

DOI: 10.19650/j.cnki.cjsi. J2209766

基于扭摆的落体质心与光心距离的高精度测量*

王若琳^{1,2}, 胡翔², 余焱², 黄安贻¹, 包福²

(1. 武汉理工大学机电工程学院 武汉 430070; 2. 湖北省计量测试技术研究院 武汉 430223)

摘要:在激光干涉绝对重力仪中,落体的旋转导致重力测量不准确。为了减小旋转误差对重力测量的影响,提出了一种能够实现高精度测量落体质心与光心间距的方法。该方法基于扭摆装置,使用扭丝横向悬挂落体,通过导引激励扭丝,落体将绕扭丝扭转,用正交干涉仪测量落体在扭转模式下光心沿着测量方向的位移信号,光电自准直仪同步测量落体扭转的角度信号。用遗传算法分别扣除了单摆与扭转一倍频分量的影响;其次构造一个随时间衰减的角度信号,消除气体阻尼对二倍频幅值衰减的影响。结果表明,光心与质心间距在重力方向的偏移量 δ_z 的扩展不确定度小于 $0.58\text{ }\mu\text{m}$ 。考虑到在NIM-3A绝对重力仪上测得的最大角速度为 24.67 mrad/s ,绝对重力测量中的旋转误差可以降低到 $0.035\text{ }\mu\text{Gal}$ 。

关键词:落体;光心;质心;遗传算法

中图分类号: TH763 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 460.40

High-precision measurement of the distance between the mass center and the optical center of falling body based on the pendulum system

Wang Ruolin^{1,2}, Hu Xiang², Yu Ye², Huang Anyi¹, Bao Fu²

(1. School of Mechanical and Electronic Engineering, Wuhan University of Technology, Wuhan 430070, China;

2. Hubei Institute of Measurement and Testing Technology, Wuhan 430223, China)

Abstract: In laser interference absolute gravimeter, the rotation of falling body leads to inaccurate gravity measurement. To reduce the influence of rotation error on gravity measurement, this article proposes a method that can measure the distance between the mass center and the optical center of falling body with high precision. Based on the torsion pendulum device, this method uses torsion wire to laterally suspend the falling body. By guiding and exciting the twisted wire, the falling body may twist around the twisted wire. The orthogonal interferometer is used to measure the displacement of the optical center of the falling body along the measuring direction in the twisting mode, and the photoelectric autocollimator is used to measure the angle signal of the falling body twisting synchronously. The genetic algorithm is used to deduct the influence of simple pendulum and torsion-frequency doubling component respectively. Secondly, an angle signal that decays with time is constructed to eliminate the influence of gas damping on the attenuation of the second harmonic amplitude. Results show that the expanded uncertainty of the offset between the optical center and the centroid in the direction of gravity is less than $0.58\text{ }\mu\text{m}$. The maximum angular velocity measured by NIM-3A absolute gravimeter is 24.67 mrad/s , and the rotation error in absolute gravity measurement can be reduced to $0.035\text{ }\mu\text{Gal}$.

Keywords: falling body; center of mass; optical center; genetic algorithm

0 引言

重力加速度 g 的精确测定是人类认识地球重力场并观测其变化,从而认知地球的重要手段之一。绝对重力

测量能直接获得地面观测点上的绝对重力值^[1]。目前,激光干涉绝对重力仪和原子干涉绝对重力仪是开展绝对重力测量的主要手段;国际上激光干涉绝对重力仪的合成标准不确定度最优可达到 $1.8\text{ }\mu\text{Gal}$,原子干涉绝对重力仪的合成标准不确定度最优可达到 $4.5\text{ }\mu\text{Gal}$ ^[2,3]。其

收稿日期:2022-05-11 Received Date: 2022-05-11

* 基金项目:国家重点研发计划(2018YFF0212401)项目资助

中,落体的旋转误差是激光干涉绝对重力仪的一个主要系统误差源。

在激光干涉绝对重力仪中,落体被释放的瞬间,受释放机构转矩作用的影响,落体具有微小的旋转角速度,在下落过程中具有微小旋转运动。落体自由下落期间只受重力作用,因此它将绕自身质心(centre of mass, COM)旋转,且角速度基本保持不变。由于落体光心(optical centre, OC)与质心不重合,激光干涉仪实际测量量与角锥棱镜光心的运动加速度有关,其中包含了光心具有的向心加速度。落体质心与光心的距离矢量可以分解为水平方向与垂直方向两部分,水平矢量引起的向心加速度沿水平方向,与重力方向垂直,不会对测量造成干扰,但垂直分量会引入系统误差,从而增加不确定度^[2-6]。重力方向的偏移引入相应的不确定度为 $\sigma_g = \omega_{\max}^2 R_{\max}$ 。其中 $R_{\max}$ 为 OC 与 COM 间距的最大值, $\omega_{\max}$ 为落体下落过程中最大的旋转速度。

1988 年, Hanada^[7] 提出一种在具有角立方棱镜的光学元件中使光学中心与重心重合的方法。先调整光学元件在水平可调的矩形工作台上的位置,使光学元件质心与旋转台的旋转轴尽量重合,然后使用迈克尔逊干涉仪测量在旋转光学元件上反射光线的光程长度变化,使光学中心与轴重合。最终可以使其光心与质心在 $50\ \mu\text{m}$ 范围内重合。

2007 年, Rothleitner 等^[8] 给出一种在三维空间中测量物体光心与质心之间距离的方法。该方法基于机械平衡技术,最终可使空心角锥镜组件的光心与质心在 $43 \pm 16\ \mu\text{m}$ 范围内重合。

2015 年, Niebauer 等^[9-10] 提出一种新方法。他在扭丝上悬挂落体,利用扭丝的柔软特性,确保质心悬挂在扭丝下方,并使用正交干涉仪测量落体在扭转模式下 OC 沿着干涉仪测量方向的位移曲线,从而得到光心与质心的间距。这种扭摆法理论上可以将质心相对于光心的位置调整到约 $1\ \mu\text{m}$ 的精度,与传统的平衡方法相比,这种技术可以实现一个数量级的改进。

正交干涉仪测得的位移信号中,由于受气体阻尼的影响,扭转与单摆这两种模态并不是单一频率的振动,可以看成无数频率成分所组成。部分频率成分耦合到扭转的二倍频模态中,直接影响到二倍频幅值。本文在使用扭摆法的基础上,使用光电自准直仪监测落体作扭摆运动时的角度信号,正交干涉仪同步采集落体角锥的 OC 与 COM 的间距在 z 方向上的投影的改变量,结合这两组数据,采用遗传算法以及构造函数的手段来消减扭转一倍频分量和单摆分量对扭转二倍频幅值的影响。

经过信号处理后,位移信号二倍频处信噪比从 6.61 dB 提高至 36.91 dB,提高了超过 30 倍,测量结果 δ_z 的扩展不确定度小于 $0.58\ \mu\text{m}$ 。

1 基本原理

落体自由下落时,以质心为原点建立如图 1(a) 所示的坐标系。质心与光心的间距可以分解为水平方向与垂直方向两部分,水平矢量与重力方向垂直,不会对测量造成干扰;但垂直分量 δ_z 会引入重力测量不确定度^[11]。

为了测量落体光心与质心在垂直方向上的距离,本文使用扭摆法进行实验。基于扭丝的柔软特性,当水平悬挂落体时,其延长线过落体质心,扭摆系统平衡位置处(即扭丝未发生扭转时)的质心坐标系随落体放置方式的改变发生改变,如图 1(b) 所示。其中 z 轴与正交干涉仪的测量光平行, y 轴沿着扭丝方向, x 轴与二者正交。

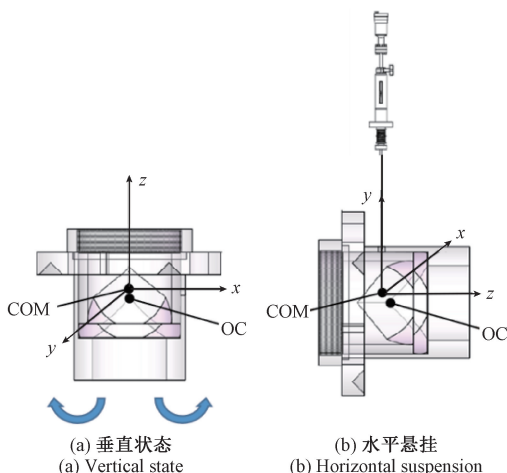


图1 落体在绝对重力仪中的三维位置关系及光心和质心的测量装置

Fig. 1 Three-dimensional position relation of falling body in absolute gravimeter and measuring device of optical center and centroid

落体悬挂在扭丝的下端,当落体在下落过程中光心围绕质心旋转时,由于光心 y 分量偏移量在扭转模式下不会对信号产生影响,落体 OC 与 COM 之间的距离在重力方向上的变化可以表示为 $d_z = \delta_z(1 - \cos\theta) + \delta_x \sin\theta$ 。其中, θ 是旋转角度, δ_x 是光心和质心之间的距离在水平方向的偏移量, δ_z 是光心和质心之间的距离在重力方向的偏移量,即落体 OC 与 COM 间距测量最终的目标量。

落体绕扭丝小角度扭转, d_z 可以转化成如下表达式:

$$d_z = \frac{1}{2}\delta_z\theta^2 + \delta_x\theta \quad (1)$$

其中,落体作扭摆运动时落体角锥的 OC 与 COM 的间距在 z 方向上的投影的改变量 d_z 通过激光干涉仪得到,落体的扭转角度信号 θ 通过光电自准直仪同步测量

得到。当落体从初始扭转角度 θ_0 被释放后, θ 为一个含有空气阻尼的周期性角运动, 可以写成谐振子形式:

$$\theta(t) = \theta_0 \exp(-\beta t) \sin(\omega t) \quad (2)$$

式中: ω 是扭转角速度, β 是阻尼系数。推导可得:

$$d_z \cong \frac{1}{4} \delta_z \theta_0^2 \exp(-2\beta t) + \delta_x \theta_0 \exp(-\beta t) \sin(\omega t) - \frac{1}{4} \delta_z \theta_0^2 \exp(-2\beta t) \cos(2\omega t) \quad (3)$$

式(3)包含一个常数项、一个正比于 δ_x 的单频项和另一个正比于 δ_z 的双频项。扭转二倍频分量可以通过调整扭丝的长度和直径来设计, 以便它出现在机械噪声较小的频域点, 并且防止扭转运动信号被其他运动模式覆盖^[12]。

2 实验装置

使用扭摆法测量落体光心和质心之间的距离, 测量装置示意图如图2所示, 装置顶端是固定的真空导引, 导引的底部连接了一段长度适中的钨丝, 落体悬挂在钨丝下端, 落体左侧为光电自准直仪, 落体右侧为正交干涉仪, 三者的中心线重合。

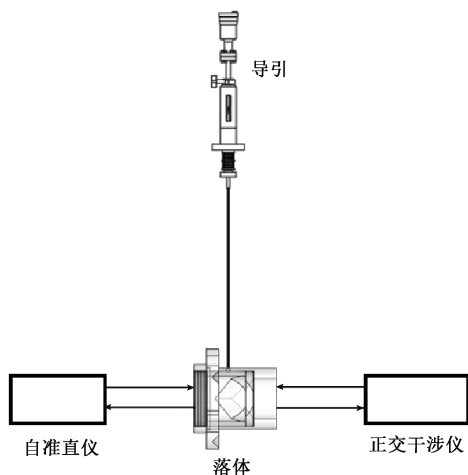


图2 测量装置示意图

Fig. 2 Schematic diagram of the measuring device

在测量时, 通过导引给落体外部激励, 使扭丝扭转, 此时落体围绕质心执行简单的小角度的谐波运动。

为了实现高精度测量、提高信号处理的实时性和控制共模噪声源, 使用四通道信号系统, 光束路径如图3所示。从单频正交干涉仪中可以得到四组干涉信号, 对这4组信号进行预处理, 可以提取出干涉信号的相位变化, 并从中导出落体的水平位移信号 d_z 。

线性偏振输入激光束通过半波片来调整偏振入射角。光束在偏振分束器1的偏振分束表面被分成两路偏

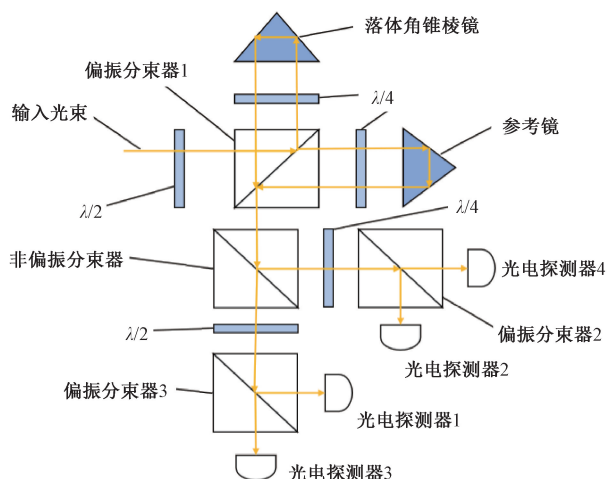


图3 四通道信号激光干涉仪的光路

Fig. 3 Light path diagram of the four-channel signal laser interferometer

振光束。其中一个用作测量臂梁, 另一个是参考臂光束。反射光束和透射光束两次穿过 $1/4$ 波片以调整偏振方向, 并在穿过偏振分束器1之后变成重新组合的光束。然后, 非偏振分束器将重新组合的光束平均分成透射光束和反射光束。反射光束变成圆偏振光束, 相位延迟 90° 。偏振分束器2将圆偏振光束分成两个相对于彼此具有 180° 相移的线性偏振光束。透射光束变成圆偏振光束, 相位延迟 90° 。偏振分束器3将其分成两个相对于彼此具有 180° 相移的线性偏振光束。光电探测器1~4依次接收具有 90° 相移的正弦或余弦信号。

3 数据处理

3.1 扭转角信号

将自准直仪监测的扭转角信号按谐振子模型 $\theta(t) = \theta_0 \exp(-\beta t) \sin \omega t$ 进行拟合, 可以得到初始扭转角 θ_0 、阻尼常数 β 和角频率 ω 的最佳匹配值。令其傅里叶变换后的幅频谱峰值为 B_1 。以 $\theta(t)' = \theta_0^2 \exp(-2\beta t) \cos 2\omega$ 为函数模型构造与扭转模式的二倍频分量相对应的构造角度信号, 令其傅里叶变换后的幅频谱峰值为 B_2 。

3.2 位移信号

位移信号由正交干涉仪采集得到。落体的运动包含3种主要运动模式, 扭转运动、单摆运动和晃动模式。在这3种模式中, 目标信号是扭转运动模式中的二倍频分量。位移信号的时域图和经傅里叶变换后的幅频谱如图4所示, 幅频谱从左到右的3个峰值分别对应扭转运动的一倍频、扭转运动的二倍频以及单摆运动, 展现出二倍频幅值较小、一倍频与单摆幅值较大的特点。由于一倍频、单摆与二倍频所处频率十分接近, 且一倍频和单摆

分量的幅值比二倍频分量的幅值大2~3个数量级,考虑到气体阻尼的影响,在幅值谱中,会影响二倍频峰值。

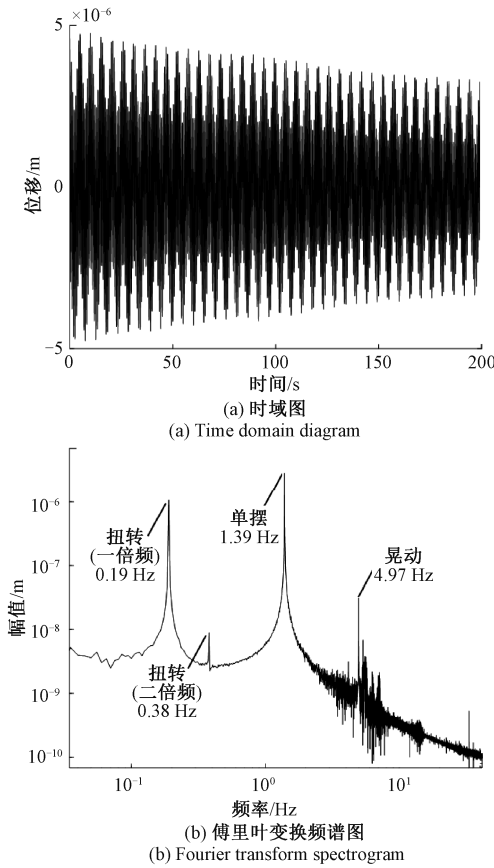


图4 原位移信号

Fig. 4 Original displacement signal

3.3 遗传算法

遗传算法是按照自然界“优胜劣汰,适者生存”的生物进化规律提出的一种全局优化自适应概率搜索算法。进化论中的适应度,是表示某一个体对环境的适应能力,也表示该个体繁殖后代的能力。遗传算法的适应度函数也叫评价函数,是用来判断群体中的个体优劣程度的指标,可以根据所求问题的目标函数来进行评估^[13-15]。

遗传函数通过建立目标模型并选择合适的适应度函数,可以得到在一定频域内的全局最优解,从而构造出合适的目标函数,达到消减特定频域峰值以减小对二倍频幅值影响的目标。运用遗传算法,进行两次数据处理。

1) 减小单摆对二倍频的影响。采用遗传算法,参考单摆运动模型,以 $A\exp(-\beta_0 t)\sin \omega_0 t$ 为函数模型构造单摆运动信号。其中 A 是单摆运动的幅值, β_0 是单摆运动的阻尼常数,这两者为未知参数,角频率 ω_0 在原位移信号的频谱图中可得到大致范围。原信号与构造所得的单摆运动信号之差经傅里叶变换后,取频谱图中单摆频

率附近信号幅值的算术平均值为适应度函数。设置变量参数范围,得到使适应度函数最小的参数,带入函数模型得到构造单摆信号,原信号与该信号相减用来扣除单摆对二倍频峰值的影响。扣除单摆信号前后的时域图和傅里叶变换频谱图如图5所示,图5(b)中,实线为扣除单摆前的原位移信号,虚线为扣除单摆后的位移信号,可以看出单摆信号的幅值降低了两个量级。

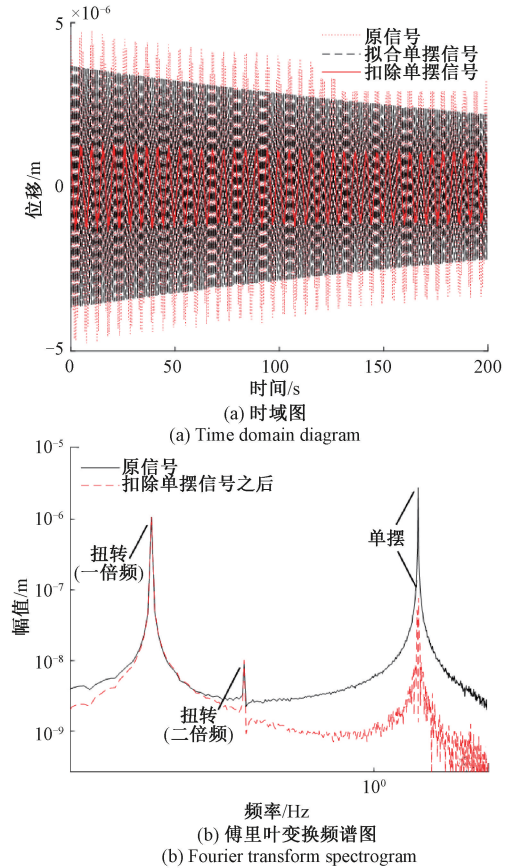


图5 扣除单摆信号前后

Fig. 5 Before and after deducting the pendulum signal

2) 消除扭转运动中一倍频分量对二倍频分量的影响。采用遗传算法,与构造单摆信号的原理类似,参考式(3)的单频项,以 $\delta_x \theta_0 \exp(-\beta t) \sin \omega t$ 为函数模型构造一倍频信号。扣除构造单摆信号后的信号与构造所得的一倍频信号之差经傅里叶变换后,取频谱图中一倍频附近信号幅值的算术平均值为适应度函数。设置变量参数范围,得到使适应度函数最小的参数,带入函数模型得到构造一倍频信号,扣除构造单摆信号后的信号与该信号相减用来扣除一倍频对二倍频峰值的影响。

扣除构造单摆信号和构造一倍频信号后的最终信号经傅里叶变换后,得到的幅频谱如图6所示,其中实线为消减单摆后的位移信号,虚线为扣除一倍频后的位移信号。从图6可以看出,一倍频的幅值降低了3个量级,与

底噪处于同一个量级,一倍频被完全扣除,有效降低了一倍频信号对二倍频的影响。扣除单摆后的单摆的峰值还是高于扭转二倍频的峰值,可能由于扭丝远大于光心与质心重力方向的偏移量,地脉动导致落体单摆,落体光心的位移经扭丝放大的结果。当初始角度为 2.05° 时,上述处理方法使二倍频处信噪比从 6.61 dB 提高超过 30 倍至 36.91 dB,底噪降低一个数量级,得到更加准确的二倍频峰值。

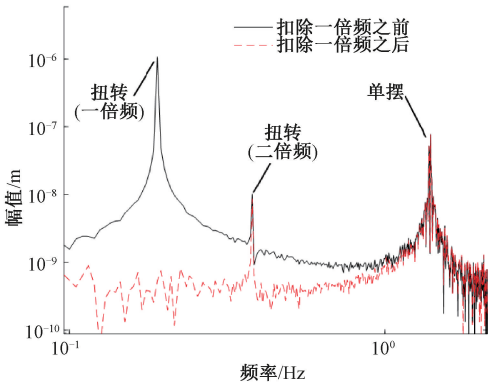


图 6 扣除一倍频信号前后的频谱图

Fig. 6 Spectrum before and after deducting the frequency doubling signal

根据公式,得到 COM 和 OC 的落体距离的计算公式:

$$\delta_x = \frac{A_f}{B_1}$$

(4)

$$\delta_z = \frac{4A_{2f}}{B_2}$$

(5)

其中, A_f 是图 5 中一倍频的幅值, A_{2f} 是图 6 中最接近真实值的二倍频的幅值。

4 不确定度评定

4.1 A 类不确定度

为了得到更准确的数据,改变初始扭转角 θ_0 ,进行多组实验,且对同一初始角度进行了重复性实验。以初始角度 θ_0 为 2.05° 的重复性实验为例,运用上述数据处理方法,算出 3 组 δ_{zi} 的值及其平均值 $\bar{\delta}_z$,如表 1 所示。

表 1 初始角度 $\theta_0=2.05^\circ$ 的重复性实验

Table 1 Repetitive experiment of initial angle $\theta_0=2.05^\circ$

i	1	2	3	$\bar{\delta}_z$
$\delta_{zi}/\mu\text{m}$	54.24	54.44	54.25	54.31

因重复性实验测量次数较少,选用极差法计算标准偏差 $s(x)$ 。从有限次独立重复测量的一系列测得值中找出最大值 $x_{\max}$ 和最小值 $x_{\min}$,得到极差 $R = x_{\max} - x_{\min}$;根据测量次数 n 对应的极差系数 C_n ($n = 3$ 时, $C_n = 1.69$),根据公式 $s(x) = (x_{\max} - x_{\min})/C_n$ 得到估计的标准偏差。

算术平均值的实验标准偏差 $s(\bar{x}) = s(x)/\sqrt{n}$;算得 $s(\bar{x})$ 即 A 类不确定度 u_1 为 $0.07\ \mu\text{m}$ 。

4.2 B 类不确定度

仪器在系统的测量过程中所引入的不确定度主要来自正交干涉仪和光电自准直仪本身存在的误差。

分辨率恒定的条件下,信噪比(二倍频处信号幅值与二倍频附近本底噪声的比值)越高,由本底噪声引入的不确定度越小。实验所使用的正交干涉仪在 $0.3\sim0.5\ \text{Hz}$ 处的分辨率为 $0.2\ \text{nm}$,在初始扭转角度为 2.05° 时,由测量得到的位移信号算得由本底噪声引入的不确定度为 $u_2=0.78\ \mu\text{m}$ 。

由压电陶瓷实验,测量得到实验所使用的正交干涉仪示值误差为 $4\ \text{nm}$,根据蒙特卡洛算法,得到正交干涉仪的示值误差引入的不确定度 u_3 为 $0.06\ \mu\text{m}$ 。

光电自准直仪型号为 AIM-50-Mini,其角度范围为 $\pm 1.5^\circ$,参考说明书取精度为其 1% 即 $54''$,根据蒙特卡洛算法得到自准直仪的测量精度引入不确定度 u_4 为 $0.01\ \mu\text{m}$ 。

对扭转角信号进行拟合得到初始扭转角 θ_0 、阻尼常数 β 和角频率 ω 的最佳匹配值,所得参数值会与真实值有一定的误差,从而引入不确定度。拟合参数时,可以得到在 95% 置信区间下衰减系数 β 和初始角度 θ_0 的波动范围。在 β 和 θ_0 的范围下计算出 δ_z 的极值,将此极值与 δ_z 的最佳估计值的最大偏差作为因拟合参数误差引入的不确定度 u_5 为 $0.06\ \mu\text{m}$ 。

4.3 合成不确定度

合成标准不确定度是由各标准不确定度分量合成得到^[16-17]。当输入量间不相关时,合成标准不确定度的评定公式可简化为:

$$u_c = \sqrt{\sum_{i=1}^N u_i^2}$$

(6)

当初始扭转角 θ_0 不同时,运用上述方法,8 组实验的 δ_z 的平均值与其标准合成不确定度如图 7 所示。

4.4 加权算术平均值及实验标准偏差

落体光心与质心沿 z 方向的偏移量 δ_z 按加权算术平均值的方法计算。加权算术平均值 x_w 表征对同一被测

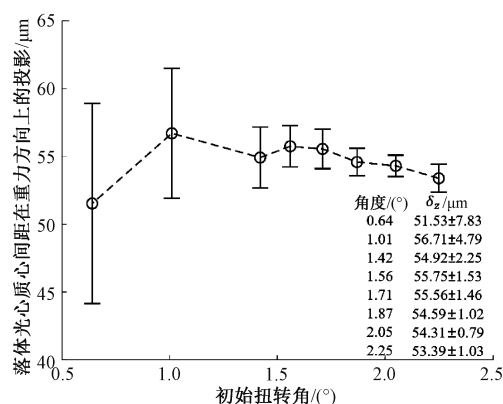


图7 8组实验的合成不确定度

Fig. 7 Synthetic uncertainty of eight groups of experiments

量进行多组测量,考虑各组的权后所得的被测量估计值,计算公式为:

$$x_w = \frac{\sum_{i=1}^m W_i \bar{x}_i}{\sum_{i=1}^m W_i} \quad (7)$$

式中: W_i 为第 i 组观测结果的权, $\bar{x}_i$ 为第 i 组观测结果平均值, m 为重复观测的组数。

若有 m 组观测结果的值为 $\bar{x}_1, \bar{x}_2, \dots, \bar{x}_m$; 其合成标准不确定度分别为 $u_{c1}, u_{c2}, \dots, u_{cm}$; u_c^2 称为合成方差,任意设定第 n 个合成方差为单位权方差 $u_{cn}^2 = u_0^2$, 即相应的观测结果的权为 1, $W_n = 1$ 。则 $\bar{x}_i$ 的权 W_i 如下:

$$W_i = \frac{u_0^2}{u_{ci}^2} \quad (8)$$

加权算术平均值 x_w 的实验标准偏差 s_w 如下式所示:

$$s_w = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^m W_i (\bar{x}_i - x_w)^2}{(m-1) \sum_{i=1}^m W_i}} \quad (9)$$

因此,运用遗传算法,先降低单摆影响再扣除一倍频数据处理方法,算得每组的合成标准不确定度,取 8 组扩展不确定度的最大值的权为 1,得到 δ_z 的加权算术平均值为 $54.48 \mu\text{m}$, 加权算术平均值实验标准偏差为 $0.29 \mu\text{m}$,按正态分布取置信因子 $k=2$,加权算术平均值的扩展不确定度为 $0.58 \mu\text{m}$ 。

5 结 论

本文提出了一种基于遗传算法的数据处理方法,此种方法在测量自由落体的质心和光心间距时能消减单摆

模式与扭转模式中的一倍频的部分频率成分对扭转模式二倍频幅值的影响,使得测量落体中光心与质心间距在重力方向上的投影 δ_z 的扩展不确定度小于 $0.58 \mu\text{m}$ 。与国内外现有且公开可知的光心质心测量最小误差 $1 \mu\text{m}$ 相比,此种数据处理方法实现了更精确的测量。

该方法基于扭摆法,将下落物体用一根扭丝悬挂,通过真空导引给落体外部激励,使其作扭转运动。同时,用正交干涉仪测量落体由于扭摆产生的位移,光电自准直仪同步采集落体的扭摆角度。先消减单摆模式对扭转模式二倍频的影响,通过遗传算法以 $A \exp(-\beta_0 t) \sin \omega_0 t$ 为函数模型构造单摆运动信号,将单频正交干涉系统测得的位移信号减去构造所得的单摆运动信号。再消减扭转模式中的一倍频对二倍频的影响,通过遗传算法以 $\delta_x \theta_0 \exp(-\beta t) \sin \omega t$ 为函数模型构造扭转运动一倍频信号,将扣除构造单摆信号后的信号减去构造所得的一倍频信号。

针对此数据处理方法进行不确定度评定,得到 δ_z 的加权算术平均值为 $54.48 \mu\text{m}$,取置信因子 $k=2$,加权算术平均值的扩展不确定度为 $0.58 \mu\text{m}$,即可以将 δ_z 的大小调整到 $0.58 \mu\text{m}$ 以内。考虑到在 NIM-3A 绝对重力仪上测得的最大角速度为 $24.67 \text{ mrad/s}^{[18]}$,绝对重力测量中的旋转误差可以降低到 $0.035 \mu\text{Gal}$ 。

参考文献

- [1] 冯金扬,吴书清,李春剑,等. 基于双干涉仪的自由落体绝对重力测量[J]. 光学精密工程, 2015, 23(10): 2740-2746.
FENG J Y, WU SH Q, LI CH J, et al. Free-fall absolute gravity measurement based on double interferometers[J]. Optics and Precision Engineering, 2015, 23(10): 2740-2746.
- [2] 吴书清,李春剑,徐进义,等. CCM. G-K2 国际比对和 NIM-3A 型绝对重力仪[J]. 计量学报, 2017, 38(1): 127-128.
WU SH Q, LI CH J, XU J Y, et al. The comparison of absolute gravimeters CCM. G-K2 and NIM-3A absolute gravimeter[J]. Acta Metrologica Sinica, 2017, 38(1): 127-128.
- [3] WU S Q, FENG J Y, LI C J, et al. The results of 10th international comparison of absolute gravimeters (ICAG-2017)[J]. Journal of Geodesy, 2021, 95(6): 1-16.

- [4] FALLER J E. Thirty years of progress in absolute gravimetry: A scientific capability implemented by technological advances[J]. *Metrologia*, 2002, 39(5): 425-428.
- [5] ROTHLEITNER C, FRANCIS O. On the influence of the rotation of a corner cube reflector in absolute gravimetry[J]. *Metrologia*, 2010, 47(5): 567-574.
- [6] 滕云田, 吴琼, 郭有光, 等. 基于激光干涉的新型高精度绝对重力仪[J]. *地球物理学进展*, 2013, 28(4): 2141-2147.
- TENG Y T, WU Q, GUO Y G, et al. New type of high-precision absolute gravimeter base on laser interference[J]. *Progress in Geophysics*, 2013, 28(4): 2141-2147.
- [7] HANADA H. Coinciding the optical center with the center of gravity in a corner cube prism: A method[J]. *Applied Optics*, 1988, 27(16): 3530-3533.
- [8] ROTHLEITNER C, SVITLOV S, MÉRIMÈCHE H, et al. A method for adjusting the centre of mass of a freely falling body in absolute gravimetry[J]. *Metrologia*, 2007, 44(3): 234-241.
- [9] NIEBAUER T M, SASAGAWA G S, FALLER J E, et al. New generation of absolute gravimeters [J]. *Metrologia*, 1995, 32(3): 159-180.
- [10] NIEBAUER T M, CONSTANTINO A, BILLSON R, et al. Balancing a retroreflector to minimize rotation errors using a pendulum and quadrature interferometer[J]. *Applied Optics*, 2015, 54(18): 5750-5758.
- [11] HANADA H, TSUBOKAWA T, TSURUTA S. Possible large systematic error source in absolute gravimetry[J]. *Metrologia*, 1996, 33(5): 155-160.
- [12] 余烨, 胡翔, 王启宇, 等. 绝对重力仪中落体光心与质心间距的精确测量[J]. *计量学报*, 2020, 41(7): 830-834.
- YU Y, HU X, WANG Q Y, et al. Precisely measure the distance between the falling body's mass center and its optical center for absolute gravimeters [J]. *Acta Metrologica Sinica*, 2020, 41(7): 830-834.
- [13] 郭丽华, 朱元昌, 邸彦强. 基于遗传算法的光电经纬仪布站优化设计[J]. *仪器仪表学报*, 2010, 31(4): 741-746.
- GUO L H, ZHU Y CH, DI Y Q. Optimization of photoelectric theodolite station distribution based on GA[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2010, 31(4): 741-746.
- [14] 周晓军, 薛志英, 林水生, 等. 遗传算法在双光束干涉型光纤传感器信号处理中的应用[J]. *仪器仪表学报*, 2001, 22(z1): 30-31.
- ZHOU X J, XUE ZH Y, LIN SH SH, et al. Application of genetic algorithm in signal processing of two-beam interferometric fiber sensor [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2001, 22(z1): 30-31.
- [15] 李艳生, 万勇, 张毅, 等. 基于人工蜂群-自适应遗传算法的仓储机器人路径规划[J]. *仪器仪表学报*, 2022, 43(4): 282-290.
- LI Y SH, WAN Y, ZHANG Y, et al. Path planning for warehouse robot based on the artificial bee colony-adaptive genetic algorithm [J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2022, 43(4): 282-290.
- [16] 魏明明. 蒙特卡洛法与 GUM 评定测量不确定度对比分析[J]. *电子测量与仪器学报*, 2018, 32(11): 17-25.
- WEI M M. Comparative analysis of measurement uncertainty evaluation with Monte Carlo method and GUM[J]. *Journal of Electronic Measurement and Instrumentation*, 2018, 32(11): 17-25.
- [17] 彭钰钦, 涂亚庆, 杨辉跃. DFT 算法频率和相位差测量不确定度评估[J]. *电子测量与仪器学报*, 2020, 34(9): 17-22.
- PENG Y Q, TU Y Q, YANG H Y. Uncertainty evaluation of DFT frequency and phase difference measurement[J]. *Journal of Electronic Measurement and Instrumentation*, 2020, 34(9): 17-22.
- [18] 王艳, 王启宇, 冯金扬, 等. 用于绝对重力仪的落体旋转评估方法[J]. *光学学报*, 2022, 42(8): 138-144.
- WANG Y, WANG Q Y, FENG J Y, et al. Evaluation of

falling object rotation for absolute gravimeter[J]. Acta Optica Sinica, 2022, 42(8): 138-144.

作者简介



王若琳, 2020 年于武汉理工大学获得学士学位, 现为武汉理工大学硕士研究生, 主要研究方向为重力测量与精密测量物理。

E-mail: 594300128@qq.com

Wang Ruolin received her B.Sc. degree from Wuhan University of Technology in 2020. She is currently a M.Sc. candidate at Wuhan University of Technology. Her main research interests include gravity measurement and precision measurement physics.



胡翔, 现为湖北省计量测试技术研究院教授级高级工程师, 主要研究方向为力学计量设备的研制。

E-mail: 305133509@qq.com

Hu Xiang is a professor-level senior engineer at Hubei Institute of Measurement and Testing

Technology. His main research interests include the development of mechanical measurement equipment.



黄安贻 (通信作者), 1988 年于华中理工大学获得学士学位, 1991 年于武汉工学院获得硕士学位, 2002 年于武汉理工大学获得博士学位, 现为武汉理工大学教授, 主要研究方向为机电一体化技术、智能仪器与虚拟

仪器、制造信息处理与过程控制等方面的研究。

E-mail: huanganyi@whut.edu.cn

Huang Anyi (Corresponding author) received his B.Sc. degree from Huazhong University of Science and Technology in 1988, M.Sc. degree from Wuhan Institute of Technology in 1991, and Ph.D. degree from Wuhan University of Technology in 2002. He is currently a professor at Wuhan University of Technology. His main research interests include mechatronics technology, intelligent instruments and virtual instruments, manufacturing information processing and process control.