(19)国家知识产权局

(12)发明专利

(10)授权公告号 CN 114993606 B
(45)授权公告日 2023.03.21

(21)申请号 202210607791.9
(22)申请日 2022.05.31
(65)同一申请的已公布的文献号
申请公布号 CN 114993606 A
(43)申请公布日 2022.09.02
(73)专利权人 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 王粤 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
专利代理师 焦海峰
(51)Int.Cl.
G01M 9/06(2006.01)
G01M 9/08(2006.01)

(56)对比文件
WO 2022033608 A1,2022.02.17
CN 105550383 A,2016.05.04
CN 106709460 A,2017.05.24
RU 0002566609 C2,2015.06.10

审查员 张东海

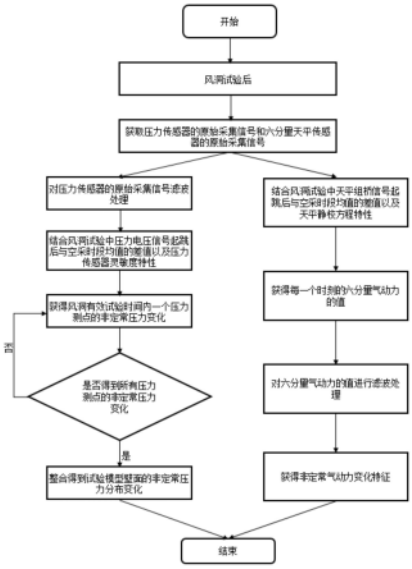
权利要求书2页 说明书5页 附图3页

(54)发明名称

一种非定常压力和气动力数据风洞试验结果处理方法

(57)摘要

本发明提供了一种非定常压力和气动力数据风洞试验结果处理方法，其特征在于，包括如下步骤：风洞试验后，获取试验模型壁面压力测点处压力传感器的原始采集信号和六分量天平传感器的原始采集信号；通过Savitzky-Golay平滑和微分滤波器，去除噪声干扰信号，获得压力测点的非定常压力信号进而获得试验模型表面非定常压力分布变化；通过对六分量天平测量的六通道信号进行线性方程求解变换获得每一时刻的六分量气动力信号，最后对六分量气动力信号进行Savitzky-Golay平滑和微分滤波获得非定常气动力信号。本发明提供的方法简单、高效，能够去除激波风洞非定常试验压力信号和气动力信号中的糅合噪声以及其他干扰信号。



CN 114993606 B

1.一种非定常压力和气动力数据风洞试验结果处理方法，其特征在于，包括如下步骤：

步骤1.风洞试验后，获取试验模型壁面压力测点处压力传感器的原始采集信号和六分量天平传感器的原始采集信号；

步骤2.通过Savitzky-Golay平滑和微分滤波器去除压力传感器的原始采集信号中的噪声干扰信号后，计算风洞试验中空采时段起跳前的压力传感器电压信号的均值，以去除惯性振动信号，结合每个压力测点处压力传感器的灵敏度，获得风洞有效试验时间内该压力测点的非定常压力变化；

步骤3.重复步骤2得到所有压力测点的非定常压力变化，整合所有压力测点的非定常压力变化，得到所述试验模型壁面的非定常压力分布变化；

步骤4.对六分量天平传感器的原始采集信号，结合风洞试验中空采时段起跳前的六分量天平传感器电压信号的均值，对六分量天平传感器的六通道信号进行线性变换获得每一时刻的六分量气动力的值；

步骤5.通过Savitzky-Golay平滑和微分滤波器对步骤4中所述每一时刻的六分量气动力的值进行滤波处理，以去除噪声干扰信号以及惯性振动信号，获得非定常气动力变化特征，

步骤1中获取得到六分量天平传感器的原始采集信号后，还包括步骤：对采集得到的六分量天平传感器的原始采集信号按照六分量天平组桥方式对六个通道的信号进行组桥，获得联合组桥后的六分量电压信号，

步骤4中所述获得每一时刻的六分量气动力的值的具体内容为：

计算联合组桥后的六分量电压信号在空采时段起跳前的六分量电压信号均值，进而得到风洞有效试验时间内每一时刻的每个分量的电压信号与空采时段内的六分量电压信号均值的差值；

根据六分量天平的静校公式，建立六分量电压信号的差值到六分量气动力的线性方程组，获得每一时刻六分量天平传感器测得的六分量气动力的值，

步骤4中所述线性变换的方程为：

$$\begin{cases} Yi = -\Delta Uyi \cdot c_1 + Mzi \cdot c_2 + Mxi \cdot c_3 + Xi \cdot c_4 + Zi \cdot c_5 + Myi \cdot c_6 \\ Mzi = Yi \cdot c_7 - \Delta Umzi \cdot c_8 + Mxi \cdot c_9 + Xi \cdot c_{10} + Zi \cdot c_{11} + Myi \cdot c_{12} \\ Mxi = Yi \cdot c_{13} + Mzi \cdot c_{14} - \Delta Umxi \cdot c_{15} + Xi \cdot c_{16} + Zi \cdot c_{17} + Myi \cdot c_{18} \\ Xi = Yi \cdot c_{19} + Mzi \cdot c_{20} + Mxi \cdot c_{21} - \Delta Uxi \cdot c_{22} + Zi \cdot c_{23} + Myi \cdot c_{24} \\ Zi = Yi \cdot c_{25} + Mzi \cdot c_{26} + Mxi \cdot c_{27} + Xi \cdot c_{28} - \Delta Ui \cdot c_{29} + Myi \cdot c_{30} \\ Myi = Yi \cdot c_{31} + Mzi \cdot c_{32} + Mxi \cdot c_{33} + Xi \cdot c_{34} + Zi \cdot c_{35} - \Delta Umyi \cdot c_{36} \end{cases}$$

式中c_1，c_2...c_{36}为六分量天平的静校系数，Yi、Mzi、Mxi、Xi、Zi、Myi分别为在时刻i时的升力、俯仰力矩、滚转力矩、阻力、侧偏力和偏航力矩，ΔUyi，ΔUmzi，ΔUmxi，ΔUxi，ΔUzi，ΔUmyi为风洞有效试验时间内每一时刻i的每个分量的电压信号与空采阶段内的六分量电压信号均值的差值。

2.根据权利要求1所述的一种非定常压力和气动力数据风洞试验结果处理方法，其特征在于，

步骤2中所述去除压力传感器的原始采集信号中的噪声干扰信号后的具体内容为：根据滤波去除噪声干扰信号之后的压力传感器电压信号，获得在风洞试验中空采时段起跳前

的压力传感器电压信号的均值，计算风洞有效试验时间内，每一时刻滤波后的压力传感器电压信号与起跳前的空采时段压力传感器电压信号均值的差值，用每一时刻的差值除以该压力测点的压力传感器的灵敏度，获得风洞有效试验时间内该压力测点的非定常压力变化。

3.根据权利要求1所述的一种非定常压力和气动力数据风洞试验结果处理方法，其特征在于，

采用Gauss-Sidel迭代方法计算每一时刻所述线性变换的解，进而获得每一时刻六分量天平传感器测得的六分量气动力的值。

4.根据权利要求1所述的一种非定常压力和气动力数据风洞试验结果处理方法，其特征在于，

步骤1中获取得到试验模型壁面压力测点处压力传感器的原始采集压力信号后，还包括步骤：对压力传感器的原始采集压力信号进行初步人工筛选审查，以剔除信号异常或未成功采集到信号的压力测点。

一种非定常压力和气动力数据风洞试验结果处理方法

技术领域

[0001] 本发明属于风洞试验领域，涉及一种非定常压力和气动力数据风洞试验结果处理方法，具体地说是一种可以简便、快捷处理激波风洞非定常试验中模型壁面压力传感器电压信号以及六分量天平电压信号进而获得非定常壁面压力分布以及气动力变化的试验数据处理方法。

背景技术

[0002] 随着高超声速技术领域的发展，高超声速非定常气动特性是高超声速飞行器研制的关键内容。由于激波风洞可以产生高总温的试验气流，在高超声速飞行器关键技术试验研究和验证上有着不可替代的作用。区别于一般定常试验研究，非定常动态试验需要获得飞行器模型壁面压力分布以及气动力各个分量的非定常变化，用来研究飞行器表面压力载荷非定常变化以及动态气动特性。而激波风洞一般有效试验时间短，试验气流会对试验模型产生瞬时冲击作用，从而模型会发生惯性振动，一方面影响壁面压力传感器的测压信号，另一方面气动力测量信号中会耦合惯性振动信号。另外，风洞试验中的气流噪声也会对压力传感器的信号采集产生副作用。一般而言，耦合噪声以及其他干扰因素的压力传感器原始采集电压信号在某测点、某时刻测得的压力值并非该时刻真实的压力值，因为其他因素导致的压力信号在该时段的信号高频振荡可能会导致取值明显偏离真实值，从而产生误差。对于采用六分量杆式应变天平测得的气动力信号，原始6通道电压信号需要进一步处理才能获得随时间变化的6分量气动力信号。

[0003] 以前传统的风洞试验压力信号、气动力信号处理方法一般都是针对定常试验测量结果，处理获得风洞有效试验时间内的信号平均值然后转化为压力和气动力作为定常测量结果。这种方法针对风洞非定常试验测量是无效的，研究者不仅需要从原始压力采集信号、六分量天平信号中获得随时间变化的信号值，而且还需要去除噪声、惯性振动以及其他干扰因素。但是目前关于处理风洞试验非定常压力以及天平测力信号的方法比较少。针对以上问题，提出一种非定常压力和气动力数据风洞试验结果处理方法。

发明内容

[0004] 为了解决现有技术中的缺陷和不足，本发明提出了一种非定常压力和气动力数据风洞试验结果处理方法，本方法中通过Savitzky-Golay平滑和微分滤波器，获取壁面压力分布以及六分量气动力非定常变化特征，能够去除激波风洞非定常试验压力信号和气动力信号糅合噪声以及其他干扰信号。

[0005] 一种非定常压力和气动力数据风洞试验结果处理方法，包括如下步骤：

[0006] 步骤1.风洞试验后，获取试验模型壁面压力测点处压力传感器的原始采集信号和六分量天平传感器的原始采集信号；

[0007] 步骤2.通过Savitzky-Golay平滑和微分滤波器去除压力传感器的原始采集信号中的噪声干扰信号后，计算风洞试验中空采时段起跳前的压力传感器电压信号的均值，以

去除惯性振动信号，结合每个压力测点处压力传感器的灵敏度，获得风洞有效试验时间内该压力测点的非定常压力变化；

[0008] 步骤3.重复步骤2得到所有压力测点的非定常压力变化，整合所有压力测点的非定常压力变化，得到所述试验模型壁面的非定常压力分布变化；

[0009] 步骤4.对六分量天平传感器的原始采集信号，结合风洞试验中空采时段起跳前的六分量天平传感器电压信号的均值，对六分量天平传感器的六通道信号进行线性变换获得每一时刻的六分量气动力的值；

[0010] 步骤5.通过Savitzky-Golay平滑和微分滤波器对步骤4中所述每一时刻的六分量气动力的值进行滤波处理，以去除噪声干扰信号以及惯性振动信号，获得非定常气动力变化特征。

[0011] 作为一种优选的技术方案，步骤2中所述去除压力传感器的原始采集信号中的噪声干扰信号后的具体内容为：根据滤波去除噪声干扰信号之后的压力传感器电压信号，获得在风洞试验中空采时段起跳前的压力传感器电压信号的均值，计算风洞有效试验时间内，每一时刻滤波后的压力传感器电压信号与起跳前的空采时段压力传感器电压信号均值的差值，用每一时刻的差值除以该压力测点的压力传感器的灵敏度，获得风洞有效试验时间内该压力测点的非定常压力变化。

[0012] 作为一种优选的技术方案，步骤1中获取得到六分量天平传感器的原始采集信号后，还包括步骤：对采集得到的六分量天平传感器的原始采集信号按照六分量天平组桥方式对六个通道的信号进行组桥，获得联合组桥后的六分量电压信号。

[0013] 作为一种优选的技术方案，步骤4中所述获得每一时刻的六分量气动力的值的具体内容为：计算联合组桥后的六分量电压信号在空采时段起跳前的六分量电压信号均值，进而得到风洞有效试验时间内每一时刻的每个分量的电压信号与空采时段内的六分量电压信号均值的差值；根据六分量天平的静校公式，建立六分量电压信号的差值到六分量气动力的线性方程组，获得每一时刻六分量天平传感器测得的六分量气动力的值。

[0014] 作为一种优选的技术方案，步骤4中所述线性变换的方程为：

[0015]
$$\begin{cases} Yi = -\Delta Uyi \cdot c_1 + Mzi \cdot c_2 + Mxi \cdot c_3 + Xi \cdot c_4 + Zi \cdot c_5 + Myi \cdot c_6 \\ Mzi = Yi \cdot c_7 - \Delta Umzi \cdot c_8 + Mxi \cdot c_9 + Xi \cdot c_{10} + Zi \cdot c_{11} + Myi \cdot c_{12} \\ Mxi = Yi \cdot c_{13} + Mzi \cdot c_{14} - \Delta Umxi \cdot c_{15} + Xi \cdot c_{16} + Zi \cdot c_{17} + Myi \cdot c_{18} \\ Xi = Yi \cdot c_{19} + Mzi \cdot c_{20} + Mxi \cdot c_{21} - \Delta Uxi \cdot c_{22} + Zi \cdot c_{23} + Myi \cdot c_{24} \\ Zi = Yi \cdot c_{25} + Mzi \cdot c_{26} + Mxi \cdot c_{27} + Xi \cdot c_{28} - \Delta Ui \cdot c_{29} + Myi \cdot c_{30} \\ Myi = Yi \cdot c_{31} + Mzi \cdot c_{32} + Mxi \cdot c_{33} + Xi \cdot c_{34} + Zi \cdot c_{35} - \Delta Umyi \cdot c_{36} \end{cases}$$

[0016] 式中c_1，c_2...c_{36}为六分量天平的静校系数，Yi、Mzi、Mxi、Xi、Zi、Myi分别为在时刻i时的升力、俯仰力矩、滚转力矩、阻力、侧偏力和偏航力矩，ΔUyi，ΔUmzi，ΔUmxi，ΔUxi，ΔUzi，ΔUmyi为风洞有效试验时间内每一时刻i的每个分量的电压信号与空采阶段内的六分量电压信号均值的差值。

[0017] 作为一种优选的技术方案，采用Gauss-Sidel迭代方法计算每一时刻所述线性变换的解，进而获得每一时刻六分量天平传感器测得的六分量气动力的值。

[0018] 作为一种优选的技术方案，步骤1中获取得到试验模型壁面压力测点处压力传感器的原始采集压力信号后，还包括步骤：对压力传感器的原始采集压力信号进行初步人工筛选审查，以剔除信号异常或未成功采集到信号的压力测点。

[0019] 本发明和现有技术相比具有如下有益效果：

[0020] 本发明提供的处理方法，针对激波风洞非定常试验压力信号和气动力信号糅合噪声以及其他干扰信号，通过Savitzky-Golay平滑和微分滤波器，去除噪声干扰信号，获得压力测点非定常压力信号进而获得试验模型表面非定常压力分布变化；通过对六分量天平测量的六通道信号进行线性方程求解变换获得每一时刻的六分量气动力信号，最后对六分量气动力信号进行Savitzky-Golay平滑和微分滤波获得非定常气动力信号。该方法简单、高效、便捷，能够节约时间成本，为后续快速开展非定常试验结果的分析具有重要作用。

附图说明

[0021] 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申获得其它的实施附图。

[0022] 图1为本发明中非定常压力和气动力数据风洞试验结果处理方法的流程图；

[0023] 图2为本发明中非定常压力分布变化处理方法的流程图；

[0024] 图3为本发明中非定常六分量天平传感器信号处理方法的流程图。

具体实施方式

[0025] 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。

[0026] 本发明提供的一种非定常压力和气动力数据风洞试验结果处理方法，可以从原始压力采集信号、六分量天平信号中获得随时间变化的信号值，而且还可以去除噪声、惯性振动以及其他干扰因素，如图1所示，方法内容如下：

[0027] 步骤1.风洞试验后，获取试验模型壁面压力测点处压力传感器的原始采集信号和六分量天平传感器的原始采集信号。

[0028] 原始的采集信号需要经过数据处理，其中对采集得到的压力传感器的原始采集信号进行初步人工筛选审查，以剔除信号异常或未成功采集到信号的压力测点，在获取壁面压力分布时跳过这些“异常点”。

[0029] 步骤2.通过Savitzky-Golay平滑和微分滤波器去除压力传感器的原始采集信号中的噪声干扰信号后，计算风洞试验中空采时段起跳前的压力传感器电压信号的均值，以去除惯性振动信号，结合每个压力测点处压力传感器的灵敏度，获得风洞有效试验时间内该压力测点的非定常压力变化。该滤波器是一种在时域内基于局域多项式最小二乘法拟合的滤波方法。这种滤波器最大的特点在于在滤除噪声的同时可以确保信号的形状、宽度不变。

[0030] 如图2所示，非定常压力变化的具体内容为：

[0031] 201.对上述已初步人工筛选审查后的信号采用Savitzky-Golay平滑和微分滤波器滤波，得到去除噪声干扰信号的压力传感器电压信号；

[0032] 202.根据滤波去除噪声干扰信号之后的压力传感器电压信号，获得风洞试验中空采时段的起跳前的压力传感器电压信号的均值；即滤波后仍保有电压信号的压力测点处，在空采时段的起跳前这些压力测点上的压力传感器电压信号的均值；

[0033] 203.在风洞有效试验时间内，计算每一时刻滤波后的压力传感器电压信号与起跳前的空采时段压力传感器电压信号均值的差值；滤波后的电压信号在空采时段的电压信号均值计算方法是：在空采阶段的每个时刻i的电压信号为vi，则信号均值$\bar{v}$的计算公式为：

[0034] $$\bar{v}=\sum_{i=1}^{k}v_i\Big/k$$

[0035] 式中，K为空采阶段的采集到信号数目；

[0036] 204.用每一时刻的差值除以一个压力测点的压力传感器的灵敏度，获得风洞有效试验时间内该压力测点的非定常压力变化。

[0037] 本申请中获得每个时刻压力传感器或六分量天平传感器电压信号相对于起跳前(空采阶段)电压信号均值的相对变化量，使用该相对变化量进行数据处理，一方面更加合理，另一方面这样使得计算得到的压力或者气动力分量更加准确。

[0038] 步骤3.重复步骤2，得到所有压力测点的非定常压力变化，整合所有压力测点的非定常压力变化，得到所述试验模型壁面的非定常压力分布变化。

[0039] 本发明中能够基于激波风洞压力传感器原始采集信号获得非定常压力分布变化，该压力信号处理方法具有能够有效滤除噪声以及其他干扰信号，获得真实的压力分布变化的特点，且操作简单快捷。

[0040] 步骤4.对六分量天平传感器的原始采集信号，结合风洞试验中空采时段起跳前的六分量天平传感器电压信号的均值，对六分量天平传感器的六通道信号进行线性方程求解变换获得每一时刻的六分量气动力的值。如图3所示，六分量气动力的值的具体过程为：

[0041] 401.对获得的六分量天平传感器原始采集信号U1，U2，...U6按照六分量天平组桥方式对六个通道的信号进行组桥，获得联合组桥之后的六分量电压信号，分别为：Uy＝U2-U1，Umz＝U2+U1，Umx＝U3，Ux＝U4，Uz＝U5-U6，Umy＝U5+U6；

[0042] 402.计算联合组桥后的六分量电压信号在空采时段起跳前的六分量电压信号均值；

[0043] 403.获得风洞有效试验时间段之内每一时刻i的每个分量的电压信号与空采阶段内的六分量电压信号均值的差值ΔUyi，ΔUmzi，ΔUmxi，ΔUxi，ΔUzi，ΔUmyi；

[0044] 404.根据六分量天平的静校公式，建立六分量电压信号的差值ΔUyi，ΔUmzi，ΔUmxi，ΔUxi，ΔUzi，ΔUmyi到六分量气动力升力Yi，俯仰力矩Mzi，滚转力矩Mxi，阻力Xi，侧偏力Zi，偏航力矩Myi的线性变化方程组，如下所示；

[0045] 在时刻i，

[0046] $$\begin{cases} Yi=-\Delta Uyi\cdot c_1+Mzi\cdot c_2+Mxi\cdot c_3+Xi\cdot c_4+Zi\cdot c_5+Myi\cdot c_6 \\ Mzi=Yi\cdot c_7-\Delta Umzi\cdot c_8+Mxi\cdot c_9+Xi\cdot c_{10}+Zi\cdot c_{11}+Myi\cdot c_{12} \\ Mxi=Yi\cdot c_{13}+Mzi\cdot c_{14}-\Delta Umxi\cdot c_{15}+Xi\cdot c_{16}+Zi\cdot c_{17}+Myi\cdot c_{18} \\ Xi=Yi\cdot c_{19}+Mzi\cdot c_{20}+Mxi\cdot c_{21}-\Delta Uxi\cdot c_{22}+Zi\cdot c_{23}+Myi\cdot c_{24} \\ Zi=Yi\cdot c_{25}+Mzi\cdot c_{26}+Mxi\cdot c_{27}+Xi\cdot c_{28}-\Delta Ui\cdot c_{29}+Myi\cdot c_{30} \\ Myi=Yi\cdot c_{31}+Mzi\cdot c_{32}+Mxi\cdot c_{33}+Xi\cdot c_{34}+Zi\cdot c_{35}-\Delta Umyi\cdot c_{36} \end{cases}$$

[0047] 其中c_1，c_2...c_{36}为6分量天平的静校系数，Yi、Mzi、Mxi、Xi、Zi、Myi分别为在时刻i

时的升力、俯仰力矩、滚转力矩、阻力、侧偏力和偏航力矩，ΔUyi，ΔUmzi，ΔUmxi，ΔUxi，ΔUzi，ΔUmyi为风洞有效试验时间内每一时刻i的每个分量的电压信号与空采阶段内的六分量电压信号均值的差值。可以采用Gauss-Sidel迭代方法求得每一时刻该方程组的解，获得每一时刻六分量天平传感器测得的六分量气动力的值。

[0048] 步骤5.通过Savitzky-Golay平滑和微分滤波器对步骤4中所述每一时刻的六分量气动力的值进行滤波处理，以去除噪声干扰信号以及惯性振动信号，获得非定常气动力变化特征。采用Savitzky-Golay平滑和微分滤波器，可以去除气动力值中的噪声干扰信号以及惯性振动信号，对天平测得的六分量气动力进行平滑滤波后可以获得一定程度反映非定常气动力变化特征。

[0049] 本申请中基于激波风洞六分量测力天平的原始采集信号可以获得非定常气动力变化，该气动力信号处理方法基于原始六分量电压信号准确快速获得非定常六分量气动力信号变化，操作简单快捷，而且能够在一定程度上还原出气动力的非定常变化特征。

[0050] 本发明提供的一种非定常压力和气动力数据风洞试验结果处理方法，基于风洞非定常试验结果，区别于传统的定常试验数据结果处理手段，通过传感器的原始信号采集数据，过滤干扰噪声信号，快速获得非定常数据，对后续分析也具有重要作用。而且针对非定常激波风洞试验原始数据的处理方法，实施起来简单可靠，本发明提供的处理方法较之现有技术中的一些处理方法在人力以及时间成本方面更低一些。

[0051] 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。

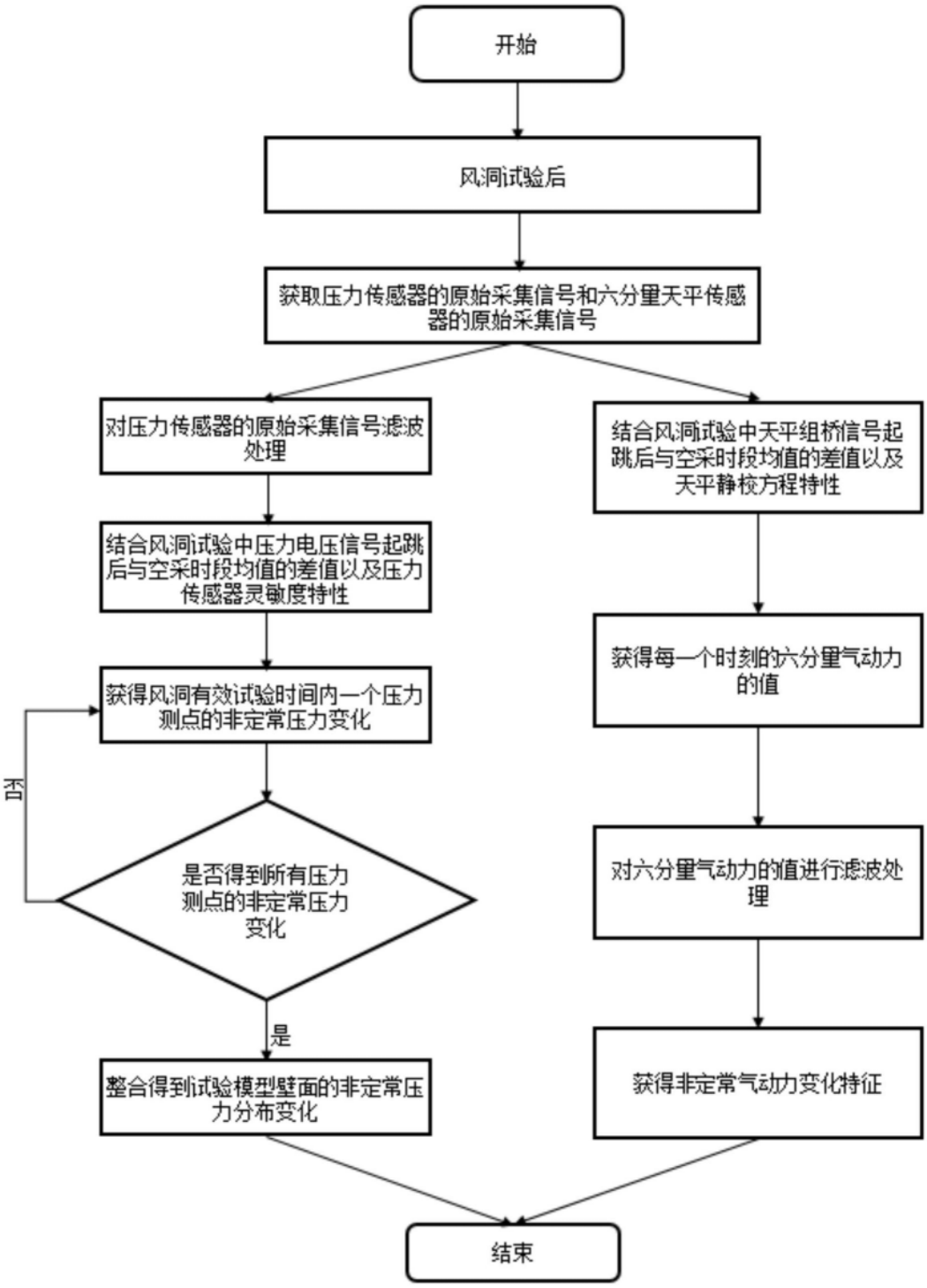

开始
风洞试验后
获取压力传感器的原始采集信号和六分量天平传感器的原始采集信号
对压力传感器的原始采集信号滤波处理
结合风洞试验中压力电压信号起跳后与空采时段均值的差值以及压力传感器灵敏度特性
获得风洞有效试验时间内一个压力测点的非定常压力变化
否
是否得到所有压力测点的非定常压力变化
是
整合得到试验模型壁面的非定常压力分布变化
结合风洞试验中天平组桥信号起跳后与空采时段均值的差值以及天平静校方程特性
获得每一个时刻的六分量气动力的值
对六分量气动力的值进行滤波处理
获得非定常气动力变化特征
结束

图1

开始
获取压力传感器原始采集信号
人工剔除异常传感器信号
传感器电压信号Savitzky-Golay平滑和微分滤波
计算滤波后电压信号空采阶段电压信号起跳前均值
计算风洞有效试验时间段内滤波后电压信号与起跳前均值电压信号的差值
用每一时刻的差值除以该测点传感器灵敏度获得压力非定常变化
整合所有测点的压力非定常变化获得壁面非定常压力分布变化
结束

图2

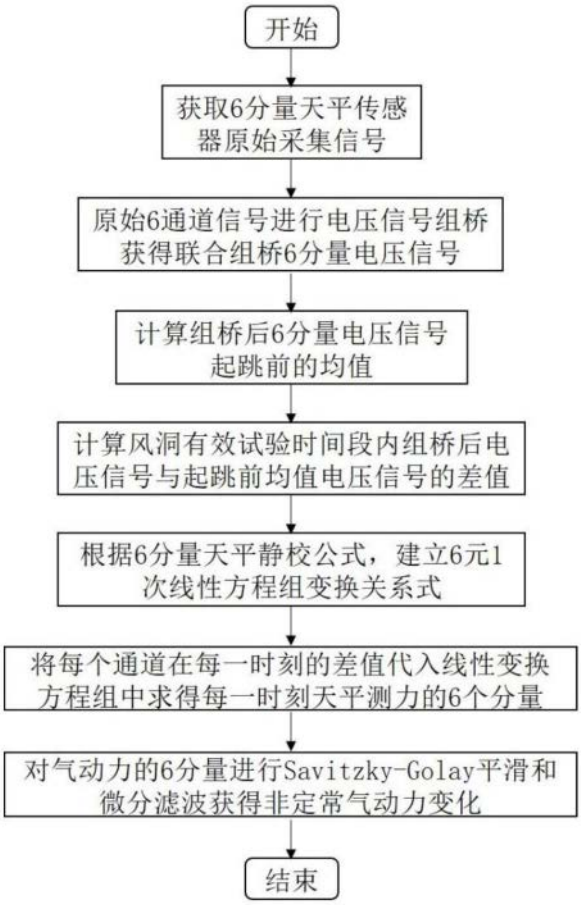

开始
获取6分量天平传感器原始采集信号
原始6通道信号进行电压信号组桥获得联合组桥6分量电压信号
计算组桥后6分量电压信号起跳前的均值
计算风洞有效试验时间段内组桥后电压信号与起跳前均值电压信号的差值
根据6分量天平静校公式，建立6元1次线性方程组变换关系式
将每个通道在每一时刻的差值代入线性变换方程组中求得每一时刻天平测力的6个分量
对气动力的6分量进行Savitzky-Golay平滑和微分滤波获得非定常气动力变化
结束

图3