

文章编号:1000-8055(2008)11-1993-08

滚动轴承的几何常数和故障特征倍频的估计方法

廖明夫, 马振国, 雷剑宇

(西北工业大学 动力与能源学院, 西安 710072)

摘 要: 提出了几何常数的概念. 通过对轴承几何关系的分析和对 1274 个型号的轴承参数的统计发现, 同系列轴承的几何常数小范围波动, 近似为常数, 不同系列却有较大差异. 确定了 7 个基本类型的滚动轴承共 45 个系列的几何常数. 建立了基于几何常数、滚动体个数和轴承系列的滚动轴承局部内环、外环故障特征倍频的估计方法. 只需已知轴承类型和滚动体个数, 就可得到相应的特征倍频, 为滚动轴承故障诊断提供了有效的途径.

关 键 词: 倍频估计; 滚动轴承; 几何常数; 故障特征倍频

中图分类号: TH133.33

文献标识码: A

Geometry number of rolling element bearings and estimation of characteristic octave frequencies of bearing defects

LIAO Ming-fu, MA Zhen-guo, LEI Jian-yu

(School of Power and Energy, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China)

Abstract: Geometry number was introduced in this paper. According to the geometry relationship of rolling element bearing and the statistics of 1274 bearing models, it was found that bearing geometry number of bearings of the same series of is relatively constant, but it is quite different for different series of bearing. Geometry numbers of 45 series can be classified to 7 basic types. A method to estimate characteristic octave frequencies of defect in inner race and outer race was introduced. The method is based on number of balls, the geometry number and series of bearing. Since geometry numbers are provided and the number of balls and the series of bearing can easily be obtained in practice, the method is helpful for detecting defects in bearings.

Key words: octave frequency estimation; defect characteristic octave frequency; geometry number; rolling element bearing

滚动轴承的故障特征频率是目前利用振动信号分析来诊断滚动轴承局部故障的重要依据和标准^[1-7]. 故障特征频率也可用故障特征倍频来替代, 便于在变转速情况下表达所要提取的故障特征^[8]. 为得到故障特征倍频, 必需事先已知轴承的

几何参数, 即滚动体个数、滚动体直径、接触角和轴承节径. 但在实际中, 常常无法得到这些参数, 给故障诊断带来困难.

为此, 有必要建立滚动轴承的故障特征倍频估计方法. 文献[1]提出, 内环故障特征倍频和外

收稿日期: 2007-10-23; 修订日期: 2008-04-07

作者简介: 廖明夫(1960-), 男, 陕西西安人, 教授、博导、博士, 主要从事发动机结构动力学、旋转机械故障诊断和风力发电技术研究.

收,从而达到环故障特征倍频分别为 0.6 倍和 0.4 倍的滚动体个数.本文对 7 个基本类型共 45 个系列 1274 个轴承型号进行了统计检验,证明文献[1]给出的估计值对 SKF 球面滚子轴承 22300 系列、SKF 角接触球轴承 7400 系列、SKF 圆锥滚子轴承 30300 系列和 31300 系列、SKF 圆柱滚子轴承 N200 系列、N300 系列和 N400 系列是适用的,内环特征倍频误差在 5 % 以内,外环特征倍频在 7.5 % 以内.对其它类型的轴承系列误差较大,需要修正.

本文依据滚动轴承的几何关系,定义 $p = \frac{d \cos \alpha}{D} \cdot Z$ (d 为滚动体直径, D 为轴承节径, α 为接触角, Z 为滚动体个数) 为滚动轴承的几何常数.通过对轴承几何关系的分析和对轴承参数的统计发现,同系列轴承,轴承的几何常数小范围波动,可近似为常数.利用几何常数,建立了滚动轴承局部故障特征倍频的估计方法,确定了 7 个基本类型 45 个轴承系列的几何常数库.只需已知轴承类型和滚动体个数,就可得到轴承外环故障、内环故障的特征倍频,误差范围(与利用标准轴承数据,按照特征频率公式计算的结果比较)在 2 % 以内,为滚动轴承故障诊断提供了有效的支持.

1 滚动轴承局部故障特征倍频

轴承不同元件的局部故障特征频率可以通过轴承简单的运动关系,由轴承的转速、轴承零件的形状、尺寸参数和滚动体个数计算得到^[9].特征倍频由特征频率直接推导得到.

内环滚道局部故障特征倍频

$$F_i = f_i / f = Z \cdot [1 + (d \cos \alpha / D) / 2], \quad (1)$$

外环滚道局部故障特征倍频

$$F_e = f_e / f = Z \cdot [1 - (d \cos \alpha / D) / 2], \quad (2)$$

保持架局部故障特征倍频

$$F_c = f_c / f = [1 - (d \cos \alpha / D) / 2] = F_e / Z \quad (3)$$

其中 f_i , f_e , f_c 分别为内环滚道、外环滚道、保持架局部故障特征频率, f 为内环转动频率, D 为轴承节径, d 为滚动体直径, α 为接触角, Z 为单列滚动体个数.

由式(1)~(3)可见,需要已知轴承的节径、滚动体直径、接触角以及滚动体个数才能算得上述的特征倍频.《机械设计手册 轴承》^[10] 给出了符合 GB/T 276-1994 标准的深沟球轴承系列尺寸列表,其它国标轴承则参数不足,无法直接计算.

2 基于倍频因子和滚动体个数的故障特征倍频估计方法

如上所述,在实践中滚动轴承的几何参数较难获得,其故障倍频不能通过式(1)~式(3)直接计算得出.而滚动体个数是容易获知的.如果能从滚动体个数估计出故障特征倍频,就可以给诊断轴承故障带来极大的方便.

文献[1]提出,内环故障特征倍频和外环故障特征倍频分别为 0.6 倍(倍频因子 = 0.6)和 0.4 倍(倍频因子 = 0.4)的滚动体个数,即

$$F_i = 0.6 \times Z, \quad F_e = 0.4 \times Z. \quad (4)$$

利用 7 个基本类型共 45 个系列的轴承数据对此估计值进行检验,结果表明:文献[1]给出的估计值对 SKF 球面滚子轴承 22300 系列、SKF 角接触球轴承 7400 系列、SKF 圆锥滚子轴承 30300 系列和 31300 系列、SKF 圆柱滚子轴承 N200 系列、N300 系列和 N400 系列是适用的,内环特征倍频误差在 5 % 以内,外环特征倍频在 7.5 % 以内.图 1 给出 SKF22300 系列外环和内环故障特征倍频因子精确值和估计值的比较,可见吻合得很好.对其它类型的轴承系列误差较大,需要修正.图 2 表示国标 61800 系列轴承外环和内环故障特征倍频精确值和估计值的比较.内环和外环相对误差最大分别达到 13.12 % 和 14.82 %.因此,需要建立新的估计方法.

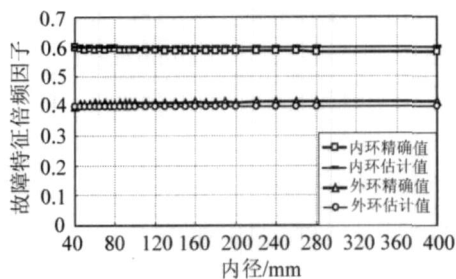


图 1 SKF 22300 系列外环和内环故障特征倍频因子精确值和估计值的比较

Fig. 1 Compare of estimated value and exact value of characteristic octave frequency number (COFN) of inner race and outer race defect in 22300 bearing series of SKF group

把式(1)和(2)改写成

$$F_i = Z \cdot a_i \quad (5)$$

$$F_e = Z \cdot a_e \quad (6)$$

$$a_i = [1 + (d \cos \alpha / D) / 2] \quad (7)$$

$$a_e = [1 - (d \cos \alpha / D) / 2] \quad (8)$$

其中 α_i 和 α_e 分别为内环和外环故障倍频因子。

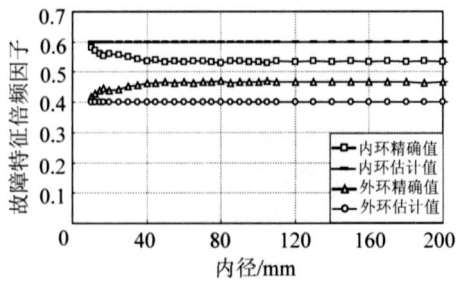


图 2 国标 61800 系列外环和内环故障特征倍频因子精确值和估计值的比较

Fig. 2 Compare of estimated value and exact value of COFN of inner race and outer race defect in 61800 bearing series of China country standard

因此,若估计出 α_i 和 α_e ,就可得到轴承所有故障特征倍频.首先利用 7 个基本类型共 45 个系列的轴承数据,算出每一个系列所有型号轴承特征倍频因子 α_i 和 α_e ,以轴承内径为横坐标画出曲线图.对于 SKF 的轴承系列,利用该公司公众网站公布的计算服务程序进行计算.由于数据量很大,仅给出图 3 和图 4 所示的两个轴承系列的计算结果。

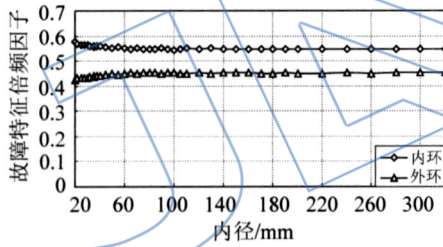


图 3 SKF 32000 系列轴承的内外环故障特征倍频因子

Fig. 3 COFN of inner race and outer race defect in 32000 bearing series of SKF group

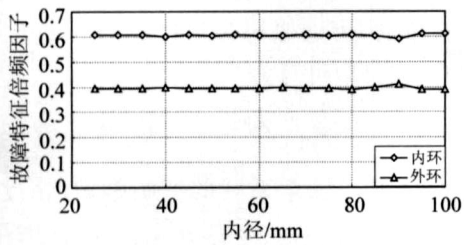


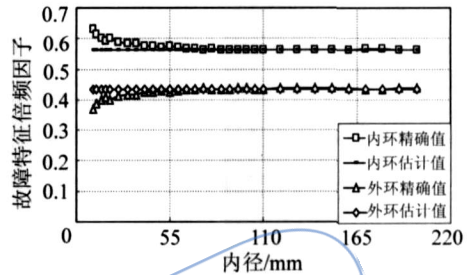
图 4 SKF 7400 系列轴承的内外环故障特征倍频因子

Fig. 4 COFN of inner race and outer race defect in 7400 bearing series of SKF group

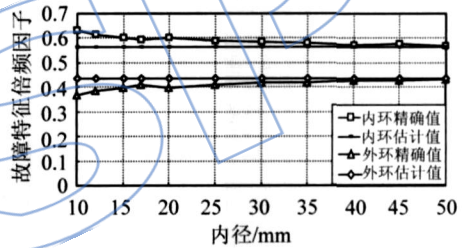
对所得的每一轴承系列倍频因子 α_i 和 α_e 进行线性拟合,就得到该轴承系列的倍频因子估计

值.附录 1 的表 1~表 7 列出了 7 类 45 个轴承系列的内、外环故障特征倍频因子.只需知道轴承类型和滚动体个数,利用表中所给出的倍频因子就可得到对应的特征倍频,而不再必须确知轴承参数。

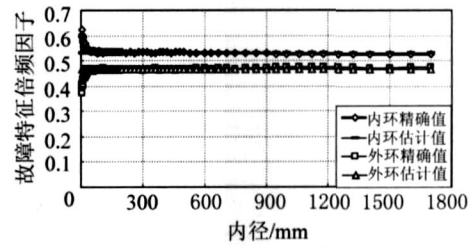
该方法提高了估计精度,各系列平均估计误差都降到了 1.5 % 以下.以国标深沟球轴承 6000 系列和 SKF 深沟球轴承 61800 系列为例,如图 5 所示。



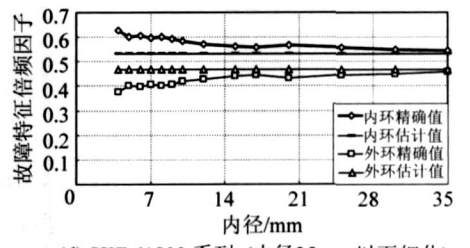
(a) 国标 6000 系列



(b) 国标 6000 系列内



(c) SKF 61800 系列



(d) SKF 61800 系列 (内径 35 mm 以下细化)

图 5 倍频因子估计值与精确值对比

Fig. 5 Compare of estimated value and exact value of COFN of inner race and outer race defect in bearing

另外,从图 5 可以看出,倍频因子估计值与

实际值在很大的范围内都能很好吻合,平均误差很小.但是,在小内径范围,估计误差仍然偏大.其中,SKF61800 系列在轴承内径小于 40 mm 时,内环故障特征倍频因子估计误差最大达到 14.93 % (618/4 轴承),外环估计误差最大达到 24.96 % (618/4 轴承).国标 6000 系列内径 10 mm 以下的轴承参数不足.轴承内径小于 40 mm 时,同样误差较大.内环特征倍频因子估计误差最大达到 10.6 % (6000 轴承),外环估计误差最大达到 18.2 % (6000 轴承).

在小内径范围误差大的主要原因是,倍频因子 a_i 和 a_e 与滚动体个数相关联,式(5)和式(6)表示的几何参数和滚动体个数独立分离的假设不适用.因此,还需建立轴承小内径范围的特征倍频估计方法.

3 滚动轴承的几何常数和故障特征倍频估计的几何常数方法

3.1 滚动轴承几何本构关系和几何常数

滚动轴承的滚动体在内环和外环之间的滚道中绕轴承几何中心公转,公转半径指滚动体中心至轴承几何中心的距离,其 2 倍即为轴承节径 D .图 6 中 R ,即 OA 的长度为轴承公转半径, r 为滚动体半径, O 为轴承几何中心, OB 为滚动体的切线.由图中三角关系,有

$$\sin \theta = \frac{r}{R} = \frac{d}{D} \tag{9}$$

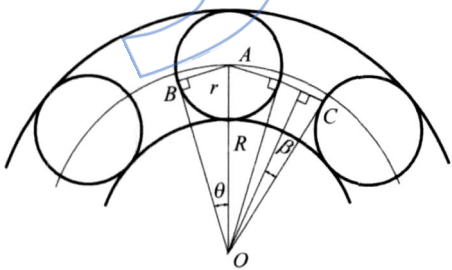


图 6 滚动体与滚道的几何关系示意图
Fig. 6 Geometric relationship of balls and races

表 1 列出 3 个系列轴承滚动体直径与节径之比(即滚节比)随内径和滚动体个数的变化.从中可见,滚动体直径与节径之比(即滚节比)很小.对所有 7 类 45 个系列轴承统计的结果表明,滚动体直径与轴承节径之比 d/D (即滚节比)最大为 0.326 7,平均值为 0.147 7.代入(9)式,得 $\theta \leq \sin^{-1}0.3267 = 0.3328$, $\theta = 0.3328$ 时, $\sin \theta \theta = 0.9816$.由泰勒公式知, θ 越小, $\sin \theta \theta$ 比值越接

近 1,即 $\sin \theta \approx \theta$. d/D 的范围满足使 $\sin \theta \theta \approx 1$,即 $\sin \theta \approx \theta$.于是式(9)对所有滚动轴承变为

$$\theta \approx \frac{d}{D} \tag{10}$$

表 1 3 个系列轴承滚动体直径与节径之比(即滚节比)随内径和滚动体个数的变化

Table 1 Value of d/D of bearing of 3 series changes with Z and inner diameter

SKF61800 系列			SKF61900 系列			国标 6000 系列		
内径/ mm	$\frac{d}{D}$	Z	内径/ mm	$\frac{d}{D}$	Z	内径/ mm	$\frac{d}{D}$	Z
4	0.2514	7	4	0.2667	6	10	0.2631	7
12	0.1450	12	10	0.2044	9	12	0.2312	8
30	0.0976	17	25	0.1415	13	20	0.2048	9
100	0.0667	27	55	0.1059	17	25	0.1754	10
460	0.0720	25	240	0.0848	21	45	0.1499	12
950	0.0533	30	710	0.0800	20	70	0.1367	13
1700	0.0485	33	1700	0.0696	23	200	0.1255	14

由图 6 所示的几何关系,可得

$$Z \cdot \theta + Z \cdot \beta = \pi \tag{11}$$

其中 β 为保持架所产生的节距角.

把式(10)代入式(11),则有

$$\frac{d}{D} Z + Z \beta = \pi. \tag{12}$$

对于近年来有些轴承的滚动体前后相接排列于滚道,即保持架不存在,则有 $\beta = 0$,于是

$$\frac{d}{D} Z = \pi = \text{常数}. \tag{13}$$

对于有保持架的滚动轴承,同一系列的 $Z \beta$ 在小范围波动,可近似视为常数.因此,对于同一系列轴承,式(12)可写为

$$\frac{d}{D} Z = \pi - Z \beta = \pi - G = \text{常数} \tag{14}$$

其中 G 为某一轴承系列的节距常数.由此可知,对于同一系列轴承始终有 $\frac{d}{D} Z = \text{常数}$.

考虑到同系列轴承的滚动体与滚道接触角 α 亦近似为常数,则进一步有 $\frac{d \cos \alpha}{D} Z \approx \text{常数}$.故定义 $p = \frac{d \cos \alpha}{D} Z$ 为滚动轴承的几何常数.它包含了轴承的几何本构关系.

表 2 列出了国标 61800 和 SKF23200 轴承系列的几何常数.

表 2 国标 61800 和 SKF 23200 轴承系列的几何常数 p

Table 2 Geometry number p of 61800 series of China country standard and 23200 series of SKF group

轴承系列	国标 61800	SKF 23200
内径/mm	10~220	90~480
几何常数 p	1.716	2.5192

3.2 故障特征倍频估计的几何常数方法

由式(1)~式(3)可得
内环滚道局部故障特征倍频

$$F_i = \frac{1}{2} (Z + p), \tag{15}$$

外环滚道局部故障特征倍频

$$F_e = \frac{1}{2} (Z - p), \tag{16}$$

保持架局部故障特征倍频

$$F_c = F_e / Z. \tag{17}$$

由式(15)和式(16)可见,滚动体个数 Z 为正整数,始终是精确值,且至少是轴承几何常数 p 的数倍(范围:3.06~23.75).而倍频估计公式中, Z 和 p 为和差关系,这时, p 的误差对估计值的影响很小.因此,基于几何常数的倍频估计方法精度要高得多.图 7 和图 8 给出 2 个系列轴承特征倍频精确值和估计值之间的相对误差,最大不大于 2%.

同样对 7 类 45 个系列 1274 个轴承型号进行了计算.得到每一个轴承系列的几何常数,由附录 1 的表 3~表 9 给出.若已知轴承系列和滚动体个数 Z ,查表中对应的几何常数 p ,根据公式(15)~(17)就可算出故障特征倍频.

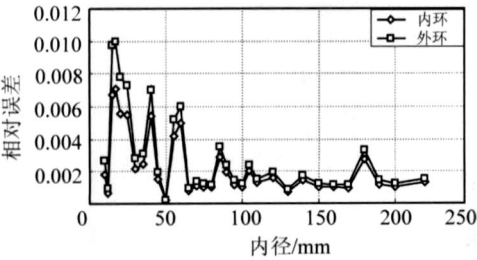


图 7 国标 61900 系列几何常数法所得
内外环倍频值的相对误差

Fig. 7 Relative error of octave frequency from geometry-number method for 61900 bearing series of China country standard

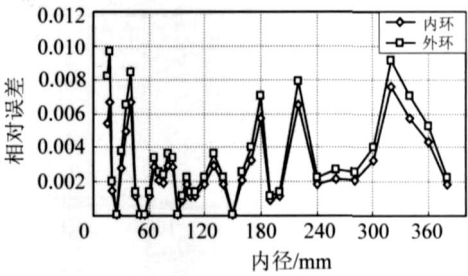


图 8 SKF 16000 系列几何常数法所得
内外环倍频值的相对误差

Fig. 8 Relative error of octave frequency from geometry-number method for 16000 bearing series of SKF group

4 两种方法的比较

基于几何常数估计方法考虑了滚动体个数与滚节比之间的关系,而倍频因子估计方法基于滚动体个数与滚节比独立的假设,对同一轴承系列求出平均倍频因子.利用两种方法对所有系列轴承的倍频进行了估计,结果表明,基于几何常数的估计方法要比倍频因子方法精度高,特别是在小内径范围,效果显著.图 9 和图 10 表示两种方法估计误差的比较.在整个内径范围,基于几何常数的估计方法误差比倍频因子方法的误差都要小,在小内径范围前者误差要小于后者 8~10 倍.

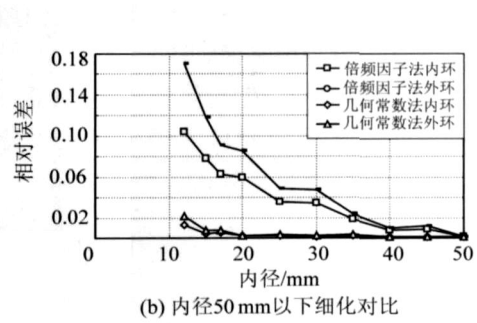
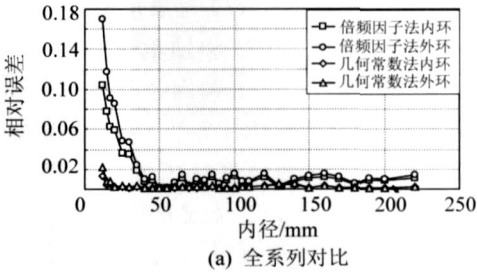


图 9 国标 16000 系列几何常数法和倍频因子法
所得倍频值的相对误差对比

Fig. 9 Compare of relative error of octave frequency from geometry-number method and from COFN method for 16000 bearing series of China country standard

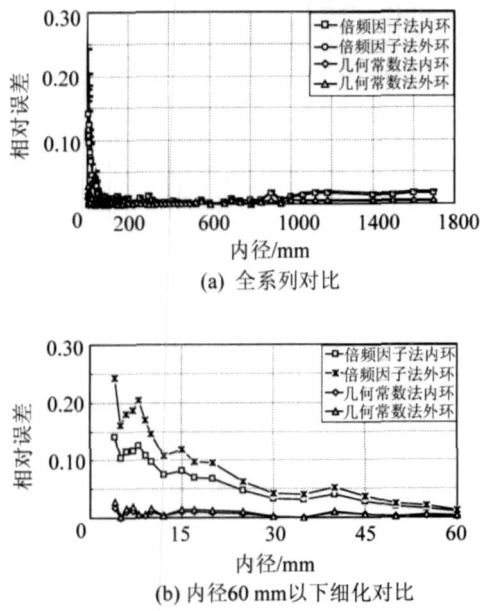


图 10 SKF 61900 系列几何常数法和倍频因子法所得倍频的相对误差对比

Fig. 10 Compare of relative error of octave frequency from geometry-number method and from COFN method for 61900 bearing series of SKF group

5 结 论

本文依据滚动轴承的几何关系,定义 $p = d \cdot Z \cos \alpha / D$ (d 为滚动体直径, D 为轴承节径, α 为接触角, Z 为滚动体个数) 为滚动轴承的几何常数,反映轴承滚动体个数和轴承滚节比间的几何本构关系.建立了基于倍频因子和基于几何常数的轴承故障特征倍频估计方法,对 7 大类型 45 个系列 1 274 个轴承型号进行了统计计算,得到倍频因子表和几何常数表.本文的结论为:

- 1) 同一轴承系列轴承几何常数 p 基本不变;
- 2) 基于几何常数的轴承故障特征倍频估计方法要比基于倍频因子的方法准确;
- 3) 利用本文给出的几何常数表,只需已知轴承系列和滚动体个数就可求得轴承故障特征倍频,内、外环故障特征倍频误差小于 2 %.

参考文献:

[1] Vance J M. Rotordynamics of turbomachinery[M].

New York : Wiley, 1988.

[2] 雷剑宇,廖明夫.基于旋转坐标系转轴振动信号的滚动轴承故障诊断方法[J].航空动力学报,2007,22(8):1340-1345.

LEI Jianyu, LIAO Mingfu. A diagnostic approach to rolling element bearing based on vibration signal of shaft in a rotating reference frame[J]. Journal of Aerospace Power, 2007, 22(8): 1340-1345. (in Chinese)

[3] Matt W, Jeremy S, Sanket A, et al. A comprehensive high frequency vibration monitoring system for incipient fault detection and isolation of gears, bearings and shafts/couplings in turbine engines and accessories[C]// Proceedings of the ASME Turbo Expo. v 5. [S. l.]:[s. n.], 2007: 885-894.

[4] Al-Raheem K F, Asok R, Ramachandran K P, et al. Rolling element bearing fault diagnosis using laplace-wavelet envelope power spectrum[J]. Eurasip Journal on Advances in Signal Processing, 2007:73629.

[5] 陈刚,廖明夫.基于小波分析的滚动轴承故障诊断研究[J].科学技术与工程,2007,12:2810-2814.

CHEN Gang, LIAO Mingfu. Fault diagnosis for a rolling element-bearing based on wavelet analysis[J]. Science Technology and Engineering, 2007, 12: 2810-2814. (in Chinese)

[6] 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):606-612.

WANG Ping, LIAO Mingfu. Adaptive demodulated resonance technique for the rolling bearing fault diagnosis[J]. Journal of Aerospace Power, 2005, 20(4): 606-612. (in Chinese)

[7] 孟涛,廖明夫.利用时延相关解调法诊断滚动轴承的故障[J].航空学报,2004,1:41-44.

MENG Tao, LIAO Mingfu. Detection and diagnosis of the rolling element bearing fault by the delayed correlation-envelope technique[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 2004, 1: 41-44. (in Chinese)

[8] 雷剑宇,廖明夫.滚动轴承局部故障的特征倍频诊断方法[J].测控技术,2007,26(9):72-75.

LEI Jianyu, LIAO Mingfu. A new approach based on the defect characteristic octave frequencies to diagnose local defects in a rolling element bearing[J]. Measurement & Control Technology, 2007, 26(9):72-75. (in Chinese)

[9] 成大先.机械设计手册 轴承[M].北京:化学工业出版社,2004.

[10] 沈庆根.化工机器故障诊断技术[M].杭州:浙江大学出版社,1994.

附录 1 轴承故障特征倍频因子和轴承几何常数表

计算了 7 个基本类型 45 个系列共 1274 个型号的滚动轴承,得到故障特征倍频因子和几何常数如表 3~表 9 所列.

表 3 国标深沟球轴承

Table 3 Deep groove ball bearing of China country standard

倍频因子	轴承系列						
	61800 系列	61900 系列	16000 系列	6000 系列	6200 系列	6300 系列	6400 系列
内环倍频因子	0.5342	0.5481	0.5544	0.5646	0.5865	0.6157	0.6359
外环倍频因子	0.4658	0.4519	0.4456	0.4354	0.4135	0.3843	0.3641
几何常数	1.716	1.7665	1.773	1.798	1.825	1.858	1.9056
轴承内径/mm	10~220	10~220	12~220	10~200	10~200	10~170	17~110
被统计轴承个数	33	33	32	32	32	29	18
轴承个数总计				209			

表 4 SKF 深沟球轴承

Table 4 Deep groove ball bearing of SKF group

倍频因子	轴承系列								
	60800 系列	60900 系列	61800 系列	61900 系列	16000 系列	6000 系列	6200 系列	6300 系列	6400 系列
内环倍频因子	0.5233	0.5346	0.5323	0.544	0.5499	0.5598	0.5849	0.6163	0.6369
外环倍频因子	0.4767	0.4654	0.4677	0.456	0.4501	0.4402	0.4151	0.3837	0.3631
几何常数	1.6	1.6	1.7509	1.7268	1.7631	1.8127	1.8230	1.8414	1.92
轴承内径/ mm	360~1000	320~1320	4~1700	4~1700	15~380	4~1120	3~340	4~280	17~90
被统计轴承 个数	10	9	80	71	39	60	54	42	16
轴承个数 总计	381								

表 5 SKF 圆锥滚子轴承

Table 5 Tapered roller bearing of SKF group

倍频因子	轴承系列									
	30200	30300	31300	32900	32000	32200	32300	33000	33100	33200
	系列	系列	系列	系列	系列	系列	系列	系列	系列	系列
内环倍频因子	0.5704	0.5892	0.5781	0.5358	0.5475	0.5706	0.5841	0.5501	0.5602	0.5699
外环倍频因子	0.4296	0.4108	0.4219	0.4642	0.4525	0.4294	0.4159	0.4499	0.4398	0.4301
几何常数	2.8	2.8158	2.5	2.7059	2.6795	2.7867	2.7394	2.7067	2.7614	2.7588
轴承内径/ mm	17~220	15~260	25~150	75~360	20~320	28~300	17~120	50~150	40~110	25~320
被统计轴承 个数	31	24	21	17	41	33	32	15	14	15
轴承个数总计	243									

表 6 SKF 球面滚子轴承

Table 6 Spherical roller bearing of SKF group

倍频因子	轴承系列								
	21300 系列	22200 系列	22300 系列	23900 系列	23000 系列	23100 系列	23200 系列	24000 系列	24100 系列
内环倍频因子	0.5716	0.5716	0.5886	0.5355	0.5491	0.5598	0.5684	0.5498	0.561
外环倍频因子	0.4284	0.4284	0.4114	0.4645	0.4509	0.4402	0.4316	0.4502	0.439
几何常数	2.795	2.7303	2.7171	2.6	2.6	2.5944	2.5192	2.5852	2.5584
轴承内径/ mm	25~100	25~360	40~400	180~480	110~480	100~480	90~480	65~480	100~480
被统计轴承 个数	16	33	28	17	24	25	26	27	25
轴承个数 总计	221								

表 7 SKF 调心球轴承

Table 7 Spherical ball bearing of SKF group

倍频因子	轴承系列			
	1200 系列	1300 系列	2200 系列	2300 系列
内环倍频因子	0.5629	0.5819	0.5751	0.6079
外环倍频因子	0.4371	0.4181	0.4249	0.3921
几何常数	2.433	2.506	2.5455	2.578
轴承内径/ mm	6~130	5~100	10~110	12~100
被统计轴承个数	27	21	22	20
轴承个数总计	90			

表 9 SKF 圆柱滚子轴承

Table 9 Cylindrical roller bearing of SKF group

倍频因子	轴承系列		
	N200 系列	N300 系列	N400 系列
内环倍频因子	0.577	0.6003	0.6067
外环倍频因子	0.423	0.3997	0.3933
几何常数	2.5822	2.6033	2.3055
轴承内径/ mm	30~120	30~120	30~120
被统计轴承个数	18	18	18
轴承个数总计	54		

表 8 SKF 角接触球轴承

Table 8 Angular contact ball bearing of SKF group

倍频因子	轴承系列		
	7200 系列	7300 系列	7400 系列
内环倍频因子	0.5742	0.5921	0.6049
外环倍频因子	0.4258	0.4079	0.3951
几何常数	2.1393	2.1151	2.1313
轴承内径/ mm	10~190	12~190	25~100
被统计轴承个数	31	29	16
轴承个数总计	76		