

本文引用格式: 卢绮雯,林声宇,邓昌,等.基于梅尔频谱的电磁继电器内部异响特征提取[J].自动化与信息工程,2023,44(6):39-45.

LU Qiwen, LIN Shengyu, DENG Chang, et al. Extraction of internal abnormal noise features of electromagnetic relay based on Mel spectrum[J]. Automation & Information Engineering, 2023,44(6):39-45.

基于梅尔频谱的电磁继电器内部异响特征提取*

卢绮雯¹ 林声宇² 邓昌² 刘夏丽² 黄志海²

(1.广州智柔智能科技有限公司, 广东 广州, 510006

2.广东工业大学机电工程学院, 广东 广州, 510006)

摘要: 通过对电磁继电器异响声音信号进行时频分析和异响特征提取方法的研究, 选择梅尔频谱来提取异响特征。首先, 对异响声音信号进行预处理; 然后, 通过短时 FFT 变换得到异响声音信号的频谱图; 接着, 通过梅尔滤波器组得到梅尔频谱; 最后, 经过实验验证, 梅尔频谱可以较好地表达电磁继电器异响特征, 具有较强的抗噪声干扰能力, 且数据大小适中, 可为后续的故障诊断提供有效信息。

关键词: 电磁继电器; 内部异响; 梅尔频谱; 特征提取; 时频分析

中图分类号: TP391.4

文献标志码: A

文章编号: 1674-2605(2023)06-0007-07

DOI: 10.3969/j.issn.1674-2605.2023.06.007

Extraction of Internal Abnormal Noise Features of Electromagnetic Relay Based on Mel Spectrum

LU Qiwen¹ LIN Shengyu² DENG Chang² LIU Xiali² HUANG Zhihai²

(1.Guangzhou Zhirou Intelligent Technology Co., Ltd., Guangzhou 510006, China

2.School of Mechanical and Electrical Engineering, Guangdong University of Technology, Guangzhou 510006, China)

Abstract: By conducting time-frequency analysis on the abnormal sound signal of electromagnetic relay and studying the method of extracting abnormal sound features, Mel spectrum is selected to extract abnormal sound features. Firstly, preprocess the abnormal sound signal; Then, the frequency spectrum of the abnormal sound signal is obtained through short-term FFT transformation; Next, obtain the Mel spectrum through the Mel filter bank; Finally, through experimental verification, the Mel spectrum can better express the abnormal noise features of electromagnetic relay, has strong anti noise interference ability, and the data size is moderate, which can provide effective information for subsequent fault diagnosis.

Keywords: electromagnetic relay; internal abnormal noise; Mel spectrum; feature extraction; time-frequency analysis

0 引言

电磁继电器是一种通过弱电流、低电压来控制强电流、高电压的自动开关, 主要完成信号传递、执行控制、系统配电等功能, 不仅在工业和民用设备中应用广泛, 在航空航天、军工等领域也是不可或缺的基本元件^[1-2]。电磁继电器在生产过程中, 由于零件尺寸的一致性难以保证, 装配过程复杂, 导致其参数、性能指标的一致性较差^[3-4]。因此, 在电磁继电器生产过

程中有电性能测试、密封性检测、外观检测、老化测试、内部异响检测等多道质量检测工序^[5-6]。其中, 内部异响是电磁继电器内部松动零部件与其他零部件碰撞发出的声音。目前, 内部异响检测主要采用人工检测的方法, 存在主观性强、成本高、效率低等问题。声学检测是被测件在运行过程中或外界激励下产生机械振动并发出声学信号, 通过对声学信号进行特征分析来进行故障检测^[7-8]。采用声学检测的方法进行电

* 基金项目: 国家自然科学基金(52175457); 广东省基础与应用研究基金(2022B1515120053)。

磁继电器内部异响检测，需要先提取电磁继电器内部异响特征。

本文利用梅尔频谱提取电磁继电器内部异响特征。首先，对比分析电磁继电器两种异响声音信号，选用了异响特征较为明显的发声方式；然后，对麦克风采集的电磁继电器内部异响声音信号进行时频域特征分析；接着，对电磁继电器内部异响声音信号进行预处理；最后，利用梅尔频谱提取电磁继电器内部异响特征。

1 电磁继电器结构及工作原理

电磁继电器主要由线圈、弹簧、铁芯、动触点、衔铁等零部件组成，内部结构如图 1 所示。

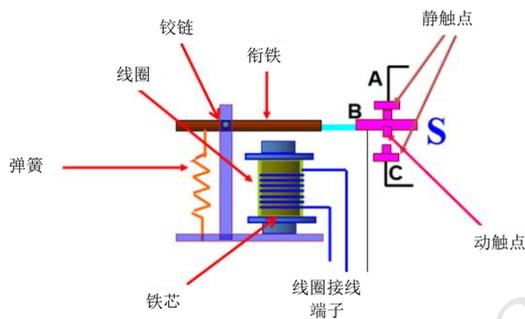


图 1 电磁继电器内部结构

电磁继电器分为低压控制电路和高压工作电路两部分，工作原理如图 2 所示。

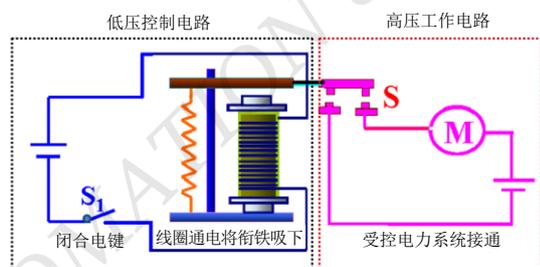


图 2 电磁继电器工作原理

电磁继电器是利用电磁铁控制工作电路通断的开关。当线圈通电时，产生电磁效应，衔铁在电磁力的吸引下克服弹簧的拉力吸向铁芯，使衔铁的动触点 B 与静触点 C（常开触点）吸合；当线圈断电后，电磁力消失，衔铁在弹簧的反作用下返回原来的位置，

使动触点 B 与静触点 A（常闭触点）吸合，达到电路导通、切断的目的。

2 电磁继电器两种异响声音信号分析

电磁继电器发出的声音有两种：一种是电磁继电器主动发声，即在电路通断状态切换的瞬间，铁芯吸合和释放衔铁时发出的“嘀”“嗒”声；另一种是电磁继电器被动发声，即在外激励下发出声音，如敲击电磁继电器外壳、向电磁继电器外壳发射已知波形的声波来振动电磁继电器等。

在实验室安静环境下，输入周期为 400 ms 的方波信号，对正常电磁继电器和内部零件松动的异常电磁继电器进行通断电测试。

利用音频采集系统采集电磁继电器的声音信号。音频采集系统主要包括 MEMS 数字麦克风、电磁激振器、边缘计算平台等。首先，在电磁激振器上安装夹具和多个电磁继电器；然后，将 MEMS 数字麦克风水平放置在距离电磁继电器 5 cm 的地方，关闭隔音罩，开启电磁激振器，利用 MEMS 数字麦克风采集电磁继电器的声音信号；最后，关闭电磁激振器，打开隔音罩，边缘计算平台处理采集的电磁继电器的声音信号。

正常和异常电磁继电器通断电时声音信号的音频波形及频谱图如图 3 所示。

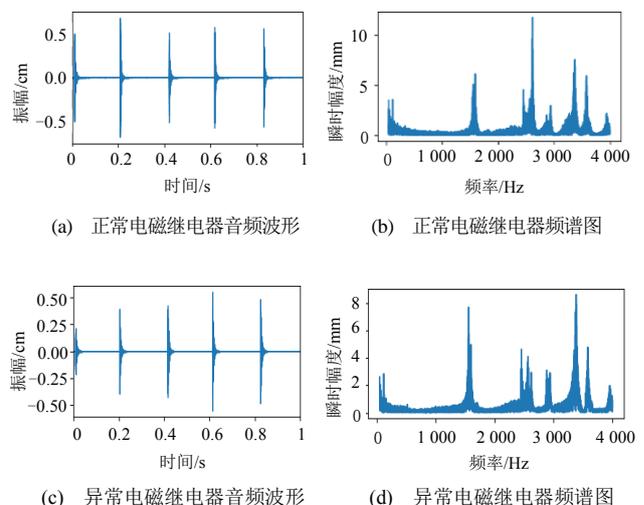
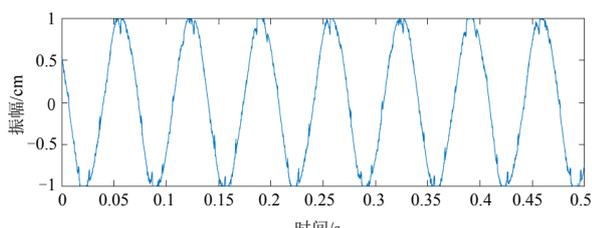


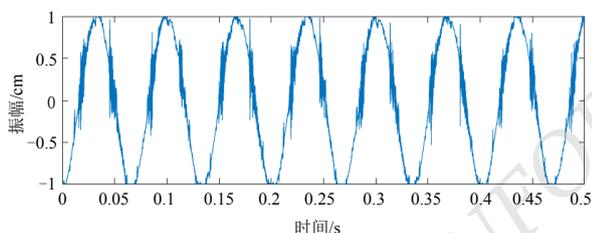
图 3 正常和异常电磁继电器通断电时声音信号的音频波形及频谱图

由图3可知,正常电磁继电器和内部零件松动的异常电磁继电器通断电时声音信号的音频波形非常接近,频谱图的能量分布也基本一致,即通过声音信号的音频波形和频谱图很难区分正常电磁继电器和内部零件松动的异常电磁继电器。

在实验室安静环境下,利用电磁激振器振动正常电磁继电器和内部零件松动的异常电磁继电器。电磁激振器在10~100 Hz的低频段振动,振幅约为10 mm。利用MEMS数字麦克风采集正常电磁继电器和异常电磁继电器声音信号的音频波形,如图4所示。



(a) 正常电磁继电器



(b) 内部零件松动的异常电磁继电器

图4 电磁继电器振动时声音信号的音频波形

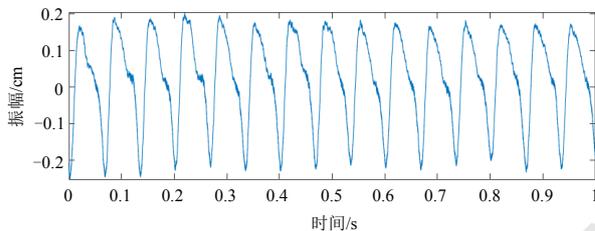
由图4(b)可以看出,在一个周期的类正弦基波中存在两处高频率的异响特征信号,这是内部零件松动电磁继电器在振动过程中零件碰撞产生的异响声音。

为此,本文用电磁激振器振动多个电磁继电器的被动发声方法来采集电磁继电器内部异响声音信号。

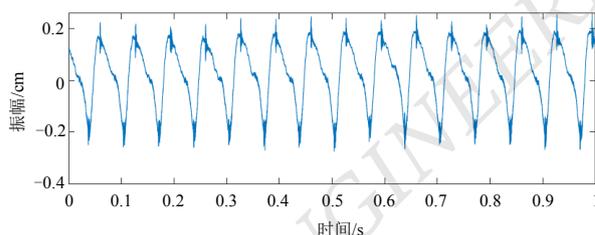
3 电磁继电器内部异响声音信号时频分析

电磁继电器内部异响声音信号时频分析主要关注声音信号在时间和频率上的变化。

在实验室安静环境下,将6个电磁继电器同时放到电磁激振器上进行振动检测,电磁激振器的频率为15 Hz,采集声音信号的音频波形如图5所示。



(a) 均为正常电磁继电器



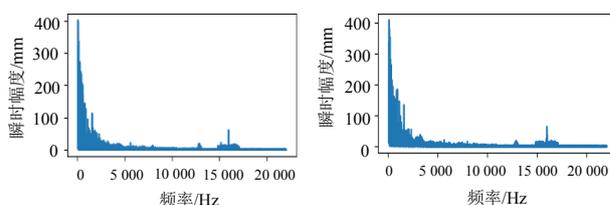
(b) 包含一个内部零件松动的异常电磁继电器

图5 6个电磁继电器振动时声音信号的音频波形

由图5(b)可以发现,类正弦基波的波峰和波谷存在异响特征信号。

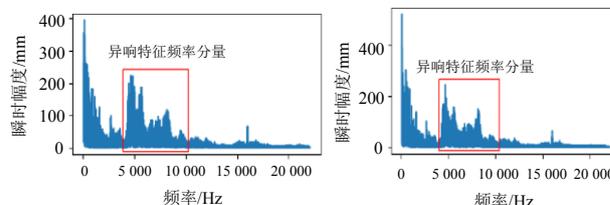
对比图4和图5可以发现:当电磁激振器负载只有1个电磁继电器时,其发出的波形是一个相对标准的正弦波;当电磁激振器负载为6个电磁继电器时,其发出的正弦波出现了形变。

在实验室安静环境下,对比2个正常电磁继电器和2个内部零件松动的异常电磁继电器声音信号的FFT频谱图,如图6所示。



(a) 正常电磁继电器1频谱

(b) 正常电磁继电器2频谱



(c) 异响电磁继电器1频谱

(d) 异响电磁继电器2频谱

图6 正常与异常电磁继电器声音信号的FFT频谱图对比

在工业噪声环境下，正常电磁继电器和内部零件松动的异常电磁继电器声音信号的音频波形和频谱如图 7 所示。

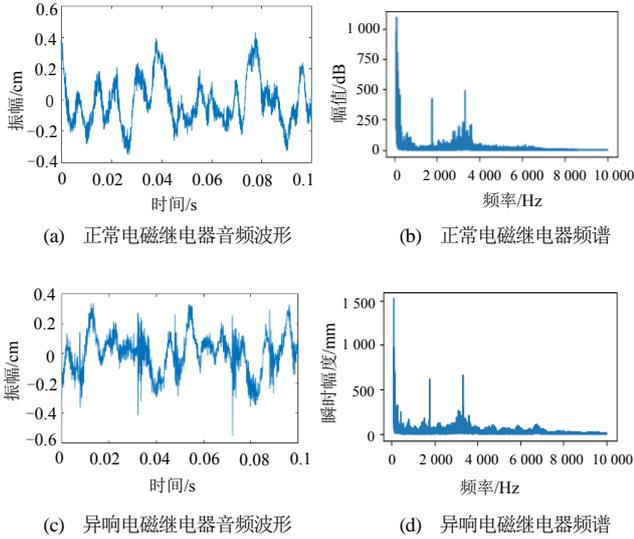


图 7 工业噪声环境下正常电磁继电器和内部零件松动的异常电磁继电器声音信号的音频波形和频谱

由图 6、7 可知：在实验室安静环境下，时域或频域的内部零件松动的异常电磁继电器声音信号都有鲜明的特征；但在实际工业噪声环境下，考虑到检测效率和电磁激振器寿命等因素，需要同时检测 6~10 个电磁继电器，且激振频率提高到 25 Hz 以上，导致电磁激振器本身的声音产生了随机变化，增大了特征提取难度；且实际检测过程中，存在噪声干扰，无法从时域或频域提取单一特征对内部零件松动的异常电磁继电器声音信号进行有效表征，增加了异响特征提取的难度。

4 异响声音信号声谱图构建

采集的电磁继电器内部异响声音信号特征不固定、频率范围较宽，且在噪声干扰的环境下，很难通过单一的时域或频域特征进行故障诊断。因此，本文考虑利用声谱图来提取电磁继电器异响特征。

4.1 异响声音信号预处理

采集的电磁继电器内部异响声音信号预处理主要包括剪裁、预加重、分帧与加窗、降噪处理等。

首先，对异响声音信号进行剪裁，确保可提取到

异响特征且数据量较小，使用 Audacity 音频编辑器将声音信号统一剪裁为 1 s 的长度。

然后，对异响声音信号进行预加重，强调高频信号，减小低频信号的影响，提高异响声音信号的质量和可识别性。预加重先对异响声音信号进行微分运算，再乘以一个系数，计算公式为

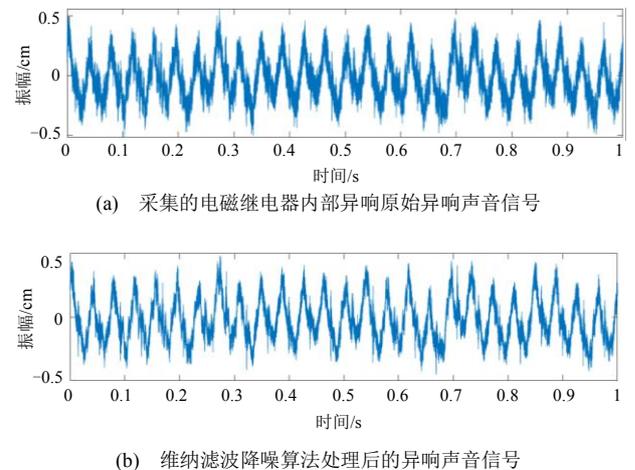
$$y[n] = x[n] - \alpha x[n-1] \quad (1)$$

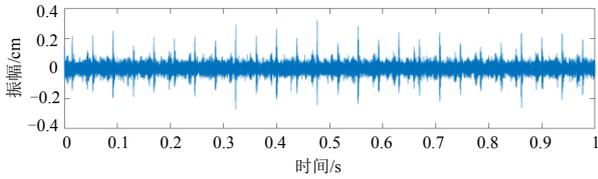
式中： $y[n]$ 为预加重后的异响声音信号； $x[n]$ 为原始异响声音信号； α 为预加重系数，一般取值在 0.9~1 之间，可以通过不同的预加重系数来调整高频信号的增益。

接着，通过分帧的方法将异响声音信号切割成短时信号，再进行加窗处理，使短时信号两侧的突变数据变得平滑。本文使用汉明窗（公式(2)）进行加窗处理，将每帧短时信号和汉明窗函数相乘，加窗后异响声音信号的频谱能量减小，避免了频谱泄露和振荡等问题。

$$w(n) = \begin{cases} 0.54 - 0.46 \cos\left(\frac{2\pi n}{N-1}\right), & 0 \leq n \leq N-1 \\ 0, & \text{others} \end{cases} \quad (2)$$

最后，降噪处理。噪声主要分为外部工业环境的白噪声和电磁激振器工作时产生的低频噪声两部分。采用维纳滤波降噪算法来减弱外部工业环境的白噪声影响；利用 FIR 带通滤波器降低电磁激振器工作时产生的低频噪声。滤波效果如图 8 所示。





(c) FIR 带通滤波器处理后的异响声音信号

图 8 采集的电磁继电器内部异响声音信号滤波效果

由图 8 可知，采集的电磁继电器内部异响声音信号的频段为 4~10 kHz，电磁激振器噪声低于 100 Hz，将带通滤波器的通带范围设置为 2~10 kHz，对低频电磁激振器的类正弦波噪声有较好的抑制效果。

4.2 基于梅尔频谱的异响特征提取

预处理后的电磁继电器内部异响声音信号被分为很多帧，每帧异响声音信号通过短时 FFT 变换得到一个频谱，如图 9 所示。

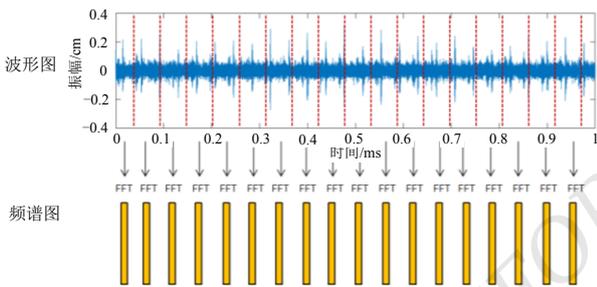


图 9 短时 FFT 变换过程

对短时 FFT 变换后的频谱取绝对值，得到的声谱图如图 10 所示。

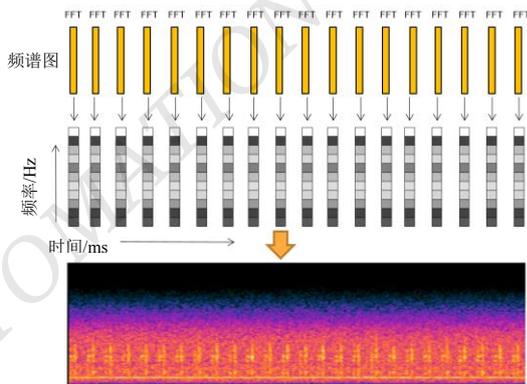


图 10 声谱图构建过程

由图 10 可知，声谱图既可以看见异响声音信号随时间的变化，也可以看见每帧异响声音信号的能量

分布。

电磁继电器内部异响声音信号的短时频谱如图 11 所示。

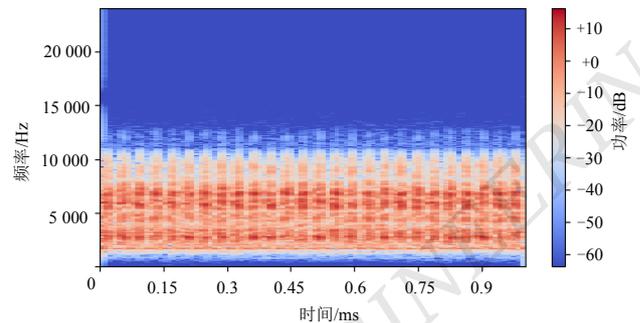


图 11 电磁继电器内部异响音频短时频谱图

由短时频谱幅值的平方可得到功率谱，其突出了强弱信号间的差异。电磁继电器内部异响声音信号的功率谱如图 12 所示。

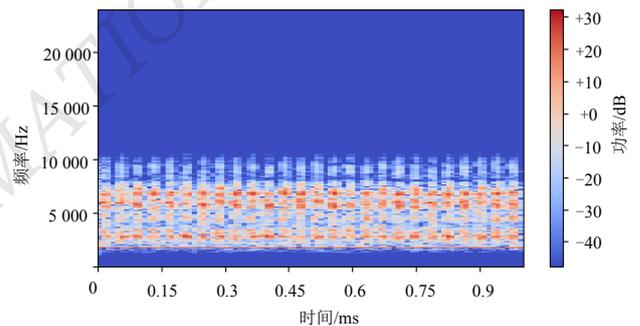


图 12 电磁继电器内部异响声音信号的功率谱

本文选用梅尔频谱作为声谱图来表达电磁继电器内部异响特征。梅尔频谱将普通频率转换成梅尔频率。梅尔频率对低频是近似线性的，对高频是非线性的。梅尔频率基于人类的听觉习惯进行分析，即利用一组三角滤波器来模拟人耳的频率分辨力，该组三角滤波器不是均匀分布的，在低频率段滤波器间中心频率间隔较短，在高频率段滤波器间中心频率间隔较长。

本文采用的梅尔滤波器组由 64 个三角滤波器组成，将频谱与梅尔滤波器相乘，可转换为梅尔尺度上的功率谱，梅尔滤波器组 $S(m)$ 的计算公式为

$$s(m) = \sum_{k=0}^{k-1} |X(k)|^2 H_m(k), 0 \leq m < M \quad (3)$$

式中： M 为三角滤波器的个数， k 为频谱长度，

$X(k)$ 为异响声音信号的频谱, $H_m(k)$ 为第 m 个三角滤波器的系统响应函数, 其计算公式为

$$H_m(k) = \begin{cases} 0 & k < f(m-1) \\ \frac{k-f(m-1)}{f(m)-f(m-1)} & f(m-1) \leq k \leq f(m) \\ \frac{f(m+1)-k}{f(m+1)-f(m)} & f(m) \leq k \leq f(m+1) \\ 0 & k > f(m+1) \end{cases} \quad (4)$$

式中: $f(m)$ 为第 m 个三角滤波器的中心频率。

得到电磁继电器异响声音信号的梅尔频谱如图 13 所示。

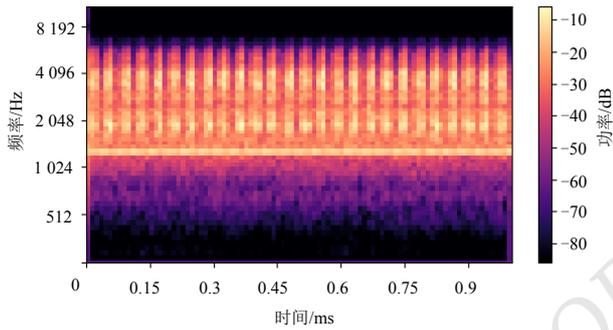
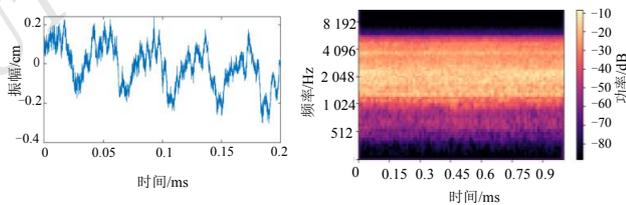


图 13 电磁继电器异响声音信号梅尔频谱

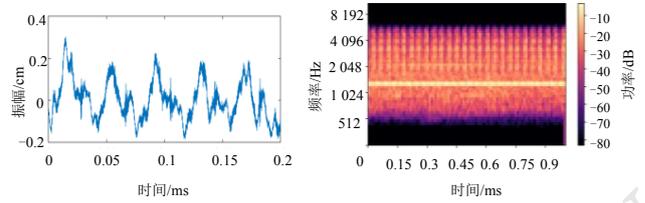
5 实验分析

在突发噪声、强烈噪声、电磁继电器异响等环境下, 利用梅尔频谱对采集的电磁继电器异响声音信号进行特征提取实验。

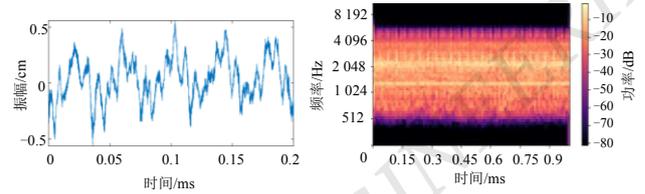
FIR 带通滤波器的带通范围为 2~10 kHz; 分帧的帧长为 20 ms, 帧移为 10 ms; 梅尔滤波器组为 64 个三角滤波器, 通过梅尔频谱将电磁继电器内部异响声音信号转换为 (64, 94, 1) 的二维单通道图像。实验结果如图 14 所示。



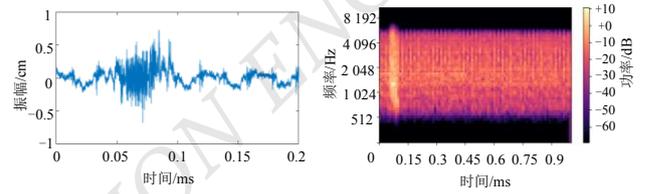
(a) 正常电磁继电器



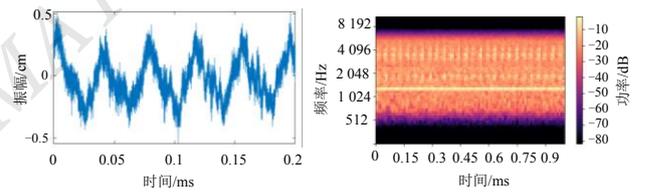
(b) 电磁继电器异响声音较小



(c) 电磁继电器异响声音微弱



(d) 电磁继电器突发噪声



(e) 电磁继电器背景噪声较大

图 14 复杂环境下电磁继电器声音信号的梅尔频谱对比

由图 14 可知: 正常电磁继电器虽然存在白噪声干扰, 但其梅尔频谱整体趋于光滑; 电磁继电器内部异响特征在声谱图上表现为竖直的能量不同的条纹, 异响特征微弱的声音信号, 其能量条纹变浅; 突发噪声干扰只会覆盖部分梅尔频谱。综上所述, 梅尔频谱对多类异响声音特征都有较好的表达效果。

6 结论

本文通过对电磁继电器两种异响声音信号进行时频域特征分析, 选择梅尔频谱来提取电磁继电器内部异响特征。通过在多种环境下采集电磁继电器内部异响的声音信号, 发现其梅尔频谱能够有效抵抗突发噪声的影响, 对异响特征有较好的表达效果。但本文采集的电磁继电器样本数据量不多, 可能无法涵盖所

有实际可能发生的异常情况,下一步将继续完善数据样本,进一步检验方法的有效性。

参考文献

[1] 尚浩天.噪声背景下基于深度学习的转机故障识别[D].吉林:东北电力大学,2022.
 [2] 翟国富,崔行磊,杨文英.电磁继电器产品及研究技术发展综述[J].电器与能效管理技术,2016(2):1-8.
 [3] 孙宗先,崔韬,顿明真,等.城轨车辆电磁继电器选型方法探讨[J].机电工程技术,2022,51(12):280-283.
 [4] 肖斌.电磁继电器质量一致性设计及关键工序控制技术研究[D].哈尔滨:哈尔滨工业大学,2020.
 [5] AOKI T, HAMADA K, YOSHIDA K, et al. Technical trends and international standardization activities in electromagnetic relays for control systems[J]. IEICE Transactions on Electronics, 2019,102(9): 628-635.
 [6] 张红斌,杨云,李广丽.直流电磁继电器测试系统的设计[J].

微计算机信息,2006(22):92-94.
 [7] 王彪,彭佳,严宇,等.交直流继电器电性能测试系统设计[J].中国高新科技,2022(20):10-11;20.
 [8] 孙丽,赵俊杰,袁春元,等.基于时域和谱峭度特征融合及指数模型的滚动轴承 RUL 预测[J].机床与液压,2023,51(10):203-209.
 [9] 蔡波,黄晋英,杜金波,等.基于 MEEMD 多特征融合与 LS-SVM 的行星齿轮箱故障诊断[J].中国测试,2021,47(9):126-132.
 [10] 唐伟.声学缺陷检测中关键技术的研究[D].天津:天津大学,2018.
 [11] 贺正楚,潘红玉.德国“工业 4.0”与“中国制造 2025”[J].长沙理工大学学报(社会科学版),2015(3):103-110.
 [12] 吴易容.广州地铁列车继电器的可靠性分析与换型研究[D].广州:华南理工大学,2018.
 [13] 李恒奎,卫昱乾,杨岗.动车组轴承轨旁声学故障诊断研究综述[J].轴承,2022,516(11):1-7.

作者简介:

卢绮雯,女,1982年生,硕士,主要研究方向:测控技术与仪器。E-mail: 24084480@qq.com
 林声宇,男,1999年生,硕士,主要研究方向:声学检测。E-mail: 532099228@qq.com
 邓昌,男,1998年生,硕士,主要研究方向:声学检测。E-mail: 1164599755@qq.com
 刘夏丽,女,1992年生,博士,主要研究方向:声学检测,故障诊断。E-mail: lxl@gdut.edu.cn
 黄志海,男,1999年生,硕士,主要研究方向:声学检测。E-mail: 2519652417@qq.com



(上接第 38 页)

[7] 戴天虹,孙春雪,黄建平,等.基于黄金正弦混沌斑鬣狗优化算法的高光谱波段选择[J].激光与光电子学进展,2022,59(10): 519-528.
 [8] 郑梦迪,孙咪咪,贺紫涵,等.基于 ITS2 序列及二级结构对易混淆药材牛尾独活、当归、独活和羌活的鉴别研究[J].药理学学报,2021,56(8):2289-2294.
 [9] 焦青亮,刘明,于坤,等.基于卷积神经网络的光谱预处理方法[J].光谱学与光谱分析,2022,42(1):292-297.
 [10] 段龙,鄢天荣,王江丽,等.结合高光谱成像和机器学习的棉

种年份鉴别[J].光谱学与光谱分析,2021,41(12):3857-3863.
 [11] SIMONYAN K, VEDALDI A, ZISSERMAN A. Deep inside convolutional networks: Visualising image classification models and saliency maps[J]. arXiv preprint arXiv:1312.6034, 2013.
 [12] CHMIEL W, KWIECIEŃ J, MOTYKA K. Saliency Map and Deep Learning in Binary Classification of Brain Tumours[J]. Sensors, 2023, 23(9): 4543.

作者简介:

赵路路,男,1995年生,硕士研究生,助理工程师,主要研究方向:复杂系统的集成与设计。E-mail: ll.zhao@giim.ac.cn
 殷泽轩,男,1998年生,学士,助理工程师,主要研究方向:自动化工程。E-mail: zx.yin@giim.ac.cn
 陈红,女,1997年生,学士,助理工程师,主要研究方向:智能传感技术。E-mail: chen.h@giim.ac.cn
 刘诚,男,1998年生,硕士研究生,主要研究方向:复杂系统的集成与设计。E-mail: 805327372@qq.com