

引力常数 G 及其测量

张平华

(中国科学院物理研究所)

引力相互作用是物理世界的四种^[1]基本相互作用之一。它的耦合常数为引力常数 G 。本文将介绍近年来有关 G 的理论和测量的进展。

一、 G 又被重视起来了

引力常数 G 是人类测量得最早的基本物理常数。远在 1798 年, 卡文迪什已经用扭秤测出了引力常数 G , 并且用它估计过地球的质量。由于引力相互作用是四种基本相互作用中最弱的一种, G 的精确测量是非常困难的。 G 又没有什么用处^[1], 使得以后 G 的测量研究长期陷于停顿的状态。直到 1969 年, G 的测量精度还几乎停留在卡文迪什的水平, 只有三位有效数。有人分析甚至不超过 $1/500$ ^[2]。

近年来随着广义相对论理论研究的进展, 提出了许多牵涉到 G 的性质的理论, 推动了为验证这些理论的 G 的测量研究工作。 G 又被重视起来了, 以下对这些理论作简单的介绍。

二、关于 G 的一些理论

1. G 随时间和空间而变化的理论^[3]

有一类含有马赫原理的理论认为引力常数 G 与宇宙空间总的物质分布有关。如果宇宙物质的分布随时间而改变, G 也会随时间改变。此外在宇宙不同的地点, 宇宙总物质对它的影响不同, G 也会随地点的不同而不同。现代宇宙论认为宇宙是膨胀的, 宇宙物质分布越来越稀, G 就会随时间越变越小。现在的 G 要比远古时代的 G 小。有人认为地球上的五大洲可能由于 G 变小, 地球膨胀, 由原来是一大块物质分裂而成的, 至今仍在继续漂离。这类理论的一种, 如 Dicke-Brans-Gordan 的理论, 认为每年 G 的相对变化 $\Delta G/G$ 是 $10^{-10} - 10^{-11}$ 。这类理论的另一类, 如 Nordtvedt 和 Will 的理论得出地球在绕太阳作椭圆轨道运动时, 由于地球位置的不同, $\Delta G/G$ 最大可达 10^{-10} 。

2. G 随速度而变化的理论^[3]

有一类认为宇宙中存在优越参考系的理论, 得出 G 要随着相对于这个优越参考系的速度不同而不同。

同。地球对优越参考系的速度等于地球对太阳的速度加上太阳对优越参考系的速度。地球绕太阳运动时, 速度方向不断地改变, 有以一年为周期的变化。地球相对于优越参考系的速度也就有以一年为周期的变化。为此地球上的 G 值也会有以一年为周期的变化。

3. Dirac 的大数假设^[4,5]

这种理论也得出 G 要随时间而变, 但出发点和上面提到过的理论不同。曾经在量子力学中作出重要贡献的 Dirac, 在 1973 年发展了他在三十多年前提出过的大数假设理论。物理学中用自然单位得出的无量纲常数, 如精细结构常数的倒数 $\hbar c/e^2 \sim 137$ 。质子、电子的质量比 $m_p/m_e \sim 1800$ 等。Dirac 认为这些无量纲常数所以取这些值是有原因的, 现在人类还无法知道这个原因。另外有些无量纲的数却是非常大的数。例如质子和电子之间的电力和引力之比 $e^2/Gm_p m_e$ 约为 2×10^{39} 的无量纲大数。宇宙的年龄 (约为 2×10^{10} 年) 如用原子时间单位 $e^2/m_p c^3$ 来表示, 得到一个约为 7×10^{39} 的无量纲大数。同上面一样, Dirac 认为这个数值也应该是原因的, 虽然还无法知道, 但可以假定这些大数之间是有联系的, 其中一个大数如随时间变化 (如上述用原子单位表示的宇宙年龄) 其他大数也要随时间变化。由此, 上面的无量纲大数 $e^2/Gm_p m_e \sim 2 \times 10^{39}$ 就应该随时间而变大 (因为宇宙年龄是变大的)。如果认为 $e^2/m_p c^3$ 不随时间变化, 那么 G 就应该随时间而变小。每年 $\Delta G/G$ 是 $10^{-10} - 10^{-11}$ 或更小些。Dirac 这个理论牵涉面很广。宇宙的总质量 (包括不可见的黑洞在内) 如用质子质量为单位来表示, 约为 10^{74} 的无量纲大数, 它恰为前面所提大数的平方, 它也要随时间变大。因此, 宇宙总质量将不断地增加, 宇宙就不断地产生物质, 可能在宇宙空间均匀地产生, 也可能在有物质的地方增生。有人对这种无中生有作了一些解释^[3], 认为存在着引力屏蔽效应。物体对外的引力, 受到物体本身外层的屏蔽。 G 变小后, 物体膨胀, 屏蔽效应减弱, 引力增大, 于是引力质量增大, 好像是产生了物质。

这个理论还影响引力和电磁力的统一场论。基于物理单位的两个不同性质, 提出了两种度规理论, 消除

1) 弱-电统一场论成功后, 只有三种基本相互作用了。

了数学上很成功的 Weyl 理论的矛盾。

4. Fujii 的修改牛顿引力反平方定律的理论^[6,7]

Fujii 从基本粒子理论出发,赋予伸缩子(dilaton)以一定的质量,它与引力子相互作用后,在通常的牛顿引力上附加了一个力;使得物体质点之间的引力,即使在经典范围内也偏离了反平方律,可以表示为 $GMm/r^{2+\delta}$, 其中 δ 表示偏离的程度。上面的式子也可以等价地表示为 $G(r)Mm/r^2$ 。换句话说,根据这个理论,引力常数也不是一个常数,而是要随相互作用的两个质量的距离而变的。Hanon^[8] 从相对论的度规理论得出了与 Fujii 同样的结果。Fujii 理论的结果用 G 的公式可近似表示为^[9]

$$G(R) = G_{\infty} \left[1 + \frac{1}{3} (1 + \mu R) e^{-\mu R} \right],$$

这里 μ 是与伸缩子质量有关的参数; R 是相互作用质量的间距; G_{∞} 是个常数,它是在 R 趋近无穷远时的 G 值。但是在天文观测中,从行星的运动规律看,证明 G 是个常数。实验室里作的卡文迪什型测量 G 的实验, R 约为 10 厘米的数量级,测出的 G 也是常数¹⁾。为了不与这些事实矛盾, μ 必须作下列限制:

$$\frac{1}{10 \text{ 米}} > \mu > \frac{1}{1 \text{ 千米}}$$

由此根据 $G(R)$ 的公式可知,当考虑大距离 $R \gg 1$ 千米的 G 值时, G 值变为常数,其值为 G_{∞} 。而考虑 $R \ll 10$ 米实验室尺度时, G 值也变为常数,其数值为 $4/3 G_{\infty}$, 与观测和实验事实符合。不过大距离的 G 值与小距离的 G 值有 $4/3$ 倍的差别。这对地面上的物理过程不会有什么影响,但对行星质量的估计和对地球内部结构的了解却会有很大的影响。此外对 $R < 1$ 厘米的 G 值从未测量过,在这范围内 G 值也可能有很大的偏离。综合起来,附加的力起作用的范围是在 10 米和 1 千米之间及小于 1 厘米。

由于理论上给不出伸缩子的质量,这个理论只能得出 G 可以随 R 变化,变化的方式和范围仍然不很确定。Fujii 理论的意义在于第一次把引力相互作用与其他相互作用(强相互作用)联系起来。

以上各种理论得出的 G 的相对变化量 $\Delta G/G$, 数值都是很小的,一般多在 10^{-10} 左右。现代 G 的精度还只达到三、四位有效数,要在实验室里作实验验证是极其困难的。目前只能作天文观测和地质考古上的验证。关于 G 随时间变化的理论, Shapiro^[10,11] 用雷达测距法对行星长期跟踪,观察其轨道数据的变化,得出每年 $\Delta G/G$ 不大于 4×10^{-10} /年。Van Flandern^[5,12] 用掩星法观测月亮的轨道,发现半径有所变大,得出每年 $\Delta G/G$ 为 $(9 \pm 4) \times 10^{-11}$ /年。还有人^[13] 考察古代虫类化石,认为如远古时代 G 值比现在大,地球离太阳要比现在近,地球上的温度要高得使这些虫类不能生存,

从而否定 G 变的理论。但也有人解释为当时的太阳没有现在那么热,来消除这矛盾^[11]。所有这些工作不确定因素都比较多,也可以作别种解释,所以都还不能得出非常肯定的结论。一种理论的最终验证最可靠的还是通过实验室里的实验。随着实践和理论的发展对 G 的精度要求将会越来越高。

三、测量方法的简单回顾^[1,14]

引力常数 G 很难测得精确是由引力相互作用的三个特点所决定:(1)上面提到的它的微弱性;(2)引力是不好屏蔽的,所有测量都在外界引力干扰场下进行;(3)引力相互作用与其他相互作用没有联系。引力相互作用的结果,只能引起机械变化,不能直接发生电磁变化,不可能直接利用已发展得很精密的电磁相互作用的测量技术。

引力常数 G 的测量是根据牛顿的万有引力定律 $f = GMm/r^2$ 。这个公式是对质点或密度均匀的球体而言的,其中 f 很微弱,不易测准。测量 G 的方法按所用相互作用质量的大小可分为两类。一类是用庞大的自然界物体作为吸引质量(例如,通过考察一座孤立的山包对铅垂线的影响来测 G)。另一类是相互吸引的质量都用比较小的,在实验室里可直接测量的物体。在测量其相互作用的方法上,还有两种区别。一种相当于静力学的方法,相互作用力用另一种外力去平衡,测出这外力的大小来求 G 。另一种相当于动力学的方法,两个相互作用的物体要影响彼此间的运动,从运动规律的变化来求力,从而得出 G 。

自然界物体的质量不能直接秤量,只能间接估计,得出的 G 值不大可靠。这种方法很少用。

在实验室法中,由于所用物体的质量比起周围物体(如附近的建筑物、活动的车辆、上空的大气层等)小得多,除了要消除地心引力的影响外,还必需设法消除这些物体引力的影响。引力不好屏蔽,只好采取抵消的办法,卡文迪什用的扭秤法,正是可以达到这个目的的巧妙办法。扭秤的示意图如图 1,一根细丝下面悬挂一根细杆,杆的两端是两个小球。只要扭秤两边是严格对称的,两个小球又离得比较近,它们所处地点的引力场强度认为是相同的。那末外界的干扰力场不论

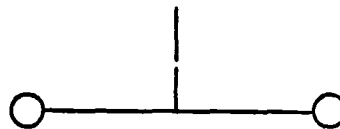


图 1

1) 1976 年 Long 作实验得出不是常数的结果,下文再作介绍。

是多大,也不论它是否随时间变化,都将互相抵消而对扭秤毫无作用.干扰扭秤的就剩下引力梯度(即在两小球处的引力场的强度不同)和引力梯度的不规则变化,这种干扰就要小得多了.当然对于微弱的引力来说还是一个不可忽视的误差.如果把一对质量相同的大球放在扭秤的两边,扭秤将偏转并产生扭力矩 $\tau\theta$ (τ 是比例常数,它是扭丝扭转模量的倒数; θ 是扭秤偏转的角度)与大球产生的引力矩相平衡.如果平衡时,大球对小球的引力方向正好垂直于扭秤秤杆,则平衡方程为 $\tau\theta = GMml/r^2$. l 是扭秤杆长,如力不正好垂直于秤杆或还要考虑大球对杆的引力会对测量产生误差,则引力矩还应与大球的位置和杆的粗细等几何量有关.总之,引力矩总可写成 $GMmf$ 和数个几何量的函数 f (几何量)的乘积,即 $GMmf$ (几何量).如果相互作用的两质量不是球形,这个几何量函数往往是很复杂,甚至只能用级数表示,取其前几项近似.

扭秤是抵消外界引力干扰的有效工具,从卡文迪什最早的测 G 的实验,一直到近代测 G 的工作,几乎毫无例外地都用扭秤.近代的一些实验设想,也脱离不了扭秤^[15].

引力常数 G 测量技术的改进,可说是扭秤性能和使用方法的改进.

四、近年来的进展

这里对近年来的两个实验作个原理性的介绍.一个是 Beams 等人测量 G 的工作,用比较新颖的方法,测出了现在认为最可靠的 G 的数值.一个是 Long 等人得出了在实验室尺度内引力反平方律遭到破坏的结果.

1. Beams 等人的工作^[2,14,16]

这个方法可以说是静力学式的方法,利用悬挂扭秤的支架转动所产生的力矩来平衡扭秤所受到的引力力矩.原理示意图如图 2.实际上用的扭秤是一根黄铜细棒,长约 4 厘米,直径约 0.2 厘米,用扭丝把它水

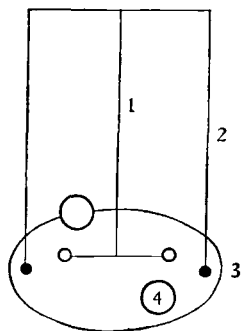


图 2

1.扭秤; 2.支架; 3.可转动圆盘; 4.大球

平悬挂起来.大球是约 10 公斤的钨球.扭秤悬挂在支架上,支架固定在可以转动的圆盘上,圆盘上的两个大球可以取去或放上.扭丝上有一面镜子,可以反射光束(产生光束的光源和接收反射光的接收器都固定在圆盘上,图中未画出).当圆盘上没有大球时,扭秤没有受到力矩,处于其平衡位置上.当放上大球时,扭秤受到大球的引力要产生偏转,假设沿顺时针方向偏转,这时扭秤上的镜子所反射的光束也要改变方向,可把它当作一个信号,给予伺服系统,启动电动机使圆盘逆时针方向转动以抵消扭秤的偏离,使扭秤保持在其平衡位置上.当然圆盘需作加速转动,才能不断地抵消扭秤的偏离,这时圆盘要越转越快.由于引力力矩很小,平衡它所需的角加速度也很小,大约数小时后才达到每分钟一两转的角速度.测出圆盘的角加速度即可求出 G .角加速度可通过测出一组转角和对应的时间而求得. G 的求法如下:扭秤所受的引力力矩为 $GMmf$ (几何量),它为转动加速度所产生的力矩 $I\dot{\omega}$ 所平衡,即 $I\dot{\omega} = GMmf$,测出上式中的各个量,即可求出 G .由于实际上所用扭秤是根细棒,所以 f 是个很复杂的函数.只能用级数表示,取其前几项近似,测量的结果是 $G = (6.674 \pm 0.012) \times 10^{-8}$ 达因·厘米²/克².这里 0.012 表示三个标准偏差.

此法的优点在于外力矩是通过角加速度引起的圆盘转动角度的变化来测量的.观测的时间长,这个角度变化可以积累得比较大,这可消去一些噪声,因为噪声是没有这种积累效应的.在测量过程中,扭秤、大球等都随着圆盘转动,这对周围环境所产生的干扰力场和引力梯度有平均作用,可以减少由它们引起的误差. Beams 等人认为这种方法还有很大潜力.但也有人认为要受到伺服系统噪声的限制^[17].

2. Long 的工作^[18]

美国的 Long 认为在实验室范围内的距离(数十厘米的数量级)引力常数也可能不是常数.他仔细分析了前人测量 G 的工作,得出了这种可能性^[19].他发现过去很多人测出的 G 值,数值上虽然参差不齐,但却有个规律,所用的两个质量间距越大,测出的 G 值也越大,从这些数据甚至还可估计出一条 G 随间距的变化关系曲线来.他提出了一个提高测量 G 精度的方法^[20].在 G 的测量中,两个相互作用球质心的距离是不容易测准的.要求球的密度非常均匀,质心才能与球的几何中心重合,球越大就越难做到这一点.另外加工精确的球形也是不容易的.他认为现在只能测准到 0.01 毫米.他们提出,用环形物体代替过去的球形物体作为吸引质量,来克服这个困难.环形物体的引力场不像球形物体按对间距很敏感的 $1/r^2$ 的关系变化.对于环形物体其引力场在其轴线上某一区域可以随距离变化得很慢.适当设计环的尺寸和组合,这几

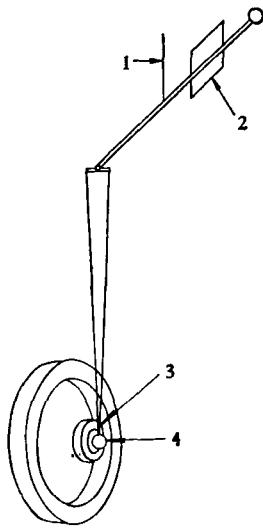


图 3

1. 扭丝; 2. 电容板; 3. 小环; 4. 小球

乎不变的引力场的区域甚至可以是很宽的。如把扭秤的小球放在这一区域上, 则对两个相互作用质量的质心距离的测量, 就可以比较粗略了。均匀力场区的出现可以这样理解, 在环形物体的球心上, 由于四面引力相互抵消, 引力为零。沿环轴线方向上无穷远的一点, 其引力显然也为零。引力场沿轴线由零变到零, 其间必有一个一级微商为零的转折点(此处场强最大)。在这点附近区域引力场的变化是缓慢的。Long 用这个方法测量了间距为 4.48 厘米和 29.9 厘米的 G 。发现它们确是不同, $\Delta G/G$ 的数值为 0.37%, 和由前人所做数据估计出来的 $\Delta G/G$ 为 0.4% 符合得很好。这就说明在实验室的范围内牛顿关于引力的反平方律也不是严格成立的。实验装置如图 3 所示。在此图上大环、小环都画在一起。实际实验时只用一个环(大环或小环)。大环半径 20 多厘米, 约 58 公斤重。小环半径数厘米, 约 1 公斤重。小球质量为 50 克。扭秤的两个小球不在同一水平面上, 以减少金属环对另一小球和秤杆的引力所产生的影响。金属环对扭秤产生的引力矩是用加在电容板上的静电力矩来平衡, 是一种静力学测 G 法。实验时先把大环置于适当位置, 测出扭秤上平衡电压, 由它可以推出大环的引力力矩, 然后换上小环置于比较小的距离上, 得出小环的引力力矩。由此可求出 G_A 和 G_B 及其相对变化 $(G_A - G_B)/G_B = \delta$ 。实验的结果是 $\delta = 0.0037 \pm 0.007$ 。引力常数 G 和相互作用距离 R 的关系是

$$G(R) = G_0 [1 + (0.002) \ln R].$$

例如, 当 $R = 6$ 厘米时, $G \sim 6.660 \times 10^{-8}$ 达因·厘米/克²; 当 $R = 80$ 厘米时, $G \sim 6.690 \times 10^{-8}$ 达因·厘米²/克²。

Long 的实验结果引起了实验物理学家的重视, 现在已经设想了好几种方法来验证牛顿的引力反平方律^[21, 22]。

五、测量 G 和验证 Fujii 理论的一种可能方法

在地面实验室测量引力常数 G , 扭秤是必不可少的工具, 它能有效地抵消许多引力干扰。但是由于扭丝性能不太稳定(如蠕变等), 待测的几何量也较多, 实际上可以利用等效原理来代替扭秤的作用。如果让两个小球在高真空中以零初速度自由下落, 则两个小球不论它们受到多大的外界引力, 不论这外界引力是稳定的还是随时间而变化, 只要这两个球所处位置的外界引力场是均匀的(空气阻力可以不计), 这两个小球的相对距离将始终保持不变。如有变化必然是由小球间的作用力所引起的。如果让一个直径为 10 厘米、重 10 公斤的钨球和另一个直径 1 厘米重 10 克的钨球, 彼此相距 1 毫米自由下落, 在下落 1 米之后, 由于两球间的引力作用, 其间距将有 10^{-6} 厘米数量级的变化。下落 5—6 米以后将发生 10^{-3} 厘米数量级的变化。它们之间的距离变化如能测准到 10^{-9} 厘米, 并有效地消除一些系统误差, 对下落 5 米的实验, G 可测到 5 位有效数。对下落 1 米的可测到 4 位有效数。

测量时由 $s = \frac{GMt^2}{2r^2}$ 来计算出 G (当作一体问题, 并认为引力加速度近似为常数)。待测的量就只有 M, r 和一组 S, t 值。这一组数值测得越多, 就更便于利用数据处理来减少一些误差。

要在实验室里验证 Fujii 的理论, 一般认为是极其困难的, 因为其范围是 10 米以上或 1 厘米以下。在这范围内两质量间的吸引力都不可能设计得很强, 也还未提出利用天文观测的现实办法。现令一个直径为 1 厘米重 10 克的钨球和另一直径为 1 毫米的小球相距 0.1 毫米, 自由下落 5 米, 则引力所产生的位移可达 10^{-7} — 10^{-6} 厘米的数量级。如以 10^{-9} 厘米的精度来测量这个位移, 则可以三位有效数的精度验证在 1 厘米左右 G 是否有所偏离。如认为在这区域 G 的偏离比较大, 则测量精度还可降低。此外还可验证 Long 的实验结果。如果 Long 的那条曲线可延伸到 1 厘米以下的话, 这时 G 值应在第三位有效数上有所偏离。

六、结束语

测量引力常数 G 的意义已不限于精确地测定一种基本物理常数的数值。它涉及到一些引力场理论的正确性。虽然引力场已有很完善的理论——广义相对论

来描述它,但是广义相对论的效应大多数都微弱得无法进行实验检验。由此可以说引力场的矛盾和性质是未被充分揭露的。随着近代科学技术的发展,揭露这种矛盾的实验已提到日程上来了,其中最重要的是现在正在进行的引力波探测实验。而引力常数 G 的测量,也是不可忽视的一个方面,现在国际上也已开展起来了。本文所介绍的只限于所了解到的一些进展情况。

参 考 文 献

- [1] A. H. Cook, Proceedings of the International Conference on Precision Measurement and Fundamental Constants, (1970), 475.
 [2] R. D. Rose, *Phys. Rev. Lett.*, 23-12 (1969), 657.
 [3] Misner, K. S. Thorne, J. A. Wheeler, *Gravitation*, Freeman, San Francisco, (1973), 1121.
 [4] P. A. M. Dirac, *Proc. Roy. Soc. London A*, 333-1595(1973), 403; 338-1615 (1974), 439; *The Physicists's Conception of Nature*, Edited by Jagdish Mehra, (1973).
 [5] T. C. Van Flandern, *Sci. Amer.*, 234-2 (1976), 44.
 [6] Y. Fujii, *Annals of Physics*, 69-2(1972), 494.
 [7] Y. Fujii, *Natural Physical Science*, 234 (1. Nov. 1971), 5.
 [8] O. Hanlon, *Phys. Rev. Lett.*, 29(1972), 137.
 [9] D. R. Mikkelson and M. J. Newman, *Phys. Rev. D*, 16-4(1977), 919.
 [10] I. I. Shapiro, *Phys. Rev. Lett.*, 26-1 (1971), 27.
 [11] J. D. Barrow, *Mon. Not. R. Astron Soc.*, 184-3 (1978), 677.
 [12] T. C. Van Flandern, *Mon. Not. R. Astron Soc.*, 170 (1975), 333.
 [13] 现代物理学参考资料第二集, 科学出版社, (1978), 21.
 [14] J. W. Beams, *Phys. Today*, 24-5 (1971), 35.
 [15] V. B. Braginsky, C. M. Caves, K. S. Thorne, *Phys. Rev. D*, 15-8 (1977), 2047.
 [16] W. R. Towler, Proceedings of the International Conference on Precision Measurement and Fundamental Constants, (1970), 485.
 [17] F. N. Hooge, *Appl. Sci. Res.*, 33-2 (1977), 191.
 [18] D. R. Long, *Nature*, 260 (1. Apr. 1976), 417.
 [19] D. R. Long, *Phys. Rev. D*, 9-4 (1974).
 [20] D. R. Long, *Phys. Rev. D*, 10-6 (1974).
 [21] 8th Intern. Conf. on General Relativity and Gravitation, (1977), 268.
 [22] H. Hirakawa, Proc. of 2nd Marcel Grossmann Meeting, (1979).

太 阳 能 电 池

李 春 鸿

(中国科学院长春应用化学研究所)

太阳能电池是利用光生伏打效应,把光能直接转换成电能的一种半导体器件。

光生伏打效应是早在1839年由 Becquere1 首次发现的。用硒和氧化亚铜等半导体材料中也有这一现象,但能量转换效率很低(小于1%)。用这种材料做成的电池只能供照度计用。

1954年,美国 Bell 实验室首次用单晶硅制成 p-n 结太阳能电池,成功地把太阳光直接变成电能,转换效

率达到3—6%^[1-3]。以后的20多年以来,随着宇航事业的发展,硅电池作为人造卫星的电源,目前它的效率已达到10—14%。同时,其他类型的太阳能电池也相继发展起来,如 CdS, GaAs, CdTe 等单晶电池和 CdS, CdTe 等薄膜多晶电池。Si 单晶电池及 CdS 薄膜电池的效率进展情况示于图1^[4]。

一、种类及结构

太阳能电池的种类很多。按其材料分,有硅电池、硫化镉电池、砷化镓电池、碲化镉电池和磷化铟电池等;按其结晶性质分有单晶和多晶等电池;按其结的性质来分有同质结、异质结和肖特基结等电池。太阳能电池的种类、效率及研制情况见表1^[3]。其中,硅单晶太阳能电池在技术上比较成熟,它的可靠性较大,比功率较高,寿命较长,在超过一个月的航天任务中得以广泛的应用。估计到1985年仍将为大多数卫星所采用。它的缺点是成本比较高。CdS 薄膜太阳能电池的特点是重量轻,耐辐照性能好,制造简单,成本低,易于制成大面积方阵。但它不够稳定,因此尚未得到广泛

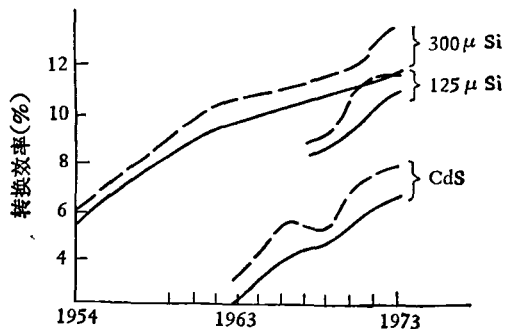


图 1

---- 最大; —— 平均