

文章编号: 1000-8055(2007)01-0156-07

滚动轴承振动的灰自助动态评估与诊断

夏新涛^{1, 2}, 陈晓阳¹, 张永振², 王中宇³, 柏有才⁴, 刘春浩¹

(1. 上海大学 轴承研究室, 上海 200072;

2. 河南科技大学 机电工程学院, 河南 洛阳 471003;

3. 北京航空航天大学 仪器科学与光电工程学院, 北京 100083;

4. 人本集团有限公司, 上海 200000)

摘 要: 以灰预报和自助再抽样方法为基础, 提出灰自助动态评估与诊断模型, 以评估和改进滚动轴承的振动. 该模型用动态不确定度、估计区间、估计真值、平均不确定度、平均真值和系统误差测度等 6 个参数, 描述滚动轴承振动的基本特征. 对 HKRB 轴承的试验表明, 该模型对随机误差的概率分布与系统误差的类型没有任何要求, 在平均不确定度为最小的条件下分离出系统误差. 评估的可信度达到 100%. 根据灰自助动态评估结果, 还诊断出影响轴承振动的误差特征, 揭示了来自轴承零件制造的误差根源, 为实施滚动轴承振动的生产过程控制奠定了基础.

关 键 词: 航空、航天推进系统; 滚动轴承; 振动; 评估; 诊断; 非统计原理

中图分类号: TH 133 133

文献标识码: A

Dynamic assessment and diagnosis of vibration of rolling bearings using grey bootstrap

XIA Xin tao^{1, 2}, CHEN Xiao yang¹, ZHANG Yong-zhen²,

WANG Zhong-yu³, BAI You-cai⁴, LIU Chun-huo¹

(1. Research Institute of Bearings, Shanghai University, Shanghai 200072, China;

2. School of Electromechanical Engineering,

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

3. School of Instrument Science and Opto-Electronics Engineering,
Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China;

4. C & U Group Limited Company, Shanghai 200000, China)

Abstract: Based on grey prediction and bootstrap resampling, a model of dynamic assessment and diagnosis is proposed to evaluate and improve vibration of rolling bearings. The model characterizes vibration of rolling bearings by developing six parameters, viz. dynamic uncertainty, estimated interval, estimated true value, mean uncertainty, mean true value, and systematic error measure. Experiments on HKRB bearing show that the model can separate systematic errors with a minimum of the mean uncertainty, without any requirements for both the probability distribution of random errors and the type of systematic errors. Reliability of assessment is proved to be 100%. The model also discovers the effect of error character on vibration of rolling bearings and then lays a foundation of control over vibration of rolling bearings in the process of

收稿日期: 2006-05-23; 修订日期: 2006-10-20

基金项目: 国家自然科学基金资助(50375011; 50675011); 国防科工委项目子项(M KPT-2004-51ZD/7)

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, 上海大学轴承研究室博士生, 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.

production, by revealing error root from making the parts of rolling bearings.

Key words: aerospace propulsion system; rolling bearing; vibration; assessment; diagnoses; non statistical theory

滚动轴承的振动特性对航天航空推进系统动态特性、工作寿命及可靠性等有重大影响^[1,4]. 由美国 NASA 组织实施的航天航空推进系统仿真系统涉及到滚动轴承的振动特性^[1,2], 许多研究也致力于轴承振动的机理、影响因素以及控制方法等细微分析, 并取得许多进展^[3,7]. 为了从总体上把握轴承振动的基本特性, 目前的研究涉及到动态测量与评估等综合问题^[7,10]. 由于轴承制造与装配系统是一个动态的概率分布不确定的随机过程, 并伴随着许多已知和未知的系统误差干扰, 从而使轴承振动产生许多难以预测的复杂变化^[4,6,9,11], 给动态评估与控制带来难度.

目前, 灰预报 GM (1, 1) 模型^[12,13] 和 Bootstrap (自助法)^[14,15] 是系统评估的流行方法. Bootstrap 可以模拟未知分布, 但所产生的评估误差可以是无限的^[16]; GM (1, 1) 有很好的预报功能, 但由于强烈衰减随机误差, 不利于评估不确定性, 并对原始数据有特殊要求^[12]. 为此, 综合 Bootstrap 和 GM (1, 1) 的优点, 提出轴承振动的灰自助动态评估模型 GBM (1, 1) (grey bootstrap model), 并根据评估结果诊断轴承制造过程存在的问题. 所提出的方法属于非统计原理范畴^[3,11].

1 基本原理

1.1 定义说明

为方便与轴承制造过程诊断结合起来研究, 先给出随机误差与系统误差的定义说明.

随机误差是指影响随机振动的制造与装配过程中产生的误差, 例如, 在正常情况下, 轴承零件加工表面的圆度误差和锥度误差等都属于随机误差, 其大小和方向没有明显的时间规律性, 但内含某种统计规律. 随机误差的大小用估计区间和不确定度来度量.

系统误差包括定值系统误差和变值系统误差. 定值系统误差和时间无关, 是常数, 这里指轴承的与结构有关的固有振动速度有效值 (又称估计真值). 变值系统误差是呈某种趋势变化的误差, 和时间有关系, 这里指振动速度有效值的趋势变化规律 (估计真值的变化).

随机误差的扰动, 不会使真值变化即振动速

度有效值的均值 (估计的平均真值) 变化很小; 但变值系统误差会使振动速度有效值发生变化, 其变化量用系统误差测度 (估计真值的变动量) 表示.

1.2 GBM(1, 1) 动态评估

在全自动生产模式下, 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, 采集到滚动轴承振动的数据序列向量:

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

式中, $x(t)$ 为时刻 t (或 t 时刻亦即第 t 套轴承) 的数据. 从 X 中取与时刻 t 紧邻时刻的前 m 个数据 (包括时刻 t 的数据), 构成时刻 t 的动态评估子序列向量如下:

$$\begin{aligned} X_m &= \{x_m(u)\}; \\ u &= t - m + 1, t - m + 2, \dots, t; \\ m &\leq t \end{aligned} \tag{2}$$

式中: u 为 u 时刻.

动态评估的含义是用 t 时刻前的 X_m 评估时刻 t 的振动的状态. 在时刻 t , 由 Bootstrap^[14], 从 X_m 中等概率地随机抽取 1 个数据, 抽取 m 次, 得到第一个 Bootstrap 样本, 它有 m 个数据. 抽取数据是可以再放回的, 即无论抽取多少次, X_m 中信息不会减少或变化, 总保持抽样前状态. 这样连续重复 B 次, 得到 B 个 Bootstrap 再抽样样本, 用向量表示为:

$$Y_{\text{Bootstrap}} = (Y_1, Y_2, \dots, Y_b, \dots, Y_B) \tag{3}$$

式中 Y_b 为第 b 个 Bootstrap 样本, 且有:

$$Y_b = \{y_b(u)\}; b = 1, 2, \dots, B \tag{4}$$

式中: $y_b(u)$ 为 Y_b 中第 u 个 Bootstrap 再抽样数据.

由 GM (1, 1)^[12], 设 Y_b 的一次累加生成序列向量为:

$$X_b = \{x_b(u)\} = \left\{ \sum_{j=t-m+1}^u y_b(j) \right\} \tag{5}$$

灰生成模型可以描述为如下的灰微分方程:

$$\frac{dx_b(t)}{dt} + c_1 x_b(t) = c_2 \tag{6}$$

式中: t 为连续的时间变量, c_1 和 c_2 是待定系数.

用增量代替微分, 即:

$$\begin{aligned} \frac{dx_b(t)}{dt} &= \frac{\Delta x_b(t)}{\Delta t} = \\ x_b(t+1) - x_b(t) &= y_b(t+1) \end{aligned} \tag{7}$$

式中 Δt 取了单位时间间隔 1. 再设均值生成序列向量为:

$$\begin{aligned} \mathbf{Z}_b &= \{z_b(u)\} = \{0.5x_b(u) + 0.5x_b(u-1)\} \\ u &= t-m+2, t-m+3, \dots, t \end{aligned} \quad (8)$$

在初始条件 $x_b(t-m+1) = y_b(t-m+1)$ 下, 灰微分方程的最小二乘解为:

$$\begin{aligned} \hat{x}_b(j+1) &= \\ [y_b(t-m+1) - c_2/c_1]e^{-c_1j} + c_2/c_1 \\ j &= t-1, t \end{aligned} \quad (9)$$

式中, c_1 和 c_2 为 ($c_1 \neq 0$):

$$\begin{aligned} (c_1, c_2)^T &= (\mathbf{D}^T \mathbf{D})^{-1} \mathbf{D}^T (\mathbf{Y}_b)^T \\ u &= t-m+2, t-m+3, \dots, t-1, t \end{aligned} \quad (10)$$

$$\mathbf{D} = (-\mathbf{Z}_b, \mathbf{I})^T; \mathbf{I} = (1, 1, \dots, 1) \quad (11)$$

由累减生成^[12], 时刻 $w = t+1$ 的预测值可以表示为:

$$\begin{aligned} \hat{y}_b(w) &= \hat{x}_b(w) - \hat{x}_b(w-1); \\ w &= t+1 \end{aligned} \quad (12)$$

在时刻 w , 有 B 个数据, 可以构成如下序列向量:

$$\begin{aligned} \hat{\mathbf{X}}_w &= \{\hat{y}_b(w)\}; b = 1, 2, \dots, B; \\ w &= t+1 \end{aligned} \quad (13)$$

由于 B 很大, 因此可以用 $\hat{\mathbf{X}}_w$ 建立 t 时刻关于振动 x_m 的频率函数:

$$f_w = f_w(x_m) \quad (14)$$

式中: f_w 为 GBM(1, 1) 的频率分布函数(一般是直方图), 可以用来描述 t 时刻振动的状态. 这里的状态包括振动在 t 时刻的估计真值和对真值的估计区间.

在 t 时刻的估计真值用加权均值表示:

$$X_0 = X_0(w) = \sum_{k=1}^K f_w x_{mk} \quad (15)$$

式中: X_0 为 t 时刻振动的估计真值, 又称为在 t 时刻系统误差的瞬时值(实际上, 参数 X_0 是从振动的输出信息中分离出来的系统误差); K 表示将 $\hat{\mathbf{X}}_w$ 分为 K 组; k 表示第 k 组, $k = 1, 2, \dots, K$; x_{mk} 为第 k 组中值; f_w 是对应于 x_{mk} 的 GBM(1, 1) 频数.

设概率参数为 $\alpha \in [0, 1]$, 则置信水平为:

$$P = (1 - \alpha) \times 100\% \quad (16)$$

在 t 时刻, 在置信水平 P 下, 对振动真值的估计区间为:

$$\begin{aligned} [X_L, X_U] &= [X_L(w), X_U(w)] = \\ [X_{\alpha/2}, X_{1-\alpha/2}] \end{aligned} \quad (17)$$

式中: $X_{\alpha/2}$ 是对应频数为 $\alpha/2$ 的振动值 x_m ; $X_{1-\alpha/2}$

是对应频数为 $1 - \alpha/2$ 的振动值 x_m ; X_L 是估计区间的下边界值; X_U 是估计区间的上边界值. X_L 和 X_U 分别描述振动在 t 时刻瞬态波动的极小值和极大值.

定义 t 时刻轴承振动的扩展不确定度为:

$$U = U(w) = X_U - X_L \quad (18)$$

式中: U 是 t 时刻在置信水平 P 下的估计的不确定度, 即动态不确定度.

显然, GBM(1, 1) 用 $w = t+1$ 时刻的预报值描述 t 时刻的动态不确定度. 动态不确定度随 t 的变化而变化, 不同于用经典统计方法研究的静态不确定度. 这里虽然使用了频数的概念, 但实际上并未涉及到原始数据序列 $\mathbf{X}$ 的概率分布问题. 这意味着 GBM(1, 1) 不依赖于任何概率分布.

设研究的总时间单位数为 T , 如果有 h 个实际的振动值位于估计区间 $[X_L, X_U]$ 之外, 则对真值估计的可信度定义为:

$$P_B = \left[1 - \frac{h}{T - m} \right] \times 100\% \quad (19)$$

一般, P_B 不等于 P . 由 P_B 定义可知, P_B 越大越好, 最好是 $P_B \geq P$. 由 $[X_L, X_U]$ 和 U 的定义可知, 在 t 时刻, P 越大, 则 U 越大. 若 $P = 100\%$, 则 U 可以取到最大值. 必须注意一个问题, 即 U 越大, $[X_L, X_U]$ 越偏离真值, 进而估计结果越失真. 因此, 定义平均不确定度 U_{mean} :

$$\begin{aligned} U_{\text{mean}} &= U_{\text{mean}}(m, B, P) = \\ \left[\frac{1}{T - m} \right] \sum_{k=m+1}^T U(k) \Big|_{P_B = 100\%} \end{aligned} \quad (20)$$

考虑到最小不确定性^[17], P 应满足:

$$U_{\text{mean}} \Big|_{m, B, P} \rightarrow \min \quad (21)$$

式中: 符号“ $\Big|_{P_B = 100}$ ”是在 $P_B = 100\%$ 的条件下; 符号“ $\rightarrow$ ”是趋近一个极限.

平均不确定度 U_{mean} 实际上是一个统计量, 可以作为轴承振动随机波动状态的统计评价指标. 最合适的评估结果是在 $P_B = 100\%$ 的条件下, U_{mean} 得到最小值. U_{mean} 越小, 振动的波动范围越小, 振动越稳定. 为此, 必须合理选择 m, B 和 P .

为了从整体上评估振动的量值大小, 定义:

$$X_{0\text{mean}} = \left[\frac{1}{T - m} \right] \sum_{k=m+1}^T X_0(k) \quad (22)$$

式中: $X_{0\text{mean}}$ 为平均真值, 也是一个统计量, 可以作为轴承振动量值大小的统计评价指标. 从整体上看, $X_{0\text{mean}}$ 越小, 振动越小.

为了评估系统误差对振动的影响, 定义估计真值的变动量:

$$dX_0 = \max_t X_0(t) - \min_t X_0(t) \quad (23)$$

式中: dX_0 为估计真值变动量, 即系统误差测度.

2 试验研究

2.1 轴承振动的动态评估

轴承振动用径向振动速度有效值表示, 单位为 $\mu\text{m/s}$, 试验用轴承代号为 HKRB, 测量要求按相关标准^[11]. 轴承安装在测试仪器的驱动轴上, 驱动轴以 1 800 r/min 转速带动轴承内圈转动; 80 N 的轴向载荷作用于轴承外圈端面; 速度传感器在轴承外圈半径方向提取轴承的径向振动速度信号. 研究中忽略测量过程中各种误差的影响.

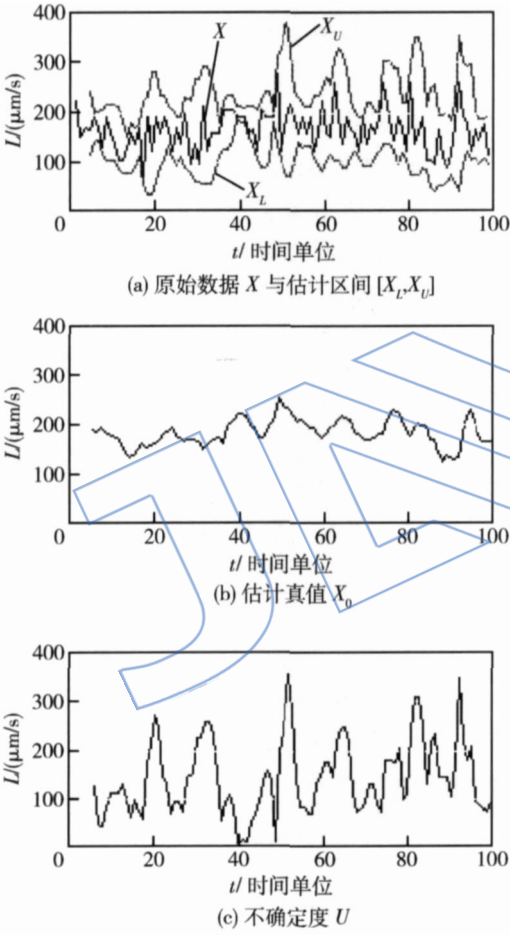


图 1 低频段振动速度动态评估

Fig. 1 Dynamic evaluation for vibrational speed with low frequency band

轴承制造与装配的不同的误差因素对不同频率振动值的影响不同, 据此可以对影响振动的误差实施有针对性的控制^[11]. 因此, 轴承振动速度的评估被划分为 3 个频段: 低频振动速度 L 的频段为 50~300 Hz, 中频振动速度 M 的频段为 300~1 800 Hz, 高频振动速度 H 的频段为 1 800~

10 000 Hz. 100 套试验轴承的有关数据如图 1~图 3 所示. 通过计算, 得到了满足平均不确定度 U_{mean} 为最小的参数及整体评估结果, 如表 1 所示. 由表 1 可知, 所研究的滚子轴承的低频振动和中频振动比较差, 而高频振动比较好.

表 1 轴承振动的整体评估
($P_B=100\%$, $m=4$, $B=2\,500$)
Table 1 Whole evaluation for bearing vibration
($P_B=100\%$, $m=4$, $B=2\,500$)

频段	$P/\%$	$U_{\text{mean}}/(\mu\text{m/s})$	$X_{0\text{mean}}/(\mu\text{m/s})$	$dX_0/(\mu\text{m/s})$
低频段	77	155.5	194.9	88.9
中频段	75	149.4	183.9	70.4
高频段	69	81.4	91.7	23.6

图 1~图 3 给出 3 个频段中轴承振动速度的动态评估结果.

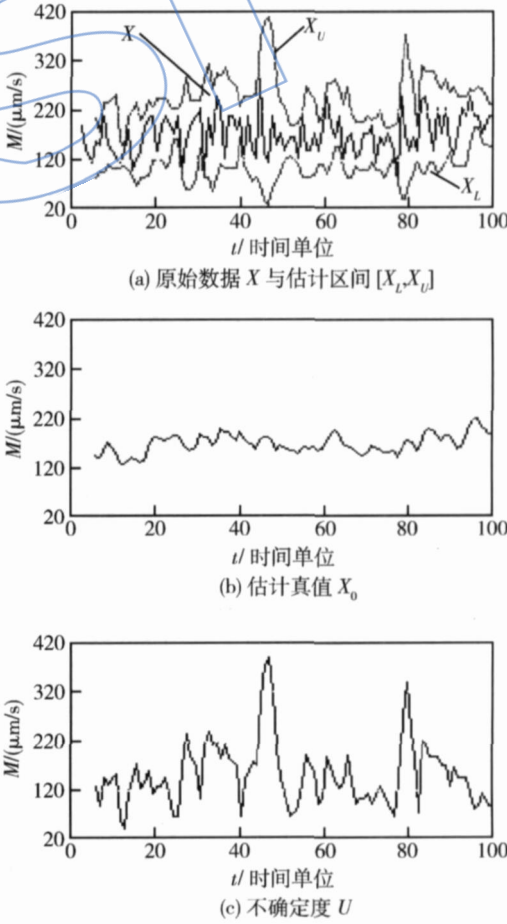


图 2 中频段振动速度动态评估

Fig. 2 Dynamic evaluation for vibrational speed with medium frequency band

图 1(a), 图 2(a) 和图 3(a) 是估计区间 $[X_L, X_U]$ 对原始数据 X 随机波动的动态描述. $[X_L, X_U]$ 比较紧密地从外部包络了 X 的随机波动轨迹, 这表明 GBM(1, 1) 较好地描述了轴承振动速度的瞬态变化状态.

图 1(b), 图 2(b) 和图 3(b) 是估计真值 X_0 对 X 的趋势变化的动态描述. 在图 1(a) 低频段, 从整体上看, X 有先下降然后上升再下降的变化过程, 这个过程被 X_0 在图 1(b) 中基本反映出来了, 系统误差比较大(见表 1, $dX_0 = 88.9$). 在图 2(a) 中频段, X 有整体上升的变化趋势, 这个过程被

度 U 的动态描述. X 的随机波动越大, U 值越大, 反之 U 值越小, 与 X_0 的变化无关. 这意味着 GBM(1, 1) 可以动态分离系统误差, 使随机振动的评估结果 U 和 $[X_L, X_U]$ 不受系统误差的影响, 因而 GBM(1, 1) 无须系统误差的任何先验知识.

从以上分析可知, 该轴承低频和中频振动值 X_{0mean} 大的原因是系统误差大, 而高频振动值 X_{0mean} 小的原因是系统误差小; 低频和中频振动平均不确定度 U_{mean} 大的原因是随机振动大, 而高频振动平均不确定度 U_{mean} 小的原因是随机振动小.

2.2 影响因素试验与分析

为了确认系统误差对低频段和中频段振动造成的影响, 并诊断影响振动速度的因素, 按顺序从时刻 $t = 1 \sim 50$ 个时间单位的 50 套轴承中取出 30 套, 依次序编号为 1~30. 将取出的轴承拆套, 测量套圈各加工表面的所有误差即制造过程中的误差项目, 发现系统误差主要来源于外圈滚道圆度误差 δ_e 、内圈滚道圆度误差 δ_i 、内圈滚道锥度误差 C_i 和斜挡边粗糙度 R_a 等, 有关结果如图 4 和图 5 所示.

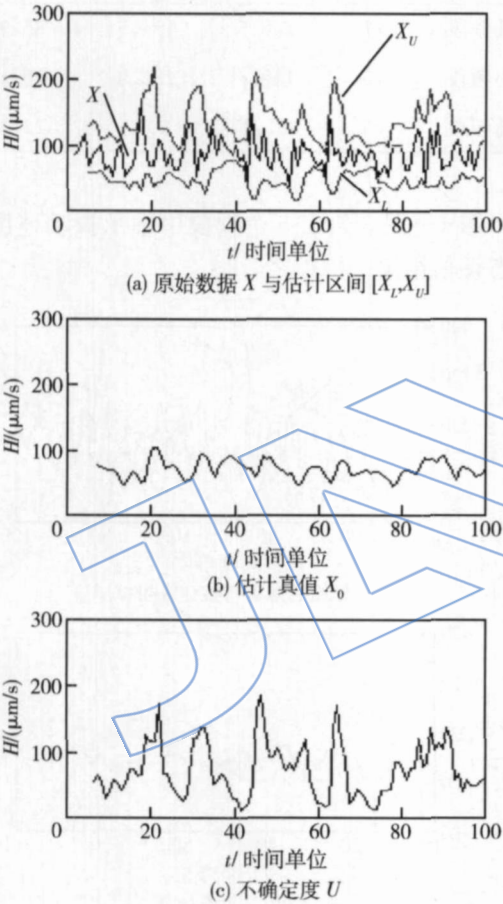


图 3 高频段振动速度动态评估

Fig. 3 Dynamic evaluation for vibrational speed with high frequency band

X_0 在图 2(b) 中反映出来了, 即整体上 X_0 呈现逐渐上升的状态, 系统误差比较大($dX_0 = 70.4$). 在图 3(a) 高频段, 从整体上看, X 几乎没有趋势变化规律, 在图 3(b) 中 X_0 可近似为一条水平线, 即系统误差比较小($dX_0 = 23.6$). 这意味着 GBM(1, 1) 可以动态地评估系统误差对瞬时振动值的影响.

图 1(c), 图 2(c) 和图 3(c) 是对 X 的不确定

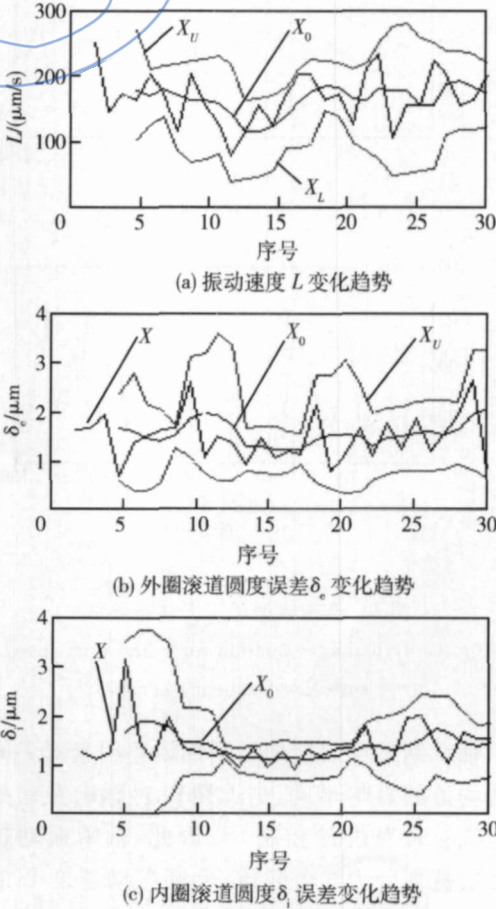


图 4 质量分析(低频段)

Fig. 4 Quality analysis (low frequency band)

图 4(a) 是 30 套轴承的低频段振动速度数据和动态评估结果, 原始数据 X 和估计真值 X_0 整体变化趋势仍保持图 1(a) 和图 1(b) 时间段 $t=1 \sim 50$ 个时间单位中先下降然后上升的趋势. 图 4(b) 和图 4(c) 分别是轴承外圈和内圈滚道圆度误差的原始数据 X 与估计真值 X_0 变化趋势图, 从整体上可以看出, 它们和低频段振动速度几乎有一致的规律. 因此, 影响低频段振动的系统误差就是外圈和内圈滚道的圆度误差. 这些误差随时间 t 有规律地变化, 属于变值系统误差, 和制造过程有关. 对它们的整体评估结果如表 2 所示, 系统误差测度 dX_0 约为 0.9, 达到平均真值 X_{0mean} 的 50% 以上, 比较大, 是造成低频段振动速度差的主要原因.

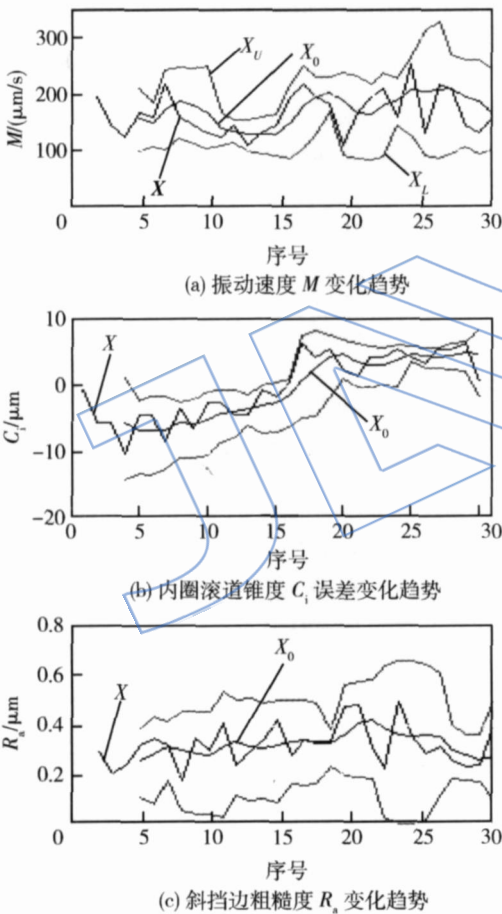


图 5 质量分析 (中频段)

Fig. 5 Quality analysis (medium frequency band)

图 5(a) 是 30 套轴承的中频段振动速度数据和动态评估结果, X 和 X_0 整体变化趋势仍保持图 2(a) 和图 2(b) 时间段 $t=1 \sim 50$ 个时间单位中先上升再下降的趋势. 图 5(b) 和图 5(c) 分别是轴承内圈滚道锥度和斜挡边粗糙度误差的 X 与 X_0 变化趋势图, 从整体上可以看出, 它们和中频段振

动速度有一致的先上升再下降的趋势规律. 因此, 影响中频段振动的系统误差就是内圈滚道锥度和斜挡边粗糙度误差. 这些误差随时间 t 有规律地变化, 属于变值系统误差, 和制造过程有关. 对它们的整体评估结果如表 2 所示, 内圈滚道锥度的 dX_0 高达 11.97, 远远超过 X_{0mean} ; 斜挡边粗糙度的 dX_0 为 0.18, 达到 X_{0mean} 的 50% 以上, 也比较大. 这 2 个误差造成中频段振动速度变差.

表 2 轴承零件制造质量的整体评估

($P_B = 100\%$)

Table 2 Whole evaluation for machining quality of bearing parts ($P_B = 100\%$)

项 目	$P/\%$	$U_{mean}/\mu m$	$X_{0mean}/\mu m$	$dX_0/\mu m$
外圈滚道圆度误差 δ_e	85	1.70	1.67	0.85
内圈滚道圆度误差 δ_i	85	1.68	1.22	0.90
内圈滚道锥度误差 C_i	85	7.95	1.29	11.97
斜挡边粗糙度 R_a	85	0.42	0.3	0.18

关于影响因素的试验研究, 确认了轴承零件的制造过程存在变值系统误差, 进而导致低频与中频轴承振动速度呈现趋势规律变化, 是振动质量变差的主要原因.

上述理论与试验研究还表明, 灰自助动态评估方法通过 6 个评估参数即估计真值、估计区间、动态不确定度、平均不确定度、平均真值和系统误差测度等, 动态地评估滚动轴承振动的基本特征, 为实施滚动轴承振动的总体评估与生产控制奠定了基础.

3 结 论

以 GM(1, 1) 预报和 Bootstrap 再抽样为基础, 建立了基于全自动生产模式的灰自助动态评估模型 GBM(1, 1), 较好地解决了滚动轴承振动的动态评估问题.

推荐了用于动态评估滚动轴承振动的 6 个评估参数, 即估计真值、估计区间、动态不确定度、平均不确定度、平均真值和系统误差测度等. 动态评估的实施是在 100% 的可信度下, 以最小平均不确定度为基本条件的.

滚动轴承振动的 GBM(1, 1) 动态评估实现了误差的动态分离, 因而无需系统误差和随机误差的任何先验信息.

根据 GBM (1, 1) 的评估结果, 可以诊断影响滚动轴承振动的误差特征, 并揭示轴承零件制造过程存在的误差根源, 为实施滚动轴承振动的总体评估与生产控制奠定了基础。

参考文献:

- [1] 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 (NPSS) by NASA [J]. Test and Research of Gas Turbine, 2003, 16(1): 57-62
- [2] 林基恕, 张振波. 21 世纪航空发动机动力传输系统的展望[J]. 航空动力学报, 2001, 16(2): 109-114, 118
LIN Jishu, ZHANG Zhenbo. Prospects of aeroengine power transmission system in the 21st century[J]. Journal of Aerospace Power, 2001, 16(2): 109-114, 118
- [3] 夏新涛, 王中宇, 常洪. 滚动轴承加工质量与振动的灰色关联度[J]. 航空动力学报, 2005, 20(2): 250-254
XIA Xintao, WANG Zhongyu, CHANG Hong. Grey correlation of vibration with rolling bearing's machining quality [J]. Journal of Aerospace Power, 2005, 20(2): 250-254
- [4] Helmut M. Noise characteristics of rolling bearing greases [J]. Lubrication Engineering, 2000, 56(10): 36-41
- [5] Kiral Zeki, Karagülle Hira. Simulation and analysis of vibration signals generated by rolling element bearing with defects [J]. Tribology International, 2003, 36(9): 667-678
- [6] Banda N. Noise and vibration in rolling bearings[J]. Journal of Japanese Society of Tribologists, 2003, 48(1): 43-48
- [7] 唐云冰, 罗贵火. 非线性支承转子的动平衡[J]. 航空动力学报, 2005, 20(4): 601-605
TANG Yunbing, LUO Guihuo. Rotor balancing taking nonlinear stiffness characteristics into account [J]. Journal of Aerospace Power, 2005, 20(2): 601-605
- [8] 王平, 廖明夫. 滚动轴承故障诊断的自适应共振解调技术[J]. 航空动力学报, 2005, 20(4): 607-612
WANG Ping, LIAO Mingfu. Adaptive demodulated resonance technique for the rolling bearing fault diagnosis [J]. Journal of Aerospace Power, 2005, 20(4): 607-612
- [9] Arenas J.P. Enhancing the vibration signal from rolling contact bearing using an adaptive closed-loop feedback control for wavelet denoising [J]. Journal of Mechanical Engineering, 2005, 51(4): 184-193
- [10] Estocq P, Bolaers F, Dron J.P. Method of denoising by spectral subtraction applied to the detection of rolling bearings defects [J]. Journal of Vibration and Control, 2006, 12(2): 197-211
- [11] 夏新涛, 颜潭成, 孙立明, 等. 滚动轴承噪声理论与实践[M]. 北京: 机械工业出版社, 2005
XIA Xintao, XIE Tancheng, SUN Liming, et al. Theory and practice of noise of rolling bearings [M]. Beijing: China Machine Press, 2005
- [12] Julong D. Introduction to grey system theory [J]. The Journal of Grey System, 1989, 1(1): 1-24
- [13] Tzur Li Tien. A Research on the prediction of machining accuracy by the deterministic grey dynamic model DGDm (1, 1, 1) [J]. Applied Mathematics and Computation, 2005, 161: 923-945
- [14] Efron B. Bootstrap methods [J]. The Annals of Statistics, 1979, 7: 1-66
- [15] Reeves J.J. Bootstrap prediction intervals for ARCH models [J]. International Journal of Forecasting, 2005, 21: 237-248.
- [16] Yatracos Y. Assessing the quality of bootstrap samples and of the bootstrap estimates obtained with finite resampling [J]. Statistics and Probability Letters, 2002, 59: 281-292.
- [17] Rarnan R, Grillo P. Minimizing uncertainty in vapour cloud explosion modeling [J]. Process Safety and Environmental Protection, 2005, 83(4B): 298-306