DOI: 10.3901/JME.2019.08.192

采煤机截割部行星架可靠性设计*

赵丽娟 范佳艺 李明昊 李 惠
(辽宁工程技术大学机械工程学院 阜新 123000)

摘要: 为提高采煤机截割部行星架在复杂煤层赋存条件下的工作可靠性,以“MG400/951-WD”型号采煤机为研究对象,基于破煤理论,利用 Matlab 得到含坚硬夹矸的复杂煤层赋存条件下采煤机螺旋滚筒的冲击载荷,结合刚柔耦合虚拟样机技术建立以截割部行星架为柔性件的采煤机刚柔耦合虚拟样机模型,仿真发现了行星架应力集中区域。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,分析行星架设计变量对渐变可靠性灵敏度的影响,构建行星架多目标优化设计状态函数,利用改进粒子群算法,得到设计变量最优解。结果表明,优化后的行星架最大应力下降 56.388%,设计变量灵敏度趋于零,行星架关注区域更加稳健,行星架可靠性得到提高。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,提出一种协同刚柔耦合虚拟样机动态可靠性设计方法,对机械设备传动机构的可靠性分析与设计具有重要工程应用价值。

关键词: 采煤机;行星架;刚柔耦合;可靠性灵敏度;可靠性稳健设计

中图分类号: TD421

Reliability Design of Shearer's Planet Carrier

ZHAO Lijuan FAN Jiayi LI Minghao LI Hui

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

Abstract: In order to improve the reliability of shearer's planet carrier in complicated seam, using the MG400/951-WD shearer model as the research object, basing on the cutting coal theory, drum's general force and torque load is obtained by Matlab. Combining with rigid-flexible virtual prototype coupling established a virtual prototype model with flexible planet carrier, weak links are found through the simulation. Combining with the theory of reliability sensitivity design, robust design theory and the theory of performance degradation, the influence of the planet carrier's design variables to reliability sensitivity gradient is analyzed, a multi-objective optimization evaluation function of planet carrier is established, the optimal design variables is obtained by improved particle swarm optimization. The results show that the maximum stress decreased by 56.388% and design variable sensitivity tends to be stable. Combining with the theory of reliability sensitivity design, robust design theory and the theory of performance degradation, a theory of collaborative coupled virtual prototype technology with reliability design is proposed, which has important engineering application values.

Key words: shearer; planet carrier; rigid-flexible coupling; reliability sensitivity; reliability robust design

0 前言

采煤机截割部行星架作为采煤机截割部传动机构的关键零件,易受到复杂、多变冲击载荷的影响而失效^[1]。近年来行星架可靠性的研究多集中在行星架应力分析,朱卫波等^[2-4]采用有限元分析软件在建立好的完整齿轮模型或 1/4 齿轮模型上直接添加力或力矩对采掘机械行星减速机构的齿轮进行等效应力分析,并针对仿真结果进行优化;郭建峰^[5]对

行星齿轮减速器进行有限元处理,分析关键位置应力集中原因;高鹏等^[6]通过对采煤机牵引部行星架的有限元分析解决了其在新型采煤机工作时出现的传动失效问题;赵书斐等^[7]利用 Matlab 获得行星架受力曲线,应用 Ansys 对行星架进行有限元分析得到行星架受力。

在复杂煤层赋存条件下工作的采煤机,所受载荷具有非线性、时变性和强耦合性特点^[8-9],以往研究中的静态分析方法难以准确表达行星架可靠性信息,而将刚柔耦合虚拟样机技术与可靠性设计理论相结合可解决复杂煤层采煤机截割部行星架可靠性稳健设计问题,分析在冲击载荷作用下行星架设计

* 国家自然科学基金资助项目(51674134)。20180411 收到初稿,20180904 收到修改稿

变量对其可靠性的影响, 利用改进粒子群算法对行星架设计变量进行可靠性稳健设计, 提高行星架工作可靠性。

1 理论背景

1.1 多目标优化设计理论

假设有 n 个目标函数, 多目标优化设计的表达式为^[10]

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

式中 $F(x)$ ——矢量目标函数;
 $\mathbf{V} - \min F(x)$ ——多目标函数极小化;
 $g_j(x) \leq 0, h_k(x) \leq 0$ ——约束条件。

对于矢量目标函数 $\mathbf{F}(x) = [f_1(x), f_2(x), \dots, f_n(x)]^T$ 矢量 $\mathbf{F}^A = [f_1^A, f_2^A, \dots, f_n^A]$ 难以同时达到最优解, 结合线性加权法引入权重系数 W_i , 将多目标优化问题转化为单目标评价构造的评价函数为

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

即将式(1)转化为如下等价求解问题

$$\begin{cases} \min \lambda \\ \text{s.t. } x \in D \\ W_i |f_i(x) - f_i^A| \leq \lambda \quad i = 1, 2, \dots, n \quad \lambda \geq 0 \end{cases} \quad (3)$$

式中加权系数可由线性加权和法计算得到, 计算式为

$$W_i = 1 / f_i^* \quad (4)$$

$$f_i^* = \min_{x \in D} f_i(x) \quad (5)$$

式(3)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量纲一化

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^[11-12]。可靠性指标定义为

$$\beta = \frac{\mu_g}{\sigma_g} = \frac{E[g(x)]}{\sqrt{\text{Var}[g(x)]}} \quad (6)$$

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^[13]

$$\frac{dR(\beta)}{d\mathbf{B}^T} = \frac{dR(\beta)}{d\beta} \frac{\partial \beta}{\partial \mu_g} \frac{\partial \mu_g}{d\mathbf{B}^T} \quad (7)$$

$$\frac{dR(\beta)}{d\text{Var}(B)} = \frac{\partial R(\beta)}{\partial \beta} \frac{\partial \beta}{\partial \sigma_g} \frac{\partial \sigma_g}{\partial \text{Var}(B)} \quad (8)$$

$$\frac{\partial \beta}{\partial \mu_g} = \frac{1}{\sigma_g} \quad (9)$$

$$\frac{\partial \mu_g}{d\mathbf{B}^T} = \left[\frac{\partial g}{\partial X_1}, \frac{\partial g}{\partial X_2}, \frac{\partial g}{\partial X_3}, \dots, \frac{\partial g}{\partial X_n} \right] \quad (10)$$

$$\frac{\partial \beta}{\partial \sigma_g} = -\frac{\mu_g}{\sigma_g^2} \quad (11)$$

$$\frac{\partial \sigma_g}{d\text{Var}(B)} = \frac{1}{2\sigma_g} \left[\frac{\partial g}{\partial B} \otimes \frac{\partial g}{\partial B} \right] \quad (12)$$

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, 因此灵敏度量纲一化是必要的。

可靠度 R 对设计变量的灵敏度量纲一化分别为

$$\alpha_{wlg} = \frac{dR}{dX_i} \frac{\sigma_i^*}{R} \quad (13)$$

$$\eta_{wlg} = \frac{dR}{d\text{Var}(X_i)} \frac{\text{Var}(X_i)^*}{R} \quad (14)$$

式中 σ_i^* ——设计变量的标准差;

$\text{Var}(X_i)^*$ ——设计变量的方差;

R ——可靠度。

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^[14]

$$\begin{cases} \min S(X) = w_1 S_1(X) + w_2 S_2(X) \\ \text{s.t. } R \geq R_0 \\ X_{\min} \leq X \leq X_{\max} \end{cases} \quad (15)$$

式中 $S(X)$ ——多目标评价函数;

$S_1(X)$ ——基于仿真建立的多目标评价函数;

$S_2(X)$ ——基于可靠性灵敏度分析的多目标评价函数;

w_1 和 w_2 ——权值;

X ——设计变量;

R ——可靠度;

R_0 ——目标可靠度;

$X_{\min}$ ——设计变量区间下限;

$X_{\max}$ ——设计变量区间上限。

权值 w_1 和 w_2 计算方法为

$$w_1 = \frac{S_2(X^{*1}) - S_2(X^{*2})}{[S_1(X^{*2}) - S_1(X^{*1})] + [S_2(X^{*1}) - S_2(X^{*2})]} \quad (16)$$

$$w_2 = 1 - w_1 \quad (17)$$

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

$$S_2(X) = \|\nabla P(X)\|_F = \sqrt{\sum_{i=1}^k \left(\frac{\partial R}{\partial X_i} \right)^2} \quad (18)$$

式中, $\nabla P(X)$ 为可靠度对设计变量的一阶偏导矢量。

2 采煤机刚柔耦合建模与仿真

2.1 载荷文件的生成

根据苏联破煤理论,基于项目组开发的“采煤机载荷模拟程序”,计算夹矸煤坚固性系数为 4.1,截深为 800 mm,滚筒转速为 58 r/min,牵引速度为 10 m/min 工况下的载荷曲线^[8, 15],采煤机工作时,前滚筒受载比后滚筒恶劣,前滚筒三向力及三向力矩如图 1 所示。

图 1 采煤机滚筒载荷曲线

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^[16-17],应用 ANSYS 生成截割部行星架模态中性文件^[18],替换相应刚性零件。对虚拟样机

施加约束、接触和驱动^[19],建立的采煤机刚柔耦合模型如图 2 所示。

图 2 采煤机刚柔耦合虚拟样机模型

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,在滚筒质心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,仿真得到前截割部行星架的应力云图和最大应力节点曲线如图 3、4 所示。

图 3 行星架应力云图

图 4 行星架最大应力节点应力曲线图

由图 3、4 可知,前截割部行星架最大应力值为 796.0443 MPa,最大应力值点出现在行星轴孔处。

3 行星架渐变可靠性灵敏度分析

3.1 行星架设计变量的选取与约束条件的建立

由行星架刚柔耦合仿真结果可知,行星架应力集中区域分别为行星架轴间处和渐开线花键卸荷槽处,

位置如图 5 所示。

图 5 行星架应力集中区域

定义行星架第一关注区域失效和第二关注区域失效两种失效形式, 影响第一区域可靠性的参数分别有倒圆角 R_1 、长度 L_1 、厚度 H_1 和直径 D_1 , 如图 6 所示, 定义其为第一关注区域的设计变量矢量 $\mathbf{X}_1$, 其初始值为 $\mathbf{X}_1=(2, 10, 7, 235)^T$, 对结构参数按照高斯分布计算得到采煤机行星架设计变量的概率统计特性^[13], 如表 1 所示。

图 6 第一关注区域设计变量

表 1 行星架第一关注区域设计变量概率统计特性

随机变量	均值	标准差	三阶矩	四阶矩	分布类型
倒圆角 R_1 / mm	2	0.010 0	0	0.000 300	Gaussian
长度 L_1 / mm	10	0.050 0	0	0.007 500	Gaussian
厚度 H_1 / mm	7	0.035 0	0	0.003 675	Gaussian
直径 D_1 / mm	235	1.175 0	0	4.141 875	Gaussian

影响第二区域可靠性的参数分别有直径 D_2 、倒圆角 R_2 和宽度 L_2 , 如图 7 所示, 定义其为第二关注区域的设计变量矢量 $\mathbf{X}_2$, 其初始值为 $\mathbf{X}_2=(150, 2, 8)^T$, 计算方法得到行星架第二关注区域设计变量的概率统计特性, 如表 2 所示。

图 7 第二关注区域设计变量的选取

表 2 行星架第二关注区域设计变量概率统计特性

随机变量	均值	标准差	三阶矩	四阶矩	分布类型
直径 D_2 / mm	150	0.750 0	0	1.687 500	Gaussian
倒圆角 R_2 / mm	2	0.010 0	0	0.000 300	Gaussian
宽度 L_2 / mm	8	0.040 0	0	0.004 800	Gaussian

根据采煤机截割部行星传动系统的装配关系, 得到行星架第一关注区域设计变量 $(R_1, L_1, H_1, D_1)^T$ 和第二关注区域设计变量 $(D_2, R_2, L_2)^T$ 的约束条件为

$$\begin{cases} 0 \leq R_1 \leq 20 \\ 0 \leq L_1 \leq 50 \\ 0 \leq H_1 \leq 8 \\ 200 \leq D_1 \leq 420 \end{cases} \quad (19)$$

$$\begin{cases} 147.7 \leq D_2 \leq 200 \\ 0 \leq R_2 \leq 10 \\ 0 \leq L_2 \leq 41 \end{cases} \quad (20)$$

3.2 行星架多目标优化设计状态函数的建立

在约束条件内建立不同设计变量的行星架模态中性文件, 对其进行刚柔耦合虚拟样机仿真, 基于仿真结果, 利用 Matlab 拟合得到行星架最大应力与各设计变量之间的函数关系^[20], 依据性能退化理论构造考虑性能退化的行星架剩余强度^[13], 关系式为

$$\sigma(n) = \sigma'_{F \lim} \left[1 + \frac{\ln \left(1 - \frac{n}{N+1} \right)}{\ln(N+1)} \right] \quad (21)$$

式中 $\sigma(n)$ ——剩余强度;

n ——载荷作用次数;

$\sigma'_{F \lim}$ ——初始强度;

N ——疲劳寿命。

根据行星架最大应力与各设计变量之间的函数关系并结合式(21), 利用理想点与线性加权法得到考虑性能退化的采煤机截割部行星架第一和第二关注区域的状态函数为

$$\begin{aligned} G_1((R_1, L_1, H_1, D_1), t) &= \sigma_{xxj}(t) - g_1(R_1, L_1, H_1, D_1) = \\ &= \sigma_{xxj}(t) - 0.1489R_1^3 + 1.150R_1^2 + 18.109R_1 + \\ &= 0.00400L_1^3 - 0.444L_1^2 + 12.718L_1 + 0.636H_1^3 - \end{aligned}$$

$$15.835H_1^2 + 87.379H_1 - 0.004196D_1^3 + 3.0049D_1^2 - 712.496D_1 + 54996.308 \quad (22)$$

$$G_2((D_2, R_2, L_2), t) = \sigma_{xx}(t) - g_2(D_2, R_2, L_2) = \sigma_{xx}(t) + 0.00799D_2^3 - 4.405D_2^2 + 802.297D_2 + 0.568R_2^3 - 16.937R_2^2 + 143.202R_2 - 0.0252L_2^3 - 0.1285L_2^2 + 29.733L_2 - 49358.682 \quad (23)$$

3.3 行星架渐变可靠性灵敏度分析及量纲一化

行星架的多失效形式相关的可靠度关系式为^[13]

$$P = P_1 + P_2 - C(P_1, P_2) \quad (24)$$

式中 P_1 ——第一关注区域可靠度;

P_2 ——第二关注区域可靠度;

$C(P_1, P_2)$ ——第一和第二关注区域的相关性系数。

结合性能退化理论, 矩阵中系数的关系式可表示为

$$\rho_{ij}(t) = \frac{\text{Cov}(g_i(t), g_j(t))}{\sigma_{g_i(t)} \times \sigma_{g_j(t)}} \quad (25)$$

行星架多失效形式间的相关系数矩阵为

$$\rho_{ij} = \begin{pmatrix} 1 & 0.2517 \\ 0.2517 & 1 \end{pmatrix} \quad (26)$$

行星架第一和第二关注区域的可靠度对设计变量的均值渐变灵敏度和方差渐变灵敏度关系式为

$$\frac{dR_s(t)}{d(\bar{X}_i, t)^T} = \sum_{i=1}^2 \frac{\partial R_s(t)}{\partial R_i(t)} \frac{\partial R_i(t)}{\partial \beta_i(t)} \frac{\partial \beta_i(t)}{\partial \mu_{g_i(t)}} \frac{\partial \mu_{g_i(t)}}{\partial (\bar{X}_i, t)^T} + \frac{\partial R_s(t)}{\partial \rho_{12}(t)} \frac{\partial \rho_{12}(t)}{\partial (\bar{X}_i, t)^T} \quad (27)$$

$$\frac{dR_s(t)}{d\text{Var}(\bar{X}_i, t)^T} = \sum_{i=1}^2 \frac{\partial R_s(t)}{\partial \beta_i(t)} \frac{\partial \beta_i(t)}{\partial \sigma_{g_i(t)}} \frac{\partial \sigma_{g_i(t)}}{\partial \text{Var}(\bar{X}_i, t)^T} + \frac{\partial R_s(t)}{\partial \rho_{12}(t)} \frac{\partial \rho_{12}(t)}{\partial \text{Var}(\bar{X}_i, t)^T} \quad (28)$$

式中 $R_s(t)$ ——行星架渐变可靠度;

$R_i(t)$ ——第 i 关注区域的渐变可靠度;

$\beta_i(t)$ ——第 i 关注区域的渐变可靠性指标;

$\mu_{g_i(t)}$ ——第 i 关注区域的设计变量均值;

$\rho_{12}(t)$ ——关注区域之间的相关性系数;

$\partial \sigma_{g_i(t)}$ ——第 i 关注区域的设计变量方差。

根据式(13)、(14)对行星架渐变可靠性灵敏度进行量纲一化处理, 得到采煤机截割部行星架第一关注区域和第二关注区域的量纲一化均值渐变灵敏度和均值渐变灵敏度量纲一化数值, 如图 8~11 所示。

图 8 第一关注区域的均值渐变灵敏度量纲一化结果

图 9 第一关注区域的均值渐变灵敏度量纲一化数值

图 10 第二关注区域的均值渐变灵敏度量纲一化结果

图 11 第二关注区域的均值渐变灵敏度量纲一化数值

图 8、9 可知, 采煤机截割部行星架渐变可靠性灵敏度表明了设计变量对行星架可靠性的影响, 其值越大, 对行星架可靠性的影响越大, 其值越小, 对行星架可靠性的影响越小^[21-23]。第一关注区域设计变量 $X_1 = (R_1, L_1, H_1, D_1)_{4 \times 1}^T$ 的均值渐变灵敏度量纲一化最大数值为(2.120 9, 0.106 5, -1.403 0, 0.004 177), 行星架第一关注区域的倒圆角 R_1 、长度 L_1 和直径 D_1 的均值增加, 将使行星架第一关注区域的性能趋于可靠, 厚度 H_1 的均值降低将使行星架第一关注区域的性能趋于可靠^[24-26]。

由图 10、11 可知, 第二关注区域设计变量 $X_2 = (D_2, R_2, L_2)_{3 \times 1}^T$ 的均值渐变灵敏度量纲一化最大数值为(0.027 25, 7.212, 0.337 5), 行星架第二关注区域的直径 D_2 、倒圆角 R_2 和宽度 L_2 的均值增加,

将使行星架第二关注区域的性能趋于可靠。采煤机截割部行星架渐变可靠性灵敏度分析结果为行星架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行星架可靠性稳健设计

由上述分析可知, 行星架结构参数对行星架可靠性均有影响, 因此为提高行星架工作可靠度有必要对行星架各参数进行可靠性稳健优化设计。基于多目标优化设计理论和可靠性稳健优化设计数学模型^[27], 应用改进粒子群算法对采煤机截割部行星架进行可靠性稳健优化设计。

在可靠性优化设计模型基础上引入可靠性灵敏度函数, 搭建可靠性稳健优化设计总体函数^[13]。应用改进粒子群算法的核函数表达式为 $\text{function}[xm, Sv]=\text{PSO}[@S, 10, 2, 2, 0.9, 0.4, 50, 3]$, 式中 xm 为目标函数取最小值时的自变量值; Sv 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^[28]。优化结果如图 12 所示。

图 12 粒子群优化结果

由图 12 可知, 粒子群算法预测的状态函数最优解为 296.956, 因此行星架预测最优解为 353.044 MPa。圆整粒子群优化结果后得到设计变量如表 3、4 所示。

表 3 采煤机截割部行星架第一关注区域设计变量

随机变量	倒圆角 R_1/mm	长度 L_1/mm	厚度 H_1/mm	直径 D_1/mm
原始数据	2	10	7	235
最优解	8	20	5	256

表 4 采煤机截割部行星架第二关注区域设计变量最优解

随机变量	直径 D_2/mm	倒圆角 R_2/mm	宽度 L_2/mm
原始数据	150	2	8
最优解	156	5	13

基于粒子群的优化分析结果, 建立优化后的行星架模态中性文件进行刚柔耦合虚拟样机仿真, 得到优

化后的行星架应力云图和最大值曲线如图 13~15 所示, 优化后行星架设计变量灵敏度如图 16、17 所示。

图 13 优化后行星架等效应力

图 14 优化后行星架第一关注区域最大值曲线图

图 15 优化后行星架第二关注区域最大值曲线图

由图 13~15 可知, 行星架的最大应力值为 347.17 MPa, 预测误差仅为 1.692%, 与优化前比较, 最大应力值降低了 56.388%, 安全系数为 1.872, 在采煤机平稳截割过程中, 行星架第一和第二关注区域应力平均值分别为 200 MPa 和 170 MPa, 均小于许用应力。

图 16 第一关注区域优化前后灵敏度比较

图 17 第二关注区域优化前后灵敏度比较

由图 16、17 可知,优化后的行星架第一关注区域设计变量灵敏度为(0.830 4, -0.002 963, -0.759 6, 0.000 955 7),优化后的行星架第二关注区域设计变量灵敏度为(0.015 62, 1.682, 0.204 0),与优化前进行比较,行星架第一关注区域和第二关注区域设计变量更趋于零,表明优化后行星架第一关注区域和第二关注区域均更加稳健。得到优化后的行星架第一关注区域的可靠度 $R_{XXJ1}=0.999\ 9$,行星架第二关注区域的可靠度 $R_{XXJ2}=0.999\ 9$,优化后的行星架可靠度为 $R_s=R_{XXJ1} \times R_{XXJ2}=0.999\ 9$,达到设计要求。

2015 年 6 月起在兖州煤业鄂尔多斯文玉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,该机型采煤机在兖州煤业本部煤矿使用至今,工作稳定,行星架性能可靠。

5 结论

(1) 采煤机工作过程中受到的冲击载荷复杂多变,利用项目组基于破煤理论开发的“采煤机载荷模拟程序”可得到用于虚拟样机仿真的螺旋滚筒三向力及三向力矩,通过刚柔耦合虚拟样机仿真获得关键零件的薄弱环节,可以此建立关键零件的失效区域。

(2) 将刚柔耦合虚拟样机仿真与多目标优化设计理论、性能退化理论相结合,获得用于零件可靠性分析的状态函数,为构建复杂机构可靠性分析状态函数提供了数据支撑。

(3) 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,提出了一种协同刚柔耦合虚拟样机动态可靠性设计方法,可分析多因素对机械设备可靠性的影响并进行可靠性稳健优化设计,具有重要工程应用价值。

参 考 文 献

- [1] 马联伟. 采煤机行星架可靠性分析与优化[J]. 煤炭工程, 2016, 48(6): 128-131.
- [2] 朱卫波, 杨兆建, 王义亮. 采煤机截割部行星齿轮动力学分析[J]. 煤炭科学技术, 2010, 38(5): 80-82.
- [3] 朱卫波, 杨兆建, 王义亮. 采煤机截割部行星齿轮动力学分析[J]. 煤炭科学技术, 2010, 38(5): 80-82.
- [4] 吴卫东, 李华亮, 薛红锐. 基于 ABAQUS 的采煤机截割部行星传动的接触应力[J]. 黑龙江科技学院学报, 2012, 22(1): 39-41.
- [5] 蒲新征. 薄煤层采煤机摇臂行星齿轮机构优化与分析[J]. 煤矿机械, 2013, 34(1): 43-44.
- [6] 郭建峰. 采煤机截割部行星减速器的受力分析及仿真[D]. 阜新: 辽宁工程技术大学, 2015.
- [7] 高鹏, 韩振铎, 刘泽, 等. MG400/930-WD 型采煤机牵引部行星架传动失效分析[J]. 矿山机械, 2015(6): 30-35.
- [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.
- [9] 赵丽娟, 张农海. 含硫化铁结核薄煤层采煤机行星组件优化设计[J]. 机械设计, 2010, 27(7): 74-78.
- [10] 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.
- [11] 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.
- [12] 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.
- [13] 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.
- [14] 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.
- [15] 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.
- [16] 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.
- [17] 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.
- [18] 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.
- [19] 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.
- [20] 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.

- shearer's planetary in thin coal seam with iron sulfide[J]. Journal of Machine Design, 2010, 27(7): 74-78.
- [10] 孙靖民, 梁迎春. 机械优化设计[M]. 北京: 机械工业出版社, 2012.
- SUN Jingmin, LIANG Yingchun. Mechanical design[M]. Beijing: China Machine Press, 2012.
- [11] 王新刚, 张义民, 王宝艳. 机械零部件的动态可靠性灵敏度分析[J]. 机械工程学报, 2010, 46(10): 188-193.
- WANG Xingang, ZHANG Yimin, WANG Baoyan. Dynamic reliability sensitivity analysis of mechanical components[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2010, 46(10): 188-193.
- [12] YANG Zhou, ZHANG Yimin, ZHANG Xuefang, et al. Reliability sensitivity-based correlation coefficient calculation in structural reliability analysis[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2012, 25(3): 608-614.
- [13] 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.
- ZHOU Na. Theory research on reliability based robust design of gear transmission with multiple failure modes[D]. Shenyang: Northeastern University, 2012.
- [14] 杨周, 张义民, 王倩倩, 等. 非正态随机参数的螺旋管簧的可靠性稳健设计[J]. 振动、测试与诊断, 2012(s1): 80-84.
- YANG Zhou, ZHANG Yimin, WANG Qianqian, et al. The reliability and robust design of spiral tube spring with nonnormal random parameters[J]. Journal of Vibration, Measurement & Diagnosis, 2012(s1): 80-84.
- [15] 赵丽娟, 马永志. 基于多体动力学的采煤机截割部可靠性研究[J]. 煤炭学报, 2009(9): 1271-1275.
- ZHAO Lijuan, MA Yongzhi. reliability research on shearer cutting unit based on multi-body dynamic[J]. Journal of China Coal Society, 2009(9): 1271-1275.
- [16] 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 shin coal seam[J]. Journal of Mechan-ical Transmission, 2013, 37(1): 47-50.
- [17] 赵丽娟, 田震, 张建军, 等. 协同仿真技术在薄煤层采煤机械动态可靠性分析中的应用[J]. 机械设计, 2016(8): 72-78.
- ZHAO Lijuan, TIAN Zhen, ZHANG Jianjun, et al. Application of collaborative simulation technology in reliability analysis of thin coal seam mining machinery[J]. Journal of Machine Design, 2016(8): 72-78.
- [18] 曲天智, 蒋金泉, 赵丽娟. 复杂结构薄煤层高效综采关键技术[M]. 徐州: 中国矿业大学出版社, 2010.
- QU Tianzhi, JIANG Jinquan, ZHAO Lijuan. Key technology of efficient fully mechanized in complex thin seam[M]. Xuzhou: China University of Mining and Technology Press, 2010.
- [19] 赵丽娟, 李明昊, 田震, 等. 刨煤机牵引块疲劳寿命分析与优化设计[J]. 煤炭学报, 2016, 41(3): 776-781.
- ZHAO Lijuan, LI Minghao, TIAN Zhen, et al. Coal plough's traction block reliability analysis and optimization design [J]. Journal of China Coal Society, 2016, 41(3): 776-781.
- [20] 赵丽娟, 范佳艺. 基于遗传算法的采煤机螺旋滚筒多目标优化设计[J]. 中国机械工程, 2018, 29(5): 591-596.
- ZHAO Lijuan, FAN Jiayi. Shearer's helical drum multi-objective optimization design based on GA[J]. China Mechanical Engineering, 2018, 29(5): 591-596.
- [21] 贾庆轩, 李彤, 陈钢, 等. 基于多层映射模型的空间机械臂运动可靠性影响因素灵敏度分析[J]. 机械工程学报, 2017, 53(11): 10-19.
- JIA Qingxuan, LI Tong, CHEN Gang, et al. Sensitivity analysis on factors influencing motion reliability of space manipulator based on the multilayer mapping model[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2017, 53(11): 10-19.
- [22] 朱学军, 王安麟, 黄洪钟. 基于健壮性的机械设计方法[J]. 机械科学与技术, 2000, 19(2): 230-233.
- ZHU Xuejun, WANG Anlin, HUANG Hongzhong. Mechanical design method based on robustness[J]. Mechanical Science and Technology, 2000, 19(2): 230-233.
- [23] 张义民. 任意分布参数的机械零件的可靠性灵敏度设计[J]. 机械工程学报, 2004, 40(8): 100-105.
- ZHANG Yimin. Reliability sensitivity design of mechanical parts for arbitrary distribution parameters[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2004, 40(8): 100-105.
- [24] 张义民, 朱丽莎, 王新刚, 等. 具有强非线性状态方程的机械零部件可靠性灵敏度分析方法[J]. 应用数学和力学, 2010, 31(10): 1256-1266.
- ZHANG Yimin, ZHU Lisha, WANG Xingang, et al. Reliability sensitivity analysis method of mechanical parts with strong nonlinear state equations[J]. Applied Mathematics and Mechanics, 2010, 31(10): 1256-1266.
- [25] 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.
- [26] 卢昊. 基于矩方法的相关失效模式机械结构系统可靠性稳健设计[D]. 沈阳: 东北大学, 2012.
- LU Hao. Raliability robust design of mechanical structural system with dependent failure modes based on moment method[D]. Shenyang: Northeastern University,

- 2012.
- [27] YANG Zhou, ZHANG Yimin, HUANG Xianzhen, et al. Reliability-based robust optimization design of automobile components with non-normal distribution parameters[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2013, 26(4): 823-830.
- [28] 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.
- 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.

作者简介: 赵丽娟, 女, 1964 年出生, 博士, 教授, 博士研究生导师。主要研究方向为采掘机械动态可靠性分析与性能优化、机械系统动力学分析与控制、先进制造技术及应用、机电液一体化系统的仿真与应用。
E-mail: zlj2120@163.com
范佳艺(通信作者), 女, 1990 年出生, 博士研究生。主要研究方向为机械系统动力学分析与控制。
E-mail: fffan6363@163.com

第 8 届上银优秀机械博士论文奖——佳作奖

高速滚动轴承动力学及润滑热失效研究

作 者: 王云龙

毕业学校: 北京理工大学

指导教师: 王文中

现代装备向高速/重载等方向的发展对轴承性能提出了更高要求。在高速工况下, 打滑蹭伤以及轴承工作温度突然升高和润滑失效导致的表面损伤成为轴承的主要失效形式。因此对高速滚动轴承的动态特性和结构参数影响有必要进一步深入研究, 提出更精确的模型预测轴承的性能, 并进行优化设计。本文针对高速滚动轴承, 建立了滚动轴承的动力学分析模型, 揭示了角接触球轴承在不同工况下的打滑机理, 分析了不同工况条件和结构参数对轴承动态特性的影响; 耦合轴承动力学模型和热弹流动压润滑模型对轴承的润滑热失效机理进行了研究和揭示; 在高速主轴试验机上进行了高速滚动轴承的验证实验。论文的主要工作包括如下。

(1) 建立了角接触球轴承完全动力学模型, 系统分析了角接触球轴承的动态特性, 揭示了高速角接触球轴承在不同工况下的打滑机理, 提出了能有效抑制打滑发生的条件。

(2) 耦合轴承动力学模型和热弹流润滑模型, 对高速角接触球轴承的润滑性能进行了系统分析, 发现在一定工况下轴承润滑性能偏离经典弹流理论的预测, 进而提出了轴承的润滑热失效条件。

(3) 基于轴承动力学模型, 系统研究了滚道曲率半径系数对轴承内部接触压力、动态特性的影响规律, 提出了高速轻载轴承以减小打滑、重载工况以延长疲劳寿命为目标的滚道曲率半径系数优化策略。

(4) 建立了考虑滚道表面粗糙度影响的轴承动力学模型, 研究了滚道表面粗糙度对轴承动态特性、润滑性能和表层下应力波动的影响。结果表明: 载荷较低时, 适当的内滚道表面粗糙度有利于减小打滑; 载荷足够大时, 滚道表面粗糙度对滚动体的运动几乎无影响; 减小表面粗糙度有利于提高疲劳寿命, 但小于某一粗糙度后影响微小。

(5) 通过试验研究了不同轴承参数和工况对轴承外圈温升的影响, 证实了沟道曲率半径系数存在优化值和最佳轴向载荷, 间接验证了所建立的高速滚动轴承动力学模型及分析结果。

本文研究为高速滚动轴承的分析和性能预测提供了理论基础, 对高速滚动轴承的优化设计提出了合理建议。