



张铁民, 李文涛, 梁莉. 基于灵敏度分析的病死猪搬运车转盘结构多目标优化设计[J]. 华南农业大学学报, 2017, 38(5): 103-109.

基于灵敏度分析的病死猪搬运车转盘 结构多目标优化设计

张铁民, 李文涛, 梁莉

(华南农业大学 工程学院/国家生猪种业工程技术研究中心, 广东 广州 510642)

摘要:【目的】改善病死猪搬运车的工作性能, 降低成本, 对其转盘结构进行多目标优化设计。【方法】采用 Creo Simulate 三维设计软件, 对病死猪搬运车的转盘结构进行了静力学有限元分析以及灵敏度分析, 建立多目标优化设计模型。采用模糊物元分析法和加权平均法对设计方案进行优选。【结果】建立了优化设计数学模型, 得到了 6 组非劣解; 通过评估优选, 获得了病死猪搬运车转盘结构的最优化设计方案。优化设计前后的参数对比分析结果表明, 优化后的病死猪搬运车转盘质量为 20.90 kg, 比原始方案(25.94 kg)减小了 19.43%; 最大等效应力为 1.44 MPa, 比原始方案(1.50 MPa)减少了 4.00%。【结论】基于灵敏度分析的病死猪搬运车转盘结构多目标优化设计是可行的, 可以为转盘结构的改进提供理论指导。

关键词: 搬运车; 转盘; 灵敏度; 优化; 物元分析; 加权平均法
中图分类号: TH123;S229 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-411X(2017)05-0103-07

Multi-objective optimization design for turntable of dead pig vehicle based on sensitivity analysis

ZHANG Tiemin, LI Wentao, LIANG Li

(College of Engineering, South China Agricultural University/National Pig Seed Industry
Engineering Technology Research Center, Guangzhou 510642, China)

Abstract: 【Objective】 To improve the working performance of dead pig vehicle and cut down the costs, multi-objective optimization design was carried out on the structure of turntable. 【Method】 By using the Creo Simulate three-dimension design software, the statics finite element analysis and sensitivity analysis of the original turntable were executed. Based on the above analysis, a multi-objective optimization design model for the structure of turntable was built. The optimal design scheme was selected using the fuzzy matter-element analysis method and weighted average method. 【Result】 The multi-objective optimization design model for the structure of turntable was built, and six groups of non-inferior solution were obtained. The optimal design scheme was obtained by evaluating and preferring. Comparative analysis on parameters before and after optimization showed that the turntable mass after optimization was 20.90 kg and reduced 19.43%. The maximum equivalent stress was 1.44 MPa and reduced 4.00%. 【Conclusion】 The proposed structural optimization design for the turntable of dead pig vehicle based on sensitivity analysis is reasonable and feasible. The result can provide the theoretical guide for improving turntable structure.

Key words: vehicle; turntable; sensitivity; optimization; matter-element analysis; weighted average method

病死猪无害化处理是畜禽养殖清洁生产关键环节之一^[1-2],针对病死猪搬运车的研究具有重要意义^[3]。病死猪搬运车的结构组成比较复杂,转盘作为其一个关键结构,在搬运工作时承受着较大的载荷,在保证整机工作性能和可靠性方面具有非常重要的作用,是病死猪搬运车设计的关键环节。病死猪搬运车转盘结构的设计一般是根据经验和有关的参考文献,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搬运车静、动态性能的一组参数,这种做法的缺点是难以保证所获取的参数组合是最优方案^[4]。近年来,随着虚拟样机技术的迅速推广运用,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^[5]。许俊臣^[6]对船舶加筋结构进行了模态分析,从而获得了其动力减振优化模型。张平等^[7]通过对轿车车身进行自由模态分析,改善了其局部模态特性,使整车刚度更加协调。刘江华^[8]采用虚拟样机分析技术对全地形车包括悬架系统在内的专用底盘进行了结构设计和优化,使其应力分布更加均匀。上述研究方法为病死猪搬运车转盘结构的多目标优化设计提供了有益参考。本文采用的是 Creo Simulate 有限元分析软件,对病死猪搬运车的转盘结构进行了静力学分析和灵敏度分析,在此基础上建立了多目标优化设计模型,并求解获得非劣解集。采用模糊物元分析法^[9]和加权平均法^[10]确定一组最优解,从而实现病死猪搬运车转盘结构的多目标优化设计。

1 搬运车转盘结构有限元分析

现代农业机械的结构优化设计通常是多目标优化问题^[11],以华南农业大学微机电系统设计课题组自主研发的病死猪搬运车(图 1)^[12]的转盘结构(图 2)作为研究对象,对其进行多目标优化设计。

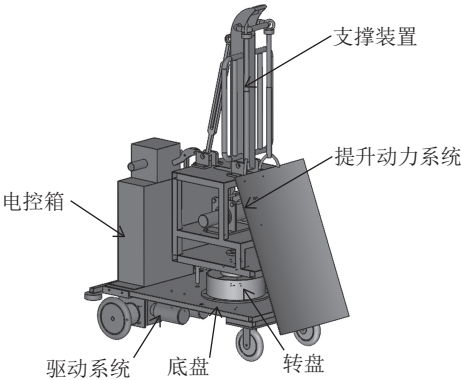


图 1 病死猪搬运车整体结构

Fig. 1 The whole structure of dead pig vehicle

图 1 是病死猪搬运车的整体结构,主要包括底盘、驱动系统、转盘、电控箱、提升动力系统、支撑装置等部分。工作时,提升动力系统是由一种带自锁结构的电动绞盘配合钢丝绳组成,用于实现搬运车提升和放下病死猪;支撑装置是一种可伸缩支撑架,它可以起到支撑作用,防止在提升病死猪上升的过程中发生侧翻;转盘装置是由牛眼轴承的组合方式来完成的,用于支撑和辅助车体 180° 转动;采用两轮独立驱动,自动化程度高。

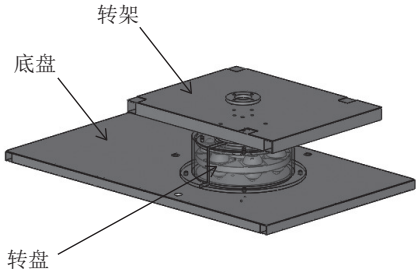


图 2 病死猪搬运车转盘结构

Fig. 2 Turntable structure of dead pig vehicle

1.1 有限元建模

病死猪搬运车的转盘结构主要有 2 个方面的作用,即作为支撑结构和动力传递结构。因此转盘必须具有良好的力学性能才能保证整机工作的可靠性。

由于转盘的受力情况比较复杂,为了得到准确的优化结果,在对转盘进行优化设计之前需要对其有限元模型进行合理的简化,为此做出如下假设:①认为转盘材料为各向同性;②认为转盘的装配孔均为光孔;③认为转盘的受力均为线性的。采用 Creo Simulate 有限元分析软件对转盘进行简化,简化后的有限元模型如图 3 所示,网格划分如图 4 所示。

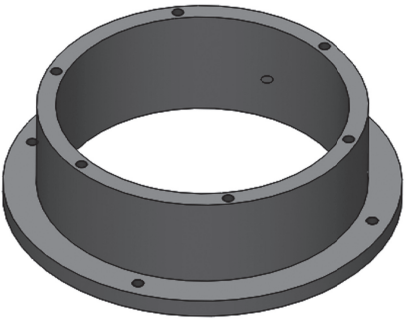


图 3 转盘的有限元模型

Fig. 3 Finite element model of the turntable

1.2 静力学分析

由于转盘结构以及受力情况较为复杂,在进行



图 4 转盘的网格划分图

Fig. 4 Grid partition of the turntable

优化设计前, 需要对其有限元模型进行静力学分析和结构灵敏度分析, 然后采用模糊物元分析法和加权平均法获得最优解, 完成多目标优化设计。具体步骤如下。

1) 定义材料: 考虑到这里的转盘工作环境各有不同, 受力情况较为复杂, 为了使用的安全性, 选择 45 钢, 通过查找机械设计手册, 定义材料属性。

2) 定义约束: 由于安装时, 周围的孔均用螺栓进行了固定, 因此在定义约束时, 用“位移约束”将上下侧面的 10 个孔进行约束, 将其固定; 另外, 由于转盘是放置在搬运车底板上, 所以必须施加“平面约束”将转盘的底面进行约束。

3) 施加载荷: 由分析可知, 该转盘既承受垂直方向的力, 同时也承受水平方向的力。转盘垂直方向的受力主要包括电动绞盘及其支撑架、支撑臂以及病死猪垂直方向的分量, 大小为 3 780 N, 方向垂直向下; 水平方向的力主要就是病死猪水平方向的分量, 大小为 1 000 N, 分散作用在 6 个安装孔上。

4) 运行求解: 有限元静态分析结果见图 5 和图 6。图 5 是转盘的等效应力分析图, 图 6 是转盘的位移图。转盘所受的最大等效应力为 1.505 MPa, 最大位移量为 0.000 068 6 mm。

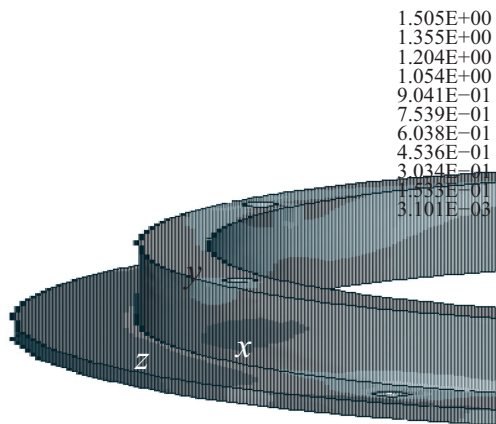


图 5 转盘的等效应力图

Fig. 5 Equivalent stress diagram of the turntable

<http://xuebao.scau.edu.cn>

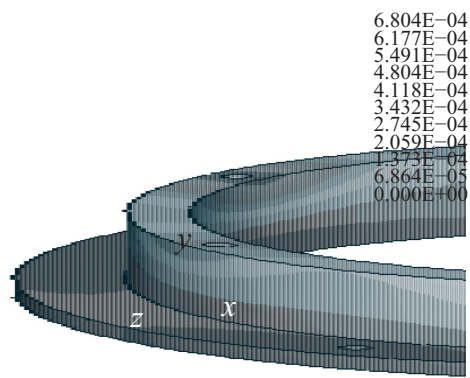


图 6 转盘的位移图

Fig. 6 Displacement diagram of the turntable

2 搬运车转盘结构优化设计

2.1 灵敏度分析

在确定优化参数之前, 需要先进行灵敏度分析。运用灵敏度分析方法确立参数的变化范围, 然后在这个范围内寻找最佳设计^[13]。灵敏度分析可分为绝对灵敏度和相对灵敏度, 绝对灵敏度的计算公式为:

$$\frac{\partial u}{\partial x_i} \approx \frac{u(x_i + \Delta x_i) - u(x_i)}{\Delta x_i}, \tag{1}$$

相对灵敏度的计算公式为:

$$\frac{\partial u}{\partial x_i} \approx \frac{[u(x_i + \Delta x_i) - u(x_i)] / u(x_i)}{\Delta x_i / x_i}. \tag{2}$$

采用一阶差分法计算等效应力 (g) 与转盘结构尺寸 (X_i) 的灵敏度关系为:

$$\frac{\partial g}{\partial X_i} \approx \frac{[g(X_i + \Delta X_i) - g(X_i)] / g(X_i)}{\Delta X_i / X_i}. \tag{3}$$

经过计算和对比分析, 得到转盘上端内圆环直径(D_1)、上端外圆环直径(D_2)、下端外圆环直径(D_3)、转盘下端厚度(h)以及转盘下端定位孔直径(d)对转盘最大等效应力的灵敏度曲线(图 7)。

2.2 确定优化参数

根据图 7 的灵敏度曲线可以看出, 转盘上端内圆环直径(D_1)在 290~330 mm 的范围内波动时, 转盘的最大等效应力在 1.8~5.0 MPa 范围内变化; 上端外圆环直径(D_2)在 330~370 mm 的范围内波动时, 转盘的最大等效应力在 1.6~9.5 MPa 范围内变化; 下端外圆环直径(D_3)在 390~450 mm 的范围内波动时, 转盘的最大等效应力在 1.57~2.62 MPa 范围内变化; 转盘下端厚度(h)在 10~30 mm 的范围内波动时, 转盘的最大等效应力在 1.60~3.48 MPa 范围内变化; 转盘下端定位孔直径(d)在 5~20 mm 的范围内波动时, 转盘的最大等效应力在 1.40~2.14 MPa 范围内变化。

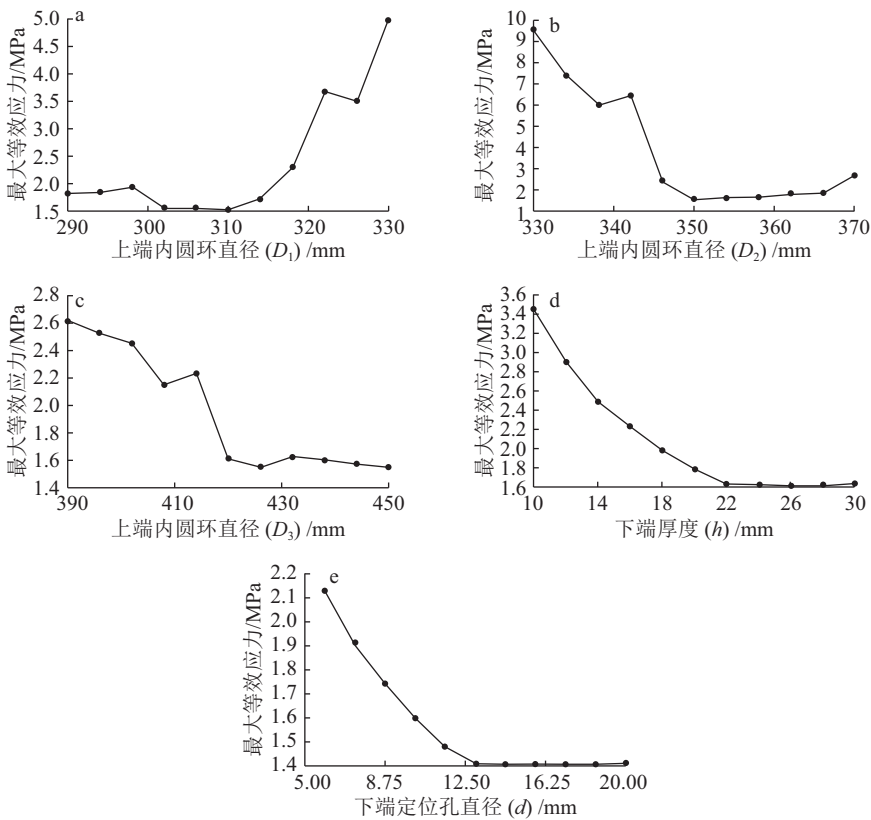


图 7 最大等效应力与转盘结构参数的关系曲线

Fig. 7 The curve of the maximum equivalent stress and the turntable structure parameters

为明确 D_1 、 D_2 、 D_3 、 h 、 d 与转盘最大等效应力之间的关系,将这 5 个参数作为优化设计的变量,最大等效应力和质量作为优化目标,进行多目标优化设计。

2.3 确定目标函数

根据转盘的静力学分析结果,将转盘的最大等效应力确定为优化目标,然而在减小最大等效应力的过程中,往往会导致转盘结构的质量增加,这并不符合我们轻量化、低成本的设计理念,为此这里将转盘的质量 (M) 也确定为一个优化目标,使二者之间达到一个较为理想的平衡点。根据上面结构灵敏度分析的结果,将转盘的上端内圆环直径、上端外圆环直径、下端外圆环直径、转盘下端厚度以及转盘下端定位孔直径作为设计变量,依次记为 X_1 、 X_2 、 X_3 、 X_4 、 X_5 ,其中 X_1 的初始值为 310 mm,上、下限分别为 290、330 mm; X_2 的初始值为 350 mm,上、下限分别为 330、370 mm; X_3 的初始值为 420 mm,上、下限分别为 390、450 mm; X_4 的初始值为 20 mm,上、下限分别为 10、30 mm; X_5 的初始值为 10 mm,上、下限分别为 5、20 mm。

在转盘的有限元模型中定义 5 个优化设计的变量,将转盘的最大等效应力和质量作为优化设计

的目标函数,优化设计的目的是获取最优的设计参数组合 $X = (X_1, X_2, X_3, X_4, X_5)$,使转盘在质量减轻的前提下,最大等效应力越小越好。

采用梯度投影优化算法^[14],优化收敛公差为 2%,最大优化迭代次数为 20,于是就可以建立如下的多目标优化设计数学模型:

$$\begin{cases} \min \begin{cases} g(X_i) \\ M(X_i) \end{cases} \\ \text{s.t.} \begin{cases} 290 \text{ mm} \leq X_1 \leq 330 \text{ mm} \\ 330 \text{ mm} \leq X_2 \leq 370 \text{ mm} \\ 390 \text{ mm} \leq X_3 \leq 450 \text{ mm} \\ 10 \text{ mm} \leq X_4 \leq 30 \text{ mm} \\ 5 \text{ mm} \leq X_5 \leq 20 \text{ mm} \end{cases} \end{cases}, \quad (4)$$

其中,

$$i = 1, 2, 3, 4, 5, \quad g(X) = \sum_{k=1}^m \frac{\Delta F_k}{\Delta A_k},$$

式中, $M(X_i)$ 为优化后的转盘的质量; m 为零件有限元网格划分的四面体的个数; ΔF_k 为第 k 个有限元的合力; ΔA_k 为第 k 个有限元的面积; i 为约束条件,目标函数 $g(X)$ 取转盘的最小应力值, $M(X)$ 取转盘的最小质量。

2.4 求解

根据上述建立的数学模型, 采用 Creo Simulate 软件的优化设计模块对病死猪搬运车转盘结构进

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。

表 1 优化设计的结果
Tab. 1 The results of optimization design

项目	变量	原方案(C_0)	优化设计方案					
			C_1	C_2	C_3	C_4	C_5	C_6
设计变量	X_1/mm	310	310.20	310.28	311.74	324.71	325.04	310.08
	X_2/mm	350	353.78	352.18	346.64	354.69	355.29	351.03
	X_3/mm	420	408.26	409.56	408.11	400.66	400.46	425.96
	X_4/mm	20	16.04	17.01	16.09	12.62	12.45	24.10
	X_5/mm	10	12.10	12.90	14.60	16.59	16.56	11.99
优化目标	M/kg	25.94	24.58	24.38	20.90	17.34	17.40	19.12
	g/MPa	1.50	1.54	1.44	1.44	1.38	1.39	1.37

3 采用模糊物元分析法获取最优化设计方案

以有序的三元组 $R = (N, C, V)$ 作为描述事物的基本元, 称为物元。其中, N 表示事物的名称; C 表示事物的特征; V 表示事物关于特征 C 的量值^[9]。如果描述物元的某特征量值具有模糊性, 此时构成的一个三元有序组就是模糊物元^[9, 15]。

3.1 决策方案的物元建立

通过优化后得到的病死猪搬运车转盘结构设计方案的有多种, 由于各个评价指标量纲不统一, 因此需要借助评价方法获得最佳的设计方案^[16]。对于一个多目标决策方案, 将该方案的事物, 特征以及量值用有序三元组来描述, 即事物就是方案 C_i , 特征就是评价指标 M_j , 量值就是给定的数值 x_{ij} , 从而可以构成如下的物元, 即模糊物元判断矩阵(R):

$$R = \begin{bmatrix} & C_0 & C_1 & C_2 & C_3 & C_4 & C_5 & C_6 \\ M_1 : (X_1) & 310 & 310.20 & 310.28 & 311.74 & 324.71 & 325.04 & 310.08 \\ M_2 : (X_2) & 350 & 353.78 & 352.18 & 346.64 & 354.69 & 355.29 & 351.03 \\ M_3 : (X_3) & 420 & 408.26 & 409.56 & 408.11 & 400.66 & 400.46 & 425.96 \\ M_4 : (X_4) & 20 & 16.04 & 17.01 & 16.09 & 12.62 & 12.45 & 24.10 \\ M_5 : (X_5) & 10 & 12.10 & 12.90 & 14.60 & 16.59 & 16.56 & 11.99 \\ M_6 : (M) & 25.94 & 24.58 & 24.38 & 20.90 & 17.34 & 17.40 & 19.12 \\ M_7 : (g) & 1.50 & 1.54 & 1.44 & 1.44 & 1.38 & 1.39 & 1.37 \end{bmatrix}, \quad (5)$$

式中, $M_i(i = 1, 2, \dots, 7)$ 表示评价指标, $C_j(j = 0, 1, \dots, 6)$ 表示设计方案。

3.2 隶属度的确定

对于越大越优型的决策问题, 即效益型指标, 计算公式为:

$$U_{ij} = \frac{X_{ij} - \min X_{ij}}{\max X_{ij} - \min X_{ij}}, \quad (6)$$

对于越小越优型的决策问题, 即成本型指标, 计算公式为:

$$U_{ij} = \frac{\max X_{ij} - X_{ij}}{\max X_{ij} - \min X_{ij}}, \quad (7)$$

式中, X_{ij} 表示设计方案 C_j 的评价指标 M_i 所对应的参数值, $\max X_{ij}$ 和 $\min X_{ij}$ 分别表示多目标决策方案中每一项指标所对应量值中的最大值与最小值。

在上述 7 项评价指标中, 质量(M)和等效应力(g)作为优化目标, 越小越好, 应当按照成本型指标来进行评估; 转盘上端内圆环直径、上端外圆环直径虽然对转盘质量有一定的影响, 但是对于最大等效应力的影响更为明显, 应越大越好, 应当按照效益型指标进行评估; 下端外圆环直径、转盘下端厚度以及转盘下端定位孔直径对质量有很大影响, 而对最大等效应力影响较小, 应越小越好, 因此按照成本型指标进行评估。

3.3 模糊物元的建立

根据前面模糊物元判断矩阵 R 以及隶属度

U_{ij} , 建立隶属度矩阵 R^ξ :

$$R^\xi = \begin{bmatrix} & C_0 & C_1 & C_2 & C_3 & C_4 & C_5 & C_6 \\ M_1 & 0 & 0.013\ 3 & 0.018\ 6 & 0.115\ 7 & 0.978\ 1 & 1 & 0.005\ 3 \\ M_2 & 0.388\ 4 & 0.825\ 4 & 0.641\ 2 & 0 & 0.930\ 6 & 1 & 0.507\ 5 \\ M_3 & 0.233\ 7 & 0.694\ 1 & 0.643\ 1 & 0.700\ 0 & 0.992\ 2 & 1 & 0 \\ M_4 & 0.351\ 9 & 0.691\ 8 & 0.608\ 6 & 0.687\ 6 & 0.985\ 4 & 1 & 0 \\ M_5 & 1 & 0.681\ 3 & 0.559\ 9 & 0.302\ 0 & 0 & 0.004\ 6 & 0.698\ 0 \\ M_6 & 0 & 0.158\ 1 & 0.181\ 4 & 0.586\ 0 & 1 & 0.993\ 0 & 0.793\ 0 \\ M_7 & 0.235\ 3 & 0 & 0.588\ 2 & 0.588\ 2 & 0.941\ 2 & 0.882\ 4 & 1 \end{bmatrix}.$$

(8)

3.4 计算关联度并进行关联分析确定多目标决策方案

通过计算关联度并排序, 即可实现多目标方案的最终决策^[15]. 用 k_i 表示关联度, 此时将所有关联度组合, 构造出关联度复合模糊物元, 以 R^k 表示, 采用加权平均法^[10]进行处理, 即有

$$R^k = R^\xi \times R^w,$$

(9)

式中, R^ξ 是隶属度矩阵, R^w 表示每一决策方案指标的权的复合物元^[15].

如果 W_j 表示每一决策方案第 j 项评价指标的

权重, 则

$$W_j = \sum_{i=1}^m \xi_{ij} / \sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n \xi_{ij},$$

(10)

式中, ξ_{ij} 表示关联系数, $m \leq 7, n \leq 7$ 且为正整数. 此时

$$R^w = \begin{bmatrix} & W_j \\ C_1 & W_1 \\ C_2 & W_2 \\ \vdots & \vdots \\ C_n & W_n \end{bmatrix}.$$

代入数值计算得

$$R^w = \begin{bmatrix} 0.084\ 3 & 0.116\ 9 & 0.123\ 7 & 0.113\ 7 & 0.222\ 4 & 0.224\ 4 & 0.114\ 6 \end{bmatrix}^T$$

$$R^k = \begin{bmatrix} M_1 & M_2 & M_3 & M_4 & M_5 & M_6 & M_7 \\ k_i & 0.459\ 5 & 0.698\ 1 & 0.705 & 0.707\ 6 & 0.348\ 6 & 0.643\ 7 & 0.681\ 4 \end{bmatrix}^T.$$

(11)

按各种优化设计方案的优劣程度排序依次为: $C_3C_2C_1C_6C_5C_0C_4$, 由此可以确定最佳优化设计方案为 C_3 . 优化设计前后各参数的对比如表 2 所示.

表 2 优化设计前后参数对比

Tab. 2 Comparison of parameters before and after optimization design

参数 ¹⁾	原始方案	优化方案	变化率/%
X_1/mm	310	311.74	0.56
X_2/mm	350	346.64	-0.96
X_3/mm	420	408.11	-2.83
X_4/mm	20	16.09	-19.55
X_5/mm	10	14.60	46.00
M/kg	25.94	20.90	-19.43
g/MPa	1.50	1.44	-4.00

1) X_1 : 转盘上端内圆环直径, X_2 : 转盘上端外圆环直径, X_3 : 转盘下端外圆环直径, X_4 : 转盘下端厚度, X_5 : 转盘下端定位孔直径, M : 转盘质量, g : 转盘等效应力.

根据表 2 可以看出: 优化后的转盘上端内圆环直径(X_1)为 311.74 mm, 比原方案增加了 0.56%; 优化后的转盘上端外圆环直径(X_2)为 346.64 mm, 减小了 0.96%; 优化后的转盘下端外圆环直径(X_3)为 408.11 mm, 减小了 2.83%; 优化后的转盘下端厚度(X_4)为 16.09 mm, 减小了 19.55%; 优化后的转盘下端定位孔直径(X_5)为 14.60 mm, 增加了 46.00%; 优化后的转盘质量为 20.90 kg, 减小了 19.43%; 优化后的转盘等效应力为 1.44 MPa, 减小了 4.00%.

4 结论

在 Creo Simulate 优化设计软件中, 对病死猪搬运车的转盘结构进行有限元静力学分析, 得出转盘的最大等效应力为 1.50 MPa. 通过灵敏度分析, 确定转盘结构优化设计的设计变量依次为转盘上端内圆环直径、上端外圆环直径、下端外圆环直径、转盘下端厚度以及转盘下端定位孔直径, 目标函数为最大等效应力以及转盘质量. 建立优化设计数学模

型, 进行多目标优化设计, 获取 6 组非劣解集; 采用模糊物元分析法以及加权平均法对 6 组非劣解集进行评估, 获得最优化设计方案为 C_3 。

通过优化前后的参数对比, 结果得出: 优化后的转盘质量为 20.90 kg, 减小了 19.43%; 优化后的转盘等效应力为 1.44 MPa, 减小了 4.00%。完成了对病死猪搬运车转盘结构的多目标优化设计, 为转盘结构的改进提供了理论指导。

参考文献:

[1] 孙培明, 唐宏. 病死猪无害化处理技术综合性分析与讨论[J]. 中国猪业, 2015(4): 55-58.

[2] 乔娟, 刘增金. 产业链视角下病死猪无害化处理研究[J]. 农业经济问题, 2015(2): 102-109.

[3] 高绪, 谢菊芳, 樊磊, 等. 病死猪无害化处理运输车辆安全可追溯系统的构建与应用[J]. 中国农业科学, 2016, 49(12): 2290-2300.

[4] 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]. 农业机械学报, 2013, 44(12): 56-61.

[5] 薛隆泉, 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.

[6] 许俊臣. 船舶加筋结构的运行模态分析及动力减振优化[D]. 大连: 大连理工大学, 2013.

[7] 张平, 雷雨成, 高翔, 等. 轿车车身模态分析及结构优化设计[J]. 汽车技术, 2006(4): 5-9.

[8] 刘江华. 四轮独立驱动电动全地形车专用底盘结构设计及优化[D]. 南京: 东南大学, 2015.

[9] 蔡文. 新学科《物元分析》[J]. 广东工学院学报, 1992, 9(4): 105-108.

[10] LIU H X, HE X, HE B. Method of successive weighted averages (MSWA) and self-regulated averaging schemes for solving stochastic user equilibrium problem[J]. Netw Spat Econ, 2009, 9(4): 485-503.

[11] 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.

[12] 张铁民, 李文涛, 梁莉, 等. 一种病死猪搬运车及其作业方法: CN104944293A[P]. 2015-09-30.

[13] SONG X, SUN G, LI Q. Sensitivity analysis and reliability based design optimization for high-strength steel tailor welded thin-walled structures under crashworthiness[J]. Thin Wall Struct, 2016, 109: 132-142.

[14] BONETTINI S, PRATO M, REBEGOLDI S. A cyclic block coordinate descent method with generalized gradient projections[J]. Appl Math Comput, 2016, 286: 288-300.

[15] 杨兆兰. 多目标决策模糊物元分析[J]. 甘肃联合大学学报(自然科学版), 2005, 19(3): 12-14.

[16] 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.

【责任编辑 周志红】