

doi:10.6041/j.issn.1000-1298.2013.12.010

基于灵敏度分析的木薯收获机机架结构优化设计*

廖宇兰¹ 刘世豪¹ 孙佑攀² 马庆芬¹ 林 茂¹

(1. 海南大学机电工程学院, 海口 570228; 2. 中国长安汽车集团股份有限公司四川建安车桥分公司, 雅安 625700)

摘要: 为了提高木薯收获机的工作性能, 对其机架结构进行了多目标优化设计。在 CAD/CAE 协同设计平台下, 对木薯收获机的机架进行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, 求解后得到了 6 组非劣解。在所得 6 组优化设计方案和原方案中, 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。优化设计前、后的对比分析表明, 机架质量减小 4.29% 情况下, 最大变形减小 27.04%, 从而证明所提出的基于灵敏度分析的机架结构多目标优化设计方法是合理可行的。

关键词: 木薯收获机 机架 轻量化 灵敏度分析 优化设计

中图分类号: S225.7¹; S220.2 文献标识码: A 文章编号: 1000-1298(2013)12-0056-06

Structural Optimization for Rack of Cassava Harvester Based on Sensitivity Analysis

Liao Yulan¹ Liu Shihao¹ Sun Youpan² Ma Qingfen¹ Lin Mao¹

(1. College of Mechanical and Electrical Engineering, Hainan University, Haikou 570228, China
2. Sichuan Jian'an Branch, China Changan Automobile Group Co., Ltd., Yaan 625700, China)

Abstract: In order to improve the working performance of cassava harvester, multi-objective optimization design for the rack of the harvester was conducted. Under the CAD/CAE integrated design platforms, the statics finite element analysis and sensitivity analysis of the original rack were executed. Based on the above analysis, the multi-objective optimization design model for the rack was built, and six groups of non-inferior solution were obtained. From six groups of optimization design schemes and original design scheme, the optimal design scheme was selected by using fuzzy matter-element method and entropy-weight method. Comparative analysis on rack before and after optimization design showed that the rack's mass reduced 4.29% and the maximum deformation reduced 27.04%, which proved that the proposed structural optimization design method for cassava harvester's rack based on sensitivity analysis was reasonable and feasible.

Key words: Cassava harvester Rack Lightweight Sensitivity analysis Optimization design

引言

木薯是一种广泛栽培于热带、亚热带地区的重要主粮作物^[1], 也是我国海南、广东和广西等地区的一种重要经济作物, 种植面积逐年增加, 为了提高木薯产业的生产效率, 木薯收获机械化已是必然趋势。由于我国的木薯收获机研究尚处于起步阶段,

探索木薯收获机的结构优化设计方法, 对于研制成熟机型具有重要的理论意义。木薯收获机的结构组成较为复杂, 机架作为其基本载体, 在田间工作时承受的负荷很大, 搅动土壤量也很大。因此, 机架在保证整机工作性能和可靠性等方面起着非常重要的作用, 是木薯收获机设计的关键环节。

木薯收获机机架结构的传统设计方法主要是依

收稿日期: 2012-10-09 修回日期: 2012-11-11

* 国家自然科学基金资助项目(51365011, 51009044)

作者简介: 廖宇兰, 教授, 主要从事热带作物收获机械设计研究, E-mail: liaoyulan@sina.com

据经验反复修改结构形状和尺寸,从一系列结构尺寸的可变范围内选取有利于机架静、动态性能的一组参数,这难以确保所获取的参数组合是最优方案。近年来,随着虚拟样机技术的迅速推广运用^[2],以 CAD/CAE 软件结合优化算法来提高机械结构的力学性能已成为研究的热点。鲍诺等采用有限元分析软件对辊压机的机架进行结构动态优化设计,降低了机架的振动幅度^[3]。金文明等对液压模锻锤机架进行静态有限元结构分析,得出机架的应力和位移分布规律,并获取应力集中部位^[4]。王琳等为了提高七辊矫正机机架稳定性,采用有限元法对其进行静力分析,选取合适的设计变量对机架进行优化,使整个机架的应力分布更加均匀^[5]。上述研究方法为木薯收获机机架结构的优化设计提供了有益参考,但由于木薯收获机机架结构与受力的复杂性,在机架仿真分析中会导致优化设计难以成功:木薯收获机机架仿真分析是一个反复迭代的过程,机架结构优化设计需要大量的求解时间,这导致优化设计的实用性降低;减轻机架质量和提高力学性能往往是互相冲突的,对机架进行轻量化设计往往导致力学性能下降,结合优化算法对木薯收获机机架进行多目标优化设计求得了非劣解集,也很难科学而快速地从非劣解集中选择一组最佳解。

本文利用有限元分析软件建立木薯收获机机架的参数化模型,在静态分析和灵敏度分析基础上建立多目标优化设计模型,并求解获得非劣解集。采用模糊物元法和熵权法从非劣解集中挑选出一组最优解,实现木薯收获机机架结构的优化设计。

1 木薯收获机机架有限元分析

现代农业机械的结构优化设计通常是多目标优化问题^[6],本文以 4UMS-1 型木薯收获机^[7]的机架为研究对象(图 1),对其进行结构多目标优化设计。

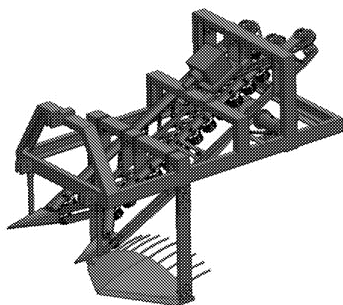


图 1 4UMS-1 型木薯收获机机架
Fig.1 4UMS-1 cassava harvester

1.1 有限元建模

对木薯收获机机架进行有限元分析前,首先在三维软件 Solidworks 中建立如图 2 所示参数化模

型,其中前梁高度为 433 mm,中间梁高度为 100 mm,加强梁高度为 250 mm,后梁高度为 600 mm,底梁长度为 2 000 mm、宽度为 1 000 mm,各段梁厚度均为 10 mm。4UMS-1 型木薯收获机的机架的材料为 HT200,质量为 157.98 kg。该机架起着支撑夹持输送机构和动力传输的作用,还承受挖掘铲在工作过程中所传递的挖掘反力,因此机架必须具有良好的力学性能才能保证整机工作的可靠性。

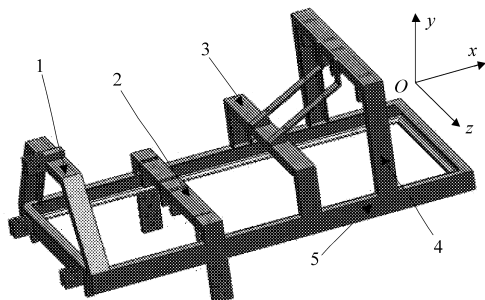


图 2 木薯收获机机架模型

Fig.2 Cassava harvester rack model

1. 前梁 2. 中间梁 3. 加强梁 4. 后梁 5. 底梁

由于木薯收获机机架形状较为复杂,为了得到更加准确的机架有限元模型,将其进行如下简化处理:①认为机架材料为各向同性,其密度分布均匀。②焊接对机架整体性能的影响忽略不计,将焊缝和各部件看作一个整体。③机架各梁上的装配孔均忽略不计。采用 ANSYS 的智能分网法进行网格划分后机架的有限元模型如图 3 所示,共有节点数 39 913,单元数 19 599。约束条件为:前梁连接悬挂牵引机构,底梁起支撑整个机架的作用,故在前梁和底梁上与牵引机构连接的部位施加固定约束。完成有限元前处理后,按照图 4 所示的方法对木薯收获机机架进行分析与优化设计。

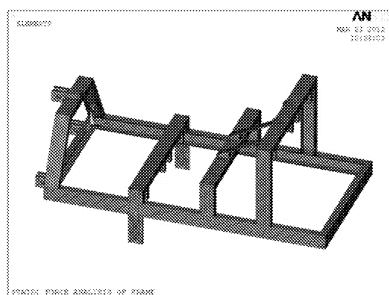


图 3 木薯收获机机架的有限元模型

Fig.3 Rack's finite element model

1.2 静力学分析

4UMS-1 型木薯收获机机架结构及受力都比较复杂,用一般力学的分析方法很难做出较精确的判断。为此,在建立的机架有限元模型基础上对机架的实际工作状况进行静力学分析,为机架结构的优化设计提供理论依据。

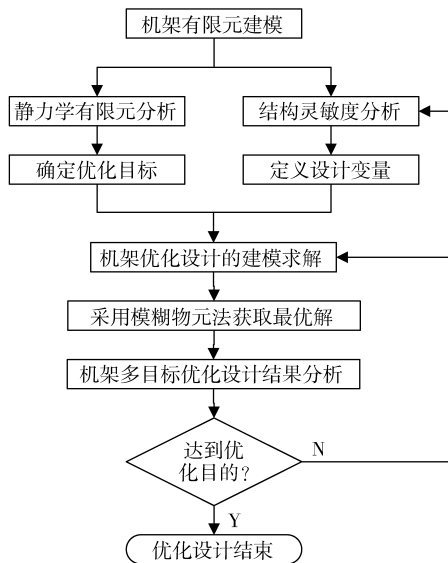


图4 机架优化设计流程

Fig. 4 Rack's optimization design process

牵引力以集中力的形式作用在前横梁三点悬挂机构处,其大小和挖掘铲与土壤间的挖掘力相等,方向沿 x 轴负向;挖掘力为 6 300 N,以集中力的形式作用在机架连接挖掘铲的两吊耳处,方向沿 x 轴正向;挖掘铲的重力为 480 N,以集中力的形式也作用在两吊耳处,方向竖直向下,即 y 轴负向;夹持输送机自重为 3 200 N,夹持住木薯工作时,按同时夹住两株输送计算,木薯重力为 500 N,分散作用在 16 个安装板上,方向竖直向下,即 y 轴负向;减速器自重为 400 N,以集中力形式作用在两个支架梁上,方向竖直向下。机架经 ANSYS 程序求解之后显示的变形云图和应力云图如图 5、6 所示。通过分析图 5 可得,最大变形在前梁处为 12.28 mm,为了提高机架的刚度和木薯收获机的工作稳定性,须进一步进行优化设计来减小最大变形。通过分析图 6 可以得出,机架的最大应力出现在前梁处为 65.6 MPa,小于机架的屈服极限强度 235 MPa,机架强度满足设计要求。同时,在保证木薯收获机机架静态性能的前提下,可对机架进行轻量化设计。

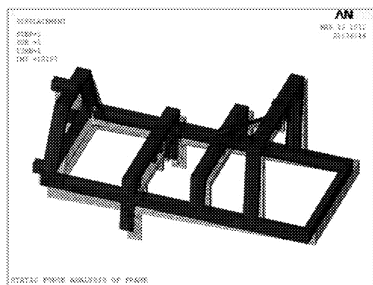


图5 机架总变形云图

Fig. 5 Rock's total deformation

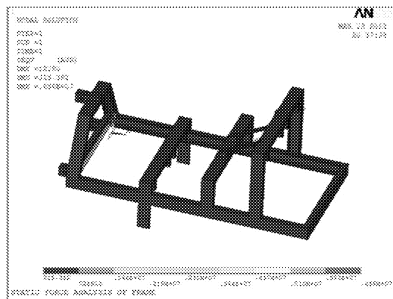


图6 机架应力云图

Fig. 6 Rock's stress distribution

2 机架结构优化设计

2.1 机架结构的灵敏度分析

灵敏度分析是指模型的输出量受各种输入量变化的影响以及模型本身受输入量变化的影响^[8],由于灵敏度分析具有预测性,可作为进行有限元模型修正与选择优化设计变量的方法。机械结构灵敏度的主要研究对象之一是结构参数或设计变量的改变对力学特性影响的灵敏程度^[9]。本文主要研究木薯收获机机架静态灵敏度,即静态刚度对设计参数的灵敏度。木薯收获机机架结构的平衡方程为

$$K\delta = F \quad (1)$$

式中 K ——刚度矩阵 F ——载荷向量

δ ——结构的节点位移矢量

采用一阶差分计算节点位移对厚度 d 的灵敏度为

$$\frac{\partial \delta}{\partial d} = \frac{\Delta \delta}{\Delta d} = \frac{\delta(d + \Delta d) - \delta d}{\Delta d} \quad (2)$$

在木薯收获机机架结构有限元分析中,采用数学方法计算出木薯收获机机架的静态性能参数随设计变量变化灵敏度,依据灵敏度再选择对静态特性影响比较大的参数作为设计变量,从而有针对性地进行结构优化。本文利用 ANSYS 软件的最优梯度法^[10]分别求解木薯收获机机架各结构参数对最大变形的灵敏度。经过计算和对比分析得到,木薯收获机机架各部分梁的厚度对最大变形的灵敏度曲线如图 7~11 所示。

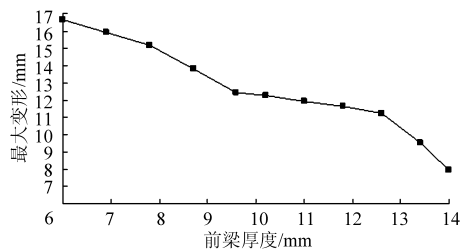


图7 前梁厚度与最大变形的关系曲线

Fig. 7 Curve between front beam's thickness and maximum deformation

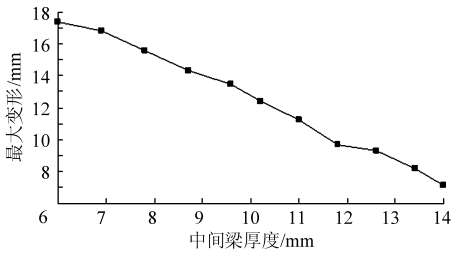


图 8 中间梁厚度与最大变形的关系曲线

Fig. 8 Curve between middle beam's thickness and maximum deformation

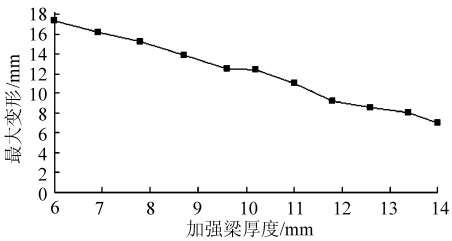


图 9 加强梁厚度与最大变形的关系曲线

Fig. 9 Curve between strengthen beam's thickness and maximum deformation

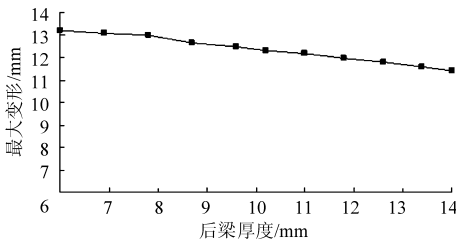


图 10 后梁厚度与最大变形的关系曲线

Fig. 10 Curve between behind beam's thickness and maximum deformation

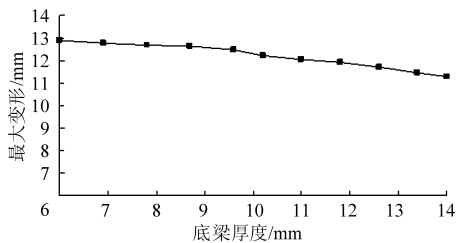


图 11 底梁厚度与最大变形的关系曲线

Fig. 11 Curve between bottom beam's thickness and maximum deformation

由上述灵敏度曲线可以看出,前梁、中间梁、加强梁的厚度对木薯收获机机架的最大变形均有较大影响,而后梁、底梁的厚度对最大变形的影响较小,这与木薯收获机机架变形云图相吻合,证明了有限元分析的正确性。

随着前梁厚度的增大,木薯收获机机架的最大变形逐渐减小。这是由于木薯收获机机架最大变形主要集中在前梁,随着前梁厚度的增大,机架的刚度增大,抵抗变形的能力也增大,故变形减小。随着中间梁、加强梁厚度的增加,木薯收获机机架的变形几

乎呈线性减小。这主要是因为这两部分承载较大,适当增加厚度可以有效减小最大变形。因此,为了提高木薯收获机机架的刚度,须把前梁、中间梁、加强梁的厚度作为优化设计的变量。

机架的后梁和底梁厚度对最大变形的影响较小,说明这两部分结构尺寸可作为木薯收获机机架进行轻量化设计的变量。

2.2 机架结构优化建模与求解

根据机架的静力学分析结果,将木薯收获机机架的最大变形作为优化目标,为减小最大变形往往导致整个木薯收获机机架的质量增加,不符合现代农业机械结构轻量化设计的要求,故将木薯收获机机架的质量 m 也设定为一个优化目标。根据上文结构灵敏度分析结果,将木薯收获机机架的各部分厚度作为设计变量,前梁 x_1 、中间梁 x_2 、加强梁 x_3 、后梁 x_4 和底梁 x_5 的下限均为 6 mm、初始值均为 10 mm、上限均为 14 mm。

在木薯收获机机架三维模型中定义 5 个设计变量,并将木薯收获机机架的最大变形和质量设置为目标函数,优化设计的目的是获取最优的设计参数组合 $\mathbf{X} = (x_1, x_2, x_3, x_4, x_5)$,使木薯收获机机架在质量减轻的前提下,最大变形越小越好。由此可得,木薯收获机机架结构优化设计的数学模型为

$$\begin{cases} \min \begin{cases} f_m(\mathbf{X}) = f(x_1, x_2, x_3, x_4, x_5) \\ f_s(\mathbf{X}) = f(x_1, x_2, x_3, x_4, x_5) \end{cases} \\ \text{s. t.} \begin{cases} 6 \text{ mm} \leq x_1 \leq 14 \text{ mm} \\ 6 \text{ mm} \leq x_2 \leq 14 \text{ mm} \\ 6 \text{ mm} \leq x_3 \leq 14 \text{ mm} \\ 6 \text{ mm} \leq x_4 \leq 14 \text{ mm} \\ 6 \text{ mm} \leq x_5 \leq 14 \text{ mm} \end{cases} \end{cases} \quad (3)$$

根据上述数学模型,在 ANSYS 软件的优化设计模块对木薯收获机的机架结构进行优化设计,反复迭代求解后得到 6 组非劣解,原设计方案和优化设计的非劣解集如表 1 所示。

3 采用模糊物元法获取最优设计方案

通过优化后得到的木薯收获机机架设计方案有多种,由于各个评价指标量纲不统一,因而需要借助评价方法获得最佳的设计方案^[11]。目前可供借鉴的评价模型很多,本文根据木薯收获机机架优化方案各指标的特点,在综合考虑现有各评价模型优缺点的基础上,选择采用模糊物元法^[12]获取最优的机架设计方案,其步骤如下:

(1) 对于多个评价方案,构建设计方案模糊物元判断矩阵 \mathbf{R}

$$R = \begin{bmatrix} & C_0 & C_1 & C_2 & C_3 & C_4 & C_5 & C_6 \\ M_0:(x_1) & 10 & 10.84 & 10.84 & 10.84 & 10.22 & 10.37 & 10.74 \\ M_1:(x_2) & 10 & 13.32 & 13.01 & 10.70 & 9.71 & 13.01 & 12.07 \\ M_2:(x_3) & 10 & 12.92 & 13.88 & 13.78 & 13.97 & 7.65 & 12.80 \\ M_3:(x_4) & 10 & 7.18 & 7.07 & 7.38 & 6.35 & 6.78 & 7.29 \\ M_4:(x_5) & 10 & 6.22 & 6.87 & 7.62 & 7.21 & 7.11 & 6.94 \\ M_5:(m) & 157.98 & 154.23 & 155.64 & 153.67 & 148.69 & 140.09 & 151.20 \\ M_6:(\delta) & 12.28 & 10.15 & 9.34 & 8.75 & 11.27 & 12.99 & 8.96 \end{bmatrix} \quad (4)$$

式中 $M_i(i=0,1,\dots,6)$ ——评价指标 $C_j(j=0,1,\dots,6)$ ——设计方案

表1 优化设计的结果

Tab.1 Optimization design results

方案与编号	原方案		优化设计方案					
	C_0	C_1	C_2	C_3	C_4	C_5	C_6	
设计变量	x_1/mm	10	10.84	10.84	10.84	10.22	10.37	10.74
	x_2/mm	10	13.32	13.01	10.70	9.71	13.01	12.07
	x_3/mm	10	12.92	13.88	13.78	13.97	7.65	12.80
	x_4/mm	10	7.18	7.07	7.38	6.35	6.78	7.29
	x_5/mm	10	6.22	6.87	7.62	7.21	7.11	6.94
优化目标	m/kg	157.98	154.23	155.64	153.67	148.69	140.09	151.20
	δ/mm	12.28	10.15	9.34	8.75	11.27	12.99	8.96

(2) 利用隶属度函数,将方案的各特征值进行归一化处理为模糊量值。本文利用极差变换法。

效益型指标为

$$u_{ij} = \frac{x_{ij} - \min x_{ij}}{\max x_{ij} - \min x_{ij}} \quad (5)$$

式中 x_{ij} ——方案 C_j 的指标 M_i 所对应的参数值

成本型指标为

$$u_{ij} = \frac{\max x_{ij} - x_{ij}}{\max x_{ij} - \min x_{ij}} \quad (6)$$

$$R' = \begin{bmatrix} & C_0 & C_1 & C_2 & C_3 & C_4 & C_5 & C_6 \\ M_0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0.2619 & 0.4404 & 0.8809 \\ M_1 & 0.0803 & 1 & 0.9141 & 0.2742 & 0 & 0.9141 & 0.6537 \\ M_2 & 0.3718 & 0.8338 & 0.9857 & 0.9699 & 1 & 0 & 0.8148 \\ M_3 & 0 & 0.7726 & 0.8027 & 0.7178 & 0.8821 & 1 & 0.7424 \\ M_4 & 0 & 1 & 0.8280 & 0.6231 & 0.7380 & 0.7645 & 0.8095 \\ M_5 & 0 & 0.2096 & 0.1307 & 0.2409 & 0.5192 & 1 & 0.3789 \\ M_6 & 0.1675 & 0.6698 & 0.8548 & 1 & 0.4057 & 0 & 0.9434 \end{bmatrix} \quad (7)$$

(3) 根据熵权法确定各设计方案的权重向量 W_j 。

由于各个指标的重要性程度不同,所以要确定各个指标的权重^[13]。指标权重反映了各个因素在评判和决策过程中所起的作用,指标权重的确定关系到方案排序结果的准确性。熵权法是根据指标的变异信息量来确定指标重要性程度的一种客观赋权

在7种指标中,质量和最大变形应越小越好,选为成本指标;后梁、底梁的厚度对木薯收获机机架质量有很大影响而对最大变形影响很小,应越小越好,选为成本指标;前梁、中间梁、加强梁的厚度虽然对质量有影响,但是设计变量对最大变形的影响更突出,应越大越好,选为效益指标。矩阵 R 转换为隶属度矩阵 R'

法^[14],使获得的权重更为客观。

由建立的判断矩阵 R 及隶属度矩阵 R' ,根据熵的定义,有 m 个指标, n 个被评价对象,则第 i 个评价指标的熵为

$$h_i = - \frac{\sum_{j=1}^n p_{ij} \lg p_{ij}}{\lg n} \quad (8)$$

其中

$$p_{ij} = \frac{1 + r_{ij}}{\sum_{j=1}^n (1 + r_{ij})}$$

式中 r_{ij} ——矩阵 \mathbf{R}' 中的元素
计算后得

$$\mathbf{H}_{ij} = (0.985\ 2, 0.752\ 8, 0.772\ 8, 0.772\ 6, 0.771\ 8, 0.735\ 9, 0.761\ 5)^T$$

定义了第 i 个指标的熵之后, 可得到第 i 个指标的熵权

$$w_i = \frac{1 - h_i}{m - \sum_{i=1}^m h_i} \quad \left(0 \leq w_i \leq 1, \sum_{i=1}^m w_i = 1 \right) \quad (9)$$

计算得

$$\mathbf{W}_j = (0.010\ 2, 0.100\ 8, 0.157\ 0, 0.157\ 1, 0.157\ 6, 0.192\ 5, 0.224\ 8)$$

(4) 确定最优木薯收获机机架设计方案各优化方案的优劣性能向量为

$$\mathbf{P} = \mathbf{W}_j \mathbf{R}' = (0.104\ 1, 0.711\ 8, 0.731\ 0, 0.672\ 3, 0.605\ 7, 0.566\ 7, 0.732\ 0)$$

由上述计算结果可知, 木薯收获机机架各设计方案的优劣顺序依次为: C_6 、 C_2 、 C_1 、 C_3 、 C_4 、 C_5 、 C_0 , 这说明 6 种优化方案均优于原方案, 即本文提出的优化方法是有效的, 并且优化方案 C_6 为最佳设计方案。优化设计前、后木薯收获机机架的参数对比如表 2 所示。由表 2 可知, 优化设计后机架的质量减小 4.29%, 最大变形减小 27.04%, 静态性能得到很大提高。此外, 机架在 4UMS-1 型木薯收获机样机上与其他构件装配效果良好(图 12), 保证了整机

表 2 优化前后参数对比

Tab.2 Parameter comparison

方案	质量/kg	最大变形/mm
原设计	157.98	12.28
优化	151.20	8.96
变化率/%	-4.29	-27.04

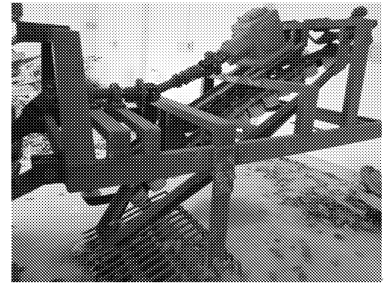


图 12 木薯收获机样机

Fig.12 Cassava harvester prototype

的工作性能。

4 结束语

在 CAD/CAE 协同优化设计平台下, 对木薯收获机机架的参数化模型完成静力学分析后, 通过灵敏度分析法选择设计变量, 并进行多目标优化设计, 得到 6 组非劣解集。将模糊物元法用于木薯收获机机架结构优化设计结果的决策, 得到的最佳设计方案使机架的质量减小 4.29%, 最大变形减小 27.04%, 即静态性能得到较大改善, 从而提高了木薯收获机的工作性能。

参 考 文 献

- 1 杨望, 杨坚, 郑晓婷, 等. 木薯力学特性测试[J]. 农业工程学报, 2011, 27(14): 50~54.
Yang Wang, Yang Jian, Zheng Xiaoting, et al. Experiment on mechanical properties of cassava[J]. Transactions of the CSAE, 2011, 27(14): 50~54. (in Chinese)
- 2 薛龙泉, 代春英, 何亚峰, 等. 虚拟样机技术的封闭式差动无级变速器的研究[J]. 农业机械学报, 2007, 38(2): 138~141.
Xue Longquan, Dai Chunying, He Yafeng, et al. Research on closed differential CVT based on virtual prototyping technology [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2007, 38(2): 138~141. (in Chinese)
- 3 鲍诺, 赵方, 孙伟亮, 等. HFCG160-140 辊压机机架有限元模态分析及优化设计[J]. 机械设计与制造, 2012, 50(6): 13~15.
Bao Nuo, Zhao Fang, Sun Weiliang, et al. Frame of HFCG160-140 roller press modal finite element analysis and optimal design [J]. Machinery Design & Manufacture, 2012, 50(6): 13~15. (in Chinese)
- 4 金文明, 杨慎华, 王瑞丽. 50 kJ 液压模锻锤机架的结构静力学及瞬态响应分析[J]. 塑性工程学报, 2009, 16(2): 144~149.
Jin Wenming, Yang Shenhua, Wang Ruili. Static and transient analysis on the frame of 50 kJ hydraulic die forging hammer[J]. Journal of Plasticity Engineering, 2009, 16(2): 144~149. (in Chinese)
- 5 王琳, 王静, 盛步云. 七辊矫正机架的有限元分析与优化[J]. 武汉理工大学学报: 信息与管理工程版, 2012, 34(1): 34~37.
Wang Lin, Wang Jing, Sheng Buyun. Analysis and optimization of the 7-roll plate straightener rack[J]. Journal of Wuhan University of Technology: Information & Management Engineering, 2012, 34(1): 34~37. (in Chinese)
- 6 黄小龙, 刘卫东, 张春龙, 等. 苗间锄草机器人锄草刀优化设计[J]. 农业机械学报, 2012, 43(6): 42~46.
Huang Xiaolong, Liu Weidong, Zhang Chunlong, et al. Optimal design of rotating disc for intra-row weeding robot [J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2012, 43(6): 42~46. (in Chinese)

- 2 陈无畏, 祝辉. 基于状态识别的整车操纵性和平顺性的协调控制[J]. 机械工程学报, 2011, 47(6): 121 ~ 129.
Chen Wuwei, Zhu Hui. Coordinated control of vehicle ride comfort and handling stability based on state identification [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2011, 47(6): 121 ~ 129. (in Chinese)
- 3 Uys P E, Els P S, Thoresson M. Suspension setting for optimal ride comfort of off-road vehicles travelling on roads with different roughness and speeds [J]. Journal of Terramechanics, 2007, 44(2): 163 ~ 175.
- 4 Wang G, Yang W, Kang X, et al. A virtual test approach for vehicle ride comfort evaluation[C]. SAE Paper 2004-01-0232, 2004.
- 5 GB/T 4970—2009 汽车平顺性试验方法[S]. 2009.
GB/T 4970—2009 Method of running test—automotive ride comfort [S]. 2009. (in Chinese)
- 6 武一民, 韩亚平, 崔根群. 基于虚拟仪器的车辆振动测量分析[J]. 仪器仪表学报, 2006, 27(6): 419 ~ 420.
- 7 宗长富, 陈双, 冯刚, 等. 基于频率加权滤波的汽车平顺性评价[J]. 吉林大学学报: 工学版, 2011, 41(6): 1 517 ~ 1 521.
Zong Changfu, Chen Shuang, Feng Gang, et al. Evaluation of vehicle ride comfort based on frequency weighted filtering [J]. Journal of Jilin University: Engineering and Technology Edition, 2011, 41(6): 1 517 ~ 1 521. (in Chinese)
- 8 汤爱华, 欧健, 邓国红, 等. 汽车平顺性试验数据处理方法[J]. 重庆工学院学报: 自然科学版, 2008, 22(3): 92 ~ 96.
- 9 徐中明, 周小林, 余烽, 等. 汽车平顺性分析中时域法和频域法的对比[J]. 汽车工程, 2012, 34(4): 306 ~ 310.
Xu Zhongming, Zhou Xiaolin, Yu Feng, et al. Comparison between time and frequency domain method in vehicle ride comfort analysis [J]. Automotive Engineering, 2012, 34(4): 306 ~ 310. (in Chinese)
- 10 ISO 2631—1:1997. Mechanical vibration and shock—evaluation of human exposure to whole-body vibration—part 1: general requirements[S]. 1997.
- 11 BS 6841: 1987. Guide to measurement and evaluation of human exposure to whole-body mechanical vibration and repeated shock [S]. 1987.
- 12 VDI 2057. Human exposure to mechanical vibrations whole-body vibration[S]. 2002.
- 13 VectorNav Ltd. VN-100 UM001 user manual [M]. Ver1.1. VectorNav Ltd., 2009.
- 14 Racelogic Ltd. RLVB 10SPS 10 Hz speed sensor instruction manual [M]. Racelogic Ltd., 2007.
- 15 张小龙, 李亮, 李红志, 等. 基于改进 RBF 网的汽车侧偏角估计方法试验研究[J]. 机械工程学报, 2010, 46(22): 105 ~ 110.
Zhang Xiaolong, Li Liang, Li Hongzhi, et al. Experimental research on vehicle sideslip angle estimation based on improved RBF neural networks [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2010, 46(22): 105 ~ 110. (in Chinese)

(上接第 61 页)

- 7 孙佑攀, 廖宇兰, 陈丹萍. 4UMS-1 型木薯收获机的设计[J]. 农机化研究, 2012, 34(2): 89 ~ 92.
Sun Youpan, Liao Yulan, Chen Danping. Design of 4UMS-1 type cassava harvester[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2012, 34(2): 89 ~ 92. (in Chinese)
- 8 Park S R, Yang S H. Analytical sensitivity analysis of geometric errors in a three-axis machine tool[J]. Transactions of the Korean Society of Mechanical Engineers, 2012, 36(2): 165 ~ 171.
- 9 He Q S, Liu X, Xiao S F. Application of orthogonal experimental design on reliability and sensitivity analysis[J]. Advanced Materials Research, 2011, 211 ~ 212: 651 ~ 655.
- 10 Kiyong Yi, Choi K K, Kim N H, et al. Design sensitivity analysis and optimization for minimizing springback of sheet-formed part[J]. International Journal for Numerical Methods in Engineering, 2007, 71(12): 1 483 ~ 1 511.
- 11 田启华, 肖人彬, 钟毅芳, 等. 基于信息公理和模糊数学的设计方案评价方法[J]. 农业机械学报, 2008, 39(12): 136 ~ 140.
Tian Qihua, Xiao Renbin, Zhong Yifang, et al. Evaluation schemes method for design based on information axiom and fuzzy mathematics[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2008, 39(12): 136 ~ 140. (in Chinese)
- 12 余健, 房莉, 仓定帮, 等. 熵权模糊物元模型在土地生态安全评价中的应用[J]. 农业工程学报, 2012, 28(5): 260 ~ 266.
Yu Jian, Fang Li, Cang Dingbang, et al. Evaluation of land eco-security in wanjiang district base on entropy weight and matter element model[J]. Transactions of the CSAE, 2012, 28(5): 260 ~ 266. (in Chinese)
- 13 郑健, 蔡焕杰, 王健, 等. 温室小型西瓜调亏灌溉综合效益评价模型[J]. 农业机械学报, 2011, 42(7): 124 ~ 129.
Zheng Jian, Cai Huanjie, Wang Jian, et al. Fuzzy evaluation to integration benefit of regulated deficit irrigation of mini-watermelon based on information entropy[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2011, 42(7): 124 ~ 129. (in Chinese)
- 14 Zou Z H, Yun Y, Sun J N. Entropy method for determination of weight of evaluating indicators in fuzzy synthetic evaluation for water quality assessment [J]. Journal of Environmental Sciences, 2006, 18(5): 1 020 ~ 1 023.