

高精度重力仪的测量原理与发展现状*

房丰洲, 顾春阳

(天津大学 精密测试技术及仪器国家重点实验室 天津市微纳制造技术工程中心 天津 300072)

摘要:重力仪拥有广阔的应用空间,是获取重力相关信息所使用的最直接和最重要的仪器之一,对涉及重力测量的行业起着无可替代的支撑作用。重力测量原理的完善与创新能够极大地提高相关重力测量仪器的测量能力。首先介绍了重力仪的基本概念与分类,然后根据重力测量原理的成熟程度和相关重力仪应用的广泛程度,选取了自由落体重力仪、原子干涉重力仪、弹簧重力仪和超导重力仪4种目前重力仪行业内最为典型的重力仪,分别介绍了它们的测量原理与发展现状,并重点总结了与重力仪测量精度有关的指标,最后对国内外重力仪的相关研究情况进行了总结和展望。

关键词:重力仪;重力测量;测量原理

中图分类号: TH762 **文献标识码:** A **国家标准学科分类代码:** 510.8040

Measurement principle and development status of high precision gravimeters

Fang Fengzhou, Gu Chunyang

(State Key Laboratory of Precision Measuring Technology and Instruments,
Centre of Micro/nano Manufacturing Technology, Tianjin University, Tianjin 300072, China)

Abstract: Gravimeters, which can obtain the information related to gravity efficiently, have potentially found wide applications in various fields. This kind of instrument plays an irreplaceable supporting role in many industries referring gravimetry. It has been proved by history that the improvement and innovation of the measurement principle employed in gravimeters have significantly increased the performance of such instruments. Firstly, this article introduces the basic concept and classification of gravimeters. Secondly, according to the maturity of measurement principle and the wideness of application field of relevant gravimeters, four typical kinds of gravimeters widely used in the world are selected in this review, including the free-falling body gravimeter, atomic interference gravimeter, spring type gravimeter and superconducting gravimeter. This review presents the measurement principle and development status of each type of gravimeter respectively, and emphasizingly summarizes the specifications related to measurement accuracy. Finally, the present status and future development of the related research on gravimeters both in China and abroad are discussed.

Keywords: gravimeter; gravimetry; measurement principle

0 引言

重力仪广泛应用于地球物理、资源勘探、惯性导航与定位、计量学和基础科学研究等^[1-6]各个方面。随着这些领域的迅速发展,人们所遇到的挑战也越来越艰巨,对重力测量的精度要求也日益提高,以资源勘探为例,对重力仪的精度要求已由最初的1 mGal提升至1 μ Gal(1 Gal =

10⁻² m/s²),以适应实际工程测量的需求。自400年前伽利略第一次尝试测量重力以来,重力测量仪器采用的原理经历了比萨斜塔抛球、摆式测量、弹簧测量、自由落体式重力测量到原子干涉测量、超导重力测量的发展过程。几百年来仪器的种类与型号不断改变,不变的是重力仪测量原理的创新与突破,以及每一次测量原理更新带来的测量精度的飞跃。本文在前人工作的基础上,综述了自由落体式重力仪、原子干涉重力仪、弹簧重力仪和

收稿日期:2017-02 Received Date: 2017-02

* 基金项目:国家重点基础研发计划项目(2016YFB1102200)、国家自然科学基金(51320105009、61635008)及国家引智计划“111”项目(B07014)资助

超导重力仪4种典型重力仪的基本测量原理及相应种类重力仪的发展现状。当今世界上各行各业中现役的重力仪所采用的原理远不止这4种,研发中的原理就超过十种^[7],但考虑到技术的成熟程度以及其广泛的代表性,本文将就这4种测量方式进行详述。

1 重力仪基本概念

重力仪是测量重力加速度或重力缓慢变化情况的仪器^[8]。它与同样可以感知重力加速度变化的加速度计和地震仪的主要区别在于,其能在更低的测量频率上保持更低的噪声水平,有时重力仪的测量频率甚至低于0.1 Hz。理想情况下,重力仪的仪器噪声水平应低于周围环境的地球物理噪声。按照重力仪的用途不同,可以将其分为绝对重力仪(absolute gravimeter, AG)和相对重力仪(relative gravimeter, RG)两类。

绝对重力仪是用于测定某一地点重力加速度值的仪器,其基本工作原理是根据物体的自由落体运动状态或对称落体运动状态来计算重力加速度值。前者是通过精密测量自由落体过程中的位移和时间间隔确定重力加速度值;后者则通过精确确定对称自由运动过程中的距离

和时间间隔确定重力加速度值。绝对重力仪之所以称之为“绝对”是因为重力仪中的涉及时间和长度的测量,其精度都追溯到了各自的基准^[9]。在高精度绝对重力仪中,测长、测时一般采用精度很高的激光测距系统和原子钟计时系统。

相对重力仪是测定相对重力加速度值的仪器,其测量的是某几个地点或某几个时间的重力加速度差值。因此相对重力仪是将重力加速度变化量与某一可测量建立联系,这一可测量可以是位移、频率、功率、电流等与加速度不同量纲的物理量。目前商用相对重力仪的测量原理较商用绝对重力仪要丰富,如零长弹簧、石英弹簧、低温超导悬浮、静电悬浮都是目前较为成熟的相对重力仪采用的测量原理。

表1所示为目前世界上技术较为成熟、应用最为广泛的高精度重力仪,其中倾斜金属零长弹簧原理与石英弹簧原理本质上都是质量—弹簧原理,在本文中作为一类进行介绍。采用表1中测量原理的重力仪其测量精度均能稳定保持在 μGal 量级,且它们的生产量超过过去20年间生产的重力仪总数的90%,涵盖了今天绝大多数正在使用的重力仪,因此采用这几种测量原理的重力仪在高精度重力仪行业具有很强的代表性。

表1 典型的高精度重力仪

Table 1 Typical high precision gravimeters

类型	种类	测量原理	代表型号	精度(量级)/ μGal	产量/台	产地
绝对重力仪	自由落体重力仪	自由落体	FG-5, JILA-g	1	150	美国
	原子干涉重力仪	原子干涉	暂无	0.1	较少	美国
相对重力仪	弹簧重力仪	倾斜金属零长弹簧	LCR	10	2 000	美国
		石英弹簧	CG-3, CG-5	1	250	加拿大
	超导重力仪	超导磁悬浮	GWR	0.001	30	美国

2 绝对重力仪

高精度绝对重力仪是精确获得全球不同位置重力加速度值的重要工具。同一个地方的重力加速度因为地质运动等原因引起的变化速率可以达到每年 $1 \mu\text{Gal}$,这样的变化可能会影响到诸多精密测量过程,例如质量标准的确定就受到当地绝对重力加速度的影响^[4]。因此对于重力加速度值的绝对测量与更新具有重要意义。国际上早已依托绝对重力仪建立了国际绝对重力基站网(IAGBN)用以测量和确定广阔区域内的地壳构造板块运动^[10]。在我国,为了获取重力场这一基础性资料,测绘部门先后建立了“国家重力基本网1985(85网)”和“国家重力基本网2000(2000网)”,目前正在建立新的“国家重力基本网2020(2020网)”。高精度绝对重力仪在

这些重力网的建立过程中发挥了无可替代的作用:建立绝对重力基准。同时,通过绝对重力仪在全国各绝对重力点上的流动测量,可以将基准传递到全国网、区域网和重力台站,形成对全国重力测量的控制^[11]。除此之外,高精度重力仪还可用于监测海平面的变化进而为全球气候变化提供数据支持、为卫星实验提供精准的地面数据^[12]、监测人类活动对地球含水层和深水水库的影响等^[13]。

经典的绝对重力仪测量原理主要包括自由落体运动、上抛法、上抛下落对称运动、冷原子干涉和测单摆周期法等。其中前4种测量原理属于弹道式绝对重力仪原理,目前世界上有大约200台便携式弹道绝对重力仪^[14]。近20年来,又有一些基于新测量原理的仪器加入到绝对重力仪家族中来,如凸轮式绝对重力仪和原子干涉绝对重力仪。本节将主要介绍自由落体式绝对重力

仪和原子干涉绝对重力仪。由于凸轮式绝对重力仪与自由落体式绝对重力仪测量原理相近,上抛法中的对称运动虽能抵消一部分外界因素产生的误差,但其仪器结构复杂,使应用受到一定限制,迄今为止只有意大利国家计量院研制的 IMGC-2 型绝对重力仪采用该原理^[15],单摆式绝对重力仪因为测量精度较低,并且测量原理非线性,较难从原理上提高测量精度,测量较为耗时(单点 1 ~ 6 h),测量精度受温度影响较大等原因已经渐渐退出历史舞台,采用以上 3 种测量原理的绝对重力仪本文不再做重点介绍。

2.1 自由落体式绝对重力仪

2.1.1 原理

物体只在重力作用下从静止开始下落的运动,叫做自由落体运动。因此做自由落体运动的物体其运动状态,如速度、位移等参数,与当地重力加速度值直接相关,在理想状态下,物体运动状态只取决于重力加速度和下落运动的时间,如图 1 所示。反之,当测量出物体在下落运动某一时刻或某段时间内的运动状态时,也可以据此解算出物体运动中的重力加速度值,其数学描述如下。

在一个均匀的重力场中,自由下落物体的下落方程表述为:

$$m \frac{d^2 z}{dt^2} = m \ddot{z} = mg \tag{1}$$

图 1 所示为物体做自由落体运动下落过程中位移与时间的对应关系,其中 z 轴指向重力加速度的方向。

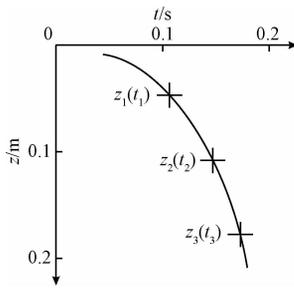


图 1 自由落体运动的时间-位移示意图

Fig. 1 The free-falling body motion time-displacement diagram

消去式(1)中的质量,可以整理出关于速度的方程:

$$\dot{z} = \dot{z}_0 + gt, \quad \dot{z}_0 = v_0 \tag{2}$$

对于下落物体的位移有:

$$z = z_0 + v_0 t + \frac{g}{2} t^2 \tag{3}$$

式中: z_0 和 v_0 分别为 $t = 0$ 时刻的初始位移和初始速度。对于高精度的重力测量,需要考虑地球重力场非一致性的特点,即在铅锤方向上,重力加速度 g 是随高度变化的。在自由落体式绝对重力仪实验测量过程中,可以将

重力考虑为是随下落高度线性变化的。因此要在式(1)中引入一个能反映重力在垂直方向变化的量,即垂直重力梯度 γ , 得到式(4)。

$$m \ddot{z} = m \left(g_0 + \frac{dg_z}{dz} z \right) = m(g_0 + \gamma z) \tag{4}$$

式中: g_0 是在初始位置 $z = 0$ 处的加速度值,对于常用的 FG5 和 JILA 型绝对重力仪这个初始位置指的是,自由下落运动刚开始时实验物块还处在静止状态时重心所在位置。忽略初始参数,并对式(4)进行二重积分可得到方程^[16]:

$$z = \frac{g_0}{\gamma} (\cosh \gamma^+ t - 1), z_0 = v_0 = 0 \tag{5}$$

考虑到初始参数 z_0 和 v_0 的影响,将式(5)中的变量 z 展开为幂级数,带入式(4),取变量 t 最高为 4 阶,并忽略高阶项,得到式(6)。

$$z(t) = z_0 \left(1 + \frac{1}{2} \gamma t^2 + \frac{1}{24} \gamma t^4 \right) + v_0 \left(t + \frac{1}{6} \gamma t^3 \right) + \frac{1}{2} g_0 \left(t^2 + \frac{1}{12} \gamma t^4 \right) \tag{6}$$

式(6)就是高精度自由落体式重力仪所采用的观测方程,用最小二乘法处理时间-位移数据对,并用式(6)进行拟合即可得到重力加速度 g 值。

高精度重力测量中,也要考虑光速是有限的这一情况,因此在最小二乘法处理数据之前,在时间的观测值 t' 中要引入一项 z/c :

$$t = t' + \frac{z}{c} \tag{7}$$

g_0 值受参考高度 ($z = 0$ 的位置) 选取的影响,参考高度取决于重力仪的设置与校准,对于高精度重力测量,为了保证测量精度,参考高度的误差需要控制在 ± 1 mm 以内。更多关于绝对重力仪中运动方程的理论分析可以参见文献[16-17]。

为了简化理论公式的应用过程,文献[18]中提出了一个简单的方程可以评价时间-位移数据对的测量精度,令式(3)中的 $z_0 = v_0 = 0$, 并经过微分便可得到式(8)。

$$\frac{dg}{g} = \frac{dz}{z} - 2 \frac{dt}{t} \tag{8}$$

由式(8)可知,如果要求相对精度 $dg/g = 10^{-9}$, 下落距离设为 0.2 m, 下落时间设为 0.2 s, 则对于时间-位移数据对的测量精度要求高达 0.2 nm 和 0.1 ns。由以上分析不难发现,高精度自由落体式绝对重力仪的技术难点在于精确测量物体的下落时间和位移。目前世界上应用广泛的高精度绝对重力仪采用的均是激光干涉测位移-原子钟定时组合测量系统。

2.1.2 发展现状

历史上,惠更斯研制出了第一架可以测定重力加速度的摆钟^[19]。时至今日,绝对重力仪所采用技术的先进

程度和达到的测量精度已经非前人所能比拟,尤其是近50年,自由落体式绝对重力仪发展迅速,主要技术日益成熟,测量精度不断提高。2004年,国际计量局宣布弹道自由落体测量重力加速度方法是官方采用的重力计量的主要方法。

国际上, Micro-g 公司生产的 FG-5 型绝对重力仪自1992年诞生以来已经逐渐成为绝对重力仪的行业标准,该型重力仪是在美国 JILA 实验室研发的 JILA-g 绝对重力仪基础上商品化改进而来。FG-5 重力仪相较 JILA-g 重力仪,采用了主动隔振平台,并严格控制仪器内部的温度漂移,优化了反射镜下落轨迹控制机构的设计,通过这些改进,FG5 重力仪具有了更高的测量精度和更强的可靠性。并且由于仪器集成了计算机系统,其数据处理性能得到很大增强,能够对自由落体过程中激光干涉系统测量得到的时间-位移数据进行实时处理,进而自动计算和存储重力加速度测量值,极大方便了用户的使用。

目前 FG-5 系列的最新型号 FG-5X 绝对重力仪通过改进自由落体装置的机械结构设计,减少了反射镜下落时驱动电机振动对位移测量系统的影响,使其在一个安静的台站进行观测,分辨力可以达到 $15 \mu\text{Gal}/\sqrt{\text{Hz}}$,即观测 3.75 min 可获得 $1 \mu\text{Gal}$ 的精度,若观测 6.25 h 精度可提高到 $0.1 \mu\text{Gal}$ ^[20]。不过 FG-5X 依然存在反射镜下落时驱动电机一直保持通电工作的问题,这样还是会引入微小的振动,对位移测量系统造成不利影响。2012年,清华大学团队设计制作的 T-1 型绝对重力仪采用了新颖的弹性下拉方法,结合精密机械设计和运动控制实现下落反射镜的自由落体运动,T-1 重力仪在自由落体运动期间驱动电机与机械传动装置保持停止不动,有效减少了重力测量中的振动干扰,目前 T-1 重力仪在 12 h 内重力测量值的标准差可优于 $1 \mu\text{Gal}$,测量结果的复现性优于 $3 \mu\text{Gal}$ ^[11]。

FG-5 型的姊妹型 A10 绝对重力仪是目前唯一可用于野外绝对重力测量的商用重力仪,其激光干涉测距系统、控制系统和软件几乎与 FG5 型相同,所不同的是 A10 型重力仪的设计适于各种气候条件,可以方便快捷的进行现场安装和测量,即使在恶劣环境中作业也可获得很高的准确度与精确度。A10 重力仪在安静环境下测量 10 min 精度可以达到 $10 \mu\text{Gal}$,测量 30 min 精度可以达到 $1 \mu\text{Gal}$ 。2005 年设计出来的 FGL 型绝对重力仪整合了 A10 型和 FG5 型绝对重力仪的优点,兼顾了 A10 的便捷小巧和 FG5 的性能优势。除了以上提到的型号,近 30 年来世界各国研究机构及公司还研发出很多款自由落体式绝对重力仪,如加州大学圣迭戈分校下属研究所研发的 IGPP 型绝对重力仪,法国航空部门研发的 GA60 型绝对重力仪、德国红宝基金会光学研究所研发的 MPG 型重力仪、俄罗斯科学院西伯利亚分院自动化和电子技术研究

所研制的 GABL 型重力仪等,相关信息可以参见参考文献[21-25]。

2.2 原子干涉型绝对重力仪

2.2.1 原理

在过去 20 年里,激光冷却和物质波原子干涉技术获得了长足的发展^[26],并由此诞生出了一种新的惯性力测量方法—原子干涉测量^[27]。

原子和中子等粒子既有粒子性也有波动性,利用原子、中子的波动性也可制成干涉仪,人们称之为原子干涉仪或物质波干涉仪。物质波干涉与光学干涉类似,需要相应的工具实现分束与合束,在原子干涉仪中这个工具就是双光子拉曼脉冲。通过 3 束拉曼脉冲可以实现原子波包的分束、偏转和合束,最终实现原子波的干涉。两条干涉路径的相位差包含了重力加速度的信息,通过提取干涉相位就可以得到重力加速度的精确值^[28]。以图 2 为例对原子干涉法测量重力加速度的原理进行简要介绍^[29-31]。

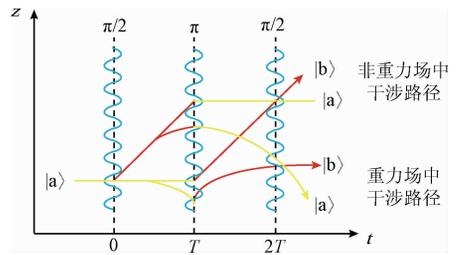


图2 重力场和无重力场中的原子干涉示意图
Fig. 2 Illustration of the principle of an atomic interferometer in a gravitational field and without gravitational field

图 2 所示的过程中, $|a\rangle$ 和 $|b\rangle$ 代表原子基态的两个长期水平,它们由光场耦合可以得到一个公共的中间态,这个中间态远离(相差 GHz 量级)最近的激发态(该激发态由 $|a\rangle$ 和 $|b\rangle$ 通过吸收单个光子产生)。3 束拉曼脉冲在空间和(或)时间上相互独立,形成一个 $\pi/2 \rightarrow \pi \rightarrow \pi/2$ 脉冲序列来实现原子波包的分束、偏转和合束。所谓 $\pi/2$ 脉冲是指,当光脉冲宽度和强度的乘积满足一定条件时,可使电子自旋倾倒 $\pi/2$ 角度。此乘积再加倍时,光脉冲可使电子自旋反向,即为 π 脉冲。这个脉冲序列的作用可以类比于激光干涉中的分光镜—反射镜—分光镜组合。在原子干涉过程中,第 1 个 $\pi/2$ 脉冲可以将原来处于基态的原子激发到 $|a\rangle$ 和 $|b\rangle$ 的相干叠加态,产生两束空间上分离的物质波,起到光学干涉中的分光镜的作用。接着, π 脉冲将所有原子的内态(如量子状态)和外态(如物质波的动量)翻转,相当于光学干涉中的反射镜。最后一个 $\pi/2$ 脉冲再将两束物质波在空间上重新混合并发生波包干涉。

处于 $|a\rangle$ 和 $|b\rangle$ 两种状态的原子数目的增减能够反映出物质波相位的变化,即物质波的相位的差值可以依据两态的原子相对数目来测定。在原子干涉重力仪中,常通过荧光检测的方法测量处于不同态的原子数目。

在原子干涉中, $|a\rangle$ 和 $|b\rangle$ 态的转换概率为:

$$P_{|a\rangle} = N_{|a\rangle} / (N_{|a\rangle} + N_{|b\rangle}) \quad (9)$$

式中: $N_{|a\rangle}$ 和 $N_{|b\rangle}$ 分别代表处于 $|a\rangle$ 和 $|b\rangle$ 两种状态的原子的数目。

$$P_{|a\rangle} = \frac{[1 + C \cos(\Delta\varphi_i + \Delta\varphi_p)]}{2} \quad i = 1, 2, 3 \quad (10)$$

式(10)中所示的概率取决于发生干涉的两束物质波的相对相位 $\Delta\varphi_p$ 和 3 束拉曼脉冲的相对相位 $\Delta\varphi_i$ 。 $\Delta\varphi_p$ 指的是广义上的相位,满足关系 $\Delta\varphi_p = \varphi_1 - 2\varphi_2 + \varphi_3$, 本质上是原子偶极与拉曼脉冲相互作用的结果。 $\Delta\varphi_i$ 只取决于原子与拉曼脉冲间的相对运动,在原子干涉仪中,这个相对运动是由于旋转和自由落体中惯性力作用造成的,所以有 $\Delta\varphi_i = \Delta\varphi_{rot} + \Delta\varphi_g$ 。

由旋转造成的相位变化取决于以下物理量:

$$\Delta\varphi_{rot} = 2E(\omega S) / \hbar c^2 \quad (11)$$

式中: S 为与物质波入射方向垂直的面积, ω 为旋转矢量, E 为原子的相对论质量并满足 $E = mc^2$, c 为光速, \hbar 为普朗克常量。值得一提的是,如果原子干涉仪中使用的是铷原子和频率为 ν 的可见光,在同样的覆盖面积下,式(11)中的相位变化要比光学干涉仪高 10^{10} 倍^[32]。这说明原子干涉原理在精密测量领域的巨大应用潜力。

在原子干涉过程中,重力加速度 g 造成的相位变化为:

$$\Delta\varphi_g = (\mathbf{k}_{eff} \mathbf{g}) T^2 \quad (12)$$

式中: \mathbf{k}_{eff} 是拉曼脉冲光束的有效波矢, T 是拉曼脉冲间的时间间隔。通过选择不同的干涉构型可以将原子干涉原理应用于重力仪或陀螺仪。当拉曼脉冲光束形成垂直驻波时,原子干涉仪可以测量重力加速度。在原子干涉重力仪中,垂直方向运动的原子通过激光冷却的原子云喷泉产生。通过激光冷却技术,原子云的温度可以低至 $1 \mu\text{K}$ 量级,使原子拥有很低的运动速度 (1 cm/s 量级),这样可以尽可能地增大时间间隔,提高重力仪的测量分辨力。

2.2.2 发展现状

原子干涉测量方法在新的惯性传感器中具有极大的潜力,事实上其测量精度已经媲美目前最精密的传统测量仪器^[31]。1999年,斯坦福大学物理系 Peters A 等人^[33]设计制作了基于激光冷却的原子喷泉干涉仪并对重力加速度进行了测量,他们仔细研究和校准了系统效应的影响,使测量的绝对不确定度达到了 $\Delta g/g = 3 \times 10^{-9}$ 。目前世界上有两种绝对重力仪能够提供 μGal 级的绝对重力加速度值测量,一种是前文介绍的以 FG-5 为代表的自

由落体式绝对重力仪,另一种就是原子干涉绝对重力仪。

原子干涉绝对重力仪测量频率为 $2 \sim 3 \text{ Hz}$, 单次测量时间为 200 ms 。观测 1 min 短时分辨力可以达到 $3 \mu\text{Gal}$, 若持续测量 48 h , 则长时间分辨力可以达到 $0.1 \mu\text{Gal}$ 。而目前自由落体式绝对重力仪测量频率为 0.1 Hz , 单侧测量时间同样为 200 ms , 因此自由落体式绝对重力仪达到同样精度需要更长时间: 分辨力达到 $4 \sim 5 \mu\text{Gal}$ 需要持续测量 15 min , 分辨力达到 $1 \mu\text{Gal}$ 需要 10 h ^[31]。

但原子干涉重力仪获得高精度的代价是相比传统的自由落体式重力仪从结构和原理上都要复杂得多。原子干涉重力仪在工作时需要制备大量的冷原子以供使用,目前制备冷原子常用的方法是使用原子激光冷却与俘获技术,但集成这部分装置会使原子干涉重力仪设计复杂、体积庞大,因而目前原子干涉重力仪还无法像 FG-5 一样投入实际工程应用,只停留在实验室使用阶段。不过随着原子冷却技术的发展以及高稳定性激光系统的应用,原子干涉重力仪正在走向小型化,例如磁光陷阱技术 (magneto optical trap, MOT) 和高稳定性光纤激光组合应用使制造紧凑型的原子干涉重力仪成为可能^[28]。

目前国际上研究原子干涉重力仪的团队除了 Peters A 等人^[33] 外还有法国 Gouët J. L. 等人^[34]、德国的 Schmidt M 等人^[35] 等,后两个小组在仪器小型化方面的研究较为领先。国内研究原子干涉重力仪的单位主要有浙江大学、华中科技大学、中国科学院武汉物理与数学研究所、中国计量科学研究院等。其中,华中科技大学研究团队于 2009 年实现了原子干涉重力测量,并于 2011 年对仪器进行了改进,增加了主动反用于压低拉曼光反射镜的振动噪声,使其能够在 100 s 积分时间内达到 $5.5 \mu\text{Gal}$ 的分辨力,2013 年报告的最新型号 AG2 重力仪,通过进一步降低主要噪声,改善探测系统的信噪比以及拉曼光相位噪声等,在 100 s 测量时间内,其测量分辨力能达到 $0.5 \mu\text{Gal}$ ^[36]。2014 年,浙江大学科研人员研制的原子重力仪分辨力在 200 s 测量时间内可以达到 $11 \mu\text{Gal}$ ^[28]。表 2 汇总了国内外相关研究团队报告的原子干涉重力测量精度相关指标。

表 2 国内外原子干涉重力测量精度指标

Table 2 Resolution and uncertainty of atomic Interference gravimeters in the world

研究小组	时间	分辨力/ ($\mu\text{Gal} \cdot \text{Hz}^{-1/2}$)	不确定度/ μGal
Peters A 等人 ^[33]	2008 年	8	3
Gouët J. L. 等人 ^[34]	2008 年	14	-
Schmidt M 等人 ^[35]	2011 年	20	10
华中科技大学	2013 年	4	-
浙江大学	2014 年	11	-

原子干涉重力仪拥有很好的短期稳定性和较高的测量频率,在较短时间内就能达到与自由落体式重力仪相同的精度,并且具有进一步提升测量精度的潜力。相信随着仪器小型化的发展,采用原子干涉原理进行绝对重力加速度测量将会是今后绝对重力仪发展的一个重要方向。

3 相对重力仪

在大地测量学、地球物理学、航空航天等诸多领域的实践中,人们发现测量重力加速度值在短时间内或一个区域内的变化情况往往能够获得很多甚至全部所需信息,例如地震的监测与预测、矿产资源勘探和航天器发射与导航等。在这种需要短时间大区域内精确测量重力加速度变化值的情况下,单纯依靠绝对重力仪进行测量,时间成本和经济成本都非常高昂,也无法达到满意的精度。相对重力仪的应用在很大程度上弥补了绝对重力仪在以上领域中的不足,相较绝对重力仪其具有测量频率高、实时性好、对重力变化敏感等特点。不过为了保证测量精度,相对重力仪所测数据需要经过绝对重力仪或绝对重力测量点(重力参考网)的校准。在实际测量中,需要兼顾精度与经济两个方面的因素,因此最有效的解决方法是将绝对重力仪与相对重力仪根据自身性能特点合理搭配,结合起来使用。相对重力仪除了围绕绝对重力仪测量点进行相对重力加速度的测量辅助绝对重力仪的测量工作,有效拓展绝对重力加速度值的适用范围之外,其在大地测量领域还发挥着不可替代的作用^[9]。

1) 能监控较大区域内的短时重力变化:相对重力仪便携性高,极大地缩短了前往不同测量点的运输时间,并且其测量速度快,甚至可以在运输工具上实现实时重力测量;

2) 增密和完善国家重力参考网;

3) 为完善区域大地水准面提供高密度的重力数据点。

相对重力仪自诞生以来所采用的测量原理众多,这得益于其相对测量的特性,使得重力的测量不再局限于依靠位移与时间的测量,可以拓展到其他更易精密测量的物理量上,前人也进行过很多尝试,比如利用光弹效应^[37]。不过限于技术的成熟程度,很多测量原理没有投入实际应用,直到今天大多数高精度相对重力仪无论通过何种形式,借助于弹簧或是其他悬浮技术,归根结底还是将重力的变化量转化为位移量。目前广泛使用的高精度相对重力仪所采用的原理主要有3种:倾斜零长弹簧原理、石英弹簧原理以及超导磁悬浮原理。这3种原理覆盖了目前绝大多数相对重力仪。截至1999年,世界上有超过1500台零长弹簧重力仪、超过1100台石英弹簧

重力仪和超过80台超导重力仪投入商业应用。这3种重力仪生产总数占比现役重力仪总数超过90%^[7]。

3.1 弹簧型相对重力仪

3.1.1 原理

相对重力仪所采用的众多测量原理中应用历史最悠久、最经典的莫过于质量—弹簧平衡测重原理。应用该原理进行测量的相对重力仪可以类比为生活中常见的弹簧秤,它们都是将重力的变化转变为了弹簧长度的变化。图3所示为最简单的一种质量-弹簧结构,弹簧垂直悬挂着质量已知的质量块,由胡克定律可知,当系统处于平衡状态时满足方程:

$$mg = k(l - l_0) \quad (13)$$

因此,当地重力加速度值的变化与弹簧的伸长量成正比:

$$\Delta g = \frac{k}{m} \Delta l \quad (14)$$

式中: m 为重块的质量, g 为当地的重力加速度, l 为悬挂重块时弹簧的长度, l_0 为未悬挂重块时弹簧的长度, k 为弹簧常数。在高精度重力测量中,校准因子 k/m 可通过与绝对重力测量点数据比对获得。



图3 垂直质量-弹簧平衡结构

Fig. 3 Vertical mass-spring balance structure

不过应用图3所示原理的相对重力仪,其重力测量精度受到弹簧变化长度测量分辨力的限制,例如要达到 $10 \mu\text{Gal}$ 的测量分辨力,需要测量弹簧长度变化的位移传感器分辨力至少要达到 10^{-9}m ^[7,9],这在弹簧相对重力仪出现的初期是很难稳定实现的。一些设计者认识到了这个问题,因此将弹簧设计的尽量长,以方便测量弹簧长度变化,如1932年哈特利(Hartley)、1938年格拉夫(Graf A)以垂直弹簧秤为基础研制出的杠杆弹簧扭秤,并由此诞生的德国阿斯卡利亚(Askania)GS型重力仪。但较长的弹簧无疑会降低仪器的便携性,削弱其工程实用性。为了改善弹簧重力仪精度受位移测量精度限制的问题,LoCaste & Romberg公司于20世纪30年代对垂直弹簧重力仪进行了改进,诞生了一种全新的弹簧测重原理—倾斜零长弹簧原理^[9]。

图4所示为最简单的弹簧杠杆结构。当重力与弹簧弹力产生的力矩相平衡时有:

$$mg \sin(\alpha + \delta) = k(l - l_0) b \frac{d}{l} \sin \alpha \quad (15)$$

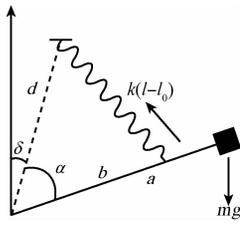


图4 弹簧杠杆平衡结构

Fig. 4 Lever spring balance structure

式(15)表明重力加速度 g 和 α 角之间的关系是非线性的。当满足下列条件时:

$$l_0 = 0 \text{ (即“零长弹簧”)}, \alpha + \delta = 90^\circ \quad (16)$$

式(15)可以化简为:

$$mga = kbdsin\alpha \quad (17)$$

设置角度为:

$$\alpha \rightarrow 90^\circ, \delta \rightarrow 0^\circ \quad (18)$$

这样设置能够很大程度上增加这个结构的机械灵敏度,即“助动性”。式(16)和(18)便是 LCR 弹簧重力仪的设计依据^[9]。在倾斜零长弹簧测重力系统中,达到优于 $10 \mu\text{Gal}$ 的测量分辨力对位移传感器的分辨力要求仅为几百纳米,比垂直弹簧系统降低了几个数量级。

由式(18)可知,倾斜零长弹簧重力仪要求重块和转杆在水平方向上成一条直线。但当重力仪所在地区重力加速度值发生变化时,重块会偏离水平位置,这时为了保证高精度的重力测量,需要进行“调零”操作。在倾斜弹簧重力仪诞生之初,该种仪器上装有一个连接转杆的刻度盘,人们通过旋转重力仪上的刻度盘使转杆回到水平方向完成“调零”,这一过程同时也是读取重力变化值的过程:此时此刻刻度盘上的示数与上一次示数之差即为两次测量中重力加速度的差值。随着数字化和自动化技术的发展,这一调零读数过程已被电反馈系统所替代。在现在的重力仪中,重块与三平板电容器的中间极板固定在一起,通过电容传感器获得重块位置并完成反馈调零。这种电反馈系统不但更加精准,而且可以有效避免由于机械结构缺陷带来的周期误差^[38-39]。

3.1.2 发展现状

1939年 LoCaste & Romberg 公司基于零长弹簧长周期垂直地震仪的概念研发出了使用倾斜零长弹簧原理进行测量的 LCR 高精度助动金属弹簧重力仪^[40-41],并于1945年实现了量产。虽然当时精度只能达到 $200 \mu\text{Gal}$,但其在工程现场环境下的重力监测方面有着业界公认的优秀表现,直到今天其多种改进型号仍在重力测量领域发挥着重要作用^[42],它也是迄今为止唯一一种服役超过70年的高精度相对重力仪。在 LCR 弹簧重力仪基础上发展而来的 gPhone 相对重力仪,增加了双层恒温结构,保证仪器不受外界温度变化的影响,同时对内层空间进

行真空处理,减少了外部气压变化对仪器的影响。gPhone 重力仪的测量分辨力优于 $1 \mu\text{Gal}$ ^[43],量程达到 7000 mGal ,能够满足全球范围内的重力测量需求。目前最新研发出的 Burris 重力仪为了在高强度的野外工作环境中保持高可靠性,仪器内部大部分的传感器部件都采用金属制成,并且基于微处理器自动读数,能实现数字化全自动测量,数据经滤波处理后连续读数精度能够达到 $0.1 \mu\text{Gal}$ 。可以预见,倾斜零长弹簧重力仪在今后还将继续发挥重要作用。

不过,虽然倾斜零长弹簧系统可以很有效的将重力变化转化为位移变化,解决了当时重力仪精度受到位移测量精度限制的问题,但这也引入了其他因素的影响,比如调零过程中灵敏度与弹簧倾斜的程度有关,导致线性度下降,影响到了精度的进一步提升。得益于上世纪80年代微小位移测量技术的迅速发展,垂直弹簧重力仪再次回到人们的视野。同一时期,先得利(Scintrex)公司基于垂直弹簧平衡原理开发出了一款全新的相对重力仪-石英弹簧重力仪。该种重力仪使用石英弹簧替代了金属弹簧,石英弹簧和金属弹簧的制作过程完全不同,因此石英弹簧有一些性能要优于金属弹簧,例如石英弹簧不像金属弹簧那样易产生记忆和疲劳。石英弹簧重力仪的代表型号为 CG-3、CG-5 型重力仪,它们采用非助动的垂直石英弹簧系统,具有世界范围的重力变化测量能力,并且没有采用机械调零装置,而是采用具有 0.2 nm 分辨力的基于电容传感器的电反馈系统^[44]。CG-5 型重力仪是基于 CG-3 型重力仪的最新改进型自动电子读数重力仪,它采用抗静电整体熔融石英传感器,骨架和活动部件之间没有连接点,因此几乎没有零长弹簧重力仪存在的掉格现象,其测量分辨力优于 $1 \mu\text{Gal}$,并且相较 LCR 重力仪其具有更短的测量时间,仅需 $1 \sim 2 \text{ min}$,这使其在高密度重力成像中发挥了重要作用,我国“十一五”期间国家投资建设的重大科技基础设施“中国大陆构造环境检测网络(陆态网)”中就大量使用了 CG-5 型重力仪进行测量^[45]。我国自主研发的 DZW 型相对重力仪自1986年诞生以来几经改进也已经能够达到的测量精度^[46],目前仍在我国地震测量系统中发挥作用。

3.2 超导重力仪

3.2.1 原理

一般的弹簧重力仪由于所采用的机械弹簧具有蠕变、迟滞、非线性等固有缺点,导致其长期稳定性较差,精度很难进一步提高。在20世纪60年代末,结合超导技术和磁悬浮技术最新的发展成果,美国科学家普 Prothero W. A. 等人^[47]率先提出了超导重力仪的设计,突破了弹簧重力仪测量精度的瓶颈。

超导重力仪本质上讲也是一款弹簧型重力仪,所不同的是其中机械弹簧被替换为了超导磁悬浮结构,即“虚

拟弹簧”设计,它利用超导体中电流极高的稳定性这一特点创造出了一个非常稳定的弹簧—重块系统。因为超导重力仪测重原理与弹簧重力仪并无本质区别,因此本节不再介绍其使用的测量原理,重点从设计结构上分析超导重力仪实现稳定高精度重力测量的原因。

超导重力仪具有极高的稳定性,这得益于其核心设计:超导磁悬浮结构。这一结构由超导低温产生装置、超导球、电容器和一对持续通电的线圈构成,如图5所示,这也是超导重力仪诞生之初时的设计^[8]。

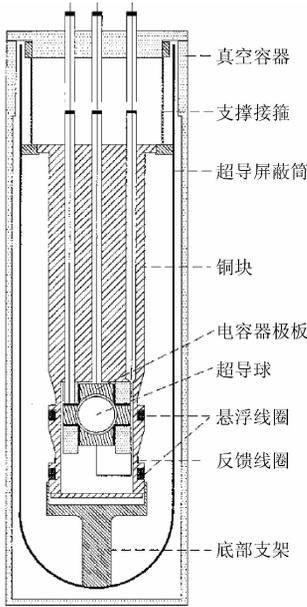


图5 超导重力仪低温超导悬浮结构原理

Fig.5 Diagram of the cryogenic superconducting suspension structure of superconducting gravimeter

由超导材料制成的超导球被悬浮在由一对超导线圈形成的梯度磁场中,其受到的悬浮力由线圈产生的非均匀磁场和超导球表面感应电流的相互作用产生。由于超导体的独特的零电阻特性和迈斯纳效应^[48],超导线圈长时间工作时电流损耗几乎为0。线圈上装有控制持续电流的装置,当线圈中形成稳定的电流后,线圈被超导分流器短路,只要低温超导结构持续提供低于临界温度低温环境,电流就可以被永久“困”在线圈中,这种产生持续闭合电流的方法也是超导技术中使用的标准方法^[49]。这一系列的设计为悬浮超导球提供了非常稳定的磁场环境,进而保证了其所受悬浮力是非常稳定的,这套悬浮装置对小球所起到的支撑作用也可以等效为一个无限长的弹簧。

在超导重力仪工作时,悬浮球的中心与上方线圈处于同一平面,将这一位置记为零点。图5中的两个线圈在垂直方向上形成亥姆霍兹结构,这样可以保证分别调整小球受到的悬浮力和悬浮力梯度时两者不互相影响,使小球既能够保持悬停在零点,也能对于微小的重力变

化产生足够大的位移。值得一提的是,两线圈的匝数比的选取对于超导球所受悬浮力的大小、梯度以及是否与位移成线性有很大影响^[50],GWR 仪器公司为了寻找到最合适的匝数比曾经制作了多台超导重力仪试验机进行实验。在早期的超导重力仪中,线圈所采用的导线是钛铌合金导线,它具有较高的临界电流但是存在磁通蠕动的问题,目前已被铌导线替代。

超导球采用中空的设计^[8],内部中心位置处加工有一电极板,与位于小球上方和下方的极板构成了一个三平板电容器,这一电容器与外部电路相连构成电容桥电路,当小球发生上下移动时,其位移会破坏电容桥电路的平衡,进而导致电路相关电参量发生变化,测量有关参量即可获取小球发生的位移,并进一步引导反馈系统完成超导球调零过程。超导球的位移反映的正是重力的变化情况。为了提高重力仪的线性动态测量范围以及对重力变化的响应速度,仪器中设计有反馈系统,起到的作用与弹簧重力仪中电反馈系统类似。超导重力仪中存在两种反馈方式。第1种来自于测位移时使用的电容桥电路。当电容桥平衡被破坏时,三极板电容器自身会产生作用于悬浮球的恢复力,满足下列关系:

$$F = \frac{1}{2} \epsilon_0 A V_{\text{drive}}^2 \left(\frac{1}{(d-x)^2} - \frac{1}{x^2} \right) \quad (24)$$

式中: A 是3块极板的总面积, d 是上下两块极板间的距离, x 是超导球中的极板与上极板间的距离, V_{drive} 是作用于上下两极板间的电压。当 $x \neq d/2$,既超导球中心与上方线圈处于同一平面时,恢复力为0。当 $x \neq d/2$ 时,电容器会在小球上形成指向零点的恢复力。第2种反馈方式称为磁反馈,这种方法是将超导球偏离零点的位移通过电容桥电路转化为相应大小的电流,输入位于下方超导线圈附近的反馈线圈(见图5)中进而产生相应大小的恢复力。这种反馈方式具有很好的线性特性,并且当超导球位于零点,即电容桥电路重新平衡时,磁反馈产生的恢复力同样为0,与电容器反馈方式保持一致。超导重力仪除了以上介绍的作为核心的超导悬浮结构外,还会设计有电磁屏蔽系统、仪器温度控制系统、倾斜振动控制系统和数据处理系统,其中每一部分都经过了十分精密的设计,超导重力仪之所以重力测量精度能有如此惊人的提高,得益于整个系统每一部分都进行了严格的精度控制。

3.2.2 发展现状

从超导重力仪第一次被提出之后的30年时间里,超导重力仪的基本设计都没有发生过较大变化,采用的均为图5所示的单传感器超导重力仪,这种设计存在抗干扰能力较差的不足。1990年,美国加州大学圣迭戈分校的科研人员对其进行了多项改进^[8],在原有的超导重力仪基础上又增加了一组超导球悬浮结构,发展出了双传感器超导重力仪^[51],有效的提高了仪器在倾斜时的灵敏

度,使超导重力仪的性能获得了很大提升,在此基础上诞生了目前的 GWR 仪器公司的商用型超导重力仪。

现在较新型的 SG 系列超导重力仪相比早期型号优化了制冷系统,其制冷温度可以达到 4 K,低于液氮的沸点,避免了仪器使用过程中液氮的挥发,仪器连续运行能力大为提高,同时液氮罐的体积也相应减小,方便仪器移动。SG 系列重力仪在 1 min 测量时间内,测量分辨力能够达到 10 ~ 40 nGal。

最新型号 iGav 超导重力仪重点优化了仪器内部的结构设计,将控制系统置于超导重力传感器的上方,从而有效减小了仪器的体积,并对电子器件进行了低能耗设计,仪器整体的便携性大幅提升,其在频率域内测量分辨力高达 1 nGal^[52],是目前最灵敏最稳定的便携式商用相对重力仪。当严格控制环境中影响重力测量的因素时,绝大部分超导重力仪一年时间内的最低漂移仅为 1 μ Gal 量级,测量分辨力高达 10^{-3} μ Gal。如此高的测量精度可以帮助地球物理学以及基础重力研究获得更多有价值的信息,比如在我国重力固体潮相关研究中 GWR 公司的 TT70 型超导重力仪就发挥了重要作用^[53]。

4 结论与展望

随着科学技术的进步,重力测量原理得到了极大丰富,尤其在最近几十年,在科技的推动下,重力测量原理逐渐由宏观拓展到微观,由接触支撑发展为悬浮,在此基础上研发出的重力仪也从最初精度较低的摆式重力仪发展到今天超高精度的原子干涉重力仪和超导重力仪。这些高精度的重力仪的不断应用,不但能够产生很大的经济价值,而且其获得的高精度重力数据会进一步有力推动科学的进步。虽然经过了近几十年的发展,重力仪行业已经基本形成良性发展,主流型号的重力仪测量精度已能够稳定保持在 μ Gal 量级,但也存在以下问题。

1) 成熟的高精度绝对重力仪测量原理目前还相对单一,世界上绝大部分绝对重力仪都为自由落体式绝对重力仪,这会导致该种仪器中存在的系统误差不易被察觉,所获取的重力测量数据无法被验证,这不利于重力仪相关研究的进一步发展。

2) 随着科学技术的进步,近些年重力仪行业也不断涌现出更先进的测量原理,但这些原理或重力仪样机大多停留在实验室阶段,始终没有给重力仪行业带来深远的变化。这是因为重力仪很强调工程实用性,而应用新的测量原理的重力仪,在诞生之初往往结构复杂、体型笨重,极大的限制了其应用。因此在研发新的测量原理和设计新的重力仪之初,科研人员就应当足够重视仪器的小型化、便携化问题,这样才能够使新研制出的重力仪拥有更广阔的应用前景。

目前,我国在高精度重力仪领域的研究,尤其是高精

度相对重力仪相关研究,较国际先进水平还存在较大差距。我国测绘、资源勘探、地震测量等实际工程领域使用的重力仪大都是进口产品,最精密的超导重力仪的相关研究在我国甚至处于空白状态,如果不及时追赶差距,形成良性发展循环,不但会在重力仪行业丧失主动权,还会影响到相关基础科学领域的进步。但同时,我们也应清醒的认识到,目前较为成熟的高精度重力仪的研制都是经过长期的探索与改进以及系统性的精度提高才成功的,因此一款高精度重力仪的研制与生产会是一个长期的系统性的工程,需要坚定的信念和持续的投入,我国重力仪行业的发展也必将会是一个任重而道远的过程。

参考文献

- [1] VERDUN J, BAYER R, KLINGELE E E, et al. Airborne gravity measurements over mountainous areas by using a LaCoste & Romberg air-sea gravity meter[J]. *Geophysics*, 2002, 67(3): 807-816.
- [2] 奔粤阳, 杨晓龙, 李倩, 等. 重力辅助阻尼捷联惯性导航系统[J]. *仪器仪表学报*, 2014, 35(7): 1482-1488.
BEN Y Y, YANG X L, LI Q, et al. Damping strapdown inertial navigation system aided by gravity[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2014, 35(7): 1482-1488.
- [3] 孙枫, 曹通. 基于重力信息的惯性系粗对准精度分析[J]. *仪器仪表学报*, 2011, 32(11): 2409-2415.
SUN F, CAO T. Accuracy analysis of coarse alignment based on gravity in inertial frame[J]. *Chinese Journal of Scientific Instrument*, 2011, 32(11): 2409-2415.
- [4] ROBINSON I A, KIBBLE B. An initial measurement of Planck's constant using the NPL Mark II watt balance[J]. *Metrologia*, 2007, 44(6): 427-440.
- [5] 刘民, 彭明, 刘碧野. 空间计量中时间单位和时间测量[J]. *电子测量与仪器学报*, 2016, 30(8): 1137-1143.
LIU M, PENG M, LIU B Y. Time unit and time measurement in space metrology [J]. *Journal of Electronic Measurement and Instrumentation*, 2016, 30(8): 1137-1143.
- [6] 赵蓓蕾, 周向阳. 航空遥感惯性稳定平台建模与控制系统设计[J]. *电子测量与仪器学报*, 2016, 30(10): 1543-1550.
ZHAO B L, ZHOU X Y. Control system modeling and design of aerial remote inertial stabilized platform[J]. *Journal of Electronic Measurement and Instrumentation*, 2016, 30(10): 1543-1550.
- [7] CHAPIN D. Gravity instruments: Past, present, future[J]. *The Leading Edge*, 1998, 17(1): 100-112.
- [8] GOODKIND J M. The superconducting gravimeter[J].

- Review of Scientific Instruments, 1999, 70 (11): 4131-4152.
- [9] TIMMEN L. Absolute and relative gravimetry [M]. Springer Berlin Heidelberg, 2010.
- [10] BOEDECKER G. IAGBN absolute gravity observations data processing standards station documentation [J]. Bulletin D'information-Bureau Gravimétrique International, 1988, 63: 51-56.
- [11] 胡华, 伍康, 申磊, 等. 新型高精度绝对重力仪[J]. 物理学报, 2012, 61(9): 542-549.
HU H, WU K, SHEN L, et al. A new high precision absolute gravimeter [J]. Acta Physica Sinica, 2012, 61(9): 542-549.
- [12] WAHR J, VELICOGNA I. What might GRACE contribute to studies of post glacial rebound[J]. Space Science Reviews, 2003, 108(1): 319-330.
- [13] PEARLMAN M, ALTAMIMI Z, BECK N, et al. GGOS working group on ground networks communications[C]. Dynamic Planet, 2007: 719-726.
- [14] VITUSHKIN L F. Absolute ballistic gravimeters [J]. Gyroscopy and Navigation, 2015, 6(4): 254-259.
- [15] D'AGOSTINO G, DESOGUS S, GERMAK A, et al. The new IMG-02 transportable absolute gravimeter; Measurement apparatus and applications in geophysics and volcanology [J]. Annals of Geophysics, 2008, 51(1): 39-49.
- [16] COOK A H. The absolute determination of the acceleration due to gravity [J]. Contemporary Physics, 1967, 1(3): 84-114.
- [17] NAGORNY V D. A new approach to absolute gravimeter analysis [J]. Metrologia, 1995, 32(3): 201-208.
- [18] TORGE W. Gravimetry and tectonics [J]. Geodesy and Geophysics, 1993, 115(1): 131-172.
- [19] SNELDERS H A. Christiaan Huygens and Newton's theory of gravitation [J]. Notes and Records of the Royal Society of London, 1989, 43(2): 209-222.
- [20] 白磊, 张为民, 邢乐林, 等. FG5x-246 与 FG5 绝对重力仪比对测量实验 [J]. 地理空间信息, 2016, 14(3): 104-106.
BAI L, ZHANG W M, XING L L, et al. Contrast test of FG5x-246 absolute gravimeter with FG5 [J]. Geospatial Information, 2016, 14(3): 104-106.
- [21] FALLER J, HAMMOND J. Laser-interferometer determination of the acceleration of gravity [J]. IEEE Journal of Quantum Electronics, 1969, 3(6): 358-358.
- [22] ALASIA F, CANNIZZO L, GERUTTI G, et al. Absolute gravity acceleration measurements: Experiences with a transportable gravimeter [J]. Metrologia, 1982, 18(4): 221-229.
- [23] ARNAUTOV G P, BOULANGER Y D, KALISH E N, et al. "Gabl", an absolute free-fall laser gravimeter [J]. Metrologia, 1983, 19(2): 49-55.
- [24] SAKUMA A. An industrialized absolute gravimeter: Type GA-60-A description of the instrument and its trial use in the French gravity net [J]. Bulletin d'Information du BGI, 1983, 53: 114-118.
- [25] YONGYUAN F, GUANGYUAN Z, DEXI L, et al. A transportable absolute gravimeter for determining the acceleration due to the earth's gravity [J]. Metrologia, 1982, 18(3): 139-143.
- [26] CHU S. The manipulation of neutral particles [J]. Uspekhi Fizicheskikh Nauk, 1999, 169(3): 274-291.
- [27] DUBETSKY B, KASEVICH M A. Atom interferometer as a selective sensor of rotation or gravity [J]. Physical Review A, 2006, 74(2): 154-154.
- [28] 吴彬. 高精度冷原子重力仪噪声与系统误差研究 [D]. 杭州: 浙江大学, 2014.
WU B. Research on the noise sources and the systematic errors of the high precision cold atom gravimeter [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2014.
- [29] PETERS A, CHUNG K Y, CHU S. High-precision gravity measurements using atom interferometry [J]. Metrologia, 2001, 38(1): 25-61.
- [30] 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.
ZHANG CH D. The application of atom interferometer to the measurement of gravitational acceleration [J]. Geophysical and Geochemical Exploration, 2000, 24(5): 321-326.
- [31] BARYSHEV V N, BLINOV I Y. Application of atomic interferometers in gravimetry [J]. Measurement Techniques, 2015, 57(12): 1333-1337.
- [32] MÜLLER T, GILOWSKI M, ZAISER M, et al. A compact dual atom interferometer gyroscope based on laser-cooled rubidium [J]. The European Physical Journal D, 2009, 53(3): 273-281.
- [33] PETERS A, CHUNG K Y, CHU S. Measurement of gravitational acceleration by dropping atoms [J]. Nature, 1999, 400(6747): 849-852.
- [34] GOUËT J L, MEHLSTÄUBLER T E, KIM J, et al. Limits to the sensitivity of a low noise compact atomic gravimeter [J]. Applied Physics B, 2008, 92(2): 133-144.
- [35] SCHMIDT M, SENGEL A, HAUTH M, et al. A mobile high-precision absolute gravimeter based on atom interferometry [J]. Gyroscopy and Navigation, 2011, 2(3): 170-177.
- [36] 孙步梁. 高分辨率原子干涉重力测量实验研究 [D]. 武汉: 华中科技大学, 2013.
SUN B L. Demonstration of sub-microGal resolution

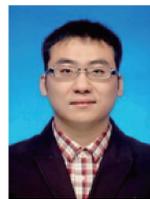
- gravity measurement by atom interferometer [D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2013.
- [37] LAUTZENHISER T V. Dipole mass laser-based gravity gradiometer. US Patent, 4215578[P]. 1980.
- [38] RÖDER R, SCHNÜLL M, WENZEL H G. Gravimetry with an electrostatic feedback system [J]. Bulletin D'information-Bureau Gravimétrie International, 1985, 57(1): 72-81.
- [39] RÖDER R, SCHNÜLL M, WENZEL H G. SRW feedback for LaCoste-Romberg gravimeters with extended range [J]. Bulletin D'information-Bureau Gravimétrie International, 1988, 62(1): 46-50.
- [40] LUCIEN J B, LACOSTE. A new type long period vertical seismograph [J]. Physics, 1934, 5(7): 178-180.
- [41] KRIEG L A. Mathematical modelling of the behavior of the lacoste and romberg 'G' gravimeter for use in gravity network adjustments and data analyses [R]. DTIC Document, 1981.
- [42] JENTZSCH G. The automated Burris gravity meter-A new instrument using an old principle [C]. Proceedings of the International Symposium on Terrestrial Gravimetry: Static and Mobile Measurements (TG-SMM2007), 2008: 21-28.
- [43] 张锐, 韦进, 刘子维, 等. 用 SGC053 超导重力仪观测资料对 gPh058 重力仪格值的精密测定 [J]. 大地测量与地球动力学, 2011, 31(5): 151-155.
ZHANG R, WEI J, LIU Z W, et al. Accurate determination of scale value of gPh058 gravimeter by use of observations with SGC053 superconducting gravimeter [J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 2011, 31(5): 151-155.
- [44] TIMMEN L, GITLEIN O. The capacity of the Scintrex Autograv CG-3M no. 4492 gravimeter for "absolute-scale" surveys [J]. Revista Brasileira De Cartografia, 2004, 2(2): 89-95.
- [45] 肖凡, 何志堂, 张宏伟, 等. CG-5 型相对重力仪测量精度分析 [J]. 测绘技术装备, 2011, 13(2): 6-8.
XIAO F, HE ZH T, ZHANG H W, et al. Measurement accuracy analysis of the CG-5 relative gravimeter [J]. Geomatics Technology and Equipment, 2011, 13(2): 6-8.
- [46] 李家明, 胡国庆, 姚植桂, 等. DZW-II 型微伽重力仪的改进设计 [J]. 大地测量与地球动力学, 2005, 25(4): 127-132.
LI J M, HU G Q, YAO ZH G, et al. Performing design of micro Gal gravimeter of type DZW-II [J]. Journal of Geodesy and Geodynamics, 2005, 25(4): 127-132.
- [47] PROTHERO W A, GOODKIND J M. A superconducting gravimeter [J]. Review of Scientific Instruments, 1968, 39(9): 1257-1262.
- [48] ROSEINNES A C, RHODERICK E H, GOLDMAN A M. Introduction to superconductivity [M]. McGraw-Hill, 1975.
- [49] GOODKIND J M, WARBURTON R. Superconductivity applied to gravimetry [J]. IEEE Transactions on Magnetics, 1975, MA11(2): 708-711.
- [50] PROTHERO W A. A cryogenic gravimeter [D]. Berkeley: University of California, 1967.
- [51] KRONER C, DIERKS O, NEUMEYER J, et al. Analysis of observations with dual sensor superconducting gravimeters [J]. Physics of the Earth and Planetary Interiors, 2005, 153(4): 210-219.
- [52] 贾剑钢, 栾威, 申文斌. iGrav-007 超导重力仪格值的精密测定 [J]. 武汉大学学报信息科学版, 2015, 40(10): 1366-1370.
JIA J G, LUAN W, SHEN W B. Accurate determination of the calibration factor of iGrav-007 superconducting gravimeter [J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2015, 40(10): 1366-1370.
- [53] 许厚泽, 孙和平. 我国重力固体潮实验研究进展 [J]. 地球科学进展, 1998, 13(5): 415-421.
HSU H T, SUN H P. Progress status of the experimental study on tidal gravity in China [J]. Advance in Earth Sciences, 1998, 13(5): 415-421.

作者简介



E-mail: fzfzang@tju.edu.cn

Fang Fengzhou (Corresponding author) received his Ph. D. degree in 1994 from Harbin Institute of Technology in 1994. Now he is a professor and Ph. D. supervisor in College of Precision Instrument and Opto-electronics Engineering, Tianjin University. His main research interests include ultra-precision surface machining, optical freeform surface machining, micro/nano machining and metrology.



顾春阳, 2015 年于哈尔滨工业大学获得学士学位, 现于天津大学攻读硕士学位, 主要研究方向为精密测量技术。

E-mail: guchunyang@tju.edu.cn

Gu Chunyang received his B. Sc. degree from Harbin Institute of Technology in 2015. Now, he is an M. Sc. student in Tianjin University. His main research field is precision measurement technology.