

DOI: 10.13382/j.jemi.B2206110

油气管道动态直流与交流混合干扰分离检测方法*

李 茜 宾 帆 周熙朋 张安安 杨 超

(西南石油大学电气信息学院 成都 610500)

摘要:随着电网和管网交叉建设,油气管道上动态直流干扰与交流干扰呈混叠化发展趋势,加剧了管道腐蚀速度。为分离检测油气管道上的动态直流和交流干扰,分别利用不同分辨率的FFT提取混合干扰信号中动态直流干扰和交流干扰的频谱特性。进而利用分段聚合近似和FFT相结合的方式,将动态直流干扰近似处理为直流信号,实现动态直流干扰与交流干扰的分离与特征参量计算。检测结果表明,动态直流干扰和交流干扰的检测进度符合预期要求,其中原始交流干扰电位有效值与分离后测得的交流干扰电位偏差不超过 $\pm 2.5\%$,动态直流干扰电位有效值与分离测得的动态直流干扰电位有效值相差小于1 mV(不超过 $\pm 0.5\%$)。所做工作可以为干扰源排查和管道腐蚀针对性防护提供数据支撑。

关键词:油气管道;混合干扰检测;快速傅里叶变换;分段聚合近似

中图分类号: TM757.4; TN818 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 470.4051

Detection and separation method for dynamic DC and AC mixed interference on oil and gas pipelines

Li Qian Bin Fan Zhou Xipeng Zhang An'an Yang Chao

(School of Electrical Engineer and Information, Southwest Petroleum University, Chengdu 610500, China)

Abstract: With the cross construction of power grid and pipe network, the dynamic DC interference and AC interference on oil and gas pipelines show a mixed development trend, which aggravates the pipeline corrosion rate. In order to separate and detect dynamic DC and AC interference on oil and gas pipelines, the spectrum characteristics of dynamic DC interference and AC interference in the mixed interference signal are extracted using FFT with different resolutions. Then, the dynamic DC interference is approximately treated as DC signal by using the combination of subsection aggregation approximation and FFT to realize the separation of dynamic DC interference and AC interference and the calculation of characteristic parameters. The test results show that the detection progress of dynamic DC interference and AC interference meets the expected requirements. The deviation between the original AC interference potential effective value and the AC interference potential measured after separation is not more than $\pm 2.5\%$, and the difference between the dynamic DC interference potential effective value and the dynamic DC interference potential effective value measured after separation is less than 1 mV (not more than $\pm 0.5\%$). The work provides data support for interference source troubleshooting and targeted pipeline corrosion protection.

Keywords: oil and gas pipeline; mixed interference detection; FFT; piecewise aggregation approximation

0 引言

油气管道作为石油与天然气最主要的输送途径之一,一直以来都是国家能源保障工作的重中之重。在运

行过程中受环境影响,管道上往往会存在大量杂散电流,这会直接加剧管道腐蚀并对管道沿线设备造成干扰甚至破坏,严重威胁管道的运行安全^[1-3]。特别地,随着近年来管网、电网、铁路网建设的快速推进和相互融合,油气管道上动态直流干扰与交流干扰愈发常见且呈混合化发

收稿日期: 2022-12-12 Received Date: 2022-12-12

* 基金项目:智能电网四川省重点实验室开放基金项目(2021-IEPGKLSF-KFYB02)、西南石油大学自然科学“揭榜挂帅”项目(2021JBGS06)、西南石油大学科研“启航计划”项目(2021QHZ006)资助

展,加大了管道杂散电流干扰的检测与防护难度,造成了巨大的经济损失和不良的社会影响^[4-6]。

已有研究表明,杂散电流干扰的危害程度与频率大小在主体上成负相关关系^[7],故危害较大的直流干扰一直是杂散电流研究的重点,许多学者就直流干扰检测、防护技术展开了研究。文献[8-10]分别利用断电试片法、SCM检测技术、直流电压梯度测量法对管地电位偏移量、管中杂散电流、地电位梯度展开检测,并评估了直流干扰的危害程度,然后依次施加针对性防护措施,最终取得了一定的直流干扰防护效果。随着杂散电流研究的不断深入,交流干扰腐蚀问题不断突出,引起了人们的广泛关注,逐渐形成了较为完善的交流干扰检测评价体系^[11-12]。文献[13-14]使用数据记录仪对管道交流干扰电位、电流密度等测试参数进行检测,并施加了针对性干扰防护。目前,杂散电流的相关研究聚焦于单独的直流干扰或交流干扰,针对混合干扰的研究仍较为欠缺^[15],而上述研究虽基于不同测试方法从不同角度分别对交流、直流干扰进行检测,并取得了一定的干扰防护效果,但受检测方法限制,均无法独立完成交直流混合干扰的有效检测。

实际工程中,受管网、电网、铁路网三者相互交叉邻近的影响,油气管道上混合干扰的出现在所难免,特别是城市范围内地铁线路、管线、输电线交叉邻近现象尤为突出,由此形成动态直流与交流混叠的混合干扰更为集中常见^[16-17]。研究表明,动态直流干扰主要集中在0.5 Hz频段范围内,具有较强的腐蚀性^[18-19];而交流干扰以工频50 Hz或其二次谐波为主并伴有其他谐波分量,腐蚀性较低但去极化作用很强^[20-24],二者之间存在明显频段差异,检测、评价标准和防护措施均存在明显区别^[5,25]。由于现有干扰评价体系无法支撑混合干扰的整体评价,所以必须对混合干扰进行分离检测与评价。但目前针对油气管道动态直流与交流混合干扰的检测主要通过断电试片法和数据记录仪配合进行^[15,26],虽在一定程度上实现了干扰分类检测与针对性防护,然而并未实现混合干扰的完全分离,亦没有得到比较真实的交流干扰与动态直流干扰,给后续干扰评价与防护带来巨大的不确定性。

综上,目前对混合干扰的检测研究成果,均局限于动态直流干扰或交流干扰的单一检测,不适用于管道干扰信号呈混合化的情形。因此,本文针对混合干扰信号,利用多分辨FFT对混合干扰进行分析,确定干扰的频段分布范围和幅频特性。并根据动态直流干扰的低频特性,将FFT与分段聚合近似相结合,将动态直流干扰近似处理为直流信号,实现不同频段的动态直流干扰与交流干扰信号分离检测。最后,分别对管道干扰仿真数据和实测管道干扰信号进行分离检测,检测结果验证了所提方法的有效性。所做工作可为管道干扰源排查和数据采集

参数选择提供参考。

1 基于多分辨率FFT的混合干扰频谱提取

由于动态直流干扰与交流干扰均由交变信号构成,二者混叠形成的混合干扰难以直接在时域进行分离处理,所以可考虑通过时频转换对其进行分析。FFT具备优异的时频转换性能,通过将原始时域信号分解为多个不同频率正弦信号的叠加,实现了复杂时域信号的时频转换和幅频提取,在信号分析与处理领域得到广泛应用。文献[27]将FFT应用于动态直流干扰分析,提取出动态直流干扰的幅频特征,验证了FFT在油气管道干扰检测场景下应用的可行性。

1.1 多分辨率FFT设计

频谱分辨率与检测带宽是FFT的两个关键性能参数,当FFT转换序列长度一定时,分辨率与检测带宽负相关^[28]。由于混合干扰中动态直流干扰信号与交流干扰信号频段差异明显但具体频率未知,采用单一分辨率FFT无法同时兼顾频谱精度与信号带宽,容易造成频谱泄漏甚至是干扰漏检。所以,需基于动态直流干扰与交流干扰所处频段,设计不同分辨率的FFT对混合干扰进行处理,以得到表征混合干扰幅频特征的动态直流干扰频谱和交流干扰频谱。根据奈奎斯特采样定理,FFT分辨率与被测信号频率之间的关系如式(1)所示。

$$\Delta f = \frac{f_s}{N} = \frac{p \cdot f_{\max}}{N} \quad (1)$$

式中: Δf 为FFT分辨率,数值越小分辨率越高; f_s 为FFT采样速率; f_{\max} 为被测信号最高频率; p 为倍频因子, $p \geq 2$; N 为转换序列长度。

由于动态直流干扰集中分布在0.5 Hz以下的频段范围内,而交流干扰主要分布在工频及其谐波频段,二者不存在频段混叠,分别使用低带宽、高分辨率FFT与高带宽、低分辨率FFT对混合干扰进行处理,即可得到动态直流干扰与交流干扰有效频谱序列。

1.2 混合干扰频谱提取

干扰危害与频率基本成负相关,而管道上交流干扰主要分布在工频50 Hz及其九次谐波以内^[20,23-24],综合考虑交流干扰主要频段分布及其对管道的危害程度,使用1 024 Hz频段检测带宽与1 Hz频谱分辨率的FFT,重点分析1 000 Hz以内交流干扰信号的分布情况及幅频特征。根据奈奎斯特采样定理,使用傅里叶变换对信号进行分析时,采样速率应至少大于或等于2倍的被测信号最大频率,为具备足够的检测带宽,需保证交流干扰频谱提取时FFT的采样速率不低于2 048 Hz。通过1 Hz频谱分辨率FFT得到1 024 Hz频段范围内信号的幅值和

频率如下:

$$N_a = f_{as} \cdot T_a \quad (2)$$

$$f_{ak} = \frac{kf_{as}}{N_a} = k\Delta f_a \quad (3)$$

$$A_{ak} = \begin{cases} |X_a(k)| / N_a & k = 0 \\ 2|X_a(k)| / N_a & 0 < k \leq N_a/2 - 1 \end{cases} \quad (4)$$

式中: N_a 为 1 Hz 分辨率 FFT 转换序列长度, 取 2 048; f_{as} 为 1 Hz 分辨率 FFT 对应的采样速率; T_a 为 1 Hz 分辨率 FFT 转换时间, $T_a = 1/\Delta f_a$; f_{ak} 为 $X_a(k)$ 对应的频率分量; Δf_a 为 1 Hz 分辨率 FFT 对应的频谱分辨率; $X_a(k)$ 为 1 Hz 分辨率 FFT 频谱序列, $0 \leq k \leq N_a/2 - 1$; A_{ak} 为 $X_a(k)$ 对应的幅值分量, 其中 $k=0$ 表示零频分量幅值。

受频谱泄漏和环境噪声影响, 频谱序列 $X_a(k)$ 中可能包含幅值不为零的噪声或旁瓣分量, 其中旁瓣分量由频谱泄漏产生, 可由峰值检测进行滤除; 噪声信号通常能量较低、幅值较小且主要分布在工频及其谐波之外的频率点, 可根据工程经验设置阈值予以消除, 最终得到不含旁瓣和噪声的工频及其谐波有效干扰频谱序列 $X'_a(k)$ 。值得注意的是, 当旁瓣分量幅值和占比较大时, 表示频谱泄漏较为严重, 其频谱序列难以表征干扰信号的真实频谱, 基于该频谱进行后续处理可能产生较大的检测误差, 此时需提高 FFT 分辨率对交流干扰进一步处理以获得有效干扰频谱。

动态直流干扰的频谱提取过程与交流干扰频谱提取相同, 因此文中不在赘述。值得注意的是, 提取 0~1 Hz 频段范围内的动态直流干扰频谱^[29]采用的 FFT 频段检测带宽为 1.024 Hz, 分辨率为 0.001 Hz。

2 基于干扰频谱的重采样

理想情况下, 若干扰信号成分单一且无频谱泄漏, 可认为频谱序列中非零频分量处的非零幅值即为干扰信号幅值。然而, 正常情况下混合干扰信号成分较为复杂, 且受频谱泄漏、频率零散分布与相位关系未知的的影响, 无法直接通过频谱序列真实还原各干扰成分的幅值特征以及总的动态直流干扰和交流干扰。

根据整周期采样理论, 被测信号测量精度与采样周期的完整性直接相关, 即采样频率直接影响被测信号检测精度^[30]。一般来说, 交流信号通常包括单周期采样和多周期采样测量两种方式, 其中单周期采样适用于已知频率交流信号的检测, 确保所有采样点恰好均匀分布在单个信号周期内; 多周期采样也主要用于已知频率交流信号的检测, 确保所有采样点均匀分布在多个周期内, 当对频段已知但具体频率未知的信号进行检测时, 多通过

大幅提升采样速率和增加信号测量周期的方式缩减误差。但对混合干扰而言, 其组成复杂且频率未知, 无论采用单周期采样还是多周期采样均可能存在干扰信号周期与采样速率不匹配的问题, 进而导致明显测量误差和测量仪器处理性能的浪费。所以可以考虑基于交流干扰频谱调整信号的采样速率, 完成干扰频率与采样速率之间的相互匹配, 确保交流干扰信号周期的完整性。图 1 所示为基于干扰频谱的重采样流程。

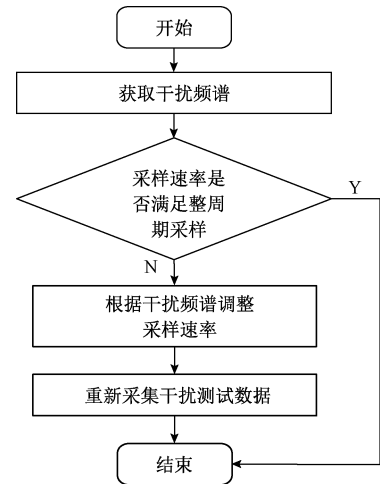


图 1 基于干扰频谱的重采样流程

Fig. 1 Sub-sampling process based on interference spectrum

根据奈奎斯特采样定理和工程实际经验, 通常保证被测信号单周期采样点数大于 20, 即可满足信号采样的准确性。为兼顾采样精度与测量仪器处理效率, 基于干扰频谱的采样速率设置如下所示:

$$h = \frac{f_0 \cdot \prod_{k=1}^n (f_{ak}/f_0)}{f_{amax}} \quad (5)$$

$$f'_{as} = \begin{cases} h \cdot f_{amax} & h \geq 20 \\ 2h \cdot f_{amax} & 10 \leq h < 20 \\ 4h \cdot f_{amax} & 5 \leq h < 10 \\ 10h \cdot f_{amax} & 2 \leq h < 5 \\ 20f_{amax} & h \leq 1 \end{cases} \quad (6)$$

式中: f'_{as} 为根据干扰频谱调整的重采样速率; f_0 为工频频率, 取值为 50 ± 0.5 Hz; h 为采样频率系数, 用以确保干扰频谱中最高频率干扰信号的单周期采样点数不低于 20; f_{ak} 为频谱序列 $X'_a(k)$ 对应的有效干扰频率分量, $0 \leq k \leq N_a/2 - 1$; f_{amax} 为频谱序列 $X'_a(k)$ 中的最大有效干扰频率分量。

3 基于分段聚合近似的混合干扰分离检测

分段聚合近似法是一种时间序列数据的降维方法,

将时间序列平均划分为多个分段,然后每个分段用其对应的均值来表示^[31]。由于动态直流干扰所属 MHz 频段非常接近零频直流,可考虑基于分段聚合近似的思想将动态直流干扰信号分段近似处理为直流信号,便于通过交、直流分离处理分离出该时间段内的交流干扰信号。由于采样速率为被测信号频率 20 倍时,被测信号一般无明显频谱泄漏,同样的,单周期内采用 20 个及以上拟合点对信号进行分段近似拟合也不会造成明显信号失真。为便于阐述与处理,后文将最高频不大于 0.05 Hz 的动态直流干扰信号称为低频动态直流干扰信号,对应的混合干扰称作低频混合干扰,反之分别称作高频动态直流干扰信号和高频混合干扰。

3.1 低频混合干扰分离检测

1) 低频动态直流干扰分段近似

对低频混合干扰而言,直接利用交流干扰频谱提取时使用的 1 Hz 分辨率 FFT 进行连续处理,可将其中的低频动态直流干扰信号按秒分段近似为直流信号。由于低频动态直流干扰信号均不大于 0.05 Hz,对应的信号周期也都不小于 20 s,通过 1 Hz 分辨率 FFT 连续转换可保证信号单周期分段数目均不小于 20,满足信号采样与拟合还原要求。

图 2 (a)、(b)、(c)分别为 0.01、0.03 与 0.05 Hz 频率对应拟合信号与原始信号的波形对比,当单周期分段数目不低于 20 时,通过 1 Hz 分辨率 FFT 得到的近似直流电位能基本拟合还原为原始信号,且分段数目越多波形吻合度越高。

如图 3 所示,信号频率越高,单周期分段越少,近似拟合偏差值相对越大,但一般不超过 ±5‰。因而,可在几乎不影响低频动态直流干扰原有特征的情况下,直接通过 1 Hz 分辨率 FFT 将低频混合干扰中的动态直流干扰分段近似为直流。

2) 低频混合干扰分离检测

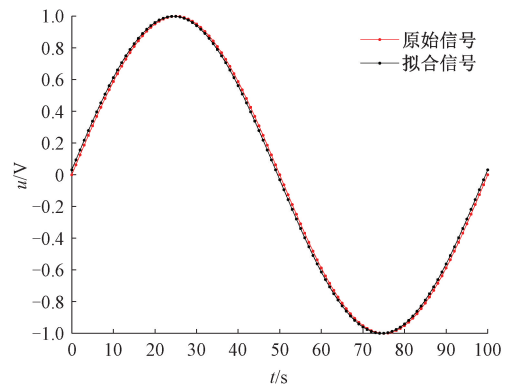
(1) 交流干扰分量

由于低频动态直流干扰信号可通过分段近似为直流信号,其与被测信号中原有的管道直流信号之和可用 1 Hz 分辨率 FFT 得到的零频分量进行表示,所以将重采样得到的原始测量数据减去对应 FFT 零频分量即可得到较为纯净的交流干扰信号。通过均方根值计算和幅值计算公式可得到每秒实时更新的交流干扰电位有效值与幅值。

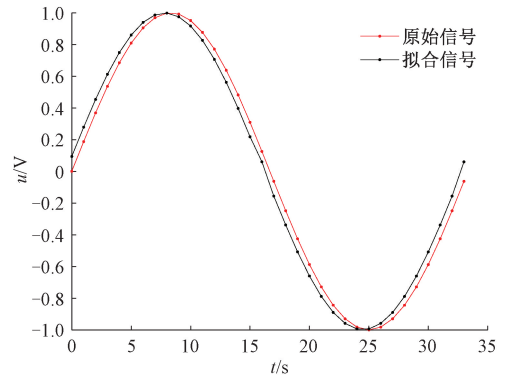
$$v_{ac} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (D_i - v_{adc})^2}{n}} \quad (7)$$

$$V_{ac} = \sqrt{2} v_{ac} \quad (8)$$

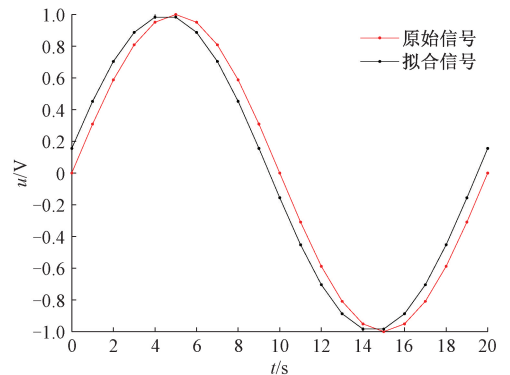
式中: v_{ac} 为每秒内交流干扰电位有效值; D 为测量仪器



(a) 0.01 Hz 信号
(a) 0.01 Hz signal



(b) 0.03 Hz 信号
(b) 0.03 Hz signal



(c) 0.05 Hz 信号
(c) 0.05 Hz signal

图 2 不同频率下低频原始信号与拟合信号波形对比

Fig. 2 Comparison of low-frequency original signal and fitted signal waveform at different frequencies

每秒形成的采样数据集; v_{adc} 为 1 Hz 分辨率 FFT 零频分量幅值; V_{ac} 为每秒内交流干扰电位幅值。

(2) 低频动态直流干扰检测

由于通过 1 Hz 分辨率 FFT 得到的零频分量同时包含原始管道直流信号和动态直流干扰分段近似得到的近似直流信号,所以需去除原始管道直流信号才能得到较为纯净的动态直流干扰信号。由于原始直流信号较为稳

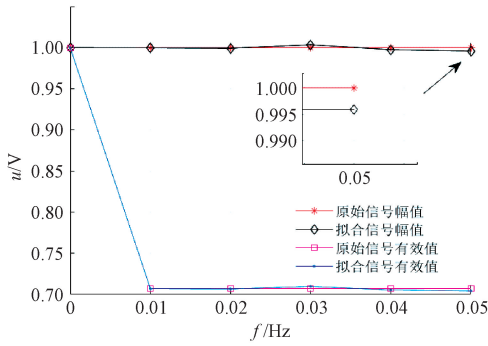


图 3 低频原始信号与拟合信号电位偏差对比
Fig. 3 Comparison of potential deviation between low-frequency original signal and fitted signal

定,可用动态直流干扰频谱提取时 0.001 Hz 分辨率 FFT 得到的零频分量进行表示,即在 1 Hz 分辨率 FFT 零频分量中消去 0.001 Hz 分辨率 FFT 零频分量可得到纯粹的低频动态直流干扰信号。为客观体现低频动态直流干扰的幅值特征,分别对每秒内低频动态直流干扰的瞬态干扰电位和整周期干扰电位有效值进行检测。

$$\Delta v_{dc} = v_{adc} - v_{ddc} \quad (9)$$

$$v_{dc} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^M \Delta v_{dc}^2}{M}} \quad (10)$$

式中: Δv_{dc} 为每秒内低频动态直流干扰瞬时电位; v_{ddc} 为 0.001 Hz 分辨率 FFT 零频分量幅值; v_{dc} 为 M s 内的动态直流干扰电位的均方根值, M 通常取 1 000。

3.2 高频混合干扰分离检测

1) 高频动态直流干扰分段近似

对高频混合干扰而言,由于其中的高频动态直流干扰频率大于 0.05 Hz,对应的信号周期小于 20 s,直接利用 1 Hz 分辨率 FFT 对其进行连续处理,无法保证高频动态直流干扰信号单周期分段数目大于 20,可能导致明显信号失真与检测误差。所以,为保证足够的分段数,需对每个分段的时间间隔进行压缩,即需要压缩 FFT 转换时间。由于分辨率可由 FFT 采样速率和转换序列长度进行调节,所以通过调节 FFT 分辨率便可以调整 FFT 转换时间。具体方法为:如式(2)所示,在 1 Hz 分辨率的基础上提升 FFT 采样速率 f_{as} 为 f'_{as} 或缩短 FFT 转换序列 N_a 为 N'_a ,即可缩短 FFT 转换时间,进而调整高频动态直流干扰单个信号周期内 FFT 的转换次数,以保证足够的分段近似点数目。

$$T'_a = \frac{\Delta f'_a}{\Delta f_a} = \frac{N'_a T_a f_{as}}{N_a f'_{as}} \quad (11)$$

式中: T'_a 为调整过后的 FFT 转换时间; $\Delta f'_a$ 为调整过后的 FFT 分辨率; N'_a 为调整过后 FFT 转换序列长度; f'_{as} 为

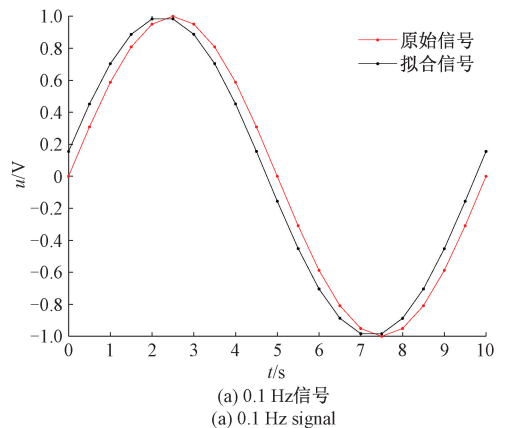
调整过后 FFT 采样速率。

随着 FFT 转换时间缩短,FFT 分辨率逐渐降低,为避免交流干扰频谱泄漏影响零频分量,FFT 转换时间不能过短。由于 0.05 Hz 与 1 Hz 之间存在相对较大的频段差,采用固定的 FFT 转换时间保证分段近似的有效性,但 1 Hz 信号单周期存在 20 个分段点即意味着 0.1 Hz 信号单周期将存在 200 个分段点,远高于分段拟合需要的点数要求,存在很大无用计算量和处理性能资源浪费。如果根据高频动态直流干扰信号的最高频率,梯级缩短 FFT 转换时间,不仅可以解决上述问题,还能保证高频动态直流干扰信号单周期分段近似点数不小于 20(0.5 Hz 以上的干扰信号分布较少,固定采用 0.1 s 的 FFT 转换时间进行分析)。

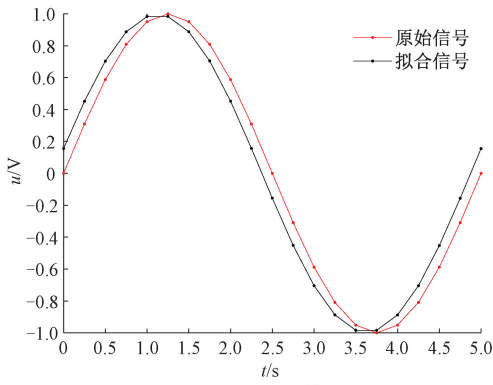
$$T'_a = \begin{cases} 0.5 & 0.05 < f_{dmax} \leq 0.1 \\ 0.25 & 0.1 < f_{dmax} \leq 0.2 \\ 0.1 & 0.2 < f_{dmax} \leq 1 \end{cases} \quad (12)$$

式中: T'_a 为梯级调整过后的 FFT 转换时间,单位为 s; f_{dmax} 为动态直流干扰 FFT 中的最大有效干扰频率,单位为 Hz。

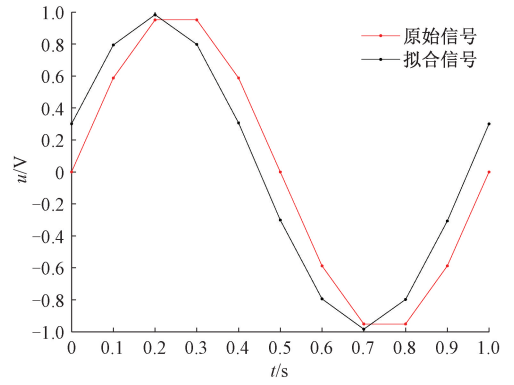
从图 4 可以看出,通过缩短 FFT 转换时间可有效增加信号单周期分段数目,当分段数目 ≥ 20 时,信号波形几乎不存在失真,能基本还原原始信号,并表征原始信号的幅值特征。特别的,1 Hz 信号单周期分段数目为 10 时,其拟合偏差明显大于 0.1~0.5 Hz 信号的拟合偏差,但也几乎不存在明显失真(1 Hz 拟合信号幅值为 0.983 6 V,与原始信号的偏差低于 2%)。如图 5 所示,0.05~0.5 Hz 范围内最大偏差基本不超过 $\pm 5\%$,当分段数目不低于 20 时(0.3 与 0.4 Hz 处分段数目均大于 20),分段数目的增加不能明显提升信号的检测精度,所以通过梯级缩短分段近似时间间隔,保证单周期分段数目接近 20,能在将高频混合干扰中的动态直流干扰分段近似为直流的同时兼顾处理精度与效率。



(a) 0.1 Hz 信号
(a) 0.1 Hz signal

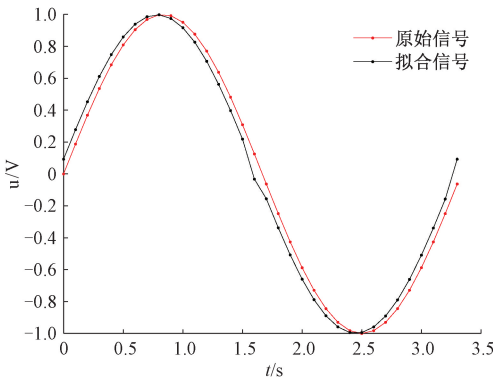


(b) 0.2 Hz信号
(b) 0.2 Hz signal

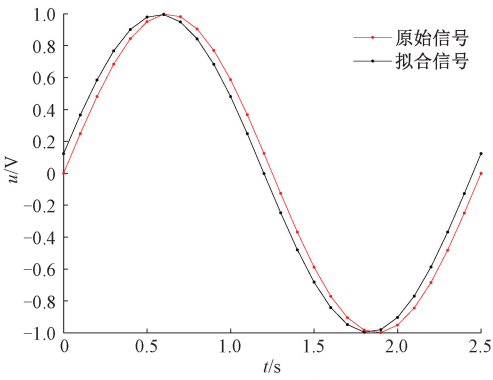


(f) 1 Hz信号
(f) 1 Hz signal

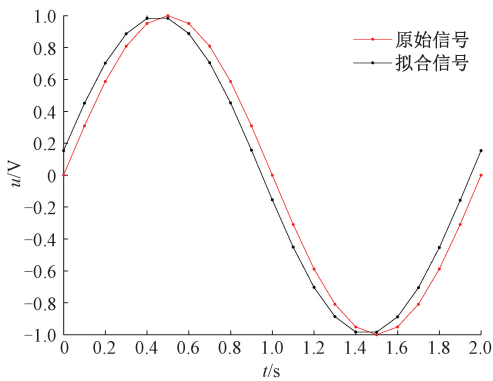
图4 不同频率下高频原始信号与拟合信号波形对比
Fig. 4 Comparison of high-frequency original signal and fitted signal waveform at different frequencies



(c) 0.3 Hz信号
(c) 0.3 Hz signal



(d) 0.4 Hz信号
(d) 0.4 Hz signal



(e) 0.5 Hz信号
(e) 0.5 Hz signal

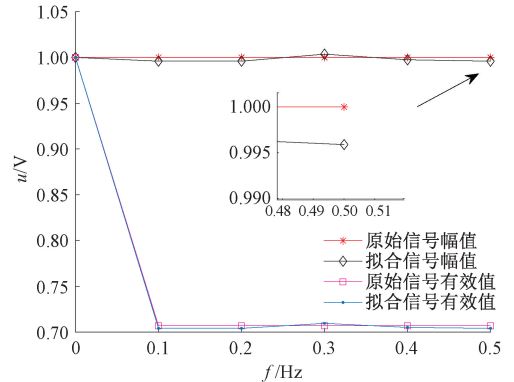


图5 高频原始信号与拟合信号电位偏差对比
Fig. 5 Comparison of potential deviation between high-frequency original signal and fitted signal

2) 高频混合干扰分离检测

(1) 交流干扰检测

与低频混合干扰中交流干扰检测方法类似,检测高频混合干扰中的交流干扰时,同样需要将重采样获得的原始测量数据减去对应高频动态直流干扰分段近似 FFT 中的零频分量,得到较为纯净的交流干扰信号。但不同的是,由于 FFT 转换时间被压缩,参与运算的测量数据需按比例缩减,且 FFT 零频分量应为分段近似时 FFT 中的零频分量。最后通过均方根值计算和幅值计算公式可得到每秒内实时更新的交流干扰电位有效值与幅值。

$$\delta_{vac} = \sqrt{1/n \sum_{i=1}^n (D'_i - v_{dc})^2} \quad (13)$$

$$v_{ac} = \sqrt{1/q \sum_{i=1}^q \delta_{vac}^2} \quad (14)$$

$$V_{ac} = \sqrt{2} v_{ac} \quad (15)$$

式中: δ_{vac} 为 T'_a 时间内交流干扰电位有效值; D'_i 为 T'_a 时

间内原始采样数据集; q 为 1 s 内 FFT 转换次数, $q = 1/T'_a$ 。

(2) 高频动态直流干扰检测

与低频动态直流干扰检测类似, 通过分段近似 FFT 得到的零频直流中除了包含高频动态直流信号外还包含原始直流信号, 需滤除原始直流信号才能得到纯粹的高频动态直流干扰信号。

$$\delta_{vdc} = v_{adc} - v'_{ddc} \tag{16}$$

$$\Delta v_{dc} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^q \delta_{vdc}^2}{q}} \tag{17}$$

$$v_{dc} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^M \Delta v_{dci}^2}{M}} \tag{18}$$

式中: δ_{vdc} 为 T'_a 时间内动态直流干扰的近似直流电位; v'_{ddc} 为 T'_a 时间内 FFT 零频分量幅值。

4 算例分析

4.1 仿真分析

为验证方法的有效性, 以董亮等^[27] 在深圳某管道上实际测得的动态直流干扰主要分布频段数据为基础, 随机叠加交流干扰混合, 然后对混叠形成的混合干扰进行分析处理, 原始混合干扰信号组成如表 1 所示。

表 1 原始混合干扰信号组成 (仿真)

Table 1 Original mixed interference signal composition (simulation)

信号分类	频率/Hz	幅值/V	表达式	
动态直流 干扰信号	0.006	0.7	$0.7 \times \sin(2 \times \pi \times 0.006 \times t)$	
	0.007	0.5	$0.5 \times \sin(2 \times \pi \times 0.007 \times t)$	
	0.008	1.2	$1.2 \times \sin(2 \times \pi \times 0.008 \times t)$	
	0.009	1.0	$\sin(2 \times \pi \times 0.009 \times t)$	
	0.010	-0.12	$-0.12 \times (2 \times \pi \times 0.01 \times t)$	
	0.011	0.7	$0.7 \times \sin(2 \times \pi \times 0.011 \times t)$	
	0.012	1.6	$1.6 \times \sin(2 \times \pi \times 0.012 \times t)$	
	0.013	1.0	$\sin(2 \times \pi \times 0.013 \times t)$	
	0.014	0.1	$0.1 \times \sin(2 \times \pi \times 0.014 \times t)$	
	0.015	-0.5	$-0.5 \times \sin(2 \times \pi \times 0.015 \times t)$	
	0.016	1.0	$\sin(2 \times \pi \times 0.016 \times t)$	
	0.017	0.9	$0.9 \times \sin(2 \times \pi \times 0.017 \times t)$	
	0.018	0.5	$0.5 \times \sin(2 \times \pi \times 0.018 \times t)$	
	交流干扰信号	50	3.0	$3 \times \sin(2 \times \pi \times 50 \times t)$
		100	-0.7	$-0.7 \times \sin(2 \times \pi \times 100 \times t)$
		150	0.5	$0.5 \times \sin(2 \times \pi \times 150 \times t)$
		250	0.25	$0.25 \times \sin(2 \times \pi \times 250 \times t)$
	直流信号	0	-0.5	$-0.5(t)$

1) 干扰频谱提取

针对频段未知的混合干扰信号, 先分别使用 1 Hz 分辨率 FFT 与 0.001 Hz 分辨率对其进行时频转换。

图 6、7 为不同分辨率下的混合干扰频谱图。可以发现频谱图中的干扰信号幅频参数与表 1 所示原始混合干扰的幅频参数基本一致, 说明通过多分辨率提取得到的干扰频谱可以准确反映混合干扰的信号组成和幅频特征。

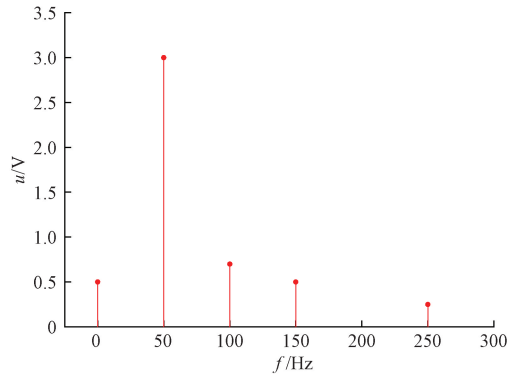


图 6 1 Hz 分辨率下混合干扰频谱图

Fig. 6 Spectrum of mixed interference at 1 Hz resolution

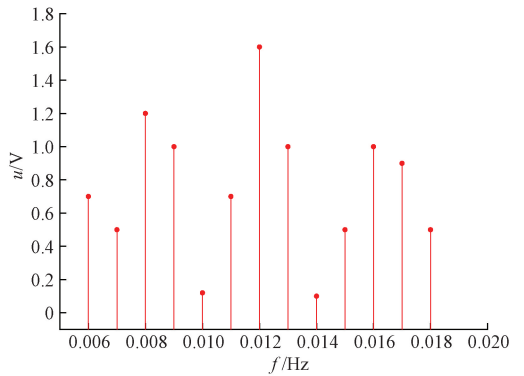


图 7 0.001 Hz 分辨率下混合干扰频谱图

Fig. 7 Spectrum of mixed interference at 0.001 Hz resolution

通过对频谱图对应数据进行阈值筛选和峰值检测得到的交流干扰与动态直流干扰有效频谱数据分别如表 2、3 所示。可以得出交流干扰频率分布于 50、100、150、250 Hz 处, 且工频 50 Hz 为最主要成分; 动态直流干扰主要分布于 0.006、0.007、0.008、0.010、0.012、0.014、0.016 Hz 等处, 且信号最高有效频率为 0.016 Hz。

表 2 交流干扰有效频谱

Table 2 AC interference effective spectrum

频率/Hz	50	100	150	250	0
幅值/V	3	0.7	0.5	0.25	-

表3 动态直流干扰有效频谱

Table 3 Dynamic DC interference effective spectrum

频率/Hz	0.006	0.007	0.008	0.010	0.012	0.014	0.016	0
幅值/V	0.7	0.5	1.2	0.12	1.6	0.1	1	0.5

将交流干扰有效频率代入式(11)中,得到满足整周期采样定理的重采样速率 $f'_{as} = 6\ 000\ \text{Hz}$,该采样速率下可实现混合干扰中所有交流干扰的整周期检测,消除采样速率与被测信号频率不匹配带来的测量误差和盲目提升采样速率带来的处理负担。

2) 基于分段聚合近似的动态直流干扰检测

由于经过阈值筛选与峰值检测得到动态直流干扰有效频谱中信号的最高频率为 $0.016\ \text{Hz}$,小于 $0.05\ \text{Hz}$,属于低频动态直流干扰。通过 $1\ \text{Hz}$ 分辨率 FFT 持续转换即可将动态直流干扰信号分段聚合近似为直流信号,且成为 $1\ \text{Hz}$ 分辨率 FFT 零频分量 v_{adc} 的一部分。由于 $0.001\ \text{Hz}$ 分辨率 FFT 已得到原始直流电位为 $-0.5\ \text{V}$,通过式(13)将原始直流信号从 $1\ \text{Hz}$ 分辨率 FFT 零频分量去除,即可得到每秒内较为纯净动态直流干扰分段近似得到的瞬时直流电位 Δv_{dc} 。

然后,将 Δv_{dc} 代入式(14)得到 $1\ 000\ \text{s}$ 内动态直流干扰电位有效值为 $2.186\ 65\ \text{V}$,而对应的 $1\ 000\ \text{s}$ 内原始动态直流干扰电位有效值为 $2.186\ 82\ \text{V}$,即分段聚合近似处理后动态直流干扰电位有效值的检测结果偏差值小于 $1\ \text{mV}$ 。

图8所示为 $1\ 000\ \text{s}$ 内间隔抽取 50 个点形成的拟合动态直流干扰与原始动态直流干扰波形对比,分别考虑了原始直流信号存在与否的两种情况,可以发现无论原始直流信号存在与否,拟合信号与原始信号波形基本一致。图9所示为原始直流信号是否存在两种情况下的拟合信号与原始信号偏差对比,可以看出任意时刻拟合信号与原始信号之间瞬时电位偏差基本不大于 $1\ \text{mV}$ (不超过 $\pm 0.5\%$),说明经过分段聚合近似与直流信号分离两个处理步骤基本未对动态直流干扰自身测试参数造成影响,验证了基于分段聚合近似的动态直流干扰检测的可行性与有效性。

3) 交流干扰分离检测

由于通过 $1\ \text{Hz}$ 分辨率 FFT 已经得到每秒内动态直流干扰与原始直流信号叠加而成的零频分量 v_{adc} ,将其代入式(11)与(12),消去被测信号存在的原始直流信号与动态直流干扰信号,得到了较为纯净的交流干扰电位有效值 v_{ac} 与幅值 V_{ac} 。

图10(a)、(b)所示分别为原始交流干扰与混合干扰分离后交流干扰电位幅值、有效值与对应偏差对比,其中原始交流干扰电位有效值与幅值分别为 $1.769\ 43\ \text{V}$ 与 $3.130\ 89\ \text{V}$,而分离后测得的交流干扰电位有效值主要分

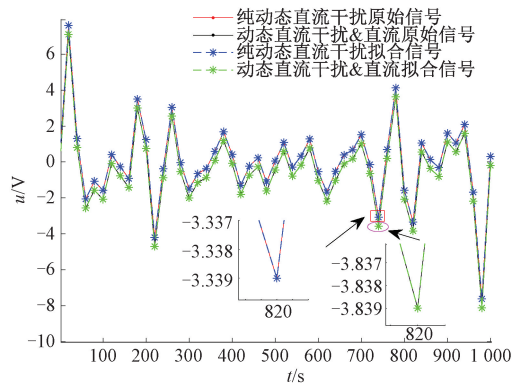


图8 动态直流干扰拟合信号与原始信号波形对比
Fig. 8 Comparison of dynamic DC interference fitting signal and original signal waveform

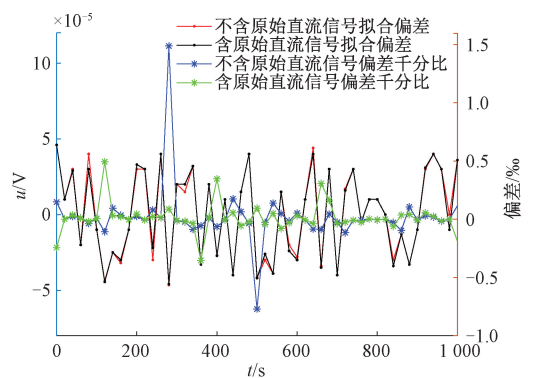


图9 动态直流干扰拟合信号与原始信号偏差对比
Fig. 9 Comparison of the deviation between the dynamic DC interference fitting signal and the original signal

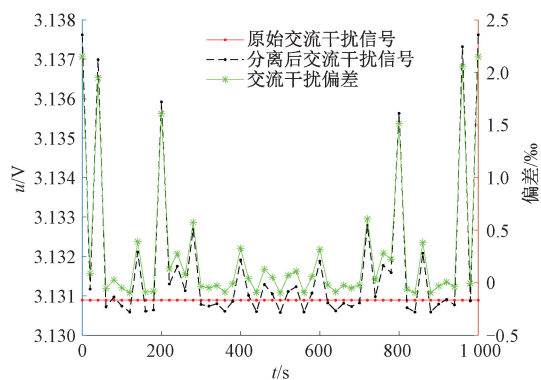
布在 $1.769 \sim 1.771\ 5\ \text{V}$ 范围内,电位幅值主要分布在 $3.13 \sim 3.138\ \text{V}$ 范围内,误差均不大于 $\pm 2.5\%$,具备极高的交流信号检测精度,证明了混合干扰分离检测的准确性。

4.2 实验验证

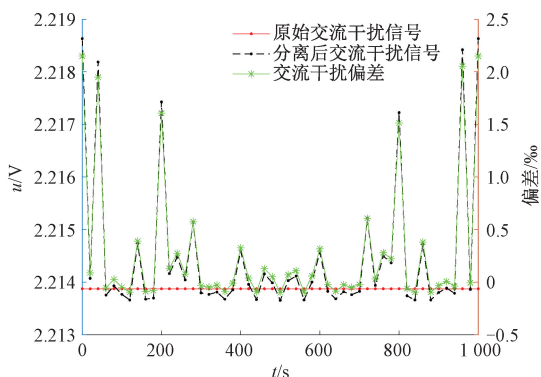
为进一步验证油气管道动态直流和交流混合干扰分离检测方法的可行性,基于项目团队实测管道干扰数据,实验环节基于自研的混合干扰自动测试仪进行测试。测试仪基于 STM32 硬件平台进行开发,测试仪中主控处理器、输出控制电路、信号调理电路与测试试片、参比电极等配合,实现混合干扰各项测试参数的准确分离检测,然后通过数据存储单元、DTU 无线通信模块进行数据暂存或实现与远程终端之间的双向数据交互。

1) 干扰频谱提取

对采集到的混合干扰信号进行多分辨率 FFT 处理,得到动态直流干扰和交流干扰的频谱如表4所示。



(a) 交流干扰幅值对比与误差分析
(a) Amplitude comparison and error analysis of AC interference



(b) 交流干扰有效值对比与误差分析
(b) Amplitude comparison and error analysis of AC interference

图 10 交流干扰原始信号与测量值电位对比与误差分析
Fig. 10 Comparison and error analysis of AC interference original signal and measured value potential

表 4 混合干扰频谱

Table 4 Hybrid interference spectrum

类型	频率/Hz	幅值/V
动态直流干扰	0.05	0.500 5
	0.10	0.350 1
	0.235	0.250 0
	0.848	0.500 0
交流干扰	50	0.499 8
	100	0.250 1

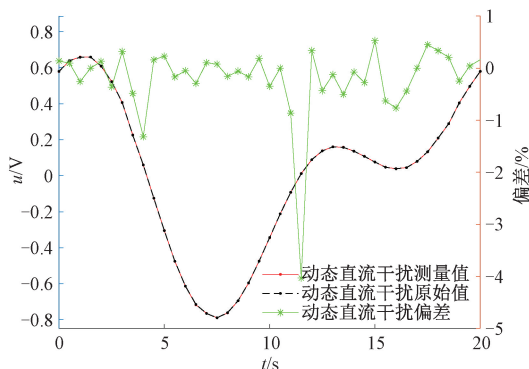
从表 4 可以看出,实测的管道混合干扰电流信号中,动态直流干扰主要分布在 0.05、0.10、0.235 和 0.848 Hz 处,而交流干扰主要分布在 50 和 100 Hz 处,与本文所分析的动态直流干扰与交流干扰频段分布区间保持一致。

2) 干扰电位分析

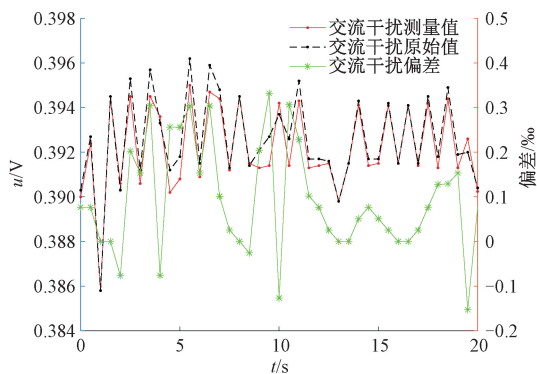
由于动态直流和交流混合干扰中最低频率为 0.05 Hz,其信号周期为其他分量的公倍数,故混合干扰的波动周期与最低频分量相同,均为 20 s。因此,选取一个混合干扰周期内的数据分析即具有代表性。

图 11 为测量装置在一个混合干扰周期内分离检测

得到的动态直流干扰电位、交流干扰电位与原始标准电位的电位波形及误差对比,由于混合干扰中存在大于 0.05 Hz 的信号(0.1 Hz),根据分段近似的要求,每组测量数据之间的时间间隔为 0.5 s。从图中可以看出,分离检测实验得到的动态直流干扰分量、交流干扰分量与原始信号之间的偏差普遍小于 1 mV、测量误差普遍小于 ±5%,验证了多分辨率 FFT 与分段聚合近似在动态直流与交流混合干扰分离检测中的准确性与有效性,可以为后续研究者在数据采集参数的选择上提供建议。



(a) 动态直流干扰分量
(a) Dynamic DC interference component



(b) 交流干扰分量
(b) AC interference component

图 11 干扰电位波形对比及偏差分析
Fig. 11 Interference potential waveform comparison and deviation analysis

5 结 论

针对油气管道上频率未知的动态直流与交流混合干扰,提出一种基于多分辨率 FFT 与分段聚合近似的混合干扰分离检测方法,通过算例验证,得出下列结论:

1) 混合干扰检测中通过多分辨率 FFT 可提取准确的混合干扰频谱,然后基于干扰频谱调整测量仪器采样速率使之满足整周期采样定理,能有效降低干扰信号频率未知情况下因信号频率与采样速率不匹配带来的测量误差。

2) 由于动态直流干扰所处频段极低, 根据干扰频谱选取合适的时间间隔可将其分段近似为直流信号, 然后滤除被测信号中总的直流信号得到了相对真实的交流干扰信号。

3) 在 FFT 分段近似得到的总直流信号中剔除超高分辨率 FFT 处理下得到的管道直流信号, 得到了较为准确的动态直流干扰信号。

4) 基于多分辨率 FFT 与分段聚合近似分离得到的动态直流干扰与交流干扰具有实时同步性, 可以反映任意时刻的混合干扰整体特征, 能为油气管道混合干扰检测、评价、针对性防护以及腐蚀机理研究提供数据支撑与理论参考。

需要指出的是, 由于暂时不能对静态直流干扰与管道自身直流信号进行识别, 本文所述混合干扰分离方法不能用于静态直流干扰的分离检测。下一步将研究计及动态直流干扰、静态直流干扰与交流干扰混叠形成的混合干扰分离检测与分析方法, 以提升混合干扰检测方法的应用范围和准确性。

参考文献

[1] 王瑞鹏, 程拥军. 埋地管道交流杂散电流的危害与排流[J]. 腐蚀与防护, 2014, 35(5): 514-516.
WANG R P, CHENG Y J. Buried pipeline AC stray current and discharge method [J]. Corrosion & Protection, 2014, 35(5): 514-516.

[2] 靳凯. 轨道交通杂散电流对埋地金属管线的影响及应对措施[J]. 城市轨道交通研究, 2021, 24(5): 199-201, 207.
JIN K. Influence of urban rail transit stray current on buried metal pipeline and countermeasures [J]. Urban Mass Transit, 2021, 24(5): 199-201, 207.

[3] 唐赵林. 交流杂散电流干扰下的管道电位测量与干扰评价问题[J]. 全面腐蚀控制, 2020, 34(8): 66-70, 131.
TANG ZH L. Process of pipeline potential measurement and interference evaluation under AC stray current interference [J]. Total Corrosion Control, 2020, 34(8): 66-70, 131.

[4] 赵书华, 李晓, 王树立, 等. 埋地管道直流杂散电流腐蚀及防护的研究进展[J]. 材料保护, 2020, 53(5): 123-128.
ZHAO SH H, LI X, WANG SH L, et al. Research progress of corrosion and protection of DC stray current interference on buried pipelines [J]. Materials Protection, 2020, 53(5): 123-128.

[5] 杨永, 罗艳龙, 孙明, 等. 油气管道交流杂散电流腐蚀研究进展[J]. 石油学报, 2021, 42(9): 1247-1254.
YANG Y, LUO Y L, SUN M, et al. Research advances

in stray alternating current corrosion of oil and gas pipelines [J]. Acta Petrolei Sinica, 2021, 42(9): 1247-1254.

- [6] 梁海波, 王怡. 基于深度学习的天然气钢制管道缺陷检测方法研究[J]. 电子测量与仪器学报, 2022, 36(9): 148-158.
LIANG H B, WANG Y. Research on defect detection method of natural gas steel pipeline based on deep learning [J]. Journal of Electronic Measurement and Instrumentation, 2022, 36(9): 148-158.
- [7] 万红霞, 李婷婷, 宋东东, 等. 杂散电流对埋地管道的腐蚀及排流方式的研究进展[J]. 表面技术, 2021, 50(4): 125-134.
WAN H X, LI T T, SONG D D, et al. Research progress of stray current on corrosion and drainage method of buried pipeline [J]. Surface Technology, 2021, 50(4): 125-134.
- [8] 曹方圆, 白锋, 李博, 等. 直流感地极电流干扰下阴极保护电源输出对管道电位分布的影响[J]. 腐蚀与防护, 2021, 42(8): 63-68, 75.
CAO F Y, BAI F, LI B, et al. Effect of output of cathodic protection power supply on potential distribution of pipeline under DC grounding electrode current interference [J]. Corrosion and Protection, 2021, 42(8): 63-68, 75.
- [9] 符耀庆, 王秀通, 陈胜利. 南朗段埋地天然气管道杂散电流检测与治理[J]. 表面技术, 2016, 45(2): 22-27.
FU Y Q, WANG X T, CHEN SH L. Stray current detection and treatment for buried natural gas pipeline of Nanlang segment [J]. Surface Technology, 2016, 45(2): 22-27.
- [10] 张永飞, 赵书华, 李平, 等. 长输埋地管道阴极保护故障诊断与排除[J]. 腐蚀与防护, 2014, 35(11): 1168-1172, 1176.
ZHANG Y F, ZHAO SH H, LI P, et al. Fault diagnosis and elimination of cathodic protection system for long-distance buried pipelines [J]. Corrosion & Protection, 2014, 35(11): 1168-1172, 1176.
- [11] 李鑫, 陈长风. 油气长输埋地管道交流腐蚀研究进展[J]. 材料保护, 2020, 53(9): 114-120.
LI X, CHEN CH F. Research progress on alternating current corrosion of oil & gas long-distance buried pipelines [J]. Materials Protection, 2020, 53(9): 114-120.
- [12] 唐德志, 杜艳霞, 路民旭. 埋地管道交流干扰有效检测技术及风险评价方法最新研究进展[J]. 腐蚀科学与防护技术, 2018, 30(3): 311-318.

- TANG D ZH, DU Y X, LU M X. Recent advances in testing and risk assessment of AC interference with buried pipelines [J]. Corrosion Science and Protection Technology, 2018, 30(3): 311-318.
- [13] 贺裕卓, 季寿宏, 钱济人, 等. 电气化铁路对嘉兴段天然气管道的交流干扰及防护[J]. 腐蚀与防护, 2021, 42(7): 80-85.
- HE Y ZH, JI SH H, QIAN J R, et al. AC interference of electric railway on natural gas pipeline in Jiaying and protection[J]. Corrosion and Protection, 2021, 42(7): 80-85.
- [14] 吕义超, 沈卫凯, 钱玉华. 榆济天然气管道交流杂散电流的检测与防护[J]. 腐蚀与防护, 2018, 39(5): 355-358.
- LYU Y CH, SHEN W K, QIAN Y H. Detection and protection of AC stray current of Yulin-Jinan natural gas pipeline[J]. Corrosion & Protection, 2018, 39(5): 355-358.
- [15] 徐成. 交直流杂散电流与应力耦合作用下 X70 管线钢腐蚀及涂层剥离行为研究[D]. 北京: 北京工业大学, 2018.
- XU CH. Study on corrosion behavior of X70 pipeline steel and coating delamination under stray AC and DC with stress [D]. Beijing: Beijing University of Technology, 2018.
- [16] 白锋, 李雄, 曹方圆. 高压直接地极对埋地油气管道腐蚀影响的等效电流研究[J]. 电网技术, 2019, 43(5): 1834-1840.
- BAI F, LI X, CAO F Y. Equivalent current study on the corrosion effect of HVDC grounding electrode on buried oil and gas pipeline [J]. Power System Technology, 2019, 43(5): 1834-1840.
- [17] 曹滨滨. 燃气管道交直流混合干扰的检测与分析[J]. 腐蚀与防护, 2021, 42(8): 81-85.
- CAO B B. Detection and analysis of AC-DC mixed interference to gas pipeline [J]. Corrosion and Protection, 2021, 42(8): 81-85.
- [18] 肖嵩, 姜子涛, 童清福, 等. 轨道交通杂散电流对武汉燃气管道干扰的波动规律[J]. 腐蚀与防护, 2020, 41(12): 37-43.
- XIAO S, JIANG Z T, TONG Q F, et al. Fluctuation regularity of stray current interference from rail transit to Wuhan gas pipelines [J]. Corrosion and Protection, 2020, 41(12): 37-43.
- [19] 郭勇, 丁继峰, 王港, 等. 埋地管道地铁直流杂散电流检测与防护的研究现状[J]. 材料保护, 2021, 54(7): 133-139.
- GUO Y, DING J F, WANG G, et al. Research status of detection and protection of subway DC stray current of buried steel pipelines[J]. Materials Protection, 2021, 54(7): 133-139.
- [20] 莫冰玉, 黄万里, 周尚虎, 等. 稳态下交流输电线路对邻近埋地油气管道电磁影响的案例研究[J]. 中国电机工程学报, 2020, 40(18): 6035-6045.
- MO B Y, HUANG W L, ZHOU SH H, et al. Case studies of the electromagnetic influence of AC transmission lines on the adjacent buried oil/gas pipeline under steady state[J]. Proceedings of the CSEE, 2020, 40(18): 6035-6045.
- [21] WEN C, LI J, WANG S, et al. Experimental study on stray current corrosion of coated pipeline steel [J]. Journal of Natural Gas Science & Engineering, 2015, 27:1555-1561.
- [22] YONG J, XIA B, YONG H J, et al. Harmonic voltage induction on pipelines: Measurement results and methods of assessment[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2018, 33(5): 2170-2179.
- [23] 郑晓亮, 谢晓贤, 王强. 基于灰狼优化的埋地管道泄漏双波谱定位方法[J]. 仪器仪表学报, 2022, 43(8): 204-214.
- ZHENG X L, XIE X X, WANG Q. Grey wolf optimization based buried pipe leak localization using dual-wave spectrum [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2022, 43(8): 204-214.
- [24] WANG Y, YONG J, SUN Y Y, et al. Characteristics of harmonic distortions in residential distribution systems[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 2017, 32(3): 1495-1504.
- [25] 罗勇, 周斌, 张海雷. 甬台温管道杂散电流干扰防治措施[J]. 油气田地面工程, 2019, 38(12): 92-96.
- LUO Y, ZHOU B, ZHANG H L. Prevention and control measures for stray current interference in Yongtaiwen pipeline[J]. Oil-Gas Field Surface Engineering, 2019, 38(12): 92-96.
- [26] 李明, 董列武, 谢成, 等. 输油管道杂散电流检测评价与防护实践[J]. 材料保护, 2017, 50(2): 91-95.
- LI M, DONG L W, XIE CH, et al. Detection and countermeasures of stray current corrosion of oil pipeline[J]. Materials Protection, 2017, 50(2): 91-95.
- [27] 董亮, 姚知林, 葛彩刚, 等. 地铁杂散电流干扰下管地电位波动特征的傅里叶分析[J]. 表面技术, 2021, 50(2): 294-303.
- DONG L, YAO ZH L, GE C G, et al. Fourier analysis of the fluctuation characteristics of pipe-to-soil potential under metro stray current interference [J]. Surface Technology, 2021, 50(2): 294-303.

- [28] 沈廷鳌, 管金发, 华卫星, 等. 基于 FFT 的极端频率信号相位差测量方法 [J]. 电子测量技术, 2020, 43(24): 6-10.
SHEN T AO, GUAN J F, HUA W X, et al. New phase difference measurement algorithm for extreme frequency signals based on FFT [J]. Electronic Measurement Technology, 2020, 43(24): 6-10.
- [29] 朱振, 向敏, 陈啟斌, 等. 天然气管道受强烈地铁杂散电流干扰案例分析 [J]. 腐蚀与防护, 2021, 42(8): 69-75.
ZHU ZH, XIANG M, CHEN Q B, et al. Case analysis of natural gas pipeline interfered by strong subway stray current [J]. Corrosion and Protection, 2021, 42(8): 69-75.
- [30] 涂亚庆, 沈艳林, 沈廷鳌, 等. 非整周期采样信号相位差估计的相频匹配方法 [J]. 振动与冲击, 2017, 36(6): 7-10, 37.
TU Y Q, SHEN Y L, SHEN T AO, et al. Phase and frequency matching based phase difference estimation method for non-integer periods sampling signals [J]. Journal of Vibration and Shock, 2017, 36(6): 7-10, 37.

- [31] 林顺富, 田二伟, 符杨, 等. 基于信息熵分段聚合近似和谱聚类的负荷分类方法 [J]. 中国电机工程学报, 2017, 37(8): 2242-2253.
LIN SH F, TIAN ER W, FU Y, et al. Power load classification method based on information entropy piecewise aggregate approximation and spectral clustering [J]. Proceedings of the CSEE, 2017, 37(8): 2242-2253.

作者简介



李茜, 2011 年于华南理工大学获得学士学位, 2016 年于四川大学获得博士学位, 现为西南石油大学电气信息学院副教授, 主要研究方向为能源系统智能感知、综合能源系统运行与控制。

E-mail: swpuliqian@163.com

Li Qian received her B. Sc. degree from South China University of Technology in 2011 and Ph. D. degree from Sichuan University in 2016, respectively. Now she is an associate professor in School of Electric Engineering and Information, Southwest Petroleum University. Her main research interests include intelligent perception of energy system, operation and control of integrated energy system.