

三维数据化技术在输电线故障检测中的应用研究

为了提高对输电线的故障智能诊断和检测能力,结合大数据分析和特征提取方法进行输电线故障检测,提出基于三维数据化技术的输电线故障检测方法。采用多传感器组网方法进行输电线网络数据采集,对采集的输电线数据进行三维特征重组,提取反映输电线网络故障的谱特征量,结合三维数据化分析技术进行输电线故障数据的可视化图谱重构,根据图谱中的异常分布状态,进行故障类别判断,实现输电线故障检测。实验结果表明,采用该方法进行输电线故障数据检测的准确性较好,通过对输电线的三维数据化图谱分析能实现输电线故障点的准确定位识别。

郑明 葛朝晖 张智 韩阳 李佩泽/国网河北省电力有限公司经济技术研究院

0 引言

随着输配电技术的发展,大规模的电路网络已经形成,电力传输是通过输电线路组网实现的,输电线路组网具有节点众多和组网结构复杂等问题,且输电线路长期处于高负荷工况状态,容易发生节点传输控制失效和线路中断,从而产生输电配电故障。为了提高输电配电的稳定性,需要对输电线路进行实时监测和故障状态识别,实现对输电线路故障准确检测,确保输电网络处于良好的运行工况下。研究输电线路故障检测方法,在电网优化组网设计和输电配电的优化控制等领域具有重要的应用价值,在输电线路的状态监测中具有广阔的应用前景^[1]。

由于输电线路网络传输节点之间存在

自相关性和特征扰动性,导致输电线故障检测准确性不高,对输电线故障检测是建立在输电线的传输数据特征分析基础上的,结合输电线的传输数据特征提取和状态监测,实现故障诊断和检测,提高输电线的故障状态识别能力。传统方法主要有小波特征提取方法、时频特征分析方法以及谱特征分析方法^[2-3]。其中,文献[4]中提出一种基于相关谱匹配方法进行输电线故障特征提取,结合故障数据滤波检测方法实现对输电线路的断点数据检测,并实现对故障节点的准确定位识别。该方法在故障识别中存在分故障图谱的分辨能力不高和故障特征的匹配性不好等问题。文献[5]中提出一种基于模糊指向性聚类的输电线断点故障数据挖掘技术。采用模糊指向性聚类方法进行输电线的故障数据属性分类和特征提取,提高故障类别的判断分析能力。该方法需要大量的输电线传输的先验样本作为数据支持,在输电线故障检测中容易存在漂移失真。

针对上述问题,本文提出基于三维数据化技术的输电线故障检测方法,实现输电线故障检测。最后进行仿真实验,展示了本文方法在提高输电线故障检测准确性方面的优越性能。

1 输电线故障数据多传感器采集和特征提取

1.1 输电线路网络的节点传输数据采集

为了实现对输电线故障的准确检



郑明/工程师

关键词/Keywords

三维数据化技术·
输电线·
故障检测·
图谱·

国家自然科学基金项目(61071201),河北省自然科学基金资助项目(E2013203380)。

测,首先采用神经网络方法进行输电线异常节点传输故障数据特征提取和信息采集,构建输电线路网络的节点分布神经网络模型,采用如图1所示的组网模型进行输电线路的数据采集。

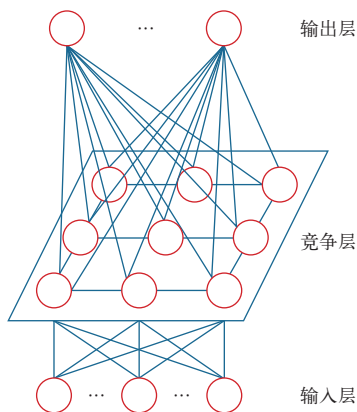


图1 输电线路的传输数据传感器采集神经网络模型

在图1的输电线路数据采集模型中,传感器组网采用三层模型,分别为输入层、竞争层和输出层^[6],在输入层中采集的输电线路传感信息融合数据的特征分量满足如下条件:① $C \subset S$; ② $\text{Min} \|C\|$; ③ $\forall p \in A, \text{cov}_p \geq k$; ④ C 中输电线路传输节点具有多重连通性; ⑤ $\text{Max}(t_{\text{end}} - t_0)$, t_0 , t_{end} 分别为输电线路故障数据采集的起始时间和终止时间。

采用量化融合跟踪方法,得到输电线路网络节点输出的电压分量为

$$WD_x(t, f) = \int x\left(t + \frac{\tau}{2}\right) x^*\left(t - \frac{\tau}{2}\right) e^{-j2\pi f\tau} d\tau \quad (1)$$

式中, x^* 为线性卷积; t 为对输电线路故障数据输出的采样时间。

得到输电线路连通性概率密度为

$$P_c = \frac{e_i^\alpha e_j^\alpha}{d(s_i, s_j)^\beta} + z \quad (2)$$

式中, e_i , e_j 分别为输电线路 s_i , s_j 的剩余能量; z 为输电线路网输出数据的采样脉冲。

采用局部谱密度分析方法,提取在采样时间 t_{k+1} 时内输电线路检测状态,计算公式为

$$\hat{x}_{k+1}^- = F(\hat{x}_k^+) \quad (3)$$

将输电线路的故障检测覆盖区域分为若干个边长为 Ke 的块,结合相位统计特征分析方法^[7],得到输电线路传感信息采集输出结果为

$$\begin{aligned} \dot{\alpha}(X, t) &= C\dot{E} - C\dot{P}(t) \\ &= C[\dot{e}^T \ddot{e}^T \cdots e^{(n)T}]^T - C[\dot{p}(t)^T \ddot{p}(t)^T \cdots P^{(n)}(t)^T]^T \\ &= C_n[e^{(n)} - p^{(n)}(t)] + \sum_{k=1}^{n-1} C_k[e^{(k)} - p^{(k)}(t)] \\ &= C_n[x_1^{(n)} - x_{ld}^{(n)} - p^{(n)}(t)] + \sum_{k=1}^{n-1} C_k[e^{(k)} - p^{(k)}(t)] \quad (4) \\ &= C_n[\dot{x}_n - x_{ld}^{(n)} - p^{(n)}(t)] + \sum_{k=1}^{n-1} C_k[e^{(k)} - p^{(k)}(t)] \\ &= C_n[f(X, t) + \Delta f(X, t) - x_{ld}^{(n)} - p^{(n)}(t)] + \\ &\quad \sum_{k=1}^{n-1} C_k[e^{(k)} - p^{(k)}(t)] \end{aligned}$$

根据上述对输电线路传输数据的采样结果,结合特征提取和信息融合方法进行输电线路故障检测和特征匹配,进行故障检测。

1.2 故障特征提取

采用多传感器组网方法进行输电线路网络数据采集,对采集的输电线路数据进行三维特征重组,提取反映输电线路网络故障的谱特征量,采用Takens嵌入定理^[8],提取输电线路故障数据在三维数据化背景下的特征信息流,得到输电线路故障数据的特征分布的互信息量和输出增益为

$$\text{Info}(B) = - \sum_{i=1}^m p_i \log_2 p_i \quad (5)$$

$$\text{Info}_A(B) = \sum_{j=1}^v \frac{|B_j|}{|B|} \text{Info}(B_j) \quad (6)$$

$$\text{Gain}(A) = \text{Info}(B) - \text{Info}_A(B) \quad (7)$$

结合输电线路故障数据图谱特征进行信息重构,构建输电线路故障数据时间序列单变量时间序列为 $\{x_n\}$,其中数据样本长度为 N ,在传感器节点进行数据采集,得到输电线路故障数据特征分布的高维图谱 $x_s = [x(\eta_1), \dots, x(\eta_N)]^T$ 的估计值

$$\hat{x}_s = W_s^T y \quad (8)$$

式中, $\hat{x}_s = [\hat{x}(\eta_1), \dots, \hat{x}(\eta_N)]^T$ 。

采用三维数据化处理技术,得到输电线路故障特征的功率谱密度特征维 $P_n = P_0/\delta$,采用传感融合跟踪识别方法,得到输电线路故障检测的判别函数为

$$\begin{cases} E\{w(k)u_i^T(k)\} = B_i(k) & i=1,2,\dots,N \\ E\{u_i(k)u_j^T(k)\} = D_{ij}(k) & i,j=1,2,\dots,N \text{ 且 } i \neq j \end{cases} \quad (9)$$

提取输电线路故障信息的功率谱密度特征,得

到输电线故障数据检测问题转化为求三维数据异常谱特征分布问题^[9], 表示为

$$\mathbf{x}(k+1) = \mathbf{A}(k)\mathbf{x}(k) + \mathbf{\Gamma}(k)\mathbf{w}(k) \quad (10)$$

$$\mathbf{z}_i(k) = \mathbf{H}_i(k)\mathbf{x}(k) + \mathbf{u}_i(k) \quad i=1,2,\dots,N \quad (11)$$

式中, $\mathbf{x}(k) \in \mathbf{R}^{n \times 1}$ 为输电线故障数据的三维空间分布矢量; $\mathbf{A}(k) \in \mathbf{R}^{n \times n}$ 为状态转移矩阵。

对输电线断点故障数据信息流采用稀疏性融合方法进行数据融合处理^[10], 得到故障数据的谱特征量

$$\mathbf{z}_k^i = h_k^i(\mathbf{x}_k, \mathbf{u}_k) + \mathbf{v}_k^i \quad i=1,2,\dots,M \quad (12)$$

式中, $\mathbf{z}_k^i$ 为传感 i 在 k 时刻的测度信息; $i(i=1,2,\dots,M)$ 为输电线传输数据采集节点。

通过上述分析, 实现了对输电线故障信息特征提取, 根据特征提取结果进行输电线故障检测。

2 输电线故障检测的实现

2.1 输电线数据的三维特征重组

在上述采用多传感器组网方法进行输电线网络数据采集和谱特征量提取的基础上, 进行输电线故障检测。本文提出基于三维数据化技术的输电线故障检测方法, 构建输电线断点故障数据检测的知识库模型, 得到输电线故障数据训练序列矩阵 $\mathbf{Y}(k-1|k-1)$, 以及 k 时刻信息序列矩阵 $\tilde{\mathbf{M}}(k)$, 对输电线故障数据信息阵 $\mathbf{Y}(k|k)$ 进行规则向量集重组, 得到重组结果

$$\mathbf{Y}(k|k-1) = \{\mathbf{I} - \mathbf{F}(k-1)[\mathbf{F}(k-1) + \tilde{\mathbf{Q}}^{-1}(k-1)]^{-1}\} \times \mathbf{F}(k-1) \quad (13)$$

$$\mathbf{Y}(k|k) = \mathbf{Y}(k|k-1) + \tilde{\mathbf{H}}^T(k)\mathbf{R}^{-1}(k)\tilde{\mathbf{H}}(k) \quad (14)$$

$$\hat{\mathbf{y}}(k|k-1) = \lambda^{-1}(k)\{\mathbf{I} - \mathbf{F}(k-1)[\mathbf{F}(k-1) + \tilde{\mathbf{Q}}^{-1}(k-1)]^{-1}\} \times [\tilde{\Phi}^{-1}(k-1)]^T [\hat{\mathbf{y}}(k-1|k-1) + \hat{\mathbf{i}}(k-1)] \quad (15)$$

$$\hat{\mathbf{y}}(k|k) = \hat{\mathbf{y}}(k|k-1) + \tilde{\mathbf{H}}^T(k)\mathbf{R}^{-1}(k)\tilde{\mathbf{M}}(k) \quad (16)$$

其中

$$\begin{cases} \mathbf{F}(k-1) = \lambda^{-1}(k)[\Phi^{-1}(k-1)]^T \mathbf{Y}(k-1|k-1)\Phi^{-1}(k-1) \\ \hat{\mathbf{i}}(k-1) = \mathbf{Y}(k-1|k-1)\Phi^{-1}(k-1)\mathbf{J}(k-1)\tilde{\mathbf{M}}(k-1) \end{cases} \quad (17)$$

结合经验模态分解方法, 得到输电线故障数据融合后的特征尺度参数估计值

$$\begin{aligned} \hat{\mathbf{y}}(k|k) &= \mathbf{Y}(k|k)\hat{\mathbf{x}}(k|k) = \mathbf{P}^{-1}(k|k)\hat{\mathbf{x}}(k|k) \\ &= \mathbf{Y}(k|k)\hat{\mathbf{x}}(k|k-1) + \tilde{\mathbf{H}}^T(k)\mathbf{R}^{-1}(k)[\tilde{\mathbf{M}}(k) - \tilde{\mathbf{H}}(k)\hat{\mathbf{x}}(k|k-1)] \\ &= [\mathbf{Y}(k|k-1) + \tilde{\mathbf{H}}^T(k)\mathbf{R}^{-1}(k)\tilde{\mathbf{H}}(k)]\hat{\mathbf{x}}(k|k-1) + \tilde{\mathbf{H}}^T(k)\mathbf{R}^{-1}(k)\tilde{\mathbf{H}}(k)[\tilde{\mathbf{M}}(k) - \tilde{\mathbf{H}}(k)\hat{\mathbf{x}}(k|k-1)] \\ &= \hat{\mathbf{y}}(k|k-1) + \tilde{\mathbf{H}}^T(k)\mathbf{R}^{-1}(k)\tilde{\mathbf{M}}(k) \end{aligned} \quad (18)$$

对于两个过零点的故障数据进行点对点信息融合, 得到信息融合的统计分布函数为

$$\begin{aligned} \mathbf{P}(k|k) &= \mathbf{P}(k|k-1) - \mathbf{P}(k|k-1)\tilde{\mathbf{H}}^T(k) \times \\ &\quad [\tilde{\mathbf{H}}(k)\mathbf{P}(k|k-1)\tilde{\mathbf{H}}^T(k) + \mathbf{R}(k)]^{-1}\tilde{\mathbf{H}}(k)\mathbf{P}(k|k-1) \\ &= [\mathbf{P}^{-1}(k|k) + \tilde{\mathbf{H}}^T(k)\mathbf{R}^{-1}(k)\tilde{\mathbf{H}}(k)]^{-1} \end{aligned} \quad (19)$$

采用包络线特征匹配方法, 得到故障数据的量化跟踪结果为 $\mathbf{P}(k|k)$, 故障检测的三维数据匹配函数

$$\mathbf{Y}(k|k) = \mathbf{P}^{-1}(k|k) = \mathbf{Y}(k|k-1) + \tilde{\mathbf{H}}^T(k)\mathbf{R}^{-1}(k)\tilde{\mathbf{H}}(k) \quad (20)$$

确定三维故障数据的功率谱密度特征, 得到输电线故障数据的非线性、非平稳特征分量为

$$\begin{aligned} \mathbf{Y}(k|k-1) &= \mathbf{P}^{-1}(k|k-1) \\ &= \{\mathbf{F}^{-1}(k-1) + [\tilde{\mathbf{Q}}^{-1}(k-1)]^{-1}\}^{-1} \\ &= \mathbf{F}(k-1) - \mathbf{F}(k-1)[\mathbf{F}(k-1) + \tilde{\mathbf{Q}}^{-1}(k-1)]^{-1}\mathbf{F}(k-1) \\ &= \{\mathbf{I} - \mathbf{F}(k-1)[\mathbf{F}(k-1) + \tilde{\mathbf{Q}}^{-1}(k-1)]^{-1}\}\mathbf{F}(k-1) \end{aligned} \quad (21)$$

其中

$$\begin{aligned} \mathbf{F}(k-1) &= \lambda^{-1}(k)[\Phi^{-1}(k-1)]^T \mathbf{P}^{-1}(k-1|k-1)\Phi^{-1}(k-1) \\ &= \lambda^{-1}(k)[\Phi^{-1}(k-1)]^T \mathbf{Y}(k-1|k-1)\Phi^{-1}(k-1) \end{aligned} \quad (22)$$

根据输电线故障数据的特征分量进行三维数据图谱重构, 实现故障检测。

2.2 输电线故障数据的可视化图谱分析

根据输电线的故障数据的分量图谱分解结果, 计算输电线故障状态向量的预测值为

$$\begin{aligned} \hat{\mathbf{y}}(k|k-1) &= \mathbf{Y}(k|k-1)\hat{\mathbf{x}}(k|k-1) \\ &= \{\mathbf{I} - \mathbf{F}(k-1)[\mathbf{F}(k-1) + \tilde{\mathbf{Q}}^{-1}(k-1)]^{-1}\} \times \\ &\quad \mathbf{F}(k-1)[\Phi(k-1)\hat{\mathbf{x}}(k-1|k-1) + \mathbf{J}(k-1)\tilde{\mathbf{M}}(k-1)] \\ &= \{\mathbf{I} - \mathbf{F}(k-1)[\mathbf{F}(k-1) + \tilde{\mathbf{Q}}^{-1}(k-1)]^{-1}\}\lambda^{-1}(k) \times \\ &\quad [\Phi^{-1}(k-1)]^T \mathbf{Y}(k-1|k-1)[\hat{\mathbf{x}}(k-1|k-1) + \Phi^{-1}(k-1)\mathbf{J}(k-1)\tilde{\mathbf{M}}(k-1)] \end{aligned}$$

$$= \lambda^{-1}(k) \{I - F(k-1)[F(k-1) + Q^{-1}(k-1)]^{-1}\} \times [\Phi^{-1}(k-1)]^T [\hat{y}(k-1|k-1) + \hat{i}(k-1)] \quad (23)$$

其中

$$\hat{i}(k-1) = Y(k-1|k-1)\Phi^{-1}(k-1)J(k-1)\tilde{M}(k-1) \quad (24)$$

结合三维数据化分析技术进行输电线故障数据的可视化图谱分析,得到三维图谱分量为

$$\hat{P}_{k+1}^- = \frac{\partial F}{\partial x} \Big|_{x=\hat{x}_k^+} P_k^+ \frac{\partial F}{\partial x} \Big|_{x=\hat{x}_k^+}^T + Q_k = P_k^+ + Q_k \quad (25)$$

其中,用 $\text{ann}(u, r_1, r_2, \alpha)$ 表示输电线故障特征的偏转向量,根据输电线故障数据的三维图谱分布,得到输电线故障特征的包络值为

$$\bar{C}_{ij} = \sum_{\tau} (x_{i\tau} - \bar{x}_{i\tau})(x_{j\tau} - \bar{x}_{j\tau}) \quad (26)$$

$$\tilde{C}_{ij} = \sum_{\tau} (x_{i\tau} - \tilde{x}_{i\tau})(x_{j\tau} - \tilde{x}_{j\tau}) \quad (27)$$

结合输出功率异常监测方法,根据三维数据化技术,实现输电线故障检测,得到故障检测的迭代式为

$$y^{(n)} = f(y^{(n-1)}, \dots, \dot{y}, t) + \Delta f(y^{(n-1)}, \dots, \dot{y}, t) + d(t) + b(y^{(n-1)}, \dots, \dot{y}, t)u \quad (28)$$

式中, $y \in R^m$ 为初始化的输电线状态向量; $f \in R^m$ 为故障位置估计函数。

根据输电线数据图谱中的异常分布状态,进行故障类别判断,由此实现了输电线的故障数据检测。

3 实验与结果分析

为了测试本文方法在实现输电线故障检测中的应用性能,进行仿真实验,实验采用Matlab 7仿真软件设计,输电线的网络覆盖范围为 400×400 ,输电线的传输链路衰减为 $1\ 200\ \text{B/s}$,对输电线中传输数据采样时间间隔为 $0.23\ \text{s}$,对输电线传输数据的初始采样频率 $f_1 = 1.25\ \text{Hz}$,终止采样频率 $f_2 = 2.54\ \text{Hz}$,故障数据分布的尺度系数为 0.32 ,尺度因子为 0.26 ,根据上述仿真环境和参量设定,进行输电线路故障检测仿真实验,得到原始故障数据采样结果如图2所示。

以图2采集的输电线故障数据为研究对象,进

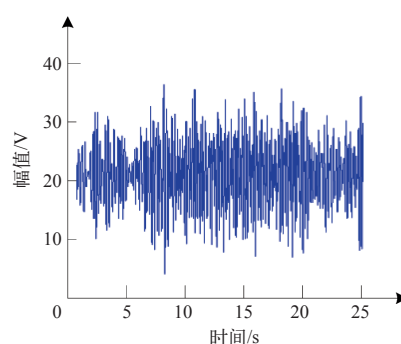


图2 输电线原始故障数据采样结果

行输电线网络故障的谱特征量提取,结合三维数据化分析方法,得到输电线数据三维图谱如图3所示。

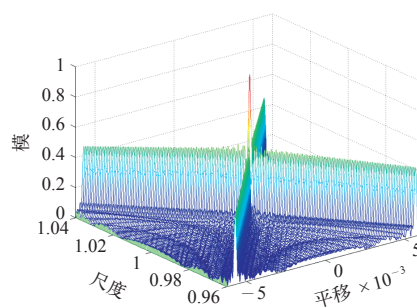


图3 输电线路故障数据的三维可视化图谱

根据输电线数据图谱中的异常分布状态,进行故障类别判断,为了对比算法性能,采用不同方法,得到输电线故障检测性能对比结果如下表所示。分析下表得知,采用本文方法进行输电线故障检测的准确性较高,计算开销较小,对输电线故障检测的准确性较好。

表 性能对比

迭代次数	本文方法		传统方法	
	准确度(%)	时间开销/s	准确度(%)	时间开销/s
20	92.2	2.09	66.7	5.23
30	95.3	4.75	75.8	12.65
40	96.7	5.43	80.3	24.36
50	99.8	6.45	84.3	42.78

4 结束语

为了提高输电配电的稳定性,需要对输电线路进行实时监测和故障状态识别,实现对输电线 (下转第75页)

- [3] 公安部天津消防科学研究所. GB 13495—92 消防安全标志 (作废标准) [S]. 北京: 中国标准出版社, 1992.
- [4] 公安部天津消防科学研究所. GB 13495.1—2015 消防安全标志第1部分: 标志 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2015.
- [5] 中国标准化研究院, 机械科学研究总院, 轻工业标准化研究所, 等. GB/T 15565.2—2008 图形符号术语第2部分: 标志及导向系统 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2009.
- [6] 公安部天津消防科学研究所. GB 15630—1995 消防安全标志设置要求 [S]. 北京: 中国标准出版社, 1996.
- [7] 公安部沈阳消防科学研究所. GB 17945—2000 消防应急灯具 (作废标准) [S]. 北京: 中国标准出版社, 2000.
- [8] 中国标准化研究院, 国务院应急管理部, 公安部天津消防研究所等. GB/T 23809—2009 应急导向系统设置原则与要求 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2009.
- [9] 公安部天津消防研究所, 中国建筑标准设计研究院有限公司. 13J811—1改 建筑设计防火规范图示 [M]. 北京: 中国计划出版社, 2015.
- [10] 李顺康, 冯志文. 灯光疏散指示标志设置探讨 [J]. 建筑电气, 2011 (4): 14-21.
- [11] 李顺康. 对设计规范中有关疏散走道、疏散通道和防火门条款的商榷 [J]. 电世界, 2016 (10): 1-4.
- (收稿日期: 2017-06-14) **EA**

(上接第27页)

路故障准确检测, 确保输电网络处于良好的运行工况, 本文提出基于三维数据化技术的输电线故障检测方法, 提取反映输电线网络故障的谱特征量, 结合三维数据化分析技术进行输电线故障数据的可视化图谱分析和故障检测。研究表明, 采用该方法进行输电线故障检测的准确性较好, 实时性较强, 具有很好的应用价值。

参考文献

- [1] 和敬涵, 刘琳. 解耦变换模式下智能配电网快速状态估计算法 [J]. 中国电机工程学报, 2017, 37 (4): 1088-1095.
- [2] 苑宇, 马孝江. 局域波时频域多重分形在故障诊断中的应用 [J]. 振动与冲击, 2007, 26 (5): 60-63.
- [3] 李良敏, 温广瑞. 基于遗传算法的多尺度支持向量机及其在机械故障诊断中的应用 [J]. 机械科学与技术, 2008, 27 (8): 1101-1106.
- [4] Deng Z H, Cao L B, Jiang Y Z, et al. Minimax probability TSK fuzzy system classifier: a more transparent and highly interpretable classification model [J]. IEEE Transactions on Fuzzy Systems, 2015, 23 (4): 813-826.
- [5] Huang Hongwei, Ge Xiaotian, Chen Xuansong. Density clustering method based on complex learning classification system [J]. Journal of Computer Applications, 2017, 37 (11): 3207-3211.
- [6] Ji Yugang, Li Yitong, Shi Chuan. Aspect rating prediction based on heterogeneous network and topic model [J]. Journal of Computer Applications, 2017, 37 (11): 3201-3206.
- [7] 敖星, 吕俊峰, 赵孟娜. 基于主成分分析和多元支持向量机的旋转机械故障诊断方法 [J]. 四川兵工学报, 2010, 31 (9): 83-86.
- [8] 王海峰, 陆军. 复杂电力设备突发故障诊断方法研究与仿真 [J]. 计算机仿真, 2013, 30 (3): 127-129.
- [9] 刘聪, 李颖晖, 吴辰, 等. 基于鲁棒自适应滑模观测器的多故障重构 [J]. 控制与决策, 2016, 31 (7): 1219-1224.
- [10] 李兵, 徐榕, 贾春宁, 等. 基于自适应形态提升小波与改进非负矩阵分解的发动机故障诊断方法 [J]. 兵工学报, 2013, 34 (3): 353-360.
- (收稿日期: 2018-02-10) **EA**