

基于奇异值分解的磁记忆信号特征提取方法*

胥永刚, 谢志聪, 孟志鹏, 陆明

(北京工业大学机电学院 北京, 100124)

摘要 针对金属磁记忆信号容易受到环境噪声影响,使得缺陷信号可检测性降低的情况,首先,利用传统的奇异值分解方法对场桥主梁磁记忆信号进行分解和重构,发现尽管可以取得较为理想的降噪效果,但如何自适应确定重构时的奇异值个数仍存在困难;然后,将磁记忆信号按照二进递推方法构造矩阵,重复进行奇异值分解可以获得具有不同分辨率的近似信号和细节信号,从而形成多分辨奇异值分解,其中细节信号对应磁记忆中的噪声成分,近似信号为去除噪声之后的有效磁记忆信号,从而实现了磁记忆信号的降噪。将该方法用于某场桥主梁磁记忆信号的处理,有效地提高了重构信号的信噪比,准确地判断出了该主梁的应力集中区域,为评估其应力状态和早期故障诊断奠定了基础。

关键词 磁记忆; 奇异值分解; 多分辨奇异值分解; 特征提取; 应力集中

中图分类号 TG115.28; TH12

引言

磁记忆检测技术可有效探测到以应力集中为特征的铁磁性构件的危险部位^[1-2],克服常规无损检测方法只能检测宏观缺陷的不足,为铁磁性构件的潜故障早期诊断奠定技术基础。但是在实际检测过程中,磁记忆信号易受到现场环境和被测对象自身铁磁性构造的影响而包含大量噪声,直接用于缺陷识别可能会影响其准确性。目前,磁记忆信号处理降噪方法主要为小波降噪^[3-4],但在特征提取方面效果不显著。

奇异值分解(singular value decomposition, 简称 SVD)^[5]主要用于信号降噪处理及周期成分的提取^[6],在机电设备振动信号处理和故障诊断领域已有应用^[7]。笔者尝试将 SVD 技术用于场桥主梁磁记忆信号的降噪处理,发现采用振动信号常用的奇异差分谱方法选择 SVD 重构时的奇异值个数,所得信号严重失真,只有选择合适的奇异值个数方能重构出理想的磁记忆信号,但奇异值个数的自适应选择尚无更理想的方法。

借鉴小波多分辨分析的思想,基于矩阵二分递推构造原理,重复进行 SVD 分解可以获得具有不同分辨率的近似信号和细节信号,以多分辨率来展

信号不同层次的概貌和细部特征,此即多分辨奇异值分解(multi-resolution singular value decomposition, 简称 MRSVD)。将上述思想用于场桥磁记忆信号的分解和重构,可以有效去除噪声成分,提高信噪比,从而准确判断场桥主梁应力集中区域,评估其应力状态。

1 磁记忆检测原理

磁性金属在拉伸、压缩、扭曲和周期性载荷作用下,应力集中区易产生稳定的滑移位错带。源于位错聚积变成和磁畴壁厚相等时磁畴边界的固锁效应,在位错聚积区易产生自有漏磁场。当外界存在微弱地球磁场时,在受检物体应力集中区的表面将形成漏磁场梯度^[8]。金属磁记忆方法的基本原理就是记录和分析产生在铁磁构件和设备应力集中区或缺陷区中的自有漏磁场的分布情况。

在应力集中区形成磁场 H_p 的变化,即磁场的切向分量 $H_p(x)$ 具有最大值,而法向分量 $H_p(y)$ 改变方向并有零值点,如图 1 所示。通过磁场法向分量 $H_p(y)$ 的测定,计算出梯度值 $K = dH_p(y)/dx$,根据梯度出现极大值便可推断工件的应力集中区^[8]。

场桥主要由主梁、刚性支腿和柔性支腿组成,其

* 国家自然科学基金资助项目(51075009);北京市优秀人才培养计划资助项目(2011D005015000006)
收稿日期:2012-12-12;修回日期:2013-03-28

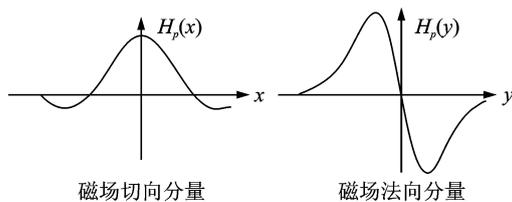


图1 磁记忆检测原理

Fig.1 Principle of metal magnetic memory testing

中主梁与刚性支腿之间采用高强度螺栓或焊接连接形式,且为减少结构自重,提高结构的承载能力,主要采用钢板焊件制造的箱型梁结构。根据文献[9]中对场桥的有限元分析,不同起重条件下,刚性支撑腿与主梁结合部(端部)及主梁箱型部位(中部)会发生应力集中,这就为磁记忆方法检测场桥应力集中区域提供了可行性。

2 多分辨奇异值分解基本原理

奇异值分解(SVD)是一种正交化的方法。一个实矩阵 $\mathbf{A} \in \mathbf{R}^{m \times n}$, 不管其行列是否相关,必定存在一对正交矩阵 $\mathbf{U} = (u_1, u_2, \dots, u_m) \in \mathbf{R}^{m \times m}$ 和一个正交矩阵 $\mathbf{V} = (v_1, v_2, \dots, v_n) \in \mathbf{R}^{n \times n}$, 使得

$$\mathbf{A} = \mathbf{U}\mathbf{S}\mathbf{V}^T \quad (1)$$

其中: $\mathbf{S} = (\text{diag}(\sigma_1, \sigma_2, \dots, \sigma_q), \mathbf{0})$ 或者其转置,这取决于 $m < n$ 还是 $m > n$; $\mathbf{A} \in \mathbf{S}^{m \times n}$; $\mathbf{0}$ 代表零矩阵; $q = \min(m, n)$, 且有 $\sigma_1 \geq \sigma_2 \geq \dots \geq \sigma_q \geq 0$, 称为矩阵 \mathbf{A} 的奇异值。

设有 $Y = (y(1), y(2), \dots, y(N))$ 为离散数字信号,可以构造 Hankel 矩阵如下

$$\mathbf{H} = \begin{bmatrix} y(1) & y(2) & \dots & y(n) \\ y(2) & y(3) & \dots & y(n+1) \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ y(N-n+1) & y(N-n+2) & \dots & y(N) \end{bmatrix} \quad (2)$$

其中: $1 < n < N$ 。

令 $m = N - n + 1$, 则 $\mathbf{H} \in \mathbf{R}^{m \times n}$, 上述矩阵称为重构吸引子轨道矩阵,然后再对重构吸引子轨道矩阵进行奇异值分解。SVD 的本质是将原始信号分解为一系列分量信号的简单线性叠加,一个分量从原始信号中被分离的过程就是从原始信号中简单的减去,而且各个分离出来的分量信号保持在原信号中的相位不变,也就是具有零相位偏移特性。其意义在于可以选取感兴趣的若干分量进行简单的叠加,从而实现对信号特征信息的提取^[10]。

对于含噪信号构造的 Hankel 矩阵有后面的

$q - k$ 个奇异值明显小于前 k 个奇异值,即奇异值在第 k 个点发生突变,而前 k 个奇异值代表了要提取的理想信号。由于每一个奇异值对应着一个分量信号,因此,只要选择前面 k 个分量进行简单的叠加,就可获得降低了噪声的信号。但如何选择奇异值分量的个数,是 SVD 重构时的一个关键问题。若奇异值数目选择过多,则会使处理结果混进一部分噪声;而选择过少又会丢掉信号中的有用成分,甚至造成信号波形的畸变。

SVD 的信号处理方法本质上属于同一层次的矢量空间进行,使得结果处在同一层次空间、同一分辨率上。文献[11]借鉴小波多分辨率的思想,利用 SVD 方法来获得信号在不同层次空间、具有不同分辨率的分解结果,从而实现信号在不同层次子空间的多分辨率分解,称多分辨 SVD 分解。

利用 SVD 实现信号的多分辨率分解,采用矩阵二分递推构造思想,即对信号 $Y = (y(1), y(2), \dots, y(N))$ 按如下方式构造矩阵

$$\mathbf{H} = \begin{bmatrix} y(1) & y(2) & \dots & y(N-1) \\ y(2) & y(3) & \dots & y(N) \end{bmatrix} \quad (3)$$

以上矩阵经过 SVD 处理后,有且只有两个奇异值。第 1 个奇异值较大,第 2 个奇异值较小,由此得到的信号分量对原始信号的贡献量也有轻重之分,类似于小波分析中的细节信号(称其为 SVD 细节信号,记为 D_j)和近似信号(称其为 SVD 近似信号,记为 A_j),再对 A_j 继续取行数为 2 构造矩阵进行下一层次的 SVD 分解。以此类推,将原始信号分解为一系列 SVD 细节信号和近似信号,设原始信号为 A_0 ,其递推 SVD 分解过程如图 2 所示。

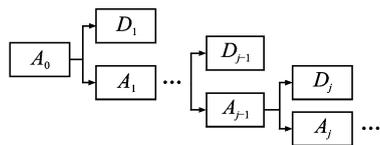


图2 信号二分递推 SVD 分解过程

Fig.2 The dichotomizing recursion SVD decomposition of signal

此分解方式可实现对信号的多层次分解,且每次分解过程中分量始终为 2 个,不会造成能量的损失,如此便将原信号的细节特征和主体信号以多层次展现出来,最后通过逆运算将一系列分解所得 SVD 近似及细节信号重构出来。重构本质是利用各层细节信号与最后一层近似信号进行简单相加所得,因此选取其中有效的信号进行相加,即可实现对原始信号的降噪及特征提取。

3 实测数据分析

本研究实际检测数据来源于天津港(集团)有限公司 ZPMC DH-512-11 场桥,检测所用仪器为俄罗斯动力诊断公司研制的 TSC-1M-4 型应力集中磁检测仪。

TSC-1M-4 型应力集中磁检测仪可测定铁磁性构件的应力集中区,并提供配套分析软件 MMM-System,可在计算机上对数据作深入的处理。现对场桥横梁中间部位进行检测,并用该系统自带软件进行分析,结果如图 3 所示。

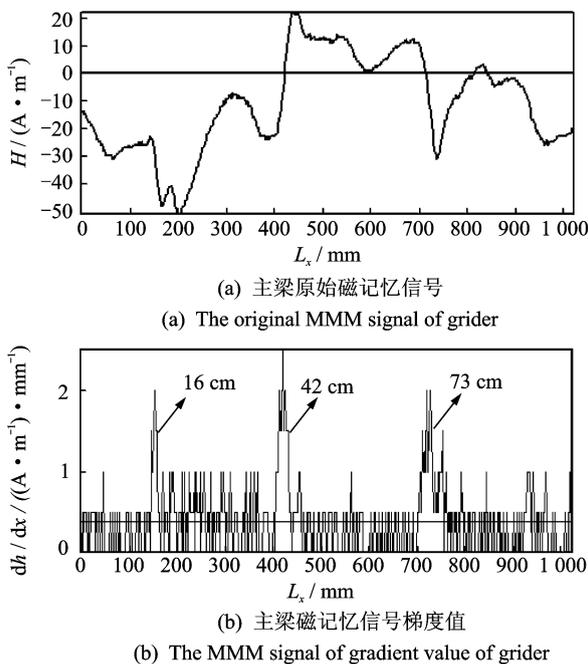


图3 仪器自带软件 MMM-System 处理结果

Fig. 3 The results of girder signal processed by MMM-System

由图 3 可见,梯度值中有 3 处明显突起,为主梁所测部位的 3 处应力集中区,其横坐标分别对应 16, 42 和 73 cm。对比检测部位实际情况(如图 4 所示),起重机 16 cm 和 73 cm 处对应 2 个平联钢板,42 cm 对应主梁中间部位。实际场桥起重重物时,主梁的中间部位会发生应力集中,且主梁与主梁之间的平联主要承受压力,多数构件为等厚度平面钢板焊接而成,组件与组件之间通过螺栓连接,故主梁中间部位和平联部位均会发生应力集中。检测结果与理论分析及现场情况完全一致,同时也证明磁记忆检测方法的有效性。但是从图 3 中也可发现,原始磁记忆信号存在较多噪声,其梯度值并不理想,对进一步判断应力的大小及位置造成干扰,因此有必

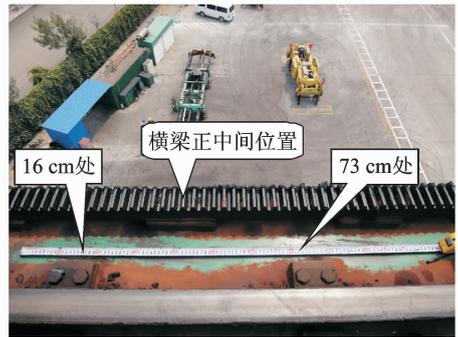


图4 场桥中部横梁检测现场

Fig. 4 The testing field of girder in the central

要对磁记忆信号进行进一步处理。

在机械振动信号处理中,因有用信号和噪声成分相关性很弱,SVD 分解得到的奇异谱会出现突变。为了合理地描述含噪信号的奇异值突变情况,文献[10]提出了奇异值差分谱的概念。笔者将此方法用于场桥磁记忆信号处理,将 SVD 重构时的奇异值个数取为 7,结果如图 5(a)所示。对比图 3(b),尽管梯度值中绝大部分噪声已被剔除干净,但信号已严重失真。可见,对磁记忆信号而言,不能沿用前述的奇异差分谱方法确定奇异值个数。将 SVD 重构时的奇异值个数分别取为 10, 20 和 30,重构磁记忆信号并计算对应的梯度值,分别得到如图 5(b, c, d)所示结果。

由图 5 可以看出:取前 10 个奇异值重构信号所得结果仍然严重失真;取前 20 个奇异值时基本保留了有效成分,且起到较好的降噪效果;取前 30 个奇异值时信号保留有效成分更多,但同时也混入一定的噪声成分。据此,可估计最佳奇异值个数取值应该介于 20 至 30 之间,但如何确定具体数值尚无有效方法,因此笔者利用多分辨分解方法以实现磁记忆信号的特征提取。

利用多分辨 SVD 对图 3(a)所示的原始磁记忆信号进行 4 层分解,得到 4 个 SVD 细节信号和 1 个近似信号,分别计算其梯度值得到如图 6 所示结果,其中(a)~(d)分别为第 1~4 个细节信号的梯度值,(e)为近似信号的梯度值。可见在细节信号中,基本体现了原信号的噪声成分,而近似信号的梯度值不但很好地去除了环境噪声的影响,而且完整保留了信号奇异性特征。

图 7 为经多分辨 SVD 分解后得到的近似信号,与图 3(a)相比较,原始信号中的噪声成分基本被滤除干净,信号变得更为光滑。

图 8 为 3 个不同的梯度值曲线:(a)为原始信号

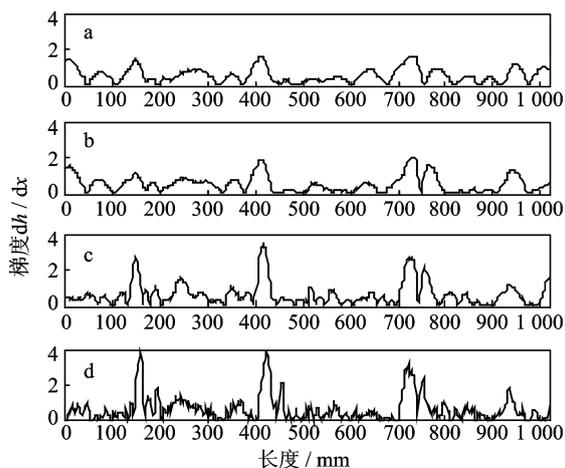


图5 取不同奇异值个数重构的信号

Fig. 5 The reconstructed signals with different singular value numbers

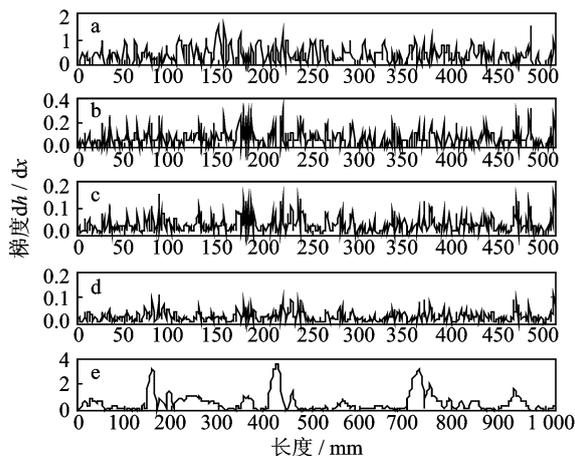


图6 多分辨SVD对原始信号梯度值的提取结果

Fig. 6 The extracted results of original signal gradient value by multi-resolution SVD

的梯度值曲线；(b)为当重构奇异值个数取为20时利用传统SVD方法降噪之后的梯度值曲线；(c)为利用多分辨SVD分解后近似信号的梯度值曲线。比较可以发现：因原始磁记忆信号中含有较强的噪声，对应的梯度值曲线亦出现较强的毛刺，影响应力集中区域的判别；传统SVD降噪方法得到的梯度值曲线在去除噪声的同时，亦出现了一定程度的失真，如右端边缘处出现了本不该存在的梯度上升趋势；而多分辨SVD方法得到的梯度值曲线在去除噪声的同时亦充分保留了原始梯度值曲线中的峰值信息（如16, 42和73 cm处），同时在93 cm处亦出现峰值，经后期再次对检测位置检查分析和判断，发现此处正好为相邻的平联部位，可见(c)图判断结果完全正确，与实际场桥设备检测位置情况吻合。

同理，笔者对场桥端部数据进行处理，结果如图9所示，代表意义同图8。

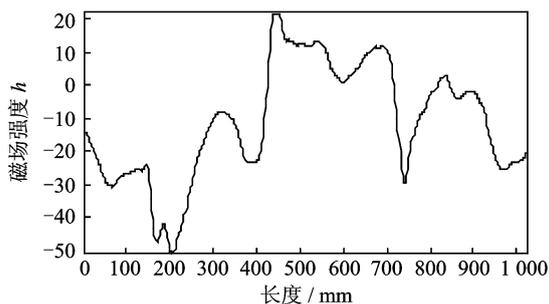
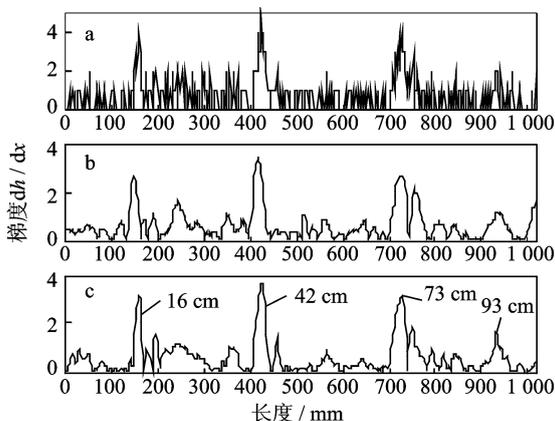
图7 磁记忆检测信号 $H_p(y)$ 的近似信号Fig. 7 The approximate signal of MMM signal $H_p(y)$ 

图8 梯度值曲线对比

Fig. 8 The comparison of gradient value curve

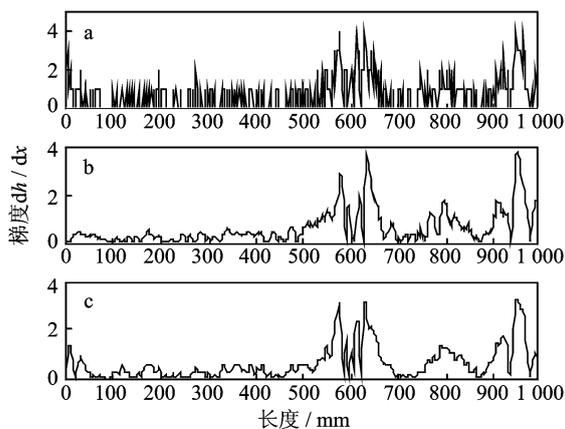


图9 场桥端部检测数据梯度值曲线对比

Fig. 9 The comparison of gradient value curve of girder in the end

对比检测部位实际情况（如图10所示），不同起重条件下，支撑腿与横梁结合部及横梁中间部位会发生应力集中。从图9(c)梯度曲线中可发现在60 cm处左右出现了明显的梯度峰值，意味着该处存在明显的应力集中区，该位置恰好正处于支撑腿与横梁的结合部正上方，且60 cm左右二处峰值正好对应组件螺栓连接处，与实际结果完全吻合，且对比原始信号，降噪效果显著，便于更精确判断铁磁构件中的应力集中区域。



图10 场桥端部横梁检测现场

Fig.10 MMM test of girder in the end

4 结论

1) 磁记忆方法可有效检测铁磁构件故障缺陷,尤其对于肉眼无法观察到明显缺陷的应力集中区域,较之振动信号、声发射信号等常规检测方法有明显优势,且适用于非工作状态,使用方便,为场桥等设备的应力集中检测与寿命评估提供理论依据。

2) 将奇异值分解法应用于场桥磁记忆信号的特征提取,表明该方法能提取信号有效成分,有利于对应力集中区域及大小进行准确判断,且多分辨SVD分解法效果优于传统的SVD分解法,在磁记忆无损检测领域具有很好的应用前景。

3) 本研究数据于港口设备实际现场检测所得,综合港口设备使用情况,对于经常受力的设备部件和位置进行定期检测,积累历史数据,可望建立设备应力集中状况数据库,进而预测设备零部件剩余寿命,实现设备预警和状态维修。

参 考 文 献

- [1] Dubov A A. Express method of quality control of a spot resistance welding with usage of metal magnetic memory[J]. *Welding in the World*, 2002, 46(6): 317-320.
- [2] Doubov A A. Diagnostics of equipment and constructions strength with usage of magnetic memory[J]. *Inspection Diagnostics*, 2001, 35(6): 19-29.
- [3] 成曙,杨荣祥,牛余朋,等. 小波分析在金属磁记忆无损检测中的应用[J]. *自动测量与控制*, 2008, 27(7): 48-51.
Cheng Shu, Yang Rongxiang, Niu Yupeng, et al. Application of wavelet analysis in metal magnetic memory testing technology[J]. *Automatic Measurement and Control*, 2008, 27(7): 48-51. (in Chinese)

- [4] 张起欣,张世富,王鹏飞. 基于小波变换的磁记忆信号去噪方法研究[J]. *石油化工自动化*, 2007, 4: 33-35.
Zhang Qixin, Zhang Shifu, Wang Pengfei. Research on noise removing theories for metal magnetic memory signal based on wavelet transform[J]. *Automation in Petro-chemical Industry*, 2007, 4: 33-35 (in Chinese)
- [5] Akritas A G, Malaschonok G I. Applications of singular value decomposition (SVD)[J]. *Mathematics and Computers in Simulation*, 2004, 67(1): 15-31.
- [6] 邹春华,赵学智. 轴承振动信号中调幅特征的奇异值分解提取方法[J]. *工具技术*, 2011, 45(3): 83-87.
Zou Chunhua, Zhao Xuezhi. Method of singular value decomposition for extraction of amplitude modulation feature of bearing vibration signal[J]. *Tool Engineering*, 2011, 45(3): 83-87. (in Chinese)
- [7] 陈恩利,吴勇军,申永军,等. 基于改进奇异值分解技术的齿轮调制故障特征提取[J]. *振动工程学报*, 2008, 21(3): 530-534.
Chen Enli, Wu Yongjun, Shen Yongjun, et al. An improved method of detecting modulated gear fault characteristic based on singularity value decomposition [J]. *Journal of Vibration Engineering*, 2008, 21(3): 530-534. (in Chinese)
- [8] 温伟刚,萨殊利. 金属磁记忆检测的机理及实现[J]. *北方交通大学学报*, 2002, 26(4): 67-70.
Wen Weigang, Sa Shuli. Mechanism and implementation of magnetic memory metal diagnostic technique [J]. *Journal of Northern Jiaotong University*, 2002, 26(4): 67-70. (in Chinese)
- [9] 丁克勤,乔松,寿比南. 起重机械虚拟仿真计算与分析[M]. 北京:机械工业出版社, 2010: 204-224.
- [10] 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.
Zhao Xuezhi, Ye Bangyan, Chen Tongjian. Difference spectrum theory of singular value and its application to the fault diagnosis of headstock of lathe[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2010, 46(1): 100-108. (in Chinese)
- [11] 赵学智,叶邦彦,陈统坚. 多分辨奇异值分解理论及其在信号处理和故障诊断中的应用[J]. *机械工程学报*, 2010, 46(20): 64-75.
Zhao Xuezhi, Ye Bangyan, Chen Tongjian. Theory of multi-resolution singular value decomposition and its application to signal processing and fault diagnosis[J]. *Journal of Mechanical Engineering*, 2010, 46(20): 64-75. (in Chinese)



第一作者简介:胥永刚,男,1975年10月生,副教授。主要研究方向为机械故障诊断、现代信号处理等。曾发表《机电设备早期故障微弱信号的非线性检测方法及其工程应用》(《振动工程学报》2011年第24卷第5期)等论文。
E-mail: xyg@bjut.edu.cn