

DOI:10.3969/j.issn.1000-1298.2010.12.014

# 联合收获机纵向轴流脱粒谷物运动仿真与试验\*

杨方飞<sup>1</sup> 阎楚良<sup>1</sup> 杨炳南<sup>1</sup> 衣淑娟<sup>2</sup> 姜楠<sup>2</sup>

(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. 黑龙江八一农垦大学工程学院, 大庆 163319)

**【摘要】** 纵向轴流联合收获机因其在脱净率、破碎率、分离率等方面的优势近年来得到大力推广。以纵向轴流滚筒为研究对象,在合理假设的基础上,对谷物运动受力状态加以分析,根据给出的谷物喂入段、脱离分离盖板侧及凹板侧各段的运动状态非线性微分方程,采用高阶龙格-库塔数值方法,开发出谷物脱粒过程运动状态分析软件,对谷物运动状态进行数值仿真。对比高速摄像试验分析结果,验证了数值仿真结果的有效性,为纵向轴流滚筒的设计提供了依据。

**关键词:** 联合收获机 纵向轴流脱粒 运动状态 仿真 高速摄像

**中图分类号:** S225.3; TP391.9 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2010)12-0067-05

## Simulation and Testing of Cereal Motion in Threshing Unit of Combine Harvester with Axial Feeding

Yang Fangfei<sup>1</sup> Yan Chuliang<sup>1</sup> Yang Bingnan<sup>1</sup> Yi Shujuan<sup>2</sup> Jiang Nan<sup>2</sup>

(1. State Key Laboratory of Soil-Plant-Machinery System Technology, Chinese Academy of Agricultural Mechanization Sciences, Beijing 100083, China

2. College of Engineering, Heilongjiang August First Land Reclamation University, Daqing 163319, China)

### Abstract

Combine harvester with axial feeding threshing roller was rapidly popularized in recent years due to its high threshing rate, low broken rate and high separating rate. The movement of cereal passing through the axial feeding threshing roller was analyzed based on reasonable assumptions. According to the nonlinear equations of cereal motion in each sector, feeding zone, concave side and cover side of threshing-separating zone, software which could analyze cereal state of motion was developed based on numerical method of high order Runge-Kutta. The effectiveness of numerical simulation result was verified compared with high-speed photography testing results. This study laid the foundation for the design of axial feeding threshing roller.

**Key words** Combine harvester, Threshing with axial feeding, Motion state, Simulation, High-speed photography

### 引言

纵向轴流联合收获机因其在脱净率、破碎率、分离率等方面的优势,近年来得到大力推广。国外对于轴流脱粒过程的研究工作开始于20世纪60年

代,Arnold根据试验指出分离率是凹板的指数函数,这一结论被广泛采用,但Arnold并没有定量地研究脱粒装置其他参数及作物状态参数对分离的影响<sup>[1]</sup>,卢里耶等提出的切流脱粒理论基本公式,一直被用于轴流脱粒装置的研究,但他认为脱粒空间

收稿日期:2010-09-15 修回日期:2010-10-12

\*“十一五”国家科技支撑计划重大项目(2006BAD11A01)

作者简介:杨方飞,高级工程师,主要从事数字化设计与仿真研究,E-mail:kingyff@163.com

通讯作者:阎楚良,研究员,博士生导师,主要从事结构可靠性与数字化设计研究,E-mail:yancl@sina.com

内谷物的运动速度等于滚筒的圆周速度<sup>[2]</sup>,而实测的谷物平均运动速度仅为滚筒圆周速度的20%~50%。国内自20世纪60年代末起也开始对轴流脱粒装置进行研究<sup>[3~5]</sup>。建立纵向轴流脱分过程的数学模型时,目前大多采用试验研究方法<sup>[3,6~8]</sup>,对于谷物在纵向轴流脱粒滚筒内的运动机理研究涉及不多。本文在合理假设的基础上,从谷物的运动学和动力学分析出发,根据给出的谷物在脱分装置各段的运动状态微分方程,采用高阶龙格-库塔数值方法,开发脱粒分离过程运动状态分析软件,通过数值仿真,对谷物在纵向轴流脱粒空间中的运动学和动力学规律进行研究,并利用高速摄像进行验证。

## 1 数学模型的建立

为了使建立的运动数学模型既能与实际较吻合,又不过于复杂,在建模时提出以下假设<sup>[9]</sup>:谷物连续均匀喂入,不考虑谷物湿度的影响;谷物向滚筒的喂入速度远小于喂入段螺旋叶片的线速度,在计算时忽略;谷物紧贴盖板、盖板导向板以及凹板表面作定常连续流动,忽略谷物层间的相对滑动;谷物茎秆为非弹性体,当谷物被滚筒钉齿(或纹杆)抓取后,即以滚筒的线速度运动,不考虑其加速度的变化过程。

从纵向轴流滚筒的工作原理可知,谷物在脱粒滚筒喂入段和脱离分离段受力状况不同,在盖板侧和凹板侧受力也不尽相同,在建立脱粒空间坐标系的基础上,给出谷物在各段的运动状态微分方程<sup>[10]</sup>。

### 1.1 坐标系的建立

设滚筒轴线与水平线呈 $\gamma$ 角安装,原点 $O$ 通过喂入口端面中心,沿出口方向为 $z$ 轴,沿端面建立 $x$ 、 $y$ 轴,且 $x$ 、 $y$ 、 $z$ 轴正向符合右手法则,如图1所示,令空间任一点 $M$ 到滚筒轴线的矢量为 $r$ , $x$ 轴正向到 $r$ 的逆时针方向夹角为 $\theta$ 。

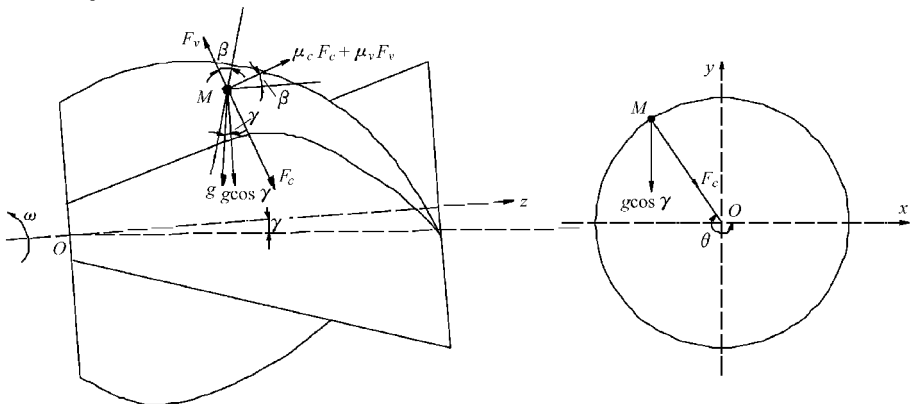


图1 脱粒空间坐标系示意图

Fig.1 Reference frame of threshing roller space

### 1.2 喂入段运动状态微分方程的建立

谷物从喂入段螺旋轴端喂入,并由轴端输出,其能产生较大的离心力和摩擦力,从而卷带起谷物充满螺旋叶片的四周。谷物在喂入段主要承受螺旋叶片的反力 $F_v$ 及其摩擦阻力 $\mu_v F_v$ 、盖板或凹板反力 $F_c$ 及其摩擦阻力 $\mu_c F_c$ 、重力 $g$ , $F_v$ 、 $\mu_v F_v$ 和 $\mu_c F_c$ 落在过 $M$ 点的圆柱切平面内,如图2所示。将各力向 $r$ 、 $\theta$ 、 $z$ 方向分别投影,建立谷物运动微分方程

$$\begin{cases} r\ddot{\theta} = -\mu_c \sin\beta r \dot{\theta}^2 + g \left[ \cos\gamma \cos\theta \left( \sin^2\beta - \frac{\mu_v}{2} \sin(2\beta) \right) - \mu_c \sin\gamma \sin\beta \sin\theta \right] \\ \ddot{z} = -\mu_c \cos\beta r \dot{\theta}^2 + g \cos\beta \left[ \cos\gamma \cos\theta \cdot (\sin\beta - \mu_c \cos\beta) - \mu_c \sin\gamma \sin\theta \right] \\ \beta = \arctan\left(\frac{r\dot{\theta}}{\dot{z}}\right) \end{cases} \quad (1)$$

式中  $\beta$ ——喂入螺旋角

### 1.3 脱粒分离段运动状态微分方程的建立

由于谷物在滚筒凹板侧与盖板侧受力状况不同,因此分别给出运动状态方程。

在凹板侧,谷物主要承受的力包括打击元件的打击力 $F_d$ 及其摩擦力 $\mu_d F_d$ 、凹板反力 $F_c$ 及其摩擦力 $\mu_c F_c$ 、重力 $g$ , $F_d$ 、 $\mu_d F_d$ 和 $\mu_c F_c$ 落在过 $M$ 点的圆柱切平面内,如图3所示。设凹板包角为 $\alpha$ ,则当

图2 谷物在喂入段受力示意图

Fig.2 Scheme of forces on cereal in feeding zone of threshing roller

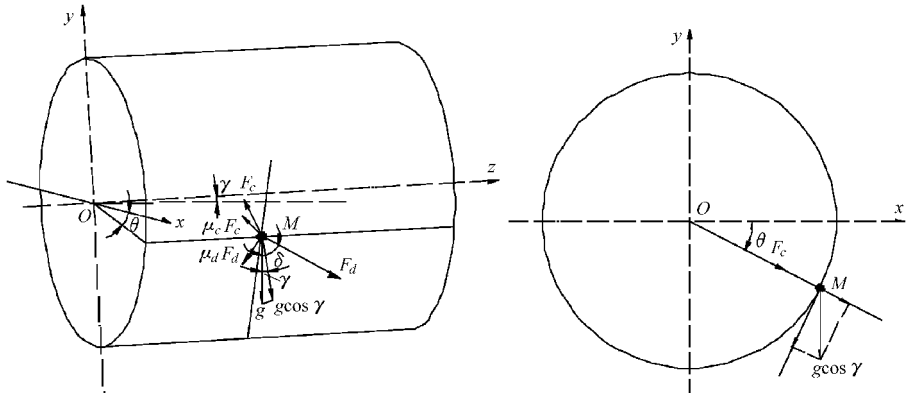


图 3 谷物在滚筒凹板侧受力示意图

Fig. 3 Scheme of forces on cereal in concave side of threshing roller

$\theta \in \left[ n\pi - \frac{\alpha - \pi}{2}, n\pi + \frac{\alpha + \pi}{2} \right]$  ( $n = 1, 2, 3 \dots$ ) 时, 谷物在凹板侧运动。

将谷物所受各力向  $r, \theta, z$  方向投影, 建立凹板侧运动微分方程

$$\begin{cases} r\ddot{\theta} = (A - \mu_c \sin\phi)r\dot{\theta}^2 - A(R+r)\omega\dot{\theta} + \\ g(\cos\gamma\cos\theta - \mu_c \sin\gamma\sin\theta\sin\phi) + AR\omega^2 \\ \ddot{z} = (B - \mu_c \cos\phi)r\dot{\theta}^2 - B(R+r)\omega\dot{\theta} - \\ g\mu_c \sin\gamma\sin\theta\cos\phi + BR\omega^2 \\ \phi = \arctan\left(\frac{r\dot{\theta}}{\dot{z}}\right) \end{cases} \quad (\theta \in \left[ n\pi - \frac{\alpha - \pi}{2}, n\pi + \frac{\alpha + \pi}{2} \right]; n = 1, 2, 3 \dots) \quad (2)$$

其中  $A = \frac{dN_r N_c}{2\pi L} \left( \frac{e}{1-e} + \frac{\Delta\mu(z)}{1+\Delta} \right) (1 + \mu_d \tan\delta)$

$B = \frac{dN_r N_c}{2\pi L} \left( \frac{e}{1-e} + \frac{\Delta\mu(z)}{1+\Delta} \right) (\tan\delta - \mu_d)$

式中  $\phi$ ——谷物沿凹板运动螺旋角  
 $N_r$ ——滚筒钉齿排列螺旋头数  
 $N_c$ ——钉齿列数  $L$ ——钉齿排列螺距  
 $R$ ——钉齿作用半径  $d$ ——钉齿直径  
 $\Delta$ ——谷草比  $\mu(z)$ ——脱粒率  
 $e$ ——谷物速度增长系数  
 $\delta$ ——钉齿对谷物打击力的作用角

$\mu(z)$  的计算式为<sup>[11]</sup>

$$\mu(z) = \frac{1}{\mu_1 - \mu_2} [\mu_1(1 - e^{-\mu_2 z}) - \mu_2(1 - e^{-\mu_1 z})]$$

式中, 脱粒和分离参数  $\mu_1, \mu_2$  与脱粒装置和谷物参数相关, 通过回归分析结果与试验数据比较可得, 对于纵向轴流脱粒装置,  $\mu_1 \in [2.9, 3.5], \mu_2 \in [3.0, 3.6]$  较合适。

在盖板侧谷物受力包括螺旋叶片的反力  $F_v$  及其摩擦阻力  $\mu_v F_v$ 、盖板或凹板反力  $F_c$  及其摩擦阻力

$\mu_c F_c$ 、重力  $g$ , 受力状况与喂入段类似, 参考喂入段建立谷物运动微分方程

$$\begin{cases} r\ddot{\theta} = -\mu_c \sin\phi r\dot{\theta}^2 + g \left[ \cos\gamma\cos\theta \left( \sin^2\phi - \frac{\mu_v}{2}\sin(2\phi) \right) - \mu_c \sin\gamma\sin\phi\sin\theta \right] \\ \ddot{z} = -\mu_c \cos\phi r\dot{\theta}^2 + g\cos\phi \left[ \cos\gamma\cos\theta(\sin\beta - \mu_v \cos\phi) - \mu_c \sin\gamma\sin\theta \right] \\ \phi = \arctan\left(\frac{r\dot{\theta}}{\dot{z}}\right) \end{cases} \quad (\theta \in \left[ n\pi - \frac{\alpha - \pi}{2}, n\pi + \frac{\alpha + \pi}{2} \right]; n = 0, 1, 2 \dots) \quad (3)$$

## 2 仿真分析与结果讨论

对上述建立的谷物在脱粒空间运动状态非线性微分方程, 采用高阶龙格-库塔数值方法, 根据自适应变步长技术, 开发出谷物脱粒过程运动状态分析软件, 对谷物运动状态进行数值模拟, 并可通过调整脱粒装置各参数, 分析其对谷物运动状态的影响。

考虑现有试验装置给定仿真条件: 凹板包角  $180^\circ$ , 滚筒半径 230 mm, 长度 1 050 mm, 钉齿 6 排, 钉齿螺旋线头数 2, 钉齿直径 10 mm, 盖板导向板螺旋角  $30^\circ$ , 钉齿作用角  $26^\circ$ , 滚筒转速 500 r/min, 喂入量 2.5 kg/s, 谷草比 0.83。仿真获得的谷物沿滚筒轴向位移与切向位移关系如图 4 所示, 可以看出, 谷物在凹板侧受钉齿强烈打击作用谷物切向速度急剧增加, 到达盖板侧后, 由于几乎不受钉齿打击力, 谷物在惯性力作用下沿导向板作螺旋运动, 受到摩擦阻力以及自身重力的作用, 谷物作非线性减速运动。从图 5 中也能看出, 谷物切向速度呈上升趋势, 但存在剧烈的波动, 速度增减规律与位移图中一致。图 6 所示为谷物变化迹线, 可以清楚的观察到谷物在轴流脱分装置中的运动轨迹。

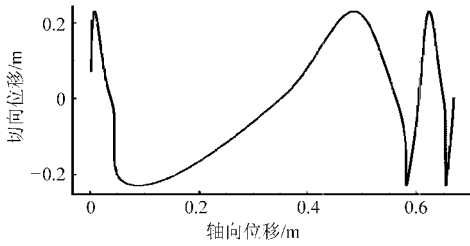


图4 轴向位移-切向位移曲线

Fig. 4 Curve of axial displacement-circumferential displacement

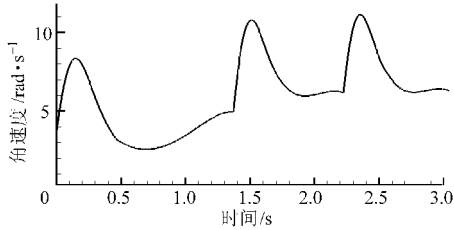


图5 角速度-时间曲线

Fig. 5 Curve of angular velocity-time

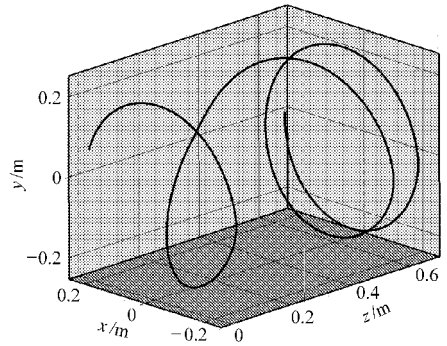


图6 谷物在纵向轴流脱粒空间中的迹线仿真曲线

Fig. 6 Trace simulation curve of cereal in threshing roller space with axial feeding

凹板间隙 30 mm, 滚筒转速、喂入量、谷草比等参数与仿真条件相同。采用美国 Vision Research 公司生产的 V5.1 型高速摄像机, 分辨率为 1 024 × 1 024 像素<sup>[12]</sup>。拍摄频率采用 500 F/s (相邻两帧图片时间间隔 0.002 s), 采用两侧光源 (每个光源 1 300 W), 拍摄窗口位于脱分装置前部, 顶面拍摄, 拍摄距离 1 316 mm。

图7为选取的部分谷物运动轨迹高速摄像图

### 3 仿真结果验证

试验用水稻为松粳 9 号, 平均长度 700 mm, 千粒质量 26.4 g, 稻谷含水率 15%, 滚筒顶距 30 mm,

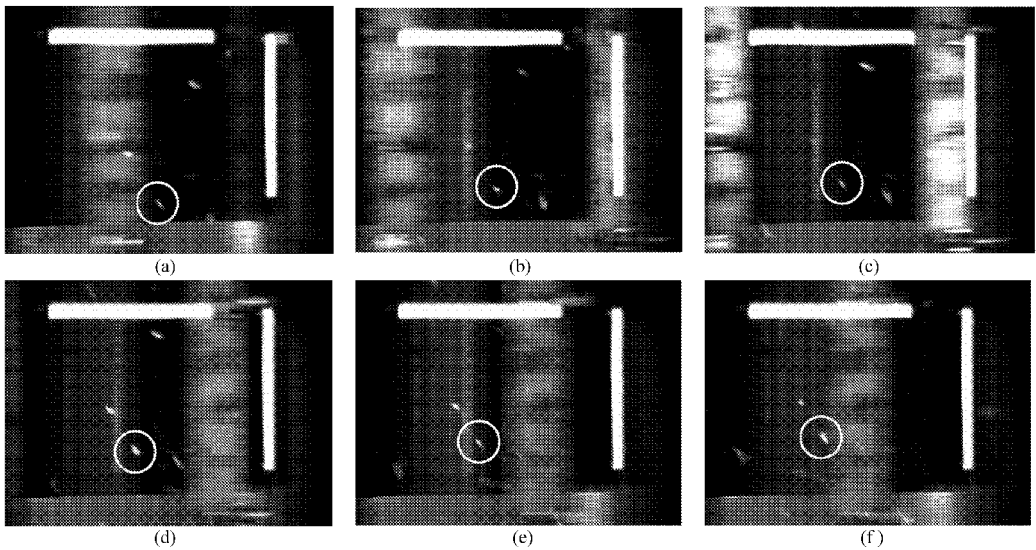


图7 谷物运动轨迹高速摄像结果

Fig. 7 Photos of single corn in the process of threshing

(a)  $t=0.008\text{ s}$  (b)  $t=0.016\text{ s}$  (c)  $t=0.020\text{ s}$  (d)  $t=0.024\text{ s}$  (e)  $t=0.028\text{ s}$  (f)  $t=0.032\text{ s}$

片, 图中白色横条及竖条为带刻度标尺 (长度均为 100 mm), 横竖标尺线交点设为坐标原点。对高速摄像获得的图片进行二值化处理后进行识别, 获得谷物的位移信息, 根据摄像频率及位移变化, 求得谷物轴向运动及切向运动速度, 由此可绘出谷物在脱分装置前部的运动轨迹。

图 8、9 分别为轴向速度时域曲线和切向速度时域曲线。对比分析表明: 由于试验过程中, 谷物除了受理论分析时的各力作用外, 还受到风力影响, 且由于谷物自身转动而使得每一刻迎风面积不相同, 因此试验结果拟合曲线有波动, 整体来看, 仿真结果与

试验结果吻合较好。

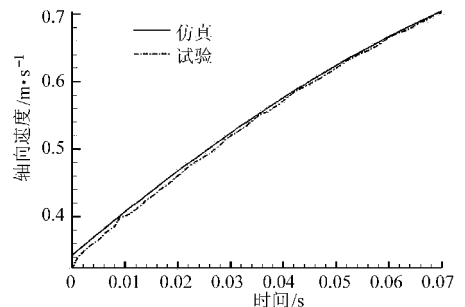


图8 轴向速度时域曲线

Fig. 8 Time domain curve of axial speed

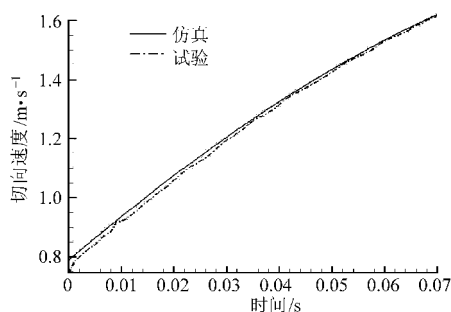


图9 切向速度时域曲线

Fig.9 Time domain curve of circumferential speed

## 4 结束语

在合理假设的基础上,根据给出的谷物在纵向轴流脱分装置中的喂入段、脱分段凹板侧及盖板侧的运动状态非线性微分方程,采用高阶龙格-库塔数值方法,开发出谷物脱粒过程运动状态分析软件,软件仿真结果与试验结果吻合较好。此外可通过调整脱分装置各结构参数,考察各参数对谷物运动状态的影响,为纵向轴流滚筒的设计提供了依据。

## 参 考 文 献

- Arnold R E. Experiments with rasp bars and threshing drums, some factors affecting performance[J]. Journal of Agricultural Engineering Research, 1964(9): 99 ~ 134.
- 卢里耶 A B, 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.
- 王成芝,葛永久. 轴流滚筒的试验研究[J]. 农业机械学报,1982,13(1):55 ~ 72.  
Wang Chengzhi, Ge Yongjiu. A research on axial-flow threshing cylinder[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 1982,13(1):55 ~ 72. (in Chinese)
- 吴叙田. 轴流滚筒脱粒分离过程的理论分析与研究[D]. 北京:中国农业机械化科学研究院,1981.  
Wu Xutian. Theory analysis and research on threshing-separating process of axial feeding roller[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Mechanization Sciences,1981. (in Chinese)
- 王岳. 轴流脱粒原理和立式轴流脱粒分离清选合为一体应用的研究[D]. 北京:中国农业机械化科学研究院,1986.  
Wang Yue. Research on threshing theory of axial feeding roller and vertical roller device integrated with threshing-separating-cleaning[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Mechanization Sciences,1986. (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)
- 徐立章,李耀明,张立功,等. 轴流式脱粒-清选装置试验台的设计[J]. 农业机械学报,2007,38(12):85 ~ 88.  
Xu Lizhang, Li Yaoming, Zhang Ligong, et al. Development on test-bed of axial threshing and cleaning unit[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2007,38(12):85 ~ 88. (in Chinese)
- 万霖. 钉齿式轴流脱粒与分离装置参数的试验研究[D]. 大庆:黑龙江八一农垦大学,2005.  
Wang Lin. Experiment study on technological parameter of peg-tooth axial flow threshing and separating unit[D]. Daqing: Heilongjiang August First Land Reclamation University, 2005. (in Chinese)
- 杨方飞,阎楚良. 谷物在纵向轴流滚筒脱粒空间中的运动状态分析[J]. 农业机械学报,2008,39(11):48 ~ 50.  
Yang Fangfei, Yan Chuliang. Movement analysis of cereal in axial flow threshing roller space[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2008,39(11):48 ~ 50. (in Chinese)
- 张认成,桑正中. 轴流脱粒空间谷物运动仿真研究[J]. 农业机械学报,2000,31(1):55 ~ 57.  
Zhang Rencheng, Sang Zhengzhong. Simulation research on the motion of cereal in axial threshing space[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2000,31(1):55 ~ 57. (in Chinese)
- 李杰,阎楚良,杨方飞. 纵向轴流脱粒装置的理论模型与仿真[J]. 江苏大学学报:自然科学版,2006,27(4):299 ~ 302.  
Li Jie, Yan Chuliang, Yang Fangfei. Theoretical model and simulation of threshing of axial unit with axial feeding[J]. Journal of Jiangsu University: Natural Science Edition,2006,27(4):299 ~ 302. (in Chinese)
- 衣淑娟,蒋恩臣. 轴流脱粒与分离装置脱粒过程的高速摄像分析[J]. 农业机械学报,2008,39(5):52 ~ 55.  
Yi Shujuan, Jiang Enchen. High-speed photography analysis on process of threshing of axial flow threshing and separating installation[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2008,39(5):52 ~ 55. (in Chinese)
- 阎楚良,杨方飞,张书明. 数字化设计技术及其在农业机械设计中的应用[J]. 农业机械学报,2004,35(6):211 ~ 214.  
Yan Chuliang, Yang Fangfei, Zhang Shuming. Digitized design technology and its application in agricultural machinery design[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2004,35(6):211 ~ 214. (in Chinese)

对辊(上辊沿轴向配置圆环,圆环直径 $\phi 160$  mm,环高19.5 mm,间距48 mm;下辊直径 $\phi 160$  mm,横板高6.5 mm)可以显著改善喂入性能,并可提高其工作可靠性。确定喂入对辊与卷捆机构距离为20 mm、喂入对辊间距为30 mm、上辊前倾角为 $27^\circ$ 。

(2)经试验验证,配置圆环结构喂入对辊的钢辊式圆捆打捆机设计可行,可提高秸草的捡拾打捆作业效率并扩大其应用范围,尤其可用于含水率较大且横向铺放的稻秆捡拾打捆作业。

### 参 考 文 献

- 1 王德福,张全国. 青贮稻秆圆捆打捆机的改进研究[J]. 农业工程学报,2007,23(11):168~171.  
Wang Defu, Zhang Quanguo. The study of improving of round baler for straw ensiling[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2007, 23(11):168~171. (in Chinese)
- 2 徐秀英. 中国牧草收获机械发展现状及其趋势[J]. 安徽农业科学,2007,35(8):2506~2508.
- 3 蒋恩臣. 畜牧业机械化[M]. 北京:中国农业出版社,2005:104~117.
- 4 孙义忠. 牧草机械化生产配置机具[J]. 新农业,2003(9):54.
- 5 刘玉. MK5050-6型青贮圆捆机[J]. 山西农机,2004(5):16.
- 6 吴晓杰,韩鲁佳. 乳酸菌制剂对早籼稻青贮饲料品质的影响[J]. 中国农业大学学报,2005,10(3):35~39.  
Wu Xiaojie, Han Lujia. Effect of lactic acid bacteria on quality of rice straw silage[J]. Journal of China Agricultural University, 2005, 10(3):35~39. (in Chinese)
- 7 Vough L, Buckmaster D, Heinrichs J. Baleage system—what is working best today[M]. Silage for Dairy Farms: Growing, Harvesting, Storing and Feeding, NRAES—181, USA, 2006:158~170.
- 8 李湘萍. 4LSK-50型麦秸联合收获机的研究[J]. 农业工程学报,2003,19(1):107~109.  
Li Xiangping. 4LSK-50 wheat straws combine baler[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2003, 19(1):107~109. (in Chinese)
- 9 赵维俭. 9JY-1800型牧草捡拾圆捆机工作性能分析[J]. 农牧与食品机械,1993(6):9~10.  
Zhao Weijian. Capacity analysis on 9JY-1800 alfalfa round baler[J]. Agricultural and food machinery, 1993(6):9~10. (in Chinese)
- 10 周世宏,史世红,吴树明. 影响圆捆打捆机生产效率的因素分析及解决方案[J]. 农业机械,2005(3):100~101.  
Zhou Shihong, Shi Shihong, Wu Shuming. Acting factors of productivity of the round baler[J]. Agricultural Machinery, 2005(3):100~101. (in Chinese)
- 11 仇志强. 变废为宝 提高产值——浅析玉米秸秆圆捆包膜技术[J]. 农机推广与安全,2005(4):22.
- 12 王国权,余群,卜运龙. 秸秆捡拾打捆机设计及捡拾器的动力学仿真[J]. 农业机械学报,2001,32(5):59~61.  
Wang Guoquan, Yu Qun, Pu Yunlong. Design of pickup baler and dynamic simulation of pickup roller[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2001, 32(5):59~61. (in Chinese)
- 13 王春光,敖恩查,邢冀辉,等. 钢辊外卷式圆捆打捆机设计与试验[J]. 农业机械学报,2010,41(增刊):103~106.  
Wang Chunguang, Ao Encha, Xing Jihui, et al. Design and experiment on round baler with revolute steel roller[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2010,41(Supp.):103~106. (in Chinese)

(上接第71页)

- 14 阎楚良,杨方飞. 农业机械产品数字化设计技术及展望[J]. 中国工程科学,2006,8(9):13~18.  
Yan Chuliang, Yang Fangfei. Digitized design technology and its application in agricultural machinery design[J]. Engineering Science, 2006,8(9):13~18. (in Chinese)
- 15 阎楚良. 农业机械设计数字化是实现农业机械现代化重要战略举措[J]. 科学中国人,2005(2):55~58.  
Yan Chuliang. Digitized design in agricultural machinery is the important strategic initiatives of modernization of agricultural machinery[J]. Scientific Chinese, 2005(2):55~58. (in Chinese)
- 16 李杰,阎楚良,杨方飞. 基于虚拟样机技术的联合收割机切割机构的仿真[J]. 农业机械学报,2006,37(10):74~76.  
Li Jie, Yan Chuliang, Yang Fangfei. Research on cutter's simulation of combine harvester based on virtual prototyping technology[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2006,37(10):74~76. (in Chinese)
- 17 李杰,阎楚良,杨方飞. 联合收割机振动筛的动态仿真与参数优化[J]. 吉林大学学报:工学版,2006,36(5):701~704.  
Li Jie, Yan Chuliang, Yang Fangfei. Dynamic simulation and parameter optimization of the combine harvester vibration sieve[J]. Journal of Jilin University: Engineering and Technology Edition, 2006,36(5):701~704. (in Chinese)
- 18 阎楚良. 农业机械数字化设计新技术[M]. 北京:中国农业科学技术出版社,2003.