

doi:10.3969/j.issn.1672-4348.2019.01.009

# 基于改进 BESO 算法的集材绞盘机卷筒优化设计

闫晓磊,何炬,许启旺,黄登峰

(福建工程学院 福建省汽车电子与电驱动重点实验室,福建 福州 350118)

**摘要:** 通过修正材料插值模型和引入应力均方差作为性能收敛指标,改进了基于 von Mises 应力的双向渐进结构拓扑优化(Bi-directional Evolutionary Structural Optimization, BESO)方法,并结合 Abaqus 有限元软件及 MATLAB 语言编程实现了该算法;在此基础上,优化设计了集材绞盘机摩擦卷筒,得到不同材料体积分数、不同旋转周期数时,摩擦卷筒的最优拓扑结构,在减轻质量的同时,降低了应力集中水平。优化结果对实现集材绞盘机摩擦卷筒轻量化设计具有工程指导意义。

**关键词:** 摩擦卷筒;拓扑优化;应力;飞轮

**中图分类号:** TH122      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1672-4348(2019)01-0050-05

## Optimal design of the yarder friction roll based on improved BESO method

YAN Xiaolei, HE Ju, XU Qiwang, HUANG Dengfeng

(Fujian Key Laboratory of Automotive Electronics and Electric Drive, Fujian University of Technology, Fuzhou 350118, China)

**Abstract:** The previous bi-directional evolutionary structural optimization (BESO) method based on von Mises stress was improved by modifying the material interpolation model and introducing the stress mean square error as the performance convergence index. The improved BESO algorithm was realized by combining finite element software Abaqus with programming language MATLAB. On this basis, the yarder friction roll was optimized and the optimal structural topologies were obtained under different material volume fractions and different numbers of rotation periods, for which the mass and the stress concentration level decreased simultaneously. Optimization results provide a significant engineering guide for realizing lightweight design of the yarder friction roll.

**Keywords:** friction roll; topology optimization; stress; flywheel

林业机械不断向轻量化、高效率方向发展,摩擦卷筒作为林业绞盘机的重要动力部件,直接影响着林业绞盘机的工作效率及性能,因此,对摩擦卷筒进行进一步优化很有必要<sup>[1]</sup>。国内外学者对此已开展了一系列研究:Usabiaga 等<sup>[2]</sup>在分析卷筒直径对钢丝绳影响的基础上,对卷筒直径进行优化设计;罗健康等<sup>[3]</sup>基于有限元方法,针对卷筒壁厚进行了优化设计;聂金宁等<sup>[4]</sup>采用微积分与有限元仿真分析相结合的方法,研究卷筒在不同载荷条件下的应力状态,并对卷筒进行了优化设计;吴传宇等<sup>[5]</sup>借助有限元分析软件对摩擦卷筒进行了分析与改进;张嘉璐等<sup>[6]</sup>基于有限元方法,对抛物线形和双锥形摩擦卷筒结构形式进行了应力及形变分析。以上研究仅对摩擦卷筒进行了结构分析或尺寸参数优化设计。为了得到力学性能更加良好的结构,拓扑优化成为了最常用的设计方法<sup>[7]</sup>。张小珍等<sup>[8]</sup>基于 Optistruct 软件,以摩擦卷筒体积最小为优化目标,对摩擦卷筒进

收稿日期: 2018-11-06  
基金项目: 福建省自然科学基金(2015J05088);福建省教育厅中青年教师教育科研项目(JA14225);福建工程学院科研启动基金(GY-Z1400)  
第一作者简介: 闫晓磊(1981-),男,河南许昌人,副教授,博士,研究方向:结构轻量化技术。

行了拓扑结构优化,但得到的优化结果边界不清晰。本文尝试利用一种改进的拓扑优化方法对摩擦卷筒进行优化设计。

常见的拓扑优化方法有水平集方法、均匀化方法、SIMP 方法<sup>[9-10]</sup>、渐近结构优化方法(BESO)、独立连续映射法(ICM)、移动可变形组件法(MMC)等。BESO 方法具有边界清晰、易于实现的特点,但实际应用中仍存在灵敏度推导繁琐复杂<sup>[11-12]</sup>、删除单元导致的数值奇异<sup>[13-14]</sup>、基于准则法优化时性能难以评价等一些问题<sup>[15]</sup>。针对这些问题,本文尝试改进基于 von Mises 应力的双向渐进结构拓扑优化方法,并将其应用于林业绞盘机摩擦卷筒的轻量化设计。

## 1 基于米塞斯应力的 BESO 算法改进

### 1.1 材料插值模型

BESO 方法的设计变量是离散的(0 或 1),结构有限元网格划分后,每个单元对应一个设计变量,当某个单元对应的设计变量为 0 时,就意味着将该单元的材料删掉,这在原理上行得通,但在实际的有限元数值计算时,直接将单元材料赋值为 0 可能会造成结构刚度矩阵奇异<sup>[16-18]</sup>。为避免这种数值奇异现象,本文采用修改的材料插值模型:

$$\begin{cases} E(x_i) = E_{\min} + x_i^p(E_0 - E_{\min}) \\ \rho(x_i) = \rho_{\min} + x_i^p(\rho_0 - \rho_{\min}) \end{cases}, x_i = 0 \text{ or } 1 \quad (1)$$

其中,  $x_i$  为  $i$  个单元的设计变量;  $E(x_i)$ 、 $\rho(x_i)$  分别代表单元的弹性模量和密度;  $E_0$ 、 $\rho_0$  分别代表  $x_i = 1$  时的弹性模量和密度;  $E_{\min}$ 、 $\rho_{\min}$  分别代表  $x_i = 0$  时的弹性模量和密度,通常取  $E_{\min} = 10^{-6}E_0$ 、 $\rho_{\min} = 10^{-6}\rho_0$ ;  $p$  为惩罚系数(通常取 3)。此时,单元“删除”是通过赋予单元一种很“软”的材料实现的,从而可避免结构刚度数值奇异的问题。

### 1.2 应力灵敏度分析

应力水平是结构设计的一个重要判断标准,一个理想的结构,内部应力应处于同一应力水平。以应力水平为优化准则的 BESO 方法,原理简单、计算效率高,更适合于实际工程应用。结构中某一点处的 Von Mises 应力为:

$$\sigma^{VM} = \sqrt{\sigma^T T \sigma} \quad (2)$$

其中,  $\sigma$  为某一点处的应力向量,  $T$  为系数矩阵。

根据有限元理论,第  $i$  个单元内的应力状态可表示为:

$$\sigma_i = D B u_i \quad (3)$$

其中,  $D$  为单元的弹性矩阵;  $B$  为应变矩阵;  $u_i$  为单元节点位移。

将公式(1)代入公式(3)整理可得:

$$\sigma_i = \left[ \frac{E_{\min}}{E_0} + x_i^p \left( 1 - \frac{E_{\min}}{E_0} \right) \right] D_0 B u_i \quad (4)$$

其中,  $D_0$  表示单元为实体材料时的弹性矩阵。

再将公式(4)代入公式(2),得到第  $i$  个单元内等效的米塞斯应力:

$$\sigma_i^{VM} = \left[ \frac{E_{\min}}{E_0} + x_i^p \left( 1 - \frac{E_{\min}}{E_0} \right) \right] \sigma_{i0}^{VM} \quad (5)$$

其中,  $\sigma_{i0}^{VM}$  代表第  $i$  个单元材料为实体材料时的米塞斯应力。

将公式(5)两边对  $x_i$  求导得:

$$\frac{d\sigma_i^{VM}}{dx_i} = p x_i^{p-1} \left[ 1 - \frac{E_{\min}}{E_0} \right] \sigma_{i0}^{VM} \quad (6)$$

因此,基于 von Mises 应力的单元灵敏度数可定义为:

$$\alpha_i = \frac{E_0}{p(E_0 - E_{\min})} \frac{d\sigma_i^{VM}}{dx_i} = \begin{cases} \sigma_{i0}^{VM} & x_i = 1 \\ 0 & x_i = 0 \end{cases} \quad (7)$$

可见,基于应力准则的拓扑优化,其灵敏度计算很容易。在实际应用中,单元的灵敏度数可通过单元各节点处的灵敏度数求平均得到:

$$\alpha_i^e = \frac{\sum_{n=1}^M \alpha_i^n}{M} \quad (8)$$

式中,  $M$  为第  $i$  个单元的节点数,对于四边形单元  $M=4$ ,对于六面体单元  $M=8$ 。

### 1.3 性能评价指标

基于米塞斯应力的 BESO 算法的基本原理就是逐步删除结构中应力低的材料,从而使结构的应力分布逐渐均匀。在统计学中,均方差是用来衡量数据离散程度的,均方差越小说明数据越集中,反之,则越离散。结构应力是否均匀,同样可以用应力均方差来衡量<sup>[19]</sup>。因此,本文将应力均方差作为基于应力的 BESO 算法的性能评价指标 PI,即

$$PI = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{N_k} (|\sigma_i^{VM}| - \bar{\sigma}_k^{VM})^2}{N_k}} \quad (9)$$

其中,  $N_k$  代表第  $k$  次迭代时结构的实体单元总

数,  $\bar{\sigma}_k^{VM}$  代表第  $k$  次迭代各实体单元的平均应力。

1.4 改进的 BESO 算法步骤及软件实现

改进后的 BESO 算法包括以下计算步骤:

- 1) 初始化设计区域,对设计区域进行网格的划分,给定目标体积分数及删除率;
- 2) 对结构进行有限元方法分析;
- 3) 计算单元等效应力,得到单元灵敏度数并进行滤波处理<sup>[20]</sup>;
- 4) 根据单元灵敏度数大小,对单元进行排序,按照删除率对单元进行删、添;
- 5) 重复以上过程,直至满足收敛条件,得到最优拓扑结构。

图 1 给出了该算法的具体流程图。

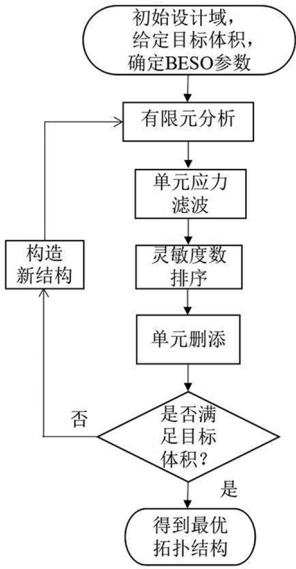


图 1 改进后 BESO 算法流程图

Fig.1 The improved BESO method flowchart

改进的 BESO 算法是通过联合 Abaqus 有限元软件与 MATLAB 编程语言来实现的,在算法实现过程中的关键步骤包括:

- 1) 有限元软件的调用。在 MATLAB 程序中,采用 dos 命令来调用 Abaqus 有限元软件,命令格式为:status = dos ( 'abaqus job=file\_name.inp' ), 其中,status 表示返回状态;file\_name 表示有限元模型文件名。
- 2) 有限元分析结果的读取。通过读取 Abaqus 的 fil 文件,将单元节点应力数据保存为 txt 文件,然后再导入到 MATLAB 的 workspace 中。
- 3) 删、添单元后新结构的构造。可通过修改 inp 文件来实现单元的删、添,从而构造新的结构

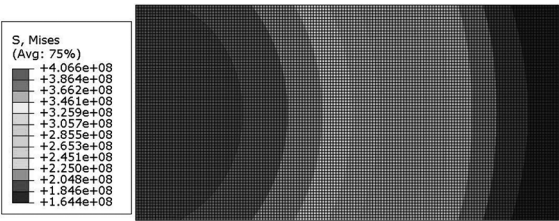
用于下一步有限元分析。

2 集材绞盘机摩擦卷筒设计

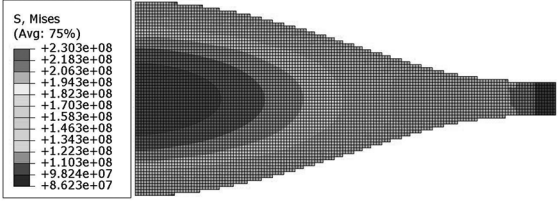
2.1 算法验证

为验证改进的 BESO 算法,先来研究一个简单算例:旋转飞轮的形状优化问题。在离心载荷作用下,盘型飞轮可看成二维轴对称问题。假设飞轮由铝合金制成,弹性模量为 70 GPa、泊松比为 0.3、密度为 2 700 kg/m<sup>3</sup>;飞轮半径为 300 mm、轴向厚度为 150 mm;飞轮以 2 000 rad/s 高速旋转。设定 BESO 的进化率 ER=2%、惩罚系数  $p=3$ 、滤波半径  $r_{min}=3$ 、目标体积  $V^*=50\%$ 。

图 2 (b) 为优化后飞轮的形状及应力分布。与初始状态图 2 (a) 相比,最大应力降低了 43%,低应力区域(深色)也明显减少。图 3 给出了优化过程中飞轮结构应力均方差的变化曲线,从图 3 可以看出,经过优化,飞轮内部应力变得更加均匀。此外,从图 2 (b) 还可以看到,优化后的飞轮形状与等应力飞轮的形状十分相似。综上所述,改进的 BESO 方法是可行、有效的。下面采用该方法进一步开展应用研究。



(a) 飞轮初始结构应力分布



(b) 体积分数为50%时飞轮最优形状及其应力分布

图 2 旋转飞轮优化结果对比

Fig.2 Omparison of flywheel optimization results

2.2 摩擦卷筒拓扑优化设计

集材绞盘机是依靠摩擦卷筒与钢索产生的摩擦力牵引钢索运行的,对摩擦卷筒进一步优化设计,有利于实现绞盘机轻量化和提高作业效率。摩擦卷筒主要承受的载荷是钢索拉力对其作用的扭矩,设摩擦卷筒最大牵引力为 19 208 N,根据文



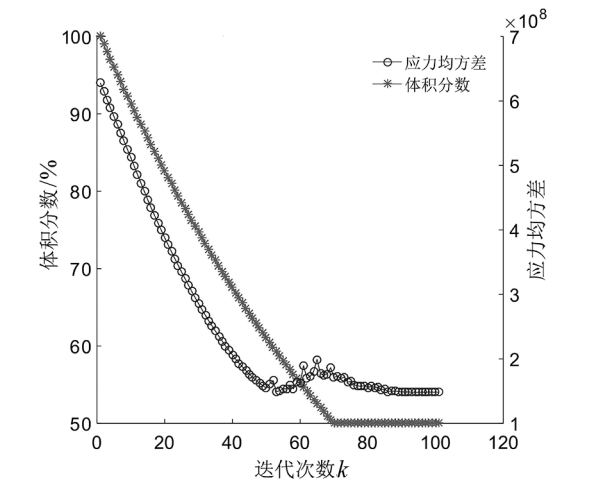


图 3 飞轮应力均方与体积分数变化差曲线  
Fig.3 Stress standard deviation convergence curve of flywheel

献[7],可以得到工作半径为 150 mm 的摩擦卷筒所承受的最大扭矩约为 2 881.2 N · m。摩擦卷筒的材质一般为低合金高强钢,弹性模量为 210 GPa,泊松比为 0.3,密度为 7 900 kg/m<sup>3</sup>。摩擦卷筒是旋转周期对称结构,图 4 为 1/4 周期摩擦卷筒的初始结构(旋转角度为 60°),外半径为 150 mm,内、外端径向厚度都为 20 mm,轴向最大厚度为 70 mm,轴向最小厚度为 50 mm;其中深色部分为非设计域,浅色部分为实际的设计域。其他优化参数不变。

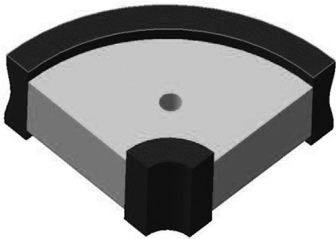


图 4 摩擦卷筒的初始结构  
Fig.4 Initial model of friction drum

图 5 给出了旋转周期数为 4、设计域材料体积分数为 40%时的摩擦卷筒最优拓扑结构及其应力分布。从图中可看出,优化后摩擦卷筒结构边界清晰,不存在中间过渡材料;且最大应力为 24.11MPa,远小于材料的许用应力 113 MPa,可见仍有进一步优化的空间。

为进一步研究材料体积分数及旋转周期数对摩擦卷筒结构的影响,图 6、7、8 分别给出了在体

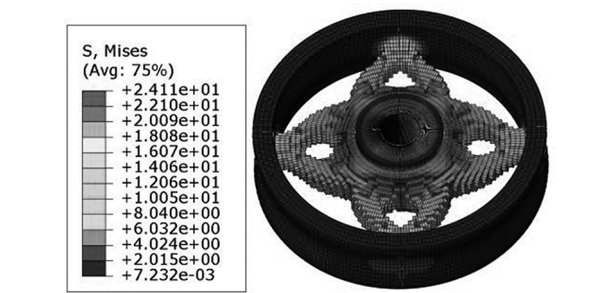


图 5 旋转周期数为 4、材料体积分数为 40%时的最优摩擦卷筒拓扑结构  
Fig.5 Optimal friction drum topology when the number of rotation periods is 4 and the material volume fraction is 40%

积分数为 20%、40%以及 60%情况下,不同旋转周期数对应的摩擦卷筒的最优拓扑结构。

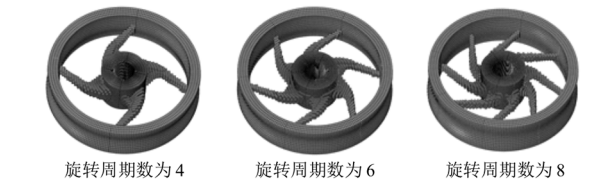


图 6 材料体积分数为 20%时不同旋转周期数的摩擦卷筒最优拓扑结构  
Fig.6 Topological optimization results of the friction drum with a volume fraction of 20%

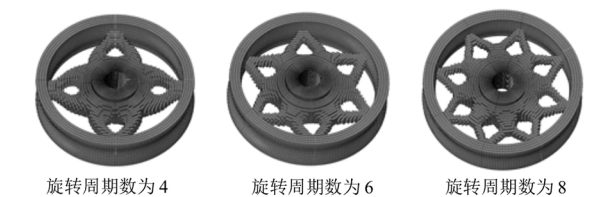


图 7 材料体积分数为 40%时不同旋转周期数的摩擦卷筒最优拓扑结构  
Fig.7 Topological optimization results of the friction drum with a volume fraction of 40%

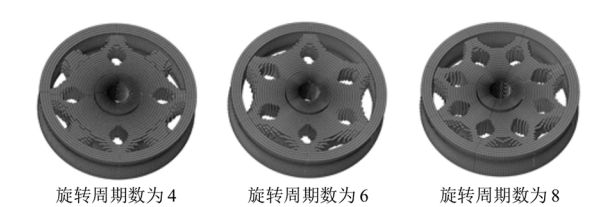


图 8 材料体积分数为 60%时不同旋转周期数的摩擦卷筒最优拓扑结构  
Fig.8 Topological optimization results of the friction drum with a volume fraction of 60%

对比图 6-8 可看出,不同约束条件,摩擦卷筒的最优拓扑不尽相同。随着旋转周期数的增加,摩擦卷筒内的孔洞也跟着增多,但结构形式变化不大;随着材料体积分数减小,摩擦卷筒的孔洞逐渐增大,结构形式变得明显不同,结构中“杆件”增多,结构趋于简单化。在实际设计生产中,应综合考虑使用的材料性能及加工成本,选择经济实用的拓扑结构。

### 3 结论

1)改进的 BESO 算法无需复杂的公式推导,

具有简单高效、易于实现的特点,便于实际工程应用。

2)采用改进的 BESO 方法可得到结构合理、边界清晰的集材绞盘机摩擦卷筒最优拓扑结构,为摩擦卷筒轻量化设计与开发提供了理论和技术支撑。

3)不同约束条件,摩擦卷筒的最优拓扑不尽相同;随着旋转周期数目增加,摩擦卷筒结构形式变化不大,但随着材料体积分数减小,摩擦卷筒结构形式变化明显,摩擦卷筒中“杆件”增多,结构趋于简单化。

### 参考文献:

- [1] 吴传宇,周成军,张正雄,等. 便携式绞盘机结构优化设计[J]. 福建农机, 2015(1): 36-39.
- [2] Usabiaga H, Pagalday J M. Analytical procedure for modeling recursively and wire by wire stranded ropes subjected to traction and torsion load [J]. International Journal of Solids and Structures, 2008, 45(21): 5503-5520.
- [3] 罗健康,印波. 起重机卷筒有限元分析及结构优化[J]. 机械设计与制造, 2010(11): 185-186.
- [4] 聂金宁,王慧,付秀丽. 新型电缆牵引机双摩擦卷筒应力分析与仿真[J]. 机械设计, 2012, 29(4): 73-77.
- [5] 吴传宇,周成军,周新年,等. 集材绞盘机新型摩擦卷筒试验与仿真分析[J]. 福建农林大学学报(自然科学版), 2016, 45(5): 611-616.
- [6] 张嘉璐,邵明辉. 矿用无极绳绞车摩擦卷筒结构形式的研究[J]. 矿山机械, 2017(7): 26-29.
- [7] 董小虎,丁晓红. 基于自适应成长法的周期性加筋结构拓扑优化设计方法[J]. 中国机械工程, 2018, 29(17): 2045-2051.
- [8] 张小珍,沈嵘枫,粘雅玲. 摩擦卷筒轻量化设计[J]. 福建农林大学学报(自然科学版), 2015, 44(6): 662-667.
- [9] Zuo W, Saitou K. Multi-material topology optimization using ordered SIMP interpolation[J]. Structural & Multidisciplinary Optimization, 2017, 55: 477-491.
- [10] 焦洪宇,周奇才,李英. 基于 SIMP 材料插值模型的周期性结构拓扑优化[J]. 应用力学学报, 2014(4): 578-581.
- [11] 谢亿民,左志豪,吕俊超. 利用双向渐进结构优化算法进行建筑设计[J]. 时代建筑, 2014(5): 20-25.
- [12] Nguyen T, Ghabraie K, Tran-Cong T. Applying Bi-directional Evolutionary Structural Optimization Method for Tunnel Reinforcement Design Considering Nonlinear Material Behaviour[J]. Computers and Geotechnics, 2014, 55: 57-66.
- [13] Sigmund O. Morphology-based black and white filters for topology optimization[J]. Structural & Multidisciplinary Optimization, 2007, 33(4-5): 401-424.
- [14] 匡兵,李应弟,刘夫云,等. 基于单元密度进化步长控制的双向渐进结构优化方法[J]. 计算力学学报, 2016, 33(1): 15-21.
- [15] Xia L, Zhang L, Xia Q, et al. Stress-based topology optimization using bi-directional evolutionary structural optimization method[J]. Computer Methods in Applied Mechanics & Engineering, 2018, 333: 356-370.
- [16] 贺丹,刘书田. 渐进结构优化方法失效机理分析与改进策略[J]. 计算力学学报, 2014(3): 310-314.
- [17] Huang X, Xie Y M. Evolutionary topology optimization of continuum structures methods and applications[M]. Chichester: John Wiley and Sons Ltd, 2010.
- [18] 苏巧灵. 基于敏度权重系数的渐进结构优化算法[J]. 机械设计与研究, 2018(3): 12-16.
- [19] 闫晓磊. 储能飞轮优化设计理论与方法研究[D]. 长沙:湖南大学, 2012.
- [20] 冯鹏升. 基于单元应力选择的 BESO 算法及其应用研究[J]. 机械设计, 2018(2): 23-27.

(责任编辑:陈雯)