

摩擦学

基础及应用

Mocaxue Jichu ji Yingyong

刘启跃 王文健 何成刚 编



西南交通大学出版社

摩擦学基础及应用

刘启跃 王文健 何成刚 编

西南交通大学出版社

· 成 都 ·

图书在版编目 (C I P) 数据

摩擦学基础及应用 / 刘启跃, 王文健, 何成刚编.
—成都: 西南交通大学出版社, 2015.1
ISBN 978-7-5643-3612-7

I. ①摩… II. ①刘… ②王… ③何… III. ①摩擦 -
理论 IV. ①O313.5

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2014) 第 300367 号

摩擦学基础及应用

刘启跃 王文健 何成刚 编

责任编辑	王 旻 孟苏成
封面设计	米迦设计工作室
出版发行	西南交通大学出版社 (四川省成都市金牛区交大路 146 号)
发行部电话	028-87600564 028-87600533
邮政编码	610031
网 址	http://www.xnjdcbs.com
印 刷	成都中铁二局永经堂印务有限责任公司
成品尺寸	185 mm × 260 mm
印 张	12.5
字 数	311 千字
版 次	2015 年 1 月第 1 版
印 次	2015 年 1 月第 1 次
书 号	ISBN 978-7-5643-3612-7
定 价	36.00 元

图书如有印装质量问题 本社负责退换
版权所有 盗版必究 举报电话: 028-87600562

前 言

摩擦学是研究做相对运动的相互作用表面间的摩擦、磨损和润滑，以及三者间相互关系的理论和实践的一门科学技术。在实际生产生活中，摩擦无处不在，故摩擦学在工程领域的应用十分广泛。摩擦学研究的内容包括摩擦、磨损和润滑等三大方面，且三者之间存在紧密的关联。随着研究的深入发展，摩擦学研究进一步拓展了研究内容和对象，形成了新的摩擦学研究领域，如纳米摩擦学、生物摩擦学、仿生摩擦学、极端工况下摩擦学等。摩擦学的研究成果对提高机器工作的可靠性、促进工业节能减排起到了不可替代的作用。

本书共 8 章，主要围绕摩擦、磨损与润滑这三大摩擦学研究内容进行介绍；第 1 章绪论，第 2 章固体表面的接触，第 3 章摩擦原理，第 4 章磨损原理，第 5 章润滑理论，第 6 章至第 8 章主要介绍工业摩擦学与设计、润滑材料及摩擦磨损试验与测试技术。本书既可作为高等院校本专科生、研究生和实验员的课程教材，也可作为摩擦学研究工作者和工程技术人员的参考书。

在本书编写过程中，引用和参考了部分文献资料，在此对这些文献资料的作者表示感谢。

由于编者水平所限，书中不妥与疏漏之处在所难免，欢迎广大读者给予批评指正。

编 者

2014 年 10 月

目 录

第 1 章 绪 论	1
1.1 摩擦学简介	1
1.2 摩擦学研究对象与内容	3
第 2 章 固体表面的接触	7
2.1 固体表面形貌	7
2.2 固体表面性质	12
2.3 固体表面接触	22
2.4 Hertz 接触理论	28
第 3 章 摩擦原理	37
3.1 摩擦的概念与分类	37
3.2 摩擦理论	38
3.3 滑动摩擦	46
3.4 滚动摩擦	51
3.5 影响摩擦的因素	67
第 4 章 磨损原理	70
4.1 磨损过程	70
4.2 磨损的基本类型	71
4.3 磨损理论	95
4.4 影响磨损的因素	101
4.5 减小磨损的途径	104
第 5 章 润滑理论	109
5.1 引 言	109
5.2 Reynolds 方程	111
5.3 Reynolds 方程的简化	116
5.4 推力轴承	119
5.5 径向轴承	126
5.6 弹性流体动压润滑	135
5.7 流体静压润滑	142
5.8 边界润滑	145

第 6 章 工业摩擦学与设计.....149

6.1 工业摩擦学问题149

6.2 摩擦学设计152

6.3 摩擦副材料设计153

6.4 减摩耐磨材料设计156

第 7 章 润滑材料.....159

7.1 润滑油.....159

7.2 润滑脂.....169

7.3 固体润滑材料176

第 8 章 摩擦磨损试验与测试技术181

8.1 摩擦磨损试验的分类.....181

8.2 摩擦磨损试验机182

8.3 摩擦磨损的检测与分析188

参考文献193

第 1 章 绪 论

1.1 摩擦学简介

1.1.1 摩擦学定义

20 世纪 60 年代中期,受英国政府的委托,H.P.Jost 对英国各工业部门进行摩擦学方面的调查,于 1966 年发表了著名的《关于英国润滑教育与研究的现状和工业需要的报告》。该报告明确指出,英国政府如果能够加强摩擦学的科研与教育,充分运用这方面的知识和研究成果,在降低摩擦损耗和因摩擦引起的能源消耗、延长机器寿命、减少易损件的更换、节约润滑材料、提高设备可靠性等方面,英国工业每年可节约资金费用相当于英国国民生产总值的 1%。由于这份报告在经济上的重要性,引起了世界各国科学界的重视,并由报告中的“摩擦学”来对这门学科进行命名,并由此形成了一门新兴的学科“摩擦学”。

摩擦学 (Tribology) 一词是什么意思呢?由英文词组成来看,Tribos 是希腊字根,意为“摩擦”,而 logy 是英文后缀,意为学科、科学,其直译为“摩擦的科学”。这是自 H.P.Jost 发表报告后才有的新词,其确切的定义:“摩擦学是研究做相对运动的相互作用表面及其有关的理论和实践的一门科学技术。”在中国科学技术名词审定委员会审定公布的“机械工程名词”中将摩擦学定义为:“研究做相对运动物体的相互作用表面、类型及其机理、中间介质及环境所构成的系统的行为与摩擦及损伤控制的科学与技术。”

众多的工程系统(如机器、车辆等)的技术功能取决于运动过程,所以摩擦学在工程领域的应用是十分广泛的,它与工程中的许多问题相关。如寿命、可靠性、质量、节约能源、节省材料、维修工作量、地基基础、人工关节以及自然现象中的滑坡、泥石流等。由于其运用的广泛性及其研究内容的性质决定了摩擦学又是一门涉及多学科的边缘学科,其涉及的主要学科为物理学、化学、机械工程、断裂力学、材料力学、流体力学等。

1.1.2 研究摩擦学的意义

虽然摩擦学形成的历史较短,然而人类自觉运用摩擦学知识的历史却很悠久。在古代文明中,摩擦学知识的运用使人类社会得以迅速发展。人类的祖先自从学会靠摩擦来取火后,就告别了生吃食物的习惯,使人类向文明社会跨进了一大步。随后出现的车轮,是人类历史上最伟大的发明之一,它运用滚动来代替滑动,从而大大减小了摩擦阻力,为人类的来往交

流及运输发展提供了必需的工具，亦为人类的商业社会发展提供了依据。

在科学技术高速发展的今天，摩擦学的运用领域更为广泛。目前，世界上的能量 $1/3 \sim 1/2$ 以各种方式最终消耗于摩擦，因摩擦导致的损坏也是机械失效的主要原因，为修复和更换因摩擦损坏的零部件，要花费很多资金和人力，特别是现代大型工业，因维修或失效停机造成的损失更为惊人。如果能够很好地应用摩擦学的知识，则在降低能量消耗，延长机器寿命等方面可节约出大量费用。继英国之后，美国、日本等西方工业强国分别对各自国家进行了摩擦学应用技术的调查，发现如能应用摩擦学的现有知识，每年可节约的资金可达国民生产总值的 1% 左右。我国也于 1984 年对国内冶金、石油、煤炭、机械、铁道 5 个行业做过调查，统计测算表明，应用现有摩擦学知识和技术，我国每年可节约的资金占国民生产总值的 1.4% 左右。发展中国家节约潜力更大是因企业管理水平还不高，许多生产节约指标还低于西方工业发达国家。

摩擦学知识可利用在尖端科学领域中解决一些问题，如航天、真空、高温、核电及深水作业等。此外当今机械产品在国际市场上的竞争力都是以效率高、精度保持好、使用可靠、寿命长为号召的，这些要求均与摩擦学知识相关。因此，开展摩擦学的研究，以正确控制摩擦（增摩或减摩）和磨损，合理选择润滑材料及润滑方式，才能达到节约能源，提高机器设备的使用寿命、可靠性和生产效率，以及满足特殊工况的要求，这无疑将对国民经济的发展带来巨大的经济效益。

1.1.3 摩擦学发展简史

人类运用摩擦学知识的历史悠久，然而摩擦学的理论发展却是近几个世纪的事。

人类对摩擦现象早有认识，并能用来为自己服务，如史前人类已知钻木取火。《诗经·邶风·泉水》已有“载脂载辇，还车言迈”的诗句，表明我国在春秋时期已较普遍地应用动物脂肪来润滑车轴。应用矿物油作润滑剂的记载最早见于西晋张华所著《博物志》。书中提到酒泉延寿和高奴有石油，并且用于“膏车及水碓甚佳”。但长久以来摩擦学的研究进展缓慢。直到 15 世纪，意大利的列奥纳多·达芬奇才开始把摩擦学引入理论研究的途径。阿蒙顿在 1699 年和库仑在 1785 年根据大量的试验先后制订了有关固体摩擦的一些法则。阿蒙顿和库仑的试验结果都表明，摩擦力与法向载荷成正比，他们把摩擦力与法向载荷之比称为“摩擦系数”。试验表明，摩擦系数的大小与几何接触面积无关，这就是人们后来称之为摩擦学的两个公理。

20 世纪 40 年代 Bowdon 与 Tabor 发现表面几何接触面积与两个表面上微凸体接触形成的“真实”接触面积相差很大。他们应用了这种观察结果并假设了在微凸体接触点上作用有分子黏附力，因而就能解释阿蒙顿和库仑的经验法则了。目前这一黏着理论已被大家公认为是一种摩擦理论。

在科学基础上，开始研究磨损还是最近的事。1938 年，Seibel 对早期系统磨损研究进行综合评述，他根据磨损外部条件的不同性质，对磨损形式进行了初步的分类。第二次世界大战以后，Burwell 根据物体磨损的物理机理进行了分类，把常见的磨损机理归类为 4 种磨损机理，即黏着磨损、磨粒磨损、磨蚀磨损、疲劳磨损。这一分类方法普遍为人们所接受。

流体润滑理论的数学基础是由雷诺于 1886 年在推导了著名的雷诺方程时奠定的。在此基础上人们先后发展了流体动压润滑理论、静压润滑理论、弹性流体动压润滑理论等。Stribeck 详细研究了各种工作变量（如载荷、速度）对滑动轴承和滚动轴承的润滑和摩擦的影响。这成为了润滑理论的基础。Hardy 于 1922 年研究了滑动表面的某些部分可能只有一层极浅的润滑油膜，这时润滑剂的作用决定于润滑剂的化学成分，而不是其黏度，由此形成了边界润滑理论。

由摩擦学发展史可知，过去人们不太重视这门学科，一方面是因这是一门边缘学科，分散于各个学科中，虽有一些研究，但缺乏系统性。另一方面更主要的原因是随着生产技术的进步，人们才逐渐认识了这门学科在经济领域的巨大潜力，才加以重视与研究的。自从摩擦学作为一门独立的学科创建以来，它在工业和交通运输业中对国民经济的发展和科技进步所发挥的重要作用及其巨大的经济意义已越来越为人们所认识。然而，摩擦、磨损和润滑是自然界（包括人体）普遍存在的现象，大至宇宙，小至分子、原子，只要有相对运动的界面，这些现象都会发生。因此可以推断，摩擦学将会在更广泛的范围内促进其他学科的发展，如天体物理、地球科学、核子物理、医学工程、运动力学等。一旦这一点被人们所充分认识，摩擦学必将进入一个新的发展阶段。

1.2 摩擦学研究对象与内容

从学科性质上看，摩擦学具有以下 3 个特点：

（1）摩擦学是一门在某些传统学科的基础上综合发展起来的边缘学科。摩擦、磨损和润滑涉及科学技术的极其广泛的专业领域，包括力学、物理学、化学、热力学、传热学、表面科学以及机械工程和材料科学与工程等多种学科。

（2）摩擦学是一门具有很强应用背景的横断学科。摩擦学的产生主要是以节约资源、节省能源、提高效益等近代实用性很强的课题为背景。然而，它的应用背景已远远超出了机械行业以及工业和交通运输业的领域，因而产生了生物摩擦学、地质摩擦学和生态摩擦学等新的学科分支。

（3）摩擦学是一门学科边界还没有完全界定的新兴学科。随着科学技术的发展，摩擦学与一些先进的技术和方法相结合，并且不断地向其他学科渗透，从而又逐步形成新的学科分支，如摩擦化学、摩擦学设计以及陶瓷摩擦学、高分子材料摩擦学、空间摩擦学、核反应系统摩擦学和纳米摩擦学以及计算摩擦学等。

摩擦学研究涉及领域广泛，主要研究内容可以归纳为以下几个方面：

1.2.1 摩擦与磨损

摩擦是物体做相对运动时，在其接触表面间产生的阻碍切向运动的现象。物体表面的形

貌、表面物理、化学性能，以及相对运动时的工况条件都会影响到摩擦特性。研究摩擦起因、摩擦过程中的物理化学现象是一个十分重要的内容。

磨损引起机器零件的失效。目前，对磨粒磨损、黏着磨损机理的认识比较一致、对微动磨损、浸蚀磨损、腐蚀磨损、表面疲劳磨损的机理还有不同的看法。有关磨损机理、磨损规律和磨损失效的研究有待进一步深入。

1.2.2 流体润滑

现代大型机械、轧钢机、精密机械广泛采用了流体动压与流体静压润滑。有关的理论计算由于计算技术的限制，在过去都做了许多简化，建立雷诺方程后，又做了简化，导致计算结果与实际情况有较大出入。例如高速滑动轴承，流体的流动状态已经从层流过渡到紊流状态；重载轴承及反形接触滚动摩擦表面润滑状态的研究。必须考虑润滑油的压黏特性和接触表面的弹性变形，甚至支座的弹性变形，由此产生出弹性流体润滑理论，当然同时还应考虑表面粗糙度的影响。另外高速轴承出现的油膜振荡现象提醒人们，不仅要考虑轴承的静特性，还要研究其动特性，并要把轴承和转子等作为一个完整系统去观测。

1.2.3 边界润滑

流体动压润滑轴承在启动和制动过程中不可避免地要出现边界润滑。低速重载相互滑动的表面也会处于边界润滑状态。因此，润滑剂与金属表面材料的物理化学作用、边界膜的形成及特性、表面处理新工艺的研究已成为本学科的一个重要分支。

1.2.4 摩擦材料

摩擦副材料的物理机械性能很大程度上决定了物体接触面之间的摩擦特性，研究高性能的耐磨、减摩和摩阻材料以满足不同的机械要求，是现代工业对摩擦学提出的一个重要课题。例如载重 250 t 以上的汽车要可靠制动，需要摩擦系数大、强度高的摩阻材料；而大型闸门的滑道，要求强度高、摩擦系数小的减摩材料。还必须合理地选择摩擦副的材料匹配，以获得最佳的技术和经济效果。

1.2.5 润滑剂与润滑技术

20 世纪 70 年代中期，对润滑剂和添加剂的作用、机理开展了较深入的研究，取得很大进展。当前要进一步提高润滑剂的性能，研制适合各种特殊工况下的润滑剂、合成润滑剂及起各种作用的添加剂。应注意高水基液压介质和润滑剂的研制和应用，固体润滑剂有良好的减摩和耐磨性能，工作温度范围广，适合应用于环境特殊的条件（如放射性、高真空环境等），也是研制的方向之一。

润滑方式很重要。实践已证明正确的润滑方式对形成良好的润滑状态、节约润滑剂有很大影响。现已在重要的润滑系统中配置必要的故障分析报警装置,提高润滑系统可靠性。

1.2.6 摩擦学测试技术

摩擦学的研究正在从宏观到微观、从静态到动态、从单因素到多因素、从定性到定量,需要观察 10^{-10} m ($\text{\AA}$) 级的微观表面形貌的微观测试技术和对大型设备及系统运行进行监控的测试方法和仪器。现已研制出了各种磁性收集器,光谱分析仪,放射性同位素分析仪,X 射线衍射仪 (XRD),电子扫描显微镜 (SEM)、原子力显微镜 (AFM) 和摩擦力显微镜 (FFM) 等。

从摩擦学的研究对象和该学科所担负的任务看,它的发展绝不会只是依附于并从而被限制在机械领域之内。根据人类社会发展和世界科学技术发展的总趋势,摩擦学在 21 世纪的重大突破将很可能发生在机械领域之外。其发展具有以下 3 个特征:

(1) 摩擦学的发展将越来越多地超出机械领域,并与新兴学科和高新技术实现大跨度的交叉与综合,形成新的学科生长点。

(2) 摩擦学的基本科学问题的研究将从宏观向微观和宇观两头扩展,并取得重大突破。

(3) 摩擦学的主要研究方法将从对面向现象与面向摩擦学元件的简化的定性描述向面向摩擦学系统的系统分析与定量化发展。

近年来,已经采用先进的仪器设备,观测相对运动的固体表面原子间的作用力以研究摩擦的起因;研究了在高真空 (10^{-7} Pa) 条件下,黏着和摩擦的化学效应;研究了磁流体、磁粉和磁力-空气摩擦理论与技术及其产品;已开发出利用电压控制摩擦力以减少机械摩擦的新技术,即电控摩擦技术。用磨损图对材料分类取得了进展,在钢铁材料磨损图的基础上,已建立了切削刀具材料、铝合金、陶瓷、铝-石墨复合材料、聚四氟乙烯等多种材料以及耐磨镀层零件的磨损图。

在摩擦学元件方面也取得了可喜的进展,如空气轴承、永磁轴承、铁粉-流体动压密封和轴承以及电磁轴承的开发,后者既可用于直径为 1 m 的涡轮发电机组和高速磨床,也可用于宇宙飞船、工业用泵和马达。摩擦学材料在医学工程上的应用(如人工髋关节、膝关节和心脏瓣膜)的进展也很引人注目。随着计算机数值分析技术的发展,采用数据处理多重网格技术,使各种制造方法形成的各种固体表面模式可作为计算的输入数据,从而改善了对粗糙表面润滑接触的凸起特性的预测方法,并深化了表面形貌对润滑有效性影响的认识。

随着研究的深入发展,摩擦学研究进一步拓展了研究内容和对象,形成了新的摩擦学研究领域。

1. 纳米摩擦学或微观摩擦学

纳米摩擦学 (nano tribology) 或微观摩擦学 (micro tribology) 是在原子、分子尺度上研究物质相互接触,以及在滑动过程中表面的微观摩擦、磨损与润滑行为及其机理。主要研究

内容包括纳米薄膜润滑和微观摩擦磨损机理，以及表面和界面分子工程，即通过材料表面微观改性或分子涂层，或者建立有序分子膜的润滑状态，以获得优异的减摩耐磨性能。这一领域已引起了世界上许多国家摩擦界的广泛兴趣，但目前大都还停留在基础性研究阶段。

2. 生物摩擦学 (Biotribology)

生物摩擦学是从生物系统问题出发，研究生物器件的摩擦学行为，并进行模拟、应用的一门学科。从生物摩擦学的内涵上看，它不仅涉及机械学、材料学、力学、物理学、化学等，而且涉及生物学、生物医学工程等，具有强烈的学科交叉性。生物体内存在大量的摩擦学现象。目前，生物摩擦学的研究主要集中在美、英、日、中等几个国家，其研究内容大都是超高分子量聚乙烯 (UHMWPE) 制成的各种人工关节 (包括膝关节、髋关节、肘关节等) 以及与关节相连的软骨组织的摩擦、磨损与润滑问题。

3. 极端环境下的摩擦学

极端环境工况即所谓的“三高、一特殊”工况。“三高”是指以高速、高低温、高载荷为代表的摩擦副的苛刻运行条件；“一特殊”是指摩擦副所处的特殊环境或介质情况，如空间环境、核辐射环境、特殊气氛、强场或强粒子流环境、特殊液体介质和多相流介质环境等。这方面的研究目前主要涉及航天飞机、低温涡轮泵、高温高速转子轴承以及在高真空、高负荷、核反应堆和可控核聚变等条件下机械元件的摩擦磨损与润滑、密封和寿命预测等方面的研究。

4. 仿生摩擦学

仿生摩擦学属机械仿生范畴，是机械学科、材料学科、生命学科等多学科交叉渗透的产物。研究内容包括认识和理解生物表面润湿、黏附、摩擦、润滑、磨损的生物物理机制，包括不同工作条件下仿生原则的建立和仿生设计的实现等。从研究对象看，涉及固-固界面、固-液界面和固-气界面间的相互摩擦作用和由此产生的磨损。

第 2 章 固体表面的接触

摩擦学主要研究对象是做相对运动的相互作用表面上发生的各种现象。因此,深入认识和了解固体表面形貌、表面物理、化学性质及表面接触状态,对正确应用摩擦学设计具有十分重要的意义。

2.1 固体表面形貌

2.1.1 表面形貌

任何机械零件的表面,即使是经过精加工的表面,也会存在不同程度的几何形状误差。这种误差体现了固体表面的几何特性,它是固体表面形貌的数量特征,并直接影响到摩擦表面的相互作用。在制造机器零件的切削加工过程中,由于机床-工件-刀具这一工艺系统的误差、振动和零件材料组织的缺陷等,加工表面均有一定的形状误差、波纹度和表面粗糙度。从宏观上看,已加工表面似乎很平整,但在显微镜下观察,却好似大地表面一样,有起伏的山谷,这就是零件的真实表面形貌,它由表面形状误差、波纹度和表面粗糙度组成,如图 2-1 所示。

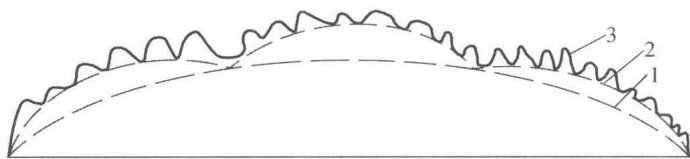


图 2-1 固体表面微观几何特征

1—表面形状误差；2—波纹度；3—表面粗糙度

1. 表面形状误差

机器零件的表面多数由简单的平面和回转表面构成,国家标准中已规定了形状和位置公差。在制造机器零件的过程中,机床-工件-刀具系统的误差及弹性变形,导致表面形状误差,数值由最大偏差表示,一般用平面度、圆度和圆柱度等误差来表示。表面形状误差主要是造成零件表面配合中的间隙不均匀,导致接触受力不均,局部过度磨损。

2. 波纹度

波纹度是制造机器零件过程中,机床-工件-刀具系统的振动和机床传动件的缺陷周期性

重复在机器零件已加工表面上的结果。波纹度是有规则的、周期性的表面宏观误差，通常用波距和波高表示，其数值与加工方法有关。表面波纹度减少了实际接触面积，导致部分接触表面压力增强，磨损加剧。

3. 表面粗糙度

表面粗糙度是在制造过程中，切削刀刃在已加工表面上残留的刀痕或切屑导致的表面层塑性变形和金属撕裂、工艺系统的高频振动等原因而引起的误差。表面粗糙度影响了固体表面的真实接触面积，对接触表面摩擦、磨损有重要的影响。

表面粗糙度是反映加工零件表面质量的一个重要参数。零件被加工成型之后，表面上都会留下反映其加工方法特点的表面纹理，这除了影响零件的外表装饰以外，更重要的是关系产品的摩擦学性能，例如，两个相对滑动和滚动摩擦表面的耐磨性、配合表面的密封性、连接件的接触刚度、液体和气体在壁面的流动性等。

表面粗糙度只是由工艺方法引起的，许多工艺因素能对表面粗糙度产生影响，如刀具或磨粒本身留下的痕迹，它对某些工艺方法呈周期性，而对另一些工艺方法则更多呈现随机性。另外，由于加工中材料的撕裂、刀瘤的碎屑以及刀尖形状的微观不平度，也形成比较精细的结构。波纹度的产生可归因于个别的机械特性，例如，砂轮的不平衡、刀具进给螺纹的不规则性以及机械刚性或阻尼不足等。形状误差通常是由于工件的支撑装置的刚性不足，在加工力作用下产生弯曲或偏斜而引起的，刀头或工件导向导轨不直也会引起形状误差，热处理造成材料变形也可能使表面弯曲。

形状误差是表面的总体形状与理想表面形状的偏离，一般由机器或工件的挠曲或导轨误差引起。波纹度是表面粗糙度叠加其上的表面特征成分，由机床或工件的挠曲、振动、颤动、材料应变等原因所引起的。表面粗糙度由加工方法产生的，是加工介质（如切削刀具、磨粒、电火花）留下的微观不平度。从表面几何结构的形式来分析，形状误差、表面波纹度、表面粗糙度三者的波动间距有很大差别，因此曾有人提出以间距大小来区分它们，间距小于 1 mm 者属于表面粗糙度，间距在 1 ~ 10 mm 内按表面波纹度处理，间距大于 10 mm 者为形状误差。这种划分方法的严谨性有待进一步研究，因为不可能只用一个间距数值作为所有表面的区分界限，只有从内涵特征上来区别粗糙度、波纹度和形状误差才合理有效。

2.1.2 表面形貌参数

固体表面的微观几何形状统称为表面形貌，工程上表面形貌特征常采用表面粗糙度。图 2-2 是表面粗糙度廓形图，基准线 Ox 是轮廓的算术平均中线， A_1 ， A_2 是轮廓峰顶线， B_1 ， B_2 是轮廓谷底线， l 为取样长度，轮廓偏距 y 是在测量方向上轮廓线上的点与基准线之间的距离。国家标准规定可用以下参数表示表面粗糙度：微观不平度 R_z 、轮廓算术平均偏差 R_a 和轮廓最大高度 R_y 。

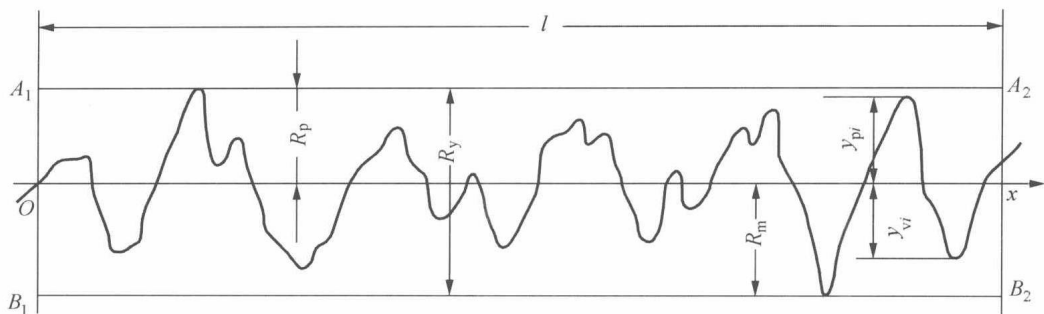


图 2-2 表面粗糙度廓形图

1. 微观不平度 R_z

微观不平度也称为微观不平度十点平均高度，是在取样长度 l 内，5 个最大的轮廓峰高的平均值与 5 个最大的轮廓谷深的平均值之和称为 R_z 。

$$R_z = \frac{\sum_{i=1}^5 y_{pi} + \sum_{i=1}^5 y_{vi}}{5} \quad (2-1)$$

式中， y_{pi} 为第 i 个最大的轮廓峰高； y_{vi} 为第 i 个最大的轮廓谷深。

2. 轮廓算术平均偏差 R_a

在取样长度内，被测轮廓线上各点到中线距离的绝对值总和的算术平均值，称为轮廓算术平均偏差 R_a 。

$$R_a = \frac{1}{l} \int_0^l |y(x)| dx \quad (2-2)$$

近似为

$$R_a = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |y_i| \quad (2-3)$$

3. 轮廓最大高度 R_y

轮廓最大高度 R_y 是在取样长度内轮廓峰顶线和轮廓谷底线之间的距离。也有用轮廓均方根偏差 R_q 表示表面粗糙度

$$R_q = \sqrt{\frac{1}{l} \int_0^l y^2(x) dz} \quad (2-4)$$

在摩擦磨损计算中，仅用表面粗糙度还不足以说明表面粗糙的确切情况，如斜率、形状和波距等，因而不完全反映表面的接触特性，有可能出现轮廓最大高度 R_y 一样，而有不同波距的表面，显然这些表面的接触特性不同，至少接触点的数目不会完全一样。又如图 2-3 所

示是具有相同轮廓算术平均偏差 R_a 的表面，接触点和真实接触面积完全不同，因此除了用表面粗糙度参数外，还应补充表 2-1 所示的附加表面参数。其中，轮廓支承曲线（或称支承面曲线）表征了轮廓支承面与幅度分度之间的关系。为了绘制支承面曲线，可以在表面粗糙度轮廓图上，分成一系列平行于中线的水平线，其中任意一条离中线的距离为 z 的平行线与轮廓表面相截如图 2-4 所示，各峰截线长度之和为

$$\eta_p = b_1 + b_2 + \cdots + b_i + \cdots + b_n \tag{2-5}$$

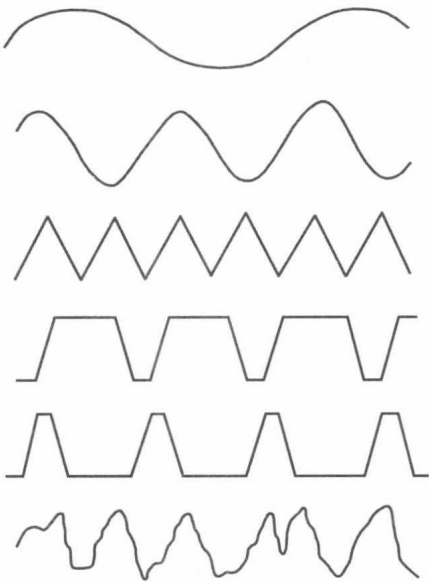


图 2-3 轮廓算术平均偏差不同的不同表面

表 2-1 摩擦磨损计算采用的表面粗糙度和波纹度的附加表面参数

参 数		定 义
粗糙度	轮廓最大峰高（填平深度） R_p	轮廓中线到峰顶线间的距离
	轮廓峰顶部平均曲率半径 r	在取样长度范围内，5 个最高轮廓峰的顶部曲率半径的平均值
	轮廓峰的平均倾角 φ	在取样长度范围内，轮廓峰的侧面与中线间的平均倾角
	轮廓支承曲线参数 v, δ	按相对数值的轮廓支承曲线的近似幂参数
波纹度	最大波峰高 H_b	在波形图基线长度 L 范围内，峰高线与波谷线间的距离
	平均波距	在基线长度 L 范围内，波峰间的算术平均距离，基线长 $L \geq 5S$
	峰顶曲线平均曲率半径	在基线长度范围内，峰顶平均曲率半径数值

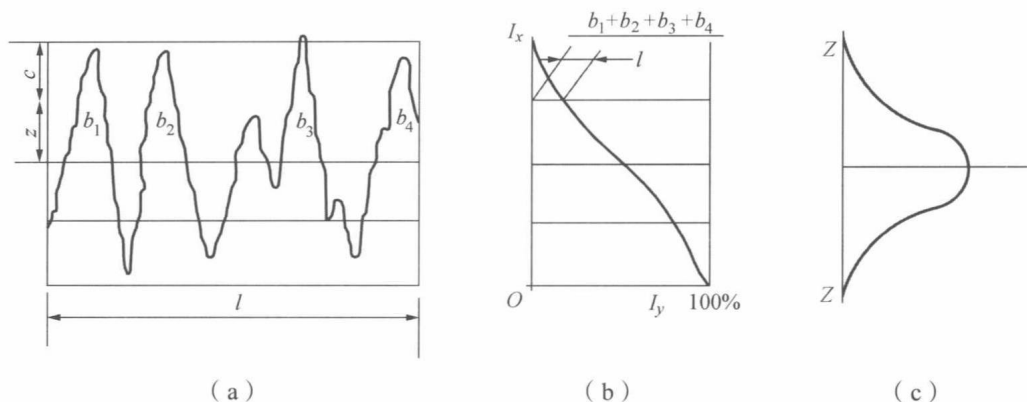


图 2-4

横坐标是峰截线长度和 η_p 与所测轮廓取样长度 l 之比 i_y ，纵坐标是截线距轮廓峰顶线的距离 c 与轮廓最大高度 R_y （或轮廓最大峰高 R_y ）之比 i_x 。大多数加工表面的轮廓偏距（纵坐标 z ）的变化，含有周期变化和随机变化两部分。大量的测试结果表明，工程上见到的表面轮廓的纵坐标分布曲线是高斯曲线。而支承曲线本身也就是纵坐标分布曲线的累积分布，支承面曲线主要用于计算真实接触面积。

峰截线长度和 η_p 的增加除与各个峰截线长度 b_i 有关外，还与接触轮廓高峰的数目有关。当轮廓的最低峰进入接触面后，随着接触面的接近量 c 值增加，峰截线长度和 η_p 就只与各个峰截线长度 b_i 有关。

2.1.3 确定表面形貌的方法

表面粗糙度构成了表面的微观形貌，测定的方法很多，有光切法、光干涉法、电子显微镜观察和表面轮廓仪测量法。

1. 光切法

光源发出的光线经过狭缝后，以一定的倾斜角度投射到机器零件的表面上，在与投射方向对应的反射方向上观察，则可看到反映表面粗糙度的弯曲不平的光带。按照光切法设计的光学显微镜只能观察表面的很小一部分，不能对表面全貌进行观察，计算平均算数偏差也较麻烦，实际工作中很少采用。

2. 光波干涉法

光波干涉法是将一个光源发出的光，用分光的办法分成两束（或多束）光，其中一束光投射到表面上，再经不同的光路使两束（或多束）光相互叠加，由于光程差而产生双光束（多光束）干涉现象，被测表面的轮廓表现为干涉条纹的弯曲程度。利用光波干涉法制成的多束光干涉显微镜测量精度较高，也限于对局部表面的观察。