

新型高精度绝对重力仪*

胡华 伍康 申磊 李刚 王力军†

(中国计量科学研究院 - 清华大学精密测量联合实验室; 清华大学精密测试技术及仪器国家重点实验室;

清华大学精密仪器与机械学系, 北京 100084)

(2012年1月17日收到; 2012年1月22日收到修改稿)

精密测量地球表面的重力加速度 (g , 常用值 9.81 m/s^2) 是探测地球重力场的重要途径, 已广泛应用于计量、测绘、地质、地震与资源勘探等领域. 随着我国“2000 国家重力基本网”和“中国地壳运动观测网络”的建成, 对高精度绝对重力测量的需求日益增加. 为深入研究现有绝对重力测量技术可能存在的系统误差, 并满足国内多个领域对高精度绝对重力仪的迫切需求, 自主研制 T-1 型可搬运式高精度绝对重力仪样机, 采用经典的真空自由落体方案, 通过激光干涉测量和数据拟合方法获得重力加速度值. T-1 型绝对重力仪主要包括以下几部分: 高真空度自由落体装置、小型化激光干涉测量装置、超低频垂直隔振系统、高速信号采集系统、仪器控制与数据处理系统. 绝对重力测量的长度基准为稳频 He-Ne 激光器, 时间基准为铷原子钟, 这两项现有基准的测量不确定度都优于 1×10^{-9} . 测试结果表明, T-1 型绝对重力仪在 12 h 内重力测值的标准差可优于 $1 \mu\text{Gal}$ ($1 \mu\text{Gal} = 10^{-8} \text{ m/s}^2$), 测量结果的复现性优于 $3 \mu\text{Gal}$, 可实现微伽量级不确定度的精密重力测量, 有望在我国多个关键领域发挥重要应用.

关键词: 绝对重力测量, 激光干涉仪, 自由落体方法

PACS: 91.10.-v, 43.20.Ye

1 引言

重力测量是一门古老的学科, 最早可追溯到 16 世纪伽利略的比萨斜塔自由落体实验. 随着激光和时频技术的发展, 绝对重力测量 (g , 常用值 9.81 m/s^2) 的准确度不断提高, 并广泛应用于计量、测绘、地质、地震、资源勘探等多个领域^[1,2]. 目前, 高精度绝对重力测量的基本原理是采用稳频激光干涉测量技术, 精密测量真空环境下的自由落体运动的位移和时间, 通过拟合自由落体运动参数得到绝对重力值. 其中, 稳频激光提供长度测量基准, 原子钟提供时间测量基准, 现有的这两项基准的相对不确定度都优于 1×10^{-9} , 因此理论上绝对重力测量的不确定度可优于 μGal 量级 ($1 \mu\text{Gal} = 10^{-8} \text{ m/s}^2$).

绝对重力测量技术在 20 世纪 70—80 年代取得较快发展, 当时由于军事和资源勘探的需要, 世界上主要国家包括美国、俄罗斯、中国、意大利、法国等都大力研制绝对重力仪. 其中, 中国计量科

学研究院曾研制 NIM-2 型绝对重力仪并参加国际绝对重力仪比对, 后来由于各种原因致使相关工作基本停滞^[3,4]. 意大利国家计量院研制了 IMGC-2 型绝对重力仪, 这是迄今为止唯一采用上抛 - 下落原理的高精度绝对重力仪^[5]. 美国 JILA 实验室在绝对重力测量领域具有重要地位, Faller 的研究小组曾研制六台 JILA-g 型绝对重力仪, 提供给多个国家的计量和测绘部门使用^[6]. 后来, Niebauer 等在 JILA-g 基础上进行改进, 实现了高精度绝对重力仪的商品化, 即目前 Micro-g 公司生产的 FG-5 型绝对重力仪^[7]. 1999 年, 朱棣文等发表基于原子干涉仪的高精度绝对重力测量结果^[8], 在精密物理测量领域引起广泛关注, 目前国内已有若干单位开展相关研究工作^[9-11].

随着我国的“2000 国家重力基本网”和“中国地壳运动观测网络”的建成, 对高精度绝对重力测量的需求日益增加, 突显重力测量仪器在国民经济发展和国防建设中的重要性. 由于高精度绝对重力仪综合了激光测量、精密机械、真空技术、隔振技术等多学科技术, 自主研发难度较大, 国际上

* 清华大学自主科研计划 (批准号: 2010THZ05) 资助的课题.

† E-mail: lwan@mail.tsinghua.edu.cn

绝大多数国家的计量和测绘部门都已经采购 FG-5 型绝对重力仪. 1995 年以来, 国家测绘局、中国地震局、中科院测地所等国内单位先后引进了 FG-5, 用于开展各自领域的高精度绝对重力测量任务^[12-13]. 然而, 购买 FG-5 不仅在仪器维护等方面存在许多问题和不便, 重力测量数据的可靠性和溯源问题也无法保障. 因此, 自主研发新型的高精度可搬运式绝对重力仪具有重要的现实意义.

本文主要介绍清华大学自主研发的 T-1 型可搬运式高精度绝对重力仪, 包括其系统原理与结构、系统关键技术与绝对重力测量结果. T-1 型绝对重力仪采用新颖的弹性下拉方法实现自由落体运动, 结合小型化的激光干涉测量装置和高速信号采集处理技术, 可实现微伽量级不确定度的精密重力测量.

2 系统原理与关键技术

2.1 系统总体设计

T-1 型绝对重力仪采用经典的自由落体方案和模块化的设计思路, 主要面向实验室环境下的高精度绝对重力观测. 仪器的主体结构如图 1 所示, 整体高度约 1.3 m, 占地面积约 0.6 m × 0.6 m, 各组成部分可分拆以便于运输, 从而实现在不同重力台站之间的流动观测. 仪器主要包括以下几个主要组成部分:

1) 真空自由落体装置. 通过精密机械设计和运动控制, 可重复实现下落物体的自由落体运动. 下落物体采用非磁性材料制作, 消除外界磁场对自由落体运动的干扰. 采用离子泵将落体装置内的真空度维持在 1×10^{-4} Pa 以下, 基本消除残余空气对落体运动的影响.

2) 激光干涉测量装置. 采用稳频 He-Ne 激光器搭建小型化激光干涉仪, 激光经光纤导入干涉测量装置, 经过准直、分光、合光之后形成干涉条纹信号, 由高速光电探测器接收. He-Ne 激光器的短期频率稳定度优于 1×10^{-9} , 从而确保激光干涉测量的准确度.

(3) 超低频垂直隔振系统. 利用长周期地震仪悬挂激光干涉装置的参考棱镜, 降低地面微振动对重力精密测量的影响. T-1 系统实际采用的超级弹簧装置, 可实现 40—60 s 的本征振荡周期, 具有很好的隔振效果. 自主研发的主动式隔振平台已实现 15 s 的本征振荡周期, 有望将来取代超级弹簧用

于高精度重力测量.

4) 高速信号采集系统. 利用高速数据采集卡对干涉条纹信号进行采样, 采样频率设定为 100 MHz. 采集卡的时钟信号由铷原子钟控制, 时间测量的不确定度优于 1×10^{-9} . 数据采集的起始时间由外部的频率触发器控制, 当干涉条纹信号的频率达到 1 MHz, 频率触发器控制采集卡开始采样.

5) 数据处理与仪器控制系统. 通过软件编程, 对采集的干涉条纹信号进行数字化处理, 精确计算扫描信号的过零点时间并拟合得到重力测值, 以及计算地球固体潮汐、极移修正等多项重力改正值. 仪器控制也通过该软件来实现, 可以设定各项测量参数, 控制自由落体装置、信号采集、数据处理协调工作, 实现全自动测量.

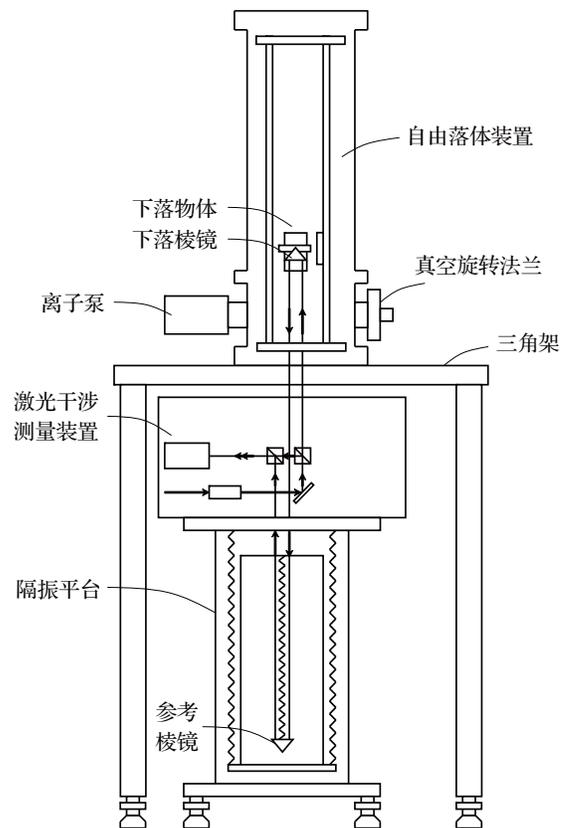


图 1 T-1 型绝对重力仪测量装置的主体结构

2.2 真空自由落体装置

自由落体装置用于实现稳定的、可重复的自由落体运动, 是所有基于自由落体原理的绝对重力仪的核心组成部分. T-1 型绝对重力仪自由落体装置的机械结构如图 2 所示, 主要包括真空腔、导轨装置和机械传动装置. 真空腔主要包括主腔体、连接腔体、真空观察窗等. 真空腔内沿竖直方向安装

了直线导轨装置, 支撑托盘固定在导轨的滑块上, 可以沿导轨作低摩擦的直线运动. 下落物体上安装了三个金属球珠, 与支撑托盘上的三个 V 形槽相配合, 确保下落物体能够稳定放置在托盘上. 托盘与一根竖直方向悬挂的压缩弹簧相连接, 弹簧底端固定在真空腔的底座上. 当物体下落时, 弹簧向下施力于支撑托盘, 使其向下运动的加速度大于重力加速度, 从而使下落物体产生自由落体运动.

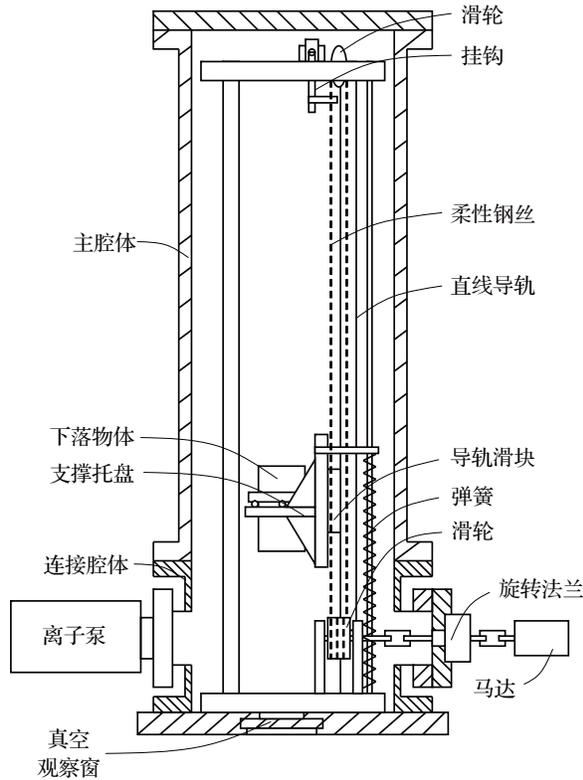


图2 自由落体装置的机械结构

机械传动装置用于将下落物体运送到真空腔的顶部位置, 并实现自由落体运动, 主要包括马达、旋转法兰、滑轮、柔性钢丝、挂钩等部件. 通过马达运转, 首先将支撑托盘及下落物体运送到真空腔的顶部位置, 支撑托盘与下落物体被挂钩悬挂住, 此时与支撑托盘连接的弹簧处于被拉伸的状态, 产生一个竖直向下的拉力. 然后, 反向运转马达, 拨动挂钩转动以释放支撑托盘, 在弹簧的下拉作用下, 下落物体与支撑托盘分离, 开始作自由落体运动. 当支撑托盘向下运动到真空腔的下方位置时, 弹簧由被拉伸的状态转变为被压缩的状态, 产生一个向上的推力, 使支撑托盘开始作减速运动. 在此过程中, 支撑托盘与作自由落体运动的下落物体重新接触, 并且一起作减速运动, 直至静止停留在真空腔的底部位置. 通过重复以上步骤, 即可重复实现下

落物体的自由落体运动.

T-1 型绝对重力仪的自由落体装置采用新颖的弹性下拉方法, 结合精密机械设计和运动控制实现了下落物体的自由落体运动. 在其他类型的绝对重力仪中, 通常采用高速运转马达及机械传动装置的方式, 使得承载下落物体的支撑托盘快速往下运动, 从而实现下落物体的自由落体运动. 显然, 下落物体飞行期间马达传动系统一直处于工作状态, 导致自由落体装置产生较强的振动, 因此这种方法可能会影响重力测量结果的准确度. 与现有技术方案相比, T-1 型绝对重力仪在自由落体运动期间使马达与机械传动装置保持停止不动, 降低马达传动系统对重力测量的振动干扰, 提高测量装置的机械稳定性和测量结果的准确度.

2.3 激光干涉测量装置

激光干涉测量装置用于测量自由落体运动的位移, 是绝对重力测量系统的重要组成部分. T-1 型绝对重力仪激光干涉测量装置的光路结构如图 3 所示. 首先, 通过光纤将激光传输到干涉测量装置, 经过光束准直器, 激光束被反射镜反射, 竖直向上传输到分光镜 1. 一部分激光经分光镜 1 反射后沿水平方向传输, 作为参考光束到达分光镜 2; 另一部分激光继续沿竖直向上方向传输, 作为测量光束进入真空腔, 到达下落物体中的回射棱镜, 经反射后沿竖直向下方向传输, 到达隔振平台上的参考棱镜, 经再次反射后沿竖直向上方向传输, 到达分光镜 2. 参考光束和测量光束在分光镜 2 进行合光, 一部分光束沿水平方向传输, 到达光电探测器.

在重力测量过程中, 下落棱镜随着下落物体作自由落体运动, 参考光束和测量光束在分光镜 2 进行合光后产生干涉效应, 干涉条纹的数量与下落物体运动的位移成正比. 来自分光镜 2 的合光光束水平传输到高速光电探测器, 转换为电信号传输给数据采集卡进行后续处理. 在实际操作中, 通过精细调节分光镜 1 和分光镜 2, 使激光干涉条纹的信号强度最大化, 满足后续信号采集和处理的需要.

在绝对重力测量中需要精确调整测量光束的方向, 使其与重力加速度方向即绝对竖直方向平行. 为了调节测量光束的垂直度, 需要使用水平参考液面和一个校准回射棱镜. 如图 4 所示, 测量光束向上传输到分光镜 1, 一部分激光继续沿竖直向上方向传输, 作为测量光束进入真空腔, 到达下落物体中的回射棱镜, 经反射后沿竖直向下方向传输, 被

水平液面反射后沿着原光路回到分光镜 1; 另一部分激光沿水平方向传输, 经过分光镜 2 反射后沿竖直向上方向传输, 经校准回射棱镜反射后沿着原光路返回. 当测量光束接近于竖直方向向上传输时, 上述两路回射的激光在分光镜 1 产生干涉效应. 通过精细调节反射镜来控制测量光束方向, 当观测到的干涉条纹呈现均匀的圆形光斑, 则认为测量光束沿绝对竖直方向向上传输. 在调节过程中, 不需要移动原有的激光干涉测量装置的光学器件, 因此该调节方法简单易行, 确保测量结果的稳定性和准确性.

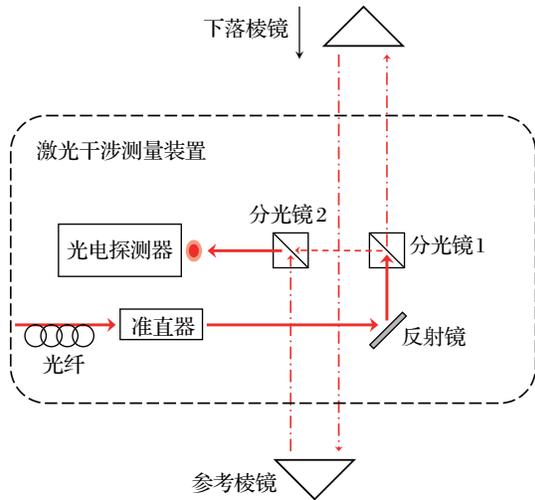


图 3 激光干涉测量装置的光路结构

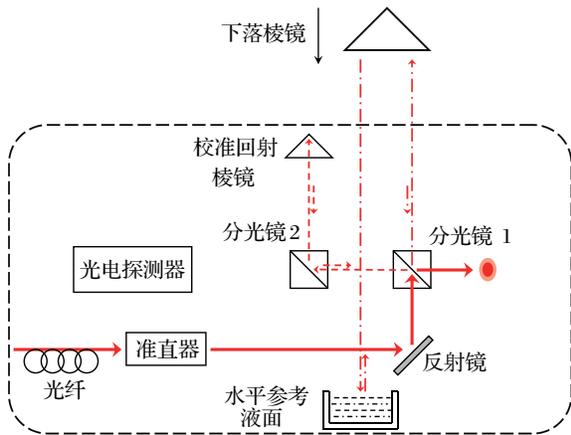


图 4 测量光束的垂直度调节方法

2.4 高速信号采集与数据处理

如何处理激光干涉条纹信号并计算 g 值, 是绝对重力测量中的关键技术环节. 在现有的技术方案中, 通常采用过零检测器和时间间隔分析仪来计算条纹信号的过零点时间. 由于条纹信号是频率不断

增加的扫频信号, 在计算过零点时间的过程中, 过零检测器和时间间隔分析仪的硬件电路系统可能引入非线性的相位偏移, 使得重力测值的拟合结果可能产生偏差.

T-1 型绝对重力仪采用高速数字采样方法进行条纹信号处理, 不仅消除上述硬件电路可能带来的测量偏差, 而且高速数字采样可以完整记录自由落体运动对应的条纹信号特征, 便于深入研究重力测量中可能存在的系统误差. 根据激光干涉原理, 条纹信号的频率 f 与自由落体运动的速度 v 成正比, 如下式所示:

$$f = v/(\lambda/2), \quad (1)$$

其中, $\lambda \approx 632.8 \text{ nm}$ 为 He-Ne 激光器的波长.

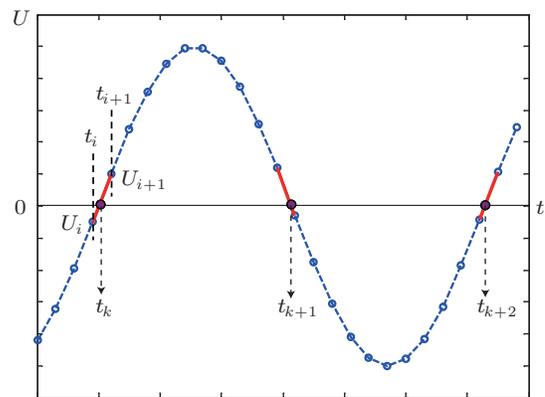


图 5 条纹信号过零点时间的计算方法

当干涉条纹信号的频率达到 1 MHz 时, 高速数据采集卡开始对条纹信号进行采样, 并将数字条纹信号输入计算机内存. 数据采集卡的采样频率设置为 100 MHz, 其采样时钟与外部连接的铷原子钟同步. 为了精确计算条纹信号的过零点的时间, T-1 型绝对重力仪采用基于双采样点的线性插值方法^[14]. 如图 5 所示, 根据信号采样的原理, 条纹信号的真实过零点总是介于两个具有相反极性的相邻采样点 U_i 与 U_{i+1} 之间. 利用一定的算法找到所有满足条件 $U_i \cdot U_{i+1} \leq 0$ 的采样点, 然后根据线性插值公式计算过零点对应的的时间

$$t_k = t_i + \frac{U_i}{U_i - U_{i+1}} \cdot T_s, \quad (2)$$

其中, 采样时刻 t_i 对应信号幅值 U_i , 采样时刻 t_{i+1} 对应信号幅值 U_{i+1} , T_s 为采样时间间隔, 即采样频率 f_s 的倒数. 采样时刻 t_i 等于采样时间间隔乘以系数 $(i - 1)$, 如下所示:

$$t_i = (i - 1) \cdot T_s = (i - 1)/f_s. \quad (3)$$

两个相邻采样点的时间间隔为 10 ns, 采用上述线性插值方法计算过零点的时间, 测量不确定度可小于 1 ns, 确保后续数据处理的准确度. 令 t_k 时刻对应自由落体运动的位移零点, 当计算得到条纹信号的过零点时间序列 $\{t_k, t_{k+1}, t_{k+2}, \dots\}$, 根据激光干涉测量原理, 与过零点时间序列对应的位移序列为 $\{0, \lambda/4, \lambda/2, \dots\}$. 基于时间序列和位移序列, 采用下面的多项式进行拟合, 即可得到重力加速度的数值

$$z(t) = z_0 + v_0 t + \frac{1}{2} g_0 t^2 + \gamma \left(\frac{1}{2} z_0 t^2 + \frac{1}{6} v_0 t^3 + \frac{1}{24} g_0 t^4 \right), \quad (4)$$

其中, z_0 , v_0 和 g_0 分别是自由落体初始状态的位移、速度和重力加速度, γ 为实测的重力垂直梯度.

3 实验结果

T-1 型绝对重力仪完全在清华大学设计和制作完成, 实际系统如图 6 所示. 2010 年 11 月以来, T-1 型绝对重力仪在清华大学和中国计量科学研究院进行过多次绝对重力观测, 均取得了优异的测量结果, 并实际验证了仪器系统的设计可靠性和测量结果的稳定性.



图 6 T-1 型绝对重力仪在清华大学精密测量联合实验室

3.1 拟合残差信号分析

T-1 型绝对重力仪根据自由落体运动的位移和时间序列进行数值拟合, 从而计算得到重力加速度值. 根据拟合得到的运动方程参数, 重新计算运动

位移并与实际测量的位移进行比较, 即可得到拟合残差. 拟合残差反映了自由落体运动测量的综合特性. 如图 7 所示, 为 T-1 型绝对重力仪 16 次自由落体测量的拟合残差的平均结果. 采用平均处理可以消除拟合残差中的一些随机分量, 从而更清晰的显示残差信号的内在特征.

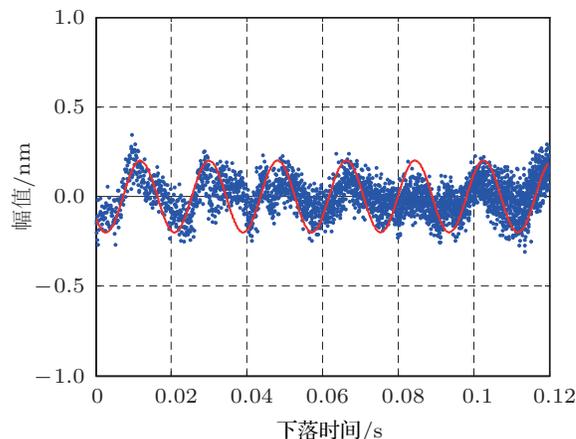


图 7 T-1 型绝对重力仪 16 次自由落体运动的平均拟合残差. 图中离散点为实测残差值, 连续曲线为拟合值

从图 7 可以看出, 平均拟合残差的幅值远小于 1 nm, 这表明采用激光干涉技术测量自由落体运动位移的精度达到纳米量级以下. 此外, 残差信号中含有一些特定频率成分的振荡信号, 这些振荡可以看作是叠加在自由落体运动中的位移噪声. 关于残差中振荡信号的来源有多种可能, 其一是在测量过程中激光干涉仪的参考棱镜的微小振动, 尽管采取了超低频垂直隔振装置, 但是幅度在纳米尺度以下的微小振动很难控制. 另一原因是落体释放时产生的振动传导至地面, 进而传导至激光干涉仪, 使测量光束方向发生微小偏差从而影响重力测值, 该效应通常称为反弹效应. 在 T-1 型绝对重力仪中, 采用被动式的弹性下拉方法实现自由落体运动, 在测量期间避免了马达快速运转对仪器的振动冲击, 因此测量期间仪器自身产生的振动得到有效控制, 反弹效应很小.

研究表明, 拟合残差中的振荡信号可能导致一定的重力测值偏差. 假设残差信号是幅值为 A_0 、频率为 f_0 的正弦信号, 由此引起重力测值的标准不确定度通过下式进行估算^[15]:

$$\sigma_{g_{\text{seis}}} = \frac{30}{\pi T^3} \frac{A_0}{f_0}, \quad (5)$$

其中, T 是物体的自由下落时间, 并且 $f_0 > 0.7/T$.

如图 7 所示, 对残差信号进行近似拟合, 可得到 $A_0 = 0.2 \text{ nm}$, $f_0 = 55 \text{ Hz}$, $T = 0.12 \text{ s}$ 的振荡曲

线. 根据 (5) 式, 计算反弹效应导致的重力测值不确定度为 $2.0 \mu\text{Gal}$. 有关绝对重力仪的残差振荡的来源分析及其对重力测值的影响是长期以来的研究难点, 有待进一步探索.

3.2 重力观测结果

2010 年 11 月至今, T-1 型绝对重力仪在清华大学和中国计量科学研究院 (简称计量院) 进行了多次重力观测, 均取得了微伽量级的高精度测量结果. 特别是计量院在昌平设立的重力观测台站, 由于远离城市, 周围环境极其安静, 重力测点采取独立地基设计, 非常适合进行高精度绝对重力观测.

图 8 是 T-1 型绝对重力仪于 2011 年 3 月在计量院昌平重力台站的测量结果, 共 25 组数据, 每组 16 次自由落体测量, 各组间隔 30 min. 其中, 误差图的中值为一组重力测值的均值, 误差图的高度为组内重力均值的标准差. 图 8(a) 中的连续实线为地球固体潮引起的重力变化理论计算值, 图 8(b) 为固体潮改正后的各组重力测量结果, 所有重力测值都减去了重力测量结果的均值 (约 $980121000 \mu\text{Gal}$).

根据重力实测结果, 各组内重力测值的离散度极小, 单次自由落体测量的标准差约为 $10 \mu\text{Gal}$. 理论上来说, 如果重复进行 100 次以上的自由落体测量, 重力测量结果均值的标准差将减小至 $1 \mu\text{Gal}$ 以下, 从而达到优于微伽量级的测量精度 (或称为统计不确定度). 实际的重力测量过程持续约 12 h, 通过多组重复测量来消除仪器可能存在的测量偏差. 从图 8(a) 可以看出, 各组重力测值与固体潮的理论曲线具有很好的一致性, 绝对重力测量结果在较长的时间周期内准确反映了重力场的变化规律, 这正是高精度绝对重力仪必须达到的基本要求. 从图 8(b) 可以看出, 经过固体潮改正后的各组重力测值分布在均值上下 $\pm 5 \mu\text{Gal}$ 范围内, 其波动的原因包括海洋潮汐、气压变化以及仪器自身的稳定性. 经固体潮改正后的重力测量结果均值的标准差为 $0.4 \mu\text{Gal}$, 这表明 T-1 型绝对重力仪可以在典型的测量周期内完成优于微伽量级的高精度绝对重力观测, 并且在持续观测过程中无明显的系统漂移. 在重力测量精度方面, T-1 型绝对重力仪已经达到与国际上占主导地位 FG-5 型绝对重力仪相当的水平, 这也几乎是基于现有技术方案所能达到的最高水平.

为了检验 T-1 型绝对重力仪在不同条件下测量结果的一致性, 在计量院昌平重力台站进行了仪器

测量结果复现性的测试. 2011 年 3 月, T-1 型绝对重力仪在昌平重力台站的 5 号点位进行了两次重力观测, 并于 2012 年 2 月再次进行了两次重力观测, 每次测量都重新组装、调整仪器. 结果表明, 在同一点位的四次重力测量结果的标准差小于 $3 \mu\text{Gal}$, 重力仪的测量结果具有很好的复现性.

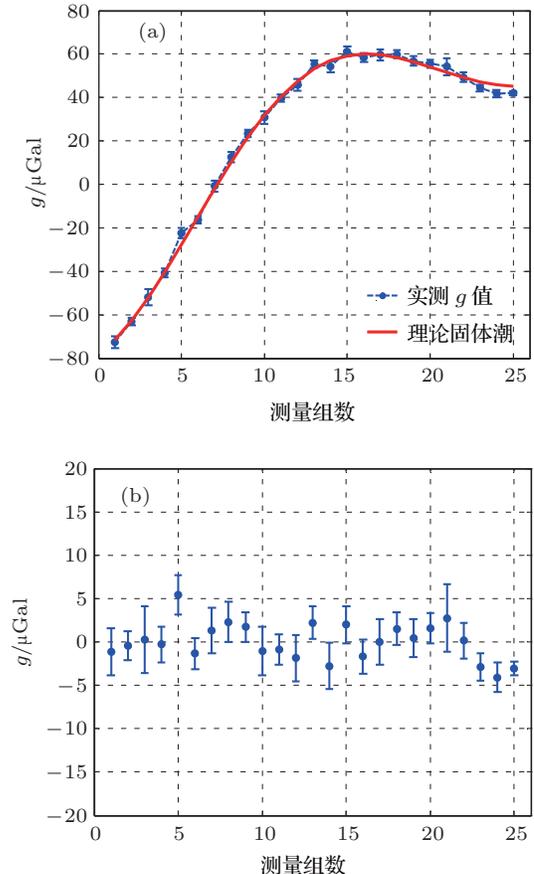


图 8 T-1 型绝对重力仪在昌平重力观测台站 5 号点的测量结果, 图中所示重力值已减去均值 (a) 12 h 重力测值与理论固体潮曲线相符; (b) 固体潮改正后的各组重力测值

由于地球表面的绝对重力值随时间、地点和地质结构 (例如地表沉降、地下水位等) 而动态变化, 因此无法定义重力测点的“标准重力值”, 只能通过多台绝对重力仪在同一测点进行测量比对的方法, 确定测点的“参考重力值”和各仪器的系统偏差. 计量院昌平重力观测台站仍处于建设之中, 由于只开展过有限的几次绝对重力观测, 没有进行较大规模的绝对重力仪比对, 因此目前无法得知各重力测点的参考重力值, 也无法确定 T-1 型绝对重力仪在该台站的测量结果偏差. 未来几年有望在该台站开展一些区域性的高精度绝对重力仪比对活动, 届时将有助于确立重力台站的参考重力值, 并且对于 T-1 型绝对重力仪的测量不确定度评估具有重要

意义.

4 结论与展望

T-1 型绝对重力仪为自主研制的高精度、可搬运式绝对重力测量装置, 采用新型的自由落体装置、激光干涉测量技术和高速信号采集处理技术, 可实现微伽量级不确定度的精密重力测量, 有望在我国的计量、测绘、地震等领域发挥重要应用. 实际测试结果表明, T-1 型绝对重力仪在 12 h 内重力测量结果的标准差可优于 $1 \mu\text{Gal}$, 测量结果的复现

性优于 $3 \mu\text{Gal}$, 主要性能指标与国际上占主导地位 FG-5 型绝对重力仪相当.

绝对重力仪的测量对象是重力加速度的绝对值, 为了评估仪器测量结果与重力参考值的偏差, 需要进行全面、细致的测量不确定度分析. 根据已有的研究结果, 影响高精度绝对重力测量的因素多达十几项, 需要根据不同的仪器系统逐项具体分析, 这是下一阶段的主要研究任务. 此外, T-1 型绝对重力仪将择机参加国际和区域性的绝对重力仪比对, 这将有助于深入研究仪器测量可能存在的各种偏差, 进一步提升高精度绝对重力仪的研制水平.

-
- [1] Faller J E 2002 *Metrologia* **39** 425
- [2] Wang L J 2009 *Atom Optics and Space Physics* (Amsterdam: IOS Press) p465
- [3] Guo Y G, Huang D L, Fang Y Y, Zhang G Y, Zhou J H, Xu J Y 1988 *Acta Geophysica Sinica* **31** 73 (in Chinese) [郭有光, 黄大伦, 方永源, 张光远, 周景华, 徐进义 1988 地球物理学报 **31** 73]
- [4] Zhang W M, Zhang C J 2002 *Progress in Geophysics* **17** 180 (in Chinese) [张为民, 张赤军 2002 地球物理学进展 **17** 180]
- [5] Origlia C, Quagliotti D, Berrino G, Corrado G, D'Errico V, Ricciardi G 2008 *Annals of Geophysics* **51** 39
- [6] Peter G, Moose R E, Wessells C W, Faller J E, Niebauer T M 1989 *Journal of Geophysical Research* **94** 5659
- [7] Niebauer T M, Sasagawa G S, Faller J E, Klopping F 1995 *Metrologia* **32** 159
- [8] Peters A, Chung K Y, Chu S 1999 *Nature* **400** 849
- [9] Xu X Y, Wang Y Z 1997 *Acta Phys. Sin.* **46** 1062 (in Chinese) [徐信业, 王育竹 1997 物理学报 **46** 1062]
- [10] Zheng S L, Chen J, Lin Q 2005 *Acta Phys. Sin.* **54** 3535 (in Chinese) [郑森林, 陈君, 林强 2005 物理学报 **54** 3535]
- [11] Ren L C, Zhou L, Li R B, Liu M, Wang J, Zhan M S 2009 *Acta Phys. Sin.* **58** 8230 (in Chinese) [任利春, 周林, 李润兵, 刘敏, 王谨, 詹明生 2009 物理学报 **58** 8230]
- [12] Zhang W M, Wang Y, Zhou X H 2008 *Progress in Geophysics* **23** 69 (in Chinese) [张为民, 王勇, 周旭华 2008 地球物理学进展 **23** 69]
- [13] Liu D Z, Li H, Xing L L, Sun S A, Liu Z W, Xiang A M 2007 *Journal of Geodesy and Geodynamics* **27** 88 (in Chinese) [刘冬至, 李辉, 邢乐林, 孙少安, 刘子维, 项爱民 2007 大地测量与地球动力学 **27** 88]
- [14] Svitlov S, Maslyk P, Rothleitner C, Hu H, Wang L J 2010 *Metrologia* **47** 677
- [15] Svetlov S 1997 *Gravity, Geoid and Marine Geodesy* **117** (Berlin: Springer) 47

A new high precision absolute gravimeter*

Hu Hua Wu Kang Shen Lei Li Gang Wang Li-Jun†

(Joint Institute for Measurement Science, State Key Lab of Precision Measurement Technology and Instrument, Department of Precision Instrument and Mechanology, Tsinghua University, Beijing 100084, China)

(Received 17 January 2012; revised manuscript received 22 January 2012)

Abstract

The accurate measurement of local gravitational acceleration (g , normal value 9.81 m/s^2) is a key approach to the exploration of the gravitational field of the earth, and it has been applied in metrology, geodesy, geodynamics, seismology, and mineral exploration. With the plan of ‘2000 national gravity network’ and ‘China crustal motion observation network’, highly precision gravity measurement will be increasingly required in the long term. In order to further investigate the possible systematic error of current absolute gravity measurement, and satisfy various requirements for highly accurate gravity observation, the T-1 absolute gravimeter prototype is designed and built at Tsinghua University. The T-1 instrument adopts the classic free-fall scheme to measure the g value by tracking the trajectory of a free-fall motion in vacuum with a laser interferometer. The T-1 absolute gravimeter consists of several sub-systems: high vacuum free-fall chamber, compact laser interferometer, low-frequency vertical vibration isolation, high-speed signal acquisition system, instrument control and data processing system. The length and time standards used in g measurement are stabilized He-Ne laser and rubidium atomic clock respectively. It’s well known that both of the two standards have an uncertainty of less than 1×10^{-9} . The practical gravity measurement results of T-1 absolute gravimeter give a standard deviation of the mean of less than $1 \mu\text{Gal}$ ($1 \mu\text{Gal} = 10^{-8} \text{ m/s}^2$) in a typical observation within 12 h. And the reproducibility of less than $3 \mu\text{Gal}$ is verified by repeatedly measuring gravity. The T-1 absolute gravimeter is a promising instrument by which highly accurate gravity measurement at a microgal level can be realized, and it is hopefully to be used in many research and application areas.

Keywords: absolute gravity measurement, laser interferometer, free-fall method

PACS: 91.10.–v, 43.20.Ye

* Project supported by the Tsinghua University Initiative Scientific Research Program (Grant No. 2010THZ05).

† E-mail: lwan@mail.tsinghua.edu.cn