

## 联合收割机喂入量与收获过程损失模型

陈度<sup>1</sup>, 王书茂<sup>1\*</sup>, 康峰<sup>2</sup>, 祝青园<sup>3</sup>, 李晓华<sup>4</sup>

(1. 中国农业大学工学院, 北京 100083; 2. 北京林业大学工学院, 北京 100083; 3. 厦门大学物理与机电工程学院, 福建 361005; 4. 洛阳中收机械装备有限公司, 河南 471000)

**摘要:** 为了研究联合收割机喂入量与收获过程损失率之间的关系, 该文对联合收割机喂入量和收获损失的影响因素进行了详细分析, 采用 3 种模型试验研究了喂入量与收获过程损失的关系, 基于新疆-2A 型联合收割机的试验样本建立了基于幂函数、指数函数和二次函数的关系模型, 其中二次函数模型具有较高准确性, 其决定系数  $R^2=0.826$ , 并利用喂入量控制试验装置进行验证。试验表明, 当喂入量在 0.3~4.1 kg/s 的范围内时, 收获过程损失率实测值与二次函数模型计算值的绝对偏差范围为 0.04%~0.91%, 吻合较好, 说明所建立的二次函数模型具有良好的准确性。该模型可作为预测试验用样机收获过程损失的有效工具。

**关键词:** 收割机, 喂入, 数学模型, 收获损失

doi: 10.3969/j.issn.1002-6819.2011.09.004

中图分类号: S225.31

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2011)-09-0018-04

陈度, 王书茂, 康峰, 等. 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 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 with English abstract)

## 0 引言

联合收割机的喂入量是指单位时间内联合收割机加工的作物量<sup>[1]</sup>。喂入量也是联合收割机一个非常重要的参数, 其工作部件只有在设计的额定喂入量范围内才能发挥最佳效能。收获损失是多种损失的集合, 主要包括收获前损失、割台损失和收获过程损失, 以落粒、丢穗、漏割、脱不净、夹带、破碎等形式表现出来。联合收割机无论设计者还是使用者, 都在追求大喂入量和低损失率, 希望提高工作效率, 保证收获质量。

联合收割机收获过程的损失与喂入量、作物属性、脱粒室和清选室的结构参数等有直接关联<sup>[2-3]</sup>。田间作业时, 脱粒和清选部件的工作参数调整到最佳状态后不会自动改变, 作物属性在一定地点和时间条件下也基本一致, 而喂入量直接取决于联合收割机的作业速度, 受驾驶员的主观操作因素影响很大。试验表明, 特定条件下, 收获损失与喂入量关联度很大, 研究其关系模型对于收获过程中降低损失率具有指导意义。本文结合田间试验样本对联合收割机喂入量和收获损失的影响因素进行分析, 并建立了喂入量与收获过程损失之间的关系模型, 然后在室内喂入量控制试验装置上进行了模型验证试验。

收稿日期: 2011-05-23 修订日期: 2011-06-27

基金项目: 国家“863”高技术研究发展计划资助项目(2010AA101402)

作者简介: 陈度(1981-), 男, 汉族, 重庆人, 中国农业大学和美国华盛顿州立大学联合培养博士生, 研究方向为农业自动化及测控技术。北京 中国农业大学, 100083。Email: tchendu@gmail.com

\*通信作者: 王书茂(1959-), 男, 汉族, 河北人, 教授, 博士生导师, 研究方向为机电一体化和计算机测控技术。北京 中国农业大学(东校区) 114信箱, 100083。Email: wangshumao@cau.edu.cn

## 1 田间试验样本

本文利用之前开发的基于虚拟仪器技术的联合收割机作业参数检测系统<sup>[4]</sup>, 并依据国家标准 GB/T 8097-1996《收获机械联合收割机试验方法》<sup>[5]</sup>制定了相应的田间试验流程和准则, 以新疆-2A 型全喂入自走式稻麦联合收割机(额定喂入量 2.0 kg/s, 割幅 2.36 m, 生产率 5 333~6 666 m<sup>2</sup>/h, 前进速度 1.7~22.4 km/h)为试验样机, 在中国甘肃武威和河南洛阳进行了小麦田间收获试验, 获得了大量试验数据, 然后对异常数据点剔除并平均后, 得到 39 组田间试验样本。如表 1 所示为其中的 10 组试验样本, 并按照喂入量升序排列。

表 1 田间试验样本  
Table 1 Field experimental data samples

样本	谷物密度/(kg·m <sup>-2</sup> )	喂入量/(kg·s <sup>-1</sup> )	作业速度/(km·h <sup>-1</sup> )	草谷比	籽粒含水率/%	收获过程损失/%
1	0.479	1.12	1.44	1.20	12.3	1.39
2	0.477	1.61	2.63	1.21	12.1	0.67
3	0.651	2.21	2.88	0.81	12.2	0.32
4	0.478	2.34	3.24	1.21	12.1	0.24
5	0.655	2.83	3.61	0.82	12.4	0.42
6	0.385	3.31	5.43	1.42	12.2	0.93
7	0.386	3.82	6.13	1.41	12.2	1.83
8	0.599	4.28	5.10	1.15	12.4	3.86
9	0.479	4.72	6.48	1.19	12.1	4.47
10	0.654	5.14	6.48	0.84	12.4	5.96

## 2 喂入量影响因素分析

喂入量的影响因素主要包括谷物密度、割茬高度、割幅宽度和作业速度。其中谷物密度在田间波动较大, 不仅与单位面积株数、长势有关, 而且与茎秆含水率的

变化有关；割茬高度由收获工艺决定，一般情况下应该保留在一定范围内，当谷物密度和割茬高度一定时，可以从草谷比的信息上反映出来；对于特定的联合收割机，割幅宽度是个常数，因为大部分情况下，联合收割机都是满幅收获；当作业速度提高，喂入量会随之增大。

本文根据试验样本建立的喂入量与作业速度的关系如图 1 所示。从图中可以看出，喂入量与作业速度近似呈线性关系，当作业速度增加，喂入量增大。这是因为作业速度提高时，单位时间内收获的谷物增加，喂入量也就随之增大。但是从图 1 中也发现，喂入量除了与作业速度有关外，还受其他因素的影响，因此在相同作业速度下，喂入量存在较大波动。

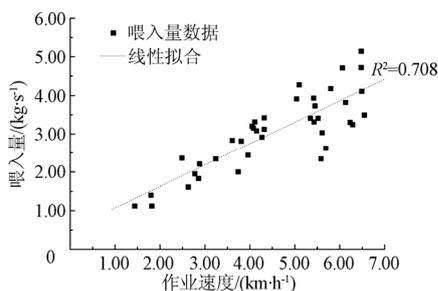


图 1 喂入量与作业速度的关系

Fig.1 Relationship between feeding rate and ground speed

图 2 所示为不同谷物密度时，喂入量与作业速度的关系。从图中可以看出，喂入量受谷物密度的影响较大，相同作业速度下，谷物密度越大，其喂入量也越大。即使谷物密度相同时，喂入量与作业速度之间也不是简单的线性关系，因为在谷物密度和作业速度一定的情况下，草谷比发生变化，其喂入量也会发生变化。这也进一步说明，实际收获过程中喂入量应该是一个范围，除了与作业速度有关外，还与草谷比，谷物秸秆混杂度等因素有关。

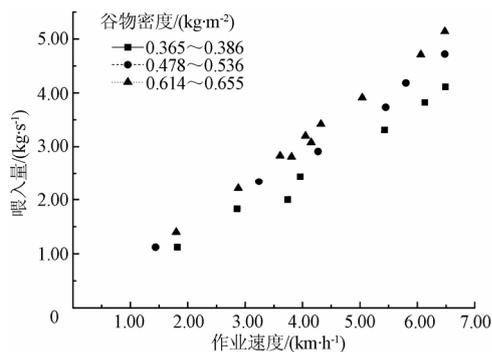


图 2 不同谷物密度时喂入量与作业速度的关系

Fig.2 Relationship between feeding rate and ground speed at different grain yields

在联合收割机工作过程中，谷物密度不可控制，但割茬高度可以控制在一定范围内，即草谷比变化很小，而且正常情况下为满幅收获，因此唯一可调的参数就是作业速度。为此国内外学者对喂入量检测进行了大量研究，试图获取喂入量信息来控制联合收割机作业速度。Coers 和 Burke 通过检测倾斜输送喂入辊的负荷对作业速

度进行控制<sup>[6]</sup>，Staiert 和 Krukow 等试图通过改变喂入辊的转速来达到谷物均匀喂入的目的，同时实现过载保护<sup>[7]</sup>。Budzich 也曾设计了不同的检测方法对脱粒滚筒的扭矩进行检测，并实现对作业速度的控制<sup>[8]</sup>。国内介战等通过在倾斜输送机上的压力传感器来检测喂入量，用以控制作业速度，并进行了大量试验，建立了基于谷物对倾斜输送机底板压力的喂入量当量模型<sup>[9-10]</sup>。陈进等根据喂入驱动轴扭矩检测喂入量，建立了两者的关系方程<sup>[11]</sup>。

### 3 收获损失分类及影响因素

收获损失主要包括收获前损失（PHL）、割台损失（GL）和收获过程损失（PL）<sup>[12]</sup>。收获前损失是在谷物收获前，因为风、雨、成熟期等自然因素造成的落粒损失。割台损失主要由漏割、落粒和丢穗三种损失组成，受谷物成熟度、作业行走路线及拨禾轮位置和转速的影响。收获前损失和割台损失主要受谷物自然属性（成熟度、倒伏度、含水率）不可控因素影响，通过选择合适的收获时间<sup>[13]</sup>，对拨禾轮进行适当调整和控制，便可有效地降低这两种损失。收获过程损失除了受谷物自然属性的影响外，还主要受到喂入量、草谷比等收获参数的影响<sup>[14]</sup>，该损失直接影响收获机械的效率和作业质量。国内外学者对如何检测收获过程损失进行了大量研究<sup>[15-19]</sup>，也有学者通过自动控制联合收割机的作业速度改变喂入量，来降低收获过程损失<sup>[20-21]</sup>。

具体来讲收获过程损失包括脱粒损失、分离损失和清选损失，分别由联合收割机的脱粒、分离和清选装置引起。在脱粒过程中，喂入量过大或过小都会使脱粒损失增加，即使相同喂入量下，草谷比过大也会导致破碎率升高；分离损失主要受喂入量的影响，如果喂入量过大，会导致籽粒未被分离出来造成夹带损失；清选损失与茎秆破碎程度、风量大小有关，而茎秆破碎程度主要由喂入量和茎秆含水率决定。因此，在整个收获过程损失中，喂入量是决定因素。

### 4 喂入量与收获过程损失关系模型

本文试图建立喂入量与收获过程损失之间的关系模型，需要指出的是在田间试验样本中，收获过程损失率主要包含清选损失和分离损失，而不包括脱粒破碎率所造成的损失。Philips 和 O'Callaghan 曾采用指数方程建立了脱粒损失和喂入量的关系模型<sup>[22]</sup>。联合收割机测试研究中心 PAMI (Prairie Agricultural Machinery Institute)、FAT (Swiss Federal Research Station for Agricultural Economics and Engineering) 和 DLG (German Agricultural Society) 利用线性函数、幂函数、指数函数和二次函数对收获过程损失进行了回归分析<sup>[23]</sup>。本文利用幂函数、指数函数和二次函数对田间试验样本（表 1）进行拟合分析，拟合结果如图 3 所示。具体拟合模型的参数和结果如下

$$\eta = 0.51 + 0.002q^{4.797} \quad R^2 = 0.761 \quad (1)$$

$$\eta = 0.36 + 0.03e^{1.05q} \quad R^2 = 0.746 \quad (2)$$

$$\eta = 4.11 - 3.17q + 0.68q^2 \quad R^2 = 0.826 \quad (3)$$

式中,  $\eta$  为收获过程损失率, %;  $q$  为喂入量,  $\text{kg/s}$ 。

对图 3 进行分析可以看出, 幂函数和指数函数的拟合结果表明, 其收获过程损失率是随着喂入量的增加而逐渐增大的, 与一般的研究结果相吻合; 而二次函数的拟合结果却表明, 在小喂入量的时候 ( $< 2.5 \text{ kg/s}$ ), 随着喂入量增大, 收获过程损失率会逐渐减小, 当喂入量达到  $2.5 \text{ kg/s}$  时, 收获过程损失率达到最低, 此后随着喂入量不断增大, 收获过程损失率又逐渐增加, 这说明对于新疆-2A 型试验样机, 在喂入量为  $2.5 \text{ kg/s}$  的时候, 其收获过程损失率最低, 此时具有最好的收获质量, 而该试验样机设计喂入量为  $2.0 \sim 2.5 \text{ kg/s}$ 。另外, 从拟合结果来看, 二次函数的  $R^2$  值最高, 说明二次函数对该样机具有较好的拟合精度。

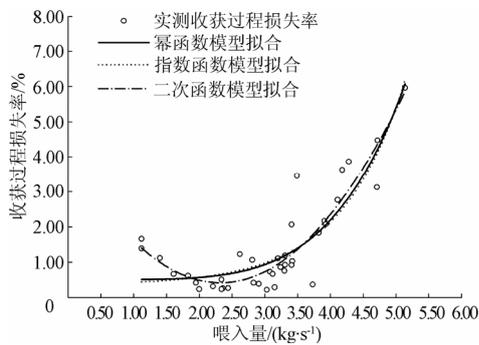


图 3 喂入量与收获过程损失率不同关系模型拟合结果

Fig.3 Fitting results of relational models for feeding rate and processing loss

以上现象说明收获过程损失率并不是一直随着喂入量的增大而增加的, 只有当喂入量达到设计值时, 收获过程损失率的变化才符合此规律。分析原因可能是在喂入量尚未达到设计值时, 喂入脱粒滚筒的物料较少, 脱粒滚筒与谷物之间的揉搓、打击以及对谷物产生的加速度不够充分, 便导致脱不净损失增加; 随着喂入量增大到设计范围内时, 此时联合收割机工作在最佳状态, 收获过程损失率达到最低; 随着喂入量进一步增大, 喂入物料过多, 导致脱粒滚筒对谷物脱粒不充分, 同时分离和清选系统也不能对脱粒后的物料进行充分分离和清选, 致使收获过程损失率迅速增大。

## 5 收获过程损失模型验证

本文在洛阳中收机械装备有限公司试验车间利用喂入量控制试验装置对本文建立的喂入量与收获过程损失模型(式 3)进行了验证性试验, 如图 4 所示。该装置由支架、输送带和变频电机构成, 输送带长度为  $26 \text{ m}$ , 宽  $1 \text{ m}$ , 由变频电机驱动, 输送带速度调节范围为  $0 \sim 1.2 \text{ m/s}$ 。试验前, 将试验样机的拨禾轮拆卸掉, 并支撑起前轮, 保证该样机各部件工作正常。

试验过程中, 称取相应质量的谷物, 均匀的铺撒在输送带上, 输送带的喂入速度设定为  $1.0 \text{ m/s}$ 。本文在喂入量为  $0.3 \sim 4.1 \text{ kg/s}$  的范围内分别进行了 11 组恒喂入量

试验验证, 其收获过程损失率的检测方法如文献[4]所述。试验验证结果如图 5 所示。

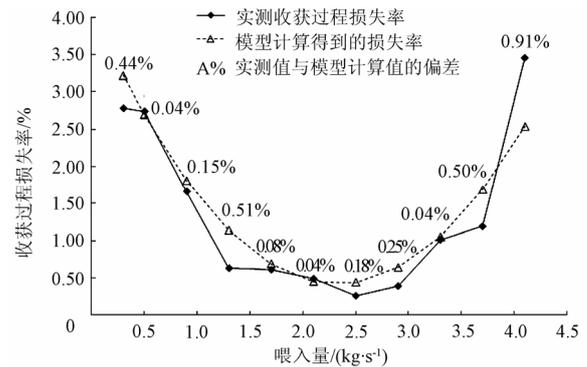


图 5 试验值与模拟值的比较

Fig.5 Comparison of experimental values with model results

从图 5 可以直观地看出实际检测收获过程损失率与模型计算值的偏差率。喂入量控制试验结果表明, 根据田间试验样本建立的喂入量与收获过程损失模型具有较好的准确性, 其绝对偏差范围为  $0.04\% \sim 0.91\%$ , 其偏差的均值为  $0.29\%$ , 这个结果证明了前文的结论, 即收获过程损失率并不是随着喂入量增大而增加, 只有当喂入量达到一定值后才符合此规律, 这个值理论上应该在该联合收割机的设计喂入量范围之内。对于本试验样机, 其收获质量最优喂入量应为  $2.5 \text{ kg/s}$ 。

## 6 结论

利用开发的联合收割机作业参数检测系统, 以新疆-2A 型联合收割机为试验样机, 在中国多个小麦主产区进行了小麦收获田间试验, 获得了试验样本。根据试验样本分析了喂入量和收获损失的影响因素, 并建立了喂入量和收获过程损失的幂函数、指数函数和二次函数关系模型。试验样本分析发现, 收获过程损失率并不是随喂入量增大而增加, 只有当喂入量到达设计喂入量之后才符合此变化规律。因此采用二次函数模型形式表达喂入量与收获过程损失率的关系具有较高的可信度, 其决定系数  $R^2=0.826$ 。利用室内联合收割机喂入量控制试验台对试验样机进行了验证试验, 结果表明: 当喂入量在  $0.3 \sim 4.1 \text{ kg/s}$  的范围内, 收获过程损失率实测值与模型计算值的绝对偏差范围为  $0.04\% \sim 0.91\%$ , 其均值为  $0.29\%$ 。说明建立的收获过程损失模型具有良好的准确性。

### [参 考 文 献]

- [1] 卢里耶, 格罗姆勃切夫斯基著. 农业机械的设计和计算 [M]. 北京: 中国农业机械出版社, 1983, 263—264.
- [2] Craessaerts G, De Baerdemaeker J, Missotten B, et al. Fuzzy control of the cleaning process on a combine harvester[J]. Biosystems Engineering, 2010, 106(2): 103—111.
- [3] Miu P I, Kutzbach H D. 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] Kang Feng, Wang Shumao, Zhu Qingyuan, et al. Model analysis of threshing power consumption for combine harvester

- based on computer measurement system[C]// International Conference on Computers, Communications, Control and Automation, Hong Kong: IEEE, 2011, 137—140.
- [5] GB/T 8097-2008, 收获机械联合收割机试验方法[S].
- [6] Coers B A, Burke D J. Automatic control initiation for a harvester[P]. USA: 6834484, 2004-12-28.
- [7] Staiert R W, Krukow E T. Combine feeder drive control[P]. USA: 4332127, 1982-6-1.
- [8] Budzich T. Control in harvester machine[P]. USA: 3138908, 1964-06-30.
- [9] 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—36.  
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—36. (in Chinese with English abstract)
- [10] 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 with English abstract)
- [11] 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 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 with English abstract)
- [12] ANSI/ASAE S343.3, Terminology for combines and grain harvesting[S].
- [13] 袁剑平, 王晨阳, 高松洁, 等. 小麦最佳收获期形态指标的研究[J]. 河南农业大学学报, 1996, 30(4): 324—328.  
Yuan Jianping, Wang Chenyang, Gao Songjie, et al. Study on wheat kernel formation and morphology of optimum harvest period[J]. Acta Agriculturae Universitatis Henanensis, 1996, 30(4): 324—328. (in Chinese with English abstract)
- [14] Andrews S B, Siebenmorgen T J, Vories E D, et al. Effects of combine operating parameters on harvest loss and quality in rice[J]. Transactions of the ASAE, 1993, 36(6): 1599—1607.
- [15] Zhao Zhan, Li Yaoming, Chen Jin, et al. Grain separation loss monitoring system in combine harvester[J]. Computer and Electronics in Agriculture, 2011, 76(2): 183—188.
- [16] 倪军, 毛罕平, 李萍萍. 阵列式压电晶体传感器谷粒清选损失监测仪设计[J]. 农业机械学报, 2010, 41(8): 175—177.  
Ni Jun, Mao Hanping, Li Pingping. Design of intelligent grain cleaning losses monitor based on array piezocrystals[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010, 41(8): 175—177. (in Chinese with English abstract)
- [17] 周利明, 张小超, 刘阳春, 等. 联合收割机谷物损失测量 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)
- [18] Craessaerts G, Saeys W, Missotten B, et al. Identification of the cleaning process on combine harvesters, Part II: A fuzzy model for prediction of the sieve losses[J]. Biosystems Engineering, 2010, 106(2): 97—102.
- [19] Liu C, Leonard J. Monitoring actual grain loss from an axial flow combine in real time[J]. Computers and Electronics in Agriculture, 1993, 9(3): 231—242.
- [20] Fluffy M J L, Stone G T. Speed control of a combine harvester to maintain a specific level of measured threshing grain loss[J]. Journal of Agricultural Engineering Research, 1983, 28(6): 537—543.
- [21] McGechan M B, Glasbey C A. The benefits of different speed control systems for combine harvesters[J]. Journal of Agricultural Engineering Research, 1982, 27(6): 537—552.
- [22] Philips P R, O'Callaghan J R. Cereal harvesting-A mathematical model[J]. Journal of Agricultural Engineering Research, 1974, 19(4): 415—433.
- [23] Miu P I. Applied modeling theory of material separation in combine harvesters[C]// ASAE Annual International Meeting, Ottawa: ASAE, 2004: 4115—4125.

## Mathematical model of feeding rate and processing loss for combine harvester

Chen Du<sup>1</sup>, Wang Shumao<sup>1\*</sup>, Kang Feng<sup>2</sup>, Zhu Qingyuan<sup>3</sup>, Li Xiaohua<sup>4</sup>

(1. College of Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China; 2. School of Technology, Beijing Forestry University, Beijing 100083, China; 3. School of Physics and Mechanical and Electrical Engineering, Xiamen University, Fujian 361005, China; 4. Luoyang Zhongshou Machinery Equipment Co., Ltd., Henan 471000, China)

**Abstract:** To investigate the relationship between feeding rate and harvest loss of combine harvesters, the paper intensively analyzed the factors that influenced feeding rate and harvest loss for combine harvester. The mathematical model between feeding rate and processing loss was established using three functions (power, exponential and quadratic) based on field test samples of Xinjiang-2A combine harvester. The model based on quadratic function showed the highest accuracy and its coefficient of determination was 0.826. Validation experiment was conducted to verify developed model through feeding rate controllable equipment. The results showed that when the feeding rate was between 0.3-4.1 kg/s, the absolute deviation between measured processing loss and calculated value was in the range of 0.04%-0.91%. It indicated that the developed quadratic model was accurate. It is concluded that the developed model could be capable of predicting the processing loss for the tested machine.

**Key words:** harvesters, feeding, mathematical models, processing loss