

摩擦学原理

温诗铸

清华大学出版社

339783

摩擦学原理

温诗铸



清华大学出版社

内 容 提 要

本书系统地论述了摩擦学的基本理论及其应用,内容涉及摩擦学研究的主要领域。本书取材新颖,较全面地反映了现代摩擦学的状况。

全书共二十五章,由流体润滑、弹性流体动压润滑与边界润滑、摩擦与磨损三部分组成。本书针对各种摩擦状态的特点,着重阐述摩擦过程的基本现象与表面层变化,进而介绍基本理论和各种计算方法以及测试技术,并说明它们在工程中的应用。

本书为机械学专业研究生教材,也可作为高等理工院校机械工程专业师生的教学参考书,以及供从事机械设计和研究的工程技术人员参考。



新华书店总店科技发行所发行

☆

开本: 850×1168 1/32 印张: 15 3/4 字数: 409 千字

1990年1月第1版 1990年1月第1次印刷

印数: 0001—4000

平: ISBN 7-302-00476-5/TB·2 定价: 3.90 元

精: ISBN 7-302-00481-1/TB·4 定价: 7.50 元

前 言

摩擦学 (Tribology) 是有关摩擦、磨损与润滑科学的总称。它是研究在摩擦与磨损过程中两个相对运动表面之间相互作用、变化及其有关的理论与实践的一门学科。由于摩擦引起能量的转换、磨损则导致表面损坏和材料损耗,而润滑是降低摩擦和减少磨损的最有效的措施。摩擦、磨损与润滑三者之间的关系十分密切。

摩擦学的研究对于国民经济具有重要意义。据估计,全世界大约有 $\frac{1}{2} \sim \frac{1}{3}$ 的能源以各种形式消耗在摩擦上。而摩擦导致的磨损是机械设备失效的主要原因,大约有 80% 的损坏零件是由于各种形式的磨损引起的。因此,控制摩擦,减少磨损,改善润滑性能已成为节约能源和原材料、缩短维修时间的重要措施。同时,摩擦学对于提高产品质量、延长机械设备的使用寿命和增加可靠性也有重要作用。由于摩擦学对工农业生产和人民生活的巨大影响,因而引起世界各国的普遍重视,成为近三十年来迅速发展的技术学科,并得到日益广泛的应用。

摩擦学问题中各种因素往往错综复杂,涉及到多门学科,例如流体力学、固体力学、流变学、热物理、应用数学、材料科学、物理化学,以及化学和物理学等内容。因此多学科的综合分析是摩擦学研究的显著特点。

由于摩擦学现象发生在表面层,影响因素繁多,这就使得理论分析和实验研究都较为困难,因而理论与实验研究的相互促进和补充是摩擦学研究的另一个特点。随着理论研究的日益深入和实

验技术日益先进，目前摩擦学研究方法的发展趋势正由宏观进入微观；由定性进入定量；由静态进入动态；以及由单一学科角度的分析进入多学科的综合研究。

目前已经有各种有关摩擦学的书籍出版，但大都偏重于介绍摩擦学的部分领域。这本《摩擦学原理》试图全面地阐述摩擦学整个领域的基本理论与应用，以使读者获得较系统的知识和了解本学科的全貌。全书共计二十五章可以分为三部分：第一章至第十章介绍流体润滑理论；第十一章至第十八章论及弹性流体动压润滑与边界润滑理论；第十九章至第二十五章阐述摩擦与磨损问题。

本书试图尽可能地介绍摩擦学最新的研究领域和发展趋势。关于本学科的经典内容，凡属基础理论，也都力求陈述清楚。

本书是在参阅大量专业文献，总结我们自己多年来的科学研究和教学经验的基础上编写而成。它是一本适于研究生和大学生使用的教学参考书，亦可供从事摩擦学研究和设计的工程技术人员使用。

由于摩擦学涉及的范围较广，而本书的篇幅有限，因此在取材和论述方面必然存在不少缺点，敬请广大读者提出批评指正。

在本书编写过程中，得到清华大学摩擦学研究所的同事们和研究生的热情支持和帮助，作者对他们表示真诚的感谢。

温诗铸

目 录

| | |
|------------------------------|-------|
| 第一章 流体润滑与流体性质 | (1) |
| §1-1 润滑状态 | (1) |
| §1-2 流体的粘度 | (3) |
| §1-3 粘度与温度 | (8) |
| §1-4 粘度与压力 | (12) |
| §1-5 粘度与剪应变率 | (14) |
| §1-6 润滑油的密度 | (16) |
| 参考文献..... | (17) |
| 第二章 Reynolds 方程 | (18) |
| §2-1 概述 | (18) |
| §2-2 普遍 Reynolds 方程..... | (20) |
| §2-3 润滑膜压力形成机理 | (25) |
| §2-4 应用与简化 | (27) |
| §2-5 积分边界条件 | (33) |
| 参考文献..... | (34) |
| 第三章 楔形滑块与推力轴承润滑 | (35) |
| §3-1 无限长斜面滑块 | (36) |
| §3-2 无限长其它楔形滑块 | (42) |
| §3-3 有限长滑块 | (46) |
| §3-4 推力轴承 | (49) |
| 参考文献..... | (51) |
| 第四章 径向轴承润滑 | (52) |
| §4-1 轴心位置与间隙形状 | (53) |

| | |
|---------------------------------|----------------|
| §4-2 无限短轴承 | (55) |
| §4-3 无限长轴承 | (66) |
| §4-4 有限长轴承 | (72) |
| 参考文献 | (73) |
| 第五章 润滑计算的数值法基础 | (74) |
| §5-1 有限差分法的应用 | (75) |
| §5-2 静压润滑(有限差分法) | (78) |
| §5-3 动压润滑(有限差分法) | (82) |
| §5-4 有限元法与边界元法 | (89) |
| §5-5 数值解法的其它问题 | (94) |
| 参考文献 | (98) |
| 第六章 能量方程与温度场计算 | (99) |
| §6-1 传导与对流散热 | (99) |
| §6-2 能量方程 | (101) |
| §6-3 能量方程的解析解 | (104) |
| §6-4 能量方程的数值解法 | (106) |
| §6-5 变粘度润滑计算 | (108) |
| 参考文献 | (114) |
| 第七章 挤压膜与动载荷轴承 | (115) |
| §7-1 概述 | (115) |
| §7-2 挤压膜润滑 | (117) |
| §7-3 动载荷径向轴承的 Reynolds 方程 | (122) |
| §7-4 简单动载荷轴承计算 | (125) |
| §7-5 一般动载荷轴承计算 | (128) |
| 参考文献 | (132) |
| 第八章 油膜振荡与动态特性 | (133) |
| §8-1 油膜振荡现象 | (133) |
| §8-2 油膜振动频率与抗振轴承 | (137) |

| | |
|--|---------|
| §8-3 油膜动态特性 | (142) |
| §8-4 动态特性系数的确定 | (145) |
| §8-5 轴承稳定性分析 | (150) |
| 参考文献 | (154) |
| 第九章 湍流润滑 | (155) |
| §9-1 概述 | (155) |
| §9-2 层流到湍流的转变 | (156) |
| §9-3 轴承的临界雷诺数 Re_c | (159) |
| §9-4 湍流运动方程 | (161) |
| §9-5 湍流润滑理论 | (165) |
| §9-6 湍流润滑的轴承性能 | (170) |
| 参考文献 | (172) |
| 第十章 静压润滑与气体润滑 | (173) |
| §10-1 静压推力盘 | (174) |
| §10-2 静压轴承的优化设计 | (177) |
| §10-3 轴承刚度与节流器 | (179) |
| §10-4 气体润滑 | (183) |
| 参考文献 | (188) |
| 第十一章 点线接触问题的经典理论 | (189) |
| §11-1 几何模拟与弹性模拟 | (189) |
| §11-2 Hertz 接触应力理论 | (192) |
| §11-3 刚性接触润滑理论 | (196) |
| §11-4 刚性润滑理论的局限性 | (200) |
| 参考文献 | (202) |
| 第十二章 弹性流体动压润滑理论 | (203) |
| §12-1 Ertel-Грубин 近似解 | (203) |
| §12-2 线接触弹流的数值解法 | (209) |
| §12-3 Dowson-Higginson 膜厚公式(线接触) | (217) |

| | |
|--------------------------------|---------|
| §12-4 点接触弹流的数值解法 | (219) |
| §12-5 Hamrock-Dowson 膜厚公式(点接触) | (223) |
| 参考文献 | (224) |
| 第十三章 弹流润滑特性与测试 | (225) |
| §13-1 压力分布与油膜形状 | (225) |
| §13-2 乏油问题 | (234) |
| §13-3 点接触弹流润滑特性 | (236) |
| §13-4 弹流润滑的测试 | (240) |
| 参考文献 | (251) |
| 第十四章 弹流润滑理论的应用 | (252) |
| §14-1 线接触问题的润滑状态图 | (252) |
| §14-2 齿轮传动 | (256) |
| §14-3 滚动轴承 | (264) |
| §14-4 凸轮机构 | (268) |
| §14-5 点接触问题的润滑状态图 | (270) |
| §14-6 非稳态弹流润滑问题 | (273) |
| 参考文献 | (276) |
| 第十五章 弹流润滑中的热效应 | (277) |
| §15-1 弹流润滑的能量方程 | (277) |
| §15-2 入口区热效应计算 | (279) |
| §15-3 热弹流理论的数值方法 | (281) |
| §15-4 热弹流理论的主要结果 | (286) |
| §15-5 表面接触温度 | (293) |
| 参考文献 | (298) |
| 第十六章 弹流摩擦与流变润滑 | (299) |
| §16-1 摩擦曲线与摩擦力 | (299) |
| §16-2 牛顿流体的摩擦力计算 | (303) |
| §16-3 非牛顿流体的摩擦力计算 | (305) |

| | |
|-------------------------|---------|
| §16-4 润滑脂的弹流润滑 | (313) |
| 参考文献 | (316) |
| 第十七章 部分膜弹流润滑 | (318) |
| §17-1 基本方程 | (319) |
| §17-2 部分膜弹流润滑的特性 | (324) |
| §17-3 膜厚比与表面损伤 | (329) |
| §17-4 微观弹流润滑 | (333) |
| 参考文献 | (334) |
| 第十八章 边界润滑与表面膜 | (335) |
| §18-1 边界润滑的类型 | (335) |
| §18-2 表面膜的形成及特性 | (338) |
| §18-3 边界润滑的特性 | (343) |
| §18-4 吸附热与临界温度 | (346) |
| §18-5 润滑剂的添加剂 | (350) |
| 参考文献 | (353) |
| 第十九章 摩擦表面形态与表面接触 | (354) |
| §19-1 表面形貌参数 | (354) |
| §19-2 表面形貌的统计参数 | (357) |
| §19-3 表层结构与表面性质 | (362) |
| §19-4 粗糙表面的接触 | (364) |
| 参考文献 | (371) |
| 第二十章 固体摩擦理论 | (372) |
| §20-1 摩擦的基本特性 | (373) |
| §20-2 简单的摩擦理论 | (376) |
| §20-3 粘着摩擦理论 | (378) |
| §20-4 摩擦二项式定律 | (385) |
| §20-5 滑动摩擦的影响因素 | (387) |
| 参考文献 | (396) |

| | |
|--------------------------------|---------|
| 第二十一章 磨粒磨损与粘着磨损 | (397) |
| §21-1 磨损的分类..... | (398) |
| §21-2 磨粒磨损..... | (402) |
| §21-3 粘着磨损..... | (408) |
| §21-4 胶合计算准则..... | (416) |
| 参考文献..... | (420) |
| 第二十二章 表面疲劳磨损与腐蚀磨损 | (421) |
| §22-1 表面疲劳磨损..... | (421) |
| §22-2 接触疲劳准则与疲劳寿命..... | (429) |
| §22-3 腐蚀磨损..... | (436) |
| §22-4 微动磨损..... | (438) |
| §22-5 气蚀..... | (439) |
| 参考文献..... | (442) |
| 第二十三章 宏观磨损规律 | (443) |
| §23-1 磨损过程曲线..... | (444) |
| §23-2 磨合磨损..... | (445) |
| §23-3 表面品质与磨损..... | (450) |
| §23-4 摩擦副材料..... | (455) |
| 参考文献..... | (458) |
| 第二十四章 磨损理论与磨损计算 | (459) |
| §24-1 粘着磨损理论..... | (459) |
| §24-2 疲劳磨损理论..... | (461) |
| §24-3 能量磨损理论..... | (462) |
| §24-4 剥层磨损理论..... | (465) |
| §24-5 IBM 磨损计算方法..... | (467) |
| §24-6 组合磨损计算方法..... | (470) |
| 参考文献..... | (475) |
| 第二十五章 磨损检测与分析 | (476) |

| | |
|----------------------|---------|
| §25-1 磨损实验与装置····· | (476) |
| §25-2 磨损量的测量····· | (478) |
| §25-3 摩擦表面形态的分析····· | (485) |
| §25-4 磨损状态的检测····· | (487) |
| §25-5 磨损失效分析····· | (489) |
| 参考文献····· | (492) |

第一章 流体润滑与流体性质

§1-1 润 滑 状 态

润滑的目的是在摩擦表面之间形成低剪切强度的润滑膜，用它来减少摩擦阻力和降低材料磨损。润滑膜可以由液体或气体组成的流体膜或者固体膜。根据润滑膜的形成原理和特征，润滑状态可以分为：(1)流体动压润滑；(2)流体静压润滑；(3)弹性流体动压润滑；(4)边界润滑；(5)干摩擦状态等五种基本类型。表 1-1 列出了各种润滑状态的基本特征。

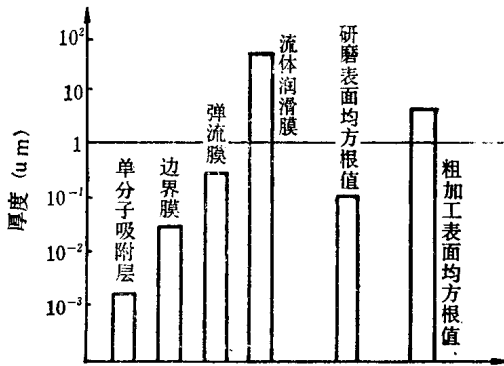


图 1-1 膜厚度与粗糙度

各种润滑状态所形成的润滑膜厚度不同，但是单纯由润滑膜的厚度还不能准确地判断润滑状态，尚须与表面粗糙度进行对比。图 1-1 列出润滑膜厚度与粗糙度的数量级。只有当润滑膜厚度足以超过两表面的粗糙峰高度时，才有可能完全避免峰点接触而实

表 1-1 各种润滑状态的基本特征

| 润滑状态 | 典型膜厚 | 润滑膜形成方法 | 应用 |
|----------|--|--------------------------------|------------------------|
| 流体动压润滑 | $1 \sim 100 \mu\text{m}$ | 由摩擦表面的相对运动所产生的动压效应或挤压效应形成流体润滑膜 | 中高速下的面接触摩擦副,如滑动轴承 |
| 流体静压润滑 | $1 \sim 100 \mu\text{m}$ | 通过外界压力将流体送到摩擦表面之间,强制地形成润滑膜 | 所有速度下的面接触摩擦副,如滑动轴承、导轨等 |
| 弹性流体动压润滑 | $0.1 \sim 1 \mu\text{m}$ | 与流体动压润滑相同 | 中高速下的点线接触摩擦副,如齿轮、滚动轴承等 |
| 边界润滑 | $10^{-3} \sim 5 \times 10^{-2} \mu\text{m}$ | 润滑油中的成份与金属表面产生物理或化学作用而形成润滑膜 | 低速度或者重载条件下的摩擦副 |
| 干摩擦状态 | $10^{-3} \sim 10^{-2} \mu\text{m}$ (氧化膜厚) | | 无润滑或自润滑的摩擦副 |

现全膜流体润滑。对于实际机械中的摩擦副,通常总是几种润滑状态同时存在,统称为混合润滑状态。

根据润滑膜厚度鉴别润滑状态的办法虽然是可靠的,但由于测量上的困难,往往不便采用。另外,也可以用摩擦系数值作为判断各种润滑状态的依据。图 1-2 为摩擦系数的典型数值。

随着工况参数的改变可能导致润滑状态的转化。图 1-3 是典型的 Streibeck 曲线,它示出滑动轴承的润滑状态转化过程以及摩擦系数随无量纲轴承特性数的变化。这里, η 为润滑油粘度; U 为滑动速度; p 为轴承单位面积载荷。

应当指出:研究各种润滑状态的特性及其变化规律所涉及的学科各不相同,处理问题的方法也不一样。对于流体润滑状态,包括流体动压润滑和流体静压润滑,主要是应用流体力学和传热学、

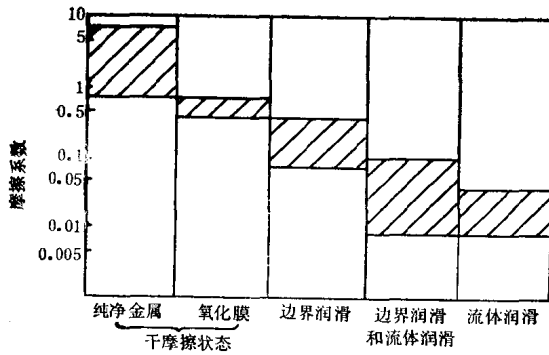


图 1-2 摩擦系数的典型值

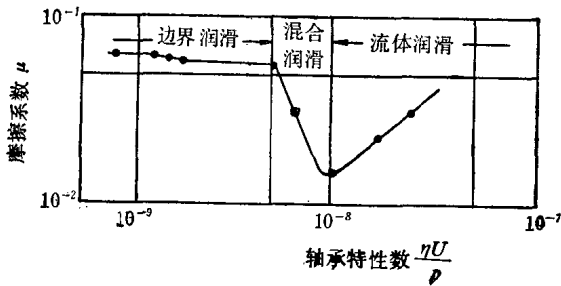


图 1-3 Stribeck 曲线

振动力学等来计算润滑膜的承载能力及其它物理特性。在弹性流体动压润滑中,由于载荷集中作用,还要根据弹性力学分析接触表面的变形以及润滑剂的流变学性能。对于边界润滑状态,则是从物理化学的角度研究润滑膜的形成与破裂机理。而在混合润滑和干摩擦状态中,主要的问题是限制磨损,它将涉及到材料科学、弹塑性力学、传热学、化学和物理学等内容。

§1-2 流体的粘度

在现代工业中,用作润滑剂的流体种类繁多,除最常用的润滑

油和润滑脂之外,空气或气体润滑现在已相当普遍,用水或其它工业流体作为润滑剂也日益广泛,例如在核反应堆里采用液态金属钠润滑。在某些场合也可以使用固体润滑剂,例如石墨、二硫化钼或聚四氟乙烯(PTFE)等。在本章中仅限于讨论与润滑理论有关的流体润滑剂的物理性能。

根据润滑理论的分析,润滑剂最重要的物理性质是它的粘度。在一定的工况条件下,润滑剂的粘度是决定润滑膜厚度的主要因素。例如,对于流体动压润滑,润滑膜厚度与粘度成正比;而在弹性流体动压润滑下,润滑膜厚度与粘度的0.7次方成正比。虽然润滑剂的粘度不直接影响边界润滑膜厚度,但对于边界润滑下的粗糙表面,由于在接触峰点之间形成的油包也承受一部分载荷,而润滑剂的粘度与油包的承载能力密切相关。

另一方面,粘度也是影响摩擦力的重要因素。高粘度的润滑剂不仅引起很大的摩擦损失和发热,而且难以对流散热。这样,由于摩擦温度的升高,可能导致润滑膜破裂和表面磨损。所以,对于任何实际的工况条件,都存在着合理的粘度值范围。

润滑剂的粘度和密度是随温度、压力等工况参数而变化的。在以液体作润滑剂的流体动压润滑中,主要的问题是粘度性质及其与温度的关系。气体润滑时,润滑剂的可压缩性即密度随压力的变化将具有重要作用。而对于弹性流体动压润滑状态,温度和压力对粘度的影响以及润滑剂的压缩性都将成为不可忽视的问题。

一、动力粘度与运动粘度

流体流动时,由于流体与固体表面的附着力和流体内部分子间的作用,不断产生剪切变形,而流体的粘滞性就是流体抵抗剪切变形的能力。粘度是流体粘滞性的度量,用以描述流动时的内摩擦。

Newton 最先提出粘性流体的流动模型。他认为流体的流动

是许多极薄的流体层之间的相对滑动，如图 1-4a 所示。由于流体的粘滞性，在相互滑动的各层之间将产生剪应力，亦即流体的内摩擦力，由它们将运动传递到各相邻的流体层，使流动较快的层减速，而流动较慢的层加速，形成按一定规律变化的流速分布。图 1-4b 表示在厚度为 h 的流体表面上有一块面积为 A 的平板，在 F 力的作用下以速度 U 运动。此时，由于粘性流体的内摩擦力将运动依次传递到各层流体，使各层的流速 u 按直线分布。

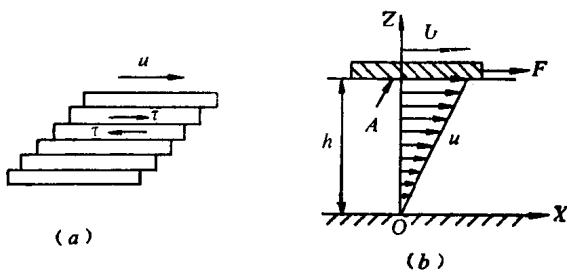


图 1-4 流动模型

Newton 还提出了粘滞剪应力与剪应变率成正比的假设，称为牛顿粘性定律，即

$$\tau = \eta \dot{\gamma} \quad (1-1)$$

其中， τ 为剪应力，即单位面积上的摩擦力， $\tau = F/A$ ； $\dot{\gamma}$ 为剪应变率，即剪应变随时间的变化率， $\dot{\gamma} = d\gamma / dt$ 。

$$\dot{\gamma} = \frac{d\gamma}{dt} = \frac{d}{dt} \frac{dx}{dz} = \frac{d}{dz} \frac{dx}{dt} = \frac{du}{dz}$$

可知；剪应变率等于流动速度沿流体厚度方向的变化梯度。这样，牛顿粘性定律可写成

$$\tau = \eta \frac{du}{dz} \quad (1-2)$$

式中的比例常数 η 定义为流体的动力粘度。

凡是服从牛顿粘性定律的流体统称为牛顿流体，而不符合该