

基于 BBSRIA 的测量系统动态精度损失分解与溯源^{*}

蒋敏兰 汪晓东

【摘要】 利用单子带信号重构改进算法在信号分解中的优势,实现了对测量系统动态精度损失信号的有效分解,得到测量系统各主要结构单元的频率成分,在此基础上利用神经网络所具有的输入到输出之间的非线性映射能力完成求解各频率成分所包含的未知参数。同时根据测量系统内部各结构单元的误差特性完成分解信号的溯源。实验结果表明利用单子带信号重构改进算法可以实现精度损失信号的可靠分解与溯源。

关键词: 测量系统 单子带重构改进算法 动态精度损失分解与溯源

中图分类号: TH115

文献标识码: A

Dynamic Accuracy Loss Decomposition and Tracing of Measuring System Based on BBSRIA

Jiang Minlan Wang Xiaodong

(Zhejiang Normal University, Jinhua 321004, China)

Abstract

Based on whole-system dynamic error modeling method and theory, the theory and method of dynamic accuracy loss decomposition and tracing were studied. Using bill belt signal reconstruction improvement arithmetic, the accuracy loss signal of emulation system was decomposed, its frequency components of the system's main insider structural units was obtained. Then by using non-linear mapping ability from input to output of BP NN, model parameters of the built accuracy loss function model of each insider cells were estimated, and the signals decomposing were achieved. Using the error characteristic of each insider structural units and the systemic whole error model, the signals tracing were achieved. Experimental result indicated that by using BBSRIA (bill belt signal reconstruction improvement arithmetic), reliably decompose and tracing of the accuracy loss signal could be achieved.

Key words Measuring system, Bill belt signal reconstruction improvement arithmetic, Theory of dynamic accuracy loss decomposition and tracing

引言

动态精度损失分解与溯源理论是测量精度理论的重要内容之一,测量系统精度损失溯源研究就是利用合适的信号分析方法和参数估计方法,根据系统不同测量阶段输出总误差是内部各结构单元误差综合作用的结果,根据各结构单元误差特性以及系统输出总误差特性,将测量系统各测量阶段的输出总误差分解并溯源到内部各结构单元,从而得到测量系统及其内部各结构单元的误差变化规律,即掌

握测量系统及其内部各单元的精度损失规律,同时分辨出各结构

单元的精度损失对测量系统总精度损失的影响程度。这为下一步有效提高测量系统的精度,对测量系统进行精度均匀性设计提供理论依据。

单子带重构改进算法(bill belt signal reconstruction improvement arithmetic,简称BBSRIA)从Mallat分解算法产生频率折叠的根本入手,采用傅里叶变换及逆变换消除了各子带上的多余频率成分,从而实现精度损失信号的有效分解。

收稿日期:2007-10-08

^{*} 国家自然科学基金资助项目(项目编号:50675057)和高等学校博士学科点专项科研基金资助项目(项目编号:20040359011)

蒋敏兰 浙江师范大学数理信息学院 讲师,321004 金华市

汪晓东 浙江师范大学数理信息学院 教授

在此基础上,利用 BP 神经网络的非线性映射能力实现分解信号参数的识别。

本文对一仿真实例的精度损失信号进行分解与溯源研究,首先利用单子带信号重构改进算法对系统总精度损失信号进行分解,在此基础上,用一三层 BP 网络实现对相关参数的估计,结合系统内部各结构单元的误差特性实现精度损失的溯源。

1 单子带信号重构改进算法

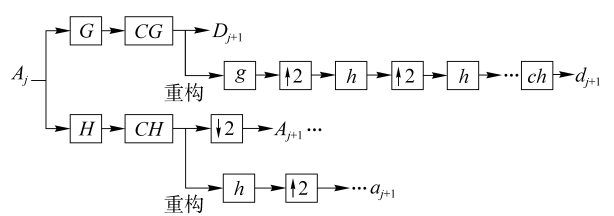
动态测量精度损失分解与溯源的实现是建立在对动态测量数据处理过程之上的,动态测量数据处理过程可分为 3 个阶段:预处理、成分分离、参数估计与成分结果表示,其中第 2 阶段是关键。在数据经过预处理阶段初辨出其统计特性以及所含粗略成分(如趋势项和周期项)之后,就进入成分分离阶段。完成成分分离之后就需要确定各成分的相关参数,实现成分的参数估计,获得各成分的结果表示^[1-2]。

以识别、提取确定性成分为主的信号处理方法主要可分为拟合法和滤波法。拟合法主要应用各种广义回归分析方法,包括传统的最小二乘法回归分析、稳健性回归分析、最小最大法回归分析、逐步回归分析、阻尼最小二乘法回归分析、有偏回归分析、递推最小二乘法回归分析等^[3-5];而对于周期性成分则常采用各种频谱分析方法、Mallat 分解算法及其在这两者的基础上发展起来的各种改进算法来实现。

小波多分辨分析在时频两域都具有表征信号局部特征的能力,很适合分析信号的成分,被誉为分析信号的显微镜。但是 Mallat 算法本身存在缺陷,由 Mallat 算法得到的小波系数,从频率成分上看,各层(尺度)的高频子带(细节)部分存在频率折叠,当用 Mallat 算法来提取一个复杂信号中的某个、某几个频率成分或某个频段的信号分量时,Mallat 算法中的频率折叠是一个明显的不容忽视的缺陷^[6-9]。

单子带信号重构改进算法是在小波 Mallat 分解算法的基础上发展起来的,其基本思想是利用傅里叶变换和傅里叶逆变换来去除各子带中多余的频率成分,这样单子带重构信号中将不存在频率混淆。单子带重构改进算法如图 1 所示^[8-9]。

在图 1 中 A_j 表示第 2^j 尺度上的近似部分(低频子带), A_{j+1} 和 D_{j+1} 分别表示第 2^{j+1} 尺度上的近似部分和细节部分(高频子带), a_{j+1} 和 d_{j+1} 分别表示第 2^{j+1} 尺度上的近似部分和细节部分的重构信号。与常规的单子带重构算法相比,单子带重构改进算法中增加了 3 个算子 CG、CH 和 ch。



图中: h g G H : 分别与 h 、 g 、 G 、 H 卷积

$\downarrow 2$: 隔点采样

$\uparrow 2$: 隔点插零

CG : 消除频率混淆算子

CH : 消除频率混淆算子

ch : 消除频率混淆算子

图 1 单子带重构改进算法

Fig.1 Bill belt signal reconstruction improvement arithmetic

算子 CH 和 ch 的计算式相同。令 $x(n)$ 表示 2^j 尺度上的低频子带小波系数 $W = e^{-j2\pi/N_j}$, 则算子 CH 和 ch 的计算式为

$$X(k) = \begin{cases} \sum_{n=0}^{N_j-1} x(n)W^{kn} & (0 \leq k \leq \frac{N_j}{4}, \frac{3N_j}{4} \leq k \leq N_j) \\ 0 & (\text{其他}) \end{cases}$$

则
$$\tilde{x}(n) = \frac{1}{N_j} \sum_{k=0}^{N_j-1} X(k)W^{-kn} \quad (1)$$

式(1)中 N_j 表示 2^j 尺度的数据长度, $k = 0, 1, \dots, N_j-1$; $n = 0, 1, \dots, N_j-1$, $\tilde{x}(n)$ 是算子 CH 和 ch 的输出。对于算子 ch, N_j 等于原始信号的数据长度。算子 CG 的计算式为

$$X(k) = \begin{cases} \sum_{n=0}^{N_j-1} x(n)W^{kn} & (\frac{N_j}{4} \leq k \leq \frac{3N_j}{4}) \\ 0 & (\text{其他}) \end{cases}$$

则
$$\tilde{x}(n) = \frac{1}{N_j} \sum_{k=0}^{N_j-1} X(k)W^{-kn} \quad (2)$$

式(2)中, $\tilde{x}(n)$ 是算子 CG 的输出,其他符号意义同式(1)。

算子 CH、ch 和 CG 的实际计算可以借助快速傅里叶变换(FFT)和快速傅里叶逆变换(IFFT)来进行。单子带重构改进算法的具体实施方法如下:

(1) 消除取得近似部分 A_j 过程中频率混淆的方法

① A_{j-1} 与 h 卷积后,设结果为 A'_j ,先对 A'_j 进行快速傅里叶变换。② 将快速傅里叶变换的结果中频率大于 $f_s/2^{j+1}$ 部分谱值置零。③ 对置零后的结果进行快速傅里叶逆变换。④ 对快速傅里叶逆变换的结果进行隔点采样,采样后的结果作为 A_j 再进行下一步分解。

(2) 消除取得细节部分 D_j 过程中频率混淆的方法

① A_{j-1} 与 g 卷积后, 设结果为 D_j' , 先对 D_j' 进行快速傅里叶变换。② 将快速傅里叶变换结果中 $f \leq f_s/2^{j+1}$ 部分的谱值置零。③ 对置零后的结果进行快速傅里叶逆变换, 结果作为 D_j , 不进行隔点采样。

(3) 消除自近似部分 A_j 单子带重构过程中频率混淆的方法

消除自近似部分 A_j 单子带重构过程中频率混淆的方法是, 在第 2^j 尺度上, 由未被隔点采样的信号开始重构, 这样在 2^j 尺度上不进行隔点插零, 而是从下一步, 即第 2^{j-1} 尺度上开始隔点插零。由于第一步重构不产生虚假频率成分, 而后续的虚假成分一般可以被 h 滤掉, 因此就消除了 A_j 重构过程的频率混淆。

(4) 消除自细节部分 D_j 单子带重构过程中频率混淆的方法

① 设 d_j 是由 D_j 重构的结果, 对 d_j 进行快速傅里叶变换。② 将快速傅里叶变换结果中非 $[f_s/2^{j+1}, f_s/2^j]$ 部分谱值置零。③ 对置零后的结果进行快速傅里叶逆变换, 其结果即为真实的 d_j 。

2 测量系统精度损失分解与溯源实现

通过上述分析可知, 利用 Mallat 单子带重构算法可以方便地把各频率成分分解。实现精度损失信号的分解, 在此基础上利用神经网络的非线性映射能力实现对各分量的参数估计, 建立各结构单元的表达式, 实现精度损失的分解, 同时根据系统内各结构单元的误差特性最终可以实现分解结果的溯源研究。

现有一仿真系统, 其结构如图 2 所示, 系统的 4 个环节分别为: 二阶环节、线性环节、增益环节和周期环节, 各环节的传输特性表达式如下

$$f_1(t) = 2e^{-2t} \sin(10\pi t + 3\pi/4) \quad f_2(t) = 0.5t + 2$$

$$f_3(t) = 4 \quad f_4(t) = \sin(70\pi t)$$

可得系统的传递链函数

$$F(f_1, f_2, f_3, f_4) = f_1(f_2 f_3 + f_4) =$$

$$2e^{-2t} \sin(10\pi t + 3\pi/4) [4(0.5t + 2) + \sin(70\pi t)] =$$

$$2e^{-2t} \sin(10\pi t + 3\pi/4) (8 + 2t + \sin(70\pi t)) \quad (3)$$

假定各个传输环节在 $j=0$ 和 $j=n$ 时的误差, 研究系统在 $j=n$ 时相对于 $j=0$ 时的精度损失情况, 其中第 3 个环节的误差 $e_{3j}(t)$ 为一均值为零的随机信号

$$e_{10}(t) = 0.1t \quad e_{20}(t) = \sin(150\pi t)$$

$$e_{30}(t) = n_{w0}(t) \quad e_{40}(t) = \sin(300\pi t + \pi/4)$$

$$e_{1n}(t) = 0.3t \quad e_{2n}(t) = 2\sin(150\pi t)$$

$$e_{3n}(t) = n_{wn}(t) \quad e_{4n}(t) = 2\sin(300\pi t + \pi/4)$$

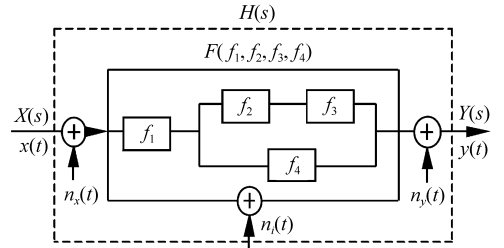


图 2 串联式测量系统结构

Fig. 2 Structure of series parallel measurement system

假设系统未受到外界干扰, 也即系统在测量过程中无外界噪声输入, 对于 $n_{wn}(t) - n_{w0}(t)$ 的结果最终还是一个随机信号, 则该系统的精度变化即精度损失为

$$E_n = e_n - e_0 = [(e_{1n}(t) - e_{10}(t))f_2 + (e_{2n}(t) - e_{20}(t))]f_3 + (e_{3n}(t) - e_{30}(t)) + (e_{1n}(t) - e_{10}(t))f_4 + (e_{4n}(t) - e_{40}(t)) = 0.4t^2 + 1.6t + 4\sin(150\pi t) + 0.2t\sin(70\pi t) + \sin(300\pi t + \pi/4) + n_w(t) \quad (4)$$

以 400 Hz 的采样频率对该总误差进行采样, 在 Matlab 中画出式 (4) 所表示的图形, 结果如图 3 所示。分析图 3 所示的曲线, 可以很明显发现, 在原始信号中包含二次项误差, 在进行小波分析之前将该二次项分离。用最小二乘拟合方法, 在 Matlab 中进行多项式拟合, 将二次项成分分离, 所得结果如图 3 中光滑拟合曲线所示, 其二次项系数为 0.399 68, 一次项系数为 1.598 1, 常数项为 -0.012 778, 其表达式为

$$s = 0.399\ 68t^2 + 1.598\ 1t - 0.012\ 778 \quad (5)$$

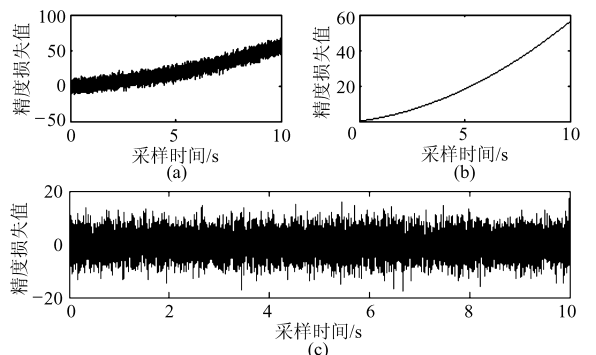


图 3 原始信号及分离后信号

Fig. 3 Original signal and signal after separation

(a) 原始信号 (b) 二次项分离 (c) 分离后信号

用单子带重构改进算法对分离出二次项后的信号, 如图 3 所示加以分析, 采用 db40, 分解至 2 层, 结果如图 4 所示, 从图中可以清楚地获得该信号的频谱组成。

用神经网络的方法来求解系统包含的未知数,

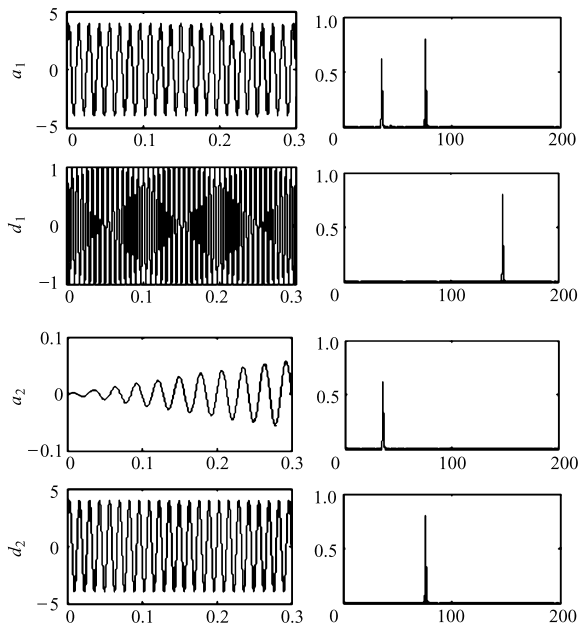


图4 仿真信号频率分离结果

Fig.4 Frequency separating results of emulate signal

网络结构如图5所示。由各组成环节的传输特性与误差特性的粗略信息,以及由白化建模理论获得的系统各组成环节的传递链函数,如知道第二个环节是一个线性增益环节,设其表达式为

$$f_{20} = a_1 t + b_1$$

其误差特性为一周期形式,其表达式为

$$e_{20} = k_2 \sin(2\pi n_1 t + \varphi_1)$$

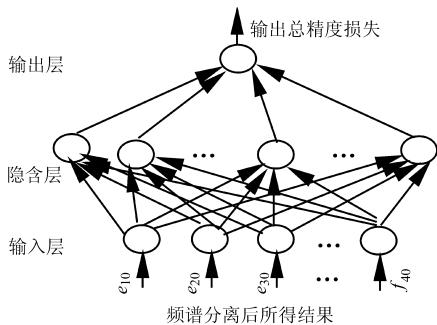


图5 系统的3层BP网络分析结构图

Fig.5 BP network structure

将各个未知部分作为一个3层BP神经网络的

输入端,将系统的精度损失量值作为网络输入,利用BP网络的自学习、自组织功能,应用Levenberg-Marquart优化算法,对网络进行训练,训练误差为 10^{-4} ,网络的权值即为所求的各个未知数,其结果如下

$$f_1(t) = 1.998e^{-2t} \sin(10\pi t + 3\pi/4)$$

$$f_2(t) = 0.499t + 2.003 \quad f_3(t) = 4.001$$

$$f_4(t) = 1.002 \sin(70\pi t) \quad e_1(t) = 0.202t$$

$$e_2(t) = 0.996 \sin(150\pi t) \quad e_3(t) = n_w(t)$$

$$e_4(t) = 0.999 \sin(300\pi t + \pi/4)$$

其中, $e_i(t)$ 为各动态测量系统内部各环节*n*时相对于零时损失的误差,即相当于各环节的精度损失。

该结果与原系统各单元特性基本相符。

从这一仿真实例的结果分析,利用单子带信号重构改进算法,结合BP神经网络可以实现测量系统的精度损失分解与溯源。根据上述结果,基本掌握了系统各环节的精度损失情况,其中精度损失最大的是第一个环节,这符合前面系统第一环节误差特性;第二和第四环节也有一定的精度损失。同时,从分解情况可以知道随机信号对系统的精度损失也有一定的影响。

3 结束语

单子带信号重构改进算法从Mallat算法的本身入手,解决了频率混淆问题,从而能够实现精度损失信号的可靠分解。本文利用单子带信号重构改进算法完成了仿真系统精度损失信号的分离,得到了各结构单元的频率成分,在此基础上利用神经网络所具有的输入到输出之间的非线性映射能力完成求解系统包含的未知参数,实现信号的分解。利用系统内各结构单元的误差特性以及系统全误差模型实现信号的溯源。

测量系统精度损失分解与溯源的实现完善了测量精度理论,为后续进一步对测量系统的精度损失诊断、精度损失建模预测以及基于精度损失的测量系统优化研究提供了可能。

参 考 文 献

- 1 [苏] 格拉诺夫斯基 B A. 动态测量[M]. 傅烈堂,鲍建忠,译. 北京:中国计量出版社,1989:4~7.
- 2 Proakis J G. Advanced digital signal processing[M]. Macmillan Publishing Company,1992:11~27.
- 3 Mestre M. Least squares best fit using linear prediction for engineering surfaces metrology[C]// IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference,Brussels, Belgium,1996,1:435~440.
- 4 Neter J,Wasserman W,Kutner M H. Applied linear regression models[M]. Richard D Irwin Inc.,1983:115~127.
- 5 Myers R H. Classical and modern regression with applications[M]. Duxbury Press,1986:174~177.
- 6 Pinsky M A. Introduction to Fourier analysis and wavelets[M]. Beijing: China Machine Press,2003:111~127.

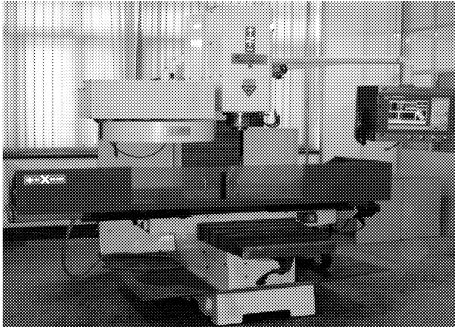


图7 TDNC40A 四轴加工中心

Fig. 7 Four-axis machining center TDNC40A

4 结束语

本文监控数据系统,基于PC的控制器,既充分地利用了微软操作系统的强大功能又通过引入RTX系统改善了桌面操作系统实时性不强的不足。组件技术的应用,使各种开发工具开发的组件和应用程序以及组件与组件之间可以进行互操作,能方便地建立可伸缩的应用系统。现场总线的应用实现了数控系统底层单元的灵活配置。另外,本文将故障监测和诊断技术与数控相结合,构建了层次化的可监控体系,开发了原型机,在数控系统网络化研究方面进行了一定的探索。

参 考 文 献

- 1 王文,秦兴,陈子辰. 基于可编程逻辑器件的可重构数控系统研究[J]. 计算机集成制造系统,2002,8(7):565~569.
Wang Wen, Qin Xing, Chen Zichen. Research on reconfigurable CNC system based on programmable logical device[J]. Computer Integrated Manufacturing Systems, 2002,8(7):565~569. (in Chinese)
- 2 王林军. 基于STEP和XML的网络数据库的建立[J]. 农业机械学报,2006,37(7):150~153.
Wang Linjun. Building web database based on STEP and XML[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2006,37(7):150~153. (in Chinese)
- 3 王太勇,王涛,杨洁,等. 基于嵌入式技术的数控系统开发设计[J]. 天津大学学报,2006,39(12):1508~1515.
Wang Taiyong, Wang Tao, Yang Jie, et al. Design of CNC system based on embedded technology[J]. Journal of Tianjin University, 2006,39(12):1508~1515. (in Chinese)
- 4 王太勇,李宏伟,汪文津,等. 开放式数控系统分布式智能协作体系的研究[J]. 天津大学学报,2004,37(8):673~677.
Wang Taiyong, Li Hongwei, Wang Wenjin, et al. Framework of distributive and intelligent cooperation based on open architecture CNC[J]. Journal of Tianjin University, 2004,37(8):673~677. (in Chinese)
- 5 谢经明,周祖德,陈幼平. 基于现场总线的开放式数控系统体系结构研究[J]. 华中科技大学学报:自然科学版,2002,30(4):1~3.
Xie Jingming, Zhou Zude, Chen Youping, et al. Research on the architecture of field bus-based open CNC system[J]. Journal of Huazhong University of Science and Technology: Nature Science, 2002,30(4):1~3. (in Chinese)
- 6 王俊席,杨林,祝轲卿,等. 基于实时操作系统的发动机控制软件开发平台设计[J]. 农业机械学报,2006,37(9):36~39.
Wang Junxi, Yang Lin, Zhu Keqing, et al. Design of control software development platform for electrically controlled engine based on real-time operating system[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2006,37(9):36~39. (in Chinese)
- 7 殷磊,王润孝,高利辉,等. 基于组件技术构建分布式数控故障诊断系统[J]. 计算机工程与应用,2003,3(3):53~55.
Yin Lei, Wang Runxiao, Gao Lihui, et al. Construct of NC distributed fault diagnosis based on groupware technique[J]. Computer Engineering and Applications, 2003,3(3):53~55. (in Chinese)

(上接第186页)

- 7 Albert Boggess, Francis J Narcowich. 小波与傅里叶分析基础[M]. 芮国胜,康健,译. 北京:电子工业出版社,2004:105~132.
- 8 杨建国. 小波及其工程应用[M]. 北京:机械工业出版社,2005:3~72.
- 9 Yang Jianguo. An anti-aliasing algorithm for discrete wavelet transform[J]. Mechanical Systems and Signal Processing, 2003,17(5):945~954.