doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.05.011

# 茶园施肥机离心撒肥过程仿真与参数优化

胡永光<sup>1</sup> 杨叶成<sup>1</sup> 肖宏儒<sup>2</sup> 李萍萍<sup>3</sup> (1. 江苏大学农业装备工程学院,镇江 212013; 2. 农业部南京农业机械化研究所,南京 210014;

3. 南京林业大学生物与环境学院,南京 210037)

摘要:针对目前茶园中无专用施肥或撒肥装备,传统的大田撒肥装置无法适应茶树较窄行距的问题,根据茶树行距和肥料特性,设计了叶片位置倾角可调的偏置式撒肥离心盘。基于撒肥过程的受力和运动分析,以肥料颗粒为对象,建立其在离心盘上运动的动力学模型。基于 Design - Expert 的正交试验设计和中心组合曲面响应设计,首先进行撒肥过程的离散元仿真,建立颗粒分布变异系数与施肥机行走速度、离心盘叶片个数、叶片偏置角度等因素之间的关系模型并解析;然后进行撒肥工作参数的优化。结果表明,各因素对分布变异系数影响的主次顺序为:叶片个数、偏置角度、行走速度;叶片个数与偏置角度的交互作用对分布变异系数的影响较弱;经回归分析和优化可知,当叶片个数为5、偏置角度为13.44°、行走速度为的交互作用对分布变异系数达到最小值6.12%;验证试验的实测值与模型理论值的平均相对误差为11.18%。因此,基于离散元的撒肥过程仿真可用于离心式撒肥装置工作参数的优化,并可获得较好的茶园撒肥均匀性。

中图分类号: S224.21 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2016)05-0077-06

# Simulation and Parameter Optimization of Centrifugal Fertilizer Spreader for Tea Plants

Hu Yongguang<sup>1</sup> Yang Yecheng<sup>1</sup> Xiao Hongru<sup>2</sup> Li Pingping<sup>3</sup>

(1. School of Agricultural Equipment Engineering, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China

2. Nanjing Research Institute for Agricultural Mechanization, Ministry of Agriculture, Nanjing 210014, China

3. College of Biology and the Environment, Nanjing Forestry University, Nanjing 210037, China)

Abstract: No customized fertilizer machines are widely applied in tea fields and traditional spreaders for field crops are constrained by the narrow row spacing of tea trees when used for tea fields. According to the row spacing of tea trees and the characteristics of fertilizer, fertilizer-pushing blades were deployed away from the center of the centrifugal plate with their adjustable offset angles, and the horseshoe-shaped outlet was adopted. A dynamic model of the fertilizer particle's movement on the centrifugal plate was established through force and kinetic analysis. With orthogonal test design and central composite design in Design – Expert, the fertilizer spreading process was simulated with EDEM based on a discrete element model. A regression equation of the relationship between variation coefficient of fertilizer particles' distribution and spreader forwarding speed, blade number and blade offset angle was obtained, and the order of the influence of the above factors on the variation coefficient of fertilizer particle distribution was: blade number, forwarding speed, blade offset angle. The influence of the influence was less for the interaction between forwarding speed and blade offset angle. It is found out after regression analysis and optimization that the variation coefficient decreased to the minimum of 6. 12% when blade number was 5,

收稿日期: 2015-10-10 修回日期: 2015-11-30

基金项目:农业部公益性行业(农业)科研专项(201303012)、江苏高校优势学科建设工程项目(2014-37)和江苏省青蓝工程项目 作者简介:胡永光(1976—),男,教授,博士生导师,主要从事茶果园生产装备与技术研究,E-mail: deerhu@163.com forwarding speed was 0.6 m/s and blade offset angle was 13.44°. The validation experiment showed that the average relative error between the measurements and the predictions was 11.18%. Therefore, the EDEM simulation model could be used to optimize operation parameters of a centrifugal-plate fertilizer spreader, and achieve the expected spreading uniformity in tea fields.

Key words: tea plants; fertilizer spreader; centrifugal plate; fertilize particle; DEM simulation; variation coefficient of particles' distribution

# 引言

施肥是茶园种植中重要的作业之一,机械化施 肥可显著提高效率和降低劳动强度,但目前茶园中 缺乏专用施肥装备,传统的施肥方式是人工施撒,劳 动效率低、强度大<sup>[1]</sup>。茶园施肥机作为一种重要的 茶园施肥机械,将为茶叶生长提供营养保障。

对于施肥机的研究比较多<sup>[2-10]</sup>,但国内外施肥 机种类主要为离心式撒肥机,大多设备只适用于开 阔的地面,并不适用于窄行距的茶园。而传统的施 肥机设计方法,大都依靠设计者的经验或试验方法, 无法满足现代农业高效精确施肥的需要。因此本文 对施肥机离心盘的叶片个数、行走速度、离心盘转 速、离心盘叶片偏置角度等参数进行深入分析和探 讨,并利用 EDEM (DEM Solutions 公司,英国)仿真 软件对肥料颗粒在离心盘上的运动及肥料的分布情 况进行模拟计算,以期获得一种茶园专用的高效施 肥机。

#### 1 茶园施肥机结构与原理

由于成年茶树的行间距仅为 0.8 m,为方便施 肥机在茶树间行走,应尽可能减小宽幅,所设计的茶 园施肥机的长、宽、高为:500 mm × 300 mm × 700 mm, 并置于东风 15 型手扶拖拉机的前端。如图 1 所示, 结构主要由肥料箱、机架、离心盘、下料口、直流电动 机、辅助下料装置等组成。肥料箱固定于机架上,辅 助下料装置的顶部与肥料箱的底部连接,辅助下料 装置的底部与下料口相连接,离心盘固定安装于机 架上并位于下料口的正下方,位于离心盘底部的孔 与直流电动机的输出轴相配合<sup>[11]</sup>。

进行茶园施肥时,将施肥装置通过机架固定在 手扶拖拉机的前端,肥料箱中加入适量肥料,并将直 流电动机接通电源。肥料在自身重力和机器震动的 作用下,通过辅助下料装置进入到下料口中。由于 下料口为仿蹄型,肥料会经过缓冲后缓慢均匀流出, 落到离心盘上。此时,由于离心盘在直流电动机的 驱动下匀速旋转,肥料落到离心盘上后会在叶片的 推动下,以一定速度被抛出落到茶园地面上,即完成 施肥过程。



图 1 茶园施肥机总体结构

Fig. 1 Overall structure of spreader used in tea fields
1. 肥料箱 2. 机架 3. 下料口 4. 离心盘 5. 直流电动机
6. 辅助下料装置

## 2 肥料颗粒运动分析

#### 2.1 肥料的选择与肥料特性参数

试验中选用的肥料为茶树需求量最多的专用硫酸钾复合肥,肥料颗粒的相关参数见表1。

表1 肥料颗粒参数

Гab. 1	Particle	parameters
--------	----------	------------

参数	数值
肥料颗粒直径/mm	3.27
肥料颗粒密度/(g·cm <sup>-3</sup> )	1.61
泊松比	0.25
剪切模量/MPa	11.00
肥料颗粒堆积密度/(g·cm <sup>-3</sup> )	0.90
肥料颗粒与离心盘之间弹性恢复系数	0.39
肥料颗粒之间弹性恢复系数	0.35
肥料颗粒与离心盘之间动摩擦因数	0.41
肥料颗粒之间动摩擦因数	0.42
肥料颗粒与离心盘之间静摩擦因数	0.55
肥料颗粒之间静摩擦因数	0.63

#### 2.2 肥料颗粒在离心盘上的运动

即

如图 2 所示,撒肥过程中,颗粒沿 NA 运动,ON长度为h,OA 长R,设当肥料颗粒运动到某一时刻时  $\angle OQN = \theta, NQ$  长度为l,OQ 长度为r,则肥料的运 动的起点为

$$\mu mg \leqslant mr_0 \omega^2 \tag{1}$$

$$r_0 \ge \frac{\mu g}{\omega^2} \tag{2}$$

图 3a 为肥料颗粒在离心盘上受力情况的主视 图,图 3b 为肥料颗粒在离心盘上与叶片接触时受力 的俯视图。由图中可知颗粒重力引起的摩擦力为



图 2 离心盘俯视图 Fig. 2 Centrifugal plate top view





$$F_1 = \mu mg \tag{3}$$

颗粒所受的离心力为

$$F_{ce} = m \frac{v^2}{r} = m \frac{\left(r\omega - \frac{\mathrm{d}l}{\mathrm{d}t}\mathrm{sin}\theta\right)^2}{r}$$
(4)

颗粒所受的科氏力为

$$F_{co} = 2m\omega \,\frac{\mathrm{d}l}{\mathrm{d}t} \tag{5}$$

叶片侧面对颗粒的摩擦力为

$$F_2 = \mu F_{co} = 2\mu m\omega \frac{\mathrm{d}l}{\mathrm{d}t} \tag{6}$$

沿 NA 方向,由牛顿第二定律得

$$m\frac{\mathrm{d}^{2}l}{\mathrm{d}t^{2}} = m\frac{\left(r\omega - \frac{\mathrm{d}l}{\mathrm{d}t}\mathrm{sin}\theta\right)^{2}}{r}\mathrm{cos}\theta - \mu mg - 2\mu m\omega\frac{\mathrm{d}l}{\mathrm{d}t}$$
(7)

即

$$\frac{\mathrm{d}^2 l}{\mathrm{d}t^2} = \frac{\left(r\omega - \frac{\mathrm{d}l}{\mathrm{d}t}\mathrm{sin}\theta\right)^2}{r}\mathrm{cos}\theta - \mu g - 2\mu\omega\frac{\mathrm{d}l}{\mathrm{d}t} \quad (8)$$

由图2可知

$$\cos\theta = \frac{l}{r} \quad \sin\theta = \frac{h}{r} \quad r = \sqrt{h^2 + l^2}$$
代人式(8)得

$$\frac{\mathrm{d}^{2}l}{\mathrm{d}t^{2}} = \frac{\left(r\omega - \frac{\mathrm{d}l}{\mathrm{d}t}\frac{h}{r}\right)^{2}}{r} \frac{l}{r} - \mu g - 2\mu\omega \frac{\mathrm{d}l}{\mathrm{d}t} = l\omega^{2} - 2\frac{lh\omega}{r^{2}}\frac{\mathrm{d}l}{\mathrm{d}t} + \frac{lh^{2}}{r^{4}}\left(\frac{\mathrm{d}l}{\mathrm{d}t}\right)^{2} - 2\mu\omega \frac{\mathrm{d}l}{\mathrm{d}t} - \mu g \quad (9)$$

由式(9)可得,肥料颗粒在离心盘上的运动方 程为

$$\frac{\mathrm{d}^2 l}{\mathrm{d}t^2} = \frac{lh^2}{\left(h^2 + l^2\right)^2} \left(\frac{\mathrm{d}l}{\mathrm{d}t}\right)^2 - \left(2\frac{lh\omega}{h^2 + l^2} + 2\mu\omega\right)\frac{\mathrm{d}l}{\mathrm{d}t} + l\omega^2 - \mu g \qquad (10)$$

# 2.3 肥料颗粒脱离圆盘后的运动

肥料颗粒脱离离心盘后,在空气中受到重力、浮 力、空气阻力等作用,最终落于茶园地面上。

在空中运动时,空气阻力系数 K 为

$$K = \frac{3}{8} C_D \rho_a \frac{1}{\rho_p r_p} \tag{11}$$

式中  $\rho_a$ ——空气密度  $\rho_p$ ——颗粒密度

其中,阻力系数 C<sub>D</sub> 与雷诺数 Re 存在相关关系<sup>[7]</sup>。

$$Re = \frac{2r_p v_p \rho_a}{\eta_a}$$

式中  $\eta_a$ ——空气动力粘度

设 Z 轴正方向为与重力相反的方向,则 3 个方向的运动方程<sup>[12-14]</sup>为:

$$X \noti T \noti T = -Kv_{px} \sqrt{v_{px}^2 + v_{py}^2 + v_{pz}^2}$$
(12)

$$Y \,\dot{\mathcal{T}} \,\dot{\square} \qquad \frac{\mathrm{d}^2 y}{\mathrm{d}t^2} = - \,K v_{py} \,\sqrt{v_{px}^2 + v_{py}^2 + v_{pz}^2} \qquad (13)$$

$$Z \, \vec{j} \vec{p} = -K v_{pz} \sqrt{v_{px}^2 + v_{py}^2 + v_{pz}^2} - g \qquad (14)$$

式中 v<sub>pz</sub> — Z 方向的速度分量 v<sub>py</sub> — Y 方向的速度分量 v<sub>px</sub> — X 方向的运动分量

# 3 撒肥过程仿真分析

#### 3.1 仿真试验设计

拟将离心盘实体模型导入 EDEM 软件,对撒肥 过程进行仿真<sup>[15-18]</sup>。研究撒肥机行走速度(简称 行走速度)、离心盘叶片偏置角度(简称偏置角度)、 离心盘叶片个数(简称叶片个数)对撒肥均匀性的 影响,并通过分析优化出撒肥机的最优工作参数。

以行走速度、偏置角度、叶片个数为影响因素, 以撒肥肥料颗粒的分布变异系数为评价指标,采用 三因素三水平的二次回归正交旋转中心组合设计试 验方法,进行撒肥效果的仿真试验。试验因素编码 水平如表2所示。采用 Design - Expert 8.06(Stat - Ease 公司,美国)进行仿真组合试验设计,试验方案 见表3, $X_1$ 、 $X_2$ 、 $X_3$ 分别为叶片个数、偏置角度和行走 速度的编码值,分布变异系数记为 $y_0$ 。

表 2 因素水平编码 Tab.2 Factor levels and codes

		因素	
水平	叶片个数	偏置角度	行走速度
		/(°)	$/(m\boldsymbol{\cdot} s^{-1})$
上水平(+1)	6	60	0.8
零水平(0)	4	30	0.6
下水平(-1)	2	0	0.4
变化区间 $\Delta_j$	2	30	0.2

#### 表 3 试验方案及结果

Fab. 3	Experiment	arrangement	and	results
--------	------------	-------------	-----	---------

	V	V	v	101
试验序号	Λ <sub>1</sub>	A 2	X <sub>3</sub>	y/%
1	- 1	- 1	0	28.64
2	1	- 1	0	9.69
3	- 1	1	0	41.82
4	1	1	0	9.40
5	- 1	0	- 1	38.93
6	1	0	- 1	13.50
7	- 1	0	1	36.59
8	1	0	1	11.92
9	0	- 1	- 1	12.21
10	0	1	- 1	20. 92
11	0	- 1	1	12.92
12	0	1	1	17.13
13	0	0	0	11.61
14	0	0	0	11.01
15	0	0	0	8.92
16	0	0	0	9.07
17	0	0	0	10.36

### 3.2 仿真结果

如图 4 所示,沿施肥机行进方向,将仿真撒肥区 域划分成 7 × 7 个方格。统计每格中落入肥料颗粒 的数目,计算肥料颗粒的横向分布变异系数。仿真 试验结果如表 3 所示。



#### 3.3 回归模型的建立与检验

在 Design - Expert 中, 对离散元仿真结果进行 回归分析, 建立分布变异系数与各因素之间的关系 模型; 同时采用响应面分析法, 考察两因素间的交互 作用效应。

由表 4 的方差分析可知,该模型的修正决定系数  $R^2 = 0.9934;$ 回归系数检验结果也表明回归方程高度显著;统计量 F = 269.73, P < 0.0001, 失拟检验不显著,说明仿真结果与回归方程吻合良好,模型较好地表征了分布变异系数与叶片个数、偏置角度、行走速度的关系,可用于对分布变异系数的预测<sup>[19]</sup>。

表 4 方差分析 Tab.4 Analysis of variance

来源	平方和	自由度	均方差	F	Р
模型	2 037. 37	9	226.37	269.73	< 0.0001
$X_1$	1 287.02	1	1 287.02	1 533. 51	< 0.0001
$X_2$	83.27	1	83.27	99.22	< 0.0001
$X_3$	6.13	1	6.13	7.30	0.0306
$X_1 X_2$	45.36	1	45.36	54.05	0.0002
$X_1 X_3$	0.14	1	0.14	0.17	0.6907
$X_2 X_3$	5.06	1	5.06	6.03	0.0437
$X_{1}^{2}$	492.64	1	492.64	586.99	< 0.0001
$X_2^2$	7.98	1	7.98	9.51	0.0177
$X_{3}^{2}$	75.13	1	75.13	89. 52	< 0.0001
残差	5.87	7	0.84		
误差	5.58	4	1.40		
失拟	0.29	3	0.097	0.069	0.9734
$R^2$	0.9971				
预测 R <sup>2</sup>	0.9935				
调整 R <sup>2</sup>	0.9934				

在模型中, $X_1$ 、 $X_2$ 、 $X_3$ 、 $X_1X_2$ 、 $X_2X_3$ 、 $X_1^2$ 、 $X_2^2$ 、 $X_3^2$ 的 *P*值均小于0.05,说明其对模型的影响显著;其中,  $X_1$ 、 $X_2$ 、 $X_1^2$ 、 $X_3^2$ 的*P*值均小于0.001,说明该因素对 模型的影响极为显著; $X_1X_3$ 的*P*值为0.6907,大于 0.05,说明对模型的影响不显著,模型中不予考虑。

最终得到的分布变异系数 y 与各影响因素编码 值的二次回归方程为

 $y = 10.19 - 12.68X_1 + 3.23X_2 - 0.88X_3 - 3.37X_1X_2 -$ 

1.  $13X_2X_3 + 10.82X_1^2 + 1.38X_2^2 + 4.22X_3^2$  (15)

上述回归方程中,系数绝对值的大小决定了该 因素对分布变异系数的影响,因此可知在仿真试验 中,各因素对于分布变异系数的影响由大到小顺序 为:*X*<sub>1</sub>、*X*<sub>2</sub>、*X*<sub>3</sub>。

#### 3.4 分布变异系数的单因素效应分析

图 5 为当其它因素水平为 0 时,单一因素对分 布变异系数影响的分布直方图。随着撒肥机行走速 度的增加,分布变异系数先减后增,当行走速度为 0.6 m/s 时,分布变异系数最小;分布变异系数随着 叶片个数的增加而减小,当叶片个数为 6 片时,分布 变异系数最小;叶片的偏置角度对分布变异系数的 影响先变小后变大,当偏置角度为 30°时,肥料的分 布变异系数最小。



#### 3.5 因素交互作用分析

由方差分析(表4)可知,*X*<sub>1</sub>*X*<sub>2</sub>(叶片个数、偏置 角度)、*X*<sub>2</sub>*X*<sub>3</sub>(偏置角度、行走速度)对分布变异系数 的影响显著,*X*<sub>1</sub>*X*<sub>3</sub>(叶片个数、行走速度)对其影响 不显著,这里仅对*X*<sub>1</sub>*X*<sub>2</sub>、*X*<sub>2</sub>*X*<sub>3</sub>交互作用对分布变异 系数的影响效应进行分析。 基于生成的响应曲面(图6),进行交互作用效 应分析。在图6a中,叶片个数与偏置角度的交互作 用对分布变异系数的影响较为明显,而叶片个数对 分布变异系数的影响比偏置角度更大,说明叶片个 数对于分布变异系数的影响要大于偏置角度对变异 系数的影响。在分布变异系数达到最小之前,分布 变异系数随着叶片个数的增加先减小后变大,随偏 置角度的增加也呈现出先减小后增大的趋势;当偏 置角度在0°~30°之间,叶片个数在4~6之间时,分 布变异系数较小。

偏置角度与行走速度的交互作用对分布变异系数的影响如图 6b 所示,比叶片个数与偏置角度的交 互作用影响较小。偏置角度对于分布变异系数的影 响比行走速度更为明显,说明偏置角度对于分布变 异系数的影响比行走速度更大。分布变异系数随偏 置角度的增加而逐渐增大,随行走速度的增大先减 小后增大;当偏置角度为 0°~30°、行走速度为 0.6 m/s 时,分布变异系数均较小。



# 4 参数优化与试验验证

#### 4.1 参数优化

基于以上回归方程,利用 Design - Expert 的中 心组合响应曲面设计(Central composite design, CCD)进行参数优化。以分布变异系数为目标函数, 在各因素范围的约束条件下,寻求其最小值。这里, 叶片个数为2~6个,偏置角度为0°~60°,行走速度 为0.4~0.8 m/s,分布变异系数变化范围为 0~100%。优化结果如图7所示,黄色区域表示优 化范围,优化后的结果为:叶片个数为5、偏置角度 为13.44°、行走速度为0.6 m/s,此时分布变异系数 达到最小值,为6.12%。

#### 4.2 试验验证

为验证分布变异系数回归方程的参数优化结果,在江苏大学室内土槽进行6组撒肥试验,并对其 误差进行统计分析<sup>[20]</sup>。试验装置及撒肥后效果如 图8所示,试验统计结果见表5。







图 8 试验装置及作业效果 Fig. 8 Test equipment and operation performance

	表 5	5 验证试验	验结果	
Tab.	5	Validation	test results	

试验序号	分布变异系数 预测值	分布变异系数 实测值	相对误差
1	6.12	7.04	13.07
2	6.12	6. 98	12.32
3	6.12	6.78	9.73
4	6.12	7.24	15.47
5	6.12	6.48	5.56
6	6.12	6.87	10.92
平均值	6.12	6.90	11.18

在最佳工作参数下,分布变异系数的预测值和 实测值均较小,即肥料颗粒分布比较均匀;分布变异 系数的平均实测值为6.90%,平均预测值为6.12%,其 平均相对误差为11.18%,最大相对误差为15.47%。 5 结论

(1)通过对撒肥过程的受力和运动分析,建立 了肥料颗粒在撒肥过程中的动力学模型。

(2)通过离散元仿真分析,得到各因素对分布 变异系数影响大小的先后顺序为:叶片个数、偏置角 度、行走速度;通过对叶片个数、偏置角度、行走速度交 互作用分析可知,叶片个数与偏置角度、偏置角度与行 走速度交互作用时对分布变异系数的影响较为明显。

(3) 经多元回归分析和参数优化可知, 撒肥装置在叶片个数为5、偏置角度为13.44°、行走速度为0.6 m/s时, 肥料颗粒分布变异系数达到最小值6.12%。验证试验表明,该分布变异系数实测值与理论值的相对误差均值为11.18%, 表明回归模型能够较好地模拟撒肥颗粒分布均匀性。

#### 参考文献

- 1 肖宏儒, 权启爱. 茶园作业机械化技术及装备研究[M]. 北京: 中国农业科学技术出版社, 2012.
- 2 李鹏.摆管式撒肥机机理与试验研究[D].武汉:华中农业大学,2013.
- 3 吕昊.基于离散元法的排肥器数字化设计方法研究[D].长春:吉林大学,2008.
- 4 董向前,宋建农,张军奎,等. 锥盘式颗粒肥撒施机构抛撒性能分析与试验[J]. 农业工程学报,2013,29(19):33-40.

DONG Xiangqian, SONG Jiannong, ZHANG Junkui, et al. Working performance and experiment on granular fertilizer spreader with cone disk[J]. Transactions of the CSAE, 2013, 29(19):33 - 40. (in Chinese)

- 5 秦朝民,刘君辉.离心式撒肥机撒肥部件研究设计[J].农机化研究,2006(10):100-102. QIN Chaomin,LIU Junhui. Study and design on spreading mechanism of centrifugal fertilizer spinner[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research,2006(10):100-102.(in Chinese)
- 6 吴辉,王秀,张晋国,等. 圆盘式施肥机抛撒模型中圆盘转速的试验研究[J]. 农机化研究,2007(7):136-139.
   WU Hui,WANG Xiu,ZHANG Jinguo, et al. Study on speed of spinning disc in model of spinning disc spreader[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research,2007(7):136-139. (in Chinese)
- 7 HOFSTEE J W, HUISMAN W. Handling and spreader of fertilizers part 1: physical properties of fertilizer in relation to particle motion [J]. Journal of Agricultural Engineering Research, 1990, 47:213 234.
- 8 DINTWA E, LIEDEKERKE P V, OLIESLAGERS R, et al. Model for simulation of particle flow on a centrifugal fertilizer spreader [J]. Biosystems Engineering, 2004, 87(4):407-415.
- 9 LIEDEKERKE P V, TIJSKENS E, DINTWA E, et al. DEM simulations of the particle flow on a centrifugal fertilizer spreader [J]. Powder Technology, 2009, 190(3): 348 360.
- 10 OLIESLAGERS R, RAMON H, BAERDEMAEKER J D. Calculation of fertilizer distribution patterns from a spinning disc spreader by means of a simulation model[J]. Journal of Agricultural Engineering Research, 1996, 63(2):137-152.
- 11 濮良贵,纪明刚. 机械设计[M]. 8 版. 北京:高等教育出版社,2006.
- 12 INNS F M, REECE A R. The theory of the centrifugal distributor II: motion on the disc, off-centre feed[J]. Journal of Agricultural Engineering Research, 1962, 7(4): 345 353.
- 13 CUNNINGHAM F M. Performance characteristics of bulk spreaders for granular fertilizer [J]. Transactions of the ASAE, 1963, 6(2):108-114.
- 14 PITT R E, FARMER G S, WALKER L P. Approximating equations for rotary distributor spread patterns [J]. Transactions of the ASAE, 1982,25(6):1544-1552.
- 15 贾洪雷,王文君,庄健,等. 仿形弹性镇压辊设计与试验[J]. 农业机械学报,2015,46(6):28-34. JIA Honglei,WANG Wenjun,ZHUANG Jian, et al. Design and experiment of profiling elastic press roller[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2015,46(6):28-34. (in Chinese)
- 16 金丽丽, 姬长英, 方会敏, 等. 变量施肥机连续混合装置中肥料颗粒运动的数值分析[J]. 浙江农业学报, 2015, 27(2): 261-265.
- 17 MALONE K F, XU B H. Determination of contact parameters for discrete element method simulations of granular systems [J]. Particuology, 2008(6):521-528.
- 18 邢继波,王泳嘉. 离散元法的改进及其在颗粒介质研究中的应用[J]. 岩土工程学报,1990,12(5):51-57. XING Jibo,WANG Yongjia. Improvement of discrete element method and its applications in granular media[J]. Chinese Journal of Geotechnical Engineering,1990,12(5):51-57. (in Chinese)
- 19 陈树人,段建,姚勇,等.环模式成型机压缩水稻秆成型工艺参数优化[J].农业工程学报,2013,29(22):32-41. CHEN Shuren, DUAN Jian, YAO Yong, et al. Optimization of technique parameters of annular mould briquetting machine for straw briquette compressing[J]. Transactions of the CSAE, 2013, 29(22):32-41. (in Chinese)
- 20 JONES J R, LAWRENCE H G, YULE I J. A statistical comparison of international fertilizer spreader test methods—Confidence in bout width calculations [J]. Powder Technology, 2008, 184(3):337-351.