

基于改进时间序列方法的 HRG 输出建模预测

王 琪, 汪立新, 田 颖
(第二炮兵工程大学 304 教研室, 西安 710025)

摘 要: 针对半球谐振陀螺仪的输出可能不符合时间序列分析的平稳性要求的问题, 提出了一种基于经验模态分解的改进时间序列灰色预测方法, 该方法将经验模态分解、时间序列建模和灰色预测结合起来。首先利用经验模态分解对陀螺仪的输出原始信号进行预处理, 分解得到原始信号中包含的随机项和趋势项, 然后对这些信号进行平稳性检验, 根据检验结果选择时间序列分析和灰色预测对这些数据分别进行建模预测, 最后将预测结果进行重构得到最终的预测值。仿真实验结果表明, 该方法的预测效果比单独使用时间序列分析进行建模预测的效果要好。

关键词: 半球谐振陀螺仪; 输出预测; 时间序列分析; 经验模态分解; 灰色预测

中图分类号: U666.1 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-637X(2015)03-0036-03

HRG's Output Modeling and Prediction Based on Improved Time Series Method

WANG Qi, WANG Li-xin, TIAN Ying

(No. 304 Teaching and Research Section, The Artillery Engineering University, Xi'an 710025, China)

Abstract: In order to solve the problem that HRG's output may not satisfy the stability requirement of time series analysis, an improved time series-grey prediction method based on empirical mode decomposition was proposed. This method combined empirical mode decomposition with time series modeling and grey prediction. First, the empirical mode decomposition was used for preprocessing the original signals of the gyro, and separating the trend part from random part. Then, the stability of the signals was analyzed, and time series analysis and grey prediction were used to model and predict the data according to the result of analysis. At last, the final prediction result was obtained by reconstructing the prediction result. Simulation results demonstrate that the prediction effect of this method is better than the one using time series analysis alone.

Key words: hemispherical resonator gyro; output prediction; time series analysis; empirical mode decomposition; grey prediction

0 引言

半球谐振陀螺仪(Hemispherical Resonator Gyro, HRG)作为一种新型陀螺,与经典的机械式陀螺相比,由于没有高速旋转的转子、轴承和与摩擦有关的机械部件,具有长寿命的突出优点^[1]。因此,利用其输出的历史数据对陀螺的输出进行预测,及时给出陀螺仪的输出稳定性评价,对于 HRG 的实际应用具有重大意义。由于影响 HRG 输出的因素很多,因此陀螺的输出

数据常会呈现较强的非线性和非平稳性,这对于陀螺输出的建模预测是非常不利的。从本质上讲,经验模态分解(Empirical Mode Decomposition, EMD)是一个对信号进行平稳化处理的方法,将信号中真实存在的不同尺度波动或趋势逐级分解出来,产生一系列具有不同特征尺度的数据序列,而且经验模态分解的结果完全由信号本身决定,是一种自适应信号分解方法,因而适用于输出信号具有较强非线性和非平稳性的 HRG 的输出信号处理。

1 经验模态分解

经验模态分解(EMD)是美国学者 HUANG N E 于 1998 年提出的一种非平稳非线性信号的分析方法,它

收稿日期:2014-05-21

修回日期:2014-06-14

基金项目:总装探索研究项目(2010TC4303)

作者简介:王 琪(1991—),男,四川简阳人,硕士生,研究方向为半球谐振陀螺仪原理及应用。

通过对信号的筛选把信号分解成不同频率的本征模态函数(Intrinsic Mode Function, IMF)和一个余项的和。IMF 分量反映信号的内部特征,余项表示信号的趋势。每个 IMF 分量都是单分量的幅值或频率调制信号,且满足以下两个条件^[2]:

1) 整个信号中零点与极点数相等或者最多相差 1;

2) 信号上任意一点,由局部极大值确定的包络线和局部极小值确定的包络线的均值均为零,即信号关于时间轴局部对称。

经验模态分解由以下几个步骤组成^[3]:

1) 找出原始信号 $x(t)$ 的所有局部极值点,分别将所有极大值点和极小值点用两条曲线连接起来,得到上、下包络线,记上、下包络线的均值为 $m(t)$;

2) 记 $x(t)$ 与 $m(t)$ 的差为 $h_1(t)$,如果 $h_1(t)$ 不满足上述的 IMF 分量的两个条件,则将 $h_1(t)$ 作为原始信号重复以上步骤,直至 $h_{1k}(t)$ 满足 IMF 分量的两个条件,此时记 $c_1(t) = h_{1k}(t)$;

3) 用原始信号减去得到的第一个 IMF 分量得到剩余信号,将剩余信号作为新的原始信号重复以上步骤,直至剩余信号变成一个单调序列,其中不再包含任何模式信息,即为分解后的余项。

2 灰色理论

灰色理论是中国邓聚龙教授于 1982 年创立的,是一种研究少数据、贫信息不确定性的新方法。灰色预测理论是通过累加操作的方法,对无规则的原始数据进行处理,从而弱化原始数据的随机性和波动性,生成有规则的准指数规律的数据,然后对这些生成的数据进行建模、预测^[4]。传统的 GM(1,1)模型的建模步骤如下所述^[5-6]。

1) 对原始数据 $x^{(0)}(k)$ 进行一次累加操作,得到

$$x^{(1)}(k) = \sum_{i=1}^k x^{(0)}(i) \quad (1)$$

2) 对 $x^{(1)}(t)$ 做紧邻均值生成,得均值生成

$$z^{(1)}(k) = \frac{1}{2} [x^{(1)}(k) + x^{(1)}(k-1)] \quad (2)$$

3) 得出 GM(1,1) 灰色微分方程。若 $\hat{a} = (a, b)^T$ 为参数列,且

$$B = \begin{bmatrix} -z^{(1)}(2) & 1 \\ -z^{(1)}(3) & 1 \\ \vdots & \vdots \\ -z^{(1)}(n) & 1 \end{bmatrix}, \quad Y = \begin{bmatrix} x^{(0)}(2) \\ x^{(0)}(3) \\ \vdots \\ x^{(0)}(n) \end{bmatrix} \quad (3)$$

则 GM(1,1) 灰色微分方程为

$$x^{(0)}(k) + ax^{(1)}(k) = b \quad (4)$$

4) 微分方程的白化。将式(2)代入式(3)可得白化方程为

$$\frac{dx^{(1)}(t)}{dt} + ax^{(1)}(t) = b \quad (5)$$

解此微分方程可得离散解为

$$\hat{x}^{(1)}(k+1) = \left(x^{(0)}(1) - \frac{b}{a}\right)e^{-ak} + \frac{b}{a} \quad (6)$$

5) 运用最小二乘法对参数 a 和 b 进行估计,有

$$\hat{a} = (B^T B)^{-1} B^T Y \quad (7)$$

将 a 和 b 的估计值代入式(6),从而得到预测模型。最后对预测数据经累减处理可得原始数据的预测公式为

$$\hat{x}^{(0)}(k+1) = x^{(1)}(k+1) - x^{(1)}(k) = \left(x^{(0)}(1) - \frac{b}{a}\right)(1 - e^{-a})e^{-ak} \quad (8)$$

3 新预测模型算法

由于 HRG 的输出具有较强的非线性和非平稳性,不能直接运用时间序列分析对其进行建模预测。因此,在本文中首先运用 EMD 方法对原始输出数据进行分解,得到其 IMF 分量和趋势项^[7],然后分别对两种信号选择合适的建模方法进行建模预测,算法的具体步骤如下:

1) 运用 EMD 方法对原始数据进行分解,得到各 IMF 分量和趋势项;

2) 对各 IMF 分量和趋势项进行平稳性检验,若信号平稳,则运用时间序列分析建立时间序列模型^[8-9],否则运用灰色建模方法建立 GM(1,1)模型;

3) 运用建立的时间序列模型和 GM(1,1)模型对各 IMF 分量和趋势项分别进行预测得到预测值;

4) 将各预测值重组得到最终的预测值。

新算法流程如图 1 所示。

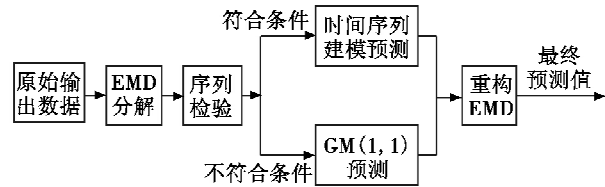


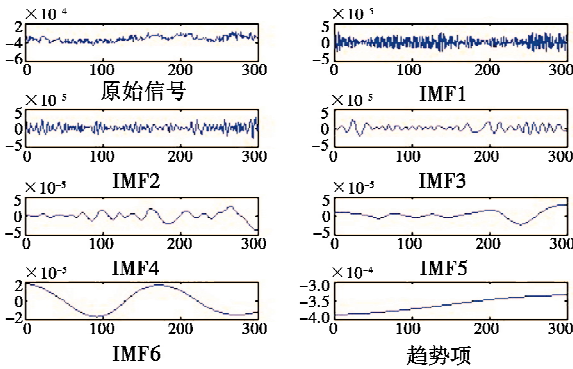
图 1 新算法流程图

Fig. 1 Flow chart of the new algorithm

4 算例应用与分析

现有 HRG 的输出原始数据 360 个,在新算法的应用中,将前 300 个数据作为原始数据,分别运用时间序列分析和本文提出的新算法进行建模,并预测出后 60 个数据与原始数据进行对比,以检验新算法的可靠性。

首先利用 EMD 方法对原始数据进行分解,分解结果如图 2 所示。



图中横坐标为数据序列数, 纵坐标为各分解量的值, 单位为V。

图2 信号分解结果

Fig. 2 Result of signal decomposing

然后对分解所得的 IMF 分量和趋势项进行平稳性检验。检验结果表明,6 个 IMF 分量满足时间序列分析的条件,可以运用时间序列分析进行建模预测,而趋势项不满足时间序列分析的条件,需要运用灰色建模方法建立 GM(1,1)模型^[10],各数据建模结果如表 1 所示。

表1 IMF 分量和趋势项建模结果

Table 1 Modeling results of IMF and trend part

数据	IMF1	IMF2	IMF3
模型	ARMA(3,1)	AR(3)	ARMA(2,1)
参数	a_1	0.078 2	0.347 6
	a_2	0.246 9	-0.108 7
	a_3	0.063 2	-0.183 9
	b_1	-0.004 2	0.000 4
数据	IMF4	IMF5	IMF6
模型	ARMA(2,1)	ARMA(2,1)	ARMA(2,1)
参数	a_1	1.963 5	1.980 1
	a_2	-0.987 4	-0.986 5
	a_3	-0.983 8	-0.983 8
	b_1	0.194 7	0.219 4

最后运用表 1 中建立的模型对各 IMF 分量和趋势项进行预测,将预测结果进行重构,得到最终的预测结果,并与真实信号和直接运用时间序列分析得到的预测结果相比较,如图 3 所示。

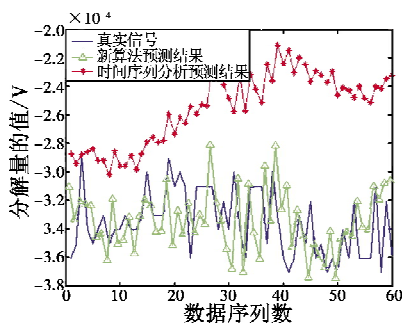


图3 预测结果比较

Fig. 3 Comparison of prediction results

从图 3 可以看出,本文提出的新型预测算法比直接运用时间序列分析建模的效果要好。定义平均相对误差为

$$\delta = \frac{1}{60} \sum_{i=1}^{60} \left| \frac{x_i - xl_i}{xl_i} \right| \times 100\% \quad (9)$$

式中: x_i 为 i 时刻的预测值; xl_i 为 i 时刻的真实值。经计算可得,该次预测的平均相对误差为 7.01%。

5 结论

本文针对 HRG 的输出序列具有较强的非平稳性和非线性、不能直接运用时间序列分析进行建模预测的问题,提出了一种基于 EMD 的新型时间序列灰色建模预测方法。这种新算法利用了经验模态分解处理非平稳、非线性信号的优势对原始数据进行预处理,使其能够适用于时间序列建模和灰色预测。在仿真实验中可以看出,该方法的预测效果比单独运用时间序列分析的效果要好,说明这种新型预测模型可以有效处理非平稳、非线性信号的时间序列建模预测问题。但是从结果中可以看出,该算法的平均相对误差还是相对较大,说明该算法还有进一步改进的可能,主要改进的方面应该在对各 IMF 分量和趋势项选择更加合适的建模方法,以提高预测结果的精确度。

参考文献

- [1] 李成. 半球谐振陀螺仪稳定平台数字控制系统研究 [D]. 西安:第二炮兵工程大学,2013. (LI C. Research on digital control system of HRG-based stabilized platform [D]. Xi'an: The Second Artillery Engineering University, 2013.)
- [2] 羊初发. 基于 EMD 的时频分析与滤波研究 [D]. 成都:电子科技大学,2009. (YANG C F. Time frequency analysis and filtering study [D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology of China, 2009.)
- [3] HUANG N E, SHEN Z, LONG S R, et al. The empirical mode decomposition and the Hilbert spectrum for nonlinear and non-stationary time series analysis [J]. Proceedings of the Royal Society of London, 1998, 454: 903-995.
- [4] 邓聚龙. 灰色系统基本方法 [M]. 武汉:华中理工大学出版社,1987. (DENG J L. Basic method of grey system [M]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology Press, 1987.)
- [5] LEI M L, FENG A R. Modeling electricity price forecast with grey and correlation method in competitive markets [C]//Asia-Pacific Power and Energy Engineering Conference, Piscataway NJ: IEEE, 2010: 1-4.
- [6] LI S H, WANG Y N. The grey prediction of effectiveness of strut intensity of hydraulic tressel [J]. The Journal of Grey System, 1994, 6(2): 119-12.
- [7] 张秋昭,张书毕,侯东阳. 基于经验模态分解的光纤陀螺 (下转第 44 页)

- an-low resolution [D]. Changsha: National University of Defense Technology, 2008.)
- [2] GUAN J, CHEN X L, HUANG Y, et al. Adaptive fractional fourier transform-based detection algorithm for moving target in heavy sea clutter [J]. IET Radar Sonar Navigation, 2012, 6(5): 389-401.
- [3] 隆刚, 陈学佳. 高分辨率遥感图像港内舰船的自动检测方法 [J]. 计算机仿真, 2007, 24(5): 198-201. (LONG G, CHEN X Q. A method for automatic detection of ships in harbor area in high-resolution remote sensing image [J]. Computer Simulation, 2007, 24(5): 198-201.)
- [4] 张振. 高分辨率可见光遥感图像港口及港内目标识别方法研究 [D]. 北京: 中国科学技术大学, 2005. (ZHANG Z. A study on harbor target recognition in high resolution optical remote sensing image [D]. Beijing: University of Science and Technology of China, 2005.)
- [5] 周静, 田金文. 基于海岸线背景的海面小目标检测方法 [J]. 红外与激光工程, 2005, 34(4): 486-489. (ZHOU J, TIAN J W. Method of detecting small target in port-sea background [J]. Infrared and Laser Engineering, 2005, 34(4): 486-489.)
- [6] 沈叶健, 徐守时. 一种有效的可见光图像中水坝目标的识别方法 [J]. 计算机应用, 2006, 26(8): 1972-1974. (SHEN Y J, XU S S. Effective method for dam recognition from visible images [J]. Computer Applications, 2006, 26(8): 1972-1974.)
- [7] 荆浩, 陈学佳, 顾志伟. 一种基于边缘特征的海岸线检测方法 [J]. 计算机仿真, 2006, 23(8): 89-93. (JING H, CHEN X Q, GU Z W. A method for coastline extraction based on edges [J]. Computer Simulation, 2006, 23(8): 89-93.)
- [8] 李琨, 郑庆晖, 廖冬学. 基于梯度特征的图像自动分割方法 [J]. 宇航学报, 2006, 27(6): 1288-1292. (LI K, ZHENG Q H, LIAO D X. An automatic image segmentation approach based gradient [J]. Journal of Astronautics, 2006, 27(6): 1288-1292.)
- [9] 蔡姝, 吴宏明. 基于海陆分割的舰船目标变化检测研究 [J]. 电视技术, 2010, 34(5): 109-112. (CAI S, WU H M. Study on change detection of ship target based on sea-land segmentation [J]. Video Engineering, 2010, 34(5): 109-112.)
- [10] 瞿继双, 王超, 王正志. 一种基于多阈值的形态学提取遥感图象海岸线特征方法 [J]. 中国图象图形学报, 2003, 8(7): 87-91. (QU J S, WANG C, WANG Z Z. A multi-threshold based morphological approach for extracting coastal line feature from remote sensed images [J]. Journal of Image and Graphics, 2003, 8(7): 87-91.)
- [11] 肖利平, 曹炬, 高晓颖. 复杂海地背景下的舰船目标检测 [J]. 光电工程, 2007, 34(6): 6-10. (XIAO L P, CAO J, GAO X Y. Detection for ship targets in complicated background of sea and land [J]. Opto-Electronic Engineering, 2007, 34(6): 6-10.)
- [12] CARRETERO-MOYA J, GISMERO-MENOYO J, ASENSIO-LOPEZ A, et al. A small-target detection in high-resolution heterogeneous sea clutter: An empirical analysis [J]. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, 2011, 47(3): 1880-1898.
- (上接第 38 页)
- 螺随机序列平稳化处理 [J]. 传感技术学报, 2011, 24(10): 1440-1444. (ZHANG Q Z, ZHANG S B, HOU D Y. FOG random sequence pretreatment using empirical mode decomposition [J]. Chinese Journal of Sensors and Actuators, 2011, 24(10): 1440-1444.)
- [8] 杨位钦, 顾岚. 时间序列分析与动态数据建模 [M]. 北京: 北京理工大学出版社, 1988. (YANG W Q, GU L. Time series analysis and dynamic data modeling [M]. Beijing: Beijing Institute of Technology Press, 1988.)
- [9] 首招勇, 杨媛媛. 时间序列问题的建模方法和过程 [J]. 数学理论与运用, 2012, 32(1): 112-120. (SHOU Z Y, YANG Y Y. On the modeling of time series [J]. Mathematical Theory and Applications, 2012, 32(1): 112-120.)
- [10] 李潇. 灰色最小二乘支持向量机在滑坡变形预测中的应用 [J]. 测绘通报, 2010, 6: 44-46. (LI X. Application of grey least square support vector machine in landslides deformation prediction [J]. Bulletin of Surveying and Mapping, 2010, 6: 44-46.)

本刊国内邮发代号为 36-693 欢迎订阅