



(12) 发明专利申请

(10) 申请公布号 CN 103309355 A

(43) 申请公布日 2013. 09. 18

(21) 申请号 201310187795. 7

(22) 申请日 2013. 05. 20

(71) 申请人 哈尔滨工业大学

地址 150001 黑龙江省哈尔滨市南岗区西大直街 92 号

(72) 发明人 陈兴林 王伟峰 张旭 李聪
刘杨

(74) 专利代理机构 哈尔滨市松花江专利商标事
务所 23109

代理人 张宏威

(51) Int. Cl.

G05D 3/00 (2006. 01)

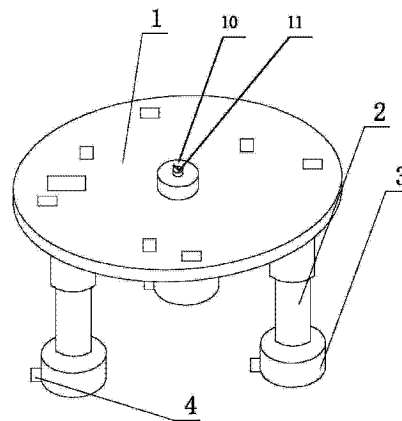
权利要求书3页 说明书13页 附图7页

(54) 发明名称

多轴支撑气浮平台的质心偏移容许干扰的测量与监控方法

(57) 摘要

多轴支撑气浮平台的质心偏移容许干扰的测量与监控方法,属于超精密仪器设备平台技术领域。本发明为了解决现有支撑平台的调平状态受限,应用范围狭窄的问题。它首先设定质心偏移量阈值,然后将质心偏移量 $G(x_0, y_0)$ 与质心偏移量阈值进行比较,当质心偏移量 $G(x_0, y_0)$ 小于质心偏移量阈值时,对支撑腿的伸缩长度进行补偿;当质心偏移量 $G(x_0, y_0)$ 大于质心偏移量阈值时,通过控制气足的喷嘴喷气使承载平台在水平混凝土基座上平动,跟随承载平台上负载的运动以调整相对位移量 (x_2, y_2) ,直到将质心偏移量 $G(x_0, y_0)$ 调至质心偏移量阈值范围之内。本发明用于气浮平台的质心偏移容许干扰的测量与监控。



1. 一种多轴支撑气浮平台的质心偏移容许干扰的测量与监控方法,其特征在于,所述多轴支撑气浮平台包括承载平台(1),三条支撑腿(2)、三个气浮筒(3)和三个气足(4),

所述承载平台(1)为圆形平台,承载平台(1)由三条支撑腿(2)支撑,三条支撑腿(2)与承载平台(1)下表面的三个连接点构成等边三角形,并且该等边三角形的中心与承载平台(1)的圆心重合;

每条支撑腿(2)的末端连接一个气浮筒(3),每个气浮筒(3)的底端通过气浮球轴承连接一个气足(4);

承载平台(1)上表面安装一个平面光栅(7-1),该平面光栅(7-1)读数头与承载平台(1)上的负载固联;

所述测量与监控方法首先设定质心偏移量阈值,然后将质心偏移量 $G(x_0, y_0)$ 与质心偏移量阈值进行比较,

当质心偏移量 $G(x_0, y_0)$ 小于质心偏移量阈值时,按下述方法对支撑腿(2)的伸缩长度进行补偿:

所述质心偏移量 $G(x_0, y_0)$ 的获得方法为:以承载平台(1)的圆心为原点建立两面直角坐标系,承载平台(1)的质心坐标为 $(0, 0)$,将 $G(x_0, y_0)$ 作为承载平台(1)与其上负载整体的质心,其中 x_0 为质心偏移量 $G(x_0, y_0)$ 在空间坐标系中X轴方向的坐标, y_0 为质心偏移量 $G(x_0, y_0)$ 在空间坐标系中Y轴方向的坐标,采用平面光栅(7-1)测得承载平台(1)上面负载与承载平台(1)的相对位移量 (x_2, y_2) ,则有:

$$\begin{cases} x_0 = \frac{M_1 x_1 + M_2 x_2}{M_1 + M_2} = \frac{M_2 x_2}{M_1 + M_2} \\ y_0 = \frac{M_1 y_1 + M_2 y_2}{M_1 + M_2} = \frac{M_2 y_2}{M_1 + M_2} \end{cases},$$

式中 M_1 为承载平台(1)的质量, M_2 为承载平台(1)上负载的质量;

质心偏移量 $G(x_0, y_0)$ 对气足(4)气膜高度的影响按以下方法获得:

设定三条支撑腿(2)与承载平台(1)下表面的三个连接点为A、B和C,其中A点坐标为 $\left(-\frac{1}{2}L, -\frac{\sqrt{3}}{6}L\right)$,B点坐标为 $\left(\frac{1}{2}L, -\frac{\sqrt{3}}{6}L\right)$,C点坐标为 $\left(0, \frac{\sqrt{3}}{3}L\right)$,式中L为三个连接点A、B和C形成的等边三角形的边长,

当气浮平台处于静态平衡状态时,根据力系的主矢和对于坐标轴的主矩为零得到公式:

$$\begin{cases} \sum F_i = 0 \\ \sum M_x(F_i) = 0 \\ \sum M_y(F_i) = 0 \end{cases},$$

式中 $i = 1, 2$ 和 3 , F_1 为对应于A点的支撑腿(2)上的负载力, F_2 为对应于B点的支撑腿(2)上的负载力, F_3 为对应于C点的支撑腿(2)上的负载力; $M_x(F_i)$ 为负载力 F_i 绕X轴的等效转矩, $M_y(F_i)$ 为负载力 F_i 绕Y轴的等效转矩,

将 A、B 和 C 三点坐标代入上述公式得到：

$$\begin{cases} F_1 + F_2 + F_3 - G = 0 \\ -(F_1 + F_2) \cdot \frac{\sqrt{3}}{6} L + F_3 \cdot \frac{\sqrt{3}}{3} L - G \cdot y_0 = 0, \\ F_1 \cdot \frac{1}{2} L - F_2 \cdot \frac{1}{2} L + G \cdot x_0 = 0 \end{cases}$$

求解上式, 获得 F_1 、 F_2 和 F_3 的值：

$$\begin{cases} F_1 = \frac{G}{3} + \frac{\sqrt{3}x_0 - y_0}{\sqrt{3}L} \cdot G \\ F_2 = \frac{G}{3} - \frac{\sqrt{3}x_0 + y_0}{\sqrt{3}L} \cdot G, \\ F_3 = \frac{G}{3} + \frac{2y_0}{\sqrt{3}L} \cdot G \end{cases}$$

由此获得当前对应于 A 点的支撑腿的承重质量 m_1 、对应于 B 点的支撑腿的承重质量 m_2 和对应于 C 点的支撑腿的承重质量 m_3 , m_1 、 m_2 和 m_3 与质心 $G(x_0, y_0)$ 的关系为：

$$\begin{cases} m_1 = \frac{M}{3} + \frac{\sqrt{3}x_0 - y_0}{\sqrt{3}L} \cdot M \\ m_2 = \frac{M}{3} - \frac{\sqrt{3}x_0 + y_0}{\sqrt{3}L} \cdot M, \\ m_3 = \frac{M}{3} + \frac{2y_0}{\sqrt{3}L} \cdot M \end{cases}$$

式中 M 为承载平台 (1) 与其上负载整体的总质量；

最后获得质心偏移量 $G(x_0, y_0)$ 与气足 (4) 的气膜高度矩阵：

$$\begin{bmatrix} h_1 \\ h_2 \\ h_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{G}{LJ} & -\frac{G}{\sqrt{3}LJ} \\ -\frac{G}{LJ} & -\frac{G}{\sqrt{3}LJ} \\ 0 & \frac{2G}{\sqrt{3}LJ} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x_0 \\ y_0 \end{bmatrix} + \frac{G}{3J},$$

式中 h_1 为对应于 A 点的支撑腿 (2) 底部气足的气膜高度, h_2 为对应于 B 点的支撑腿 (2) 底部气足的气膜高度, h_3 为对应于 C 点的支撑腿 (2) 底部气足的气膜高度, G 为承载平台 (1) 与其上负载整体的总重量, J 为支撑腿 (2) 底部气足的气膜刚度；

气足的气膜高度变化使支撑轴 (2) 产生的高度变化通过倾角传感器 (7-4) 或者线阵 CCD (7-3) 的测量信号获得, 对该测量信号进行处理, 获得质心偏移量 $G(x_0, y_0)$ 对承载平台 (1) 倾角干扰信息, 由承载平台 (1) 倾角干扰信息计算获得各个支撑腿 (2) 调平所需的位移量, 由此实现对气浮平台的质心偏移容许干扰的测量与补偿；

当质心偏移量 $G(x_0, y_0)$ 大于质心偏移量阈值时,通过控制气足 (4) 的喷嘴喷气使承载平台 (1) 在水平混凝土基座上平动,跟随承载平台 (1) 上负载的运动以调整相对位移量 (x_2, y_2) ,直到将质心偏移量 $G(x_0, y_0)$ 调至质心偏移量阈值范围之内。

2. 根据权利要求 1 所述的多轴支撑气浮平台的质心偏移容许干扰的测量与监控方法,其特征在于,所述承载平台 (1) 的半径为 2 米,三条支撑腿与承载平台 (1) 下表面的三个连接点构成的等边三角形的顶点距离承载平台 (1) 圆心的距离为 1.4 米。

多轴支撑气浮平台的质心偏移容许干扰的测量与监控方法

技术领域

[0001] 本发明涉及多轴支撑气浮平台的质心偏移容许干扰的测量与监控方法,属于超精密仪器设备平台技术领域。

背景技术

[0002] 在现代社会中,经常需要高平面度的平台,比如在空间交汇对接、地面测量、导航、网络通信和编队控制等全物理仿真试验中,需要支撑整个地面仿真器,为地面仿真实验提供基础平台;为编队卫星地面试验验证、控制算法验证分析等物理仿真试验提供平台支撑。由于平台运动或者是静止时都可能由于大面积水平基座的不平整等原因处于倾斜状态,不利于为负载提供尽可能水平的作业平台保证准确对接,因此需要平台在静止和运动状态都能够被快速、精确的调平,以保证平台足够的水平度。

[0003] 现有技术中,存在各种使用调平机构的工作平台,其调平机构为重力式(自重)调平机构、四杆调平机构或等容积液压缸调平机构。但是,上述调平机构具有许多缺点,例如:

[0004] (1) 重力式调平机构依靠自重来调平工作平台,其由工作平台、支架组成,这种调平机构不稳定,安全系数低,操作员操作舒适性差。

[0005] (2) 四杆调平机构采用的是靠物理中四杆的特性来调平工作平台,它的缺陷是对于结构为伸缩的臂架不适用,应用范围狭窄。

[0006] (3) 等容积液压缸调平机构采用的是在变幅臂处安装被动油缸,工作平台处安装等容积调平液压缸来调平工作平台,其由工作平台、被动油缸、等容积调平液压缸构成。它的缺点是对结构为多级伸缩的臂架不适用,应用范围狭窄。

[0007] 因此,就迫切需要提供一种系统平台,能够在任何状况下,由调平系统调节使工作平台保持为水平状态。

发明内容

[0008] 本发明目的是为了解决现有支撑平台的调平状态受限,应用范围狭窄的问题,提供了一种多轴支撑气浮平台的质心偏移容许干扰的测量与监控方法。

[0009] 本发明所述多轴支撑气浮平台的质心偏移容许干扰的测量与监控方法,所述多轴支撑气浮平台包括承载平台,三条支撑腿、三个气浮筒和三个气足,

[0010] 所述承载平台为圆形平台,承载平台由三条支撑腿支撑,三条支撑腿与承载平台下表面的三个连接点构成等边三角形,并且该等边三角形的中心与承载平台的圆心重合;

[0011] 每条支撑腿的末端连接一个气浮筒,每个气浮筒的底端通过气浮球轴承连接一个气足;

[0012] 承载平台上表面安装一个平面光栅,该平面光栅读数头与承载平台上的负载固联;

[0013] 所述测量与监控方法首先设定质心偏移量阈值,然后将质心偏移量 $G(x_0, y_0)$ 与质

心偏移量阈值进行比较,

[0014] 当质心偏移量 $G(x_0, y_0)$ 小于质心偏移量阈值时,按下述方法对支撑腿的伸缩长度进行补偿:

[0015] 所述质心偏移量 $G(x_0, y_0)$ 的获得方法为:以承载平台的圆心为原点建立两面直角坐标系,承载平台的质心坐标为 $(0, 0)$,将 $G(x_0, y_0)$ 作为承载平台与其上负载整体的质心,其中 x_0 为质心偏移量 $G(x_0, y_0)$ 在空间坐标系中 X 轴方向的坐标, y_0 为质心偏移量 $G(x_0, y_0)$ 在空间坐标系中 Y 轴方向的坐标,采用平面光栅测得承载平台上负载与承载平台的相对位移量 (x_2, y_2) ,则有:

$$[0016] \quad \begin{cases} x_0 = \frac{M_1 x_1 + M_2 x_2}{M_1 + M_2} = \frac{M_2 x_2}{M_1 + M_2} \\ y_0 = \frac{M_1 y_1 + M_2 y_2}{M_1 + M_2} = \frac{M_2 y_2}{M_1 + M_2} \end{cases},$$

[0017] 式中 M_1 为承载平台的质量, M_2 为承载平台上负载的质量;

[0018] 质心偏移量 $G(x_0, y_0)$ 对气足气膜高度的影响按以下方法获得:

[0019] 设定三条支撑腿与承载平台下表面的三个连接点为 A、B 和 C,其中 A 点坐标为 $\left(-\frac{1}{2}L, -\frac{\sqrt{3}}{6}L\right)$,B 点坐标为 $\left(\frac{1}{2}L, -\frac{\sqrt{3}}{6}L\right)$,C 点坐标为 $\left(0, \frac{\sqrt{3}}{3}L\right)$,式中 L 为三个连接点 A、B 和 C 形成的等边三角形的边长,

[0020] 当气浮平台处于静态平衡状态时,根据力系的主矢和对于坐标轴的主矩为零得到公式:

$$[0021] \quad \begin{cases} \sum F_i = 0 \\ \sum M_x(F_i) = 0 \\ \sum M_y(F_i) = 0 \end{cases},$$

[0022] 式中 $i = 1, 2$ 和 3 , F_1 为对应于 A 点的支撑腿上的负载力, F_2 为对应于 B 点的支撑腿上的负载力, F_3 为对应于 C 点的支撑腿上的负载力; $M_x(F_i)$ 为负载力 F_i 绕 X 轴的等效转矩, $M_y(F_i)$ 为负载力 F_i 绕 Y 轴的等效转矩,

[0023] 将 A、B 和 C 三点坐标代入上述公式得到:

$$[0024] \quad \begin{cases} F_1 + F_2 + F_3 - G = 0 \\ -(F_1 + F_2) \cdot \frac{\sqrt{3}}{6}L + F_3 \cdot \frac{\sqrt{3}}{3}L - G \cdot y_0 = 0 \\ F_1 \cdot \frac{1}{2}L - F_2 \cdot \frac{1}{2}L + G \cdot x_0 = 0 \end{cases},$$

[0025] 求解上式,获得 F_1 、 F_2 和 F_3 的值:

$$[0026] \begin{cases} F_1 = \frac{G}{3} + \frac{\sqrt{3}x_0 - y_0}{\sqrt{3}L} \cdot G \\ F_2 = \frac{G}{3} - \frac{\sqrt{3}x_0 + y_0}{\sqrt{3}L} \cdot G, \\ F_3 = \frac{G}{3} + \frac{2y_0}{\sqrt{3}L} \cdot G \end{cases}$$

[0027] 由此获得当前对应于 A 点的支撑腿的承重质量 m_1 、对应于 B 点的支撑腿的承重质量 m_2 和对应于 C 点的支撑腿的承重质量 m_3 , m_1 、 m_2 和 m_3 与质心 $G(x_0, y_0)$ 的关系为:

$$[0028] \begin{cases} m_1 = \frac{M}{3} + \frac{\sqrt{3}x_0 - y_0}{\sqrt{3}L} \cdot M \\ m_2 = \frac{M}{3} - \frac{\sqrt{3}x_0 + y_0}{\sqrt{3}L} \cdot M, \\ m_3 = \frac{M}{3} + \frac{2y_0}{\sqrt{3}L} \cdot M \end{cases}$$

[0029] 式中 M 为承载平台与其上负载整体的总质量;

[0030] 最后获得质心偏移量 $G(x_0, y_0)$ 与气足的气膜高度矩阵:

$$[0031] \begin{bmatrix} h_1 \\ h_2 \\ h_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{G}{LJ} & -\frac{G}{\sqrt{3}LJ} \\ -\frac{G}{LJ} & -\frac{G}{\sqrt{3}LJ} \\ 0 & \frac{2G}{\sqrt{3}LJ} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x_0 \\ y_0 \end{bmatrix} + \frac{G}{3J},$$

[0032] 式中 h_1 为对应于 A 点的支撑腿底部气足的气膜高度, h_2 为对应于 B 点的支撑腿底部气足的气膜高度, h_3 为对应于 C 点的支撑腿底部气足的气膜高度, G 为承载平台与其上负载整体的总重量, J 为支撑腿底部气足的气膜刚度;

[0033] 气足的气膜高度变化使支撑轴产生的高度变化通过倾角传感器或者线阵 CCD 的测量信号获得, 对该测量信号进行处理, 获得质心偏移量 $G(x_0, y_0)$ 对承载平台倾角干扰信息, 由承载平台倾角干扰信息计算获得各个支撑腿调平所需的位移量, 由此实现对气浮平台的质心偏移容许干扰的测量与补偿;

[0034] 当质心偏移量 $G(x_0, y_0)$ 大于质心偏移量阈值时, 通过控制气足的喷嘴喷气使承载平台在水平混凝土基座上平动, 跟随承载平台上负载的运动以调整相对位移量 (x_2, y_2) , 直到将质心偏移量 $G(x_0, y_0)$ 调至质心偏移量阈值范围之内。

[0035] 所述承载平台的半径为 2 米, 三条支撑腿与承载平台下表面的三个连接点构成的等边三角形的顶点距离承载平台圆心的距离为 1.4 米。

[0036] 本发明的优点: 本发明可以用于空间交汇对接的仿真系统以及其它各种要求水平的系统。该气浮平台具有置承重量大、调平精度高、调整时间快等优点; 所述气浮平台在使用过程中, 通过与平台测量控制系统的相互配合, 具有自修整功能, 能很好地提高平台的调整精度、稳定性和可靠性。

[0037] 本发明所述多轴支撑气浮平台可根据实际需求,快速、精确的为负载提供所需的高平面度作业平台,属于超精密仪器设备。本发明为实际工程应用中提供了高精度调平的大面积平台,它的承载平台在大面积水平基座上能够保证在平动和静止时均达到有高精度的水平度。

附图说明

- [0038] 图 1 是本发明所述多轴支撑气浮平台的结构示意图；
[0039] 图 2 是多轴支撑气浮平台放置在水平混凝土基座上的结构示意图；
[0040] 图 3 是承载平台与三条支撑腿的连接状态示意图；
[0041] 图 4 是气足的立体结构示意图；
[0042] 图 5 是图 4 的剖视图；
[0043] 图 6 是所述气浮平台整体质心偏移位置的坐标示意图；
[0044] 图 7 是倾角传感器的安装方式与三条支撑腿之间的位置关系图；
[0045] 图 8 是利用线阵 CCD 计算气浮平台倾角的示意图；
[0046] 图 9 是平台测量控制系统的控制框图；
[0047] 图 10 是多轴支撑气浮平台的调平方法的流程图。

具体实施方式

[0048] 具体实施方式一:下面结合图 1 至图 10 说明本实施方式,本实施方式所述多轴支撑气浮平台的质心偏移容许干扰的测量与监控方法,所述多轴支撑气浮平台包括承载平台 1,三条支撑腿 2、三个气浮筒 3 和三个气足 4,

[0049] 所述承载平台 1 为圆形平台,承载平台 1 由三条支撑腿 2 支撑,三条支撑腿 2 与承载平台 1 下表面的三个连接点构成等边三角形,并且该等边三角形的中心与承载平台 1 的圆心重合;

[0050] 每条支撑腿 2 的末端连接一个气浮筒 3,每个气浮筒 3 的底端通过气浮球轴承连接一个气足 4;

[0051] 承载平台 1 上表面安装一个平面光栅 7-1,该平面光栅 7-1 读数头与承载平台 1 上的负载固联;

[0052] 所述测量与监控方法首先设定质心偏移量阈值,然后将质心偏移量 $G(x_0, y_0)$ 与质心偏移量阈值进行比较,

[0053] 当质心偏移量 $G(x_0, y_0)$ 小于质心偏移量阈值时,按下述方法对支撑腿 2 的伸缩长度进行补偿:

[0054] 所述质心偏移量 $G(x_0, y_0)$ 的获得方法为:以承载平台 1 的圆心为原点建立两面直角坐标系,承载平台 1 的质心坐标为 $(0,0)$,将 $G(x_0, y_0)$ 作为承载平台 1 与其上负载整体的质心,其中 x_0 为质心偏移量 $G(x_0, y_0)$ 在空间坐标系中 X 轴方向的坐标, y_0 为质心偏移量 $G(x_0, y_0)$ 在空间坐标系中 Y 轴方向的坐标,采用平面光栅 7-1 测得承载平台 1 上面负载与承载平台 1 的相对位移量 (x_2, y_2) ,则有:

$$[0055] \quad \begin{cases} x_0 = \frac{M_1 x_1 + M_2 x_2}{M_1 + M_2} = \frac{M_2 x_2}{M_1 + M_2} \\ y_0 = \frac{M_1 y_1 + M_2 y_2}{M_1 + M_2} = \frac{M_2 y_2}{M_1 + M_2} \end{cases},$$

[0056] 式中 M_1 为承载平台 1 的质量, M_2 为承载平台 1 上负载的质量;

[0057] 质心偏移量 $G(x_0, y_0)$ 对气足 4 气膜高度的影响按以下方法获得:

[0058] 设定三条支撑腿 2 与承载平台 1 下表面的三个连接点为 A、B 和 C, 其中 A 点坐标为 $\left(-\frac{1}{2}L, -\frac{\sqrt{3}}{6}L\right)$, B 点坐标为 $\left(\frac{1}{2}L, -\frac{\sqrt{3}}{6}L\right)$, C 点坐标为 $\left(0, \frac{\sqrt{3}}{3}L\right)$, 式中 L 为三个连接点 A、B 和 C 形成的等边三角形的边长,

[0059] 当气浮平台处于静态平衡状态时, 根据力系的主矢和对于坐标轴的主矩为零得到公式:

$$[0060] \quad \begin{cases} \sum F_i = 0 \\ \sum M_x(F_i) = 0 \\ \sum M_y(F_i) = 0 \end{cases},$$

[0061] 式中 $i = 1, 2$ 和 3 , F_1 为对应于 A 点的支撑腿 2 上的负载力, F_2 为对应于 B 点的支撑腿 2 上的负载力, F_3 为对应于 C 点的支撑腿 2 上的负载力; $M_x(F_i)$ 为负载力 F_i 绕 X 轴的等效转矩, $M_y(F_i)$ 为负载力 F_i 绕 Y 轴的等效转矩,

[0062] 将 A、B 和 C 三点坐标代入上述公式得到:

$$[0063] \quad \begin{cases} F_1 + F_2 + F_3 - G = 0 \\ -(F_1 + F_2) \cdot \frac{\sqrt{3}}{6}L + F_3 \cdot \frac{\sqrt{3}}{3}L - G \cdot y_0 = 0 \\ F_1 \cdot \frac{1}{2}L - F_2 \cdot \frac{1}{2}L + G \cdot x_0 = 0 \end{cases},$$

[0064] 求解上式, 获得 F_1 、 F_2 和 F_3 的值:

$$[0065] \quad \begin{cases} F_1 = \frac{G}{3} + \frac{\sqrt{3}x_0 - y_0}{\sqrt{3}L} \cdot G \\ F_2 = \frac{G}{3} - \frac{\sqrt{3}x_0 + y_0}{\sqrt{3}L} \cdot G \\ F_3 = \frac{G}{3} + \frac{2y_0}{\sqrt{3}L} \cdot G \end{cases},$$

[0066] 由此获得当前对应于 A 点的支撑腿的承重质量 m_1 、对应于 B 点的支撑腿的承重质量 m_2 和对应于 C 点的支撑腿的承重质量 m_3 , m_1 、 m_2 和 m_3 与质心 $G(x_0, y_0)$ 的关系为:

$$[0067] \quad \begin{cases} m_1 = \frac{M}{3} + \frac{\sqrt{3}x_0 - y_0}{\sqrt{3}L} \cdot M \\ m_2 = \frac{M}{3} - \frac{\sqrt{3}x_0 + y_0}{\sqrt{3}L} \cdot M, \\ m_3 = \frac{M}{3} + \frac{2y_0}{\sqrt{3}L} \cdot M \end{cases}$$

[0068] 式中 M 为承载平台 1 与其上负载整体的总质量；

[0069] 最后获得质心偏移量 $G(x_0, y_0)$ 与气足 4 的气膜高度矩阵：

$$[0070] \quad \begin{bmatrix} h_1 \\ h_2 \\ h_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{G}{LJ} & -\frac{G}{\sqrt{3}LJ} \\ -\frac{G}{LJ} & -\frac{G}{\sqrt{3}LJ} \\ 0 & \frac{2G}{\sqrt{3}LJ} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} x_0 \\ y_0 \end{bmatrix} + \frac{G}{3J},$$

[0071] 式中 h_1 为对应于 A 点的支撑腿 2 底部气足的气膜高度, h_2 为对应于 B 点的支撑腿 2 底部气足的气膜高度, h_3 为对应于 C 点的支撑腿 2 底部气足的气膜高度, G 为承载平台 1 与其上负载整体的总重量, J 为支撑腿 2 底部气足的气膜刚度；

[0072] 气足的气膜高度变化使支撑轴 2 产生的高度变化通过倾角传感器 7-4 或者线阵 CCD7-3 的测量信号获得, 对该测量信号进行处理, 获得质心偏移量 $G(x_0, y_0)$ 对承载平台 1 倾角干扰信息, 由承载平台 1 倾角干扰信息计算获得各个支撑腿 2 调平所需的位移量, 由此实现对气浮平台的质心偏移容许干扰的测量与补偿；

[0073] 当质心偏移量 $G(x_0, y_0)$ 大于质心偏移量阈值时, 通过控制气足 4 的喷嘴喷气使承载平台 1 在水平混凝土基座上平动, 跟随承载平台 1 上负载的运动以调整相对位移量 (x_2, y_2) , 直到将质心偏移量 $G(x_0, y_0)$ 调至质心偏移量阈值范围之内。

[0074] 本实施方式中, 所述多轴支撑气浮平台包括承载平台 1, M 条支撑腿 2、M 个气浮筒 3 和 M 个气足 4, M 为 3、4、5 或 6,

[0075] 所述承载平台 1 为圆形平台, 承载平台 1 由 M 条支撑腿 2 支撑, M 条支撑腿 2 与承载平台 1 下表面的 M 个连接点构成正 M 边形, 并且该正 M 边形的中心与承载平台 1 的圆心重合。

[0076] 多轴支撑气浮平台的测量控制系统包括负载反馈单元 5、执行单元 6、位置测量单元 7、安全保护单元 8、控制器 9、旋转电机 10 和直线光源 11,

[0077] 负载反馈单元 5 包括 M 个压力传感器 5-1 和四个差动传感器 5-2；执行单元 6 包括 M 个伺服音圈电机 6-1 和 M 个伺服音圈电机驱动器 6-2；位置测量单元 7 包括平面光栅 7-1、M 个直线光栅 7-2、线阵 CCD7-3、倾角传感器 7-4、M 个电子水平仪 7-5 和室内 GPS7-6；安全保护单元 8 包括 2M 个接近传感器 8-1 和 M 个温度传感器 8-2, 线阵 CCD7-3 由不少于六个 CCD 组成,

[0078] 所述多轴支撑气浮平台设置于圆形水平混凝土基座上, 线阵 CCD7-3 所包括的所有 CCD 沿圆形水平混凝土基座的圆周方向均匀放置, 承载平台 1 上设置有旋转电机 10, 旋转

电机 10 的上表面设置直线光源 11,

[0079] 每条支撑腿 2 内部安装有一个压力传感器 5-1、一个伺服音圈电机 6-1 和一个直线光栅 7-2, 压力传感器 5-1 用来检测相应支撑腿 2 的力矩, 伺服音圈电机 6-1 用来驱动相应的支撑腿 2 的伸缩, 每个伺服音圈电机 6-1 由一个伺服音圈电机驱动器 6-2 驱动, 直线光栅 7-2 用于采集伺服音圈电机 6-1 驱动支撑腿 2 所产生的位移,

[0080] 四个差动传感器 5-2 沿承载平台 1 的圆周方向均匀分布在承载平台 1 的上表面外边缘上, 差动传感器 5-2 用来测量承载平台 1 与承载平台 1 上的负载之间的相对位置,

[0081] 平面光栅 7-1 安装在承载平台 1 的上表面, 平面光栅 7-1 用于测量承载平台 1 上的负载相对承载平台 1 在两个相互垂直方向上发生的相对位移量;

[0082] 倾角传感器 7-4 和 M 个电子水平仪 7-5 均安装在承载平台 1 的上表面上, 倾角传感器 7-4 用于测量承载平台 1 移动过程中在空间坐标系的 X 方向和 Y 方向上的振动角度; M 个电子水平仪 7-5 所处的位置分别对应于 M 条支撑腿 2 与承载平台 1 下表面的 M 个连接点, 电子水平仪 7-5 用于测量承载平台 1 静止时的状态;

[0083] 室内 GPS7-6 安装于相对圆形水平混凝土基座的上方空间, 用于测量承载平台 1 在圆形水平混凝土基座上的位置坐标,

[0084] 每条支撑腿 2 内部的上限行程和下限行程分别安装一个接近传感器 8-1, 接近传感器 8-1 用于实现限位报警; 每个伺服音圈电机 6-1 内部安装一个温度传感器 8-2, 温度传感器 8-2 用于实现温度报警;

[0085] 压力传感器 5-1 的压力信号输出端连接控制器 9 的压力信号输入端, 差动传感器 5-2 的位置信号输出端连接控制器 9 的位置信号输入端, 控制器 9 的驱动控制信号输出端连接伺服音圈电机驱动器 6-2 的驱动控制信号输入端, 伺服音圈电机驱动器 6-2 的驱动信号输出端连接伺服音圈电机 6-1 的驱动信号输入端, 伺服音圈电机 6-1 的驱动信号输出端连接支撑腿 2 的驱动信号输入端;

[0086] 平面光栅 7-1 的相对位移信号输出端连接控制器 9 的相对位移信号输入端, 直线光栅 7-2 的支撑腿位移信号输出端连接控制器 9 的支撑腿位移信号输入端, 线阵 CCD7-3 的监测信号输出端连接控制器 9 的监测信号输入端, 倾角传感器 7-4 的倾角信号输出端连接控制器 9 的倾角信号输入端, 电子水平仪 7-5 的水平信号输出端连接控制器 9 的水平信号输入端, 室内 GPS7-6 的 GPS 信号输出端连接控制器 9 的 GPS 信号输入端,

[0087] 温度传感器 8-2 的温度信号输出端连接控制器 9 的温度信号输入端, 接近传感器 8-1 的极限位置信号输出端连接控制器 9 的极限位置信号输入端。

[0088] 本实施方式中气足 4 具有喷嘴, 承载平台 1 采用气足 4 浮在水平混凝土基座上。利用气足 4 的喷嘴喷气可使承载平台 1 在基座上平动。

[0089] 本实施方式中所使用的气足 4 是动压的, 承载平台 1 依靠 M 个气足 4 支撑起来, 为保证受力的均匀, M 个气足结构相同, 离中心的距离也相同。图 5 所示, 气足 4 下端是一个环形结构, 外圆半径 R_1 , 内圆半径 R_2 , 喷嘴分布在半径为 R_0 的圆周上。

[0090] 多轴支撑气浮平台的测量控制系统还包括上位机 12 和状态显示板 13,

[0091] 上位机 12 的信号传输端与控制器 9 的信号传输端连接, 上位机 12 的显示信号输出端连接状态显示板 13 的显示信号输入端。

[0092] 具体实施方式二: 下面结合图 1 至图 10 说明本实施方式, 本实施方式对实施方式

一或二作进一步说明,本实施方式所述承载平台 1 的半径为 2 米,三条支撑腿与承载平台 1 下表面的三个连接点构成的等边三角形的顶点距离承载平台 1 圆心的距离为 1.4 米。

[0093] 图 3 所示,多轴支撑气浮平台的支撑腿 2 与承载平台 1 下表面的三个连接点 A、B、C 三点连线构成一个边长为 $L = 2424\text{mm}$ 的等边三角形。气足 4 依靠压缩空气在气浮球轴承和球套之间形成气膜,实现近似无摩擦的运动,以模拟航天器在外层空间所受扰动力矩极小的动力学环境。

[0094] 结合图 1 至图 3 所示,当承载平台 1 的半径为 2 米时,通过对圆形承载平台 1 进行有限元分析,得出三条支撑腿 2 与承载平台 1 的交点 A、B、C 三点构成的等边三角形顶点距离承载平台 1 圆心的距离为 1.4m,此时,承载平台 1 各处均无变形。

[0095] 所述支撑腿 2 为伸缩式可调节支撑腿。

[0096] 本发明中,图 3 所示,在每条支撑腿 2 内部安装有一个伺服音圈电机 6-1,伺服音圈电机 6-1 由伺服音圈电机驱动器 6-2 进行驱动,伺服音圈电机为执行机构,本发明中可选择高频响伺服音圈电机作为执行机构。伺服音圈电机用来补偿承载平台 1 在振动过程中 A、B、C 三点的振幅,通过控制三个伺服音圈电机来补偿支撑腿 2 的伸缩量,以达到稳定承载平台 1 的目的。

[0097] 所述伺服音圈电机的原理是带电线圈在磁场中产生力的作用,所以音圈电机具有零磁滞、零磁槽效应、高频响、高精度、高加速度、高速度、力特性好、控制方便、体积小和分辨率高等优点。根据驱动、反馈、控制器和控制算法等配置高低,音圈电机一般可以达到 500-1000Hz 的运动频率,甚至更高。音圈电机的驱动可消除传统驱动中间环节带来的影响。

[0098] 差动传感器 5-2 用来测量承载平台 1 与承载平台 1 上的负载之间的相对位置,,为承载平台 1 在圆形水平混凝土基座上平动提供位置信息。压力传感器 5-1 检测支撑腿 2 力矩的大小,用以防止支撑腿 2 在内部故障或外部因素的影响下,已处于卡死状态时,伺服音圈电机 6-1 仍然强行驱动支撑腿运动等故障的出现,从而防止伺服音圈电机过载。接近传感器 8-1 在伺服音圈电机 6-1 超出行程时实现限位报警;温度传感器 8-2 在伺服音圈电机 6-1 的温度过高超过其承受范围时,实现温度报警,系统进而做出响应。安全保护单元 8 用来保证平台测量控制系统在运行过程中硬件的安全运行。

[0099] 直线光栅 7-2 为非接触式光栅,直线光栅 7-2 用于实现对伺服音圈电机移动位置信号的采集并反馈给控制器;平面光栅 7-1 测量获得的承载平台 1 上的负载相对承载平台 1 在两个相互垂直方向上发生的相对位移量用来计算相对位移造成的质心偏移干扰。

[0100] 旋转电机 10 带动直线光源 11 旋转时,线阵 CCD7-3 和室内 GPS7-6 构成了水平动态倾角测量系统,用来测量并反馈承载平台 1 动态过程中的倾角。线阵 CCD7-3 所包括的所有 CCD 沿圆形水平混凝土基座的圆周方向均匀放置,是为了减少由于物体遮光的影响造成一部分 CCD 接收不到光线,导致倾角信息不全面,不能更好的调平承载平台 1。

[0101] 倾角传感器 7-4 为双轴倾角传感器,它能够获得多轴支撑气浮平台在平动或静止状态时的倾角,起到平台倾斜角监视和超限保护的作用,保证承载平台 1 倾角保持在线阵 CCD 的监测范围之内。

[0102] 上位机 12 和状态显示板 13 通过以太网相连接,状态显示板 13 用于实时显示当前各支撑腿运动状态、伺服音圈电机温度等状态信息。

[0103] 图 3 所示,定义 Z 向垂直于地平面, X、Y 方向符合右手定则; R_x 、 R_y 、 R_z 为承载平

台 1 分别沿 X、Y、Z 的转动方向；气足 4 的气浮球轴承能够实现承载平台 1 Rx 向、Ry 向和 Rz 向的有限摆角自由转动，伺服音圈电机实现对包含气浮球轴承和承载平台 1 重力的卸载以及保证承载平台 1 在 Z 向的长距离自由浮动。X、Y、Z 轴可以实现长距离自由运动；Rz 轴可以绕 Z 轴 $0 \sim 360^\circ$ 自由转动；Rx、Ry 分别可以绕 X、Y 轴 $-30 \sim 30^\circ$ 自由转动。承载平台 1 需要具有 6 自由度，气足 4 在圆形水平混凝土基座上能够实现二维自由平动。承载平台 1 在稳定调节的过程中，在不需要调节承载平台 1 高度时，如图 3 所示，以 A 点为参考原点建立坐标系，主要通过调节 B、C 两点的 Z 坐标达到稳定的目的。

[0104] 多轴支撑气浮平台的测量控制系统是一种实时动态调平系统，其控制框图如图 9 所示。测量控制系统采用双环结构：内环为三个伺服音圈电机的位置控制环，其输入信号为各支撑腿 2 调平时所需的位移量构成的三维向量；外环为角度控制环，其输入信号为二维零向量。测量控制系统的位置控制和角度控制均采用闭环控制。位置控制环部分包括三个支撑腿 2 上的位置环控制器、电机驱动器、音圈电机、以及直线光栅，其中位置反馈是通过直线光栅测量实现的。角度控制环部分主要包括角度环控制器、倾角传感器、线阵 CCD 以及室内 GPS。其中承载平台 1 输出角度包括两个反馈通道：一是通过倾角传感器的测量结果直接实现反馈；二是根据线阵 CCD 和室内 GPS 的测量结果计算得到平台倾角而完成反馈。由于承载平台 1 的动态调平功能是通过控制三个支撑腿 2 上的音圈电机实现的，因此角度环控制器的输出控制量需要经过解算得到三个音圈电机的位置控制输入量，即通过倾角位移变换矩阵进行变换。在利用线阵 CCD 和室内 GPS 进行倾角反馈时，需要将线阵 CCD 输出的光点高度结合室内 GPS 测量的承载平台坐标进行计算获得当前的承载平台倾角，即通过高度倾角变换矩阵进行变换。

[0105] 下面分析多轴支撑气浮平台的干扰信号的成分及其影响，干扰信号主要包括质心偏移干扰和地面平面度干扰。地面平面度干扰通常是小振幅、低频率的正弦波信号。下面主要分析质心偏移干扰造成的影响。

[0106] 质心偏移干扰主要包括两个方面：一是导致音圈电机负载发生变化；二是对各气足 4 的气膜高度产生影响。由于三个支撑腿 2 上音圈电机的负载为承台平台 1 在各个支撑腿 2 上的分布载荷，因此当承载平台 1 因为上面设备发生相对位移而导致质心偏移时各个音圈电机的负载会发生变化，故需要考虑质心偏移对各音圈电机负载变化的影响。

[0107] 上述质心偏移容许干扰的测量与监视方法中，承载平台 1 的质心坐标为 $(0, 0)$ 为忽略承载平台 1 上的负载影响近似获得的。它是为了通过实验获得承载平台上负载容许的移动范围，以保证在调平过程中质心偏移造成的干扰始终限制在容许范围之内。

[0108] 质心坐标 $G(x_0, y_0)$ 与气足 4 的气膜高度的关系即反应了质心偏移对气膜高度的影响，该影响会直接反应为各支撑轴 2 的高度，最终表现为影响承载平台 1 的平面倾斜角度。承载平台 1 的倾角信息是通过倾角传感器测量输出或者通过线阵 CCD 的光点测量信息进行计算得到。如此，质心发生偏移造成的对承载平台 1 倾角的干扰就包含在倾角测量反馈通道的倾角信息中，能够通过倾角传感器或线阵 CCD 的反馈直接被控制器 9 读取。然后，控制器 9 再将其解算获得各个支撑腿 2 调平所需的位移量，最后再对电机进行伺服控制，达到调平的目的。

[0109] 因为质心偏移的干扰反映到了音圈电机负载和承载平台 1 的倾角测量中。因此，当质心偏移超过一定限度时，音圈电机的负载变化量会比较大，另一方面对平台倾角的施

加的干扰也会较大,往往会造成自动调平系统控制性能不理想的后果。因此,可以通过重复性实验获得自动调平平台所容许的负载与承载平台 1 的最大相对位移量。然后通过承载平台 1 上安装可调限位装置对承载设备的移动范围进行约束,以使因相对位移产生的质心偏移造成的干扰始终保持在容许范围之内,起到对质心偏移干扰的监视作用,保证多轴支撑气浮平台的测量控制系统始终有较理想的控制性能。

[0110] 工作原理:

[0111] 将多轴支撑气浮平台放在大面积圆形水平混凝土基座上,当多轴支撑气浮平台处于静止状态时,多轴支撑气浮平台利用放置在承载平台 1 上的电子水平仪以及放置在水平混凝土基座上的线阵 CCD 结合室内 GPS 通过计算来测量自身的水平度。用旋转电机带动承载平台 1 上的直线光源快速旋转,在此光源的光束扫描过程中,线阵 CCD 可根据记录光点的位置计算承载平台 1 的俯仰角度,为控制器提供反馈信息。

[0112] 由混凝土基座周围的线阵 CCD 实时测量光点的高度,由室内 GPS 实时测量承载平台 1 在混凝土基座中的位置信息。当旋转光源高速扫过两个相邻的线阵 CCD 时,两个相邻 CCD 上的光电位置以及光源构成一个平面,如图 8 中的平面 α 。由于光源旋转速度较高,旋转光源扫过两个相邻线阵 CCD 的时间间隔极小,因此可将平面 α 近似看作承载平台 1 当前所在的平面。因此,可以将相邻 CCD 上的光点坐标以及承载平台 1 的位置坐标分别通过线阵 CCD 和室内 GPS 反馈给控制器。然后,控制器经过几何关系换算可计算得到承载平台 1 在两个垂直方向上的倾角,然后根据倾角信息解算将获得各个支撑腿 2 的实际位移偏移量,再控制伺服音圈电机来驱动支撑腿 2 伸缩,做出上移或者是下移运动,以进行相应补偿,调整承载平台 1 的水平度。伺服音圈电机通过非接触式光栅尺的测量数据来保证位移精度,从而保障支撑腿 2 的定位精度。在此过程中,负载反馈单元和安全保护单元能够实时监测多轴支撑气浮平台状态并及时做出响应。承载平台 1 在运动过程中通过与静止状态时同样的方式,对支撑腿进行伸缩驱动以对采集获得的偏移量做出相应补偿,保证了承载平台的水平精度。

[0113] 调节三个支撑腿 2 的伸长量使承载平台 1 达到水平,倾角传感器的安装方式与 3 条支撑腿之间的位置关系如图 7 所示。倾角传感器的两个相互垂直的轴,即 x 和 y 轴需要分别与 AB、CD1 平行。

[0114] 当承载平台 1 处于静止状态时,控制器发出静止状态模式并进入伺服周期,旋转电机带动直线光源在承载平台 1 中间快速旋转,在光束扫描过程中,线阵 CCD 可根据记录光点的位置计算承载平台 1 的俯仰角度,为调平系统提供反馈信息。如果承载平台 1 为水平,那么线阵 CCD 中各 CCD 扫描到的位置为同一位置高度;如果承载平台 1 不水平,那么不平的角度方向会伴随线阵 CCD 有扫描高度的偏移,如果承载平台 1 向上倾斜,那么对应光点的位置高度会偏上;如果承载平台 1 向下倾斜,那么对应光点的位置高度会偏下,线阵 CCD 反馈的平台倾角信息和电子水平仪检测出平台倾角信息反馈给控制器,控制器在伺服周期内对传感器数据进行融合和几何处理转化为支撑腿的位移信息发送给执行机构模块。

[0115] 在实际控制过程中,控制器接收到线阵 CCD 的光点高度信息后,需要结合室内 GPS 测量的承载平台 1 的坐标信息进行计算得到承载平台 1 在两个相互垂直方向上的倾角,然后再对倾角进行解耦,得到三个支撑腿 2 调平所需的位移量。

[0116] 多轴支撑气浮平台的调平方法通过多轴支撑气浮平台的测量控制系统实现调平,

所述调平方法包括以下步骤：

[0117] 步骤一、通过上位机 12 将当前的工作模式、控制命令和误差参数通过以太网发送给控制器 9；

[0118] 步骤二、控制器 9 每 $200\ \mu\text{s}$ 发出伺服周期开始信号，启动平动状态工作模式或静止状态工作模式；若启动平动状态工作模式，则执行步骤三；若启动静止状态工作模式，则执行步骤五；

[0119] 步骤三、检查控制器 9 是否接收到线阵 CCD7-3 的监测信号，若是，执行步骤四；否则，执行步骤六；

[0120] 步骤四、控制器 9 根据线阵 CCD7-3 输出的监测信号和室内 GPS7-6 输出的 GPS 信号，计算获得承载平台 1 的倾角信息，然后执行步骤六；

[0121] 步骤五、位置测量单元 7 中的电子水平仪 7-5 和线阵 CCD7-3 检测承载平台 1 的水平度，并将水平度信息传递给控制器 9，然后执行步骤七；

[0122] 步骤六、控制器 9 对其读取的所有反馈信号进行数据融合处理，获得支撑腿 2 的调节量，然后控制器 9 通过驱动伺服音圈电机驱动器 6-2 对伺服音圈电机 6-1 的驱动信号进行修正，然后执行步骤八；

[0123] 步骤七、控制器 9 对其读取的所有反馈信号进行数据融合处理，获得支撑腿 2 的调节量，然后控制器 9 通过驱动伺服音圈电机驱动器 6-2 对伺服音圈电机 6-1 的驱动信号进行修正，然后执行步骤九；

[0124] 步骤八、判断承载平台 1 是否静止，若是，执行步骤五；否则，执行步骤十；

[0125] 步骤九、判断承载平台 1 的水平度是否达到设定精度范围之内，若是，则执行步骤十一；否则，返回步骤五；

[0126] 步骤十、判断承载平台 1 的水平度是否达到设定精度范围之内，若是，则执行步骤十一；否则，返回步骤三；

[0127] 步骤十一、当前伺服周期调平结束，返回步骤二，等待下一个伺服周期，直至结束。

[0128] M 为 3，此时步骤六和步骤七中所述控制器 9 对其读取的所有反馈信号进行数据融合处理，获得支撑腿 2 的调节量的具体方法为：

[0129] 设定线阵 CCD7-3 由六个 CCD 组成，将圆形水平混凝土基座上的六个 CCD 沿圆周方向顺序编号为①、②、③、④、⑤和⑥，以④号 CCD 和①号 CCD 的中心连线做为空间直角坐标系的 X 轴方向，该空间直角坐标系位于直线光源 11 的基准光所在的水平面 X-0-Y 上，按照右手定则定义空间直角坐标系的 Y 轴方向和 Z 轴方向，设定圆形水平混凝土基座的半径为 R，直线光源 11 在③号 CCD 上的位置坐标为 $A1(-\frac{1}{2}R, \frac{\sqrt{3}}{2}R, H_3)$ ， H_3 为旋转光源在③号 CCD 上照射的光点高度，直线光源 11 在④号 CCD 上的位置坐标为 $B1(-R, 0, H_4)$ ， H_4 为旋转光源在④号 CCD 上照射的光点高度，设定 K 点为③号 CCD 上基准光点的位置，J 点为④号 CCD 上基准光点的位置，承载平台 1 中心位置点的坐标为 $C1(x_01, y_01, 0)$ ，

[0130] 过 K 点作 X 轴的垂线，垂足为 H，KH 与 C1J 相交于 D 点，作 DE 垂直于 X-0-Y 平面，交 C1B1 于点 E；过点 E 作 $EL1//DK$ ，交 A1K 于点 L1， $\angle A1EL1$ 即平面 α 绕 X 轴旋转产生的夹角 θ_x ，平面 α 为 A1、B1 和 C1 三点所确定的平面，

[0131] 作 C1F 垂直于 DK，交 DK 于点 F；再作 DK 的垂线 FG，交 A1E 于点 G，连接 C1G， $\angle GC1F$

即平面 α 绕 Y 轴旋转产生的夹角 θ_y , 过 C1 点作 X 轴的垂线, 垂足为 I, 由

$$[0132] \quad \frac{DE}{H_4} = \frac{C1D}{C1J} = \frac{HI}{IJ} = \frac{x_0 + \frac{1}{2}R}{x_0 + R}, \text{ 可得 DE 的长度: } DE = \frac{x_0 + \frac{1}{2}R}{x_0 + R} \cdot H_4,$$

$$[0133] \quad \text{由 HD 为三角形 JIC1 的中位线得 } HD = \frac{1}{2}y_0,$$

$$[0134] \quad \text{故有 } \theta_x = \angle A1E1 = \arctan \frac{H_4 - DE}{DK} = \arctan \frac{RH_4}{(x_0 + R)(-y_0 + \sqrt{3}R)},$$

[0135] 做 FM 垂直于 EL1, 垂足为 M, 由坐标关系可知:

$$[0136] \quad EM = DF = -\frac{1}{2}y_0,$$

$$[0137] \quad EL1 = DK = \frac{\sqrt{3}}{2}R - \frac{1}{2}y_0, A1L1 = H_3 - DE = H_3 - \frac{x_0 + \frac{1}{2}R}{x_0 + R} \cdot H_4,$$

$$[0138] \quad \text{由 } \frac{EM}{EL1} = \frac{GM}{A1L1} \text{ 得 } GM = \frac{EM \cdot A1L1}{EL1} = \frac{H_3(x_0 + R)y_0 - H_4(x_0 + \frac{1}{2}R)y_0}{(x_0 + R)(y_0 - \sqrt{3}R)},$$

$$[0139] \quad \text{因此, } GF = GM + MF = GM + DE = \frac{H_3(x_0 + R)y_0 - H_4(x_0 + \frac{1}{2}R)y_0}{(x_0 + R)(y_0 - \sqrt{3}R)} + \frac{x_0 + \frac{1}{2}R}{x_0 + R} \cdot H_4,$$

$$[0140] \quad \text{根据坐标关系得到: } C1F = x_0 + \frac{1}{2}R,$$

$$[0141] \quad \text{则: } \theta_y = \angle GC1F = \arctan \frac{GF}{C1F} = \arctan \left(\frac{H_3 y_0}{(x_0 + \frac{1}{2}R)(y_0 - \sqrt{3}R)} - \frac{\sqrt{3}H_4 R}{(x_0 + R)(y_0 - \sqrt{3}R)} \right),$$

[0142] 再根据计算获得的 θ_x 和 θ_y 进行解耦,

[0143] 以前述方式建立气浮平台的空问直角坐标系, 其原点为伺服音圈电机 6-1 最大位移输出的 1/2 处, 设定三条支撑腿 2 与承载平台 1 下表面的三个连接点为 A、B 和 C, A 点坐标为 $(0, 0, z_1)$, B 点坐标为 $(-L, 0, z_2)$, C 点坐标为 $(-\frac{L}{2}, \frac{\sqrt{3}}{2}L, z_3)$, 式中 z_1 表示 A 点在空问直角坐标系中 Z 轴的坐标值, z_2 表示 B 点在空问直角坐标系中 Z 轴的坐标值, z_3 表示 C 点在空问直角坐标系中 Z 轴的坐标值,

[0144] 根据 A、B、C 三点的坐标关系, 可得:

$$[0145] \quad \theta_x = \frac{z_3 - \frac{z_1 + z_2}{2}}{\frac{\sqrt{3}}{2}L}, \quad \theta_y = \frac{z_2 - z_1}{L},$$

[0146] 设定 $z_1 + z_2 + z_3 = 0$,

[0147] 求解上式获得:

$$[0148] \quad \begin{bmatrix} z_1 \\ z_2 \\ z_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{\sqrt{3}}{6}L & -\frac{1}{2}L \\ -\frac{\sqrt{3}}{6}L & \frac{1}{2}L \\ \frac{\sqrt{3}}{3}L & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \theta_x \\ \theta_y \end{bmatrix},$$

[0149] 所获得的 z_1 、 z_2 、 z_3 的值即为调平过程中,三个支撑腿 2 上各个伺服音圈电机 6-1 的伺服控制输入量,即支撑腿 2 的位移控制量。

[0150] 本发明中,控制器采用运动控制卡实现。控制器接收到上位机 12 的控制信号后,对控制信号进行参数解析,设置系统时钟、初始化中断、初始化 GPIO 口、初始化变量、控制参数设置等系统初始化工作。

[0151] 调平方法在执行过程中,始终通过接近传感器 8-1 监测伺服音圈电机运动位移是否超出行程阈值,若是,通过控制器 9 控制伺服音圈电机驱动器 6-2 停止驱动;同时通过温度传感器 8-2 监测伺服音圈电机的内部温度是否超过温度阈值,若是,通过控制器 9 控制伺服音圈电机驱动器 6-2 停止驱动,对伺服音圈电机驱动器 6-2 进行安全保护。

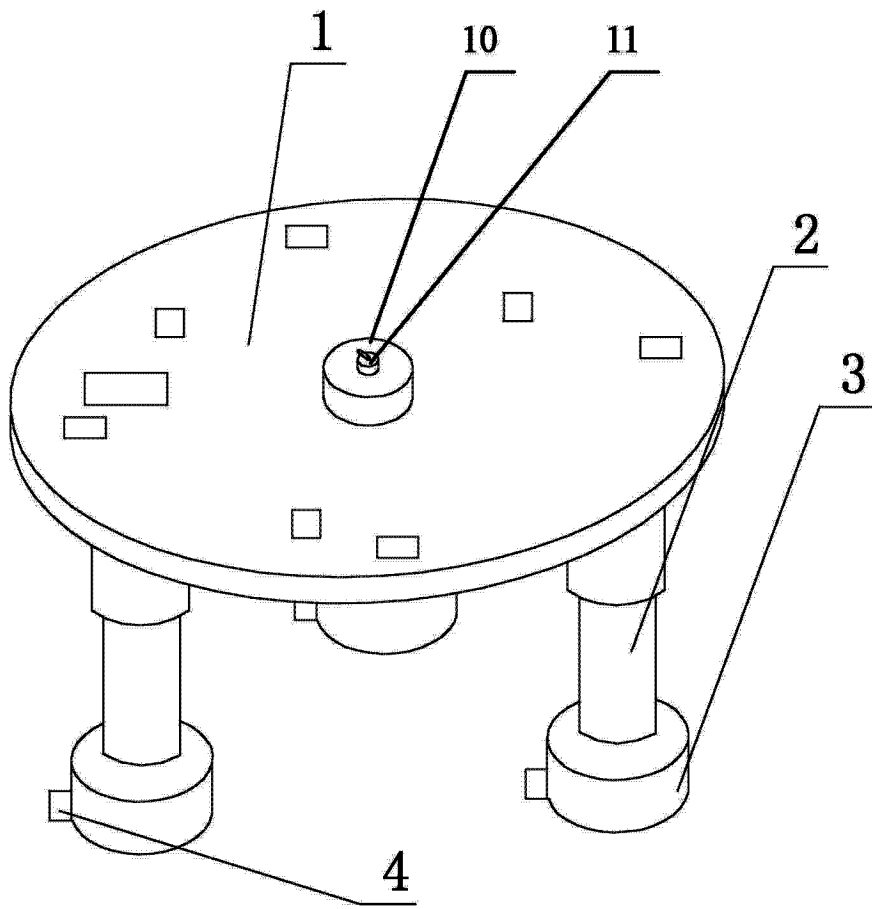


图 1

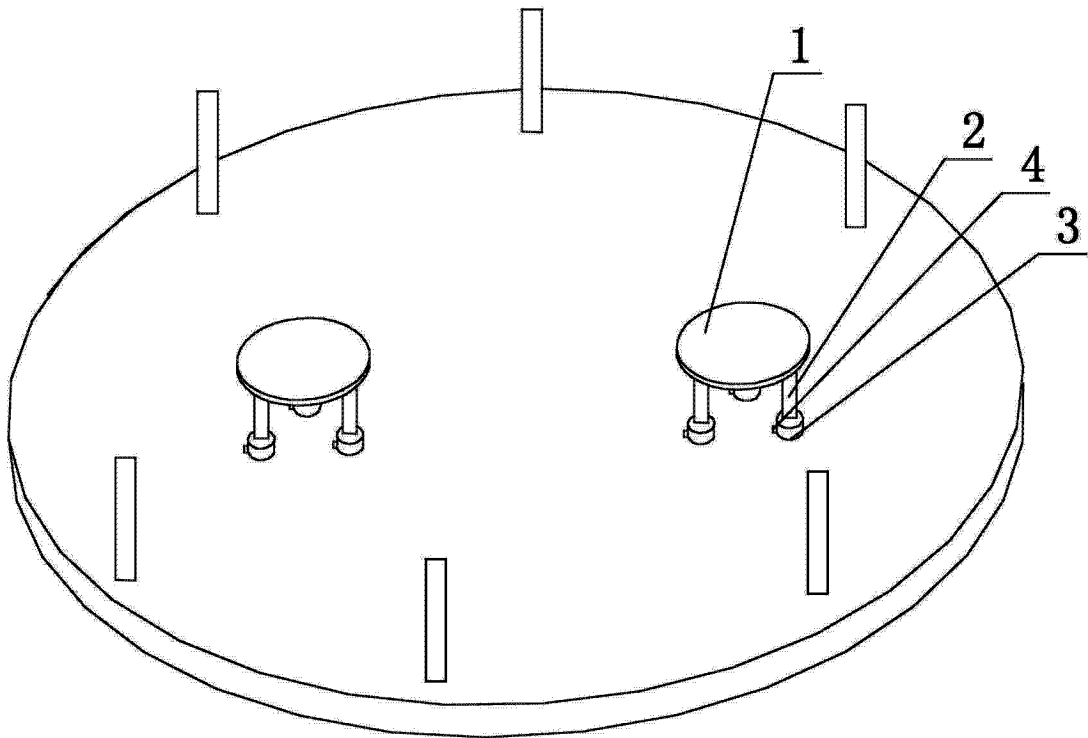


图 2

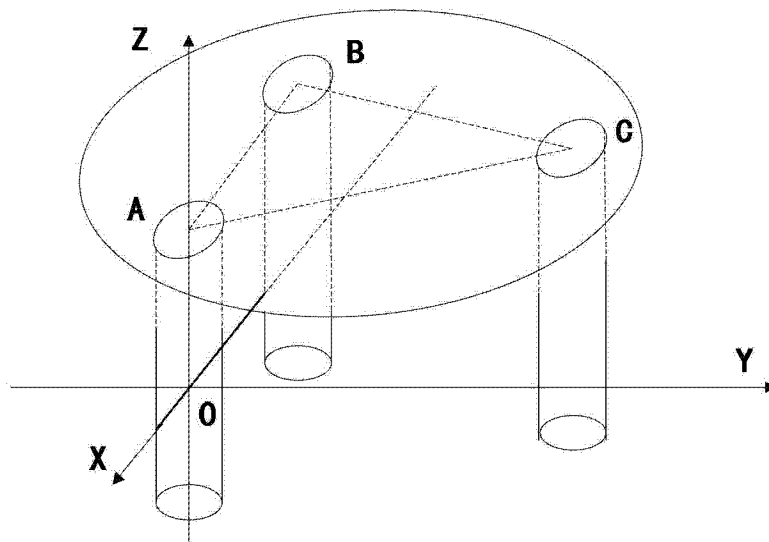


图 3

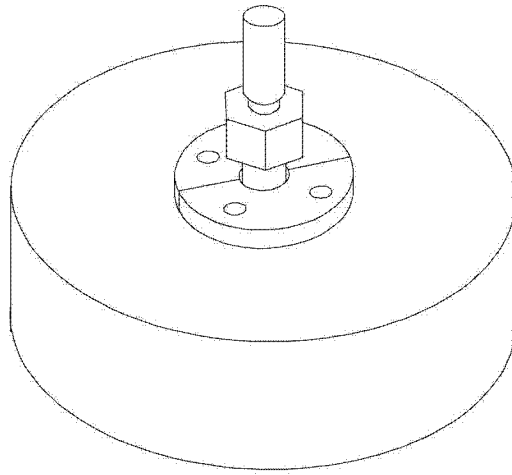


图 4

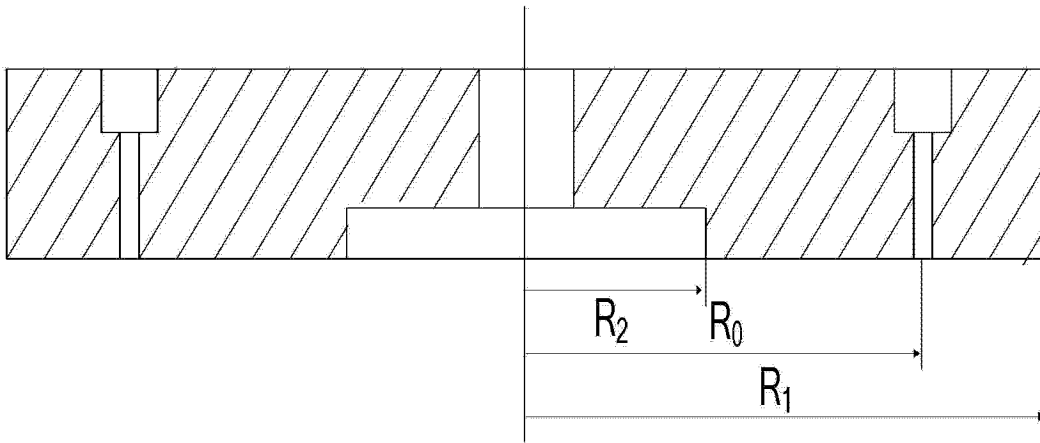


图 5

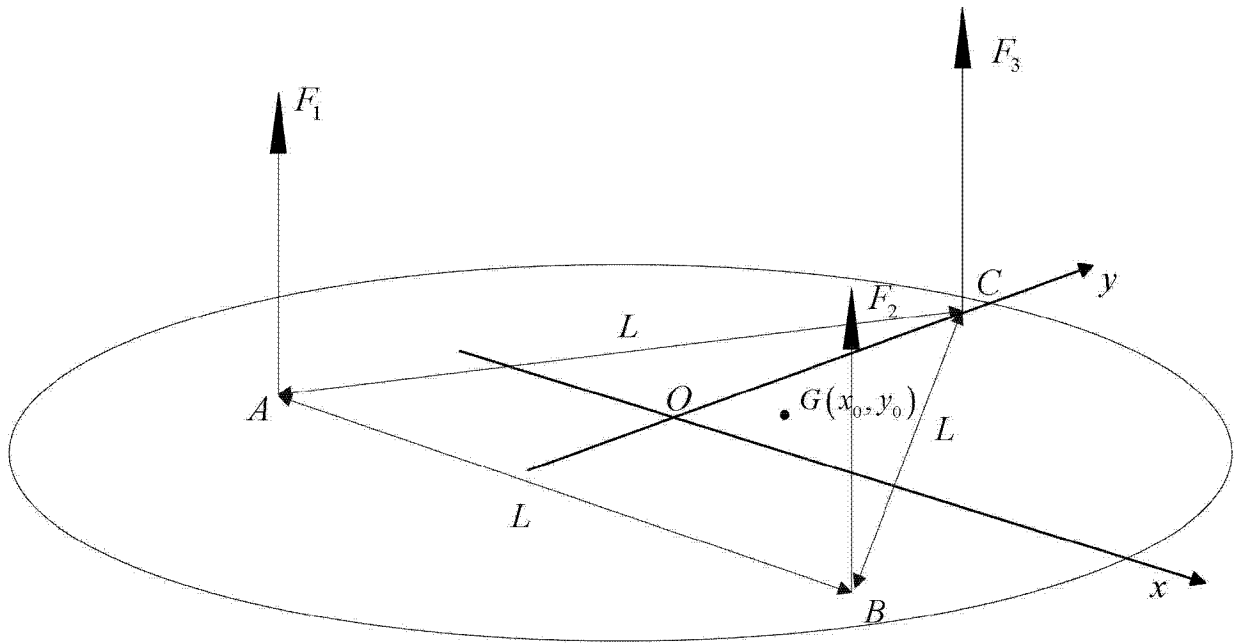


图 6

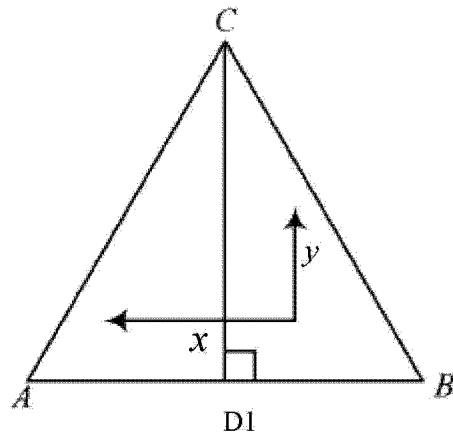


图 7

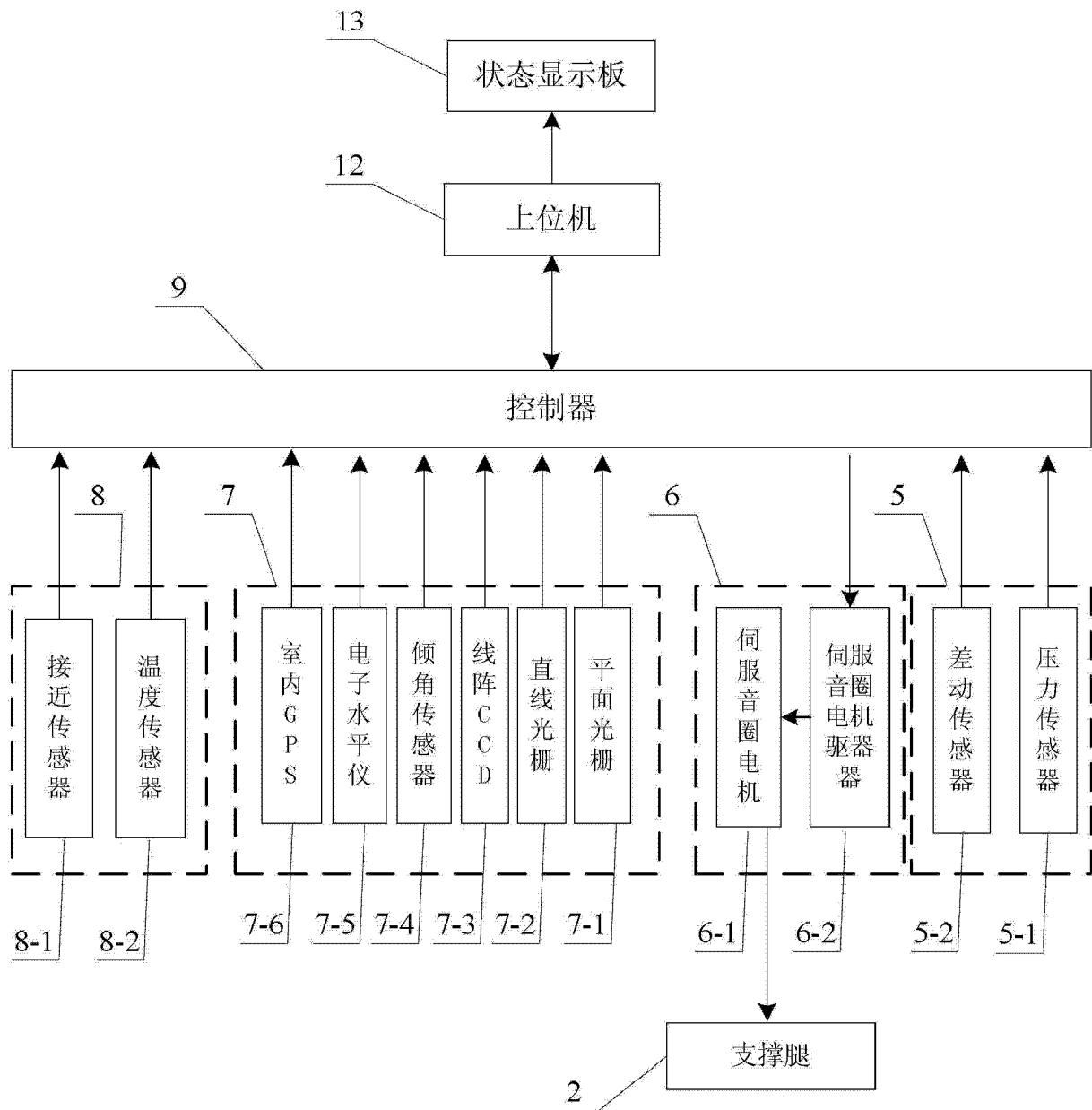


图9

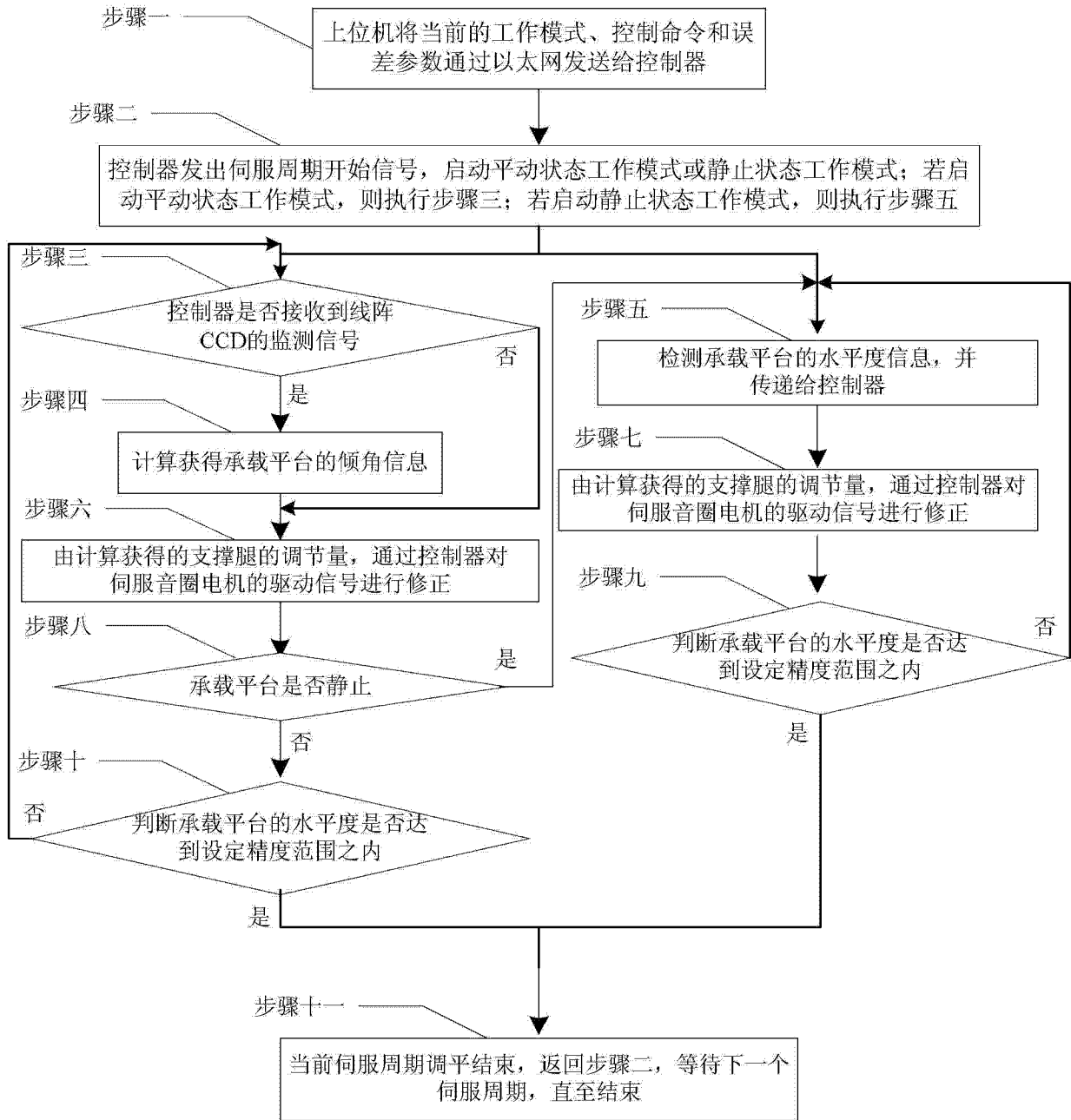


图 10