

喷雾机喷杆有限元模态分析与结构优化*

邱白晶 何耀杰 盛云辉 尹振华 邓武清

(江苏大学现代农业装备与技术教育部重点实验室, 镇江 212013)

摘要: 在 ANSYS 中建立了喷杆的参数化有限元模型,并验证了模型的准确性。根据喷杆的模态分析结果在 ANSYS 中对喷杆结构进行了优化,在质量增加 8.4% 的情况下,喷杆一阶固有频率从 9.16 Hz 增加到了 10.41 Hz,避开了路面激励的频率区间。结合 ADAMS 对喷杆优化前、后作业时的弹性变形作了对比,结果表明:优化前喷杆末端在水平方向最大弹性变形 D_{bmax} 为 39.6 mm,均方根为 12.6 mm;优化后喷杆在水平方向最大弹性变形 D_{amax} 为 10.1 mm,均方根为 2.9 mm,喷杆经过优化后其水平方向弹性变形明显减小。

关键词: 喷雾机 喷杆 模态分析 参数化模型 优化设计

中图分类号: S49; O326 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2014)08-0112-05

引言

喷杆是弱阻尼的弹性体,喷杆喷雾机在不平路面作业时产生的加速度会使喷杆发生弹性变形,这是导致喷雾沉积均匀性下降的主要原因之一^[1-3]。

为了减小喷杆在作业过程中的弹性变形,提高喷雾沉积均匀性,国内外学者作了很多相关研究,Roman 等设计了一种电液控制系统用于抑制喷杆弹性变形,取得了一定效果^[4-6],何耀杰研究了拉索对喷杆形变的抑制作用^[7],但这些研究并未从喷杆本身的结构优化入手,而喷杆作业时的弹性变形又与喷杆本身的结构有密切的关系^[8]。目前,针对喷杆结构与弹性变形关系的研究方法主要有试验分析和数值计算两种,虽然试验分析法准确,但只能测量出喷杆在试验状态下的信息;而喷杆数值模型则可以预测其在各种载荷和边界条件下的动态特性,便于喷杆的结构优化和动态仿真,只是数值模型的可靠性常常不能保证^[9]。

本文在有限元软件 ANSYS 中建立喷杆的参数化有限元模型后,利用试验模态分析技术对其进行验证,在确认模型的可靠性后对喷杆进行结构优化,最后利用多体动力学软件 ADAMS 建立具有弹性体喷杆的喷雾机模型,并分析喷杆优化前后的弹性变形情况。

1 喷杆参数化建模、分析与验证

1.1 喷杆参数化建模与数值模态分析

喷杆由不同规格的钢管焊接而成,呈对称结构,长度 $L = 8\ 000\ \text{mm}$ 。由于本文采用喷杆的参数化有限元模型来对喷杆结构进行优化,需首先定义优化过程中的变量。考虑到喷杆的外形结构不应有重大的改变,如喷幅、折叠方式等,故选取制造喷杆所用钢管的厚度、喷杆的总体积为模型中的变量,以保证在外形结构不变的情况下也能对喷杆进行优化。

建模具体过程为:将 Pro/E 中的喷杆模型以 .igs 文件导入至有限元分析软件 ANSYS 中,类型为壳。并将构成喷杆的主要钢管厚度定义为变量,初始值为喷杆实际结构的钢管厚度,如表 1 所示。其余非主要钢管厚度按实际结构定义为定量。采用节点耦合的方式来描述实体喷杆的焊接连接,而后

表 1 喷杆模型主要变量的初始参数

Tab.1 Variable quantities' initial values of each main component from spray boom

部件	壁厚/mm	截面尺寸/mm
圆钢管 1	1.5	φ25
圆钢管 2	1.5	φ25
方钢管 1	1.5	30 × 30
方钢管 2	1.5	30 × 30
方钢管 3	2.0	30 × 30
方钢管 4	3.0	40 × 30

收稿日期: 2013-09-10 修回日期: 2013-11-04

* 国家公益性行业(农业)科研专项资助项目(201203025-04)、江苏省科技支撑计划资助项目(BE2011334)、国家农业科技成果转化资金资助项目(2012GB2C100154)、江苏省高校自然科学研究重大资助项目(10KJA470007)和江苏省高校优势学科建设工程资助项目(苏财教(2011)8号)

作者简介: 邱白晶,教授,博士生导师,主要从事农业机械化设计及理论研究,E-mail: qbj@ujs.edu.cn

定义模型密度 $\rho = 7.85 \times 10^3 \text{ kg/m}^3$, 弹性模量 $E = 2.07 \times 10^5 \text{ MPa}$, 泊松比 $\mu = 0.3$, 单元类型为 10 mm 的 Shell181 的壳单元 (图 1)。并对喷杆进行自由网格划分, 最终所得有限元模型单元数为 32 880, 节点数为 32 746^[7]。

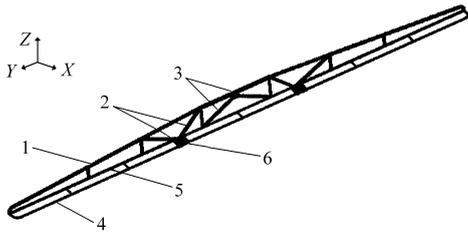


图 1 ANSYS 中建立的喷杆参数化有限元模型

Fig. 1 Spray boom's parametric finite element model built in ANSYS

- 1. 方钢管 1 2. 方钢管 2 3. 方钢管 4 4. 圆钢管 1 5. 圆钢管 2
- 6. 方钢管 3

为了对喷杆的动态特性进行研究, 采用分块兰索斯法 (Block Lanczos) 提取喷杆模型在自由状态下前 8 阶非刚体模态, 图 2 所示为前 2 阶模态振型。

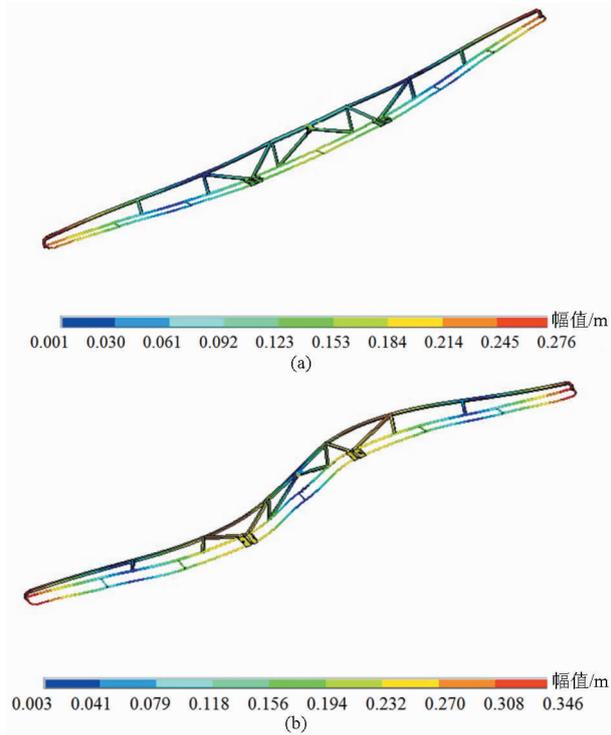


图 2 喷杆数值模态分析的前 2 阶振型

Fig. 2 First two mode shapes of spray boom by modal calculation

- (a) 一阶振型 (b) 二阶振型

1.2 喷杆模型验证

考虑到数值模型的可靠性常常不能保证, 故采用试验模态分析技术对所建立喷杆有限元模型的准确性进行检验^[9]。试验具体过程为^[7], 用弹性绳悬吊喷杆以保证其与数值模态分析具有相同的自由边

界条件。试验采用多点激励, 定点响应的方法。响应点位置及试验现场如图 3 所示。激励信号由 LC-1 型激振力锤给出, 由 AD-YD305 型力传感器采集; 响应信号由 YD-1 型加速度传感器采集。采集的激励及响应信号经过电荷放大器放大后在 SD380 型动态信号分析仪中进行快速傅里叶变换并求频响函数。采样过程中对每个频响函数进行了 5 次平均, 以消除信号中的随机噪声。最后将求得的所有频率响应函数导入上位机, 在 STAR7 软件中通过多项式法拟合, 求得了喷杆的结构模态参数。

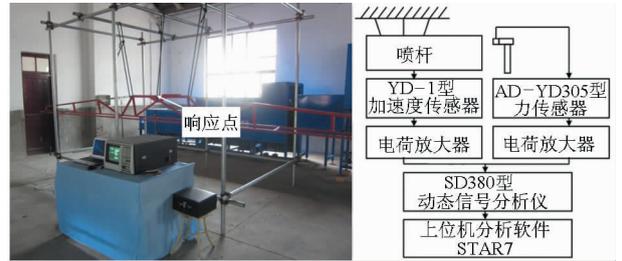


图 3 模态试验系统

Fig. 3 Measure system

应用共振频率差和模态置信准则来判定喷杆参数化有限元模型的准确性^[7,10]如表 2、图 4 所示。

表 2 试验模态和解析模态的模态频率差

Tab. 2 Resonance frequency difference between modal calculation and modal experiment analysis

阶次	试验 频率/Hz	解析 频率/Hz	共振频 率差/%
1	8.97	9.16	2.10
2	11.96	13.02	8.14
3	21.16	19.45	8.79
4	24.46	22.91	6.76
5	30.10	29.76	1.14
6	32.90	33.03	0.40
7	35.13	36.05	2.55
8	42.14	46.32	9.02

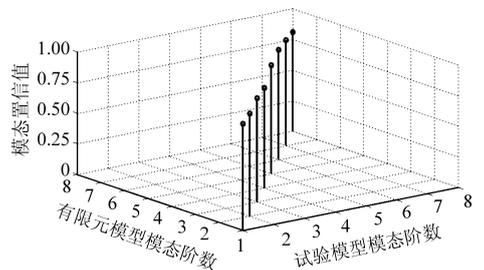


图 4 模态置信准则

Fig. 4 Modal assurance criterion

考虑到前 8 阶振型的共振频率差都小于 10%, 同时各个振型的模态置信准则都大于 0.8^[11], 可以认为所建立的喷杆的参数化有限元模型是合理的。

2 喷杆结构优化

2.1 喷杆工况

Clijmans 等指出,由于轮胎具有低通滤波性,行走底盘在田间作业时受到的激励一般小于 10 Hz^[12-13]。而当喷杆与喷雾机底盘之间无悬挂装置时,不平路面对底盘的激励会直接传递给喷杆,该喷杆的一阶固有频率为 9.16 Hz,在小于 10 Hz 的范围内,作业时喷杆易产生较大变形。

针对上述情况,需要对喷杆进行优化,以提高喷杆受 10 Hz 以下激励时的动刚度。本文主要通过改变喷杆结构来实现。

2.2 确立目标函数

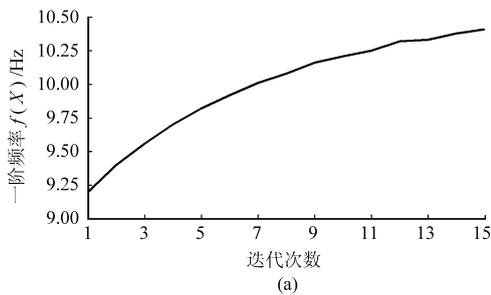
考虑到优化的目的在于提高喷杆的低阶固有频率,所以将目标函数定义为提高喷杆一阶固有频率。由于在 ANSYS 中以计算最小值为目标函数,故需将目标函数定义为一个足够大的数值减去喷杆一阶固有频率。为此将目标函数定义为

$$\max f(X) = 1000 - f_1 \quad (1)$$

式中 f_1 ——喷杆一阶固有频率,Hz

2.3 确立设计变量

根据 1.1 节中所建立的参数化喷杆有限元模型,考虑到喷杆的外形结构不应有重大的改变,故将制造喷杆所用钢管的厚度定义为设计变量^[14],根据



各个材料的可选购规格定义了设计变量的上限值和下限值,增量为 0.1 mm。并且所有设计变量的取值范围都满足喷杆构件静力学要求。

2.4 确立状态变量

根据 1.1 节中所建立的参数化喷杆有限元模型,考虑到喷杆质量不应增加过大(不超过 10%),以免造成材料的浪费以及喷雾机的田间通过性下降,所以将喷杆总体积定为状态变量。

2.5 建立优化模型

所建立的优化模型为

$$\max f(X) = f(\delta_1, \delta_2, \delta_3, \delta_4, \delta_5, \delta_6) \quad (2)$$

$$\text{s. t. } V(X) \leq V_{\max}(X) = 1.1V_0(X) \quad (3)$$

式中 $V_0(X)$ ——喷杆原体积, m^3

$V_{\max}(X)$ ——喷杆体积上限, m^3

$\delta_1, \delta_2, \delta_3, \delta_4, \delta_5, \delta_6$ ——圆钢管 1、圆钢管 2、方钢管 1、方钢管 2、方钢管 3、方钢管 4 的厚度, mm

模型的求解过程利用了 ANSYS 中 Design Opt 模块,选用一阶方法进行求解,一共进行了 15 次迭代,迭代结果如图 5 所示。优化结果如表 3 所示。可知,在喷杆总质量增加 8.4% 的情况下,其一阶固有频率从 9.16 Hz 增加到 10.41 Hz,避开了田间路面的激励范围。

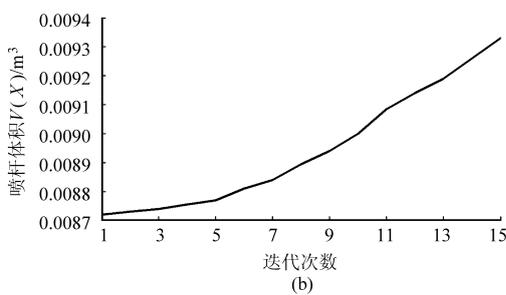


图 5 目标函数以及状态变量变化曲线

Fig. 5 Curve of objective function and state variable

(a) 目标函数 (b) 状态变量

表 3 喷杆优化结果

Tab. 3 Spray boom optimized results

项目	变量	初始值	上限值	下限值	优化结果
目标函数	一阶固有频率/Hz	9.16			10.41
状态变量	喷杆总体积/ m^3	0.008 61	0.009 47		0.009 33
设计变量	圆钢管 1 厚度/mm	1.5	3.0	1.0	3.0
	圆钢管 2 厚度/mm	1.5	3.0	1.0	3.0
	方钢管 1 厚度/mm	1.5	3.0	1.0	1.5
	方钢管 2 厚度/mm	1.5	3.5	1.0	1.8
	方钢管 3 厚度/mm	2.0	3.5	1.0	1.7
	方钢管 4 厚度/mm	3.0	4.5	1.5	2.5

3 喷杆仿真作业分析

3.1 喷雾机模型建立

为了考察喷杆结构优化的效果,采用数值模拟的方法对比喷杆优化前、后的作业性能。具体方案为:在多体动力学软件 ADAMS 中建立具有弹性体喷杆的喷雾机整机刚柔混合模型,并进行随机路面仿真实行走。

其中底盘的几何结构由 PRO/E 生成 parasolid 文件导入 ADAMS 后生成,技术参数按实际喷雾机参数设定^[15],如表 4 所示。

表 4 底盘主要技术参数
Tab. 4 Main parameters of chassis

参数	数值
地隙高度/m	0.8
轮距/m	1.6
轴距/m	1.6
结构质量/kg	1500
喷杆高度/m	0.76

轮胎模型是根据厂家提供的轮胎特性参数,编制的 UA 轮胎特性文件。田间作业路面是利用谐波叠加原理生成的随机路面,激励频率范围为 0 ~ 10 Hz^[16]。最后根据所建立的喷杆有限元模型在 ANSYS 中生成模态中性文件(.mnf),导入到 ADAMS 中与喷雾机进行刚性连接后便得到具有弹性体喷杆的喷雾机整机刚柔混合模型,如图 6 所示。

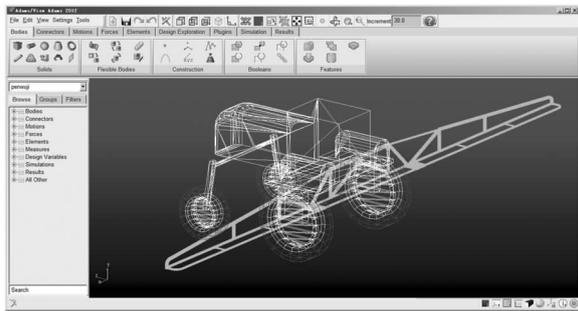


图 6 ADAMS 中所建立的模型

Fig. 6 Model built in ADAMS

对于该喷雾机整机模型来说,弹性体喷杆形变的计算是在模态空间中通过模态的线性叠加而得到的。一般来说,导入到 ADAMS 中的喷杆模态中性文件所保留的喷杆模态数越多,计算结果就越精确,但考虑到所建立路面的激励频率低于 10 Hz,而喷杆的 6 阶固有频率已经达到了 32.9 Hz,远超过了路面的激励频率,所以可忽略喷杆高阶振型对结构的动态特性造成的影响,同时考虑到计算效率,因而生成

的模态中性文件(.mnf)只保留了喷杆自由边界条件下的前 6 阶非刚体模态。

3.2 喷杆作业性能分析

由于喷杆作业时各处的振幅随着与喷杆对称中心距离的增大而增大,并且振幅最大处为喷杆末端^[6],同时考虑到该喷杆的一阶振型为水平方向的一阶弯曲,所以将喷杆末端在水平方向的弹性变形 D 作为衡量喷杆作业性能的指标。

将优化前、后的喷杆模型与喷雾机底盘连接并进行仿真实行走,仿真时喷雾机行驶速度 v 为 8 km/h,行驶距离 l 为 40 m。作业过程中喷杆左末端在水平方向的弹性变形 D 如图 7 所示。优化前喷杆在水平方向弹性变形最大值 D_{bmax} 为 39.6 mm,均方根为 12.6 mm;优化后喷杆在水平方向弹性变形最大值 D_{amax} 为 10.1 mm,均方根 D_a 为 2.9 mm。可见,喷杆经过优化后其水平方向弹性变形明显减小。

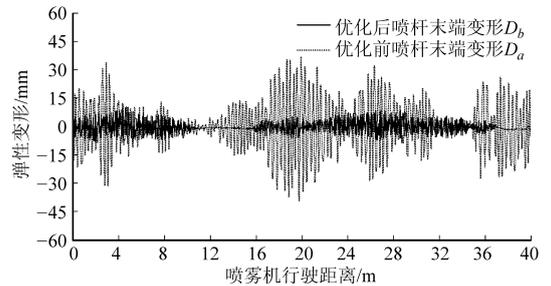


图 7 喷杆末端水平方向弹性变形

Fig. 7 Deformation of spray boom end on horizontal direction

4 结论

(1) 以 ANSYS 为平台建立了一种由管型材料制造的喷杆参数化有限元模型。定义完各变量的初始值后对喷杆进行数值模态分析,提取了喷杆自由边界条件下的前 8 阶非刚体模态。

(2) 对喷杆参数化有限元模型进行试验验证,并依据喷杆数值模态分析结果,对喷杆的结构进行了优化,在喷杆总质量增加 8.4% 的情况下,使喷杆的一阶固有频率从 9.16 Hz 增加到 10.41 Hz,避开了田间作业时激振频率范围。

(3) 在 ADAMS 中建立了具有柔性体喷杆的喷雾机模型,对优化前后的喷杆作业性能在 ADAMS 中作了仿真对比,结果表明优化前喷杆末端在水平方向最大弹性变形 D_{bmax} 为 39.6 mm,均方根为 12.6 mm;优化后喷杆在水平方向最大弹性变形 D_{amax} 为 10.1 mm,均方根为 2.9 mm,喷杆经过优化后其水平方向弹性变形明显减小。

参 考 文 献

- 1 Speelman L, Jansen J W. The effect of spray-boom movement on the liquid distribution of field crop sprayers[J]. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 1974,19(2): 117 - 129.
- 2 Langenakens J, Ramon H, De Baerdemaeker J. A model for measuring the effect of tire pressure and driving speed on horizontal sprayer boom movements and spray pattern[J]. *Transactions of the ASAE*, 1995,38(1): 65 - 72.
- 3 Ooms D, Ruter R, Lebeau F, et al. Impact of the horizontal movements of a sprayer boom on the longitudinal spray distribution in field conditions[J]. *Crop Protection*, 2003, 22(6): 813 - 820.
- 4 Ramon H, De Baerdemaeker J. Design of a cascade controller for a flexible spray boom[J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 1996, 10(2): 197 - 210.
- 5 Roman H. A design procedure for modern control algorithms on agriculture machinert applied to active vibration control of a spray boom[D]. Belgium: Katholieke Universiteit Leuven, 1993.
- 6 Roman H, Anthonis J, Moshou D, et al. Evaluation of a cascade compensator for horizontal vibration of a flexible spray boom[J]. *Journal of Agricultural Engineering Research*, 1998,71(1): 81 - 92.
- 7 何耀杰, 邱白晶, 杨亚飞, 等. 基于有限元模型的喷雾机喷杆弹性变形分析与控制[J]. *农业工程学报*, 2014,30(6):28 - 36.
He Yaojie, Qiu Baijing, Yang Yafei, et al. Deformation analysis and control of elastic deformation for spray boom based on finite element model[J]. *Transactions of the CSAE*, 2014, 30(6): 28 - 36. (in Chinese)
- 8 Langenakens J, Clijmans L, Ramon H, et al. The effects of vertical sprayer boom movements on the uniformity of sprayer distribution[J]. *Journal of Agriculture Engineering Research*,1999,74(3):281 - 291.
- 9 沃德·海伦, 斯蒂芬·拉门兹, 波尔·萨斯. 模态分析理论与试验[M]. 白化同, 郭继忠, 译. 北京:北京理工大学出版社, 2001.
- 10 陈锦喜, 王瑞林, 张军挪, 等. 基于有限元模型的机枪动态特性优化设计[J]. *振动与冲击*,2012,31(21):77 - 79.
Chen Jinxi, Wang Ruilin, Zhang Junnuo, et al. Optimal design for dynamic characteristics of a machine gun based on a finite element model[J]. *Journal of Vibration and Shock*, 2012, 31(21): 77 - 79. (in Chinese)
- 11 Hemez F M. Theoretical and experimental correlation between finite element models and modal tests in the context of large flexible space structures[D]. Colorado: University of Colorado, 1993.
- 12 Clijmans L, Ramon H, de Baerdemaeker J. Structural modification effects on the dynamic behavior of an agricultural tractor[J]. *Transactions of the ASAE*, 1998, 41(1): 5 - 10.
- 13 Kennes P, Anthonis J, Clijmans L, et al. Construction of a portable test rig to perform experimental modal analysis on mobile agricultural machinery[J]. *Journal of Sound and Vibration*, 1999, 228(2): 421 - 441.
- 14 张娜娜, 赵匀, 刘宏新. 高速水稻插秧机车架的轻量化设计[J]. *农业工程学报*, 2012, 28(3): 55 - 59.
Zhang Nana, Zhao Yun, Liu Hongxin. Light design of frame for self-propelled chassis rice transplanter[J]. *Transactions of the CSAE*, 2012, 28(3): 55 - 59. (in Chinese)
- 15 舒庆, 刘晋浩. 防风固沙草方格铺设机器人通过性研究[J]. *农业机械学报*, 2007, 38(7):99 - 102,120.
Shu Qing, Liu Jinhao. Research on trafficability of straw-checkerboard sand barriers paving robot[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2007, 38(7):99 - 102,120. (in Chinese)
- 16 徐延海. 随机路面谱的计算机模拟[J]. *农业机械学报*, 2007, 38(1):33 - 35.
Xu Yanhai. Computer simulation on stochastic road irregularities [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2007, 38(1):33 - 35. (in Chinese)
- 17 He Yaojie, Qiu Baijing, Yang Yafei. Simulation analysis of isolation about spray boom[J]. *Advanced Materials Research*, 2014, 900: 742 - 745.
- 18 张洪伟, 张以都, 王锡平, 等. 基于 ANSYS 参数化建模的农用车车架优化设计[J]. *农业机械学报*, 2007, 38(3):35 - 38.
Zhang Hongwei, Zhang Yidu, Wang Xiping, et al. Optimization design of an agricultural vehicle frame based on ANSYS parametric modeling[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2007, 38(3):35 - 38. (in Chinese)
- 19 He Yaojie, Qiu Baijing, Yang Yafei. Modal testing and parameters' identification of spray boom[J]. *Applied Mechanics and Materials*, 2014,532:324 - 427.
- 20 陈树人, 韩红阳, 陈刚, 等. 喷杆喷雾机机架动态特性分析与减振设计[J]. *农业机械学报*, 2013,44(4):50 - 53.
Chen Shuren, Han Hongyang, Chen Gang, et al. Dynamic characteristic analysis and vibration reduction design for sprayer frame [J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2013,44(4):50 - 53. (in Chinese)

Design and Experiment of Virtual Prototype of Double Disc Mower Cutter

Zhao Manquan¹ Zhang Ning¹ Yang Tiejun² Shi Yanhua³

(1. College of Mechanical and Electrical Engineering, Inner Mongolia Agricultural University, Hohhot 010018, China

2. Hohhot Branch, Chinese Academy of Agricultural Mechanization Sciences, Hohhot 010010, China

3. College of Mechanical and Electrical Engineering, Wuhan Polytechnic University, Wuhan 430023, China)

Abstract: Using parametric design of SolidWorks, three-dimensional solid models of all parts of 9YG-130 double disc mower cutter were built, and the design of virtual prototype was completed by constraint assemble. Introducing the models to the dynamic analysis software ADAMS, the motion simulation was performed, and the trajectory of the cutter vertex was obtained when setting the forward speed of the cutter with 2.78 m/s, and rotation speed with 2 000 r/min. The virtual orthogonal experiment with three levels and four factors was conducted, and Design-Expect 8.0 software was used to complete analysis of variance. The results showed that the repeat cut ratio of the cutter was effectively reduced when the four factors were $v_g = 57.01$ m/s, $v_j = 2.76$ m/s, $h = 34.06$ mm, and $m = 3$. The actual prototype experiment results showed that the experiment design met the mower requirements for grass industry technology, and improved efficiency and accuracy of the design.

Key words: Double disc mower Cutting unit Virtual prototyping Virtual orthogonal test Performance test

(上接第 116 页)

Finite Element Modal Analysis and Structure Optimization of Spray Boom

Qiu Baijing He Yaojie Sheng Yunhui Yin Zhenhua Deng Wuqing

(Key Laboratory of Modern Agricultural Equipment and Technology, Ministry of Education,

Jiangsu University, Zhenjiang 212013, China)

Abstract: In order to study dynamic characteristic of spray boom, a parametric finite element model of spray boom was built in ANSYS, and the model was validated by experimental modal analysis. According to the result of spray boom modal analysis, the structure of the spray boom was optimized in ANSYS, in the condition of increasing the spray boom mass for 8.4%, increasing the first mode frequency from 9.16 Hz to 10.41 Hz, and avoiding from the resonance vibration section. Then, the deformation of the spray boom in operating before and after optimization was compared and analyzed in ADAMS. The result showed that the max horizontal deformation at the spray boom end before optimization D_b max was 39.6 mm, and the root-mean-square was 12.6 mm. The max horizontal deformation at the spray boom end after optimization D_{amax} was 10.1 mm, and the root-mean-square was 2.9 mm. The horizontal deformation was reduced.

Key words: Sprayer Spray boom Modal analysis Parametric model Optimal design