



普通高等教育“十一五”国家级规划教材

主编 王之栋 沈心敏

摩擦学设计基础



北京航空航天大学出版社
BEIHANG UNIVERSITY PRESS



普通高等教育“十一五”国家级规划教材

摩擦学设计基础

主编 王之栎 沈心敏



北京航空航天大学出版社

内 容 简 介

本书是普通高等教育“十一五”国家级规划教材,共分8章,内容包括:第1章绪论,第2章摩擦学设计理论基础,第3章流体润滑基本方程,第4章流体动压轴承,第5章动载径向轴承,第6章动压轴承性能二维分析,第7章油膜润滑中的特殊效应,第8章气膜力学特征与气体动密封。书中主要介绍摩擦学研究的基本领域和一般性理论基础,以及摩擦学设计所涉及的润滑理论基础知识,较为详细地探讨了流体润滑理论在滑动轴承支承和密封设计特性方面的研究分析方法。

本书适合机械工程相关专业本科生和研究生使用,也可作为相关科研和技术人员研究设计的参考书。

图书在版编目(CIP)数据

摩擦学设计基础 / 王之栎, 沈心敏主编. -- 北京 :
北京航空航天大学出版社, 2018.1
ISBN 978-7-5124-2598-9

I. ①摩… II. ①王… ②沈… III. ①摩擦—理论—
硕士生入学考试—自学参考资料 IV. ①0313.5

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2017)第 278491 号

版权所有,侵权必究。

摩擦学设计基础

主编 王之栎 沈心敏

责任编辑 王 实

*

北京航空航天大学出版社出版发行

北京市海淀区学院路 37 号(邮编 100191) <http://www.buaapress.com.cn>

发行部电话:(010)82317024 传真:(010)82328026

读者信箱: bhp@263.net 邮购电话:(010)82316936

北京泽宇印刷有限公司印装 各地书店经销

*

开本:710×1 000 1/16 印张:16.25 字数:346 千字

2018 年 1 月第 1 版 2018 年 1 月第 1 次印刷

ISBN 978-7-5124-2598-9 定价:49.00 元

前 言

摩擦学是近几十年发展起来的一门边缘学科,研究内容主要包括摩擦、磨损和润滑的理论与实践等,研究的目的是针对具有相对运动特征工作表面的摩擦过程和工作机理问题,寻找工程解决方案。摩擦学研究涉及机械学、力学、物理学、化学、材料学等诸多学科,交叉学科特点明显,其研究成果对相关学科的科学技术发展,以及工业水平的提高和经济发展都起到了重要作用。

本书作为机械工程及相关专业本科和研究生教材,旨在通过本课程的学习,使学生对摩擦学设计基础理论知识有一定的了解,同时拓展摩擦学相关的科学知识,为从事机械设计及相关学科的研究和设计工作奠定坚实的基础。教材中对摩擦学及利用摩擦学的知识进行设计的背景知识作了一般性介绍,对摩擦部件减小摩擦、降低磨损和延长使用寿命所应用的润滑理论基础作了较为深入的论述。

本书的编写,以北京航空航天大学出版社出版的《摩擦学基础》(1991年)一书为基础,对一些章节进行了加工完善,增加了高速旋转部件间密封设计应用的部分。全书共分8章。第1章绪论,介绍摩擦学与摩擦学设计概要;第2章摩擦学设计理论基础,介绍摩擦学设计所涉及的主要研究内容和基础;第3章流体润滑基本方程,介绍摩擦学设计中应用的润滑力学基本方程;第4章流体动压轴承,介绍动压滑动轴承的静动性能和分析方法;第5章动载径向轴承,介绍动载荷作用下径向轴承运动特征及分析方法;第6章动压轴承性能二维分析,介绍构造二维数学模型对动压轴承的性能分析方法;第7章油膜润滑中的特殊效应,介绍油膜润滑条件下热、紊流、表面状态的影响及分析方法;第8章气膜力学特征与气体动密封,介绍润滑力学在气体流道密封中的应用,以及气膜和刷密封的分析方法。

书中,第2~7章,由沈心敏和王之栎在《摩擦学基础》一书的基础上编写完善,其中第6章的部分内容由刘雨川编写,第1、8章由王之栎、沈心敏、刘国西等编写,J. Chew为刷密封部分提供了部分资料。沈心敏对全书文稿进行了认真细致的梳理,全书由王之栎和沈心敏统稿并任主编。在编写本书的过程中,马纲、陈心颐、陈辉、李理科、丁蕾等为部分内容的编写提供了材料,郭苗苗、迟佳栋等参加了部分文稿的编辑工作。

感谢《摩擦学基础》一书的作者,感谢参加编撰及为本书提供无私帮助和提出宝贵意见的各位同仁。

由于作者水平有限,书中如有不妥之处,敬请各位读者指正。

作 者

2016年于北京航空航天大学

目 录

第 1 章 绪 论	1
1.1 摩擦学与摩擦学设计	1
1.2 摩擦学专业教育	3
第 2 章 摩擦学设计理论基础	5
2.1 摩擦表面的物理性质与表面接触	5
2.2 摩擦与磨损	11
2.2.1 摩擦的分类	11
2.2.2 库仑摩擦定律	11
2.2.3 摩擦机理	12
2.3 流体的物理性质	18
2.3.1 流体介质的连续性	18
2.3.2 牛顿粘性定律与流体粘度	19
2.3.3 密度、可压缩性与状态方程	25
习 题	27
第 3 章 流体润滑基本方程	29
3.1 连续方程	29
3.2 动量方程	30
3.2.1 粘性流体微元体的受力与平衡	30
3.2.2 牛顿流体应力与应变率的关系	33
3.2.3 动量方程	37
3.3 N-S 方程的简化	38
3.4 雷诺方程	40
3.4.1 广义雷诺方程	40
3.4.2 典型物理模型对应的雷诺方程	42
3.4.3 雷诺方程的一维解析解	46
3.5 压力边界条件	51
3.5.1 压力边界	51

3.5.2 常用边界条件·····	52
习 题·····	54
第4章 流体动压轴承 ·····	59
4.1 推力轴承稳态性能·····	59
4.1.1 动压推力轴承的一般形式·····	59
4.1.2 斜面推力轴承·····	60
4.1.3 斜面-平面组合轴承·····	63
4.1.4 瑞利(Rayleigh)阶梯轴承·····	64
4.1.5 可倾瓦推力轴承·····	65
4.2 径向轴承的承载·····	68
4.2.1 径向轴承·····	68
4.2.2 径向轴承间隙函数·····	69
4.2.3 无限短轴承压力分布·····	70
4.2.4 油膜反力与承载能力·····	71
4.2.5 无限宽轴承解·····	80
4.3 挤压油膜轴承·····	82
4.3.1 挤压油膜雷诺方程·····	82
4.3.2 平行平板挤压油膜轴承·····	83
4.3.3 共曲柱面挤压油膜轴承·····	85
4.4 径向轴承动态特性·····	88
4.4.1 径向轴承刚度和阻尼系数·····	88
4.4.2 短轴承油膜刚度和阻尼系数计算·····	91
4.4.3 刚度和阻尼系数的坐标转换·····	94
4.5 动压径向轴承稳定性·····	96
4.5.1 动压径向轴承的失稳·····	96
4.5.2 失稳机理·····	97
4.5.3 轴承系统稳定性与失稳界限转速·····	100
4.5.4 动压径向轴承的抑振方法·····	109
4.5.5 挤压油膜轴承的阻尼减振·····	111
习 题·····	113
第5章 动载径向轴承 ·····	119
5.1 瞬态雷诺方程·····	119

5.2 轴颈运动方程和油膜反力	121
5.3 轴心轨迹的求解	126
习 题	135
第 6 章 动压轴承性能二维分析	136
6.1 二维有限差分法	136
6.2 分离变量乘积解	141
6.3 变分校正解	142
6.3.1 变分原理及应用	143
6.3.2 变分短校正解雷诺方程边值问题的构成	146
6.3.3 变分长校正解	147
6.4 二维有限元法	149
6.5 求解方法与计算结果	151
6.6 非圆轴承的间隙函数和雷诺方程	154
6.7 有限长轴承稳态性能	156
6.8 有限长轴承油膜刚度和阻尼系数	163
6.9 多油楔径向轴承的刚度和阻尼系数	167
习 题	172
第 7 章 油膜润滑中的特殊效应	173
7.1 润滑膜的热效应	173
7.2 润滑膜中的紊流效应	182
7.3 润滑表面粗糙度效应	188
7.4 润滑油膜的气穴效应	195
7.5 润滑表面弹性变形和弹流润滑	203
习 题	206
第 8 章 气膜力学特征与气体动密封	207
8.1 气体流道密封	207
8.2 气膜的承载与密封	208
8.2.1 密封气膜	208
8.2.2 端面气膜密封的分类	210
8.2.3 端面气膜密封分析的数学模型	214
8.2.4 气膜性能计算	220

8.3 刷密封	226
8.3.1 刷密封及其设计技术	226
8.3.2 刷密封数值模拟的数学模型	227
8.3.3 刷密封数值计算方法与数学模型的离散	230
8.3.4 刷密封性能分析	244
习 题	247
参考文献	248

第 1 章 绪 论

摩擦学是研究相互运动表面之间的摩擦、磨损和润滑等现象和规律的科学。摩擦学设计则是应用摩擦学理论指导设计行为的方法与技术。系统中具有相对运动关系的零件之间都存在摩擦学问题,从原始简单劳动工具到现代复杂工程系统,从微循环机械装置到飞机、火箭和航天器,其机械系统中都普遍存在着各种不同形式的摩擦、磨损和润滑现象,其中很多问题的研究和解决,都依赖摩擦学的研究进展,同时其在科学技术的进步中起到重要作用。摩擦学的研究和摩擦学设计为人类的科学技术发展和社会文明进步做出了重要贡献。

本章简要介绍摩擦、磨损和润滑科学与技术的发展,以及摩擦学(设计)基础课程的性质、任务和内容特点。

1.1 摩擦学与摩擦学设计

摩擦学与摩擦学设计作为一种科学理论和设计技术准则对人类科学技术的发展和社会文明进步做出了重要贡献。公元前 2600 年前后,我国就有“黄帝作车”的记载,古车车轮与轴间就设计有滑动轴承。埃及古建筑内残存的浮雕像显示,在公元前 1900 年前后,就已经有在道路上倾倒润滑油以减小搬运置放于大型滑板上巨人时摩擦的施工方法。在这一时期,由于人们对摩擦学问题认识不多,运动副的摩擦、磨损和润滑的应用与研究进展缓慢。到 15 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”的论述。约 200 年后,人们似乎已对达·芬奇的见解有些遗忘,阿蒙顿(G. Amontons)于 1699 年通过试验发现了两个摩擦定律。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其局限性,但它们仍可适用于多种工况条件,因而一直为人们所使用,并被称为阿蒙顿-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。

阿蒙顿-库伦所研究的领域,被今天的人们称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伴随表面磨损,而影响磨损的因素众多,其发生发展过程十分复杂,涉及的学科广泛,以致于人们对它的认识在某些方面还不十分清晰,尚未得出一个可靠而又简明的定律能替代上述摩擦定律。

流体粘性定律由牛顿(Newton)于 1887 年提出,到 19 世纪末,人们对流体动压润滑的工作原理有了较为深入的研究。彼特罗夫(N. P. Petrov)于 1883 年给出了同心运动流体润滑轴承中的摩擦力与轴承运转参数之间的关系。同年,托威(B. Tow-

er)在他的实验中,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,在一些物理假定的条件下,导出了油润滑状态下的流体动力微分方程,被后人称为雷诺方程。雷诺在其著作中,以近似解方式得到了轴承中的油膜动压力分布,并与托威实验测量结果进行了比较,其一致性良好。雷诺方程奠定了流体润滑的力学基础。

在一般机械工程设计中,根据相互运动表面状态和工作条件的不同,可以将摩擦分为三种,即干摩擦、流体摩擦和混合摩擦。其中,混合摩擦是指干摩擦、边界摩擦、流体摩擦中两种或两种以上同时存在的摩擦状态。当相互作用摩擦表面间添加有润滑剂时,其摩擦因数将有不同程度的降低,表现为摩擦力降低,表面磨损减小,这对于维持相互运动表面结构的几何特征和力学特征作用明显,因此,润滑设计也是工程和机械设计中的重要组成部分。

从19世纪末期到20世纪中期的约80年间,流体润滑力学方面的研究取得了一系列重要进展,标志性成果体现在1886年建立了流体润滑力学基本方程——雷诺方程,接着提出了各种求解方法,如从简化雷诺方程得到的无限宽和无限短轴承近似解及有限宽轴承的近似解等,为润滑力学的研究奠定了基础。1960年以后,随着计算技术的发展,数值计算方法日臻完善,气穴边界的提出,轴承性能的预计,静压支承技术的应用,流体动力润滑径向轴承动态特性概念的形成,滑动轴承与转子系统耦合的稳定性分析,转子临界转速与不平衡响应的预计,流体动力润滑径向轴承的非线性瞬态性能的分析,阶梯轴承、可倾瓦轴承、多油楔轴承的工程应用,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,固体润滑的发展和应用,等等,都使摩擦学理论研究和设计应用逐渐发展完善。

在摩擦和磨损理论研究进程中,1935年鲍登(F. P. Bowdon)等开始应用材料粘着概念来解释摩擦和磨损机理,于1950年提出了粘着理论,在以金属材料为对象的研究中取得了令人较满意的结果。这一时期在摩擦、磨损和润滑等诸多方面的研究多局限在某些学科范围内孤立进行,所取得的研究成果也较分散,因而未被广泛认识和应用,这对于解决生产实际中越来越多的跨学科综合性问题愈显不足。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和分析,认为摩擦或润滑作为一门学科发展较晚,主要因为它是一门边缘学科,内容上与多学科关联紧密,加之人们把“润滑”局限地理解为“加油”等简单概念,妨碍了对摩擦学的经济技术意义的深入理解。据当时调查报告中的保守估计,仅在英国,如果采用当时拥有的相关知识去解决工业实际中有关摩擦、磨损和润滑问题,每年即可节约大约5.15亿英镑。为有利于学科的发展,乔斯特建议将这一跨学科的边缘学科称作摩擦学(Tribology),即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与技术。它是摩擦、磨损和润滑研究的统称,也是一门既有传统继承又十分年轻的新兴学科。

摩擦学学科的建立,使相关研究工作得到迅速发展,原来分散在各个学科中从事

摩擦、磨损和润滑的研究者,逐渐整合组成了各种国际性和区域性组织,出版摩擦学学术期刊,举办一系列国际学术会议,如1974年首次召开的、两年一届的里兹-里昂国际摩擦学会议等,使这门新兴学科在随后的30年里成为世界上发展最快的学科之一。

摩擦学研究的重要进展有:表面形貌的研究与处理;摩擦副表面粗糙度效应与弹流润滑;边界膜和干膜润滑的构成、摩擦特性及其破裂;摩擦副表面热效应;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;润滑油和添加剂;微动摩擦;纳米和微纳米尺度上的摩擦学研究,等等。近年来,人们越来越深刻地认识到很多工程应用中的摩擦学问题,实际上是一个具有复杂系统特征的多学科系统工程问题,涉及机械、材料、物理、化学、生物等学科的宏观或微观领域,其研究方向众多,对工业产品质量影响明显,发展前景广阔。

1.2 摩擦学专业教育

1. 摩擦学课程

摩擦学及摩擦学设计课程一直依托摩擦学学科的建立。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和硕士学位设置。自1970年开始,随着摩擦学在国民经济发展中的地位受到关注,摩擦学教育也引起普遍重视,包括在大学中设置摩擦学相关课程,建立摩擦学相关专业,培养研究生等,并规划从摩擦学学科研究发展的角度教育和培养人才。

在机械设计及相关专业本科教学计划中的“机械设计”课程中,强度理论和结构设计能力得到加强,但作为机械学科的三大支柱之一的摩擦与润滑理论,虽然有所涉及,但系统性不强,至今仍是一个较薄弱的环节。在设计准则中,机械零件的结构尺寸和材料主要受强度条件制约,而其相对运动表面磨损和胶合失效的预防,仅是借用一些简单的强度公式或系数表征。在滑动轴承设计中,通常仅介绍液膜润滑机理和润滑力学原理,这显然不能很好地满足现代机械设计理论的状况和发展趋向。如现代航空燃气轮机旋转零件众多,且相对运动零部件的作业环境严酷,直接影响整机的工作状态,对其寿命、效率和可靠性的准确预估仍然是当今研究的课题,而这均与摩擦学问题相关。一般投资愈大和生产率愈高的机械设备,发生故障或损坏时所造成的损失也愈大。近几十年来的调查数据表明,一般机械零件的失效中70%左右是由其表面损伤和磨损所造成的,而由体积强度不够引起报废的零件只占较小比例,这也凸显了摩擦学问题的研究对于工业发展的重要性。

摩擦学与机械工程联系紧密,通常被认为是机械学的研究范畴。随着机械学及相关学科的发展,以及机械设备和装置性能的提高,作为机械学发展方向之一的摩擦学基础理论,对机械学科的发展发挥着不可替代的作用。摩擦学的研究及其成果的

推广,以及其在工作中的应用,都已成为业界共同关注的研究课题。

摩擦学是一门跨多学科的边缘学科,是工程设计相关人才综合素质培养的必备课程之一。

2. 本书的主要内容及特点

《摩擦学设计基础》一书将结合摩擦学基本理论和摩擦学设计基本方法予以论述,着重对摩擦、磨损和润滑方面的基础理论及滑动轴承、流体密封等工程应用进行讨论,可作为机械专业本科和研究生的教材,也可作为一般相关技术人员的设计分析参考书。其主要内容及特点如下:

① 着重讨论和阐述摩擦学中有关摩擦、磨损和润滑基本物理概念的建立,摩擦学基本知识和基本理论,并对不可压缩流体润滑的基本公式进行推演论证。

② 阐述润滑流体物理性质、粘流润滑基本方程及其在典型运转条件下的应用,径向轴承的性能计算,以及楔形效应和挤压效应及其响应,并对轴承动态特性和非线性瞬态性能分析的一维和二维解法进行讨论。

③ 对流体润滑中的表面粗糙度效应、紊流效应、热效应、气穴效应、弹流润滑等问题,以及部分计算与试验测量结果之间的比较进行讨论。

④ 对气体动密封技术进行分析,讨论端面气膜密封和刷密封的分析方法和设计规律,以及设计参数对其性能的影响,为进一步研究提供参考。

第2章 摩擦学设计理论基础

2.1 摩擦表面的物理性质与表面接触

1. 固体的摩擦表面

摩擦、磨损和润滑均发生在相对运动的固体表面间,为了认识、研究与利用相对运动表面之间的摩擦学现象,应用摩擦学机理进行设计,首先需要深入地了解固体表面的几何特征、物理和化学性质,及其在一定载荷下的表面接触状态和作用过程。

真实的固体表面并不是几何上的平面。工程中所用的固体表面,存在自然或加工痕迹,其表面的几何形状特征非常复杂,通常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,如图 2.1(a)所示。经过精加工的固体零件表面,则具有相对规则的凸峰和凹谷,如图 2.1(b)所示。可用表面测量仪器清楚地描绘固体的表面形貌,即固体表面的几何形态特征是由形成表面固体的物理性质、最终加工方法和加工条件所决定的,而相对运动表面间的表面形貌对其润滑状态、摩擦力的大小、耐磨性、接触刚度、疲劳强度以及对流体的阻力和表面涂附性能等都是至关重要的。

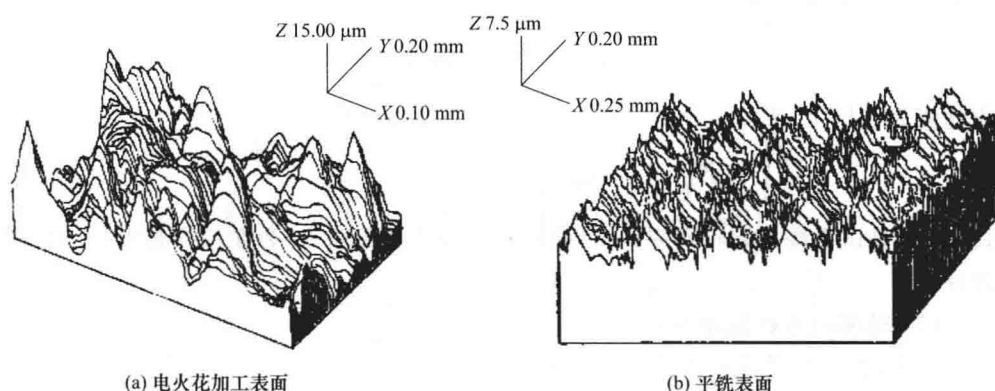


图 2.1 表面三维形貌图谱

2. 表面形貌及其描述

取得表面形貌三维特征可用光学仪器测量,图 2.2 所示为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特征,即体现了表面加工方法固有特征的表面粗糙度、空间周期上不规则性的表面波度及形状误差。

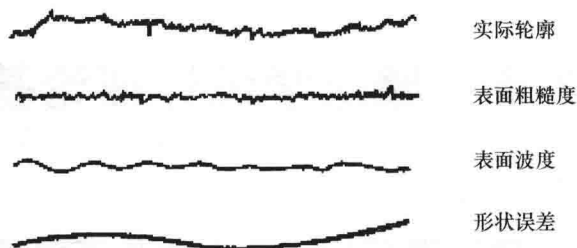


图 2.2 表面形貌的三个主要特征

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。图 2.3 给出了在取样长度,即基本测量长度(L)内的表面粗糙度轮廓(简称表面轮廓)曲线。图中 x 轴为轮廓的算术平均中线,它将轮廓划分为上、下两半,在取样长度内,由中线至轮廓线上、下两侧边所围成的面积相等; $y(x)$ 表示轮廓高度。根据国家标准 GB/T 1031—2009,评定与轮廓高度特性有关的表面粗糙度的参数有下列三个:

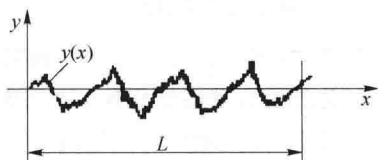


图 2.3 轮廓曲线

相等; $y(x)$ 表示轮廓高度。根据国家标准 GB/T 1031—2009,评定与轮廓高度特性有关的表面粗糙度的参数有下列三个:

(1) 轮廓算术平均偏差 Ra

轮廓算术平均偏差 Ra 指在取样长度 L 内,被测轮廓上各点至轮廓中线的距离 $y(x)$ 绝对值的总和的算术平均值,即

$$Ra = \frac{1}{L} \int_0^L |y(x)| dx \quad (2.1a)$$

或近似为

$$Ra = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |y_i| \quad (2.1b)$$

式中: y_i 是以中线为起点量得的 x_i 处的轮廓高度偏差量; n 为在取样长度内的度量数目。

(2) 轮廓均方根偏差 Rq

因为式(2.1)的表达方式使得具有不同表面形貌的表面可以有相同的 Ra 值,见图 2.4。所以当表面细部特征与研究问题具有较大相关性时,就要求表面粗糙度有更加准确的表达方法。

轮廓均方根偏差 Rq 指在取样长度 L 内,轮廓上各点至中线距离 $y(x)$ 平方平均值的平方根,即

$$Rq = \left\{ \frac{1}{L} \int_0^L [y(x)]^2 dx \right\}^{1/2} \quad (2.2a)$$

或近似为

$$Rq = \left[\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n y_i^2 \right]^{1/2} \quad (2.2b)$$

偏差离中线较远的点给予了较大的比重,与算术平均偏差相比更能反映粗糙度高度的影响。图 2.4 中给出了不同廓形的 Rq 。虽然均方根偏差比算术平均偏差能更好地描述表面形貌特征,但仍不能区分两个具有相同轮廓线而对称放置的表面的廓形。

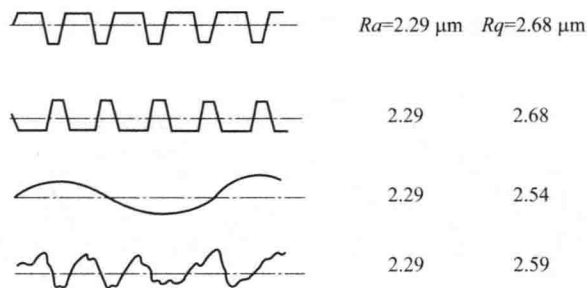


图 2.4 具有相同 Ra 值的不同表面形貌

(3) 轮廓单元的平均高度 Rc

轮廓单元的平均高度 Rc 是指在一个取样长度内轮廓单元高度 Zt (如图 2.5 所示) 的平均值,表达式为

$$Rc = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n Zt_i \quad (2.3)$$

式中: n 为取样长度内的轮廓单元数; Zt_i 为第 i 个轮廓单元高度。

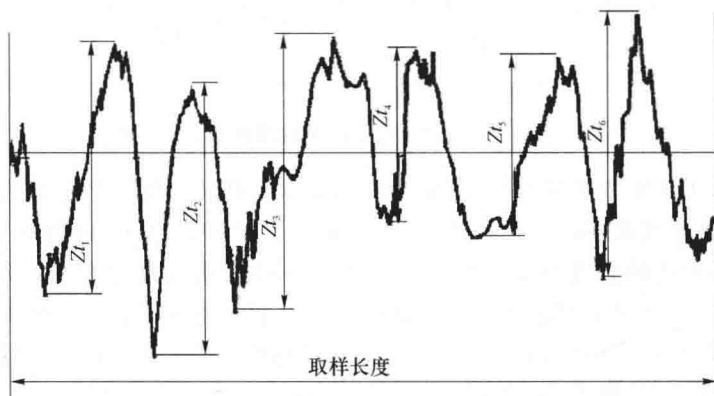


图 2.5 轮廓单元的高度(以粗糙度轮廓为例)

上述的表面粗糙度参数中,一般常采用算术平均偏差 Ra 和均方根偏差 Rq 。

3. 表面粗糙度附加评定参数

表面粗糙度的描述最早是用高度特性参数评定的,随着研究的深入和技术的发展,需要更全面地描述表面形貌,以评定或判断表面的功能。定义与微观不平度间距特性有关的参数和与微观不平度形状特性有关的参数,前者有 S 和 S_t ,后者有 $Rmr(c)$ 和 K 。

S_m 为轮廓微观不平度的平均间距,即在取样长度内轮廓微观不平度间距的平均值。如图 2.6 所示为轮廓微观不平度间距,用 S 表示,即含有一个轮廓峰和一个邻谷的一段中线长。

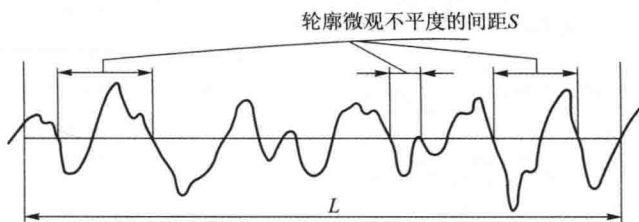


图 2.6 轮廓微观不平度间距

S_{tm} 为轮廓单峰平均间距,即在取样长度内轮廓单峰间距的平均值。图 2.7 所示为轮廓单峰间距 S_t ,即两个相邻单峰的最高点之间的距离在中线上的长度。

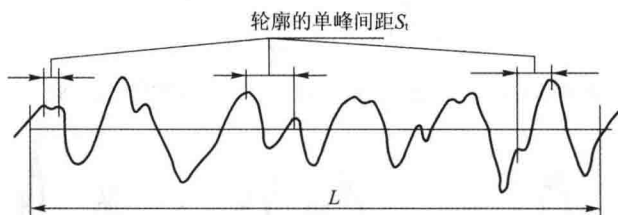


图 2.7 轮廓的单峰间距

$Rmr(c)$ 为轮廓支承长度率,其值为在给定水平截面高度 c 上轮廓的实体材料长度 $Ml(c)$ 与评定长度 l_n 的比率,与微观不平度形状特性有关,即指在评定长度 l_n 内,一平行于中线的直线与轮廓相截后得到的各段截线长度之和与评定长度 l_n 之比。该参数常用于研究摩擦表面的接触状态和表面耐磨性。表面轮廓线的丰满程度可用轮廓支承长度率曲线图 2.8 中曲边三角形面积 $A_{\triangle ABC}$ 与四边形面积 $A_{\square ABCD}$ 的比值 K 表征。 K 值越大,表面轮廓越丰满,表面的耐磨性能也越好。

4. 表面粗糙度轮廓的统计描述

由触针式轮廓仪所得到的表面粗糙度轮廓形状表明,粗糙度高度常显示出偶然性,即表现为随机变化特征。这种表面高度变化特征,可根据统计学原理,描述为表面粗糙度高度的频率分布。在取样长度 L 内,如图 2.9 所示,在跨高度分组的某组

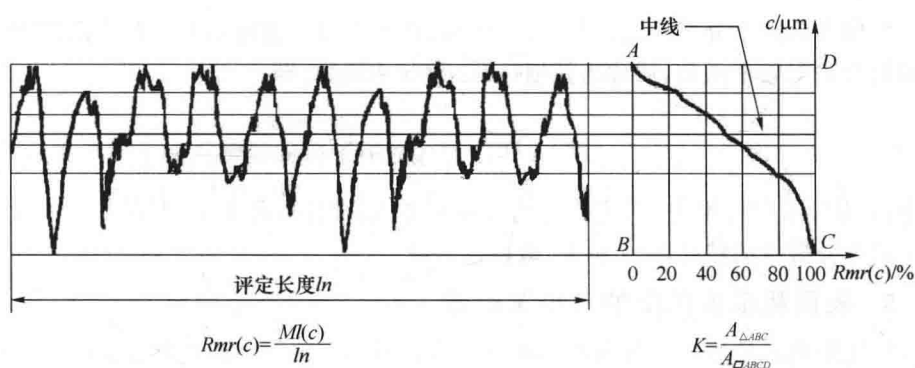


图 2.8 支承长度率曲线

平均高度 y_i 处 ($i=1, 2, \dots, n$, n 为分组数) 作两条直线, 相距为 Δy_i 且平行于中线, 两平行线内轮廓线段的水平方向长度分别为 $a, b, c, d, \dots$, 其总和 l_{y_i} 与取样长度 L 的比值, 称为该平均高度 y_i 的出现相对频率, 即

$$l_{y_i}/L = (a + b + c + d + \dots)_i / L \quad (2.4)$$

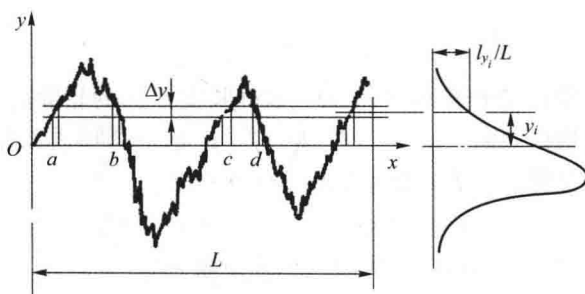


图 2.9 粗糙度轮廓的高度频率分布

全表面粗糙度高度的频率分布, 可用各组平均高度 y_i 与其出现的相对频率 (l_{y_i}/L) 之间的函数关系来描述。粗糙度轮廓高度的频率分布直方图见图 2.10。

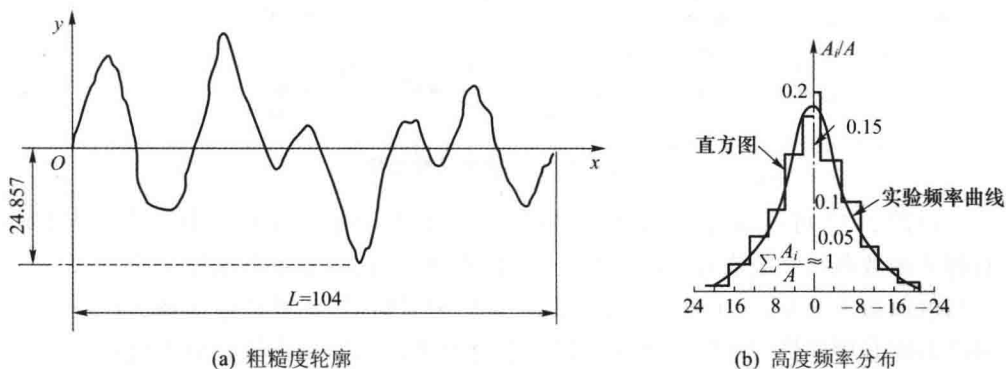


图 2.10 粗糙度轮廓及其高度频率分布的直方图