

基于低通滤波的连续刚构桥冲击系数试验研究

周勇军¹, 于明策², 杨敏³, 石雄伟⁴, 刘万锋¹

(1. 长安大学公路学院, 陕西 西安 710064; 2. 山东交通职业学院, 山东 潍坊 261206;
3. 云南省公路科学技术研究院, 云南 昆明 650051; 4. 西安公路研究院, 陕西 西安 710065)

摘要:为了明确特殊桥梁冲击系数测试方法及其适用性,以高墩大跨连续刚构桥为研究对象,通过现场随机车流试验获得了典型截面的应变时程曲线,研究了低通滤波限值对桥梁结构最大动态响应及冲击系数的影响,基于传统试验法及加权平均法分析了不同滤波限值下的应变冲击系数,通过对比分析给出了合理的滤波上限值及计算应变静态分量时的截止频率值。研究结果表明:不同的低通滤波值对应变冲击系数计算值有影响;采用传统定义法计算冲击系数,1 Hz可作为该类结构求近似静态应变响应的低通截止频率;采用加权平均法计算高墩大跨连续刚构桥这类特殊结构的冲击系数时,对时程曲线不进行低通滤波处理就可以满足实际工程精度要求。

关键词:高墩连续刚构桥;冲击系数;时程曲线;低通滤波;截止频率

中图分类号:U441.3 **文献标识码:**A **文章编号:**1000-8829(2017)01-00018-05

Dynamic Load Allowance Test of Continuous Rigid Frame Bridge Based on Low-Pass Filter Method

ZHOU Yong-jun¹, YU Ming-ce², YANG Min³, SHI Xiong-wei⁴, LIU Wan-feng¹

(1. Highway School, Chang'an University, Xi'an 710064, China; 2. Shandong Transport Vocational College, Weifang 261206, China; 3. Yunnan Science & Technology Research Institute of Highway, Kunming 650051, China; 4. Xi'an Highway Institute, Xi'an 710065, China)

Abstract: In order to study the experimental method of dynamic load allowance (DLA) and its application in the special bridges engineering, a continuous rigid frame bridge with high piers is taken as an example, and the strain time-history curves of typical section is measured on site under the random traffic, then the effects of low-pass filter method on the maximum dynamic responses and DLA are analyzed. Under the conditions of different low-pass filter, strain DLA is calculated by using traditional experiment and weighted average method, respectively. Finally, the reasonable upper limit of filtering and the cutoff frequency of the equivalent static strain are given by comparison. The results show that the strain DLA is affected by low-pass filter. For the continuous rigid frame bridge structure, the frequency of 1 Hz is recommended as the low-pass cut-off frequency to get the approximate static strain from the dynamic response curve when the traditional method is used to calculate DLA. It is not necessary to employ low-pass filter method for the original vibration data when using weighted average method to calculate DLA of this type of bridge, still it can meet the requirements of practical engineering.

Key words: continuous rigid frame bridge with high piers; dynamic load allowance (DLA); time-history response curve; low-pass filter; cut-off frequency

冲击系数是反映桥梁结构动力性能的一项重要指

标,而振动时程曲线则是计算桥梁冲击系数的重要依据^[1]。为了最大限度地消除实测信号中的干扰成分,研究人员需要凭自己的经验对实测数据进行滤波处理,往往导致冲击系数最终值出现较大偏差。据目前已有文献,大多学者把研究重点放在模态频率影响因素以及如何求时程曲线的动态分量上,也取得了一定的研究成果:袁向荣^[2]用滑动拟合方法拟合了梁的振

收稿日期:2015-10-30

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51008028);陕西省自然科学基金(2016JM5030,2016JM5043);陕西省交通科技项目(14-26T);山西省交通科技项目(14-2-08,15-2-01)

作者简介:周勇军(1978—),男,湖北孝感人,博士,教授,主要研究方向为桥梁结构动力分析。

动响应曲线;王永平^[3]利用泰勒级数对简支梁动挠度曲线进行逼近得到静态分量;张利宁^[4]通过幂级数曲线拟合提取得到静态分量;李伟钊^[5]等将功率谱第一主瓣的右谷值确定为低通“截止频率”;徐绪绪^[6]对三跨连续梁桥进行了3种不同截止频率下的滤波,并给出了建议的“截止频率”。以上文献研究核心在于不同方法对常规桥梁的静态分量进行提取和分析计算,然而静态分量的提取和桥梁结构形式(即动力特性)有关,对于高墩大跨连续刚构桥这类特殊结构如何设置合理的滤波限值,目前文献^[7-12]还少有涉及,加之由于高墩大跨连续刚构桥在国外较少使用,国外低通滤波法主要用于缺陷大体积地基结构^[13],因此,研究连续刚构桥的滤波上限值(截止频率值)及求解静态分量就显得尤为迫切。本文以高墩大跨连续刚构桥为研究对象,采用现场实测的典型时程曲线,基于低通滤波法通过传统试验法及基于加权平均法^[10]分别计算了各种不同滤波限值下的最大动应变响应及冲击系数,通过对比分析得出合理的滤波上限值及求静应变分量时的截止频率值,为以后类似工程结构动力性能的测试提供参考依据。

1 冲击系数计算

1.1 传统定义法

传统的桥梁冲击系数 μ 定义为汽车过桥时测得的效应时间历程曲线上,最大动效应与最大静力效应值的比值,即

$$\mu = \frac{A_{dyn}}{A_{st}} - 1 \quad (1)$$

式中, A_{st} 为效应时间历程曲线上最大静力效应处量取的最大静力效应值; A_{dyn} 为最大静力效应处量取的最大动效应值^[1,7-8]。

1.2 试验测试法

早期工程师在实践中采用跑车试验记录时程中的最大动效应与相应最小动效应的平均值代替式(1)中的最大静力效应值,并以此来计算冲击系数 μ ,即^[5,9]

$$1 + \mu = \frac{Y_{max}}{Y_{mean}}, Y_{mean} = \frac{1}{2}(Y_{max} + Y_{min}) \quad (2)$$

式中, Y_{max} 为车辆行驶过程中桥梁结构测点最大动效应(挠度或应变)值, $Y_{max} = A_{dyn}$; Y_{min} 为时程历程曲线上与 Y_{max} 相对应的最小动效应(挠度或应变)值; Y_{mean} 为 Y_{max} 与 Y_{min} 的平均值, $Y_{mean} \approx A_{st}$ 。实际操作过程中,可用最大动效应值(波峰)分别与其相邻两个最小动效应值(波谷)计算冲击系数,并取平均值作为最终冲击系数值。

由于该方法不需进行静力加载试验就能方便地获取最大“静”效应,故在实际桥梁测试中应用比较广泛。

1.3 加权平均法

以上两种方法仅考虑了汽车荷载作用于某截面时的冲击系数 μ ,而截面设计所采用的冲击系数理论值 μ 应综合地反映多个动荷载(或多个位置处)的效应,因此笔者提出了一种加权平均的计算方法^[10],该加权法计算公式为

$$\mu = \frac{\sum_{i=1}^n (\mu_i Y_{meani})}{\sum_{i=1}^n Y_{meani}} \quad (3)$$

式中, Y_{meani} 为动效应时程曲线上第*i*个冲击系数 μ_i 计算值处所对应的局部平均值; n 为时程曲线上较有规律的“波形”个数,它考虑了时程曲线上所有峰值处的冲击系数并对其进行了加权计算,其原理如图1所示。

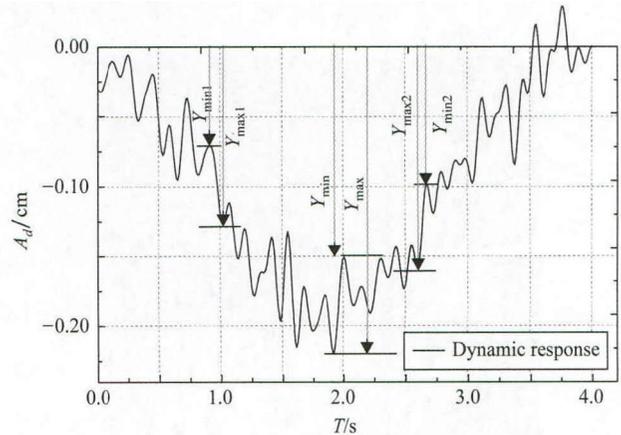


图1 加权平均法冲击系数计算示意图

2 数据测试与分析

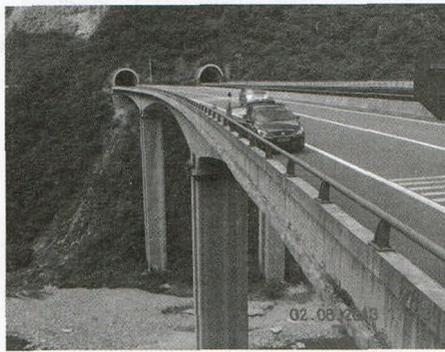
2.1 数据采集

陕西境内某座高墩大跨连续刚构桥其跨径组合为(65+108+65)m,上部主梁采用单箱单室箱梁结构,其根部高度为6.5m,跨中梁高2.5m;上顶板宽12.0m,下底板宽6.5m;下部桥墩为双薄壁空心墩,墩高分别为54.5m和59m,两薄壁墩净距3.0m,薄壁墩尺寸3.0m×6.5m,壁厚0.6m(顺桥)×1.0m(横桥)。对该连续刚构桥进行现场试验数据采集,根据现场实际情况选取桥梁边跨及中跨跨中断面为测试断面,由于无法进入到箱梁里面,在不阻碍交通的前提下,采用长标距应变仪粘贴于桥梁上顶面来采集随机车载下桥梁结构的振动时程信号,如图2所示。

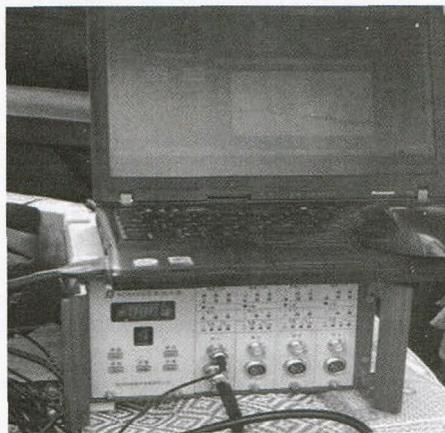
2.2 处理分析

基于DAYSLab软件进行数据采集与分析(见图3),通过在抗混滤波器中设置不同低通(low-pass)限值来改变滤波范围。为使分析结果更加合理准确,在所采集的众多数据中选择信号及其波形良好的一组实测数据作为典型数据进行分析,可分别得到该桥在不滤波(+∞)和不同低通滤波频率(20,15,12,9,7,6,5,4,3,2,1.5及1Hz以下)情况下的动应变响应时程

曲线(基于采集系统通过采集电压变化来表征动应变变化原理,此处用电压变化值表征动应变变化值),部分结果如图4所示。



(a) 工程实桥



(b) 测试仪器

图2 桥梁现场测试

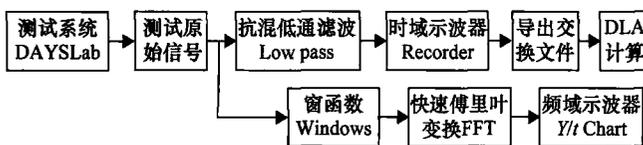
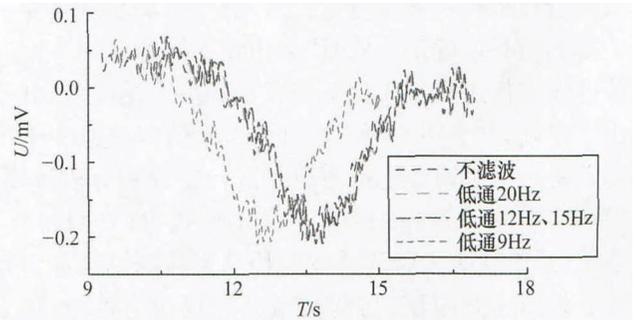


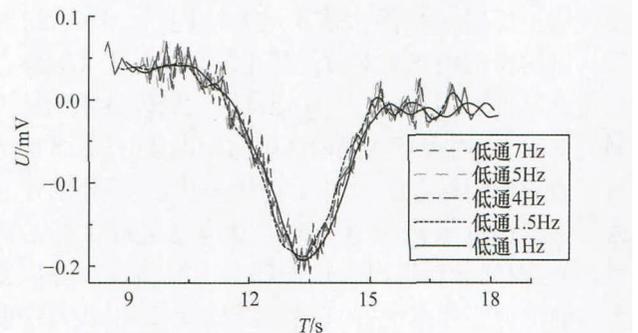
图3 试验数据处理流程图

从图4可以看出,在不考虑滤波到12 Hz的低通滤波范围内,典型截面的应变时程曲线没有太大的变化,而低通频率自9 Hz开始,最大动应变的位置出现“漂移”且应变时程曲线的形状发生了改变;低通频率在9~5 Hz之间时,应变时程曲线上有规则性的波形数随滤波频率的降低而逐渐减少;当低通频率值小于4 Hz时,随着低通频率值的减小,应变时程曲线逐渐接近于平滑曲线,且其应变峰值亦随之减小,此时可以将

某个低通频率值所对应的曲线作为该测点的静应变近似时程曲线,该低通值即为求解静态分量时的截止频率。



(a) 低通9 Hz及以上时数据处理



(b) 低通1~7 Hz时的数据处理

图4 不同低通滤波下的部分动应变时程曲线

为进一步定量分析各低通滤波频段对最大动响应以及冲击系数的影响,从而确定最大“静效应”所对应的低通滤波截止频率,分别用本文1.2节和1.3节所述方法对各滤波段时程曲线进行冲击系数的计算,典型时程曲线冲击系数计算过程见表1所示。低通滤波对最大动应变值的影响见表2及图5、图6所示,低通滤波对冲击系数值的影响见表2及图7所示。

表1 典型时程曲线冲击系数计算值(低通滤波20Hz)

试验测试法	Y_{max}/mV	Y_{min}/mV	Y_{mean}/mV	μ_i	μ	
试验测试法	0.2190	0.1783	0.1987	0.1024	0.1439	
	0.2190	0.1505	0.1848	0.1854		
加权平均法	Y_{max}	0.2190	0.1505	0.1848	0.1854	0.2221
	局部1	0.0778	0.0221	0.0500	0.5576	
	局部2	0.1519	0.1118	0.1319	0.1521	
	局部3	0.2151	0.1337	0.1744	0.2334	
	局部4	0.1732	0.1432	0.1582	0.0948	
	局部5	0.1580	0.0974	0.1277	0.2373	
局部6	0.0976	0.0367	0.0672	0.4535		

注:试验测试法的冲击系数是计算最大波峰响应值与对应相邻两个波谷值平均值得到

表2 不同滤波上限冲击系数计算值比较

	低通滤波/Hz					误差/%			
	① +∞	② 20	③ 15	④ 12	⑤ 7	②-① ①	③-① ①	④-① ①	⑤-① ①
最大动应变/mV	0.2188	0.2190	0.2187	0.2179	0.2100	0.09	-0.05	-0.41	-4.02
试验测试法 μ	0.1408	0.1439	0.1422	0.1414	0.1246	2.20	0.99	0.43	-11.51
加权平均法 μ	0.2210	0.2221	0.2216	0.2230	0.2265	0.50	0.27	0.90	2.49

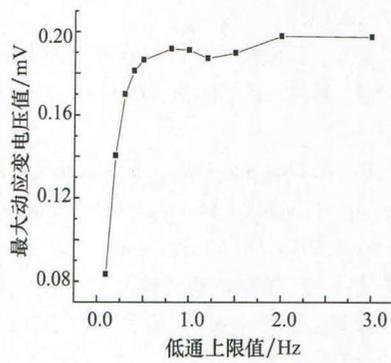


图5 低通滤波为3 Hz 以下时最大动态响应

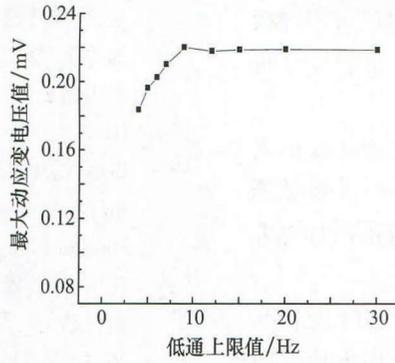


图6 低通滤波为4 Hz 以上时最大动态响应

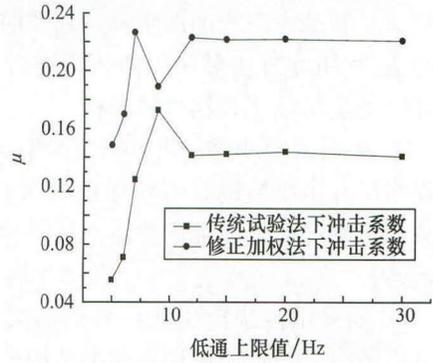


图7 低通滤波为5 Hz 以上时的冲击系数

由表2及图5~图7可得:

① 随着低通滤波频率值的增大,试验测试法及加权平均法计算的冲击系数值均是先增大后稍有减小且最后基本保持不变,从另一方面也说明了低通滤波值对冲击系数值影响较大,是否设置低通滤波以及如何设置低通频率值对桥梁冲击系数计算非常重要。

② 低通频率在0~0.5 Hz时,各动应变冲击系数曲线总体上随低通滤波值的增大而不断增大,原因在于此段低通滤波在消除干扰信号的同时也在很大程度上削减了真实信号,所以不建议0~0.5 Hz的频段作为求近似最大静应变的截止频率;而5~7 Hz的频段最大动态应变响应及冲击系数振荡较大,从排除干扰信号的角度出发,也不适合作为滤波截止频率。

③ 在不同低通滤波值下,仅有截至频率为9 Hz时的时程曲线中最大动应变所处波峰位置(即产生最大动应变的时刻)发生了局部偏移,而其他频段的最大动应变所处波峰位置基本相同,由此可以推断,滤波截至频率为9 Hz时所对应的时程曲线为异常曲线,予以剔除。剔除后的数据见表2,由表2可得:在低通频率7 Hz~+∞范围内,所计算的时程曲线最大动应变变化量非常小,此时,最大动应变值在5%范围内变化,用加权平均法所计算得到的冲击系数变化也很小,其数值在3%范围内变化;相比之下,用试验测试法计算的冲击系数值变化范围则较大,最大可达12%,说明加权平均法计算冲击系数要比传统试验法稳定。故对于高墩大跨连续刚构桥这类特殊结构在实测动载时程曲线数据求冲击系数时,可选用加权平均法进行计算,对时程曲线不进行低通滤波处理就可以满足实际工程精度要求。

④ 由低通0~3 Hz频段所对应的最大动应变变化曲线知:0.5~1.0 Hz频段所对应的动应变时程曲线比较平稳,基本保持不变,且其上下波动范围在5%以内,故0.5~1.0 Hz的低通滤波频段可以作为传统定义法下求近似静应变的截止频率,考虑实用性,建议取1 Hz作为同类结构桥梁求近似最大静应变的低通

“截止频率”。

3 工程验证

为证实取1 Hz作为求近似最大静应变的低通“截止频率”的实用性,将该典型原始应变时程曲线与经低通1 Hz滤波后的应变时程曲线绘制于同一图形中(见图8),可分别得传统定义法和试验测试法下的冲击系数值,其对比结果见表3。

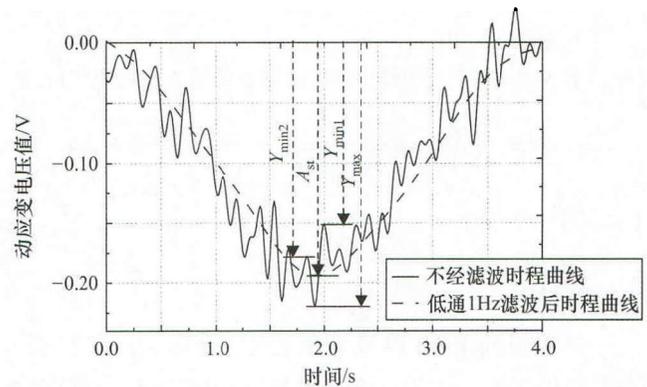


图8 原不经滤波时程曲线与低通1 Hz滤波后对比

表3 两种冲击系数计算值对比

Y_{max}/V	Y_{min}/V	Y_{mean}/V	A_{st}/V	试验测试法 μ ①	传统定义法 μ ②	②-① ②
0.220	0.174	0.197	0.196	0.117	0.122	0.04

由图8可知,经低通1 Hz滤波处理后的静应变时程曲线与原时程曲线“中线”非常吻合,且最大静应变值 A_{st} 和原始曲线最大动应变值 Y_{max} 与其所对应的相邻波峰值 Y_{min1} 、 Y_{min2} 所得平均值非常接近;由表3知,用式(1)所计算得到的冲击系数与式(2)所计算得冲击系数值误差为4%,说明取1 Hz作为同类结构桥梁求近似最大静应变的低通截止频率是可行的。

4 结论

由以上分析可以得出以下主要结论:

① 对于高墩大跨连续刚构桥这种特殊结构来说,

在根据实测动态时程曲线求冲击系数时建议采用加权平均法,利用此方法对时程曲线不进行低通滤波处理就可以满足实际工程精度要求;

② 利用试验测试法求冲击系数时,低通滤波值对时程曲线冲击系数的计算值影响较大,是否设置低通滤波以及如何设置低通频率值对桥梁冲击系数计算非常重要;

③ 如采用传统定义法计算高墩大跨连续刚构桥冲击系数时,可取 1 Hz 作为该类结构求近似静应变时程曲线的低通“截止频率”。

参考文献:

[1] JTG D60 - 2015,公路桥涵设计通用规范[S].

[2] 袁向荣. 移动荷载识别的响应曲线滑动拟合法[J]. 振动、测试与诊断,2007,27(4):320 - 323,343.

[3] 王永平,陈彦江,傅金科. 单车荷载下简支梁桥的动力特性和响应的试验研究[J]. 土木工程学报,1995,28(5):39 - 46.

[4] 张利宁. 统计方法分析桥梁冲击系数的研究[J]. 公路交通科技,2004,21(5):67 - 69.

[5] 李伟钊,张巍,王宗林,等. 一种基于低通滤波的公路简支梁桥实测冲击系数计算方法[J]. 振动与冲击,2012,31(20):46 - 50.

[6] 徐绪绪. 桥梁行车动力响应的测试评价方法研究[D]. 重

庆:重庆交通大学,2013.

[7] 周勇军,赵煜,贺全海,等. 刚构 - 连续组合桥梁冲击系数多因素灵敏度分析[J]. 振动与冲击,2012,31(3):97 - 101.

[8] Deng L, Wang F, He W. Dynamic impact factors for simply-supported bridges due to vehicle braking[J]. Advances in Structural Engineering, 2015, 18(6):791 - 801.

[9] 张丽芳,艾军,陈建兵,等. 桥梁动载试验及其有限元简化模拟研究[J]. 武汉理工大学学报(交通科学与工程版),2013,37(2):250 - 253.

[10] 周勇军,蔡军哲,石雄伟,等. 基于加权法的桥梁冲击系数计算方法[J]. 交通运输工程,2013,13(4):29 - 36.

[11] 周勇军,张晓栋,宋一凡,等. 高墩连续刚构桥纵向振动基频的能量法计算公式[J]. 长安大学学报(自然科学版),2013,33(3):48 - 54.

[12] 张亮,朱永,章鹏,等. 数据采集对斜拉索索力测量精度影响研究[J]. 测控技术,2008,27(7):26 - 28.

[13] Suhas D, Lakshmi C R, Rao Z S, et al. A systematic implementation of elliptic low-pass filters using defected ground structures[J]. Journal of Electromagnetic Waves and Applications, 2015, 29(15):2014 - 2026.

[14] 于明策. 高墩大跨弯连续刚构桥冲击系数试验研究[D]. 西安:长安大学,2014.

□

(上接第 17 页)

5 结论

针对目前 EMD 降噪效果受本征模式分量之间模态混叠的影响,提出一种基于本征模式分量筛选聚合算法,并在此基础上添加 SVD 降噪,得出以下结论:

① 该方法可以缓解单个分析本征模式分量时,模态混叠带来的干扰,并能提取出敏感的本征模式分量。

② 添加 SVD 降噪可进一步减少模态混叠带来的干扰,获得更准确的故障振动信号,以便后续的故障诊断。

③ 通过实验验证,该方法能有效地提取城轨车辆牵引电机轴承故障特征信息。

该方法为城轨车辆牵引电机轴承故障诊断提出一种可靠的方法并具有一定的通用性。

参考文献:

[1] 时培明,丁雪娟,李庚,等. 一种 EMD 改进方法及其在旋转机械故障诊断中的应用[J]. 振动与冲击,2013,32(4):185 - 190.

[2] 张晓楠,曾庆山,万红. 基于改进小波去噪和 EMD 方法的轴承故障诊断[J]. 测控技术,2014,33(1):23 - 26,30.

[3] 崔颖,赵军,赖欣欢. 基于 EEMD 和变尺度随机共振的轴

承故障诊断[J]. 测控技术,2013,32(7):15 - 18,22.

[4] 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.

[5] 陈恩利,张玺,申永军,等. 基于 SVD 降噪和盲信号分离的滚动轴承故障诊断[J]. 振动与冲击,2012,31(23):185 - 190.

[6] 何正嘉,陈进,王太勇,等. 机械故障诊断理论及应用[M]. 北京:高等教育出版社,2010.

[7] Huang N E, Shen Z, Long S R, et al. The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for nonlinear and non-stationary time series analysis [J]. Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Science, 1998, 454(1971):903 - 995.

[8] Boudraa A O, Cexus J C. EMD-based signal filtering[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2007, 56(6):2196 - 2202.

[9] 曾鸣,杨宇,郑近德,等. μ -SVD 降噪算法及其在齿轮故障诊断中的应用[J]. 机械工程学报,2015,51(3):95 - 103.

[10] 朱军,闵祥敏,孔凡让,等. 基于分量筛选奇异值分解的滚动轴承故障诊断方法研究[J]. 振动与冲击,2015,34(20):61 - 65.

[11] Golub G H, Van Loan C F. Matrix Computations[M]. 4th ed. Baltimore: Johns Hopkins University Press, 2013.

□