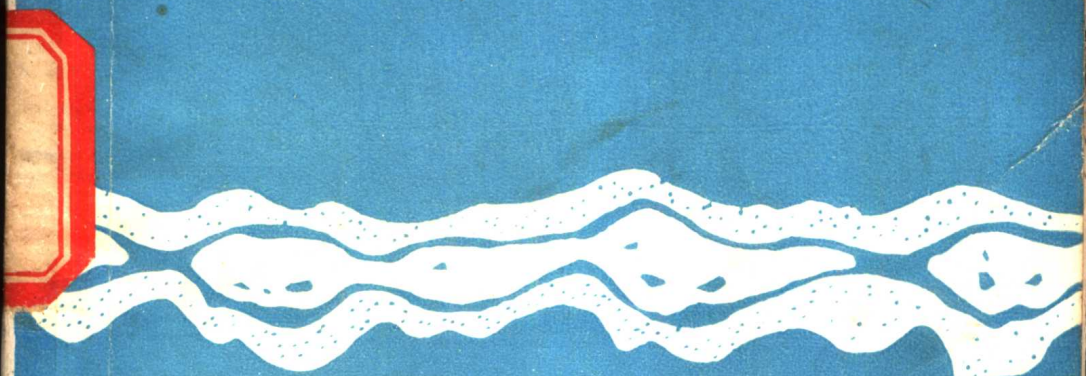


• 浙江机械专辑 •

摩擦学概论

〔英〕 J. Halling 著

王沛民译 全永昕校



浙江省机械工业厅经济技术情报站

1981.12.

摩 擦 学 概 论

(英) J. Halling 著

王沛民译 全永昕校

浙江省机械工业厅经济技术情报站

一九八一年十二月

序 言

摩擦学是一个新名词，它用以表示任何与相对运动界面上的作用载荷有关的问题。因此，名词虽是新的，但所研究的课题却是众所周知的摩擦、磨损和润滑问题。虽然这门学科对所有工业设备都是重要的，但它还具有更为广泛的意义。刷牙或使用人工关节，就是摩擦学现象的明显实例。这是一门边缘学科，它涉及到物理学、化学、材料科学、工程学和数学，常常同时与所有这些学科相关。

本书概略地介绍摩擦学的基本原理，同时揭示各门科学和工程技术如何使我们去认识这些原理。本书的主要论题着重从物理原理上加以阐明，而在数学方面则仅作简略的论证。这是希望读者能弄懂基本的物理论述，而不要囿于数学细节。

本书在每一章结尾都简要指明了各种实习课题，它们能够扩大对学科内容的了解。本书大体适合大学理工科一年级学生的程度，或作为综合性大学开始科技专业训练的前期教材。如大多数课程一样，任何人要从本书有所得益，取决他预备花费的时间，这不仅要理解书中讲述的内容，而且要通过课题实习对学科获得较深的感性认识。本书意图并非作为对摩擦学的肤浅的概述。

应当承认，本书大部份内容取自先前出版的《摩擦学原理》一书，该书是由我与我的同事合著的。同样，实习课题选自《摩擦学实习课题（学校用）》小册子，它是由我担任主席的摩擦学小组编撰的。

我十分感激执教于 Calday Grange Grammar Schools 的 W.E.W. Smith 先生。在我准备编写本书时，他提供了许多有益

的建议。我确信这些建议将提高本书对教学的价值。最后，我要感谢L. M. Chadderton女士在整理手稿中给予的巨大帮助。本书最后得以成功，她的功劳应与作者相同。

赛尔福特大学教授 J. 霍林
工程学硕士、哲学博士

目 录

序 言

第一章 绪 论

1-1 摩擦学 (Tribology)	1
1-2 摩擦学的现象	1
1-3 历史概况	3
1-4 摩擦学问题的解决方法	7
1-5 经济上的考虑	11
1-6 结论	13
1-7 实习课题建议	13

第二章 表面的性质和表面接触

2-1 引言	16
2-2 表面的性质	16
2-3 表面性能	18
2-4 研究表面的方法	19
2-5 表面的几种几何特性	26
2-6 固体的载荷	31
2-7 粗糙表面的接触	34
2-8 温度影响	38
2-9 实习课题建议	39

第三章 摩 擦

3-1 引言	42
3-2 导致摩擦的可能原因	43

3-3	简单的粘着理论	44
3-4	简单理论的扩充	48
3-5	弹性物体之间的摩擦	50
3-6	滚动摩擦	52
3-7	摩擦的实验测定法	60
3-8	实习课题建议	63

第四章 磨损和材料性能

4-1	引言	66
4-2	磨损的类型	67
4-3	磨损机理	68
4-4	影响磨损特性的因素	76
4-5	塑料的摩擦学特性	80
4-6	磨损的测量	82
4-7	实习课题建议	86

第五章 润滑剂的性能和试验

5-1	引言	89
5-2	粘度	89
5-3	温度对粘度的效应	91
5-4	压力对粘度的效应	93
5-5	粘度的测定	93
5-6	润滑剂的其它性能	99
5-7	润滑脂	101
5-8	实习课题建议	102

第六章 静压轴承

6-1	引言	103
6-2	简单的油垫轴承	106
6-3	毛细管补偿式轴承的特性	112

6-4	流体静压径向轴承	114
6-5	实习课题建议	117

第七章 流体动压润滑

7-1	引言	120
7-2	基本理论问题	122
7-3	气体润滑轴承	141
7-4	弹性流体动压润滑 (E.H.L.)	142
7-5	实习课题建议	151

第八章 解决摩擦学问题方法的选择

8-1	引言	152
8-2	环境介质	152
8-3	载荷	154
8-4	速度	157
8-5	摩擦学上的载荷与速度的极限	159
8-6	摩擦学极限的应用	165
8-7	结论	168

第 一 章

绪 论

1-1 摩擦学 (Tribology)

英文 tribology 一词源出于希腊字 $\tau\rho\iota\beta\omicron\sigma$ (意即摩擦), 故可以直译为“摩擦的科学”。但是这种译义有些过于狭窄, 因此人们将摩擦学定义为“关于相对运动相互作用表面的科学技术以及有关的问题和实践”。该定义既概括了字面译义, 又包括了固体接触的许多其它方面的内容。事实上, 摩擦学具体地把化学家、工程师、材料科学家、物理学家, 以及许多其他诸如接触到力学、摩擦、润滑与磨损等学科方面的研究人员所共同关心的问题联系在一起。这门学科研究范围的广泛, 是其最显著的特点。它是一门**跨学科**的科学。

虽然摩擦学是个新名词, 但它涉及到早为人类注意的某些最古老的问题。为减少平移运动的阻力而发明的轮子, 明显是一种摩擦学装置, 此项发明无疑早于其历史记载。几乎在日常生活的各个方面, 我们都会遇到摩擦学的现象, 而不仅仅在作为工业社会基本要素的机械这一方面。

1-2 摩擦学的现象

我们来考察生活中象征性的一天。当我们还躺在床上, 对棉布床单或尼龙床单的不同感觉就是一种摩擦学现象。清早活动我

们的臂膀时，常会感到自己的“摩擦学节点”（关节）不灵活。的确多亏摩擦学家的现代技术，使人们不再受关节炎那种疾病的痛苦。

随后从事的某些活动，也许是划火柴引燃煤气，或者是擦肥皂盥洗梳妆，更是些与摩擦学相关的现象。刷牙就是一种受控制的磨损过程。刮脸时肥皂的润滑作用和剃刀的锋刃，表明了恰到好处的摩擦学应用能给我们带来方便。拿取、握持、搬动或擦拭什么，都显示出摩擦学的效果；在家里或在工作场所，任何一种器具都组成了摩擦学接触。我们乘坐的汽车具有数千种不同的摩擦学接触，如轮胎与道路的接触，以其独特功能保障安全的制动装置的接触等等。

甚至进行娱乐活动也到处遇到摩擦学现象。摩擦对爬山的人是至关重要的，而对滑雪溜冰者通常则是灾难，在这里宁可需要受控制的摩擦，尤其是他若想停下来的话。在各种球类游戏中，我们利用摩擦使球灵活地旋转和投掷。有趣的是设想一下，如果我们的行走不是象现在在地上的这种样子，则人类可能演化成什么模样。若在小摩擦的冰上行走，或在大摩擦的稠泥中前进，我们马上就能认识到身体是如何适应地面实际的摩擦状况的。

在生命进化过程中，动物自身在地球表面移动的能力，已经成为判断进化程度的一个重要依据。我们把移动的阻力与动物重量的比率，即**阻力/重量**比，作为进化的过程来考察。从离开海洋的原始爬行动物开始，以及爬行动物、类人猿和人的次第演化，我们发现其**阻力/重量**比随着历史进程慢慢地减小，如图1-1所示，按图中的对数尺度，我们可以看出经过千百万年的延续，**阻力/重量**比减小了三十倍（曲线E），这正是人类发展进化的结果。

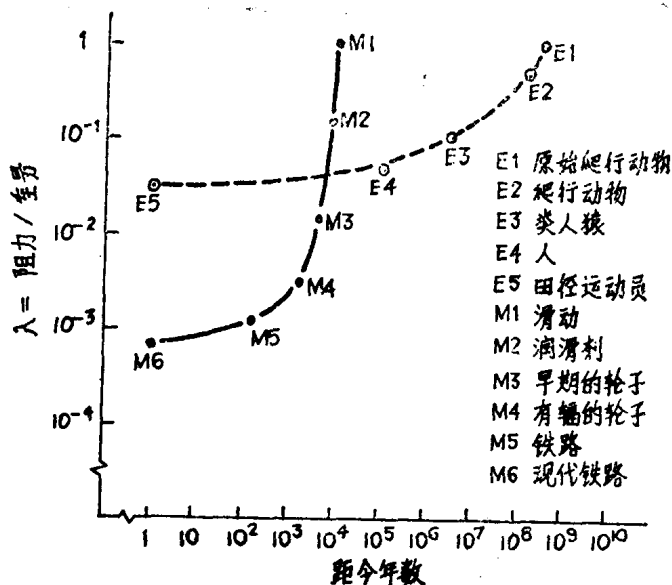


图1-1 阻力/重量比随地球历史的时间刻度的减少

大约一万年前，近代人移动大的物体，只能完全依靠物体的滑动。后来，由于以动物油脂为主的原始润滑剂以及稍晚出现的整套轮系的发展，人们大大提高了自己搬运物体的能力。如图1-1所示，我们看到在此一万年间，阻力/重量比减少了数千倍（曲线M）。

1-3 历史概况

轮子的发明大概至少在六千年以前，最早的已知历史记载中就有应用轮子的资料。值得注意的是高度发达的印加文化并未揭示或发挥轮子的原理。产生于人类历史初期的另一些摩擦学的应用是：利用摩擦取火，用骨头和鹿角制成的轴承改进钻的结构，利用简易的磨盘碾碎谷物等等。图1-2是一种简单的弓钻（这种式样的钻在印度仍有使用）和简陋的碾谷的磨石。新近的

考古学发现也提供了古代应用润滑剂的证据。由埃及古墓出土的一辆战车上有轮盘轴承，其上涂有一些已被碎石残渣沾污了的动物油脂润滑剂，污物中含有石英砂以及铝、铁和石灰的化合物，估计它们是在使用过程中沾上的。

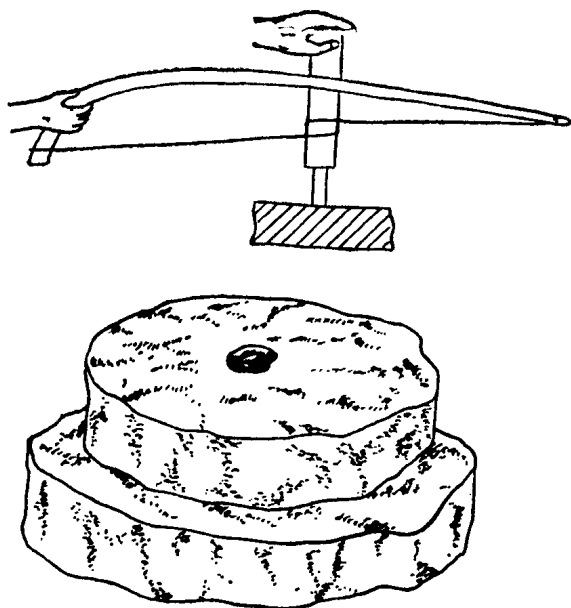


图1-2 四千年前用人力的弓钻和石磨

建造金字塔的不朽劳动，促成了埃及人在摩擦学方面的许多发展。有一幅保存完好的浮雕上的图画，描绘出用滚筒和滑板搬运巨石和塑像的情景。图 1-3 给出了这种过程的一个例证。从图上可以看到，172名奴隶正沿着木头轨道拖运一座质量约为六万千克的巨型塑像，这座塑像安放在木质滑板上。更细致地观察这幅图，可以看见一个人站在滑板前端，正向滑板与滑道之间倾倒什么润滑剂，他无疑是我们最早的摩擦学家之一。饶有兴趣的是估计一下在此场合的摩擦系数。如果假设每个奴隶的拖拉力约为800牛顿，则摩擦系数可认为是

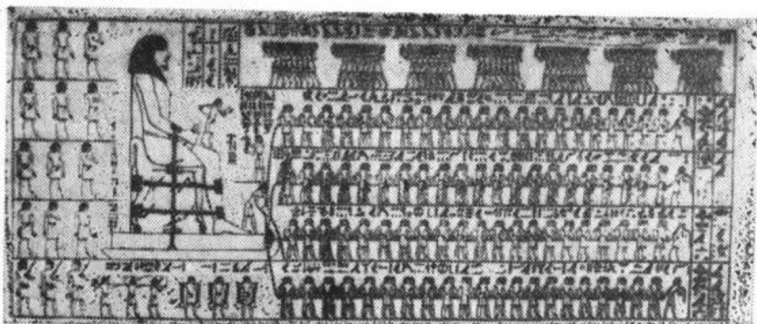


图1-3 约在公元前1880年埃及巨像的搬运。取自EI Bersheh岩洞内的图画。(在Nineveh和Babylon的新发现,由A.H. Layard 报告)

$$\mu = \frac{\text{奴隶的人数} \times \text{每个奴隶的力}}{\text{塑像的重量}} = \frac{172 \times 800}{6 \times 10^5} = 0.23$$

这正是我们对润滑不良的木材滑动时所预计的数值,这种“巧合”是值得注意的。尽管当时的艺术家显然不可能用透视方法来绘图,但这幅画应当是场景的真实记录。我们认为,在某种意义上,这幅画就象现代技术拍摄的照片一样,是当时所作的一个可靠记录。

还可以举出古代社会许多其它的摩擦学实例,但摩擦学作为科学与其实不同,直到十五世纪才产生。辽纳多·达·芬奇(Leonardo da Vinci, 1452-1519)明确认识到**摩擦力与负荷成正比而与名义接触面积无关**。他还提出过关于滚动的极为敏锐的论点:“滚动摩擦并非起因于摩擦,而是由接触所引起,这种接触可以描述为无限多个微小阶段形成的过程。”

摩擦的前两条定律总是归功于阿蒙顿(Aмонтон),这是他在1699年提出的,而且毫无疑问他并不知道辽纳多的工作。1780年,库仑(Coulomb)提出了摩擦的第三条定律。库仑指出**两表面间的摩擦与其相对速度无关**,虽然现在已经知道,与前两条定律(即摩擦力与负荷成正比而与名义接触面积无关)相

比,这一条并不是普通正确的。由于工业的蓬勃兴起,在这段时期前后还出现了若干其它的摩擦学进展,这种进步一直持续到今天。

润滑剂的应用起源很早,但牛顿(Newton)是研究粘性流动定律的先驱者。对轴承润滑的理论研究到上世纪末期才开始。在这方面比查姆·托尔(Beauchamp Tower, 1899)、奥斯本·雷诺(Osborne Reynolds, 1886)的工作,以及同时期的斯托克斯(Stokes)和彼德罗夫(Petroff)的工作尤其显著。

1928年在罗马附近的尼密(Nemi)湖发现的残片,是我们现在称之为滚动轴承的应用的最早证据。这些残片的年代在公元40年前后,它多少有点象滚珠止推轴承,可能是当时雕塑家为使大型雕塑转动方便而采用的(见图1-4)。这种型式的轴承大概在1700年前后开始用于机器,而现在则广泛地用在各种机器上。它们价格便宜,而且各种规格型号的都能买到,这些原因使其受到欢迎。

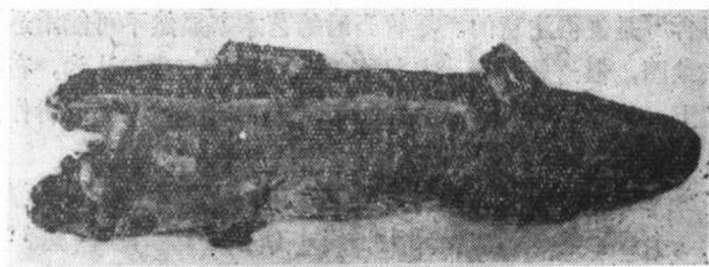


图1-4 尼密湖轴承的部分碎片(由Vrelli Te Novi di Nemi, Libreria Dello Statto, Rome报告)

最初的润滑剂显然取自动物的脂肪,但是矿物油很快被公认为是一种来源丰富且更为有效的替代物。现在化学家们已经提供了多种工业用途的润滑剂。这些润滑剂能满足设备在更高负荷与速度下运转的需要,常常也能满足在极其恶劣的环境条件(如高温、高湿度、高真空以及种种化学蒸汽)下的运转要求。许多情况下,环境条件要求全新的润滑手段,例如在与核反应装置、太

空运载工具等有关的问题中。过去二十五年多来，汽车发动机的寿命提高了三倍还多，而且效率更高。这些成果比之于任何其它个别的原因，应当更多地归功于出色的摩擦学实践的发展。

1-4 摩擦学问题的解决方法

尽管这个问题要在本书其它章节作详细介绍，但是这里仍然可以列出解决摩擦问题的适用的原则性方法。在此之前，我们必须对问题的性质加以确定。人们总是希望将磨损减至最小程度，因为它意味着效率和资金两方面的损失。就摩擦而论，我们看出一个有趣的矛盾。在许多情况下希望减少摩擦，以避免为克服摩擦而引起的能量损耗。但在另外许多情况下，我们又靠摩擦来实现种种特殊的功能。可以设想一下不利用摩擦而驾驶汽车或刹车的困难。甚至不值钱的螺母和螺栓，之所以能够锁紧，也是因为它们之间存在摩擦的缘故。

表 1-1 各种材料组合的摩擦和磨损

材 料	μ	磨 损 率 $\text{cm}^3/\text{cm} \times 10^{-12}$
低碳钢对低碳钢	0.62	157000
60/40黄铜对工具钢	0.24	24000
聚四氟乙烯对工具钢	0.18	2000
钨铬钴合金对工具钢	0.60	320
不锈钢对工具钢	0.53	270
聚乙烯对工具钢	0.65	30
碳化钨对碳化钨	0.35	2

以后我们只考虑力图减小摩擦和磨损的那些问题，预先说明这一点是必要的。摩擦和磨损虽然在同处产生，可是这两种效应之间并不存在简单的关系。例如大的摩擦并不意味着大的磨损，表 1-1 的数据就说明了这一点。表中有两处值得注意：首先，最低的 μ 值并非兼有最小的磨损率；其次，所有的 μ 值皆分布在相差大致三倍的范围内，而最小与最大磨损率的数值则相差 78000 倍之多。

我们现在来研究受载荷 W 作用的摩擦界面上的摩擦与磨损问题（也就是在两个表面间垂直作用着力 W ）。

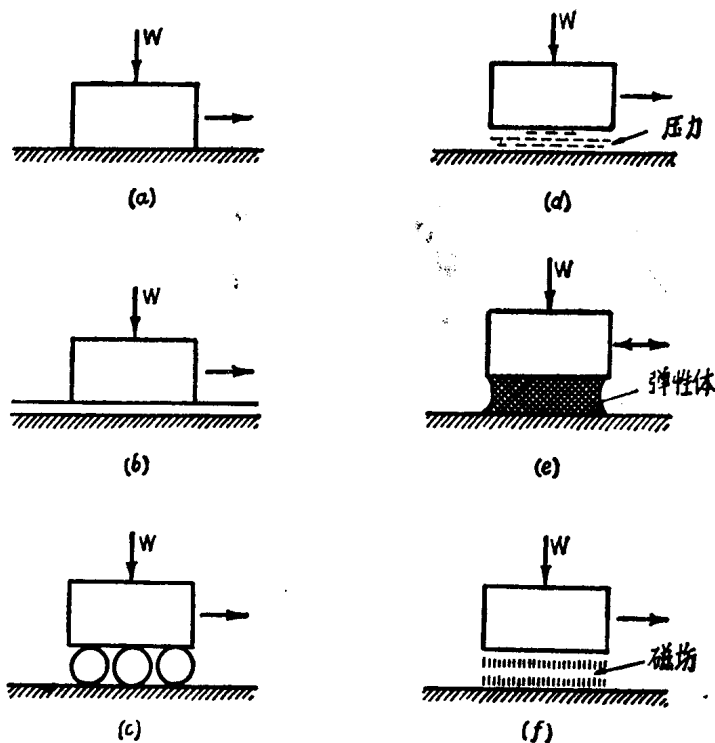


图1-5 摩擦学问题的解决方法。(a)材料的选择；(b)表面膜的应用；(c)滚动元件的应用；(d)压力流体膜的应用；(e)弹性材料的应用；(f)磁场的应用

(1)材料的选择(图1-5a)

注意到表 1-1 引用的数据，我们可以首先考察合理地选用材料以满足我们要求的可能性。由表1-1可知，PTFE（聚四氟乙烯）与淬硬的工具钢对磨时， μ 值较小而磨损率适中。由于这个原因，此种材料常常用于所谓“干轴承”，其各种设计产品皆有成品出售。可惜 PTFE 有两个缺点：一是比较软，因而对于这种

接触必须限制其作用的负荷；二是这种材料温度升高时容易失效，由于所有摩擦皆会产生热量，尤其高速时温度增高太大，因此它们不能用于高速情况（见第二章和第四章）。这些问题可以用金属而不是用塑料部分地加以解决。近期的研究认为，金属的某种形式的晶体结构对我们特别有利。例如钴基合金似乎在这方面就可能解决问题。

（2）表面膜的应用（图1-5 b）

粘附在固体表面的表面膜能为固体的接触形成一个阻挡层。膜层剪切所产生的滑动，减少了界面上的摩擦和磨损。但是这种膜层极薄而且容易破裂，故不能使固体表面间的接触完全消除。我们可以将常用的表面膜分为以下三类。

一种膜是由金属接触时的化学反应而形成的。最为人熟知的也许就是极压添加剂，它们可以在金属表面生成如氯化物或硫化物那种化合物表面膜。这种膜能在摩擦过程的高温下保持其化学稳定性，所以它是合乎要求的。化学膜受到摩擦也会损坏，因而膜层愈厚抗磨能力愈高。图1-6表示了化学膜经受摩擦周期次数的特性，虽然单分子层的 μ 值很低，但是来回移动一次也就破坏了。显然，增加膜层的厚度能够延长膜的寿命。

第二种表面膜用的是象石墨或二硫化钼那样的材料。这些所谓层状固体，因其层状结构（可比作一叠纸牌）而得以应用。可以理解，这种结构使它们能在垂直于分层的方向上承受载荷，并且由于一层在另一层上的自由滑动，而获得较小的摩擦（见第四章）。

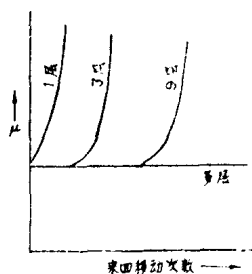


图1-6 润滑剂的单分子层数的增加对表面膜寿命的影响

最后，某些场合最常见的是由软金属（例如铅）形成的表面膜。这里我们又一次利用软金属的低剪切强度来减小摩擦力，而基体金属的内在强度仍能在垂直方向承受高载荷（见第三章）。

（3）滚动接触（图1-5 c）

解决问题的方法是用滚动元件将两个物体隔开。根据不同的设计要求，滚动元件可以是圆球、圆柱或任何其它能够产生滚动的几何形体，即是说它们在运动平面内具有圆的几何形状。初看起来，我们似乎能因此而完满地消除摩擦和磨损，但实际上是做不到的，因为在这种系统内总是存在着某些滑动（见第三章）。尽管如此，还是广泛地应用这种方法，若与上述（1）和（2）法相比，它产生的摩擦与磨损要小得多。

（4）压力流体膜润滑（图1-5 d）

另一种解决问题的方法，是用相对较厚的润滑剂膜将表面完全隔离（一般达到几百 μm 厚，不同于（2）中讨论的厚度在 $1\mu\text{m}$ 左右的表面膜）。当我们对这种系统施加负荷时，如果流体的总压力（压强 $\times$ 面积）比负荷小，液体则将流失。解决的途径之一是为流体提供一个压力源，这就是液体静压或外压轴承的原理（见第五章）。

再一种更巧妙的途径，就是借用表面相对滑动时产生的压力。我们若将两个运动表面相互倾斜而不是平行放置，则流体将被电进横断面积逐渐收缩的通道。此时对粘性流体将产生流体动压力，这就是液体动压或自压润滑轴承的原理（见第六章）。

（5）弹性方法（图1-5 e）

在某些情况下，例如在小行程的往复运动中，两元件间的滑动范围是受到限制的。汽车的支承系统就是这种例子。对于这些场合，一个值得考虑的方法就是在两个表面间粘贴一个弹性物，由弹性物的变形而使运动得到调节。承载能力会因这种装置而减