



高等学校教材

# 摩擦学概论

河海大学 王学浩 主编

7



高等学校教材

摩擦学概论

河海大学 王学浩 主编

水利电力出版社



B719029

高等学校教材

概率学概论

河海大学 王学清 主编

\*

水利电力出版社出版

(北京三里河路6号)

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

水利电力出版社印刷厂印刷

\*

787×1092毫米 16开本 10.75印张 237千字

1994年10月第一版 1994年10月北京第一次印刷

印数0001—2000册

ISBN 7-120-01230-4/TH·16

定价2.10元

## 内 容 提 要

本书系统简明地介绍了工业领域涉及的摩擦学内容,着重分析相互运动表面间的摩擦、磨损和润滑,阐明其基本机理。简要介绍正确控制摩擦、防止和减少磨损、合适选择润滑材料和润滑方式,以及试验和测试方法。

本书作为工科院校机械类专业及相近专业摩擦学选修课教材,也可供有关工程技术人员参考。

## 前 言

机器要作功,必存在着运动。两接触表面之间作相对运动时,会出现阻碍物体运动的摩擦,消耗能量并引起磨损,而润滑则是减少摩擦和降低磨损的有效措施。因此,摩擦、磨损与润滑之间存在着内在的密切联系,涉及到物理、化学、冶金、机械和材料等学科。由于多学科交叉性、认识上的局限性和研究的分散性,长期影响摩擦、磨损与润滑作为一门学科的发展。直到1966年在著名的乔斯特报告中才首次出现了“Tribology”(摩擦学)一词,并强调了摩擦学作为一门综合性边缘学科在机械工程中的普遍性、重要性和复杂性。现在,摩擦学已成为国内外发展最快的学科之一。

随着现代工业的发展,各工业发达国家都很重视摩擦学的研究,并大力开展摩擦学的教育,在高等学校开设了摩擦学选修课程,编写了教材。现有的教材从不同的角度阐述了摩擦学的原理,但篇幅均较大。为满足高等工科院校机械类专业开设少学时摩擦学选修课的需要,编写一本用于少学时,内容上又尽可能系统、全面的摩擦学概论教材就显得十分必要。

本书是根据能源部教育司《一九九〇~一九九二年高等学校教材编审出版计划》,为工科院校机械类专业编写的学时数为30的摩擦学选修课教学用书。全书共分十章,第一章、第二章、第七、八、九、十章由河海大学机械学院王学浩编写,第三、四、五、六章由葛洲坝水电工程学院姜国方编写,由王学浩担任主编工作,西安交通大学朱均教授负责全书的审稿。

本书部分章节曾由主编在1981~1983年为河北机电学院机械系高年级学生开设摩擦学选修课时使用,这次编写重新作了调整和改写,限于编者的水平,取材未必恰当,全书安排不一定合适,一定存在不少缺点和错误,诚恳地请读者指正。

本书在编写过程中,得到朱均教授热情地帮助,仔细地审阅了初稿,提出了宝贵的意见。书中引用了某些著作中的成果,谨向有关著者表示谢意;对成书过程中,帮助编者绘图、抄稿的同志致以衷心的感谢。

王学浩

1990年1月25日

# 目 录

## 前言

|                         |     |
|-------------------------|-----|
| 第一章 绪论 .....            | 1   |
| 第一节 摩擦学发展简史 .....       | 1   |
| 第二节 研究摩擦学的意义及内容 .....   | 2   |
| 第三节 摩擦学的研究方法 .....      | 4   |
| 第二章 表面形貌和表面性质 .....     | 6   |
| 第一节 表面形貌 .....          | 6   |
| 第二节 金属表面的性质 .....       | 10  |
| 第三节 表面层的真实接触 .....      | 12  |
| 第三章 摩擦 .....            | 18  |
| 第一节 摩擦的概念与分类 .....      | 18  |
| 第二节 经典摩擦定律 .....        | 19  |
| 第三节 各种摩擦理论概述 .....      | 20  |
| 第四节 减摩和摩擦材料及其摩擦特性 ..... | 28  |
| 第四章 磨损 .....            | 37  |
| 第一节 概述 .....            | 37  |
| 第二节 磨损的五种基本型式 .....     | 39  |
| 第三节 磨损计算简介 .....        | 61  |
| 第四节 耐磨设计和减少磨损的方法 .....  | 53  |
| 第五节 摩擦磨损试验简介 .....      | 59  |
| 第五章 润滑材料 .....          | 63  |
| 第一节 润滑油 .....           | 63  |
| 第二节 润滑脂 .....           | 72  |
| 第三节 合成润滑油(脂)简介 .....    | 76  |
| 第四节 固体润滑材料简介 .....      | 77  |
| 第六章 润滑方式与润滑装置 .....     | 78  |
| 第一节 几种典型零部件的润滑 .....    | 78  |
| 第二节 润滑系统 .....          | 81  |
| 第七章 流体润滑基本方程 .....      | 85  |
| 第一节 润滑流体膜 .....         | 85  |
| 第二节 流体润滑的基本方程 .....     | 86  |
| 第三节 雷诺方程的解 .....        | 92  |
| 第四节 能量方程 .....          | 96  |
| 第八章 流体动压润滑 .....        | 101 |

|      |                    |     |
|------|--------------------|-----|
| 第一节  | 流体动压润滑轴承的基本形式      | 101 |
| 第二节  | 推力轴承               | 102 |
| 第三节  | 径向轴承               | 112 |
| 第四节  | 油膜稳定性              | 120 |
| 第五节  | 挤压膜润滑              | 122 |
| 第六节  | 流体动压轴承设计           | 124 |
| 第七节  | 滑动轴承性能试验           | 127 |
| 第九章  | 流体静压润滑             | 130 |
| 第一节  | 概述                 | 130 |
| 第二节  | 静压推力轴承计算           | 134 |
| 第三节  | 静压导轨设计             | 141 |
| 第四节  | 静压径向轴承设计           | 145 |
| 第十章  | 弹性流体动压润滑           | 152 |
| 第一节  | 概述                 | 152 |
| 第二节  | 考虑压粘特性的雷诺方程        | 154 |
| 第三节  | 各种弹性流体润滑理论的膜厚公式及应用 | 157 |
| 参考文献 |                    | 163 |

# 第一章 绪 论

## 第一节 摩擦学发展简史

机器要作功，就要运动。在两个相互接触的物体作相对运动的过程中，接触表面间出现阻碍物体切向运动的摩擦现象，使机器所传递的一部分能量在不断克服摩擦阻力的过程中消耗掉，同时还引起材料表层磨损，机件发热，进而影响整个机械系统的动态特性。

人类很早就注意到了摩擦现象，据史料介绍，早在二、三万年前，我国的柳江人、河套人和北京周口店山顶洞人就已经掌握了穿孔和磨削技术，可能已经学会摩擦取火。公元前1711~1066年的商代，出现了马车，圆形的车轮把重物对地面的滑动摩擦转化为滚动摩擦，并采用光滑的车轮轮毂轴承孔支承车轴，大大提高了运输的效率，达到省力省功的目的。又据考古发现，在埃及出土的约公元前2400年的古墓里，刻有古埃及人劳动场面的浮雕，奴隶们在搬运巨型雕像时，有人往底板下加类似润滑剂的东西，这大约就是世界上第一个有记载的润滑工人。这些都是利用润滑减小摩擦或者把滑动摩擦改为滚动摩擦实现减轻劳动强度、提高生产效率的原始方法。象自然界中一切其他事物一样，摩擦现象也有其有利的一面，首先，人类依靠摩擦行走；面近代的摩擦传动、各类机械的制动、摩擦焊接等都是利用摩擦来完成的，可以说，摩擦在自然界普遍存在，人类的生存、生活、发展都离不开它。

摩擦现象虽然早就被人类认识到，但从科学的角度去研究还是近几百年的事。达·芬奇（L. da. vinci）是世界上第一个对摩擦现象提出科学论断的科学家，他指出：摩擦力与法向载荷成正比；与名义接触面积无关。1699年阿芒顿（Amontou）也发表了这两条有名的摩擦定律。1780年库仑（Coulomb）提出了第三条摩擦定律：摩擦力与速度无关。这三条著名的摩擦力定律作为公理沿用至今。

流体润滑理论的建立较晚，1886年雷诺（O. Reynolds）对流体动力润滑作了清晰的理论解释，从理论上证明了轴颈在轴承中旋转时会产生流体动压。

摩擦是一种复杂的现象，对其研究涉及到物理、化学、冶金、机械、材料等学科。在很长时期里，人们对摩擦现象的认识和研究却分散在摩擦、磨损、润滑三个范畴中，使得摩擦学作为一门学科的发展十分缓慢。

随着机械工业的发展，高参数机器的不断问世，涉及到摩擦学领域中的实际问题日益增多，因此从本世纪40年代以来，世界各国都重视了摩擦、磨损和润滑方面的研究。1940年，苏联召开了第一次“全苏机器中的摩擦与磨损”会议，以后，美、英、西德等工业发达国家分别召开了这方面的学术会议，出版了大量会议论文集和专业刊物、著作，推动了摩擦、磨损与润滑的研究和发展。

然而，在很长的一段时期里，各行各业的研究工作者只从自己从事工作的那一个侧面狭义地理解问题，看不到摩擦现象的普遍性、复杂性、多学科性，妨碍了从更广泛的范围

和多种现象的内在联系中去进行深入的研究,妨碍了人们认识摩擦学这门学科的经济意义和技术意义,不能不影响到摩擦学作为一门学科的发展。

1964年,受英国政府的委托,乔斯特(H.P.Jost)对英国各工业部门进行了摩擦学方面的调查,于1966年2月发表了著名的“关于英国润滑教育与研究的现状和工业需要的报告”,报告明确地指出了摩擦学在科学、技术、经济中的重要地位;分析了摩擦学长期被忽视,发展缓慢的原因;强调摩擦学具有多学科性,是一门边缘学科。报告建议用“Tribology(摩擦学)”一词来说明这门学科的内容,并对摩擦学作出以下定义:

**研究作相对运动的相互作用表面及有关理论和实践的科学技术。**

摩擦学一词包括摩擦、磨损与润滑几方面的内容。

乔斯特在报告中还指出,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五亿一千五百万英镑费用,相当于当时英国国民经济总值的1%。我国通过摩擦学工业应用调查后指出,本世纪末,通过摩擦学技术达到每年节约400亿元人民币是完全可能的,与所付出的投资之比,大约为45:1,效益十分可观。

乔斯特的报告不仅引起了本国政府的重视,在世界上也引起很大的反响,摩擦学作为一门边缘学科得到广泛重视。1973年,在英国伦敦召开的第一届欧洲摩擦学会议上,成立了国际摩擦学学会,此后,欧洲摩擦学会议每两年举行一次。国际摩擦学会议每四年举行一次。与此同时,美、日、西德等国家相继成立了摩擦学会,越来越多的专家从事摩擦学方面的研究工作,使分散在各个有关学科中的研究逐渐统一起来,摩擦学的研究进入了一个新的阶段。

我国的摩擦学研究起步较晚,1962年在兰州召开了全国第一届摩擦、磨损和润滑研究工作报告会。1977年起开始派出人员参加国际摩擦学会议,并在会上宣读了我国对摩擦学研究的论文,受到与会各国代表的好评。1979年在广州召开了第二届全国会议,会上决定在机械工程学会下成立摩擦学会,各省、市、自治区也相应成立或筹建摩擦学分会。在全国摩擦学学会的组织和推动下,1982~1985年在全国范围内开展了摩擦学工业调查与应用活动,为节约能源,提高机械寿命和产品质量,开发新产品,取得了明显的技术、经济效益;组织出版了《润滑与密封》、《摩擦与磨损》等专业性刊物,编写了各层次的摩擦学培训教材;积极开展国内和国际间的学术交流。现在,在全国一部分高等院校、科研单位和企业已建立了摩擦学方面的专业研究室,进行教学培训和科研工作,并取得了一系列科研成果,解决了若干生产实践中的难题,摩擦学在我国得到了迅速地发展。

## 第二节 研究摩擦学的意义及内容

### 一、研究摩擦学的意义

现代工业和科学技术,要求机器向大功率、高速度、高精度和自动化程度高、使用寿命长、可靠性好的方向发展,其中涉及到摩擦学的问题很多。

首先在能耗方面。据估计,目前世界上几乎有 $1/3 \sim 1/2$ 的能源是以各种形式的摩擦损失消耗在各类机械传递能量的过程中,例如,1966年,英国的汽轮发电机组消耗在机组轴承中的能量约为发电能力的 $0.8\% \sim 1\%$ ,即1000MW的机组,要损耗 $8 \sim 10$ MW,每年需多烧20000t煤,折合400000英磅,当前国外机组轴承损耗已降到 $0.3\%$ ,而我国为 $0.5\% \sim 0.7\%$ 。其他行业中的摩擦损失更可观,纺织机械占 $80\%$ ,现代化汽车占 $20\%$ ,涡轮喷气发动机占 $2\%$ ,由此可见,通过改善摩擦节约能源降低损耗是大有潜力的。

其次,机器作相对运动时,除了产生摩擦阻力,引起系统发热,同时还发生零部件的磨损。据统计,机器零件的失效, $80\%$ 是由磨损引起的。按磨损性质分,农机具失效有 $40\%$ 是因磨粒磨损引起的, $\frac{1}{3}$ 的锅炉管道失效是浸蚀磨损引起的。据介绍,国民经济收入中有 $50\%$ 用于补偿磨损和类似磨损,如英国国民经济总产值的 $30\%$ 用于更换磨损与磨蚀所造成的损坏件。事实上,由于对偶表面的磨损而需要更换的配件生产所用的钢材,往往与生产主机所需用的钢材相等,例如1974年我国汽车产值16.6亿元,耗用钢材270000t,而配件产值14亿元,耗用钢材230000t。其他如金属刀具的磨损,英国每年消耗硬质合金刀具2000万件,价值5千万英镑,美国仅在1971年用于刀具磨损的费用约400亿美元,由此可见磨损造成的损失多么惊人。

大型机器的工作可靠性对摩擦学提出了许多研究课题,例如1972年,在日本由于汽轮发电机轴承的油膜振荡,引起机器飞裂,造成重大损失。我国的大型汽轮发电机组也发生过同样问题,后果很严重。

重视摩擦学的研究,改进对摩擦学的教育,利用摩擦学技术,正确控制摩擦和磨损,合理选用润滑材料及润滑方式,不仅可以提高机器设备的寿命和可靠性,满足特殊工况的要求,还可以达到节省能源、材料,为国民经济的发展带来巨大的经济和技术效益。

## 二、摩擦学的研究内容

摩擦学是涉及数学、力学、物理学、化学、冶金学、机械工程等多学科的一门新兴的边缘科学。实用性强,内容繁多。其主要研究内容可归纳为六个方面。

### 1. 摩擦与磨损

摩擦是物体作相对运动时,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、表面层的机械-物理性能、表面生成膜的性质,以及相对运动时的工况条件(速度、压力、温度、润滑状况、环境因素等)都会影响到摩擦特性。为了揭示摩擦的本质,必须对摩擦起因、摩擦过程中的物理化学现象进行深入地研究。

磨损引起机器零件的失效。但是,迄今为止国际学术界还没有一个公认的磨损定义,看法很多。其中对磨粒磨损、粘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。

### 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,在过去都作了许多简化,建立雷诺方程后,又作了简化,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粘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。

### 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。

### 4. 摩擦材料

摩擦副材料的物理机械性能在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350t以上的汽车要可靠的制动,需用摩擦系数大、强度高的摩擦材料;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。

### 5. 润滑剂与润滑技术

70年代中,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。

### 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,深入进行,需要观察 $10^{-10}$ m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射线荧光分析仪,电子扫描显微镜及铁谱分析仪等。

## 第三节 摩擦学的研究方法

摩擦学作为一门新兴的跨学科的边缘科学,过去那种分散、孤立、静止的研究方法已不再适用,必须从系统、动态、多因素综合地加以研究,解决其中的问题。

### 一、用摩擦学的观点研究

必须运用摩擦学的观点研究和解决摩擦学领域中的问题。例如,解决界面上在允许承载下的摩擦磨损问题,可通过各种途径如采用摩擦系数低的材料;合理选用润滑剂;改变

摩擦状态及利用各种场力使界面脱开等。在设计时满足载荷、速度、环境因素及限制约束条件，以找到满意的答案。

## 二、必须用系统的观点研究

为了全面考虑摩擦过程中的各个因素之间的关系及环境的作用，必须用系统的观念研究。一个系统包含了系统的构成和功能两大部分，系统的构成指构成系统的元素、元素的特性及元素间的关系；系统的功能指系统的输入、输出及功能转变。

元素的性质决定于材料及其特性。在内部各个因素变化时，元素之间相互影响，产生材料损失和能量损失，进而影响整个系统的功能变化。当能量损失和材料损失很小时，输入和输出的关系不变，系统的结构是稳定的；当摩擦副的能量损失和材料损失增大时，则系统的结构产生变化，从轻微磨损到急剧磨损，导致系统功能丧失。

运用系统分析方法，可以进行失效分析、材料选择和状态监测，但由于摩擦的复杂性，在理论上和应用方面都有待研究和发展，以得到满意的分析结果。

## 三、用现代测试方法研究

现代测试方法已渗透应用到摩擦学领域中的各个方面，

- (1) 摩擦表面微观分析方法；
- (2) 磨损微粒分析技术；
- (3) 摩擦过程参数的现代测量技术。

## 第二章 表面形貌和表面性质

在摩擦区域内,除载荷、速度、温度和周围环境介质的影响外,相互作用表面的表面形貌、表面层的构造及物理-机械性质对摩擦过程特性也有很大的影响。

### 第一节 表面形貌

#### 一、表面形貌

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,有起伏的山峦和峡谷,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。



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(GB 1182~1184-80)中已规定了形状和位置公差。平面的形状公差由直线度、平面度确定;圆柱面的形状公差用直线度、圆度、圆柱度、线轮廓度和面轮廓度确定。

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。

形状误差使个别地方的峰顶发生接触,对接触特性有很大影响。

#### 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复映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、峰和谷的大小几乎相等的表面宏观误差,通常用波距和波高表示,其数值与加工方法有关,一般波距在1000~10000 $\mu\text{m}$ 范围,而波高在几个微米到40 $\mu\text{m}$ 范围内。波距与波高的比值是波纹度的重要特性,它在40到几万范围内变化。

波纹度影响表面接触特性,减少实际接触面积,导致真实接触表面压强增加,加快磨损。

#### 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切削层,及切削时刀具与已加工表面的摩擦;切屑分离时的塑性变形和金属撕裂、工艺系统的高频振动等原因

产生的。沿切削方向度量的微观几何误差称纵向表面粗糙度，沿垂直于切削方向测得的表面微观几何误差称横向表面粗糙度。国家标准 GB1031-83 规定了表面粗糙度的参数及数值。

表面粗糙度影响机器零件的耐磨性、接触疲劳强度、配合性质和接触刚度等。

固体表面的微观几何形状，即形位公差、波纹度和表面粗糙度的高度统称为表面形貌。

## 二、表面形貌参数

工程上常采用表面粗糙度表征表面形貌参数。图2-2是表面粗糙度图廓形图，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：微观不平度十点高度 $R_z$ 、轮廓算术平均偏差 $R_a$ 和轮廓最大高度 $R_y$ 。

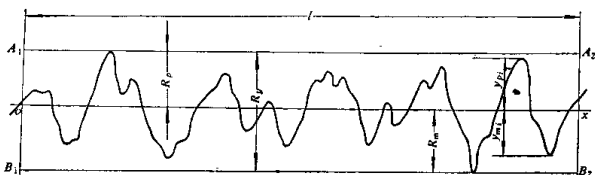


图 2-2 表面粗糙度图廓形图

微观不平度十点高度是在取样长度内 5 个最大的轮廓峰高的平均值与 5 个最大的轮廓谷深平均值之和

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

式中  $y_{pi}$ ——第  $i$  个最大的轮廓峰高；

$y_{mi}$ ——第  $i$  个最大的轮廓谷深。

轮廓算术平均偏差 $R_a$ 是在取样长度内轮廓偏距绝对值的算术平均值

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

近似为

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

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 $R_q$ 表示表面粗糙度的，

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

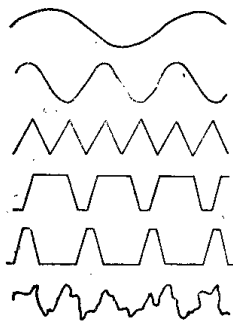


图 2-3 算术平均偏差相同的不同表面

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 $R_z$ 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一样。又如图 2-3 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 的附加参数, 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布之间的关系。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距离为 $z$ 的平行线与轮廓表面相截如图 2-4, 各峰截线长度之和为

$$\eta_z = b_1 + b_2 + \dots + b_i + \dots + b_n \quad (2-5)$$

横坐标是截线长度和 $\eta_z$ 与所测轮廓取样长度 $l$ 之比 $t_z$ , 纵坐标是截线距轮廓峰顶线的距离 $c$ 与轮廓最大高度 $R_z$  (或轮廓最大峰高 $R_p$ ) 之比 $x$ 。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。而支承面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。

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                                              |
|---------------------|--------------------------------------------------|
| <b>粗 糙 度</b>        |                                                  |
| 轮廓最大峰高 (填平深度) $R_p$ | 轮廓中线至峰顶线间的距离                                     |
| 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 $\varphi$  | 在取样长度范围内, 轮廓峰的侧面与中线的平均倾角                         |
| 轮廓支承曲线参数 $\nu, b$   | 按相对数值的轮廓支承曲线的近似每参数                               |
| <b>波 纹 度</b>        |                                                  |
| 最大波峰高 $H_B$         | 在波形图基线长度 $L_B$ 范围内, 峰高线与波谷线间的距离                  |
| 平均波距 $S_B$          | 在基线长度 $L_B$ 范围内, 波峰间的算术平均距离, 基线长 $L_B \geq 5S_B$ |
| 峰顶曲线平均曲率半径 $r_B$    | 在基线长度范围内, 峰顶平均曲率半径数值                             |

峰截面总长度 $\eta_p$ 的增加除与各个峰截长度 $b_i$ 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后, 随着接触面的接近量 $c$ 值增加, 峰截面总长度 $\eta_p$ 就只与各个

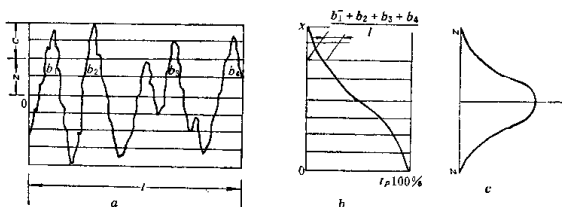


图 2-4 支承面曲线的确定  
a. 表面轮廓采样; b. 累积分布; c. 纵坐标分布曲线

峰截面长度 $b_i$ 有关。

### 三、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、表面轮廓仪测量法和电子显微镜观察。

#### 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, 计算平均算术偏差 $R_a$ 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。

#### 3. 电子显微镜观察法

利用电子显微镜观察表面, 与光学显微镜相比, 分辨能力高达 $2 \times 10^{-12} \text{m}$ , 放大倍数20~80万倍。电子显微镜基本原理是在一个高真空系统中, 用电子枪发射电子束到被测表面, 再反射到荧光屏上成象, 可以清晰地显示出表面形貌。

#### 4. 表面轮廓记录法

这是常用的方法。图2-5是电感式传感器的原理图, 测针2在轮廓表面上移动, 被测表面上的峰谷迫使测针上下移动, 带动杠杆1绕支点3摆动, 铁芯4作同步上下移动, 而使差动电感线圈5的电感量发生变化, 输出与测针位移量成正比的调幅波, 经放大、检测

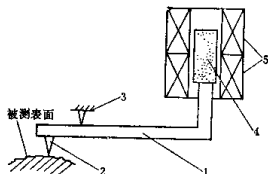


图 2-5 电感式传感器原理图

及功率放大,可以直接记录表面轮廓廓形,并可进行信号积分,直接读出算术平均偏差 $R_a$ 。

由于电动轮廓仪放大倍数高,反映迅速,便于计算处理,应用比较普遍,现已研制出可测三维轮廓图形的仪器。

## 第二节 金属表面的性质

在摩擦过程中,除了表面形貌影响摩擦磨损特性之外,金属表面的物理、化学、机械性能的影响也很大。如表层的吸附作用;切削加工和摩擦过程中,表层金属材料的金相组织和机械性质的改变;固体表面层结构的变化和表面膜的变化等均导致表面层性质与本体材料有很大的差异。

### 一、固体表面层结构的变化

金属及其合金都是由原子或分子所组成的一种物质的凝聚集态。通常,金属在固态下都是晶体,其原子按一定几何形状有规则的排列,称为空间晶格。基本排列形式分体心立方晶格、面心立方晶格和密排六方晶格,见图2-6。

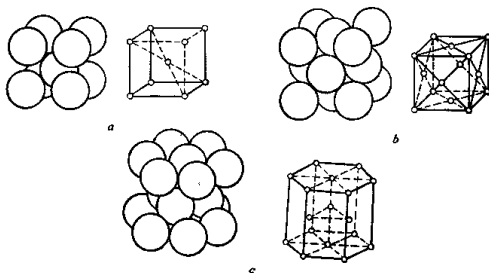


图 2-6 晶格的基本排列形式

a. 体心立方晶格; b. 面心立方晶格; c. 密排六方晶格

对于一个完整的晶体,其结构应该完全具有周期性,但在实际晶体中,存在着晶体结构的缺陷和结构变化,均显著地影响其物理、化学和机械性能。

#### 1. 晶格缺陷

(1) 点缺陷 在晶体中,原子在其平衡位置振动。当某个原子具有较高的振动能量和运动幅度,以致脱离其在晶格中的位置而“挤入”晶格间隙中,晶体内便形成一个空位,飞逝的原子挤入晶格间隙破坏了原子有序的排列,形成多余的间隙原子,见图2-7。

空位的产生和重新分布称点缺陷,另外,晶体中的杂质也是一种点缺陷。

晶体中相邻原子还不断地交换位置,造成空位的迁移,在迁移过程中空位的凝聚会形成微裂缝或细孔。