



固定相位振动噪声对绝对重力测量的影响

要佳敏 庄伟 冯金扬 王启宇 赵阳 王少凯 吴书清 李天初

Effect of vibration noise with fixed phase on absolute gravimetry applying vibration isolator

Yao Jia-Min Zhuang Wei Feng Jin-Yang Wang Qi-Yu Zhao Yang Wang Shao-Kai Wu Shu-Qing
Li Tian-Chu

引用信息 Citation: *Acta Physica Sinica*, 70, 219101 (2021) DOI: 10.7498/aps.70.20210884

在线阅读 View online: <https://doi.org/10.7498/aps.70.20210884>

当期内容 View table of contents: <http://wulixb.iphy.ac.cn>

您可能感兴趣的其他文章

Articles you may be interested in

大倾斜角度下基于冷原子重力仪的绝对重力测量

Measurement of absolute gravity based on cold atom gravimeter at large tilt angle

物理学报. 2018, 67(19): 190302 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20181121>

基于原子重力仪的车载静态绝对重力测量

Static measurement of absolute gravity in truck based on atomic gravimeter

物理学报. 2020, 69(6): 060302 <https://doi.org/10.7498/aps.69.20191765>

船载系泊状态下基于原子重力仪的绝对重力测量

Absolute gravity measurement based on atomic gravimeter under mooring state of a ship

物理学报. 2021, 70(4): 040304 <https://doi.org/10.7498/aps.70.20201522>

可移动三维主动减振系统及其在原子干涉重力仪上的应用

A mobile three-dimensional active vibration isolator and its application to cold atom interferometry

物理学报. 2019, 68(18): 183301 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20190443>

基于滑模鲁棒算法的超低频主动隔振系统

Ultra-low frequency active vibration control for cold atom gravimeter based on sliding-mode robust algorithm

物理学报. 2018, 67(2): 020702 <https://doi.org/10.7498/aps.67.20171884>

拉曼激光边带效应对冷原子重力仪测量精度的影响

Influence of Raman laser sidebands effect on the measurement accuracy of cold atom gravimeter

物理学报. 2019, 68(19): 194205 <https://doi.org/10.7498/aps.68.20190581>

固定相位振动噪声对绝对重力测量的影响*

要佳敏 庄伟[†] 冯金扬 王启宇 赵阳 王少凯 吴书清 李天初

(中国计量科学研究院, 北京 100029)

(2021年5月11日收到; 2021年6月10日收到修改稿)

绝对重力仪在地球物理等领域有着广泛的应用, 其普遍采用激光干涉式或原子干涉式的测量原理. 现有的绝对重力仪主要利用垂直隔振系统来减小地面振动对参考镜的影响以提升仪器的测量精密度. 但在激光干涉式绝对重力仪中, 隔振系统对仪器自振效应等固定相位振动噪声的响应可能引入系统误差, 即影响测量准确度; 在原子干涉式绝对重力仪中也可能有尚未标定的振动来源通过隔振系统引入系统误差. 本文对现有绝对重力仪中使用的4种典型隔振系统进行理论分析及仿真建模, 以自振脉冲、地脉动和随机振动这3种典型信号为输入, 分析激光干涉式绝对重力仪中隔振系统内参考镜的真实振动及其对重力测值的影响, 并通过实验对比评估了其中两种系统在实际重力仪中的性能. 结果表明, 当仪器运行期间存在自振脉冲等固定相位振动噪声时, 隔振系统中参考镜振动引入的系统误差可能达到 $10 \mu\text{Gal}$ ($1 \mu\text{Gal} = 1 \times 10^{-8} \text{ m/s}^2$) 及以上. 使用性能更好的隔振系统或在实际测量中对该系统误差进行修正, 有望进一步提高国产激光干涉式绝对重力仪的测量精度.

关键词: 绝对重力仪, 垂直隔振系统, 自振效应, 系统误差**PACS:** 91.10.-v, 91.10.Pp, 07.10.Fq, 43.40.Tm**DOI:** 10.7498/aps.70.20210884

1 引言

重力加速度是地球表面某一质点在地球万有引力与自转离心力共同作用下的自由落体运动的加速度, 其方向垂直于该质点所在位置的大地水准面, 是1个随时间和空间变化的参数. 重力加速度的精确测量在计量、地球物理、资源勘探、辅助导航等领域都有着广泛的应用, 研制高精度绝对重力测量仪器具有重要的科学、应用和战略意义^[1-4].

现有的高精度绝对重力仪普遍采用自由落体法, 主要包括以角锥棱镜为下落物体的激光干涉式绝对重力仪(简称光学重力仪)^[5-8]和以冷原子团为下落物体的原子干涉式绝对重力仪(简称原子重力仪)^[9-13]. 前者通过激光干涉仪测量角锥棱镜在

真空中自由下落的运动轨迹, 拟合求解重力加速度; 后者根据原子团在自由下落的过程中经过3次拉曼激光脉冲作用形成的原子干涉相位来计算重力加速度. 由于二者的实际测量对象是下落物体或下落原子团相对于仪器内1个参考镜(角锥棱镜或平面镜)的运动加速度, 因此参考镜自身的加速度必然耦合到测量结果中. 现有的绝对重力仪可以达到微伽(μGal , $1 \mu\text{Gal} = 1 \times 10^{-8} \text{ m/s}^2$)量级的测量精度, 此时如果直接将参考镜放置在地面上, 地面振动引起的测量值离散度将远大于该测量精度. 因此高精度绝对重力仪必须利用隔振系统使参考镜自身的运动大幅衰减, 或利用测振仪器获得参考镜自身的运动加速度并在计算重力加速度时对其进行修正. 目前多数高精度绝对重力仪主要使用隔振系统.

* 国家重点研发计划(批准号: 2018YFF0212401, 2016YFF0200206)和中国计量科学研究院基本科研业务费(批准号: 29-AKY1922-20, AKYZD2002)资助的课题.

[†] 通信作者. E-mail: zhuangwei@nim.ac.cn

影响绝对重力测量的地面振动噪声包括环境噪声和仪器自身噪声. 环境噪声与测量时间和测量点的坐标、地基及周围环境有关, 可以根据频率来粗略区分. 首先是人类活动噪声, 一般大于 1 Hz, 如车辆、风机等人工振源的振动、建筑物和树木的晃动、仪器测试期间附近的人员走动. 其次是地球本身产生的噪声, 一般在 0.1—1 Hz, 如风激振、地震、火山等地球内部运动引起的振动, 以及周期性的地脉动. 根据美国地质调查局对分布在全球多个地震台站测量数据的分析, 地脉动噪声模型的加速度功率谱密度在周期为 5 和 1/3 s 的位置存在峰值^[14]. 最后是大气运动噪声, 一般小于 0.1 Hz, 如风造成的植物晃动以及气压波动, 这部分噪声变化较为缓慢, 幅值也相对较低, 对绝对重力测量的影响可以忽略^[15,16]. 仪器自身噪声主要指仪器运行引起的振动. 光学重力仪中, 传动机构每次释放下落物体时, 绝对重力仪的静态质量瞬间减小, 此时地面支持力与仪器所受重力不再平衡, 等效为 1 个瞬时冲击, 称为自振效应; 传动机构主要由电机控制, 下落物体运动过程中电机自身的振动也会传递到地面. 原子重力仪中, 当隔振系统内有带铁磁性的金属件且仪器未使用磁屏蔽罩时, 隔振系统附近磁光阱产生的规律变化的磁场将使这些金属件及与其固定的参考镜发生受迫振动^[17], 从而对测量结果产生影响. 综上, 为了配合绝对重力仪的测量精度, 隔振系统的本征频率应不高于 0.1 Hz, 即本征周期在 10 s 以上. 地面振动包含水平分量和垂直分量, 由于绝对重力测量只依靠垂直方向的位移数据进行计算, 因此现有的隔振系统普遍为垂直隔振系统, 可以从原理上分为被动式和主动式, 其中主动式又分为一级和二级.

实际测量中, 光学重力仪内参考镜的振动全部来源于地面振动, 易通过地震计得到其具体数值并建立仿真. 其中来源于环境的地面振动噪声 (主要为人类活动噪声、周期性地脉动及随机振动) 的产生及持续与重力仪的测量过程是相对独立的, 即时间上不相关, 理论上不会引入恒定的系统误差. 而光学重力仪的自振效应与仪器采集下落物体运动轨迹的时间段存在固定的时间差, 即自振效应导致的地面振动对测量环节而言具有固定相位的噪声, 由此引起的隔振系统内参考镜的振动也具有固定相位. 这种参考镜振动将导致光学重力仪存在系统误差, 即影响测量准确度. 对于原子重力仪, 目前

尚无完整资料给出关于参考镜振动来源及真实振动情况的定量分析, 不易建立仿真. 因此下文主要对光学重力仪进行仿真分析. 本文将从被动式、一级主动式、二级主动式这 3 大类垂直隔振系统的工作原理出发, 分析这些系统在自振效应、地脉动及随机振动构成的地面振动输入下对重力加速度测量值在系统误差和测值离散度两方面的影响, 为进一步提高国产光学重力仪的测量精度提供建议.

2 原理

2.1 参考镜振动对重力值测量误差的影响

首先回顾误差理论的基本概念. 测量误差指的是仪器的测量值与被测量的真实值之差^[18], 正常情况下包括系统误差和随机误差^[18]. 系统误差指在同一条件下测量被测量值时出现的大小和符号都保持不变的误差, 或根据一定规律随测量条件的变化而变化的误差; 随机误差指在同一条件下测量被测量值时出现的大小和符号都以不可预测的方式变化的误差^[18], 一般遵循正态分布、矩形分布等分布规律. 仪器的测量精度 (精确度, accuracy) 指的是准确度 (trueness) 和精密度 (precision) 的综合^[19], 分别由系统误差和随机误差决定^[20], 如图 1 所示.

绝对重力测量普遍以 n 次测量值的均值作为最终结果, 并用均值标准差 ν 表征测量值离散度^[21], 满足

$$\nu = \sigma / \sqrt{n}, \quad (1)$$

其中 σ 指这 n 个测量值的标准差^[18]. 一般认为随机误差符合正态分布规律及 3σ 原则, 计算时应剔除超过 3σ 范围的单次测量值^[18].

下面考察参考镜的实际振动对重力测量值的影响. 光学重力仪利用迈克耳孙干涉仪测量下落物体的运动轨迹, 对其进行二次拟合来计算重力加速度. 设 t 为下落过程中的某一时刻, 以开始测量的瞬间为时间零点; $s(t)$, $N(t)$ 分别为该时刻下落物体、参考镜相对于惯性参考系的位移; $s_m(t)$ 为干涉仪实测的下落物体相对于参考镜的位移. 因此有

$$\begin{cases} s(t) = \frac{1}{2}gt^2 + v_0t + s_0, \\ N(t) = \frac{1}{2}a_Nt^2 + v_0Nt + s_{0N} + R_N(t), \\ s_m(t) = s(t) + N(t) = \frac{1}{2}g_mt^2 + v_0mt + s_{0m}, \end{cases} \quad (2)$$

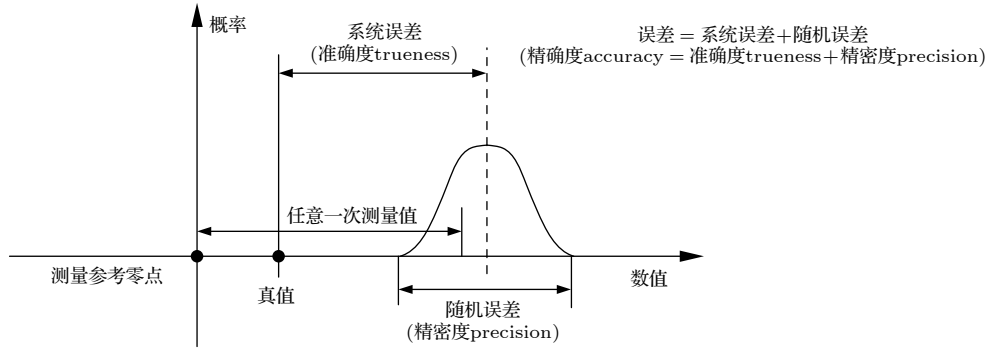


图 1 系统误差与随机误差

Fig. 1. Systematic error and random error.

其中, g 为当地当时的重力加速度; v_0 和 s_0 分别为下落物体在 $t = 0$ 时刻的初速度和初位移; a_N , v_{0N} 和 s_{0N} 分别为对 $N(t)$ 进行二次拟合得到的参考镜的加速度、初速度和初位移; $R_N(t)$ 为 $N(t)$ 二次拟合后的残差; g_m , v_{0m} 和 s_{0m} 分别为对 $s_m(t)$ 进行二次拟合得到的下落物体相对于参考镜的加速度、初速度和初位移. 化简得

$$\Delta g_L = g_m - g = (g + a_N) - g = a_N. \quad (3)$$

也就是说, 参考镜振动引起的重力测量误差 Δg_L 就是参考镜自身的运动加速度 a_N , 可以通过对参考镜位移进行二次拟合得到.

当参考镜位于隔振系统内时, 其真实振动是地面振动输入下该镜作为被隔振物体的振动, 可以通过以下方法评估光学重力仪中与其对应的测量误差: 1) 利用地震计或加速度计测量下落物体完成 1 次自由下落期间的地面振动, 提取其中的典型信号作为仿真参数, 包括地脉动信号、随机振动信号和释放引起的自振脉冲信号; 2) 在仿真软件中建立隔振系统的物理模型; 3) 将 1) 中获得的典型信号作为 2) 中隔振系统的输入信号, 求取系统的输出信号即参考镜的振动位移信号; 4) 对 3) 中得到的参考镜振动位移信号进行二次拟合, 该二次项系数即为参考镜振动引入的重力测量误差 Δg_L .

2.2 垂直隔振系统的物理模型

下面介绍绝对重力测量领域中普遍使用的各类隔振系统的物理模型, 仿真时将据此搭建相应的仿真模型.

被动式垂直隔振系统主要有零长弹簧结构、欧拉压杆结构、负刚度弹簧结构等^[22–24], 其中最具代表性的是基于零长弹簧结构的 Lacoste 型, 以

及由负刚度压杆及正刚度弹簧组成的美国 Minus K 公司生产的隔振系统^[25]. Lacoste 型系统可以实现 30 s 的长周期^[26], 但长期稳定性较差, 负载在百克量级; Minus K 型系统的周期一般为 1 s 附近, 但长期稳定性强, 负载达到十千克量级. 这两类系统在其平衡位置附近的等效物理模型均如图 2(a) 所示, 其中 k_1 和 β_1 分别为弹簧的刚度和阻尼, M_1 为参考镜及其他与之固定的结构件的总质量, $z_1(t)$ 为地面振动在惯性参考系中的位移, 即系统底座的绝对位移, $z_2(t)$ 为参考镜的绝对位移. 后续将分别分析这两种系统.

一级主动式垂直隔振系统在原子重力仪中应用较为广泛, 如美国斯坦福大学和中国科学院精密测量科学与技术创新研究院搭建的隔振系统^[27,28], 理论上也可以应用于光学重力仪. 这些系统的等效物理模型如图 2(b) 所示, 其中 k_1 和 β_1 分别为一级弹簧的刚度和阻尼, M_1 为一级框架的总质量, 包括参考镜和传感器及其他结构件, $z_1(t)$ 和 $z_2(t)$ 分别为地面振动和参考镜的绝对位移, $f(t)$ 为反馈力. 系统的工作原理是: 传感器探测一级框架的绝对位移 $z_1(t)$ 输入至控制器, 驱动器根据控制器的输出信号向一级框架提供反馈力 $f(t)$, 使其绝对位移趋于 0, 从而实现对参考镜的隔振. 下文将以中国科学院精密测量科学与技术创新研究院研制的系统^[28] 为典例进行仿真, 这是因为该系统与上述 Minus K 型被动系统具有相同的机械结构, 对比二者的仿真结果可以直观地考察反馈控制对系统性能的提升.

二级主动式垂直隔振系统主要应用于光学重力仪, 目前应用最广泛且性能最好的是美国 Micro-g 公司研制的“Superspring”系统^[29], 清华大学等单位也研制了不同结构的同类系统^[30–32]. 这些系统的等效物理模型均如图 2(c) 所示, 其中, k_1 和 β_1

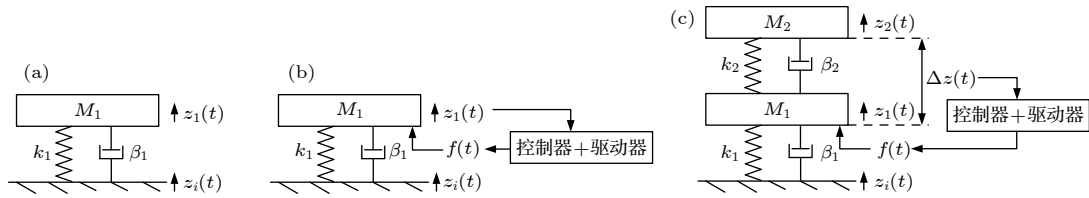
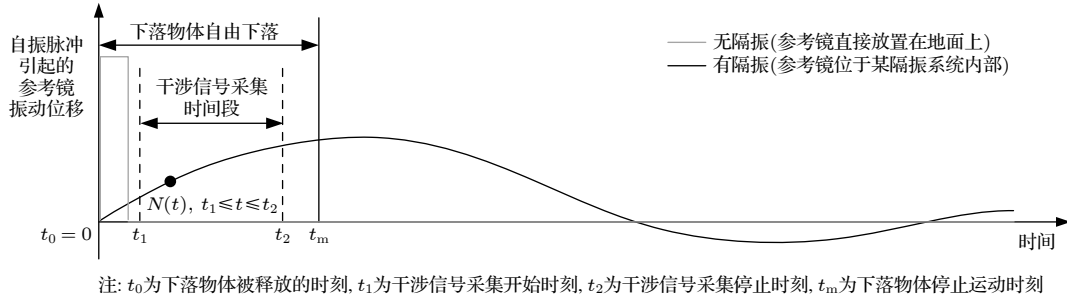


图 2 (a) 被动式隔振系统的物理模型; (b) 一级主动式隔振系统的物理模型; (c) 二级主动式隔振系统的物理模型

Fig. 2. Physical models: (a) Passive vibration isolator; (b) one-stage active vibration isolator; (c) double-stage active vibration isolator.



注: t_0 为下落物体被释放的时刻, t_1 为干涉信号采集开始时刻, t_2 为干涉信号采集停止时刻, t_m 为下落物体停止运动时刻

图 3 自振脉冲输入下隔振系统内参考镜的振动

Fig. 3. Real vibration of reference retro-reflector in a vibration isolator under the impulse caused by self-vibration effect.

分别为一级弹簧的刚度和阻尼; M_1 为一级框架的总质量; k_2 和 β_2 分别为二级弹簧的刚度和阻尼; M_2 为包括参考镜在内的二级框架的质量; $z_i(t)$, $z_1(t)$ 和 $z_2(t)$ 分别为地面振动、一级框架和参考镜的绝对位移; $\Delta z(t)$ 为一级框架和二级框架之间的相对位移; $f(t)$ 为反馈力. 系统的工作原理是: 安装在一级框架和二级框架之间的位移探测模块探测二者的相对位移 $\Delta z(t)$ 并输入至控制器, 驱动器根据控制器的输出信号向一级框架提供反馈力 $f(t)$, 使其跟踪二级框架的运动, 此时系统的闭环周期达到 20 s 以上, 可以等效为由 1 个超长弹簧与 1 个质量块组成的弹簧振子, 从而实现对参考镜的隔振 [33].

2.3 隔振系统内参考镜的实际运动

光学重力仪完成一次测量的基本流程为: 1) 下落物体被释放; 2) 信号采集系统被触发, 开始采集干涉仪探测到的下落物体运动轨迹; 3) 干涉仪信号采集结束; 4) 下落物体减速、静止并被复位. 受软件控制, 信号采集的开始和停止时刻一般与下落物体被释放的时刻有固定的延时. 如前所述, 环境振动噪声与重力测量的信号采集过程在时间上不相关, 即具有随机相位, 理论上不会导致系统误差. 而以自振效应导致的地面振动脉冲为主的仪器自身噪声与信号采集过程一般有固定的时间差, 即具有固定相位. 下面忽略随机相位振动噪声的影

响, 考虑地面振动仅为自振脉冲时的情况, 以此为例说明该类噪声将对重力测量引入系统误差.

以脉冲信号为隔振系统的输入信号, 此时系统的输出信号即参考镜的真实运动遵循该系统自身的脉冲响应规律, 如图 3 所示, 其中 4 个瞬时 t_0 , t_1 , t_2 和 t_m 分别对应下落物体被释放、信号采集开始、信号采集结束以及下落物体停止.

从图 3 可以看出, 不使用隔振系统时参考镜的振动与地面的脉冲信号完全相同, 如果在 t_1-t_2 时段 $N(t) = 0$, 则自振脉冲不会引入系统误差 (但此时测值离散度往往较大). 而当参考镜位于隔振系统内时, t_1-t_2 时段 $N(t)$ 一般为系统的脉冲响应, 由此引入的重力测量误差 Δg_L 即为该段 $N(t)$ 二次拟合时的二次项系数. 对每一次下落而言, $N(t)$ 都具有基本相同的相位及幅值, 因此 Δg_L 为固定的系统误差. 这种现象可以推广至其他类似的噪声源, 即任何对下落信号采集过程而言具有固定相位的振动噪声, 如传动电机的振动等, 都将对重力测量引入系统误差.

3 仿真参数及模型

下面利用美国 MathWorks 公司生产的 MATLAB 软件及其仿真工具 Simulink 来定量分析使用隔振系统后不同类型的振动噪声对光学重力仪引入的测量误差. 为了提高运算速度, 仿照实际测量,

表 1 仿真运算参数表
Table 1. Parameters used in simulation.

测量参数	数值	振动信号	参数	数值
单次测量中采集的下落物体运动时长/ms	120	信号1: 自振效应导致的脉冲	速度/(mm·s ⁻¹)	0.1
采集电路触发时刻与下落物体释放瞬间的延时/ms	30	信号2: 第1种地脉动(正弦信号)	幅值/mm	5
单组测量包含的下落次数	100	信号2: 第1种地脉动(正弦信号)	频率/Hz	0.2
单组测量期间相邻两次测量的时间间隔/s	20	信号3: 第2种地脉动(正弦信号)	幅值/mm	2
相邻两组测量的时间间隔/h	1	信号3: 第2种地脉动(正弦信号)	频率/Hz	3
总测量组数	12	信号4: 代表随机振动的高斯白噪声	PSD/(m ² ·Hz ⁻¹)	2.5×10 ⁻¹⁷

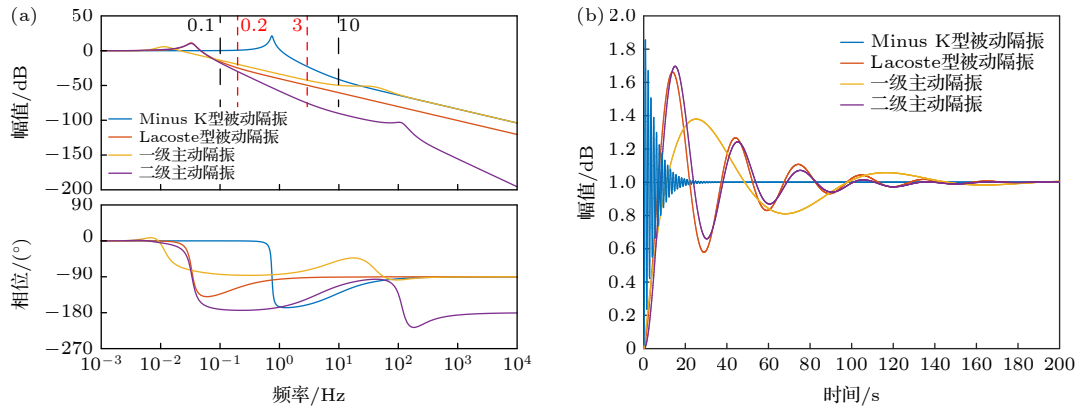


图 5 4种隔振系统 (a) 传递函数伯德图; (b) 阶跃响应

Fig. 5. Four vibration isolators used in simulation: (a) Bode diagrams; (b) step responses.

4种隔振系统的仿真模型见图5,分别是周期为0.85 s的Minus K型、周期为30 s的Lacoste型、闭环周期为66 s的一级主动式、闭环周期30 s的二级主动式.图5(a)为各模型传递函数的伯德图,其中黑色虚线表示地脉动的主要频带0.1—10 Hz,红色虚线表示该频带内的两个峰值频率0.2 Hz(周期5 s)和3 Hz;图5(b)为各模型的阶跃响应,可以直观地反映各系统的周期.这些隔振系统仿真模型的参数来源分别为:1) Minus K型.以中国计量科学研究所购产品的实测机械结构参数为依据.2) Lacoste型.根据文献[26]的实验数据推算而得.3) 一级主动式. Minus K的机械结构参数同上,拾振器参数以中国计量科学研究所购的CMG-3ESP地震计参数为依据,控制器(proportion integration differentiation, PID)参数根据文献[28]提供的该类型系统的性能推算而得.4) 二级主动式.机械参数及PID控制器参数根据文献[33]提供的该类型系统的性能推算而得,传感器参数、驱动器参数采用同一系统的实际参数[33].

图5揭示了以下信息.首先,对同样基于Minus K型机械结构的隔振系统,增加反馈控制使系统由

被动式变为一级主动式后,0.02—20 Hz的传递函数幅频曲线下移,说明一级主动式系统对该频段地面振动的衰减效果提升,提升幅度最大可达40 dB以上,而此频段以外的超低频段和高频段的幅频曲线则保持不变.其次,Lacoste型系统与Minus K型系统的幅频曲线形状大致相同,但二者周期不同,在频率特性上表现为前者的幅频曲线相当于后者左移的结果(同时阻尼比略有改变,使得谐振峰高度有所区别),因此Lacoste型系统对0.4 Hz以上的地面振动(涵盖地脉动的一个峰值频率3 Hz)的衰减效果比Minus K型系统更好.此外,被动式系统和一级主动式系统的高频衰减速度都是-20 dB/dec,但二级主动式系统采用了两级弹簧,高频衰减速度是-40 dB/dec,因此虽然仿真中二级主动式系统的闭环周期是一级主动式系统的1/2(且与Lacoste型系统的周期相同),但对于频率在0.1 Hz以上的地面振动(涵盖地脉动的两个峰值频率0.2和3 Hz)来说,二级主动式系统的衰减效果仍优于一级主动式、Lacoste型及Minus K型系统,这也是目前光学重力仪普遍采用Superspring来实现更高测量精度的原因[33].需要说明的是,伯德

图中一级主动式系统的两个谐振峰来源于地震计, 二级主动式系统的谐振峰来源于两级弹簧振子结构. 对于一级主动或二级主动式系统, 这两个谐振峰均相差 3 个量级左右, 因此系统的阶跃响应只会体现低频谐振频率, 而高频谐振频率不会影响系统的隔振效果. 最后, 虽然 4 种系统的相频曲线均有较大变化, 但后续仿真及实际测量中尚未观察到该变化对测量结果的影响, 因此本文暂不对此进行探究.

4 结果

4.1 仿真运算结果

仿真运算得到的不同隔振条件下参考镜振动对光学重力仪引入的重力测量误差如表 2 所列, 包含 12 组数据, 每组 100 次下落. 图 6(a) 和图 6(b) 分别表示表 2 中输入为综合振动信号时光学重力仪的单组及 12 组测量误差. 表中数据以“ $E \pm \nu$ ”的形式表示, 其中 E 为系统误差, 用测量误差的均值表示, ν 为测量值离散度, 以测量误差的均值标准差表示, 二者均按照国际比对的惯例精确至 $0.1 \mu\text{Gal}$ ^[35]. 表 2 中综合信号输入时的运算结果并非由其前两列数据直接相加得到, 而是由前两列信号之和为输入重新运行仿真程序所得, 以便于更准确地模拟实际情况.

表 2 基于 12 组仿真数据得到的参考镜振动对光学重力仪引入的测量误差 (单位: μGal)

Table 2. Measurement errors introduced in laser-interferometry absolute gravimeter by the vibration of retro-reflector, obtained from 12 data sets simulated results (unit: μGal).

隔振类型	输入信号		
	自振脉冲 (信号1)	地脉动及随机振动 (信号2—4)	综合振动 (信号1—4)
无隔振	5.1 ± 15.1	21.0 ± 74.9	-121.8 ± 90.4
Minus K型 (被动式)	655.8 ± 0.4	2.1 ± 2.0	658.5 ± 2.5
Lacoste型 (被动式)	0.0 ± 0.0	0.0 ± 0.0	0.0 ± 0.0
一级主动式	-15.9 ± 0.0	-0.4 ± 0.2	-15.9 ± 0.2
二级主动式	0.0 ± 0.0	0.0 ± 0.0	0.0 ± 0.0

根据图 6(a), 不使用隔振时重力仪的测量误差主要分布在 $\pm 5000 \mu\text{Gal}$ 左右, 与在一般地面环境的实测数据相符^[34], 验证了表 1 右侧输入参数的合理性.

纵向对比表 2 各行, 使用隔振系统后测量值离散度 ν 相比无隔振时均明显减小, 这验证了各系统仿真模型的合理性. 需要注意的是, 当输入为自振脉冲时, 使用 Minus K 型被动式系统或一级主动式系统后, 系统误差的绝对值 $|E|$ 反而大于无隔振时的 $|E|$, 与 2.3 节及图 3 的理论分析相符. 具体来看, 相同综合振动输入下隔振效果从低到高分别为 Minus K 型系统、一级主动式系统 (基于 Minus K 型系统设计)、二级主动式系统: 使用 Minus K 型系统时, 系统误差的绝对值 $|E|$ 和测量值离散度 ν 分别达到 0.6 mGal 和 $2 \mu\text{Gal}$ 左右; 使用一级主动式系统时二者分别为 16 和 $0.2 \mu\text{Gal}$ 左右; 使用二级主动式系统时二者均在 $0.1 \mu\text{Gal}$ 以内 (可忽略不计). 该仿真结果符合第 3 节给出的定性分析: 根据图 5, 频率在 0.1 Hz 以上 (涵盖地脉动频带) 的输入信号对应的输出信号的幅频衰减程度由低到高分别为 Minus K 型系统、一级主动式系统和二级主动式系统, 这意味着同等输入下系统内参考镜的振动位移越小, 引入的系统误差和测值离散度越小.

虽然仿真结果表明 Lacoste 型被动式系统的隔振效果与二级主动式系统的效果相当, 但实际的 Lacoste 型系统易受温度等环境因素的影响及弹簧蠕变等材料特性的限制, 无法长期保持数十秒的长周期; 根据文献 [6], 目前仅 IMGIC 型绝对重力仪曾经应用该类系统进行长期重力检测, 因此下文不再提及该系统.

横向对比表 2 各列, 应用同一系统时, 自振脉冲将导致重力测量存在系统误差; 地脉动和随机振动一般不会导致系统误差, 表现为使用二级主动式、一级主动式、甚至 Minus K 型被动式系统时, 二者引起的系统误差均不大于 $5 \mu\text{Gal}$; 综合振动导致的系统误差与自振脉冲导致的系统误差相同.

增大用于计算的数据组数, 可以直观看出上述结果的统计收敛规律, 如图 7 所示, 图 7 中点划线对应的纵坐标等于相应输入信号下所有计算结果的均值, 表示收敛极限. 对各类型的振动输入, 随着数据量的增加, 测量值离散度 ν 都将不断减小; 自振脉冲输入或综合振动输入下的系统误差 E 相同且不会随数据量的增加而改变; 地脉动和随机信号输入下的系统误差 E 将收敛至 0.

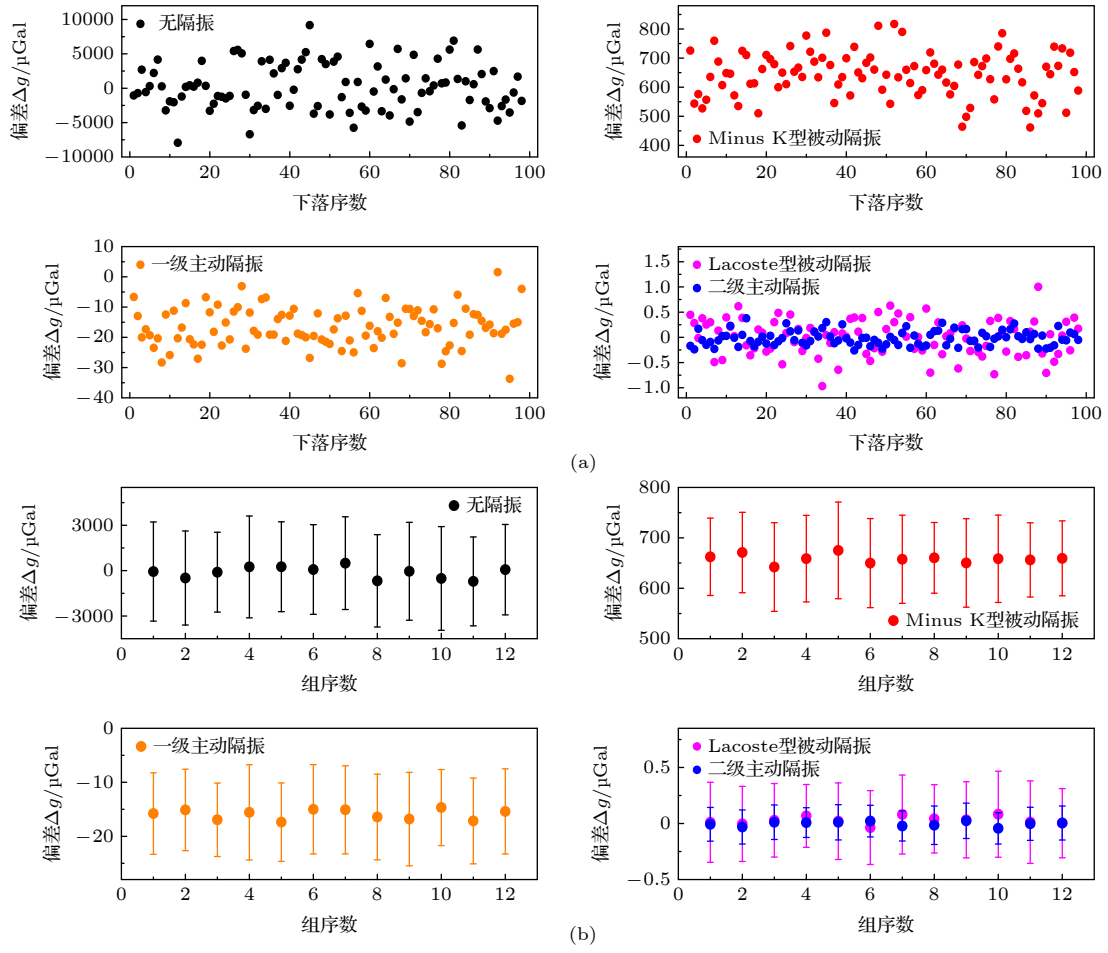


图 6 综合振动输入下参考镜振动对光学重力仪引入的 (a) 单组重力测量误差, (b) 12 组重力测量误差, 图 (b) 中误差条为每组测值的标准差

Fig. 6. Measurement errors of obtained from (a) one data set and (b) 12 data sets introduced in laser-interferometry absolute gravimeter by the vibration of retro-reflector under impulse, seismic noise and random noise, with the error bar in (b) indicating the standard deviation of each set.

4.2 实验测量结果

仍以光学重力仪为例, 为了更清楚地考察一般地面环境中固定相位振动噪声对重力测量值的影响, 利用清华大学 T-1 型绝对重力仪 [7] 分别配合 Minus K 型被动式隔振系统和 Superspring 型二级主动式隔振系统进行对比实验 (图 8(a) 和图 8(b)). 无隔振时的测量在 Superspring 未解锁期间完成, 此时其内部的参考镜与底座固定, 相当于参考镜直接放置在地面上. 除隔振系统外, 测量时重力仪的其他硬件及软件设备均保持不变. 本次实验包含 6 组测量, 每组 100 次下落.

在测量过程中的一段时间内, CMG-3 ESP 型地震计同步采集了重力仪下方的地面振动速度信号. 在下落物体释放瞬间, 地震计信号中出现 1 个脉冲, 其幅值约为 0.1 mm/s, 是其他时刻信号幅值

的 14 倍, 且持续时间不大于 30 ms, 说明该脉冲同时包含自振脉冲、地脉动和随机振动, 而其他时刻的地震计信号则只包含后两者. 据此可以将自振脉冲单独识别出来, 并确认其真实幅值与表 1 右侧第 1 种自振脉冲信号の設定值相符; 而其他时刻的信号幅值及图 6(a) 也已表明表 1 右侧第 2, 3 种地脉动信号和第 4 种随机信号の設定值合理, 符合实际情况.

综上, 前述仿真运算时使用的综合信号输入参数与实测情况相符, 仿真结果可以与实测结果对比 (表 3). 表 1 同样采用“系统误差 $E \pm$ 测值离散度 ν ”的形式表示 (精确至 0.1 μGal), 以 A-10 型绝对重力仪在该实验地点的实测值为参考值, 以根据 T-1 型绝对重力仪的不确定度表修正后的本实验的实测值与该参考值的偏差为系统误差.

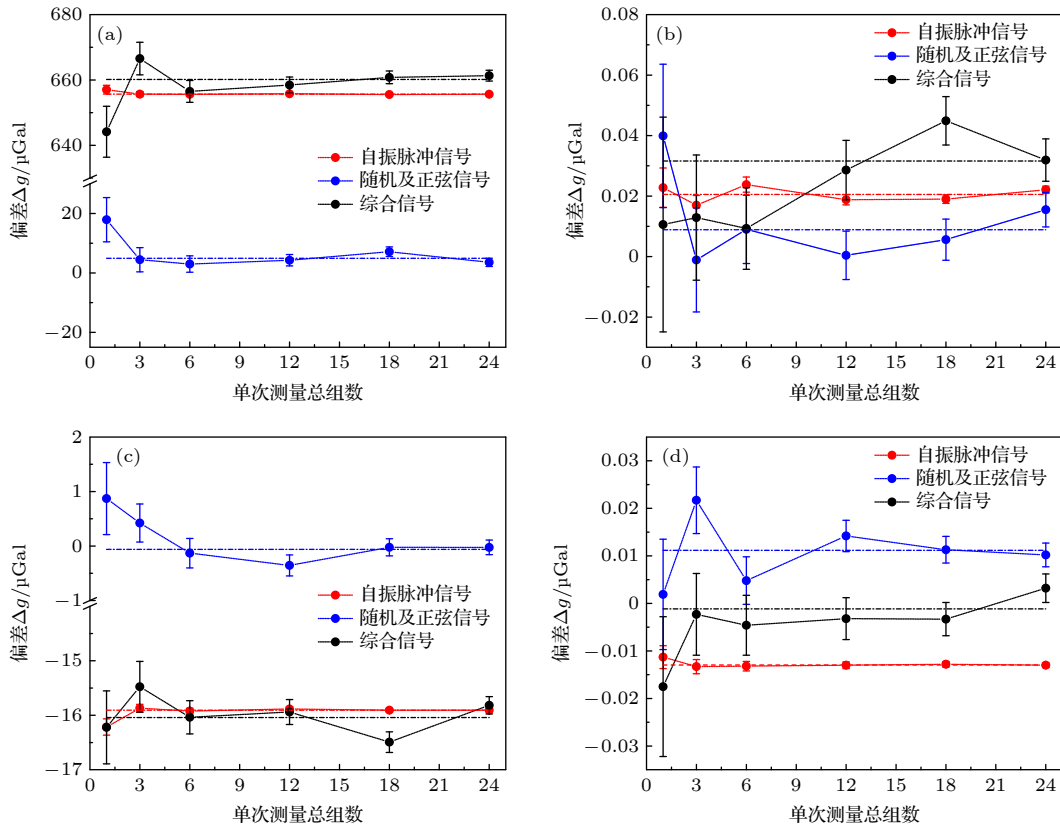


图 7 参考镜振动对光学重力仪引入的测量误差随测量组数的变化 (a) Minus K 型被动隔振系统; (b) Lacoste 型被动隔振系统; (c) 一级主动隔振系统; (d) 二级主动隔振系统

Fig. 7. Measurement errors introduced in laser-interferometry absolute gravimeter by the vibration of retro-reflector, varying with the numbers of data sets used in simulation: (a) Minus K passive vibration isolator; (b) Lacoste passive vibration isolator; (c) one-stage active vibration isolator; (d) double-stage active vibration isolator.

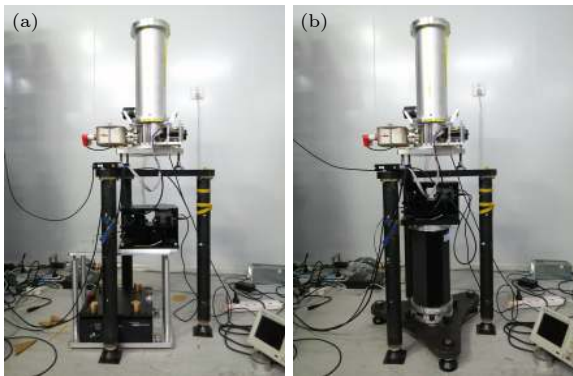


图 8 实验验证现场图 (a) 干涉仪下方放置 Minus K 型被动式系统; (b) 干涉仪下方放置 Superspring 二级主动式系统

Fig. 8. Picture of absolute gravimeter with (a) Minus K passive vibration isolator or (b) Superspring double-stage active vibration isolator.

纵向对比表 3 各行发现:首先,无隔振时的系统误差反而小于使用 Minus K 型系统时的系统误差,与 2.3 节的理论分析及表 2 的仿真结果一致,且无隔振时测值离散度的实际值与仿真值一致,再

次验证了输入参数的合理性;其次,使用 Minus K 型系统时系统误差的实测值与仿真值基本一致,证明此时以自振效应为主的固定相位振动噪声引入的系统误差确实高达 0.5 mGal 以上.该结果不仅验证了仿真算法的合理性,同时表明,如果仅使用 Minus K 及类似的被动式隔振系统来搭建小型化绝对重力仪时,实现毫伽量级的测量精度也存在一定困难.

表 3 6 组实际测量结果 (单位: μGal)

Table 3. Measurement results obtained from 6 data sets (unit: μGal).

隔振类型	结果类型	
	实测结果 (综合信号)	仿真结果 (综合信号)
无隔振	-52.0 ± 110.0	-40.7 ± 123.3
Minus K型(被动式)	655.2 ± 77.8	656.5 ± 3.3
一级主动式	—	-16.0 ± 0.3
Superspring型 二级主动式	-6.7 ± 12.6	0.0 ± 0.0

另外, 当使用 Minus K 型被动式系统及 Superspring 型二级主动式系统时, 测量值离散度的实测值虽明显小于无隔振时, 但远大于各自对应的仿真值. 这主要是因为各系统的仿真模型是基于图 2 中完全理想的理论模型建立的, 没有考虑实际系统内存在的干扰因素, 如系统调平精度有限使得参考镜的水平扰动耦合进垂直方向, 系统中弹性元件刚度非线性、机械结构参数受温度等环境因素的影响而变化等. 后续工作中将对这些干扰因素进行深入分析, 有望更好地改进仿真模型. 虽然这些因素使得实际系统的性能具有一定的局限性, 不过绝大多数情况下 Superspring 等二级主动式垂直隔振系统已经能够满足微伽量级的测量精度要求.

最后, 随测量组数的增加, 实测结果同样具有统计收敛规律 (图 9).

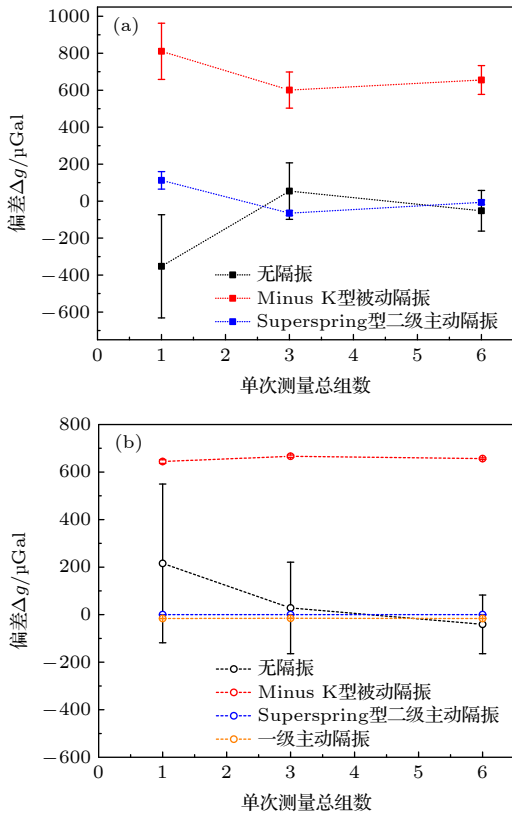


图 9 实际测量结果 (a) 及相同振动输入下的仿真结果 (b)
Fig. 9. Measurement results (a) and simulation results (b) of g values under the same vibration input.

5 讨论

上述仿真结果全部基于表 1 所列的仿真参数计算得到, 但实际测量过程中这些参数可能发生

变化并导致仿真结果改变. 下面对此进行简要分析, 其中表 4—7 均采用“系统误差 $E \pm$ 测量离散度 ν ”的形式表示, 均精确至 $0.1 \mu\text{Gal}$.

表 4 采集过程起始时刻改变时的仿真结果 (单位: μGal)

Table 4. One set of simulated results with different t_1 (unit: μGal).

隔振类型	采样起点 t_1/ms		
	34	35	36
无隔振	-84.6 ± 314.7	215.6 ± 334.0	154.2 ± 294.5
Minus K型 (被动式)	658.6 ± 8.1	660.8 ± 9.2	660.7 ± 7.7
一级主动式	-16.2 ± 0.7	-16.1 ± 0.8	-17.3 ± 0.7
二级主动式	0.0 ± 0.0	0.0 ± 0.0	0.1 ± 0.0

首先, 由图 3 可看出, 如果信号采集过程相对于下落物体被释放时刻的时间差发生改变, 则 t_1-t_2 这段“采集窗口”将在参考镜的振动位移曲线上前后移动, 使真正影响重力计算结果的参考镜位移也发生改变. 当采集时长固定为 120 ms 时, 可以通过改变 t_1 的取值来计算该问题的影响, 此时的一组 (包含 100 次下落, 下同) 仿真结果如表 4 所列. 目前大多数光学重力仪普遍采用电触发的方式来启动采集过程, 实际上 t_1 的不确定度仅为 0.35 ms ^[21]. 根据表 4, 可以推测这种情况下使用各类型隔振系统时系统误差 E 的变化基本不会超过此时的测量离散度 ν , 因此 t_1 变化造成的影响一般情况下可以忽略. 在使用其他触发方式的光学重力仪中, 该方法同样可以用来分析 t_1 变化或采集时长变化对重力测量误差造成的影响.

其次, 下落间隔的变化也可能对仿真结果产生影响, 比如下落间隔太短可能导致隔振系统的上一次脉冲响应尚未充分衰减时重力仪已开始下一次测量, 此时仿真结果的系统误差理论上将进一步增大. 由于实际光学重力仪的最短下落间隔为 3 s ^[36], 可以在下落间隔分别为 $30, 20, 10, 7, 3 \text{ s}$ 时重新进行计算, 此时的一组仿真结果如表 5 所列. 从表 5 可以看出, 使用 Minus K 型被动式隔振系统时, 系统误差的绝对值 $|E|$ 确实会随着下落间隔的缩短而增大; 而一级主动式和二级主动式隔振系统的隔振效果很好, 因此即使连续两次测量的脉冲响应发生叠加, 参考镜的振动幅度也足够小, 进而测量结果不会有明显变化.

表 5 下落间隔改变时的仿真结果 (单位: μGal)
Table 5. One set of simulated results with different drop interval (unit: μGal).

隔振类型	下落间隔/s				
	30	20	10	7	3
无隔振	-168.0 ± 328.5	215.6 ± 334.0	176.7 ± 281.9	49.7 ± 322.1	-281.3 ± 295.2
Minus K型(被动式)	658.5 ± 9.4	667.5 ± 8.1	631.2 ± 9.2	937.9 ± 8.7	1037.1 ± 8.5
一级主动式	-16.3 ± 0.7	-15.4 ± 0.8	-15.7 ± 0.7	-16.5 ± 0.8	-16.8 ± 0.8
二级主动式	0.0 ± 0.0	0.0 ± 0.0	0.1 ± 0.0	0.1 ± 0.0	0.2 ± 0.0

此外, 前述仿真运算过程中只以 2 个位于地脉动峰值频率的正弦函数来模拟地脉动, 但实际的地脉动包含的频率成分更为丰富, 可以通过增加仿真输入中的正弦函数来考察这种简化是否会对仿真结果产生影响. 在 0.1—10 Hz 这个对绝对重力测量影响最大的频段取频率值重新构建正弦函数 (0.1—1 Hz 按 0.1 Hz 的间隔取值, 在 1—10 Hz 按 1 Hz 的间隔取值), 这些正弦函数各自的幅值按照地脉动噪声功率谱密度的新高噪声模型 (new high noise model, NHNM)^[14] 来设定. 由此得到的一组仿真结果如表 6 所列, 其与使用 2 个正弦函数模拟地脉动时的仿真结果基本一致, 再次证明与重力测量的信号采集过程在时间上不相关的环境振动噪声理论上不会导致系统误差.

表 6 使用多种正弦函数模拟地脉动时的仿真结果 (单位: μGal)

Table 6. One set of simulated results with multiple sinusoidal signals as the seismic noise (unit: μGal).

隔振类型	地脉动信号	
	19个正弦信号	2个正弦信号
无隔振	226.3 ± 297.3	215.6 ± 334.0
Minus K型(被动式)	662.4 ± 8.3	644.2 ± 7.8
一级主动式	-15.1 ± 0.8	-16.2 ± 0.7
二级主动式	0.1 ± 0.0	0.0 ± 0.0

还可以将实验期间地震计实测的地面振动数据直接作为隔振系统模型的输入来计算仿真结果. 以 16 次下落对应的地震计数据为例, 其结果如表 7 所列. 从表 7 可以看出, 使用隔振系统后, 以地震计原始信号为输入与以表 1 的设计信号为输入时的仿真计算结果基本吻合. 两种输入下仿真结果相差较大的是二级主动式系统, 这再次说明真实振动环境总比仿真设计更复杂, 即使在测量时使用了性能最好的隔振系统, 实际的重力测量系统误差 E 也可能达到微伽量级, 需要引起注意. 考虑测量离散度 ν , 可以认为 3 种隔振条件下的实测结果均

与仿真结果基本一致.

除上述参数外, 表 1 中其他仿真参数的变化也可能使计算结果改变. 研究人员可以依据实测参数值修改表 1 并按照图 4 所示的流程图自编仿真程序, 预估此时不同类型的振动噪声对重力测量结果的影响.

表 7 以 16 次下落的地震计原始数据为输入时的计算结果 (单位: μGal)

Table 7. Results with the ground vibrations measured during 16 drops as input signal (unit: μGal).

隔振类型	结果类型		
	仿真值 (真实振动信号)	仿真值 (设计信号)	实测值
无隔振	-264.5 ± 849.3	-513.9 ± 678.3	471.5 ± 676.6
Minus K型(被动式)	646.0 ± 16.5	629.1 ± 18.8	876.7 ± 615.6
一级主动式	-12.1 ± 2.5	-17.9 ± 1.5	—
二级主动式	1.8 ± 0.1	0.0 ± 0.0	-20.0 ± 62.6

总体而言, 重力测量过程中相对于信号采集过程具有固定相位的振动噪声将引入无法通过统计方法消除的系统误差, 其大小与噪声的实际幅值有关. 对光学重力仪来说, 可以通过在真空腔内增加平衡下落机构以减小自振效应, 调节传动电机参数以减小电机振动等方法来减小该系统误差. 为了实现更高的测量精度, 一般应使用二级主动式隔振系统; 如受其他条件所限必须使用 Minus K 型或一级主动式隔振系统时, 则可以利用地震计实测上述噪声引起的地面振动, 并根据本文的仿真运算思路预测由此引入的重力测值系统误差. 具有随机相位的振动噪声不会引入系统误差, 且可以通过增加数据量来减小该类噪声引起的测量值离散度.

6 结 论

现有的激光干涉式绝对重力仪广泛利用垂直隔振系统来减小地面振动对仪器内参考镜的影响.

但当参考镜位于隔振系统内部时,自振效应等噪声源将使参考镜产生遵循确定规律的振动,这些振动相对于重力仪的信号采集过程而言相位固定,由此将向重力测量过程引入非零的系统误差.本文针对上述理论建立了4种典型隔振系统的仿真模型,根据典型激光干涉式绝对重力仪的测量参数及地面振动参数编写了仿真算法,定量分析了不同地面振动输入下使用隔振系统后参考镜的实际振动对重力测量值系统误差及离散度的影响,并利用激光干涉式绝对重力仪对使用其中两种隔振系统时的情况进行了实测验证.结果表明,从测量值离散度来看,隔振效果从高到低分别为二级主动式、一级主动式和 Minus K 型被动式系统(Lacoste 型被动式系统的理论隔振效果很好,但长期稳定性与其他3种系统有显著差距,目前尚无广泛应用);从系统误差来看,具有固定相位的参考镜振动确实会引入系统误差,而相位随机的地面振动导致的参考镜振动则不会引入系统误差.在本仿真模拟的自振脉冲幅度较大的情况下,使用一级主动式系统有可能引入十微伽量级的系统误差,使用 Minus K 型隔振系统引入的系统误差甚至可能达到百微伽量级,而使用二级主动式系统时重力测值的系统误差一般可忽略.使用 Minus K 型系统时的实测结果与仿真结果一致.在实际测量中,应用性能更好的隔振系统可以同时提高重力测量的准确度和精密性;在隔振系统确定的情况下,综合理论分析、仿真计算和实际测量,有望更加准确地预测及分析使用当前隔振系统时参考镜振动对绝对重力测量精度的影响,对提高国产激光干涉式重力仪的测量精度有重要意义.

感谢清华大学精密仪器系的王力军教授、伍康副研究员和文艺博士提供实验设备及场地.

参考文献

- [1] Marson I, Faller J E 1986 *J. Phys. E:Sci. Instrum.* **19** 22
- [2] Faller J E 2002 *Metrologia* **39** 425
- [3] Steiner R L, Williams E R, Newell D B, Liu R 2005 *Metrologia* **42** 431
- [4] Timmen L, Gitlein O, Klemann V, Wolf D 2011 *Pure Appl. Geophys.* **169** 1331
- [5] Niebauer T M, Sasagawa G S, Faller J E, Hilt R, Klotting F 1995 *Metrologia* **32** 159
- [6] D'Agostino G, Desogus S, Germak A, et al. 2008 *Ann. Geophys.* **51** 39
- [7] Hu H, Wu K, Shen L, Li G, Wang L J 2012 *Acta Phys. Sin.* **61** 099101 (in Chinese) [胡华, 伍康, 申磊, 李刚, 王力军 2012 物理学报 **61** 099101]
- [8] Wu S Q, Li C J, Xu J Y, Su D W, Feng J Y, Ji W X 2017 *Acta Metrol. Sin.* **38** 01 (in Chinese) [吴书清, 李春剑, 徐进义, 粟多武, 冯金扬, 吉望西 2017 计量学报 **38** 01]
- [9] Kasevich M, Chu S 1991 *Phys. Rev. Lett.* **67** 181
- [10] Le Gouët J, Mehlstäubler T, Kim J, Merlet S, Clairon A, Landragin A, Pereira Dos Santos F 2008 *Appl. Phys. B* **92** 133
- [11] Wang S K, Zhao Y, Zhuang W, Li T C, Wu S Q, Feng J Y, Li C J 2018 *Metrologia* **55** 360
- [12] Hu Z K, Sun B L, Duan X C, Zhou M K, Chen L L, Zhan S, Zhang Q Z, Luo J 2013 *Phys. Rev. A* **88** 043610
- [13] Wang Q, Wang Z, Fu Z, Liu W, Lin Q 2016 *Opt. Commun.* **358** 82
- [14] Peterson J 1993 *Observations and Modeling of Seismic Background Noise* (U.S. Geological Survey) Report 93-322
- [15] Sorrells G G, Douze E J 1974 *J. Geophys. Res.* **79** 4908
- [16] Cessaro R K, Chan W 1989 *J. Geophys. Res. -Solid Earth* **94** 15555
- [17] Chen L L, Luo Q, Zhang H, Duan X C, Zhou M K, Hu Z K 2018 *Rev. Sci. Instrum.* **89** 066105
- [18] Chen F F 2007 *Fundamental Technology for Instrument Design* (Beijing: Tsinghua University Press) pp410—430 (in Chinese) [陈非凡 2007 仪器设计技术基础 (北京: 清华大学出版社) 第410—430页]
- [19] International Vocabulary of Metrology—Basic and General Concepts and Associated Terms (VIM), JCGM 2012 https://www.bipm.org/utils/common/documents/jcgm/JCGM_200_2012.pdf [2021-03-29]
- [20] Li Y H, Guo Y K 2010 *Design of Modern Precision Instrument* (2nd Ed.) (Beijing: Tsinghua University Press) pp57—59 (in Chinese) [李玉和, 郭阳宽 2010 现代精密仪器设计 (第2版) (北京: 清华大学出版社) 第57—59页]
- [21] Li Z 2016 *Ph. D. Dissertation* (Beijing: Tsinghua University) (in Chinese) [李哲 2016 博士学位论文 (北京: 清华大学)]
- [22] LaCoste Jr L J B 1934 *Physics* **5** 178
- [23] Stochino A, Abbot B, Aso Y, et al. 2009 *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. A, Accel. Spectrom. Detect. Assoc. Equip.* **598** 737
- [24] Winterflood J, Blair D G, Slagmolen B 2002 *Phys. Lett. A* **300** 122
- [25] Platus D L 1993 *Machine Design* **65** 123
- [26] Li G, Hu H, Wu K, Wang G, Wang L J 2014 *Rev. Sci. Instrum.* **85** 104502
- [27] Hensley J M, Peters A, Chu S 1999 *Rev. Sci. Instrum.* **70** 2735
- [28] Tang B, Zhou L, Xiong Z, Wang J, Zhan M 2014 *Rev. Sci. Instrum.* **85** 093109
- [29] Rinker R L 1983 *Ph. D. Dissertation* (Boulder: University of Colorado)
- [30] Wu K, Li G, Hu H, Wang L 2017 *Chin. J. Mech. Eng.* **30** 164
- [31] Wang G, Wu K, Hu H, Li G, Wang L 2016 *Rev. Sci. Instrum.* **87** 105101
- [32] Yao J, Wu K, Guo M, Wang G, Wang L 2020 *IEEE Trans. Instrum. Meas.* **69** 2670
- [33] Yao J M 2020 *Ph. D. Dissertation* (Beijing: Tsinghua University) (in Chinese) [姚佳敏 2020 博士学位论文 (北京: 清华大学)]
- [34] Guo M, Wu K, Yao J, Wen Y, Wang L 2021 *IEEE Trans. Instrum. Meas.* **70** 1004310
- [35] Francis O, Baumann H, Ullrich C, et al. 2015 *Metrologia* **52** 07009
- [36] FG5-X Absolute Gravimeter User's Manual, Micro-g Lacoste <http://microglacoste.com/wp-content/uploads/2018/01/FG5-X-Manual-115060001.pdf> [2021-06-03]

Effect of vibration noise with fixed phase on absolute gravimetry applying vibration isolator*

Yao Jia-Min Zhuang Wei[†] Feng Jin-Yang Wang Qi-Yu Zhao Yang
Wang Shao-Kai Wu Shu-Qing Li Tian-Chu

(National Institute of Metrology, China, Beijing 100029, China)

(Received 11 May 2021; revised manuscript received 10 June 2021)

Abstract

Absolute gravimeter, an instrument which is applied to laser interferometry or atom interferometry for measuring the gravitational acceleration g (approximately 9.8 m/s^2), plays an important role in metrology, geophysics, geological exploration, etc. To achieve a high accuracy of several microGals (μGal , $1\mu\text{Gal} = 1 \times 10^{-8} \text{ m/s}^2$), a vertical vibration isolator is widely employed in the absolute gravimeter to protect the reference object (a retro-reflector or a mirror) from being disturbed by ground vibration noises. However, the reference object in vibration isolator may still move due to isolator's response to the impulse caused by the self-vibration effect in laser-interferometry gravimeter, or the forced vibration of the ferromagnetic component in the isolator under the varying magnetic field of magneto-optical traps (MOTs) in atom-interferometry gravimeter. This vibration of the reference object has a fixed phase relative to the detection of the free-fall of a falling object or atoms, leading an additional systematic error to be introduced into measured g value. In this paper, the physical models of four typical vertical vibration isolators used in the current absolute gravimeters are introduced, i.e. a passive Minus K isolator, a passive Lacoste isolator, a one-stage active isolator, and a double-stage active isolator. The simulation models of these isolators are also created with specific resonance periods. Taking a laser-interferometry gravimeter for example, the responses of these isolators under impulse input are analyzed, proving that the real vibration of the reference object, namely the output of each isolator, has a fixed phase relative to the detection of the fringe signal, which indicates the trajectory of the free-falling object, hence resulting in an additional systematic error. To provide a detailed evaluation, firstly the vibration of the reference object under an impulse, a seismic noise, and a random noise, which represent typical ground vibrations, are obtained by running the simulation. Then the corresponding errors in the calculation of g value are presented. Besides, the experimental results of T-1 laser-interferometry gravimeter at a noisy site in Tsinghua University, with either a Minus K isolator or a Superspring isolator used, are compared with the simulated results. According to the above simulations and experiments, the systematic error introduced by the vibration of resonance object in a Minus K isolator or a one-stage active isolator under impulse can respectively exceed $600 \mu\text{Gal}$ or $10 \mu\text{Gal}$, while the error with the object in a Lacoste isolator or a double-stage active isolator can be neglected. Therefore, it is better to use a double-stage active vibration isolator in absolute gravimeter to avoid this systematic error and achieve higher measurement accuracy. With more information about the forced vibration in the isolators under varying magnetic fields of MOT, the systematic error introduced by the vibration of reference object can also be specifically evaluated in the future.

Keywords: absolute gravimeter, vertical vibration isolator, self-vibration effect, systematic error

PACS: 91.10.-v, 91.10.Pp, 07.10.Fq, 43.40.Tm

DOI: 10.7498/aps.70.20210884

* Project supported by the National Key Research and Development Program of China (Grant Nos. 2018YFF0212401, 2016YFF0200206) and the Research Funds for National Institute of Metrology, China (Grant Nos. 29-AKY1922-20, AKYZD2002).

[†] Corresponding author. E-mail: zhuangwei@nim.ac.cn