

DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2012.08.013

穴盘育苗精密播种装置压电振动台特性分析与试验*

陈书法^{1,2} 张石平^{1,2} 李耀明¹

(1. 江苏大学现代农业装备与技术省部共建教育部重点实验室, 镇江 212013; 2. 淮海工学院机械工程学院, 连云港 222005)

【摘要】 利用压电元件的逆压电效应设计了一种用于精密播种蔬菜、花卉、林木等微小种子的压电振动台, 在外加电场的作用下使压电振动驱动系统产生机械微位移, 经位移放大机构放大后驱动种子盘振动, 使种子盘上的种子产生有利于吸种盘吸种的“沸腾”运动。建立了压电振动台数学模型, 研究分析了压电振动台的动、静态特性并进行了试验。试验结果表明: 当外加电压为 90 ~ 110 V 时, 压电驱动系统具有较强的驱动能力, 振幅达 1.31 mm, 机械系统振动响应频率在 13 ~ 55 Hz 之间, 且频宽可调(共振频率为 25 Hz); 压电振动台具有良好的动态特性和较好的播种性能, 满足精密播种的农艺要求。

关键词: 穴盘育苗 精密播种 压电振动 压电陶瓷叠堆 逆压电效应

中图分类号: S223.2 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2012)08-0066-05

Analysis and Experiment on Characteristic of Piezoelectric Vibration Table for Precision Tray Seeding Device

Chen Shufa^{1,2} Zhang Shiping^{1,2} Li Yaoming¹

(1. Key Laboratory of Modern Agricultural Equipment and Technology, Ministry of Education & Jiangsu Province, Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China

2. College of Mechanical Engineering, Huaihai Institute of Technology, Lianyungang 222005, China)

Abstract

A piezoelectricity vibration table was designed for seeding precisely the small size of seeds of some vegetables, trees, flowers, etc. The piezoelectric vibration driving system produced the mechanical micro-displacements with the applied electric field. The micro-displacements amplified by the amplification mechanism drove the seed dish vibrating and produced the boiling movement beneficial to suck seeds. The mathematical model of piezoelectric vibration was established. The static and dynamic state properties of the variation table were analyzed and experienced. The experimental results showed that the piezoelectric vibration system had a higher drive capacity with 90 ~ 110 V electric voltage. Vibration amplitude achieved 1.31 mm, vibration frequency was at 13 ~ 55 Hz and adjustable (resonant frequency of 25 Hz). The piezoelectric vibration table has better characteristics and higher seeding performances. It runs smoothly and meets the agronomic demands for precise tray seeding.

Key words Tray seeding, Precise seeding, Piezoelectric variation, Piezoelectric ceramics stack, Converse piezoelectric effect

引言

穴盘育苗精密播种机是工厂化育秧育苗技术中

的一种重要设备^[1]。精密播种装置作为穴盘育苗精密播种机的关键组成部分, 主要用于培育蔬菜、花卉、林木以及水稻等秧苗的精密排种、播种, 具有节

收稿日期: 2011-09-10 修回日期: 2011-11-07

* 高等学校博士学科点专项科研基金资助项目(20103227120010)、江苏省农机三项工程资助项目(NJ2010-17)和江苏大学现代农业装备与技术省部共建教育部重点实验室开放基金项目(NZ2008-05)

作者简介: 陈书法, 博士生, 淮海工学院副教授, 主要从事精密播种与施肥理论及技术研究, E-mail: csf7012@yahoo.com.cn

省种子用量、出苗率高且出苗整齐等优点。

为使精密播种装置种子盘内的种子更均匀、稳定流动,广泛采用振动等方式。在振动气吸式穴盘育苗精密播种机中,有电磁振动式、振动气力式、机械振动式、液压振动式等多种振动工作原理的精播装置^[1-8]。压电振动作为一种新型振动方式,与其他振动方式比较,具有线性好、控制方便、位移分辨率高、频率响应好、无噪声、无电磁干扰、低电压驱动及易于微型化的优点,适用于低功率、微小种子播种要求的振动场合^[9]。

本文利用压电元件的逆压电效应研究设计压电振动台,并进行动、静态特性分析和试验研究,为振动气吸式精密播种装置的设计提供借鉴,以满足精密播种蔬菜、花卉、林木等微小种子的工作要求。

1 精量播种工作原理及压电振动台结构

1.1 工作原理

振动气吸式穴盘精密播种装置由精密吸种部件和种盘振动台两部分组成^[1],如图 1 所示。吸种部件主要由吸种盘、气室、转换开关、接管和气源等组成。吸种盘上钻有与育苗盘相匹配的吸种孔。吸种盘几何参数由播种农艺要求来确定,现选用与泡沫塑料穴盘(425 mm × 840 mm, 672 穴/盘,定制)相匹配的吸种盘结构。种子盘振动台由种子盘、压电振动台和播种架等组成。

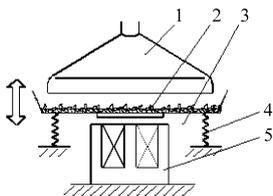


图 1 振动气吸式精密播种装置工作原理图

Fig.1 Principle of vibration air-suck precise seeding device

1. 吸种部件 2. 种子盘 3. 振动台面 4. 振动弹簧 5. 激励器

利用气吸-振动工作原理进行精密播种的过程如下:打开振动台,调节电压、频率等激励振动参数,使种子盘内的种子相互分离,呈“沸腾”运动状态,以利于吸种盘吸种。吸种时将气力吸种部件移动到种子盘振动台正上方,调节气力吸种部件的转换开关使气源和气室接通,气室形成负压,抛起的种子在气力作用下被吸附在吸种盘上均布的吸种孔上。吸种后将吸种盘移到育苗穴盘上方适当位置,气室与气源通路切断,同时气室与大气相通,迅速释放负压,种子靠自重落入育苗穴盘,实现对靶播种。

1.2 压电振动台结构

压电振动台由压电驱动系统、支撑弹簧、导向装置、种子盘和振动台台面等组成,如图 2 所示。

压电驱动系统由压电陶瓷专用驱动电源、压电堆及其二级柔性铰链位移放大机构组成。对于单个压电体,在一定的驱动电压下,难以满足实际要求。为了增加位移输出量,最常用的措施是采用多组压电片在力学上串联、电学上并联的设计方法构成压电堆,使各压电片产生的位移量可以叠加输出。压电堆在外加电压作用下产生相应的伸长应变,由于该应变位移仍较小,所以采用二级柔性铰链式位移放大机构进一步放大位移。放大倍数可达 11 倍以上,最高可达到 25 倍。振动台台面与振动台座之间设计有支撑弹簧及导向装置。

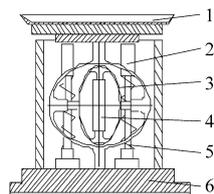


图 2 压电振动台结构简图

Fig.2 Structure of piezoelectric vibration table

1. 种子盘及振动台面 2. 导向装置 3. 柔性铰链放大机构
4. 压电堆 5. 支撑弹簧 6. 振动台座

种子盘与吸种盘结构尺寸基本相同,称之为宽种子盘结构,该结构对于驱动力有限的压电振动台无法满足种子盘振动要求,因此本设计采用了窄种子盘结构形式,即吸种部件每次只吸取 1~2 行种子,种子盘宽度只有宽种子盘宽度的 1/20~1/10,减小了种子盘质量,解决了宽种子盘种子极易偏集导致吸种不能进行、结构设计复杂、安装精度要求高等问题。

2 压电振动台基本特性分析

2.1 压电驱动系统

2.1.1 压电堆的迟滞特性及驱动能力

当驱动电压相同时,电压上升和下降阶段的输出位移不同。在电压下降阶段,返回电压的峰值不同,输出的位移也不相同,这种现象称为迟滞。图 3 为哈尔滨溶智纳芯科技有限公司生产的 PTDC200V10/10/60 型压电堆的迟滞特性。

由图 3 可知,该压电堆下降时线性度较好,其回归拟合公式为 $y = 1.964x$, x 为外加电压, y 为微位移。试验时可采取先升压后降压的方式进行。因此,压电堆的基本特性为等效质量的弹性元件,可对系统进行位移激励。

压电元件的驱动能力主要取决于外加电压及其变形。压电堆在同时受外力和电场作用时其机械与电学关系为^[9]

$$S_3 = S_{33}^E T_3 + d_{33}^E E_3 \quad (1)$$

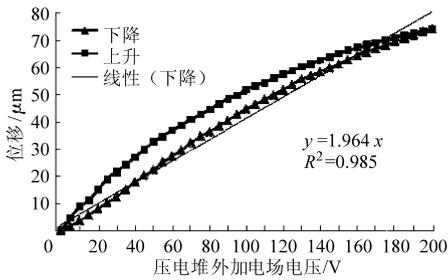


图3 PTDC200V10/10/60型压电堆的迟滞特性

Fig. 3 Sluggish characteristic of PTDC200V10/10/60 piezoelectric ceramic stack

$$D_3 = d_{33}T_3 + \varepsilon_{33}^T E_3 \quad (2)$$

式中 S_3 ——压电材料的应变

S_{33}^E ——压电材料的应力, Pa

T_3 ——压电材料的柔度, m/N

d_{33} ——压电常数 E_3 ——电场强度, V/m

D_3 ——电位移, m ε_{33}^T ——介电常数

由式(1), 对由 n 层组成的压电堆, 其输出为

$$\frac{x_x}{nt} = -S_{33}^E \frac{F}{A} + d_{33} \frac{V}{t} \quad (3)$$

式中 x_x ——压电堆的总变形量, m

t ——单层压电片厚度, m

F ——预压力, N V ——电场电压, V

A ——压电堆的横截面积, m²

则有

$$x_x = \frac{1}{k_x} (F_{ind} - F) \quad (4)$$

其中 $F_{ind} = nd_{33}k_x V$ $k_x = A/(ntS_{33}^E)$

式中 F_{ind} ——惯性负载, N

k_x ——压电堆的刚度系数, m/N

2.1.2 二级柔性铰链放大机构

柔性铰链结构如图4所示。二级柔性铰链放大机构的基本特性也是等效质量的弹性元件, 其基本参数为放大倍数 K_h 。

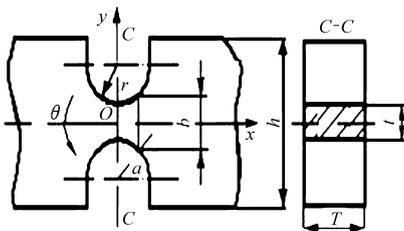


图4 柔性铰链结构参数

Fig. 4 Structure parameters of singer axis flexure hinge

2.2 支撑弹簧及导向装置

支撑弹簧及导向装置同轴安装以保证导向装置、振动台面的支撑及弹性回复要求, 支撑弹簧的基本特性参数为弹性刚度; 导向装置限定种子盘为垂直运动, 同时其结构能减小或消除由于制造、安装等造成的误差, 特别是质量偏心误差等产生的附加振

动对振动台运动的影响。导向装置的基本特性是基础刚性件, 其阻尼力与相对运动速度成正比^[5]。

3 压电振动台动态特性分析

3.1 动力学模型

3.1.1 压电驱动系统

组成压电驱动系统的元件均为具有一定等效质量的弹性元件, 且基本结构为串联联接, 因此其动力学数学模型可简化为无阻尼质量-弹簧系统^[10], 如图5所示。即

$$K_T = k_x K_h \quad (5)$$

$$m_e = \frac{1}{3} (m_p + m_h) \quad (6)$$

式中 K_T ——压电堆及二级柔性铰链机构串联的等效弹性刚度系数

m_e ——压电堆及二级柔性铰链机构串联的等效质量

m_p ——压电堆质量

m_h ——二级柔性铰链机构质量

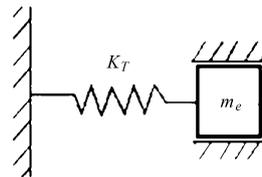


图5 压电驱动系统的动力学模型

Fig. 5 Dynamical model of piezoelectric vibration system

3.1.2 压电振动台

压电振动台动力学数学模型为单自由度质量-阻尼-弹簧系统^[5], 如图6所示。

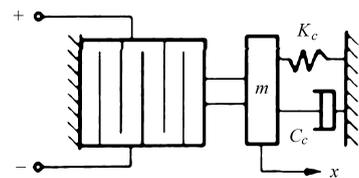


图6 压电振动台动力学模型

Fig. 6 Dynamics model of piezoelectric vibration table

3.2 动态特性分析

压电振动台在压电驱动系统施加外加电场电压 $V = U \sin \omega t$ ($\omega = 2\pi f$ 为振动圆频率, f 为振动频率, Hz) 作用下输出位移 x 为激励, 驱动种子盘振动。由文献[5]可知, 该压电振动台为并联单自由度质量-阻尼-弹簧系统, 且总质量为 $m + m_e$ 、实际阻尼系数为 C_c 、并联弹簧刚度系数为 $K_T + K_c$ 。

由图5、图6、式(5)、式(6)得压电振动台动力学方程为

$$(m + m_e) \ddot{x} + C_c \dot{x} + (K_T + K_c) x = K_T (nd_{33} k_x U \sin \omega t - F) \quad (7)$$

则有 $x = H \sin(\omega t - \varphi)$ (8)

其中 $H = \frac{nd_{33}k_x K_T U}{(K_T + K_c) \sqrt{(1 - \lambda^2)^2 + (2\xi\lambda)^2}}$ (9)

$\varphi = \arctan \frac{2\xi\lambda}{1 - \lambda^2}$ (10)

$\lambda = \omega / \omega_n$ (11)

$\omega_n = \sqrt{\frac{K_T + K_c}{m + m_e}}$ (12)

$\xi = C_c / C$ (13)

$C = 2 \sqrt{(K_T + K_c)(m + m_e)}$ (14)

式中 H ——振幅 φ ——相位角
 λ ——频率比 ω_n ——系统共振频率
 ξ ——阻尼比 C ——临界阻尼系数

由式(7)分析可知:①压电堆受到外加电场 V 和预紧力 F 的机电耦合作用对系统进行激励。 F 在激励中只起静偏位作用,对振动没有影响,在计算中令其为零,在实际应用中减少了系统的位移和能量输出。②令 $\beta = 1 / \sqrt{(1 - \lambda^2)^2 + (2\xi\lambda)^2}$,称为系统的幅频特性。由文献[5]分析可知该系统具有典型的单自由度系统动态特性,这里不再详述。③采用较软的支撑弹簧可增大系统的振幅输出。

4 精密播种试验

4.1 试验材料和设备

(1) 试验材料

选择西红柿、烟草(丸粒化)、小油菜等作物种子进行播种试验。

(2) 试验仪器与设备

自制 UJS-PTW20030605 型精密播种机性能测试平台:气力设备组、穴盘育苗设备组、种子数粒仪、高清摄像机、BVM-300-4M 型四通道振动测试与模态分析仪、橡胶锤和物理天平等。

压电堆选用哈尔滨溶智纳芯科技有限公司生产的 PTDC200V10/10/60 型,额定电压 200 V,外形尺寸 10 mm × 10 mm × 60 mm;驱动电源型号 RHV1C200D;柔性铰链放大机构结构参数^[11]如下:柔性铰链中心厚度 $t = 0.5$ mm,铰链厚度 $T = 3$ mm,角度 $\theta = 8^\circ$,半径 $r = 1$ mm;材料采用弹簧钢,其弹性模量 $E = 200$ GPa,泊松比 $\gamma = 0.288$,密度 $\rho = 7854$ kg/m³。在压电堆与一级柔性铰链机构间加垫片并粘接形成预紧力 80 ~ 120 N;对种子盘、振动台面及柔性铰链放大机构、弹簧和压电堆实测,等效总质量 $m = 0.56$ kg,并取 $\omega_n = 2\pi f_n = 50\pi$,式中 f_n 为共振频率,由试验结果取为 25 Hz,得振动台弹簧总刚度系数 $k \approx 350$ N/m,由直径为 1 mm、材料为 65Mn

的弹簧钢丝绕制成中径为 13 mm、高度为 28 mm、有效圈数为 7 圈的压簧 2 根。

4.2 试验方法、步骤

采用单因素多水平法。电压从 50 V 开始,每 5 V 为一挡;压电振动频率 5 ~ 80 Hz,每 2 Hz 为一挡。由测振仪测量出振动台相应的振动参数;同时进行吸种试验。

4.3 试验结果

试验结果如图 7 所示。由试验结果可知:压电堆电场电压在 30 ~ 110 V 时工作台振幅与电压基本呈正比,在外加电压 90 ~ 110 V 时达到较大值,此后工作台振幅基本保持定值。这是由于机械阻尼力随振动频率变化以及压电堆的迟滞特性共同作用的结果。

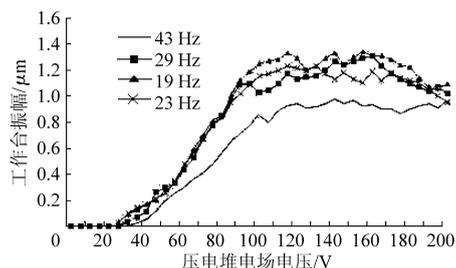


图 7 压电振动台幅频特性

Fig. 7 Amplitude-frequency characteristic of piezoelectric vibration table

振动强度 $K(K = H\omega^2/g, g$ 为重力加速度)与吸种率试验结果如图 8 所示。吸种率达到 85% 以上时,种子处于较好的吸种状态,机械系统具有一定的振动响应频率(13 ~ 55 Hz);系统工作在共振区(21 ~ 29 Hz)具有良好的振动响应,此时振动强度达到 1.4 ~ 1.7,振幅在 0.67 ~ 1.31 mm,吸种率达到 95%。

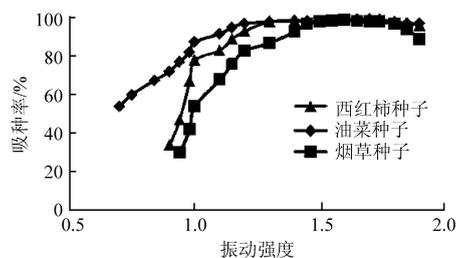


图 8 振动强度与吸种率关系

Fig. 8 Relationship between sucking seed rate and vibration intensity

5 结论

(1) 将压电振动台用于振动气吸式精密播种装置上对微小种子进行精密播种效果较好。

(2) 试验结果表明:外加电压 90 ~ 110 V 时工作台振幅达到较大值,此后基本不变,具有较好的系统稳定性。系统工作在共振区(21 ~ 29 Hz)具有良

好的振动响应,振幅可达 0.67 ~ 1.31 mm,吸种率达到 95%。

量-弹簧振动系统。采用该系统的输出位移激励种子盘振动台组成并联系统,成为典型的单自由度振动系统,具有较为可靠的动态幅频特性。

(3) 压电振动驱动系统为无阻尼单自由度质

参 考 文 献

- 1 刘彩玲. 水稻育苗精量播种装置的理论及试验研究[D]. 镇江: 江苏理工大学,1998.
Liu Cailing. Theoretical and experimental study on rice seedling precision mechanism[D]. Zhenjiang: Jiangsu University of Science and Technology, 1998. (in Chinese)
- 2 吴爱祥,孙业志,刘湘平. 散体动力学理论及其应用[M]. 北京:冶金工业出版社,2002.
- 3 闻邦椿,刘树英. 振动机械的理论及动态设计方法[M]. 北京:机械工业出版社,2001.
- 4 赵立新,郑立允,王玉果,等. 振动气吸式穴盘播种机的吸种性能研究[J]. 农业工程学报,2003,19(4):122~125.
Zhao Lixin, Zheng Liyun, Wang Yuguo, et al. Seed suction performance of vibrational air-suction tray seeder [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2003, 19(4): 122~125. (in Chinese)
- 5 屈维德,唐恒龄. 机械振动手册[M]. 北京:机械工业出版社,2000.
- 6 张石平,陈进,李耀明. 振动气吸式穴盘精量播种装置种子群“沸腾”运动分析[J]. 农业工程学报,2008,24(7):20~24.
Zhang Shiping, Chen Jin, Li Yaoming. Analysis of seeds boiling motion on vibrational air-suction tray seeder [J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2008, 24(7): 20~24. (in Chinese)
- 7 张石平,夏静. 气吸振动式蔬菜穴盘育苗精密播种装置的研究[J]. 农机化研究,2007(8):80~83,105.
Zhang Shiping, Xia Jing. Study on equipment of vibrational air-suction vegetable tray precise seeder [J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2007(8): 80~83, 105. (in Chinese)
- 8 张石平,陈进,李耀明. 振动气吸式穴盘精播装置振动条件理论分析与实验[J]. 农业机械学报,2008,39(7):56~61.
Zhang Shiping, Chen Jin, Li Yaoming. Experiment study of vibration parameters for the vibrational air-suction tray precision seeding-machine [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2008, 39(7): 56~61. (in Chinese)
- 9 王矜奉,姜祖桐,石瑞大. 压电振动[M]. 北京:科学出版社,1989.
- 10 曲兴田,董景石,郭俊臣,等. 基于柔性铰链放大机构的压电叠堆泵[J]. 吉林大学学报:工学版,2008,38(3):552~556.
Qu Xingtian, Dong Jingshi, Guo Junchen, et al. Piezoelectric stack pump based on flexure hinge magnification machine [J]. Journal of Jilin University: Engineering and Technology Edition, 2008, 38(3): 552~556. (in Chinese)
- 11 陶帅,白鸿柏,侯军芳,等. 预压力对压电致动器位移和迟滞影响的分析[J]. 兵器材料科学与工程,2009,32(2):29~32.
Tao Shuai, Bai Hongbai, Hou Junfang, et al. Effect of preliminary pressure on the displacement and hysteresis of the piezoelectric actuators [J]. Ordnance Material Science and Engineering, 2009, 32(2): 29~32. (in Chinese)
- 12 何秀华,毕雨时,王健,等. 基于 ANSYS/Fatigue 的泵用压电振子疲劳分析[J]. 排灌机械工程学报,2011,29(1):35~38.
He Xiuhua, Bi Yushi, Wang Jian, et al. Fatigue analysis of piezoelectric vibrator for pump based on ANSYS/Fatigue [J]. Journal of Drainage and Irrigation Machinery Engineering, 2011, 29(1): 35~38. (in Chinese)

(上接第 45 页)

- 5 曹爱芳. 鲁西北小麦宽幅播种栽培技术[J]. 吉林农业,2010(9):105.
- 6 马爱平,王娟玲,靖华,等. 不同播种行距与密度对小麦产量和水分利用效率的影响[J]. 陕西农业科学,2009(1):3~5.
- 7 石振平. 加大小麦免耕播种行距的试验研究[J]. 农机科技推广,2005(12):22~23.
- 8 周兴祥,高焕文,刘俊峰. 华北平原一年两熟保护性耕作体系试验研究[J]. 农业工程学报,2001,17(6):80~83.
Zhou Xingxiang, Gao Huanwen, Liu Junfeng. Conservation tillage system experiment on double cropping area of Huabei plain [J]. Transactions of CSAE, 2001, 17(6): 80~83. (in Chinese)
- 9 刘立晶,高焕文,李洪文. 玉米-小麦一年两熟保护性耕作体系试验研究[J]. 农业工程学报,2004,20(6):70~73.
Liu Lijing, Gao Huanwen, Li Hongwen. Experiment & research on corn & wheat double cropping [J]. Transactions of CSAE, 2004, 20(6): 70~73. (in Chinese)
- 10 姚宗路,李洪文,高焕文,等. 一年两熟区玉米覆盖地小麦免耕播种机的试验研究[J]. 农业机械学报,2007,38(8):57~61.
Yao Zonglu, Li Hongwen, Gao Huanwen, et al. Experiment on no-till wheat planter under the maize stubble in double cropping area [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2007, 38(8): 57~61. (in Chinese)
- 11 高焕文,何明. 建设可持续高产高效保护性耕作体系[J]. 农机科技推广,2010(9):4~6.