

扭秤周期法测量万有引力常数 G *

罗俊^① 胡忠坤^① 傅湘辉^① 唐孟希^② 范淑华^①

(^①华中理工大学物理系, 武汉 430074; ^②中山大学物理系, 广州 510275)

摘要 在华中理工大学引力实验中心的山洞实验室进行了扭秤周期法测量万有引力常数 G 的实验. 初步的实验结果为 $G = (6.669\,0 \pm 0.001\,6) \times 10^{-11} \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{s}^{-2}$, 其相对精度为 240×10^{-6} . 这一结果在 3σ 范围内与 1986 年 Cohen 和 Taylor 给出的平均值相吻合.

关键词 万有引力常数 扭秤 周期法

随着天体物理、地球物理以及航天物理等学科不断发展, 人们对各种天体(包括地球)质量的绝对数值日益感兴趣, 引力常数 G 的精确测量也就显得更加重要. 另外, 对 G 进行高精度的测量, 有助于研究引力相互作用的性质. 近代有些不同于广义相对论的引力理论在不同程度上预言引力常数 G 的非恒量性. 自 1937 年 Dirac^[1] 大数假说问题提出后, 引力以及相关问题的研究引起了物理学家的关注. 在由 Brans-Dicke 建立的标量-张量引力理论中, 引力常数 G 被认为是由一个标量场 Φ 的平均值的倒数所决定, 而标量场 Φ 是与宇宙的质量密度相关的. 当考虑膨胀宇宙模型时, 理论上预言引力常数 G 是随时间减小的; 在实验方面, 人们先后设计了多种不同的实验, 探讨引力常数随时间和距离的变化规律^[2,3]. 1986 年 Fischbach 等人^[4] 对 Eötvös 等人的实验工作重新分析后提出自然界可能存在“第 5 种力”, 并认为其作用的大小与物质的原子种类有关. 尽管目前的主流观点认为不存在“第 5 种力”, 但人们关于中程力的实验检验一直在进行. 如果 G 值的测量能够达到人们所期望的高精度, 对上述问题的讨论将具有重要的意义. 此外, 4 种相互作用中的电磁、强和弱相互作用均可用规范场论的标准模型统一描述, 而把引力相互作用也包括在内的大统一理论目前还存在许多困难, 万有引力常数 G 的精确测量可能对这一领域的理论研究有所启发和推动.

自从 Cavendish^[5] 1798 年采用精密扭秤取得历史上第一个较为精确的万有引力常数 G 测量值以来, 近两百年时间内, 人们在这一领域内做出了艰苦卓绝的努力, 将不断发展的近代科学技术及加工工艺带进 G 的测量中, 并与巧妙的实验设计相结合, 力求得到精确可靠的结果. 尤其是近 30 年来, 大部分实验者都认为自己的测 G 实验达到了 10^{-4} 量级的相对精度, 但事实上他们的测量结果之间的吻合度仅达到 10^{-3} 量级. 目前普遍接受 1986 年 Cohen 和 Taylor^[6] 根据历史上多次可信度较高的测 G 结果的平均值 $(6.672\,59 \pm 0.000\,85) \times 10^{-11} \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{s}^{-2}$. 但最近 3 组测量结果相互之间有较大差别. 新西兰国家标准计量实验室的 Fitzgerald 等

人^[7]采用了静电力补偿的直接倾斜法,测得 $G = (6.665\,6 \pm 0.000\,6) \times 10^{-11} \text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{s}^{-2}$, 比平均值低 0.1%. 德国伍珀塔尔大学的 Walesch 等人^[8],通过激光干涉法测出两个单摆之间的距离,测得 $G = (6.671\,9 \pm 0.000\,8) \times 10^{-11} \text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{s}^{-2}$,与平均值基本相符. 德国的布伦瑞克联邦物理技术学院的 Michaelis 等人^[9]利用水银支持的扭秤在吸引质量引力作用下偏转测得 $G = (6.715\,4 \pm 0.000\,6) \times 10^{-11} \text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{s}^{-2}$,比平均值高出 0.6%. 最近 Luther 等人利用两种不同的扭丝,采用周期法测得 $G = (6.674\,0 \pm 0.000\,7) \times 10^{-11} \text{m}^3 \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{s}^{-2}$,与他们 1982 年的实验结果相吻合^[10,11]. 我们从 1993 年开始进行周期法测 G 的实验研究工作.

1 周期法测 G 的一般原理

扭秤的灵敏度很高,当扭秤周围的引力场发生改变时,其振动频率将发生变化. 周期法测引力常数 G 的原理为:如图 1 所示,当吸引质量 M_a , M_b 的连线与秤杆平衡位置平行时(近程配置),吸引质量对检验质量的吸引力为扭秤系统提供附加的正回复力矩,使得总回复力矩增大,故其振动频率增加,周期减小;当吸引质量 M_a , M_b 的连线与秤杆平衡位置垂直时(远程配置),吸引质量提供负回复力矩,使得总回复力矩减小,故扭秤振动频率减小,周期增大.

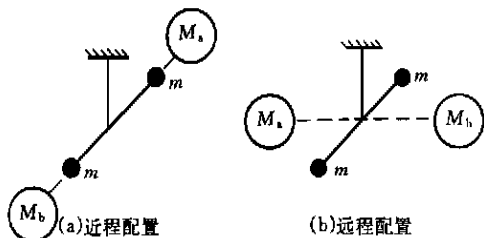


图 1 周期法测 G 原理图

(a) 近程配置产生引力正回复力; (b) 远程配置产生引力负回复力

扭秤在高真空下(忽略空气阻尼)自由运动时,其运动方程为

$$I\ddot{\theta} + K\theta = 0, \quad (1)$$

其中 θ 为扭秤偏转角, I 为转动惯量, K 为扭丝的扭转弹性系数. 扭秤运动周期为

$$T_1 = 2\pi \sqrt{I/K}. \quad (2)$$

当在检验质量附近放置吸引质量时,在 θ 的一级近似下扭秤系统所受到的广义力可表示为

$$Q = \sum \mathbf{F}_i \cdot \frac{\partial \mathbf{r}_i}{\partial \theta} \equiv -GC_g\theta, \quad (3)$$

其中 $\mathbf{r}_i$ 和 $\mathbf{F}_i$ 分别为扭秤各部分的矢径以及它们与吸引质量之间的万有引力, G 就是待测的引力常数, C_g 是由扭秤以及吸引质量的长度、距离、质量等参数确定的常数,我们称之为耦合常数. 在此情况下,扭秤运动方程变成

$$I\ddot{\theta} + K\theta + GC_g\theta = 0, \quad (4)$$

此时扭秤运动的周期相应为

$$T_2 = 2\pi \sqrt{I/(K + GC_g)}. \quad (5)$$

通过实验测出两种情况下扭秤的周期,由(2)和(5)式便可计算出

$$G = 4\pi^2 I (1/T_2^2 - 1/T_1^2) / G_g. \quad (6)$$

周期法测引力常数 G 有以下几个优点: (1) 与倾斜法相比,它对扭秤平衡位置的漂移不是十分敏感; (2) 将待测参量从角位移转变成扭秤的周期,从而可降低探测器的非线性效应影响,提高待测参量的相对精度; (3) 将吸引质量与检验质量之间距离的非接触动态测量转变成两对称放置的吸引质量之间距离的可接触静态测量,从而保证了测量精度. 这种方法也有一

些缺点: (1) 高灵敏度扭秤的周期一般较长, 因而所需测量时间也较长, 对外界环境的稳定性提出了更高的要求; (2) 由于吸引质量产生的附加引力场是非均匀的, 扭秤的运动存在相应的非线性问题. 这两点是需要在实验设计和数据处理中加以克服的.

2 实验设计

整个实验装置如图 2 所示, 由扭秤系统、真空系统和测量记录系统三部分组成. 在真空容器中, 通过悬点 P 用一根直径 $25\text{ }\mu\text{m}$ 、长度约为 513 mm 的钨丝悬挂一扭秤, 秤杆半臂长为 $b=(200.000\pm0.001)\text{ mm}$. 悬丝与秤杆之间通过连接部件相连并粘有小的平面镜, 用于反射激光束, 秤杆一端通过直径为 $50\text{ }\mu\text{m}$ 、长度 $l_1=(435.5\pm0.5)\text{ mm}$ 的钨丝悬挂一球形检验质量, 其大小为 $m_1=(32.256\,0\pm0.000\,5)\text{ g}$. 另一端通过直径为 $50\text{ }\mu\text{m}$ 、长度为 $l_2=(21.5\pm0.5)\text{ mm}$ 的钨丝悬挂另一球形检验质量, 大小为 $m_2=(32.285\,8\pm0.000\,5\text{ g})$. 因为小球 m_1 和 m_2 不在同一高度, 所以该扭秤是不对称的. 选取这种非对称扭秤是基于以下考虑: 吸引质量放置前后扭秤周期变化大, 可提高周期变化测量的相对精度; 易于调节其运动振幅的大小; 减小真空容器容积, 以便于抽高真空.

吸引质量 M_a, M_b 是陈应天 1984 年在 Cavendish 实验室做反平方率检验时使用的两个圆柱体^[12]. 它们为非磁性不锈钢正圆柱体, 具体参数见表 1. M_a, M_b 同轴安置于铝制底座上, 调节回转台使其轴线通过 m_1 并垂直于扭秤秤杆方向, M_a, M_b 间距离由定位块规确定, 它的长度为 $2d=(60.240\pm0.002)\text{ mm}$. 回转台面可绕其轴线转动, 由步进电机控制, 其分辨率为 $0.005^\circ/\text{步}$. 回转台还可沿秤杆方向(y 方向)及垂直秤杆方向(x 方向)调节位置, 调节精度均为 $1\text{ }\mu\text{m}$. 实验中通过检测有无吸引质量时扭秤平衡位置是否改变来调节水平方向距离, 使得检验质量 m_1 在水平面内偏离 M_a, M_b 中心的偏差均小于 0.01 mm . 真空容器上端是真空导引, 该导引可调节固定点 P 的垂直位置, 调节精度可达 0.05 mm , 同时可使该固定点 P 在水平面内作任意角度的旋转, 以调节扭秤的平衡位置.

为了减小容器内空气阻尼对扭秤运动的影响, 提高系统的品质因数, 必须对容器抽高真空. 真空系统是个 3 级泵系统. 第 1 级是机械泵, 在机械泵工作的同时, 需要对真空容器包括吸附泵进行加热烘烤约 2 h , 机械泵将容器内的气压抽至 $5\sim10\text{ Pa}$; 第 2 级是两个吸附泵, 在液氮温度下利用多孔吸附剂物理吸附大量气体, 将容器内的气压抽至 $10^{-2}\sim10^{-3}\text{ Pa}$; 第 3 级为溅射离子泵, 将容器内的气压抽至约 $2\times10^{-5}\text{ Pa}$, 达到实验所要求. 实验结果表明, 在此真空中, 扭秤系统的品质因数为 $Q=36\,000$. Q 值进一步提高的主要限制将是扭丝的装钎工艺和材料本身的问题, 空气阻尼的影响已降到次要地位.

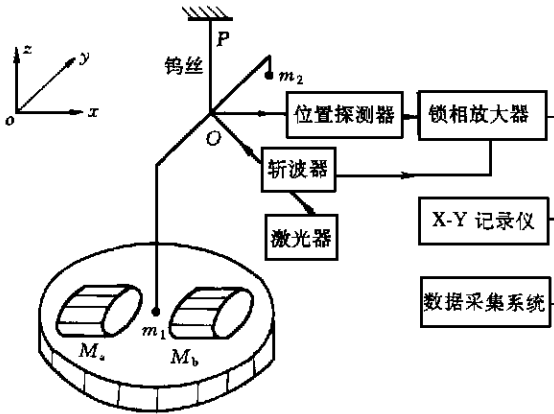


图 2 周期法测 G 实验装置图

表 1 基本实验参量

参量	符号	大小及其不确定性
圆柱体 A 长度	L_1	$(100.007 \pm 0.001) \text{ mm}$
圆柱体 B 长度	L_2	$(100.000 \pm 0.001) \text{ mm}$
圆柱体 A 直径	D_1	$(100.003 \pm 0.001) \text{ mm}$
圆柱体 B 直径	D_2	$(99.998 \pm 0.001) \text{ mm}$
圆柱体 A 质量	M_a	$(6.251\,33 \pm 0.000\,01) \text{ kg}$
圆柱体 B 质量	M_b	$(6.250\,56 \pm 0.000\,01) \text{ kg}$
圆柱体 A、B 间距	d	$(30.120 \pm 0.002) \text{ mm}$
检验质量 m_1	m_1	$(32.256\,0 \pm 0.000\,5) \text{ g}$
检验质量 m_2	m_2	$(32.285\,8 \pm 0.000\,5) \text{ g}$
扭秤半杆长	b	$(200.000 \pm 0.001) \text{ mm}$
m_1, m_2 垂直距离	h	$(416.4 \pm 0.5) \text{ mm}$
转动惯量	I_0	$(28\,767.0 \pm 0.9) \text{ g} \cdot \text{cm}^2$

测量系统(如图 2 所示)包括光杠杆、位置探测器、锁相放大器等. 2.5 mW 的 He-Ne 激光源发出一光束, 经频率为 731 Hz 的斩波器斩波后, 入射到悬丝与扭杆连接部件 O 的小镜面上, 经反射后落在精密位置探测器上, 从而将角位移信号转换成电信号. 该信号差动输出到锁相放大器(128A, EG &G 公司)进行放大, 然后输出到记录系统. 记录系统分成两路, 一路用 X-Y 记录仪直接进行模拟记录, 另一路进行 A/D 转换后由计算机采集并存储. 前一路记录的曲线是为了直观监视扭秤的运动, 后一路采集的是用于分析处理的原始实验数据.

实验室位于华中理工大学喻家山人防山洞内, 纵深 150 m, 实验室上面覆盖层厚度大于 40 m. 实验室内用于安装扭秤实验装置的隔振台重约 24 t, 由 16 根均匀分布的弹簧支撑, 隔振台的本征频率约为 1.8 Hz. 隔振台上建有容积为 5 m×3 m×3.5 m 的屏蔽室, 屏蔽室内外均用 0.5 mm 厚的电磁屏蔽材料装贴, 对外界的电磁干扰有良好的屏蔽效果. 由于实验室本身的位置以及如上所述的设计, 实验室内的自然恒温效果非常好, 屏蔽室内年温度变化小于 1℃, 日温度变化小于 0.005℃^[13].

位于实验室地表下约为 3 m 深处有成规则分布的 6 块铜板和粗铜线连接而成的地线系统. 隔振台上的扭秤系统以及所有仪器设备均与此地线系统连接. 此外, 实验中的扭秤系统、吸引质量以及真空容器等均为非磁性材料, 从而使得磁场效应对扭秤的影响可以忽略不计.

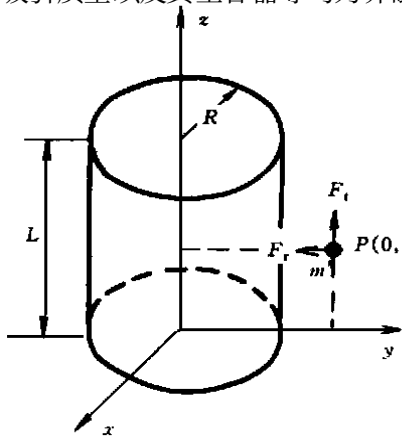


图 3 圆柱体引力场示意图

3 实验结果

3.1 耦合常数 C_g 的计算

由于圆柱体具有加工精度高的优点, 所以在许多扭秤实验中, 均选择圆柱体作为吸引质量. 但由于圆柱体不能像球体一样作为点质量来处理, 故耦合常数 C_g 的计算成为周期法测 G 中一项重要而复杂的工作.

设在长为 L , 半径为 R , 平均密度为 ρ 的有限长实心圆柱体外, 在离中心轴线距离为 a , 底面距离为 l 处的 P 点有一点质量 m (如图 3 所示), 它所受到圆柱体的轴向引力大小为^[14]:

$$F_l = -2mG^0 [C_l(L+l, R, a) - C_l(l, R, a)], \quad (7)$$

其中

$$C_l(l, R, a) = -\frac{R^2 - l^2 - a^2}{\sqrt{(R+a)^2 + l^2}} K(k) + \sqrt{(R+a)^2 + l^2} E(k) +$$

$$\frac{l^2}{\sqrt{(R+a)^2 + l^2}} \left[\frac{\sqrt{l^2 + a^2} + R}{\sqrt{l^2 + a^2} - l} \Pi(p_1, k) + \frac{\sqrt{l^2 + a^2} - R}{\sqrt{l^2 + a^2} + a} \Pi(p_2, k) \right],$$

$$k = \frac{\sqrt{4aR}}{\sqrt{(R+a)^2 + l^2}}, \quad p_1 = \frac{2a}{\sqrt{l^2 + a^2} - a}, \quad p_2 = \frac{-2a}{\sqrt{l^2 + a^2} + a}.$$

$K(k)$, $E(k)$, $\Pi(p_1, k)$ [或 $\Pi(p_2, k)$] 分别为第1类、第2类和第3类完全椭圆积分。

P 点处的检验质量 m 所受到的径向引力大小为^[13]

$$F_r = 2mG^0 [C_r(L+l, R, a) - C_r(l, R, a)], \quad (8)$$

其中

$$C_r(l, R, a) = \frac{l^2}{2a \sqrt{1 + (R+a)^2/l^2}} \left\{ \left[1 + 2 \frac{R^2 + a^2}{l^2} \right] K(k) - \right.$$

$$\left. \left[1 + \frac{(R+a)^2}{l^2} \right] E(k) - \frac{(R-a)^2}{l^2} \Pi(h, k) \right\},$$

$$k = \frac{\sqrt{4aR/l^2}}{\sqrt{1 + (R+a)^2/l^2}}, \quad h = \frac{4aR}{(R+a)^2}.$$

依据(3)式及图2, 我们将耦合常数 C_g 写成以下3部分之和的形式:

$$C_g = C_{g1} + C_{g2} + C_{g3}, \quad (9)$$

其中 C_{g1} , C_{g2} 和 C_{g3} 分别表示检验质量 m_1 , m_2 和秤杆与吸引质量之间的耦合常数。下面, 以 C_{g1} 为例, 给出简略计算过程。

在如图2所示坐标系中, m_1 的矢径 $\mathbf{r}_1$ 为

$$\mathbf{r}_1 = x\mathbf{i} + y\mathbf{j} + z\mathbf{k} = b\sin\theta\mathbf{i} - b\cos\theta\mathbf{j} + l_2\mathbf{k}. \quad (10)$$

m_1 所受 M_a 和 M_b 的万有引力 $\mathbf{F}_1$ 为

$$-2m_1\rho_a G \{ [C_t(x+d-x_0, R_a, y+b-y_0) - C_t(x+L_a+d-x_0, R_a, y+b-y_0)] \mathbf{i} +$$

$$2m_1\rho_a G \{ [C_r(x+d-x_0, R_a, y+b-y_0) - C_r(x+L_a+d-x_0, R_a, y+b-y_0)] \mathbf{j} -$$

$$2m_1\rho_b G \{ [C_t(x_0+d-x, R_b, y+b-y_0) - C_t(x_0+L_b+d-x, R_b, y+b-y_0)] \mathbf{i} +$$

$$2m_1\rho_b G \{ [C_r(x_0+d-x, R_b, y+b-y_0) - C_r(x_0+L_b+d-x, R_b, y+b-y_0)] \mathbf{j} \}. \quad (11)$$

由(3), (10)及(11)式可得

$$C_{g1} = 2m_1 b^2 \rho_a \left[\frac{\partial C_t(x+d-x_0, R_a, y+b-y_0)}{\partial(x+d-x_0)} - \frac{\partial C_t(x+L_a+d-x_0, R_a, y+b-y_0)}{\partial(x+L_a+d-x_0)} \right] \Big|_{\theta=0} +$$

$$2m_1 b^2 \rho_b \left[\frac{\partial C_t(x_0+d-x, R_b, y+b-y_0)}{\partial(x_0+d-x)} - \frac{\partial C_t(x_0+L_b+d-x, R_b, y+b-y_0)}{\partial(x_0+d-x)} \right]$$

$$\left. \frac{\partial C_t(x_0+L_b+d-x, R_b, y+b-y_0)}{\partial (x_0+L_b+d-x)} \right] \Big|_{\theta=0} + \\ 2m_1b^0_a[C_r(x+d-x_0, R_a, y+b-y_0) - C_r(x+L_a+d-x_0, R_a, y+b-y_0)] \Big|_{\theta=0} + \\ 2m_1b^0_b[C_r(x_0+d-x, R_b, y+b-y_0) - C_r(x_0+L_b+d-x, R_b, y+b-y_0)] \Big|_{\theta=0}.$$

(12)

同理可得到 C_{g2} 和 C_{g3} 的表达式, 不过形式更为复杂些. 在 C_{g1} , C_{g2} 和 C_{g3} 的表达式中代入表 1 给出的实验参数可得

$C_g = -(53.939\,7 \pm 0.003\,6) \text{ kg}^2/\text{m}.$

(13)

另外, 根据扭秤各部分结构, 计算得到扭秤转动惯量为

$I = (28.766\,9 \pm 0.000\,9) \times 10^{-4} \text{ kg} \cdot \text{m}^2.$

(14)

3.2 周期处理

周期法测 G 中的关键问题之一是精确确定扭秤的运动周期. 由于扭秤运动的原始数据中包含了除吸引质量的引力效应之外的许多其他干扰因素的影响, 实验记录的曲线并不是严格意义上的正弦曲线. 如扭丝的蠕变引起扭秤静平衡点的漂移和扭秤有限振幅引起的非线性效应, 阻尼的存在引起的扭秤运动振幅的衰减, 激光功率的波动引起的探测器输出电压幅值的变化, 固体潮以及地壳脉动对扭秤的影响等都会对扭秤周期的精确测量带来困难. 由于扭秤运动的周期长达几千秒, 如果实验数据测量时间为几天时间, 采用通常的 FFT 方法很难达到实验所要求的精度. 为此, 我们采用多参数非线性迭代拟合方式对原始数据进行处理, 最后得到有和无圆柱体两种情况下扭秤的运动周期为

$T_1 = (3\,484.2 \pm 0.4) \text{ s}, \quad T_2 = (4\,441.2 \pm 0.4) \text{ s}.$

(15)

3.3 误差分析及实验结果

误差分析是进行实验设计的依据和获得可靠实验精度的保证. 我们详细分析了各种误差来源并根据相应的理论公式和这些参量的实际测量偏差, 计算了它们对 $\Delta G/G$ 的贡献, 所得结果如表 2 所示.

表 2 实验误差表

误差来源	误差 $\Delta G/G(\times 10^{-6})$
吸引质量的位置	
$\Delta d = 0.002 \text{ mm}$	48
$x_0 = 0.01 \text{ mm}$	4.2
$y_0 = 0.01 \text{ mm}$	25
$z_0 = 0.5 \text{ mm}$	16
$\alpha_0 = 5 \times 10^{-3} \text{ rad}$	2.4
吸引质量的密度	17
检验质量的大小	16
转动惯量	31
周期拟合	230
总误差	240

从表 2 中可以看出, 目前影响实验精度的主要因素是周期拟合的误差, 这表明, 扭秤运动

中可能包含有未被认识的系统误差. 如果能找出某些新的影响因素降低周期拟合的误差, 实验的最终精度可得到进一步提高, 有关这一方面的研究目前正在进行之中.

根据前面给出的有关参数和公式, 由(15)式给出的一组典型扭秤运动周期值所对应的万有引力常数 G 值为 $(6.669\,1 \pm 0.001\,6) \times 10^{-11} \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{s}^{-2}$. 如果考虑扭丝滞弹性的影响, 可根据 Kuroda 假设对上述 G 值进行修正^[16], 修正后的结果为 $(6.669\,0 \pm 0.001\,6) \times 10^{-11} \text{ m}^3 \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{s}^{-2}$, 其相对精度为 240×10^{-6} .

4 结语

万有引力常数 G 的精确测量, 是目前国际上的一个难点问题, 为广大物理学家所关注. 从一年来多次实验测量结果来看, 在不同时间不同外界条件下测出的 G 值略有不同. 这一现象给予我们极大的启示. 在迄今为止的测 G 实验中, 极有可能存在未被完全认识和消除的系统误差, 从而导致了不同小组测量结果吻合程度较差的局面. 我们希望通过进一步的深入研究, 将 G 的测量精度提高到 50×10^{-6} .

致谢 中国科学院高能物理研究所张平华研究员和中山大学胡恩科教授对我们开展此项研究工作给予了极大的鼓励与支持, 作者曾与中国科学院理论物理研究所张元仲研究员进行过有益讨论, 在此一并表示衷心感谢.

参 考 文 献

- 1 Dirac P A M. The cosmological constants. *Nature* 1937, 139: 323
- 2 Chin C W, Stothers R. Limit on the secular change of the gravitational constant based on studies of solar evolution. *Phys Rev Lett*, 1976, 36: 833~835
- 3 Long D R. Experimental examination of the gravitational inverse square law. *Nature* 1976, 260: 417~418
- 4 Fischbach E, Sudarsky D, Szafer A, et al. Reanalysis of the Eötvös experiment. *Phys Rev Lett*, 1986, 56: 3~6
- 5 Cavendish H. Experiments to determine the density of the Earth. *Philos Trans Roy Soc* 1798, 88: 469~526
- 6 Cohen E H, Taylor B N. The 1986 recommended values of fundamental physical constants CODATA Bulletin. 1986, 63
- 7 Fitzgerald M P, Armstrong T R. Newton's gravitational constant with uncertainty less than 100 ppm. *IEEE Trans on Instrum and Measur* 1995, 44: 494~497
- 8 Walesch H, Meyer H, Piel H, et al. The gravitational force at mass separations from 0.6 m to 2.1 m and the precise measurement of G . *IEEE Trans on Instrum and Measur*, 1995, 44: 491~493
- 9 Michaelis W, Haars H, Augustin R. A new precise determination of Newton's gravitational constant. *Metrologia* 1995, 96 (32): 267~276
- 10 Bagley C H, Luther G G. Preliminary result of a determination of Newtonian constant of gravitation; A test of the Kuroda hypothesis. *Phys Rev Lett*, 1997, 78: 3 047~3 050
- 11 Luther G G, Towler W R. Redetermination of the Newtonian gravitational constant G . *Phys Rev Lett*, 1982, 48: 121~124
- 12 Chen Y T, Cook A. *Gravitational Experiments in the Laboratory*. Cambridge: Cambridge University Press. 1993. 196~251
- 13 Fan Shuhua, Wu Shuchao, Luo Jun. Performance of a precise infrared shadow sensor thermometer. *Rev Sci Instrum*, 1997, 68: 3 079~3 081
- 14 陈应天, 王 勤. 论有限圆柱体轴向牛顿引力场的意义. *中国科学, A 辑*, 1983, 13(2): 166~171
- 15 罗 俊, 张学荣, 李建国, 等. 有限圆柱体的径向引力场. *中国科学, A 辑*, 1990, 20(2): 163~167
- 16 Kuroda K. Does the time-of-swing method give a correct value of the Newtonian gravitational constant? *Phys Rev Lett*, 1995, 75(15): 2 796~2 798