

基于 Fractal 理论的钻机电控系统随机噪声隔离方法

刘鑫, 魏立鑫, 张峰

(天水电气传动研究所集团有限公司, 甘肃 天水 741000)

摘要:针对石油钻机电气传动系统控制信号受多源随机噪声干扰导致执行器输出不稳定的问题,提出一种基于 Fractal 理论的钻机电控系统随机噪声隔离方法。由于晶闸管及补偿电容的投切、供电电源阻抗高等多源随机因素影响,致使变频器的频率、电压、脉冲等信号存在复合噪声污染,利用 Fractal 理论非线性特征分析能力,剔除高斯噪声冗余信息,可使信号在低信噪比下提高识别率。同时结合 Welch 分析功率谱密度,从信号局部特征提取分形维数参数以反应全局趋势,最终实现信号的有效降噪。实验表明,该方法能够准确计算信号的分形维数,降低噪声隔离误差。

关键词:变频调速系统;多源随机噪声;Fractal 理论;Welch 方法

中图分类号:TP391.9 **文献标识码:**A **DOI:**10.19457/j.1001-2095.dqed26512

Random Noise Isolation Method for Drilling Rig Electronic Control System Based on Fractal Theory

LIU Xin, WEI Lixin, ZHANG Feng

(Tianshui Electric Transmission Research Institute Group Co., Ltd., Tianshui 741000, Gansu, China)

Abstract: In addressing the issue of the electrical drive system of oil drilling rigs encountering instability in actuator output due to interference from multi-source random noise, a novel approach was proposed. The Fractal theory was utilized to isolate random noise in the drilling rig electrical control system. The presence of composite noise pollution in the frequency, voltage, pulse, and other signals of the frequency converter, attributable to factors such as thyristor and compensation capacitor casting, power supply impedance, and other multi-source random noise, necessitates the employment of fractal theory's nonlinear feature analysis capability. This capability enables the elimination of redundant information present in Gaussian noise, thereby enhancing the signal's low signal-to-noise ratio and improving the recognition rate. Concurrently, in conjunction with Welch analysis of the power spectral density, the fractal dimension parameter was extracted from the local features of the signal to respond to the global trend, thereby achieving effective noise reduction of the signal. Experimental findings demonstrate the efficacy of this method in accurately calculating the fractal dimension of the signal and reducing noise isolation error.

Key words: variable frequency drive (VFD); multi-source random noise; Fractal theory; Welch method

石油钻机电气传动系统主要由三相电机、变频器、变速器和机械传动构件组成^[1-2],通过人机交互界面(human machine interface, HMI)发送远控命令,利用 PROFINET 现场总线网络,传输开关量、脉冲、高频等信号控制变频器,以驱动绞车电机、泥浆泵电机、顶驱电机、自动送钻电机等设备,具体结构如图 1 所示。由于石油钻机运行环境恶劣:环境温度 $-20\text{ }^{\circ}\text{C}\sim+55\text{ }^{\circ}\text{C}$ 、海拔小于 $1\,500\text{ m}$ 、湿度达 95% ,对于石油钻机变频驱动系统

(variable frequency drive, VFD)从进线端输入交流 600 V 电压,经过整流单元将电压转化为直流 810 V ,并输送至公共直流母线上,再由逆变单元转换为频率 $0\sim 150\text{ Hz}$ 、电压 $0\sim 600\text{ V}$ 交流电,以一拖一方式控制三相交流电机^[3-4]。在 VFD 系统内部,整流电路与逆变电路采用脉宽调制技术(pulse width modulation, PWM)控制方式,导致输出信号含有大量高次谐波,产生的电磁干扰会引起电源波形畸变,从而影响驱动对象控制精度;

作者简介:刘鑫(1981—),男,本科,高级工程师,主要研究方向为石油钻机电气传动系统,Email: haiyang21cn@sina.com

通讯作者:魏立鑫(1994—),男,硕士研究生,工程师,主要研究方向为石油钻机电控系统数据挖掘、数据分析,

Email: m18363862647@163.com

在VFD系统外部,晶闸管、补偿电容等设备换相操作会导致变频器输入电源受到干扰,同时当外部控制信号受到干扰后,也会导致变频器驱动电机产生振动、发热等现象。因此,整个控制过程容易受到内部和外部多种因素影响,致使控制信号含有大量噪声,最终对驱动设备造成不良的影响。

在工程应用中,常见的时域滤波算法有均值滤波、高斯滤波、低通/高通滤波算法等,且主流降噪方法以降噪声效果为主,并不考虑计算效率,适用场景简单。如均值滤波算法对高斯噪声效果

显著,但无法处理脉冲噪声,并且信号窗口大小需要经验调整;高斯滤波算法对高频噪声抑制效果显著,但对参数选择敏感,实时性不能保证;低通/高通滤波算法适用于周期性噪声处理,但需要精确截取频率段,易导致相位失真。因此,多源随机噪声的处理需要根据应用场景及系统资源选择最佳组合方案。

综上所述,为了满足石油钻机电控系统控制稳定、可靠运行的要求,本文提出一种高效的降噪方法,避免传统降噪方法的信号失真、硬件依赖、非线性噪声处理不足等缺陷。

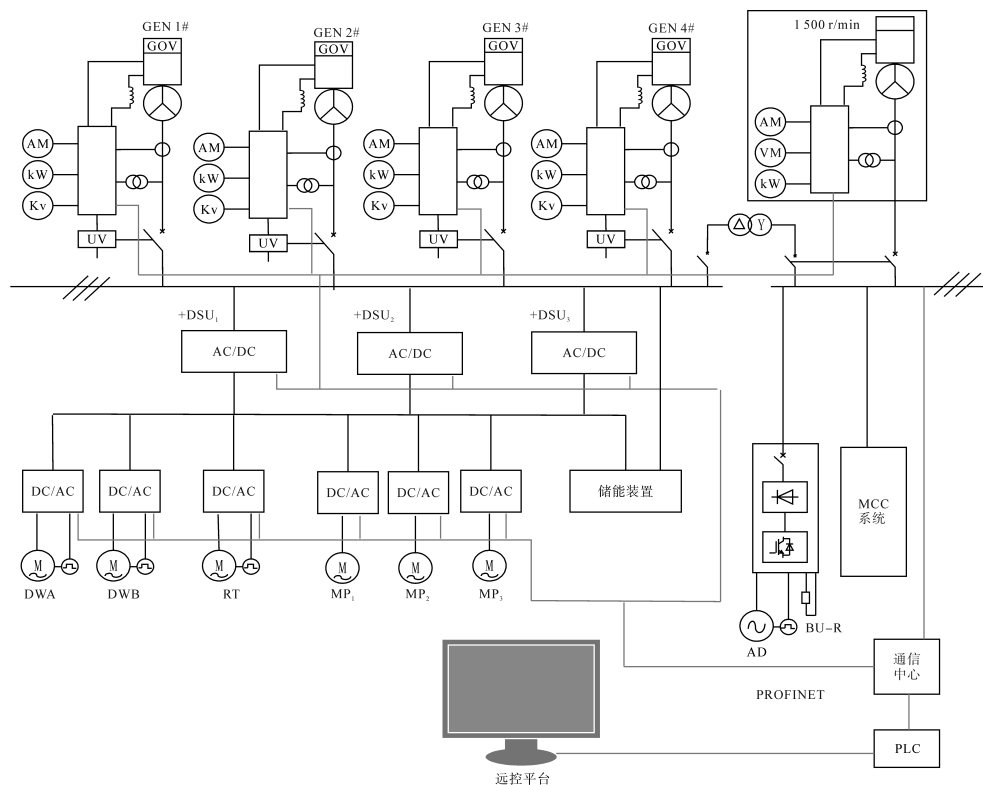


图1 石油钻机传动驱动系统拓扑

Fig.1 Oil rig transmission drive system topology

1 Fractal理论

Fractal理论是度量不规则几何空间有效性与复杂度的数学方法,通过描述信号结构属性,能够实现噪声信号的分类与识别^[5-7]。常见的Fractal方法包括相似维数、Kolmogorov容量维数、Box-counting维数、Information维数及Correlation维数,其中Box-counting维数在信号处理领域应用广泛,能够检测低信噪比的信号点,且算法简单。Box-counting维数经常被用作描述信号的几何尺度信息,而Information维数用于量化数据点的空间分布程度^[8-10]。

假设 F 为 R^n 中任意非空子集,对 $\forall \delta > 0$, $\exists N(F) < \delta$ 使得覆盖集合的数值函数有最小值,则集合 F 的Box-counting维数定义如下式所示:

$$Dim = \lim_{\delta \rightarrow 0} \left[\frac{N(F)}{\log(1/\delta)} \right] \quad (1)$$

式中: δ 为立方体边长; $N(F)$ 为关于 δ 的覆盖集合 F 数目,即盒子数。

在Box-counting定义中, R^n 空间覆盖集合可以映射为边长为 δ 的立方体,用于确定被测信号的形态、结构等信息。Information维数反映 F 集合空间分布情况,在边长为 δ 的立方体下测量的信息量,如下式所示:

$$I(\delta) = \sum_{i=1}^{N(F)} P_i \log \frac{1}{P_i} \quad (2)$$

式中: P_i 为集合 F 在第 i 个立方体中的概率, 当每个立方体的 P_i 相等时, 则 $P_i = 1/N(F)$, 故 $I(\delta) = \ln N(F)$ 。

当连续时间信号函数为 $x(t)$ 时, 对连续信号离散化 $X = \{x(t_1), x(t_2), \dots, x(t_n)\}$, 设离散信号点之间的间隔为 δ_i , 因此, 每个信号对应的时间点 t_i 表示为下式:

$$t_i = \delta_i \cdot i \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (3)$$

式中: i 为离散化后的信号点; δ_i 为信号 A/D 转换后的采样间隔。

每个时间点对应信号映射关系为 $x(i) = x(t_i)$, 含有 $|x(i+1) - x(i)|/\delta$ 个立方体, 因此, 整个波形被边长为 δ 的立方体所覆盖。如果 δ 取值足够小, 则时间信号 $x(t)$ 波形的 Fractal 维数如下式所示:

$$\log N(F) = -Dim \cdot \log \delta + \log C \quad (4)$$

式中: $\log C$ 为调节常数。

原则上 i 取值趋近于 ∞ , 考虑信号处理的计算量与 $x(t)$ 的实变性, i 的取值范围为 $[1, 128]$ 。

为了最大程度表征信号特征间的模式信息, 预处理信号后, 提取对噪声敏感的特征, 消除载波频率的影响, 运用中值滤波进行降噪, 而 Box-counting 维数与 Information 维数的特征向量如下式所示:

$$T = \left[\frac{\log N(F) - \log N(2F)}{\log 2}, \frac{I(\delta) - I(2\delta)}{\log 2} \right] \quad (5)$$

假设当前 t_i 时刻接受信号为 $x(t_i) = s_i + \varepsilon_i$, 其中 s_i 为原始信号, ε_i 为噪声信号, s_i 与 ε_i 相互独立分布, 服从均值为 0、方差为 $\sigma^2/2$ 的高斯分布。因此, P_i 可以表示为下式:

$$P_i = \frac{\sum_{j=1}^n H[\delta - |x(t_i) - x(t_j)|]}{N(F)} \quad (6)$$

式中: $H(\cdot)$ 为阶跃函数。

令 $f(x_i)$ 服从高斯分布, 如 $f(x_i) = |s_i - s_j + \varepsilon_i - \varepsilon_j|$, 则 $f(x_i)$ 的密度函数如下式所示:

$$f(x_i) = \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} \left[e^{-\frac{(x_i - \mu)^2}{2\sigma^2}} + e^{-\frac{(x_i + \mu)^2}{2\sigma^2}} \right] \quad (7)$$

式中: μ 为高斯分布均值; σ^2 为高斯分布方差。

综上所述, 通过 Fractal 理论在信号传输领域的数学推导可知, 传输信号的不规则程度与调制类型显著相关, 在特定信噪比范围内, Fractal 方法表征的分形特征具有噪声不敏感特性, 使其可

有效提升信号识别准确率。

2 Welch 法估计功率谱密度

功率谱密度用于描述频域信号的分布情况, 将时域信号按照快速傅里叶变换 (fast Fourier transform, FFT) 获取频域信号, 采用 Welch 功率谱估计法进行非参数化处理, 通过对信号进行分段加窗处理, 分别计算各子段的功率谱密度估计值, 最后综合所有信号段估计值进行平均值计算最终得到结果^[11-15]。由于噪声本身属于非平稳随机过程, 难以建立精确的数学模型进行描述, 需借助功率谱密度分析实现特征提取, 当信号分布特征未知时, 非参数化功率谱估计方法的计算效率和估计精度更高^[16-20]。

根据统计学理论, 对长度为 M 原始信号离散化 $X = \{x(t_1), x(t_2), \dots, x(t_n)\}$, 并分段处理 L , 每段数据长度为 $N = M/L$, 将样本数据进行 Fourier 变换, 估计随机序列功率谱, 如下两式所示:

$$\begin{aligned} S'(k) &= \frac{1}{N} |x(k)|^2 \\ &= \frac{1}{N} |FFT[x(t_k)]|^2 \quad k = 1, 2, \dots, n-1 \end{aligned} \quad (8)$$

$$S'(f) = \frac{1}{N} |x(f)|^2 \quad (9)$$

式中: $FFT[x(t_k)]$ 为对样本信号进行 Fourier 变换; $x(f)$ 为变换后的频域信号; N 为随机噪声信号的长度。

由于 Fourier 变换是一种估计值, 不能有效避免误差, 为使功率谱密度估计平滑, 采用窗函数, 对每段信号加入窗函数 $w(n)$, 合适的窗口能够提高频谱的分辨率, 增加频峰宽度, 如下式所示:

$$I(w) = \frac{1}{U} \left| \sum_{i=0}^{n-1} x(t_i) w(n) e^{-j\omega n} \right|^2 \quad (10)$$

式中: U 为归一化因子, 即功率谱的渐进无偏估计。

每一段信号自相关, 功率谱密度估计如下式所示:

$$P_{xx}(e^{j\omega}) = \frac{1}{L} \sum_{i=1}^L I_i(w) \quad (11)$$

在工业控制领域的数字信号处理中, 功率谱密度估计主要应用于频谱分析、频带分配等场景, 该方法不仅对含基波分量的非线性系统信号具有显著的优势, 同时对含有高阶谐波信号的估计精度也较好。

3 基于Fractal理论的噪声隔离方法

石油钻机电控系统驱动设备过程中,受电机振动、电磁干扰等影响,具体表现为有效信号与噪声频谱的重叠,以及动态工况下信号呈现时变特性,这些因素导致传统线性滤波方法效果有限。基于Fractal理论的滤波算法能够通过分形维数,量化噪声与信号的非线性结构差异,有效区分频谱重叠与信号区域,避免过度滤波引起的信号缺失。因此,在噪声识别与隔离的算法设计中,研究结合Fractal理论与小波变换理论的混合滤波算法具有一定的工程应用意义,基于Fractal理论的噪声隔离方法流程图如图2所示。

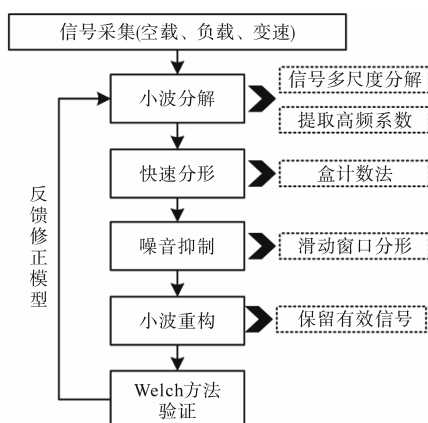


图2 基于Fractal理论的噪声隔离方法流程图

Fig.2 Flow chart of noise isolation method based on Fractal theory

图2展示了在交流变频钻机中,采集空载、负载、变速工况下的控制信号,包含噪声干扰样本。运用Fourier变换进行小波分解,为了量化噪声与有效信号的结构差异,采用盒计数法快速分形,利用滑动窗口的时变性,进行动态更新,实现噪声抑制的目的,最后重新构建有效信号结构,达到噪声与有效信号的隔离。为了进一步验证算法的可行性,利用Welch方法,在不同重构信号长度下,进行多样交叉试验对比,从而验证噪声隔离算法的效果。

4 实验结果与分析

实验仿真软件环境:Matlab 2014a /Simulink, Windows10专业版;硬件环境:ZJ70DB VFD系统、调试机处理器Intel(R)Core(TM)i7 2.3 GHz、硬盘1 TB+ 512GSSD。

目前,石油钻机以ZJ70DB电控系统为主,钻井深度达7 000 m,VFD系统主要包括3台1 500 kW整流单元、2台800 kW交流变频器、1台1 200

kW交流变频器、1台1 000 kW逆变器、1台1 200 kW逆变器。主控对象为绞车、泥浆泵、转盘,主控方式采用2路PLC冷备用,通过PLC采集电机运行参数、转速等信号,判断设备运行工况,利用稳定的控制信号,在远控HMI系统反馈显示电压、电流、频率、速度等数据,实现高效的钻井作业。传输信号用DPO3034 300MHz 2.5 GS/s示波器实时监测并记录。

原始信号如图3所示,采集后的信息呈现非线性规律,对记录的传输信号值做归一化处理,信号最大长度 M 为128,分段数量 L 为32,添加幅值为0.4的高斯白噪声。

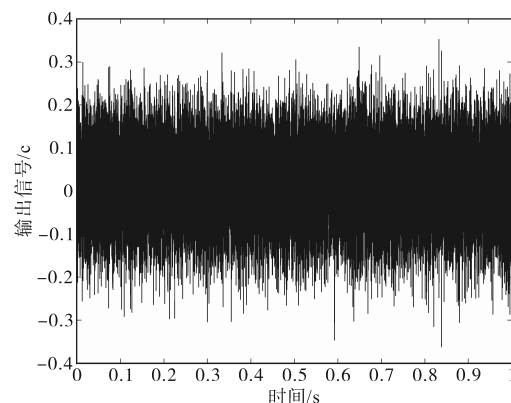


图3 原始信号分布

Fig.3 Raw signal distribution

Fractal算法的盒计数法需要通过不同分段数量 L 对信号进行划分,利用盒计数法,对信号进行快速分形,其主要目的反映信号的复杂度和空间能力,图4展示了分形后的数据形态,分形维数越高,则信号越复杂、不规则;反之,信号越平滑。此时分形维数为1.304 1,则每段信号的频率分辨率为400,在刻画随机噪声的多尺度特性时,与傅里叶变换形成互补,以便获取噪声与有效信号的特征。

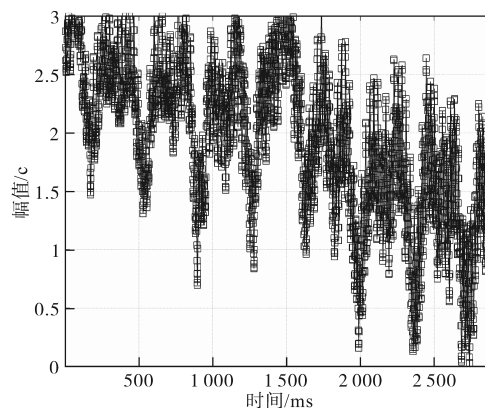


图4 分段信号分布

Fig.4 Segmented signal distribution

为了满足分形维数计算的对数线性拟合需求,常取值2的整数次幂,以保证尺度间距的均匀性,若分段数的取值不合理,会导致信号分辨率不足的问题。对比信号不同分段值对分形维数稳定性与降噪性能的影响,确定最优取值范围,具体结果如表1所示。

表1 分形维数敏感度分析
Tab.1 Fractal sensitivity analysis

分段数	Fractal标准差	SNR/dB	计算时间/s
16	0.09	7.5	0.8
32	0.15	9.2	1.6
64	0.07	10.6	2.4
128	0.10	10.5	5.3

如表1所示,分段数为64时,标准差最小,说明分形维数计算越稳定,而分段数为16时的标准差值则反映出信号内混有强随机噪声;当分段数为64时,与分段数为128的信噪比值接近,说明该值已达到饱和,但计算时间要比后者少50%多。因此,分段数为64是精度与效率的平衡分段点。

Welch方法在分形维数降噪过程中提供趋势

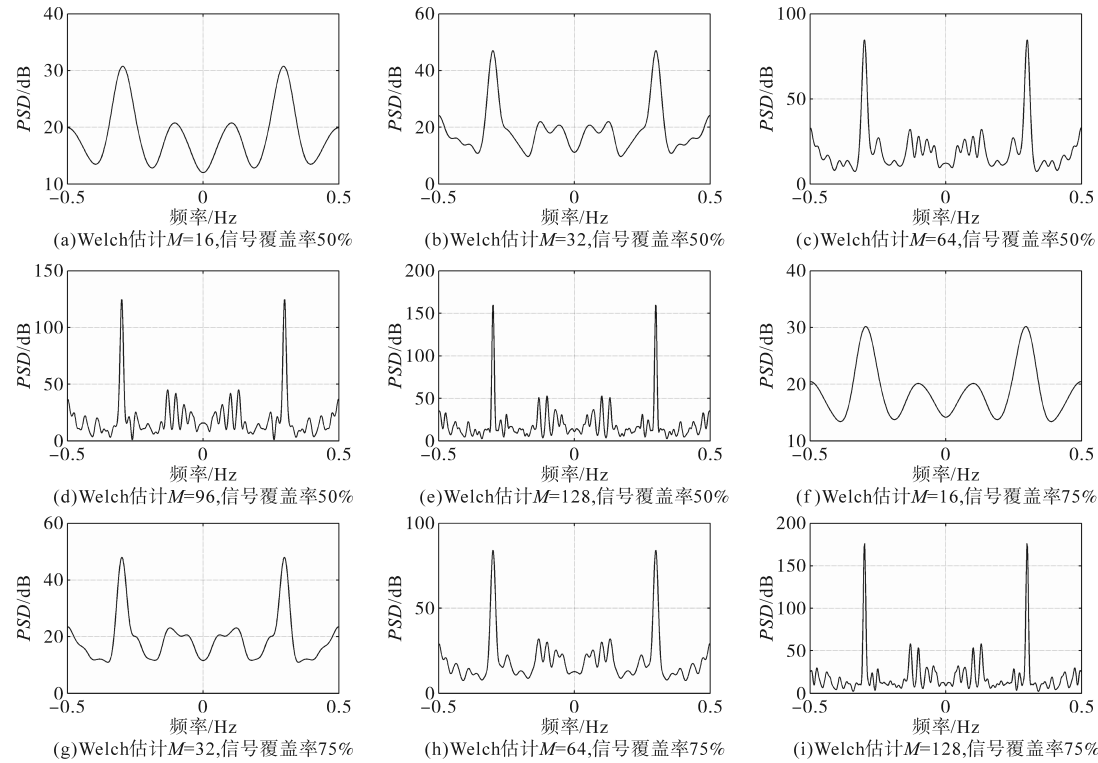


图5 Welch估计功率谱密度

Fig.5 Welch estimates the power spectral density

表2 算法对比

Tab.2 Algorithm comparison

算法	最优参数	Δ SNR/dB	失真率/%
均值滤波	窗口5	7.1±1.5	8.3
最小均方差滤波	步长0.05	9.5±2.0	5.7
Fractal	分段64,覆盖率50%	11.0±1.8	4.2

分析能力,通过覆盖率调整优化分段信息的连续能力,从而增加计算的稳定性,如图5所示。图5表示不同信号长度下的Welch功率谱密度,在信号覆盖率为50%下,当 $M=16$ 且 $L=32$ 时,曲线所包含的标准信号与噪声信号信息量较少,局部特征不能反应全局趋势;当 $M=32$ 且 $L=32$ 时,不能体现信号分布情况;当 $M=64$ 且 $L=32$ 时,基本可以反应出图3所示的信号趋势;当 $M=96$ 且 $L=32$ 时,信号分形数量增加,导致方差增大,过度反映信号趋势;当 $M=128$ 且 $L=32$ 时,已无法辨别信号基本特征,功率谱密度估计值以尖峰形式呈现。在信号覆盖率为75%下,则功率谱密度增大,方差也随着内部信息量增大而增大,导致频谱增加。因此,噪声与信号覆盖率为50%, $M=64$ 结果最优,能反映信号特征的稳定性及可靠性。上述实验已验证Fractal算法的有效性,但缺乏优越性。因此,对比均值滤波、最小均方滤波算法,以验证该算法的优越性, Δ SNR表示降噪后的信噪比与原始信号信噪比间的差值,如表2所示。

从表2可知,分形维数 Δ SNR为11.0显著优于均值滤波、最小均方差滤波,失真率也最低,表明该算法能更好地保留信号特征。

为了验证Welch估计功率谱密度的有效性,结合BT法、周期图法,统计比较PSD的方差值,

方差越小信号越稳定。经过实验验证, Welch法方差中值为3.381 4, BT法方差中值为4.646 5, 周期法方差中值为24.702 2, 如图6所示。

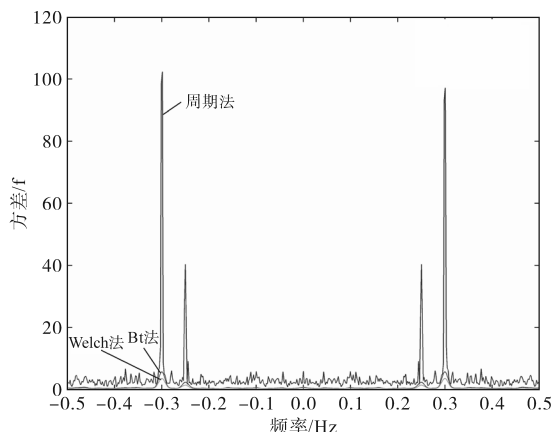


图6 不同方法间的方差比较

Fig.6 Comparison of variance between methods

综上所述,通过模拟现场实际负载工况,采用Fourier变换法对传输信号进行频域分析,并基于Welch功率谱估计法实施分段加窗处理,从统计结果可知,本文研究的算法在该信号降噪处理方面具备良好的性能。

5 结论

针对石油钻机VFD系统在多源随机噪声干扰下信号失真的问题,提出一种基于Fractal理论的钻机电控系统随机噪声隔离方法,利用硬件设施模拟现场负载环境,结合Welch功率谱估计法分析信号频域特征,并利用Fractal方法量化噪声与信号间非线性差异。实验数据表明,该方法能有效实现传输信号的降噪,满足工况需求。因此,本理论具有一定的工程应用前景。

参考文献

- [1] 石建龙,魏立鑫.多重自适应PID控制的负荷自动送钻策略[J].制造业自动化,2023,45(8):132-135.
SHI Jianlong, WEI Lixin. Load automatic drilling strategy based on multi-adaptive PID control[J]. Manufacturing Automation, 2023, 45(8): 132-135.
- [2] 刘浩,魏立鑫,尤立春. Kalman滤波算法在海洋钻机中控制信号的优化[J]. 电气传动, 2023, 53(11): 19-24.
LIU Hao, WEI Lixin, YOU Lichun. Optimization of control signal for Kalman filter algorithm in marine drilling rig[J]. Electric Drive, 2023, 53(11): 19-24.
- [3] FENG Yanwei, WEI Lixin. Fuzzy control of drilling rig winch motor based on SAWS-SSA algorithm[J]. IEEE Access, 2023, 11: 136496-136506.
- [4] 温崇,张新春,杨盛成.石油钻机用正压通风型防爆变频调速三相异步电动机开发[J]. 电气防爆, 2021(5): 14-19.
WEN Chong, ZHANG Xinchun, YANG Shengcheng. Design of pressurized ventilation explosion-proof frequency control three-phase asynchronous motor used in oil and gas drilling equipment[J]. Electric Explosion Protection, 2021(5): 14-19.
- [5] LI Shuguang, CAO Wuyang, CAO Xiaolong. Research on multi-mode auto-drilling technology of AC variable frequency rig[C]// 2020 7th International Conference on Information Science and Control Engineering (ICISCE), Changsha, China, 2020: 2125-2129.
- [6] 刘凤刚,刘明亮.石油钻机变频器故障诊断方法研究[J]. 中国设备工程, 2023(11): 161-163.
LIU Fenggang, LIU Mingliang. Research on fault diagnosis method of oil drilling rig inverter[J]. China Plant Engineering, 2023(11): 161-163.
- [7] 武静,饶子玉,沈宇驰,等.利用分形维数和BP神经网络实现超声导波缺陷分类的实验研究[J]. 机械强度, 2024, 46(2): 328-338.
WU Jing, RAO Ziyu, SHEN Yuchi, et al. Experimental study of ultrasonic guided wave defect classification based on fractional dimension and BP neural network[J]. Journal of Mechanical Strength, 2024, 46(2): 328-338.
- [8] 余晓玫,高飞,李文娟,等.面向车联网的激光雷达通信信号波形模式识别[J]. 激光杂志, 2023, 44(9): 166-171.
YU Xiaomei, GAO Fei, LI Wenjuan, et al. Pattern recognition of lidar communication signal waveform for vehicle networking[J]. Laser Journal, 2023, 44(9): 166-171.
- [9] 金吉,王斌,喻敏,等.基于分形特征的自适应EEMD及其在风功率预测中的应用[J]. 太阳能学报, 2023, 44(5): 416-424.
JIN Ji, WANG Bin, YU Min, et al. Adaptive EEMD based on fractal feature and its application in wind power prediction[J]. Acta Energetica Solaris Sinica, 2023, 44(5): 416-424.
- [10] 曾志.复杂电磁环境下无线通信信号盲估计技术研究[D]. 北京:北京邮电大学, 2023.
ZENG Zhi. Research on blind estimation techniques for wireless communication signals in complex electromagnetic environments[D]. Beijing: Beijing University of Posts and Telecommunications, 2023.
- [11] 胡非,高红亮,唐勇.电力变压器噪声及其传播特性研究[J]. 湖北师范大学学报(自然科学版), 2023, 43(4): 1-7.
HU Fei, GAO Hongliang, TANG Yong. Study on noise and transmission characteristics of power transformer[J]. Journal of Hubei Normal University (Natural Science), 2023, 43(4): 1-7.
- [12] 程倩.基于数字化直接线性相位比对的相位噪声测量[D]. 西安:西安电子科技大学, 2022.
CHENG Qian. Phase noise measurement based on digitized direct linear phase ratio[D]. Xi'an: Xidian University, 2022.
- [13] 李雪艳,官宇航,罗铭涛,等.基于Welch法的协方差随机子空间方法的模态参数识别[J]. 力学学报, 2022, 54(10): 2850-2860.

- LI Xueyan, GUAN Yuhang, LUO Mingtao, et al. Modal parameter identification by covariance stochastic subspace method based on Welch's method[J]. Chinese Journal of Theoretical and Applied Mechanics, 2022, 54(10): 2850-2860.
- [14] 杨婧, 程乃平, 倪淑燕. Welch算法在弱信号检测中的性能分析[J]. 计算机仿真, 2020, 37(5): 235-240.
- YANG Jing, CHENG Naiping, NI Shuyan. Performance analysis of Welch algorithm in weak signal detection[J]. Computer Simulation, 2020, 37(5): 235-240.
- [15] 尹康达, 李小军, 张晓刚, 等. 台基噪声功率谱估计中的Welch参数选择[J]. 地震地磁观测与研究, 2023, 44(4): 63-67.
- YIN Kangda, LI Xiaojun, ZHANG Xiaogang, et al. Selection of Welch parameters in seismic station noise power spectrum estimation[J]. Seismological and Geomagnetic Observation and Research, 2023, 44(4): 63-67.
- [16] 李金杰, 邹国锋, 魏良玉, 等. 基于功率谱密度与随机配置网络的低压串联电弧故障检测[J]. 科学技术与工程, 2023, 23(34): 587-595.
- LI Jinjie, ZOU Guofeng, WEI Liangyu, et al. Low-voltage series arc fault detection based on power spectral density and stochastic configuration network[J]. Science Technology and Engineering, 2023, 23(34): 587-595.
- [17] 张慧彬. 基于谐波合成法模拟的脉动风速功率谱密度和相关性分析[J]. 运输经理世界, 2023(2): 103-105.
- ZHANG Huibin. Power spectral density and correlation analysis of pulsating wind speed based on simulation by harmonic synthesis method[J]. Transport Business China, 2023(2): 103-105.
- [18] 栾某德, 甘德强, 李振垚, 等. 基于模型响应功率谱密度预测的强迫振荡扰动源设备定位法[J]. 电力系统自动化, 2022, 46(22): 111-119.
- LUAN Moude, GAN Deqiang, LI Zhenyao, et al. Location method for forced oscillation source device based on power spectral density prediction of model responses[J]. Automation of Electric Power Systems, 2022, 46(22): 111-119.
- [19] 孟庆生, 李杨, 王文静, 等. 影响随机噪声CCA法勘探的关键因素试验研究[J]. 中国海洋大学学报: 自然科学版, 2023, 53(6): 134-141.
- MENG Qingsheng, LI Yang, WANG Wenjing, et al. Experimental study on key factors influencing ambient noise CCA prospecting method[J]. Periodical of Ocean University of China, 2023, 53(6): 134-141.
- [20] 孙明阳, 和阳, 邱先群, 等. 随机频率三角波注入永磁同步电机无位置传感器降噪控制[J]. 电工技术学报, 2023, 38(6): 1460-1471.
- SUN Mingyang, HE Yang, QIU Xianqun, et al. Random-frequency triangular wave injection based sensorless control of PMSM drives for audible noise reduction[J]. Transactions of China Electrotechnical Society, 2023, 38(6): 1460-1471.

收稿日期: 2025-03-17

修改稿日期: 2025-04-11

(上接第56页)

- [17] 臧佳, 田凯, 曹冰. 一种基于FPGA的PMU测量单元的设计[J]. 电工技术, 2023(21): 111-112.
- ZANG Jia, TIAN Kai, CAO Bing. Design of FPGA-based phasor measurement unit[J]. Electric Engineering, 2023(21): 111-112.
- [18] MAO M, XU J, WU Z, et al. A multiarea state estimation for distribution networks under mixed measurement environment[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2022, 18(6): 3620-3629.
- [19] 姚霆宇, 余学祥, 韩雨辰, 等. 基于改进Fast-DTW的多维地磁序列匹配算法研究[J]. 现代信息科技, 2024, 8(8): 89-92, 96.
- YAO Tingyu, YU Xuexiang, HAN Yuchen, et al. Research on multidimensional geomagnetic sequence matching algorithm based on improved fast-DTW[J]. Modern Information Technology, 2024, 8(8): 89-92, 96.
- [20] FARRANCE I, FRENKEL R. Uncertainty of measurement: a review of the rules for calculating uncertainty components through functional relationships[J]. The Clinical Biochemist Reviews, 2012, 33(2): 49-75.
- [21] PAU M, PEGORARO P A. WLS-based state estimation for unobservable distribution grids through allocation factors evaluation[J]. IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2024, 73: 1-13.
- [22] CHUGHTAI A H, AKRAM U, TAHIR M, et al. Dynamic state estimation in the presence of sensor outliers using MAP-based EKF[J]. IEEE Sensors Letters, 2020, 4(4): 1-4.
- [23] HU P, GAO W, LI Y, et al. Anomaly detection and state correction in smart grid using EKF and data compensation techniques[J]. IEEE Sensors Journal, 2024, 24(8): 12995-13009.
- [24] BARAN M E, WU F F. Network reconfiguration in distribution systems for loss reduction and load balancing[J]. IEEE Transactions on Power Delivery, 1989, 4(2): 1401-1407.
- [25] 王竞才, 李琰, 徐天奇. 基于扩展卡尔曼滤波的智能电网虚假数据检测[J]. 智慧电力, 2022, 50(3): 50-56.
- WANG Jingcai, LI Yan, XU Tianqi. Detection of false data in smart grid based on extended Kalman filter[J]. Smart Power, 2022, 50(3): 50-56.

收稿日期: 2024-12-03

修改稿日期: 2025-02-12