

温室自动施肥机的设计与仿真

傅泽田^{1,2,3} 董玉红^{1,3} 张领先^{2,4} 杨 菡² 王洁琼^{1,3} 李鑫星^{2,3,4*}

(1. 中国农业大学工学院, 北京 100083; 2. 中国农业大学信息与电气工程学院, 北京 100083;
3. 食品质量与安全北京实验室, 北京 100083; 4. 农业部农业信息化标准化重点实验室, 北京 100083)

摘要: 精密施肥是精确农业作业体系中的重要环节之一, 近年来人们对设施温室精密施肥的要求愈加迫切。该文主要设计一款小型、精准、实用的设施温室自动施肥机。该施肥机采用 ARM9 S3C2440 微处理器作为电路控制模块的核心, 配备料位监测预警装置; 采用槽轮式施肥装置, 槽轮选择对颗粒肥料具有良好填充和排出效果的锥形圆弧凹槽断面, 通过控制步进电动机的脉冲频率控制槽轮转动的圈数, 进而控制施肥装置的施肥量。该文利用 SolidWorks 完成施肥机的结构建模, 用 Simulation 对其主要受力部位进行强度校核, 验证其结构的可行性; 采用 EDEM 软件对施肥机构的排肥效果进行仿真模拟, 验证该施肥装置可以均匀、稳定、连续地将肥料排出施肥装置; 建立施肥装置实体模型进行施肥量验证试验, 试验结果表明, 在 5、10、15、20 r/min 4 种转速下, 试验得到的排肥量实际值与理论值的最大误差为 2.42%, 小于 3%, 这说明所设计的施肥装置在不同的转速下仍可以达到较高的排肥精度, 可以实现精确施肥的目标。

关键词: 农业机械; 设计; 控制装置; 精准施肥; 自动施肥机

doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2017.z1.050

中图分类号: S147

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2017)-Supp.1-0335-08

傅泽田, 董玉红, 张领先, 杨 菡, 王洁琼, 李鑫星. 温室自动施肥机的设计与仿真[J]. 农业工程学报, 2017, 33(增刊 1): 335—342. doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2017.z1.050 http://www.tcsae.org

Fu Zetian, Dong Yuhong, Zhang Lingxian, Yang Han, Wang Jieqiong, Li Xinxing. Design and simulation of automatic fertilizing machine for greenhouse[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2017, 33(Supp.1): 335—342. (in Chinese with English abstract) doi: 10.11975/j.issn.1002-6819.2017.z1.050 http://www.tcsae.org

0 引 言

中国作为农业生产大国, 至今仍有超过 40% 的人从事农业生产活动, 加上近年来水土流失、土地荒漠化现象严重, 耕地面积逐年锐减, 这就意味着大力发展农业技术, 提高单产量是十分必要的^[1-6]。近年来我国以高技术、高投入为特征的高度集约化的设施农业发展迅速^[7-9]。截至 2014 年, 中国设施温室设施面积高达 410.9 万 hm²^[10]。设施温室生产过程中, 为增加作物产量, 生产者往往会人为加大肥料的使用量^[11-13], 但由于设施温室的封闭性以及特定农作物对营养元素的选择性吸收, 多余的土壤盐分逐年积累, 造成设施环境内水、热失衡, 导致设施温室产量逐年降低, 许多设施温室在使用几年后不得不再被废弃^[14-17]。因此, 科学精密施肥也是设施农业作业体系中重要的组成部分之一。

由于设施温室结构的封闭性, 其种植面积受到一定的限制, 这使得大型农业机械无法应用于设施温室作业, 从而导致设施温室生产机械化程度较低。目前国外在设施温室施肥中大多数采用肥水一体化灌溉模式, 将肥料

配制成一定比例的营养液, 通过相应的管路系统输送到作物根部, 为作物生长提供精确的营养物质^[18-20]。这种施肥方式可以取得良好的施肥效果, 但其成本比较高, 且可移植性较差, 不能普遍应用于中国的小农经济。目前中国北方大部分的设施温室设施中, 主要还是依靠人力来进行各项生产作业, 不仅增加了设施温室生产的劳动成本, 而且还造成设施温室产量降低、利润减少^[21-23]。

本文主要研究了一种可用于设施温室作业的自走式自动施肥机, 该施肥机体型较小, 可以自由出入各个设施温室大棚, 而且其配置有精确施肥电路控制模块, 通过该电路控制模块可以实现对设施温室作物的自动精密施肥, 从而减轻生产者的劳动强度, 在一定程度上提高了设施温室生产的机械化程度。

1 施肥机机械结构与工作原理

设计的设施温室智能自动施肥机主要由底盘、发动机、施肥装置、传动装置、开沟器、速度传感器、肥料箱、步进电动机、驱动器及驱动轮等部分组成, 如图 1 所示。其主要技术指标和技术参数如表 1 所示。

施肥机运行前, 首先进行施肥标定, 标定机器运行相关参数, 并输入到电路控制模块的数据库中, 然后将设施温室内需要施肥地段的施肥量信息也输入到电路控制模块。施肥机由发动机带动驱动轮前进, 从动轮上安装有速度传感器, 实时监测施肥机的运动速度, 并将速度信息传送到电路控制模块, 电路控制模块对数据进行分析, 计算出步进电动机的转动脉冲频率并传送给驱动

收稿日期: 2016-11-14 修订日期: 2016-12-14

基金项目: 叶类蔬菜产业技术体系北京市创新团队建设专项资金项目 (BAIC07-2016); 2017 教育部基本科研业务费支持

作者简介: 傅泽田, 教授, 博士生导师, 主要从事农业系统工程与信息化技术, 北京 中国农业大学工学院, 100083. Email: fzt@cau.edu.cn

*通信作者: 李鑫星 (1983-), 男, 河北承德人, 博士, 副教授, 研究方向为农业系统与知识工程。北京 中国农业大学信息与电气工程学院, 100083.

Email: lxxcau@cau.edu.cn

器, 驱动器驱动步进电动机转动, 从而控制传动轴的转动速度, 确保将定量的化肥深施于正下方的肥沟内, 完成定量准确施肥。整个系统的控制结构如图 2 所示。

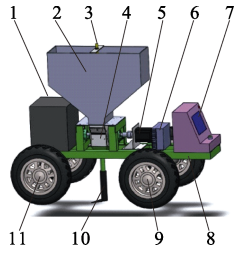


图 1 装置结构原理图

Fig.1 Structure principle diagram of device

表 1 主要技术指标和技术参数

Table 1 Main technical indicators and technical parameters

项目 Project	技术指标、参数 Technical indicators and parameters
外形尺寸 (长×宽×高) Dimensions (length×width×height)/ (mm× mm ×mm)	1 200×800×1 000
整机质量 Machine weight/ kg	150
功耗 Power/ W	<1 000
料位报警距离 Alarm distance/ mm	<150
肥料箱容量 Fertilizer tank capacity/ kg	≤50
施肥方式 Fertilization method	带状深施
施肥行数 Number of fertilization lines	1
施肥量 Amount of fertilizer/(kg·hm ⁻²)	200~600

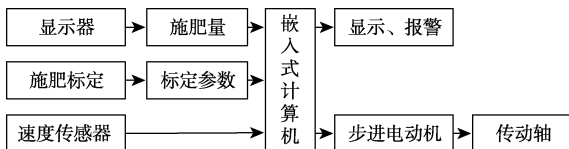


图 2 施肥机控制结构示意图

Fig.2 Control structure of the fertilizer machine

2 施肥机的设计与实现

2.1 施肥装置的设计与参数确定

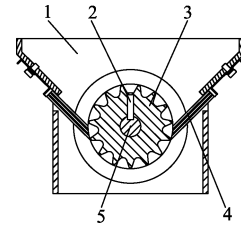
施肥装置主要是用来完成对肥料的精确计量与排放, 其设计要求如下:

1) 所设计的施肥装置能够保证在不同作业速度下肥料排出均匀、连续, 施肥量稳定; 降低外界环境、机器振动等因素对施肥的影响。

2) 施肥装置具有较高的适用性, 能够适用于不同颗粒规格、不同肥料性质的颗粒状肥料以及粉状肥料。

3) 所设计的施肥装置施肥过程中能够减少肥料颗粒的损伤。

根据以上设计要求, 综合分析各种施肥结构, 最终采用了如图 3 所示的槽轮式施肥装置。该施肥装置主要由施肥盒、槽轮、传动轴、毛刷等组成。



1. 肥料箱 2. 紧定螺钉 3. 槽轮 4. 毛刷 5. 传动轴
1. Fertilizer bin 2. Set screw 3. Sheave 4. Brush 5. Transmission shaft

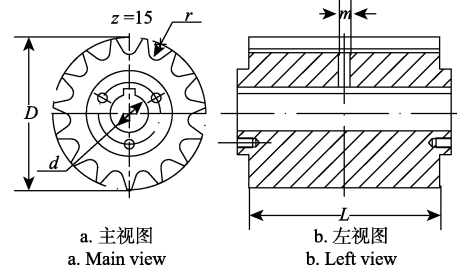
图 3 施肥装置二维结构简图

Fig.3 2-D schematic of fertilizer device

施肥装置工作时, 肥料箱中的肥料在重力场的作用下, 经过肥料箱卸料口进入施肥盒内, 充满施肥盒的肥料部分充入槽轮的凹槽内; 传动轴带动槽轮转动, 充入槽轮凹槽内的肥料随槽轮转动, 从而被强制排出施肥盒; 被排出的肥料经出料漏斗沿管道被深施于正下方开沟器开出的肥沟内。

槽轮是施肥装置的关键工作部件, 它能够精确计量肥料, 使肥料顺畅地排放到肥沟内。槽轮的凹槽断面形状决定着肥料在施肥装置中的填充和排出效果, 从而影响着整个施肥机的性能, 因此断面形状的选择非常关键。

本文选用常用的锥形圆弧凹槽断面, 其结构如图 4 所示。



a. 主视图
a. Main view
b. 左视图
b. Left view

注: D 表示槽轮直径; L 表示槽轮工作长度; z 表示槽轮槽数; r 表示凹槽半径; d 表示轴孔直径; m 表示紧钉螺钉孔直径。

Note: D is diameter of the sheave; L is working length of the sheave; z is number of slots; r is the groove radius; d is diameter of the shaft hole; m is diameter of the nail screw hole.

图 4 槽轮二维结构

Fig.4 2-D schematic of sheave

槽轮单转施肥量 q' 计算公式如下^[25]:

$$q' = \pi DL \gamma \left(\frac{\psi S}{t} + \lambda \right) \quad (1)$$

$$t = \frac{\pi D}{z}$$

式中 q' 为槽轮单转施肥量, g/r ; S 为槽轮上每个凹槽的截面积, cm^2 ; L 为槽轮工作长度, cm ; D 为槽轮直径, cm ; z 为槽轮槽数; t 为凹槽节距, cm ; γ 为肥料容重, g/cm^3 ; ψ 为凹槽内肥料充满系数, 取 $0.7 \sim 0.9$; λ 为带动层特性系数, 取 $0.2 \sim 0.4$ 。

则施肥装置每小时的施肥为:

$$q = q' \times n \quad (2)$$

式中 q' 为槽轮单转施肥量, g/r ; n 为槽轮转速, r/h 。
施肥机每公顷的施肥量为

$$Q = \frac{0.6q}{vB} \quad (3)$$

式中, q 为施肥装置每小时的施肥量, g/h ; B 为施肥机行距, m ; v 为施肥机前进速度, km/h 。

从以上关系式可以看出, 影响施肥量的因素是槽轮直径 D 、槽轮工作长度 L 、槽轮转速 n 、槽轮槽数 z 以及凹槽半径 r (决定凹槽截面积 S)。一般情况下凹槽半径 r 在 $2\sim 9\text{ mm}$, 槽数 z 在 $8\sim 20$ 之间时具有良好的填充和施肥效果。在相关参数不变的条件下, 当施肥量一定时, 如果槽轮直径 D 过大, 则需要减小槽轮转速 n 或者槽轮工作长度 L , 而槽轮转速过小会造成肥料排出不均匀, 槽轮工作长度过小容易产生肥料堵塞现象; 如果槽轮直径 D 过小, 就必须提高槽轮转速 n 或者增加槽轮工作长度 L , 而当槽轮转速过大时, 容易导致颗粒肥料损伤严重, 增加槽轮工作长度会导致施肥装置制造成本增加。为了满足施肥量的需求以及施肥的均匀性和稳定性要求等, 经过多次设计优化, 最终选定槽轮直径 $D=80\text{ mm}$, 施肥工作长度 $L=100\text{ mm}$, 凹槽半径 $r=4\text{ mm}$, 槽轮槽数 $z=15$ 。一般情况下, 作物需肥量在 $1\ 500\sim 6\ 000\text{ kg}/\text{hm}^2$ 之间^[24-28], 施肥时机器的行走速度在 $1\sim 5\text{ km}/\text{h}$ 之间^[29], 结合槽轮单转施肥量, 得出槽轮转速应在 $5\sim 15\text{ r}/\text{min}$, 故仿真模拟时槽轮转速取 $n=10\text{ r}/\text{min}$ 。

2.2 动力装置的选择

该施肥机的动力装置主要包括提供总动力的发动机和施肥装置的步进电动机, 现分别进行型号选择。

施肥机在运行过程中, 其行驶阻力 (外部) F_r 主要包括: 滚动阻力 F_f 、空气阻力 F_w 、坡度阻力 F_i 和加速阻力 F_a 四种阻力^[30]的作用, 即 $F_r=F_f+F_w+F_i+F_a$ 。由于该施肥机主要工作在设施温室中, 运行速度较低, 工作路面坑洼不平, 故其受到的空气阻力和加速阻力较小, 最大爬坡滚动阻力和坡度阻力是其行驶阻力的主要部分。施肥机正常工作时受到的行驶阻力 F_r 为

$$F_r = Mgf \cos \alpha + Mgf \sin \alpha \quad (4)$$

式中 α 为路面爬坡角, 以最大设计爬坡角代入计算, ($^\circ$); M 为施肥机的质量, 取空载和满载 2 种工况计算, kg ; f 为滚动阻力系数, 按施肥机的行驶工况, 设计时取 0.15 ; g 为重力加速度, $9.8\text{ m}/\text{s}^2$ 。

由此计算施肥机最大设计爬坡角度行驶时发动机的负载功率 N_e

$$N_e = \frac{F_r v_l}{3.6 \eta_r} \quad (5)$$

式中 F_r 为最大爬坡角度行驶时的行驶阻力, N ; v_l 为最大爬坡角度行驶时的最低行驶车速, 一般设计为 $5\text{ km}/\text{h}$; η_r 为行驶驱动系统的总效率, 设计取 0.7 。

由以上公式得出施肥机正常工作时发动机的负载功率 $N_e=747\text{ W}$, 故所选择的发动机功率 $P_e \geq N_e=747\text{ W}$ 。

步进电机的额定转矩 T 应不小于克服肥料最大重力对槽轮作用的重力矩与克服计量槽轮的转动惯量所需的扭矩之和, 才能够保证施肥机正常工作, 即

$$T \geq G_{\max} \cdot R + \frac{1}{4} m_l \cdot R^2 \cdot \omega^2 \quad (6)$$

式中 G_{\max} 为肥料最大重力, N ; R 为槽轮半径, m ; m_l

为槽轮的质量, kg ; ω 为槽轮的最大角速度, rad/s ;

依据以上的参数代入数据算得 $T \geq 2.5\text{ N}\cdot\text{m}$, 故所选用的步进电动机的额定转矩应大于 $2.5\text{ N}\cdot\text{m}$ 。

根据估算的电机转矩值, 决定采用型号为 60HB30 的步进电动机, 该电动机的保持转矩为 $3.0\text{ N}\cdot\text{m}$, 电压为 $24\sim 48\text{ V}$, 转动惯量为 $900\text{ g}/\text{cm}^2$, 完全可以满足施肥装置运行要求^[31]。

2.3 电路控制模块

电路控制模块是施肥机的核心工作部件, 主要用于接收传感器传来的信息并进行分析处理, 实现对设施温室自动施肥机运动的控制。电路控制模块的核心采用 ARM9 S3C2440 微处理器, 这种处理器使用了 2 片外接的 32 Mbytes 的 SDRAM 芯片作为内存, 并接在一起形成 32 bit 的总线, 其具有足够的 IO 口和模数转换通道, 可靠性和集成度高^[32], 可满足施肥机的控制需求。该电路控制模块需要使用 5V 电源供电, 通过降压芯片产生 3 种电压: 3.3 、 1.8 、 1.25 V , 以便用于整个系统各个部分的运作。

显示器选用了 TFT-LCD (薄膜晶体管液晶显示器) 屏幕, 其工作电压在 $1.5\sim 6\text{ V}$ 之间, 可直接使用控制模块提供的电压。且这种显示器体型小、质量轻、厚度薄, 占用施肥机空间较小, 有利于设施温室作业。

电路控制模块中配置的料位监测装置主要由光电开关、LED 灯和蜂鸣器报警电路组成。料位监测装置用于实时监测肥料箱内剩余肥料状况, 当肥料箱内肥料不足时及时报警, 提示工作人员添加肥料。该装置的工作原理电路示意图如图 5 所示。

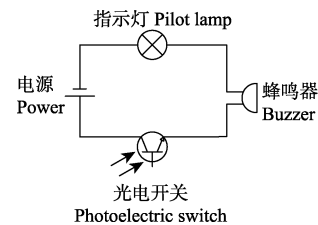


图 5 料位监测装置工作原理电路示意图
Fig.5 Circuit working principle diagram of fertilizer level monitoring device

光电开关 (photoelectric switch) 利用物体对红外光束的遮挡或反射作用, 通过检测电路检测物体的有无。所设计的施肥装置采用发射器和接收器集成于一体的漫反射式光电开关, 当有物体存在时, 发射器产生的光线会在物体的漫反射作用下被反射给接收器, 光电开关就产生了开关信号。而当没有物体存在时, 接收器接收不到发射器发出的光线信号, 此时检测电路会发出不同的开关信号, 其工作原理如图 6 所示。

为保证肥料箱中料位测量数据的准确性与精度, 将光电开关安装于肥料箱顶部中间位置, 具体安装位置如图 7 所示。

综合分析施肥机的工作状况与工作条件, 决定采用型号为 E3F-DS30C4 的常开型漫反射式光电开关, 其电源电压为 $10\sim 30\text{ V}$, 输出方式为 NPN, 其灵敏度高、频

率响应快, 当检测到料位低于所设定的警戒值时可以及时发出信号, 使蜂鸣器发出警报。

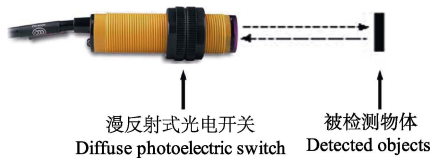
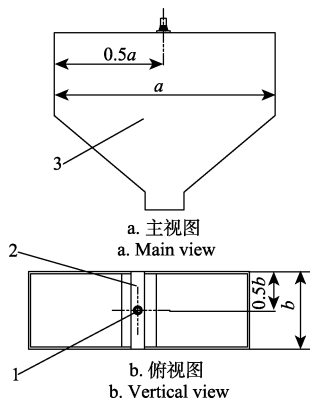


图6 漫反射式光电开关原理图

Fig.6 Principle diagram of diffuse photoelectric switch



1. 光电开关 2. 支撑板 3. 肥料箱
1. Photoelectric switch 2. Support plate 3. Fertilizer bin
注: a 表示料仓长度; b 表示料仓宽度。
Note: a is length of the bin; b is width of the bin.

图7 光电开关安装位置示意图

Fig.7 Schematic diagram of installation location of photoelectric switch

3 关键部位的受力分析及强度校核

本文采用 SolidWorks 中的 Simulation 对施肥机关键受力部位进行了有限元分析。当载荷作用于零件或者装配体上时, 其为了保持平衡状态, 就会产生相应的内力和反作用力, 宏观上看就是产生了应变或位移。利用 Simulation 可以比较真实地模拟零件或者装配体在某种载荷作用下所产生的应力、应变以及位移等情况, 然后进一步得到零件或者装配体在该载荷作用下的安全系数, 从而对其结构或者材料的设计进行优化。

3.1 施肥装置横梁的有限元分析

横梁采用焊接方式安装在底盘上, 前后对称安装了一对。它的作用是支撑、固定整个施肥装置部分, 将整个施肥装置的重量传递给底盘。现设定横梁材料为普通碳钢, 其各项规格参数如表 2 所示, 当肥料箱内充满肥料 (50 kg) 时, 横梁受到最大约束力 (约 600 N), 假设力是均匀且连续的, 则单一横梁受到约 300 N 的压力。用 SolidWorks Simulation 对横梁施加 300 N 的压力进行有限元分析后, 最终得到其应力图解、位移图解以及安全系数图解如图 8 所示。

从图 8 可以看出, 当横梁受到 300 N 的压力时, 其最大等效应力约为 1.2×10^7 Pa, 没有超出材料的屈服强度 2.20594×10^8 Pa; 其最大位移约为 0.01 mm, 说明受力时横梁的变形较小, 满足设计要求; 其安全系数图解显示最小安全系数约为 18, 说明横梁没有产生屈服。综合以上分

析结果可知, 在实际应力加载下, 该横梁完全满足应力强度要求。

表 2 横梁规格参数
Table 2 Specification of the beam

属性 Attribute	数值 Value
材料 Material	普通碳钢
质量 Weight/ kg	0.988 86
体积 Volume/ mm ³	1.27×10^5
弹性模量 Elastic modulus/ Pa	2.1×10^{11}
泊松比 Poisson's ratio	0.28
抗剪模量 Shear modulus/ Pa	7.9×10^{10}
密度 Density/ (kg·m ⁻³)	7.8×10^3
张力强度 Tensile strength/ Pa	3.99826×10^8
屈服强度 Yield strength/ Pa	2.20594×10^8
热膨胀系数 Thermal expansion coefficient/ K	1.3×10^5
热导率 Thermal conductivity/ (W·m ⁻¹ ·K ⁻¹)	43
比热 Specific heat/ (J·kg ⁻¹ ·K ⁻¹)	440

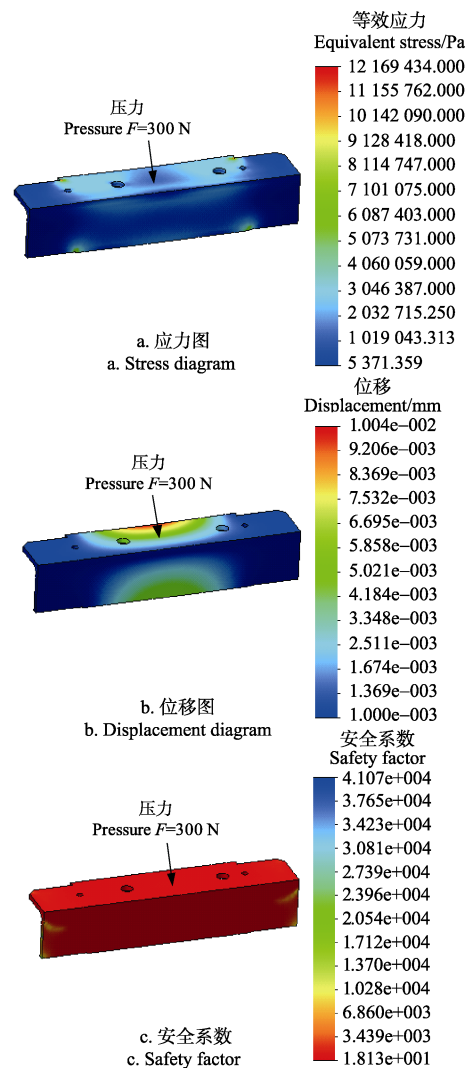


图8 横梁的有限元分析图解

Fig.8 Diagram of finite element analysis of beam

3.2 传动轴有限元分析

在整个施肥装置中, 传动轴的作用是将步进电机轴的动力传递给槽数 $z=15$ 的槽轮, 使槽轮旋转, 将肥料排

出，因此传动轴需要有一定的耐磨度和较高的抗疲劳性。现设定传动轴的材料为 45 钢，其规格参数如表 3 所示，由于所选定的步进电动机的保持转矩为 3 N·m，传动轴在工作时会受到 3 N·m 的扭矩，现假设传动轴受到的扭矩是均匀且连续的，用 SolidWorks Simulation 进行有限元分析后，最终得到其应力图解、位移图解以及安全系数图解如图 9 所示。

表 3 传动轴规格参数
Table 3 Specification of transmission axle

属性 Attribute	数值 Value
材料 Material	45 钢
质量 Weight/kg	0.686 553
体积 Volume/mm ³	8.7459e+004
弹性模量 Elastic modulus/Pa	2.05e+011
泊松比 Poisson's ratio	0.29
抗剪模量 Shear modulus/Pa	8e+010
密度 Density/(kg·m ⁻³)	7.85 e+003
张力强度 Tensile strength/Pa	6.25e+008
屈服强度 Yield strength/Pa	5.3e+008
热膨胀系数 Thermal expansion coefficient/K	1.15e-005
热导率 Thermal conductivity/(W·m ⁻¹ ·K ⁻¹)	49.8
比热 Specific heat/(J·kg ⁻¹ ·K ⁻¹)	486

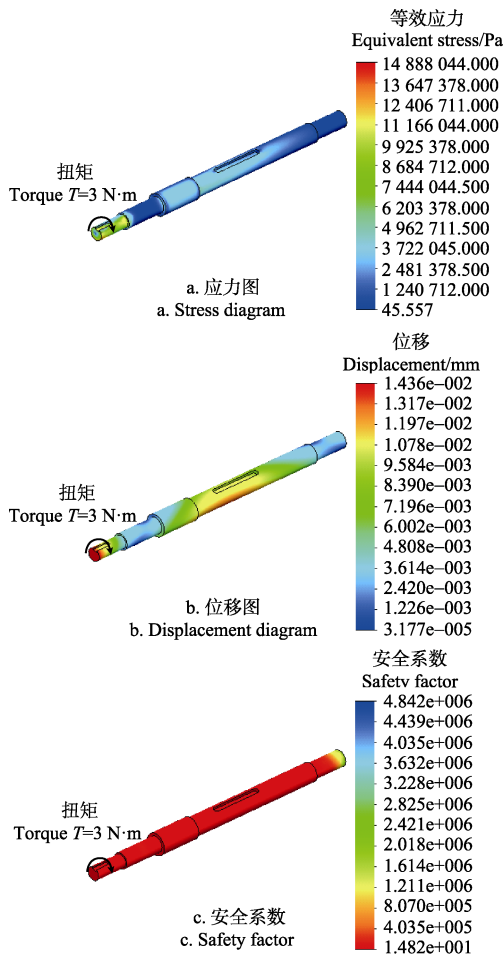


图 9 传动轴的有限元分析图解

Fig.9 Diagram of finite element analysis of transmission axle

从图 9 可以看出，当传动轴受到 3 N·m 的扭矩时，其最大等效力约为 1.5×10^7 Pa，没有超出材料的屈服强度 5.3×10^8 Pa；其最大位移约为 0.014 mm，说明受力时传动轴的变形较小，满足设计要求；其安全系数图解显示最小安全系数约为 14.8，说明传动轴没有产生屈服。综合以上分析结果可知，在实际应力加载下，该传动轴完全满足应力强度要求。

4 基于 EDEM 的施肥装置工作过程的仿真

4.1 施肥装置 EDEM 仿真

在仿真运行前，首先需要对前处理器参数进行设置，前处理器的参数主要包括整体参数（各种材料的泊松比、剪切模量、密度、摩擦系数以及颗粒运动方向上重力加速度等）、仿真颗粒、几何模型以及颗粒工厂的设置。

本文以尿素作为仿真模拟施肥材料，其外形为大小、形状规则的圆球形，在 EDEM 中建立的尿素颗粒物理模型如图 10 所示。

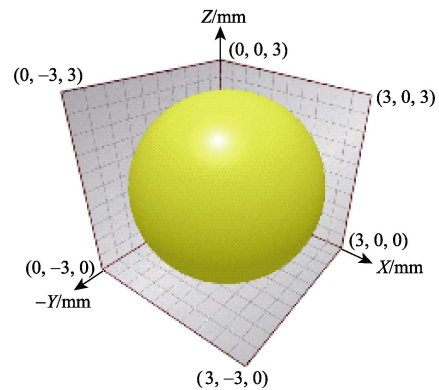


图 10 尿素颗粒物理模型

Fig.10 Physics model of urea particle

EDEM 支持多种格式的几何文件，可以直接将用 SolidWorks 建模的施肥装置导入 EDEM 中，如图 11 所示为导入的施肥装置在 EDEM 中的显示状态。

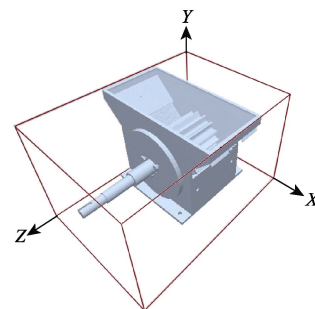


图 11 施肥装置三维模型

Fig.11 3-D model of fertilizer device

EDEM 特有的颗粒工厂技术 (particle factory)，可以根据实际需要，设置颗粒的总质量或数量、开始生成时间、初始位置、生成速率等。

求解器的参数主要是设置时间步长和仿真总时间。时间步长的选定标准是瑞利(Rayleigh)参数，这是 EDEM 仿真模拟准静态颗粒接触时的最大时间步长，如果时步

选取过大, 仿真时会出现颗粒乱飞的情况, 如果时步选取过小, 会增加计算时间, 造成资源浪费。在 EDEM 中, 一般选择瑞利时步的 5%~30%。

本文选用传动轴转速为 10 r/min 进行模拟仿真。为了保证仿真运行过程中肥料可将整个施肥槽轮凹槽充满, 且仍有足够多的余料存于进料口, 经过反复测试, 最终将肥料颗粒数量定为 10 000 粒, 仿真瑞利时间步长百分比设置为 10%, 输出时间步长为 0.05 s, 网格大小 1.5 mm, 仿真时间总长 5 s。

4.2 仿真结果分析

后处理模块 (Analyst) 提供了对仿真结果进行分析和判断的非常丰富的工具, 可以用动画方式显示仿真过程, 用图表显示仿真结果。图 12 所示为施肥装置在上述参数设置条件下排肥效果的仿真结果。

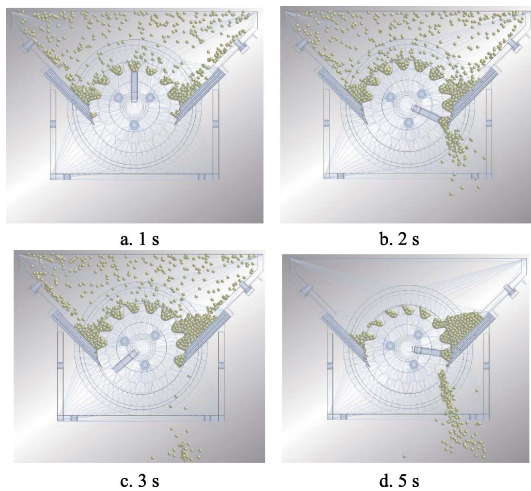


图 12 施肥装置在转速 10 r/min 时仿真结果

Fig.12 Simulation results of fertilizer device at speed of 10 r/min

由图 12 可知: 该施肥装置在 1 s 和 2 s 时刻, 选定的仿真时间步长参数合理, 未出现颗粒乱飞现象; 所设计的槽轮凹槽在运行过程中具有良好的肥料填充效果, 槽轮凹槽半径、槽轮槽数等参数设计合理, 排料凹槽中基本上被肥料颗粒充满。

在 2、3 和 5 s 时刻, 所设计的施肥装置中的毛刷结构一方面可以代替刚性元件支撑肥料颗粒, 有效地防止刚性连接中容易产生的颗粒堵塞现象, 另一方面排料侧的毛刷可以有效地刷除排料槽轮凹槽外多余的肥料颗粒, 使其充满后一个槽轮凹槽, 从而保证每个排料凹槽的排量稳定。

该施肥装置具有良好的排肥效果, 所设计的槽轮凹槽可以均匀、稳定、连续地将肥料排出施肥装置, 通过合理控制传动轴的转速, 该施肥机可以实现精确施肥的目标。

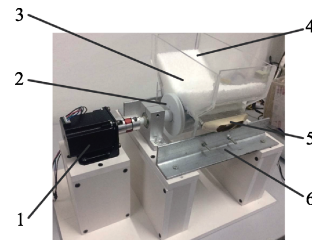
5 排肥性能试验验证

5.1 试验材料及装置

试验所用的肥料为含氮量 46.4% 的尿素, 密度 1.335 g/cm³, 容重 0.78 g/mL, 其粒度范围 0.85~2.80 mm。试验在自行设计的实验台上进行, 具体试验装置如图 13 所示。

5.2 结果与分析

试验选用排肥精度作为衡量施肥装置工作性能的指标, 首先根据公式计算出所设计的施肥装置的理论单转施肥量 $q'=146.55$ g/r, 然后在 5、10、15、20 r/min 4 种槽轮转速下分别进行排肥精度试验, 每种转速下采集 10 组数据, 每组试验重复 3 次取平均值, 试验结果如表 4 所示。从表中数据可以看出, 试验得到的排肥量实际值与理论值的最大误差为 2.42%, 小于 3%, 这说明所设计的施肥装置在不同的转速下仍可以达到较高的排肥精度, 可以实现精确施肥的目标。



1. 步进电机 2. 槽轮 3. 肥料盒 4. 尿素颗粒 5. 毛刷 6. 固定角钢
1. Stepper motor 2. Sheave 3. Fertilizer bin 4. Urea particles 5. Brush 6. Angle iron

图 13 排肥试验装置

Fig.13 Device of fertilizing experiment

表 4 排肥理论值与实际值对比

Table 4 Comparison between theoretical value and actual value of fertilization

转数 Rotation turns	理论值 Theoretical value/g	实际值 Actual value/g				最大误差 Maximum error/%
		5 r/min	10 r/min	15 r/min	20 r/min	
1	146.55	143.51	147.18	144.78	144.68	2.07
2	293.10	286.10	289.12	286.00	292.38	2.42
3	439.65	436.90	442.11	435.06	438.54	1.04
4	586.20	584.24	585.22	581.54	580.36	1.00
5	732.75	731.21	728.16	731.83	728.84	0.63
6	879.30	876.40	876.43	882.88	874.56	0.54
7	1 025.85	1 021.19	1 024.98	1 028.41	1 017.60	0.80
8	1 172.40	1 169.76	1 172.79	1 177.75	1 168.78	0.31
9	1 318.95	1 317.96	1 315.45	1 322.10	1 316.17	0.26
10	1 465.50	1 466.07	1 457.08	1 462.50	1 461.08	0.57

6 结论

1) 设计了槽轮式施肥装置, 通过 ARM9 电路控制模块完成对施肥地段、施肥量、以及施肥标定的设置, 通过控制步进电动机的脉冲频率控制排肥槽轮的转速, 进而控制施肥装置的施肥量, 从而实现定量精确施肥。

2) 利用 SolidWorks Simulation 对自动施肥机的横梁和传动轴 2 个主要受力部位进行有限元静力分析, 验证了所设计的施肥机在材料结构上可以满足刚度和强度要求。

3) 利用 EDEM 对施肥装置的排肥效果进行模拟仿真, 验证了所设计的施肥装置具有良好的排肥效果, 可以均匀、稳定、连续地将肥料排出施肥装置。

4) 针对 5、10、15、20 r/min 4 种转速下的排肥精度进行了试验, 验证了所设计的施肥机的施肥装置排肥误差在 0.54%~2.42% 之间, 说明该装置可以实现精密施肥的目的。

[参 考 文 献]

- [1] 周巍. 我国农业和农村统计生产能力评估[J]. 中国统计, 2014(2): 19—21.
- [2] 田卫堂, 胡维银, 李军, 等. 我国水土流失现状和防治对策分析[J]. 水土保持研究, 2008, 15(4): 204—209. Tian Weitang, Hu Weiyin, Li Jun, et al. The Status of Soil and Water Loss and Analysis of Countermeasures in China[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2008, 15(4): 204—209. (in Chinese with English abstract)
- [3] Li Yuechen, Liu Chunxia, Yuan Xingzhong, et al. Spatiotemporal features of soil and water loss in Three Gorges Reservoir Area of Chongqing[J]. Journal of Geographical Sciences, 2009, 19(1): 81—94.
- [4] 王占军, 邱新华, 唐志海, 等. 宁夏 1999—2009 年土地荒漠化演变影响因素分析[J]. 中国沙漠, 2013, 33(2): 325—333. Wang Zhanjun, Qiu Xinhua, Tang Zhihai, et al. Analysis on the Factors Influencing the Evolution of Desertification in Ningxia of China from 1999 to 2009[J]. Journal of Desert Research, 2013, 33(2): 325—333. (in Chinese with English abstract)
- [5] 蔡运龙, 汪涌, 李玉平. 中国耕地供需变化规律研究[J]. 中国土地科学, 2009, 23(3): 11—18, 31. Cai Yunlong, Wang Yong, Li Yuping. Study on Changing Relationship of Demand and Supply of Cultivated Land in China[J]. China Land Science, 2009, 23(3): 11—18, 31. (in Chinese with English abstract)
- [6] 刘毅, 杨宇. 中国人口、资源与环境面临的突出问题及应对新思考[J]. 中国科学院院刊, 2014, 29(2): 248—257. Liu Yi, Yang Yu. Serious Problems and Countermeasures of China's Population, Resources, and Environment[J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2014, 29(2): 248—257. (in Chinese with English abstract)
- [7] Anonymous. China Green Agriculture, Inc. Achieves Construction Milestone on New 40 000 Metric Ton Fertilizer Production Facility[J]. Agriculture Business Week, 2009(1).
- [8] 李中华, 王国占, 齐飞. 我国设施农业发展现状及发展思路[J]. 中国农机化, 2012(1): 7—10. Li Zhonghua, Wang Guozhan, Qi Fei. Current situation and thinking of development of protected agriculture in China [J]. Chinese Agricultural Mechanization, 2012(1): 07—10. (in Chinese with English abstract)
- [9] 钱春阳, 陆文龙, 王建春, 等. 基于物联网的设施温室监控系统中无线传感器节点设计[J]. 计算机测量与控制, 2015, 23(2): 673—676. Qian Chunyang, Lu Wenlong, Wang Jianchun, et al. Design Technology for Wireless Sensor Node in Greenhouse Monitoring System Based on Internet of Things[J]. Computer Measurement & Control, 2015, 23(2): 673—676. (in Chinese with English abstract)
- [10] 我国设施农业创造近 7000 万个就业岗位[J]. 吉林农业, 2015(14): 22.
- [11] 于希宏. 日光温室施肥技术[J]. 现代农村科技, 2010(4): 35.
- [12] Cain S A. Sanchez, C. A., T. A. Doerge. Using nutrient uptake patterns to develop efficient nitrogen management strategies for vegetables[J]. Hort Technology, 1999, 9(4): 601—606.
- [13] 许金群. 设施蔬菜施肥问题及对策[J]. 新农业, 2013, 11(21): 33.
- [14] 李东坡, 武志杰, 梁成华, 等. 设施土壤生态环境特点与调控[J]. 生态学杂志, 2004, 23(5): 192—197. Li Dongpo, Wu Zhijie, Liang Chenghua, et al. Characteristics and regulation of greenhouse soil environment[J]. Chinese Journal of Ecology, 2004, 23(5): 192—197.
- [15] 刘孝慧, 殷晓蓉, 郭吉山, 等. 设施蔬菜施肥存在的问题及对策措施[J]. 中国园艺文摘, 2015(1): 162—163.
- [16] 李萍萍. 设施园艺中的土壤生态问题分析及清洁生产对策[J]. 农业工程学报, 2011, 27(增刊 2): 346—351. Li Pingping. Soil ecological problem and its resolvent in greenhouse horticulture[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2011, 27(Supp.2): 346—351. (in Chinese with English abstract)
- [17] 张发勤. 设施蔬菜的发展及施肥现状浅谈[J]. 农技服务, 2015, 32(6): 129.
- [18] Sima R M, MăNiuțu D N, Cenariu D, et al. The impact of culture system and fertilization type on yield and fruit quality of greenhouse tomatoes[J]. Aab Bioflux, 2010, 2(1): 49—54.
- [19] Patel N, Rajput T B S. Fertigation: a technique for efficient use of granular fertilizer through drip irrigation[J]. Journal of the Institution of Engineers, 2004, 85(2): 50—54.
- [20] 陈广锋, 杜森, 江荣凤, 等. 我国水肥一体化技术应用及研究现状[J]. 中国农技推广, 2013, 29(5): 39—41.
- [21] 胡建. 现代设施农业现状与发展趋势分析[J]. 农机化研究, 2012(7): 245—248. Hu Jian. Analysis on the Current Situation and Development of Modern Facilities Agriculture[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2012(7): 245—248. (in Chinese with English abstract)
- [22] 王淑英. 西宁市设施温室生产现状调研[J]. 北方园艺, 2014(4): 171—173. Wang Shuying. Investigation of Facilities Greenhouse Production Present Situation in Xining City[J]. Northern Horticulture, 2014(4): 171—173. (in Chinese with English abstract)
- [23] 郝园园. 河北省设施温室发展现状分析[J]. 农家顾问, 2014, 15(12): 21—22.
- [24] 李建勇, 高俊杰, 徐守国, 等. 化肥施用量对有机基质栽培番茄养分吸收利用的影响[J]. 中国生态农业学报, 2011, 19(3): 602—606. Li Jianyong, Gao Junjie, Xu Shouguo, et al. Effect of chemical fertilizer dose on nutrient absorption and utilization of tomato cultured in organic substrate[J]. Chinese Journal of Eco-Agriculture, 2011, 19(3): 602—606. (in Chinese with English abstract)
- [25] 孙军利, 赵宝龙, 蒋卫杰等. 不同施肥对日光温室春茬黄瓜生长、产量和品质影响[J]. 石河子大学学报(自然科学版), 2006, 24(6): 689—693. Sun Junli, Zhao Baolong, Jiang Weijie, et al. Effects of N, P₂O₅ and K₂O on Cucumber Yield, Quality and Growth in Growing Media[J]. Journal of Shihezi University (Natural Science), 2006, 24(6): 689—693. (in Chinese with English abstract)
- [26] 林碧英, 张瑜, 毛美华. 不同施肥水平对温室樱桃番茄果实品质的影响[J]. 中国农学通报, 2010, 26(4): 137—141. Lin Biying, Zhang Yu, Mao Meihua. Effects of Different Fertilization Levels on the Quality of Greenhouse Cherry Tomato[J]. Chinese Agricultural Science Bulletin, 2010, 26(4): 137—141. (in Chinese with English abstract)
- [27] 贺会强, 陈凯利, 邹志荣, 等. 不同施肥水平对日光温室

- 番茄产量和品质的影响[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版), 2012, 40(7): 135—140.
- He Huiqiang, Chen Kaili, Zou Zhirong, et al. Effects of different fertilization levels on yield and quality of greenhouse tomato[J]. Journal of Northwest A & F University (Natural Science Edition), 2012, 40(7): 135—140. (in Chinese with English abstract)
- [28] 闵炬, 施卫明. 不同施氮量对太湖地区大棚蔬菜产量、氮肥利用率及品质的影响[J]. 植物营养与肥料学报, 2009, 15(01): 151—157.
- Min Ju, Shi Weiming. Effect of different N rates on the yield, N use efficiency and fruit quality of vegetables cultivated in plastic greenhouse in Taihu lake region[J]. Plant Nutrition and Fertilizer Science, 2009, 15(01): 151—157. (in Chinese with English abstract)
- [29] 李宝筏. 农业机械学[M]. 北京: 中国农业出版社, 2003.
- [30] 余志生. 汽车理论[M]. 北京: 机械工业出版社, 2009.
- [31] 刘锦波, 张承慧. 电机与拖动[M]. 北京: 清华大学出版社, 2007.
- [32] 方建军. 移动式采摘机器人研究现状与进展[J]. 农业工程学报, 2004, 20(2): 273—278.
- Fang Jianjun. Present situation and development of mobile harvesting robot[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2004, 20(2): 273—278. Transactions of the Chinese Society of English abstract)

Design and simulation of automatic fertilizing machine for greenhouse

Fu Zetian^{1,2,3}, Dong Yuhong^{1,3}, Zhang Lingxian^{2,4}, Yang Han², Wang Jieqiong^{1,3}, Li Xinxing^{2,3,4*}

(1. College of Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China; 2. College of Information and Electrical Engineering, China Agricultural University, Beijing 100083, China; 3. Beijing Laboratory of Food Quality and Safety, Beijing 100083, China; 4. Key Laboratory of Agricultural Informationization Standardization (Beijing), Ministry of Agriculture, 100083, China)

Abstract: As a large agricultural country, there are still more than 40% of people in China engaging in agricultural production activities. In recent years, the soil erosion and desertification have been in serious state, and the arable land has decreased year by year, which means that it is very necessary to develop agricultural technology to improve crop yield per unit area. Therefore, in recent years, China has vigorously developed agricultural greenhouse cultivation which has characteristics of high input, high technology and high yield. Agricultural greenhouse cultivation is an important part of China's agricultural production. In 2014, the area of greenhouse in China was up to 4.109 million hm². With the promotion of precision agriculture, the technology of modern agricultural greenhouse cultivation is developing towards precision. Precision fertilization is one of the important parts of precision agriculture operation system. Due to that the structure of modern agricultural greenhouse is closed, and the planting area is limited in China, the large agricultural machinery cannot be applied to greenhouse operations, leading to that the mechanization level in greenhouse production is lower than other developed countries in the world. At present, the fertilization in greenhouse in China is still mainly relying on manpower. Because of the increasing labor cost and decreasing yield in greenhouse production, the profits of greenhouse is reduced. In the pursuit of more profit, people's requirements of precision fertilization in greenhouse are increasingly urgent. This paper mainly introduced a small, precise and practical fertilizing machine. This machine was mainly used in greenhouse and it was intelligent and automatic. The fertilization machine used ARM9 S3C2440 microprocessor as the core of circuit control module. It was equipped with a fertilizer level monitoring alarm device, and would alarm automatically when the fertilizer level was less than 15 cm, so that the staff could add fertilizer in time. The machine used the Geneva mechanism as fertilizer metering mechanism. By controlling the pulse frequency of the stepping motor, the amount of fertilization could be controlled so as to achieve quantitative precision fertilization. The three-dimensional model of the fertilization machine was built by the SolidWorks. The intensity check was performed for its main parts of the force with simulation. All those verified that the structure could meet the requirements of hardness and intensity. The fertilization effect was simulated by the EDEM (enhanced discrete element method), a general CAE (computer-aided engineering) software applied to the discrete element method. In the simulation, the speed of the sheave was set to 10 r/min, the output time step was 0.05 s, and the total simulation time was 5 s. It was found that there weren't flying particles during the process of simulation, which showed that the selected rotational speed of the sheave and the parameter of the simulation time step were reasonable. The sheave grooves in the process of simulation were almost filled with the fertilizer particles, which proved that the device could get a good effect of fertilization and the parameter of the sheave was reasonable. The brush structure in the fertilization device could effectively get rid of the extra fertilizer particles and supplement fertilizer particles for other incompletely filled groove in order to make sure every groove could discharge a certain amount of fertilizer. The simulation results showed that the fertilization device could discharge the fertilizer particles evenly, stably and continuously. By properly controlling the rotation speed of the drive shaft, the fertilization machine could achieve the goal of precise fertilization. The results show that maximum error of fertilizer test actual value and the theoretical value is 2.42%, less than 3% under four kinds rotational speed (5, 10, 15, 20 r/min). Therefore, the machine designed in this paper could greatly improve the automation level for greenhouse production and reduce the labor intensity of fertilization in greenhouse. It has broad applicability and popularity in our facility greenhouse production.

Keywords: agricultural machinery; design; control equipment; precision fertilization; automatic fertilizing machine