



3.1 质量计量的基本概念

3.1.1 质量计量在国民经济各部门中的作用

在我国质量计量历史悠久,远在春秋战国时期就发展到一定的水平。在秦始皇统一中国后,统一了文字,也统一了度量衡制度。以后各封建王朝都建立了这方面的标准器。“衡”是指衡器,就是通常所说的秤。我们的祖先很早就会应用杠杆原理制造秤了。

质量计量发展到今天已较完善,应用非常广泛。它与国民经济各部门都有密切联系,不论是工业生产、国内外贸易、交通运输、医疗卫生,还是科学技术发展以及人民日常生活等各方面都离不开质量计量。例如,在工业生产中,如果炼钢时钢的成分化验过程中称量不准,就可能把好钢错划成为不合格品;在地质探矿中,如果对矿质成分分析不准,就会把贫矿当富矿,这样会给国家的经济建设带来不应有的损失;在对外贸易中,如果质量测试不准,不仅会带来经济损失,还有损国家声誉;在农业中,土壤分析、一年的收成好坏等都是通过大量的质量计量才能得出正确的结论;在医疗卫生中,如果把药品成分化验错了,就会造成医疗事故,甚至造成生命危险;在科学技术中,质量计量越来越成为主要手段之一;在人民生活中,质量计量更是应用广泛。因此,质量计量在人类生产和社会活动中得到广泛的应用。随着生产发展和科学技术的进步,其应用更加普遍,它本身也必将得到更大的发展和完善。

质量计量的基本任务是:建立各级质量基准和标准,保证各级质量标准准确可靠,确保质量计量精度;分析质量计量中的各种影响因素,研究和改进测量方法,提高工作效率;简化质量量值传递系统,便于质量传递,保证全国质量量值的统一。

3.1.2 质量的物理概念

在现代物理学中,质量的概念有两种:惯性质量和引力质量。惯性质量表示的是物体惯性大小的度量,而引力质量表示的是物质引力相互作用的能力的度量。事实上,大量精确的实验表明,同一物体的这两个质量严格相等,是同一个物理量的不同表征。在日常生活中,质量常常被用来表示重量,但是在科学上,这两个词表示物质不同的属性。

将同样的力施加在两个不同的静止物体上,使它们得到相同的速度就需要各自相应的时间。费时较长的物体表明它具有较大的惯性;费时较短的物体表明它具有较小的惯性。也就是说,物体的加速度与它的惯性成相反的关系。根据牛顿第二定律,在同样的力的作用下,物体的加速度与它的质量成反比。因此,可用物体的质量来度量它的惯性,物体的质量越大,它的惯性就越大。

通过重力确定的质量称为重力质量。实际上,人们用惯性来确定质量,用称重法来测量重量,综合起来就得到某物体质量 m 与重量 W 之间的关系式: $W=mg$ 。式中, g 为地球上某一地点的重力加速度。重量和质量是两个不同的概念。把物体自地球移到其他星球上,其质量不变,而重量改变。同一物体在月球上的重量只有在地球上重量的约六分之一。物体的惯性质量取决于其受力时的加速度。根据牛顿运动第二定律,质量为 m 的物体受到的力为 F ,加速度为 F/m 。物体的质量也决定了其被引力场影响的程度。

3.1.3 质量单位的发展

质量是量度物体惯性大小的物理量。质量是决定物体受力时变化难易程度的唯一因素,因此质量是描述物体惯性的物理量。质量是物理学中的基本量之一,符号 m 。在国际单位制中,质量的基本单位是千克(符号 kg)。在实验室中,天平是测量质量的常用工具。

1795 年 4 月 7 日,克在法国被规定为相等“容量相等边长为百分之一米的立方体的水于冰溶温度时的绝对重量”。由于商贸一般涉及的质量远比一克(g)大,又由于以水为标准的质量既不方便又不稳定,于是,人们制造了一个临时的质量标准:一块金属人工制品,质量为克的 1000 倍,即千克(kg)。

同时,准确判定一立方分米(1L)的水质量的工作也展开了。虽然千克定义规定的水温 0°C 是非常稳定的温度点,但是科学家们经过多年的研究,于 1799 年在定义中改用水最稳定的密度点,也就是水达到最大密度时的温度—— 4°C 。同年,人们制造出一块纯铂的原器,其质量等于 4°C 时一立方分米的水。该原器于六月被呈上法国国家档案局,并于 1799 年 12 月被正式定为“档案局千克”(Kilogramme des Archives),而一千克(1kg)的定义就相等其质量。这个标准维持了 90 年。

自 1889 年以来,“千克”是由保存在法国巴黎国际计量局(BIPM)的一个铂铱合金(90%的铂,10%的铱)圆柱所定义,它的高和直径都是 39mm。该圆柱于 1879 年制成,经仔细调校,符合自 18 世纪法国大革命以来“千克”的质量,并于 10 年后被采纳,成为国际千克原器。人们一直认为这一圆柱的质量不会改变。

目前,在国际单位制里的 7 个基本单位里面,除了质量单位“千克”以外,其余 6 个基本

单位都不是以实物来定义的。也就是说,质量是唯一一个以实物来定义的国际单位。用实物来定义质量单位的一个缺点就是实物的质量会随着时间的流逝而可能发生改变。实际上,到了1992年,经与其他千克原器相比,国际千克原器变化了约 $50\mu\text{g}$ 。对此,科学家们的基本想法是让千克成为基本的物理学常量,就像今天我们用光在真空中的行进速度来定义米一样。有鉴于此,科学家们正在研究以更稳定的量子力学常数——普朗克常数 h 取代实物,重新对“千克”进行定义,并尽快达成用基本物理常数来统一计量制度的目标。普朗克常数反映的是量子力学中能量子的大小,每一份能量子等于 $h \cdot \nu$,其中, h 为普朗克常数, ν 为辐射电磁波的频率。将这一等式与更加著名的 $E=mc^2$ 结合在一起,科学家们就可以据此定义质量了。

3.1.4 质量计量的发展动态

质量计量就是借助天平与秤等专门测量仪器,采用直接测量或者组合测量等实验方法,为求出被测物体和国际千克原器所具有的质量的对应值而进行的实验工作。质量计量有三项要素:①测量仪器(天平或秤);②千克原器或砝码;③测量方法。从当前情况看,世界各国的质量量值传递系统已经比较完善,但仍然有许多问题有待研究解决。主要有以下几方面的动向。

1) 关于质量千克原器的国际比对和保存方法研究

国际上有千克原器,许多国家也有自己的千克原器,千克原器质量准确与否直接关系到其量值的可靠、统一。因此,各国千克原器要与国际千克原器进行比对。千克原器应很好保存,它应尽可能放在条件较好的环境中。好的环境是指尽可能地减少尘土、温度、湿度、气压、振动等的影响。目前许多国家都在研究如何保存千克原器,另外,各国在比对前都要进行精细的清洗工作,如何对其进行清洗也是研究的课题之一。

2) 原器天平研制动态

原器天平是指在千克原器比对中所使用的天平。原器天平的结构在19世纪末已基本定型,目前已发展到相当水平。目前研制的原器天平有等臂原器天平、单盘原器天平、液体静力平衡质量比较仪、电子天平千克比较仪等,它们的测量精度可达微克级。不论什么结构的原器天平,其结构特点都在于天平刀刃与刀承永不脱离,这样可以避免因开启天平而带来的误差,提高测量精度。目前原器天平仍在研究和改进中。

3) 质量自然基准的研究

在国际单位制中,长度、质量、时间、电流等七个基本物理量中,唯有质量这一物理量仍然是实物基准(即千克原器)。由于实物基准易受自然界种种因素的影响,其量值传递精度往往不易保证,因此人们在努力寻求质量的自然基准。但到目前为止,质量自然基准的几种可行方案所采用的质量基准,其准确度都不理想,最高只能达 1×10^{-7} ,而目前的实物基准千克原器可达 10^{-9} 量级。随着科学技术的发展,人类一定会找到理想的质量自然基准。

4) 空气密度和湿度对测量结果影响的研究

质量计量绝大多数是在空气中进行的,空气密度和湿度对测量结果有一定影响,特别是精密质量测试必须考虑其影响,这种影响有多大、如何对其进行修正,也是研究的课题之一。

5) 动态测量和在线测量的研究

现在的质量计量大部分是在相对静止的状态下进行的,即使动态称量也是在速度很低的情况下进行测量。如物体在高速运动中,像转动物体的质心或重心位置的测量、生产线上质量较小物体的在线测量,这些都是需要研究的课题。

3.2 质量的量值传递与溯源

3.2.1 质量量值传递系统

一个国家所建立起来的千克原器,以及以此千克原器为基础所建立起来的质量单位的分量和倍量,只有经过若干级传递环节,才能把质量值传递到具体的工作砝码上去。这里所说的“若干级传递环节”就是质量的量值传递系统。根据 JJG 2053—2006,我国的质量计量器具检定系统框图如图 3.1 所示。其中,质量计量器具具体分为三层:最高级为计量基准器具,中间是计量标准器具,最底层是工作计量器具。检定系统规定了每件计量器具的使用权限、传递途径及本身的不确定度范围。

我国的质量国家基准是由 1kg 质量基准砝码、1kg 质量作证基准砝码及原器天平组成。1kg 质量基准砝码也称为国家公斤原器,系 1965 年从 BIPM 引进,编号为 No. 60,经 BIPM 检定的结果为 $1\text{kg} + 0.295\text{mg}$,标准偏差 $s = 0.008\text{mg}$ 。1986 年被批准为质量国家基准。

国家工作基准砝码由非磁性不锈钢制造,分为千克工作基准砝码、千克组工作基准砝码、克工作基准砝码、克组工作基准砝码、毫克组工作基准砝码和微克组工作基准砝码。

一等标准砝码的质量标称值为 $0.05\text{mg} \sim 50\text{kg}$,二等标准砝码的质量标称值为 $1\text{mg} \sim 50\text{kg}$ 。

其余各级砝码的质量标称值为:一级(E_1): $(1 \sim 50)\text{kg}$; 二级(E_2): $1\text{mg} \sim 50\text{kg}$; 三级(F_1): $1\text{mg} \sim 50\text{kg}$; 四级(F_2): $1\text{mg} \sim 5\text{t}$; 五级(M_1, M_{11}): $1\text{mg} \sim 5\text{t}$; 六级(M_2, M_{22}): $1\text{g} \sim 5\text{t}$; 七级(M_3): $100\text{g} \sim 50\text{kg}$ 。

一等、二等砝码和 E_1 级、 E_2 级砝码及各级毫克组砝码必须做成整块材料实心体,其余各级可以做成空心体。制造砝码的材料要求稳定性好、抗磁性能好、结构紧密,无孔隙,并具有一定的硬度。对砝码的结构特性(如形状、尺寸、材料等)和计量特性(如标称值、允差等)均有严格规定。

3.2.2 砝码的检定

质量计量中使用的砝码都是实物,而且是在空气中进行测量。被称物体的重力与已知质量的标准砝码的重力在衡器上进行比较的过程称为衡量。

砝码是否准确直接影响到衡量结果的准确度,所以砝码的检定工作对保证衡量的准确性和可靠性相当重要。砝码的检定方法一般有以下两种:交换衡量法和替代衡量法。其中,交换衡量法可分为单次交换衡量法和双次交换衡量法。替代法也分单次替代法、双次替

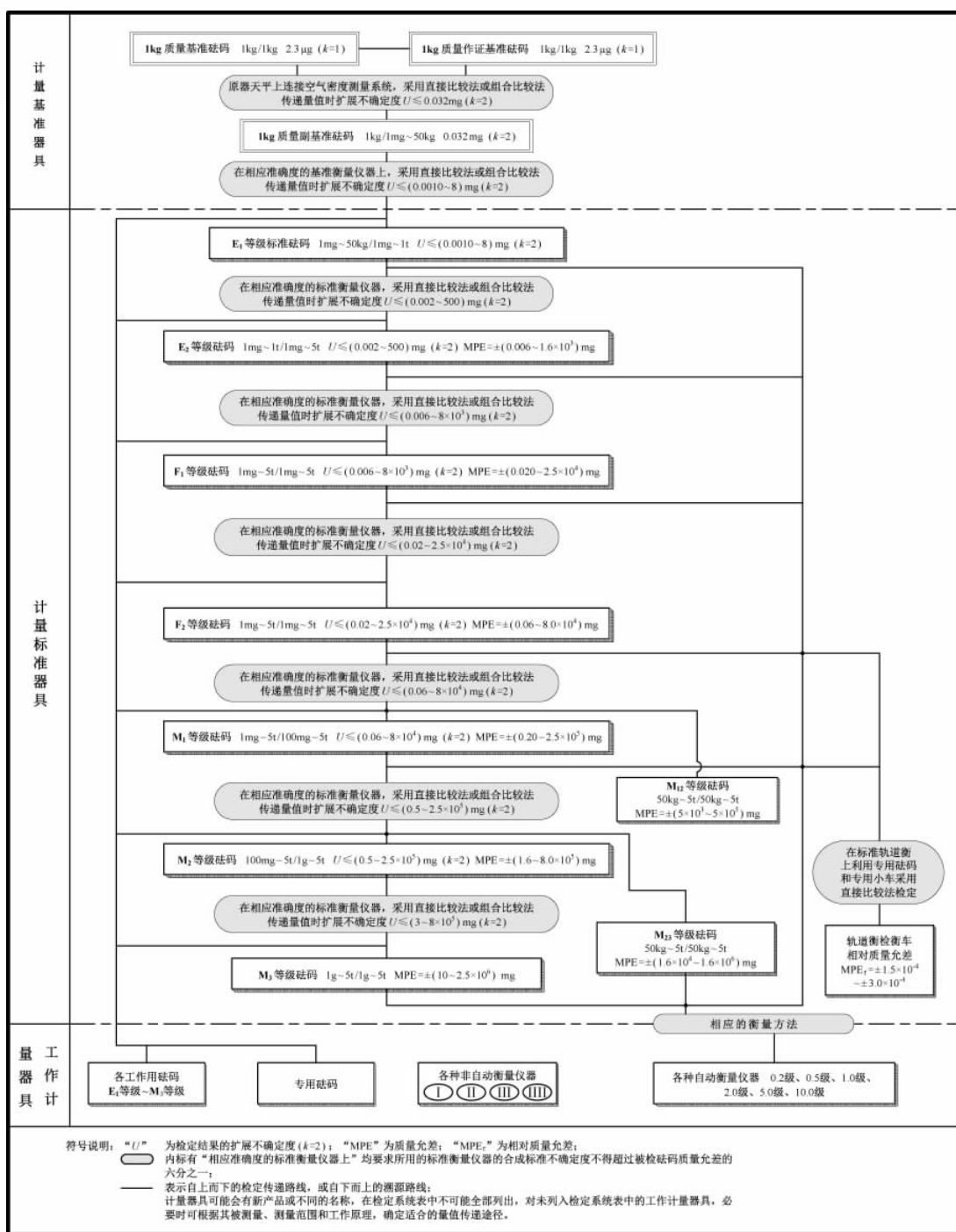


图 3.1 我国的质量计量器具检定系统框图(JJG 2053—2006)

代法和连续替代法。对于 E₁、E₂ 采用双次交换衡量法或双次替代衡量法。对于 F₁、F₂ 及其以下等级砝码采用单次交换衡量法或单次替代衡量法。

1. 天平砝码交换衡量法

单次交换衡量法的检测步骤为三步:

第一步: 将被检砝码(通常以 B 表示)置于天平的右盘, 将相同标称值的标准砝码(通常以 A 表示)置于天平的左盘; 开启天平测定其平衡位置(以 I_{AB} 表示)。若开启天平时其横梁的倾角太大而无法读数, 则应在较轻的盘中添加小标准砝码 u 使其平衡后再进行测定。

第二步: 将左、右盘中的所有砝码全部交换后, 开启天平测定其平衡位置(以 I_{BA} 表示)。若开启天平时其横梁的倾角太大而无法读数, 则应在较轻的一盘中添加小标准砝码 w 使其平衡后再进行测定。

第三步: 将测分度值的小标准砝码 r 加于显示较轻的一盘中, 测定其平衡位置(以 I_{BAr} 表示)。

双次交换法的观测步骤可以是四步, 也可以是五步, 观测四步的, 其中前三步与单次交换法完全相同。

第四步: 将测分度值的小砝码 r 保留在盘中, 把其余所有砝码进行第二次交换后, 测定其平衡位置(以 I_{ABr} 表示)。

对于观测五步的, 其中第一、二步和前两者相同; 第三步与第二步相同; 第四步将左、右盘中的所有砝码进行第二次交换, 使其与第一步相同后, 开启天平测定其平衡位置; 第五步将测分度值的小砝码 r 加于较轻的一盘中, 测定天平的分度值。

在测定以上各平衡位置时, 对于摆动式天平, 应读取并记录四个回转点($i_1 \sim i_4$); 对于阻尼式天平, 应读取并记录两个静止点(I_1 和 I_2)。然后利用前三个回转点或两个静止点分别计算出相应的天平分度值, 再计算得到被检砝码的质量。

2. 天平砝码替代衡量法

单次替代法的观测步骤为三步:

第一步: 将被检砝码 B 置于天平的任一盘中, 在另一盘中加放配衡砝码 T , 开启天平测定其平衡位置(以 I_B 表示)。

第二步: 保留配衡砝码 T , 取下被检砝码 B , 然后以相同标称值的标准砝码 A 代替。开启天平测定其平衡位置(以 I_A 表示)。若发现此时天平横梁的倾角太大而无法读数, 则应在较轻的一盘中添加小标准砝码 w 使其平衡后再进行测定。

第三步: 在显示较轻的一盘中添加测分度值小砝码 r , 测定其平衡位置(以 I_{Ar} 表示)。

双次替代法的观测步骤有四步和五步的。观测四步的, 其中前三步与单次替代法顺序完全相同。

第四步: 将测分度值小砝码 r 保留在盘中, 只取下标准砝码 A , 而代之以第一步中的被检砝码 B , 测定其平衡位置(以 I_{Br} 表示)。

对于观测五步的, 其中第一、二步与前者相同; 第三步与第二步相同; 第四步取下盘中的标准砝码 A , 而代之以第一步中的被检砝码 B , 测定其平衡位置(以 I_{B2} 表示)。

第五步: 将分度值小砝码 r 加于较轻的一盘中, 测定其平衡位置(以 I_{Br} 表示)。计算出相应的天平分度值, 再计算得到被测砝码的质量。

3. 天平砝码连续替代法

检定准确度等级较低的砝码可采用连续替代法, 其检定方法如下:

- (1) 将若干个与被检砝码组中的标称值对应相等的、其质量的总和不超过所用天平最大称量的标准砝码加于天平的任一盘中,在另一盘上放上配衡砝码 T ,使其平衡。开启天平,记下连续四个回转点读数或两次静止点读数,关闭天平。
 - (2) 在放标准砝码的盘中取下一个标称质量值最大的标准砝码为 A_1 ,代以标称质量值与 A_1 相同的被检砝码为 B_1 ,开启天平,如不平衡,则关闭天平并在较轻的一盘中加小标准砝码 w_1 使之平衡。再开启天平,按上述相同的方法记下读数后关闭天平。
 - (3) 根据天平中标准砝码的组合形式,按上述方法,依次取下第 j 号标准砝码 A_j ,代之以第 j 号被检砝码 B_j ,直至秤盘中的标准砝码全部为被检砝码所代替时为止。
 - (4) 在显示较轻的一盘中加测分度值的标准小砝码 r 。开启天平,并记下相应的数据后关闭天平。
- 若天平的称量或准确度等级达不到被检砝码所要求的准确度时,整组砝码可在不同称量的天平上分段检定。被检砝码的质量可以计算得到。

3.2.3 天平的分类与检定

1. 天平的分类

按天平的构造原理来分,可分为机械式天平(杠杆天平)和电子天平两大类。

杠杆天平又可以分为等臂双盘天平 and 不等臂双刀单盘天平。双盘天平还可以分为摆动天平 and 阻尼天平,普通标牌天平 and 微分标牌天平(亦称电光天平);按加砝码器加码范围,可分为部分机械加码和全部机械加码。一般化验室较适用的是最大称量 100g 或 200g、分度值为 0.1mg 的部分机械加码电光天平。全机械加码电光天平的加码器比部分机械加码的易发生故障,使用者较少。双盘天平存在不等臂性误差、空载和实载灵敏度不同及操作较麻烦等固有的缺点,逐渐被不等臂单盘天平代替。不等臂单盘天平采用全量机械减码,克服了双盘天平的缺点,操作更简便快速。

电子天平采用电磁力平衡的原理,没有刀口刀承,无机械磨损,采用全部数字显示,称量快速,只需几秒钟就可显示称量结果。电子天平连接计算机和打印机后具有多种功能,是现在天平中最先进的,但也是价格最昂贵的,现在还有部分小型化验室没有或少有电子天平。

按在量值传递中的作用,分为标准天平和工作用天平。标准天平是直接用于检定传递砝码质量量值的天平。标准天平以外的天平一律称工作用天平。它们又可分为分析天平和其他专用天平。

按分度值大小,可以分为常量天平(分度值 0.1mg)、半微量天平(分度值 0.01mg)和微量天平(分度值 0.001mg)。

按精度分,单杠杆天平的精度与级别如表 3.1 所示。天平的精度(相对精度)定义为天平的名义分度值与最大载荷的比值。对于电子天平,目前我国只要求指明分度值与最大载荷,暂不分级别。

表 3.1 杠杆天平的精度与级别

天平级别	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
精度≤	1×10^{-7}	2×10^{-7}	5×10^{-7}	1×10^{-6}	2×10^{-6}	5×10^{-6}	1×10^{-5}	2×10^{-5}	5×10^{-5}	1×10^{-4}

2. 天平的检定

1) 机械天平的检定

机械天平在进行检定时,首先要进行外观检查及安装,包括如下步骤:①清洁天平;②调试光源;③安装横梁,调整中刀位置;④安装吊耳、秤盘,调整边刀位置;⑤安装盘托。

天平的基本计量性能如下:①天平的检定标尺分度值误差;②天平的横梁不等臂性误差;③天平的示值重复性;④游码标尺、链码标尺称量误差;⑤机械挂砝码的组合误差。根据 JJG 98—2006 的要求,天平的检定程序和步骤如表 3.2 所示。其中, r 为测灵敏度所用的小砝码, P_1 、 P_2 为相当天平称量的一副等量砝码。

表 3.2 天平的检定程序和步骤

观察顺序	左盘	右盘	检 定 项 目
1	0	0	第 1、2 步检定空载左盘分度值
2	r	0	
3	P_1	P_2	第 3、4 步检定不等臂性
4	P_2	P_1	
5	$P_2 + r$	P_1	第 5 步检定全载左盘分度值
6	0	0	第 6、7 步检定空载右盘分度值
7	0	r	
8	P_1	P_2	第 8、9 步检定全载右盘分度值; 第 3、8 步检定全载重复性
9	P_1	$P_2 + r$	
10	0	0	第 1、6、10 步检定空载重复性

2) 电子天平的检定

根据我国现行的国家计量检定规程 JJG 1036—2008《电子天平》,电子天平检定项目主要有:外观、偏载误差、重复性和示值误差,这些误差都有对应的误差允许范围。

(1) 外观检查:电子天平是对物质的质量进行分析及精密测量的仪器。检定前首先对电子天平进行目测检查,其中包括:计量特征、标记、天平的使用条件及地点是否合适等。依据国家计量检定规程,电子天平没有标注检定分度值 e ,外观检定第一步就不合格。电子天平的工作台应当平稳和牢固,具有一定的刚度,同时具有一定的防震功效。电子天平存放的室内环境对于电子天平检定结果的准确度有着重大的影响。送检的电子天平应当在指定的室内检定环境中平稳存放 24h 以上,使电子天平内的机械结构趋于平稳,同时使电子天平的整机与检定的室内环境的温度和湿度相平衡,再进行检定或校准工作。

(2) 偏载误差:偏载误差就是在偏载测试时载荷在不同位置的示值误差。检定中分别对加载和空载的平衡位置进行计数并记录,每加一次载荷均应返零一次。对同一载荷多次衡量结果之间的差值,不得超过电子天平在该载荷时的最大允许误差的绝对值。各载荷点的示值误差不得超过天平在此载荷时的最大允许误差,这样才算合格。载荷在不同位置的示值误差须满足相应载荷最大允许误差的要求。检定时分别把标准砝码放在四角离中心 $1/2$ 处,然后再放正中间,测量 5 个不同位置的示值,然后根据记录把最大误差的绝对值减去最小误差的绝对值,得出的结果偏载误差小于最大允许误差(MPE)。按检定规程,应该取偏载误差各点中的最大值作为最后的偏载误差。

(3) 重复性: 电子天平的重复性检定应该在空载和加载状态下分别进行。电子天平是极精密的仪器, 对于气流、静电、桌面振动、放歪, 甚至空气浮力等影响都要将其考虑在内, 否则精确度和重复性会很差。对电子天平检定时, 需要测试环境相对稳定, 屏蔽外界干扰。电子天平的重复性等于 $E_{\max} - E_{\min}$, 其中, $E_{\max}$ 为加载时天平示值误差的最大值, $E_{\min}$ 为加载时天平示值误差的最小值, $E_{\max} - E_{\min} < \text{MPE}$ 。重复性误差的计算结果是误差的最大值与最小值之间差值的绝对值, 没有正负。在电子天平重复性检定中, 重复性误差的计算结果是称量结果中的最大值减去最小值或是称量误差的最大值减去最小值。

(4) 示值误差: 电子天平载荷点的最大允许误差包含电子天平线性误差的影响, 也包含电子天平内校砝码、重复性及四角误差等多个因素的影响。示值误差是相对真值而言的, 由于真值不能确定, 实际上使用的是约定真值或实际值。为确定测量仪器的示值误差, 当利用高等级的测量标准对其进行检定或校准时, 该测量标准器复现的量值即为约定真值, 通常称为实际值、校准值或标准值。检定方法: 用标准砝码采用直接测量法, 检定电子天平各技术参数的示值, 可得电子天平示值与标准砝码值之差, 即为电子天平的示值误差。各载荷点的示值误差不得超过该天平在该载荷时的最大允许误差。无论加载或卸载, 应保证有足够的测量点数, 对于首次检定的天平, 测量点数不得少于 10 点, 对于后续检定或者使用中检定的电子天平, 测量点数可以适当减少, 但不得少于 6 点。计量检定人员对电子天平进行检定时, 如果电子天平各载荷点的最大允许误差超差, 就可以判定该电子天平不合格。

3.3 质量计量设备应用实例

20 世纪 90 年代以前, 开展砝码检定工作的配套设备主要是机械天平。由于机械天平存在着刀口机械磨损, 因而天平的灵敏度和重复性不能长期保持, 而且天平的准确度通常很难达到 10^{-7} 量级; 另外, 还存在着读数等待时间长、人员读数误差大和操作繁琐等缺点。因此, 在一定程度上阻碍了质量量值传递技术的发展。质量比较仪的出现, 使砝码的检定准确度和检测效率等各方面得到很大的提高。质量比较仪的特点是准确度高、操作简便、读数直观快捷, 且全自动的真空质量比较仪可以在不需要检测人员直接参与的情况下就能完成对质量的测量工作, 使质量测量过程中的干扰因素降到最低, 从而得到更加准确的测量结果。因此, 质量比较仪的出现给砝码质量量值传递带来了前所未有的技术革命, 它将完全代替机械天平, 从而成为质量量值传递工作的主要设备。

下面以质量比较仪的计量为例进行介绍。

1. 测量环境

质量比较仪的传感器灵敏度很高, 要保证其具有很好的重复性。首先, 使用前要充分预热, 使磁钢达到热平衡, 保证使用时示值不再漂移, 经常使用可始终保持通电预热状态。其次, 要充分考虑环境条件的影响。由于电子元器件对温、湿度的敏感(存在温漂系数), 当温、湿度不稳定时, 示值也发生漂移, 准确度越高, 这种现象就越明显。为保证周围环境温度稳定, 应避免阳光照射, 远离门窗及空调的出风口。保持室内相对湿度为 45%~65%, 避免室内湿度过大或过小对测量结果造成影响。当室内湿度不满足要求时, 可采取使用加湿机或除湿机来解决。最后, 在质量比较仪称量时, 对被称物要轻拿轻放, 避免较大的冲击对测量

结果的影响,确保量值准确可靠。

2. 测量方法

1) 重复性测量

由于质量比较仪的测量是高精度的质量测量,为消除仪器本身的漂移对测量结果的影响,重复性测量采用闭环方式进行测量,即选用两个满足 JJF 1326—2011 要求的标准砝码(最大载荷或二分之一最大载荷),按照 ABBA 循环方式进行。其中,A 代表标准砝码,B 代表另一个标准砝码。分别将这两个标准砝码放在秤盘中心位置,待比较仪显示稳定后,记录显示器示值,第 i 次测量的 B 与 A 的示值之差为

$$\Delta I_i = \frac{I_{B1i} - I_{A1i} - I_{A2i} + I_{B2i}}{2} \quad (i = 1, 2, 3, \dots, n) \quad (3.1)$$

式中: I_A 为砝码放在秤盘中心位置的读数; I_B 为砝码放在偏离秤盘中心位置的读数。

在相同测量条件下,循环测量 n 次,重复性校准结果用测定序列的单次测量结果的标准偏差 s 表示,即

$$s = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\Delta I_i - \overline{\Delta I})^2}{n-1}} \quad (3.2)$$

式中: $\overline{\Delta I} = \frac{\sum_{i=1}^n \Delta I_i}{n}$ 。

2) 偏载误差测量

进行质量比较仪偏载误差的测量时,选用最大载荷或二分之一最大载荷的单个标准砝码,每一偏载测量都采用 ABBA 形式,A 代表砝码放在秤盘的中心位置,B 代表砝码放在偏离秤盘中心的位置。每一位置的偏载误差计算公式如下:

$$\Delta I_i = \frac{I_{B1} - I_{A1} - I_{A2} + I_{B2}}{2} \quad (3.3)$$

在四个偏载位置的示值差值中,取一个绝对值最大的差值作为偏载误差。

3) 示值误差测量

示值误差测量选用一个满足校准比较仪的标准砝码,按照 ABBA 方式先将标准砝码放在秤盘上,待比较仪显示稳定后,记录显示器示值。接着再在该秤盘上放一个小质量的标准砝码 m_s ,待比较仪显示稳定后,记录显示器示值。每次循环测量的示值分别为 I_{A1} 、 $I_{(A+m_s)1}$ 、 $I_{(A+m_s)2}$ 、 I_{A2} ,共循环测量三次。

添加标准小砝码引起比较仪示值误差的变化量为

$$\overline{\Delta I_{m_s}} = \frac{I_{(A+m_s)1} - I_{A1} - I_{A2} + I_{(A+m_s)2}}{2} \quad (3.4)$$

三次测量的平均示值误差变化量为

$$\Delta I_{m_s} = \frac{\Delta I_{m_s1} + \Delta I_{m_s2} + \Delta I_{m_s3}}{3} \quad (3.5)$$

质量比较仪通常是用于高精度测量砝码或物体的质量,故在对其示值误差的校准中,对测量该项性能的标准砝码有很高的要求。在 JJF 1326—2011 中,针对不同检定分度数的质