



工程与 生活中的力学

GONGCHENG
YU SHENGHUOZHONG DE LIXUE

王永正 冯立富等 编著



陕西科学技术出版社

工程与生活中的力学

主 编 王永正 冯立富

编著者 (以姓氏笔画为序)

于伯毅 王永正 冯立富

李 颖 岳成章 姚 宏

郭书祥 康 婷

陕西科学技术出版社

图书在版编目(CIP)数据

工程与生活中的力学/王永正,冯立富主编. —西安:
陕西科学技术出版社, 2005. 9

ISBN 7-5369-3993-0

I. 工... II. ①王... ②冯... III. 应用力学
IV. 039

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2005)第 079980 号

出版社 陕西科学技术出版社

西安北大街 131 号 邮编 710003

电话(029)87211894 传真(029)87218236

<http://www.snstp.com>

发行者 陕西科学技术出版社

电话(029)87212206 87260001

印刷 西安翔云印刷厂

规格 850mm×1168mm 32 开本

印张 4.75

字数 122 千字

印数 1-3000

版次 2005 年 9 月第 1 版

2005 年 9 月第 1 次印刷

定价 12.50 元

(如有印装质量问题,请与承印厂联系调换)

序 言

力学是一门非常重要的工程基础学科。它在许多工程技术中,特别是在航空、航天、航海、机械、建筑等众多领域有着极其广泛的应用。目前,国内、外高等学校开设的各种力学课程有数十门之多,其中理论力学、材料力学、结构力学和流体力学等是我国高等工程技术院校各专业普遍开设的专业基础必修课。这些课程理论性强,其中大多数例题和习题都是直接处理已经简化好了的力学模型(如质点、刚体、杆件、杆系等),学生在学习时往往会感到比较抽象,对于这些知识在将来的专业课和专业实践中有什么用处知之甚少,甚至一无所知,从而在一定程度上影响了学生学习这些课程的积极性和学习效果。

为了解决这个问题,我们编著了这本《工程与生活中的力学》。本书是一本与力学教材配合使用的课外读物。书中的每一篇文章都是从工程实际问题或大家熟悉的自然现象引入的。这些问题和现象的机理不是显而易见的,但当读者运用学习过的力学知识进行分析之后,便会有豁然开朗之感。我们希望学生在学习力学课程时,通过阅读本书能真切地知道,力学决不只是一些抽象的概念和枯燥的定理公式,实际上力学是一门应用范围极广的绚丽多彩的学科,从而激发他们学习力学课程的兴趣,并且加深对一些力学概念和理论的理解,培养和提高他们应用学过的知识,分析、研究、解决工程与生活中力学问题的意识和能力。我们还希望本书能对那些从事力学教学工作不久的年轻教师有所裨益,同时为学生开展论文写作有所帮助。

本书内容按一般工程技术院校所开设的主要力学课程的先后

次序编排,即第1—14篇为理论力学部分,第15—23篇为材料力学部分,第24—29篇为结构力学、流体力学和非线性力学部分。

参加本书编著工作的有:王永正、冯立富、李颖、岳成章、于伯毅、郭书祥、姚宏和康婷,由王永正、冯立富担任主编。

在本书的编著和出版工作中,空军工程大学训练部陆阿坤部长给予了大力支持,我们表示衷心感谢。

编著本书是我们的一种尝试。由于我们才智有限,书中难免有不当之处,欢迎广大读者指正,以使本书再版时能更加充实、更加完善。

编 著 者

2005年9月

目 录

- 1 接触表面越光滑摩擦力就越小吗 (1)
- 2 从自行车的前叉谈起 (5)
- 3 乘坐在两交通工具上的乘客相互观测对方的速度相同吗
..... (13)
- 4 轴流式压气机进口的学问 (19)
- 5 飞机非线性操纵的实现 (25)
- 6 第三宇宙速度的计算 (31)
- 7 谈谈喷气发动机的推力 (39)
- 8 秋千为什么会越荡越高 (45)
- 9 公路弯道外侧为什么要比内侧高 (51)
- 10 从台风的旋涡说起 (57)
- 11 潮汐的成因只是月球和太阳的引力吗 (62)
- 12 一起车祸——质量悬殊的两物体碰撞 (67)
- 13 地心隧道 (69)
- 14 飞机起落架减震支柱工作原理 (73)
- 15 “ $\sqcap$ ”形管道中的力学 (78)
- 16 巧布载荷 (80)

17	竹中的力学	(84)
18	冰块与管壁谁会被压坏	(88)
19	不容忽视的应力集中	(91)
20	“咽喉顶枪”与压杆稳定	(94)
21	飞机也会疲劳	(97)
22	起落架为什么会折断	(103)
23	小变形条件在解决工程实际问题中的作用	(107)
24	神奇的拱结构	(113)
25	薄壳结构与“第三只脚”	(120)
26	鞭梢效应	(123)
27	香蕉球的奥秘	(129)
28	从流线型到边条翼	(133)
29	奇妙的非线性	(137)
	作者简介	(145)

1 接触表面越光滑摩擦力就越小吗

摩擦是人类日常生活和生产实践中存在的最普遍的现象。原始人就已经知道了利用摩擦,钻木取火就是最典型的例子。但人们对于摩擦现象进行科学研究,仅始于15世纪的意大利文艺复兴时代。1508年意大利科学家达·芬奇(Leonardo da Vinci, 1452 - 1519)首先提出了摩擦力的概念。1699年法国科学家阿蒙顿(Amonton, 1663 - 1705)在大量试验的基础上,建立了摩擦第一定律和第二定律,即摩擦力与法向载荷成正比而与名义接触面积(如图1.1中所示的面积 $a \times b$)无关。1780年又一位法国科学家库仑(Coulomb, 1736 - 1806)提出了摩擦第三定律,即摩擦力与相对滑动速度无关。这些定律现在被人们统称为“古典摩擦定律”,或“阿蒙顿—库仑摩擦定律”,或“库仑摩擦定律”。

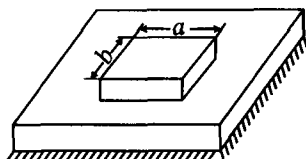


图 1.1 名义接触面积

若用 F_{sm} 表示最大静滑动摩擦力, F 表示动滑动摩擦力, F_N 表示法向载荷,根据库仑摩擦定律有

$$F_{sm} = f_s F_N \quad (1)$$

$$F = f F_N \quad (2)$$

式中, f_s 和 f 分别称为静滑动摩擦因数和动滑动摩擦因数,且 $f_s > f$ 。

库仑认为,摩擦力起因于物体接触表面凸凹不平的互嵌作用。因此接触表面越光滑,摩擦因数就越小,相应的摩擦力也越小。

库仑摩擦定律在当时是符合工程实际的。由于该定律形式简单,使用方便,因此即使是在现代的许多工程技术问题中也仍被广泛使用。

随着科学技术的发展,特别是机械加工水平的极大提高,人们已经可以把物体的接触表面加工得极为光滑。实验表明,当接触表面非常光滑时,随着表面光洁程度的提高,摩擦力不仅不再减小,反而逐渐增大!是什么原因使摩擦力随表面光洁程度的提高而增大呢?

有人作过这样的试验:将两块光滑洁净的铅板压在一起后,采用图1.2所示的方法放置。此时铅板在接触面的法线方向上没有载荷作用,但仅在重力 F_p 的作用下却不能使两铅板相对滑动。这说明两接触表面间同样存在着摩擦力。这种情形下的摩擦力是怎样产生的呢?



科学家们对摩擦机理进行深入研究后发现,库仑摩擦定律是在工业不太发达、机械加工

图 1.2 仅靠重力不能使两铅板相对滑动

工艺比较落后、高速机器尚未出现的条件下产生的,应用刚体力学的凸凹互嵌作用虽然可以粗略地解释当时的摩擦现象,但远远不能说明复杂的摩擦机理。

现代摩擦理论认为,摩擦力的产生主要有两个方面的原因:

(1) 机械作用方面

实际物体表面都是凸凹不平的,有着微观的微凸体和凹穴。

即使是经过精密抛光的金属表面,其粗糙度的高度也不小于 $100\text{\AA}$ ($1\text{\AA} = 10^{-10}\text{m}$)。因此,当两个物体的表面接触时,接触仅仅发生在凸体处,实际的接触面积只占总的名义接触面积的很小一部分,接触处的表面压强很大。于是,在接触的微凸体附近不仅有弹性

变形发生,而且还会产生塑性变形,使表面微凸体相互压入和啮合。同时,由于局部压强很大,直接接触的微凸体间甚至还会发生“冷焊”。当接触表面间发生相对滑动或具有相对滑动趋势时,必须克服弹性和塑性变形的影响,剪断“焊接点”,由此产生的切向阻力就是滑动摩擦力的一部分。

另外,当两接触表面材料的硬度不同时,硬表面上的微凸体会在软表面上犁出一道道细小的沟槽。此时的犁沟阻力也是滑动摩擦力的一部分。

有人在室温条件下将铜质滑块在钢质洁净表面上缓慢滑动。结果发现,界面上出现了明显的“焊接点”被剪切的现象,有些铜的微粒被牢牢地粘附在钢表面上,同时也还有些钢的碎片竟然从钢表面上脱落下来,而且铜质滑动表面上出现了许多清晰的沟槽和滑道。

(2) 分子作用方面

物体分子间的引力和斥力是分子间距离的函数。在两个相接触的物体表面,某些接触点的分子间距很小,它们之间产生斥力;而另一些接触点的分子间距较大,它们之间产生引力。一般来说,总的引力大于总的斥力,它们的合力(不妨称为分子凝聚力)与作用于物体的法向载荷所起的作用相同。当两个接触表面间有相对滑动或相对滑动趋势时,这种分子凝聚力也会产生切向阻力,这种切向阻力同样是滑动摩擦力的一部分。

机械作用和分子作用的比例与接触表面的光洁程度、材料的性质和法向载荷的大小等因素有关。光洁程度高时,分子作用比例大;光洁程度低时,机械作用比例大。对于金属材料,分子作用比例大;对于橡胶和聚合材料,分子作用比例小。

因此,现代摩擦理论认为

$$F_{sm} = f_s F_N + \alpha_s A \quad (3)$$

$$F = f F_N + \alpha A \quad (4)$$

上述公式称为摩擦二项式定律。式中, α_s 和 α 为由分子凝聚力决

定的比例系数, A 为两接触表面的名义接触面积。

应当指出,摩擦是一种十分复杂的物理、化学现象,并伴随有热、光、电等现象发生。摩擦还与接触时间(接触时间越长,摩擦力越大)、环境条件和接触面的相对速度等因素密切相关。严格地讲,任何摩擦试验都是不可逆的和不可重复的。因此,正如1965年的诺贝尔物理学奖获得者费曼(Richard P Feynman)所指出的那样:“要作精确定量的摩擦试验是十分困难的,尽管有经过精确分析的大量工程数据,但对摩擦定律仍然没有分析得很完善。”

摩擦对工程实际的影响正愈来愈受到人们的关注。有人估计,每年全世界生产的能量大约有30%~50%消耗在摩擦上。由于摩擦磨损,英国工业在上个世纪60年代每年损失7亿多英镑,美国在上个世纪70年代每年造成的经济损失高达1000多亿美元。摩擦磨损还会造成灾难性的事故。因此,更进一步地深入研究摩擦机理和规律,利用摩擦机理和规律为人类服务,不仅具有重要的理论意义,而且还必然会带来巨大的经济效益和社会效益。

1966年,由希腊语的Tribos(摩擦)派生出了一个新词——摩擦学(Tribology)。摩擦学一词的问世标志着一门新的边缘学科的诞生。这门学科是研究作相对运动的相互作用表面及其有关理论和实践的科学技术。它涉及物理学、力学、化学、数学、材料科学、机械学和润滑学等众多领域。摩擦学已成为世界上发展最快的应用科学之一。

(本文作者:冯立富 郭书祥)

2 从自行车的前叉谈起

人人都见过自行车,绝大多数人会骑自行车。但是,关于自行车的学问,知道的人就不是很多了。就拿自行车的前叉来说,它的结构有什么特点?恐怕很多人司空见惯,不会留意。为什么要采用这样的结构?大概深入思考过的人就更少了。

如图 2.1 所示,除踏板、齿轮、链条外,自行车由两部分组成:车架与后轮构成自行车的主体部分;把手、前叉与前轮构成使骑车

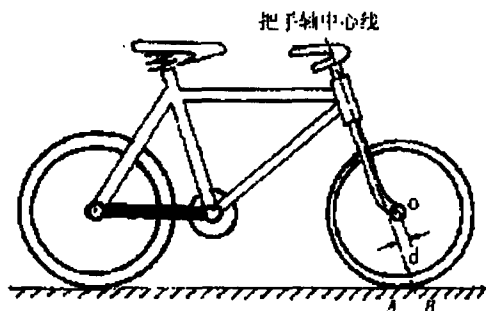


图 2.1 自行车及其前叉

者便于驾驭自行车的关键部分。这两部分可以绕把手轴中心线相对转动。把手轴和前叉从把手开始,向前下方延伸,在与前轮轴连接前向上翘起,从而使把手轴中心线在前轮中心 O 的下面通过,与地面相交于 B

点,而 B 点又在前轮接地点 A 的前面。下面我们来分析这种结构的力学道理。

处于直立状态的静止自行车,如果没有人搀扶,也没有放下支撑架,就会立即向一侧翻倒。但是行驶中的自行车将会怎样呢?假设直线行驶的自行车向右侧倾斜 φ 角,如图 2.2 所示(该图是从前向后看)。这时,作用在前轮中心 O 的前轮重力 G 仍沿铅垂方向,但已偏离此时自行车所在的平面 Π' 。将 G 分解为平面 Π'

内的分力 G_1 和垂直于平面 Π' 的分力 G_2 。 $G_1 = G\cos\varphi$, $G_2 = G\sin\varphi$ 。因为 G_1 与把手轴中心线共面, 都在平面 Π' 内, 所以 G_1 对把手轴中心线的力矩为零。但 G_2 对把手轴中心线却形成力矩 G_2d , d 是 O 点到把手轴中心线的垂直距离 (见图 2.1)。因为 O 点在把手轴中心线的前面, 所以该力矩将使前轮绕把手轴中心线向右偏转, 地面产生向右的摩擦力, 从而使自行车自动由直线运动变为向右的曲线运动。在曲线平动

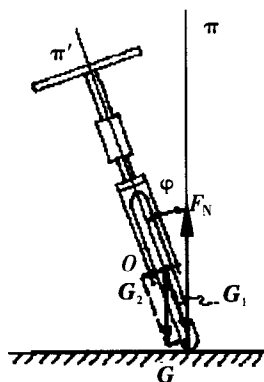


图 2.2 自行车向右倾侧时

参考系来观察, 自行车和骑车者的重心将受到向左的惯性离心力, 阻止自行车继续向右倾倒, 在骑车者的适当操作下, 能使自行车恢复直立状态。在自行车向右倾倒时, 地面在 A 点给前轮的支反力 F_N 铅直向上, 也偏离了自行车所在平面 Π' (见图 2.2), 同理也对把手轴中心线形成力矩。因为 A 点在把手轴中心线的后下方, 所以该力矩也是使前轮绕把手轴中心线向右偏转的。

上述分析说明了自行车前叉结构的作用, 即当自行车向右 (或向左) 倾倒时, 能自动右 (或左) 转弯, 产生惯性离心力, 阻止自行车翻倒。因此, 我们说自行车具有一定的横侧稳定性, 使骑车者便于驾驭, 初学骑车者也能较快地学会, 而不会遇到太大的困难。注意, 上述原理仅在自行车向前行驶时才能发挥作用, 至于杂技演员的定车表演, 则全靠演员高超的平衡功夫和操作技能, 一般人是做不到的。

除了自行车前叉的结构能使自行车具有一定的横侧稳定性外, 车轮的陀螺效应也能增强自行车的横侧稳定性。自行车直线行驶时, 前轮以角速度 $\omega = v/R$ 自转, v 为自行车行进的速度, R 为

前轮半径。前轮自转角速度矢量 ω 的方向水平向左,自转动量矩矢量也沿此方向。当自行车向右倾倒时,倾侧角速度 $\Omega = \dot{\varphi}$ 。对于前轮而言,这是一种强迫进动角速度,其角速度矢量 Ω 的方向水平向前(指向自行车的前进方向)。这时前轮产生陀螺力矩 $M_g = I\omega \times \Omega$,其中 I 是前轮对于前轮轴的转动惯量。若近似认为前轮的质量皆分布在轮缘上,则 $I \approx \frac{G}{g} \cdot R^2$ 。前轮的陀螺力矩 M_g 方向铅直向下,作用在前轮轴上,使前叉连同前轮绕把手轴中心线向右偏转。所以,车轮的陀螺效应增强了自行车的横侧稳定性。

如上所述,自行车前叉的结构和车轮的陀螺效应都能使自行车具有一定的横侧稳定性,但两者的性质是不同的。当自行车倾侧时,由自行车前叉结构所产生的前轮偏转力矩与 $\sin\varphi$ 成正比,而由车轮陀螺效应所产生的前轮偏转力矩与 $\dot{\varphi}$ 成正比。因此,当自行车倾侧角 φ 很小时,由前叉结构所产生的前轮偏转力矩也很小; φ 较大时才会产生明显的前轮偏转力矩。所以,由前叉结构产生的稳定性,反应比较迟缓,而由车轮陀螺效应产生的稳定性则不然。当自行车刚开始倾倒, φ 角还很小时,只要有一定的 $\dot{\varphi}$,就立即产生一定的前轮偏转力矩。当然,即使 φ 角较大时,只要 $\dot{\varphi}$ 为零,车轮的陀螺效应也立即消失。车轮的陀螺效应还与自行车前进的速度 v 成正比,速度 v 较大时,前轮偏转所产生的惯性离心力通常也较大,这说明骑车速度快时,自行车不易翻倒。初学骑车者感到骑得快容易而骑得慢难,其原因就在于此。骑车者还有这样的体会:要让自行车转弯,通过骑车者身体向转弯方向倾侧的办法,比强行转动龙头更有效。这正是利用了自行车倾侧时会自动转弯的性质。

上面讨论的是自行车在行进中的横侧稳定性问题,它是物体平衡与运动稳定性的一个例子。任何物体处于平衡状态或某一运动状态时,都有个稳定性问题。当物体受到小扰动而偏离平衡状

态或原运动状态,随即小扰动消失时,如果存在着某种机制,能使物体保持在原平衡状态或原运动状态附近,而不是偏离得越来越远,我们就称该物体的平衡状态或运动状态是稳定的。否则就是不稳定的。举个最简单的例子,轻质直杆的一端连接一较重的小球,另一端用一固定球铰链悬挂起来,形成一个摆。如图 2.3,此摆有两个平衡位置:一个是小球在最低处;另一个是小球在最高处。显然,前一种平衡状态的重心在悬挂点下面,是稳定的;后一种平衡状态的重心在悬挂点上面,是不稳定的,实际上是不可能维持的。图 2.4 所示的玩具,之所以玩偶能稳定地立在支撑点 O 上,是因为两个配重 A 、 B 使玩偶的重心已处在支撑点的下面,从而平衡成为稳定的。

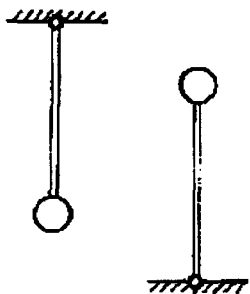


图 2.3 平衡的稳定性

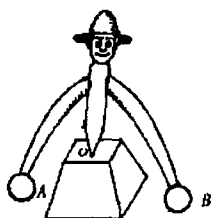


图 2.4 玩偶的平衡

上述实例是一个较普遍的原理的应用。该原理是这样叙述的:若定常约束系统受到的主动力有势,则系统在主动力势能取极小值的那些平衡位置是稳定的。

在工程上,平衡与运动的稳定性常常是一个很重要的问题。下面再来分析几个实际例子。船舶漂浮在水面上,受到水的浮力。根据阿基米德原理,浮力的大小等于与浸没在水中的那部分船舶的体积相等的水的重量,方向铅直向上,作用线通过船舶浸没部分

的形心(几何中心),通常称该点为浮心。当船舶平衡时,浮力等于重力,且浮心 B 与重心 C 在同一铅垂线上,如图 2.5a 所示。由于不可避免地会受到风浪的影响,船舶在停泊或行驶中,总会不断地左右摇摆而偏离平衡状态。这时,浮心与重心不在同一铅垂线上,浮力对重心构成力矩。如果该力矩总是要使船舶回到平衡状态去,那么船舶的平衡是稳定的,反之则是不稳定的。不稳定的船舶当然不能使用。初看起来,似乎只要重心在浮心的下面,船舶就是稳定的;重心在浮心的上面,船舶就不稳定。但是,需要注意,船舶倾侧时,其浸泡在水中的体积形状已经发生变化,浮心应是此时浸没体积的形心 B' ,而不是原来平衡时的浮心 B 了。所以不能简单地把“船舶的重心位于平衡时浮心的下面”作为稳定条件,而应该引入定倾中心的概念。所谓定倾中心,是船舶从平衡状态倾侧一个小角度时,浮力的作用线(通过此时的浮心)和平衡时的浮心与重心连线(称为浮轴)的交点 M ,见图 2.5b。船舶平衡的稳定条件应该是:船舶的重心位于定倾中心的下面。可见,因为定倾中心通常都比浮心高,所以上述稳定条件比“重心在浮心下面”要宽松一些。如图 2.5b 所示,重心虽在浮心上面,但仍是稳定的。船舶除对于左右摇摆的稳定性外,还有前后俯仰的稳定性问题。

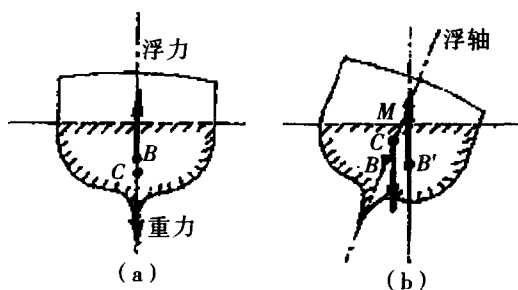


图 2.5 船舶平衡的稳定性

下面再来探讨飞机运动的稳定性问题。飞机运动稳定性问题

是比较复杂的,通常分纵向稳定性和横航向稳定性两大类。在这里只介绍纵向稳定性中的迎角静稳定性问题。所谓迎角静稳定,是指飞机在匀速直线平飞状态下,如果受到扰动,速度不变,迎角偏离原状态,在扰动消失时,飞机具有自动恢复原平飞状态的趋势;否则称为迎角静不稳定。迎角静不稳定的飞机稍受扰动,其迎角就会产生较大偏离,显然将给飞行员控制飞机造成困难。那么,怎样保证飞机是迎角静稳定的呢?这与飞机飞行时受到的空气动力密切相关。空气动力作用在飞机表面各处,构成分布力系。通常将其合力分解成垂直于飞行速度方向的升力和平行于该方向的阻力。阻力对迎角静稳定性影响很小,在此不予考虑。升力的作用点 P 叫做压心。当飞机保持平飞状态时,压心与飞机重心重合,或处于同一铅垂线上,升力等于重力,而且对重心的俯仰力矩等于零,如图 2.6a 所示。但当飞机受到扰动而使迎角变化时,升力的大小要改变,升力的作用点(压心)也会移动,不再与重心重合或处于同一铅垂线上。这时升力将会产生对重心的俯仰力矩。如果该力矩具有使飞机恢复到原平飞状态的趋势,则飞机是迎角静稳定的;否则就是迎角静不稳定的。也就是说,对于迎角静稳定的飞机,当扰动使迎角增大(飞机抬头)时,会自动产生俯仰力矩使迎角减小;当扰动使迎角减小(飞机低头)时,会自动产生俯仰力矩使迎角增大。虽然道理如此简单,但是因为迎角变化时压心要移动,所以将产生什么样的俯仰力矩,不是一目了然的。为了分析这个问题,必须用到一个很重要的概念—焦点。当迎角不太大时,飞机的升力和俯仰力矩都与迎角成线性关系。于是飞机上存在这样一个特殊点 F ,升力对该点的力矩不随迎角变化(如前所述,当迎角变化时,升力对重心或其它点的力矩是变化的)。这个特殊点 F ,称为飞机的焦点。飞机保持平飞时,升力对焦点的力矩等于 $Y_0 d$ 或 Gd (见图 2.6a),其中 Y_0 是平飞时的升力, G 是飞机的重量, d 是飞机重心与焦点之间的距离。因为迎角变化时,虽然升