

doi: 10.12068/j.issn.1005-3026.2020.02.012

# 采煤机截割部扭矩轴的动态可靠性分析

杨周<sup>1</sup>, 姜超<sup>1</sup>, 张义民<sup>2</sup>, 姜红猛<sup>1</sup>

(1. 东北大学 机械工程与自动化学院, 辽宁 沈阳 110819; 2. 沈阳化工大学 机械工程学院, 辽宁 沈阳 110142)

**摘 要:** 考虑结构和材料等随机参数对零件动态可靠性的影响,避免轴系产生共振,利用 Workbench 软件建立扭矩轴参数化有限元模型. 用模态分析法求解前六阶固有频率和临界转速,并与传递矩阵法比较,证明了结构和转速设计的合理性. 结合谐响应分析,说明共振失效应考虑一阶固有频率. 通过响应面设计和拉丁超立方抽样法完成对扭矩轴结构、材料参数的抽样,运用 BP 神经网络拟合一阶固有频率的功能函数,并求解随机参数的可靠性灵敏度. 采用一次二阶矩法(FOSM)计算轴在特定转速下的可靠度,并用 Monte-Carlo 模拟法(MCS)进行了验证,说明转速设计较为可靠. 通过灵敏度分析,明确了对扭矩轴动态可靠性影响最大的因素,为轴的稳健优化设计奠定基础.

**关 键 词:** 扭矩轴;有限元;BP 神经网络;可靠度;可靠性灵敏度

**中图分类号:** TH 133.2      **文献标志码:** A      **文章编号:** 1005-3026(2020)02-0217-06

## Dynamic Reliability Analysis of Torque Shaft in Cutting Part of Coal Mining Machines

YANG Zhou<sup>1</sup>, JIANG Chao<sup>1</sup>, ZHANG Yi-min<sup>2</sup>, JIANG Hong-meng<sup>1</sup>

(1. School of Mechanical Engineering & Automation, Northeastern University, Shenyang 110819, China;  
2. School of Mechanical Engineering, Shenyang University of Chemical Technology, Shenyang 110142, China.  
Corresponding author: JIANG Chao, E-mail: 523840648@qq.com)

**Abstract:** The Workbench software was used to establish a parametric finite element model of the torque shaft. Through modal analysis and comparison with the transfer matrix method, the first six orders of natural frequency and corresponding limit speed were obtained to verify the rationality of the structure and speed design. The harmonic response analysis illustrated that resonance invalidation should consider the first natural frequency. In addition, the response surface design and Latin superpower square sampling methods were used to realize the sampling analysis of the structure and material parameters. The BP neural network technology was used to fit the functions of first order natural frequency, solving the reliability sensitivity of each random parameter. The first order second moment and Monte-Carlo simulation were used to calculate the reliability at a specific speed and to find out the biggest influencing factor on the dynamic reliability, thus laying a foundation for the robust optimization design of shaft.

**Key words:** torque shaft; finite element; BP neural network; reliability; reliability sensitivity

近年来,采煤机关键零件的可靠性研究日益受到重视,从采煤机截割部、牵引部、液压系统细化到了采煤机截割部行星架、扭矩轴、牵引部链轮等关键零件. 如 Dewangan 等<sup>[1-3]</sup> 通过对比多种截齿在不同特性的煤层采掘过程中的裂纹扩展、齿面温度热量情况及截齿的切削性能,对截齿磨损机理进行研究;赵丽娟等<sup>[4]</sup> 基于 Pro/E, ADAMS, ANSYS 及 MATLAB 多软件联合仿真,建立新型齿轮传动的采煤机截割部刚柔耦合模型,应用 ADAMS/Vibration 模块对其进行振动分析,通过观察系统的主要振型判断截割部各激励源是否会激发截割部系统发生共振;张义民等<sup>[5]</sup>

近年来,采煤机关键零件的可靠性研究日益受到重视,从采煤机截割部、牵引部、液压系统细化到了采煤机截割部行星架、扭矩轴、牵引部链轮等关键零件. 如 Dewangan 等<sup>[1-3]</sup> 通过对比多种截齿在不同特性的煤层采掘过程中的裂纹扩展、齿面温度热量情况及截齿的切削性能,对截齿磨

针对具有复杂结构的 MG500/1130 – AWD 型采煤机摇臂行星轮系,采用集中质量参数法对其进行有限元建模,分析行星轮与太阳轮的动态接触应力以确定其失效模式,再通过对行星轮与太阳轮的可靠性灵敏度设计,得到各参数均值和方差对结构可靠性的影响.在扭矩轴振动特性研究方面,赵伟<sup>[6]</sup>通过对扭矩轴的扭振特性和模态分析得出共振发生的极限转速,但并未指出影响共振问题的主要因素;冷晓慧等<sup>[7]</sup>利用 Workbench 软件对扭矩轴的应力分析发现易断裂失效部位为卸荷槽,但并未考虑卸荷槽结构对轴系共振失效的情况.综上所述,扭矩轴频率可靠性方面相关研究需要新的进展.本文通过研究 MG750/1800 – WD 电牵引采煤机截割部扭矩轴的动态特性,验证扭矩轴工作转速设计的合理性,分析其结构和材料参数对轴固有频率的可靠性灵敏度的影响,为扭矩轴的加工制造及转速设计提供理论依据.

1 扭矩轴动态特性分析

1.1 扭矩轴结构分析及简化

MG750 截割部传动系统如图 1 所示.截割部扭矩轴是一根细长的柔性轴,在渐开线花键啮合作用下传递电动机的大输出扭矩,在前后轴承的支承下旋转,其结构尺寸如图 2 所示.

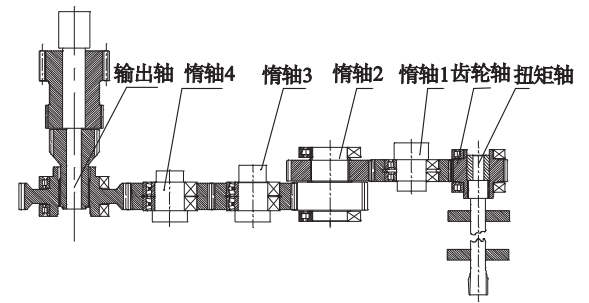


图 1 MG750 采煤机截割部传动系统  
Fig. 1 Transmission system of MG750 shearer cutting sections

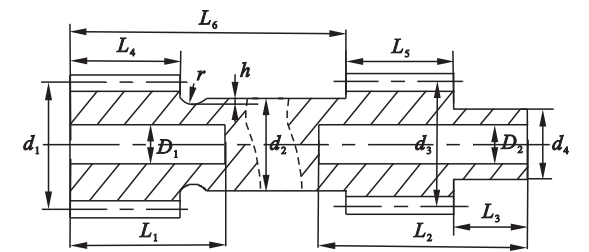


图 2 扭矩轴结构尺寸图  
Fig. 2 Structure dimension diagram of torque shaft

对扭矩轴进行有限元分析时,为了得到更好的网格划分效果,将锥度较小的轴面简化为等直

径轴面,轴内孔径视为常数,忽略轴段倒角及圆角影响.

1.2 扭矩轴的模态分析

本文采用 Workbench 软件对扭矩轴进行模态分析<sup>[8]</sup>,得到最低非零阶固有频率,将其对应的转速与设计转速进行比较,以验证工作转速设计的合理性.

用模态分析方法研究轴系无阻尼自由振动的动态特性,因此扭矩轴的多自由度运动学微分方程简化为

$$Kx = F.$$
 (1)

式中: $K$  是刚度矩阵; $x$  是位移矩阵; $F$  是力矢量.

扭矩轴材料采用 18Cr2Ni4WA,泊松比 0.3,密度 7 800 kg/m<sup>3</sup>,弹性模量 210 GPa.划分网格时采用六面体主导,网格划分计算精度高,节点数为 286 503,单元数为 76 424,单元尺寸设为 5 mm.划分后的扭矩轴有限元网格如图 3 所示.

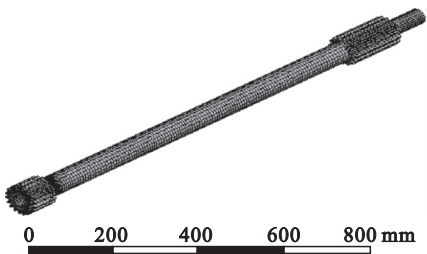


图 3 扭矩轴网格模型  
Fig. 3 Grid model of torque shaft

对扭矩轴施加轴向固定约束及径向轴承支承(径向刚度  $k = 1.197\,9 \times 10^8$  N/mm)约束,模态分析过程取其前 6 阶非零固有频率和振型,分析结果见图 4,计算结果见表 1.

表 1 扭矩轴前 6 阶固有频率及转速  
Table 1 The first six order natural frequencies and speed of torque shaft

模态阶数	频率/Hz	转速/(r·min <sup>-1</sup> )
1	58.297	3 497.82
2	58.304	3 498.24
3	319.260	19 155.60
4	319.310	19 158.60
5	651.110	39 066.66
6	818.490	49 109.40

将有限元结果与传递矩阵法<sup>[9]</sup>数值解进行对比,结果见表 2,可以看到两者之间的相对误差在 8% 以内,因此可认为有限元得到的结果基本准确.

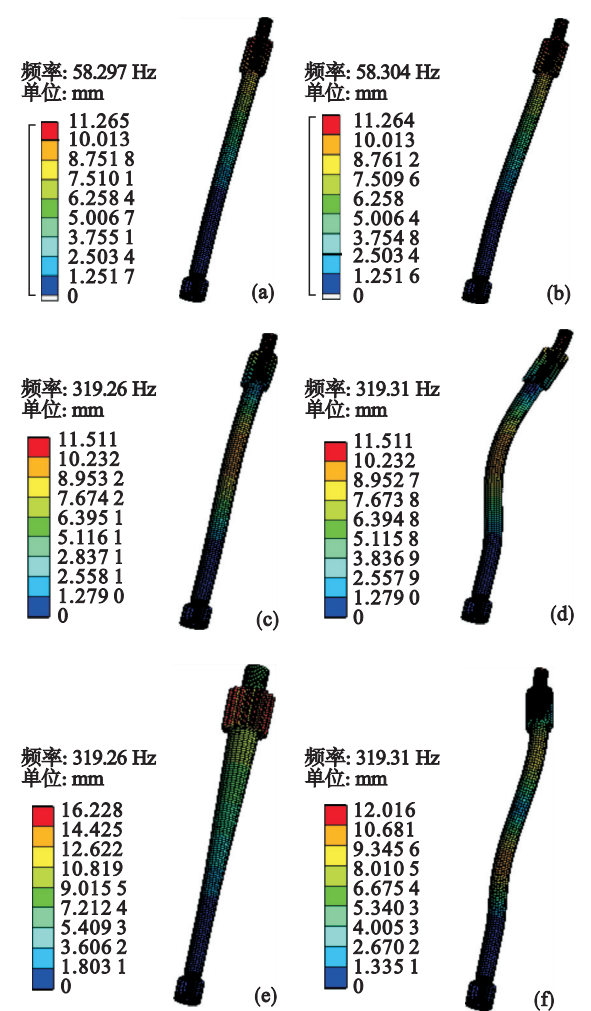


图 4 扭矩轴前六阶模态振型

Fig. 4 Modal vibration of the first six orders of torque shaft

(a)——一阶振型；(b)——二阶振型；(c)——三阶振型；  
(d)——四阶振型；(e)——五阶振型；(f)——六阶振型。

表 2 固有频率结果对比

Table 2 Comparison of natural frequency results

频率阶次	Hz		
	有限元解	传递矩阵解	相对误差/%
一阶	58.297	58.658	6.2
二阶	319.26	305.532	4.3
三阶	651.11	701.897	7.8

由于该扭矩轴的最低非零阶固有频率所对应的临界转速为 3 497.82 r/min,而扭矩轴的工作转速为 1 485 r/min,小于 2 448.6 r/min(临界转速的 0.7 倍),故该扭矩轴的结构及工作转速的设计是合理的。

## 2 扭矩轴的谐响应分析

谐响应分析用于确定结构在已知频率和幅值的正弦载荷作用下的稳态响应,从而探测共振。谐

响应分析中,激振力为

$$F = F_0 \cos(wt) . \tag{2}$$

在扭矩轴谐响应分析中,激振频率取 0 ~ 300 Hz,初始相位角取 0,幅值取 100 N,激振力  $F$  施加在扭矩轴花键啮合接触处。

经 Workbench 谐响应分析求得扭矩轴的幅频响应曲线,如图 5 所示:当外界的激振频率从 0 逐渐增加时,在 60 Hz 附近扭矩轴径向位移出现峰值,说明扭矩轴在 60 Hz 附近达到第一次共振。结合模态分析中的前六阶固有频率值,说明共振问题应该考虑低阶次的模态频率。因此,本文在分析扭矩轴频率可靠性时考虑的是一阶固有频率。

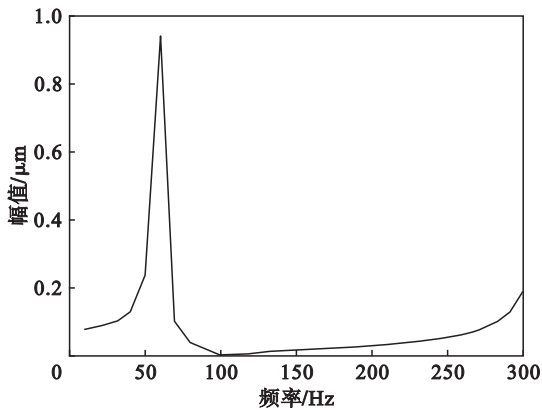


图 5 频响曲线

Fig. 5 Frequency response curve

## 3 扭矩轴动态可靠性灵敏度分析

### 3.1 频率函数拟合

本文采用 BP 神经网络拟合技术构建扭矩轴一阶固有频率与设计变量间的功能函数,选取表 3 参数作为随机变量,结构尺寸和材料参数的变异系数分别设为 0.005 和 0.05<sup>[10]</sup>。

利用 Workbench 软件“Six Sigma Analysis”中的 DOE 模块设计实验,采用拉丁超立方抽样法<sup>[11]</sup>对各变量进行抽样,样本个数为 500,最终得到维数为 500 × 17 的数据样本矩阵。采用响应面分析方法<sup>[12]</sup>,得到图 6 所示各随机参数对固有频率影响程度柱形图,可知:各参数对固有频率的影响有较大差异,其中轴的直径  $d_3$ 、轴段长度  $L_6$ 、转子长度  $L_5$ 、中间轴段直径  $d_2$ ,以及材料参数(密度  $\rho$  和弹性模量  $E$ )对固有频率影响较大。由此对输入参数进行筛选,忽略影响程度较小的变量,将影响较大的参数作为固有频率函数拟合的输入变量,记作  $X$ ,则  $X = [d_2, d_3, L_5, L_6, \rho, E]^T$ 。

表 3 随机参数  
Table 3 Random parameters

参数	均值	标准差	参数	均值	标准差
$d_1/\text{mm}$	80	0.4	$L_3/\text{mm}$	103	0.051
$d_2/\text{mm}$	60	0.3	$L_4/\text{mm}$	80.3	0.401 5
$d_3/\text{mm}$	80	0.4	$L_5/\text{mm}$	147	0.735
$d_4/\text{mm}$	45.2	0.26	$L_6/\text{mm}$	1 010	5.05
$D_1/\text{mm}$	36	0.18	$r/\text{mm}$	8	0.04
$D_2/\text{mm}$	25	0.125	$h/\text{mm}$	5	0.025
$L_1/\text{mm}$	200	1	$E/\text{GPa}$	200	10
$L_2/\text{mm}$	150	0.515	$\rho/(\text{kg}\cdot\text{m}^{-3})$	7 800	390

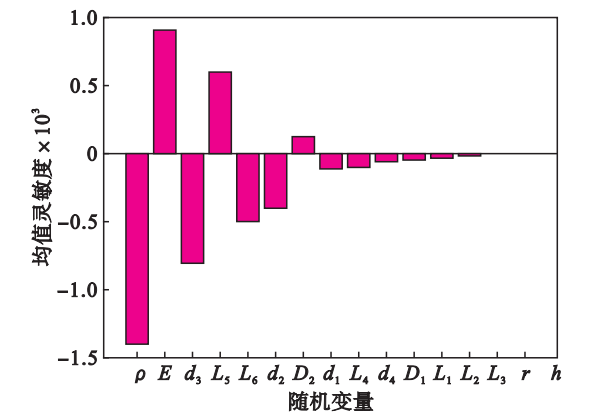


图 6 各参数对固有频率的影响

Fig. 6 Influence of each parameter on the natural frequency

采用 BP 神经网络拟合技术,拟合扭矩轴一阶固有频率关于筛选后的变量的函数,以 300 组样本数据不间断训练,将每次优化后的权值和偏置作为初始值往复训练,并以 200 组样本数据进行测试,并记录拟合过程.可以得出结论:500 组数据训练后的误差稳定在 0.63% 附近(见图 7),经过 BP 神经网络训练后的函数拟合效果更好(见图 8),且拟合相对误差均小于 0.5%(见图 9),可认为得到的频率功能函数较为可靠.

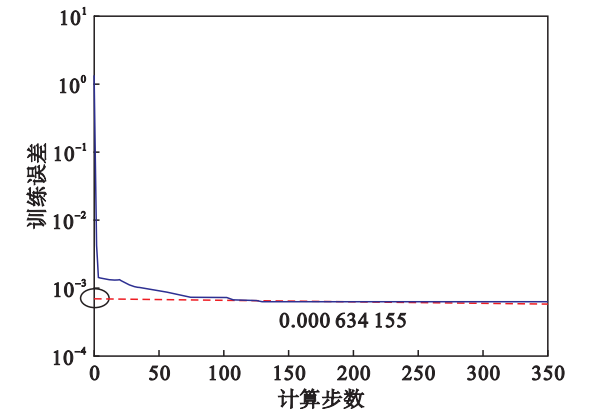


图 7 训练误差变化

Fig. 7 Training error

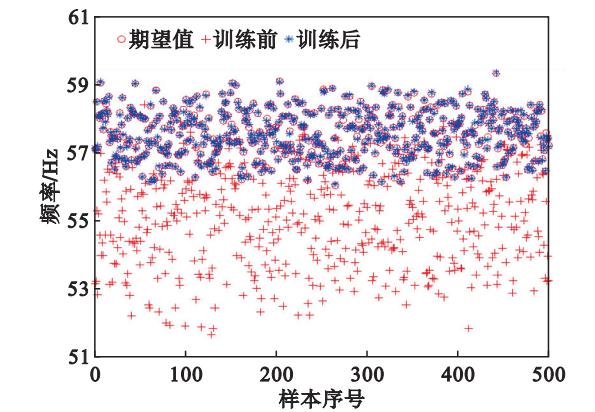


图 8 训练结果与期望值的对比

Fig. 8 Comparison of training results and expected values

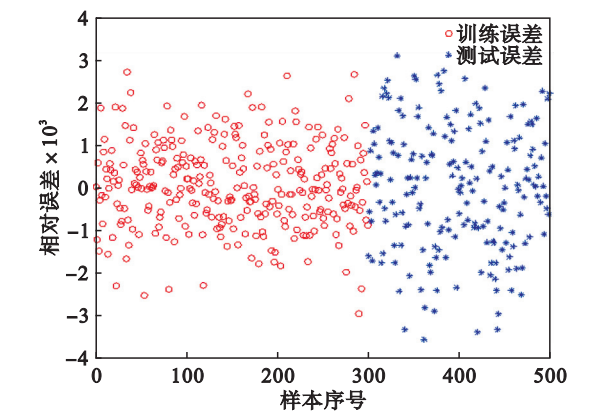


图 9 样本数据拟合误差

Fig. 9 Sample data fitting error

将 BP 神经网络优化后的权值  $w_{11}, w_{21}$  和偏置  $b_1, b_2$  代入式(3),可以得到扭矩轴固有频率的拟合函数:

$$Y(X) = w_{21}\phi(w_{11}X + b_1) + b_2. \quad (3)$$

3.2 扭矩轴动态频率可靠性灵敏度计算

本文研究扭矩轴在极限转速 3 000 r/min(对应频率 50 Hz)时的可靠度及可靠性灵敏度.以筛选后参数  $X = [d_2, d_3, L_5, L_6, \rho, E]^T$  为输入变量,以最低一阶固有频率  $f$  为响应量.

在前文中,已通过 BP 神经网络拟合出了响应量与基本变量之间的函数关系,通过转换公式将转速转换为频率,这样就可以建立关于频率的极限转速函数.转换公式为

$$f_{z(t)} = \frac{n}{60}. \quad (4)$$

式中:  $f_{z(t)}$  为转速对应下的频率;  $n$  为转速(r/min).

基于 BP 神经网络拟合得到的数学模型,建立如下功能函数:

$$z(X) = Y(X) - f_{z(0)}. \quad (5)$$



式中： $Y(\mathbf{X})$  为神经网络的输出值； $f_{z(0)}$  为轴最高转速 3 000 r/min 的对应频率，即 50 Hz.

采用一次二阶矩法将功能函数在均值处展开，得到可靠性指标  $\beta$  的近似表达式为

$$\beta = \frac{g_{\mathbf{X}}(\mu_{\mathbf{X}_i})}{\sqrt{\sum_{i=1}^N \left(\frac{\partial g_{\mathbf{X}}}{\partial X_i}\right)^2 \sigma_{X_i}^2}} \quad (6)$$

式中： $N$  为随机参数的个数； $g_{\mathbf{X}}$  为功能函数； $\mu_{X_i}$  为随机参数  $X_i$  的均值； $\sigma_{X_i}$  为  $X_i$  的标准差.

可靠度  $R$  与可靠性指标  $\beta$  的关系为

$$R = \phi(\beta) \quad (7)$$

式中  $\phi$  为标准正态分布函数.

计算得到扭矩轴频率可靠度随转速变化的曲线(见图 10)和转速为 3 000 r/min 的可靠度计算结果(见表 4). 可见,由一次二阶矩法(FOSM)和 Monte-Carlo 模拟法(MCS)<sup>[13]</sup>分别计算的扭矩轴固有频率可靠度大致相等,有效地验证了一次二阶矩法求解可靠度的准确性. 当转速小于 15 000 r/min 时,扭矩轴频率可靠度接近 1,前文所述该轴实际工作转速为 3 000 r/min,说明轴的工作转速设定较为可靠. 此外,从可靠性安全方面考虑,应设定扭矩轴的安全转速小于 20 000 r/min.

为进一步确定轴的主要参数对零件可靠性的影响规律,利用前文得到的一阶固有频率功能函数,采用一次二阶矩法计算均值灵敏度和标准差灵敏度(见图 11、图 12),得出结论,对扭矩轴固有频率影响较大的因素为扭矩轴结构和材料:增加轴的弹性模量  $E$ ,降低轴的材料密度  $\rho$ ,减小轴结构尺寸  $d_3, L_6, D_2$ ,增加  $L_5$ ,以及减小所有随机参数的标准差,都会增加扭矩轴固有频率的可靠度.

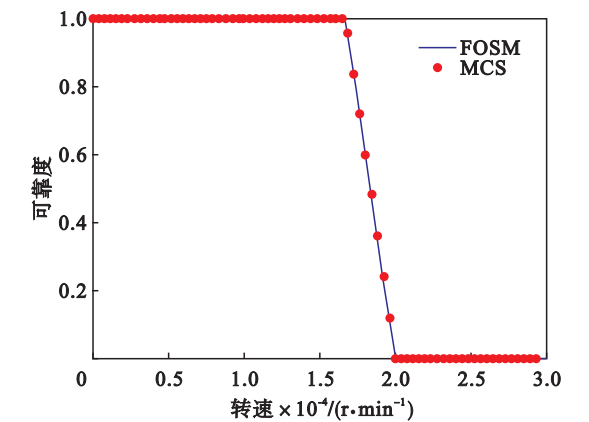


图 10 扭矩轴频率可靠度曲线

Fig. 10 Frequency reliability curve of torque shaft

表 4 可靠度比较		
Table 4 Reliability comparison		
方法	可靠性指标 $\beta$	可靠度 $R$
FOSM	3.559 9	0.999 814 5
MCS	3.912 9	0.999 954 4

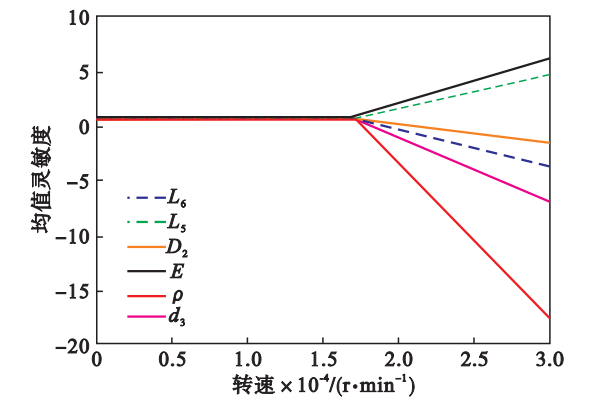


图 11 一次二阶矩法的均值灵敏度

Fig. 11 Mean sensitivity of FOSM method

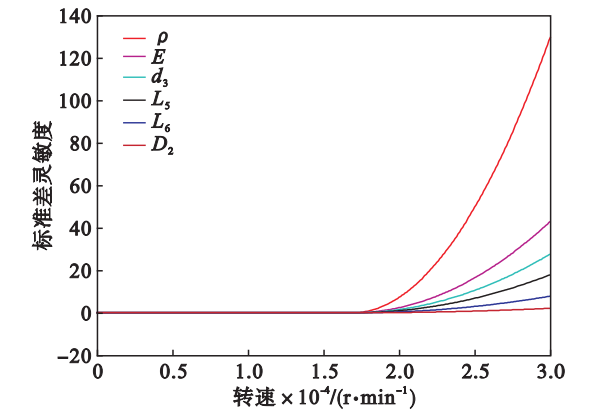


图 12 一次二阶矩法的标准差灵敏度

Fig. 12 Standard deviation sensitivity of FOSM method

## 4 结 论

1) 扭矩轴卸荷槽尺寸对轴的固有频率的影响可以忽略,因此作为扭矩轴的关键结构卸荷槽在设计时只需要满足应力强度要求即可.

2) 通过对扭矩轴模态分析可知,扭矩轴在设定工作转速下不会发生共振现象,这与文献[6]中采煤机截割部在正常工作时处于安全频率范围内不会发生共振现象的结论一致.

3) 通过对扭矩轴结构和材料等因素的可靠性灵敏度分析可知:适当增加轴的弹性模量  $E$ ,降低轴的材料密度  $\rho$ ,减小轴结构尺寸  $d_3, L_6, D_2$ ,增加  $L_5$ ,以及减小所有随机参数的标准差,都会增加扭矩轴固有频率的可靠度.

4) 本文采用的频率可靠性分析理论和计算方法可以为扭矩轴的结构设计、振动学分析及稳健优化设计提供方向和理论依据。

参考文献:

[ 1 ] Dewangan S, Chattopadhyaya S. Performance analysis of two different conical picks used in linear cutting operation of coal [J]. *Arabian Journal for Science and Engineering*, 2016, 41 ( 1 ): 249 – 265.

[ 2 ] Dewangan S, Chattopadhyaya S. Wear assessment of conical pick used in coal cutting operation [J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2015, 48 ( 5 ): 2129 – 2139.

[ 3 ] Dewangan S, Chattopadhyaya S. Characterization of wear mechanisms in distorted conical picks after coal cutting [J]. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, 2016, 49 ( 1 ): 225 – 242.

[ 4 ] 赵丽娟, 陈鹏, 宋朋. 采煤机截割部振动特性分析及传动系统优化 [J]. *机械传动*, 2015, 39 ( 1 ): 131 – 134.

( Zhao Li-juan, Chen Peng, Song Peng. Vibration characteristics analysis and transmission system optimization of shearer cutting section [J]. *Mechanical Transmission*, 2015, 39 ( 1 ): 131 – 134. )

[ 5 ] 张义民, 王婷, 黄婧, 等. 采煤机摇臂系统行星轮系疲劳可靠性灵敏度设计 [J]. *东北大学学报( 自然科学版)*, 2016, 37 ( 10 ): 1426 – 1431.

( Zhang Yi-min, Wang Ting, Huang Jing, et al. Fatigue reliability based sensitivity design of planet gear for shearer rocker arm system [J]. *Journal of Northeastern University ( Natural Science)*, 2016, 37 ( 10 ): 1426 – 1431. )

[ 6 ] 赵伟. 采煤机截割部扭振模态分析 [J]. *机械管理开发*, 2014 ( 5 ): 54 – 56.

( Zhao Wei. Analysis of torsional vibration mode of shearer cutting department [J]. *Mechanical Management and Development*, 2014 ( 5 ): 54 – 56. )

[ 7 ] 冷晓慧, 杨兆建, 王义亮. 采煤机扭矩轴卸荷槽尺寸参数化设计 [J]. *煤炭技术*, 2015, 34 ( 3 ): 239 – 241.

( Leng Xiao-hui, Yang Zhao-jian, Wang Yi-liang. Parametric design of the dimensions of the unloading groove of the shearer torque shaft [J]. *Coal Technology*, 2015, 34 ( 3 ): 239 – 241. )

[ 8 ] Peng R, Qin X Y. Modal analysis of crane girder based on ANSYS Workbench [J]. *Advanced Materials Research*, 2014, 951 ( 10 ): 58 – 61.

[ 9 ] Wang L, Hofmann V, Bai F, et al. Modeling of coupled longitudinal and bending vibrations in a sandwich type piezoelectric transducer utilizing the transfer matrix method [J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2018, 108: 216 – 237.

[ 10 ] 杨周. 非正态分布参数的机械构件的可靠性灵敏度与可靠性设计 [D]. 沈阳: 东北大学, 2010.

( Yang Zhou. Reliability-based sensitivity and reliability-based robust design for mechanical components with non-normal random variables [D]. Shenyang: Northeastern University, 2010. )

[ 11 ] Olsson A, Sandberg G, Dahlblom O. On Latin hypercube sampling for structural reliability analysis [J]. *Structural Safety*, 2003, 25 ( 1 ): 47 – 68.

[ 12 ] Gomes H M, Awruch A M. Comparison of response surface and neural network with other methods for structural reliability analysis [J]. *Structural Safety*, 2004, 26 ( 1 ): 49 – 67.

[ 13 ] Lu C M, Zhang Y M, Li H, et al. Frequency reliability and sensitivity analysis on the rotor system [J]. *Applied Mechanics and Materials*, 2012, 271/272: 1296 – 1300.



( 上接第 211 页 )

( Feng Xiang-li, Wang Lei, Liu Yang. Effect of heat input on microstructure and tensile deformation behavior of Q460 steel weld joint [J]. *Journal of Northeastern University ( Natural Science)*, 2018, 39 ( 4 ): 511 – 515. )

[ 3 ] Wang X, Dong W C, Lu S P, et al. Effects of Ti-bearing inclusions on the microstructure and mechanical properties of MAG multilayer weld metal [J]. *Acta Metallurgica Sinica ( English Letters)*, 2012, 25 ( 1 ): 1 – 9.

[ 4 ] 黄须强, 王大伟, 修世超. AISI304/低碳钢真空扩散焊接头组织和性能 [J]. *东北大学学报( 自然科学版)*, 2017, 38 ( 12 ): 1759 – 1763.

( Huang Xu-qiang, Wang Da-wei, Xiu Shi-chao. Microstructure and performance of AISI304/mild steel vacuum diffusion bonded joint [J]. *Journal of Northeastern University ( Natural Science)*, 2017, 38 ( 12 ): 1759 – 1763. )

[ 5 ] Zhao B, Fang C L. Characteristics of the electrode melting phenomena in narrow gap MAG high-rotating-speed arc welding [J]. *Rare Metals*, 2007, 26 ( sup1 ): 291 – 295.

[ 6 ] Kolpakov A G, Rakin S I. Estimation of stress concentration

in a welded joint formed by explosive welding [J]. *Journal of Applied Mechanics and Technical Physics*, 2018, 59 ( 3 ): 569 – 575.

[ 7 ] Sinha V C, Kundu S, Chatterjee S. Microstructure and mechanical properties of friction stir welded joints between commercially pure copper and Al 6351 alloy [J]. *Archives of Metallurgy and Materials*, 2017, 62 ( 3 ): 1819 – 1825.

[ 8 ] Yang L, Jiang X H, Wang X H. Study on welding process performance of HG70D high strength steel plate [J]. *China Welding*, 2018, 27 ( 3 ): 59 – 64.

[ 9 ] Dong Y, Soares C G. Stress distribution and fatigue crack propagation analyses in welded joints [J]. *Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures*, 2019, 42 ( 1 ): 69 – 83.

[ 10 ] Ohji T, Tsuji Y, Miyasaka F, et al. Mathematical modeling of metal active gas (MAG) arc welding [J]. *Journal of Materials Science & Technology*, 2001, 17 ( 1 ): 167 – 168.

[ 11 ] Haidemenopoulos G, Papadimitriou K. Retained austenite and mechanical properties in bainite transformed low alloy steels [J]. *Steel Research*, 2016, 66 ( 10 ): 433 – 438.