

引用格式:丁云,张生伟,李国强,等.基于邻域局部最大均值与多尺度形态学滤波的弱小红外目标检测算法[J].电光与控制,2018,25(9):37-41. DING Y, ZHANG S W, LI G Q, et al. An infrared dim target detection algorithm based on local maximum mean of neighborhood and multi-scale morphological filtering[J]. Electronics Optics & Control, 2018, 25(9):37-41.

基于邻域局部最大均值与多尺度形态学滤波的 弱小红外目标检测算法

丁云^{1,2}, 张生伟^{1,2}, 李国强^{1,2}, 马军勇^{1,2}, 张春景^{1,2}

(1. 光电控制技术重点实验室, 河南 洛阳 471000; 2. 中国航空工业集团公司洛阳光电设备研究所, 河南 洛阳 471000)

摘要: 根据弱小目标的成像特性,提出了基于邻域局部最大均值与多尺度形态学滤波的目标检测算法。通过滑动窗口判断图像中心是否为最大值,若是,则用中心点四邻域的两个方向的最大均值替代中心点;否则,计算其四邻域方向极大二值的梯度,根据加权系数计算赋给中心点。遍历整幅图像,用来消除噪声和改善初始图像的信噪比。然后,再对图像进行多尺度的形态学滤波,可以有效地估计背景并将背景从原始图像中移出。改进的自适应分割方法计算阈值之后,从候选点中来提取目标。对序列图像采取多帧关联处理,可以进一步降低虚警率。实验结果表明,该算法易于实现,能提高检出概率,较好并完整地检测出目标,且降低虚警率。

关键词: 红外弱小目标; 目标检测; 邻域局部最大均值; 多尺度形态学滤波; 自适应分割; 虚警

中图分类号: V271.4; TP391 **文献标志码:** A **doi:**10.3969/j.issn.1671-637X.2018.09.008

An Infrared Dim Target Detection Algorithm Based on Local Maximum Mean of Neighborhood and Multi-scale Morphological Filtering

DING Yun^{1,2}, ZHANG Sheng-wei^{1,2}, LI Guo-qiang^{1,2}, MA Jun-yong^{1,2}, ZHANG Chun-jing^{1,2}

(1. Science and Technology on Electro-Optic Control Laboratory, Luoyang 471000, China;

2. Luoyang Institute of Electro-Optic Equipment, AVIC, Luoyang 471000, China)

Abstract: According to the imaging features of dim targets, we put forward a target detection algorithm based on the local maximum mean of neighborhood and multi-scale morphological filtering. It is determined whether the image center is the maximum or not by the sliding window. If it is the maximum, the center pixel will be replaced by the maximum mean of the two directions of its four neighborhoods. Otherwise, the center will be assigned according to the calculated weighting coefficient by figuring out the two maximum gradients of four neighborhoods. It is implemented through the whole image for eliminating the noise and improving the signal-to-noise ratio of the original image. Then, multi-scale morphological filtering of the image is carried out and the background can be estimated effectively and be removed from the original image. After the threshold is calculated by using the improved adaptive segmentation method, the targets are extracted from candidate points. Multi-frame association is applied to sequential images for further reducing the false alarm rate. Experiments show that, the method is easy to implement, and can detect the whole target with high detection probability and low false alarm rate.

Key words: infrared dim target; target detection; local maximum mean of neighborhood; multi-scale morphological filtering; adaptive segmentation; false alarm

收稿日期:2017-09-29

修回日期:2018-08-02

基金项目:航空工业集团创新基金(2012D61350);航空科学基金(20155152041)

作者简介:丁云(1989—),男,江西上饶人,硕士生,研究方向为图像目标检测。

0 引言

高技术信息化的战争要求在更远距离、更短时间、更为复杂背景下有效地发现敌机目标,这对红外搜索与

跟踪系统提出了更高的要求。由于探测器自身的分辨率低及红外成像系统噪声的干扰,红外弱小目标很容易被湮没在背景之中,缺少足够的纹理信息,导致很难有效地区分目标与虚警。世界各国的学者、研究机构在弱小红外目标背景抑制、去噪等方面展开了深入的研究,利用目标在所处频域为高频分量,背景为低频分量的特点分离目标与背景,提出了高通滤波、中值滤波^[1-2]、基于 Robinson 保护带滤波^[3]、局部熵信息^[4]等方法,自适应形态学^[5-6]、小波变换^[6-7]、神经网络^[8-9]、视觉对比度机制等数学工具也被广泛运用于背景抑制处理,这些算法在背景平缓或者目标信噪比较高时检测效果不错,但是当目标只有几个像素或者具有固定云层杂波干扰产生大量的虚假目标时,通常会导致检测失败,或者出现较高的虚警率,使红外搜索系统的性能大打折扣。因此,研究如何在保证弱小目标检测能力的同时降低虚警率,是有效提升红外搜索系统探测距离的关键。

本文根据弱小红外目标的成像特性,提出了一种基于局部邻域最大均值与多尺度形态学滤波的检测算法,先对输入图像进行局部邻域求最大均值的一级滤波,去除图像中的奇异点,再对图像进行多尺度的数学形态学滤波,保留高频信息,然后利用改进的自适应分割方法^[10]提取出候选目标,对序列图像进行多帧关联等去虚警措施,得到最终的检测结果。通过大量实验表明,该方法不但能剔除大量的虚警,而且能较好地还原出目标尺寸,提高目标的检出概率。

1 算法过程分析

对空目标检测算法主要包括滤波处理、图像自适应分割及虚警剔除,算法流程如图 1 所示。



图 1 本文算法流程

Fig. 1 Flow chart of the proposed algorithm

1.1 滤波处理

1.1.1 改进均值滤波

均值滤波是图像处理中消除噪声的一种常用方法。假设噪声 n 是加性且在空间上不相关的高斯噪声,其期望为 0,方差为 σ^2 , f 是未被干扰的图像,含噪图像 g 在点 (i,j) 处数学含义可表示为

$$g(i,j) = f(i,j) + n(i,j) \quad (1)$$

经均值滤波处理后的图像为

$$\bar{g}(x,y) = \frac{1}{R} \sum_{(i,j) \in S} g(i,j) = \frac{1}{R} \sum_{(i,j) \in S} f(i,j) + \frac{1}{R} \sum_{(i,j) \in S} n(i,j) \quad (2)$$

式中: $x=0,1,2,\dots,M-1;y=0,1,2,\dots,N-1;M,N$ 分别为待处理图像的行数与列数; S 是以 (x,y) 为中心的邻域集合; R 为 S 内的点数。由式(2)可知,处理后噪声的方差 $\sigma_n^2 = \sigma^2/R$,噪声方差变小,说明噪声强度减弱,即抑制了噪声。但是也能看出,该方法平滑了图像信号,使图像边界变得模糊,细节对比度变差,且邻域越大模糊程度越大,常用的邻域像素大小分别为 3×3 和 5×5 。

均值滤波对图像局部窗口所有像素取灰度的平均值代替窗口中心像素灰度值,这样令无效的像素点也参与了运算,带来不可预知的结果,使得处理后的图像不能真实地反映目标与噪声在图像中的差异,为后续再处理带来麻烦。本文提出基于邻域最大均值方法,充分利用目标点与噪点在图像中的像素差异,根据相关性以最少的周围像素值计算模板中心点的灰度值,这样可以滤除较大的噪声而对目标影响不大。具体算法实现如下:

- 1) 构建一个大小为 $Q \times Q$ 的滤波算子, Q 值取为 3;
- 2) 图像大小设为 $H \times W$,列数增量变量为 I ,行数增量变量为 J ,其中,初始值 $I = (Q+1)/2, J = (Q+1)/2$;
- 3) 对输入图像用滤波窗口开始遍历,取当前块为 $Mode$;
- 4) 寻找 $Mode$ 中心点像素大小 $MM = Mode(2,2)$, $Mode$ 中最大灰度值 $\max(Mode)$ 以及计算 $Mode$ 中心点四邻域的灰度值;
- 5) 判断 MM 值是否等于 $\max(Mode)$:如是,执行将 $Mode$ 中心点四邻域的最大二值求平均赋给中心点像素 $F_1(I,J)$;如否,计算四邻域最大二值与中心点的绝对差值 A 和 B ,以绝对差的倒数作为权值计算, $W_1 = A/(A+B), W_2 = B/(A+B)$,将极大二值分别与权值相乘并求和,再赋给模板中心点 $F_1(I,J)$;
- 6) 当前窗口已经处理完毕,右移 $J++$ 进行新的窗口处理,返回步骤 4);
- 7) 当前行处理完毕,下移 $I++$ 进行新的窗口处理,返回步骤 4);
- 8) 当 $I = H - (Q-1)/2, J = W - (Q-1)/2$,保存滤波结果图像 F_1 。

1.1.2 多尺度形态学滤波

改进均值滤波处理完毕后,图像中较大的随机噪点已经滤除,接下来采用数学形态学方法对背景进行抑制。数学形态学是一种非线性滤波方法,它的基本思想是用具有一定形态的结构元,去度量和提取图像中的对应形状,以达到对图像分析和识别的目的,基本运算主要有膨胀、腐蚀、开启和闭合 4 种。

1) 膨胀运算。

灰度图像 $f(x,y)$ 被结构元素 $b(x,y)$ 膨胀,表示为

$f \oplus b$, 定义为

$$(f \oplus b)(s, t) = \max \{ f(s-x, t-y) + b(x, y) \mid (s-x), (t-y) \in D_f, (x, y) \in D_b \} \quad (3)$$

式中, D_f 和 D_b 分别为 f 和 b 的定义域。

2) 腐蚀运算。

灰度图像 $f(x, y)$ 被结构元素 $b(x, y)$ 腐蚀, 表示为 $f \ominus b$, 定义为

$$(f \ominus b)(s, t) = \min \{ f(s+x, t+y) - b(x, y) \mid (s+x), (t+y) \in D_f, (x, y) \in D_b \} \quad (4)$$

3) 开启运算。

用 b 开启 f , 记为 $f \circ b$, 定义为

$$f \circ b = (f \ominus b) \oplus b \quad (5)$$

4) 闭合运算。

用 b 闭合 f , 记为 $f \cdot b$, 定义为

$$f \cdot b = (f \oplus b) \ominus b \quad (6)$$

通过开启运算处理, 图像中小于结构元尺寸的小目标以及大目标的部分边缘将会被滤除, 只剩下大目标内部和面积起伏的背景, 并且背景的边缘部分能很好地保留。结构元素形状、方向、尺度的选择决定了算法对图像边缘提取的效果, 并且由于每个方向的结构元素只对同方向的结构元素较敏感, 不同方向的边缘被平滑掉, 因此选取结构元素要全面。长度为3、方向分别为 $0^\circ, 45^\circ, 90^\circ, 135^\circ$ 的结构元素分别为: $b_1 =$

$$\begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}, b_2 = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 \\ 0 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 0 \end{bmatrix}, b_3 = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}, b_4 = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}。$$

本文算法流程如下:

1) 选取直线元素作为结构体, 定义长度分别为3, 5, 9, 11, 角度分别为 $0^\circ, 45^\circ, 90^\circ, 135^\circ$ 的结构体;

2) 将相同形状、不同尺寸的结构体作为一类, 使用各类中的结构体对图像进行串联滤波, 其中, 0° 和 90° 方向结构元素长度为9, 11 串联, 45° 和 135° 方向结构元素长度为3, 5 串联, 得到4幅滤波后的图像;

3) 分别计算长度为3, 5, 9, 11, 相角为 $0^\circ, 45^\circ, 90^\circ, 135^\circ$ 的4种结构体插入图像的次数, 计算所有结构体插入图像的总次数以及4类串联滤波器的权数, 其中, 权数定义为各类结构体插入图像中的次数除以总次数后得到的值;

4) 将由流程2)得到的4幅图像与对应的权数相乘求和, 得到平滑后的图像 $F_{\text{filter_end}}$;

5) 将输入图像 F_1 与图像 $F_{\text{filter_end}}$ 作差, 就可得到背景抑制后的图像 $F_{\text{filter_out}}$ 。

1.2 改进自适应分割方法

由于弱小目标和背景灰度对比度不大, 而且灰度分布往往接近或者交叠, 很难只用固定的阈值直接对原始图像分割提取目标, 如图2所示。

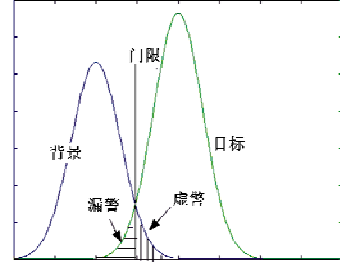


图2 图像分割

Fig. 2 Image segmentation

本文利用内窗口对滤波后的图像进行遍历运算, 算出初始阈值 T_{\min} , 分割成两块区域后进行灰度等统计, 为了避免图像中过亮或过暗等因素的干扰, 对一定像素进行剔除运算, 最后判断使得两类方差取得最大值的阈值即为最优分割门限。具体算法步骤如下:

1) 初始化参数, 设定内窗口尺度大小 $scale$ 为 p , 阈值调整参数为 K , $F_{\text{filter_out}}$ 为形态学滤波后输出, T_{\max} 为 $F_{\text{filter_out}}$ 中最大像素;

2) 利用内窗口模板对预处理后的图像 $F_{\text{filter_out}}$ 进行遍历, 将每一次运算后的矩阵的平均值赋给 $F_{\text{filter_out}}$ 运算的第一个量, 依次类推, 直至整幅图像运算完毕, 得到一幅新的图像 $B(x, y)$;

3) 根据 $B(x, y)$ 以及阈值调整参数 K 定义最小阈值范围, 即

$$T_{\min} = \max(B(x, y)) - K; \quad (7)$$

4) 对 $F_{\text{filter_out}}$ 中的所有像素值与 T ($T \in [T_{\min}, T_{\max}]$) 进行比较, 将图像分为灰度值大于 T 的图像区域 G_1 和灰度值小于等于 T 的区域 G_2 , 对 G_1 和 G_2 的像素进行排序, 将 $1/3$ 的最大值与最小值丢弃, 统计 G_1 和 G_2 的灰度总和 S_1, S_2 及对应的像素个数 n_1, n_2 , 分别求得平均值 G_{1_avg} 和 G_{2_avg} , 令

$$\begin{cases} G_{1_avg} = S_1/n_1 \\ G_{2_avg} = S_2/n_2 \\ A_{vg} = (G_{1_avg} + G_{2_avg})/2 \end{cases} \quad (8)$$

$$\begin{cases} S = S_1 + S_2 \\ P_1 = S_1/S \\ P_2 = S_2/S \end{cases} \quad (9)$$

5) 计算 G_1 和 G_2 的类间方差

$$\sigma^2(T) = P_1(A_{vg} - G_{1_avg})^2 + P_2(A_{vg} - G_{2_avg})^2; \quad (10)$$

6) 最优的阈值应该使得类间方差 $\sigma^2(T)$ 取得最大值的阈值, 即

$$T^* = \{T^* \mid \sigma^2(T) \geq \sigma^2(T^*), \forall T \in [f_{\min}, f_{\max}]\} \quad (11)$$

1.3 多帧关联

为了在低信噪比情况下检出弱小目标,提高检出概率,同时又保证虚警率不至于太高,在降低阈值时,必须充分考虑目标与虚警的差异特性。目标在场景中位置相对固定,而为了去除随机噪点的干扰,降低虚警,可以使用多帧关联的方法。具体思路如下:每一帧图像经过处理后,分别记录候选目标的坐标位置信息 (x_i, y_i) ,前3帧保存信息不上报目标,待第4帧处理完毕后,开始前4帧目标的坐标位置关联,关联策略是4帧选3就判定为有目标。关联策略如图3所示。

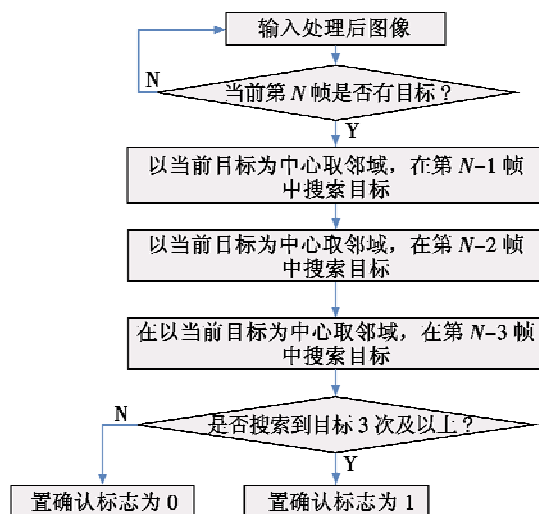


图3 多帧关联

Fig. 3 Multi-frame association

2 实验结果与分析

本次实验运行软件平台为 Matlab R2012a,处理的图像为常温25℃、低温-20℃及低温-40℃灵敏度测量时获取,像素大小160×160,灰度级数为256。基于局部邻域最大均值滤波算子尺寸为3,数学形态学结构元素长度分别为3,5,9,11,阈值分割系数取6,多帧关联半径为5,每个任务仿真3组,无多帧关联,单一形态学滤波算法,本文算法中选择检出概率和虚警率两个指标,分别定义为:目标检出概率 = $\frac{\text{检测出的真实目标数}}{\text{图像中实际的目标总数}} \times 100\%$,虚警率 = $\frac{\text{检测出的虚假目标数}}{\text{检测出的所有可能的目标总数}} \times 100\%$ 。实验结果如下。

第1组数据,常温25℃,选取第168帧图像,各方法检出结果如图4、表1所示。

第2组数据,低温-20℃,选取第90帧图像,各方法检出结果如图5、表2所示。

第3组数据,低温-40℃,分别选取第183、第185帧图像,各方法检出结果如图6、表3所示。

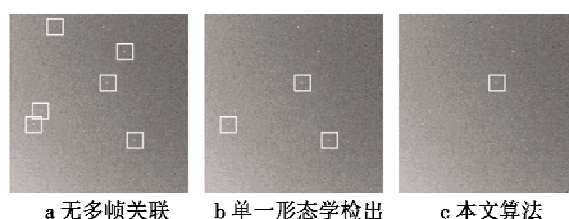


图4 第168帧图像各方法检出结果(25℃)

Fig. 4 The 168th frame image results of different methods (25℃)

表1 常温下检出结果统计(25℃)

Table 1 The statistical result at normal temperature (25℃)

总帧数	无多帧关联		单一形态学算法		本文算法	
200帧	检出概率	虚警率	检出概率	虚警率	检出概率	虚警率
	100%	20%	100%	2%	100%	0%

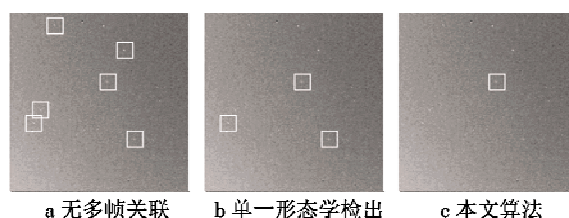


图5 第90帧图像各方法检出结果(-20℃)

Fig. 5 The 90th frame image results of different methods(-20℃)

表2 低温下检出结果统计(-20℃)

Table 2 The statistical result at low temperature (-20℃)

总帧数	无多帧关联		单一形态学算法		本文算法	
200帧	检出概率	虚警率	检出概率	虚警率	检出概率	虚警率
	98.5%	89%	98.5%	49%	99.5%	3%

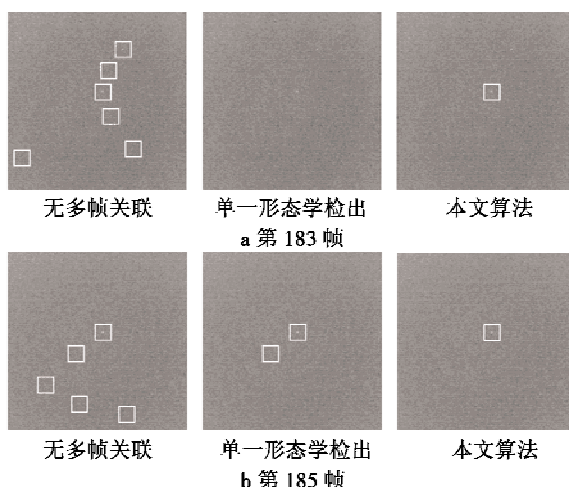


图6 第183、第185帧图像各方法检出结果(-40℃)

Fig. 6 The 183th and 185th frame image results of different methods(-40℃)

由实验结果数据可得,多帧关联算法能有效地去除探测器性能造成的随机噪点的干扰,在常温情况下,

单一尺度的形态学滤波与本文算法都能较好地检测出目标并且保持较低的虚警率;但是当温度分别降为 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}$ 和 $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ 时,探测器成像质量较差,红外探测器的噪声较大,从图5及表2的统计中可以看到,单一形态学滤波的虚警率已经达到了49%,在图6及表3中单一形态学算法不仅检出概率低,而且虚警率也很高。低温条件下,本文算法在保证较高检出概率的同时,依然能较好地抑制虚警的产生,提高了目标检出结果的置信度。

表3 低温下检出结果统计($-40\text{ }^{\circ}\text{C}$)

Table 3 The statistical result at low temperature ($-40\text{ }^{\circ}\text{C}$)

总帧数	无多帧关联		单一形态学算法		本文算法	
200 帧	检出概率	虚警率	检出概率	虚警率	检出概率	虚警率
	89%	78%	31.5%	45%	85%	0%

3 结束语

本文充分利用红外弱小目标与噪点、背景的差异性,利用邻域内像素的相关性等信息,可以有效地改善图像的质量,采用改进的阈值计算方法,可以稳定准确地判断出最优的分割门限。相比传统的序列检测算法,本文算法能有效地区分真实目标点与随机固定坏元的干扰,检出准确率高,虚警率低。另外,在算法实现的过程中,包括各种滤波算子以及门限系数的选择更多的是要依据经验值,因此更好地获取先验知识显得尤为重要,而且算法的可适用性也需要更多的验证。

参考文献

- [1] YANG L, YANG J, YANG K. Adaptive detection for infrared small target under sea-sky complex background [J]. *Electronics Letters*, 2004, 40(17):1083-1085.
- [2] ZHANG B Y, ZHANG T X, CAO Z G, et al. Fast new small target detection algorithm based on a modified partial differential equation in infrared clutter[J]. *Optical Engineering*, 2007, 46(10):106401-1-6.
- [3] CHEN C L P, LI H, WEI Y T, et al. A local contrast method for small infrared target detection [J]. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2014, 52(1):574-581.
- [4] ZHANG Y, XIONG M T, WU Q Z. Evaluation of dim target detection and tracking algorithms [C]//The 4th International Symposium on Advanced Optical Manufacturing and Testing Technologies: Optical Test and Measurement Technology and Equipment, 2009:7283.7283W1-7283W6.
- [5] BARNETT J. Statistical analysis of median subtraction filtering with application to point target detection in infrared backgrounds [J]. *Proc. SPIE*, 1989. doi:10.1117/12.951425.
- [6] GONZALEZ R C, WOOD R E. Digital image processing [M]. 3rd ed. 阮秋琦, 阮宇智, 译. 北京:电子工业出版社, 2013.
- [7] 汪洋, 郑亲波, 张钧屏. 基于数学形态学的红外图像小目标检测[J]. *红外与激光工程*, 2003, 32(1):28-31.
- [8] SHECHTMAN E, IRANI M. Matching local self-similarities across images and videos [C]//IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition, 2007:1-8.
- [9] KHAN J F, ALAM M S. Target detection in cluttered FLIR imagery using probabilistic neural network [C]//Proc. SPIE, 2005:55-66.
- [10] LIU L, HUANG Z J. Infrared dim target detection technology based on background estimate [J]. *Infrared Physics & Technology*, 2014, 62(2):59-64.
- [1] YANG L, YANG J, YANG K. Adaptive detection for infrared small target under sea-sky complex background [J].
- (上接第25页)
- [3] 曾作钦. 基于奇异值分解的信号处理方法及其在机械故障诊断中的应用[D]. 广州:华南理工大学, 2011.
- [4] 康春玉, 章新华. 一种基于奇异值分解的自适应降噪方法[J]. *声学技术*, 2008, 27(3):455-458.
- [5] 王维, 张英堂, 徐章遂. 基于动态聚类的奇异值分解降噪方法研究[J]. *振动工程学报*, 2008, 21(3):304-308.
- [6] 丛华, 吴广平, 饶国强, 等. 计算阶次分析中避免阶次混叠的滤波定阶方法及其应用[J]. *振动与冲击*, 2012, 31(12):42-44.
- [7] 张文斌. 奇异值能量差分谱在信号降噪中的应用[J]. *工矿自动化*, 2014, 40(10):25-28.