

·信号与信息处理·

基于小波变换的涡喷发动机遥测数据分析方法研究

梁彦, 谌国森

(92941部队, 辽宁 葫芦岛 125001)

摘要:在飞行试验中,由于涡喷发动机遥测数据有限,因此要对其故障进行准确分析定位存在很大难度。利用小波变换对涡喷发动机涡轮转速、喷嘴前压力等遥测数据经过去噪提取后,找出奇异点,并经系统去噪筛选,形成数据文件,利用BP神经网络的模式分类功能,发现故障出现的时刻及部件,并结合研制过程中地面试车数据库,可实现准确定位涡喷发动机故障部位及类型。实际应用证明方法实用有效,可进一步推广到其他系统或部件的故障分析工作中。

关键词: 涡喷发动机; 遥测数据; 小波分析; 奇异点; 去噪

中图分类号: TP274

文献标识码: A

文章编号: 1673-1255(2015)-03-0040-05

Research on Analysis Methods of Turbojet Engine Telemetry Data Based on Wavelet Transform

LIANG Yan, CHEN Guo-sen

(92941 Army Unit, Huludao 125001, China)

Abstract: Due to the limited telemetry data for the turbojet engine during the flight test, it is difficult to locate accurately the turbojet engine's fault. After the de-noising extraction with wavelet transform of the data, such as speed of the turbojet engine, former pressure of nozzle etc, the singularity is found and the data file is formed through the system noise filtering. Using the BP network pattern classification function, the moment of failure occurs and default parts are detected. With the ground test database in the development process, it can locate accurately the turbojet engine defaults parts and types. The results show that the method is effective and can be applied in other subsystem fault analysis.

Key words: turbojet engine; telemetry data; wavelet transform; singularity; de-noising

在涡喷发动机的遥测数据中,由于涡轮转速、振动等数据的频率较高,为了显示直观,处理后数据时间坐标轴选取刻度较大,信号大幅压缩,细节大多被噪声信号掩盖,仅能判断遥测数据的大致趋势^[1]。为了较好的利用遥测数据分析定位故障,通过小波分析把遥测数据进行预处理,分解成一系列的窄带信号,变成单一成分的信号以提高分辨率。处理中,涡轮转速信号可通过与振动信号横向对比,剔除系统噪声信号。使遥测数据可信度进一步提高,处理后的数据可利用BP神经网络进行故障

特征识别,结合涡喷发动机故障树模型,准确定位故障部位。

1 小波变换分析涡喷发动机信号的局部奇异性

涡喷发动机信号的奇异点及不规则突变部分带有比较重要的信息,它是信号的重要特征之一,一般通过研究函数在傅里叶变换域的衰减以推断函数是否具有奇异性及奇异性的大小^[2-5]。但傅里叶

收稿日期: 2015-04-20

作者简介: 梁彦(1977-),女,辽宁大连人,硕士,工程师,研究方向为武器系统试验; 谌国森(1965-),男,辽宁朝阳人,硕士,高级工程师,研究方向为武器系统试验。

变换缺乏空间局部性,它只能确定一个函数奇异性,难以确定奇异点在空间的位置及分布情况^[3]。

小波变换是近年发展起来的一种新理论,在工程应用领域被认为是近代分析工具及方法的重大突破,它主要有三个优良特性:一是小波可作为广义函数的构成框架;其二是小波具有空间一频率局部化特性;其三是快速的小波算法。文中利用小波变换所具有的空间局部化性质来分析信号的奇异性及奇异性位置和奇异度的大小,对挖掘遥测数据信息利用率有较大的应用价值。

通常情况下信号奇异性分两种情况:(1)信号在某一时刻内其幅值发生突变引起信号的非连续,幅值的突变处称为第一种类型的间断点,高速运行中的涡喷转子的轴承破碎、卡死、叶片破碎都会引起这种畸变,这是文中重点分析的信号的奇异性;(2)信号外观上很光滑,幅值没有突变,但是信号的一阶微分有突变产生,且一阶微分式不连续,称为第二种类型的间断点。

通常用李普希兹指数(Lipschitz)来描述函数的局部奇异性,以下给出描述信号奇异度的一般定义。

设 n 为一非负整数,且 α 满足 $n \leq \alpha \leq n+1$, 函数 $f(t):[a,b] \rightarrow R$ 在点 $x_0 \in [a,b]$ 是 Lipschitz α 。如果存在正常数 A 和 $h_0(>0)$ 及 n 次多项式 $P_n(x)$, 对任意 $h \in (-h_0, h_0)$, 均有

$$|f(x_0+h) - P_n(h)| \leq A|h| \quad (1)$$

如果存在 α , f 在 $x_0 \in [a,b]$ 不是 Lipschitz α , 则函数 $f(t):[a,b] \rightarrow R$ 在点 $x_0 \in [a,b]$ 是奇异的。

显然 $\alpha=1$ 时,函数(信号)是连续可导的;当 $0 < \alpha < 1$ 时,函数的光滑性降低,当 $\alpha=0$ 时,函数不连续但有界。 α 越小, $f(t)$ 在 t_0 处的奇异性程度越高。

2 涡喷发动机遥测数据的检出方法

遥测信号在传输过程中,要受到外来干扰与设备内部噪声的影响,实际接收到的是混入了噪声的遥测信号,设信号与噪声之间的关系是加性的,其具体模型为^[6]

$$x(t) = s(t) + n(t) \quad (2)$$

其中, $x(t)$ 为接收到的信号; $s(t)$ 为待检测的瞬时信

号; $n(t)$ 为零均值的高斯白噪声。

通常去噪的方法有:简单消高频去噪、非线性阈值去噪及模极大值去噪。第一种方法原理较简单,直接滤除高频即可去掉噪声,但会丢失大量的有用信号,故不宜采用。第二种方法的原理是噪声在每个尺度下的小波系数将小于某一定值,具有良好的统计优化特性。除去小于某一定值的小波系数,用余下的小波系数进行重构即可达到去噪效果。最后一种方法基本原理是有用信号奇异点的模极大值随尺度的增大而增大,具有正的 Lipschitz 指数;而噪声的模极大值随尺度的增大而减小,具有负的 Lipschitz 指数。它们的模极大值在小波变换下具有不同的变化趋势,所以可以利用寻找到的有用信号模极大值进行重构以达到去噪效果。

实用结果表明,单独使用第二种或第三种方法都不能有效地找到含噪声波信号的奇异点,合理有效的方法是综合两种或更多的辅助信息来达到信息的彻底分离。

2.1 非线性阈值去噪

通常的方法是,首先将遥测信号进行小波处理,把小波系数的绝对值看作是一个局部的独立变量,给定一个阈值 d ,所有绝对值小于阈值 d 的小波系数被划为“噪声”,它们的数值用零代替;而超过阈值 d 的小波系数数值用阈值 d 缩减后再重新取值^[7]。这种判断方法具有良好的统计优化特性,如何选取小波阈值是非线性阈值去噪的关键。通过对小波系数进行阈值化,得到各层新的高频系数并存入数组内。最后,将每层新的高频系数和低频系数进行小波逆变换完成信号重构,从而达到去噪的效果。应该注意的是,此算法的前提是变换域中的小波系数是相互独立的,按照最小均方差来将小波系数分成两类,即噪声信号(小波系数)和有用信号(小波系数),因此信号足够长时,去噪效果才明显。

2.2 模极大值去噪

实际上,非线性阈值法只满足一定的统计优化特性而不能理想地去噪。在特定情况下,还残留一些能量较大的噪声或干扰脉冲(其模极大值大于所设定的阈值),这给后面通过小波变换寻找奇异点带来了困难。因此,对于已去噪的信号还需要有效的方法才能找到有用信号的奇异点^[8]。

采用模极大值的方法在多尺度下对已去噪信号寻找所需的奇异点。既然信号和噪声在不同尺度下小波变换的模极大值的传播行为截然相反,那么在高尺度(低频带)下就很容易找到有用信号的奇异点(这时噪声的能量特别小)。但此时奇异点所对应时刻的分辨率比较低,不能满足系统精确定位的要求。由不确定原则表明,任何信号在时域和频域里的性质是相互制约的,不可能同时出现时域和频域的高分辨率,即频域的高分辨率(高尺度)必然对应着时域的低分辨率。因此必须从时域低分辨率的奇异点向上寻找时域高分辨率的奇异点的传播点,从而满足精确时刻要求。

3 小波变换用于遥测数据奇异点的检测

小波变换优越于傅里叶(FFT)变换的地方在于,小波变换能够同时在时域和频域突出信号的局部特性^[9]。几乎所有的信号都能够根据从原始数据中提取出来的某些特征来表现信号。提取信号的特征要根据信号本身的特点和用户的目的来决定,但是一些具有共性的特点,如信号的过零点、极值点、断点和信号突变的地方往往是包含信息最多的地方,也是分析的重点。

信号的奇异点能够通过信号进行小波变换后在不同尺度上的综合表现,来反映信号的突变或者瞬间特征,如信号的瞬变或者边缘的不同表现:过渡得比较陡峭或者平稳,在小波多尺度变换上就表现为最大值的变换情况。突变信号在数字信号处理中具有非常重要的地位和作用。如在声呐探测、物体探伤等技术中发射的限时限拼信号,经一段时间后反射波才能到达接收器,接收信号会发生突变,检测这些突变点就可以估算被探测对象的距离和大小。在图像处理中,把像素点的灰度作为像素点位置的函数,那么清晰的物体边缘在图像中表现为像素点灰度值的突变,检测这些突变点就可以掌握图像中物体的边缘和形体特征。这在图像识别、目标检测、计算机视觉应用方面都是关键性的问题^[10]。

3.1 检测第一类间断点

这类间断点通常是指正常情况下的信号突变。在图像处理方面,一个重要方面是边界的检

测,包含一个信号突变点检测的问题。在动态系统中,信号突变是非常快的。信号突变的主要特征是信号在时间和空间上存在局部的变化,根据信号变化的速度快慢,选择合适的分解尺度,小波分析良好的局部分析功能就能充分发挥,从而方便地解决信号突变点检测的问题。

信号突变点的检测内容包括:突变点的时机、突变点的类型和振幅的改变。用小波分析来检测第一类间断点时,可以得出信号幅值变化的准确时间,即间断点的准确位置。如图2即是图1的原始信号图中低频正弦信号中加入中高频特征的正弦信号的时间点检测出来的原理示例。

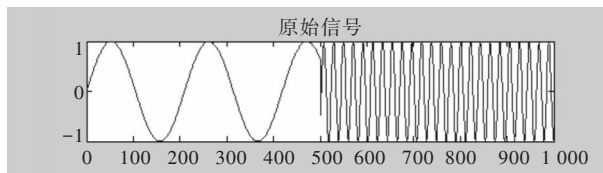


图1 原始信号图

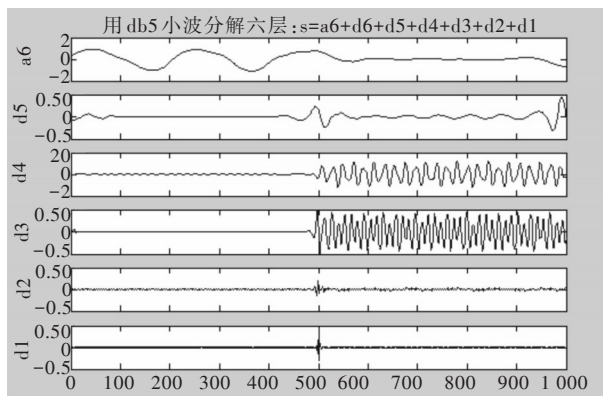


图2 小波分解后的细节信号和近似信号示意图

由图2可以看出,信号经小波分解后,第一层(d1)和第二层(d2)的高频部分将信号的不连续点显示得非常清晰,因为信号的断裂部分包含的是高频成分。但如果只想辨别出信号的不连续点,则用db1小波比用db5小波效果更好。由图可以看出,信号的不连续点的定位非常准确,即该点在时域中一个非常小的范围之内。

这个例子说明了小波分析比传统的傅里叶(FFT)分析有更大的优越性。如果这种信号由傅里叶变换进行分析,则在频域中是无法检测出信号的频率变化点的,而在小波变换中,这种突变点的特征则表现得很明显。

实际应用中,通过对涡喷发动机的转速遥测信号进行小波分析,可以发现轴承破碎、叶片破碎、转子卡死等突发性机械故障,能够准确地从极少的几个参数定位发动机故障。

3.2 检测第二类间断点

在以电信号为主的遥测信号中,频域内一阶微分发生突变的现象很多,其中隐藏着众多的信息,如某电子油门调节器供油调节信号类似由两个独立的满足指数方程的信号连接起来的,可利用小波分析来检测此第二类间断点的准确位置。

表面上,供油调节信号在外观上是很光滑的曲线,但是,该信号具有一阶微分且突变。利用小波变换可将此第二类间断点寻找出来。变换的图形如图3~图6所示。

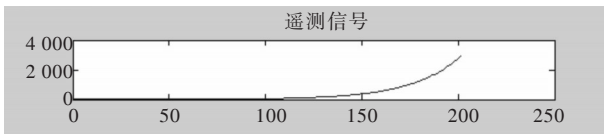


图3 油门调节信号示意图

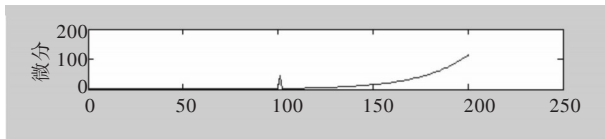


图4 一阶微分信号示意图

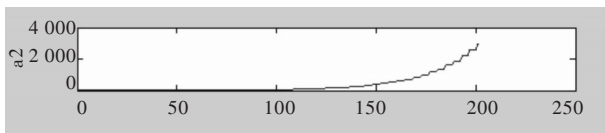


图5 近似信号

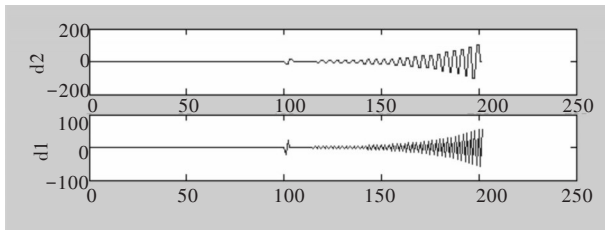


图6 小波分析后的细节信号

由图3可以看出,油门调节信号在外观上看是光滑的,没有奇异性。但从该信号的一阶微分曲线信号图形(图4)却可以看出,在 $t=100$ 点处,有明显

的不连续。将该信号进行小波分解后,第一层的高频部分d1将信号的不连续点显示得很明显,这个断裂点在信号的中部发生,在其他地方可以忽略,因为发动机的供油是一个平滑的连续过程,信号中部的奇异点表明油门控制器本体电路出现问题。

3.3 奇异点的系统去噪筛选方法

在信号处理中,信号中含噪声是一种很普遍的情况,噪声的种类也会各种各样,而噪声的存在增加了辨别信号奇异点的复杂性。一般来说,如果信号用小波分解的第一层能够估计出奇异点的大体位置,则信号的断裂点就能够在小波分解的更深层次上显示出来,但实际遥测信号传输中大量噪声的出现,使信号奇异点的确定难度大为增加^[7]。

为了更准确地去除遥测信号中的噪声,可采用相关遥测信号比对除噪方法,即首先对带来普遍干扰的信号,如振动信号及电磁干扰信号,振动会给所有部件带来同步干扰,即干扰是系统性的,这种干扰信号还很多,用小波分析出多数信号的奇异点后,对奇异点出现时间进行比对,同一时刻,如弹体共振出现时刻,此刻出现的奇异点,可定位为噪声,可放过或定位为噪声源,再进一步对振动进行分析。

3.4 涡喷发动机故障的定位方法

涡喷发动机的研制过程中,要进行无数次的地面试车,由于试车是在厂房中进行,可以增加数量可观的传感器及记录设备,处理后的数据可建立模型,为在研发和飞行试验中故障分析打下良好基础^[15]。涡喷发动机遥测数据经过去噪提取后,利用小波分析找出奇异点,并经系统去噪筛选,形成数据文件,利用BP神经网络的模式分类功能,进行故障特征识别,结合涡喷发动机研制过程中地面试车积累的故障树模型,准确定位故障部位和故障预期。应用结果表明,小波分析结合神经网络的方法可以有效地识别涡喷发动机飞行试验中出现的故障。

4 结束语

飞行试验结束后,需对传送回来的数据进行事后分析,由于涡喷发动机的遥测数据有限,并且涡

轮转速、喷嘴前压力等重要数据,由于频率较高,一般处理时间坐标轴选取刻度较大,细节数据大多被噪声信号掩盖,仅能判断各个信号的大致趋势,因此要对其故障进行准确分析定位存在很大困难。在飞行试验中对涡喷发动机遥测数据的直接获取,利用小波变换对遥测数据进行去噪提取、找出奇异点,并经系统去噪筛选,结合BP神经网络的模式分类功能,可实现对涡喷发动机的故障识别,为飞行试验中涡喷发动机遥测数据处理和故障分析提供了有效的方法。实际应用也证明此方法实用有效,可进一步推广到其他系统或部件的故障分析定位工作中。

参考文献

- [1] 赵圣占,王琮南,樊孝春.小波、小波包分析在遥测数据处理中的应用[J].强度与环境,2011(4):54-59.
- [2] 孙延奎.小波分析及其应用[M].北京:机械工业出版社,2005.
- [3] 彭玉华.小波变换与工程应用[M].北京:科学出版社,2002:1-51.
- [4] 任国恒,朱变,朱海.马特拉算法在遥测数据短期预测中的应用[J].武汉工程大学学报,2014(2):73-78.
- [5] 刘涛,徐卫昌.小波变换在热波检测图像增强中的应用[J].激光与红外,2012(6):709-712.
- [6] 杨莘元.小波变换在遥测信号检测中的应用[J].宇航学报,2002(2),77-79.
- [7] 林敏,周兆经.基于小波包的瞬时信号去噪与频谱分析[J].电子测量与仪器学报,2000(6):1-5.
- [8] 潘泉.小波滤波方法及应用[M].北京:清华大学出版社,2005:1-30.
- [9] 谢锋,谢寿生.基于小波分析的航空发动机旋转失速检测方法[J].航空动力学报,2006,21(4):754-758.
- [10] 陈逢时.子波变换理论及其在信号处理中的应用[M].北京:国防工业出版社,1998:150-161.
- [11] 陈彬强,张周锁,何正嘉.双密度双树复小波变换及其在机械故障微弱特征提取中的应用[J].机械工程学报,2012(5):56-63.
- [12] 徐小军,王友仁.基于离散分数阶正交小波变换图像降噪新方法[J].电子学报,2014(2):280-287.
- [13] 闫阳.基于小波变换的图像压缩编码方法研究[J].科学技术与工程,2012(11):2737-2740.
- [14] 徐湛.基于稀疏小波变换的超宽带低信噪比信号检测算法[J].仪器仪表学报,2013(4):825-830.
- [15] 冯斌.液体火箭发动机试验数据处理方法研究[C]//哈尔滨工程大学,2012.
- [16] 盛海娟,马卫东,龙昱程.平移不变小波变换在遥测数据去噪中的应用[J].现代电子技术,2014(1):8-10.

(上接第10页)

题,总体透过率取0.3,能够满足设计要求。

参考文献

- [1] 江萍,田雏坚,扬小君,等.一种新型离轴三反式光学系统的设计[J].光子学报,2006,35(4):608.
- [2] 韩昌元.高分辨率空间相机的光学系统研究[J].光学精密工程,2008(11):2164-2171.
- [3] 刘吉,赵辉,王小燕,等.光电探测技术与应用[M].北京:国防工业出版社,2009.
- [4] 林涛,李阔.分布式面源型红外诱饵建模研究[J].光电技术应用,2007,22(1):72-74.
- [5] 李凡,刘上乾,张峰,等.点源目标的红外搜索与跟踪系统的作用距离估算[J].红外技术,2008,30(9):502-504.
- [6] 邢强林,黄惠明,熊仁生.红外成像探测系统作用距离分析方法研究[J].光子学报,2004,33(7):893-896.
- [7] 牟达,王建立,陈涛.红外搜索跟踪系统作用距离的分析[J].仪器仪表学报,2006,27(6):93-95.
- [8] 吴晗平.红外点目标探测系统作用距离方程理论研究—基于探测率温度特性与背景影响[J].红外技术,2007,29(6):341-344.
- [9] 黄静,刘朝晖,邓书颖.点源目标的红外成像系统作用距离分析[J].科学技术与工程,2007,18(7):4587-4590.
- [10] 王兵学,张启衡,王敬儒,等.凝视型红外搜索跟踪系统作用距离模型中参数值的确定[J].红外技术,2004,26(4):6-10.
- [11] 吴军辉,朱景成.红外成像系统对点目标动态探测概率分析[J].红外技术,2000,22(1):40-44.
- [12] 陈玻若.红外系统[M].北京:国防工业出版社,1988.
- [13] 周学艳.目标与背景光谱辐射特性测量方法的研究[D].长春:长春理工大学,2006.
- [14] 严世华,祝世杰.红外搜索跟踪系统作用距离分析与计算[J].光电技术应用,2011,26(2):39-41.