

输电线路行波测距数据的正弦拟合自动筛选方法

张可¹, 张凌¹, 胡燕玲¹, 张静¹, 束洪春², 余多², 白冰²

(1. 云南电网公司大理供电局, 云南 大理 671000; 2. 昆明理工大学电力工程学院, 云南 昆明 650500)

摘要: 采用低门槛突变量启动的行波测距装置记录了故障数据和非故障干扰杂波。然而, 行波测距需要的主要信息来自于故障初瞬数据, 因此自动筛选出故障初瞬数据是实现行波测距的最基本条件。提出了利用正弦拟合的方法自动筛选故障初瞬数据。将行波测距装置记录的电流行波数据分为两段, 分别对这两段数据进行正弦拟合的计算, 再根据这两段数据的正弦拟合度和幅值计算数据的模态特征值, 若计算得到的数据模态特征值大于设定阈值, 则判断其为包含有效信息的故障初瞬数据; 反之, 则为非故障初瞬数据。大量实测数据计算表明, 所提出的输电线路行波测距数据的正弦拟合自动筛选方法是可行的, 且准确可靠。

关键词: 行波测距; 正弦拟合; 故障数据; 数据模态特征值; 自动筛选

Transmission line traveling wave data automatically screening method based on sine fitting

ZHANG Ke¹, ZHANG Ling¹, HU Yanling¹, ZHANG Jing¹, SHU Hongchun², YU Duo², BAI Bing²

(1. Dali Power Supply Bureau, Yunnan Power Grid Corporation, Dali 671000, China; 2. Faculty of Electric Power Engineering, Kunming University of Science and Technology, Kunming 650500, China)

Abstract: Traveling wave fault location devices record fault data and non-fault interference clutter using low-threshold variation start. However, the main information of traveling wave ranging is from fault early instantaneous data. So the most basic condition of traveling wave ranging is to screen out fault early instantaneous data automatically. This paper proposes a method of sinusoidal fitting to automatically screen out fault early instantaneous data. The current traveling data recorded by traveling wave fault location device is divided into two sections, the sine fitting of two sections is calculated respectively. Then modal eigenvalues of two pieces are calculated according to the degree and amplitude of sine fitting. If the calculated modal eigenvalue is greater than the set threshold value, it is judged as a failure early instantaneous data that contains valid information. On the contrary, it is regarded as the non-fault early instantaneous data. A large number of calculations show that the proposed transmission line traveling wave data automatically screening method based on sine fitting is feasible, accurate and reliable.

Key words: traveling wave ranging; sine fitting; fault data; data modal eigenvalue; screening automatically

中图分类号: TM77

文章编号: 1674-3415(2015)20-0058-07

0 引言

随着行波测距装置在220 kV及以上电压等级输电线路上的广泛应用, 大量的故障实测数据被记录下来。为了能够尽可能多地记录故障发生的整个过程, 行波测距装置记录了故障初瞬、故障稳定和故障切除数据。另外, 现有的行波测距装置普遍采用低门槛突变量启动, 它在确保对弱故障可靠启动的同时, 亦使大量非故障干扰杂波被记录, 给故障数据有效筛选带来困难^[1-2]。行波测距需要的主要信息来自于故障初瞬数据, 因此, 对数据模态进行正确的判别, 筛选出故障初瞬数据, 是实现行波测距的

最基本条件^[3]。

在现场中, 行波录波数据的筛选方法主要还是依靠现场运维人员根据已有的行波测距理论和经验对故障数据进行筛选。此方法工作量大、效率低, 同时可能出现由于电网运行人员对行波测距相关理论掌握不足或操作失误导致其选错数据, 以致测距失败^[4-5]。因此需要研究一种行波测距数据自动筛选方法, 对行波录波数据信息进行综合分析和判别, 筛选出故障初瞬数据, 实现有效的故障测距。

本文研究正弦拟合的方法及不同的行波录波数据的模态特征, 提出了一种行波测距数据自动筛选方法。对行波高速采集装置获得的行波录波数据分

析表明, 本方法对故障初瞬数据具有较好的筛选效果。

1 正弦拟合

正弦拟合法是一种基于参数估计的拟合算法, 其以正弦函数作为信号模型, 利用最小二乘法对采样数据进行拟合^[6], 估计出正弦信号的频率、幅值与相位, 从而得到其表达式^[7-9]。我国电网的额定频率为 50 Hz, 因此, 可设拟合正弦函数模型为

$$y(t) = A \sin(100\pi t + \theta) \quad (1)$$

式中: $y(t)$ 为拟合正弦信号的瞬时值; A 为拟合正弦信号的幅值; θ 为拟合正弦信号的初相位。将式(1)展开得

$$y(t) = A \sin \theta \cos(100\pi t) + A \cos \theta \sin(100\pi t) \quad (2)$$

令 $a = A \sin \theta$, $b = A \cos \theta$, 则有

$$y(t) = a \cos(100\pi t) + b \sin(100\pi t) \quad (3)$$

这样, 待估计参数就由 A 、 θ 变为 a 、 b 。

实际的采样数据与其时间序列均是离散化的, 定义采样间隔为 Δt , 设数据记录序列为时刻 $0, \Delta t, 2\Delta t, \dots, (n-1)\Delta t$ 的采样数据为 f_1, f_2, \dots, f_n 。

而由式(3)知 $0, \Delta t, 2\Delta t, \dots, (n-1)\Delta t$ 时刻的拟合函数值为 y_1, y_2, \dots, y_n , 为使采样数据与函数拟合值之间误差的平方和最小, 即

$$\xi(a, b) = \sum_{i=1}^n [f_i - y_i]^2 \quad (4)$$

最小, 须满足条件 $\frac{\partial \xi}{\partial a} = 0$, $\frac{\partial \xi}{\partial b} = 0$, 可得方程

$$\begin{aligned} \sum_{i=1}^n [a \cos(100\pi t_i) + b \sin(100\pi t_i)] \cos(100\pi t_i) &= \sum_{i=1}^n f_i \cos(100\pi t_i) \\ \sum_{i=1}^n [a \cos(100\pi t_i) + b \sin(100\pi t_i)] \sin(100\pi t_i) &= \sum_{i=1}^n f_i \sin(100\pi t_i) \end{aligned} \quad (5)$$

令

$$\begin{cases} Q_{11} = \sum_{i=1}^n \cos(100\pi t_i) \cos(100\pi t_i) \\ Q_{12} = \sum_{i=1}^n \sin(100\pi t_i) \cos(100\pi t_i) \\ Q_{21} = \sum_{i=1}^n \cos(100\pi t_i) \sin(100\pi t_i) \\ Q_{22} = \sum_{i=1}^n \sin(100\pi t_i) \sin(100\pi t_i) \end{cases}$$

$$\begin{cases} l_1 = \sum_{i=1}^n f_i \cos(100\pi t_i) \\ l_2 = \sum_{i=1}^n f_i \sin(100\pi t_i) \end{cases}$$

则方程(5)可写成如式(6)的矩阵形式。

$$Q \cdot d = l \quad (6)$$

$$\text{其中 } Q = \begin{bmatrix} Q_{11} & Q_{12} \\ Q_{21} & Q_{22} \end{bmatrix}, \quad l = \begin{bmatrix} l_1 \\ l_2 \end{bmatrix}, \quad d = \begin{bmatrix} a \\ b \end{bmatrix}, \text{ 从式(6)}$$

可求得 a 、 b , 得到 $A = \sqrt{a^2 + b^2}$, 至此, 即可求出拟合正弦函数。

定义波形的正弦拟合度为

$$\rho = \frac{A}{\sum_{i=1}^n |y_i - f_i|} \quad (7)$$

利用波形的正弦拟合度衡量原始故障录波波形与工频正弦函数的相似程度。

2 输电线路故障的行波过程

行波的产生过程可采用叠加定理进行分析, 当输电线路某点 F 发生故障时, 图 1(a)中电路可等效为图 1(b)中的电路, 图 1(b)又可视作正常负荷分量图 1(c)和故障分量图 1(d)的叠加。对图 1(d)中的故障分量进行单独分析可知, 故障分量相当于在系统电势为零时, 在故障点 F 处叠加了一个与该点正常负荷状态下大小相等、方向相反的电压。在这一电压的作用下, 将产生由故障点 F 向线路两端传播的行波。行波沿线路运动时, 遇到波阻抗不连续的点将发生折射与反射^[10-12]。对图 1 所示的输电线路 mn 而言, 若在母线 n 处配置电流型行波测距装置, 则该装置将感受到以下行波。

① 初始浪涌

$$i = (-1 + \beta_n) e^{-\gamma x} u_f / (Z_C + 2R_f)$$

② 首个故障点反射波

$$i = (-1 + \beta_n) \beta_n \beta_f e^{-3\gamma x} u_f / (Z_C + 2R_f)$$

③ 首个经故障点透射的对侧母线反射波

$$i = (-1 + \beta_m) \beta_n \alpha_f e^{-\gamma(2l-x)} u_f / (Z_C + 2R_f)$$

式中: l 为故障线路 mn 的全长; x 为故障点距观测母线 n 的距离; γ 为线路传播常数; Z_C 为线路波阻抗; α_f 和 β_f 分别为故障点的电压折射、反射系数; β_m 和 β_n 分别为母线 m 和 n 的反射系数。

3 故障录波特征分析

本文对行波高速采集装置获得的故障数据进行分析。为了能够尽可能多地记录故障发生的整个过

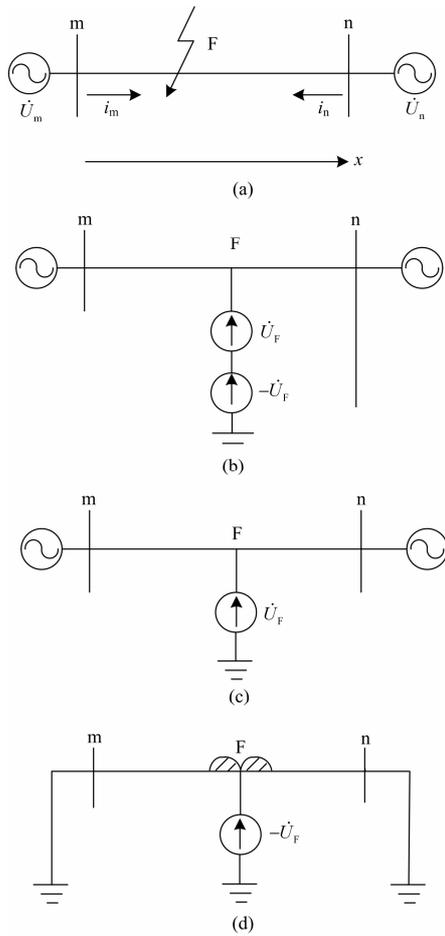


图 1 利用叠加定理分析故障行波产生过程

Fig. 1 Analysis of fault traveling wave generation process by superposition theorem

程，行波高速采集装置分条记录从故障初始一直到保护动作切除故障线路的整个过程，同时，由于采用低门槛的突变量启动，一些干扰数据也被记录下来，因此，如图 2 所示，行波高速采集装置记录的数据包括：故障初瞬、故障稳定、故障切除及杂波干扰。

以如图 3 所示的电路为例，短路发生前，电路处于稳定状态，其 a 相的电流表达式为

$$i = I_m \sin(\omega t + \alpha - \varphi_{|0|})$$

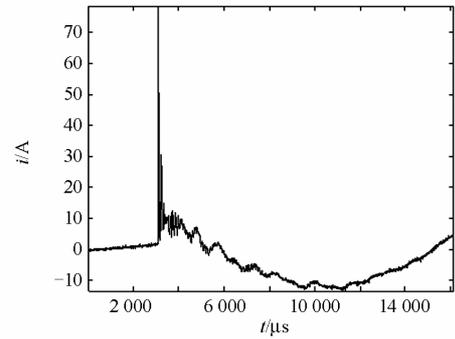
当发生短路故障时，短路电流为

$$i = I_m \sin(\omega t + \alpha - \varphi) +$$

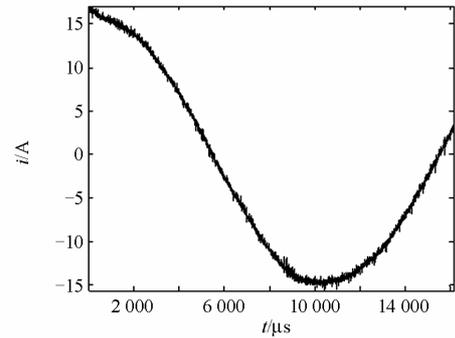
$$[I_{m|0|} \sin(\alpha - \varphi_{|0|}) - I_m \sin(\alpha - \varphi)]e^{-t/T_a}$$

式中：短路前一瞬间用下标|0|表明； φ 为稳态短路电流和电源电压间的相角； α 为电源电压的初相角； I_m 为稳态短路电流的幅值。

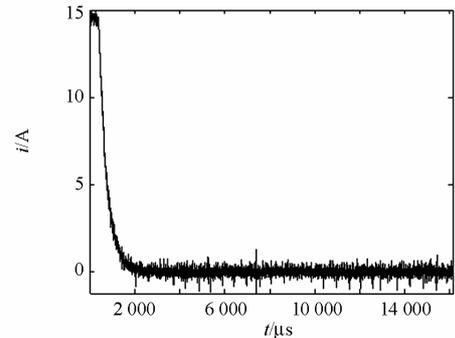
由上可见，故障初瞬反映了故障发生时电流的



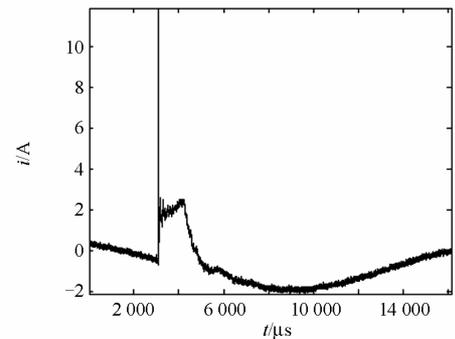
(a) 故障初瞬



(b) 故障稳定



(c) 故障切除



(d) 杂波干扰

图 2 行波录波数据

Fig. 2 Traveling wave recorded data

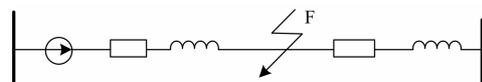


图 3 故障电路

Fig. 3 Fault circuit

暂态过程,此过程造成了输电线路电流波形的剧烈畸变^[13];当 t 逐渐增大时,短路至稳定状态,稳态短路电流为交流电流,其幅值大小取决于电源电压幅值和短路回路的总阻抗。另外,从短路发生到稳态之间的暂态过程中,电流还包含逐渐衰减的直流电流,它们出现的物理原因是电感中电流在突然短路瞬时的前后不能突变^[14]。

当线路故障后,继电保护装置作用于断路器跳闸,故障电流迅速降低。但因为是在断路器的触头分闸瞬间,有电弧出现,触头间电流并不为零,必然在线路上引起暂态行波过程^[15],其波形如图2(c)所示。杂波干扰则反映的是输电线路遭受外部干扰而未发生故障时,线路电流的暂态过程。由于行波测距需要的主要信息来自于故障初瞬数据,因此需将故障初瞬数据筛选出来。

4 数据模态的特征值

故障初瞬的故障发生前后短时窗内的电流波形与标准正弦波的相似度较低,而后半段时窗内的电流波形与标准正弦波的相似度较高。同时,故障会导致电流幅值大幅度增加,因此,故障后工频电流幅值将大于故障前工频电流幅值。

故障稳定阶段的故障发生前后短时窗内的电流波形和后半段时窗内的电流波形相对于标准工频正弦波的相似度都较高,基本没有明显差别。同时,前后时窗的正弦拟合函数的幅值也基本无差别。

故障切除阶段的故障发生前后短时窗内的电流波形和后半段时窗内的电流波形相对于标准工频正弦波的相似度都很低,基本没有明显差别。同时,前段时窗的正弦拟合函数的幅值大于后段时窗正弦拟合函数的幅值。

杂波干扰阶段在拟合度方面与故障过程非常相似。但其前后时窗的正弦拟合函数的幅值无明显区别。

行波高速采集装置记录的数据大体为故障初始行波前4 ms及后12 ms的电流数据。因此,根据以上分析可将一条数据分为两段不同的数据进行分析,设整条数据为 $Data$,则

$$\begin{cases} Data1 = Data(i), i=1, \dots, m \\ Data2 = Data(j), j=N-m+1, \dots, m \end{cases} \quad (8)$$

式中: $m=4\ 500$; $Data1$ 为前4.5 ms时窗数据; $N=16\ 000$; $Data2$ 为后4.5 ms时窗数据。

分别对 $Data1$ 、 $Data2$ 进行正弦拟合计算,可分别得到两组数据的正弦拟合度和幅值: (ρ_1, A_1) 、 (ρ_2, A_2) 。拟合度计算值一般为小数,其比值更能体现差距,而幅值一般为较大的数,其差值更能体现差距,

因此定义数据模态特征值为

$$P = (A_2 - A_1) \cdot \frac{\rho_2}{\rho_1} \quad (9)$$

5 算法实现流程

本文研究正弦拟合的方法及不同数据的模态特征,提出了一种行波测距数据自动筛选方法,具体实现步骤如下:

1) 正弦拟合函数的确定。设定正弦拟合函数模型为 $y(t)=a\cos(100\pi t)+b\sin(100\pi t)$;然后,利用最小二乘法对采样数据进行拟合,可确定参数 a 、 b ,即可求出正弦拟合函数。其中, $y(t)$ 为正弦拟合函数的瞬时值; t 为采样时刻; a 、 b 为待估计参数,正弦拟合幅值为 $A = \sqrt{a^2 + b^2}$ 。

2) 波形的正弦拟合度计算。计算采样波形与正弦拟合函数波形的正弦拟合度,定义为 $\rho = \frac{A}{\sum_{i=1}^n |y_i - f_i|}$ 。其中, y_i 为 i 时刻的正弦拟合函数

值; f_i 为 i 时刻的采样数据。

3) 数据模态特征值的计算。将行波测距装置记录的故障初始电流行波数据 $Data$ 分为两段不同数据:前4.5 ms时窗数据 $Data1$ 、后4.5 ms时窗数据 $Data2$,分别对其进行正弦拟合计算,得到两组数据的正弦拟合度和幅值: (ρ_1, A_1) 、 (ρ_2, A_2) ;再利用式(9)计算数据模态特征值 P 。

4) 故障数据的筛选。通过大量实测数据的计算,确定筛选故障初瞬数据的阈值 φ ,按以下条件筛选出故障初瞬数据:

若 $P > \varphi$,则判定为故障初瞬数据;

若 $P \leq \varphi$,则判定为其他故障阶段数据。

算法流程如图4所示。

6 应用实例及分析

以图2中四种录波数据为例,采用以上方法进行故障初瞬数据的筛选。

1) 故障初瞬

将故障初瞬数据按照式(8)分为两组,利用最小二乘法对采样数据进行拟合,其拟合效果如图5所示。

分别计算两组数据的正弦拟合度及幅值,计算结果如表1所示。

表1 故障初瞬分组数据正弦拟合度及幅值计算结果

Table 1 Calculation result of sine fitting degree and amplitude of fault early instantaneous packet data

数据	正弦拟合度	幅值
$Data1$	9.812e-04	6.891 0
$Data2$	3.0042e-04	62.260 7

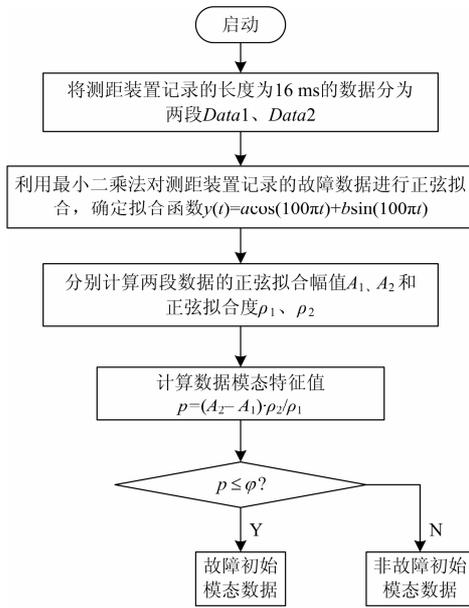


图4 算法流程
Fig. 4 Algorithm process

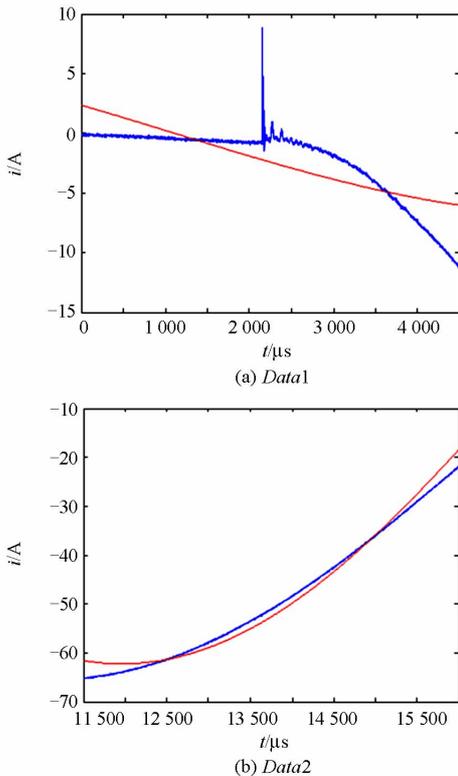


图5 故障初瞬分组数据正弦拟合效果

Fig. 5 Sine fitting effect of fault early instantaneous packet data

根据式(9)计算得出的特征值 $P=16.943$ 。

2) 故障稳定

将故障稳定数据按照式(8)分为两组, 利用最小二乘法对采样数据进行拟合, 其拟合效果如图6所示。

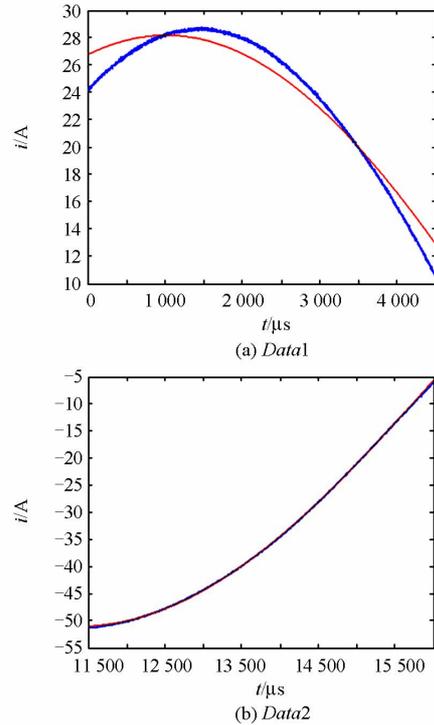


图6 故障稳定分组数据正弦拟合效果

Fig. 6 Sine fitting effect of fault stable packet data

分别计算两组数据的正弦拟合度及幅值, 计算结果如表2所示。

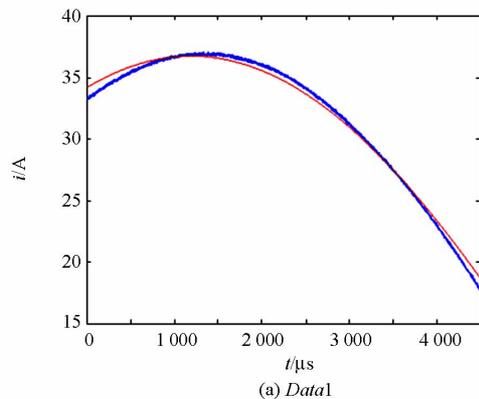
表2 故障稳定分组数据正弦拟合度及幅值计算结果
Table 2 Calculation result of sine fitting degree and amplitude of fault stable packet data

数据	正弦拟合度	幅值
Data1	0.006 8	28.175 7
Data2	1.9508e-04	51.014 8

根据式(9)计算得出的特征值 $P=0.655$ 。

3) 故障切除

将故障切除数据按照式(8)分为两组, 利用最小二乘法对采样数据进行拟合, 其拟合效果如图7所示。



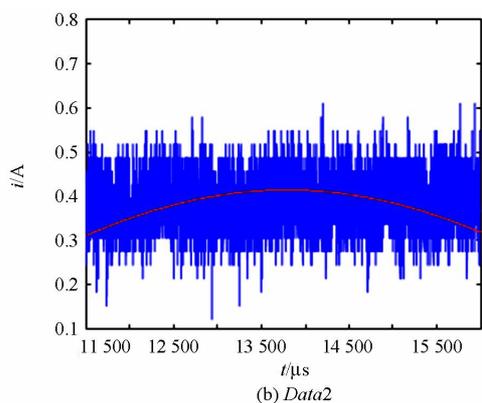


图7 故障切除分组数据正弦拟合效果

Fig. 7 Sine fitting effect of fault clearing packet data

分别计算两组数据的正弦拟合度及幅值, 计算结果如表3所示。

根据式(9)计算得出的特征值 $P=-0.0047$ 。

表3 故障切除分组数据正弦拟合度及幅值计算结果

Table 3 Calculation result of sine fitting degree and amplitude

of fault clearing packet data		
数据	正弦拟合度	幅值
Data1	0.3127	8.5789
Data2	15.4357	0.0069

4) 杂波干扰

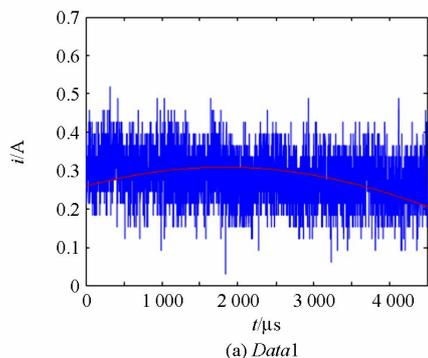
将杂波干扰数据按照式(8)分为两组, 利用最小二乘法对采样数据进行拟合, 其拟合效果如图8所示。

分别计算两组数据的正弦拟合度及幅值, 计算结果如表4所示。

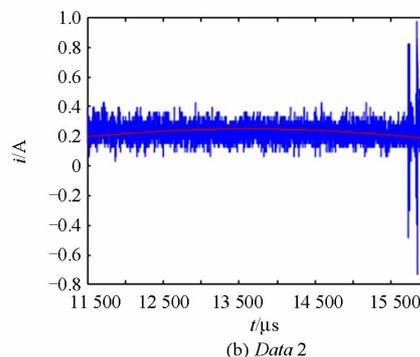
根据式(9)计算得出的特征值 $P=-0.0369$ 。

5) 结果分析

将以上四种数据特征值 P 的计算结果进行比较可以看出, 由于数据模态特征值计算公式(9)是针对故障初瞬阶段而建立的, 它对除故障初瞬以外的三种阶段敏感度较低, 无法准确区分故障稳定、故障切除及杂波干扰, 但它可以准确地将故障初瞬与其他三种数据区分开。经过大量实测数据的计算, 只要取 $P>10$ 即可将故障初瞬数据从录波数据中筛选出来。



(a) Data1



(b) Data2

图8 杂波干扰分组数据正弦拟合效果

Fig. 8 Sine fitting effect of clutter packet data

表4 杂波干扰分组数据正弦拟合度及幅值计算结果

Table 4 Calculation result of sine fitting degree and amplitude of clutter packet data

数据	正弦拟合度	幅值
Data1	0.0013	0.3086
Data2	8.1242e-4	0.2495

7 结论

1) 将行波测距装置记录的电流行波数据分为两段, 分别对这两段数据进行正弦拟合的计算, 再根据这两段数据的正弦拟合度和幅值计算数据的模态特征值, 若计算得到的数据模态特征值大于设定阈值, 则判断其为包含有效信息的故障初瞬数据; 反之, 则为非故障初瞬数据。

2) 应用实例及大量实测数据的计算表明, 本文所提的输电线路行波测距数据的正弦拟合自动筛选方法可将故障初瞬数据从录波数据中筛选出来。

参考文献

- [1] 钱海, 贾松江, 李治兵, 等. 基于历史故障波形的行波测距装置检验方法[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(16): 139-143.
QIAN Hai, JIA Songjiang, LI Zhibing, et al. Inspection of traveling wave fault location equipment based on the historical fault waveforms[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(16): 139-143.
- [2] 张广斌, 束洪春, 于继来. 利用广义电流模量的行波实测数据半监督聚类筛选[J]. 中国电机工程学报, 2012, 32(10): 150-159.
ZHANG Guangbin, SHU Hongchun, YU Jilai. Travelling wave field data contingency screening based on semi-supervised clustering using generalized current modal component[J]. Proceedings of the CSEE, 2012, 32(10): 150-159.

- [3] 苏煜, 罗四倍, 王薇. 基于形态梯度与小波变换模之和的行波启动元件[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(23): 5-9.
SU Yu, LUO Sibe, WANG Wei. Fault location methods based on traveling wave theory for power system and its development[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(23): 5-9.
- [4] 张广斌. 实测数据环境的输电线路行波故障测距关键技术研究[D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2014.
ZHANG Guangbin. The key technology of traveling wave fault location for transmission lines based on the measured data[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2014.
- [5] 曾祥君, 尹项根, 陈浩, 等. 电力系统暂态过程同步记录的研究[J]. 电力系统及其自动化学报, 2001, 13(1): 1-4.
ZEN Xiangjun, YIN Xianggen, CHEN Hao, et al. Study for transient data synchronous acquisition technology in power systems[J]. Proceedings of the CSU-EPSA, 2001, 13(1): 1-4.
- [6] 孟玲玲, 孙常栋, 韩宝如. 基于最小二乘法和独立分量分析的间谐波检测算法[J]. 电力系统保护与控制, 2012, 40(11): 76-81.
MENG Lingling, SUN Changdong, HAN Baoru. Algorithm for inter-harmonic detection based on least square method and ICA[J]. Power System Protection and Control, 2012, 40(11): 76-81.
- [7] 赵广泉. 配电网微机消谐装的研究[D]. 重庆: 重庆大学, 2012.
ZHAO Guangquan. Research of microprocessor based resonance elimination device[D]. Chongqing: Chongqing University, 2012.
- [8] 丛志鹏. 基于曲线拟合方法的故障测距应用研究[D]. 济南: 山东大学, 2008.
CONG Zhipeng. Study on fault location based on curving fitting method[D]. Jinan: Shandong University, 2008.
- [9] 李庆扬. 数值分析[M]. 北京: 清华大学出版社, 2008.
- [10] 李传兵, 谭博学, 高鹏, 等. 基于D型行波原理的T接线故障测距方法[J]. 电力系统保护与控制, 2013, 41(18): 78-82.
LI Chuanbing, TAN Boxue, GAO Peng, et al. A fault location method for T-connection lines based on D-type traveling wave theory[J]. Power System Protection and Control, 2013, 41(18): 78-82.
- [11] 刘万超, 陈平, 马永明, 等. 基于多时窗相关函数和形态学滤波的单端行波故障测距研究[J]. 电力系统保护与控制, 2009, 37(20): 28-33.
LIU Wanchao, CHEN Ping, MA Yongming, et al. Study of fault locating based on single terminal traveling waves using multi-window correlation functions and mathematical morphological filtering algorithm[J]. Power System Protection and Control, 2009, 37(20): 28-33.
- [12] 陈平, 徐丙垠, 李京, 等. 现代行波故障测距装置及其运行经验[J]. 电力系统及其自动化, 2003, 27(6): 66-69.
CHEN Ping, XU Bingyin, LI Jing, et al. Modern travelling wave based fault locator and its operating experience[J]. Automation of Electric Power Systems, 2003, 27(6): 66-69.
- [13] 束洪春. 电力工程信号处理应用[M]. 北京: 科学出版社, 2009.
- [14] 李光琦. 电力系统暂态分析[M]. 北京: 中国电力出版社, 2006.
- [15] 葛耀中. 新型继电保护和故障测距的原理与技术[M]. 西安: 西安交通大学出版社, 1996.

收稿日期: 2015-01-14; 修回日期: 2015-03-08

作者简介:

张可(1981-), 男, 本科, 工程师, 主要从事电气工程及自动化工作;

张凌(1976-), 男, 本科, 工程师, 主要从事电气工程及自动化工作;

胡燕玲(1975-), 女, 本科, 工程师, 主要从事电气工程及自动化工作。

(编辑 周金梅)