网络出版时间：2019-11-20 14:15:57

第 32 卷　第 4 期　石家庄铁道大学学报(自然科学版)　Vol. 32　No. 4
2019 年 12 月 Journal of Shijiazhuang Tiedao University(Natural Science Edition)　Dec. 2019

基于单边波动谱的奇异值分解降噪有效阶次确定方法

张　安，　陈明义，　马增强

(石家庄铁道大学 电气与电子工程学院,河北 石家庄　050043)

摘要:针对奇异值分解降噪中奇异值有效阶次难以确定的问题,提出了一种基于单边波动差分谱的奇异值分解降噪有效阶次确定方法。该方法首先将振动信号构造成 hankel 矩阵,再进行奇异值分解,利用分解所得的奇异值得到波动差分谱,最后根据波动差分谱的单边极大值来确定奇异值有效阶次。通过仿真数据以及实际轴承故障数据的分析,证明该方法能够有效提高信号的信噪比,为后续诊断工作奠定了良好基础。

关键词:奇异值分解;有效阶次;波动差分谱;降噪

中图分类号: TP206.3; TH 133.33　**文献标志码:** A　**文章编号:** 2095 - 0373(2019)04 - 0073 - 08

滚动轴承是现代机械设备中应用最多的部件之一,但由于疲劳、磨损、粘着、腐蚀和破损等因素引起的轴承故障会导致轴承组件出现问题[1],甚至会导致整个机械损坏。而故障振动信号,尤其是早期故障,由于内部激励弱,以及周围复杂的噪声背景和其它干扰源的影响,振动信号的故障特征就会被周围设备噪声所淹没,难以识别。作为一种非线性滤波的信号处理方法,奇异值分解(Singular Value Decomposition, SVD)能够有效地消除信号中的噪声,提高信号的信噪比,且处理过的信号无相位偏移,具有良好的稳定性,得到了广泛的应用。

在 SVD 降噪的方法中确定奇异值阶次一直是研究的难点和热点问题。在工程应用中往往通过观察奇异值曲线,找出曲线的突变点来确定有效阶次或者进行试凑来找到有效阶次,这 2 种方法往往都非常依赖操作者的经验,不易掌握。所以,研究人员都想要找到一种操作性强、原理清晰、结果准确、有量化判据的奇异值有效秩阶次的确定方法。王益艳等[2]提出了奇异值均值法,求得分解后得到的奇异值的平均值,将此数值对应点作为有效阶次。此方法计算简单便捷,在工程方面应用广泛。赵学智等[3]提出了奇异值差分谱法,相邻奇异值做差,差值依次排列得到差分谱,根据差分谱最大值选择有效阶次,该方法在信号信噪比较高的情况下有较好的降噪效果,被广泛采用。王树青等[4]采用奇异值相对变化率的最大值确定有效秩阶次,此方法相比于差分谱是对奇异值做差后的差值增加了权值,其降噪效果以及存在的不足与差分谱法基本相同。钱征文等[5]将信号频谱图中主频个数的 2 倍作为奇异值有效秩阶次,对于频谱特征明显的仿真信号,此方法效果较好。赵学智等[6]发现了有效奇异值和信号频率个数之间的关系,并能够提取出信号的单个频率,此方法在主频明显的情况下效果较好。代荡荡等[7]设置奇异值模糊区,通过模糊 C 均值聚类来确定多个有效奇异值,所提方法完全基于数据驱动,具有较好的去噪效果。龚木红等[8]提出一种分段串联奇异值分解降噪方法,该方法降噪效果优于全局奇异值分解降噪,但在数据分段时需要进行多次实验找出最佳值。郑顾平等[9]提出了基于遗传算法的奇异值降噪方法,能够还原信号细节,有较强鲁棒性。

收稿日期:2018 - 05 - 25　**网络出版日期:**-　**责任编辑:**车轩玉　DOI:10.13319/j.cnki.sjztddxxbzrb.20180525001

网络出版地址: http://kns.cnki.net/kcms/detail/13.1402.n.20191120.1354.013.html

基金项目:国家自然科学基金(U1534202,11372199,11572206)

作者简介:张安(1992—),男,硕士研究生,主要研究方向为滚动轴承故障诊断。E-mail:404716409@qq.com

张安,陈明义,马增强.基于单边波动谱的奇异值分解降噪有效阶次确定方法[J].石家庄铁道大学学报:自然科学版,2019,32(4):73-80.

针对奇异值降噪中有效阶次去确定的问题,上述方法进行了充分的探究,并得到了丰富的成果,但也存在着过降噪、欠降噪以及只适用于特定信号等不足之处。本文也对这个问题进行了研究,提出了一种新的有效阶次确定方法,该方法通过奇异值建立波动谱,选择波动谱单边极大值作为有效阶次。对于上述问题有一定改进。

1 奇异值分解降噪

1.1 奇异值分解原理

测得含有故障信息的振动信号 $x(i)(i=1,2,\cdots,N)$,基于相空间重构理论,能够构造出吸引子轨迹矩阵,也称为 Hankel 矩阵[10]。

$$\boldsymbol{A}=\begin{bmatrix} x(1) & x(2) & \cdots & x(N-L+1) \\ x(2) & x(3) & \cdots & x(N-L+2) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ x(L) & x(L+1) & \cdots & x(N) \end{bmatrix} \tag{1}$$

式中,N 为信号长度;L 为矩阵行数。

对式(1)所得的 Hankel 进行奇异值分解,过程如下式

$$\boldsymbol{A}=\boldsymbol{U}\begin{bmatrix} \sum & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}\boldsymbol{V}^{H} \tag{2}$$

式中,$\boldsymbol{U}$ 是 m 阶正交矩阵;$\boldsymbol{V}$ 是 n 阶正交矩阵。$\sum=\operatorname{diag}(\sigma_1,\sigma_2,\cdots,\sigma_r)$ 是 r 阶对角阵,而 σ_i 是矩阵 $\boldsymbol{A}$ 的非零奇异值。0 是零矩阵。

将式(1)中的零奇异值去除,可以把 $\boldsymbol{A}$ 的奇异值分解写成精简的向量形式[11]

$$\boldsymbol{A}=\sum_{i=1}^{r}\sigma_i\boldsymbol{u}_i\boldsymbol{v}_i^{H} \tag{3}$$

式中,$\boldsymbol{u}_i$、$\boldsymbol{v}_i$ 分别是 $\boldsymbol{U}$、$\boldsymbol{V}$ 的第 i 个列向量。

得到的一系列奇异值 σ_i 各自代表一系列分量信号,因为 $x(i)$ 是含有故障信息的有用信号和噪声组成,所以矩阵 $\boldsymbol{A}$ 也同样含有 2 种信号,而分解得出的奇异值 σ_i 则反映了有用信号和噪声的能量集中情况。前面较大的奇异值主要反映的是有用信号,后面较小的奇异值则主要反映噪声,将这些奇异值置零就可以去除实测信号中的噪声。再利用式(2)进行矩阵重构,经过奇异值分解反变换就可得到重构矩阵,进而将重构矩阵转化为长度为 N 的重构信号,也就是降噪信号。

1.2 奇异值分解关键问题

因此利用奇异值分解降噪,要达到良好的去噪效果关键是奇异值阶次和矩阵结构即行数 L 的确定。矩阵有着良好的去噪效果,在构造矩阵方面的理论研究已经相对成熟。延迟步长 $\tau=1$[12],这在式(3)中已经显示出来,是在构造矩阵时采用最为广泛的一种形式。在矩阵行数 L 选取的方面,Golyandina[13] 和 Mahmoudva ND R et al[14] 经过研究都得出当 N 为偶数时,行数 $L=N/2$,当 N 为奇数时,行数 $L=(N-1)/2$,这样构造出的矩阵降噪效果最好。采用上述矩阵构造方式,对奇异值有效阶次的确定问题进行研究。

2 基于单边波动差分谱的有效阶次确定

奇异值的有效阶次确定的本质就是分析奇异值突变情况,从而找出较大较小的分界线,即找出相差最大的 2 个奇异值,本文提出利用波动差分谱法来确定奇异值阶次,原理如下。

将分解得到的奇异值由大到小排列形成序列 $S=(\sigma_1,\sigma_2,\cdots,\sigma_r)$,通过某个奇异值与它前一个以及后一个奇异值的差值绝对值之和来表示奇异值曲线的波动程度 k

$$d1_i=|\sigma_{i+1}-\sigma_i| \quad i=2,\cdots,r-1 \tag{4}$$

$$d2_i=|\sigma_{i-1}-\sigma_i| \quad i=2,\cdots,r-1 \tag{5}$$

$$k_i=d1_i+d2_i \tag{6}$$

则所有 k_i 所形成的序列 $K(K_1, K_2, \cdots, K_{r-1})$ 称为波动差分谱。通过波动差分谱可以观察到奇异值曲线的波动幅值情况，在波动差分谱中根据单边极大值原则[15]从右至左，选择第一个至少单边与其相邻峰值比较，差距绝对值最大的极大峰值对应点的位置来确定有效阶次。它代表了奇异值去曲线的突变情况，表明了奇异值所反映的意义发生了变化，即故障信息和噪声的区别。前 n 个奇异值对应的分量为有用信号分量，之后的奇异值对应的分量为噪声信号分量。

3　仿真信号分析

构建仿真信号，采用本文方法进行分析，来进行实验，并与广泛应用的均值法、差分谱法进行对比，该仿真信号如下式所示。

$$\begin{cases} x_1(t) = [1 + 0.5\sin(5\pi t)]\sin[120\pi t + 20\pi t^2] \\ x_2(t) = \sin(40\pi t) \\ x_3(t) = n(t) \\ x(t) = x_1(t) + x_2(t) + x_3(t) \end{cases} \tag{7}$$

式中，$x_1(t)$是调幅调频信号；$x_2(t)$是正弦信号；$x_3(t)$是信噪比为 5 dB 的高斯白噪声。$x(t)$是由上述 3 个信号组成的含噪仿真信号，信噪比为 25.530 7 dB，$x_1(t) + x_2(t)$是不含噪声的净信号。信号的采样频率为 $f_s = 1\ 024$ Hz，采样点数 $N = 1\ 024$，采样时间 $t = 1$ s。仿真信号波形如图 1 所示。

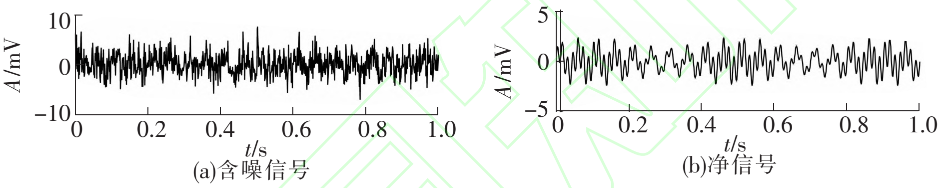


图 1　仿真信号波形

现分别使用 4 种算法对仿真信号进行去噪分析，4 种算法奇异值有效阶次的选取结果如图 2 所示。由图 2(a)得均值法选取的有效奇异值阶次为 229，图 2(b)得差分谱法选取的有效奇异值阶次为 4，单边极大值法选取的有效奇异值阶次为 6。由图 2(c)全貌图以及图 2(d)放大图可得，本文方法所选的极大峰值为 2、4、8、10 对应的峰值。根据单边极大值原则，8 对应峰值与 4 对应峰值差距绝对值最大且是从右往左的第一个极大峰值，所以确定的有效奇异值阶次为 8。

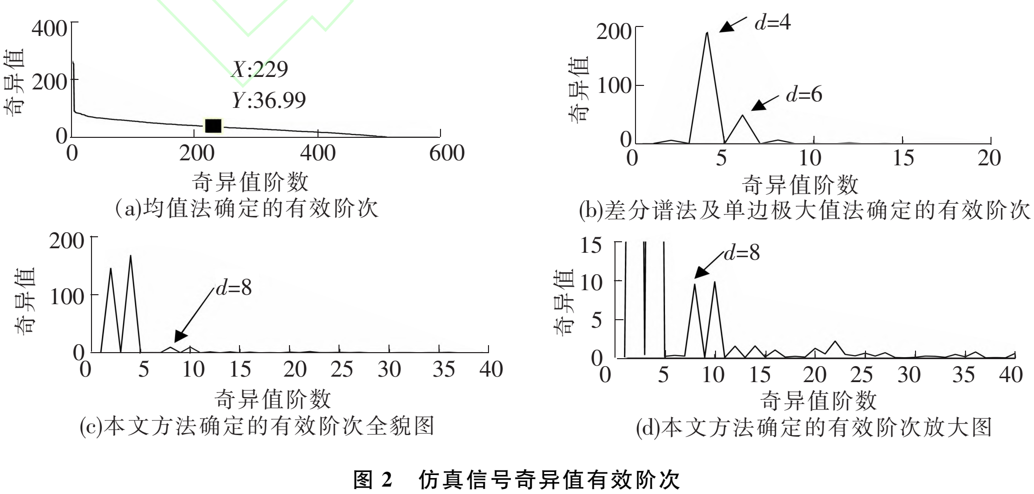


图 2　仿真信号奇异值有效阶次

根据选取的有效奇异值阶次对信号进行重构，得到重构次信号即为降噪信号，4 种方法得到的降噪信号的时域波形如图 3 所示。可以看出，均值法得到的降噪信号与净信号有较大差别，波形凌乱，噪声严重，周期特征不明显。差分谱法噪声明显减少，但是调幅调频特征已经明显被滤掉，出现了过降噪现象。

单边极大值法前半部分调幅调频特征被滤掉，也同样出现了过降噪现象。本文方法噪声明显减小，且信号趋势与净信号基本一致，直观上看降噪效果较好。

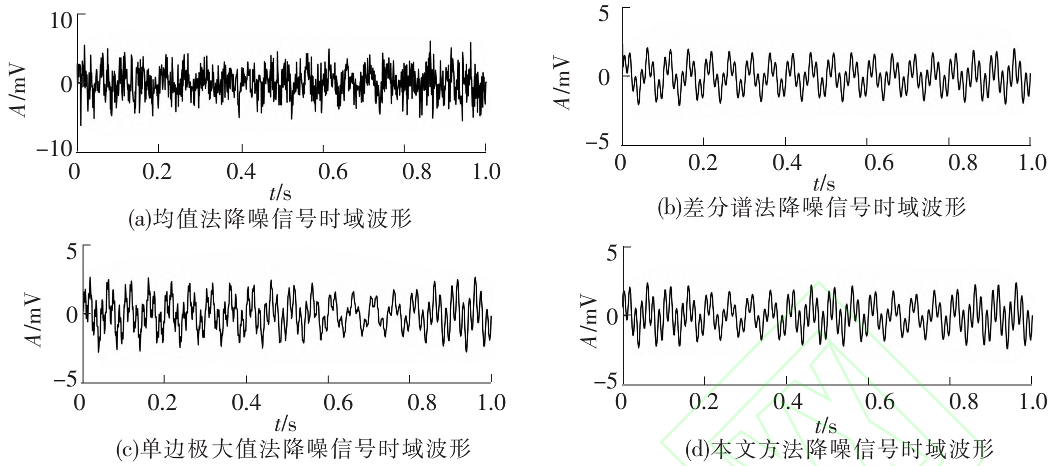


图 3 仿真信号降噪后时域波形

为了能够更精确的评价 4 种方法的降噪效果，从数值上进行比较，采用信号均方误差(Mean Square Error，MSE)和信噪比(Signal to Noise Ratio，SNR)来评价上述 4 种方法，其定义分别如下

$$\mathrm{MSE}=\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}(s(i)-\hat{s}(i))^2 \tag{8}$$

$$\mathrm{SNR}=10\lg\frac{\sum_{i=1}^{N}s^2(i)}{\frac{1}{N}\sum_{i=1}^{N}(s(i)-\hat{s}(i))^2} \tag{9}$$

式中，$s(i)$为净信号的第 i 个数据；$\hat{s}(i)$为降噪信号的第 i 个数据。

表 1 是 4 种方法降噪后的 MSE 和 SNR，从表中数值可以看出，本文降噪方法的 MSE 最小且 SNR 最大，降噪效果最好。

表 1 4 种方法降噪后信号 MSE 和 SNR

评价指标	均值法	差分谱法	单边极大值法	本文方法
MSE	2.651 1	0.109 4	0.051 8	0.012 6
SNR	26.384 3	40.229 7	43.472 1	49.624 3

在净信号中加入不同强度的噪声，得到信噪比分别为 −100 dB、−50 dB、−30 dB、−10 dB、0 dB、10 dB 的仿真信号，来验证本文方法在不同信噪比情况下的去噪能力。在不同信噪比情况下的有效奇异值阶次以及降噪信号的信噪比如图 4、图 5 所示，具体数值在表 2、表 3 中列出。

仿真信号采样点数为 1 024，由第一小节可知，经过奇异值分解可以得到 512 个奇异值。由图 4 以及表 2 可以得出均值法在不同噪声水平下确定的奇异值有效阶次最大为 249，最小为 152，平均值为 223。差分谱法确定的奇异值有效阶次最大为 10，最小为 2，平均值为 5。单边极大值法确定的有效阶次最大为 28，最小为 4，平均值为 14。本文方法确定的有效奇异值阶次最大为 38，最小为 6，平均值为 16。可以看出本文方法确定的有效奇异值阶次更为合理。

降噪结果可由图 5 看出，本文方法的降噪信号的信噪比曲线位于其它 3 种方法上方，即各个噪声水平的仿真信号经过降噪后，得到的降噪信号的信噪比都比其它 3 种方法大。为了更清楚地说明各个方法的降噪能力，采用降噪指数来评价，定义如下

$$I=\mathrm{SNR}_2-\mathrm{SNR}_1 \tag{10}$$

式中，I 为降噪指数；SNR_1 为仿真信号信噪比；SNR_2 为降噪信号信噪比。

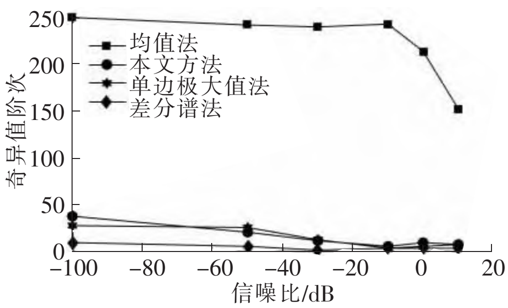


图 4　不同噪声水平有效奇异值阶次对比

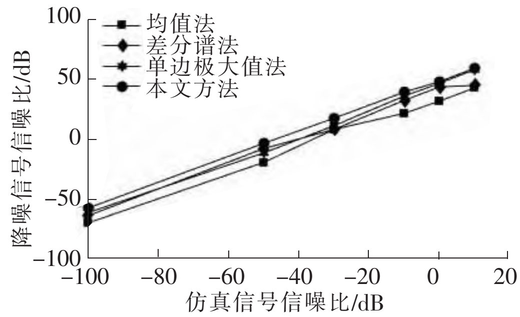


图 5　不同噪声水平降噪信号信噪比对比

表 2　不同噪声水平有效奇异值阶次

实验方法	−100 dB	−50 dB	−30 dB	−10 dB	0 dB	10 dB	均值
均值法	249	241	239	242	213	152	223
差分谱法	10	6	2	4	4	4	5
单边法	28	26	13	4	6	8	14
本文方法	38	21	12	6	10	8	16

表 3　不同噪声水平降噪信号信噪比及降噪指数　　dB

实验方法	−100 dB		−50 dB		−30 dB		−10 dB		0 dB		10 dB		均值
	SNR_2	I	SNR_2	I	SNR_2	I	SNR_2	I	SNR_2	I	SNR_2	I	
均值法	−69.19	30.81	−19.25	30.74	0.75	30.75	21.23	31.23	31.28	31.28	42.18	32.18	31.17
差分谱法	−63.26	36.73	−7.82	42.18	7.99	37.99	31.97	41.97	42.99	42.99	44.22	34.22	39.35
单边法	−60.67	39.33	−11.42	38.58	11.04	41.04	35.55	45.55	45.89	45.89	57.28	47.28	42.94
本文方法	−56.94	43.06	−3.49	46.51	17.18	47.18	38.77	48.77	47.33	47.33	58.48	48.48	46.19

由图 5 以及表 3 可以得出,本文方法相较于均值法降噪指数平均值提升了 48.19%,较差分谱法降噪指数提升了 17.38%,较单边极大值法降噪指数提升了 7.57%。因此,本文方法在信号的不同噪声水平下降噪效果更有优势。

4　实测信号分析

为了进一步验证本文提出方法在滚动轴承故障特征提取中的有效性,采用实际滚动轴承故障信号进行了验证,实验平台如图 6 所示的 QPZZ-Ⅱ旋转机械故障试验台。信号的采样频率为 25 600 Hz,轴承转速为 314 r/min。根据滚动轴承的参数(表 4)得到内圈故障特征频率为 38 Hz。

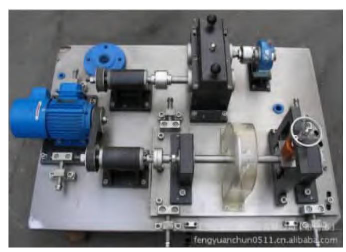


图 6　QPZZ-Ⅱ旋转机械故障试验台

表 4　滚动轴承参数

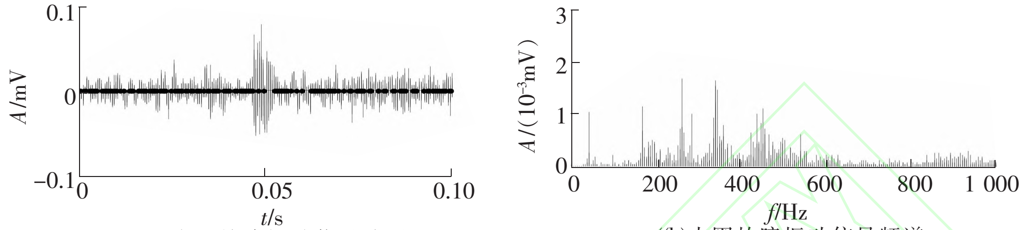
内径/mm	外径/mm	厚度/mm	滚子数量	节圆直径/mm	接触角/(°)
25	52	15	13	38.5	0

内圈故障信号的时域和频域波形如图 7 所示,从图中可以看出,时域波形杂乱,无法看出周期性冲击成分;在频谱图中,噪声将故障信号特征掩盖,无法识别故障特征频率及其故障种类。

由仿真信号的实验可以看出,均值法降噪效果与另外 3 种方法有较大差距,而差分谱,单边极大值法与本文方法在仿真信号分析时效果较为接近。因此,在对噪声水平较高的实测信号进行分析时,对差分谱法、单边极大值法以及本文方法进行了对比。

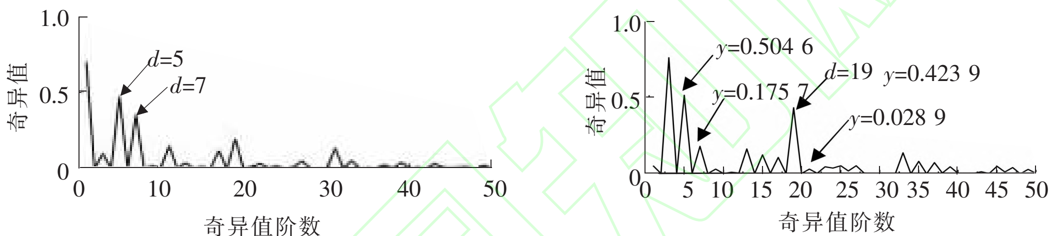
3 种算法奇异值有效阶次的选取结果如图 8 所示。由图 8(a)可得,差分谱法选取的有效奇异值阶次为 5,单边极大值法选取的有效奇异值为 7。由图 8(b)可得,5 和 7 对应峰值差距绝对值为 0.328 9,19 和 21 对应峰值差距绝对值为 0.395 0,所以本文方法选取的有效奇异值阶次为 19。

根据选取的有效奇异值阶次对信号进行重构,得到降噪信号,2 种方法得到的降噪信号的时域波形如图 9 所示。由图 9(a)和图 9(b)可以看出,差分谱法以及单边极大值法降噪后的信号幅值明显偏小,且冲击特性基本被消除,不能体现出原信号的时域特征,出现了过降噪现象。本文方法降噪后的信号时域波如图 9(c)所示,降噪信号冲击特征被保留,而且周期性比原信号更加明显,凌乱程度也有所减小,噪声被较好地滤除。



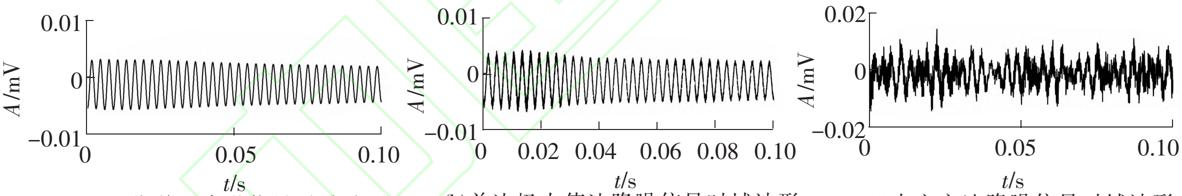
(a)内圈故障振动信号波形 ((b)内圈故障振动信号频谱

图 7 内圈故障信号波形及其频谱



(a)差分谱法确定的有效阶次 (b)本文方法确定的有效阶次

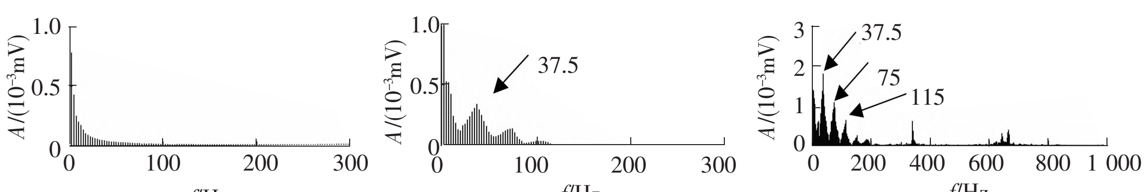
图 8 内圈故障信号奇异值有效阶次



(a)差分谱法降噪信号时域波形 (b)单边极大值法降噪信号时域波形 (c)本文方法降噪信号时域波形

图 9 降噪信号时域波形

为了进一步分析 3 种方法的降噪效果,对差分谱法、单边极大值法以及本文方法的降噪信号分别进行 Hilbert 包络变换,得到如图 10 所示包络谱。由图 10(a)可以看出差分谱法降噪信号的包络图已经明显失真,故障信息丢失,不能分辨出轴承的故障特征频率及其倍频。由图 10(b)可以看出,单边极大值法的包络图只能够看出故障冲击特征的 1 倍频(37.5 Hz),也出现了一定的失真。而本文方法的降噪信号的包络谱如图 10(c)所示,在背景噪声复杂的情况下,提取的故障特征频率更明显,能够清晰地看到故障特征的 1 倍频(37.5 Hz)、2 倍频(75 Hz)和 3 倍频(115 Hz),凸显了故障特征,能直观有效地分析出故障类型,与理论结果非常接近。



(a)差分谱法降噪信号包络谱 (b)单边极大值法降噪信号包络谱 (c)本文方法法降噪信号包络谱

图 10 降噪信号包络谱

5　结论

对 SVD 中有效奇异值选择问题进行了探究,用本文方法分别对仿真信号和实测信号进行了降噪实验,并与被广泛采用的均值法、差分谱法以及单边极大值法进行了对比,得到了如下结论:

(1)用奇异值方法进行降噪的过程中,均值法确定的奇异值阶次偏大,重构后的降噪信号往往降噪不足。而差分谱法确定的有效奇异值阶次变小,很多有用的净信号分量也被滤除,因此容易出现过降噪现象。本文方法确定的有效奇异值阶次较为合理,不同噪声水平的信号降噪后的信噪比较好。

(2)本文方法能够在较为完整地保留故障信息的前提下,有效地消除噪声,降噪后的信号经过包络解调可以提取出轴承的故障特征频率及其倍频。

(3)在对实测信号的分析中可以看出,本文方法得到的包络谱对故障频率的提取只提取到了三倍频,说明方法在信号的高频段出现了过降噪问题,需要对原始信号进行频谱分析,并进行研究、解决。

参 考 文 献

[1]沙美好,刘利国.基于振动信号的轴承故障诊断技术综述[J].轴承,2015(9):59-63.

[2]王益艳.基于特征均值的 SVD 信号去噪算法[J].计算机应用与软件,2012,29(5):121-123,142.

[3]赵学智,叶邦彦,陈统坚.奇异值差分谱理论及其在车床主轴箱故障诊断中的应用[J].机械工程学报,2010,46(1):100-108.

[4]王树青,林裕裕,孟元栋,等.一种基于奇异值分解技术的模型定阶方法[J].振动与冲击,2012,31(15):87-91.

[5]钱征文,程礼,李应红.利用奇异值分解的信号降噪方法[J].振动.测试与诊断,2011,31(4):459-463.

[6]赵学智,聂振国,叶邦彦,等.信号有效奇异值的数量规律及其在特征提取中的应用[J].振动工程学报,2016,29(3):532-541.

[7]代荡荡,王先培,赵宇,等.一种改进的奇异值降噪阶次选取方法用于紫外光谱信号去噪的研究[J].光谱学与光谱分析,2016,36(7):2139-2143.

[8]龚木红,高永毅,李赞,等.局部奇异值分解降噪的研究[J].机械工程师,2016(5):76-78.

[9]郑顾平,李强,李刚.基于遗传算法的奇异值分解信号去噪算法[J].计算机应用研究,2015,32(8):2281-2285.

[10]张贤达.矩阵分析与应用[M].北京:清华大学出版社,2006.

[11]张贤达.现代信号处理[M].北京:清华大学出版社,2002.

[12]孟智慧,王昌.基于 SVD 降噪和谱峭度的滚动轴承故障诊断[J].轴承,2013(10):52-55.

[13]Golyandina N. On the choice of parameters in singular spectrum analysis and related subspace-based methods[J]. Stat. Interface,2010,3(3):259-279.

[14]Mahmoudvand R, Zokaei M. On the singular values of the Henkel matrixwith application in singular spectrum analysis[J]. Chilean Journal of Statistic,2012,3(1):43-56.

[15]王建国,李健,刘颖源.一种确定奇异值分解降噪有效秩阶次的改进方法[J].振动与冲击,2014,33(12):176-180.

A Method for Determining the Effective Rank Order of Singular Value Decomposition Denoising Based on the Unilateral Fluctuation Differential Spectrum

Zhang An, Chen Mingyi, Ma Zengqiang

(School of Electrical and Electronic Engineering, Shijiazhuang Tidao University, Shijiazhuang 050043, China)

Abstract: Aiming atthe problem that the effective rankorderof singular value is difficult to determine in singular value, a method based on the unilateral fluctuation differential spectrum was presented. Firstly, the vibration signal was constructed as a Hankel matrix, and then the matrix was decomposed by using singular value decomposition, the singular value obtained by the decomposition was used to structure the fluctuation difference spectrum. Finally, the effective rank order of the singular value was determined according to the unilateral maximum of the fluctuation difference spectrum. The simulation data and the actual bearing fault data analysis show that the method can effectively improve the signal-to-noise ratio, and lay a good foundation for the subsequent diagnosis.

Key words: singular value decomposition (SVD); effective order rank; fluctuation differential spectrum; noise reduct

(上接第 26 页)

(2)对悬厅安装完成后,即拆除临时支架后的周边结构进行刚度和强度校核,满足设计要求。

(3)对临时支架作用的下部梁、柱进行刚度和强度校核,发现强度满足设计要求,但刚度超限,需对其进行临时刚度加固处理。

本文的计算有效指导了施工的安全顺利进行,可为类似工程施工提供一定参考。

参 考 文 献

[1]尹敏达. 大型复杂钢结构建筑工程施工新技术与应用[M]. 北京:中国建筑工业出版社,2012.
[2]赵宇新,宋敏. 钢结构安装过程[M]. 北京:中国建筑工业出版社,2010.
[3]姚雪峰. 大型钢结构常用施工方法及其适应性探讨[J]. 科技信息, 2011(23):307-307.
[4]胡侃. 大跨度多塔斜拉桥临时支架受力分析[D]. 成都:西南交通大学, 2014.
[5]张慎伟. 大型钢结构施工过程计算理论与监测技术[D]. 上海:同济大学, 2007.
[6]王新敏. ANSYS 工程结构数值分析[M]. 北京:人民交通出版社,2007.
[7]中华人民共和国建设部. GB50017—2003 钢结构设计规范[M]. 北京:中国计划出版社, 2003.

Simulation Analysis of the Installation Process of a Museum's Hanging Hall

Qiao Qi, Li Haiyan

(Department of Engineering Mechanics, Shijiazhuang Tiedao University, Shijiazhuang 050043, China)

Abstract: This paper takes the installation of a museum hanging hall as background. Using the finite element analysis software, the models of the hanging hall, temporary bracket and the lower support of the bracket are established. By loading solution, the stress and deformation of the structure under different working conditions are obtained, then the strength and stiffness of the structure are checked based on the calculation results. The results show that the hanging hall and the bracket meet the design requirements during the construction process, but the stiffness of the lower beam of the bracket exceeds the limit, and it should be reinforced accordingly. The calculation of this paper effectively guides the safety of the construction and can provide a reference for the construction of similar projects.

Key words: steel structure; hanging hall; temporary bracket; simulation analysis