

组合式轴流脱分装置动力学仿真

衣淑娟, 陶桂香, 毛 欣

(黑龙江八一农垦大学工程学院, 大庆 163319)

摘 要: 为了从力学的角度对轴流脱粒空间的脱粒机理进行进一步探讨, 根据动力学原理, 建立螺旋叶片板齿组合式轴流脱粒装置的动力学模型, 分析稻谷在装置中受力情况, 并对脱粒过程进行仿真。研究结果表明在整个脱粒过程中, 谷物沿着叶片边缘螺旋线方向受力分布不均匀, 当稻谷沿着螺旋叶片运行到距喂入口 5~9 m 区间时, 此时加速度达到整个脱粒过程中的最大区域。凹板、盖板与滚筒之间的谷物受力明显高于滚筒反力和叶片反力, 证明凹板与盖板参数是影响稻谷轴流脱粒的主要因素。

关键词: 稻谷, 动力学模型, 组合式轴流装置, 仿真

doi: 10.3969/j.issn.1002-6819.2009.07.017

中图分类号: TP391.9

文献标识码: A

文章编号: 1002-6819(2009)-7-0094-04

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 CSAE, 2009, 25(7): 94—97. (in Chinese with English abstract)

0 引 言

组合式轴流脱分装置是由螺旋叶片、板齿、盖板、凹板等部件构成, 稻谷在轴流式脱分装置中做旋转运动的同时又有轴向运动, 稻谷运动的路程较长, 在脱粒的同时进行分离, 具有脱粒功耗低、脱净率较高、茎秆破碎程度低等特点^[1-4], 为了揭示该装置的脱粒本质, 本文对该装置的脱粒机理做进一步的研究。国内外脱粒机理的研究表明, 轴流脱分装置的脱粒质量与谷物在脱粒空间所受冲击、搓揉等力学状态密切相关, 因而研究脱粒过程的动力学特性是脱粒机理研究的主要内容之一。以往研究轴流脱分装置时, 大多沿用郭略契金^[5]的切流脱粒理论基本公式, 认为脱粒空间内谷物的运动速度等于滚筒的圆周速度, 或者假设谷物在脱粒空间内从入口到出口运动时质量保持不变。而实测的谷物平均运动速度仅为滚筒圆周速度的 20%~50%^[6], 随着轴流脱粒过程的进行, 占谷物质量很大一部分的籽粒不断地从凹板分离出去, 改变了谷物在脱粒空间的受力与运动状态, 因而传统的研究思想建立数学模型具有很大的局限性。1988 年张认成运用变质量系统的基本原理, 建立了轴流脱粒空间内谷物运动的非线性力学模型并进行了仿真, 得出谷物交替出现的受力状态是保证籽粒有效脱粒的动力学条件, 但此模型的建立是针对钉齿式轴流装置而言, 并且忽略了滚筒对谷物的作用^[7]。本文拟从动力学的角度对轴流脱分空间的脱粒机理进行探讨, 应用变质量系统的基

本原理, 利用理论推导与仿真相结合的方法, 建立轴流脱分空间内谷物的动力学模型, 通过计算机动态仿真, 探讨轴流稻谷在组合式轴流装置内受力分布规律, 为该装置的进一步研究奠定理论基础。

1 质量变化规律的确定

由稻谷脱粒运动^[1]可知, 脱粒开始时, 稻谷以较低的速度喂入脱分装置, 先经过锥台的抓取后进入脱分空间, 稻谷以一定的速度在滚筒外表面与螺旋叶片所形成的空间内沿着螺旋叶片方向运动, 运动过程中稻谷受到脱粒部件的打击、摩擦、冲击、梳刷、搓擦等作用而使稻谷脱粒。随着脱粒过程的进行, 脱出物不断地从凹板处分离落入接料车, 因此, 对稻谷在脱粒过程进行受力分析时不能忽略稻谷在脱分过程中的质量变化。

由图 1 可知, 设凹板长度近似为滚筒长度为 L , z 为脱粒装置轴线上任一点到喂入口距离, 即稻谷轴线方向的线位移, 由文献[1]可知, 在 z 处的相邻 Δz 内, 各处稻谷被脱粒或分离的机会是相等的。因此, 在任意位置 z 处的相邻 Δz 内, 稻谷中脱下物脱落的概率与稻谷中任意位置时所含稻谷量成正比, 比例系数记为 γ 。由概率论原理求得稻谷质量变化规律为

$$m(z) = Q\gamma e^{-\gamma z} \quad (1)$$

式中: $m(z)$ ——脱粒装置内沿轴向某一点处稻谷质量; $z(t)$ ——脱粒装置内某时刻稻谷沿轴向的位置; γ ——稻谷中脱下物脱落的概率与稻谷中任意位置时所含稻谷量成正比, 其比例系数。通过计算, 根据喂入量为 0.5~2.5 kg/s, 滚筒转速为 600 r/min, 稻谷水分为 15%, 顶距为 30 mm, 凹板间隙为 30 mm, 栅格尺寸为 14 mm × 50 mm 时的试验数据, 计算出的比例系数 $\gamma = 3.1 \sim 3.5$; Q ——喂入量。

收稿日期: 2008-07-20 修订日期: 2009-03-16

基金项目: 国家教育部博士点基金 (20060223001); 农业装备重大产品关键技术装置研制 (2006BAD11A03)

作者简介: 衣淑娟 (1965—), 女, 教授, 博士, 博士生导师, 中国农业工程学会会员 (E041200148S), 研究方向: 收获技术与设备。大庆 黑龙江八一农垦大学工程学院, 163319。Email: yishujuan_2005@126.com

2 稻谷脱粒过程的动力学模型建立

由于脱粒装置内的凹板侧和盖板侧脱粒部件不同，因此稻谷在脱粒时受力状况不同，须分别建立稻谷在凹板侧和盖板侧的动力学模型。谷物微元体示意图如图 1 所示。

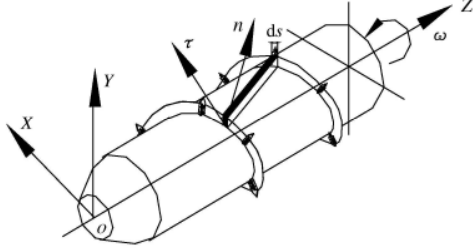


图 1 微元体示意图

Fig.1 Diagrammatic sketch of the infinitesimal

2.1 盖板侧稻谷动力模型的建立

2.1.1 受力分析

盖板侧脱粒部件主要由盖板、脱粒滚筒、螺旋叶片及板齿组成，稻谷在脱粒过程中主要是在滚筒外表面与螺旋叶片所形成的空间沿螺旋叶片方向运动，在运动中因螺旋叶片左侧对稻谷作用很小，在确定动力学模型时，螺旋叶片左侧对稻谷疏导时的作用力忽略不计。稻谷在盖板侧运动时主要受到右侧螺旋叶片的挤压、滚筒支反力、盖板打击力及由于螺旋叶片、滚筒外表面、盖板表面与稻谷之间挤压、搓擦而引起的摩擦力，其中螺旋叶片右侧的挤压作用力与稻谷运动方向相反，对稻谷向前运动有阻碍作用；稻谷与螺旋叶片之间摩擦力方向和滚筒转速方向相同，对稻谷向前运动有推动作用。稻谷运动角近似等于螺旋叶片升角 β ，盖板对稻谷的作用力方向近似与导向板导角 η 方向垂直。在盖板侧脱粒空间内距喂入口 s 处取微元体 ds 进行受力分析，受力如图 2 所示。

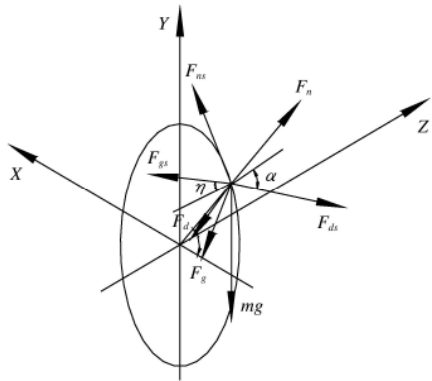


图 2 盖板侧谷物受力示意图

Fig.2 Diagrammatic sketch of grain force capping plate

2.1.2 模型的建立

根据达朗伯原理^[8-10]盖板侧稻谷动力学模型如下

$$\begin{aligned} m(z)a_{ay} &= F_N \sin \theta + F_{ns} \cos \theta - \\ &F_g \cos \eta \cos \theta - F_{gs} \sin \eta \sin \theta - \\ &F_d \sin \beta \cos \theta - F_{ds} \cos \beta \sin \theta - m(z)g \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} m(z)a_{ax} &= -F_n \cos \theta + F_{ns} \sin \theta - \\ &F_d \sin \beta \sin \theta - F_{ds} \cos \beta \cos \theta - \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} &F_g \cos \eta \sin \theta - F_{gs} \sin \eta \cos \theta \\ m(z)a_{az} &= F_{ds} \sin \beta + F_d \cos \beta - \\ &F_g \sin \eta + F_{gs} \cos \eta \end{aligned} \quad (4)$$

式中： θ ——任意时刻微元体沿螺旋叶片方向运动的角度； R ——任意时刻微元体质心所在圆周半径， $R = r + a/2 + d/2$ ；其中： r ——滚筒半径， a ——螺旋叶片高， d ——顶距； β ——螺旋升角， $\beta=9^\circ$ ； η ——盖板侧运动螺旋角，近似等于螺旋升角； F_n 、 F_g 、 F_d 、 F_{ns} 、 F_{gs} 、 F_{ds} ——分别为滚筒表面对微元体的支持力、盖板、螺旋叶片对微元体的挤压力及相应摩擦力； f_{d1} 、 f_{d4} 、 f_{d2} ——微元体与滚筒、盖板、螺旋叶片之间的摩擦系数，大小为 0.35、0.38、0.35。

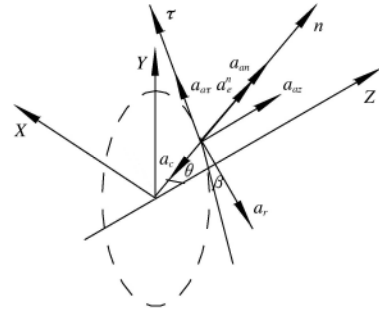


图 3 加速度示意图

Fig.3 Schematic diagram of acceleration

由文献[11-12]基于运动学原理建立了谷物运动模型，得出微元体加速度示意图如图 3，加速度表达式如下

$$a_{ax} = -\ddot{\theta}R \cos \theta; \quad a_{ay} = -\ddot{\theta}R \sin \theta; \quad a_{az} = \dot{\theta}^2 R \sin \beta$$

将上式变量代入方程 (2) ~ (4)，另外为了书写方便设：

$$\begin{aligned} \sin \eta - f_{d1} \cos \eta &= k_1 \\ \cos \beta + f_{d2} \sin \beta &= k_2 \\ \cos \eta \cos \theta + f_{d4} \sin \eta \sin \theta &= k_3 \\ \sin \beta \cos \theta + f_{d2} \cos \beta \sin \theta &= k_4 \\ \sin \theta + f_{d1} \cos \theta &= k_5 \\ -\cos \theta + f_{d1} \sin \theta &= k_6 \\ \cos \eta \sin \theta + f_{d4} \sin \eta \cos \theta &= k_7 \\ \sin \beta \sin \theta + f_{d2} \cos \beta \cos \theta &= k_8 \end{aligned}$$

解方程得：

$$F_d = \frac{m(z)(k_1 k_6 a_{ay} - k_5 k_1 a_{ax} - k_7 k_5 a_{az} + k_3 k_6)}{(k_8 k_5 - k_4 k_6) k_1 - (k_7 k_5 - k_3 k_6) k_2} \quad (5)$$

$$F_g = \frac{m(z)a_{az} - F_d k_2}{k_1} \quad (6)$$

$$F_n = \frac{m(z)a_{ax} + F_d k_7 + F_g k_8}{k_6} \quad (7)$$

2.2 凹板侧稻谷动力模型的建立

2.2.1 受力分析

凹板侧脱粒部件主要由凹板、脱粒滚筒、螺旋叶片

及板齿构成,由稻谷的脱粒运动过程可知,凹板侧主要依靠凹板、滚筒、螺旋叶片及板齿对稻谷的揉搓、挤压而脱粒,其中螺旋叶片左侧对稻谷螺旋运动起疏导作用,但作用力很小可忽略;滚筒、凹板、右侧螺旋叶片对稻谷的挤压作用及由于相互打击和挤压而产生的摩擦力是稻谷脱粒的主要原因,各作用力大小、方向均不一致,一方面可使稻谷由于受到摩擦而脱粒,另一方面可以对稻谷的运动起推动作用使得稻谷在滚筒外表面与螺旋叶片所形成的空间,沿螺旋叶片所形成的滑道运动,运动情况总体上和盖板侧相同。在凹板侧脱粒空间内距喂入口 s 处取微元体 ds 进行受力分析,受力如图 4 所示。

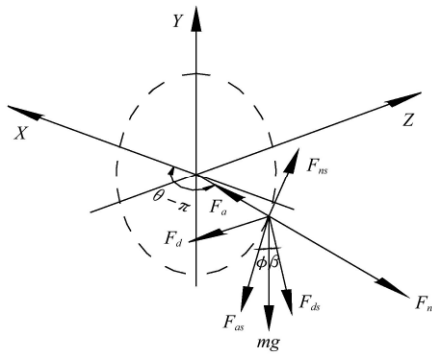


图 4 凹板侧谷物受力示意图

Fig.4 Diagrammatic sketch of grain force concave

2.2.2 模型的建立

由达朗伯原理^[7]得凹板侧稻谷动力模型如下:

$$\begin{aligned} m(z)a_{ay} &= F_n \sin \theta + F_{ns} \cos \theta - \\ &F_a \sin \theta - F_{as} \cos \varphi \cos \theta - \\ &F_d \sin \beta \cos \theta - F_{ds} \cos \beta \sin \theta \\ &- m(z)g \end{aligned} \quad (8)$$

$$\begin{aligned} m(z)a_{ax} &= -F_n \cos \theta + F_{ns} \sin \theta - \\ &F_d \sin \beta \sin \theta - F_{ds} \cos \beta \cos \theta - \\ &F_a \cos \theta - F_{as} \cos \varphi \sin \theta \end{aligned} \quad (9)$$

$$m(z)a_{az} = F_{ds} \sin \beta + F_d \cos \beta + F_{as} \sin \varphi \quad (10)$$

式中: F_a 、 F_{as} 、 f_{d3} ——分别为凹板对微元体的挤压力及相应摩擦力、摩擦系数,其中 f_{d3} 的大小取 0.38。

将上式变量代入方程(8)~(10),另外,为了书写方便设:

$$\begin{aligned} \sin \varepsilon + f_{d2} \cos \varphi \cos \varepsilon &= k_9 \\ \cos \varepsilon + f_{d2} \cos \varphi \sin \varepsilon &= k_{10} \\ \sin \beta \sin \varepsilon + f_{d3} \cos \beta \cos \varepsilon &= k_8 \\ f_{d2} \sin \varphi &= k_{11} \end{aligned}$$

解上式方程得

$$F_d = \frac{m(z)(k_{11}k_6a_{ay} - k_5k_{11}a_{ax} - k_{10}k_5a_{az} + k_9k_6)}{(k_8k_5 - k_4k_6)k_{11} - (k_{10}k_5 - k_9k_6)k_2} \quad (11)$$

$$F_a = \frac{m(z)a_{az} - F_dk_2}{k_{11}} \quad (12)$$

$$F_n = \frac{m(z)a_{ax} + F_ak_{10} + F_dk_8}{k_6} \quad (13)$$

3 动力学模型仿真

3.1 仿真条件

在凹板间隙 30 mm、滚筒转速 600 r/min、顶距 30 mm、喂入量 1.5 kg/s、稻谷水分 15% 条件下,在 Matlab 环境下,用 Simulink 图形输入仿真工具,建立式(2)~(13)的仿真模型对稻谷脱粒过程中各作用力沿螺旋叶片方向的分布规律进行仿真。

边界条件: 滚筒直径 460 mm; 滚筒长度: 2300 mm; 螺旋叶片高度: 70 mm; 螺旋升角: 10° 。

初始条件: $t=0$ 时, $F_n=0$; $F_d=0$; $F_a=0$ 。

3.2 仿真结果与分析

利用 Excel 得到谷物脱粒过程中受力沿螺旋叶片的分布规律如图 5,由图可知,沿螺旋叶片方向,各作用力分布不均匀,呈周期性波动,其中凹板或盖板反力最大,滚筒反力次之,螺旋叶片反力值最小。表明在整个脱粒过程中,凹板或盖板反力与滚筒反力对稻谷脱粒起主要作用,而螺旋叶片的脱粒作用较柔和,主要起输送作用。

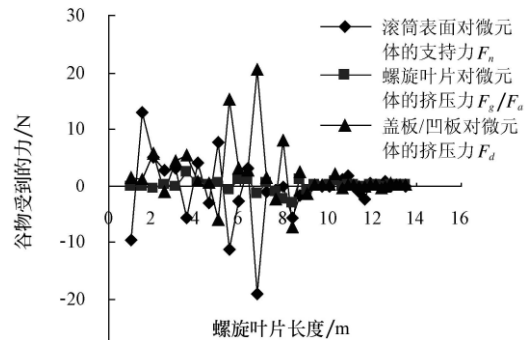


图 5 谷物受到各力沿螺旋叶片的分布

Fig.5 Distribution grain force along helical blade

根据达朗伯原理,谷物受到的外力主要取决于谷物的质量和加速度。当脱粒刚开始时,谷物质量为脱粒过程中的最高值,因此,作用力出现了高峰值,且各作用力高峰值同时出现在 X 轴上方,此高峰区域较短,接着力又恢复较平缓波动状态。当稻谷沿着螺旋叶片运行到距喂入口 5~9 m 区间时,此时加速度达到整个脱粒过程中的最大区域,因此,各作用力再次出现了高峰区域,其中,在距喂入端 6 m 处,各作用力方向相同,而在该区域的其它点各作用方向相异,总之,沿螺旋叶片长度方向各作用力分布不均匀,稻谷受到各作用力高峰值出现在脱粒的前期和中期各有一处。谷物沿螺旋叶片运动时,盖板侧、凹板侧受力不相同,且受力方向随着谷物运动位置不同而呈交替性变化,另外在谷物运动过程中,籽粒、短秆等不断被脱落而分离出去,随着谷物质量不断减少、加速度不断变化,各作用力沿螺旋叶片方向不断变化。

4 结 论

基于动力学原理,建立螺旋叶片板齿组合式轴流脱分装置脱粒过程稻谷动力学模型,通过仿真获得稻谷在装

置内的受力分布规律, 仿真结果表明: 沿螺旋叶片方向, 各作用力分布不均匀, 呈周期性波动, 凹板、盖板与滚筒之间的谷物受力明显高于滚筒反力和叶片反力, 证明凹板与盖板参数是影响稻谷轴流脱粒的主要因素。动力学模型的建立为该装置的进一步研究奠定理论基础。

[参 考 文 献]

- [1] 衣淑娟. 螺旋叶片板齿组合式轴流装置理论与试验研究[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2007.
Yi Shujuan. Study on Assembled Plank-Tooth and Helical Vanes Axial Flow Device Theory and Experiment[D]. Harbin: Northeast Agricaltral University, 2007. (in Chinese with English abstract)
- [2] Harrison H P. Rotor power and losses of an axial flow combin[J]. Transactions of the ASAE, 1991, 34(1): 60—64.
- [3] Long J D, Handy M Y, Johnson W H. A study of the effects of centrifugal force upon wheat separation[J]. ASAE, St.Joseph. 1967, MI49085: 67—69.
- [4] Huynh V M. Threshing and separating process—A mathematical model[J]. Transactions of the ASAE, 1982, 20(1): 65—73.
- [5] 卢里耶 АБ, 格罗姆勃切夫斯基 АА(袁佳平等译). 农业机械的设计和计算[M]. 北京: 中国农业机械出版社, 1983: 547.
- [6] 李升揆, 川村登. 轴流スレシセに関する研究(第二报) 被脱谷物のこぎ室内での运动解析[J]. 农业机械学会誌, 1986, 48(1): 33—41.
- [7] 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 with English abstract)
- [8] 哈工大力学教研室. 理论力学(上册, 第6版)[M]. 北京: 高等教育出版社, 2003: 170—177.
- [9] 清华大学理论力学教研组. 理论力学(中册, 第4版)[M]. 北京: 高等教育出版社, 1979: 160—177.
- [10] 王仲仁, 苑世剑. 弹性与塑性力学基础[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 2004: 1—12.
- [11] 陶桂香. 组合式轴流装置仿真与试验研究[D]. 大庆: 黑龙江八一农垦大学, 2008.
Tao Guixiang. Study on Assembled Axial Flow Device Simulating and Experiment[D]. Daqing: Heilongjiang Bayi Agricultural University, 2008. (in Chinese with English abstract)
- [12] 陶桂香, 衣淑娟. 组合式轴流装置稻谷运动仿真及高速摄像验证[J]. 农业机械学报, 2009, 40(2): 84—86.
Tao Guixiang, Yi Shujuan. Simulation of the rice motion model in axial threshing device[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, 40(2): 84—86. (in Chinese with English abstract)

Dynamic simulation of assembled axial flow threshing and separating device

Yi Shujuan, Tao Guixiang, Mao Xin

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

Abstract: In order to discuss threshing mechanism of axial threshing space further from the view of mechanics, the authors explored a dynamical model of axial flow threshing device with plunk-tooth and helical vanes assembled. Based on the principle of dynamics, mechanical condition of threshing grain was analyzed, and the force that loaded on the grain was simulated in the course of threshing. Results show that the force is uneven along the edge of helical vanes. When grain moves to the area with the range from five to nine meters near to feeding entrance along helical vanes, the acceleration reaches the maximum areas during the threshing period. The force on the grain between the concave board, cover board and cylinder is evidently higher than that on the grain in other space, which indicates that the parameaters of cover board, concave board are main factors of axcial flow threshing.

Key words: grain, dynamic models, assembled axial flow device, simulation