# 外摩擦研究简史

**郑州外国语学校 司德平 选自《物理教学》2012年第11期**

摘要 回顾了外摩擦研究500多年漫长而曲折的历史，不仅再现了人们对摩擦的物理机制的认识过程，而且也说明了技术发展水平时摩擦现象的研究及理论发展的制约作用。

关健词外摩擦发展史摩擦理论物理机制

摩擦是日常生产和生活中普遍存在的一种现象。摩擦可分为干摩擦和湿摩擦两种。干摩擦是固体表面之间的摩擦，又叫外摩擦；湿摩擦是流体内部或流体与固体间的摩擦，又叫内摩擦。其中，外摩擦包括静摩擦、滑动摩擦和滚动摩擦。中学物理教学中主要学习外摩擦。

人类很早就对摩擦现象有了认识并加以利用，2000多年前古希腊的哲学家亚里士多德（Aristoteles，公元前384-前322）就已经提到摩擦力的概念，但真正对摩擦进行定量的研究，则始于15世纪的文艺复兴时期。在现代文明迅猛发展的今天，摩擦现象及其本质仍是重要的研究课题之一。在各种基础研究和工程技术领域，以及工业生产活动中，如何降低摩擦、减少能量损耗、防止过热和烧焦仍是不可忽视的问题。所以，重新回顾摩擦漫长而曲折的历史，或许有着一定的启发意义。

研究外摩擦500多年漫长而曲折的历史大致可划分为五个时期。

## 1．达·芬奇的早期研究时期

1508年，意大利著名的科学家、艺术家达·芬奇（L.daVinci，1452-1519）使用石头和木头开始了对固体摩擦的实验研究。但直到19世纪末，他的与摩擦有关的大多数著作和设计图才在阿特兰提库斯抄本里被发现，他的手稿发现更晚，是1967年在马德里发现的。阿特兰提库斯抄本和阿伦德尔抄本内的草图证明，达·芬奇测量了水平和倾斜平面上物体间的摩擦力；测量了半圆形截面槽或半支承座与滚筒间的摩擦；进行了表面接触面积对摩擦阻力影响的实验研究。他从钢缆绳在卷起和伸直两种状态下需要同样多的人才能挪动一事，已发现了同等重量的物体之间的摩擦力与接触面积无关的重要结论。

达·芬奇还首次引入摩擦因数概念。他将摩擦因数定义为摩擦力与垂直载荷的比值，即μ＝。对于“磨光的光滑表面”，他的结论是：“每一个摩擦物体所具有的摩擦阻力等于自身重量的四分之一”。这一结论对他那时通常在轴座上使用的材料（大多为硬木，少数是铁和硬木的组合）来说，是比较符合实际的。1964年，鲍登（Bowden）和法博尔（Fabor）提供的例证也表明，在潮湿条件下，它们的摩擦系数为0.2，在无润滑条件下则为0.25～0.50或0.20～0.60。

达·芬奇还研究了摩擦面间有润滑油和其他东西介入时对摩擦的影响，并将这种情况下产生的摩擦称之为复合摩擦。他认为，“所有东西，不管它是如何薄，当它放入两个互相摩擦的物体中间时，摩擦都会减少”，他把这时摩擦减小的原因归结为滚动作用。同时，他把两个面的软硬按三种方式搭配，引进了直接接触和间接接触的概念，提出：“两个互相摩擦的物体若是硬度不同，软的材料会使硬的材料受到磨损”。后来，人们应用电子束衍射法、利用电解法将摩擦面稍微除去一薄层的方法，完全证实了达·芬奇的这个科学预言。

## 2．阿蒙顿的进一步研究时期

进入17世纪后，由于水力和风力能源的广泛应用，机器大量增加，特别是磨的发展，大大推进了对摩擦的研究。许多科学家进行了各种各样的摩擦实验，其中最有成就者当推法国实验物理学家阿蒙顿（G.Amontons，1663-1705）。作为一个永动机的积极倡导者，他自然对摩擦产生的损失十分敏感，这促使他转向摩擦研究。他通过多次实验后，于1699年12月19日向法国皇家科学院提交了一篇经典论文。在文中讨论了他的摩擦实验和对实验结果的分析，提出了摩擦力的经典规律，这就是后来人们所熟知的阿蒙顿干摩擦定律。

（1）静摩擦定律：两接触物体间的最大静摩擦力，跟接触面上的正压力成正比，并与接触面的性质及状态有关，但与接触面的面积及形状无关。即fm＝μ0N。

（2）滑动摩擦定律：滑动摩擦力跟摩擦物体接触面上的正压力成正比，与接触面的面积无关。即f＝μN。

## 3．库仑对摩擦的总结时期

进入18世纪的法国，在经济、军事、工业等方面有了很大的发展。机器的大量使用，使得机械的效率和耐磨问题成为机械设计上的一大难题。为此，巴黎科学院于1781年以“摩擦定律和绳的倔强性”为题，进行了一次有奖竞赛。法国物理学家库仑（C.A.Coulomb，1736-1806）研究总结了达·芬奇和阿蒙顿的实验和理论之后，又进一步做了大量的实验。最终以《简单的机械理论》为题的论文赢得了这次竞赛的优胜奖。他研究了平面的摩擦，绳缆的摩擦，枢轴承的摩擦和滚动摩擦。指出了影响摩擦力的因素有接触面表面的性质及涂层、表面承受的压力、接触时间、表面滑动的速度、空气的湿度或干燥程度等，共有12项之多。他逐项进行试验，提出了他的摩擦理论—库仑摩擦定律。

（1）库仑摩擦第一定律：摩擦力跟作用在摩擦面上的正压力成正比，与外表的接触面积无关。这实际上就是阿蒙顿定律，也就是现在称谓的静摩擦定律和滑动摩擦定律。

（2）库仑摩擦第二定律：滑动摩擦力和滑动速度大小无关。

这一结论，若作为普遍法则是不正确的。实际上滑动摩擦力与相对滑动速度是有关系的。滑动摩擦力f滑随相对速度v的变化关系可粗略用右图表示。但在相对速度不大时，一般近似认为滑动摩擦力与相对速度无关。

（3）库仑摩擦第三定律：最大静摩擦大于滑动摩擦力，即fm＞f滑。

（4）库仑二项式定律：这是反映摩擦力和负载之间的关系。即滑动摩擦力f＝μN＋A。

库仑认为“常数”A跟正压力的平方根成正比，但它没有反映出A的物理意义。这一定律也只适用于干摩擦和边界摩擦。

库仑对摩擦的研究，汇集了从达·芬奇到阿蒙顿的研究成果，提出了他的摩擦定律，对摩擦现象的认识提高到了一个新水平，因此他于1782年当选为法国科学院的院士。但是，实际上这些定律只能是经典的经验公式，对于实际情况也仅仅是近似的、粗浅的描述。

## 4．19世纪对摩擦的研究时期

19世纪，随着蒸汽机进入实用阶段，工业革命迅速普及，为了防止机器的高速转动而带来的轴承烧毁和磨损，润滑成了这个时期摩擦研究的特征。

1883年，英国的托尔（B.Tower，1845-1904）在本国机械学杂志上发表了一篇轴承摩擦的实验报告。他在研究轴承的润滑中，发现了油膜具有高压力的现象，从而迎来了润滑的历史。同时代的英国物理学家雷诺（O.Reynolds，1842-1912）注意到了托尔的意外发现，并对油膜上产生的压力进行了研究。1886年，他发表了“润滑理论及托尔在实验方面的应用”的论文。他根据托尔的发现，利用流体力学的原理，从理论上证明了因旋转而在油膜中发生流体力学性质的高压力，同时也说明了轴与轴承的间隙能支撑载荷的道理。雷诺的论文为滑动轴承的完善提供了理论依据。

1854年，希伦（G.A.Him）提出了用空气代替润滑油的设想。1896年，金斯伯里（A.Kingsbury，1863-1943）证明了这一设想，并在一次美国军事系统的展览会上进行了空气轴承的公开表演。这种轴承后来在高速磨床、高级陀螺仪上得到了广泛的应用。

这一时期值得一提的事件还有：雷尼（G.Rennie，1791-1866）发现，当压力超过某一数值时，摩擦迅速增大。这表明，库仑摩擦定律的成立是有条件的，也说明，在摩擦过程中应该考虑凸凹受到破坏这一情况。他根据这种观点提出，摩擦和磨损不过是同一现象的两个方面，这是非常现代化的看法。第二，希尔（R.Hill）曾把凸凹换为一种弹簧，把摩擦力看作对弹簧弹性变形的阻抗。第三，莫伦（A.J.Morin，1795-1880）与雷尼一起测定了许多摩擦系数值，直到今天这些数值仍在广泛应用。第四，希伦研究了润滑的影响，测定了润滑的固体表面在各种条件下的摩擦系数。第五，瑟斯顿（R. H. Thurston）制作了测定各种润滑油摩擦系数的器械，并利用它们做了各种摩擦试验。

总之，进入19世纪，由于摩擦的实验定律大体已确立完毕，只是在研究如何减小摩擦方面进行了一系列工作，但还不具备用摩擦理论明确解释摩擦现象的技术条件，仍然没有对摩擦的物理机制给出科学的、满意的解释。

## 5．从经典理论到近现代理论时期

早在阿蒙顿前后时期，帕朗（A.Parent）和欧拉（Léonhard Euler）将摩擦力引进了力学体系，从而促进了对摩擦力产生机制的研究。因此，达·芬奇、阿蒙顿、库仑等人在研究摩擦定律的同时，就对摩擦的物理机制提出了一个凸凹说。他们认为摩擦的根源在于两表面的凸凹相互啮合，当一个物体在另一个物体表面上滑动时，互相啮合的凸凹部分，就会相互撞碰，产生断裂、磨损，阻碍物体运动，就产生了滑动摩擦。1737年，贝利多（B. F. de Belidor）还用许多半球粘成的模型当作摩擦面，以此来验证凸凹说是否正确，这是将摩擦面的形状模型化的最早尝试，直到今天，在推导磨损方程时仍在使用它。但是，这一理论无法解释为什么表面越光滑，反而摩擦越大；新生成的结晶表面在空气中停留时间一长，摩擦因数就会急剧减小等现象的产生。

1734年，英国物理学家德萨古利斯（J.T.Desaguliers）基于凸凹说无法解释光滑铅柱的粘合实验，在《实验物理学教程》一书中，他抛弃了凸凹说，提出了分子说。该学说认为产生摩擦的真正原因在于接触面间的分子力作用。并由此推断，表面越光滑，接触越紧密，分子力的影响就越大，因而摩擦力也就越大。德萨古利斯预言：“只要把平面无止境地研磨得很光滑，摩擦迟早会增大的。”这一理论得到了英国物理学家文斯（S.Vince，1749-1821）的赞同。到了20世纪，由于表面加工技术的进步，他的这一天才预言终于被英国科学家哈迪（W.Hardy）的实验所证实。

凸凹说认为摩擦源于凸凹体间的相互挤压、剪切的机械阻力；而分子说则认为摩擦来源于接触面上晶体分子间静电引力。二者争论的焦点在于前者认为摩擦是凸凹间的斥力，后者认为是接触面间的粘结引力。

1939年，前苏联科学家克拉格尔斯基统一了争论很久的凸凹说和分子说，认为摩擦具有二重性：它不仅要克服两表面分子相互吸引所决定的静电作用力，还要克服由于表面粗糙互相啮合而发生变形所引起的机械阻力。从而提出了一套分子-机械理论学说。

20世纪，摩擦物理机制的争论焦点是围绕着如何对摩擦定律进行解释展开的，其中对分子说的再认识基本代表了20世纪摩擦研究的主流。尤因（J.A.Ewing）首先应用分子说说明了因摩擦引起的能量损失并不是由表面的凸凹造成的，而是由固体表面分子引力场的相互干涉所致。随后，托姆林森（G.A.Tomlinson）又从分子说的观点对库仑定律作了证明，并给出了公式。哈迪以分子说为基础，进一步提出了粘合说，并相继得到许多证据的强有力支持：首先是哈迪自己的实验，即用洗干净的玻璃作表面摩擦。实验表明，充分研磨的表面摩擦力大，这就直接否定了凸凹说，而且摩擦的痕迹从最初宽1μm，到摩擦过程中达50μm。这表明，摩擦不只是由于分子力的不连续交叉导致能量损失的问题，而是基于分子力导致表面破坏。在他1919年和1920年发表的论文中，对此给予了详细的说明。但现代的粘合说是综合学说，它没有把凸凹说作为误论抛弃掉，而且包含了凸凹说的内容，在因粘合而产生的摩擦当中，表面的凸凹也给予了较大的影响。

1950年，鲍登等人认为两物体个别接触区产生的高压引起局部热熔而粘为一体，这样形成的连结又因表面相对滑动而剪断。粘结点的形成和剪断在接触表面上交替进行，构成摩擦的粘结分量；较硬表面的微凸体犁削较软材料的基体，构成摩擦的变形分量。总的摩擦力是二者之和。这种理论被称为粘结学说，被普遍承认适用于金属间的摩擦。

近年来，由于表面加工技术的发展，半导体工业所带来的高真空、高洁净环境技术的发展等有利条件，相继又出现了表面微凸体的塑性作用学说和热活化分子动力交换学说。这些学说也能在一定范围内说明摩擦所产生的物理机制。

20世纪摩擦理论的发展是和此时的技术进步分不开的。这一时期表面加工技术的发展，半导体工业所带来的高真空、高洁净环境技术的发展，都为摩擦现象的研究及理论发展创造了条件。摩擦研究的历史也充分说明了技术发展水平的制约作用，可以说，摩擦的历史就是机械技术史的外史。

但是，由于影响摩擦的因素相当复杂，现有的这些学说都不是包罗万象的，无法完整和圆满地将摩擦的物理机制说清楚。也就是说，摩擦的本质至今还没有完全研究清楚。