



(12) 发明专利申请

(10) 申请公布号 CN 113970419 A

(43) 申请公布日 2022. 01. 25

(21) 申请号 202111192645.6

(22) 申请日 2021.10.13

(71) 申请人 中国科学院力学研究所
地址 100190 北京市海淀区北四环西路15号

(72) 发明人 汪运鹏 聂少军 姜宗林

(74) 专利代理机构 北京和信华成知识产权代理
事务所(普通合伙) 11390
代理人 焦海峰

(51) Int. Cl.
G01M 9/06 (2006.01)

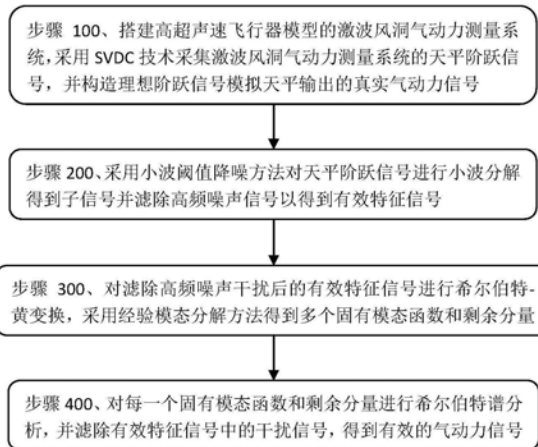
权利要求书2页 说明书7页 附图5页

(54) 发明名称

一种基于时频变换的激波风洞测力天平信号数据处理方法

(57) 摘要

本发明公开了一种基于时频变换的激波风洞测力天平信号数据处理方法,搭建高超声速飞行器模型的激波风洞气动力测量系统,采用SVDC技术采集激波风洞气动力测量系统的天平阶跃信号,并构造理想阶跃信号模拟天平输出的真实气动力信号;采用小波阈值降噪方法对天平阶跃信号进行小波分解得到子信号并滤除高频噪声信号以得到有效特征信号;对滤除高频噪声干扰后的有效特征信号进行希尔伯特-黄变换,采用经验模态分解方法得到多个固有模态函数和剩余分量;对每一个固有模态函数进行希尔伯特谱分析,并滤除有效特征信号中的干扰信号,得到有效的气动力信号;本发明有效辨识出天平信号中的不同干扰成分,输出可靠的气动力结果。



1. 一种基于时频变换的激波风洞测力天平信号数据处理方法,其特征在于,包括以下步骤:

步骤100、搭建高超声速飞行器模型的激波风洞气动力测量系统,采用SVDC技术采集所述激波风洞气动力测量系统的天平阶跃信号,并构造理想阶跃信号模拟天平输出的真实气动力信号;

步骤200、采用小波阈值降噪方法对所述天平阶跃信号进行小波分解得到子信号,对所述子信号进行相关性分析,并滤除高频噪声信号,以得到有效特征信号;

步骤300、对滤除高频噪声干扰后的所述有效特征信号进行希尔伯特-黄变换,采用经验模态分解方法得到多个固有模态函数和剩余分量;

步骤400、对每一个所述固有模态函数进行希尔伯特谱分析,得到相应的瞬时频率、瞬时幅值和Hilbert谱,并滤除所述有效特征信号中的干扰信号,得到有效的气动力信号。

2. 根据权利要求1所述的一种基于时频变换的激波风洞测力天平信号数据处理方法,其特征在于,在步骤200中,所述小波阈值降噪方法对所述天平阶跃信号进行近似分解和细节分解,分解得到低频系数和高频系数,其中,所述低频系数用于展示整个所述天平阶跃信号的趋势,所述高频系数用于展示整个所述天平阶跃信号的细节成分,所述小波阈值降噪方法进行小波分解以及过滤高频噪音的具体实现方式为:

步骤201、利用一维离散小波变换对降噪后的所述天平阶跃信号进行多级小波分解,以得到所述天平阶跃信号经过多级小波分解的低频系数和高频系数;

步骤202、对低频系数、高频系数和理想阶跃信号进行快速傅里叶变换,并计算经过快速傅里叶变换后的所述低频系数、高频系数和理想阶跃信号的99%占用带宽;

步骤203、以所述理想阶跃信号的99%占用带宽为基准,将所述高频系数和低频系数的99%占用带宽与基准对比,过滤完全不符合所述理想阶跃信号的99%占用带宽的高频系数和低频系数。

3. 根据权利要求2所述的一种基于时频变换的激波风洞测力天平信号数据处理方法,其特征在于:对低频系数、高频系数和理想阶跃信号进行快速傅里叶变换后生成频谱图,过滤超过所述理想阶跃信号的99%占用带宽的所述高频系数,且根据所述高频系数的幅值和对应的频率来确定每个所述高频系数的主要频率。

4. 根据权利要求2所述的一种基于时频变换的激波风洞测力天平信号数据处理方法,其特征在于:所述高频系数和低频系数的99%占用带宽与所述理想阶跃信号的99%占用带宽无交集,则表示所述高频系数和低频系数的99%占用带宽完全不符合所述理想阶跃信号的99%占用带宽,过滤除去完全不符合的高频系数和低频系数。

5. 根据权利要求4所述的一种基于时频变换的激波风洞测力天平信号数据处理方法,其特征在于:所述99%占用带宽为所述低频系数、高频系数和理想阶跃信号经过快速傅里叶变换后的信号功率占总信号功率的99%。

6. 根据权利要求2所述的一种基于时频变换的激波风洞测力天平信号数据处理方法,其特征在于:将过滤完全不符合的高频系数和低频系数后进行傅里叶逆变换,且选取过滤完全不符合的高频系数和低频系数的适当系数进行信号重构,得到滤除高频噪声信号后的有效特征信号。

7. 根据权利要求1所述的一种基于时频变换的激波风洞测力天平信号数据处理方法,

其特征在于,在步骤300中,利用希尔伯特-黄变换对所述有效特征信号的数据处理方式:利用希尔伯特-黄变换的经验模态分解方法将所述有效特征信号中的低频系数进行多级处理,得到多级的固有模态函数和多级处理后的剩余分量;

其中,所述经验模态分解中的上一级的所述固有模态函数为下一级的固有模态函数和剩余分量之和。

8.根据权利要求3所述的一种基于时频变换的激波风洞测力天平信号数据处理方法,其特征在于:在步骤400中,利用希尔伯特谱分析方法对得到的每一级的所述固有模态函数进行Hilbert谱分析,得到每一个所述固有模态函数的瞬时频率、瞬时幅值和Hilbert谱,滤除所述固有模态函数的干扰信号,得到有效的气动力信号的实现步骤为:

获取所述低频信号的多级固有模态函数和剩余分量的时域图;

获取所述低频信号的多级的所述固有模态函数的Hilbert谱,得到每一级所述固有模态函数的瞬时频率,计算每级的所述固有模态函数和剩余分量的99%占用带宽;

保留完全符合所述理想阶跃信号的99%占用带宽的剩余分量和固有模态函数做为有效的气动力信号。

9.根据权利要求8所述的一种基于时频变换的激波风洞测力天平信号数据处理方法,其特征在于:根据多级的所述固有模态函数的Hilbert谱获取原始的所述天平阶跃信号的主要频率,且将所述天平阶跃信号以及固有模态函数的频谱图中具有相同波形且振幅占比最大的主要频率作为惯性振动频率。

一种基于时频变换的激波风洞测力天平信号数据处理方法

技术领域

[0001] 本发明涉及激波风洞测力试验技术领域,具体涉及一种基于时频变换的激波风洞测力天平信号数据处理方法。

背景技术

[0002] 脉冲型应变天平是通过快速响应模型在冲击载荷的作用下的变形而引起应变片的电压变化并予以测量,进而反映出模型载荷的一种测量装置,因其整体结构刚度大、分量间干扰低、输出灵敏度高、稳定性强和精准度高等特点广泛应用于高超声速飞行器测力试验等。天平的输出信号中包含了气动力信号、惯性振动干扰信号和其他干扰信号(如结构高阶模态振动、非定常气动载荷或其他流场干扰因素引起的干扰信号)。

[0003] 在激波风洞中开展测力试验时,测力系统在流场起动瞬间受到冲击激励,对天平的输出信号产生惯性干扰,尤其是在极短的有效试验时间(毫秒级)内,叠加有动态气动力和惯性振动的天平输出信号可能无法直接分辨出规律性,信号处理结果与真实气动力之间产生较大的误差,甚至导致数据不可用。

[0004] 由于模型测力天平系统结构的复杂性,现有的激波风洞测力天平系统在有效试验时间内,天平信号中部分高频率分量(由结构高阶模态振动、非定常气动载荷或其他流场干扰等因素引起的高频干扰)有可能无法完全衰减,此时对信号直接进行传统的滤波处理和快速傅里叶变换分析反而有可能增大处理结果的误差。

发明内容

[0005] 本发明的目的在于提供一种基于时频变换的激波风洞测力天平信号数据处理方法,以解决现有技术中的技术问题。

[0006] 为解决上述技术问题,本发明具体提供下述技术方案:

[0007] 一种基于时频变换的激波风洞测力天平信号数据处理方法,包括以下步骤:

[0008] 步骤100、搭建高超声速飞行器模型的激波风洞气动力测量系统,采用SVDC技术采集所述激波风洞气动力测量系统的天平阶跃信号,所述天平阶跃信号模拟风洞试验中测力系统受到的激励作用,构造理想阶跃信号模拟天平输出的真实气动力信号;

[0009] 步骤200、采用小波阈值降噪方法对所述天平阶跃信号进行小波分解,得到子信号,对所述子信号进行相关性分析,并滤除高频噪声信号,得到有效特征信号;

[0010] 步骤300、对滤除高频噪声干扰后的所述有效特征信号进行希尔伯特-黄变换,采用经验模态分解方法得到多个固有模态函数和剩余分量;

[0011] 步骤400、对每一个所述固有模态函数进行希尔伯特谱分析,得到相应的瞬时频率、瞬时幅值和Hilbert谱,并滤除所述有效特征信号中的干扰信号,得到有效的气动力信号。

[0012] 作为本发明的一种优选方案,在步骤200中,所述小波阈值降噪方法对所述天平阶跃信号进行近似分解和细节分解,分解得到低频系数和高频系数,其中,所述低频系数用于

展示整个所述天平阶跃信号的趋势,所述高频系数用于展示整个所述天平阶跃信号的细节成分,所述小波阈值降噪方法进行小波分解以及过滤高频噪音的具体实现方式为:

[0013] 步骤201、利用一维离散小波变换对降噪后的所述天平阶跃信号进行多级小波分解,以得到所述天平阶跃信号经过多级小波分解的低频系数和高频系数;

[0014] 步骤202、对低频系数、高频系数和理想阶跃信号进行快速傅里叶变换,并计算经过快速傅里叶变换后的所述低频系数、高频系数和理想阶跃信号的99%占用带宽;

[0015] 步骤203、以所述理想阶跃信号的99%占用带宽为基准,将所述高频系数和低频系数的99%占用带宽与基准对比,过滤完全不符合所述理想阶跃信号的99%占用带宽的高频系数和低频系数。

[0016] 作为本发明的一种优选方案,对低频系数、高频系数和理想阶跃信号进行快速傅里叶变换后生成频谱图,过滤超过所述理想阶跃信号的99%占用带宽的所述高频系数,且根据所述高频系数的幅值和对应的频率来确定每个所述高频系数的主要频率。

[0017] 作为本发明的一种优选方案,所述高频系数和低频系数的99%占用带宽与所述理想阶跃信号的99%占用带宽无交集,则表示所述高频系数和低频系数的99%占用带宽完全不符合所述理想阶跃信号的99%占用带宽,过滤除去完全不符合的高频系数和低频系数。

[0018] 作为本发明的一种优选方案,所述99%占用带宽为所述低频系数、高频系数和理想阶跃信号经过快速傅里叶变换后的信号功率占总信号功率的99%。

[0019] 作为本发明的一种优选方案,将过滤完全不符合的高频系数和低频系数后进行傅里叶逆变换,且选取过滤完全不符合的高频系数和低频系数的适当系数进行信号重构,得到滤除高频噪声信号后的有效特征信号。

[0020] 作为本发明的一种优选方案,在步骤300中,利用希尔伯特-黄变换对所述有效特征信号的数据处理方式:利用希尔伯特-黄变换的经验模态分解方法将所述有效特征信号中的低频系数进行多级处理,得到多级的固有模态函数和多级处理后的剩余分量;

[0021] 其中,所述经验模态分解中的上一级的所述固有模态函数为下一级的固有模态函数和剩余分量之和。

[0022] 作为本发明的一种优选方案,在步骤400中,利用希尔伯特谱分析方法对得到的每一级的所述固有模态函数进行Hilbert谱分析,得到每一个所述固有模态函数的瞬时频率、瞬时幅值和Hilbert谱,滤除所述固有模态函数的干扰信号,得到有效的气动力信号的实现步骤为:

[0023] 获取所述低频信号的多级固有模态函数和剩余分量的时域图;

[0024] 获取所述低频信号的多级的所述固有模态函数的Hilbert谱,得到每一级所述固有模态函数的瞬时频率,计算每级的所述固有模态函数和剩余分量的99%占用带宽;

[0025] 保留完全符合所述理想阶跃信号的99%占用带宽的剩余分量和固有模态函数做为有效的气动力信号。

[0026] 作为本发明的一种优选方案,根据多级的所述固有模态函数的Hilbert谱获取原始的所述天平阶跃信号的主要频率,且将所述天平阶跃信号以及固有模态函数的频谱图中具有相同波形且振幅占比最大的主要频率作为惯性振动频率。

[0027] 本发明与现有技术相比较具有如下有益效果:

[0028] 本发明采用小波变换和希尔伯特-黄变换,针对高超声速飞行器模型的激波风洞

天平信号进行降噪和时频变换分析处理,有效辨识出天平信号中的不同干扰成分,输出可靠的气动力结果,降低后续快速傅里叶变换滤除系统惯性特征频率的误差,提高整个激波风洞气动力测量系统的精度。

附图说明

[0029] 为了更清楚地说明本发明的实施方式或现有技术中的技术方案,下面将对实施方式或现有技术描述中所需要使用的附图作简单地介绍。显而易见地,下面描述中的附图仅仅是示例性的,对于本领域普通技术人员来讲,在不付出创造性劳动的前提下,还可以根据提供的附图引伸获得其它的实施附图。

[0030] 图1为本发明实施例提供的测力天平信号数据处理方法的流程示意图;

[0031] 图2为本发明实施例提供的天平阶跃信号的时域图;

[0032] 图3为本发明实施例提供的小波分解的低频系数的时域信号图;

[0033] 图4为本发明实施例提供的小波分解的高频系数的时域信号图;

[0034] 图5为本发明实施例提供的小波除燥后的有效特征信号与低频系数的时域对比结果图;

[0035] 图6为本发明实施例提供的小波除燥后的有效特征信号与低频系数的频谱对比结果图;

[0036] 图7为本发明实施例提供的经验模态分解信号的时域图;

[0037] 图8为本发明实施例提供的多级固有模态函数的瞬时频率图;

[0038] 图9为本发明实施例提供的小波除燥后的有效特征信号与剩余分量的时域对比结果图;

[0039] 图10为本发明实施例提供的小波除燥后的有效特征信号与剩余分量的频谱对比结果图。

具体实施方式

[0040] 下面将结合本发明实施例中的附图,对本发明实施例中的技术方案进行清楚、完整地描述,显然,所描述的实施例仅仅是本发明一部分实施例,而不是全部的实施例。基于本发明中的实施例,本领域普通技术人员在没有做出创造性劳动前提下所获得的所有其他实施例,都属于本发明保护的范围。

[0041] 如图1所示,本发明提供了一种基于时频变换的激波风洞测力天平信号数据处理方法,本实施方式采用小波变换和希尔伯特-黄变换,针对高超声速飞行器模型的激波风洞天平信号进行降噪和时频变换分析处理,有效辨识出天平信号中的不同干扰成分,输出可靠的气动力结果。

[0042] 为了便于数据采集分析,本实施方式在激波风洞气动力测量系统内用阶跃载荷信号(简称“天平阶跃信号”)模拟风洞试验中测力系统受到的激励作用,用构造的理想阶跃载荷信号(简称“理想阶跃信号”)模拟天平输出的真实气动力信号,然后对天平阶跃信号进行时频变换分析处理,用于验证该时频方法的可靠性。

[0043] 在进行激波风洞试验时,测力系统受到来流的瞬间冲击作用,产生突变信号,而且系统受到风洞流场的激励作用,可能导致天平信号并不稳定。在有效试验时间内,天平信号

叠加有多个频率随时间变化的信号,是一个典型的非线性、非平稳的突变信号。

[0044] 本实施方式针对脉冲型风洞测力天平信号的受冲击振动特点,采用小波阈值降噪方法和希尔伯特-黄变换法对激波风洞天平信号进行时频变换分析处理。

[0045] 具体包括以下步骤:

[0046] 步骤100、搭建高超声速飞行器模型的激波风洞气动力测量系统,采用SVDC技术采集所述激波风洞气动力测量系统的天平阶跃信号,所述天平阶跃信号模拟风洞试验中测力系统受到的激励作用,构造理想阶跃信号模拟天平输出的真实气动力信号。

[0047] 需要补充说明的是,SVDC技术通过悬挂钢丝对系统施加稳定的载荷,瞬间剪断钢丝对系统施加冲击阶跃载荷作用。

[0048] 其中,激波风洞气动力测量系统的采集装置由半锥角为 10° 、长度为750mm的标准尖锥模型、三分量脉冲型应变天平和弯刀支撑结构构成。采用该装置对测力系统采集适量的阶跃载荷信号,该信号在一定程度上反映了实际风洞试验中的风洞测力信号的特征。

[0049] 选取采集到的任意一个天平阶跃信号,将其时域波形图绘制成图2所示。图2中虚线用于模拟受到流场起动瞬时冲击激励作用时测力系统的响应信号,实线表示的是构造的理想阶跃信号,用于模拟简化后的定常气动力信号。天平阶跃信号用于模拟简化后的风洞测力信号,采样时间是150ms,包括前50ms的零值信号和加载后的100ms的气动力信号,信号在第50ms时发生跳变,边沿触发时间忽略不计,理想阶跃信号由0N突变为2.5N左右,并在后100ms内保持稳定不变。

[0050] 步骤200、采用小波阈值降噪方法对所述天平阶跃信号进行小波分解,得到子信号,对所述子信号进行相关性分析,并滤除高频噪声信号,得到有效特征信号。

[0051] 所述小波阈值降噪方法对所述天平阶跃信号进行近似分解和细节分解,分解得到低频系数和高频系数,其中,所述低频系数用于展示整个所述天平阶跃信号的趋势,所述高频系数用于展示整个所述天平阶跃信号的细节成分,所述小波阈值降噪方法进行小波分解以及过滤高频噪音的具体实现方式为:

[0052] 步骤201、利用一维离散小波变换对降噪后的所述天平阶跃信号进行多级小波分解,以得到所述天平阶跃信号经过多级小波分解的低频系数和高频系数。

[0053] 小波分解一般可以表示为由一对互补的低通滤波器和高通滤波器组成,天平阶跃信号经过一级小波分解后得到低频系数和高频系数,此时,可以继续对低频系数进行不断的分解来提高信号过滤精度。

[0054] 在本实施方式中,利用一维离散小波变换对降噪后的天平阶跃信号进行8级小波分解,将得到的低频系数 $A_1 \sim A_8$ 与高频系数 $D_1 \sim D_8$ 进行对比,根据小波分解的原理,在时域内有

$$[0055] \quad S = (A_1 + D_1)$$

$$[0056] \quad = (A_2 + D_2) + D_1$$

$$[0057] \quad = (A_3 + D_3) + D_2 + D_1$$

$$[0058] \quad = \dots$$

$$[0059] \quad = (A_8 + D_8) + D_7 + D_6 + \dots + D_1;$$

[0060] 式中,S为经过小波降噪去毛刺后的天平阶跃信号, $A_1 \sim A_8$ 和 $D_1 \sim D_8$ 分别为经过8级小波分解得到的低频系数和高频系数。

[0061] 低频系数A1~A5与原始信号基本保持了相同的波形,展示了原始信号的近似信息,而高频系数反映了原始信号的细节信息,低频系数和高频系数具体的时域图如图3和图4所示。

[0062] 步骤202、对低频系数、高频系数和理想阶跃信号进行快速傅里叶变换,并计算经过快速傅里叶变换后的所述低频系数、高频系数和理想阶跃信号的99%占用带宽。

[0063] 步骤203、以所述理想阶跃信号的99%占用带宽为基准,将所述高频系数和低频系数的99%占用带宽与基准对比,过滤完全不符合所述理想阶跃信号的99%占用带宽的高频系数和低频系数。

[0064] 其中,作为优选的是,对低频系数、高频系数和理想阶跃信号进行快速傅里叶变换后生成频谱图,过滤超过所述理想阶跃信号的99%占用带宽的所述高频系数,且根据所述高频系数的幅值和对应的频率来确定每个所述高频系数的主要频率。

[0065] 所述高频系数和低频系数的99%占用带宽与所述理想阶跃信号的99%占用带宽无交集,则表示所述高频系数和低频系数的99%占用带宽完全不符合所述理想阶跃信号的99%占用带宽,过滤除去完全不符合的高频系数和低频系数。所述99%占用带宽为所述低频系数、高频系数和理想阶跃信号经过快速傅里叶变换后的信号功率占总信号功率的99%。

[0066] 部分低频系数、高频系数以及理想阶跃信号的99%占用带宽结果如下表1所示,理想阶跃信号的99%占用带宽为0.02~205.07Hz。高频系数D1~D5幅值较小,基本趋近于零且保持稳定,其频率非常高,均在240.60Hz以上,相对于原始信号可以当作高频噪声干扰滤掉。D6和D7占据高频系数主导地位,其幅值与原始信号相当,其主要频率为379.89Hz,可以认为是激波风洞气动力测量系统的惯性振动频率。D8的99%占用带宽是74.96~243.03Hz,与理想阶跃信号有重叠部分,所以D8不能完全当作干扰信号滤掉。

[0067] 表1 8级小波分解后的信号的99%占用带宽

| | Signal | 99% occupied bandwidth (Hz) |
|--------|-------------------|-----------------------------|
| | D1 | 1674.17 ~ 24749.60 |
| | D2 | 240.60 ~ 23441.80 |
| | D3 | 405.33 ~ 22085.60 |
| | D4 | 1162.16 ~ 2398.01 |
| [0068] | D5 | 724.06 ~ 1953.89 |
| | D6 | 339.58 ~ 538.53 |
| | D7 | 234.97 ~ 441.92 |
| | D8 | 74.96 ~ 243.03 |
| | A7 | 0.02 ~ 151.22 |
| | A8 | 0.02 ~ 89.39 |
| | Ideal step signal | 0.02 ~ 205.07 |

[0069] 滤掉高频系数D1~D7后的低频系数A7初步反映出理想阶跃载荷的特征,其频率符合理想阶跃信号的99%占用带宽,将其与理想阶跃信号进行对比,如图5和图6所示。图5和图6分别表示在时域波形图和频域幅度频谱图的对比,虚线是经过小波降噪去毛刺后的天平阶跃信号,点划线是理想阶跃信号,实线表示经过8级小波分解后的第7级低频系数A7。相比于天平阶跃信号S,A7已去掉了大部分振动干扰信号,其中S的主要频率为379.89Hz左右,验证了测力系统的惯性振动频率为379.89Hz。

[0070] 将过滤完全不符合的高频系数(D1~D5)和低频系数(A1~A4)后进行傅里叶逆变换,且选取过滤完全不符合的高频系数和低频系数的适当系数(D6和A5~A8)进行信号重构,得到滤除高频噪声信号后的有效特征信号。

[0071] 步骤300、对滤除高频噪声干扰后的所述有效特征信号进行希尔伯特-黄变换,采用经验模态分解方法得到多个固有模态函数和剩余分量。

[0072] 利用希尔伯特-黄变换对所述有效特征信号的数据处理方式:利用希尔伯特-黄变换的经验模态分解方法将所述有效特征信号中的低频系数进行多级处理,得到多级的固有模态函数和多级处理后的剩余分量;

[0073] 其中,所述经验模态分解中的上一级的所述固有模态函数为下一级的固有模态函数和剩余分量之和。

[0074] 由于希尔伯特-黄变换方法容易受到高频噪声的影响,所以首先对天平阶跃信号进行高频降噪处理,经过小波分解降噪后的低频系数滤掉了724.06Hz以上的频率,可以采用希尔伯特-黄变换进行处理分析。

[0075] 因此,利用希尔伯特-黄变换中的经验模态分解方法对低频系数A5进行三级处理,得到三个固有模态函数IMFs和一个剩余分量Residual,在时域内有:

$$\begin{aligned}
 A5 &= (IMF1 + R1) \\
 [0076] \quad &= IMF1 + (IMF2 + R2) \quad ; \\
 &= IMF1 + IMF2 + (IMF3 + R3)
 \end{aligned}$$

[0077] 式中A5是天平阶跃信号经过小波分解滤掉高频系数D1~D5后的低频系数A5,基本无高频噪声的干扰,IMF1~IMF3分别是天平阶跃信号经过三级经验模态分解处理后的固有模态函数,R1~R3是天平阶跃信号经过三级经验模态分解处理后的剩余分量,具体经过经验模态分解方法处理后的有效特征信号的时域图如图7所示。

[0078] 图7中第一级固有模态函数IMF1与原始的天平阶跃信号的波形相似,基本反映了原始的天平阶跃信号的近似值,占据天平阶跃信号中的主导地位,其主要频率为379.89Hz,与小波分解得到的惯性振动频率相同,第二级固有模态函数IMF2和第三级固有模态函数IMF3反映了信号的细节值,其占有比例较小,第二级固有模态函数IMF2仅在信号跳变时有幅值,而在信号跳变后其幅值保持稳定且趋于零,第三级固有模态函数IMF3在信号跳变后的时间段内一直存在波动。

[0079] 步骤400、对每一个所述固有模态函数进行希尔伯特谱分析,得到相应的瞬时频率、瞬时幅值和Hilbert谱,并滤除所述有效特征信号中的干扰信号,得到有效的气动力信号。

[0080] 在步骤400中,利用希尔伯特谱分析方法对得到的每一级的所述固有模态函数进行Hilbert谱分析,得到每一个所述固有模态函数的瞬时频率、瞬时幅值和Hilbert谱,滤除所述固有模态函数的干扰信号,得到有效的气动力信号的实现步骤为:

[0081] 获取所述低频信号的多级的所述固有模态函数的Hilbert谱,得到每一级所述固有模态函数的瞬时频率。

[0082] 需要补充说明的是,利用希尔伯特-黄变换中的希尔伯特谱分析方法对得到的多级固有模态函数进行Hilbert谱分析,得到每一个IMF的瞬时频率,具体如图8所示,图8中第三级固有模态函数IMF3的瞬时频率发现其主要频率为31.30Hz左右,完全位于理想阶跃信

号的99%占用带宽内,所以不能将第三级固有模态函数IMF3当作低频干扰信号直接滤掉。

[0083] 对所有的固有模态函数和剩余分量进行快速傅里叶变换,计算固有模态函数和剩余分量的99%占用带宽;

[0084] 保留完全符合所述理想阶跃信号的99%占用带宽的剩余分量和固有模态函数做为有效的气动力信号。

[0085] 三级固有模态函数和剩余分量的99%占用带宽,整理结果至表2所示,

[0086] 表2 HHT处理后的信号的99%占用带宽

| | Signal | 99% occupied bandwidth (Hz) |
|--------|-------------------|-----------------------------|
| | IMF1 | 240.97 ~ 495.09 |
| | IMF2 | 2.81 ~ 553.05 |
| [0087] | IMF3 | 4.67 ~ 240.02 |
| | R2 | 0.02 ~ 140.79 |
| | R3 | 0.02 ~ 97.85 |
| | Ideal step signal | 0.02 ~ 205.07 |

[0088] 根据表2中的数据,滤掉固有模态函数IMF1和IMF2后的剩余分量R2完全符合理想阶跃信号的99%占用带宽,且基本反映出理想阶跃信号的特征,将剩余分量R2的时域和频域范围内的分布图与小波分解后的有效特征信号的对比结果整理如图9和图10所示。

[0089] 根据多级的所述固有模态函数的Hilbert谱获取原始的所述天平阶跃信号的主要频率,且将所述天平阶跃信号以及固有模态函数的频谱图中具有相同波形且振幅占比最大的主要频率作为惯性振动频率。

[0090] 经过小波分解后的高频系数D1~D5是信号中的高频低幅值噪声干扰成分,去掉该噪声干扰后的低频系数A5与原始信号基本保持了相同的波形和幅值,但是去掉了明显的毛刺信号。将经过小波分解和希尔伯特-黄变换方法应用于天平阶跃信号后的R2分析可知。高频系数D6、D7以及固有模态函数IMF1具有相同的波形,其主要频率是379.9Hz,反映了测力系统振动的惯性频率。高频系数D8和第二级固有模态函数IMF2在50ms附近产生信号跳变,作用时间短,作用力大,而在信号跳变后,幅值变为零,反映了在采集信号时剪断钢丝瞬间对系统产生的冲击载荷作用。

[0091] 本实施方式采用小波变换和希尔伯特-黄变换,对激波风洞天平信号进行降噪和时频变换分析处理,有效辨识出天平信号中的不同干扰成分,输出可靠的气动力结果,输出的气动力结果为线性且平稳的突变信号,且为后续利用快速傅里叶变换识别系统惯性特征频率提供线性且平稳的信号,另外本实施方式可直接识别出惯性频率特征,便于后续的惯性特征频率筛选工作。

[0092] 以上实施例仅为本申请的示例性实施例,不用于限制本申请,本申请的保护范围由权利要求书限定。本领域技术人员可以在本申请的实质和保护范围内,对本申请做出各种修改或等同替换,这种修改或等同替换也应视为落在本申请的保护范围内。

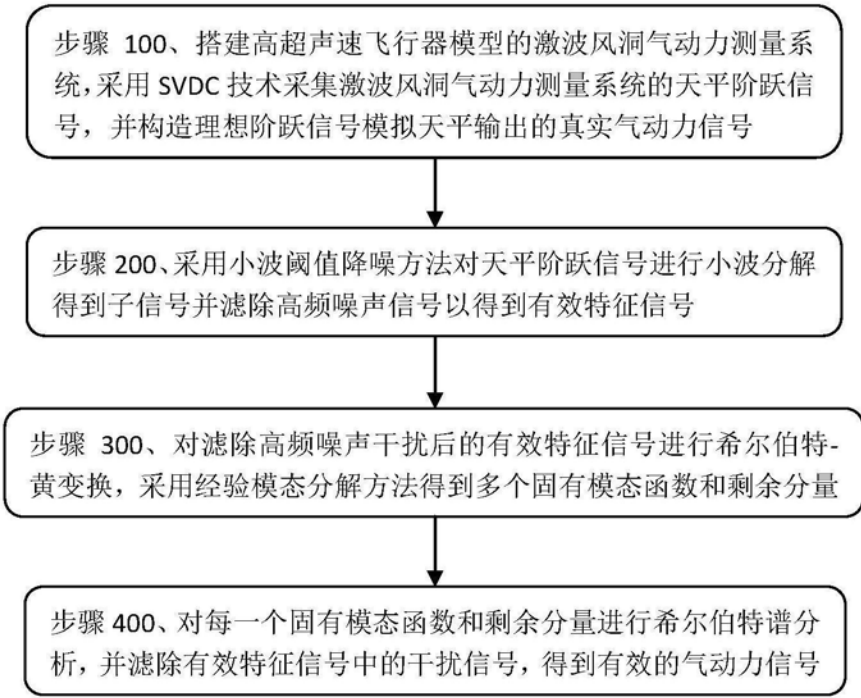


图1

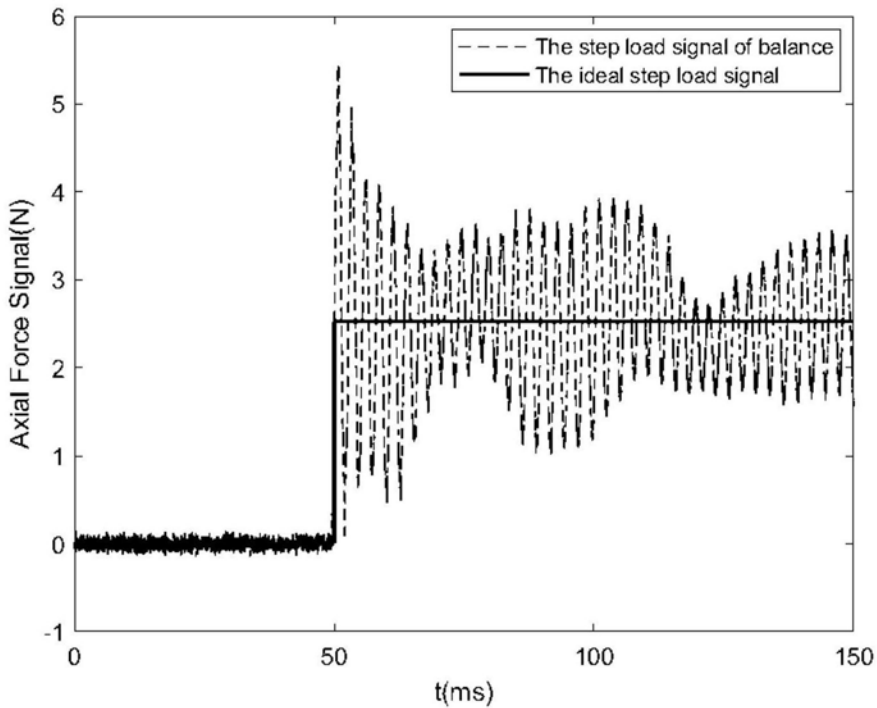


图2

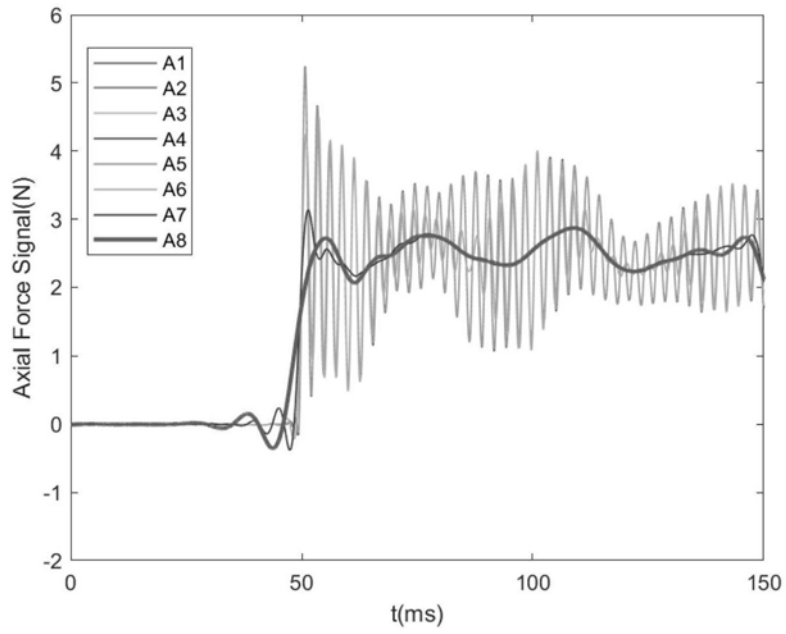


图3

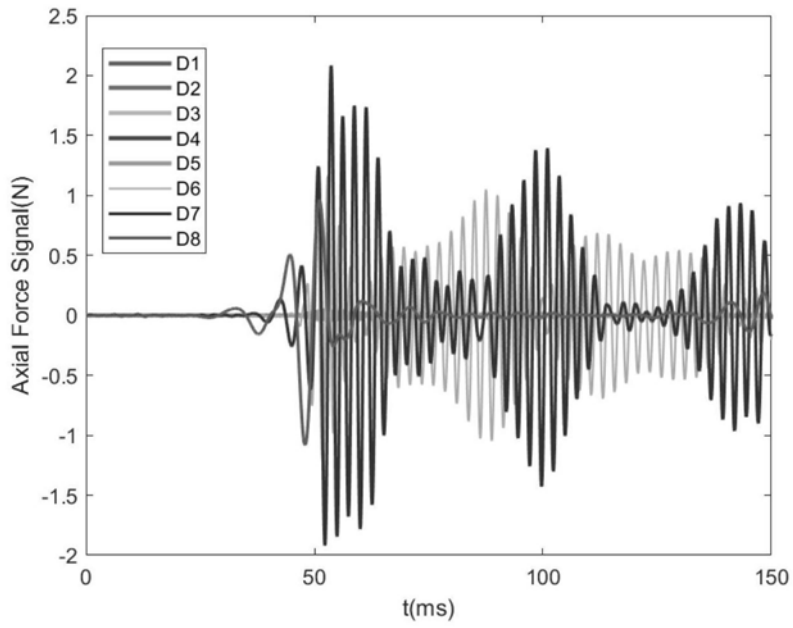


图4

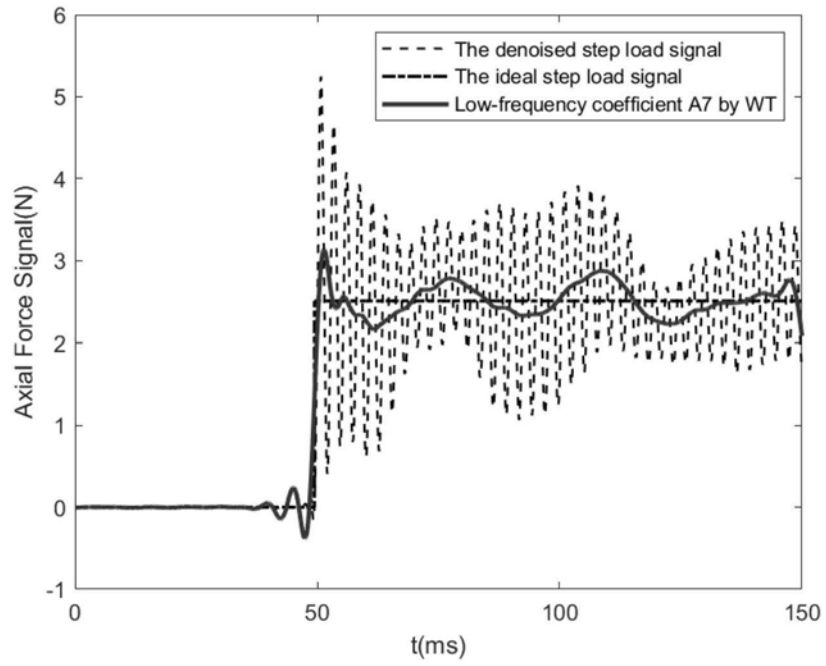


图5

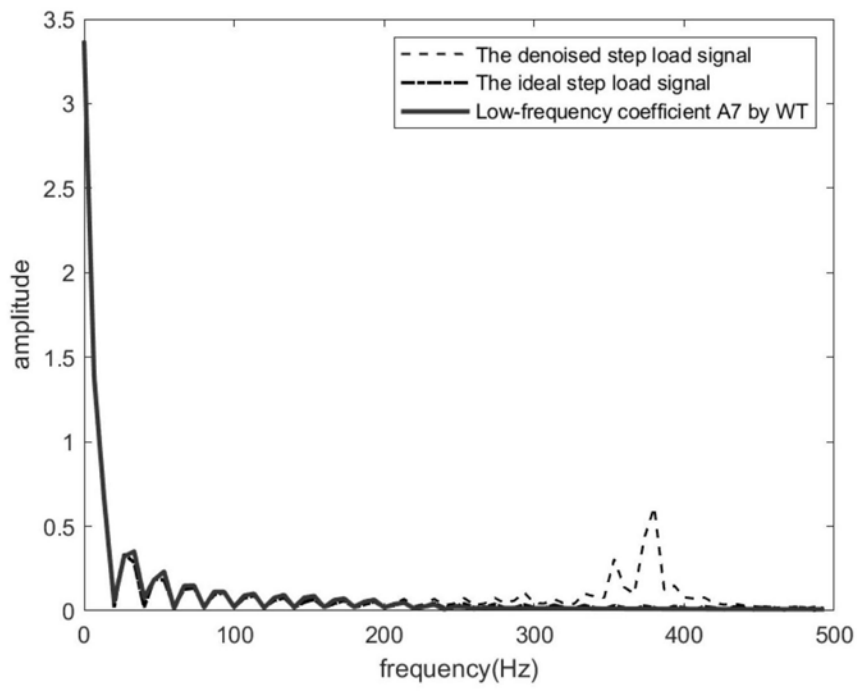


图6

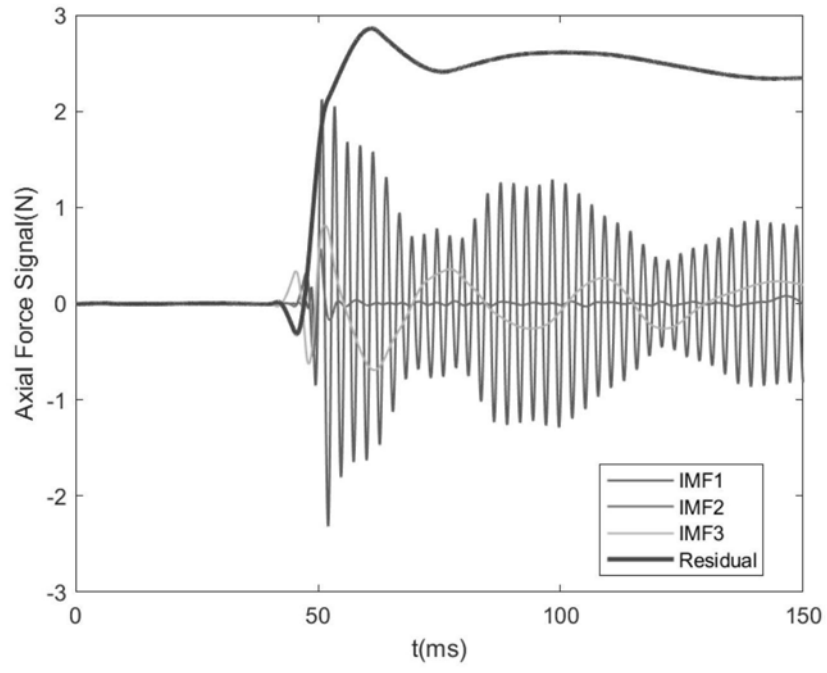


图7

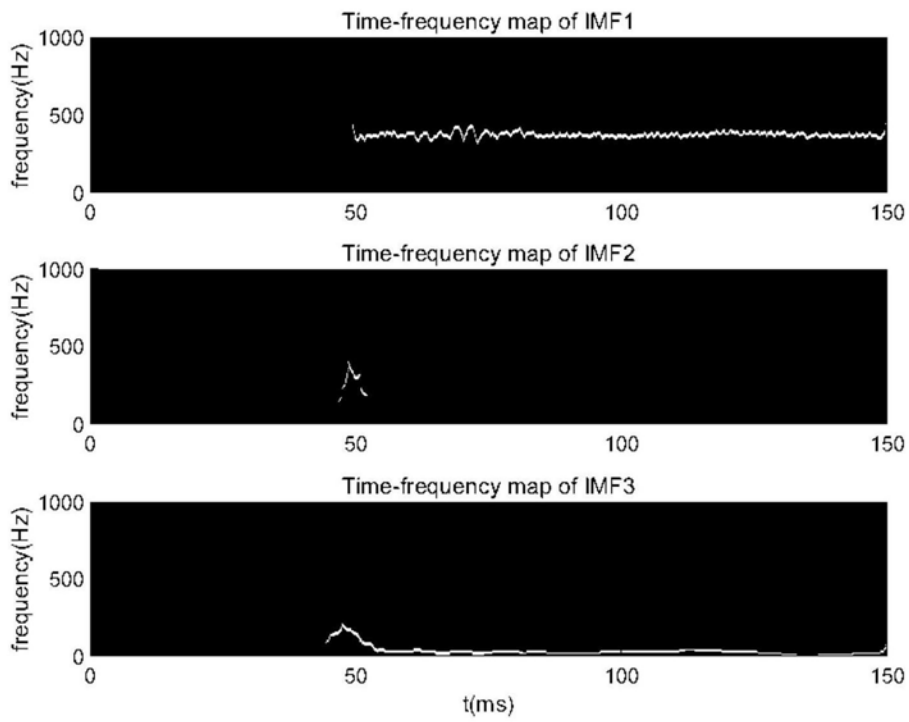


图8

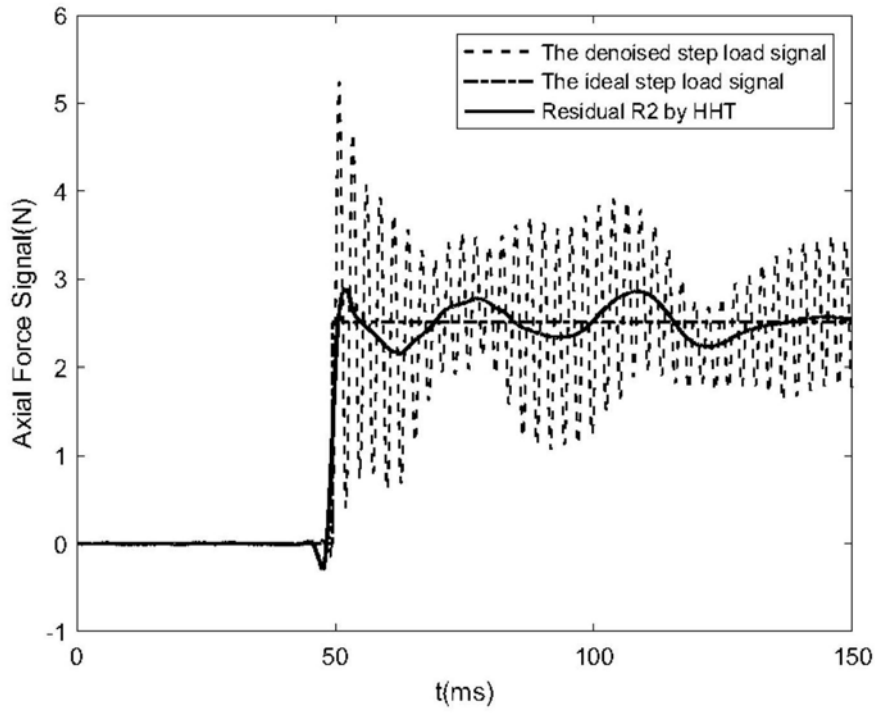


图9

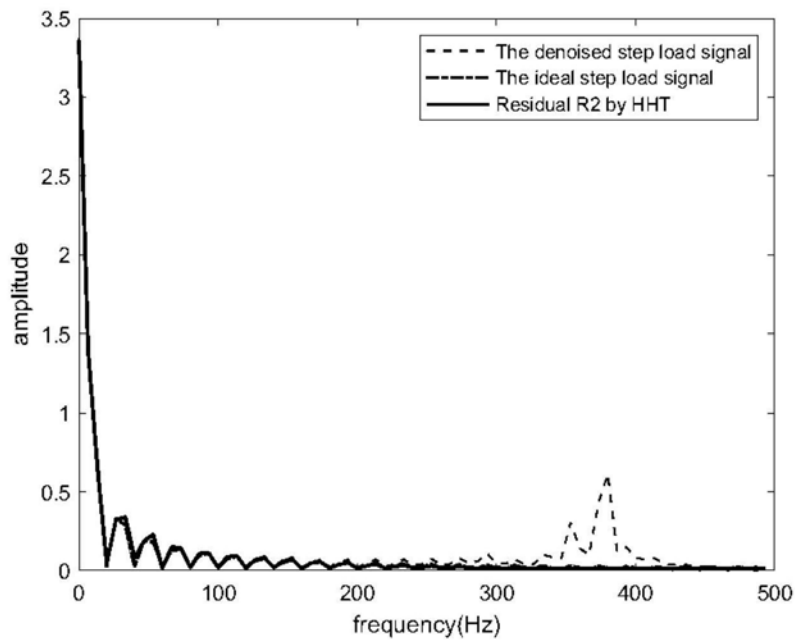


图10