DOI: 10.3901/JME.2019.24.021

融合应力集中因子与贝叶斯理论的结构健康评估方法^{*}

朱 林¹ 贾民平² 林明智³ 陈 晖³

(1. 扬州大学机械工程学院 扬州 225001;

2. 东南大学机械工程学院 南京 211189;

3. 广西柳工机械股份有限公司研究总院 柳州 545006)

摘要: 针对传统结构健康评估方法评估精度较低的现状, 提出一种融合应力集中因子与贝叶斯理论的结构健康评估方法。首先, 结合基于应力集中因子的序化模型策略与非齐次泊松过程, 运用贝叶斯理论方法对试验信息及总体过程参数的序化关系进行有效融合, 推导出适合不同初始损伤状态的过程参数先验分布。同时, 基于应力集中递进因子与似然函数的概念, 建立融合应力集中因子与贝叶斯定理非齐次泊松过程的参数后验分布预测方法。最后对提出的结构健康评估方法进行实例研究, 并将预测结果与独立的试验结果进行比较。结果表明, 提出方法的平均预测精度为 91.99%, 可以实现通过少量试验信息完成结构健康状态评估的目的, 从而为结构健康的精确评估提供了一种思路。

关键词: 应力集中因子; 贝叶斯; 非齐次; 递进因子; 健康评估

中图分类号: TH17

Health Assessment Approach for Structure by Fusion of Stress Concentration Factor and Bayesian Theory

ZHU Lin¹ JIA Minping² LIN Mingzhi³ CHEN Hui³

(1. School of Mechanical Engineering, Yangzhou University, Yangzhou 225001;

2. School of Mechanical Engineering, Southeast University, Nanjing 211189;

3. Central Research Institute, Guangxi Liugong Machinery Company, Liuzhou 545006)

Abstract: Aiming at the low accuracy of traditional structural health assessment approach, the health assessment approach for structure by fusion of stress concentration factor and Bayesian theory is proposed. The prior parameters distribution for different damage situation based on non-homogeneous Poisson process is obtained by combine the ordering model of stress concentration factor with the non-homogeneous Poisson model, and having an effective integration on the test information with the ordering relation, by using Bayesian method. The posterior distribution calculation approach based on Bayesian is achieved by using the prior information, based on the progressive factor and the likelihood function. Further, a case study of the proposed structural health assessment approach is carried out, and the predicted results are compared with the independent test results. It can be clearly found from the results that the average accuracy is 91.99%. The proposed approach can be used to completes the purpose of health assessment by using a small amount of test information, and provides a way for the accurate assessment of structural health.

Key words: stress concentration factor; bayesian approach; non-homogeneous; progressive factor; health assessment

0 前言

当今, 大型机械设备正以前所未有的速度向前

发展^[1-2]。一方面, 结构不断向复杂化、轻巧化发展; 另一方面, 破坏造成的损失越来越大, 结构必须最大限度地发挥其效能。为在满足经济性的前提下充分发挥结构效能, 对其进行健康评估是必要的^[3]。裂纹是结构失效形式, 裂纹结构的健康评估已成为这一领域的研究重点^[4-5]。

贝叶斯理论与经典统计方法的本质区别在于先

^{*} 国家自然科学基金(51675098)、江苏省自然科学基金青年(BK20190911)和中国博士后科学基金(2019M661947)资助项目。20180815 收到初稿, 20190221 收到修改稿

验信息的利用。评估对象一般能做的试验次数少,如何利用经验来减少试验次数就变得极为关键,这一点也推动了贝叶斯方法的应用^[6-7]。王宇^[8]在考虑材料疲劳裂纹扩展具有较大分散性的前提下,建立了一种基于贝叶斯理论的疲劳寿命分析方法,并研究了特定裂纹长度下的概率分布。TORREGOSA 等^[9]根据不同参数对裂纹结构健康评估的影响,建立了动态贝叶斯模型,实现了参数实时更新下的结构健康状态评估。BECK 等^[10]根据结构健康指标服从指数与 Weibull 分布的特点,建立了基于贝叶斯理论的结构健康状态评估方法,并通过实例对其可行性与分析准确性进行了验证。文献[6-10]能够实现结构健康状态的评估,但未能够充分将理论模型所预测出的数据转化为需要的先验分布。STRAUB 等^[11]通过构建信息间传递模型,实现了先验信息与后验信息间融合,并完成了健康评估。KARANDIKAR 等^[12]针对传统健康评估方法的局限性,建立了考虑失效相关性的系统贝叶斯网络模型,并将贝叶斯网络应用于复杂机械系统的健康评估。文献[11-12]能够基本上实现先验信息与后验信息间的传递,但上述评估模型的假设都具有相同的初始状态,无法评价同一批结构间初始损伤状态不同的情况。

鉴于此,本文提出了一种融合应力集中因子与贝叶斯理论的结构健康评估方法,建立基于应力集中因子增长的序化模型,并将各试验信息及总体过程参数中的应力集中因子序化关系进行有效融合,推导出适合不同初始损伤状态的非齐次泊松过程(Non-homogeneous Poisson Process, NHPP)参数先验分布,并结合各组试验过程的似然函数,由贝叶斯定理获得融合应力集中因子与 NHPP 的参数后验分布。同时,结合少量的现场试验信息与先验分布信息完成不同裂纹初始状态下结构的健康评估。

1 序化模型假设

假设 1: 假设有 $n-1$ 组不同裂纹初始状态的同种构件疲劳试验数据信息,即

第一组数据

$$X^{(1)} = [x_1^{(1)}, x_2^{(1)}, \dots, x_{m_1}^{(1)}] \sim f_X(\theta_1) \quad (1)$$

第 n 组数据

$$X^{(n)} = [x_1^{(n)}, x_2^{(n)}, \dots, x_{m_n}^{(n)}] \sim f_X(\theta_n) \quad (2)$$

裂纹结构的应力集中因子表示为裂纹区域的最大应力与区域名义应力的比值。由于损伤加剧,对

应额定加载次数的裂纹扩展增量及可靠度变化量存在 $\theta_1 \leq \theta_2 \leq \dots \leq \theta_{n-a} \leq \theta_n$ 的序化关系。

假设 2: 第 j 组裂纹扩展数据 $N_j(t)$ 是具有均值函数 $E[N_j(t)] = V_j(t) = \beta_j(t - t_{0j})^{\alpha_j}$ 的 NHPP, 各阶段损伤率为 $\lambda_j(t) = \frac{dE[N_j(t)]}{dt} = \alpha_j \beta_j(t - t_{0j})^{\alpha_j - 1}$, 且强度为 $\lambda_j(t)$ 的 NHPP 可以等价为 Weibull 过程。 α 为 Weibull 过程的形状参数, β 为尺度参数。

假设 3: 裂纹初始状态不改变失效机理, 故各组数据的 Weibull 过程形状参数 α 相等。

假设 4: 基于假设 1, 为了保证同时刻应力集中因子逐渐变大, 引入应力集中递进因子 δ_j 来描述初始状态不同所引起的变化, δ_j 取均值分布。

$$\delta_j = K_{t,j} / K_{t,j-1} > 1 \quad (3)$$

式中, $K_{t,j}$ 为时间节点所对应的应力集中因子。

某个时间节点的应力集中因子 K_t 可以表示为

$$K_t = \frac{\sigma_{\max}}{\sigma_n} \quad (4)$$

式中, $\sigma_{\max}$ 为结构分析的最大应力, σ_n 为结构分析的名义应力。

$$\sigma_n = \frac{\int_0^A f(x) dx}{A} \quad (5)$$

式中, A 为积分路径的选取距离, $f(x)$ 为应力状态拟合分布方程。

通常, $[\delta_{j,L}, \delta_{j,U}]$ 为应力集中递进因子的取值区间。

其一、二阶矩分别为

$$E\{\delta_j\} = \frac{\delta_{j,U} + \delta_{j,L}}{2} \quad (6)$$

$$E\{\delta_j^2\} = \frac{\delta_{j,U}^3 + \delta_{j,L}^3}{3(\delta_{j,U} + \delta_{j,L})} \quad (7)$$

式中, $E\{\delta_j\}$ 为应力集中递进因子的一阶矩; $E\{\delta_j^2\}$ 为应力集中递进因子的二阶矩; $\delta_{j,L}$ 与 $\delta_{j,U}$ 为应力集中递进因子取值区间。

2 先验分布

2.1 第一组数据先验分布

不同裂纹初始状态下结构健康评估的关键问题在于先验分布的确定和验前信息的融合^[13]。在初始裂纹最小的试验阶段内, 运用已有理论模型进行先验信息的预测。本文在基于多因素修正的裂纹扩展预测模型^[5]的基础上, 对多组合理修正系数范围内的构件裂纹数据进行预测, 并求解第一组数据所对

应的先验分布参数的均值与标准差。

$$\sigma \cdot [1 - (\sigma_m / \sigma_u)^2] \cdot \left(\frac{C}{N} \right)^{-\frac{1}{m}} \cdot Q \cdot C_L = \frac{A}{\int_0^L \frac{(L - L_0 + r)}{\sqrt{2(L - L_0)r + r^2}} dr} \quad (8)$$

式中, σ_m 为平均应力; σ 表示循环应力; σ_u 为材料极限强度; Q 为表面质量系数; C_L 为加载方式系数; N 为疲劳寿命; m 、 C 为与材料、应力比有关的参数; L 为裂纹扩展后长度; L_0 为裂纹初始长度。

根据预测数据求解先验参数的均值 $E(\beta_1)$ 与标准差 $E(\beta_1^2)$, 可得尺度参数的先验系数为

$$\begin{cases} a_1 = [E(\beta_1)]^2 / D(\beta_1) \\ b_1 = E(\beta_1) / D(\beta_1) \end{cases} \quad (9)$$

式中, $D(\beta_1) = E(\beta_1^2) - [E(\beta_1)]^2$

同时, 形状参数的先验系数 c_1, d_1 可以表示为

$$\begin{cases} c_1 = \frac{[E_1(\alpha)]^2 - [E_1(\alpha)]^3 - E_1(\alpha^2)}{D_1(\alpha)} \\ d_1 = c_1 \frac{[1 - E_1(\alpha)]}{E_1(\alpha)} \end{cases} \quad (10)$$

2.2 其他组数据的先验分布

在 $j > 1$ 的试验数据组内, 根据裂纹扩展中结构健康评估所得的可靠度数值的实际特点, NHPP 的尺度参数 β_j 取适应性较强的 Gamma 分布作为先验分布

$$\pi(\beta_j | a_j, b_j) = \frac{b_j^{a_j}}{\Gamma(a_j)} \beta_j^{a_j-1} \exp(-b_j \beta_j) \quad a_j > 0, b_j > 0 \quad (11)$$

采用矩等价的方法, 结合上一序化数据组的后验分布与应力集中递进因子, 共同作为本组先验信息。假设试验数据 D , 随机变量 β_j 和 δ_j 的先验均值和方差与上一序化数据组中后验 β_{j-1} 的关系为

$$E(\beta_j) = E(\beta_{j-1} | D) E(\delta_j) \quad (12)$$

$$E(\beta_j^2) = E(\beta_{j-1}^2 | D) E(\delta_j^2) \quad (13)$$

根据 Gamma 分布均值与方差公式, 可得

$$\begin{cases} a_j = [E(\beta_j)]^2 / D(\beta_j) \\ b_j = E(\beta_j) / D(\beta_j) \end{cases} \quad (14)$$

$$D(\beta_j) = E(\beta_j^2) - [E(\beta_j)]^2$$

失效函数 $\lambda_j(t) = \alpha_j \beta_j t^{\alpha_j-1}$ 以及累积失效函数 $m(t)$ 之间的关系为

$$m'(t) = \left(\frac{1}{\lambda(t)} \right) = \left(\frac{1}{\lambda \alpha} t^{1-\alpha} \right)' = \frac{1}{\lambda \alpha} (1-\alpha) t^{-\alpha} \quad (15)$$

α 的先验分布可取 Beta 分布, 即

$$\pi(\alpha | c_j, d_j) = \frac{\Gamma(c_j + d_j)}{\Gamma(d_j) \Gamma(c_j)} \alpha^{c_j-1} (1-\alpha)^{d_j-1} \quad (16)$$

式中, $c_j > 0, d_j > 0$ 。

根据序化模型假设 3, 序化排列的各组数据的 Weibull 过程中形状参数 α 是相等的, 随机变量 α 的先验均值和方差与上一序化试验数据组中后验分布均值和方差的关系可表示为

$$E(\alpha_j) = E(\alpha_{j-1} | D) \quad (17)$$

$$E(\alpha_j^2) = E(\alpha_{j-1}^2 | D) \quad (18)$$

Beta 分布的均值和方差可以表示为

$$E(\alpha) = \frac{c}{c+d} \quad (19)$$

$$E(\alpha^2) = \frac{cd}{(c+d)^2(c+d+1)} \quad (20)$$

根据式(19)、(20), 形状参数的先验系数 c_j, d_j 可以表示为

$$\begin{cases} c_j = \frac{[E_j(\alpha)]^2 - [E_j(\alpha)]^3 - E_j(\alpha^2)}{D_j(\alpha)} \\ d_j = c_j \frac{[1 - E_j(\alpha)]}{E_j(\alpha)} \end{cases} \quad (21)$$

假设 α_j 与 β_j 相互独立, 可得第 j 个初始状态下参数 α 与 β 的联合先验分布。

$$\pi(\alpha, \beta | a_j, b_j, c_j, d_j) = \frac{\Gamma(c_j + d_j)}{\Gamma(a_j) \Gamma(d_j) \Gamma(c_j)} h_j^{a_j} \beta_j^{a_j-1} \exp(-b_j \beta_j) \alpha^{c_j-1} (1-\alpha)^{d_j-1} \quad (22)$$

3 后验分布

第 j 种裂纹初始状态下构件的试验数据为 D , 每组数据的特定裂纹扩展长度截尾尺寸为 L_j , 第 i 个载荷作用次数与第 $i+1$ 个载荷作用次数间的裂纹扩展长度为 $L_{j,i}$, 则第 j 种似然函数^[14-15]为

$$L(D | \beta_j, \alpha) = \beta_j^{N_j} \alpha^{N_j} U_j^{\alpha-1} \exp(-b_j \beta_j) \quad (23)$$

式中, N_j 为试验数据中裂纹扩展长度的记录次数,

$$U_j = \prod_{i=1}^{N_j} L_{j,i}。$$

第 j 组数据的后验分布为

$$\pi(\alpha, \beta_j | D) =$$

$$\frac{1}{D_j} \alpha^{N_j+c_j-2} \beta_j^{N_j+a_j-1} (1-\alpha)^{d_j-1} U_j^{\alpha-1} \exp(-b_j \beta_j) \quad (24)$$

α 和 β_j 的一阶矩、二阶矩为

$$E_j(\alpha^r) =$$

$$\frac{\Gamma(N_1 + a_j)}{D_j} \int_0^1 \alpha^{N_1 + c_j - 1 + r} (1 - \alpha)^{d_j - 1} U_j^{\alpha - 1}(b_j)^{-N_j - a_j} d\alpha \quad (25)$$

$$E(\beta_j^r) =$$

$$\frac{\Gamma(N_1 + a_j + r)}{D_j} \int_0^1 \alpha^{N_1 + c_j - 1} (1 - \alpha)^{d_j - 1} U_j^{\alpha - 1}(b_j)^{-N_j - a_j - r} d\alpha \quad (26)$$

式中, $r = 1, 2$; D_j 可表示为

$$D_j =$$

$$\Gamma(N_j + a_j) \cdot \int_0^1 \alpha^{N_1 + c_j - 1} (1 - \alpha)^{d_j - 1} U_j^{\alpha - 1}(b_j)^{-N_j - a_j} d\alpha \quad (27)$$

4 实例应用

为了实现不同裂纹初始状态结构的健康状态评估, 在如图 1 所示的结构上分别制取出 10 mm, 25 mm, 38 mm 及 43 mm 的裂纹, 结构的板厚为 3 mm, 其余结构尺寸及初始裂纹位置如图 1 所示。裂纹主要出现在侧板与下盖板的连接处, 且向侧板扩展至箱型梁结构断裂失效, 故在相应位置预制出初始裂纹。结构所用材料的力学性能参数如表 1 所示。

图 1 试验结构

表 1 材料的基本力学参数

参数	数值
屈服强度 $\sigma_{0.2}$ /MPa	225
抗拉强度 σ_m /MPa	370
伸长率 $A(\%)$	22
断裂韧度 K_{IC} /(MPa $\cdot$ m ^{1/2})	107.85
断裂性能常数 m	4.198 7
断裂性能常数 $C/\times 10^{-16}$	2.26

然后对构件进行疲劳加载试验, 加载力为 1 850 N, 载荷加载频率为 1 Hz, 总加载时间为 41.67 小时。加载完毕后对数据进行处理分析可得如表 2 所示的寿命, 其过程服从 NHPP。如表 2 所示为不同初始裂纹长度情况下固定裂纹扩展长度与载荷作用次数之间的 15 个数据。分别在如表 2 所示的数据组 1~4 中随机选取 10 个数据为训练数据对上述模型进行训练, 而剩余另 5 个数据为测试数据。

表 2 对应于不同裂纹初始尺寸构件的裂纹扩展寿命

数据组 1		数据组 2		数据组 3		数据组 4	
载荷作用次数	裂纹扩展长度	载荷作用次数	裂纹扩展长度	载荷作用次数	裂纹扩展长度	载荷作用次数	裂纹扩展长度
/10 ³	L/mm	/10 ³	L/mm	/10 ³	L/mm	/10 ³	L/mm
0	0	0	0	0	0	0	0
10	3.91	10	6.29	10	9.22	10	10.87
20	9.15	20	14.38	20	21.13	20	21.54
30	14.41	30	20.99	30	29.54	30	30.26
40	18.54	40	25.89	40	35.22	40	37.44
50	21.04	50	29.16	50	38.93	50	43.48
60	22.08	60	31.18	60	41.41	60	48.78
70	22.48	70	32.71	70	43.44	70	53.73
80	23.73	80	34.82	80	45.73	80	58.75
90	27.96	90	38.92	90	49.03	90	64.22
100	37.99	100	46.73	100	54.07	100	70.53
110	57.28	110	60.32	110	61.56	110	78.11
120	72.23	120	76.07	120	79.96	120	87.33
130	86.77	130	92.47	130	96.33	130	98.60
140	105.88	140	112.32	140	115.16	140	123.02
150	128.90	150	130.27	150	138.62	150	146.32

同时, 运用有限元手段对不同初始裂纹长度情况下应力分布状态进行分析, 由高应力值往低应力值的积分路径上按距离布置测点来获得所测点的应力值。根据前期研究发现, 每隔 2 mm 布

置一个应力值获取点且最终选取距离为 12 mm 可以很好的体现分析结构应力的分布状态, 然后即可获得如图 2 所示的构件损伤部位的初始应力分布状态。

图2 不同初始裂纹状态下的裂纹根部应力状态分布

根据图2所得到的结果对应力状态分布方程进行拟合,得到如表3所示的应力状态分布方程。将应力状态分布方程与如图2所示的距离为0处的最

大应力值代入式(2)、(3)中对应力集中因子进行求解,最后将不同初始状态下的应力集中因子代入式(1)可得到如表5所示的应力集中递进因子。

表3 应力状态分布方程

初始长度 L/mm	应力状态拟合分布方程
10	$f(x) = -0.005x^3 + 0.17x^2 - 3.93x + 176.05$
25	$f(x) = -0.003x^3 - 0.024x^2 - 1.52x + 307.01$
38	$f(x) = 0.051x^3 - 0.6x^2 - 8.69x + 327.79$
43	$f(x) = -0.025x^3 + 0.52x^2 - 8.75x + 327.94$

将标准载荷、表1中的材料力学参数及如图2a中的最大应力值代入式(7)中对多组表面质量系数与加载方式系数组合所对应的裂纹扩展长度进行求解。根据前期修正系数的研究,表面质量系数的常用数据为1.2、1.4、1.6,加载方式系数的常用系数为0.8、1.0、1.2。然后运用Weibull过程对数据分布的尺寸参数与形状参数进行求解,获得如表4所示的尺度参数与形状参数的均值与标准差。

表4 基于多因素修正裂纹扩展预测模型的先验信息

数据类别	初始模型预测数据	
尺度参数 β	均值	39.16
	标准差	0.63
形状参数 α	均值	0.95
	标准差	0.11

根据第2.2节中所述的先验信息递进关系得到如表5所示的先验参数。由于数据组1的先验估计过程中对构件的可靠性了解不多,故采用理论模型预测的方法对先验系数进行求解,而其他组数据的先验估计是在前一组数据后验估计的基础上获得。同时,对过程参数的后验分布进行求解,进而得到Weibull过程参数的后验推断,如表6所示。

根据上述计算结果即可获得如图3所示等效后的Weibull过程尺度参数 α 和形状参数 β 的先验等效概率密度及如图4所示的Weibull过程尺度参数 α 和形状参数 β 的后验等效概率密度。

表5 构件不同初始状态的裂纹扩展先验信息

数据组	应力集中递进因子		尺寸参数		形状参数		先验系数			
	δ_L	δ_U	均值	标准差	均值	标准差	a	b	c	d
1	—	—	39.161	2.393	0.946	0.148	-1.002	-0.026	-1.165	-0.061
2	1.057	1.176	43.899	0.177	0.949	0.108	-1.000	-0.023	-1.058	-0.057
3	0.990	1.103	52.789	0.027	1.189	0.109	-0.993	-0.019	-0.795	0.126
4	0.971	1.081	63.897	0.018	1.490	0.119	-0.977	-0.016	-0.482	0.159

表 6 构件裂纹扩展的后验推断

数据组	尺寸参数				形状参数			
	均值	标准差	5%分位点	95%分位点	均值	标准差	5%分位点	95%分位点
1	39.318	2.672	34.92	43.71	0.949	0.108	0.77	0.13
2	50.443	0.463	49.68	51.20	1.189	0.109	1.01	1.37
3	62.278	0.316	61.76	62.80	1.490	0.119	1.29	1.69
4	87.642	0.298	87.15	88.13	1.989	0.136	1.77	2.21

(a) 尺寸参数的先验等效概率密度

(b) 形状参数的先验等效概率密度

图 3 先验参数的等效概率密度

(a) 尺寸参数的后验等效概率密度

(b) 形状参数的后验等效概率密度

图 4 后验参数的等效概率密度

为了对融合应力集中因子与贝叶斯理论的结构

健康评估方法的预测精度进行分析, 将试验数据与预测结果进行对比, 即可获得如图 5 所示的结果。同时, 计算每个固定载荷作用次数所对应的预测精

(a) 第一组数据

(b) 第二组数据

(c) 第三组数据

(d) 第四组数据

图 5 预测结果比较

度, 对每一组数据中 5 个固定载荷作用次数下的预测精度求平均值可以得到如表 7 所示的数据, 统计分析得到四组数据的平均预测精度为 91.99%。

表 7 预测结果的精度

数据组别	平均预测精度(%)
第一组	90.98
第二组	91.19
第三组	92.83
第四组	92.94

根据如表 1 所示的材料力学性能参数, 可得结构的临界断裂裂纹长度为 166.76 mm, 然后将临界裂纹长度与上述预测数据相结合即可获得如图 6 所示的不同裂纹初始状态下结构可靠度渐变过程。

图 6 不同裂纹初始状态下结构健康可靠度渐变过程

5 结论

研究了一种融合应力集中因子与贝叶斯理论的结构健康评估方法, 得出结论如下:

(1) 将基于应力集中因子的序化模型策略与 NHPP 相结合, 运用贝叶斯方法对不同损伤初始状态下的试验信息及应力集中因子的序化关系进行有效融合, 推导出了不同初始损伤状态的过程参数先验分布。同时, 基于应力集中递进因子与似然函数的概念, 通过借用部分先验信息的策略, 建立了基于贝叶斯定理的 NHPP 参数后验分布模型。

(2) 运用融合应力集中因子与贝叶斯理论的结构健康评估方法对不同初始状态下箱型构件的可靠性评估进行了实例研究, 研究结果表明测试数据的平均预测精度为 91.99%, 可以较好地实现通过少量现场试验信息完成构件可靠性评估的目的。

参 考 文 献

- [1] 张义民, 孙志礼. 机械产品的可靠性大纲[J]. 机械工程学报, 2014, 50(14): 14-20.
ZHANG Yiming, SUN Zhili. The outline of the reliability of mechanical products[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2014, 50(14): 14-20.

- [2] 谢里阳. 机械可靠性理论、方法及模型中若干问题评述[J]. 机械工程学报, 2014, 50(14): 27-35.
XIE Liyang. Issues and commentary on mechanical reliability theories, methods and models[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2014, 50(14): 27-35.
- [3] ZHANG W, JIA M P, ZHU L, et al. Comprehensive overview on computational intelligence techniques for machinery condition monitoring and fault diagnosis[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering, 2017, 30(4): 782-795.
- [4] 朱林, 贾民平, 冯月贵, 等. 考虑残余应力重分布情况下的裂纹扩展预测研究[J]. 机械工程学报, 2017, 53(8): 43-49.
ZHU Lin, JIA Minping, FENG Yuegui, et al. Prediction study of the crack propagation with consideration of the residual stress redistribution[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2017, 53(8): 43-49.
- [5] ZHU L, JIA M P. Estimation study of structure crack propagation under random load based on multiple factors correction[J]. Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering, 2017, 39: 681-693.
- [6] 明志茂, 张云安, 陶俊勇, 等. 研制阶段系统可靠性增长的 Bayesian 评估与预测[J]. 机械工程学报, 2010, 46(4): 150-156.
MING Zhimao, ZHANG Yunan, TAO Junyong, et al. Bayesian estimation and prediction of reliability growth of system in product development stage[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2010, 46(4): 150-156.
- [7] FAN W L, ANG H S, LI Z L. Reliability assessment of deteriorating structures using Bayesian updated probability density evolution method (PDEM)[J]. Structural Safety, 2018, 65: 60-73.
- [8] 王宇. 贝叶斯参数更新在可靠性分析中的应用[D]. 南京: 南京航空航天大学, 2014.
WANG Yu. Bayesian parameter updating in the application of the reliability analysis[D]. Nanjing: Nanjing University of Aeronautics And Astronautics, 2014.
- [9] TORREGOSA R F, HU W. Probabilistic risk analysis of fracture of aircraft structures using a Bayesian approach to update the distribution of the equivalent initial flaw sizes[J]. Fatigue & Fracture of Engineering Materials & Structures, 2013, 36(11): 1092-1101.
- [10] BECK J L, AU S K. Bayesian updating of structural models and reliability using Markov chain Monte Carlo simulation[J]. Journal of Engineering Mechanics, 2002, 128(4): 380-391.
- [11] STRAUB D, PAPAIOANNOU I. Bayesian updating with structural reliability methods[J]. Journal of Engineering (下转第 36 页)

- [20] 王建国, 李健, 万旭东. 基于奇异值分解和局域均值分解的滚动轴承故障特征提取方法[J]. 机械工程学报, 2015, 51(3): 104-110.
- WANG Jianguo, LI Jian, WAN Xudong. Fault feature extraction method for rolling bearings based on singular value decomposition and local mean decomposition[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2015, 51(3): 104-110.
- [21] 霍炬, 李云辉, 杨明. 激光投影成像式运动目标位姿测量与误差分析[J]. 光子学报, 2017, 46(9): 127-131.
- HUO Ju, LI Yunhui, YANG Ming. Measurement and error analysis of laser projection imaging moving targets[J]. Acta Photonica Sinica, 2017, 46(9): 127-131.
- [22] WU Bin, WANG Bing. Automatic measurement in

large-scale space with the laser theodolite and vision guiding technology[J]. Advances in Mechanical Engineering, 2013(5): 533-542.

作者简介: 赵祚喜(通信作者), 男, 1968 年出生, 教授, 博士研究生导师。主要研究方向为智能农机装备系统设计。

E-mail: zhao_zuoxi@hotmail.com

宋俊文, 女, 1994 年出生。主要研究方向为车辆设计理论与方法。

E-mail: 710512700@qq.com

谈婷, 女, 1995 年出生。主要研究方向为车辆设计理论与方法。

E-mail: 2243517403@qq.com

黎源鸿, 男, 1990 年出生, 博士研究生。主要研究方向为土壤异质硬物检测。

E-mail: 625267029@qq.com

马昆鹏, 男, 1992 年出生。主要研究方向为土壤异质硬物检测。

E-mail: mkp1002040223@gmail.com

(上接第 27 页)

- Mechanics, 2014, 141(3): 04014134.
- [12] KARANDIKAR J M, KIM N H, SCHMITZ T L. Prediction of remaining useful life for fatigue-damaged structures using Bayesian inference[J]. Engineering Fracture Mechanics, 2012, 96(2): 588-605.
- [13] ZHU B, DAN M F. Reliability assessment of ship structures using Bayesian updating[J]. Engineering Structures, 2013, 56(6): 1836-1847.
- [14] PENG W, HUANG H Z, LI Y, et al. Life cycle reliability assessment of new products: A Bayesian model updating approach[J]. Reliability Engineering & System Safety,

2013, 112: 109-119.

- [15] MOSALLAM A, MEDJAHHER K, ZERHOUNI N. Data-driven prognostic method based on Bayesian approaches for direct remaining useful life prediction[J]. Journal of Intelligent Manufacturing, 2016, 27(5): 1037-1048.

作者简介: 朱林(通信作者), 男, 1989 年出生, 博士, 讲师。主要研究方向为机械系统可靠性与寿命预测。

E-mail: zhulin157@163.com

贾民平, 男, 1960 年出生, 博士, 教授, 博士研究生导师。主要研究方向为故障诊断及质量监控。

E-mail: mpjia@seu.edu.cn