

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2016.01.008

新型落体式惯量测量方法研究^{*}

马继杰¹,程光明^{1*},陈胜辉¹,陆品²,王学武²,王京宏²

(1. 浙江师范大学精密机械研究所,浙江金华321004;2. 金华质量技术监督检测院,浙江金华321001)

摘要:为解决传统落体法将阻力矩视为恒定值进行消元引起的惯量测量精度误差较大的问题,将考虑不同阻力因素的阻力矩函数应用到落体法惯量测量中。通过开展落体法惯量测量装置中阻力因素分析,建立了阻力矩与速度和载荷间的关系,提出了通过在两次落体过程中主动构建相同速度和载荷从而通过做差进行有效消元的方法。设计了一套落体法惯量测量装置,并对提出的新型落体法进行了实验研究,重复测量了3个飞轮的惯量值。研究表明:新型落体法的惯量测量误差不超过5%,通过在两次落体过程中主动构建相同的阻力影响因素并进行消元能有效减小阻力影响,提高落体法惯量测量重复性和精度。

关键词:惯量测量;落体法;重复性;阻力影响因素

中图分类号:TH73

文献标志码:A

文章编号:1001-4551(2016)01-0043-05

Research on a new falling body method for inertia measurement

MA Ji-jie¹, CHENG Guang-ming^{1*}, CHEN Sheng-hui¹, LU Pin²,
WANG Xue-wu², WANG Jing-hong²

(1. Institute of Precision Machinery, Zhengjiang Normal University, Jinhua 321004, China;

2. Jinhua Product Quality Supervision and Inspection Institute, Jinhua 321001, China)

Abstract: In order to reduce the inertia measuring error in the traditional falling body method arisen from the constant resistance torque elimination, resistance torque function in terms of various resistances was applied to the falling body method. By analyzing the resistances in the falling body inertia measuring apparatus, a new falling body method using the actively built equivalent speed and load to eliminate the resistance torque was proposed. A new falling body inertia measuring apparatus was designed independently to verify the new method. Experiment was also conducted on this apparatus. The results indicate that the repeated test of 3 inertia disks can give a maximum measuring error of less than 5%, and that the influences of the resistances could be well reduced by creating equivalent impact factors in the two falling process and consequently improve the repeatability and precision of the falling body method.

Key words: inertia measurement; falling body method; resistance torque; speed and load

0 引 言

在精密仪器、工程机械、武器系统、航空航天等领域,转动惯量是影响系统工作特性的重要参数^[1-3],精确测量转动惯量具有重要现实意义。常用的惯量测量方法有扭摆法、复摆法、三线摆法、落体法等^[4-5]。

在众多方法中,落体法无需将被测物从系统中拆卸即可完成惯量测量,较之其他方法具有在系统测量的先天优势,在诸如电机转子、螺旋桨、齿轮等诸多需

要测惯量的场合具有广阔的应用前景。但是,落体法当前的应用状况并不乐观,惯量测量结果精度和重复性不高。于治会^[6]研究了落体法测惯量的基本规律并进行实验,惯量测量不确定度达到6%;郭长立等^[7]对测加速度法和测时法进行对比实验,发现测角加速度法优于测时法;南京理工大学王海林等^[8]分析了吊绳与转轴不垂直情况下的惯量测量结果,并指出了落体法测惯量时加速度与速度相关,但未进一步提出解决方法。传统落体法测惯量的主要症结在于忽略了测

收稿日期:2015-09-14

基金项目:国家自然科学基金资助项目(51175478);浙江省质量技术监督系统科研计划资助项目(20130288)

作者简介:马继杰(1980-),男,天津蓟县人,工学博士,讲师,主要从事机电检测装备方面的研究。E-mail:mjj@zjnu.cn

通信联系人:程光明,男,教授,博士生导师。E-mail:cgm123@163.com

量装置中存在的诸多非恒定的阻力因素的影响,将阻力矩视为恒定值进行消元,精度难以提高。

本研究提出一种新型落体式惯量测量方法,用于减少阻力矩对惯量测量结果的影响,提高惯量测量重复性和精度。

1 阻力分析与阻力矩函数

落体法惯量测量装置典型结构如图 1 所示。

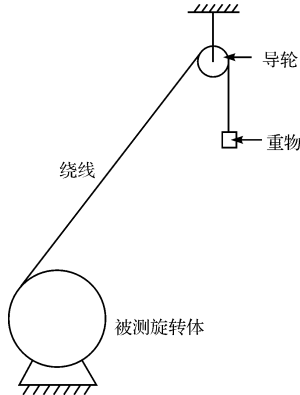


图 1 落体法惯量测量装置结构图

工作时,重物(标准砝码)从静止开始下落,拖动被测物加速旋转。在该过程中,被测物所受力矩可以由重物及绕线盘直径计算得出,加速度可由编码器测得的位移数据计算得出,那么根据刚体转动方程可以计算出被测物的惯量值。考虑到重物下落时存在阻力因素,文献[6]提出通过两次不同质量的重物两次落体,并用两次落体方程做差消除阻力因素的影响,公式如下:

$$I \cdot \frac{d\omega_1}{dt} = m_1 g R - m_1 \frac{d\omega_1}{dt} R^2 - M \quad (1)$$

$$I \cdot \frac{d\omega_2}{dt} = m_2 g R - m_2 \frac{d\omega_2}{dt} R^2 - M \quad (2)$$

$$I = \frac{(m_2 - m_1) g R - \left(m_2 \frac{d\omega_2}{dt} - m_1 \frac{d\omega_1}{dt} \right) R^2}{\frac{d\omega_2}{dt} - \frac{d\omega_1}{dt}} \quad (3)$$

式中: I —被测旋转体惯量, m_1 —重物 1 的质量, m_2 —重物 2 的质量, ω_1 —第一次下落的角速度, ω_2 —第二次下落的角速度, g —重力加速度, R —绕线盘半径, M —阻力矩。

上述方法是在假定阻力矩 M 为常值的条件下得出的,而实际中,落体法惯量测量装置中存在轴承摩擦阻力、空气阻力等多种阻力矩,这些阻力影响因素多种多样,产生的阻力矩 M 也并非恒定值,“直接用公式(1)和公式(2)做差,消掉阻力矩 M ”的做法值得商榷。

根据图 1 所示的落体法惯量测量装置的基本结构,其中的阻力来源主要为被测物工作台轴承阻力、重

物导轮轴阻力以及重物下落过程中的空气阻力,下面本研究对几种阻力分别进行分析,以提取其中的主要影响因素。

轴承阻力的影响因素繁多,与轴承自身的结构尺寸、几何精度、材料性能等固有参数相关,也与轴承当前的转速、载荷、温度等使用参数有关。对于结构尺寸等轴承固有参数,可以认为在轴承生命周期的某一阶段内保持不变,随着轴承选型确定,其阻力变化在同一时期内与固有参数无关,而是由使用参数变化引起的。速度、载荷和温度等参数直接影响轴承的润滑情况^[9-10],是轴承阻力最主要的影响因素。

轴承阻力随速度和载荷的变化趋势如图 2 所示^[11]。

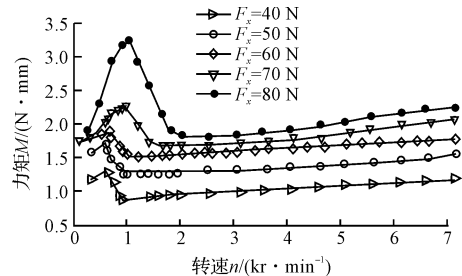


图 2 轴承阻力与速度、载荷间的关系

图 2 中,载荷增加时,轴承阻力也随之增大;速度增加时,随着润滑油膜的建立过程轴承阻力先增大后减小(起动阶段),之后又逐渐增大(稳定运行阶段)。在不同加速度的落体过程中,由于整体行程有限,轴承温升可以忽略不计。那么,就落体法中的轴承阻力而言,需要考虑的主要阻力影响因素为速度和载荷。

空气阻力的主要影响因素为速度和重物外形尺寸。速度因素同为轴承阻力的主要影响因素,可一并考虑;传统落体法中两次下落采用不同重物,外形尺寸并非完全一致,由此产生的空气阻力也并不相同,但空气阻力整体数量级较小,可予以忽略。

综合以上分析可知,落体法中阻力矩大小的主要影响因素为速度和载荷,二者直接关系到惯量测量的重复性和精度,必须加以考虑。据此,可确定阻力矩函数 $M(\omega, L)$,函数包含速度和载荷两个变量,当选取两次落体过程中速度和载荷相同的点进行计算时,阻力矩的大小是近似相等的(其他次要阻力因素忽略不计),可通过消元法消去阻力矩的影响。

2 惯量测量方法

根据上述确定的阻力矩函数,笔者通过在两次下落过程中主动构建相同的阻力因素—速度和载荷,可获得近似相等的阻力矩,通过两次落体方程做差即可消掉阻力矩。

2.1 相同速度的构建

速度是影响落体法惯量测量重复性和精度最主要的因素之一。笔者在进行落体法惯量测量实验时测得的加速度-速度曲线如图3所示。

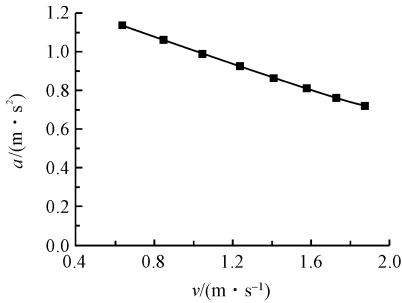


图3 落体法加速度随速度变化曲线

由图3可以看出,在重物下落过程中随着速度的升高,加速度出现明显的下降趋势,因而直接采用不同时间段的加速度(由于两次计算加速度的时刻速度不相同)计算惯量必然会产生偏差。

由于两次落体过程中速度变化并不相同,可以考虑选择下落过程中相同速度点的加速度用于计算惯量,即第一次落体过程中的加速度 $\beta_1 = \left. \frac{d\omega_1}{dt} \right|_{\omega_1 = \omega_0}$,

第二次下落过程中的加速度 $\beta_2 = \left. \frac{d\omega_2}{dt} \right|_{\omega_2 = \omega_0}$, (其中:

ω_0 —两次下落过程中都能达到的某一速度值)。那么,两次下落过程中速度同为 ω_0 的点即为同速度计算点。值得注意的是,同速度计算点不是唯一的,可以根据计算需要进行优选。

2.2 相同载荷的构建

载荷是轴承阻力的重要影响因素之一,载荷不同,轴承阻力的大小也会发生变化。传统落体法采用两个不同质量的重物进行两次下落实验,而重物对导轮轴承产生径向载荷,因此两次下落过程中的轴承载荷并不相同。

考虑到传统落体法中采用两个不同质量重物的作用在于产生不同的加速度,那么研究者可以采用更换惯量盘的方式实现相同的效果,即两次落体过程采用同一重物,而在被测物工作台上同轴安装具有不同转动惯量的标准惯量盘,产生两次不同的落体加速度。由于采用同一重物,两次落体过程的轴承载荷相等。

用更换惯量盘的方式改变落体加速度虽然能消除导轮轴承载荷的差异,但同时会引起工作台轴承载荷的变化。圆盘形刚体的转动惯量可用下式计算:

$$I = 1/2mR^2 \quad (4)$$

可以看出转动惯量不仅与圆盘质量有关,还与质量分布有关。那么,可以通过改变圆盘半径设计出这样的

标准惯量盘:转动惯量不同,质量相同。采用上述标准惯量盘既可以产生不同加速度,又可以保证载荷因素的一致性,从而构建出两次落体过程中相同的载荷因素。

2.3 惯量计算方法

考虑速度和载荷因素的影响及系统自身的固有转动惯量,两次落体过程的落体方程分别为:

$$(I_1 + I + I_0) \cdot \frac{d\omega_1}{dt} = mgR - m \frac{d\omega_1}{dt} R^2 - M(\omega_1, L_1) \quad (5)$$

$$(I_2 + I + I_0) \cdot \frac{d\omega_2}{dt} = mgR - m \frac{d\omega_2}{dt} R^2 - M(\omega_2, L_2) \quad (6)$$

式中: I —被测旋转体惯量; I_0 —系统惯量; I_1 —标准盘1的惯量; I_2 —标准盘2的惯量; ω_1 —第一次下落的角速度; ω_2 —第二次下落的角速度; m —落体重物质量; g —重力加速度; R —绕线盘半径; $M(\omega, L)$ —系统阻力函数,与速度和载荷相关。

为消除阻力影响,两次落体过程中取相同速度点 ω_0 进行计算,同时由于标准盘1和2的质量相同,载荷相同记为 L_0 。于是,方程(1,2)在 $\omega_1 = \omega_2 = \omega_0$ 且 $L_1 = L_2 = L_0$ 的条件下为:

$$(I_1 + I + I_0) \cdot \left. \frac{d\omega_1}{dt} \right|_{\omega_1 = \omega_0} = mgR - mR^2 \left. \frac{d\omega_1}{dt} \right|_{\omega_1 = \omega_0} - M(\omega_0, L_0) \quad (7)$$

$$(I_2 + I + I_0) \cdot \left. \frac{d\omega_2}{dt} \right|_{\omega_2 = \omega_0} = mgR - mR^2 \left. \frac{d\omega_2}{dt} \right|_{\omega_2 = \omega_0} - M(\omega_0, L_0) \quad (8)$$

方程(7,8)做差可消去阻力矩,得到的被测旋转体转动惯量公式为:

$$I = \frac{mR^2 \left(\left. \frac{d\omega_1}{dt} \right|_{\omega_1 = \omega_0} - \left. \frac{d\omega_2}{dt} \right|_{\omega_2 = \omega_0} \right) - \left(I_2 \left. \frac{d\omega_1}{dt} \right|_{\omega_1 = \omega_0} - I_1 \left. \frac{d\omega_2}{dt} \right|_{\omega_2 = \omega_0} \right)}{\left. \frac{d\omega_1}{dt} \right|_{\omega_1 = \omega_0} - \left. \frac{d\omega_2}{dt} \right|_{\omega_2 = \omega_0}} - I_0 \quad (9)$$

3 实验及结果分析

3.1 实验装置

本研究根据上述方法设计的惯量测量装置如图4、图5所示。位移数据由安装在导轮上的光电脉冲编码器测得,并通过安装在计算机上的PCI2394采集卡进行读取与处理。本研究配置了3个同质量、不同惯量的标准惯量盘,惯量值分别为1.156 gm²、2.606 gm²和5.112 gm²,用于实现两次不同加速度的落体过程。重物采用M2级标准砝码,质量100 g和200 g可选。

3.2 惯量测量实验及分析

相比其他惯量测量方法,落体法的重复性和精度



图 4 同质量、不同惯量标准盘

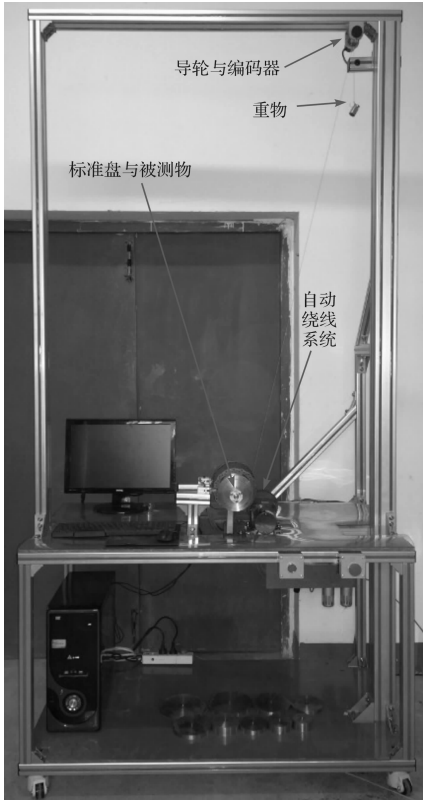


图 4 新型落体法惯量测量实验装置

水平不高,主要症结在于忽略了阻力矩的不确定性。本研究提出通过构建相同的速度和载荷获得相同的阻力矩计算点,用于改善测量重复性和精度,下面对其有效性进行验证。

为便于对比测量结果,笔者专门加工了一组惯量盘,选取其中 3 个作为被测物,惯量值经测量分别为 5.01 gm^2 、 8.51 gm^2 和 12.21 gm^2 。

实验条件设置如下:

- ① 采样时间间隔为 10 ms;
- ② 绕线盘半径 R 为 50 mm;
- ③ 落体重物质量为 100 g;
- ④ 标准惯量盘 1 惯量为 2.606 gm^2 ;

- ⑤ 落体行程 2 m;
- ⑥ 标准惯量盘 2 惯量为 5.112 gm^2 ;
- ⑦ 系统惯量经校准为 1.629 gm^2 。

本研究对 3 个被测盘惯量重复测量 10 次,观察测量结果如图 6 所示。

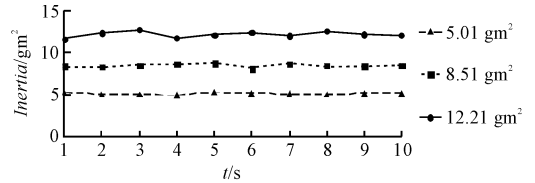


图 6 新型落体法惯量测量结果

3 次测量的统计结果如表 1 所示。

表 1 惯量测量统计

项目	1 号盘	2 号盘	3 号盘
实际值/ gm^2	5.01	8.51	12.21
10 次平均值/ gm^2	5.07	8.50	12.19
10 次中最大相对误差	4.7%	4.8%	4.4%

从实验结果可以看出,新型落体法的直接测量误差不超过 5%,通过多次测量取平均值可以使测量精度显著提高,这表明对速度和载荷因素的处理可以改善落体法测惯量的重复性和测量精度。

新型落体法惯量测量装置可以适应一般惯量测量场合的要求,特别是配备了自动绕线系统,测量周期可以控制在 2 min 以内,有望在生产线上工业产品的全检中得到应用。

4 结束语

本研究通过对轴承摩擦、空气阻力等各种阻力矩进行分析,确定落体法中最主要的阻力影响因素为速度和轴承载荷。笔者据此设计新型落体式惯量测量方法:选取两次下落过程中的相同速度点计算加速度,构建相同的速度因素;采用具有相同质量、不同惯量的标准惯量盘完成两次下落,构建相同的载荷因素;在速度和载荷因素相同的条件下,将两次落体方程做差消除阻力函数,计算被测物惯量。笔者用该方法对 3 种惯量盘进行惯量测量时,最大误差不超过 5%,多次测量取平均值可以显著提高测量精度。

实验结果表明,新型落体法能有效克服阻力影响,提高惯量测量重复性与精度。

(下转第 51 页)

本文引用格式:

马继杰,程光明,陈胜辉,等. 新型落体式惯量测量方法研究[J]. 机电工程,2016,33(1):43-46,51.

MA Ji-jie, CHENG Guang-ming, CHEN Sheng-hui, et al. Research on a new falling body method for inertia measurement [J]. Journal of Mechanical & Electrical Engineering, 2016,33(1):43-46,51.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>