(19)中华人民共和国国家知识产权局

(12)发明专利申请

(10)申请公布号 CN 109377841 A
(43)申请公布日 2019.02.22

(21)申请号 201811387739.7

(22)申请日 2018.11.21

(71)申请人 大连理工大学
地址 116024 辽宁省大连市高新园区凌工路2号

(72)发明人 李玉刚 迟凤东 陈景杰 翟钢军 乔东生 欧进萍

(74)专利代理机构 大连星海专利事务所有限公司 21208
代理人 王树本 徐雪莲

(51)Int.Cl.
G09B 23/18(2006.01)

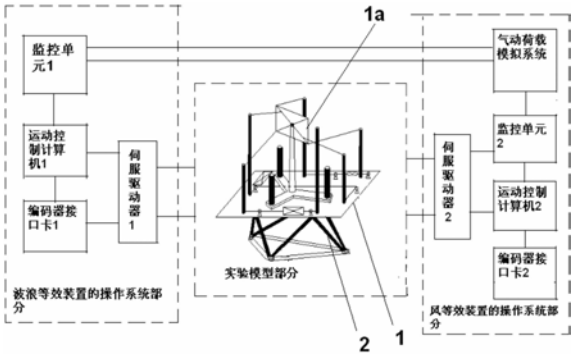
权利要求书2页 说明书5页 附图4页

(54)发明名称

应用风浪等效装置的浮式海上风电机组实验装置及其方法

(57)摘要

本发明涉及海洋工程技术领域，一种应用风浪等效装置的浮式海上风电机组实验装置及其方法，其中实验方法包括以下步骤：(1)实验模型的制作，(2)气动荷载模拟系统参数的设定，(3)气动荷载模拟系统与监控单元的搭接，(4)监控单元与运动控制计算机的连接，(5)控制指令的发送，(6)运动状态的反馈。实验装置包括波浪等效装置的操作系统部分、风等效装置的操作系统部分及实验模型部分。该实验装置无需依赖波浪水池和造风装置，操控电动缸对六自由度平台加载力来模拟不同浪高、周期的波浪荷载下的运动状态，解决了对造风装置的功能和风场品质要求严格的问题，整个实验装置结构简单，易安装，操作方便，安全可靠。



CN 109377841 A

1.一种应用风浪等效装置的浮式海上风电机组实验装置的实验方法，其特征在于包括以下步骤：

步骤1、实验模型的制作，为保证实验模型与实体严格符合几何相似条件，需要在实验模型的制作与模拟过程中，要按照统一的实验模型缩尺比，实验模型在海洋工程水池中试验时，需对这些尺度参数以及外形设计尺寸进行换算，通过公式(1)进行描述，

$$\frac{h_s}{h_m}=\frac{H_s}{H_m}=\frac{\lambda_s}{\lambda_m} \qquad (1)$$

式中，h_m为实验模型在试验时的水深、H_m为实验模型在试验时的波高、λ_m为实验模型在试验时的波长、h_s为实体在海上的实际水深、H_s为实体在海上的实际波高、λ_s为实体在海上的实际波长；

步骤2、气动荷载模拟系统参数的设定，在气动荷载模拟系统中进行浮式风电机组实际工作状态下叶片所受到风向、风速参数的设定；

步骤3、气动荷载模拟系统与监控单元的搭接，将气动荷载模拟系统与监控单元进行有效的搭接，便于实时监控浮式风机的工作状态，从而调整气动荷载模拟系统中的参数，进而更好地模拟实际工程中的工作状态；

步骤4、监控单元与运动控制计算机的连接，将监控单元与运动控制计算机通过以太网进行连接，便于实时监控浮式海上风电机组的工作状态，通过运动控制计算机对六自由度平台进行操控，进而更好地模拟浮式海上风电机组在实际工程中的工作状态；

步骤5、控制指令的发送，通过运动控制计算机向伺服驱动器发送控制指令，操控三个电动缸的运动来带动牵引绳，进而使风机叶片产生运动，同时操控六个折返式电动缸带动六自由度平台产生运动；

步骤6、运动状态的反馈，实验模型通过编码器信号的形式将运动的信息传递给伺服驱动器，接下来，伺服驱动器将编码器信号传递给编码器接口，编码器接口通过ISA总线与运动控制计算机相连，从而使实验模型运动的信息传送给运动控制计算机，以实现实验模型运动信息的有效反馈。

2.根据权利要求1所述方法中的实验装置，包括波浪等效装置的操作系统部分、风等效装置的操作系统部分及实验模型部分，其特征在于：所述波浪等效装置的操作系统部分，包括监控单元1、运动控制计算机1、编码器接口1和伺服驱动器1，所述风等效装置的操作系统部分，包括监控单元2、运动控制计算机2、编码器接口2、伺服驱动器2及气动荷载模拟系统，其中气动荷载模拟系统分别与监控单元1、2相连，所述监控单元1、2分别与运动控制计算机1、2之间通过以太网连接，运动控制计算机1、2与编码器接口1、2之间通过ISA总线连接，所述伺服驱动器1还分别与运动控制计算机1、编码器接口1及实验模型部分相连，所述伺服驱动器2还分别与运动控制计算机2、编码器接口2及实验模型部分相连，由运动控制计算机1、2对伺服驱动器1、2发送控制信号，伺服驱动器1、2会通过伺服驱动来控制实验模型部分，同时，实验模型部分会将编码器信号通过伺服驱动器1、2反馈给编码器接口1、2，最终传给监控单元1、2，实现监控单元1、2与实验模型部分之间的信息传递；所述实验模型部分，包括六自由度平台，所述六自由度平台上面安装有风机、第一、二、三电动缸及第一、二、三、四、五、六滑轮道组，所述第一电动缸通过第一滑轮道组及牵引线与风机叶片端点A连接，第一电动缸还通过第二滑轮道组及牵引线与风机叶片端点C连接，当第一电动缸工作时，带动与其相

连的第一、二滑轮道组工作，通过牵引线将力传递给与其相连的风机叶片，进而来模拟风的推力；所述第二电动缸通过第五滑轮道组及牵引线与风机叶片连接，第二电动缸还通过第六滑轮道组及牵引线与风机叶片连接，当第二电动缸工作时，带动与其相连的第五、六滑轮道组工作，通过牵引线将力传递给与其相连的风机叶片，进而来模拟风机的恢复力；所述第三电动缸通过第三滑轮道组及牵引线与风机叶片端点B连接，第三电动缸还通过第四滑轮道组及牵引线与风机叶片端点D连接，当第三电动缸工作时，分别带动与其相连的第三滑轮道组和第四滑轮道组工作，通过牵引线将力传递给与其相连的风机叶片上，进而来模拟风机的扭矩，所述第一、二、三电动缸分别与伺服驱动器1、2相连；所述六自由度平台依靠六个折返式电动缸支承，每个折返式电动缸的顶部安装有万向节并与六自由度平台的底部铰链连接，每个折返式电动缸的底部安装有万向节并与底座铰链连接，所述折返式电动缸，包括伺服电机、高强度伺服同步带、滚珠丝杠、丝杠螺母、轴承及推杆，伺服电机通过高强度伺服同步带驱动与高强度伺服同步带连接的滚珠丝杠、滚珠丝杠通过钢珠带动与滚珠丝杠连接的丝杠螺母、丝杠螺母与安装有轴承的推杆直接相连从而驱动推杆作往返直线运动，所述六个折返式电动缸中的每个折返式电动缸分别与伺服驱动器1、2相连；实验通过力加载折返式电动缸并对六自由度平台进行力加载，模拟风电机组在具有不同浪高、周期的波浪荷载下的运动状态，即横荡、纵荡、垂荡、艏摇、横摇和纵摇典型的六种运动。

应用风浪等效装置的浮式海上风电机组实验装置及其方法

技术领域

[0001] 本发明涉及一种应用风浪等效装置的浮式海上风电机组实验装置及其方法，属于海洋工程技术领域。

背景技术

[0002] 海上风能作为一种清洁的可再生能源，越来越受到世界各国的重视，当海水水深超过50m时，浮式海上风电机组(FOWT)将具有更好的经济可行性。FOWT作为新兴的前沿学科领域，其耦合的风浪环境物理特性极其复杂且实际建设工程经验匮乏，相关数值研究需要更多地依赖物理模型试验进行验证，而如何真实地重现海上环境，提高FOWT模型试验研究的精度，是国内外学者普遍关注的问题。

[0003] 对于浮式海上风电机组模型试验，目前波浪水池的风场普遍由可移动式风扇阵列产生，但是存在两大挑战：其一波浪水池试验中对造风装置的功能和风场品质要求非常高；其二弗劳德数与雷诺数相似准则不匹配。如何真实地重现海上环境，提高浮式海上风机模型试验研究的精度，成为国内外学者非常关注的一个问题，先进的浮式海上风电机组模型试验技术是我国海上风电开发的迫切需求。

发明内容

[0004] 为了克服现有技术中存在的不足，本发明目的是提供一种应用风浪等效装置的浮式海上风电机组实验装置及其方法。该实验装置中的实验模型部分是针对浮式海上风电机组的运动特征，设计出六自由度平台用来模拟波浪代替造风装置，模拟风电机组在具有不同浪高、周期的波浪荷载下的真实运动状态。

[0005] 为了实现上述发明目的，解决已有技术中所存在的问题，本发明采取的技术方案是：一种应用风浪等效装置的浮式海上风电机组实验装置的实验方法，包括以下步骤：

[0006] 步骤1、实验模型的制作，为保证实验模型与实体严格符合几何相似条件，需要在实验模型的制作与模拟过程中，要按照统一的实验模型缩尺比，实验模型在海洋工程水池中试验时，需对这些尺度参数以及外形设计尺寸进行换算，通过公式(1)进行描述，

[0007] $$\frac{h_s}{h_m}=\frac{H_s}{H_m}=\frac{\lambda_s}{\lambda_m} \qquad (1)$$

[0008] 式中，h_m为实验模型在试验时的水深、H_m为实验模型在试验时的波高、λ_m为实验模型在试验时的波长、h_s为实体在海上的实际水深、H_s为实体在海上的实际波高、λ_s为实体在海上的实际波长；

[0009] 步骤2、气动荷载模拟系统参数的设定，在气动荷载模拟系统中进行浮式风电机组实际工作状态下叶片所受到风向、风速参数的设定；

[0010] 步骤3、气动荷载模拟系统与监控单元的搭接，将气动荷载模拟系统与监控单元进行有效的搭接，便于实时监控浮式风机的工作状态，从而调整气动荷载模拟系统中的参数，进而更好地模拟实际工程中的工作状态；

[0011] 步骤4、监控单元与运动控制计算机的连接，将监控单元与运动控制计算机通过以太网进行连接，便于实时监控浮式海上风电机组的工作状态，通过运动控制计算机对六自由度平台进行操控，进而更好地模拟浮式海上风电机组在实际工程中的工作状态；

[0012] 步骤5、控制指令的发送，通过运动控制计算机向伺服驱动器发送控制指令，操控三个电动缸的运动来带动牵引绳，进而使风机叶片产生运动，同时操控六个折返式电动缸带动六自由度平台产生运动；

[0013] 步骤6、运动状态的反馈，实验模型通过编码器信号的形式将运动的信息传递给伺服驱动器，接下来，伺服驱动器将编码器信号传递给编码器接口卡，编码器接口卡通过ISA总线与运动控制计算机相连，从而使实验模型运动的信息传送给运动控制计算机，以实现实验模型运动信息的有效反馈。

[0014] 所述方法中的实验装置，包括波浪等效装置的操作系统部分、风等效装置的操作系统部分及实验模型部分，所述波浪等效装置的操作系统部分，包括监控单元1、运动控制计算机1、编码器接口卡1和伺服驱动器1，所述风等效装置的操作系统部分，包括监控单元2、运动控制计算机2、编码器接口卡2、伺服驱动器2及气动荷载模拟系统，其中气动荷载模拟系统分别与监控单元1、2相连，所述监控单元1、2分别与运动控制计算机1、2之间通过以太网连接，运动控制计算机1、2与编码器接口卡1、2之间通过ISA总线连接，所述伺服驱动器1还分别与运动控制计算机1、编码器接口卡1及实验模型部分相连，所述伺服驱动器2还分别与运动控制计算机2、编码器接口卡2及实验模型部分相连，由运动控制计算机1、2对伺服驱动器1、2发送控制信号，伺服驱动器1、2会通过伺服驱动来控制实验模型部分，同时，实验模型部分会将编码器信号通过伺服驱动器1、2反馈给编码器接口卡1、2，最终传给监控单元1、2，实现监控单元1、2与实验模型部分之间的信息传递；所述实验模型部分，包括六自由度平台，所述六自由度平台上面安装有风机、第一、二、三电动缸及第一、二、三、四、五、六滑轮道组，所述第一电动缸通过第一滑轮道组及牵引线与风机叶片端点A连接，第一电动缸还通过第二滑轮道组及牵引线与风机叶片端点C连接，当第一电动缸工作时，带动与其相连的第一、二滑轮道组工作，通过牵引线将力传递给与其相连的风机叶片，进而来模拟风的推力；所述第二电动缸通过第五滑轮道组及牵引线与风机叶片连接，第二电动缸还通过第六滑轮道组及牵引线与风机叶片连接，当第二电动缸工作时，带动与其相连的第五、六滑轮道组工作，通过牵引线将力传递给与其相连的风机叶片，进而来模拟风机的恢复力；所述第三电动缸通过第三滑轮道组及牵引线与风机叶片端点B连接，第三电动缸还通过第四滑轮道组及牵引线与风机叶片端点D连接，当第三电动缸工作时，分别带动与其相连的第三滑轮道组和第四滑轮道组工作，通过牵引线将力传递给与其相连的风机叶片上，进而来模拟风机的扭矩，所述第一、二、三电动缸分别与伺服驱动器1、2相连；所述六自由度平台依靠六个折返式电动缸支承，每个折返式电动缸的顶部安装有万向节并与六自由度平台的底部铰链连接，每个折返式电动缸的底部安装有万向节并与底座铰链连接，所述折返式电动缸，包括伺服电机、高强度伺服同步带、滚珠丝杠、丝杠螺母、轴承及推杆，伺服电机通过高强度伺服同步带驱动与高强度伺服同步带连接的滚珠丝杠、滚珠丝杠通过钢珠带动与滚珠丝杠连接的丝杠螺母、丝杠螺母与安装有轴承的推杆直接相连从而驱动推杆作往返直线运动，所述六个折返式电动缸中的每个折返式电动缸分别与伺服驱动器1、2相连；实验通过力加载折返式电动缸并对六自由度平台进行力加载，模拟风电机组在具有不同浪高、周期的波浪荷载下

的运动状态，即横荡、纵荡、垂荡、艏摇、横摇和纵摇典型的六种运动。

[0015] 本发明有益效果是：一种应用风浪等效装置的浮式海上风电机组实验装置及其方法，其中实验方法包括以下步骤：(1)实验模型的制作，(2)气动荷载模拟系统参数的设定，(3)气动荷载模拟系统与监控单元的搭接，(4)监控单元与运动控制计算机的连接，(5)控制指令的发送，(6)运动状态的反馈。实验装置包括波浪等效装置的操作系统部分、风等效装置的操作系统部分及实验模型部分。该实验装置无需依赖波浪水池和造风装置，操控电动缸对六自由度平台加载力来模拟不同浪高、周期的波浪荷载下的运动状态，解决了对造风装置的功能和风场品质要求高的问题以及弗劳德数与雷诺数相似准则不匹配的问题，整个实验装置结构简单，易安装，操作方便，安全可靠。

附图说明

[0016] 图1是本发明方法步骤流程图。

[0017] 图2是本发明实验装置结构示意图。

[0018] 图3是本发明实验装置中的实验模型部分结构示意图。

[0019] 图4是本发明实验装置中的第一、二、三电动缸及六个折返式电动缸中的每个折返式电动缸分别与伺服驱动器1、2连接示意框图。

[0020] 图5是本发明实验装置中的折返式电动缸结构示意图。

[0021] 图中：1、六自由度平台，1a、风机模型，1b、第一电动缸，1c、第二电动缸，1d、第三电动缸，1e、第一滑轮道组，1f、第二滑轮道组，1g、第三滑轮道组，1h、第四滑轮道组，1i、第五滑轮道组，1j、第六滑轮道组，2、折返式电动缸，2a、伺服电机，2b、高强度伺服同步带，2c、滚珠丝杠，2d、丝杠螺母，2e、轴承，2f、推杆，3、万向节，4、底座。

具体实施方式

[0022] 下面结合附图对本发明作进一步说明。

[0023] 如图1所示，一种应用风浪等效装置的浮式海上风电机组实验装置的实验方法，包括以下步骤：

[0024] 步骤1、实验模型的制作，为保证实验模型与实体严格符合几何相似条件，需要在实验模型的制作与模拟过程中，要按照统一的实验模型缩尺比，实验模型在海洋工程水池中试验时，需对这些尺度参数以及外形设计尺寸进行换算，通过公式(1)进行描述，

[0025] $$\frac{h_s}{h_m}=\frac{H_s}{H_m}=\frac{\lambda_s}{\lambda_m} \qquad (1)$$

[0026] 式中，h_m为实验模型在试验时的水深、H_m为实验模型在试验时的波高、λ_m为实验模型在试验时的波长、h_s为实体在海上的实际水深、H_s为实体在海上的实际波高、λ_s为实体在海上的实际波长；

[0027] 步骤2、气动荷载模拟系统参数的设定，在气动荷载模拟系统中进行浮式风电机组实际工作状态下叶片所受到风向、风速参数的设定；

[0028] 步骤3、气动荷载模拟系统与监控单元的搭接，将气动荷载模拟系统与监控单元进行有效的搭接，便于实时监控浮式风机的工作状态，从而调整气动荷载模拟系统中的参数，进而更好地模拟实际工程中的工作状态；

[0029] 步骤4、监控单元与运动控制计算机的连接，将监控单元与运动控制计算机通过以太网进行连接，便于实时监控浮式海上风电机组的工作状态，通过运动控制计算机对六自由度平台进行操控，进而更好地模拟浮式海上风电机组在实际工程中的工作状态；

[0030] 步骤5、控制指令的发送，通过运动控制计算机向伺服驱动器发送控制指令，操控三个电动缸的运动来带动牵引绳，进而使风机叶片产生运动，同时操控六个折返式电动缸带动六自由度平台产生运动；

[0031] 步骤6、运动状态的反馈，实验模型通过编码器信号的形式将运动的信息传递给伺服驱动器，接下来，伺服驱动器将编码器信号传递给编码器接口卡，编码器接口卡通过ISA总线与运动控制计算机相连，从而使实验模型运动的信息传送给运动控制计算机，以实现实验模型运动信息的有效反馈。

[0032] 如图2、3、4，5所示，所述方法中的实验装置，包括波浪等效装置的操作系统部分、风等效装置的操作系统部分及实验模型部分，所述波浪等效装置的操作系统部分，包括监控单元1、运动控制计算机1、编码器接口卡1和伺服驱动器1，所述风等效装置的操作系统部分，包括监控单元2、运动控制计算机2、编码器接口卡2、伺服驱动器2及气动荷载模拟系统，其中气动荷载模拟系统分别与监控单元1、2相连，所述监控单元1、2分别与运动控制计算机1、2之间通过以太网连接，运动控制计算机1、2与编码器接口卡1、2之间通过ISA总线连接，所述伺服驱动器1还分别与运动控制计算机1、编码器接口卡1及实验模型部分相连，所述伺服驱动器2还分别与运动控制计算机2、编码器接口卡2及实验模型部分相连，由运动控制计算机1、2对伺服驱动器1、2发送控制信号，伺服驱动器1、2会通过伺服驱动来控制实验模型部分，同时，实验模型部分会将编码器信号通过伺服驱动器1、2反馈给编码器接口卡1、2，最终传给监控单元1、2，实现监控单元1、2与实验模型部分之间的信息传递；所述实验模型部分，包括六自由度平台1，所述六自由度平台1上面安装有风机模型1a、第一、二、三电动缸1b、1c、1d及第一、二、三、四、五、六滑轮道组1e、1f、1g、1h、1i、1j，所述第一电动缸1b通过第一滑轮道组1e及牵引线与风机模型1a叶片端点A连接，第一电动缸1b还通过第二滑轮道组1f及牵引线与风机模型1a叶片端点C连接，当第一电动缸1b工作时，带动与其相连的第一、二滑轮道组1e、1f工作，通过牵引线将力传递给与其相连的风机模型1a叶片上，进而来模拟风机模型1a的推力；所述第二电动缸1c通过第五滑轮道组1i及牵引线与风机模型1a叶片连接，第二电动缸1c还通过第六滑轮道组1j及牵引线与风机模型1a叶片连接，当第二电动缸1c工作时，带动与其相连的第五、六滑轮道组1i、1j工作，通过牵引线将力传递给与其相连的风机模型1a叶片上，进而来模拟风机模型1a的恢复力；所述第三电动缸1d通过第三滑轮道组1g及牵引线与风机模型1a叶片端点B连接，第三电动缸1d还通过第四滑轮道组1h及牵引线与风机模型1a叶片端点D连接，当第三电动缸1d工作时，分别带动与其相连的第三滑轮道组1g和第四滑轮道组1h工作，通过牵引线将力传递给与其相连的风机模型1a叶片上，进而来模拟风机模型1a的扭矩，所述第一、二、三电动缸1b、1c、1d分别与伺服驱动器1、2相连；所述六自由度平台1依靠六个折返式电动缸2支承，每个折返式电动缸2的顶部安装有万向节3并与六自由度平台1的底部铰链连接，每个折返式电动缸2的底部安装有万向节3并与底座4铰链连接，所述折返式电动缸2，包括伺服电机2a、高强度伺服同步带2b、滚珠丝杠2c、丝杠螺母2d、轴承2e及推杆2f，伺服电机2a通过高强度伺服同步带2b驱动与高强度伺服同步带2b连接的滚珠丝杠2c、滚珠丝杠2c通过钢珠带动与滚珠丝杠2c连接的丝杠螺母2d、丝杠

螺母2d与安装有轴承2e的推杆2f直接相连从而驱动推杆2f作往返直线运动，所述六个折返式电动缸2中的每个折返式电动缸分别与伺服驱动器1、2相连；实验通过力加载折返式电动缸2并对六自由度平台1进行力加载，模拟风电机组在具有不同浪高、周期的波浪荷载下的运动状态，即横荡、纵荡、垂荡、艏摇、横摇和纵摇典型的六种运动。

实验模型的制作
气动荷载模拟系统参数的设定
气动荷载模拟系统与监控单元的搭接
监控单元与运动控制计算机的连接
控制指令的发送
运动状态的反馈

图1

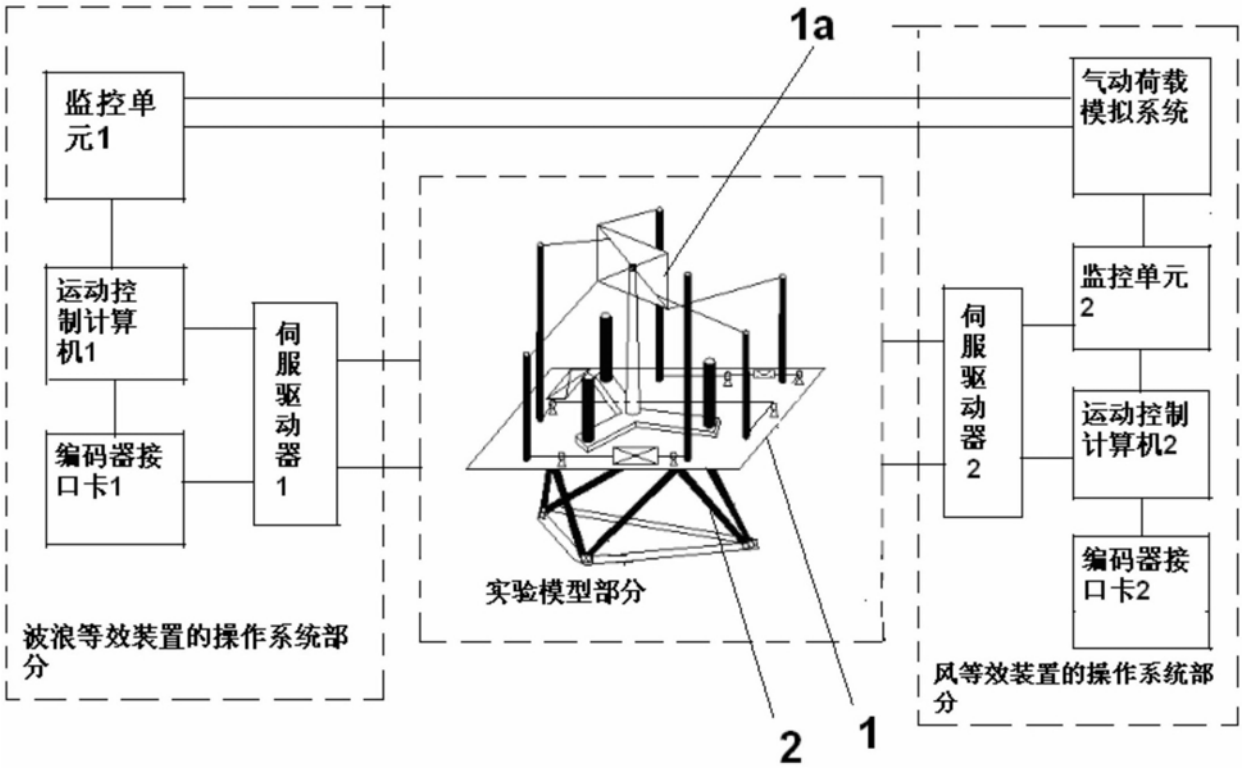

1a
监控单元1
运动控制计算机1
编码器接口卡1
伺服驱动器1
波浪等效装置的操作系统部分
实验模型部分
2
1
气动荷载模拟系统
监控单元2
伺服驱动器2
运动控制计算机2
编码器接口卡2
风等效装置的操作系统部分

图2

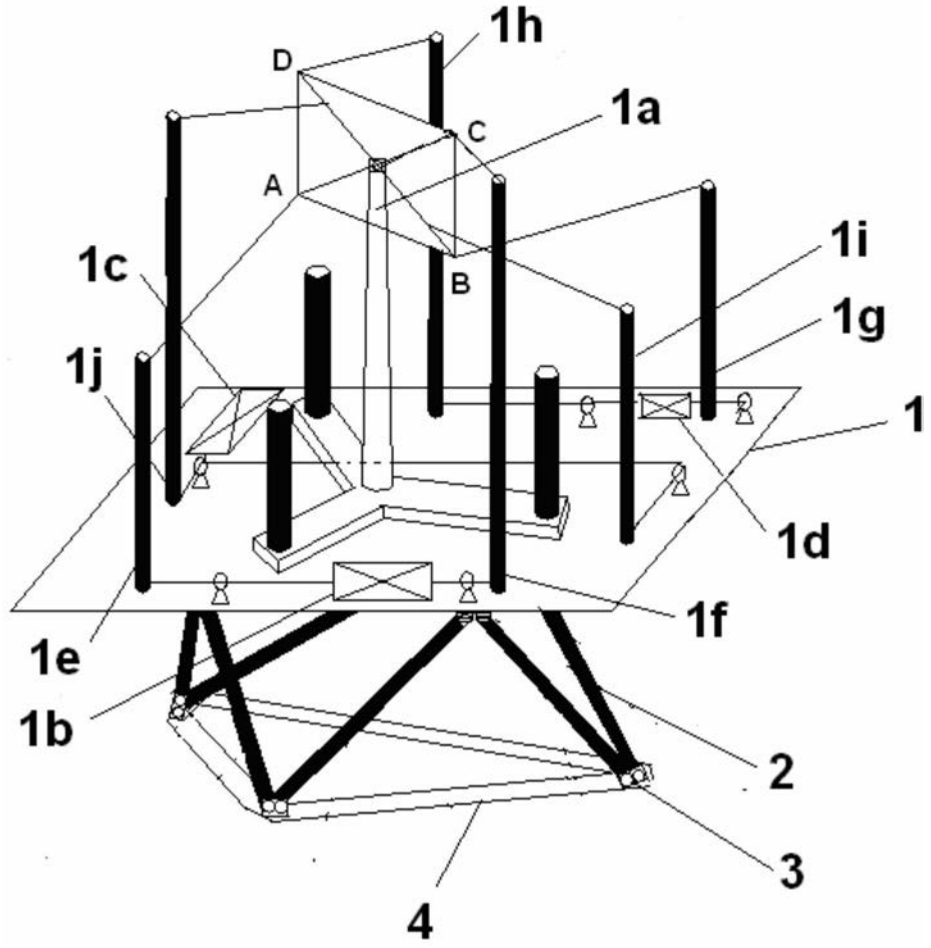


图3

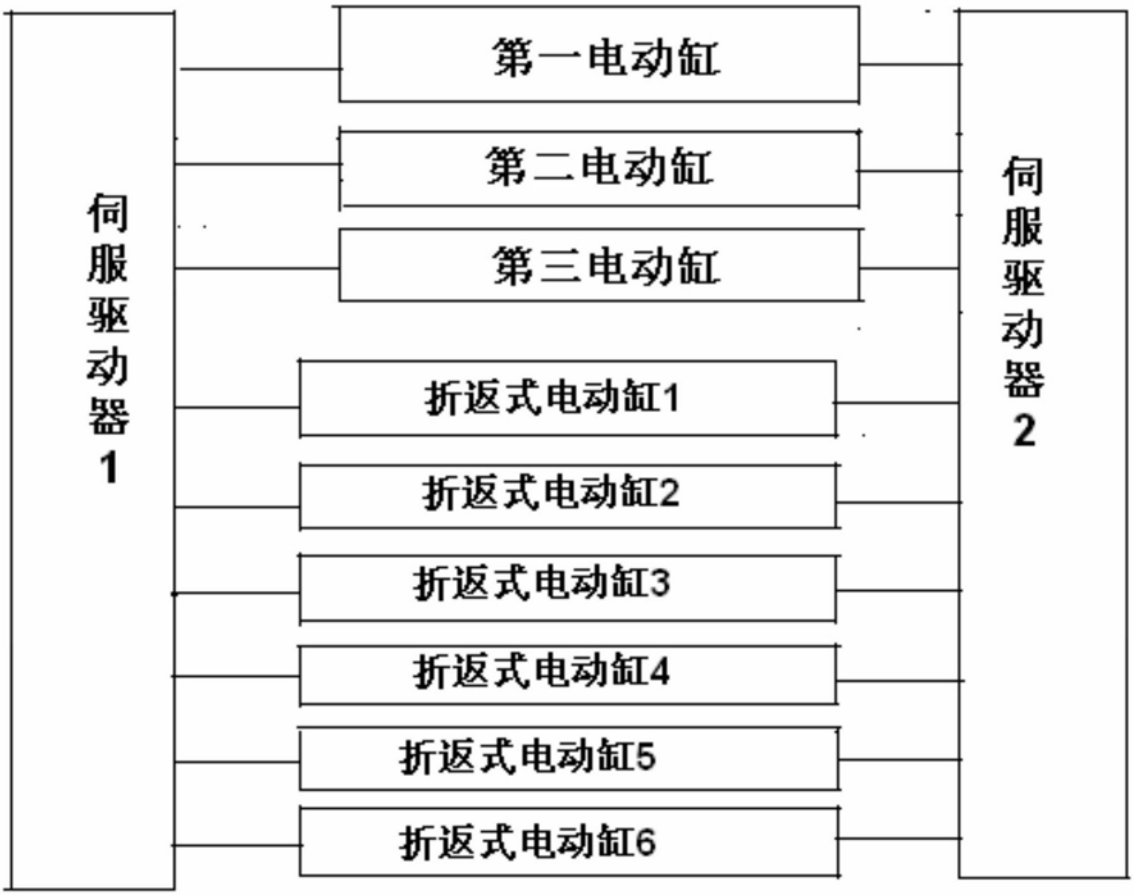

伺服驱动器1
第一电动缸
第二电动缸
第三电动缸
折返式电动缸1
折返式电动缸2
折返式电动缸3
折返式电动缸4
折返式电动缸5
折返式电动缸6
伺服驱动器2

图4

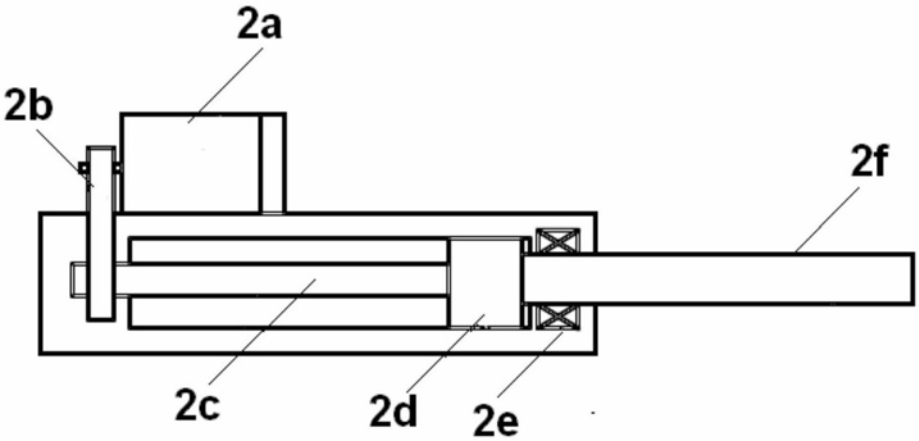

2a
2b
2f
2c
2d
2e

图5