

MOCA XUE

摩擦学基础

沈心敏 闻英梅 孙希桐 陈燕生 编著
陈燕生 主编

北京航空航天大学出版社

061

摩擦学基础

沈心敏 闻英梅 编著
孙希桐 陈燕生
V陈燕生 主编

北京航空航天大学出版社

内 容 简 介

本书作为高等工科院校机械设计专业本科生的教材,较全面、系统地论述了摩擦、磨损和润滑的基础理论、物理本质及数学力学基础,而偏重于不可压缩流体润滑理论基础。

本书亦可供机械学专业研究生及有关的工程技术和科技人员参考。

摩 擦 学 基 础 MOCA XUE JICHU

编 著 沈心敏 等

主 编 陈燕生

责任编辑 肖之中

*

北京航空航天大学出版社出版
新华书店总店科技发行所发行 各地新华书店经销
北京农业工程大学印刷厂印装

*

787×1092 1/16 印张: 21 字数: 537 千字
1991年6月第一版 1991年6月第一次印刷 印数: 2200 册
ISBN 7-81012-226-8/TH·010 定价: 5.45 元

前 言

摩擦学是近十多年来发展起来的一门边缘学科,包括摩擦、磨损和润滑,涉及诸如机械学、力学、物理学、化学和材料学等多门学科,对发展国民经济和科学技术起着日益重要的作用,已成为国内外不少高等工科院校机械设计性专业的必修或选修课程。

本书作为机械设计专业本科生的教材,旨在使学生通过本课程的学习,奠定并开扩从摩擦学角度设计机械零件所必需的理论基础及知识面,与传统的以强度理论为主要基础的机械零件设计方法相结合,更好地适应现代机械设计发展的需要。

本书以编者在北京航空航天大学讲授流体润滑理论时所用讲义《润滑基本原理》为基础,根据近年来教学经验、科研工作体会及对国内外发展的认识、扩充改写而成。本书较全面地系统地介绍了摩擦学原理,主要论述摩擦、磨损和润滑的基本理论、物理本质及有关的数学力学基础,侧重于不可压缩流体润滑理论。

本书第四、五、六(部分)、七、八、九、十和十六各章由沈心敏编写的,第二、三、十四和十五各章由孙希桐编写的,第十一、十三章和§6.1节由闻英梅编写的,第一和十二章由陈燕生编写。练习题由沈心敏和闻英梅整编。由陈燕生担任主编。

本书第二、三、十三、十四和十五各章,承北京矿业学院研究生部吴永伟审阅,在此表示感谢。

本书审稿人陈田才同志曾提出了许多宝贵意见,谨此一并致谢。

本书目录中带有“*”号的为选学内容。本书亦可供机械类研究生、有关工程技术及研究人员参考。

我们期望能得到读者们的批评和指正。

陈燕生 1988.10

主 要 符 号

A	振幅, 功, 功热换算系数, 面积
A_e	有效承载面积
a	赫兹接触区长半轴
B	轴承主运动方向尺寸, 阻尼器轴承参数
b	赫兹接触区短半轴
C	可压缩性
c	比热, 轴承半径间隙, 常数
D	轴承直径
d	轴颈直径, 阻尼系数
E	弹性模量
E'	综合弹性模量
e	轴颈偏心率
F	力
f	摩擦系数
G	剪切弹性模量
g	重力加速度
H	布氏硬度HB
h	润滑膜厚
I	阻抗矢量
J	热功当量, 泛函
k	热传导系数, 刚度系数
L	润滑膜表面典型尺寸, 轴承宽度, 取样长度 (基本长度)
L/D	径向轴承宽径比
l	平均自由行程
M	质量, 迁移矢量, 力矩
m	质量
m	米
N	法向力
N	牛 (力的单位)
n	转速
O_e	轴承中心
O_i	轴颈中心
P	单位宽度上载荷

P	泊
p	压力 (压强)
p_a, p_0	环境压力, 大气压力
p_v	气穴压力
p_m	平均压力
p_c	油腔压力
p_s	供油压力
Q	热量, 流量
q	单位宽度体积流量, 热量
R	气体常数, 当量曲率半径
R_b	轴承半径
R_j	轴颈半径
r	轴颈半径, 半径
S	轴承特性系数
s	秒
T	温度
t	时间
U	表面 x 向切向速度
u	流体 x 向速度
V	表面法向速度
V_s	纯挤压速度
v	流体 y 向速度, 比容
W	表面 z 向的切向速度, 轴上作用力, 体积力分量
W	瓦
w	流体 z 向速度
X	坐标轴, 体积力分量
x	坐标轴
Y	坐标轴, 体积力分量
y	坐标轴
Z	坐标轴, 体积力分量
z	坐标轴
α	压粘系数
β	温粘系数
γ	角应变
Δ	增量
δ	转子无量纲转速
ε	法向应变, 轴颈偏心率, 小量
ξ	坐标轴

η	动力粘度系数, 坐标轴
θ	角向坐标
λ	膜厚比
ν	运动粘度, 泊松比
ξ	位移, 坐标轴, 椭圆中心坐标
ρ	密度
σ	正应力, 表面组合粗糙度标准差
σ_H	接触应力
σ_s	屈服极限
τ	切应力
ϕ	偏位角
ψ	轴承相对间隙
Ω	进动角速度
ω	轴的角速度, 松弛因子
ω_b	轴承角速度
ω_c	特征值虚部, 自激振动频率
ω_j	轴颈角速度
ω_l	载荷旋转角速度
ω_s	失稳角速度

目 录

主要符号

第一章 导 论

§ 1.1 摩擦学发展简介	(1)
§ 1.2 摩擦学课程性质	(3)
§ 1.3 本教材内容特点	(4)

第二章 表面性质与表面接触*

§ 2.1 表面形貌及其描述	(5)
§ 2.2 表面物理化学性质	(11)
§ 2.3 表面离散接触	(15)
附录2.1 高度频率分布数据	(21)

第三章 摩 擦

§ 3.1 摩擦的分类	(22)
§ 3.2 库仑摩擦定律及其局限性	(22)
§ 3.3 干摩擦	(23)

第四章 流体物理性质

§ 4.1 连续介质概念	(30)
§ 4.2 牛顿粘性定律与流体粘度	(30)
§ 4.3 密度、可压缩性与状态方程	(35)
§ 4.4 热力特性	(36)
附表4.1 常用单位换算表	(37)

第五章 流体润滑基本方程

§ 5.1 连续方程	(39)
§ 5.2 纳维—斯托克斯方程	(40)
§ 5.3 简化 $N-S$ 方程	(48)
§ 5.4 雷诺方程	(50)
§ 5.5 压力边界条件	(61)

第六章 动压润滑性能一维分析

§ 6.1 推力轴承稳态性能	(64)
§ 6.2 径向轴承稳态性能	(73)
§ 6.3 挤压油膜轴承性能	(84)
§ 6.4 径向轴承动态特性	(90)
附录6.1 径向轴承计算的三角函数积分	(98)

第七章 动压径向轴承稳定性

§ 7.1 动压径向轴承的失稳现象	(101)
§ 7.2 油膜失稳机理	(102)
§ 7.3 轴承系统稳定性与失稳界限转速	(105)
§ 7.4 动压径向轴承的抑振方法	(114)
§ 7.5 挤压油膜轴承的阻尼减振	(116)

第八章 动载荷径向轴承*

§ 8.1 瞬态雷诺方程	(119)
§ 8.2 运动方程和油膜反力方程	(121)
§ 8.3 求解方法	(125)

第九章 动压润滑性能二维计算

§ 9.1 二维有限差分法	(136)
§ 9.2 分离变量乘积解	(141)
§ 9.3 变分短校正解*	(143)
§ 9.4 变分长校正解*	(144)
§ 9.5 二维有限元素法*	(146)
§ 9.6 几种解法的比较	(148)
§ 9.7 非圆轴承的间隙函数和雷诺方程	(150)
§ 9.8 有限长轴承稳态性能	(152)
§ 9.9 有限长轴承油膜刚度和阻尼系数计算	(158)
§ 9.10 多油楔径向轴承的刚度和阻尼系数	(162)
附录9.1 变分基础*	(167)

第十章 油膜润滑一些特殊效应*

§ 10.1 润滑膜中热效应	(171)
§ 10.2 紊流润滑	(181)
§ 10.3 表面粗糙度效应	(187)
§ 10.4 润滑油膜的气穴效应	(194)

第十一章 弹性流体动压润滑

§ 11.1	概述	(203)
§ 11.2	线接触弹流润滑的理论基础	(204)
§ 11.3	刚性等粘线接触润滑—马丁 (Martin) 理论	(211)
§ 11.4	弹性变粘线接触润滑—格鲁宾 (Грубин) 理论	(214)
§ 11.5	重载线接触等温全膜弹流数值解—道森 (Dowson) —希金森 (Higginson) 理论	(217)
§ 11.6	线接触弹流润滑工作区与膜厚计算	(221)
§ 11.7	点接触弹流的油膜厚度*	(228)
§ 11.8	弹流润滑牵引力与流变模型*	(233)

第十二章 液体静压润滑

§ 12.1	工作原理和基本性能	(239)
§ 12.2	定压供油圆形平面油垫的刚度	(246)
§ 12.3	圆形平面静压油垫的挤压效应	(256)
§ 12.4	径向多垫静压轴承	(259)
§ 12.5	径向多腔静压轴承	(263)
§ 12.6	动静压混合轴承简介	(268)

第十三章 边界润滑*

§ 13.1	润滑油的组成	(270)
§ 13.2	边界摩擦特点及边界膜	(271)
§ 13.3	边界润滑机理	(272)
§ 13.4	边界润滑膜的强度	(275)
§ 13.5	边界摩擦情况下添加剂的作用	(277)
§ 13.6	影响边界润滑性能的因素	(279)

第十四章 固体润滑与固体润滑剂*

§ 14.1	固体润滑的基本概念	(282)
§ 14.2	常用固体润滑剂及其摩擦机理	(283)

第十五章 磨 损

§ 15.1	粘着磨损	(288)
§ 15.2	磨料磨损	(291)
§ 15.3	表面疲劳磨损	(295)
§ 15.4	腐蚀磨损	(299)

第十六章 理论与试验比较

§ 16.1 油膜压力分布.....	(303)
§ 16.2 气穴效应.....	(304)
§ 16.3 温度分布.....	(306)
§ 16.4 弹流润滑油膜特性.....	(307)
§ 16.5 紊流影响.....	(308)
§ 16.6 动压径向轴承不稳定性.....	(309)
§ 16.7 轴心轨迹.....	(310)
练习题	(312)
参考文献	(323)

第一章 导 论

摩擦、磨损和润滑是相互运动表面之间可能发生的三种既互有联系又各有区别的作用形态。由人类原始的很多简单劳动过程到当代的多种复杂工程系统，特别是机械工程系统，乃至日常生活的许多方面，都普遍地存在着种种不同形式的摩擦、磨损和润滑问题。这些问题的研究和解决，对人类创造光辉灿烂的历史文明和高度发达的现代科技都曾经起到了重要作用，并且，还将对人类未来的科学技术发展和社会文明进步继续地作出重要贡献。

本章将在扼要地回顾摩擦、磨损和润滑发展的基础上，阐明摩擦学课程的性质和任务，介绍本教材的编写目的与内容特点。

§ 1.1 摩擦学发展简介

有史记载，公元前2600年前后，我国有“黄帝作车”，古车出现也就相伴着滑动轴承问世。埃及古建筑中残存的浮雕像表明，约在公元前1900年左右，已载有在道路上倾倒润滑液的情形，以减轻搬运一位坐在大滑板上巨人时所发生的摩擦。后来，在一个漫长时期里，运动副的摩擦、磨损和润滑的应用与研究虽也有一些发展，但进展缓慢。直到十五世纪，达·芬奇 (Leonardo da Vinci) 于1508年第一次提出了，摩擦力与法向载荷成正比，而与接触面积无关。过了近二百年，人们对于达·芬奇的见解似乎有所遗忘，阿蒙顿 (G. Amontons) 于1699年通过试验也发现了这两条摩擦定律。约在1785年，库伦 (C. A. Coulomb) 提出了第三摩擦定律。这三条摩擦定律虽有一些显着例外，但它们也能适用于多种多样的工况条件，所以它们一直为人们所沿用，并统称为阿蒙顿——库伦摩擦定律，即：摩擦力与法向载荷成正比；摩擦力与名义接触面积无关；摩擦力与滑动速度无关。

上述的由阿蒙顿——库伦所研究的摩擦领域，人们今天称之为干摩擦和边界摩擦。这两种摩擦状态具有一个共同特征，即在摩擦过程中同时相伴发生着表面磨损。由于影响磨损的因素众多，其发生和发展过程又十分复杂，所涉及的基本学科还很广泛，所以人们对它的认识至今还不十分清楚，还没有得出一条可靠而又简明的定量的定律可与上述的摩擦定律相比较。

流体粘性定律虽然早由牛顿 (Newton) 于1687年提出，但直到十九世纪末，人们才对流体动压润滑的工作原理有所理解。彼特罗夫 (N. P. Petroff) 于1883年给出了同心运转流体润滑轴承中的摩擦力与轴承运转参数之间的关系。托威 (B. Tower) 也于1883年在他的著名实验中，最早发现了流体动力润滑轴承中会自动形成流体动压力的现象。随即，雷诺 (O. Reynolds) 于1886年，运用粘性流体运动方程和流体连续方程，采用一些简化的物理假定，最先导出了油润滑条件下的流体动力微分方程，即后人称之为的雷诺方程；雷诺还在他著名论文中，近似解得了轴承中的油膜动压力，并与托威实验测量结果进行了比较，一致性是良好的。从而奠定了流体润滑的力学数学基础^[1, 2]。

如把边界摩擦也当作一种润滑状态,则在机械工程等实际中,根据运转条件不同,可能遇到相互运动表面之间存在着三种不同的摩擦润滑状态,即边界摩擦润滑、流体摩擦润滑和混合摩擦润滑。其中,由于流体(液体或气体)润滑具有较低摩擦,并可减轻乃至避免表面磨损,对具有相互运动表面的作用最为有利,因此,在可能的条件之下,当力争实现流体润滑状态。

这样,在已建立了的流体润滑力学基础上,从十九世纪末期到二十世纪中期的约八十年间,即由1886年到1966年间,流体润滑学方面取得了一系列的重要进展。例如:提出了求解雷诺方程的种种近似方法,起先是简化雷诺方程得到的无限宽(长)和无限窄(短)轴承近似解,后又产生了有限宽轴承的一些近似解,现代计算机出现和计算技术进展,又使种种数值解应运而生;油膜或气穴的种种边界条件的提出;气体润滑轴承性能的预计;静压支承技术的工业应用;流体动力润滑径向轴承动态特性概念的形成,及其与转子系统耦合的稳定性分析、临界转速和不平衡响应预计;流体动力润滑径向轴承的非线性瞬态性能分析;阶梯轴承和可倾瓦轴承等多油楔轴承的问世和它们的性能预计;高副线接触和点接触弹性流体动力润滑理论的建立和应用;紊流润滑理论的形成;固体润滑剂的发展和应用;等等^[2]。

在这一时期,摩擦理论和磨损机理的研究也有了一定发展。例如鲍登(F.P. Bowden)等人于1935年开始应用材料粘着概念来进行摩擦和磨损研究,接着又于1950年提出了粘着理论,这对金属材料是比较令人满意的^[3,5]。

虽然摩擦、磨损和润滑的诸多方面在这一时期取得了上述进展,但是,其各方面的研究工作大多是在各自熟悉的学科范围内孤立地进行的,所取得的研究成果也随之分散在甚至局限在机械学的有关分支之中。这对于解决生产实际中本来就属于跨学科的综合性问题,愈益显得不够,影响了理论和实践的更好结合,既妨碍了理论本身的发展及其研究成果的推广应用,也不利于对工程技术人员和学生进行跨学科的摩擦、磨损和润滑教育的实施。

然而,客观上的科学技术和生产实际的发展需要,以及在摩擦、磨损和润滑各方面已经取得的成就,已为形成一门新的跨学科的边缘学科奠定了基础。1966年,乔斯特(H.P. Jost)对英国当时的摩擦、磨损和润滑的教育与研究现状作了调查与分析,在调查组的报告中指出^[3],过去普遍忽视摩擦学或润滑这门学科的主要原因有两个,其一是因为忽视这是一门边缘学科,以致未能注意到它在内容上的多学科之间的相关性和重要性,其二是人们往往把“润滑”一词过于通俗地并局限地理解为“加油工”和“黄油嘴”等类简单概念,而妨碍了人们去充分理解这门学科的经济意义和技术意义。据调查时的偏于保守的估计,仅在英国,如果采用当时拥有的知识去解决工业实际中的有关摩擦、磨损和润滑问题,每年即可节约大约5.15亿英镑。如此巨额的经济效益是惊人的。为了消除上述误解以及由其所带来的不利影响,乔斯特建议将这一跨学科的边缘学科称作摩擦学(Tribology),它是研究相互运动表面之间的作用及其有关理论和实践的一门综合性科学技术。它是摩擦、磨损和润滑的统称,是一门既继承传统却又十分年青的新兴学科。

摩擦学学科的建立,首先推动了研究工作的迅速发展。无论是在国际范围内还是在许多国家中,原来分散在各个分支中分别从事摩擦、磨损和润滑工作的科技工作者,自此之后逐渐地集合了起来,组成了国际性的以及各国自己的摩擦学学会,出版了国际的以及各国自己的摩擦学期刊,举办了一系列的国际性的学术会议,例如以1974年里兹——里昂摩擦学会议

为开端的每两年举行一次的里兹——里昂国际性摩擦学会议，等等，从而使这门新兴学科成为世界上发展最快的学科之一。其重要进展主要有：在多种分析仪器的研制与综合运用基础上，使得磨损研究有了较快进展；表面形貌的研究与处理，以及摩擦副间的表面粗糙度效应（如部分弹流润滑）；边界膜和干膜润滑的构成、摩擦特性及其破裂；热效应；润滑膜的流变效应；金属加工中的流体动力润滑和弹流润滑；新材料和离子沉积等新技术的研究与开拓；两相或多相流润滑效应；人工关节和生物摩擦学；流体密封；润滑液和添加剂，等等。

§ 1.2 摩擦学课程性质

摩擦学学科的建立，也给摩擦学教育以有力的推动。尽管在乔斯特报告以前，在少数国家，如英、法、罗马尼亚等国就已有这方面的职业前教育直至设置了硕士学位，但是对于摩擦学教育的较普遍重视，还是自七十年代才开始的，包括设置摩擦学课程、建立摩擦学专业、培养研究生以及不同层次的有关摩擦学的在职教育。这反映了，摩擦学对国民经济发展的影响日益受到了重视，而这方面的各种层次的人材，却因历史上的原因至今还大量短缺。

就机械设计专业本科生的“机械零件”或“机械设计”课程而言，它们是在一个相当长的历史时期内逐步地发展和形成的。早期，机械零件的结构、材料和尺寸，主要是由其整体强度来决定的，而它们的相对运动表面的磨损和胶合失效的预防，也是借用一些简单的强度公式形式来表达的。除了在滑动轴承一章中，简略地介绍了液膜润滑机理属于摩擦学范畴以外，可以说强度设计（包括疲劳强度、刚度和稳定性）贯串于整个课程。甚至可以说，机械设计专业的课程设置基本上是以力学强度为主线的。但是，现代机械的发展状况和趋向，诸如机械化和自动化生产的规模更大和程度更高，机械及其零组件的工作环境也更加严酷恶劣（如高温、低温、真空、幅射、特殊介质等工况）等等，表明对机械寿命、效率和可靠性等性能的要求也愈来愈高。而且，投资愈大和生产率愈高的机械设备，一旦发生故障或损坏，其所造成的损失也愈大。近二十年来的粗略调查数据表明，许多机械的百分之七十左右的机械零件（包括一些工夹具零件）的报废是由于其表面损伤和磨损所造成的，而出自零件强度，尤其是出自零件体积强度不够而引起报废的只占较小比例。当然，不能由此就说机械的强度设计不重要了，而应当说，这正是由于机械强度设计不论在基础理论上还是在应用上，都已日臻完善并已为设计人员所掌握，同时也应看到，随着机械学及其有关学科的发展，仍然会提出新的强度设计问题。但是，由前面所述也能清楚看到，摩擦学不仅自身在基础理论上还有许多还不够成熟之处，而且就连摩擦学中已有的成就也远未被机械工程中各层次的有关设计人员和管理人员所掌握，显然，这也就阻碍着摩擦学的研究及其成果的推广应用。乔斯特报告中说错误估计摩擦、磨损和润滑科学在机械设计中和维修中的重要性已造成惊人损失，并指出只要应用已有的有关知识，就可每年节省数以亿（英磅）计的开支，其说服力及其引人关注之处就在于此。

概略而相对孤立地说来，在许多情形下，随着机械工况及其性能的发展，机械设计的重点表现出某些转移现象。例如，早期的机构设计以保证机械能够按一定规律去运动，到后来的强度设计以确保机械能安全地工作，现在则已经面临着第三领域，即摩擦学设计，以进一步保证机械的长寿命、高可靠度和优良运转性能。

显然,单就机械设计专业来说,以力学强度为主线的课程设置已不能适应这一发展,需从专业计划整体上做一定调整。至少像现在这样把摩擦学知识分散在多门课程中(何况有的知识尚没有落脚处),既不完备又有重复,且某些观点又互不一致,这样的局面应当首先尽快改变。为此,拟在机械设计专业中设置新的课程——摩擦学,与传统的机械原理和机械零件等课程相辅相成,以全面地提高学生的设计能力和技术素质。当然,对于已经从事机械设计和维修管理的工程技术人员,也拟给予必要的普及性的在职补课。但应再次强调指出,摩擦学是一门跨多学科的边缘学科,只有对机械设计专业的培养计划进行必要的调整、改革和充实,才能造就出必要数量和质量的新一代的机械设计专门人材。

§ 1.3 本教材内容特点

基于以上认识,尝试编写一本为机械设计专业大学本科生的摩擦学教材,着重进行有关摩擦、磨损和润滑方面的基础教育,取名为《摩擦学基础》,以区别于以应用为主的“摩擦学设计”方面的教材。这样,本教材在内容取舍和编写上具有如下特点:

1. 本教材将着重讨论不可压缩流体润滑的基本理论,同时对摩擦和磨损也介绍了必要的基本知识和基本理论。

2. 着重于摩擦学中有关基本物理概念的建立,基本工作原理的论证,以及一些重要公式的推导,同时对有关工程应用也给予了必要的注意。

为此,鉴于润滑流体物理性质和粘流润滑基本方程,是整个流体润滑基本理论的基础,因此本教材将给以较详细表述和推导,并注意其中所引入的一些物理假定和有限用条件,注意基本方程在一些典型运转条件下的应用。

在本教材有关章节中,如径向轴承在楔形效应和挤压效应下的轴承性能计算,以及径向轴承的动态特性和非线性瞬态性能分析,都着力介绍了一维短轴承近似解析解。该解法虽是近似的有一定局限性,但它不失为说明轴承润滑有关物理概念和工作原理的一种得力方法。

一维短轴承解在一定条件下虽然也有足够精度,但介绍的目的是不要局限于这些解的本身,所以为了适应广泛工程应用之需要,为了进一步阐明有关润滑力学的基本理论,本教材还介绍了一些典型的二维数值计算方法。

本教材除了以较大篇幅介绍了各种典型的液体动压润滑之外,为适应工程应用之需要,也对液体静压润滑的基本理论作了较为深入的阐述。

近几十年来,弹性流体动力润滑理论有了迅速进展,并受到广泛应用和深入研究,本教材将对其基本内容给予一定的介绍。

为了更好地理解与掌握润滑的基本理论,本教材还专门编写一章,介绍有关理论分析计算结果与试验测量结果之间的比较。

3. 为适应机械设计中摩擦学设计之开拓的需要,本教材还在有关章节中介绍了当今发展起来的一些特殊的润滑效应问题,如紊流润滑、热效应、表面粗糙度效应和气穴效应等,以给予这些方面的一些基本理论和基本知识,以及处理问题的方法。

本教材还编入了我们近年来在教学实践中所累积起来的一些练习题,它们对训练学生掌握与应用有关基础理论,将是十分有益的。

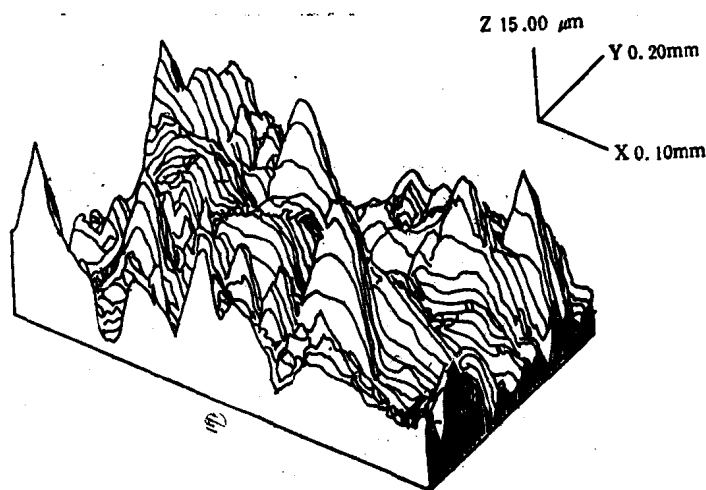
第二章 表面性质与表面接触

摩擦、磨损和润滑都是发生在相互运动的固体表面处，因此，为了认识、研究与利用相互运动表面之间的各种摩擦学现象与机理，进行正确的摩擦学设计，需要深入地了解固体的表面形貌、表面物理、化学性质及在一定载荷下表面接触状态。

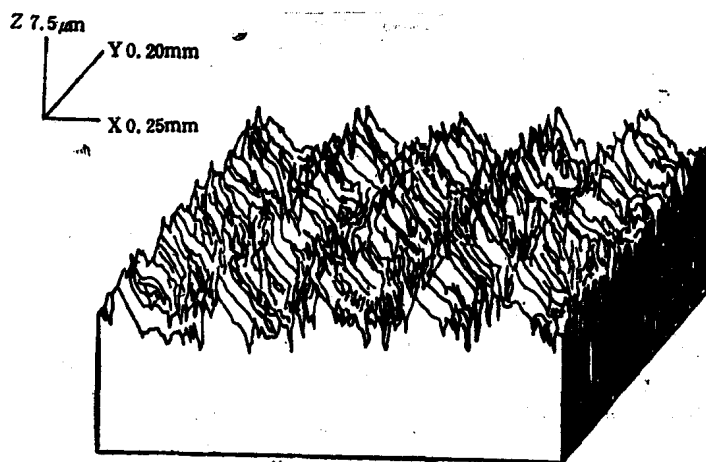
§ 2.1 表面形貌及其描述

真实的固体表面没有几何上的平面。工程中所用的固体表面，更非是绝对的平滑，其表面几何形状特征可能象地球表面一样复杂，是由许许多多不规则的大小不同和形状各异的凸峰和凹谷构成的，如图2.1(a)。即使是经过超精研磨等机械加工的固体零件表面，也都布满了不规则的凸峰和凹谷。图2.1(b)和(c)，它们分别是用触针式轮廓仪与计算机相连，并辅之以精密工作台，而得到的平铣表面和磨削加工表面的凸峰和凹谷的高低、宽窄分布的三维形态图。而图2.1(d)则给出了表面的三维形态等高线图。

上述的表面几何形态，称之为表面形貌，即是指固体表面几何形态特征的详细图形，是由形成表面的最后加工方法的特性和其他因素所决定的。相互运动表面的表面形貌对于表面之间的润滑状态、摩擦力的大小、耐

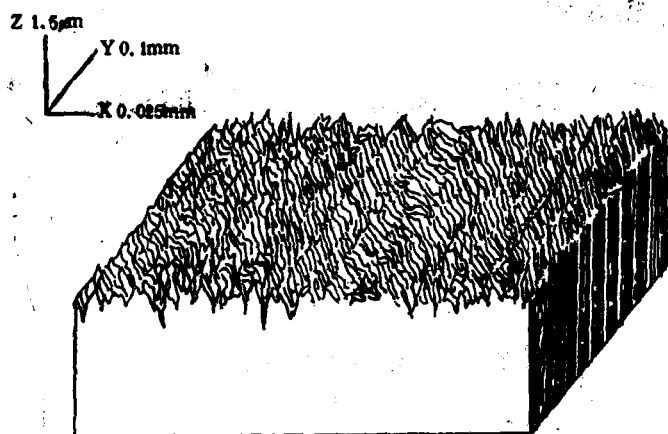


(a) 电火花加工表面

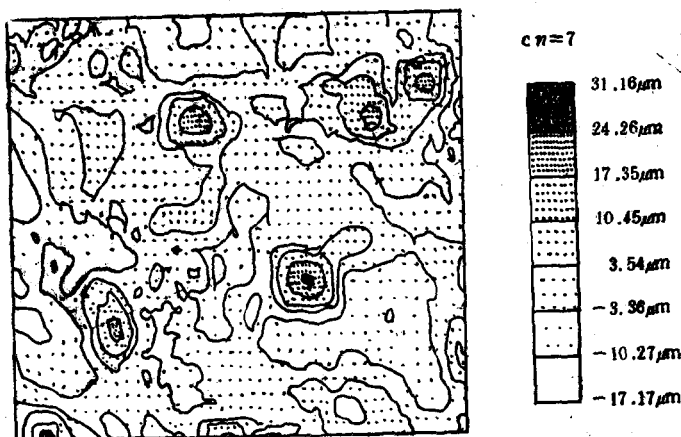


(b) 平铣表面

图2.1 表面三维形貌图谱 [96]



(c) 磨损表面



(d) 表面等高线图

图2.1 表面三维形貌图谱 [96]

磨损性能、接触刚度、疲劳强度、配合性质、测量精度、密封性能、乃至对流体的阻力和表面涂附性能等都有至关重要的影响^[4]。

目前在取得表面形貌三维图形方面，除用上述的触针式轮廓仪与计算机连接绘图之外，还有一种方法，即是利用光学仪器来观察测量。三维图形能够较全面地提供出有关表面几何形状特征的较完整的信息，诸如表面上微凸体分布、高度、间距、斜率和曲率等。显然，就工程实用来说，上述表面形貌三维图形的取得并非简单，于是目前常取一个典型的截面内的二维表面轮廓曲线来条件性地表述实际的表面形貌。图2.2给出一个截面上的二维表面轮廓曲线。

该图提供了表面形貌中的三个主要成分，即

(1) 表面粗糙度。指细密空间不规则性，其高度、宽度和方向形成了表面的主要结构。