

海洋重力仪的现状和发展 *

PRESENT STATE AND DEVELOPMENT OF MARINE GRAVIMETERS

张遴梁

(国家海洋局第一海洋研究所 青岛 266061)

重力资料的质量高低及其应用范围在很大程度上取决于所使用的重力测量仪器设备。目前广泛使用的重力仪大都为相对重力仪,自 30 年代第一台海洋重力仪诞生以来,已有 70 a 历史,特别是近 20 a 来随着金属材料技术、电子技术、传感技术和计算机技术的高速发展,对重力仪的集成化、数字化、自动化方面有了重大的改进和发展,使它在轻型化、自动化方面有了很大的发展,更容易操作,更快速地取得测量资料。

本文根据最新的文献资料和对当前国际市场上海洋重力仪的发展情况进行介绍,并且介绍 LA-COSTE & ROMBERG 公司生产的航空-海洋重力仪。

1 海洋重力仪概况

人们为了测量重力的变化和进行重力的相对测量,在上世纪 30 年代已研究设计了几十种重力仪。几十年来比较流行和广泛应用的传感器主要有以下两种:(1)以

Lacoste & Romberg 发明的“零长弹簧”为基础设计的传感器,其代表产品为目前世界上广泛应用的 L & R 金属弹簧重力仪。(2)石英“零长弹簧”传感器,如加拿大 World-Wide 重力仪和美国的 Worden 重力仪。

我国在 80 年代由地质部生产的 ZSM 系列的重力仪属于石英“零长弹簧”。

L & R 公司从 1939 年起开始制造高精度重力仪,直到 1965 年才生产了世界上第一台带有动态稳定平台的重力仪。这样的重力仪第一次实现了在船上或飞机上进行高精度测量。迄今已有 100 多台这类重力仪在世界各地天空和海洋中连续不断地记录着重力资料,使地球物理工作者更快速更方便地完成世界各地(包括海洋)的重力测量。此后, L & R 公司依据其著名的享有专利的“零长弹簧”悬挂系统为核心的传感器和采用陀螺稳定基准平台不断改进重力仪传感器和垂直基准平台,同时,对系

统的电子线路也进行了不断改进使其得到不断完善。在 80 年代中期生产了体积较小,重量较轻,数字自动化较高的航空-海洋重力仪。1997 年起在航空-海洋重力仪方面具有 35 a 经验的 L & R 公司经过 9 a 的精心设计和制作,计划于 2001 年正式推出新一代动态重力仪——航空-海洋重力仪 II™,据称是当今世界上最为完美的重力仪之一。

另一家重力仪生产商为德国 Bodensee 公司,也是历史悠久的享有很高知名度的公司,它生产 KSS 系列带有稳定平台的重力仪。在 1975 年生产了海洋重力仪 KSS-5 型,它带有 GSS20 传感器和稳定的陀螺平台 KT20/KE20,它可以在航行的船只上进行连续的重力测量,到 1981 年共生产了 14 台,其中我

* 国家 863 计划资助项目 820-01-02-02-01 号。

收稿日期:2001-05-15;

修回日期:2001-06-11

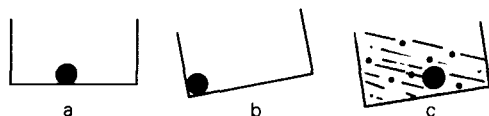


图1 小球在光滑表面上滚动,表示重力仪垂直轴倾斜对固有周期调节的影响
a,b,c 对应于无限长周期,用于航空-海洋重力仪,c 对应于小球浸在黏液体中

国进口了6台,这是八、九十年代我国海洋单位进行海洋勘探中进行重力测量的主要设备。直到1984年,Bodensee公司又研制出带有直线型传感器GSS-30和带有新的平台和一个微处理器控制电路的新一代重力仪KSS-30型重力仪,一共生产了17台。

1983年为了开发宇宙应用,市场上开发出了新一代高精度陀螺,Bodensee公司利用该商品又开发了一种新的小平台,且带有一个新的高精度加速度计,并用于对平台横向、纵向的控制,然后由直线型传感器GSS-30和微处理器控制电路组成高精度重力仪系统——KSS-31型,它没有交叉耦合效应,这是Bodensee公司的最完善的海洋重力仪,1999年我国地矿部海洋地质调查局购买了1台。

2 海洋重力仪传感器

航空-海洋重力仪传感器的基本原理是L.J.B.Lacoste博士在1930年发明的零长弹簧原理,采用特殊的弹簧和相应的尺寸相结合,开发出具有很长周期的垂直悬挂系统,可以证明该系统具有无限长周期。当周期为无限长,且弹簧所施加的力矩准确地与重力所施加的力矩相平衡时,重力仪杠杆不论处在什么位置都将保持静止状态。此时,重力的最微小变化将使杠杆移至一端或另一端。

图1表示简化的机械模型,以便说明。图1a中表面是光滑平面(对应于无限长周期情况)小球处

于随遇平衡状态,小球将停在任何点上。如果平面倾斜如图1b所示(对应于重力出现微小变化)小球将滚动较低一侧,在图1c中如小球浸在黏性液体中(相当于重力仪上加阻尼),小球将恒速滚到底部。

根据相似性原理,可以通过杠杆在强阻尼重力仪中的速度来测定重力的微小变化。在强阻尼条件下,运动速度变小,因而能使更快地达到稳态速度。L & R航空-海洋重力仪的时间常数一般小于1ms,这意味着传感器对重力变化的响应几乎是瞬时的。

下面简要说明一下Lacoste利用零长弹簧悬挂系统实施杠杆运动为无限长周期的原理和通过测量杠杆运动速度来测得重力读数的原理。

图2为零长弹簧几何尺寸示意图,其中OA=OB,AO严格保持垂直状态,即杠杆处于水平时,弹

簧处于45°。

弹簧偏离水平位置偏角 θ 所产生的恢复力矩为:

$$M_r = \frac{KaL_0}{\sqrt{2}} \left(\frac{\theta}{2} - \frac{3}{8}\theta^2 + \dots \right) \quad (1)$$

从式(1)可知,若 $L_0=0$,即系统恢复力矩为 $M_r=0$,因而系统处于自然平衡状态, $L_0=0$ 的条件是弹簧伸长量等于其长度,就是说,这类弹簧所表现的特性就好像未拉伸的弹簧长度为零一样,故称为零长弹簧。

只有当 A_0 处于垂直位置时其周期才准确地为无限大,这就是航空-海洋重力仪条件,否则不可能保证重力测量精度。

重力仪杠杆运动的状态可用下列微分方程来表述,该方程适用于所有简谐运动的系统。

$$g + z'' + bB'' + fB' + kB - cs = 0 \quad (2)$$

其中“'”和“''”分别表示对时间的一次、二次微分, B 是杠杆偏离其水平位置的度量,一般用 M 表示(B 和图2中的 θ 角是等量的)。而前3项是重力和加速度力作用重物的结果, z'' 是重力仪壳体的加速度,如果重力仪呈现线性状态,则 b, f, k, c 必须为常数。

对于微小的运动而言,系数 b

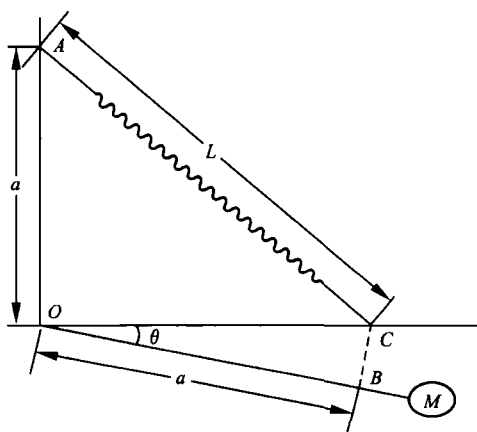


图2 零长弹簧悬挂系统原理
重块M装在运动杠杆OB上,杠杆可沿O点旋转,同时由一两端固定在A,B点上的零长弹簧支撑着

可假设为常数;系数 f 为阻尼所产生的; k 是弹簧恢复力, cs 是弹簧张力 S 所施加的单位质量上的垂直力, b 可视为弹簧的张力。通过测微计螺旋丝杆和连杆系统移动弹簧在重力仪机壳上固定点(图2中A点)即可调节 s_0 。

对于航空-海洋重力仪, $k=0$ (灵敏度无限大), 若 f 很大(强阻尼), b 也可忽略不计, 方程可简化为一阶微分方程:

$$g + z'' + fB' - cs = 0 \quad (3)$$

$$\text{其稳态解为 } g = S + KB' \quad (4)$$

式中的系数 K 将杠杆的速度单位转换成重力单位 (s^{-1}), 因此, 读取重力仪数据时, 仅需读取弹簧张力设置 S (正比于测微计丝杆的位置) 和杠杆的运动速度 B' 。其优点是无需知道杠杆的确切位置, 只需知道杠杆位置的变化, 并通过计算求得(求数值微分)。

由于通过上述方法测得的杠杆运动速度, 因此在测量过程中不需要进行准确的调零(即杠杆无需在水平位置下即可进行测量, 这是以前其他重力仪所无法比拟的)。

通过调节测微计丝杆位置可调节弹簧张力 S , 使杠杆位置大致恢复其读数线位置上(零位或水平位置), 以满足全世界范围内重力测量的需要, 测量范围为 $20\,000 \times 10^{-5} \text{ cm/s}^2$ 或 $12\,000 \times 10^{-5} \text{ cm/s}^2$ 。

通过调节 S 使杠杆维持在静止状态, 则式(4)中 $B' = 0, g = cs + 0$ 。这一状态称为“静态读数”, 用来测定系数 K 。在达到静态读数后, 使 S 改变一个固定值 Δs , 则读数变化 $\Delta g = c\Delta s - KB'$, 由于此时重力是不变化的, 即 $\Delta g = 0$, 因此,

$$KB' = c\Delta s, \text{ 从而确定了因子 } K = c\Delta s/B'。$$

3 L & R 公司新一代航空-海洋重力仪 IITM 性能及主要技术指标

新一代航空-海洋重力仪 IITM 在原有航空-海洋重力仪 3.1 型基础上采集了全新的数字电路和经过重大改进的重力仪传感器, 仪器全部装在一个机柜里, 且重量比旧型号减少 40%, 体积减小 48%。仪器采用著名的零长弹簧悬挂系统, 强阻尼, CPI 电路, 依靠数控系统控制光纤陀螺平台, 记录数据资料和监视系统, 自动控制系统保证仪器在无需人员操作下安全可靠运行等等。

性能及主要技术指标

动态精度: $< 0.25 \times 10^{-5} \text{ cm/s}^2$ 在实验室中, 水平加速度 $50\,000 \times 10^{-5} \text{ cm/s}^2$ 垂直加速度 $100\,000 \times 10^{-5} \text{ cm/s}^2$ 。重力仪传感器精度: $0.01 \times 10^{-5} \text{ cm/s}^2$
重力仪系统分辨率: $0.01 \times 10^{-5} \text{ cm/s}^2$
重力系统采样速率: $0.1 \sim 9\,999 \text{ Hz}$

平台范围: $\pm 25^\circ$ 纵向和横向
平台控制响应时间: 200 Hz
漂移: $3 \times 10^{-5} \text{ cm/(s}^2 \cdot \text{月)}$, 或更小, 2 a 后可忽略不计

系统动态范围: $\pm 200\,000 \times 10^{-5} \text{ cm/s}^2$

陀螺及寿命: 一个双轴光纤陀螺 FOGs, 寿命超过 $50\,000 \text{ h}$

工作温度: $0 \sim 40^\circ \text{C}$, 无需环境控制, 但系统在 30°C 附近工作最佳。

电源消耗: $300 \text{ W}, 115/230 \text{ VAC}$

保险期限: 仪器 1 a 保险期, FOGs 2 a 保险期

尺寸和重量: 尺寸 $64 \text{ cm} \times 56 \text{ cm} \times 74 \text{ cm}$, 重量 104 kg

新一代航空-海洋重力仪 IITM 在传感器方面还作了以下重大改进:

加热器改为在高频下对传感器均衡加温, 克服了老型号重力仪加温时低温噪声干扰。测量原理是测摆移运速率, 杠杆不需调零, 且无掉格问题。开摆, 锁摆采用全自动电路操作更为方便, 所有 A/D 转换板 (16 bit) 全都安装在紧靠传感器的地方减少了外部噪声干扰, 提高了测量精度, 仪器有一个内部微处理器来控制整个系统, 有两个串行接口——一个接口连接外部任选的 PC 机, 而另一个用于原始数据输出。

在陀螺平台方面采用了第 3 代高品位固态光纤陀螺 (FOGs), 比当前的电-机械陀螺有了重大改进, 其寿命超过 $50\,000 \text{ h}$, 且 FOGs 不需特殊加温和恒温即可进入最佳状态, 这也是以前电陀螺所无法比拟的。

人们最感兴趣的是系统配置了内置全自动的系统自检和故障诊断且具有网络遥控功能。一旦系统 II 型重力仪出现重大故障使用者无需一定送厂方诊断, 接入互联网, 实施遥控诊断故障, 排除故障, 为用户在使用上提供了更多的方便。

参考文献(略)

(本文编辑:李本川)