率的小麦时，脱分后籽粒夹带损失率和纵轴流滚筒下脱出混合物分布规律略有不同，脱分矩阵系数将有相应变化，但对脱分矩阵方程 (2) 的通用性没有影响。

### 2.4 小麦脱分矩阵方程

利用表 3 所示的切纵流脱粒分离装置脱分系数矩阵  $A_n$  中的未脱分系数  $a_n$  与接料盒序号数  $n$  之间的关系采用多项式对未脱分系数  $a_n$  进行曲线拟合，拟合出的曲线相关系数为 0.9926，曲线方程为

$$a_n = \left\{ \begin{array}{l} \frac{1}{1000} (0.275n^5 - 11.988n^4 + 207.326n^3) \\ -1812.375n^2 + 8389.109n - 19493.48 \end{array} \right\} \quad (6)$$

未脱分系数  $a_n$  与接料盒序号数  $n$  之间的拟合曲线如图 3 所示。

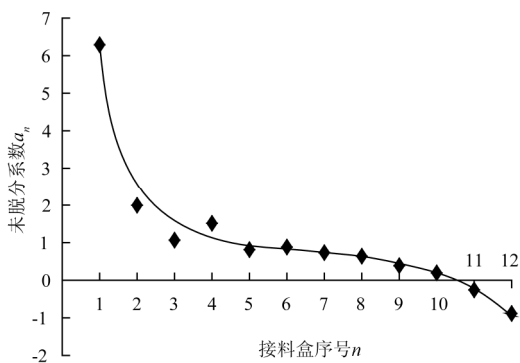


图 3 未脱分系数  $a_n$  曲线拟合

Fig.3 Curve fitting of no threshing-separating coefficient  $a_n$

利用表 3 所示的切纵流脱粒分离装置脱分系数矩阵  $A_n$  中的脱分杂余系数  $b_n$  与接料盒序号数  $n$  之间的关系采用指数函数对脱分杂余系数  $b_n$  进行拟合，相关系数为 0.9987，拟合曲线为

$$b_n = \frac{0.7835e^{0.41403n}}{100} \quad (7)$$

脱分杂余系数  $b_n$  与接料盒序号数  $n$  之间的拟合曲线如图 4 所示。

利用表 3 所示的切纵流脱粒分离装置脱分系数矩阵  $A_n$  中的脱分籽粒系数  $c_n$  与接料盒序号数  $n$  之间的关系采用指数对脱分籽粒系数  $c_n$  进行曲线拟合得知，相关系数为 0.9810，拟合曲线为

$$c_n = \frac{1}{100} (27.2957e^{0.078621n} - 2.3445e^{0.347844n}) \quad (8)$$

脱分籽粒系数  $c_n$  与接料盒序号数  $n$  之间的拟合曲线如图 5 所示。

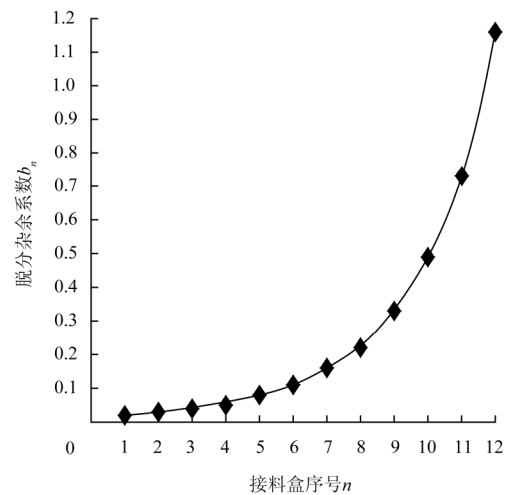


图 4 脱分杂余系数  $b_n$  曲线拟合

Fig.4 Curve fitting of threshing-separating miscellany coefficient  $b_n$

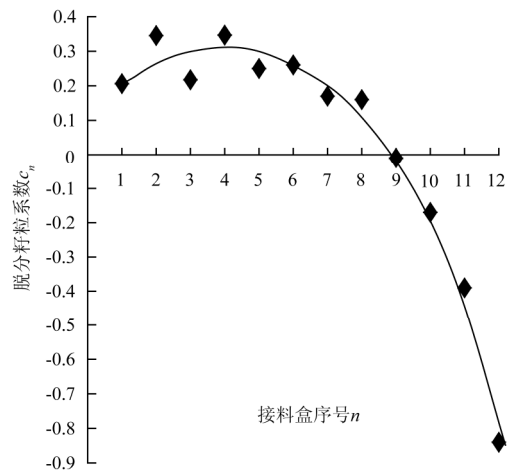


图 5 脱分籽粒系数  $c_n$  曲线拟合

Fig.5 Curve fitting of threshing-separating grain coefficient  $c_n$

由式 (6)、(7)、(8) 可得脱分系数矩阵  $A_n$  的函数表达式。

### 3 田间籽粒夹带损失检测试验

收获田间小麦品种为扬麦 16，籽粒平均产量为  $0.62997 \text{ kg/m}^2$ ，收获时平均留茬高 100 mm，割下后小麦平均草谷比为 1.32，切纵流联合收获机割幅为 4 750 mm，前进速度为 1.02 m/s，则平均喂入量为 7 kg/s。

由表 1 可见，在钉齿纵轴流滚筒下的第 10、11、12 和 13 接料盒内的脱分杂余率较小且数值相对稳定，脱出物中茎秆杂余质量占收获茎秆总质量的 0.5%~0.57%，未脱分籽粒率与脱分籽粒率比值  $X_n/Z_n$  为 1.77~1.87，在第 11 接料盒位置沿纵轴流滚筒径向安装一排 PVDF 压电薄膜传感器<sup>[8,20]</sup>，用于检测脱出物中籽粒的含量。试验时由机手驾驶切纵流联合收获机在 10 m 长的测试区内，按照规定行驶速度、割幅和留茬进行收获；用油布人工接收从排草口中排出所有物料，再去杂得出所含的夹带损

变量; 同时在试验时开启 PVDF 检测传感器, 记录出撞击传感器的籽粒数量, 将检测到的籽粒数量转换成籽粒质量和脱分籽粒率  $Z_n$ , 并用式 (2) 计算出夹带损失的籽粒质量, 结果如表 4 所示。

由表 4 可得, 切纵流联合收获机在田间收获时, 将 PVDF 传感器检测到的籽粒数量运用脱分矩阵方程计算出的夹带损失量与人工实测值的误差为  $-4.82\% \sim -5.87\%$ , 说明将阵列式 PVDF 传感器检测到的籽粒数量应用脱分矩阵方程计算出的籽粒夹带损失与实际值较接近。因此, 切纵流联合收割机在田间收获时, 可以应用 PVDF 籽粒夹带损失传感器对收获中的籽粒夹带损失进行实时检测。

表 4 纵轴流联合收获机夹带损失计算值和测量值的比较结果  
Table 4 Comparison of calculated entrainment loss and measured values of tangential-axial combine harvester

| 序号 | PVDF 检测值/粒 | 计算得籽粒夹带损失/g | 人工检测籽粒夹带损失/g | 误差值/% |
|----|------------|-------------|--------------|-------|
| 1  | 5798       | 77.61       | 81.75        | -5.06 |
| 2  | 5807       | 78.05       | 82.47        | -5.36 |
| 3  | 5862       | 80.60       | 85.63        | -5.87 |
| 4  | 5829       | 79.08       | 83.08        | -4.82 |

## 4 结 论

1) 在小麦喂入量为  $7 \text{ kg/s}$  时, 切纵流联合收获机上的刀形齿切流滚筒的初脱分籽粒率为  $40.22\%$ , 未脱分率为  $59.78\%$ ; 钉齿纵轴流滚筒的复脱分籽粒率为  $59.5\%$ , 籽粒夹带损失率为  $0.28\%$ 。当未脱分系数  $a_n < 0$  时, 籽粒夹带损失率为  $0.28\% \leq X_n \leq 0.69\%$ ; 当杂率分离系数  $b_n \geq 0.3304$  时, 钉齿纵轴流滚筒下的杂余含量为  $0.50\% \leq Y_n \leq 0.57\%$ ; 当籽粒分离系数  $c_n \leq -0.1667$  时, 钉齿纵轴流滚筒下的籽粒分离率为  $0.15\% \leq Z_n \leq 0.61\%$ 。

2) 存在一个脱分矩阵方程满足刀形齿切流滚筒和钉齿纵轴流滚筒组合时的纵轴流脱粒分离装置脱出混合物分布规律; 将聚偏氟乙烯 PVDF 传感器检测到的切纵流联合收获机田间小麦收获时籽粒夹带损失数量, 运用脱分矩阵方程计算出的夹带损失量与人工实测值的误差为  $-4.82\% \sim -5.87\%$ , 可以对田间收获的籽粒夹带损失进行实时监控。

### [参 考 文 献]

[1] Petre I Miu, Heinz-Dieter Kutzbach. 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.

[2] 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.

[3] 孟繁昌, 庞风斌, 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 Feng bin, 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 with English abstract)

[4] 牛盾. 我国农业机械化的新形势和水稻生产机械化问题[J]. 农业机械学报, 2000, 16(4): 7-10.

Niu Dun. New situation of agricultural mechanization and the development of paddy production mechanization in China[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2000, 16(4): 7-10. (in Chinese with English abstract)

[5] 李俊峰, 介战. 联合收获机谷物损失测试研究探讨[J]. 农机化研究, 2007, 29(12): 248-250.

Li Junfeng, Jie Zhan. Analyses of combine harvester grain loss measurement[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2007, 29(12): 248-250. (in Chinese with English abstract)

[6] Andrzej O. Probe with PVDF sensor for energy measurements of optical radiation[J]. Measurement Science Review, 2003(3): 111-114.

[7] Maertens K, Ramon H, Baerdemaeker J D. An on-the-go monitoring algorithm for separation processes in combine harvesters[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2004, 43(3): 197-207.

[8] Li Yaoming, Chen Yi. Monitoring method and device of attachment loss in combine harvester[J]. International Agricultural Engineering Journal, 2011, 20(2): 14-19.

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

Jie Zhan. Prospect of test method of grain random loss rate in China[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2009(7): 5-9. (in Chinese with English abstract)

[10] 介战, 刘红俊, 侯风云. 中国精准农业联合收获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 Chinese Society of Agricultural Engineering, 2005, 21(2): 179-182. (in Chinese with English abstract)

[11] Glibert J, Strubbe I. Grain loss monitors for harvesting machines [P]. US: 5046362, 1991-09-10.

[12] Bernhardt G. Apparatus and Method for Determining Grain loss in Combine Harvester [P]. US: 6869355, 2005-03-22.

[13] Guy H J. Offset grain loss sensor for combine harvesters [P]. US: 4540003, 1985-09-10.

[14] Kotyk W M, Kirk T G, Wilson R J, et al. Unthreshed head grain loss monitor [P]. US: 4825146, 1989-04-25.

[15] 周利明, 张小超, 刘阳春, 等. 联合收获机谷物损失测量 PVDF 阵列传感器设计与试验[J]. 农业机械学报, 2010, 41(6): 167-171.

Zhou Liming, Zhang Xiaochao, Liu Yangchun, et al. Design of PVDF sensor array for grain loss measuring[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(6): 167-171. (in Chinese with English abstract)

[16] 李耀明, 徐立章, 徐娇娇. 联合收获机夹带损失实时监控方法 [P]. 中国: 200910181537.1, 2009-12-30.

[17] Zhao Zhan, Li Yaoming, Chen Jin, et al. Grain separation loss monitoring system in combine harvester[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 2011(2506): 1-6.

- [18] 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 with English abstract)
- [19] 唐忠, 李耀明, 徐立章, 等. 不同脱粒元件对切流与纵轴
- [20] 流水稻脱粒分离性能的影响[J]. 农业工程学报, 2011, 27(3): 93-97.  
Tang Zhong, Li Yaoming, Xu Lizhang, et al. Effects of different threshing components on grain threshing and separating by tangential-axial test device[J]. Transactions of the CSAE, 2011, 27(3): 93-97. (in Chinese with English abstract)
- [21] Shirinov A V, Schomburg W K. Pressure sensor from a PVDF film[J]. Sensors and Actuators, 2008, 142(1): 48-55.

## Test and analysis of wheat entrainment loss for tangential-longitudinal-axial combine harvester

Tang Zhong, Li Yaoming<sup>\*</sup>, Zhao Zhan, Xu Lizhang, 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 timely acquire the situation of entrainment losses of the tangential-longitudinal-axial combine harvester when it harvest in a field, an tangential-longitudinal-axial threshing-separating test bed was built in the laboratory, which was made up of a knife-type teeth tangential-axial drum, assistant feeding wheel and spike teeth longitudinal-axial drum of the tangential-longitudinal-axial combine harvester. The threshing-separating performance test was conducted with the test bed at the wheat feeding rate of 7 kg/s, the components and the distribution regularity of the threshed mixture were measured, the threshing-separating coefficient matrix was established and then threshing-separating matrix equation of threshing-separating device on the tangential-longitudinal-axial combine harvester was solved. The array PVDF (Polyvinylidene Fluoride) piezoelectric-film sensor was applied to measure the grain number of the 11<sup>th</sup> materials boxes location under spike-tooth longitudinal-axial drum of the tangential-longitudinal-axial combine harvester, the measured results were compared with the entrainment losses which was calculated by the threshing -separating matrix equation. The result showed that the their difference between the measured entrainment losses in the field and calculated values was -4.82%- -5.87%.It has real-time monitor for grain entrainment losses in the field.

**Key words:** harvesters, losses, testing, sensors, threshing-separating