

机械工程学科研究生教学用书

摩擦学教程

主 编 黄 平

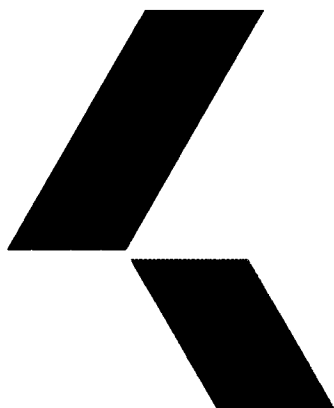
副主编 孟永钢 徐 华

Tribology Course

0313.5/5

2008

机械工程学科研究生教学用书



摩擦学教程

主 编 黄 平

副主编 孟永钢 徐 华

Tribology Course



高等教育出版社

图书在版编目(CIP)数据

摩擦学教程/黄平主编. —北京:高等教育出版社,
2008.4

ISBN 978-7-04-023351-3

I. 摩… II. 黄… III. 摩擦学-教材 IV. O313.5

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008)第 035754 号

策划编辑	刘占伟	责任编辑	杜惠萍	封面设计	刘晓翔	责任绘图	尹莉
版式设计	王莹	责任校对	俞声佳	责任印制	韩刚		

出版发行 高等教育出版社
社 址 北京市西城区德外大街 4 号
邮政编码 100120
总 机 010-58581000

经 销 蓝色畅想图书发行有限公司
印 刷 北京中科印刷有限公司

开 本 787×1092 1/16
印 张 31
字 数 760 000

购书热线 010-58581118
免费咨询 800-810-0598
网 址 <http://www.hep.edu.cn>
<http://www.hep.com.cn>
网上订购 <http://www.landaco.com>
<http://www.landaco.com.cn>
畅想教育 <http://www.widedu.com>

版 次 2008 年 4 月第 1 版
印 次 2008 年 4 月第 1 次印刷
定 价 57.00 元

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题,请到所购图书销售部门联系调换。

版权所有 侵权必究

物料号 23351-00

内 容 简 介

本书系统地介绍了摩擦学的基础理论与方法,分为摩擦理论、磨损理论与润滑理论三篇,共十章。第一篇摩擦理论包括摩擦表面分析、润滑剂和固体摩擦三章,详细讨论了表面形貌参数、表面结构、表面性质、润滑剂及其特性、添加剂、摩擦基本理论和摩擦测量方法等。第二篇磨损理论包括磨损机理、磨损规律和磨损检测与抗磨损设计三章,内容涵盖磨损分类、磨损机理和理论、磨损过程与规律、磨损的转化、磨损计算以及摩擦磨损实验方法与测量装置,还介绍了摩擦状态分析、磨损失效分析以及减摩抗磨的常用方法。第三篇润滑理论包括四章,给出润滑理论中著名的 Reynolds 方程的推导后,对典型零件润滑设计作了详细介绍,并介绍了常用润滑计算数值方法。本篇还分析了润滑状态转化,包括流体润滑向弹流润滑的转化、弹流润滑向薄膜润滑的转化、稀薄气体效应、润滑失效和边界润滑等。

本书各章都配备了习题,并给出了主要推导题和计算题的参考答案或/和解题步骤,还提供了径向滑动轴承流体动力润滑和线接触弹流动力润滑两个数值计算源程序。

本书可作为高等院校摩擦学课程研究生教材和相关专业师生的教学及科研参考书,也可作为从事摩擦学方面工作的工程技术人员和研究人员的参考用书。

Brief Introduction

The main guideline of this book is to systematically introduce the tribology basic theories and methods. The book is divided to three parts with ten chapters in total. Part 1 is about friction theories, including three chapters. The contents involve surface topography parameters, surface structure, surface properties, lubricants and their properties, additives, basic friction theories and etc in detail. Part 2 is about wear theories, including three chapters. The contents cover wear classification, wear mechanisms and theories, wear process and rules, wear transition, wear calculation, friction and wear experimental methods, and measurement instruments. Friction status analyses, element wear failure analyses, and some common friction reduction and anti-wear methods are also presented. Part 3 is about lubrication theories, including four chapters. After the famous Reynolds equation in lubrication is deduced, some lubrication designs of the typical mechanical elements are presented. Then, several common numerical methods for lubrication calculation are given. In this part, we also discuss on lubrication status transition including transition of hydrodynamic lubrication to elasto-hydrodynamic lubrication, transition of elasto-hydrodynamic lubrication to thin film lubrication, rarefied effect, lubrication failure and boundary lubrication.

Exercises are designed with some reference answers and/or solutions for some important deducing and calculating exercises. Two programs for the journal bearing hydrodynamic lubrication and the line contact elasto-hydrodynamic lubrication are supplied in appendixes for readers' usage.

The book can be used as a textbook for post-graduates. It can also serve as a reference book for university teachers and students in their teaching and research as well as for researchers and technicians in a tribology research or tribology design department.

前 言

摩擦学是研究相对运动表面间的摩擦、润滑和磨损的一门应用科学。摩擦学普遍存在于生活和工程中,它涉及物理、化学、冶金学、材料学、流变学、流体力学、弹性力学、粘弹性力学、热力学和机械学等多种学科。

车轮是人类进行摩擦学设计最早和最成功的实例之一,润滑剂使用也有几千年的历史。据估计,人类使用能源的 $1/3 \sim 1/2$ 以摩擦和磨损的形式被消耗。因此,如果能够减少摩擦损耗,就可以大量节省能源。有效减少和控制磨损,可降低维修和重新制造零件的费用及材料。从著名学者达·芬奇把摩擦作为研究对象到20世纪60年代中期Jost报告提出把摩擦学作为一门学科,摩擦、磨损与润滑从古老、众多交叉学科的孤立研究成为一个崭新、系统的研究领域。

本书在参考国内外相关摩擦学专著、教材的基础上,确定以系统介绍摩擦学的基础理论与方法为编写主线。为了体现摩擦学的自身规律,本书分为摩擦、磨损与润滑三篇,共十章。第一篇摩擦理论包括摩擦表面分析、润滑剂和固体摩擦三章,详细讨论了表面形貌参数、表面结构、表面性质、润滑剂及其特性、添加剂和摩擦基本理论等。第二篇磨损理论包括磨损机理、磨损规律和磨损检测与抗磨损设计三章,内容涵盖磨损分类、磨损机理和理论、磨损过程与规律、磨损的转化、磨损计算以及摩擦磨损实验方法与测量装置,并介绍了摩擦状态分析、零件磨损失效分析以及减摩抗磨的常用方法。第三篇润滑理论包括四章,在给出了润滑理论中著名的Reynolds方程的推导后,对典型零件的润滑设计作了详细介绍,并介绍了润滑计算中的常用数值方法。本篇最后讨论了润滑状态的转化,包括流体润滑向弹流润滑转化、弹流润滑向薄膜润滑的转变、稀薄气体效应、润滑失效和边界润滑,掌握摩擦状态转化规律对学习者的整体认识摩擦学的发展和今后进行研究会有很大帮助。

本书还在各章后面共配备了218习题,并对主要的推导题和计算题提供了参考答案或/和解题步骤,这些内容不仅弥补了以往许多摩擦学书籍和教材这方面的不足,也为教师的教学提供了很大的方便,并会对研究生在学习中学会如何处理摩擦学问题提供很大的帮助。此外,在附录中还提供了径向滑动轴承流体动力润滑和线接触弹流动力润滑的数值计算源程序。

本书由黄平主编,孟永钢和徐华为副主编,参加编写工作的有陈东(第一章),孟永钢(第二、三章),朱文坚(第四章),谢小鹏(第五章),陈扬枝(第六章),徐华(第七、八章),黄平(第九、十章、附录一至三、索引)。

编者

2007年9月

Preface

Tribology is an applied subject to study friction, wear and lubrication of surfaces with a relative motion. Friction widely exists in our daily life and engineering. Tribology is connected with many subjects such as physics, chemistry, metallurgy, material science, rheology, fluid dynamics, theory of elasticity, viscous elasticity, thermodynamics, mechanology and etc.

A wheel is the earliest and most successful sample of tribological design. Lubricants have also been used for thousands of years. According to estimation, one third to half of the energy consumed by men wastes in the form of friction and wear. Therefore, if reduce some portion of friction waste, we will be able to save a great amount of energy. If effectively reduce or control wear, we will be able to reduce the cost and material for maintaining and reproducing elements. From the famous researcher Da Vinci taking friction as a study object to the Jost Report putting forward tribology as a subject in 1960s, friction, wear and lubrication of old, multi and independent disciplines have become a new and systematic research subject.

Based on referring connected monographs and text books of both domestic and international, we determine that the main guideline of this book is to systematically introduce the tribology basic theories and methods. In order to present the own rules of tribology, the book is divided to three parts—friction, wear and lubrication with ten chapters in total. Part One is about friction theories, in which the basic friction theories are introduced, including three chapters about friction surface analysis, lubricants and solid friction. In this part, we discuss surface topography parameters, surface structure, surface properties, lubricants and their properties, additives, basic friction theories and etc in detail. Part Two is about wear theories, including three chapters, which are wear mechanisms, wear rules and wear measurement, and anti-wear design. The contents cover wear classification, wear mechanisms and theories, wear process and rules, wear transition, wear calculation, friction and wear experimental methods, and measurement instruments. Furthermore, friction status analysis, element wear failure analyses, and some common friction reduction and anti-wear methods are also presented. Part Three is about lubrication theories, including four chapters. After the famous Reynolds equation in lubrication is deduced, we present some lubrication designs of the typical mechanical elements. Then, several common numerical methods for lubrication calculation are given. In the end of this part, we discuss on lubrication status transition including transition of hydrodynamic lubrication to elasto-hydrodynamic lubrication, transition of elasto-hydrodynamic lubrication to thin film lubrication, rarefied effect, lubrication failure and boundary lubrication. Mastering the friction status transition rules will be a great help for students to understand tribology developments in general and in their future researches.

At the end of each chapter exercises are designed, including 218 exercises in total. At the end of the book the reference answers and/or solutions for some important deducing and calculating exercises are presented. These contents well make up insufficient of the past tribology reference books or textbooks in this aspect. This will be convenient for teachers in the course and it is also greatly helpful for students to learn more about how to correctly treat tribology problems. Besides, we also supply two programs in appendixes for readers'usage. They are the journal bearing hydrodynamic lubrication numerical program and the line contact elasto-hydrodynamic lubrication numerical program.

II Preface

The author in chief of this book is Huang Ping, and the associate authors are Meng Yonggang and Xu Hua. authors writing the contents of this book are Chen Dong for Chapter 1, Meng Yonggang for Chapter 2 and 3, Zhu Wenjian for Chapter 4, Xie Xiaopeng for Chapter 5, Chen Yangzhi for Chapter 6, Xu Hua for Chapter 7 and 8, and Huang Ping for Chapter 9, 10, Appendix 1 to 3 and Index.

Authors
September, 2007

目 录

第一篇 摩擦理论

第一章 摩擦表面分析	3	2.5 润滑油的表面张力	50
1.1 表面形貌参数及统计	3	2.6 润滑油添加剂	53
1.2 摩擦表面与内部结构	11	习题	54
1.3 摩擦表面性质	15	参考文献	59
1.4 粗糙表面的接触	18	第三章 固体摩擦	60
1.5 摩擦状态	26	3.1 摩擦的基本特性	60
习题	29	3.2 摩擦理论	64
参考文献	30	3.3 滑动摩擦	71
第二章 润滑剂	31	3.4 滚动摩擦	74
2.1 润滑剂的作用与类型	31	3.5 摩擦的其他问题	76
2.2 润滑油密度	39	习题	84
2.3 流体粘度	40	参考文献	86
2.4 非牛顿流体	45		

第二篇 磨损理论

第四章 磨损机理	91	习题	156
4.1 磨损概述	91	参考文献	157
4.2 磨粒磨损	96	第六章 磨损检测与抗磨损设计	159
4.3 粘着磨损	100	6.1 摩擦磨损实验方法与装置	159
4.4 疲劳磨损	108	6.2 磨损量的测量方法	166
4.5 腐蚀磨损	119	6.3 机械系统摩擦状态监测技术	171
习题	125	6.4 零件磨损失效分析	175
参考文献	126	6.5 润滑油、润滑脂和固体润滑剂的合理 选用	176
第五章 磨损规律	127	6.6 摩擦副材料配伍	182
5.1 磨损过程曲线	128	6.7 表面涂层技术	186
5.2 影响磨损的因素	132	习题	201
5.3 磨损的转化	137	参考文献	202
5.4 非金属摩擦材料	143		
5.5 磨损计算	149		

第三篇 润滑理论

第七章 润滑原理	207	参考文献	240
7.1 流体润滑的形式与状态	207	第八章 典型零件润滑设计	241
7.2 流体润滑的基本方程	208	8.1 常见摩擦副的几何和运动关系以及 边界条件	241
7.3 Reynolds 方程	213	8.2 滑块与止推轴承	257
7.4 求解润滑问题的其他方程	216	8.3 径向滑动轴承	265
7.5 弹性流体动力润滑理论	222	8.4 挤压膜轴承	273
7.6 润滑脂的润滑简介	237	8.5 动载荷轴承	276
习题	238		

II 目录

8.6 气体轴承	286	9.5 多重网格法求解润滑问题	343
8.7 流体静压润滑	289	习题	353
8.8 滚动轴承	293	参考文献	357
8.9 齿轮传动中的润滑	295	第十章 润滑状态转化	359
8.10 凸轮机构的润滑	298	10.1 润滑状态的转化	359
习题	299	10.2 连续介质气体向稀薄气体转化	376
参考文献	305	10.3 混合润滑状态	386
第九章 润滑分析常用数值方法	306	10.4 润滑失效	391
9.1 Reynolds 方程的数值解法	306	10.5 边界润滑	399
9.2 能量方程的数值解法	317	习题	414
9.3 弹性流体动力润滑数值解法	322	参考文献	417
9.4 超薄气体润滑数值解法	330		
附录一 部分习题参考答案与解答	420		
附录二 径向轴承流体动力润滑分析程序	454		
附录三 线接触弹流润滑计算程序(多重网格积分)	460		
索引	471		

CONTENTS

Part One Friction Theories

Chapter 1 Friction Surface Analysis	3	2.3 Viscosity of Fluid	40
1.1 Topographical Parameters and Statistics	3	2.4 Non-Newtonian Fluid	45
1.2 Friction Surface and Inner Structure	11	2.5 Surface Tension of Lubricating Oil	50
1.3 Properties of Friction Surface	15	2.6 Additives of Lubricating Oil	53
1.4 Contact of Rough Surface	18	Exercises	54
1.5 Friction Statuses	26	References	59
Exercises	29	Chapter 3 Solid Friction	60
References	30	3.1 Basic Friction Characteristics	60
Chapter 2 Lubricants	31	3.2 Friction Theories	64
2.1 Types and Functions of Lubricants	31	3.3 Sliding Friction	71
2.2 Density of Lubricating Oil	39	3.4 Rolling Friction	74
		3.5 Some Friction Problems	76
		Exercises	84
		References	86

Part Two Wear Theories

Chapter 4 Wear Mechanisms	91	Anti-wear Design	159
4.1 Wear Introduction	91	6.1 Friction and Wear Experimental methods and Instruments	159
4.2 Abrasion Wear	96	6.2 Wear Volume Measurement Methods	166
4.3 Adhesion Wear	100	6.3 Monitoring Techniques of Mechanical System Friction Statuses	171
4.4 Fatigue Wear	108	6.4 Wear Failure Analyses of Elements	175
4.5 Corrosion Wear	119	6.5 Properly Choose Lubricating Oil, Grease and Solid Lubricants	176
Exercises	125	6.6 Material Compatibility of Friction Pairs	182
References	126	6.7 Surface Coating Techniques	186
Chapter 5 Wear Rules	127	Exercises	201
5.1 Wear Process Curve	128	References	202
5.2 Influence factors on Wear	132		
5.3 Wear Transition	137		
5.4 Non-metal Friction Materials	143		
5.5 Wear Calculation	149		
Exercises	156		
References	157		
Chapter 6 Wear Measurement and			

II CONTENTS

Part Three Lubrication Theories

Chapter 7 Lubrication Principles	207	8.10 Cam Machinery Lubrication	298
7.1 Hydrodynamic Lubrication Types and Statuses	207	Exercises	299
7.2 Basic Equations of Hydrodynamic Lubrication	208	References	305
7.3 Reynolds Equation	213	Chapter 9 Common Numerical Methods for Lubrication Analysis ...	306
7.4 Other Equations for Solving Lubrication Problems	216	9.1 Numerical Method for Solving Reynolds Equation	306
7.5 Elasto-Hydrodynamic Lubrication Theory	222	9.2 Numerical Method for Solving Energy Equation	317
7.6 Brief Introduction of Grease Lubrication	237	9.3 Numerical Method for Solving Elasto - hydrodynamic Lubrication	322
Exercises	238	9.4 Numerical Method for Solving Ultra Thin Gas Lubrication	330
References	240	9.5 Multi-grid Method for Solving Lubrication Problem	343
Chapter 8 Lubrication Designs of the Typical Mechanical Elements	241	Exercises	353
8.1 Geometric and Kinematic Relations and Boundary Conditions for Common Friction Pairs	241	References	357
8.2 Slider and Thrust Bearing	257	Chapter 10 Lubrication Status Transition	359
8.3 Journal Bearing	265	10.1 Lubrication Status Transition	359
8.4 Squeezing Bearing	273	10.2 Transition of Continuum Gas to Rarefied Gas	376
8.5 Dynamic Bearing	276	10.3 Mixed Lubrication statuses	386
8.6 Gas Bearing	286	10.4 Lubrication Failure	391
8.7 Hydrostatic Lubrication	289	10.5 Boundary Lubrication	399
8.8 Rolling Contact Bearing	293	Exercises	414
8.9 Gear Transmission Lubrication	295	References	417
Appendix 1 Exercise Reference Answers and Solutions	420		
Appendix 2 Program for Analyzing Hydrodynamic Lubrication of Journal Bearings	454		
Appendix 3 Program for Analyzing Line Contact Elasto-hydrodynamic Lubrication with Multi-grid Integration	460		
Index	471		

第一篇

摩擦理论

摩擦是摩擦学的三项基本内容之一,也是人类认识最早的摩擦学现象。人类在了解不少摩擦现象的过程中,掌握了一些摩擦规律,并提出了许多摩擦理论。要深入研究摩擦现象,就必须从摩擦副表面形态、织构、接触状况、摩擦表面的介质及其特性等方面进行分析,这些内容是摩擦、磨损和润滑问题的基础,也是深入探索摩擦微观本质和进行摩擦学机理研究的基础。

本篇共包括三章。

在第一章摩擦表面分析中,首先对表面形貌参数及统计方法作了详细介绍,包括表面几何形状误差、表面粗糙度和表面形貌的统计参数。在对工程中主要的金属材料 and 塑料摩擦表面与内部结构的特点进行了讨论之后,分析了摩擦表面性质,如润湿角、表面能和表面吸附现象等。从后面的章节学习中可知,这些性能对摩擦性能有重要的影响。在这一章中,还分析了粗糙表面的接触问题。通过介绍接触面积、接触模型,分析了接触应力和接触变形沿表面深度上的变化情况,并进行了粗糙表面的接触分析。这些内容涉及统计学、物理化学、材料学和弹性力学。最后还介绍了各种摩擦状态以及区分不同摩擦状态的方法。掌握这一章的内容将有助于深刻理解摩擦学的基本原理。

在第二章润滑剂中,对润滑剂的类型、润滑油的特性参数和添加剂的作用进行了讨论。虽然润滑剂有三种形态,但是在工程中最常用的是润滑油。润滑油最主要的性能就是它的流体粘度。在给出了粘度的定义后,介绍了粘度随温度和压力变化的规律,这些规律在实际零件的摩擦学设计时都是必须考虑的。在这一章中,还介绍了润滑脂和固体润滑剂的基本类型和特性等内容。在这章中还讨论了润滑油的密度与压力的关系、润滑油的添加剂,最后分析讨论了不同类型的非牛顿流体。

第三章固体摩擦内容包括:摩擦的基本特性、摩擦理论和摩擦测量方法与装置。本章对滑动摩擦和滚动摩擦分别作了讨论,对摩擦测量方法与装置以及摩擦中一些常见问题也作了介绍。

第一章 摩擦表面分析

1.1 表面形貌参数及统计

1.1.1 表面几何形状误差

从宏观上看,光滑、平整的表面在显微镜下观察时,却显示出表面由许多不规则的凸峰和凹谷组成。这是因为加工过程中,切削、磨削引起的塑性变形以及加工设备的振动等原因,造成表面由许多不同形状的微凸峰和凹谷组成,如图 1.1 所示。表面几何特征对于混合润滑和干摩擦状态下的摩擦、磨损和润滑起着决定性影响。

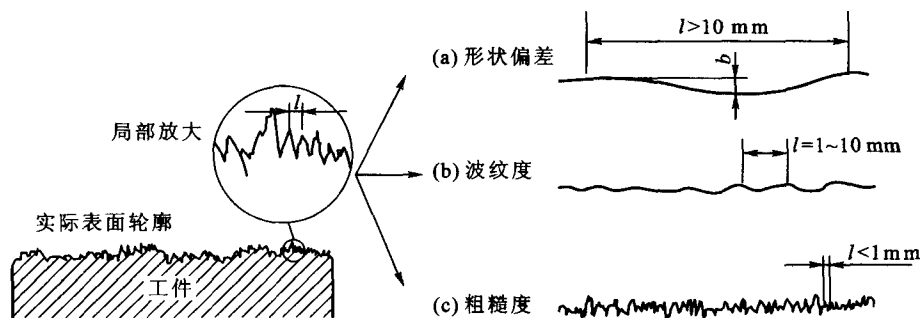


图 1.1 实际表面轮廓

1. 宏观几何形状误差

表面宏观几何形状误差又称为表面形状偏差,主要用直线度、平面度表示平面几何形状误差。直线度是指在指定方向上,其实际轮廓线与理论直线的偏差。当用刀形样板平尺进行校验时,刀口与被检表面的最大空隙 b 即为所检范围内的直线度。平面度是指整个平面各方向上存在的最大直线度,如图 1.1a 所示。波距 l 大于 10 mm 的偏差属于表面形状偏差。

对圆柱形表面,在垂直于轴线的横截面内最典型的误差有椭圆度;在通过轴线的纵截面内,最典型的误差有圆柱度(鼓形度、鞍形度、弯曲度和圆锥度)。

2. 中间几何形状误差

中间几何形状误差又称为表面波纹度,是一种比宏观几何形状误差范围更小的误差,通常采用波纹度表示,它是在表面上周期性重复出现的一种几何形状误差,如图 1.1b 所示。波距 l 在 1 ~ 10 mm 间属于波纹度范围。

3. 微观几何形状误差

表面微观几何形状误差又称为表面粗糙度,不像表面波纹度那样有明显的周期性,其波距 l

在 1 mm 以下,如图 1.1c 所示。微观几何形状误差越大,表面越粗糙。一般来说,表面粗糙度是影响摩擦性能最重要的表面几何形状特征。

综上所述,表面粗糙度、波纹度和形状偏差三者的区别通常以两波峰或波谷距离(波距)的大小加以区别。一般而言,波距大于 10 mm 属于形状偏差;波距在 1 ~ 10 mm 间属于波纹度范围;波距小于 1 mm 属于表面粗糙度范围。将图 1.1a、图 1.1b、图 1.1c 所示几何形状误差叠加到一起,就是表面的实际情况。

1.1.2 表面粗糙度

在摩擦学中,最重要、也是常用的表面形貌参数是表面粗糙度,它取表面上某一个截面的外形轮廓曲线表示。根据表示方法的不同可分为一维、二维和三维的形貌参数。

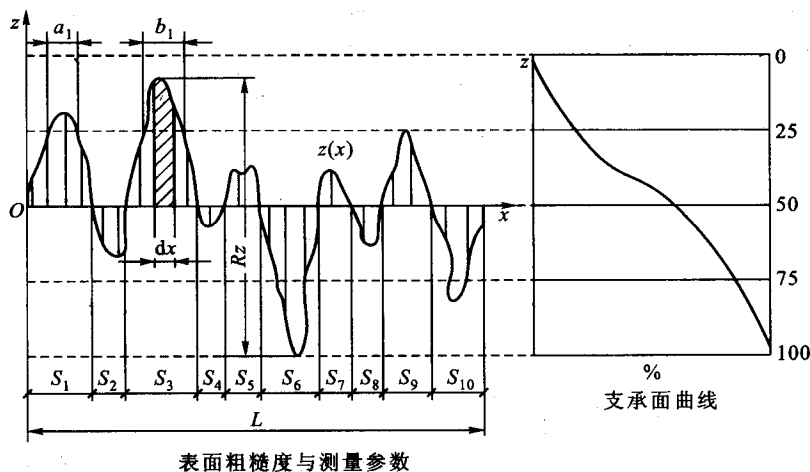


图 1.2 表面形貌轮廓与参数示意图

一维形貌通常用轮廓曲线的高度参数来表示,如图 1.2 所示。它描绘出沿截面水平方向(x 方向)上轮廓高度 z 的起伏变化。选择轮廓的平均高度线亦即中心线为 x 轴,使轮廓曲线在 x 轴上下两侧的面积相等。一维形貌参数种类繁多,最常用的有:

1. 轮廓算术平均偏差或中心线平均值 R_a

它是轮廓上各点高度在测量长度范围内的算术平均值,即

$$R_a = \frac{1}{L} \int_0^L |z(x)| dx = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |z_i| \quad (1.1)$$

式中, $z(x)$ 为各点轮廓高度; L 为测量长度; n 为测量点数; z_i 为各测量点的轮廓高度。

2. 轮廓均方根偏差或均方根值 R_q 或 σ

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{L} \int_0^L [z(x)]^2 dx} = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n z_i^2} \quad (1.2)$$

3. 最大峰谷距 R_z

在测量长度内,最高峰与最低谷之间的高度差称为最大峰谷距 R_z ,它表示表面粗糙度的最大起伏量,如图 1.2 所示。

4. 支承面曲线

支承面曲线是根据表面粗糙度图谱绘制的。理论的支承面曲线如图 1.2 所示。假设粗糙表面磨损到深度 z_1 时,在图中形成了宽度为 a_1 和 b_1 的两个平面,将 a_1 和 b_1 求和,并除以 L 就可以算出在测量长度内支承面积占的百分比,将百分比绘制在右图对应高度的 z 处,就可以得到支承面为随深度 z 变化的曲线即支承面曲线。 z 高于最高粗糙峰的支承面积比为 0%, 低于最低粗糙谷的比为 100%。

支承面曲线主要用于计算实际接触面积。实际接触面积只占名义接触面积的很小一部分,有时可以用下面的函数表示两者的关系:

$$\frac{A_r}{A_n} = b \left(\frac{a}{Rz} \right)^v \quad (1.3)$$

式中, A_r 是实际接触面积; A_n 是名义接触面积; b 和 v 是与加工方式有关的参数; a 是从最高峰算起的接近量; Rz 是最大峰谷距。

必须注意,在实际中,接近量 a 一般远小于最大峰谷距 Rz , 所以,式(1.3)只在这一条件下适用。表 1.1 给出了部分常用加工表面计算支承面百分比的参数。

表 1.1 部分常用加工表面计算支承面百分比的参数

精度等级	最大峰谷距 $Rz/\mu\text{m}$	b	v	加工方法
5	37	0.4 1.0	2.1 ~ 2.2	铣削 车削
6	18	0.5 0.6 0.9 1.4	1.6 ~ 2.0	铣削 内圆磨 平面磨 车削
7	8 ~ 9.4	0.6 0.6 0.9 1.0 1.8	1.4 ~ 2.0	铣削 外圆磨 内圆磨 平面磨 车削
8	4.7	0.7 0.9 1.1 1.6 2.0 2.0	1.6 ~ 1.9	珩磨 外圆磨 内圆磨 平面磨 抛光 车削
9	2.4	1.3 1.4 2.3 2.4 2.5	1.4 ~ 1.9	外圆磨 内圆磨 平面磨 珩磨 抛光

续表

精度等级	最大峰谷距 $Rz/\mu\text{m}$	b	v	加工方法
10	1.2	1.9 2.0 2.4 2.5 3.5	1.5 ~ 1.9	珩磨 外圆磨 平面研磨 圆柱体研磨 抛光
11	0.6	2.5 ~ 3.0	1.4 ~ 1.6	珩磨、平面和圆 柱体研磨
12	0.3	2.6 3.3	1.2 ~ 1.3	圆柱体研磨 平面研磨
13	0.15	3.3 4.5	1.1 ~ 1.2	圆柱体研磨 平面研磨

5. 中线截距平均值 RSm

中线截距平均值是轮廓与中心线各截点之间的截距 S_i 在测量长度内的平均值,它反映了粗糙峰的疏密程度,如图 1.2 所示。

$$RSm = \frac{1}{10} \sum_{i=1}^{10} S_i \tag{1.4}$$

应当指出:一维形貌参数不能完整地说明表面几何特征。虽然图 1.3 所示四种表面轮廓的 Ra 值相同,但形貌却相差很大,甚至可能完全相反,如图 1.3a 和图 1.3b 所示。虽然均方根值 σ 比中心线平均值 Ra 稍好一些,但对于图 1.3a 和图 1.3b 所示两个相反的轮廓仍然无法区别。通常,一维形貌参数仅适用于描述用同一种制造方法得到的具有相似轮廓的表面。如果将一维高度参数和一维波长参数配合,可以粗略地构成表面形貌的二维图像。

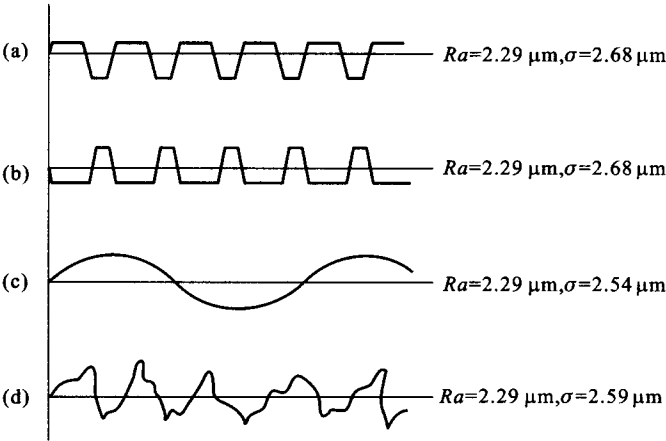


图 1.3 不同轮廓的 Ra 和 σ 值

一维形貌参数难以全面表征表面的摩擦学特性,如表面轮廓曲线的坡度、曲率等都与粗糙表