

世界重力梯度仪的研究现状

吴琼¹, 滕云田¹, 张兵², 张涛³

(1. 中国地震局地球物理研究所, 北京 100081; 2. 防灾技术学院, 河北 燕郊 065201; 3. 中国地震应急搜救中心, 北京 100049)

摘要:在对地下结构的探测过程中,重力梯度仪器的研制及其科学的布设方式已经成了一个世界关注的研究课题。笔者介绍了目前世界上存在的基于扭矩和差分加速度计两种测量原理的重力梯度仪,并对其测量原理进行简要描述。然后对基于光学和原子干涉重力梯度测量仪器进行描述,最后介绍了作者提出的重力梯度测量光路,为自主研发绝对重力梯度仪提供技术参考。

关键词:重力梯度仪;扭矩平衡;激光干涉

中图分类号: P631 **文献标识码:** A **文章编号:** 1000-8918(2013)05-0761-08

重力梯度测量是一个困难而费时的测量任务,但是高精度重力梯度测量数据对于高精度惯性制导、地球科学、空间科学和地质科学都有着重要的意义^[1],同时重力梯度测量已经被认为是一种资源探测的有效手段之一,是对基础地质调查、基础地质研究,油气矿藏等资源勘查等领域具有重要的应用价值^[2],航空和卫星重力梯度测量对山区、无人区和沿海大陆架部分的基础数据获取更具重要意义^[3-4]。从 1971 年美国空军首次提出精度为 1 E 的移动级重力梯度仪到现在,重力梯度仪虽然得到了世界科学家的重视,并取得了迅速的发展,但是很多还处于实验室阶段。目前唯一商用的重力梯度仪是由美国贝尔实验室研制的旋转加速度计重力梯度仪^[5]。

从 20 世纪 70 年代至今,世界上出现的重力梯度仪的设计原理有差分加速度计法和基于扭矩的测量模式。其中基于扭矩的测量模式由于其体积和稳定性的问题,进步缓慢。2006 年,赵立珍等设计了基于扭矩测量的二维簧片重力梯度仪,其在体积、稳定性等方面有所突破^[6]。基于差分加速度计的重力梯度仪由于其自身的高稳定性和高精度,得到了迅速的发展和应用。随着激光技术和原子干涉技术的发展,激光干涉绝对重力梯度仪和原子干涉绝对重力梯度仪得到了进一步的发展。另外,超导重力梯度仪也是具有发展前景的一类重要的重力梯度仪。为了减小测量误差,很多学者还针对航空重力

梯度测量惯性稳定平台和加速度计的动态调整方法也开展了大量的研究工作^[7-8]。

笔者主要描述了目前世界上正在研究中的重力梯度仪结构和原理,同时对某些样机进行了精度描述。最后对笔者提出的基于激光干涉的绝对重力梯度仪测量光路进行简要介绍。

1 基于扭矩的重力梯度仪

19 世纪 90 年代初,匈牙利地球物理学家 Eotvos 利用扭称测量水平向的重力梯度,开创了重力梯度测量的先河,同时也开始了基于扭矩的重力梯度仪研究。后经德国 W. Schweydar 对 Eotvos 的扭称进行改进,使得梯度测量取得了迅速发展,重力梯度仪成为当时油气普查的唯一有效工具^[9]。

扭称测量的方式是利用一根悬丝悬挂一根横杆,在横杆的两端各挂一个质量为 m 的检验质量,这样便构成一个扭称。扭称对水平扭转方向灵敏度很高,可以测量水平向的重力梯度。但是这种结构测量时间长,稳定性差,测量受到地形起伏的影响严重,不适合于野外观测使用。

随着检测技术的提高,2004 年起,由方俊先生带领的研究团队开展了基于簧片的扭矩重力梯度测量装置研究,其结构图如图 1 所示^[10]。系统主要由扭摆系统、信号检测电路和信号采集系统构成。扭摆系统由检验质量, Z 型连接杆和簧片构成。假设系统放置方向与正北方向的夹角为 α , 当 $\alpha = 0^\circ, 90^\circ$ 、

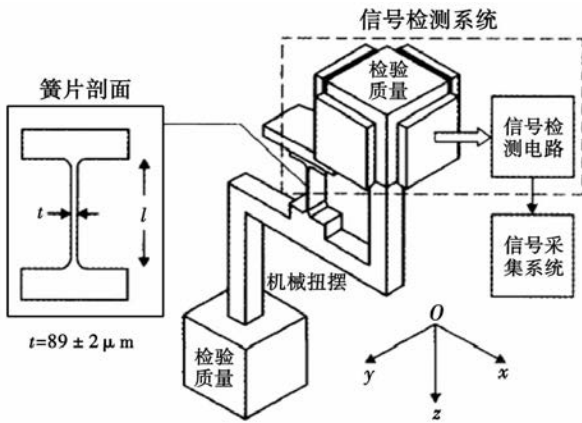


图 1 簧片重力梯度仪系统结构示意图

180° 时对应系统绕 y 轴偏转的夹角为 $\Delta\theta_1$ 、 $\Delta\theta_2$ 和 $\Delta\theta_3$ ，绕 z 轴偏转的角度为 $\Delta\beta_1$ 、 $\Delta\beta_2$ 。 k_y 和 k_z 为绕 y 轴和 z 轴旋转时的转动刚度， I_x 、 I_y 和 I_z 为绕 x 轴、 y 轴和 z 轴转动时的转动惯量， m 为检验质量， $m_b/2$ 为上下两竖直杆的质量， h 为上下两竖直杆的杆长。则可以得出

$$W_{xy} = \frac{k_z(\Delta\theta_1 + \Delta\theta_2)}{2(I_y + I_x)}$$

$$W_{yz} = \frac{k_z(\Delta\theta_1 - \Delta\theta_2)}{2(2m + m_b)lh}$$

$$W_{xz} = \frac{k_y(\Delta\beta_1 - \Delta\beta_2)}{2(I_x + I_z)}$$

$$W_{xx} - W_{zz} = \frac{k_y(\Delta\beta_1 + \Delta\beta_2)}{2(2m + m_b)lh}$$

$$W_{yy} - W_{zz} = \frac{k_y\Delta\beta_3}{(2m + m_b)lh} - \frac{k_z(I_x - I_z)(\Delta\theta_1 - \Delta\theta_2)}{2[(2m + m_b)lh]^2}$$

重力梯度张量的表达式。由此可知，当对应于三个不同的 α 角度时，测量得到 $\Delta\theta_1$ 、 $\Delta\theta_2$ 、 $\Delta\theta_3$ 、 $\Delta\beta_1$ 和 $\Delta\beta_2$ ，结合泊松方程，就可以计算得到全张量重力梯度值。

2 基于差分加速度计的重力梯度仪

2.1 旋转加速度计式重力梯度仪

由于重力梯度测量的重要性，美国海军和空军从 20 世纪 70 年代开始，投入几亿美元进行重力梯度仪的研制。1975 ~ 1990 年间美国 Bell Aerospace 公司(现并入 Lockheed Martin 公司)研制了旋转加速度计重力梯度仪 GGI (gravity gradient instrument)，装在潜艇中用作导航，后来装在船上普查油气。澳大利亚 BHP Billiton 公司引进这种技术，并做了细致踏实的工作，研制成功 FALCON 航空重力仪，于 1999 年正式投入使用^[11]。这类重力梯度仪的基本机构如图 2 所示。最近由于引入了对关键信

号的数字化操作，使得整套设备在尺寸和重量方面大大减轻，而在噪声抑制和稳定性方面有了显著提高，使其更适合与航空测量^[12]。

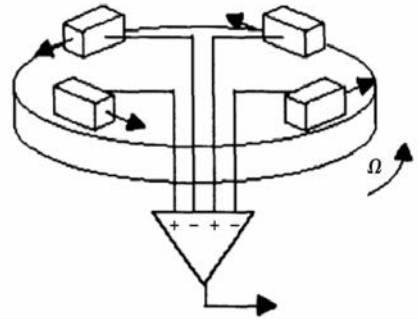


图 2 重力梯度仪 GGI 的结构示意

根据爱因斯坦广义相对论的一个基本原理——等效原理，我们知道对于一个封闭系统内的观测者，万有引力效应与该封闭系统的加速度造成的“重量感”完全相同。因此在一个密闭的系统内，同一个方向上安装两台加速度计，这两台加速度计将感受该方向上相同的系统加速度。因此将四台加速度计两两配对，精确放置在一个圆周上，敏感轴与圆周相切。处于圆上同一直径上的两台加速度计为一对，感受方向相反大小相同的转盘加速度，从而将转盘的加速度效应抵消^[13]。

设转盘的角速度为 Ω ，装置半径为 ρ ，时间序列为 t ， $G_{ij} = \partial g_i / \partial j$ 是重力矢量的 i 分量对 j 方向的偏导数，则该重力梯度仪理想情况下的 ρ 输出为^[14-15]

$$\rho_{\text{输出}} = 4\rho[\sin(2\Omega t)G_{xy} + \frac{1}{2}\cos(2\Omega t)(G_{xy} - G_{yy})]$$

由式(2)可以看出，GGI 只能测量 G_{xy} 和 $G_{xy} - G_{yy}$ ，因此被称为部分分量重力梯度仪。

1988 年 Bell Geospace 获得军方的全张量重力梯度测量 (FTG) 技术，2002 年 FTG 改装后形成 Air-FTGTM 进行航空重力梯度测量。FTG 是将三套 GGI

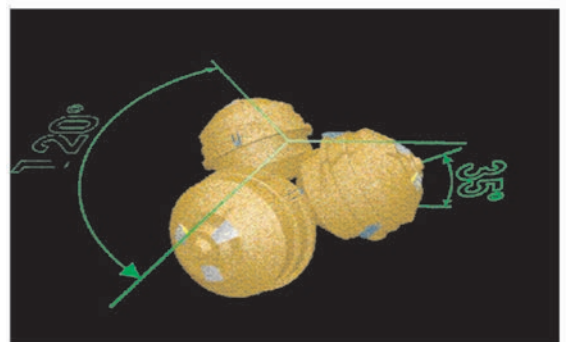


图 3 全张量重力梯度仪 (FTG)

安装在由陀螺仪稳定的平台上,可以测量全部五个独立的重力梯度张量元素,称为全张量重力梯度仪。三个 GGI 的轴线相互垂直,每条轴线与铅垂线以同样的角度相交,从上往下看,三条轴线的投影相隔 120° (图 3)。

2.2 基于 MEMS 的重力梯度仪

基于 MEMS 的重力梯度仪采用的原理与 GGI 相似,也是采用基于差分加速度计的测量模式。不过这种重力梯度仪用一个单独的晶片构成,在这个晶片上集成了两个加速度计,每个加速度计有两个

梳状电容结构。由于加速度计是基于 MEMS 集成在一个单独的晶片上,因此与传统的加速度计相比具有更小的质量和体积。它的测量原理是利用长弹簧和小的附加质量,使得它可以实现较低水平的布朗噪声。放置在梳状驱动机构中的电容极板作为输出装置,其综合灵敏度为 $119 \text{ mE}/\sqrt{\text{Hz}}$ [16]。这种重力梯度仪以微小的体积和重量(小于 1 kg),或许会成为未来卫星重力梯度测量仪器的一个发展方向。其基本结构如图 4 所示。

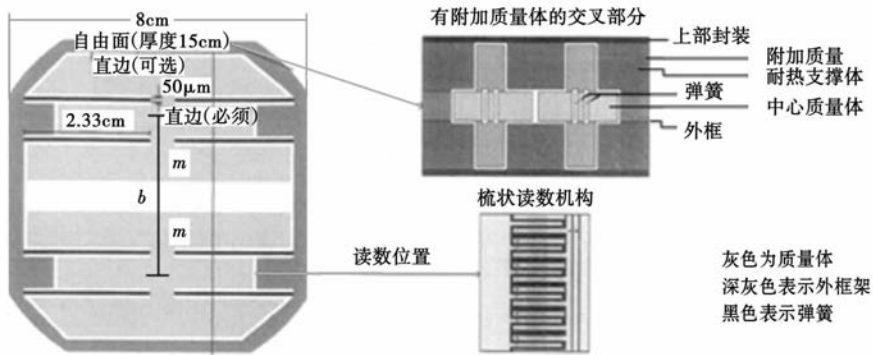


图 4 基于 MEMS 的重力梯度仪的测量机构

从图 4 可以看出,其测量结构是两个质量为 m (0.02 kg) 的检验质量,二者质心间的距离是 b (5 cm)。检验质量与框架之间用弹簧相连,选择弹性系数为 1 N/m 的轻质弹簧,以实现在敏感方向上弹性系数非常低,在重力作用方向又足够坚硬以支撑检验质量。该梯度仪的噪声水平可以用功率谱的形式表达为

$$S_T(f) = \Gamma_n^2 = \left(\frac{8}{mb} \right)^2 \left(\frac{2\pi k_B f T}{Q(f)} + \frac{(2\pi f_0)^2 \varepsilon_A(f)}{2\beta_N} \right).$$

其中: f_0 是差分模式机械谐振频率; $Q(f)$ 为谐振品质因数; $\varepsilon_A(f)$ 为传感器噪声能量; β_N 为传感器耦合因子; f 为工作频率; k_B 是万有引力常数; 上式中第一项是机械噪声,而第二项是读数系统噪声,两项均正比于温度 T 。堆积在电容极板上的寄生电荷会提供一个附加力的作用,限制梯度仪的精度。但是随着温度的降低,这些寄生电荷的活动性将大大减弱,一般情况下选择航天器上容易实现的温度 77 K 作为基于 MEMS 的重力梯度仪的工作温度。这样既不会额外增加冷却系统,又能保证测量精度。

探头的读数机构采用梳状电容结构,如图 5 所示。梳齿用高参杂硅制成,以获得非常小的梳齿间距。开始梳齿之间存在一个匹配电容。由于检验质量的运动,这些电容将不再平衡,检验质量的运动位移将会以电容差的形式输出。这个电容差被锁相放

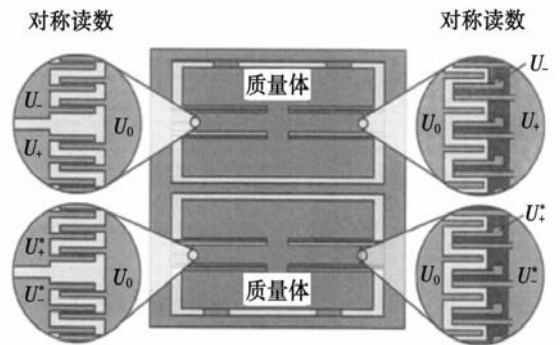


图 5 基于 MEMS 的重力梯度仪的读数机构

大器或者 $\Delta - \Sigma$ 调制器处理后输出到电子单元。电子单元在一块超大规模集成电路 (ASIC) 上实现。ASIC 提供所需的反馈以保证系统稳定在工作点附近。这个反馈力由相似的梳状电容结构提供。由于质量-弹簧系统的衰减很小,控制过程需要优化。电容控制极板同时也会产生一个等效的负弹簧,包含在所有的质量-弹簧系统的调谐中。

2.3 静电悬浮加速度计重力梯度仪

静电悬浮加速度计重力梯度仪就是将基于静电悬浮原理制成的加速度计放置在不同的矢量方向,通过差分原理测量该矢量方向上重力梯度张量。由于静电悬浮加速度计利用静电力平衡检验质量受到

的重力作用,将检验质量悬浮在超高真空腔内,其质心和行心的稳定性非常高,采用差分电容方式输出敏感质量的位移,最终获得极高的测量精度。由于其工作时承受的加速度较小,故其量程很小,但是更适合与太空微重力环境的梯度测量,因此,国际上与航空重力及重力梯度测量的实验室对这种高精度静电悬浮式重力梯度仪进行了深入的研究。美国的 MACEK 和 MESA 加速度计系统、欧空局(ESA)的 ASTRE 加速度系统^[17]、法国 ONERA 研制的 STAR 加速度系统^[18]以及 GRADIO 加速度系统^[19] 是国际上的成功研制实例。这些加速度计在研究大气阻力、太空太阳辐射压力、地球漫反射、电子推进器推理测量、高空地球重力场精密测量、空间重力梯度测量等军用和民用领域发挥了重要的作用^[20]。

图 6 是静电悬浮加速度计的示意。由于悬浮体(rotor)的位置信息是悬浮控制系统的闭环反馈信号,因此,对悬浮体沿三个正交轴的位置信息必须精确检测。图中利用差分电容法对此进行检测^[21]: ①悬浮体可检测的位移变化频率为 0 ~ 20 kHz; ②最小可检测位移变化为 0.01 μF, 对应电容的变化为 ΔC_{min} = 20 pF; 最大可检测位移变化为 ±2 μF, 对应电容的变化为 ΔC_{max} = 20 pF。

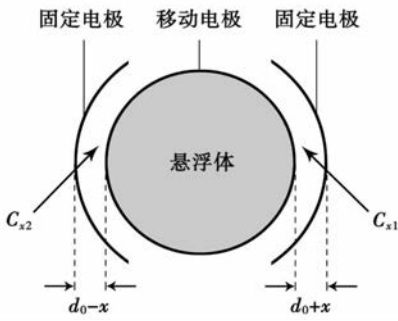


图 6 差分电容静电悬浮加速度计

2.4 超导重力梯度仪

放置重力梯度仪的旋转平台的线和角加速度与敏感轴与加速度计放置的不同心度 δn 和不平行度 δl 影响到最终测量的线加速度 a 和角加速度 α, 这种误差影响可以表达为

$$\begin{cases} \delta\Gamma_a = \frac{1}{l} \delta n \cdot a, \\ \delta\Gamma_\alpha = (\delta l \times n) \cdot \alpha. \end{cases} \quad (4)$$

而对于超导重力梯度仪,在低温条件下可以保证 δn 和 δl 的稳定性。这样就可以在第一次安装的时候测量得到误差系数,然后从梯度仪的输出中减去。通过使用这种“余项共模平衡”技术^[22],可以将 δn 和 δl 的效应压缩至最小。因此超导重力梯度仪

(SGG)自身具有噪声低、无标度因子漂移、机械稳定性好,以及高灵敏度、高分辨率、和宽动力范围等优点。国际上许多机构正积极开展超导重力梯度仪的研制工作,并取得了一定的成效。20 世纪 80 年代初, Maryland 大学研制了精度为 0.01 E 的单轴超导重力实验样机,同时,美国的 Standford 大学、澳大利亚的西奥大学和英国的 ARKeX 公司、加拿大 GEDEX 公司等研究机构都在开展超导重力梯度仪的研制工作^[23]。

超导重力梯度仪同样是基于差分加速度计的原理设计而成^[24],如图 7 所示。轴向分量重力梯度仪是通过两个线性加速度计的敏感轴沿分离方向成同一直线实现,而交叉分量重力梯度仪则是通过四个检验质量信号组合实现,或者通过两个同轴的旋转臂互相正交的角加速度计的信号差分实现。一个全张量梯度仪可以通过 3 个轴向分量重力梯度仪和 3 个交叉分量重力梯度仪的组合实现。

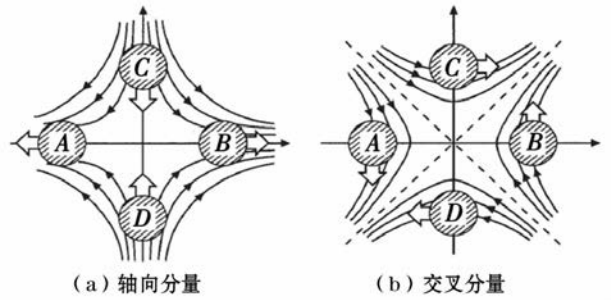


图 7 超导重力梯度仪的实现

图 8 是超导加速度计的实现原理示意图。加速度计由弱弹簧、超导检测质量、超导感应线圈和带有输入输出线圈的超导量子干涉仪(SQUID)放大器组成。在感应线圈和 SQUID 回路中保存有持续电流。当平台经过加速或者施加等效的重力信号时,检测质量相对于感应线圈将产生位移,并通过迈斯纳效应(完全抗磁性)调制其感应系数,这将引起线圈中量子磁通量发生变化,从而产生一个随时间变化的

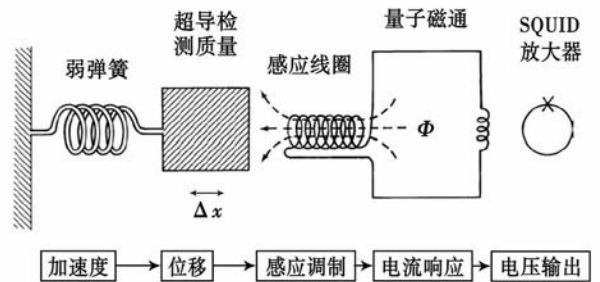


图 8 超导重力加速度计的设计原理示意

电流。SQUID 则将感应电流转换为电压信号输出^[25]。

将六个完全相同的超导加速度计安装在正六面体的六个面上,每相对面上的两个超导加速度计就形成一个梯度仪,其敏感轴正交于正六面体的表面。从而构成三轴超导重力梯度仪(三轴 SGG),如图 9

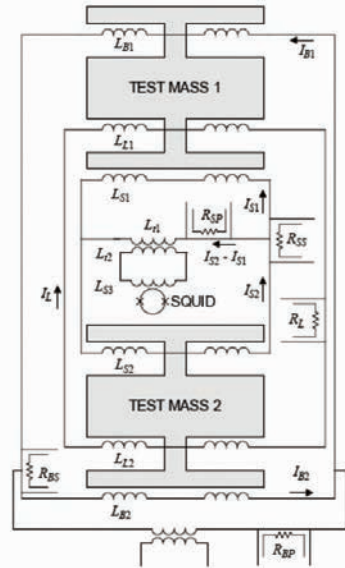


图 9 三轴 II 型超导重力梯度仪及单轴回路

所示。SGG 的固有梯度噪声的功率谱可以用

$$S_r(f) = \frac{8}{ml^2} \left[k_B T \frac{2\pi f_0}{Q(f)} + \frac{(2\pi f_0)^2}{2\beta\eta} E_A(f) \right] \quad (5)$$

表示。其中: m 、 $Q(f)$ 、 T 表示检测质量的重量(图 9 右 TEST MASS1 和 TEST MASS2)、品质因子和温度; l 为重力梯度仪基线长; k_B 是万有引力常数, β 是传



感器的机电能量耦合常数; η 为 SQUID 电路的能量耦合常数; $E_A(f)$ 为 SQUID 能量输入分辨率,单位是 J/Hz ; f 和 f_0 分别是工作频率和谐振频率。

实现超导的前提必须有低温保持系统,为了更适用于航空和航海测量,必须摆脱对液态氮的依赖。图 10 是置于支撑机构上的 SGG 恒低温保持系统的内部结构。通过建立在二级脉冲管冷却头上的一个闭循环冷却器制冷,从而实现了摆脱液态氮的前提下使得操作温度稳定在 3 K。这套装置中 SGG 被封装在一个真空罐中,并用一个自振周期为 5Hz 的

隔振架支撑,用以消除冷却头和压缩机的振动对测量结果的影响^[26]。

目前 Maryland 大学的单轴超导重力梯度仪实验样机的精度为 0.01 E,其灵敏度提高到 $10^{-3} E/\sqrt{Hz}$,全张量超导重力梯度仪室温条件下的灵敏度可达 $0.02 E/\sqrt{Hz}$ ^[20]。

3 绝对重力梯度测量仪

3.1 原子干涉绝对重力梯度仪

近 20 年来发展起来的原子干涉技术通过原子干涉感应外界力场的变化,通过感应加速度形成加速度计,将加速度计组合进而形成重力梯度仪,与卫星跟踪技术相结合则可以实现卫星重力梯度测量。由于原子干涉对重力场具有高的敏感性,因此可以获得比目前资料相比更高精度和更高分辨率的重力场信息^[27]。原子干涉重力梯度仪就是在相同的惯性参考坐标系下测量两相隔一定距离的使用拉曼激光脉冲参与作用的原子绝对重力仪构成^[28],其基本原理图如图 11 所示。

利用拉曼激光实现原子干涉的基本原理(图 12)是,利用多普勒冷却效应,将三对相互垂直的激光束再加上磁场方向相反的线圈产生磁场梯度构成磁光阱(MOT),将原子束约束在一个很小的范围

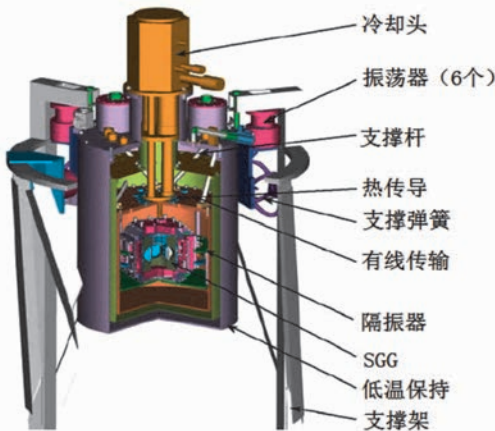


图 10 置于支撑结构上的恒温低温保持器

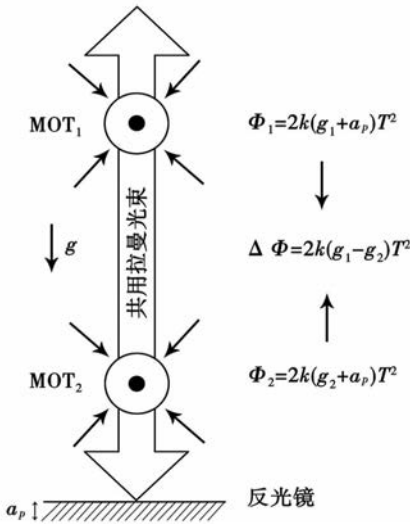


图 11 双磁光阱 (MOT1 和 MOT2) 构成重力梯度仪原理

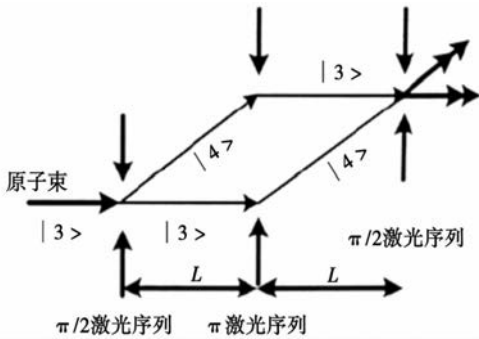


图 12 利用拉曼光束实现原子干涉原理

内。利用激光操控原子,使得原子波包发生分裂、偏转和重新汇合,从而实现类似与光学干涉仪的分光镜和反光镜作用,最终形成原子干涉图样。

整个过程类似于光学中的 Mach-Zehnder 干涉仪。发生跃迁的光子数可以用标准荧光谱法测定,上磁光阱 (MOT₁) 和下磁光阱 (MOT₂) 俘获的原子云共用一束拉曼光束,其相位分别用 Φ_1 和 Φ_2 表示。而跃迁概率 p 与干涉仪两臂间的相位差 $\Delta\Phi$ 相关^[29]

$$p_{F=4} = \frac{1}{2} [1 + C \cos(\Delta\Phi_{rot} + \Delta\Phi_{acc} + \Delta\Phi_{las})]$$

上式中, $\Delta\Phi_{rot}$ 、 $\Delta\Phi_{acc}$ 和 $\Delta\Phi_{las}$ 是与 $\Delta\Phi$ 相关的分量。其中: $\Delta\Phi_{acc} = k_{eff} a L^2 / V^2$ 是原子感测到与线性加速度相关的分量, $k_{eff} = k_1 - k_2 \approx 2k_{las}$ 代表拉曼激光束的有效波矢, a 为线性加速度,在重力场中, $a = g + a_p$ (a_p 为平台加速度), L 为拉曼激光对的间隔距离, V 为原子平均速度在水平方向的投影。

目前斯坦福大学研制的原子干涉绝对重力梯度仪在实验室环境下其加速度计的分辨力达到 $4 \times 10^{-9} \text{ g} / \sqrt{\text{Hz}}$,这也是目前世界上原子干涉加速度计

的最高分辨力,不过随着原子干涉技术的逐渐成熟和时间标准的进一步提高,其测量精度和分辨力会进一步提高。

3.2 激光干涉绝对重力梯度仪

激光干涉绝对重力梯度仪是在原来激光干涉绝对重力仪的基础上利用差分算法发展起来的。与激光干涉绝对重力仪相比, Micro-G 公司为美国宇航局 (NASA) 设计的激光干涉绝对重力梯度仪的特点是:①大动态范围;②无超长弹簧隔振系统;③地面倾斜属于共模误差;④地面震动也属于共模误差,对动态测量非常有利;⑤对近地面的孔洞敏感。

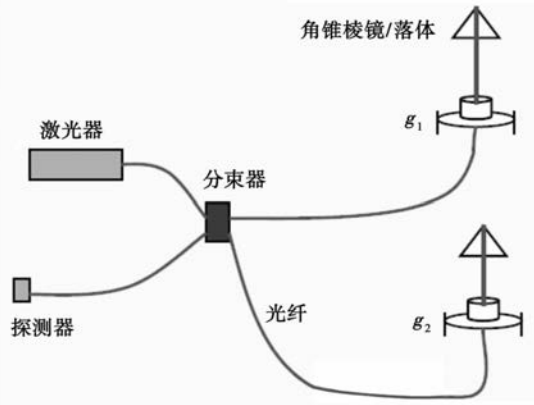


图 13 Micro-G 公式的激光干涉重力梯度仪光路

图 13 是其光路图,图 14 是样机外形及第一次测量的结果。激光器 (laser) 发射的激光经过分束器 (splitter) 得到两束激光,这两束激光除了能量是原始激光的一半外,其他性质完全相同。其中的一束通过光纤传到上干涉系统,另一束传至下干涉系统。这两束激光在上下两个干涉系统中分别形成测量光束和参考光束,最终各自形成干涉条纹,被探测器 (detector) 记录。计算出上下两个角锥棱镜 (corner cube) 的绝对重力值后差分后就可以得到垂直向重力加速度之差。由于两个角锥棱镜的测量状态,测量时的激光性质,采用的时钟以及所处的自然环境完全相同,可以认为是由两个角锥棱镜所处位置的地面重力垂直梯度造成,因此经过与两角锥棱镜的距离比后就可以得到测点环境的重力垂直梯度。目前该梯度仪还没有公开其精度和分辨力水平。

通过对 Micro-G 公司的激光干涉重力梯度仪的分析,我们发现:①每个落体具有自己独立的伺服控制机构,②两个真空筒内(图 14 左,投放室)的真空度不可能完全一样,③上下两个真空筒之间没有刚性连接,而是通过地面耦合。因此,这种结构下测到的两套干涉波形会有不同的振动、气压、伺服延迟的

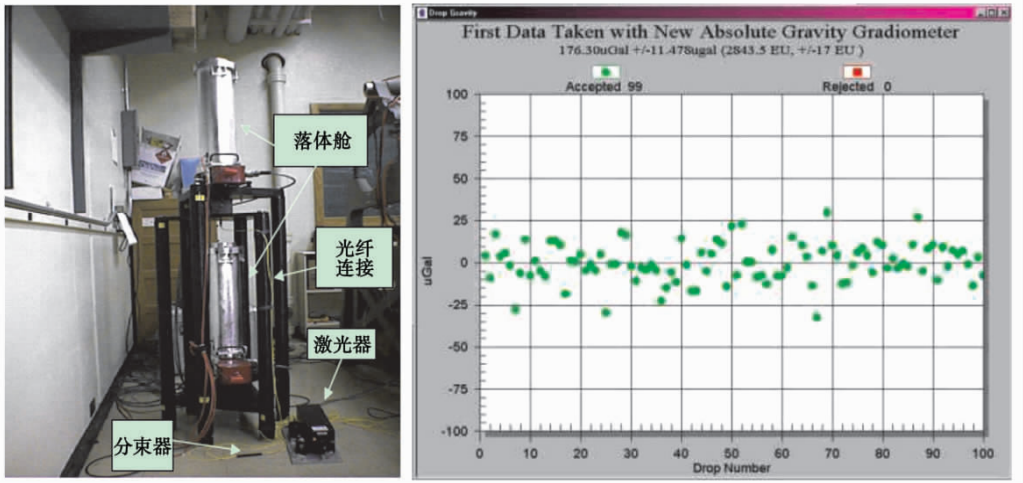


图 14 Micro-G 公司的激光干涉重力梯度仪外形及其第一次测量结果

影响,而且非共模误差经过差分后不会被消除,必然会引入到测量结果中来。因此,作者设计了一套绝对重力梯度测量光路^[30],如图 15 所示。

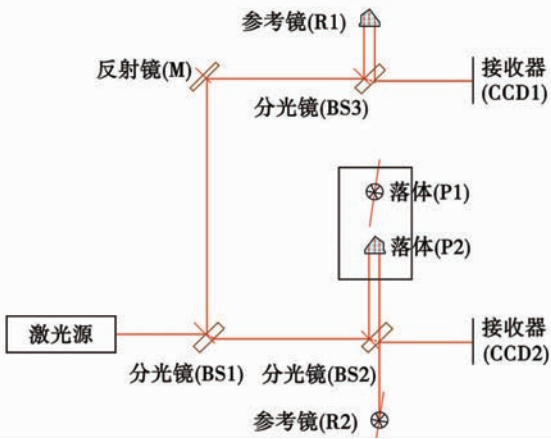


图 15 双干涉重力梯度光路设计

激光器发出一束光,经分光镜 BS1 后,一部分入射分光镜 BS2,另一部分经反射镜 M 入射分光镜 BS3。BS2 的反射光线经真空筒中的落体 P2 和参考镜 R2 反射后,与参考光束形成干涉,被接收器 CCD2 接收。BS3 的反射光线经真空筒中的落体 P1 和参考镜 R1 反射后,与参考光束形成干涉,被接收器 CCD1 接收。

这套装置中,激光源、BS1、BS2、BS3、M、R1、R2、CCD1 和 CCD2 均是刚性连接,落体 P1 和 P2 在真空筒中在同一套伺服电机控制系统的作用下做自由下落运动。因此,CCD1 和 CCD2 接收到的干涉条纹受到的震动、气压等环境干扰均保持相同,最终形成共模误差。同时测量的梯度值与两落体间距相关,可以保证分辨率的情况下大大缩小测量系统的体积。是一套切实可行的重力梯度测量方案。

4 结论

笔者从原理和精度上详细描述了目前世界上商用和实验室研制阶段的各种类型的重力梯度仪。其中基于 MEMS 加速度计的重力梯度仪以其质量轻和体积小成为了未来航空重力和重力梯度测量时有效减小载荷的一种选择。静电悬浮重力梯度仪由于其自身的结构特点是卫星重力梯度测量的一个选择。超导重力仪由于其工作在超低温下,整个系统的稳定性比其他的重力梯度仪要高。原子干涉重力梯度仪在地球上使用时,如果有效消除地面震动的干扰,其的分辨力可以达到激光干涉仪的 10^{17} 倍(测量线性加速度),是其他所有重力梯度仪所不能匹敌的。以激光干涉原理设计的绝对重力梯度仪由于其实现条件简单,操作方便,便于野外使用等优势,未来将是重力梯度仪的一个重要发展方向。

最后提出了笔者所设计的基于激光干涉的重力梯度测量光路,将可能造成的测量误差转换为共模误差,在计算结果中消除。同时考虑了测量系统体积问题,是一套切实可行的重力梯度测量方案,并在作者的研究工作中进行实践性研究。为实现高精度重力梯度测量仪器的自主研发提供技术思路。

参考文献:

- [1] 蔡体菁,周百令. 重力梯度仪的现状和前景[J]. 中国惯性技术学报,1999(1):1-6.
- [2] DiFrancesco D. Advances and challenges in the development and deployment of gravity gradiometer systems[C]// EGM 2007 International Workshop. Innovation in EM, Grav and Mag Methods; a new Perspective for exploration Capri, Italy: 2007,15-18.
- [3] 张昌达. 航空重力测量和航空重力梯度测量问题[J]. 地球物理学报, 2005,2(4):282-291.
- [4] 徐新禹,王正涛,邹贤才,等. GOCE 卫星重力梯度测量误差分

- 析及其模拟研究[J]. 大地测量与地球动力学, 2010, 30(2): 71 - 75.
- [5] Gerber M A. Gravity gradiometry[J]. *Astronautics and Aeronautics*, 1978, 16:18 - 26.
- [6] 彭益武, 赵立珍, 屈少波, 等. 二维簧片重力梯度仪的研制[J]. 物探与化探, 2006, 30(5): 401 - 409.
- [7] 涂良成, 李祝, 伍文杰, 等. 航空重力与重力梯度测量对惯性稳定平台的需求分析[J]. 中国惯性技术学报. 2012, 20(1): 18 - 23.
- [8] 涂良成, 刘金全, 王志伟, 等. 旋转加速度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] 方俊. 重力测量与地球形状学:上册[M]. 北京: 科学出版社, 1965.
- [10] 赵立珍, 彭益武, 周泽兵. 基于扭矩测量的二维簧片重力梯度仪的设计[J]. 大地测量与地球动力学, 2006, 26(2): 128 - 133.
- [11] 张昌达. 航空重力测量和航空重力梯度测量问题[J]. 工程地球物理学报, 2005, 2(4): 282 - 290.
- [12] Lee J B, Boggs D B, Downey M A, et al. First test survey results from the Falcon Helicopter-borne airborne gravity gradiometer system[C]//ASEG abstracts. 2006.
- [13] 刘凤鸣, 赵琳, 王建敏. 基于加速度计重力梯度仪分析与设计[J]. 地球物理学进展, 2009, 24(6): 2058 - 2062.
- [14] DiFrancesco D. Gravity gradiometry developments at lockheed martin[C]//EGS-AGU-EUG Joint Assembly. France; Nice, 2003: 6 - 11.
- [15] 张永明, 张贵宾, 盛军. 航空重力梯度测量的基本理论及应用[J]. 地质装备, 2006, 7(6): 23 - 27.
- [16] Flokstra J, Cuperus R, Wiegink R J, et al. A MEMS-based gravity gradiometer for future planetary missions[J]. *CRYOGENICS*. 2009, 49: 665 - 668.
- [17] Nati M, Bernard A, Foulon B, et al. Astre, a highly performant accelerometer for the low frequency range of the microgravity environment[C]// Proc 23th Symposium on Space Environmental Control Systems, Germany: Friedrichshafen, 1994.
- [18] Touboul P, Foulon B, Marie G, et al. Star, the accelerometer of the geodesic mission CHAMP[C]// 49th International Astronautical Congress, Australia; Melbourne, 1998.
- [19] Touboul P, Foulon B, Willemetot E, et al. Continuation of the GRADIO Accelerometer Development[R]. ONERA Final Report 62/6114 PY, ESA Contract, 1993.
- [20] 唐富荣, 薛大同. 静电悬浮式三轴加速度传感器的初步设计[J]. 传感器技术, 2001, 20(7): 30 - 32.
- [21] Han Fengtian, Gao Zhongyu, Wang Yongliang. A differential capacitance to voltage converter for electrostatic levitation applications[J]. *Sensors and Actuators A*. 2002, 99: 249 - 255.
- [22] Moody M V, Chan H A, Paik H J. Superconducting gravity gradiometer for sensitive gravity measurements II [J]. *Experiment Physical Review D*, 1987, 35: 3572 - 3597.
- [23] 张永明, 张贵宾. 超导重力梯度勘探系统[J]. 勘探地球物理进展, 2009, 23(2): 147 - 151.
- [24] Paik H J, Richard J P. Development of a sensitive superconducting gravity gradiometer for geological and navigational applications [M]. USA, University of Maryland Press, 1986, 207.
- [25] Paik H J, Richard J P. Principle of gravity gradiometry [EB/OL] (2006 - 11 - 06) [2007 - 02 - 01] http://www.physics.umd.edu/GRE/Gravity_Gradiometry.pdf.
- [26] Paik H J, Richard J P. Superconducting gravity gradiometers (SGGs) [EB/OL]. (2006 - 11 - 06) [2007 - 02 - 01] http://www.physics.umd.edu/GRE/NASA_SGG.pdf.
- [27] 翟振和, 吴宣梅. 基于原子干涉测量技术的卫星重力梯度测量[J]. 测绘通报, 2007, 2: 5 - 6, 36.
- [28] 秦永元, 游金川, 赵长山. 利用原子干涉实现高精度惯性测量[J]. 中国惯性技术学报, 2008, 16(2): 244 - 248.
- [29] Yver-Leduc F, Cheinet P, Fils J, et al. Reaching the quantum noise limit in a high-sensitivity cold-atom inertial sensor[J]. *J Opt B: Quantum Semiclass Opt*, 2003, 5: 136 - 142.
- [30] 吴琼, 滕云田, 郭有光. 激光干涉重力梯度仪设计方案[J]. 物探与化探, 35(2): 230 - 233.

THE RESEARCH SITUATION OF THE GRADIOMETER IN THE WORLD

WU Qiong¹, TENG Yun-tian¹, ZHANG Bing², ZHANG Tao³

(1. Institute of Geophysics, China Earthquake Administration, Beijing 100081, China; 2. Institute of Disaster Prevention, Yanjiao 065201, China; 3. National Earthquake Response Support Service, Beijing 100049, China)

Abstract: During the exploration of the underground medium structure, the gradiometer as well as its new deployment styles for various applications has become an important research topic of world concern. This paper describes various kinds of gradiometers based on torsion balance and difference algorithm and deals with the principle of each instrument. In addition, the absolute gradiometers based on the laser and atom interference are also described. In the last part of this paper, the design of the measurement light path is presented. The results obtained by the authors can serve as the technologic reference for developing gradiometer.

Key words: gradiometer; torsion balance; laser interference

作者简介: 吴琼(1980 -), 男, 河南长葛人, 博士, 主要从事地球探测仪器研究。