

李殿家 高峰太 编著

设备润滑技术

兵器工业出版社

设备润滑技术

李殿家 高峰太 编著

兵器工业出版社

内 容 简 介

这是一本介绍润滑技术基础理论和设备润滑应用技术实践的图书。内容包括摩擦和磨损、润滑原理、润滑剂的分类、常用润滑油、润滑脂、添加剂、机械零部件的润滑、机械设备的润滑、润滑油的污染与控制、设备的润滑管理。全书共分 10 章,比较系统地讲述了润滑的基础理论,以最新的资料介绍了各种润滑剂和有关产品,并详细讲述了典型设备零部件和常用设备的润滑以及润滑和液压系统的污染监测与控制、润滑管理等内容,对指导企业的润滑工作和提高润滑管理水平具有重要作用。

本书内容深入浅出,图文并茂,可供工矿企业管理者,机械设计、设备管理与维修技术人员,润滑工作者阅读使用;也可作为工矿企业设备润滑技术培训的教材。

图书在版编目(CIP)数据

设备润滑技术 / 李殿家,高峰太编著. —北京:兵器工业出版社,2006.1

ISBN 7-80172-610-3

I. 设... II. ①李... ②高... III. 机械设备—润滑
IV. TH 117.2

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2005)第 148409 号

出版发行:兵器工业出版社

发行电话:010-68962596,68962591

邮 编:100089

社 址:北京市海淀区车道沟 10 号

经 销:各地新华书店

印 刷:山东汇文印务有限公司

版 次:2006 年 1 月第 1 版第 1 次印刷

责任编辑:宋丽华

封面设计:黄立乾

责任校对:王 绛

责任印制:赵春云

开 本:787×1092 1/16

印 张:23.5

字 数:543 千字

定 价:58.00 元

(版权所有 翻印必究 印装有误 负责调换)

序 言

这本《设备润滑技术》是作者在长期机床设计和设备管理工作中,对设备润滑进行应用研究实践经验的总结并参考了大量有关资料编著成书。它是一本设备润滑的基础理论和应用技术实践的专业著作。

润滑是一个古老而又富有生命力的崭新的技术领域。我们知道,在古老的纺车、织机和木车等机械的运动部位上就已经采用加油润滑的方法来降低摩擦,减少磨损,以延长使用寿命。但进步非常缓慢。直到 19 世纪末才开始对润滑进行比较深入的研究。因而润滑又是一个崭新的应用学科。

在最近的几十年里,随着我国工矿企业迅速发展,生产设备向大型、高精度、高速、重载方向发展。同时设备所处的环境条件多种多样,如,高温、高湿、低温、超低压、特殊气氛等恶劣条件。这就对润滑提出了更高、更苛刻的要求。

润滑是设备管理和维护的重要基础工作。加强设备润滑是确保设备安全正常运行的必要措施。每一个企业管理者、设备设计、管理和维修技术人员以及操作者都应当十分重视润滑工作。特别是大型冶金、化工、国防、矿山等工业企业,解决好设备润滑问题,对减少设备运动副机件磨损,使设备处于良好的运行状态,充分发挥设备潜力,延长设备维修周期和寿命周期,减少设备维修工作量,保持设备精度,提高产品质量,从而提高企业的经济效益具有重要意义。

润滑和其他每一个应用学科一样,要搞好这项工作就要让企业领导和设备管理、维修技术人员熟悉润滑的基础理论,掌握润滑技术,采用先进合理的润滑方法,选用适宜的润滑剂,进行合理润滑。这本书兼顾基础理论和应用两方面,比较系统地讲述了润滑的基本原理,并详细讲述了典型设备和零部件的润滑以及润滑和液压系统的污染检测与控制、润滑管理的内容,可以提高大家学习润滑的理论和技术的需要。这本书同时根据现在润滑剂更新换代的速度很快的实际,以最新的资料介绍了各种润滑剂和有关产品的分类、性能指标和应用范围,又可以作为一本案头工具书随时查阅。

综上所述,这本书结构严谨,逻辑性强。每一章节既相互衔接又相对独立,具有广泛的适用性,相信广大读者读此书必有收益。

徐志伟

前 言

润滑是一个古老的话题，人们在生活和生产实践中，早就使用润滑的方法来减少摩擦副的磨损，例如，在古老的车轴和纺车轴摩擦面上加油润滑以延长使用寿命。但由于当时科学知识的限制，直到 19 世纪末才开始进行比较深入的研究。因而润滑技术又是一门崭新的应用学科。

润滑的应用是极其广泛的，几乎涉及到国民经济的所有部门，甚至每个家庭。润滑技术和任何有相对运动的机械设备的可靠运行及使用寿命是密切相关的。设备润滑工作的重要性现在已逐步为工矿企业的领导者和广大工程技术人员所认识。目前国内，润滑技术尚处于大家都认为重要，但却没有在实践上和行动上充分重视起来的状态。

润滑技术学就是用润滑的方法减少或控制两个相互接触并有相对运动的物体表面间的摩擦，降低磨损，保证设备可靠运行、延长设备使用寿命的一门应用科学。

摩擦是普遍存在的物理现象，凡是有相对运动的表面间都存在摩擦；伴随摩擦的必然结果是产生磨损。润滑则是减少或控制摩擦、降低磨损的有效方法之一。对于每一个工矿企业来说，解决好设备的润滑问题，使设备处于良好的润滑状态，才能够充分发挥设备潜力，延长设备使用寿命，最大限度地减少设备维修工作量，从而可以提高企业的综合经济效益。因而，搞好设备润滑是每一个企业领导者和设备管理人员不容忽视的重要课题。

润滑是设备管理和维护的重要基础工作，加强设备润滑是确保设备正常运行的必要措施之一。改善设备的润滑状况，采用先进合理的润滑方法，加强润滑管理，提高设备操作者对润滑重要性的认识，学习并掌握润滑的基本知识，不断提高润滑技术和管理水平，正确地掌握润滑操作技能，具有十分重要的意义。

要搞好设备润滑，就要使企业管理者、工程技术人员，尤其是设备管理和维修技术人员都了解并熟悉润滑的基本理论、技术和方法；掌握正确、合理的润滑技术，对保证设备正常安全运行具有不可替代的作用。润滑技术学属于多学科的边缘学科，涉及的知识面广，因而加强润滑理论和技术、方法的推广和学习具有十分重要的意义。

基于推动润滑知识的学习和提高的目的，本书从摩擦和润滑技术原理；润滑剂和有关产品的分类、质量指标、性能和应用范围；设备润滑技术应用和管理 3 个方面进行了详细阐述。由于笔者学识水平的限制，书中不足之处望读者批评指正。

李殿家
2005 年 10 月

目 录

第一章 摩擦与磨损	(1)
第一节 固体表面的接触	(1)
一、固体表面的性质	(1)
二、固体表面的接触	(4)
三、表面接触的物理与化学特性	(7)
第二节 摩擦	(9)
一、摩擦的分类与摩擦定律	(9)
二、摩擦机理	(10)
三、滑动摩擦	(15)
四、滚动摩擦	(18)
五、机械零件的摩擦	(19)
第三节 磨损	(22)
一、磨损机理	(23)
二、磨损分析	(33)
三、影响磨损的因素	(38)
四、减少磨损的途径	(40)
第二章 润滑原理	(43)
第一节 润滑状态及其转化	(43)
一、润滑状态的判断	(43)
二、润滑状态的转化	(45)
第二节 流体动压润滑	(46)
一、流体的粘度和动压承载机理	(46)
二、雷诺方程	(50)
三、湍流和流态转变	(56)
第三节 弹性流体动压润滑	(58)
一、弹流润滑机理和弹性变形	(58)
二、线接触弹流润滑的基本方程	(61)
三、线接触弹流润滑的油膜厚度	(65)
第四节 液体静压润滑	(67)
一、基本概念	(68)
二、液体静压润滑的流量计算	(71)
三、主要参数和基本计算公式	(76)
第五节 边界润滑	(79)

一、边界膜的特点和分类	(79)
二、边界润滑机理	(80)
三、影响边界膜润滑性能的因素	(82)
第三章 润滑剂的分类	(85)
第一节 润滑剂的基本类型	(85)
一、液体润滑剂	(85)
二、半固体润滑剂	(86)
三、固体润滑剂	(86)
四、气体润滑剂	(86)
第二节 润滑剂的分类和命名	(87)
一、润滑剂的总分组	(87)
二、工业液体润滑剂的粘度分类	(88)
三、润滑剂的详细分类	(88)
第三节 润滑脂的分类和命名	(105)
一、按稠化剂类型分类	(105)
二、按使用性能分类	(107)
第四节 石油添加剂的分类	(109)
一、润滑剂添加剂的分组	(109)
二、复合添加剂的分组	(109)
第五节 合成润滑剂的命名	(112)
一、合成润滑剂的命名方法	(112)
二、合成润滑剂的命名	(112)
第四章 常用润滑油	(114)
第一节 润滑油的质量指标	(114)
一、粘度	(114)
二、闪点和燃点	(115)
三、凝点和倾点	(116)
四、润滑油的纯洁性指标	(116)
五、润滑油的腐蚀性能	(117)
六、安定性	(118)
七、抗乳化性和抗泡沫性	(118)
八、抗磨性	(119)
第二节 常用润滑油	(119)
一、全损耗系统用油	(119)
二、齿轮油	(121)
三、压缩机油	(127)

四、内燃机油	(135)
五、主轴、轴承和离合器用油	(145)
六、导轨油	(147)
七、液压油	(148)
八、电器绝缘油	(158)
九、热传导液	(159)
十、汽轮机油和蒸汽汽缸油	(160)
第五章 润滑脂	(163)
第一节 润滑脂的组成和质量指标	(163)
一、润滑脂的组成	(163)
二、润滑脂的质量指标	(164)
第二节 润滑脂的流变性	(167)
一、粘塑性	(168)
二、触变性	(168)
三、膨胀性	(169)
第三节 常用润滑脂	(169)
一、单一皂基润滑脂	(169)
二、混合皂基润滑脂	(177)
三、复合皂基润滑脂	(179)
四、非皂基润滑脂	(184)
五、合成润滑脂	(186)
第六章 添加剂	(195)
第一节 润滑剂添加剂	(195)
一、清净剂和分散剂	(195)
二、抗氧化剂和抗氧化抗腐剂	(200)
三、油性剂和摩擦改进剂	(204)
四、极压抗磨剂	(205)
五、粘度指数改进剂	(209)
六、防锈剂	(211)
七、降凝剂	(214)
八、抗泡沫剂和抗乳化剂	(216)
第二节 复合添加剂	(218)
一、添加剂的配伍性	(218)
二、添加剂的复合	(219)
第三节 固体润滑剂	(220)
一、概述	(221)

二、几种常用固体润滑剂	(221)
三、作润滑油脂添加剂的固体润滑剂	(224)
第七章 机械零部件的润滑	(226)
第一节 轴承的润滑	(226)
一、滑动轴承的润滑	(226)
二、滚动轴承的润滑	(230)
第二节 齿轮传动的润滑	(238)
一、闭式齿轮传动的润滑	(238)
二、开式齿轮传动的润滑	(242)
三、蜗轮蜗杆传动的润滑	(243)
第三节 滑动导轨的润滑	(245)
一、滑动导轨润滑分析	(245)
二、滑动导轨润滑方式和润滑剂的选择	(246)
三、提高滑动导轨平稳性的措施	(248)
第四节 联轴器和离合器的润滑	(249)
一、联轴器的润滑	(249)
二、离合器的润滑	(251)
第五节 传动链条和钢丝绳的润滑	(253)
一、传动链条的润滑	(253)
二、钢丝绳的润滑	(255)
第六节 螺旋传动的润滑	(256)
一、滑动螺旋传动的润滑	(257)
二、滚动螺旋副的润滑	(258)
第七节 机械无级变速器的润滑	(258)
一、机械无级变速器对润滑油的要求	(259)
二、润滑方式和润滑油的选用	(259)
第八节 液压系统用油	(261)
一、液压系统对液压油的基本要求	(261)
二、液压油的选择	(261)
第八章 机械设备的润滑	(264)
第一节 内燃机的润滑	(264)
一、内燃机润滑的特点	(264)
二、内燃机对润滑油的性能要求	(265)
三、内燃机油的选择	(266)
第二节 压缩机的润滑	(269)
一、空气压缩机的润滑	(269)

二、其他气体压缩机的润滑	(275)
第三节 锻压设备的润滑	(275)
一、机械压力机的润滑	(276)
二、螺旋压力机的润滑	(279)
第四节 起重运输机械的润滑	(281)
一、桥式和龙门式起重机的润滑	(281)
二、轮式和履带式起重机的润滑	(282)
三、输送机械的润滑	(282)
第五节 工程机械的润滑	(283)
一、推土机的润滑	(283)
二、液压挖掘机的润滑	(284)
三、装载机的润滑	(284)
第六节 炼铁及烧结设备的润滑	(284)
一、原料场设备的润滑	(285)
二、烧结设备的润滑	(286)
三、炼铁设备的润滑	(287)
第七节 炼钢设备的润滑	(290)
一、转炉炼钢设备的润滑	(290)
二、电炉炼钢设备的润滑	(290)
三、炼钢附属设备的润滑	(291)
四、连铸设备的润滑	(291)
第八节 轧钢设备的润滑	(292)
一、加热设备的润滑	(292)
二、轧钢设备的润滑	(293)
第九章 润滑油的污染与控制	(295)
第一节 润滑油中的污染物及其劣化	(295)
一、污染物的种类	(295)
二、润滑油的劣化及影响因素	(297)
第二节 润滑油污染的检测	(299)
一、润滑油污染的检测方法	(300)
二、润滑油污染度的测定	(304)
三、油液污染度等级	(307)
四、油液中金属磨屑的现场监测	(310)
第三节 油液污染的控制	(311)
一、减少油液污染的措施	(311)
二、油液的过滤和净化	(313)

第十章 设备的润滑管理	(322)
第一节 设备润滑管理的任务和内容	(322)
一、设备润滑管理的基本任务	(322)
二、润滑管理的组织	(323)
三、润滑管理制度	(324)
四、润滑“五定”与“三过滤”	(327)
第二节 润滑油的更换	(328)
一、建立合理的换油制度	(328)
二、换油标准	(330)
三、换油步骤	(335)
第三节 润滑油的代用和掺配	(337)
一、润滑油的代用	(337)
二、润滑油的掺配	(338)
第四节 设备漏油的治理	(341)
一、设备漏油的原因和治理原则	(342)
二、静接合面漏油的治理	(344)
三、减速器漏油的治理	(349)
附录一 新旧润滑油牌号对照表	(353)
附录二 计算粘度指数用 L 、 D 、 H 数值表 (mm^2/s)	(354)
附录三 国内外润滑油对照表	(356)
附录四 国内外润滑脂对照表	(362)
参考文献	(364)

第一章 摩擦与磨损

摩擦是任何两个互相接触并有相对运动的物体间普遍存在的现象。机械中一切发生相对运动的零件接触表面间都存在着摩擦，同时机械所传递的一部分能量在克服摩擦阻力的过程中被消耗掉并转化成摩擦热使零件升温，表面层产生磨损。磨损是摩擦产生的后果。人们在实践中认识到，为了减少运动副的摩擦阻力和磨损，可以采用抗磨性较好的材料或用滚动摩擦代替滑动摩擦来提高使用寿命。润滑方法则是改善摩擦状态、减少磨损的重要途径。

第一节 固体表面的接触

摩擦、磨损和润滑都是在两个有相对运动的表面间进行的，因此，了解摩擦表面的特性与接触过程具有重要意义。首先要考虑两个摩擦表面的宏观和微观几何特性以及表面接触的物理与化学特性等。

一、固体表面的性质

(一) 表面形貌

一个看似光滑平整的零件表面，如果从微观上看，它是由许多形状各异的凸峰和凹谷组成的。零件表面的这种凸凹不平的微观几何形态称为表面形貌。凸峰是指表面上微小的不规则的微凸体，其几何形状是不规则的、复杂的，为了便于分析，常把这些凸峰形状理想化，典型的凸峰模型有半球形、圆柱形及圆锥体等。

一个理想的光滑表面与实际表面的差别在于其表面形状不同；表面大尺寸的差别，实际表面是波浪式的；表面小尺寸的差别，实际表面是粗糙的。所以，通常用表面形状误差、表面波纹度及表面粗糙度这3种几何特性来描述表面形貌。

(1) 表面形状误差 是在零件制造过程中形成的实际表面几何形状对理想几何形状的误差。如表面凸起、凹入和锥度等，一般无明显周期性变化。

(2) 表面波纹度 由间距比粗糙度大得多的、随机的或接近周期形式的成分构成的表面不平度。通常包括由工件加工时的意外因素引起的不平度，如机床、夹具、刀具、工件系统产生振动；系统间的不均匀运动或系统刚度差产生的变形以及零件热处理引起的扭曲等形成。

(3) 表面粗糙度 是指零件加工表面上具有的较小间距和较小峰谷高度的微观几何形状特性。一般由所采用的加工方法和（或）其他因素形成。

为了评定表面粗糙度，通常取一段用于判别具有表面粗糙度特征的基准线长度

(称为取样长度 L) 进行测量。为了能充分反映加工表面的粗糙度特征, 取评定轮廓所必须的一段长度, 它可包括一个或几个取样长度作为评定长度 L_n 。轮廓的最小二乘中线 m (简称中线) 是指具有几何轮廓形状并划分轮廓的基准线, 在取样长度内使轮廓线上各点轮廓偏距的平方和为最小 (见图 1-1)。在评定表面粗糙度参数时是以轮廓中线为基准线的。

轮廓偏距是指在测量方向上, 轮廓线上的点与基准线的距离, 用 y 表示。

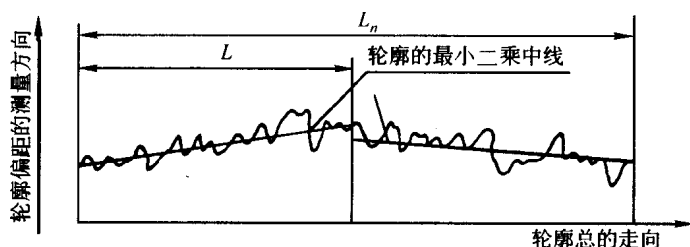


图 1-1 轮廓的最小二乘中线

表面粗糙度按以下参数之一进行评定。

a. 轮廓算术平均偏差 R_a , 指在取样长度 L 内轮廓偏距 y 绝对值的算术平均值 (见图 1-2)。

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

或按如下近似公式计算

$$R_a = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |Y_i| \quad 1-2$$

式中 Y_i ——第 i 个点的轮廓偏距值;

n ——在取样长度 L 内间隔个数。

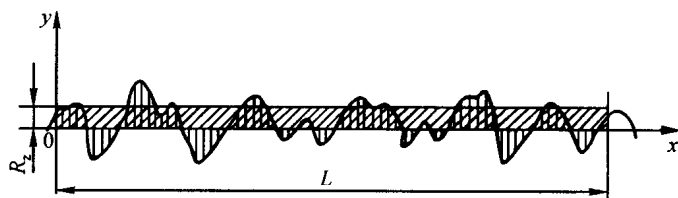


图 1-2 轮廓算术平均偏差 R_a

b. 微观不平度十点高度 R_z , 是指在取样长度内 5 个最大轮廓峰高的平均值与 5 个最大轮廓谷深的平均值之和 (图 1-3)。

$$R_z = \frac{1}{5} \left(\sum_{i=1}^5 y_{pi} + \sum_{i=1}^5 y_{vi} \right) \quad 1-3$$

式中 y_{pi} ——第 i 个最大的轮廓峰高;

y_{vi} ——第 i 个最大的轮廓谷深。

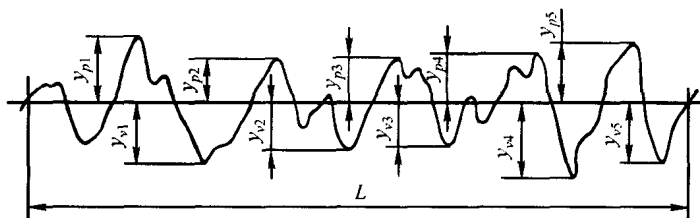


图 1-3 微观不平度的十点高度 R_z

c. 轮廓最大高度 R_y ，是指在取样长度内轮廓峰顶线和轮廓谷底线之间的距离（图 1-4）。

d. 轮廓水平截距 c ，轮廓峰顶线和平行于它与轮廓相交的截线之间的距离（图 1-5）。

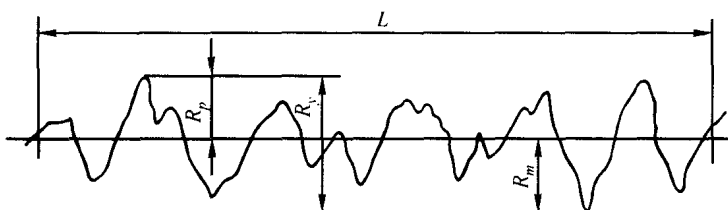


图 1-4 轮廓峰顶、谷底线

e. 轮廓支承长度 η_p ，是指在取样长度 L 内，一平行于中线的线与轮廓相截所得各段截线长度之和（图 1-5），由图可知：

$$\eta_p = b_1 + \dots + b_i + \dots + b_n$$

轮廓支承长度率 t_p ，是指轮廓支承长度 η_p 与取样长度 L 之比。

$$t_p = \eta_p / L$$

t_p 值是对应于不同水平截距 c 而给出的。它可用长度单位 μm 或轮廓最大高度 R_y 的百分数表示。

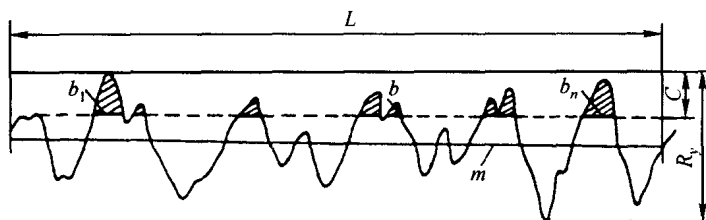


图 1-5 轮廓支承长度

除以上参数外，轮廓微观不平度的平均高度和轮廓曲线峰顶圆弧平均半径等对研究摩擦副的摩擦学特性也具有较重要意义。

表面粗糙度是通用的评价表面微观几何形状的重要参数。但它只能说明与表面垂直的截面上的表面轮廓，而无法说明表面微凸体的形状、尺寸、斜率及分布情况等。有些表面轮廓算术平均偏差虽然相同，但却具有完全不同的轮廓。因此，要把表面形貌描述好，还需要测量评定一些其他参数，如微凸体的形状及其分布状况等。

(二) 金属表面的结构

除了表面形貌影响接触时的摩擦学性质外，表面的结构也是重要的影响因素。

纯净的金属表面在大气条件下很难存在，在机械加工中暴露出来的纯净表面，很快就会被周围的介质污染而形成各种膜。

经机械加工形成的金属表面，其表面层结构见图 1-6。在基体材料上是变形层，即加工硬化层。加工方法不同变形层厚度和硬度也不同（见表 1-1）。变形层上是毕氏（Bieby）层，金属在机械加工过程中表面金属熔融、流动和冷却形成的冷硬层，是一不定形结构层或称微晶粒结构硬化层，厚度约为 $0.01\mu\text{m}$ 。

表 1-1 各种机械加工表面变形层特性

加工方法		变形层硬度	变形层厚度/ μm
		心部硬度	
车削		1.20 ~ 1.50	30 ~ 50
精车		1.40 ~ 1.860	20 ~ 60
端铣		1.40 ~ 1.60	40 ~ 100
平铣		1.20 ~ 1.40	40 ~ 80
铰孔		—	150 ~ 200
平磨		1.50	16 ~ 35
滚齿和刨齿		1.60 ~ 2.00	120 ~ 150
剃齿		—	≤ 100
外圆 磨削	淬硬钢	1.25 ~ 1.30	20 ~ 40
	低碳钢	1.60 ~ 2.00	30 ~ 60
	未淬硬钢	1.40 ~ 1.60	30 ~ 60

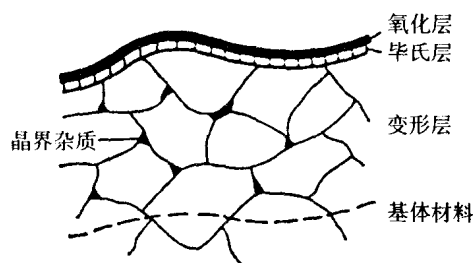


图 1-6 金属表面层剖面示意图

纯净金属表面在大气中氧的作用下，形成氧化物。所以毕氏层上有复合氧化物组成的氧化层，其厚度约为 $0.01 \sim 0.02\mu\text{m}$ 。同时，表面吸附大气中的各种气体分子，形成吸附层，其厚度约为 $0.5 \sim 3\text{nm}$ 。在有润滑剂的条件下，表面还附有润滑油膜。

综上所述，金属零件表面是不平滑的，有凸峰和凹谷。若放大观察，就像丘陵山区那样高低不平，有山峰、深谷分布在起伏的大地上。凸峰、凹谷的高低程度用粗糙度表示，粗糙度的大小取决于加工方法，加工越精细粗糙度越小。这些不同高度的微凸体在表面上的分布密度，服从正态分布定律。

二、固体表面的接触

(一) 表面接触力学

两个物体互相压紧时，在接触区附近产生的应力和变形称为接触应力和接触变形。接触应力和接触变形具有明显的局部性，随着离开接触处距离的增大而迅速减小。材料在接触处的变形受到各方面的限制，接触区附近处在三向应力状态。

1. 弹性接触

两个任意形状的物体接触于一点，若接触体是光滑而均质的，接触面积小于接触表面的面积，在法向力 p 的作用下两物体压紧后形成的接触面积为椭圆形，在接触面上压应力的大小按半椭球形分布，最大压应力发生在接触面中心处，在这种情况下，若在接触面上只出现弹性变形就称为弹性接触。

下面对固体表面接触产生变形的一般物理概念以及接触界面机械功的转移机理做简单叙述。首先从最基本的情况说起，在一个半无限长弹性体上，作用一个任意分布的载荷 $p(x, y)$ ，如图 1-7 所示。在接触区 A_0 内进行积分，则可得到总载荷 F_N 为

$$F_N = S_{A_0} p dx dy \quad 1-4$$

在机械的运动副中，很多是曲面的接触，如圆柱体及球的接触等。早在 1881 年赫兹研究了弹性体表面在载荷作用下产生的应力和应变提出了著名的弹性理论。赫兹理论在解决弹性体问题时，有如下假设：

- ① 材料具有完全弹性；
- ② 两个相接触的物体具有相同的弹性常数；
- ③ 表面是光滑的；
- ④ 在接触区内两个表面的曲率中心不在界面的同一侧；
- ⑤ 围绕接触表面公法线无自旋的相对角速度；
- ⑥ 接触物体不传递切向力（即

牵引力）。

尽管有上述假设，赫兹理论仍然被广泛应用着。对滚动轴承、齿轮、凸轮等点、线接触的机械运动副工作表面之间的弹性接触，可以用赫兹弹性接触理论加以说明。

点接触。钢球和钢球的接触（见图 1-8），在以接触区为圆的范围内任意半径 r 处的接触压力 p 可按式求出。

$$p = (3F/2\pi a^2) \cdot [1 - (r/a)^2]^{1/2}$$

$$\text{接触半径 } a = (3FR/2E')^{1/3}$$

$$\text{接触面积 } A_n = \pi a^2 = \pi (3FR/2E')^{2/3}$$

式中 F ——载荷；

R ——综合曲率半径， $R^{-1} = R_1^{-1} + R_2^{-1}$ ；其中 R_1, R_2 分别为两钢球半径；

E' ——综合弹性模量， $1/E' = [(1 - \nu_1^2)/E_1 + (1 - \nu_2^2)/E_2]/2$ ；其中 E_1, E_2 分别为两钢球的弹性模量；

ν_1, ν_2 ——两钢球的泊松比。

对垂直于界面所传递的机械功，必须计算两个钢球由于弹性变形引起的移近量 δ ，

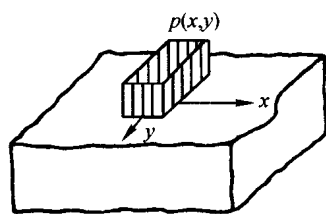


图 1-7 作用在半无限长弹性体上的载荷分布

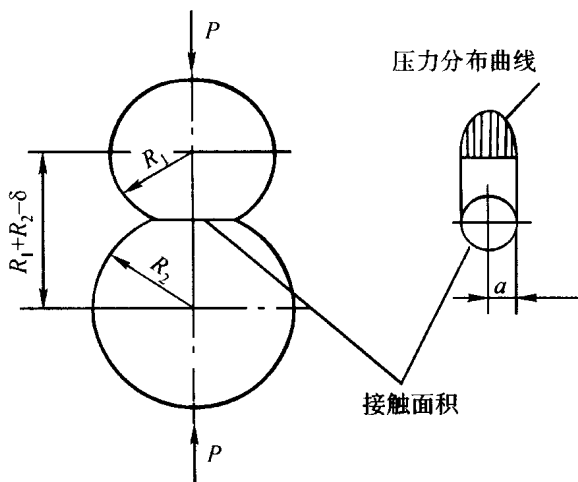


图 1-8 两圆球之间的赫兹接触

也称弹性变形量。

$$\delta = [9F^2/4E'^2R]^{1/3}$$

两个接触钢球的弹性势能 U 可用下面的关系式求得。

$$F = \partial u / \partial \delta$$

$$\partial \delta = (2/3) [9/4E'^2R]^{1/3} F^{-1/3} \partial F$$

$$\partial u = F \partial \delta = (2/3) [9/4E'^2R]^{1/3} F^{2/3} \partial F$$

$$\text{积分, 得, } u = \int_0^F (2/3) [9/4E'^2R]^{1/3} F^{2/3} \partial F = (2/5) [9/4E'^2R]^{1/3} F^{5/3}$$

对于纯弹性接触, 当脱离接触时, 势能转变为动能。如果是塑性接触, 上述赫兹理论则不再适用。

2. 塑性接触

当 $\delta_{\max}$ 达到较软物体抗拉屈服极限的 1.8 倍时, 开始发生塑性流动, 产生塑性变形。随着载荷的继续增加, 接触面积就相应增大, 除去载荷后, 则留下永久印痕 (布氏印痕)。这时的接触状态称为塑性接触。

两表面接触时, 随着载荷的增加, 两表面就靠得更紧, 接触微凸体的数量增加, 并与总载荷成正比, 而弹性接触点所承受的载荷值将不变。所以表面之间的接触是弹性的还是塑性的取决于表面的几何形状和材料性质。是弹性接触还是塑性接触可以用塑性指数来衡量。

塑性指数 C_p 为

$$C_p = (E'/2H) (R_s/r)^{1/2}$$

式中 E' ——综合弹性模量;

H ——较软材料的硬度 (HB);

R_s ——表面微凸体高度的算术平均偏差;

r ——微凸体综合曲率半径, $r^{-1} = r_1^{-1} + r_2^{-1}$, r_1 、 r_2 分别为两表面微凸体的平均曲率半径。

当 $C_p < 0.6$ 时是弹性接触; 若 $C_p > 1$, 则在部分接触区有塑性变形; $C_p > 10$ 则完全为塑性接触, 由于机械加工形成的表面 C_p 大多数在 10 以上, 所以几乎在任何接触情况下都有某些表面微凸体产生塑性变形。只有滚动轴承例外, C_p 约为 1 左右。在实际接触情况下, 表面微凸体顶端的曲率半径是比较小的, 即使在很小的接触载荷下也会有塑性变形产生。正确的磨合能形成较光滑的表面, 使接触明显地呈现出向弹性接触过渡的趋势。

(二) 表面接触面积

在运动副中, 两个相接触的表面总是粗糙的, 粗糙表面的接触可视为许多表面微凸体的接触。当载荷轻时, 接触微凸体呈弹性变形, 载荷重时就产生塑性变形。粗糙表面接触时应明确以下 3 个名词的含义 (图 1-9)。

(1) 表观接触面积 A_n 是指表面的宏观面积, 即这个表面的几何面积。若有一个边长为 a 、 b 的矩形表面, 则表观接触面积 $A_n = a \cdot b$ 。

(2) 轮廓接触面积 A_a 是指表观接触面积内, 表面被压皱部分所形成的面积。这个面积的大小与表面承受的载荷有关。