



(12)发明专利申请

(10)申请公布号 CN 111473947 A

(43)申请公布日 2020.07.31

(21)申请号 202010378937.8

(22)申请日 2020.05.07

(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 杨瑞鑫 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 胡剑辉

(51)Int.Cl.

G01M 9/06(2006.01)

G01L 25/00(2006.01)

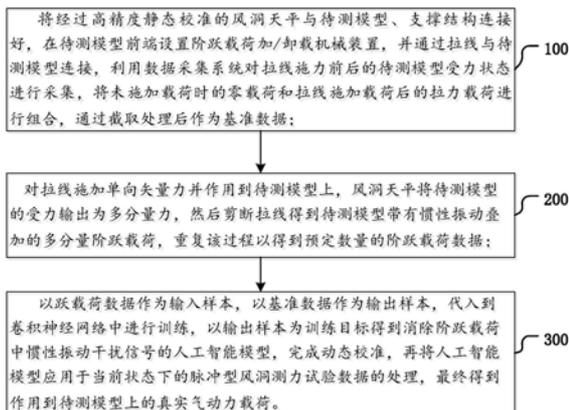
权利要求书2页 说明书6页 附图2页

(54)发明名称

一种脉冲风洞测力系统单矢量动态校准方法

(57)摘要

本发明提供一种脉冲风洞测力系统单矢量动态校准方法,将测力系统通过拉线与阶跃载荷加/卸载机械装置连接,利用数据采集系统对拉线施力前后的数据采集,以零载荷和拉力载荷处理后的组合载荷作为输出样本,以剪断拉线时的多分量阶跃载荷作为输入样本,代入到卷积神经网络中进行训练,得到消除阶跃载荷中干扰信号的人工智能模型,再将人工智能模型应用于当前状态下的脉冲型风洞测力试验数据的处理,最终得到真实气动力载荷。本发明通过风洞天平直接读取沿拉线拉力矢量方向的载荷数值,将卷积神经网络技术引入进行动态校准,消除惯性振动引起的干扰信号,然后直接应用于实验,提高了校准效率,同时提高脉冲型风洞瞬态气动力测量精度,减小测量误差。



1. 一种脉冲风洞测力系统单矢量动态校准方法,其特征在于,包括如下步骤:

步骤100,将经过高精度静态校准的风洞天平与待测模型、支撑结构连接好,在待测模型前端设置阶跃载荷加/卸载机械装置,并通过拉线与待测模型连接,利用数据采集系统对拉线施力前后的待测模型受力状态进行采集,将未施加载荷时的零载荷和拉线施加载荷后的拉力载荷进行组合,通过截取处理后作为基准数据;

步骤200,对拉线施加单向矢量力并作用到待测模型上,风洞天平将待测模型的受力输出为多分量力,然后剪断拉线得到待测模型带有惯性振动叠加的多分量阶跃载荷,重复该过程以得到预定数量的阶跃载荷数据;

步骤300,以跃载荷数据作为输入样本,以基准数据作为输出样本,代入到卷积神经网络中进行训练,以输出样本为训练目标得到消除阶跃载荷中惯性振动干扰信号的人工智能模型,完成动态校准,再将人工智能模型应用于当前状态下的脉冲型风洞测力试验数据的处理,最终得到作用到待测模型上的真实气动力载荷。

2. 根据权利要求1所述的脉冲风洞测力系统单矢量动态校准方法,其特征在于,

所述阶跃载荷加/卸载机械装置包括固定座,和活动安装在所述固定座上的拉线固定架,所述拉线固定架与所述待测模型相对,所述拉线的一端固定在所述待测模型上,另一端固定在所述拉线固定架上,为所述待测模型提供由平面内任意位置输入拉线方向的单矢量载荷。

3. 根据权利要求2所述的脉冲风洞测力系统单矢量动态校准方法,其特征在于,

所述拉线固定架为对称的十字形或米字型,通过中心与所述固定座固定,且固定后的所述拉线固定架能够以圆心为基点在平面内旋转,所述拉线固定架的圆心延长线与所述待测模型的轴心线重合。

4. 根据权利要求2所述的脉冲风洞测力系统单矢量动态校准方法,其特征在于,

在所述拉线固定架上刻有限制所述拉线移动的多个凹槽。

5. 根据权利要求2所述的脉冲风洞测力系统单矢量动态校准方法,其特征在于,

所述待测模型为任意一种飞行器的外形形状,且所述待测模型的前缘朝向所述拉线固定架,所述拉线与所述待测模型的固定点在测量阻力时位于所述待测模型的前缘位置处,测量法向载荷时位于所述待测模型的侧面上。

6. 根据权利要求1所述的脉冲风洞测力系统单矢量动态校准方法,其特征在于,

连接后的所述待测模型、风洞天平与支撑结构形成一个完整的测力系统,测力系统直接放置在风洞试验舱内部或风洞试验舱外部进行动态校准,使校准后的测力系统直接应用于具体试验,保持动态校准后的测力系统与实验时的绝对一致。

7. 根据权利要求1所述的脉冲风洞测力系统单矢量动态校准方法,其特征在于,

所述数据采集系统采集的信号周期范围为半个周期至多个周期。

8. 根据权利要求1所述的脉冲风洞测力系统单矢量动态校准方法,其特征在于,

所述拉线为单股304钢丝,所述钢丝的拉力大于或等于气动力载荷。

9. 根据权利要求1所述的脉冲风洞测力系统单矢量动态校准方法,其特征在于,

所述拉线是通过自动剪断装置根据控制信号实现剪断的,且剪断点位于所述阶跃载荷加/卸载机械装置一侧的拉线固定点处。

10. 根据权利要求1所述的脉冲风洞测力系统单矢量动态校准方法,其特征在于,

所述风洞天平为三分量天平。

## 一种脉冲风洞测力系统单矢量动态校准方法

### 技术领域

[0001] 本发明涉及空气动力学技术领域,尤其涉及一种利用神经网络实现脉冲风洞测力系统单矢量动态校准方法。

### 背景技术

[0002] 在风洞试验中,脉冲型风洞的来流会对被测模型造成冲击,使被测模型在承受正常风洞影响外,还会产生结构惯性振动,如图2所示,该惯性振动在有效试验时间内无法完全衰减,而惯性振动产生的振动信号对天平的测量结果会产生很大影响,且该惯性振动对于刚度较差的测力系统结构或天平结构,其影响是致命的,使得传统的常规应变天平无法在脉冲型风洞中正常使用。

[0003] 此外,现有在脉冲型风洞中的试验过程,有时会在极短的时间内完结,如1毫秒,在这个时间内甚至不会产生一个完整同期的输出信号,针对该种半个周期或一个周期的情况,现有常规天平也完全无法处理。

[0004] 另外,现有技术中静态调整天平的设备体积庞大,因此,只能在风洞外进行,而此时的调整仅是针对天平本身,当天平在风洞内与模型、支撑结构连接后,还需要极复杂的连接方式和计算方式来获取多分量下的载荷数据,稍有差错就可能影响试验结果。

### 发明内容

[0005] 本文发明的目的是提供一种利用神经网络实现脉冲风洞测力系统单矢量动态校准方法。

[0006] 具体地,本发明提供一种脉冲风洞测力系统单矢量动态校准方法,包括如下步骤:

[0007] 步骤100,将经过高精度静态校准的风洞天平与待测模型、支撑结构连接好,在待测模型前端设置阶跃载荷加/卸载机械装置,并通过拉线与待测模型连接,利用数据采集系统对拉线施力前后的待测模型受力状态进行采集,将未施加载荷时的零载荷和拉线施加载荷后的拉力载荷进行组合,通过截取处理后作为基准数据;

[0008] 步骤200,对拉线施加单向矢量力并作用到待测模型上,风洞天平将待测模型的受力输出为多分量力,然后剪断拉线得到待测模型带有惯性振动叠加的多分量阶跃载荷,重复该过程以得到预定数量的阶跃载荷数据;

[0009] 步骤300,以跃载荷数据作为输入样本,以基准数据作为输出样本,代入到卷积神经网络中进行训练,以输出样本为训练目标得到消除阶跃载荷中惯性振动干扰信号的人工智能模型,完成动态校准,再将人工智能模型应用于当前状态下的脉冲型风洞测力试验数据的处理,最终得到作用到待测模型上的真实气动力载荷。

[0010] 在本发明的一个实施方式中,所述阶跃载荷加/卸载机械装置包括固定座,和安装在所述固定座上的拉线固定架,所述拉线固定架与所述待测模型相对,所述拉线的一端固定在所述待测模型上,另一端固定在所述拉线固定架上,为所述待测模型提供由平面内任意位置输入拉线方向的单矢量载荷。

[0011] 在本发明的一个实施方式中,所述拉线固定架为对称的十字形或米字型,通过中心与所述固定座固定,且固定后的所述拉线固定架能够以圆心为基点在平面内旋转,所述拉线固定架的圆心延长线与所述待测模型的轴心线重合。

[0012] 在本发明的一个实施方式中,在所述拉线固定架上刻有限制所述拉线移动的多个凹槽。

[0013] 在本发明的一个实施方式中,所述待测模型为任意一种飞行器的外形形状,且所述待测模型的前缘朝向所述拉线固定架,所述拉线与所述待测模型的固定点在测量阻力时位于所述待测模型的前缘位置处,测量法向载荷时位于所述待测模型的侧面上。

[0014] 在本发明的一个实施方式中,连接后的所述待测模型、风洞天平与支撑结构形成一个完整的测力系统,测力系统直接放置在风洞试验舱内部或风洞试验舱外部进行动态校准,使校准后的测力系统直接应用于具体试验,保持动态校准后的测力系统与实验时的绝对一致。

[0015] 在本发明的一个实施方式中,所述数据采集数据系统采集的信号周期范围为半个周期至多个周期。

[0016] 在本发明的一个实施方式中,所述拉线为单股304钢丝,所述钢丝的拉力大于或等于气动力载荷。

[0017] 在本发明的一个实施方式中,所述拉线是通过自动剪断装置根据控制信号实现剪断的,且剪断点位于所述阶跃载荷加/卸载机械装置一侧的拉线固定点处。

[0018] 在本发明的一个实施方式中,所述风洞天平为三分量天平。

[0019] 本发明在将人工智能模型应用于同一测力系统的脉冲型风洞测力试验数据分析。采用基于人工智能技术单矢量动态校准方法,对采集的测力系统信号(带有惯性振动信号干扰)通过深度学习模型进行“智能”处理,最终得到作用到飞行器的真实气动力载荷,该气动力消除了由于脉冲型风洞流场起动和短试验时间所引起的测力系统结构振动干扰,即大大降低或彻底排除惯性振动干扰对气动载荷的影响,实现脉冲型风洞测力系统的智能化。

## 附图说明

[0020] 图1是本发明一个实施方式的校准方法流程示意图;

[0021] 图2是激波风洞与传统低速风洞测力试验中风洞天平有效输出信号示意图;

[0022] 图3是本发明一个实施方式的卷积神经网络结构示意图;

[0023] 图4是本发明一个实施方式的深度学习卷积神经网络(CNN)训练的流程圖。

## 具体实施方式

[0024] 以下详细描述本方案利用卷积神经网络进行测力系统动态校准,以及实现消除脉冲风洞测力试验的惯性振动干扰信号的动态校准模型处理过程。

[0025] 如图1所示,在本发明的一个实施方式中公开一种脉冲风洞测力系统单矢量动态校准方法,包括如下步骤:

[0026] 步骤100,将经过高精度静态校准的风洞天平与待测模型、支撑结构连接好,在待测模型前端设置阶跃载荷加/卸载机械装置,并通过拉线与待测模型连接,利用数据采集系统对拉线施力前后的待测模型受力状态进行采集,将未施加载荷时的零载荷和拉线施加载

荷后的拉力载荷进行组合,通过截取处理后作为基准数据;

[0027] 对由风洞天平、待测模型及支撑结构构成的测力系统进行动态校准前,需对风洞天平进行高精度静态校准,常规的风洞天平分为单分量天平、三分量天平或六分量天平,具体选用类型根据测力试验的要求确定。本实施方式中选用三分量天平,使阶跃载荷加/卸载机械装置通过拉线施加的单矢量力 $F$ ,由风洞天平按照静态校准时的体轴坐标系的各个坐标轴方向,自动分解为多个分量力,力的大小由风洞天平实时测量输出,且多个分量力的合力为单矢量力 $F$ 。

[0028] 现有动态校准仅对风洞天平进行动态加载、卸载,完成动态校准后再在风洞中与吹风试验的待测模型和支撑结构连接,依力学知识,某一结构的振动特性(模态频率)与其质量和结构直接相关,因此现有仅对风洞天平(或测力系统相似结构)进行动态校准的方式,一旦在风洞试验中重新连接后,会改变测力系统的结构,将产生一定测量误差,甚至对结果无法评估。

[0029] 本实施方式不采用传统的悬挂砝码瞬间卸载的方式仅校准风洞天平来得到阶跃载荷,而是通过拉线对待测模型施加单矢量拉力并通过剪断拉线卸载实现阶跃载荷的方式,其载荷大小通过经高精度静态校准的风洞天平直接读取,该单矢量拉力通过风洞天平直接输出分解为多分量力。因此,本方案由可实现单次任意方向、任意载荷的加载,单矢量加载通过风洞天平即可实现多分量阶跃载荷同时“定量”精确加载,更接近实际风洞吹风试验时的气动力加载方式,且精准度更高,这里的动态校准精准度取决于风洞天平的静态校准精准度,而传统悬挂砝码方法受到拉力方向和砝码精度影响较大,其带有载荷的拉线方向一般较难做到精确重合所选的坐标系,并且传统动态校准加载阶跃载荷一般只能对单个分量、单个方向悬挂砝码载荷进行加载和卸载,无法做到所有分量同时加载和卸载。本实施方式的具体单矢量施加过程在下面的步骤中进行说明。

[0030] 本实施方式中的拉线采用单股304钢丝,拉力 $\geq 30\text{kg}$ ,直径 $\leq 0.5\text{mm}$ 。钢丝的拉力性能参数根据飞行器动态校准载荷范围确定,一般风洞内气动力载荷与动态校准载荷在一个数量级范围内,或与载荷大小相接近。本方案采用的钢丝型号相较于其他材质拉线,其刚度好且拉力方向几乎无变形,更适于施加阶跃载荷。

[0031] 进行动态校准时,整个测力系统可位于风洞试验舱内部,也可整体置于风洞试验舱外部完成校准过程,保证了校准后的测力系统即为试验采用的测力系统,减少测量时的误差。

[0032] 本发明中的待测模型为任意拟进行风洞气动力试验的飞行器模型,本实施方式选用的待测模型为圆锥形结构的测力标准模型,在其它的实施方式中,该待测模型可以是任意一种飞行器的形状。待测模型的圆锥一端朝向风洞方向,锥体通过风洞天平与弯刀型支撑结构连接固定在空中,风洞天平安装在模型内部,锥体的半锥角为10度,风洞天平的测量数据线缆通过支撑结构的空心支撑杆引出后,与数据采集系统连接。动态校准的整套系统连接、安装方式与风洞试验时一致。

[0033] 本方案中的数据采集系统配置NI PXIe-8880控制器,软件应用LabVIEW Professional Development System,板卡选用NI PXIe-4331八通道采集模块进行数据信号采集,其采样率为102.4kS/s,分辨率达24-bit。LabVIEW Professional Development System直接采集风洞天平的输出数据,输出信号根据风洞天平力分量数可得到单通道或多

通道数据,同时具备对数据信号进行滤波、信号查看及手动触发采集数据等功能,可满足目前动态校准数据建模样本的采集和处理需求。

[0034] 步骤200,对拉线施加单向矢量力并作用到待测模型上,风洞天平将待测模型的受力输出为多分量力,然后剪断拉线得到待测模型带有惯性振动叠加的多分量阶跃载荷,重复该过程以得到预定数量的阶跃载荷数据;

[0035] 阶跃载荷加/卸载机械装置设置在待测模型的相对位置处,大致高度与支撑结构支起的待测模型高度对应,接线固定架活动安装在固定座上,拉线固定架垂直于待测模型的轴心线,且中心通过待测模型的轴心延长线,安装后的拉线固定架能够在其垂直平面内以中心为圆心转动位置,因此,理论上,拉线一端可以在平面内任意一点位置固定。拉线的一端固定在待测模型前缘的拉线悬挂点处,另一端固定在拉线固定架上,形成一个作用于待测模型,由平面坐标系(拉线固定架)内任意一点固定拉线所施加的单矢量载荷,即可以通过拉线对待测模型施加方向为待测模型前缘点到平面内所有点的单矢量力 $F$ 。

[0036] 具体的拉线与待测模型的固定点在测量阻力时位于待测模型的前缘位置处,测量法向载荷时则位于待测模型的机体面上。

[0037] 拉线固定架可以为对称的十字形或米字型结构。同时可在拉线固定架上设置限制拉线移动的多个凹槽。各凹槽之间的间隔距离相等,固定后,可使钢丝卡入相应位置的凹槽中实现定位,且不会左右移动。

[0038] 拉线施加的是单矢量 $F$ ,且 $F$ 的大小根据实验要求任意给出,由悬挂拉线固定后的最终拉力确定, $F$ 的方向也由悬挂拉线固定后的最终方向确定。

[0039] 施加单矢量力 $F$ 的同时,风洞天平输出的电压信号为单分量或多分量(由实验配置的风洞天平类型决定)。以本实施方式选用的三分量风洞天平为例,通过数据采集系统实时输出的风洞天平测量信号为三个分量力,一般为轴向力、法向力和俯仰力矩,且在单矢量力 $F$ 的作用下,三个分量力输出定常信号,即实现了在施加载荷的过程中,通过施加一个任意大小、任意方向的单矢量力,风洞天平会实时输出定量测量的、方向由风洞天平坐标系决定的多分量力。

[0040] 在剪断拉线前,保持数据采集系统实时采集风洞天平测量数据,通过在阶跃载荷加/卸载机械装置固定拉线的一端剪断拉线,实现大小为 $F$ 的单矢量阶跃载荷的卸载过程。在本实施方式中,采用在拉线固定架一端剪断拉线,可以减少误差,降低卸载波动。剪断的手段可以是人工直接利用钳子剪断,也可以是利用自动剪断设备按指令要求剪断。

[0041] 此时,测力系统输出的信号则为多分量阶跃载荷,并被数据采集系统实时记录。剪断一次完成动态校准的一个测试样本数据的提取,再次测量时,重复连接拉线并剪断的过程,测试和样本数量根据后续建模需求确定。本实施方式中进行了120次阶跃载荷测试,通过数据采集系统内的LabVIEW软件提取了120组动态载荷施加和卸载的信号数据样本。

[0042] 步骤300,以跃载荷数据作为输入样本,以基准数据作为输出样本,代入到卷积神经网络中进行训练,以输出样本为训练目标得到消除阶跃载荷中惯性振动干扰信号的人工智能模型,完成动态校准,再将人工智能模型应用于当前状态下的脉冲型风洞测力试验数据的处理,最终得到作用到待测模型上的真实气动力载荷。

[0043] 在准备好动态校准阶跃载荷测试样本后,对样本数据进行预处理。阶跃载荷数据是载荷 $F$ 与惯性振动的叠加,是作为建模数据处理的输入样本;未施加载荷时的零载荷和剪

断拉线前的拉力载荷的组合数据,通过截取处理作为建模数据处理的输出样本,即理想阶跃载荷。

[0044] 利用卷积神经网络对数据处理后的输入、输出样本进行深度学习训练模型,训练模型过程中以输出样本(理想阶跃载荷)为训练目标,根据样本的质量和数量,建立人工智能模型,其对该测力系统的结构振动特性可以进行准确描述,将带有惯性振动的跃载荷数据,通过该模型处理后,可完全消除惯性振动引起的干扰信号。

[0045] 在该步骤中,采用了基于深度学习的单矢量动态自校准技术,引入人工智能技术对测力系统结构进行深度学习建模,主要采用卷积神经网络(Convolutional Neural Networks, CNN)训练模型。通过对动态信号进行人工智能建模,对结构振动进行高精度识别,从而使风洞天平输出“纯”气动载荷信息,不带有惯性振动干扰或者忽略掉,使风洞天平输出的仅为高超声速飞行器测力模型的“定常”或准定常气动力信号。

[0046] 卷积神经网络(CNN)结构如图3所示,左侧输入数据为风洞天平输出的阶跃载荷采集信号(带有惯性振动干扰), $N$ 为风洞天平分量数,因本实施方式采用三分量风洞天平,因此 $N=3$ ,即有3个通道时序信号数据;右侧输出数据为理想阶跃载荷信号(目标期望输出),为3通道数据;中间为隐含层为三层,且 $L1-N$ 、 $L2-N$ 均取64,即扩展至64通道信号; $L3-N$ 取3,即最终变换成3通道信号,实现与输入数据通道数一致。

[0047] 具体的深度学习卷积神经网络(CNN)训练过程如图4所示。动态校准数据样本训练中,CNN采用块式组合(本实施方式中仅用一个块即可实现较好的效果),每一个块中包含多层卷积层,其尺寸不断加大(即通道数增加),用于从细微局部到区域更广的局部中提取振动特征信息,最后还原回原来输入数据的通道数,完成天平数据多个维度之间的信息融合。

[0048] CNN采用块结构且每个块结构中包含多个不同尺寸、不同通道数的卷积核,所选取的尺寸在多次实验中进行了对比验证。证明了最终得到的网络模型对风洞天平动态响应干扰的特征提取是充分的。通道数的结果对比显示,只要在多个通道中进行了充分的融合,校准结果的精确度会根据融合程度的大小较快饱和,因此只要达到通道数足够的情况下,动态校准结果都是足够可靠的。

[0049] 参数空间的优化使用了Adam自适应学习方法,Adam方法体现了训练时间短,网络参数收敛快的优点。训练使用了GPU加速,训练速度比CPU训练几十至上百倍,体现出了深度学习算法高度的可并行性。

[0050] 在本方案实施方式中,可将人工智能模型应用于同一测力系统的脉冲型风洞测力试验数据分析,使校准后的测力系统直接应用于具体试验,保持动态校准后的测力系统与实验时的绝对一致。采用基于人工智能技术单矢量动态校准方法,对采集的测力系统信号(带有惯性振动信号干扰)通过深度学习模型进行“智能”处理,最终得到作用到飞行器的真实气动力载荷,该气动力消除了由于脉冲型风洞流场起动和短试验时间所引起的测力系统结构振动干扰,即大大降低或彻底排除惯性振动干扰对气动载荷的影响,实现脉冲型风洞测力系统的智能化。

[0051] 本实施方式可不受风洞天平实际风洞试验输出信号周期的限制,最低可依据半个周期信直接输出准定常的飞行器气动力载荷,突破了传统高精度测力系统因脉冲风洞极短试验时间而限制其工程应用的技术瓶颈,可使脉冲高焓风洞测力系统性能和测力试验技术指标在现有基础上大幅度提升。

[0052] 本实施方式不仅仅可以将测力系统放在风洞外进行动态校准,也方便直接在风洞内对原始测力系统进行动态校准,其可保证被校准对象即为试验对象。

[0053] 至此,本领域技术人员应认识到,虽然本文已详尽描述了本发明的多个示例性实施例,但是,在不脱离本发明精神和范围的情况下,仍可根据本发明公开的内容直接确定或推导出符合本发明原理的许多其他变型或修改。因此,本发明的范围应被理解和认定为覆盖了所有这些其他变型或修改。

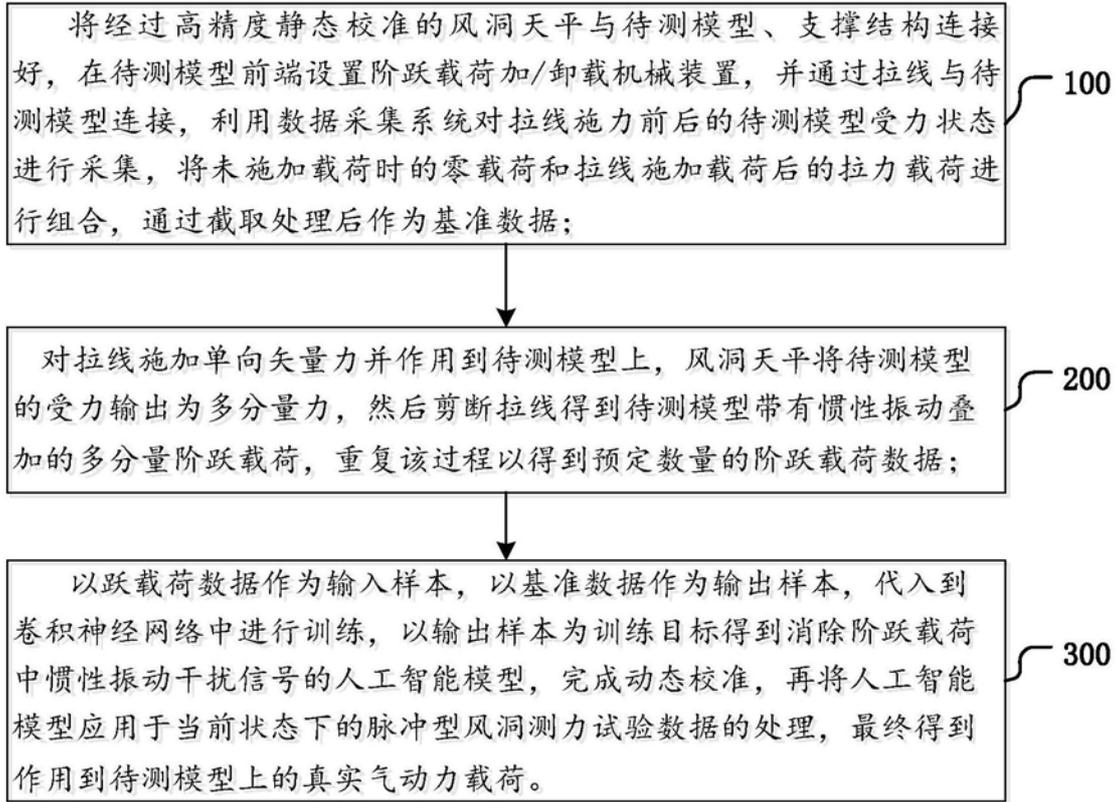


图1

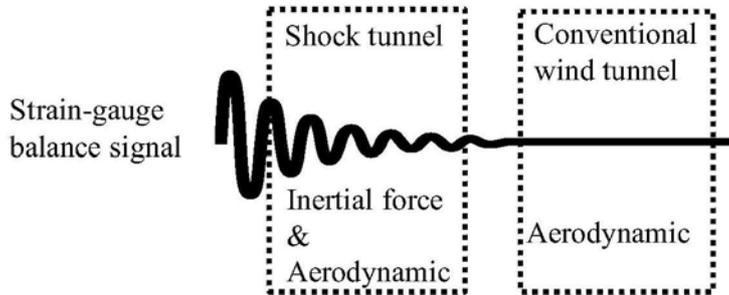


图2

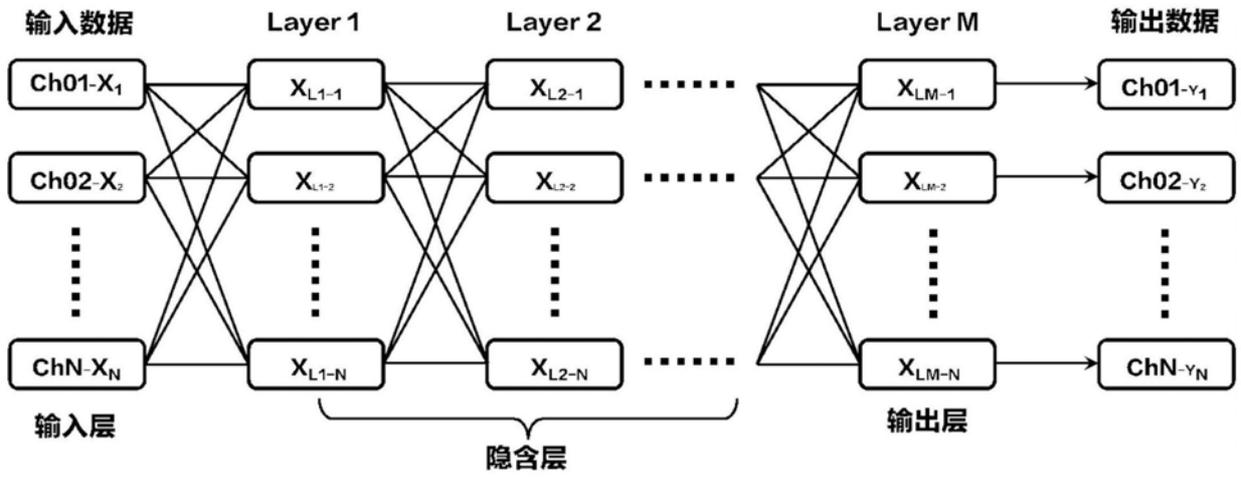


图3

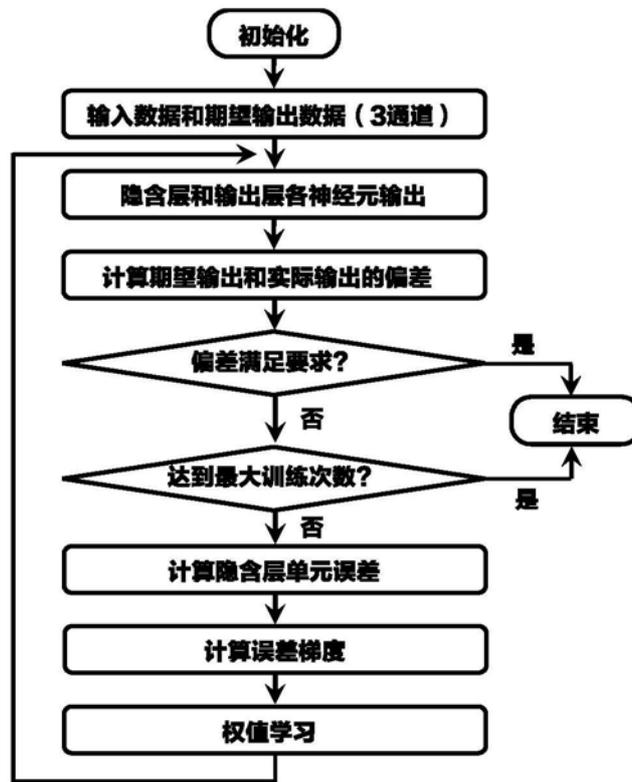


图4