doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2020.S1.013

果园开沟施肥机机架优化设计与试验

刘双喜[1,2]　徐春保[1]　张宏建[1,3]　张成福[4]　刘雪梅[1]　王金星[1,3]

(1.山东农业大学机械与电子工程学院,泰安 271018;2.山东省园艺机械与装备重点实验室,泰安 271018;
3.山东省农业装备智能化工程实验室,泰安 271018;4.高密市益丰机械有限公司,高密 261500)

摘要:为提高果园开沟施肥机的动态作业性能,避免共振的发生,同时保证作业时开沟一致性及施肥稳定性,对其机架进行多目标优化设计。首先,建立果园开沟施肥机机架的参数化模型及有限元模型。其次,通过模态分析,得出机架的固有频率及振型,研究其对整机动态性能的影响,将一阶模态频率设定为目标函数。通过机架灵敏度分析,得到各杆件厚度对一阶模态频率的灵敏度,将灵敏度杆件的厚度设定为设计变量,将其厚度变化范围设定为约束条件。根据现代农机结构轻量化设计的要求,将机架的质量也作为目标函数。以目标函数、设计变量、约束条件为基础,构建机架多目标优化的数学模型。然后,基于 Hammersley 抽样方法,按约束条件选取 42 组试验样本进行试验设计,并计算其对应的目标值。根据试验设计结果,选用移动最小二乘法并拟合出对应响应面。其中,一阶模态频率响应面模型的决定系数 $R^2=0.997\,4$,质量响应面模型的决定系数 $R^2=0.999\,9$,均大于拟合模型要求的精度 0.9,拟合精度较高,满足设计要求。最后,基于响应面以及多目标遗传算法对果园开沟施肥机机架进行结构优化设计。优化结果表明:优化后的果园开沟施肥机机架一阶模态频率由原来的 35.39 Hz 提高到 38.31 Hz,提高了 8.25%,且远离拖拉机的输入频率 35 Hz;优化后质量为 389 kg,满足在提升一阶模态频率下,质量最小的要求。优化后果园开沟施肥机作业的开沟一致性系数和施肥稳定性系数比优化前分别提高 3.72%、3.57%,提升效果明显,满足果园开沟施肥生产要求。

关键词:果园开沟施肥机;机架;灵敏度分析;遗传算法;多目标优化

中图分类号:S224.2　　**文献标识码**:A　　**文章编号**:1000-1298(2020)S1-0113-10

Optimization Design and Experiment for Rack of Orchard Ditching-fertilizer Machine

LIU Shuangxi[1,2]　XU Chunbao[1]　ZHANG Hongjian[1,3]　ZHANG Chengfu[4]　LIU Xuemei[1]　WANG Jinxing[1,3]

(1. *College of Mechanical and Electronic Engineering*, *Shandong Agricultural University*, *Taian* 271018, *China*
2. *Shandong Provincial Key Laboratory of Horticultural Machinery and Equipment*, *Taian* 271018, *China*
3. *Shandong Provincial Engineering Laboratory of Agricultural Equipment Intelligence*, *Taian* 271018, *China*
4. *Gaomi City Yifeng Machinery Co.*, *Ltd.*, *Gaomi* 261500, *China*)

Abstract: China has superior natural conditions and is suitable for the growth of fruit trees. It is a big fruit producing country. The cultivation area and yield of fruit trees rank first in the world all year round. Fertilization of fruit trees is a key link in orchard management. Ditching fertilizer machine is an important equipment to realize mechanized fertilization in orchard. In order to improve the dynamic performance of orchard ditching fertilizer machine, avoid resonance, and ensure ditching consistency and fertilization stability, the multi-objective optimization design of its rack was carried out. Firstly, the parametric model and finite element model for the rack of the orchard ditching fertilizer machine were established. Secondly, through modal analysis, the natural frequency and vibration mode of the rack were obtained, and its influence on the dynamic performance of the whole machine was studied, and the first-order modal frequency was set as the objective function. Through the sensitivity analysis of the rack, the sensitivity of each member thickness to the first-order modal frequency was obtained. The thickness of the sensitive

收稿日期:2020-08-01　修回日期:2020-09-10

基金项目:国家重点研发计划项目(2016YFD0201104)和国家苹果产业技术体系项目(CARS-27)

作者简介:刘双喜(1978—),男,副教授,博士,主要从事机器视觉与图像处理研究,E-mail:shuangxiliu168@163.com

通信作者:王金星(1970—),男,教授,博士生导师,主要从事智能农业装备研究,E-mail:jinxingw@163.com

member was set as the design variable, and its thickness variation range was set as the constraint condition. According to the requirements of modern agricultural machinery structure lightweight design, the quality of the rack was also taken as the objective function. On the basis of objective function, design variables and constraints, the mathematical model of multi-objective optimization of rack was constructed. Then, based on Hammersley sampling method, totally 42 groups of test samples were selected according to the constraint conditions to design the experiment, and the corresponding target values were calculated. According to the experimental design results, the moving least square method was determined and the corresponding response surface was fitted. Among them, the complex correlation coefficient R^2 of the first-order modal frequency response surface model was 0.997 4, and the complex correlation coefficient R^2 of the mass response surface model was 0.999 9, which were all higher than the accuracy required by the fitting model of 0.9, which met the design requirements. Finally, based on response surface methodology and multi-objective genetic algorithm, the structure optimization design for the rack of the orchard ditching fertilizer machine was carried out. The optimization results showed that the first-order modal frequency of the optimized rack of the orchard ditching fertilizer machine was increased by 8.25% from the original value of 35.39 Hz to 38.31 Hz, and was far away from the input frequency of the tractor; the optimized mass was 389 kg, which can meet the requirements of minimum mass when the first-order modal frequency was raised. After optimization, the ditching consistency and fertilization stability of orchard ditching and fertilizing machine were increased by 3.72% and 3.57% respectively compared with those before optimization, and the improvement effect was obvious, which met the requirements of orchard ditching and fertilization production.

Key words: ditching fertilizer machine of orchard; rack; sensitivity analysis; genetic algorithm; multi-objective optimization

0 引言

果树施肥是果园管理中的关键作业环节,施肥质量直接影响果树养分的吸收,合理施肥是保证果树丰产、稳产和增产的重要措施[1-2]。果树施肥的主要形式有深施基肥、土壤追肥、叶面喷肥、树干涂肥等[3-4]。其中,基肥的肥料施用量占全年施肥总量的70%以上,是影响果树产量及品质最重要的阶段[5-6]。我国果园土壤有机质含量低、土地贫瘠,基肥多采用开沟施肥的方式。果园开沟施肥机结构复杂、工作环境恶劣,机架作为其基本载体,在工作时容易因过载和共振而损坏[7-8]。因此,机架在保证整机工作性能和可靠性等方面起着至关重要的作用,是果园开沟施肥机设计的关键环节。

近年来,虚拟样机技术的快速发展,为果园开沟施肥机机架的设计及优化提供了有效手段[9-10]。目前,相关研究在利用 CAD/CAE 软件完成结构静力学分析的基础上,与灵敏度分析相结合,对开沟施肥机的性能进行优化。刘爽等[11]以某联合收获机主机车身框架为研究对象,利用有限元软件对收获机框架模型进行尺寸优化和拓扑优化。廖宇兰等[12]为了提高木薯收获机的工作性能,基于静力学有限元分析和灵敏度分析,建立了多目标优化设计模型,采用模糊物元法和熵权法进行优选,获得了最佳机架结构设计方案。谢斌等[13]分析车架在相应工况下的受力情况,进行车架的疲劳分析与寿命预测,构建了多目标拓扑优化数学模型,进行轻量化设计。MILLS 等[14]基于灵敏度分析对凸轮机构的质量、弹簧刚度、阻尼系数和凸轮转速等参数进行优化设计。STRATIS 等[15]利用灵敏度分析筛选变量,使用基于对比度的果蝇优化算法进行高效桁架优化。上述研究方法为果园开沟施肥机机架结构的优化设计提供了参考,但由于机架结构复杂、受力多样,传统优化方法在机架仿真分析中存在效率低、精度差、周期长等缺点。而多目标遗传算法效率高,用户根据侧重方向选择优化结果,从而可保证优化结果的准确可靠。

本文在保证一阶模态频率提高的基础上,同时确保机架结构质量最轻,对自行研制的果园开沟施肥机机架进行优化设计。首先,建立果园开沟施肥机机架的参数化模型及有限元模型。其次,以一阶模态频率和结构质量为目标,以灵敏度杆件为设计变量,以杆件厚度变化范围为约束条件,对机架进行多目标优化建模。然后,基于 Hammersley 抽样方法完成试验设计,选用移动最小二乘法拟合出对应响应面。最后,基于多目标遗传算法对机架进行结构优化。

1 整机结构与工作原理

1.1 整机结构

如图 1 所示,果园开沟施肥机主要由机架、肥箱、传动系统、开沟机构、排肥机构、导肥机构和覆土

机构等构成，整机主要技术参数如表 1 所示。

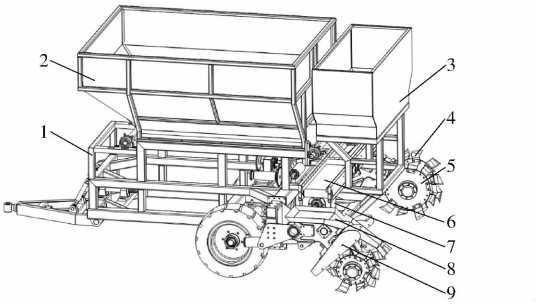


图 1　果园双行开沟施肥机整机结构图

Fig. 1　Structure diagram of orchard double-row ditching fertilizer applicator

1. 机架　2. 有机肥箱　3. 化肥箱　4. 开沟刀　5. 开沟刀盘　6. 肥料传输带　7. 传动箱　8. 导肥板　9. 覆土罩壳

表 1　主要技术参数

Tab. 1　Main technical parameters

参数	数值
配套动力/kW	≥58.8
作业速度/(m·s^{-1})	0.4～1.6
整机尺寸(长×宽×高)/(mm×mm×mm)	4 030×2 470×2 150
开沟深度/mm	0～400
开沟宽度/mm	150～350
开沟深度一致性系数/%	≥95
有机肥施肥量/(kg·m^{-2})	0～2.7
化肥施肥量/(kg·m^{-2})	0～0.7
有机肥箱容积/L	2 450
化肥箱容积/L	650

1.2　工作原理

果园开沟施肥机作业时，拖拉机牵引开沟施肥机前进，并为开沟施肥机的工作提供动力。开沟机构工作，刀盘旋转，开沟刀在切削入土的同时将土抛起。与此同时，施肥机构开始工作，传动系统将动力传递至肥料输送带，将肥料箱中的肥料输送到所开沟中完成施肥作业；最后，开沟装置抛出来的土壤触碰到覆土罩壳后，落入到所开沟槽中，完成土壤回填作业，由此实现开沟、施肥、覆土联合作业。

2　机架模态分析

2.1　机架参数化模型建立

利用 Solidworks 软件建立果园开沟施肥机机架的参数化模型，整体为空间长方体结构，如图 2 所示。机架主体由 15 根横梁、14 根纵梁、22 根竖直支撑梁、12 根斜支撑梁以及 4 个吊耳通过焊接的方式刚性联接而成，通过牵引架与拖拉机相连。

2.2　机架有限元模型建立

将建立的机架模型导入到有限元软件 Hypermesh 中进行有限元建模。为提高仿真结果的准确性，清理模型中的自由边、T 形边以及对结构影响不大的圆角和倒角[16]。由于机架属于简单的管状类零件，故选择抽取中面进行 Shell 网格划分的方法，网格大小选择 10 mm×10 mm，共有 127 353 个节点和 125 336 个网格单元。其中 2D 中的 Qualityindex 功能的 QI 值为 0.01，网格质量较好。机架钢管材料为 Q235，弹性模量为 2.10×10^5 MPa，泊松比为 0.30，密度为 7.85 g/cm^3。各个方管之间的焊接，采用 RBE2 刚性单元进行模拟。约束条件：牵引架上连接管及牵引架下连接管前部的吊耳与牵引架相连；纵梁上的车轴固定板与车桥相连，因此在牵引架上下连接管、车轴固定板处施加固定约束。有限元建模完成后的机架模型如图 3 所示。

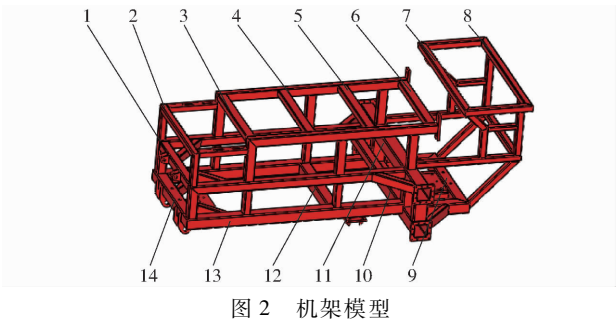


图 2　机架模型

Fig. 2　Frame model

1. 牵引架上连接管　2. 横梁　3. 有机肥箱支撑管 1　4. 有机肥箱支撑管 2　5. 有机肥箱支撑管 3　6. 有机肥箱支撑管 4　7. 化肥箱支撑管 1　8. 化肥箱支撑管 2　9. 变速箱支撑管　10. 液压系统安装管　11. 开沟装置支撑管　12. 车桥安装管　13. 纵梁　14. 牵引架下连接管

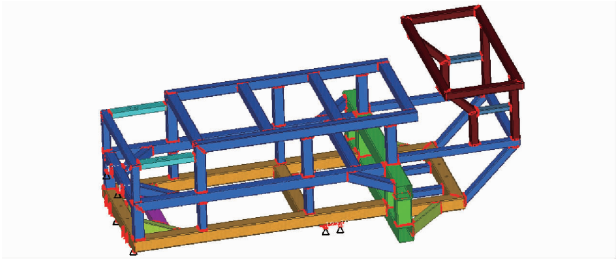


图 3　机架有限元模型

Fig. 3　Frame finite element model

2.3　机架模态分析

采用 Hypermesh 中 Radioss 求解器，对建立的有限元模型进行求解。由于低阶振型对结构的影响程度较大，而高阶振型对结构的影响较小[17-18]，提取机架的前 6 阶模态，固有模态频率和振型描述如表 2，模态振型如图 4 所示。

由表 2 可知，机架的固有频率随着阶次的递增而增加，前 6 阶固有频率范围为 35.39～87.25 Hz。从图 4 可知，机架的一阶和二阶模态振型为化肥箱机架沿 X 轴和 Y 轴的摆动，最大位移分别为 7.16 mm 和 5.92 mm；三阶模态振型主要为整体沿 Y 轴摆动，最大位移为 4.17 mm；四阶模态振型主要

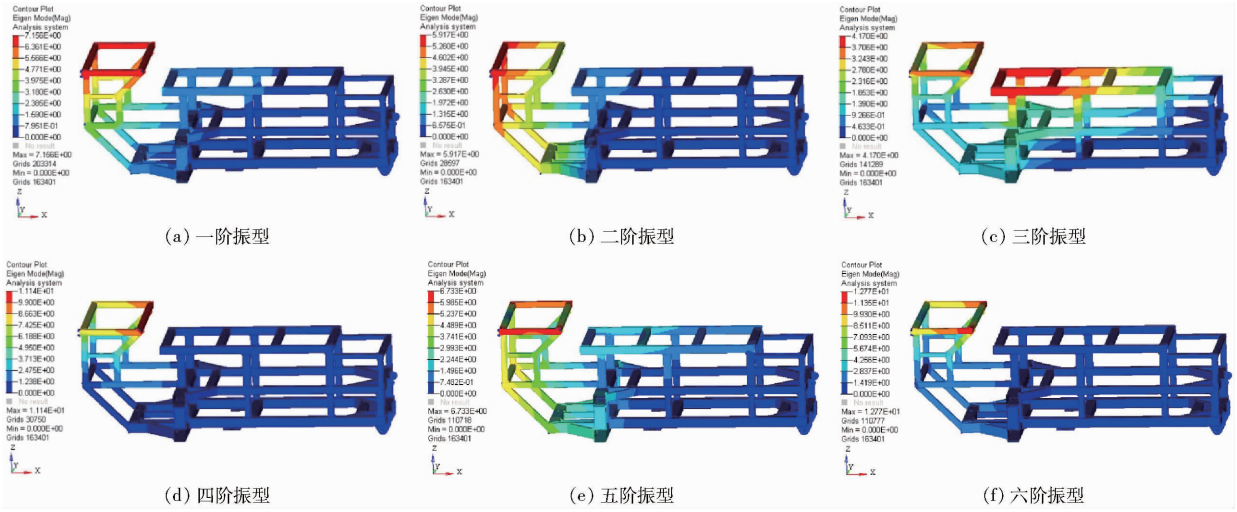
表 2 机架前 6 阶模态频率及振型

Tab. 2 First six modes of frame frequency and model description

阶次	频率/Hz	振型描述	最大位移/mm
1	35.39	化肥箱机架沿 X 轴摆动	7.16
2	42.19	化肥箱机架沿 Y 轴摆动	5.92
3	65.32	整体沿 Y 轴摆动	4.17
4	76.43	化肥箱机架沿 Y 轴摆动	11.10
5	78.61	整体扭转	6.38
6	87.25	化肥箱机架扭转	12.78

为化肥箱机架沿 Y 轴的摆动，最大位移为 11.1 mm；五阶模态振型为整体的扭转变形，最大位移为 6.38 mm；六阶主要为化肥箱机架的扭转变形，最大位移为 12.78 mm。通过前 6 阶振型图可以看出，机架在化肥箱处容易产生变形且变形最大。

整机在工作过程中受到的外界激励主要有开沟作业时的振动、果园行间不平引起的振动、拖拉机引起的振动等。由于拖拉机的激励频率比较小，并且轮胎对振动的高频部分能起到衰减作用，所以传到



(a) 一阶振型 (b) 二阶振型 (c) 三阶振型

(d) 四阶振型 (e) 五阶振型 (f) 六阶振型

图 4 机架前 6 阶模态振型图

Fig. 4 Vibration mode diagrams of the first six modes of frame

机架主要是中低频 0 ~ 35 Hz[19-20]；拖拉机输出频率范围为 9 ~ 12.67 Hz，则开沟部件工作频率范围为 1.91 ~ 7.58 Hz；开沟施肥机以 0.8 ~ 1.2 m/s 的作业速度行驶时，路谱频率范围在 0.02 ~ 6 Hz 之间。

模态分析结果表明，开沟施肥机机架的一阶固有频率为 35.39 Hz，与拖拉机输出频率 35 Hz 接近，容易产生共振。为了避免共振，需在果园开沟施肥机机架满足刚度、强度的基础上，对机架进行优化设计，减小振动变形，提高固有频率，保证质量最小。由于机架的整体结构已经确定，只有通过改变机架横梁的厚度，来优化机架结构。

3 灵敏度分析

为减少计算机运算时间和后期处理结果的负担，利用灵敏度分析的方法，找出机架模态频率的灵敏部件、不灵敏部件和负灵敏部件，加厚灵敏部件可以增强机架的结构性能，减薄不灵敏部件和负灵敏部件可以实现机架轻量化[21]。

3.1 灵敏度分析理论

结构灵敏度分析是结构优化的基础和前提，它反映设计变量的改变对响应的影响程度[22]。在本研究中，可以将灵敏度分析理解为由于果园开沟施肥机机架各部件厚度的改变而引起的机架固有频率的变化率。由于机架的结构阻尼较小，可简化为无阻尼多自由度模型[23-24]。一个多自由度的无阻尼振动系统可表示为

$$\boldsymbol{m}\ddot{\boldsymbol{X}} + \boldsymbol{K}\boldsymbol{X} = \boldsymbol{F} \tag{1}$$

当系统作用力为零时，振动方程为

$$\boldsymbol{m}\ddot{\boldsymbol{X}} + \boldsymbol{K}\boldsymbol{X} = \boldsymbol{O} \tag{2}$$

式中 $\boldsymbol{K}$——$n \times n$ 的刚度矩阵

$\boldsymbol{m}$——$n \times n$ 的质量矩阵

$\ddot{\boldsymbol{X}}$——物理坐标下加速度

$\boldsymbol{X}$——物理坐标下位移

$\boldsymbol{O}$——零矩阵

其特征方程可以记为

$$(\boldsymbol{K} - \omega_i^2 \boldsymbol{m})\boldsymbol{X}_i = \boldsymbol{O} \tag{3}$$

式中 ω_i——系统固有圆频率，rad/s

$\boldsymbol{X}_i$——模态振型向量

采用直接求导法计算固有频率 ω_i 对厚度 d 的灵敏度，将式(3)对 d 取偏导数且两边同时左乘 $\boldsymbol{X}_i^{\mathrm{T}}$ 可得

$$\boldsymbol{X}_i^{\mathrm{T}}(\boldsymbol{K} - \omega_i^2 \boldsymbol{m})\frac{\partial \boldsymbol{X}_i}{\partial d} + \boldsymbol{X}_i^{\mathrm{T}}\left(\frac{\partial K}{\partial d} - \omega_i \frac{\partial m}{\partial d} - \frac{\partial \omega_i}{\partial d}\boldsymbol{m}\right)\boldsymbol{X}_i = \boldsymbol{O} \tag{4}$$

式中　d——横梁厚度，mm

解出模态频率的导数，即灵敏度 S 为

$$S=\frac{\partial\omega_i}{\partial d}=\frac{\boldsymbol{X}_i^{\mathrm{T}}(\boldsymbol{K}-\omega_i^2\boldsymbol{m})\dfrac{\partial X_i}{\partial d}}{\boldsymbol{X}_i^{\mathrm{T}}\boldsymbol{m}\boldsymbol{X}_i} \tag{5}$$

3.2　灵敏度分析结果

根据果园开沟施肥机开沟一致性及施肥稳定性的要求，结合机架模态分析结果，选择牵引架连接处、车轴支撑处、作业及调整支撑处、化肥箱支撑处及有机肥箱支撑处为灵敏度分析目标。对选出的 12 个机架的横向杆件进行灵敏度建模分析，以厚度为设计变量，以机架的总体质量为目标，将一阶模态频率作为约束条件，进行一阶模态频率灵敏度计算，求解出机架各结构参数对一阶模态频率的灵敏度如表 3 所示。

表 3　机架一阶模态频率对性能杆件厚度的灵敏度

Tab. 3　Sensitivity of the first mode frequency of frame to thickness of performance member

序号	部件	板厚/mm	模态灵敏度/(Hz·mm^{-1})
1	牵引架上连接管	4	1.00×10^{-2}
2	有机肥箱支撑管 1	4	3.00×10^{-2}
3	有机肥箱支撑管 2	4	3.91×10^{-2}
4	有机肥箱支撑管 3	4	-5.71×10^{-3}
5	有机肥箱支撑管 4	4	-3.07×10^{-2}
6	化肥箱支撑管 1	3.5	−1.27
7	化肥箱支撑管 2	3.5	−1.42
8	变速箱支撑管	5.8	0.64
9	液压系统安装管	5	0.68
10	开沟装置支撑管	5	0.73
11	车桥安装管	5.8	2.15×10^{-2}
12	牵引架下连接管	5.8	2.96×10^{-3}

从机架各结构参数对一阶模态频率的灵敏度中看出，一阶模态频率分别对 4、5、6、7 号杆件的厚度的灵敏度是负值，说明增大杆件的厚度会使机架一阶模态频率减弱；而对其余杆件厚度灵敏度是正值，说明增大相应杆件的厚度会使机架的模态频率提高。

根据灵敏度分析结果，综合考虑增加机架的一阶模态频率以及降低机架重量，剔除模态灵敏度数量级在 0.01 以下的部件，选择化肥箱支撑管 1、化肥箱支撑管 2、变速箱支撑管、液压系统安装管、开沟装置支撑管作为优化的杆件，其中变速箱支撑管、液压系统安装管、开沟装置支撑管进行加厚，化肥箱支撑管 1、化肥箱支撑管 2 进行减薄，需要优化的机架各杆件如图 5 所示。

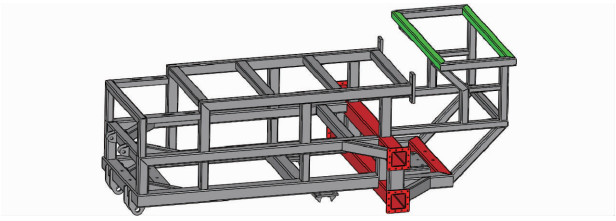


图 5　需要优化的机架杆件示意图

Fig. 5　Schematic of frame member to be optimized

4　机架多目标优化设计

4.1　机架多目标优化流程

目前常用的多目标优化算法有：强度帕累托进化算法、粒子群算法、遗传算法、禁忌搜索算法、蚁群算法等[25]。其中 FONSECA 提出的多目标遗传算法(MOGA)，因为易于执行且效率较高，被广泛应用于各类优化问题分析[26]。为了缩短计算时间同时保证准确性，选择 MOGA 算法对机架模型进行优化。

基于多目标遗传算法的果园开沟施肥机机架优化设计方法，具体步骤如下：

(1)建立果园开沟施肥机机架的参数化模型及有限元模型。

(2)通过模态分析找出需要优化的区域，从而确定目标函数；通过机架灵敏度分析，找出灵敏度杆件，确定设计变量及约束条件。根据目标函数、设计变量、约束条件构建多目标优化的数学模型。

(3)基于 Hammersley 抽样方法，按约束条件选取 42 组试验样本进行试验设计，并计算其对应的目标值。

(4)根据试验设计结果，选用移动最小二乘法拟合出对应响应面。

(5)基于多目标遗传算法结合响应面结果，进行优化求解。

(6)根据优化结果，重新构造机架的三维模型，再次完成模态分析验证优化结果。

基于多目标遗传算法的果园开沟施肥机机架优化设计方法流程如图 6 所示。

4.2　机架多目标优化数学模型的建立

根据机架的模态分析结果可知，果园开沟施肥机的激励与机架的一阶固有模态频率接近，容易产生共振。为提高模态频率，常用办法是增加相应部分的厚度，但这种办法不符合现代农业机械结构轻量化设计的要求[27]，故将开沟施肥机机架的质量 m 也设定为一个优化目标。根据结构灵敏度分析结果，将开沟施肥机机架各高灵敏度杆件厚度作为设计变量，即设化肥箱支撑管 1 为 x_1、化肥箱支撑管 2 为 x_2、变速箱支撑管为 x_3、液压系统安装管为 x_4、开

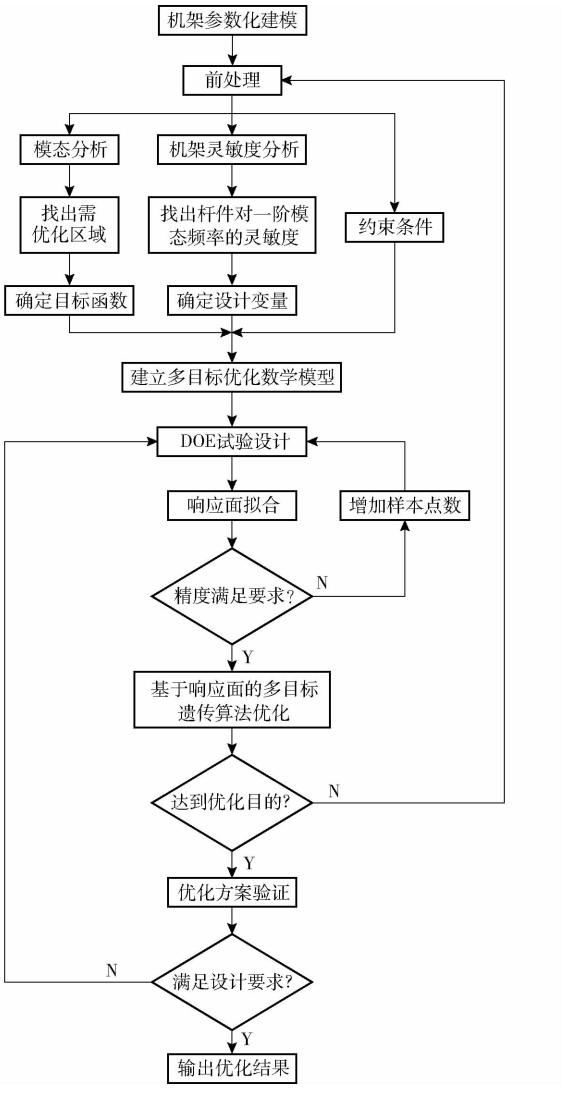


图 6 基于遗传算法的机架优化设计流程图

Fig. 6 Flow chart of frame optimization design based on genetic algorithm

沟装置支撑管为 x_5,其中机架各杆件设计变量和一阶模态频率限定范围如表 4。

表 4 机架各杆件厚度和其一阶模态频率初值及其变化范围

Tab. 4 Initialvaluc and vaniation range of com poncnts' thicknccss and the first order modal frequcncy of boat-type tractor rack

变量	x_1/mm	x_2/mm	x_3/mm	x_4/mm	x_5/mm	一阶模态频率/Hz
初值	3.5	3.5	5.8	5	5	35.39
下限	2.5	2.5	3	3	3	40
上限	7.5	7.5	8	8	8	

在果园开沟施肥机机架的优化设计中,为避免一阶模态频率与拖拉机输入频率相近,同时保证质量最小,获得最优的设计参数组合,$\boldsymbol{X}=(x_1,x_2,x_3,x_4,x_5)$定义了 5 个设计变量,并将开沟施肥机机架的质量作为目标函数,一阶模态频率作为优化响应,得到开沟施肥机机架结构优化设计的数学模型

$$\begin{cases}\min F_m(\boldsymbol{X})=F(x_1,x_2,x_3,x_4,x_5)\\ F_f(x_1,x_2,x_3,x_4,x_5)\geqslant 40\ \text{Hz}\\ \text{s.t.}\begin{cases}2.5\ \text{mm}\leqslant x_1\leqslant 7.5\ \text{mm}\\ 2.5\ \text{mm}\leqslant x_2\leqslant 7.5\ \text{mm}\\ 3\ \text{mm}\leqslant x_3\leqslant 8\ \text{mm}\\ 3\ \text{mm}\leqslant x_4\leqslant 8\ \text{mm}\\ 3\ \text{mm}\leqslant x_5\leqslant 8\ \text{mm}\end{cases}\end{cases}\tag{6}$$

式中 $F_m(\boldsymbol{X})$——设计变量关于机架质量的函数

$F_f(\boldsymbol{X})$——设计变量关于一阶模态频率的函数

4.3 试验设计

试验设计(Design of experience,DOE)方法有很多,如全因子设计、部分因子设计、拉丁超立方、哈默斯里等[28]。为了让试验点尽量均匀地分布在设计空间,且适用高度非线性的响应面拟合,本文选用哈默斯里(Hammersley)试验设计方法。基于 Hammersley 抽样方法,按约束条件中试验因素水平的取值范围,获得 42 组试验样本并通过 Hyperstudy 软件得到优化目标的结果,见表 5。

表 5 试验设计及结果

Tab. 5 Experimental design and results

试验号	x_1/mm	x_2/mm	x_3/mm	x_4/mm	x_5/mm	f/Hz	m/t
1	2.62	5.00	4.67	4.00	3.71	33.94	0.341
2	2.74	3.75	6.33	5.00	4.43	36.26	0.352
3	2.86	6.25	3.56	6.00	5.14	33.03	0.361
4	2.98	3.13	5.22	7.00	5.86	37.28	0.368
5	3.10	5.63	6.89	3.20	6.57	34.23	0.360
6	3.21	4.38	4.11	4.20	7.29	35.19	0.361
7	3.33	6.88	5.78	5.20	3.10	31.88	0.352
8	3.45	2.81	7.44	6.20	3.82	36.79	0.358
9	3.57	5.31	3.19	7.20	4.53	33.17	0.363
10	3.69	4.06	4.85	3.40	5.24	34.39	0.347
11	3.81	6.56	6.52	4.40	5.96	32.79	0.366
12	3.93	3.44	3.74	5.40	6.67	35.41	0.363
13	4.05	5.94	5.41	6.40	7.39	33.62	0.382
14	4.17	4.69	7.07	7.40	3.20	33.89	0.366
15	4.29	7.19	4.30	3.60	3.92	30.42	0.347
16	4.40	2.66	5.96	4.60	4.63	35.51	0.351
17	4.52	5.16	7.63	5.60	5.35	33.71	0.371
18	4.64	3.91	3.37	6.60	6.06	34.07	0.368
19	4.76	6.41	5.04	7.60	6.78	32.52	0.387
20	4.88	3.28	6.70	3.80	7.49	35.20	0.367
21	5.00	5.78	3.93	4.80	3.31	30.96	0.348
22	5.12	4.53	5.59	5.80	4.02	32.88	0.359
23	5.24	7.03	7.26	6.80	4.73	31.47	0.378
24	5.36	2.97	4.48	7.80	5.45	34.54	0.373
25	5.48	5.47	6.15	3.04	6.16	31.97	0.360
26	5.60	4.22	7.81	4.04	6.88	33.71	0.371
27	5.71	6.72	3.06	5.04	7.59	30.84	0.375
28	5.83	3.59	4.73	6.04	3.41	32.63	0.355
29	5.95	6.09	6.40	7.04	4.12	31.32	0.374
30	6.07	4.84	3.62	3.24	4.84	30.93	0.347
31	6.19	7.34	5.28	4.24	5.55	29.98	0.366
32	6.31	2.58	6.95	5.24	6.27	34.35	0.370
33	6.43	5.08	4.17	6.24	6.98	31.91	0.379
34	6.55	3.83	5.84	7.24	7.69	33.49	0.390
35	6.67	6.33	7.51	3.44	3.51	30.00	0.355
36	6.79	3.20	3.25	4.44	4.22	31.59	0.348
37	6.90	5.70	4.91	5.44	4.94	30.57	0.367
38	7.02	4.45	6.58	6.44	5.65	32.13	0.378
39	7.14	6.95	3.80	7.44	6.37	29.94	0.386
40	7.26	2.89	5.47	3.64	7.08	32.73	0.365
41	7.38	5.39	7.14	4.64	7.80	31.51	0.384
42	7.50	4.14	4.36	5.64	3.61	30.66	0.357

4.4　响应面拟合

响应面法是一种试验条件寻优的方法，适宜拟合优化目标和试验因素之间复杂的非线性响应关系[29]。Hyperstudy 中主要的近似模型方法有最小二乘法（Leastsquares regression，LSR）、移动最小二乘法（Moving least squares method，MLSM）、超级克里金（Hyper Kriging，HK）和径向基函数（Radial basis function，RBF）。为了提高拟合面的精度及可靠性，选择移动最小二乘法进行拟合。

在拟合时，采样点不完全落在响应曲面上，因此会产生一定误差，所以拟合的精度通常由决定系数 R^2 来表示[30]。本文中，一阶模态频率响应面模型的决定系数 $R^2=0.997\,4$，质量响应面模型的决定系数 $R^2=0.999\,9$，均大于近似模型要求的拟合精度 0.9，拟合精度较高，满足分析要求。近似模型中的部分响应面如图 7、8 所示。

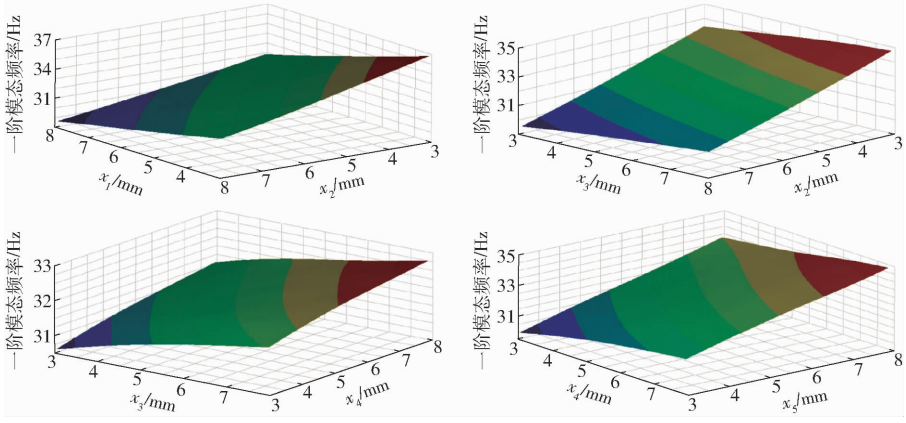


图 7　杆件厚度与一阶模态频率的部分响应面

Fig. 7　Partial response surface of member thickness and the first mode frequency

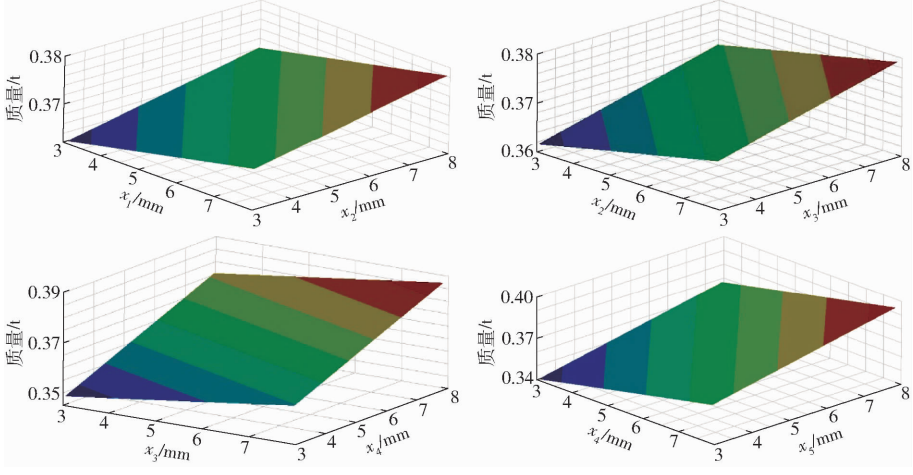


图 8　杆件厚度与质量的部分响应面

Fig. 8　Partial response surface of member thickness and mass

4.5　优化设计

在 MOGA 算法中设置最大代数为 50，种群规模为 184。待处理完成后，按照遗传算法的优化流程完成机架高灵敏度杆件厚度的优化。首先，优化算法随机产生数量为 n 的初始种群；其次进行非支配排序、适合度评价；然后经过选择、交叉、变异操作产生第一代子代种群。自动选取更优的个体，使得种群向 Pareto 前沿移动。接下来，重复上述过程直到迭代次数达到最大值。

4.6　结果分析及验证

经过 8 318 次寻优计算，得到的 Pareto 前沿如图 9 所示。优化结果有多种选择，本文以机架的一阶模态频率最大为侧重点选择优化方案，最终选择最优解的各杆件厚度、一阶模态频率、机架总质量变化如表 6 所示。

由表 6 可知，优化后果园开沟施肥机机架化肥

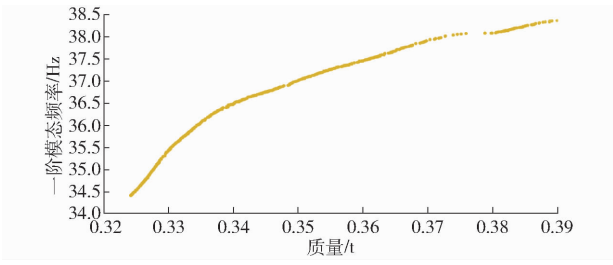


图 9　优化后 Pareto 图

Fig. 9　Pareto diagram after optimization

表 6 优化前后结构设计方案对比

Tab. 6 Comparison of structural design schemes before and after optimization

方案	x_1/mm	x_2/mm	x_3/mm	x_4/mm	x_5/mm	一阶固有频率/Hz	质量/kg
优化前	3.5	3.5	5.75	5.0	5.0	35.39	355
优化后	2.5	2.5	7.50	8.00	8.00	38.31	389

箱支撑管 1、化肥箱支撑管 2 厚度减小,而其余优化杆件厚度增加,优化结果与前期机架一阶模态频率对性能杆件厚度的灵敏度分析结果预测的趋势相符,说明优化结果准确可靠;一阶模态频率由原来的 35.39 Hz 提高到 38.31 Hz,提高了 8.25%,从而使一阶模态频率高于输入频率 35 Hz,避免共振;质量为 389 kg,满足在提升一阶模态频率下质量最小的目标。对优化后的机架模型进行模态分析,得到其前 6 阶固有模态频率如表 7 所示。

表 7 优化后果园开沟施肥机机架前 6 阶固有模态频率

Tab. 7 Top 6 rank natural frequency of optimized orchard ditching fertilizer machine frame

阶次	1	2	3	4	5	6
频率/Hz	38.31	45.38	68.40	68.76	81.67	86.67

为验证优化结果的准确性,2020 年 1 月在高密市益丰机械有限公司试验基地开展性能试验,图 10 为果园开沟施肥机性能试验场景。测试方法及指标参照 GB/T 5262—2008《农业机械试验条件测定方法的一般规定》及 NY/T 740—2003《开沟机械作业质量评价试验方法》。试验条件为:天气晴,气温 -4 ~ 3℃,西南风,风速小于 2 km/h,空气相对湿度 64%,试验地土质为壤土,绝对含水率 16.7%,地面相对平整,面积约 650 m^2。试验结果表明,机架在果园开沟施肥机上配合良好,工作时各部件运行稳定,优化前后的对比如表 8 所示。



图 10 性能试验作业场景

Fig. 10 Operation scene of performance test

表 8 优化前后开沟施肥效果的对比

Tab. 8 Comparison of ditching and fertilization effects before and after optimization %

指标	开沟深度一致性系数	施肥稳定性系数
优化前	91.36	90.23
优化后	94.76	93.45
变化率	3.72	3.57

试验结果表明,优化后果园开沟施肥机作业的开沟一致性系数和施肥稳定性系数比优化前分别提升 3.72%、3.57%,提升效果明显,满足果园开沟施肥生产要求。

5 结论

(1)建立果园开沟施肥机机架的参数化模型,然后基于实体机架建立机架的有限元模型。

(2)通过模态分析,得出机架的固有频率及振型,研究其对整机动态性能的影响,将一阶模态频率为目标函数;通过机架灵敏度分析,得到各杆件厚度对一阶模态频率的灵敏度。将灵敏度杆件的厚度设定为设计变量,将其厚度变化范围设定为约束条件;根据现代农机结构轻量化设计的要求,将机架的质量也作为目标函数。以目标函数、设计变量、约束条件为基础,构建多目标优化的数学模型。

(3)基于 Hammersley 抽样方法,按约束条件选取 42 组试验样本进行试验设计,并计算其对应的目标值。根据试验设计结果,选择移动最小二乘法拟合出对应响应面。其中,一阶模态频率响应面模型的决定系数 $R^2 = 0.9974$,质量响应面模型的决定系数 $R^2 = 0.9999$,均大于拟合模型要求的精度 0.9,拟合精度较高,满足分析要求。

(4)基于响应面以及多目标遗传算法对果园开沟施肥机机架进行结构优化设计。优化结果表明:优化后的果园开沟施肥机机架第一阶模态频率由原来的 35.39 Hz 提高到 38.31 Hz,提高了 8.25%,且远离拖拉机的输入频率 35 Hz;质量为 389 kg,满足在提升一阶模态频率下,质量最小的要求。优化后果园开沟施肥机作业的开沟一致性系数和施肥稳定性系数提升效果明显,满足果园开沟施肥生产要求。

参 考 文 献

[1] 韩冰,刘斐,慕军营,等. 一种果园挖坑施肥机结构设计[J]. 农机化研究,2015,37(3):123 - 125,129.
HAN Bing, LIU Fei, MU Junying, et al. Structural design of orchard digging fertilizing machinery[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research,2015,37(3):123 - 125,129. (in Chinese)

[2] 翟长远,杨硕,张波,等. 支持故障报警的果园对靶变量排肥系统[J/OL]. 农业机械学报,2015,46(10):16 - 23.

ZHAI Changyuan, YANG Shuo, ZHANG Bo, et al. Orchard toward-target variable-rate fertilizer system supporting fault alarming[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2015,46(10):16 - 23. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? file_no=20151003&flag=1&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2015.10.003. (in Chinese)

[3] 张建兵,杨劲松,姚荣江,等. 有机肥与覆盖方式对滩涂围垦农田水盐与作物产量的影响[J]. 农业工程学报,2013,29(15):116 - 125.
ZHANG Jianbing, YANG Jinsong, YAO Rongjiang, et al. Dynamics of soil water, salt and crop growth under farmyard manure and mulching in coastal tidal flat soil of northern Jiangsu Province[J]. Transactions of the CSAE, 2013, 29(15): 116 - 125. (in Chinese)

[4] 侯晓静,杨劲松,王相平,等. 不同施肥方式下滩涂围垦农田土壤有机碳及团聚体有机碳的分布[J]. 土壤学报,2015,52(4):818 - 827.
HOU Xiaojing, YANG Jingsong, WANG Xiangping, et al. Effects of fertilization on soil organic carbon and distribution of soc in aggregates in tidal plat polders[J]. Acta Pedologica Sinica, 2015,52(4):818 - 827. (in Chinese)

[5] 张林森,李雪薇,王晓琳,等. 根际注射施肥对黄土高原苹果氮素吸收利用及产量和品质的影响[J]. 植物营养与肥料学报,2015,21(2):421 - 430.
ZHANG Linsen, LI Xuewei, WANG Xiaolin, et al. Effects of fertilization with injection to the rhizosphere on nitrogen absorption and utilization, fruit yield and quality of apple in the Loess Plateau[J]. Journal of Plant Nutrition and Fertilizer, 2015,21(2): 421 - 430. (in Chinese)

[6] 孙权,王静芳,王素芳,等. 不同施肥深度对酿酒葡萄叶片养分和产量及品质的影响[J]. 果树学报,2007(4):455 - 459.
SUN Quan, WANG Jingfang, WANG Sufang, et al. Influence of fertilization depth on NPK content in leaves, yield and fruit quality of grapevine[J]. Journal of Fruit Science, 2007(4):455 - 459. (in Chinese)

[7] 施展,张衍林,王凤武,等. 基于 ANSYS 的双侧果园开沟机机架模态分析与结构改进[J]. 华中农业大学学报,2020,39(2):150 - 159.
SHI Zhan, ZHANG Yanlin, WANG Fengwu, et al. Modal analyses and frame improvement of the ANSYS based orchard double-sided cutter ditching machine[J]. Journal of Huazhong Agricultural University, 2020,39(2):150 - 159. (in Chinese)

[8] 蒋亚军,廖宜涛,秦川,等. 4SY - 2.9 型油菜割晒机机架振动分析及改进[J]. 农业工程学报,2017,33(9):53 - 60.
JIANG Yajun, LIAO Yitao, QIN Chuan, et al. Vibration analysis and improvement for frame of 4SY - 2.9 typed rape windrower [J]. Transactions of the CSAE, 2017,33(9): 53 - 60. (in Chinese)

[9] 姜红花,白鹏,刘理民,等. 履带自走式果园自动对靶风送喷雾机研究[J/OL]. 农业机械学报,2016,47(增刊):189 - 195.
JIANG Honghua, BAI Peng, LIU Limin, et al. Caterpillar self-propelled and air-assisted orchard sprayer with automatic target spray system[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2016,47(Supp):189 - 195. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? file_no=2016s029&flag=1&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2016.S0.029. (in Chinese)

[10] 郝朝会,杨学军,刘立晶,等. 果园多功能动力底盘设计与试验[J/OL]. 农业机械学报,2018,49(12):66 - 73,92.
HAO Zhaohui, YANG Xuejun, LIU Lijing, et al. Design and experiment of multifunctional dynamic chassis for orchard[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018,49(12):66 - 73,92. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? file_no=20181208&flag=1&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.12.008. (in Chinese)

[11] 刘爽,徐红梅,周杰,等. 基于模态的联合收获机车身框架振动特性分析与结构优化[J]. 华中农业大学学报,2018,37(3):108 - 116.
LIU Shuang, XU Hongmei, ZHOU Jie, et al. Analyzing vibration characteristics and optimizing structure of combine harvester body frame based on modal analysis[J]. Journal of Huazhong Agricultural University, 2018,37(3):108 - 116. (in Chinese)

[12] 廖宇兰,刘世豪,孙佑攀,等. 基于灵敏度分析的木薯收获机机架结构优化设计[J/OL]. 农业机械学报,2013,44(12):56 - 61.
LIAO Yulan, LIU Shihao, SUN Youpan, et al. Structural optimization for rack of cassava harvester based on sensitivity analysis [J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013,44(12):56 - 61. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? file_no=20131210&flag=1&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2013.12.010. (in Chinese)

[13] 谢斌,温昌凯,杨子涵,等. 基于实测载荷的蔬菜田间动力机械车架结构优化[J/OL]. 农业机械学报,2018,49(增刊):463 - 469.
XIE Bin, WEN Changkai, YANG Zihan, et al. Structure optimization of frame for field vegetable power machinery based on measured load data[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018,49(Supp.):463 - 469. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? file_no=2018s063&flag=1&journal_id=jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.S0.063. (in Chinese)

[14] MILLS J K, NOTASH L, FENTON R G. Optimal design and sensitivity analysis of flexible cam mechanisms[J]. Mechanism and Machine Theory, 1993, 28: 563 - 581.

[15] STRATIS K, JAMES G, MICHAEL E F. Efficient truss optimization using the contrast-based fruit fly optimization algorithm

[J]. Computers and Structures,2017, 182:137 - 148.

[16] 陈志,周林,赵博,等. 玉米收获机底盘车架疲劳寿命研究[J]. 农业工程学报,2015,31(20):19 - 25.
CHEN Zhi, ZHOU Lin, ZHAO Bo, et al. Study on fatigue life of frame for corn combine chassis machine[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(20): 19 - 25. (in Chinese)

[17] 李发宗,童水光,王相兵. 基于模态分析的液压挖掘机工作装置动态优化设计[J/OL]. 农业机械学报,2014,45(4):28 - 36.
LI Fazong, TONG Shuiguang, WANG Xiangbing. Dynamic optimization design for working device of hydraulicexcavator based on modal analysis[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2014, 45(4): 28 - 36. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? file_no = 20140405&flag = 1&journal_id = jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2014.04.005. (in Chinese)

[18] 陈学前,沈展鹏,刘信恩. 基于响应面与灵敏度分析的区间不确定性参数识别方法[J]. 振动与冲击,2019,38(16):267 - 273.
CHEN Xueqian, SHEN Zhanpeng, LIU Xinen. A method of interval uncertain parameter identification based ona response surface model and sensitivity analysis[J]. Journal of Vibration and Shock, 2019, 38(16): 267 - 273. (in Chinese)

[19] 周明刚,张露,陈源,等. 基于灵敏度分析的船式拖拉机机架结构优化设计[J]. 农业工程学报,2016,32(12):54 - 60.
ZHOU Minggang, ZHANG Lu, CHEN Yuan, et al. Structural optimization for rack of boat-type tractor based on sensitivity analysis[J]. Transactions of the CSAE, 2016, 32(12): 54 - 60. (in Chinese)

[20] 刘孟楠,周志立,徐立友,等. 基于随机载荷功率谱的电动拖拉机复合能量系统研究[J/OL]. 农业机械学报,2018,49(2):358 - 366.
LIU Mengnan, ZHOU Zhili, XU Liyou, et al. Electric tractor energy system and management strategy research based on load power spectral density[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2018, 49(2): 358 - 366. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? file_no = 20180247&flag = 1&journal_id = jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2018.02.047. (in Chinese)

[21] 肖宏儒,赵映,丁文芹,等. 1KS60 - 35X 型果园双螺旋开沟施肥机刀轴设计与试验[J]. 农业工程学报,2017,33(10):32 - 39.
XIAO Hongru, ZHAO Ying, DING Wenqin, et al. Design and experiment on blade shaft of 1KS60 - 35X type orchard double-helix trenching and fertilization machine[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(10): 32 - 39. (in Chinese)

[22] 陈剑,杜选福,施斐博. 基于加权相对灵敏度的驾驶室结构轻量化[J]. 中国机械工程,2016,27(24):3402 - 3407.
CHEN Jian, DU Xuanfu, SHI Feibo. Applications of weighted relative sensitivity analyses in lightweighting of cab structures [J]. China Mechanical Engineering, 2016, 27(24):3402 - 3407. (in Chinese)

[23] 黄云林,李青林,姚成建. 联合收获机脱粒滚筒模态分析与结构参数优化[J]. 农机化研究,2019,41(12):30 - 36.
HUANG Yunlin, LI Qinglin, YAO Chengjian. Modal analysis and structural parameter optimization of threshing cylinder of combine harvester[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2019, 41(12): 30 - 36. (in Chinese)

[24] 陈树人,韩红阳,卢强. 4LZ - 2.0 型联合收获机割台模态分析[J]. 农业机械学报,2012,43(增刊):90 - 94.
CHEN Shuren, HAN Hongyang, LU Qiang. Modal analysis of header for type 4LZ - 2.0 combine harvester[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(Supp.): 90 - 94. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? file_no = 2012s18&flag = 1&journal_id = jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2012.S0.018. (in Chinese)

[25] 魏心泉,王坚. 多目标资源优化分配问题的 Memetic 算法[J]. 控制与决策,2014,29(5):809 - 814.
WEI Xinquan, WANG Jian. Hybrid effective Memetic algorithm for multi-objective resource allocation problem[J]. Control and Decision, 2014, 29(5): 809 - 814. (in Chinese)

[26] FONSECA C M, FLEMING P J. Genetic algorithms for multiobjective optimization: formulation discussion and generalization[C]// Proceedings of the Fifth International Conference on Genetic Algorithms, California, 1993.

[27] 刘宏新,苏航,李金龙,等. 滚筒式免耕播种机构交互式优化设计系统研究[J/OL]. 农业机械学报,2019,50(3):58 - 68.
LIU Hongxin, SU Hang, LI Jinlong, et al. Interactive optimal design system of drum-type no-till planter mechanism[J/OL]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2019, 50(3): 58 - 68. http://www.j-csam.org/jcsam/ch/reader/view_abstract.aspx? file_no = 20190306&flag = 1&journal_id = jcsam. DOI:10.6041/j.issn.1000-1298.2019.03.006. (in Chinese)

[28] 胡昌华,扈晓翔,骆功纯. 基于试验设计与弹道仿真的制导工具误差快速评价方法[J]. 中国惯性技术学报,2007,15(5):542 - 545.
HU Changhua, HU Xiaoxiang, LUO Gongchun. Fast evaluating methods on guidance instrument error based on experiment design and trajectory simulation[J]. Journal of Chinese Inertial Technology, 2007, 15(5): 542 - 545. (in Chinese)

[29] 陈洪武,彭聪聪,田铖,等. 基于响应面法对桁架结构形状的优化设计[J]. 工程设计学报,2018,25(4):457 - 464.
CHEN Hongwu, PENG Congcong, TIAN Cheng, et al. Optimal design for truss structure shape based on response surface method[J]. Chinese Journal of Engineering Design, 2018, 25(4): 457 - 464. (in Chinese)

[30] 王俊,申立中,杨永忠,等. 基于响应曲面法的非道路用高压共轨柴油机设计点优化标定[J]. 农业工程学报,2017,33(3):31 - 39.
WANG Jun, SHEN Lizhong, YANG Yongzhong, et al. Optimizing calibration of design points for non-road high pressure common rail diesel engine base on response surface methodology[J]. Transactions of the CSAE, 2017, 33(3): 31 - 39. (in Chinese)