

基于 EDEM 仿真的有机肥深施机施肥控制系统的设计

史丽娜 徐丽明* 邢洁洁 袁全春 刘旭东 陈俊威 王荣炎

(中国农业大学 工学院,北京 100083)

摘要 针对林果园不同地块土壤肥力不均,林果在各生长阶段对有机肥需求量不同等问题,对有机肥深施机施肥控制系统进行设计。采用离散元仿真软件 EDEM 对施肥转盘旋转角度与施肥流量进行仿真,并进行线性拟合。结合机器行进速度、单位面积理论施肥量、施肥转盘旋转角度与施肥流量等因素,设计有机肥深施机施肥控制系统,主要包括测速模块、主程序模块(速度、施肥量、脉冲转换模块)、中断模块和液晶显示模块。室内施肥试验结果表明:当单位面积理论施肥量分别为 7 500、9 750 和 11 250 kg/hm² 时,实际施肥量分别为 7 532.46、9 836.82 和 11 042.28 kg/hm²,施肥变异系数 CV 分别为 1.1%、1.3% 和 1.9%,施肥一致性良好。田间试验结果表明:该有机肥深施机施肥均匀,无断流现象,达到设计要求。本研究所设计的有机肥深施机施肥控制系统满足林果园有机肥深施的农艺要求,可以进行林果园有机肥深施作业。

关键词 施肥机;有机肥;转盘式施肥机构;EDEM 仿真

中图分类号 S224.21

文章编号 1007-4333(2018)01-0126-07

文献标志码 A

Design of fertilization control system based on EDEM simulation for deep application of organic fertilizer

SHI Lina, XU Liming*, XING Jiejie, YUAN Quanchun, LIU Xudong, CHEN Junwei, WANG Rongyan

(College of Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China)

Abstract In order to solve the problems of uneven soil fertility in different plots and different demands for organic fertilizer at different growth stages, one organic fertilizer application machine was designed in this study. Discrete element simulation software EDEM was used to simulate the rotation angle of the fertilizer rotary table and the discharge rate, and fitted the results by combining machine running speed, the theory of fertilization amount per unit area, fertilizer mechanism rotation angle and fertilizer flow and other factors were combined in the new machine. This machine included the main program module, speed measurement module (speed, fertilization rate, and pulse conversion module), interrupt module and liquid crystal display module. The results of indoor experiment showed that: When the theory fertilization amount per unit area were 7 500, 9 750 and 11 250 kg/hm², respectively, the actual amount of fertilizer were 7 532.46, 9 836.82 and 11 042.28 kg/hm², respectively. The coefficient of variation of CV fertilizer was 1.1%, 1.3% and 1.9% displaying good consistency. The results of field experiment showed that: The fertilizer was uniform and there was no flow phenomenon. All the results meet the design requirements. This machine can meet the agronomic requirements of deep application of organic fertilizer, and can be used for the deep application of organic fertilizer.

Keywords fertilization system; organic fertilizer; rotary disc fertilizer discharging mechanism; EDEM simulation

林果园科学施肥能够提高果品产量,改善果品质量。随着农业机械向自动化、智能化方向发展,迫切需要研究一种有机肥深施机,实现按需施肥,提高林果园土壤肥力和环境效益,实现“低污染”可持续

发展。

目前施肥机的施肥方式主要有步进电机无极调速控制施肥、电液调速控制施肥和地轮带动外槽轮排肥器施肥^[1-3]。前 2 种方式只能根据设定值进行

收稿日期:2017-01-08

基金项目:现代农业产业技术体系建设专项资金资助(CARS-29)

第一作者:史丽娜,硕士研究生,E-mail:slnchn@163.com

通讯作者:徐丽明,教授,博士生导师,主要从事生物生产自动化研究,E-mail:xlmoffice@126.com

施肥,不能随行进速度实时变化;地轮带动外槽轮排肥器施肥的方式施肥量可以随行进速度实时变化,但是该施肥方式对地块平整性要求高,地轮容易产生打滑等现象,导致施肥量不均。

已有研究表明,为实现精量施肥,可采用测土施肥法^[4-5],即根据土壤肥力实时改变施肥量和施肥种类。该施肥方式主要包括基于处方图的控制方式和基于传感器的控制方式,基于处方图的控制方式需要先对施肥地块进行网格化取样,并对土壤样品进行试验分析得到具体施肥处方图,利用处方图控制施肥机具施肥;基于传感器的控制方式是实时传感器与施肥机配套使用,边行走边测定土壤和果树的相关特性,根据实时传感器的在线测定结果对施肥机进行控制^[6-7],实现精量施肥。该施肥方法精度高,但是成本高,普适性差,因此商业应用较难^[8]。

针对以上问题,本研究拟设计一种基于 EDEM 仿真和单片机控制的有机肥深施肥控制系统^[9-10],旨在实现林果园深施有机肥。

1 有机肥物料特性参数的测定

本研究选用青岛深蓝肥业有限公司“肥老头”牌颗粒状有机肥,粒径 2~4 cm,黑色,有轻微刺激气味。室内试验测量有机肥的密度、休止角和松散度等物料特性参数,为后续整机和控制系统设计做指导。

1.1 密度

将有机肥装满量程为 250 mL 的量筒,用精度为 0.01 g 的 LP502A 电子天平测其质量,减去量筒自身质量(176.33 g),重复 5 次求平均值,测定结果见表 1。计算得有机肥的密度约为 0.86 g/cm³。

1.2 休止角

采用注入法,将有机肥从漏斗上方慢慢注入,漏斗底部漏出的有机肥在水平面上形成圆锥体。测量圆锥体的垂直高度 h 和水平圆盘半径 r (图 1),计算得到有机肥的休止角 θ 。重复测量 5 组,取其平均值。有机肥休止角 θ 为:

$$\theta = \arctan \frac{h}{r} \quad (1)$$

有机肥堆积形成的圆锥体垂直高度 h 通过 T 型尺和直尺进行卡量,圆锥体底面半径 r 通过圆锥体在坐标纸上水平和垂直方向坐标值求均值测定,试验结果见表 2。计算求得该有机肥休止角平均值为 $33.4^\circ \leq 40^\circ$,满足生产过程中流动性需求。

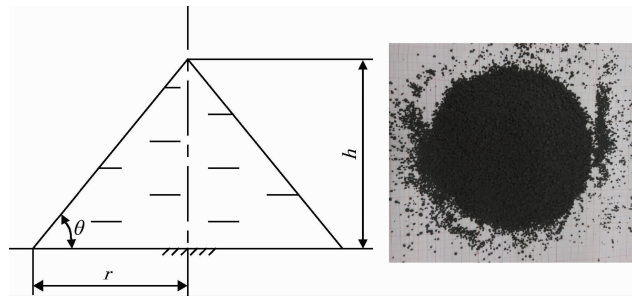
表 1 有机肥密度测定结果

Table 1 Determination of density of organic fertilizer

组别	质量/g	密度/(g/cm ³)
Group	Quality	Density
1	215.51	0.862
2	215.30	0.861
3	214.80	0.859
4	214.06	0.856
5	214.49	0.858
平均值 Mean	214.83	0.859

注:体积取量筒体积 250 mL,未考虑量筒内肥料颗粒间隙对体积造成的影响。

Note: The volume of the cylinder is 250 mL, Without considering the effect of fertilizer granule on the volume caused by cylinder clearance.



h 为有机肥堆积形成的圆锥体的高, r 为有机肥堆积形成的圆锥体的底面圆半径, θ 为有机肥堆积形成的圆锥体的母线与底面圆的夹角,即休止角。

h is the height of a cone formed by the accumulation of organic fertilizer, r is the radius of the bottom circle of a cone formed by accumulation of organic fertilizer, θ is the angle between the generatrix and the bottom circle of a cone formed by accumulation of organic fertilizer, that is angle of repose.

图 1 注入法测量有机肥休止角

Fig. 1 Measurement of angle of repose of organic fertilizer by injection

表 2 有机肥休止角测量结果

Table 2 Measurement results of repose angle of organic fertilizer

组别	高度 h /mm	半径 r /mm	休止角 θ /(°)
Group	Height	Radius	Angle of repose
1	98.2	142.3	34.6
2	99.8	149.2	33.8
3	97.2	154.3	32.2
4	98.4	144.4	34.3
5	95.8	153.3	32.0
平均值 Mean	97.8	148.7	33.4

1.3 松散度

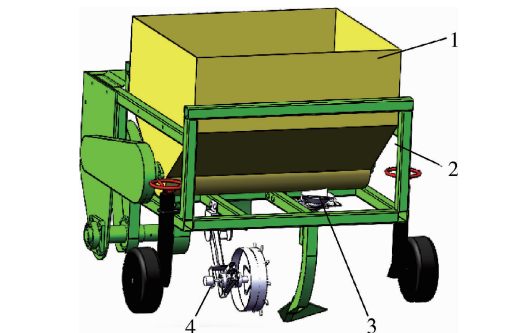
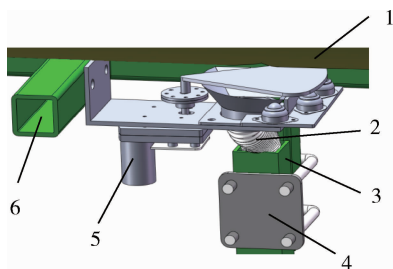
有机肥的松散度决定施肥均匀性和机器作业质量,但目前很少有关于有机肥松散度的确切评价和量化标准。已有研究提出了许多测定松散度的方法,但是其数值具有很大程度的随机性。实际试验中以手握成团、松开即散视为松散度较好,适用于机器作业。

该有机肥在试验过程中手握成团,松开即散,适用于机器作业。

2 有机肥深施机和转盘式施肥机构的设计

2.1 有机肥深施机

根据有机肥的种类和特性,本研究设计一种有机肥深施机,主要包括:肥箱、机架、三点悬挂、中央传动、圆盘式旋耕深开沟机构和定量施肥机构等(图2)。设计圆盘式旋耕开沟部件实现深开沟,圆盘边缘均匀分布安装6把IT225旋耕刀;施肥控制系统由转盘式施肥机构和地轮测速机构等部分组成。



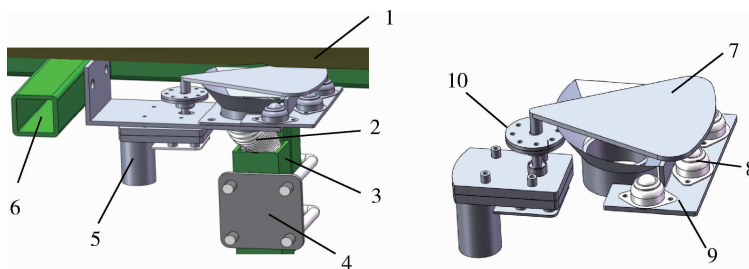
1. 肥箱;2. 机架;3. 转盘式施肥机构;4. 地轮测速机构
1. Fertilizer box;2. Frame;3. Fertilizer switch mechanism;
4. Wheel speed measuring mechanism

图2 有机肥深施机三维建模

Fig. 2 3D model of organic fertilizer deep application machine

2.2 转盘式施肥机构

施肥机构是施肥控制系统的载体,本研究设计一种转盘式施肥机构(图3),主要包括舵机、施肥转盘、万向球轴承和连接法兰等,施肥作业时施肥转盘沿图3箭头方向往复旋转,实现不同施肥量的控制。



1. 肥箱;2. 输肥管;3. 输肥铲;4. U型螺栓;5. 舵机;6. 机架;7. 施肥转盘;8. 万向球轴承;9. 轴承连接板;10. 连接法兰
1. Fat box;2. fertilizer tube;3. Fertilizer shovel;4. U bolt;5. Steering gear;6. Frame;7. Fertilizer switch turntable;
8. Universal ball bearing;9. Bearing connection plate;10. Connection flange

图3 转盘式施肥机构

Fig. 3 Rotary table type fertilizer discharging mechanism

3 EDEM 仿真及施肥控制系统的设计

3.1 施肥作业与控制流程

本研究的施肥作业与控制流程见图4。

3.2 基于 EDEM 的施肥控制参数仿真

利用离散元仿真软件 EDEM^[11-13] 建立有机肥颗粒间 Hertz-Mindlin 接触模型^[14],该模型将接触作用力分解为法向接触力、切向接触力(包含滑动摩擦)和滚动摩擦力矩,每种力或力矩都可以简化为1个弹簧1个阻尼以及1个滑动器^[15-17]。EDEM 仿真分为3部分,模型创建、仿真计算和数据分析。其

中,模型创建需要设置参数,确定物理和材料属性。通过查阅文献,参考尿素的物料特性参数作为有机肥相关参数,其中密度为 860 kg/m^3 ,泊松比为 0.4,剪切模量为 $2.8 \times 10^7 \text{ Pa}$;肥箱的密度为 7800 kg/m^3 ,泊松比为 0.3,剪切模量为 $7 \times 10^{10} \text{ Pa}$;有机肥与有机肥颗粒间恢复系数为 0.6,静摩擦系数为 0.5,滚动摩擦系数位 0.01;有机肥与肥箱间恢复系数为 0.6,静摩擦系数为 0.3,滚动摩擦系数为 0.01。

利用 Solidworks 三维建模软件对肥箱部分进行建模并将模型导入 EDEM 软件中,仿真过程中生成有机肥颗粒至肥箱总容积的 4/5。分别选定施肥

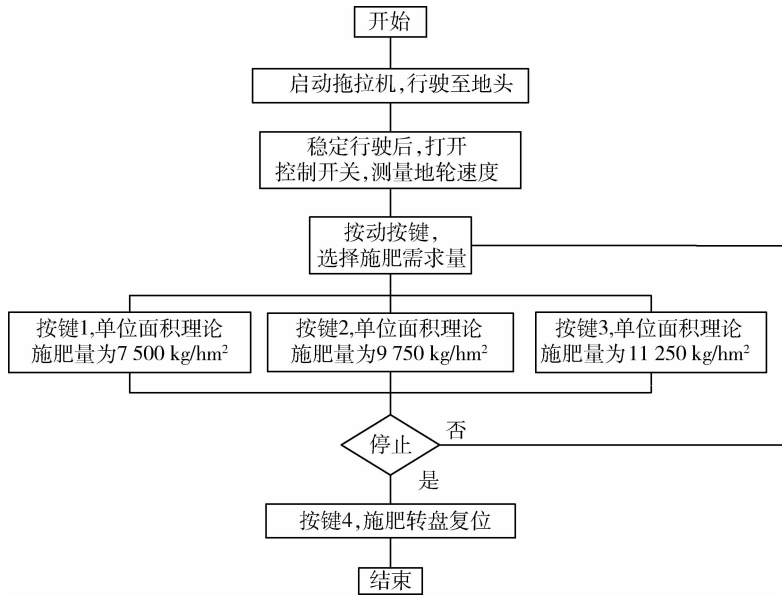


图 4 施肥作业与控制流程图

Fig. 4 Fertilizer application and control flow chart

转盘旋转角度 α 为 10° 、 20° 、 30° 、 40° 、 50° 和 60° 等 6 个角度进行施肥仿真。待有机肥稳定下落时开始计时, 持续 2 s, 对不同角度单位时间施肥量进行结果分析(表 3), 并对施肥转盘旋转角度与单位时间施肥量的关系进行拟合(图 5(a))。

由于施肥转盘与舵机输出轴同轴安装, 因此施肥转盘旋转角度与舵机输出轴旋转角度相同。编写程序对舵机输出轴旋转角度与脉冲进行标定试验。每组脉冲值对应的舵机旋转角度测定 5 次, 取平均值, 结果见表 4, 施肥转盘旋转角度与脉冲拟合关系见图 5(b)。

表 3 单位时间施肥量与施肥转盘旋转角度仿真结果

Table 3 Simulation results of unit time fertilizer output and fertilizer rotary angle

施肥量/(kg/s) Unit time fertilizer	旋转角度 α /($^\circ$) Fertilizer rotary angle
0.061	10
0.222	20
0.460	30
0.778	40
1.032	50
1.176	60

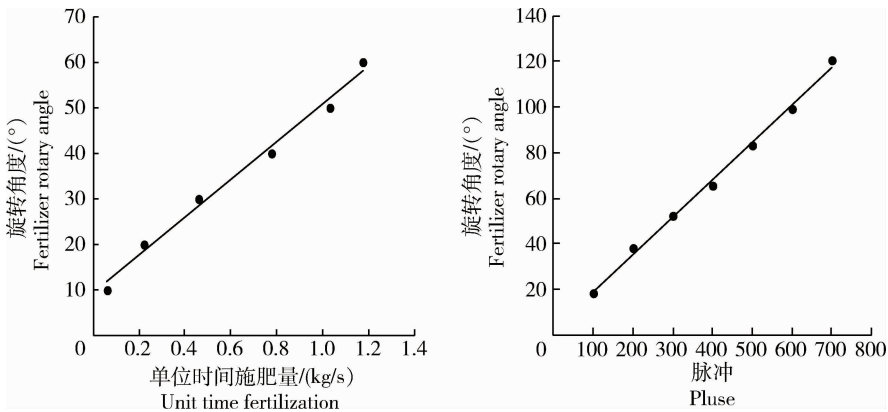


图 5 施肥转盘旋转角度与单位时间施肥量(a)及脉冲(b)的关系

Fig. 5 Relationship between the rotation angle and the amount of fertilizer per unit time and pulse

表4 舵机输出轴旋转角度与脉冲关系试验结果
Table 4 Simulation results of steering angle and pulse

脉冲 m Pulse	100	200	300	400	500	600	700
旋转角度 $\alpha/(\circ)$	18	38	52	65	83	99	120
Fertilizer turntable angle							

施肥转盘旋转角度与单位时间施肥量之间的关系为:

$$\alpha = 41.60q + 9.16 \quad (2)$$

施肥转盘旋转角度与舵机脉冲之间的关系式为:

$$\alpha = 0.16m + 2.29 \quad (3)$$

式中: q 为单位时间施肥量, kg/s ; m 为舵机脉冲。目前, 果园种植行距一般为 3 m , 则每 hm^2 走过的行程 $s = 3\,333 \text{ m}$ 。由单位长度需肥量与供肥量相等得:

$$\frac{Q}{s} = \frac{q}{v} \quad (4)$$

式中: Q 为单位面积理论施肥量, kg/hm^2 。由式(2)、(3)和(4)得:

$$m = 0.08Qv + 40.17 \quad (5)$$

受施肥转盘上侧有机肥的重力及施肥转盘转动时与有机肥颗粒间产生的摩擦力影响, 需要对施肥转盘受到的转矩进行分析, 验证舵机的转矩是否能够提供施肥转盘转动。将肥箱模型导入 EDEM 仿真软件, 设置参数进行仿真, 分析得到施肥转盘转动过程中受到的最大转矩为 $5.7 \text{ N} \cdot \text{m}$ 。本研究所选 ASME-03B 型数字舵机额定转矩是 $38 \text{ N} \cdot \text{m}$, 可以提供足够的旋转动力。

3.3 施肥控制系统

根据上述单位面积理论施肥量 Q 、施肥转盘旋转角度 α 、单位时间施肥量 q 、脉冲 m 以及机器行进速度 v 之间的关系, 得到舵机控制脉冲 m 与单位面积理论施肥量 Q 、机器行进速度 v 之间的关系。采用增量式光电编码器采集地轮转速并实时传送给 STC89C52RC 单片机, 通过按键输入单位面积理论施肥量 Q , 控制程序控制施肥转盘实时旋转一定角度, 实现定量施肥。

该施肥控制系统主要程序包括测速模块、主程序模块、中断模块和液晶显示模块。利用 3 个定时器, 定时/计数器 0 用于 20 ms 定时, 定时/计数器 1 用于计数, 测取增量式光电编码器传递的脉冲个数并实时传送给单片机进行处理, 进而转换为行进速度 v ; 定时/计数器 2 用来产生中断函数, 利用高低

电平转换方式产生不同脉冲宽度控制舵机转动不同角度。

选定 3 个单位面积理论施肥量, 分别为 $7\,500$ 、 $9\,750$ 和 $11\,250 \text{ kg}/\text{hm}^2$, 用 3 个按键分别控制; 第 4 个按键为复位键, 在停止施肥时按下该键, 施肥转盘复位至闭合状态, 停止落肥。程序启动后施肥转盘处于复位状态, 按下 1 键, 理论施肥量 $7\,500 \text{ kg}/\text{hm}^2$, 根据行进速度 v 实时改变施肥转盘角度 α , 实时改变施肥量; 按下 2 键, 理论施肥量 $9\,750 \text{ kg}/\text{hm}^2$, 根据行进速度 v 实时改变施肥转盘旋转角度 α , 实时改变施肥量, 以此类推。液晶显示模块用来显示机器行进速度和单位面积理论施肥量。

4 施肥效果试验

4.1 室内施肥试验

为验证实际施肥量是否达到设计要求, 进行室内施肥试验。试验分 3 组, 各组单位面积理论施肥量分别为 $7\,500$ 、 $9\,750$ 和 $11\,250 \text{ kg}/\text{hm}^2$, 即理论施肥流量分别为 1.126 、 1.464 和 1.680 kg/s 。通过 3 个按键输入单位面积理论施肥量, 正常施肥并收集 10 s 内落到地面的有机肥, 每组试验重复 6 次。用电子台秤称取 10 s 内每组的施肥量, 取实际施肥量的平均值与理论施肥量进行比较, 得到试验数据见表 5。3 组试验中实际单位面积施肥量分别为 $7\,532.46$ 、 $9\,836.82$ 和 $11\,042.28 \text{ kg}/\text{hm}^2$, 施肥变异系数 CV 分别为 1.1% 、 1.3% 和 1.9% , 施肥一致性良好。

4.2 田间试验

在日照市立盈工业园试验田对采用本研究设计的施肥控制系统的有机肥深施肥进行施肥效果田间试验。地块长度 300 m 。在地头启动拖拉机, 设定 3 组单位面积理论施肥量分别为 $7\,500$ 、 $9\,750$ 和 $11\,250 \text{ kg}/\text{hm}^2$, 运行控制程序, 机器正常开沟施肥。每组施肥量作业 2 行, 共 6 行, 每行选中间地段, 间隔 1 m 挖开 0.5 m 的沟, 观察施肥效果。试验结果表明该有机肥深施肥施肥均匀, 无断流现象(图 6)。

表5 单位时间施肥量试验结果

Table 5 The results of unit time discharge test

组别 Unit number	平均值/(kg/s) Average value	理论值/(kg/s) Theoretical value	标准差 Standard deviation	施肥变异系数/% CV
1	1.131	1.126	0.013	1.1
2	1.477	1.464	0.019	1.3
3	1.658	1.680	0.031	1.9



图6 施肥均匀性效果试验

Fig. 6 Fertilization uniformity test

5 结论

本研究针对林果园不同地块土壤肥力不均、林果在各生长阶段对有机肥的需求量不同和国内现有林果园施肥机械适用性差等问题,设计了一种有机肥深施肥控制系统。采用离散元仿真软件 EDEM 对施肥控制参数进行仿真,得到舵机控制脉冲 m 与单位面积理论施肥量 Q 、机器行进速度 v 之间的关系,设计施肥控制系统,编写控制程序。室内施肥试验结果表明:在单位面积施肥量分别为 7 532.46、9 836.82 和 11 042.28 kg/hm² 时,施肥变异系数 CV 分别为 1.1%、1.3% 和 1.9%,施肥一致性较好;田间试验结果表明:施肥均匀,无断流现象。综上,本研究设计的有机肥深施肥控制系统合理,可以用于林果园施肥作业。

参考文献 References

[1] 马旭,马成林,桑国旗,庄俭. 变量施肥机具的设计[J]. 农业机

械学报,2005,36(1):50-53

Ma X, Ma C L, Sang G Q, Zhuang J. Design of variable rate fertilizer applicator [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2005, 36(1): 50-53 (in Chinese)

- [2] 楚世哲,张立新,李振,李凯. 双变量施肥机施肥控制系统设计[J]. 新疆农村机械化,2016(1):18-20
- Chu S Z, Zhang L X, Li Z, Li K. Design of double variable control system of fertilization [J]. *Xinjiang Rural Mechanization*, 2016 (1): 18-20 (in Chinese)
- [3] 韩大勇,吕钊钦,崔方方,沈向. 新型果树施肥机的设计[J]. 农机化研究,2010,32(12):65-68
- Han D Y, Lv Z Q, Cui F F, Shen X. Design of the fertilizing machine for fruit trees [J]. *Journal of Agricultural Mechanization Research*, 2010, 32(12): 65-68 (in Chinese)
- [4] 王秀,赵春江,孟志军,陈立平,潘瑜春,薛绪掌. 精准变量施肥机的研制与试验[J]. 农业工程学报,2004,20(5):114-117
- Wang X, Zhao C J, Meng Z J, Chen L P, Pan Y C, Xue X Z. Design and experiment of variable rate fertilizer applicator [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2004, 20(5): 114-117 (in Chinese)
- [5] 贾良良,张朝春,江荣风,陈新平,张福锁. 国外测土施肥技术的发展与应用[J]. 世界农业,2008(5):60-63
- Jia L L, Zhang C C, Jiang R F, Chen X P, Zhang F S. Development and application of soil testing and fertilization technology abroad [J]. *World Agriculture*, 2008(5): 60-63 (in Chinese)
- [6] 陈立平. 精准农业变量施肥理论与试验研究[D]. 北京: 中国农业大学,2003
- Chen L P. Theoretical and experimental studies on variable-rate fertilization in precision farming [D]. Beijing: Agriculture University, 2003 (in Chinese)
- [7] 胡志超,田立佳,彭宝良,吴峰,王海鸥. 变量技术在农业机械上的应用[J]. 农机化研究,2009,31(4):226-229
- Hu Z C, Tian L J, Peng B L, Wu F, Wang H O. Application of variable technology in agricultural machinery [J]. *Journal of Agricultural Mechanization Research*, 2009, 31 (4): 226-229 (in Chinese)
- [8] 赵文旻. 精准变量施肥技术研究现状及发展趋势[J]. 科技与创新,2016(16):32-33
- Zhao W M. Research status and development trend of precision

- variable fertilization technology[J]. *Science and Technology & Innovation*, 2016(16):32-33 (in Chinese)
- [9] 张辉,李树君,张小超,王志,王伟平. 变量施肥电液比例控制系统的设计与实现[J]. *农业工程学报*, 2010, 26(S2): 218-222
Zhang H, Li S J, Zhang X C, Wang Z, Wang W P. Development and performance of electro-hydraulic proportion control system of variable rate fertilizer [J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2010, 26(S2): 218-222 (in Chinese)
- [10] 张书慧,马成林,杜巧玲,聂昕,吴才聪,韩云霞. 精确农业自动变量施肥机控制系统设计与实现[J]. *农业工程学报*, 2004, 20(1): 113-116
Zhang S H, Ma C L, Du Q L, Nie X, Wu C C, Han Y X. Design of control system of variable rate fertilizer applicator in precision agriculture[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering*, 2004, 20(1): 113-116 (in Chinese)
- [11] 胡国明. 颗粒系统的离散元素法分析仿真[M]. 武汉: 武汉理工大学出版社, 2010
Hu G M. *Simulation of Particle System by Discrete Element Method*[M]. Wuhan: Wuhan University of Technology Press, 2010 (in Chinese)
- [12] 王国强. 离散单元法及其在 EDEM 上的实践[M]. 西安: 西北工业大学出版社, 2010
Wang G Q. *Discrete Element Method and Application in EDEM*[M]. Xi'an: Northwestern Polytechnical University Press, 2010 (in Chinese)
- [13] Owen P J, Cleary P W. Prediction of screw conveyor performance using the Discrete Element Method (DEM)[J]. *Powder Technology*, 2009, 193(3): 274-288
- [14] 孟杰, 孟文俊. 影响 EDEM 仿真结果的因素分析[J]. *机械工程与自动化*, 2014(6): 49-51
Meng J, Meng W J. Analysis of influencing factor on results of EDEM simulation [J]. *Mechanical Engineering and Automation*, 2014(6): 49-51 (in Chinese)
- [15] 心男. 基于 EDEM-FLUENT 耦合的气吹式施种器工作过程仿真分析[D]. 长春: 吉林大学, 2013
Xin N. Simulation analysis of working process of air-blowing seed-metering device based on coupled EDEM-FLUENT[D]. Changchun: Jilin University, 2013 (in Chinese)
- [16] 徐泳, 李艳洁, 李红艳. 离散元法在农业机械化中应用评述[J]. *农机化研究*, 2004(5): 26-30
Xu Y, Li Y J, Li H Y. Application of discrete element method in agricultural mechanization [J]. *Journal of Agricultural Mechanization Research*, 2004(5): 26-30 (in Chinese)
- [17] 周韦, 王金峰, 王金武, 杨欣伦. 基于 EDEM 的水田深施肥机构螺旋钢丝的数值模拟与分析[J]. *农机化研究*, 2015(1): 27-30
Zhou W, Wang J F, Wang J W, Yang X L. Numerical simulation and analysis of a fertilizer can on fertilizer spreader based on EDEM[J]. *Journal of Agricultural Mechanization Research*, 2015(1): 27-30 (in Chinese)

责任编辑: 刘迎春