

基于乏信息理论的转盘轴承启动摩擦力矩变异分析

夏新涛¹, 樊 睢¹, 陈 龙¹, 刘 静², 王荆鄂²

(1. 河南科技大学机电工程学院, 洛阳 471003; 2. 洛阳 LYC 轴承有限公司, 洛阳 471039)

摘 要: 基于乏信息理论探讨转盘轴承启动摩擦力矩和载荷之间的关系, 以揭示启动摩擦力矩估计真值、波动范围、信息熵、变异系数和概率密度函数的非线性演变特征。在模拟试验中, 采用了 2 种不同的转盘轴承, 对每种轴承改变载荷 5 次, 同时测量内圈表面上均布 6 个点的启动摩擦力矩, 并对试验数据进行变异分析。试验结果表明, 随着载荷的增加, 估计真值非线性增大, 变异系数整体上呈现非线性衰减趋势; 在变异系数的非线性衰减过程中有一个敏感点, 在该点处变异系数异常增大。转盘轴承启动摩擦力矩具有变量不确定性和函数多变性。敏感点的发现可以为轴承的性能改进与测量系统分析提供参考。

关键词: 轴承, 摩擦, 力矩, 转盘轴承, 启动摩擦力矩, 变异系数, 非线性, 不确定性

doi: 10.3969/j.issn.1002-6819.2012.z1.014

中图分类号: TH133

文献标志码: A

文章编号: 1002-6819(2012)-Supp.1-0081-06

夏新涛, 樊 睢, 陈 龙, 等. 基于乏信息理论的转盘轴承启动摩擦力矩变异分析[J]. 农业工程学报, 2012, 28(增刊 1): 81-86.

Xia Xintao, Fan Ju, Chen Long, et al. Variation analysis of starting friction torque for slewing bearing based on poor information theory[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2012, 28(Supp.1): 81-86. (in Chinese with English abstract)

0 引 言

转盘轴承可以承受较大的轴向载荷、径向载荷和倾覆力矩等综合载荷, 在大型农业机械装备中广泛应用。随着科学技术的发展, 为确保大型装备在服务期内安全可靠地运行, 对转盘轴承的性能寿命及其可靠性提出了越来越高的要求^[1-4]。启动摩擦力矩的稳定性和不确定性直接影响大型装备启动与变速的精确性、安全性和可靠性, 是转盘轴承的一个重要性能指标。很多类型的转盘轴承在多变的载荷下工作, 这对启动摩擦力矩随载荷变化的稳定性有很大影响。随着载荷的变化, 如果启动摩擦力矩的变化异常, 会直接影响大型装备的安全启动和稳定运行, 已经引起工程界和学术界的关注^[5-6]。

由于工作条件和轴承结构的复杂性, 启动摩擦力矩的理论计算值和实际测试值相差甚远, 很难建立精确的纯理论模型。目前主要依赖试验研究来评估其性能且有关报道很少, 原因是启动摩擦力矩的内部和外部影响因素众多, 其数值呈现出明显的不确定性和未知的变化趋势, 特别是其概率分布仍然是未知或未确知的, 属于非线性动力学范畴^[6-9]。在乏信息理论中, 轴承性能的非线性动力学特征演变被称为变量的不确定性和函数的多变性^[10-14]。考虑到大型装备昂贵的试验和检测成本, 难以得到很多的启动摩擦力矩试验数据。这样, 依赖于

已知概率分布和大量数据的经典统计理论难以解决这个问题。因此, 转盘轴承启动摩擦力矩的评估成为一个亟待解决的科学技术难题。

乏信息指研究对象呈现的特征信息不完备与不充分, 且缺乏先验知识。数据少, 概率分布未知或趋势未知等都是乏信息的表现^[6]。以乏信息理论为依据, 本文通过改变载荷的试验对转盘轴承启动摩擦力矩进行变异分析, 以揭示其非线性演变特征, 为转盘轴承安全启动与运行建立可靠的前期评估机制。

1 试验数据与变异分析步骤

试验是在专用的试验机上进行的, 选用了 2 种不同的转盘轴承, 内齿双排 4 点接触球轴承和外齿单排 4 点接触球轴承, 分别用代号 B 和 L 表示 (这 2 种轴承为大型转盘轴承, 设计寿命 20 a, 最大往复回转速度 5 r/min。润滑剂采用精制矿物合成油为基础油的低凝抗磨液压油, 在工作过程中由润滑系统定时喷注油脂润滑)。在试验时, 采用 10#机油滴油润滑, 轴承外圈固定不动, 在 800 kN 的轴向载荷下, 对内圈加载不同大小的载荷 (对轴承 B 施加的倾覆力矩为 0, 676, 1 352, 2 028, 2 470 kN·m, 对轴承 L 施加的径向载荷为 0, 42.5, 85, 127.5, 170 kN), 以探讨载荷对轴承启动摩擦力矩的影响。为准确观测启动摩擦力矩, 在轴承内圈圆周上均布标记 6 个点, 经过正反转分别多次测量这些点处的启动摩擦力矩值, 以消除测量系统的不确定性, 经均值滤波后的各点测量数据如图 1 所示。

在给定的载荷下, 从轴承上的 1 个点可以获得 1 个滤波数据, 共有 6 个点, 只能获得 6 个滤波数据。本文

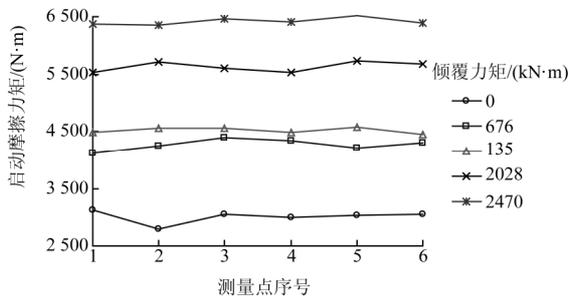
收稿日期: 2011-06-15 修订日期: 2011-11-21

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 (51075123)

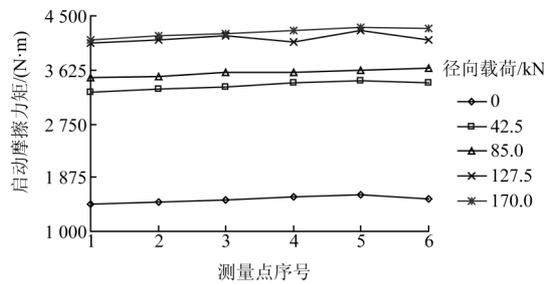
作者简介: 夏新涛 (1957-), 男, 湖南衡东县人, 教授, 博士, 博士生导师, 主要从事滚动轴承性能乏信息试验分析方面的研究。洛阳 河南科技大学机电工程学院, 471003。Email: xiaxt1957@163.com

研究的问题是, 改变载荷 5 次, 每次处理 6 个数据, 探讨启动摩擦力矩随载荷变化的变异程度。为探讨启动摩擦力矩的非线性动力学演变特征即变量的不确定性和函数的多变性, 需要根据各次载荷下的 6 个数据, 构建出相应载荷下启动摩擦力矩的概率密度函数。这是一个乏信息问题, 用乏信息理论解决该问题的步骤如下:

- 1) 用自助法^[6,15]分别对各次载荷下的 6 个数据进行多次抽样, 生成大量的模拟数据;
- 2) 用最大熵法处理模拟数据, 建立对应载荷下启动摩擦力矩的概率密度函数, 得到 1 个本征函数;
- 3) 由本征函数计算估计真值、波动范围、信息熵和变异系数, 得到 4 个乏信息变量;
- 4) 分析本征函数和乏信息变量的演变特征, 诠释变量不确定性和函数多变性的内在机制, 得到转盘轴承启动摩擦力矩的变异规律与表示方法。



a. 轴承 B



b. 轴承 L

图 1 启动摩擦力矩的试验数据

Fig.1 Test data of starting friction torque

2 乏信息变异分析的数学模型

设在载荷 M 下, 各点启动摩擦力矩数据序列 T_M 为

$$T_M = (T_{M1}, T_{M2}, T_{M3}, \dots, T_{Mk}, \dots, T_{Mn}) \quad (1)$$

式中, T_{Mk} 是在载荷 M 下的第 k 点启动摩擦力矩数据, N·m; n 是 T_M 中的数据个数, $n=6$ 。

设对 T_M 进行了第 b 步自助抽样^[15]。从式 (1) 中等概率可放回地抽样 1 次, 获得第 1 个抽样数据 $t_{Bb}(1)$, 如此抽样 $m_D=n$ 次, 得到 m_D 个抽样数据, 构成第 b 个自助样本 T_{Bb} , 设为

$$T_{Bb} = (t_{Bb}(1), t_{Bb}(2), \dots, t_{Bb}(k), \dots, t_{Bb}(m_D)); \quad (2)$$

$$k = 1, 2, \dots, m_D; b = 1, 2, \dots, B$$

式中, m_D 为自助评估因子即自助样本数据序列的数据个数, B 为自助抽样步数即自助样本个数。

由式 (2) 可以得到 1 个含量为 B 的大样本

$$T_{BB} = (t_{B1}, t_{B2}, \dots, t_{Bb}, \dots, t_{BB}) \quad (3)$$

式中

$$t_{Bb} = \frac{1}{m_D} \sum_{k=1}^{m_D} t_{Bb}(k) \quad (4)$$

设启动摩擦力矩为随机变量 t , N·m; 其概率密度函数为 $f(t)$, 则信息熵 H 的表达式为

$$H = - \int_{-\infty}^{+\infty} f(t) \ln f(t) dt \quad (5)$$

最大熵法是在所有可行解中, 满足熵最大的解是最“无偏”的^[10]。因此, 设目标函数为

$$H \rightarrow \max \quad (6)$$

约束条件为

$$\int_S t^i f(t) dt = m_{Mi}; \quad i = 0, 1, 2, \dots, m_M \quad (7)$$

式中, S 为积分空间, $S \in [S_{\min}, S_{\max}]$; m_M 为原点矩的阶数; m_{Mi} 为第 i 阶原点矩。

将式 (3) 中的 t_{Bb} 从小到大排序并分成 $Q-2$ 组, 画直方图, 得到第 q 组的组中值 ξ_q 和频率 $F_q, q=2, 3, \dots, Q-1$ 。再将直方图扩展成 Q 组, 即 $q=1, 2, \dots, Q$, 并令 $F_1=F_Q=0$ 。于是求得式 (7) 中的第 i 阶原点矩 m_{Mi}

$$m_{Mi} = \sum_{q=1}^Q \xi_q^i F_q; \quad i = 0, 1, 2, \dots, m_M \quad (8)$$

由式 (5) ~ (8), 可以获得概率密度函数 $f(t)$ 的表达式

$$f(t) = \exp\left(\lambda_0 + \sum_{i=1}^{m_M} \lambda_i t^i\right) \quad (9)$$

式中, $\lambda_0, \lambda_1, \dots, \lambda_i, \dots, \lambda_{m_M}$ 为拉格朗日乘子。其中, 首个拉格朗日乘子 λ_0 为

$$\lambda_0 = -\ln\left(\int_S \exp\left(\sum_{i=1}^{m_M} \lambda_i t^i\right) dt\right) \quad (10)$$

其他拉格朗日乘子可以由式 (11) 求出

$$m_{Mi} = \frac{\int_S t^i \exp\left(\sum_{i=1}^{m_M} \lambda_i t^i\right) dt}{\int_S \exp\left(\sum_{i=1}^{m_M} \lambda_i t^i\right) dt}; \quad i = 1, 2, \dots, m_M \quad (11)$$

由式 (9) 获得概率密度函数 $f(t)$ 后, 可以计算出启动摩擦力矩的估计真值 T_0 , N·m

$$T_0 = \int_S t f(t) dt \quad (12)$$

设显著性水平 $\alpha \in [0, 1]$, 则置信水平 P 为

$$P = (1 - \alpha) \times 100\% \quad (13)$$

在给定的 P 下, 启动摩擦力矩估计区间 $[T_L, T_U]$ 的下界值 T_L 和上界值 T_U , N·m 分别由式 (14) 和 (15) 求出

$$\frac{\alpha}{2} = \int_{S_{\min}}^{T_L} f(t) dt \quad (14)$$

$$1 - \frac{\alpha}{2} = \int_{S_{\min}}^{T_U} f(t) dt \quad (15)$$

于是得到启动摩擦力矩的波动范围 U , N·m。

$$U = T_U - T_L \quad (16)$$

由式 (12) 和式 (16) 可以得到启动摩擦力矩的变异系数 c

$$c = \frac{U}{T_0} \quad (17)$$

以上推荐了 4 个乏信息量即特征参数 (估计真值 T_0 、波动范围 U 、信息熵 H 和变异系数 c 等) 和 1 个本征函数 (概率密度函数 $f(t)$)，以从不同角度刻画转盘轴承启动摩擦力矩的特征。

估计真值可以描述启动摩擦力矩的大小，波动范围和信息熵可以描述启动摩擦力矩的不确定性，变异系数可以描述启动摩擦力矩的相对不确定性。因此，估计真值属于性能尺度的量，波动范围、信息熵和变异系数属于性能稳定性的量。

随着工作条件的变化，所研究的总体将发生性能演变，其表现为输出样本的特征变异。乏信息变异系数是估计真值变化很大的各个样本之间变异程度的一种常用量。

当比较样本的变异程度时，若估计真值基本相同，则可以直接用波动范围和信息熵等来比较；若估计真值变化很大，则不能用波动范围和信息熵来比较样本的变异程度，而需用变异系数。

3 变异分析与讨论

3.1 估计真值的演变

用所提出的乏信息系统理论得到估计真值，如图 2 所示。

从总体趋势上看，随着载荷的增加，2 种轴承启动摩擦力矩的估计真值均呈现非线性上升趋势。这是轴承启动摩擦力矩非线性演变的一个特点，是由具有制造误差的滚动体和滚道之间的非线性接触引起的^[1-3,13-14]。

从细节规律上看，2 种轴承启动摩擦力矩的估计真值具体演变规律不同。轴承 B 的估计真值非线性不明显，接近直线规律；轴承 L 的估计真值非线性很明显，接近指数规律。这和轴承的游隙、内部结构及其尺寸参数、载荷性质和润滑状态等有关。

无论是总体趋势，还是细节规律，有一点值得注意：估计真值具有波动性即不确定性。

虽然估计真值属于特征参数，经典统计学认为是一个确定的常数，但是，由于工作条件不断变化，必然导致估计真值成为一个变量，而且，这个变量具有不确定性。因此，轴承启动摩擦力矩具有变量不确定性的特性。

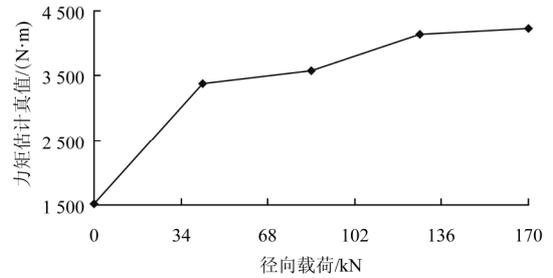
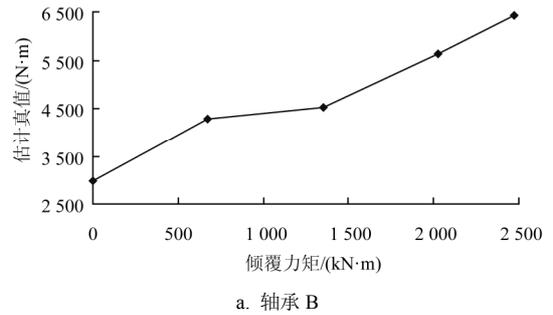


图 2 启动摩擦力矩的估计真值

Fig.2 Estimated true value of starting friction torque

根据轴承设计理论，载荷越大，启动摩擦力矩越大，导致轴承能量消耗越大，运行条件越恶劣，进而影响大型装备的效能，还会缩短轴承寿命。因此，轴承的设计应当考虑最大载荷对轴承摩擦磨损寿命的影响^[1,7-14]。

3.2 波动范围和信息熵的演变

取置信水平 $P=90%$ ，用所提出的乏信息系统理论可以得到波动范围和信息熵，分别如图 3 和图 4 所示。

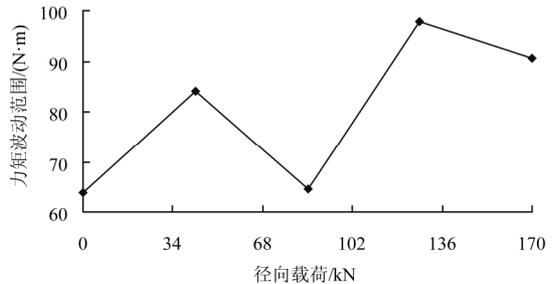
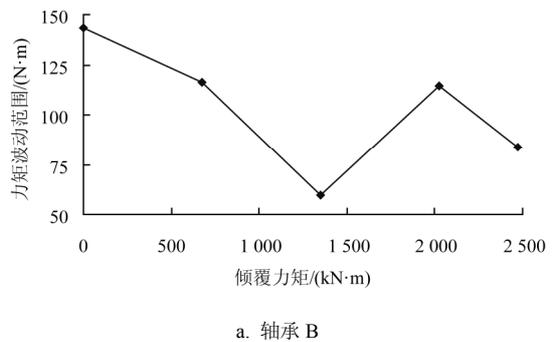


图 3 启动摩擦力矩的波动范围

Fig.3 Fluctuation range of starting friction torque

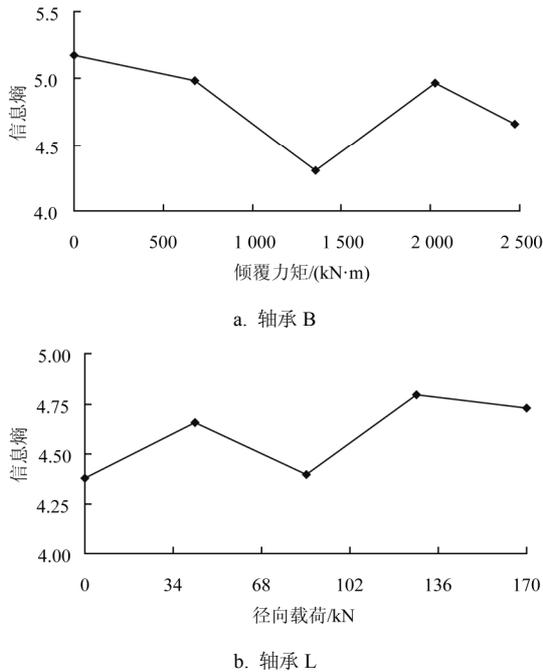


图 4 启动摩擦力矩的信息熵

Fig.4 Information entropy of starting friction torque

可以看出，随着载荷的增加，轴承 B 的波动范围和熵值总体上均呈现下降趋势，而轴承 L 的波动范围和熵值总体上均呈现上升趋势。对于一种轴承，波动范围和熵值的变化趋势一致，是因为这 2 个参数都是描述系统不确定性的量。2 种轴承的这 2 个参数表现出不同的变化趋势，和轴承的游隙、内部结构及其尺寸参数、载荷性质、润滑状态以及制造质量等有关^[4-5,7-14]。2 种轴承的波动范围和熵值均呈现出比较大的波动，表明轴承启动摩擦力矩随着载荷的增加具有变化的不确定性。

虽然波动范围和熵值均属于特征参数，经典统计学认为它们都是确定的常数，但是，由于工作条件不断变化，必然导致这 2 个参数成为变量，而且，这 2 个变量均具有不确定性。这是轴承启动摩擦力矩具有变量不确定性的又一种表现。

3.3 概率密度函数的演变

根据经典统计学，概率密度函数是对一个总体自然属性的本质模拟。因此，本节将通过对概率密度函数的演变分析，来揭示轴承启动摩擦力矩具有变量不确定性的内在机制。

用所提出的乏信息系统理论可以得到 2 种轴承启动摩擦力矩的概率密度函数，部分结果如图 5 和图 6 所示。可以看出，2 种轴承启动摩擦力矩的概率密度函数曲线不尽相同，即使同一种轴承，在不同的载荷下也有不同的曲线，但也存在某些共性。曲线的共同之处是形状上的单峰性和位置上的非原点性；差异之处在于单峰形状的对称性即有的左右对称、有的左偏、有的右偏，峰顶位置的非等值性，以及曲线的匀称性即高度和宽度各异。

非原点性是指曲线覆盖的区域不包含横坐标原点，

且总位于横坐标原点的右侧；非等值性是指，对于不同载荷或不同轴承，峰顶的横坐标取值不同。本文将对称性、非等值性和匀称性统称为函数的多变性，以展示概率密度函数的演变。峰顶位置的非等值性主要影响估计真值的大小；曲线的匀称性主要影响波动范围和熵值的取值大小；单峰形状的对称性主要影响估计真值、波动范围和熵值的不确定性。非原点性表明启动摩擦力矩总大于零。

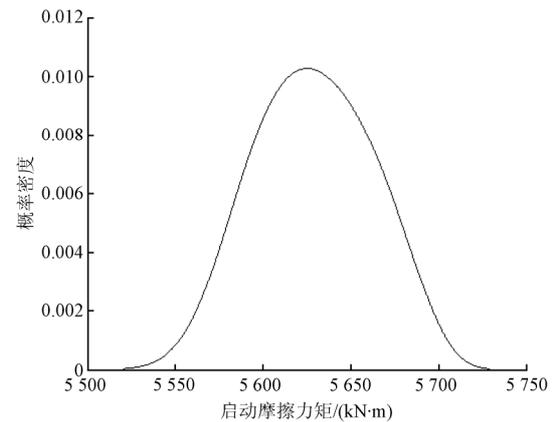
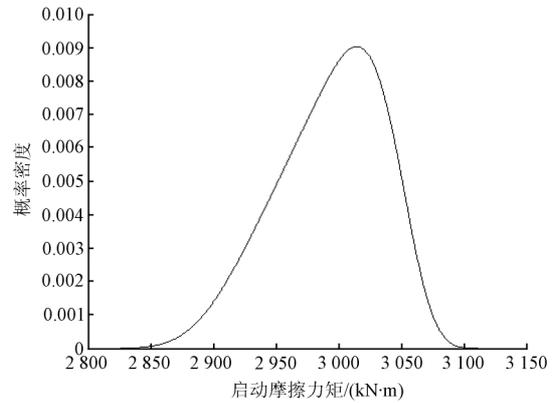
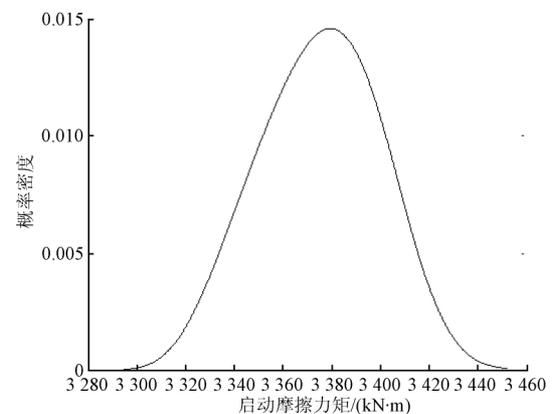
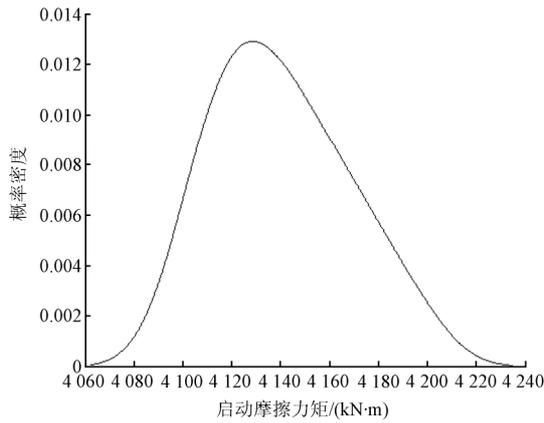


图 5 轴承 B 启动摩擦力矩的概率密度函数

Fig.5 Probability density function of starting friction torque of bearing B





b. 径向载荷为 127.5 kN

图 6 轴承 L 启动摩擦力矩的概率密度函数

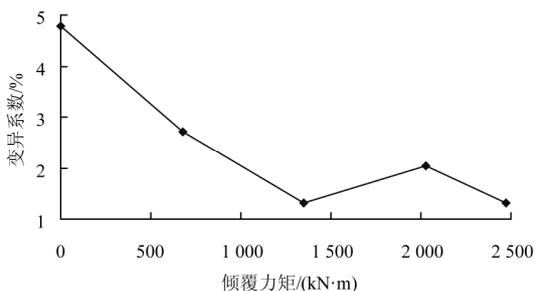
Fig.6 Probability density function of starting friction torque of bearing L

作为本征函数，概率密度函数决定了估计真值、波动范围和熵这 3 个特征参数的取值及其不确定性，所以，轴承启动摩擦力矩的变量不确定性来源于函数的多变性内在机制。

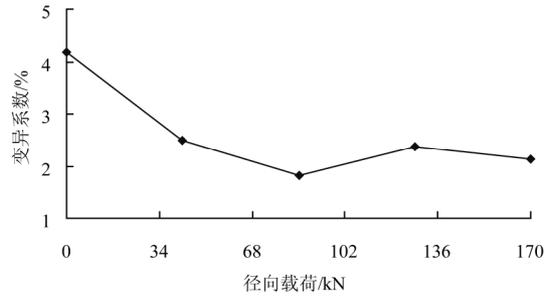
3.4 变异系数的演变

启动摩擦力矩具有变量不确定性和函数多变性。由图 2~4 可知，对于不同的轴承，波动范围和熵可能具有不同或相反的演变规律。所以，单独用波动范围和熵均不能完善、统一地描述和评估转盘轴承启动摩擦力矩伴随载荷的演变规律。这是乏信息系统理论上的一个新问题。这个问题的原因在于，如图 2 所示，随着载荷的增加，轴承 B 和 L 启动摩擦力矩的估计真值分别由 2 993 和 1 526 N·m 增大到 6 424 和 4 235 N·m，均变化显著。因此，对样本总体的变异程度分析，不能用不确定性参数，只能用相对不确定性参数即变异系数。下面用变异系数来描述载荷对启动摩擦力矩演变的驱动作用。

用所提出的乏信息系统理论可以得到 2 种轴承启动摩擦力矩的变异系数，如图 7 所示。可以看出，2 种轴承变异系数的变化规律很明显且十分相似：总体上看，随着载荷的增加，变异系数除在 1 个点（分别对应于轴承 B 的 2028 kN·m 倾覆载荷和轴承 L 的 127.5 kN 径向载荷）奇异增大外，其他部分的趋势是非线性下降的。这表明转盘轴承启动摩擦力矩的变异系数会随着载荷的增加而非线性衰减，在衰减过程中伴随有局部的异变。在本文中，定义对应变异系数奇异增大的载荷为敏感点。



a. 轴承 B



b. 轴承 L

图 7 启动摩擦力矩的变异系数

Fig.7 Variation coefficient of starting friction torque

与波动范围、信息熵、概率密度函数相比，变异系数可以完善而统一地描述载荷对转盘轴承启动摩擦力矩不确定性变异的驱动规律，还有助于发现某些问题。

从计量学角度看，一个物理量越大，允许其值的波动越大即变异系数基本保持常数。从轴承性能角度看，变异系数越小，启动摩擦力矩越稳定。从轴承性能非线性动力学演变角度看，变异系数由大变小，意味着启动摩擦力矩的相对稳定性发生了进化，工作性能变得更好了，即在允许的载荷范围内，转盘轴承对更大的载荷具有免疫能力。在敏感点，变异系数突然增大，意味着轴承免疫能力的波动，出现了返祖性或基因畸变。

如果轴承在敏感点运行，会极大地影响其性能的稳定性和工作寿命。敏感点的出现与测量系统和轴承系统的结构形式，设计参数，润滑条件，制造质量，以及载荷特征等有关系。因此，转盘轴承系统的设计、制造和测量应当考虑敏感点问题。这是一个新发现，现有文献没有报道这种现象。这个发现将为测量系统分析，轴承设计和制造质量控制等提供参考。

4 结论

1) 随着载荷增大，启动摩擦力矩的估计真值呈现非线性上升趋势。这导致轴承能量消耗增大，缩短轴承寿命。因此，转盘轴承的设计应当考虑最大载荷对轴承摩擦磨损寿命的影响。

2) 随着载荷增大，启动摩擦力矩的变异系数呈现非线性衰减趋势。这意味着在允许的载荷范围内，转盘轴承对更大的载荷具有免疫能力。

3) 在变异系数非线性衰减过程中，有一个敏感点，在该点处变异系数奇异增大。这意味着启动摩擦力矩产生了返祖性。如果轴承在该点运行，会极大地影响其性能的稳定性和工作寿命。敏感点的发现将为轴承系统设计，制造质量控制与测量系统分析等提供参考。

[参 考 文 献]

[1] Potonik P, Göncz P, Flašker J, et al. Fatigue life of double row slewing ball bearing with irregular geometry[J]. Procedia Engineering, 2010, 2(1): 1877-1886.
 [2] Gao Xuehai, Huang Xiaodiao, Wang Hua, et al. Effect of raceway geometry parameters on the carrying capability and the service life of a four-point-contact slewing bearing[J].

- Journal of Mechanical Science and Technology, 2010, 24(10): 2083–2089.
- [3] Glodez S, Potocnik R, Flašker J. Computational model for calculation of static capacity and lifetime of large slewing bearing's raceway[J]. Mechanism and Machine Theory, 2012, 47(1): 16–30.
- [4] Maciejewski J. Quality assurance testing of a slewing bearing[J]. Journal of Failure Analysis and Prevention, 2008, 8(5): 431–433.
- [5] Cousseau T, Graça B, Campos A, et al. Experimental measuring procedure for the friction torque in rolling bearings[J]. Lubrication Science, 2010, 22(4): 133–147.
- [6] Xia Xintao, Lv Taomei, Meng Fannian. Gray chaos evaluation model for prediction of rolling bearing friction torque[J]. Journal of Testing and Evaluation, 2010, 38(3), 291–300.
- [7] 窦东阳, 杨建国, 李丽娟, 等. 基于 EMD 和 MLEM2 的滚动轴承智能故障诊断方法[J]. 农业工程学报, 2011, 27(4): 125–130.
Dou Dongyang, Yang Jianguo, Li Lijuan, et al. Intelligent fault diagnosis method for rolling bearings based on EMD and MLEM2[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2011, 27(4): 125–130. (in Chinese with English abstract).
- [8] Kappaganthu K, Nataraj C. Nonlinear modeling and analysis of a rolling element bearing with a clearance[J]. Communications in Nonlinear Science and Numerical Simulation, 2011, 16(10): 4134–4145.
- [9] Harsha S P. Nonlinear dynamic response of a balanced rotor supported by rolling element bearings due to radial internal clearance effect[J]. Mechanism and Machine Theory, 2006, 41(6): 688–706.
- [10] 贾继德, 陈安宇, 朱忠奎. 基于信息熵的时频参数优化及内燃机轴承磨损监测[J]. 农业工程学报, 2010, 26(4): 203–207.
Jia Jide, Chen Anyu, Zhu Zhongkui. Optimization of time-frequency parameter and its application to monitor bearing wear of internal combustion engine based on information entropy[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering (Transactions of the CSAE), 2010, 26(4): 203–207. (in Chinese with English abstract).
- [11] 陆爽. 基于奇异值分解和支持向量机的滚动轴承故障模式识别[J]. 农业工程学报, 2007, 23(4): 115–119.
Lu Shuang. Fault pattern recognition of rolling bearing based on singularity value decomposition and support vector machine[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2007, 23(4): 115–119. (in Chinese with English abstract).
- [12] Lioulios A N, Antoniadis I A. Effect of rotational speed fluctuations on the dynamic behaviour of rolling element bearings with radial clearances[J]. International Journal of Mechanical Sciences, 2006, 48(8): 809–829.
- [13] Olave M, Sagartzazu X, Damian J, et al. Design of four contact-point slewing bearing with a new load distribution procedure to account for structural stiffness[J]. Journal of Mechanical Design, Transactions of the ASME, 2010, 132(2): 0210061–02100610.
- [14] Xia Xintao, Meng Fannian. Grey relational analysis of measure for uncertainty of rolling bearing friction torque as time series[J]. The Journal of Grey System, 2011, 23(2): 135–144.
- [15] Drikvandi R, Modarres R, Jalilian A H. A bootstrap test for symmetry based on ranked set samples[J]. Computational Statistics and Data Analysis, 2011, 55(4): 1807–1814.

Variation analysis of starting friction torque for slewing bearing based on poor information theory

Xia Xintao¹, Fan Ju¹, Chen Long¹, Liu Jing², Wang Jing'e²

(1. School of Mechatronics Engineering, Henan University of Science and Technology, Luoyang 471003, China;

2. Luoyang LYC Bearing Limited Company, Luoyang 471039, China)

Abstract: Based on the information poor theory, the relationship between the starting friction torque of the slewing bearing and the load was discussed to reveal nonlinear evolution characteristics of the estimated true value, fluctuation range, information entropy, variation coefficient, and probability density function of the starting friction torque. In the simulated experiment, two different slewing bearings were adopted, the load was changed five times for each bearing, the starting friction torques of six points which were evenly distribution on the surface of the inner ring were measured simultaneously, and variation analysis of the test data was made. The test result showed that with the rise of the load, the estimated true value nonlinearly increased and the variation coefficient nonlinearly decreased in view of the overall situations, at which there was a sensitive spot where the variation coefficient increased abnormally. This indicated that the starting friction torque of the slewing bearing had the uncertainty of the variable and the polytropy of the function. The findings provide a reference for analyzing the measuring system and improving the bearing performance.

Key words: bearings, friction, torque, slewing bearing, starting friction torque, variation coefficient, nonlinearity, uncertainty