

基于二元混合随机过程的光纤跳线剩余寿命预测

陈文林^{1,2},锁斌^{1,2,3*},齐洋^{1,2}

(1.西南科技大学 信息与控制工程学院,四川 绵阳 621010;

2.西南科技大学 复杂环境装备可靠性研究中心,四川 绵阳 621010;3.浙江大学 先进技术研究院,杭州 310058)

摘要:由于传统单一随机过程模型难以准确描述光纤跳线在高温加速老化过程中的退化趋势,提出一种基于二元混合随机过程的可靠性评估与剩余寿命预测方法。该方法基于非线性Wiener过程和非线性Gamma过程对插入损耗和回波损耗建立联合退化模型,采用自适应差分进化算法估计模型参数;利用Copula函数刻画2个性能参数间的相关性。实验分析表明:相比仅采用Wiener过程的单性能退化模型,联合退化模型在可靠性评估中表现出更高的可靠性和保守性。

关键词:光纤跳线;非线性Wiener过程;非线性Gamma过程;Copula函数;可靠性评估;剩余寿命预测

中图分类号:TN929.1;TP2373 **文献标志码:**A **文章编号:**1002-5561(2026)03-0095-07

DOI:10.13921/j.cnki.issn1002-5561.2026.03.016

Remaining life prediction of optical fiber patch cords based on bivariate hybrid stochastic process

CHEN Wenlin^{1,2},SUO Bin^{1,2,3*},QI Yang^{1,2}

(1. School of Information and Control Engineering, Southwest University of Science and Technology, Mianyang Sichuan 621010, China;

2. Research Center for Reliability of Equipment in Complex Environments, Southwest University of Science and Technology, Mianyang Sichuan 621010, China; 3. Institute of Advanced Technology, Zhejiang University, Hangzhou 310058, China)

Abstract: Since a traditional single stochastic process model is difficult to accurately describe the degradation trend of optical fiber patch cords during high-temperature accelerated aging, a reliability assessment and remaining useful life prediction method based on a bivariate hybrid stochastic process is proposed. This method establishes a joint degradation model for insertion loss and return loss using a nonlinear Wiener process and a nonlinear Gamma process. The model parameters are estimated using an adaptive differential evolution algorithm, and the correlation between the two performance parameters is characterized by a Copula function. Experimental analysis shows that, compared with the single-performance degradation model based on the Wiener process, the joint degradation model exhibits higher reliability and conservativeness in reliability assessment.

Key words: optical fiber patch cord, nonlinear Wiener process, nonlinear Gamma process, Copula function, reliability assessment, remaining useful life prediction

0 引言

光通信网络作为网络信息传输基石,承载了全球90%以上的数据传输,是智算中心、互联网等发展的

收稿日期:2025-10-10。

基金项目:国家自然科学基金项目(U1830133)资助;四川省高效电源变换技术工程研究中心基金项目(JS20231000536)资助;中央引导地方科技发展资金项目(2023ZYDF022)资助。

作者简介:陈文林(1999—),男,硕士研究生,现就读于西南科技大学信息与控制工程学院电子信息专业,主要研究方向为可靠性评估与寿命预测。

***通信作者:**锁斌(1979—),男,教授,博士生导师,主要研究方向为不确定量化、加速寿命试验设计与寿命预测。



基础网络^[1]。光纤跳线(由光纤和光纤连接器组成)作为光通信链路的基础单元,在光通信系统中应用广泛,其可靠性直接决定了整个系统的传输性能。但在实际使用过程中,光纤跳线常暴露于高温、电磁等多物理场耦合环境中。因此,分析光纤跳线可靠性并预测其剩余寿命,掌握其退化趋势与寿命终点,对保障系统稳定运行至关重要。

目前,国内外关于光纤跳线的可靠性研究与剩余寿命预测尚不充分,但围绕其关键组件——光纤连接器和光纤的可靠性评估已取得一定成果。为缩短传统寿命测试周期,张楠等人^[2]聚焦于光纤连接器失效模式及其机理,对光纤连接器实施了温度循环加速退

化试验,以插入损耗作为性能退化参数进行了寿命评估。在光纤失效机理分析及可靠性研究方面,齐永恒等人^[3]通过模拟实际工作环境,对比退役光纤样品,发现水汽会显著促进光纤表面微裂纹的扩展,从而导致断裂失效。张立岩等人^[4]则通过测试动态与静态疲劳参数,验证了2个参数之间的关系,并基于静态疲劳试验平台揭示了疲劳参数与光纤寿命之间的关联。综上可知,基于加速或疲劳试验获取性能退化数据已成为评估光纤连接器和光纤可靠性的有效手段,其优势在于数据获取简便、省时、成本低,并能准确反映产品性能退化状态,这为光纤跳线可靠性评估奠定了基础。然而,光纤跳线属于典型的多性能特征产品,若仅依赖单一性能参数构建退化模型,将不可避免地损失部分系统可靠性信息,导致评估精度受限。因此,有必要研究一种能综合多个性能特征的退化评估方法,以实现更全面、准确的光纤跳线可靠性分析。

在多元可靠性评估方面,研究者常采用随机过程对多个退化量进行联合建模,并借助 Copula 函数构建多元退化模型。其中,Wiener 过程因其能够刻画非单调退化路径而备受关注。赵建印等人^[5]提出了多元退化失效与突发失效竞争下的可靠性评估方法,基于 Wiener 过程构建一元退化模型,再采用 Copula 函数刻画变量间的相关性,从而评估产品可靠性。赵洪山等人^[6]利用非线性 Wiener 过程分别建立糠醛与甲醇含量的退化轨迹,结合 Copula 函数耦合 2 个退化量,并采用马尔可夫链蒙特卡罗-吉布斯采样(MCMC-Gibbs)方法进行参数估计,实现了变压器油纸绝缘的剩余寿命预测。此外,Gamma 过程与逆高斯(IG)过程因其对单调递增退化数据的良好拟合能力,也被广泛应用于多元退化建模。张根保等人^[7]采用非线性 Gamma 过程描述产品性能退化情况,再通过 Copula 函数构建联合模型以预测产品寿命;王艺菲与安绮梦等人^[8-9]基于二元 IG 过程建模,并利用 Copula 函数融合多个退化量,实现了产品剩余寿命的准确预测。然而,以上研究多基于单一类型的随机过程(如 Wiener 过程、Gamma 过程或 IG 过程)进行建模。对于光纤跳线而言,其多个性能参数的退化轨迹兼具非线性和非单调特征,且参数间存在相互作用,仅依赖单一随机过程的模型难以准确反映其实际退化行为。

为满足光纤跳线可靠性研究的需求,解决多参数分析不足的难题,本文提出一种基于二元混合 Wiener-Gamma 过程的光纤跳线剩余寿命预测方法。

1 退化过程及加速老化模型

1.1 非线性 Wiener 过程与非线性 Gamma 过程

在产品退化建模领域,当采用 Wiener 过程时,其期望和方差表现为时间的线性函数,该过程通常用于描述线性退化特征的产品。然而某些产品退化过程呈现非线性特征,为此需引入时间尺度变换函数 $\tau(t)$ 构建更精确的模型。假设光纤跳线性能退化过程服从非线性 Wiener 过程,则非线性 Wiener 过程的退化轨迹 $X_w(t)$ 的表达式为

$$X_w(t) = \mu_w \tau(t) + \sigma_w B(\tau(t)) \quad (1)$$

式中: t 表示光纤退化失效时间;非线性时间尺度变换函数 $\tau(t) = t^{\gamma}$, γ 为形状参数; μ_w 为漂移系数,表征温度应力下的平均退化速率; σ_w 为扩散系数,反应退化过程的随机波动强度; $B(t)$ 为标准布朗运动,满足 $B(t) \sim N(0, t)$;根据文献[10],退化失效时间的分布函数 $R_w(t)$ 的表达式为

$$R_w(t) = \Phi\left(\frac{\omega - \mu_w t^{\gamma}}{\sigma_w \sqrt{t^{\gamma}}}\right) + \exp\left(\frac{2\mu_w \omega}{\sigma_w^2}\right) \times \Phi\left(\frac{-\omega - \mu_w t^{\gamma}}{\sigma_w \sqrt{t^{\gamma}}}\right) \quad (2)$$

式中: $\Phi(\cdot)$ 表示正态分布的累积分布函数, ω 为非线性 Wiener 过程的失效阈值。退化失效时间的概率密度函数 $f_w(t)$ 的表达式为

$$f_w(t) = \frac{\omega}{\sqrt{2\pi\sigma_w^2\tau(t)^3}} \times \exp\left[-\frac{(\omega - \mu_w \tau(t))^2}{2\sigma_w^2\tau(t)}\right] \frac{d\tau(t)}{dt} \quad (3)$$

Wiener 过程的剩余寿命服从 IG 分布,在得到非线性 Wiener 过程中的参数 μ_w 、 σ_w 后,即可得到在观测时刻 t 的概率密度函数 $f_w(t|l_w)$ 的表达式为

$$f_w(t|l_w) = \frac{\omega - x}{\sqrt{2\pi\sigma_w^2 t^{3\gamma}}} \exp\left(-\frac{(\omega - x - \mu_w t^{\gamma})^2}{2\sigma_w^2 t^{\gamma}}\right) \quad (4)$$

式中: x 为退化量, l_w 为剩余寿命。

退化数据的可靠性评估需要选择合适的性能退化模型。Wiener 过程模型具有随机增量,但不能保证其严格非负变化,因此不适用于某些由裂纹、磨损等失效机理引起的严格单调非负退化过程。相比之下,Gamma 过程具有非负单调递增的特性,更适合描述随机过程的不确定性单调退化^[11]。当光纤跳线性能服从 Gamma 过程,且退化轨迹与 t 为非线性关系时,非线性

Gamma 过程的退化轨迹 $X_g(t)$ 的表达式为

$$X_g(t) \sim \text{Gamma}(\mu_g \tau(t), \sigma_g) \quad (5)$$

式中: 时间尺度变换函数 $\tau(t) = t^{\gamma_g}$, γ_g 、 μ_g 、 σ_g 分别为非线性 Gamma 过程的形状参数、漂移系数、尺度系数。根据文献[12], 由疲劳寿命分布近似得到的分布函数 $R_g(t)$ 的表达式为

$$R_g(t) = 1 - \Phi \left[\frac{1}{\mu_g} \left(\sqrt{\frac{t^{\gamma_g}}{\sigma_g}} - \sqrt{\frac{\sigma_g}{t^{\gamma_g}}} \right) \right] \quad (6)$$

相应的概率密度函数 $f_g(x)$ 的表达式为

$$f_g(x) = \frac{\sigma_g^{\tau(t)}}{\Gamma(\mu_g(t))} x^{\tau(t)-1} e^{-\sigma_g x} \quad (7)$$

在观测时刻 t , 剩余寿命 l_g 的概率密度函数 $f_g(t|l_g)$ 的表达式为

$$f_g(t|l_g) = \frac{1}{\sigma_g^{\Delta\mu_g} \Gamma(\Delta\mu_g)} (\omega_g - x)^{\Delta\mu_g-1} e^{-\frac{\omega_g - x}{\sigma_g}} \quad (8)$$

式中: ω_g 为非线性 Gamma 过程的失效阈值。

1.2 加速老化模型

加速老化试验的核心原理是在实验室条件下施加大于工作状态时的环境应力, 加速材料、产品的老化进程, 获得产品的加速老化数据, 然后推导其在正常使用环境中的长期性能退化规律及寿命。加速老化试验规避了传统自然老化试验耗时较长的缺陷, 提高了试验效率。

对于非线性 Wiener 过程和非线性 Gamma 过程, 加速老化试验中的温度应力^[13-14]可采用以下加速老化模型:

$$\begin{cases} \mu_w = a_w \exp(-\frac{B_w}{k_B T}) \\ \mu_g = a_g \exp(-\frac{B_g}{k_B T}) \end{cases} \quad (9)$$

式中: a_w 、 a_g 分别为非线性 Wiener 和非线性 Gamma 过程的材料特性常数, B_w 、 B_g 分别为非线性 Wiener 和非线性 Gamma 过程的激活能 (单位为 eV), 玻尔兹曼常数 $k_B = 8.167 \times 10^{-5}$ eV/K, T 为开尔文温度。

2 基于 Copula 函数的联合退化模型及剩余寿命预测

2.1 基于 Copula 函数的联合退化模型

光纤通信系统中, 插入损耗表征光信号通过跳线后的功率衰减, 回波损耗是反映信号反射性能的参数^[15]。光纤连接器端面质量与清洁度不佳、光纤断裂

或插拔不当、光纤微弯等因素均会同时影响这 2 个性能退化参数。光纤跳线的可靠性与光纤和光纤连接器的退化情况直接相关。为此, 本文选取插入损耗与回波损耗作为关键退化量, 基于 Copula 函数构建联合退化模型, 实现对光纤跳线可靠性评估与剩余寿命预测。

假设已知 2 个性能退化参数的边缘分布 $W(x)$ 和 $G(y)$, 根据 Sklar 定理, 若 $H(x, y)$ 是 $W(x)$ 和 $G(y)$ 的联合分布函数, 则存在唯一 Copula 函数 $C(\cdot)$ 使得式 (10) 成立。

$$H(x, y) = C(W(x), G(y), \theta) \quad (10)$$

式中: θ 为相关性系数。

阿基米德族是 Copula 函数的常见形式之一, 包括 Clayton Copula、Frank Copula 和 Gumbel Copula 3 种函数形式, 这 3 种 Copula 函数具有不同的耦合效果。鉴于不同 Copula 函数将产生差异化的建模结果, 根据实际退化数据特征选择最优 Copula 函数至关重要。本文采用赤池信息量准则 (AIC) 作为模型选择的统计标准, 该准则通过平衡拟合优度与复杂度 (以参数数量为量化指标) 为 Copula 函数优选提供理论依据。AIC 的计算基于似然函数值, 其数学表达式为

$$I_{AIC} = -2 \ln A + 2m \quad (11)$$

式中: I_{AIC} 为 AIC 值, A 为模型对应的极大似然函数值, m 为模型中参数的个数。AIC 值越小, 表明模型在拟合精度与复杂度间的权衡越优^[16]。相较于传统单一拟合评价指标, AIC 通过引入参数惩罚项有效避免过拟合问题, 在多元退化建模中具有普适优势。

2.2 系统剩余寿命预测

在可靠性工程中, 剩余寿命指在系统正常工作的情况下, 从当前时间到系统失效的时间。定义系统的联合剩余寿命 l 为系统内任意一个性能指标达到失效阈值的时间, 则有

$$l = \min(l_w, l_g) \quad (12)$$

式中: l_w 和 l_g 分别为以插入损耗和回波损耗作为性能退化指标时的剩余寿命。联合剩余寿命条件失效概率 f_l 为

$$f_l = c(f_w, f_g; \theta) \quad (13)$$

式中: f_w 与 f_g 分别为插入损耗和回波损耗在剩余寿命 l_w 、 l_g 时的失效概率, $c(\cdot)$ 为 Copula 函数 $C(\cdot)$ 的概率密度函数。

3 自适应差分进化算法

自适应差分进化算法在差分进化框架中引入了

陈文林, 锁斌, 齐洋: 基于二元混合随机过程的光纤跳线剩余寿命预测

动态参数调整机制,通过优化缩放因子与交叉概率,显著提升了复杂优化问题的求解效率与收敛性能^[17]。针对非线性 Wiener-Gamma 过程的参数估计问题,传统的极大似然估计(MLE)方法因易陷入局部最优解而导致估计偏差。为此,本文采用自适应差分进化算法求解退化模型参数向量,算法流程图如图1所示。该算法主要分为4个步骤:首先,构建基于退化数据的负对数似然函数,将参数估计转化为一个优化问题;其

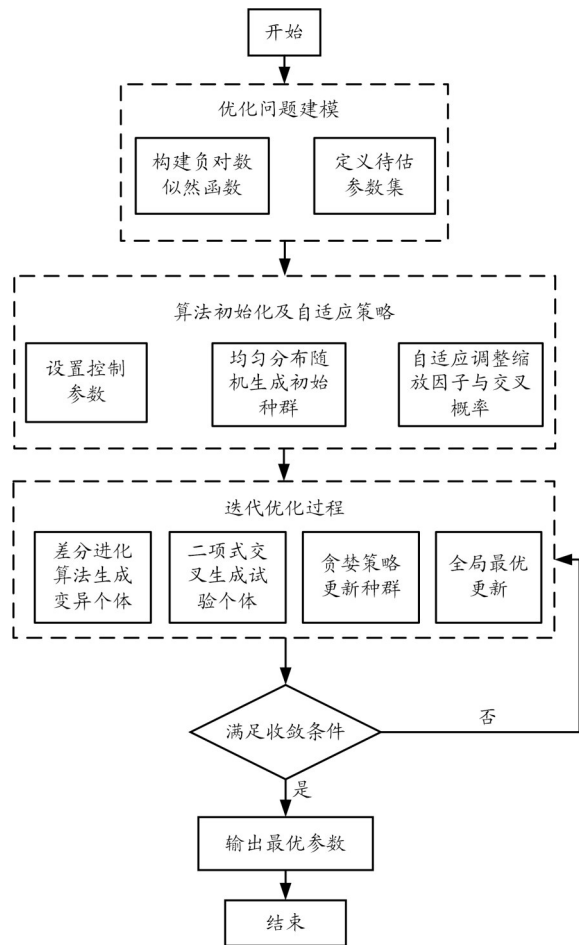


图1 自适应差分进化算法流程图

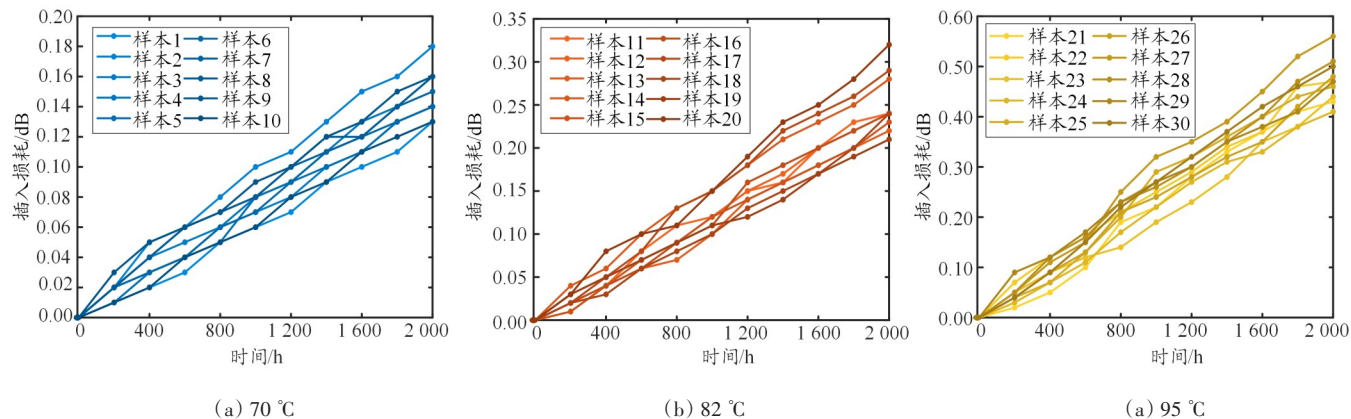


图2 不同温度应力下插入损耗的退化轨迹

次,初始化种群并引入自适应参数策略,以平衡全局探索与局部开发能力;随后,进入包含变异、交叉与选择的迭代优化循环,直至满足收敛条件;最终,输出估计得到的最优模型参数。通过以上步骤,可以有效估计出模型中的位置参数与形状参数。

4 试验分析

4.1 光纤跳线退化轨迹建模及退化模型检验

为掌握某型多模光纤跳线在光通信系统中高温环境下的可靠性演变规律,本文首先结合既往工程经验分析了光纤跳线的失效模式。分析得出:插入损耗与回波损耗增大是光纤跳线主要的2种退化失效模式,温度则是影响这2种失效模式的敏感环境应力。然后,随机选取了30个全新样品开展高温加速老化试验。具体试验信息如下:在正常温度(25 °C)下测量所有全新多模光纤跳线样品的插入损耗与回波损耗初始值并记录;接着将样本1~10置于70 °C下老化,样本11~20置于82 °C下老化,样本21~30置于95 °C下老化。试验过程中,每隔200 h测量一次所有样品的插入损耗值与回波损耗值,每个样品测试3次取平均值并记录,试验总时长为2 000 h,得到不同温度应力下多组样品的插入损耗与回波损耗退化轨迹分别如图2和图3所示。

本文从上述样品中每个温度下随机抽取3个样品的检验结果,对其退化增量进行了正态性检验与Gamma分布适用性检验。参考国际IEC 61300标准的多模光纤跳线产品,插入损耗和回波损耗的失效阈值分别为0.6 dB和20 dB,得到光纤跳线插入损耗与回波损耗的退化增量分布检验结果如表1所示。其中, p 值是统计检验中的显著性概率。

从表1可以看出,所有 p 值均大于0.05,这表示插入损耗退化增量符合正态分布,回波损耗退化增量符合Gamma分布,即可以认为2个性能参数的退化过程分别服从Wiener过程与Gamma过程,验证了本文所建模型的适用性。

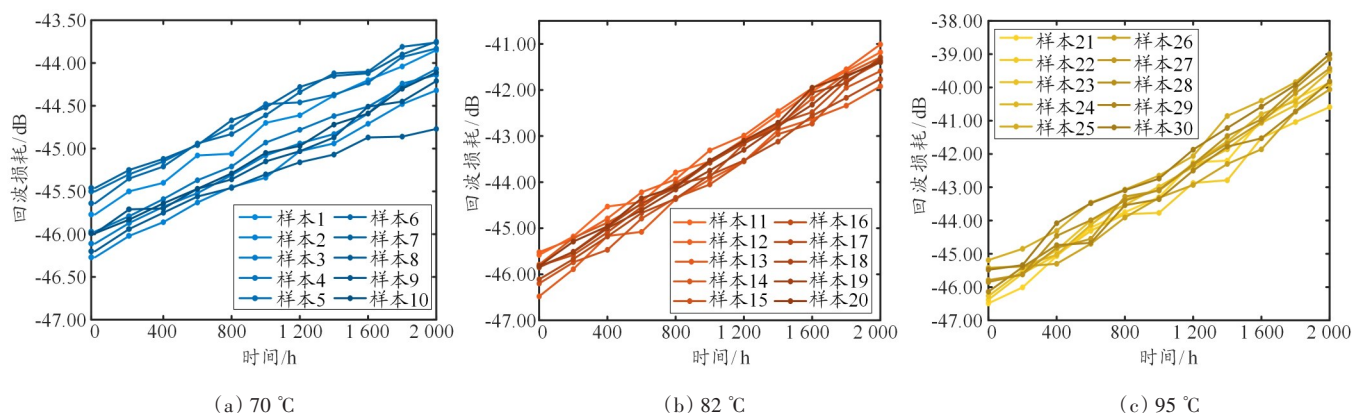


图3 不同温度应力下回波损耗退化轨迹

表1 退化增量分布检验结果

温度/°C	样本编号	插入损耗 p 值	回波损耗 p 值
73	5	0.06	0.95
	6	0.06	0.62
	2	0.11	0.75
82	11	0.56	0.71
	17	0.49	0.96
	14	0.41	0.93
95	27	0.77	0.72
	22	0.54	0.91
	24	0.71	0.62

表2 Copula函数计算结果

模型	Copula函数	AIC值
模型A	Frank	-4 464.80
	Gumbel	-2 608.21
	Clayton	-1 342.36
模型B	Frank	-4 802.47
	Gumbel	-3 922.65
	Clayton	-4 078.58

4.2 不同退化模型的可靠性评估及剩余寿命预测

首先,基于Copula理论分别建立以下2种模型:模型A(本文所提联合退化模型)采用二元混合Wiener-Gamma过程进行性能退化建模;模型B统一采用非线性Wiener过程对2个性能退化参数进行建模。然后,对式(3)和式(7)取对数得到其对数似然函数,再将不同温度应力下的退化数据分别代入,通过自适应差分算法求解,获得正常工作温度(25 °C)下的参数估计值。将模型A的参数估计值代入式(2)、式(3)、式(6)、式(7),模型B的参数估计值代入式(2)、式(3),得到2个性能退化参数的不同概率密度函数,基于概率密度函数估计不同Copula函数的参数。最后,基于式(11)计算各Copula函数的AIC值,从而选取最优Copula函数,相关结果如表2所示。可以看出, Frank Copula函数的AIC值显著低于其他模型,表明其对模型A和模型B具有最优拟合效果。因此,本文选择 Frank Copula函数来描述2个性能退化参数之间的相关性。基于 Frank Copula函数分别得到模型A与模型B的联合可靠度模型,表达式分别为

$$R_A(t) = -\frac{1}{13.88} \ln \left[1 + \frac{(e^{-13.88R_{\alpha}(t)} - 1)(e^{-13.88R_{\beta}(t)} - 1)}{e^{-13.88} - 1} \right] \quad (14)$$

$$R_B(t) = -\frac{1}{19.66} \ln \left[1 + \frac{(e^{-19.66R_{\alpha}(t)} - 1)(e^{-19.66R_{\beta}(t)} - 1)}{e^{-19.66} - 1} \right] \quad (15)$$

在考虑相关性时,使用模型A和模型B的光纤跳线系统的平均寿命 L_A 和 L_B 分别为

$$L_A = \int_0^{+\infty} R_A(t) dt \quad (16)$$

$$L_B = \int_0^{+\infty} R_B(t) dt \quad (17)$$

光纤跳线可靠性由最先失效的性能参数决定。本文采用可靠度作为定量指标评估各模型的可靠性表现,对比了3种不同模型的可靠度:模型A、忽略插入损耗单调递增特性的模型B、采用非线性Gamma过程且只考虑插入损耗的光纤跳线退化模型C,结果如图4所示。可以看出,在光纤跳线运行初期,模型B的退化速度快于模型C,因此在该阶段采用回波损耗作为评估系统整体可靠度的指标更为适宜。进入运行中后期后,模型C的退化速率显著加快,并超过模型B,此

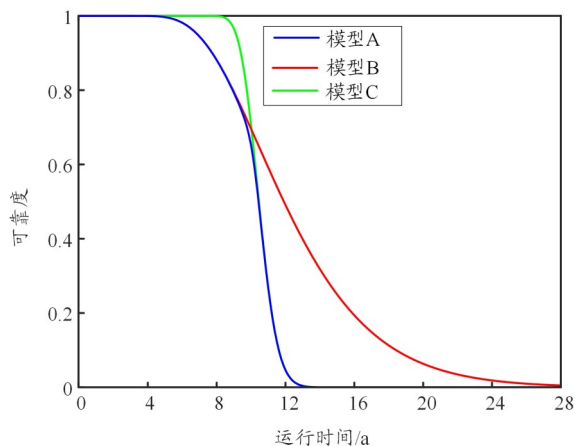


图4 不同模型的可靠度曲线

时则更适合以插入损耗来表征其可靠度。同时,模型A因为能够有效捕捉不同性能退化参数之间的依赖关系,所以更准确地反映了在各退化阶段中主导系统可靠性的关键参数。该模型不仅提高了寿命预测的准确性,也为多性能退化系统的可靠性分析提供了更为全面的视角。

将图4中模型A和模型B的数据代入式(16)和式(17),可得模型A预测的平均寿命为12.14 a,模型B预测的平均寿命为13.91 a。这表明忽略插入损耗的单调递增特性将导致平均寿命被高估约14.6%。再根据式(4)和式(8),计算各观测时刻剩余寿命概率密度峰值对应的时间作为平均剩余寿命预测值,得到如图5和图6所示的剩余寿命预测结果。

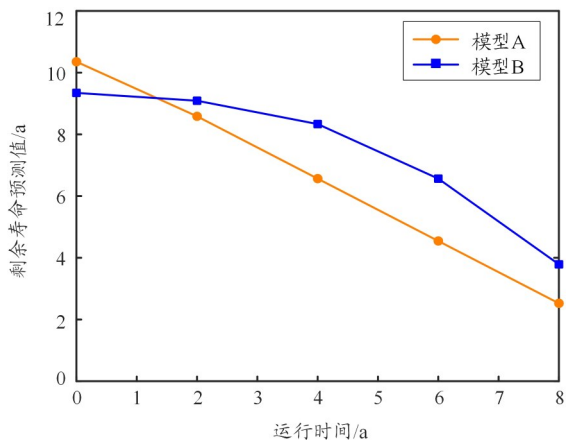


图5 不同模型在不同时刻的平均剩余寿命曲线

从图5可以看出,随着运行时间增加,2种模型的预测曲线均呈下降趋势,在开始时模型A的预测值高于模型B,在运行约2 a时曲线出现交叉,此后模型A的预测值低于模型B,且两者差距随时间逐渐扩大。这一差异反映了2种模型对性能退化机制的描述能力

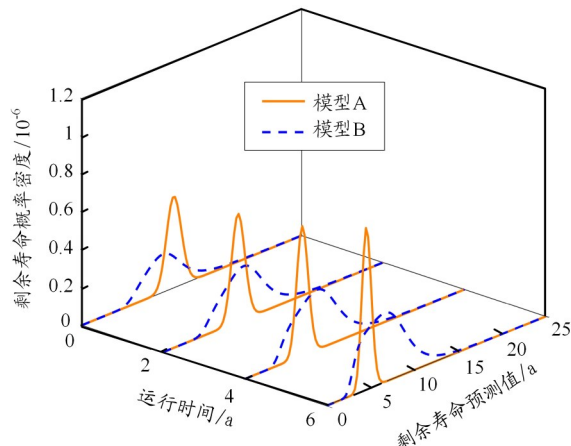


图6 不同模型在不同使用时刻的剩余寿命概率密度曲线

不同。模型A在长期运行条件下预测更为保守,对剩余寿命的估计更谨慎。相比之下,模型B在运行后期会高估系统剩余寿命,可能导致维修决策滞后,进而增加突发故障带来的运营风险与经济损失。

从图6可以看出,在不同运行时间下,模型A与模型B的概率密度分布形态存在明显差异。模型A曲线整体左偏,表明其剩余寿命估计较短,与前文分析一致。由于可靠性评估中保守预测通常更有参考价值,因此模型A在描述多性能退化过程方面具有更好的工程适用性。

综上所述,本文所提模型在剩余寿命预测可靠性与工程保守性方面具有优势,为制定合理的光纤跳线视情维护策略提供了重要依据。

5 结束语

本文以某型多模光纤跳线为研究对象,提出了一种基于二元混合Wiener-Gamma过程的可靠性评估与剩余寿命预测方法。基于温度应力下的性能退化数据,系统研究了光纤跳线的可靠性及其剩余寿命。主要研究结论如下:

1) 光纤跳线的插入损耗与回波损耗在退化过程中具有显著相关性。通过对比单性能参数退化模型与联合退化模型的可靠度曲线发现,后者估计的剩余寿命更短,反映出所提方法在评估中更为保守,从而在实际工程中具备更高的适用性与安全保障。

2) 与传统仅采用非线性Wiener过程模型相比,本文建立的Wiener-Gamma过程联合退化模型能够更准确地描述插入损耗单调递增的特性。研究显示,若忽略该特性,将在使用初期低估产品的无故障运行年限;长期运行会高估剩余寿命,导致维修策略滞后,增

加后期故障风险,进而影响光纤通信系统的稳定运行。

本文的研究也存在一定局限性。试验中发现插入损耗与回波损耗的测量存在一定误差,尽管已采取3次测量取均值的方式予以缓解,但其对评估结果的影响仍未完全消除。后续研究将在退化建模中进一步引入测量误差项,以提升模型精度与预测可靠性。

参考文献:

- [1] 李晗,张玉乾,左铭青,等. 高速光纤通信技术发展探讨(特邀)[J]. 光学学报, 2025, 45(13): 242-260.
- [2] 张楠,冯业为,李鹏,等. 基于温度循环加速退化试验的光纤连接器寿命评估[J]. 环境技术, 2024, 42(2): 146-153.
- [3] 齐永恒,韩云钊,王旭涛,等. 光纤的机械可靠性及断裂形貌分析研究[J]. 光通信技术, 2023, 47(4): 53-57.
- [4] 张立岩,李婧,段建彬,等. 光纤寿命与疲劳参数的关系研究[J]. 光通信技术, 2019, 43(2): 54-57.
- [5] 赵建印,姜经纬,孙媛,等. 基于多元退化失效与突发失效竞争的贮存可靠性评估[J/OL]. 北京航空航天大学学报: 1-14 (2024-11-12) [2026-05-18]. <https://doi.org/10.13700/j.bh.1001-5965.2024.0601>.
- [6] 赵洪山,常杰英,曲岳哈,等. 基于二元非线性 Wiener 随机过程的变压器油纸绝缘剩余寿命预测方法[J]. 电工技术学报, 2023, 38(15): 4040-4049.
- [7] 张根保,张定飞,冉琰,等. 基于 Gamma 和混合 Copula 的元动作单元性能可靠性分析[J]. 湖南大学学报(自然科学版), 2021, 48(4): 113-125.
- [8] 王艺斐,苏春,谢明江. 基于二元逆高斯过程的腐蚀输油管道剩余寿命预测[J]. 东南大学学报(自然科学版), 2020, 50(6): 1038-1044.
- [9] 安绮梦,闫在在,孙立君. 基于逆高斯过程的二元退化可靠性建模与评估[J]. 控制与决策, 2024, 39(11): 3727-3735.
- [10] Li Yang, Gao Haifeng, Chen Hongtian, et al. Accelerated degradation testing for lifetime analysis considering random effects and the influence of stress and measurement errors[J]. Reliability Engineering and System Safety, 2024, 247: 110101.
- [11] 齐金平,冯洪,刘晓宇,等. 考虑个体差异的车轮二元相关退化可靠性分析[J]. 安全与环境学报, 2024, 24(8): 3005-3014.
- [12] 杨志远,赵建民,李俐莹,等. 二元相关退化系统可靠性分析及剩余寿命预测[J]. 系统工程与电子技术, 2020, 42(11): 2661-2668.
- [13] Lim H, Bong-Jin Y. Optimal design of accelerated degradation tests based on Wiener process models[J]. Journal of Applied Statistics, 2011, 38(2): 309-325.
- [14] Zhang Chunhua, Lu Xiang, Tan Yuanyuan, et al. Reliability demonstration methodology for products with Gamma process by optimal accelerated degradation testing[J]. Reliability Engineering and System Safety, 2015, 142: 369-377.
- [15] 宋志佗. 光跳线及光尾纤的插入损耗及回波损耗简析[J]. 现代传输, 2014(3): 76-79.
- [16] 文冰梅,赵联文,黄磊. AIC 准则与留一法交叉验证渐近等价的证明[J]. 统计与决策, 2022, 38(6): 40-43.
- [17] Zhu Lun, Zhou Guo, Zhou Yongquan, et al. Self-adaptive differential evolution-based coati optimization algorithm for multi-robot path planning[J]. Robotica, 2025, 43(3): 959-996.