

doi: 10.3969/j.issn.1005-3026.2017.01.017

# 采煤机牵引部可靠性灵敏度分析及优化设计

周 笛, 张旭方, 张义民  
(东北大学 机械工程与自动化学院, 辽宁 沈阳 110819)

**摘 要:** 以 MG300/700-WD 牵引部传动系统为例,考虑了系统非线性侧隙和时变啮合刚度,建立了传动系统的动力学模型. 基于高阶随机响应面方法,构建了牵引部参数与系统最大接触应力的显式关系,并计算了系统参数的可靠性灵敏度. 建立了牵引部传动系统最佳可靠性与最小占用空间的优化模型,并分析了优化模型的可靠性灵敏度. 结果表明:牵引部传动系统第二级行星轮的参数对于系统可靠性影响较大,太阳轮参数较行星轮参数灵敏. 优化模型可以提高牵引部系统的可靠性,在高结构强度区域降低了参数的可靠性灵敏度.

**关 键 词:** 可靠性灵敏度;高阶随机响应面法;可靠性;优化设计;牵引部

中图分类号: TD 421      文献标志码: A      文章编号: 1005-3026(2017)01-0081-05

## Reliability Sensitivity Analysis and Optimization Design on Tractive Drive System of Shearer Loader

ZHOU Di, ZHANG Xu-fang, ZHANG Yi-min  
(School of Mechanical Engineering & Automation, Northeastern University, Shenyang 110819, China.  
Corresponding author: ZHANG Yi-min, E-mail: ymzhangneu@126.com)

**Abstract:** Traction unit is an important dynamic transmission system of a shearer loader. Considering the nonlinear backlash and time-varying mesh stiffness, the dynamic model was established for the tractive transmission system of MG300/700-WD shearer loader. Based on the high-order stochastic response method, an explicit relationship between the parameters of traction unit and the maximum contact stress was built. Indexes of reliability sensitivity were calculated to analyze the system performance. The maximal reliability model and minimal space model were proposed to optimize the traction unit in shearer loader. The research results show that the second planetary gear system has a great effect on the reliability of traction unit and the parameters of sun gear are more sensitive than those of planet gear. The optimization models can elevate the system reliability and can decrease the indexes of reliability sensitivity in the area of high structural strength.

**Key words:** reliability sensitivity; high-order stochastic response surface method; reliability; optimization design; traction unit

采煤机牵引部承担了采煤机整体质量和行走任务,主要由多级平行轴齿轮系与多级行星齿轮系共同组成.系统自身存在着时变刚度与非线性侧隙等因素,一旦发生故障,牵引部结构的检测与维修时间所需较长,直接影响了采煤机整体的工作效率<sup>[1]</sup>.由此,对于牵引部传动系统的可靠性研究成为了采煤机性能分析过程中一个重要环节.基于采煤机系统的故障数据统计分析,动态故障树方法被应用在采煤机系统失效分析与可靠性计算<sup>[2-3]</sup>.Hoseinie等<sup>[4]</sup>建立了采煤机各子系统的可靠性分布函数以计算采煤机整体系统的可靠性.由于采煤机系统的结构特点和工作环境,系统响应是动态变化的,周笛等<sup>[5]</sup>分析了采煤机摇臂传动系统的可靠性与可靠性灵敏度并且计算了牵引部传动系统的动态可靠性.

响应面法是在经验模型构造和开发中应用的

收稿日期: 2015-03-24  
基金项目: 国家重点基础研究发展计划项目(2014CB046303); 国家自然科学基金资助项目(51405069).  
作者简介: 周 笛(1989-),男,辽宁锦州人,东北大学博士研究生; 张义民(1958-),男,吉林长春人,东北大学教授,博士生导师,教育部“长江学者奖励计划”特聘教授.

统计技术. Myers 等<sup>[6]</sup>将响应面法定义为“一种用于开发、改进、优化的统计和数学方法”. 响应面方法建立了设计变量与系统响应之间的函数关系,同时根据目标函数与参数约束对系统进行优化设计. Gavin 等<sup>[7]</sup>提出了高阶随机响应面方法(HOSRSM),用高阶多项式建立响应面并分析了模型的可靠性,以提高拟合精度和适用性. Li<sup>[8]</sup>改进了高阶响应面方法并应用在结构可靠性优化设计中. 响应面方法被广泛应用到了系统响应分析、可靠性计算和产品优化等方面<sup>[9]</sup>.

本文考虑了采煤机牵引部传动系统的工作过程和运动特点,基于系统动力学模型利用高阶随机响应面方法分析了系统响应与系统参数之间的关系,讨论了系统参数的可靠性灵敏度并对采煤机传动系统进行优化设计.

## 1 牵引部传动系统动力学模型

采煤机 MG300/700 - WD 牵引部与行走部包括两级直齿轮平行轴传动系统、两级 NGW 型行星齿轮传动系统和一级行走轮齿轮传动系统(齿轮 5,6 未画出). 图 1 为牵引部模型,根据三自由度齿轮集中质量模型,建立了采煤机牵引部传动系统的动力学方程<sup>[5,10]</sup>:

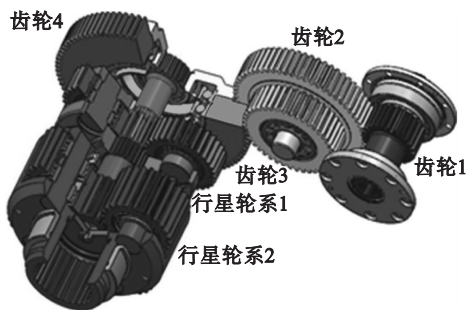


图 1 牵引部齿轮传动系统模型

Fig. 1 Model of gear transmission system of traction unit

$$M\ddot{\mathbf{q}} + C\dot{\mathbf{q}} + \omega_c G\dot{\mathbf{q}} + (K_b + K_g(t) + \omega_c^2 K_v + \omega_c K_e)h(\mathbf{q}) = \mathbf{T}(t). \quad (1)$$

其中: $M$ 为系统质量矩阵; $G$ 为陀螺矩阵; $C$ 为阻尼矩阵; $K_b$ 为支撑刚度矩阵; $K_g(t)$ 为时变啮合刚度矩阵; $K_v$ 为向心刚度矩阵; $K_e$ 为切向刚度矩阵; $\mathbf{T}(t)$ 为外激励向量; $\mathbf{q}$ 为系统广义自由度向量,其中包含平行轴传动系统与行星轮系的竖直位移 $\hat{\mathbf{x}}$ 、水平位移 $\hat{\mathbf{y}}$ 与转动位移 $\hat{\mathbf{u}}$ :

$$\mathbf{q} = [\underbrace{\hat{x}_1, \hat{y}_1, \hat{u}_1}_{\text{太阳轮1}}, \underbrace{\hat{x}_2, \hat{y}_2, \hat{u}_2}_{\text{内齿圈1}}, \underbrace{\hat{x}_3, \hat{y}_3, \hat{u}_3}_{\text{行星架1}}, \underbrace{\hat{x}_4, \hat{y}_4, \hat{u}_4}_{\text{行星轮1}}, \underbrace{\hat{x}_{s1}, \hat{y}_{s1}, \hat{u}_{s1}}_{\text{太阳轮2}}, \underbrace{\hat{x}_{r1}, \hat{y}_{r1}, \hat{u}_{r1}}_{\text{内齿圈2}}, \underbrace{\hat{x}_{c1}, \hat{y}_{c1}, \hat{u}_{c1}}_{\text{行星架2}}, \underbrace{\hat{x}_{l1}, \hat{y}_{l1}, \hat{u}_{l1}}_{\text{行星轮2}}]^T.$$

$$\underbrace{\hat{x}_{s2}, \hat{y}_{s2}, \hat{u}_{s2}}_{\text{太阳轮2}}, \underbrace{\hat{x}_{r2}, \hat{y}_{r2}, \hat{u}_{r2}}_{\text{内齿圈2}}, \underbrace{\hat{x}_{c2}, \hat{y}_{c2}, \hat{u}_{c2}}_{\text{行星架2}}, \underbrace{\hat{x}_{l2}, \hat{y}_{l2}, \hat{u}_{l2}}_{\text{行星轮1}}]$$

在齿轮传动系统运动过程中,非线性侧隙函数  $h$  为

$$h(\mathbf{q}) = \begin{cases} q - b, & q > b; \\ 0, & |q| \leq b; \\ q + b, & q < -b. \end{cases}$$

其中,  $2b$  表示传动系统的齿侧间隙. 齿轮传动系统运动过程中存在单双齿啮合区,并考虑行星轮间的时变啮合刚度的相位差,采用梯形波表示齿轮的啮合刚度<sup>[5,10]</sup>.

## 2 基于响应面法的可靠性灵敏度

### 2.1 高阶随机响应面方法

高阶响应面方法<sup>[9-10]</sup>根据样本点与系统响应利用任意阶多项式  $\hat{g}(\mathbf{x})$  来近似真实的极限状态函数  $g(\mathbf{x})$ ,其对于非线性极限状态函数有较好的拟合能力. 参数变量的最高阶次的估计是高阶响应面方法的一个重要环节,对于参数变量  $x_i$  ( $i=1,2,\dots,n$ ) 根据 Hermite 正交多项式构建多项式:

$$g(\mathbf{x}) = g(\mu_1, \dots, \mu_{i-1}, x_i, \mu_{i+1}, \dots, \mu_n) \approx \sum_{l=1}^n a_l H_l(x_i). \quad (3)$$

其中,  $H_l$  的三项递推公式为

$$\left. \begin{aligned} H_{l+1}(x_i) &= x_i H_l(x_i) - l H_{l-1}(x_i), l \geq 1; \\ H_0(x_i) &= 1, H_1(x_i) = x_i. \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

在忽略交叉项的前提下,通过样本点计算式(3)得到了变量  $x_i$  的最高阶次  $k_i$ . 其次,依据两条假设<sup>[9]</sup>构建高阶多项式  $\hat{g}(\mathbf{x})$  中的交叉项:(1)交叉项中任意变量的阶次  $p_i$  不得高于其最高阶次  $k_i, p_i \leq k_i$ ;(2)任一交叉项中阶次和不得高于其变量的最高阶次,  $\sum p_{ir} \leq \max\{k_i\}$ ,由此构建高阶响应面表达式:

$$\hat{g}(\mathbf{x}) = b_0 + \sum_{i=1}^n \sum_{r=1}^{k_i} b_{ir} x_i^r + \sum_{r=1}^m c_r \prod_{i=1}^n x_i^{p_{ir}}. \quad (5)$$

其中: $b_0$ 为常数项; $b_{ir}$ 为单变量系数; $c_r$ 为交叉项系数; $m$ 为交叉项个数. 根据样本点定义高阶多项式误差为

$$\sum \varepsilon^2 = \sum [\hat{g}(\mathbf{x}) - g(\mathbf{x})]^2. \quad (6)$$

根据最小二乘法原理使得误差的平方和(式(6)所示)最小,可以得到响应面表达式的各系数,多项式共  $m+n+1$  项. 高阶响应面方法充分

考虑了参数变量高阶项与高阶交叉项的作用,对于低失效概率的非线性系统有较好的拟合性能.

2.2 基于高阶响应面法的可靠性灵敏度分析

可靠性灵敏度计算分析了参数对于结构可靠性的影响程度<sup>[11-12]</sup>,可靠性灵敏度表示为

$$S_i = \frac{\partial R}{\partial \theta_i} = \int_{\Omega} \frac{\partial f_x(x_1, x_2, \dots, x_i, \dots, x_n)}{\partial \theta_i} \mathrm{d}\mathbf{x} . \quad (7)$$

其中: $f_x(\mathbf{x})$ 表示系统的概率密度分布函数; $\theta_i$ 表示系统参数 $x_i$ 的某一分布参数;积分域 $\Omega$ 表示系统的可靠域.根据式(7),可靠性灵敏度<sup>[11]</sup>表示为

$$S_i = \int_{\Omega} \frac{\partial f_x(\mathbf{x})}{\partial \theta_i} f_x(\mathbf{x}) \mathrm{d}\mathbf{x} = \int_{\Omega} \frac{\partial \ln[f_x(\mathbf{x})]}{\partial \theta_i} f_x(\mathbf{x}) \mathrm{d}\mathbf{x} = E\left[\frac{\partial \ln[f_x(\mathbf{x})]}{\partial \theta_i}\right]_{\Omega} . \quad (8)$$

式(8)为在可靠域上灵敏度数学期望形式,可表示为

$$\hat{S}_i = \frac{1}{N} \sum_{q=1}^N \left\{ I_{\Omega}(\mathbf{x}_q) \frac{\partial \ln[f_x(\mathbf{x})]}{\partial \theta_i} \right\} . \quad (9)$$

其中,可靠域 $\Omega$ 可以利用响应面函数表示,即当可靠域 $g(\mathbf{x}) > 0$ 时,指示函数 $I = 1$ ,否则 $I = 0$ .特别地,当系统随机变量相互独立,变量的联合概率密度函数 $f_x(\mathbf{x})$ 可以表示为每个变量概率密度函数 $f(x_i)$ 的乘积.由此,式(9)可以表示为

$$\left. \begin{aligned} \hat{S}_i &= \frac{1}{N} \sum_{q=1}^N \{ I[g(\mathbf{x}_q) > 0] \kappa(x_i) \} , \\ \kappa(x_i) &= \frac{\partial \ln[f(x_i)]}{\partial \theta_i} . \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

Rubinstein<sup>[11]</sup>给出多种分布形式对于分布参数的 $\kappa(x_i)$ ,根据全微分公式可以计算出不同变量分布对于分布均值与标准差的 $\kappa(x_i)$ 结果,如表 1 所示.

表 1 不同分布对于均值与标准差的  $\kappa(x_i)$  函数  
Table 1  $\kappa(x_i)$  function for mean value and standard deviation of various distribution

分布形式	均值 $\kappa(x_i)$	标准差 $\kappa(x_i)$
$N(\mu, \sigma)$	$\frac{x_i - \mu}{\sigma^2}$	$\frac{1}{\sigma} \left[ \left( \frac{x_i - \mu}{\sigma} \right)^2 - 1 \right]$
$LN(\mu, \sigma)$	$\frac{\ln(x_i) - \mu}{\sigma^2}$	$\frac{1}{\sigma} \left[ \left( \frac{\ln(x_i) - \mu}{\sigma} \right)^2 - 1 \right]$
$\text{Exp}(\lambda)$	$(x_i \lambda - 1) \lambda$	$\frac{1}{2} (x_i \lambda - 1) \lambda^2$
$\text{Rayleigh}(\lambda)$	$\frac{\sqrt{2}(x_i^2 - 2\lambda^2)}{\sqrt{\pi} \lambda^3}$	$-\frac{x_i^2 - 2\lambda^2}{(\pi - 4) \lambda^4}$
$\text{ChiSquare}(\lambda)$	$\frac{1}{2} \left[ \ln\left(\frac{x_i}{2}\right) - \psi(\lambda) \right]$	$\frac{1}{4} \left[ \ln\left(\frac{x_i}{2}\right) - \psi\left(\frac{1}{2}\lambda\right) \right]$
$\text{Gamma}(b, c)$	$\frac{\left[ \ln\left(\frac{x_i}{b}\right) - \psi(c) \right]}{b} - \frac{bc - x_i}{b^2 c}$	$\frac{\left[ \ln\left(\frac{x_i}{b}\right) - \psi(c) \right]}{b^2} - \frac{b - x_i}{2b^3 c}$

高阶响应面方法相对于 Monte Carlo 方法减少了计算量,并保证计算结构的精度,计算系统可靠性灵敏度具有一定优越性.

3 采煤机牵引部可靠性灵敏度分析

采煤机 MG300/700 - WD 牵引部结构如图 1 所示,部分参数如表 2 所示,电机额定功率为 75 kW,系统传动比为 283. 1. 其中第一级行星轮系含有 3 个行星轮,传动比为 6. 64,第二级行星轮系含有 4 个行星轮,传动比为 5. 25.

表 2 MG300/700-WD 采煤机系统参数  
Table 2 Parameters of MG300/700-WD system

参数	齿轮 1	齿轮 2	齿轮 3	齿轮 4
齿数 $z$	23	61	42	89
齿宽 $B$ /mm	61	60	60	55

参数	太阳轮 1	行星轮 1	太阳轮 2	行星轮 2
齿数 $z$	14	31	16	25
齿宽 $B$ /mm	64	59	95	105

考虑各齿轮的齿宽服从于正态分布的随机变量,表 2 所示为系统随机变量均值,变异系数为 0. 05. 牵引部运动过程中,根据式(1)计算系统响应,并通过齿面接触应力计算公式<sup>[10]</sup>得到采煤机牵引部传动系统齿轮动态接触应力,由此定义牵引部传动系统功能函数 $Z$ 为

$$Z = \sigma_s - \max[\sigma_c(\mathbf{x})] = \sigma_s - \hat{g}(B_1, B_2, B_3, B_4, B_{s1}, B_{p1}, B_{s2}, B_{p2}) . \quad (11)$$

其中: $\sigma_s$ 表示危险环节第二级行星齿轮系材料的接触强度 1 500 MPa; $\hat{g}(\mathbf{x})$ 表示系统随机变量与运动过程中最大接触应力的响应面关系;当 $Z > 0$ 时,牵引部传动系统安全可靠,否则系统将会失效.根据高阶随机响应面方法构建函数 $\hat{g}(\mathbf{x})$ ,计算精度为 $10^{-6}$ 共 160 项,随机变量最高阶次如表 3 所示.响应面计算结果与 Monte Carlo 结果对比,如图 2 所示.

表 3 响应面中随机变量最高阶次  
Table 3 High orders of variables in HOSRSM

变量	$B_1(x_1)$	$B_2(x_2)$	$B_3(x_3)$	$B_4(x_4)$
阶次	2	3	2	2

变量	$B_{s1}(x_5)$	$B_{p1}(x_6)$	$B_{s2}(x_7)$	$B_{p2}(x_8)$
阶次	2	2	3	3

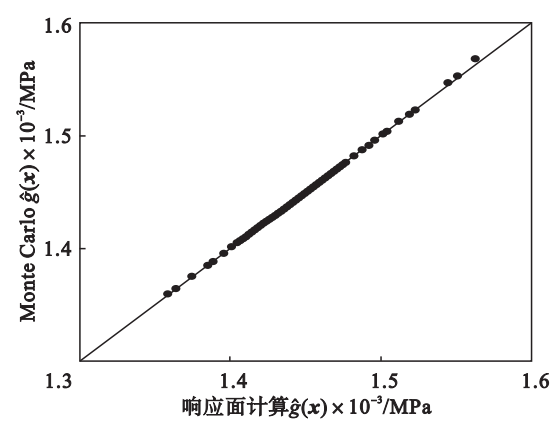


图 2 响应面与 Monte Carlo 计算结果对比  
Fig. 2 Results comparison of HOSRSM and Monte Carlo

当  $N = 10^6$  时,根据式(12)计算响应面的拟合优度,结果  $G$  越接近 1 表明其具有较好一致性,其中  $\bar{g}$  为 Monte Carlo 计算结果的均值.

$$G=1-\frac{\sum_{i=1}^N[\hat{g}(x)-g(x)]^2}{\sum_{i=1}^N[g(x)-\bar{g}(x)]^2}=0.999\,984\,3. \quad (12)$$

基于高阶响应面  $\hat{g}(x)$ ,利用表 1 和式(10)计算采煤机牵引部结构参数的均值可靠性灵敏度与标准差可靠性灵敏度如下:

$$S_{\mu}=[0.004,-0.006,0.008,-0.011,-0.010,-0.245,1.036,0.983]^T\times 10^{-1}, \quad (13)$$

$$S_{\sigma}=[-0.002,-0.003,0.011,-0.014,-0.022,-0.054,-1.08,-0.965]^T\times 10^{-1}. \quad (14)$$

根据式(13)和式(14)可知,采煤机牵引部运动过程中,传动系统第二级行星轮系结构参数均值可靠性灵敏度和标准差可靠性灵敏度比其余位置灵敏度数值大,即第二级行星轮系对传动系统的可靠性影响较大,其中太阳轮结构参数的影响高于行星齿轮的参数影响.因此对于采煤机牵引部传动系统应重点控制第二级行星轮系的制造精度和工作维护情况.

### 4 基于高阶响应面法的牵引部参数优化设计

基于牵引部可靠性灵敏度计算结果,利用高阶响应面法对采煤机牵引部第二级行星轮系结构参数进行优化设计,设计变量为  $y=[B_{s2},B_{p2},L_{s2},L_{p2}]^T$ ,其中  $L$  表示相应齿轮结构的中心孔径.结构参数的变化将对传动系统的质量、啮合刚度等参数产生影响,根据响应面方法构建优化模型

如下:

$$\left. \begin{aligned} \min & \{ \max [\sigma_c(y)] = \hat{g}(B_{s2},B_{p2},L_{s2},L_{p2}) \}, \\ \text{s. t. } & B_j^{\min} \leq B_j \leq B_j^{\max}, j = s2, p2, \\ & L_j^{\min} \leq L_j \leq L_j^{\max}, j = s2, p2. \end{aligned} \right\} \quad (15)$$
$$\left. \begin{aligned} \min & \{ V = \pi B_{s2}(d_{s2}/2)^2 + 4\pi B_{p2}(d_{p2}/2)^2 \}, \\ \text{s. t. } & \max [\sigma_c(y)] = \hat{g}(B_{s2},B_{p2},L_{s2},L_{p2}) < \sigma_s, \\ & B_j^{\min} \leq B_j \leq B_j^{\max}, j = s2, p2, \\ & L_j^{\min} \leq L_j \leq L_j^{\max}, j = s2, p2. \end{aligned} \right\} \quad (16)$$

根据式(15)模型对采煤机牵引部第二级行星轮系结构优化,以使得传动系统可以在更安全的条件下运行,即最佳可靠性模型;式(16)模型表示在保证传动系统安全运行的条件下,尽量减小采煤机牵引部传动系统的占用空间,即最小空间模型.式(15)中,优化目标是由高阶响应面法计算的传动系统最大接触应力构成;而式(16)中,约束条件是由高阶响应面法进行计算的.两种模型优化计算结果如表 4 所示.两种优化模型与原模型在不同结构强度  $\sigma_s$  的作用下,系统可靠性的计算结果如图 3 所示,参数可靠性灵敏度计算结果如图 4 所示.

表 4 优化计算结果  
Table 4 Optimization results

模型	$B_{s2}/\text{mm}$	$B_{p2}/\text{mm}$	$L_{s2}/\text{mm}$	$L_{p2}/\text{mm}$
原始模型	95	105	0	110
最佳可靠性模型	109.25	120.75	2.3	93.5
最小空间模型	99.51	89.25	2.04	96.44

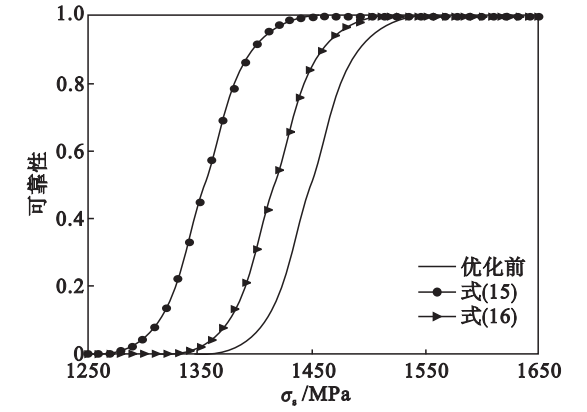


图 3 优化后传动系统的可靠性  
Fig. 3 Reliability of optimized drive system

在图 3 中,以式(15)模型优化可以提升采煤机牵引部传动系统的可靠性,同时会使得传动系统的占用空间增加;以式(16)模型优化可以减小占用空间并提升系统的可靠性,两种优化模型的可靠性都有所提升.在不同结构强度的作用下,最

佳可靠性优化模型式 (15) 的可靠性计算结果高于最小占用空间模型式 (16)。

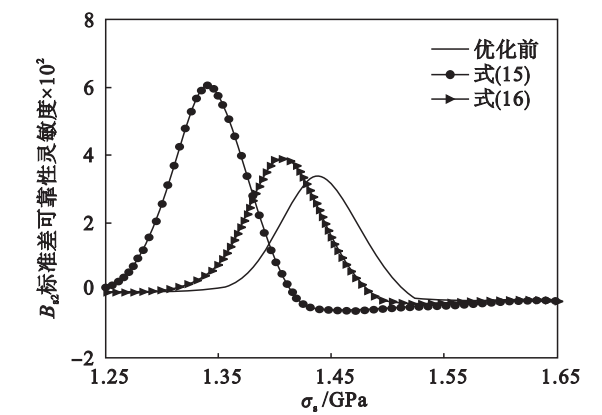


图 4 优化后传动系统的可靠性灵敏度  
Fig. 4 Reliability sensitivity of optimized drive system

优化模型在低结构强度 ( $\sigma_s < 1\,450\text{ MPa}$ ) 的情况下,系统参数的标准差可靠性灵敏度增加量值较大,如图 4 所示。在结构强度较高情况下 ( $\sigma_s > 1\,450\text{ MPa}$ ),优化模型的标准差可靠性灵敏度低于原模型的参数的可靠性灵敏度,即参数的离散性对于系统的可靠性影响减小,其中式 (16) 模型灵敏度明显低于式 (15) 模型 ( $450\text{ MPa} < \sigma_s < 1\,500\text{ MPa}$ )。

## 5 结 论

1) 针对 MG300/700 – WD 采煤机,建立了牵引部传动系统动力学模型。利用高阶响应面方法,构建牵引部运动过程中系统参数与系统最大接触应力的显示表达式关系。基于响应面方法计算采煤机牵引部传动系统随机参数的均值可靠性灵敏度与标准差可靠性灵敏度。牵引部传动系统中,第二级行星轮系随机参数的可靠性灵敏度较大,其中太阳轮随机参数较行星齿轮参数更为灵敏。

2) 针对采煤机第二级行星轮系,建立了最优可靠性模型和最小占用空间模型进行优化设计。两种模型的可靠性相对于原模型都有所增加,其中最佳可靠性模型可靠性提升较大。在低结构强度区域,两种优化模型的标准差可靠性灵敏度都有所增加,而在高结构强度区域优化模型的标准差可靠性灵敏度相对于原模型有所降低,即参数波动性对于可靠性的影响降低。

## 参考文献:

[ 1 ] Dhillon B. Mining equipment reliability, maintainability and safety [ M ]. London; Springer, 2008 : 146 – 166.

[ 2 ] Gupta S, Ramkrishna N, Bhattacharya J. Replacement and maintenance analysis of long-wall shearer using fault tree technique [ J ]. *Mining Technology*, 2006, 115 ( 2 ) : 49 – 58.

[ 3 ] 张海民,程刚,葛世荣. 基于动态故障树的采煤机牵引部可靠性分析 [ J ]. *矿山机械*, 2010, 38 ( 21 ) : 1 – 5.

( Zhang Hai-min, Cheng Gang, Ge Shi-rong. Reliability analysis of traction unit of shearer based on dynamic fault tree [ J ]. *Mining and Processing Equipment*, 2010, 38 ( 21 ) : 1 – 5. )

[ 4 ] Hoseinie S H, Ataie M, Khalokakaie R, et al. Reliability analysis of drum shearer machine at mechanized long-wall mines [ J ]. *Journal of Quality in Maintenance Engineering*, 2012, 18 ( 1 ) : 98 – 119.

[ 5 ] 周笛,张旭方,杨周,等. 采煤机牵引部传动系统动态可靠性分析 [ J ]. *煤炭学报*, 2015, 40 ( 11 ) : 2546 – 2551.

( Zhou Di, Zhang Xu-fang, Yang Zhou, et al. Vibration reliability analysis on tractive transmission system of shearer [ J ]. *Journal of China Coal Society*, 2015, 40 ( 11 ) : 2546 – 2551. )

[ 6 ] Myers R H, Montgomery D C. Response surface methodology [ M ]. New York; Wiley and Sons, 2009 : 1 – 30.

[ 7 ] Gavin H P, Yau S C. High-order limit state functions in the response surface method for structural reliability analysis [ J ]. *Structural Safety*, 2008, 30 ( 2 ) : 162 – 179.

[ 8 ] Li H S. Reliability-based design optimization via high order response surface method [ J ]. *Journal of Mechanical Science and Technology*, 2013, 27 ( 4 ) : 1021 – 1029.

[ 9 ] Ivan N V, Lidia N B. Quality improvement with design of experiments: a response surface approach [ M ]. New York; Spring, 2001 : 4 – 21.

[ 10 ] Zhou D, Zhang X F, Zhang Y M. Dynamic reliability analysis for planetary gear system in shearer mechanisms [ J ]. *Mechanism and Machine Theory*, 2016, 105 ( 11 ) : 244 – 259.

[ 11 ] Rubinstein R Y, Kroese D P. Simulation and the Monte Carlo method [ M ]. Hoboken; John Wiley & Sons, 2007 : 203 – 211.

[ 12 ] 史妍妍,孙志礼,闫明. 基于响应面方法的可靠性灵敏度分析方法 [ J ]. *东北大学学报 ( 自然科学版 )*, 2009, 30 ( 2 ) : 270 – 273.

( Shi Yan-yan, Sun Zhi-li, Yan Ming. Application of response surface methodology in sensitivity calculation of reliability [ J ]. *Journal of Northeastern University ( Natural Science )*, 2009, 30 ( 2 ) : 270 – 273. )