

摩 擦 学

南京航空学院机械原理零件教研室

1981. 10.

目 录

绪 言	1-5
第一章 摩 擦	
1·1 摩擦定律	5-9
1·2 摩擦表面的形貌及其评定标准	9-13
1·3 金属表面的物理与化学性质及其对摩擦的影响	14-17
1·3·1 金属表面的组成	
1·3·2 干净金属表面间的摩擦——真空中的摩擦试验	
1·4 固体表面接触的过程、实际接触面积	18-21
1·5 摩擦的分子说	21-25
1·5·1 摩擦凹凸说的弱点	
1·5·2 分子说的提出	
1·5·3 汤姆林逊的摩擦的原子模型	
1·6 表面接触中的塑性变形作用	25-32
1·6·1 粘附作用产生的阻抗	
1·6·2 粘结点的增大	
1·6·3 材料工作硬化对摩擦的影响	
1·6·4 刨犁作用产生的阻抗	
1·7 爬行现象及其原因	32-37
1·7·1 蠕变过程对摩擦系数的影响	
1·7·2 $\mu - \dot{\nu}$ 曲线特性与振动的关系	
1·8 表面能量对摩擦现象的影响	37-42
1·8·1 表面自由能	

1·8·2 表面能对摩擦的影响

第二章 磨 损

- | | | |
|-------|-----------------|-------|
| 2·1 | 基本概念 | 44-48 |
| 2·1·1 | 磨损的量度 | |
| 2·1·2 | 机器零件的磨损过程 | |
| 2·1·3 | 磨损的类型 | |
| 2·2 | 粘附磨损 | 48-56 |
| 2·2·1 | 剪切面对粘附磨损的影响 | |
| 2·2·2 | 粘附磨损定律 | |
| 2·2·3 | 温度、滑动速度对磨损的影响 | |
| 2·2·4 | 表面自由能对磨屑颗粒大小的影响 | |
| 2·3 | 磨粒磨损 | 56-63 |
| 2·3·1 | 磨粒磨损的定量关系 | |
| 2·3·2 | 刨削角与磨损量的关系 | |
| 2·4 | 疲劳磨损 | 64-66 |
| 2·5 | 腐蚀磨损 | 66-68 |
| 2·6 | 微动磨损 | 68-69 |
| 2·7 | 侵蚀磨损 | 69-73 |
| 2·7·1 | 受固体颗粒撞击的侵蚀磨损 | |
| 2·7·2 | 受液体质点撞击的侵蚀磨损 | |

第三章 流体润滑

- | | | |
|-------|---------------|-------|
| 3·1 | 润滑的类型 | 74-76 |
| 3·2 | 流体的粘度 | 76-79 |
| 3·2·1 | 粘度的单位 | |
| 3·2·2 | 温度和压力对流体粘度的影响 | |

3 · 3	流体动力润滑基本原理	80-81
3 · 4	纳维尔—斯托克方程	81-84
3 · 5	雷诺方程	84-86
3 · 6	圆柱——平面线接触摩擦付的流体动力 润滑	86-90
3 · 7	弹性流体动力润滑简介	90-97
3·7·1	弹性流体动力润滑的物理过程	
3·7·2	道逊的数值解	
3 · 8	边界润滑	97-103
3·8·1	润滑剂化学成份简介	
3·8·2	边界润滑的机理	
第四章	固体润滑剂的应用与发展	
4 · 1	概述	104
4 · 2	固体润滑剂的特性	104-107
4 · 3	固体润滑材料	107-110
4 · 4	固体润滑剂的使用方式	110-121
4 · 5	粘体固体润滑膜的组成、应用与制配 工艺	121-128
第五章	摩擦学的试验	
5 · 1	概述	129-130
5 · 2	工作参数的控制	130-135
5·2·1	相对运动与摩擦付的接触形式	
5·2·2	加载方法	
5·2·3	速度	
5·2·4	温度及其测量	

5·2·5 试验延续时间

5·3 一些常用的摩擦磨损试验机介绍 135-143

5·3·1 Shell 四球试验机

5·3·2 Alpha LFW-1 与 Timken 试验机

5·3·3 其他类型试验机

5·3·4 利用现有设备组成摩擦试验设备的可能性

本书参考文献目录 143-144

绪 言

摩擦学(Tribology)是研究摩擦、磨损和润滑的技术科学。它的基础,牵涉的范围很广,和机械学、力学、材料学、冶金、物理化学等学科密切相关。从本质上说,可看作是应用物理的一部分,在具体的应用上,几乎关系到生产和生活的各个方面,在现代的机械设计中,为提高机器的效率和寿命,对摩擦学的考虑已成为重要的、基础的设计内容之一。

摩擦和磨损的现象总是不可避免地存在于人类的生产实践和生活之中。正象万有引力是具有质量的物体间固有的自然现象一样,摩擦是相互接触的物体在发生相对运动时必然存在的一种自然现象。大抵说来,从很早的时候起,太古初民对摩擦磨损现象就已有感性认识,并能加以利用,甚至懂得了润滑的作用。我们新石器时代的远祖已会利用研磨的方法来制作石器工具,他们也一定已观察到他们的工具和穿戴的兽皮或其他装饰品在使用中逐渐磨损,以及行走在泥泞的沼泽地或天雨时较之在干燥的地面上容易滑倒……等等。在寒冷的季节搓动两手来取暖,几乎成了人类的本能。这种摩擦生热原理的利用终于导致“钻木取火”术的出现,从而点燃了照耀人类文明前景的火炬。是人类进化史上了不起的成就。有趣的是,直到今天人们还经常利用摩擦来取火—例如擦火柴和使用打火机。

在一幅绘于公元前约2000年的古埃及绘画中,画着由172人牵曳一个巨大的木制撬板沿木质导轨在前进。木撬上的一尊雕像根据尺寸比例和比重来估计,约重60吨,即 6×10^5 牛顿,值得惊异的是画中画着一个人在前进道路上,向木导轨倾倒着一种流体(可能是油类),很显然这是作为润滑剂使用的。据计算,若每个人的牵引力以700牛顿计,则可以估算出在此情况下木撬与导轨间的摩擦系

数为：

$$\mu = \frac{F}{W} = \frac{172 \times 700}{6 \times 10^5} = 0.2$$

这和硬木在有润滑时的摩擦系数大致相当，但如果不加润滑剂，则硬木对硬木的摩擦系数约为0.5-0.6，较前者大三倍。也就是说，牵曳雕像的人数将增到516人，由此可见古埃及人已懂得采用润滑方法来减小摩擦，提高劳动效率。

在我国《诗经》泉水篇中也有“载脂载膏，还车言迈”的诗句，意思是在车轴轴颈上涂上油脂，将轴和车轮装配妥善，然后驱车远行。可见三千多年前，在我国已广泛应用油脂作润滑剂了。至于用滚动来代替滑动的车轮的发明和应用，当在更早的时候。（注：“膏”古辖字。是古代插入车轴端部径向孔内插销，用以限制轮毂的轴向窜动，横截面成长方形，常用青铜制成。）

在现代机器的设计中，一方面广泛应用摩擦来传动，制动或控制，另一方面摩擦又是使有用的机械能遭受损失、降低机器效率和导致磨损的主要原因。摩擦还可以使机器产生振动或爬行现象，影响到工作质量。随着机器向高速、高精度、高负荷的“三高”方向发展，以及要在特殊的、严酷的环境下工作的要求，如何保证机器及其零件具有足够的稳定性，就成为重要的课题。举例来说，许多精密机械其摩擦付之间的间隙，往往只有几十微米以至几微米。因此，如果它们的抗磨性欠佳，就容易由于磨损，造成间隙过大；而丧失其原有精度，以至造成报废。正因为如此，近三十多年来，摩擦磨损这一古老的课题又日益为人们所重视，以至出现了“Tribology”这个词，而成为一门新的学科。据估计在高度机械化和自动化的今天，约有1/3-1-1/2的能源最后消耗于各种形式的摩擦、磨损及由此引起的设备

失效与替换之中。在一部汽车中约有30%的动力消耗于其机械的摩擦。一台巨大的发电机的两个轴承常要消耗上千匹马力。故在能源紧张的今天，摩擦学的研究和应用日益引起国际技术界的注意，是很自然的。

目前我国机械产品寿命短、效率低是相当普遍的质量问题，以内燃机车为例，一般寿命只有40-50万公里，检修率达20%左右，而欧美各国多在100万公里以上，检修率仅为3-6%。

其他如机床，航空发动机等的使用寿命和国外相当的产品比较，也同样是差距很大，所以存在这种现象，原因虽是多方面的，而摩擦学研究和应用的落后也是主要原因之一。由此可知摩擦学对国民经济的发展，具有重大的意义。它的成效可以表现为在不增加投资的条件下，通过发挥设备的效率，延长机器的使用寿命，为社会生产和积累更多的财富。

摩擦可分为内摩擦和外摩擦。内摩擦是指物体内部分子（原子）间发生相对位移时所产生的摩擦；外摩擦是作相对运动的两物体在界面上发生的摩擦。本课程以研究两固态物体在相对运动时所发生的摩擦、磨损和润滑方法为主旨。其目的在掌握有关摩擦学的基础知识，了解其发展方向与研究的方法，并能在机械设计或其他生产实践中，结合实际情况加以应用。

本讲义暂分为三篇共五章。

第一篇“摩擦与磨损”讨论摩擦磨损的现象及有关的一些学说。如前所述，人类对摩擦磨损的现象虽早就有所接触，但迄今对其内在的机理还是没有充分的认识。在科学技术发展的各个不同阶段，为解释摩擦磨损的本质及其过程，曾提出过各种学说和假说，虽然这些学说的本身往往是够完善的，甚至是有争论的。但在这一客观真理认

识过程的长河中，都起到推动和互相启发的作用，它们的创立和发展，正好证明人类对真理的认识是不断地前进的，在本篇第一章中，将摘要介绍有关的各种理论，并列出一一些参考资料，供在这方面有兴趣的同志自学与研究。

第二篇“润滑”中，在流体润滑的理论与应用方面对流体动压润滑(Hydrodynamic Lubrication)和弹性流体润滑(Elastohydrodynamic Lubrication)只作简单的介绍，而着重介绍固体润滑剂及其应用，这是因为考虑到对于前者，学生在其他课程(如机械零件课程)中已有所接触，且这方面的论著较多，故在本课程有限的教学时数内，编者认为着重介绍对航空、航天及其他在特殊工况下工作的机器设备来说显得日趋重要的固体润滑剂润滑或边界润滑的基本知识是适宜的。

摩擦学的研究方法很多，例如应用系统理论的方法(Systematic Approaches)即是其一。但不论是用什么方法，最基本的还是进行摩擦磨损试验。这是所有理论的根据和检验。机器及其零件在实际服役中的考验，是根本的和权威性的试验。但是，这种工业性的试验虽然最合乎实际工况，却往往周期长、费用大。且影响实验结果的因素较多，难以控制和进行分析。故通常不能不先行求助于实验室的试验。然而，麻烦的是即便是实验室的摩擦磨损试验。应用不同类型的试验设备、不同形式的摩擦偶件的相对运动乃至不同的试验方式与程序，所得出的试验数据和结果，是不能简单地进行比较的。此外，有些试验藉助于巧妙的设计，可以在比较简单的设备和使用精密度并不太高的仪器来进行，这就有赖于研究者的匠心和经验。因此，本讲义除在各章的叙述中，尽可能从试验的根据出发外，还加进了第三篇“摩擦磨损试验”。在该篇中将扼要介绍目前较通用的试验方法和试验设备

及其型号，也举出一些试验设计与计算的实例，希望这会有助于对试验的重要性的认识，并从中得到启发与借镜。

第一篇 摩擦与磨损

第一章 摩擦

1·1 摩擦定律

摩擦是一固体在另一固体上滑动（或滚动）时的阻抗。解释摩擦与磨损的各种早期的理论和假说可概括为：机械作用说、分子说，以及摩擦表面间的分子及机械作用说等等，在晚近的研究中着重注意到了摩擦过程中的热传导和焊接作用，以及表面能量对摩擦磨损的影响等问题。

虽然摩擦磨损的现象早已为人们所熟悉，而且在人类（或所有地球上的生物）的行动中，总是自觉的或不自觉的去适应摩擦世界的存在。但首先对摩擦现象加以仔细考虑，总结归纳的在西方当推十五世纪文艺复兴时期的大师L·达·芬奇（Leonardo da Vinci, 1452-1519），其背景是当时的建筑业和造船技术已日趋繁荣。达·芬奇的贡献是多方面的，在摩擦的问题上，他通过观察与试验已认识到下列两点：

1. 切向的摩擦力 F 和运动物体的重量成正比。
2. 摩擦力的大小和两固体接触面积的大小无关。

基于上述的认识，他还提出今天称作摩擦系数的概念的雏形。即认为“在表面光滑的平面与平面之间摩擦时，摩擦力的大小为运动物体的重量的四分之一。”此外，他也已观察到随物体的材料性质不同和表面粗糙程度的不同，摩擦力也有所不同。

达·芬奇以后的约二百年间，从文献记录上看，对摩擦的研究没

有什么进展。直到十七世纪末，产业革命的浪潮冲击着欧洲大陆，机器的应用使摩擦的问题突出起来。1699年阿蒙顿(G·Amon-ton)独立地在试验的基础上以较完备的形式提出上述1, 2, 两条定律。故一般称之为阿蒙顿摩擦定律。其后库伦(E·Coulomb)于1785年发表其研究，认为两摩擦面间摩擦阻力的大小与两表面相对滑动的速度无关。而成为有关摩擦的第三定律。结合前述的两条定律，常合称为阿蒙顿——库伦定律。但是库伦的研究只限于速度变化范围不大的情况下，才是近似地符合事实的。

在另一方面，从十七世纪末叶到十八世纪上半叶，正是牛顿力学体系日趋完成的年代。帕郎(Паран)首先把摩擦力作为新概念引进静力学的体系中，解答了把摩擦力考虑在内的静态平衡问题。并于1704年提出了“摩擦角”和“摩擦锥”的概念。他在阿蒙顿的表达式

$$F = \mu \cdot W \quad (\text{式中 } F \text{ 为摩擦力, } \mu \text{ 为摩擦系数})$$

的基础上导出滑动表面上的反作用力偏离接触表面公法线某一角度的结论。这个偏角 \varnothing 被称为平衡角(注：即摩擦角)。故有

$$F = N \operatorname{tg} \varnothing$$

的关系。式中 \varnothing ——总反作用力与法线间的夹角。

N ——摩擦表面间的正压力，即沿其公法线的压力。

欧拉(Leonhard Euler, 1707-1783)的功绩在于首先把摩擦力的考虑引入动力学体系中，并从而在实验中得出动摩擦小于静摩擦的结论。欧拉也是将能量守恒定律应用于对摩擦研究的先驱。在研究物体沿斜面下滑的问题后，欧拉导出了确定动摩擦系数的公式和测量参数。即当物体A沿斜面下滑时(图1-1)，根据能量守恒定律，可写出下列运动方程

$$\frac{mv^2}{2} = W \cdot l \cdot \sin \alpha - F_k \cdot l \dots (1-1)$$

式中： m ——物体的质量；

W ——物体的重量；

l ——物体沿斜面下滑走过的距离；

v ——物体下滑 l 距离时的瞬时速度；

F_k ——物体与斜面间的动摩擦力；

α ——斜面的倾角。

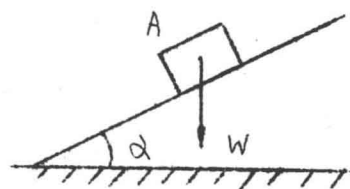


图 1-1

因 $m = \frac{W}{g}$ (g ——重力加速度)

$$F_k = \mu_k W \cos \alpha \quad (\mu_k \text{ 物体与斜面间的滑动摩擦系数})$$

以及在等加速运动且初速度为零的情况下，物体A的瞬时速度

$$v = \frac{2l}{t},$$

此处， t 为物体从初位置下滑距离 l 所费的时间。

将以上这些关系式代入式(1-1)化简，即可得用于测定动摩擦系数的方程：

$$\mu_k = \tan \alpha - \frac{2l}{gt^2 \cos \alpha} \quad (1-2)$$

根据上式，若取 l 和 α 为某一定值，则只须测定参数 t 即可求出 μ_k 。这一研究摩擦系数的方法，虽未能真正揭示摩擦过程中的物理作用的本质，且斜面倾角过小物体下滑的速度极缓慢时，难以测定有关参数。但对理解动摩擦与静摩擦的区别上，仍然是有很大的意义。欧拉本人并以摩擦表面的微观的凹凸不平的形貌来解释动摩擦系数较静摩擦系数小一些的现象，并得出摩擦系数值随材料不同而有差别的结论。

欧拉在摩擦研究方面的另一贡献，是导出了著名的绕体摩擦的欧拉公式（式 1-3）。对皮带传动设计有很大的指导作用。即如图 1-2 所示的皮带传动中，皮带紧边的拉力 T_1 和松边的拉力 T_0 有如下的关系：

$$T_1 = T_0 e^{\mu_s \alpha} \quad (1-3)$$

上式中 α —— 皮带对皮带轮的包角（单位弧度）。

μ_s —— 皮带与皮带轮间的静摩擦系数通常取作 0.3~0.4。

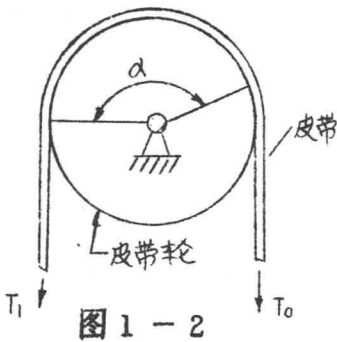


图 1-2

综上所述，从达·芬奇到库伦在近三百年的期间，摩擦现象及其主要的力学性质被归纳成四条古典的摩擦定律。这些定律又被应用了三、四百年，并纳入了牛顿力学的体系；即使是最近四十多年来的研究，对此也只是作了些局部的修改或重新解释。现在结

合现代的观点将这些定律复述如下：

一、摩擦力与滑动表面的正压力成正比。

这种关系的数学表达式为：

$$F = \mu N$$

此处， F 是摩擦力或滑动的抵抗力。

N 由载荷引起的作用于摩擦面的法线方向的反作用力。

μ 是比例常数，称作摩系数。

如果 F 是物体由静止到开始滑动时的摩擦力，这比例常数以 μ_s 表之，称为静摩擦系数。如果 F 是运动中的物体的摩擦力，则以 μ_k 表之，称为动摩擦系数。

三、摩擦力与名义的接触面积 (apparent area of contact) 无关，但和实际的接触面积 (actual area of

contact)成正比。——关于这一点，将在下面作进一步的讨论。

三 摩擦力与相对滑动速度无关，或近似地与滑动速度无关。实际是摩擦力随滑动速度而有微小的变化，但在速度变化相当大的范围内，只要摩擦发生的热不显著，则摩擦力近似一常数。

四 摩擦系数和组成摩擦偶件（或称摩擦配对，frictional Couple）的两元件的材料有关。具有有效润滑作用的固体，摩擦系数可低至0.02，但某些金属的配对，其摩擦数值可大于1.0。正因其如此，经验告诉我们，在设计机器时慎重选择摩擦配对的材料是重要的原则。

1.2 摩擦表面的形貌及其评定标准

上节介绍的摩擦定律虽然总结了摩擦现象的一般规律，但它本身并没有揭示产生摩擦的原因和过程。现在转过来讨论这方面的机理。

首先我们注意到实际的机器零件，不管它的表面精度多么高，其显微表面形貌都是凹凸不平的；就好像是山脉绵亘的地区，有峰峦，有深谷，称为表面的峰谷现象。图1-3是它的夸张了的形象。摩擦表面的这种不均一性是各种摩擦磨损理论的共同基础和重要依据之一。早期的研究者认为摩擦就是来源于两摩擦表面的峰谷相互镶嵌或啮合作用；摩擦功就是为了使一组粗糙表面对另一组抬起并滑过所消耗的能量。这种主张被称为摩擦的机械作用说或凹凸说。在一个相当长的时期内，这种主张在解释摩擦原因中占统治位置。在现代的研究中，虽然逐渐否定了纯粹的机械作用说。但另一方面却又更有根据地证明了表面的峰谷现象在摩擦学中的重要作用。它直接关系到摩擦的产生和摩擦系数值，影响到润滑的效果和润滑膜破损后粗糙峰峦之间碰撞的概率和应力应变的大小。因此，在介绍现代的摩擦理论之前，让我们先来研究一下摩擦表面的情况是必要的。

实际的表面偏离理想的平滑表面可以是多方面的，例如：

- (1) 形状的偏差。
- (2) 波浪式的起伏——即在较大的间距内的偏差形式。
- (3) 粗糙度或称表面光洁度——是指摩擦表面上所具有的较小间距内的微小峰谷的不平度。
- (4) 格子状构造。

在摩擦学的研究中，目前较注意的是粗糙度问题。为了评价表面光洁度（或粗糙度），通常对表面的横断面采用两种表征参数。在这方面各个国家各有自己的标准，但其旨趣是大同小异的。

我国的表面光洁度国家标准GB1031-68中规定：表面光洁度按下列表征参数之一来评定：

(1) 轮廓的平均算术偏差 R_a ——也就是中线平均值 (Center Line Average, 简写作 C.L.A.)。是指在基本长度内，被测轮廓上各点至轮廓中线的距离 (y_1, y_2, \dots, y_n) 的绝对值总和的平均值。(图 1-3(a)) 即

$$R_a = \frac{1}{l} \int_0^l |y| dx \quad (1-4)$$

上式中 l 为基本长度，是为了限制和减弱加工表面上其他几何形状偏差，特别是表面波浪形对光洁度测量结果的影响。在评定表面光洁度时所规定的一段表面长度。在国标中规定了这长度的系列。而所谓轮廓中线，是指方向与轮廓一致，将轮廓曲线划分为上下两部分，且在基本长度范围内，使轮廓曲线在上下两边所围成的面积（即峰和谷的面积）相等的直线。为了测量的方便，前式可近似地改用：

$$R_a = \frac{\sum_{i=1}^n |y_i|}{n} \quad (1-5)$$

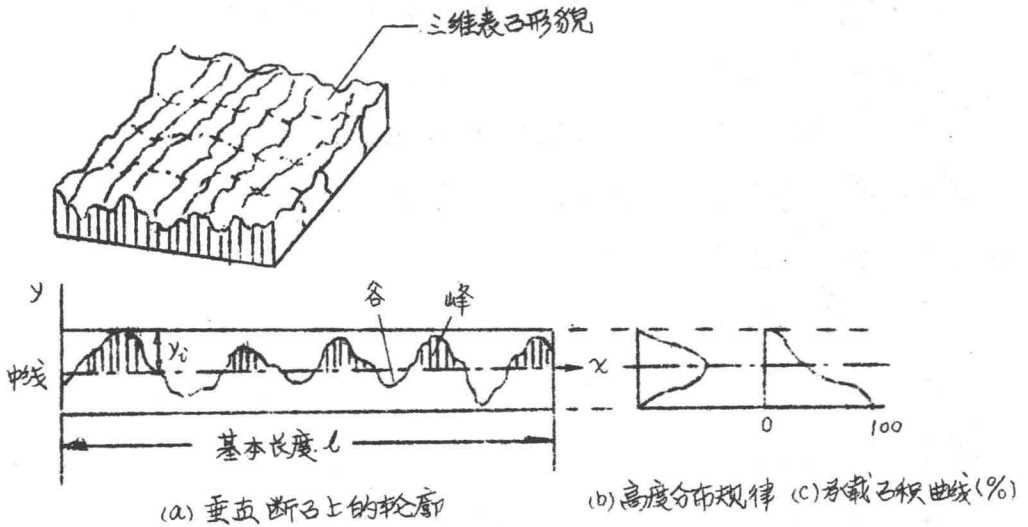


图 1 - 3

n 为基本长度范围内凹凸偏差 y_i 的点数。

(2) 不平度平均高度 R_z ——是在基本长度范围内，从平行于轮廓中线的任意一直线起到被测表面上五个最高点（峰顶）和五个最低点（谷底）之间的距离差的平均值。如图 1 - 4 中所示则有

$$R_z = \frac{(h_1 + h_2 + h_3 + h_4 + h_5) - (h_6 + h_7 + h_8 + h_9 + h_{10})}{5} \quad (1-6)$$

在 GB1031-68 中表面光洁度划分为 14 个级别，各级代号和 R_a , R_z 的数值以及相应使用的基本长度见附表 1 - 1。

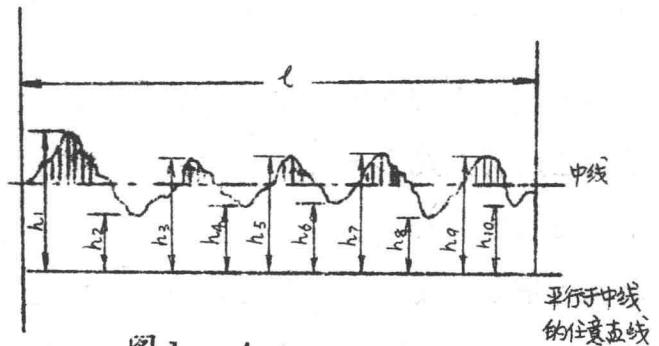


图 1 - 4

上述表面光洁度评定的参数，只表达了在垂直断面上表面凹凸高度偏离理想平滑表面的程度，显然，未能反映出表面凹凸不平的形状的全貌。例如具有相同的 R_z 值的表面，即使是在垂直断面上，其微观的凹凸形状，也可以像图

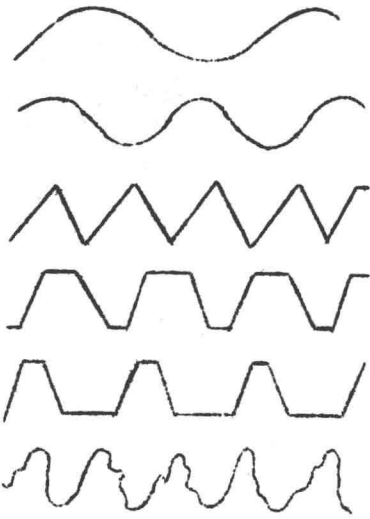


图 1 - 5

具有相同 R_a 值的
但凹凸形状不同的
各种表面举例

1 - 5 所示那样, 有很大的不同, 因而对摩擦磨损的影响也就不能不有所不同。但是根据测量统计各种加工表面峰谷高度的随机分布是非常接近正态分布的。就是说高度很小的点的数目占的比例很大, 高度愈大的点, 其数目愈小。如图 1 - 3 (b) 所示。此外, 相同的材料往往有极相似的表面凹凸形状。故无论是用 R_a 或 R_z 仍旧能表征表面形貌对摩擦磨损的某些影响和关系。然而, 为了更全面准确地研究表面形貌与摩擦磨损的关系, 目前一些学者正在探讨三维, 表面形貌的表征与测量及其在摩擦学中的效应问题。

在本节结束前, 顺便提一下, 测量表面光洁度的方法与仪器, 目前常用的有针式轮廓测量仪 (Stylus Profilometer), 是利用针尖半径很小 ($\leq 2 \sim 10 \mu m$) 的金刚钻探针与被测表面相接触, 当探针表面上扫过时, 由于表面的凹凸不平, 探针将随之作垂直方向的上下位移, 将此位移放大显示或记录下来, 就是描绘出来的与该表面粗糙度相关的轮廓图形。由于探针上所加的载荷很小, 一般不致损伤被测表面。但探针针尖半径的有限尺寸, 对仪器的分辨率是一个限制, 故不适宜用于测量精度很高的表面。其他测量的方法与手段, 还有光学显微镜、电子显微镜等, 以及用与标准样件比较, 凭肉眼判定的方法等等, 不再详述。