

系统自振对绝对重力仪的影响模式分析

吴 琮¹ 郝晓光² 滕云田¹ 郭有光²

(1 中国地震局地球物理研究所,北京市海淀区民族大学南路 5 号,100081)
(2 中国科学院测量与地球物理研究所,武汉市徐东大街 340 号,430077)

摘 要:隔振问题是绝对重力仪研制中的关键技术难题之一。在自主研制“小型 mGal 级绝对重力仪”过程中发现,除了需要克服地面振动的影响之外,系统自振的影响也不容忽视,最大能达到 mGal 量级。通过对研制样机实验观测结果的分析,研究了系统自振产生的原因以及对系统偏差与观测内符合精度的影响模式,并给出了改进方案,以消除“系统自振”的影响,提高研制仪器的观测精度。
关键词:绝对重力仪;隔振问题;系统自振
中图法分类号:P223.1

高精度绝对重力和重力梯度测量对于监测地面垂直运动^[1]、描绘地下质量体的重新分布^[2]、预测全球海平面升降^[3]、标定相对重力仪漂移^[4]、矿产探测^[5]、导航技术^[6]等科学和国防建设领域都有着广泛的应用。特别是 20 世纪 60 年代以来,随着深空探测和导弹技术的发展以及对高精度绝对重力测量要求的不断提高,世界各国加大了对绝对重力仪的研究和投入。同时,随着便携式绝对重力仪的发展,绝对重力基准已开始在南极建设^[7]。

绝对重力仪通过测量落体作自由下落运动时相对于参考棱镜的位移来拟合求解测点的重力加速度。由于测点的大地脉动和仪器系统自振的影响,使得参考棱镜在该过程中产生非线性振动,从而给测量结果带来振动误差。张伟民等^[8]利用 FG5 型绝对重力仪验证了各类振动对测量结果的影响,当真空系统与干涉仪接触时进行测量,确定其系统自振对测量结果的影响高达 $20 \times 10^{-5} \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ 。而当测点位于背景振动干扰较小的观测墩上时,环境的振动对测量结果的影响却不大,约为几 μGal ,但对测量精度的影响为 $14.6 \times 10^{-8} \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$ (每组 100 次测量)。因此,在绝对重力仪研制的过程中,系统自振的减小或者隔离问题是设计测量系统及驱动单元时需要考虑的重要因素

之一。

绝对重力仪进行测量时,系统自振一般来源于落体的控制机构。目前,国际上绝对重力仪研制采用的主要方法为激光干涉和原子干涉^[9]。激光干涉绝对重力仪的测量原理可以分为上抛法和下落法两种测量方式。上抛法是利用一套可控的抛射机构弹射抛体,测量抛体上升和下落过程中相对参考镜的位移^[10]。由于抛射机构的存在,整个测量系统在抛体作上抛运动中必然会产生系统自振。下落法对落体的控制方式是通过拖架将落体提升至一定的高度后释放拖架,让落体作自由下落运动^[11]。因此,落体伺服跟踪机构的摩擦和系统的驱动力源就成了整个测量系统的振动源。在落体或抛体运动过程中,系统自振总是存在,而且与不同的地下介质结构耦合后会产生不同的振动模式,形成变化的系统偏差。

国际上相关研究机构对大地脉动和系统自振采用同时处理的方式,即利用长周期弹簧悬挂参考棱镜,同时隔离地面振动和系统自振对测量结果的影响。美国的 FG5、A10、FGL 以及早期的 JILA-g 型绝对重力仪均利用超长弹簧(自振周期为 30~60 s)悬挂参考棱镜。其基本结构是由支撑弹簧悬挂支架,支架上再悬挂主弹簧,而参考棱镜就安装在主弹簧底端。放于支架上的位置探测

器会感知与其相连的质量块与参考棱镜之间的距离变化,然后将该变化转换为电信号控制伺服线圈,产生相应的反作用力于质量块上,从而保证质量块与参考棱镜之间的距离恒定^[12],即保证参考棱镜的“绝对静止”。意大利、德国、中国以及俄罗斯等的研究机构对于振动的处理则是采用长周期地震计悬挂参考棱镜。如中国的 NIM-3 型绝对重力仪^[13]是将参考棱镜悬挂在一个自振周期为 15 s 的地震计上,可以将隔振系数提升至 0.999 5,有效解决了地面振动引入的测量误差。本文主要考虑系统自振对测量结果的影响模式,根据自主研发的激光干涉绝对重力仪实验样机的 5 次实验结果,分析了系统自振产生的原因及其对测量结果的影响方式,同时针对系统自振的抑制尝试性地提出了改进方案。

1 样机测量原理

实验样机对落体的控制采用下落法,基于波纹管的伺服控制系统。电机置于大气中,通过齿轮齿杆咬合结构控制波纹管,进而控制位于高真空环境中拖架和落体的运动。

在落体自由下落过程中,利用高速数字化仪得到包含落体相对于参考棱镜时间位移信息的干涉带波形和同步地面振动波形。对采集到的干涉带波形进行过零点检测,得到落体下落轨迹上的时间-位移坐标。直接利用最小二乘拟合这些时间位移坐标计算重力加速度,这种方法是目前绝对重力仪研制中常用的算法^[14,15],称为多位置拟合法(简称多位置法)。但是由于系统自振的影响,不仅重建的落体下落轨迹包含了振动误差,而且不同的测量值之间也存在振动误差,因此,本文提出了画线选点拟合法(简称画线法)。其原理如下:

首先假设测量出的落体下落过程中的地面振动曲线为 $f(t)$,然后采用 n 条斜率为 k 、截距为 b_i ($i=1,2,\cdots,n$)的平行直线与振动曲线 $f(t)$ 相交,则振动曲线上所有的交点满足:

$$V_i(t) = kt + b_i \tag{1}$$

对式(1)进行二次微分有:

$$V''_i(t) = \text{d}^2(kt + b_i)/\text{d}t^2 = 0 \tag{2}$$

由于干涉带波形和地震仪波形的采集参数完全相同,因此可以挑选与这些交点时间对应的落体轨迹上的时间-位移坐标进行最小二乘拟合。由于在这些时间点上的干涉带波形受到的振动影响可以认为是线性的,在计算重力加速度时,由式

(2)可知,振动的影响会随着二次微分的过程自动置零,即可以消除参考棱镜的振动对计算结果的影响。

2 系统自振对样机测量精度的影响模式分析

2010 年 9 月 5~13 日,该样机分别在 H07 测点(楼房总高为 18 层,地下两层,实验室位于大楼的第 9 层)、H05 测点(北京国家地球物理现象台地磁实验室)和 H03 测点(国家白家疃重力基准点)进行了性能实验,有效测量 498 组,共 7 968 次下落。H07 测点参考值是通过与中国计量院重力基准点联测得到的,H05 测点参考值直接由 H03 联测得到。通过与测点的参考值相比较,得出当实验样机在干扰较小的基岩上进行观测,干涉带波形的信噪比高于 60 dB 时,观测内符合精度为 50 μGal ,系统偏差为 500 μGal 。而在高层建筑内或者夯实地基的测点观测时,观测内符合精度与系统偏差较差。其测量结果如表 1 所示。

通过对实验中干涉带波形和数据的分析,可以得到系统自振对测量结果的 3 种影响模式。

1) 各个测点得到的系统误差不同。从表 1 可以看出,多位置法每次测量的系统偏差各不相同。虽然画线法改善了结果,但结果中仍然存在着不同的系统偏差。这是因为系统自振经过与不同的地下介质结构耦合后,产生不同的振动响应,从而表现出不同的系统误差。

表 1 样机在不同测点的系统偏差与观测内符合精度

Tab.1 Experimental Results for Different Measure Points

时间	测点	组数	$W(\sigma)$	$V(\sigma)$	备注
5 日	H07	88	-905(275)	814(150)	高层建筑
9 日	H03	126	874(45)	791(36)	基岩
10 日	H05	129	-4 248(27)	897(34)	夯实地基
12 日	H03	29	359(20)	317(18)	基岩
13 日	H03	126	-940(96)	448(14)	基岩

注: W 为多位置法结果; V 为画线法结果; σ 为观测内符合精度 ($10^{-8} \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$)。

2) 单次下落的偏差曲线极值位置相对固定。将落体一次下落的距离分成若干小段,对每小段拟合计算出一个重力值,与测点处参考值之间的偏差连成曲线,称为单次下落偏差曲线。随机选取了一次测量数据(H05,1 组 2 号),其单次下落偏差曲线与地震仪记录波形的对比如图 1 所示。仔细分析 0.06~0.16 s 之间地震仪波形与偏差

曲线可以发现,偏差曲线与地震仪记录到的地面振动波形有趋于一致的变化趋势。经过多次分析对比发现,这种情况在实验数据中普遍存在,而且偏差曲线中最大误差点(用最大圆标识)出现的位置也相对固定。这说明偏差来自于相对稳定的振动,而整个测量过程中只有系统自振可能产生稳定的振动。

3) 上段与下段的测量结果不一致。实验样机中落体下落的总距离为 8 cm,考虑到落体和拖架的脱离与重新接触,仅取 1~7 cm 的数据参与计算,这里将 1~3.5 cm 和 3.5~7 cm 作为落体运动的上下段分别进行处理,以便发现系统自振对测量结果的影响。表 2 列出了此次实验中上段和下段多位置法处理结果与画线法处理结果。从表 2 可见,12 日采集信号的信噪比比其他几次稍高,13 日参考棱镜没有悬挂于地震仪上。结果发现,多位置法的测量结果中上段的系统偏差明显小于下段(13 日 H03 点除外),虽然画线法改善了这一状况,但是仍然出现了上段系统偏差明显优于下段的测量结果,尤其是 10 日。

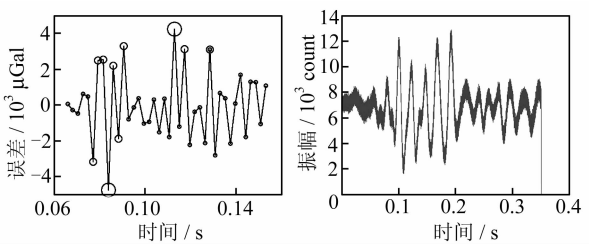


图 1 单次下落偏差曲线与地震仪记录波形对比
Fig. 1 Comparison Between the Single Drop Residuals and the Seismic Waves

由图 2 可见,隔振系统的参考棱镜安装在长周期地震仪动圈上,在落体下落的整个过程中,系统产生的自振通过真空系统基座、地下介质、干涉仪基座后,作用于地震仪,该系统的冲击响应设为 $h(t+\tau')$,其中 τ' 为系统的延迟时间。设系统自振为 $x(t)$,则其对参考棱镜的影响为 $y(t)$,则有:

$$y(t) = x(t)h(t+\tau')$$

其频域表达为:

$$Y(\omega) = X(\omega)H(\omega)e^{j\omega\tau'} \tag{3}$$

式中, $Y(\omega)$ 、 $X(\omega)$ 和 $H(\omega)$ 分别为 $x(t)$ 、 $y(t)$ 和 $h(t)$ 的傅立叶变换。由于延迟时间 τ' 的存在,参考棱镜受到系统自振的影响延迟了 τ' ,这就使得第一段系统偏差较小;而在第二段中,系统自振开始影响参考棱镜,系统偏差变大,如表 2 所示。

从 9 月 13 日的结果来看,多位置法的结果中第一次出现了下段结果优于上段的情况,但是画

线法结果中上段仍旧优于下段。这是因为画线法主要是基于带有延迟效应的振动曲线进行计算的,因此,画线法处理结果与之前几日的规律相似。多位置法则是直接对提取的时间-位移对进行拟合计算,因此,当延迟效应不存在时,出现了一次下段优于上段的现象。这种现象是系统自振对测量结果影响的典型模式。

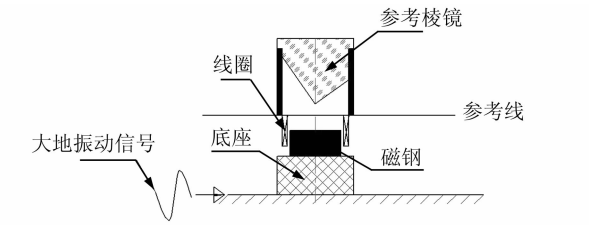


图 2 隔振系统示意图
Fig. 2 Schematic Diagram of Vibration Isolation System

表 2 上下段的测量结果对比/ $10^{-8} \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$
Tab. 2 Comparison Between results from 1-3.5 cm and 3.5-7 cm of the Free Falling/ $10^{-8} \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$

时间	测点	多位置法			画线法		
		上段(R)	下段(D)	R-D	上段(P)	下段(Q)	P-Q
5 日	H07	1 210	2 707	-1 497	-37	1 689	-1 726
9 日	H03	1 129	2 137	-1 008	864	1 267	-403
10 日	H05	6 948	-44 627	51 611	-966	-35 571	34 605
12 日	H03	438	3 056	-2 618	155	-747	902
13 日	H03	-3 507	806	-4 313	580	1 237	-657

3 结 语

本文通过对自主研发的波纹管落体控制绝对重力仪实验样机的实验数据进行了分析,发现系统自振对测量结果的影响存在 3 种典型模式,并对影响的原因进行了定性分析,为下一步研究中确定系统自振对测量结果的影响提供知识储备。此外,首次提出了基于数字信号处理的画线选点拟合法,通过与经典的多位置法处理结果相比较发现,画线法可以较好地改善系统偏差和观测的内符合精度,但是还需要进一步的实验验证。

同时,基于以上的分析结果,笔者所属的研究组提出了一套基于平衡锤结构的落体伺服控制系统。电机控制的齿轮系统驱动导杆,控制落体及拖架的运动。与导杆相连的是一个安装在导轨上的平衡锤,通过调整平衡锤的质量,使之产生的重力与波纹管收到的大气压力平衡,从而减少驱动电机的容量,减小系统自振。同时,电机容量的减少还可以减少电机动力线回馈的脉冲式干扰,有利于提高采样信号的信噪比,获取高精度的测量结果。

致谢:感谢黄大伦研究员和方永源研究员给予本文的指导和帮助。

参 考 文 献

[1] Simon D, Williams P, Baker T F, et al. Absolute Gravity Measurements at UK Tide Gauges[J]. *Geophysical Research Letters*, 2001, 28 (12): 2 317-2 320

[2] Sugihara M. Geothermal Reservoir Monitoring with an FG5 Absolute Gravimeter[C]. *The 28th Workshop on Geothermal Reservoir Engineering*, Stanford, California, 2003

[3] Vilibic I. Global Sea Level Rise? New Techniques for the Absolute Sea Level Measurement [J]. *Geofizika*, 1997, 14(1):119-131

[4] Hinderer J, Florsch N, Makinen J, et al. On the Calibration of a Superconducting Gravimeter Using Absolute Gravity Measurements[J]. *Geophys Jour Int*, 1991,106(2):491-497

[5] 张善法,孟令顺,杜晓娟,等. 高精度重力测量在金矿采空区探测中的应用研究[J]. *地球物理学进展*, 2009, 24(2):590-595

[6] 郭有光,钟斌,边少锋. 地球重力场确定与重力场匹配导航[J]. *海洋测绘*,2003,23(5):61-64

[7] 鄂栋臣,赵珞成,王泽民,等. 南极拉斯曼丘陵重力基准的建立[J]. *武汉大学学报·信息科学版*, 2011,36(12):1 466-1 469

[8] 张伟民,郝晓光,郭有光,等. 绝对重力仪研制中几

种干扰因素的实验研究[J]. *地球物理学进展*,2008, 23(4):1 143-1 148

[9] 张昌达. 利用原子干涉仪测量重力加速度[J]. *物探与化探*, 2000, 24(5):321-326

[10] 张为民,王勇,周旭华. 我国绝对重力观测技术应用研究与展望[J]. *地球物理学进展*,2008,23(1):69-72

[11] Sakuma A. Present Status of the Absolute Measurement of Gravitational Acceleration[C]. *Precision Measurement and Fundamental Constants II* Government Printing Office, Washington D C,1984

[12] Niebauer T M, Sasagawa G S, Faller J E. A New Generation of Absolute Gravimeters[J]. *Metrologia*, 1995, 32(3):159-180

[13] 高景龙. NIM-3 型新的轻小高精度可移式绝对重力仪[J]. *测绘学报*,1993,22(3):223-229

[14] Agostino G D, Desogus S, Germak A, et al. The New IMGC-02 Transportable Absolute Gravimeter: Measurement Apparatus and Applications in Geophysics and Volcanology[J]. *Annals of Geophysics*, 2008, 51(1):39-49

[15] Nagorny V D. A New Approach to Absolute Gravimeter Analysis[J]. *Metrologia*, 1995, 32 (3): 201-208

第一作者简介:吴琼,博士,现主要从事地球探测技术与地球物理仪器研制研究。
E-mail:wuqiong_cea@hotmail. com

Influence Mode Analysis of Self Vibration on Absolute Gravimeter

WU Qiong¹ HAO Xiaoguang² TENG Yuntian¹ GUO Youguang²

(1 Institute of Geophysics, China Earthquake Administration, 5 South Minzhudaxue Road, Beijing 100081, China)
(2 Institute of Geodesy and Geophysics, Chinese Academy of Sciences, 340 Xudong Street, Wuhan 430077, China)

Abstract: Vibration isolation is one of key problems for absolute gravimeter development. We find out that the measurement error caused by self vibration is up to about mGal, which cannot be neglected. We analyze the experimental data, and try to find the reason and influence model of self vibration. Thus a new technique to improve the measurement accuracy of absolute gravimeter is provided.

Key words: absolute gravimeter; vibration isolation; self vibration

About the first author: WU Qiong, Ph. D, majors in earth observation technology and geophysical instrumentation.
E-mail: wuqiong_cea@hotmail. com