

航天轴承摩擦力矩的参数-非参数融合性分析

徐永智¹, 夏新涛²

(1. 西北工业大学 机电学院, 西安 710072;

2. 河南科技大学 机电工程学院, 河南 洛阳 471003)

摘 要: 提出参数-非参数融合性方法分析航天轴承摩擦力矩性能,该方法用统计方法判断航天轴承摩擦力矩的基本特征;用符号判断法确定航天轴承摩擦力矩的时序特征;用秩和判断法判断航天轴承摩擦力矩状态特征;融合 3 种方法系统分析航天轴承摩擦力矩总体性能,实现航天轴承摩擦性能的评估.该方法可以降低数据符号,偏离平均值较大、较小及不同数据排列顺序对航天轴承总体性能的影响,正确反映航天轴承的工作性能和稳定性能、时序特征及状态特征,全面系统地揭示航天轴承的总体性能.根据工作性能与稳定性能,性能比较好的航天轴承被确定,进一步根据航天轴承的时序特征和状态特征选出总体性能最优的轴承,置信水平可以达到 99%,和现行选用的航天轴承一致,表明该方法反映航天轴承摩擦力矩信息多,可以从少数航天轴承中得到总体性能最优的轴承.

关 键 词: 非参数评估;基本特征;时序特征;状态特征;符号判断法;秩和判断法

中图分类号: V21; TH133.33

文献标志码: A

Analysis of parameter-nonparametric fusion on space bearing friction moment

XU Yong-zhi¹, XIA Xin-tao²

(1. School of Mechanical Engineering,

Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China;

2. School of Mechatronics Engineering,

Henan University of Science and Technology, Luoyang Henan 471003, China)

Abstract: Parameter-nonparametric fusion method was put forward to analyze the characteristic of space bearing friction moment, by using statistical method to judge the basic characteristic of space bearing friction moment; symbol judgment method was used to determine the time sequence characteristic of space bearing friction moment; while rank sum judgment method was used to determine the state characteristic of space bearing friction moment; these three methods were fused to analyze the overall characteristic of space bearing friction moment, in order to evaluate the friction characteristic of space bearing. The method can avoid the effect of the plus or minus and some mini-max values and time sequence on overall characteristic of space bearing. The basic characteristic, the time sequence characteristic and the state characteristic of space bearing were discovered to reflect the overall characteristic on space bearing; the results show that the better space bearing are determined according to working performance and stabilization of the space bearing, at the same time, on the basis of the time sequence and state characteristic of the space bearing, the optimal overall space bearing was chosen, with the credibility up to 99%, in line with the current selection of

space bearings; there were more information of the space bearing with use of the fusion method, showing that the fusion method could choose the space bearing of the optimal overall characteristic from a handful of space bearings.

Key words: nonparametric evaluation; basic characteristic;
time sequence characteristic; state characteristic;
symbol judgment method; rank sum judgment method

滚动轴承摩擦力矩是轴承制造、装配、环境等综合因素的体现,主要用来反映轴承在工作中的摩擦与润滑状态,是行业用来评价轴承运转灵活性的重要指标;在航天领域中,滚动轴承摩擦力矩直接影响到动力信号传递的准确性以及工作的稳定性与可靠性^[1-2],对滚动轴承摩擦力矩的合理正确评估一直受到相关工程与学术界的关注。

目前研究表明,滚动轴承摩擦力矩的理论计算值与试验值之间有显著差异,特别是动态滚动轴承摩擦力矩的计算很困难^[1],主要原因是影响滚动轴承摩擦力矩因素很多,且具有不确定性,滚动轴承摩擦力矩的动态测量有一个时间积累过程,有不确定的强烈波动和趋势变化,属于概率与趋势规律未知的乏信息系统^[3];夏新涛等用模糊理论对滚动轴承摩擦力矩进行预报,通过对滚动轴承摩擦力矩建立隶属函数来研究摩擦力矩^[4];夏新涛、王中宇等用近年来兴起的乏信息系统原理来分析滚动轴承摩擦力矩^[5-7],用最大熵概率分布与 bootstrap 方法来推断滚动轴承摩擦力矩^[8],这些文章从不同方面揭示滚动轴承摩擦力矩的特征,为滚动轴承摩擦力矩的进一步研究提供了很好的经验。在滚动轴承摩擦力矩测量过程中有许多不确定因素影响,如环境湿度、温度等,势必造成测量数据的差异,特别一些大的离散值的出现,可能是变异数值也可能是测量误差,都会造成摩擦力矩评估的差异,而一些现代航空系统对航天轴承的可靠性有严格的要求,才能保证安全可靠运行^[9-12],夏新涛、张耀强、唐云冰、苗学问等分别用灰度理论^[13-14]、自助加权范数法^[15]、非线性法^[16-17]、支持向量机^[18]等方法研究了滚动轴承的不同性能,国外一些学者用优化极大似然函数的变邻域搜索与模拟退火法^[19]、随机数法^[20]、高阶统计量法^[21]、矩与概率加权矩法^[22]来评估轴承的性能,但这些方法是从参数或者非参数来研究轴承性能,参数评估法过分依据数据,非参数评估法忽略数据具体数值对轴承性能的影响,单一参数或非参数评估法不能全面反映轴承的性能,尤其对于总体性能要求很高的航天轴承采用单一评估

法分析轴承性能是不可取的,基于此本文在航天轴承摩擦力矩参数评估基础上,提出航天轴承摩擦力矩的参数-非参数融合性分析,从不同方面挖掘摩擦力矩的更多信息,实现对航天轴承摩擦力矩更准确的把握,为航天轴承的选用提供有力的依据。

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,采集到航天轴承摩擦力矩的数据序列向量

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

式中 $x(t)$ 为时刻 t 的摩擦力矩数据。

从 $\mathbf{X}$ 中取出第 m 套轴承的摩擦力矩数据,构成时刻 t 的摩擦力矩向量

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

参数-非参数融合性方法适用于对精密度要求高的零部件进行总体性能分析,本文从航天轴承基本特征、时序特征、状态特征 3 个特征来反映航天轴承的总体性能。

1.1.1 航天轴承基本特征

航天轴承基本特征是反映航天轴承工作性能及其稳定性能的指标,计算方法是从航天轴承摩擦力矩的数据中计算出航天轴承摩擦力矩的平均值及方差,计算过程中除去数据符号的影响,数据均采用绝对值,从而揭示航天轴承摩擦力矩的基本特征,根据从测得的数据中提取的工作性能参数 X_m^h 、灵敏性能参数 X_m^c 来反映航天轴承的稳定性能

$$X_m^h = \frac{\sum_{t=1}^n |x_m(t)|}{n} \quad (3)$$

$$X_m^c = \frac{\sum_{t=1}^n (|x_m(t)| - X_m^h)^2}{n} \quad (4)$$

1.1.2 航天轴承时序特征

航天轴承时序特征主要反映航天轴承同一时刻摩擦力矩优劣的情况,为了避免粗大数据对整体情况的影响采用符号评判法来判断,对航天轴承摩擦力矩的具体状况作出合理的评估,具体步骤如下:

1) 给出样本 $\mathbf{X}_m(t); t=1,2,\dots; m=1,2,\dots$

2) 令

$$Z_i = \begin{cases} 1 & X_i(t) < X_j(t) \\ 0 & X_i(t) > X_j(t) \end{cases}$$

$$i \neq j \quad t = 1, 2, \dots, n \quad Z = \sum_{i=1}^n Z_i$$

$$Z \sim B(n, P) \quad (5)$$

式中 Z 为同一时间航天轴承摩擦力矩的时序特征参数,服从 $B(n, P)$ 的 3 项分布.

3) 根据显著性水平 α , 确定临界值 C .

4) 若 $Z > C$, 则说明第 i 轴承总体性能优于第 j 轴承, 否则第 j 轴承总体性能优于第 i 轴承.

1.1.3 航天轴承状态特征

航天轴承状态特征是反映每套航天轴承摩擦力矩在总体摩擦力矩中所处的状况, 分析该套摩擦力矩的总体特征. 具体方法是按照总体摩擦力矩大小排列顺序, 每套航天轴承摩擦力矩在总体中的位置即为该摩擦力矩的秩, 计算出航天轴承摩擦力矩的秩和来反映该套航天轴承摩擦力矩在总体摩擦力矩中的具体情况, 能有效避免航天轴承摩擦力矩顺序不合理的影响, 从而对航天轴承摩擦力矩的分布情况做出合理评估. 秩和评判法, 其具体步骤如下:

1) 设 $X_i(t)$ 为来自总体样本 $\mathbf{X}$ 的一个样本, $\{X_i(1), X_i(2), \dots, X_i(n)\}$ 为该样本的观测值, 记 $\{X_{(i)}(1), X_{(i)}(2), \dots, X_{(i)}(n)\}$ 为该样本的次序统计量, 定义如果 $X_i(m) = X_{(i)}(k)$, 那么 $X_i(m)$ 的秩为 $R_{(i)}(k)$, 该样本 $\{X_i(1), X_i(2), \dots, X_i(n)\}$ 的秩为

$$R_i = \sum_{k=1}^m R_{(i)}(k) \quad m \leq n$$

2) 设 $\{X_i(1), X_i(2), \dots, X_i(n)\}$, $\{X_j(1), X_j(2), \dots, X_j(n)\}$ 是来自总体 $\mathbf{X}$ 的任意两个样本, 把这两个样本的值混合在一起按从小到大的顺序排列 $\{X_{(i)}(1), X_{(i)}(2), \dots, X_{(i)}(n)\}$ 及 $\{X_{(j)}(1), X_{(j)}(2), \dots, X_{(j)}(n)\}$, $X_i(t)$ 的秩就是按照顺序所在位置的次序号数, 记为 $R(X_{(i)}(t))$, 秩和为

$$R_{X_i} = \sum_{i=1}^m R(X_{(i)}(t))$$

$$R_{X_j} = \sum_{j=1}^m R(X_{(j)}(t)) \quad (6)$$

3) 根据显著性水平 α , 利用正态分布确定置信水平 $u_{\alpha/2}$.

4) 计算航天轴承摩擦力矩状态特征参数

$$R = \frac{R_{X_i} - i(i+j+1)/2}{\sqrt{ij(i+j+1)/12}} \quad (7)$$

式中 R 为试验样本置信水平下标准秩; i, j 为数据组数, 分别为 1 和 2.

5) 如果 $R \geq u_{\alpha/2}$, 第 i 轴承时序特征次于第 j 轴承; 如果 $R < u_{\alpha/2}$, 第 i 轴承时序特征与第 j 轴承时序特征没有明显区别.

1.2 评判方法

1.2.1 航天轴承基本特征评判方法

航天轴承基本特征用工作性能参数 X_m^h 和灵敏性参数 X_m^c 来反映, X_m^h 代表轴承的工作性能, 数值越小表示该轴承的工作性能越好; X_m^c 用来评价航天轴承的稳定性能, 其数值越小, 轴承的稳定越好; X_m^h 值大而 X_m^c 值小表示航天轴承振动剧烈但性能稳定; X_m^h 值小而 X_m^c 值大, 表示工作性能好但性能不稳定; X_m^h 和 X_m^c 值均大表示该轴承振动性能不好, 稳定性能也不好, 两者综合反映航天轴承摩擦力矩工作性能及稳定性, 为初步分析航天轴承摩擦力矩奠定了基础.

1.2.2 航天轴承时序特征评判方法

航天轴承时序特征评估中, 显著性水平 α 是衡量航天轴承摩擦力矩水平的状态参数, 该数值越小说明比较结果差异越大, 数值越大说明比较结果差异越小, 一般采用 0.01, 0.05, 对于一般设备摩擦力矩置信水平要求为 95%, 对于重要设备摩擦力矩置信水平要求 99%~100%; Z_i 表示该套轴承摩擦力矩大于另外航天轴承摩擦力矩的次数, 该数值越大表明该套轴承与其他轴承相比润滑及其运转灵敏性越差; C 是在具体样本空间中显著性水平 α 条件下 Z_0 的标准值, 表示一个基准值, 大于该数值表示相差的等级达到某种程度.

该方法综合两套航天轴承摩擦力矩总体情况判断航天轴承摩擦力矩的时序特征, 避免数据中个别较大、较小数据的影响, 反映航天轴承摩擦力矩具体对比状况, 进一步说明航天轴承摩擦力矩的时序特征.

1.2.3 航天轴承状态特征评判方法

航天轴承状态特征评判方法是采用秩和判断法,该方法可以有效解决不同数值排列顺序对航天轴承摩擦力矩的影响,秩和 R_{X_i} 数值越大表明该套航天轴承摩擦力矩排列顺序越靠后,其状态特征越差,也就是该轴承摩擦性能不好;由于该试验数据为2048个,用正态分布来模拟航天轴承摩擦力矩的特征分布,根据显著性水平 α ,利用正态分布确定 $u_{\alpha/2}$,计算 R 并与 $u_{\alpha/2}$ 比较,得出这两套航天轴承摩擦力矩时序特征的优劣.

最后汇总 3 种方法的结果来综合判断航天轴承摩擦力矩的特征,从少数几套航天轴承中选出性能最优的轴承.

2 试验及数据分析

随机抽出 10 套航天轴承测量摩擦力矩数据,试验目的是测量航天轴承摩擦力矩,从中选出摩擦性能最好的轴承.

2.1 试验条件及测量原理

试验在室温为 $20\sim 25\text{ }^{\circ}\text{C}$,相对湿度为 55% 以上的条件下进行,环境干净,地基无振动,航天轴承摩擦力矩测量原理如图 1,测量轴承 3 的外圈安装在更换套 4 内,并同更换套一起由传动系统驱动旋转,被测轴承的内圈由更换心轴 2 和销子 1 固定在主轴 6 上,由弹簧 10 通过吊丝 8 施加轴向载荷. 主轴 6 安装在空气轴承 5 内(主轴 6 和空气轴承 5 之间摩擦力矩极小). 外圈转动时,由于轴承 3 内部摩擦力矩的作用,内圈与主轴 6 沿摩擦力矩的方向旋转. 吊丝 8 的一端固定在弹性支座 9 上,另一端与主轴 6 联接,这样吊丝 8 内部就产生扭矩,当扭矩与轴承 3 的摩擦力矩平衡时,主轴 6 不再转动,装在主轴 6 上的吊丝 8(即传感

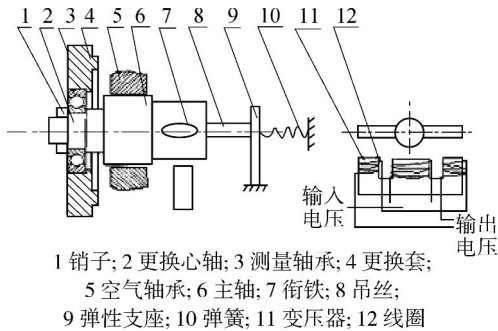


图 1 航天轴承摩擦力矩测量原理图

Fig. 1 Measuring principle diagram of space bearing friction moment

器)根据主轴 6 产生的角度产生相应的电信号,电信号与摩擦力矩大小成正比.

2.2 试验方案

1) 在试验机主轴转速为 2 r/min ,轴向载荷为 15 N 条件下,用专用摩擦力矩测量仪测量航天轴承摩擦力矩,其参数见表 1.

表 1 摩擦力矩测量仪主要技术参数

Table 1 Main technical parameters of friction moment measuring instrument

参数	数值
轴承直径范围/mm	2~8
力矩测量范围/ $(\mu\text{N}\cdot\text{m})$	0~100
轴向载荷/N	1~4
主轴转速/ (r/min)	2
测量值误差/ $(\mu\text{N}\cdot\text{m})$	$-2.5\sim 2.5$
测量值灵敏度/ $((\mu\text{N}\cdot\text{m})/\text{h})$	2.5
气源压力/MPa	$0.35\sim 0.44$

2) 每套轴承进行连续测量和间隔均匀测量,连续记录2048个离散数据数值.

2.3 航天轴承摩擦力矩基本特征

航天轴承摩擦力矩基本特征参数如表 2,从表中可以看到稳定性能参数的量级为 0.1,灵敏性能参数的量级为 0.001,相对量级之比为 1%,表明航天轴承摩擦力矩的变化比较小,数值比较

表 2 航天轴承摩擦性能表

Table 2 Friction performance tables on space bearing

编号	X_m^h	X_m^c	备注
航天轴承 1	0.4830	0.0029	**
航天轴承 2	0.4656	0.0242	**
航天轴承 3	0.2726	0.0026	**
航天轴承 4	0.2970	0.0061	**
航天轴承 5	0.6628	0.0034	***
航天轴承 6	0.1699	0.0062	*
航天轴承 7	0.1566	0.0014	*
航天轴承 8	0.2807	0.0019	**
航天轴承 9	0.4830	0.0029	**
航天轴承 10	0.6863	0.0027	***

注: * 表示航天轴承摩擦力矩稳定性、平稳性良好; ** 表示航天轴承摩擦力矩稳定性、平稳性一般; *** 表示航天轴承摩擦力矩稳定性、平稳性较差.

稳定;航天轴承6、航天轴承7的稳定性、灵敏性特征比较接近,其特征明显优于其他轴承;航天轴承5、航天轴承10的稳定性最差,摩擦激烈,灵敏性一般;航天轴承1、航天轴承2、航天轴承9稳定性较差,灵敏性一般;航天轴承3、航天轴承4、航天轴承8稳定性较好,灵敏性一般,由此可以推断航天轴承6、航天轴承7的摩擦力矩基本特征比较好,为方便作者比较航天轴承摩擦力矩基本特征,把10套航天轴承的基本特征参数列入表2,用*给出等级以供参考。

从航天轴承摩擦力矩基本特征参数公式可以看出该公式除去航天轴承摩擦力矩正负号(方向)的影响来揭示摩擦力矩的特征,包含远离摩擦力矩平均值的数据的影响,在稳定性能参数计算中较大、较小数值以线性方式影响结果,在灵敏性能参数计算中以平方的方式影响结果,很明显航天轴承摩擦力矩基本特征受较大、较小数值影响较大,对要求较严的航天轴承来说很不合理,下面利用符号判断法降低远离摩擦力矩平均值的数据的影响来分析航天轴承摩擦力矩的特点。

2.4 航天轴承摩擦力矩时序特征

根据公式 $Z = \sum_{i=1}^{2048} Z_i = 897$, 该样本容量较大且根据文献[23]知航天轴承摩擦力矩近似服从正态分布,这样 C_1 和 C_2 由下列公式确定:

$$C_1 = \frac{n}{2} - u_{\alpha/2} \frac{\sqrt{n}}{2} \quad (8)$$

$$C_2 = \frac{n}{2} + u_{\alpha/2} \frac{\sqrt{n}}{2} \quad (9)$$

其中 $n = 2048$, $\alpha = 0.01$, 计算结果 $C_1 = 949.3206$, $C_2 = 1098.6704$, 如图2所示(图中总体数据为两个样本 Z_i 之和;99%置信水平数值为在置信水平为99%条件下样本总体数据对应的标准值;样本数值是两个样本中最小的 Z_i 之和)。

图2中总体数据为2048,在置信水平为99%条件下,航天轴承摩擦力矩的时序特征值为949.3206,航天轴承6与航天轴承7摩擦力矩的时序特征值为897,也就是 $Z = 897 < 949.3206 = C_1$,这说明在置信水平为99%条件下,航天轴承6的时序特征与航天轴承7的时序特征有显著区别,航天轴承7的摩擦力矩时序特征优于航天轴承6的摩擦力矩时序特征。

从航天轴承时序分析方法可以知道,该方法弱化了偏远数值的影响,但忽略了数据排列对结果的影响,对于精密度要求很高的航天轴承,需要

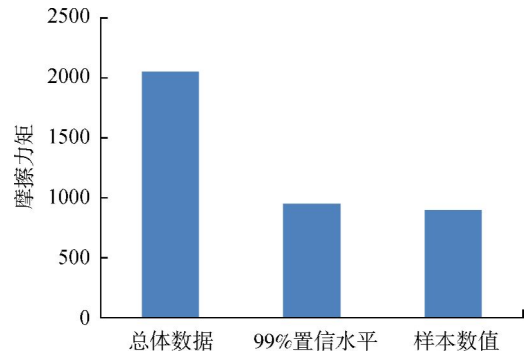


图2 航天轴承6、航天轴承7的时序特征对比

Fig. 2 Comparison of time sequence characteristic on space bearing No. 6 and No. 7

对航天轴承摩擦力矩进行状态分析。

2.5 航天轴承摩擦力矩状态特征

根据式(6)、式(7)得

$$R_{X_1} = \sum_{i=1}^{2048} R[X_{(i)}] = 6664192$$

$$R_{X_2} = 1726464 \quad |R| = 65.2415$$

计算 R , 如果为负取绝对值 $|R|$ 。

由正态分布得到临界值 $u_{0.0005} = 3.3$, 这样 $|R| = 65.2415 > 3.30 = u_{0.0005}$, 根据秩和判定法,说明在置信水平为99%条件下航天轴承6的摩擦力矩状态特征与航天轴承7的摩擦力矩状态特征在综合排序中有显著差别,同时根据图3中航天轴承6、航天轴承7的摩擦力矩秩和的对比可以看出航天轴承6的摩擦力矩数据排列的顺序明显滞后于航天轴承7的排列顺序,说明航天轴承7的摩擦力矩状态特征优于航天轴承6的摩擦力矩状态特征,航天轴承7的摩擦性能优于航天轴承6的摩擦性能(图中总体为两个样本摩擦力矩秩和;航天轴承6、航天轴承7分别表示航天轴承6、航天轴承7摩擦力矩秩和)。

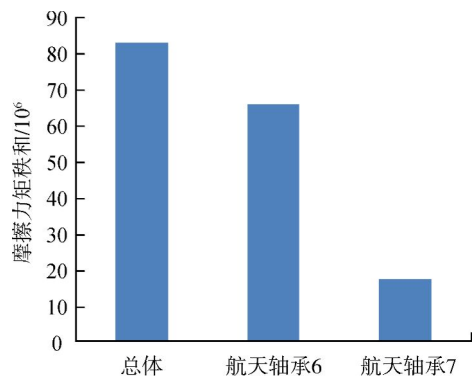


图3 航天轴承6、航天轴承7的摩擦力矩秩和对比

Fig. 3 Comparison of rank sum on space bearing No. 6 and No. 7 friction moment

为了方便系统分析航天轴承摩擦力矩特征,把航天轴承6、航天轴承7的性能特征列于表3,综合航天轴承的基本特征、时序特征、状态特征见表3,航天轴承7摩擦力矩的基本特征优于航天轴承6摩擦力矩的基本特征;同时在显著性水平 $\alpha=0.05$ 下,航天轴承7的摩擦力矩时序特征和状态特征均优于航天轴承6的摩擦力矩时序特征和状态特征,综合考虑航天轴承的3个特征评判航天轴承7的摩擦性能优于航天轴承6的摩擦性能,从而确定试验中10套航天轴承中航天轴承7的摩擦性能最好,这和目前选择的轴承一致,也证明了这种综合方法的可行性。

表3 航天轴承6、航天轴承7摩擦力矩特征参数对比
Table 3 Comparison of characteristic parameters on space bearing No. 6 and No. 7 friction moment

编号	X_m^h	X_m^c	Z	R
航天轴承6	0.1699	0.0062	897	65.2405
航天轴承7	0.1566	0.0014	1151	-65.2405

3 讨论

航天轴承摩擦力矩的参数-非参数融合性分析从不同侧面反映航天轴承摩擦力矩性能的特点,综合反映航天轴承摩擦性能。航天轴承摩擦力矩基本特征从原数据中摒除正负符号的影响来揭示数据的基本特征,不涉及数据的大小和集中、离散排序的分析;航天轴承摩擦力矩的时序特征根据原数据时序分布情况反映数据的时序特征,摒除原数据中极大、极小数据对数据基本特征的影响,侧面显示原数据时序对比情况;航天轴承摩擦力矩的状态特征根据原数据排序情况反映数据集集中、离散状况,摒除由于次序排列的不同造成评估的误差影响,从数据特征、时序排列、状态分布情况全面反映航天轴承摩擦力矩信息。

航天轴承摩擦力矩的3个特征是相互联系、有机结合的同一评估体系,不能从单一特征来判断航天轴承摩擦性能优劣,需综合考虑3个特征反映的综合信息,来评估航天轴承的摩擦性能,能够综合分析航天轴承的摩擦性能的优劣。

4 结论

1) 本文提出参数-非参数融合方法分析航天轴承摩擦力矩的特征,以航天轴承摩擦力矩基本特征、时序特征、状态特征来综合反映航天轴承的

摩擦性能,构建航天轴承摩擦力矩评估方法和参数,为航天轴承摩擦性能的优化选择提供理论依据。

2) 参数-非参数融合性分析可以除去数据符号的影响、降低偏离数据平均值的大数据的影响以及数值不同排列顺序的影响,反映了航天轴承的总体性能。

3) 根据工作性能与稳定性能,性能比较好的航天轴承被确定,进一步根据航天轴承的时序特征和状态特征选出总体性能最优的轴承,置信水平可以达到99%。

参考文献:

- [1] 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.
- [2] 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 and storage and attitude control fly wheel[J]. Optics and Precision Engineering, 2007, 15(2): 243-247. (in Chinese)
- [3] 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.
- [4] 夏新涛, 贾晨辉, 王中宇, 等. 滚动轴承摩擦力矩的模糊预测[J]. 航空动力学报, 2009, 24(4): 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(4): 945-950. (in Chinese)
- [5] 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.
- [6] 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(增刊): 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(suppl.): 294-297. (in Chinese)
- [7] 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.
- [8] 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)
- [9] 赵薇, 张义民. 振动传递路径系统的传递可靠性灵敏度[J]. 航空动力学报, 2012, 27(5): 1080-1086.
ZHAO Wei, ZHANG Yimin. Reliability sensitivity of vibration transfer path systems[J]. Journal of Aerospace Power, 2012, 27(5): 1080-1086. (in Chinese)
- [10] 冯文哲, 刘琦. 成败型产品的 Bayes 可靠性验证试验设计[J]. 航空动力学报, 2012, 27(1): 110-117.
FENG Wenzhe, LIU Qi. Bayesian reliability demonstration test design for binomial distributed product[J]. Journal of Aerospace Power, 2012, 27(1): 110-117. (in Chinese)
- [11] XIA Xintao. Forecasting method for product reliability along with performance data[J]. Journal of Failure Analysis and Prevention, 2012, 12(5): 532-540.
- [12] Pierce D M, Zeyen B, Huigens B M, et al. Predicting the failure probability of device features in MEMS[J]. IEEE Transactions on Device and Materials Reliability, 2011, 11(3): 433-441.
- [13] 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)
- [14] 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)
- [15] 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)
- [16] 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)
- [17] 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)
- [18] 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)
- [19] Abbasi B, Niaki S T A, Khalife M A, et al. A hybrid variable neighborhood search and simulated annealing algorithm to estimate the three parameters of the Weibull distribution[J]. Expert Systems with Applications, 2011, 38(1): 700-708.
- [20] El-Adl M E. Predicting future lifetime based on random number of three parameters Weibull distribution[J]. Mathematics and Computers in Simulation, 2011, 81(9): 1842-1854.
- [21] Bartkute-Norkuniene V, Sakalauskas L. Consistent estimator of the shape parameter of three-dimensional Weibull distribution[J]. Communications in Statistics-Theory and Methods, 2011, 40(16): 2985-2996.
- [22] Toasa Caiza P D, Ummenhofer T. General probability weighted moments for the three-parameter Weibull distribution and their application in S-N curves modeling[J]. International Journal of Fatigue, 2011, 33(12): 1533-1538.
- [23] 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): 27-30.
XU Yongzhi, XIA Xintao. Assessment of friction torque for space bearing using genetic-variation method[J]. Bearing, 2014(1): 27-30. (in Chinese)