天平与砝码

TIANPING YU FAMA

技术标准出版社

内 容 提 要

本书共分九章。内容包括天平的基本理论；天平的分类、结构和精度等级；天平的安装、使用、维护和检定。重点介绍了分析天平的调修技术和修理工具的使用。还简单介绍了单盘天平与扭力天平的结构、原理、检定和修理技术。最后对有关精密衡量法和误差的知识，以及砝码的使用、保养和检定方法等作了比较详细的叙述。

本书可供天平使用人员和从事质量计量工作的人员阅读，亦可供大专院校有关专业在教学中参考。

天 平 与 砝 码

湖南省计量标准管理局《天平与砝码》编写组 编

*

技术标准出版社出版

（北京复外三里河）

技术标准出版社秦皇岛印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

*

开本 850×1168 1/32 印张 $9^1/_2$ 插页 1 字数 266,000

1979年10月第一版 1979年10月第一次印刷

印数 1—27,000

*

书号：15169•3-104 定价 1.40 元

前　言

天平、砝码是科研和生产单位广泛使用的计量器具，而衡量技术又是通过各种计量器具与方法来认识物质量的基本手段之一。为了提高衡量准确度，除去研制新型的、具有更高精度的仪器之外，正确使用与维护现有的天平、砝码，以及普遍采用精密衡量法，同样是很重要的。目前，不少实验室工作人员，感到对天平的性能和正确的衡量方法缺乏深入的了解，迫切需要一本实用的参考书；广大的质量计量工作人员和天平检修人员，为了学习业务，提高技术水平，也希望有一本辅助性读物。为此湖南省计量标准管理局抽调长沙、株洲、衡阳市和岳阳、黔阳、郴州地区标准计量管理处及津市计量管理所的计量人员和天平检修人员，组成编写组，在有关单位的支持与协助下，写成了这本《天平与砝码》。参加本书编写组的有钟国屏、文国安、李成美、周壮达、许晋秋、鲁隆富、何玉兰、李文炳等同志，由钟国屏、文国安、李成美同志任主编，陈勤孝、戴士华同志担任本书的制图工作。

在本书编写过程中，得到了上海天平仪器厂、上海第二天平厂、湘西仪表总厂天平厂、北京光学仪器厂、沈阳天平厂和部分天平修理、使用单位以及计量部门的指导，并提供了许多宝贵的技术资料；也得到了中国计量科学研究院第一力学实验室同志们的支持与帮助，并由杜恩光同志承担了本书的审校工作。在此一并表示感谢。

本书力求把工作中积累起来的点滴经验和体会介绍出来，供与称量技术有关的科研、教学、生产人员和天平检修人员参考。但由于作者水平所限，加之时间仓促，错误之处，在所难免，敬希读者批评指正。

编　者

目　录

第一章　天 平 理 论

天平是进行质量计量的基本工具之一。作为计量器具，天平有其特有的计量性能。这些性能受一定因素的制约，同时，各性能之间也存在着有机的联系。天平理论的任务，就是对影响天平性能的因素和各个性能相互间的关系进行研究，揭示它们的变化规律，以便我们在工作中能正确使用天平，使天平的性能得以正常的发挥；在调修天平时使每一举措有更明确的目的性；甚至利用各性能间的有机联系，还可以收到多方面的效果。可见，掌握天平理论是很重要的。

在讨论天平理论之前，先介绍几个物理上的基本概念。

第一节　基 本 概 念

一　质 量 与 重 量

（一）质量

众所周知，空载的汽车起动时容易，紧急制动也不难停住；满载的汽车起动和制动都比较困难。运动员赛跑时，从起跑到达到一定的速度，以及从疾跑中停下来，都需要一定的时间。从生活常识知道，这就是“惯性”在起作用。牛顿以他著名的第二定律，对这种现象作了准确的描述。

根据牛顿第二定律，在惯性系统中，任何一个物体受力后所得到的加速度，其大小与所受力的大小成正比，而与该物体的质量成反比，其方向与所受力的方向相同。用公式表示时，可写为如下形式：

$$\vec{a} = \frac{\vec{F}}{m}$$

式中：$\vec{F}$——物体所受的外力；

m——物体的质量；

$\vec{a}$——物体受外力时所获得的加速度。

从上式明显看出，用同一大小的力，作用在任何两个不同质量的物体上，质量小的物体获得的加速度大，即速度的变化率大，也可以说该物体保持原来运动速度的能力小；质量大的物体则相反。我们将这种物体受力时保持原来运动速度的能力，叫做物体的惯性。质量大的物体，惯性大；质量小的物体，惯性小。因此也可以说，质量是物体惯性的量度。这种由牛顿第二定律引出来的物体质量的概念，人们称它为惯性质量。

从物理学中知道，任何两个物体间都存在着引力，牛顿的万有引力定律对影响引力大小的因素，给出了定量的描述。万有引力定律可用下式表示：

$$F=G\frac{m_1m_2}{r^2}$$

式中：m_1、m_2——分别为两个物体的质量；

r——两个物体之间的距离；

F——两个物体中，一个物体所受另一个物体的吸引力；

G——万有引力常数。

从万有引力定律公式可知，任何两个物体之间的引力，与这两个物体各自的质量成正比，而与它们之间距离的平方成反比。这种由万有引力定律引出来的物体的质量，称为引力质量。引力质量是表征物体产生引力场和受引力场作用的能力。

综上所述，一个物体有两个质量值：一个是惯性质量值，一个是引力质量值。进一步研究证明，任一物体的引力质量和它的惯性质量严格成正比。若以同一个单位量来体现时，对任何物体来说，它的两种质量值是同样的。为此，通常把引力质量和惯性质量看作为一个统一的物理量——质量。因此，质量的概念可以这样来叙述：质量是物体的一种属性，它是物体惯性的量度，并表征着物体产生引力场和受引力场作用的能力。

（二）重量

物体受地球吸引的力，叫做重力或物体的重量。在这个力的作用下，自由的物体从高处落下，水向低处流；若物体不是自由的，则重力表

现为物体对支持物的压力或对系挂物的拉力。压力或拉力越大，说明物体的重量越大。

（三）质量与重量的关系

根据万有引力定律，地球表面的物体都要受地球的引力作用，根据牛顿第二定律，物体受力时要产生加速度。若用 P 表示这个引力，用 g 表示在此引力作用下物体产生的重力加速度，可得出下式：

$$P=mg$$

这就是说，在地球上同一地点（即重力加速度 g 不变时），任何物体的重量与其质量成正比。

从另一方面说，质量与重量是两个完全不同的概念。首先，重量是一种力，有大小、方向（指向地心）和力的作用点（即物体的重心）；质量只有大小没有方向。其次，重量因物体所处地理位置（海拔高度和纬度）的不同而不同，一般地说，物体的重量随着海拔高度和纬度的增加而减小。质量则没有这种变化，它在地球上任何地方都是一样的。可见，质量与重量有密切联系，但它们又是不同的两个物理量。

由于历史和习惯上的原因，长期以来重量和质量值都使用同样的计量单位，使这两个不同的物理量容易产生混淆。本书在以后各章的叙述中，也常常使用重量与质量这两个名词。一般在谈到平衡方程式时，应理解为重量；在谈到衡量结果时，应理解为质量，这一点应该引起衡量工作者的注意。

二　杠杆、力矩与杠杆的平衡

（一）杠杆

一根有支点、重点和力点三个作用点的杆，叫做杠杆。

杠杆一般分两类：支点在力、重二点之间的叫第一类杠杆；支点在力、重二点以外的叫第二类杠杆。天平横梁属于第一类杠杆，复式杠杆秤则是把两类杠杆组配起来使用。在复式杠杆秤上，各类杠杆按其用途，又有基层杠杆（或承重杠杆）、传力杠杆和辅助杠杆之分。

（二）力矩

杠杆上支点到重、力两点间的距离分别叫重臂和力臂，习惯上统

称为力臂。作用在杠杆某一臂上的力与这个力臂的乘积称为力矩（包括重支矩和力支矩）。

（三）杠杆的平衡

当重支矩等于力支矩时，称为“杠杆处于平衡状态”。由此可知，杠杆在平衡时，一般并非两个作用力相等，而是两个力矩相等，两个力的大小具有一定的比例关系。

设在杠杆 MON 上（如图 1—1 所示），已知重支臂等于二分之一力支臂，即

$$OM=\frac{1}{2}ON$$

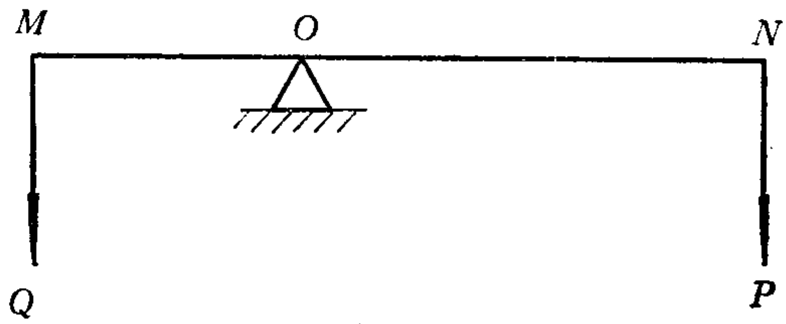

图 1—1

如果杠杆处于平衡状态，即

$$Q\cdot OM=P\cdot ON$$

或 $$Q\cdot\frac{ON}{2}=P\cdot ON$$

则 $$P=\frac{Q}{2}$$

由此得知，当杠杆平衡时，若杠杆一臂的长度为另一臂的几倍，那么，作用于这一臂上的力也就等于另一臂上作用力的几分之一。

在介绍重量与质量的关系时已经指出，物体的重心，就是地球引力在物体上的作用点。根据重心与支点的不同的位置关系，杠杆的平衡状态可分为以下三种：

1．稳定平衡　杠杆的重心处于支点的下方，杠杆被扰动后，它能够自动回到原来的平衡位置。

2．不稳定平衡　杠杆的重心处于支点的上方，杠杆被扰动后，它永远不能回到原来的平衡位置。实际上这种平衡状态是难于存在的。

3. 随遇平衡　杠杆的重心与支点相重合，杠杆被扰动后，它可以在任何位置上平衡下来。

三　衡　量

假若物体是不自由的，重力的作用会表现为物体对支持物的压力或悬挂物的拉力。在杠杆秤上，被称物体和砝码都是不自由的，因此，可以把衡量看成是被称物体的重量与已知物体——砝码的重量分别作用于支持物上的比较。

一般说，衡量原理可分如下三种：

（一）杠杆原理

当杠杆平衡时，两力对于支点所形成的力矩相等，即

$$力 \times 力臂 = 重 \times 重臂$$

杠杆天平就是建立在此原理基础上的。如图 1—2 所示，用 Q 表示被称物的重量，用 P 表示砝码的重量。由于重量等于质量乘重

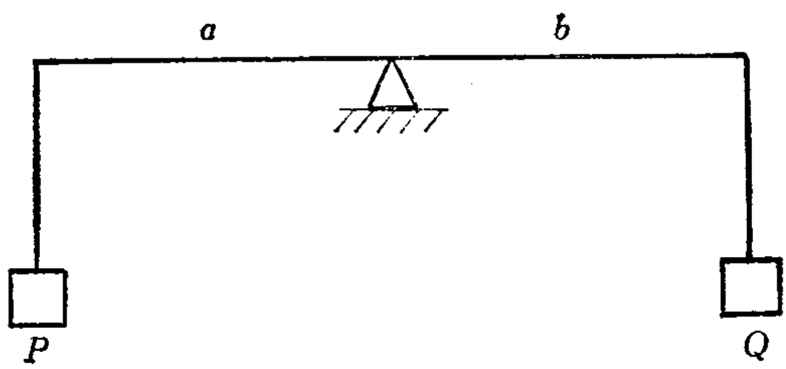

图 1—2

力加速度，所以当杠杆平衡时，平衡方程式为：

$$m_P g a = m_Q g b$$

设力臂等于重臂，即　$a = b$，同一位置 g 值相同，故得出

$$m_P = m_Q$$

由上式可知，在杠杆天平上衡量时，测定的不是物体的重量，而是物体的质量。

严格地说，杠杆天平左、右两秤盘所处位置的 g 值并不相等，不过它们之间的差值甚微，所以在普通精度的称量当中，可以认为相等。

（二）弹性元件变形原理

在重力作用下，挂在弹簧上的物体，有可能将弹簧拉长——变形。按照弹簧变形的大小，就可判定出作用力——重力的大小，如图1—3所示。

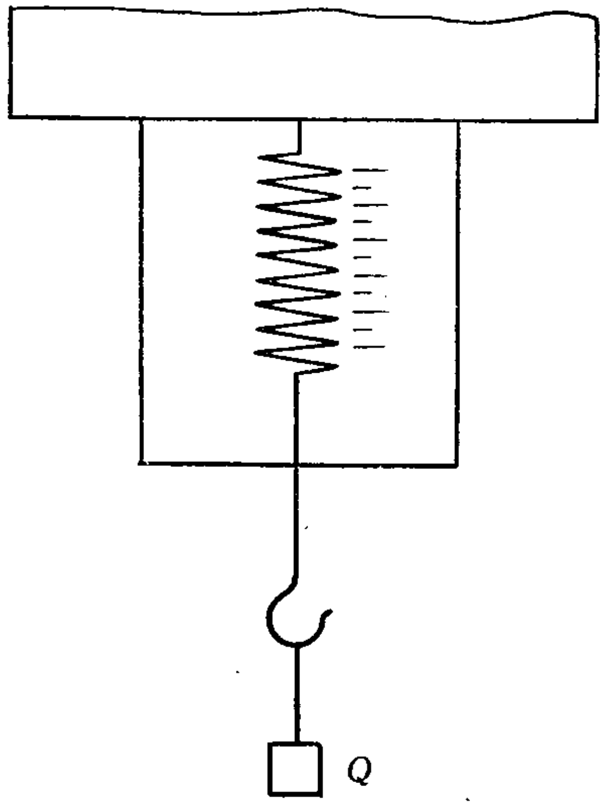

图 1—3

根据虎克定律，物体的变形与使其变形的外力之间的关系式如下：

$$l = kF$$

式中：l——变形的大小，即弹簧伸长的长度；

k——比例常数（视测量 l 和 F 所选用的单位而定）；

F——造成变形的外力。

在衡量物体时，造成变形的外力就是物体的重量 Q。所以

$$l = kQ$$

若 $$k=1,\ Q=m_Q g$$

则 $$m_Q g=l$$

可见，根据弹簧伸长的长度，可以测量物体的重量。

（三）液压原理

从力学原理知道，在一个 U 形管中充以一定的液体时，一个液面受到的压力，可以由另一液面上的压力所平衡。液压秤就是根据这个原理制成的。为了以少量的砝码衡量较大的重物，一般把两管制成不同的截面积，利用液体传递压强的性质，放在面积较大的活塞上的大重物，可以由放在面积较小的活塞上的小砝码所平衡。图 1—4 是液压秤的结构示意图，P 是砝码的重量，Q 是被衡量重物的重量，A_1、A_2 是两个活塞的面积。在两个活塞以下的空间里，充以油液。

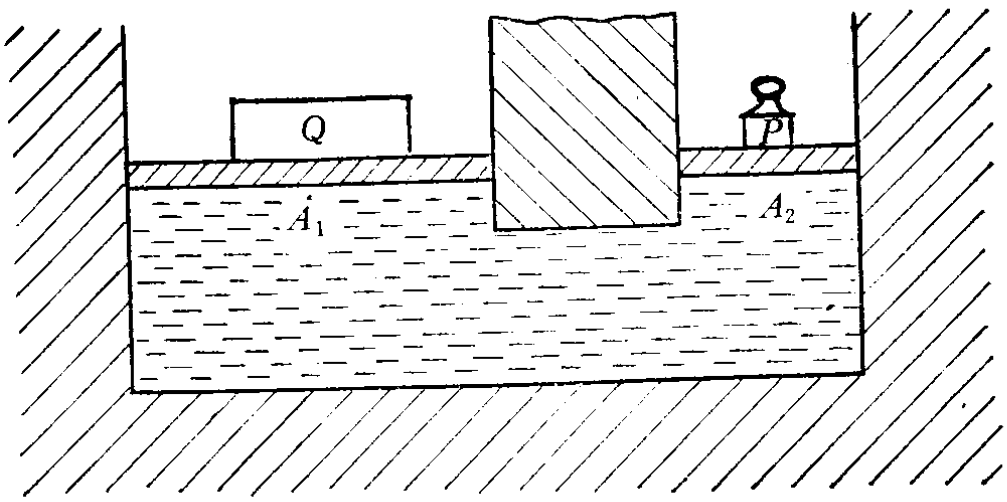

图 1—4

根据平衡时压强相等的原理，得

$$\frac{Q}{A_1}=\frac{P}{A_2}$$

若用 m_Q、m_P 分别表示重物和砝码的质量，因为 $Q=m_Q g$，$P=m_P g$，代入上式得

$$\frac{m_Q g}{A_1}=\frac{m_P g}{A_2}$$

即 $$\frac{m_Q}{A_1}=\frac{m_P}{A_2}$$

所以 $$m_Q = m_P \frac{A_1}{A_2}$$

由此得知，在液压秤上衡量时得到的是物体的质量。

此外，还有其他一些衡量原理，如磁悬原理和石英振荡原理等，因应用不甚普遍，这里不做介绍。

第二节　天平的计量性能

任何一台计量仪器都具有其特有的计量性能，天平的计量性能包括稳定性、正确性、灵敏度和不变性。这里仅就影响天平计量性能的因素和它们的相互关系介绍如下。

一　天平的稳定性

（一）稳定性的定义和达到稳定的条件

天平横梁在受到扰动后，能自动回到初始平衡位置的能力，称为稳定性。

为了掌握影响天平稳定性的因素及变化规律，首先必须导出实现稳定性的条件。取横梁为任意形式 MN（如图 1—5 所示），以便得出的结论具有普遍意义。

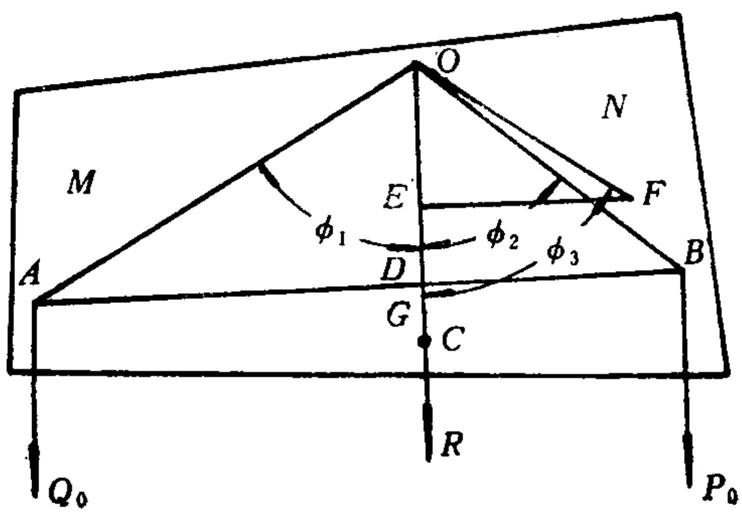

图 1—5

假设：

1．支点位于 O 点，横梁的自重 R 作用于它的重心 C 点；

2．Q_0 和 P_0 为挂在横梁上两秤盘的重量，分别作用于 A 和 B 点；

3．横梁附有重量为 G 的骑码，它可沿标尺 EF 移动，并处于标尺的起始点 E 上。

把 A、B、F 同 O 点以及 A、B 点互相联结，从 O 点引垂线与 AB 联线交于 D 点。

现用下列符号表示图 1—5 中的各角和线段：

$\varphi_1 = \angle AOD$	$\varphi_2 = \angle BOD$	$\varphi_3 = \angle EOF$
$a = AO$	$b = BO$	$x = CO$
$m = DO$	$l_1 = OF$	$L = EF$
$n = EO$		

现在，假设把秤盘Q_0和P_0从横梁上摘去，从力学原理可知，杠杆MN类似一个固定在轴上的任意自由物体，经过一系列摆动之后达到静止状态。这时，杠杆将处于这样的位置，即它的重心C位于通过支点的铅垂线上，也就是 OD 的延长线上。而骑码的重心也同样作用于通过支点的铅垂线上，因而，它对横梁的影响正如横梁本身的重量一样，紧压在支点上，而不会使横梁产生转动。

现在，假设重新加力 Q_0和P_0（即秤盘的重量）于A和 B 点，为使横梁的平衡位置不变，必须使 Q_0和 P_0所产生的力矩总和为零，即

$$Q_0 a\sin\varphi_1 - P_0 b\sin\varphi_2 = 0 \qquad (1-1)$$

式中 $a\sin\varphi_1$和$b\sin\varphi_2$为重臂和力臂。

但式（1—1）只有当下列条件得到满足时才成立：

$$Q_0 : P_0 = b\sin\varphi_2 : a\sin\varphi_1 \qquad (1—2)$$

若上述条件得不到满足，即

$$Q_0 : P_0 \neq b\sin\varphi_2 : a\sin\varphi_1$$

那么，横梁将相对于原来位置偏转一个 α 角，达到 A_1OB_1 的位置，如图1—6中虚线所示。

在新的位置上，横梁平衡的方程式为：

$$Q_0 a\sin(\varphi_1 - \alpha) - P_0 b\sin(\varphi_2 + \alpha) - Rx\sin\alpha - Gn\sin\alpha = 0 \qquad (1—3)$$

展开得 $Q_0 a\sin\varphi_1\cos\alpha - Q_0 a\cos\varphi_1\sin\alpha - P_0 b\sin\varphi_2\cos\alpha -$

$$P_0 b\cos\varphi_2\sin\alpha - Rx\sin\alpha - Gn\sin\alpha = 0 \qquad (1—4)$$

考虑到在真实横梁上，角φ_1和φ_2总是接近 90°，因此 取 $\sin\varphi_1 = \sin\varphi_2 = 1$ 不会有很大的误差（因为若三刀刃在同一平面上，则AO、BO分别与 AD、BD相重合）。

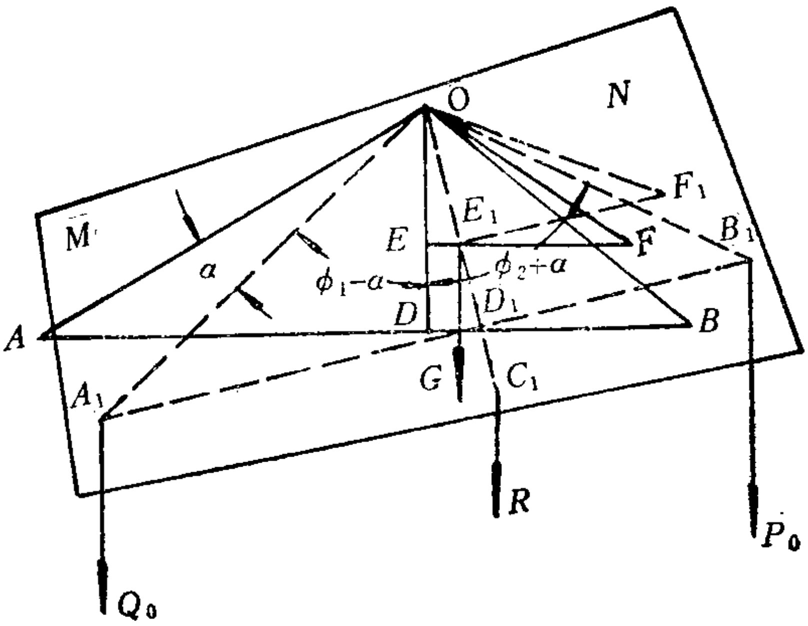

图 1—6

其次，从图 1—6 可看出，$a\cos\varphi_1$和$b\cos\varphi_2$都等于OD，而$OD = m$，所以$a\cos\varphi_1 = b\cos\varphi_2 = m$。

将上述等式代入式（1—4），得

$$Q_0 a\cos\alpha - Q_0 m\sin\alpha - P_0 b\cos\alpha - P_0 m\sin\alpha - Rx\sin\alpha - Gn\sin\alpha = 0$$

或 $$(Q_0 a - P_0 b)\cos\alpha - [(Q_0 + P_0)m + Rx + Gn]\sin\alpha = 0 \qquad (1—5)$$

假设横梁的倾角增大到β，横梁新状态的数学表述为下列不等式：

$$(Q_0 a - P_0 b)\cos\beta - [(Q_0 + P_0)m + Rx + Gn]\sin\beta \neq 0 \qquad (1—6)$$

此时，作用在横梁上的力矩总和不等于零，因此，横梁不会停留在新的位置上，而要返回到原先的位置。

从方程式（1—5）可求出

$$Q_0 a - P_0 b = \frac{[(Q_0 + P_0)m + Rx + Gn]\sin\alpha}{\cos\alpha}$$

现将这个差数代入不等式（1—6），得

$$[(Q_0+P_0)m+Rx+Gn]\frac{\sin\alpha}{\cos\alpha}\cos\beta-[(Q_0+P_0)m+Rx+Gn]\sin\beta\neq 0$$

或 $$[(Q_0+P_0)m+Rx+Gn]\left(\frac{\sin\alpha}{\cos\alpha}\cos\beta-\sin\beta\right)\neq 0$$

如果将上式中的$\sin\beta$乘$\frac{\cos\alpha}{\cos\alpha}$，得

$$[(Q_0+P_0)m+Rx+Gn]\left(\frac{\sin\alpha\cos\beta}{\cos\alpha}-\frac{\sin\beta\cos\alpha}{\cos\alpha}\right)\neq 0$$

$$[(Q_0+P_0)m+Rx+Gn]\frac{\sin(\alpha-\beta)}{\cos\alpha}\neq 0 \qquad (1—7)$$

这个不等式的左边叫做恢复力矩，即由于有这个力矩的存在，横梁才能回复到原来的平衡位置。

由结构所决定，横梁的摆角总是小于90°，即$\alpha<90°$，因此，$\cos\alpha>0$。

这表明，为使横梁回复到原来平衡位置，必须使下列条件得到满足：

$$[(Q_0+P_0)m+Rx+Gn]>0 \qquad (1—8)$$

事实上，如果不等式（1—8）成立，则当横梁倾角$\beta>\alpha$时，式（1—7）所示力矩总和为负号，横梁将向左转，缩小β，直至$\beta=\alpha$。在$\beta<\alpha$的情况下，式（1—7）的力矩总和为正号，横梁又开始向增大β角的方向偏转，直到等于α为止，横梁回到自己的初始位置。

在$[(Q_0+P_0)m+Rx+Gn]<0$的情况下，当$\beta>\alpha$时，式（1—7）的力矩总和为正号，表示横梁应向加大β角的方向转动，这样使β永远不能等于α，因此，横梁不能平衡。当$\beta<\alpha$时，式（1—7）的力矩总和为负号，横梁向减小β角的方向转动，这也使β永远不能等于α，因此，横梁不能平衡。

由此可见，只有$[(Q_0+P_0)m+Rx+Gn]>0$，是天平稳定平衡的条件。也就是说，只有$[(Q_0+P_0)m+Rx+Gn]$为正值的天平，

才能处于稳定平衡状态。

在式（1—8）中，Q_0、P_0、R和G都是正值，而x、m和n值可能有如下的变化：

x是横梁重心到支点的距离。横梁的重心可以高于、低于支点或与支点相重合，即有$x>0$、$x<0$或$x=0$三种情况；

m是支点刀刃与两重点刀刃所在平面之间的距离。根据三刀的相对位置，支点刀刃可以在这个平面以上，也可以“吃”入这个平面以下，或恰好通过这个平面。用数学语言表示，这个距离可为正、负或零，即$m>0$、$m<0$、$m=0$。这三种情况描述的事实，通常简称作离线、吃线和三刀一线；也可以分别叫做正透光、负透光、无透光，如图1—7、图1—8、图1—9所示；

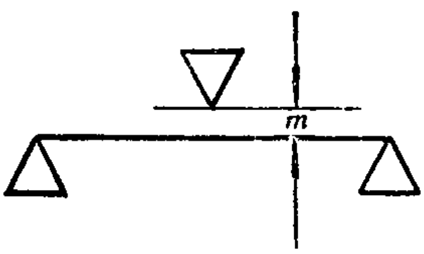

图 1—7

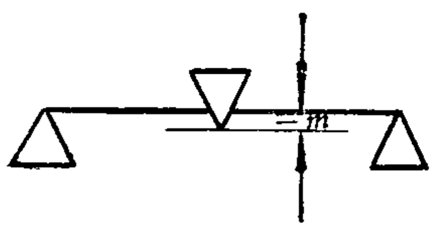

图 1—8

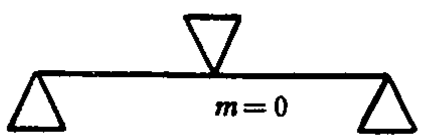

图 1—9

n是标尺上的骑码的重心到支点刀刃的距离。根据骑码标尺安设位置的不同，骑码的重心可以高于或恰好处在通过支点刀刃的水平面内，因此n值可能为负或零。

前面已证明，天平稳定的条件是$[(Q_0+P_0)m+Rx+Gn]$的总和为正。因此，有必要进一步讨论x、m和n对天平的稳定性有什么样的影响。

（二）各个参数对天平稳定性的影响