

喷雾机喷杆结构形状及截面尺寸优化与试验

陈晨^{1,2}, 薛新宇^{1*}, 顾伟¹, 崔龙飞¹, 秦维彩¹, 周良富¹

(1. 农业部南京农业机械化研究所, 南京 210014; 2. 安徽农业大学工学院, 合肥 230036)

摘要: 针对喷雾机喷杆结构动力学特性原始设计缺陷, 该文提出了一种基于遗传算法的多变量优化方法。以平面十八杆桁架单元为基础结构, 在 Abaqus 平台中建立了单侧喷杆参数化有限元模型。基于 Isight 多学科多目标优化平台提取模型设计变量组及优化目标, 采用多岛遗传算法 (multi-island genetic algorithm, MIGA) 对喷杆桁架结构形状及杆件截面尺寸进行优化, 得到了一阶固有频率为 10.87 Hz, 质量为 35.82 kg, 幅宽为 5 m 的单侧喷杆结构模型。根据优化后模型的结构参数制造喷杆样品, 通过对其进行模态试验验证了数值模型的准确性。针对优化前、后喷杆模型进行了以位移功率谱密度 (power spectrum density, PSD) 函数为激励的随机振动仿真, 结果表明, 优化后喷杆模型的质量下降并没有明显增加其在竖直方向上振动位移响应量。该文研究结果可为进一步研究喷雾机喷杆结构的动力学性能优化提供依据。

关键词: 模态分析; 有限元分析; 优化; 喷杆; 遗传算法; 随机振动; 路面不平度

doi: 10.3969/j.issn.1002-6819.2015.09.009

中图分类号: S49

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2015)-09-0050-07

陈晨, 薛新宇, 顾伟, 等. 喷雾机喷杆结构形状及截面尺寸优化与试验[J]. 农业工程学报, 2015, 31(9): 50—56.
Chen Chen, Xue Xinyu, Gu Wei, et al. Experiment and structure shape and section size optimization of spray boom[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2015, 31(9): 50—56. (in Chinese with English abstract)

0 引言

喷杆喷雾机是大田作业中应用最广泛的植保机型, 宽幅喷杆喷雾机对提高施药效率、减少作业过程中对农作物的损害具有积极作用^[1-3]。喷杆喷雾机田间施药过程中, 由路面起伏产生的外部激励会导致喷杆产生振动, 从而影响喷雾沉积分布均匀性, 缩短喷杆使用寿命^[4-6]。

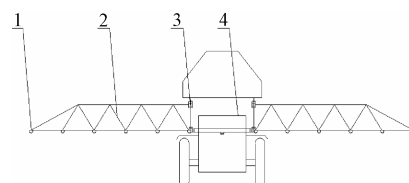
为了抑制喷杆振动, 提高喷杆田间作业过程中的稳定性, 国内外学者对喷杆喷雾机开展了一些相关研究。其中, Nation H. J. 等研究了喷杆回转连接机构对喷杆振动特性的影响, 研究表明为了降低喷杆振动, 回转关节应避免使用钢索、弹簧等柔性连接^[7-9], Anthonis J. 与 Ramon H. 等对喷杆减振悬架机构进行了研究, 结果表明安装电液控制悬架可以减小喷杆的振动幅值^[10-12], 陈达等研究了折叠喷杆展开状态下的有限元模型, 结果表明在喷杆折叠机构加装吸振装置可以有效降低喷杆振动^[13], 何耀杰等建立了喷杆结构数值模型, 并提取各阶振型及固有频率, 结合喷杆模态信息研究在不同位置添加拉索对喷杆振动特性的影响, 研究表明在 3/4 喷杆位置处添加拉索能够有效抑制喷杆弹性形变^[14], 邱白晶等构建了喷杆结构参数化模型, 以杆件壁厚为变量, 一阶振型的固有频率为优化目标, 通过改变喷杆结构壁厚改善了喷杆作业

时的弹性变形情况^[15]。上述研究从添加抑振部件及增加杆件壁厚等方面取得了一定的减振效果, 但未从喷杆原始结构形状进行性能优化。

本文使用有限单元法及计算机辅助优化设计 (computer aided optimization, CAO) 等现代设计理论与方法, 在喷杆结构类型、构件材料已定的条件下, 采用多岛遗传算法 (multi-island genetic algorithm, MIGA) 对喷杆结构几何形状及杆件截面尺寸进行了全局优化^[16], 即同时优化喷杆结构的节点位置和杆件的截面尺寸, 在固有频率、节点位移等多种约束条件下, 搜索质量最轻的喷杆结构最优参数组合。然后, 以路面位移功率谱密度 (power spectrum density, PSD) 函数为输入激励对喷杆优化前、后模型进行随机振动仿真, 分析评估优化结果。

1 建立喷杆参数化模型

本文以单侧长度为 5 m 的平面喷杆为研究对象, 喷杆在喷雾机两边呈对称分布。鉴于国标 GB/T 24677.1—2009 中只规定喷杆幅宽 12 m 以上的喷雾机应设有悬架系统^[17], 本文喷杆与机身采用直接连接方式, 如图 1 所示。



1. 喷头 2. 喷杆 3. 连接机构 4. 机架
1. Nozzle 2. Spray boom 3. Connection structure 4. Frame

图1 喷杆喷雾机结构示意图
Fig.1 Structure of boom sprayer

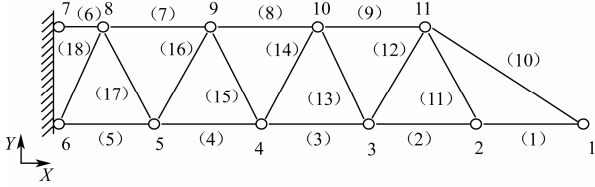
收稿日期: 2015-01-21 修订日期: 2015-04-16

基金项目: 国家公益性行业 (农业) 科研专项资助项目 (201203025)

作者简介: 陈晨, 男, 安徽宿州人, 主要从事施药技术与植保机械研究。
南京 农业部南京农业机械化研究所, 210014。Email: 270034737@qq.com
*通信作者: 薛新宇, 女, 江苏苏州人, 研究员, 主要从事植保与环境工程技术研究。南京 农业部南京农业机械化研究所, 210014。

Email: 735178312@qq.com

因此, 可以将单侧喷杆简化成长度为 5 m 的悬臂梁模型进行研究。在 Abaqus 有限元分析软件中选用梁单元构建以平面十八杆桁架为基础的喷杆初始模型^[18-19], 喷杆结构几何形状如图 2 所示, 定义有限元模型参数: 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 $\mu=0.3$ 。



注: 图中数字为结构节点编号, 括号内数字为杆件编号。

Note: Figures in the figure mean sequence numbers of structural change points, figures in brackets are sequence numbers of structural bars.

图 2 喷杆初始结构示意图

Fig.2 Initial structure of spray boom

在平面直角坐标系中结构节点 6 为坐标原点, 其中喷杆左端节点 (6、7) 添加固定约束, 机构杆件均选用圆钢管。

2 喷杆结构优化

2.1 优化目标函数的选取

本文以喷杆的质量为优化目标, 可选取如下目标函数:

$$F(x) = \sum_{i=1}^{18} \rho A_i L_i \quad (1)$$

式中: A_i 为第 i 号杆件的横截面积, mm^2 ; L_i 为第 i 号杆件的长度, mm

2.2 定义变量组参数

1) 截面尺寸变量组

$$A_i = \pi \delta_i (2r_i - \delta_i) \quad (2)$$

$$(r_i \leq r_i \leq \bar{r}_i, \delta_i \leq \delta_i \leq \bar{\delta}_i)$$

式中: r_i 为第 i 号杆件的截面外圆半径, r_i 和 \bar{r}_i 分别为 r_i 的下限值和上限值, mm ; δ_i 为第 i 号杆件的截面厚度, δ_i 和 $\bar{\delta}_i$ 分别为 δ_i 的下限值和上限值, mm 。

2) 坐标位置变量组

$$x_j, y_j \quad (x_j \leq x_j \leq \bar{x}_j, y_j \leq y_j \leq \bar{y}_j) \quad (3)$$

式中: x_j 为第 j 号节点横坐标, x_j 和 \bar{x}_j 分别为 x_j 的下限值和上限值, mm ; y_j 为第 j 号节点纵坐标, y_j 和 \bar{y}_j 分别为 y_j 的下限值和上限值, mm 。

2.3 定义约束条件

Langenakens J. 等指出, 喷杆喷雾机以 0~20 km/h 行驶速度进行田间作业时, 由于路面不平度和轮胎弹性在竖直方向上会产生 0~10 Hz 的振动激励^[20]。文中所研究的喷雾机喷杆与机身为刚性连接, 底盘产生的激励会直接传递给喷杆。针对上述情况, 为保证喷杆动力学特性, 优化后的喷杆一阶固有频率应规避激励频率范围。

具体的约束函数陈述如下:

$$f_1 \leq f_1 \quad (4)$$

式中: f_1 为一阶固有频率, f_1 为 f_1 的下限值, Hz 。

2.4 统一设计变量

考虑到优化过程中截面尺寸与节点坐标的变化量级不同, 两类变量进行耦合时可能导致算法收敛失败^[16]。本文进行了统一变量转换, 如下所示:

$$Z_k = [r_i, \delta_i, x_j, y_j] \quad (\bar{Z}_k \leq Z_k \leq \bar{Z}_k) \quad (5)$$

$$X_k = \frac{Z_k - \bar{Z}_k}{\bar{Z}_k - \bar{Z}_k} \quad (6)$$

式中: Z_k 为第 k 个设计变量, \bar{Z}_k 和 \bar{Z}_k 分别为 Z_k 的下限值和上限值; X_k 为第 k 个设计变量所对应无量纲统一变量。

通过上式转换, 设计变量全部映射到区间 [0,1] 上, 获得了等量级的无量纲设计变量。

2.5 多岛遗传算法的优化机理

在传统并行分布式遗传算法的基础上改进产生的多岛遗传算法^[21], 将单一种群分割成若干个子种群, 称之为“岛”, 分别在每个“岛”上应用传统遗传算法中的选择、交叉和变异等操作进行子种群进化, 如图 3 所示。多岛遗传算法每隔特定的代数, 按特定的比例从子种群中选择个体“迁移”到其他种群中, 通过这种操作, 进行各“岛”间个体的交换, 以维持种群的多样性, 从而抑制过早收敛的现象。

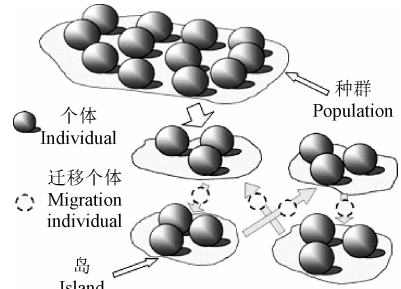


图 3 多岛遗传算法优化机理图

Fig.3 Concept of multi-island genetic algorithm

2.6 喷杆桁架结构尺寸优化结果

本文的优化设计变量共 15 个, 杆件截面外径和壁厚参数变量 6 个, 其中杆件 1、2、3、4、5 为圆管 a, 截面参数定义为 r_a 、 δ_a , 杆件 6、7、8、9、10 为圆管 b, 截面参数定义为 r_b 、 δ_b , 杆件 11、12、13、14、15、16、17、18 为圆管 c, 截面参数定义为 r_c 、 δ_c ; 结构节点位置坐标变量 9 个, 分别是节点 7 的 y 坐标值, 节点 8、9、10、11 的 x 、 y 坐标值。依次对上述设计变量进行统一变量转换, 得到统一变量 X_k 。

将 Abaqus 有限元分析软件所建立的平面喷杆模型集成到 Isight 多学科多目标优化软件中, 从参数化有限元模型中解析输入、输出文件, 提取 2.2 节中所定义的截面尺寸变量组及节点位置变量组共 15 个参数化变量, 转换为统一变量 X_k 。利用多岛遗传算法进行迭代运算, 搜索约束条件下目标函数的最优解^[22-23], 迭代结果如图 4 所

示。依据实际加工工艺要求对结果模型尺寸进行圆整，最终的优化结果如表 1 所示，喷杆结构优化前、后的形状变化如图 5 所示。

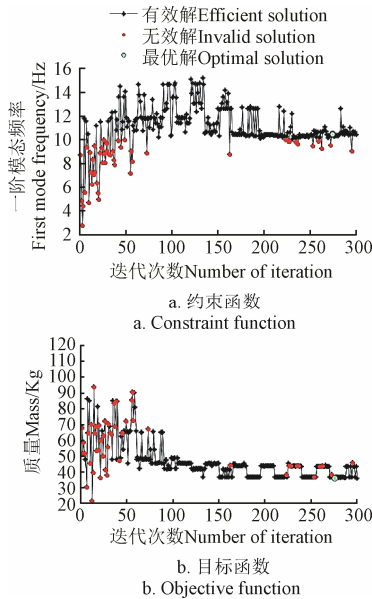


图 4 目标函数及约束函数变化曲线

Fig.4 Curve of objective function and constraint function

表 1 初始状态与优化状态对比表

Table 1 Comparison between initial state and optimized state					
项目 Item	变量 Variable	初始值 Initialization	下限 Lower limit	上限 Upper limit	优化值 Optimal value
目标函数 Objective function	质量 Mass/kg	69.47			35.82
约束函数 Constraint function	固有频率 First mode frequency/Hz	16.71	10	—	10.87
设计变量 Design variable	r_a/mm	30	10	50	25
	δ_a/mm	3	1	4	3
	r_b/mm	25	10	50	20
	δ_b/mm	3	1	4	2
	r_c/mm	20	10	50	10
	δ_c/mm	3	1	4	2
	y_7/mm	800	0	1 000	427
	x_8/mm	500	0	1 000	233
	y_8/mm	800	0	1 000	307
	x_9/mm	1 500	1 000	2 000	1 177
	y_9/mm	800	0	1 000	239
	x_{10}/mm	2 500	2 000	3 000	2 188
	y_{10}/mm	800	0	1 000	179
	x_{11}/mm	3 500	3 000	4 000	3 169
	y_{11}/mm	800	0	1 000	170

注： r_i 为结构杆件*i*的外径， δ_i 为结构杆件*i*的壁厚， x_j 为结构节点*j*的横坐标值， y_j 为结构节点*j*的纵坐标值。
Note: r_i represents outside diameters of structure bar i , δ_i represents thickness of structure bar i , x_j represents abscissa values of structure node j , y_j represents ordinate values of structure node j .

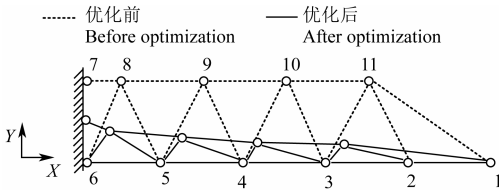


图 5 喷杆优化结构与初始结构对比图

Fig.5 Comparison of initial structure and optimized structure for spray boom

3 喷杆结构振型验证

3.1 喷杆数值模态分析

本文采用 Abaqus 有限元分析软件，对平面十八杆桁架喷杆优化模型进行了数值模态分析。提取了竖直平面内喷杆有限元模型前 6 阶模态信息，图 6 为竖直平面内喷杆前 2 阶模态振型。

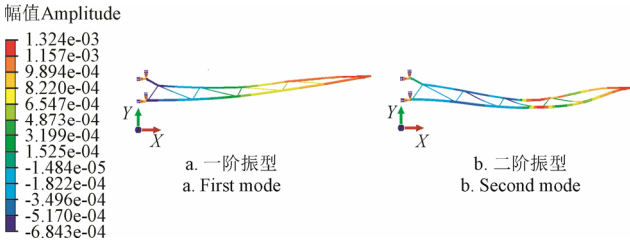


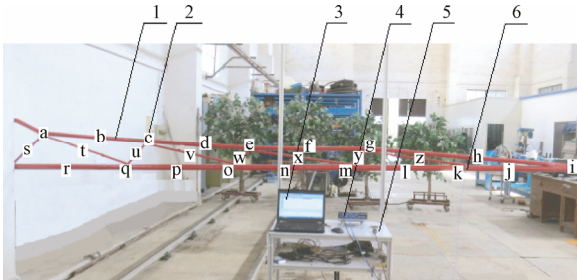
图 6 喷杆数值模态分析的前 2 阶振型

Fig.6 First two mode shapes of spray boom by modal calculation

3.2 喷杆模态试验

为了保证数值模型在工程应用时的可靠性，采用模态分析试验对所建立的喷杆参数化有限元模型的准确性进行验证^[24]。试验中为了使实体模型与数值模型保持一致，采用固定支撑方式将喷杆水平固定在混凝土立柱上形成悬臂结构^[24-25]。试验采用单点敲击、多点拾振法 (single input multiple output, SIMO) 对喷杆样品模态信息进行采集，激励点位置应避开喷杆振型节点，各拾振点位置应均匀分布且涵盖所有杆件结构关联点^[25]，共布置 26 个拾振点。

在模态试验过程中使用 PCB-086C02 型力锤敲击喷杆结构给出激励信号，振动响应输出信号由 PCB-333B42 型加速度传感器采集。在 m+p-Vibpilot 型动态信号分析仪中对采集到的输入激励信号及输出响应信号进行处理后得频响函数，再通过 Analyzer 数据分析软件进行拟合分析，可以直观的获得喷杆结构的模态参数。模态试验现场情况及激励点、拾振点位置如图 7 所示。



1.喷杆 2.激励点 3.数据分析软件 4.信号分析仪 5.激振力锤 6.加速度传感器
1. Spray boom 2. Exciting point 3. Data analysis software 4. Signal analyzer 5. Impulse hammer 6. Acceleration sensor

注：图中字母为拾振点序号。
Note: Letters in the figure are sequence numbers of response points.

图 7 喷杆模态试验

Fig.7 Modal test of spray boom

3.3 频率及振型相关性分析

基于喷杆模态试验结果，采用频率相关性和振型相

关性原则对喷杆有限元模型进行验证，可以得到频率及振型相关性数据对比情况，如表 2、图 8 所示。

表 2 固有频率计算值与试验值对比

Table 2 Natural frequency comparisons of numerical value and test value

阶次 Mode	试验频率 Test frequency/Hz	计算频率 Numerical frequency/Hz	频率误差 Resonance frequency difference/%
1	10.43	10.87	4.05
2	36.20	37.60	5.85
3	70.91	73.47	3.48
4	95.17	103.12	7.71
5	115.53	123.76	6.65
6	136.48	149.52	9.55

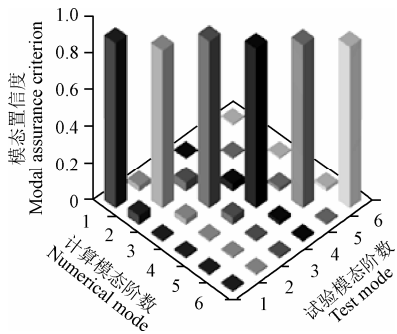


图 8 模态振型相关性置信度值

Fig.8 Model assurance criterion of mode shape correlation

表 2 列出了前 6 阶试验模态和计算模态的频率误差，结果都在 10% 以内，满足工程要求，图 8 中同阶模态信息的对应振型相关性模态置信度值都大于 0.85，符合工程参考要求^[26]。根据以上对比结果，本文所建立的喷杆参数化有限元模型可运用于工程研究。

4 喷杆桁架的随机振动仿真及分析

4.1 喷雾机模型建立

为了验证喷杆结构优化结果，在 Abaqus 软件中建立喷杆喷雾机整机刚柔混合模型如图 9 所示，并进行以位移功率谱密度（PSD）函数为激励的随机振动仿真。

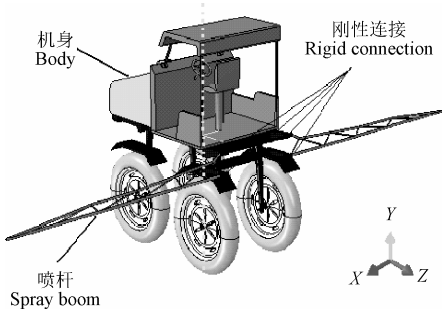


图 9 Abaqus 中建立的喷雾机模型

Fig.9 Boom sprayer model built in Abaqus

喷杆喷雾机有限元模型由 PRO/E 所建立的几何模型文件导入 Abaqus 后生成，依据喷雾机实际参数设定模型技术参数^[14-15]。在 Abaqus 中对喷杆模型进行网格划分，运用 Lanczos 法进行模态分析并提取前 6 阶模态信息。考

虑到喷杆喷雾机在田间作业时机身结构相较于喷杆结构仅产生少量的弹性变形，所以建模过程中将机身定义成整体刚性体模型，并且与喷杆之间添加刚性连接。鉴于喷雾机输药管路一般采用软管铺设，对喷杆结构特性影响很小，所以模型中管路及喷头可用均匀布置的等效质量点替代。

4.2 路面功率谱密度

车辆随机振动仿真激励主要采用路面功率谱密度描述其统计特性^[27]，其中路面功率谱密度可以表示为：

$$G_q(n)=\begin{cases} G_q(n_0)(\frac{n}{n_0})^{-W}, & n_l \leq n \leq n_u \\ 0, & \text{其他} \end{cases} \quad (7)$$

式中： n 为空间频率， n_l 和 n_u 分别为 n 的下限值和上限值， m^{-1} ； n_0 为参考空间频率， m^{-1} ； $G_q(n_0)$ 为参考空间频率下的路面功率谱密度值， 10^{-6} m^3 ； W 为频率指数，为双对数坐标上斜线的斜率。

参考文献[28]中分级路面谱的频率指数 $W=2$ ，参考空间频率 $n_0=0.1 \text{ m}^{-1}$ ，空间频率下的各级路面功率谱密度参数如表 3 所示。

表 3 各级路面功率谱密度参数

Table 3 Pavement power spectral density parameters at all levels

路面等级 Road grade	功率谱密度 Power spectral density $G_q(n_0)/(10^{-6} \text{ m}^3)$	轮廓均方根偏差 Root mean square $R_q(n_0)/(10^{-3} \text{ m})$
A	16	3.81
B	64	7.61
C	256	15.23
D	1 024	30.45
E	4 096	60.90

时间频率与空间频率的关系可以表示为：

$$f=un \quad (8)$$

式中： f 为时间频率，Hz； u 为行驶速度，m/s。

本文根据喷雾机作业情况，选用 D 级路面，定义车速 $u=20 \text{ km/h}$ 。所以可以得到输入激励的位移功率谱密度 $G_q(f)/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 如图 10 所示。

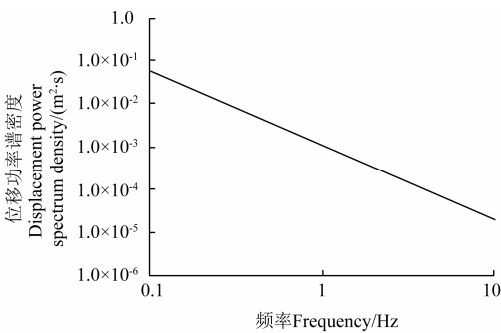


图 10 位移功率谱密度

Fig.10 Power spectral density of displacement

4.3 随机振动仿真分析

在 Abaqus 中定义随机振动分析步，添加 4.2 节中定义的路面位移功率谱密度（PSD）^[29]。鉴于田间作业过程

中机身受到的激励通常小于 10 Hz, 喷杆材料为 Q235 钢, 所以在随机振动分析步中设置: 频率为 0~10 Hz, 阻尼比为 6×10^{-4} 。为获得位移激励下喷杆在 y 方向(竖直方向)的响应幅值, 沿喷杆模型以 0.5 m 为间隔对称布置 22 个位移响应点。

将喷雾机机身分别与优化前、后的喷杆模型连接并进行随机振动仿真, 仿真过程中喷杆模型各节点位移响应情况如图 11 所示。优化前、后喷杆模型末梢节点最大位移响应分别为 7.9 和 9.5 mm, 响应量相差不到 2 mm 且均在 10 mm 以内。可见, 优化后喷杆在质量减少 48.43% 的情况下其竖直方向的随机振动位移响应量没有明显增加。优化后喷杆结构的共振频率区间保持在激励频率之外, 避免出现位移共振, 为喷嘴与作物冠层间提供了相对稳定的作业距离, 以保障喷雾分布均匀性。

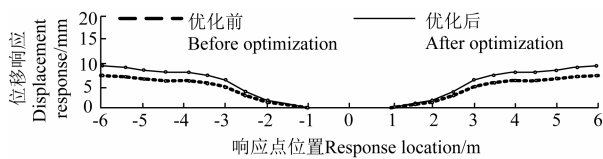


图 11 喷杆各响应点最大位移响应

Fig.11 Maximum response displacement of spray boom each response point

5 结 论

1) 基于现代设计理论与方法建立了以平面十八杆桁架为基础结构的喷杆参数化有限元模型。利用多岛遗传算法(multi-island genetic algorithm, MIGA)对喷杆参数化有限元模型进行了多变量优化, 从变量组空间中搜索最优参数解集, 确定了一阶固有频率为 10.87 Hz, 质量为 35.82 kg 的喷杆结构模型的参数组合。

2) 在喷杆结构有限元建模过程中使用梁单元进行参数化建模较实体单元建模更加简单方便, 模型优化迭代计算速度大幅提升。通过模态试验采集样品模型的模态信息, 对梁单元建模的可靠性及准确性进行验证。结果表明, 采用梁单元建立的喷杆参数化有限元模型可运用于工程研究。

3) 根据喷雾机整机有限元模型进行了随机振动仿真, 通过施加位移功率谱密度(power spectrum density, PSD)得到振动激励下喷杆各节点的响应位移量。结果表明: 优化前、后喷杆模型在质量减少 48.43% 的情况下其最大位移响应量相差不到 2 mm 且均在 10 mm 以内, 竖直方向的随机振动位移响应量没有明显增加。因此, 利用遗传算法进行多变量优化可快速准确的获得喷杆结构参数最优解。

[参 考 文 献]

[1] 刘雪美, 苑进, 张晓辉, 等. 3MQ-600 型导流式气流辅助喷杆弥雾机研制与试验[J]. 农业工程学报, 2012, 28(10): 8—12.
Liu Xuemei, Yuan Jin, Zhang Xiaohui, et al. Development and experiment on 3MQ-600 type air-assisted boom sprayer

with air-deflector[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2012, 28(10): 8—12. (in Chinese with English abstract)

[2] 宋坚利, 何雄奎, 杨雪玲, 等. 喷杆式喷雾机雾流方向角对药液沉积影响的试验研究[J]. 农业工程学报, 2006, 22(6): 96—99.
Song Jianli, He Xiongkui, Yang Xueling, et al. Influence of nozzle orientation on spray deposits[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2006, 22(6): 96—99. (in Chinese with English abstract)

[3] 吴吉麟, 苗玉斌. 不同激励源下宽幅喷雾机喷杆的动态特性分析[J]. 农业工程学报, 2012, 28(4): 39—44.
Wu Jilin, Miao Yubin. Dynamic characteristic analysis of boom for wide sprayer with different exciting sources[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2012, 28(4): 39—44. (in Chinese with English abstract)

[4] 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.

[5] Lardoux Y, Sinfort C, Enfält P, et al. Test method for boom suspension influence on spray distribution, Part I: experimental study of pesticide application under a moving boom original research article[J]. Biosystems Engineering, 2007, 96(1): 29—39.

[6] 陈志刚, 吴春笃, 杨学军. 喷杆喷雾雾量的分布均匀性[J]. 江苏大学学报: 自然科学版, 2008, 29(6): 465—468.
Chen Zhigang, Wu Chunduo, Yang Xuejun. Spray distribution uniformity of boom spraying[J]. Journal of Jiangsu University: Natural Science Edition, 2008, 29(6): 465—468. (in Chinese with English abstract)

[7] Nation H. J. The dynamic behavior of field sprayer booms[J]. Journal of Agriculture Engineering Research, 1982, 27(1): 61—70.

[8] Nation H. J. The design and performance of a gimbal-type mounting for sprayer booms 1. Development procedure[J]. Journal of Agriculture Engineering Research, 1987, 36(4): 233—246.

[9] Nation H. J. The design and performance of a gimbal-type mounting for sprayer booms 2. Optimization model and validation[J]. Journal of Agriculture Engineering Research, 1987, 36(4): 247—260.

[10] Patrik Kennes, Ramon H, Josse De Baerdemaeker. Modelling the effect of passive vertical suspension on the dynamic behavior of sprayer boom[J]. Journal of Agriculture Engineering Research, 1999, 72(3): 217—229.

[11] Anthonis J, Ramon H. Design of an active suspension to suppress the horizontal vibrations of a spray boom[J]. Journal of Sound and Vibration, 2003, 266(3): 573—583.

- [12] Anthonis H, Audenaert J, Ramon H. Design optimisation for the vertical suspension of a crop sprayer boom[J]. *Biosystems Engineering*, 2005, 90(2): 153—160.
- [13] 陈达. 柔性桁架喷杆系统设计与动态仿真研究[D]. 北京: 中国农业机械化科学研究院, 2011.
Chen Da. Study on Flexible Truss Boom System Design and Dynamic Simulation[D]. Beijing: Chinese Academy of Agricultural Mechanization Sciences, 2011. (in Chinese with English abstract)
- [14] 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 Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2014, 30(6): 28—36. (in Chinese with English abstract)
- [15] 邱白晶, 何耀杰, 盛云辉, 等. 喷雾机喷杆有限元模态分析与结构优化[J]. *农业机械学报*, 2014, 45(8): 112—116.
Qiu Baijing, He Yaojie, Sheng Yunhui, et al. Finite element modal analysis and structure optimization of spray boom[J]. *Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery*, 2014, 45(8): 112—116. (in Chinese with English abstract)
- [16] 刘军伟, 姜节胜. 桁架动力学形状优化的统一设计变量方法[J]. *振动工程学报*, 2000, 13(1): 84—88.
Liu Junwei, Jiang Jiesheng. Shape optimization for truss dynamics with unified design variables[J]. *Journal of Vibration Engineering*, 2000, 13(1): 84—88. (in Chinese with English abstract)
- [17] GB/T 24677.1-2009, 喷杆喷雾机技术条件[S].
- [18] 李民, 舒歌群, 卫海桥. 多体动力学建模方法对发动机主轴承载荷计算影响[J]. *农业工程学报*, 2008, 24(12): 57—61.
Li Min, Shu Gequn, Wei Haiqiao. Influence of multi-body dynamics modeling method on simulation of engine main bearing force[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2008, 24(12): 57—61. (in Chinese with English abstract)
- [19] Li Y X, Wang X, Gao Y W. Modeling for mechanical response of CICC by hierarchical approach and ABAQUS simulation[J]. *Fusion Engineering and Design*, 2013, 88(11): 2907—2917.
- [20] Langenakens J, Clijmans L, Ramon H, et al. The Effects of Vertical Sprayer Boom Movements on the Uniformity of Spray Distribution[J]. *Journal of Agriculture Engineering Research*, 1999, 74(3): 281—291.
- [21] Chen H, Ooka R, Kato K. Study on optimum design method for pleasant outdoor thermal environment using genetic algorithms (GA) and coupled simulation of convection, radiation and conduction[J]. *Building and Environment*, 2008, 43(1): 18—30.
- [22] 唐文艳. 结构优化中遗传算法研究和应用[D]. 大连: 大连理工大学, 2002.
Tang Wenyan. Research and Application of Genetic Algorithm in Structural Optimization[D]. Dalian: Dalian University of Technology, 2002. (in Chinese with English abstract)
- [23] 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, Zhang Yun, Liu Hongxin. Light design of frame for self-propelled chassis rice transplanter[J]. *Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE)*, 2012, 28(3): 55—59. (in Chinese with English abstract)
- [24] 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.
- [25] 徐有刚, 冯加权, 杜强, 等. 大型结构件模态试验方法[J]. *科学技术与工程*, 2007, 7(13): 3231—3234.
Xu Yougang, Feng Jiaquan, Du Qiang, et al. Modal test method of large structural parts[J]. *Science Technology and Engineering*, 2007, 7(13): 3231—3234. (in Chinese with English abstract)
- [26] 丁剑平, 缪增华, 陈小亮. 某全地形车车架模态相关性分析[J]. *固体力学学报*, 2013, 33(5): 193—197.
Ding Jianping, Miao Zenghua, Chen Xiaoliang. Correlation study of mode for one frame of all terrain vehicles[J]. *Chinese Journal of Solid Mechanics*, 2013, 33(5): 193—197. (in Chinese with English abstract)
- [27] 张智. 基于随机路面输入的货车车架可靠性分析评价方法研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2013.
Zhang Zhi. The Reliability Analysis and Evaluation Method of A Truck Frame exposed to Random Road Input[D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2013. (in Chinese with English abstract)
- [28] 赵济海, 林茂成, 应国增, 等. 路面激励工况的定义、分级与应用[J]. *汽车工程*, 1989(4): 10—18.
Zhao Jihai, Lin Maoheng, Ying Guozeng, et al. Definition, grading and application of the road exciting condition index[J]. *Automotive Engineering*, 1989(4): 10—18. (in Chinese with English abstract)
- [29] 王冬立, 李尧, 张伟. 列车车载设备随机振动仿真分析[J]. *铁道通信信号*, 2010, 46(11): 69—71.
Wang Dongli, Li Rao, Zhan Wei. The train control on-board equipment simulation of random vibration analysis[J]. *Railway Signalling & Communication*, 2010, 46(11): 69—71. (in Chinese with English abstract)

Experiment and structure shape and section size optimization of spray boom

Chen Chen^{1,2}, Xue Xinyu^{1*}, Gu Wei¹, Cui Longfei¹, Qin Weicai¹, Zhou Liangfu¹

(1. *Nanjing Research Institute for Agriculture Mechanization, Nanjing 210014, China;*

2. *School of Engineering, Anhui Agricultural University, Hefei 230036, China)*

Abstract: During the boom sprayer spraying, the vibration of the boom excited by field ground roughness not only influences homogeneity of spray distribution, but also reduces the life of the sprayer. To improve the structure dynamic behavior of the original boom design, a multi-variable optimization approach by genetic algorithms was presented. A parametric finite element model of the 18 bar plane truss element was built by the finite element software Abaqus. Then the mass of spray boom is taken as optimization goal. The first mode frequency of spray boom is taken as constraint condition. The element node coordinate and section dimension of spray boom are taken as design variables. All the design variables are transformed to dimensionless variables based on the unified design variable method to avoid optimization analysis failing to converge. The design variables and the optimization goal of the model were set on the Isight multidisciplinary multi-objective optimization platform, the shape of the boom structure and bar section dimension were optimized by using Multi-Island Genetic Algorithm (MIGA) method to obtain a single lance structure with 10.87 Hz first mode frequency, 35.82 kg mass and 5 m width. According to the technological requirements, the optimized structural dimensions were adjusted to manufacture an actual sample. In order to ensure the reliability and accuracy of the finite element model, the modal test in impact method was done to validate the finite element model and its modal parameters. In the test, the boom was fixed on the concrete column to make the actual model consistent with the finite element model. Single-point excitation and multi-point acquisition method was used. The exciting signal was generated by an impulse hammer and the response signal was measured by acceleration sensors. Then the modal parameters were identified in the computer. After the test, a comparison between test and simulation was made. The result showed that the difference of first 6 modes frequency between finite element model and test modal model were all less than 10%, the modal assurance criterion (MAC) of the first 6 modes between finite element model and test modal model were all more than 0.85, which indicated that the finite element model and the modal parameters of the model met the requirement of engineering research. Since the spray boom was fixed on the tractor chassis frame, the oscillation of chassis from ground roughness would directly transfer to the spray boom, which may lead to spray boom's vibration. A rigid-flexible coupling sprayer virtual prototyping is established in Abaqus to compare vibration displacement between the spray booms before and after optimization. Generally, hose laid was used in the pesticide transport, which has little impact on spray boom structure dynamic behavior. So the pipeline and nozzle was substituted by the uniform distribution mass in the sprayer model. Random vibration response was analyzed under the excitation of power spectrum density (PSD) of the class D road at the tractor speed of 20 km/h. The result showed that the maximal vibration deformations at the end point of the spray boom were about 7.9 mm and 9.5 mm relative to the static condition before and after optimization respectively. The deformations were all less than 10mm. The maximal deformation after the optimization was not increased obviously with the mass of the optimized spray boom was decreased by 48.43%.

Key words: modal analysis; finite element analysis; optimization; spray boom; genetic algorithms; stochastic vibration; road roughness