

基于模糊权重的轴承品质实现可靠性研究

夏新涛¹, 刘 斌¹, 李云飞¹, 张纪祥²
(1. 河南科技大学 机电工程学院, 河南 洛阳 471003;
2. 临沂开元轴承有限公司 技术中心, 山东 临沂 276300)

摘 要: 以模糊数学理论为基础,提出了轴承品质影响因素权重确定的方法。对原始的轴承品质实现可靠性模型进行修正,提出了改进的轴承品质实现可靠性模型,并基于最大熵原理对轴承品质实现可靠性的真值及真值区间进行估计。以 30306 和 30204 圆锥滚子轴承为对象进行试验研究,发现原始的可靠性模型计算结果相对于试验结果的偏差为 20%~35%,改进的可靠性模型计算结果相对与试验结果的偏差为 12%~14%,偏差降低了 8%~21%,可见改进的可靠性模型比原始的可靠性模型更准确。
关 键 词: 滚动轴承; 品质实现可靠性; 模糊数学; 贴近度; 权重; 真值估计
中图分类号: V229⁺.2 **文献标志码:** A

Research on quality achieving reliability of bearing based on fuzzy weight

XIA Xintao¹, LIU Bin¹, LI Yunfei¹, ZHANG Jixiang²
(1. School of Mechatronics Engineering,
Henan University of Science and Technology, Luoyang Henan 471003, China;
2. Technique Center,
Linyi Kaiyuan Bearing Company Limited, Linyi Shandong 276300, China)

Abstract: Based on the theory of fuzzy mathematics, the method to determine the weight of bearing quality influencing factors was put forward. The original model of quality achieving reliability was modified and the improved model of bearing quality achieving reliability was proposed. Then the true value and true value interval of bearing quality achieving reliability were further estimated based on the maximum entropy principle. Taking two kinds of tapered roller bearing, 30306 and 30204, as experimental objects, it was found that the deviation of the original reliability model calculation from the test results was 20%—35%, and the deviation of the improved reliability model calculation from the test results was 12%—14%, which was reduced by 8%—21%. It can be known that the improved reliability model is more accurate than the original reliability model.
Key words: rolling bearing; quality achieving reliability; fuzzy mathematics; close degree; weight; true value assessment

收稿日期:2017-08-05

基金项目:河南省自然科学基金(162300410065)

作者简介:夏新涛(1957—),男,教授、博士生导师,博士,主要从事滚动轴承性能分析与乏信息处理等方面研究。

引用格式:夏新涛,刘斌,李云飞,等. 基于模糊权重的轴承品质实现可靠性研究[J]. 航空动力学报,2018,33(12):3013-3021. XIA Xintao, LIU Bin, LI Yunfei, et al. Research on quality achieving reliability of bearing based on fuzzy weight[J]. Journal of Aerospace Power, 2018, 33(12):3013-3021.

滚动轴承是机械产品中重要的基础零件,其主要作用是构件之间的连接过渡以及将构件之间的滑动摩擦变为滚动摩擦,有效减少摩擦力。滚动轴承广泛应用于机床设备、交通运输、航空航天、医疗器械等与人们生活息息相关的领域,是必不可少的机械组成基础件之一。随着时代的进步和科技的发展,机械产品稳定性的要求也越来越高,由此对轴承品质的可靠性也提出了更高的要求。

滚动轴承可靠性是近年来业界十分关注的话题,国内外对此进行了大量的研究并取得了不错的研究成果。金光^[1]提出了一种新的小子样条件下航天轴承性能可靠性分析的多层贝叶斯模型,是一种解决小子样条件下可靠性评估的有效途径。宋军强等^[2]对航空发动机分布式控制系统的网络拓扑结构进行优化设计并针对可靠性评估方法存在的不足,提出一种用于评估一般网络结构可靠性的方法。由于等^[3]提出了一种基于静强和寿命可靠性的涡轮盘/榫结构优化设计方法,可在保证优化精度的条件下大幅提高优化效率。夏新涛等^[4]将灰自助原理融泊松分布,用以预测轴承振动性能可靠性的变异过程,验证结果表明预测模型效果十分理想。史修江等^[5]以航空发动机主轴轴承为对象,对滚动体和套圈之间的弹流润滑性能进行了试验分析,探讨了不同工况下的弹流润滑的特性。Gould 等^[6]研究了乱流风对风力发电机轴承的负载及可靠性的影响,并用实例证明了过载和接触疲劳更容易导致轴承的失效。Desnica、Asonja 等^[7-8]建立了农业机械万向轴轴承的可靠性模型,研究并对比了实验条件下和使用条件下可靠性的差异及原因,并提出了提高轴承可靠性的解决方案。Mikic 等^[9]对活塞式压缩机曲轴轴承可靠性进行了研究,通过对轴承轴向间隙和温度的监测并分析了工作状态的可靠性。

品质实现可靠性^[10-11]是指在给定生产条件下,产品品质可以达到一定的等级、加工水平可以使产品的考核指标控制在一定范围内能力的大小。轴承品质实现可靠性可以将轴承的振动、噪声、寿命等作为考核指标进行研究,而这些考核指标受到诸多因素的影响。品质实现可靠性的研究过程中,根据研究对象要求的不同,选取的考核指标及影响因素也会随之改变。根据因素空间理论^[12-14],多因素的复杂影响状态是很难进行研究的,针对这种情况可以将因素的复杂影响分解为多个简单影响因素,然后把这些简单因素状态合成为复杂因素状态进行考察。

轴承品质受诸多因素的复杂影响,其影响因素之间的相互作用未知,属于典型的乏信息问题,仅用传统的经典统计学方法进行分析是不现实的,模糊数学恰好可以解决此类问题。本文通过模糊数学^[15-17]的方法研究影响轴承品质的单个影响因素的状态,并将这些单因素状态结果进行合成得到整个品质实现可靠性的影响因素状态,进而研究轴承品质实现可靠性情况。基于乏信息系统理论^[18-19],本文应用隶属度、贴近度等权重分析方法对轴承品质考核指标与影响因素之间的关系进行分析,获取各影响因素与轴承品质考核指标之间的权重关系。引入了原始的轴承品质实现可靠性模型并进行修正,提出了改进的轴承品质实现可靠性模型,并基于最大熵原理对轴承品质实现可靠性的真值及真值区间进行估计。

1 可靠性模型

1.1 数据的收集

假设将轴承的某个性能指标 X_0 作为品质考核指标进行研究,可以获得该性能指标参数的数据序列 X_0 为

$$X_0 = [x_0(1), x_0(2), \dots, x_0(k), \dots, x_0(n)] \quad (1)$$

式中 k 为数据序号, $k=1, 2, \dots, n$; n 为数据的个数; $x_0(k)$ 为第 k 个轴承品质考核指标的参数测量值。

设影响轴承此品质考核指标的影响因素个数为 m 个,可以获得第 i 个影响因素参数的数据序列 X_i 为

$$X_i = [x_i(1), x_i(2), \dots, x_i(k), \dots, x_i(n)] \quad (2)$$

式中 i 为影响因素序号, $i=1, 2, \dots, m$; $x_i(k)$ 为第 i 个影响因素的第 k 个影响因素的参数测量值。

1.2 品质分级

将轴承的品质的等级分为 S_j 级, P_j 作为第 S_j 级轴承品质考核指标及影响因素之间品质等级的标准值, $x_i(k)$ 是影响因素参数测量值,如果某个参数测量值 $x_i(k)$ 满足

$$P_{j-1} < x_i(k) \leq P_j; j = 1, 2, \dots, J \quad (3)$$

式中 J 为品质等级个数,通常 $J=4 \sim 7$ 。则称该参数测量值所对应的产品品质等级为 S_j 级。

根据式(3),对所有参数测量值数据进行品质等级分级。则品质等级可实现的频率序列可表示为

$$Y_i^0 = [y_i^0(1), y_i^0(2), \dots, y_i^0(j), \dots, y_i^0(J)] \quad (4)$$

式中

$$y_i^0(j) = \frac{M_{ji}}{n} \quad (5)$$

式中 M_{ji} 为符合 S_j 级标准值的参数值频数。

则轴承品质考核指标及影响因素参数值的品质等级实现积累分布序列可以表示为

$$\mathbf{Y}_i = [y_i(1), y_i(2), \dots, y_i(j), \dots, y_i(J)] \quad (6)$$

式中

$$y_i(j) = \sum_{s=1}^j y_i^0(s) \quad (7)$$

由式(6)知,轴承品质考核指标及其影响因素品质等级的实现积累分布矩阵 $\mathbf{E}$ 可以表示为

$$\mathbf{E} = \begin{bmatrix} y_0(1) & y_0(2) & \cdots & y_0(j) & \cdots & y_0(J) \\ y_1(1) & y_1(2) & \cdots & y_1(j) & \cdots & y_1(J) \\ \vdots & \vdots & & \vdots & & \vdots \\ y_i(1) & y_i(2) & \cdots & y_i(j) & \cdots & y_i(J) \\ \vdots & \vdots & & \vdots & & \vdots \\ y_m(1) & y_m(2) & \cdots & y_m(j) & \cdots & y_m(J) \end{bmatrix} \quad (8)$$

1.3 影响因素权重的确定方法

不同的影响因素对轴承品质实现可靠性的影响程度是不同的,因此需要对各影响因素在总的影响过程中起到的作用进行区分,影响因素权重的大小体现着影响因素和轴承品质考核指标之间关系的相关程度,可以用于区分单个影响因素在总体中的重要程度。单独使用某种方法进行分析结果往往具有一定的片面性,综合几种不同的方法进行分析才能更为全面地得到轴承品质实现可靠性的结果。

1.3.1 隶属度权重

将各项数据 $\mathbf{X}_i$ 利用映射公式映射到 $[0, 1]$ 内,以保证所有数据均为模糊数。

$$z_i = \frac{x_i - x_{\min}}{x_{\max} - x_{\min}} \quad (9)$$

设 $\mathbf{Z}_i$ 是有限论域 $\mathbf{Q}$ 上的模糊子集,其列与列之间的元素具有不同的性质属性,同一列元素具有相同的性质属性。 $\mathbf{Z}_i$ 描述为

$$\mathbf{Z}_i = [z_i(1), z_i(2), \dots, z_i(k), \dots, z_i(n)] \quad (10)$$

研究 $\mathbf{Z}_i (i=1, 2, \dots, m)$ 对 $\mathbf{Z}_0$ 的符合程度时,定义绝对差值

$$\Delta_{ik} = |z_{ik} - z_{0k}| \quad (11)$$

$$\Delta_{k\max} = \max_i \Delta_{ik} \quad (12)$$

建立相同属性元素的隶属函数

$$\mu_{ik} = \mu_{ik}(z_{ik}, z_{0k}) = 1 - \frac{\Delta_{ik}}{\Delta_{k\max}} \quad (13)$$

平均隶属度为

$$\mu_i = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \mu_{ik}; i = 1, 2, \dots, m \quad (14)$$

隶属度可以反映数据序列之间的隶属程度,平均隶属度 μ_i 越大, $\mathbf{Z}_i$ 对 $\mathbf{Z}_0$ 的关系越显著;反之,越不显著。

由隶属度权重法,品质影响因素 $\mathbf{X}_i$ 的权重可以定义为

$$\omega_i = \frac{\mu_i}{\sum_{i=1}^m \mu_i}; i = 1, 2, \dots, m \quad (15)$$

1.3.2 贴近度权重

设 $\mathbf{X}_0$ 和 $\mathbf{X}_i$ 是有限论域 $\mathbf{Q}$ 上的模糊子集, $\mu_{0k} \in [0, 1]$ 和 $\mu_{ik} \in [0, 1]$ 分别是 $\mathbf{X}_0$ 和 $\mathbf{X}_i$ 的隶属度。闵可夫斯基距离的定义为

$$d_{pk} = d_p(\mathbf{X}_0, \mathbf{X}_i) = \left(\frac{1}{n} \sum_{k=1}^n |\mu_{0k} - \mu_{ik}|^p \right)^{\frac{1}{p}} \quad (16)$$

式中 n 为集合 $\mathbf{X}_0$ 和 $\mathbf{X}_i$ 的元素个数; p 为常数,一般取正整数。

当 $p=1$ 时,闵可夫斯基距离变为海明距离;当 $p=2$ 时,闵可夫斯基距离变成欧几里德距离。

有限论域 $\mathbf{Q}$ 上的两个模糊子集 $\mathbf{X}_0$ 和 $\mathbf{X}_i$ 的贴近度定义为

$$N = N_p(\mathbf{X}_0, \mathbf{X}_i) = \frac{1}{2} [\mathbf{X}_0 \circ \mathbf{X}_i + (1 - \mathbf{X}_0 \diamond \mathbf{X}_i)] \quad (17)$$

式中运算符“ $\circ$ ”为矩阵的模糊运算,运算符“ $\diamond$ ”为“ $\circ$ ”的反置^[20]

$$\mathbf{X}_0 \circ \mathbf{X}_i = \bigvee_{k=1}^n (\mu_{0k} \wedge \mu_{ik}) \quad (18)$$

$$\mathbf{X}_0 \diamond \mathbf{X}_i = \bigwedge_{k=1}^n (\mu_{0k} \vee \mu_{ik}) \quad (19)$$

式中“ $\vee$ ”表“或”运算取最大,“ $\wedge$ ”表示“与”运算取最小^[20]

海明贴近度为

$$N_{1i} = N_1(\mathbf{X}_0, \mathbf{X}_i) = 1 - \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n |\mu_{0k} - \mu_{ik}| \quad (20)$$

欧几里德贴近度为

$$N_{2i} = N_2(\mathbf{X}_0, \mathbf{X}_i) = 1 - \left(\frac{1}{n} \sum_{k=1}^n |\mu_{0k} - \mu_{ik}|^2 \right)^{1/2} \quad (21)$$

基数贴近度为

$$\text{I} : N_{3i} = N_3(\mathbf{X}_0, \mathbf{X}_i) = \frac{\sum_{k=1}^n (\mu_{0k} \wedge \mu_{ik})}{\sum_{k=1}^n (\mu_{0k} \vee \mu_{ik})} \quad (22)$$

$$\text{II} : N_{4i} = N_4(\mathbf{X}_0, \mathbf{X}_i) = \frac{2 \sum_{k=1}^n (\mu_{0k} \wedge \mu_{ik})}{\sum_{k=1}^n \mu_{0k} + \sum_{k=1}^n \mu_{ik}} \quad (23)$$

贴近度描述的是 $\mathbf{X}_0$ 和 $\mathbf{X}_i$ 之间的贴近程度。在相关性方面,它的意义就是贴近度越大,那么 $\mathbf{X}_0$ 和 $\mathbf{X}_i$ 的关系越显著;反之, $\mathbf{X}_0$ 和 $\mathbf{X}_i$ 的关系越不显著。

由贴近度权重法,品质影响因素 $\mathbf{X}_i$ 的权重可以定义为

$$\omega_i^{2,3,4,5} = \frac{N_{ri}}{\sum_{i=1}^m N_{ri}}; r = 1, 2, 3, 4 \quad (24)$$

式中 ω_i^2 应用海明贴近度得到的品质影响因素权重; ω_i^3 应用欧几里德贴近度得到的品质影响因素权重; ω_i^4 应用基数贴近度 I 得到的品质影响因素权重; ω_i^5 应用基数贴近度 II 得到的品质影响因素权重。

1.4 原始与改进的可靠性模型

对所有轴承品质影响因素的品质等级实现累计分布值进行合成,可以得到轴承品质等级影响因素的状态合成值 x_j

$$x_j = \sum_{i=1}^m \omega_i^t y_i(j); t = 1, 2, \dots, T; j = 1, 2, \dots, J \quad (25)$$

式中 t 是品质影响因素权重序号; $T=5$ 。

由组织可靠性应用理论,原始的轴承品质实现可靠性模型 $r_j(t)$ 定义为^[10-11]

$$r_j(t) \approx 1 - \exp(-ax_j^b); j = 1, 2, \dots, J \quad (26)$$

式中 a, b 为品质影响系数; $r_j(t)$ 为轴承的品质在 S_j 级时,应用第 t 种权重确定方法所计算得到轴承品质实现可靠性函数。

原始的可靠性模型具有一定的缺陷性,需要对其进行修正。根据原始模型可求得可靠性的概率密度函数

$$f(x_j) = abx_j^{b-1} \exp(-ax_j^b) \quad (27)$$

原始的可靠性模型是在影响因素参数合成值 x_j 取值为 $[0, +\infty)$ 的前提下建立的。当 $x_j \in [0,$

$+\infty)$ 时,

$$\int_0^{+\infty} f(x_j) dx = 1 \quad (28)$$

然而,轴承的影响因素参数合成值 x_j 的实际取值范围为 $[0, 1]$, 当 $x_j \in [0, 1]$ 时,

$$\int_0^1 f(x_j) dx = 1 - \exp(-a) \quad (29)$$

这在可靠性求解过程中是不合理的,因此需要对原始模型进行改进。

改进后取得新的轴承品质实现可靠性模型为

$$R_j(t) = \frac{1}{1 - \exp(-a)} [1 - \exp(-ax_j^b)] \quad (30)$$

式中 a, b 为品质影响系数; $R_j(t)$ 为轴承的品质在 S_j 级时,应用第 t 种权重确定方法所计算得到轴承品质实现可靠性函数。

应用极大似然法对模型中的品质影响系数进行求解。首先对模型进行求导取得概率密度函数

$$f(x_j) = R'_j = \frac{ab}{1 - \exp(-a)} x_j^{b-1} \exp(-ax_j^b) \quad (31)$$

极大似然函数为

$$L(a, b) = \left[\frac{ab}{1 - \exp(-a)} \right]^J \prod_{j=1}^J x_j^{b-1} \cdot \exp\left(-a \sum_{j=1}^J x_j^b\right) \quad (32)$$

参数估计的极大似然估计方程为

$$\begin{cases} \frac{\partial \ln L}{\partial a} = \frac{J}{a} - \frac{J \cdot \exp(-a)}{1 - \exp(-a)} - \sum_{j=1}^J x_j^b = 0 \\ \frac{\partial \ln L}{\partial b} = \frac{J}{b} + \sum_{j=1}^J \ln x_j - a \sum_{j=1}^J (x_j^b \cdot \ln x_j) = 0 \end{cases} \quad (33)$$

式中 x_j 为影响因素参数合成值; J 为品质等级个数。品质影响系数 a, b 值可以用数值迭代法求出。

轴承品质实现可靠性的大小代表着各影响因素在生产加工过程中实现此等级加工水平的能力高低和轴承达到该等级品质水平能力的大小。轴承品质实现可靠性的数值越大,说明对轴承品质考核指标的要求越低,实现此等级加工水平的能力就会越大;反之,则说明实现该品质等级加工水平的能力越小。

2 真值及真值区间估计

本节基于乏信息系统理论中的自主最大熵方法,对轴承品质实现可靠性数据进行研究分析。

首先对轴承各等级的少量品质实现可靠性数据进行自助再抽样,得出一个含有大量品质实现可靠性数据的自助样本,再根据最大熵原理建立轴承品质实现可靠性的最大熵概率密度函数并求得其概率分布情况,最后在给定的置信水平下对轴承品质实现可靠性进行真值估计和真值区间估计。

2.1 自助法生成大样本

由式(30),当轴承品质等级为 S_j 级时,轴承品质实现可靠性的数据序列 R_j 可以表示为

$$R_j = [R_j(1), R_j(2), \dots, R_j(t), \dots, R_j(T)] \tag{34}$$

从原始数据序列 R_j 中等概率并可放回的进行自助再抽样,可得到轴承品质实现可靠性样本 R_{s_d} ,为

$$R_d = [R_d(1), R_d(2), \dots, R_d(h), \dots, R_d(T)] \tag{35}$$

式中 R_d 是抽取的第 d 个样本; $h=1,2,\dots,T$ 。

则自助样本 R_d 的平均值表示为

$$R_d = \frac{1}{T} \sum_{h=1}^T R_d(h) \tag{36}$$

对数据序列 R_j 进行 D 次连续重复抽样,可以得到 D 个轴承品质等级实现可靠性样本

$$R = [R_1, R_2, \dots, R_d, \dots, R_D]^T \tag{37}$$

式中 R_d 为的第 d 个自助样本的平均值, $d=1,2,\dots,D$ 。

2.2 最大熵概率密度

轴承品质实现可靠性 R_j 的各阶原点矩为

$$m_l = \frac{1}{D} \sum_{d=1}^D R_d^l \tag{38}$$

式中 m_l 为第 l 阶的原点矩; l 为原点矩阶数, $l=1,2,\dots,q$; q 为最高阶数。

由最大熵原理可得轴承品质实现可靠性函数 R_j 的各阶原点矩需满足

$$m_l = \frac{\int_{\Psi} R^l \exp \left[\sum_{l=1}^q \lambda_l R^l \right] dR}{\int_{\Psi} \exp \left[\sum_{l=1}^q \lambda_l R^l \right] dR} \tag{39}$$

式中 R 为关于 R_d 的连续随机变量; Ψ 为积分空间; λ_l 为求解常数,拉格朗日乘子。

通过式(39)求出 $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_q$ 后,求出 λ_0

$$\lambda_0 = -\ln \left[\int_{\Psi} \exp \left[\sum_{l=1}^q \lambda_l R^l \right] dR \right] \tag{40}$$

则,轴承品质实现可靠性的最大熵概率密度函数表示为

$$f = f(R) = \exp \left[\lambda_0 + \sum_{l=1}^q \lambda_l R^l \right] \tag{41}$$

轴承品质实现可靠性的最大熵概率分布函数表示为

$$F = F(R) = \int_{\Psi_0}^R f(R) dR = \int_{\Psi_0}^R \exp \left[\lambda_0 + \sum_{l=1}^q \lambda_l R^l \right] dR \tag{42}$$

式中 Ψ_0 为积分下限。

2.3 真值及真值区间估计

S_j 级轴承的品质实现可靠性的真值 R_j 为

$$R_j = \int_{\Psi} R f(R) dR \tag{43}$$

给定显著水平 $\alpha \in [0,1]$,置信水平为

$$P = (1 - \alpha) \times 100\% \tag{44}$$

则,对应置信水平 $P = \alpha/2$ 处的置信区间的下边界 $R_L = R_{\alpha/2}$ 满足

$$P = \alpha/2 = \int_{R_0}^{R_{\alpha/2}} F(R) dR \tag{45}$$

对应置信水平 $P = 1 - \alpha/2$ 处的置信区间的上边界 $R_U = R_{1-\alpha/2}$ 满足

$$P = 1 - \frac{\alpha}{2} = 1 - \int_{R_0}^{R_{1-\alpha/2}} F(R) dR \tag{46}$$

所以轴承品质实现可靠性参数的估计区间为

$$[R_L, R_U] = [R_{\alpha/2}, R_{(1-\alpha/2)}] \tag{47}$$

3 品质实现可靠性试验研究

本次试验研究队象为 30306 圆锥滚子轴承,以其振动加速度作为轴承品质的考核指标,选择某公司生产的 30 套 30306 产品为试验轴承。影响圆锥滚子轴承振动加速度的影响因素很多,本文主要选取的对象为滚子和内、外圈的加工参数,其中,滚子参数 8 个、内圈参数 11 个、外圈参数 9 个。试验研究使用的振动加速度影响因素符号及表达含义见表 1,表 1 中其他符号参见文献[18-19]。

在生产加工过程中,随机抽取 30 套 30306 圆锥滚子轴承作为试验轴承,进行编号后对其振动加速度值进行测量。定义振动加速度测量值为 X_0 ,单位: dB。

$X_0 = (53.167, 53.667, 55.167, 57.167, 55.833, 57.167, 54.667, 55.000, 55.667, 53.667, 56.167, 53.667, 54.500, 55.167, 56.167, 55.000, 54.167, 52.833, 53.833,$

55.333, 52.833, 56.000, 57.833, 54.667, 53.667, 52.667, 56.000, 56.333, 55.667, 55.667)。

将编号测量后的轴承拆套,分别对滚子及内、外圈的品质影响因素项目进行测量,记录各项测

量值,各项影响因素参数的测量值见图 1。

首先对试验轴承的振动加速度数据进行品质等级分级。取产品的品质等级个数 $J=6$,即将轴承振动加速度分为六级。则 30306 圆锥滚子轴承振动加速度品质分级结果见表 2。

表 1 影响因素的符号及含义

Table 1 Symbols and meanings of influencing factors μm

符号	含义	所属部分	符号	含义	所属部分
X_1	K_i	内圈	X_{15}	L_e	外圈
X_2	S_{di}	内圈	X_{16}	外滚道圆度	外圈
X_3	$\Delta 2\beta$	内圈	X_{17}	外滚道波纹度	外圈
X_4	L_i	内圈	X_{18}	外滚道表面粗糙度	外圈
X_5	内滚道圆度	内圈	X_{19}	外滚道椭圆度	外圈
X_6	内滚道波纹度	内圈	X_{20}	S_D	外圈
X_7	内滚道表面粗糙度	内圈	X_{21}	D_w	滚子
X_8	内滚道椭圆度	内圈	X_{22}	$\Delta 2\Phi$	滚子
X_9	S_{if} (挡边)	内圈	X_{23}	圆度	滚子
X_{10}	表面粗糙度(挡边)	内圈	X_{24}	波纹度	滚子
X_{11}	S_d	内圈	X_{25}	直线度	滚子
X_{12}	K_e	外圈	X_{26}	表面粗糙度	滚子
X_{13}	S_e	外圈	X_{27}	基面跳动	滚子
X_{14}	$\Delta 2\alpha$	外圈	X_{28}	基面表面粗糙度	滚子

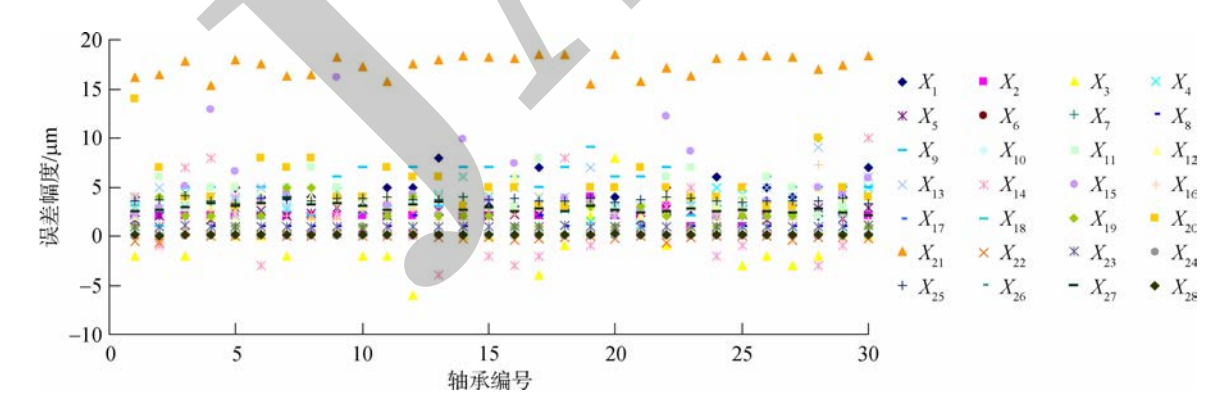


图 1 影响因素数据

Fig. 1 Data of influencing factors

表 2 振动加速度品质等级分级

Table 2 Quality grade scale of vibration acceleration

序号	品质等级	标准值/dB	频数	积累分布	序号	品质等级	标准值/dB	频数	积累分布
1	S_1	53	3	3/30	4	S_4	56	8	23/30
2	S_2	54	6	9/30	5	S_5	57	4	27/30
3	S_3	55	6	15/30	6	S_6	58	3	30/30

从表 2 可知,30306 圆锥滚子轴承各品质等级的标准值随着品质等级的提高而降低。通过将已知测量数据和各品质等级标准值的大小进行比较可以对各试验轴承进行品质分级,同时可以得出符合各等级品质要求的圆锥滚子轴承的频数。通过对符合各品质等级标准值的轴承频数进行一次累加生成,可以得到试验圆锥滚子轴承的品质等级实现积累分布,如图 2。

对所有试验测量记录的振动加速度的各品质等级影响因素测量值进行分级,得到试验轴承影响因素品质等级实现积累分布的综合矩阵 E ,见表 3。

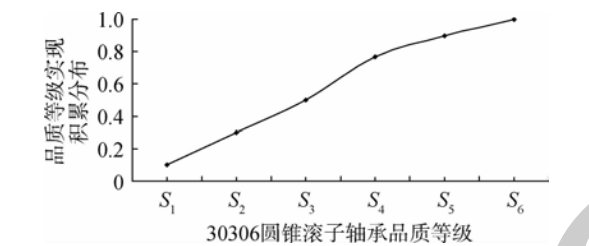


图 2 品质等级实现积累分布图

Fig. 2 Quality grade achieve accumulation distribution

表 3 影响因素品质等级实现积累分布

Table 3 Achieve accumulation distribution of influencing factors quality grade

序号	S_1	S_2	S_3	S_4	S_5	S_6
X_1	0.000	0.133	0.300	0.700	0.900	1.000
X_2	0.000	0.067	0.767	0.933	1.000	1.000
X_3	0.300	0.733	0.867	0.933	0.967	1.000
X_4	0.033	0.033	0.100	0.567	1.000	1.000
X_5	0.000	0.000	0.300	0.533	1.000	1.000
X_6	0.000	0.000	0.033	0.133	0.867	0.967
X_7	0.000	0.000	0.000	0.167	0.933	1.000
X_8	0.000	0.767	0.767	0.967	1.000	1.000
X_9	0.067	0.300	0.600	0.967	1.000	1.000
X_{10}	0.000	0.000	0.067	0.367	0.633	1.000
X_{11}	0.000	0.033	0.300	0.500	0.967	1.000
X_{12}	0.000	0.133	0.400	0.667	0.933	1.000
X_{13}	0.000	0.167	0.400	0.667	0.933	0.967
X_{14}	0.300	0.533	0.733	0.833	0.867	0.967
X_{15}	0.033	0.067	0.333	0.700	0.867	0.967
X_{16}	0.000	0.033	0.100	0.433	0.900	0.967
X_{17}	0.000	0.067	0.600	0.867	1.000	1.000
X_{18}	0.000	0.000	0.333	0.600	1.000	1.000
X_{19}	0.033	0.300	0.667	0.767	0.967	0.967

续表

序号	S_1	S_2	S_3	S_4	S_5	S_6
X_{20}	0.000	0.200	0.667	0.867	0.933	0.967
X_{21}	0.000	0.000	0.000	0.000	0.133	1.000
X_{22}	0.100	0.367	0.600	0.800	0.900	0.967
X_{23}	0.000	0.000	0.000	0.200	1.000	1.000
X_{24}	0.000	0.000	0.000	0.967	1.000	1.000
X_{25}	0.033	0.267	0.867	1.000	1.000	1.000
X_{26}	0.000	0.000	0.000	0.467	1.000	1.000
X_{27}	0.000	0.000	0.000	0.300	0.767	1.000
X_{28}	0.000	0.000	0.300	0.900	0.967	0.967

每种影响因素对试验轴承振动加速度的影响程度是不同的,因此需要对各影响因素根据影响程度的不同进行区别对待。根据模糊权重的确定方法,以模糊数学中的隶属度计算方法进行计算,可以得到振动加速度与各影响因素之间的隶属度情况,计算结果为 $\mu_1=0.5496$, $\mu_2=0.6066$, $\mu_3=0.6362$, $\mu_4=0.5473$, $\mu_5=0.6330$, $\mu_6=0.6465$, $\mu_7=0.6497$, $\mu_8=0.3789$, $\mu_9=0.5884$, $\mu_{10}=0.5569$, $\mu_{11}=0.5668$, $\mu_{12}=0.6510$, $\mu_{13}=0.5347$, $\mu_{14}=0.6236$, $\mu_{15}=0.6303$, $\mu_{16}=0.5062$, $\mu_{17}=0.5535$, $\mu_{18}=0.5191$, $\mu_{19}=0.5301$, $\mu_{20}=0.5020$, $\mu_{21}=0.4531$, $\mu_{22}=0.5916$, $\mu_{23}=0.5777$, $\mu_{24}=0.6296$, $\mu_{25}=0.5917$, $\mu_{26}=0.5629$, $\mu_{27}=0.5889$, $\mu_{28}=0.4865$ 。

根据隶属度权重法可以得出振动加速度与各影响因素之间的权重值为 $\omega_1^1=0.0346$, $\omega_2^1=0.0382$, $\omega_3^1=0.0400$, $\omega_4^1=0.0344$, $\omega_5^1=0.0398$, $\omega_6^1=0.0407$, $\omega_7^1=0.0409$, $\omega_8^1=0.0238$, $\omega_9^1=0.0370$, $\omega_{10}^1=0.0350$, $\omega_{11}^1=0.0357$, $\omega_{12}^1=0.0410$, $\omega_{13}^1=0.0336$, $\omega_{14}^1=0.0392$, $\omega_{15}^1=0.0397$, $\omega_{16}^1=0.0318$, $\omega_{17}^1=0.0348$, $\omega_{18}^1=0.0327$, $\omega_{19}^1=0.0334$, $\omega_{20}^1=0.0316$, $\omega_{21}^1=0.0285$, $\omega_{22}^1=0.0372$, $\omega_{23}^1=0.0364$, $\omega_{24}^1=0.0396$, $\omega_{25}^1=0.0372$, $\omega_{26}^1=0.0354$, $\omega_{27}^1=0.0371$, $\omega_{28}^1=0.0306$ 。

由影响因素的权重值和品质等级实现积累分布的综合矩阵,可以得出影响因素品质等级的状态合成值为 $x_1=0.0348$, $x_2=0.1462$, $x_3=0.3585$, $x_4=0.6410$, $x_5=0.9158$, $x_6=0.9882$ 。

同理,根据轴承振动加速度和各影响因素试验数据,运用其他影响因素权重确定方法可以计算出每种方法确定的品质等级影响因素的状态合

成值,见表 4。

表 4 品质等级影响因素的状态合成值
Table 4 State composite value of quality grade
influencing factors

权重	x_1	x_2	x_3	x_4	x_5	x_6
ω_i^1	0.0348	0.1462	0.3585	0.6410	0.9158	0.9882
ω_i^2	0.0358	0.1451	0.3570	0.6403	0.9159	0.9884
ω_i^3	0.0348	0.1461	0.3585	0.6411	0.9158	0.9882
ω_i^4	0.0352	0.1472	0.3558	0.6385	0.9147	0.9881
ω_i^5	0.0342	0.1477	0.3570	0.6392	0.9133	0.9881

由品质等级影响因素状态合成值,根据数值迭代法,计算可得品质影响系数 $a=-1.054$ 和 $b=0.675$ 。将所得结果代入改进的轴承品质实现可靠性模型可以得出试验圆锥滚子轴承的振动加速度在不同品质等级时的实现可靠性的综合矩阵,见表 5。

根据自助法最大熵法,取 $D=10\,000$,分别对所得圆锥滚子轴承振动加速度品质实现可靠性矩阵中各等级的品质实现可靠性进行自助再抽样。再用最大熵原理对试验轴承各品质等级可靠性的真值及真值区间进行估计,可以得出试验圆锥滚子轴承品质实现可靠性的真值估计及真值区间估计,见表 6。

表 5 品质实现可靠性的综合矩阵
Table 5 Integrated matrix of quality achieving reliability

可靠性	ω_i^1	ω_i^2	ω_i^3	ω_i^4	ω_i^5
$R_1(t)$	0.06175	0.06298	0.06176	0.06230	0.06097
$R_2(t)$	0.17843	0.17747	0.17837	0.17940	0.17993
$R_3(t)$	0.37156	0.37017	0.37156	0.36908	0.37021
$R_4(t)$	0.63294	0.63219	0.63299	0.63046	0.63119
$R_5(t)$	0.90947	0.90960	0.90941	0.90836	0.90686
$R_6(t)$	0.98718	0.98733	0.98718	0.98700	0.98698

表 6 可靠性真值及真值区间估计结果
Table 6 Reliability true value and true value interval
estimation results

可靠性	S_1	S_2	S_3	S_4	S_5	S_6
可靠性真值	0.0621	0.1786	0.3705	0.6319	0.9089	0.9871
下区间	0.0612	0.1775	0.3690	0.6304	0.9064	0.9870
上区间	0.0629	0.1797	0.3716	0.6330	0.9097	0.9873

由表 6 可知,在高等级 S_1 级时,试验轴承的品质实现可靠性最低,而且随着轴承品质等级的降低,其品质实现可靠性逐渐提高,而且这种变化在中高品质等级阶段最明显。当在 S_5 级时,轴承品质实现可靠性可以达到 91% 左右。因此在现有的加工水平下,研究用 30306 圆锥轴承的振动加速度值普遍保持在第 S_5 级品质等级,即振动加速度值为 57 dB 水平,对应的轴承品质实现可靠性为 90.89%。

分别将 30306 轴承数据和文献[10-11]中 30204 轴承数据的原始的可靠性模型计算结果、改进的可靠性模型计算结果和试验所得结果进行比较,见图 3、图 4。

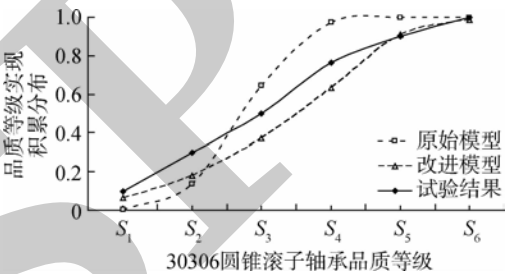


图 3 30306 轴承品质实现可靠性结果比较
Fig. 3 Comparison of quality achieving reliability
results of 30306 bearing

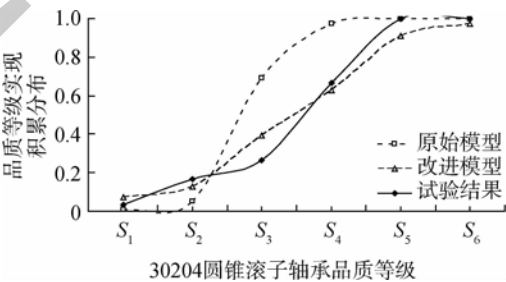


图 4 30204 轴承品质实现可靠性结果比较
Fig. 4 Comparison of quality achieving reliability
results of 30204 bearing

由图 3、图 4 可知,原始的可靠性模型计算结果与试验结果差异巨大,偏差值分别达到 20.97% 和 34.47%,可见品质实现可靠性模型的改进是十分有必要的。改进后的可靠性模型计算结果与试验结果虽有一定偏差但总体趋势基本相同,偏差值也减小为 13.47% 和 12.83%,总体偏差值降低了 8%~21% 左右,可见改进的可靠性模型比原始的可靠性模型更准确。轴承品质实现可靠性受到诸多因素的影响,品质实现可靠性模型建立过程中仅考虑了其中主要影响因素,所以理论计算结果与实际结果有一定的差异。

4 结 论

品质实现可靠性作为一个新概念,其理论在实际应用中还有可以改进之处。本文基于模糊数学理论,获得了轴承品质影响因素的权重,引入原始的轴承品质实现可靠性模型并修正,由此得出改进的轴承品质实现可靠性模型,实现了轴承品质实现可靠性的真值及真值区间估计。以30306和30204圆锥滚子轴承的振动加速度为品质可靠性考核指标进行试验研究,证明了改进的可靠性模型比原始的可靠性模型更准确。

参考文献:

- [1] 金光. 小子样条件下航天轴承性能可靠性建模与评估[J]. 国防科技大学学报, 2010, 32(1): 133-137.
JIN Guang. Performance reliability modeling and estimation for space bearing under small sample circumstance [J]. Journal of National University of Defense Technology, 2010, 32(1): 133-137. (in Chinese)
- [2] 宋军强, 汤丽丽, 潘慕绚, 等. 航空发动机分布式控制拓扑结构优化方法[J]. 航空动力学报, 2016, 31(6): 1435-1440.
SONG Junqiang, TANG Lili, PAN Muxuan, et al. Aero-engine distributed control system topology optimization method[J]. Journal of Aerospace Power, 2016, 31(6): 1435-1440. (in Chinese)
- [3] 由于, 陆山. 基于静强度和寿命可靠性的双辐板涡轮盘/榫结构优化设计方法[J]. 航空动力学报, 2017, 32(6): 1388-1393.
YOU Yu, LU Shan. Optimization design method for twin-web turbine disk/tenon structure based on static strength and life reliability[J]. Journal of Aerospace Power, 2017, 32(6): 1388-1393. (in Chinese)
- [4] 夏新涛, 孟艳艳, 邱明. 用灰自助泊松方法预测滚动轴承振动性能可靠性的变异过程[J]. 机械工程学报, 2015, 51(9): 97-103.
XIA Xintao, MENG Yanyan, QIU Ming. Forecasting for variation process of reliability of rolling bearing vibration performance using grey bootstrap Poisson method [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2015, 51(9): 97-103. (in Chinese)
- [5] 史修江, 王黎钦, 古乐, 等. 基于拟动力学的航空发动机主轴承球轴承热弹流润滑分析[J]. 航空动力学报, 2016, 31(1): 233-240.
SHI Xiujiang, WANG Liqin, GU Le, et al. Thermal elastohydrodynamic lubrication analysis of aero-engine mainshaft ball bearing based on quasi-dynamic[J]. Journal of Aerospace Power, 2016, 31(1): 233-240. (in Chinese)
- [6] GOULD B J, BURRIS D L. Effects of wind shear on wind turbine rotor loads and planetary bearing reliability[J]. Wind Energy, 2016, 19(6): 1011-1021.
- [7] DESNICA E, ASONJA A, MIKIC D, et al. Reliability model of bearing assembly on an agricultural cardan shaft [J]. Journal of the Balkan Tribological Association, 2015, 21(1): 38-48.
- [8] ASONJA A, DESNICA E. Reliability of agriculture universal joint shafts based on temperature measuring in universal joint bearing assemblies[J]. Spanish Journal of Agricultural Research, 2015, 13(1): 1-8.
- [9] MIKIC D, DESNICA E, ASONJA A, et al. Reliability analysis of ball bearing on the crankshaft of piston compressors[J]. Journal of the Balkan Tribological Association, 2016, 22(4): 5060-5070.
- [10] 夏新涛, 尚艳涛, 金银平, 等. 基于多权重法的机械产品品质实现可靠性分析[J]. 中国机械工程, 2013, 24(22): 3003-3009.
XIA Xintao, SHANG Yantao, JIN Yiping, et al. Quality achieving reliability analysis of mechanical product based on multi-weighted method[J]. China Mechanical Engineering, 2013, 24(22): 3003-3009. (in Chinese)
- [11] 尚艳涛. 滚动轴承质量信息评估方法研究[D]. 河南 洛阳: 河南科技大学, 2014.
SHANG Yantao. Study on assessment methods of rolling bearing quality based on poor information [D]. Luoyang Henan: Henan University of Science and Technology, 2014. (in Chinese)
- [12] 李洪兴. 因素空间理论与知识表示的数学框架(I): 因素空间的公理化定义与描述架[J]. 北京师范大学学报(自然科学版), 1996, 32(4): 470-475.
LI Hongxing. Factor Spaces and Mathematical Frame of knowledge representation (I): axiomatic definition of factor spaces and description frames [J]. Journal of Beijing Normal University (Natural Science), 1996, 32(4): 470-475. (in Chinese)
- [13] 董学军, 黎明, 陈英武. 航天器发射组织可靠性模型[J]. 管理工程学报, 2013, 27(4): 75-83.
DONG Xuejun, LI Ming, CHEN Yingwu. An organizational reliability model of spacecraft launch [J]. Journal of Industrial Engineering and Engineering Management, 2013, 27(4): 75-83. (in Chinese)
- [14] DONG Xuejun, CHEN Yingwu, LI Ming, et al. A spacecraft launch organizational reliability model based on CSF [J]. Quality & Reliability Engineering International, 2013, 29(7): 1041-1054.
- [15] MORDESON J N, NAIR P S. Fuzzy mathematics [M]. Berlin Heidelberg: Physica-Verlag, 2001.
- [16] NOVAK V, PERFILEIEVA I, BEHOUNEK L, et al. Formal methods for fuzzy mathematics, approximation and reasoning: Part I [J]. Fuzzy Sets and Systems, 2008, 159(14): 1727-1728.
- [17] NOVAK V, PERFILEIEVA I, BEHOUNEK L, et al. Formal methods for fuzzy mathematics, approximation and reasoning: Part II [J]. Fuzzy Sets and Systems, 2009, 160(8): 1003-1004.
- [18] 夏新涛. 滚动轴承信息试验分析与评估[M]. 北京: 科学出版社, 2007.
- [19] 夏新涛. 信息可靠性分析[M]. 北京: 科学出版社, 2017.
- [20] 夏新涛, 常振, 叶亮, 等. 卫星动量灵敏性变异分析[J]. 航空动力学报, 2017, 32(3): 704-713.
XIA Xintao, CHANG Zhen, YE Liang, et al. Variation analysis of sensitivity for satellite momentum wheel [J]. Journal of Aerospace Power, 2017, 32(3): 704-713. (in Chinese)