

# 基于颗粒聚合体的玉米果穗建模方法

于亚军<sup>1</sup>, 周海玲<sup>1</sup>, 付宏<sup>2</sup>, 吴玄辰<sup>1</sup>, 于建群<sup>1\*</sup>

(1. 吉林大学生物与农业工程学院, 长春 130022; 2. 吉林大学计算机科学与技术学院, 长春 130012)

**摘要:** 在采用离散元法分析玉米脱粒过程时, 需要建立玉米果穗的分析模型。该文根据玉米果穗的结构和形态, 提出基于颗粒聚合体的玉米果穗分析模型建模方法, 并研制了玉米果穗的建模软件, 同时添加到自主研发的玉米脱粒过程分析软件中。通过实际玉米果穗与其分析模型的对比和玉米脱粒过程的初步仿真分析, 证明了该玉米果穗建模方法的可行性, 为采用离散元法分析玉米的脱粒过程奠定了基础。

**关键词:** 仿真分析, 建模, 软件, 玉米, 脱粒, 颗粒聚合体, 离散元法

doi: 10.3969/j.issn.1002-6819.2012.08.026

中图分类号: TP391.7

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2012)-08-0167-08

于亚军, 周海玲, 付宏, 等. 基于颗粒聚合体的玉米果穗建模方法[J]. 农业工程学报, 2012, 28(8): 167-174.

Yu Yajun, Zhou Hailing, Fu Hong, et al. Modeling method of corn ears based on particles agglomerate[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2012, 28(8): 167-174. (in Chinese with English abstract)

## 0 引言

在采用离散元法<sup>[1-2]</sup>分析玉米脱粒过程时, 需要建立玉米果穗的分析模型。对于玉米果穗的建模研究, 目前主要集中在虚拟作物的研究方面。如王雪提出的基于骨架模型的玉米生长运动仿真方法<sup>[3]</sup>, 实现了对玉米生长运动的可视化模拟; 刘晓东提出的基于 Loop 细分格式的虚拟作物果实建模<sup>[4]</sup>, 实现了对小麦和玉米果实形态的建模。而基于分析玉米脱粒过程的玉米果穗建模, 并能够实现玉米籽粒脱落和玉米芯的断裂, 尚未见报道。

本文提出一种玉米果穗建模的新方法——颗粒聚合体方法<sup>[5]</sup>, 同时研制了玉米果穗建模软件。采用该建模方法建立的玉米果穗分析模型, 不仅能够模拟玉米果穗的结构和形态, 还可以模拟玉米脱粒时, 籽粒脱落和玉米芯的破碎。本文的研究工作为采用离散元法分析玉米的脱粒过程奠定了基础。

## 1 玉米果穗结构分析

玉米果穗的结构如图 1 所示, 包含玉米芯和生长在芯上的籽粒 2 个部分。通过对玉米果穗结构和形态分析, 同时为了实现不同品种玉米果穗的模拟, 将果穗在轴向上分成 4 段, 即前段、中段 1、中段 2 和末段, 如图 1a 所示。其中前段和末段不再细分, 中段 1 和中段 2 部分

可根据果穗的结构再分为小段, 通常每一段几何形状近似成圆台形。如图 1b 所示, 玉米果穗截面上可由籽粒行数  $row$  划分成相应的块数, 每一块玉米果穗的截面为角度  $\theta$  ( $^\circ$ ) 的扇形平面 ( $\theta=360^\circ/row$ )。



图 1 玉米果穗结构  
Fig.1 Structure of corn ear

不同品种的玉米果穗可用如下参数表征: 玉米果穗长、籽粒行数、行粒数、每段果穗大小端直径、每段长度、每段行内籽粒偏移角度和行间籽粒偏移量<sup>[6-7]</sup>。其中行内籽粒偏移角度为同一行内相邻玉米籽粒中心连线与果穗轴线的夹角, 行间籽粒偏移量为相邻 2 行同一位置玉米籽粒中心在轴向上的距离, 见图 1a。

通常玉米芯也近似圆台形, 与玉米果穗对应, 玉米芯也可分为前段、中段 1、中段 2 和末段, 其几何形状也可用玉米芯每段大小端直径、每段长度和总长度表征, 见图 2。

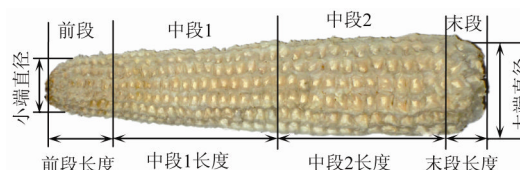


图 2 玉米芯结构  
Fig.2 Structure of corn cob

收稿日期: 2011-12-10 修订日期: 2012-02-24

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (60973090、51175219、11172112); 吉林省科技发展计划项目 (20100313); 吉林大学工程仿生教育部重点实验室开放课题资助项目 (K2010082)

作者简介: 于亚军 (1983—), 男, 黑龙江哈尔滨人, 博士生, 主要从事离散元法边界建模及农机部件优化设计方面的研究。长春 吉林大学生物与农业工程学院, 130022。Email: yy19830202@yahoo.com.cn

\*通信作者: 于建群 (1958—), 男, 吉林长春人, 教授, 博士生导师, 主要从事农业机械方面的教学和研究。长春 吉林大学生物与农业工程学院, 130022。Email: yujianqun@jlu.edu.cn

通常玉米籽粒截面近似梯形，其几何形状可用上底宽、下底宽、高度和厚度表征，见图 3。

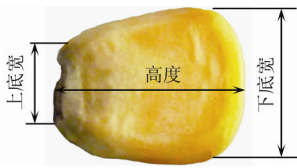


图 3 玉米籽粒结构  
Fig.3 Structure of a corn kernel

## 2 玉米果穗分析模型建模方法

### 2.1 玉米芯分析模型建模方法

玉米芯分析模型建模方法及主要步骤如下：

1) 首先建立全局坐标系  $oxyz$  及玉米芯局部坐标系  $OXYZ$  (见图 4)。其中全局坐标系是大地坐标系，局部坐标系与玉米芯相连，原点为玉米芯质心，玉米芯轴线方向为  $X$  轴，过原点且垂直于  $X$  轴的平面中的过某一玉米籽粒中心的直线为  $Y$  轴， $Z$  轴由右手定则确定。

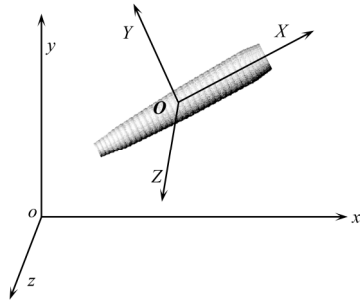


图 4 全局坐标系和局部坐标系

Fig.4 Global coordinate system and local coordinate system of corn cob

2) 为了模拟脱粒过程中玉米芯的断裂，将玉米芯分成若干小块。在轴向上中段 1 和中段 2 (如图 2) 还可分为  $n_1$  和  $n_2$  小段，因此玉米芯在轴向上的段数  $n=2+n_1+n_2$ 。在截面上玉米芯由籽粒行数  $row$  划分成相应的块数，见图 1b。因此整个玉米芯可分为  $n \times row$  个玉米芯小块，每个小块上生长一定数量的玉米籽粒。

3) 每个玉米芯小块采用球组合而成，且每个球对应一个玉米籽粒，即每个玉米籽粒生长在玉米芯小块的一个组成球上。玉米脱粒过程中，每个玉米芯小块不再发生破碎。

4) 采用颗粒聚合体方法<sup>[5]</sup>建立玉米芯的分析模型，即在截面上相邻玉米芯小块的起始组成球相连接，生成各段玉米芯；在轴向上相邻 2 段玉米芯首尾组成球相连接，生成整个玉米芯。每个玉米芯小块之间的连接由连接力学模型<sup>[8-9]</sup>产生的连接力实现。当作用在小块上的外力大于连接力时，小块之间的连接被破坏，由此即可实现脱粒时玉米芯破碎成小块或几个小块的组合。

在采用上述方法建立玉米芯分析模型时，玉米芯小块组成球的半径及球心坐标计算方法如下：

1) 首先将玉米芯每个小块编号，其中第 1 段即前段

对应小块编号为  $0 \sim (row-1)$ ，第  $k$  段对应小块编号为  $(k-1) \times row \sim (k \times row-1)$ ，全部小块编号为  $0, 1, \dots, i, \dots, (n \times row-1)$ 。

2) 由输入的玉米芯前段和末段大小端半径、长度和段行粒数，确定玉米芯分析模型的前段和末段的大小端半径、长度和段行粒数。

3) 当中段 1 和中段 2 玉米芯分为  $n_1$ 、 $n_2$  段时，由输入的玉米芯中段 1 和中段 2 大小端半径、长度和段行粒数，通过比例关系计算出各段玉米芯分析模型的大小端半径、长度和段行粒数 (1 段玉米穗上 1 行玉米籽粒的个数)。

如图 5 所示，以中段 1 玉米芯为例，设中段 1 的各小段编号分别为  $0, 1, \dots, k, \dots, n_1-1$ 。设中段 1 玉米芯的长度为  $len_1$  (mm)，段行粒数为  $rownum_1$ ，大小端半径分别  $rx$  (mm)、 $rs$  (mm)， $\Delta r$  (mm) 为大小端半径之差， $\Delta rx_k$  (mm)、 $\Delta rs_k$  (mm) 分别为第  $k$  小段玉米芯大小端半径与  $rs$  之差。由三角形比例关系即可计算出  $\Delta rx_k$ 、 $\Delta rs_k$  分别为  $(k+1) \times \Delta r / n_1$ 、 $k \times \Delta r / n_1$ ，第  $k$  小段玉米芯的大小端半径分别为  $\Delta rx_k + rs$ 、 $\Delta rs_k + rs$ 。各段玉米芯长度为  $len_1 / n_1$ ，段行粒数为  $rownum_1 / n_1$ 。

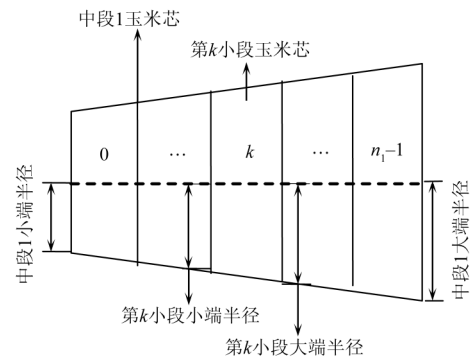


图 5 中段 1 玉米芯轴向截面的结构简图

Fig.5 Schematic of axial section of mid-part corn cob

4) 由前面计算出的玉米芯小块参数，计算玉米芯小块各组成球的球心坐标和半径。如图 6 所示，以第  $i$  号玉米芯小块为例，设玉米芯小块的长度 (即所在段长度)、行内偏移角度、行间偏移量、所在段大小端半径和对应的段行粒数分别为  $len_i$ 、 $\alpha_i$ 、 $p_i$ 、 $rx_i$ 、 $rs_i$  和  $rownum_i$ ，其中  $\alpha_i$  和  $p_i$  由用户设定，其他参数由步骤 3) 求得。玉米芯小块组成球个数为  $rownum_i$ ，各组成球编号分别为  $0, 1, \dots, j, \dots, rownum_i-1$ 。由大小端半径及段行粒数采用步骤 3) 中的算法即可求出组成球  $j$  的直径  $d_j$  (mm) 为

$$d_j = (2 \times j + 1) \times (rx_i - rs_i) / (2 \times rownum_i) + rs_i \quad (1)$$

由玉米芯小块编号  $i$ 、组成球编号  $j$ 、行内偏移角度计算组成球沿  $X$  轴轴向偏移角度，然后即可计算出玉米芯局部坐标系下组成球半径及球心的  $X$ 、 $Y$ 、 $Z$  坐标分别为

$$r_j = 0.5 \times d_j \quad (2)$$

$$X_{\text{芯}j} = (2 \times j + 1) \times len_i / rownum_i \quad (3)$$

$$Y_{\text{芯}j} = r_j \times \sin(i \times \theta + j \times \alpha_i) \quad (4)$$

$$Z_{\text{芯}j} = r_j \times \cos(i \times \theta + j \times \alpha_i) \quad (5)$$

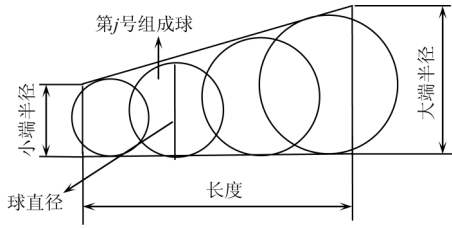


图 6 第  $i$  号玉米芯小块结构简图

Fig.6 Schematic of the number  $i$  piece of corn cob

计算玉米芯组成球的行间偏移量算法为：将玉米芯小块编号以行数为模取余，即将玉米芯小块的编号化为  $0 \sim (\text{row}-1)$ ，当编号为偶数时球心位置不变，奇数时组成球球心  $X$  坐标增加  $p_i$ 。采用上述方法建立的玉米芯几何模型，如图 7 所示。

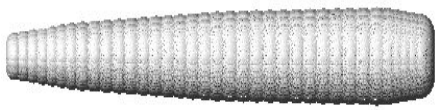


图 7 玉米芯分析模型  
Fig.7 Analysis model of corn cob

## 2.2 玉米籽粒分析模型建模方法

玉米籽粒分析模型建模方法及主要步骤如下：

1) 首先建立玉米籽粒局部坐标系  $O'X'Y'Z'$  (见图 8)，坐标原点为玉米籽粒质心， $X'$ 轴与  $X$ 轴 (见图 4) 平行，籽粒质心和籽粒对应玉米芯组成球心连线为  $Y'$ 轴， $Z'$ 轴由右手定则确定。

2) 每个玉米籽粒采用一定数量的单层球组合而成<sup>[10]</sup>，球直径即为玉米籽粒的厚度，玉米籽粒上底、下底和 2 侧各采用一定数量的球组合，籽粒内部也采用球填充。对籽粒进行受力分析时，计算出各组成球的作用力并求合力，即是作用在该籽粒上的作用力。

为了简化算法和编程，玉米籽粒视为一个整体，各组成球不再分离，即玉米籽粒不破碎。脱粒过程中籽粒破碎判断，是通过计算籽粒上的最大作用力，并与试验得到的破碎力比较来实现。

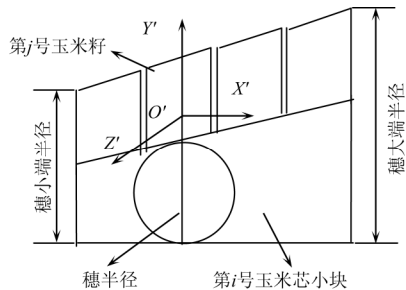


图 8 玉米籽粒局部坐标系

Fig.8 Local coordinate system of corn kernel

在采用上述方法建立玉米籽粒分析模型时，玉米籽粒组成球的半径和球心坐标计算方法如下：

a) 由输入的前段、中段 1、中段 2 和末段大小端玉米果穗半径，确定前段和末段及中段 1 和 2 分成各

段玉米果穗分析模型的大小端半径，其中中段 1 和中段 2 分成各段的大小端玉米果穗半径与各段玉米芯模型的大小端半径计算方法相同。

b) 由玉米芯小块的参数计算出各玉米籽粒的参数 (上底宽、下底宽、高度和厚度) 和质心坐标。如图 8 所示，以玉米芯小块  $i$  及第  $j$  号组成球对应的玉米籽粒为例，设玉米芯小块所在段大小端果穗半径为  $srx_i$  (mm) 和  $srs_i$  (mm)，其他参数见 2.1 节。由玉米芯小块对应的段长度及段行粒数计算出籽粒厚度  $d_{厚j}$  (mm) 为

$$d_{厚j} = len_i / rownum_i \quad (6)$$

由大小端果穗半径、大小端芯半径、段行粒数，计算出籽粒质心位置对应的果穗半径  $rad_{穗j}$  (mm)、芯半径  $rad_{芯j}$  (mm)、籽粒上底面宽度  $d_{上j}$  (mm)、下底面宽度

$d_{下j}$  (mm) 见图 9 分别为

$$rad_{穗j} = (2 \times j + 1) \times (srx_i - srs_i) / (2 \times rownum_i) + srs_i \quad (7)$$

$$rad_{芯j} = (2 \times j + 1) \times (rx_i - rs_i) / (2 \times rownum_i) + rs_i \quad (8)$$

$$d_{上j} = 2 \times rad_{穗j} \times \tan(\theta/2) \quad (9)$$

$$d_{下j} = 2 \times rad_{芯j} \times \tan(\theta/2) \quad (10)$$

由籽粒质心对应的果穗半径和芯半径，计算出籽粒的高度  $d_{高j}$  (mm)，由籽粒的高度计算出质心与玉米果穗轴线的距离  $h$  (mm)，分别为

$$d_{高j} = rad_{穗j} - rad_{芯j} \quad (11)$$

$$h = 2 \times d_{高j} / 3 + rad_{芯j} \quad (12)$$

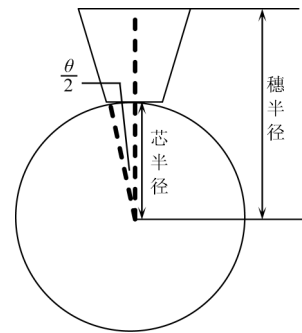


图 9 玉米果穗截面简图

Fig.9 Schematic of the section of corn ear

由质心与玉米果穗轴线的距离，计算出玉米芯局部坐标系下籽粒质心的  $X$ 、 $Y$ 、 $Z$  坐标分别为

$$X_{粒j} = (2 \times j + 1) \times len_i / rownum_i \quad (13)$$

$$Y_{粒j} = h \times \sin(i \times \theta + j \times \alpha_i) \quad (14)$$

$$Z_{粒j} = h \times \cos(i \times \theta + j \times \alpha_i) \quad (15)$$

计算玉米籽粒的行间偏移量算法与计算玉米芯组成球的行间偏移量算法相同。限于篇幅，籽粒各组成球中心坐标的计算从略。采用上述方法建立的玉米籽粒几何模型如图 10 所示。

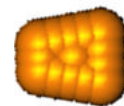


图 10 玉米籽粒分析模型

Fig.10 Analysis model of corn kernel



### 2.3 玉米果穗分析模型建模方法

本文采用颗粒聚合体方法<sup>[5]</sup>建立玉米果穗的分析模型，即采用一个连接球模拟籽粒果柄，将玉米籽粒与对应的玉米芯组成球连接，连接球半径与籽粒组成球半径相同，且认为连接球与玉米籽粒是一个整体，如图 11 所示。玉米籽粒脱落（脱粒）时，同时删除连接球。生成玉米果穗的局部坐标系与玉米芯局部坐标系  $OXYZ$  相同，见图 4 和图 11。

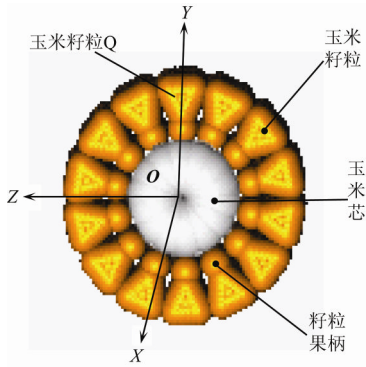


图 11 玉米芯、籽粒和籽粒果柄简图

Fig.11 Schematic of corn cob, kernel and kernel stem

为计算玉米籽粒与玉米芯的连接力<sup>[11-12]</sup>，需建立另一个局部坐标系  $O''X''Y''Z''$ ，其中坐标原点  $O''$  为与被分析玉米籽粒连接的玉米芯小块组成球球心， $X''$  轴为连接球球心与组成球球心连线（与  $Y$  轴平行），当被分析籽粒为  $Q$  时（见图 11）， $Y''$  轴与  $Z$  轴平行，当分析其它籽粒时， $Y''$  轴需转动， $Z''$  与  $X$  轴平行。因在离散元法分析计算中，玉米果穗上邻接接触籽粒的影响已考虑，所以下面只考虑玉米果穗上存在一个被分析籽粒（如  $Q$  籽粒）时的情况。

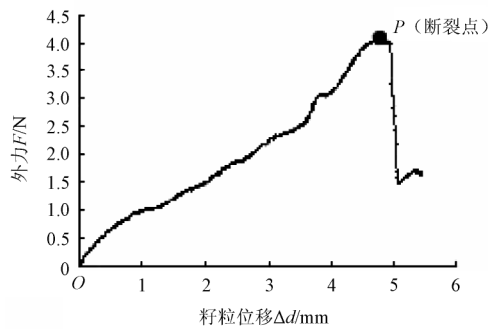


图 12 籽粒沿坐标轴位移  $\Delta d$  与沿坐标轴作用力  $F$  的关系

Fig.12 Relationship between kernel's displacement  $\Delta d$  and force  $F$  along the axes obtained from experiments

通过试验可知<sup>[13]</sup>，在  $O''X''Y''Z''$  坐标系中，当作用在该籽粒上的外力与某坐标轴（ $X''$ 、 $Y''$  或  $Z''$ ）平行时，则该籽粒相对于玉米芯沿坐标轴（ $X''$ 、 $Y''$  或  $Z''$ ）的位移  $\Delta d$  (mm) 与  $F$ (N) 的关系见图 12 所示。图中  $P$  点为籽粒脱粒点，即当作用在籽粒（如  $Q$  籽粒）上的外力  $F$  (N) 大于等于  $P$  点力时，该籽粒脱落（脱粒）。

因图 12 中  $OP$  段近似为直线，因此可以采用线性粘

弹性力学模型<sup>[8-9]</sup>，计算玉米籽粒与玉米芯之间沿  $X''$ 、 $Y''$  或  $Z''$  轴的连接力为

$$\begin{cases} F_{X''}^{(t)} = F_{X''K}^{(t)} + F_{X''D}^{(t)} \\ F_{Y''}^{(t)} = F_{Y''K}^{(t)} + F_{Y''D}^{(t)} \\ F_{Z''}^{(t)} = F_{Z''K}^{(t)} + F_{Z''D}^{(t)} \end{cases} \quad (16)$$

式中  $F_{X''}^{(t)}$ 、 $F_{Y''}^{(t)}$  和  $F_{Z''}^{(t)}$  为  $t$  时刻玉米芯组成球  $i$  和连接球  $j$  沿  $X''$ 、 $Y''$  或  $Z''$  轴方向连接力，N；其中  $F_{X''(Y'',Z'')K}^{(t)}$  为沿  $X''$ 、 $Y''$  或  $Z''$  轴方向连接的弹性力，N， $F_{X''(Y'',Z'')K}^{(t)} = F_{X''(Y'',Z'')K}^{(t-\Delta t)} + \Delta F_{X''(Y'',Z'')K}^{(t)}$ ； $F_{X''(Y'',Z'')K}^{(t-\Delta t)}$  为上一时步沿  $X''$ 、 $Y''$  或  $Z''$  轴方向连接的弹性力，N； $\Delta F_{X''(Y'',Z'')K}^{(t)} = K_{X''(Y'',Z'')} \Delta u_{X''(Y'',Z'')}$ ； $K_{X''(Y'',Z'')}$  为沿  $X''$ 、 $Y''$  或  $Z''$  轴方向连接的刚度系数； $\Delta u_{X''(Y'',Z'')}$  为  $t$  时刻两球沿  $X''$ 、 $Y''$  或  $Z''$  轴方向的相对位移，mm； $F_{X''(Y'',Z'')D}^{(t)}$  为沿  $X''$ 、 $Y''$  或  $Z''$  轴方向连接的阻尼力，N， $F_{X''(Y'',Z'')D}^{(t)} = C_{X''(Y'',Z'')} \Delta u_{X''(Y'',Z'')} / \Delta t$ ； $C_{X''(Y'',Z'')}$  为沿  $X''$ 、 $Y''$  或  $Z''$  轴方向连接的阻尼系数； $\Delta t$  为计算时间步长，s。

采用库伦-摩尔准则判断籽粒的脱粒，步骤为：①建立直角坐标系见图 13，其中  $X$ 、 $Y$  和  $Z$  轴分别为籽粒与玉米芯间的连接作用力  $F_{X''}^{(t)}$ 、 $F_{Y''}^{(t)}$  和  $F_{Z''}^{(t)}$ ；在该坐标系的  $X$ 、 $Y$  和  $Z$  轴上，分别标出试验得到的  $F_{\max X''}$ 、 $F_{\max Y''}$ 、 $F_{\max Z''}$  点，其中  $-F_{\max X''}$  是籽粒上作用外力为压力时，籽粒脱落时的作用力，N； $F_{\max X''}$  是籽粒上作用外力为拉力时，籽粒脱落时的作用力，N；分别过坐标轴上  $F_{\max Y''}$ 、 $-F_{\max Y''}$ 、 $F_{\max Z''}$ 、 $-F_{\max Z''}$  点做倾角为  $\gamma$  ( $\gamma$  为籽粒与芯之间的摩擦角，°) 的斜面，在过  $F_{\max X''}$ 、 $-F_{\max X''}$  做平行于坐标面的平面，则由上述平面围成的梯形六面体区域形成判断脱粒的准则；②由公式 (1) 计算出当前时步被分析籽粒与芯之间的连接作用力  $F_{X''}^{(t)}$ 、 $F_{Y''}^{(t)}$  和  $F_{Z''}^{(t)}$ ，把 3 个作用力  $F_{X''}^{(t)}$ 、 $F_{Y''}^{(t)}$  和  $F_{Z''}^{(t)}$  标在图 13 中，如果 3 个作用力形成的坐标点在梯形六面体区域之外，则该籽粒脱粒；如果 3 个作用力形成的坐标点在梯形六面体区域内，则该籽粒不脱落。

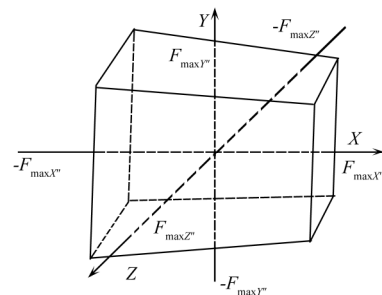


图 13 玉米籽粒脱粒的库伦摩尔准则

Fig.13 Mohr-Coulomb criterion of corn kernel threshing

玉米芯组成小块之间的连接力计算和破坏准则，也可以采用上述方法，区别在于：①局部坐标系选取不同，计算玉米芯组成小块之间连接力时，局部坐标系的  $X''$  轴为两连接球心连线；②刚度系数和阻尼系数

选取不同，玉米芯组成小块之间的连接力计算和破坏准则，采用由试验得到的玉米芯连接刚度系数和阻尼系数；玉米芯与籽粒之间的连接力计算和破坏准则，采用由试验得到的玉米芯与籽粒之间连接的刚度系数和阻尼系数。

这样从外部看一个玉米果穗是一个整体，当与脱粒部件（或其他玉米穗或脱下的玉米粒）发生接触时，采用离散元法中的接触力学模型<sup>[14]</sup>，计算接触作用力（斥力）。从内部来看，组成玉米芯的小块、玉米芯与籽粒间采用连接力学模型<sup>[8-9]</sup>计算连接力（吸引力）。当作用外力在梯形六面体区域外时，玉米芯破碎或籽粒从玉米芯脱落（脱粒）；当作用外力在梯形六面体区域内时，玉米芯不破碎或籽粒不从玉米芯脱落（脱粒），此时玉米籽粒与玉米芯之间和玉米芯小块间可以有相对位移。

### 3 玉米脱粒过程的离散元法计算方法

玉米脱粒过程的离散元法计算方法如下。

1) 在全局坐标系  $oxyz$  的脱粒机玉米果穗入口随机产生一点，作为待生成玉米穗的质量中心，以该点为坐标原点，产生局部坐标系  $OXYZ$  并生成一个玉米芯。然后计算玉米籽粒质心点坐标，在该点建立局部坐标系  $OXYZ$ ，并生成玉米籽粒，由此生成一个玉米果穗。下一时步再随机产生一点，并用同样方法生成另一个玉米

果穗，如此反复。

2) 在全局坐标系  $oxyz$  下，生成的玉米果穗在重力作用下下落，当碰到脱粒部件并接触碰撞时，采用接触力学模型<sup>[14]</sup>计算接触作用力，并计算该果穗上的所有接触作用合力和合力矩，然后在全局坐标系  $oxyz$  下，由牛顿第二定律计算该果穗质心的平动速度和位移，在局部坐标系  $OXYZ$  下由欧拉动力学方程，计算该果穗绕质心的角速度和角位移。

3) 在局部坐标系  $O'X''Y''Z''$  下，计算玉米芯与籽粒（或玉米芯组成小块）之间的连接力并由库伦-摩尔准则判断籽粒是否脱粒（破碎），如果不脱落（破碎）则在局部坐标系  $O'X''Y''Z''$  下，计算玉米籽粒与玉米芯之（或玉米芯组成小块）间相对位移。

4) 对于脱落的玉米籽粒（或玉米芯小块），根据其上的合力和合力矩，在全局坐标系  $oxyz$  下，由牛顿第二定律计算该籽粒质心的平动速度和位移，在局部坐标系  $OXYZ$  下由欧拉动力学方程，计算该籽粒绕质心的角速度和角位移。

通过上述方法按时步迭代，即可求出玉米穗、脱落玉米籽粒、破碎玉米芯小块和未脱落籽粒相对其生长玉米芯，在每一时刻所受的力、力矩、运动速度和新位置，由此即可分析玉米的脱粒过程。

根据上述玉米脱粒过程计算方法，课题组研制了玉米脱粒过程分析软件<sup>[15]</sup>，软件的流程见图 14。

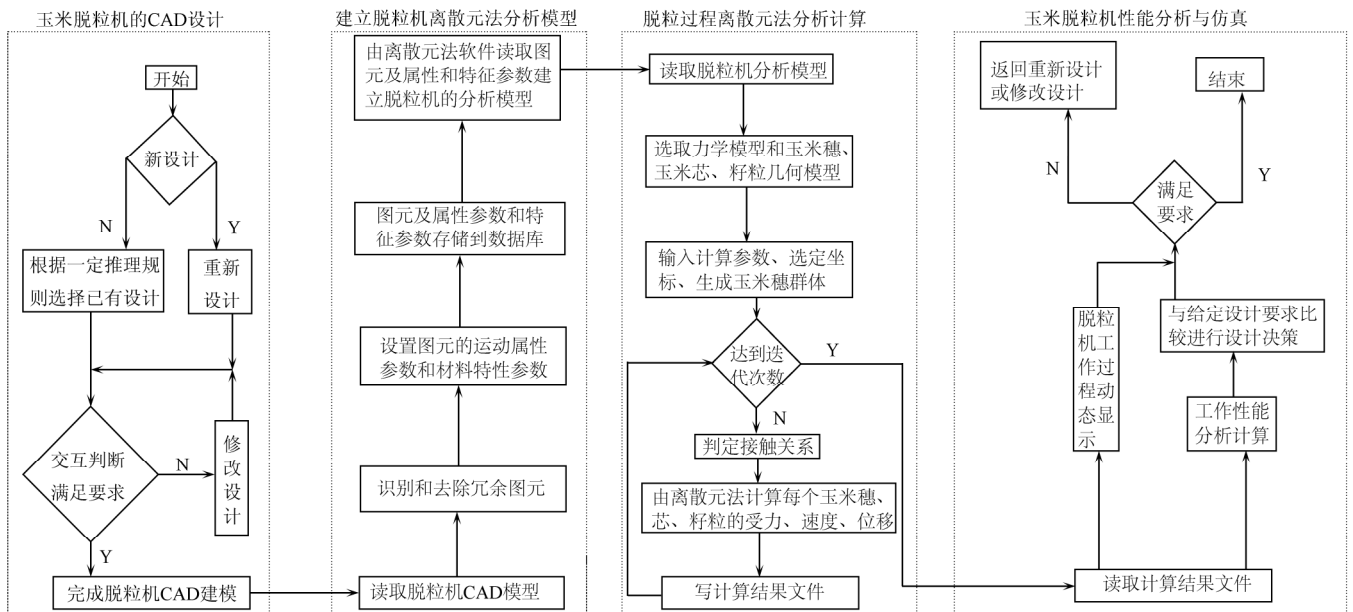


图 14 玉米脱粒过程分析软件的结构及流程图

Fig.14 Structure and flow chart of analysis software for corn threshing process

## 4 果穗建模方法的实例验证

### 4.1 实例验证

根据上述玉米果穗建模方法，设计了果穗建模模块，并添加到文献<sup>[15]</sup>开发的分析软件上。

以吉单 79、先锋 8 号和郑单 958 三个品种玉米果穗

为例，采用上述建模方法及软件，所建立的玉米果穗分析模型与实际玉米果穗的对比，见图 15~17，其中建模参数（根据实际果穗测量得到）选取如表 1~3 所示。

通过图 15~17 的对比可知，采用本文提出的玉米果穗建模方法及其软件，所建立的玉米果穗分析模型，与实际玉米果穗的形态较相近。

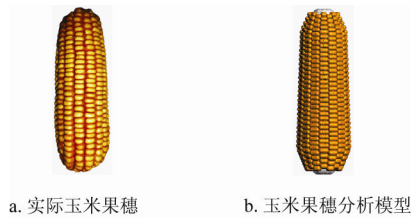


图 15 吉单 79 实际玉米果穗与其分析模型的对比

Fig.15 Contrast of the entities and analysis models of corn ear of JiDan79

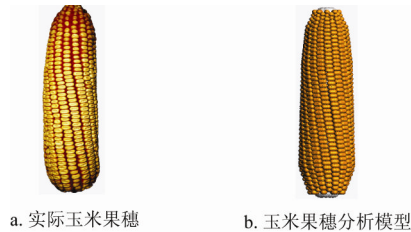


图 16 先锋 8 号实际玉米果穗与其分析模型的对比

Fig.16 Contrast of the entities and analysis models of corn ear of XianFeng8

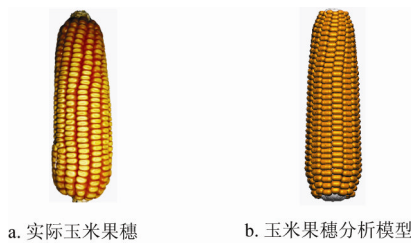


图 17 郑单 958 实际玉米果穗与其分析模型的对比

Fig.17 Contrast of the entities and analysis models of corn ear of ZhengDan958

表 1 吉单 79 号玉米果穗建模参数

Table 1 Model Parameters of corn ear of JiDan79

果穗长 /mm	上底穗半径 /mm	下底穗半径 /mm	上底芯半径 /mm	下底芯半径 /mm	行内偏移角 /( $^{\circ}$ )	行间偏移量 /mm	行粒数 /粒	行数 /行	
前段	20.5	17.5	23.4	10.5	14	0	2.1	4	16
中段	114.5	23.4	27	14	16.2	0	2.1	26	16
末段	20	27	18.8	16.2	11	0	2.1	3	16

表 2 先锋 8 号玉米果穗建模参数

Table 2 Model Parameters of corn ear of XianFeng8

果穗长 /mm	上底穗半径 /mm	下底穗半径 /mm	上底芯半径 /mm	下底芯半径 /mm	行内偏移角 /( $^{\circ}$ )	行间偏移量 /mm	行粒数 /粒	行数 /行	
前段	20	12.6	21.1	9.1	10.7	0	2.7	6	18
中段 1	39	21.1	24.8	10.7	11.8	0.7	2.7	24	18
中段 2	110	24.8	26.6	11.8	13.7	1.5	2.7	10	18
末段	28	25.6	17.4	12.9	10.4	0.6	2.7	5	18

表 3 郑单 958 玉米果穗建模参数选取

Table 3 Model Parameters of corn ear of ZhengDan958

果穗长 /mm	上底穗半径 /mm	下底穗半径 /mm	上底芯半径 /mm	下底芯半径 /mm	行内偏移角 /( $^{\circ}$ )	行间偏移量 /mm	行粒数 /粒	行数 /行	
前段	22	16	20.5	8.5	10.4	-0.5	1.5	4	14
中段 1	43.5	20	24.8	10.7	11.8	-0.7	1.5	9	14
中段 2	110	24.8	26.6	11.8	13.7	-1.5	1.5	18	14
末段	28	25.6	17.4	12.9	10.4	-0.6	1.5	4	14

图 18 为一种滚筒式玉米脱粒机的三维 CAD 模型。图 19 为采用图 14 的边界建模模块<sup>[16]</sup>，由图 18 的三维 CAD 模型建立的该脱粒机的三维离散元法分析模型。图 20 为采用上述玉米果穗分析模型和脱粒过程分析软件。实现的玉米脱粒过程三维离散元法仿真分析。从图中可以看出，随着仿真计算时间的延续，玉米籽粒逐渐从玉米果穗上脱落，并从脱粒机凹板上的孔漏出。

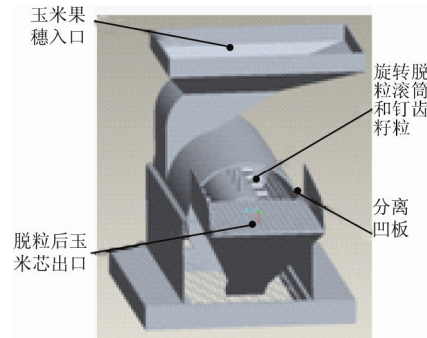


图 18 滚筒式玉米脱粒机的三维 CAD 模型

Fig.18 Three dimensional CAD model of drum type corn thresher

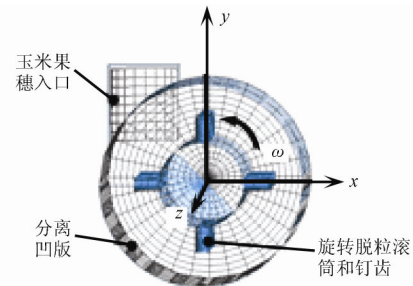
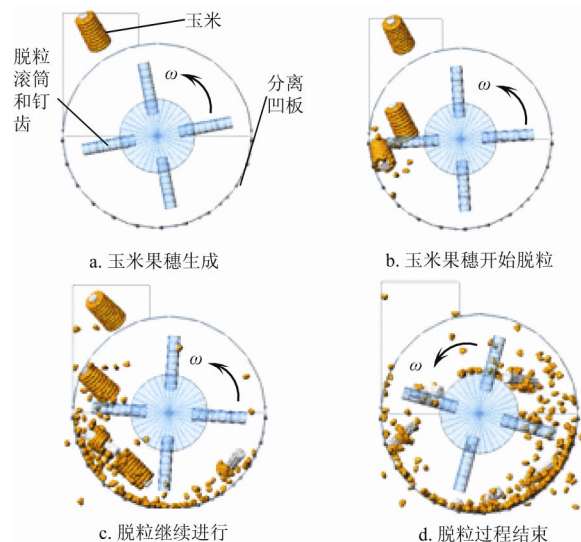


图 19 滚筒式玉米脱粒机的三维离散元法分析模型

Fig.19 Three dimensional DEM analysis model of drum type corn thresher



注：图中  $\omega$  为脱粒机的转速，rad/s。

图 20 玉米脱粒过程的三维离散元法仿真分析

Fig.20 Simulation and analysis of corn threshing process based on three dimensional discrete element method

仿真分析时玉米芯之间及玉米芯与玉米籽粒之间的

破坏力的选取见表 4，仿真参数选取见表 5，其中玉米芯与玉米籽粒的密度分别为 156 和 1 200 kg/m<sup>3</sup>，其他数据均为前期试验测试结果。

表 4 玉米脱粒过程仿真时破坏力  
Table 4 Broken force of corn threshing process

	法向最大压力 $-F_{\max X'}/N$	法向最大拉力 $F_{\max X'}/N$	切向最大力 $F_{\max Y'}/N$	切向最大力 $F_{\max Z'}/N$
玉米芯间	50	66	100	100
玉米芯与玉米籽粒间	0.75	2.7	0.15	0.3

表 5 玉米脱粒过程仿真分析参数

Table 5 Parameters of simulation and analysis of corn threshing process

	法向刚度系数 $k_n/(N \cdot m^{-1})$	切向刚度系数 $k_s/(N \cdot m^{-1})$	法向阻尼系数 $c_n/(N \cdot s \cdot m^{-1})$	切向阻尼系数 $c_s/(N \cdot s \cdot m^{-1})$	动摩擦因数 $f_k$	静摩擦因数 $f_s$
玉米芯与玉米籽粒连接力学模型	2 100	60	0.64	0.11	0	0
玉米芯与玉米籽粒接触力学模型	1 200	800	0.4	0.32	0.3	0.4
玉米芯与玉米芯连接力学模型	1 000	800	0.51	0.43	0	0
玉米芯与玉米芯间接接触力学模型	800	500	0.45	0.37	1.8	2.1
玉米籽粒之间接触力学模型	2 500	1700	0.3	0.24	0.30	0.4
玉米芯与边界接触力学模型	1 600	1000	0.64	0.52	0.5	0.6
玉米籽粒与边界接触力学模型	5 000	3300	0.25	0.21	0.3	0.4

上述实例初步证明了本文建立的玉米果穗分析模型的可行性和有效性，可以实现玉米脱粒过程的仿真分析。有关玉米脱粒过程仿真分析及其与试验的详细对比将另文撰述。

#### 4.2 讨论

本文所提出的玉米果穗建模方法，以 3 个玉米品种为研究对象进行了分析和研究，通过实例验证可知，采用本文提出的玉米果穗建模方法及其软件，所建立的玉米果穗分析模型，可实现对玉米果穗形态的模拟以及实现玉米脱粒过程的仿真分析。

但本文所提出的建模方法还存在不足之处，例如：本文选择的 3 个玉米品种大多数玉米果穗形状均比较规则，因此采用本文所提出的建模方法基本可以对果穗的结构和形态进行模拟，但对有些玉米果穗的不规则形状造成的籽粒分布不均匀情况，本文没有进行深入研究；另外本文也没有考虑籽粒败育现象造成籽粒缺失、籽粒发霉、籽粒病虫害等现象。

对于这些问题以及其他一些没有考虑到的问题，本

文将在后续研究工作中深入考虑，添加相应的功能，使本文提出的玉米果穗建模方法更趋完善。

#### 5 结论

本文根据玉米果穗的结构和形态及玉米籽粒脱落和玉米芯断裂的规律，提出并建立了基于颗粒聚合体的玉米果穗分析模型建模方法，并研制了果穗建模软件。采用该软件对 3 个玉米品种进行了建模，通过实际玉米果穗与其分析模型的对比和玉米脱粒过程的初步仿真分析，证明了该玉米果穗建模方法的可行性，为采用离散元法析玉米的脱粒过程奠定了基础。

#### [参 考 文 献]

[1] Tijksens E, Ramon H, Baerdemaeker J De. Discrete element modeling for process simulation in agriculture[J]. Journal of Sound and Vibration, 2003, 266(3): 493—514.

[2] Zhu H P, Zhou Z Y, Yang R Y, et al. Discrete particle simulation of particulate systems: A review of major applications and findings[J]. Chemical Engineering Science, 2008, 63(23): 5728—5770.

[3] 王雪, 郭新宇, 陆声链, 等. 基于骨架模型的玉米生长运动仿真与动画生成技术[J]. 农业机械学报, 2009, (S1): 198—201.  
Wang Xue, Guo Xinyu, Lu Shenglian, et al. Growth simulation and animation creation of corn based on skeleton model[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2009, (S1): 198—201. (in Chinese with English abstract)

[4] 刘晓东, 姚兰, 赵飞蓉, 等. 基于 Loop 细分格式的虚拟作物果实建模[J]. 中国农业大学学报, 2007, 12(2): 72—75.  
Liu Xiaodong, Yao Lan, Zhao Feirong, et al. Modeling of virtual crop fruit based on loop subdivision scheme[J]. Journal of China Agricultural University, 2007, 12(2): 72—75. (in Chinese with English abstract)

[5] 刘连峰. 颗粒聚合体碰撞破损的细观力学仿真研究[J]. 力学进展, 2006, 36(2): 599—610.  
Liu Lianfeng. Micromechanics study on agglomerate impact breakage[J]. Advances in Mechanics, 2006, 36(2): 599—610. (in Chinese with English abstract)

[6] 杨锦忠, 张洪生, 郝建平, 等. 玉米果穗图像单一特征的品种鉴别力评价[J]. 农业工程学报, 2011, 27(1): 196—200.  
Yang Jinzhong, Zhang Hongsheng, Hao Jianping, et al. Identifying maize cultivars by single characteristics of ears using image analysis[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2011, 27(1): 196—200. (in Chinese with English abstract)

[7] 王玉亮, 刘贤喜, 苏庆堂, 等. 多对象特征提取和优化神经网络的玉米种子品种识别[J]. 农业工程学报, 2010, 26(6): 199—204.  
Wang Yuliang, Liu Xianxi, Su Qingtang, et al. Maize seeds varieties identification based on multi-object feature extraction and optimized neural network[J]. Transactions of

- the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2010, 26(6): 199–204. (in Chinese with English abstract)
- [8] Sawamoto Y, Tsubota H, Kasai Y, et al. Analytical studies on local damage to reinforced concrete structures under impact loading by discrete element method[J]. Nuclear Engineering and Design, 1998, 179(2): 157–177.
- [9] 刘凯欣, 高凌天. 离散元法在求解三维冲击动力学问题中的应用[J]. 固体力学学报, 2004, 25(2): 181–185.  
Liu Kaixin, Gao lingtian. The application of discrete element method in solving three-dimensional impact dynamics problems[J]. Acta Mechanica Solida Sinica, 2004, 25(2): 181–185. (in Chinese with English abstract)
- [10] 郭敬山. 组合玉米和组合超球颗粒模型的三维离散元法算法研究[D]. 长春: 吉林大学, 2010: 4–8.  
Guo Jingshan. Research of algorithm for combination corn and super-ball particles model in 3D DEM[D]. Changchun: Jilin University, 2010: 4–8. (in Chinese with English abstract)
- [11] 李心平, 高连兴. 种子玉米籽粒果柄断裂机理试验研究[J]. 农业工程学报, 2007, 23(11): 47–51.  
Li Xinping, Gao Lianxing. Experimental study on breaking mechanism of kernel stem of corn seed[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2007, 23(11): 47–51. (in Chinese with English abstract)
- [12] 李心平, 高连兴. 速搓式玉米种子脱粒机的性能试验[J]. 农业工程学报, 2009, 25(12): 102–106.  
Li Xinping, Gao Lianxing. Performance test on corn thresher with different-speed threshing parts[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2009, 25(12): 102–106. (in Chinese with English abstract)
- [13] 吴玄辰. 基于二维离散元法的玉米脱粒过程仿真分析[D]. 长春: 吉林大学, 2011: 10–12.  
Wu Xuanchen. Simulation and analysis of maize threshing based on 2D DEM[D]. Changchun: Jilin University, 2011: 10–12. (in Chinese with English abstract)
- [14] 于建群, 付宏, 李红, 等. 离散元法及其在农业机械工作部件研究与设计中的应用[J]. 农业工程学报, 2005, 21(5): 1–6.  
Yu Jianqun, Fu Hong, Li Hong, et al. Application of discrete element method to research and design of working parts of agricultural machines[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2005, 21(5): 1–6. (in Chinese with English abstract)
- [15] 李艳双. 颗粒聚合体的三维离散元法算法研究与软件设计[D]. 长春: 吉林大学, 2011: 24–30.  
Li Yanshuang. Research of Algorithm for particle agglomerate in 3D DEM and design of the software[D]. Changchun: Jilin University, 2011: 24–30. (in Chinese with English abstract)
- [16] 于亚军, 于建群, 陈仲, 等. 三维离散元法边界建模软件设计[J]. 农业机械学报, 2011, 42(8): 98–103.  
Yu Yajun, Yu jianqun, Chen Zhong, et al. Design of 3D DEM boundary modeling software[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(8): 98–103. (in Chinese with English abstract)

## Modeling method of corn ears based on particles agglomerate

Yu Yajun<sup>1</sup>, Zhou Hailing<sup>1</sup>, Fu Hong<sup>2</sup>, Wu Xuanchen<sup>1</sup>, Yu Jianqun<sup>1\*</sup>

(1. School of Biological and Agricultural Engineering, Jilin University, Changchun 130022, China;

2. College of Computer Science and Technology, Jilin University, Changchun 130012, China)

**Abstract:** It is necessary to establish the analysis models of corn ears to analyze corn threshing process using DEM (the Discrete Element Method). According to the shapes and the structure of corn ears, a method for establishing analysis models of corn ears based on particles agglomerate was proposed and the corn ears modeling software was developed, which was added to the corn threshing simulation software developed by our group. By comparing the corn ears' entities with the analysis models and the simulation analysis of corn threshing process, the feasibility of the new method was validated. This paper provides reference for analyzing corn threshing process used by DEM.

**Key words:** computer simulation, models, software testing, discrete element method, corn ear, corn threshing, particles agglomerate