

doi:10.11918/j.issn.0367-6234.2015.10.021

应用 DS_mT 的堆芯吊篮故障信号小波包分析

郭 清^{1,2}, 夏 虹², 韩文伟²

(1. 哈尔滨工程大学 工程训练中心, 150001 哈尔滨;
2. 核安全与仿真技术国防重点学科实验室(哈尔滨工程大学), 150001 哈尔滨)

摘 要: 为解决反应堆堆芯吊篮故障信息难以获取问题, 提出一种采用 DS_mT & 小波包能量分析的故障特征决策提取融合方法. 研究分析了堆芯吊篮在吊篮破裂、吊篮紧固件部分脱落和堆芯支撑下板与吊篮热处理变形 3 种故障工况的振动信号, 采用小波包变换提取故障信号频段能量, 将含有故障信息的采集数据经小波包能量分析后直接赋值给 DS_mT 信度函数. 实验结果表明, 小波包能量分析 DS_mT 融合方法的诊断准确率优于小波包子带能量特征向量图方法, DS_mT 融合算法能够有效辨识吊篮故障模式, 具有较高的诊断效率及可靠性.

关键词: 故障信号; 吊篮故障; 小波包分析; 故障特征

中图分类号: TP18 **文献标志码:** A **文章编号:** 0367-6234(2015)10-0113-05

Wavelet packet analysis of fault signal for core hanging basket using DS_mT

GUO Qing^{1,2}, XIA Hong², HAN Wenwei²

(1. Engineering Training Center, Harbin Engineering University, 150001 Harbin, China; 2. National Defense Key Subject Laboratory for Nuclear Safety and Simulation Technology (Harbin Engineering University), 150001 Harbin, China)

Abstract: This paper proposes a DS_mT & wavelet packet energy analysis fusion method for the problem of reactor core hanging basket fault information. Three kinds of vibration signals in fault conditions from fastener bursting, fastener parts falling off and heat treatment deformation are analyzed and investigated. Then the extracted fault signal frequency band energy based method is directly used and assigned the collected data to DS_mT reliability function. The experimental results show that diagnostic accuracy of DS_mT is superior to sub-band energy vector graphics, and DS_mT can effectively identify hanging basket failure mode with high diagnostic efficiency and reliability.

Keywords: fault signal; hanging basket fault; wavelet packet analysis; fault feature

吊篮是反应堆内堆芯的支承部件, 由于长期工作在高温、高压和高辐射的环境下并时时受冷却剂的高速冲击, 吊篮故障研究是核动力装置故障诊断的一个重要内容. 吊篮内的任何紧固件一旦发生松落事件, 都会影响到一回路机组的正常运转, 甚至有可能为发展成更高级别的核事故埋下隐患. RES-M 法国在役检查规范^[1]中要求对原型堆“在运行期间内构件进行永久性的外部振动监测”. 文献[2]对堆芯吊篮描述如下: “堆芯吊篮的破裂虽极少可能发生, 但也必须加以

考虑”; “堆芯吊篮下部结构存在损坏问题”; “由于运行中堆芯吊篮的紧固件部分脱落需要进行维修”等. 从中可归纳出吊篮故障模式主要体现在吊篮破裂和吊篮部分紧固件部分脱落. 文献[3]分析计算了核电站反应堆吊篮结构与振动特性. 文献[4]研究分形关联维方法对堆内振动信号进行故障诊断, 但都对堆芯吊篮的破裂和松动件等具体故障振动信号进行深入研究. 本文提出了一种应用 DS_mT & 小波包能量分析的吊篮故障特征融合识别算法, 使用小波包变换对堆芯吊篮 3 种故障工况下的冲击信号进行分解, 对频段能量集中的信号进行重构, 构成由各频段能量组成的子带特征向量, 并将其作为 DS_mT 独立证据源的信度赋值, 最后使用 DS_mT 组合规则进行决策级数据融合分析及验证.

收稿日期: 2014-03-11.

基金项目: 国家自然科学基金(51379046).

作者简介: 郭 清(1978—), 女, 讲师, 博士;

夏 虹(1962—), 女, 教授, 博士生导师.

通信作者: 郭 清, guoqing@hrbeu.edu.cn.

1 多源信息 DS_mT 融合算法

DS_mT^[5] (dezert-smarandache theory) 是由法国科学家 Jean Dezert 博士和美国数学家 Florentin Smarandache 教授于 2003 年共同提出的一种新的推理理论。DS_mT 提出了一种新的数学框架, 处理用广义基本信度函数表示的不确定、不精确和高冲突信息源。DS_mT 超越了 D-S 理论的局限, 提出了一种新的融合规则, 能够很好地适应静态和动态的融合问题。

针对堆芯吊篮同一信号能够形成不同的故障特征信息, 仅使用单一信息处理手段, 如有并发故障^[6]发生时, 并不能得到准确的诊断结果, 需要使用信息融合方法综合利用各种信息才能做出准确的诊断决策。从信息融合方法角度来看, 本文在特征层拟采用小波包能量分析获取含有故障信息的能量特征向量, 在决策层采用 DS_mT 不确定算法诊断堆芯吊篮的故障类型。使用归一化后能量特征向量赋值给 DS_mT 的信度函数, 考虑到吊篮故障信息源是独立和动态变化的, 利用 DS_mT 经典组合规则和 PCR5 重新分配规则^[7-11] 进行融合。其中经典 DS_mT 模型下其组合规则为 $\forall A \in D^\theta$ 时

$$m_{M(\theta)}^f(A) \equiv m(A) = \sum_{\substack{X_i, X_j \in D^\theta \\ X_i \cap X_j = A}} m_1(X_i) m_2(X_j).$$

式中的经典组合规则能够保证融合后的信度赋值 $m(\cdot)$ 恰好是一个广义的基本信度赋值, 即 $m(\cdot): D^\theta \in [0, 1]$ 。这里 $m_{M(\theta)}^f(\varphi)$ 在封闭空间都假设其恒为零, 除非在开放空间可以规定其不为零。

PCR5 (第 5 种比例冲突分配规则) 是考虑到含有冲突的规范形式表达时, 把部分冲突质量分配到了包含有冲突的所有元素上。从数学理论角度讲, 该冲突质量重新分配规则具有很高精度。PCR5 的重新分配规则为: 当 $k=2, \forall X \in D^\theta \setminus \{\varphi\}$ 时

$$m_{\text{PCR5}}(X) = m_{12}(X) + \sum_{\substack{Y \in D^\theta/X \\ XY = \varphi}} \left[\frac{m_1(X)^2 m_2(Y)}{m_1(X) + m_2(Y)} + \frac{m_2(X)^2 m_1(Y)}{m_2(X) + m_1(Y)} \right].$$

DS_mT 推理理论处理不确定、不完备信息的能力已经得到公认, 但在用该理论作为故障目标识别时, 基本概率赋值 (BPA) 的构造是一个难点, 需要专家的经验知识及知识库, 也可以使用距离函数或指数函数来构造基本信度赋值, 但这些方法都存在弊端, 或者信息量巨大难以取舍, 或者计算量过大耗时太长。小波包能量分析经过分频后得到能量特征向量, 具有真实的数据特征, 因此用小波包能量特征向量构造每个独立证据源的 BPA 是切实可行的。

2 堆芯吊篮故障信号数据采集

为解决信号输入问题, 首先对堆芯吊篮故障信号进行数据采集。使用加速度传感器模拟获取堆芯吊篮环境噪声信号, 由工频 50 Hz 电源供电, 经电荷放大器放大后, 送入研华 PXI-3980 主机和采样频率为 250 KS/s 研华 PXI-2022 数据采集卡, 由钢球敲击、跌落和摩擦钢板来模拟吊篮发生故障时的冲击信号, 得出堆芯吊篮在吊篮破裂、吊篮紧固件部分脱落和堆芯支撑下板与吊篮热处理变形 3 种故障工况振动信号, 如图 1~3 所示, 图中显示为 0.1 ms 每帧的动态故障信号捕捉图。将得到的信号进行小波包变换, 由小波包系数计算各频带能量, 确定各频段能量大小。

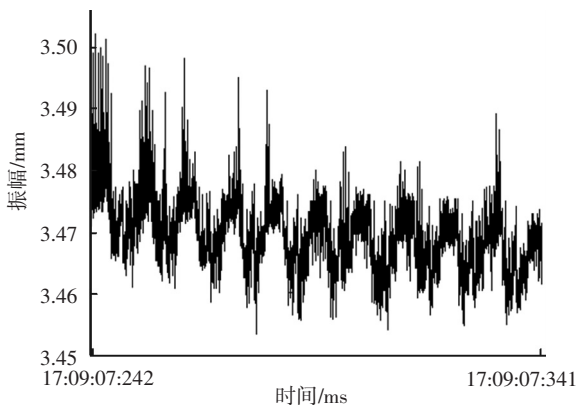


图 1 堆芯吊篮破裂情况下故障仿真波形

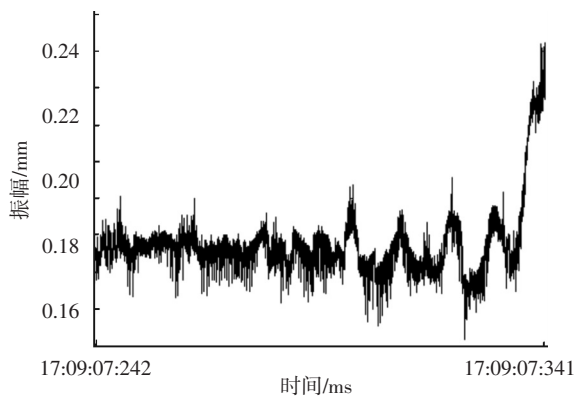


图 2 吊篮紧固件部分脱落时故障仿真波形

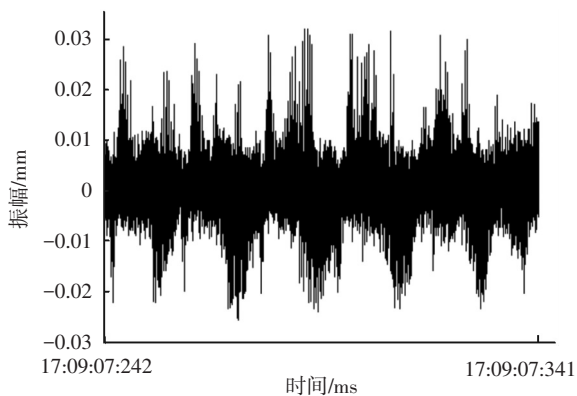


图 3 堆芯支撑下板与吊篮热处理变形情况下故障仿真波形

3 堆芯吊篮故障信号分析与处理

3.1 堆芯吊篮故障识别方案

小波包具有强大的微弱信号提取能力,适用于堆芯吊篮故障特征信号(敏感因子)的提取,能把平稳或非平稳信号映射到一组基函数上,此组基函数由小波函数伸缩而成,在通频范围内能得到不同频带上的分解序列.DSmT & 小波包能量分析故障识别方法将小波包理论与 DSmT 有机地结合起来,如图 4 所示,具有比能量特征向量图预测效率更高的特点.

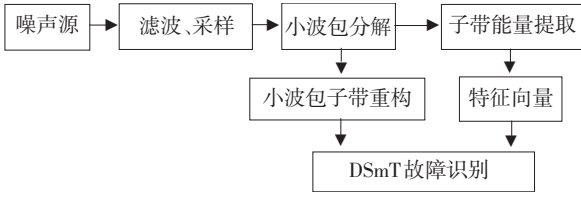


图 4 DSmT & 小波包能量分析故障识别方法

3.2 小波包能量分析算法

小波分析方法的显著优点是选择小波基时存在多样性,采用不同的小波基可以显示信号不同角度的时频特性,因而针对故障诊断中要捕捉故障特征信号来说,是一个非常有力的工具.小波包分析可以提取振动信号中含有故障成分的特征信号,不同的故障信号在不同的频段内能量各不相同,使用小波包分解-重构方法可以将故障信号划分为不同频段,根据各个频段内的能量差异,反映出吊篮故障特征.也就是说利用小波多分辨分析技术和小波包分析技术可以把信号分解在不同的频带内,可以对各频带内信号的能量进行统计分析.小波包变换是一种线性变换,满足能量守恒定理,即

$$\int_{-\infty}^{+\infty} |f(t)|^2 dt = \sum_j \sum_k |c_{j,k}|^2.$$

式中小波包系数 $c_{j,k}$ 具有能量的量纲性质,可用于能量分析^[12].小波包分解是将信号分解在不同频带上的投影,故障特征能量在被细化的频带内放大而清晰地体现出信号间的细微差异.对采集到的振动信号进行小波包分解,获得信号的低频系数和高频系数;再由最低层的低频小波包分解系数和经过阈值量化处理的高频小波包系数,进行小波包重构.选取合适的小波基函数能够有效地表示一个信号的不同成分特征,本文选取小波包基函数为

$$u_n(t) = 2^{-j/2} u_n(2^{-j}t - k), n \in \mathbf{Z}_+, j, k \in \mathbf{Z}.$$

式中: $u_n(t)$ 为小波函数; j 为尺度因子; n 为调制参数; t 为函数变量; k 为平移量; $\mathbf{Z}_+$ 为正整数域; $\mathbf{Z}$ 为整数域. 其中 $u_n(t)$ 满足

$$\begin{cases} u_{2n}(t) = \sqrt{2} \sum_k h_k u_n(2t - k), \\ u_{2n+1}(t) = \sqrt{2} \sum_k g_k u_n(2t - k). \end{cases}$$

式中 $\{h_k\}$ 、 $\{g_k\}$ 分别为低通和高通滤波器系数,小波包实质上是一个函数族,其分解算法为

$$\begin{cases} d_k^{j+1,2n} = \sum_{l \in \mathbf{Z}} h_{2l-k} d_l^{j,n}, \\ d_k^{j+1,2n+1} = \sum_{l \in \mathbf{Z}} g_{2l-k} d_l^{j,n}. \end{cases} (k \in \mathbf{Z})$$

式中: $d_k^{j+1,2n}$ 、 $d_k^{j+1,2n+1}$ 分别为尺度 $j+1$ 下的相应系数; $d_l^{j,n}$ 为尺度 j 下某空间系数,即通过 $d_l^{j,n}$ 和滤波器系数 $\{h_k\}$ 与 $\{g_k\}$ 求出 $d_k^{j+1,2n}$ 和 $d_k^{j+1,2n+1}$; l 为小波包变换的平移量.由上式可求出 $\{d_l^{j,n}\}$,即小波包的重构算法为

$$d_l^{j,n} = \sum_{k \in \mathbf{Z}} [h_{l-2k} d_k^{j+1,2n} + g_{l-2k} d_k^{j+1,2n+1}].$$

选择短支撑 db3 小波基进行 3 层小波分解与重构对小波包阈值进行降噪处理,得出各频段的重构信号,提取各频带范围的特征信号,得到小波包处理后的动态信号如图 5~7 所示.

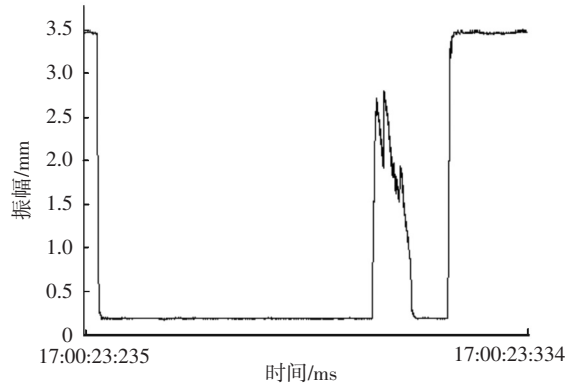


图 5 堆芯吊篮破裂时小波包处理信号

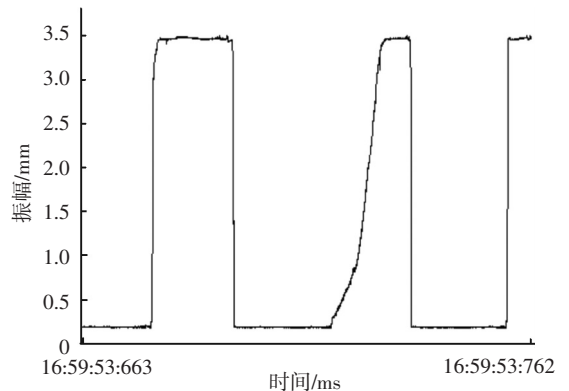


图 6 吊篮紧固件部分脱落时小波包处理信号

由小波包系数得到各频段的能量,其能量可求得

$$E_{3,j} = \int |S_{3,j}(t)|^2 dt = \sum_{k=1}^n |d_{j,k}|^2.$$

式中: $S_{3,j}$ 为 3 层小波包重构后的信号; j 为小波包重

构信号的个数; t 为积分变量; k 为重构信号的离散点幅值求和变量; n 为 3 层小波重构信号 S_{3j} 的采样点数; $d_{j,k}(j=0,1,2,\cdots,7;k=0,1,2,\cdots,n)$ 为 S_{3j} 的离散点的幅值.每个节点系数表示一个频段信号特征,其中输入信号和输出信号都为动态信号,小波包分解以二叉树的结构分解,如图 8 所示.

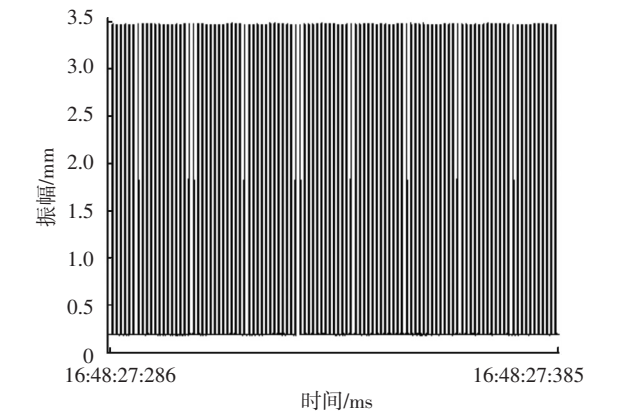


图 7 堆芯支撑下板与吊篮热处理变形时小波包处理信号

信号的某些频带能量的改变即代表一种故障情况,当有发生故障时输出信号的小波包子带能量值也会发生变化,因而故障特征信息包含在小波包子带能量中,经 3 层小波包分解后的信号构成 8 维特征向量,以 8 个频带信号的能量为元素构造特征向量,为方便比较各频带能量大小,将特征向量进行归一化处理,计算后得出堆芯吊篮在吊篮破裂、吊篮紧固件部分脱落和堆芯支撑下板与吊篮热处理变形 3 种子带能量特征向量,见表 1.

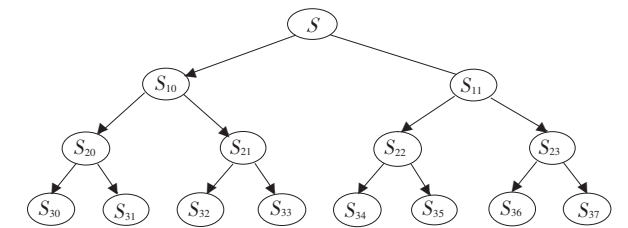


图 8 小波包系数分解结构

表 1 堆芯吊篮故障模式下的子带能量特征向量

吊篮故障类型	E'_{30}	E'_{31}	E'_{32}	E'_{33}	E'_{34}	E'_{35}	E'_{36}	E'_{37}
吊篮破裂	0.038 52	0.132 14	0.112 62	0.386 53	0.207 11	0.046 67	0.215 43	0.096 12
吊篮紧固件部分脱落	0.006 41	0.015 92	0.038 14	0.445 43	0.092 09	0.099 08	0.078 32	0.191 73
堆芯支承下板与吊篮热处理变形	0.002 67	0.121 53	0.399 89	0.043 51	0.381 27	0.043 67	0.130 51	0.201 94

将含有故障信息的特征向量定义为 $\mathbf{E}'_j = (\mathbf{E}_{3j})^{1/2}(j=0,1,\cdots,7)$,那么由频带能量构成含有故障信息的特征向量 $\mathbf{T}$ 为

$$\mathbf{T} = [\mathbf{E}'_{30}, \mathbf{E}'_{31}, \mathbf{E}'_{32}, \mathbf{E}'_{33}, \mathbf{E}'_{34}, \mathbf{E}'_{35}, \mathbf{E}'_{36}, \mathbf{E}'_{37}].$$

由此就建立了子带能量与故障特征的映射关系,为方便比较绘出特征吊篮故障特征能量图,分析能量分布特征,捕捉故障频带位置,诊断堆芯吊篮可能发生的故障类型.小波包信号分解是把所有信号(包括正弦信号)都划归到相应的频带处理,所有被分解频带信号都具有一定能量,因而各频道中的信号能量可以作为特征向量来判断堆芯吊篮是否发生故障.

4 验证与分析

为了研究 DSMT 融合算法性能,对比能量特征向量图和 DSMT 融合算法的诊断效率及准确性,从表 2 中可以看出,DSMT 融合方法在诊断时间及准确性上的表现更为优异,采用小波包能量分析与 DSMT 相结合的方法,对复杂核动力装置状态进行预测,比能量特征向量图预测具有更高的预测精度.

由此可见,进行不同吊篮故障提取融合方法的集成,能够有效提高堆芯吊篮故障诊断结果的准确

度,进而克服单一特征提取方法的缺陷与不足.实验结果表明,DSMT 融合算法的诊断准确率优于传统子带能量特征向量图,DSMT 融合算法不但适用于单一微弱故障诊断,还适用于并发故障的诊断,它对于大型核动力装置故障诊断方法,又提供了一种有效的智能融合方法.本文的故障实验是建立在仿真故障信息基础上,对真实堆芯吊篮的工况还需进一步做更细致的研究,以便更好地应用于堆芯吊篮的故障监测与预测.

另一方面,DSMT 最佳信度赋值选取问题,一直是 DSMT 融合方法应用中的一个难题,目前还没有形成一个统一的标准.本文直接使用子带能量特征向量作为 DSMT 的信度函数赋值,全部采用采集数据,数据具有真实性,也为选取 BPA 的取值方法提供了一种新的研究思路.

表 2 DSMT 融合算法与能量特征向量图诊断性能比较

诊 断 方 法	诊断时间/s	诊断正确率/%
小波包能量分析	0.323 7	99.23
DSMT 融合方法		
小波包子带能量特征向量图	0.455 8	97.47

5 结 论

1) 主要研究解决了反应堆堆芯吊篮故障信息难以有效获取和不确定信息的故障识别问题, 提出一种小波包能量特征提取和不确定理论 DS_mT 故障决策的融合方法。

2) 采用小波包能量分析方法在特征层捕捉故障数据特征信号, 动态数据采集了吊篮破裂、吊篮紧固件部分脱落和堆芯支撑下板与吊篮热处理变形 3 种堆芯吊篮故障信号, 利用小波包变换对故障信号进行分解-重构, 提取频段能量构建子带能量特征向量, 归一化处理后为 BPA 信度函数赋值提供信源。

3) 采用 DS_mT 不确定算法在决策层对堆芯吊篮的故障模式进行识别及验证, 结果显示本文提出的 DS_mT 融合算法比直接采用小波包子能量特征识别图方法的诊断率更高, 表明了所研究方法的可行性及有效性。

参考文献

- [1] 中港第四航务工程局. 风雨历程——中港第四航务工程发展史(1951-2001)[M]. 北京:中港第四航务工程局, 2001.
- [2] 赵志祥. 中国原子能科学研究院年报 2008[M]. 北京:原子能出版社, 2009.
- [3] 喻丹萍, 胡永陶. 秦山核电二期工程反应堆堆内构件模型流致振动试验研究[J]. 核动力工程, 2003, 24(S1):

109-113.

- [4] 吕阳, 夏虹. 基于振动信号的堆内构件故障诊断研究[J]. 应用科技, 2013, 40(4): 63-37.
- [5] SMARANDACHE F, DEZERT J. Advances and Applications of DS_mT for Information Fusion[M]. Rehoboth: American Research Press, 2004.
- [6] LIGGINS M, HALL D L, LLINAS J. Handbook of multisensor data fusion theory and practice[M]. 2nd ed. New York: CRC Press, 2008.
- [7] AIROUCHE M, BENTABET L, ZELMAT M. Pedestrian tracking using color, thermal and location cue measurements: a DS_mT-based framework[J]. Machine Vision and Applications, 2012, 23(5): 999-1010.
- [8] Smarandache F, DEZERT J. Advances and applications of DS_mT for information fusion (collected works)[M]. Rehoboth: American Research Press, 2006.
- [9] RONALD P S. Statistical Multisource-multitarget Information Fusion[M]. Boston, London: Artech House, 2007.
- [10] HULifang, GUAN Xin, HE You. Efficient combination rule of Dezert-Smarandache theory[J]. Journal of Systems Engineering and Electronics, 2008, 19(6): 1139-1144.
- [11] DEZERT, SMARANDACHE F. On the generation of hyper-power sets for the DS_mT[C]//Proceedings of the 6th International Conference on Information Fusion. Piscataway: IEEE Press, 2003: 1118-1125.
- [12] 李舜酩, 李香莲. 振动信号的现代分析技术与应用. 北京:国防工业出版社, 2008.09.

(编辑 张 红)