



# (12)发明专利

(10)授权公告号 CN 106352846 B

(45)授权公告日 2018.08.28

(21)申请号 201610701467.8

(22)申请日 2016.08.22

(65)同一申请的已公布的文献号  
申请公布号 CN 106352846 A

(43)申请公布日 2017.01.25

(73)专利权人 中国科学院西安光学精密机械研究所

地址 710119 陕西省西安市高新区新型工业园信息大道17号

(72)发明人 赵怀学 周艳 田留德 赵建科  
薛勋 潘亮 胡丹丹 段亚轩  
张洁 曹昆 李坤 赛建刚 昌明

(74)专利代理机构 西安智邦专利商标代理有限公司 61211

代理人 汪海艳

(51)Int.Cl.

G01C 1/00(2006.01)

(56)对比文件

CN 101833304 A, 2010.09.15,  
CN 101081481 A, 2007.12.05,  
CN 104482849 A, 2015.04.01,  
CN 101886921 A, 2010.11.17,

审查员 吴腊红

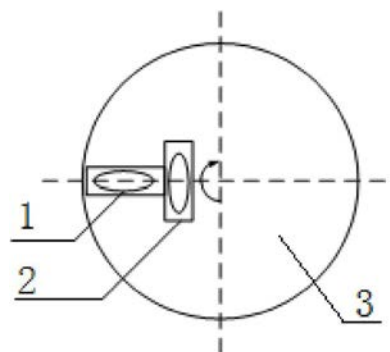
权利要求书2页 说明书4页 附图1页

(54)发明名称

一种倾角回转误差的测试方法

(57)摘要

本发明提供一种倾角回转误差的测试方法,包括以下步骤:将第一电子水平仪和第二电子水平仪互相垂直放置在待测转轴所在的转台的台面上;转动转台,待测转轴跟随转台每间隔 $\Delta\theta^\circ$ 旋转一次,每旋转一次记录电子水平仪的示值,总共旋转角度为转台极限转角;记录两台电子水平仪的示值;根据得到的数据进行数据处理得到待测转轴的倾角回转误差,依据传统倾角回转误差计算方法,针对惯性系统回转范围受限,无法展成傅里叶级数,不能对倾角回转误差进行测试的问题,本发明提出了惯性系统中回转角度受限情况下倾角回转误差的测试方法,给出了倾角回转误差的算法。



1. 一种倾角回转误差的测试方法,其特征在于:包括以下步骤:

步骤一:将第一电子水平仪和第二电子水平仪互相垂直放置在待测转轴所在的转台的台面上;

步骤二:转动转台,待测转轴跟随转台每间隔  $\Delta\theta^\circ$  旋转一次,每旋转一次记录电子水平仪的示值,总共旋转角度为转台极限转角;记旋转次数为  $i, i=1, 2, \dots, n$ ; 记待测转轴的旋转角度为  $\theta_i$ , 其中  $\theta_i = i \times \Delta\theta^\circ$ ; 电子水平仪的示值记为  $w_{xi}$  和  $w_{yi}$ ; 其中  $w_{xi}$  为第一电子水平仪示值;  $w_{yi}$  为第二电子水平仪示值;

步骤三:数据处理

3.1: 利用最小二乘法,拟合测量值  $w_{xi}$  和  $w_{yi}$  的理论曲线;理论曲线如公式(1)所示;

$$\begin{aligned} w'_{xi} &= a_1 + a_2 \cdot \sin(\theta_i + a_3) \\ w'_{yi} &= b_1 + b_2 \cdot \cos(\theta_i + b_3) \end{aligned} \quad (1)$$

式中:

$w'_{xi}$ —待测转轴在各旋转角度时第一电子水平仪的理论示值;

$w'_{yi}$ —待测转轴在各旋转角度时第二电子水平仪的理论示值;

$a_1$ —第一电子水平仪零位引入的零次谐波分量;

$a_2$ —待测转轴自身倾斜在第一电子水平仪所在方向引入的一次谐波分量;

$a_3$ —待测转轴自身倾斜在第一电子水平仪所在方向引入的一次谐波分量的起始相位角;

$b_1$ —第二电子水平仪零位引入的零次谐波分量;

$b_2$ —待测转轴自身倾斜在第二电子水平仪所在方向引入的一次谐波分量;

$b_3$ —待测转轴自身倾斜在第二电子水平仪所在方向引入的一次谐波分量的起始相位角;

3.2: 利用公式(1)得到的理论值,通过公式(2)计算被测转轴的倾角回转误差的两个正交分量  $\Delta w_{xi}$  和  $\Delta w_{yi}$ ;

$$\begin{aligned} \Delta w_{xi} &= w_{xi} - w'_{xi} \\ \Delta w_{yi} &= w_{yi} - w'_{yi} \end{aligned} \quad (2)$$

3.3: 通过公式(3)计算被测转轴的倾角回转误差;

$$\Delta w = \pm \max \left\{ \sqrt{\Delta w_{xi}^2 + \Delta w_{yi}^2} \right\} \quad (3)。$$

2. 一种倾角回转误差的测试方法,其特征在于:包括以下步骤:

步骤一:第一次测量;

1.1: 将电子水平仪放置在待测转轴所在的转台的台面上;

1.2: 转动转台,待测转轴跟随转台每间隔  $\Delta\theta^\circ$  旋转一次,每旋转一次记录电子水平仪的示值,总共旋转角度为转台最大旋转角度;记旋转次数为  $i, i=1, 2, \dots, n$ ; 记待测转轴的旋转角度为  $\theta_i$ , 其中  $\theta_i = i \times \Delta\theta^\circ$ ; 电子水平仪的示值记为  $w_{xi}$ ;

步骤二:第二次测量;

2.1: 将步骤一中所述电子水平仪放置在待测转轴所在的转台的台面上,具体位置和步骤一中该电子水平仪的放置位置相互垂直;

2.2: 转动转台,待测转轴跟随转台每间隔  $\Delta\theta^\circ$  旋转一次,每旋转一次记录电子水平仪

的示值,总共旋转角度为转台最大旋转角度;记旋转次数为 $i, i=1, 2, \dots, n$ ;记待测转轴的旋转角度为 $\theta_i$ ,其中 $\theta_i = i \times \Delta \theta^\circ$ ;电子水平仪的示值记为 $W_{yi}$ ;

步骤三:利用最小二乘法,拟合测量值 $w_{xi}$ 和 $w_{yi}$ 的理论曲线;理论曲线如公式(1)所示;

$$\begin{aligned} w'_{xi} &= a_1 + a_2 \cdot \sin(\theta_i + a_3) \\ w'_{yi} &= b_1 + b_2 \cdot \cos(\theta_i + b_3) \end{aligned} \quad (1)$$

式中:

$w'_{xi}$ —待测转轴在各旋转角度第一次测量时电子水平仪的理论示值;

$w'_{yi}$ —待测转轴在各旋转角度第二次测量时电子水平仪的理论示值;

$a_1$ —第一次测量时电子水平仪零位引入的零次谐波分量;

$a_2$ —待测转轴自身倾斜在第一次测量时电子水平仪所在方向引入的一次谐波分量;

$a_3$ —待测转轴自身倾斜在第一次测量时电子水平仪所在方向引入的一次谐波分量的起始相位角;

$b_1$ —第二次测量时电子水平仪零位引入的零次谐波分量;

$b_2$ —待测转轴自身倾斜在第二次测量时电子水平仪所在方向引入的一次谐波分量;

$b_3$ —待测转轴自身倾斜在第二次测量时电子水平仪所在方向引入的一次谐波分量的起始相位角;

3.2:利用公式(1)得到的理论值,通过公式(2)计算被测转轴的倾角回转误差的两个正交分量 $\Delta w_{xi}$ 和 $\Delta w_{yi}$ ;

$$\begin{aligned} \Delta w_{xi} &= w_{xi} - w'_{xi} \\ \Delta w_{yi} &= w_{yi} - w'_{yi} \end{aligned} \quad (2)$$

3.3:通过公式(3)计算被测转轴的倾角回转误差;

$$\Delta w = \pm \max \left\{ \sqrt{\Delta w_{xi}^2 + \Delta w_{yi}^2} \right\} \quad (3)。$$

3.根据权利要求1或2所述的倾角回转误差的测试方法,其特征在于:所述 $\Delta \theta^\circ$ 等于 $5^\circ$ 。

## 一种倾角回转误差的测试方法

### 技术领域

[0001] 本发明涉及倾角回转误差的测试方法,尤其涉及一种在回转角度受限的情况下倾角回转误差的测试方法。

### 背景技术

[0002] 航天、航海、兵器及大地测量等领域中,惯性系统由于结构限制,回转范围受限,无法连续转动一周。

[0003] 传统倾角回转误差测试方法,需要被测转轴连续转动一周的数据,才能完成傅里叶分析,进而得到倾角回转误差。因此,对于转角受限的待测转轴,传统倾角回转误差测试方法测试数据有限,无法进行傅里叶分析,不再适用倾角回转误差测试。

### 发明内容

[0004] 本发明的目的是提供一种倾角回转误差的测试方法,即使在惯性系统回转角度受限的情况下,也能对倾角回转误差进行测试。

[0005] 本发明的技术解决方案是:

[0006] 一种倾角回转误差的测试方法,包括以下步骤:

[0007] 步骤一:将第一电子水平仪和第二电子水平仪互相垂直放置在待测转轴所在的转台的台面上;

[0008] 步骤二:转动转台,待测转轴跟随转台每间隔  $\Delta\theta^\circ$  旋转一次,每旋转一次记录电子水平仪的示值,总共旋转角度为转台极限转角(转台的最大旋转角度),即旋转至转台不能再旋转为止;记旋转次数为  $i$ ,  $i=1,2,\dots,n$ ;待测转轴的旋转角度为  $\theta_i$ ,其中  $\theta_i=i\times\Delta\theta^\circ$ ;待测转轴在各旋转角度时电子水平仪的示值记为  $W_{xi}$  和  $W_{yi}$ ;其中  $W_{xi}$  为第一电子水平仪示值; $W_{yi}$  为第二电子水平仪示值;

[0009] 步骤三:数据处理

[0010] 3.1:利用最小二乘法,拟合测量值  $W_{xi}$  和  $W_{yi}$  的理论曲线;理论曲线如公式(1) 上示;

$$\begin{aligned} w'_{xi} &= a_1 + a_2 \cdot \sin(\theta_i + a_3) \\ w'_{yi} &= b_1 + b_2 \cdot \cos(\theta_i + b_3) \end{aligned} \quad (1)$$

[0012] 式中:

[0013]  $W'_{xi}$ —待测转轴在各旋转角度时第一电子水平仪的理论示值;

[0014]  $W'_{yi}$ —待测转轴在各旋转角度时第二电子水平仪的理论示值;

[0015]  $a_1$ —第一电子水平仪零位引入的零次谐波分量;

[0016]  $a_2$ —待测转轴自身倾斜在第一电子水平仪所在方向引入的一次谐波分量;

[0017]  $a_3$ —待测转轴自身倾斜在第一电子水平仪所在方向引入的一次谐波分量的起始相位角;

[0018]  $b_1$ —第二电子水平仪零位引入的零次谐波分量;

[0019]  $b_2$ —待测转轴自身倾斜在第二电子水平仪所在方向引入的一次谐波分量;

[0020]  $b_3$ —待测转轴自身倾斜在第二电子水平仪所在方向引入的一次谐波分量的起始相位角；

[0021] 3.2:利用公式(1)得到的理论值,通过公式(2)计算被测转轴的倾角回转误差的两个正交分量  $\Delta W_{xi}$ 和  $\Delta W_{yi}$ ;

$$\begin{aligned} \Delta w_{xi} &= w_{xi} - w'_{xi} \\ \Delta w_{yi} &= w_{yi} - w'_{yi} \end{aligned} \quad (2)$$

[0023] 3.3:通过公式(3)计算被测转轴的倾角回转误差;

$$\Delta w = \pm \max \left\{ \sqrt{\Delta w_{xi}^2 + \Delta w_{yi}^2} \right\} \quad (3)。$$

[0025] 本发明还提供另外一种倾角回转误差的测试方法,在该方法中只用了一台电子水平仪,具体的测试方法如下:

[0026] 步骤一:第一次测量;

[0027] 1.1:将电子水平仪放置在待测转轴所在的转台的台面上;

[0028] 1.2:转动转台,待测转轴跟随转台每间隔  $\Delta \theta^\circ$  旋转一次,每旋转一次记录电子水平仪的示值,总共旋转角度为转台最大旋转角度,即旋转至转台不能再旋转为止;记旋转次数为  $i, i=1, 2, \dots, n$ ;记待测转轴的旋转角度为  $\theta_i$ ,其中  $\theta_i = i \times \Delta \theta^\circ$ ;电子水平仪的示值记为  $W_{xi}$ ;

[0029] 步骤二:第二次测量;

[0030] 2.1:将步骤一中所述电子水平仪放置在待测转轴所在的转台的台面上,具体位置和步骤一中该电子水平仪的放置位置相互垂直;

[0031] 2.2:转动转台,待测转轴跟随转台每间隔  $\Delta \theta^\circ$  旋转一次,每旋转一次记录电子水平仪的示值,总共旋转角度为转台最大旋转角度;即旋转至转台不能再旋转为止,记旋转次数为  $i, i=1, 2, \dots, n$ ;记待测转轴的旋转角度为  $\theta_i$ ,其中  $\theta_i = i \times \Delta \theta^\circ$ ;电子水平仪的示值记为  $W_{yi}$ ;

[0032] 步骤三:利用最小二乘法,拟合测量值  $W_{xi}$ 和  $W_{yi}$ 的理论曲线;理论曲线如公式(1)所示;

$$\begin{aligned} w'_{xi} &= a_1 + a_2 \cdot \sin(\theta_i + a_3) \\ w'_{yi} &= b_1 + b_2 \cdot \cos(\theta_i + b_3) \end{aligned} \quad (1)$$

[0034] 式中:

[0035]  $W'_{xi}$ —待测转轴在各旋转角度第一次测量时电子水平仪的理论示值;

[0036]  $W'_{yi}$ —待测转轴在各旋转角度第二次测量时电子水平仪的理论示值;

[0037]  $a_1$ —第一次测量时电子水平仪零位引入的零次谐波分量;

[0038]  $a_2$ —待测转轴自身倾斜在第一次测量时电子水平仪所在方向引入的一次谐波分量;

[0039]  $a_3$ —待测转轴自身倾斜在第一次测量时电子水平仪所在方向引入的一次谐波分量的起始相位角;

[0040]  $b_1$ —第二次测量时电子水平仪零位引入的零次谐波分量;

[0041]  $b_2$ —待测转轴自身倾斜在第二次测量时电子水平仪所在方向引入的一次谐波分量;

[0042]  $b_3$ —待测转轴自身倾斜在第二次测量时电子水平仪所在方向引入的一次谐波分量的起始相位角；

[0043] 3.2:利用公式(1)得到的理论值,通过公式(2)计算被测转轴的倾角回转误差的两个正交分量  $\Delta W_{xi}$ 和  $\Delta W_{yi}$ ;

$$\begin{aligned} \Delta w_{xi} &= w_{xi} - w'_{xi} \\ \Delta w_{yi} &= w_{yi} - w'_{yi} \end{aligned} \quad (2)$$

[0045] 3.3:通过公式(3)计算被测转轴的倾角回转误差;

$$\Delta w = \pm \max \left\{ \sqrt{\Delta w_{xi}^2 + \Delta w_{yi}^2} \right\} \quad (3)。$$

[0047] 在多数情况下,待测转轴跟随转台每间隔 $5^\circ$ 旋转一次。

[0048] 本发明的有益效果是:

[0049] 依据传统倾角回转误差计算方法,针对惯性系统回转范围受限,无法展成傅里叶级数,不能对倾角回转误差进行测试的问题,本发明提出了惯性系统中回转角度受限情况下倾角回转误差的测试方法,给出了倾角回转误差的算法。

## 附图说明

[0050] 图1为本发明倾角回转误差测试示意图。

[0051] 图中附图标记为:1-第一电子水平仪;2-第二电子水平仪;3-转台台面。

## 具体实施方式

[0052] 以下结合附图对本发明做进一步描述。

[0053] 首先,如图1所示,将第一电子水平仪和第二电子水平仪互相垂直的放置在被测转轴所在的转台台面3上;

[0054] 将待测转轴每间隔一定的度数即  $\Delta \theta^\circ$  旋转一次,本实施例中可以间隔 $5^\circ$ 旋转一次;每旋转一次,记录一次电子水平仪的示值,旋转至转台不能旋转为止。

[0055] 记待测转轴的角度为 $\theta_i$ , $\theta_i = i \times \Delta \theta^\circ$ ,其中*i*为旋转次数, $i = 1, \dots, n$ 。记待测转轴在各相应角位置上第一电子水平仪1的示值为 $W_{xi}$ ,记第二电子水平仪2的示值为 $W_{yi}$ 。

[0056] 通过记录的以上数值进行数据处理:

[0057] 利用最小二乘法,拟合测量值 $W_{xi}$ 和 $W_{yi}$ 的理论曲线。理论曲线如公式(1)所示。

$$\begin{aligned} w'_{xi} &= a_1 + a_2 \cdot \sin(\theta_i + a_3) \\ w'_{yi} &= b_1 + b_2 \cdot \cos(\theta_i + b_3) \end{aligned} \quad (1)$$

[0059] 式中:

[0060]  $W'_{xi}$ —待测转轴在各旋转角度时第一电子水平仪的理论示值;

[0061]  $W'_{yi}$ —待测转轴在各旋转角度时第二电子水平仪的理论示值;

[0062]  $a_1$ —第一电子水平仪零位引入的零次谐波分量;

[0063]  $a_2$ —待测转轴自身倾斜在第一电子水平仪所在方向引入的一次谐波分量;

[0064]  $a_3$ —待测转轴自身倾斜在第一电子水平仪所在方向引入的一次谐波分量的起始相位角;

[0065]  $b_1$ —第二电子水平仪零位引入的零次谐波分量;

[0066]  $b_2$ —待测转轴自身倾斜在第二电子水平仪所在方向引入的一次谐波分量；

[0067]  $b_3$ —待测转轴自身倾斜在第二电子水平仪所在方向引入的一次谐波分量的起始相位角；

[0068] 扣除电子水平仪零位和被测转台旋转轴自身倾斜引入的零次和一次谐波分量，得到被测转轴的倾角回转误差的两个正交分量  $\Delta w_{xi}$  和  $\Delta w_{yi}$ 。

$$\begin{aligned} \Delta w_{xi} &= w_{xi} - w'_{xi} \\ \Delta w_{yi} &= w_{yi} - w'_{yi} \end{aligned} \quad (2)$$

[0070] 计算被测转轴的倾角回转误差，结果取其最大值：

$$\Delta w = \pm \max \left\{ \sqrt{\Delta w_{xi}^2 + \Delta w_{yi}^2} \right\} \quad (3)$$

[0072] 本发明还具有另外一种测试方法，在该方法中只用了一台电子水平仪，进行了两次测量，对两次测量数值进行数据处理得到最终的倾角回转误差。

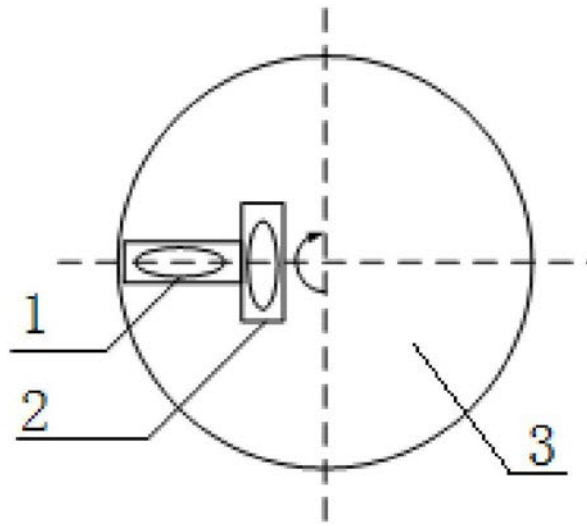


图1