

基于最小二乘原理的电力故障录波器通道校正方法

车仁飞, 范作程, 梁 军, 李欣堂

(山东大学电气工程学院, 山东 济南 250061)

摘要: 为了保证电力故障录波器的测量精度, 提出了一种基于线性最小二乘原理的录波器通道校正方法。根据录波器模拟量采样电路的构成, 采用线性数学模型来描述模拟量通道的输入输出特性, 在此基础上采用最小二乘准则获得最小二乘意义下的变比参数, 同时说明了通道相移的计算方法。所提出的算法具有简单、实用、精度高等特点。在 WDG-IV 型电力故障录波器上的实验结果表明, 这一通道校正方法对提高录波器的测量精度是十分有效的。

关键词: 电力故障录波器; 最小二乘法

中图分类号: TM76

文献标识码: A

文章编号: 1003-4897(2002)09-0028-03

1 引言

随着电子技术的发展, 电力故障录波器正朝着通道数更多、采样速度更快、精度更高、功能更强的方向发展, 新型电力故障录波测距装置的研究与开发生产, 为提高我国电力行业的安全运行水平和事故分析能力提供了条件。电力故障录波器已成为电力系统记录动态过程必不可少的精密设备, 其主要任务是记录系统大扰动如短路故障、系统振荡、频率崩溃、电压崩溃等发生后的有关系统电参量的变化过程及继电保护与安全自动装置的动作行为^[1]。为了实现这些功能, 保证录波器的正确启动和精确故障定位, 要求录波器应具有很高的测量精度, 为此, 除了选择线性度较好的 PT、CT 和正确设计采样电路外, 录波器的模拟量通道校正也是必不可少的关键环节。

录波器采样通道除 PT、CT 外, 还由若干电阻、电容和运算放大器等元件组成。传统的利用硬件电路调整通道变比的方法, 不仅会造成测量误差, 而且无法从根本上矫正通道之间的相位误差, 从而影响电压、电流、有功、无功等模拟量的测量精度, 导致测距结果不准。所以, 必须寻找一种简单、实用的方法来准确地估计通道变比和通道间的相移, 以保证测量精度。

本文提出了一种利用最小二乘原理解决电力故障录波器模拟通道校正问题, 该方法具有简单、实用、精度高等特点。

2 线性最小二乘法^[2]

设理论函数 $y = f(x; b_1, b_2, \dots, b_n)$ 是各参数 b_i

($i = 1, 2, \dots, n$) 的线性函数, 即线性数学模型

$$y = f(x; b) = b_1\varphi_1(x) + b_2\varphi_2(x) + \dots + b_n\varphi_n(x) \quad (1)$$

式中: $\varphi_1(x), \varphi_2(x), \dots, \varphi_n(x)$ 为已知 n 个线性无关的连续函数。

最小二乘法通过取残差向量 r 的欧氏范数

$$\|r\|_2 \text{ 最小, 来求取参数 } b. \text{ 即: 使 } Q = \sum_{i=1}^m [y_i - f(x_i; b)]^2 \text{ 为最小。}$$

取 m 个实验数据点 (x_i, y_i) , $i = 1, 2, \dots, m$, 并令 $a_{ij} = \varphi_j(x_i)$, $i = 1, 2, \dots, m$, $j = 1, 2, \dots, n$, 代入式(1)得到矛盾方程组 ($m > n$)

$$\begin{cases} a_{11}b_1 + a_{12}b_2 + \dots + a_{1n}b_n = y_1 \\ a_{21}b_1 + a_{22}b_2 + \dots + a_{2n}b_n = y_2 \\ \dots \quad \dots \quad \dots \quad \dots \\ a_{m1}b_1 + a_{m2}b_2 + \dots + a_{mn}b_n = y_m \end{cases} \quad (2)$$

矛盾方程组(2)一般不存在通常意义下的解。我们应用最小二乘准则来求出参数 $b_1, b_2, \dots, b_n$, 采用数学分析求极值的方法, 求出 Q 对 b_k 的偏导数, 令其等于 0, 得

$$\frac{\partial Q}{\partial b_k} = \sum_{i=1}^m 2(y_i - \sum_{j=1}^n a_{ij}b_j)(-a_{ik}) = 0 \quad (k = 1, 2, \dots, n)$$

从而导出线性方程组

$$\sum_{i=1}^m \left(\sum_{j=1}^n a_{ik}a_{ij} \right) b_j = \sum_{i=1}^m a_{ik}y_i \quad (k = 1, 2, \dots, n) \quad (3)$$

定义二离散函数的内积为

$$(\varphi_k, \varphi_j) = (\varphi_k(x), \varphi_j(x)) =$$

$$\sum_{i=1}^m \varphi_k(x_i) \varphi_j(x_i) = \sum_{i=1}^m a_{ik}a_{ij} \quad (4)$$

于是式(3)可写成

$$\sum_{j=1}^n (\varphi_k, \varphi_j) b_j = (\varphi_k, y) \quad (k=1, 2, \dots, n) \quad (5)$$

其矩阵形式为

$$\begin{bmatrix} (\varphi_1, \varphi_1) & (\varphi_1, \varphi_2) & \dots & (\varphi_1, \varphi_n) \\ (\varphi_2, \varphi_1) & (\varphi_2, \varphi_2) & \dots & (\varphi_2, \varphi_n) \\ \dots & \dots & \ddots & \dots \\ (\varphi_n, \varphi_1) & (\varphi_n, \varphi_2) & \dots & (\varphi_n, \varphi_n) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \\ \dots \\ b_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (\varphi_1, y) \\ (\varphi_2, y) \\ \dots \\ (\varphi_n, y) \end{bmatrix} \quad (6)$$

求解方程组(5),即可得到参数 b 在最小二乘意义下的最佳估计值。

3 基于最小二乘原理的录波器通道校正方法

3.1 通道变比校正

电力故障录波器的模拟量采样电路主要由 PT、CT、运算放大器、电阻、电容等元件组成,可以近似按照线性数学模型来确定采样通道的输入与输出关系。为简单起见,采用如下线性函数

$$y = kx + y_0 \quad (7)$$

式中: y 代表实际输入量; x 代表实际采集量; k 代表通道变比; y_0 代表截距。

为了准确地估计出式(7)中的参数 k 和 y_0 ,可利用上面所述的最小二乘法进行参数估计。由式(1)可知, $b_1 = y_0$, $b_2 = k$,并注意 $\varphi_1(x) = 1$, $\varphi_2(x) = x$,设有观测数据 (x_i, y_i) , $i = 1, 2, \dots, m$ 。于是由式(4)得

$$\left\{ \begin{array}{l} (\varphi_1, \varphi_1) = \sum_{i=1}^m \varphi_1(x_i) \varphi_1(x_i) = m \\ (\varphi_1, \varphi_2) = \sum_{i=1}^m \varphi_1(x_i) \varphi_2(x_i) = \sum_{i=1}^m x_i \\ (\varphi_2, \varphi_1) = \sum_{i=1}^m \varphi_2(x_i) \varphi_1(x_i) = \sum_{i=1}^m x_i \\ (\varphi_2, \varphi_2) = \sum_{i=1}^m \varphi_2(x_i) \varphi_2(x_i) = \sum_{i=1}^m x_i^2 \\ (\varphi_1, y) = \sum_{i=1}^m \varphi_1(x_i) y_i = \sum_{i=1}^m y_i \\ (\varphi_2, y) = \sum_{i=1}^m \varphi_2(x_i) y_i = \sum_{i=1}^m x_i y_i \end{array} \right.$$

由式(6)得

$$\begin{bmatrix} (\varphi_1, \varphi_1) & (\varphi_1, \varphi_2) \\ (\varphi_2, \varphi_1) & (\varphi_2, \varphi_2) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (\varphi_1, y) \\ (\varphi_2, y) \end{bmatrix} \quad (8)$$

由式(8)可计算出参数 b_1 和 b_2 ,即 y_0 和 k 。

在实用中,为了更精确地表示通道变比特性,可以用多个不同参数的线性函数来表示不同区段的变比,如图1所示。在电压或电流输入值较小的区段用函数 $y = k_1 x + y_{01}$ 来表示,在电压或电流输入值

较大的区段则用函数 $y = k_2 x + y_{02}$ 来表示。

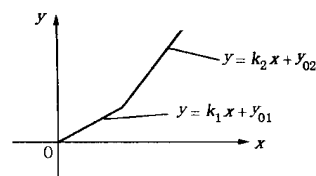


图1 利用多个线性函数表示通道输入输出特性

Fig. 1 Input-output property of channel using several linear function

3.2 通道相位校正

在很多情况下,造成故障录波器测距结果不准的一个主要原因是各个通道之间存在相位误差(尤其是电压通道和电流通道之间存在较大的相位差),相位误差的存在也同样影响着有功功率、无功功率以及功率因数等计算结果的精确性,因此必须进行通道的相位误差校正。

在输入同相位交流信号的情况下,设通道 i 有 m 次相位观测值 (α_{ik}) , $k = 1, 2, \dots, m$ 。则采用如下公式计算通道 i 对于通道 1 的相移。

$$\delta_i = \frac{1}{m} \sum_{k=1}^m (\alpha_{ik} - \alpha_{1k}) \quad (9)$$

式中 δ_i 为通道 i 对于通道 1 的相移; α_{ik} 为通道 i 相位第 k 次观测值; α_{1k} 为通道 1 相位第 k 次观测值。

利用计算获得的各通道相移 δ_i ,对各通道的量测进行相位校正,即可保证各通道相位的一致。

表1 电压电流测试结果

Tab. 1 Test results of voltage and current				
测试回路	输入值	测量值	相对误差 (%)	行业标准要求 (%)
相电压回路	3.00 V	3.002 V	0.067	$\leq \pm 10$
	10.0 V	10.006 V	0.06	$\leq \pm 2.5$
	30.0 V	30.017 V	0.057	$\leq \pm 1$
	60.0 V	60.0 V	0.0	$\leq \pm 0.5$
	90.0 V	90.06 V	0.067	$\leq \pm 1$
	120.0 V	120.1 V	0.083	$\leq \pm 5$
电流回路	0.5 A	0.504 A	0.8	$\leq \pm 10$
	1.0 A	0.999 A	- 0.1	$\leq \pm 2.5$
	2.5 A	2.490 A	- 0.4	$\leq \pm 1$
	5.0 A	4.997 A	- 0.06	$\leq \pm 0.5$
	25.0 A	25.00 A	0.0	$\leq \pm 1$
	50.0 A	50.10 A	0.2	$\leq \pm 2.5$
	100.0 A	100.3 A	0.3	$\leq \pm 5$

4 实验测试

应用所提出的算法,在 WDL-IV 录波器上进行了电压、电流、有功、无功、相位一致性等的测试,测

试结果分别如表 1、表 2、表 3 所示。测试结果表明,测量值具有很高的精度,远远超过行业标准的要求。

表 2 有功无功测试结果

Tab.2 Test results of active power and reactive power

测试回路	输入量			测量值		相对视在功率误差		行业标准要求(%)
	U/V	I/A	相位角	P/W	Q/var	有功功率(%)	无功功率(%)	
A 相	57.74	5.00	0°	288.4	0.040	- 0.1	0.0	≤ ±1.5
	57.74	5.00	45°	204.2	204.0	0.0	0.0	≤ ±1.5
	57.74	5.00	90°	- 0.513	289.0	0.2	0.1	≤ ±1.5
B 相	57.74	5.00	0°	288.4	- 0.178	- 0.1	0.1	≤ ±1.5
	57.74	5.00	45°	204.2	204.1	0.0	0.0	≤ ±1.5
	57.74	5.00	90°	- 0.142	288.7	0.1	0.0	≤ ±1.5
C 相	57.74	5.00	0°	287.7	- 0.099	- 0.3	0.0	≤ ±1.5
	57.74	5.00	45°	203.8	204.0	- 0.1	- 0.0	≤ ±1.5
	57.74	5.00	90°	- 0.249	288.8	0.1	0.0	≤ ±1.5

因为有功功率和无功功率的测量精度,既包含了电压电流的精度也包含了通道间相位差的精度,最能说明测量精度的高低,所以表 4 给出了不采用最小二乘原理的有功功率和无功功率的测量精度,表 2 和表 4 对比说明,采用最小二乘原理的通道校正方法,大大提高了测量精度。

表 3 交流电压、交流电流相位一致性测试结果

Tab.3 Test results of phase difference of alternating voltage and current

测试回路	输入信号	最大相位差	行业标准要求
交流电压回路之间	额定,同相位	0.008°	≤ ±5°
交流电流回路之间	额定,同相位	0.067°	≤ ±5°
交流电压与交流电流回路之间	额定,同相位	0.102°	≤ ±5°

表 4 不采用最小二乘法时的有功无功测试结果

Tab.4 Test results of active power and reactive power not using the least square principle

测试回路	输入量			测量值		相对视在功率误差		行业标准要求(%)
	U/V	I/A	相位角	P/W	Q/var	有功功率(%)	无功功率(%)	
A 相	57.74	5.00	0°	288.77	- 4.31	0.0	1.5	≤ ±1.5
	57.74	5.00	45°	200.92	207.18	- 1.1	1.1	≤ ±1.5
	57.74	5.00	90°	- 4.30	288.60	1.5	0.0	≤ ±1.5
B 相	57.74	5.00	0°	288.61	- 4.25	0.0	1.5	≤ ±1.5
	57.74	5.00	45°	206.52	200.99	0.8	- 1.1	≤ ±1.5
	57.74	5.00	90°	4.02	288.07	1.4	- 0.2	≤ ±1.5
C 相	57.74	5.00	0°	288.72	- 2.35	0.0	0.8	≤ ±1.5
	57.74	5.00	45°	202.26	205.23	- 0.6	0.4	≤ ±1.5
	57.74	5.00	90°	- 1.89	288.53	0.6	- 0.1	≤ ±1.5

5 结论

最小二乘法是广泛应用于科学实验与工程技术的最优化方法之一,是求一切平方和形式的目标函数的最优解的一种基本方法。本文提出的基于最小二乘原理的录波器通道校正方法,有效地保证了录波器的测量精度,提高了产品质量。该方法也可应用于其它测量设备的模拟量通道校正中。

参考文献:

[1] DL/T553-94. 220 ~ 500 kV 电力系统故障动态记录技术

准则[S].

[2] 刘钦圣. 最小二乘问题计算方法[M]. 北京:北京工业大学出版社,1989,10.

收稿日期: 2002-01-08; 回修日期: 2002-04-12

作者简介:

车仁飞(1971 -),男,讲师,博士研究生,研究方向为电力系统运行与控制。

梁 军(1956 -),男,教授,研究方向为电力系统运行与控制。

李欣唐(1965 -),男,高级工程师,研究方向为电力系统运行与控制。(下转第 34 页)

件,可支持扫描形成的图纸以及各种绘图软件绘制的大量图纸;

(2) 采用 SQL Server 形成图纸数据库和参数数据库,实现远程权限校核;

(3) 采用可以直接嵌入 HTML 语言并与之高效衔接的 ASP 编程技术,定义图纸中元件的连接关系,使基于 JPG 图纸的设备参数管理可以精确到具体元件;

(4) 采用通用的 B/S 结构,将所需数据库和图形网页采用流行的各种 Web 发布方式发布即可,不需客户端程序,不但开发效率较高而且使用也灵活方便。

5 结语

本文采用 Internet Explore 4.0 作为客户端浏览工具,ASP3.0 作为系统开发工具,SQL Server7.0 数据库作为后台数据管理系统,以 Windows 9x 或 Windows NT 作为操作平台。开发出的系统适应面宽,性能稳定,功能扩展较为容易,可用于其它以位图为基础的图纸及信息管理。

参考文献:

- [1] 尹涛,卢金滇,江峰. 继电保护的图纸管理及图纸管理系统[J]. 继电器,2000,28(8):34-36.
- [2] 蔡泽祥,刘桂喜,孔华东. 发电厂继电保护可视化整定计算与定值管理系统[J]. 继电器,2000,28(6):1-3.
- [3] 孔华东,陈兴华,蔡泽祥,等. 面向对象的发电厂继电保护信息管理与培训系统[J]. 电力自动化设备,2001,21(4):33-36.
- [4] 廖信彦. Active Server Pages 3 彻底研究[M]. 北京:中国铁道出版社,2001,1.
- [5] 崔家佩,孟庆炎,陈永芳,等. 电力系统继电保护与安全自动装置整定计算[M]. 北京:中国电力出版社,1993,3:3-7.

收稿日期: 2001-11-20

作者简介:

刘为雄(1969-),男,硕士研究生,讲师,研究方向为电力系统继电保护。

蔡泽祥(1960-),男,博士生导师,教授,研究方向为电力系统继电保护、电力系统稳定分析与控制。

尹引(1979-),男,大学本科,研究方向为电力系统继电保护。

Drawings and information management based on bitmap of power system relay protection

LIU Wei-xiong, CAI Ze-xiang, YIN Yin, KONG Hua-dong

(Electric Power College of South China University of Technology, Guangzhou 510640, China)

Abstract: Bitmap type drawings gained widespread existence in power system relay protection. To make better use of them, ASP programming was used. Because ASP sets hotspots area for interested elements in drawings and responses requests from client-side, users could get a closed contact between the client-side graphical pages to the server-side database which could be a bitmap-oriented drawings-information management system in the field of power system relay protection. The developed system could run on Internet/Intranet, explore drawings in different layers according their internal relating logic, query drawings elements and its related relay protection information intellectually, and systematically manage drawings and data information. It is shown practical in power system information management.

Key words: relay protection; bitmap; ASP; drawings and information management

(上接第 30 页)

The electric power fault recorder channel calibration approach based on least square

CHE Ren-fei, FAN Zuo-cheng, LIANG Jun, LI Xin-tang

(School of Electric Power Engineering, Shandong University, Jinan 250061, China)

Abstract: To ensure the measurement precision of the electric power fault recorder, this paper proposes a channel calibration approach based on the linear least square method. According to the components of the recorder analog sample circuit, the linear mathematics model is adopted to describe the input-output property of the channel, and on this condition, the ratio is obtained by using the least square principle. The calculation method of channel phase shift is also illuminated in this paper. The proposed approach is simple and practical and has high precision. The test results on the WDGL-IV electric power fault recorder prove that the channel calibration algorithm is effective in improving the measurement precision.

Key words: electric power fault recorder; least square method