

现代称重技术 最新质量计测技术

ADVANCED WEIGHING TECHNOLOGY

[日] 亀岡紘一

Koichi Kameoka

[中] 施昌彦

Changyan Shi

中国计量出版社

China Metrology Publishing House

现代称重技术 最新质量计测技术 ADVANCED WEIGHING TECHNOLOGY

[日] 龟冈紘一

Koichi Kameoka

[中] 施昌彦

Changyan Shi

中国计量出版社

China Metrology Publishing House

现代称重技术

图书在版编目 (CIP) 数据

现代称重技术: 汉英日对照/(日) 龟冈紘一, 施昌彦著. —北京: 中国计量出版社, 2000. 10
ISBN 7-5026-1382-X

I. 现… II. ①龟… ②施… III. 秤-基本知识 IV. TH715.1

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2000) 第 71084 号

中国计量出版社出版
China Metrology Publishing House

北京和平里西街甲 2 号

邮政编码 (Post Code) 100013

电话 (Tel) 010-64275360

北京市迪鑫印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行

版权所有 不得翻印

*

787 mm×1092 mm 16 开本 印张 17.25 字数 371 千字

2000 年 10 月第 1 版 2000 年 10 月第 1 次印刷

*

印数 1—2 000 定价: 58.00 元

序 言

最近数十年间，由于传感器和微处理器的应用，称重技术有了重要的进展。采用传感器和微处理器后，秤的静态特性和动态特性有了突飞猛进的提高。通过这种实践，与以前相比，秤的技术人员在改善秤的性能方面对秤的动态特性的重要性更为关注。本书是注重秤的动态学理论层面的关于称重技术的图书。作者在各自的研究机关从事该项技术研究达 35 年以上，积累了上述技术革新时代的经验，从这些经验获得的知识应该是很重要的，我们想通过这本书提供给 21 世纪从事称重技术工作的读者。

以下是各章的概要。

第 1 章叙述质量测量的基本概念。首先，研究秤的功能和结构，并从此导出秤的基本结构和称重的基本原理。然后，阐明机械秤与电秤和电子秤的差别。最后，还研究了工业秤。

第 2 章说明有关静特性的必要的最小限度的基础知识。即讲述了单一杠杆、复合杠杆、罗伯威尔型秤、平台秤等典型的机械秤，以及双梁式称重传感器型秤。

第 3 章是本书的中心部分。先给出存在库仑衰减的质量—弹簧—制动系统的动态模型，然后论述秤的动态学。为了便于理解，列举了料斗秤、皮带秤、喂料秤等的动态学的例子。另外，本章是以一定程度的拉普拉斯变换的预备知识为前提进行论述的。

第 4 章是介绍数字信号、数字系统及数字滤波器的初等知识的一章。

第 5 章的大部分是由龟岡取得的研究成果构成。在各构成素材中，含有从动态学或数学的观点看很有趣的现象，相信读者会感兴趣。

附录 A1 和 A2 列出拉普拉斯变换和逆变换的对应表。

谢 辞

用日、中、英三种文字出版详细地论述动态特性的质量测量技术的专著，是中国计量出版社前社长王东宝先生的提议。如果没有他的这个提议以及其后的关照，也许这样一本独具风格的图书难以面世。作者对王东宝先生致以最深切的谢意。

历经相当长一段时间，作者首先完成了英文稿，然后，由龟岡担当日文翻译工作，中文翻译工作请中国计量科学研究所的蔡常青女士承担。蔡女士专门研究质量测量，故得以准确地、流畅地将其译成中文。另外，日文和英文的文字处理和插图绘制工作由中谷诚先生（日本姬路工业大学博士在读生）完成。在此，对蔡女士和中谷先生的协助表示感谢。

本书是作者在日本、中国、韩国三个国家的大学、科研机构、企业等处举行约 20 次讲座的讲义内容的整理与归纳，对讲座过程中提出的问题，书中也做了较好的阐述。因此，对提供 7 次讲座机会的石田公司深表谢意。

作者的初次会面是在日中质量力测量会议 (ISMFM' 92) 上。因此，对成功地召开为我们创造会面机会的会议做出贡献的中国计量科学研究所前副院长王立吉教授和大阪工业大学名誉教授前田親良先生表示衷心的感谢。另外，龟岡对大阪府大学名誉教授小野敏郎先生不断给予的指导和鞭策也深表谢意。

最后，恰逢新世纪来临之际本书得以出版，我们对中国计量出版社社长马纯良先生、副总编何伟仁先生及责任编辑王红女士致以衷心的感谢。

龟岡 紘一（日本姬路工业大学）

施 昌 彦（中国计量科学研究所）

2000 年 11 月

目 录

第 1 章 秤的功能和结构	(1)
1.1 基本结构和称重原理	(1)
1.2 电秤和电子秤系统的构成	(2)
1.3 工业秤的功能及其系统构成	(2)
1.3.1 功能特征和分类	(2)
1.3.2 控制的目的	(3)
1.3.3 系统的结构	(3)
第 2 章 秤的静力学	(5)
2.1 杠杆的静力学	(5)
2.1.1 杠杆的分类	(5)
2.1.2 单一杠杆	(6)
2.1.3 复合杠杆系	(8)
2.2 罗伯威尔型秤	(9)
2.3 平台秤.....	(11)
2.4 双梁式称重传感器型秤.....	(12)
第 3 章 秤的动态学	(15)
3.1 动态模型.....	(15)
3.2 自由响应.....	(15)
3.2.1 无阻尼的情况.....	(15)
3.2.2 粘性阻尼的情况.....	(17)
3.2.3 库仑阻尼的情况.....	(17)
3.2.4 天平静平衡点的测量.....	(19)
3.3 受迫响应.....	(20)
3.3.1 阶跃响应.....	(20)
3.3.2 秤的调定时间.....	(21)
3.3.3 斜坡响应.....	(23)
3.3.4 料斗秤的响应.....	(24)
3.3.5 频率响应.....	(26)
3.3.6 杠杆秤对由基础激励的响应.....	(29)

3.3.7	用传递函数计算响应的方法	(32)
3.3.8	皮带秤的响应	(33)
3.3.9	控制系统的响应	(36)
3.3.10	喂料秤的响应	(38)
第4章	称重信号处理	(41)
4.1	数字信号和数字系统	(41)
4.1.1	数字信号的表示	(41)
4.1.2	方框图表示和变换函数	(42)
4.2	数字滤波器	(44)
4.2.1	FIR(有限长脉冲响应)滤波器	(44)
4.2.2	IIR(无限长脉冲响应)滤波器	(45)
4.2.3	频率响应	(45)
4.3	数字滤波器的设计方法	(46)
4.3.1	脉冲—恒量法	(46)
4.3.2	双线性 z 变换法	(47)
4.4	称重信号的数字处理	(48)
4.4.1	模拟称重信号	(48)
4.4.2	低通滤波器的应用	(48)
4.4.3	陷波滤波器的应用	(49)
第5章	称重系统的分析研究	(51)
5.1	基础振动对复合杠杆式秤的影响	(51)
5.1.1	运动方程式	(51)
5.1.2	计量杠杆的防振条件	(52)
5.1.3	J 平衡的物理意义	(54)
5.1.4	防振条件的实验验证	(54)
5.2	双梁式称重传感器型秤的振动特性	(55)
5.2.1	固有模态	(55)
5.2.2	频率响应	(57)
5.3	对双梁式称重传感器型秤基础振动的补偿	(59)
5.3.1	补偿的概念	(59)
5.3.2	运动方程式	(61)
5.3.3	系统的方框图表示	(63)
5.3.4	补偿理论的可行性试验	(64)
5.4	组合秤中出现的概率和统计现象	(66)

5.4.1	组合秤模型.....	(66)
5.4.2	组合问题的数学描述.....	(67)
5.4.3	组合过程的数学描述.....	(67)
5.4.4	计算机模拟结果和分析.....	(69)
附录	(72)
附录 1	拉普拉斯变换表	(72)
附录 2	拉普拉斯变换的性质	(73)
参考文献	(74)

第1章 秤的功能与结构

1.1 基本结构和称重原理

两种不同类型的机械秤示于图 1.1。那么，秤的基本结构和称重原理方面的共同特征是什么呢？

对于图 1.1 (a) 所示的天平或杠杆秤，放在载荷盘上的被测物体的质量，与放在砝码盘上的砝码的质量是利用它们的自重对支点的力矩，通过计量杠杆进行比较的。这也可以看作是对物体载荷产生的作用力与砝码自重产生的反作用力进行比较，而且两者同时作用在计量杠杆上。对于图 1.1 (b) 所示弹簧秤，由弹簧伸长而产生的恢复力，应被视为反作用力或抗力。

综上所述，我们认识到通常可以把秤分解成三个功能部分，即载荷接受部分或受载器、力比较部分、反力部分。载荷接受部分（例如载荷盘等），它作为秤的一部分用于接受载荷，并将载荷产生的力施加到力比较部分上。反力部分（例如，带砝码的砝码盘或弹簧等），它作为秤的一部分产生反作用力，并将其施加到力比较部分上。力比较部分（例如计量杠杆等），它作为秤的一部分接受以上两种力。

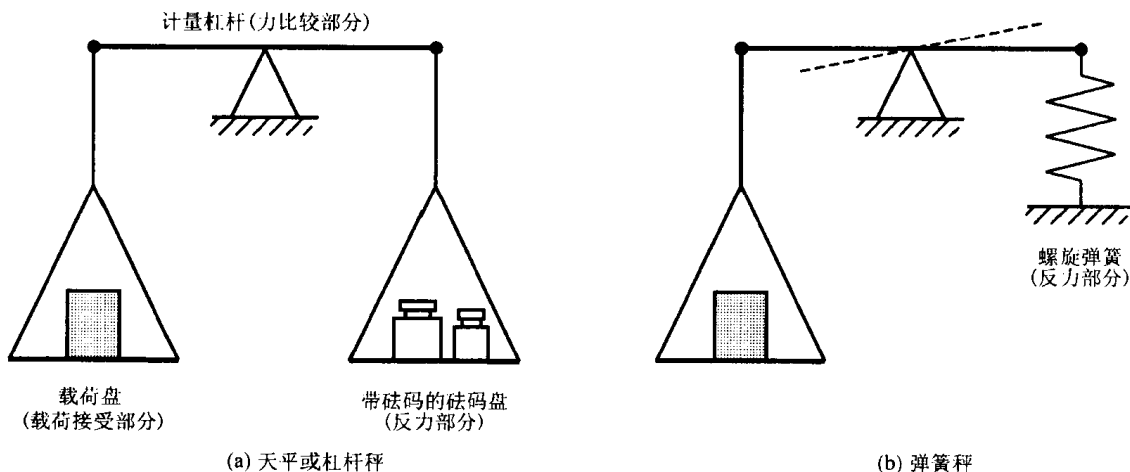


图 1.1 机械秤的两种类型

当我们检查任何一种机械秤时，会注意到它们通常都具有以上结构。所以，我们可以认为这种结构是秤的基本结构。此外，测量是以物体质量产生的作用力与反力部分产生的反作用力之间的平衡为基础的。所以，我们可以认为秤的称重原理是利用了力的平衡。现代科技

的发展,使我们在质量测量方面不仅能够利用力的静平衡,而且还可以利用力的动平衡。

载荷传递杠杆应该包括在载荷接受部分之中。对于料斗秤中称重传感器直接支承料斗的情形,可认为它属于力比较部分被省略的一种特例。

对于天平或杠杆秤,其测得值可以从反力部分上的砝码变化中获得。对于弹簧秤,其测得值可以从反力部分的弹簧伸长变化中获得。一般来说,机械秤的测得值可以从反力部分产生的某些量值变化中获得。

1.2 电秤和电子秤系统的构成

机械秤是指包括显示功能在内的所有功能都能通过机械手段实现的一种秤。而电秤和电子秤具有一个能将反力部分产生的变化转换成电量的传感器,还具有一个能处理电量信号以获得测得值的信号处理装置。所以,电秤和电子秤的特征在于有传感器和信号处理装置。

图 1.2 说明了电秤和电子秤基本系统的构成。传感器将转化了的电信号,输送给由 3 种基本电路组成的信号处理装置,它们是输入电路、数据处理电路、输出电路。输入电路上有例如滤波器、放大器、A/D 转换电路等,它们将传感器的输出信号变换成更适用于数据处理的信号。数据处理电路通过处理其输入信号,来获取测得值以及与测量有关的必需值。输出电路则是传输处理好的测量结果的电路。

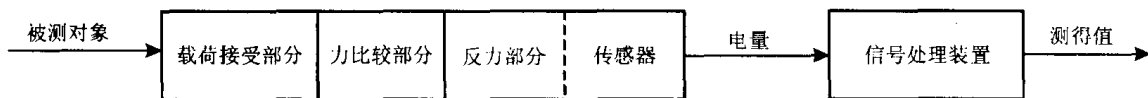


图 1.2 电秤和电子秤基本系统框图

按照反力部分是否承受了反作用力,可以将传感器如图 1.3 所示划分为两类,即非反力型传感器和反力型传感器。

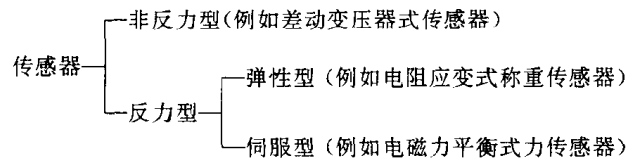


图 1.3 秤用传感器按是否承受反力所作的分类

1.3 工业秤的功能及其系统构成

1.3.1 功能特征和分类

工业秤主要用于工业称重,它们具有以下特征:

- (1) 对载荷接受部分的加载或卸载是自动进行的。

(2) 用物体自重 W 确定物体质量值 M 的过程是自动进行的。
 这种秤的系统框图示于图 1.4。此外大多数工业秤还有以下一个特征，即
 (3) 具有质量值的控制功能。
 典型工业秤的名称和功能列于表 1.1。

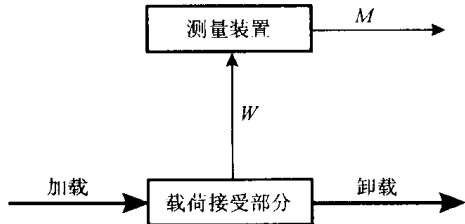


图 1.4 工业自动秤的系统框图

表 1.1 工业秤的名称及其功能

秤 名	功 能
皮带秤	质量测量
料斗秤	
料斗秤	质量测量 质量值控制
包装秤	
喂料秤	
检重秤	
联合秤	

1.3.2 控制的目的

若注意观察一下加到载荷接受部分上的物体的质量流动状态，及其与经过测量后的物体的质量流动状态之间的差异，我们可以得知表 1.1 中所说的质量值控制的目的就是为了控制质量流动的状态。从这个观点出发，料斗秤或包装秤的控制目的，就是为了获得一种断续流动状态，而每次断续流动的量都是预定的。联合（分选组合）秤的控制目的也属于这种类型。检重秤的目的，是为了按照预定质量等级获得离散的流量动状态。至于喂料的控制，则是为了获得一个预定质量流量的流动状态，或者获得一个总量与预定值相同的流量动状态。

1.3.3 系统的结构

一个控制系统通常包括被控对象、检测部分、调节部分或控制器，以及操作部分（见图 3.23）。在工业称重系统中，被控对象包括供料装置、分配装置、排放装置，而被控变量就是被测质量。图 1.4 所示的系统相当于一个检测部分，而各种执行器则用于操作部分。

图 1.5 显示了从系统构成的观点对工业称重系统的分类情况。图 1.5 (a) 所示为料斗秤或包装秤的系统构成图。被控对象是供料装置，其典型实例为螺旋喂料器。此时操作部分是驱动喂料器的一个变速电机。称量斗相当于载荷接受部分。目标值用符号 R 表示，操作变量用符号 C 表示。符号 m 和 m' 分别代表质量流动的状态；用不同的符号意指两种状态有所不同。

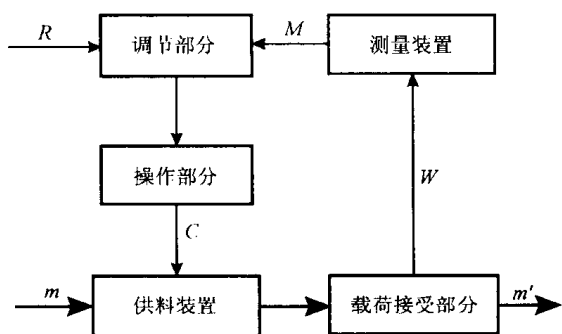
图 1.5 (b) 所示为一台喂料秤的系统构成图，它的典型实例是一台变速的皮带喂料秤，载荷接受部分由皮带称重段和称重托轮组成。被控对象是皮带喂料器或供料装置，而操作部分

是变速电机，被检测质量的总量用符号 Q 表示。选择 Q 或其对时间的导数 Q' 为被控变量，为了得到 Q 值，就需要测量皮带的运行速度 v 。

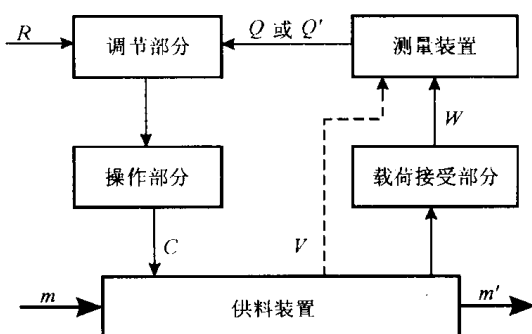
图 1.5 (c) 所示为一台检重秤的系统构成图。被控对象是分配装置，而皮带输送机通常被用作载荷接受部分。

图 1.5 (d) 所示为一台联合（分选组合）秤的系统构成图，通常以一些小的称量斗作为载荷接受部分，并且每个斗都装有一个用执行器控制的阀门。这些阀门就是被控对象，而执行器即为控制元件操作部分。

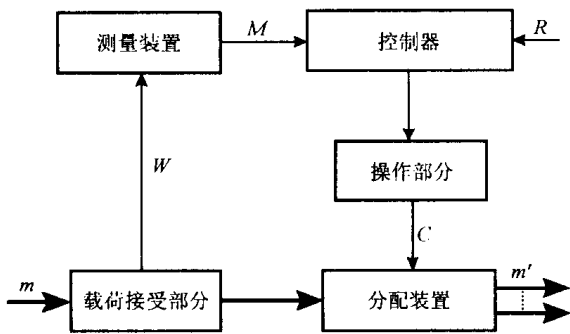
对于图 1.5 (a) 和 1.5 (b) 中所示的秤，由于在测量质量的同时必须控制质量的流动状态，所以应采用反馈控制。另一方面，对于图 1.5 (c) 和 (d) 中所示的秤，由于对质量流动状态的控制是在测量质量之后进行的，所以基本上进行顺序控制。



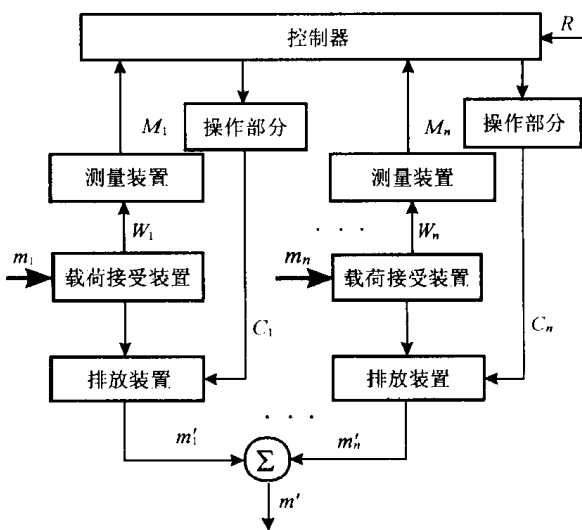
(a) 料斗秤的系统框图



(b) 喂料秤的系统框图



(c) 检重秤的系统框图



(d) 联合秤（分选组合秤）的系统框图

图 1.5 工业称重系统的构成框图

第 2 章 秤的静力学

2.1 杠杆的静力学

2.1.1 杠杆的分类

通常把具有支点轴、载荷轴和力轴的直杠杆称为基本杠杆。每个轴的位置分别被称为支点、重点和力点。支点就是杠杆的支承点，杠杆可以围绕它转动。重点和力点分别是载荷和力的作用点。

按照以上 3 个点的分布，可以把基本杠杆分为 3 种类型，即第一类杠杆、第二类杠杆和第三类杠杆。在图 2.1 所示的分类图中， F 是支点， A 是重点， B 是力点，它们作用在同一直线上。

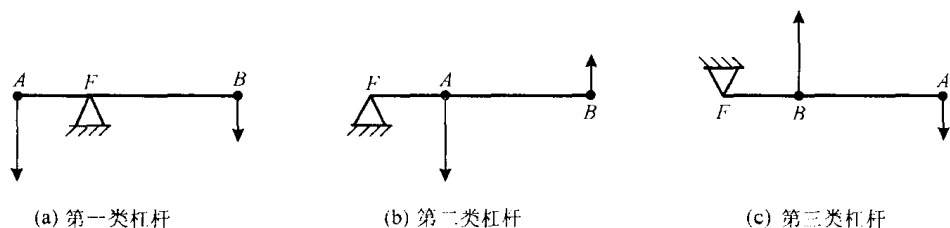


图 2.1 杠杆的分类

按照联接杠杆的数量可以将杠杆(系)称为单一杠杆或复合杠杆(系)。单一杠杆是独立的，例如天平的横梁，而复合杠杆则是由相关联的杠杆组合而成的一个杠杆系。

支点、重点和力点的数量，在一个杠杆上并不限于一个。例如对于图 2.2 所示的杠杆，我们可以看作是一个双联杠杆，它有两个支点和两个重点。包含这种双联杠杆的一个复合杠杆系，见图 2.3 所示。

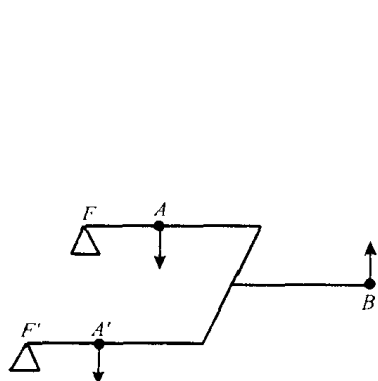


图 2.2 双联杠杆

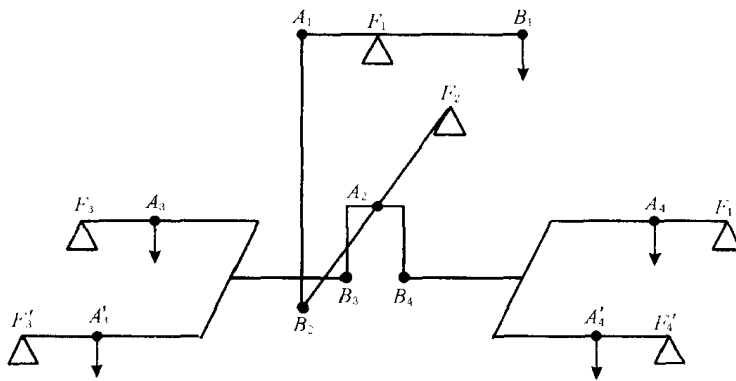


图 2.3 复合杠杆系

2.1.2 单一杠杆

在实际应用中，杠杆在载荷作用下保持其静平衡位置的情况有两种：第一，总是与空载下杠杆的平衡位置相一致（第一种情况）；第二，平衡位置随载荷而变化（第二种情况）。当我们研究以上两种情况下的静平衡条件时，我们将杠杆设想为一个刚体。

(1) 静平衡条件，单一杠杆保持静平衡的必要和充分条件是

$$\sum(\text{诸力})=0 \quad \text{和} \quad \sum(\text{诸力矩})=0 \quad (2.1)$$

为了研究单一杠杆在第一种情况和第二种情况下的静平衡条件，我们将上述充分必要条件应用于那些支点、力点和重点不在同一直线上的杠杆。

假设当载荷为零时，杠杆在初始力的作用下保持静平衡，如图 2.4 所示。 W_0 作用于 A 点， P_0 作用于 B 点， R_0 作用于 F 点， G 作用于 C 点（重心）。再假设当施加载荷 W 和反力 P 时，杠杆仍保持在相同的位置上。那么，静平衡条件在加载前后即为

$$\begin{aligned} W_0 + P_0 + G + R_0 &= 0 \\ W_0 a + P_0 b + Gc &= 0 \end{aligned} \quad (2.2)$$

并且

$$\begin{aligned} (W_0 + W) + (P_0 + P) + G + (R_0 + R) &= 0 \\ (W_0 + W)a + (P_0 + P)b + Gc &= 0 \end{aligned} \quad (2.3)$$

式中， R 是作用于 F 点的力的增量。

在图 2.4 中，我们必须考虑力的符号和作用点。向下的力为正，而向上的力为负，以支点为原点，当力的作用点位于重点一方时为正，而位于力点一方时为负。所以，逆时针方向的力矩为正，顺时针方向的力矩为负。

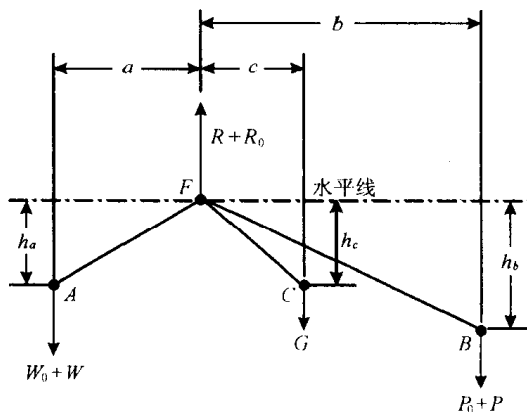


图 2.4 单一杠杆的静平衡条件

将式 (2.2) 代入式 (2.3)，化简后可得

$$\begin{aligned} W + P + R &= 0 \\ Wa + Pb &= 0 \end{aligned} \quad (2.4)$$

式 (2.2) 和式 (2.4) 是第一种情况下的静平衡条件。

下面让我们考虑一下第二种情况下的静平衡条件。在这种情况下，随着载荷 W 的变化，3

个点 A 、 B 、 C 发生变动，其水平距离为 a 、 b 、 c 也随之变化，变动后的距离为 a' 、 b' 、 c' ，则我们可以得到静平衡条件如式 (2.2) 和 (2.3)，只是式中 a 、 b 、 c 要用 a' 、 b' 、 c' 替代之。但是像式 (2.4) 那样的简单等式，在第二种情况下是无法得到的。

(2) 杠杆比

杠杆比记为 LR ，其定义为

$$LR = \frac{FP}{FL} \quad (2.5)$$

式中， FP ——支点与力点之间的水平距离；

FL ——支点与重点之间的水平距离。

第一种情况下的杠杆比为

$$LR = |b/a| \quad (= \text{常数}) \quad (2.6)$$

由式 (2.4) 中的第二个式子，我们可以得到

$$|b/a| = |W/P| \quad (2.7)$$

$|W/P|$ 的值就是我们所知的机械利益。在第一种情况下，杠杆比与机械利益相同。第二种情况下的杠杆比可定义为

$$LR = |b'/a'| \quad (2.8)$$

此杠杆比随着 W 和 P 的值而变化，且不等于机械利益 $|W/P|$ 。

(3) 灵敏度和稳定性

设想施加一个小的添加载荷 ΔW ，杠杆的角度随之产生一个小的增量 $\Delta\theta$ ，此时杠杆即获得一个新的平衡位置。比值 $\Delta\theta/\Delta W$ 被定义为灵敏度。如图 2.4 所示的情况，灵敏度可写为

$$s = \frac{\Delta\theta}{\Delta W} = \frac{a}{(W_0 + W)h_a + (P_0 + P)h_b + Gh_c} \quad (2.9)$$

式中 $(W_0 + W)$ 和 $(P_0 + P)$ 分别代表在施加 ΔW 之前，作用于重点和力点上的力； h_a 、 h_b 和 h_c 分别代表 A 、 B 、 C 三点到 F 点的垂直距离，当这三点位于 F 点所处水平线的下方时它们均取正值。在第一种情况下，这些垂直距离保持不变；但在第三种情况下会发生变化，它取决于杠杆的静平衡位置。从灵敏度的定义可以明显地得出，当 ΔW 取相同值时，增量 $\Delta\theta$ 与灵敏度成正比。

从式 (2.9) 中可以得到以下结论：

- ①若 $h_a \neq 0$ 或 $h_b \neq 0$ ，则 s 受 W 或 P 的影响；
- ②若 $h_a = h_b = 0$ ，则 s 不受 W 或 P 的影响；
- ③若 $h_a = h_b = h_c = 0$ ，则 $s = \infty$ 。

尽管式 (2.9) 是从第一类杠杆导出的，但是当 a 值为正时，同样可以用于第二类和第三类杠杆。

设想以任意方式将一个杠杆偏离其平衡位置一个小的角度，然后释放，杠杆的平衡状态按其是否回到原来的位置而被称为稳定或不稳定。如果释放后杠杆仍停在原来的位置上，那么平衡被称为是中性的。

(4) 回转弹性系数

回转弹性系数可以定义为：稳定的杠杆回转一个单位角度所需要的力矩。在图 2.5 中，当

施加一个添加载荷 ΔW 时，回转弹性常数可以写为

$$K = \frac{a\Delta W}{\Delta\theta} = (W_0 + W)h_a + (P_0 + P)h_b + Gh_c \quad (2.10)$$

式(2.10)也适用于第二类和第三类杠杆。

周期 T 和弹性常数 K 之间的关系如下。

$$T = \frac{2\pi}{\omega_n} = 2\pi \sqrt{\frac{J}{K}} \quad (2.11)$$

式中 J 是杠杆对支点的惯性矩，而 $\omega_n = (\sqrt{K/J})$ 是杠杆系的固有频率。

2.1.3 复合杠杆系

复合杠杆系统是自由度为 1 的系统，当复合杠杆系中任意一个杠杆的位置给定时，其它所有杠杆的位置就可以确定。所以当我们讨论复合杠杆系的运动时，可以利用理想的单一杠杆，因为它的运动等效于杠杆系中任何一个杠杆。引入等效回转弹性常数和等效惯性矩有利于我们讨论复合杠杆系。

(1) 等效回转弹性常数

图 2.5 所示为一复合杠杆系，其中带有弹簧的第一杠杆通过一根连杆与第二杠杆相联。假设该系统在以下力的作用下保持静平衡： W_1 作用于 A_1 点， P_1 作用于 B_1 点， W_2 作用于 A_2 点， P_2 作用于 B_2 点。再假设由于添加载荷 ΔW 引起的在 A_1 和 B_2 点力的变化量同为 ΔF ，而杠杆角度的变化各为 $\Delta\theta_1$ 和 $\Delta\theta_2$ 。

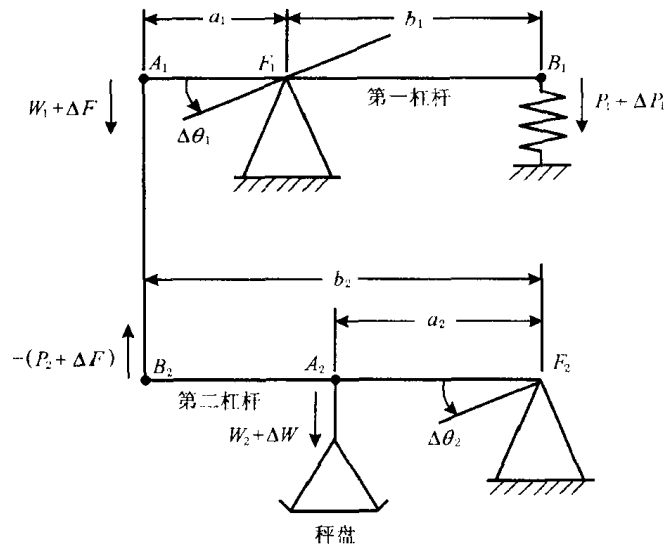


图 2.5 等效回转弹性常数和等效惯性矩的推导

在这种情况下，回转弹性常数可以写为

$$K_1 = \frac{a_1 \Delta F}{\Delta\theta_1} \quad K_2 = \frac{a_2 \Delta W - b_2 \Delta F}{\Delta\theta_2} \quad (2.12)$$

约束条件为