

文章编号: 1001-4888(2019)05-0775-08

基于粒子滤波的疲劳裂纹扩展 和剩余寿命预测实验研究^{*}

严刚, 汤剑飞

(南京航空航天大学航空学院 机械结构力学及控制国家重点实验室, 江苏南京 210016)

摘要: 本文对应用粒子滤波在线预测疲劳裂纹扩展和剩余寿命进行了实验研究。根据 ASTM 标准制作了紧凑拉伸(CT)试件, 结合 MTS 疲劳测试系统进行了 Q235 钢的疲劳裂纹扩展实验。通过将传统的 Paris 模型嵌入到贝叶斯状态估计的框架中, 采用粒子滤波方法, 结合裂纹张开位移(COD)引伸计不断获得的裂纹监测信息, 在线预测未来时刻疲劳裂纹扩展情况并更新剩余寿命。实验结果验证了粒子滤波对疲劳裂纹扩展和剩余寿命在线预测的可行性和有效性, 表明粒子滤波不仅能进行在线预测, 还能给出预测结果的置信区间; 随着监测信息的增多, 剩余寿命预测结果的不确定性逐渐减小。

关键词: 疲劳裂纹扩展; 剩余寿命; 粒子滤波; 在线预测; 紧凑拉伸试件

中图分类号: V214.8 **文献标识码:** A **DOI:** 10.7520/1001-4888-18-088

0 引言

在长期的交变载荷作用下, 结构不可避免地会在应力集中部位产生疲劳裂纹。如果这些疲劳裂纹不能被及时发现而任其扩展, 将引起结构失效等严重后果。在过去几十年中, 基于断裂力学的分析方法在结构疲劳裂纹扩展和剩余寿命预测方面发挥了重要作用^[1,2]。但传统方法大多是离线预测方法, 由一定数量试验事先确定的预测模型参数具有很强的分散性, 使得结构设计带有很大的保守性。近年来, 结构健康监测领域的研究进展已开始为单个结构进行在线疲劳裂纹扩展预测和剩余寿命评估提供可能性, 这对充分发挥结构的使用寿命具有重要意义^[3,4]。

目前发展的结构疲劳裂纹扩展和剩余寿命在线预测方法主要可分为基于数据的方法和基于模型的方法^[5]。前者通过实验获得的大量数据来训练建立疲劳裂纹现有状态与未来状态之间的关系^[6,7]; 后者大多采用传统疲劳裂纹扩展模型, 将之改进以满足在线预测的需要^[8,9]。由于材料微观结构的不同、疲劳损伤累积的随机性、实验载荷谱与实际载荷谱的差异等因素的存在, 加上当前发展水平的制约, 与现有无损检测技术相比, 结构健康监测系统识别的裂纹信息还存在较大的误差, 如何考虑这些不确定性因素的影响是在线预测面临的一个重要问题。贝叶斯概率统计理论由于承认生产实践的继承性, 可以将对结构的认识以及维护人员经验等相关信息加以利用作为先验知识参与决策, 从而在结构疲劳断裂研究方面体现出其特有的处理不确定性问题的优越性^[10]。在基于模型的方法中, 采用贝叶斯理论不仅能根据健康监测系统定时识别的裂纹数据对不同疲劳扩展模型进行最优选择, 还能对模型参数进行更新, 减小模型参数的不确定性, 提高预测结果的准确度^[11]。在贝叶斯理论的框架中, 粒子滤波是处理非线性

^{*} 收稿日期: 2018-04-27; 修回日期: 2018-09-12

基金项目: 江苏省自然科学基金(BK20130783), 南京航空航天大学基本科研业务费(NS2016011)资助项目

通讯作者: 严刚(1981—), 男, 副教授, 主要研究领域: 结构健康监测与结构疲劳断裂。Email: yangang@nuaa.edu.cn

性、非高斯系统问题的有效方法,近年来在很多领域都得到了广泛应用,在疲劳裂纹扩展在线预测方面具有重要的应用前景。如 Orchard 等人采用粒子滤波对齿轮盘有限元模型中的裂纹扩展进行了预测^[12];Corbetta 等人探讨了应用粒子滤波对随机载荷作用下裂纹扩展进行预测的可行性^[13]。这些研究都表明了粒子滤波在疲劳裂纹扩展和剩余寿命预测方面的重要应用价值,但还都处于初步研究阶段,且大多集中在粒子滤波的算法部分,验证数据主要来源于数值仿真,而少有实验验证。

本文的目的即在现有 ASTM 标准的框架下,制作紧凑拉伸(CT)试件并结合 MTS 疲劳测试系统,对疲劳裂纹扩展和剩余寿命在线预测进行实验研究,利用裂纹张开位移(COD)引伸计不断获得的裂纹监测信息,在线预测未来时刻疲劳裂纹扩展情况并更新剩余寿命估计结果,验证基于粒子滤波预测方法的可行性和有效性。

1 基于粒子滤波的在线预测方法

1.1 Paris 公式

在断裂力学中,裂纹在疲劳载荷下的扩展被分为三个阶段:低速扩展段、稳定扩展段和快速扩展段。Paris 认为,在稳定扩展段,应力强度因子对于控制裂纹扩展速率起着最重要的作用,由此提出了著名的 Paris 公式^[14]

$$da/dN = C (\Delta K)^m \quad (1)$$

其中, a 为裂纹长度; N 为疲劳载荷循环数; da/dN 为裂纹扩展速率; ΔK 为应力强度因子变程; C 和 m 是描述材料疲劳裂纹扩展性能的基本参数。对 Paris 公式两端取对数,可获得斜率为 m ,与纵轴交点为 $\log C$ 的直线方程。在传统离线预测中, C 和 m 通常由实验数据进行直线拟合得到。

一旦基本参数和应力强度因子变程得到确定,Paris 公式就可用于对疲劳裂纹扩展和剩余寿命进行预测。但由于环境、材料和测量误差等因素的影响,导致实验获得的 Paris 模型参数存在很大的不确定性,因此有必要采取合适的方法来考虑不确定性因素的影响,提高预测精度和可靠性。

1.2 粒子滤波

一般情况下,动态系统的系统方程和测量方程可以描述为

$$\begin{cases} X_k = f(X_{k-1}, \omega_{k-1}) \\ Z_k = h(X_k, v_k) \end{cases} \quad (2)$$

其中, X_k 是 k 时刻的状态变量; Z_k 是 k 时刻的测量信息; f 是系统函数,描述了系统的演化行为; h 是测量函数,描述了测量信息与状态变量之间的关系; ω_k 和 v_k 分别是独立同分布的系统噪声和测量噪声。在每个 k 时刻,获得系统的测量信息 Z_k ,并加入测量序列 $Z_{1:k} = \{Z_1, Z_2, \dots, Z_k\}$ 中。贝叶斯状态估计的目的是通过测量序列估计出当前状态变量 X_k 的条件分布 $p(X_k | Z_{1:k})$,包含了从 $p(X_k | Z_{1:k})$ 到 $p(X_{k-1} | Z_{1:k-1})$ 的预测和更新两个步骤^[15]:

$$\begin{cases} p(X_k | Z_{1:k-1}) = \int p(X_k | X_{k-1}) p(X_{k-1} | Z_{1:k-1}) dX_{k-1} \\ p(X_k | Z_{1:k}) = \frac{p(Z_k | X_k) p(X_k | Z_{1:k-1})}{p(Z_k | Z_{1:k-1})} \end{cases} \quad (3)$$

但对于非线性系统,式(3)通常没有解析解,需要由蒙特卡洛方法来获得近似解。粒子滤波(序贯蒙特卡罗法)采用一组具有权重 w_k^i 的粒子 X_k^i ($i = 1, 2, \dots, N_s$) 来近似式(3)中的后验分布:

$$p(X_k | Z_{1:k}) = \sum_{i=1}^{N_s} w_k^i \delta(X_k - X_k^i) \quad (4)$$

其中, δ 为 Dirac 脉冲函数, w_k^i 为 X_k^i 对应的权重,可由下式获得

$$w_k^i \propto \frac{p(X_k^i | Z_{1:k})}{q(X_k^i | Z_{1:k})} \quad (5)$$

其中, $q(X_k | Z_{1:k})$ 为重要性密度函数,权重需要进行归一化。

由状态空间假设(一阶 Markov 独立性),重要性权重可以递归获得:

$$w_k^i \propto w_{k-1}^i \frac{p(Z_k | X_k^i) p(X_k^i | X_{k-1}^i)}{q(X_k^i | X_{k-1}^i, Z_k)} \quad (6)$$

其中 $p(X_k^i | X_{k-1}^i)$ 和 $p(Z_k | X_k^i)$ 分别是由式(2)定义的转移密度函数和似然函数。为简化计算,通常取转移密度函数作为重要性密度函数,即 $q(X_k^i | X_{k-1}^i, Z_k) = p(X_k^i | X_{k-1}^i)$, 由此可得

$$w_k^i \propto w_{k-1}^i p(Z_k | X_k^i) \quad (7)$$

粒子滤波存在的一个重要不足是粒子枯竭,需对后验概率密度的离散近似进行重采样,复制权值较高的粒子而淘汰权值较低的粒子,重新生成一个独立同分布、权值均为 $w_k^i = 1/N_s$ 的样本集合^[16]。定义衡量粒子枯竭程度的有效粒子数量为

$$N_{eff} = 1 / \sum_i^{N_s} (w_k^i)^2 \quad (8)$$

当有效粒子数量低于预先设定的阈值 N_{th} 时,启动重采样程序。在某一时间步,预测、更新和重采样构成了粒子滤波算法的一个递归的基本过程。

1.3 在线预测方法

为满足在线预测的要求,将 Paris 公式嵌入到贝叶斯状态估计的框架中。定义状态向量 $X = [a \ C \ m]^T$, 测量量 Z 为由 COD 引伸计的裂纹张开位移通过柔度法转换得到的裂纹长度。假设在 $k-1$ 时刻,由粒子滤波,裂纹长度 a 以及模型参数 C 和 m 的概率密度 $p(a_{k-1})$ 、 $p(C_{k-1})$ 和 $p(m_{k-1})$ 的离散估计已知,即存在 a, C 和 m 的概率密度的 N_s 个抽样样本。将 Paris 公式改写为离散形式

$$a_k = a_{k-1} + C (\Delta K)^m \Delta N_k \quad (9)$$

通过式(4),可以计算 k 时刻裂纹长度先验概率密度的离散估计

$$p(a_k | a_{k-1}, C_{k-1}, m_{k-1}) = \sum_{i=1}^{N_s} w_{k-1}^i \delta(a_k - a_k^i) \quad (10)$$

其中

$$a_k^i = a_{k-1}^i + C_{k-1}^i [\Delta K(a_{k-1}^i)]^{m_{k-1}^i} \Delta N_k \quad (i = 1, 2, \dots, N_s) \quad (11)$$

对于模型参数 C 和 m ,则采用如下的随机游动策略来获得其在 k 时刻的离散估计^[8]

$$\begin{cases} C_k^i = C_{k-1}^i + \eta_c^i \\ m_k^i = m_{k-1}^i + \eta_m^i \end{cases} \quad (i = 1, 2, \dots, N_s) \quad (12)$$

其中 η_c 和 η_m 是均值为零,方差为 σ_{η_c} 和 σ_{η_m} 的随机变量。

当获得 k 时刻裂纹长度的观测值 Z_k 后,通过似然函数更新每个粒子的权值,该权值衡量了该粒子接近真实参数的程度。根据文献[16],似然函数可取对数正态分布

$$p(Z_k | X_k^i) = \frac{1}{Z_k \sqrt{2\pi} \zeta_k^i} \exp \left[-\frac{1}{2} \left(\frac{\ln Z_k - \lambda_k^i}{\zeta_k^i} \right)^2 \right] \quad (i = 1, 2, \dots, N_s) \quad (13)$$

其中 $\zeta_k^i = \sqrt{\ln(1 + (\rho/a_k^i(m_{k-1}^i, C_{k-1}^i))^2)}$, $\lambda_k^i = \ln[a_k^i(m_{k-1}^i, C_{k-1}^i)] - \frac{1}{2}(\zeta_k^i)^2$, ρ 为裂纹长度测量误差的标准差。

接下来对粒子进行重采样,每个粒子被采样的概率正比于其权值。重采样完成后,便获得了 k 时刻模型参数以及裂纹长度的后验概率分布 $p(a_k, C_k, m_k | Z_k)$ 的离散估计。同时,将疲劳裂纹由当前状态发展到临界长度的载荷循环数,定义为结构的剩余寿命,由裂纹长度的概率密度分布就可估算结构剩余寿命分布。

2 实验研究

2.1 实验系统

为了验证应用粒子滤波对结构疲劳裂纹扩展和剩余寿命进行在线预测的可行性和有效性,在现有 ASTM 标准下进行了实验研究^[17]。根据 ASTM 标准制作了 CT 试件,如图 1 所示,试件材料为 Q235 钢,厚度为 20mm。采用美国 MTS 公司的疲劳测试系统 LandMark370.10 进行了疲劳裂纹扩展实验。实验中,在 CT 试验件缺口安装了美国 MTS 公司的 632.02F 型 COD 引伸计,在线监测试验件缺口张开位移,采用柔度法计算疲劳裂纹的长度作为测量信息^[18]。

实验共采用了 4 个 CT 试验件,分别命名为 CT_1、CT_2、CT_3 和 CT_4,其中 CT_2、CT_3 和 CT_4 的测试数据为离线预测和在线预测提供先验知识,CT_1 的测试数据用于验证预测结果。根据

ASTM 标准,首先对试件施加恒幅交变载荷预制疲劳裂纹,最大载荷为 32.8kN,应力比为 0.1,加载频率为 5Hz。当 COD 引伸计测量的预制疲劳裂纹达长度达到 16mm 左右(含预制缺口长度)时,开始正式疲劳裂纹扩展实验。正式实验中,CT_1 的最大载荷为 32.8kN,CT_2、CT_3 和 CT_4 的最大载荷为 36 kN,应力比均为 0.1,加载频率均为 5Hz。图 2(a)所示为实验过程中 COD 引伸计通过柔度法测量得到的疲劳裂纹扩展曲线。本文中假设临界裂纹长度为 60mm,各试件的疲劳寿命如表 1 所示。为获得裂纹扩展速率,根据 ASTM 标准,由裂纹扩展数据处理得到裂纹扩展速率和应力强度因子变程 $da/dN-\Delta K$ 曲线图,并进行了直线拟合,如图 2(b)所示。由拟合直线确定各试件的参数 m 和 $\log C$ 的值,如表 2 所示。

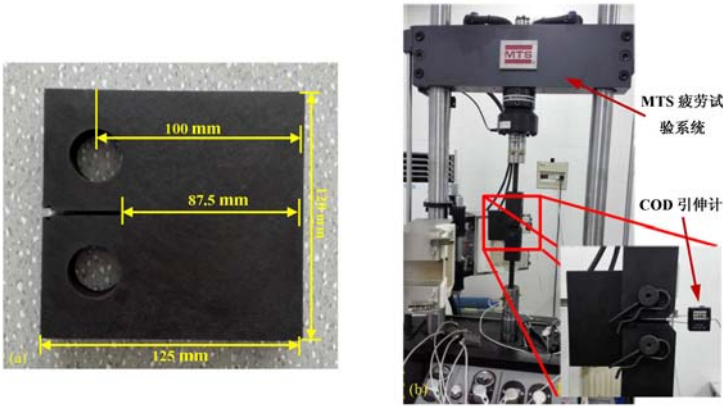


图 1 实验试件与实验系统
Fig.1 CT specimen and test set-up

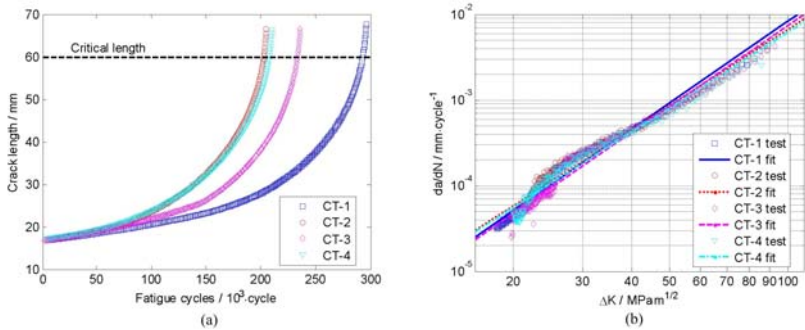


图 2 疲劳裂纹扩展曲线与 $da/dN-\Delta K$ 双对数坐标图

Fig.2 Fatigue crack growth curves and $da/dN-\Delta K$ data within log-log coordinate

表 1 各试件到达临界长度的疲劳寿命

试件编号	CT_1	CT_2	CT_3	CT_4
疲劳寿命($\times 10^3$ 载荷循环)	292.9	202.7	233.2	207.4

表 2 各试件裂纹扩展数据拟合获得的参数值

试件编号	CT_1	CT_2	CT_3	CT_4
参数 m	3.165	2.946	3.132	2.923
参数 $\log C$	-19.363	-18.578	-19.335	-18.554

2.2 离线预测结果

由图 2(b)和表 2 可看出,部分测量数据偏离拟合直线,拟合的直线存在一定的不确定性,各试件的

拟合参数也有分散性。为考虑不确定性,假设 $\log C$ 和 m 服从正态分布 $N(m, \sigma^2)$ 。对表 2 所示的拟合参数进行统计分析并考虑样本数量的限制,对标准差进行了修正,假设 $\log C$ 服从 $N(-18.958, 0.226)$, m 服从 $N(3.042, 0.062)$ 。

采用蒙特卡洛法,从初始裂纹长度以及模型参数的分布中随机抽取 1000 个样本,由式(11)对疲劳裂纹扩展进行离线预测,预测结果如图 3(a)所示。对蒙特卡洛法计算的结果进行统计分析,获得其中值及 99% 置信区间,也在图 3(a)上标出。对疲劳裂纹扩展曲线进行分析,得到剩余寿命的预测结果,如图 3(b)所示。离线预测的中值剩余寿命为 286.2×10^3 载荷循环,与实际剩余寿命的误差为 6.7×10^3 载荷循环,占实际使用寿命的 2.3%。但从图 3 可以看出,由于模型参数的误差以及测量噪声的影响,离线预测存在很大的不确定性,其 99% 置信区间的上下限分别为 130.6×10^3 载荷循环和 607.3×10^3 载荷循环,宽度为 476.7×10^3 载荷循环。出于安全考虑,以下限值作为设计值,则过于保守,材料疲劳断裂性能裕度明显偏大。

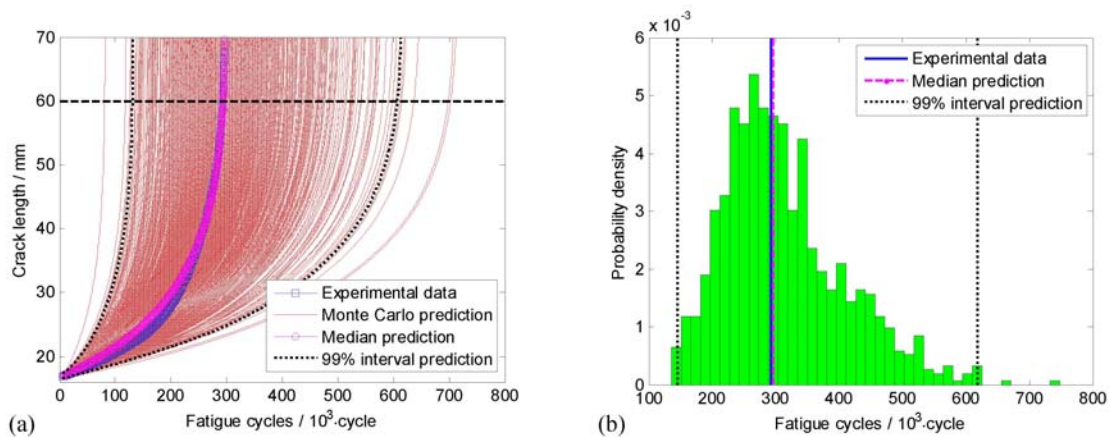


图 3 离线预测的疲劳裂纹扩展曲线与剩余寿命

Fig. 3 Offline predicted fatigue crack growth curves and residual life

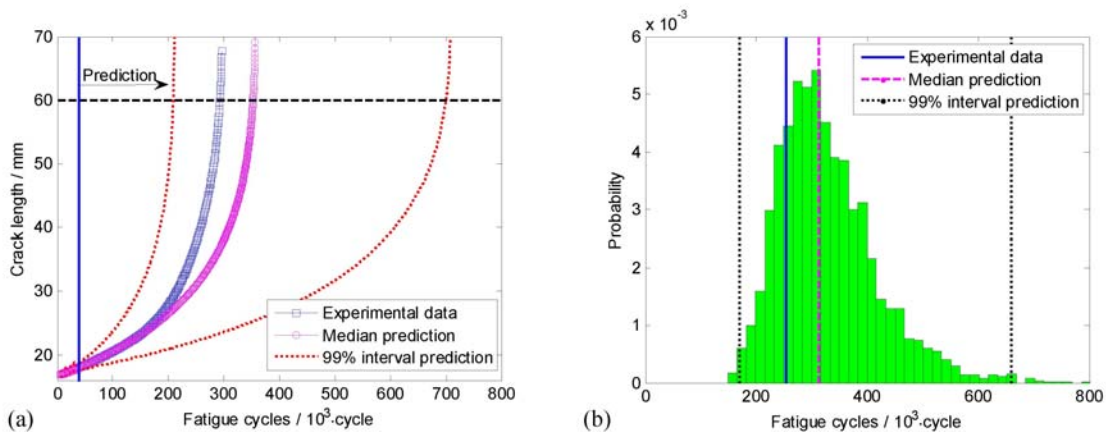


图 4 40×10^3 载荷循环时在线预测的疲劳裂纹扩展曲线和剩余寿命

Fig. 4 Online predicted fatigue crack growth curves and residual life after 40×10^3 fatigue cycles

2.3 在线预测结果

在本文中,将粒子的个数 N_s 设为 3000,载荷循环的间隔 ΔN 设为 1000,然后由式(9)~(13),采用粒子滤波算法从初始裂纹以及模型参数的初始分布中随机抽取 3000 个样本,结合 COD 引伸计测量获得的裂纹长度信息,在线预测疲劳裂纹扩展,并更新剩余寿命。图 4(a)所示为 40×10^3 载荷循环时粒子滤波在线预测的裂纹扩展结果,对结果进行统计分析,获得其中值及 99% 置信区间,剩余寿命的预测结

果如图 4(b)所示。图 5 和图 6 所示分别为 120×10^3 载荷循环和 200×10^3 载荷循环时粒子滤波在线预测的裂纹扩展和剩余寿命结果。这些预测结果的中值和 99% 置信区间也在表 3 中列出。图 7 所示为每隔 40×10^3 载荷循环的粒子滤波在线预测剩余寿命的结果与实际剩余使用寿命的比较,离线预测(即 0 载荷循环时的预测)结果也在图中标出。由图 4~图 7 和表 3 可以看出,当裂纹长度的测量信息较少时,由于模型误差的存在,疲劳裂纹扩展和剩余寿命的在线预测具有很大的误差和不确定性;但随着裂纹长度测量信息的增多,疲劳裂纹扩展和剩余寿命的预测精度不断提高,不确定性不断减小,表明了粒子滤波对疲劳裂纹扩展和剩余寿命在线预测的可行性和有效性。

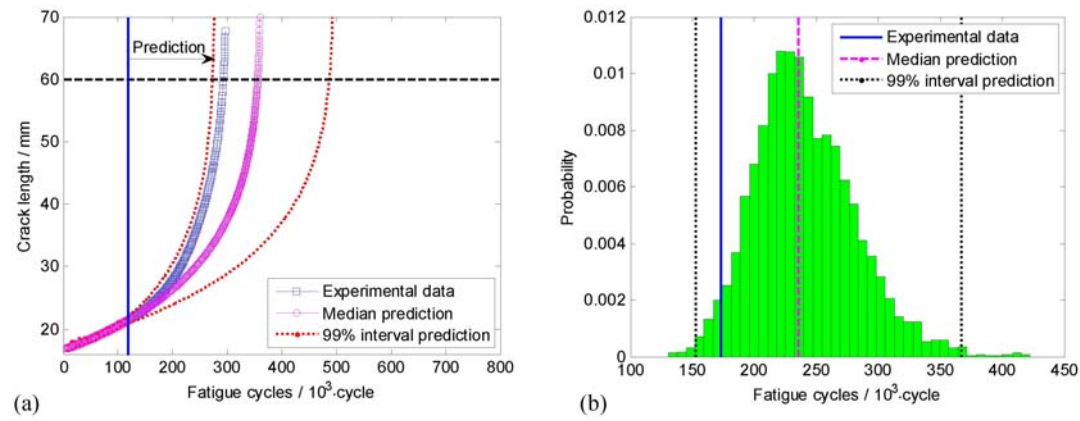


图 5 120×10^3 载荷循环时在线预测的疲劳裂纹扩展曲线和剩余寿命

Fig. 5 Online predicted fatigue crack growth curves and residual life after 120×10^3 fatigue cycles

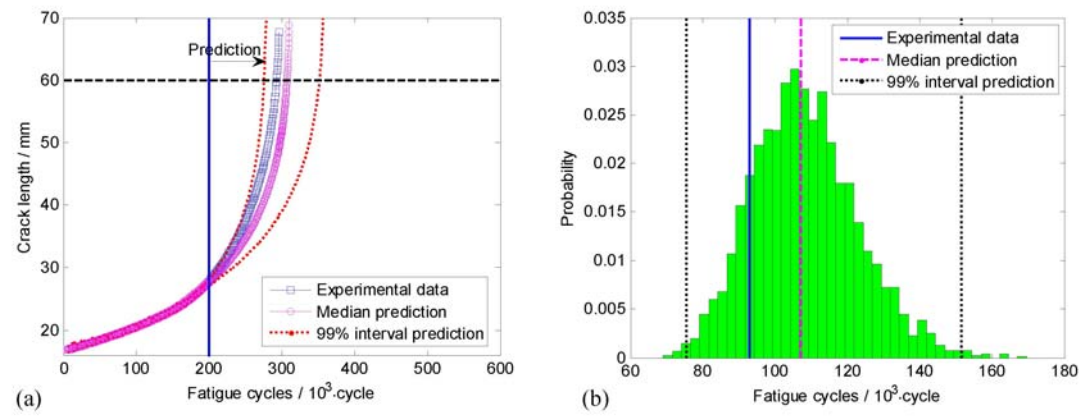


图 6 200×10^3 载荷循环时在线预测的疲劳裂纹扩展曲线和剩余寿命

Fig. 6 Online predicted fatigue crack growth curves and residual life after 200×10^3 fatigue cycles

表 3 不同载荷循环时剩余寿命在线预测结果

Tab. 3 Online predicted residual lives after different fatigue cycles

载荷循环 ($\times 10^3$ 载荷循环)	40	80	120	160	200	240	280
剩余寿命中值 ($\times 10^3$ 载荷循环)	352.3	280.2	235.6	183.3	107.1	43.2	11.3
剩余寿命 99% 置信 区间($\times 10^3$ 载荷循环)	[208.7 699.9]	[179.8 429.5]	[152.8 365.2]	[128.9 252.9]	[75.4 151.5]	[32.6 56.9]	[8.9 14.7]

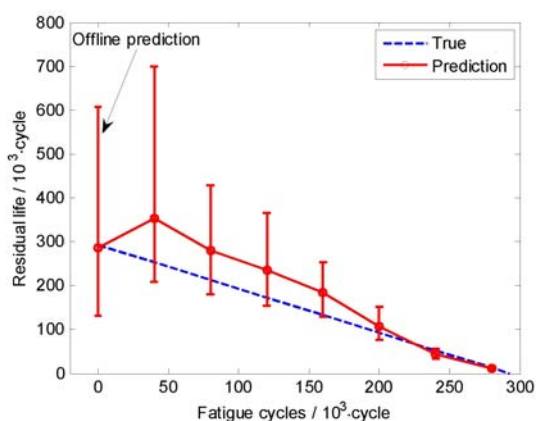


图7 离线与在线预测结果比较图

Fig. 7 Comparison of offline and online predicted results

3 结论

本文对基于粒子滤波的结构疲劳裂纹扩展和剩余寿命在线预测进行了实验研究。采用 ASTM 标准制作了 CT 试件,并结合 MTS 疲劳测试系统进行了疲劳裂纹扩展实验。通过将传统的 Paris 模型嵌入到贝叶斯滤波的框架中,采用粒子滤波方法,结合不断获得的裂纹监测结果,在线预测未来时刻疲劳裂纹扩展情况并更新剩余寿命估计结果。

实验结果表明,传统离线预测方法易受模型参数分布的影响,预测结果具有很大的不确定性;而基于粒子滤波的在线预测方法能在预测过程中,将监测系统获得的测量数据不断反馈给预测模型,修正预测模型参数,更新剩余寿命,减少预测结果的不确定性并给出预测结果的置信区间,从而验证了基于粒子滤波的疲劳裂纹扩展和剩余寿命在线预测方法的可行性和有效性。

参考文献:

- [1] Cui W C. A state-of-the-art review on fatigue life prediction methods for metal structures[J]. Journal of Marine Science and Technology, 2002, 7(1):43-56.
- [2] 张小丽,陈雪峰,李兵,等. 机械重大装备寿命预测综述[J]. 机械工程学报, 2011, 47(11):100-116 (ZHANG Xiaoli, CHEN Xuefeng, LI Bin, et al. Review of life prediction for mechanical major equipments[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2011, 47(11):100-116 (in Chinese))
- [3] 卿新林,王奕首,赵琳. 结构健康监测技术及其在航空航天领域中的应用[J]. 实验力学, 2012, 27(5):517-526 (QING Xinlin, WANG Yishou, ZHAO Lin. Structural health monitoring technology and its application in aeronautics and astronautics[J]. Journal of Experimental Mechanics, 2012, 27(5):517-526 (in Chinese))
- [4] 孟光,尤明懿. 基于状态监测的设备寿命预测与预防维护规划研究[J]. 振动与冲击, 2011, 30(8):1-11 (MENG Guang, YOU Mingyi. Review on condition-based equipment residual life prediction and preventive maintenance scheduling[J]. Journal of Vibration and Shock, 2011, 30(8):1-11 (in Chinese))
- [5] An D, Kim N H, Choi J H. Practical options for selecting data-driven or physics-based prognostics algorithms with reviews[J]. Reliability Engineering and System Safety, 2015, 133:223-236.
- [6] Mohanty S, Das Santanu S, Chattopadhyay A, et al. Gaussian process time series model for life prognosis of metallic structures[J]. Journal of Intelligent Material Systems and Structures, 2009, 20(8):887-896.
- [7] Zio E, Maio F D. Fatigue crack growth estimation by relevance vector machine[J]. Expert Systems with Applications, 2012, 39(12):10681-10692.
- [8] Cobb A C, Michaels J E, Michaels T E. An integrated approach to local ultrasonic monitoring of fastener hole fatigue cracks[J]. The Aeronautical Journal, 2009, 113(1144):775-788.
- [9] Coppe A, Haftka R T, Kim N H. Uncertainty reduction of damage growth properties using structural health monitoring[J]. Journal of Aircraft, 2010, 47(6):2030-2038.

- [10] Ling Y, Mahadevan S. Integration of structural health monitoring and fatigue damage prognosis[J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2012, 28:89—104.
- [11] Guan X, Jha R, Liu Y. Model selection, updating and averaging for probabilistic fatigue damage prognosis[J]. *Structural Safety*, 2011, 33:242—249.
- [12] Orchard M E, Vachtsevanos G J. A particle-filtering approach for on-line fault diagnosis and failure prognosis[J]. *Transactions of the Institute of Measurement and Control*, 2009, 31(3-4):221—246.
- [13] Corbetta M, Sbarufatti C, Manes A, et al. Real-time prognosis of random loaded structures via bayesian filtering: a preliminary discussion[J]. *Engineering Fracture Mechanics*, 2015, 145:143—160.
- [14] Paris P, Erdogan F. A critical analysis of crack propagation laws[J]. *Journal of Basic Engineering*, 1963, 85(4): 528—533.
- [15] Arulampallam M S, Maskell S, Gordon N, et al. A tutorial on particle filters for online nonlinear/non-Gaussian Bayesian tracking[J]. *IEEE Transactions on Signal Processing*, 2002, 50:174—188.
- [16] An D, Choi J H, Kim N H. Prognostics 101: a tutorial for particle filter-based prognostics algorithm using Matlab [J]. *Reliability Engineering and System Safety*, 2013, 115:161—169.
- [17] ASTM E647, Standard test method for measurement of fatigue crack growth rates[S]. ASTM International, 2011.
- [18] 方钦志, 张石山, 赵明喈, 等. 疲劳裂纹扩展柔度法测量系统研究[J]. *实验力学*, 2000, 15(1):110—114 (FANG Qinzhi, ZHANG Shishan, ZHAO Minghao, et al. Research on the measuring system for fatigue crack growth investigation by compliance method[J]. *Journal of Experimental Mechanics*, 2000, 15(1):110—114 (in Chinese))

Experimental study on prediction of fatigue crack growth and residual life by using particle filter

YAN Gang, TANG Jian-fei

(State Key Laboratory of Mechanics and Control of Mechanical Structures, College of Aerospace Engineering, Nanjing University of Aeronautics and Astronautics, Nanjing 210016, China)

Abstract: This paper presents an experimental study on online prediction of fatigue crack growth (FCG) and residual life (RL) by using particle filter (PF). According to ASTM standard, compact tension (CT) specimens are manufactured and FCG experiments for Q235 steel are performed by MTS fatigue test system. By embedding the conventional Paris model into the Bayesian framework, PF is employed to online predict FCG in the future and update the estimate of RL with continuously monitoring data from a crack open displacement (COD) gauge. Experimental results have validated the feasibility and effectiveness of the PF-based online prediction method, demonstrating that PF can not only give prediction results, but also their confidence intervals; with the increase of monitoring data, the uncertainties of RL predictions are progressively reduced.

Keywords: fatigue crack growth; residual life; particle filter; online prediction; compact tension coupon