

# 基于IPSO-PF算法的疲劳裂纹扩展预测

靳婷<sup>1</sup> 王晓磊<sup>2</sup> 刘宇<sup>1</sup> 袁建明<sup>1</sup>

(1. 武汉理工大学交通与物流工程学院, 港口装卸技术交通运输行业重点实验室, 武汉 430063)

(2. 中交一航局安装工程有限公司, 天津 300457)

**摘要:** 传统Paris公式预测裂纹扩展时忽略了裂纹扩展过程中各种不确定因素的影响, 导致预测的裂纹扩展过程与真实的裂纹扩展过程相差较大。为提高疲劳裂纹扩展预测的精度, 提出了一种基于改进粒子群优化粒子滤波(Improved Particle Swarm Optimization-Particle Filtering, IPSO-PF)算法的疲劳裂纹扩展预测方法。首先, 在粒子滤波(Particle Filtering, PF)算法的框架上, 利用粒子群优化(Particle Swarm Optimization, PSO)算法对基于观测信息更新后的部分粒子进行优化, 保持大权值的粒子状态不变, 将小权值的粒子趋向于高似然区域, 设计了IPSO-PF算法; 然后, 将IPSO-PF算法与Paris公式结合, 构建了基于Paris公式和IPSO-PF算法的疲劳裂纹扩展预测模型; 最后, 使用公开的2024-T351铝合金数据集对该模型的有效性进行了验证。结果表明, 与传统PF算法相比, IPSO-PF算法能够提高粒子的多样性, 使用IPSO-PF算法构建的裂纹扩展预测模型的预测误差为2.6%, 优于基于PF算法的9.2%。

**关键词:** 疲劳裂纹; 裂纹扩展预测; 粒子滤波; 粒子群优化; 算法优化

**中图分类号:** O346.2 **DOI:** 10.16579/j.issn.1001.9669.2025.04.006

## 0 引言

疲劳裂纹作为机械结构的常见损伤类型, 广泛存在于各种工程结构中。据统计, 疲劳失效占机械结构失效总数的50%~90%, 严重影响机械结构的安全<sup>[1]</sup>。准确预测疲劳裂纹的扩展过程对缩短机器的停机时间和保障生产人员安全具有重要的应用价值。

在工程中, 一般使用Paris公式实现对裂纹的扩展及疲劳寿命的预测<sup>[2]</sup>。但传统Paris公式预测裂纹扩展时一般把裂纹扩展模型的参数看作一个确定的值, 通过一定数量的试验事先确定模型的参数, 进而预测裂纹的扩展, 这种方法预测的疲劳裂纹扩展过程也是一个确定的过程。然而, 疲劳裂纹扩展是一个具有随机性的过程, 受到各种不确定性因素的影响, 如结构尺寸、材料缺陷、载荷和环境因素等。使用确定性的物理或数据驱动模型等传统方法进行疲劳裂纹扩展预测容易产生较大的误差<sup>[3]</sup>。

粒子滤波(Particle Filtering, PF)算法被视为解决不确定性下疲劳裂纹扩展预测问题的最新技术<sup>[4]</sup>。祝志远等<sup>[5]</sup>将Paris公式和PF算法结合, 实现了对30Cr2Ni4MoV钢和2024-T42铝合金两种材料疲劳裂

纹扩展的预测, 该方法相较于直接使用Paris公式可以大幅提高裂纹扩展预测的准确性和可靠性。LIU等<sup>[6]</sup>将PF算法应用于齿轮, 跟踪齿轮的退化, 并准确地预测了齿轮的剩余疲劳寿命。

虽然将Paris公式与PF算法结合的方法比直接用Paris公式进行预测裂纹扩展的预测精度有一定程度的提高, 但是传统PF算法存在粒子贫化问题, 限制了预测精度的进一步提高。鉴于此, 关雪雪<sup>[7]</sup>提出了一种混合PF的优化算法, 在重要性采样时, 采用证据理论确定模型参数的先验分布, 并在重采样后引入了差分进化自适应Metropolis算法移动步, 改善了粒子多样性匮乏的问题, 该算法在预测电池容量退化和疲劳裂纹扩展方面相比传统PF算法取得了更好的预测效果。顾震华<sup>[8]</sup>提出了一种非线性PF算法, 将其与Paris公式结合实现了裂纹扩展预测, 使用Q235钢试样的裂纹扩展试验数据证明了基于非线性PF算法的裂纹扩展预测精度高于扩展卡尔曼滤波和PF算法的预测精度。杨伟博等<sup>[9]</sup>提出了一种基于Paris公式和辅助PF算法的裂纹扩展预测方法, 该方法将重采样后的粒子趋向高似然区, 缓解粒子多样性匮乏问题, 通过孔边裂纹的扩展预测试验证明该方法适用于裂纹扩展预测。WANG

收稿日期: 2023-09-02 修回日期: 2023-10-20

基金项目: 国家重点研发计划项目(2022YFB2602302)

作者简介: 靳婷, 女, 1998年生, 山西运城人, 硕士研究生; 主要研究方向为金属疲劳寿命预测; E-mail: 1459929157@qq.com。

袁建明(通信作者), 男, 1977年生, 湖北武汉人, 教授, 博士研究生导师; 主要研究方向为现代机械设计及理论、港口物流新技术及装备、港口装备智能运行维护; E-mail: 13871511072@163.com。

引用格式: 靳婷, 王晓磊, 刘宇, 等. 基于IPSO-PF算法的疲劳裂纹扩展预测[J]. 机械强度, 2025, 47(4): 47-53.

JIN Ting, WANG Xiaolei, LIU Yu, et al. Fatigue crack growth prediction based on IPSO-PF algorithm[J]. Journal of Mechanical Strength, 2025, 47(4): 47-53.

等<sup>[10]</sup>在 PF 算法的重采样过程中增加一个随机因子,提高了粒子的多样性,通过齿轮齿根处的裂纹扩展数值试验验证了所提方法的有效性。陈健等<sup>[11]</sup>同时改进裂纹扩展模型和 PF 算法,从这两方面优化,解决了 Paris 公式只能描述裂纹扩展阶段扩展规律的问题。

虽然上述学者提出了一些改进的 PF 算法,并将其应用于疲劳裂纹扩展预测领域,但相关文献较少,研究仍存在一定的不足。例如,国内外鲜有学者将遗传算法、粒子群算法等智能算法与 PF 算法结合用于疲劳裂纹扩展预测研究。因此,本文使用粒子群优化 (Particle Swarm Optimization, PSO) 算法优化 PF 算法中小权值粒子的分布,得到了改进粒子群优化粒子滤波 (Improved Particle Swarm Optimization-Particle Filtering, IPSO-PF) 算法;在此基础上将 IPSO-PF 算法与 Paris 公式结合,构建了裂纹扩展预测模型;最后通过试验验证了所提模型的有效性,为结构的疲劳裂纹扩展预测提供了一种有效途径。

## 1 IPSO-PF 算法原理

### 1.1 PF 算法

PF 算法源于贝叶斯思想和蒙特卡洛模拟理论,它可以有效地处理任意复杂的非线性模型。假设非线性动态模型由一组随时间变化无法观察的状态序列  $x_t$  和一组观测序列  $z_t$  组成,即

$$\begin{cases} x_t = f_t(x_{t-1}, v_{t-1}) \\ z_t = h_t(x_t, s_t) \end{cases} \quad (1)$$

式中,  $x_t$  为状态方程;  $z_t$  为观测方程;  $v_t$  为过程噪声;  $s_t$  为观测噪声;  $f_t(\cdot)$  为状态转移函数;  $h_t(\cdot)$  为观测函数;  $t$  为时间,取值为  $1, 2, \dots$ 。

贝叶斯估计的实质就是通过一组可以直接观测到的信息  $Z_t = \{z_1, z_2, \dots, z_t\}$  递推出在该时刻无法直接观测的状态变量  $x_t$ , 即估计  $p(x_t | z_{1:t})$ 。它包括预测步、更新步两个步骤:

$$\begin{cases} p(x_t | z_{1:t-1}) = \int p(x_t | x_{t-1}) p(x_{t-1} | z_{1:t-1}) dx_{t-1} \\ p(x_t | z_{1:t}) = \frac{p(z_t | x_t) p(x_t | z_{1:t-1})}{p(z_t | z_{1:t-1})} \end{cases} \quad (2)$$

式中,  $p(x_t | x_{t-1})$  为转移概率密度函数,表示在给定  $t-1$  时刻的状态下,获得的  $t$  时刻状态发生的概率密度函数,反映了递推过程中状态变量的演变过程。

对于常见的非线性模型,一般使用近似的手段来简化运算假设系统,  $\{X_t^i\}_{i=1}^n$  为粒子集,  $\{w_t^i\}_{i=1}^n$  为粒子集中各粒子的权值,则可用  $\{X_t^i, w_t^i\}_{i=1}^n$  来近似后验概率分布  $p(X_t | Z_t)$ , 即

$$p(X_t | Z_t) \approx \sum_{i=1}^n w_t^i \delta(X_t - X_t^i) \quad (3)$$

式中,  $\delta(\cdot)$  为狄拉克函数。

重要性权值计算式为

$$w_t^i = w_{t-1}^i \frac{p(z_t | x_t^i) p(x_t^i | x_{t-1}^i)}{q(x_t^i | x_{t-1}^i, z_{1:t})} \quad (4)$$

式中,  $q(\cdot)$  为重要性密度函数

为提高算法的计算效率,需对粒子进行重采样,实现大权值粒子替代小权值粒子,从而缓解粒子退化,提高算法的精度和可靠性。

### 1.2 PSO 算法

PSO 算法是一种基于群体协作的随机搜索算法,它的思想源于鸟群飞行过程中的协作行为<sup>[12]</sup>。在 PSO 算法中,每个粒子都有速度和位置两个属性,同时通过一定的规则定义这些粒子位置的适应度值。PSO 算法的数学描述如下:

在  $m$  维搜索空间内,由  $n$  个粒子组成的群体,每个粒子都由两个向量表示,分别用  $\mathbf{x} = (x_{i,1}, x_{i,2}, \dots, x_{i,m})$  和  $\mathbf{v} = (v_{i,1}, v_{i,2}, \dots, v_{i,m})$  表示粒子的位置和速度,粒子的更新过程为

$$v_{ij}(t+1) = \omega v_{ij}(t) + c_1 r_1 [p_{ij}(t) - x_{ij}(t)] + c_2 r_2 [g_j(t) - x_{ij}(t)] \quad (5)$$

$$x_{ij}(t+1) = x_{ij}(t) + v_{ij}(t+1) \quad (6)$$

式中,  $v_{ij}(t)$  为粒子  $i$  的第  $j$  维速度分量;  $x_{ij}(t)$  为粒子  $i$  的第  $j$  维位置分量;  $p_{ij}(t)$  为粒子  $i$  的第  $j$  维个体最优解;  $g_j(t)$  为粒子在第  $j$  维全局最优解;  $\omega$  为惯性因子;  $c_1, c_2$  均为学习因子;  $r_1, r_2$  均为  $[0, 1]$  间的随机数。

为评价粒子的“好坏”程度,定义粒子的适应度函数<sup>[13]</sup>为

$$F_{\text{fitness}} = \exp \left[ -\frac{1}{2R_s} (z_{\text{new}} - z_{\text{pred}})^2 \right] \quad (7)$$

式中,  $z_{\text{new}}$  为最新时刻的实际测量值;  $z_{\text{pred}}$  为预测的测量值;  $R_s$  为观测噪声方差。

使用最新的测量值和预测的测量值定义了 PSO 算法的适应度函数,式(7)能够反映  $z_{\text{new}}$  与  $z_{\text{pred}}$  之间的“近似”程度。在优化过程中,粒子可以根据个体最优解和全局最优解来优化自身的状态。使用 PSO 算法可将适应度小的粒子趋向于适应度大的位置,即让每个粒子都分布在高似然区域附近,使预测的测量值和实际的测量值之间的误差最小。

### 1.3 PSO 算法优化粒子分布

PF 算法中的重采样步骤,在复制粒子时会使大权值粒子容易被复制保留,而小权值粒子很容易被淘汰,这样会导致粒子的多样性逐步减弱。PF 算法实质上就是通过大量的随机粒子近似状态变量的真实分布,用退化后的极少数粒子的状态来估计状态变量的

真实分布,便容易产生较大的偏差。

PSO 算法使得每个粒子都具备自我更新的能力,通过不断迭代更新粒子的个体最优值和全局最优值来更新自身的状态,以达到粒子都能够向最优值靠拢的目的。因此,将 PSO 算法引入 PF 算法中,让 PF 算法中权值更新后的粒子能够自我优化。首先,将 PF 算法产生的粒子与 PSO 算法的粒子进行关联,使之一一对应;其次,定义 PSO 算法中的粒子适应度函数,使 PSO 算法中的最优粒子对应 PF 算法中与实际测量值最接近的粒子;最后,让粒子通过 PSO 算法粒子群体间的合作,逐步向真实状态趋近。这样就可以尽可能地让粒子都位于高似然区,从而避免 PF 算法中大量的小权值粒子被淘汰。

在将 PSO 引入 PF 算法时,既需要使用 PSO 算法实现粒子的优化,又需要防止所有的粒子都趋向于局部最优的解,避免粒子的“趋同性”。因此,为了在优化 PF 算法中粒子状态的同时保持粒子的多样性,对粒子的权值进行大小排序,将其分为大权值粒子和小权值粒子,保持大权值粒子处于原有状态,使用 PSO 算法对 PF 算法中小权值粒子进行优化,对小权值粒子根据式(5)、式(6)进行优化,使粒子向真实状态靠近。本文所用的 IPSO-PF 算法与传统的粒子群优化粒子滤波(Particle Swarm Optimization-Particle Filtering, PSO-PF)算法的不同之处如下:在传统 PSO-PF 算法中,当确定最优的粒子后,需将所有粒子都趋向于最优粒子,这样会使部分原本就是大权值的粒子都趋向于权值最大的粒子,可能导致粒子多样性降低,同时浪费了计算资源。而 IPSO-PF 算法并不将所有粒子趋向于高似然区域,而是只针对小权值粒子做优化,因此既避免了粒子的“趋同性”,又提高了计算效率。IPSO-PF 算法的示意图如图 1 所示。

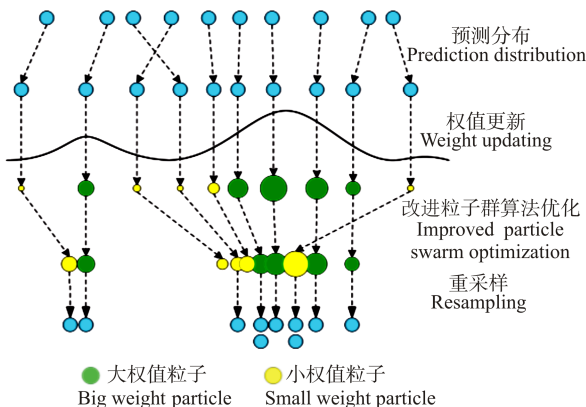


图 1 IPSO-PF 算法示意图

Fig. 1 Schematic diagram of IPSO-PF algorithm

IPSO-PF 算法改进之处在于对重采样前的小权值粒子使用 PSO 算法进行优化,使部分小权值粒子趋向

高似然区域,重采样后的粒子具有更好的多样性。

## 2 基于 IPSO-PF 算法的疲劳裂纹扩展预测

### 2.1 状态空间模型

结构的疲劳裂纹扩展过程实质上就是裂纹长度随载荷循环次数增长的过程。在描述疲劳裂纹扩展速率的模型中,Paris 公式应用最广泛,其表达式为

$$\frac{da}{dN} = C(\Delta K)^m \quad (8)$$

式中, $da/dN$ 为疲劳裂纹扩展速率; $C$ 、 $m$ 均为材料参数; $\Delta K$ 为应力强度因子幅值。

当两次裂纹扩展的间隔足够小时,将离散化的 Paris 公式作为描述裂纹扩展过程的状态方程,用于描述裂纹长度随着载荷循环次数增长的规律,即

$$a_{t+1} = a_t + \frac{da_t}{dN_t} \Delta N_t = a_t + C_t (\Delta K)^{m_t} \Delta N_t \quad (9)$$

式中, $a_{t+1}$ 为  $t+1$  时刻的裂纹长度; $\Delta N_t$ 为预测间隔; $C_t$ 、 $m_t$ 均为  $t$  时刻的裂纹扩展模型参数。

观测方程用于反映系统观测变量和状态变量之间的映射关系,将测量的实际裂纹长度作为观测方程,对裂纹的扩展过程进行修正。

### 2.2 疲劳裂纹扩展预测流程

基于 IPSO-PF 算法的疲劳裂纹扩展预测流程如图 2 所示。

具体步骤如下:

步骤 1:从裂纹扩展模型待估计的模型参数中采样  $n$  个粒子,获得  $n$  个粒子的初始状态值,并假设这些粒子初始权值相等,均为  $1/n$ 。

步骤 2:使用描述裂纹扩展过程的状态方程计算  $n$  个粒子预测裂纹长度  $a_{\text{pred}}$ ,得到先验估计。

步骤 3:观测是否有测量的裂纹长度  $a_{\text{meas}}$ ,若有测量值,则将  $n$  个粒子预测的裂纹长度  $a_{\text{pred}}$  与测量的裂纹长度  $a_{\text{meas}}$  进行比较,使用式(7)对更接近实际测量信息的粒子赋予更大的权值(适应度值),若无测量值,则直接进行步骤 6。

步骤 4:对权值进行排序,使用改进粒子群优化算法更新小权值粒子的状态变量(待估计的模型参数),并再次计算此时各粒子的预测裂纹长度和权值。

步骤 5:归一化粒子的权值,对归一化后的粒子集进行多项式重采样,得到新的状态值与权值集 ( $\{x_{i+1}^i\}_{i=1}^n, \{w_{i+1}^i\}_{i=1}^n$ )。

步骤 6:计算各裂纹长度的加权平均值,将其作为下一时刻的预测裂纹长度,若预测裂纹长度大于结构失效的临界裂纹长度  $a_c$ ,则结束预测,否则,返回步骤 2。

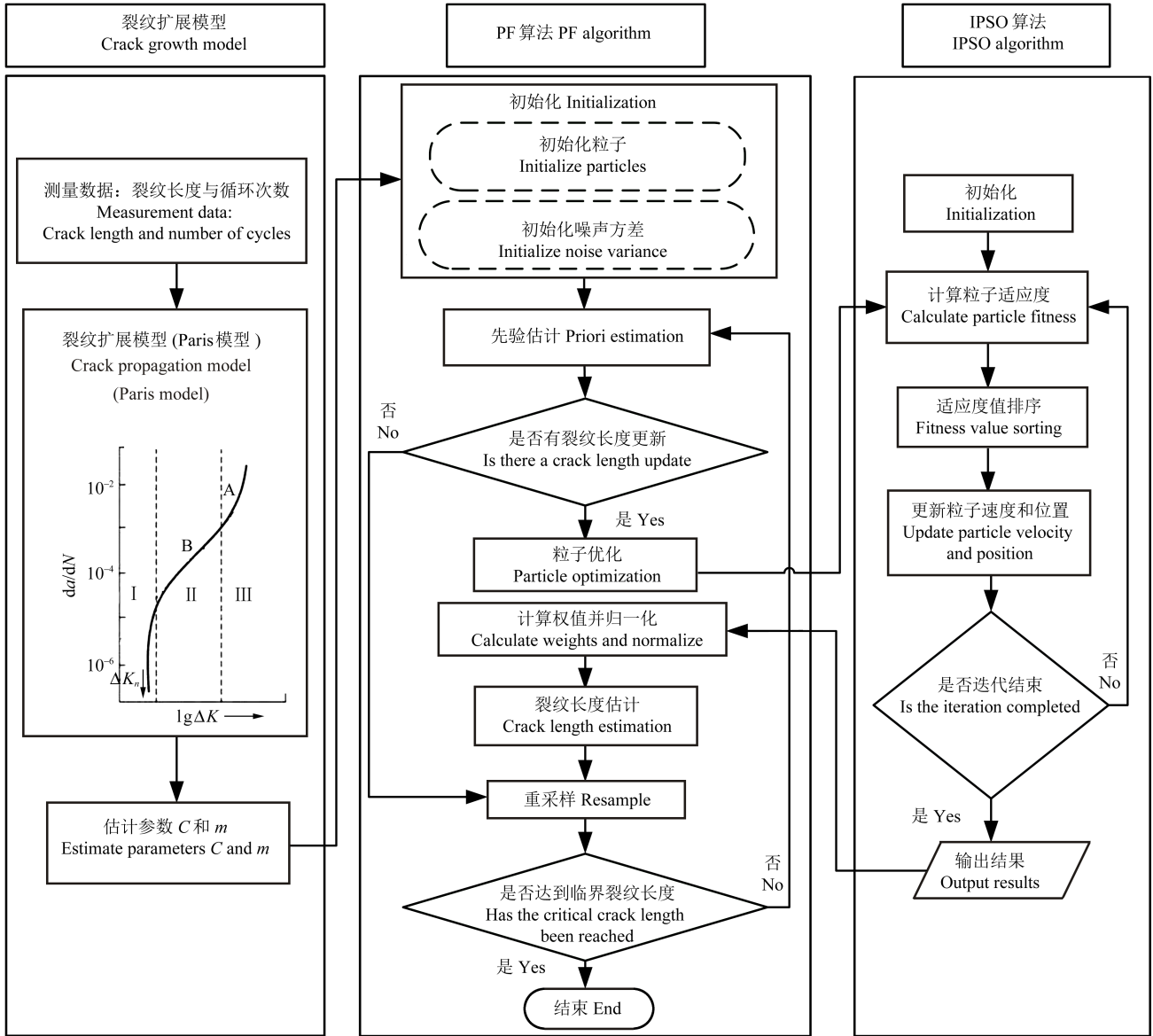


图2 基于 IPSO-PF 算法的疲劳裂纹扩展预测流程图

Fig. 2 Flow chart for predicting fatigue crack propagation based on IPSO-PF algorithm

### 3 试验及结果分析

为了说明 IPSO-PF 算法在裂纹扩展预测中的有效性及先进性,使用 WU 等<sup>[14-15]</sup>做的 30 条 2024-T351 铝合金裂纹扩展的公开数据集进行验证。将图 3 所示的 30 条裂纹扩展数据的平均值作为先验信息,取裂纹扩展速率最快的曲线 1(试件 1)和裂纹扩展速率最慢的曲线 2(试件 2)的部分裂纹长度作为实际观测数据,预测这两种极限情况下的裂纹长度的扩展过程。

试验数据说明,试验使用标准紧凑拉伸试样,宽度和厚度分别为 50 mm 和 12 mm,试验开始时的初始裂纹长度为 18 mm。试验使用载荷幅值为 3.6 kN 的恒幅正弦信号加载,应力比为 0.2。

计算 30 条裂纹扩展曲线的平均值并求取 30 条裂纹平均扩展速率,用式(8)对求取的平均扩展速率进行拟合,拟合结果如图 4 所示。

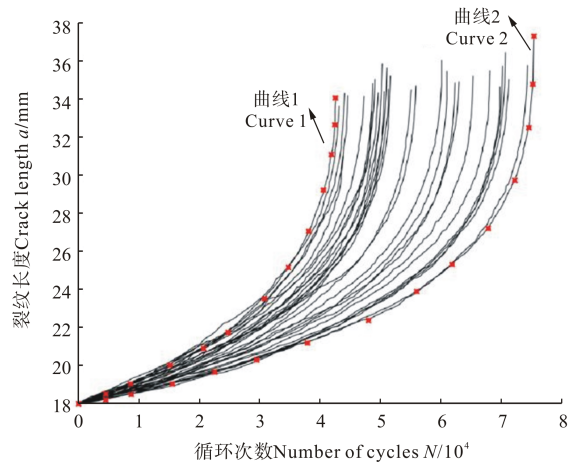


图3 2024-T351 裂纹扩展试验数据

Fig. 3 Data of 2024-T351 crack propagation test

得到 2024-T351 铝合金对应的参数为  $C=3.08 \times 10^{-30}$ ,  $m=3.24$ 。为简化计算过程,可用  $\lg C$  替代  $C$ ,并假设参数  $[\lg C, m]$  服从二元正态分布<sup>[16]</sup>。

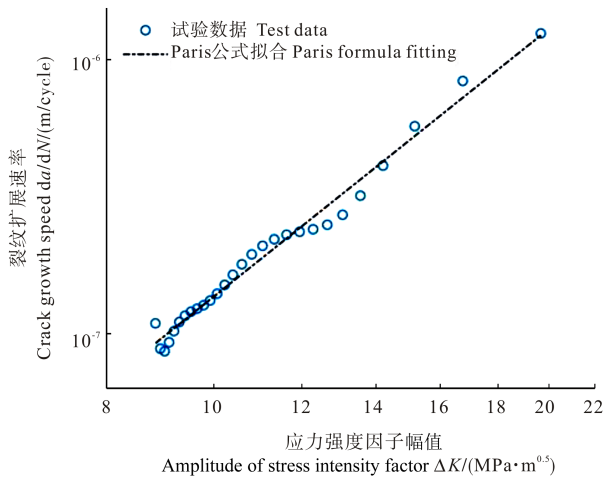


图 4 Paris 公式拟合裂纹扩展过程

Fig. 4 Crack propagation process fitted by Paris formula

为实现对这两条裂纹的扩展预测,在曲线 1 和曲线 2 上分别取 3 个点作为实际的观测数据。曲线 1(试件 1)的观测数据分别为(10 000, 19.254)、(20 000, 21.026)和(30 000, 23.259)。曲线 2(试件 2)的观测数据分别为(10 000, 18.553)、(20 000, 19.310)和(30 000, 20.264)。取粒子数  $n=1\ 000$ ,根据李光保等<sup>[17]</sup>的建议,粒子群优化算法参数  $c_1=c_2=2$ ,  $\omega=0.9$ ,迭代次数为 50,取 IPSO-PF 算法中权值较小的一半粒子使用 PSO 算法优化。

将 Paris 公式分别与 PF 算法和 IPSO-PF 算法结合,得到 Paris-PF 方法和 Paris-IPSO-PF 方法,对曲线 1 和曲线 2 的裂纹扩展过程进行预测。曲线 1 和曲线 2 的裂纹扩展预测曲线分别如图 5 和图 6 所示。由图 5、图 6 可以看出,Paris-IPSO-PF 方法预测效果最好,Paris-PF 方法预测效果次之,Paris 方法预测效果最不理想。

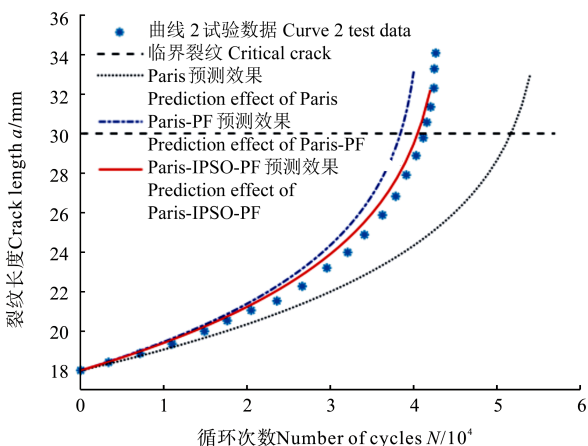


图 5 不同预测方法对曲线 1 裂纹扩展预测效果

Fig. 5 Prediction effect of different prediction methods on crack propagation of curve 1

假设临界裂纹长度  $a_c=30$  mm,计算此时实际循环次数和各种方法预测循环次数的相对误差。表 1、表 2 所示分别为曲线 1 和曲线 2 对应的相对误差。由表 1、表 2 可知,基于 Paris 方法的两条曲线平均相对预测误

差为 27.1%;基于 Paris-PF 方法的两条曲线平均相对预测误差为 9.2%;基于 Paris-IPSO-PF 方法的两条曲线平均相对预测误差为 2.6%。这表明 Paris-PF 方法和 Paris-IPSO-PF 方法相比于直接使用 Paris 方法进行裂纹扩展预测的精度均有大幅提高,两种方法均能有效预测裂纹的扩展过程,大幅提高裂纹扩展预测的准确性。相比于 Paris-PF 方法,Paris-IPSO-PF 方法在预测裂纹扩展方面具有更高的准确性。

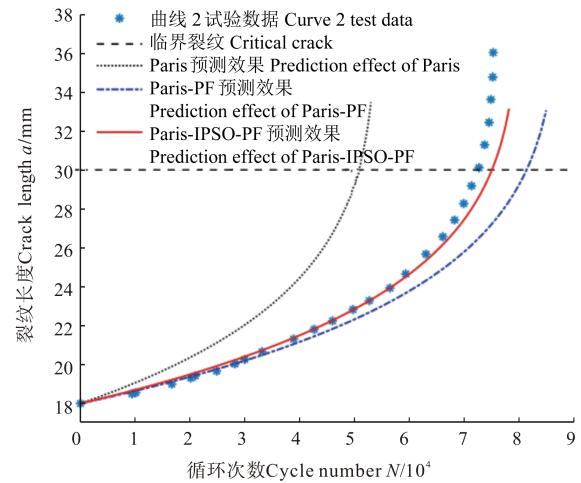


图 6 不同预测方法对曲线 2 裂纹扩展预测效果

Fig. 6 Prediction effect of different prediction methods on the crack propagation of curve 2

表 1 不同预测方法对曲线 1 的预测误差

Tab. 1 Prediction errors of different prediction methods for curve 1

预测方法 Prediction methods	实际循环次数 Actual number of cycles	预测循环次数 Predicted number of cycles	预测误差 Prediction error/%
Paris	41 250	51 750	25.5
Paris-PF	41 250	38 700	6.2
Paris-IPSO-PF	41 250	40 450	1.9

表 2 不同预测方法对曲线 2 的预测误差

Tab. 2 Prediction errors of different prediction methods for curve 2

预测方法 Prediction methods	实际循环次数 Actual number of cycles	预测循环次数 Predicted number of cycles	预测误差 Prediction error/%
Paris	72 600	51 750	28.7
Paris-PF	72 600	81 370	12.1
Paris-IPSO-PF	72 600	75 000	3.3

曲线 1 和曲线 2 到达临界裂纹长度时,利用 Paris-PF 方法和 Paris-IPSO-PF 方法对粒子预测的循环次数分布图如图 7、图 8 所示。由图 7、图 8 可以看出,基于传统 PF 算法预测裂纹长度扩展到临界裂纹长度时,大量的粒子出现在偏离真实值的位置,特别是对曲线 1 的预测,大量粒子预测的次数集中在 35 000 次附近;而基于 IPSO-PF 算法预测粒子大多出现在距离真实值较近的位置,呈现出正态分布的特点,粒子分布更加合理。造成上述结果的主要原因是 PF 算法在重采样过程中有更大的概率保留并复制大权值粒子,淘汰小权值粒

子,导致样本贫化。在粒子根据第一次的观测信息进行状态更新后,部分粒子陷入了局部最优的陷阱,这类粒子具有较大的权值,然后直接进行重采样时,对这类粒子状态进行了大量的复制,从而导致大量的陷入局部最优的粒子保留到最后,使真正接近模型参数真实值的粒子减少,最终导致预测结果与真实结果存

在较大的偏差。而IPSO-PF算法将小权值粒子趋向于高似然区域,相当于“稀释”了陷入局部最优粒子的权值,使重采样时避免大量复制陷入局部最优的粒子,提高了粒子的多样性。因此,粒子分布更加合理,最终使 Paris-IPSO-PF 方法对裂纹扩展的预测结果与真实结果更加接近。

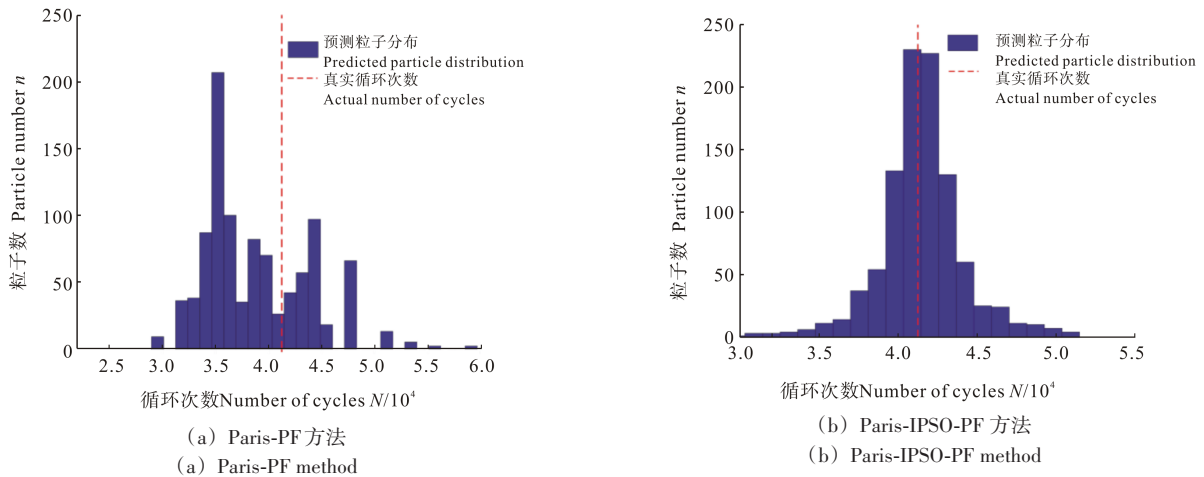


图7 不同方法预测曲线1的粒子分布

Fig. 7 Particle distribution of different prediction methods predicting curve 1

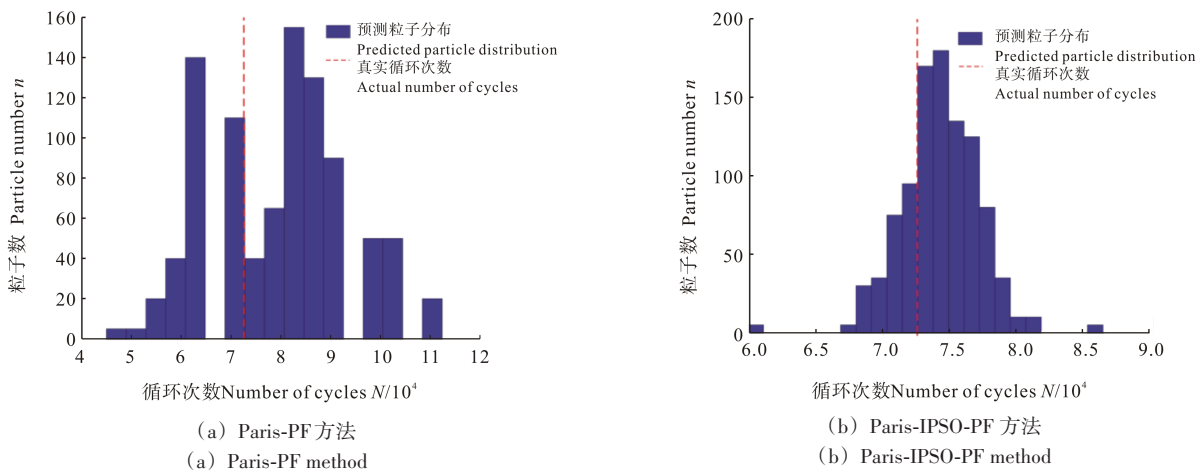


图8 不同方法对曲线2的预测粒子分布

Fig. 8 Predictive particle distribution of curve 2 by different methods

## 4 结论

运用PF算法思想,将裂纹扩展过程中的不确定性考虑在内。分析了PF算法的不足,使用PSO算法对其进行优化,得到IPSO-PF算法,并得出以下结论:

1)该算法缓解了粒子多样性匮乏问题。

2)构建了基于IPSO-PF算法的疲劳裂纹扩展模型,并使用2024-T351铝合金公开数据集进行了仿真验证。结果表明,基于IPSO-PF算法的裂纹扩展预测方法的平均预测误差为2.6%,相比于传统基于PF方法的预测精度提升了6.6个百分点。

### 参考文献 (References)

[1] 孙国芹,尚德广,王杨. 金属多轴疲劳行为与寿命预测研究进展

[J]. 机械工程学报,2021,57(16):153-172.

SUN Guoqin, SHANG Deguang, WANG Yang. Research progress on fatigue behavior and life prediction under multiaxial loading for metals[J]. Journal of Mechanical Engineering, 2021, 57(16): 153-172. (In Chinese)

[2] PARIS P C, ERDOGAN F. A critical analysis of crack propagation laws[J]. Journal of Basic Engineering, 1963, 85(4):528-534.

[3] 杨文猛,蒋玮,王杰. 风力发电机齿轮疲劳裂纹扩展行为研究及寿命预测[J]. 机械强度,2022,44(5):1214-1220.

YANG Wenmeng, JIANG Wei, WANG Jie. Research on fatigue crack propagation behavior and life prediction of wind turbine gear [J]. Journal of Mechanical Strength, 2022, 44(5): 1214-1220. (In Chinese)

[4] CHEN J, YUAN S F, WANG H. On-line updating Gaussian process measurement model for crack prognosis using the particle filter [J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2020, 140:106646.

- [5] 祝志远,黄小平,余宏淦,等. 基于已有数据和粒子滤波的 Paris 参数估计和剩余寿命预测[J]. 中国造船,2021,62(2): 33-45.  
ZHU Zhiyuan, HUANG Xiaoping, YU Honggan, et al. Estimation of parameters in Paris model and prediction of residual life based on existing data and particle filter[J]. Shipbuilding of China,2021, 62(2):33-45. (In Chinese)
- [6] LIU X, JIA Y, HE Z, et al. Hybrid residual fatigue life prediction approach for gear based on Paris law and particle filter with prior crack growth information[J]. Journal of Vibroengineering, 2017, 19 (8): 5908-5919.
- [7] 关雪雪. 预测结构性性能退化的混合粒子滤波方法[D]. 武汉:华中科技大学,2018:22-40.  
GUAN Xuexue. A combined particle filter method for predicting structural performance degradation[D]. Wuhan: Huazhong University of Science & Technology,2018:22-40. (In Chinese)
- [8] 顾震华. 基于 Lamb 波的结构疲劳裂纹监测及寿命预测方法研究[D]. 无锡:江南大学,2021:41-58.  
GU Zhenhua. Research on structural fatigue crack monitoring and life prediction based on Lamb waves [D]. Wuxi: Jiangnan University, 2021:41-58. (In Chinese)
- [9] 杨伟博,袁慎芳,邱雷,等. 基于辅助粒子滤波的疲劳裂纹扩展预测研究[J]. 振动与冲击,2018,37(5):114-119.  
YANG Weibo, YUAN Shenfang, QIU Lei, et al. Prediction of fatigue crack propagation based on auxiliary particle filtering [J]. Journal of Vibration and Shock,2018,37(5):114-119. (In Chinese)
- [10] WANG T, BIN J, RENAUD G, et al. Probabilistic method for fatigue crack growth prediction with hybrid prior[J]. International Journal of Fatigue, 2022, 157: 106686.
- [11] 陈健,袁慎芳,王卉,等. 基于高斯权值-混合建议分布粒子滤波的疲劳裂纹扩展预测[J]. 航空学报,2017,38(11):168-176.  
CHEN Jian, YUAN Shenfang, WANG Hui, et al. Using Gaussian weighting-mixture proposal distribution particle filter for fatigue crack growth prediction [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2017,38(11):168-176. (In Chinese)
- [12] 徐仁义,王航,彭敏俊,等. 核电厂电动闸阀外漏故障预测方法研究[J]. 哈尔滨工程大学学报,2022,43(12):1759-1765.  
XU Renyi, WANG Hang, PENG Minjun, et al. Fault prediction method of electric gate valve outer failure in nuclear power plants [J]. Journal of Harbin Engineering University, 2022, 43 (12) : 1759-1765. (In Chinese)
- [13] 文昌俊,陈哲,邵明颖,等. 基于改进 PSO-BP 神经网络的干燥机可靠性预测[J]. 机械强度,2023,45(2):504-508.  
WEN Changjun, CHEN Zhe, SHAO Mingying, et al. Reliability prediction of dryer based on improved PSO-BP neural network [J]. Journal of Mechanical Strength,2023, 45(2):504-508. (In Chinese)
- [14] WU W F, NI C C. Statistical aspects of some fatigue crack growth data[J]. Engineering Fracture Mechanics,2007,74(18):2952-2963.
- [15] WU W F, NI C C. A study of stochastic fatigue crack growth modeling through experimental data [J]. Probabilistic Engineering Mechanics,2003, 18(2): 107-118.
- [16] PITT M K, SILVA R D S, GIORDANI P, et al. On some properties of Markov chain Monte Carlo simulation methods based on the particle filter[J]. Journal of Econometrics,2012, 171(2):134-151.
- [17] 李光保,高栋,路勇,等. 基于改进神经网络和 Fluent 的气液固技术的内表面处理[J]. 吉林大学学报(工学版),2024,54(6): 1537-1547.  
LI Guangbao, GAO Dong, LU Yong, et al. Internal surface treatment of gas-liquid-solid technology based on improved neural network and Fluent [J]. Journal of Jilin University (Engineering and Technology Edition), 2024, 54(6): 1537-1547. (In Chinese)

## Fatigue crack growth prediction based on IPSO-PF algorithm

JIN Ting<sup>1</sup> WANG Xiaolei<sup>2</sup> LIU Yu<sup>1</sup> YUAN Jianming<sup>1</sup>

(1. Key Laboratory of Port Cargo Handling Technology Ministry of Communications, School of Transportation and Logistics, Wuhan University of Technology, Wuhan 430063, China)

(2. Installation Engineering Co., Ltd., China Communications First Harbor Engineering, Tianjin 300457, China)

**Abstract:** The traditional Paris formula ignores the influence of various uncertain factors in the crack growth process, which leads to a big difference between the predicted crack growth process and the real crack growth process. In order to improve the prediction accuracy of fatigue crack growth, a fatigue crack growth prediction method based on the improved particle swarm optimization particle filtering (IPSO-PF) algorithm was proposed. Firstly, based on the framework of the particle filtering (PF) algorithm, the particle swarm optimization (PSO) algorithm was used to optimize some particles based on the updated observation information, keeping the state of particles with large weights unchanged, and particles with small weights tend to high likelihood region, and IPSO-PF algorithm was designed. Then, combining IPSO-PF algorithm with Paris formula, a fatigue crack growth prediction model based on Paris formula and IPSO-PF algorithm was constructed. Finally, the validity of the model was verified by using the open 2024-T351 aluminum alloy data set. The results show that compared with the traditional PF algorithm, IPSO-PF algorithm can improve the diversity of particles. The prediction error of the crack growth prediction model based on IPSO-PF algorithm is 2.6%, which is better than 9.2% based on PF algorithm.

**Key words:** Fatigue crack; Crack growth prediction; Particle filtering; Particle swarm optimization; Algorithm optimization

Corresponding author: YUAN Jianming, E-mail: 13871511072@163.com

Fund: National Key Research and Development Plan Project (2022YFB2602302)

Received: 2023-09-02 Revised: 2023-10-20