

# 农业机械仿真分析方法教学案例

宋井玲，张银平，王相友

(山东理工大学农业工程与食品科学学院，山东 淄博 255000)

**摘要** 为提高《高等农业机械学》课程中仿真分析方法这部分内容的教学效果，针对农业机械仿真分析方法难以理解、实际应用时无从下手问题，文章结合典型应用实例进行讲解。以大蒜直立种植装置的研究为例，阐述仿真分析应用软件的选择及接口设置、仿真系统建立的方法和仿真分析原理。既有助于学生对该部分内容的理解，又能提高学生的创新能力，达到学以致用，以解决农业机械中的前沿问题。

**关键词** 仿真分析；教学案例；农业机械

中图分类号：G642

文献标识码：A

计算机仿真分析法是一种基于计算机仿真技术的模拟分析方法，将实际应用供应链构建问题根据不同软件要求，先进行模型化，再按照仿真软件的要求进行仿真运行，最后对结果进行分析。农业机械作业具有季节性强，利用计算机软件进行仿真分析可以使农业机械试验不受试验环境条件的限制，大大缩短研发周期，因此仿真分析方法在农业机械研究中应用越来越广泛，也是《高等农业机械学》这门课程的主要内容。

由于农业机械的多样性和作用处理的对象如种子、作物、土壤等的性质多变且又是随机变化的，使得仿真的建立复杂多样，需要选择适用的应用软件及多个应用软件耦合。大蒜的种植除了与很多作物的种植要求相同外，还要求芽尖向上直立种植，因此大蒜直立种植装置的研发是大蒜种植机的关键也是目前研究的难点和热点之一，利用仿真分析方法可得到或观察到实际试验难以获得并有价值的信息，其仿真系统包含机械装置、蒜种和土壤，因此大蒜直立种植装置仿真的建立具有农业机械的代表性。为将理论与实际相结合，提高这部分内容的教学效果，又能与先进的农业机械技术及其研究方法紧密结合，激发学生创新意识，树立攻克行业难题的信心，本文拟以大蒜直立种植装置种植蒜种为例，阐述仿真系统建立的方法和仿真分析原理。

## 1 预习及需了解的相关知识内容

农业机械的仿真方法涉及机械结构及其原理、农业物料和仿真软件等内容，本案例是在已讲过机械仿真分析有关概念、理论，了解了常用仿真软件后，在对大蒜机械化种植技术初步了解的基础上进行。在该部分内容教学之前还应了解大蒜种植农艺要求、大蒜直立种植装置的结构组成、关键参数、工作原理和特点。巩固复习一种三维建模软件，了解EDEM、ADAMS软件的界面、基本功能，掌握本课

程讲过的有关计算机仿真分析方法的概念、分类、原理和步骤等。

## 2 仿真系统的建立

对农业机械进行仿真分析，首先要根据农业机械的工作原理及处理对象的特性建立仿真系统。大蒜直立种植装置种植蒜种的过程是携带蒜种的栽植器做栽植运动入土后打开，将蒜种直立插送至土壤中，是机械、土壤和蒜种的互作过程，其仿真分析系统包括大蒜直立种植装置模型、蒜种模型和土壤模型，需要EDEM-ADAMS联合仿真才能模拟栽植器在复杂运动情况下种植蒜种过程，目的是观察蒜种在种植过程中的运动、在土壤中形成的种穴形状、分析影响蒜种直立种植的因素及规律。

### 2.1 应用软件

模拟大蒜直立种植装置的栽植器在复杂运动时，与土壤、种子之间的交互作用，单一的仿真软件往往难以满足所有需求。EDEM软件虽然能精确模拟土壤颗粒和种子的离散行为，却无法直接处理栽植器在机具上的复合运动。此外，ADAMS软件可以用于复杂运动的仿真分析，但在离散元分析上有所不足。因此，结合EDEM和ADAMS两个软件的特点，构建一个联合仿真系统，是实现大蒜直立种植装置等类似农业机械及装置仿真分析研究的有效途径<sup>[1]</sup>。首先，利用三维建模辅助工具，创建大蒜直立种植装置的三维模型，将该模型分别导入到ADAMS和EDEM软件中，生成相应的运动模型和离散元模型。其次，建立联合仿真接口，进行相关参数的设置，以确保两个软件之间的数据交换准确无误。最后，在EDEM环境中，构建土槽和蒜种的离散元模型，并将它们与直立种植装置的离散元模型结合，形成一个完整的仿真系统。进行仿真试验时，需利用ADAMS软件控制直立种植装置的运动，使其在EDEM环境中能够同步执行预设的复合动作。

## 2.2 直立种植装置模型

直立种植装置是仿真系统中的机械部分,建立其仿真模型,首先应根据其工作原理对其工作机构进行简化。直立种植装置经过简化后主要由平行四杆双曲柄机构和栽植器两部分组成,栽植器固定连接在平行四杆机构的一个连杆上。栽植器随工作机以速度 $v$ 匀速前进,同时携带单粒芽尖朝上的蒜种相对工作机做连续的圆周运动。栽植器运动到最低点附近进入土壤、到达合适深度时打开,蒜种从栽植器中掉落接触到土壤,在土壤和栽植器共同作用下,芽尖朝上的蒜种保持直立状态插入到土壤中,栽植器运动离开土壤后关闭,完成一次栽种工作过程。

在ADAMS软件中导入创建好的直立种植装置模型,杆件之间采用转动副连接,同时采用移动副将其中未连接栽植器的一个连杆与地面连接。根据直立种植装置工作时的运动,分别为主动杆和移动副添加旋转驱动和平移驱动。为栽植器设置运动函数 $\text{STEP}(time, t1, \theta1, t2, \theta2)$ , $t1$ 和 $t2$ 分别为栽植器打开前后的时间, $\theta1$ 和 $\theta2$ 为对应时间栽植器的打开角度。EDEM-ADAMS联合仿真通过定义几何形状和材料类型,确定栽植器每一个部件的质量特性,材料类型选择硬性材料,在本系统中选择为steel(钢铁),至此,直立种植装置动力学模型建立完成。

在构建直立种植装置的离散元模型时,首先,在EDEM软件中导入创建好的直立种植装置三维模型,确保每个零件的名称和材料属性与ADAMS运动模型相对应。模型设置完成后,在栽植器开口上方建立一个颗粒工厂模拟蒜种下落位置。

## 2.3 联合仿真接口设置

### 2.3.1 G-Force来源设置

在ADAMS中,对直立种植装置运动模型的所有构件设置G-Force来源,选择Subroutine,并设置User Parameters为0,Routine为ACSI\_Adams::。为每个构件按顺序分配求解ID(1至6),完成后输出《lizhi》文件。

### 2.3.2 外部接口文件设置

(1) EDEM模型文件《lizhi.dem》:在前处理和Simulator中进行参数设置。

(2) ADAMS模型文件《lizhi.bin》:在ADAMS中完成约束、运动副等设置。

(3) 控制文件《lizhi.acf》:用于控制ADAMS仿真的运行,可以对相应的控制命令等进行修改。

(4) 耦合文件《lizhi.cosim》:实现EDEM与ADAMS耦合的耦合,确保数据交换无误。

(5) 环境变量文件《Environmental variable to be put in adm file.txt》:将环境变量文件内容复制到耦合文件《lizhi.

cosim》中,并做必要修改。

### 2.3.3 结构文件修改

(1) 控制文件:根据栽植周期2s,在《lizhi.acf》中设置仿真时间为2s和步数为100,以模拟一个完整的直立种植过程。

(2) 耦合文件:直立种植装置仿真有6个构件,在程序中以part\_a至part\_f表示,使用Notepad++软件对各部分程序进行设置和修改,保证耦合设置正确。

(3) Adams启动文件:利用Notepad++软件启动Adams的co-simulation模块,并正确导入《lizhi.cosim》文件作为配置选项。

## 2.4 蒜种离散元建模

蒜种是直立种植装置处理的对象,农业机械处理的对象有种子、农作物植株和果实等农业物料,一般都形状不规则、大小尺寸差异较大、特征参数多且是随机分布的,仿真模型多用离散元模型,蒜种离散元模型的构建方法对常用农业物料的离散元模型具有一定的典型性。可利用多球颗粒组合的技术方法来构建这个模型,具体操作如下:在EDEM软件中导入创建好的蒜种三维实体模型,并以该蒜种模型作为模板,向内部填充球形颗粒生成离散元模型。在建立蒜种三维模型时,应符合蒜种大小和形状的样本分布规律,主要建模方法有三维扫描仪扫描法和手工测量法。

为构建蒜种的离散元模型,可采用XML自动填充建模法向模板中填充球形颗粒,该方法的球形颗粒通常采用相同大小的颗粒,这些颗粒在蒜种模型内部挤压和堆积,最终形成一个颗粒组合体来模拟蒜种的形状和体积。在蒜种模型内部最上方设置一个颗粒工厂出料口,在该出料口将动态地产生出球形颗粒,当球形颗粒向下运动接触到蒜种轮廓边界或其它颗粒时,会停止运动并在那里堆积,直至蒜种的三维模型被球形颗粒完全充满。为了保证填充模型的精度质量,采用Hertz-Mindlin无滑移接触模型此外,设置较小的颗粒间动静摩擦系数和碰撞恢复系数,以增加颗粒的流动性,使其能够顺利地填充到蒜种的底部和形状复杂的区域。同时,设置较大的重力加速度,以加快颗粒的沉降过程。球形颗粒填充完成后,可以在EDEM后处理界面中获得所有球形颗粒的半径和球心坐标数据。将时间设置为0,导出dec文件并将后缀改为.xml,在该dec文件中补充上获得的各球形颗粒的球心坐标和半径,新建EDEM文件时,打开此dec文件就会自动生成蒜种离散元模型。可采用不同大小的颗粒填充,比较颗粒大小和模型精度、仿真试验时间之间的关系。建立多个蒜种的离散元模型供在联合仿真时随机调用,以满足模拟仿真分析的需求。

## 2.5 土槽离散元仿真模型

土壤和蒜种不同属散粒体,是农业机械特别是种植、播种机械部件作用的对象。建立土壤离散元模型需要设置土壤的物理特性、接触力学特性等参数,其参数可以通过试验测量或者查阅相关文献来获得。

建立土壤离散元模型应先在EDEM软件的Geometries模块创建一个土槽,该系统系统土槽尺寸为 $200 \times 120 \times 150\text{mm}$ ,再在土槽上方设置一个颗粒工厂,使其以10000个/秒的速率生成土壤颗粒填充土槽。为观察分析栽植器入土对土壤的扰动及土壤的运移规律,土壤模型可上下均分为三层,分别用不同颜色区分,每层30000个颗粒,共计90000个颗粒。土壤颗粒可简化为球形,分半径为2.0、1.0和0.5mm三种,每种颗粒分别占10%、75%和15%,每种颗粒大小范围设定为该种颗粒半径的0.8—1.2倍之间。选择土壤颗粒粒径大小(Size)为随机(random),可使土壤离散元模型在0.4—2.4mm半径范围内均有颗粒生成<sup>[2]</sup>。将土壤颗粒填充完成后,等待颗粒填充趋于稳定,土槽离散元模型建立完成。

## 3 仿真分析

### 3.1 参数设置

将土壤和蒜种离散元模型导入到直立种植装置离散元模型中,确定三者之间的接触类型,设定蒜种、栽植器以及土壤的关键力学参数以及三者相互之间的接触参数。具体参数的设定可参考相关文献<sup>[3]</sup>或者依据实际测量值进行微调。

### 3.2 种植过程仿真

在配置好参数后,通过ADAMS软件的Co-simulation模块启动《lizhi.adm》文件,即可开始联合仿真。在仿真过程中,设置特定的观察时间和视图或剖面,在仿真周期内,选择不同的时间节点,如可以分别取对应立直种植装置工作关键位置的0s、0.5s、0.9s、1.3s、2s进行观察分析。0s时,颗粒工厂以芽尖向上的姿态生成一粒蒜种落入到栽植器内,栽植器在土槽上方;0.5s时,栽植器开始入土;0.9s时,栽植器运动至最低点达到种植深度;1.3s时,栽植器开始打开释放蒜种;2s时,栽植器离开土壤,一粒蒜种的直立种植过程的模拟结束。

### 3.3 大蒜直立种植装置仿真实验

种植蒜种的直立度是衡量直立种植装置性能的主要指标,截取相应时刻的画面可以观察和测量蒜种的直立度。

栽植器运动入土挤压土壤,在土壤中形成种穴后,土壤回流支撑蒜种使蒜种直立在土壤中。种穴形状的对称度越高,越有利于蒜种在土壤中直立,种植蒜种的直立度越

高,因此研究种穴的形状非常重要。种穴形状是栽植器入土部分的轮廓面在整体复合运动和打开运动过程中形成的,其边界形状复杂,很难进行理论分析。实际试验中,栽植器离开土壤后土壤回流是不可避免的且是随机的,也很难观察到种穴的准确形状,尤其是指定的剖面形状。利用该仿真系统不产生蒜种,设置动画叠加,即可得到种穴任意剖面的准确形状。

改变栽植器形状和直立种植装置的运动参数等,可利用该仿真系统以蒜种的直立度和种穴形状为指标进行模拟仿真实验。

## 4 结语

通过建立仿真系统进行农业机械的仿真实验,既降低了实验成本,又能解决农业机械季节性、试验条件难以满足的问题,使学生深刻体会到农业机械仿真分析的重要性和在农业机械研发中的作用。可以让学生学会灵活利用仿真分析方法观察机械、土壤和蒜种的互作过程,获得用其他方法难以得到的信息的方法,如种穴各剖面的准确形状、土壤运移情况等。

该案例中包含机械部件-栽植器、种子-蒜种和土壤具有代表的农业机械仿真分析处理的对象,应用到了三维建模、离散元仿真和机械系统动力学自动分析等软件,可以起到举一反三的效果。通过此案例可提高教学效果,加深对农业机械仿真分析方法的理解、学会选择和综合利用有关仿真软件解决农业机械领域中的实际问题及创新研发。

★基金项目:山东省优质专业学位教学案例库建设项目(SDYAL2022117、SDYAL2022120、SDYAL2023116)。

作者简介:宋井玲(1964—),女,硕士,山东理工大学,教授,研究方向为农业机械化及其自动化。

## 参考文献

- [1] 朱惠斌,吴宪,白丽珍,等.基于EDEM-ADAMS仿真的稻茬地双轴破茬免耕装置研制[J].农业工程学报,2022,38(19):10-22.
- [2] 贺一鸣,向伟,吴明亮,等.基于堆积试验的壤土离散元参数的标定[J].湖南农业大学学报(自然科学版),2018,44(2):216-220.
- [3] 曾智伟,马旭,曹秀龙,等.离散元法在农业工程研究中的应用现状和展望[J].农业机械学报,2021(52):1-20.