

引用格式:苏小会,王钦钦,王贵鸿.基于改进小波阈值算法的遥测数据去噪研究[J].科学技术与工程,2019,19(22):254-258

Su Xiaohui, Wang Qinjin, Wang Guihong. Denoising of telemetry data based on improved wavelet threshold algorithm[J]. Science Technology and Engineering, 2019, 19(22): 254-258

基于改进小波阈值算法的遥测数据去噪研究

苏小会 王钦钦 王贵鸿

(西安工业大学计算机科学与工程学院,西安 710032)

摘要 为改善目前遥测数据检测系统硬件体积较大、数据测量误差大、去噪算法适用性弱等缺陷,利用改进小波阈值的遥测参数去噪算法实现了遥测监测系统软件化设计,通过对遥测空速、发动机转速等参数进行小波去噪效果实验分析,结果表明,该算法对于空速数据去噪效果显著提升,将测量误差平方和降低为 2 199.6,去噪拟合曲线与原始数据曲线相似度高达 0.989,且对其他遥测数据噪声处理具有较好的通用性。

关键词 遥测数据去噪 小波变换 阈值函数 曲线相似度

中图法分类号 TP399; **文献标志码** A

随着社会经济的迅速发展和时代的进步,航空飞行器的生产和应用越来越广泛,对飞行器航空安全保障要求也越来越高,飞行器试飞测试工作越来越受到国家和民众的重视。为了实现对飞行器试飞过程中多类设备运行状态进行实时的监测,为地面维护人员提供真实的设备运行参数信息,亟待需要提高遥测检测系统的便携性和实时性^[1]。

通过对国内外遥测数据检测系统的研究与分析,目前国内外遥测系统大多存在硬件体积结构大,适用性差等缺点,不能满足遥测检测系统的便携性和灵活性要求^[2]。另外,遥测参数在采集、量化和传输过程中,由于受到量化误差、电磁干扰及传播途径等因素的影响,会不可避免地存在测量误差,影响飞行器设备运行状态的监测和维护^[3]。因此,对遥测参数数据去噪算法进行深入研究变得至关重要^[4]。在关于遥测数据去噪方法的研究中,差分演化、蚁群优化等算法已被广泛应用于连续区域数值优化,但对于离散区域上的数值优化结果不尽如人意^[5]。于凤全等^[3]验证了滑动平均算法和加权局部多项式回归算法在误差服从正态分布时的平滑效果一般;杜远^[5]得出在飞机显示系统中,迟滞思想只适用于油箱油量、组件状态的切换等数据的平滑处理,滑动平均能够对低频跳动、尖刺进行有效平滑,但是对于高频的数据噪声,几乎达不到显示平滑

的效果。文献[6]提出了基于小波的数据噪声处理方法,验证该方法对于数据的噪声强度估计及数据滤波具有较好的效果。

基于以上遥测数据检测硬件系统和数据处理算法中存在的问题,采用基于小波阈值的方法进行遥测参数去噪处理,并对常用小波阈值函数优化和改进,采用改进阈值的小波方法进行遥测空速数据去噪处理,通过误差平方和及曲线相似度两个指标定量分析算法的去噪效果,以提升遥测系统参数测量精度和系统适用性,更好地维护航空安全。

1 小波阈值去噪算法原理

小波变换是一种能够同时在时域和频域上进行非平稳信号的分析,提取信号的局部特征并区分出信号部分和噪声部分。其本质是对信号在小波基空间里进行分解,剔除数据噪声,分离出真实信号^[6]。一维小波去噪模型定义如下

$$s(k) = f(k) + \delta \times e(k), \quad k = 1, 2, \dots, n - 1 \quad (1)$$

式(1)中: $s(k)$ 为含噪声信号; $f(k)$ 为真实信号; $e(k)$ 为噪声信号。

为有效抑制遥测参数中存在的数据噪声,有效分离出参数真实值,采用基于阈值的小波去噪方法对遥测数据噪声进行分解。由于小波阈值函数并不是唯一的,且不同的阈值函数适用于不同的噪声类型。因此,选取一个适宜的阈值函数对遥测参数小波分解产生的高频系数进行过滤是必要的^[8]。为解决常用软阈值函数、硬阈值函数和 Garrote 阈值函数在数据去噪处理中存在的震荡和过度平滑问题,现对阈值函数中两个重要因素阈值确定方式和阈值

函数进行改进。

首先,通过引入一个收缩方程,使阈值函数在该点阈值处连续,并且加入高阶幂函数因子,使噪声信号和有用信号之间能够平滑过渡。另外,针对固定阈值处理中数据过度平滑的问题,在每个分解尺度上采用不同的阈值进行量化分析,使阈值能随着分解尺度的增加逐渐减小,从而减少小波系数和原系数之间的偏差,达到更好去噪效果。改进的阈值函数定义如式(2)所示:

$$\varphi_{j,k} = \begin{cases} \omega_{j,k} - \frac{\lambda_j^n}{\omega_{j,k}}, & |\omega_{j,k}| \geq \lambda_j \\ 0, & |\omega_{j,k}| < \lambda_j \end{cases} \quad (2)$$

式(2)中: $\omega_{j,k}$ 为小波系数; j 为分解尺度; λ_j 为 j 尺度的阈; $\lambda_j = \frac{\sigma / \sqrt{2 \ln N}}{\lg(j+1)}$, $\sigma = \text{median}\left(\frac{|\omega_{j,k}|}{0.6745}\right)$, 从 λ_j 的函数定义中可以得出,随着尺度 j 的增加,阈值 λ_j 逐渐缩小, $\omega_{j,k}$ 更接近 $\omega_{j,k}$, 有效克服了恒定偏差的影响。

从式(2)的定义中可以看出,当 $n \rightarrow \infty$ 时,此函数趋近于硬阈值函数;当 $n = 1$ 时, $\omega_{j,k} > \lambda_j$ 则 $\varphi_{j,k} = \omega_{j,k} - \lambda_j$, 而 $\omega_{j,k} < -\lambda_j$ 时, $\varphi_{j,k} = \omega_{j,k} + \lambda_j$, 等同于软阈值函数,并且 n 越小,函数曲线越光滑^[9]。

另外,当 $\omega_{j,k} \rightarrow \infty$ 时, $\omega_{j,k} - \frac{\lambda_j^n}{\omega_{j,k}} \rightarrow \omega_{j,k}$;当 $\omega_{j,k} \rightarrow \pm \lambda_j$ 时,高阶幂函数 $\frac{\lambda_j^n}{\omega_{j,k}} \rightarrow 1$, $\omega_{j,k} - \frac{\lambda_j^n}{\omega_{j,k}} \rightarrow 0$,表明改进的阈值函数不仅保留了硬阈值函数的优点且在 λ_j 处连续。

2 算法实验验证

为验证改进的小波阈值函数在数据去噪中的优越性,基于遥测系统实现飞行器空速、发动机转速、机舱温度及湿度等参数的采集、发送、接收工作,采用便携式数据处理软件对 4 种遥测参数进行数据解析和平滑处理,通过改进阈值函数的小波方法实现数据去噪处理,更好地实现遥测参数真实信号显示。

2.1 系统工作原理

遥测数据检测系统主要由机上采集端和地面接收端两大模块组成。其具体模块结构和工作原理如图 1 所示。

遥测数据检测系统主要包括工程配置模块、机上采集模块、数据解析模块、平滑处理模块和界面显示 5 大部分。工程配置即在参数采集之前设置对应的参数存储位置和编码格式,现采集飞行器空速和发动机转速两类参数。在采集端,系统调取工程配

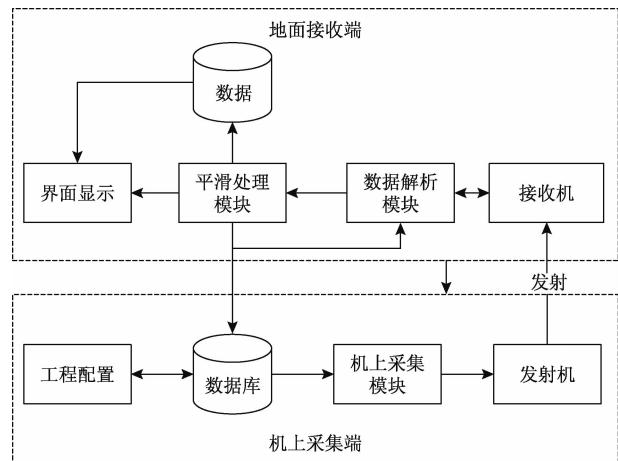


图 1 遥测数据检测系统原理图

Fig. 1 Schematic diagram of telemetry data detection system

置文件,根据文件设置待监测参数类型和存储方式进行数据采集和编码,并通过发射机进行载波调制形成电信号发射到空间中;在地面接收端,通过接收机接受参数信号进行载波解调,并将数据包传输到数据解析模块,数据解析模块根据工程配置文件进行遥测参数分路、工程量数据转换处理,并将分路后的参数数据保存在数据库中,或者通过数据平滑处理模块进行数据去噪处理,并将去噪后的数据由显示模块进行平滑曲线显示,供地面监控人员进行实时的飞行器远行状态分析和设备维护工作^[9]。现采用改进阈值函数的小波方法对遥测到的飞行器空速数据进行平滑处理实现。

2.2 改进阈值的小波去噪方法实现

基于 MATLAB 仿真平台实现改进阈值函数的小波去噪算法编程。选取某飞行器飞行试验中 175 个空速数据进行改进阈值小波算法去噪实验分析。首先对原始空速数据加入随机数据噪声构建出含噪数据模型,其空速数据加噪前后数据曲线显示如图 2 所示。

由图 2 可知,加噪后的空速数据曲线存在较多的毛刺和尖点,与原始数据曲线存在较大的偏差,现基于小波阈值的去噪方法对遥测空速数据噪声进行处理,将其去噪后数据与原始采集数据相对比,以更加准确、高效的分析各算法的去噪能力及适用性。

小波去噪包括小波基选取、确定分解层数、阈值处理和信号重构 4 个过程,整体去噪过程如图 3 所示。

如图 3 所示,采用一维小波变换进行信号重构,首先需要选取一个合适的小波函数,然后确定分解层数对一维信号进行小波分解,确定分解层数时,分解层数太少,会导致噪声去除不完全,分解层数太多

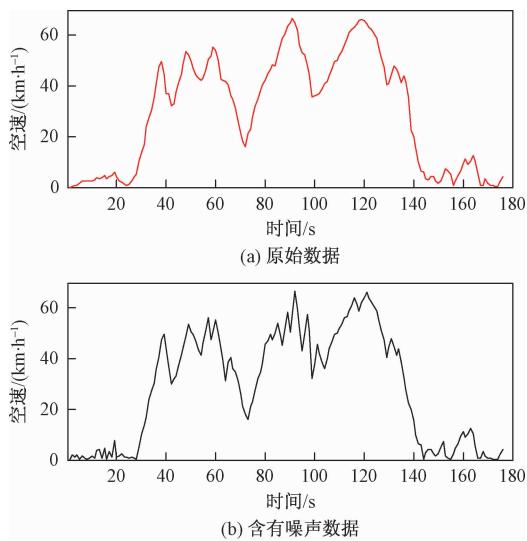


图 2 飞行器空速数据加噪前、后曲线图

Fig. 2 Curve of aircraft airspeed data before and after noising



图 3 小波阈值去噪过程图

Fig. 3 Wavelet threshold algorithm's denoising process diagram

会增加计算量;对含噪信号进行小波分解后,噪声部分基本上包含在高频部分,需要采用阈值的方式对分解后的高频系数进行量化处理;最后,对新的小波系数进行重构即可达到有效去除噪声的目的^[10]。

然后采用改进阈值小波算法进行数据去噪,根据小波阈值去噪流程,基于遥测参数离散、噪声不连续等特性,采用相对信噪比增益进行去噪效果衡量;选用 Biorthogonal 小波基函数进行遥测参数去噪处理;由于噪声幅值较小,为简化计算量且有效去除噪声,选取空速数据最佳分解层数为 2;接着,采用自适应阈值方式进行各层阈值的确定,并通过改进的阈值函数对阈值进行量化,经过多次仿真实验,阈值函数中 n 的取值为 3 时,去噪效果最佳;最后,对小波系数进行重构,即可得到去噪后的空速数据。去噪后空速数据曲线如图 4 所示。

为了验证改进阈值函数的小波方法的去噪效果,分别采用软阈值函数、硬阈值函数、Garrote 阈值函数的小波方法对含噪飞行器遥测空速数据进行 2 层小波分解。不同阈值函数去噪效果图如图 5~图 7 所示。

通过图 5~图 7 所示的软阈值函数、硬阈值函数、Garrote 阈值函数数据去噪效果图可知,硬阈值函数去噪曲线图存在较多的震荡现象;软阈值函数的去噪效果相对较平滑,但是丢失了部分有用信息;由图 7 可知,Garrote 阈值函数去噪效果相对于硬阈

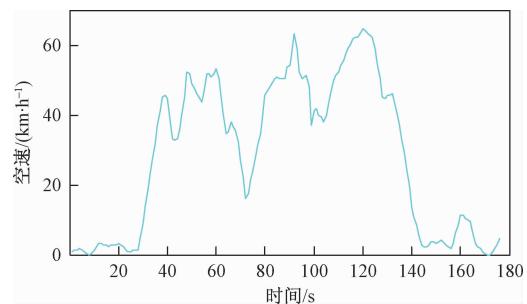


图 4 改进的阈值函数去噪效果图

Fig. 4 Improved threshold function de-noising effect diagram

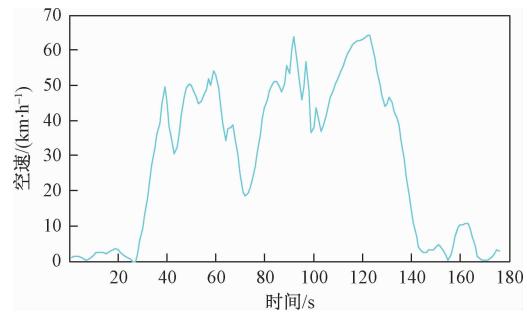


图 5 硬阈值函数去噪效果图

Fig. 5 Hard threshold function denoising effect diagram

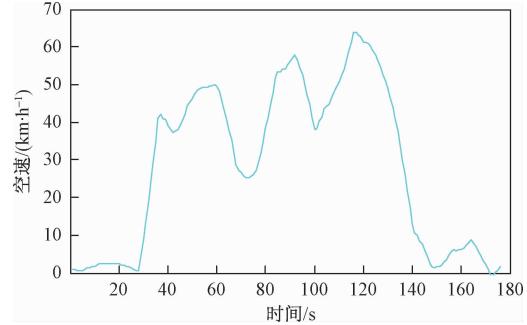


图 6 软阈值函数去噪效果图

Fig. 6 Soft threshold function denoising effect diagram

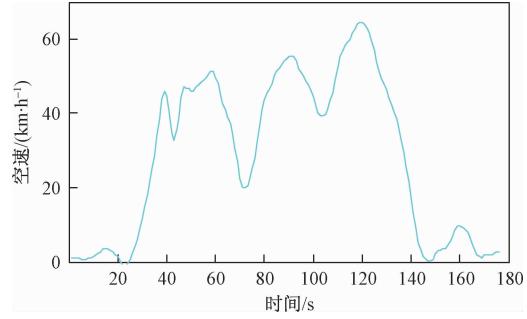


图 7 Garrote 阈值函数去噪效果图

Fig. 7 Garrote threshold function denoising effect diagram

值函数的震荡现象有所减轻,并且减少了信息丢失;结合图 4~图 7 可知,改进的阈值函数的去噪效果,其视觉上均优于其他 3 种阈值函数,特别是在 40~70 数据点之间较软、硬阈值函数有较大的改善。

2.3 实验结果分析

为了对上述4种阈值函数的去噪效果进行合理的评价,通过误差平方和(SSE)及曲线相似度(NCC)两个指标作为去噪效果评价标准,确保在遥测数据检测系统中,不仅要提高去噪精度,还要保留数据的真实性,使测量数据曲线更接近原始数据曲线,提高遥测系统故障分析准确度^[11]。基于以上两种评价模型,得出上述4种阈值函数的去噪误差平方和及曲线相似度,如表1所示。

表1中所示曲线相似度判断标准,其值越趋近于-1,表示去噪后数据曲线与原始数据曲线相似度越低;越趋近于1,表示两曲线相似度越高。结合表1和图4~图7可知,采用软阈值函数进行遥测参数去噪的误差值较大,且去噪后曲线相似度较低,整体去噪效果劣于硬阈值函数。硬阈值函数由于本身不连续处理特性,会引起多处振荡现象,达不到曲线显示平滑的效果。Garrote阈值函数能够对空速数据进行有效的处理,其去噪整体去噪效果优于软、硬阈值函数,但是仍然存在一定的数据失真现象。结合图4和表1可知,改进的阈值函数在空速数据去噪中的效果优于其他3种小波阈值方法,其不仅保留了原始数据的变化特征,而且极大地降低了测量误差,误差平方和值为2 199.6,去噪后数据曲线与原始数据曲线相似度高达0.989。

为了验证改进阈值函数的小波方法在遥测数据去噪中的强适用性,将该方法分别应用于遥测发动机转速、机舱温度及湿度数据的去噪处理中,各参数去噪效果评价指标值如表2所示。

表2中是基于改进阈值函数的小波方法在飞行器遥测参数去噪中的相关性能指标值。综合误差平方和及曲线相似度两个评价指标可知,改进阈值函数的小波方法在去除噪声和提高去噪曲线相似度方

表1 不同阈值函数的去噪效果评价指标值

Table 1 Evaluation index value of denoising effect of different threshold function

阈值函数	软阈值函数	硬阈值函数	Garrote 阈值函数	改进的阈值函数
SSE	3 094.5	2 372.0	2 558.0	2 199.6
NCC	0.988	0.984	0.987	0.989

表2 不同遥测数据去噪效果评价指标值

Table 2 Denoising evaluation index values of different telemetry data

参数类型	空速	发动机转速	温度	湿度
SSE	2 199.6	466 480	6.646	13.784
NCC	0.989	0.998	0.994	0.768

面均有较好的效果。因此,课题研究的改进阈值函数的小波方法能够有效地应用于遥测数据检测系统中。

3 结论

针对目前遥测检测系统在遥测参数监测中存在的缺陷和需求,采用C++-QT实现了遥测系统便携式数据处理软件设计,完成遥测参数的数据转换和分路保存工作,简化了硬件结构,提高了系统便携性。深入研究基于小波阈值的数据去噪算法,提出改进阈值函数的小波方法对遥测数据空速、数据进行去噪处理,结果表明该方法相对于传统软阈值函数、硬阈值函数、Garrote阈值函数具有明显的去噪优越性,不仅提高了去噪精度,而且使去噪后曲线与原始数据曲线相似度高达0.989。将该算法应用于遥测发动机转速、温度、湿度等参数数据去噪处理,得出该算法能够处理多种遥测数据噪声,具有较强的适用性。

参 考 文 献

- Murray N J, David A. The role of satellite remote sensing in structured ecosystem risk assessments[J]. Science of the Total Environment, 2018, S619-620: 249-257
- 党凡. 航空飞行试验遥测技术的发展趋势展望与应对[J]. 通讯世界, 2015(9): 68-69
Dang Fan. Prospect and response to the development trend of Telemetry Technology in aeronautical flight test[J]. Communication World, 2015(9): 68-69
- 于凤全, 王旭明, 谢彦宏. 面向飞机参数数据处理应用的数据平滑算法对比[J]. 指挥控制与仿真. 2015, 37(1): 116-120
Yu Fengquan, Wang Xuming, Xie Yanhong. Data smoothing algorithms for aircraft parameter data processing applications[J]. Command Control and Simulation. 2015, 37 (1): 116-120
- 崔娇, 黄少荣. 基于差分演化的自适应参数控制蚁群算法[J], 计算机工程. 2011, 37(6): 190-192
Cui Jiao, Huang Shaorong. Adaptive parameter control ant colony algorithm based on differential evolution[J]. Computer Engineering, 2011, 37(6): 190-192
- 杜远. 机载显示系统数据平滑方法分析与研究[J]. 上海: 科技视界, 2017(10): 59
Du Yuan. Analysis and research on data smoothing method of airborne display system[J]. Shanghai: Science and Technology Perspective, 2017(10): 59
- 王佰兴. 基于小波分析的数据平滑处理算法研究与应用[J]. 科技创新导报, 2009, 31(16): 143-144
Wang Baixing. Research and application of data smoothing processing algorithms based on wavelet analysis[J]. Science and Technology Innovation Report, 2009, 31(16): 143-144
- 王旭, 刘文生. 一种改进小波阈值去噪方法的研究[J]. 测绘科学, 2011, 36(5): 179-180
Wang Xu, Liu Wensheng. Research on an improved wavelet thresh-

- old denoising method [J]. Surveying and Mapping Science , 2011 , 36(5) : 179-180
- 8 李 敏. 小波阈值去噪中新函数的研究 [J]. 长春理工大学学报 (自然科学版) , 2011 , 34(3) : 176-178
Li Min. Research on new functions in wavelet threshold denoising [J]. Journal of Changchun University of Technology (Natural Science Edition) , 2011 , 34(3) : 176-178
- 9 宋启程, 张西韩. 遥测技术的发展及应用探讨 [J]. 科技资讯, 2013 , 13(2) : 41 , 71
Song Qicheng, Zhang Xihan. Development and application of telemetry technology [J]. Science and Technology Information , 2013 , 13 (2) : 41 , 71
- 10 李庆华. 基于小波阈值算法的信号去噪研究 [D]. 乌鲁木齐: 新疆大学, 2013
Li Qinghua. Research on signal denoising based on wavelet threshold algorithm [D]. Urumqi: Xinjiang University, 2013
- 11 余 建. 微波介电常数测量系统的误差分析及改进方法研究 [D]. 成都: 电子科技大学, 2014
Yu Jian. Error analysis and improvement method of microwave dielectric constant measurement system [D]. Chengdu: University of Electronic Science and Technology , 2014

Denoising of Telemetry Data Based on Improved Wavelet Threshold Algorithm

SU Xiao-hui, WANG Qin-qin, WANG Gui-hong

(Computer Science and Engineering College, Xi'an Technological University , Xi'an 710032 , China)

[Abstract] In order to improve the shortcomings of large hardware volume, large data measurement error, weak applicability of de-noising algorithm in the current telemetry data detection system, the software design of telemetry monitoring system was realized based on the improved wavelet threshold de-noising algorithm for telemetry parameters. The wavelet dissipation experiment was carried out based on the airspeed and engine speed. It shows that the algorithm's de-noising effect for telemetry airspeed data is significantly improved, the square sum of measurement errors is reduced to 2 199. 6 and the similarity between the de-noising fitting curve and the original data curve is as high as 0. 988 9 , and it has good generality in data de-noise for other telemetry parameters.

[Key words] remove data noise of telemetry parameters wavelet transform threshold function curve similarity