

doi :10. 3969/j. issn. 1005 - 3026. 2016. 10. 013

采煤机摇臂系统行星轮系疲劳可靠性灵敏度设计

张义民,王 婷,黄 婧

(东北大学 机械工程与自动化学院,辽宁 沈阳 110819)

摘 要 : 由于采煤机摇臂系统的行星轮系结构比较复杂 ,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. 主要考虑行星轮与太阳轮结构尺寸的随机性 ,利用 BP 神经网络的非线性映射功能 ,模拟得到疲劳寿命与随机参数的关系表达式. 采用最大可能点摄动法进行可靠性设计. 最后通过对行星轮与太阳轮的可靠性灵敏度设计 ,得到了各参数均值和方差对结构可靠性的影响情况. Monte - Carlo 仿真试验验证了所提方法的正确性 ,为行星轮与太阳轮可靠性灵敏度设计提供了理论参考.
关 键 词 : 行星轮与太阳轮 ;有限元建模 ;BP 神经网络 ;最大可能点摄动法 ;可靠性灵敏度设计
中图分类号 : TD 421 **文献标志码 :** A **文章编号 :** 1005 - 3026(2016)10 - 1426 - 06

Fatigue Reliability-Based Sensitivity Design of Planet Gear for Shearer Rocker Arm System

ZHANG Yi-min , WANG Ting , HUANG Jing

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

Abstract : As the planet gears structure of shearer rocker arm system is very complicated , a finite element model was built using the lumped-mass parameter method , and the dynamic contact stress of the planet gear and sun gear was analyzed to determine its failure mode. Considering the randomness of structural dimension for the planet gear and sun gear , a relational expression between the fatigue life and random parameters was obtained by using the nonlinear mapping function of BP neural network. The MPPPM was applied to the reliability design. The effect of the parameters ' mean and variance on the structure reliability was achieved by the planet gear and sun gear reliability-based sensitivity design. The simulation experiment using the Monte-Carlo showed the correctness of the as-proposed method , and provided a theoretical reference for the reliability-based sensitivity design of the planet gear and sun gear.
Key words : planet gear and sun gear ; finite element model ; BP neural network ; MPPPM(most probable point perturbation method) ; reliability-based sensitivity design

摇臂系统是采煤机重要部件之一 ,其主要作用就是把动力传递给截割部的滚筒. 现代采煤机的摇臂系统大部分都由直齿轮系和行星轮系构成. 其中 ,行星轮系主要承担减速和传递大扭矩的作用 ,所承受的载荷复杂 ,且处于恶劣的地下工况 ,一旦发生故障将无法继续工作 ,而齿轮的接触疲劳是影响其使用寿命的主要因素之一^[1] ,齿面处易发生点蚀、磨损和胶合等疲劳失效模式 ,从而造成齿轮的严重失效. 因此对其进行结构可靠性设计是十分必要的. 文献 [2 - 4] 以行星轮系的体积和最小为目标函数 ,进行可靠性优化设计 ,但未以齿轮的接触疲劳为目标进行结构可靠性设计 ;文献 [5] 采用罚函数法对行星轮系进行可靠性优化设计 ,但没有进行可靠性灵敏度设计 ;文献 [6] 分析了行星轮系的系统参数对其固有频率和振动模态的灵敏度 ,但没有对其进行疲劳可靠性灵敏度设计.

考虑到齿轮传动系统的结构特点及工程实际

下的疲劳寿命,很难确定极限状态函数,而数值模拟工作量太大,为此采用传统的响应面法.与多项式拟合相比,BP 神经网络具有更强的非线性逼近能力,并逐渐应用于各种机构的分析当中^[7].本文采用 BP 神经网络模拟随机设计变量与失效寿命之间的表达式,然后应用随机摄动法对已训练的神经网络进行计算,完成对其结构可靠性灵敏度设计.与蒙特卡洛方法的结果进行对比,验证了此方法的精确性和高效性.

1 行星轮与太阳轮的有限元分析

1.1 行星轮系建模

研究对象为某型采煤机摇臂系统的行星轮系.行星轮系的基本参数如表 1 所示.由于太阳轮所在轴为齿轮轴,且内齿圈与外壳固定在一起,故其轴承刚度 $k_s = k_r = 0$.齿轮和齿轮轴的材料参数:密度 ρ 为 $7\,850\text{ kg/m}^3$,弹性模量 E 为 $2.1 \times 10^{11}\text{ Pa}$,泊松比 μ 为 0.3 .

表 1 行星轮系的基本参数

Table 1 Basic parameters of planet gears

基本参数	太阳轮 s	内齿圈 r	行星架 c	行星轮 p
质量/kg	10.770	83.189	702.813	23.495
转动惯量 kg·m ²	8.754	96.212	612.136	19.063
基圆直径 mm	135.315	575.01	387	211.430
啮合刚度 N·m ⁻¹	3.418×10^9	4.665×10^9	—	—
轴承刚度 N·m ⁻¹	—	—	3.529×10^9	$1.215\,79 \times 10^9$
扭转刚度 N·m·rad ⁻¹	—	2×10^{10}	—	—
啮合角/(°)	26.364 67	19.999 98	—	—

本文参考文献 [8],采用 mass21 单元将太阳轮、齿圈、行星架及 4 个行星轮分别简化成集中质量单元,采用 matrix27 单元将模型中所有轴承及由行星轮分别与太阳轮、齿圈构成的齿轮副简化成弹簧单元.图 1 为行星轮系的集中参数有限元模型,由固定坐标系 $x-y$ 和旋转坐标系 $\zeta-\eta$ 组成.

1.2 有限元分析结果

通过行星轮系的集中参数系统有限元模型及实验测得的电机动态轴输入载荷,对系统进行动力学特性分析,如图 2 所示.分析得到行星轮与太阳轮的动态齿面接触应力较大,4 个行星轮中最大的动态齿面接触应力如图 3 所示.

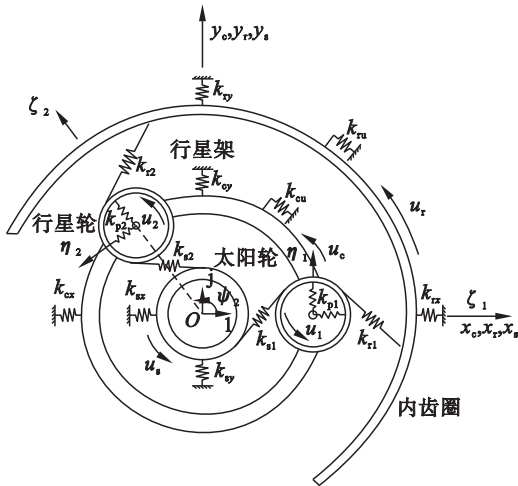


图 1 行星轮系的有限元模型

Fig. 1 Finite element model of planetary gears

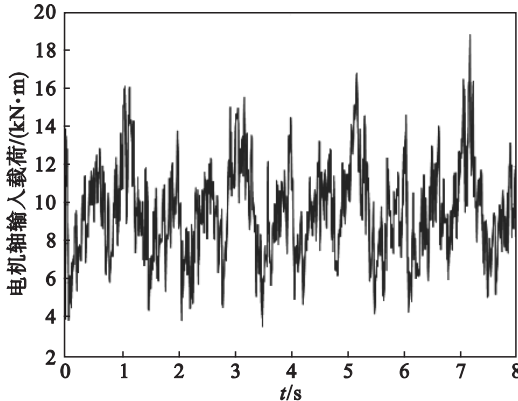


图 2 电机轴动态输入载荷

Fig. 2 Dynamic input load of motor shaft

由图 3 可知,行星轮与太阳轮啮合时的齿面接触应力最大峰值为 $1\,782\text{ MPa}$,大于材料的接触疲劳极限 $1\,519\text{ MPa}$.基于上述分析可知,在截割简单煤层工况下,采煤机截割部传动系统中,齿轮的失效形式主要是由于接触应力过大产生的齿面点蚀,应对其进行结构可靠性设计优化.

2 接触疲劳寿命拟合

2.1 随机变量的抽样

齿轮在实际设计、加工制造与装配过程中产生的误差,造成其几何尺寸具有随机性,并服从正态分布.均值根据设计要求确定,方差根据准则确定,具体取值如表 2 所示.对这 5 个随机变量采取拉丁超立方抽样技术,设置样本容量为 300,即可得到所需的样本.

2.2 计算接触疲劳寿命

为了精确估算疲劳寿命,采用雨流计数法对已求得的齿轮接触线各单元的应力载荷谱进行统计分析,得到各单元的各级应力均值、应力幅值及

相应的应力循环数. 由于应力均值对疲劳累积损伤的影响, 本文利用 Goodman 直线^[9]对雨流计数的结果修正为对称循环载荷谱. 本文中行星轮与太阳轮的材料为 18Cr2Ni4WA, 抗拉强度 $S_u = 1\,180\text{ MPa}$.

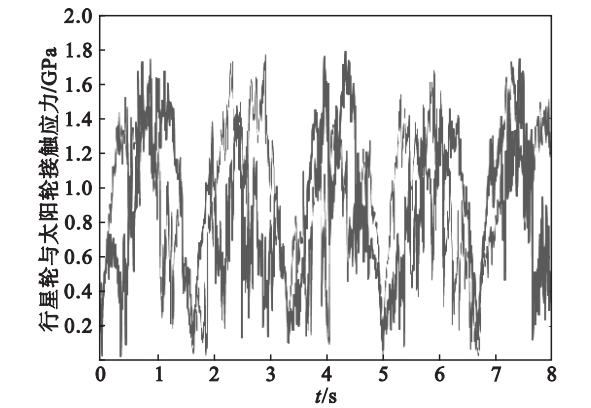


图 3 行星轮与太阳轮的动力接触应力
Fig. 3 Dynamic contact stress of planet gear and sun gear

表 2 随机变量 Table 2 Random variables			
随机变量	均值	标准差	备注
B_2/mm	130	0.216 7	行星轮系的工作齿宽
a_2/mm	193.5	0.007 7	行星轮与太阳轮的中心距
a_3/mm	193.5	0.012 0	行星轮与内齿圈的中心距
$\alpha_2/(\text{^\circ})$	20	0.033 3	行星轮系啮合的压力角
x_2/mm	0.659 2	6.776 7e-4	行星轮的变位系数

Goodman 直线表达式为

$$S_{ij} = \frac{S_{aij}}{1 - S_{mij}/S_u} \quad (1)$$

式中: S_{ij} 为单元的对称循环应力; S_{aij} 为单元 j 的第 i 级应力幅值; S_{mij} 为单元 j 的第 i 级应力均值.

查阅文献 [10], 得到材料为 18Cr2Ni4WA 的齿轮接触疲劳 $S-N$ 曲线, 其方程为

$$m\lg S + \lg N = \lg C \quad (2)$$

式中: N 为应力循环次数; S 为对应 N 的条件疲劳极限; m 为由试验确定的指数; C 为由试验确定的常数. 曲线方程参数值如下: m 为 11.001 1, $\lg C$ 为 42.700 8, 接触疲劳应力 σ_b 为 1 519.4 MPa, 疲劳曲线拐点对应循环次数为 5×10^7 .

当疲劳载荷具有多个载荷水平时, 选用 Miner 线性疲劳累积损伤理论, 对各级应力循环造成的损伤进行累加, 由此完成对行星轮与太阳轮接触疲劳寿命的估算:

$$N_f \sum_{i=1}^k \frac{n_i}{N_i} = 1 \quad (3)$$

式中: k 为载荷水平的个数; n_i 为第 i 个载荷水平的循环数; N_i 为第 i 个载荷水平下的疲劳寿命; N_f 为安全运行的次数.

2.3 BP 神经网络拟合疲劳寿命

本文采用 BP 神经网络, 以随机变量 $B_2, a_2, a_3, \alpha_2, x_2$ 为网络的输入参数, 疲劳寿命 N_f 为输出参数, 建立 5-12-1 三层神经网络. 其中, 隐含层的传递函数选用 Logsig 函数, 输出层的传递函数选用 Purelin 函数, 训练函数选用 Trainlm 函数. 则疲劳寿命与随机变量 $[B_2, a_2, a_3, \alpha_2, x_2] = [X_1, X_2, X_3, X_4, X_5]$ 之间的函数关系可以近似为

$$N_f = b_2 + w_2 \frac{1}{1 + \exp[-(w_1 X_i + b_1)]} \quad (4)$$

式中: b_1 为输入层与隐含层间的阈值; b_2 为隐含层与输出层间的阈值; w_1 为输入层与隐含层间的权重; w_2 为隐含层与输出层间的权重. 通过计算, 求出该式中 4 个参数的取值如下所示.

为提高训练、收敛速度及 BP 神经网络的稳定性, 每次仿真都对训练样本的输入和输出参数进行归一化处理:

$$X_i^* = \frac{2(X_i - \min(X_i))}{\max(X_i) - \min(X_i)} - 1 \quad (5)$$
$$y_i^* = \frac{y_i + 1}{2} (\max(y_i) - \min(y_i)) + \min(y_i) \quad (6)$$

经过 BP 神经网络训练后, 得到行星轮与太阳轮接触寿命的训练样本为 300 个, 训练后的均方误差为 $1.852\,92 \times 10^{-2}$ (目标误差为 2×10^{-2}), 神经网络计算结果和有限元分析结果的最大误差为 $7.937\,25 \times 10^{-2}$, 可知采用 BP 神经网络模拟的功能函数较为精确.

$$b_1 = \begin{bmatrix} 10.0338809392464 \\ 3.39411876543926 \\ 3.01914169121544 \\ 1.98260684668051 \\ 1.01284898450322 \\ 0.373907708325490 \\ 0.400050963215324 \\ -3.80819114454197 \\ 0.990912953526422 \\ 2.80345256479518 \\ 4.62552609689061 \\ 4.90854267186142 \end{bmatrix},$$
$$b_2 = [3.16705349007506],$$

$$\begin{aligned} w_1 &= \begin{bmatrix} -0.7122437458 & 7.6759086651 & -1.3966442641 & 5.3343082057 & -1.0812892393 \\ -1.2761276231 & -3.0075944355 & 2.2947562864 & 0.1154355750 & -1.6296306786 \\ -1.4342642901 & 1.0753786120 & -2.3704779502 & -2.7630010568 & 2.1309285610 \\ -1.6489683140 & -0.1073260168 & 0.1001752715 & -1.6439898544 & -0.0569807354 \\ -2.1906203466 & -2.7798085735 & -1.1365766434 & 2.7776714363 & -1.3155060385 \\ -0.7123526892 & 2.3419873983 & 2.9776282816 & -0.7471949036 & -2.1853467982 \\ -1.1563607646 & -1.3046013181 & -1.3710722643 & -3.0631173509 & 1.6248132420 \\ 0.52990500442 & -2.9354922098 & 0.6690864713 & -2.5543363953 & 0.7015292923 \\ 1.31579507295 & -0.1457937066 & -0.0764172323 & 1.2035625958 & 0.0151744674 \\ -1.4562318051 & 2.4613246124 & 0.0823959029 & -3.5019574997 & -0.5050603486 \\ 1.9427709774 & 1.4267602383 & 1.2276086353 & 2.5355299986 & 0.7062538218 \\ 1.55408461605 & -1.5785640552 & -2.0023107180 & -2.7698702915 & 1.5906743090 \end{bmatrix}, \\ w_2 &= \begin{bmatrix} -3.0446475697 & 0.0408470477 & -0.0328589770 & -1.7368194616 & -0.0676394606 \\ 0.0086908132 & -0.0454930699 & -0.5128050783 & 1.4219268130 & -0.0204011069 \\ 0.3333844310 & -0.0125848963 & & & \end{bmatrix}. \end{aligned}$$

3 结构可靠性灵敏度设计

3.1 行星轮与太阳轮的结构可靠性分析

利用神经网络拟合出的疲劳寿命 N_f 与随机矢量 $X = [X_1, X_2, X_3, X_4, X_5]$ 的功能函数为 $N_f(X)$ 则行星轮与太阳轮的极限状态函数为

$$g(X) = N_f(X) - N_0. \tag{7}$$

式中 N_0 为给定的疲劳寿命. 当极限状态函数 $g(X) \leq 0$ 时, 行星轮与太阳轮为失效状态; 当 $g(X) > 0$ 时, 行星轮与太阳轮为安全状态. $g(X) = 0$ 表示一个五维极限状态曲面, 通常称为失败面.

把 X 和 $g(X)$ 表示为

$$X = X_d + \varepsilon X_p, \tag{8}$$

$$g(X) = g_d(X) + \varepsilon g_p(X). \tag{9}$$

式中 $0 < |\varepsilon| \ll 1$ 为一小参数; 下标 d 为确定成分; 下标 p 为随机成分, 且均值为零. 要求确定部分要远大于随机部分.

对 $g(X)$ 取一阶矩、二阶矩、三阶矩和四阶矩. 根据 Kronecker^[11] 代数、相应的随机分析理论及矩阵值函数的 Taylor 展开式, 有

$$\mu_g = E[g(X)] = E[g_d(X)] + \varepsilon E[g_p(X)] = g_d(X), \tag{10a}$$

$$\begin{aligned} \sigma_g^2 &= E[g(X)]^2 = \varepsilon^3 E\left[\left(\frac{\partial g_d(X)}{\partial X}\right)^{[2]} X_p^{[2]}\right] = \\ &\left(\frac{\partial g_d(X)}{\partial X^T}\right)^{[2]} \text{Var}(X), \tag{10b} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \theta_g &= C_3[g(X)] = \varepsilon^3 E\left[\left(\frac{\partial g_d(X)}{\partial X}\right)^{[3]} X_p^{[3]}\right] = \\ &\left(\frac{\partial g_d(X)}{\partial X^T}\right)^{[3]} C_3(X), \tag{10c} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \eta_g &= C_4[g(X)] = \varepsilon^4 E\left[\left(\frac{\partial g_d(X)}{\partial X}\right)^{[4]} X_p^{[4]}\right] = \\ &\left(\frac{\partial g_d(X)}{\partial X}\right)^{[4]} C_4(X). \tag{10d} \end{aligned}$$

式中, $\text{Var}(X)$, $C_3(X)$, $C_4(X)$ 为随机参数的二阶矩、三阶矩和四阶矩矢量.

可靠性指标定义为

$$\beta = \frac{\mu_g}{\sigma_g} = \frac{E[g(X)]}{\sqrt{\text{Var}[g(X)]}}. \tag{11}$$

求得可靠性指标后, 通过四阶矩技术和 Edgeworth 级数将未知的状态分布函数展开成标准的正态分布函数, 从而确定行星轮与太阳轮的结构可靠度. Edgeworth 级数可表示为

$$\begin{aligned} F(y) &= \Phi(y) - \varphi(y) \left[\frac{1}{6} \frac{\theta_g}{\sigma_g^3} H_2(y) + \right. \\ &\left. \frac{1}{24} \left(\frac{\eta_g}{\sigma_g^4} - 3 \right) H_3(y) + \frac{1}{72} \left(\frac{\theta_g^2}{\sigma_g^5} \right) H_5(y) + \dots \right]. \tag{12} \end{aligned}$$

式中 $H_j(y)$ 为 j 阶 Hermite 多项式, 递推关系为

$$\left. \begin{aligned} H_{j+1}(y) &= yH_j(y) - jH_{j-1}(y), \\ H_0(y) &= 1, \\ H_1(y) &= y. \end{aligned} \right\} \tag{13}$$

此系统的可靠度为

$$R(\beta) = P[g(X) > 0] = 1 - F(-\beta). \tag{14}$$

当 $R > 1$ 时, 采用下述经验公式进行修正:

$$R^* = R(\beta) - \left\{ \frac{R(\beta) - \Phi(\beta)}{[1 + (R(\beta) - \Phi(\beta))\beta]^p} \right\}. \tag{15}$$

由于行星轮与太阳轮接触寿命的分散性较大, 若 $N_0 = 100 \text{ d}$, 可求得行星轮与太阳轮系的可靠度指标及可靠度 $\beta = 4.484\ 866\ 896\ 233\ 15$, $R = 0.997\ 103\ 650\ 217\ 132$.

为了验证摄动法的正确性, 本文使用

MATLAB 软件进行了 Monte – Carlo 仿真试验 , 随机抽样次数为 1×10^6 , 得到相应的可靠度 $R_{MCS} = 1$, 可以看出采用摄动法求得的行星轮与太阳轮的可靠性是比较准确的.

3.2 行星轮与太阳轮的结构可靠性灵敏度设计
行星轮与太阳轮的可靠度对基本随机参数矢

$$\frac{\partial R}{\partial \beta} = \varphi(-\beta) \times \left\{ 1 - \beta \left[\frac{1}{6} \frac{\theta_g}{\sigma_g^3} H_2(-\beta) + \frac{1}{24} \left(\frac{\eta_g}{\sigma_g^4} - 3 \right) H_3(-\beta) + \frac{1}{72} \left(\frac{\theta_g}{\sigma_g^5} \right)^2 H_5(-\beta) \right] - \left[\frac{1}{3} \frac{\theta_g}{\sigma_g^3} H_1(-\beta) + \frac{1}{8} \left(\frac{\eta_g}{\sigma_g^4} - 3 \right) H_2(-\beta) + \frac{5}{72} \left(\frac{\theta_g}{\sigma_g^5} \right)^2 H_4(-\beta) \right] \right\};$$

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial H_{j+1}(y)}{\partial \beta} &= H_j(\beta) + \beta \frac{\partial H_j(y)}{\partial \beta} - j \frac{H_{j-1}(\beta)}{\partial \beta}, \\ \frac{\partial H_0(\beta)}{\partial \beta} &= 0, \frac{\partial H_1(\beta)}{\partial \beta} = 1; \end{aligned} \right\} \quad (19)$$

$$\frac{\partial \beta}{\partial \mu_g} = \frac{1}{\sigma_g}; \quad (20)$$

$$\frac{\partial \mu_g}{\partial X^T} = \left[\frac{\partial \bar{g}}{\partial X_1} \frac{\partial \bar{g}}{\partial X_2} \cdots \frac{\partial \bar{g}}{\partial X_n} \right]; \quad (21)$$

$$\frac{\partial \beta}{\partial \sigma_g} = -\frac{\mu_g}{\sigma_g^2}; \quad (22)$$

$$\frac{\partial R(\beta)}{\partial \sigma_g} = \varphi(-\beta) \left[\frac{1}{2} \frac{\theta_g}{\sigma_g^4} H_2(-\beta) + \frac{1}{6} \frac{\eta_g}{\sigma_g^5} H_3(-\beta) + \frac{1}{12} \frac{\theta_g^2}{\sigma_g^7} H_5(-\beta) \right]; \quad (23)$$

$$\frac{\partial \sigma_g}{\partial \text{Var}(X)} = \frac{1}{2\sigma_g} \left[\frac{\partial \bar{g}}{\partial X} \otimes \frac{\partial \bar{g}}{\partial X} \right]. \quad (24)$$

当 $R > 1$ 时 , 可靠性指标 β 的灵敏度为

$$\frac{\partial R^*}{\partial \beta} = \frac{\partial R(\beta)}{\partial \beta} + \left[\frac{\partial R(\beta)}{\partial \beta} - \varphi(\beta) \right] \times \frac{\varphi(\beta - 1) [R(\beta) - \varphi(\beta)] - 1}{\{1 + [R(\beta) - \varphi(\beta)]\beta\}^{\beta+1}} + \frac{A}{\{1 + [R(\beta) - \varphi(\beta)]\beta\}^{\beta+1}}. \quad (25)$$

式中 ,
 $A = [R(\beta) - \varphi(\beta)] \{1 + [R(\beta) - \varphi(\beta)]\beta\} \times \ln\{1 + [R(\beta) - \varphi(\beta)]\beta\} + [R(\beta) - \varphi(\beta)]\beta$.
将式(25)替换式(16)和式(17)中的 $\partial R(\beta)/\partial \beta$, 即可求得均值和方差的灵敏度.

把已知条件和计算结果代入式(16)和式(17) , 得到各随机参数的均值和方差灵敏度 :

$$\frac{\partial R}{\partial X^T} = \begin{bmatrix} \partial R/\partial B_2 \\ \partial R/\partial a_2 \\ \partial R/\partial a_3 \\ \partial R/\partial a_2 \\ \partial R/\partial x_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 6.5386337601 \times 10^{-2} \\ -1.8346251174 \times 10^{-2} \\ -1.5359927409 \times 10^{-4} \\ 3.9828469672 \times 10^{-1} \\ 2.2011283846 \times 10^{-2} \end{bmatrix},$$

量 X 的均值和方差的灵敏度分别为

$$\frac{dR}{dX^T} = \frac{\partial R}{\partial \beta} \frac{\partial \beta}{\partial \mu_g} \frac{\partial \mu_g}{\partial X^T}, \quad (16)$$

$$\frac{dR}{d\text{Var}(X)} = \frac{\partial R}{\partial \beta} \frac{\partial \beta}{\partial \sigma_g} \frac{\partial \sigma_g}{\partial \text{Var}(X)}. \quad (17)$$

式中 ,

$$\frac{dR}{d\text{Var}(X)} = \begin{bmatrix} \partial R/\partial \sigma_{B_2} \\ \partial R/\partial \sigma_{a_2} \\ \partial R/\partial \sigma_{a_3} \\ \partial R/\partial \sigma_{a_2} \\ \partial R/\partial \sigma_{x_2} \end{bmatrix} =$$

$$\begin{bmatrix} -7.4661175449 \times 10^{-1} \\ -5.8778089822 \times 10^{-2} \\ -4.1200181059 \times 10^{-6} \\ -2.7701803084 \times 10^{-1} \\ -8.4608022898 \times 10^{-2} \end{bmatrix},$$

$$\frac{dR}{d\text{Var}(X)} = \begin{bmatrix} \partial R/\partial \sigma_{B_2} \\ \partial R/\partial \sigma_{a_2} \\ \partial R/\partial \sigma_{a_3} \\ \partial R/\partial \sigma_{a_2} \\ \partial R/\partial \sigma_{x_2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -7.4661175449 \times 10^{-1} \\ -5.8778089822 \times 10^{-2} \\ -4.1200181059 \times 10^{-6} \\ -2.7701803084 \times 10^1 \\ -8.4608022898 \times 10^{-2} \end{bmatrix}.$$

此结果与采用一次二阶矩法分析的结果在数值上虽有差异 , 但总体趋势是一致的. 对于均值灵敏度 , 行星轮的压力角 α_2 和行星轮的齿宽 B_2 的灵敏度值较高 , 且灵敏度符号为正值 , 可知在一定范围内 , 行星轮系的可靠度随 α_2 和 B_2 的增加而增大. 而其余尺寸随机参数对其影响可忽略 , 因此 , 在满足行星轮系体积、质量和成本要求的前提下 , 适当增大行星轮的齿宽 , 行星轮系的可靠性会有所提高.

4 结 论

本文对采煤机摇臂传动系统的行星轮系进行了有限元建模和行星轮与太阳轮的动态接触疲劳应力分析 , 由分析结果知 , 齿面动态接触应力峰值确定了行星轮与太阳轮的失效模式. 采用 BP 神经网络方法模拟出的疲劳寿命表达式适用于复杂结构、精度要求较高的可靠性灵敏度设计. Monte – Carlo 仿真试验验证了所提方法的正确

性. 本文方法适用于滚筒式电牵引采煤机, 截割功率 $\leq 2 \times 300 \text{ kW}$, 牵引功率 $\leq 2 \times 40 \text{ kW}$. 结果表明, 采用本文方法得到了采煤机摇臂系统各个结构尺寸参数的均值和方差对行星轮系可靠性的影响情况, 具备了较高的应用价值.

参考文献：

[1] Wang J , Wang Y , Huo Z. Finite element residual stress analysis of planetary gear tooth[J]. *Advances in Mechanical Engineering* 2013(5) : 1 – 12.

[2] Wang S J , Lyu J. Reliability optimum design of NWG-type oil-submerged planetary gear reducer[J]. *Key Engineering Materials* 2005 297/298/299/300 : 1895 – 1900.

[3] Li X , Jiang S , Li S , et al. Nonlinear transient engagement characteristics of planetary gear train [J]. *Journal of Vibroengineering* 2013 , 15(2) : 933 – 941.

[4] Yang J , Zhang C , Lin Z , et al. Dynamic load analysis of bearings in a three-ring planetary gear transmission[J]. *Journal of Mechanical Engineering* 2004 , 17(2) : 827 – 829.

[5] Ericson T , Parker R G. Planetary gear modal properties and dynamic response : experiments and analytical simulation [C] // Proceedings of the ASME 2011 International. Washington D C : American Society of Mechanical

Engineers 2011 331 – 343.

[6] Lin J , Parker R G. Sensitivity of planetary gear natural frequencies and vibration modes to model parameters[J]. *Journal of Sound and Vibration* , 1999 228(1) : 109 – 128.

[7] 朱丽莎 , 张义民 , 卢昊 , 等. 基于神经网络的转子振动可靠性灵敏度分析[J]. *计算机集成制造系统* , 2012 , 18(1) : 149 – 155.

(Zhu Li-sha , Zhang Yi-min , Lu Hao , et al. Reliability sensitivity analysis of rotor vibration based on neural network [J]. *Computer Integrated Manufacturing Systems* , 2012 , 18(1) : 149 – 155.)

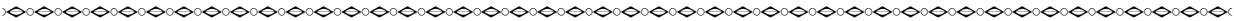
[8] Lin J , Parker R G. Analytical characterization of the unique properties of planetary gear free vibration[J]. *Journal of Vibration and Acoustics* , 1999 , 121(3) : 316 – 321.

[9] 陈传尧. 疲劳与断裂[M]. 武汉 : 华中科技大学出版社 , 2002 : 3 – 33.

(Chen Chuan-yao. Fatigue and fracture [M]. Wuhan : Huazhong University of Science and Technology , 2002 : 3 – 33.)

[10] Wu Z F , Wang T , Zhang R. Experimental study of contact fatigue property for 18Cr2Ni4WA gears [J]. *Acta Armamentarii* 2010 31(5) : 598 – 602.

[11] Vetter W J. Matrix calculus operations and Taylor expansions [J]. *SIAM Review* , 1973 , 15(2) : 352 – 356.



(上接第 1409 页)

2. 0% 时 , 铁矿球团矿还原后的强度逐渐增大.

2) 经还原后 , 球团矿的孔隙度及孔径都有所增大 ; 但相比普通球团矿 , 含 MgO 球团矿还原前、后孔隙度及孔径分布变化相对较小 , 且孔径分布相对集中.

3) 球团矿还原膨胀是决定球团矿还原后强度的关键因素 , 抑制还原膨胀是改善球团矿还原后强度的有效方法.

参考文献：

[1] 周传典. 高炉炼铁生产技术手册[M]. 北京 : 冶金工业出版社 , 2002 : 50 – 60.

(Zhou Chuan-dian. Technical manuals of blast furnace ironmaking production[M]. Beijing : Metallurgical Industry Press 2002 : 50 – 60.)

[2] Matsumura M , Hoshi M , Kawaguchi T. Improve of sinter softening property and reducibility by controlling chemical compositions[J]. *ISIJ International* , 2005 , 45 (4) : 598 – 607.

[3] 高强健 , 魏国 , 何奕波 , 等. MgO 对球团矿抗压强度的影响 [J]. *东北大学学报(自然科学版)* , 2007 , 28(3) : 365 – 368.

(Gao Qiang-jian , Wei Guo , He Yi-bo , et al. Effect of MgO on compressive strength of pellet [J]. *Journal of Northeastern University (Natural Science)* , 2007 , 28(3) :

365 – 368.)

[4] Biswas A K. Principles of blast furnace ironmaking[M]. Brisbane : Cootha Publishing House , 1981 : 38 – 66.

[5] Shen F M , Gao Q J , Wei G , et al. Densification process of MgO bearing pellets [J]. *Steel Research International* 2015 , 86(6) : 644 – 650.

[6] Gao Q J , Shen F M , Wei G , et al. Gas-solid reduction kinetic model of MgO-fluxed pellets [J]. *International Journal of Minerals Metallurgy and Materials* , 2014 21(1) : 12 – 17.

[7] Coetsee T , Poslorius P C , Viuiers E E. Rate-determining steps for reduction in magnetite-coal pellets [J]. *Mineral Engineering* 2002 , 15(11) : 919 – 929.

[8] Gao Q J , Wei G , Jiang X , et al. Characteristics of calcined magnesite and its application on oxidized pellet production [J]. *Journal of Iron and Steel Research International* 2014 , 21(4) : 408 – 412.

[9] Loo C E , Wan K T , Howes V R. Mechanical properties of natural and synthetic mineral phases in sinters having varying reduction degradation indices [J]. *Ironmaking and Steelmaking* , 1998 25(6) : 279 – 285.

[10] Shen F M , Jiang X , Wu G S , et al. Proper MgO addition in blast furnace operation[J]. *ISIJ International* 2006 46(1) : 65 – 69.

[11] Khaki J , Kashiwa Y , Ishii K. High temperature behavior of self fluxed pellets during heating up reduction [J]. *Ironmaking and Steelmaking* , 1994 21(1) : 56 – 63

[12] Gao Q J , Shen F M , Wei G , et al. Effects of MgO containing additive on low-temperature metallurgical properties of oxidized pellet [J]. *Journal of Iron and Steel Research , International* 2013 20(7) : 25 – 28.