

基于贝叶斯方法与稳健理论的滚动轴承 摩擦力矩不确定度建立方法

徐永智^{1,2}

(1. 河南科技大学 应用工程学院, 河南 三门峡 472000;
2. 三门峡职业技术学院 汽车学院, 河南 三门峡 472000)

摘 要: 基于贝叶斯方法与稳健化理论,提出一种未知分布时间序列不确定度的建立方法。该方法以中位数估计与 Huber M 估计融合方法分析时间序列数据的稳健性,构建贝叶斯先验分布,并与实验数据建立贝叶斯后验分布,创建以贝叶斯后验分布建立时间序列数据的不确定度。在显著性水平为 0~0.1,通过对滚动轴承摩擦力矩分析,中位数估计与 Huber M 估计相融合方法确定了滚动轴承摩擦力矩稳健数据的边界值、显著性水平,构建了贝叶斯先验分布。以贝叶斯后验分布构建滚动轴承摩擦力矩不确定度。与经典统计学得到的不确定度比较,在相同置信水平下,该方法缩短了评估区间,提高了评估精度 0~50%。该融合方法以稳健数据构建先验分布,提供一种贝叶斯方法先验分布建立方法;采用中位数估计与 Huber M 估计融合方法确定了数据显著性水平和边界值的确定,减小置信水平与稳健数据边界值主观确定的误差;为未知分布时间序列的不确定度建立提供了一种理论。

关 键 词: 贝叶斯方法; 稳健理论; 滚动轴承; 摩擦力矩; 不确定度

中图分类号: V21; TH133.33

文献标志码: A

Uncertainties establishment method of friction moment on rolling bearing based on Bayesian theory and robust theory

XU Yongzhi^{1,2}

(1. College of Applied Engineering,
Henan University of Science and Technology, Sanmenxia Henan 472000, China;
2. Automotive College, Sanmenxia Polytechnic, Sanmenxia Henan 472000, China)

Abstract: A method on basis of Bayesian theory and robust theory was proposed to solve uncertainties of time series data on unknown distribution. The method combining with median and Huber M estimate was used to analyze robust property of time series data and establish prior distribution on Bayesian theory. Uncertainties were established by inferring from prior distribution and distribution function on time series data. At the significance level 0—0.1 range, for studies of friction torque of rolling bearing, the method determined boundaries value and confidence level of friction torque, and established prior distribution on Bayesian theory. Compared with classic statistics, the method distinctly increased evaluation accuracy 0—50% under the same confidence level. Application significance of the method lied in taking robust data to establish prior distribution,

收稿日期: 2021-05-18

基金项目: 校企合作项目(SZYhxkt-2021-002); 博士专项基金(SZYGCCRC-2021-007)

作者简介: 徐永智(1974—),男,副教授,博士,主要从事滚动轴承性能研究。E-mail: xxyyzzh@163.com

引用格式: 徐永智. 基于贝叶斯方法与稳健理论的滚动轴承摩擦力矩不确定度建立方法[J]. 航空动力学报, 2022, 37(5): 1000-1009.
XU Yongzhi. Uncertainties establishment method of friction moment on rolling bearing based on Bayesian theory and robust theory[J]. Journal of Aerospace Power, 2022, 37(5): 1000-1009.

and provide a establishment method of prior distribution on Bayesian theory; adopting the median and Huber M estimate method to determine confidence level and boundary value could reduce errors of subjective factors, and provide a theory to establish uncertainties on unknown distribution.

Key words: Bayesian theory; robust theory; rolling bearings; friction torque; uncertainties

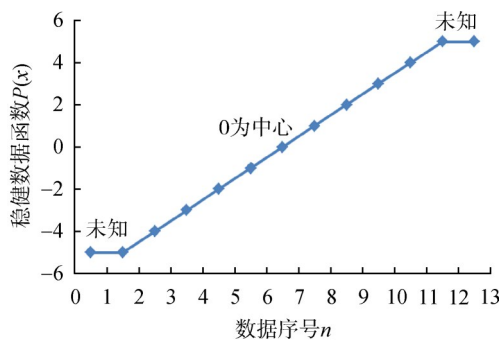
滚动轴承摩擦力矩是反映机械传递效率和工作精度的综合性指标^[1],受加工误差^[2]、润滑^[3-5]、尺寸^[6]等多种因素影响,属于概率与趋势规律未知的乏信息系统,具有不确定性^[7-9],常采用数据的不确定度来表示。很多学者采用统计学方法^[10-17]和非统计学方法^[18-30]对滚动轴承性能或者不确定性进行了研究,但是这些方法需要知道数据分布类型或者数据置信水平,未能很好地解决滚动轴承摩擦力矩未知分布、置信水平的不确定性问题。

贝叶斯理论重视数据的挖掘,以先验分布弥补数学模型的误差,有效地提高数据的评估质量,但是其先验分布很难建立^[31-38]。稳健理论重视数据的稳健性,可以可靠地、稳定地反映数据的本征特征,并且不需要知道数据分布类型和置信水平^[31]。基于此,本文将两种理论融合,以稳健数据构建贝叶斯先验函数,与实验数据创建贝叶斯后验函数,构建滚动轴承摩擦力矩的不确定度,预期为未知分布、趋势项或者置信水平的不确定性研究提供一种思路。

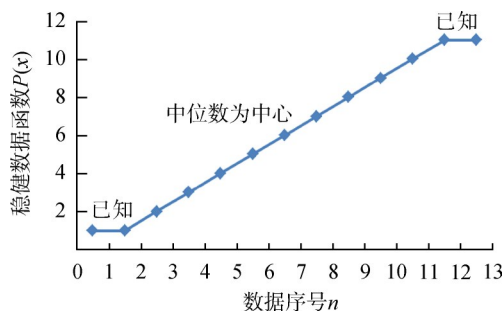
基于稳健理论,中位数估计与 Huber M 估计融合方法可以分析未知分布时间序列,确定稳健数据的边界值及显著性水平,具体见图1,并且能够可靠地反映数据的本征特征,可以解决贝叶斯函数的先验分布以及置信水平问题。因此,以中位数估计与 Huber M 估计融合方法对滚动轴承摩擦力矩实验数据进行处理,建立贝叶斯先验分布与置信水平。

以滚动轴承摩擦力矩稳健数据建立先验分布,与实验数据共同构建贝叶斯后验分布,可以反映数据的先验信息及数据的特征,以贝叶斯后验分布建立数据序列不确定度。

根据文献[39],滚动轴承摩擦力矩近似于正态分布;文献[40]中滚动轴承摩擦力矩稳健数据近似于正态分布,可假设滚动轴承摩擦力矩服从均值未知方差已知,且均值的先验分布为正态分布的数学模型,以此弥补数学模型产生的误差,建立滚动轴承摩擦力矩的不确定度。



(a) Huber M估计



(b) 中位数估计与Huber M估计融合

图1 Huber M估计、中位数估计与Huber M估计融合方法分布

Fig.1 Distribution function of Huber M estimate method and the median and Huber M estimate fusion method

1 数学模型

1.1 基本定义

将连续的时间变量 t 离散化,在设定时间间隔下,按一个时刻一套轴承,采集到滚动轴承摩擦力矩的数据序列向量:

$$\mathbf{X} = \{x(t)\}; t = 1, 2, \dots \quad (1)$$

式中 $x(t)$ 为时刻 t 的摩擦力矩数据。

从向量 $\mathbf{X}$ 中抽第 i 套轴承的摩擦力矩数据,构成时刻 t 的摩擦力矩向量

$$\mathbf{X}_i = \{x_i(t)\}; t = 1, 2, \dots; i = 1, 2, \dots \quad (2)$$

假设 $\mathbf{X}_i$ 是来自正态分布总体 $N(\xi, \sigma_0^2)$ 的 ξ 一

个样本,每套轴承摩擦力矩数据的均值、方差为

$$\overline{x_i(i)} = \frac{1}{T} \sum_{i=1}^T x_i(t) \quad (3)$$

$$\sigma_0^2 = \frac{1}{T-1} \sum_{i=1}^T [x_i(t) - \overline{x_i(t)}]^2 \quad (4)$$

1.2 数学模型

ξ 为滚动轴承摩擦力矩的均值,假设 ξ 的先验信息为正态分布 $N(\eta, \nu^2)$, 那么 ξ 的先验密度函数^[31]是

$$\lambda(\xi) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\nu} \exp\left[-\frac{1}{2\nu^2}(\xi - \eta)^2\right],$$

$$-\infty < \xi < +\infty \quad (5)$$

则 ξ 的后验分布^[31]为

$$h(\xi|x) = \left(\frac{A}{2\pi}\right)^{1/2} \exp\left[-\frac{(\xi - \eta_1)^2}{2\sigma_1^2}\right] \quad (6)$$

其中

$$\eta_1 = \frac{B}{A} = \frac{\overline{x_i(t)}\sigma_0^{-2} + \eta\nu^{-2}}{\sigma_0^{-2} + \nu^{-2}} \quad (7)$$

$$\sigma_1^2 = \frac{1}{A} = \frac{\sigma_0^2\nu^2}{\sigma_0^{-2} + \nu^{-2}} \quad (8)$$

据此可知后验分布函数为正态分布 $N(\eta_1, \sigma_1^2)$ 的密度函数,于是得到

$$P\left(\left|\frac{\xi - \eta_1}{\sigma_1}\right| \leq \mu_{\alpha/2}\right) = 1 - \alpha \quad (9)$$

即

$$P(\eta_1 - \sigma_1\mu_{\alpha/2} \leq \xi \leq \eta_1 + \sigma_1\mu_{\alpha/2}) = 1 - \alpha \quad (10)$$

故可得到 ξ 的置信度为 $1 - \alpha$ 的贝叶斯置信区间为 $[\eta_1 - \sigma_1\mu_{\alpha/2}, \eta_1 + \sigma_1\mu_{\alpha/2}]$ 。

1.3 贝叶斯先验函数的建立

η, ν 的确定方法如下:先对实验数据进行稳健处理,获取实验数据的稳健数据,并用来构建贝叶斯先验函数。实验数据稳健处理的方法为中位数估计与 Huber M 估计融合方法,根据该方法可以确定实验数据的显著性水平(用来确定置信水平)、稳健数据边界值^[31],具体如下:

将时间序列 $X_i(t)$ 取绝对值按照从小到大顺序进行排列得到 $X'_i(t)$, 为了方便简写为 X'

中位数 $m_{X'}$

$$m_{X'} = \begin{cases} x'_i\left(\frac{T+1}{2}\right), & T \text{ 为奇数} \\ \frac{1}{2}\left[x'_i\left(\frac{T}{2}\right) + x'_i\left(\frac{T}{2} + 1\right)\right], & T \text{ 为偶数} \end{cases} \quad (11)$$

计算新数据列的平均值 $x'_i(b)$ 和 $x'_i(e)$ 是

$X'_i(t)$ 中的两个数值,其中 $x'_i(b) \leq m_{X'}; m_{X'} \leq x'_i(e)$; 从 $x'_i(b)$ 至 $m_{X'}$ 的数据为 t_1 , 从 $m_{X'}$ 至 $x'_i(e)$ 的数据个数为 t_2 。

如果 $x'_i(t) \leq x'_i(b)$ 时, $x'_i(b)$ 代替 $x'_i(t)$; $x'_i(t) \geq x'_i(e)$ 时, $x'_i(e)$ 代替 $x'_i(t)$ 。得到新的数据列 $\overline{X}'_i(t) = X'_i(t)$ 其中 $x'_i(b) \leq x'_i(t) \leq x'_i(e)$ 。

计算新的数据列的平均值为

$$\overline{X}'_i(t) = \frac{1}{T} \sum_{i=1}^T x'_i(t) \quad (12)$$

计算中位数和平均值的差值的绝对值为

$$D_i = |m_{X'} - \overline{X}'_i(t)| \quad (13)$$

t_1, t_2 根据具体情况可以相等,也可以不等,本文采取相等,即 $t_1 = t_2, t_1 = t_2 = 1, 2, \dots, T/2$ 或者 $T + 1/2, T$ 为偶数或者奇数。计算临界值 K_1, K_2 为临界值,根据得到一系列差值 D_i , 其中 $D_{\min}$ 为差值 D_i 的最小值,其所对应的 $x'_i(b), x'_i(e)$ 分别为对应 K_1, K_2 , 即

$$K_1 = x'_i(b) \quad (14)$$

$$K_2 = x'_i(e) \quad (15)$$

得到实验数据本征区间。这样 $[K_1, K_2]$ 确定, t_1, t_2 确定,并计算出显著性水平 α

$$\alpha = \frac{t_1 + t_2}{2} \times 100\% \quad (16)$$

显著性水平 $\alpha = 0\% \sim 10\%$, 得出分布函数为

$$\phi_i(t) = \begin{cases} x'_i(t) & K_1 \leq x'_i(t) \leq K_2 \\ K_2 & x'_i(t) > K_2 \\ K_1 & x'_i(t) < K_1 \end{cases} \quad (17)$$

分布函数的平均值 η 及方差 ν 为经验值即

$$\eta = \overline{\phi_i(t)} \quad (18)$$

$$\nu = V_{\phi_i} \quad (19)$$

1.4 滚动轴承摩擦力矩不确定度

不确定度为 M_i, U_i, P_i , 其中均值 M_i 表示摩擦力矩的大小;均值区间 U_i 表示滚动轴承的精度,置信水平表示实验数据的可靠度。

$$M_i = \eta^* = 1 - \alpha \quad (20)$$

$$U_i = (\eta^* - \sigma^* \mu_{\alpha/2}, \eta^* + \sigma^* \mu_{\alpha/2}) \quad (21)$$

$$P_i = (1 - \alpha_i) \times 100\% \quad (22)$$

为了分析上述方法不确定度的特点,采用经典统计学确定实验数据不确定度,经典统计学不确定度建立式(23)~式(25)。

$$C_{Mi} = A_i = \frac{1}{T} \sum_{i=1}^T x_i(t) \quad (23)$$

$$C_{Pi}=(1-\alpha)\times 100\%$$
 (24)

$$C_{Ui}=\sigma_i=\sqrt{\sigma_i^2}$$
 (25)

为了对比两种方法不确定度的特点,将两种方法置信水平取相同数值,即按照贝叶斯方法确定。

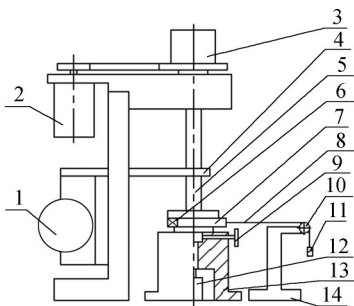
2 实 验

随机抽出 10 套航天轴承 HKTA 测量摩擦力矩数据,实验目的是测量轴承的摩擦力矩,研究滚动轴承摩擦力矩不确定度。

2.1 实验条件及测量原理

实验条件要求实验温度为 10~35℃,空气相对湿度在 80% 以下进行;环境干净,不应有尘屑、杂质进入轴承;远离磁场、电场,避免外界因素干扰测量结果。

根据 GB/T 32562-2016 标准,滚动轴承摩擦力矩使用专用测量仪进行测量,工作原理见图 2。



1 手轮;2 电动机;3 加载装置;4 拨叉;5 驱动主轴;
6 滚动轴承;7 校准轮;8 吊线;9 锁紧轮;
10 力转换轮;11 砝码;12 扭矩传感器;
13 定位支座;14 校准支架。

图 2 滚动轴承摩擦力矩专用测试仪原理图^[41]
Fig.2 Principal of the special measurement of the friction torque on rolling bearings

图 2 是滚动轴承摩擦力矩的测量原理及仪器,测量对象是滚动轴承 6 的摩擦力矩,轴承 6 用心轴安装在定位支座 13 上,心轴的上端通过加载装置加载,心轴的下端与传感器 12(扭矩传感器)接触。测试装置动力源是电动机 2,通过同步齿形带带动驱动主轴 5 转动。使测试轴承 6 外圈旋转,由于轴承摩擦力矩的作用,测试轴承 6 内圈也会旋转,传感器 12 阻止测试轴承 6 内圈旋转,当扭矩传感器 12 测试的阻力矩与被测试轴承 6 摩擦力矩动态平衡时,传感器测试的力矩即为被测轴承 6 的摩擦力矩^[41]。

2.2 实验方案

在实验机转速为 2 r/min,轴向载荷为 15 N 条件下,用摩擦力矩专用测量仪测量 HKTA 滚动轴承摩擦力矩,其参数见表 1。每套轴承进行连续测量和间隔均匀采样,连续记录 2 048 个离散数据数值。

表 1 滚动轴承摩擦力矩专用测量仪主要技术参数^[41]
Table 1 Main technical parameters of the special measurement of the friction torque on rolling bearings^[41]

项目	参数
被测轴承内径范围/mm	8~30
力矩测量范围/(μN·m)	0~50
轴向载荷/N	0~20
主轴转速/(r/min)	0~5
示值误差/(μN·m)	-2.5~2.5
示值稳定性/(μN·m/h)	2.5
气源压力/MPa	0.35~0.44

3 实验数据及数据分析

根据上述实验,每个 0.03 s 采集一个数据,得到 8 套滚动轴承 HKTA 摩擦力矩数据,见图 3。

图 3 为 1~10 套 HKTA 滚动轴承摩擦力矩,从图中可以看出滚动轴承力矩范围为 0~1.4 μN·m,有的轴承摩擦力矩变化较大,如第 3 套轴承摩擦力矩范围为 0~1.4 μN·m,有的轴承摩擦力矩变化较小,如第 9 套轴承摩擦力矩范围为 0.2~1.2 μN·m。

滚动轴承摩擦力矩的变化趋势也不相同,第 1、3 套轴承有上升的趋势,第 5、9 套轴承有下降的趋势,其余轴承趋势不明显。有的轴承摩擦力矩变化速度较快,如第 1~4 套轴承,有的轴承变化速度缓慢,如第 6、7、9 套轴承,说明 HKTA 滚动轴承摩擦力矩具有复杂多样性、不确定性。为进一步分析滚动轴承摩擦力矩的特点,根据 HKTA 滚动轴承摩擦力矩实验数据,按照统计学方法计算每套轴承的中位数、平均值及标准差参数,具体如下见图 4。

根据图 4 滚动轴承摩擦力矩的性能参数中位数、平均值、标准差的对比情况,可以看出滚动轴承摩擦力矩的中位数范围是[0.152 320,0.656 530],

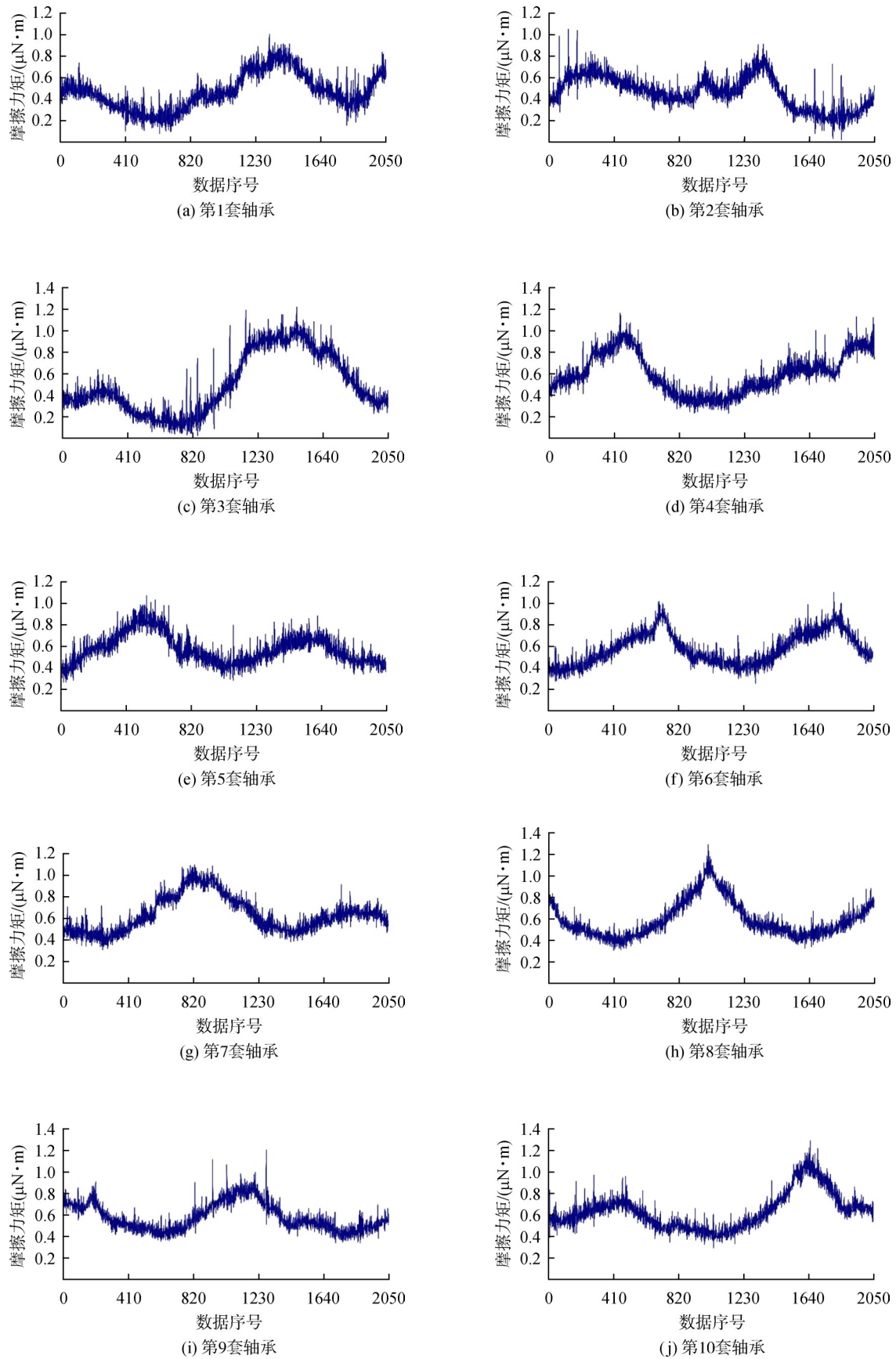


图 3 1~10套 HKTA 滚动轴承摩擦力矩实验数据

Fig.3 Test data of the friction torque on 1—10 sets HKTA rolling bearings

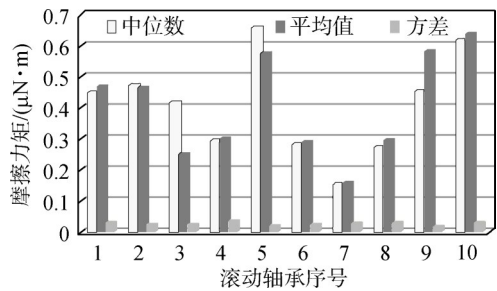
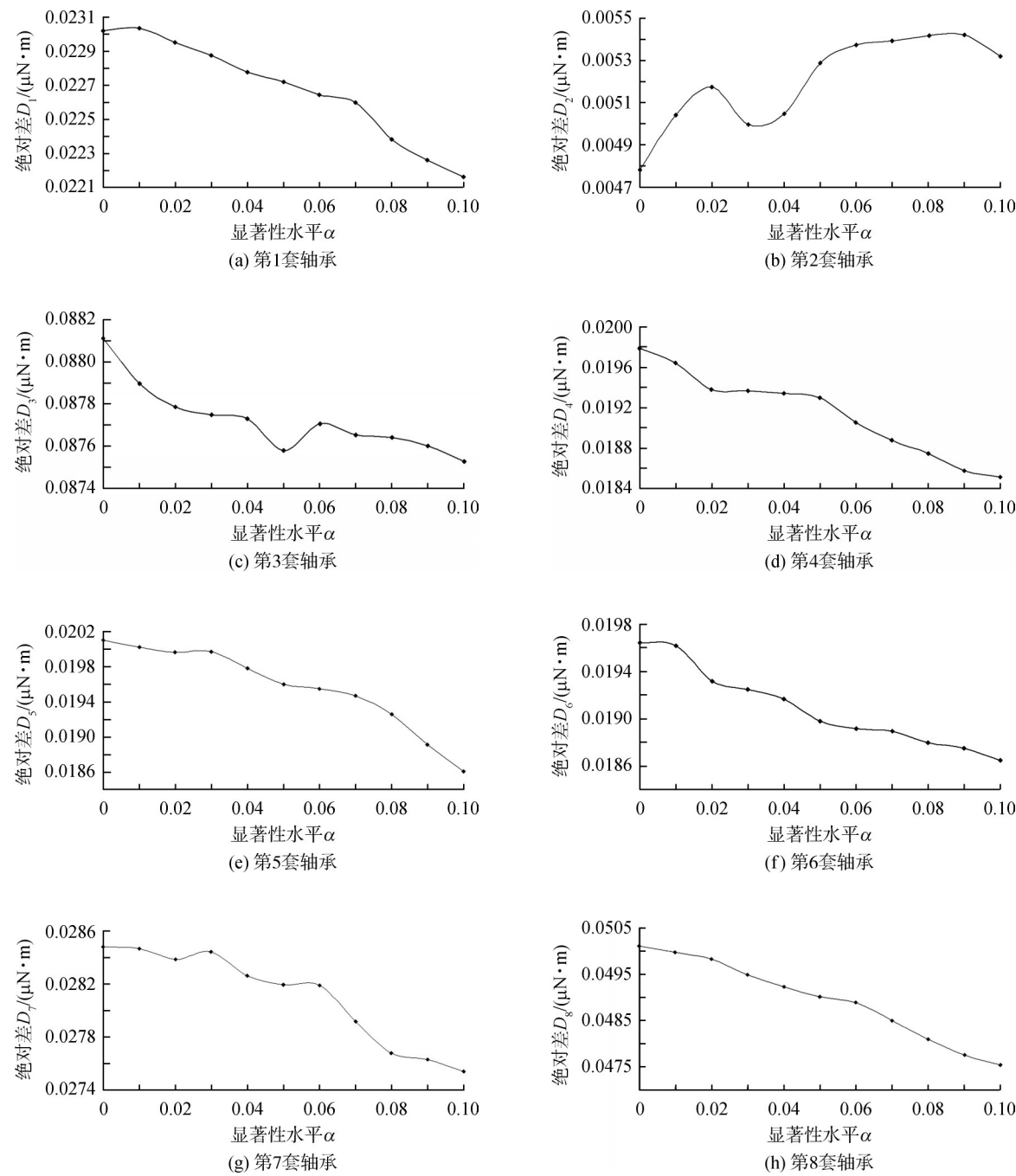


图 4 1~10 套 HKTA 滚动轴承摩擦力矩中位数、平均值及标准差

Fig.4 Median, mean and standard deviation of the friction torque on 1—10 sets HKTA rolling bearings

摩擦力矩平均值范围是 $[0.159\ 440, 0.639\ 096]$, 摩擦力矩的方差范围是 $[0.017\ 522\ 0, 0.035\ 533\ 9]$, 从变化趋势三者没有明显的规律, 说明滚动轴承摩擦力矩数据的大小、分布、变化趋势具有多样性、复杂性, 为了更好地分析滚动轴承摩擦力矩的特点, 利用数据中位数与 Huber M 融合方法来获取滚动轴承摩擦力矩的先验函数, 在 $0\sim 0.1$ 显著性水平范围内, 中位数与稳健数据均值之间的差值 D 具体见图 5。



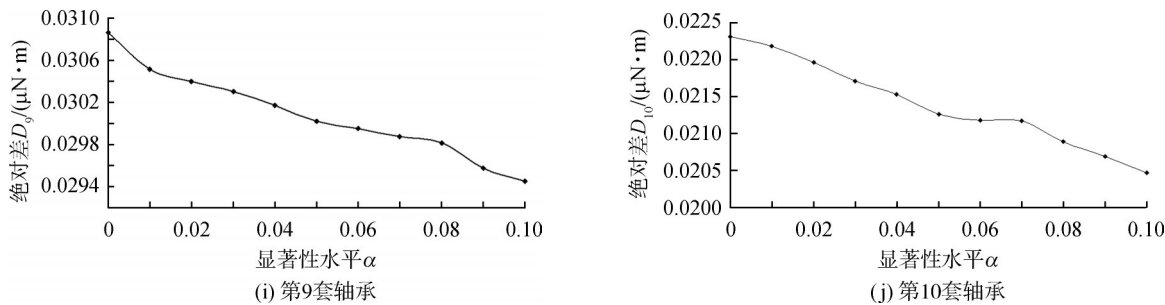


图 5 1~10 套 HKTA 滚动轴承摩擦力矩 D 图
Fig.5 D charts of the friction torque on 1—10 sets HATA rolling bearings

根据滚动轴承摩擦力矩 D 图,可以看出在显著性水平在 0~0.1 范围内,除第 2 套轴承外,随着显著性水平的增加 D 值减小,说明摩擦力矩数据中确实存在部分离散数据。在显著性水平为 0.1 时, D 值最小,即有 10% 的摩擦力矩数据为离散数据。为此,将该部分离散数据进行稳健化处理,得到摩擦力矩稳健化数据。分析稳健实验数据的参数特点,结果见图 6。

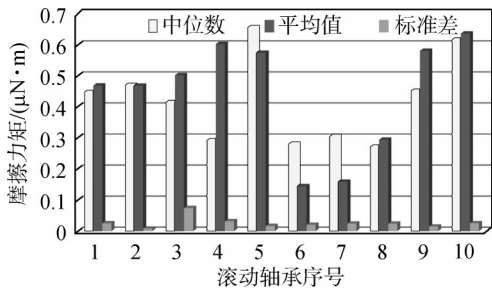


图 6 1~10 套 HKTA 滚动轴承摩擦力矩稳健数据中位数、平均值及标准差
Fig.6 Median, mean and standard deviation of the robust data of the friction torque on 1—10 sets HATA rolling bearings

根据图 4、图 6 数据对比,发现稳健数据中的中位数没有发生变化,而平均值及标准差比实验数据的平均值及标准差小,说明数据稳健化处理确实减小离散数据对总体数据的影响,增强了数据的稳健性。

以稳健实验数据建立贝叶斯先验分布,根据 $D_{\min}$ 及式(16)~式(19)得到先验函数参数,结果见表 2。

根据式(3)、式(4)、式(7)、式(8)、式(18)、式(19)计算贝叶斯后验分布参数,结果见表 3。

根据贝叶斯后验函数及先验分布的显著性水平以及式(20)、式(21)、式(22)得到不确定度,结果如表 4。

表 2 1~10 套 HKTA 滚动轴承摩擦力矩先验分布参数
Table 2 Prior distribution parameters of the friction torque on 1—10 sets HKTA rolling bearings

No.	α_i	$\eta_i/(\mu\text{N}\cdot\text{m})$	$\nu_i/(\mu\text{N}\cdot\text{m})$
1	0.1	0.469 139	0.025 387 0
2	0	0.468 772	0.024 227 9
3	0.1	0.502 728	0.074 691 0
4	0.1	0.602 863	0.032 147 0
5	0.1	0.574 911	0.017 044 0
6	0.1	0.145 081	0.020 592 0
7	0.1	0.159 120	0.024 559 0
8	0.1	0.294 858	0.024 243 0
9	0.1	0.581 222	0.015 179 0
10	0.1	0.636 710	0.029 794 7

表 3 1~10 套 HKTA 滚动轴承摩擦力矩后验分布参数
Table 3 Posterior distribution parameters of the friction torque on 1—10 sets HKTA rolling bearings

No.	$\eta^*/(\mu\text{N}\cdot\text{m})$	$\sigma^*/(\mu\text{N}\cdot\text{m})$
1	0.470 102	0.014 375 7
2	0.465 615	0.024 227 9
3	0.503 583	0.011 828 2
4	0.604 370	0.017 341 2
5	0.576 635	0.009 789 17
6	0.145 081	0.020 592
7	0.159 440	0.013 793
8	0.296 702	0.014 657
9	0.582 850	0.008 550 83
10	0.639 096	0.029 794 7

表 4 1~10 套 HKTA 滚动轴承摩擦力矩贝叶斯方法的不确定度

Table 4 Uncertainties of the Bayesian method of the friction torque on 1-10 sets HKTA rolling bearings

No.	不确定度		
	$M_i/(\mu\text{N}\cdot\text{m})$	$P_i/\%$	$U_i/(\mu\text{N}\cdot\text{m})$
1	0.470 102	90	[0.470 079, 0.470 126]
2	0.465 615	100	[0.344 718, 0.586 513]
3	0.503 583	90	[0.463 000, 0.543 560]
4	0.604 370	90	[0.545 740, 0.663 002]
5	0.576 634 9	90	[0.543 537, 0.620 234]
6	0.145 081	90	[0.128 558, 0.164 669]
7	0.159 440	90	[0.136 681, 0.182 199]
8	0.296 702	90	[0.272 517, 0.320 887]
9	0.582 850	90	[0.553 940, 0.611 762]
10	0.639 096	90	[0.490 420, 0.787 771]

为了比较贝叶斯方法和经典统计学方法建立不确定度特点,经典统计学置信水平及式(23)、式(24)、式(25)建立经典统计学不确定度,结果见表5。

从表4、表5中可以看出在相同的置信水平

表 5 1~10 套 HKTA 滚动轴承摩擦力矩经典统计学的不确定度

Table 5 Uncertainties of the classic statistics of the friction torque on 1-10 sets HKTA rolling bearings

No.	不确定度		
	$C_{Mi}/(\mu\text{N}\cdot\text{m})$	$C_{Pi}/\%$	$C_{Ui}/(\mu\text{N}\cdot\text{m})$
1	0.470 103	90	[0.421 497, 0.518 709]
2	0.465 615	100	[0.344 718, 0.586 513]
3	0.503 584	90	[0.463 000, 0.543 560]
4	0.604 371	90	[0.545 740, 0.663 002]
5	0.576 636	90	[0.543 537, 0.620 234]
6	0.148 351	90	[0.109 821, 0.186 881]
7	0.159 440	90	[0.113 922, 0.204 958]
8	0.296 702	90	[0.248 333, 0.345 071]
9	0.582 851	90	[0.553 940, 0.611 762]
10	0.639 096	90	[0.490 420, 0.787 771]

下,贝叶斯区间评估明显要短于经典统计学区间评估,说明贝叶斯区间评估的误差小,使用稳健化处理后的数据作为先验分布,结果可以提高数据评估的精度。根据区间长度对比,贝叶斯区间长度约为经典区间长度的 0~0.5,即评估精度提高了 0~50%,不同轴承精度提高的程度有所不同。

4 讨 论

本文根据文献[39-40]建立滚动轴承摩擦力矩为方差已知、均值未知、均值先验分布为正态分布的贝叶斯数学模型,并推断出该数学模型下摩擦力矩的后验函数服从正态分布,从原理说明该数学模型是合理、可行的,用先验函数弥补数学模型带来的误差。

将中位数估计和 Huber M 估计相结合的方法对实验数据进行处理,两者不需要知道数据的分布类型、置信水平,确定未知分布实验数据的稳健问题,同时根据平均值与中位数的接近程度确定了实验数据的显著性水平和 Huber M 边界值问题,根据图4和图6结果显示该方法可以提高实验数据的稳健性,为未知分布数据置信水平的确定以及 Huber M 边界值确定给出了依据。

从表4、表5结果可知,在相同置信水平下,贝叶斯区间评估的精度明显高于经典统计学区间评估的精度;同时与模糊理论方法确定的区间相比,在相同置信水平下,该方法不确定度区间明显小于模糊理论确定的区间^[42],可以作为提高区间评估精度的依据。根据式(7)、式(8)也可以说明该数学模型的均值和方差小于等于经典统计学的结果,说明稳健数据可以作为贝叶斯评估的经验函数,并且缩短评估区间。

该方法的不足是需要知道数据分布的特点,根据数据特点建立数据分布相应的数学模型。本文只研究了一定范围显著性水平的数据特点,需要进一步研究数据的显著性特点。

5 结 论

本文使用将中位数估计和 Huber M 估计融合方法对滚动轴承摩擦力矩数据进行处理,构建贝叶斯先验分布和置信水平;根据数据近似正态性特征构建贝叶斯后验分布,以贝叶斯后验分布建立滚动轴承摩擦力矩不确定度,其不确定度具有准确的置信水平和较高的精度,为未知分布实验数据不确定度建立提供一种方法。

参考文献:

- [1] IKER H, JOSU A, MIKEL A. Friction torque in four contact point slewing bearings: effect of manufacturing errors and ring stiffness[J]. Mechanism and Machine Theory, 2017, 112: 145-154.
- [2] JING Liu, YANG Zhanglin, SHAO Yimin. An investigation for the friction torque of a needle roller bearing with the roundness error[J]. Mechanism and Machine Theory, 2018, 121: 259-272.
- [3] GONÇALVES D, PINHO S, GRAÇA B, et al. Friction torque in thrust ball bearings lubricated with polymer greases of different thickener content[J]. Tribology International, 2016, 96(4): 87-96.
- [4] GONÇALVES D, COUSSEAU T, GAMA A, et al. Friction torque in thrust roller bearings lubricated with greases, their base oils and bleed-oils[J]. Tribology International, 2017, 107(12): 306-319.
- [5] HAMMAMI M, MARTINS R, FERNANDES C, et al. Friction torque in rolling bearings lubricated with axle gear oils[J]. Tribology International, 2018, 119(3): 419-435.
- [6] YANG Weixu, WANG Xiaoli, LI Hanqing, et al. A novel tribometer for the measurement of friction torque in microball bearings[J]. Tribology International, 2017, 114(10): 402-408.
- [7] GAN K G, ZAITOV L M. Investigation into the dependence of the friction moment of high speed self lubrication ball bearing on the duration of the work rotational and load[J]. Soviet Engineering Research, 1990, 10(2): 41-46.
- [8] 白越, 杨作起, 黎海文, 等. 储能/姿控一体化飞轮能耗实验研究[J]. 光学精密工程, 2007, 15(2): 243-247.
- BAI Yue, YANG Zuoqi, LI Haiwen, et al. Experimental study on power loss of integrated energy storage and attitude control flywheel[J]. Optics and Precision Engineering, 2007, 15(2): 243-247. (in Chinese)
- [9] SOCHTING S, SHERRINGTON I, LEWIS S D, et al. An evaluation of the effect of simulated launch vibration on the friction performance and lubrication of ball bearing for space applications[J]. Wear, 2006, 260(11/12): 1190-1202.
- [10] VISNADI L B, DE CASTRO H F. Influence of bearing clearance and oil temperature uncertainties on the stability threshold of cylindrical journal bearings[J]. Mechanism and Machine Theory, 2019, 134: 57-73.
- [11] MAO Wengui, LI Jianhua, HUANG Zhonghua, et al. Bearing dynamic parameters identification for a sliding bearing-rotor system with uncertainty[J]. Inverse Problems in Science and Engineering, 2018, 26(8): 1094-1108.
- [12] DHANISH P B, MATHEW J. Effect of CMM point coordinate uncertainty on uncertainties in determination of circular features[J]. Measurement, 2006, 39(6): 522-531.
- [13] WILLINK R, LIRA I A. A united interpretation of different uncertainty intervals[J]. Measurement, 2005, 38(1): 61-66.
- [14] RATEL G. Evaluation of the uncertainty of the degree of equivalence[J]. Metrologia, 2005, 42: 140-144.
- [15] CORDERO R R, ROTH P. Revisiting the problem of the evaluation of the uncertainty associated with a single measurement[J]. Metrologia, 2005, 42: 115-119.
- [16] KIAN P, DILEEP S. Uncertainty estimates in the fuzzy-product-limit estimator[J]. International Journal of Uncertainty, Fuzziness and Knowledge-based System, 2005, 13(1): 11-26.
- [17] RARNAN R, GRILLO P. Minimizing uncertainty in vapour cloud explosion modeling[J]. Process Safety and Environmental Protection, 2005, 83(4): 298-306.
- [18] XIA Xintao, WANG Zhongyu, GAO Yongsheng. Estimation of non-statistical uncertainty using fuzzy-set theory[J]. Measurement Science and Technology, 2000, 11(4): 430-435.
- [19] 夏新涛, 贾晨辉, 王中宇, 等. 滚动轴承摩擦力矩的乏信息模糊预报[J]. 航空动力学报, 2009, 24(2): 945-950.
- XIA Xintao, JIA Chenhui, WANG Zhongyu, et al. Fuzzy prediction of rolling bearing friction torque using information poor system theory[J]. Journal of Aerospace Power, 2009, 24(2): 945-950. (in Chinese)
- [20] 夏新涛, 陈晓阳, 张永振, 等. 滚动轴承乏信息实验分析与评估[M]. 北京: 科学技术出版社, 2007.
- [21] 夏新涛, 陈晓阳, 张永振, 等. 航天轴承摩擦力矩不确定度的灰自助动态评估[J]. 哈尔滨工业大学学报, 2006, 38(7): 294-297.
- XIA Xintao, CHEN Xiaoyang, ZHANG Yongzhen, et al. Dynamic assessment for uncertainty of friction moment of space bearing using grey bootstrap[J]. Journal of Harbin Institute of Technology, 2006, 38(7): 294-297. (in Chinese)
- [22] 王中宇, 夏新涛, 朱坚民. 非统计及其工程应用[M]. 北京: 科学出版社, 2005.
- [23] 夏新涛, 陈晓阳, 张永振, 等. 航天轴承摩擦力矩的最大熵概率分布与bootstrap推断[J]. 宇航学报, 2007, 28(5): 1395-1400.
- XIA Xintao, CHEN Xiaoyang, ZHANG Yongzhen, et al. Maximum entropy probability distribution and bootstrap inference of space bearing friction moment[J]. Journal of Astronautics, 2007, 28(5): 1395-1400. (in Chinese)
- [24] 夏新涛, 陈晓阳, 张永振, 等. 滚动轴承振动的灰自助动态评估与诊断[J]. 航空动力学报, 2007, 22(1): 156-162.
- XIA Xintao, CHEN Xiaoyang, ZHANG Yongzhen, et al. Dynamic assessment and diagnosis of vibration of rolling bearing using grey bootstrap[J]. Journal of Aerospace Power, 2007, 22(1): 156-162. (in Chinese)
- [25] 夏新涛, 徐永智, 金银平, 等. 用自助加权范数法评估三参数威布尔分布可靠性最优置信区间[J]. 航空动力学报, 2013, 28(3): 481-488.
- XIA Xintao, XU Yongzhi, JIN Yinping, et al. Assessment for optimum confidence interval of reliability with three-parameter Weibull distribution using bootstrap weighted-norm method[J]. Journal of Aerospace Power, 2013, 28(3): 481-488. (in Chinese)
- [26] 夏新涛, 王中宇, 孙立明, 等. 滚动轴承振动与噪声关系的

- 灰色研究[J].航空动力学报,2004,19(3):424-428.
- XIA Xintao, WANG Zhongyu, SUN Liming, et al. On relationship between vibration and noise of rolling bearing using grey system theory[J]. Journal of Aerospace Power, 2004, 19(3):424-428. (in Chinese)
- [27] 张耀强,陈建军,邓四二,等.考虑表面波纹度的滚动轴承-转子系统非线性动力特性[J].航空动力学报,2008,23(9):1731-1736.
- ZHANG Yaoqiang, CHEN Jianjun, DENG Sier, et al. Non-linear dynamic characteristics of a rolling bearing-rotor system with surface waviness[J]. Journal of Aerospace Power, 2008, 23(9):1731-1736. (in Chinese)
- [28] 苗学问,田喜明,洪杰.基于支持向量机的滚动轴承状态寿命模型[J].航空动力学报,2008,23(12):2190-2195.
- MIAO Xuewen, TIAN Ximing, HONG Jie. Grade-life model of rolling bearing based on support vector machine[J]. Journal of Aerospace Power, 2008, 23(12):2190-2195. (in Chinese)
- [29] 唐云冰,高德平,罗贵火.滚动轴承非线性轴承力及其对轴承系统振动特性的影响[J].航空动力学报,2006,21(2):366-373.
- TANG Yunbing, GAO Deping, LUO Guihuo. Non-linear bearing force of the rolling ball bearing and its influence on vibration of bearing system[J]. Journal of Aerospace Power, 2006, 21(2):366-373. (in Chinese)
- [30] VIITALA R, WIDMAIER T, HEMMING B, et al. Uncertainty analysis of phase and amplitude of harmonic components of bearing inner ring four-point roundness measurement[J]. Precision Engineering, 2018, 54(10):118-130.
- [31] 师义民,许勇,周丙常.近代统计方法[M].北京:高等教育出版社,2011.
- [32] YU Jun, XU Yonggang, YU Guangbin, et al. Fault severity identification of roller bearings using flow graph and non-naive Bayesian inference[J]. Mechanical Engineering Science, 2019, 233(14):5161-5171.
- [33] SUN Shuang, PRZYSTUPA K, MING Wei, et al. Fast bearing fault diagnosis of rolling element using Lévy Moth-Flame optimization algorithm and Naive Bayes[J]. Eksploatacja i Niezawodność: Maintenance and Reliability, 2020, 22(4):730-740.
- [34] ZHANG Nannan, WU Lifeng, JING Yang, et al. Naive bayes bearing fault diagnosis based on enhanced independence of data[J]. Sensors, 2018, 18(2):1-17.
- [35] 王岩,罗倩,邓辉.基于变分贝叶斯的轴承故障诊断方法[J].计算机科学,2019,46(11):323-327.
- WANG Yan, LUO Qian, DENG Hui. Bearing fault diagnosis method based on variational Bayes[J]. Computer Science, 2019, 46(11):323-327. (in Chinese)
- [36] LUO Zuolong, DONG Fenghui. Statistical investigation of bearing capacity of pile foundation based on bayesian reliability theory[EB/OL]. [2021-05-02]. <https://doi.org/10.1155/2019/9858617>.
- [37] ZHANG Nannan, WU Lifeng, WANG Zhonghua, et al. Bearing remaining useful life prediction based on Naive Bayes and Weibull distributions[J]. Entropy, 2018, 20:1-19.
- [38] GAO Tianhong, LI Yuxiong, HUANG Xianzhen, et al. Data-driven method for predicting remaining useful life of bearing based on Bayesian theory[J]. Sensors, 2021, 21(1):182-197.
- [39] 徐永智,夏新涛.用遗传变异法评估航天轴承摩擦力矩[J].轴承,2014(1):27-31.
- XU Yongzhi, XIA Xintao. Assessment of friction torque for space bearings using genetic-variation method[J]. Bearing, 2014(1):27-31. (in Chinese)
- [40] 夏新涛,徐永智.滚动轴承性能变异的近代统计学分析[M].北京:科学出版社,2016.
- [41] 夏新涛,朱坚民,吕陶梅.滚动轴承摩擦力矩乏信息推断[M].北京:科学出版社,2010.
- [42] 夏新涛,章宝明,徐永智.滚动轴承性能与可靠性乏信息变异过程评估[M].北京:科学出版社,2013.

(编辑:陈越)