



(12) 发明专利申请

(10) 申请公布号 CN 104865008 A

(43) 申请公布日 2015. 08. 26

(21) 申请号 201510001532. 1

(22) 申请日 2015. 01. 04

(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 张晓琳 唐文彦 王军 邹斌

(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 岳泉清

(51) Int. Cl.

G01M 1/02(2006. 01)

G01M 1/10(2006. 01)

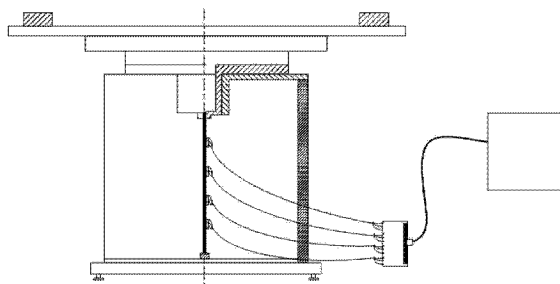
权利要求书2页 说明书7页 附图2页

(54) 发明名称

扭摆法转动惯量测量中扭杆温度补偿方法

(57) 摘要

扭摆法转动惯量测量中扭杆温度补偿方法, 涉及一种扭杆温度补偿方法, 本发明为解决现有利用扭摆法转动惯量测量台测量物体转动惯量的过程中, 扭杆的温度变化影响转动惯量测量台测量精度的问题。本发明基于扭摆法转动惯量测量台实现, 将待测物体放置在转台上, 测量扭杆温度变化时的扭摆周期和转动惯量的变化, 利用最小二乘法拟合曲线的方法获取了扭杆刚度系数 A 随温度变化的规律, 利用该规律对转动惯量测量结果进行温度误差补偿。本发明用于利用扭摆法转动惯量测量台测量物体转动惯量中。



1. 扭摆法转动惯量测量中扭杆温度补偿方法,其特征在于,该温度补偿方法基于扭摆法转动惯量测量台实现,

将待测物体放置在转台上,将转台转过一个角度释放,在忽略了空气阻尼的条件下,刚体对于转台的扭摆周期与刚体对于转动惯量测量台转轴的转动惯量之间有如下关系:

$$J = \frac{D}{4\pi^2} T^2 = AT^2 \quad (1),$$

其中, D 表示扭杆的扭转刚度,  $A = \frac{D}{4\pi^2}$  是与扭杆的扭转刚度有关的系数, T 为扭摆周期;

转动惯量测量台在 23°C 时的转动周期  $T_M$ :

$$T_M = b_k \sqrt{\frac{J_M}{J_k}} \quad (2),$$

其中,  $J_M$  表示实际测量物体的转动惯量,  $J_k$  表示测量台负载的转动惯量,  $b_k$  表示 23°C 时的扭摆周期值;

当扭杆温度变化  $\Delta K$  度时扭杆温度变化对周期的影响值  $T_C$  为:

$$T_C = a_k \Delta K \quad (3),$$

其中,  $a_k$  表示扭摆周期随温度变化的系数;

根据公式 (1)、(2) 和 (3) 获取扭杆温度变化对转动惯量测量值的影响值 R:

$$R = \frac{A (T+T_C)^2 - AT^2}{A (T+T_C)^2} \quad (4);$$

将公式 (2) 和 (3) 带入公式 (4), 获得:

$$R = \left( \frac{a_k}{b_k} \right)^2 \Delta K^2 + \frac{2a_k}{b_k} \Delta K \quad (5),$$

在转台空载、两个标准砝码负载、四个标准砝码负载和六个标准砝码负载四种情况下测量扭杆温度变化时的扭摆周期和转动惯量的变化, 利用最小二乘法拟合出转台扭摆周期随扭杆温度变化的一次曲线, 设拟合出的曲线方程为:

$$y = a_k(x-23) + b_k \quad (6),$$

其中, x 表示扭杆的温度, 单位为°C, y 表示扭杆温度变化时测得的周期数据;

将上述四种情况下获得的  $\frac{a_k}{b_k}$  的平均值带入公式 (5) 中, 获得 R 的准确值为:

$$R = 2.95 \times 10^{-4} \times \Delta K + 2.16 \times 10^{-8} \times \Delta K^2 \quad (7);$$

获得温度对转动惯量测量精度影响的表达式:  $R = (2.95 \times 10^{-2} \times \Delta K) \%$ ;

对扭杆的扭转刚度有关的系数 A 进行修正后的转动惯量为:

$$J = A(1 - 2.95 \times 10^{-4} \times \Delta K) T_M^2 - J_0,$$

其中,  $J_0$  为 23°C 时空载转台的转动惯量值,  $J_0 = 93.42 \text{Kg} \cdot \text{m}^2$ ;

对扭杆的扭转刚度有关的系数 A 进行修正后即为对温度导致的转动惯量测量误差进行补偿。

2. 根据权利要求 1 所述的扭摆法转动惯量测量中扭杆温度补偿方法,其特征在于,在转台空载、两个标准砝码负载、四个标准砝码负载和六个标准砝码负载四种情况下,  $a_k$  分别为:  $4.15 \times 10^{-4}$ 、 $5.35 \times 10^{-4}$ 、 $6.29 \times 10^{-4}$ 、 $6.60 \times 10^{-4}$ ,  $b_k$  分别为: 2.84、3.60、4.21 和 4.53。

3. 根据权利要求 1 所述的扭摆法转动惯量测量中扭杆温度补偿方法,其特征在于,测量的相对误差为:

$$\delta = \frac{J - J_s}{J_s} \times 100\%。$$

## 扭摆法转动惯量测量中扭杆温度补偿方法

### 技术领域

[0001] 本发明涉及一种扭杆温度补偿方法。

### 背景技术

[0002] 在利用扭摆法转动惯量测量台测量物体转动惯量的过程中,环境温度的变化或者扭杆扭摆过程中的发热都会使得扭杆的温度发生变化,扭杆的温度变化使得其扭摆周期发生变化。所以,扭杆的温度变化会给转动惯量测量台的测量的精度带来一定的影响。

[0003] 国内研制的转动惯量测量仪器现阶段大部分都没有提出扭杆温度变化对测量精度的影响情况,也都未采取相应的温度补偿措施。国外的一些转动惯量测量仪器精度要优于国内的产品,有些产品考虑到了温度对测量精度的影响并且提出了一些减小温度影响的措施,比如美国空间电子公司(Space Electronics)的GB系列产品(GB3300和GB8800)转动惯量的测量精度达到0.1%,为了使测量达到最优的精度,要求在使用此系列产品时周围环境温度的变化控制在 $\pm 1^{\circ}\text{C}$ 内,并且采用扭杆底端连接到扭杆夹的方式来减少由于机架热膨胀以及气浮轴承间隙微小变化导致的扭杆刚度变化。

[0004] 温度对物体物理性能的影响情况往往受到物体的材料种类、物体的形状特性以及环境温度的变化情况等多方面的影响,实际研究中常常采用的是实验的方法,通过具体的实验来找出温度变化对物体的物理特性的影响规律。此研究就是通过实验找出温度变化对转动惯量测量台测量精度的影响的规律,根据找出的规律,对扭杆温度变化所导致的测量误差进行补偿和修正。

### 发明内容

[0005] 本发明目的是为了解决现有利用扭摆法转动惯量测量台测量物体转动惯量的过程中,扭杆的温度变化影响转动惯量测量台测量精度的问题,提供了一种扭摆法转动惯量测量中扭杆温度补偿方法。

[0006] 本发明所述扭摆法转动惯量测量中扭杆温度补偿方法,该温度补偿方法基于扭摆法转动惯量测量台实现,

[0007] 将待测物体放置在转台上,将转台转过一个角度释放,在忽略了空气阻尼的条件下,刚体对于转台的扭摆周期与刚体对于转动惯量测量台转轴的转动惯量之间有如下关系:

$$[0008] \quad J = \frac{D}{4\pi^2} T^2 = AT^2 \quad (1),$$

[0009] 其中,D表示扭杆的扭转刚度, $A = \frac{D}{4\pi^2}$ 是与扭杆的扭转刚度有关的系数,T为扭摆周期;

[0010] 转动惯量测量台在 $23^{\circ}\text{C}$ 时的转动周期 $T_M$ :

$$[0011] \quad T_M = b_k \sqrt{\frac{J_M}{J_k}} \quad (2),$$

[0012] 其中,  $J_M$ 表示实际测量物体的转动惯量,  $J_k$ 表示测量台负载的转动惯量,  $b_k$ 表示 23℃时的扭摆周期值;

[0013] 当扭杆温度变化 $\Delta K$ 度时扭杆温度变化对周期的影响值  $T_C$ 为:

$$[0014] \quad T_C = a_k \Delta K \quad (3),$$

[0015] 其中,  $a_k$ 表示扭摆周期随温度变化的系数;

[0016] 根据公式 (1)、(2) 和 (3) 获取扭杆温度变化对转动惯量测量值的影响值  $R$ :

$$[0017] \quad R = \frac{A (T+T_C)^2 - AT^2}{A (T+T_C)^2} \quad (4);$$

[0018] 将公式 (2) 和 (3) 带入公式 (4), 获得:

$$[0019] \quad R = \left( \frac{a_k}{b_k} \right)^2 \Delta K^2 + \frac{2a_k}{b_k} \Delta K \quad (5),$$

[0020] 在转台空载、两个标准砝码负载、四个标准砝码负载和六个标准砝码负载四种情况下测量扭杆温度变化时的扭摆周期和转动惯量的变化, 利用最小二乘法拟合出转台扭摆周期随扭杆温度变化的一次曲线, 设拟合出的曲线方程为:

$$[0021] \quad y = a_k(x-23) + b_k \quad (6),$$

[0022] 其中,  $x$ 表示扭杆的温度, 单位为℃,  $y$ 表示扭杆温度变化时测得的周期数据;

[0023] 将上述四种情况下获得的  $\frac{a_k}{b_k}$  的平均值带入公式 (5) 中, 获得  $R$  的准确值为:

$$[0024] \quad R = 2.95 \times 10^{-4} \times \Delta K + 2.16 \times 10^{-8} \times \Delta K^2 \quad (7);$$

[0025] 获得温度对转动惯量测量精度影响的表达式:  $R = (2.95 \times 10^{-2} \times \Delta K) \%$ ;

[0026] 对扭杆的扭转刚度有关的系数  $A$  进行修正后的转动惯量为:

$$[0027] \quad J = A(1 - 2.95 \times 10^{-4} \times \Delta K) T_M^2 - J_0,$$

[0028] 其中,  $J_0$ 为 23℃时空载转台的转动惯量值,  $J_0 = 93.42 \text{Kg} \cdot \text{m}^2$ ;

[0029] 对扭杆的扭转刚度有关的系数  $A$  进行修正后即为对温度导致的转动惯量测量误差进行补偿。

[0030] 本发明的优点: 本发明提出的扭摆法转动惯量测量中扭杆温度补偿方法减少了扭摆法测量转动惯量时扭杆温度的变化对测量精度的影响, 在实验的基础上, 利用最小二乘法拟合曲线的方法给出了扭杆刚度系数  $A$  随温度变化的规律的准确公式。利用此公式对转动惯量测量结果进行温度误差补偿, 当扭杆温度由 20℃ 升高至 40℃ 时, 对比补偿前后的结果表明, 未进行温度误差补偿时的测量误差在 1% 左右, 进行温度补偿后转动惯量的测量误差不超过 0.06%, 验证了温度误差补偿的有效性。采用该补偿方法, 能有效的降低温度对测量精度的影响。

## 附图说明

[0031] 图 1 是本发明所述扭摆法转动惯量测量的装置结构示意图;

[0032] 图 2- 图 5 是不同负载情况下扭摆周期随扭杆温度变化情况及拟合曲线, 图 2 表示

空载,图 3 表示两个砝码负载,图 4 表示四个砝码负载,图 5 表示六个砝码负载,直线表示拟合曲线,另外曲线表示测量结果;

[0033] 图 6-图 9 是对系数 A 进行修正后的转动惯量测量结果对照图,图 6 表示空载,图 7 表示两个砝码负载,图 8 表示四个砝码负载,图 9 表示六个砝码负载,曲线 a 表示测量值曲线,曲线 b 表示修正值曲线,曲线 c 表示理论值曲线。

### 具体实施方式

[0034] 具体实施方式一:下面结合图 1 说明本实施方式,本实施方式所述扭摆法转动惯量测量中扭杆温度补偿方法,其特征在于,该温度补偿方法基于扭摆法转动惯量测量台实现,

[0035] 将待测物体放置在转台上,将转台转过一个角度释放,在忽略了空气阻尼的条件下,刚体对于转台的扭摆周期与刚体对于转动惯量测量台转轴的转动惯量之间有如下关系:

$$[0036] \quad J = \frac{D}{4\pi^2} T^2 = AT^2 \quad (1),$$

[0037] 其中,D 表示扭杆的扭转刚度,  $A = \frac{D}{4\pi^2}$  是与扭杆的扭转刚度有关的系数,T 为扭摆周期;

[0038] 转动惯量测量台在 23℃ 时的转动周期  $T_M$ :

$$[0039] \quad T_M = b_k \sqrt{\frac{J_M}{J_k}} \quad (2),$$

[0040] 其中,  $J_M$  表示实际测量物体的转动惯量,  $J_k$  表示测量台负载的转动惯量,  $b_k$  表示 23℃ 时的扭摆周期值;

[0041] 当扭杆温度变化  $\Delta K$  度时扭杆温度变化对周期的影响值  $T_C$  为:

$$[0042] \quad T_C = a_k \Delta K \quad (3),$$

[0043] 其中,  $a_k$  表示扭摆周期随温度变化的系数;

[0044] 根据公式 (1)、(2) 和 (3) 获取扭杆温度变化对转动惯量测量值的影响值 R:

$$[0045] \quad R = \frac{A (T+T_C)^2 - AT^2}{A (T+T_C)^2} \quad (4);$$

[0046] 将公式 (2) 和 (3) 带入公式 (4), 获得:

$$[0047] \quad R = \left( \frac{a_k}{b_k} \right)^2 \Delta K^2 + \frac{2a_k}{b_k} \Delta K \quad (5),$$

[0048] 在转台空载、两个标准砝码负载、四个标准砝码负载和六个标准砝码负载四种情况下测量扭杆温度变化时的扭摆周期和转动惯量的变化,利用最小二乘法拟合出转台扭摆周期随扭杆温度变化的一次曲线,设拟合出的曲线方程为:

$$[0049] \quad y = a_k(x-23) + b_k \quad (6),$$

[0050] 其中, x 表示扭杆的温度,单位为℃, y 表示扭杆温度变化时测得的周期数据;

[0051] 将上述四种情况下获得的  $\frac{a_k}{b_k}$  的平均值带入公式 (5) 中, 获得 R 的准确值为:

$$[0052] \quad R = 2.95 \times 10^{-4} \times \Delta K + 2.16 \times 10^{-8} \times \Delta K^2 \quad (7);$$

[0053] 获得温度对转动惯量测量精度影响的表达式:  $R = (2.95 \times 10^{-2} \times \Delta K) \%$ ;

[0054] 对扭杆的扭转刚度有关的系数 A 进行修正后的转动惯量为:

$$[0055] \quad J = A(1 - 2.95 \times 10^{-4} \times \Delta K) T_M^2 - J_0,$$

[0056] 其中,  $J_0$  为 23°C 时空载转台的转动惯量值,  $J_0 = 93.42 \text{Kg} \cdot \text{m}^2$ ;

[0057] 对扭杆的扭转刚度有关的系数 A 进行修正后即为对温度导致的转动惯量测量误差进行补偿。

[0058] 具体实施方式二: 本实施方式对实施方式一作进一步说明, 在转台空载、两个标准砝码负载、四个标准砝码负载和六个标准砝码负载四种情况下,  $a_k$  分别为:  $4.15 \times 10^{-4}$ 、 $5.35 \times 10^{-4}$ 、 $6.29 \times 10^{-4}$ 、 $6.60 \times 10^{-4}$ ,  $b_k$  分别为: 2.84、3.60、4.21 和 4.53。

[0059] 具体实施方式三: 本实施方式对实施方式一作进一步说明, 测量的相对误差为:

$$[0060] \quad \delta = \frac{J - J_s}{J_s} \times 100\%。$$

[0061] 本发明中, 结合图 1 说明扭摆法测量转动惯量测量系统: 主要包括转动惯量测量台、上位机、PT00 温度传感器、数据采集模块以及用来给扭杆加热的人造小太阳组成。转动惯量测量台采用了气浮转台结构, 使得机械摩擦力对转台扭摆周期的影响可以忽略不计, 实现了周期测量的稳定性和精确性, 为转动惯量的高精度测量提供了保证。上位机主要是对转动惯量测量台测量过程和温度数据的采集进行控制, 对采集的数据进行运算并给出测量的结果。PT100 温度传感器相比其他温度传感器具有测量精度高、使用方便、对温度的响应时间较短等优点, 因此本研究中选用 PT100 温度传感器, 并采用了三线制的接法来消除导线带来的误差, 因此能准确及时的测量出扭杆的温度, 保证了实验结论较高的准确性。温度采集模块将 PT100 采集的温度数据数字化并通过 RS485 通讯接口将温度数据实时的上传至上位机中, 以便接下来进一步的处理和计算。

[0062] 扭摆法测量转动惯量测量的原理: 将待测物体放置在转台上后, 将转台适当的转过一个小角度后释放, 根据胡克定律, 转台则在扭杆提供的恢复力矩下做周期性的摆动, 在忽略了空气阻尼的条件下, 刚体对于转台的扭摆周期与刚体对于扭摆系统转轴的转动惯量之间有如下关系:

$$[0063] \quad J = \frac{D}{4\pi^2} T^2 = AT^2 \quad (8)$$

[0064] 式中 D 表示扭杆的扭转刚度,  $A = \frac{D}{4\pi^2}$  是一个与扭杆的扭转刚度有关的一个

[0065] 标定常量, T 为扭摆周期。在忽略空气阻尼的条件下, 刚体对于转轴的转动惯量与扭摆周期的平方成正比。因此可以通过测量转台的扭摆周期来计算出待测物体绕扭摆系统转轴的转动惯量值。

[0066] 在实际测量中, 待测物体 (如图 1 中的标准砝码) 被固定在转台上, 因此测量的结果实际上被测物体与空载时的转台的转动惯量值之和, 即:

$$[0067] \quad J_x = AT_x^2 = J_0 + J_p = AT_0^2 + J_p \quad (9)$$

[0068] 式中  $J_x$  表示待测物体和转台合在一起对于扭摆系统转轴的转动惯量值,  $T_x$  为对应的扭摆周期;  $J_p$  为待测物体对于系统转轴的转动惯量值;  $J_0$  为空载转台对于转轴的转动惯量值,  $T_0$  为  $J_0$  对应的扭摆周期。因此可得出待测物体的转动惯量如下:

$$[0069] \quad J_p = J_x - J_0 = A(T_x^2 - T_0^2) \quad (10)$$

[0070] 当被测件为标准砝码时,可以得到:

$$[0071] \quad J_B = J_x - J_0 = A(T_x^2 - T_0^2) \quad (11)$$

[0072] 式中  $J_B$  表示标准砝码对于扭摆系统转轴的转动惯量,由于标准砝码的转动惯量值  $J_B$  是已知的常量,因此可以算出  $A$  的值:

$$[0073] \quad A = \frac{J_B}{T_x^2 - T_0^2} \quad (12)$$

[0074] 实际测量中,在测量待测物体之前先测量转台空载时的转台的扭摆周期,然后再测量加载上标准砝码之后的转台的扭摆周期,然后通过式 (12) 就可以标定出  $A$  的值。 $A$  值确定之后,就可以得到待测物体对于转台转轴的转动惯量值如式 (10) 所示。

[0075] 扭杆温度变化对转动惯量测量精度的影响:

[0076] 扭杆作用在转台的剪应力有胡克定律的剪应力公式可以确定:

$$[0077] \quad \tau = G \gamma \quad (13)$$

[0078] 式中  $\tau$  表示剪应力的大小,  $G$  表示扭杆的切变模量,  $\gamma$  表示扭杆扭摆时形变。

[0079] 扭杆的刚度  $D$  与切变模量之间由如下关系:

$$[0080] \quad D = \frac{\pi GR^2}{2L} \quad (14)$$

[0081] 在忽略空气阻尼的条件下,扭摆系统的扭摆周期为:

$$[0082] \quad T = 2\pi \sqrt{\frac{J}{D}} \quad (15)$$

[0083] 对于大多数的金属材料,当温度升高时,切变模量随着温度升高而降低,通过上述各式可以看出来,随着扭杆温度升高、弹性模量降低,扭杆的扭转刚度也随之降低,扭杆作用在转台的剪应力会随之减小,转台的扭摆周期随着温度的升高而增大。

[0084] 因此,可以看出,如果扭摆系统扭杆的温度在测量的过程中发生变化,将会导致测得的周期产生变化,但是与扭杆的扭摆刚度有关的  $A$  在测量之前进行标定,在测量过程中为所标定的常数,因此通过式 (11) 可以算出,温度的升高或者降低将会导致转动惯量测量结果偏高或者偏低。

[0085] 对于不同的金属材料,其切变模量随着温度变化而改变的规律都不相同,而且没有一个统一的公式能够直接计算出某一种特定材质金属的切变模量随温度变化的准确数学表达式。因此,对于本研究中扭摆系统中的扭杆,也只能通过实验的方法找到其剪切模量随温度变化的情况。

[0086] 通过人造小太阳对扭杆进行辐射加热到一定的温度 (40℃ 左右),让扭杆温度自然降低,在扭杆降温的过程中,可测量扭杆在不同温度下时转台的扭摆周期以及不同数量



标准砝码的绕轴转动惯量值。

[0087] 实验中分别测量了转台空载,两个标准砝码负载,四个标准砝码负载以及六个标准砝码负载这四种情况下扭杆温度变化时的扭摆周期和转动惯量的变化情况。

[0088] 标准砝码为测量系统的配套部件,可以通过定位工装安装在工作转台的条形台架上,如图 1 中所示,其尺寸和质量均已通过计量部门的检定,轴向理论转动惯量值已知。表 1 中列出了标准砝码按图 2- 图 5 所示的各种情况装载时的对于转轴的转动惯量理论值和扭摆周期的理论值。

[0089] 表 1 :标准砝码绕轴转动惯量和扭摆周期理论值

[0090]

被测件	空载转台	二个标准砝码	四个标准砝码	六个标准砝码
转动惯量理论值 $J_S$ (Kg.m <sup>2</sup> )	93.417	57.298	112.155	144.501
扭摆周期理论值 (s)	2.836	3.601	4.206	4.525

不

[0091] 同负载情况下,当扭杆温度变化时,周期的变化情况如图 2- 图 5 所示。

[0092] 从图 2- 图 5 可以看出,在不同的负载情况下,当扭杆在 20℃ 到 40℃ 变化时,扭摆周期基本随着扭杆温度的变化而线性的变化。利用最小二乘法拟合出转台扭摆周期随扭杆温度变化的一次曲线,对于不同的负载,得到的结果为如图 2- 图 5 所示,设拟合出的曲线方程有如下形式:

$$[0093] \quad y = a_k(x-23)+b_k \quad (16)$$

[0094] 式中  $a_k$  为最小二乘拟合得到的扭杆温度变化对扭摆周期影响的系数,  $b_k$  为扭杆温度为 23℃ 时的扭摆周期,  $x$  表示扭杆的温度,单位为℃,  $y$  表示扭杆温度变化时,测得的周期数据。拟合出的结果和数据之间的关系如表 2 所示。

[0095] 表 2 :拟合出的曲线的各系数之间的关系

[0096]

序号 $k$	负载情况	转动惯量理论值 $J_S$ (kg/m <sup>2</sup> )	$a_k$ (10 <sup>-4</sup> )	$b_k$	$\frac{a_k}{a_1}$	$\frac{b_k}{b_1}$	$\sqrt{\frac{J_k}{J_1}}$	$\frac{a_k}{b_k}$ (10 <sup>-4</sup> )
--------	------	------------------------------------	---------------------------	-------	-------------------	-------------------	--------------------------	---------------------------------------

[0097]

1	空载	93.42	4.15	2.84	1	1	1	1.47
2	二砝码	150.71	5.35	3.60	1.29	1.27	1.27	1.48
3	四砝码	205.57	6.29	4.21	1.51	1.48	1.48	1.49
4	六砝码	237.92	6.60	4.53	1.59	1.60	1.59	1.46

[0098] 对于以上所有的拟合曲线, R 决定系数均在 0.99 以上, R 决定系数是一个范围为 [0, 1] 的值, R 值越接近 1, 表示数据拟合的结果越可信, 所以本发明中的拟合的曲线可信度很高, 表现出了很好的拟合度。

[0099] 从表 2 中可以总结出以下规律：

[0100] (1) :  $\frac{a_k}{b_k}$  随着转动惯量测量台负载的变化基本保持不变,这就说明转台扭摆周期随扭杆温度的变化不受转台负载情况的影响。

[0101] (2) : 从  $\frac{a_k}{a_1}$ 、 $\frac{b_k}{b_1}$  以及  $\sqrt{\frac{J_k}{J_1}}$  这三个值随着负载的变化始终保持基本相等,这就说明当转动惯量测量台负载改变时,转台在 23℃ 时的扭摆周期值  $b_k$  以及扭摆周期随温度变化的系数  $a_k$  都随测量台负载的转动惯量  $J_k$  的平方根值以相同的比例变化。

[0102] 对测量值按公式  $R = (2.95 \times 10^{-2} \times \Delta K) \%$  对系数 A 随扭杆温度的变化进行修正后的测量结果如图 6- 图 9 所示。

[0103] 表 3 :修正前后转动惯量测量结果对比

[0104]

被测件	空载	二个标准砝码	四个标准砝码	六个标准砝码
理论值 (Kg · m <sup>2</sup> )	93.42	57.30	112.15	144.50
测量误差最大值 (%)	0.54	1.12	0.86	0.87
修正后测量误差最大值 (%)	0.03	0.06	0.06	0.06

[0105] 实际测量中对转动惯量的测量结果按上述补偿公示进行温度补偿后的结果如表 4 所示：

[0106] 表 4 :修正前后转动惯量测量结果对比

[0107]

被测件	空载	二个标准砝码	四个标准砝码	六个标准砝码
理论值 (Kg · m <sup>2</sup> )	93.42	57.30	112.15	144.50
测量值 (Kg · m <sup>2</sup> )	93.58	57.50	112.46	144.87
修正后结果 (Kg · m <sup>2</sup> )	93.46	57.31	112.20	144.57
测量误差 (%)	0.18	0.36	0.27	0.26
修正后的测量误差 (%)	0.05	0.02	0.04	0.04

[0108] 在实际的测量中,由于很难做到使扭杆处于恒温状态,所以扭杆温度变化必然会引入较大的误差。

[0109] 本发明找到了对自研转动惯量测量台扭杆温度变化时的修正方法以及相应的修正公式,在对转动惯量的测量结果修正后,当扭杆温度由 20℃ 升至到 40℃ 左右时,测量的误差最大值也不超过 0.06%。在实际测量中,对于扭杆温度变化对测量结果所带来的影响进行修正,能够有效地提高转动惯量测量台的测量精度,使得测量精度优于 0.06%。

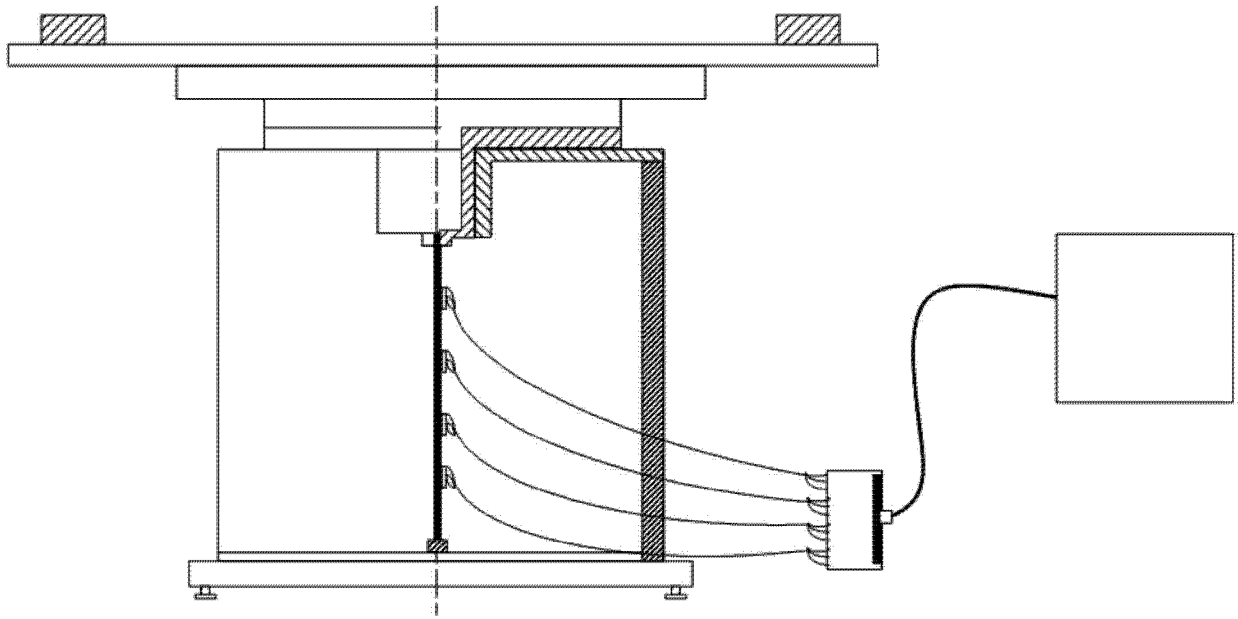


图 1

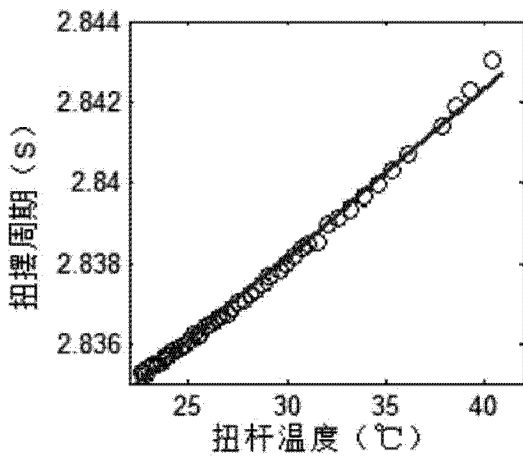


图 2

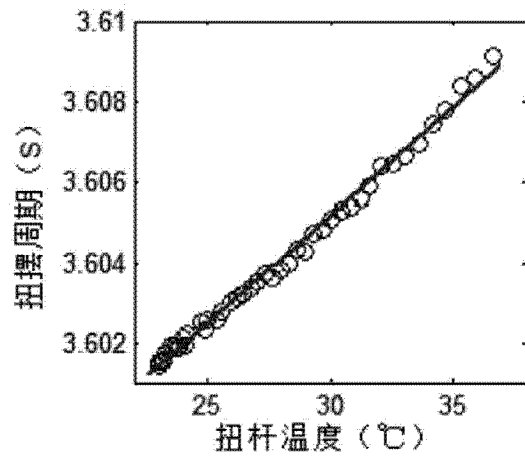


图 3

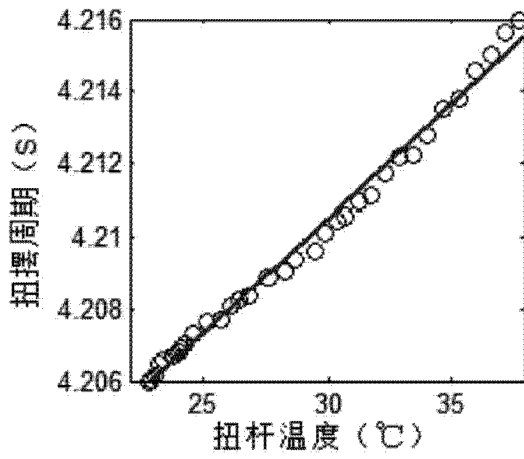


图 4

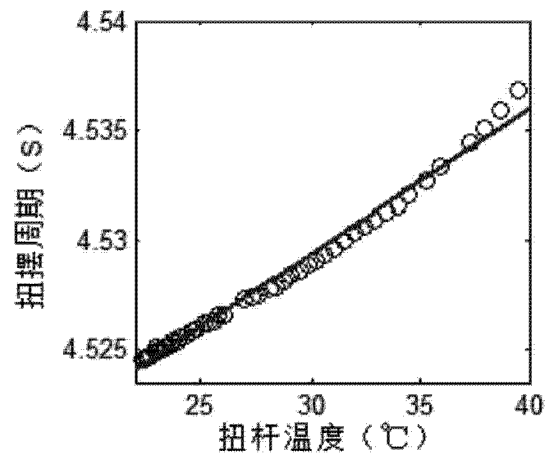


图 5

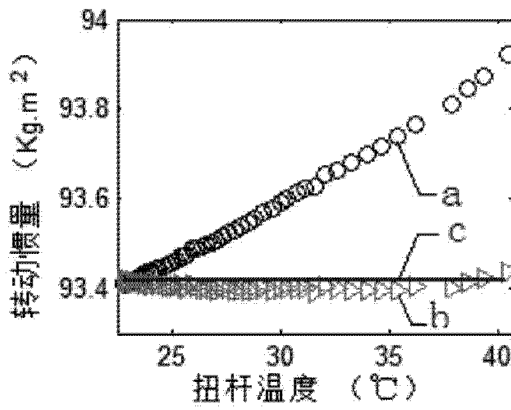


图 6

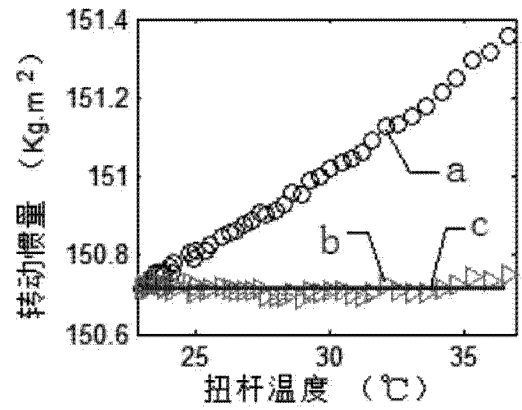


图 7

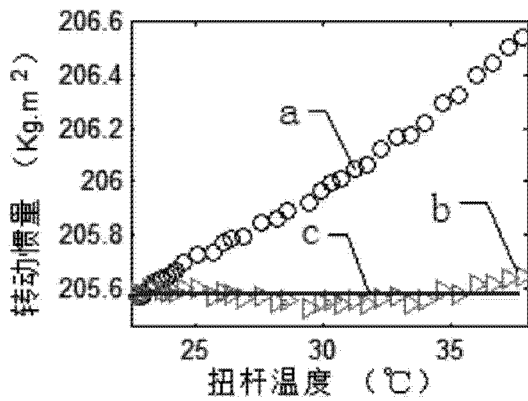


图 8

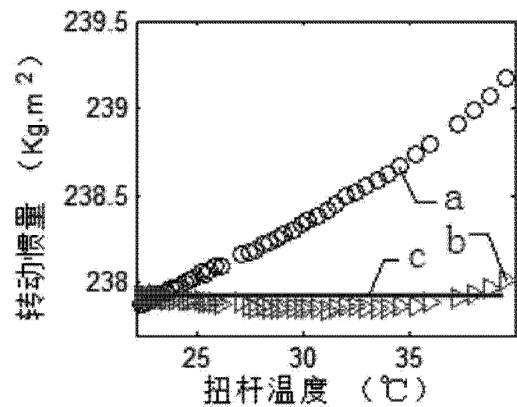


图 9