

赵丽娟,范佳艺,李明昊. 复杂煤层采煤机螺旋滚筒渐变可靠性设计[J]. 煤炭学报, 2018, 43(3): 870-877. doi:10.13225/j.cnki.jccs.2017.1009

ZHAO Lijuan, FAN Jiayi, LI Minghao. Gradient reliability design of shearer's drum in complicated seam[J]. Journal of China Coal Society, 2018, 43(3): 870-877. doi:10.13225/j.cnki.jccs.2017.1009

## 复杂煤层采煤机螺旋滚筒渐变可靠性设计

赵丽娟, 范佳艺, 李明昊

(辽宁工程技术大学 机械工程学院, 辽宁 阜新 123000)

**摘要:**为实现采煤机螺旋滚筒在复杂煤层赋存条件下综合性能最优,以“MG400/951-WD”型号采煤机为研究对象,基于破煤理论,利用 Matlab 得到了含坚硬夹矸及(或)硫化铁结核的复杂煤层赋存条件下螺旋滚筒截齿载荷,结合刚柔耦合虚拟样机技术建立以螺旋滚筒为柔性件的采煤机刚柔耦合虚拟样机模型,仿真发现了采煤机薄弱环节;结合 EDEM 离散元技术得到采煤机装煤性能。基于可靠性灵敏度设计理论、可靠性稳健设计理论和性能退化理论,分析了螺旋滚筒设计变量对渐变可靠性灵敏度的影响,构建了螺旋滚筒多目标优化设计评价函数,利用改进粒子群算法,得到设计变量最优解。结果表明,优化后的螺旋滚筒最大应力下降,装煤率提高,螺旋滚筒综合性能得到提升,可靠性得到提高。将刚柔耦合虚拟样机技术与可靠性灵敏度设计理论、可靠性稳健设计理论、性能退化理论和改进粒子群算法相结合,为采掘机械设备的可靠性分析与设计提供理论方法和数据支撑,具有普适性。

**关键词:**采煤机;螺旋滚筒;刚柔耦合;灵敏度分析;可靠性稳健设计

中图分类号:TD421

文献标志码:A

文章编号:0253-9993(2018)03-0870-08

## Gradient reliability design of shearer's drum in complicated seam

ZHAO Lijuan, FAN Jiayi, LI Minghao

(College of Mechanical Engineering, Liaoning Technical University, Fuxin 123000, China)

**Abstract:** In order to realize shearer's drum optimal comprehensive performance in complicated seam, using the MG400/951-WD shearer model as the research object, basing on the cutting coal theory, drum's three to the force and torque load was obtained by Matlab. Combing with rigid-flexible virtual prototype coupling established a virtual prototype model with flexible drum, weak links were found through the simulation; Combing with EDEM found the loading performance. Combing with the theory of reliability sensitivity design, robust design theory and the theory of performance degradation, analyzed the influence of the drum's design variables to reliability sensitivity gradient, established a multi-objective optimization evaluation function of drum, the optimal design variables was obtained by improved particle swarm optimization. The results show that the optimized drum maximum stress declined, coal rate, comprehensive performance and reliability was improved. combing with the theory of reliability sensitivity design, robust design theory and the theory of performance degradation, provides an important support of the theory and method of data for mining machinery, it is universal.

**Key words:** shearer; drum; rigid-flexible coupling; sensitivity analyses; reliability robust design

收稿日期:2017-07-24 修回日期:2017-11-27 责任编辑:许书阁

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51674134)

作者简介:赵丽娟(1964—),女,辽宁阜新新人,教授,博士生导师。E-mail: zzz2120@126.com

螺旋滚筒作为采煤机截煤和装煤的主要工作机构,其设计是否合理直接影响采煤机的工作性能。近年来对采煤机螺旋滚筒设计及工作性能的研究有:刘送永等<sup>[1]</sup>对煤岩截割试验台上的4种排列方式的滚筒进行截割实验,研究发现截齿排列方式对载荷及块煤率有影响;陈晓飞等<sup>[2]</sup>以截割比能耗和载荷波动系数等性能指标为目标对采煤机的滚筒参数进行优化,结果显示优化后采煤机的截割性能有所提高;高魁东<sup>[3]</sup>利用离散元分析了走向倾角、滚筒位置参数及摇臂厚度对薄煤层采煤机装煤性能的影响;秦大同等<sup>[4]</sup>利用模拟退火的粒子群优化算法找到了动态匹配的运动参数,使滚筒截割性能达到最优;毛君等<sup>[5]</sup>采用 EDEM 离散元仿真软件研究截深、转速对采煤机装煤率、滚筒三向载荷、截割比能耗的影响,研究结果为采煤机高效截割提供改进参考。

螺旋滚筒在复杂煤层赋存条件下工作时,具有非线性、时变性和强耦合性的冲击载荷会对螺旋滚筒自身和采煤机关键零件可靠性产生较大影响。为此,基于可靠性设计理论,结合刚柔耦合虚拟样机技术和 EDEM 离散元仿真分析软件,综合考虑螺旋滚筒截割性能、装煤性能及采煤机关键零件可靠性,利用改进粒子群算法对螺旋滚筒设计变量进行可靠性稳健设计,提升螺旋滚筒综合性能。

## 1 理论背景

### 1.1 多目标优化设计理论

假设有  $l$  个目标函数,多目标优化设计的表达式<sup>[6]</sup>为

$$\begin{cases} \text{V-min} \mathbf{F}(x) = \min_{x \in R^n} [f_1(x), f_2(x), f_3(x), \dots, \\ f_n(x)]^T \\ \text{s. t. } g_j(x) \leq 0, j = (1, 2, 3, \dots, p) \\ h_k(x) \leq 0, k = (1, 2, 3, \dots, q) \end{cases} \quad (1)$$

式中,  $\mathbf{F}(x)$  为向量目标函数;  $\text{V-min} \mathbf{F}(x)$  表示多目标函数极小化;  $g_j(x) \leq 0$  和  $h_k(x) \leq 0$  为约束条件。

对于向量目标函数  $\mathbf{F}(x) = [f_1(x), f_2(x), \dots, f_n(x)]^T$  向量  $\mathbf{F}^A = [f_1^A, f_2^A, \dots, f_n^A]$  难以同时达到最优解,将多目标优化问题转化为单目标评价函数的极值可使各目标函数接近理想值,构造的函数为

$$U(x) = \sum_{i=1}^n \left[ \frac{f_i(x) - f_i^A}{f_i^A} \right]^2 \quad (2)$$

结合理想点法,引入权重系数  $W_i$ ,构造的评价函数为

$$U(x) = \sum_{i=1}^n W_i (f_i(x) - f_i^A)^2 \quad (3)$$

即将式(1)转化为如下等价求解问题:

$$\begin{cases} \min \lambda \\ \text{s. t. } x \in D \\ |W_i |f_i(x) - f_i^A| \leq \lambda, i = 1, 2, \dots, n, \lambda \geq 0 \end{cases} \quad (4)$$

其中加权系数可由线性加权和法计算得到,公式为

$$W_i = 1/f_i^* \quad (5)$$

$$f_i^* = \min_{x \in D} f_i(x) \quad (6)$$

式(4)的最优解为  $[x^*, \lambda^*]^T$ ,  $x^*$  为该评价函数的最优解。

### 1.2 可靠性灵敏度设计及无量纲化

机械产品的可靠性是衡量产品质量的一个重要指标,也是研究机械产品在各种外界因素和内在因素作用下的安全问题<sup>[7]</sup>。可靠性指标定义为

$$\beta = \frac{\mu_g}{\sigma_g} = \frac{E[g(x)]}{\sqrt{\text{Var}[g(x)]}} \quad (7)$$

结合摄动法和矩阵微分理论,由式(7)得到可靠度  $R(\beta)$  对设计变量的均值和方差的灵敏度分别为

$$\frac{dR(\beta)}{d\bar{\mathbf{B}}^T} = \frac{dR(\beta)}{d\beta} \frac{\partial \beta}{\partial \mu_g} \frac{\partial \mu_g}{d\bar{\mathbf{B}}^T} \quad (8)$$

$$\frac{dR(\beta)}{d\text{Var}(\mathbf{B})} = \left( \frac{dR(\beta)}{d\beta} \frac{\partial \beta}{\partial \sigma_g} + \frac{dR(\beta)}{d\sigma_g} \right) \times \frac{\partial \sigma_g}{d\text{Var}(\mathbf{B})} \quad (9)$$

式中,

$$\frac{\partial \beta}{\partial \mu_g} = \frac{1}{\sigma_g} \quad (10)$$

$$\frac{\partial \mu_g}{d\bar{\mathbf{B}}^T} = \left[ \frac{\partial g}{\partial X_1}, \frac{\partial g}{\partial X_2}, \frac{\partial g}{\partial X_3}, \dots, \frac{\partial g}{\partial X_n} \right] \quad (11)$$

$$\frac{\partial \beta}{\partial \sigma_g} = -\frac{\mu_g}{\sigma_g^2} \quad (12)$$

$$\frac{\partial \sigma_g}{d\text{Var}(\mathbf{B})} = \frac{1}{2\sigma_g} \left[ \frac{\partial g}{\partial \mathbf{B}} \otimes \frac{\partial g}{\partial \mathbf{B}} \right] \quad (13)$$

式中,  $\otimes$  为克罗内克积。

在机械可靠性分析中,由于设计变量对结构的影响程度不同,设计变量的单位往往不统一,因此灵敏度无量纲化是必要的。

可靠度  $R$  对设计变量的灵敏度无量纲化分别为

$$\alpha_{wlg} = \frac{dR}{dX_i} \frac{\sigma_i^*}{R} \quad (14)$$

$$\eta_{wlg} = \frac{dR}{d\text{Var}(X_i)} \frac{\text{Var}(X_i)^*}{R} \quad (15)$$

式中,  $\sigma_i^*$  为设计变量的标准差;  $\text{Var}(X_i)^*$  为设计变量的标准差。

### 1.3 可靠性稳健设计

可靠性稳健设计是降低设计变量对结构可靠度

的影响,使结构更加稳健的一种机械设计方法,其数学模型为

$$\begin{cases} \min S(X) = w_1 S_1(X) + w_2 S_2(X) \\ \text{s. t. } R \geq R_0 \\ X_{\min} \leq X \leq X_{\max} \end{cases} \quad (16)$$

式中, $S(X)$ 为多目标评价函数; $S_1(X)$ 为基于仿真建立的多目标评价函数; $S_2(X)$ 为基于可靠性灵敏度分析的多目标评价函数; $w_1$ 和 $w_2$ 为权值; $X$ 为设计变量; $R_0$ 为目标可靠度; $X_{\min}$ 为设计变量区间下限; $X_{\max}$ 为设计变量区间上限。

权值 $w_1$ 和 $w_2$ 计算方法为

$$w_1 = \frac{S_2(X^{*1}) - S_2(X^{*2})}{[S_1(X^{*2}) - S_1(X^{*1})] + [S_2(X^{*1}) - S_2(X^{*2})]} \quad (17)$$

$$w_2 = 1 - w_1 \quad (18)$$

在可靠性灵敏度分析的基础上,多目标评价函数 $S_2(X)$ 可由可靠性灵敏度向量的 $F$ -范数建立:

$$S_2(X) = \|\nabla P(X)\|_F = \sqrt{\sum_{i=1}^k \left(\frac{\partial R}{\partial X_i}\right)^2} \quad (19)$$

式中, $\nabla P(X)$ 为可靠度对设计变量的一阶偏导向量。

## 2 采煤机刚柔耦合建模与仿真

### 2.1 载荷文件的生成

采煤机工作时,前滚筒受载比后滚筒恶劣,因此以前截割部为分析对象。根据前苏联破煤理论,基于项目组开发的“采煤机载荷模拟程序”,计算截深为800 mm,滚筒转速为58 r/min,牵引速度为10 m/min的夹研煤工况下前滚简单齿三向力及三向力矩<sup>[8]</sup>,如图1,2所示。

### 2.2 采煤机刚柔耦合模型的建立

利用Pro/Engineer建立采煤机整机模型并导入ADAMS中<sup>[9]</sup>,应用ANSYS生成螺旋滚筒和行星架模态中性文件<sup>[10]</sup>,替换相应刚性零件。对虚拟样机施加约束、接触和驱动,建立的采煤机刚柔耦合模型如图3所示。

### 2.3 基于刚柔耦合虚拟样机技术采煤机关键零件仿真结果

将载荷文本导入到ADAMS中,在滚筒截齿处施加载荷并保证与滚筒实际受力方向一致。设置仿真时间及步长,仿真得到前滚筒应力云图、最大应力节点曲线和截齿应力云图如图4~6所示,前截割部行星架的应力云图和最大应力节点曲线如图7,8所示。

由图4~6可知,前截割部螺旋滚筒最大应力值为779.946 MPa,计算得安全系数为1.635,最大应力值节

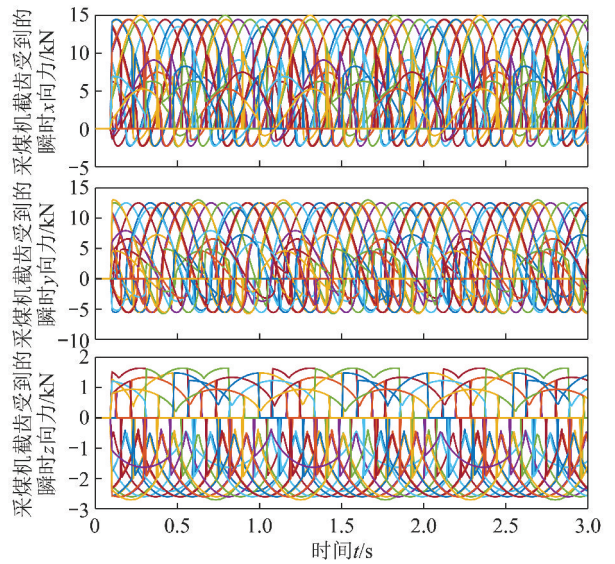


图1 前滚筒截割夹研煤时单齿三向力曲线

Fig. 1 Front shearer drum single-tooth three-way force load curves

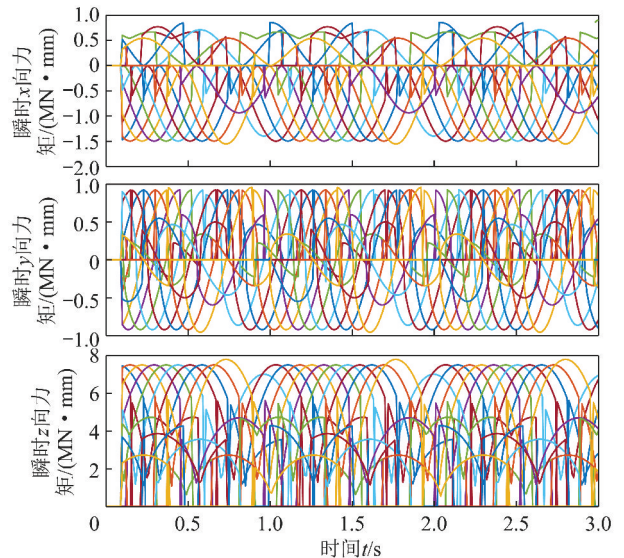


图2 前滚筒截割夹研煤时截齿受三向力矩曲线

Fig. 2 Front drum of single tooth by three to the moment the load curves

点位于第12条截线上的第24号齿上。由图7,8可知,前截割部行星架最大应力值为347.17 MPa,安全系数为1.872,最大应力值点出现在行星轴孔处。

### 2.4 基于EDEM的采煤机装煤性能仿真

根据采煤机破煤理论,仿真选择Hertz-M接触模型<sup>[11]</sup>,在颗粒工厂参数设置模块中,定义颗粒形状和尺寸,在EDEM中调用滚筒的材料参数,设置滚筒与煤壁的接触参数和煤壁的材料参数<sup>[12]</sup>。在几何参数模块中设置煤壁的几何参数与形状<sup>[13]</sup>,定义重力方向与采煤机刚柔耦合模型保持一致,仿真保存时间间隔为0.1 s。根据原型滚筒和模型滚筒的采高条件,

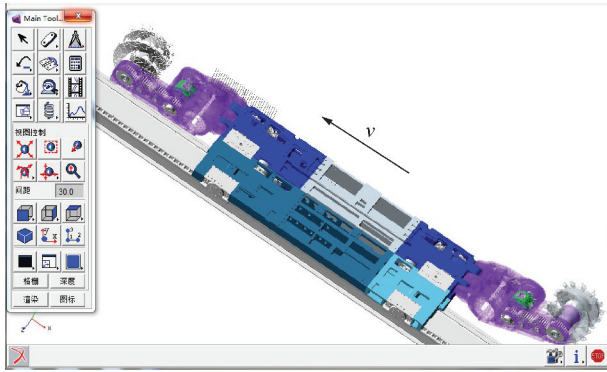


图3 采煤机刚柔耦合虚拟样机模型

Fig. 3 VP model of the coupled shearer

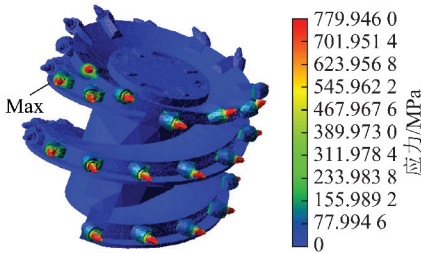


图4 螺旋滚筒应力云图

Fig. 4 Spiral drum stress nephogram

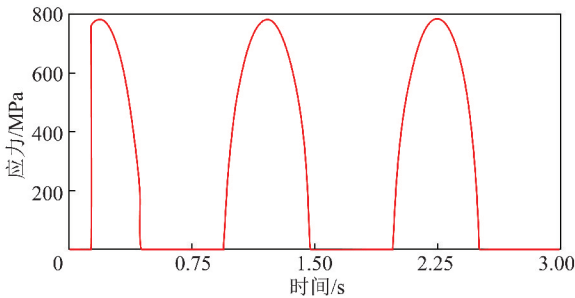


图5 螺旋滚筒最大应力节点应力曲线

Fig. 5 Spiral drum maximum stress node stress curve

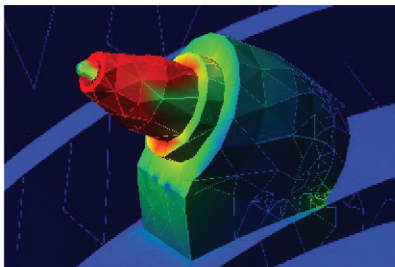


图6 采煤机螺旋滚筒截齿应力云图

Fig. 6 Shearer spiral drum pick equivalent stress nephogram

建立的夹矸煤壁颗粒工厂如图9所示。

分别将采煤机滚筒、无滚筒的采煤机截割部 IGES 模型导入 EDEM 中<sup>[14]</sup>,得到采煤机装煤仿真模型如图10所示。

该型号采煤机截割部采用 C 形设计增加了前摇臂的过煤空间,使其装煤性能明显提升。在截深为

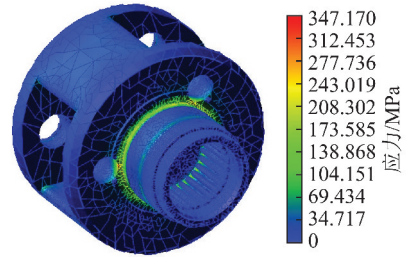


图7 行星架应力云图

Fig. 7 Planet carrier stress nephogram

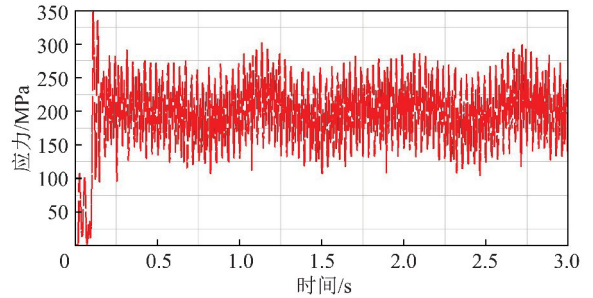


图8 行星架最大应力节点应力曲线

Fig. 8 Maximum stress node stress curve of planet carrier

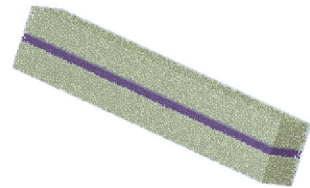


图9 煤壁颗粒工厂

Fig. 9 Coal wall pellet plant

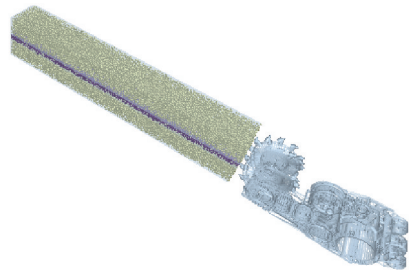


图10 EDEM 采煤机装煤仿真模型

Fig. 10 EDEM mass ejection of shearer cutting coal coal effect simulation model

800 mm,转速为 58 r/min,牵引速度为 10 m/min 的夹矸煤岩工况下,进行仿真,仿真状态如图11所示。

由图11可知,在该工况下抛射方式装煤颗粒数为 9 476,未成功装煤颗粒数为 5 964,装煤率 61.37%。该 MG400/951-WD 型交流电牵引采煤机经过试运行,有效的降低采高 0.2 ~ 0.3 m,每天平均推进进尺 3.6 m,设备运行平稳,装煤率达到 60% 以上。基于离散元的采煤机截割夹矸煤岩的装煤性能仿真结果为采煤机螺旋滚筒渐变可靠性设计提供了明确的数据支撑。

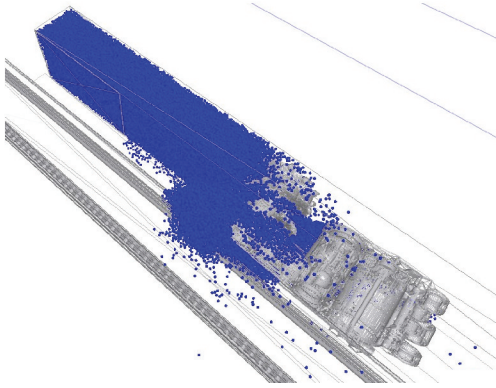


图 11 装煤效果仿真状态

Fig. 11 Loading effect of two kinds of cutting simulation

### 3 螺旋滚筒渐变可靠性灵敏度分析

#### 3.1 螺旋滚筒设计变量与约束条件的建立

螺旋滚筒设计变量直接影响采煤机的装煤效率及其工作可靠性,截线距的合理选取对采煤机关键零件受力、螺旋滚筒载荷和装煤性能有着重要影响;螺旋叶片是螺旋滚筒的重要部分,叶片螺旋升角影响截齿载荷和螺旋滚筒装煤效率<sup>[15-16]</sup>;筒毂作为与截割部壳体接触的关键位置,其对螺旋滚筒的容煤重和受载有着重要的影响。因此选取截线距  $T$ 、螺旋升角  $A$  和筒毂直径  $D_{lg}$  作为设计变量,其初始值为  $X_1 = [67, 13, 525]^T$ ,对结构参数按照高斯分布计算得到采煤机螺旋滚筒设计变量的概率统计特性<sup>[17]</sup>,见表 1。

表 1 螺旋滚筒设计变量概率统计特性

Table 1 Shearer spiral drum design variable probability statistical properties

随机变量	均值	标准差	三阶矩	四阶矩	分布类型
截线距 $T$	67	0.335	0	0.336 675	Gaussian
螺旋升角 $A$	13	0.065	0	0.012 675	Gaussian
筒毂直径 $D_{lg}$	525	2.625	0	20.671 875	Gaussian

截线距  $T$ 、螺旋升角  $A$  和筒毂直径  $D_{lg}$  的约束条件为

$$\begin{cases} 20 \leq T \leq 80 \\ 8 \leq A \leq 22 \\ 475 \leq D_{lg} \leq 570 \end{cases} \quad (20)$$

#### 3.2 螺旋滚筒多目标优化设计状态函数的建立

根据螺旋滚筒刚柔耦合仿真和 EDEM 离散元仿真结果,为衡量滚筒综合性能,选取行星架最大应力值  $f_{xxj}$ 、螺旋滚筒最大应力值  $f_{lxgt}$  和装煤率  $f_{zml}$  作为评价函数建立螺旋滚筒多目标优化设计状态函数。在约束条件内建立不同设计变量的螺旋滚筒模态中性文件,进行刚柔耦合虚拟样机仿真,得到设计变

量  $[T, A, D_{lg}]^T$  与行星架最大应力、螺旋滚筒。

最大应力和装煤率的关系如式 (21) ~ (29) 所示。

$$f_{xxj}(T) = 0.009 3T^3 - 1.575T^2 + 91.76T - 1 530 \quad (21)$$

$$f_{xxj}(A) = -0.003 57A^3 + 0.431 5A^2 - 8.902A + 398.100 \quad (22)$$

$$f_{xxj}(D_{lg}) = -8.394 \times 10^{-5} D_{lg}^3 + 0.132 3D_{lg}^2 - 69.27D_{lg} + 1.241 \times 10^4 \quad (23)$$

$$f_{lxgt}(T) = 0.013 14T^3 - 2.599T^2 + 164.9T - 2 567 \quad (24)$$

$$f_{lxgt}(A) = -0.452A^3 + 16.91A^2 - 198.1A + 1 487 \quad (25)$$

$$f_{lxgt}(D_{lg}) = -6.156 \times 10^{-5} D_{lg}^3 + 0.096 18D_{lg}^2 - 49.93D_{lg} + 9 393 \quad (26)$$

$$f_{zml}(T) = -0.008 385T^3 + 1.601T^2 - 101.4T + 2 193 \quad (27)$$

$$f_{zml}(A) = -0.020 55A^3 + 0.802 2A^2 - 9.329A + 94.6 \quad (28)$$

$$f_{zml}(D_{lg}) = 5.318 \times 10^{-6} D_{lg}^3 - 0.008 168D_{lg}^2 + 4.085D_{lg} - 598.7 \quad (29)$$

依据式 (21) ~ (29),结合性能退化可靠性理论<sup>[18]</sup>,得到螺旋滚筒多目标优化设计评价函数为

$$G_{lxgt}((X), t) = G_{lxgt}((T, A, D_{lg}), t) = -0.003 030T^3 + 0.577T^2 - 35.425T + 0.158A^3 - 5.981A^2 + 70.727A + 1.773 \times 10^{-6} D_{lg}^3 - 0.002 72D_{lg}^2 + 1.362D_{lg} - 33.940 \quad (30)$$

#### 3.3 螺旋滚筒渐变可靠性灵敏度分析及无量纲化

基于螺旋滚筒多目标优化设计评价函数  $G_{lxgt}((X), t)$ ,对其进行可靠性灵敏度分析,得到采煤机截割部螺旋滚筒均值渐变灵敏度如图 12 所示。

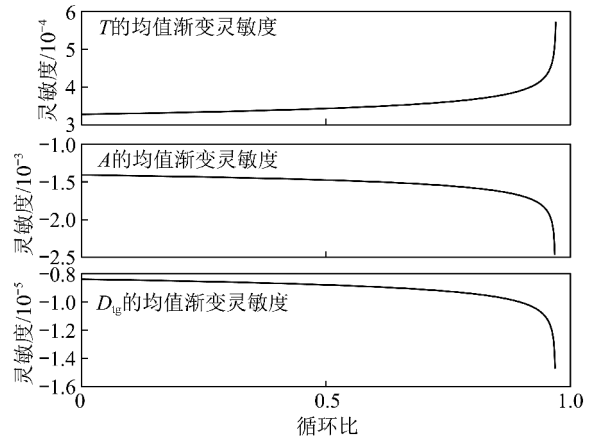


图 12 螺旋滚筒设计变量均值渐变灵敏度

Fig. 12 Spiral drum mean gradient sensitivity of design variables

由图 12 可知,螺旋滚筒渐变可靠性灵敏度表明了设计变量对螺旋滚筒可靠性的影响,其值越大,对螺旋滚筒可靠性的影响越大,其值越小,对螺旋滚筒可靠性的影响越小。

为消除设计变量量纲对螺旋滚筒的影响程度,对螺旋滚筒渐变可靠性灵敏度进行无量纲化处理,螺旋滚筒无量纲化的均值渐变灵敏度如图 13,14 所示。

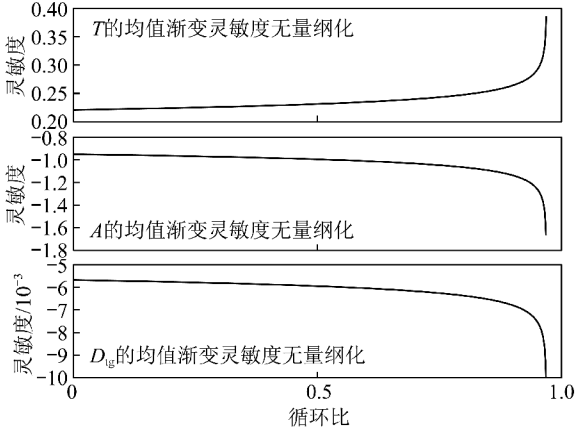


图 13 螺旋滚筒的均值渐变灵敏度无量纲化结果

Fig. 13 Spiral drum mean gradient of dimensionless sensitivity results

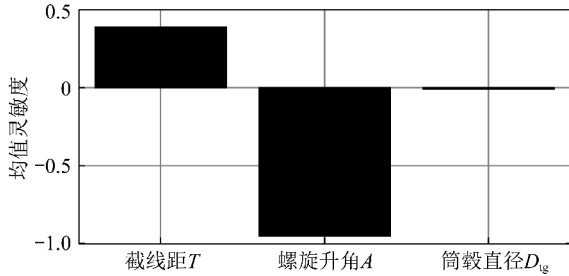


图 14 螺旋滚筒的均值渐变灵敏度无量纲化数值

Fig. 14 Spiral drum mean gradient of dimensionless sensitivity values

螺旋滚筒的设计变量  $X_n = (T, A, D_{ig})_{3 \times 1}^T$  的均值渐变灵敏度无量纲化最大数值为  $[0.386\ 9, -0.950\ 9, -0.009\ 95]$ ,表明截线距  $T$  的均值增加使螺旋滚筒的性能趋于可靠,螺旋升角  $A$  和筒毂直径  $D_{ig}$  的均值降低将使螺旋滚筒的性能更加可靠。采煤机螺旋滚筒渐变可靠性灵敏度分析结果为螺旋滚筒的稳健设计提供了理论基础和准确的数据支撑,具有重要的实际工程意义。

#### 4 基于改进粒子群算法的螺旋滚筒可靠性稳健设计

由上述分析可知,螺旋滚筒各结构参数对其工作性能均有影响,因此为提高滚筒工作性能<sup>[19]</sup>,有必要对螺旋滚筒各参数进行可靠性稳健优化设计。基于

理想点线性加权和法理论和可靠性稳健优化设计数学模型<sup>[20]</sup>,应用改进粒子群算法对采煤机螺旋滚筒进行可靠性稳健优化设计。

改进粒子群算法的核函数表达式为 function  $[x_m, S_v] = \text{PSO}[@ S, 10, 2, 2, 0.9, 0.4, 50, 3]$ ,其中,  $x_m$  为目标函数去最小值时的自变量值;  $S_v$  为目标函数最小值;  $S$  为待优化的多目标优化设计评价函数<sup>[21]</sup>。优化结果如图 15 所示。

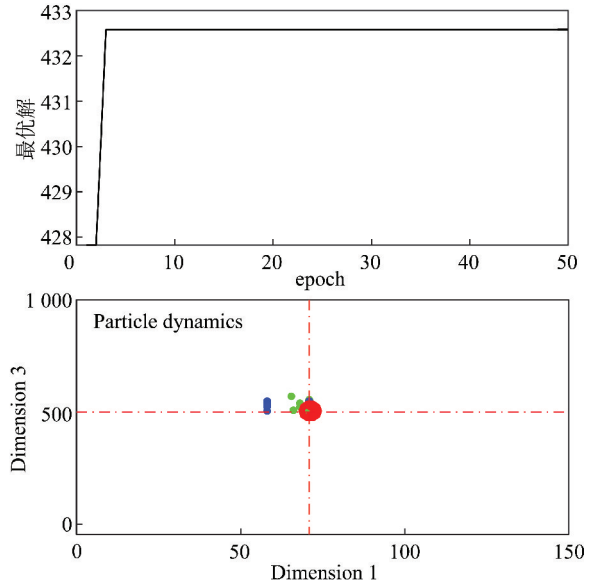


图 15 粒子群优化结果

Fig. 15 PSO's optimization results

由图 15 可知,粒子群算法预测的状态函数最优解为 432.578。圆整粒子群优化结果后得到设计变量见表 2,比较表 3 可知优化后螺旋滚筒各项性能均有明显改善,滚筒综合性能得到提升。

表 2 螺旋滚筒设计变量

Table 2 Spiral drum of coal winning machine cutting part design variables

随机变量	截线距 $T/\text{mm}$	螺旋升角 $A/(\text{°})$	筒毂直径 $D_{ig}/\text{mm}$
原始数据	67	13	525
最优解	71	12	505

表 3 优化前、后螺旋滚筒综合性能

Table 3 Spiral drum comprehensive performance before and after optimization

项目	切削面积/ $\text{mm}^2$	截割比能耗/ $(\text{kW} \cdot \text{h} \cdot \text{m}^{-3})$	截割功 率/ $\text{kW}$	螺旋滚筒最大 应力值/ $\text{MPa}$	装煤 率/ $\%$
优化前	27 802	0.758	423.4	779.946	61.37
优化后	28 054	0.745	413.8	735.841	66.11
优化量	252	-0.013	-9.6	-44.105	4.74

建立优化后的螺旋滚筒模态中性文件进行刚柔耦合虚拟样机仿真,优化后的螺旋滚筒等效力云图如图 16 所示、优化前后灵敏度比较如图 17 所示。

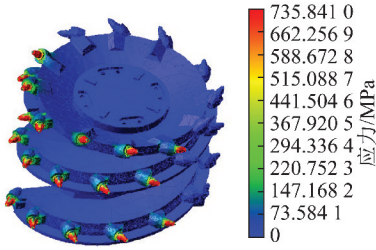


图 16 优化后的螺旋滚筒等效力云图

Fig. 16 Optimized spiral drum equivalent stress nephogram

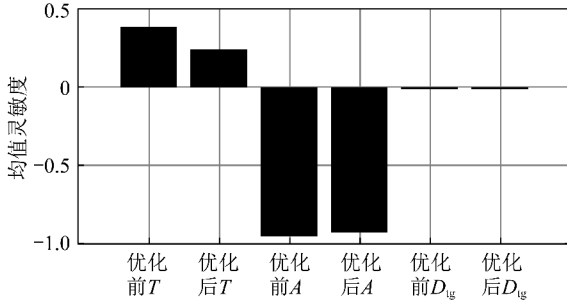


图 17 优化前后灵敏度比较

Fig. 17 Before and after sensitivity

由图 16 可知,优化后的螺旋滚筒的最大应力为 735.841 MPa,与优化前比较降低了 5.65%,仿真得到前截割部行星架最大应力值为 332.117 MPa,与优化前比较降低 4.34%,这是因为改变螺旋滚筒设计变量,降低截割阻力,进而降低关键零件受载。

由图 17 可知,优化后螺旋滚筒设计变量灵敏度为  $[0.2441, -0.9280, -0.01023]$ ,与优化前进行比较,优化后截线距  $T$  灵敏度由 0.3869 变为 0.2441,螺旋升角  $A$  灵敏度由 -0.9509 变为 -0.9280,行星架和螺旋滚筒最大应力值降低;筒毂直径  $D_{ig}$  由 -0.00995 变为 -0.01023,螺旋滚筒装煤率得到提升。可靠性稳健优化设计结果表明,螺旋滚筒结构参数对螺旋滚筒可靠度的影响降低,螺旋滚筒综合性能得到提升,优化后的螺旋滚筒符合设计要求。2015 年 6 月起在兖州煤业鄂尔多斯煤矿对该型采煤机进行了工业性试验并正式投产,单机年产量达到 120 万 t,采煤机工作稳定,性能可靠。

## 5 结 论

(1) 通过刚柔耦合虚拟样机仿真发现,前截割部螺旋滚筒最大应力值为 779.946 MPa,最大应力值节点位于第 12 条截线上的第 24 号齿上。前截割部行星架最大应力值为 347.17 MPa,最大应力值点出现在行星轴孔处。对采煤机截割夹矸煤岩的离散元模

型进行仿真,发现抛射方式装煤率 61.37%。

(2) 对螺旋滚筒多目标优化设计评价函数进行无量纲化的渐变可靠性灵敏度分析,得到螺旋滚筒设计变量的渐变灵敏度为  $[0.3869, -0.9509, -0.00995]$ ,分析结果显示截线距  $T$  的均值增加使螺旋滚筒性能趋于可靠,螺旋升角  $A$  和筒毂直径  $D_{ig}$  的均值降低将使螺旋滚筒性能更加可靠。

(3) 基于渐变灵敏度分析结果,对螺旋滚筒进行可靠性稳健设计,利用改进粒子群算法预测螺旋滚筒设计变量最优解为  $[71, 12, 505]$ ,截线距和螺旋升角灵敏度降低,行星架和螺旋滚筒最大应力值降低,筒毂直径灵敏度提高,螺旋滚筒装煤率得到提升,优化后螺旋滚筒更加稳健,综合性能得到提升。

## 参考文献 (References):

- [1] 刘送永,杜长龙,崔新霞. 采煤机滚筒截齿排列的试验研究[J]. 中南大学学报:自然科学版,2009,40(5):1281-1287.  
LIU Songyong, DU Changlong, CUI Xinxia. Experimental research on picks arrangement of shearer drum[J]. Journal of Central South University: Science and Technology, 2009, 40(5): 1281-1287.
- [2] 陈晓飞,李彦强,韩芳. 基于混沌粒子群算法的采煤机优化设计[J]. 煤矿机械,2012,33(10):23-25.  
CHEN Xiaofei, LI Yanqiang, HAN Fang. Optimal design study on shearer based on chaos particle swarm algorithm [J]. Coal Mine Machinery, 2012, 33(10): 23-25.
- [3] 高魁东. 薄煤层滚筒采煤机装煤性能研究[D]. 徐州: 中国矿业大学,2014.  
GAO Kuidong. Study on coal-loading performance of thin coal seam shearer [D]. Xuzhou: China University of Mining & Technology, 2014.
- [4] 秦大同,王镇,胡明辉,等. 基于多目标优化的采煤机滚筒最优运动参数的动态匹配[J]. 煤炭学报,2015,40(S2):532-538.  
QIN Datong, WANG Zhen, HU Minghui, et al. Dynamic matching of optimal drum movement parameters of shearer based on multi-objective optimization[J]. Journal of China Coal Society, 2015, 40(S2): 532-538.
- [5] 毛君,刘歆妍,陈洪月,等. 基于 EDEM 的采煤机滚筒工作性能的仿真研究[J]. 煤炭学报,2017,42(4):1069-1077.  
MAO Jun, LIU Xinyan, CHEN Hongyue, et al. Simulation of shearer drum cutting performance based on EDEM [J]. Journal of China Coal Society, 2017, 42(4): 1069-1077.
- [6] 孙靖民,梁迎春. 机械优化设计[M]. 北京:机械工业出版社,2012:187-204.  
SUN Jingmin, LIANG Yingchun. Mechanical design [M]. Beijing: China Machine Press, 2012: 187-204.
- [7] 张义民,闫明. 数控刀架的典型结构及可靠性设计[M]. 北京:科学出版社,2014:54-83.  
ZHANG Yimin, YAN Ming. Typical structures and the reliability design of numerical control knife rest [M]. Beijing: Science Press, 2014: 54-83.
- [8] 赵丽娟,董萌萌. 含硫化铁结核薄煤层采煤机工作机构载荷问

- 题[J]. 煤炭学报, 2009, 34(6): 840-844.
- ZHAO Lijuan, DONG Mengmeng. Load problems of working mechanism of the shearer in containing pyrites and thin coal seam[J]. Journal of China Coal Society, 2009, 34(6): 840-844.
- [9] 赵丽娟, 李佳, 田震, 等. 新型薄煤层采煤机截割部建模与仿真研究[J]. 机械传动, 2013, 37(1): 47-50.
- ZHAO Lijuan, LI Jia, TIAN Zhen. Reliability analysis of a new shearer cutting unit in thin coal seam[J]. Journal of Mechanical Transmission, 2013, 37(1): 47-50.
- [10] 赵丽娟, 陈颖, 董萌萌. 滚筒截齿对采煤机截割部工作可靠性的影响研究[J]. 现代制造工程, 2012(12): 104-110.
- ZHAO Lijuan, CHEN Ying, DONG Mengmeng. Research on the influence on working reliability of cutting unit of shearer by cutting pick[J]. Modern Manufacturing Engineering, 2012(12): 104-110.
- [11] 姜鹏. 基于离散元法的碾米机三维仿真分析[D]. 哈尔滨: 东北农业大学, 2013.
- JIANG Peng. Based on the discrete element method of rice mill Three-Dimensional simulation analysis[D]. Harbin: Northeast Agricultural University, 2013.
- [12] 王国强, 郝万军, 王继新. 离散单元法及其在 EDEM 上的实践[M]. 西安: 西北工业大学出版社, 2010: 34-58.
- WANG Guoqiang, HAO Wanjun, WANG Jixin. Discrete element method and its application in practice on the EDEM[M]. Xi'an: Northwest Polytechnical University Press, 2010: 34-58.
- [13] 周文君, 卫红波. 基于 EDEM 的带式输送机输送过程仿真及分析[J]. 煤矿机械, 2013, 34(5): 89-91.
- ZHOU Wenjun, WEI Hongbo. Simulation and analysis of belt conveyor based on EDEM Software[J]. Coal Mine Machinery, 2013, 34(5): 89-91.
- [14] 田雨. 基于 EDEM 的滚磨光整加工机理分析和参数优化[D]. 太原: 太原理工大学, 2014.
- TIAN Yu. Mechanism analysis and parameter optimization of barrel finishing based on EDEM[D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2014.
- [15] 郭黔凤. 采煤机截割滚筒结构参数的优化[D]. 太原: 太原理工大学, 2015: 29-56.
- WU Qianfeng. Structural parameters optimization for cutting drum of coal cutting machine[D]. Taiyuan: Taiyuan University of Technology, 2015: 29-56.
- [16] 赵丽娟, 何景强, 许军, 等. 截齿排列方式对薄煤层采煤机载荷的影响[J]. 煤炭学报, 2011, 36(8): 1401-1406.
- ZHAO Lijuan, HE Jingqiang, XU Jun, et al. Effect of pick arrangement on the load of shearer in the thin coal seam[J]. Journal of China Coal Society, 2011, 36(8): 1401-1406.
- [17] 周娜. 多失效模式齿轮传动的可靠性稳健设计理论研究[D]. 沈阳: 东北大学, 2012: 105-146.
- ZHOU Na. Theory research on reliability based robust design of gear transmission with multiple failure modes[D]. Shenyang: Northeastern University, 2012: 105-146.
- [18] 朱丽莎. 多失效模式大型压缩机转子系统的振动分析与可靠性稳健设计[D]. 沈阳: 东北大学, 2012: 79-96.
- ZHU Lisha. Vibration analysis and reliability based robust design of largescale compressor rotor systems with multi-failure modes[D]. Shenyang: Northeastern University, 2012: 79-96.
- [19] WANG Jinhua. Development and prospect on fully mechanized mining in Chinese coal mines[J]. International Journal of Coal Science & Technology, 2014, 1(3): 153-260.
- [20] 张义民, 黄婧, 朱丽莎, 等. 采煤机摇臂传动系统可靠性稳健优化设计[J]. 煤炭学报, 2015, 40(11): 2540-2545.
- ZHANG Yimin, HUANG Jing, ZHU Lisha, et al. Reliability based robust optimization design of the transmission system of a shearer ranging arm[J]. Journal of China Coal Society, 2015, 40(11): 2540-2545.
- [21] 胡永红. 基于 EMD 和粒子群优化小波阈值的齿轮箱健康诊断研究[D]. 太原: 中北大学, 2015: 24-25.
- HU Yonghong. Research on the method of EMD and wavelet threshold of particle swarm optimization in the fault diagnosis of gearbox[D]. Taiyuan: North University of China, 2015: 24-25.