

文章编号: 1000-8055(2005) 02-0250-05

滚动轴承加工质量与振动的灰色关联度

夏新涛¹, 王中宇², 常 洪³

(1. 河南科技大学 机电工程学院, 河南 洛阳 471003;

2. 北京航空航天大学 仪器科学与光电工程学院, 北京 100083;

3. 洛阳轴承集团有限公司, 河南 洛阳 471039)

摘要: 已经证明零件的加工质量对轴承振动会产生一定的影响,但现有的研究没有比较各种质量指标对轴承振动的影响程度。为此,通过实验研究,比较并评价不同性质的加工质量指标对轴承振动的影响程度。在研究中,采用两种航空轴承。考虑到统计理论的适用条件,采用了灰色系统理论。研究结果表明:结构尺寸误差参数对轴承振动的影响比较大,宏观形状误差参数和微观形貌参数对轴承振动的影响比较小。这表示轴承的宏观形状误差和微观形貌误差已经达到比较高的质量水平,以至于对轴承振动的影响不再成为主要因素,而轴承的结构尺寸参数及其公差存在着设计方法上的一些问题,从而成为影响轴承振动的主要因素。

关键词: 航空、航天推进系统; 滚动轴承; 振动; 加工质量; 灰关联分析

中图分类号: TH133.33

文献标识码: A

Grey Correlation of Vibration with Rolling Bearing's Machining Quality

XIA Xin-tao¹, WANG Zhong-yu², CHANG Hong³

(1. College of Mechanical and Electronical Engineering,

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

2. College of Instrument Science and Photoelectricity Engineering,

Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China;

3. Luoyang Bearing Group Ltd., Luoyang 471039, China)

Abstract: It was proved that vibration was affected by machining quality of the rolling bearing elements. Unfortunately, current research did not show the degree of influence caused by each kind of quality index. Because that different machining quality index has different contributions to the rolling bearing's vibration, so enhance machining quality without clear understanding what index is key to the problem could have no advantage in controlling vibration. Degree of influence caused by machining quality on the rolling bearing's vibration was compared and evaluated by experiments. Two kinds of aeronautical bearing were selected for testing in this investigation. Considering the unsuitability of statistics theory, grey system theory was introduced. The results show that parameters of structural dimension error exert greater effect on the rolling bearing's vibration than that of macroscopic parameters of form

收稿日期: 2004- 03- 14; 修订日期: 2004- 06- 02

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(50375011); 北京市自然科学基金项目(3043019);

河南科技大学重大科技前期预研专项基金(2003ZD03)

作者简介: 夏新涛(1957-),男,湖南衡东人,河南科技大学机电工程学院教授,主要从事滚动轴承、精密测量与计算机应用等方面的教学与研究。

error and microscopic parameters of shape. Consequently, macroscopic parameters of form errors and microscopic parameters of shape are minor factors for high quality machining bearings selected, while parameters of structural dimension errors and its tolerance are thought to be the main factors.

Key words: aerospace propulsion; rolling bearing; vibration; machining quality; grey system theory

长期以来,滚动轴承的振动特性对航天航空推进系统的动态特性、寿命与可靠性的影响问题一直受到航空工程界与理论界的关注^[1~3]。由美国 NASA 组织实施的航天航空推进系统仿真系统将涉及到滚动轴承的振动特性^[4];在航空轴承的性能分析中,瑞典 SKF 公司提出的轴承仿真工具包可以研究航空轴承的动力学行为^[5],Anantapadmanaban T 和 Radhakrishnan V 研究了轴承内部零件表面形状误差和轴承噪声频谱的关系^[6],Kanai H, Abe M 和 Kido K 估计了轴承零件滚动表面粗糙度对振动的作用^[7],夏新涛的谐波分析可以评价和优化航空轴承的振动^[8],Tandon N 和 Choudhury A 建立的理论模型可以预测分布缺陷的振动响应^[9]。

上述研究一致认为零件的加工质量对航空轴承振动会产生一定的影响,但没有对各种质量指标对轴承振动的影响大小进行比较。航空轴承的加工质量包括尺寸误差、形状误差、相互位置误差以及表面粗糙度、表面损伤等内容。这些加工质量指标的 性质不同,对轴承振动的贡献不同^[2,5~10]。为此,本文将通过实验研究,比较并评价不同性质的加工质量指标对轴承振动与噪声的影响程度。在研究中,采用两种航空轴承(编号分别为 HKA 和 HKB),并选取沟道曲率半径、沟道形状误差和沟道表面粗糙度作为不同性质加工质量参数的代表。考虑到统计分析的困难性,研究采用了灰色系统理论^[11,12]。

1 实验数据和灰色关联度分析

1.1 实验数据

振动的标准测量方法如图 1 所示,振动值为:
$$Z = 20 \lg(1000a/g) \quad (1)$$
式中: Z/dB 为轴承加速度振动值; $a/(\text{m}/\text{s}^2)$ 为测量点处轴承振动加速度有效值; $g/(\text{m}/\text{s}^2)$ 为重力加速度。

表 1 列出本文使用的符号及其含义,实验得到的数据见表 2 和表 3。测量数据时,规定外圈端面标

有一点的为轴承的正面,另一面为反面,最终数据取正面和反面数据的算术平均值。

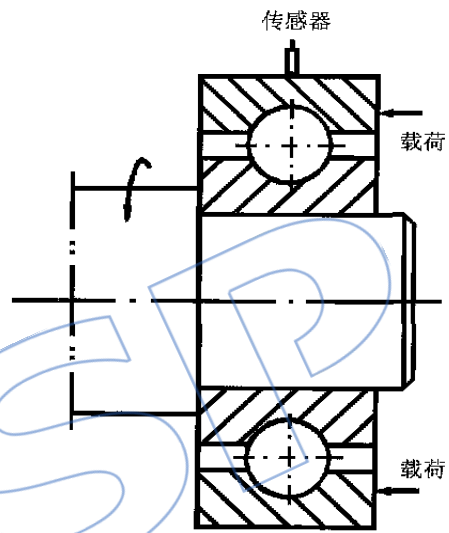


图 1 振动测量
Fig.1 Measurement of vibration

1.2 灰色关联度分析

轴承结构参数和加工质量参数对轴承振动的影响规律是十分复杂的,必须了解轴承振动值的概率分布,并有大批量的实验数据,才可能进行统计学意义上定量分析。另外,在这方面公开发表的研究资料很少,这给定量的统计分析带来难度。下面的研究将采用灰色系统理论的基本概念。主要原因是^[11,12]:灰色系统理论研究问题,允许很少的数据,并对数据的概率分布无特殊要求。

轴承振动数据 X_0 和结构参数数据 X_j 分别构成如下序列:

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

$$X_j = [x_j(1), x_j(2), \cdots, x_j(k), x_j(n)] \quad (3)$$

式中: j 为数据列序号, $j = 1, 2, \cdots, 6$; k 为数据序号, $k = 1, 2, \cdots, n$ 。

无量纲初始化后^[12],式(2)和式(3)分别变为:

$$Y_0 = [y_0(1), y_0(2), \cdots, y_0(k), y_0(n)] \quad (4)$$

表 1 符 号
Table 1 Symbol

序号	符号	含 义	参数性质	单位
1	X_0	振动加速度有效值	性 能	dB
2	X_1	内圈沟道曲率半径	结构尺寸	mm
3	X_2	外圈沟道曲率半径	结构尺寸	mm
4	X_3	内圈沟道形状误差	宏观形状	μm
5	X_4	外圈沟道形状误差	宏观形状	μm
6	X_5	内圈沟道表面粗糙度	微观形貌	μm
7	X_6	外圈沟道表面粗糙度	微观形貌	μm

表 2 HKA 轴承数据
Table 2 Data of HKA bearing

k	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	X_6	X_0
1	10.64	10.68	0.58	0.46	0.02	0.03	49.5
2	10.67	10.67	0.67	0.6	0.02	0.04	53.0
3	10.65	10.68	0.53	0.69	0.02	0.02	50.0
4	10.68	10.68	0.51	0.80	0.03	0.04	50.0
5	10.64	10.67	0.50	0.46	0.03	0.03	47.0
6	10.67	10.68	0.45	0.56	0.03	0.02	52.5
7	10.60	10.69	0.42	1.28	0.03	0.03	46.0
8	10.65	10.70	0.42	0.56	0.03	0.04	49.0
9	10.65	10.68	0.63	0.50	0.03	0.04	48.0
10	10.65	10.69	0.54	0.56	0.03	0.09	48.0
11	10.66	10.67	0.35	0.68	0.05	0.03	48.5
12	10.63	10.70	0.54	0.96	0.02	0.05	56.5
13	10.64	10.68	0.50	0.55	0.02	0.03	52.5
14	10.63	10.69	0.58	0.57	0.03	0.03	51.0
15	10.64	10.69	0.39	0.67	0.03	0.06	49.5
16	10.63	10.68	0.48	0.75	0.02	0.02	58.0
17	10.68	10.68	0.36	0.38	0.02	0.03	48.0
18	10.63	10.69	0.38	0.43	0.02	0.05	49.0
19	10.64	10.67	0.57	0.64	0.04	0.04	46.0
20	10.64	10.69	0.50	0.43	0.02	0.03	51.5
21	10.61	10.69	0.48	0.60	0.03	0.02	50.5
22	10.63	10.68	0.49	0.80	0.03	0.03	52.0
23	10.65	10.69	0.54	0.46	0.04	0.05	48.5
24	10.67	10.68	0.41	0.56	0.03	0.03	47.0
25	10.65	10.67	0.60	0.68	0.03	0.04	56.5
26	10.68	10.70	0.52	0.61	0.02	0.04	47.0
27	10.64	10.67	0.56	0.53	0.04	0.04	51.5
28	10.64	10.68	0.72	0.71	0.03	0.05	48.0

表 3 HKB 轴承数据
Table 3 Data of HKB bearing

k	X_1	X_2	X_3	X_4	X_5	X_6	X_0
1	4.098 7	4.171 5	0.59	0.68	0.042	0.067	35.0
2	4.085 1	4.164 8	1.23	0.49	0.068	0.041	35.0
3	4.092 1	4.181 1	0.40	0.73	0.044	0.05	35.5
4	4.086 9	4.167 8	0.24	0.49	0.030	0.043	39.0
5	4.097 1	4.168 1	0.38	0.28	0.045	0.026	36.5
6	4.093 7	4.169 9	0.34	0.33	0.035	0.03	37.5
7	4.097 4	4.168 5	0.81	0.49	0.045	0.028	35.5
8	4.087 8	4.180 2	0.36	0.24	0.024	0.033	36.5
9	4.096 3	4.159 0	0.36	0.67	0.037	0.55	36.5
10	4.099 7	4.170 1	0.40	0.60	0.031	0.048	40.5
11	4.094 3	4.171 7	0.29	0.29	0.038	0.03	37.0
12	4.088 3	4.165 4	0.43	0.40	0.035	0.024	43.5
13	4.095 4	4.156 0	0.77	0.56	0.037	0.049	35.0
14	4.093 7	4.169 4	0.29	0.46	0.028	0.045	35.0
15	4.092 7	4.159 1	0.42	0.27	0.054	0.037	37.0
16	4.093 5	4.172 9	0.32	0.40	0.023	0.039	37.0
17	4.103 2	4.168 2	0.39	0.38	0.031	0.027	37.0
18	4.095 8	4.176 4	0.38	0.22	0.036	0.025	33.5
19	4.093 4	4.162 4	1.51	0.49	0.085	0.053	35.5
20	4.095 4	4.166 2	0.61	0.22	0.039	0.033	35.0
21	4.097 4	4.154 4	0.38	0.37	0.036	0.032	48.0
22	4.087 3	4.167 7	0.55	0.30	0.055	0.033	37.0
23	4.104 9	4.158 9	0.41	0.38	0.03	0.051	37.0
24	4.092 7	4.159 1	0.30	0.37	0.05	0.039	36.5
25	4.093 4	4.172 0	0.31	0.46	0.026	0.056	36.0
26	4.092 0	4.158 4	0.38	0.45	0.029	0.039	36.0
27	4.099 0	4.176 4	0.43	0.56	0.047	0.040	35.0

$Y_j = [y_j(1), y_j(2), \cdots, y_j(k), y_j(n)]$ (5)
式中: $y_0(k) = \frac{x_0(k)}{x_0(1)}$; $y_j(k) = \frac{x_j(k)}{x_j(1)}$

灰色关联系数为:
 $\xi_{0j}(k) = (\Delta_{\min} + \Delta_{\max}K)/(\Delta_{0j} + \Delta_{\max}K)$ (6)
式中: $\Delta_{0j}(k) = |y_0(k) - y_j(k)|$
 $\Delta_{\min} = \min_j \min_k \Delta_{0j}(k)$
 $\Delta_{\max} = \max_j \max_k \Delta_{0j}(k)$

在式(6)中,分辨系数 $K \in [0, 1]$, 其取值大小不影响本问题的评价结果, 本文取 $K = 0.1$ 。
灰色关联度为:
$$\gamma_{0j} = \frac{1}{n} \sum_{k=1}^n \xi_{0j}(k)$$
 (7)
灰色系统理论认为: $\gamma_{0j} \in [0, 1]$; γ_{0j} 的大小,

为 X_j 相对 X_0 的关联程度。 γ_{0j} 越大, X_j 相对 X_0 的关联度越大, 反之越小。因此, 可根据 γ_{0j} 的相对大小来评价各参数 X_j 对轴承振动 X_0 的影响程度。为便于分析, 将相关计算结果列在表 4。

由表 4 可以知道: 对 HKA 轴承而言, 有:
 $\gamma_{01} \approx \gamma_{02} > \gamma_{03} > \gamma_{06} > \gamma_{04} \approx \gamma_{05}$
对 HKB 轴承而言, 有:
 $\gamma_{01} \approx \gamma_{02} > \gamma_{05} > \gamma_{04} \approx \gamma_{03} \approx \gamma_{06}$
 γ_{01} 和 γ_{02} 较大, $\gamma_{03}, \gamma_{04}, \gamma_{05}$ 以及 γ_{06} 较小, 说明尺寸参数对轴承振动的影响比较大, 宏观形状参数和微观形貌参数对轴承振动的影响较小。
 $\gamma_{01} \approx \gamma_{02}$, 说明外圈尺寸参数的变化和内圈尺寸参数的变化对轴承振动的影响程度是一致的, 因此, 外圈和内圈尺寸参数的变化范围应当保持

表4 灰色关联度 γ_{0j} ($K= 0.1$)

Table 4 Grey relational grade γ_{0j} ($K= 0.1$)

轴承编号	γ_{01}	γ_{02}	γ_{03}	γ_{04}	γ_{05}	γ_{06}
HKA	0. 828 1	0. 827 8	0. 592 8	0. 476 4	0. 462 2	0. 515 3
HK B	0. 929 8	0. 929 6	0. 636 0	0. 650 7	0. 743 0	0. 601 2

一致。

难以区分 γ_{03} , γ_{04} , γ_{05} 以及 γ_{06} 的大小, 说明宏观形状参数的变化和微观形貌参数的变化, 对轴承振动的影响程度没有大的差异。

以上结果还表明: 很难区分内圈各参数和外圈各参数谁对轴承振动的贡献大。

必须注意, 以上讨论结果是相对性的。宏观形状参数和微观形貌参数对轴承振动的影响小, 表示所研究轴承的宏观形状误差和微观形貌误差已经达到比较高的水平, 以至于对轴承振动的影响不再成为主要因素, 可以继续保持现在的质量水平。结构尺寸对轴承振动的影响大, 表示所研究轴承的结构尺寸参数大小及其误差允许范围的设计方法还存在一些问题, 从而成为影响轴承振动的主要因素, 必须进行新的设计。事实上, 所研究轴承的设计方法仍然采用了20 世纪80 年代的疲劳寿命设计方法, 这显然是不合适的, 因为轴承振动与噪声的设计完全不同于疲劳寿命设计, 其中结构参数设计是很重要的^[5], 同时, 轴承的振动与噪声寿命一般比疲劳寿命低。当然, 和结构声疲劳寿命^[1]一样, 航空轴承振动与噪声的设计理论与方法也将成为一个重要的研究课题^[5,8]。

2 结 论

轴承振动是轴承零件各种参数的综合反映, 其中, 结构尺寸参数是最重要的。

难以鉴别内圈的参数和外圈的参数谁对轴承振动的激励大。

在轴承产品设计时, 内圈和外圈的相应参数, 例如尺寸参数、宏观形状参数和微观形貌参数等的变化范围可以保持一致。

轴承的振动与噪声设计不同于疲劳寿命设计。

参考文献:

[1] 金弈山, 李琳. 关于航空发动机结构声疲劳寿命估算方法的探[J]. 航空动力学报, 2003, 18(3): 373~377.

JIN Yi-shan, LI Lin. Sonic Fatigue Life Prediction of

Aeroengine Structure [J]. *Journal of Aerospace Power*, 2003, 18(3): 373~377.

[2] 韩茂祥, 姚鲁群. 航空发动机主轴轴承使用寿命的概率分布与可靠性分析[J]. 南京理工大学学报, 2002, 26(5): 552~556.

HAN Mao-xiang, YAO Lu-qun. The Probability Distribution and Reliability Analysis of the Life of Aeroengine's Main Axle Bearings[J]. *Journal of Nanjing University of Science and Technology*, 2002, 26(5): 552~556.

[3] 马枚, 李强华, 王荣桥. 航空发动机转子动力优化设计软件工具研究[J]. 北京航空航天大学学报, 2002, 28(2): 217~220.

MA Mei, LI Qiang-hua, WANG Rong-qiao. Aeroengine Multi Rotors Dynamics Optimum Design-Model and Tool [J]. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2002, 28(2): 217~220.

[4] 金捷. 美国推进系统数值仿真(NPSS) 计划综述[J]. 燃气涡轮试验与研究, 2003, 16(1): 57~62.

JIN Jie. A Summary of Numerical Propulsion Simulation System (NPPSS) by NASA [J]. *Test and Research of Gas Turbine*, 2003, 16(1): 57~62.

[5] 杨海生, 邓四二, 夏新涛. SKF 滚动轴承仿真技术进展[J]. 轴承, 2004, 46(4): 43~46.

YANG Hai-sheng, DENG Si-er, XIA Xin-tao. Development of SKF Rolling Bearing Simulation Technology [J]. *Bearing*, 2004, 46(4): 43~46.

[6] Anantapadmanaban T, Radhakrishnan V. An Investigation of the Role of Surface Irregularities in the Noise Spectrum of Rolling and Sliding Contacts [J]. *Wear*, 1982, 83(1): 399~409.

[7] Kanai H, Abe M, Kido K. Estimation of the Surface Roughness on the Race or Balls of Ball Bearing by Vibration Analysis [J]. *A S ME Trans*, 1987, 109(1): 60~68.

[8] 夏新涛, 颀谭成, 邓四二, 等. 滚动轴承噪声的谐波控制原理 [M]. 声学学报, 2003, 3(28): 255~261.

XIA Xin-tao, XIE Tan-cheng, DENG Si-erm, et al. Harmonic Control Principle of Bearing Noise [J]. *ACTA Acustica*, 2003, 3(28): 255~261.

[9] Zandbergen T, Nijen G. Less Noise and Vibration by Proper Rolling Bearing Accuracy, Design and Installation [J]. *Shock and Vibration Digest*, 2000, 32(1): 40~51.

[10] Tandon N, Choudhury A. Theoretical Model to Predict the Vibration Response of Rolling Bearings in a Rotor Bearing System to Distributed Defects Under Radial Load [J]. *Journal of Tribology, Transactions of the A S ME*, 2000, 122(3): 609~615.

[11] Deng Julong. Introduction to Grey System Theory [J]. *The Journal of Grey System*, 1989, 1(1): 1~24.

[12] 邓聚龙. 灰理论基础 [M]. 武汉: 华中科技大学出版社, 2002.