

# 高压断路器振动信号的指数衰减振荡波建模方法

李庆民<sup>1</sup>, 王冠<sup>1</sup>, 徐国政<sup>2</sup>, 钱家骊<sup>2</sup>

(1. 山东大学电气工程学院, 山东 济南 250061; 2. 清华大学电机工程与应用电子技术系, 北京 100084)

## Modelling Method for Vibration Signals of High Voltage Circuit Breakers Based on Exponentially Damped Oscillatory Waves

LI Qing-min<sup>1</sup>, WANG Guan<sup>1</sup>, XU Guo-zheng<sup>2</sup>, QIAN Jia-li<sup>2</sup>

(1. School of Electrical Engineering, Shandong University, Ji'nan 250061, China;  
2. Dept. of Electrical Engineering, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

**摘要:** 分析了常规的指数衰减振荡波建模方法的实质和不足,提出了基于断路器振动信号传播中畸变现象的改进型建模方法。在频域内建立了自学习的优化建模策略,并通过实例分析初步验证了该优化策略的正确性和可行性。该建模方法为高压断路器机械状态的监测与诊断提供了新的理论依据和技术手段。

**关键词:** 高压断路器; 机械振动; 畸变; 建模; 指数衰减振荡波  
**中图分类号:** TM56 **文献标识码:** A

**Abstract:** The essence and deficiency of the conventional modelling method based on exponentially damped oscillatory waves are analyzed, and an improved modelling method based on the distortion phenomenon in propagation of the vibration signals of circuit breakers is proposed. A self-study optimization modelling strategy is set up in the frequency domain, and its validity and feasibility are preliminarily verified by an example. The modelling method shows a new theoretical basis and techniques for monitoring and diagnosing of the mechanical condition of high voltage circuit breakers.

**Key words:** high voltage circuit breaker; mechanical vibration; distortion; modeling; exponentially damped oscillatory wave

## 1 引言

国内外的统计资料表明,机械故障是高压开关故障的主要原因<sup>[1,2]</sup>。利用状态监测技术可及时发现机械故障的隐患,提高设备和系统的运行可靠性。

作为一种“外部监测与诊断”方法,基于高压开关机械振动信号的监测与诊断技术,还处于研究和发展的过程中,其中最关键的是如何采用先进的信号处理方法,从测得的机械振动信号中准确地提取和重构高压开关的各个分立振动事件,以有效辨识开关

的机械状态,从而达到故障诊断的目的。Stokes 等人提出了一种考虑有时延的指数衰减振荡波参数估计的方法<sup>[3]</sup>,来重构高压开关的机械振动源信号,后又经其他学者<sup>[4]</sup>修改补充,但该方法在理论和实际应用中仍存在许多局限和缺陷。笔者在分析前人工作的基础上,根据机械振动波传播中的物理特性,提出了基于振动波传播中畸变现象的指数衰减振荡波建模方法,并给出振荡波参数辨识的频域自学习策略。

## 2 时域指数衰减振荡波积分法评介

高压开关的机械振动信号  $Y(t)$  由一系列子振动事件组成,可用一组(共  $n$  个)时域中指数衰减的振荡子波描述<sup>[3]</sup>:

$$Y(t) = \sum_{i=1}^n A_i e^{-\alpha_i(t-t_i)} [\sin(\omega_i(t-t_i))] u(t-t_i) \quad (1)$$

其中:第  $i$  个振荡子波的主振荡角频率、振荡幅度、衰减系数和起始时刻分别为  $\omega_i, A_i, \alpha_i, t_i$ 。

积分法的实质是:对被测信号序列取不同时域长度进行 Fourier 变换,求取其在  $\omega_i$  处的分量,累积形成一个新的时域序列后进行最小二乘拟合。Stokes 提出的积分法使用的是近似公式,适用于  $\omega_i$  和  $\alpha_i$  都较大的情况,而当  $\omega_i$  和  $\alpha_i$  比较小时,误差较大。文[4]改进了 Stokes 的方法,可在理论上消除积分法的误差项,但应用时采用了先滤波后拟合的方法,会带来更大的误差,且信号分解的子波有时太多(250 个),丧失了其物理意义和应用价值。笔者经过分析发现积分法具有如下不足:①积分结果是各个振荡子波在  $\omega_i$  处的总贡献,因此拟合得到的振荡子波可能与实际的振动事件没有物理联系。特别是当两个振动事件的主振荡频率接近时,更是难以区分。②并不能保证拟合参数的非线性方程组一定有代数解。③未考虑不同频率振动波在传播中的畸变现象。

### 3 基于畸变现象的指数衰减振荡波建模

#### 3.1 振动波传播中的畸变现象

不同频率的振动波在媒质中传播时会发生畸变现象,在力学上称为几何弥散(Geometrical Scatter),即不同频率波的传播相速度不同,经过一定的传播距离后,其幅频特性基本不变,但相频特性发生非线性改变,最终造成整个振动波形的畸变。文[5]在研究高压开关的振动信号传播规律时,通过实验证实了这一物理特性。角频率为 $\omega$ 的频率分量传播造成的相移为: $\Delta\varphi(\omega)=-K\sqrt{\omega}$ 。其中: $K$ 为不依赖于信号频率的常数。若此时再利用前述的积分法进行拟合,则无法得到真实的振动事件和相关参数,因此建模时必须考虑振动波的相频特性变化。

#### 3.2 新的建模方法

##### 3.2.1 模型结构

设开关的机械振源由 $n$ 个指数衰减振动子波组成(数学形式见式(1)),每个子波传播后都因相频特性的非线性变化而发生畸变,总的畸变信号用 $Y(t)$ 表示,等效的传递函数模型结构见图1。则输入和输出在时域、频域的关系可分别写成:

$$Y(t) = \sum_{i=1}^n x_i(t) \otimes h_i(t); \quad Y(\omega) = \sum_{i=1}^n x_i(\omega) h_i(\omega)$$

其中: $h_i(\omega)$ 为等效的相频特性畸变环节的传递函数。

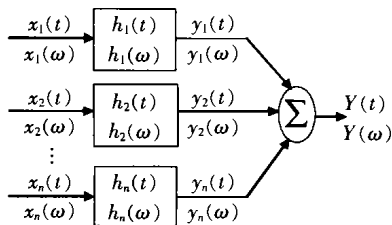


图1 振动子波畸变传播合成模型

##### 3.2.2 优化策略

由于相频特性变化的非线性,若采用时域建模在数学上不易表达,因此下述建模方法将在频域内进行,即:采用优化算法,让待求的各个振动子波发生畸变后的 Fourier 变换总和去逼近测量得到的振动信号的 Fourier 变换(包括实部与虚部)。由第 $i$ 条支路的表达式:

$$x_i(t) = A_i e^{-\alpha_i(t-t_i)} [\sin(\omega_i(t-t_i))] u(t-t_i)$$

$$x_i(\omega) = \frac{j}{2} A_i e^{-j\omega t_i} \cdot \left[ \frac{1}{\alpha_i + j(\omega + \omega_i)} - \frac{1}{\alpha_i + j(\omega - \omega_i)} \right]$$

$$h_i(\omega) = e^{-jK_i \sqrt{\omega}}$$

整理后得到如下式子:

$$Y(\omega) = Y_R(\omega) + jY_I(\omega) = \sum_{i=1}^n x_i(\omega) h_i(\omega)$$

其中:

$$Y_R(\omega) = \sum_{i=1}^n \frac{A_i}{2} [Q \cos(\omega t_i + K_i \sqrt{\omega}) + P \sin(\omega t_i + K_i \sqrt{\omega})]$$

$$Y_I(\omega) = \sum_{i=1}^n \frac{A_i}{2} [P \cos(\omega t_i + K_i \sqrt{\omega}) - Q \sin(\omega t_i + K_i \sqrt{\omega})]$$

$$P = \frac{\alpha_i}{\alpha_i^2 + (\omega + \omega_i)^2} - \frac{\alpha_i}{\alpha_i^2 + (\omega - \omega_i)^2}$$

$$Q = \frac{\omega + \omega_i}{\alpha_i^2 + (\omega + \omega_i)^2} - \frac{\omega - \omega_i}{\alpha_i^2 + (\omega - \omega_i)^2}$$

至此问题变为:若已知测得的振动信号,怎样重构成各个振动事件(子波),每个子波待求的参数为5个: $A_i, \alpha_i, t_i, K_i, \omega_i (i=1, 2, \dots, n)$ 。

对于各个振动子波的主频率 $\omega_i$ ,可以通过作被测信号的 FFT 获得;而每个振动事件的发生时刻 $t_i$ ,可借助于相关分析和求取瞬态频率的方法加以确定<sup>[5]</sup>。由以上二者可确定主要振动事件的个数,即模型的阶数。这样,模型中每个支路待定的参数变为3个: $A_i, \alpha_i, K_i$ 。

设 $Y_o(t)$ 为实测到的振动信号, $Y_{or}(\omega)$ 和 $Y_{oi}(\omega)$ 分别为其 Fourier 变换的实部和虚部。为辨识和优化各个振动子波的3个参数,这里定义1个实部和虚部误差的平方和:

$$E(\omega) = \frac{1}{2} [Y_R(\omega) - Y_{or}(\omega)]^2 + \frac{1}{2} [Y_I(\omega) - Y_{oi}(\omega)]^2 \quad (2)$$

这样参数优化辨识的过程就是使误差的平方和逐渐趋向于零,从而使得模型输出最大可能地逼近被测振动信号。为确定各个参数对逼近误差的影响,将式(2)分别对参数求偏导数:

$$\frac{\partial E(\omega)}{\partial A_i} = [Y_R(\omega) - Y_{or}(\omega)] \frac{\partial Y_R(\omega)}{\partial A_i} + [Y_I(\omega) - Y_{oi}(\omega)] \frac{\partial Y_I(\omega)}{\partial A_i}$$

$$\frac{\partial E(\omega)}{\partial \alpha_i} = [Y_R(\omega) - Y_{or}(\omega)] \frac{\partial Y_R(\omega)}{\partial \alpha_i} + [Y_I(\omega) - Y_{oi}(\omega)] \frac{\partial Y_I(\omega)}{\partial \alpha_i}$$

$$\frac{\partial E(\omega)}{\partial K_i} = [Y_R(\omega) - Y_{or}(\omega)] \frac{\partial Y_R(\omega)}{\partial K_i} + [Y_I(\omega) - Y_{oi}(\omega)] \frac{\partial Y_I(\omega)}{\partial K_i}$$

根据最快速下降法原理,可以用下列式子调整待求参数以最快的速度使逼近误差趋于最小值。

$$\Delta A_i = -\mu \frac{\partial E(\omega)}{\partial A_i}; \quad \Delta \alpha_i = -\mu \frac{\partial E(\omega)}{\partial \alpha_i}; \quad \Delta K_i = -\mu \frac{\partial E(\omega)}{\partial K_i} \quad (3)$$

其中: $\mu$ 为下降因子。这样,根据上述的参数调整公式,就可以应用自学习方法实现对振动子波各个参数的优化辨识。设频域内共有 $M$ 个采样样本,则式(2)应改写为:

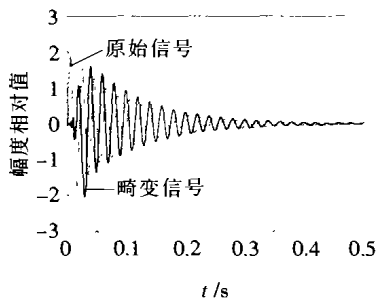
$$E = \frac{1}{2} \sum_{j=1}^M [Y_R(\omega_j) - Y_{or}(\omega_j)]^2 + \frac{1}{2} \sum_{j=1}^M [Y_I(\omega_j) - Y_{oi}(\omega_j)]^2 \quad (4)$$

同理,待求参数的调整式(3)也要作相应的离散化以便具体应用。至此,振动子波参数辨识和优化的过程总结如下:①对被测振动信号进行 Fourier 变换,获得变换的实部和虚部序列,并确定各个振动子波的角频率 $\omega_i$ 。采用瞬态频率和信号相关分析确定各个振动事件的起始时刻 $t_i$ 。②先假定各个待求的振动子波参数 $A_i, \alpha_i, K_i$ ,利用式(4)计算误差的平方和。③若误差的平方和 $E$ 没到达最小值,利用式(3)来调整待求参数,重新计算输出误差,直到误差达到

最优值(接近于零)。则此时的模型参数就是优化得到的振动子波特征参数值。

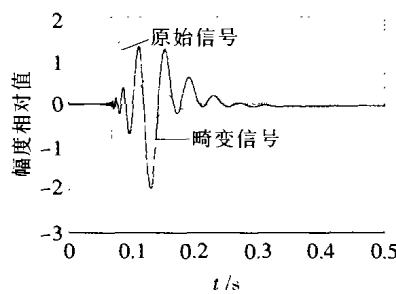
### 4 方法验证

为验证所提出的建模方法和优化策略的正确性



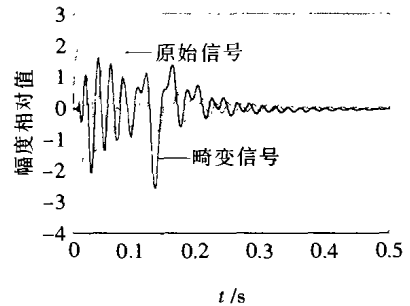
$$x_1(t) = 2e^{-10t} \sin 314t, \quad h_1(\omega) = e^{-0.05\sqrt{\omega}}, \quad y_1(t)$$

图2 振动事件1及其畸变信号



$$x_2(t) = -3e^{-25(t-0.05)} \sin[157(t-0.05)] u(t-0.05), \\ h_2(\omega) = e^{-1.4\sqrt{\omega}}, \quad y_2(t)$$

图3 振动事件2及其畸变信号



$$x_1(t) + x_2(t), \quad y_1(t) + y_2(t)$$

图4 两振动事件合成及其畸变信号

信号波形,设测量采样率为2 kHz,共1 000个采样样本,应用3.2节中提出的建模策略和优化算法去反拟合并重构两个振动事件。通过Fourier变换,见图5,可得到它的两个振动主频分别为50 Hz和25 Hz,采用瞬态频率分析法可确定振动事件发生的时刻分别为0 s和0.05 s,基本上没有误差。

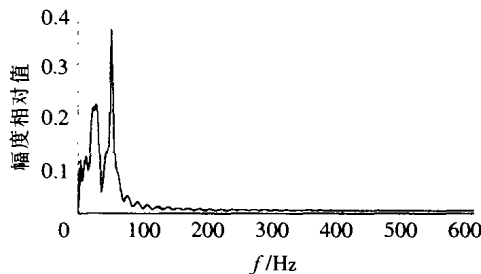


图5 总畸变信号的频谱特性

通过自学习优化算法可以辨识出表1所示的两个振动子波的特征参数,总逼近误差小于3%,可见提出的优化算法在两个子波的情况下是可行的。

表1 两个振动子波的理想参数和优化参数比较

	理想参数			优化参数		
	$A_i$	$\alpha_i$	$K_i$	$A_i$	$\alpha_i$	$K_i$
事件1	2	10	0.6	1.98	9.83	0.612
事件2	-3	25	1.4	-2.94	24.62	1.393

考虑到实际测量的振动信号中可能含有一定的背景噪声,对此也进行了一些仿真分析。在前述的合成信号中叠加一个均值为零、方差为0.01的高斯白噪声时,去重构两个振动子波,优化的结果与表1类似,最大误差不超过5%。这表明所提出的频域优化算法具有一定的抗干扰能力。进一步的仿真计算表明,当噪声的方差大于0.5时(相应的噪声幅度增大),重构的结果误差较大(10%以上),需要先对原始数据采取一定的滤波措施。

在实际检测到的振动信号中一般子波数较多(主要含4~5个),因此必须在该情况下研究优化算

和有效性,进行了仿真分析并取得了初步成果。这里假设有两个发生时刻不同的振动事件(主频率分别为50 Hz和25 Hz),其波形经传播后发生畸变,见图2~4。

设图4中的畸变信号曲线为实测到的开关振动

法的有效性。初步的仿真结果表明,当子波的数目为3或4个时,优化参数的误差会明显增大,达到20%以上。这是因为振动子波增多时,优化空间搜索的难度将加大。特别是参数 $K_i$ ,因其包含在正弦函数之中,非常容易使误差函数陷入局部最优而不能达到全局最优解。因此,应该在所提出的建模策略的基础上,采取更有效的非线性优化和拟合算法。

### 5 结论

(1)分析了指数衰减振荡波积分法建模的局限和缺陷,提出基于振动波传播畸变现象的新型建模方法。在两个子波情况下的实例分析表明,所提出的建模策略和优化算法是可行的。

(2)在模型的阶数较大时,参数空间优化搜索的难度将增加,需要研究使用其它更加有效的优化方法,如参数可分离的非线性最小二乘法等,并将这些方法应用到实测的高压开关机械振动信号处理中,以验证其有效性。

### 参考文献:

- [1] 杜彦明, 顾宽鸿. 国内配电开关设备现状及事故分析 [J]. 电网技术, 2002, 26(2): 70-76.
- [2] C Heising, E Colombo, A Janssen, et al. Final Report on High Voltage Circuit Breaker Reliability Data for Use in Substation and System Studies [A]. CIGRE Session[C], 1994.
- [3] J Q Lang, A D Stokes. Feature Extraction of Circuit-breaker Mechanical Vibration [A]. Proceedings of the ICPST'94[C], Beijing, China, 1994.
- [4] 徐立新. 断路器操作振动非平稳信号分析方法的研究 [D]. 清华大学硕士学位论文, 1992.
- [5] 沈力, 黄瑜珑, 钱家骊. 断路器振动信号的相频特性及在监测中的应用[J]. 电工技术学报, 1997, 12(3): 42-45.

作者简介:李庆民(1968-),男,工学博士,教授,从事新型高压电器、大功率电力电子技术等方面的科研工作。