

## RV减速器精度寿命的退化与可靠性评估

徐航<sup>1,2</sup> 聂义轩<sup>1,2</sup> 温东杰<sup>1,2</sup> 任继华<sup>3</sup> 洪志辉<sup>4</sup>

(1. 中原工学院 机械工业光学传感与测试技术重点实验室, 郑州 451191)

(2. 中原工学院 智能机电工程学院(工业设计学院), 郑州 451191)

(3. 赣南科技学院 智能制造与材料工程学院, 赣州 341000)

(4. 东莞市环力智能科技有限公司, 东莞 523878)

**摘要:**【目的】工业机器人行业对RV减速器提出更高的要求,精度寿命体现了减速器传动精度的保持能力,是最重要的设计准则和使用指标之一。为提升精密减速器的精度性能,对可靠性进行评估至关重要。为此,分析了精密减速器的退化特性。【方法】以RV80E减速器为例,提出基于Gamma过程的随机退化模型;结合减速器传动精度的性能退化数据,基于矩阵法和最大似然估计法对模型参数进行了估计;采用振动特征数据建立了基于遗传算法优化的高斯过程回归模型,以优化传动精度的预测。【结果】结果表明,基于高斯过程回归模型的预测精度显著优于传统回归模型;采用算法预测后的结果更新随机退化模型的后验分布参数,能够有效实现对RV减速器精度寿命可靠度的评估,为进一步进行精度寿命的可靠性优化设计奠定了基础。

**关键词:** RV减速器;精度保持性;Gamma过程;高斯过程回归;可靠性评估

**中图分类号:** TH132.46 **DOI:** 10.16578/j.issn.1004.2539.2026.01.017

## 0 引言

RV减速器作为精密的机械传动装置,广泛应用于航空航天、机器人、工程机械等领域,其性能的优良直接影响着设备性能<sup>[1]</sup>。精密减速器的寿命指标可分为疲劳寿命和精度寿命。精度寿命是指传动精度从初始精度退化到失效阈值所经历的时间,体现了RV减速器传动精度的保持能力,是RV减速器最重要的设计准则和使用指标之一。随着技术的不断发展,对作为重要领域关键部件之一的RV减速器提出更高的精度寿命要求。因此,搭建RV减速器试验台进行精度寿命试验,分析传动精度退化过程的试验数据,提出更为有效准确的精度寿命可靠性研究方法具有重要意义。

目前,对RV减速器寿命特性的研究主要集中在疲劳寿命计算分析、失效机制和加速疲劳寿命试验等方面。程曼等<sup>[2]</sup>针对精密减速器主要零件失效形式提出疲劳寿命试验方法,搭建测试装置,完成了模拟实际运作方式和加速度疲劳寿命试验。RV减速器

精度寿命的重要性越来越引起学术界和工业界的重视,精度寿命的研究主要集中在丝杆副和导轨副的精度寿命上<sup>[3]</sup>。王永青等<sup>[4]</sup>分析了精度保持性的基本内涵,针对数控机床建立了基于多体理论的位置精度保持性评价模型,通过9项精度指标的跟踪检测,完成误差敏感度定量评估。弓宇等<sup>[5]</sup>分析了精密减速器不同传动精度指标,提出便于操作的测量和数据处理方法,通过搭建试验台进行试验对比,验证了试验方法的可行性。

国内外学者对性能退化数据的可靠性和寿命预测建模方法开展了大量研究,主要包括失效形式的物理模型<sup>[6]</sup>、机器学习<sup>[7]</sup>和随机退化模型等。基于随机退化过程的可靠性建模方法充分考虑设备退化过程中随机因素的影响,可以更加准确地评估设备可靠度。常见的随机退化过程包括Wiener过程和Gamma过程等。通常,描述单调性退化过程时采用Gamma过程,其增量非负且独立,能更精确地描述设备性能退化过程。陈友东等<sup>[8]</sup>采用小子样加速退化试验

收稿日期: 2024-09-09

基金项目: 国家自然科学基金面上项目(52075561)

作者简介: 徐航,男,1984年生,河南郑州人,博士,副教授;主要研究方向为精密测量、齿轮工程; xuhangzti@126.com。

聂义轩(通信作者),男,1999年生,河北保定人,硕士研究生;主要研究方向为精密传动; nyx1216@163.com。

引用格式: 徐航,聂义轩,温东杰,等. RV减速器精度寿命的退化与可靠性评估[J]. 机械传动,2026,50(1):133-141.

XU Hang, NIE Yixuan, WEN Dongjie, et al. Degradation and reliability assessment of accuracy life of RV reducers [J]. Journal of Mechanical Transmission, 2026, 50(1): 133-141.



免费获取

提出两阶段 Gamma 过程的退化模型, 采用 Gibbs 抽样估计模型参数进行了机器人大臂关节的可靠性评估。李金峰等<sup>[9]</sup>针对 RV 减速器传动误差与回差的测量, 基于 Gamma 过程建立了退化模型, 通过二元 Copula 函数建立了多元退化模型, 综合评估了减速器的可靠性及预估寿命。王卫国等<sup>[10]</sup>利用基于 Gamma 过程的退化模型来描述装备的性能退化, 通过经验公式和粒子滤波估计参数, 通过振动信号特征预测直升机减速器行星架裂纹情况, 评估了系统剩余寿命。董浩生等<sup>[11]</sup>采用不同工艺参数对螺杆转子砂带磨削进行正交试验, 结合单因素和多因素法, 通过不同优化算法预测了工件表面质量。

综上所述, 目前针对 RV 减速器寿命特性的研究主要集中在疲劳寿命方面, 针对精度寿命方面的研究很少; 而且, 基于退化数据的可靠性研究主要集中在采用历史退化数据进行参数估计和建模, 缺少对 RV 减速器性能指标的精准预测和精度寿命可靠度的评估。因此, 本文针对 RV 减速器性能退化特点, 利用 Gamma 随机退化过程, 建立传动精度退化模型; 同时, 提取振动信号, 建立基于遗传算法优化的高斯过程回归模型, 实现基于振动特征集的传动精度预测; 通过预测结果更新随机退化模型的后验分布参数, 以实现 RV 减速器精度寿命可靠度的评估。

## 1 精度寿命的理论和退化模型建立

### 1.1 精度寿命理论概述

广义的精度保持性<sup>[12]</sup>是指设备在正常工况下, 精度项保持在设计范围内的能力。精度相关质量特性(精度项)适用于机械产品中具有误差的几何量。其适用的具体几何量有机床主轴回转精度、机床直线轴定位精度、轴承的回转精度、精密减速器的传动误差和回差等。

精度保持性通常以精度寿命(精度保持时间)(Accuracy Life, AL)为评价指标, 通过精度寿命的评估可以提供精度退化的结果。精度寿命体现了精密减速器传动精度的保持能力, 是企业生产制造中最重要的设计准则和运行指标之一。RV 减速器的传动精度指标(精度项)包括传动误差和回差等。本文中以传动误差为传动精度的退化指标, 进行精度寿命的表征。

传动精度由检测的一组传动误差数据的最大和最小的差值获得。传动误差可由 RV 减速器输出轴的实际转角与理论转角差值获得, 计算式为

$$E = \frac{\theta_{in}}{i_T} - \theta_{out} \quad (1)$$

式中,  $\theta_{in}$  为输入轴的实际转角;  $\theta_{out}$  为输出轴的实际转角;  $i_T$  为减速器的传动比。

进而得出传动精度计算式为

$$\theta = E_{m1} - E_{m2} \quad (2)$$

式中,  $\theta$  为传动精度;  $E_{m1}$  为最大传动误差值;  $E_{m2}$  为最小传动误差值。

关于 RV 减速器的精度等级, 我国尚未制定相应国家标准。目前国内企业对 RV 减速器的精度指标多按照国家标准 GB/T 30819—2014 中对谐波减速器的要求进行评级<sup>[13]</sup>, 其部分指标如表 1 所示。

表 1 精度等级指标

Tab. 1 Accuracy class indexes

项目	精度等级	指标
传动误差	1 级	传动误差 $\leq 30''$
	2 级	$30'' < \text{传动误差} \leq 1'$
	3 级	$1' < \text{传动误差} \leq 3'$
空程	1 级	空程 $\leq 1'$
	2 级	$1' < \text{空程} \leq 3'$
	3 级	$3' < \text{空程} \leq 6'$

### 1.2 基于 Gamma 过程的可靠性评估

Gamma 过程是一种连续时间的随机过程, 具有严格单调递增的特性, 要求该过程的各个退化增量相互独立且均大于 0。因此, Gamma 随机过程适用于本文的传动精度指标, 具有以下特征:

特征 1: 初始退化增量为 0, 即满足  $X(0) = 0$ , 且概率为 1。

特征 2: 任意时刻  $t \geq 0$  时,  $\Delta X(t) = X(t + \Delta t) - X(t)$ ;  $P_{Ca}[\alpha(t + \Delta t) - \alpha(t), \beta]$ ,  $P_{Ca}(\cdot)$  为 Gamma 过程。

特征 3: 对于任意时刻  $t_i$ ,  $x(t_i) = X(t_i) - X(t_{i-1})$ , 不同时刻下的性能指标退化增量  $x(t_i)$  相互独立。

设  $X(t)$  为  $t$  时刻的退化量, 根据特征 2 可得出

$$X(t + \Delta t) - X(t) \sim P_{Ca}[\alpha(t + \Delta t) - \alpha(t), \beta] \quad (3)$$

$X(t)$  的概率密度函数为

$$f_{X(t)}(x) = P_{Ca}[x|\alpha(t), \beta] = \frac{\beta^{\alpha(t)}}{\Gamma[\alpha(t)]} x^{\alpha(t)-1} e^{-\beta x} I_{(0, \infty)}(x) \quad (4)$$

式中,  $\alpha(t)$  为形状参数,  $\alpha(t) > 0$ ;  $\beta$  为尺度参数,  $\beta > 0$ ; 当  $x \in A$  时, 指示函数  $I_{(0, \infty)}(x) = 1$ , 当  $x \notin A$  时,  $I_{(0, \infty)}(x) = 0$ ;  $A$  为特定时间段内收集到的有效数据点集;  $\Gamma[\alpha(t)]$  为  $\alpha(t) > 0$  时的 Gamma 函数,  $\Gamma[\alpha(t)] = \int_0^{\infty} t^{\alpha(t)-1} e^{-t} dt$ 。

当采用 Gamma 过程描述产品失效过程时, 需设

置退化过程的失效阈值 $D_f$ , 则产品的可靠性为

$$R(t) = P[X(t) < D] = \frac{\Gamma[\alpha(t), D_f\beta]}{\Gamma[\alpha(t)]} \quad (5)$$

式中,  $D$ 为退化数据的有效增量;  $\Gamma[\alpha(t), D_f\beta]$ 为不完全Gamma函数。

可靠性评估实现步骤如下所述:

1) 通过性能退化试验获得历史性能退化数据, 建立基于Gamma过程的随机退化模型; 根据矩阵法和最大似然估计法, 估算先验分布参数 $\alpha_i$ 和 $\beta_i$ 。

2) 在性能退化试验的同时, 收集振动信号并对其进行滤波处理和特征提取。以振动信号特征集为训练集输入, 性能指标数据为训练集标签; 为了提高模型的预测精度, 对比多种回归模型的预测精度,

$$f(x_1, x_2, \dots, x_n) = \frac{1}{\sigma_1\sigma_2\cdots\sigma_n\sqrt{2\pi}} \exp\left\{-\frac{1}{2}\left[\frac{(x_1 - \mu_1)^2}{\sigma_1^2} + \frac{(x_2 - \mu_2)^2}{\sigma_2^2} + \cdots + \frac{(x_n - \mu_n)^2}{\sigma_n^2}\right]\right\} \quad (6)$$

式中,  $\mu$ 为多维高斯分布的均值向量,  $\mu = \{\mu_1, \mu_2, \dots, \mu_n\}$ ;  $C$ 为协方差矩阵,  $C = \begin{pmatrix} \sigma_1^2 & \cdots & 0 \\ \vdots & & \vdots \\ 0 & \cdots & \sigma_n^2 \end{pmatrix}$ 。

通过计算退化数据训练集和测试集的均值向量, 进一步计算协方差矩阵, 评估各个特征的相关性和分布情况, 从而完成对测试样本的预测。

训练集 $S(X, Y)$ , 令 $f(x_i) = y_i$ , 则可推出 $f = [f(x_1), f(x_2), \dots, f(x_n)]$ , 高斯回归模型为

$$y = f(x) + \varepsilon \quad (7)$$

式中,  $x$ 为训练集数据;  $y$ 为训练集标签;  $f$ 为高斯过程函数;  $\varepsilon \sim N(0, \sigma_n^2)$ 。

设待测样本数据为 $X^*$ , 预测值的样本为 $f^*$ 。基于高斯核函数进行退化数据从低维到高维的映射, 推出 $y$ 与 $f^*$ 的联合先验分布, 即

$$\begin{bmatrix} y \\ f^* \end{bmatrix} \sim N\left(0, \begin{bmatrix} C(X, X) + \delta_n^2 I_n & C(X, X^*) \\ C(X^*, X) & C(X^*, X^*) \end{bmatrix}\right) \quad (8)$$

由此推出预测值 $f^*$ 的后验分布, 即

$$f^* | X, Y, x^* \sim N[\mu(x^*), \text{var}(x^*)] \quad (9)$$

通过预测得到性能指标, 基于贝叶斯方法更新参数 $\alpha_i$ 和 $\beta_i$ 。后验概率密度函数为

$$f(s | x_{ik}) = \frac{(x_{ik} + \beta)^{t_k + \alpha}}{\Gamma(t_k + \alpha)} \left(\frac{1}{s}\right)^{(t_k + \alpha) - 1} \cdot e^{-\frac{x_{ik} + \beta}{s}} \cdot I_{(0, \infty)}(x) = P_{\text{Ga}}(s | (t_k + \alpha, x_{ik} + \beta)) \quad (10)$$

后验期望估计为

$$\hat{s} = \frac{x_{ik} + \beta}{t_k + \alpha - 1} \quad (11)$$

根据式(4)、式(5)、式(11)可得参数更新后的实时可靠度函数曲线, 即

建立基于遗传算法优化的高斯过程回归模型, 从而实现性能指标的预测。

3) 将高斯过程回归模型预测的性能指标对Gamma随机过程进行后验参数 $\alpha_i$ 和 $\beta_i$ 的更新, 此时, 更新后的模型更适合于当前设备; 最终进行精度寿命可靠度的评估。

### 1.3 基于高斯过程回归的退化精度预测

基于遗传算法优化的高斯过程回归(Genetic Algorithm-Gaussian Process Regression, GA-GPR)模型利用数据特性进行预测建模。当退化数据呈现高斯分布时, 模型的预测精度将显著提升。多维高斯分布包含协方差矩阵、均值向量两个重要参数, 其概率密度函数为

$$R(t) = P(T_{D_f} > t) = P[X(t) < D_f] = \int_0^{D_f} \frac{(1/\hat{s})^t}{\Gamma(t)} x^{t-1} e^{-(1/\hat{s})x} dx \quad (12)$$

同时, 为了比较多种模型的预测精度, 本文采用均方根误差(Root Mean Square Error, RMSE)、相对误差(Relative Error, RE)、拟合优度、预测时间4种预测精度判别指标。

#### 1) 均方根误差

均方根误差表示预测值与实际值的差异程度, 取值范围为 $[0, \infty)$ , 值越小, 预测精度越好, 计算式为

$$e_{\text{RMSE}} = \sqrt{\sum_{i=1}^n (y'_i - y_i)^2 / n} \quad (13)$$

式中,  $n$ 为预测值的数量;  $y'_i$ 为预测值;  $y_i$ 为实际值。

#### 2) 相对误差

相对误差表示预测值与实际值的偏离程度, 取值范围为 $[0, 1]$ 。绝对误差与实际值的比值越小, 预测精度越好。相对误差计算式为

$$e_{\text{RE}} = \sqrt{[\sum_{i=1}^n (y'_i - y_i)^2] / \sum_{i=1}^n y_i^2} \quad (14)$$

#### 3) 拟合优度

拟合优度又称决定系数, 衡量回归模型变量与响应变量的关系强度, 取值范围为 $[0, 1]$ 。其值越接近1, 表示预测精度越好, 计算式为

$$e_{\text{R}^2} = \left\{ \frac{n \sum_{i=1}^n y'_i y_i - \sum_{i=1}^n y'_i \sum_{i=1}^n y_i}{\sqrt{n(\sum_{i=1}^n y_i'^2) - (\sum_{i=1}^n y_i)^2} \cdot [n(\sum_{i=1}^n y_i'^2) - (\sum_{i=1}^n y_i)^2]} \right\}^2 \quad (15)$$

## 2 测量试验

### 2.1 性能退化试验

基于RV减速器试验台开展精度寿命试验,进行工作状态的监测,并采集历史退化数据(包含同步采集的振动数据和传动误差数据)。本文以RV80E-121型减速器为研究对象,以传动误差数据最大与最小的差值(传动精度)为RV减速器的性能指标,表征RV减速器的精度寿命;通过测量的振动数据构建高斯过程的回归预测模型,实现对传动精度的预测。

RV减速器综合性能测量仪如图1所示,该仪器主要包括精密机械系统、测控系统、测量软件。RV减速器的输入端由伺服电动机驱动,输出端通过负载电动机调整输出轴载荷大小,通过中控操作台控制调节电动机。测控系统通过高精度圆光栅检测系统的旋转角度,采用转矩传感器检测系统的转矩。RV减速器综合性能测量仪可测量精密减速器的多种精度指标,如传动误差、静态回差、动态回差、传动效率等。

为了研究RV减速器精度寿命的演变,采用恒定应力载荷模式进行退化试验。额定载荷为恒定应力载荷的1.5倍,即额定负载 $784\text{ N}\cdot\text{m}$ 的1.5倍;在额定转速 $2\text{ 000 r/min}$ 下进行试验,在测试期间每隔 $500\text{ h}$ 测量1次传动误差,共持续 $3\text{ 000 h}$ ;测量精度为角秒级别,根据标准GB/T 30819—2014中对传动精度等级的定义,取失效阈值 $D_f = 60''$ 。初始传动误差为 $18.06''$ ;采用三向压电式加速度传感器测量振动数据。一般而言,RV减速器内包含滑动轴承时测量主轴振动信号,包含滚动轴承时测量壳体的振

动信号。故本文采用的测量方式为减速器壳体测量法,如图2所示<sup>[14]</sup>。采样频率为 $2\text{ kHz}$ ,采样时间设定为 $180\text{ s}$ ,同一时间对其传动误差与振动信号进行测量。

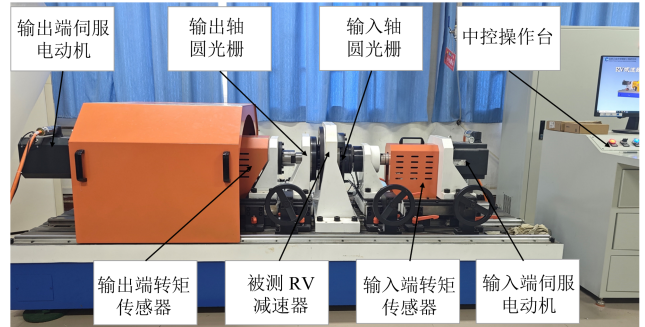


图1 RV减速器综合性能测量仪

Fig. 1 Comprehensive performance measuring instrument for the RV reducer

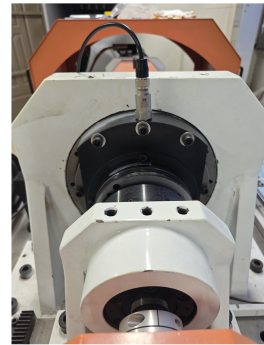
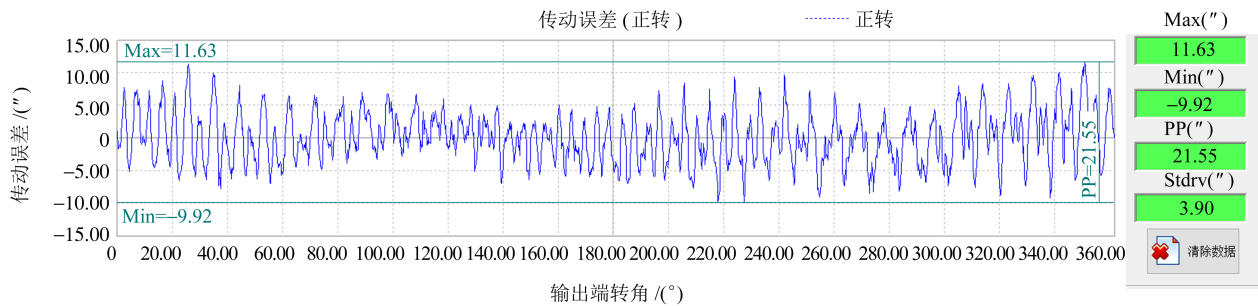


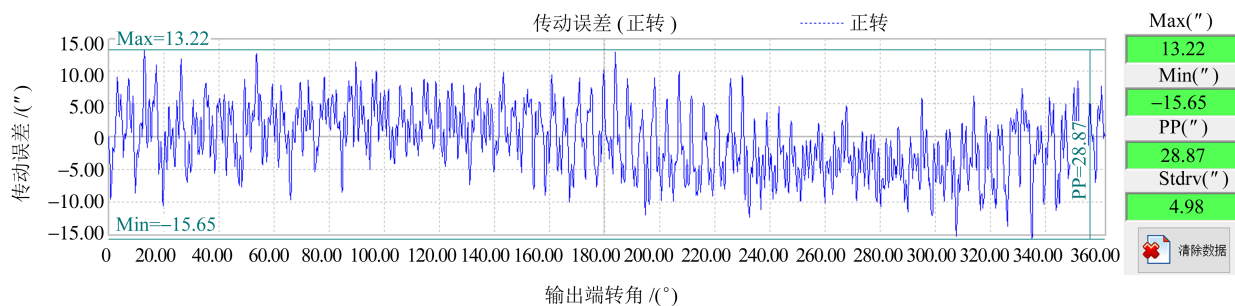
图2 传感器布置

Fig. 2 Sensor arrangement

图3所示为不同时间下的传动误差曲线,图4为传动精度汇总图。



(a) 500 h时传动误差曲线



(b) 1 000 h时传动误差曲线

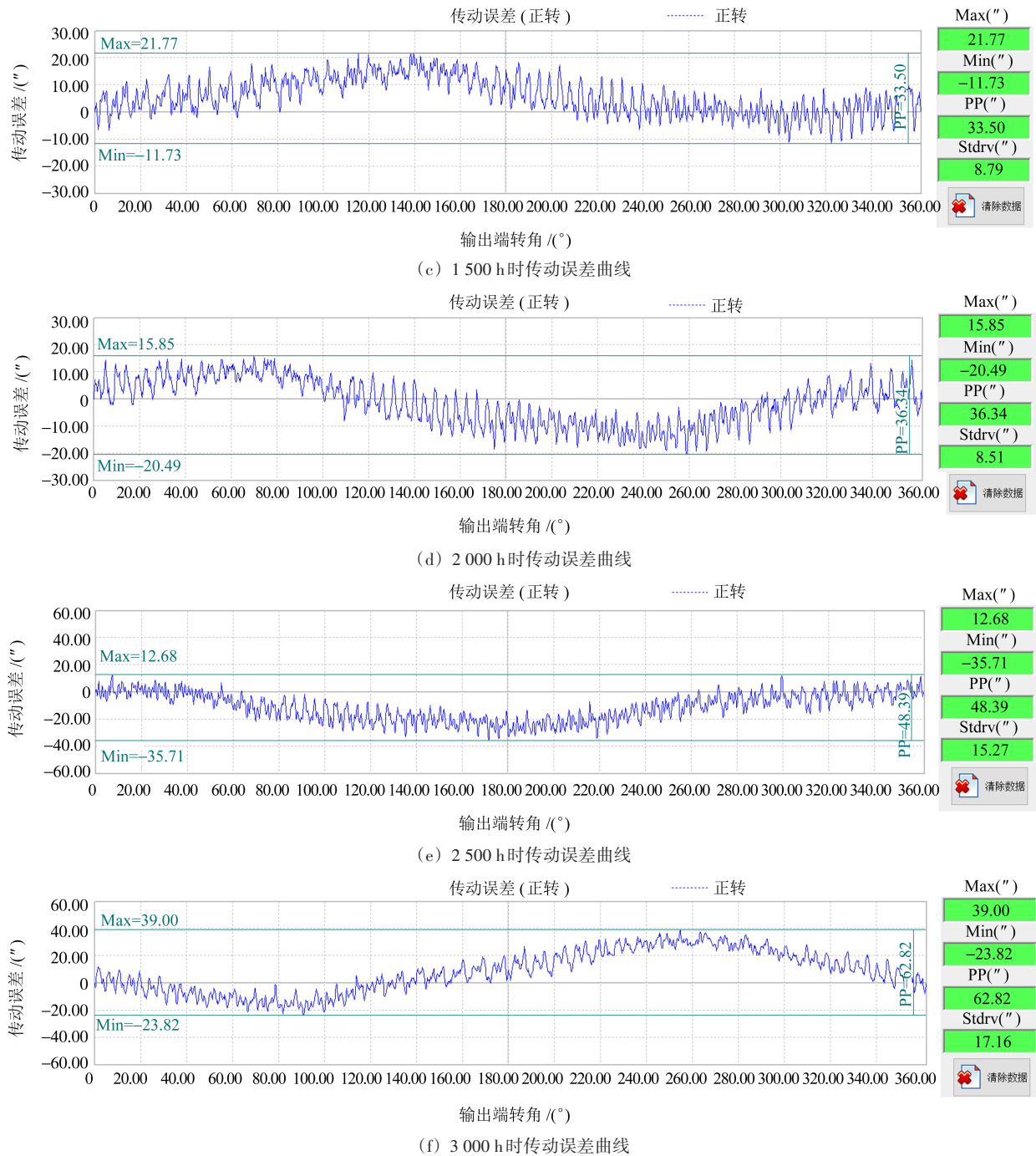


图3 不同时间下的RV减速器传动误差

Fig. 3 Transmission errors of the RV reducer at different times

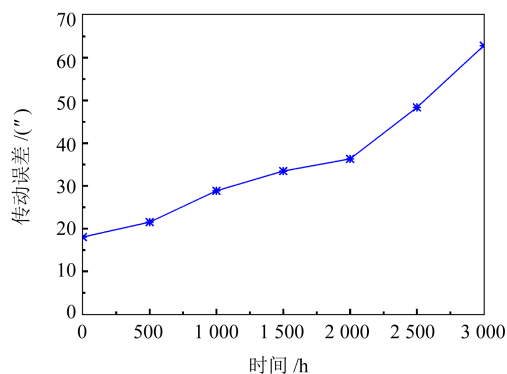


图4 传动精度汇总

Fig. 4 Summary of the transmission accuracy

## 2.2 基于Gamma过程的退化建模

基于该试验数据, 利用矩阵法和最大似然估计法估算Gamma过程的形状参数及尺度参数。基于传动误差退化增量的Gamma随机过程参数估计结果如表2所示。

表2 Gamma过程参数估算结果

Tab. 2 Estimation results of Gamma process parameters

	$\alpha$	$\beta$
传动误差增量	2.72	0.78

## 2.3 振动信号分析

每间隔500 h进行1次振动信号提取, 单次试验

提取的数据总长度为921 600。每截取6 s，计30 720个数据点为1个样本，共提取30个样本；提取6次共计180个样本。

对所有样本进行时域、频域及时频域特征提取。通过对振动信号的特征提取，部分特征趋势呈单调趋势，但有些无规则分布<sup>[15]</sup>。根据RV减速器的退化曲线，其传动精度呈单调趋势。从特征数据中选取单调性较好的有效值、方差、峭度因子和时频总能量4种特征，共计样本180×4个。

### 3 试验评估

#### 3.1 回归模型预测

为确保训练集和测试集的合理性，随机选取每次试验数据的20个特征集作为训练集样本输入，剩余10个作为测试集样本输出，即样本比例按2:1分配。为数据规整，将总样本划分6组，前4组为训练集输入，后2组为测试集输出，选取有效值、方差、峭度因子、时频总能量4种特征。部分特征数据如表3所示。

表3 第1组特征集数据

Tab. 3 First set of feature set data

时间/h	有效值	方差	峭度因子	时频总能量
500	1.500 0	1.844 9	7.272 1	0.897 4
500	1.333 3	1.791 0	8.575 8	1.114 5
500	1.319 4	1.712 8	5.104 4	0.976 5
500	1.293 9	1.621 9	7.014 9	0.848 3
500	1.194 4	1.536 1	8.404 7	0.947 1
1 000	1.180 6	1.369 4	7.642 5	0.869 2
1 000	1.138 9	1.326 0	8.860 9	0.731 0
1 000	1.133 7	1.275 1	7.733 1	0.790 3
1 000	1.013 9	1.230 8	8.776 5	0.948 3
1 000	0.930 6	1.179 4	6.955 3	0.849 8
1 500	0.916 7	1.076 2	-0.754 3	0.554 7
1 500	0.806 3	0.942 3	-2.922 1	0.318 0
1 500	0.763 9	0.707 8	1.161 9	0.634 0
1 500	0.638 9	0.493 2	-1.703 0	0.308 4
1 500	0.611 1	0.128 1	0.037 3	0.486 1
2 000	-0.125 0	-0.293 2	-9.595 2	-0.263 7
2 000	-0.263 9	-0.865 8	-12.199 1	-0.164 7
2 000	-0.367 9	-1.427 7	-7.422 2	-0.381 8
2 000	-0.513 9	-2.060 9	-11.413 4	-0.075 8
2 000	-0.625 0	-2.655 5	-8.547 5	-0.342 0
2 500	-1.930 6	-3.275 3	-15.054 9	-1.052 6
2 500	-2.055 6	-3.983 3	-13.749 4	-0.894 5
2 500	-2.111 1	-4.606 1	-16.180 7	-1.150 9
2 500	-2.138 3	-5.152 5	-16.265 3	-1.762 5
2 500	-2.305 6	-5.804 6	-14.441 1	-1.653 8
3 000	-2.958 3	-6.420 6	-18.773 2	-0.815 0
3 000	-3.000 0	-7.028 2	-17.643 9	-1.061 7
3 000	-3.069 4	-7.662 2	-16.340 5	-1.841 2
3 000	-3.177 9	-8.259 2	-17.641 0	-1.633 8
3 000	-3.263 9	-8.996 6	-19.377 3	-1.791 7

采用对应数量的传动精度退化数据，其中，120个样本用于构建训练集，60个样本作为测试集标签。建立基于遗传算法优化的高斯过程回归模型，通过对测试集预测结果进行分析，评估模型的预测精度。图5所示为高斯过程回归模型预测结果，该结果不涉及训练集的建模。

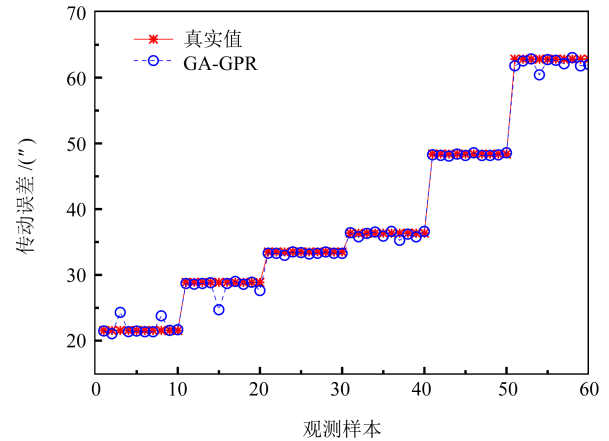


图5 GA-GPR测试集预测结果

Fig. 5 Prediction results of the GA-GPR test set

从图5可以看出，基于遗传算法优化的高斯过程回归模型的预测误差很小，显示了良好的预测效果。

本文采用相同的振动信号特征集，通过反向传播(Back Propagation, BP)神经网络和粒子群优化(Particle Swarm Optimization, PSO)算法优化BP神经网络回归模型分别进行回归预测，对比分析其与高斯过程回归模型的预测精度。模型参数如表4所示。

表4 模型参数

Tab. 4 Model parameters

模型类别	参数名称	参数值
GA-GPR	推理函数	@infGaussLiK
	均值函数	@meanConst
	协方差函数	@covRQiso
	似然函数	@likGauss
PSO-BP	粒子数量	80
	最大迭代次数	1 000
	学习率	0.01
	动量因子	0.5
BP	最大迭代次数	1 000
	目标误差	0.001
	学习率	0.01
	训练迭代次数	60

直观比较各个模型的预测精度，通过均方根误差、相对误差、拟合优度、运行时间4种指标评判预测的结果，如表5所示。

采用BP神经网络和粒子群优化算法优化BP神经网络回归模型的预测结果分别如图6、图7所示。

表5 模型预测精度判别

Tab. 5 Model prediction accuracy discrimination

模型	RMSE	RE	$e_{R^2}$	t/s
BP	2.25	2.47	0.962 4	4.60
PSO-BP	1.13	1.42	0.987 6	7.22
GA-GPR	0.36	0.49	0.998 1	1.61

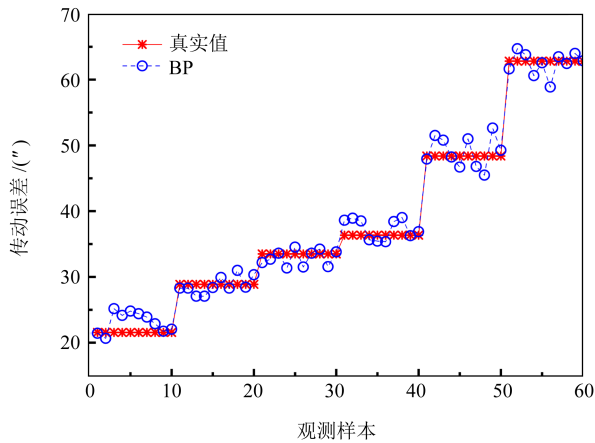


图6 BP数据测试集预测结果

Fig. 6 Prediction results of the BP data test set

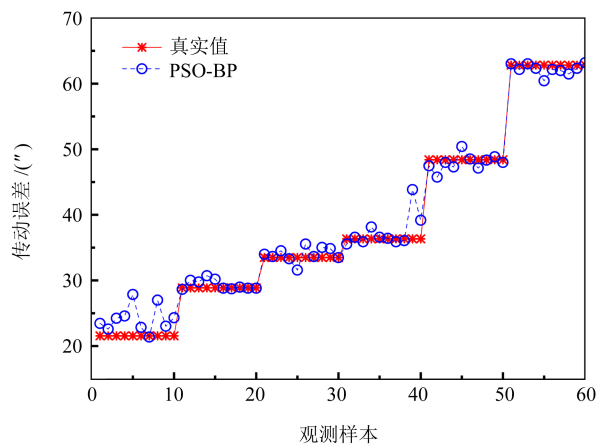


图7 PSO-BP测试集预测结果

Fig. 7 Prediction results of the PSO-BP test set

BP神经网络、粒子群优化算法优化BP神经网络和基于遗传算法优化的高斯过程回归模型均能实现传动精度的预测。对比图5~图7可知,高斯过程回归模型的预测精度远高于其他两个回归预测模型。从表5可知,高斯过程回归模型的均方根误差和相对误差远小于其他两个模型,并且拟合优度更接近1,算法运行时间最短,能实现对传动精度的精确预测。

### 3.2 精度寿命可靠度评估

通过对RV减速器不同时刻下实测振动信号的特征提取,将提取的特征向量作为回归预测模型的输入,预测出当前时刻的传动精度。通过第1.2节中提

出的Gamma随机退化模型,对预测后的传动精度结果进行后验分布参数的更新;通过式(12)计算此时RV减速器精度寿命的可靠度曲线,设定RV减速器传动精度的失效阈值 $D_f = 60''$ 。由第1.1节和第2.1节可知,此时为2、3级精度临界点且认定为失效。精度寿命可靠度曲线如图8所示。

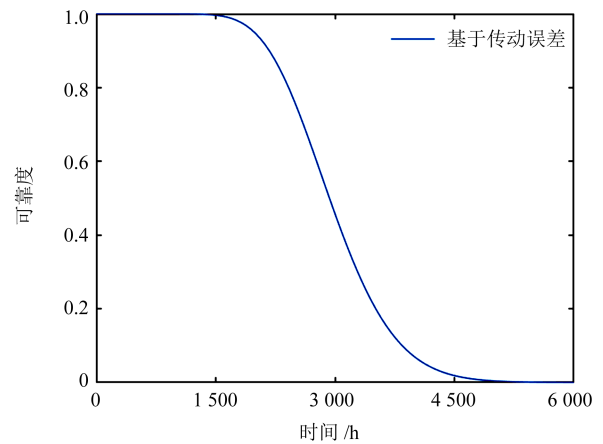


图8 精度寿命可靠度曲线

Fig. 8 Reliability curve of the accuracy life

由图8可知,3000h时,RV减速器精度寿命的可靠度为0.4391;在服役1500h后开始出现明显差异;在1000h时其精度寿命可靠度为0.9963。当设定传动精度的失效阈值 $D_f = 60''$ 时,该减速器的预期精度寿命约为2879h。

## 4 结论

针对RV减速器传动精度退化过程的特点,基于RV减速器试验台,以传动误差为传动精度的退化指标,进行精度寿命的表征。基于Gamma随机过程,利用矩阵法和最大似然估计法对退化模型的形状参数及尺度参数进行了估计;通过对振动信号的特征提取,建立高斯过程回归预测模型;通过多种回归模型预测精度的对比,实现对精度寿命的预测,为模型参数的更新提供了精确的保障,实现了精度寿命可靠度的评估。具体结论如下所述:

1) 传动误差作为传动精度的退化指标,可表征RV减速器的精度寿命。通过性能退化试验定期测量传动误差,结合在一定加载情况下减速器的性能退化数据和振动数据,建立了基于遗传算法优化的高斯过程回归模型,并建立了BP神经网络、粒子群优化算法优化BP神经网络;采用多种精度判别指标对比验证了该优化算法回归模型的预测精度,实现了对RV减速器传动精度的准确预测,为后验分布参数

的更新提供了精确保障。

2) 利用RV减速器性能退化数据,通过对传动精度失效阈值的设定,建立Gamma随机过程退化模型,估计模型的先验分布参数;基于遗传算法优化的高斯过程回归模型的预测值对模型进行后验分布参数的更新,实现了对RV减速器当前状态下的精度寿命可靠度评估,可为后续减速器精度寿命可靠性分析方法的改进提供参考。

#### 参 考 文 献

- [1] 何卫东,单丽君. RV减速器研究现状与展望[J]. 大连交通大学学报,2016,37(5):13-18.  
HE Weidong, SHAN Lijun. Status and development of RV reduce [J]. Journal of Dalian Jiaotong University, 2016, 37(5): 13-18.
- [2] 程曼,邱城,李金峰,等. 机器人减速器疲劳寿命测试装置开发与研究[J]. 机械传动,2019,43(5):156-160.  
CHENG Man, QIU Cheng, LI Jinfeng, et al. Development and research of fatigue life testing device for robot reducer[J]. Journal of Mechanical Transmission, 2019, 43(5): 156-160.
- [3] GUO S J, TANG S F, ZHANG D S. A recognition methodology for the key geometric errors of a multi-axis machine tool based on accuracy retentivity analysis [J]. Complexity, 2019, 2019 (1) : 8649496.
- [4] 王永青,吴嘉锟,刘阔,等. 数控机床精度保持性的定量评价与误差敏感度分析[J]. 机械工程学报,2019,55(5):130-136.  
WANG Yongqing, WU Jiakun, LIU Kuo, et al. Quantitative evaluation and error sensitivity analysis of accuracy retentivity of CNC machine tools [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2019, 55 (5): 130-136.
- [5] 弓宇,周晓菊,徐磊琛,等. 机器人用精密减速器传动精度试验方法的研究[J]. 机械传动,2016,40(8):134-137.  
GONG Yu, ZHOU Xiaojun, XU Leichen, et al. Research of the transmission accuracy test method of precise reducer used in robot [J]. Journal of Mechanical Transmission, 2016, 40(8): 134-137.
- [6] 袁容. 基于性能退化分析的可靠性方法研究[D]. 成都:电子科技大学,2015:23-27.  
YUAN Rong. Research on reliability modeling and analysis methods based on the performance degradation[D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2015: 23-27.
- [7] TAO T, ZIO E, ZHAO W. A novel support vector regression method for online reliability prediction under multi-state varying operating conditions[J]. Reliability Engineering & System Safety, 2018, 177:35-49.
- [8] 陈友东,刘茁. 基于两阶段Gamma过程的工业机器人可靠性评估[J]. 计算机集成制造系统,2024,30(12):4477-4483.  
CHEN Youdong, LIU Zhuo. Industrial robots reliability assessment based on two-stage Gamma process [J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2024, 30(12): 4477-4483.
- [9] 李金峰,杨翊坤,王西峰,等. 基于多元退化数据的RV减速器可靠性评估[J]. 机械传动,2023,47(5):82-87.  
LI Jinfeng, YANG Yikun, WANG Xifeng, et al. Reliability evaluation of RV reducers based on multi degenerate data[J]. Journal of Mechanical Transmission, 2023, 47(5): 82-87.
- [10] 王卫国,孙磊. 基于Gamma过程和EM-PF参数估计的剩余寿命预测方法研究[J]. 军械工程学院学报,2015,27(2):1-7.  
WANG Weiguo, SUN Lei. Residual useful life prediction research based on Gamma process and EM-PF parameter estimation algorithm [J]. Journal of Ordnance Engineering College, 2015, 27(2) : 1-7.
- [11] 董浩生,杨赫然,孙兴伟,等. 基于改进神经网络算法的螺杆砂带磨削表面粗糙度预测研究[J]. 表面技术,2022,51(4):275-283.  
DONG Haosheng, YANG Heran, SUN Xingwei, et al. Surface roughness prediction of screw belt grinding based on improved neural network algorithm [J]. Surface Technology, 2022, 51 (4) : 275-283.
- [12] 张生永,冉琰,张根保,等. 精度保持性定量评价与精度退化机理分析[J]. 机械工程学报,2022,58(7):193-213.  
ZHANG Shengyong, RAN Yan, ZHANG Genbao, et al. Quantitative evaluation of accuracy retentivity and analysis of accuracy degradation mechanism [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2022, 58(7): 193-213.
- [13] 尹勇. 工业机器人RV减速器传动精度在线监测与评级研究[D]. 徐州:中国矿业大学,2021:10-16.  
YIN Yong. Research on online monitoring and rating of transmission accuracy of RV reducers for industrial robots [D]. Xuzhou: China University of Mining and Technology, 2021: 10-16.
- [14] 李旭东. 基于深度学习的旋转部件故障诊断研究[D]. 北京:中国科学院大学(中国科学院国家空间科学中心),2021:42-46.  
LI Xudong. Research on fault diagnosis of rotating components based on deep learning [D]. Beijing: National Space Science Center, Chinese Academy of Sciences, 2021: 42-46.
- [15] 王国锋,曹增欢,冯海生,等. 基于多阶段退化建模的谐波减速器实时可靠性评估与寿命预测[J]. 天津大学学报(自然科学与工程技术版),2022,55(2):122-132.  
WANG Guofeng, CAO Zenghuan, FENG Haisheng, et al. Real-time reliability evaluation and life prediction of harmonic reducer based on multistage degradation modeling [J]. Journal of Tianjin University (Science and Technology), 2022, 55(2): 122-132.

## Degradation and reliability assessment of accuracy life of RV reducers

XU Hang<sup>1,2</sup> NIE Yixuan<sup>1,2</sup> WEN Dongjie<sup>1,2</sup> REN Jihua<sup>3</sup> HONG Zhihui<sup>4</sup>

(1. Key Laboratory of Optical Sensing and Testing Technology for Mechanical Industry, Zhongyuan University of Technology, Zhengzhou 451191, China)

[2. School of Intelligent Mechanical and Electrical Engineering(School of Industrial Design), Zhongyuan University of Technology, Zhengzhou 451191, China]

(3. School of Intelligent Manufacturing and Materials Engineering, Gannan University of Science and Technology, Ganzhou 341000, China)

(4. Dongguan Huanli Intelligent Technology Co., Ltd., Dongguan 523878, China)

**Abstract:** [Objective] The industrial robot industry has put forward higher requirements for RV reducers, and the precision life reflects the ability of the reducer to maintain transmission accuracy, which is one of the most important design criteria and usage indicators. To improve the precision performance of precision reducers, it is crucial to evaluate their reliability. Therefore, the degradation characteristics of precision reducers were analyzed. [Methods] Taking the RV80E reducer as an example, a random degradation model based on Gamma process was proposed. Combined with the performance degradation data of the reducer transmission accuracy, the model parameters were estimated based on the matrix method and the maximum likelihood estimation method. A Gaussian process regression model optimized by genetic algorithm was established using vibration characteristic data to optimize the prediction of transmission accuracy. [Results] The results show that the prediction accuracy based on Gaussian process regression model is significantly better than that of the traditional regression model. The posterior distribution parameters of the random degradation model are updated by using the algorithm to predict the results, which can effectively evaluate the reliability of the accuracy life of RV reducer and lay the foundation for further reliability optimization design of accuracy life.

**Key words:** RV reducer; Accuracy retentivity; Gamma process; Gaussian process regression; Reliability assessment

(编辑: 贾文倩)

(上接第125页)

## Design and analysis of three-term cosine cam wave generators for harmonic reducers

WANG Wei ZHANG Ruiliang XU Huaizhe WANG Yuxin

(Gear Research Institute, Taiyuan University of Technology, Taiyuan 030024, China)

**Abstract:** [Objective] The wave generator, as the driving component, has its profile curve directly affecting the deformation and stress distribution of the flexible wheel. To reduce the stress on the flexible wheel and improve its fatigue performance, a design method for a three-term cosine cam wave generator was proposed. [Methods] The profile curve of the three-term cosine wave generator was composed of a constant term, represented by the base circle radius, and three cosine terms superimposed. By using the curvature variation coefficient at the major axis, the correction factor at the minor axis, and the clearance of the flexible bearing as variable parameters, the influence of these parameters on the performance of the wave generator was analyzed, and the optimization of a specific harmonic reducer model was validated. Finite element analysis was performed on the flexible wheel structure after incorporating the new cam structure under expansion, no-load, and loading conditions, and comparisons were made with the pre-optimized structure to analyze the stress distribution on the flexible wheel. [Results] The finite element results indicate that, compared to the traditional cosine wave generator, the flexible wheel under the three-term cosine wave generator exhibits superior stress performance under various working conditions and achieves longer fatigue life.

**Key words:** Harmonic reducer; Three-term cosine cam wave generator; Flexible bearing; Stress of flexible wheel

(编辑: 刘欢欢)