

56.18
GLF

113167

重力仪

A·格拉夫著
丘其宪译

中国工业出版社

重 力 仪

A·格 拉 夫 著

丘 其 宪 译

姚 敬 刚 校

中国工业出版社

本书叙述了二十世紀五十年代中期国外重力仪的理論、制造及其在大地測量与勘探方面实际应用的問題。作者对进行实际精度为0.01毫伽的野外測量工作提出了一些实用的建議。

本书适用于野外重力測量工作者、設計师、机械师以及从事重力仪研究和整理观测資料的人员。

А. ГРАФ
ГРАВИМЕТР

принцип измерения, конструкция,
техника измерения

Перевод с немецкого

П. Ф. Шокина

Геодезиздат

Москва • 1961

* * *
重 力 仪

丘其宪 译 姚敬刚 校

*

国家測繪总局測繪书刊編輯部編輯(北京三里河国家測繪总局)

中国工业出版社出版(北京德勝門外大街30号)

(北京市书刊出版事业許可証出字第110号)

中国工业出版社第四印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·各地新华书店經售

*

开本 $787 \times 1092\frac{1}{32}$ ·印张 $3\frac{1}{4}$ ·字数65,000

1964年4月北京第一版·1964年4月北京第一次印刷

印数0001—1,890·定价(科七)0.48元

*

統一书号: 15165·2989(測繪-107)

譯者的話

安东·格拉夫 (Anton Graf) 博士是一位著名的重力測量儀器設計和製造專家。二十多年來,阿斯卡尼亞(Askania)廠在他的領導下研究和製造金屬彈簧重力儀,譬如,供陸地測量用的有大型、小型及Gs-3—Gs-12型格拉夫重力儀,供海上測量用的有Gs-2型阿斯卡尼亞-格拉夫海船重力儀等。

本書闡述了各種類型重力儀的理論,研究了儀器的結構特點和讀數系統的原理。此外,還比較詳細地描述了Gs-9型,武登(Worden)和“北美”(“North American”)型重力儀。本書內容反映了五十年代中期國外重力測量儀器的发展水平,並為提高觀測精度對野外測量提出了許多有實際價值的建議。目前,我國還很少有过綜合闡述各種重力儀理論和指導野外測量工作的書籍。因此,本書對我國重力測量工作者和從事重力儀製造的設計人員具有一定的參考價值。全書敘述簡練明了,就是初學重力測量的讀者也容易看懂。

原書出版於1957年,因而書中沒有反映近年來世界重力測量的發展情況,如在潛水艇中和海船上測量用的海洋重力儀及在飛機上測量用的航空重力儀的製造研究和使用情況。

本書是根據1961年И.Ф.紹金的俄譯本譯成中文的。中譯本中改正了俄文版中的印刷和插圖說明編排上的錯誤。

丘其亮

1963.10.

目 录

譯者的話

緒言	1
第一章 重力仪概述	2
§ 1. 重力仪的綫性彈性系統	2
§ 2. 重力仪的助動彈性系統	6
§ 3. 重力仪的彈簧	29
§ 4. 讀数裝置	36
§ 5. 所測偏差的补偿。檢定的可能性	48
§ 6. 制動裝置。气壓补偿。絕热效应	52
§ 7. 傾斜灵敏度	55
§ 8. 微震動	57
§ 9. 溫度影响	58
§ 10. 磁性影响	64
§ 11. 阻尼	64
§ 12. 零点位移。突变	65
§ 13. 野外測量須知	72
第二章 几种重力仪的概述	76
§ 14. 阿斯卡尼亚Gs-9型重力仪	76
§ 15. 武登重力仪	84
§ 16. “北美”重力仪	88
参考文献	93
俄华術語对照表	95

緒 言

二十年前还是沿用动力法测量重力，那时完全采用摆仪；即用长度固定不变的摆测量時間的方法测定重力加速度，以厘米/秒²表示。采用重力仪亦即采用靜力法，則与前法相反，它是测量长度，此长度几乎与時間完全无关。

任何一种重力仪的测量原理，实质上均相同；因为所有的靜重力仪都可以看成是高度灵敏而极精密的弹簧秤。地球全部质量作用于固定在重力仪中的小块质量的引力为弹簧的弹性反作用力所平衡。重力变化引起弹簧变形。根据产生弹簧反作用力及测定弹簧长度变化的方法，重力仪可划分为不同的种类和型号。除了气体重力仪利用气体的弹力（气体的压力）作为反作用力以外，所有其他类型的重力仪都利用金属或石英的弹力作为反作用力，用金属或石英制成螺旋弹簧、带形弹簧、扭絲或窄的薄弹簧带。凡是与重力无关的力，原則上都可以用来补偿重力，譬如，靜电力、电磁力或导体电阻等等。但是，欲使上述参数保持必需的定值不因时而易（在数小时内为其值的 $10^{-7} \sim 10^{-8}$ ）是非常困难的，因而打消了这个方面的意图。

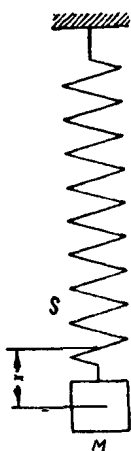
下面将簡述各种重力仪的灵敏系統及其测量装置，并詳述几种广泛应用的重力仪。

第一章 重力仪概述

§ 1. 重力仪的线性弹性系统

重力仪采用的弹性系统可以分为线性系统和助动系统两大类。本节讨论线性系统。

螺旋弹簧秤（格拉夫旧式结构的阿斯卡尼亚重力仪）



最简单的测量原理是利用众所熟知的垂直弹簧秤，螺旋弹簧 S 下端悬挂一重块 M （图 1）。设以 f 表示弹簧常数（弹簧伸长 1 厘米所需的力），则系统的平衡方程式为：

$$M \cdot g = f \cdot x, \quad (1)$$

式中 x —— 弹簧的伸长。

微分 (1) 式得：

$$\Delta x = x \cdot \frac{\Delta g}{g} \quad (2)$$

图 1 垂直弹簧重力仪的线性系统示意图

当重力变化 1 毫伽 $= 10^{-3}$ 厘米/秒² $\sim 10^{-6}g$ (g ——地球表面的重力加速度，约等于 981 厘米/秒²) 时，得 $\Delta x/\text{毫伽} = x \times 10^{-6}$ 。

从实际设想，弹簧伸长不应大于 10—20 厘米。因此，在最有利情况下得 $\Delta x/\text{毫伽} = 0.2$ 微米。

目前好的重力仪应具有 0.01 毫伽的测量精度，因此，必

須以 0.002 微米的精度測定彈簧長度的變化。

扭轉彈簧秤(格拉夫新式結構的阿斯卡尼亞 Gs-4—Gs-9 型重力儀) 重力儀的彈簧秤可以扭轉彈簧制成。在圖 2 中 S_1 和 S_2 為兩條方向相反的扭轉螺旋彈簧，它們夾持一個帶有重塊 M 的杠杆 L 。設 τ 為杠杆處於水平位置時彈簧的初始扭轉角， τ 為扭轉常數（相當於扭轉角變化單位角度時的旋轉力矩）。那末，杠杆相對於水平綫的傾斜角為 α 時，則平衡方程式可寫成：

$$MgL \cos \alpha = \tau(\tau + \alpha). \quad (3)$$

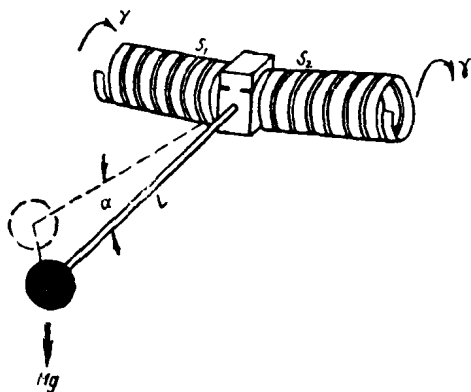


圖 2 水平扭轉螺旋彈簧重力儀的綫性系統示意圖

微分 (3) 式，並考慮到讀數時杠杆處於水平位置，即 $\alpha=0$ （重力的變化由附加裝置來抵償），則得：

$$\Delta \alpha = \tau \frac{\Delta g}{g}. \quad (4)$$

因此，再次得出角度變化與重力變化之間的綫性關係（正比關係）。假如彈簧的初始扭轉角 $\tau = 360^\circ \sim 1'' \cdot 3 \times 10^6$

角秒，則

$$\Delta\alpha = 1''.3 \text{ (每毫伽)} .$$

为了使重力测量精确到0.01毫伽， α 角的测量精度应达到 0.013 弧秒。

带形弹簧秤〔波利登 (Болиден) 重力仪〕 选择哪一种弹簧：扭转弹簧、挠曲弹簧、带形弹簧或扭丝，原理上没有什么不同。图 3 示出波利登重力仪带形弹簧的结构，对于这种结构，下式在很大范围内是正确的：

$$\Delta x = k \frac{\Delta g}{g} ,$$

式中 k ——随附加应力的增加而增大。

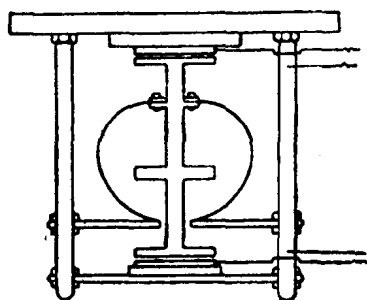


图 3 片状弹簧重力仪的线性系统示意图

螺旋弹簧的扭转弹簧秤〔哈尔特莱 (Hartley) 重力仪〕 这种系统 (图 4) 是某种程度上系统 1 和 2 的联合。其中主弹簧 S 象螺旋弹簧秤中一样应用；测量弹簧 F 用于补偿重力的变化。弹簧长度的变化借弹性 (丝状) 接头 G 变为杠杆 R 的角位移，后者可用光学装置来测量。

垂直螺旋弹簧的扭秤〔古尔夫-霍依特 (Gulf-Hoyt) 重力

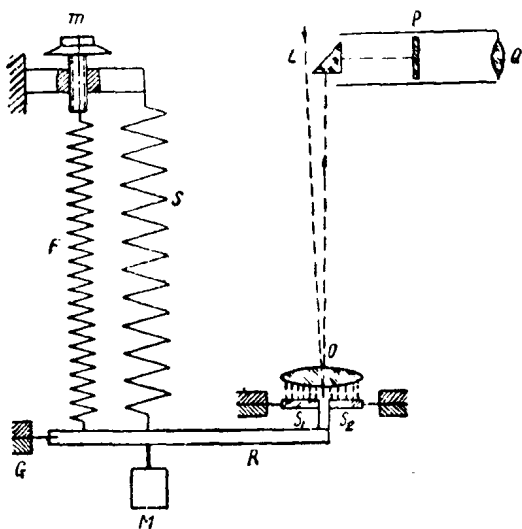


图 4 带有綫性弹性系統与光学記錄裝置的哈尔特萊重力儀的示意图

S —主彈簧； M —重塊； F —补偿（測量）彈簧； G —弹性（絲狀）接头； R —杠杆； L —光源发出的光綫； O —物鏡； S_1 和 S_2 —两个反射鏡； P —刻度片； Q —目鏡； m —測量螺絲

仪] 垂直螺旋彈簧由彈簧帶制成，当荷重变化时（也就是重力变化时），它不仅伸长，而且还产生扭轉。适当选择彈簧尺寸，重力仪可以达到这样高的灵敏度，彈簧扭轉 $10''$ 相当于重力变化 1 毫伽。彈簧的扭轉角与重力变化保持严格的比例关系（图 5）。

重力仪綫性弹性系統的灵敏度局限在光学系統的分辨本領范圍內。因此，有时采用靜电裝置代替光学裝置来記錄彈性系統的位置。后面就要談到这种靜电裝置。试图用机械方法，譬如，利用将彈簧或細絲預先扭轉几个整周 ($\tau = 20\pi =$

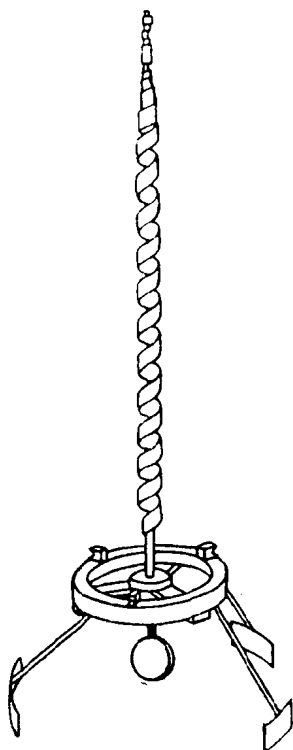


图 5 古尔夫-霍依特重力仪示意图

3600°) 增大弹性位移的方法, 来提高灵敏度, 在实践中遇到很大的困难。

§ 2. 重力仪的助弹性系统

如果只用光学方法测量扭转角, 则宜采用能提高弹性系统灵敏度的辅助方法, 即所谓助动法。

顧名思義，助動系統完全是處於不穩定狀態。助動重力儀彈性系統的穩定性實際上只隨靈敏度的提高而減小到一定限度。

分析天平可以作為應用助動系統法最簡單的一例。通常提高這種天平（圖 6）靈敏度的方法是依靠調節荷重 W 的高

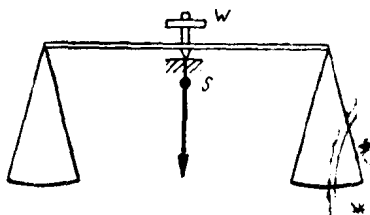


圖 6 用荷重調節靈敏度的天平的示意圖

度，使重心 S 逼近天平橫臂的旋轉軸。這種方法相當於重力儀彈簧的“軟化”，通常用增加彈簧圈數或增大彈簧直徑可達到此目的。但是有橫臂的分析天平，其靈敏度的提高很快就達到極限；因為刀口（稜形刀口）造成的橫臂位置不固定狀況，實際上不能消除。用顯微鏡觀察刀口時，可以看到刀口不是象理論要求那樣的純數學直綫，而呈某種鋸齒狀。因此，橫臂的擺動軸不是固定不變，而是在一定曲率半徑內變化。

如果在橫臂中央置一水准器（圖 7）代替調節荷重 W ，也可以提高天平的靈敏度。

橫臂傾斜時，水准器氣泡便移動，它產生一附加旋轉力矩使橫臂的傾斜增大。諸如此類提高靈敏度的方法稱為助動法。

所有助動系統有一共同特點：為彈簧尺寸很小時，系統的固有擺動周期很大（達幾秒鐘）。應用助動法，可以使該

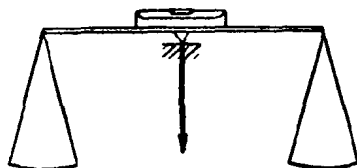


图 7 助动天平示意图

系統彈性旋轉力矩与重力矩的絕對量相平衡。当平衡被破坏时，上述两种旋轉力矩之差是一个合成力矩，往相反的方向作用。因为这一差值很小，結果使系統返回平衡位置的能量很小，系統固有摆动的周期便变得很大。

下面討論重力儀的几种最主要的助动灵敏系統。

助动彈性擺〔伊辛格 (Ising)〕 水平的石英絲 F (图 8) 与倒置摆 M 相連，摆 M 能繞 O 点轉动。重力作用引起的旋轉

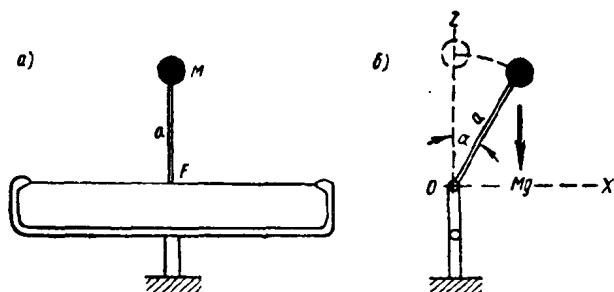


图 8 用助动石英摆的伊辛格重力仪示意图

a—正视图，b—側视图

力矩为：

$$M_g = Mga \sin \alpha,$$

式中 a —— 摆长。

这一旋轉力矩可用以 α 角为变数的正弦曲綫表示 (图 9)。石英扭絲反作用于摆的弹性力矩 2α , 可用与 α 角成正比的直綫 C 表示。若扭絲預先不加扭轉, 則直綫 C 通过 O 点; 若水平絲預先扭轉, 則此直綫与縱軸 ($\alpha=0$) 相交于 D 点 (图10)。其中, α_0 即为扭絲的初始扭轉角。 A 和 B 点相

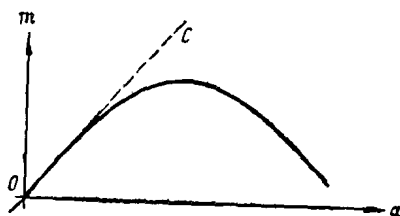


图 9 伊辛格重力仪中摆的重力旋轉力矩 (实綫) 和石英絲旋轉力矩 (虛綫)

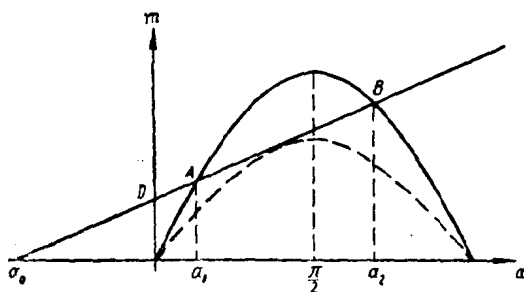


图 10 具有預应力情况的重力旋轉力矩和弹性旋轉力矩

应于摆的二个平衡位置, 其中之一 (B 点) 是稳定的, 因为性旋轉力矩随着 α 角而增大。因此, 当 (由于 g 的变化) 平衡破坏时, 摆可以恢复到起始位置。相反地, 在 A 点平衡位置是不稳定的, 因为随着 α 的增大, 重力旋轉力矩比扭絲

的彈性旋轉力矩增加得快，平衡被破壞時擺就翻倒了。若減少擺 M 的質量使直綫 AB 與正弦曲綫相切，則切點為完全助動（擺動周期無限大）。因為，當兩個 α 值無限接近時，彈性旋轉力矩與重力矩相等。對上述的擺有如下平衡方程式：

$$\Theta(\alpha - \alpha_0) = Mga \sin \alpha$$

或 $\Theta \alpha - Mga \sin \alpha = \Theta \alpha_0, \quad (5)$

式中 Θ ——石英絲扭轉常數（改變單位角度產生的旋轉力矩）；

α_0 ——扭絲的初始扭轉角。

將 (5) 式對 g 、 α 、 α_0 和 Θ 微分，則得：

$$\Delta \alpha = \frac{Mga \sin \alpha}{\Theta - Mga \cos \alpha} \cdot \frac{\Delta g}{g} + \frac{\Theta}{\Theta - Mga \cos \alpha} \cdot \Delta \alpha - \frac{\alpha - \alpha_0}{\Theta - Mga \cos \alpha} \Delta \Theta. \quad (6)$$

(6) 式的第二和第三項中用 (5) 式的關係代入，則：

$$\Delta \alpha = \frac{Mga \sin \alpha}{\Theta - Mga \cos \alpha} \left(\frac{\Delta g}{g} - \frac{\Delta \Theta}{\Theta} + \frac{\Delta \alpha_0}{\alpha - \alpha_0} \right). \quad (7)$$

由此可見，改變 Θ 與 g 的變化有同樣的作用。扭絲的扭轉常數變化（譬如，由於溫度變化引起）約 1×10^{-6} 時，引起的誤差可達 1 毫伽。第三項表示對傾斜的靈敏度。儀器繞彈性軸（即扭絲軸）傾斜時，初始扭轉角 α_0 改變的角度與儀器傾斜的角度相同。但是，必須注意不破壞觀測裝置本身的位置。當 Θ 和 α_0 為常數時：

$$\Delta \alpha = \frac{Mga \sin \alpha}{\Theta - Mga \cos \alpha} \cdot \frac{\Delta g}{g}. \quad (8)$$

當分母等於零時， $\Delta \alpha$ 為無限大，就達到完全助動，也

就是說，达到完全助动的条件为：

$$\Theta = Mga \cos \alpha. \quad (9)$$

实际上，用改变质量（焊小块石英）的方法，或者用改变力臂长度 a （旋进或旋出金属摆的调节螺丝；加长或缩短石英摆的摆杆）的方法，可把重力仪调节到所需的助动程度〔接近于条件(9)〕。

利用(5)式可将(8)式写成：

$$\Delta \alpha = \frac{\alpha - \alpha_0}{1 - (\alpha - \alpha_0) \operatorname{ctg} \alpha} \frac{\Delta g}{g}, \quad (10)$$

那末完全助动的条件为：

$$\alpha_0 = \alpha - \operatorname{tg} \alpha. \quad (11)$$

因11中示出了在 $0 \leq \alpha \leq 90^\circ$ 范围内这种关系的图形。

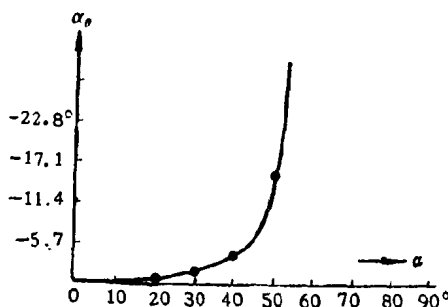


图 11 方程式 $\alpha_0 = \alpha - \operatorname{tg} \alpha$ 曲线图

由方程式(7)可知：助动摆对倾斜特别灵敏。因此必须采用辅助方法才使测量成为实际可能；譬如，有的采用二个相同的反射系统并同时读数〔齐申(Thyssen)法〕；另一辅助方法为：用一个摆在与垂直线对称的二个位置上测量〔伊辛格和诺伽(Norgaard)的方法〕。后一种情况中建议作

重复测量（将仪器恢复到起始位置），以便补偿在测量时的倾斜变化（假定倾斜变化与时间成比例）。

动重力仪〔霍尔魏克-列热（HolwechLejay）〕式的助动弹性摆 设上述的摆是在旋转轴处于水平位置时相对于平衡位置摆动，那末，扭丝或弹簧片〔如在霍尔魏克-列热仪器中那样（图12）〕的旋转力矩产生与否是毫无关系的。于是摆动方程式可写成：

$$J \frac{\Delta^2 \alpha}{\Delta t^2} + \theta(\alpha - \alpha_0) - Mga \sin \alpha = 0, \quad (12)$$

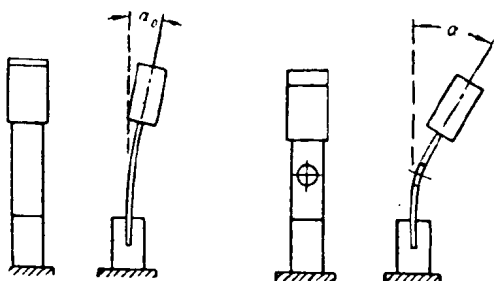


图 12 霍尔魏克-列热摆的原理图

因此，摆的摆动周期最大值（当 $\alpha_0 = 0$ 时）为：

$$T = 2\pi \sqrt{\frac{J}{\theta - Mga}}. \quad (13)$$

微分（13）式得重力仪灵敏度的表示式：

$$\frac{\Delta T}{T} = \frac{Mga}{2(\theta - Mga)} \frac{\Delta g}{g}, \quad (14)$$

即其灵敏度为物理摆灵敏度的 $\left(\frac{Mga}{\theta - Mga} \right)$ 倍。

理论上，这一表示灵敏度提高的系数可达到任意大；实