

基于 EMD 和误差匹配的动态测试系统误差溯源

邬肖敏, 李世平, 程双江
(第二炮兵工程大学, 西安 710025)

摘要: 为掌握动态测试系统的误差特性及传输特性,在全系统动态精度理论的基础上,提出了一种基于 EMD 和误差匹配相结合的方法。该方法首先采用 EMD 对动态测试系统的输出误差进行分解,然后根据分解结果进行误差匹配溯源。仿真结果表明,该方法能够有效地追溯到误差产生的源头,速度快,效率高,具有较强可行性和应用性。

关键词: 经验模态分解; 误差匹配; 动态测试系统; 误差溯源

中图分类号: V271.4; TP181 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-637X(2015)04-0092-03

Error Tracing of Dynamic Measurement System Based on EMD and Error Matching

WU Xiao-min, LI Shi-ping, CHENG Shuang-jiang
(The Second Artillery Engineering University, Xi'an 710025, China)

Abstract: To understand error properties and transmission properties of dynamic measurement system, a new method was put forward by combining EMD with error matching based on the theory of whole system dynamic precision. Firstly, EMD was used to decompose the output error of dynamic measurement system, and error matching was used to seek error sources according to the results of decomposition. Simulation results show that the method can trace error effectively with high speed and high efficiency. Therefore, it is highly feasible and applicable.

Key words: empirical mode decomposition; error matching; dynamic measurement system; error tracing

0 引言

现代测量技术随着科学技术的快速发展不断地向更高水平发展。文献[1]中提到,动态测量精度问题一直是工程测量人员和仪器设计人员关注的重点。误差溯源为掌握动态测试系统内部组成模块的动态特性及其相互之间的传递关系、提高动态测量的精度提供了理论依据。误差溯源的前提是误差分解,文献[2]分别运用了小波和神经网络对动态测试系统误差进行分解,对比了两种方法的优缺点;文献[3-4]则是将小波与神经网络这两种方法结合之后对动态误差进行分解及溯源,达到了理想的效果。本文是将经验模态分解和误差匹配这两种方法相结合对动态测试系统误差进行处理,避免了小波神经网络分解时需提前选取小波基函数的问题且缩短了溯源时间。

1 误差溯源基本原理

动态误差溯源建立在全系统精度理论^[5-6]的基础上,本文首先采用经验模态分解方法(Empirical Mode Decomposition, EMD)进行分解,然后利用误差匹配的方法追溯到系统内部产生该误差的模块,据此分析其误差特性。

1.1 经验模态分解基本原理

EMD 是由美国宇航局的黄锷博士提出的一种根据数据自身的时间尺度特性进行分解的方法,能自适应地生成固有模态函数,即 IMF。由 EMD 分解出来的固有模态函数必须满足以下两个条件:

- 1) 在整个数据序列中,极值点和过零点的数目必须相等或最多相差一个;
- 2) 在任意时间点上,信号局部极大值确定的上包络线和局部极小值确定的下包络线的均值为 0。

EMD 对信号 $x(t)$ 的分解过程如下所述。

- 1) 设 $r_0(t) = x(t)$, 取 $r_0(t)$ 的局部极大值点和极小值点,通过三次样条插值函数拟合出上下包络线,计

算出两条包络线的平均值 $m_1(t)$ 。

2) 计算出 $h_1(t) = r_0(t) - m_1(t)$ ，若满足终止条件，则 $c_1(t) = h_1(t)$ ；若不满足终止条件，则将 $h_1(t)$ 视为待处理信号，重复以上步骤，这就是“筛过程”。为保证 IMF 分量的频率调制和幅度调制都有意义，黄锷等人提出通过限制标准差 SD 来停止“筛过程”，SD 的值常取 0.2 ~ 0.3 之间，其表达式为

$$S_{SD} = \frac{\sum_0^T |h_{k-1}(t) - h_k(t)|^2}{\sum_0^T |h_{k-1}(t)|^2} \quad (1)$$

若经过 k 次筛选后， $h_k(t)$ 满足终止条件，则 $h_k(t)$ 为第一个 IMF 分量，记作 $c_1(t)$ 。

3) 设 $r_1(t) = x(t) - c_1(t)$ ，则 $r_1(t)$ 为 $x(t)$ 去掉高频分量后的信号，将 $r_1(t)$ 视为新的待处理信号，跳至步骤 1)，依次得到 $c_2(t), c_3(t), \dots$ ，若 n 次后， $c_n(t)$ 或 $r_n(t)$ 满足终止条件时分解终止，则分解结果可表示为

$$x(t) = \sum_1^n c_i(t) + r_n(t) \quad (2)$$

1.2 误差匹配的基本原理

根据全系统动态精度理论，典型的测试系统是一个混联式动态测试系统^[7]，其结构如图 1 所示。

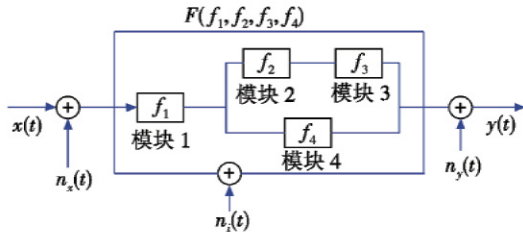


图1 混联式动态测试系统

Fig.1 Dynamic measurement system

图 1 中： f_1, f_2, f_3, f_4 分别表示模块 1, 2, 3, 4 的传递函数； $x(t), y(t)$ 分别表示系统的输入和输出； $n_x(t), n_i(t), n_y(t)$ 分别表示输入环节、中间过程、输出环节外界环境对系统的干扰。设 $e_1(t), e_2(t), e_3(t), e_4(t)$ 分别表示模块 1, 2, 3, 4 产生的误差，则系统输出总误差为

$$e_y(t) = n_x(t)F(f_k) + e_f + n_y(t) + n_i(t) \quad (3)$$

式中：

$$e_f = [e_1(t)f_2 + e_2(t)]f_3 + e_3(t) + e_1(t)f_4 + e_4(t) \quad (4)$$

$$F(f_k) = f_1 f_4 + f_1 f_2 f_3 \quad (5)$$

若系统输出总误差经 EMD 分解后共产生 l 种误差组合，误差溯源就是要找到这 l 种误差组合中与实际情况最为匹配的一种。设经过分解后得出的各个模块产生的误差分别为 $e_{1,i}(t), e_{2,i}(t), e_{3,i}(t), e_{4,i}(t)$ ， $i = 1, 2, 3, \dots, l$ ；在缺少先验知识的条件下，很难确定唯一的误差组合，在这里本文将误差修正^[8-10]的思想运用到误差溯源的过程中，根据分解的结果，将所有误差

组合分别代入图 1 所示的动态测试系统中，与各模块所产生的误差进行相消得

$$e_{f,i} = \{ |[e_1(t) - e_{1,i}(t)]f_2 + [e_2(t) - e_{2,i}(t)]f_3| + |[e_3(t) - e_{3,i}(t)] + [e_1(t) - e_{1,i}(t)]f_4 + |e_4(t) - e_{4,i}(t)| \} \quad (6)$$

比较 $e_{f,i}$ 的大小，选取其中最小的值；若 $i = m$ 时 $e_{f,i}$ 最小，那么，它所对应的误差组合即为所要寻找的最优误差匹配结果。

2 仿真分析

2.1 误差分解

系统中各模块传递函数分别为二阶环节、增益环节、线性环节、周期环节，具体函数为： $f_1(t) = t \sin(10\pi t + \pi/2)$ ； $f_2(t) = t + 2$ ； $f_3(t) = 3$ ； $f_4(t) = \sin(10\pi t)$ 。

模块 1, 2, 3, 4 产生的误差分别为： $e_1(t) = 0.4t$ ； $e_2(t) = 2 \sin(20\pi t)$ ； $e_3(t) = 5$ ； $e_4(t) = 6 \sin(50\pi t + \pi/4)$ 。

假设系统未受到外界干扰噪声的影响，即 $n_x(t) = 0, n_y(t) = 0$ 。根据全系统动态精度理论，系统输出总误差为 $e_f = [e_1(t)f_2 + e_2(t)]f_3 + e_3(t) + e_1(t)f_4 + e_4(t) = 1.2t^2 + 2.4t + 6 \sin(20\pi t) + 5 + 0.4t \sin(10\pi t) + 6 \sin(50\pi t + \pi/4)$ 。

对输出总误差信号进行采样，采样频率为 100 Hz，经 EMD 分解的结果如图 2 所示。

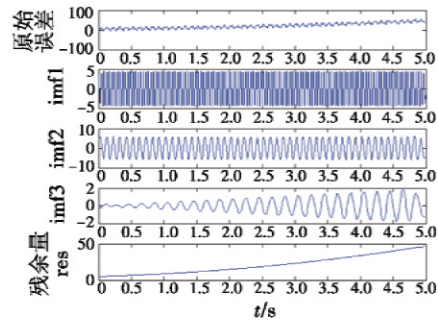


图2 EMD分解图

Fig.2 Results of decomposition by EMD

从图中可以看出，原始误差信号中包含两项周期信号：幅值随时间增大的周期信号以及趋势项信号，其频谱图如图 3 所示。

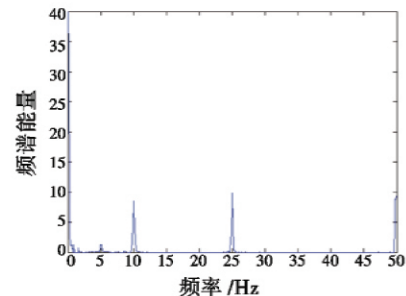


图3 频谱图

Fig.3 Frequency spectrum

从图中可以发现,在频率 5 Hz, 10 Hz, 25 Hz 处有较大的频谱能量,说明输出总误差中包含以上 3 种频率的误差信号。现对分解出来的结果进行数据拟合,分别以 5 Hz, 10 Hz, 25 Hz 的单位正弦和余弦信号作为输入信号, imf1, imf2, imf3 作为输出信号,用线性神经网络对图 2 分解出的固有模态函数进行拟合,用最小二乘法对残余量 res 进行拟合,得到如下所示的结果:

$$e_f = 1.184 1t^2 + 2.471 4t + 4.947 + 5.971\sin(157.1t + 0.787 1) + 5.987\sin(62.83t + 0.001 169) + 0.375 7t \cdot \sin(31.42t - 0.051 39) \approx 1.184 1t^2 + 2.471 4t + 4.947 3 + 5.971\sin(50\pi t + \pi/4) + 5.987\sin(20\pi t) + 0.375 7t \cdot \sin(10\pi t)。$$

原始误差信号与重构的误差信号如图 4 所示。

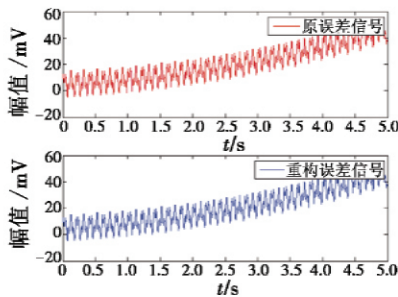


图 4 原始误差与重构误差

Fig. 4 Original error and reconstructive error

比较图中重构误差信号与原误差信号发现,EMD 分解后的误差信号经过拟合重组后,表现出与误差信号基本相同的性质,说明 EMD 对于动态误差信号的分解结果可信。

2.2 误差溯源

若已知系统内各模块的传递特性表达式,并且单个模块只会产生一种频率的误差信号。现根据误差溯源的基本原理对图 1 所示的动态测试系统进行误差溯源。由重构误差信号的函数表达式和各模块的传递函数进行对比,可以得出 $e_{10} = 0.375 7t$,去除 e_{10} 的影响后对输出总误差进行分析,可能的组合共有 6 种,分别为:

$$1) e_{2,1} = (0.057t^2 + 0.217 2t + 4.947 3)/3, e_{3,1} = 5.971\sin(50\pi t + \pi/4), e_{4,1} = 5.987\sin(20\pi t);$$

$$2) e_{2,2} = (0.057t^2 + 0.217 2t + 4.947 3)/3, e_{3,2} = 5.987\sin(20\pi t), e_{4,2} = 5.971\sin(50\pi t + \pi/4);$$

$$3) e_{2,3} = 5.971\sin(50\pi t + \pi/4)/3, e_{3,3} = 0.057t^2 + 0.217 2t + 4.947 3, e_{4,3} = 5.987\sin(20\pi t);$$

$$4) e_{2,4} = 5.971\sin(50\pi t + \pi/4)/3, e_{3,4} = 5.987 \cdot \sin(20\pi t), e_{4,4} = 0.057t^2 + 0.217 2t + 4.947 3;$$

$$5) e_{2,5} = 5.987\sin(20\pi t)/3, e_{3,5} = 5.971\sin(50\pi t + \pi/4), e_{4,5} = 0.057t^2 + 0.217 2t + 4.947 3;$$

$$6) e_{2,6} = 5.987\sin(20\pi t)/3, e_{3,6} = 0.057t^2 + 0.217 2t +$$

$$4.947 3, e_{4,6} = 5.971\sin(50\pi t + \pi/4)。$$

根据误差匹配的原理,计算各种情况下的 e_f ,其结果如图 5 所示。

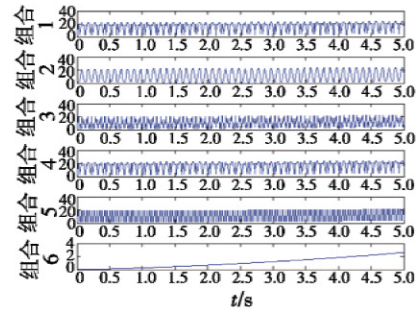


图 5 误差匹配结果

Fig. 5 Results of error matching

由图可知组合 6 所对应的误差幅值最小,所以认为误差组合 6 就是所要找的目标,即 $e_{10} = 0.375 7t, e_{20} = 5.987\sin(20\pi t)/3, e_{30} = 0.057t^2 + 0.217 2t + 4.947 3, e_{40} = 5.971\sin(50\pi t + \pi/4)。$

将经误差匹配方法寻找到的各个模块的误差与原误差进行对比,仍以 100 Hz 的频率进行采样,取 500 个点。通过对比可以发现, e_1 与 e_{10} 的最大偏差出现在第 500 个采样点,偏差值为 0.121 5; e_2 与 e_{20} 的最大偏差出现在第 17 个采样点,偏差值为 0.004 1; e_3 与 e_{30} 的最大偏差出现在第 500 个采样点,偏差值为 2.458 3; e_4 与 e_{40} 的最大偏差出现在第 473 个采样点,偏差值为 0.020 5。

3 结论

本文提出了运用 EMD 和误差匹配相结合的方法对动态测试系统进行误差溯源。通过仿真可以发现,该方法不需要对单个模块逐一进行检测,是一种快速有效的误差溯源方法,且溯源的精度较高,最大偏差为 10^{-1} ,这对于动态测试误差的研究具有一定的应用价值。但是本文所提出的方法需要大量数据的支持且未对分解与重构过程中产生的误差进行处理,仍有待于进一步优化。

参考文献

- [1] 许桢英,费业泰,陈晓怀. 动态精度理论研究与发展[J]. 仪器仪表学报, 2001(s2): 70-71, 74. (XU Z Y, FEI Y T, CHEN X H. Study and develop of the theory of the accuracy of dynamic measurement[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2001(s2): 70-71, 74.)
- [2] 许桢英. 动态测量系统误差溯源与精度损失诊断的理论与方法研究[D]. 合肥:合肥工业大学, 2004. (XU Z Y. Research on theory and method of error tracing and accuracy-loss diagnosis of dynamic measurement system [D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2004.)

(下转第 104 页)

- 直径测量系统[J]. 传感器与微系统, 2014(1): 120-122, 129. (YU Z J, LIU Y L, ZHUGE J C. High precision double linear array CCD non-contact diameter measurement system[J]. Transducer and Microsystem Technologies, 2014(1): 120-122, 129.)
- [5] 周建勇, 陈红兵, 袁世顺, 等. 一种 CCD 驱动时序参量化设计方法[J]. 半导体光电, 2013(6): 1055-1059, 1081. (ZHOU J Y, CHEN H B, YUAN S S, et al. Design of parametric CCD drive timing pulses[J]. Semiconductor Optoelectronics, 2013(6): 1055-1059, 1081.)
- [6] 唐亚军, 郭喜庆, 杨敬娴, 等. 基于 51 单片机的线阵 CCD 驱动设计[J]. 微型机与应用, 2013(12): 73-76. (TANG Y J, GUO X Q, YANG J X, et al. Design of linear CCD drive based on 51 single-chip processor[J]. Microcomputer & Its Applications, 2013(12): 73-76.)
- [7] SAN H L, FEI J. Design of linear CCD driving circuit based on SCM[J]. Procedia Engineering, 2012, 29: 165-169.
- [8] 陈骥, 王鑫, 曹久大, 等. 高速 CCD 激光位移传感器[J]. 光学精密工程, 2008(4): 611-616. (CHEN J, WANG X, CAO J D, et al. Development of high-speed CCD laser displacement sensor[J]. Optics and Precision Engineering, 2008(4): 611-616.)
- [9] 余方玉, 赵美蓉, 林玉池, 等. 步进电机矩角关系连续测试方法的研究[J]. 中国机械工程, 2014(3): 333-336. (YU F Y, ZHAO M R, LIN Y C, et al. Study on continuous test method of stepper motor torque-angle relationship[J]. Chinese Mechanical Engineering, 2014(3): 333-336.)
- [10] 孙孔政, 徐抒岩, 曹小涛, 等. 基于矩频曲线的步进电机加减速控制[J]. 微电机, 2014, 47(1): 81-85. (SUN K Z, XU S Y, CAO X T, et al. Speed control of step motor based on torque curve[J]. Micromotors, 2014, 47(1): 81-85.)
-
- (上接第 82 页)
- [4] 吴振森, 谢东辉, 谢品华, 等. 粗糙表面激光散射统计建模的遗传算法[J]. 光学学报, 2002, 22(8): 897-901. (WU Z S, XIE D H, XIE P H, et al. Genetic algorithm of statistical modeling about roughened surface laser scattering[J]. Acta Optica Sinica, 2002, 22(8): 897-901.)
- [5] 谭安胜. 水面舰艇编队作战运筹分析[M]. 北京: 国防工业出版社, 2009. (TAN A S. Operations analysis of surface warship formation[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2009.)
-
- (上接第 94 页)
- [3] 李晓惠. 动态测量误差分解及溯源研究[D]. 合肥: 合肥工业大学, 2006. (LI X H. Research on error separating and tracing of dynamic measurement[D]. Hefei: Hefei University of Technology, 2006.)
- [4] 李晓惠, 陈晓怀, 卫兵. 基于神经网络的动态测量误差分解研究[J]. 工业计量, 2005(6): 6-9. (LI X H, CHEN X H, WEI B. Research on error decomposition of dynamic measurement based on neural network method[J]. Industrial Measurement, 2005(6): 6-9.)
- [5] 李世平, 付宇, 张进. 一种基于 EMD 的系统误差分离方法[J]. 中国测试, 2011, 37(3): 9-13, 36. (LI S P, FU Y, ZHANG J. Systematic error separation method based on EMD[J]. China Measurement and Test, 2011, 37(3): 9-13, 36.)
- [6] 张俊玲. 减小测量误差的测量方法研究[J]. 大学物理实验, 2010, 23(1): 71-73. (ZHANG J L. Measurement method of reduce the measurement error[J]. Physical Experiment of College, 2010, 23(1): 71-73.)
- [7] 马强, 许桢英. 动态测量误差溯源方法研究[J]. 安徽机电学院学报, 2001, 16(4): 22-25. (MA Q, XU Z Y. The tracing of dynamic measurement errors[J]. Journal of Anhui Institute of Mechanical and Electrical Engineering, 2001, 16(4): 22-25.)
- [8] 黄迪山. 经验模态分解中虚假模态分量消除法[J]. 振动、测试与诊断, 2011, 31(3): 381-384. (HUANG D S. Effect of sampling on empirical mode decomposition and correction[J]. Journal of Vibration, Measurement and Diagnosis, 2011, 31(3): 381-384.)
- [9] 陈茉莉, 李舜韶, 饶新阳. 基于时域特征识别微频差信号[J]. 仪器仪表学报, 2012, 33(6): 1234-1239. (CHEN M L, LI S M, RAO X Y. Micro frequency difference signal identification based on time domain characteristics[J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2012, 33(6): 1234-1239.)
- [10] 谢永成, 贺芳君, 李光升, 等. 基于改进型小波神经网络的灭火系统故障诊断[J]. 电子测量技术, 2012, 35(4): 128-131. (XIE Y C, HE F J, LI G S, et al. Fire-extinguishing system fault diagnosis based on improved wavelet neural network[J]. Electronic Measurement Technology, 2012, 35(4): 128-131.)