

基质块苗移栽机双螺旋传动轴设计及模态分析

付宇超, 张文毅, 纪 要, 夏倩倩

(农业部南京农业机械化研究所, 江苏南京 210014)

摘要:针对油菜基质块育苗的模式设计一种单独的传动机构,以实现全自动移栽时基质块油菜苗的横向精确传动,传动方式采用水稻插秧机双螺旋传动凸轮轴的形式,依据双螺旋传动轴的设计原理进行参数设计。给出该模型应符合的动力学方程,并通过 ANSYS 仿真软件对设计结果及其结构振型进行模态分析。

关键词:油菜;基质块;双螺旋传动凸轮轴;结构振型;动力学方程;模态分析

中图分类号:S223.92 **文献标志码:**A **文章编号:**1002-1302(2018)06-0204-03

方体基质块苗是异于现有的毯状苗、钵体苗、穴盘苗的一种新型的育苗方式,与现有的育苗方式相比有较大的优势,主要特点是出苗整齐、成活率高、整体移栽、不须缓苗、增强肥力、优化土壤等,目前针对该育苗方式的移栽机具还处在半自动人工喂苗阶段,效率较低、工作强度较大。每个基质块之间靠基质连接,有少量的根系交错缠绕,整盘基质块苗可以看作一个整体,类似于放大的水稻毯状钵体苗,所以在设计全自动移栽机时借鉴目前水稻插秧机的原理,采用分置式移箱机构对每个苗块进行移箱作业,对适应方体基质块苗农艺特性的移箱机构中双螺旋传动凸轮轴进行设计并使用 ANSYS 软件对其进行模态分析。

1 双螺旋传动凸轮轴结构及参数设计

研究对象为横向 9 块、纵向 14 块的方体基质块,每个基质块规格为 $(40 \times 40 \times 40) \text{ mm}^3$,根据此条件确定横向须移箱 9 回,每回移距为 40 mm,根据移距首先确定螺旋槽螺距^[1]。

$$b = PZ_{\pm} / Z_{\text{从}} \quad (1)$$

式中: b 表示移距,mm; P 表示螺旋槽螺距,mm; Z_{\pm} 表示主动传动齿轮齿数; $Z_{\text{从}}$ 表示从动传动齿轮齿数。

水稻插秧机一行程的取秧次数通常为 16、18、20、24 次,而方体基质块苗横向只须取 9 次,取秧次数少的情况下可令 $P = 2b_m$ ^[1],其中 b_m 为最小移距,所以螺旋槽的螺距 P 为 80 mm。根据螺杆扭矩计算公式、耐磨性计算公式等计算双螺旋传动凸轮轴的螺线中径如下:

$$F = \frac{2T}{d_2 \tan(\lambda + \rho')} \quad (2)$$

$$\rho' = \arctan f' \quad (3)$$

$$f' = \frac{f}{\cos \alpha / 2} \quad (4)$$

收稿日期:2017-12-11

基金项目:国家科技支撑计划(编号:2013BAD08B00);江苏省重点研发计划(编号:BE2015351-1)。

作者简介:付宇超(1990—),男,山东平度人,硕士,主要从事农业机械化工程研究。E-mail:296524683@qq.com。

结合以上分析可知,该控制器对于方波信号跟踪良好,对于三角信号和正弦信号,第 1 次输入有较大的误差,之后的波形可以很好地跟随输入信号,误差平缓趋于稳定。

4 结论

与前人针对于拖拉机设计的 PID 控制器相比,本研究针对无人微耕机设计了专用的双闭环转向控制器,转向角度作为外环使用神经网络控制,转向速度作为内环使用模糊控制,使微耕机平稳转向目标角度,提出了神经网络和模糊控制的双闭环控制模型适应复杂多变的农业环境,逆模型神经网络修正单神经元自适应 PID 算法的误差,针对 STM32 进行了算法优化,降低了算法复杂度和成本。样机试验结果表明,方波信号跟踪平均误差为 0.1° ,延时时间为 0.28 s,正弦信号跟踪平均误差为 2.2° ,三角信号跟踪平均误差为 0.8° ,但在神经网络控制器学习时间内。输出误差较大需进一步优化算法。因此本研究设计的控制器满足农业环境应用要求,并为进一步试验提供平台。

参考文献:

- [1] Qiu H, Zhang Q. Feedforward - plus - proportional - integral - derivative controller for an off - road vehicle electrohydraulic steering system[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers Part D - Journal of Automobile Engineering, 2003, 217(5): 375 - 382.
- [2] 张美娜,林相泽,丁永前,等. 基于性能指标的农用车辆路径跟踪控制器设计[J]. 农业工程学报, 2012, 28(9): 40 - 46.
- [3] 黎永键,赵祚喜,黄培奎,等. 东方红拖拉机自动转向控制器设计及试验[J]. 农业工程学报, 2015, 31(增刊 2): 93 - 99.
- [4] 谢 斌,张 超,毛恩荣,等. 基于 myRIO 的电动拖拉机驱动控制器设计与室内试验[J]. 农业工程学报, 2015, 31(18): 55 - 62.
- [5] 宋春月. 无人驾驶拖拉机控制系统设计研究[D]. 上海:上海工程技术大学, 2015.
- [6] 丁向美. 基于 ARM 的微耕机远程控制系统的研究[D]. 重庆:西南大学, 2011.
- [7] 刘金琨. 先进 PID 控制 MATLAB 仿真[M]. 北京:电子工业出版社, 2011.

$$T = 9\,549\,000 \frac{P}{n}; \quad (5)$$

$$d_2 \geq 0.8 \sqrt{\frac{F}{\psi P_p}}. \quad (6)$$

式中: T 表示螺杆扭矩; d_2 表示螺纹中径; λ 表示螺旋线升角; ρ' 表示当量摩擦角; f' 表示当量摩擦系数; f 表示摩擦因数; F 表示螺杆所受的轴向载荷; N ; P 表示轴传动的功率; n 表示轴的转速; P_p 表示螺纹副许用压强; α 表示压力角; ψ 值根据螺母形式选定剖分式螺母取 2.5 ~ 3.5, 取值为 3^[2]。

钢和钢的摩擦因数为 0.15 ~ 0.17, 取 f 值为 0.16, 通常取 λ 值 $\leq 4^\circ 30'$, 本研究按 $4^\circ 30'$ 计算, P_p 值查表可知钢对钢在低速时许用压强为 7.5 ~ 13, 取值为 10, 为防止自锁现象许用压力角要满足 $[\alpha_1] \leq 38^\circ$, 为方便计算取, 预计轴传递的功率约为 0.5 kW、转速约为 80 r/min, 将(2)(3)(4)(5)带入公式(6)中得 $\alpha_1 = 35^\circ$:

$$d_2 \geq 0.8 \sqrt{\frac{2 \times 9\,549\,000 \frac{P}{n} \psi P_p}{d_2 \arctan\left(\lambda + \arctan \frac{f}{\cos \alpha / 2}\right)}}. \quad (7)$$

将各参数带入(7)式解得 $d_2 \geq 29.88$, 由于轴上须要加工键槽, 应将所得的轴颈增大以保障其强度要求, 有键槽时, 轴颈增大, 结果见表 1^[3]。查表 1 可知, 要增大轴颈 7%, 所以其轴颈 D 为 31.97 mm, 圆整为 32 mm, 螺纹大径 $D_0 = d_2 + 2a_c$, 其中 a_c 为牙顶间隙, 通常取 0.1 ~ 0.2 mm, 本研究取 0.15, 所以螺纹大径 D_0 为 32.3 mm。移箱总行程是由行距、移距、秧针宽度等决定的, 对于分置式秧箱的移箱总行程为

$$L = b_m(n-1). \quad (8)$$

此外, L 还应满足

$$L + h = B. \quad (9)$$

式中: n 表示移箱 1 个行程的取秧次数; B 表示秧箱底板宽度; h 表示秧针宽度。其中 n 为 9, b_m 为 40 带入(8)式得 L 为 32 cm, 从而得到秧箱底板宽度为 36 cm。

表 1 有键槽时轴颈增大值

轴颈 (mm)	有 1 个键槽时的增大率 (%)	有 2 个相隔 180° 键槽时的增加率 (%)
<30	7	15
30 ~ 100	5	10
>100	3	7

2 双螺旋传动凸轮轴模态分析

为了解双螺旋传动凸轮轴的结构振动特性, 确定其固有频率和振型, 避免产生共振, 须对其进行模态分析, 模态分析实际上是进行特征值和特征向量的求解, 动力学问题对应的平衡方程为^[4]:

$$[M]\{x''\} + [C]\{x'\} + [K]\{x\} = \{F(t)\}. \quad (10)$$

式中: $[M]$ 是质量矩阵; $[C]$ 是阻尼矩阵; $[K]$ 是刚度矩阵; $\{x\}$ 是位移矩阵; $\{x'\}$ 是速度矢量; $\{x''\}$ 是加速度矢量; $\{F(t)\}$ 是力矢量随时间变化。

由于双螺旋传动轴与机架固定, 不考虑其速度与加速度, 所以双螺旋传动轴的整体刚度振动基本方程可以简化为:

$$[K]\{x\} = \{F(t)\}. \quad (11)$$

双螺旋传动轴为无阻尼自由振动, 其外部激励和阻尼力均为零, 所以其动力运动方程可以表示为:

$$[M](x'') + [K](x) = \{0\}. \quad (12)$$

结构的自由振动为简谐振动可以视位移为正弦函数:

$$x = x_0 \sin(\omega t). \quad (13)$$

将其代入(12)式得:

$$([K] - \omega^2[M])\{x_0\} = \{0\}. \quad (14)$$

式中: x_0 为各节点的振幅; ω 为圆频率; 自振频率为 $f = \frac{\omega}{2\pi}$ 。

因为 $\{x_0\}$ 不全为 0, 所以 $[K] - \omega^2[M] = 0$, 即变成对该方程特征值求解的问题, 由于 $[K]$ 和 $[M]$ 均为 n 阶方阵, 所以(14)式中 ω 可以解出 n 个固有频率, 从而得出其结构振型。

要对双螺旋传动轴进行模态分析, 首先要对设计的双螺旋传动凸轮轴进行三维建模(图 1), 将三维图导入到 ANSYS 软件中, 先选用双螺旋轴的材料, 为满足双螺旋轴对刚度、强度、耐磨性、缺口敏感性等性能要求, 综合考虑选择标准合金钢(40Cr 钢)作为双螺旋轴的材料, 40Cr 钢调质处理后具有良好的综合力学性能, 良好的低温冲击韧性和低的缺口敏感性, 并能获得较高的强度和韧性等综合机械性能。40Cr 钢的弹性模量为 2.11×10^{11} N/m², 泊松比为 0.277, 质量密度为 7 870 kg/m³^[5]。其次对双螺旋传动凸轮轴进行网格划分, 利用 ANSYS 软件中的“Generate Mesh”命令将双螺旋传动凸轮轴按照 1 mm 的尺寸进行网格划分。为研究双螺旋传动凸轮轴的共振问题, 在轴上不添加任何约束力。设置完成后利用求解器解出双螺旋传动轴前 10 阶的模态振动频率(表 2)。



图 1 双螺旋传动轴

表 2 前十阶模态振动频率

阶数	频率 (Hz)
1	432.16
2	433.60
3	1 158.30
4	1 166.40
5	2 149.90
6	2 195.20
7	3 500.60
8	3 594.30
9	3 687.50
10	5 257.80

从双螺旋传动轴前十阶模态振动频率可知双螺旋传动轴的频率与阶数呈正相关, 即阶数越高, 频率越大。其中, 一、二阶之间的频率接近, 三、四阶之间的频率接近, 五、六阶之间的频率接近, 七、八、九阶之间的频率接近, 这表明这几组的振型为正交振动(图 2), 其频率为上述特征方程特征值的重根。在设计过程中, 移栽机使用现有插秧机洋马 VP6E 的底盘, 其发动机输出转速为 3 600 r/min, 其相应的激振频率为

$$f = \frac{n}{60} = \frac{3\,600}{60} = 60 \text{ Hz}. \quad (15)$$

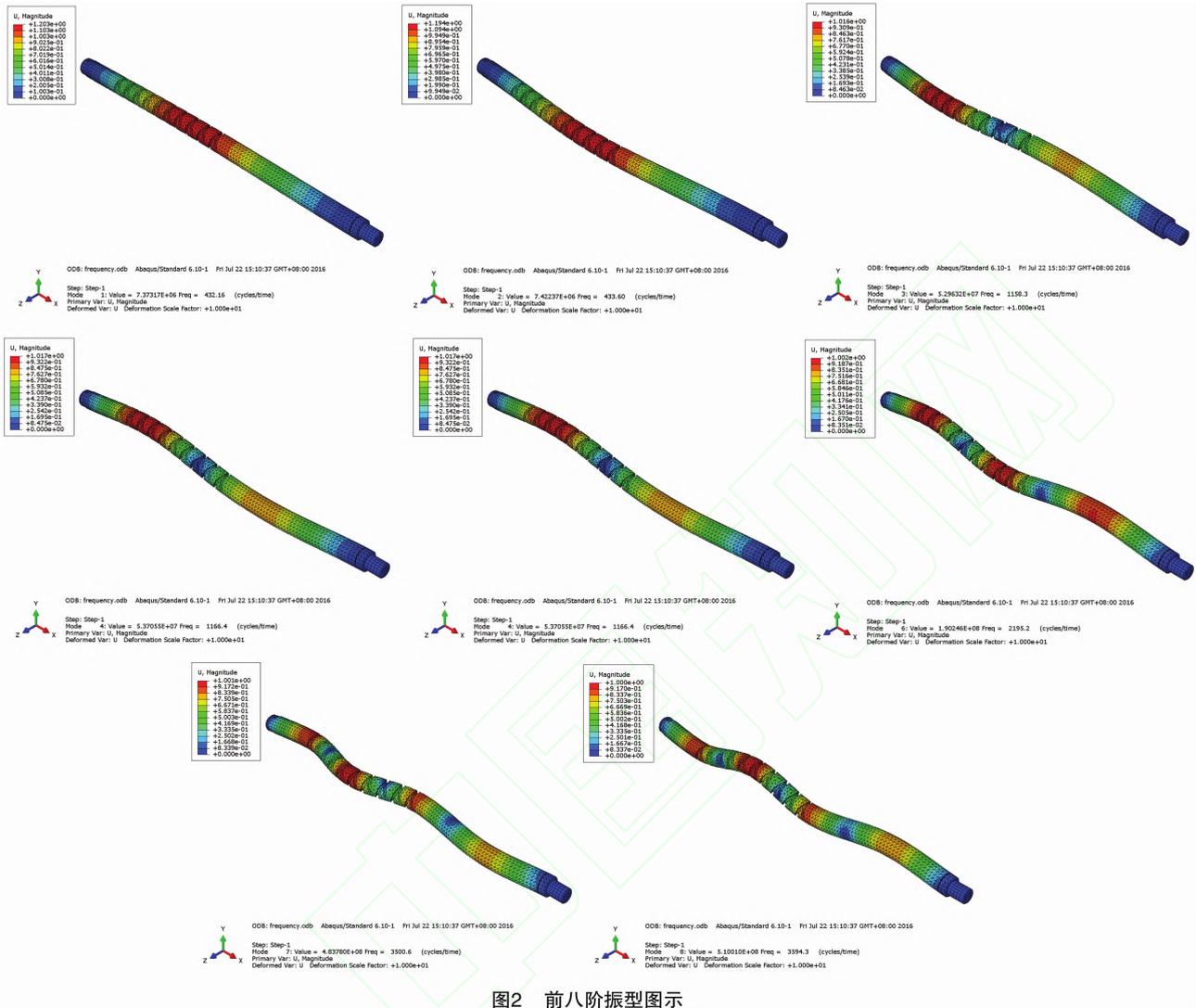


图2 前八阶振型图示

该频率远小于双螺旋传动凸轮轴的一阶振动频率,所以双螺旋传动凸轮轴不会发生共振现象。

3 总结

目前我国油菜种植大部分都是人工手撒播,但手工撒播的油菜成活率低、易产生病虫害、产量低,少数是通过育苗移栽的形式种植,但是由于南方油菜大部分都是在稻坂田上种植,由于稻坂田本身的土壤性质和油菜穴盘育苗的方式会导致油菜无法进行全自动移栽,大部分油菜种植方式都是手工或半自动移栽。本研究涉及的油菜基质块育苗是一种新型的育苗模式,油菜苗育成 $(40 \times 40 \times 40) \text{ mm}^3$ 的方体基质块使其苗块规格统一规范,有利于机械全自动移栽,本研究为该全自动移栽机中关键部件的设计及分析,主要设计了一种全自动移栽油菜基质块苗的横向移送机构的关键部件,并通过

ANSYS的仿真模块对双螺旋传动机构在横向移箱机构中的振动情况进行了模态分析,确定了其主要变形形式,为整机的设计提供理论支持。

参考文献:

- [1]陈 志,华国柱,李树军,等. 农业机械设计手册上册[M]. 北京:中国农业科学技术出版社,2007:487-488.
- [2]成大先,王德夫,姬奎生,等. 机械设计手册(第三卷)[M]. 5版. 北京:化学工业出版社,2012.
- [3]成大先,王德夫,姬奎生,等. 机械设计手册(第二卷)[M]. 5版. 北京:化学工业出版社,2012.
- [4]许进峰,田 蕾. ANSYS workbench15.0 完全自学一本通[M]. 北京:电子工业出版社,2014:181-183.
- [5]中国航空材料手册[M]. 北京:中国标准出版社,1988.