

doi:10.19306/j.cnki.2095-8110.2017.04.003

基于旋转加速度计原理的重力梯度测量 技术与试验

杨 晔, 李 达

(天津航海仪器研究所, 天津 300131)

摘 要: 旋转加速度计式重力梯度测量方法通过旋转调制的方式提取微弱的重力梯度信息。首先从测量原理出发, 指出实现该方案的主要难点及对策, 提炼出关键技术; 其次, 以多种方式开展引力梯度效应试验, 验证了理论的正确性; 最后, 尝试了面向载体应用的动态适应性试验, 达到地面低动态条件下的技术要求, 为开展高动态条件下的重力梯度测量奠定基础。

关键词: 重力梯度仪; 高分辨率加速度计; 标度因数一致性调整; 引力梯度试验; 动态试验

中图分类号: U666.12

文献标志码: A

文章编号: 2095-8110(2017)04-0020-09

Research and Experiment of Gravity Gradient Measurement Technology Based on Rotary Accelerometer Principle

YANG Ye, LI Da

(Tianjin Navigation Instrument Research Institute, Tianjin 300131, China)

Abstract: Rotational accelerometer gravity gradient measurement method extracts weak gravitational gradient information by rotating modulation. Firstly, in this paper, main difficulties and countermeasures in the process of realizing the scheme are pointed out, including the measurement principle, and the key technology is drawn out. Secondly, the gravitational gradient effect test is carried out in many ways and the correctness of the theory is validated. Finally, the dynamic adaptation test is carried out, the technical requirements are achieved within the low dynamic conditions on the ground, and the foundation to carry out high dynamic conditions under the gravity gradient measurement is laid.

Key words: Gravity gradiometer; High-resolution accelerometer; Scale factor consistency adjustment; Gravitational gradient test; Dynamic test

0 引言

20世纪70年代,出于军事目的,美国开展了基于旋转加速度计原理的重力梯度测量技术研究^[1-3]。2001年之后,该技术成为地球物理、资源勘探领域的新兴技术手段。在飞机等运动平台开展重力梯度勘查具有效率高、成本低、环境适应性强的优点,可在人员难以到达的复杂地理环境中部署使用^[4-7]。

本文在进行旋转加速度计式重力梯度测量技术研究的基础上,对开展的静态测量分辨率试验、动态适应性试验和部分功能的机载试验情况做简要介绍。

1 基本原理

如图1所示,旋转加速度计式重力梯度仪(后简称梯度仪)基于加速度计位置差分测量原理,其核心传感器通过机械旋转的方式将旋转中心处的重

收稿日期:2017-05-16;修订日期:2017-06-14

基金项目:科技部航空重力梯度仪研制(SQ2017YFSF040005)

作者简介:杨晔(1968-),男,研究员,硕士生导师,从事导航、制导与控制方面研究工作。E-mail:LiuyuYangye@eyou.com

力梯度张量水平分量调制到系统旋转频率的二倍频处,加速度四路和与平面重力梯度张量分量之间的关系可表示为

$$(a_1 + a_3) - (a_2 + a_4) = 2(\mathbf{F}_{yy} - \mathbf{F}_{xx})l \sin 2\omega t + 4\mathbf{F}_{xy}l \cos 2\omega t \quad (1)$$

式中, a_1, a_2, a_3, a_4 是4个加速度计敏感轴方向的加速度,单位是 m/s^2 , l 是加速度计检测质心到旋转中心的距离,单位是 m , $\mathbf{F}_{yy}, \mathbf{F}_{xx}, \mathbf{F}_{xy}$ 是测量平面内的重力梯度张量分量,单位是 $\text{E}(1\text{E}=10^{-9}\text{s}^{-2})$, ω 是旋转圆盘的旋转角速度,单位是 rad/s 。进行动态测量时,由惯性稳定平台承载重力梯度敏感器,隔离载体角运动对重力梯度测量的影响,同时为敏感器提供基准坐标系。

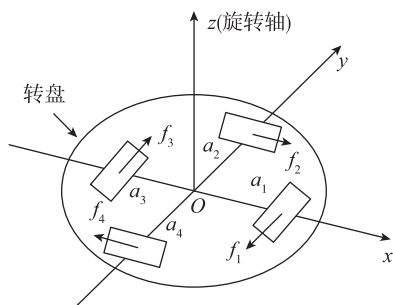


图1 旋转加速度计式重力梯度传感器基本构成示意图
Fig. 1 Basic schematic diagram of gravity gradient sensor with rotating accelerometer

2 主要技术难点及对策

完整的梯度仪主要由重力梯度敏感器(Gravity Gradiometer Implement, GGI)、惯性稳定平台、伺服单元以及重力梯度测量数据处理软件组成。其中,高分辨率石英挠性加速度计是敏感重力加速度的核心器件,GGI是获得重力梯度测量信息的主要敏感单元,惯性稳定平台是实现动态重力梯度测量的基本保证,而梯度测量数据处理软件是提取重力梯度信息和提高仪器精度的重要手段^[11-13]。

重力场中的梯度张量变化十分微弱,通常只有几十E的数值差异。要测得该量级的变化,需加速度计达到优于 $10^{-8}(\text{m/s}^2)/\sqrt{\text{Hz}}$ 的分辨率水平,这是对石英挠性加速度计研制的挑战。而在地面静态条件下,地表振动加速度噪声就达到 $10^{-4}(\text{m/s}^2)/\sqrt{\text{Hz}}$ 以上,若在运动平台上进行测量作业,运动加速度的输入值将超过 2m/s^2 。要在这种环境中分离出重力梯度信号,除了前述对加速度计分辨率的要求,还需要参与测量的各只加速度计具有高度一致的动态性能和标

度因数^[8],并在精密控制的旋转调制基础上进行差分测量。此外,对惯性稳定平台的角速率稳定刚度和数据滤波处理的效率提出了苛刻要求。

2.1 加速度计高测量分辨率的实现

高精度石英挠性加速度计是GGI核心敏感元件,对其测量分辨率的主要制约因素可表示为

$$R \propto \max \left[\frac{K_n}{P} C_R, M_p \right] \quad (2)$$

式中, R 是加速度计的分辨率, P 是加速度计摆性, K_n 是石英摆片挠性接头刚度, C_R 为检测电容的分辨率, M_p 是噪声因素。表体噪声来源于机械结构和伺服电路两个方面,其主要噪声模式为宽带白噪声、低频闪烁噪声和激励特征噪声三类。为了提高加速度计分辨率性能,根据式(2)采取的针对性措施有:1)增大摆性 P ,提高表头机械响应的灵敏度和信噪比;2)降低挠性接头刚度 K_n ,减少摆组件受到的非线性干扰;3)采用高品质熔融石英玻璃材料,降低材料应力导致的闪烁噪声;4)精细校正控制回路的中高频控制特性,提高表体动态响应精度;5)研制专用的低噪声闭环伺服线路和高稳定温控及热结构,抑制热噪声的干扰。

采取上述措施后,重力梯度测量用石英挠性加速度计较常规加速度计的本底噪声降低了2个数量级以上,在引力梯度效应测量试验中展现了数十E对应的测量分辨率水平。

2.2 加速度计标度一致性的实现

以载体的水平线运动为例,动态测量时运动加速度比重力梯度引起的加速度差值信号大6个数量级以上,加速度计间标度因数的微小差异会使得经减震器隔离的载体残余水平线运动加速度的一、三倍频分量经旋转调制进入系统输出信号,对重力梯度测量造成干扰,其机理如下

$$A_{\text{out}}(\Delta K_i) = [(K_4 - K_2)a_y + (K_1 - K_3)a_x] \sin \omega t + [(K_4 - K_2)a_x - (K_1 - K_3)a_y] \cos \omega t - (K_1 - K_2 + K_3 - K_4)\dot{\omega}l \quad (3)$$

式中, K_i ($i=1,2,3,4$) 是第 i 个加速度计的标度因数, a_x, a_y 分别是 X, Y 方向的载体线加速度, $\dot{\omega}$ 是圆盘旋转的角加速度。经测量,机载运动加速度的一、三倍频分量约为 0.01m/s^2 量级。计算可知,标度因数不一致程度为 10^{-6} 时,测量误差约为 20E。

在具体实践中通过三项技术实现加速度计间标度因数一致性:1)设置表体磁路在线调整机构,承担

标度因数在线微调的职能;2)由技术设计和工艺控制保证配对的加速度计标度因数的初始不一致性小于1%;3)通过动力学特征激励,获得加速度计标度因数不一致误差的数值信息,由控制线路控制标度因数在线调节机构实现标度一致性的实时在线调整。加速度计标度一致性在线调整原理如图2所示。为了获得标度因数不一致的数值,需要对GGI转盘在正常旋转调制的基础上叠加规定频率为 ω_s 的高频抖动激励,将对表间标度因数不一致引起的激励响应调制在

抖动频率 ω_s 及其谐波上,其机理如下:

$$\omega = \omega_0 + A \cos \omega_s t \quad (4)$$

$$A_{out}(\Delta K_i) = [(K_4 - K_2)a_y + (K_1 - K_3)a_x] \sin \omega t + [(K_4 - K_2)a_x - (K_1 - K_3)a_y] \cos \omega t + A(K_1 - K_2 + K_3 - K_4)l\omega_s \sin \omega_s t \quad (5)$$

式中, ω_s 是圆盘旋转的抖动频率, A 是高频抖动幅值。通过对该频率的解调,提取出实时的标度误差,进行反馈控制,以实现4只加速度计标度因数的高度一致。

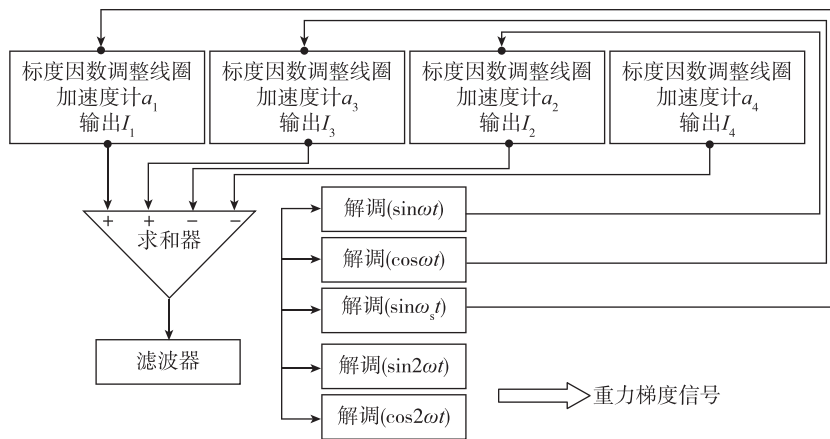


图2 加速度计标度因数一致性在线调整示意图

Fig. 2 Accelerometer scale factor consistency on-line adjustment diagram

摇摆试验表明,该方法可以保证加速度计间标度因数一致性调整精度达到期望水平。

2.3 加速度计安装误差的控制

GGI中的加速度计安装误差会使运动加速度进入GGI输出信号,从而导致对重力梯度测量的干扰。加速度计安装误差主要分为加速度计检测质心位置安装误差和敏感轴角度安装误差两种。如图3所示,位置安装误差有3个自由度,分别是径向误差、切向误差和垂向误差,分别描述加速度计检测质心实际安装位置与理论安装位置之间的差值在3个方向上的投影。经建模分析,对这类误差的控制较易实现,其对重力梯度测量的影响可忽略。而角度安装误差影响相对较大,且不易控制。如图4所示,敏感轴角度安装误差有2个自由度,分别是切向误差和垂向误差,分别描述加速度计敏感轴实际安装位置与理论安装位置之间的差值在切向和垂向方向上的投影。切向误差导致沿GGI旋转平面的平动加速度无法完全抵消,在旋转控制达到一定精度的条件下,可由标度误差进行补偿。垂向误差会使载体的垂向运动加速度进入GGI输出信号,

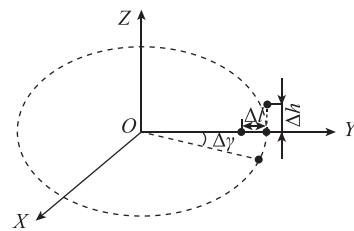


图3 检测质心位置安装误差示意图

Fig. 3 Detection of centroid position installation error diagram

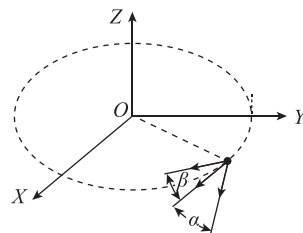


图4 敏感轴角度安装误差示意图

Fig. 4 Sensitive axis angle installation error diagram

对梯度测量影响机理如下

$$\Delta A_{out}(\Delta \beta_i) = a_z [(\Delta \beta_1 + \Delta \beta_3) - (\Delta \beta_2 + \Delta \beta_4)] + [\mathbf{I}_{xz}(\Delta \beta_2 - \Delta \beta_4) - \mathbf{I}_{yz}(\Delta \beta_1 - \Delta \beta_3)] \sin \omega t + [\mathbf{I}_{xz}(\Delta \beta_1 - \Delta \beta_3) + \mathbf{I}_{yz}(\Delta \beta_2 - \Delta \beta_4)] \cos \omega t \quad (6)$$

式中, $\beta_i (i=1, 2, 3, 4)$ 是第 i 个加速度计敏感轴的垂向角度安装误差, Γ_{xz} 、 Γ_{yz} 是对应方向的重力梯度张量, a_z 是载体的垂向加速度。可以看出, 误差第二项、第三项的载波频率为一倍频, 对重力梯度测量不造成影响, 误差第一项表示载体垂向加速度的二倍频分量与敏感轴垂向安装误差角相耦合, 进入重力梯度测量通道。

经测量, 机载垂向运动加速度的二倍频分量约为 0.02m/s^2 量级, 垂向误差为 $0.2''$ 时, 测量误差达 20E 。为此必须设计加速度计安装精调机构, 但是限于机械实现能力, 敏感轴垂向角度安装误差一般能可靠控制在 $5''$ 以内, 经计算, 该安装精度能力下对机载测量的影响约为 1000E , 量值很大, 该项误差需通过数据处理手段予以解决。

2.4 高刚度惯性稳定平台的控制实现

重力梯度仪通过惯性稳定平台隔离大动态范

围的载体角运动带来的动力学干扰, 并为梯度解算提供坐标系。载体残余角运动对重力梯度测量影响如下

$$\Delta A_{\text{out}}(\Delta\Omega) = (\Omega_y^2 - \Omega_x^2)l \sin 2\omega t + 2\Omega_x \Omega_y l \cos 2\omega t \quad (7)$$

式中, Ω_x 、 Ω_y 是 GGI 敏感到的 X 、 Y 方向角速度。正常测量作业时, 机载运动角速度约为 $1(^{\circ})/\text{s}$ 量级, 对应的测量扰动约为 $3 \times 10^5 \text{E}$ 量级, 需要通过平台将载体的大动态角速度衰减 $3 \sim 4$ 个数量级, 才能保证重力梯度信号不被淹没。平台由台体轴、内环轴、外环轴 3 条稳定回路组成, 采用固定指北三环半解析式控制模式, 使台体稳定在当地地理坐标系内。稳定回路原理框图如图 5 所示, 光纤陀螺敏感到外部干扰力矩产生的框架角速度, 其输出通过解调、校正、放大等环节驱动力矩电机, 使框架保持在陀螺敏感轴构成的惯性坐标系中, 抵消外部干扰力矩的影响。

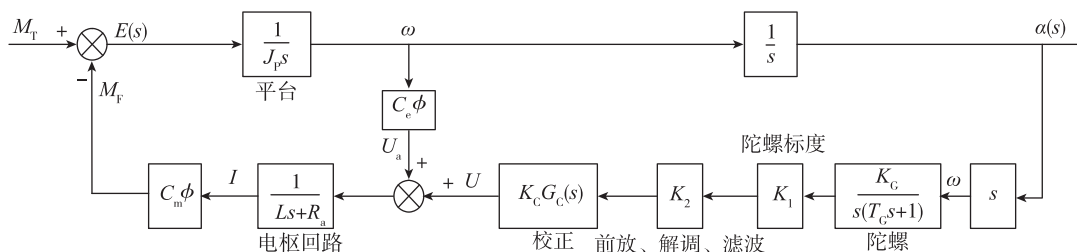


图 5 平台稳定回路控制原理框图

Fig. 5 Platform block diagram of stable loop control

当平台实现对载体角运动隔离后的残余角速度小于 $3''/\text{s}$ 时, 对梯度测量的影响小于 3E 。

2.5 重力梯度数据的处理

尽管采取了前述的多项技术措施, 但由于技术能力的限制和仪器状态随时间和环境的变化, 梯度仪的原始输出信号中仍会包含大量噪声和干扰误差, 信噪比极低。在静态测量条件下, 通过较充分的滤波手段及较完备的辅助观测项支持, 可以有效地分离出重力梯度信号。在动态测量条件下, 则需研究特殊的动态重力梯度信号提取和动态误差补偿方法。

针对动态测量重力梯度信号噪声强度大的问题, 分析重力梯度数据空间分辨率、滤波器模式与测量精度的匹配关系, 通过数据预相关处理以及解调方式的改进, 提高对梯度信号在强噪声背景下提取的能力。动态摇摆试验结果表明, 有效的预处理方法可在不损失系统空间分辨率的前提下, 将重力梯度信号的噪声幅值降至原来的 $25\%^{[9]}$ 。

通过对式(3)、式(6)的分析, 经隔离后的残余角速度会以不同的形式进入重力梯度测量通道, 形成测量误差。为此, 将惯性测量与全球定位系统(Global Positioning System, GPS)组合对载体水平加速度和垂向加速度进行观测, 并借助系统输出信号的一倍频信息对加速度计标度因数不一致程度进行实时监控, 利用垂向误差激励对加速度计敏感轴垂向安装误差进行实时监测, 在后处理过程中通过数据模型对梯度信号中载体线运动的残余扰动进行控制。

由于平台稳定回路带宽有限, 不能完全隔离角运动。载体角运动的高频残余角速度会对梯度测量造成干扰, 其影响机理见式(7)。在实际测量过程中, 利用陀螺仪测量 GGI 所敏感到的载体残余角速度作为辅助观测项, 在数据后处理的过程中将残余角运动扰动予以补偿。

在机载试验过程中, 飞机自身飞行姿态的变化、燃油的消耗以及稳定平台框架的姿态变化, 导

致固定指北的 GGI 周围质量的引力场发生改变,对重力梯度测量形成自梯度干扰。经模型计算,这部分质量源导致的自梯度影响量级约为 50E。因此,需提前对飞机不同姿态下、不同燃油质量下的自梯度影响进行测量,并在飞行过程中对姿态和飞行参数进行监控,在重力梯度数据处理中利用相应的数学拟合手段对载体自梯度效应进行校正。

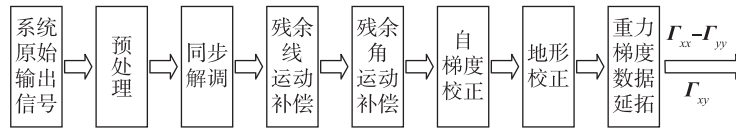


图6 动态重力梯度数据处理流程图

Fig. 6 Dynamic gravity gradient data processing flowchart

3 静态和动态重力梯度测量的特点与关键

3.1 静态和动态重力梯度测量的特点

梯度仪的静态和动态测量的主要区别在于误差模式的不同。梯度仪系统的误差可以分为两大类:一类是由 GGI 本身噪声引起的;另一类是由外界干扰(如载体线运动、角运动、磁场、温度变化、稳定平台误差、载体和稳定平台的自梯度)产生的。在实验室静态条件下,主要是 GGI 本身的噪声起作用,而外界干扰可暂不考虑。从频域看,噪声包含两种模式:第一种模式是白噪声,其误差量均匀分布在非常宽的频率范围内,通常是由加速度计摆片表面的气体分子运动碰撞现象和加速度计前置放大器前端电路中的电噪声引起的,其幅值大小取决于检测电容的间距、摆片自身的质量、表头壳体内的热噪声和电子线路的输入阻抗;第二种模式集中在较低的频段,该分量是由加速度计和 GGI 的结构误差引起,主要有 GGI 旋转装置的转动、加速度计检测质量的涡流和轴承噪声等产生的微小扰动。

在动态测量条件下,诸多系统误差通道(如加速度计标度因数的微小不一致、加速度计安装误差、同步解调过程中的解调噪声等)受到外界干扰源的激励,与之相耦合形成测量误差。动态重力梯度测量误差机理如图 7 所示。在重力梯度数据中动态噪声是其主要误差源,因此,动态重力梯度测量需要通过加速度计标度因数在线调整、提高惯性稳定平台刚度和工作带宽、借助辅助观测项进行重力梯度数据后期补偿、重力梯度数据离线滤波等一系列方法抑制系统动态误差,提高测量精度。

在重力梯度测量中,需通过延拓将航空重力梯度数据得到大地水准面的离散重力梯度观测值,再通过网格化方法得到一定分辨率、按经纬分化的规则网格观测数据,并利用地球椭球模型参数进行重力梯度地形改正,以用于地球物理解释。

综上所述,重力梯度数据处理流程图如图 6 所示。

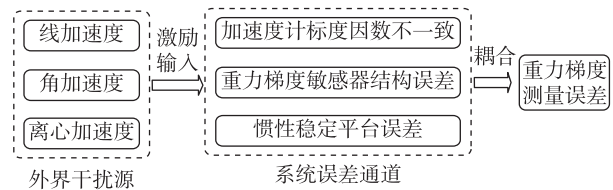


图7 重力梯度测量误差机理示意图

Fig. 7 Schematic diagram of error mechanism of gravity gradient measurement

3.2 从静态测量到动态测量的关键

梯度仪从静态测量到动态测量的关键就在于能否通过物理或数学方法隔离外界干扰源对重力梯度动态测量的影响,将 GGI 的静态分辨率在高动态的测量环境条件下得以充分体现。

航空测量时,首先要对飞机飞行高度、横向位移、姿态、最大转弯角度等飞行条件进行约束,从源头上降低外界运动干扰源的幅值,以确保重力梯度的有效测量。针对机载线运动,在稳定平台和安装底座之间装设隔振系统,可减少高频输入干扰,并在系统设计中通过调整加速度计标度一致性抑制载体水平加速度的影响,通过对加速度计敏感轴垂向安装误差角的控制抵御载体垂向加速度的作用,最后在数据后处理的过程中使用 GPS 信息、系统输出信号的一倍频分量、惯性测量单元加速度信息,利用信息融合的方法对重力梯度信号中的残余线运动误差予以补偿。针对机载角运动,稳定平台是抵御角运动作用的主要措施,它可将 GGI 与底座的角振动以及与载体的角运动隔离,因此,对 GGI 的主要干扰是由未经平台隔离的高频残余角运动和平台本身的静摩擦、反跳的现象产生的,可通过与 GGI 固连的陀螺敏感 GGI 自身的角运动,对重力梯度信号进行校正。

飞机质量和稳定平台框架所产生的引力梯度会被 GGI 所敏感,在动态测量下产生明显的误差。在试验前需对此项误差进行标定,并在数据处理过程中依据稳定平台提供的航向、横摇和纵摇数据对重力梯度数据进行自梯度校正。在动态条件下地磁场和载体本身磁场相对 GGI 的变化会影响加速度计的输出,实际中需对 GGI 及其内部加速度计进行磁屏蔽,以消除上述磁场分量的影响。另外,压力和温度的变化都会影响重力梯度信号的测量,其影响可通过为梯度仪外设计恒温恒压设施予以规避,同时,需测量和补偿环境变化以抑制该项误差。

4 试验设计与实施

4.1 重力梯度敏感器引力梯度效应试验分析

自然界小区域内的重力梯度比较平稳,在试验室条件下需寻求人工引力梯度激励手段^[10],设计相应的试验方法来确认 GGI 的测量性能。为此,先后设计线位移式和角位移式引力梯度效应测量试验技术。试验条件和主要参数如下:

1)引力梯度试验在试验室的隔振基座上进行,温度环境为 $20^{\circ}\text{C} \pm 3^{\circ}\text{C}$,气压环境为 1 个标准大气压下;

2)人工质量块采用立方体外形,边长为 100mm $\pm 1\text{mm}$,质量为 $18\text{kg} \pm 0.1\text{kg}$;

3)GGI 坐标系的确定: X 方向为 GGI 旋转相位为 0° 的方向, Y 方向为 GGI 旋转相位为 270° 的方向, Z 方向为天向;

4)线位移式引力梯度装置直线型导轨长度为 1.5m,位置控制精度为 0.1mm;

5)角位移式引力梯度装置环形型导轨半径为 0.8m,角度控制精度为 $5'$ 。

4.1.1 线位移式引力梯度效应测量试验分析

最初,依据万有引力定律设计了线位移式引力梯度测量试验方案。如图 8 所示,在 GGI 坐标系 X 轴上放置以 27 块高密度人工质量块组成的立方体

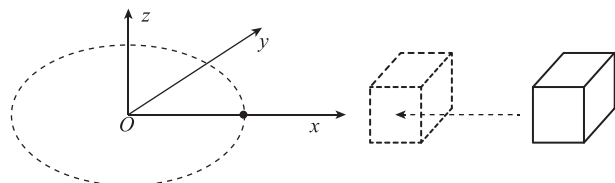


图 8 线位移式引力梯度效应试验示意图
Fig. 8 Schematic diagram of linear displacement gravitational effect

式人工质量体,产生引力梯度激励。试验过程中,沿 X 轴方向控制质量体相对于 GGI 测量工位的相对位置形成引力梯度变化(图 9)。经计算,该方法可产生 $\Gamma_{xx} - \Gamma_{yy}$ 引力梯度张量分量激励,对 Γ_{xy} 张量分量的影响可忽略。

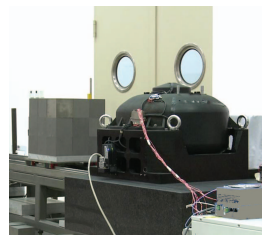


图 9 线位移式引力梯度效应试验现场
Fig. 9 Line displacement gravitational gradient effect test site

线位移式引力梯度效应试验结果如图 10 所示,测试数据与理论值比较表明,该方法在 $\Gamma_{xx} - \Gamma_{yy}$ 梯度信号上具备量程 1300E 量级,直线滑轨位置控制精度为 0.1mm 也表明该装置对 $\Gamma_{xx} - \Gamma_{yy}$ 梯度信号引力梯度效应测量分辨率优于 20E。

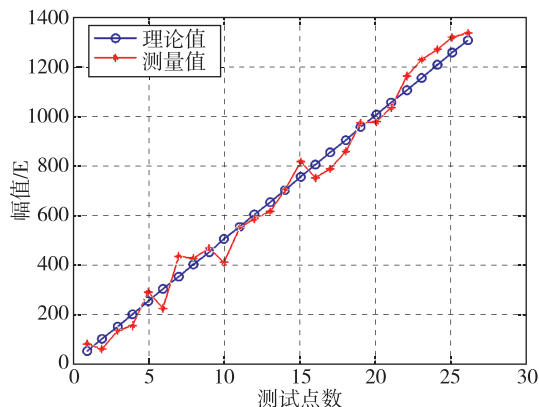


图 10 线位移式引力梯度效应试验结果($\Gamma_{xx} - \Gamma_{yy}$)
Fig. 10 Line displacement gravitational gradient effect test results($\Gamma_{xx} - \Gamma_{yy}$)

4.1.2 角位移式引力梯度效应测量试验分析

线位移式引力梯度激励法的试验效率较低,环境扰动影响大,引力梯度激励与质量体位置呈非线性。为了能更好地定量评估 GGI 的测量性能,提出了角位移式人工引力梯度激励方法。该方法的试验装置示意如图 11 所示,采用不同数量的质量块组合在 GGI 坐标系 XOY 平面上,以 X 轴为中心沿环形均匀对称布置形成引力梯度激励源。试验过程中,控制质量块的数目为 GGI 产生引力梯度变化(图 12)。

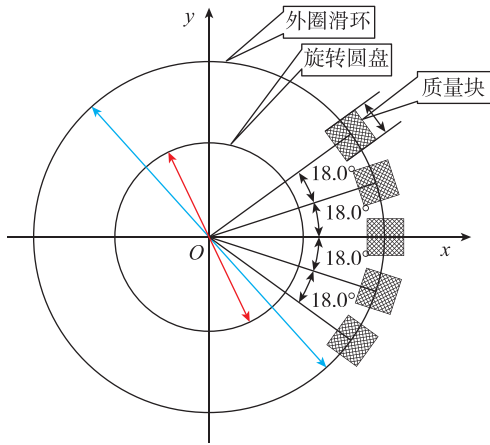


图 11 角位移式人工引力激励设备示意图

Fig. 11 Demonstration of angular displacement type artificial gravitational stimulation equipment



图 12 角位移式引力梯度效应试验现场

Fig. 12 Angular displacement gravitational gradient effect test site

角位移式引力梯度效应试验结果如图 13 所示,测试数据与理论值比较表明,该方法在 $\Gamma_{xx} - \Gamma_{yy}$ 梯度信号上具备量程 300E 量级,环形滑轨角度控制精度为 5' 也表明该装置对 $\Gamma_{xx} - \Gamma_{yy}$ 梯度信号引力梯度效应测量分辨率优于 10E。

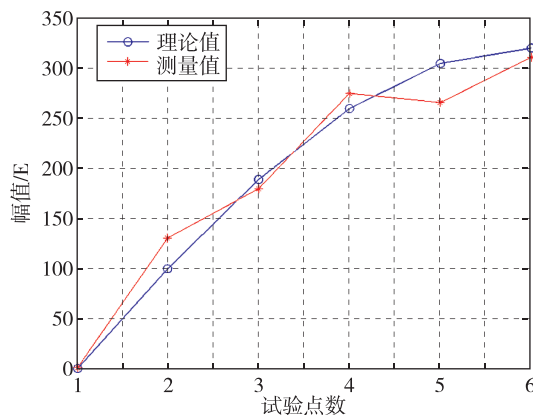


图 13 角位移式引力梯度效应试验结果 ($\Gamma_{xx} - \Gamma_{yy}$)
Fig. 13 Angular displacement gravitational gradient effect test results ($\Gamma_{xx} - \Gamma_{yy}$)

4.1.3 改进线位移式引力梯度效应测量试验

线位移式和角位移式引力梯度激励技术和测试条件在 GGI 的引力梯度效应测量评估中发挥了作用,但两种激励方式均只能激励 $\Gamma_{xx} - \Gamma_{yy}$ 重力梯度信号,缺少对于 Γ_{xy} 信号的激励评估能力。为此,改进线位移式人工引力梯度激励方法,试验装置示意图如图 14 所示。试验方式与线位移式引力梯度效应测量试验相同,在 GGI 旋转平面内控制由 27 个质量块组成的人工质量体沿径向 X 轴、Y 轴对角线方向设置质量体与 GGI 的不同距离位置。经计算,该方法可产生 Γ_{xy} 引力梯度张量分量激励,对 $\Gamma_{xx} - \Gamma_{yy}$ 张量分量的影响可忽略。

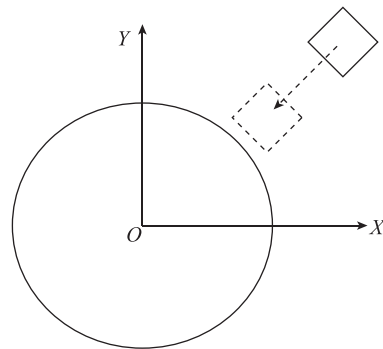


图 14 改进后线位移式引力梯度试验示意图

Fig. 14 Improved post-line displacement gravitational gradient test

改进后线位移式引力梯度效应试验结果如图 15 所示,测试数据与理论值比较表明,该方法在 Γ_{xy} 梯度信号上具备量程 650E 量级,直线滑轨位置控制精度为 0.1mm 也表明该装置对 Γ_{xy} 梯度信号引力梯度效应测量分辨率优于 10E。

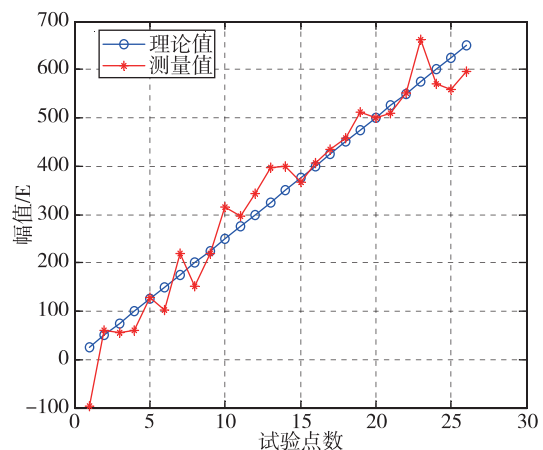


图 15 改进线位移式引力梯度效应试验结果 (Γ_{xy})
Fig. 15 Improved line displacement gravitational gradient effect test results (Γ_{xy})

4.2 梯度仪动态测量适应性试验分析

为实现重力梯度的动态测量,开展梯度仪的静态摇摆试验和振动试验。

4.2.1 梯度仪水平摇摆试验分析

梯度仪水平摇摆试验如图 16~图 18 所示。摇摆试验中典型解调输出的梯度信号如图 17 所示,从中可以看出在 4892s 系统由静态开始摇摆时,重力梯度信号出现 600E 的测量阶跃,通过优化梯度信



图 16 梯度仪水平摇摆试验现场

Fig. 16 Gradient instrument level swing test site

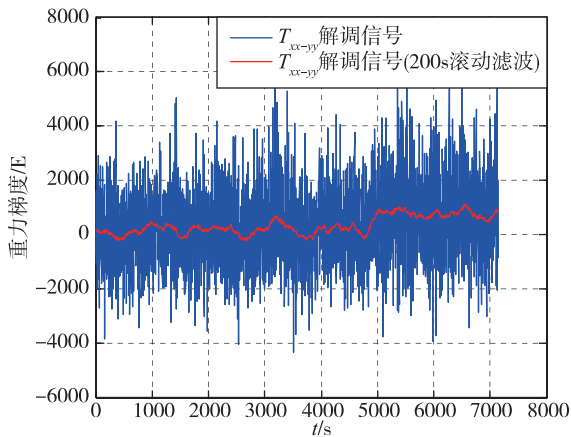


图 17 摇摆试验重力梯度信号

Fig. 17 Swing test gravity gradient signal

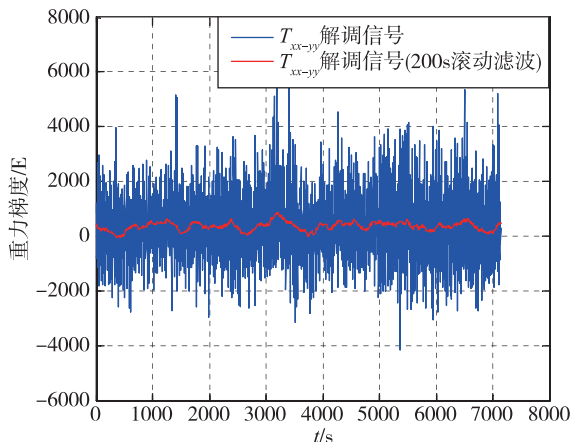


图 18 改进后摇摆试验重力梯度信号

Fig. 18 Improved wobble test gravity gradient signal

号提取方法以抑制高频谐波分量对测量的影响。将同样的摇摆试验数据进行解调,梯度信号如图 18 所示,从中可以看出梯度信号在摇摆时的阶跃现象得到一定程度的解决。

4.2.2 梯度仪垂向振动试验

梯度仪垂向振动试验如图 19 所示。如图 20、图 21 所示,大量的 GGI 振动验分析结果可以看出,在高

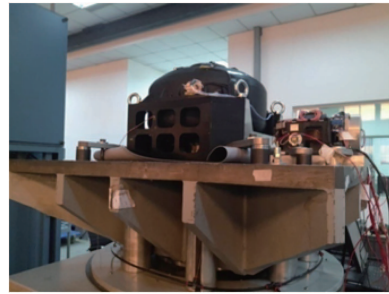


图 19 梯度仪垂向振动试验现场

Fig. 19 Gradient instrument vertical vibration test site

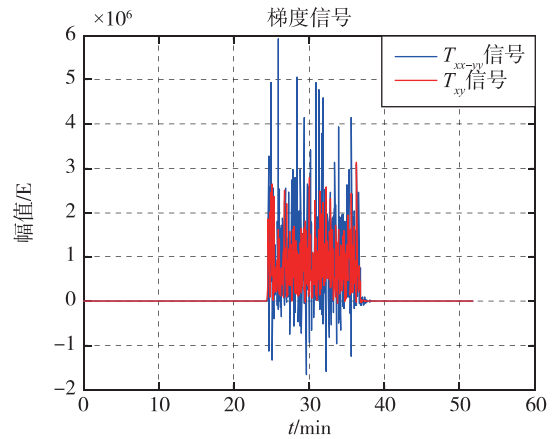


图 20 随机扫频条件下重力梯度信号

Fig. 20 Gravity gradient signal under random sweep condition

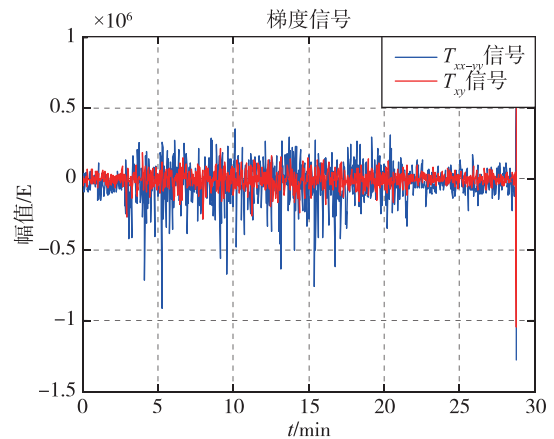


图 21 定频振动条件下重力梯度信号

Fig. 21 Gravity gradient signal under constant frequency vibration

振幅随机扫频振动条件下,重力梯度信号完全被振动噪声掩盖,无法将重力梯度信号分离出来;在定频振动条件下,分析重力梯度信号输出,采取数据处理手段可以获得稳定的重力梯度信号,此种情况下振动对于重力梯度信号影响较小。说明在高性能稳定平台保证下,GGI可以在一定振动条件下,获得准确的重力梯度信号。通过振动试验可以发现减振器在梯度仪高动态测量中具有非常重要的作用,可以增加系统在高动态条件下梯度测量信号的稳定性和准确性。

5 试验效果与展望

以上试验数据均在实验室条件下获得,与航空试验的高动态环境下仍有很大差距。目前人工质量引力梯度激励存在引力梯度分布不均匀、梯度效应表达间接、激励分辨率偏低、位置线性度不佳等问题,还无法可靠地用于系统标定和性能评估。为此,需寻求水平张量的均值重力梯度环境的构建方法,为实现对梯度仪的直接线性标定提供技术途径。此外,对全张量重力梯度测量和标定技术的研究也有待开展,这将面临更加复杂和困难的技术挑战。

参考文献

- [1] Roberts D, Chowdhury P R, Lowe S J, et al. Airborne gravity gradiometer surveying of petroleum systems under Lake Tanganyika, Tanzania [J]. *Exploration Geophysics*, 2016, 47(3):228-236.
- [2] Dransfield M H, Christensen A N. Performance of airborne gravity gradiometers [J]. *The Leading Edge*, 2013, 32(8):908-922.
- [3] Christensen A N, Dransfield M H, Galder C V. Noise and repeatability of airborne gravity gradiometry [J]. *First Break*, 2015, 33(4):55-63.
- [4] Lockheed martin gravity system [EB/OL]. [2016-12-01]. <http://www.lockheedmartin.com/us/products/gravity-gradiometry/html>.
- [5] FALCON gravity gradiometry [EB/OL]. [2016-12-01]. <http://www.cgg.com/en/What-We-Do/Multi-Physics/Acquisition-Technologies/Falcon-Gravity-Gradiometry>.
- [6] FALCON airborne gravity gradiometer survey targets outlined, genesis property, saskatchewan [EB/OL]. (2016-08-23)[2016-12-01]. <http://www.stockhouse.com/news/press-releases/2016/08/23/falcon-airborne-gravity-gradiometer-survey-targets-outlined-genesis-property>.
- [7] Johnston P. Self-gradient effects for airborne gravity gradiometry [C]//22nd International Geophysical Conference and Exhibition. Australia, 2012: 1-3.
- [8] 涂良成,刘金全,王志伟,等. 旋转重力梯度仪的加速度计动态调节方法与需求分析[J]. *中国惯性技术学报*, 2011, 19(2):131-135.
- [9] 杨晔,李达,高巍. 旋转加速度计式重力梯度仪输出解调与滤波[J]. *中国惯性技术学报*, 2016, 24(6): 701-705.
- [10] 钱学武,蔡体菁. 旋转加速度计重力梯度仪标定方法[J]. *中国惯性技术学报*, 2016, 24(4):427-430.
- [11] 黄鹤,胡平华,苗成义,等. 重力测量技术与惯性技术之间的关系[J]. *导航定位与授时*, 2015, 2(2):67-72.
- [12] Van Leeuwen E H, McCracken K G, Lee J B, et al. Airborne gravity gradiometers, US Patent 6883372 B2 [P]. 2005.
- [13] O'Keefe G J, Lee J B, Turner R J, et al. Gravity gradiometer, US Patent 5922951 [P]. 1999.