

# 重力与固体潮

第五讲 重力仪及测量方法

陈涛

地球物理学院  
中国石油大学（北京）



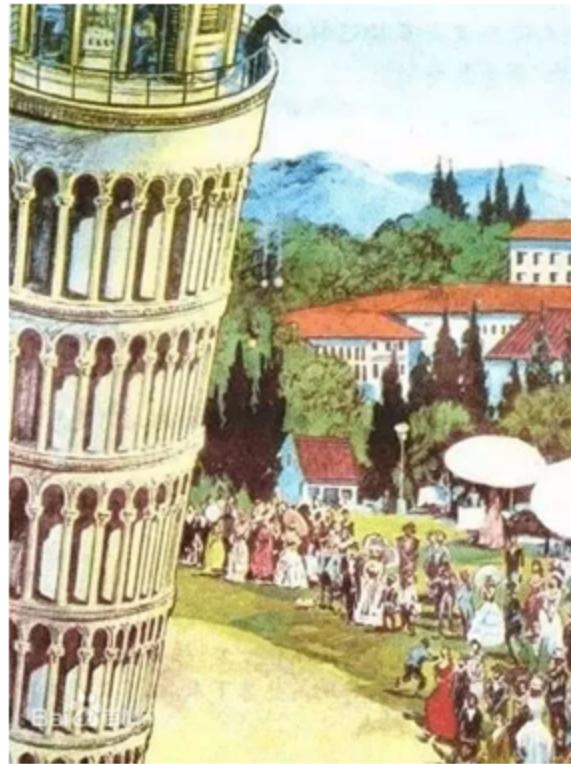
# 课前测试

- 沉积岩和火成岩谁的密度更大
  
- 研究岩矿石密度的意义



# 课前知识

- 重力加速度/重力场强度
- 你了解的重力仪器



# 课前知识



生命，为祖国  
澎湃，振兴中华，乃  
我辈之责！

——黄大年

[黄大年（吉林大学教授、博士生导师）\\_百度百科 \(baidu.com\)](#)

# 课前知识

## 喜报！中石大首个“全国高校黄大年式教师团队”获得批复

发布时间:2022-02-10 | 来源:人事处 | 浏览量: 2342

近日，教育部印发《关于公布第二批全国高校黄大年式教师团队的通知》（教师函〔2022〕2号），公布了第二批“全国高校黄大年式教师团队”入选名单，中石大李根生院士为负责人的“油气井工程教师团队”获批。

## 第三批全国高校黄大年式教师团队 创建示范活动入围名单

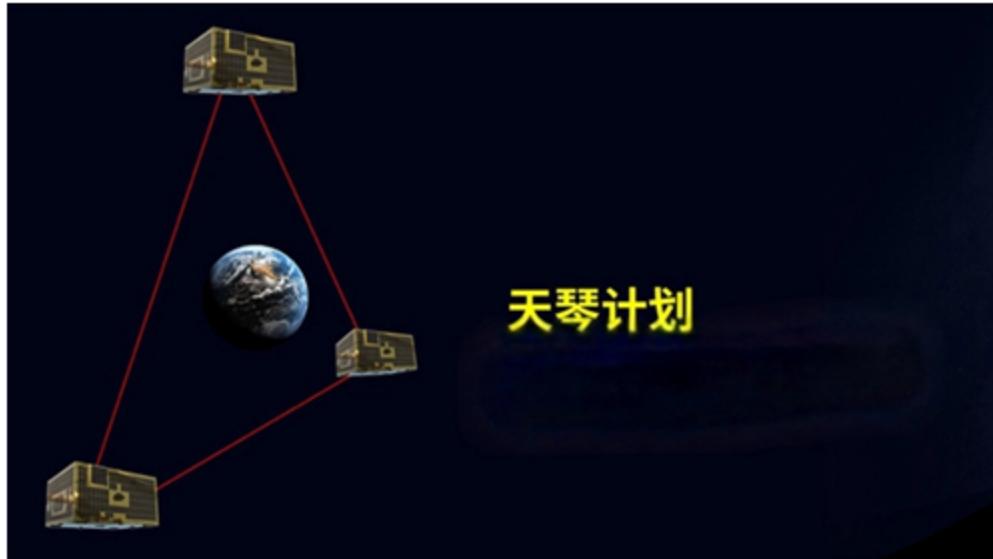
(所在高校按学校标识码排序)



序号	所在高校	团队名称	团队负责人
26	中国石油大学(北京)	重油高效清洁转化教师团队	徐春明

“重油高效清洁转化教师团队”依托化学工程与技术一级学科，牢固树立为党育人、为国育才使命，传承发扬“爱国奉献、三老四严”的石油精神，遵循“境界提升、业务精湛、全面育人”教育教学理念，建成国家级一流本科专业1个、国家级教学团队1个、国家级精品资源共享课1门、国家级一流本科课程1门，获北京市教学成果奖等5项，教师党支部入选“全国党建工作样板支部”。

# 课前知识





# 目 录

---

## 第一节 重力仪

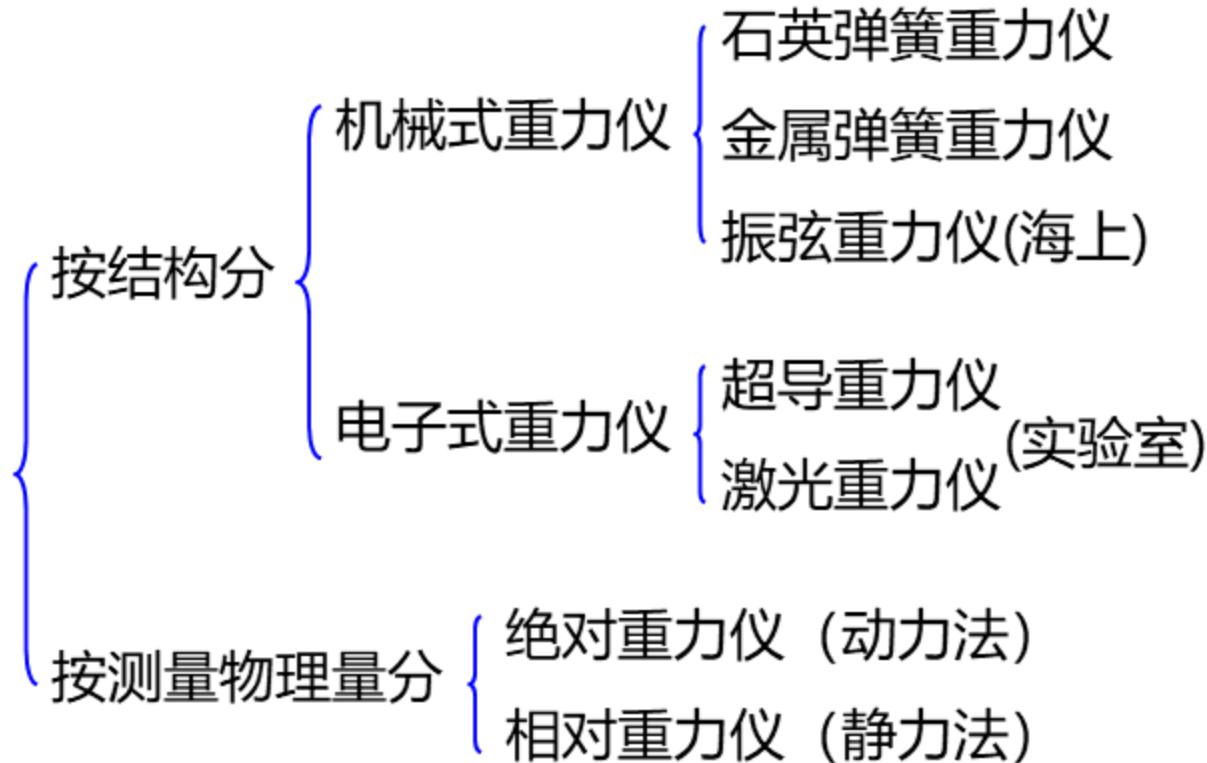


# 1. 重力仪

重力测量的物理量是**重力加速度**

- ✓ 根据测量的物理量的不同，重力测量可分为**动力法**和**静力法**两类
- ✓ **动力法**观测的是物体的**运动状态(时间与路径)**，用以测定重力的全值(**绝对重力值**)
- ✓ **静力法**是观测物体的**平衡状态**，用以确定两点间的重力差值(**相对重力值**)

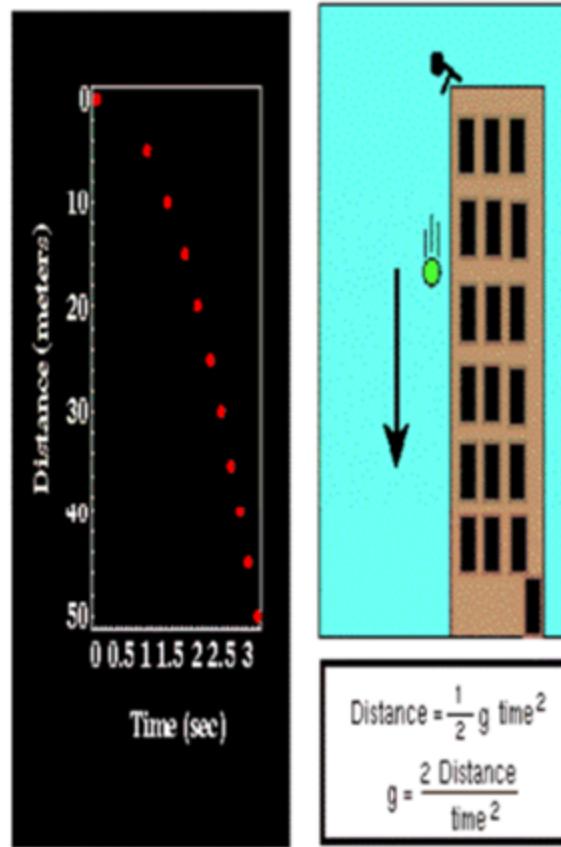
# 1. 重力仪



# 1. 重力仪

动力法

自由下落法原理



# 1. 重力仪

动力法

自由下落法原理

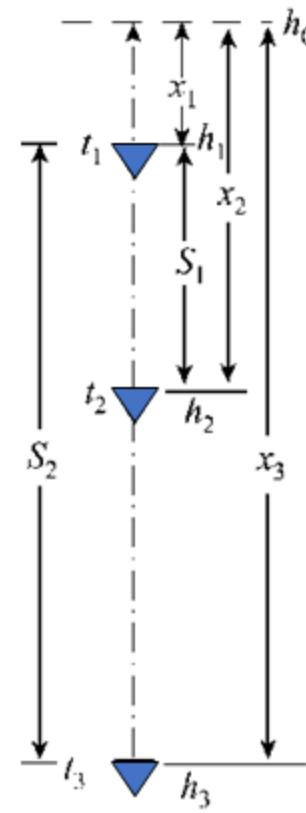
$$h = h_0 + v_0 t + \frac{1}{2} g t^2$$

$$x_1 = h_1 - h_0, x_2 = h_2 - h_0, x_3 = h_3 - h_0$$

$$x_1 = v_0 t_1 + \frac{1}{2} g t_1^2 \quad \left. \begin{array}{l} \\ \end{array} \right\}$$

$$x_2 = v_0 t_2 + \frac{1}{2} g t_2^2 \quad \left. \begin{array}{l} \\ \end{array} \right\}$$

$$x_3 = v_0 t_3 + \frac{1}{2} g t_3^2 \quad \left. \begin{array}{l} \\ \end{array} \right\}$$



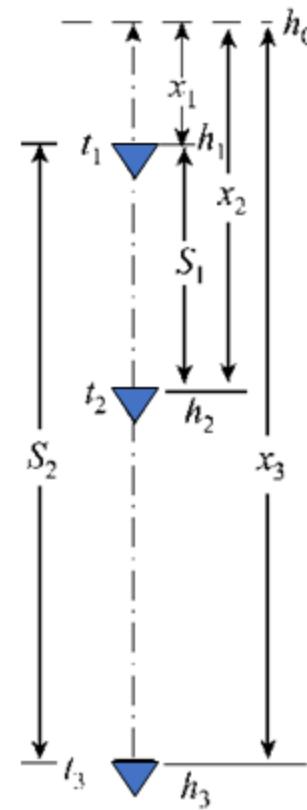
# 1. 重力仪

动力法

自由下落法原理

$$S_1 = x_2 - x_1, S_2 = x_3 - x_1, T_1 = t_2 - t_1, T_2 = t_3 - t_1$$

$$g = \frac{2 \left( \frac{S_2}{T_2} - \frac{S_1}{T_1} \right)}{T_2 - T_1}$$



# 1. 重力仪

动力法

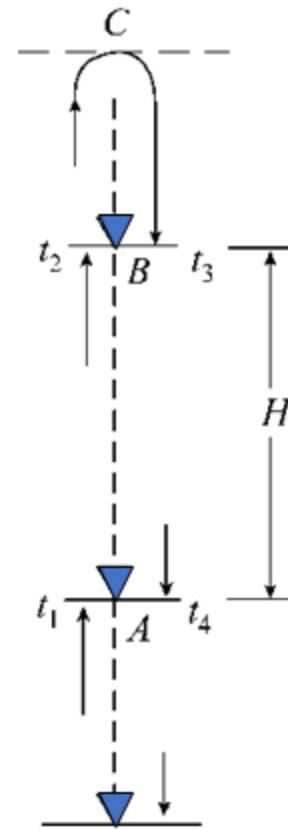
上抛法原理

能量守衡定律:  $\frac{1}{2}mv_1^2 = \frac{1}{2}mv_2^2 + mgH$

$$v_1 = 0.5g(t_4 - t_1), v_2 = 0.5g(t_3 - t_2)$$

$$g = \frac{8H}{(t_4 - t_1)^2 - (t_3 - t_2)^2}$$

$$g = \frac{4N\lambda}{(t_4 - t_1)^2 - (t_3 - t_2)^2}$$



# 1. 重力仪

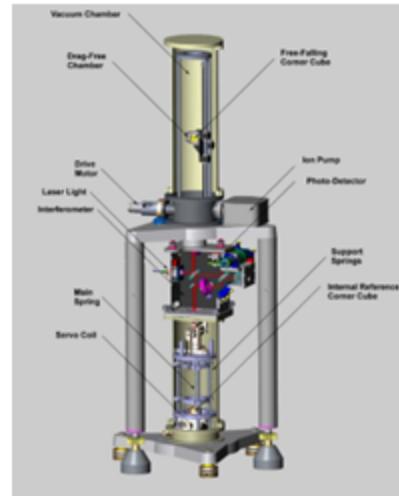
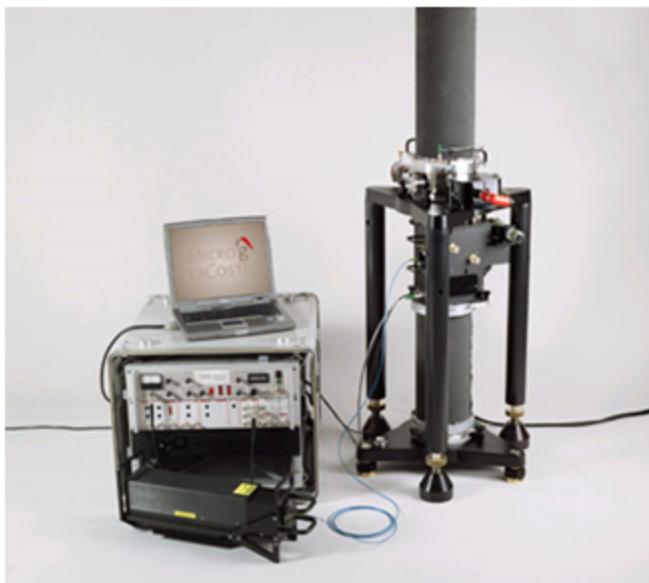
动力法

- 重力 $g$ 是随高度变化的，落体自由下落20 cm，重力值会相应地产生约 $60 \mu\text{Gal}$ 的变化
- 下落法测定 $g$ 值是自由落体质心起始位置以下 $Z=2S_2/7$ 处的数值， $S_2$ 为自由落体下落的全程。
- 上抛法测出的 $g$ 值是物体最高点以下 $Z=(H/2+H_B)/3$ 处的数值。其中 $H_B$ 为B点的高度。

# 1. 重力仪

动力法

## Micro-G FG5自由落体绝对重力仪



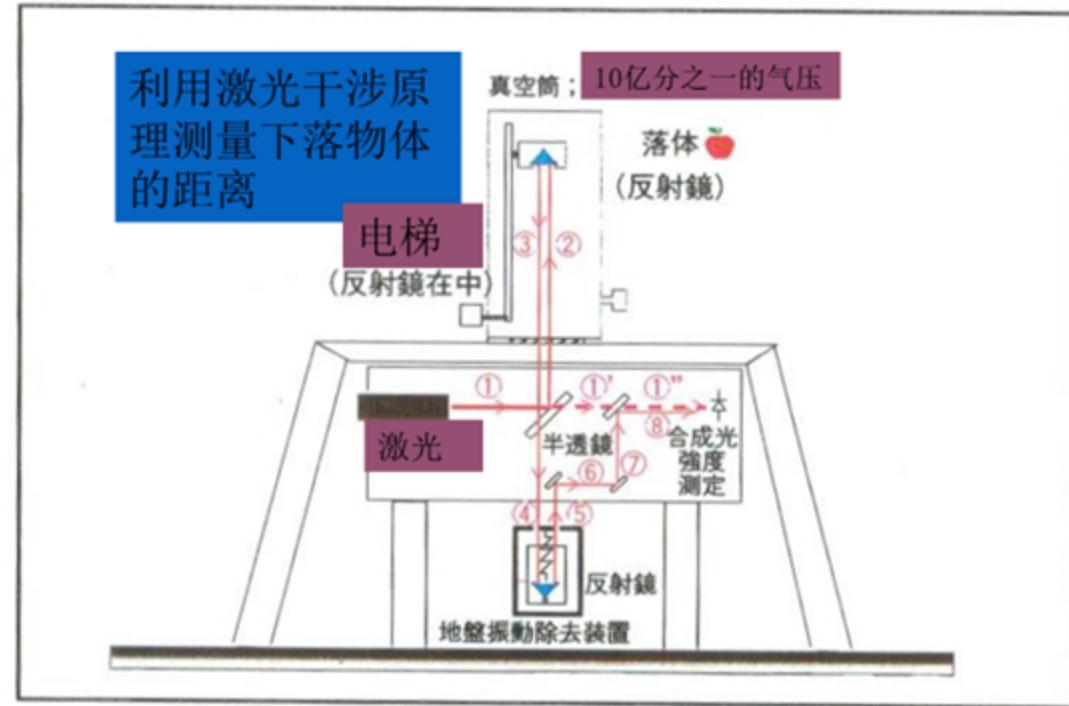
- ✓ 多在室内观测，占地面积 $3\text{ m}^2$ ，重量  
150 kg
- ✓ 精度可达 $1\text{ }\mu\text{Gal}$ ，观测时间<2小时
- ✓ 当前国际上质量最好、功能最齐的仪  
器

# 1. 重力仪

动力法

## Micro-G FG5自由落体绝对重力仪

绝对重力仪的原理图

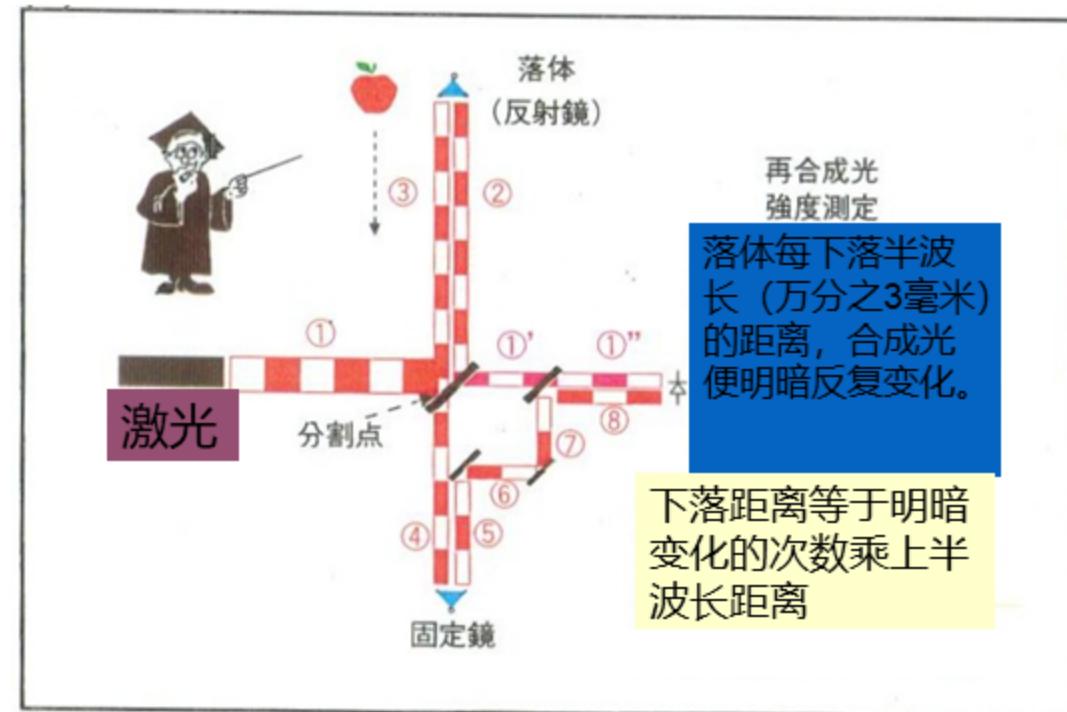


# 1. 重力仪

动力法

## Micro-G FG5自由落体绝对重力仪

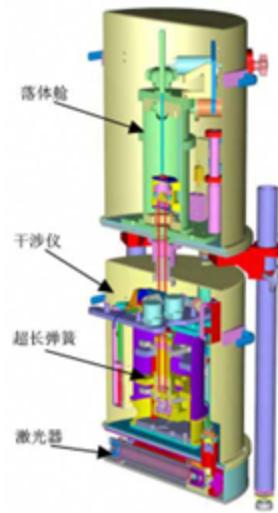
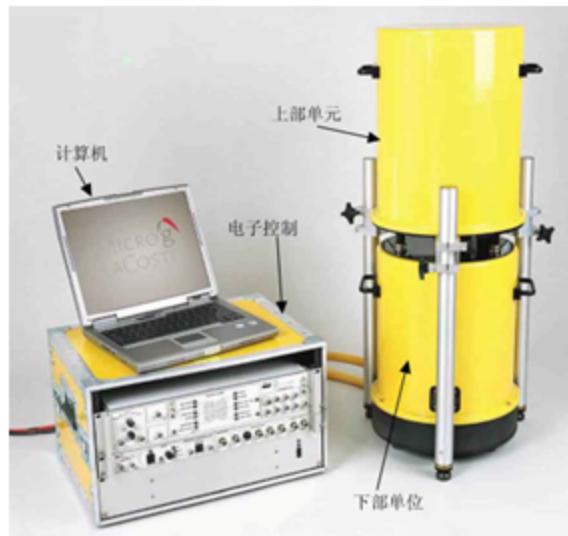
测量相位差  
(激光干涉法)



# 1. 重力仪

动力法

## Micro-G A10便捷式自由落体绝对重力仪



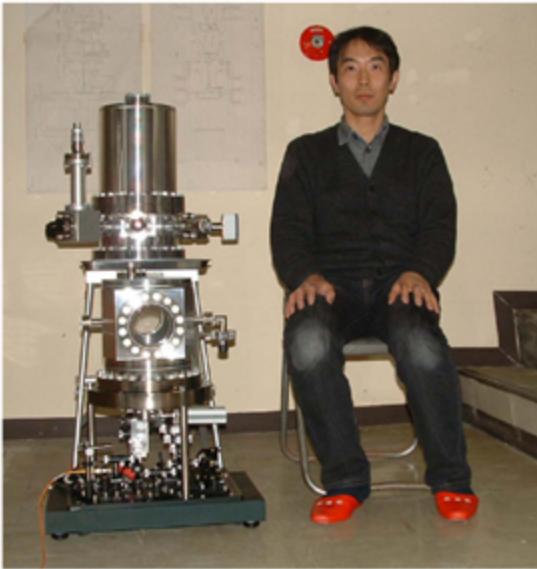
- ✓ 可车载移动的小型绝对重力仪，约100 kg
- ✓ 自动读数，使用方便。双探头系统
- ✓ 10  $\mu\text{Gal}$ 精度，观测时间仅需10分钟

# 1. 重力仪

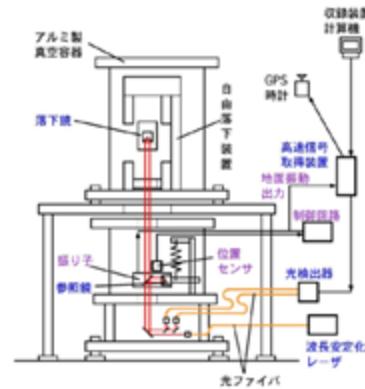
动力法

## 日本绝对重力仪的研发

組立中の小型絶対重力計



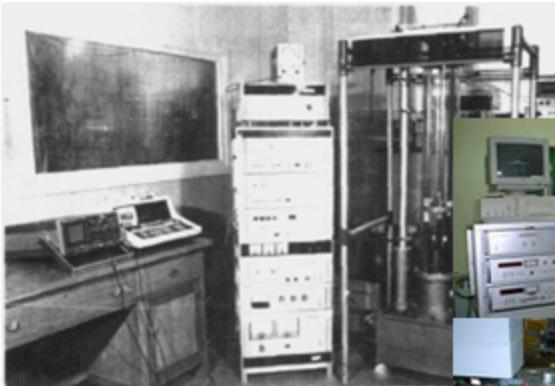
- ・自由落下距離 10cm
- ・高さ約1m
- ・精度  $3 \mu\text{gal}$   
(1cmの高低差を検知)



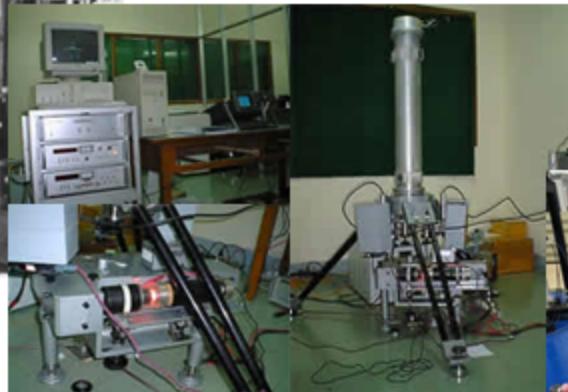
# 1. 重力仪

动力法

NIM型自由落体绝对重力仪



国家计量科学院



# 1. 重力仪

动力法

NIM型自由落体绝对重力仪



重力基准实验室

国家计量科学院



“第十届全球绝对重力仪国际比对”在中国计量院举行

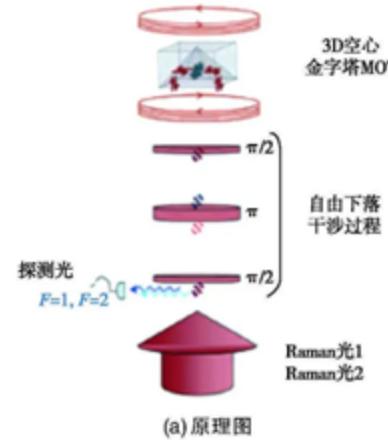
# 1. 重力仪

动力法

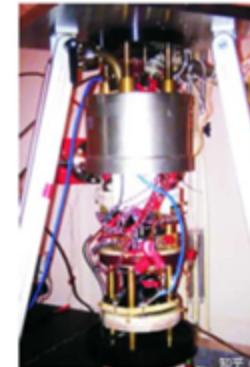
## 冷原子绝对重力仪

原子在自由落体的过程中，速度发生了变化，产生**多普勒频移现象**，此时若有一束光想要和原子保持同步共振，必需以一定变化率与其啁啾，即光的频率随时间的变化与原子的多普勒频移保持一致，这样才会受到的光的作用。

假设光和原子的互相作用时间是1 s，那么重力加速度导致的多普勒频移大约是10 MHz，而跃迁线宽受相互作用时间限制为1Hz。可以看到，仅是量级的重力加速度变化也会导致原子与光无法共振，引起发生跃迁的原子数的改变。因此我们通过对于**跃迁之后原子数的测量**，再通过一定的计算，就可以得到当地的重力值。



(a) 原理图



知乎 动力学的哥白尼

# 1. 重力仪

动力法

## $\mu$ quans冷原子绝对重力仪



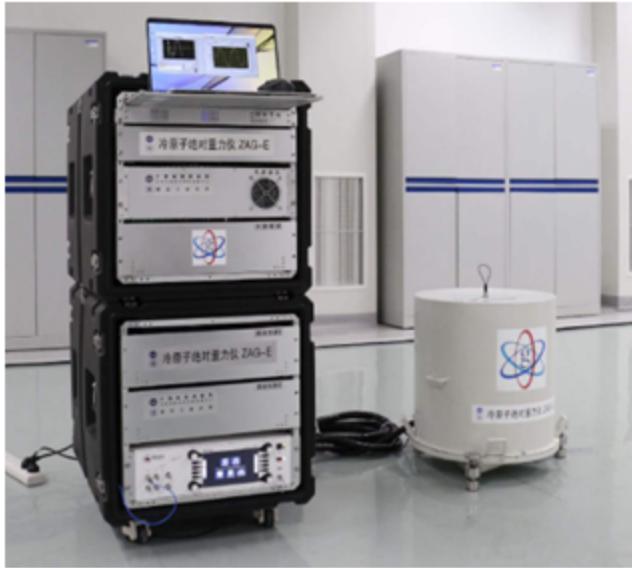
Picture of the Absolute Quantum Gravimeter.  
The instrument is composed of the sensor head  
(right side of the image) where the gravity  
measurement is performed, and the control  
unit (left side of the image)

- ✓ 室内外观测，
- ✓ 占地面积1 m<sup>2</sup>
- ✓ 重量85 kg
- ✓ 精度室内可达4~6  $\mu$ Gal

# 1. 重力仪

动力法

## ZAG-E冷原子绝对重力仪



- ✓ 室内外观测，可车载，约70 kg
- ✓ 精度室内可达 $10 \mu\text{Gal}$ 、室外可达 $30 \mu\text{Gal}$

# 1. 重力仪

静力法

## 弹簧相对重力仪

按物体受力变化而产生位移方式的不同，重力仪可分为平移式系统和旋转式系统两大类。

### 平移式

$$mg = k(S - S_0)$$

$$mg_1 = k(S_1 - S_0)$$

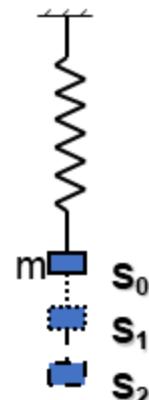
$$mg_2 = k(S_2 - S_0)$$

$$\Delta g = (g_2 - g_1)$$

$$= (k/m)(s_2 - s_1)$$

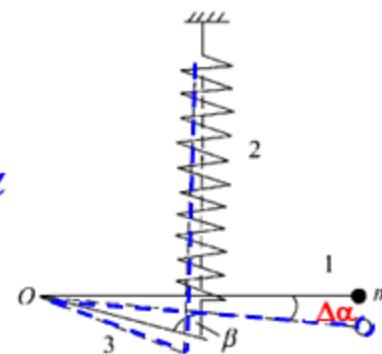
$$= c \cdot \Delta s$$

$$\text{格值 } c = k/m$$



### 旋转式

$$\Delta g = c \cdot \Delta \alpha$$



日常生活中使用的弹簧秤从原理上说就是一种平移式重力仪。

# 1. 重力仪

静力法

## 美国LCR金属弹簧重力仪



### 技术指标

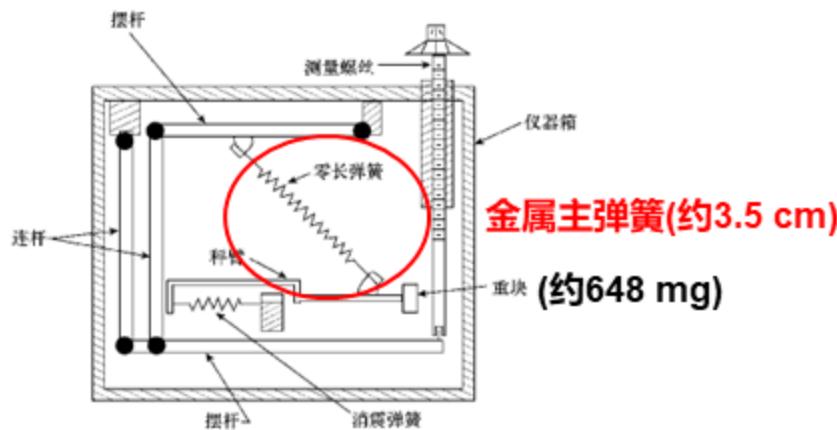
	D型	G型
测量范围	200 mGal	7000 mGal
测量精度	2 $\mu$ Gal	约4 $\mu$ Gal
零点漂移	约0.5 mGal/月 (使用1年以上) 约1 mGal/月 (使用1年以下)	约0.5 mGal/月 (使用1年以上) 约1 mGal/月 (使用1年以下)
重复性	约5 $\mu$ Gal	约10 $\mu$ Gal
电源	DC12V	DC12V
净重	3.2 kg	3.2 kg

- ▶ 美国LCR公司产品，金属弹簧
- ▶ 该仪器分为D型（勘探型）与G型（大地型）两种。前者精度高；后者测程大，适用于全球测量而不需调测程。

# 1. 重力仪

静力法

## 美国LCR金属弹簧重力仪



- 零长弹簧是一种按特定条件制成的弹簧，其弹力与弹簧支点到力作用点之间的距离成比例，即弹力与弹簧的长度（而不是与它的伸长量）成比例。
- 当重力改变时，旋转测微螺旋，使杠杆上下倾斜，再带动主弹簧，让摆杆回到零点位置。
- 上下摆杆用于放大主弹簧的伸长量。
- 消震弹簧用于灵敏度较大时候，减少外界微震对仪器读数的影响。

# 1. 重力仪

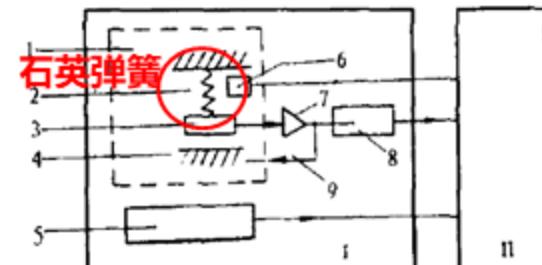
静力法

## CG石英弹簧重力仪

加拿大先达利公司产品，石英弹簧，自动读数重力仪

### 工作原理

- 弹簧系统由熔融再制的石英弹簧和重块组成
- 重块上的重力与弹簧力及附加在重块上的较小的静电恢复力达成平衡
- 当重力发生变化时，重块的位置发生改变
- 这种位置变化，可为电容位移传感器所感应。
- 自动反馈电路即将一直流电压加到电容器的极板上。这样，在重块上产生一静电力，此静电力将重块推至零点位置。
- 这个反映相对重力变化值的电压就被转换成数字信号，送到数据采集系统处理、显示和存储。



# 1. 重力仪

静力法



	CG-6	LCR-G	Burris	CG-5
传感器类型	石英弹簧	金属弹簧	金属弹簧	石英弹簧
测量范围/mGal	8 000	7 000	7 000	8 000
读数分辨率/ $\mu$ Gal	0.1	1(估读)	1	1
标准差/ $\mu$ Gal	5	5	3	5
绝对零漂/ $\mu$ Gal·d <sup>-1</sup>	<200	<10	<10	<1 000
工作温度 /℃	-45~50	-15~50	-15~50	-45~50
重量/kg	5.2	3.6(不含电池)	7.9	8.0
尺寸(长×宽×高)/cm	24.0×21.0×21.5	19.7×17.8×25.1	30.5×19.05×30.5	22.0×20.0×30.0
改正项	倾斜、潮汐、零漂、温度、噪声	无	倾斜、潮汐、温度、噪声	倾斜、潮汐、零漂、温度、噪声
读数方式	显示屏直读	人工调整度盘	人工调整度盘及掌上 PDA 控制	显示屏直读
数据存储	主机	无	掌上 PDA	主机
数据传输	USB 传输	无	RS232 和 USB 专用软件传输	RS232 和 USB 专用软件传输

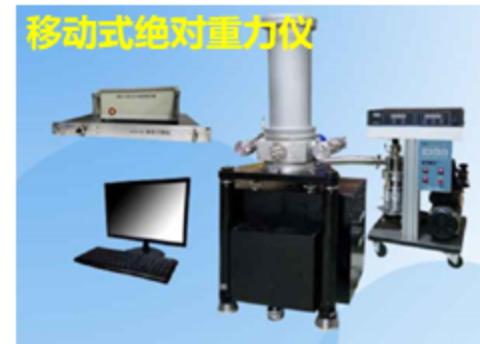
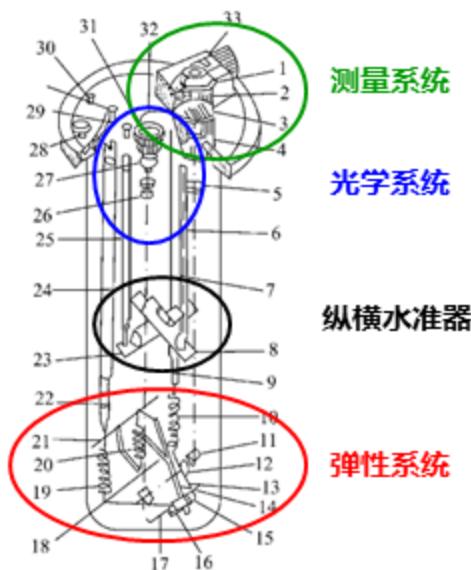
# 1. 重力仪

静力法

## ZSM国产石英弹簧重力仪



精度 $30\mu\text{Gal}$



# 1. 重力仪

静力法

## Micro-G gPhoneX相对重力仪



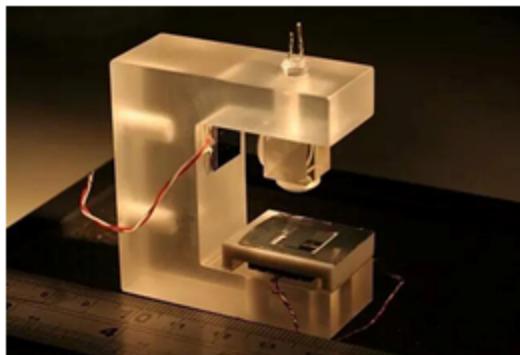
- 便携式固体潮重力仪，室内连续观测
- 类似LCR金属零长弹簧原理
- 用于地震监测、火山监测、地下水监测、固体潮观测

分辨率	0.1 $\mu$ Gal
精度	1 $\mu$ Gal
系统噪音	0.1~0.3 $\mu$ Gal/ $\sqrt{\text{Hz}}$
量程	7000毫伽（未标定，全球量程）
反馈量程（测量中）	+/-100毫伽
漂移	1.5毫伽/月，或更小；一般情况小于500微伽/月

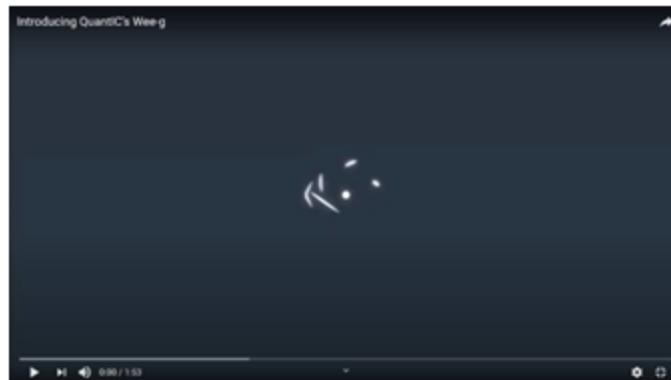
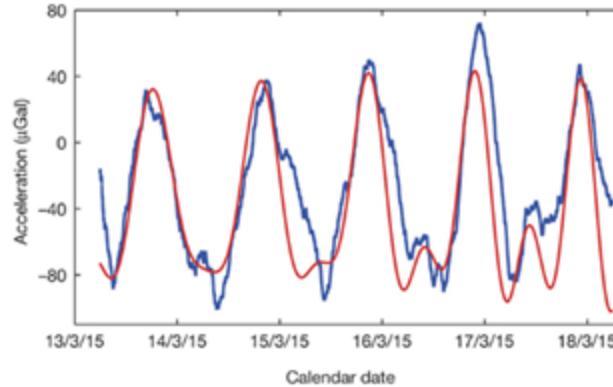
# 1. 重力仪

静力法

## WEE-重力仪



- Wee-g重力仪采用**智能手机加速度计**所使用的微机电(MEMS)技术，成本远低于传统的重力仪。
- Wee-g采用比人类头发还薄10倍的硅弹簧，如此Wee-g的12平方厘米传感器可检测到重力非常细微的变化。



# 1. 重力仪

固定超导

超导重力仪：时变重力，分辨率最高，零漂最小

## 国外

- 美国GWR仪器公司独家
- 尚未有专用的流动观测型号



GWR/OSG



GWR/iGrav

## 国内

- 华中科技大学，航空超导重力梯度仪，2010 (863主题项目)，超导重力仪
- 中科院电工所，超导重力仪，2016 (自然科学基金仪器项目)
- 华中科技大学，流动超导重力仪，2018 (国家重点研发计划项目)

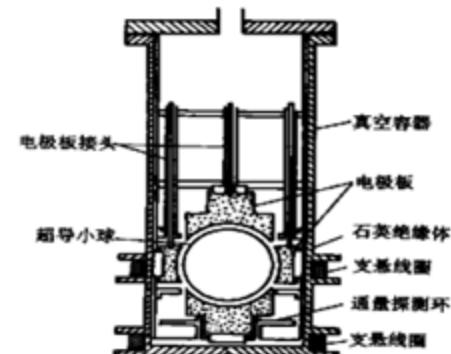
现状：国际GWR独家垄断，国内尚未实用化

# 1. 重力仪

流动超导

## iGrav便捷式超导重力仪

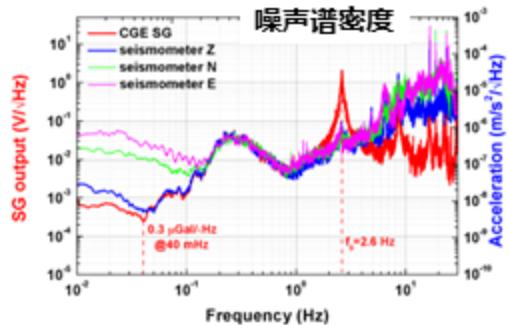
- 仪器包括超导球、电容器极板、超导磁线圈以及超导磁屏蔽等部件，整个系统被镀在铜罐上的铅超导屏蔽所包围，悬浮在真空中，温度稳定到几十个 $\mu\text{K}$ 。
- 测定相对重力变化，用变化的超导磁场替代普通重力仪中的弹簧系统，以保持重力场变化时超导小球在某一平衡位置，通过准确测量小球平衡位置的改变而得到精密的地球重力场变化。
- 精度 $0.1 \mu\text{Gal}$ ，漂移：小于 $0.5\mu\text{Gal}/\text{月}$ ，重量 30kg
- 室内连续观测，用于地震监测、火山监测、地下水监测、固体潮观测



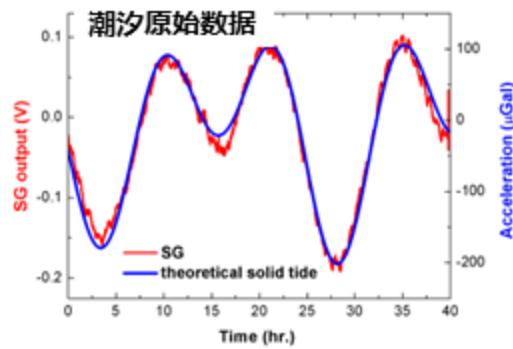
采用低温超导技术进行观测的、观测精度最高的相对重力仪

# 1. 重力仪

流动超导



实验室实测噪声与GWR最佳值相同



稳定性较好但须进一步提高

- ✓ 探测缓变微小幅度信号
- ✓ 流动观测



样机

拟解决关键技术问题：

1. 零漂抑制
2. 环境适应性提升
3. 安全流转与快速启动

# 1. 重力仪

讨论：为什么重力观测仪这么贵？我们应该优先研发哪类重力仪？



FG5绝对重力仪  
500万元以上



CG5相对重力仪  
100万元左右



GWR超导重力仪  
400万元左右

如今，FG5绝对重力仪对中国禁止出售！

# 1. 重力仪

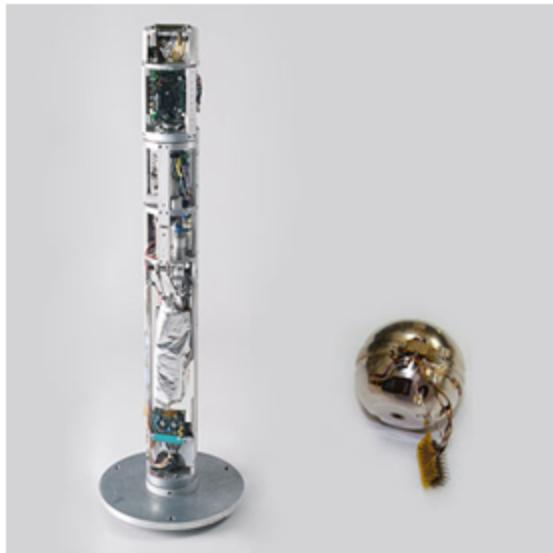
## 重力仪和国家重大战略



# 1. 重力仪

面向深地发展战略

## Micro-G LRS井中重力仪



- LRS公司的Micro-G生产的高精度井中重力仪是世界上唯一投入工业应用的井中重力仪。
- 用于井中微重力测井，为油气开发提供井下地层密度的空间变化及孔隙度分布变化资料，也可为剩余油气分布调查提供信息。
- 该仪器测井不受油井铁套管影响，测量精度为0.04 mGal。

# 1. 重力仪

面向深地发展战略

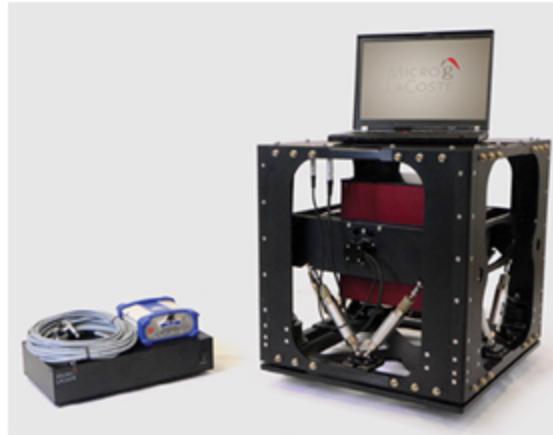
## 地面重力仪



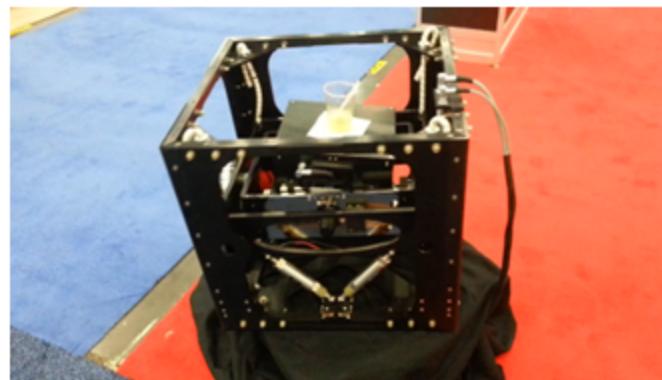
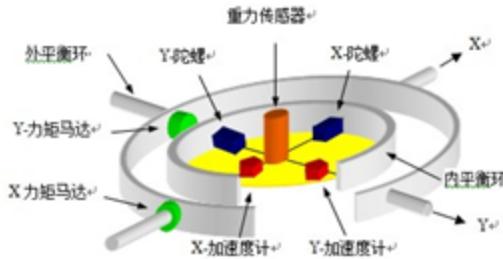
# 1. 重力仪

面向深地发展战略

## 航空重力仪



- 固定翼航空重力仪
- 精度0.75 mGal, 测程: 20000 mGal



# 1. 重力仪

面向深地发展战略

## 航空重力仪



SIG S捷联式航空重力仪(加拿大)



AIRGrav航空重力仪(加拿大)



GT-2A航空重力仪(俄罗斯)

精度0.6mGal



国产捷联式航空重力仪

精度1mGal

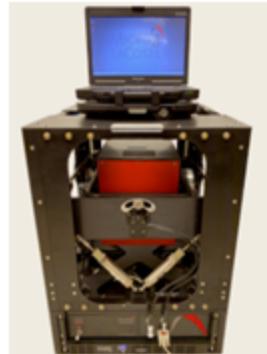
# 1. 重力仪

面向深海发展战略

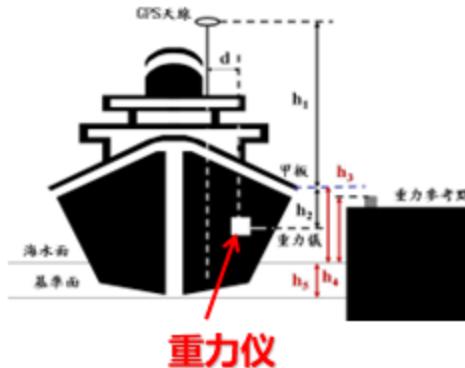
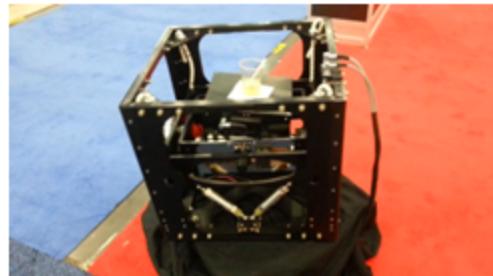
## 海洋重力仪



Micro-G MGS-6海洋重力仪  
静态精度0.02mGal  
动态精度0.75mGal



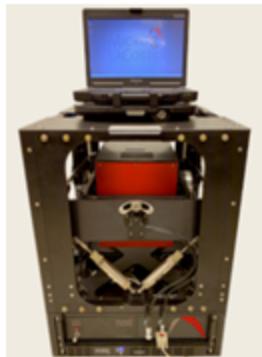
Micro-G SEA III海洋重力仪  
精度0.25mGal



# 1. 重力仪

面向深海发展战略

## 海洋重力仪



Micro-G SEA III 海洋重力仪

精度0.25mGal

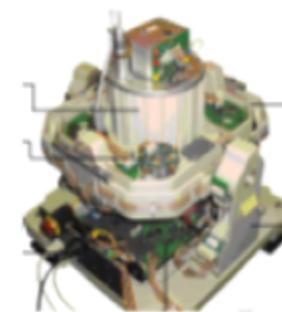


Micro-G MGS-6 海洋重力仪

静态精度0.02mGal, 动态精度0.75mGal



GT-2M 海洋重力仪  
加拿大



KSS32-M 海洋重力仪  
德国



海洋/海底重力仪

INO 海底重力仪(加拿大)

精度0.005mGal

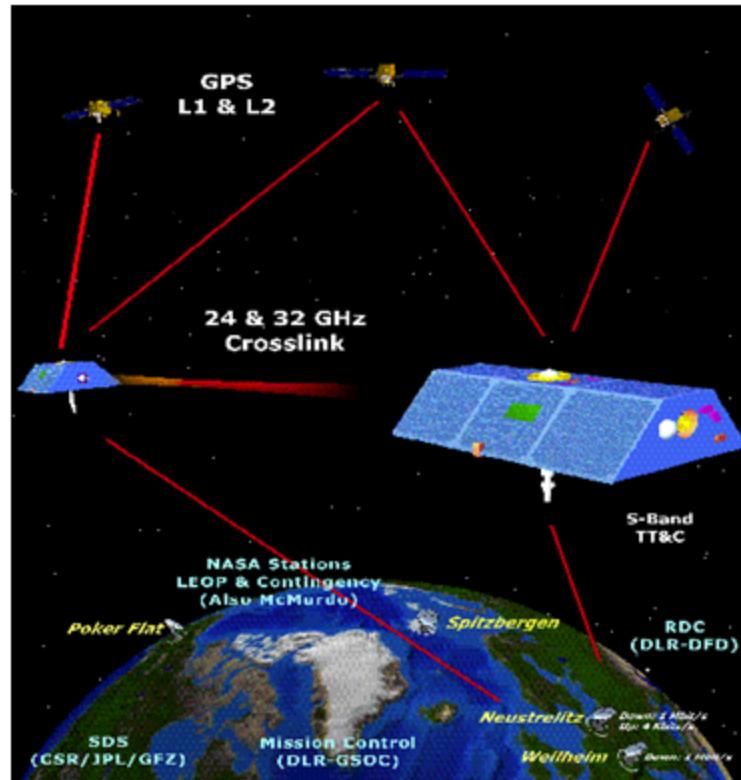


CHEKAN-AM 海洋重力仪  
俄罗斯

# 1. 重力仪

面向深空发展战略

## 卫星重力仪



# 1. 重力仪

这个国之“重”器有啥神秘？科研人员曾把自己关在山洞里20多天 (qq.com)

15年磨一剑！国产高精度量子重力仪来了\_凤凰网视频\_凤凰网 (ifeng.com)

# 1. 重力仪

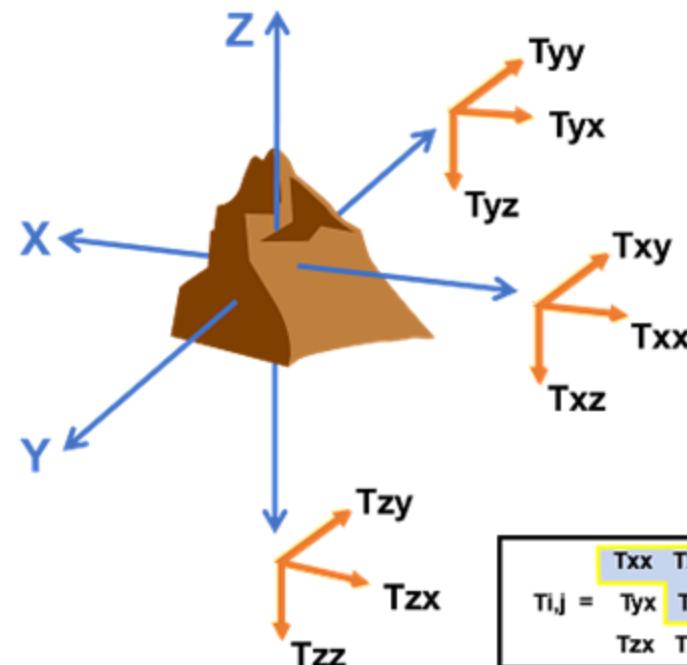
前沿科技→重力梯度

洛克希德马丁公司

BHP公司

Fugro (现在成为Xcalibur)

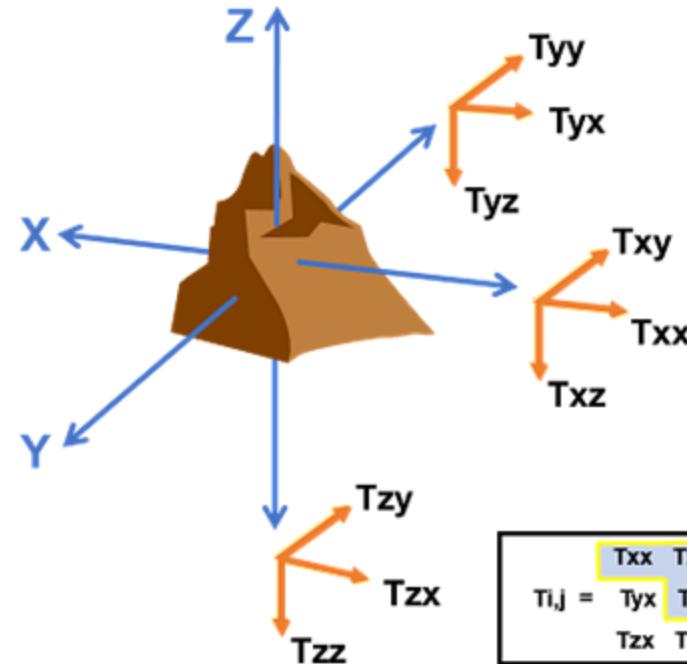
CGG公司



$T_{xx}$	$T_{xy}$	$T_{xz}$
$T_{yx}$	$T_{yy}$	$T_{yz}$
$T_{zx}$	$T_{zy}$	$T_{zz}$

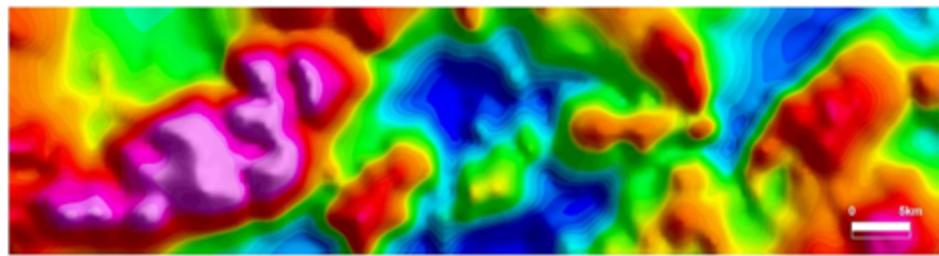
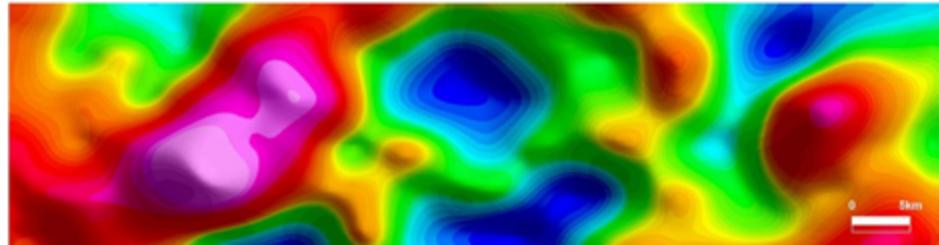
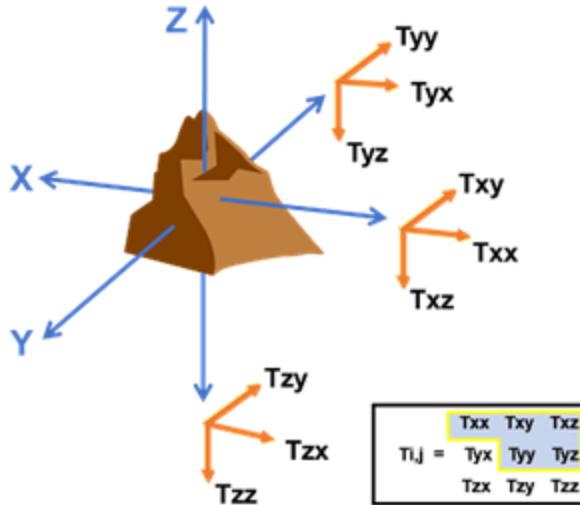
# 1. 重力仪

前沿科技→重力梯度



# 1. 重力仪

前沿科技→重力梯度



# 1. 重力仪

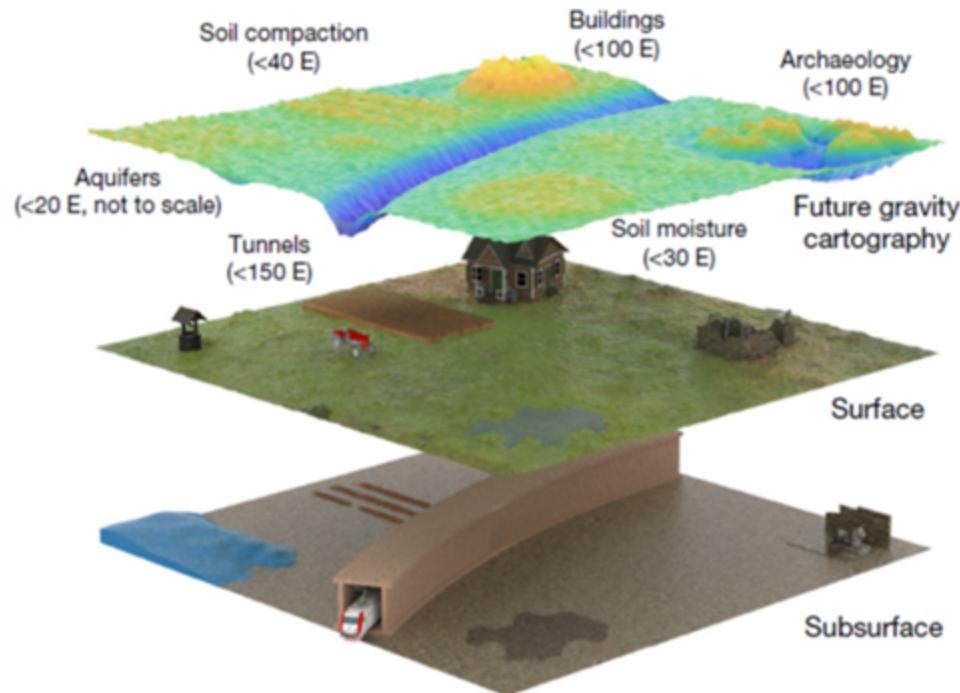
前沿科技→重力梯度

一种便携式量子  
重力梯度仪



# 1. 重力仪

## 前沿科技→重力梯度





## 1. 重力仪

前沿科技→重力梯度

军情解码：黄大年研发的航空重力梯度仪系统  
是什么？学生现场讲解 - 西瓜视频 (ixigua.com)



# 目 录

---

第一节 重力仪

第二节 影响重力仪精度的因素  
(弹簧重力仪)

## 2. 影响重力仪精度的因素

### 2.1 温度影响

温度变化会使重力仪各部件热胀冷缩，各着力点间相对位置发生变化，弹簧的弹力系数和空气的密度也是温度的函数。

为消除这一影响，采用：

- ✓ 研制与选用受温度变化影响小的材料作仪器的弹性元件；
- ✓ 附加自动温度补偿装置；
- ✓ 采用电热恒温，使仪器内部温度基本保持不变。

## 2. 影响重力仪精度的因素

### 2.2 气压影响

空气密度改变使平衡体所受的**浮力改变**，并在仪器内腔形成额外的气流。

消除的方法：

- ✓ 将弹性系统放在高真空容器内；
- ✓ 在与平衡体相反方向上加一个等体积矩的气压补偿装置。



## 2. 影响重力仪精度的因素

### 2.3 电磁力影响

摆杆摆动时，会与残存的空气分子摩擦而产生静电，静电荷的不断累积将使仪器读数发生变化。

✓ 在平衡体附近放一适量的**放射性物质**，使空气游离而导走电荷。

对于金属弹簧重力仪，含**铁磁性材料**作元件会受到地磁场变化的影响，

✓ 要将弹性系统消磁，并用磁屏进行屏蔽，在野外观测时，借助**指南针**而定向安放仪器，永远让摆杆顺着地磁场方向摆动。

## 2. 影响重力仪精度的因素

### 2.4 安置状态不一致的影响

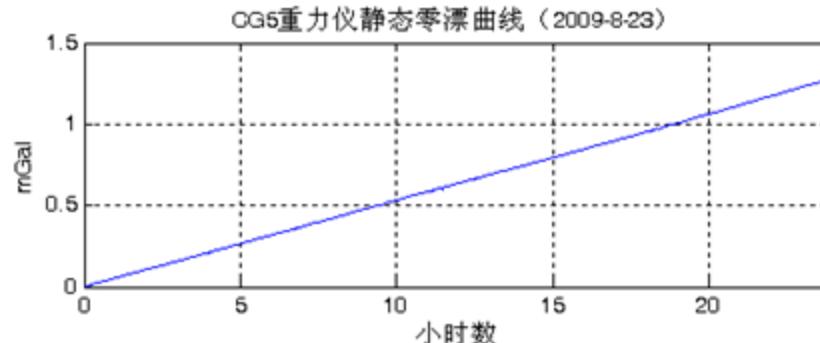
因重力仪在各测点安置不可能完全一样，因而**摆杆与重力的交角就不会一致**，测量结果不仅包含有各测点间重力的改变值，还包含了摆杆与重力方向交角不一致的影响。

- ✓ 应取平衡体的质心与水平转轴所构成的平面为水平时作为重力仪的零点位置。
- ✓ 为此，重力仪都装有指示水平的纵、横水准器和相应的调平脚螺丝，有的还装有灵敏度更高的电子水泡和自动调节系统。

## 2. 影响重力仪精度的因素

### 2.5 零点漂移

弹性重力仪中的弹性元件，在一个力(如重力)的长期作用下将会产生**弹性疲劳**等现象，致使弹性元件随时间推移而产生极其微小的永久形变，它严重地影响了重力仪的测量精度，带来了几乎不可克服的零点漂移。重力仪读数的这种随时间而改变的现象称为零点漂移。



## 2. 影响重力仪精度的因素

### 2.5 零点漂移

为消除这一影响

- ✓ 必须获得重力仪零漂的**基本规律**和在工作时间段内零漂值的大小，以便引入相应的**校正**。
- ✓ 在制造仪器时，应选择适当材料和经过时效处理，尽量使**零漂变小**并努力做到使它为时间的**线性函数**。
- ✓ 在野外工作中，必须在一批重力值已知的所谓**重力基点网**的控制下进行，才有可能进行零点校正。



# 目 录

---

第一节 重力仪

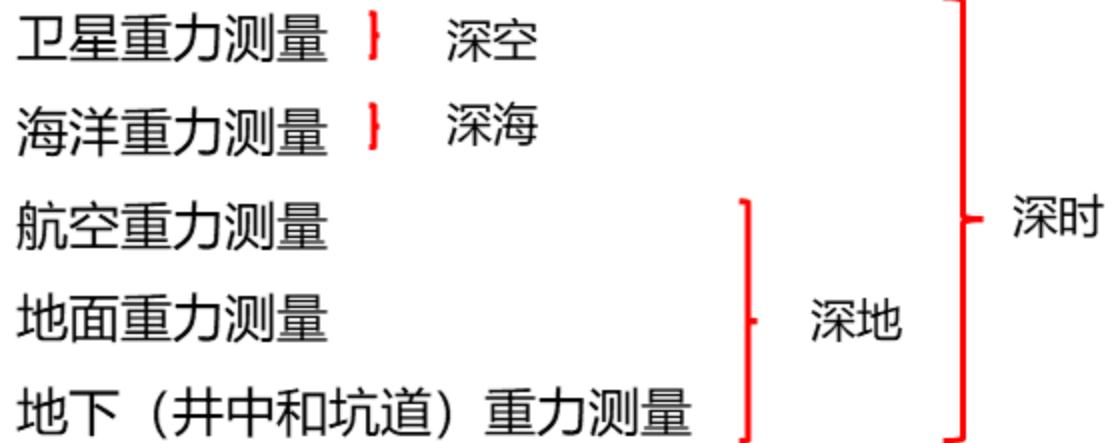
第二节 影响重力仪精度的因素

第三节 重力野外测量

### 3. 重力野外测量

### 重力测量分类

根据所处空间位置不同，重力测量分为



### 3. 重力野外测量





### 3. 重力野外测量

---

地面相对重力测量



### 3. 重力野外测量

## 重力应用流程

#### 3.1 编写重力应用技术设计书

根据承担的地质任务进行现场踏勘及搜集工区内的地质、物探、物性资料编写技术设计

#### 3.2 野外施工

采集重力异常数据及工区内岩矿石的密度参数

#### 3.3 室内资料整理

通过资料整理得到工区内异常的各种图件

#### 3.4 重力异常的推断解释和报告编写



### 3. 重力野外测量

#### 3.1 重力应用技术设计书——重力测量的地质任务

- a) 区域重力调查
- b) 能源重力勘探
- c) 矿产重力勘探
- d) 水文及工程重力测量
- e) 天然地震重力测量
- f) 军事



### 3. 重力野外测量

#### 3.1 重力应用技术设计书——重力测量的地质任务

##### a) 区域重力调查

- ✓ 研究地球深部构造，例如地壳厚度的变化（莫霍间断面的起伏），深大断裂的可能部位及延伸情况，上地幔密度的不均匀性以及研究地壳的均衡状态等；
- ✓ 研究大地及区域地质构造，划分构造单元；研究结晶基底的起伏及其内部咸分和构造；圈定沉积盆地范围，以及研究沉积岩系各密度界面的起伏和内部构造；
- ✓ 探测、圈定与围岩有明显密度差异的隐伏岩体或岩层，追索两侧岩石密度有明显差异的断裂，进行覆盖区的基岩地质、构造填图；
- ✓ 根据区域地质、构造及矿产分布规律，为划分成矿远景区提供重力场信息。

### 3. 重力野外测量

#### 3.1 重力应用技术设计书——重力测量的地质任务

##### b) 能源重力勘探

- ✓ 研究重力测量可以在沉积覆盖区快速、经济地圈出对寻找石油、天然气或煤有远景的盆地；
- ✓ 在圈定的盆地内研究沉积层的厚度及内部构造，寻找有利于储存油气或煤的各种局部构造；
- ✓ 条件有利时可以研究非构造油气藏（如岩性变化、地层的推覆、古潜山及生物礁块储油构造等），并直接探测与储油气层有关的低密度体。



### 3. 重力野外测量

#### 3.1 重力应用技术设计书——重力测量的地质任务

##### c) 矿产重力勘探

- ✓ 金属及非金属矿产的重力测量；
- ✓ 与其它地球物理方法配合，**圈定成矿带**；
- ✓ 在条件有利时，可以探测并描述**控矿构造**，或**圈定成矿岩体**；
- ✓ 直接发现埋藏较浅、体积较大的矿体或对已知矿体进行**追踪**等。

### 3. 重力野外测量

#### 3.1 重力应用技术设计书——重力测量的地质任务

##### d) 水文及工程重力测量

- ✓ 研究浮土下基岩面的起伏和有无隐伏**断裂、空洞**，以确保厂房或大坝等工程的安全；
- ✓ 寻找水源，如利于储水的地下溶洞、破碎带、地下河道等；
- ✓ 危岩、滑坡体的监测；
- ✓ 地面沉降研究；
- ✓ 在地热田的勘测开发过程中，发现热源岩体，监测地下水的升降以及水蒸汽的补给情况，以便合理、持久地开发地热田等。



### 3. 重力野外测量

#### 3.1 重力应用技术设计书——重力测量的地质任务

##### e) 天然地震重力测量

- ✓ 天然地震重力测量可分为台站重力测量和流动重力测量两种形式。
- ✓ 其主要任务是研究重力场在台站点上或在某一地震活动带、沿一条测线或一块面积的**重力随时间的变化**。
- ✓ 在台站上的观测结果是临震预报的依据之一；
- ✓ 在固定测点之间进行的流动重力观测结果是中长期预报的依据之一。



### 3. 重力野外测量

#### 3.1 重力应用技术设计书——重力测量的地质任务

f) 军事

- ✓ 精准打击
- ✓ 高精度导航
- ✓ 水下目标监测
- ✓ 隐蔽工程监测、检测

# 3. 重力野外测量

## 3.1 重力应用技术设计书——重力测量的技术设计

ICS 07.080  
B 10/19



中华人民共和国地质矿产行业标准

DZ/T 0004—2015  
代替 DZ/T 0004—91

重力调查技术规范(1 : 50 000)

The technical specification for gravity survey(1 : 50 000)

2015-04-15 发布

2015-07-01 实施



中华人民共和国国土资源部 发布

ICS



中华人民共和国地质矿产行业标准

DZ/T 0171—2017  
代替 DZ/T 0171—2007

大比例尺重力勘查规范

Large-scale Gravity Survey Specification

2017-07-08 发布

2017-09-01 实施

中华人民共和国国土资源部 发布



### 3. 重力野外测量

#### 3.1 重力应用技术设计书——重力测量的技术设计

指导思想是以尽可能少的工作量来完成所承担的地质任务。

- 资料收集与野外踏勘
- 工作比例尺选择和测网布置
- 精度要求及各项误差分配
- 野外工作方法：仪器准备、基点网、普通点、检查点、测地工作、物性工作、后勤保障、SHE等
- 编写技术设计书



### 3. 重力野外测量

#### 3.1 重力应用技术设计书——重力测量的技术设计

##### 资料收集

- ✓ 收集以往重力工作资料
- ✓ 收集已有的露头和钻井标本物性资料
- ✓ 收集地质、地球物理、地球化学、遥感、钻孔及矿产勘查等成果资料
- ✓ 收集交通图、行政区划图、高程DEM数据或地形图
- ✓ 收集测地的三角点、GPS 控制点、坐标转换参数等测绘资料



### 3. 重力野外测量

#### 3.1 重力应用技术设计书——重力测量的技术设计

##### 野外踏勘

- ✓ 了解自然地理概况及交通、通讯、供电、后勤补给等情况
- ✓ 了解勘查对象的空间展布特征及围岩的分布特征，分析地形地貌对重力勘查工作的影响因素，明确存在的技术难点及应对措施
- ✓ 实地核查测量控制点的保存情况



### 3. 重力野外测量

#### 3.1 重力应用技术设计书——重力测量的技术设计

##### 工作比例尺的确定

- ✓ 工作比例尺反映重力测量工作的详细程度，比例尺取决于相邻测线间的距离。
- ✓ 比例尺愈大，单位面积的测点数就愈多，对重力异常的研究也就愈详细。
- ✓ 比例尺应与地质任务相适应。

### 3. 重力野外测量

#### 3.1 重力应用技术设计书——重力测量的技术设计

##### 工作比例尺的确定

比例尺	面积测量时的测点密度(km <sup>2</sup> /测点)	剖面测量时的相邻点距(km)
1: 100万	80~160	5.0~10.0
1: 50万	20~40	2.0~5.0
1: 30万	4~8	1.0~2.0
1: 10万	1~2	0.5~1.0

比例尺	长方形网		正方形网
	线距(m)	点距(m)	线距=点距(m)
1: 5万	500	100~500	—
1: 1万	100	20~50	—
1: 5千	50	10~20	30~40
1: 2千	20	5~10	10~20
1: 1千	10	2~5	5~10
1: 5百	5	1~2	2~5

### 3. 重力野外测量

#### 3.1 重力应用技术设计书——重力测量的技术设计

##### 工作比例尺的确定

✓ 重力预查 (1:100万, 1:50万)

在勘探**空白区**进行**大面积、小比例尺**测量

目的：大地构造基本轮廓资料

✓ 重力普查 (1:20万, 1:10万)

在有**进一步工作价值的地区**开展调查

目的：划分区域地质构造、圈定岩体及储油构造，指示成矿、油气远景区



### 3. 重力野外测量

#### 3.1 重力应用技术设计书——重力测量的技术设计

##### 工作比例尺的确定

✓ 重力详查 (1:5万, 1:2.5万)

在成矿、油气远景区进行重力测量

目的：详细研究工区异常规律和特点，寻找局部构造或岩、矿体

✓ 重力细测 (>1:2.5万)

在已发现的储油气构造、煤盆地、成矿有利的岩矿体上进行精细测量

目的：确定地层或岩、矿体的形态和产状



### 3. 重力野外测量

#### 3.1 重力应用技术设计书——重力测量的技术设计

##### 工作比例尺的确定

在金属矿、非金属矿区,工作比例尺应根据地质任务、探测对象的大小及其异常特征来确定。对普查金属矿产来说,要求以不漏掉最小的、有工业开采意义的矿体产生的异常为原则,即至少应有一条测线穿过该异常,所以线距应不大于该异常的长度;点距应保证至少有2~3个测点处在矿体异常的宽度范围内,一般为线距的1/2~1/10.

### 3. 重力野外测量

#### 3.1 重力应用技术设计书——重力测量的技术设计

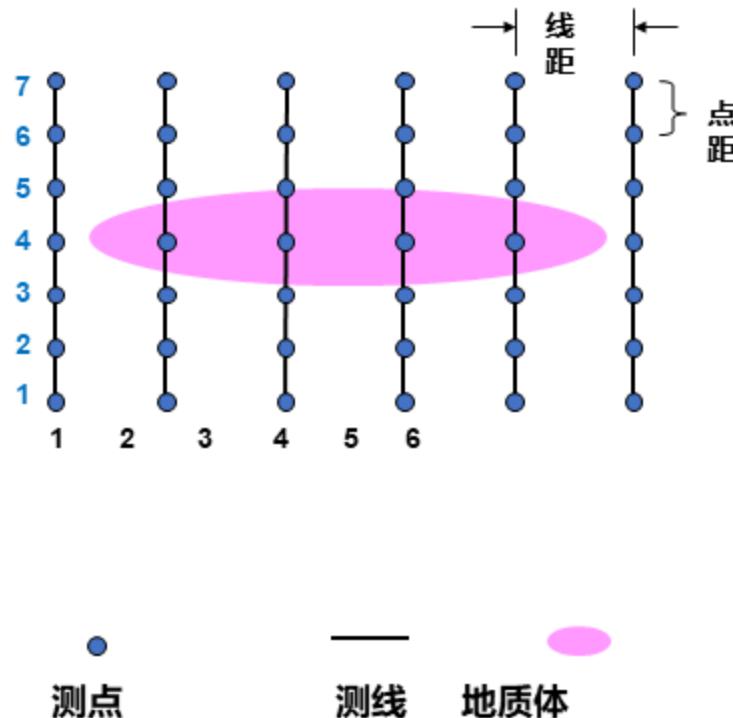
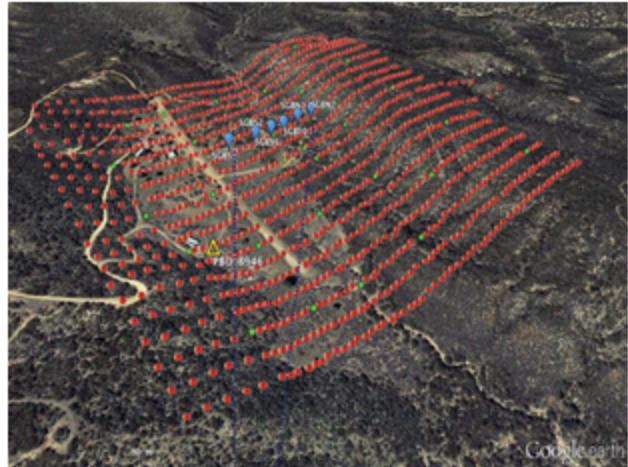
##### 测网布置

- ✓ 小比例尺测量的测网形状没有严格要求，可以沿一些交通路线布置，并使测点均匀分布全区；
- ✓ 大比例尺测量一般建立规则网，由相互平行的等间距的测线和测线上分布的等间距的测点所组成；
- ✓ 在目标异常区，根据勘查对象及目标要求可加密测线或每条测线加密测点；
- ✓ 对于走向不明或等轴状研究对象，采用方形网，即点线距相等；
- ✓ 对于有明显走向的研究对象，应用矩形网，测线方向垂直于走向。

### 3. 重力野外测量

#### 3.1 重力应用技术设计书——重力测量的技术设计

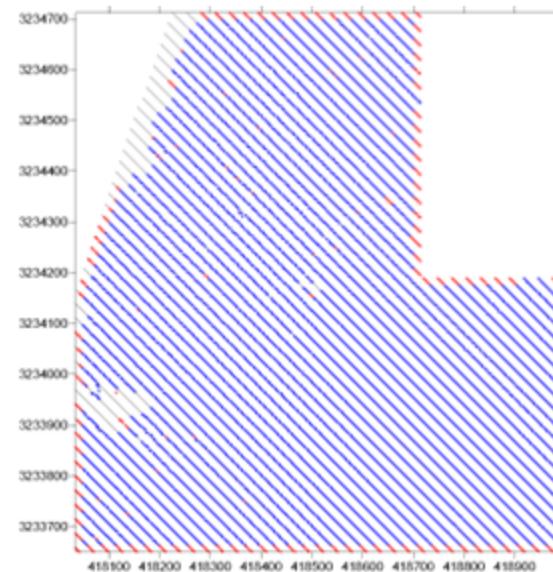
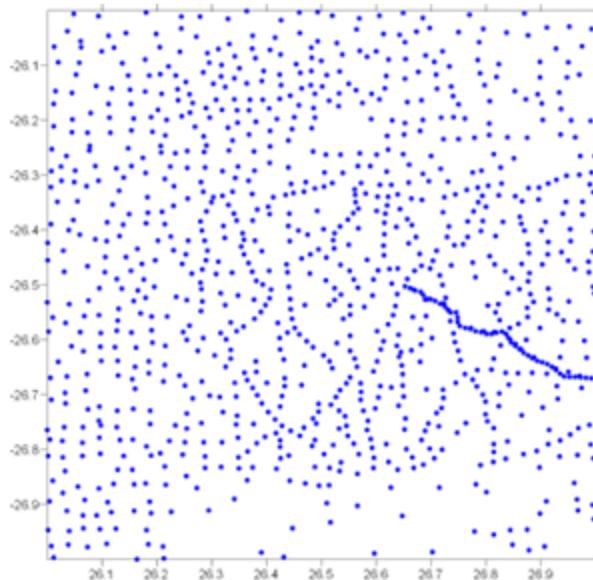
测网布置



### 3. 重力野外测量

#### 3.1 重力应用技术设计书——重力测量的技术设计

测网布置





### 3. 重力野外测量

#### 3.1 重力应用技术设计书——重力测量的技术设计

##### 精度要求及误差分配

- ✓ 测量精度是衡量野外观测质量的重要标志，也是决定技术措施、工作效率和成本的重要指标。
- ✓ 精度用异常的均方误差来衡量，包括重力观测值的均方误差和各项校正值的均方误差。
- ✓ 精度应根据地质任务和工作比例尺来确定。如金属矿普查，精度取最小的、有意义的异常幅值的 $1/2\sim1/3$ 。

### 3. 重力野外测量

#### 3.1 重力应用技术设计书——重力测量的技术设计

##### 精度要求及误差分配

工作比例尺	异常总精度 ( $\mu\text{Gal}$ )	测点观测精度 ( $\mu\text{Gal}$ )	地形改正精度 ( $\mu\text{Gal}$ )	纬度改正精度 ( $\mu\text{Gal}$ )	布格改正精度 ( $\mu\text{Gal}$ )
1: 50000	400	150	300	50	200
1: 25000	200	80	150	30	100
1: 10000	80	40	50	20	40
1: 5000	40	20	25	10	20
1: 2500	20	12	12	5	8



### 3. 重力野外测量

#### 3.1 重力应用技术设计书——重力测量的技术设计

##### 重力测量的方式

###### ✓ 路线测量

一般用于概查或普查阶段

测点沿交通方便的道路布置，测点大致均匀分布，线距没有严格要求。

###### ✓ 剖面测量

多用于详查或专门性测量

剖面线方向垂直地质体走向，尽可能通过地质体在地面投影的中心部位，

测点不能偏离剖面线，在正常值区点距可大些。

###### ✓ 面积测量

是重力测量的基本形式，可提供工区内重力异常的全貌。

### 3. 重力野外测量

#### 3.1 重力应用技术设计书——重力测量的技术设计

##### 重力测量有利条件

- ✓ 研究对象与其围岩之间有明显的（横向）**密度差**，而在围岩内部没有明显的密度变化；
- ✓ 研究对象的地质构造密度**分界面的深度有显著的变化**，而其**界面深度又不太深**；
- ✓ 在工区内**非研究对象引起的重力变化小**，或通过校正能给以**消除**；
- ✓ **地表地形平坦**或较为平坦。



### 3. 重力野外测量

#### 3.2 仪器检查与标定

##### ✓ 仪器的检查

测程、水准器位置、亮线灵敏度等

##### ✓ 仪器性能的试验

静态试验、动态试验和一致性试验

##### ✓ 仪器的标定

格值标定，特殊情况下还要进行温度系数、气压系数和磁性系数的标定。



### 3. 重力野外测量

#### 3.2 仪器检查与标定

- 所有重力仪在开工前应进行静态试验、动态试验和多台重力仪间的一致性试验，各项性能试验应在工作区完成
- 若工作期间重力仪受剧烈碰撞，经过中、大修后应重新进行各项性能试验，各项精度满足要求后方可投入生产
- 在外业结束后，应对重力仪进行动态试验和多台重力仪间一致性试验



### 3. 重力野外测量

#### 3.2 仪器检查与标定

##### 静态试验

将仪器置入安静、通风的一层楼房的室内，每隔20-30分钟观测一次，同时记录室内温度，连续进行24小时以上观测。

**目的：**了解仪器静态零点漂移是否呈线性变化。

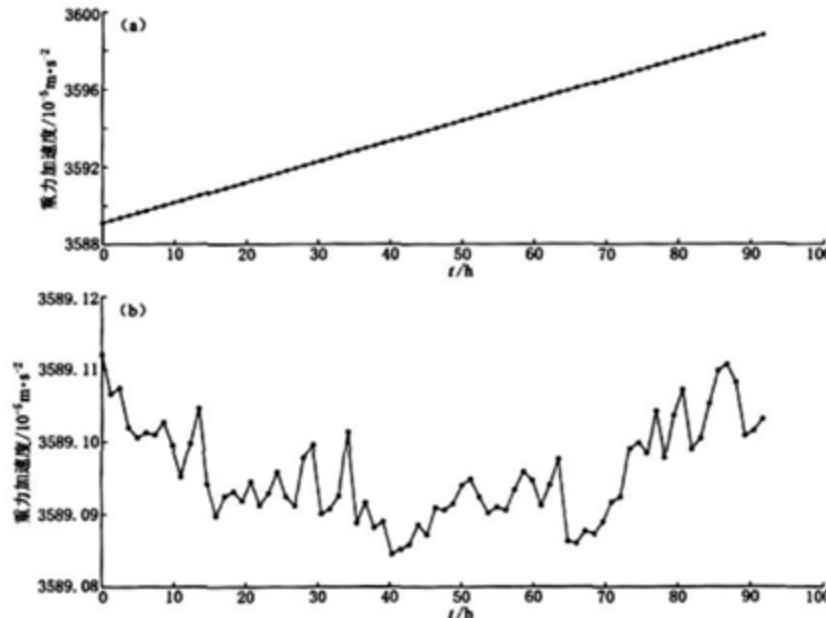


图 1 511 重力仪的静态零点漂移率和残差零漂率



### 3. 重力野外测量

#### 3.2 仪器检查与标定

##### 动态试验

选取具有一定重力差的两个点(或多个点)，采用与施工相同的运输方式，以多次重复观测的方法进行。两点间单程观测时间间隔纳10-15分钟，同时记录气温。试验时间应超出开工前和收工后各一小时，并不少于12小时。精度计算式

$$\varepsilon = \pm \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n V_i^2}{m - n}}$$

$V_i$ 各边段单个独立增量与平均独立增量的差  
 $m$ 独立增量的总个数  
 $n$ 边段数



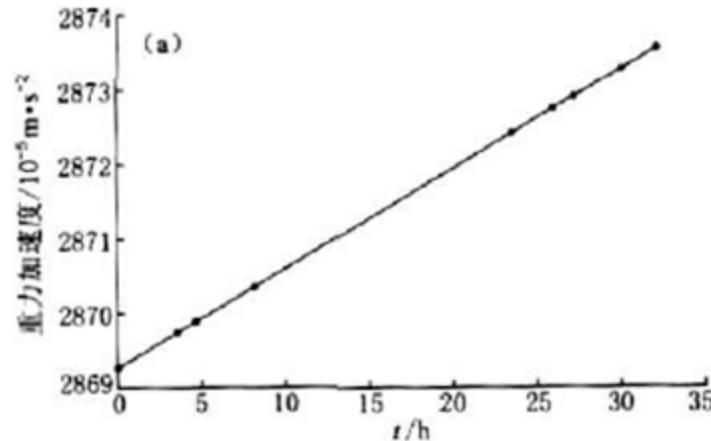
### 3. 重力野外测量

#### 3.2 仪器检查与标定

##### 动态试验

###### 目的

- ✓ 了解仪器动态混合零点漂移的速率;
- ✓ 动态观测下达到的可能精度;
- ✓ 最佳工作时间范围;
- ✓ 确定最大线性零点漂移时间间隔。





### 3. 重力野外测量

#### 3.2 仪器检查与标定

##### 一致性试验

- ✓ 当需用几台仪器在工区工作时，应做此试验；
- ✓ 精度计算式

$$\varepsilon = \pm \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n V_i^2}{m-n}}$$

- ✓ 计算应分别对各台仪器进行，超出精度要求的仪器，不能参加施工中的测量。



### 3. 重力野外测量

#### 3.2 仪器检查与标定

##### 格值标定 (已知点法)

在由国家建立的高精度的重力格值标定场的已知重力差的点上，用仪器在它们之间进行多次重复观测，其独立增量数不少于6个，格值计算式

$$C = \frac{\Delta g}{\Delta S}$$

格值精度

$$\Delta_{\text{格}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n V_i}{n(n-1)}} / \overline{\Delta S}$$



### 3. 重力野外测量

#### 3.2 仪器检查与标定

##### 格值标定（倾斜法）

利用重力仪灵敏系统在水平时与倾斜一个角时所感受的重力作用不同来进行测定的，其重力差值

$$\Delta g = g(1 - \cos \theta)$$

格值为

$$C = \frac{\Delta g}{\Delta S} = \frac{g}{\Delta S}(1 - \cos \theta)$$



### 3. 重力野外测量

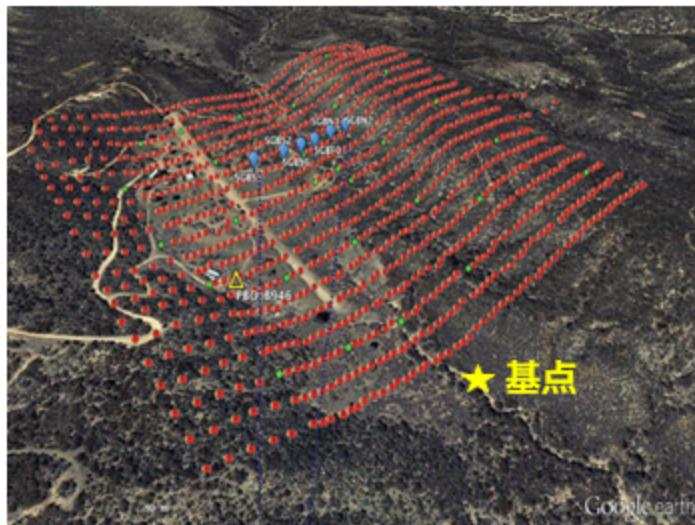
#### 3.3 重力基点网的布置与观测

- 重力仪存在零点漂移，且零漂往往不是与时间呈线性关系。用重力仪在测点上进行观测时，需要有一些精度更高、重力值已知的点来控制。这些点称为**基点**。
- 基点在观测时都要联成封闭的网络，叫做**基点网**。
- 普通点观测均应从基点开始，并终止于基点。



### 3. 重力野外测量

#### 3.3 重力基点网的布置与观测





### 3. 重力野外测量

#### 3.3 重力基点网的布置与观测

##### 基点网的作用

- ✓ 控制重力普通点的观测精度
- ✓ 避免误差的积累
- ✓ 检查重力仪在某一段工作时间内的零点漂移
- ✓ 确定零点漂移校正系数
- ✓ 推算全区重力测点上的相对重力值或绝对重力值。

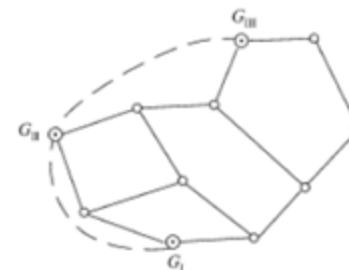


### 3. 重力野外测量

#### 3.3 重力基点网的布置与观测

##### 基点网的布置

- ✓ 均匀分布全区;
- ✓ 一台或多台精度高的仪器观测;
- ✓ 快速交通工具运送;
- ✓ 闭合环路;
- ✓ 多个环路时，每个环路中必须包含相邻环路中两个以上基点作为公共基点;
- ✓ 在交通干线上，地物地貌标志明显，周围无震源，稳固，并按规定统一编号和建立永久或半永久性标记。





### 3. 重力野外测量

#### 3.3 重力基点网的布置与观测

##### 基点网的观测方法

在基点网上观测方式的选择，是以能对观测数据进行可靠的零点漂移校正，能满足设计提出的精度要求为原则。

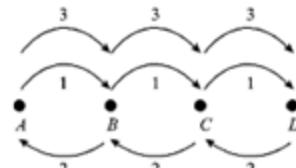


图 3-1 三重循环观测法



图 3-2 重复观法

- ✓ 单向循环重复顺序  $1 \rightarrow 2 \rightarrow 3 \rightarrow \dots \rightarrow 1 \rightarrow 2 \rightarrow 3 \rightarrow \dots$
- ✓ 往返重复顺序  $1 \rightarrow 2 \rightarrow 3 \rightarrow \dots \rightarrow 3 \rightarrow 2 \rightarrow 1$
- ✓ 三重小循环顺序  $1 \rightarrow 2 \rightarrow 1 \rightarrow 2 \rightarrow 3 \rightarrow 2 \rightarrow 3 \rightarrow 4 \rightarrow 3 \rightarrow 4 \dots$



### 3. 重力野外测量

#### 3.3 重力基点网的布置与观测

基点联测



基点联测不仅使工区建立的基点网能够推算绝对重力值，而且可以使测量成果作为全国重力测量的一个组成部分。

重力基本网的测量采用**绝对重力仪**和**相对重力仪**联合进行的。

由绝对重力仪在选定的中心台站施测，然后采用多台(至少4台以上)相对重力仪对各基本点进行环线方式实施联测，测得的重力网差值平差后建立基本网。



### 3. 重力野外测量

#### 3.3 重力基点网的布置与观测

国家重力基本网一般划分为不同的等级：

- √ 基本网点距一般为几百公里
- √ 一级网为几十公里到100 km左右
- √ 二级网为10 km左右

中国重力基本网分为基本网和一等网两级。



### 3. 重力野外测量

#### 3.3 重力基点网的布置与观测

- 1957年我国在全国范围内建立了第一个国家重力控制网，由21个基本点和82个一等点组成，称为**1957年重力基本网**。
- 该网与前苏联的三个重力基本点联测，属波茨坦重力系统，后来发现该系统有+14毫伽的常差。
- 1983年后进行新的建网工作，基本网包括6个基准点、46个基本点和5个引点，共计57个基本重力点。
- 网中北京、上海等点与东京、京都、巴黎、香港等重力点联测，属1971年国际重力基准网即**IGSN-71系统**。
- 1987年起我国正式以该网的57个重力点作为重力起算点，称为**1985国家重力基本网**。



### 3. 重力野外测量

#### 3.3 重力基点网的布置与观测

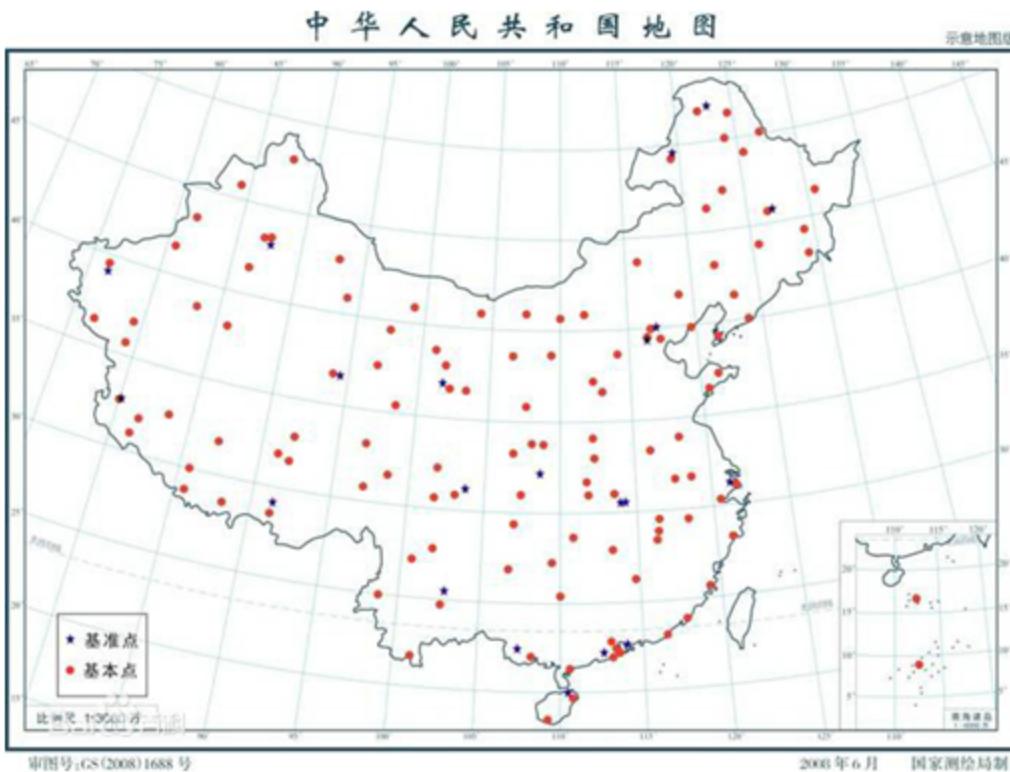
由国家测绘局、总参测绘局和中国地震局于2000年-2002年联合实施**2000国家重力基本网建设工程**

- 由21个基准点、126个基本点和112个基本点引点共计259个重力控制点组成
- 覆盖范围涵盖中国大陆、香港特别行政区、澳门特别行政区及部分海域
- 全网**实际精度为 $\pm 10 \mu\text{Gal}$** ，其中**基准点精度为 $\pm 5 \mu\text{Gal}$**
- 一个由2个闭合环线，共6条联测边组成的国家重力仪标定基线（简称长基线）
- 八个由共64个重力点组成的国家级重力仪格值标定场（简称短基线）



### 3. 重力野外测量

#### 3.3 重力基点网的布置与观测





### 3. 重力野外测量

#### 3.4 普通点、检查点的布置与观测

##### 普通点重力观测

- 普通点应尽量选择在周边20 m范围内地形平缓、近区地形影响较小、无干扰的地段。
- 不应将普通点选择在桥梁、涵洞上，或高楼边及陡崖旁，并避开大面积的水域、大功率无线电发射源、高压输电线等影响普通点卫星定位测量的地段。
- 采用单次观测，必须在规定时间内(即最大线性时间间隔)起止于基点上。

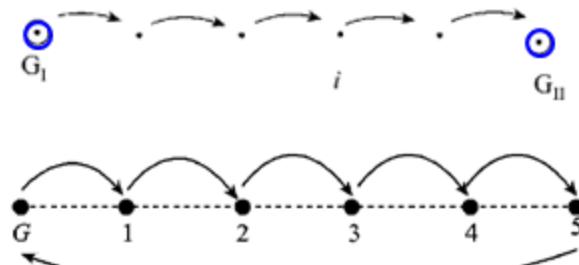
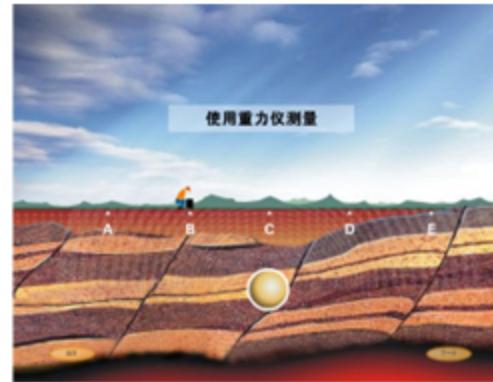


图 3-3 使用单基点测点观测路线图



### 3. 重力野外测量

#### 3.4 普通点、检查点的布置与观测

##### 普通点重力观测

- 普通点观测精度（通过检查观测来衡量），在一个点仅做一次检查观测时，观测精度用下式计算：

$$\varepsilon_{obs} = \pm \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \delta_i^2}{2n}}$$

- $\delta_i$  为改点检查观测值与原始观测值之差， $n$ 为检查点总数目



### 3. 重力野外测量

#### 3.4 普通点、检查点的布置与观测

##### 普通点重力观测

$$\varepsilon_{obs} = \pm \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n \delta_i^2}{2n}}$$

- 若某点的 $\delta_i / 2$ 超过三倍设计允许的 $\varepsilon_{obs}$ 时，该点应作废并不再参与精度的计算，且应对该点重新观测以确定其值。
- 这样的点数不应该大于总检查点数的1%。



### 3. 重力野外测量

#### 3.4 普通点、检查点的布置与观测

##### 普通点测地工作

为了重力测量的进行和对测量结果进行各项校正，需要进行一定的测地工作。

- ✓ 布设重力测网、重力测点；
- ✓ 确定测点的坐标；
- ✓ 确定重力测点的高程；
- ✓ 当测区内地形起伏较大，地形影响不能忽略时，需作相应比例尺的近区地形测量。



### 3. 重力野外测量

#### 3.4 普通点、检查点的布置与观测

物性标本采集（详见岩矿石密度）

为了了解野外地质情况，获取密度资料以便后续的数据处理和解释，需要进行标本采集。

- ✓ 均匀分布与全网；
- ✓ 浅层和深层都需要有；
- ✓ 同一类的标本数量需要有统计意义；



### 3. 重力野外测量

#### 3.4 普通点、检查点的布置与观测

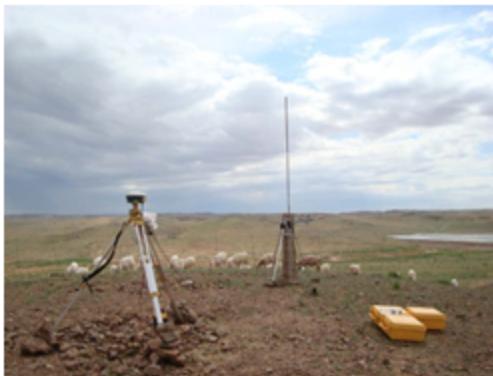
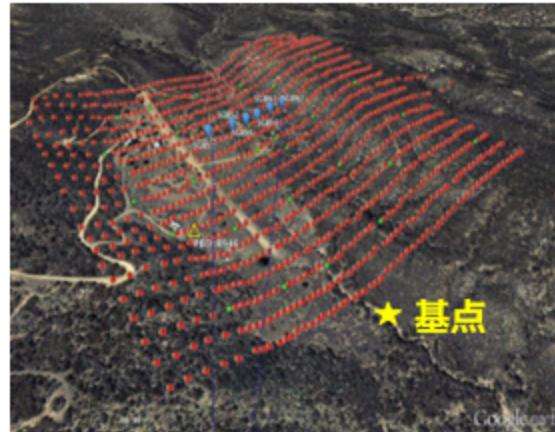
##### 检查点观测

观测质量检查主要包含普通点重力值观测、实测地形改正观测、三维坐标定位测量及物性标本测定质量检查等。

- 检查点布置在时间与空间上都大致均匀，检查工作量不小于总工作量的3%。
- 重力观测检查应按照“一同三不同”即“同点位、不同仪器、不同操作员、不同闭合单元”的要求进行。
- 地改质量检查采用重复测定法、按照“同点位、不同操作员”的要求完成，也可采用加密方位完成。
- 定位观测应按照“同点位、不同操作员、不同仪器、不同观测时段”的要求进行检查。
- 物性标本采用重复测定法，按照“同标本、同仪器、不同测定者”的要求进行检查。
- 检查点应占普通点总数的5-10%，在大面积的区域调查中也应不少于3%。

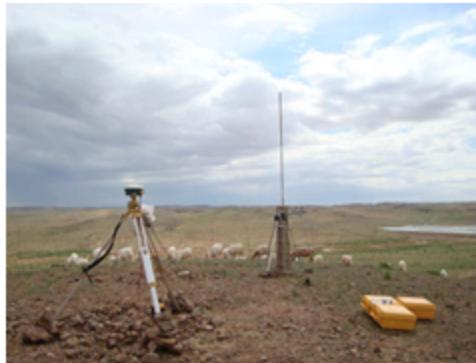
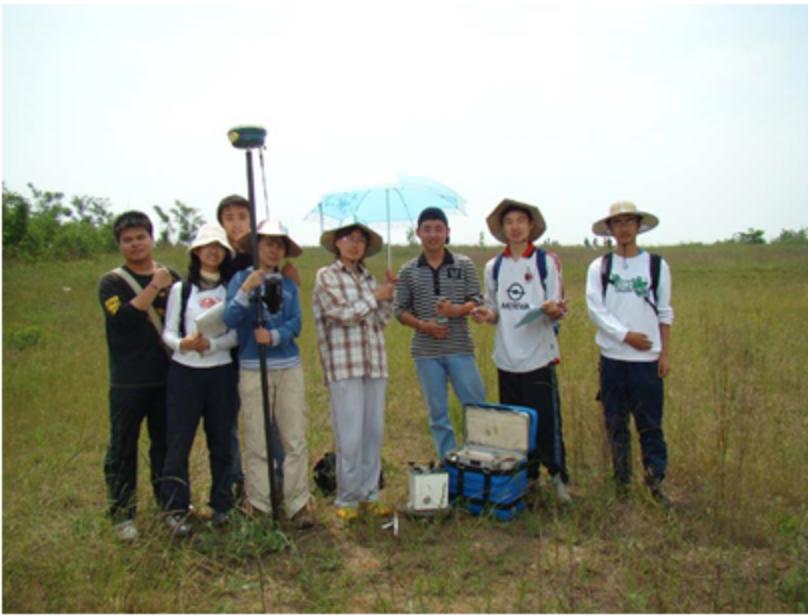


### 3. 重力野外测量



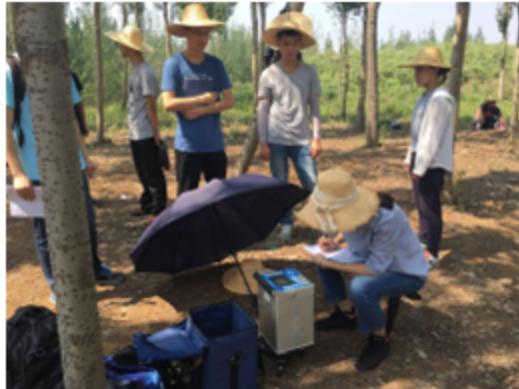


### 3. 重力野外测量





### 3. 重力野外测量



### 3. 重力野外测量



5台同时观测

专用重力观测墩



### 3. 重力野外测量

绝对重力测量



云南省大理州  
**弥渡**地震台



云南省大理州  
**大理**地震台



云南大理州**洱源**地震台

### 3. 重力野外测量

#### 3.5 新型观测平台

随着方法技术和仪器设备的发展，除了地面测量，航空、海洋、卫星等平台也给重力学开辟了全新的应用场景。



### 3. 重力野外测量

#### 3.5 新型观测平台——船载重力测量

船载重力测量的特殊性之一，就是**船体的摇摆与振动**。他和测量重力值混合在一起。但是由于船体的振动与摇摆具有特殊的周期与频率，适当的滤波处理便可以将其分离。另一个问题就是要使重力仪**保持垂直状态**。

船载重力仪（NIPRORI-II 型）





### 3. 重力野外测量

#### 3.5 新型观测平台——船载重力测量

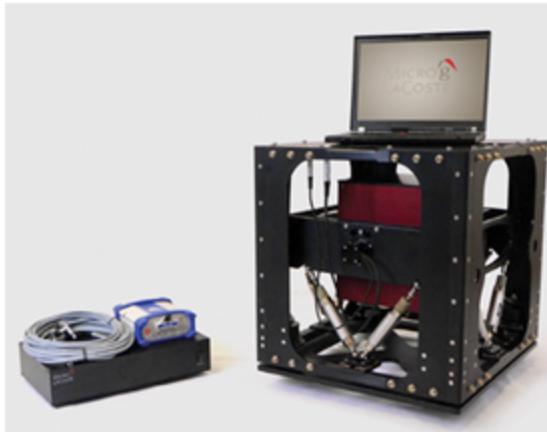
船载重力测量的比较与陆地种测量的比较

- 陆地采用**离散点**测量；船载则是采用**测线型连续点**测量。
- 陆地上刻在固定位置上埋设点位；海洋则无法固定点。
- 陆地上可对同一点进行重复测量；海洋上无法保证。
  - (1) 移动平台上使用相对重力仪。
  - (2) 使用适当的滤波器把风浪等造成的噪声滤除。
  - (3) 由于无法在同一点上重复测量，所以利用**交叉点**分析来评估精度。



### 3. 重力野外测量

#### 3.5 新型观测平台——航空重力测量

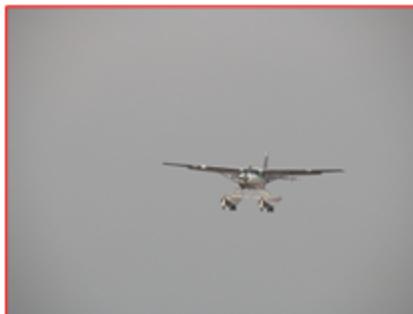


- 固定翼航空重力仪
- 精度0.75 mGal, 测程: 20000 mGal



### 3. 重力野外测量

#### 3.5 新型观测平台——航空重力测量



GT-2A航空重力仪(俄罗斯)  
精度0.6mGal



国产捷联式航空重力仪  
精度1 mGal





### 3. 重力野外测量

#### 3.5 新型观测平台——航空重力测量

由于仪器、人力不多，以中小飞机为主。最常见的螺旋桨飞机DHC-6（Twin Otter airplane），欧洲常用，加拿大De Haviland飞机公司研制。



空载重力测量飞机DHC-6（黄金维提供）



### 3. 重力野外测量

#### 3.5 新型观测平台——航空重力测量



台湾使用的空载重力测量飞机: KingAir BeechCraft 200 and 350 (黄金维提供)



### 3. 重力野外测量

#### 3.5 新型观测平台——航空重力测量



“航空地质一号”飞机性能指标

生产厂家	德事隆航空比奇飞机公司 Textron Aviation Beechcraft Corporation
主要特点	国际广泛采用的先进飞行测量平台。双发增压、中小型（节油环保）、低空 低速安全平稳、用途广泛。
重要指标	最大起飞重量6804kg；人员2-11人；载重：1200kg。
	飞行高度：10558 m；使用温度：-40°C ~ +50°C。
	航程（30min余油）4600 (km)；航速 280-500 (km/h)。
	环境条件：砂尘、湿热、盐雾、昼夜、复杂气象等条件。

“航空地质一号”中远程固定翼航空物探遥感专业调查飞机  
(可开展航空重力、磁力、摄影〔倾斜、推扫、框幅〕、高光谱、  
激光雷达等飞行测量)



### 3. 重力野外测量

#### 3.5 新型观测平台——航空重力测量

“航空地质二号”直升机性能指标



生产厂家	哈尔滨哈飞航空工业有限责任公司
主要特点	国内最新、国际先进直升机测量平台。 自主研制、新型双发（功率大了17%）、中型机。
重要指标	最大起飞重量4250kg；人员1-9人；载重：1800kg。 飞行高度：5200m；使用温度：-40°C ~ +50°C。 航程（30min余油）670 (km)；航速 252(km/h)。 环境条件：砂尘、湿热、盐雾、昼夜、复杂气象等条件。

(可开展航空重力、磁力、吊航电磁、放射性，以及激光雷达、多种航空摄影等飞行测量)



### 3. 重力野外测量

#### 3.5 新型观测平台——航空重力测量

“航空地质三号”直升机性能指标



生产厂家	昌河航空工业有限责任公司
主要特点	国内最新、国际水平直升机测量平台。 自主研制、单发、小型
重要指标	最大起飞重量2250kg；人员1-5人；载重：800kg。 飞行高度：6500m；使用温度：-40°C ~ +50°C。 航程（30min余油）500 (km)；航速 220(km/h)。 环境条件：砂尘、湿热、高原等条件。

(可开展航空重力、磁力、吊航电磁、放射性，以及激光雷达、多种航空摄影等  
飞行测量)



### 3. 重力野外测量

#### 3.5 新型观测平台——卫星重力测量

卫星上设置雷达测高仪，向海平面发射微波脉冲，经由海水反射，由卫星上天线接收，计算其发射至接收时间差，即可计算出卫星至海面的距离（Seeber, 1993）：

$$R = c \frac{\Delta t}{2}$$

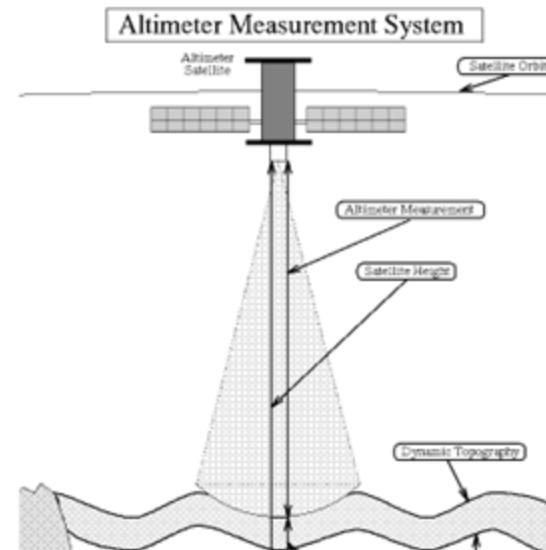
$R$ ：卫星至海面的距离

$c$ ：光速

$\Delta t$ ：脉冲往返时间

海水高度： $SSH = h - R$

$h$ ：卫星至参考椭球面的距离

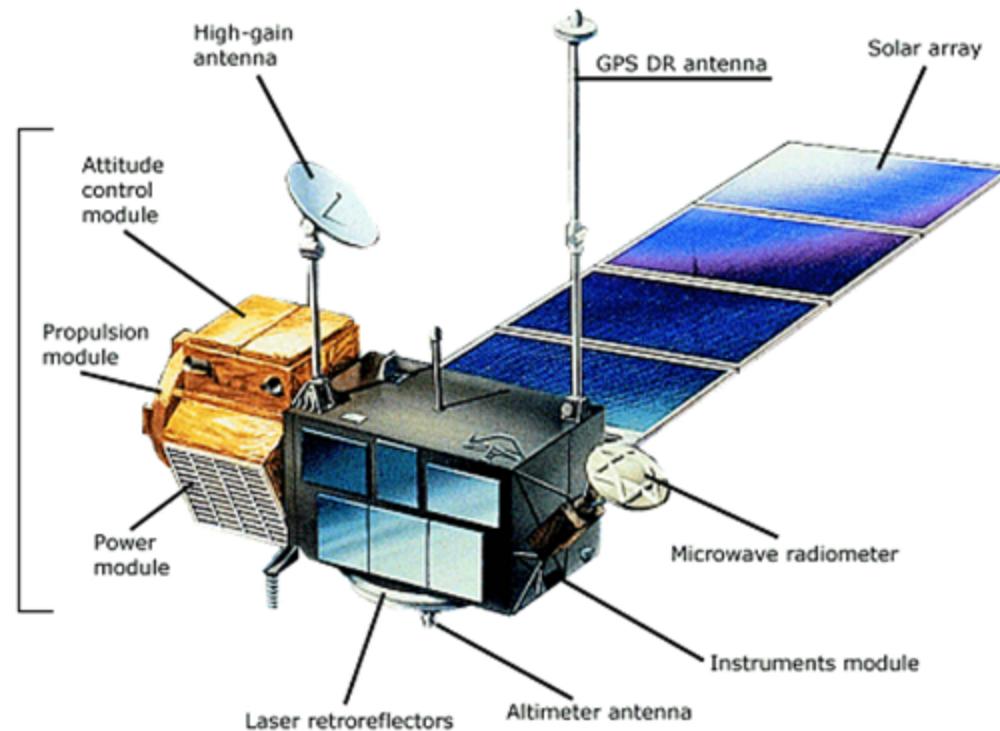




### 3. 重力野外测量

#### 3.5 新型观测平台——卫星重力测量

**TOPEX/Poseidon  
satellite altimeter**





### 3. 重力野外测量

#### 3.5 新型观测平台——卫星重力测量

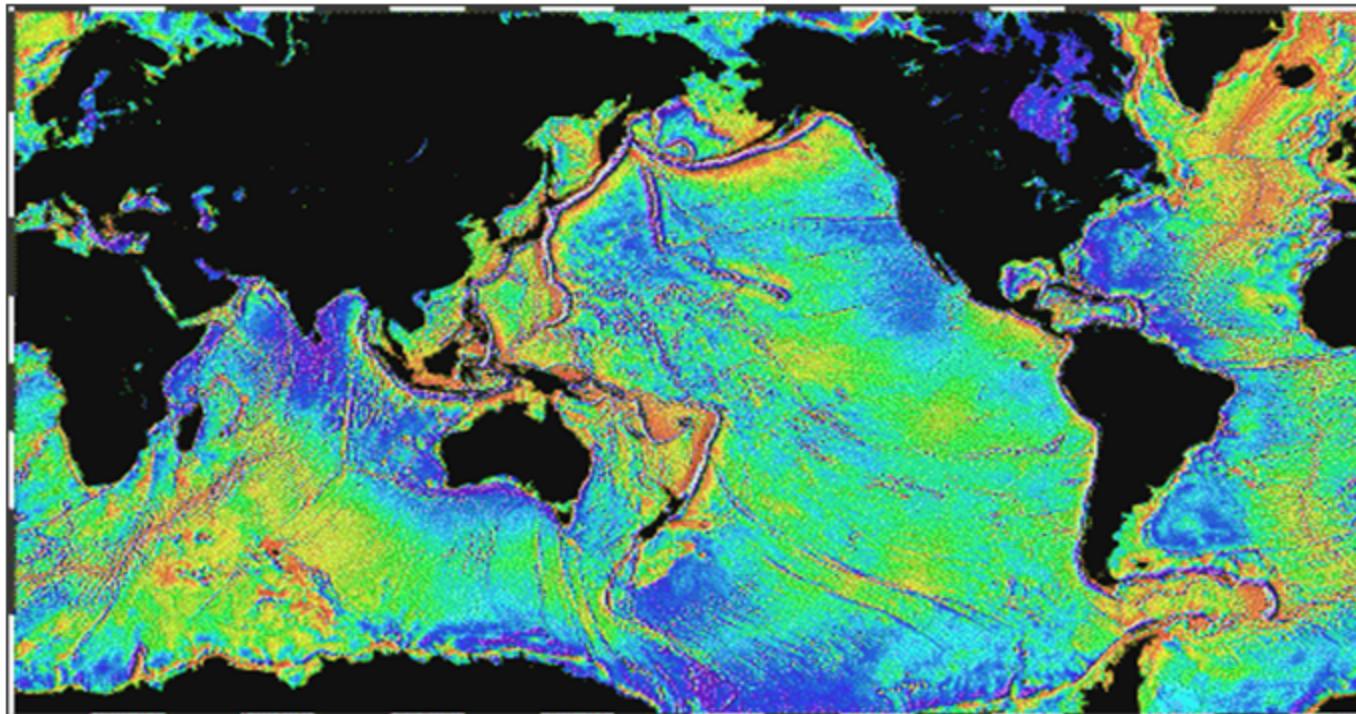
#### 海洋测高卫星一览

衛星名稱 <sup>o</sup>	發射時間 <sup>o</sup>	傾角(度) <sup>o</sup>	高度(km) <sup>o</sup>	天線波寬(度) <sup>o</sup>	脈衝頻率(Hz) <sup>o</sup>	開門個數 <sup>o</sup>	預設開門 <sup>o</sup>	開門時間(ns) <sup>o</sup>	儲存波形頻率(Hz) <sup>o</sup>
SEASAT <sup>o</sup>	1978.6.27 <sup>o</sup>	108 <sup>o</sup>	800 <sup>o</sup>	1.6 <sup>o</sup>	1020 <sup>o</sup>	60 <sup>o</sup>	30.5 <sup>o</sup>	3.125 <sup>o</sup>	10 <sup>o</sup>
GEOSAT <sup>o</sup>	1985.3.12 <sup>o</sup>	108 <sup>o</sup>	800 <sup>o</sup>	2.1 <sup>o</sup>	1020 <sup>o</sup>	60 <sup>o</sup>	30.5 <sup>o</sup>	3.125 <sup>o</sup>	10 <sup>o</sup>
ERS-1 <sup>o</sup>	1991.7.17 <sup>o</sup>	98 <sup>o</sup>	784 <sup>o</sup>	1.3 <sup>o</sup>	1020 <sup>o</sup>	64 <sup>o</sup>	32.5 <sup>o</sup>	3.03/12.12 <sup>o</sup>	20 <sup>o</sup>
ERS-2 <sup>o</sup>	1995.4.12 <sup>o</sup>	98 <sup>o</sup>	784 <sup>o</sup>	1.3 <sup>o</sup>	1020 <sup>o</sup>	64 <sup>o</sup>	32.5 <sup>o</sup>	3.03/12.12 <sup>o</sup>	20 <sup>o</sup>
ENVISAT <sup>o</sup>	2003.3.1 <sup>o</sup>	98 <sup>o</sup>	799.8 <sup>o</sup>	1.3 <sup>o</sup>	1020 <sup>o</sup>	64 <sup>o</sup>	32.5 <sup>o</sup>	3.03/12.12 <sup>o</sup>	20 <sup>o</sup>
TOPEX(ku) <sup>o</sup>	1992.8.10 <sup>o</sup>	66 <sup>o</sup>	1334 <sup>o</sup>	1 <sup>o</sup>	4500 <sup>o</sup>	128 <sup>o</sup>	32.5 <sup>o</sup>	3.125 <sup>o</sup>	10 <sup>o</sup>
TOPEX(C) <sup>o</sup>	1992.8.10 <sup>o</sup>	66 <sup>o</sup>	1334 <sup>o</sup>	2.7 <sup>o</sup>	1200 <sup>o</sup>	128 <sup>o</sup>	32.5 <sup>o</sup>	3.125 <sup>o</sup>	5 <sup>o</sup>
POSEIDON <sup>o</sup>	1992.8.10 <sup>o</sup>	66 <sup>o</sup>	1334 <sup>o</sup>	1.1 <sup>o</sup>	1700 <sup>o</sup>	60 <sup>o</sup>	29.5 <sup>o</sup>	3.125 <sup>o</sup>	20 <sup>o</sup>
GFO <sup>o</sup>	1998.2.10 <sup>o</sup>	108 <sup>o</sup>	800 <sup>o</sup>	1.6 <sup>o</sup>	1020 <sup>o</sup>	128 <sup>o</sup>	32.5 <sup>o</sup>	3.125 <sup>o</sup>	10 <sup>o</sup>
Jason-1(ku) <sup>o</sup>	2001.12.7 <sup>o</sup>	66 <sup>o</sup>	1334 <sup>o</sup>	1.3 <sup>o</sup>	1800 <sup>o</sup>	104 <sup>o</sup>	32.5 <sup>o</sup>	3.125 <sup>o</sup>	20 <sup>o</sup>
Jason-1(C) <sup>o</sup>	2001.12.7 <sup>o</sup>	66 <sup>o</sup>	1334 <sup>o</sup>	3.4 <sup>o</sup>	300 <sup>o</sup>	104 <sup>o</sup>	32.5 <sup>o</sup>	3.125 <sup>o</sup>	20 <sup>o</sup>



### 3. 重力野外测量

#### 3.5 新型观测平台——卫星重力测量

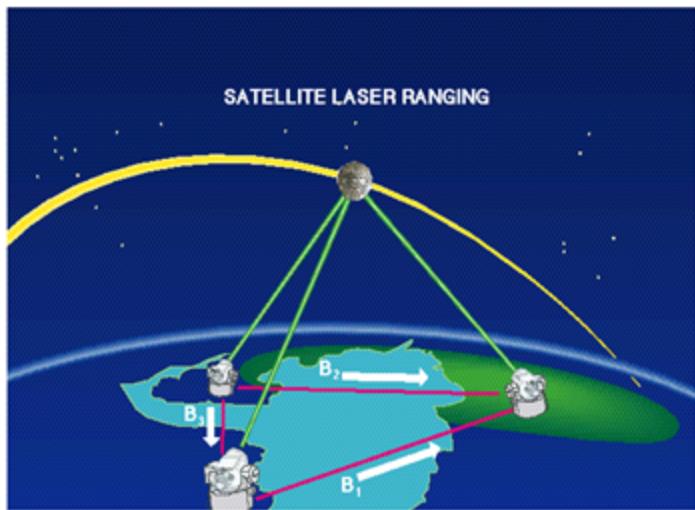


Satellite Ocean Altimetry Derived Gravity Field

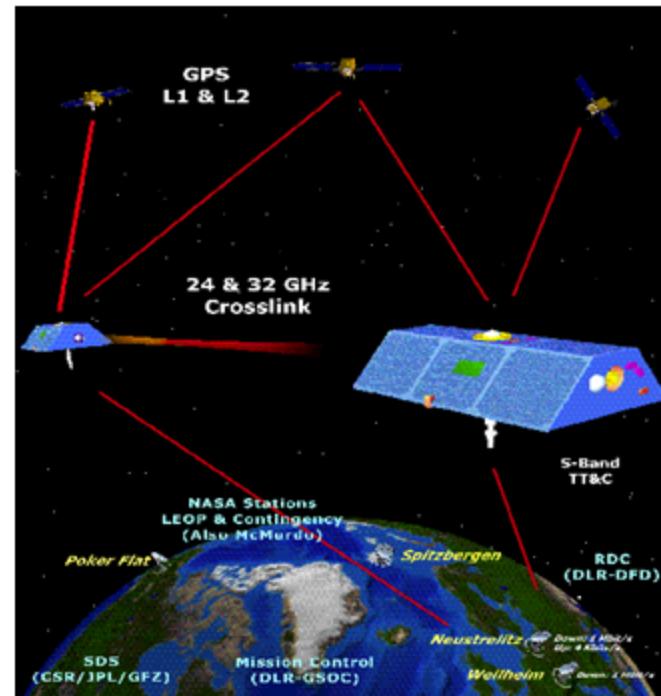


### 3. 重力野外测量

#### 3.5 新型观测平台——卫星重力测量



早期SLR (利用其他卫星)

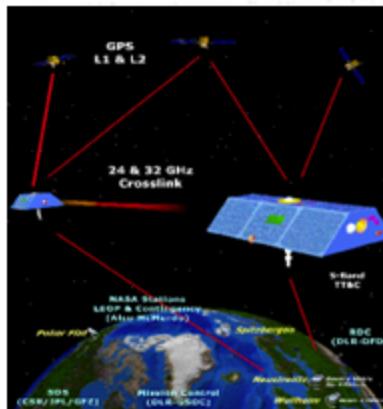
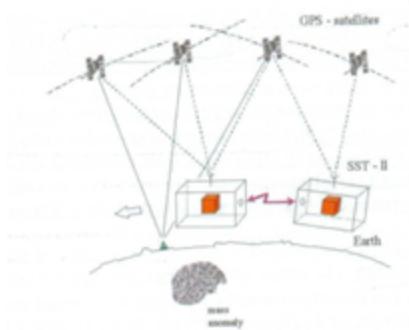


现代GRACE (专用)



### 3. 重力野外测量

#### 3.5 新型观测平台——卫星重力测量



## GRACE Mission (SST-II)

World first **SST-II mode** mission

Combined with SST-HI mode

Two spacecraft at same orbit

200 km apart, 'chase each other'

Relative motion measured by microwave link

Non-gravitational forces measured or compensated

Launched on March 17, 2002

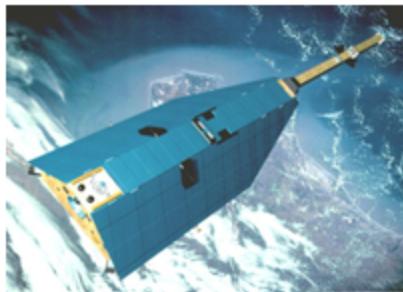
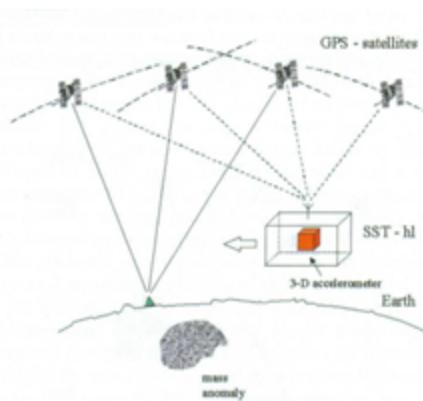
Objective: unprecedented accuracy, global/high-resolution estimates of constant and time-variable part of Earth's gravity field for Every 30 days in 5 years



### 3. 重力野外测量

#### 3.5 新型观测平台——卫星重力测量

CHAMP Mission (SST-hl)



GFZ Potsdam Germany

US/German

World first gravity mission

LEO is equipped with a GPS receiver and a 3-D accelerometer

12 GPS/GLONASS satellites at any time

Orbit of LEO monitored cm-precision without interruption, in 3-D

Accelerometer measures non-gravitational forces, which be computed or compensated

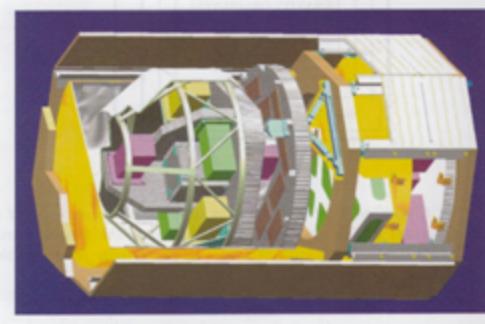
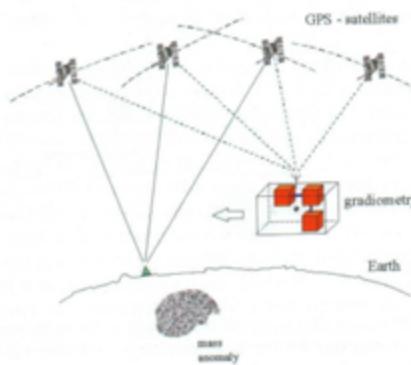
Launched on July 15, 2000; 5 years

Aims: geosphere, hydrosphere, atmosphere



### 3. 重力野外测量

#### 3.5 新型观测平台——卫星重力测量



## GOCE Mission (SGG)

World first SGG mission (SST-hl)

An ensemble of accelerometers inside one satellite; Gradiometer

SGG measures acceleration differences between test-masses, in 3-D

Non-gravitational forces drops out – they are in same manner

May 26, 2009 Launched

Objective: Static high accuracy

/spatial resolution gravity field/geoid

Half-wavelength 100 km,

1-cm geoid, 1-mg gravity

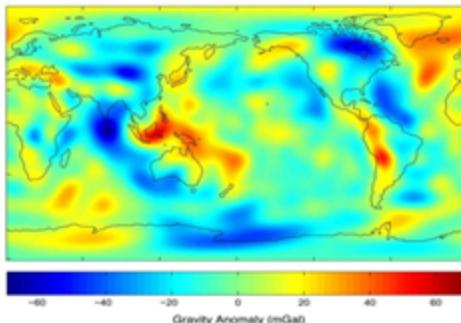


### 3. 重力野外测量

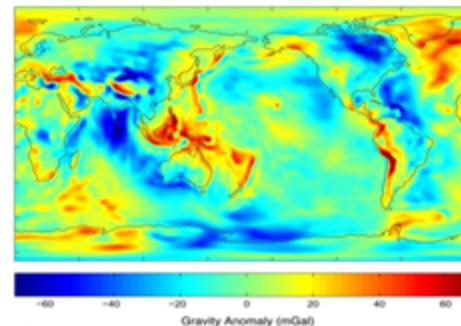
#### 3.5 新型观测平台——卫星重力测量

##### Static Gravity Anomaly

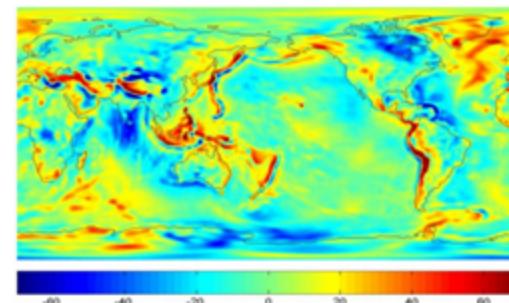
4 Decades of tracking to geodetic satellites



111 days of GRACE data



13 months of GRACE data

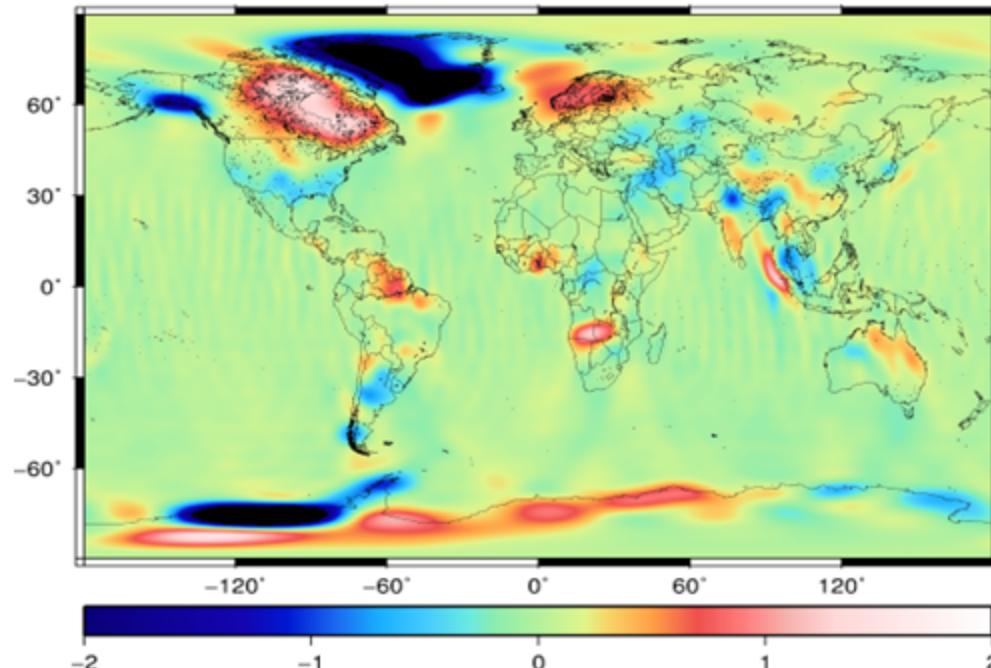




### 3. 重力野外测量

#### 3.5 新型观测平台——卫星重力测量

Global gravity rate( $\mu\text{Gal}/\text{yr}$ ), CSR05, 2003~2012





### 3. 重力野外测量

讨论：重力与GNSS观测技术的对比

- GNSS观测



- 新兴的学科
- 快速发展的学科

- 重力观测



- 古老的学科
- 尚在发展中的学科

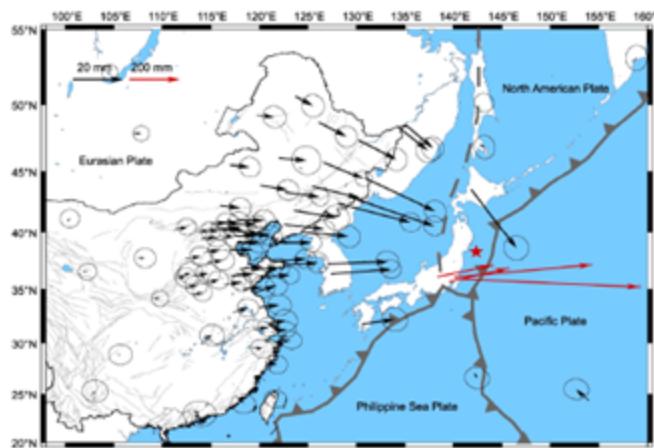
原因何在？对我们科研选题有何启发？



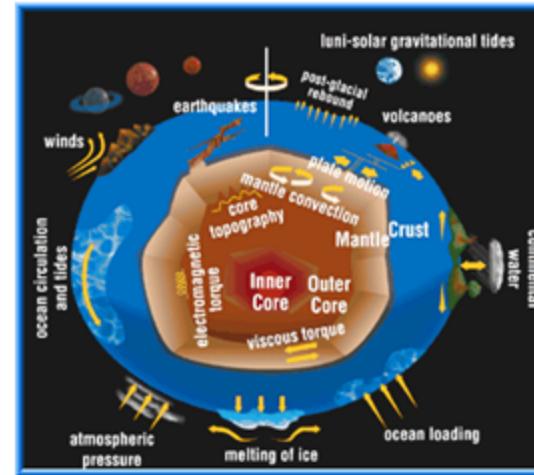
### 3. 重力野外测量

讨论：重力与GNSS观测技术的对比

- GNSS观



- 重力观测

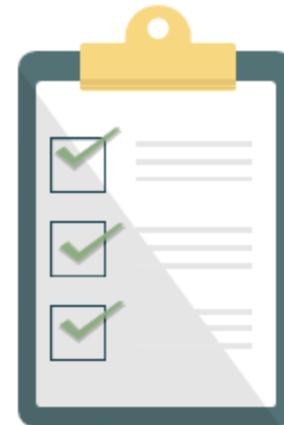


- 研究对象单纯：位移
- 观测技术可靠

- 影响因素众多，物理对象复杂
- 观测技术的稳定性与准确性不足  
漂移问题、掉格问题

# 小节

- 重力测量分类
- 仪器的检查
- 野外测量工作



## 课后习题

- 基点的作用
- 重力测量的有利条件



# 课程结束

陈涛

