

计量职工中专试用教材

质量计量

黄锦材 编



中国计量出版社

内 容 提 要

本书是计量职工中专力学专业用的专业课教材。全书共九章,按内容可分为两部分:第一部分一至六章,分别叙述了质量、重量、衡量的概念,天平的理论和天平的四大计量性能,并且较为详细地介绍天平结构、安装、使用维护及检定修理等。第二部分七至九章,主要讲述砝码的基础知识和测定方法以及各种衡器的原理、结构、检定方法,对几种典型的电子秤也略作介绍。

本书可供计量职工中专、计量中专、函授中专等层次的中等学校作教材,还也可供从事质量计量工作的初级以上计量人员作培训教材及有关人员参考用书。

计量职工中专试用教材

质 量 计 量

黄锦材 编

责任编辑 陈 葵

—*—

中国计量出版社出版

北京和平门内大街2号

中国计量出版社印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行

—*—

开本 787×1092/16 印张 18 字数 437 千字

1990年4月第1版 1990年4月第1次印刷

印数 1—3 000

ISBN 7-5026-0293-2/TB·243

定价 10.50 元

出版前言

国家技术监督局是国务院统一管理和组织协调全国技术监督工作的职能部门，负责管理全国标准化、计量、质量监督工作，并对质量管理进行宏观指导。

随着技术监督事业的迅速发展，当前迫切需要大量的各级、各类计量专门人才。举办各种形式的计量中等教育，对于提高在职计量人员的素质、改善计量队伍的结构，培养一批计量队伍的新生力量，都具有重要意义，并将对计量事业的发展产生深远影响。

近几年来，由于一批计量职工中专学校的创办，各种形式的计量中等教育如委托或联合办计量中专班、计量函授中专、计量职业高中、计量中专的专业证书培训等，也在各地陆续开展起来，但是缺少教材已成为计量中等教育迫切需要解决的重大问题。因此，我们根据国家技术监督局的决定，组织编写了一套计量职工中专教材，其中包括：几何量、热工、力学、电磁学计量四个专业的部分专业基础课和专业课试用教材，争取在1988年至1990年内出齐。

本书是委托四川省标准计量职工中等专业学校组织编写的力学计量专业的专业课教材。

计量教育事业基础十分薄弱，组织编写行业性教材还是第一次，基本条件和经验都不足，因此，这套教材的编写工作是在时间紧、难度大的情况下进行的，虽然经过多方面努力，仍然存在很多不足之处甚至于错误，我们拟在试用过程中听取各方面意见，于适当时机再次组织修改。

另外，这套教材主要是根据三年制全脱产的计量职工中等专业教育的需要编写的。在目前情况下，要对各种形式的计量中等教育都编出相应的教材难以做到。因此，在编写过程中，也一定程度地考虑了适用的多样性。其它形式的计量中等教育可参考本套教材的基本内容，适当调整使用。

在本教材的编写、审议过程中，得到了中国计量出版社、中国计量科学研究院、中国测试技术研究院、中国计量学院、中国计量测试学会，河北、四川、山东、吉林省标准计量局及有关的高等院校、省市计量部门、科研单位、大中型企业的大力支持，在此，谨表示衷心感谢。

国家技术监督局宣传教育司

1988. 8

编者的话

原国家计量局教育处为适应我国近几年来计量职工中等专业学校蓬勃发展的需要,组织编写了计量职工中等专业学校的力学计量、几何量计量、电学计量和温度计量等专业共20多门课程的教学大纲之后,又进一步组织编写相应的各种试用教材。本书就是根据“质量计量教学大纲(试行)”中的基本要求编写的。

本书包括绪论和第一至九章。在绪论中叙述了我国质量计量的发展简史及其在国民经济中的作用。第一章简明地介绍了质量、重量和衡量等概念;第二章主要叙述天平理论,对天平的四大计量性能等进行了较为详细地介绍;第三章至第六章主要讲了天平的构造、安装、使用与维护及其检定和修理等;第七章介绍了砝码的基础知识、衡量法、空气密度与砝码材料密度的测定、砝码的折算质量值和砝码的检定等;第八章对几种常用衡器的构造、衡量原理和检定方法等进行了介绍;第九章则对几种典型电子秤的有关知识作了简要介绍。

本书的主要读者是计量职工中专学员,鉴于学生们多数是初中毕业并经实际工作后,再进入中专学校学习的。基础知识的掌握程度参差不齐,因此,在编写本教材时,编者尽量避免了一些繁琐的数学推导。

本书讨论稿写成后,原国家计量局教育处于1987年11月在四川省标准计量职工中专学校召开了教材初审会。与会的各位老师和代表提出了不少修改意见,尽管本人都力图加以采纳,但由于水平有限,时间也很仓促,因此,仍可能会有许多良好的建议未能很好吸收,错误之处,敬请批评指正。本书由中国测试技术研究院黄锦材高级工程师编写,中国计量科学研究院裴玉吉高级工程师主审。

一九八八年三月

目 录

绪论	(1)
第一章 几个基本概念	(3)
第一节 质量	(3)
第二节 重力和重量	(5)
第三节 质量和重量的区别	(8)
第四节 衡量	(9)
练习题	(11)
思考题	(11)
第二章 天平理论	(12)
第一节 天平及其力学模型	(12)
第二节 天平的计量性能	(13)
第三节 单盘天平的稳定性和灵敏度	(28)
第四节 天平的运动方程和摆动周期	(30)
第五节 摆动周期、稳定性和灵敏度三者间的关系	(33)
练习题	(35)
思考题	(35)
第三章 天平的构造	(36)
第一节 天平的命名法	(36)
第二节 等臂双盘天平的构造	(41)
第三节 单盘天平的构造	(57)
第四节 扭力天平的构造	(61)
第五节 电子天平的构造	(64)
第六节 天平的现状和发展趋势	(66)
本章小结	(70)
练习题	(71)
思考题	(71)
第四章 天平的安装、使用与维护	(72)
第一节 天平的安装	(72)
第二节 天平的正确使用	(77)
第三节 天平的维护与保养	(78)
本章小结	(79)

练习题	(79)
思考题	(79)
第五章 天平的检定	(80)
第一节 天平的分级及性能指标	(80)
第二节 天平的检定	(87)
第三节 检定结果的处理	(108)
练习题	(109)
思考题	(111)
第六章 天平的修理	(112)
第一节 一般故障的调修	(112)
第二节 天平计量性能的调修	(122)
第三节 刀子的退换	(139)
第四节 天平的装配技术要求	(140)
本章小结	(142)
练习题	(143)
思考题	(143)
第七章 量值传递和检定系统	(144)
第一节 砝码	(144)
第二节 衡量法和误差	(150)
第三节 空气密度的测定方法	(165)
第四节 砝码的折算质量及砝码材料的统一约定密度	(170)
第五节 砝码的检定	(173)
第六节 检定系统	(194)
练习题	(195)
思考题	(196)
第八章 常用衡器简介	(198)
第一节 杠杆及其类别	(198)
第二节 组合杠杆及其工作原理	(199)
第三节 杆秤	(201)
第四节 架盘天平	(207)
第五节 案秤	(211)
第六节 台秤	(214)
第七节 案秤和台秤的检定	(220)
第八节 度盘秤	(226)
第九节 地秤	(232)
练习题	(239)
思考题	(239)
第九章 电子秤	(240)
第一节 概述	(240)

第二节 称重传感器	(242)
第三节 电子秤的组成及安装要求	(255)
第四节 典型电子秤介绍	(257)
第五节 电子秤的检定	(273)
本章小结	(278)
练习题	(278)
思考题	(279)
参考资料	(279)

绪 论

质量计量学,是研究关于质量的计量,保证质量量值准确一致的一门科学。它是力学、化学、辐射量、电磁等计量专业的基础,是整个计量领域中一个必不可少的组成部分。

质量是与人们生活密切相关的物理量。因此,关于质量计量问题的研究,在很早以前就受到了人们的重视,并随着人类社会的发展而发展,随着科学技术的进步而进步。

在我国,对质量的计量,已有四、五千年的历史。在《尚书·舜典》中,有“协时正月、同律度量衡”等词句。到战国初期,在墨子所著的《墨经·经下》中,也有更进一步记载。例如有:“衡而必正,说在得衡,加重于其一旁,必垂权,重相若也,相衡;则本短、标长,两加焉,重相若,则标必下,标得权也,……”。其意思是:在使用衡器时,加重物于衡器的一端,其另一端必须挂上权(秤砣),重物与权相等时,则相互平衡;而本(杠杆的一端)短,标(杠杆另一端)长的衡器,在其两端分别加上重物与权,如两者相等,则标端必定往下,权位于标的一端,……。这段文字虽然不长,但它说明了我们的祖先,在很早以前就知道利用杠杆原理来制造衡器,并用于计量物体的质量。在战国时期,权衡器也已经普遍使用了。另外,我国考古工作者还在楚国故地(今湖北、江苏等一带)和楚国墓葬中(长沙、常德一带)发现战国时代的权衡器(天平、砝码)数百件。它由木质衡杆、铜盘和环状铜权所组成。

我们的祖先,不仅知道利用杠杆原理对质量进行计量,而且还懂得这种计量必须要加以统一,并用最高命令的形式固定下来。其中人所共知的是公元前 221 年秦始皇统一度量衡的历史事实。他的诏书还被刻在商鞅方升的底部或铸在权衡器上。到了汉代,我国的度量衡制度更加完善。西汉末年,目录学家和天文学家刘歆,总结了战国时期以来的度量衡发展史,写出了我国第一篇度量衡专著,其中对单位量值、进位关系以及标准器的管理制度等都有详细记载,后被收入在《汉书·律历志》中,是比较珍贵的度量衡史料。

随着人类历史的推延,人们希望使用较小的权来平衡较大的重物。实践表明,通过移动衡杆的支点就能达到这一目的。于是,便出现了杆秤。到北魏时期杆秤已经得到广泛使用。这可从敦煌莫高窟的壁画中,有关杆秤的使用图反映出来。

到了宋朝,主管皇室库藏的官员刘承珪,在景德年间(公元 1004~1009 年),研制了一种小型戥秤,主要用于衡量贡银。其分度值相当于现在 40 mg,从而使质量的计量准确度又大大地提高了一步。该秤由于具有结构合理、使用方便、准确度高等优点,故至今仍在使

用。

明清时代,也已有一定数量的近代结构形式的天平。

清朝末年,政府决定统一度量衡制度,废除帝国主义入侵中国后纷纷传入的各种度量衡制度,如英制、法制、德制等,并商请国际权度局制造铂铱合金原器和镍铬合金副原器。宣

统元年（1909年），由国际权度局制成原器和副原器，并经校准后发给证书，我国即以此作为国家的营造尺和库平两（砵码）的最高标准器，简称营造尺库平制。

1927年南京国民政府成立后，决定废除营造尺库平制，改用米制。1928年7月18日规定了权度标准方案，其中重量以一公斤（即一千格兰姆）为标准斤。1930年10月成立全国度量衡局（1947年改为中央标准局），随后相继公布了《度量衡法》和《度量衡实施细则》等三十多个法规。

纵观我国的度量衡史，从商代西周到明清，直至民国，共经历了三千多年。历代在继承前人文化的基础上，对度量衡的单位制或管理体制都不同程度地加以发展和改进，并于前期走在世界的前列。每个炎黄子孙回想起我们伟大、勤劳、智慧的中华民族，曾创造过闻名世界的古代文化，都会感到自豪和喜悦。

建国以来度量衡事业的发展更加迅速。过去的度量衡早已发展成为十大计量。其中力学计量的分支——“质量计量”就是由“衡”发展而来的。目前全国各条战线上从事质量计量的专业队伍已是数万大军。生产天平、砵码以及各种衡器的厂家，也有相当数量。

另外，国家还先后发布了有关文件，并制订了天平、砵码和各种衡器的检定规程，这一系列重要措施，为我国质量计量事业的进一步发展奠定了牢固的基础。

质量计量（衡）同人民的生活密切相关。如买盐、米、蔬菜、水果等，其斤两准确与否，要涉及到千家万户的利益。这些都是人们所共知的。

更重要的是，质量计量早已远远超越了人民生活的范畴。它已广泛地渗透到国民经济的各个部门中，各行各业都越来越离不开准确的质量计量。比如：在冶金工业中，如果配料不准，就炼不出好钢，甚至使一炉钢水报废；在农业方面，如果施肥量不准，就不能获得丰收；在国防工业中，如果弹药量不准，炮弹就不能命中目标；在对外贸易方面，如果质量计量不准，就常常要受外商的欺负，我国在这方面曾吃过不少的亏；进口的货物明明短吨，也不敢要外商索赔，因怕自己的数据不准，出口的货物，因怕索赔，就只好多给；在交通运输中，如果质量计量不准甚至不计量，就不能保证不超载或少载，超载时对生命财产均不安全，少载则会造成能源浪费；在医药卫生部门，如果质量计量不准，就不能使药品产生良好的治疗效果，甚至造成病人死亡等等。总之，凡涉及到需要较为准确地知道某种货物量的多少，都要依靠质量计量。

质量计量的发展和准确度的提高是与其它科学技术的发展相互促进的。比如：历史上借助于质量计量方法的改善和准确度的提高，获得了可靠的实验数据，从而发现了多种同位素。1894年英国物理学家瑞利发现了新元素氦，也是由于当时有了准确度为十万分之一的天平。在现代航天技术中，在火箭点火试验期间要做1300次以上的计量，其中有675次即半数以上（以不同形式）涉及到质量计量，由于有了可靠的数据，才能使飞行器进入正确的预定轨道。而由于电磁技术、电子技术、光电技术和计算机技术的普及，质量计量已由过去的纯机械式天平或衡器，发展成目前的机电结合式的天平与机电结合式的秤或纯电子秤。纯电子秤的出现，使得最大称量不断增加，并涌现了不少的工艺秤。

质量计量在整个计量领域中，有其特殊的地位。它不仅是七个基本量之一，而且几乎各种计量都要依赖于它。如：力值、硬度、压力、真空、容量、密度、流量、化学、光学、电磁、辐射量计量和标准物质等。因此，假如质量量值失准，就会像地震一样，虽然是一处震动，但却要波及四方。所以，在进行质量量值传递时，确实是一点也不能马虎。

第一章 几个基本概念

第一节 质 量

一、惯性质量的概念

在日常生活中，人们发现用同样大小的力加在不同的物体上时，会产生不同的效果。比如，一个是垒球，另一个是铅球，掷出去后其结果是垒球比铅球掷得远；又比如：一个普通人推动一辆摩托车并不困难，但他要想推动一辆卡车就没那么容易。日常经验给了我们一个定性的回答，即同样的力施在不同的物体上所产生的加速度不相同。在这两个例子中，垒球所获得的加速度最大，卡车所获得的加速度几乎等于零。进一步研究表明，则是由于它们的惯性质量不同所致。

惯性质量是物体的一种属性。它可作为物体惯性的定量量度。在相同外力作用下，它确定物体对其运动状态变化的抵抗能力。惯性质量小者获得的加速度大，或者说速度变化率大，这表明它抵抗运动状态变化的能力小；惯性质量大者获得的加速度小，或者说速度变化率小，这表明它抵抗运动状态变化的能力大。

由此说明，质量大的物体，其惯性大，质量小的物体，其惯性小。从牛顿第二运动定律中更加清楚地看出加速度、力和惯性质量之间的定量关系。

$$a = K \frac{F}{m} \quad (1.1)$$

式中： F ——物体所受的合外力；

a ——物体受力后所获得的加速度；

m ——物体的惯性质量；

K ——比例系数。

当采用国际单位制为 单位时， $K=1$ ，则式 (1.1) 可改成 $F=ma$ 。

由式 (1.1) 可见，物体的加速度与作用在其上的合力成正比，对于一个给定的力，物体的加速度与其惯性质量成反比。

二、引力质量的概念

万有引力定律告诉我们：具有质量 m_1 和 m_2 且相隔距离为 R 的任意两个质点之间的力，是沿着连接该两质点的直线而作用的吸引力，其大小为

$$F = G \frac{m_1 m_2}{R^2} \quad (1.2)$$

质点是指不考虑物体的形状和体积大小，而将其质量集中于一点的物体。

由式 (1.2) 可见，引力 F 的大小与该两质点的质量成正比，而与该两质点间的距离之平方成反比。比例系数 G 称为万有引力常数。它必须通过给定的一对质点由实验求得。当 G 的数值一经确定，我们就将该值用在引力定律中以确定其它任何一对质点间的万有引力。在国际单位制中，现在公认的价值为

$$G = 6.6720 \times 10^{-11} \text{ N} \cdot \text{m}^2 / \text{kg}^2, \text{ 此值准确到 } 0.0006 \times 10^{-11} \text{ N} \cdot \text{m}^2 / \text{kg}^2.$$

值得指出的是两个质点之间的引力是一对作用力和反作用力。即第一个质点在第二个质点上施一沿着两者连线且指向第一个质点的力；同样，第二个质点在第一个质点上施一沿着两者连线且指向第二个质点的力；这两个力大小相等，而方向相反。因此，当你手中的重物一旦释放时，它因受来自地球的引力作用而产生加速度，并垂直地落向地面；与此同时，重物也以同样大小的力吸引地球，但地球质量比重物质量大得很多很多，因此该力使地球产生的加速度很小，并且小到无法察觉。

由此表明，任何质点，它既要产生引力场，因而吸引别的质点，与此同时，又要受其它质点产生的引力场所吸引。质点的这一属性称之为引力质量。

如果要确定有一定大小的物体（而不是质点）之间的引力时，就要将每个物体分成许多质点，然后用积分计算所有质点之间的引力。但假如两物体的大小同它们之间的距离相比是微不足道时（比如地球和太阳），则它们通常就可以看作质点。

万有引力定律无形中还包含着这样一种事实，即两个质点之间的引力与其它物体的存在或所在空间的性质无关。

三、惯性质量和引力质量的区别及其等效性

如上所述，惯性质量和引力质量是由两个完全不同的实验引入的，因而是有区别的。从物理概念上讲，不应该将此两个概念混为一谈。事实上，它们确实反映了同一物体的两种不同的属性。

比如，我们想推动一个静止于光滑（无摩擦力的）水平面上的铁块，就必须用力。这铁块表现出具有惰性，并倾向于保持静止状态，或者，假如它正在运动的话，它就倾向于继续运动下去，这里完全没有涉及到重力，即使在无重力的空间内，为了加速这铁块，会觉得同样费力。这正是铁块的惯性质量使得我们在改变它的运动状态时有必要施力。

此外，在另一种情况下，也涉及到要对这铁块施力。比如，我们要让这铁块在地面附近上空的某一高度处保持静止，如果不用力支持它，它就会加速地落向地面。显然，这时铁块的惯性不起作用，而是物体的另一个属性起作用，即它要受其它物体（这里主要指地球）的吸引。我们使铁块在空中保持静止所需之力，若不考虑惯性离心力的影响，在大小上就等于它和地球之间的吸引力。

以上是惯性质量和引力质量的区别，接着再看二者的等效性。牛顿曾设计了一个实验来直接验证惯性质量和引力质量所表现出的等效性。在单摆实验中，牛顿将摆锤作成薄球壳的形式。在这空球壳中，分别放进用天平仔细测定过的具有相同引力质量 m' 的不同物质。在

这些情况下，当摆动角度相同时，作用在摆锤上的力是相同的。由于摆锤的外形始终相同，所以，作用在运动摆锤上的空气阻力也相同。当在球壳内以一种物质代替另一种物质并让其小角度摆动时，加速运动的摆锤如果有任何差别，只能由惯性质量 m 的差别造成，并必然在摆锤的摆动周期变化上反映出现。一般说来，周期的测定准确度是很高的。但牛顿发现，在所有这些情况下，摆锤的摆动周期 T 都相同，都由下式给定，即

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{l}{g}} \quad (1.3)$$

式中： l ——单摆摆长；

g ——所在地点的重力加速度值。

因此，牛顿断定 $m = m'$ ，即惯性质量和引力质量是彼此等效的。因为式 (1.3) 是在承认式 (1.4) 中的 $m = m'$ 前提下推导而来的。即

$$T = 2\pi\sqrt{\frac{m}{K}} = 2\pi\sqrt{\frac{m}{\frac{m'g}{l}}} = 2\pi\sqrt{\frac{l}{g}} \quad (1.4)$$

式中： $K = m'g/l$ 为倔强系数。

在 1909 年，厄缶曾设计了一种准确度达到十亿分之五的测量引力的仪器。他发现在他的仪器准确度内，相等的惯性质量总受到相等的引力作用。1964 年迪克等人对厄缶实验又有所改进。他们将实验准确度又提高了数百倍，但仍得出相同的结论。

经典物理学将引力质量同惯性质量的等效性，只是看作一种令人惊奇的巧合，并不具有什么深刻的含义。但现代物理学则将这种等效性看成是导致对引力的更加深刻理解的一条思路的起点。事实上，正是这条重要的思路导致爱因斯坦广义相对论的建立。

四、质量的概念

综上所述，质量一词从物理概念上讲，应区分惯性质量和引力质量，但两者又有深刻的内在联系，等效性的反映决非偶然。因此，只要选用国际单位制，其质量值是一样的。鉴于这个事实，在通常情况下我们都不再进行区分，并统称为质量。原来曾经把质量定义为物体中所含物质的多少，随着近代物理学的发展，看起来这样定义是不够正确的。

质量是物体固有的一种物理属性。它既是物体惯性的量度，又是物体产生引力场和受引力场作用的能力的量度。

第二节 重力和重量

一、重力的概念

根据牛顿万有引力定律，位于地球表面及其附近的任何物体，都要受到来自地球中心的引力作用。此外，由于地球在不停地自转，除两极外，这些物体还要受到惯性离心力的作

用，两者的矢量和就是物体所受的重力。

树上的苹果，在重力作用下，一旦脱离树枝，根据牛顿第二运动定律就要产生加速度，其方向同重力的方向相一致。所以，苹果是垂直落向地面的。同理，其它的物体，当失去支撑时也是如此。人们把物体因受重力作用而产生的加速度叫重力加速度。若用 W 表示任一物体所受的重力，用 m 表示该物体的质量，用 g 表示该物体所在地点的重力加速度，则重力与质量的关系为

$$W = mg \quad (1.5)$$

由于重力是一种力，因此，它具有力的三要素，即大小、方向和作用点。

另外，物体的重力，虽然来源于地心引力，但一般情况下并不等于地心引力，主要是由于地球自转的缘故。因除两极外，位于地面上的物体在不停地做圆周运动。所以，物体的重力，在赤道上等于地心引力与惯性离心力的合力；在中纬度，它也等于地心引力与惯性离心力的合力；只有在两极处，它才等于地心引力。由此可见，除赤道和两极外，重力 W 与地心引力 F_1 之间有一个微小的夹角 α (图 1.1 所示)，即重力虽垂直于地面，但不指向地心。该夹角在纬度 45° 处达到最大值为 $6'$ 左右。因此，在多数地区认为重力指向地心与事实略有出入。

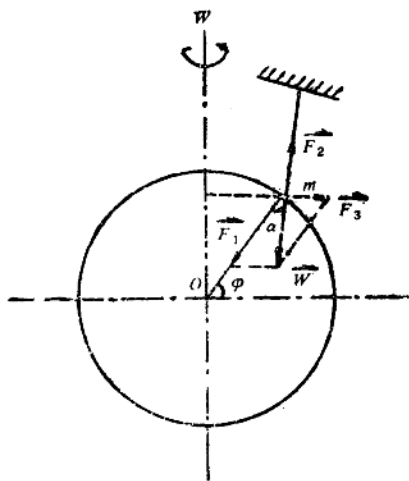


图 1.1

此外，因地球自转角速度很小，故离心力是很微弱的。即使在赤道上，也大约只有重力的 $1/289$ 。在两极重 100 N 的物体，在赤道上因自转减轻了约 0.35 N 。但假如地球自转再加快 17 倍，赤道上的离心力就要增加 17^2 (289) 倍，而与引力相平衡，此时一切物体将不受重力作用。因地球自转的赤道线速度乘上 17 等于第一宇宙速度 7.9 km/s ，任何物体依此速度环绕地球运转，它因转动而产生的离心力正好与地心引力相平衡。如不考虑空气阻力，它便永远不会落到地面上来。这正是人造地球卫星飞行的原理。

由于地球自转致使地球自身变扁，重力就随着纬度的不同而变，即物体所受的重力与其所处的地理纬度有关，出现了北半球南轻北重，南半球南重北轻的现象。

二、重量的概念

物体所受重力的大小称为重量。因此，物体的重量等于该物体的质量乘以重力加速度值。即

$$W = mg \quad (1.6)$$

式中： W ——物体的重量；
 g ——重力加速度值。

由式 (1.6) 可见, 物体的重量是重力加速度值的函数, 其量值将随 g 的量值而变。因此, 它除了与所处的地理纬度有关外, 还与其所处海拔高度有关。现对此两个结论分别予以推导。

为使问题简化, 今设地球是一个半径为 R 的均匀球体, 其自转角速度为 ω , 在地球表面附近固定一弹簧秤, 其下端挂一质量为 m 的物体并相对于地球处于静止状态。若以地球为参照系, 如图 1.1 所示, 该物体主要受三个力的作用: 地球的万有引力 F_1 , 方向指向地心; 弹簧秤的拉力 F_2 , 方向铅直向上; 该物体随地球自转的惯性离心力 F_3 , 方向垂直于地轴指向外方。

根据题设该物体相对于地球处于静止, 因此, 它所受诸力的矢量和应等于零, 即

$$F_1 + F_2 + F_3 = 0 \quad (1.7)$$

若用 W 表示 F_1 和 F_3 的矢量和, 则

$$W = F_1 + F_3 \quad (1.8)$$

按给重力下的定义, 式 (1.8) 中的 W 即为该物体的重力, 将其代入式 (1.7), 于是有

$$W + F_2 = 0 \quad (1.9)$$

由式 (1.9) 可见, 物体所受的重力 W 正好与该物体所受的弹簧秤的拉力 F_2 相互平衡, 即大小相等, 方向相反作用在同一铅垂线上。

根据余弦定理由式 (1.8) 可得,

$$W^2 = F_1^2 + F_3^2 - 2 F_1 F_3 \cos \varphi \quad (1.10)$$

式中: φ ——物体所在的地球纬度。

若进一步以 m_e 表示地球的质量, 以 G 表示万有引力常数, 则万有引力的大小 F_1 为

$$F_1 = G \frac{m_e m}{R^2} \quad (1.11)$$

由式 (1.11) 可见, 当把 R 视为常数时, 则 F_1 也为常数, 它不随地球纬度 φ 而变, 但物体所受的惯性离心力的大小 F_3 则不同, 因为

$$F_3 = m(R \cos \varphi) \omega^2 = m \omega^2 R \cos \varphi \quad (1.12)$$

将式 (1.11) 与式 (1.12) 代入式 (1.10) 得,

$$\begin{aligned} W^2 &= G^2 \frac{m_e^2 m^2}{R^4} + m^2 \omega^4 R^2 \cos^2 \varphi - 2 G \frac{m_e m^2 \omega^2}{R} \cos \varphi \\ &= G^2 \frac{m_e^2 m^2}{R^4} - \left(1 - 2 \frac{R^3 \omega^2}{G m_e} \cos^2 \varphi \right) + m^2 \omega^4 R^2 \cos^2 \varphi \\ &= G^2 \frac{m_e^2 m^2}{R^4} - \left(1 - 2 \frac{R^3 \omega^2}{G m_e} \cos^2 \varphi \right) \end{aligned}$$

两端开方, 因 ω 很小, 只取其展开式中前两项, 则得:

$$W = G \frac{m_e m}{R^2} \left(1 - \frac{R^3 \omega^2}{G m_e} \cos^2 \varphi \right) \quad (1.13)$$

由式 (1.13) 可见, 物体的重量确实与地球纬度有关, 它随地理纬度增大而增大, 并不难看出: 在赤道上重量最小, 在两极重量最大。

为导出物体的重量与其所在海拔高度有关，可将式 (1.11) 中的 R 视为变量（事实上也应如此，因不同的海拔高度对应于不同的 R ），并将该式两端对 R 微分，则得：

$$dF_1 = -2G \frac{m_0 m}{R^3} dR \quad (1.14)$$

将式 (1.14) 除以式 (1.11) 得：

$$\frac{dF_1}{F_1} = -2 \frac{dR}{R} \quad (1.15)$$

式 (1.15) 表明，任一物体所受地球的万有引力 F_1 的相对变化，为其间距离 R 的相对变化的两倍，负号则表示引力随距离增大而减小。

另外，因物体所受的惯性离心力很小，当略去其影响时，物体的重量可用万有引力大小表示，即

$$F_1 = W = mg \quad (1.16)$$

式中，各符号的含义同前。

将式 (1.16) 两端微分得：

$$dF_1 = m dg \quad (1.17)$$

再将式 (1.17) 除以式 (1.16)，则得：

$$\frac{dF_1}{F_1} = \frac{dg}{g} \quad (1.18)$$

将式 (1.18) 代入式 (1.15)，得：

$$\frac{dg}{g} = -2 \frac{dR}{R} \quad (1.19)$$

由式 (1.19) 表明：任一物体的重力加速度值与其所处的海拔高度有关，其相对变化为其间距 R 的相对变化的两倍，并随着距离 R 的增大而减小。因物体的重量是重力加速度值的函数，并由式 (1.6) 可见，物体的重量将随距离 R （海拔高度）的增加而减小。由此说明，物体的重量确实与其所在海拔高度有关。

以上仅仅是为了说明物体的重量与其所处的地理纬度和海拔高度有关，而不是推导计算物体的重量的准确公式。若要比准确地获得某一物体的重量，应事先测量当地的重力加速度值，然后再乘以该物体的质量，或者，通过与另一已知重量的标准物体进行比较。这都是目前比较常用的方法。

第三节 质量和重量的区别

通过前面两节对质量和重量的叙述，不难看出两者有以下区别。

1. 定义不同

质量是物体固有的一种物理属性。它既是物体惯性的量度，它又是物体产生引力场和受引力场作用的能力的量度。

重量是物体所受重力的大小。它等于该物体的质量乘以重力加速度值。

2. 变化规律不同

在牛顿力学范围内，物体的质量是恒量，不随地理纬度和海拔高度而变。

物体的重量，要随地理纬度和海拔高度而变，在无重力的空间内，物体的重量等于零。

3. 单位不同

在国际单位制中，质量是基本单位，单位名称为千克，单位符号为 kg，重量是导出单位，单位名称为牛[顿]，单位符号为 N。

最后需要指出的是：重量一词，由于历史的原因，在日常生活和贸易中，它往往成了质量的代名词。比如某人的体重，某某货物的毛重，皮重或净重等等。

第四节 衡 量

一、衡量的概念

利用衡量仪器，以确定物体质量量值为目的的一组操作称为衡量。

二、衡量原理

一般说来，最常见的衡量原理是杠杆原理和弹性形变原理；其次是液压原理；再其次是磁悬原理和石英振荡器原理。

1. 杠杆原理

将被衡量的质量为 m_A 的物体置于等臂天平的左盘，将已知量值的质量为 m_B 的砝码置于其右盘（见图 1.2），因物体和砝码均受重力作用，于是，就有两力矩作用于天平的横梁上。如果此时天平的横梁正好处于水平状态，则根据杠杆平衡原理可知，横梁左右两端的力矩应该相等，即

$$am_A g_1 = bm_B g_2 \quad (1.20)$$

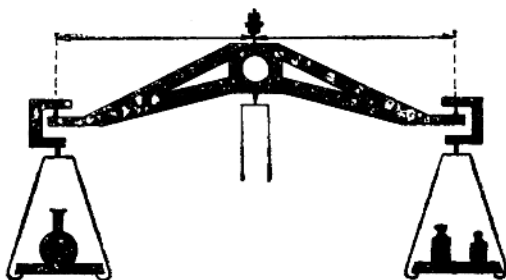


图 1.2

鉴于天平横梁的左、右两臂不会很长，故可认为两者的重力加速度 g_1 和 g_2 相等。再进一步假设天平的左、右两臂完全相等，即 a 等于 b ，则式 (1.20) 就简化为 m_A 等于 m_B ，因

为砝码 m_B 的质量值为已知，所以，就能确定物体 m_A 的质量值。

在以上的推导中，未考虑空气浮力的影响以及空天平的平衡位置等问题（这留待以后有关章节中解决）。另外，若将 m_A 置于右盘， m_B 置于左盘进行衡量，显然也是允许的。

2. 弹性形变原理

图 1.3 所示为弹簧秤的示意图。由虎克定律告诉我们，在弹性限度以内，弹性元件的形变大小或指针位移量与外力大小成正比，即

$$\Delta L = KF \quad (1.21)$$

式中： ΔL ——弹簧的伸长长度即指针位移量；

F ——加于弹簧秤上已知的外力大小；

K ——该弹簧秤的弹性系数。

对一定的秤， K 为定值。当选择得当时，可使 $K=1$ ，这时便有形变大小与外力大小一一对应的关系。

如果加于弹簧秤上的外力，就是欲求物体的重力，则根据形变的大小，亦就可直接确定该物体的重量。即

$$W = \Delta L \quad (1.22)$$

若需要用弹簧秤来测定物体的质量时，则必须事先在使用地点用已知量值的砝码对其标牌刻度进行检定，从而确定相应质量量值所对应的刻度位置，尔后即可用于进行质量测定。

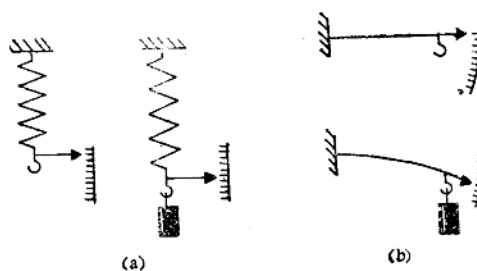


图 1.3

3. 液压原理

图 1.4 所示为液压秤原理图。假如未加载荷前，图中的两个活塞是处于平衡状态，其表面在同一水平面上，而加上物体 Q 和砝码 P 之后，仍平衡于原来的高度处，则根据帕斯卡定律可知，即

$$\frac{Qg}{A_1} = \frac{Pg}{A_2} \quad (1.23)$$

式中： A_1 、 A_2 ——大活塞与小活塞之面积；

g ——所在地的重力加速度值。

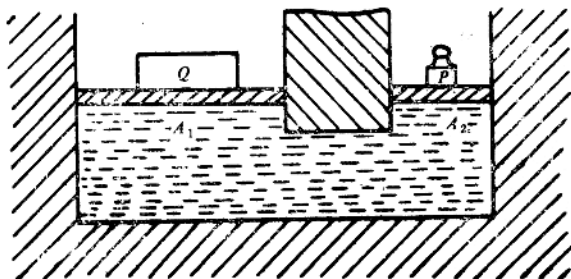


图 1.4 液压原理图