

什么是摩擦

B. B. 捷里亞金 著

科学出版社

什么是摩擦

B. B. 捷里亞金 著

52

12

002167

社

什 么 是 摩 擦

Б. В. 捷里亚金 著

刘 超 吳惜抱 譯

科 学 出 版 社

Б. В. ДЕРЯГИН
ЧТО ТАКОЕ ТРЕНИЕ
ИЗДАТЕЛЬСТВО АКАДЕМИИ НАУК СССР
МОСКВА 1952

內 容 提 要

摩擦是日常生活中最普遍的現象，沒有摩擦將寸步難行，因此了解摩擦的基本表現和規律，是一個饒有趣味的問題。本書以通俗的形式，介紹了各種摩擦現象和它們的規律；並特別着重介紹了蘇聯在摩擦研究上的最新成就。原書分內摩擦和外摩擦兩篇，外摩擦為本書的精華部分，它不僅是從力學觀點，而且以分子物理學作基礎來解釋外摩擦。論述方式都是從實驗出發，並對許多摩擦現象作了解釋，而這些現象有許多按照以往的理論是無法解釋的，例如：滑潤劑的作用、光滑固體表面的摩擦、摩擦系數不可能是恆量等等。

2/62/21
什 么 是 摩 擦

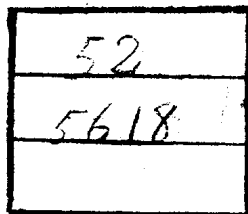
Б. В. 捷里亞金著
劉 超 吳惜抱譯

科學出版社出版（北京朝陽門大街117號）
北京市書刊出版業營業許可證出字第061號

中國科學院印刷廠印刷 新華書店總經售

1958年9月第一版	書號T1369 字數：146,000
1958年9月第一次印刷	開本：850×1168 1/32
（京）0001—3,080	印張：5 3/8

定價：(9) 0.75 元



目 录

序言	(1)
----------	-------

緒 論

§ 1. 运动的阻力	(6)
§ 2. 外摩擦和內摩擦	(7)
§ 3. 速度的陡度	(9)
§ 4. 关于动量的传递	(12)
§ 5. 摩擦和能量的轉換. 摩擦的几种形式	(14)

內 摩 擦

§ 6. 內摩擦的基本定律	(18)
§ 7. 液体和固体壁之間的滑动	(19)
§ 8. 固体在流体内运动的阻力	(21)
§ 9. 斯托克斯定律及其应用	(22)
§ 10. 管內的液流	(27)
§ 11. 片流和湍流	(29)
§ 12. 利用泊肃叶定律测定粘滞度	(36)
§ 13. 再論测定粘滞度的方法	(39)
§ 14. 粘滞性在某些工艺过程和科学研究中的作用	(41)
§ 15. 胶質溶液的粘滞性	(44)
§ 16. 气体的內摩擦机构	(47)
§ 17. 气体在固体壁面上的滑动	(49)
§ 18. 稀薄气体在多孔物中的运动	(55)
§ 19. 巴琴斯基的液体粘滞性定律	(62)
§ 20. 弗兰克耳的液体粘滞性的特殊机构	(65)

外 摩 擦 和 潤 滑

§ 21. 外摩擦. 彼德罗夫的流体动力学潤滑理論	(70)
---------------------------------	--------

498561

§22. 潤滑层的尖劈作用	(72)
§23. 空气潤滑	(79)
§24. 干摩擦或真正外摩擦	(81)
§25. 靜摩擦	(81)
§26. 阿芒湯定律及其应用	(84)
§27. 阿芒湯定律的歧离	(89)
§28. 摩擦力与接触時間关系的表演	(91)
§29. 摩擦时的跃动	(92)
§30. 有机化合物单分子层的潤滑作用	(96)
§31. 吸附潤滑	(97)
§32. 水面上不溶解的单分子层	(102)
§33. 迭分子(多分子)层的潤滑作用	(106)
§34. 外摩擦及分子力	(108)
§35. 外摩擦的机构	(114)
§36. 用模型論証外摩擦定律	(115)
§37. 外摩擦定律的进一步研討与論証. 外摩擦定律的应用	(122)
§38. 分子相互作用对摩擦力的影响的計算. 摩擦二項式定律	(123)
§39. 摩擦二項式定律的實驗基礎	(125)
§40. 摩擦二項式定律的应用. 粗糙面的摩擦	(131)
§41. 机械啮合对摩擦的影响. 預位移現象(維尔霍夫斯基效应)	(134)
§42. 固体的动摩擦	(137)
§43. 边界摩擦和潤滑性	(139)
§44. 动力摩擦时油膜分子的尖劈(緩冲)作用	(142)
§45. 有表面活性的物質对磨損的影响(列宾杰尔效应)	(144)
§46. 液体边界层的粘滯性	(147)
§47. 边界相及其定向結構	(153)
§48. 边界相和潤滑性	(155)
§49. 潤滑层的尖劈效应和防护效应.	(157)
§50. 冰为什么是滑的?	(161)
§51. 化学的“自潤滑”	(163)
§52. 轉动摩擦及滚动摩擦	(164)
参考文献	(167)

序 言

日常生活中最普遍的现象莫过于摩擦。物体的任何运动都有摩擦伴随着，因而这些运动的特性都要烙上它的痕迹。没有摩擦简直是寸步难行。因此很自然，摩擦的基本表现和规律性是怎样以及如何来解释它们，就不仅是专家(科学家,工程师,技术人员),而且也是每一个受过教育的人所应该感到兴趣的问题。但是在通俗科学读物中以及教科书中很难找到对这些问题的详尽无遗的解答。

首先应该指出,在气体和液体中的内摩擦,与固体在接触时的外摩擦二者之间有着本质上的区别。前一种形式的摩擦——内摩擦的规律和本质,比较简单而又极易了解。因此,在内摩擦方面,虽然几乎没有通俗读物,也没有专门书本,但是,广大的科学和工程技术工作者们在这方面毕竟知道得比外摩擦要多一些。甚至于那些在各自业务上经常要碰到外摩擦这一问题的专家——物理学家,物理化学家,工程师们,对于外摩擦的本质也缺乏正确的概念。

至于说到苏联的广大知识界,由于缺乏足够的通俗科学读物,以致或者对内摩擦和外摩擦现象的本质全无所知,或者抱着完全错误的概念。因此,我们把摩擦的两种形式合在同一本书中来讨论,是有道理的。固然,两种摩擦的机构是完全不同的,但是,在这两种摩擦之间有着原则上重要的共同特点,因而在同一书中来研究这些机构,对于理解这两种摩擦的每一种都是极其有利的。况且,有这样的情况,按表面的特征看来要属于外摩擦这一类,而其本质和特性却是内摩擦。同时也有相反的情况。

关于外摩擦的基本规律与性质,不仅是缺乏通俗读物,而且也缺乏专门著作。这就使得在这一领域内,特别重要的是在实践上,不仅是没有一致的见解,而且还广泛地存在着完全错误的认识。这些错误的认识已生根不下一百年之久。毫无疑问,这里最重要的原因之一,是由于摩擦的特性使得对该现象的科学研究遇到客观上的困难。困

难在于:虽然按外摩擦本身的基本表现和作用看来,它是单纯的力学现象,这种现象的探讨和测量是极其简单的,但是,它的基础却是建立在固体表面薄层中分子的相互作用上,因而与这种薄层的成分和结构发生复杂的关系。

实际说来,在所有的表面现象中,外摩擦是具有最小作用半径的最外表的一种现象。因此不难想到,外摩擦对表面状态是特别敏感的,当表面稍微有些污垢时,则它对外摩擦的影响要比对其他表面现象的影响大几倍。因此,用来表征不同表面的外摩擦特性的摩擦系数,与外面的介质以及表面状态有着非常敏锐的关系。要测得摩擦系数的可靠数值(即假定重复测量能得出同一结果),就必须极端细心而又准确地控制住实验的条件。

几乎没有例外,在外摩擦的一切研究过程中,这些条件不但不能维持一定,而且往往不能觉察出来;其主要原因就是单纯地注意到外摩擦的机械性质。参考书中所载的各种材料的摩擦系数(有时“准确”到几位有效数字),往往失掉了科学的或实用的价值,并使实用上发生错误。不但是普通材料(如皮革,木材,橡皮)的摩擦系数是如此,就是金属的摩擦系数也变化得很大,它们的数值与表面的不同加工及进行实验的条件有关。

存在这种极端不满人意的、也可以说是不容许的情况的主要原因,是由于摩擦问题一直到不久以前主要是从力学这一方面来研究,大部分没有涉及外摩擦的本性以及它的精细的物理化学机构的任何概念。物理学家们(基于近代物理的成就,他们本来可以处理摩擦理论)在摩擦这一领域内,对于正确的定量和定性的概念的发展,也没有发挥足够的作用。这种情况的主要原因也是把摩擦看作是单纯的机械现象,以及不明瞭这一领域中的基本事实——这些基本事实和研究摩擦理论时,首先是在表述摩擦的基本规律时,是应该加以考虑的。

物理学家们依靠近代科学在表面现象这一方面的成就,比较正确地评价了外摩擦的精细的分子机构。但是直到不久以前,就是这一方面的工作也没有向前推进多少。这是因为研究外摩擦问题的

物理化学家們，主要是从定性方面着手研究其物理化学現象，而不是采取理論物理和力学的方法。

近来，由于苏联学者的集体努力，关于外摩擦的許多理論問題，已經获得了正确的解释。根据这些解释，能够分析許多重要的技术現象。因此，有必要把这些成就收集并概括起来，以便有效地利用它們。

編写本書的目的即在于此，它是依照已經逝世的苏联科学院院长 С. И. 瓦維洛夫 (Вавилов) 的建議，以通俗科学讀本的形式編写而成的。本書的命名也是 С. И. 瓦維洛夫所建議的。本書的主要任务是，使那些与摩擦問題有密切关系的工程师、物理学者、物理化学学者、地質学者和其他、以及苏联的广大知識界，認識外摩擦的基本表現和規律，并使他們建立起分子机构的概念和明瞭这一現象的本質。作者認為只宜向讀者介紹摩擦方面的重要現象和該現象的机构的基本特征，而不宜作詳細談論。

沒有疑問，目前摩擦理論还是处于发展的开始阶段。因此，不应该立刻企图用它来解释比較复杂的或从屬的現象。对問題的敘述，必需是首先介紹近似地反应现实的摩擦基本規律。例如，首先必須說明：摩擦力与負荷成比例的阿芒湯 (Amonton) 定律为什么能成立，为什么外摩擦受温度和速度的影响不大。至于这些近似定律与实际情况为什么会发生分歧的問題，当然，應該列入研究摩擦規律的第二阶段，而且这一問題應該屬於建立摩擦的更精确的理論的范畴。

經常有这样的情况，尤其是在一些專門著作中，只对那些和基本近似定律有所歧离的表現作了解释，而沒有考虑到首先應該說明：为什么这些定律在一級近似的情况下是正确的。只有这样着手，对于外摩擦的机构和本性，才能得到正确的（尽管是近似的）理解，只有这样，才能进一步明瞭为什么会歧离那些比較簡單的基本定律。

本書由于采取了这种方式，所以著者对摩擦本性的探討，远未作全面的介紹，因为有些問題不是要說明摩擦的基本性質，而是要考虑对摩擦有影响的附带因素。例如，动摩擦力极近于靜摩擦力，因此，磨損現象、塑性变形現象和其他过程（与动摩擦同时发生的以及許多

能影响其大小的过程)应该列入次要地位。

这并不是說与动摩擦同时发生的表面变化和磨損現象不值得注意。恰好相反，这些現象在实际上所起的作用往往比摩擦現象本身还重要些。当內燃机（例如飞机馬达）工作时，减小磨損也許比减小摩擦力本身还要重要些。但是要想明瞭摩擦本身的性質以及遵守阿芒湯定律和摩擦的其他基本規律的原因，依靠磨損現象的研究是得不到多少收获的。直接的測量也說明了，破坏固体（甚至脆性的固体）所消耗的功只是摩擦功极小的一部分。而摩擦功，正如恩格斯早已指出的，乃是消耗在发热上，即轉变为分子的运动能。

本書是基于祖国的科学成就而編写出来的。我国的科学成就在这一知識領域內的供献，也如其他方面一样，是非常巨大的。只有以 M. B. 罗蒙諾索夫（Ломоносов）所提出的物体分子理論作基础，才有可能研究摩擦的本質。分子理論是以原子和分子的特性和运动来解释物体的所有性質和特征。机械能轉变为分子热运动能，并不能理解为超出了罗蒙諾索夫所表述的能量守恒定律的范围。有趣的是：“摩擦”这一术语正是由罗蒙諾索夫引入科学中的。

运输工程师 Н. П. 彼得罗夫（Петров）开拓了机器軸承潤滑的流体动力学理論。在苏联 Н. Е. 茹科夫斯基（Жуковский）及 С. А. 察普雷金（Чаплыгин）的經典力学著作中，对彼得罗夫所提出的問題，給出了严格的数学分析。这些經典著作者的首創性的成果，已由苏联学者麦尔察洛夫（Мерцалов），古齐雅尔（Гутьяр）和其他人繼承了下来。А. И. 巴琴斯基（Бачинский），А. С. 普列德沃季迭列夫（Предводителев），Я. И. 弗林克尔（Френкел），А. З. 戈利克（Голик）以及其他等人，发现并研究了液体粘滯度基本規律的本質。Н. С. 庫尔納科夫（Курнаков），П. П. 拉扎列夫（Лазарев），М. П. 沃拉罗維奇（Волярович），М. М. 庫沙科夫（Кусаков），М. И. 烏沙諾維奇（Усанович），Е. Г. 什魏德科夫斯基（Швейдковский）和其他人，在液体及其混合物的粘滯度，以及粘滯度測量的实际应用方面，做了重要的研究。

祖国的科学和各种外摩擦研究方面的功績是伟大的。这里应该

指出下列諸人的工作：И. В. 克拉格利斯基(Крагельский)——干摩擦方面；А. С. 阿赫馬托夫(Ахматов)，И. Л. 耶林(Елин)和Е. В. 苏霍夫(Сухов)——边界潤滑方面；М. Н. 布琴(Бучин)——低溫潤滑方面；В. Д. 庫茲涅佐夫(Кузнецов)，М. М. 赫魯紹夫(Хрущов)和他們的同事——磨損和表面磨合方面。對於理解摩擦時的磨損過程來說，院士 П. А. 列賓杰爾(Ребиндер)的工作具有巨大的價值。根據他的許多實驗資料，發現了在表面活性分子的作用下能使物體的硬度降低，因而就明顯地指出了物理化學現象對固體的變形，和機械破壞過程所起的作用。В. Н. 魏爾霍夫斯基(Верховский)、Э. С. 哈依金(Хайкин)和他們的同事，對於摩擦時的預位移現象，進行了有趣的研究。

本書主要是闡述摩擦的性質，遠不能把所有前述的研究工作都編進來。書內只介紹了一些實際應用的例子，用以說明某些原理。當然，這些例子不能代替專門討論摩擦實用問題的專著。

通俗讀物中的這個空白，在某種程度上可由 А. 薩落莫諾維奇(Саломонович)和 И. 利索夫斯基(Лисовский)所著“摩擦力”一書(1949年，第二版)來彌補。

著者認識到，本書缺陷在所難免，這在某種程度內是由於本書所担负的任務（以通俗的方式來敘述那些甚至專家們都沒有一致見解的問題）有它的困難性。希望讀者能對本書提出批評性的意見，寄到蘇聯科學院物理化學研究所表面力學實驗室（這是作者多年來與同事們研究邊界摩擦現象的地方）。

П. А. 列賓捷爾，М. П. 沃拉羅維奇，И. В. 克拉格利斯基，М. М. 庫沙科夫，Д. С. 科德尼爾(Коднир)和 С. Б. 拉特涅爾(Ратнер)對本書原稿作了審查，並提供了一些關鍵性的意見，特此向他們致以深忱的謝意。

作者以特別感激的心情回憶起 С. И. 瓦維洛夫對本書的關切，他對作者的多次談話減輕了作者在选择材料和敘述特點方面所遇到的困難。

Б. 捷里亞金

緒 論

§ 1. 运动的阻力

根据牛頓慣性定律，一切物体若未受到任何力的作用使它改变原来的状态（即改变运动的速度和方向）时，物体将保持静止或作匀速直线运动。这样看来，如果撞击任一物体，使它发生运动，那末，若以后该物体不受外力作用，则运动将以大小和方向不变的速度，永远持续下去。这一结论似乎与日常的經驗相违背。我們知道，若撞击一个置于水平面上的小球，则小球的运动将要逐渐缓慢下来，因而最后达到静止。

在所有情况下，要想使任一物体，例如車子，作恆速运动，即使运动是严格地沿着水平方向，不是上坡，也必须借助于发动机或人畜的拉力（如馬的拉力）的持续作用。这类观察说明了，例如，为什么亚里斯多德在两千年以前曾經指出：要維持一个物体作匀速运动，就得不断地施以作用力，若力的作用一旦中断，则物体也旋即停止。

但若对这种运动的情况作比較仔細的观察就会看到，首先，物体的运动决不会在刹那間停止；其次，維持物体作匀速运动所需的力，不仅与物体本身、它的性質、形状以及速度有关，而且与该物体运动时所接触到的介質或其它一些物体有关。維持物体在比較光滑的面上运动，所需的拉力小，而且在沒有拉力时，物体已有的速度减小得要缓慢一些，因而物体在停止之前，經過了較长的路程。如果物体是在容器里面运动，而此容器內的空气可以用抽气机抽出，则可以发现介質对运动的影响：随着物体周围空气密度的减小，运动的速度也减小得慢一些。

这些观察表明：物体运动減慢的原因，是由于它与周围物体之間的相互作用，而决不是物体本身的固有性質或运动的性質。由此不难想到：与周围物体隔絕而置于真空中的物体，将永远作恆速运动。慣性定律的发现，實質上就是基于这一推理。

因此,根据慣性定律,使运动速度发生变化(使速度增加或减小)的一切原因,都可以叫作“力”。因此,从日常的观察得出这样一个一般性的結論:任何运动物体都受到其周围介質或与其接触的物体的作用力,这力的效果是阻挠运动物体的运动,而且最后使它停止。这种力就叫作摩擦力或介質的阻力。例如,由于地面摩擦以及空气阻力的影响,足球滾了一定距离后就会停止。自山上滑下来得到了速度的雪橇,要受到冰的摩擦和空气阻力的阻挠而停止。

严格說来,摩擦力或阻力总是要减小运动物体与其周围物体或周围介質的相对速度。因此,当物体周围的介質本身在运动时,这种摩擦力却可以促使該物体运动。例如风,由于摩擦力,可带动小的甚至于很大的物体。颶风甚至能把汽車抛到二层楼高。来自上升的空气質点的摩擦力,能支持云中的水滴与重力平衡,而对較小的水滴,更能把它带动,迫使它一同上升。

§ 2. 外 摩 擦 和 內 摩 擦

在一切运动情况中,摩擦是伴随着相互接触的物体(或物体的一部分)的相对移动而发生的。伴随着并阻碍着两个相互接触物体的相对移动而发生的摩擦,称为外摩擦。因为它与这些物体的接触部分的表面的相互作用有关,而与物体的内部状态无关。因此,可以把冰和雪橇的滑木間的摩擦叫作外摩擦,这一摩擦是要阻挠雪橇相对于冰表面的滑动。在这里,阻挠雪橇的力,只与冰表面的状态(表面平滑程度及温度)有关,而与冰表面以下的状态无关。

严格說来,只是当固体間沒有潤滑层的情况下,才会出現外摩擦。因为只有在这种情况下,两个物体才能有“直接的”接触,因而在接触处才有两个物体的相对移动,例如滑动和滚动。

伴随着并阻挠着同一物体的諸部分間的相对移动而发生的摩擦,叫作內摩擦。这一术语,首先是运用于液体和气体。液体和气体的特征,是本身諸部分間容易发生相对移动。

可以用下面的例子來說明內摩擦的最簡單的情况。

把两块平行板沉入液体內(图1)。令上面的B板作速度为 v 的

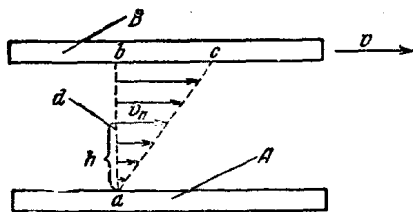


图 1. 在两块平行运动着的板间的液体内的速度分布情况。

匀速运动，运动的方向与下面的 A 板平行。如果用任一种方法来考究二板间液体微粒的运动，并测量它们的速度¹⁾，就可以看到，上板的运动传到了下面的各个液层，但所传递的运动却不完全。这就是说，每一液粒(例如 d 点)的速度，将介乎上下二平面层的速度之间，距上板越远的液粒，其速度越小。更严格说来，液粒的速度 v_n 与距下板的垂直距离 h 成正比，而且每一板附近的液粒的速度，与这些液粒所靠近的板的速度相同。

后一情况是非常重要的。因为它意味着，与固体板壁直接接触的液层，得到了与板同样的速度。也就是说，与板直接接触的液层不能沿板滑过去，如象一个固体沿另一个固体滑过那样。用下一理想实验，可以非常直观地说明速度与距不动板的距离成正比而变化的这一定律。假定在任一瞬间，某些液粒位于如图 1 所示的、垂直于二板的同一直线 ab 上，即以此直线作为起始线。那末根据速度的正比变化定律，在次一瞬间，这些液粒应该出现在与二板斜交的另一直线 ac 上。

还可以更直观地来设想二板间液粒的运动性质。设想把液体划分为许多极薄的、平行于二板的薄层 a, b, c ，(图 2)。这些薄层的总体类似一叠纸牌。由于运动时诸层的速度不同，每一层都象对其相邻的两层发

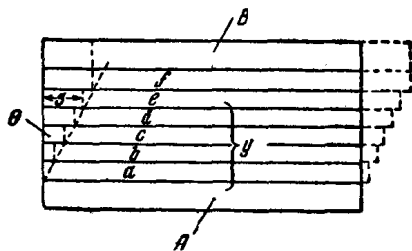


图 2. 切变简图。

生相对滑动一样。结果得到所谓切变(滑移)。不难想象，由于切变或斜错，它将呈现出如图 2 所示的诸层 a, b, c, d, e, f ，就好像一副整

1) 观察悬浮于液体内的并被液体所带动的微粒(如炭粒)的运动。

齐的紙牌变成了傾斜状态时一样。

久而久之，“切变”将不断地增大。由图 2 可以看出，切变角 θ 可以由它的正切

$$\operatorname{tg} \theta = \frac{s}{y}, \quad (1)$$

来决定。这里 s 是在观察時間内，位于距下板 y 处的液层所走过的路程。但路程等于液粒速度 v 与运动時間 t 的乘积。因此

$$\operatorname{tg} \theta = \frac{v}{y} t. \quad (2)$$

这样一来，如果切变的大小用切变角 θ 的正切来量度，那末切变将严格地正比于所經歷的时间 t 而增加。如果理解到，切变在单位時間（即当 $t = 1$ ）内的增加量就是切变的速度 G ，那末由 (2) 得到

$$G = \frac{\operatorname{tg} \theta}{t} = \frac{v}{y}. \quad (3)$$

然而，如前所述， v 是随距下板的距离按正比关系而改变的，即正比于所量度的距离 y 。因此，对于我們所研究的情况， v/y 在二板間整个体积內的諸液层中是一个恒量。

§ 3. 速度的陡度

G 这个量通常称为液流的速度陡度。有了这一符号，我們就可以說，式 (3) 表达了这样一个法则：切变速度等于速度陡度。如果速度用每秒厘米来量度，而距离以厘米来量度，那末，由 (3) 看来，速度陡度的单位是厘米/秒·厘米 = 1/秒，或秒⁻¹。

实验指出，要使二板間的液层維持恒定的速度陡度或恒定的切变速度，必須以恒定的力作用于二板上，作用于二板上的力的大小相等方向相反。作用在上板的力的方向应该向右，并平行于运动方向，而作用在下板的力是向左。显然，这两个作用力必須与下述二力平衡：这就是要把两板的相对速度减小并阻挠两板的相互移动的二力，也就是作用在动板上，要阻挠动板运动的摩擦力，以及作用在下面的不动板上，要使它沿上板运动方向发生运动的摩擦力。

这两个力可以認為是两板“之間”的摩擦力，因为这些力妨碍着

它們的相互移动。

“之間”一詞附以括号是有原因的，因为讀者会自然地提出这样一个問題：是否可以說“非‘直接’接触的两个物体‘之間’的摩擦”这一句話呢？本来，日常的、尽管是粗略的經驗，使我們認識到：只是在接触的情况下才有摩擦。象这种由經驗得来的直观認識，实际上既不和更精密的實驗結果相违背，也不和科学理論的論据相违背。

即使物体之間的吸引力和附着力的作用范围(虽然很小，但是可以量度的)能够超过固体中相邻原子或分子間的距离，然而摩擦力是不能借“真空”传递的。

在我們的两块板的情形中，二板之間不是真空，而是充滿了液体。二板間的摩擦力就是經由液体而“传递”的。但是为了更清楚地介紹摩擦力是如何經由液层而传递，我們再来研究一副正在逐漸“斜錯”的紙牌，因为这样的紙牌与液层的流动很相似。如果这种斜錯是由于这副紙牌最上一张的运动所引起的，則可以用下述的方法来說明运动是如何传到下面的諸紙牌。上面第一张和在它下面的第二张紙牌之間的摩擦，使得第二张牌发生运动。在此情况下，第二张和与它相邻的更下一张紙牌之間出現摩擦。借此方法，运动和摩擦力順次传递給所有的紙牌（包括最下一张）。然而，若最下一张紙牌是固定不动的，例如粘附在桌面上，尽管它受到了上一张紙牌的摩擦力的作用，它仍然是靜止的。显然，在此情形下，每一张紙牌都受到来自与其相邻的上下两张紙牌的两个方向相反的摩擦力的作用。

显然，这样一来，上面一张紙牌的运动順次地传递給所有下面的諸紙牌，因而使得下面諸紙牌都运动起来。开始每一张紙牌以不均匀的、逐漸增加的速度而运动。但是速度的增加有一定的限度。当每一张紙牌的速度达到这一限度时，以后所有的紙牌将进行匀速运动。这样的运动叫做稳定的运动，因为它与这样的液流情况相似，即行經空間的任一点的液粒的速度不随時間改变。平靜的河流中的水流，近似地具有这样的性質。要使所有的紙牌与被观察的一张紙牌同样作匀速运动，則作用于这张紙牌上的两个摩擦力必須有同样的大小。

如果設想两张紙牌間的摩擦力随着相对速度（等于这两张紙牌

的绝对速度之差)的增加而增大,那末我們容易得出这样的結論:当一副紙牌发生切变时,各紙牌速度的大小应当組成等差級数,即相当于图 1 和图 2 的情形.在此情形下,自下面数起的第 n 張紙牌的速度,将显然等于

$$v_n = nv_1, \quad (4)$$

这里 v_1 表示最下一張紙牌的速度.

如果我們想象地把整个液体分割成大量的、平行于运动方向的薄层,因而可以把每一层看作是一个运动的整体,而不須考虑同一层中的速度差别,則在两平板間液层的稳定流动的图景才与前面所研究的情况相似.在极限情况下,若薄层的厚度趋于零,而薄层的数目成为无限大,則没有什么不精确的地方了.在此情形下,任一这种无限薄层的速度 v ,将正比于其距不动面 $A^{1)}$ 的距离 h .这就意味着,所有薄层的速度陡度是一恆量.这一定律与紙牌情况中速度按等差級数而变化的規律相符合.而且根据各个薄层运动的均匀性以及摩擦力随相邻諸层的速度差而增大,也可以导出这一定律.

但是,与紙牌不同,在液体情况中具有下述的困难.为了要更精密地描繪出液体內速度分布的图景,我們把液体細分为数目很大的、极薄的液层.經这样分划后,这些液层的速度差变得极其微小,在极限情况下等于零.那末怎样来理解“相邻”液层的相对速度的可能差别呢?又怎样叫作“相邻”液层呢?这一問題可以用实验来解答.实验指出,在由同一种液层隔开的两块板間的摩擦力,正比于一块板相对于另一块的速度,而反比于它們的距离.由此可知:摩擦力正比于液层中的速度陡度.显然,当我們想象地把整个液体划分为許多薄层时,則“在諸薄层間”的摩擦力不是单纯地由它們的速度差来决定,而是由薄层的速度差除以薄层的中心距离来决定.当薄层的厚度趋近于零时,則速度差和距离(等于每一薄层的厚度)同时减小;它們的商(等于速度陡度)也就成为有限值.

用紙牌作比喻,对于直观地說明液体間层中速度分布的图景是

1) 原文为 y , 可能是排版之誤——譯者.

非常好的。但同时我們看到，这种比喻对于說明摩擦和运动經過液层而传递的机构來說，是非常粗淺，非常不嚴密的。此外，这个比喻把液体切变时本身各部相对移动的阻力归結为两个互相接触的固体的“外摩擦”，这就会把液体內的摩擦力的性質和原因引入不正确的理解中去。

而且，我們往后就要看到，液体中（特別是在气体中）的摩擦机构，比固体的摩擦机构，研究起来要容易得多，也簡單得多。

§ 4. 关于动量的传递

除了前面所談过的以外，还必須談一談在摩擦的两种形式中所共同具有的現象。这种共同的現象乃是摩擦的两种形式的基础，因而一般說来乃是摩擦的任何形式的基础。这一現象是：每一物体或它的諸顆粒企图把自己的运动传递給与它相接触的另一物体或諸顆粒，而使运动的速度趋于一致。

因此，物体或諸顆粒的运动速度趋于一致的傾向，乃是摩擦的基础。如果引入某一量度运动的量，就可以使这一概念变得非常精确。在力学中用一个叫做动量 I 的量——速度和質量的乘积，作为度量运动的量。即

$$I = mv. \quad (5)$$

摩擦力总是企图減慢較快物体的运动，反之，它总是要加快較慢物体的运动。結果，一个物体失掉动量，另一个物体得到动量。从力学的基本定律（牛頓定律）导出下述的普遍定律（动量守恒定律）：两个（或許多）物体間的相互作用力，不能改变它們的动量的和。因此，一个物体所失掉的动量等于另一物体所获得的动量。

摩擦时的动量交換，也遵守这一基本原理。

从日常生活中和技术上的最簡單的现象，也很容易說明动量的传递。一小船浮于池面上（图 3）。人在岸上如何能使小船发生运动呢？只要往小船內扔一些石头，就可以作到这一点。石头落入船內时，失掉了自己的速度，因而，同时就有某一动量传递給小船。因此小船也就发生运动。但是小船由此所获得的速度随即逐漸減小，最