



(12)发明专利申请

(10)申请公布号 CN 110220666 A

(43)申请公布日 2019.09.10

(21)申请号 201910546310.6

(22)申请日 2019.06.21

(71)申请人 中国农业大学

地址 100083 北京市海淀区清华东路17号

(72)发明人 祁力钧 杨泽鹏 吴亚垒 肖雨

程滨滨 张豪 杨知伦 刘娟娟

(74)专利代理机构 北京中安信知识产权代理事

务所(普通合伙) 11248

代理人 李彬 徐林

(51)Int.Cl.

G01M 9/02(2006.01)

G01M 9/06(2006.01)

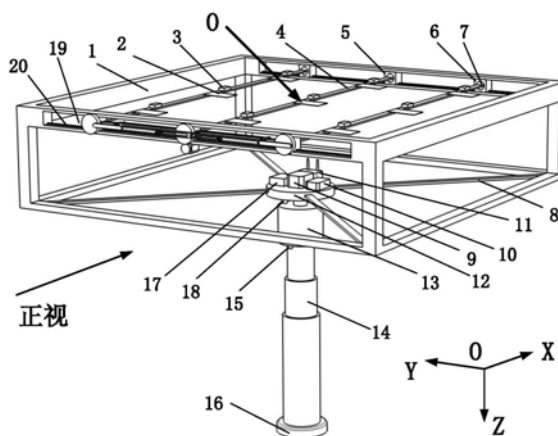
权利要求书6页 说明书16页 附图2页

(54)发明名称

基于微应变的风场检测装置及在线风场检测和评价方法

(57)摘要

本发明属于植保喷雾领域,涉及一种基于微应变的风场检测装置及在线风场检测和评价方法,主要用于悬停状态下无人机、风洞试验、风幕机等产生的稳定风场进行在线检测。本发明采用聚丙烯片来模拟风场下的叶片受风压弯曲的过程,贴附于聚丙烯片的应变片随之弯曲并发生的阻值变化,根据应变片组成的全桥电路中压差信号测量风速风向。本发明可实现自动调节检测高度,可实现同时对同水平面内多点X、Y、Z方向风速进行快速检测,并计算该点风向及风速值,可实现检测点位置的精确调节,还可对风场的分布均匀性进行评价。本发明的风场检测装置检测灵敏度高,检测精度高,具有较高的使用寿命,检测部件成本低廉且易于更换。



1. 一种基于微应变的风场检测装置,其特征在于:该装置包括支撑条旋转机构、水平旋转机构、测风间距调节机构、高度自动调节机构和控制机构;

其中,所述水平旋转机构包括旋转框架(1)、旋转圆盘(12)、第一步进电机(13)和第一角度传感器(18);所述旋转框架(1)为一横截面为正方形的长方体框架,包括水平设置的上层正方形架和下层正方形架;

所述旋转圆盘(12)的下端面固定在第一步进电机(13)的输出轴上,旋转圆盘(12)的边缘通过多个支撑辐条(8)与旋转框架(1)的下层正方形架固接;所述第一角度传感器(18)的两部分分别固定在第一步进电机(13)及旋转圆盘(12)的下端面上;

所述支撑条旋转机构包括支撑条(4)、固定基座(5)、移动基座(6)、转动轴承(7)、第二角度传感器(30)、旋转从动齿轮(31)、主动齿轮(32)、转动外轮(33)和第二步进电机(34);所述旋转框架(1)的上层正方形架中的两个相对的横梁上沿横梁的长度方向设有基座移动槽(19);

一对固定基座(5)分别固定在两个横梁的基座移动槽(19)的中部,偶数对移动基座(6)能够水平移动地设置在基座移动槽(19)中,且偶数对移动基座(6)以两个固定基座(5)之间的连线呈对称分布;

每个固定基座(5)和每个移动基座(6)内均设有转动轴承(7);两个相互对应的固定基座(5)的转动轴承(7)之间,以及每两个相互对应的移动基座(6)的转动轴承(7)之间均固接有一根支撑条(4);每根支撑条(4)上布置多个聚丙烯片(2)和多个与聚丙烯片(2)一一对应的电压放大器(3),各支撑条(4)上的多个聚丙烯片(2)在平面内呈 $n \times n$ 等距阵列分布;所述聚丙烯片(2)的上表面设有多对平行且正反交替排列的应变片(41),各应变片(41)采用差动全桥连接的方式与电压放大器(3)连接;

每个固定基座(5)的外侧均设有一个与固定基座(5)内的转动轴承(7)连接的旋转从动齿轮(31),每个移动基座(6)外侧均设有一个与移动基座(6)内的转动轴承(7)连接的转动外轮(33);位于同一侧的一个旋转从动齿轮(31)和多个转动外轮(33)之间通过一长度可调的转动连接杆连接;所述主动齿轮(32)与旋转从动齿轮(31)相互啮合,主动齿轮(32)与固接在旋转框架(1)的上层正方形架的横梁上的第二步进电机(34)的输出轴连接;所述第二角度传感器(30)的两部分分别固定在固定基座(5)和旋转从动齿轮(31)上;

所述测风间距调节机构固接在固定基座(5)与移动基座(6)之间;

所述高度自动调节机构包括多级液压升降缸(14)、位移传感器(15)和底座(16);所述多级液压升降缸(14)竖直地安装在底座(16)上,多级液压升降缸(14)的活塞杆端与第一步进电机(13)的底端固接;所述位移传感器(15)固定在第一步进电机(13)的底端;

所述控制机构包括设置在旋转圆盘(12)上的电源(9)、数据采集卡(10)、无线传输模块(11)和控制模块(17);

每个电压放大器(3)均与数据采集卡(10)连接;数据采集卡(10)能够同时采集多组电压数据,并通过无线传输模块(11)传送至远程电脑端记录并绘制风场图;

所述电源(9)分别为每个电压放大器(3)、数据采集卡(10)、无线传输模块(11)、第一步进电机(13)、多级液压升降缸(14)、位移传感器(15)、控制模块(17)、第一角度传感器(18)、第二角度传感器(30)和第二步进电机(34)供电;

所述控制模块(17)控制多级液压升降缸(14)、第一步进电机(13)及第二步进电机

(34),接收位移传感器(15)、第一角度传感器(18)和第二角度传感器(30)的监测数据,并通过无线传输模块(11)与远程电脑端通讯。

2.根据权利要求1所述的基于微应变的风场检测装置,其特征在于:所述支撑条旋转机构包括两对移动基座(6),所述转动连接杆包括一转动内套杆(24)和两个分别套接在转动内套杆(24)两端的转动外套杆(25),转动内套杆(24)与转动外套杆(25)之间通过内六角螺栓(26)、六角螺母(27)及前后两个垫片(28)进行夹紧定位,其中,转动内套杆(24)铆接在旋转从动齿轮(31)上,两个转动外套杆(25)分别铆接在两个转动外轮(33)上;所述测风间距调节机构包括移动内套杆(21)和套接在移动内套杆(21)外侧的移动外套杆(22),移动内套杆(21)能够在移动外套杆(22)内滑动,并通过夹紧螺栓(23)夹紧定位;所述移动内套杆(21)的末端和移动外套杆(22)的末端分别固接在固定基座(5)和移动基座(6)上。

3.根据权利要求1所述的基于微应变的风场检测装置,其特征在于:所述聚丙烯片(2)的表面上通过粘贴胶片(42)粘贴有两对平行且正反交替排列的应变片(41),依次为:第一应变片(a)、第二应变片(b)、第三应变片(c)和第四应变片(d);其中,第一应变片(a)和第三应变片(c)为正面粘贴,第二应变片(b)和第四应变片(d)为反面粘贴。

4.一种利用权利要求1所述的基于微应变的风场检测装置的在线风场检测方法,其特征在于:该方法包括如下步骤:

a、建立风场检测装置的三维坐标系:

将风场检测装置调至初始状态,聚丙烯片(2)处于水平状态;

将聚丙烯片(2)所在水平面上的旋转框架(1)中心点设为三维坐标系原点O,X轴平行于支撑条(4),正方向向后,Y轴垂直于支撑条(4),正方向向左,Z轴垂直于XOY水平面,正方向向下;

b、建立不同风向的风速 v 与输出电压差 U 的简化关系模型:

b1、将风速仪设置在距转速可调风机的出风口一定测试距离处,分别测定 n 个逐级递增的风速 v_i ($i=0,1,2,3\cdots n$),风速范围为 $0\sim 10\text{m/s}$,其中当 $v_0=0$ 时,调节电压放大器(3)的阻值使输出电压差 U 为0,即 $U_0=0$;

b2、将风机以所述测试距离,分别向任一水平状态下的聚丙烯片(2)沿Z轴正方向和Z轴负方向各吹出测定的 n 个风速 v_i 逐级递增的风,以及分别向任一竖直状态下的聚丙烯片(2)沿Y轴正方向和Y轴负方向各吹出测定的 n 个风速 v_i 逐级递增的风;过程中,通过数据采集卡(10)采集相应的电压放大器(3)数据,获得不同风向下风速 v_i 对应的输出电压差 U_i ,最终分别获得以公式2表示的Z轴正方向、Z轴负方向、Y轴正方向、Y轴负方向、X轴正方向和X轴负方向的风速 v 与输出电压差 U 的关系模型;其中,X轴正方向与Y轴正方向的关系模型相同,X轴负方向与Y轴负方向的关系模型相同;将获得的不同风向下 n 个不同风速值和输出的电压差信号进行多项式拟合,建立风速 v 与输出电压差 U 的模型,并确定误差修正系数 k_j :

$$v=k_j U \quad (j=1,2,3,4) \quad \text{公式2}$$

式中,风速 v 单位为 m/s ,输出电压差 U 单位为 V , k_j 为不同风向的误差修正系数, k_1 为Z轴正方向的风向标定系数, k_2 为Z轴负方向的风向标定系数, k_3 为X、Y轴正方向的风向标定系数, k_4 为X、Y轴负方向的风向标定系数;

c、风场检测:

c1、将调至初始状态的风场检测装置放置在待测风场的检测位置,同时记录每个聚丙

烯片(2)在三维坐标系中的检测坐标;

c2、分别记录每个检测坐标所对应的各水平状态的聚丙烯片(2)的Z轴方向的输出电压差 U_z 、各竖直状态的聚丙烯片(2)的Y轴方向的输出电压差 U_y 以及X轴方向的输出电压差 U_x ;根据各 U_z 、 U_y 和 U_x 的值的正负,选择步骤b获得的Z轴正方向、Z轴负方向、Y轴正方向、Y轴负方向、X轴正方向和X轴负方向的风速 v 与输出电压差 U 的关系模型,分别获得各检测坐标所对应的Z轴方向的风速 v_z 、Y轴方向的风速 v_y 和X轴方向的风速 v_x ;

c3、通过公式3和公式4计算获得各检测坐标的风速风向 $\vec{v}$ 及风速的大小 $\|\vec{v}\|$,

$$\vec{v} = (v_x, v_y, v_z) \quad \text{公式 3}$$

$$\|\vec{v}\| = \sqrt{v_x^2 + v_y^2 + v_z^2} \quad \text{公式 4}$$

式中, v_z 为Z轴方向风速, v_y 为Y轴方向风速, v_x 为X轴方向风速,单位为m/s; $\vec{v}$ 为三维向量,包含风向和风速值信息; v_x 、 v_y 、 v_z 包含正负方向信息和风速大小。

5.根据权利要求4所述的方法,其特征在于:所述步骤b2的具体过程如下:

b2.1、将风机移至任一水平状态的聚丙烯片(2)的正上方测试距离处,依次向下吹出n个风速 v_i 逐级递增的风,在风速为 v_i 时,聚丙烯片(2)协同应变片(41)向下弯曲发生变形,应变片(41)阻值变化,输出差动电压发生变化,数据采集卡(10)采集电压放大器(3)的电压数据,并通过无线传输模块(11)将不同风速 v_i 对应的输出电压差 U_i 传送至远程电脑端显示并记录,远程电脑端根据公式2获得Z轴正方向的风速 v 与输出电压差 U 的多项式拟合关系模型: $v=k_1U$;

b2.2、将风机改移至任一水平状态的聚丙烯片(2)的正下方测试距离处,依次向上吹出n个风速 v_i 逐级递增的风,其他操作均与步骤b2.1相同,此时电压风速均为负值,获得Z轴负方向的风速 v 与输出电压差 U 的多项式拟合关系模型: $v=k_2U$;

b2.3、将风机改为沿Y轴正方向吹风,测试距离不变,支撑条(4)顺时针旋转 90° ,将聚丙烯片(2)调至竖直向下且垂直于Y轴,其他操作均与步骤b2.1相同,此时电压风速均为正值,获得Y轴正方向的风速 v 与输出电压差 U 的多项式拟合关系模型: $v=k_3U$;X轴正方向与Y轴正方向的关系模型相同;

b2.4、将风机改为沿Y轴负方向吹风,其他操作均与步骤b2.1相同,此时电压风速均为负值,获得Y轴负方向的风速 v 与输出电压差 U 的多项式拟合关系模型: $v=k_4U$;X轴负方向与Y轴负方向的关系模型相同。

6.根据权利要求4-5任意一项所述的方法,其特征在于:所述步骤c2的具体过程如下:

1)水平状态的聚丙烯片(2)能够检测Z轴方向的风场风速 v_z ,每个检测坐标所对应的聚丙烯片(2)协同应变片(41)感知风场发生弯曲变形,应变片(41)阻值变化,输出差动电压发生变化,数据采集卡(10)采集各电压放大器(3)的电压数据,并通过无线传输模块(11)将各检测坐标所对应的Z轴方向的输出电压差 U_z 传送至远程电脑端,远程电脑端根据步骤b的Z轴正方向或Z轴负方向的风速 v 与输出电压差 U 的关系模型,将 U_z 转换为 v_z ,并记录数据;其中, U_z 的值为正时,使用误差修正系数为 k_1 的Z轴正方向关系模型计算风速,风向沿Z轴正方向; U_z 的值为负时,使用误差修正系数为 k_2 的Z轴负方向模型计算风速,风向沿Z轴负方向;

2) 为检测Y轴方向的风速 v_y , 支撑条(4)顺时针旋转 90° , 将聚丙烯片(2)调至竖直向下且垂直于Y轴且平行于X轴, 获得各检测坐标所对应的Y轴方向的输出电压差 U_y , 远程电脑端根据步骤b的Y轴正方向或Y轴负方向的风速 v 与输出电压差 U 的关系模型, 将 U_y 转换为 v_y , 并记录数据; 其中, U_y 的值为正时, 使用误差修正系数为 k_3 的Y轴正方向模型计算风速, 风向沿Y轴正方向; U_y 的值为负时, 使用误差修正系数为 k_4 的Y轴负方向模型计算风速, 风向沿Y轴负方向;

3) 为检测X轴方向风速 v_x , 聚丙烯片(2)保持竖直状态, 水平旋转机构顺时针旋转 90° , 使聚丙烯片(2)垂直于X轴且平行于Y轴, 此时原聚丙烯片(2)位置发生变化, 但每个检测坐标任然与一个新的聚丙烯片(2)相对应; 获得各检测坐标所对应的X轴方向的输出电压差 U_x , 远程电脑端根据步骤b的X轴正方向或X轴负方向的风速 v 与输出电压差 U 的关系模型, 将 U_x 转换为 v_x , 并记录数据; 其中, U_x 的值为正时, 使用误差修正系数为 k_3 的X轴正方向模型计算风速, 风向沿X轴正方向; U_x 的值为负时, 使用误差修正系数为 k_4 的X轴负方向模型计算风速, 风向沿X轴负方向。

7. 根据权利要求5-6任意一项所述的方法, 其特征在于: 所述步骤c1中, 控制多级液压升降缸(14)调节风场检测装置的检测高度, 实现不同水平面的风场检测; 通过调节测风间距调节机构以及支撑条(4)上的聚丙烯片(2)的间隔距离, 实现所测风距的改变。

8. 一种利用权利要求1所述的基于微应变的风场检测装置的在线风场分布均匀性评价方法, 其特征在于: 该方法包括如下步骤:

a、建立风场检测装置的三维坐标系:

将风场检测装置调至初始状态, 聚丙烯片(2)处于水平状态;

将聚丙烯片(2)所在水平面上的旋转框架(1)中心点设为三维坐标系原点O, X轴平行于支撑条(4), 正方向向后, Y轴垂直于支撑条(4), 正方向向左, Z轴垂直于XOY水平面, 正方向向下;

b、建立不同风向的风速 v 与输出电压差 U 的简化关系模型:

b1、将风速仪设置在距转速可调风机的出风口一定测试距离处, 分别测定 n 个逐级递增的风速 v_i ($i=0, 1, 2, 3 \cdots n$), 风速范围为 $0 \sim 10\text{m/s}$, 其中当 $v_0=0$ 时, 调节电压放大器(3)的阻值使输出电压差 U 为0, 即 $U_0=0$;

b2、将风机以所述测试距离, 分别向任一水平状态下的聚丙烯片(2)沿Z轴正方向和Z轴负方向各吹出测定的 n 个风速 v_i 逐级递增的风, 以及分别向任一竖直状态下的聚丙烯片(2)沿Y轴正方向和Y轴负方向各吹出测定的 n 个风速 v_i 逐级递增的风; 过程中, 通过数据采集卡(10)采集相应的电压放大器(3)数据, 获得不同风向下风速 v_i 对应的输出电压差 U_i , 最终分别获得以公式2表示的Z轴正方向、Z轴负方向、Y轴正方向、Y轴负方向、X轴正方向和X轴负方向的风速 v 与输出电压差 U 的关系模型; 其中, X轴正方向与Y轴正方向的关系模型相同, X轴负方向与Y轴负方向的关系模型相同; 将获得的不同风向下 n 个不同风速值和输出的电压差信号进行多项式拟合, 建立风速 v 与输出电压差 U 的模型, 并确定误差修正系数 k_j :

$$v = k_j U \quad (j=1, 2, 3, 4) \quad \text{公式2}$$

式中, 风速 v 单位为 m/s , 输出电压差 U 单位为 V , k_j 为不同风向的误差修正系数, k_1 为Z轴正方向的风向标定系数, k_2 为Z轴负方向的风向标定系数, k_3 为X、Y轴正方向的风向标定系数, k_4 为X、Y轴负方向的风向标定系数;

c、风场的分布均匀性评价：

将风场检测装置回至初始状态，根据目标检测风向 (x, y, z) ，通过公式5和公式6计算确定水平旋转机构应调整的水平转角 α 和支撑条旋转机构应调整的支撑条转角 β ；

$$\alpha = \arctan \frac{x}{y} \quad \text{公式 5}$$

$$\beta = \arctan \frac{\sqrt{x^2 + y^2}}{z} \quad \text{公式 6}$$

式中， α 、 β 的单位为度；

然后通过第一步进电机 (13) 和第二步进电机 (34) 分别驱动水平旋转机构和支撑条旋转机构转动相应的角度，使得各检测坐标的聚丙烯片 (2) 与所检测风场的风向 (x, y, z) 垂直；

各聚丙烯片 (2) 协同应变片 (41) 感知风场发生弯曲变形，应变片 (41) 阻值变化，输出差动电压发生变化，数据采集卡 (10) 采集各电压放大器 (3) 的电压数据，并通过无线传输模块 (11) 将输出电压差信号 U 传送至远程电脑端，远程电脑端通过公式7计算第 m 个聚丙烯片 (2) 对应的风速值 $\|\vec{v}_m\|$ ；

$$\|\vec{v}_m\| = \sqrt{(k_m U_m \cos \beta)^2 + (k_m^* U_m \sin \beta)^2} \quad \text{公式 7}$$

式中， $\|\vec{v}_m\|$ 为第 m 个检测点的风速值，单位为m/s； U_m 为第 m 个检测点的输出电压差，单位为V； β 为支撑条旋转机构转动角度， $\vec{v}_m$ 方向为 (x, y, z) ；

k_m 为第 m 个检测点的误差修正系数，其确定方式为：

$k_m U_m \cos \beta$ 为 $\vec{v}_m$ 的竖直分速度，其中 $U_m \cos \beta$ 为 U_m 的竖直分电压，当 $U_m \cos \beta$ 为正时，使用误差修正系数为 k_1 关系模型计算竖直方向风速，当 $U_m \cos \beta$ 为负时，则使用误差修正系数为 k_2 关系模型；

$k_m^* U_m \sin \beta$ 为 $\vec{v}_m$ 的水平分速度，其中 $U_m \sin \beta$ 为 U_m 的水平分电压，当 $U_m \sin \beta$ 为正时，使用误差修正系数为 k_3 关系模型计算水平方向风速，当 $U_m \sin \beta$ 为负时则使用误差修正系数为 k_4 关系模型；

通过公式8计算各聚丙烯片 (2) 的风速标准差，然后通过公式9计算各聚丙烯片 (2) 的风速分布变异系数：

$$S = \sqrt{\frac{\sum_{m=1}^q (\|\vec{v}_m\| - \bar{v})^2}{q-1}} \quad \text{公式 8}$$

$$CV = \frac{S}{\bar{v}} \times 100\% \quad \text{公式 9}$$

式中， S 为各聚丙烯片 (2) 的风速标准差， $\bar{v}$ 为风速平均值， $\|\vec{v}_m\|$ 为第 m 个检测点的风速值，单位均为m/s； q 为所检测点的总个数； CV 为聚丙烯片 (2) 所处平面内各点风速分布变异

系数,其单位为%。

9. 根据权利要求8所述的方法,其特征在于:所述步骤b2的具体过程如下:

b2.1、将风机移至任一水平状态的聚丙烯片(2)的正上方测试距离处,依次向下吹出n个风速 v_i 逐级递增的风,在风速为 v_i 时,聚丙烯片(2)协同应变片(41)向下弯曲发生变形,应变片(41)阻值变化,输出差动电压发生变化,数据采集卡(10)采集电压放大器(3)的电压数据,并通过无线传输模块(11)将不同风速 v_i 对应的输出电压差 U_i 传送至远程电脑端显示并记录,远程电脑端根据公式2获得Z轴正方向的风速 v 与输出电压差 U 的多项式拟合关系模型: $v=k_1U$;

b2.2、将风机改移至任一水平状态的聚丙烯片(2)的正下方,测试距离处,依次向上吹出n个风速 v_i 逐级递增的风,其他操作均与步骤b2.1相同,此时电压风速均为负值,获得Z轴负方向的风速 v 与输出电压差 U 的多项式拟合关系模型: $v=k_2U$;

b2.3、将风机改为沿Y轴正方向吹风,测试距离不变,支撑条(4)顺时针旋转 90° ,将聚丙烯片(2)调至竖直向下且垂直于Y轴,其他操作均与步骤b2.1相同,此时电压风速均为正值,获得Y轴正方向的风速 v 与输出电压差 U 的多项式拟合关系模型: $v=k_3U$;X轴正方向与Y轴正方向的关系模型相同;

b2.4、将风机改为沿Y轴负方向吹风,其他操作均与步骤b2.1相同,此时电压风速均为负值,获得Y轴负方向的风速 v 与输出电压差 U 的多项式拟合关系模型: $v=k_4U$;X轴负方向与Y轴负方向的关系模型相同。

10. 根据权利要求8所述的方法,其特征在于:控制多级液压升降缸(14)调节风场检测装置的检测高度,以获取更多点的风速值,代入公式7和公式8计算空间内各平面的风速标准差及风速分布变异系数。

基于微应变的风场检测装置及在线风场检测和评价方法

技术领域

[0001] 本发明涉及一种基于微应变的风场检测装置及在线风场检测和评价方法,属于植保喷雾领域。

背景技术

[0002] 在农业植保领域,植保无人机在大田中喷雾应用持续不断推进,果园风助式喷雾机械逐步代替传统冲淋式喷雾机械,利用机械产生的风场有助于雾滴穿透稠密的冠层并促使叶片翻动,提高叶片附着率,并对雾滴的漂移性、均匀性及覆盖率有着重要的影响,因此对植保无人机、果园风助式喷雾机等施药作业环境中的风场检测也十分重要。中国发明专利申请(申请号:201710439738.1)公开了一种风扇隐藏式风速检测仪,所述装置使用风扇轮检测风速,风扇不使用时可隐藏于控制器外壳内腔;中国发明专利申请(申请号:201810467180.2)公开了一种旋翼无人机立体风场测试系统和方法,提出一种基于无线风速传感器和空间网格相结合的旋翼无人机立体风场测试方法,快速测量各个空间网格测试点的风速。上述风速测量装置主要以转轮式及热敏式风速仪为主,转轮式风速仪精度要求高、价格昂贵,风轮容易损坏且不易更换,对风速变化感知能力差;热敏式风速仪探头铂丝较易损坏,且易受无人机的下洗气流中湍流影响,使得测量值高于真实值。难以精确定位,一次仅能单点测量,难以满足实验室多组数据不同位置同时检测的需求,采集效率低,不能实现精确定位测量及远程调控。

发明内容

[0003] 针对上述技术问题,本发明的一个目的是提供一种检测灵敏度高、检测精度高、具有较高的使用寿命、检测部件成本低廉且易于更换、自动化程度高、高效快速、多点位测量风速的基于微应变的风场检测装置,用聚丙烯片来模拟风场下的叶片,利用应变片受风弯曲发生阻值变化转化为压差信号来检测风速,可实现对悬停状态下无人机、风洞试验、风幕机等产生的稳定风场进行在线检测,可根据实验目的对任意目标方向进行风场风速检测,可根据X、Y、Z方位测量风速值计算该点风速及风向,采集大量风场数据实时传输给电脑端,还可对风场的分布均匀性进行评价。

[0004] 本发明的另一个目的是提供一种在线风场检测方法以及一种在线风场分布均匀性评价方法。

[0005] 为了实现上述目的,本发明提供了如下技术方案:

[0006] 不同强度的风场作用于同样大小的聚丙烯片,会发生不同程度的弯曲变形,贴附在聚丙烯片上的四条应变片随之发生相同的弯曲变形,并导致各应变片电阻值变化,输出电压差随之改变,输出电压差与风速正相关。

[0007] 本发明的风场检测装置就是根据应变片阻值变化导致的输出电压差变化来进行植保喷雾时风场的检测,并可实时调节所测量的风向及所测水平面的高度。

[0008] 一种基于微应变的风场检测装置,该装置包括支撑条旋转机构、水平旋转机构、测

风间距调节机构、高度自动调节机构和控制机构。

[0009] 其中,所述水平旋转机构包括旋转框架1、旋转圆盘12、第一步进电机13和第一角度传感器18;所述旋转框架1为一横截面为正方形的长方体框架,包括水平设置的上层正方形架和下层正方形架。

[0010] 所述旋转圆盘12的下端面固定在第一步进电机13的输出轴上,旋转圆盘12的边缘通过多个支撑辐条8与旋转框架1的下层正方形架固接;所述第一角度传感器18的两部分分别固定在第一步进电机13及旋转圆盘12的下端面上。

[0011] 所述支撑条旋转机构包括支撑条4、固定基座5、移动基座6、转动轴承7、第二角度传感器30、旋转从动齿轮31、主动齿轮32、转动外轮33和第二步进电机34;所述旋转框架1的上层正方形架中的两个相对的横梁上沿横梁的长度方向设有基座移动槽19。

[0012] 一对固定基座5分别固定在两个横梁的基座移动槽19的中部,偶数对移动基座6能够水平移动地设置在基座移动槽19中,且偶数对移动基座6以两个固定基座5之间的连线呈对称分布。

[0013] 每个固定基座5和每个移动基座6内均设有转动轴承7;两个相互对应的固定基座5的转动轴承7之间,以及每两个相互对应的移动基座6的转动轴承7之间均固接有一根支撑条4;每根支撑条4上布置多个聚丙烯片2和多个与聚丙烯片2一一对应的电压放大器3,各支撑条4上的多个聚丙烯片2在平面内呈 $n \times n$ 等距阵列分布;所述聚丙烯片2的表面上设有多对平行且正反交替排列的应变片41,各应变片41采用差动全桥连接的方式与电压放大器3连接。

[0014] 每个固定基座5的外侧均设有一个与固定基座5内的转动轴承7连接的旋转从动齿轮31,每个移动基座6外侧均设有一个与移动基座6内的转动轴承7连接的转动外轮33;位于同一侧的一个旋转从动齿轮31和多个转动外轮33之间通过一长度可调的转动连接杆连接;所述主动齿轮32与旋转从动齿轮31相互啮合,主动齿轮32与固接在旋转框架1的上层正方形架的横梁上的第二步进电机34的输出轴连接;所述第二角度传感器30的两部分分别固定在固定基座5和旋转从动齿轮31上。

[0015] 所述测风间距调节机构固接在固定基座5与移动基座6之间。

[0016] 所述高度自动调节机构包括多级液压升降缸14、位移传感器15和底座16;所述多级液压升降缸14竖直地安装在底座16上,多级液压升降缸14的活塞杆端与第一步进电机13的底端固接;所述位移传感器15固定在第一步进电机13的底端。

[0017] 所述控制机构包括设置在旋转圆盘12上的电源9、数据采集卡10、无线传输模块11和控制模块17。

[0018] 每个电压放大器3均与数据采集卡10连接;数据采集卡10能够同时采集多组电压数据,并通过无线传输模块11传送至远程电脑端记录并绘制风场图。

[0019] 所述电源9分别为每个电压放大器3、数据采集卡10、无线传输模块11、第一步进电机13、多级液压升降缸14、位移传感器15、控制模块17、第一角度传感器18、第二角度传感器30和第二步进电机34供电。

[0020] 所述控制模块17控制多级液压升降缸14、第一步进电机13及第二步进电机34,接收位移传感器15、第一角度传感器18和第二角度传感器30的监测数据,并通过无线传输模块11与远程电脑端通讯。

[0021] 所述支撑条旋转机构包括两对移动基座6,所述转动连接杆包括一转动内套杆24和两个分别套接在转动内套杆24两端的转动外套杆25,转动内套杆24与转动外套杆25之间通过内六角螺栓26、六角螺母27及前后两个垫片28进行夹紧定位,其中,转动内套杆24铆接在旋转从动齿轮31上,两个转动外套杆25分别铆接在两个转动外轮33上;所述测风间距调节机构包括移动内套杆21和套接在移动内套杆21外侧的移动外套杆22,移动内套杆21能够在移动外套杆22内滑动,并通过夹紧螺栓23夹紧定位;所述移动内套杆21的末端和移动外套杆22的末端分别固接在固定基座5和移动基座6上。

[0022] 所述聚丙烯片2的表面上通过粘贴胶片42粘贴有两对平行且正反交替排列的应变片41,依次为:第一应变片a、第二应变片b、第三应变片c和第四应变片d;其中,第一应变片a和第三应变片c为正面粘贴,第二应变片b和第四应变片d为反面粘贴。

[0023] 一种利用所述的基于微应变的风场检测装置的在线风场检测方法,包括如下步骤:

[0024] a、建立风场检测装置的三维坐标系:

[0025] 将风场检测装置调至初始状态,聚丙烯片2处于水平状态;

[0026] 将聚丙烯片2所在水平面上的旋转框架1中心点设为三维坐标系原点O,X轴平行于支撑条4,正方向向后,Y轴垂直于支撑条4,正方向向左,Z轴垂直于XOY水平面,正方向向下;

[0027] b、建立不同风向的风速 v 与输出电压差 U 的简化关系模型:

[0028] b1、将风速仪设置在距转速可调风机的出风口一定测试距离处,分别测定 n 个逐级递增的风速 v_i ($i=0,1,2,3\cdots n$),风速范围为 $0\sim 10\text{m/s}$,其中当 $v_0=0$ 时,调节电压放大器3的阻值使输出电压差 U 为0,即 $U_0=0$;

[0029] b2、将风机以所述测试距离,分别向任一水平状态下的聚丙烯片2沿Z轴正方向和Z轴负方向各吹出测定的 n 个风速 v_i 逐级递增的风,以及分别向任一竖直状态下的聚丙烯片2沿Y轴正方向和Y轴负方向各吹出测定的 n 个风速 v_i 逐级递增的风;过程中,通过数据采集卡10采集相应的电压放大器3数据,获得不同风向下风速 v_i 对应的输出电压差 U_i ,最终分别获得以公式2表示的Z轴正方向、Z轴负方向、Y轴正方向、Y轴负方向、X轴正方向和X轴负方向的风速 v 与输出电压差 U 的关系模型;其中,X轴正方向与Y轴正方向的关系模型相同,X轴负方向与Y轴负方向的关系模型相同;将获得的不同风向下 n 个不同风速值和输出的电压差信号进行多项式拟合,建立风速 v 与输出电压差 U 的模型,并确定误差修正系数 k_j :

[0030] $v=k_j U$ ($j=1,2,3,4$) 公式2

[0031] 式中,风速 v 单位为 m/s ,输出电压差 U 单位为 V , k_j 为不同风向的误差修正系数, k_1 为Z轴正方向的风向标定系数, k_2 为Z轴负方向的风向标定系数, k_3 为X、Y轴正方向的风向标定系数, k_4 为X、Y轴负方向的风向标定系数;

[0032] c、风场检测:

[0033] c1、将调至初始状态的风场检测装置放置在待测风场的检测位置,同时记录每个聚丙烯片2在三维坐标系中的检测坐标;

[0034] c2、分别记录每个检测坐标所对应的各水平状态的聚丙烯片2的Z轴方向的输出电压差 U_z 、各竖直状态的聚丙烯片2的Y轴方向的输出电压差 U_y 以及X轴方向的输出电压差 U_x ;根据各 U_z 、 U_y 和 U_x 的值的正负,选择步骤b获得的Z轴正方向、Z轴负方向、Y轴正方向、Y轴负方向、X轴正方向和X轴负方向的风速 v 与输出电压差 U 的关系模型,分别获得各检测坐标所对

应的Z轴方向的风速 v_z 、Y轴方向的风速 v_y 和X轴方向的风速 v_x ;

[0035] c3、通过公式3和公式4计算获得各检测坐标的风速风向 $\vec{v}$ 及风速的大小 $\|\vec{v}\|$,

$$[0036] \quad \vec{v} = (v_x, v_y, v_z) \quad \text{公式 3}$$

$$[0037] \quad \|\vec{v}\| = \sqrt{v_x^2 + v_y^2 + v_z^2} \quad \text{公式 4}$$

[0038] 式中, v_z 为Z轴方向风速, v_y 为Y轴方向风速, v_x 为X轴方向风速,单位为m/s; $\vec{v}$ 为三维向量,包含风向和风速值信息; v_x 、 v_y 、 v_z 包含正负方向信息和风速大小。

[0039] 所述步骤b2的具体过程如下:

[0040] b2.1、将风机移至任一水平状态的聚丙烯片2的正上方测试距离处,依次向下吹出n个风速 v_i 逐级递增的风,在风速为 v_i 时,聚丙烯片2协同应变片41向下弯曲发生变形,应变片41阻值变化,输出差动电压发生变化,数据采集卡10采集电压放大器3的电压数据,并通过无线传输模块11将不同风速 v_i 对应的输出电压差 U_i 传送至远程电脑端显示并记录,远程电脑端根据公式2获得Z轴正方向的风速 v 与输出电压差 U 的多项式拟合关系模型: $v=k_1U$;

[0041] b2.2、将风机改移至任一水平状态的聚丙烯片2的正下方测试距离处,依次向上吹出n个风速 v_i 逐级递增的风,其他操作均与步骤b2.1相同,此时电压风速均为负值,获得Z轴负方向的风速 v 与输出电压差 U 的多项式拟合关系模型: $v=k_2U$;

[0042] b2.3、将风机改为沿Y轴正方向吹风,测试距离不变,支撑条4顺时针旋转 90° ,将聚丙烯片2调至竖直向下且垂直于Y轴,其他操作均与步骤b2.1相同,此时电压风速均为正值,获得Y轴正方向的风速 v 与输出电压差 U 的多项式拟合关系模型: $v=k_3U$;X轴正方向与Y轴正方向的关系模型相同;

[0043] b2.4、将风机改为沿Y轴负方向吹风,其他操作均与步骤b2.1相同,此时电压风速均为负值,获得Y轴负方向的风速 v 与输出电压差 U 的多项式拟合关系模型: $v=k_4U$;X轴负方向与Y轴负方向的关系模型相同。

[0044] 所述步骤c2的具体过程如下:

[0045] 1) 水平状态的聚丙烯片2能够检测Z轴方向的风场风速 v_z ,每个检测坐标所对应的聚丙烯片2协同应变片41感知风场发生弯曲变形,应变片41阻值变化,输出差动电压发生变化,数据采集卡10采集各电压放大器3的电压数据,并通过无线传输模块11将各检测坐标所对应的Z轴方向的输出电压差 U_z 传送至远程电脑端,远程电脑端根据步骤b的Z轴正方向或Z轴负方向的风速 v 与输出电压差 U 的关系模型,将 U_z 转换为 v_z ,并记录数据;其中, U_z 的值为正时,使用误差修正系数为 k_1 的Z轴正方向关系模型计算风速,风向沿Z轴正方向; U_z 的值为负时,使用误差修正系数为 k_2 的Z轴负方向模型计算风速,风向沿Z轴负方向;

[0046] 2) 为检测Y轴方向的风速 v_y ,支撑条4顺时针旋转 90° ,将聚丙烯片2调至竖直向下且垂直于Y轴且平行于X轴,获得各检测坐标所对应的Y轴方向的输出电压差 U_y ,远程电脑端根据步骤b的Y轴正方向或Y轴负方向的风速 v 与输出电压差 U 的关系模型,将 U_y 转换为 v_y ,并记录数据;其中, U_y 的值为正时,使用误差修正系数为 k_3 的Y轴正方向模型计算风速,风向沿Y轴正方向; U_y 的值为负时,使用误差修正系数为 k_4 的Y轴负方向模型计算风速,风向沿Y轴负方向;

[0047] 3) 为检测X轴方向风速 v_x , 聚丙烯片2保持竖直状态, 水平旋转机构顺时针旋转 90° , 使聚丙烯片2垂直于X轴且平行于Y轴, 此时原聚丙烯片2位置发生变化, 但每个检测坐标任然与一个新的聚丙烯片2相对应; 获得各检测坐标所对应的X轴方向的输出电压差 U_x , 远程电脑端根据步骤b的X轴正方向或X轴负方向的风速 v 与输出电压差 U 的关系模型, 将 U_x 转换为 v_x , 并记录数据; 其中, U_x 的值为正时, 使用误差修正系数为 k_3 的X轴正方向模型计算风速, 风向沿X轴正方向; U_x 的值为负时, 使用误差修正系数为 k_4 的X轴负方向模型计算风速, 风向沿X轴负方向。

[0048] 所述步骤c1中, 控制多级液压升降缸14调节风场检测装置的检测高度, 实现不同水平面的风场检测; 通过调节测风间距调节机构以及支撑条4上的聚丙烯片2的间隔距离, 实现所测风距的改变。

[0049] 一种利用所述的基于微应变的风场检测装置的在线风场分布均匀性评价方法, 包括如下步骤:

[0050] a、建立风场检测装置的三维坐标系:

[0051] 将风场检测装置调至初始状态, 聚丙烯片2处于水平状态;

[0052] 将聚丙烯片2所在水平面上的旋转框架1中心点设为三维坐标系原点O, X轴平行于支撑条4, 正方向向后, Y轴垂直于支撑条4, 正方向向左, Z轴垂直于XOY水平面, 正方向向下;

[0053] b、建立不同风向的风速 v 与输出电压差 U 的简化关系模型:

[0054] b1、将风速仪设置在距转速可调风机的出风口一定测试距离处, 分别测定 n 个逐级递增的风速 v_i ($i=0, 1, 2, 3 \cdots n$), 风速范围为 $0 \sim 10\text{m/s}$, 其中当 $v_0=0$ 时, 调节电压放大器3的阻值使输出电压差 U 为0, 即 $U_0=0$;

[0055] b2、将风机以所述测试距离, 分别向任一水平状态下的聚丙烯片2沿Z轴正方向和Z轴负方向各吹出测定的 n 个风速 v_i 逐级递增的风, 以及分别向任一竖直状态下的聚丙烯片2沿Y轴正方向和Y轴负方向各吹出测定的 n 个风速 v_i 逐级递增的风; 过程中, 通过数据采集卡10采集相应的电压放大器3数据, 获得不同风向下风速 v_i 对应的输出电压差 U_i , 最终分别获得以公式2表示的Z轴正方向、Z轴负方向、Y轴正方向、Y轴负方向、X轴正方向和X轴负方向的风速 v 与输出电压差 U 的关系模型; 其中, X轴正方向与Y轴正方向的关系模型相同, X轴负方向与Y轴负方向的关系模型相同; 将获得的不同风向下 n 个不同风速值和输出的电压差信号进行多项式拟合, 建立风速 v 与输出电压差 U 的模型, 并确定误差修正系数 k_j :

[0056] $v = k_j U$ ($j=1, 2, 3, 4$) 公式2

[0057] 式中, 风速 v 单位为 m/s , 输出电压差 U 单位为 V , k_j 为不同风向的误差修正系数, k_1 为Z轴正方向的风向标定系数, k_2 为Z轴负方向的风向标定系数, k_3 为X、Y轴正方向的风向标定系数, k_4 为X、Y轴负方向的风向标定系数;

[0058] c、风场的分布均匀性评价:

[0059] 将风场检测装置回至初始状态, 根据目标检测风向 (x, y, z) , 通过公式5和公式6计算确定水平旋转机构应调整的水平转角 α 和支撑条旋转机构应调整的支撑条转角 β ;

[0060] $\alpha = \arctan \frac{x}{y}$ 公式 5

$$[0061] \quad \beta = \arctan \frac{\sqrt{x^2 + y^2}}{z} \quad \text{公式 6}$$

[0062] 式中, α 、 β 的单位为度;

[0063] 然后通过第一步进电机13和第二步进电机34分别驱动水平旋转机构和支撑条旋转机构转动相应的角度,使得各检测坐标的聚丙烯片2与所检测风场的风向 (x, y, z) 垂直;

[0064] 各聚丙烯片2协同应变片41感知风场发生弯曲变形,应变片41阻值变化,输出差动电压发生变化,数据采集卡10采集各电压放大器3的电压数据,并通过无线传输模块11将输出电压差信号U传送至远程电脑端,远程电脑端通过公式7计算第m个聚丙烯片2对应的风速值 $\|\vec{v}_m\|$;

$$[0065] \quad \|\vec{v}_m\| = \sqrt{(k_m U_m \cos \beta)^2 + (k_m^* U_m \sin \beta)^2} \quad \text{公式 7}$$

[0066] 式中, $\|\vec{v}_m\|$ 为第m个检测点的风速值,单位为m/s; U_m 为第m个检测点的输出电压差,单位为V; β 为支撑条旋转机构转动角度, $\vec{v}_m$ 方向为 (x, y, z) ;

[0067] k_m 为第m个检测点的误差修正系数,其确定方式为:

[0068] $k_m U_m \cos \beta$ 为 $\vec{v}_m$ 的竖直分速度,其中 $U_m \cos \beta$ 为 U_m 的竖直分电压,当 $U_m \cos \beta$ 为正时,使用误差修正系数为 k_1 关系模型计算竖直方向风速,当 $U_m \cos \beta$ 为负时,则使用误差修正系数为 k_2 关系模型;

[0069] $k_m^* U_m \sin \beta$ 为 $\vec{v}_m$ 的水平分速度,其中 $U_m \sin \beta$ 为 U_m 的水平分电压,当 $U_m \sin \beta$ 为正时,使用误差修正系数为 k_3 关系模型计算水平方向风速,当 $U_m \sin \beta$ 为负时则使用误差修正系数为 k_4 关系模型;

[0070] 通过公式8计算各聚丙烯片2的风速标准差,然后通过公式9计算各聚丙烯片2的风速分布变异系数:

$$[0071] \quad S = \sqrt{\frac{\sum_{m=1}^q (\|\vec{v}_m\| - \bar{v})^2}{q-1}} \quad \text{公式 8}$$

$$[0072] \quad CV = \frac{S}{\bar{v}} \times 100\% \quad \text{公式 9}$$

[0073] 式中, S 为各聚丙烯片2的风速标准差, $\bar{v}$ 为风速平均值, $\|\vec{v}_m\|$ 为第m个检测点的风速值,单位均为m/s; q 为所检测点的总个数; CV 为聚丙烯片2所处平面内各点风速分布变异系数,其单位为%。

[0074] 所述步骤b2的具体过程如下:

[0075] b2.1、将风机移至任一水平状态的聚丙烯片2的正上方测试距离处,依次向下吹出 n 个风速 v_i 逐级递增的风,在风速为 v_i 时,聚丙烯片2协同应变片41向下弯曲发生变形,应变片41阻值变化,输出差动电压发生变化,数据采集卡10采集电压放大器3的电压数据,并通过无线传输模块11将不同风速 v_i 对应的输出电压差 U_i 传送至远程电脑端显示并记录,远程

电脑端根据公式2获得Z轴正方向的风速 v 与输出电压差 U 的多项式拟合关系模型： $v=k_1U$ ；

[0076] b2.2、将风机改移至任一水平状态的聚丙烯片2的正下方，测试距离处，依次向上吹出 n 个风速 v_i 逐级递增的风，其他操作均与步骤b2.1相同，此时电压风速均为负值，获得Z轴负方向的风速 v 与输出电压差 U 的多项式拟合关系模型： $v=k_2U$ ；

[0077] b2.3、将风机改为沿Y轴正方向吹风，测试距离不变，支撑条4顺时针旋转 90° ，将聚丙烯片2调至竖直向下且垂直于Y轴，其他操作均与步骤b2.1相同，此时电压风速均为正值，获得Y轴正方向的风速 v 与输出电压差 U 的多项式拟合关系模型： $v=k_3U$ ；X轴正方向与Y轴正方向的关系模型相同；

[0078] b2.4、将风机改为沿Y轴负方向吹风，其他操作均与步骤b2.1相同，此时电压风速均为负值，获得Y轴负方向的风速 v 与输出电压差 U 的多项式拟合关系模型： $v=k_4U$ ；X轴负方向与Y轴负方向的关系模型相同。

[0079] 控制多级液压升降缸14调节风场检测装置的检测高度，以获取更多点的风速值，代入公式7和公式8计算空间内各平面的风速标准差及风速分布变异系数。

[0080] 与现有技术相比，本发明的有益效果在于：

[0081] 本发明主要用于悬停状态下无人机、风洞试验、风幕机等产生的稳定风场进行在线检测，能够高效地获取风场的风速、风向分布状况。风场检测装置用聚丙烯片来模拟风场下的发生弯曲的叶片，应变片贴在聚丙烯片上，随之弯曲，通过应变片弯曲发生的阻值变化转化为压差信号来检测风速大小，可实现对空间内各点X、Y、Z方向风速进行快速检测，可计算各点风向及风速值；可根据实验目的自动调节检测高度，同一水平面多点测量且可调节测量点位置，可快速测量同一水平面各点风速的均匀性及评价整个风场特性；自动化程度高、检测效率高，能够克服了多次测量过程的繁琐，可远程观测在线记录实时数据；且具有检测灵敏度高、检测风速范围大、检测精度高、较高的使用寿命、检测部件成本低廉、易于更换等特点。

附图说明

[0082] 图1为本发明的基于微应变的风场检测装置的结构示意图；

[0083] 图2为支撑条旋转机构的局部放大示意图；

[0084] 图3为应变片41粘贴在聚丙烯片2上的结构示意图；

[0085] 图4为应变片差动全桥连接示意图。

[0086] 其中的附图标记为：

[0087]	1旋转框架	2聚丙烯片
[0088]	3电压放大器	4支撑条
[0089]	5固定基座	6移动基座
[0090]	7转动轴承	8支撑辐条
[0091]	9电源	10数据采集卡
[0092]	11无线传输模块	12旋转圆盘
[0093]	13第一步进电机	14多级液压升降缸
[0094]	15位移传感器	16底座
[0095]	17控制模块	18第一角度传感器

[0096]	19基座移动槽	20限位滑轨
[0097]	21移动内套杆	22移动外套杆
[0098]	23夹紧螺栓	24转动内套杆
[0099]	25转动外套杆	26内六角螺栓
[0100]	27六角螺母	28垫片
[0101]	29基座滑轨孔	30第二角度传感器
[0102]	31旋转从动齿轮	32主动齿轮
[0103]	33转动外轮	34第二步进电机
[0104]	41应变片	42粘贴胶片
[0105]	a第一应变片	b第二应变片
[0106]	c第三应变片	d第四应变片
[0107]	0三维坐标系原点	

具体实施方式

[0108] 下面结合附图和实施例对本发明进行进一步说明。

[0109] 如图1所示,一种基于微应变的风场检测装置,包括支撑条旋转机构、水平旋转机构、测风间距调节机构、高度自动调节机构和控制机构。

[0110] 所述水平旋转机构和支撑条旋转机构共同构成风向自动调节单元。其中,所述水平旋转机构包括旋转框架1、旋转圆盘12、第一步进电机13和第一角度传感器18。所述旋转框架1为一横截面为正方形的长方体框架,包括水平设置的上层正方形架和下层正方形架,以及四个分别竖直固接在上层正方形架与下层正方形架的四个角部之间的连接柱。

[0111] 所述旋转圆盘12的下端面通过法兰盘铰接固定在第一步进电机13的输出轴上,旋转圆盘12的边缘通过多个支撑辐条8与旋转框架1的下层正方形架固接。所述第一角度传感器18的两部分分别固定在第一步进电机13及旋转圆盘12的下端面上。

[0112] 优选地,所述旋转圆盘12的边缘通过四条支撑辐条8分别与旋转框架1的下层正方形架的四个角部固接。

[0113] 所述支撑条旋转机构包括支撑条4、固定基座5、移动基座6、转动轴承7、第二角度传感器30、旋转从动齿轮31、主动齿轮32、转动外轮33和第二步进电机34。所述旋转框架1的上层正方形架中的两个相对的横梁上沿横梁的长度方向设有基座移动槽19,所述基座移动槽19上设有限位滑轨20。

[0114] 一对固定基座5分别固定在两个横梁的基座移动槽19的中部,偶数对移动基座6通过移动基座6底部设置的基座滑轨孔29可水平移动地设置在基座移动槽19中的限位滑轨20上,且偶数对移动基座6以两个固定基座5之间的连线呈对称分布。

[0115] 每个固定基座5和每个移动基座6内均设有转动轴承7;两个相互对应的固定基座5的转动轴承7之间,以及每两个相互对应的移动基座6的转动轴承7之间均固接有一根支撑条4。每根支撑条4上布置多个聚丙烯片2和多个与聚丙烯片2一一对应的电压放大器3,各支撑条4上的多个聚丙烯片2在平面内呈 $n \times n$ 等距阵列分布。所述聚丙烯片2的表面上通过粘贴胶片42粘贴有多对平行且正反交替排列的应变片41,各应变片41采用差动全桥连接的连接方式与电压放大器3连接。

[0116] 如图2所示,每个固定基座5的外侧均设有一个与固定基座5内的转动轴承7连接的旋转从动齿轮31,每个移动基座6外侧均设有一个与移动基座6内的转动轴承7连接的转动外轮33;位于同一侧的一个旋转从动齿轮31和多个转动外轮33之间通过一长度可调的转动连接杆连接。所述主动齿轮32与旋转从动齿轮31相互啮合,主动齿轮32与固接在旋转框架1的上层正方形架的横梁上的第二步进电机34的输出轴连接。当第二步进电机34驱动主动齿轮32转动时,主动齿轮32带动旋转从动齿轮31转动,旋转从动齿轮31通过转动连接杆带动转动外轮33同步转动,使得与旋转从动齿轮31和转动外轮33连接的转动轴承7同步转动,进而使支撑条4同步转动。所述第二角度传感器30的两部分分别固定在固定基座5和旋转从动齿轮31上。

[0117] 优选地,所述转动连接杆包括一转动内套杆24和两个分别套接在转动内套杆24两端的转动外套杆25,转动内套杆24与转动外套杆25之间通过内六角螺栓26、六角螺母27及前后两个垫片28进行夹紧定位,其中,转动内套杆24铆接在旋转从动齿轮31上,两个转动外套杆25分别铆接在两个转动外轮33上。

[0118] 所述测风间距调节机构固接在固定基座5与移动基座6之间,能够改变移动基座6与固定基座5之间的相对距离,进而改变相邻的支撑条4之间的相对距离,实现所测风距的改变。

[0119] 优选地,所述测风间距调节机构包括移动内套杆21和套接在移动内套杆21外侧的移动外套杆22,移动内套杆21可在移动外套杆22内滑动,并可以通过夹紧螺栓23夹紧定位;所述移动内套杆21的末端和移动外套杆22的末端分别固接在固定基座5和移动基座6上。

[0120] 优选地,所述移动内套杆21和转动内套杆24上都标有刻度,方便套杆定位。

[0121] 所述高度自动调节机构包括多级液压升降缸14、位移传感器15和底座16。所述多级液压升降缸14竖直地安装在底座16上,多级液压升降缸14的活塞杆端与第一步进电机13的底端固接;所述位移传感器15固定在第一步进电机13的底端。

[0122] 所述多级液压升降缸14中的每个下级液压升降缸的内部均设有移动轨,每个上级液压升降缸的底部均设有与移动轨相配合的轨槽,限制液压缸转动,使多级液压升降缸14仅能垂直升降。

[0123] 所述控制机构包括设置在旋转圆盘12上的电源9、数据采集卡10、无线传输模块11和控制模块17。

[0124] 每个聚丙烯片2上的应变片41均通过导线与一个电压放大器3连接,每个电压放大器3通过导线均与数据采集卡10连接;数据采集卡10可同时采集多组电压数据,并通过无线传输模块11传送至远程电脑端记录并绘制风场图。

[0125] 所述电源9分别为每个电压放大器3、数据采集卡10、无线传输模块11、第一步进电机13、多级液压升降缸14、位移传感器15、控制模块17、第一角度传感器18、第二角度传感器30和第二步进电机34供电。

[0126] 所述控制模块17控制多级液压升降缸14、第一步进电机13及第二步进电机34,接收位移传感器15、第一角度传感器18和第二角度传感器30的监测数据,并通过无线传输模块11与远程电脑端通讯。

[0127] 如图3所示,所述聚丙烯片2的表面上通过粘贴胶片42粘贴有两对平行且正反交替排列的应变片41,依次为:第一应变片a、第二应变片b、第三应变片c和第四应变片d;其中,

第一应变片a和第三应变片c为正面粘贴,第二应变片b和第四应变片d为反面粘贴。

[0128] 所述应变片41为长条形应变片,优选地,所述应变片41的长度为5cm;长度过短阻值变化不明显,过长则会使聚丙烯片的面积增大,降低测量精度。应变片41采用差动全桥连接,电路连接方式如图4所示,相比于单桥与差动半桥连接有着更为优越的灵敏度,所测电压变化精度更为精确。其中,输出电压差为U,电源提供给电压为E,电源、应变片的连接端口均与电压放大器3相连,电源正极接电压放大器3的VCC端,电源负极接GND端。E、U两端分别与电压放大器3的P端四个接口相连,所有电压放大器3的out端接入数据采集卡10传输压差信号U,数据采集卡10仅需一个端口连接GND。

[0129] 无风时,聚丙烯片2处于水平状态,调节电压放大器3的阻值使输出电压差U为0,当风向沿三维坐标系Z轴正方向时,各聚丙烯片2及应变片41均向下弯曲,正面粘贴的第一应变片a和第三应变片c发生拉伸,阻值增大,反面粘贴的第二应变片b和第四应变片d发生压缩,阻值减小,输出电压差U为正;当风向沿Z轴负方向时,应变片41均向上弯曲,正面粘贴的第一应变片a和第三应变片c发生压缩,阻值减小,反面粘贴的第二应变片b和第四应变片d发生拉伸,阻值增大,输出电压差U为负。因此,输出电压差U的正负代表着相反的风向。理论上,风速v与输出电压差U的关系为:

$$[0130] \quad U = \frac{2EE^*K^*(1+2\mu)}{r_0v^2} \Delta \left(\frac{r_0v^2}{2E^*} \right) \quad \text{公式 1}$$

[0131] 式中,U为输出电压差,E为电源提供给电压,E*为聚丙烯片形变模型标定系数,K*为应变片的长度相对形变量与聚丙烯片垂直面方向上相对变形量间的相关系数, μ 为应变片材料的泊松比, r_0 为最大风速时状态下空气密度,v为可承受最大风速。 $\Delta \left(\frac{r_0v^2}{2E^*} \right)$ 为受风压状

态下聚丙烯片垂直面方向上变形量,向下弯曲为负值,向上弯曲为正值,其中 r_0 为受风压状态下空气密度,v为风速变化量,E*为该状态下聚丙烯片形变模型标定系数。

[0132] 所述基于微应变的风场检测装置的工作方式:

[0133] 检测前,需确定目标检测点,目标检测点必须为 3×3 、 5×5 或 7×7 等等距阵列点,其阵列中心点为0,相邻两点间距为检测距离d,每点布置一组聚丙烯片2及电压放大器3,且对应需要相应数量的支撑条旋转机构及测风间距调节机构,并粘贴至目标位置固定。

[0134] 以图1为例,为 3×3 等距布置,则支撑条旋转机构包括三根支撑条4。在调节间距时,通过调节左右两侧移动基座6与中间固定基座5的距离来确定测风点间距。如图2所示,调节两基座距离来调节两支撑条距离,右侧及中间支撑条4的距离等于其右侧移动基座6与固定基座5距离,同时又等于右侧转动外轮33、旋转从动齿轮31分别与转动内套杆24、转动外套杆25铆接点中心的距离。先松开右侧两个夹紧螺栓23及内六角螺栓25,通过改变转动内套杆24、转动外套杆25的相对距离达到目标距离,再通过拧紧内六角螺栓26进行限定转动套杆的移动。为保证右侧转动外轮33和旋转从动齿轮31的同步转动,移动外套杆22与转动内套杆21的配合总长度应满足与目标距离差值为转动轴承7中心与固定基座6右侧壁的水平距离。然后拧紧两侧夹紧螺栓23,限定右侧移动基座6的移动。同理,左侧移动基座距离调节与右侧移动基座距离方式相同,需要保证两侧对称布置。

[0135] 为实现旋转框架高度的自动调节,首先启动电源9,采用无线传输模块11接收远程

电脑端信号,由控制模块17传送指令给多级液压升降缸14,加压升高高度,减压降低高度,位移传感器15实时监测高度信息传送给控制模块17,再由无线传输模块11实时传输给远程电脑端显示,达到目标高度即停止升降。

[0136] 风场检测时,首先将风场检测装置回至初始状态,启动电源9,远程电脑端向控制模块17发送指令,控制多级液压升降缸14调节至检测高度,位移传感器15实时监测高度并经控制模块17反馈给远程电脑端;远程电脑端向控制模块17发送指令,控制第一步进电机13和第二步进电机34回至初始转角,第一角度传感器18和第二角度传感器30分别实时监测水平旋转机构转动至水平初始转角 α_0 和支撑条旋转机构转动至支撑条初始转角 β_0 并实时经控制模块17反馈给电脑端,九组聚丙烯片2旋至水平状态根据坐标系标定方式确立坐标系XYZ;初始状态下可进行Z轴方向风速检测,聚丙烯片2处于XOY平面;检测Y轴方向风速时,支撑条旋转机构需顺时针旋转 90° ,使聚丙烯片2处于XOZ平面,由电脑端发送指令经由无线传输模块11发送至控制模块17,控制模块17控制第二步进电机34逆时针转动,第二步进电机34驱动主动齿轮32转动,旋转从动齿轮31通过转动内套杆24和转动外套杆25带动两侧转动外轮33同步转动,角度传感器30实时监测支撑条4转动的角度,反馈给控制模块17,并通过无线传输模块11传送到远程电脑端显示;检测X轴方向风速时,在支撑条旋转机构顺时针旋转 90° 后,需要调节水平旋转机构顺时针旋转 90° ,聚丙烯片2处于YOZ平面,由电脑端发送指令经由无线传输模块11发送至控制模块17,控制模块17控制第一步进电机13顺时针转动,带动旋转圆盘12及整个旋转框架1绕第一步进电机13输出轴中心一同转动,第一角度传感器18实时监测旋转框架1转动的角度,反馈给控制模块17,并通过无线传输模块11传送到远程电脑端显示。其中,在第二步进电机34转动时转动内套杆24和转动外套杆25始终处于水平状态,两个转动外轮33、旋转从动齿轮31带动各自连接的转动轴承7及支撑条4转动相同角度,从而保证了三个支撑条4及九个聚丙烯片2始终互相平行,在聚丙烯片2随着不同风压而发生不同程度的弯曲变形,风速越大,变形越大。应变片随聚丙烯片2感知风场发生变化,应变片弯曲程度越大,电阻值变化越大,输出电压差值U也越大,输出电压差U的正负代表相反的风向。九个电压放大器3将压差信号传输至数据采集卡10,数据采集卡10同时采集九组数据,并通过无线传输模块11传送到远程电脑端记录并绘制风场图。检测结束后,使聚丙烯片2旋转至竖直状态,防止因长期未使用受重力影响导致聚丙烯片下垂。

[0137] 一种在线风场检测方法,包括如下步骤:

[0138] a、建立风场检测装置的三维坐标系:

[0139] 标定风场检测装置三维坐标系如图1所示,X方向视图为风场检测装置正视图。

[0140] 将风场检测装置调至初始状态:多级液压升降缸14处于最高高度,第一角度传感器18的水平初始转角为 α_0 ,第二角度传感器30的支撑条初始转角为 β_0 ,聚丙烯片2处于水平状态;

[0141] 将聚丙烯片2所在水平面上的旋转框架1中心点设为三维坐标系原点O。X轴平行于支撑条4,正方向向后。Y轴垂直于支撑条4,正方向向左。Z轴垂直于XOY水平面,正方向向下。坐标系不随旋转发生变化,水平旋转机构和支撑条旋转机构顺、逆时针旋转分别由沿Z、X正方向观测确定。

[0142] b、建立不同风向的风速v与输出电压差U的简化关系模型:

[0143] b1、将风速仪设置在距转速可调风机的出风口一定测试距离(优选20厘米)处,分

别测定 n 个逐级递增的风速 v_i ($i=0,1,2,3\cdots n$), 风速范围为 $0\sim 10\text{m/s}$, 其中当 $v_0=0$ 时, 调节电压放大器3的阻值, 使输出电压差 U 为0, 即 $U_0=0$ 。

[0144] b2、将风机以所述测试距离, 分别向任一水平状态下的聚丙烯片2沿Z轴正方向和Z轴负方向各吹出测定的 n 个风速 v_i 逐级递增的风, 以及分别向任一竖直状态下的聚丙烯片2沿Y轴正方向和Y轴负方向各吹出测定的 n 个风速 v_i 逐级递增的风; 过程中, 通过数据采集卡10采集相应的电压放大器3数据, 获得不同风向下风速 v_i 对应的输出电压差 U_i , 最终分别获得以公式2表示的Z轴正方向、Z轴负方向、Y轴正方向、Y轴负方向、X轴正方向和X轴负方向的风速 v 与输出电压差 U 的关系模型; 因为检测X轴向风速时, 聚丙烯片2与检测Y轴方向风速同属于竖直状态布置, 所以, X轴正方向与Y轴正方向的关系模型相同, X轴负方向与Y轴负方向的关系模型相同。将获得的不同风向下 n 个不同风速值和输出的电压差信号进行多项式拟合, 建立风速 v 与输出电压差 U 的模型, 并确定误差修正系数 k_j :

[0145] $v=k_j U$ ($j=1,2,3,4$) 公式2

[0146] 式中, v 为风速, 单位是 m/s ; U 为电压放大器3的输出电压差, 单位是 V ; k_j 为不同风向的误差修正系数, k_1 为竖直正方向 (即Z轴正方向) 风向标定系数, k_2 为竖直负方向 (即Z轴负方向) 风向标定系数, k_3 为水平正方向 (即X、Y轴正方向) 风向标定系数, k_4 为水平负方向 (即X、Y轴负方向) 风向标定系数。

[0147] 优选地, 由于风机的风扇间存在间隔, 产生的风速 v_i 存在微小脉动, 所得输出电压差 U_i 为有微小变化的连续值, 取单位时间内测得的多个输出电压差值, 取其平均值作为精确值 U_i ;

[0148] 所述步骤b2的具体过程如下:

[0149] b2.1、将风机移至任一水平状态的聚丙烯片2的正上方测试距离 (20厘米) 处, 依次向下吹出 n 个风速 v_i 逐级递增的风, 在风速为 v_i 时, 聚丙烯片2协同应变片41向下弯曲发生变形, 应变片41阻值变化, 输出差动电压发生变化, 数据采集卡10采集电压放大器3的电压数据, 并通过无线传输模块11将不同风速 v_i 对应的输出电压差 U_i 传送至远程电脑端显示并记录, 远程电脑端根据公式2获得Z轴正方向的风速 v 与输出电压差 U 的多项式拟合关系模型: $v=k_1 U$ 。

[0150] b2.2、将风机改移至任一水平状态的聚丙烯片2的正下方测试距离 (20厘米) 处, 依次向上吹出 n 个风速 v_i 逐级递增的风, 其他操作均与步骤b2.1相同, 此时电压风速均为负值, 获得Z轴负方向的风速 v 与输出电压差 U 的多项式拟合关系模型: $v=k_2 U$ 。

[0151] b2.3、将风机改为沿Y轴正方向吹风, 测试距离不变, 支撑条4顺时针旋转 90° , 将聚丙烯片2调至竖直向下且垂直于Y轴, 其他操作均与步骤b2.1相同, 此时电压风速均为正值, 获得Y轴正方向的风速 v 与输出电压差 U 的多项式拟合关系模型: $v=k_3 U$ 。X轴正方向与Y轴正方向的关系模型相同。

[0152] b2.4、将风机改为沿Y轴负方向吹风, 其他操作均与步骤b2.1相同, 此时电压风速均为负值, 获得Y轴负方向的风速 v 与输出电压差 U 的多项式拟合关系模型: $v=k_4 U$ 。X轴负方向与Y轴负方向的关系模型相同。

[0153] c、风场检测:

[0154] c1、将调至初始状态的风场检测装置放置在待测风场的检测位置, 同时记录每个聚丙烯片2在三维坐标系中的检测坐标;

[0155] c2、分别记录每个检测坐标所对应的各水平状态的聚丙烯片2的Z轴方向的输出电压差 U_z 、各竖直状态的聚丙烯片2的Y轴方向的输出电压差 U_y 以及X轴方向的输出电压差 U_x ；根据各 U_z 、 U_y 和 U_x 的值的正负，选择步骤b获得的Z轴正方向、Z轴负方向、Y轴正方向、Y轴负方向、X轴正方向和X轴负方向的风速 v 与输出电压差 U 的关系模型，分别获得各检测坐标所对应的Z轴方向的风速 v_z 、Y轴方向的风速 v_y 和X轴方向的风速 v_x ；

[0156] c3、通过公式3和公式4计算获得各检测坐标的风速风向 $\vec{v}$ 及风速的大小 $\|\vec{v}\|$ ，

$$[0157] \quad \vec{v} = (v_x, v_y, v_z) \quad \text{公式 3}$$

$$[0158] \quad \|\vec{v}\| = \sqrt{v_x^2 + v_y^2 + v_z^2} \quad \text{公式 4}$$

[0159] 式中， v_z 为Z轴方向风速， v_y 为Y轴方向风速， v_x 为X轴方向风速，单位为m/s。 $\vec{v}$ 为三维向量，包含风向和风速值信息； v_x 、 v_y 、 v_z 包含正负方向信息和风速大小。

[0160] 所述步骤c2的具体过程如下：

[0161] 1) 水平状态的聚丙烯片2能够检测Z轴方向的风场风速 v_z ，每个检测坐标所对应的聚丙烯片2协同应变片41感知风场发生弯曲变形，应变片41阻值变化，输出差动电压发生变化，数据采集卡10采集各电压放大器3的电压数据，并通过无线传输模块11将各检测坐标所对应的Z轴方向的输出电压差 U_z 传送至远程电脑端，远程电脑端根据步骤b的Z轴正方向或Z轴负方向的风速 v 与输出电压差 U 的关系模型，将 U_z 转换为 v_z ，并记录数据。其中， U_z 的值为正时，使用误差修正系数为 k_1 的Z轴正方向关系模型计算风速，风向沿Z轴正方向； U_z 的值为负时，使用误差修正系数为 k_2 的Z轴负方向模型计算风速，风向沿Z轴负方向；

[0162] 2) 为检测Y轴方向的风速 v_y ，支撑条4顺时针旋转 90° ，将聚丙烯片2调至竖直向下且垂直于Y轴且平行于X轴，同理可获得各检测坐标所对应的Y轴方向的输出电压差 U_y ，远程电脑端根据步骤b的Y轴正方向或Y轴负方向的风速 v 与输出电压差 U 的关系模型，将 U_y 转换为 v_y ，并记录数据。其中， U_y 的值为正时，使用误差修正系数为 k_3 的Y轴正方向模型计算风速，风向沿Y轴正方向； U_y 的值为负时，使用误差修正系数为 k_4 的Y轴负方向模型计算风速，风向沿Y轴负方向。

[0163] 3) 为检测X轴方向风速 v_x ，聚丙烯片2保持竖直状态，水平旋转机构顺时针旋转 90° ，使聚丙烯片2垂直于X轴且平行于Y轴，此时原聚丙烯片2位置发生变化，但每个检测坐标任然与一个新的聚丙烯片2相对应；同理可获得各检测坐标所对应的X轴方向的输出电压差 U_x ，远程电脑端根据步骤b的X轴正方向或X轴负方向的风速 v 与输出电压差 U 的关系模型，将 U_x 转换为 v_x ，并记录数据。其中， U_x 的值为正时，使用误差修正系数为 k_3 的X轴正方向模型计算风速，风向沿X轴正方向； U_x 的值为负时，使用误差修正系数为 k_4 的X轴负方向模型计算风速，风向沿X轴负方向。

[0164] 优选地，所述步骤c1中，通过远程控制多级液压升降缸14调节风场检测装置的检测高度，实现不同水平面的风场检测。

[0165] 优选地，所述步骤c1中，通过调节测风间距调节机构以及支撑条4上的聚丙烯片2的间隔距离，实现所测风距的改变。

[0166] 在评价风场时，风场的均匀性至关重要，在风洞试验中需检测其水平方向风速的

均匀性,在无人机旋翼气流中则需检测竖直方向风速均匀性,本发明的风场检测装置可对任意风向风速进行检测,并进行均匀性评价。

[0167] 一种在线风场分布均匀性评价方法,包括:

[0168] a、建立风场检测装置的三维坐标系:

[0169] 标定风场检测装置三维坐标系如图1所示,X方向视图为风场检测装置正视图。

[0170] 将风场检测装置调至初始状态:多级液压升降缸14处于最高高度,第一角度传感器18的水平初始转角为 α_0 ,第二角度传感器30的支撑条初始转角为 β_0 ,聚丙烯片2处于水平状态;

[0171] 将聚丙烯片2所在水平面上的旋转框架1中心点设为三维坐标系原点O。X轴平行于支撑条4,正方向向后。Y轴垂直于支撑条4,正方向向左。Z轴垂直于XOY水平面,正方向向下。坐标系不随旋转发生变化,水平旋转机构和支撑条旋转机构顺、逆时针旋转分别由沿Z、X正方向观测确定。

[0172] b、建立不同风向的风速 v 与输出电压差 U 的简化关系模型:

[0173] b1、将风速仪设置在距转速可调风机的出风口一定测试距离(优选20厘米)处,分别测定 n 个逐级递增的风速 v_i ($i=0,1,2,3\cdots n$),风速范围为 $0\sim 10\text{m/s}$,其中当 $v_0=0$ 时,调节电压放大器3的阻值使输出电压差 U 为0,即 $U_0=0$ 。

[0174] b2、将风机以所述测试距离,分别向任一水平状态下的聚丙烯片2沿Z轴正方向和Z轴负方向各吹出测定的 n 个风速 v_i 逐级递增的风,以及分别向任一竖直状态下的聚丙烯片2沿Y轴正方向和Y轴负方向各吹出测定的 n 个风速 v_i 逐级递增的风;过程中,通过数据采集卡10采集相应的电压放大器3数据,获得不同风向下风速 v_i 对应的输出电压差 U_i ,最终分别获得以公式2表示的Z轴正方向、Z轴负方向、Y轴正方向、Y轴负方向、X轴正方向和X轴负方向的风速 v 与输出电压差 U 的关系模型;因为检测X轴向风速时,聚丙烯片2与检测Y轴方向风速同属于竖直状态布置,所以,X轴正方向与Y轴正方向的关系模型相同,X轴负方向与Y轴负方向的关系模型相同。将获得的不同风向下 n 个不同风速值和输出的电压差信号进行多项式拟合,建立风速 v 与输出电压差 U 的模型,并确定误差修正系数 k_j :

[0175] $v=k_j U$ ($j=1,2,3,4$) 公式2

[0176] 式中, v 为风速,单位是 m/s ; U 为电压放大器3的输出电压差,单位是 V ; k_j 为不同风向的误差修正系数, k_1 为竖直正方向(即Z轴正方向)风向标定系数, k_2 为竖直负方向(即Z轴负方向)风向标定系数, k_3 为水平正方向(即X、Y轴正方向)风向标定系数, k_4 为水平负方向(即X、Y轴负方向)风向标定系数。

[0177] 优选地,由于风机的风扇间存在间隔,产生的风速 v_i 存在微小脉动,所得输出电压差 U_i 为有微小变化的连续值,取单位时间内测得的多个输出电压差值,取其平均值作为精确值 U_i ;

[0178] 所述步骤b2的具体过程如下:

[0179] b2.1、将风机移至任一水平状态的聚丙烯片2的正上方测试距离(20厘米)处,依次向下吹出 n 个风速 v_i 逐级递增的风,在风速为 v_i 时,聚丙烯片2协同应变片41向下弯曲发生变形,应变片41阻值变化,输出差动电压发生变化,数据采集卡10采集电压放大器3的电压数据,并通过无线传输模块11将不同风速 v_i 对应的输出电压差 U_i 传送至远程电脑端显示并记录,远程电脑端根据公式2获得Z轴正方向的风速 v 与输出电压差 U 的多项式拟合关系模型: v

$=k_1U$ 。

[0180] b2.2、将风机改移至任一水平状态的聚丙烯片2的正下方,测试距离(20厘米)处,依次向上吹出n个风速 v_i 逐级递增的风,其他操作均与步骤b2.1相同,此时电压风速均为负值,获得Z轴负方向的风速 v 与输出电压差 U 的多项式拟合关系模型: $v=k_2U$ 。

[0181] b2.3、将风机改为沿Y轴正方向吹风,测试距离不变,支撑条4顺时针旋转 90° ,将聚丙烯片2调至竖直向下且垂直于Y轴,其他操作均与步骤b2.1相同,此时电压风速均为正值,获得Y轴正方向的风速 v 与输出电压差 U 的多项式拟合关系模型: $v=k_3U$ 。X轴正方向与Y轴正方向的关系模型相同。

[0182] b2.4、将风机改为沿Y轴负方向吹风,其他操作均与步骤b2.1相同,此时电压风速均为负值,获得Y轴负方向的风速 v 与输出电压差 U 的多项式拟合关系模型: $v=k_4U$ 。X轴负方向与Y轴负方向的关系模型相同。

[0183] c、风场的分布均匀性评价:

[0184] 将风场检测装置回至初始状态,根据目标检测风向 (x, y, z) ,通过公式5和公式6计算确定水平旋转机构应调整的水平转角 α 和支撑条旋转机构应调整的支撑条转角 β ;

$$[0185] \quad \alpha = \arctan \frac{x}{y} \quad \text{公式 5}$$

$$[0186] \quad \beta = \arctan \frac{\sqrt{x^2 + y^2}}{z} \quad \text{公式 6}$$

[0187] 式中, α 、 β 的单位为度。

[0188] 然后通过第一步进电机13和第二步进电机34分别驱动水平旋转机构和支撑条旋转机构转动相应的角度,使得各检测坐标的聚丙烯片2与所检测风场的风向 (x, y, z) 垂直;其中, α 为正值时,水平旋转机构顺时针转动, α 为负值时,水平旋转机构逆时针转动; β 为正值时,支撑条旋转机构顺时针转动, β 为负值时,支撑条旋转机构逆时针转动。

[0189] 各聚丙烯片2协同应变片41感知风场发生弯曲变形,应变片41阻值变化,输出差动电压发生变化,数据采集卡10采集各电压放大器3的电压数据,并通过无线传输模块11将输出电压差信号 U 传送至远程电脑端,远程电脑端通过公式7计算第 m 个聚丙烯片2对应的风速值 $\|\vec{v}_m\|$ 。

$$[0190] \quad \|\vec{v}_m\| = \sqrt{(k_m U_m \cos \beta)^2 + (k_m^* U_m \sin \beta)^2} \quad \text{公式 7}$$

[0191] 式中, $\|\vec{v}_m\|$ 为第 m 个检测点的风速值,单位为m/s; U_m 为第 m 个检测点的输出电压差,单位为V; β 为支撑条旋转机构转动角度,单位为度, $\vec{v}_m$ 方向为 (x, y, z) 。

[0192] k_m 为第 m 个检测点的误差修正系数,其确定方式为:

[0193] $k_m U_m \cos \beta$ 为 $\vec{v}_m$ 的竖直分速度,其中 $U_m \cos \beta$ 为 U_m 的竖直分电压,当 $U_m \cos \beta$ 为正时,使用误差修正系数为 k_1 关系模型计算竖直方向风速,当 $U_m \cos \beta$ 为负时,则使用误差修正系数为 k_2 关系模型。

[0194] $k_m^* U_m \sin \beta$ 为 $\vec{v}_m$ 的水平分速度,其中 $U_m \sin \beta$ 为 U_m 的水平分电压,当 $U_m \sin \beta$ 为正时,使

用误差修正系数为 k_3 关系模型计算水平方向风速,当 $U_m \sin \beta$ 为负时则使用误差修正系数为 k_4 关系模型。

[0195] 通过公式8计算各聚丙烯片2的风速标准差,然后通过公式9计算各聚丙烯片2的风速分布变异系数:

$$[0196] \quad S = \sqrt{\frac{\sum_{m=1}^q (\|\vec{v}_m\| - \bar{v})^2}{q-1}} \quad \text{公式 8}$$

$$[0197] \quad CV = \frac{S}{\bar{v}} \times 100\% \quad \text{公式 9}$$

[0198] 式中, S 为各聚丙烯片2的风速标准差, $\bar{v}$ 为风速平均值, $\|\vec{v}_m\|$ 为第 m 个检测点的风速值,单位均为 m/s ; q 为所检测点的总个数; CV 为聚丙烯片2所处平面内各点风速分布变异系数,其单位为%。

[0199] 优选地,通过远程控制多级液压升降缸14调节风场检测装置的检测高度,以获取更多点的风速值,代入公式7和公式8计算空间内各平面的风速标准差及风速分布变异系数。

[0200] 风速分布变异系数 CV 及标准差 S 越小,表明风场风速越均匀。对于风洞试验等对风速均匀性要求较高的风场,如果风速分布变异系数 CV 超过10%,则需要对风场结构进行优化,提高风场风速的均匀性。

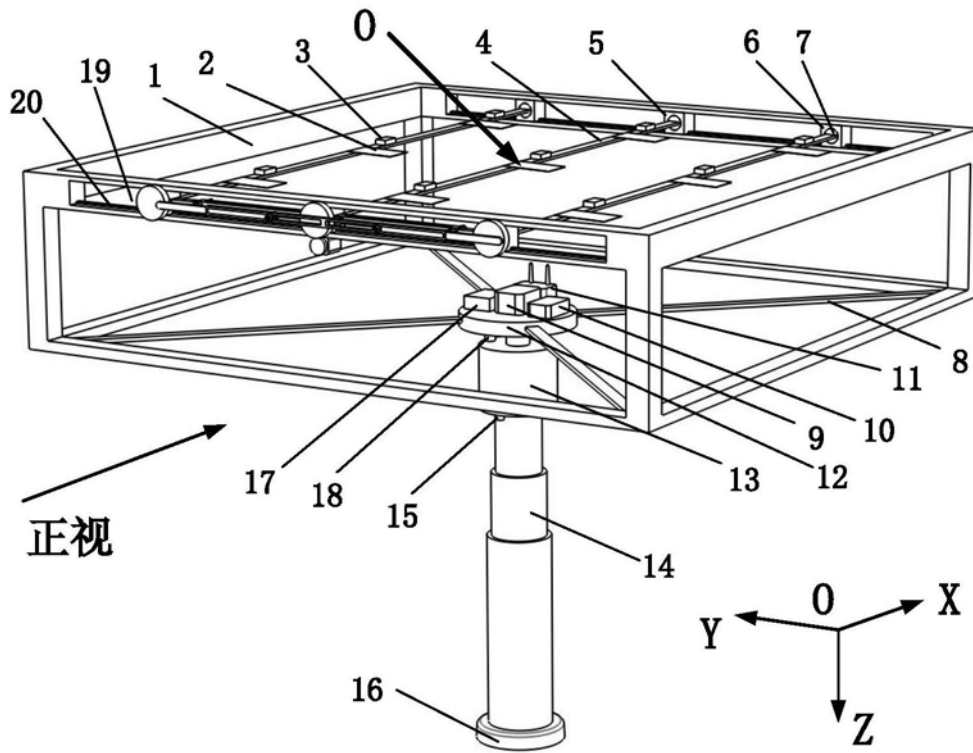


图1

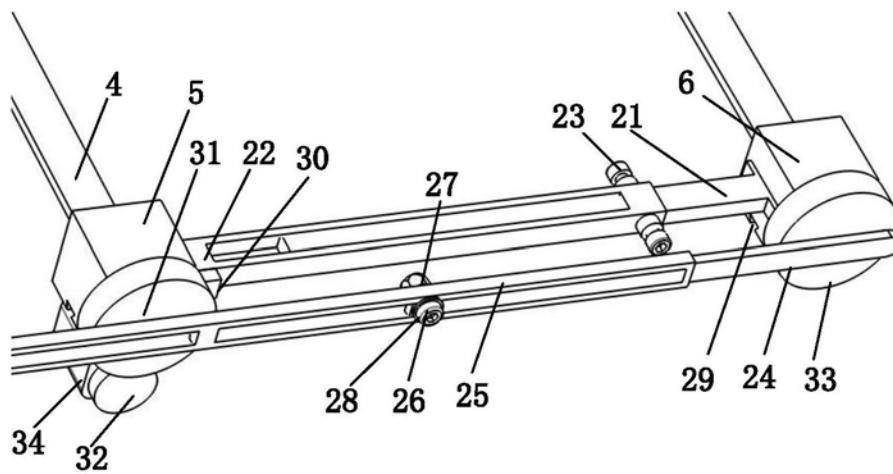


图2

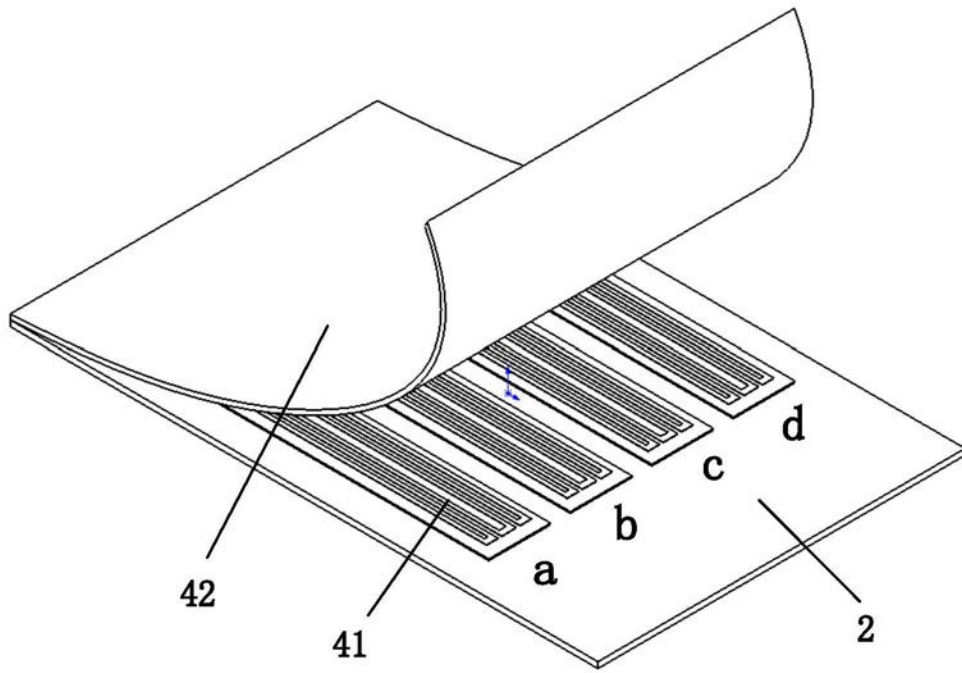


图3

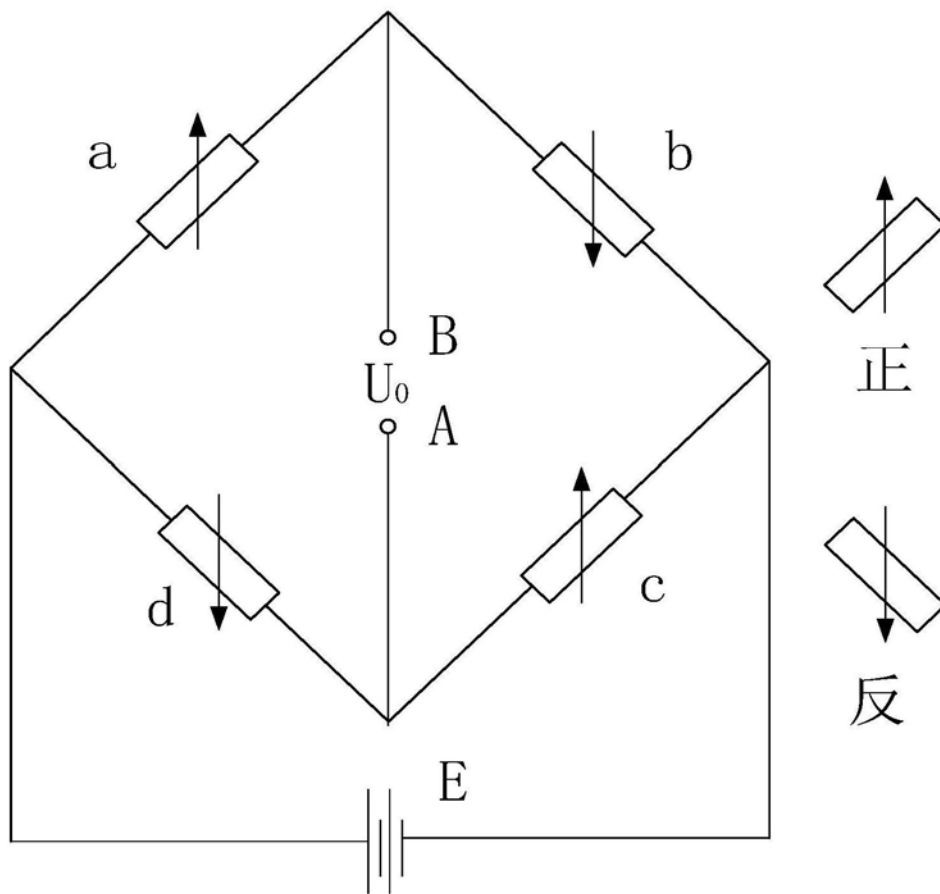


图4