

润滑设计手册

吴晓铃 主编

LUBRICATION DESIGN HANDBOOK



化学工业出版社
工业装备与信息工程出版中心

润滑设计手册

吴晓铃 主编

LUBRICATION DESIGN HANDBOOK



化学工业出版社
工业装备与信息工程出版中心

· 北 京 ·

本手册系统论述了润滑设计的基础理论,全面介绍了各种润滑剂(主要是润滑油和润滑脂)的基本知识。手册的编写贯彻了润滑剂是一种机械元件的思想,对齿轮、轴承、液压等典型传动系统的润滑设计进行了较为详细的叙述,并对设备润滑的管理进行了阐述。本手册内容新颖、实用,注重吸收国际先进技术并采用国内外先进标准。

主编吴晓铃教授长期从事摩擦学及润滑技术的研究,承担过多项国家和省部级重大项目。主审并参加编写《齿轮手册》,参加编写《机械工程手册》和《齿轮传动设计手册》等工具书,获得国家政府特殊津贴和中国机械工业科技专家称号。

本手册可供机械设计人员、润滑工程师使用,也可供高等院校机械专业师生参考。

图书在版编目(CIP)数据

润滑设计手册/吴晓铃主编. —北京:化学工业出版社, 2006. 5

ISBN 7-5025-8797-7

I. 润… II. 吴… III. 润滑-设计-手册 IV. TH117.2-62

中国版本图书馆CIP数据核字(2006)第054491号

润滑设计手册

吴晓铃 主编

责任编辑:张兴辉

文字编辑:张燕文 徐卿华

责任校对:蒋宇

封面设计:  方正工作室

*

化学工业出版社 出版发行
工业装备与信息工程出版中心
(北京市朝阳区惠新里3号 邮政编码100029)

购书咨询:(010)64982530

(010)64918013

购书传真:(010)64982630

<http://www.cip.com.cn>

*

新华书店北京发行所经销

北京永鑫印刷有限责任公司印刷

三河万龙印装有限公司装订

开本 787mm×1092mm 1/16 印张 54 字数 1324 千字

2006年8月第1版 2006年8月北京第1次印刷

ISBN 7-5025-8797-7

定价:116.00元

版权所有 违者必究

该书如有缺页、倒页、脱页者,本社发行部负责退换

京化广临字2006--26号

序

机械系统通常具有动力传递、运动变换、支承与连接等各种功能，而分别执行这些功能，并组成机械系统的各种零部件的摩擦学性能，对于整个机械系统的可靠性和经济性无疑起着非常重要的作用。因此，摩擦学设计被认为是现代机械设计的关键问题。

摩擦学是有关摩擦、磨损与润滑科学的总称。摩擦引起能量消耗，磨损导致零件表面损伤，进而使得机械设备失效，而润滑则是降低摩擦、控制磨损最有效的措施。因此，润滑设计对于节约能源和原材料，延长机械设备的使用寿命和增加工作可靠性有着重要意义。当前，随着现代科技的发展，生产过程的连续化和自动化程度不断提高，机械设备的运行速度、载荷、精度日益增加，以及由于高低温、高真空和特殊介质环境下工作等的需要，采用新材料、新结构、新工艺和合理的润滑设计也是机械设计的科技人员所面临的问题。

简言之，润滑技术是在相互摩擦表面之间添加润滑材料而形成润滑膜，藉以避免摩擦表面直接接触，并获得低剪切阻力的界面层，达到减少摩擦、磨损的目的。同时，润滑膜还具有散热、防锈、减振、降噪作用。

人类在公元前就开始在生产实践中利用润滑技术。我国《诗经》就有关于润滑的描述，《淮南子》中最早出现了“润滑”一词。早期人们采用动植物油作为润滑剂。19世纪首次从油页岩中获得矿物油，并开始用作润滑剂。19世纪中叶以后，随着油井开发和石油炼制的进步，石油润滑剂得到了广泛应用，从而推动了润滑理论和应用技术的发展。近30年来，种类繁多而性能优越的新型润滑材料不断涌现，有力地推动了润滑技术的迅速发展。

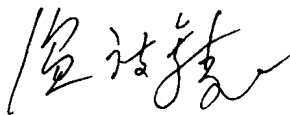
目前，我国已出版涉及润滑技术的图书大体上可以归纳为两类：一类是以润滑力学为基础关于流体润滑理论及其设计的图书；另一类是以摩擦化学为基础介绍润滑材料制备、性能和应用的图书，各有侧重。而吴晓铃教授主编的《润滑设计手册》的特点是面向机械设备设计和使用维护的需要，系统地阐述润滑设计的理论和实践，对于机械设计人员、工程技术人员具有重要的指导意义。

该手册内容丰富、翔实。除基础知识和润滑管理技术之外，涵盖了各类机械零部件的润滑设计问题，具有较强的实用性。而在介绍各类零部件润滑设计时，包括了润滑原理、设计方法、性能评定标准规范等的全面描述，并且以附录的形式列出国内外有关润滑剂的牌号和数据，这对于工程实际的润滑设计具有直接的参考价值。

手册取材新颖，注意吸收国内外先进技术和设计规范，并以适当篇幅介绍了现代润滑理论研究的新成就。

综上所述，本书出版必将推动我国润滑设计技术的进一步发展。

中国科学院院士、清华大学摩擦学国家重点实验室教授



2006年7月

前言

一般认为,摩擦消耗人类一次能源的 1/3,约有 70%的设备损坏是由于各种形式的磨损而引起的。我国每年因摩擦导致的机械磨损所损耗的材料价值高达几百亿元。目前我国已成为仅次于美国的世界第二润滑油消费大国,但是,在我国的高、中、低档润滑油消耗中,低档油所占比重很大。我国相当多的设计人员,设备管理和维修人员对润滑技术不了解,润滑设计不合理,选油不当或润滑管理不善,经常造成设备严重损坏。一些人对润滑油的应用技术不重视,反而更乐意维修和更换零件,使设备的运行成本大大提高。设备发生的故障中有 60%是由于润滑不良而引起的。以上情况说明,摩擦学对于节能、节材以至保护环境具有重要的意义。

2004 年 6 月 20 日中国工程院工程科技论坛“摩擦学工程科技论坛——润滑应用技术”在上海科学会堂召开。2004 年 12 月,中国工程院“摩擦学科学与工程前沿研讨会”在北京香山饭店召开。这对贯彻落实科学发展观,建设可持续发展的资源节约型社会,走新型工业化道路具有特别现实的意义。

润滑剂是机器零件家族中的一员,历史上人们虽然认为润滑剂在机械设备中必不可少,但在思维方式上总是将它与机械设备分别考虑,实际上割裂了两者之间的紧密关系。从 20 世纪 80 年代开始,人们的思维方式开始有了重大转变,即认为润滑剂也是机器零件家族中的一员,使润滑剂与机器有了血肉亲情。这种思维方式的重大转变,带来了机械设计的创新。这种创新还包括在设备的研制阶段就进行系统的摩擦学设计而不是像以前一样,总是把摩擦学问题放到设计的后期去处理。

本手册论述了润滑设计的基础理论,全面介绍了润滑剂的基本知识和应用技术。润滑剂是机器的“血液”,忽视润滑剂的机械设计是不完全的设计。本手册的编写贯彻了润滑剂是一种机械元件的思想。对齿轮、轴承、液压等传动的润滑设计进行了较为详细的叙述,并对设备润滑的管理进行了阐述。本手册内容新颖、实用,注重吸收国际先进技术并采用国内外先进标准。

本手册有以下主要特色:

- ① 简明扼要地介绍了润滑剂(主要是润滑油和润滑脂)及润滑油添加剂的种类与作用。
- ② 全面介绍了轴承、齿轮、液压系统以及其他机械元器件的润滑设计技术(包括润滑剂的合理选用方法)。
- ③ 在选择润滑标准方面,尽量采用国际标准化组织标准(ISO),我国国家标准(GB)以及我国行业标准(JB, SH),同时还介绍了著名公司的部分润滑剂产品以及中外油品的对照。
- ④ 机械设备的润滑不仅仅是润滑技术的问题,设备润滑的管理是关键,本手册较系统地介绍了设备润滑管理的理念和管理方法。

⑤ 润滑技术在不断发展，本手册除编入常规资料以外，还包含一部分新的润滑理论与技术（如薄膜润滑、纳米润滑、绿色环保润滑剂等）以及一些实用的资料，如机械零部件润滑剂的合理选用、润滑管理等。

本手册由吴晓铃（郑州大学）任主编。参加各章编写的人员如下：第1章，吴晓铃；第2章，秦鹤年（中国石油华北润滑油销售分公司），纪杰领（中国石油优特高级润滑油联合公司）；第3章，徐华（西安交通大学）；第4章戚文正，顾晓宏（郑州机械研究所）；第5章朱齐平（石家庄铁道学院）、彭成刚（天津大学）；第6章戚文正，顾晓宏；第7章，黄志坚（广东工业大学）。参加审稿的人员如下：陈大融（清华大学）、纪杰领（中国石油优特高级润滑油联合公司）、朱君（西安交通大学）、吴晓铃（郑州大学）、郭京波（石家庄铁道学院）、闵新和（广州机械科学研究院）。

本手册的编写得到了重庆大学机械传动国家重点实验室，湖南科技大学机械设备健康维护湖南省重点实验室和郑州大学的资助，在此表示衷心的感谢！

尽管本手册的编写者们努力工作，但由于润滑设计手册的内容涉及的学科十分广泛，编写难度较大，不妥之处在所难免，希望读者多提宝贵意见，以便今后改进。

主 编
2006.7

目 录

第 1 章 润滑设计概论	1
1.1 润滑与摩擦学	1
1.2 摩擦磨损机理	1
1.2.1 摩擦表面的形貌与接触	1
1.2.2 摩擦	4
1.2.3 磨损	8
1.3 润滑设计基础	10
1.3.1 润滑剂的作用	10
1.3.2 润滑剂的流变特性	11
1.3.3 润滑状态及分类	16
1.3.4 边界润滑	17
1.3.5 薄膜润滑	19
1.3.6 雷诺方程及其应用	19
1.4 纳米润滑	34
1.5 绿色环保润滑剂	36
参考文献	38
第 2 章 润滑剂	39
2.1 润滑剂的分类	39
2.2 润滑剂的物理化学性能及其分析评定方法	41
2.3 润滑剂的台架试验	48
2.4 润滑剂的生产工艺	51
2.4.1 溶剂精制	51
2.4.2 溶剂脱蜡	51
2.4.3 溶剂脱沥青	51
2.4.4 补充精制	51
2.4.5 加氢处理	51
2.4.6 基础油的分类	52
2.4.7 润滑油的生产调和	53
2.5 润滑剂及润滑剂添加剂的种类与作用	54
2.5.1 润滑油的种类及选用	54
2.5.2 润滑油添加剂的种类及功能	208
2.6 润滑脂	230
2.6.1 润滑脂的分类、代号及组成	230
2.6.2 润滑脂的选用	230
2.6.3 润滑脂的稠度分类	248
2.7 合成润滑剂	248
2.8 固体润滑剂	251
2.9 其他润滑材料	253
2.10 废油的处理以及润滑油的再生利用	255
附录 1 工业润滑油 ISO 黏度分类 (GB/T 3141—1994)	255
附录 2 新旧油品黏度牌号对照	256
附录 3 黏度换算表	256
附录 4 车用内燃机油种类及相应的国外产品	258
附录 5 工业用油种类及相应的国外产品	258
参考文献	259
第 3 章 轴承的润滑设计	260
3.1 滑动轴承的分类	260
3.1.1 按所承受的载荷分类	260
3.1.2 按润滑介质分类	264
3.1.3 按轴承承载能力形成的机理分类	264
3.2 流体动压润滑形成的基本原理与轴承性能计算方法	265
3.2.1 基本假设条件	265
3.2.2 基本方程	265
3.2.3 轴承静态特性计算	266
3.2.4 轴承动态特性计算	270
3.2.5 气体轴承的设计计算原理	271
3.2.6 径向轴承系统的稳定性计算	272
3.2.7 径向气体轴承系统的动力学稳定性设计	272
3.3 径向轴承主要参数的选择	273
3.4 推力轴承主要参数的选择	276
3.5 典型滑动轴承的设计示例及其性能曲线	277
3.5.1 径向轴承的设计	277
3.5.2 动压径向滑动轴承的静、动特性数据	

曲线	286
3.5.3 推力轴承的设计	359
3.5.4 气体轴承的设计	362
3.5.5 动载轴承的设计	365
3.6 滚动轴承	366
3.6.1 滚动轴承的分类	366
3.6.2 滚动轴承的润滑	368
3.6.3 滚动轴承的基本润滑理论	376
3.6.4 滚动轴承的寿命与额定载荷	378
3.7 根据基本额定动载荷选择轴承	379
3.7.1 滚动轴承的使用寿命	382
3.7.2 当量动载荷的计算	382
3.7.3 影响滚动轴承动载荷能力的主要 因素	384
3.7.4 修正基本额定寿命	385
3.8 根据基本额定静载荷选择轴承	386
3.8.1 当量静载荷计算	387
3.8.2 安全因数的选取	387
3.9 滚动轴承的设计实例	387
3.9.1 调心滚子轴承的设计	387
3.9.2 推力调心滚子轴承的设计	388
参考文献	388

第4章 齿轮传动的润滑设计

4.1 齿轮润滑概述	389
4.1.1 齿轮传动的发展及其特点、分类	389
4.1.2 齿轮摩擦学概况	392
4.1.3 国外齿轮传动的润滑技术概况	393
4.1.4 我国齿轮传动的润滑技术概况	395
4.1.5 齿轮合理润滑技术的节能及经济效益 分析	396
4.2 齿轮传动设计概述	398
4.2.1 齿轮传动的分类	399
4.2.2 齿轮传动类型的选择原则	400
4.2.3 齿轮传动与齿轮传动装置	405
4.2.4 渐开线圆柱齿轮的基本齿廓与模数 系列	407
4.2.5 齿轮轮齿加工	408
4.2.6 可靠性与安全系数	412
4.3 齿轮传动的润滑机理	415
4.3.1 齿轮传动的啮合特性	415
4.3.2 齿轮润滑的特点	416
4.3.3 齿轮润滑剂的作用及应具备的 性质	417

4.3.4 齿轮传动的润滑状态及润滑机理	418
4.4 润滑对齿轮传动的影响及对策	428
4.4.1 齿轮的主要失效形式及其设计 标准	428
4.4.2 齿轮损伤和失效的特征、产生原因 及预防措施	430
4.4.3 润滑对齿轮传动的影响	439
4.5 齿轮润滑油(脂)及添加剂	451
4.5.1 齿轮润滑油的发展历史及发展 趋势	452
4.5.2 齿轮润滑油的基础油及添加剂	454
4.5.3 齿轮润滑油的调制	459
4.5.4 齿轮润滑油的分类	461
4.5.5 齿轮润滑油的规格标准 (质量指标)	466
4.6 齿轮润滑剂的试验与评定	467
4.6.1 齿轮润滑油试验的意义	467
4.6.2 齿轮润滑油的理化性能分析	468
4.6.3 齿轮润滑油使用性能的实验室模拟 试验	468
4.6.4 齿轮润滑油工业应用尺寸的台架 评定试验	475
4.6.5 WL-100 蜗轮蜗杆油评定台架	479
4.6.6 齿轮润滑油的运行试验	482
4.7 齿轮润滑油的合理选用方法	483
4.7.1 选用齿轮润滑油应考虑的因素	483
4.7.2 齿轮润滑油的使用要求	484
4.7.3 闭式工业齿轮油的选用方法 (包括高速齿轮的润滑)	485
4.7.4 开式工业齿轮油(脂)的选用 方法	488
4.7.5 蜗轮蜗杆油的选用方法	489
4.7.6 车辆齿轮油的选用方法	491
4.7.7 仪表齿轮传动的润滑	493
4.8 齿轮传动装置的润滑方式及润滑系统的 设计	494
4.8.1 齿轮传动装置润滑系统的分类和 选择要求	494
4.8.2 齿轮传动装置的润滑方式和润滑 装置	495
4.8.3 齿轮传动的冷却	500
4.8.4 齿轮润滑油的过滤净化	505
4.9 齿轮传动装置油液监测与故障诊断 技术	508
4.9.1 油液监测的方法和取样要求	509

4.9.2	油液理化指标监测及齿轮油换油指标	511
4.9.3	油液污染度监测	514
4.9.4	油液磨损分析技术	515
4.9.5	油液分析硬件及监测专家系统	517
4.9.6	远程故障监测、预报和诊治技术	520
4.10	齿轮油的维护与管理	520
4.10.1	润滑管理的目的和任务	520
4.10.2	齿轮润滑油的储运管理	521
4.10.3	齿轮润滑油的混用与代用	521
4.10.4	齿轮润滑油使用中质量变化原因及表现	523
4.10.5	齿轮润滑油使用中的维护及管理	528
附录 1	美国 AGMA 工业闭式齿轮油黏度分类	530
附录 2	齿轮油常用黏度级的换算	530
附录 3	国内外(部分公司)抗氧防锈工业齿轮油产品牌号对照表	531
附录 4	国内外(部分公司)中负荷工业齿轮油产品牌号对照表	531
附录 5	国内外(部分公司)重负荷工业齿轮油产品牌号对照表	531
附录 6	国内外(部分公司)开式齿轮油产品牌号对照表	532
附录 7	国内外(部分公司)蜗轮蜗杆油产品牌号对照表	532
附录 8	国内外(部分公司)汽轮机油产品牌号对照表	533
附录 9	世界各主要石油公司车辆齿轮传动用油产品互换表	534
附录 10	日本工业齿轮油规格 (JIS K2219—1983)	536
附录 11	德国抗氧防锈型工业齿轮油 CL 规格 (DIN 51517 II—1989)	537
附录 12	德国极压型工业齿轮油 CLP 规格 (DIN 51517 III—1989)	538
附录 13	美国齿轮制造者协会工业闭式齿轮油规格	539
附录 14	美国钢铁公司 USS222 和 USS224 规格	540
附录 15	美军蜗轮蜗杆油规格 [MIL-L-18486B (OS)—1982]	541
附录 16	美国 AGMA 工业开式齿轮油规格 (AGMA 251.02—1974)	542

附录 17	美军车辆齿轮油规格 (MIL-L-2105D—1987)	543
附录 18	日本汽车齿轮油规格 (JIS K2219—1983)	543
附录 19	国内外工业闭式齿轮油标准或规格主要质量指标对比	544
附录 20	工业闭式齿轮用矿油型润滑剂规格 (DAVID BROWD SL 53101—1985.6)	546
附录 21	英国石油公司极压齿轮油 BP Energol GR-XP 典型特性	547
附录 22	飞马石油公司工业闭式重负荷齿轮油 Mobilgear 600 系列	548
附录 23	德士古石油公司 CALTEX MEROPA 工业齿轮油典型数据	549
附录 24	德士古石油公司 CALTEX MEROPA 开式齿轮油典型数据	550
参考文献		551

第 5 章 液压传动的润滑设计 553

5.1	液压油(液)的作用及其性能要求	553
5.1.1	液压油(液)在液压设备中的作用	553
5.1.2	液压设备对液压油(液)的性能要求	553
5.2	液压油(液)的主要物理化学性质及其测试	555
5.3	液压油(液)与材料的相容性	564
5.4	液压传动油分类及其技术指标	566
5.4.1	分类标准	566
5.4.2	矿物油型和合成烃型液压油(液)	566
5.4.3	液压液	567
5.5	液力传动油及其技术性能	572
5.5.1	液力传动油	572
5.5.2	液力传动油的主要性能	574
5.5.3	液力传动油的分类规格	575
5.5.4	液力传动油的选用	581
5.6	液压油(液)的选用	584
5.6.1	选用原则	584
5.6.2	选用方法	586
5.6.3	国产液压油(液)	588
5.6.4	国内外主要液压油(液)对照	588
5.6.5	液压油(液)的合理使用	588
5.7	常见液压设备(元件)用液压油选择	596

5.8 液压油(液)的清洁度	604	6.4 联轴器的润滑	700
5.8.1 油(液)的污染等级	604	6.5 机械无级变速器的润滑	701
5.8.2 典型液压系统的清洁度要求	615	6.5.1 机械无级变速器的功能、特点及 类型	701
5.9 液压油(液)的污染控制	616	6.5.2 机械无级变速器油(又称牵引油) 的性能特点	702
5.9.1 油液的污染	616	6.5.3 机械无级变速器油的分类和规格	704
5.9.2 油液的污染控制平衡	621	6.5.4 机械无级变速器油的选用	705
5.9.3 油液的过滤	622	6.5.5 机械无级变速器油的合理使用	706
5.9.4 液压润滑系统污染的综合控制	627	6.6 螺旋副的润滑	706
5.9.5 液压油(液)的更换	634	6.6.1 螺纹连接的润滑	706
5.10 液压油(液)的分析	638	6.6.2 回转变位及微调用螺旋副的润滑	706
5.10.1 液压油(液)的取样	638	6.6.3 机床螺旋传动的润滑	707
5.10.2 光谱分析法	641	6.7 钢丝绳的润滑	708
5.10.3 铁谱分析法	641	6.7.1 钢丝绳的摩擦、磨损	709
5.10.4 空气浓度的测定	642	6.7.2 钢丝绳润滑剂的种类及应具有 的性能	710
5.10.5 水含量的测定	643	6.7.3 钢丝绳的合理润滑	711
5.10.6 颗粒分析	643	6.8 链传动的润滑	714
5.10.7 管路污染分析	644	6.8.1 链传动的特点、类型及应用	714
5.11 液压传动中的密封	646	6.8.2 链传动装置的摩擦与磨损	715
5.11.1 密封件的分类与材料性能	646	6.8.3 链传动对润滑剂的要求和选用	715
5.11.2 新型同轴密封件	662	6.8.4 链条润滑方法的选择	717
5.11.3 特殊密封	672	6.9 活塞环和汽缸的润滑	718
5.12 液压装置的泄漏及预防	676	6.9.1 活塞环的润滑	718
5.12.1 液压装置产生泄漏的原因	676	6.9.2 活塞和汽缸的润滑	718
5.12.2 液压装置中泄漏的预防	679	6.10 凸轮的润滑	720
参考文献	680	6.11 弹簧的润滑	721
第6章 其他元器件的润滑设计	682	6.12 键销的润滑	721
6.1 导轨的合理润滑技术	682	附录1 国内外液压·导轨油(HG)及导轨油 (G)产品牌号对照表	722
6.1.1 导轨的分类及工作特点	682	附录2 国内外液力传动油与自动变速器油(ATF) 产品牌号对照表	723
6.1.2 导轨润滑状态分析及工作中常出现的 几个问题	684	附录3 国内外全损耗系统用油(AN)及机械 油品产品牌号对照表	725
6.1.3 导轨的磨损与失效	691	附录4 国内外蒸汽汽缸油产品牌号对照表	728
6.1.4 导轨润滑剂的作用及油膜厚度 计算	691	附录5 国内外工业润滑脂产品牌号对照表	728
6.1.5 流体静压润滑导轨	693	附录6 国内外往复式空压机油产品牌号 对照表	734
6.1.6 导轨油的分类及规格	693	附录7 国内外回转式空压机油产品牌号 对照表	735
6.1.7 导轨润滑油的选用	695	附录8 国内外真空泵油及扩散泵油产品 牌号对照表	736
6.1.8 机床导轨润滑方法的选择	696	附录9 国内外冷冻机油产品牌号对照表	737
6.1.9 机床导轨的维护保养	697	附录10 国内外电器绝缘油产品牌号	
6.2 自动变速器的润滑	697		
6.3 离合器的润滑	697		
6.3.1 离合器的功用与分类	697		
6.3.2 对离合器的基本要求	698		
6.3.3 离合器的润滑	698		

对照表	738	7.4.4 磨损颗粒分析	782
参考文献	740	7.4.5 机油压力监测	784
第7章 设备润滑与管理	741	7.4.6 润滑油消耗量的监测	786
7.1 设备润滑管理概述	741	7.4.7 几种机油分析及在线监测方法	787
7.1.1 设备润滑管理的意义	741	7.4.8 传感器型的在线直读油质变化 仪表	789
7.1.2 润滑管理的任务与内容	741	7.5 典型设备润滑技术及管理	791
7.1.3 润滑管理的实施	742	7.5.1 金属切削机床润滑技术及管理	791
7.2 设备润滑维护技术	744	7.5.2 内燃机润滑技术及管理	793
7.2.1 润滑系统的检查	744	7.5.3 压缩机润滑技术及管理	804
7.2.2 润滑系统的冲洗净化和换油	746	7.5.4 冷冻机润滑技术及管理	810
7.2.3 润滑系统的维护保养	754	7.5.5 汽轮机润滑技术及管理	817
7.2.4 润滑系统常见故障及原因	758	7.5.6 起重运输机械润滑技术及管理	819
7.3 润滑管理的主要制度	771	7.5.7 轧钢机润滑技术及管理	823
7.3.1 润滑材料供应管理制度	771	7.5.8 塑料加工机械润滑技术及管理	828
7.3.2 润滑装置及器具管理制度	772	7.5.9 纸浆造纸机械的润滑	830
7.3.3 润滑工安全技术操作规程	772	7.5.10 纺织机械的润滑	832
7.3.4 工艺用油液管理制度	772	7.5.11 食品加工机械的润滑	832
7.3.5 润滑管理的“五定”制度	772	7.5.12 办公机器的润滑	837
7.3.6 润滑材料的消耗定额制度	774	7.5.13 家用电器与机械的润滑	838
7.3.7 润滑油库防火制度	776	7.5.14 船用机械的润滑	841
7.4 油液的诊断与监测	776	7.5.15 锻压设备的润滑	842
7.4.1 润滑油常规指标变化	776	7.5.16 矿山设备的润滑	846
7.4.2 光谱分析法	777	参考文献	848
7.4.3 铁谱分析法	780		

第1章

润滑设计概论

1.1 润滑与摩擦学

对于机械零件而言,运动副之间存在着摩擦。有摩擦就免不了有磨损。人类减少摩擦、降低磨损的历史由来已久。大约在公元前2400年,古埃及人搬运浮雕时,就知道在底板下面加润滑剂。“润滑”二字最早出现在我国西汉《淮南子》一书中,《诗经》(公元前11世纪至公元前6世纪)中亦有在车轴上涂抹脂膏的记录。19世纪末,出现了一系列有关弹性和润滑的理论。第二次产业革命促进了摩擦、磨损和润滑的系统研究。到了20世纪中期,一门涉及力学、材料科学、物理和物理化学的新兴边缘学科迅速形成,1965年,英国教育科学部研究部的《关于摩擦学教育和研究报告》提出了“摩擦学(tribology)”一词,定义这门边缘学科为“关于摩擦过程的科学”。它涵盖了摩擦、磨损和润滑,但不是这三者简单的相加。从润滑的发展史和摩擦学的创立可见,润滑和摩擦学是密不可分的,从概念上讲,润滑是摩擦学的一部分,从实践和润滑工程的习惯上讲,润滑往往成了摩擦学的代名词。

在美国每年由于磨损造成的材料消耗约占材料产量的7%。在中国,由于摩擦、磨损每年给国家造成的损失超过了国民生产总值的1%。据报道,应用摩擦学技术的投入和带来的节约效果的平均比例为1:50。摩擦学的建立和发展给经济建设带来了巨大的效益。据英国有关方面估计,运用摩擦学技术,英国每年节约超过5亿英镑。又据美国机械工程学会估计,美国每年花在摩擦学研究和发展的费用为2400万美元,结果节约的能源占总能源消耗的11%,相当于160亿美元。

润滑设计的主要对象之一是润滑剂。对于机械设备而言,润滑油(剂)就好比血之对于人体。过去人们对于润滑设计的认识不足,虽然认为润滑剂在机器中不可缺少,但在思维方式上总是将它与机器分开来考虑。这实际上是割裂了它们之间的紧密关系。现代设计的观点,是把润滑剂作为一个机械元件来对待,即润滑剂也是机器家族中的一员。随着这种思维方式上的重大转变,带来了机械设计的创新。

1.2 摩擦磨损机理

1.2.1 摩擦表面的形貌与接触

机器中相互接触或具有相对运动的两个构件组成一对摩擦副,摩擦学是研究上述摩擦表

面间发生的作用及变化。要研究摩擦、磨损和润滑问题,首先要了解参与摩擦的固体表面的形态和接触状况。

(1) 表面形貌

摩擦副的表面不是绝对光滑的,在它的上面有微小的凸起和凹陷,利用形貌参数可以描述摩擦表面的几何特性。图 1-1 是表面一维形貌的轮廓曲线,它描绘沿截面方向上轮廓高度的变化。最常用的一维形貌参数如下。

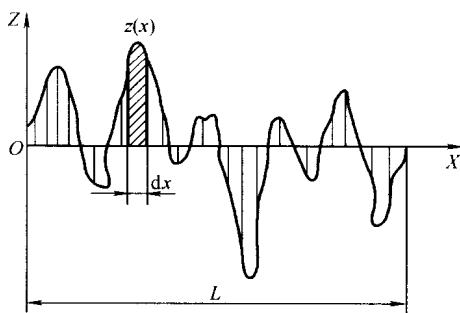


图 1-1 表面一维形貌的轮廓曲线

① 算术平均偏差 R_a

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

式中 $z(x)$ ——各点轮廓高度;

L ——测量长度;

n ——测点数量;

z_i ——各测点的轮廓高度。

② 轮廓均方根偏差 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 $R_{\max}$ $R_{\max}$ 表示表面粗糙度的最大起伏量,它是在测量长度内最高峰与最低谷之间的高度差。

④ 中线截距平均值 S_{ma} S_{ma} 是轮廓曲线与中心线各交点之间的截距 S_m 在测量长度内的平均值。该参数反映表面不规则起伏的波长或间距,以及粗糙峰的疏密程度。一维形貌不能全面反映摩擦表面的特性,为此又采用二维形貌如下。

① 坡度 Z_a Z_a 是轮廓曲线上各点的斜率 ($z = dz/dx$) 的绝对值的算术平均值。

② 峰顶曲率 C_a C_a 是各粗糙峰顶曲率的算术平均值。

如果考虑了二维轮廓曲线族和等高线,则构造了摩擦表面的三维形貌。

不同的机械加工方法对零件的形貌有重要影响,表 1-1 给出了各种加工光洁度与粗糙度的换算。

(2) 金属表层结构^[1]

加工后的金属零件表层组织结构如图 1-2 所示,金属基体之上是变形层。变形层之上是贝氏层,它是由于切削加工中表层熔化、流动,随后骤冷而形成的非晶或者微晶质层。再就是氧化层,最外层是环境中气体或液体极性分子与表面形成的吸附膜或污染膜。

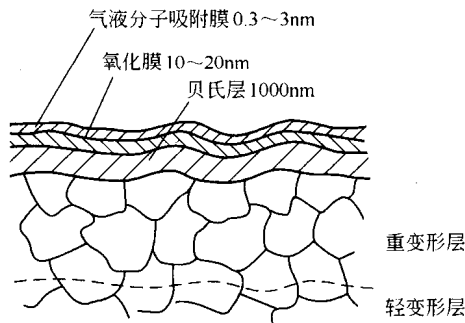


图 1-2 金属表层结构

表 1-1 各种加工光洁度与粗糙度换算

加工光洁度等级	$R_a/\mu\text{m}$	$R_z/\mu\text{m}$	L/mm	$R_{\text{max}}/\mu\text{m}$	$R_q/\mu\text{m}$	$R_p/\mu\text{m}$
∇_1	80~40	320~160	8.0	400~200		200~100
∇_2	40~20	160~80		200~100	25~12.5	100~50
∇_3	20~10	80~40		100~50		50~25
∇_4	10~5	40~20	2.5	50~25	12.5~6.25	25~12.5
∇_5	5~2.5	20~10		25~12.5	6.25~3.16	12.5~6.25
∇_6	2.5~1.25	10~5	0.8	12.5~6.25	3.16~1.58	6.25~3.12
∇_7	1.25~0.63	5~2.8		6.25~3.48	1.58~0.79	3.12~1.74
∇_8	0.63~0.32	2.8~1.4		3.48~1.76	0.79~0.4	1.74~0.88
∇_9	0.32~0.16	1.4~0.7		1.76~0.87	0.4~0.2	0.88~0.43
∇_{10}	0.16~0.08	0.7~0.4	0.25	0.87~0.48	0.2~0.1	0.43~0.24
∇_{11}	0.08~0.04	0.4~0.2		0.48~0.24	0.1~0.05	0.24~0.12
∇_{12}	0.04~0.02	0.2~0.1		0.24~0.12	0.05~0.025	0.12~0.06
∇_{13}	0.02~0.01	0.1~0.05	0.08	0.12~0.06		0.06~0.03
∇_{14}		0.05~0.025		0.06~0.03		0.03~0.015

注：此表摘自《润滑技术手册》。

金属表层的强化程度、微硬度和残余应力等对于摩擦、磨损有主要影响，而表面能、吸附效应和表面氧化等与零件的摩擦学行为密切相关。

(3) 固体表面的接触

① Hertz 接触应力 Hertz 接触理论是根据完全弹性体的静态接触条件得出的。工程实际中的接触表面可以是各种形状的曲面，分析计算时加以适当的几何简化。线接触问题可以用半径分别与接触点的曲率半径相等的两个圆柱体的接触来近似。点接触一般为椭圆接触，如球与平面的接触。

对于线接触问题，两个弹性圆柱的接触线扩展为一个狭长的面，可等效为一当量弹性圆柱和一刚性平面的接触问题，如图 1-3 所示。在接触区上，接触区的半宽 b 为

$$b=\left(\frac{8WR}{\pi LE'}\right)^{1/2} \tag{1-3}$$

式中 W ——载荷；

R ——当量曲率半径；

L ——圆柱体长度；

E' ——当量弹性模量。

在接触区上，接触应力 p 为

$$p = p_0 \left(1 - \frac{x^2}{b^2} \right)^{1/2} \quad (1-4)$$

式中 p_0 ——最大接触应力。

$$p_0 = \frac{2W}{\pi b L} = \left(\frac{WE'}{2\pi RL} \right)^{1/2} = \frac{E'b}{4R}$$

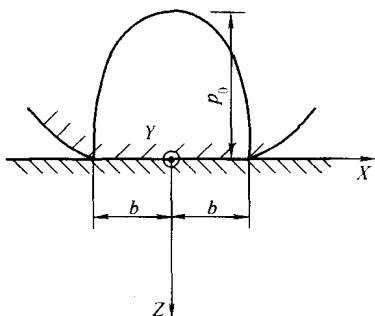


图 1-3 线接触问题

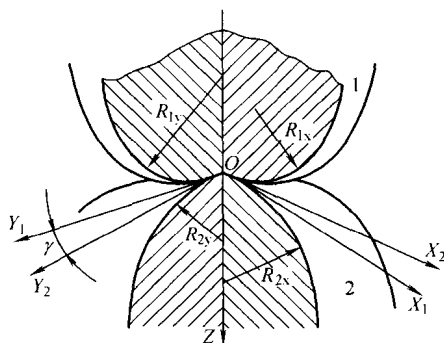


图 1-4 点接触问题

对于点接触问题，其接触区一般为椭圆，可表示为以接触点处的两个主曲率半径构成的椭圆体的接触（图 1-4）。以 a 、 b 分别表示接触区椭圆的长、短半轴，当接触椭圆的短轴方向与 x 轴方向相重合时，接触应力 p 为

$$p = p_0 \left(1 - \frac{x^2}{b^2} - \frac{y^2}{a^2} \right) \quad (1-5)$$

其中

$$p_0 = \frac{3W}{2\pi ab}$$

② 粗糙表面的接触 机械零件的表面并非理想的光滑表面，而是具有凸起和凹陷的表面。因此当两个表面接触时，实际上只是一部分表面在接触。实际表面上粗糙峰顶的形状通常是椭圆体，在分析粗糙表面接触时通常将粗糙峰顶近似地视为球体，然后转换为具有当量曲率半径 R 和当量弹性模量 E' 的弹性球体与刚性光滑平面的接触。

研究表明，单个粗糙峰在弹性接触时的实际接触面积为几何接触面积的一半^[1]。实际表面的粗糙峰高度是按照概率密度函数分布的，所以接触的峰点数根据概率来计算^[2]。实际接触面积于载荷的关系取决于表面轮廓曲线和接触状态。当粗糙峰为弹性接触时，大多数表面的轮廓高度接近于高斯分布，其实际接触面积与载荷是线性关系；而当粗糙峰为粗糙接触时，无论高度分布曲线如何，实际接触面积都与载荷成线性关系。一般来讲，两个粗糙表面的接触是混合的弹塑性系统，即较高的峰点产生塑性变形，较低的峰点则处于弹性变形状态。

1.2.2 摩擦

(1) 经典摩擦定律

表 1-2 常用材料的摩擦因数

摩擦副材料		摩擦因数		摩擦副材料		摩擦因数	
I	II	无润滑	有润滑	I	II	无润滑	有润滑
钢	钢	0.15 ^① 0.1	0.1~0.12 ^① 0.05~0.1	铸铁	铸铁	0.15 ^① 0.1	0.15~0.16 ^① 0.07~0.12
	软钢	0.2	0.1~0.2		青铜	0.28 ^① 0.15~0.21	0.16 ^① 0.07~0.15
	T8 钢	0.15	0.03		皮革	0.55 ^① 0.28	0.15 ^① 0.12
	铸铁	0.2~0.3 ^① 0.16~0.18	0.05~0.15		橡胶	0.8	0.5
	黄铜	0.19	0.03	软钢	铜、锡、磷、 青铜	0.2 ^① 0.18	0.07~0.15 ^①
	青铜	0.15~0.18	0.1~0.15 ^① 0.07		铅、银、钼、锌、镍	0.4	
	铝	0.17	0.02	软木	铸铁或钢	0.3~0.5	0.15~0.25
	轴承合金	0.2	0.04	木材	铸铁或钢	0.2~0.35	0.12~0.16
	夹布胶木	0.25~0.4	0.05~0.1		木材	0.4~0.6 ^① 0.2~0.5	0.1 ^① 0.07~0.1
	软钢纸	0.22			麻绳	0.5~0.8 ^① 0.5	
	塑料		0.016~0.3		皮革	0.4~0.5 ^① 0.03~0.05	
	冰	0.027 ^① 0.014		青铜	T8 钢	0.16	
	粉末冶金	0.35~0.55			黄铜	0.16	
黑色金属	毛毡	0.22	0.18		青铜	0.15~0.2	0.04~0.1
	石棉基材料	0.25~0.4	0.08~0.12		夹布胶木	0.23	
铝硅合金	夹布胶木	0.34			钢纸	0.24	
	塑料	0.28			硬橡胶	0.36	
	硬橡胶	0.25			塑料	0.21	
	石板	0.26		铝	T8 钢	0.18	0.03
铜	软钢纸 ^②	0.32			黄铜	0.27	0.02
	T8 钢	0.15	0.03		青铜	0.22	
黄铜	铜	0.2			夹布胶木	0.26	
	T8 钢	0.19	0.03	银	银	1.4	
	淬火 T8 钢	0.14	0.02	镍	镍	0.7	
	黄铜	0.17	0.02	铂	铂	1.2~1.3	
	硬橡胶	0.25					
	石板	0.25					
	绝缘材料	0.27					

① 静摩擦因数。

② 是经氧化锌及甘油、蓖麻油处理的软性纤维纸板。

注：表中滑动摩擦因数是试验数据。由于实际工作条件和试验条件不同，表中数据只能作近似计算参考。此表摘自《机械工程手册》第二版机械设计基础篇。

摩擦可分为外摩擦和内摩擦。两个相对滑动的固体表面的摩擦称为外摩擦，液体或气体中各部分之间的相对移动而发生的摩擦称为内摩擦。摩擦的特征是，物体或物质间相互传递运动，并试图使两者的运动速度趋于一致^[1]。

人们对摩擦的认识由浅入深。总结意大利人达·芬奇（Leonado Da Vinci），法国人阿蒙顿（G. Amontons）、库仑（C. A. Coulomb）的试验研究工作，得出了四个经典摩擦定律。

定律一：摩擦力与法向载荷成正比（库仑定律）。

$$F = fW \tag{1-6}$$

式中 F ——摩擦力；
 f ——摩擦因数；
 W ——正压力。

定律二：摩擦因数与表面接触面积无关。

定律三：静摩擦因数大于动摩擦因数。

定律四：摩擦因数与滑动速度无关。

上述四定律在一定程度上反映了滑动摩擦的机理，虽然以现代的眼光来看这些定律并不完全正确，但在许多工程实际问题中仍近似地采用。表 1-2～表 1-4 列举了部分常用材料的摩擦因数，表 1-5 给出了高速摩擦的摩擦因数，表 1-6 是冰雪的摩擦因数。

表 1-3 密封材料的摩擦因数

材 料	润 滑 剂	18℃		100℃	
		润滑剂供给量			
		充分	欠缺	充分	欠缺
氯丁橡胶	运动黏度 ^① 为 200mm ² /s 的减速器油添加菜籽油的质量分数为 10%	0.01	0.06		
鞣制皮革 铬鞣皮革 氯丁橡胶 特殊橡胶	运动黏度 ^① 为 46mm ² /s 的润滑油,添加有抗氧化剂	0.09	0.06	0.16	0.08
		0.13	0.06		
		0.02	0.07	0.12	
		0.03	0.06	0.16	0.17
鞣制皮革 氯丁橡胶 特殊橡胶	运动黏度 ^① 为 95mm ² /s 的润滑油	0.06	0.06		
		0.01			
		0.02		0.15	

① 运动黏度数值一般均指 40℃时的数值。
注：1. 表中数据使用摆式试验机测得，试样是密封材料与 45 钢套筒对磨。
2. 此表摘自《润滑技术手册》。

(2) 影响滑动摩擦的主要因素

载荷、滑动速度与温度是影响滑动摩擦的主要因素。

一般粗糙表面的摩擦发生在一部分接触峰点上，其数量和面积随载荷的增加而增加。最初是接触点尺寸增加，然后是接触点数目增加。试验表明：光滑表面在接触面上的应力约为材料硬度值的一半，而粗糙表面的接触应力可达到硬度的 2～3 倍，而产生表面塑性变形。在一般情况下，金属表面处于弹塑性接触状态，由于实际接触面积与载荷的非线性关系使得摩擦因数随着载荷的增加而降低。