

基于改进CEEMDAN方法的PEMFC氢气泄漏故障诊断

顾寅雯, 林伟勋, 刘兰晶

江苏精瓷智能传感技术研究院有限公司, 江苏 常州

收稿日期: 2025年3月30日; 录用日期: 2025年4月23日; 发布日期: 2025年4月30日

摘 要

本文提出了一种针对质子交换膜燃料电池(PEMFC)氢气泄漏故障的诊断方法, 通过结合自适应噪声全集经验模态分解(CEEMDAN)和自适应阈值去噪(ATD)技术, 有效解决了信号噪声干扰导致的故障特征提取困难问题。具体步骤如下: 首先, 利用CEEMDAN对采集的振动信号进行分解; 接着, 采用灰色关联分析(GRA)筛选出噪声主导和信号主导的分量; 随后, 对噪声主导分量进行ATD处理, 并将其与信号主导分量进行重构; 最后, 通过Teager能谱分析实现氢气泄漏故障的准确识别。为验证该方法的有效性, 采用机理模型生成的PEMFC数据进行测试, 并与CEEMD-ATD和CEEMDAN结合小波阈值去噪的方法进行对比。实验结果表明, 所提方法在自适应性和去噪性能上具有显著优势, 能够有效提升PEMFC氢气泄漏故障的诊断精度。

关键词

故障诊断, 模态分解, 灰色关联分析, 自适应阈值

Hydrogen Leakage Fault Diagnosis of PEMFC Based on the Improved CEEMDAN Method

Yinwen Gu, Weixun Lin, Lanjing Liu

Jiangsu Jingci Intelligent Sensing Technology Research Institute Co., Ltd., Changzhou Jiangsu

Received: Mar. 30th, 2025; accepted: Apr. 23rd, 2025; published: Apr. 30th, 2025

Abstract

This paper proposes a diagnostic method for hydrogen leak faults in Proton Exchange Membrane Fuel Cells (PEMFC) by combining Complete Ensemble Empirical Mode Decomposition with Adaptive Noise

文章引用: 顾寅雯, 林伟勋, 刘兰晶. 基于改进 CEEMDAN 方法的 PEMFC 氢气泄漏故障诊断[J]. 机械工程与技术, 2025, 14(2): 221-233. DOI: 10.12677/met.2025.142022

(CEEMDAN) and Adaptive Threshold Denoising (ATD) techniques, effectively addressing the challenge of extracting fault features hindered by signal noise interference. The specific steps are as follows: Firstly, CEEMDAN is used to decompose the collected vibration signals; then, Grey Relation Analysis (GRA) is employed to screen out noise-dominant and signal-dominant components; subsequently, ATD is applied to the noise-dominant components, which are then reconstructed with the signal-dominant components; finally, accurate identification of hydrogen leak faults is achieved through Teager Energy Spectrum Analysis. To verify the effectiveness of the proposed method, PEMFC data generated by a mechanistic model is used for testing, and the results are compared with those obtained using CEEMD-ATD and CEEMDAN combined with wavelet threshold denoising. Experimental results demonstrate that the proposed method has significant advantages in adaptability and denoising performance, effectively improving the diagnostic accuracy of hydrogen leak faults in PEMFC.

Keywords

Fault Diagnosis, Modal Decomposition, Grey Relation Analysis, Adaptive Threshold

Copyright © 2025 by author(s) and Hans Publishers Inc.

This work is licensed under the Creative Commons Attribution International License (CC BY 4.0).

<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



Open Access

1. 引言

随着能源危机和环境污染问题的日益严峻,氢能作为一种清洁、高效的可再生能源受到了广泛关注。质子交换膜燃料电池(PEMFC)因其零排放、高效率、快速启动等优点,在新能源汽车[1][2]、分布式发电[3][4]等领域展现出了广阔的应用前景。然而,PEMFC在实际运行过程中易受多种因素影响而产生故障,其中氢气泄漏故障不仅会导致系统性能下降,还可能引发安全事故[5]。因此,开展 PEMFC 氢气泄漏故障诊断研究具有重要意义[6]-[8]。

目前,PEMFC 故障诊断方法主要包括基于模型、基于知识和基于数据的方法。基于模型的方法需要建立精确的数学模型,但 PEMFC 内部反应机理复杂,建模难度大[9][10];基于知识的方法依赖专家经验,主观性较强;而基于数据的方法通过采集系统运行数据进行故障特征提取和识别,具有较强的适应性和实用性[10]。然而,PEMFC 运行过程中采集的信号常常包含大量噪声,这些噪声会干扰故障特征提取,降低诊断精度。因此,如何有效抑制噪声干扰,准确提取故障特征,是提高 PEMFC 故障诊断性能的关键[11][12]。

经验模态分解(EMD)作为一种自适应信号处理方法,能够将复杂信号分解为多个本征模态函数(IMF),有利于分离噪声和有效信号。为了克服传统 EMD 方法的模态混叠问题,提出了集合经验模态分解(EEMD)方法[13]。EEMD 通过向原始信号添加白噪声并进行多次 EMD 分解来抑制模态混叠,但在信号重构过程中仍会引入残余噪声。完全集合经验模态分解(CEEMD)通过每次分解中添加正负配对白噪声来消除残余噪声,但计算效率较低[12]。自适应噪声完全集合经验模态分解(CEEMDAN)在 CEEMD 的基础上改进了噪声添加策略,既保持了良好的降噪效果,又提高了计算效率[11][14]。

信号分解后,如何有效处理各分量以实现最优重构是另一个关键问题。小波阈值去噪(WTD)是一种常用的降噪方法,但传统 WTD 采用固定阈值,难以适应不同特征分量的噪声特性[14][15]。相比之下,自适应阈值去噪(ATD)技术根据信号特征自适应调整阈值,能够更好地平衡降噪效果和信号失真。此外,由于 PEMFC 故障信号中噪声和有效成分的分布具有不确定性,需要采用合适的方法识别各 IMF 分量的性质。灰色关联分析(GRA)通过计算各分量与参考序列的关联度,可以有效区分噪声主导和信号主导

的分量[16]。

综上所述, 现有研究在 PEMFC 故障诊断方面取得了一定进展, 但仍存在一些问题, 如故障信号中包含复杂噪声影响特征提取效果、信号分解方法存在模态混叠和计算效率问题、固定阈值去噪方法适应性差以及缺乏对分量性质的有效识别方法。针对此, 本文提出了一种融合 CEEMDAN 和 GRA 的联合降噪新方法, 专门用于 PEMFC 故障诊断。首先, 用 CEEMDAN 分解 PEMFC 的振动信号, 得到一系列 IMF; 然后, 利用 GRA 筛选出噪声主导和信号主导的分量; 接着, 对噪声主导分量采用 ATD 进行降噪处理, 并与信号主导分量进行重构; 最后, 分析重构信号的 Teager 能谱, 准确识别 PEMFC 的氢气泄漏故障。实验证明, 该方法在降噪效果和计算效率上均优于传统方法, 有效提高了 PEMFC 故障诊断的准确性和可靠性。同时, 本文完善了方法的理论框架, 为 PEMFC 故障诊断的后续研究提供了重要参考。

2. 面向 PEMFC 故障诊断的相关理论

2.1. 经验模式分解

PEMFC 中存在多种信号, 同时干扰信号伴随着正常的温度信号、电信号存在。为了显著提升计算效率并优化分解流程的完整性, 通过引入自适应高斯白噪声辅助信号分解, 能够有效解决 CEEMD 方法中因噪声差异导致的分解结果不正确问题。这种方法特别适用于处理 PEMFC 氢气泄漏故障信号中的复杂噪声干扰, 确保分解后的 IMF 分量更准确地反映故障特征, 为后续故障诊断提供可靠的数据基础。具体算法步骤如下:

首先, 在 PEMFC 采集到的信号中添加白噪声, 这样, 新的信号就成为:

$$r_0^i(t) = r_0(t) + \varepsilon_i w^i(t), (i = 1, 2, 3, \dots, k) \quad (1)$$

这里, 我们定义原始采集信号为 $x(t)$, 将添加到原始信号中的白噪声定义为 $\varepsilon_i w^i(t)$, 为了方便标记, 定义 $r_0(t) = x(t)$, 此外, ε_i 体现的是噪声的大小, k 表示白噪声出现的总次数。

其次, 将添加有白噪声的新信号 $r_0^i(t)$ 进行经验模式分解, 可以得到若干阶的分量信号, 从中首先可以提取第一阶信号分量, 定义为 $C_1^i(t)$, 这样就可以得到由经验模式分解出的第一个分量信号 C_1 , 而剩下的残余信号可定义为 $r_1(t)$, 其计算方式为:

$$r_1(t) = x(t) - C_1(t) \quad (2)$$

然后, 对 $r_1(t)$ 继续加噪, 重复上述步骤继续求解新的分量信号 C_i , 可得到第 2 个分量信号 C_2 , 同时会生成新的残余信号 $r_2(t)$, 其计算方式为:

$$r_2(t) = r_1(t) - C_2(t) \quad (3)$$

经过以上方式的不断迭代更新, 可不断获取新的残余信号和分量信号, 当运行到残余 $r_n(t)$ 信号出现单调增或单调减时, 则可以停止运算。这样, 可以最终获得原始信号的最终表达方式, 即:

$$x(t) = \sum_i^n C_i(t) + r_n(t) \quad (4)$$

2.2. 灰色关联分析

在探索 PEMFC 故障时, 必须要探索复杂数据序列间的内在关键联系, GRA 以其独特的方式成为了关键手段。它通过衡量因子序列与目标序列之间的灰色关联度, 来揭示它们之间的隐秘联系。当这种关联度达到较高水平时, 就表明序列间存在着密不可分的联系。特别是在 PEMFC 氢气泄漏故障的诊断场景中, 将 GRA 与 CEEMDAN 算法巧妙结合, 可迅速找到隐藏在故障中的根本原因, 从而为快速的诊断

提供了全新的思路。具体步骤如下:

1) 将 PEMFC 经 CEEMDAN 降噪处理后的信号集合 $C_i = \{C_1, C_2, \dots, C_n\}$ 作为关联度模型的输入, 具体可写为 $C_i(t) = (C_i(1), C_i(2), \dots, C_i(N))$ 。

这里, C_i 中的 i 个指代由上一步所获取的信号分量编号, 其值 i 的大小从 1 到 n 范围内进行取值; 同时, $C_i(t)$ 表示从降噪过程中获取的第 i 个信号分量在 t 时刻获得的具体信息, $t = 1, 2, 3, \dots, N$ 。

2) 由步骤 1) 中获得的 C_i 信号集合, 可写成由时间 t 组成的 C_i 信号序列, 为便于分析, 这里定义 C_1 为目标序列, 其余的元素 $C_i (i = 2, 3, 4, \dots, n)$ 将其定义为因子序列, 从而进行后续的关联度分析。

3) 从步骤 2) 中获得的序列, 为找出最小的 C_i , 需要对其进行数据的预处理, 即找出 $|\min(C_i)|$, 在找到 $|\min(C_i)|$ 后, 将其进行加法运算 ($C_i^{(0)}(t) = C_i(t) + |\min(C_i)|$), 得到累加值 $\sum_{t=1}^N C_i^{(0)}(t)$, 再求其均值 $\frac{1}{N} \sum_{t=1}^N C_i^{(0)}(t)$; 最后再采用不同时刻获得的 $C_i^{(0)}(t)$ 来除以 $\frac{1}{N} \sum_{t=1}^N C_i^{(0)}(t)$, 可获得新元素用于下一步的关联度分析, 即新元素为:

$$C_i^{(1)}(t) = \frac{C_i^{(0)}(t)}{\frac{1}{N} \sum_{t=1}^N C_i^{(0)}(t)} \quad (5)$$

4) 根据求得的 $C_i^{(1)}(t)$, 要求得其与 C_1 之间的关联度, 需要借助关联度系数展开, 即利用过渡系数 $\gamma_i(t)$, 其计算公式为:

$$\gamma_i(t) = \frac{A + \rho B}{C + \rho B} \quad (6)$$

其中, $A = \min_i \min_t |C_1^{(1)}(t) - C_i^{(1)}(t)|$, $B = \max_i \max_t |C_1^{(1)}(t) - C_i^{(1)}(t)|$, 它们分别表示在遍历完所有的 i 和 t 值下, $C_1^{(1)}(t)$ 与 $C_i^{(1)}(t)$ 取差值后的最小绝对值与最大绝对值; 这里取 $\rho = 0.4$, 同时令 $C = |C_1^{(1)}(t) - C_i^{(1)}(t)|$, 从而求得针对某个所需的 t 值状态下, $C_1^{(1)}(t)$ 与 $C_i^{(1)}(t)$ 见相减后得到的绝对差值。

5) 这样即可获得每个变量计算 $C_i (i = 2, 3, \dots, n)$ 与 C_1 之间的关联度 ξ_i , 为 PEMFC 的氢气泄漏诊断得到每个变量间的关联度信息, 其具体的计算公式为:

$$\xi_i = \frac{1}{N} \sum_{t=1}^N \gamma_i(t) \quad (7)$$

2.3. 自适应阈值处理

自适应阈值处理技术(这里特指优化后的自适应阈值降噪)能够依据自主计算得出的动态阈值, 有效地区分 PEMFC 故障诊断所要处理的信号中蕴藏的有用成分与噪声干扰, 展现出卓越的降噪性能。此技术的一大亮点在于其无需依赖外部设定的额外参数, 阈值的选择过程高度自适应, 即便在面对复杂多变的情境时, 也能保持良好的适应性和稳定性[17] [18]。当我们将这一先进的技术 with CEEMDAN 相融合, 以应用于 PEMFC 的氢气泄漏故障诊断中时, 其具体实施流程如下:

首先, 利用 CEEMDAN 方法对 PEMFC 运行过程中的振动信号或相关监测信号进行深度分解, 将其拆解为一系列本征模态分量(IMFs), 这些分量各自承载着信号的不同频率特性和动态信息(2.1 和 2.2 节已呈现相关步骤)。随后, 自适应阈值处理技术介入, 针对每个信号分量, 根据其自身的统计特性及信号能量分布, 智能地计算出最适宜的降噪阈值。这一阈值不仅考虑了信号的全局特征, 还兼顾了局部细节,

确保了降噪处理的精准性和高效性:

1) 先求得 PEMFC 采集信号中的与噪声高度相关的分量, 这里称其为主导分量, 则首先要求其标准差, 即 C_j 的标准差, 计算公式是:

$$\delta_0 = \sqrt{\frac{1}{N-1} \sum_{t=1}^N (C_j(t) - \overline{C_j})^2} \quad (8)$$

这里, N 是 C_j 的长度, $\overline{C_j}$ 为其平均值。

2) 为了高效率甄别有用信号, 需要剔除无用信号, 这里定义 C_j 里满足 $|C_j(t) - \overline{C_j}| > 3\delta_0$ 的所有元素为无用信号, 将其剔除, 这样留下的元素所构成的新分量集合 C_j^i 即认为是有用信号。若此时 $i=1$, 则 $C_j^i = C_j^1$ 。接着需要计算 C_j^i 的标准差, 定义 L_i 为 C_j^i 长度, 即可获得标准差的计算公式为:

$$\delta_i = \sqrt{\frac{1}{L_i-1} \sum_{k=1}^{L_i} (C_j^i(k) - \overline{C_j^i})^2} \quad (9)$$

这里, $\overline{C_j^i}$ 是 C_j^i 的平均值。

3) 随后结合步骤 1) 和步骤 2), 观察求得的数值大小, 比较检查是否存在大于 $3\delta_i$ 的元素出现。若没有, 就确定阈值 $\lambda = 3\delta_i$, 进入步骤 4); 若有, 则需要重复步骤 2), 剔除相关信号后, 将剩余的元素再次组成形成新的信号集合 C_j^i , 此时, 上标 i 变为 $i+1$, 再重复执行步骤 1) 和 2), 再进行比较步骤 3)。

4) 接着计算 $\min\{C_j\}$ 和 $\max\{C_j\}$, 获得 C_j 的局部极大值和极小值, 然后再将其与自适应阈值 λ 相减, 观测其结果是否大于 0。

5) 经检查后, 若发现 $\min\{C_j\} - \lambda$ 的结果大于 0, 则此时需要保留该 C_j 值。若发现 $\min\{C_j\} - \lambda$ 的结果小于 0, 则此时将其定义为 0。

6) 再继续针对不同的 C_j 值不断重复上述步骤 4) 和 5), 直到 C_j 里没有极值停止, 此时将其设置为 0, 最终即可获得降噪后的 C_j 集合, 进而进行有效的故障诊断工作。

3. 基于 CEEMDAN 与自适应阈值降噪的 PEMFC 故障诊断

因上面已经构成了一种基于完全集成经验模态分解自适应阈值降噪(CEEMDAN 与 ATD 相结合, 以下简称 CA-A)的故障诊断方法, 则可将其完全应用于 PEMFC 氢气泄漏故障智能诊断。该方法的具体实现步骤如下(流程图见图 1):

第一阶段: 多尺度振动信号分析: 利用改进的 CEEMDAN 方法对 PEMFC 氢气泄漏产生的特征振动信号 $x(t)$ 进行自适应分解。该过程可精确捕获电池堆内部压力波动、膜电极组件振动等多维度故障特征, 最终获得 k 个固有模态分量 C_i (CEEMDAN 分解)。

第二阶段: 频域特征提取与排序: 对所获 IMF 进行频谱分析, 建立频率序列 $C = \{C_1, C_2, C_3, \dots, C_k\}$ 。考虑到氢气泄漏时高频振动特征明显, 将最高频率 IMF1 设为参考序列 C_1 , 其余 IMF i 构成比较序列 C_i 。采用优化的灰色关联评估方法计算关联度 ξ_i , 并确定平均阈值 $\bar{\xi}_i$ (GRA 分析)。

第三阶段: 故障特征分量识别: 基于关联度评估结果, 将 $\xi_i > \bar{\xi}_i$ 的 IMF 识别为包含泄漏特征的噪声主导分量 C_1 , 其余归类为故障信号。这种分类方法能有效提取氢气泄漏引起的异常振动特征。

第四阶段: 自适应降噪优化: 针对 C_1 实施动态阈值降噪处理。设计自适应阈值函数 λ , 结合电池堆工况参数动态调整。通过迭代比较局部极值与 λ , 实现精确降噪, 保留关键故障特征(ATD 降噪)。

第五阶段: 特征重构与故障诊断: 将处理后的特征分量重组得到优化信号 $y(t)$ 。利用改进的 Teager 能量分析方法提取故障特征向量, 实现对 PEMFC 氢气泄漏故障的准确识别与定位(信号重构与分析)。

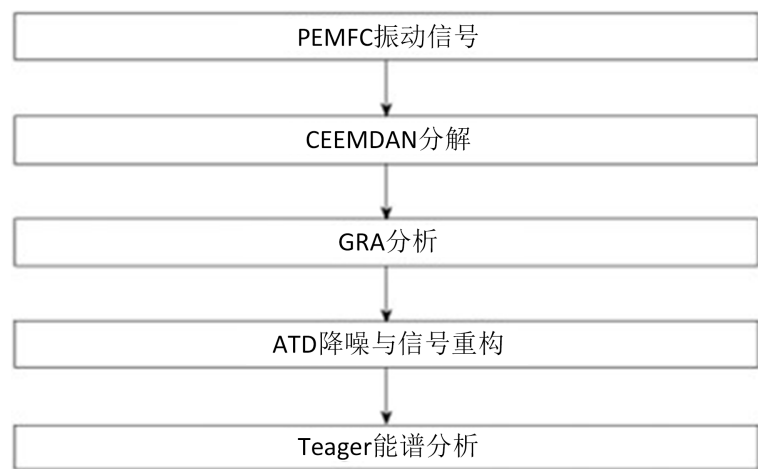


Figure 1. Process flow of CEEMDAN-ATD
图 1. CEEMDAN-ATD 流程

4. 实测信号分析

为评估本文提出的 CEEMDAN-ATD 集成诊断策略在 PEMFC 氢气泄漏检测中的实际效能，我们构建了完整的实验验证体系。基于已发表的 PEMFC 动力学建模研究，搭建了氢气泄漏故障模拟平台，生成了包含多工况、不同泄漏程度的数据样本集。

本研究选取了两种典型的对比算法：基础 CEEMD-ATD (C-A)方法以及引入小波优化的 CEEMDAN-WTD (CA-W)方法。其中，CA-W 通过整合小波变换的多分辨率分析能力，强化了原始算法在膜电极组件微弱泄漏信号提取方面的性能。

实验参数配置如下：

1) C-A 方法中，设定基准噪声水平系数为 1.0，采用双阈值分层策略，将 0.6 作为噪声 - 信号判别阈值，0.4 作为信号 - 背景分离阈值。

2) CA-W 方法选用 Daubechies 4 阶小波基函数，考虑到 PEMFC 泄漏信号的时频特性，将小波分解深度设为 5 层，并采用软阈值方案实现自适应降噪。

模型为质子交换膜燃料电池单电池，其结构参数如表 1 所示。

Table 1. List of structural parameters of PEMFC
表 1. PEMFC 结构参数表

序号	参数	数值
1	膜厚	25 μm
2	活性面积	100 cm^2
3	GDL 厚度	300 μm
4	催化剂载量	0.4 mg/cm^2
5	流道类型	同向流
6	集流板材料	石墨

泄漏孔径为 0.1778 mm，深度为 0.2794 mm。氢气泄漏传感器布置在阳极出口附近。实验设置 PEMFC 工作电流密度为 0.6 A/cm²，采用恒流模式运行，采样频率为 12 kHz，采样时间长度为 1 s。实验参数设

置为操作温度：65℃，阳极压力：1.5 atm，阴极压力：1.0 atm，阳极相对湿度：90%，阴极相对湿度：80%，氢气流量：1.2 SLPM，空气流量：2.5 SLPM。

4.1. 轻度氢气泄漏故障分析

为验证算法性能，从 PEMFC 轻度氢气泄漏工况数据中截取 1000 点采样序列作为测试样本，其原始振动波形见图 2(a)。分别应用三种诊断方法对测试数据进行处理，所得信号重构结果如图 2(b)~(d) 所示。在基础 C-A 算法分析中，经模态分解得到的 IMF 序列表现出明显的层次特征：IMF1 呈现为纯噪声特征，IMF2 包含显著的噪声成分但混杂部分故障信息，IMF3 则主要承载泄漏故障特征，更低频的分量则与故障诊断关联度较低。而采用改进的 CA-W 和 CA-A 方法，通过灰色关联度评估(详见表 2)，将前 7 个 IMF 判定为噪声主导分量，后 2 个 IMF 识别为特征主导分量，体现出更精确的分量分类效果。

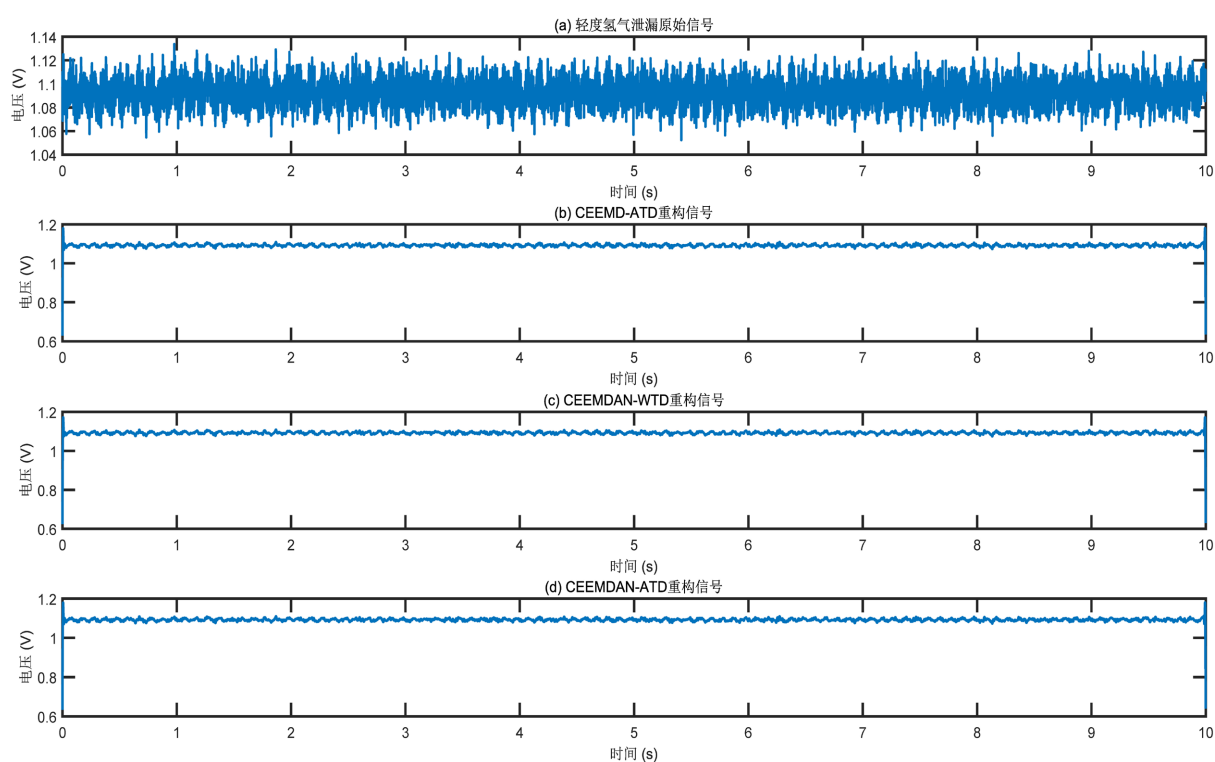


Figure 2. Time-domain waveform of the test set and reconstructed signal for mild hydrogen leak in PEMFC

图 2. PEMFC 轻度氢气泄漏测试集及重构信号的时域波形

从图中可以看出，图 3~5 分别展示了 C-A 方法、CA-W 方法和 CA-A 方法的 Teager 能量谱。首先，观察图 3 的 C-A 方法，其能量谱在低频段(10~100 Hz)较为密集，表明该频段内的频率成分较多，能量较高。随着频率的增加，能量逐渐减小，谱密度变得平滑。其次，图 4 的 CA-W 方法显示，在低频段同样有较高的能量集中，但相比图 3，其低频段的能量幅值较低，表明该方法在低频段的效果不及 C-A 方法。最后，图 5 的 CA-A 方法在低频段能量最大，与前者波形较为相似，仅幅值的最大值偏高。但在高频段，3 张图的趋势幅值都趋于降低，最终平稳趋近于 0。总结来看，CA-A 方法(图 5)在频率成分上的幅值最高，而 C-A 方法(图 3)在低频段能量较为集中。这些差异可能源于不同方法在信号处理过程中对噪声和频率成分的敏感程度不同。

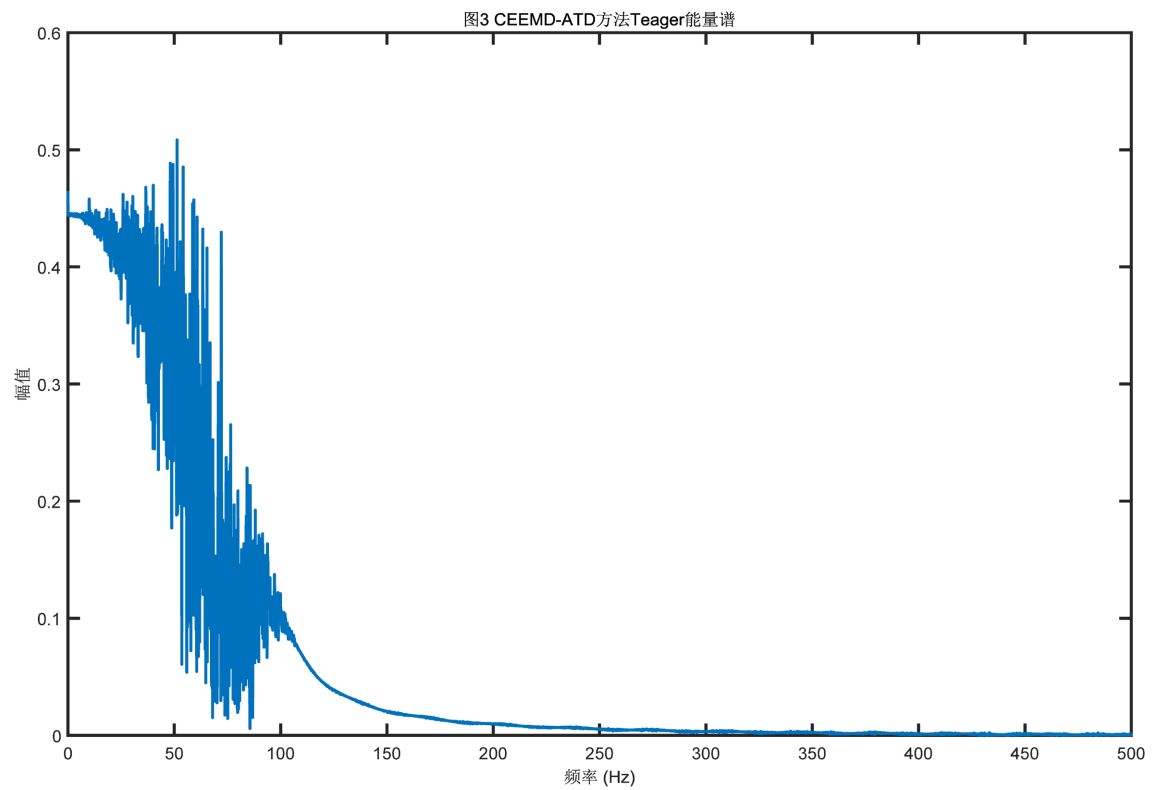


Figure 3. Teager energy spectrum of mild hydrogen leak in PEMFC Using C-A method
图 3. PEMFC 轻度氢气泄漏使用 C-A 方法的 Teager 能量谱

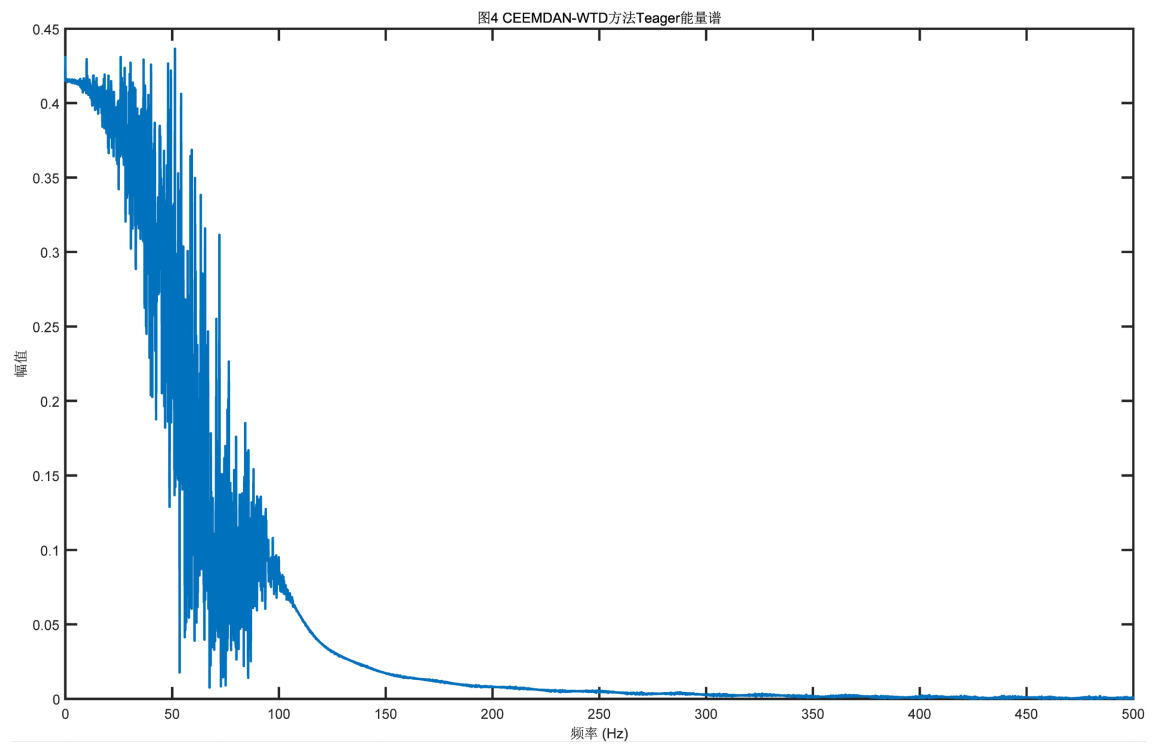


Figure 4. Teager energy spectrum of mild hydrogen leak in PEMFC using CA-W method
图 4. PEMFC 轻度氢气泄漏使用 CA-W 方法的 Teager 能量谱

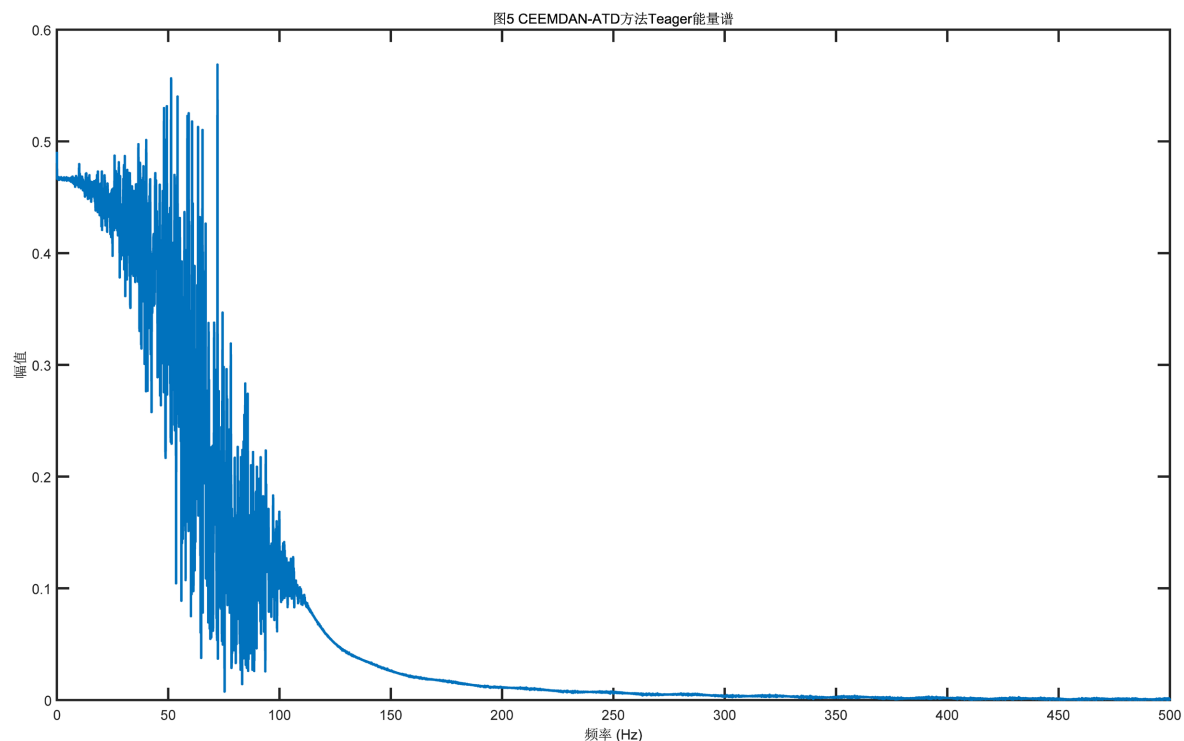


Figure 5. Teager energy spectrum of mild hydrogen leak in PEMFC using CA-A method
图 5. PEMFC 轻度氢气泄漏使用 CA-A 方法的 Teager 能量谱

Table 2. Grey relation analysis of decomposed fault signals for mild hydrogen leak
表 2. 轻度氢气泄漏故障信号分解后灰色关联分析

轻度泄漏故障信号的灰色关联度分析结果		
IMF 分量	关联度	关联强度等级
IMF2	0.7218	中等
IMF3	0.7275	中等
IMF4	0.7289	中等
IMF5	0.7287	中等
IMF6	0.7284	中等
IMF7	0.7227	中等
IMF8	0.69	较弱
IMF9	0.5925	弱

4.2. 重度氢气泄漏故障分析

针对 PEMFC 严重氢气泄漏场景，开展了深入的算法适应性验证。图 6(a)展示了重度泄漏工况下的原始振动信号特征。经三种方法处理后的信号重构效果如图 6(b)~(d)所示。对于传统 C-A 方法，模态分解结果显示：IMF1 组分表现为高频噪声特征，IMF2 包含部分故障信息但噪声占主导，IMF3 则较好地保留了泄漏特征，其余低频分量与故障识别相关性较弱。采用优化的 CA-W 和 CA-A 策略，基于灰色关联分析(见表 3)，实现了更准确的分量分类：将 IMF1-7 识别为受噪声污染的分量，IMF8-9 则保留了关键的故障特征信息，体现出改进算法在重度泄漏故障诊断中的优越性。

图 7~9 分别展示了三种不同方式重构信号的 Teager 能量谱。具体而言, 图 7 呈现了 C-A 方法的能量谱, 图 8 为 CA-W 方法, 而图 9 则是 CA-A 方法。首先, 观察图 7 中的 C-A 方法, 其能量谱在 10~100 Hz 的低频段内较为密集, 说明该频段内频率成分丰富, 能量水平较高。随着频率的增加, 能量逐渐减小, 谱密度也趋于平滑。其次, 图 8 中的 CA-W 方法显示, 在低频段同样存在能量集中现象, 但与图 7 相比, 其低频段的能量幅值相对较低, 这表明 CA-W 方法在低频段的效果略逊于 C-A 方法。最后, 图 9 中的

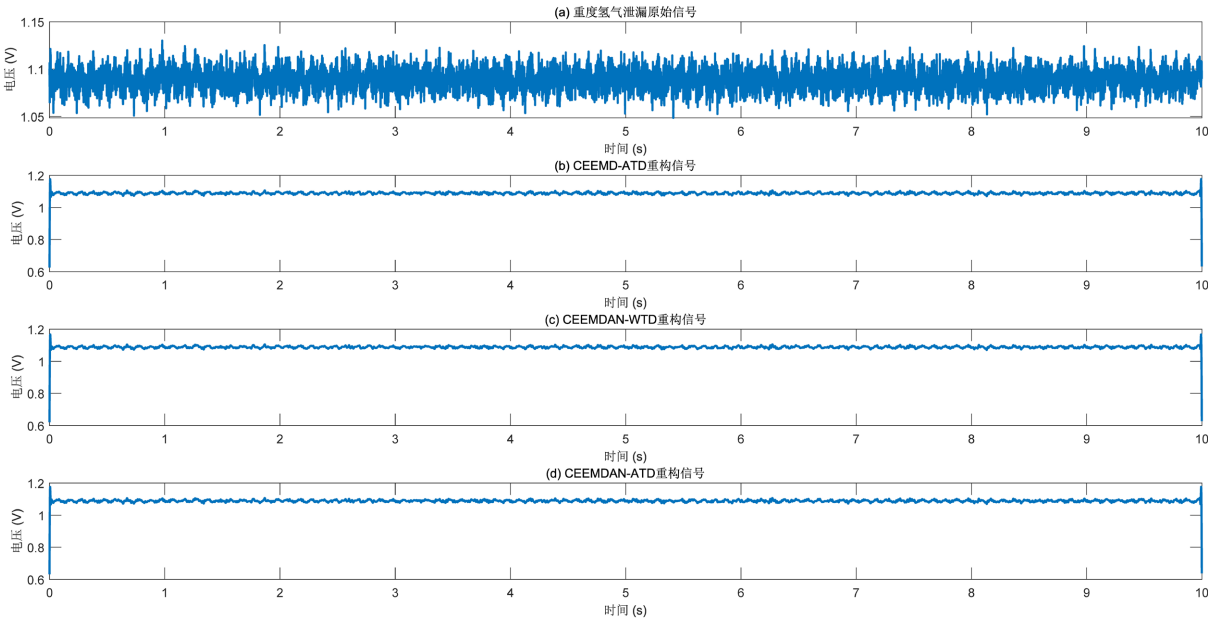


Figure 6. Time-domain waveform of the test set and reconstructed signal for severe hydrogen leak in PEMFC
图 6. PEMFC 重度氢气泄漏测试集及重构信号的时域波形

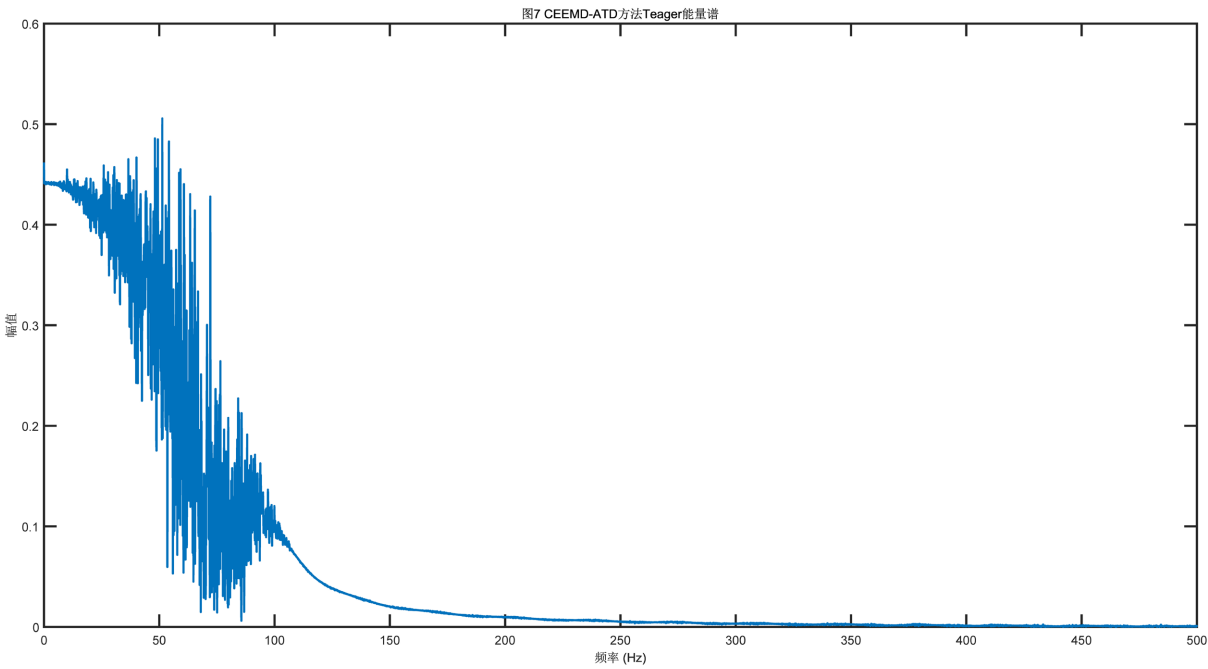


Figure 7. Teager energy spectrum of severe hydrogen leak in PEMFC using C-A method
图 7. PEMFC 重度氢气泄漏使用 C-A 方法的 Teager 能量谱

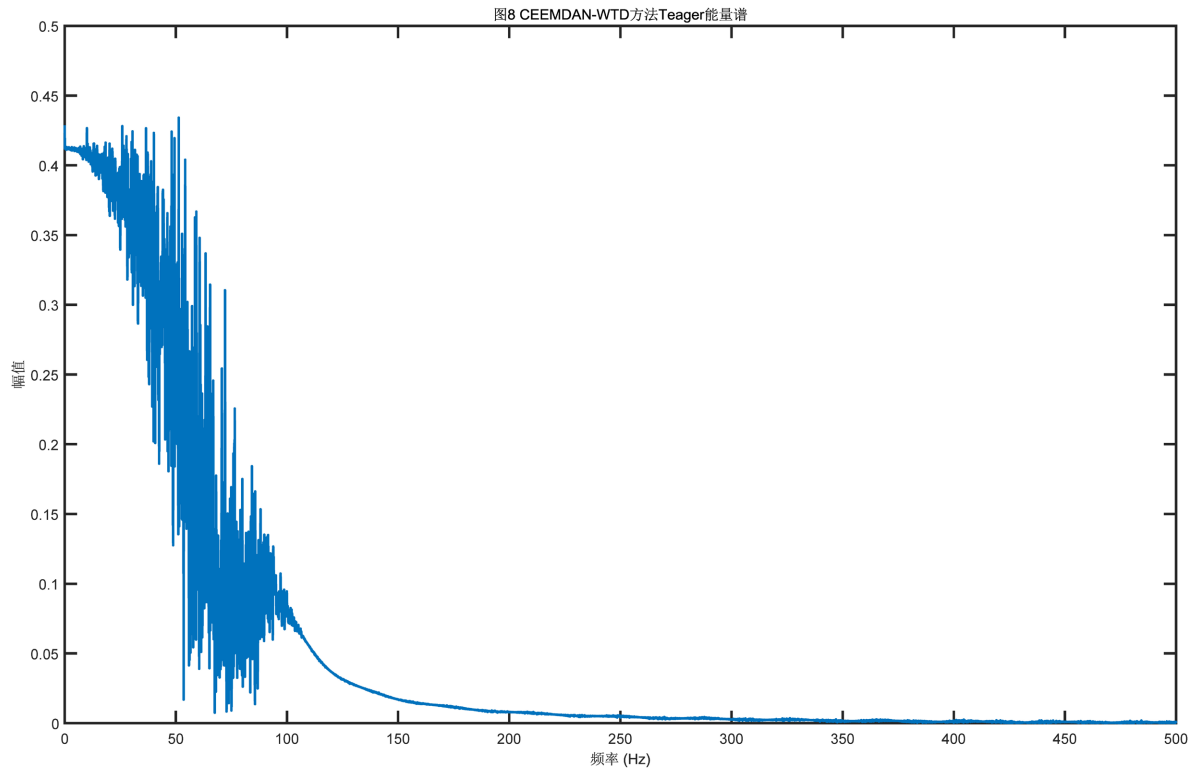


Figure 8. Teager energy spectrum of severe hydrogen leak in PEMFC using CA-W method

图 8. PEMFC 重度氢气泄漏使用 CA-W 方法的 Teager 能量谱

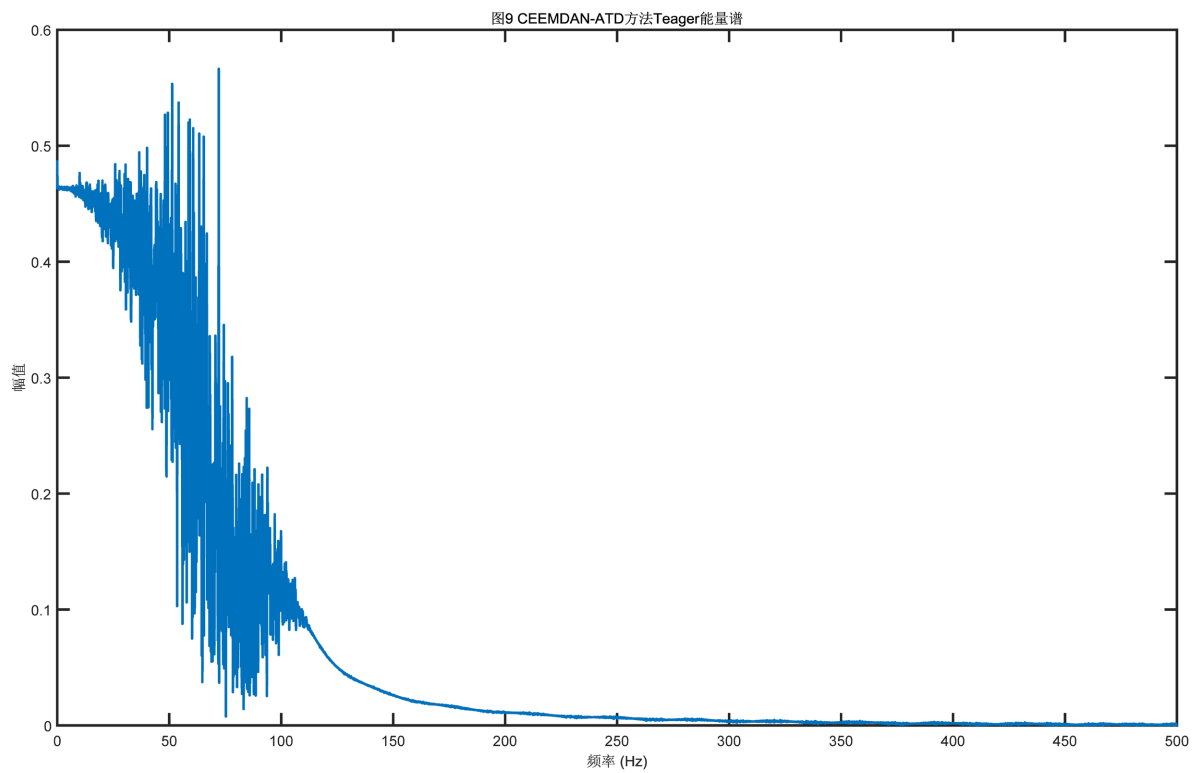


Figure 9. Teager energy spectrum of severe hydrogen leak in PEMFC using CA-A method

图 9. PEMFC 重度氢气泄漏使用 CA-A 方法的 Teager 能量谱

Table 3. Grey relation analysis of decomposed fault signals for severe hydrogen leak
表 3. 重度氢气泄漏故障信号分解后灰色关联分析

重度泄漏故障信号的灰色关联度分析结果		
IMF 分量	关联度	关联强度等级
IMF2	0.7218	中等
IMF3	0.7275	中等
IMF4	0.7289	中等
IMF5	0.7287	中等
IMF6	0.7284	中等
IMF7	0.7227	中等
IMF8	0.69	较弱
IMF9	0.5925	弱

CA-A 方法在低频段的能量最大，其波形与图 7 相似，但幅值的最大值更高。在高频段，三张图的能量谱趋势均表现为幅值逐渐降低，最终平稳趋近于 0。综上所述，CA-A 方法(图 9)在频率成分上的幅值最高，而 C-A 方法(图 7)在低频段的能量最为集中。

此外，故障在不干预的情况下是可能发生自愈的，PEMFC 氢气泄漏的自愈现象主要发生在两种情况：一是质子交换膜在合适的温湿度条件(60℃~70℃，含水率 12~16)下，微米级裂痕可通过膜材料的水合作用和形变实现自愈；二是密封圈在未超过材料弹性极限的轻微变形时，可依靠材料本身的弹性恢复达到重新密封。但机械损伤、化学降解、热损伤及疲劳开裂等情况下的泄漏则无法自愈，需及时进行维护或更换部件。

5. 结论

为应对 PEMFC 氢气泄漏故障检测信号因噪声污染而难以进行故障识别的问题，本研究将 CEEMDAN 分解法与 ATD 技术相结合，用于 PEMFC 的故障诊断分析。为验证其有效性，选择了 C-A 和 CA-W 作为对比方法。实验结果表明，所提出的方法在故障诊断方面表现出明显的优势。然而，目前在 IMF 分量筛选及噪声主导分量去噪环节中，仍需人工设定阈值参数，这限制了方法的自动化程度。值得一提的是，CEEMDAN 分解后能更好地分解引入性噪声信号，且去噪效果更佳。但 GRA 过程中的噪声阈值、噪声次数及最大迭代次数等参数仍需依据经验设置，这是未来研究中需要改进的方向。

基金项目

国家重点研发计划资助(2023YFB4005604)。

参考文献

[1] 马媛艺. 质子交换膜燃料电池在电动汽车中的应用[J]. 现代车用动力, 2024(2): 6-9+23.
[2] 吴婷, 钟书华. 中国氢燃料电池汽车 PEMFC 技术的发展进程、存在问题与对策研究——基于 DII 数据库的实证分析[J]. 生产力研究, 2021(7): 75-79.
[3] 汪海珊, 王冰, 张秋桥, 等. 独立直流微电网中多组燃料电池分布式协同控制[J]. 电气自动化, 2021, 43(2): 44-46.
[4] 李集, 谌力. 地下工程 PEMFC 分布式发电系统运行稳态安全评估[J]. 电气技术, 2014(3): 50-54.
[5] 曹翌霏, 邢彦锋, 曹菊勇, 等. 质子交换膜燃料电池密封泄漏率计算与研究[J]. 电源技术, 2024, 48(6): 1048-1055.
[6] 陈维荣, 刘嘉蔚, 李奇, 等. 质子交换膜燃料电池故障诊断方法综述及展望[J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(16):

4712-4721+4896.

- [7] 李兰心, 潘牧, 郭伟. 质子交换膜燃料电池在线监测方法研究进展[J]. 材料导报, 2024, 38(6): 109-122.
- [8] 张杰, 谌祺, 韩小涛. 基于典型机器学习的 PEMFC 故障诊断综述[J]. 电源技术, 2022, 46(7): 710-715.
- [9] 肖仰淦, 吴肖龙, 李曦. 基于 ADRC 的 PEMFC 系统阴极相对湿度和氧气过量比控制[J]. 太阳能学报, 2023, 44(12): 499-509.
- [10] 华志广, 潘诗媛, 赵冬冬, 等. 基于分解优化并行 ESN 的氢燃料电池寿命预测[J]. 航空学报, 2025, 46(2): 297-311.
- [11] 舒畅, 金潇, 李自品, 等. 基于 CEEMDAN 的配电变压器放电故障噪声诊断方法[J]. 高电压技术, 2018, 44(8): 2603-2611.
- [12] 周涛涛, 朱显明, 彭伟才, 等. 基于 CEEMD 和排列熵的故障数据小波阈值降噪方法[J]. 振动与冲击, 2015, 34(23): 207-211.
- [13] 郑近德, 程军圣, 杨宇. 改进的 EEMD 算法及其应用研究[J]. 振动与冲击, 2013, 32(21): 21-26+46.
- [14] 王宇冬, 李家翰, 岳显, 等. 基于 CEEMDAN 混合 WTD-XGBoost-LSTM 的电厂锅炉主蒸汽压力预测[J]. 电子器件, 2024, 47(3): 780-787.
- [15] 王超然, 朱亮, 李文婧, 等. 基于 WTD-CEEMDAN-Bi-LSTM-GRU 的共享单车需求预测[J]. 兰州工业学院学报, 2023, 30(3): 36-42.
- [16] 卢振生, 王磊, 王迎辉, 等. 基于灰色关联度法的发动机噪声影响因素及降噪研究[J]. 时代汽车, 2024(3): 7-9.
- [17] 韩晓娟, 陈跃燕, 张浩, 等. 基于小波包分解的混合储能技术在平抑风电场功率波动中的应用[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(19): 8-13+24.
- [18] 郭玲娟, 魏斌, 韩肖清, 等. 基于集合经验模态分解的交直流混合微电网混合储能容量优化配置[J]. 高电压技术, 2020, 46(2): 527-537.