



(12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 101625277 B

(45) 授权公告日 2011. 07. 27

(21) 申请号 200810135639. 5

US 4214179 A, 1980. 07. 22, 全文.

(22) 申请日 2008. 07. 07

WO 2004/097099 A1, 2004. 11. 11, 说明书第

7 页第 3-5 段, 第 8 页第 5 段.

(73) 专利权人 西门子公司

吴爱国等. 基于 Lagrange 方程建模的单级旋
转倒立摆控制. <<中国工程科学>>. 2005, 第 7 卷

地址 德国慕尼黑

(第 10 期), 11-15.

(72) 发明人 邵晓寅 马维民 王青岗 时文刚

胡喜 邢建辉 卓越

审查员 彭志萍

(74) 专利代理机构 北京市柳沈律师事务所

11105

代理人 张亮

(51) Int. Cl.

G01M 1/16 (2006. 01)

G01M 1/02 (2006. 01)

(56) 对比文件

US 5800331 A, 1998. 09. 01, 全文.

US 5543698 A, 1996. 08. 06, 全文.

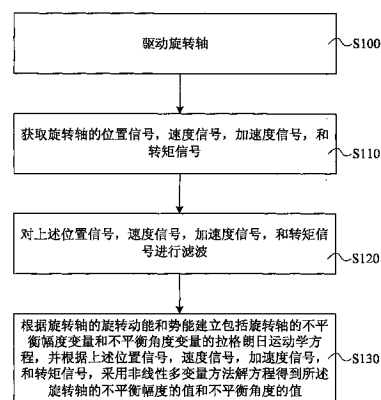
权利要求书 3 页 说明书 10 页 附图 9 页

(54) 发明名称

不平衡状态定量检测方法和装置及工件装夹
状态检测方法

(57) 摘要

本发明提出一种旋转轴的不平衡状态的定量检测方法, 根据旋转轴的旋转动能和势能建立拉格朗日运动学方程, 根据旋转轴的位置信号, 速度信号, 加速度信号, 和转矩信号采用非线性多变量方法解方程得到旋转轴的不平衡幅度的值和不平衡角度的值。上述方法通过应用从电机自身获得的驱动信号便可以方便地得到旋转轴的不平衡幅度和角度的值来精确判断旋转轴的不平衡状态。本发明还相应地提出一种旋转轴的不平衡状态的定量检测装置。本发明还提出一种工件装夹状态的检测方法, 通过应用上述旋转轴的不平衡状态的定量检测方法得到装夹工件前、后的不平衡偏差矢量, 根据偏差矢量的幅度大小便可以有效地得知工件是否被很好地装夹, 避免人工读数产生的偏差。



1. 一种旋转轴的不平衡状态的定量检测方法,其特征在于,包括以下步骤:

- 激励电机以驱动所述旋转轴,采用 S 形正弦复合速度曲线作为所述电机的激励信号,所述复合速度曲线包括位置曲线,速度曲线,和加速度曲线,这些曲线在时间轴方向上划分为加速阶段,正弦速度曲线阶段,和减速阶段,速度曲线的选择使得在上述加速和减速阶段中电机的速度不发生突然变化;

- 获取旋转轴的位置信号,速度信号,加速度信号,和转矩信号;

- 根据旋转轴的旋转动能和势能建立包括旋转轴的不平衡幅度变量和不平衡角度变量的拉格朗日运动学方程,并根据上述位置信号,速度信号,加速度信号,和转矩信号,采用非线性多变量方法解方程得到所述旋转轴的不平衡幅度的值和不平衡角度的值;

其中,所述旋转轴的不平衡幅度为旋转轴的质心至旋转轴的轴线的垂直线段长度与旋转轴的质量之积,旋转轴的不平衡角度为旋转轴的质心至旋转轴的轴线的垂直线段与旋转轴的水平轴面之间的夹角。

2. 根据权利要求 1 所述的旋转轴的不平衡状态的定量检测方法,其特征在于,在获取旋转轴的位置信号,速度信号,加速度信号,和转矩信号后对这些信号进行滤波。

3. 根据权利要求 1 所述的旋转轴的不平衡状态的定量检测方法,其特征在于,所述旋转轴的不平衡幅度:

$$U = m \cdot r$$

其中, m 为旋转轴的质量, r 为旋转轴的质心至旋转轴的轴线的距离。

4. 根据权利要求 3 所述的旋转轴的不平衡状态的定量检测方法,其特征在于,所述旋转轴的旋转动能:

$$K = \frac{1}{2} I \dot{\theta}^2$$

其中, I 为旋转轴的惯量, $\dot{\theta}$ 为旋转轴的速度信号。

5. 根据权利要求 4 所述的旋转轴的不平衡状态的定量检测方法,其特征在于,所述旋转轴的势能:

$$P = mgr[1 + \sin(\theta_0 + \theta)]$$

其中, g 为重力加速度, θ_0 为旋转轴的不平衡角度, θ 为旋转轴的位置信号。

6. 根据权利要求 5 所述的旋转轴的不平衡状态的定量检测方法,其特征在于,根据旋转轴的旋转动能和势能建立包括旋转轴的不平衡幅度变量和不平衡角度变量的拉格朗日运动学方程:

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial L}{\partial \dot{\theta}} - \frac{\partial L}{\partial \theta} = \tau$$

其中, τ 为旋转轴的转矩信号,

$$L = K - P$$

$$\text{即: } L = \frac{1}{2} I \dot{\theta}^2 - mgr[1 + \sin(\theta_0 + \theta)]$$

得到:

$$\frac{d}{dt} (mr^2 \dot{\theta}) - (-mgr \cos(\theta + \theta_0)) = \tau$$

$$\text{即: } I \ddot{\theta} + U g \cos(\theta + \theta_0) = \tau$$

其中, $\ddot{\theta}$ 为旋转轴的加速度信号。

7. 根据权利要求 6 所述的旋转轴的不平衡状态的定量检测方法, 其特征在于, 引入库伦摩擦和粘滞摩擦并改写方程 $I\ddot{\theta} + Ug \cos(\theta + \theta_0) = \tau$ 得到:

$$I\ddot{\theta} + Ug \cos(\theta + \theta_0) + F_{cf} \operatorname{sgn}(\dot{\theta}_f) + F_{vf} \dot{\theta}_f + F_{cr} \operatorname{sgn}(\dot{\theta}_r) + F_{vr} \dot{\theta}_r + \varepsilon = \tau$$

其中, F_{cf} 和 F_{vf} 分别为旋转轴正转时的库伦摩擦系数和粘滞摩擦系数, F_{cr} 和 F_{vr} 分别为旋转轴反转时的库伦摩擦系数和粘滞摩擦系数,

$\dot{\theta}_f$ 和 $\dot{\theta}_r$ 分别为旋转轴正转和反转时的速度信号, 并且

$$\operatorname{sgn}(\dot{\theta}_f) = \begin{cases} 1 & \dot{\theta}_f > 0 \\ 0 & \dot{\theta}_f = 0, \\ -1 & \dot{\theta}_f < 0 \end{cases}$$

$$\operatorname{sgn}(\dot{\theta}_r) = \begin{cases} 1 & \dot{\theta}_r > 0 \\ 0 & \dot{\theta}_r = 0, \\ -1 & \dot{\theta}_r < 0 \end{cases}$$

ε 为模型测量误差。

8. 根据权利要求 7 所述的旋转轴的不平衡状态的定量检测方法, 其特征在于, 所述非线性多变量方法是最小二乘法。

9. 一种旋转轴的不平衡状态的定量检测装置, 其特征在于, 包括:

- 旋转轴驱动单元 (310), 用于激励电机以驱动旋转轴, 采用 S 形正弦复合速度曲线作为所述电机的激励信号, 所述复合速度曲线包括位置曲线, 速度曲线, 和加速度曲线, 这些曲线在时间轴方向上划分为加速阶段, 正弦速度曲线阶段, 和减速阶段, 速度曲线的选择使得在上述加速和减速阶段中电机的速度不发生突然变化;

- 信号获取单元 (320), 用于获取旋转轴的位置信号, 速度信号, 加速度信号, 和转矩信号;

- 不平衡幅度的值和不平衡角度计算单元 (330), 用于根据旋转轴的旋转动能和势能建立包括旋转轴的不平衡幅度变量和不平衡角度变量的拉格朗日运动学方程, 并根据上述信号获取单元获取的位置信号, 速度信号, 加速度信号, 和转矩信号, 采用非线性多变量方法解方程得到所述旋转轴的不平衡幅度的值和不平衡角度的值;

其中, 所述旋转轴的不平衡幅度为旋转轴的质心至旋转轴的轴线的垂直线段长度与旋转轴的质量之积, 旋转轴的不平衡角度为旋转轴的质心至旋转轴的轴线的垂直线段与旋转轴的水平轴面之间的夹角。

10. 一种工件装夹状态的检测方法, 其特征在于, 包括以下步骤:

- 应用权利要求 1-8 任一项所述的旋转轴的不平衡状态的定量检测方法检测未装夹工件时的旋转轴的不平衡幅度和不平衡角度, 得到未装夹工件的不平衡偏差矢量:

$$\vec{M} = A_1 \angle \theta_1$$

其中, A_1 为未装夹工件时的旋转轴的不平衡幅度, θ_1 为未装夹工件时的旋转轴的不平衡角度;

- 应用权利要求 1-8 任一项所述的旋转轴的不平衡状态的定量检测方法检测装夹工件后的旋转轴的不平衡幅度和不平衡角度, 得到装夹工件后的不平衡偏差矢量:

$$\vec{N} = A_2 \angle \theta_2$$

其中, A_2 为未装夹工件时的旋转轴的不平衡幅度, θ_2 为未装夹工件时的旋转轴的不平衡角度;

- 计算未装夹工件的不平衡偏差矢量与装夹工件后的不平衡偏差矢量的差值矢量:

$$\vec{R} = \vec{M} - \vec{N} = A_R \angle \theta_R$$

其中, A_R 为该差值矢量的不平衡幅度, θ_R 为该差值矢量的不平衡角度;

- 根据上述差值矢量确定工件的装夹状态, 其中, 当差值矢量 $\vec{R}$ 的 A_R 越大, 则工件的不平衡偏差越大, 即工件装夹状态越差。

不平衡状态定量检测方法和装置及工件装夹状态检测方法

技术领域

[0001] 本发明涉及旋转轴的不平衡状态的检测方法和装置以及工件装夹状态的检测方法,特别涉及由电机驱动的旋转轴的不平衡状态的定量检测方法和装置以及工件装夹状态的检测方法。

[0002] 随着技术的发展,现代的制造加工过程对制造加工的精度和准度的要求越来越高。

[0003] 但是,制造加工装置(如机床)的电机驱动的旋转轴可能会由于各种原因出现不平衡的状态,这不仅会影响各机械部件的使用寿命,而且还会影响加工的精度和准度:

[0004] - 旋转轴的不平衡状态产生离心力作用,影响平滑转动;

[0005] - 旋转轴的不平衡状态是导致产生振动的一个主要原因;

[0006] - 旋转轴的不平衡状态导致的振动会使工件颤动,影响加工;

[0007] - 旋转轴的不平衡状态导致轴承过度磨损,支撑结构过度疲劳;

[0008] - 旋转轴的不平衡状态导致功率损失。

[0009] 可见,旋转轴是否处于平衡状态,是机械加工中的一个重要的问题,因此有必要提供一种旋转轴的不平衡状态的检测方法。

[0010] 题目为“Rotor imbalance detector for a centrifuge”的美国专利第 4,214,179 号公开了一种通过使用附加的传感器来探测旋转元件的不平衡状态的方法,该传感器探测转子的实际位置和参考位置之间的距离变化,当判断产生不平衡状态时,该传感器发出相应信号。

[0011] 题目为“Imbalance detection and rotor identification system”的美国专利第 5,800,331 号公开了一种使用电传感器来测量系统的振动或者物理压力的方法,当旋转驱动系统从速度为零加速到预定速度的期间,使用加速度仪测量系统的振动,一信号处理系统监视所测量到的振动能量的量级,所述信号处理系统确定所测量到的值的功率谱线密度,从而确定所测量的振动的频率谱线和总能量谱线,通过该振动的能量谱线便可以确定转子的不平衡状态。

[0012] 互联网地址:<http://www.spintelligentlabs.com/SL-docs/4runtutorial.pdf> 公开的技术文献“Four-run balance tutorial:Balance software for the ST-101 and other vibration meters without phase measurement capability”提出了一种使用振动传感器和试重来测量转动元件的不平衡冗余的方法。

[0013] 然而,上述的各种方法需要使用价格昂贵的附加的传感器或者试重,而且这些传感器或者试重很难安装在设备,特别是精密设备的旋转驱动系统中,另外应用这些传感器来测量需要专人来进行,普通技术人员难以进行相关的测量。

[0014] 题目为“Method and apparatus used with AC motor for detection unbalance”的美国专利第 5,543,698 号公开了一种不需使用附加传感器,而是通过电机驱动器信号探测负载不平衡状态的方法,步骤包括:确定一个定子绕组电压和一个定子绕组电流间的相角来生成相角谱线;确定电机驱动器的机械周期期间;确定所述机械周期期间的最大和最

小相角信号差值来生成一个稳定性信号；将所述的稳定性信号与一可接受的稳定性值相比较，如果所述稳定性信号大于所述稳定性值，则生成指示所述负载处于不平衡状态的信号。

[0015] 上述不需使用附加传感器的方法简单而且易于应用，但是这种方法只能定性地检测负载是否处于不平衡状态，而无法提供定量的检测结果，如不平衡幅度和不平衡角度的值，因此无法精确判断所述不平衡状态，从而无法为后续的人工或者自动校正提供相关数据。

[0016] 同样，由于工件装夹状态差通常也会影响加工的精度和准度。以加工机床为例，车床、铣床和各种磨床在加工工件 10 时，通常如图 1(a) 所示将所述工件 10 装夹在工作头 20 和顶针 30 之间，在理想情况下，应当使得所述工件 10 的轴线 110 与由电机驱动的旋转轴的轴线 100 重合，在这种情况下进行加工工件可以最大程度地保证加工的精度和准度。

[0017] 然而，在实际加工过程中，经常会出现肉眼很难判断的工件装夹不当的情况。参见图 1(b)，由于工件 10 定位不当，导致工件 10 的轴线 110 与旋转轴的轴线 100 之间存在距离为 d_1 的偏移；参见图 1(c)，由于工件 10 定位不当，导致工件 10 的轴线 110 与旋转轴的轴线 100 之间存在夹角为 β 的倾斜；参见图 1(d)，由于用于装夹工件 10 的工作头 20 和顶针 30 倾斜，导致工件 10 的轴线 110 与旋转轴的轴线 100 之间存在距离为 d_2 的偏移；参见图 1(f)，由于工件 10 装夹不当，导致工件 10 变形弯曲，其弯曲的轴线 110 与旋转轴的轴线 100 之间存在最大距离为 d_3 的偏移。

[0018] 上述各种工件装夹状态差的情况都会导致加工出现误差，严重影响加工精度和准度，因此有必要提供一种工件装夹状态的检测方法。

[0019] 现有的对工件装夹状态进行检测的方法通常是使用千分表进行手工测量，这种方法效率低下且容易发生读数误差。

[0020] 有鉴于此，本发明提供了一种旋转轴的不平衡状态的定量检测方法，通过检测旋转轴的不平衡幅度的值和不平衡角度的值来精确判断旋转轴的不平衡状态。

[0021] 本发明提供了一种旋转轴的不平衡状态的定量检测装置，通过检测旋转轴的不平衡幅度的值和不平衡角度的值来精确判断旋转轴的不平衡状态。

[0022] 本发明还提供了一种相应的准确高效的工件装夹状态的检测方法。

[0023] 所述的旋转轴的不平衡状态的定量检测方法，包括以下步骤：

[0024] - 激励电机以驱动所述旋转轴，采用 S 形正弦复合速度曲线作为所述电机的激励信号，所述复合速度曲线包括位置曲线，速度曲线，和加速度曲线，这些曲线在时间轴方向上划分为加速阶段，正弦速度曲线阶段，和减速阶段，速度曲线的选择使得在上述加速和减速阶段中电机的速度不发生突然变化；

[0025] - 获取旋转轴的位置信号，速度信号，加速度信号，和转矩信号；

[0026] - 根据旋转轴的旋转动能和势能建立包括旋转轴的不平衡幅度变量和不平衡角度变量的拉格朗日运动学方程，并根据上述位置信号，速度信号，加速度信号，和转矩信号，采用非线性多变量方法解方程得到所述旋转轴的不平衡幅度的值和不平衡角度的值；

[0027] 其中，所述旋转轴的不平衡幅度为旋转轴的质心至旋转轴的轴线的垂直线段长度与旋转轴的质量之积，旋转轴的不平衡角度为旋转轴的质心至旋转轴的轴线的垂直线段与旋转轴的水平轴面之间的夹角。

[0028] 根据本发明的一个方面，在获取旋转轴的位置信号，速度信号，加速度信号，和转

矩信号后对这些信号进行滤波。

[0029] 根据本发明的一个方面,所述非线性多变量方法是最小二乘法。

[0030] 所述得旋转轴的不平衡状态的定量检测装置包括:

[0031] - 旋转轴驱动单元,用于激励电机以驱动旋转轴,采用 S 形正弦复合速度曲线作为所述电机的激励信号,所述复合速度曲线包括位置曲线,速度曲线,和加速度曲线,这些曲线在时间轴方向上划分为加速阶段,正弦速度曲线阶段,和减速阶段,速度曲线的选择使得在上述加速和减速阶段中电机的速度不发生突然变化;

[0032] - 信号获取单元,用于获取旋转轴的位置信号,速度信号,加速度信号,和转矩信号;

[0033] - 不平衡幅度的值和不平衡角度计算单元,用于根据旋转轴的旋转动能和势能建立包括旋转轴的不平衡幅度变量和不平衡角度变量的拉格朗日运动学方程,并根据上述信号获取单元获取的位置信号,速度信号,加速度信号,和转矩信号,采用非线性多变量方法解方程得到所述旋转轴的不平衡幅度的值和不平衡角度的值;

[0034] 其中,所述旋转轴的不平衡幅度为旋转轴的质心至旋转轴的轴线的垂直线段长度与旋转轴的质量之积,旋转轴的不平衡角度为旋转轴的质心至旋转轴的轴线的垂直线段与旋转轴的水平轴面之间的夹角。

[0035] 所述的工件装夹状态的检测方法,包括以下步骤:

[0036] - 应用所述的旋转轴的不平衡状态的定量检测方法检测未装夹工件时的旋转轴的不平衡幅度和不平衡角度,得到未装夹工件的不平衡偏差矢量;

[0037] - 应用所述的旋转轴的不平衡状态的定量检测方法检测装夹工件后的旋转轴的不平衡幅度和不平衡角度,得到装夹工件后的不平衡偏差矢量;

[0038] - 计算未装夹工件的不平衡偏差矢量与装夹工件后的不平衡偏差矢量的差值矢量;

[0039] - 根据上述差值矢量确定工件的装夹状态,其中,当差值矢量的不平衡幅度越大,则工件的不平衡偏差越大,即工件装夹状态越差。

[0040] 本发明旋转轴的不平衡状态的定量检测方法和装置通过应用从电机自身获得的驱动信号便可以方便地得到旋转轴的不平衡幅度的值和不平衡角度的值来精确判断旋转轴的不平衡状态,解决了现有技术需要应用价格昂贵、难以安装、并且不易于使用的附加传感器,或者通过探测电机驱动器信号只能定性地检测负载是否处于不平衡状态的问题。

[0041] 本发明工件装夹状态的检测方法通过应用上述旋转轴的不平衡状态的定量检测方法得到装夹工件前、后的不平衡偏差矢量,根据偏差矢量的幅度大小便可以有效地得知工件是否被很好地装夹,避免人工读数产生的偏差。

附图说明

[0042] 图 1(a)-(f) 是常见的工件装夹状态的示意图;

[0043] 图 2 是本发明旋转轴的不平衡状态的定量检测方法的流程图;

[0044] 图 3 是本发明旋转轴的不平衡状态的定量检测方法用于激励电机的复合速度曲线;

[0045] 图 4 是本发明旋转轴的不平衡状态的定量检测方法的旋转轴的不平衡幅度和不

平衡角度在旋转轴的垂直轴面上的示意图；

[0046] 图 5 是本发明旋转轴的不平衡状态的定量检测方法在旋转轴的垂直轴面不同位置上计算旋转轴的势能的示意图；

[0047] 图 6(a)-(e) 是应用本发明旋转轴的不平衡状态的定量检测方法进行实验的示意图,其中 (a) 是旋转轴未加载额外负荷进行实验的示意图,(b)-(e) 是在旋转轴的不同位置加载额外负荷进行实验的示意图；

[0048] 图 7(a)-(e) 是对应图 6(a)-(e) 的实验的实验结果的极坐标图；

[0049] 图 8 是对应图 7 的旋转轴的不平衡幅度和不平衡角度的实验值与实际值的对比示意图；

[0050] 图 9 是通过旋转轴的不平衡幅度和不平衡角度的实验值得到的旋转轴的转矩随速度变化的实验值与通过测量电机电流然后计算得到的旋转轴的转矩随速度变化的实际值对比示意图；以及

[0051] 图 10 是本发明旋转轴的不平衡状态的定量检测装置的结构示意图；

[0052] 图 11 是本发明工件装夹状态检测方法的流程图。

具体实施方式

[0053] 以下结合图示对本发明进行详细说明。

[0054] 参见图 2,本发明旋转轴的不平衡状态的定量检测方法包括下述步骤：

[0055] 步骤 S100 :驱动旋转轴。

[0056] 在本发明旋转轴的不平衡状态的定量检测方法中,并不使用传感器来定性检测旋转轴是否处于不平衡状态,而是通过驱动信号来定量检测旋转轴的不平衡状态。为了获得高质量的驱动信号,在激励电机以驱动旋转轴时应当对激励信号进行优选,实验表明,旋转轴的不平衡状态对电机在运动开始和结束阶段的信号噪音非常敏感,因此为了减少所述电机在运动在开始和结束阶段的信号噪音,本发明旋转轴的不平衡状态的定量检测方法采用 S 形正弦复合速度曲线 (S-curve and sinusoidal combined velocity profile) 作为所述电机的激励信号。

[0057] 参见图 3,所述复合速度曲线包括位置 (单位 :degree) 曲线,速度 (单位 :degree/min) 曲线,和加速度 (单位 :degree/min²) 曲线。这些曲线在时间轴方向上可以被划分为三个区域,分别为 :区域 1 :加速阶段 ;区域 2 :正弦速度曲线阶段 ;和区域 3 :减速阶段。速度曲线的选择应当使得在上述加速和减速阶段中电机的速度不发生突然变化。通过采用上述复合速度曲线,可以有效地减小电机在运动的开始和结束阶段的信号噪音。

[0058] 步骤 S110 :获取旋转轴的位置信号,速度信号,加速度信号,和转矩 信号。

[0059] 这些信号可以从电机自身轻易获得,例如,可以先获得旋转轴的位置信号,通过求导便可以依次得到速度信号和加速度信号,而转矩信号则可以通过测量电机电流然后计算得到。

[0060] 步骤 S120 :对上述位置信号,速度信号,加速度信号,和转矩信号进行滤波。

[0061] 本步骤为可选步骤,为了进一步优化上述信号,可以对其进行滤波。

[0062] 步骤 S130 :根据旋转轴的旋转动能和势能建立包括旋转轴的不平衡幅度变量和不平衡角度变量的拉格朗日运动学方程,并根据上述位置信号,速度信号,加速度信号,和

转矩信号,采用非线性多变量最小二乘法解方程得到所述旋转轴的不平衡幅度的值和不平衡角度的值。

[0063] 本发明中所述的不平衡幅度和不平衡角度定义如下:其中,所述旋转轴的不平衡幅度为旋转轴的质心至旋转轴的轴线的垂直线段长度与旋转轴的质量之积,旋转轴的不平衡角度为旋转轴的质心至旋转轴的轴线的垂直线段与旋转轴的水平轴面之间的夹角。因此,通过上述的不平衡幅度和不平衡角度,便可以清楚地反映旋转轴的不平衡程度。

[0064] 参见图 4,该图为本发明旋转轴的不平衡状态的定量检测方法的旋转轴的不平衡幅度和不平衡角度在旋转轴的垂直轴面上的示意图。假设旋转轴的质量为 m ,图中圆点所在位置为旋转轴的质心,该旋转轴的质心至旋转轴的轴线的垂直线段长度为 r ,该旋转轴的质心至旋转轴的轴线的垂直线段与旋转轴的水平轴面之间的夹角为 θ_0 ,则旋转轴的不平衡幅度为:

$$[0065] \quad U = m \cdot r \quad (1)$$

[0066] 旋转轴的不平衡角度为: θ_0 。

[0067] 旋转轴的旋转动能可以计算如下:

$$[0068] \quad K = \frac{1}{2} I \dot{\theta}^2 \quad (2)$$

[0069] 其中, K 为旋转轴的旋转动能, I 为旋转轴的惯量, $\dot{\theta}$ 为旋转轴的速度信号。

[0070] 参见图 5,该图为本发明旋转轴的不平衡状态的定量检测方法在旋转轴的垂直轴面不同位置上计算旋转轴的势能的示意图。沿旋转轴的水平轴面和垂直轴面分成第一至第四共四个象限,并且当旋转轴质心如图 5(e) 所示位于水平轴面下方的垂直轴面上时,其势能为零,则其在上述四个象限中分别如图 5(a)–5(d) 所示位置的势能分别为:

$$[0071] \quad \text{第一象限: } P = mgr[1 + \sin(\theta_0 + \theta)]$$

$$[0072] \quad \text{第二象限: } P = mgr[1 + \sin(\pi - \theta_0 - \theta)]$$

$$[0073] \quad \text{第三象限: } P = mgr[1 - \cos(\frac{3\pi}{2} - \theta_0 - \theta)]$$

$$[0074] \quad \text{第四象限: } P = mgr[1 - \cos(\theta_0 + \theta - \frac{3\pi}{2})]$$

[0075] 其中, P 为势能, g 为重力加速度, θ 为旋转轴的位置信号。

[0076] 因此,综合得到:

$$[0077] \quad P = mgr[1 + \sin(\theta_0 + \theta)] \quad (3)$$

[0078] 建立拉格朗日运动学方程:

$$[0079] \quad \frac{d}{dt} \frac{\partial L}{\partial \dot{\theta}} - \frac{\partial L}{\partial \theta} = \tau \quad (4)$$

[0080] 其中,

$$[0081] \quad L = K - P \quad (5)$$

[0082] τ 为旋转轴的转矩信号,将方程 (2) 和 (3) 代入方程 (5) 可得到:

$$[0083] \quad L = \frac{1}{2} I \dot{\theta}^2 - mgr[1 + \sin(\theta_0 + \theta)] \quad (6)$$

[0084] 将方程 (6) 代入方程 (4) 可得到:

$$[0085] \quad \frac{d}{dt}(mr^2\dot{\theta}) - (-mgr \cos(\theta + \theta_0)) = \tau \quad (7)$$

[0086] 即：

$$[0087] \quad I\ddot{\theta} + Ug \cos(\theta + \theta_0) = \tau \quad (8)$$

[0088] 其中， $\ddot{\theta}$ 为旋转轴的加速度信号。

[0089] 至此，便建立了如方程 (8) 所示的包括旋转轴的不平衡幅度变量和不平衡角度变量的拉格朗日运动学方程计算模型。

[0090] 为了使所述模型更加准确，引入库伦 (coulomb) 摩擦和粘滞 (viscous) 摩擦并改写方程 (8) 得到：

$$[0091] \quad I\ddot{\theta} + Ug \cos(\theta + \theta_0) + F_{cf} \operatorname{sgn}(\dot{\theta}_f) + F_{vf} \dot{\theta}_f + F_{cr} \operatorname{sgn}(\dot{\theta}_r) + F_{vr} \dot{\theta}_r + \varepsilon = \tau \quad (9)$$

[0092] 其中，

[0093] F_{cf} 和 F_{vf} 分别为旋转轴正转时的库伦摩擦系数和粘滞摩擦系数，

[0094] F_{cr} 和 F_{vr} 分别为旋转轴反转时的库伦摩擦系数和粘滞摩擦系数，

[0095] $\dot{\theta}_f$ 和 $\dot{\theta}_r$ 分别为旋转轴正转和反转时的速度信号，并且

$$[0096] \quad \operatorname{sgn}(\dot{\theta}_f) = \begin{cases} 1 & \dot{\theta}_f > 0 \\ 0 & \dot{\theta}_f = 0, \\ -1 & \dot{\theta}_f < 0 \end{cases}$$

$$[0097] \quad \operatorname{sgn}(\dot{\theta}_r) = \begin{cases} 1 & \dot{\theta}_r > 0 \\ 0 & \dot{\theta}_r = 0, \\ -1 & \dot{\theta}_r < 0 \end{cases}$$

[0098] ε 为模型测量误差。

[0099] 方程 (9) 所示的计算模型特别适合旋转轴为水平布置的情形，但是本领域技术人员可以理解地，根据方程 (9) 可以轻易地推出类似的适合旋转轴为倾斜布置的情形的计算模型。同理，方程 (9) 只在模型中考虑了库伦摩擦和粘滞摩擦带来的影响，本领域技术人员可以理解地，为了使模型更加精确，还可以考虑其他类型的摩擦带来的影响。

[0100] 在方程 (9) 中， θ ， $\dot{\theta}_f$ ， $\dot{\theta}_r$ ， $\ddot{\theta}$ ，和 τ 分别为上述获得的位置信号，速度信号，加速度信号，和转矩信号已知量， U ， F_{cf} ， F_{vf} ， F_{cr} ， F_{vr} ， θ_0 ，和 I 则为未知量，采用非线性多变量最小二乘法将不同时间的 θ ， $\dot{\theta}_f$ ， $\dot{\theta}_r$ ， $\ddot{\theta}$ ，和 τ 的值代入方程 (9) 并建立方程组便可以求出不平衡幅度 U 的值和不平衡角度 θ_0 的值。

[0101] 参见图 6(a)-6(e)，申请人对本发明旋转轴的不平衡状态的定量检测方法进行了相关实验，并得到如图 7(a)-7(e) 所示的实验结果。

[0102] 图 6(a)：未在旋转轴上加额外负荷。

[0103] 图 6(b)：在旋转轴的 $r = 0.0775\text{m}$ ， $\theta_0 = 60^\circ$ 处加载质量为 0.165Kg 的额外负载。

[0104] 图 6(c)：在旋转轴的 $r = 0.0175\text{m}$ ， $\theta_0 = 60^\circ$ 处加载质量为 0.165Kg 的额外负载。

[0105] 图 6(d)：在旋转轴的 $r = 0.0175\text{m}$ ， $\theta_0 = 240^\circ$ 处加载质量为 0.165Kg 的额外负载。

[0106] 图 6(e) :在旋转轴的 $r = 0.0775\text{m}$, $\theta_0 = 240^\circ$ 处加载质量为 0.165Kg 的额外负载。

[0107] 图 7(a)-7(e) 显示了分别对应图 6(a)-6(e) 的实验的各种结果,这些实验结果通过图示的极坐标图表示,其中,这些极坐标图中的半径坐标(如图中的 0.01 、 0.02 、 0.03 等)表示不平衡幅度值,极角坐标(如图中的 0 、 30 、 60 、...、 330)表示不平衡角度值。

[0108] 所述试验的各种结果包括:以矩形符号标识的采用本发明旋转轴的不平衡状态的定量检测方法得到未加载额外负荷的不平衡幅度和不平衡角度的实验值;以三角形符号标识的净额外负荷的不平衡幅度和不平衡角度的理论值,所述理论值根据图 6(a)-6(e) 中给出的实验参数可以直接确定,例如,在图 6(b) 的实验中,不平衡幅度 $U = m \cdot r = 0.165\text{Kg} \cdot 0.0775\text{m} = 0.0127875\text{Kg} \cdot \text{m}$,不平衡角度 $\theta_0 = 60^\circ$,上述结果相应地在图 7(b) 中以三角形符号在极坐标中的相应位置标识出来;以加号符号标识的加载额外负荷后的不平衡幅度和不平衡角度的实际值,所述的实际值为上述以矩形符号标识的采用本发明旋转轴的不平衡状态的定量检测方法得到未加载额外负荷的不平衡幅度和不平衡角度的实验值分别与以三角形符号标识的净额外负荷的不平衡幅度和不平衡角度的理论值的矢量和;以菱形符号标识的采用本发明旋转轴的不平衡状态的定量检测方法得到加载额外负荷后的不平衡幅度和不平衡角度的实验值。

[0109] 上述的以菱形符号标识的采用本发明旋转轴的不平衡状态的定量检测方法得到加载额外负荷后的不平衡幅度和不平衡角度的实验值与以加号符号标识的加载额外负荷后的不平衡幅度和不平衡角度的实际值的重合程度越高,则本发明旋转轴的不平衡状态的定量检测方法的准确度越高。通过观察图 7(b)-7(e) 可以发现,以菱形符号标识的实验值与以加号符号标识的实际值基本重合,只存在少许偏差,可见则本发明旋转轴的不平衡状态的定量检测方法的准确度比较高。

[0110] 图 8 给出了进一步的所述不平衡幅度和不平衡角度的实验值与实际值的线条对比图,其中,实验次数 1-5 分别对应图 6(a)-6(e) 的各次实验,图中实线条分别表示不平衡幅度和不平衡角度的实际值,虚线条分别表示不平衡幅度和不平衡角度的实验值,可见所述实验值和实际值之间的吻合程度也较高,本发明旋转轴的不平衡状态的定量检测方法得到的结果比较准确地定量反映了旋转轴的不平衡状态,从而可以精确判断所述不平衡状态,为后续的人工或者自动校正提供相关数据。

[0111] 为了进一步证明本发明旋转轴的不平衡状态的定量检测方法的准确性,申请人在不同于上述实验的实验条件下进行了另外的数次实验,所述另外的数次实验的实验参数为:

[0112] 实验一:未在旋转轴上加载额外负荷。

[0113] 实验二:在旋转轴的 $r = 0.055\text{m}$, $\theta_0 = 270^\circ$ 处加载质量为 0.038Kg 的额外负载。

[0114] 实验三:在旋转轴的 $r = 0.055\text{m}$, $\theta_0 = 30^\circ$ 处加载质量为 0.038Kg 的额外负载。

[0115] 上述实验一、二、三分别在相同的实验条件下重复进行 3 次,通过采用本发明旋转轴的不平衡状态的定量检测方法得到旋转轴的不平衡幅度和不平衡角度的实验值,如下表所示:

[0116]

实验	次数	实验值	
		不平衡幅度 (Kg.m)	不平衡角度 (Degree)
实验一	1	0.006188	97.952568
	2	0.006414	97.143258
	3	0.006907	102.156855
实验二	1	0.004186	113.982468
	2	0.004282	112.38793
	3	0.004419	111.098232
实验三	1	0.007939	78.940742
	2	0.007432	87.980809
	3	0.007416	88.936889

[0117] 取上述实验一、二、三的各 3 次实验的不平衡幅度和不平衡角度的平均值,并且与相应的实际值相比较,其中,所述的实际值为采用本发明旋转轴的不平衡状态的定量检测方法得到未加载额外负荷的不平衡幅度和不平衡角度的实验值分别与净额外负荷的不平衡幅度和不平衡角度的理论值的矢量和,所述的比较结果如下表所示:

[0118]

实验	实际值		实验值 (平均值)	
	不平衡幅度 (Kg.m)	不平衡角度 (Degree)	不平衡幅度 (Kg.m)	不平衡角度 (Degree)
实验一	0.006503	99.084227	0.006503	99.084227
实验二	0.00454	104.3789	0.004295667	112.4895433
实验三	0.00742762	85.056989	0.007595667	85.28614667

[0119] 可见,通过取平均值的不平衡幅度和不平衡角度的实验值与实际值更加吻合,因此更准确地定量反映了旋转轴的不平衡状态。

[0120] 本发明旋转轴的不平衡状态的定量检测方法准确地定量反映旋转轴的不平衡状态还可以从其他方面得到验证,如图 9 所示,实线条表示的是如前所述通过测量电机电流然后计算得到的旋转轴的转矩随速度变化的实际值,虚线条表示的是通过采用本发明旋转轴的不平衡状态的定量检测方法得到旋转轴的不平衡幅度值和不平衡角度值后反代入方程 (9) 后求出的旋转轴的转矩随速度变化的实验值,可见,虚线条反映的实验值比较准确地拟合了实线条反映的实际值,因此更加证明了本发明旋转轴的不平衡状态的定量检测方法可以相当准确地反映旋转轴的不平衡状态,从而可以精确判断所述不平衡状态,为后续的人工或者自动校正提供相关数据。

[0121] 相应地,本发明还提出了一种如图 10 所示的旋转轴的不平衡状态的定量检测装置 300。该旋转轴的不平衡状态的定量检测装置 300 包括:旋转轴驱动单元 310,用于驱动旋转轴;信号获取单元 320,与所述旋转轴驱动单元 310 相连,用于获取旋转轴的位置信号,速度信号,加速度信号,和转矩信号;不平衡幅度的值和不平衡角度计算单元 330,与所述信号获取单元 320 相连,用于根据旋转轴的旋转动能和势能建立包括旋转轴的不平衡幅度变量和不平衡角度变量的拉格朗日运动学方程,并根据上述信号获取单元获取的位置信号,速度信号,加速度信号,和转矩信号,采用非线性多变量方法解方程得到所述旋转轴的不平衡幅度的值和不平衡角度的值;其中,所述旋转轴的不平衡幅度为旋转轴的质心至旋转轴的轴线的垂直线段长度与旋转轴的质量之积,旋转轴的不平衡角度为旋转轴的质心至旋转轴的轴线的垂直线段与旋转轴的水平轴面之间的夹角。

[0122] 相应地,本发明还提出了一种如图 11 所示的工件装夹状态的检测方法,该检测方法包括以下步骤:

[0123] 步骤 S200:应用上述旋转轴的不平衡状态的定量检测方法检测未装夹工件时的旋转轴的不平衡幅度和不平衡角度,得到未装夹工件的不平衡偏差矢量:

$$[0124] \quad \vec{M} = A_1 \angle \theta_1 \quad (10)$$

[0125] 其中, A_1 为未装夹工件时的旋转轴的不平衡幅度, θ_1 为未装夹工件时的旋转轴的不平衡角度。

[0126] 步骤 S210:应用上述旋转轴的不平衡状态的定量检测方法检测装夹工件后的旋转轴的不平衡幅度和不平衡角度,得到装夹工件后的不平衡偏差矢量:

$$[0127] \quad \vec{N} = A_2 \angle \theta_2 \quad (11)$$

[0128] 其中, A_2 为未装夹工件时的旋转轴的不平衡幅度, θ_2 为未装夹工件时的旋转轴的不平衡角度。

[0129] 步骤 S220:计算未装夹工件的不平衡偏差矢量与装夹工件后的不平衡偏差矢量的差值矢量:

$$[0130] \quad \vec{R} = \vec{M} - \vec{N} = A_R \angle \theta_R \quad (12)$$

[0131] 其中, A_R 为该差值矢量的不平衡幅度, θ_R 为该差值矢量的不平衡角度。

[0132] 步骤 S220:根据上述差值矢量确定工件的装夹状态。

[0133] 在方程 (12) 中,当差值矢量 $\vec{R}$ 的 A_R 越大,则工件的不平衡偏差越大,即工件装夹

状态越差。

[0134] 以上所述仅为本发明的较佳实施例而已,并不用以限制本发明,凡在本发明的精神和原则之内,所做的任何修改,等同替换,改进等,均应包含在本发明保护的范围之内。

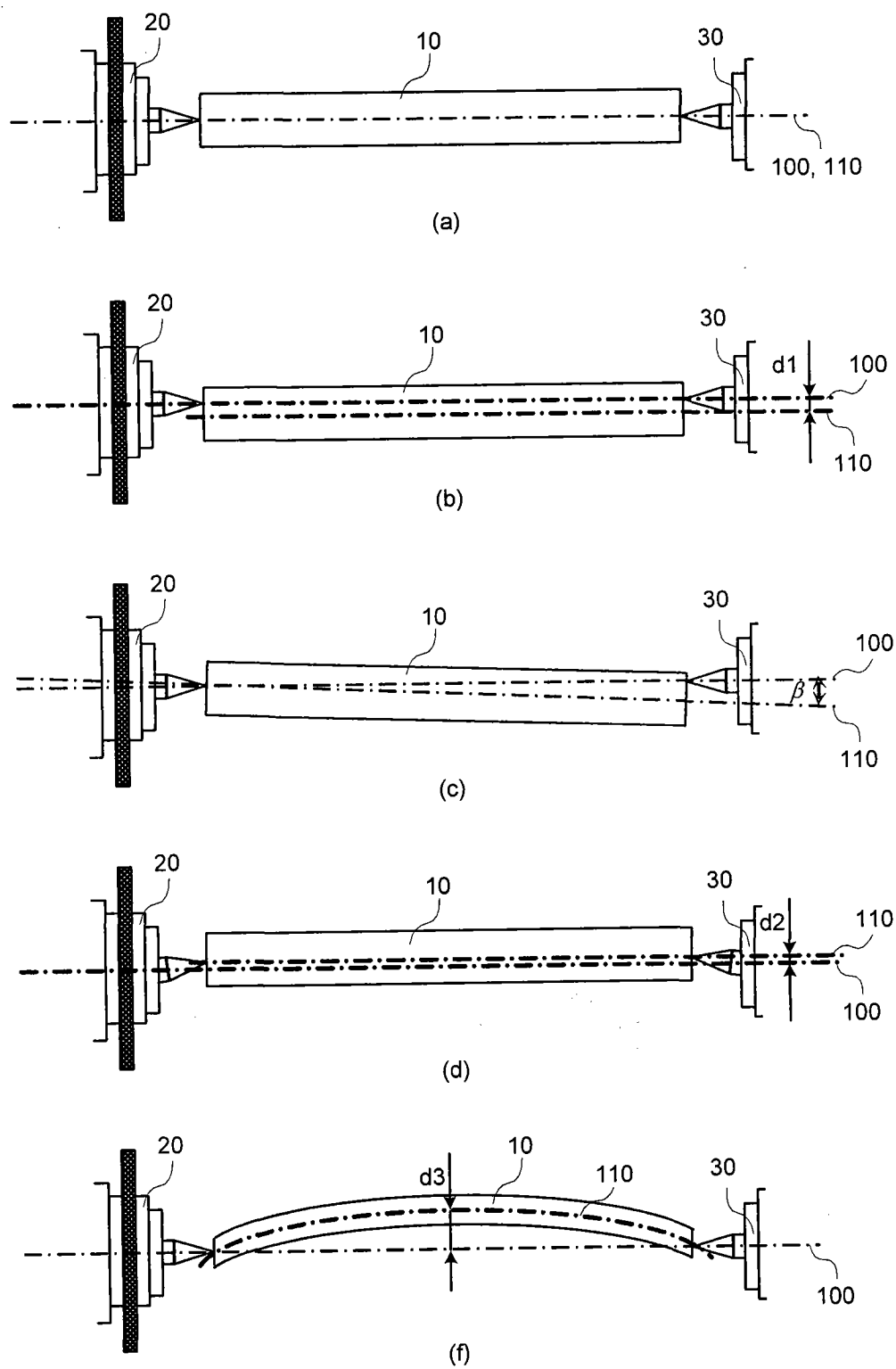


图 1

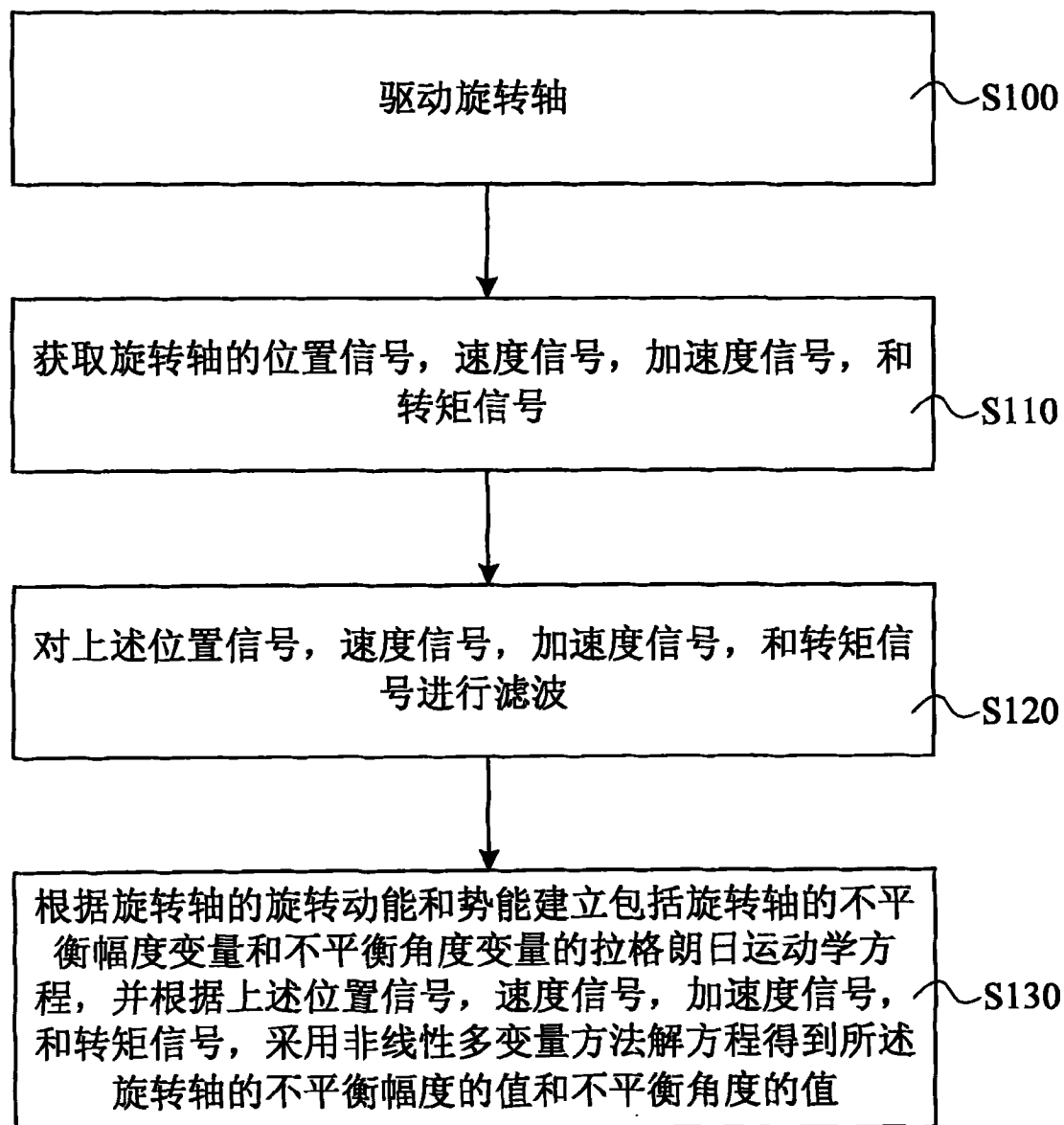


图 2

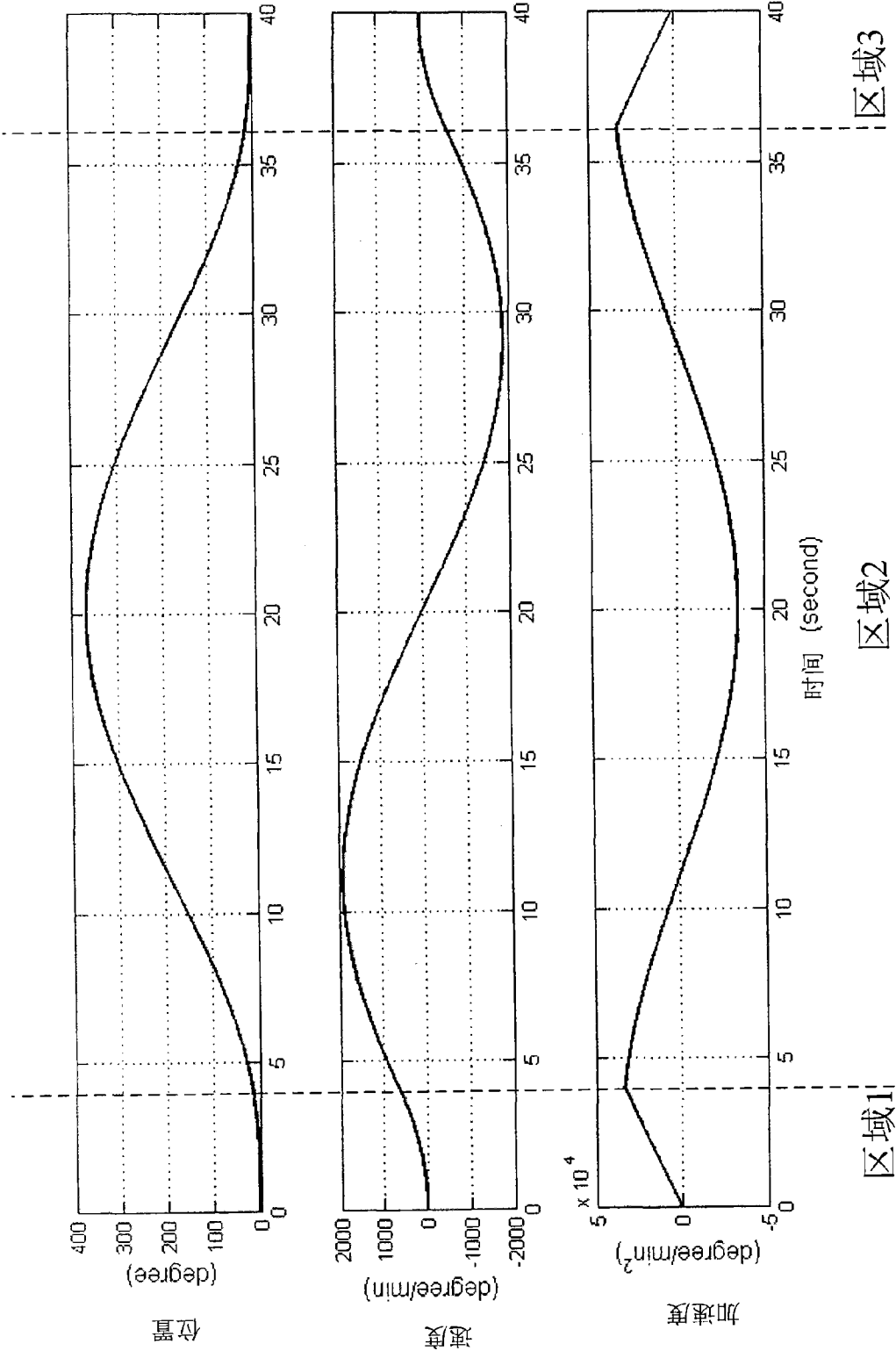


图 3

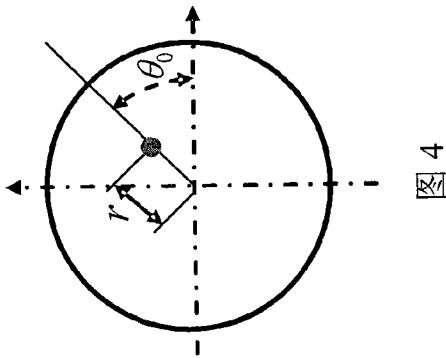


图 4

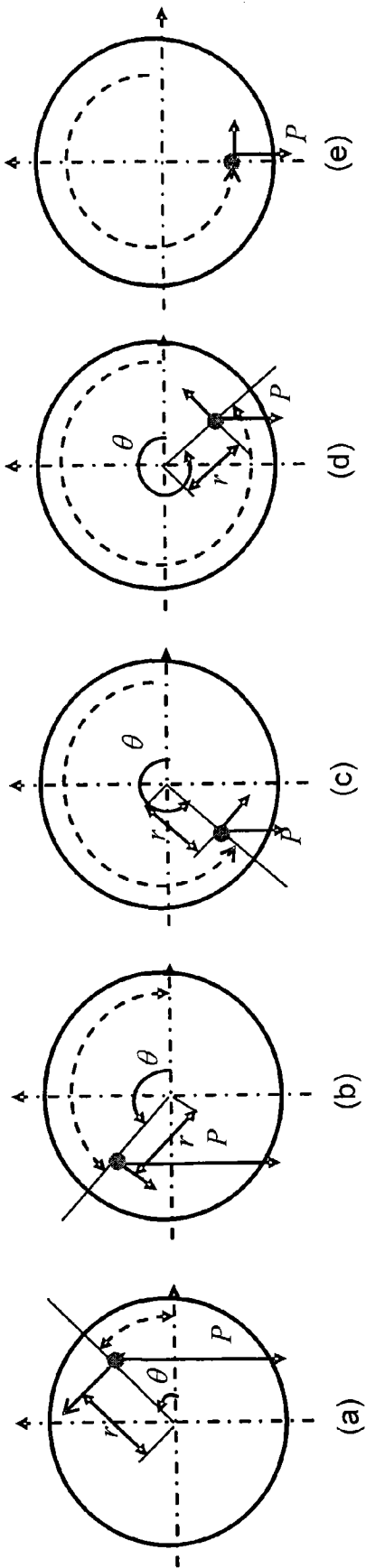


图 5

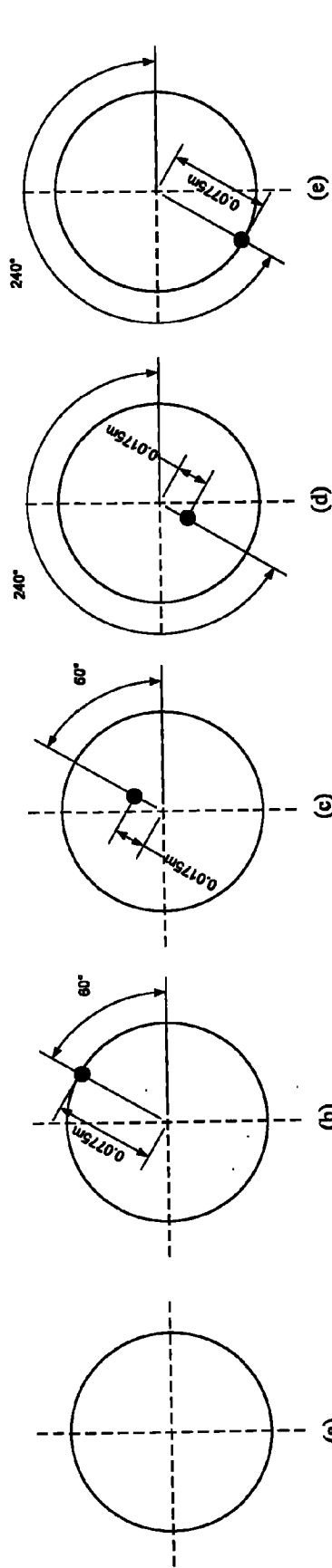


图 6

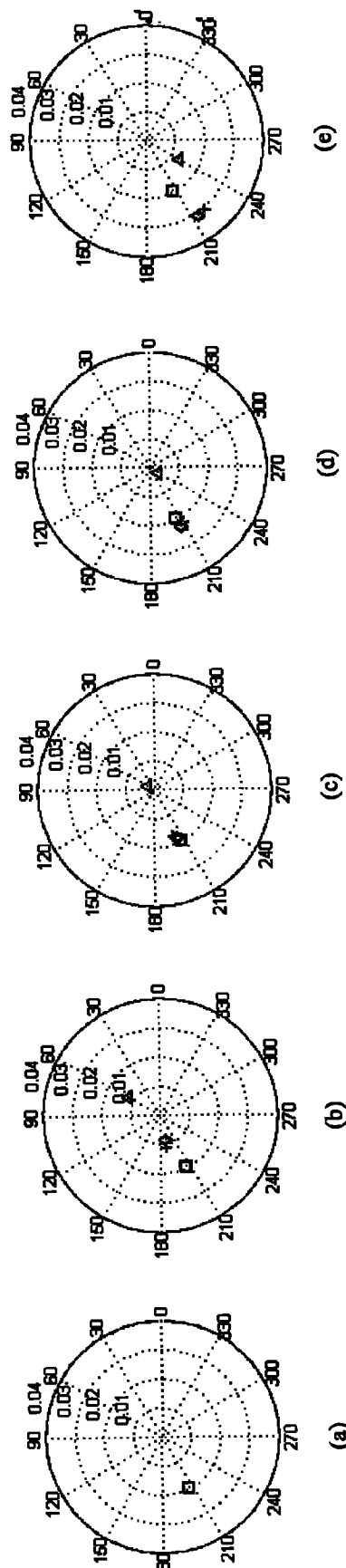


图 7

- 采用本发明旋转轴的平衡的定量检测方法得到未加载额外负荷的不平衡幅度和不平衡角度的实验值
- △ 净额外负荷的不平衡幅度和不平衡角度的理论值
- +
- ◇ 加载额外负荷后的不平衡幅度和不平衡角度的实际值
- ◇ 采用本发明旋转轴的平衡的定量检测方法得到加载额外负荷后的不平衡幅度和不平衡角度的实验值

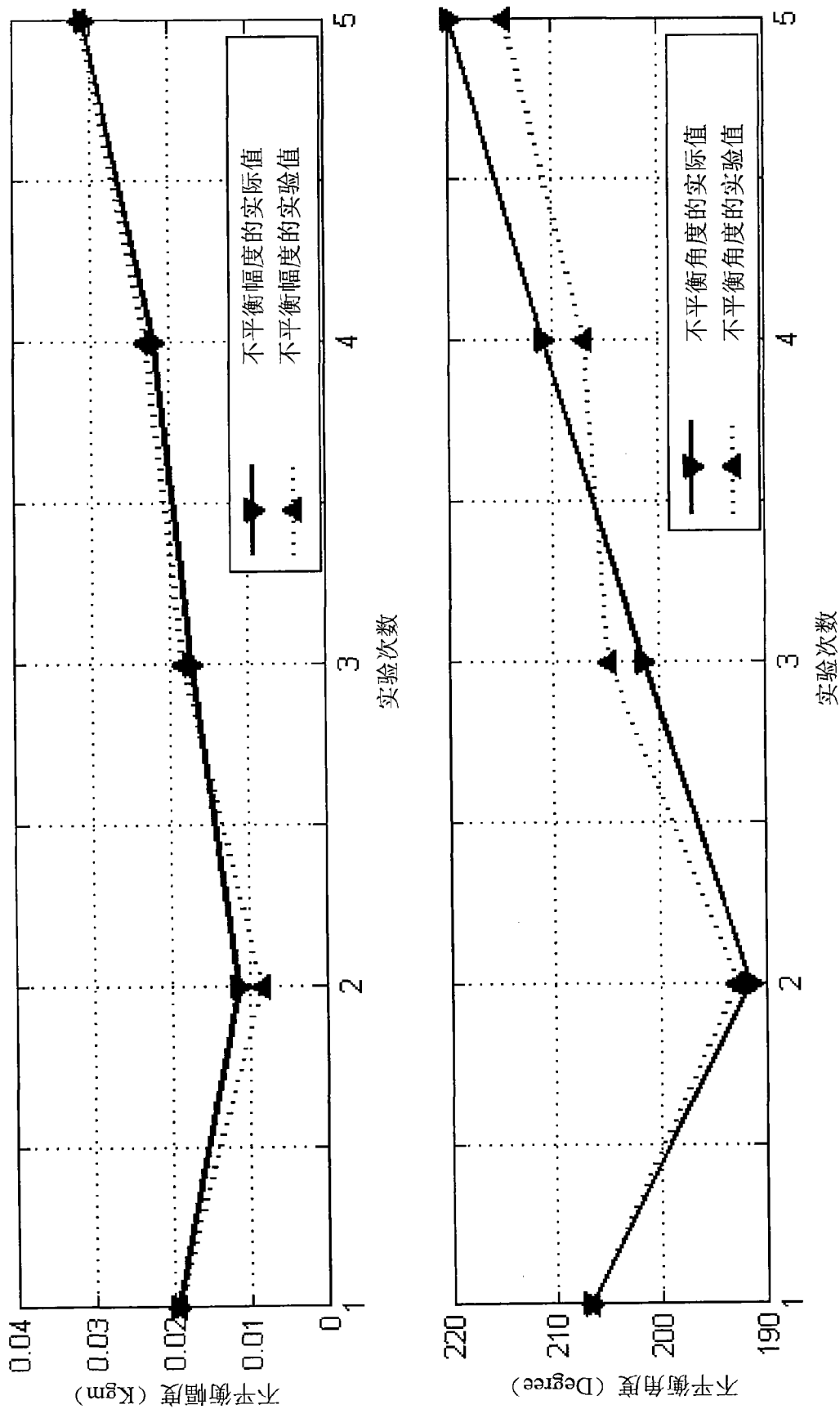


图 8

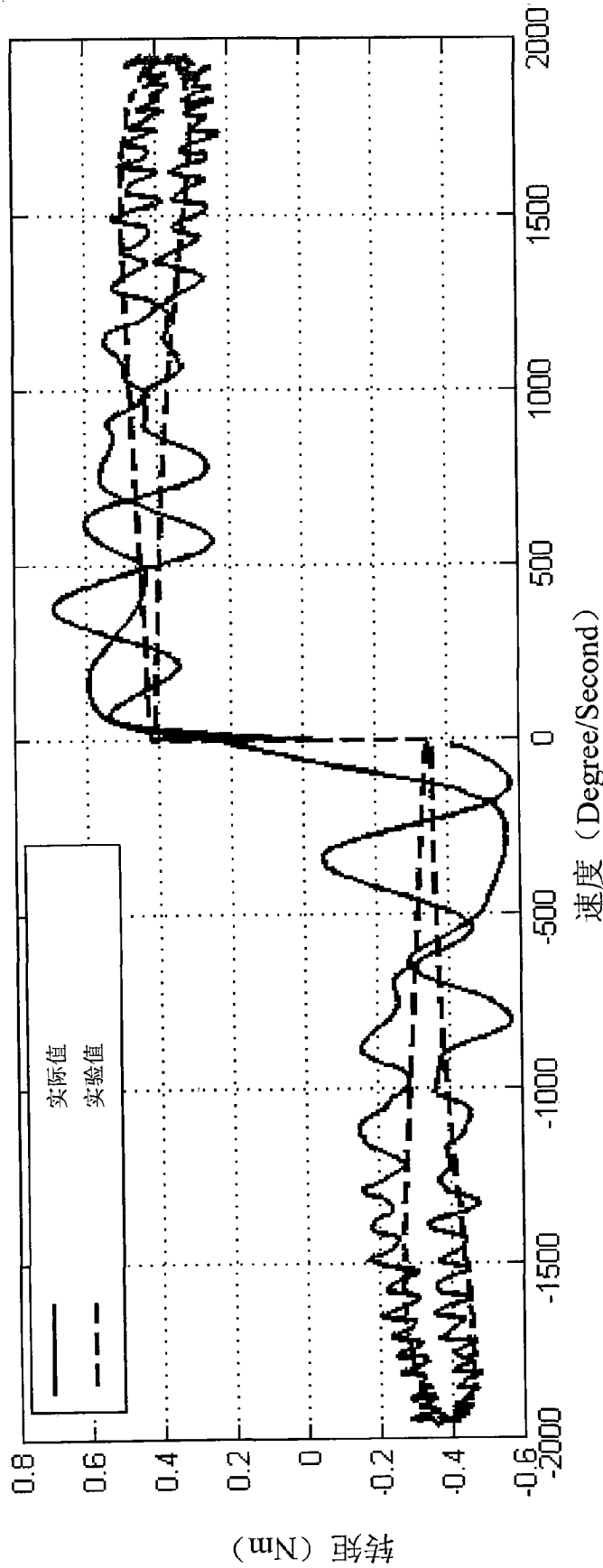


图 9

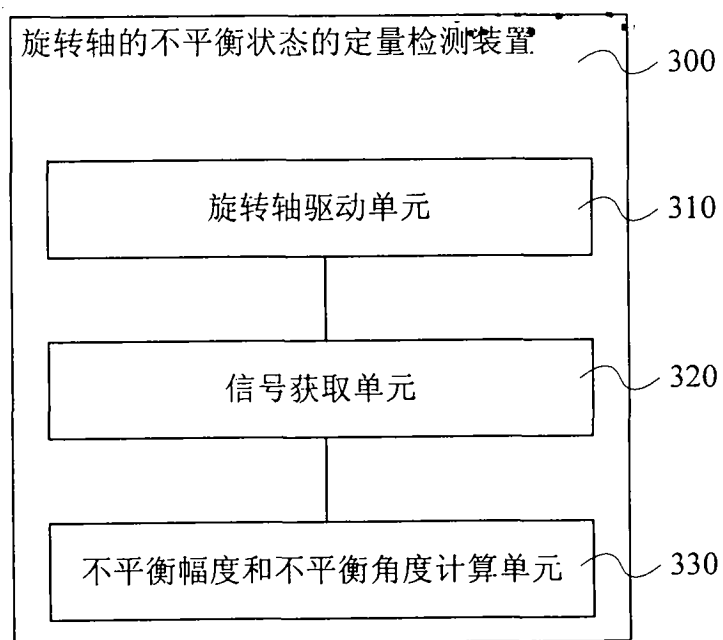


图 10

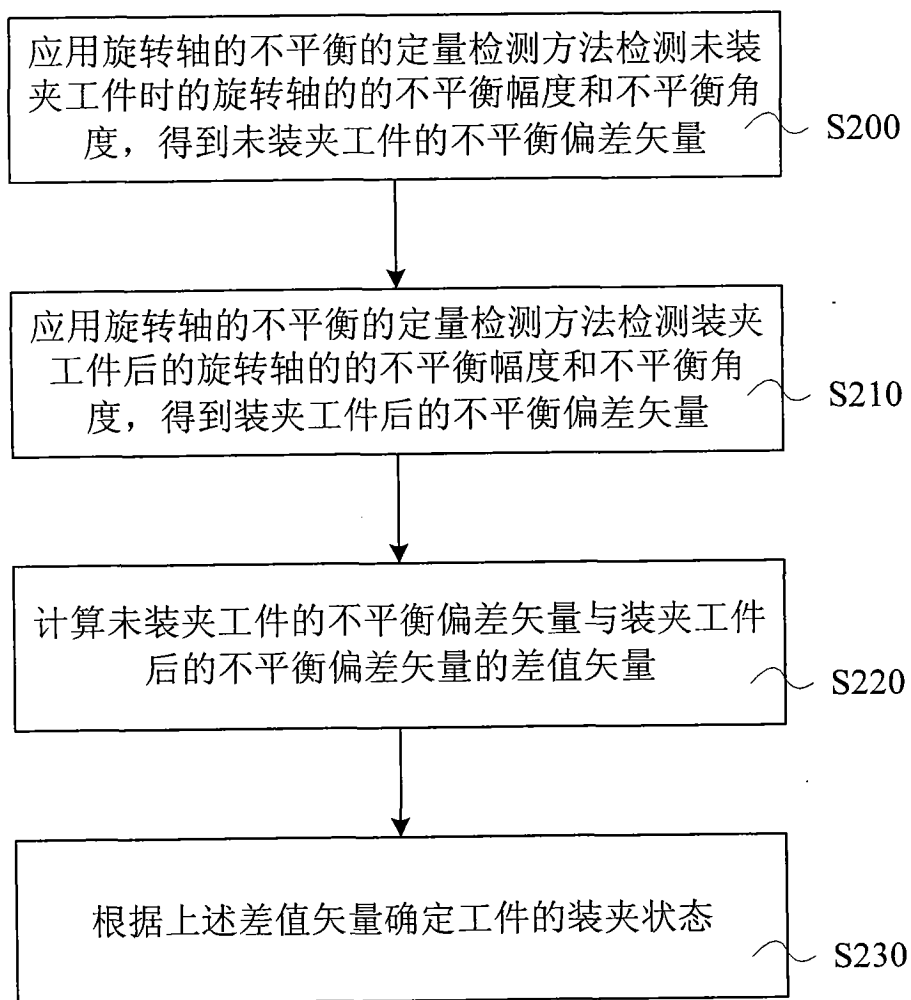


图 11