

---

# 摩擦学原理与应用

---

王松年 苏诒福 江亲瑜 编著

中国铁道出版社

## 内 容 简 介

本书较系统地介绍了摩擦学的基本理论与部分应用研究。全书共分：概论、表面性质与形貌、固体表面接触、摩擦、磨损、润滑理论、弹流、摩擦副表面温度计算、润滑材料、铁谱技术及试验机与试验方法简介等十一章。其中摩擦副表面温度计算、铁谱技术、磨损及弹流等章节的部分内容，不仅内容较新，而且提出了一些新的概念和计算方法。

本书可供高等院校有关专业师生做教材，也可供工程技术人员自学及进行应用技术研究时使用。

## 摩擦学原理与应用

王松年 苏诒福 江亲瑜 编著

\* \* \*

中国铁道出版社出版

(北京市东单三条14号)

中国铁道出版社发行 各地新华书店经售

华东交通大学印刷厂印

---

开本：787×1092mm 1/32 印张：11.75 数：265千

1990年8月 第1版 第1次印刷

印数：1—1000册

---

ISBN7-113 00877-1/TH·28

定价：4.30元

## 前 言

摩擦学是最近廿年发展起来的一门边缘学科。它是研究相对运动的接触表面及有关理论与实践的科学技术。尽管恒古以来，人们就已知道摩擦磨损并在利用或克服它，但真正认识并大力研究开发它却是在1966年英国H·Peter Jost教授发表其著名摩擦学调查报告之后。摩擦学的社会和经济意义，立即引起了全世界的注意，使之在极短时间内，得到了很大的发展。

作为摩擦学，它有以下特点：

1、它的存在遍及整个机械行业，还深入到生物、空气和水力学。可以说哪里有运动，哪里就有摩擦学的问题需要解决；

2、它是各种知识的综合，包括物理、化学、金属学及其热处理、接触力学、表面及其强化以及各种材料学科；

3、它的研究特点是：从理论到实践，从静态到动态，从宏观到微观，从零件到系统，因而难度大、实践性强；

4、大多数工程技术人员及管理人员，面对着摩擦学这个陌生的世界，不但没有充分掌握它，甚至还未认识到其重要性，因而摩擦学理论与技术不只是学习掌握的问题，也存在认识上的差距。

应当说导致近年来摩擦学迅速发展的重要原因，主要是它的应用实践性和随之而来的极大的经济效益。因此，本书在编写中，一方面力求将一些基本原理阐述清楚；另一方面

---

着重强调了应用研究及其实践。故书中介绍了作者多年来的  
一些研究结果，以便能对读者起到抛砖引玉的启发作用。例  
如，在表面形貌一节中介绍了有关应用新工艺；在磨损一章  
中介绍了三体磨损的规律及为减小磨损所提出的滤清装置选  
择与清洁度规范确定；在温度计算一章中介绍了作者所创的  
齿轮胶合瞬时温度计算公式及齿面温度场计算方法；在铁谱  
技术一章，一方面介绍了这种新的分析检测仪器，另一方面  
也介绍了些具体应用研究结果。书中也提出了一些新的概念  
和计算方法，如“等效磨粒”与“等效磨损”的概念；润  
滑状态判别中的可靠性概念及其计算方法。

为了使读者阅读方便，本书力求使内容表格和图显化，  
故全书包括数表100个，插图207幅。

本书共计十一章，其中一、二、三、五、八、九、十一  
章系由王松年执笔，六、七及第十章由苏诒福执笔，第四章  
由江亲瑜执笔，全书最后由王松年统稿。

限于水平，本书编写中错误在所难免，衷心希望同行专  
家批评指正。

作 者

# 目 录

## 第一章 概 论

- § 1 摩擦学定义及其重要性…………… (1)
  - 一、摩擦学定义…………… (1)
  - 二、摩擦学内容…………… (1)
  - 三、摩擦学的重要性…………… (2)
- § 2 摩擦学国内外发展动态…………… (3)
  - 一、国外研究动态…………… (4)
  - 二、国内研究动态…………… (6)
- § 3 摩擦学今后研究方向…………… (7)

## 第二章 固体表面性质及形貌

- § 1 固体表面的性质…………… (9)
  - 一、自由表面的组成…………… (9)
  - 二、固体表面的性能…………… (10)
- § 2 表面粗糙度的表示方法…………… (12)
  - 一、表面粗糙度的高度数值…………… (12)
  - 二、表面粗糙度的其他参数…………… (14)
  - 三、表面粗糙度的分布函数…………… (19)
  - 四、表面轮廓的自相关函数及模型参量…………… (21)
  - 五、实际表面凸峰的理想化与模型化…………… (24)
- § 3 表面形貌的影响与应用技术…………… (25)
  - 一、形状误差与波度的影响…………… (25)
  - 二、表面粗糙度的影响…………… (26)
  - 三、波度和表面粗糙度的技术应用…………… (28)

## 第三章 固体表面接触

§ 1 固体表面的接触	(31)
一、接触面积	(31)
二、固体表面间的接触性质	(34)
§ 2 固体表面的相互作用	(41)
一、分子作用	(41)
二、机械作用	(45)
§ 3 边界膜的作用与性能	(47)
一、边界润滑剂的分子结构	(48)
二、极性物在表面的吸附作用	(50)
三、边界膜及其性能	(51)
§ 4 边界膜的解吸温度	(59)
一、表面接触温度	(59)
二、边界膜解吸温度	(62)
<b>第四章 金属的摩擦</b>	
§ 1 概述	(65)
§ 2 摩擦的分类	(66)
一、按摩擦副的运动形式分类	(66)
二、按摩擦副的运动状态分类	(67)
三、按表面的润滑状态分类	(67)
§ 3 经典的摩擦定律	(69)
§ 4 干摩擦	(71)
一、机械啮合理论	(72)
二、分子吸引理论	(72)
三、静电理论	(73)
四、分子-机械理论	(73)
五、粘着理论	(73)
§ 5 边界摩擦	(81)

- 一、边界摩擦的机理····· (81)
- 二、边界膜的强度····· (83)
- 三、提高边界膜强度的方法····· (84)

## 第五章 金属的磨损

- § 1 磨损过程、分类及磨损率····· (87)
  - 一、磨损过程····· (87)
  - 二、磨损分类和磨损率····· (89)
- § 2 粘着磨损····· (91)
  - 一、粘着磨损分类····· (92)
  - 二、粘着磨损定律····· (94)
  - 三、粘着磨损的影响因素····· (99)
- § 3 磨粒磨损····· (101)
  - 一、磨粒磨损分类····· (102)
  - 二、磨粒磨损机理····· (103)
  - 三、磨粒磨损的影响因素····· (106)
  - 四、提高抗磨粒磨损能力····· (113)
- § 4 表面疲劳磨损····· (114)
  - 一、滚动接触疲劳磨损····· (115)
  - 二、滑动接触疲劳磨损····· (118)
  - 三、表面疲劳磨损的影响因素····· (119)
- § 5 腐蚀磨损····· (121)
  - 一、氧化磨损····· (121)
  - 二、特殊介质腐蚀磨损····· (124)
  - 三、微动腐蚀磨损····· (125)
  - 四、气蚀····· (129)
- § 6 润滑油的滤清和清洁度对磨损的影响····· (130)
  - 一、滤清装置的参数选择····· (131)

二、清洁度及其规范·····	(134)
第六章 流体润滑理论	
§ 1 流体动压润滑的理论基础·····	(138)
一、流体流动的连续方程·····	(139)
二、纳维-斯托克斯方程的简化·····	(141)
三、全雷诺方程及其简化·····	(143)
四、雷诺方程的几种解法·····	(149)
§ 2 径向滑动轴承·····	(152)
一、几何关系及油膜厚度·····	(154)
二、按无限宽理论的承载能力计算·····	(156)
三、轴承中的摩擦阻力和摩擦系数·····	(164)
§ 3 推力轴承·····	(167)
第七章 弹性流体动力润滑	
§ 1 概述·····	(171)
§ 2 润滑机理-弹流油膜的形成·····	(173)
§ 3 刚性滑动体的流体动压润滑·····	(175)
一、等效圆柱体·····	(175)
二、马丁方程·····	(176)
§ 4 线接触全膜弹流理论·····	(178)
一、格鲁宾理论·····	(178)
二、道森-希金森理论·····	(183)
三、影响压力分布和油膜形状的因素分析·····	(185)
§ 5 弹流润滑状态图·····	(189)
§ 6 润滑状态的判别·····	(194)
一、磨粒尺寸及其对润滑状态的影响·····	(195)
二、磨粒尺寸分布与润滑状态可靠性计算·····	(199)
三、结论·····	(205)



§ 7 点接触全膜弹流润滑	(206)
§ 8 弹流理论的应用	(209)
一、弹流理论在齿轮传动中的应用	(210)
二、弹流理论在发动机缸套活塞环润滑状态计算中的应用	(216)
第八章 齿轮摩擦副的温度计算	
§ 1 接触表面的温度	(227)
§ 2 齿面胶合温度计算	(228)
一、齿面胶合温度计算的发展	(228)
二、闪温准则及其新计算方法	(229)
三、积分准则及其新计算方法	(233)
四、讨论	(236)
§ 3 齿轮胶合设计计算方法的应用	(237)
一、校核该对齿轮的胶合强度	(239)
二、按本书方法优化设计	(239)
§ 4 齿面温度场的计算	(245)
一、齿面瞬时温度的热传导方程及边界条件	(245)
二、有限元法计算齿面瞬时温度的基本原理和程序设计	(247)
三、计算结果及其分析	(251)
第九章 润滑材料	
§ 1 润滑剂的主要物理化学性能	(259)
一、粘度	(259)
二、闪点、燃点	(261)
三、酸性	(261)
四、氧化安定性	(262)
五、乳化度、抗乳化度	(263)

六、抗泡沫性, 空气释放值	(263)
七、油性	(264)
八、油膜强度	(264)
九、皂化值	(265)
十、腐蚀度	(265)
十一、机械杂质	(265)
十二、剪切安定性	(266)
<b>§ 2 润滑油随外界条件的变化特性</b>	(266)
一、密度与温度的关系	(266)
二、粘度与温度的关系	(268)
三、粘度与压力的关系	(270)
<b>§ 3 各种润滑剂及其性能与用途</b>	(271)
<b>§ 4 润滑剂的添加剂</b>	(292)
<b>§ 5 固体润滑剂</b>	(292)
一、固体润滑剂的作用和种类	(292)
二、固体润滑剂及自润滑材料的应用	(294)
三、机械零件的固体润滑	(296)
<b>§ 6 润滑油脂的选择方法</b>	(297)
一、滑动轴承油脂的选择	(297)
二、滚动轴承油脂的选择	(300)
三、齿轮润滑油脂的选择	(301)
<b>第十章 铁谱技术及其应用</b>	
<b>§ 1 概述</b>	(307)
<b>§ 2 铁谱仪的原理与结构</b>	(310)
一、分析式铁谱仪	(310)
二、直读式铁谱仪	(319)
三、“在线”铁谱仪	(324)

四、旋转式铁谱仪.....	(325)
§ 3 磨损颗粒的识别.....	(326)
一、钢铁磨损颗粒.....	(326)
二、有色合金磨损磨粒.....	(329)
三、铁的氧化物.....	(330)
四、非金属颗粒.....	(330)
§ 4 铁谱技术的应用.....	(330)
一、在磨损机理研究上的应用.....	(332)
二、在机器运行监测上的应用.....	(332)
三、在磨粒尺寸分布规律统计上的应用.....	(348)
第十一章 常用试验方法与试验机	
一、摩擦学中试验的分类.....	(354)
二、常用的典型试验.....	(355)
三、常用试样试验机.....	(355)
四、试验机的选择.....	(356)
五、试验方法.....	(357)
<b>参考目录</b> .....	(363)

# 第一章 概 论

## §1 摩擦学定义及其重要性

### 一、摩擦学的定义

摩擦、磨损与润滑统称为摩擦学。它是研究相互接触的运动表面间摩擦磨损机理与程度、作用着的切向力以及润滑介质在其中所产生的作用的科学。

摩擦是现象，磨损是结果，润滑剂则是改善摩擦、降低磨损的重要介质，三者间有着密切的不可分割的联系。

由于相互接触的两运动表面间摩擦磨损机理及润滑状态的复杂性，在摩擦学研究和技术应用中，常常涉及到很多学科如物理、化学、流体和固体力学、金属学及其热处理及传热学，也要涉及到机械设计与制造及润滑管理等，因此，摩擦学是一门跨学科科学。

### 二、摩擦学的内容

摩擦学是一门理论性与技术性都很强的学科，因而其研究内容非常广泛，大体上可分为以下几个方面：

1、相互接触的两运动表面间摩擦、磨损机理与相应的理论；

2. 不同润滑状态的研究与计算；

a、液体润滑状态——静压润滑、液体动力及弹性流体动力润滑、空气静压与动力润滑；

b、非液体润滑状态——边界润滑及固体润滑；

3、耐磨与减磨材料的研制和选择；

4、润滑剂及其添加剂的研究与应用；

5、为改进润滑状态、提高使用寿命所进行的系统与零件的设计及加工；

6、摩擦学试验、测试及工况监控。

### 三、摩擦学的重要性

凡是有机机械运动的地方，总有摩擦与磨损的问题存在，因而必然伴随有能源消耗，原材料损失以及由于换修所造成的人力财力浪费。根据国内外有关统计调查，全世界能源的1/3是消耗在摩擦上，零件的60%是由于磨损而失效的，这个统计数字是惊人的。但如在工业生产中很好地运用摩擦学理论与技术，它所带来的经济效益是惊人的，表1—1列出了各国很好运用这门科学后所取得的结果。

表1—1

国别	投资	节约	备注
英国		5亿英镑/年	实际超过7亿
英铁		2700万磅/年	
美国		国民生产总值1%	
美国	2400万美元	节约能源162亿美元	仅运输机制行业
日本		能源3%	仅改良润滑油
中国	8亿元	国民生产总值1.37% (400亿元)	
中铁		3亿元/年	
大庆	268万元	1.4亿元/年	

注：英铁为英国铁路，中铁为中国铁路。

以下不妨再举一些具体例子说明摩擦学的重要性。

1、波兰每年用于设备维修的费用大于投资的两倍，停机维修所占时间为生产时间的三倍，损失占国民生产总值的15%；

2、我国纺织行业由于摩擦消耗的能源达85%，纱锭寿命只有3年，而国外达10年，每年更换纱锭的费用约1000万元；

3、农机院的调查表明，每年用于农机犁刀的钢材为31800吨，而磨损在泥土中的达800吨；

4、由于缺乏摩擦学知识，某单位一部机器反复修理8次，停产3个月，损失达百万元，但运用摩擦学知识找到真正原因后，解决故障只花费了几十元；

5、当前引进不少国外高精设备，由于使用单位缺乏润滑知识，随便更换润滑油，造成不少机器因此而损坏。

因此，摩擦学知识和技术在国民生产中占有非常重要的地位，一个工程技术人员，如果不懂摩擦学是不可想象的。所以在世界各国都纷纷成立摩擦学研究机构，仅波兰就有7个研究中心，一些发达的国家，都设立了摩擦学专业和培养该学科研究生。我国近几年也成立了不少研究机构，很多高校建立了摩擦学研究中心或研究室，并开始培养有关博士生及硕士生。

## § 2 摩擦学国内外发展动态

作为一门科学，摩擦学的研究有着古老的历史，在古老的中国、埃及和罗马，都曾有着摩擦学原理应用的光辉历史。但是其发展都极为缓慢，只是到了十五世纪，Leonardo da Vinci才第一个对摩擦学提出了科学的论断：即摩擦力与载荷成正比，而与名义接触面积无关。Amonton 于1699年也提出了这两条定律。约在1780年Coulomb提出了第三摩擦定律，即摩擦力与速度无关。这三条定律做为公理一直沿用到今天。而对润滑及其理论的认识和完善，则是在1883年Beauchamp Tower做了试验研究和1886年Osborne Reynolds做了理论解释之后。

现代工业的发展对摩擦学提出了更高的要求，也促进了该学科的深入研究与发展，尤其是近廿年来，自英国1966年H·Peter Jost报告发表以后，在全世界引起了研究摩擦学的热潮，其原因已在摩擦学的重要性一节中作了说明，以下介绍一些近年来国内外研究动态。

## 一、国外研究动态

### 1、摩擦磨损机理的基础研究

这方面研究的主要特点是从宏观到微观，着重于表面的和介质的微观分析，次表面层结构和应力的分析以及从系统工程角度提出新的摩擦磨损理论。

在现有理论基础上，近年来又先后出现了磨损剥层理论、表面材料迁移理论以及磨损能量理论等，其中，特别是1973年由美籍南朝鲜人N·p·Cun提出的磨损剥层理论，从次表面层的结构和应力方面分析了滑动磨损的基本机理，很好地解释了固体材料的磨损现象。

### 2、流体润滑的研究

这方面研究的主要特点是从静态到动态、从定性到定量、从理论到实际应用，研究的方面也比较广，大体包括以下几个方面：

#### a、对弹性流体动力润滑的研究：

主要是从整体到局部，解决边界润滑状态时的局部弹流问题和粗糙表面时的微弹流理论与计算；在弹流计算中，进一步考虑惯性、紊流、热效应及弹性变形等；近几年又发展起对润滑脂弹流及非牛顿流体弹流的研究。

#### b、提高计算速度和精度的研究：

其一是对雷诺方程求解方案的研究，旨在提高计算速度。通常，雷诺方程的求解包括以下3个过程：由油膜形状，

通过积分雷诺方程得到压力分布（顺解）；由压力分布，通过雷诺方程求油膜形状（逆解）；由压力分布，通过积分弹性变形求油膜形状。其计算方框图如图1—1。

其二是具体计算方法的研究，主要是应用有限元、有限差分以及CAD,提高计算精度。

c、技术应用研究：

主要包括新型

结构和特殊用途轴承的设计应用；改善动态特性和可靠性的研究；静压轴承的应用与发展以及为节能所采用的高低速时由静压转为动压的润滑方式的研究。

### 3、润滑材料的研制

对润滑油及润滑脂，主要是一些高效添加剂的研究，可有效地提高基础油抗氧化、抗腐蚀及耐高压的性能，日本、特别是美国都有较突出的发展，大大提高了摩擦副的使用寿命。

近几年来，发展特别迅速的是固体润滑材料，如高强度无机陶瓷自润滑材料；塑料基聚四氟乙烯等自润滑材料。与油脂润滑材料相容的固体涂层和固体膜，已被广泛的应用到各个领域，因而，做为一种新的学科——表面涂镀技术与设备有了更进一步的发展，真空、物理及化学气相沉积、涂敷、刷镀、离子喷镀及原子溅射等工艺制备的润滑膜有效地提高了摩擦表面的耐磨性。

### 4、试验测试技术与工况监控

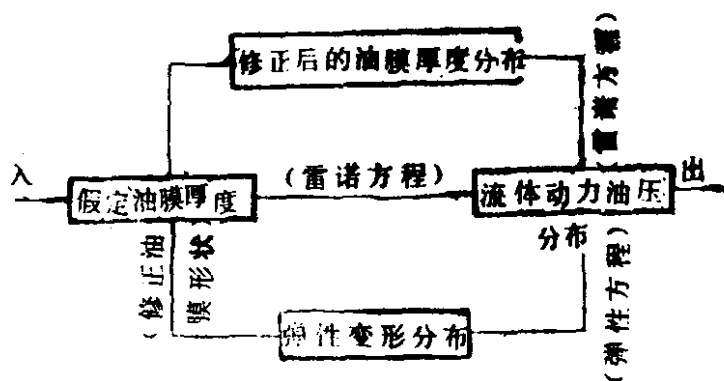


图1—1 弹流计算框图



当前，由于摩擦学向原子级微观发展，国外已开始大量使用现代电子仪表进行试验与检测工作，如各种光谱、能谱仪，扫描电镜、原子探针及铁谱仪等，很多仪器已做到可在动态时进行观察测定。

国外已经利用噪声与振动，利用润滑介质中磨粒的属性、数量及尺寸进行工况监测，从而预报机器故障的出现与否，以有效地控制机器的运用状态。

## 二、国内研究动态

我国对摩擦学的研究和应用，还是70年代末开始，可以说是刚刚起步，目前，虽然某些领域有了一定成绩，但基本上是零散的、不成体系。

1、在摩擦磨损机理方面，我国基本上处于吸收消化阶段，还谈不上独立的研究和创见；

2、在流体润滑方面，进行了一些理论与测试的研究，取得了一定的成绩。如考虑压粘、温粘效应、弹性及热变形条件下雷诺方程的解；对非牛顿流体弹流的研究；利用先进的动态结构分析仪，对滑动轴承动态特性进行的试验；滑动轴承温度场计算以及非纯净介质时润滑状态的可靠性计算等，都获得了一定的成绩。有些还比较先进；

3、在有限元、差分及CAD等计算方面，已涉猎较深，尤其是滑动轴承、缸套与活塞环及齿轮等弹流计算方面，建立了一些计算程序，在齿轮胶合计算中提出了新的计算公式及优选设计参数的曲线封闭图，对齿面三维非稳态时温度场的计算，也出现了可喜的成绩；

4、在润滑材料方面，对硫、磷、氯及其他活性基的添加剂的研究和应用进行了大量的开发。对固体润滑材料也进行了大量研究，为提高耐磨性，对复合材料及表面涂镀技术进