

果园凿型铲式深松机优化设计与试验

李亚丽 曹中华 湛小梅 杨清慧 崔晋波 李英
(重庆市农业科学院, 重庆 401329)

摘要: 针对目前我国果园深松机深松铲的铲柄与机架联接处经常由于强度不够而出现变形、断裂和损坏等现象,设计了一种凿型铲式深松机。采用 CATIA 对凿型铲式深松机三维建模,运用 ABAQUS、ISIGHT 与 FE-SAFE 软件对凿型铲式深松机数字化模型进行结构优化设计与疲劳寿命分析。田间试验结果表明,轻量化后的深松机作业时,当前进速度为 2.1 km/h、耕深为 350 mm、土壤含水率为 15% 时,强度性能扭矩最小,深松效果最佳。通过软件 ISIGHT 的优化设计及 FE-SAFE 的疲劳寿命分析后,整机质量由 0.55 t 降低到 0.45 t,降低了 16.4%,实现了轻量化设计,为果园深松机的自主研发提供一定的参考。

关键词: 果园凿型铲式深松机; 模态分析; 设计; 轻量化; 试验

中图分类号: S222 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-1298(2021)S0-0019-07

Optimal Design and Test of Orchard Chisel-type Shovel Subsoiler

LI Yali CAO Zhonghua ZHAN Xiaomei YANG Qinghui CUI Jinbo LI Ying
(Chongqing Academy of Agricultural Sciences, Chongqing 401329, China)

Abstract: In view of the phenomenon of deformation, fracture and damage at the joint of shovel handle and frame of orchard subsoiler in China, a chisel-type shovel subsoiler was designed. CATIA was used to build the 3D model of the chisel-type shovel subsoiler. ABAQUS, ISIGHT and FE-SAFE software were used to optimize the structure and analyze the fatigue life of the digital model. Field test results showed that when the lightweight subsoiler was operating, the forward speed was 2.1 km/h, the tillage depth was 350 mm, and the soil moisture content was 15%, the smaller the strength performance torque was, the best subsoil effect can be got. After the optimization design of the software ISIGHT and the fatigue life analysis of FE-SAFE, the mass of the whole machine was reduced from 0.55 t to 0.45 t, and the mass of the whole machine was reduced by 16.4%, realizing a lightweight design, the research result can provide a certain reference for the independent research and development of orchard subsoilers.

Key words: orchard chisel-type shovel subsoiler; modal analysis; design; lightweight; test

0 引言

果园深松耕法有打破犁底层、加深耕作层、改善耕层结构、提高土壤蓄水保墒、抗旱耐涝的作用^[1-3]。深松还具有明显的脱盐碱效果,一般来说,一次深松可降低盐碱含量 12% 左右^[4]。深松可以改善耕土层土壤结构,活化犁底层,提高土壤蓄水与作物抗旱、抗倒伏能力,减少环境污染^[5-6],增加农作物的产量^[7-9],实现农业可持续发展。但深松机

具一般都需要大功率拖拉机牵引,功率消耗大^[10-11],在保证强度不变的情况下使其轻量化,是深松机具研究面临的重要问题。MARAKOGLU 等^[12]研究发现优化设计后的深松机与前进速度有关,田间试验证明深松机扭矩变形程度随机具前进速度变化而不同;BADEGAONKAR 等^[13]对深松机优化设计轻量化后,在动态仿真条件下发现深松机发生扭矩变形随着耕作深度增大而增大,并在田间试验中多次验证耕作效果;文献[14-17]在保证机

收稿日期: 2021-07-02 修回日期: 2021-08-19

基金项目: 重庆市技术创新与应用发展专项(cstc2020jsex - gksbX0004、cstc2019jsex - gksbX0151、cstc2019jsex - msxmX0342) 和鲁渝科技协作计划项目(cstc2020jsex - lyjsAX0003)

作者简介: 李亚丽(1987—),女,工程师,主要从事果园机械研究,E-mail: 893170121@qq.com

通信作者: 李英(1970—),女,高级农艺师,主要从事果园机械研究,E-mail: 168175998@qq.com

具强度不变的情况下,分别对秸秆打捆机机架、机动式喷雾机机架进行优化设计使其轻量化,并通过田间试验来验证其结构优化合理性。本文针对目前我国深松机深松铲的铲柄和机架经常由于强度不够而出现变形、断裂和损坏等现象,运用 ABAQUS、ISIGHT 与 FE-SAFE 软件对果园凿型铲式深松机数字化模型进行仿真及优化设计,通过田间正交试验验证优化后果园凿型铲式深松机的强度性能指标,得到最优工作参数组合,以期为后续的果园深松机具设计提供参考。

1 总体结构设计

深松铲形状影响机械性能,现有的铲头往往是单铲头,深松机往往由铲头深入土中进行松土,而铲头质量决定了深松机的松土效率。由于松土时铲头持续与土石接触,随着松土作业时间的增加会造成铲头磨损,严重时大幅降低松土效率,因此,设计一种双头式深松铲显得尤为重要。

果园凿型铲式深松机主要由凿型深松铲和机架等部件组成,其中凿型深松铲由凿型铲、铲柄、浅松铲及碎土铲等构成,机架由挂接架和支架两部分构成,如图 1 所示。

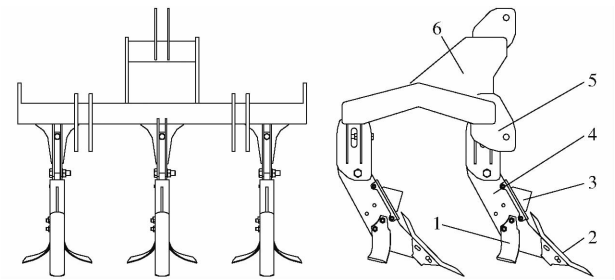


图 1 果园凿型铲式深松机结构图

Fig. 1 Structure diagrams of orchard chisel-type shovel subsoiler

1. 浅松铲 2. 凿型铲 3. 破土铲 4. 铲柄 5. 三点悬挂 6. 机架

2 仿真试验

2.1 凿型铲式深松机有限元模型建立

利用 CATIA 软件生成凿型铲式深松机零部件三维数字化模型,如图 2 所示,并对凿型铲式深松机整机进行装配,建立凿型铲式深松机的数字化设计平台,方便修改设计。

应用 ABAQUS、ISIGHT、FE-SAFE 软件对凿型铲式深松机模型进行运动仿真,通过对凿型铲式深松机变量设计优化结构,以避免外部激振频率,防止共振的发生。采用更接近凿型铲式深松机实际工作情况的加载方法,对深松铲施加函数载荷,分析凿型铲式深松机在静止和正常工作状态下的应力,根据

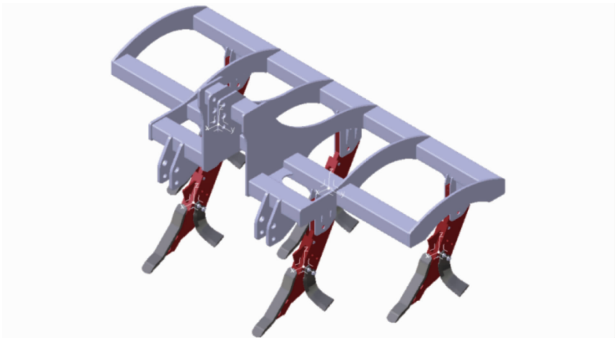


图 2 凿型铲式深松机三维模型

Fig. 2 Three-dimensional model of chisel-type shovel subsoiler

应力情况优化三维模型结构参数,保证凿型铲式深松机具有足够的刚度和强度。

在建立 ABAQUS、ISIGHT、FE-SAFE 有限元模型前,首先对三维实体模型进行抽取中面处理,如图 3 所示。

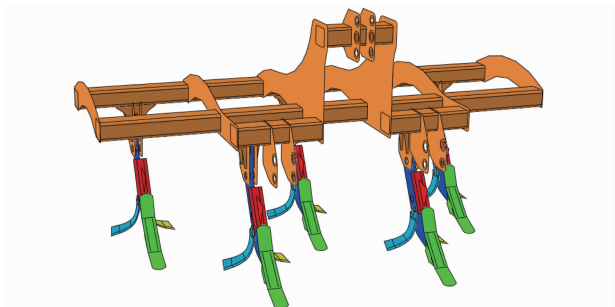


图 3 抽取中面

Fig. 3 Extraction of mid-surface

凿型铲式深松机材料选用 Q355 碳素结构钢,其具有刚性好、耐磨损等优点。Q335 碳素结构钢属性为:弹性模量 210 GPa、密度 7 850 kg/m³、泊松比 0.3、屈服极限 335 MPa。对网格的划分越细,仿真分析精度越高,计算难度越大,对网格的划分越粗,仿真分析精度越低。选用 S4R、S 单元算法,采用自由法划分网格,深松机单元数为 64 898,如图 4 所示。



图 4 网格划分

Fig. 4 Mesh division

2.2 凿型铲式深松机模态分析

模态分析主要研究凿型铲式深松机结构动态特性,即确定深松机结构的固有频率和各阶振型。有限元模态分析实质是将具有无限多个自由度的弹性

连续体振动问题离散为一个以有限个节点位移为广义坐标的多自由度系统振动的问题。对于一个多自由度的振动系统,其结构动力学平衡方程为

$$\boldsymbol{M}\ddot{\boldsymbol{x}}+\boldsymbol{C}\dot{\boldsymbol{x}}+\boldsymbol{K}\boldsymbol{x}=\boldsymbol{F}(t)$$

式中 $\boldsymbol{M}$ ——系统质量矩阵
 $\boldsymbol{C}$ ——系统阻尼矩阵
 $\boldsymbol{K}$ ——系统刚度矩阵

$\boldsymbol{F}(t)$ ——外部激励 $\boldsymbol{x}$ ——节点位移
 $\dot{\boldsymbol{x}}$ ——速度 $\ddot{\boldsymbol{x}}$ ——加速度

在无阻尼自由振动情况下,式(1)可转换为

$$\boldsymbol{M}\ddot{\boldsymbol{x}}+\boldsymbol{K}\boldsymbol{x}=\boldsymbol{0}$$

由于机构的自由振动皆可视作简谐振动,即位移为正弦函数,则有

$$\boldsymbol{x}=\boldsymbol{X}\sin(\omega t)$$

式中 $\boldsymbol{X}$ ——机构振动位移矩阵

ω ——角速度

将式(3)代入式(2)可得

$$(\boldsymbol{K}-\omega^2\boldsymbol{M})\boldsymbol{x}=\boldsymbol{0}$$

由于 $\boldsymbol{x}$ 恒不为 0,所以

$$\boldsymbol{K}-\omega^2\boldsymbol{M}=\boldsymbol{0}$$

由式(5)即可得到系统固有频率和振型。

凿型铲式深松机的动态特性决定了其结构在承受动载荷时的工作性能,采用 ABAQUS 有限元分析,选择 Lanczos 算法^[18],通过对凿型铲式深松机的模态分析可以得到其固有振动特性,其结果主要包括振动频率以及振型云图。由于低阶振动对结构的动态特性影响较大,且结合凿型铲式深松机在果园的实际工作状态,本文对前 4 阶的模态频率进行分析,如图 5 所示,凿型铲式深松机的固有频率和振型见表 1。

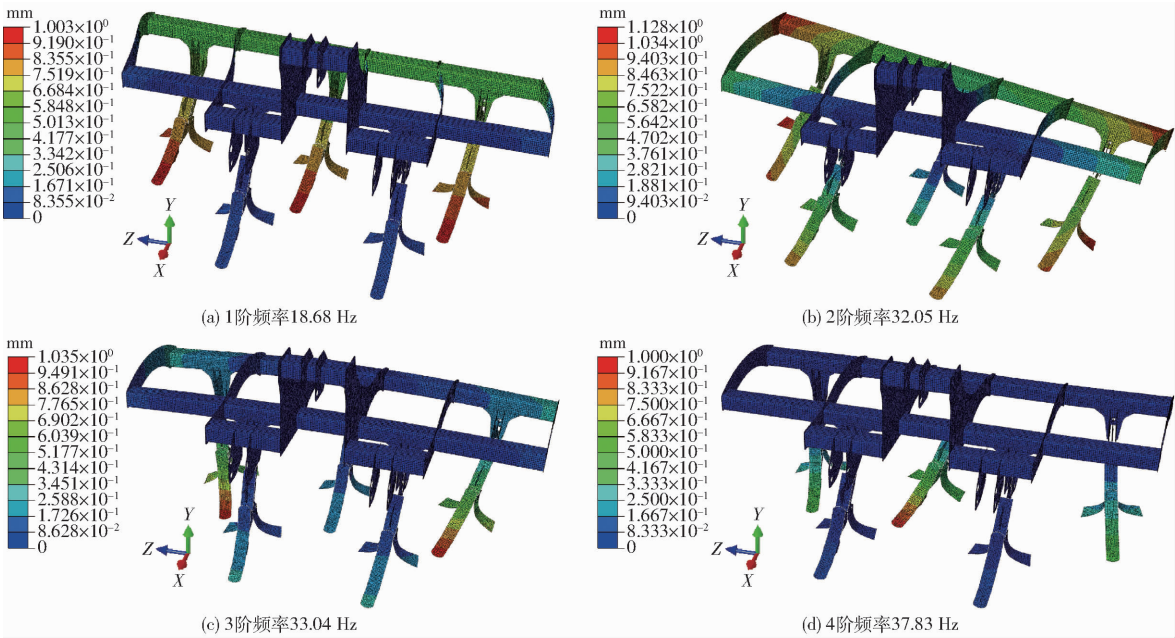


图 5 模态分析
Fig. 5 Modal analysis

表 1 凿型铲式深松机前 4 阶模态频率和振型
Tab.1 The first four natural frequencies and modal description

阶数	频率/Hz	振型
1	18. 68	扭转
2	32. 05	弯曲
3	33. 04	弯曲
4	37. 83	弯曲

由图 5 与表 1 可知,凿型铲式深松机的共振频率不小于 18. 68 Hz,因此,深松机发生共振的可能性较小。深松机振动动力源由拖拉机动力输出轴提供,拖拉机动力输出轴最大转速为 1 000 r/min,即 16. 67 Hz,外部激励频率比较低;而拖拉机振动的高频部分还被轮式行走装置的轮胎所减弱,所以传到

深松机的主要是低频 0 ~ 15 Hz 的随机振动。

2. 3 静载荷有限元分析

在凿型铲式深松机与拖拉机三点悬置相连接的位置增加边界条件,约束其 6 个方向的自由度,如图 6 所示。深松机通过螺栓固定在机架上,如图 7 所示,在螺栓孔上施加固定约束,根据模型位置坐标,Z 轴为起膜铲的重力坐标,为了使深松机正常工作,深松机最大变形量不能太大,通过土壤力学模型得出,在深松铲上加载水平向后的均布载荷 1 500 N,运行 Power Dynamics,进行静载荷有限元分析。

利用 ABAQUS 软件的静强度有限元分析计算,得到深松机在最大阻力情况下的应力分布云图,如图 8 所示。



图 6 边界条件
Fig.6 Boundary conditions



图 7 施加载荷
Fig.7 Applying load

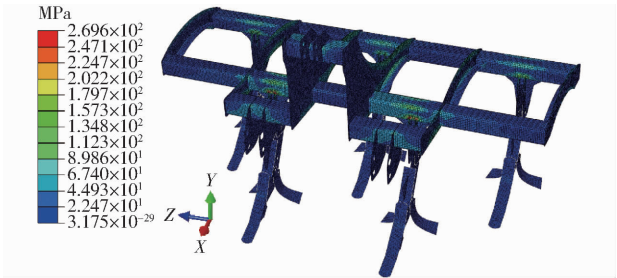


图 8 应力分布云图
Fig. 8 Stress distribution cloud diagram

由图 8 可知,在果园凿型铲式深松机的铲柄与机架联接处应力最大为 269.6 MPa,小于材料屈服强度 355 MPa,由此确定结构设计安全。

2.4 基于 ISIGHT 的尺寸优化设计

在保证果园凿型铲式深松机结构安全的前提下,对其进行优化设计,使其轻量化。采用 DOE 试验设计,将静强度分析的 odb 文件导入 ISIGHT 中进行尺寸优化设计。根据深松机结构特点选择合理的优化区域,初步选定部件 1,部件 2,⋯,部件 7,如图 9 所示,对其厚度进行优化。取应力、质量为设计变量。

由表 2 可知,在静载荷工况下,部件 2、部件 3 对应力影响较大,部件 2 对质量影响较大。

在 ISIGHT 软件中进行尺寸优化设计,优化结果见表 3,优化后整机质量由 0.55 t 降低到 0.45 t;但优化后整机 1 阶共振频率降低到 10.63 Hz,与随机振动频率范围重叠,有共振风险。

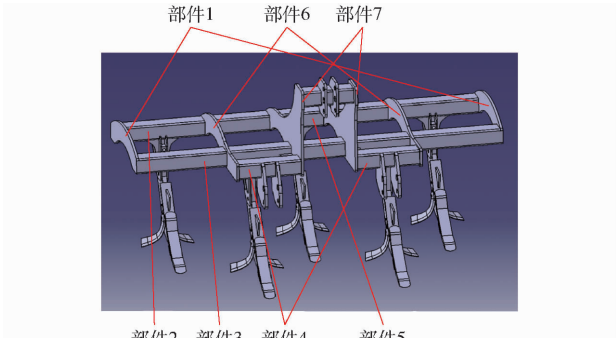


图 9 优化设计
Fig.9 Design variable diagram

表 2 各部件对应质量、应力响应值
Tab.2 Corresponding mass and stress response value of each component

部件	质量/t	应力/MPa
1	0.000 7	3.5
2	0.007 4	23.1
3	0.007 4	11.8
4	0.002 5	0.3
5	0.001 2	1.2
6	0.001 3	0.1
7	0.002 4	3.2

表 3 深松机优化结果
Tab.3 Optimization result of subsoiler

部件	优化前	优化后
部件 1 厚度/mm	16	10
部件 2 厚度/mm	10	8.26
部件 3 厚度/mm	10	5
部件 4 厚度/mm	10	5
部件 5 厚度/mm	10	5
部件 6 厚度/mm	16	10
部件 7 厚度/mm	16	10
最大应力/MPa	269.6	299.9
质量/t	0.55	0.45

对深松机进行优化处理,深松机 1 阶模态为水平扭转,因此可在侧板增加 5 mm 厚的加强筋,提高整机刚度,提高整机 1 阶共振频率,避免风险发生,改进方案如图 10 所示。

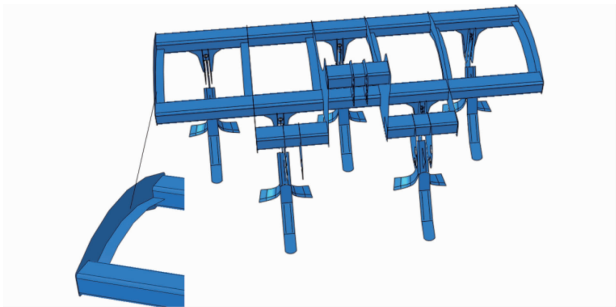


图 10 优化板厚
Fig.10 Optimizing board thickness

改进后果园凿型铲式深松机 1 阶模态频率提高到 19.2 Hz,最大应力为 299.9 MPa,整机质量 0.45 t。

2.5 基于 FE-SAFE 的疲劳寿命分析

将改进后的深松机静强度分析结果导入 FE-SAFE 软件中,添加载荷谱,设置相应属性,采用 Goodman 算法,并提交计算。疲劳分析结果如图 11 所示。

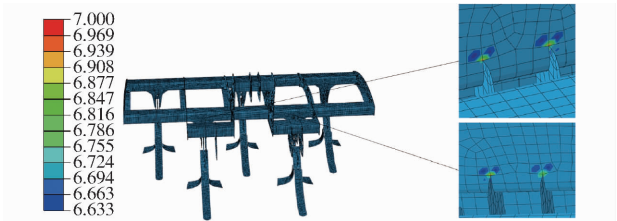


图 11 疲劳分析结果
Fig. 11 Fatigue analysis results

由图 11 可知,果园凿型铲式深松机的最小循环寿命为 6.633,位置为支耳与横梁连接的区域,这可能是由于应力集中导致的,结合实际工况,结构在该区域发生疲劳破坏风险较小,满足设计要求。

3 田间试验

3.1 试验材料

为了验证果园凿型铲式深松机优化设计后强度的合理性,在重庆市农业科学院果树研究所江津柑橘基地进行田间试验,如图 12 所示,以洋马 754 型拖拉机作为牵引动力,试验过程中拖拉机前进速度为 2.1~4.5 km/h,深松耕深为 350~550 mm。试验土壤类型为紫色土壤,土壤坚实度为 1 021 kPa,土壤容积密度为 1 760 kg/m³,土壤含水率为 10%~20%。



图 12 田间试验
Fig. 12 Field test

3.2 试验方法

选取前进速度、耕深和土壤含水率为试验因素,并以深松机扭矩 T 、变形量 D 作为试验指标进行正交试验,正交试验因素水平如表 4 所示。

3.3 试验结果与分析

通过三因素三水平田间正交试验^[20],研究不同因素对深松机强度扭矩 T 、变形量 D 的影响程度。

采用 $L_9(3^3)$ 正交表安排试验,正交试验结果如表 5 所示, A 、 B 、 C 为因素水平值。

表 4 正交试验因素水平
Tab. 4 Orthogonal test factors and levels

水平	因素		
	前进速度/(km·h ⁻¹)	耕深/mm	土壤含水率/%
1	2.1	350	10
2	3.6	400	15
3	4.5	450	20

表 5 正交试验结果与极差分析
Tab. 5 Test results and range analysis of comprehensive balance method

试验序号	因素			指标	
	A	B	C	扭矩 T / (N·m)	变形量 D /mm
1	1	1	1	8.7	0.17
2	1	2	2	9.5	0.20
3	1	3	3	7.8	0.14
4	2	1	2	8.1	0.21
5	2	2	3	11.2	0.15
6	2	3	1	11.6	0.18
7	3	1	3	10.1	0.12
8	3	2	1	9.8	0.14
9	3	3	2	10.3	0.13
扭矩	K_1	26.0	26.9	30.1	$A_1B_1C_2$
	K_2	30.9	30.5	27.9	
	K_3	30.2	29.7	29.1	
	k_1	8.7	9.0	10.0	
	k_2	10.3	10.2	9.3	
	k_3	10.1	9.9	9.7	
	R	1.6	1.2	0.7	
	K_1	0.51	0.45	0.49	
变形量	K_2	0.54	0.49	0.45	$A_3B_1C_3$
	K_3	0.39	0.50	0.41	
	k_1	0.17	0.15	0.16	
	k_2	0.16	0.16	0.15	
	k_3	0.13	0.17	0.14	
	R	0.04	0.02	0.02	

由表 5 可知,两个最优方案为 $A_1B_1C_2$ 、 $A_3B_1C_3$,这两种方案不完全相同。为便于综合分析,绘制指标扭矩和变形量随因素水平变化曲线,如图 13 所示。

深松机在实际工作中,扭矩和变形量两个指标越小越好,由图 13 可知,前进速度对扭矩和变形量的影响走势相同,当前进速度为 2.1 km/h 时,扭矩最小,变形量最大,扭矩大会引起机具断裂,综合考虑以扭矩最小为主,即 A_1 ;耕深为 350 mm 时,扭矩和变形量最小,即 B_1 ;由表 5 和图 13 可知,含水率对扭矩和变形量影响较大,综合考虑采用含水率为

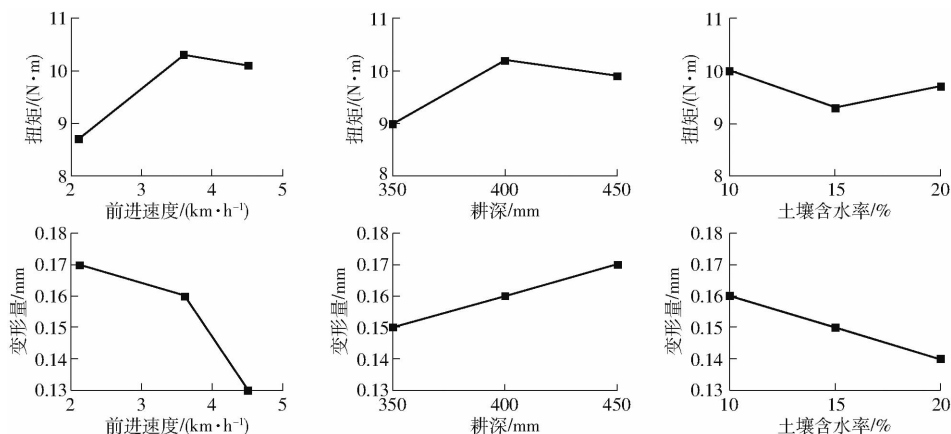


图 13 因素对指标的影响曲线

Fig. 13 Influence curves of factors on indicators

15%, 即 C_2 。通过各因素对各指标影响的综合分析, 得出最优方案为 $A_1B_1C_2$, 即前进速度 2.1 km/h、耕深 350 mm、土壤含水率 15%, 为最佳工作参数。

4 讨论

针对目前我国果园深松机深松铲的铲柄和机架经常由于强度不够而出现变形、断裂和损坏等现象, 运用 ABAQUS 软件对果园凿型铲式深松机数字化模型进行仿真分析, 采用更接近果园凿型铲式深松机实际工作情况的加载方法, 对深松铲施加函数载荷, 分析果园凿型铲式深松机在静止、启动和正常运转状态下的应力。根据应力分布情况, 采用 ISIGHT 软件对其进行结构尺寸优化设计, 保证强度不变。

采用计算机仿真分析技术, 在凿型铲式深松机数字样机的基础上对其进行特性分析和仿真, 根据仿真分析结果进行产品的优化设计, 使得凿型铲式深松机的性能达到最优。确保有限元分析结果的准

确性, 降低重复计算的风险, 提高轻量化设计方法的可靠性。

5 结论

(1) 果园凿型铲式深松机的共振频率不小于 18.68 Hz, 发生共振的可能性较小。

(2) 果园凿型铲式深松机的铲柄与机架联接处应力最大, 其最大应力为 269.6 MPa, 小于材料屈服强度 355 MPa, 结构设计安全。

(3) 通过软件 ISIGHT 的优化设计及 FE-SAFE 的疲劳寿命分析后, 整机质量由 0.55 t 降至 0.45 t, 整机质量降低 16.4%, 实现了轻量化设计目标; 最大应力为 299.9 MPa, 小于材料屈服强度 355 MPa, 优化设计合理。

(4) 田间试验验证优化后深松机的强度性能, 铲柄与机架联接处不会发生扭矩变形的最佳工作参数: 机具前进速度为 2.1 km/h、耕深为 350 mm、土壤含水率为 15%。

参 考 文 献

- [1] 张祥彩, 李洪文, 何进, 等. 耕作方式对华北一年两熟区土壤及作物特性的影响[J]. 农业机械学报, 2013, 44(增刊1): 77-82.
ZHANG Xiangcai, LI Hongwen, HE Jin, et al. Effects of different tillage managements on characteristics of soil and crop in annual double cropping areas in Northern China[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2013, 44(Supp. 1): 77-82. (in Chinese)
- [2] LI Xia, TANG Mingjun, ZHANG Dongxing, et al. Effects of sub-soiling on soil physical quality and corn yield[J]. Transactions of the CSAE, 2014, 30(23): 65-69.
- [3] 郑洪兵, 郑金玉, 罗洋, 等. 长期不同耕作方式下的土壤硬度变化特征[J]. 农业工程学报, 2015, 31(9): 63-70.
ZHENG Hongbing, ZHENG Jinyu, LUO Yang, et al. Change characteristic of soil compaction of long-term different tillage methods in cropland[J]. Transactions of the CSAE, 2015, 31(9): 63-70. (in Chinese)
- [4] 王志穷, 王维新, 李霞, 等. 保护性耕作条件下深松技术的国内外发展现状[J]. 农机化研究, 2016, 38(6): 253-258.
WANG Zhiqiong, WANG Weixin, LI Xia, et al. Development status of subsoiling at home and abroad under conservation tillage[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research, 2016, 38(6): 253-258. (in Chinese)
- [5] 王慧杰, 郝建平, 冯瑞云, 等. 微孔深松耕降低土壤紧实度提高棉花产量与种籽品质[J]. 农业工程学报, 2015, 31(8): 7-14.
WANG Huijie, HAO Jianping, FENG Ruiyun, et al. Microhole subsoiling decreasing soil compaction, and improving yield and

- seed quality of cotton[J]. Transactions of the CSAE,2015,31(8):7-14. (in Chinese)
- [6] 楚杰,路海东,薛吉全,等. 玉米宽窄行免耕精量播种机田间试验及效果[J]. 农业工程学报,2014,30(14):34-41.
CHU Jie,LU Haidong,XUE Jiquan,et al. Field experiment and effect of precise mechanical sowing of maize based on wide-narrow row deep rotation and no-tillage technology[J]. Transactions of the CSAE,2014,30(14):34-41. (in Chinese)
- [7] 郑侃,何进,李洪文,等. 中国北方地区深松对小麦玉米产量影响的 Meta 分析[J]. 农业工程学报,2015,31(22):7-15.
ZHENG Kan,HE Jin,LI Hongwen,et al. Meta-analysis on maize and wheat yield under subsoiling in Northern China[J]. Transactions of the CSAE,2015,31(22):7-15. (in Chinese)
- [8] 汤明军,王维新,李霞,等. 振动深松机的研究进展与展望[J]. 农机化研究,2016,38(4):258-263.
TANG Mingjun,WANG Weixin,LI Xia,et al. Research progress and prospect of vibrating subsoiler[J]. Journal of Agricultural Mechanization Research,2016,38(4):258-263. (in Chinese)
- [9] 赵铃,董欣,李紫辉,等. 振动式深松中耕作业机的振源部件设计及有限元分析[J]. 东北农业大学学报,2012,43(2):43-48.
ZHAO Ling,DONG Xin,LI Zihui,et al. Design and finite element analysis of vibrator component on the vibration subsoiler cultivator[J]. Journal of Northeast Agricultural University,2012,43(2):43-48. (in Chinese)
- [10] 李霞,张东兴,张瑞,等. 土壤物理特性对深松阻力影响的试验[J]. 江苏大学学报(自然科学版),2014,35(1):34-39.
LI Xia,ZHANG Dongxing,ZHANG Rui,et al. Experiment of subsoiling draught under different soil physical properties[J]. Journal of Jiangsu university(Natural Science Edition),2014,35(1):34-39. (in Chinese)
- [11] 李霞,张东兴,王维新,等. 受迫振动深松机性能参数优化与试验[J]. 农业工程学报,2015,31(21):17-24.
LI Xia,ZHANG Dongxing,WANG Weixin,et al. Performance parameter optimization and experiment of forced-vibration subsoiler[J]. Transactions of the CSAE,2015,31(21):17-24. (in Chinese)
- [12] MARAKOGLU T, CARMAN K. Effect of design parameters of a cultivator share on draft force and soil loosening in a soil bin [J]. Journal of Agronomy,2009,8(1):21-26.
- [13] BADEGAONKAR U R, DIXIT G, PATHAK K K. An experimental investigation of cultivator shank shape on draft requirement [J]. Archives of Applied Science Research,2010,2(6):246-255.
- [14] 陶雷,王永健,刘光远,等. 秸秆打捆机机架轻量化设计[J]. 中国农机化学报,2017,38(8):26-33.
TAO Lei,WANG Yongjian,LIU Guangyuan,et al. Lightweight frame design of straw baler[J]. Journal of Chinese Agricultural Mechanization,2017,38(8):26-33. (in Chinese)
- [15] 韩红阳,陈树人,绍景世,等. 机动式喷杆喷雾机机架的轻量化设计[J]. 农业工程学报,2013,29(3):47-53.
HAN Hongyang,CHEN Shuren,SHAO Jingshi,et al. Lightweight design of chassis frame for motor boom sprayer[J]. Transactions of the CSAE,2013,29(3):47-53. (in Chinese)
- [16] 张金波,佟金,马云海. 仿生减阻深松铲设计与试验[J]. 农业机械学报,2014,45(4):141-145.
ZHANG Jinbo,TONG Jin,MA Yunhai. Design and experiment of bionic anti-drag subsoiler[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery,2014,45(4):141-145. (in Chinese)
- [17] 冯伟,庞有伦,李平,等. 基于 ISIGHT 的小型收割机机架优化设计研究[J]. 西南农业学报,2019,32(1):174-178.
FENG Wei,PANG Youlun,LI Ping,et al. Lightweight design for rack of small harvester based on ISIGHT[J]. Southwest China Journal of Agricultural Sciences,2019,32(1):174-178. (in Chinese)
- [18] 徐涛,程飞,于澜,等. 基于预条件 Lanczos 算法的结构拓扑修改静态重分析方法[J]. 吉林大学学报(工学版),2007,37(5):1214-1218.
XU Tao,CHENG Fei,YU Lan,et al. New method for structural static reanalysis of topological modifications based on preconditioning Lanczos algorithm[J]. Journal of Jilin University(Engineering and Technology Edition),2007,37(5):1214-1218. (in Chinese)
- [19] 黄玉祥,杭程光,李伟,等. 深松作业效果试验及评价方法研究[J]. 西北农林科技大学学报(自然科学版),2015,43(11):228-234.
HUANG Yuxiang,HANG Chengguang,LI Wei,et al. Subsoiling test and evaluation methodology of tillage quality[J]. Journal of Northwest A&F University (Natural Science Edition),2015,43(11):228-234. (in Chinese)
- [20] 徐向宏,何明珠. 试验设计与 Design-Expert,SPSS 应用[M]. 北京:科学出版社,2010:79-84.