

## 重力加速度的绝对测定\*

方永源 张光远 李德禧 林乃光 林鸿初  
高景龙 姜溯洲 黄澄清 黄大伦 郭有光

(中国计量科学研究院)

准确测定绝对重力值,对精密测试、国防工程、地球物理以及天文学都有重要意义。

近代标准物理实验室的一些物理量的精密测量需要十分精确的当地重力值。例如,它和标准质量一起,共同构成力的标准,重力值每差 1mgal,对力和压力标准影响近百万分之一。又如在建立电流单位时,我们定义安培是一恒定的电流强度,若保持在真空中相距一米的两根无限长而圆截面极小的平行直导线内,则此导线之间,每米长度上产生的力等于  $2 \times 10^{-7} \text{N}$ ;重力值每差 1 mgal,使安培值差约千万分之五。

近代的高精度绝对重力测量,都是采用自由运动原理完成的。此原理可分简单自由下落(下落法)和对称自由运动(上抛法)两种。随着

激光精密测长和电子快速定时技术的发展,以微伽级的准确度测定自由运动物体的飞行距离和时间已是完全可能的。我们采用的下落法方案是在物体自由下落轨迹中取三点,分别测出点一和点二之间以及点一和点三之间的时间间隔和相对应的距离 ( $T_1, H_1$  及  $T_2, H_2$ ),从而得到重力值

$$g = \frac{2}{T_2 - T_1} \left[ \frac{H_2}{T_2} - \frac{H_1}{T_1} \right]$$

仪器的整体如图 1 所示。精密测长是用干涉方法进行的。这部分结构是一个变形的迈克

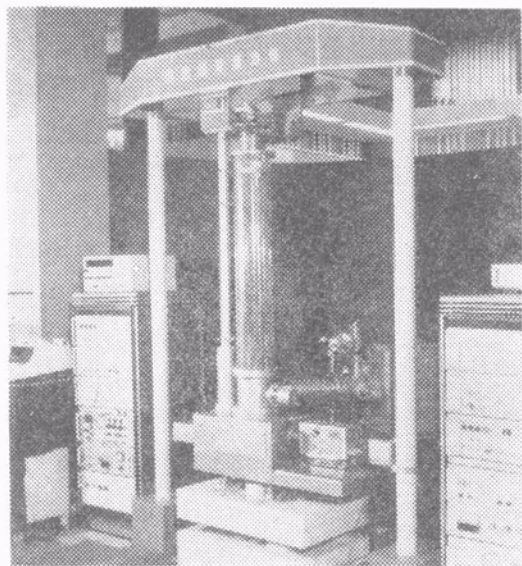


图 1 重力仪整体

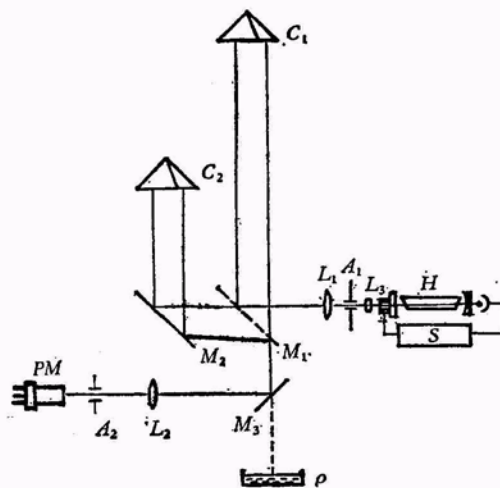


图 2 光路系统图

H——氦氖激光器;  $M_1$ ——分光镜; S——稳定伺服系统;  $M_2$ ——固定反射镜;  $C_2$ ——参考立体棱镜;  $L_3$ ——聚光镜;  $M_3$ ——可移动反射镜;  $L_2$ ——准直透镜;  $A_1$ ——孔径光栏; PM——光电倍增管;  $A_2$ ——屏蔽光栏;  $L_1$ ——准直透镜;  $C_1$ ——下落立体棱镜;  $\rho$ ——水银盘

\*1978年7月20日收到。

尔逊干涉仪,如图 2 所示。光源采用稳定在兰姆下陷的氦氖激光器,它的波长直接与国家长度基准  $K^{86}$  比对,准确度保证在  $\pm 0.0003 \text{ \AA}$  范围内。干涉仪的反射镜是两个玻璃直角立体棱镜,其角误差小于  $0.6''$ 。一个作为参考点固定在仪器底座上;另一个则装在落体上。落体一旦下落,两棱镜之间的光程差就发生变化。于是下落距离  $H$  是用半波长为单位的干涉条纹数来度量的。

为了准确测定垂直距离  $H$ ,对光学和机械系统进行了精密设计和仔细调整。将光线校准到垂直于水平面,偏离小于  $20''$ ;光束发散角小于  $15''$ ;落体质心与棱镜光心经精心调整和配重,偏差为  $\pm 0.08 \text{ mm}$ 。悬挂装置每次都把落体准确定位和稳定释放,控制落体下落转动小于  $30'/s$ 。使落体转动引起的光程差及附加加速度均可忽略。为在落体下落中尽量减小非重力干扰,采用了某些特种工艺处理。装置用离子泵抽真空,约至  $5 \times 10^{-6} \text{ torr}$ 。

本装置的电子系统如图 3 所示。四个计数器记录的信号  $H$  和  $T$  来自两路。一路是经甚低频接收机获得同原子频标比对的石英频率信号,频率为  $1 \text{ MHz}$ ,稳定度优于  $1 \times 10^{-10}$ ,准确度优于  $1 \times 10^{-9}$ 。经放大和整形变换成重复周期为  $1 \mu\text{s}$  的脉冲列;另一路则是干涉条纹信号经变换而形成的脉冲列,在落体的测量行程内,其重复频率加速变化于  $3 \text{ MHz}$  到  $14 \text{ MHz}$  之间。选取这两路脉冲的起止门控信号,是由时序发生器和符合单元产生的。当下落启动信号发出后,时序发生器将标准频率信号进行一系列逻辑处理,产生若干组时间间隔能够预选的脉冲信号。符合单元的功能是利用上述两脉冲列中

的若干脉冲在时间轴上同时出现的条件来产生起止门控脉冲,使门控脉冲和过门脉冲列在时间上有确定的关系。从而在时间测量中用符合单元的分辨时间 ( $2\tau \leq 5 \text{ ns}$ ) 代替  $\pm 1$  的量化误差 ( $1 \mu\text{s}$ )。符合条件的提出,自然产生一个符合几率的问题。为了满足精度,符合脉冲的设计宽度为  $5 \text{ ns}$  (实测半峰值处宽约  $2.5 \text{ ns}$ )。考虑测量的具体条件,不管是理论上的估计,或是电子计算机按实测状态的模拟计算,都证明在  $1 \text{ ms}$  内有足够的符合几率。

整个装置的光学、机械、电子系统以及各个参数监测仪器一旦调整完毕,实验就在电子计算机的控制下开始取数并及时进行数据处理。我们的测量从 1974 年至 1975 年共积累数据 29 组,做了近 600 次下落测量。

在处理这 29 组数据时,我们先做了一些误差分析。重力加速度的量纲为  $L^1T^{-2}$ 。原则上误差的产生来自这两个基本量的测量上。但当测量精度较高时,技术方案相应显得复杂,各种参数的监测、计算就要多些、严格些。误差来源一般可分为时频标准、长度标准、光学系统、电子线路、非重力影响和地球物理因素等项。而实际误差分析中,我们具体细分得更多。对其中影响较大的误差因素,尽各种努力加以消除或减小。

单组测量的随机误差,主要来自地面微振。产生振动的起因是多种的,故频谱也较为复杂。设其某一分量的参数是频率  $f(\text{Hz})$ 、振幅  $A_0(\mu\text{m})$ ,那么就会使测量产生一个反正弦分布的离散,其标准误差为

$$\sigma = 12.4(\sin 0.47 f)^2 A_0(\text{mgal}).$$

我们实验经常遇到的振动频率之一是  $3 \text{ Hz}$  左右。白天和晚上的振幅分别约为  $0.12 \mu\text{m}$  和  $0.05 \mu\text{m}$ 。可见,此振动产生的离散标准误差白天约为  $1.2 \text{ mgal}$ ,晚上约为  $0.7 \text{ mgal}$ 。为了提高测量精度,我们对微振进

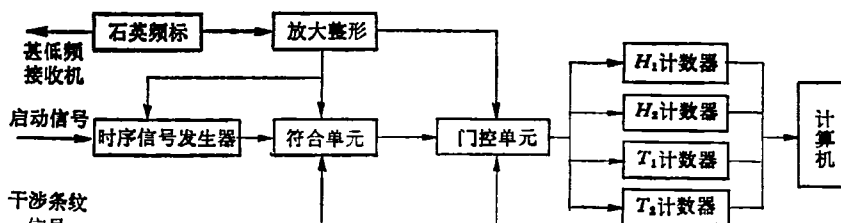


图 3 部分电子系统方框图

行了实测并给予适当的修正,使单组随机误差有所改善(见图4)。

在测量的系统误差中,较大的变动性系统误差有真空度、光线垂直性、地球潮、波长等项。这些误差都在每组实验结束时,依据当时的参数由计算机进行计算,并对结果给予修正。

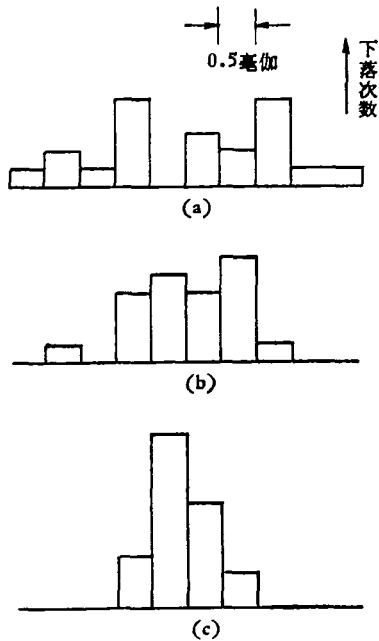


图4 1975年6月26日测量数据直方图  
(a) 白天15点,未作振动修正,标准误差:1.3毫伽  
(b) 晚上23点,未作振动修正,标准误差:0.75毫伽  
(c) 晚上23点,已作振动修正,标准误差:0.37毫伽

关于测量中较大的不变性系统误差有六项(见下表)。其中重力梯度一项,产生于我们习惯给出搁置仪器的平台面处的重力值。事实上,局部空间的重力梯度 $\beta$ 是不变的。忽略重力梯度时的测定结果与落体悬挂点的真实重力差值 $\Delta g$ 为 $\Delta g = 0.038 \beta g$ 。这就证明测定处于悬挂

系统误差表 (mgal)

序号	误差源	系统偏差	系统不确定度(±)
1	激光波长检定	0	0.03
2	电子线路	-0.05	0.02
3	电磁影响	0	0.01
4	残余空气阻力	0	0.05
5	光速有限	+0.03	0
6	重力梯度	-0.39	0
合成		-0.41	0.06

状态的落体质心下方38cm处的重力值,不需此项梯度修正。反之,任何重力梯度修正都来自此点的高差上。为了保证精度,重力梯度的测量要优于 $\pm 0.001 \text{ mgal/m}$ 。

根据上述误差分类,就可以讨论29组数据的组间分散及处理方法。每组数据一般有25次测量,其处理过程首先对组内每一个数据点进行振动修正,使其单次随机误差有较好的改善。然后对组平均值给予不变性和变动性两种系统误差的修正。这样表示29组组间分散的随机误差和单组的随机误差就不一样。它一方面来自于单组数据经振动修正后的随机误差,即误差尽管具有抵偿性,但一般只进行25次的有限次测量,其平均值只能是一个无偏估计值,与其数学期望之差值就自然带入组间分散来了。另一方面来自于各组变动性系统误差的差异和修正误差的变化上。这种误差源不会很多,但性质复杂,有补偿性的,也有单向性的。而方差分析说明,29组组间方差分量严重,从而肯定有的结果不是来自同一统计母体。可见,从29组数据求最佳值时,采用加权平均是不恰当的,而选用简单平均(即等权平均)较好。至于它的误差评定,既然这类随机误差存在单向成分,就不具备严格的补偿性。那么强调最佳值的误差随参加平均的组数的增多而减小就不合适了。考虑到国际上有的物理常数精密测量中,各家数据的全部不确定性甚至出现互不交叉重叠的现象,这都是评定最佳值的误差时估计过低的结果。所以我们选用29组组间分散的单次标准误差来表示最佳值的随机标准误差。

最后的准确度应为随机误差和系统误差的合成。用标准误差(68%置信概率)表示为

$$\sigma = 0.10 \text{ mgal.}$$

测量结果和我国过去引用的波茨坦标准重力系统对比,发现后者偏大约 $13.4 \pm 0.5 \text{ mgal}$ 。这个结论和目前国际公认的数据基本符合。

当前国际绝对重力测量向更高精度和绝对测量仪器可移动的方向发展,国际计量局(巴黎)固定台站测量精度接近 $1 \mu\text{gal}$ 。在国际计量

局帮助下,意大利计量研究所已研制成可移动式绝对重力仪精度达  $20 \mu\text{gal}$ 。根据科技事业发展需要,我们正在研制“上抛法”测定绝对重力加速度装置,以进一步提高  $g$  值的准确度并使仪器可搬运。

### 参 考 文 献

- [1] 方俊,《重力测量与地球形状学》,科学出版社,(1965).
- [2] J. A. Hammond, and J. E. Faller, *Spec. Pubc*, **343** NBS (1971), 457.
- [3] A. Sakuma, *Spec Pubc*, **343** NBS (1971), 447.

## CdS 烧结膜太阳能电池\*

鲍凤岐 张玉仙

内蒙古大学物理系

### 一、引 言

太阳能是一种取之不尽、用之不竭、无污染的天然能源。太阳能电池把太阳光能直接转换为电能,是当前太阳能利用的重大的发展方向。

目前,由于太阳能电池的造价太高,难于在地面上推广应用。为了实现地面应用的目的,降低太阳能电池的成本、提高其光电转换效率是重要的研究课题。就降低成本而言,主要考虑两方面:少耗原料及简化工艺流程。

CdS 烧结膜电池符合耗原料少和工艺简单的要求。此类电池早在 60 年代已有研究。但由于没有合适的衬底和底电极材料,加之通常烧结所得到的 CdS 膜疏松,易龟裂,不易作成电池,而未得到很好的发展<sup>[1]</sup>。1974 年, S. Vojdani 等人<sup>[2]</sup>在 Al 衬底上制作了 CdS 烧结膜太阳能电池,效率最高达 1%。1976 年,日本、美国有人分别在导电玻璃上制成了 CdS 和 CdTe 烧结膜太阳能电池,效率达 3%。

我们于 1977 年研制出导电陶瓷衬底,并在其上制成了 CdS 烧结膜太阳能电池,效率达 2.3%。

### 二、电池的制作工艺

CdS 太阳能电池,一般有烧结体电池和蒸发膜电池两种。

CdS 烧结体电池,是把 CdS 粉末压成 2mm

的圆片,然后在  $850^\circ\text{C}$  的  $\text{N}_2$  气中烧结 3 小时左右,使其成为多晶半导体片。在其一面用电镀法或真空蒸发镀上一层 Zn 或 Ni 作底电极;在另一面用浸泡法或电化学方法形成 P 型的  $\text{Cu}_2\text{S}$  层,同时形成 CdS/ $\text{Cu}_2\text{S}$  异质结。最后在 P 型  $\text{Cu}_2\text{S}$  面上制作栅状电极,便是电池了。

CdS 蒸发膜电池,是在金属化的塑料膜上真空蒸发一层 Zn 作电极,再在其上蒸上 CdS 膜,以后工序和烧结体电池相似。

由上可知,烧结体电池所需设备简单,投资少,便于大规模生产,但需要 CdS 原料多。CdS 蒸发膜电池所需设备要求高,投资大,不便大量生产,但耗费原料少。因之,前者可取之点是陶瓷工艺简单,而后者是耗原料少。

我们吸收了上述两方面的优点。经一年多的努力,研制出一种和 CdS 欧姆接触的导电陶瓷材料,并找到了一种简单地对 CdS 膜加压的方法,克服了烧结膜的工艺困难,从而研制成功 CdS 烧结膜太阳能电池。电池结构如图 1 所示

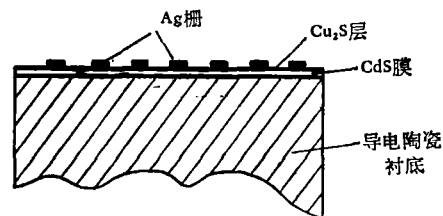


图 1 CdS 烧结膜电池的结构  
电池的制作工艺:

\* 1978 年 1 月 30 收到。