

# 摩擦磨损润滑 密封

辽宁省摩擦学学会  
姚玉泉 马先贵 丁津原 编著



东北工学院出版社

## 内 容 提 要

本书系统地介绍了关于摩擦、磨损、润滑和密封的主要理论及基本知识。侧重论述了表面形貌及表面接触；分析了普遍存在于机械中的边界摩擦状态及其润滑机理；着重阐明了润滑剂、添加剂对摩擦、磨损的影响及合理选择润滑剂的方法。本书设专章讨论了密封原理及密封型式、密封元件的选择；论述了摩擦学测试技术和试验方法。

本书既有基本内容又有较深的探讨，同时又介绍了一些近年来摩擦学方面的新发展，适用面较广，可作为摩擦学、机械学研究生及机械类本科大学生的教学用书，亦可供有关工程技术人员参考。

### 摩擦磨损润滑密封

姚玉泉 马先贵 丁津原 编著

东北工学院出版社出版 辽宁省摩擦学学会发行  
(沈阳·南湖) 沈阳市矿山印刷厂印刷

开本787×1092 1/16 印张21.25字数517千字  
1989年1月第1版 1989年1月第1次印刷  
印数 1—2000册

责任编辑：崔华林 封面设计：鄂承宗

ISBN 7-81006-082-1/TB·4

定价：14.5元

## 前 言

摩擦、磨损、润滑和密封是摩擦学 (Tribogy) 的主要内容。摩擦学是新发展起来的一门边缘学科, 它涉及到: 应用数学、物理、化学、流体力学、弹塑性力学、流变学、机械学、材料学、传热学、工艺学等学科, 普遍应用于现代工业生产的各个领域。

摩擦在大多数情况下是有害的, 主要是造成能量损失和机械零件磨损。

磨损不仅使机械零件损坏, 更重要的是使零件间配合间隙扩大, 破坏了机械的正常工作状态, 造成机械精度和效率下降, 产生冲击和振动, 甚至使机械失去工作能力。

润滑是减少摩擦、磨损, 节省原材料, 节省燃料的有力措施。

密封是防止泄漏、防止灰尘的有效方法。

因此, 控制摩擦、减少磨损, 改善润滑、密封技术, 已成当前节约能源和原材料、缩短停机及维修时间的重要手段。同时, 又可在提高产品质量, 延长设备寿命和增加可靠性等方面发挥重要作用。目前摩擦学设计已在机械设计中占有极重要地位。由于机械产品正在朝着高速、重载、高效、节能、高自动化、长寿命等方面发展, 特别是生产领域不断扩大; 特殊工况 (如高温、低温、真空等) 不断出现, 因此, 深刻地认识在各个生产领域里的各种摩擦和磨损现象, 根据摩擦、磨损理论和润滑、密封技术采取有效措施提高机械产品性能, 在经济上和技术进步上都具有重大意义。因之, 摩擦学越来越引起人们的重视。

在国际摩擦学发展的推动下, 我国近十几年来摩擦学研究得到了蓬勃发展, 今天摩擦学已成为高等院校、科研单位和生产企业十分重视的一门学科, 它在国民经济建设中正发挥着积极作用。但是我们与先进国家相比, 还有较大差距, 特别是在摩擦学教育方面更为落后, 仍有不少空白。因之, 急需在较大范围, 深入普及摩擦学知识, 迅速更新一些陈旧的观点。本书的编写目的就是想在这方面起一点微薄作用。

本书是根据作者多年从事研究生、大学本科生摩擦学教学讲稿写成。其中第一、二、三、四、八、九章由马先贵编写; 第五、六、七章和第八章 § 8—4 节由姚玉泉编写; 第十章由丁津原编写。全书由姚玉泉统稿主编。

本书在编写出版过程中, 得到了辽宁省摩擦学学会理事长陈凤志、副理事长刘应驹、秘书长杨宏柯、秘书闻鸿泉、张兴家等同志的许多帮助, 作者在此一并表示衷心地感谢。

限于作者水平, 加以时间仓促, 定会有误谬不当之处, 欢迎读者批评指正。

编著者 1988年7月 沈阳

# 目 录

## 第一章 绪论

§1—1 摩擦学的由来及研究摩擦学的重要性	1
§1—2 摩擦学的研究范围和研究方法	2
一、研究范围	2
二、研究方法	3

## 第二章 固体表面

§2—1 表面形貌	5
一、表面粗糙度	5
1、粗糙度的现有表示方法	5
2、对目前粗糙度表示方法的探讨	6
3、Williamson曲线	7
4、W—曲线在工程上的应用	11
二、表面形貌的自相关函数(二维形貌)	12
三、表面模型参量 $\gamma$ (三维形貌)	13
§2—2 表面接触	15
一、粗糙表面的接触	15
1、弹性状态接触	16
2、塑性状态接触	16
3、用概率方法求弹性状态接触下 $F_N$ 与 $A_r$ 的关系	17
二、变形型式的判据	19
§2—3 接触物理学及接触化学	20

## 第三章 摩擦

§3—1 滑动摩擦	22
一、概述	22
二、滑动摩擦机理	24
1、分子机械理论	24
2、简单粘着理论	25
3、修正粘着理论	25
4、N、P、Suh的观点	27
三、滑动摩擦系数的确定方法	29

1、刚体在弹性体上滑动	30
2、刚体在刚体上滑动	31
§ 3—2 滚动摩擦	32
一、滚动摩擦机理	33
1、微观滑动	33
2、弹性滞后	34
3、塑性变形	34
二、滚动摩擦系数	34

#### 第四章 磨损

§ 4—1 概述	37
一、磨损的定义	37
二、磨损的分类	37
§ 4—2 粘着磨损	38
一、概述	38
二、粘着磨损计算	40
1、Holm理论	40
2、Archard理论—结块清除理论	41
三、轻微磨损和严重磨损	42
§ 4—3 磨料磨损	43
一、概述	43
二、磨料磨损计算	44
三、影响磨料磨损的因素	45
1、硬度的影响	45
2、弹性模量E的影响	46
3、磨料尺寸的影响	47
四、提高抗磨损性能的措施	47
§ 4—4 表面疲劳磨损	48
一、特征	48
1、疲劳寿命离散性大	48
2、无疲劳限	49
3、Rehbinder效应	49
4、疲劳磨损产生的磨屑尺寸较大	49
二、滚动接触疲劳磨损	50
三、滑动接触疲劳磨损	50
四、磨屑尺寸	51
五、疲劳磨损理论的发展	52
1、N、P、Suh脱层理论	52

2、微观点蚀理论	54
3、转移膜理论	54
§ 4—5 腐蚀磨损	55
一、腐蚀磨损机理	55
二、腐蚀磨损种类	56
1、氧化磨损	56
2、氢致磨损	56
3、边界润滑磨损	57
三、腐蚀磨损定律	57
§ 4—6 微动磨损	58
一、概述	58
二、影响微动磨损的因素	59
1、作用力的影响	59
2、环境的影响	60
三、提高抗微动磨损的措施	61

## 第五章 流体动压润滑

§ 5—1 润滑的作用及常见摩擦（润滑）状态	62
一、润滑的作用	62
二、几种常见的摩擦（润滑）状态	62
§ 5—2 润滑油的粘度	64
一、粘性流体内摩擦定律	64
二、动力粘度的单位	64
三、润滑油的运动粘度	65
四、条件粘度	65
五、润滑油的粘温特性	66
六、润滑油的粘压特性	68
§ 5—3 流体动压润滑的承载机理和流体动压润滑基本方程	68
一、流体动压润滑的承载机理	68
二、流体动压润滑的基本方程	69
1、流体的连续性方程	69
2、微单元体的力平衡方程式	70
3、雷诺方程	72
§ 5—4 流体动压径向滑动轴承	74
一、径向滑动轴承的几何参量	74
二、承载能力分析	75
三、轴承的偏位角和轴心轨迹	78
四、油的流量	78

五、润滑油膜摩擦力	79
-----------	----

## 第六章 弹性流体动压润滑

§ 6—1 柱体的刚性接触和马丁 (Martin) 方程	81
一、柱体接触的几何模拟	81
二、马丁 (Martin) 方程	82
§ 6—2 柱体及球体接触的弹性变形	84
一、局部作用力引起的弹性位移	84
二、柱体接触时表面的弹性位移	85
三、球体接触时表面的弹性位移	87
§ 6—3 弹性流体动压润滑基本方程	88
一、考虑粘压效应的雷诺方程	88
二、考虑粘压效应及弹性变形的格鲁宾 (Грубун) 方程	88
三、道森 (Dowson) — 希金森 (Higginson) 方程	91
§ 6—4 弹性流体动压润滑理论的应用	95
一、润滑状态区域图及其应用	95
二、弹流理论在齿轮和滚子轴承上的应用	98
1、齿轮传动的弹流计算	98
2、滚子轴承的弹流计算	102
§ 6—5 球体接触的弹性流体动压润滑	105

## 第七章 边界润滑

§ 7—1 边界润滑的表面现象	113
一、粒子间的作用力	113
二、物体的表面能	114
三、液体的表面张力和界面张力	114
四、液体对固体表面的润湿作用	116
§ 7—2 吸附油膜	118
一、物理吸附油膜	118
二、化学吸附油膜	119
三、吸附量、吸附速度和吸附热	119
1、吸附量	119
2、吸附速度	120
3、吸附热	120
四、吸附膜的润滑效果	120
1、碳氢链长度的影响	120
2、吸附膜分子层数的影响	121
3、醇、酸、胺及极性基团的影响	121
§ 7—3 化学反应膜	123

一、化学反应膜的特点 .....	123
二、反应速度和活化能 .....	123
三、化学反应膜的生成机理 .....	126
1、硫系化合物的反应机理 .....	126
2、磷系化合物的反应机理 .....	129
3、氯系化合物的反应机理 .....	130
4、有机金属系化合物的反应机理 .....	131
§7—4 对边界膜的影响因素 .....	132
一、温度对边界润滑的影响 .....	132
二、载荷和速度对边界润滑的影响 .....	135
三、润滑油和添加剂对边界润滑的影响 .....	138
四、表面粗糙度对边界润滑的影响 .....	140

## 第八章 润滑剂

§8—1 润滑油 .....	142
一、润滑油的主要理化指标 .....	143
二、润滑油的基础油 .....	145
三、合成润油 .....	148
四、添加剂作用机理 .....	150
1、保护金属表面的添加剂 .....	150
2、改善润滑油性能的添加剂 .....	154
3、保护润滑油本身的添加剂 .....	157
五、主要润滑油种类、性能及应用 .....	159
1、机械油 .....	159
2、汽轮机油 .....	159
3、齿轮油 .....	160
4、液压油 .....	162
5、内燃机润滑油 .....	163
6、压缩机油 .....	164
7、汽缸油 .....	165
8、变压器油 .....	165
9、冷冻机油 .....	165
§8—2 润滑脂 .....	165
一、概述 .....	165
二、润滑脂的组成 .....	166
1、基础油 .....	166
2、添加剂 .....	168
3、稠化剂 .....	169



三、润滑脂的种类和特点 .....	170
1、皂基润滑脂 .....	170
2、烃基润滑脂 .....	171
3、无机润滑脂 .....	171
4、有机润滑脂 .....	172
四、润滑脂的使用性能 .....	173
§ 8—3 润滑剂的选用 .....	175
一、概述 .....	175
1、润滑剂种类的选择 .....	176
2、润滑油的选择方法 .....	178
二、主要零件的润滑剂选择 .....	179
1、滑动轴承润滑剂的选择 .....	179
2、滚动轴承润滑剂的选择 .....	181
3、齿轮润滑剂的选择 .....	183
1) 闭式齿轮传动润滑剂选择 .....	183
2) 蜗杆蜗轮传动润滑剂选择 .....	187
3) 开式齿轮传动润滑剂选择 .....	188
§ 8—4 固体润滑剂 .....	190
一、概述 .....	190
二、二硫化钼 ( $\text{MoS}_2$ ) .....	191
1、结构和润滑机理 .....	191
2、 $\text{MoS}_2$ 的物理化学性质及润滑特性 .....	192
3、 $\text{MoS}_2$ 的应用 .....	193
三、石墨 .....	196
1、结构 .....	196
2、性质 .....	196
3、润滑作用 .....	196
4、用途 .....	197
四、氟化石墨 .....	197
1、氟化石墨的结构和物理化学性质 .....	197
2、氟化石墨的润滑性能 .....	198
五、氮化硼 (BN) .....	199
1、结构 .....	199
2、物理化学性质 .....	200
3、润滑作用及应用 .....	200
六、聚四氟乙烯 (PTFE) .....	202
1、结构及润滑机理 .....	202
2、理化性质及摩擦特性 .....	203

3、PTFE的应用 .....	204
七、常用的固体润滑方式 .....	204
1、固体粉末润滑 .....	204
2、固体膜润滑 .....	205
3、自润滑复合材料 .....	206

## 第九章 密封

§9—1 概述 .....	209
§9—2 静密封 .....	210
一、非金属垫 .....	210
二、半金属垫 .....	212
三、金属垫片 .....	212
四、橡胶O型密封圈 .....	213
五、密封垫必要的预紧力 .....	214
§9—3 液体垫片(密封胶)的应用 .....	215
一、液态密封胶 .....	215
二、厌氧密封胶 .....	220
三、密封带 .....	221
§9—4 往复式动密封 .....	221
一、成型密封 .....	222
二、软填料密封 .....	229
§9—5 回转运动密封 .....	233
一、油封 .....	233
1、油封的密封机理 .....	233
2、影响油封密封性能的因素 .....	235
二、机械密封 .....	237
三、间隙密封 .....	237
四、迷宫式密封 .....	237
五、磁流体密封 .....	238
六、改进的橡胶O型圈密封 .....	238
§9—6 密封材料 .....	239

## 第十章 摩擦学测试技术

§10—1 摩擦磨损试验和测试方法 .....	242
一、摩擦磨损试验方法的分类 .....	242
1、研究性的摩擦磨损试验 .....	242
2、应用性的摩擦磨损试验 .....	242
二、摩擦磨损试验件接触及运动形式 .....	243

三、各种类型试验机简介 .....	244
1、往复式摩擦磨损试验机 .....	244
2、四球式摩擦磨损试验机 .....	244
3、圆盘式胶合试验机 .....	246
4、接触疲劳试验机 .....	247
5、CL—100 (FZG) 齿轮油试验机 .....	248
6、环块式试验机 .....	251
7、Falex摩擦磨损试验机 .....	252
四、磨损量的测定方法 .....	254
§ 10—2 复型技术 .....	256
一、概述 .....	256
二、塑料复膜的制作 .....	257
§ 10—3 摩擦表面温度的测量 .....	258
一、接触式测温法 .....	258
二、非接触式测温法 .....	259
§ 10—4 润滑剂主要性能的测定 .....	260
一、润滑油粘度的测定 .....	260
二、润滑脂稠度的测定 .....	262
§ 10—5 设备中摩擦磨损与润滑状态的监测 .....	262
一、铁谱技术 .....	263
1、直接读数式铁谱仪 .....	263
2、分析型铁谱仪 .....	264
3、在线式铁谱仪 .....	265
4、黑色金属磨粒的鉴别 .....	266
二、原子吸收光谱仪 .....	268
三、红外线谱仪 .....	268
§ 10—6 弹性流体动力润滑的试验原理及测试方法 .....	269
一、油膜厚度的测试 .....	269
二、油膜形状的测试 .....	273
三、压力与温度分布的测试 .....	273
§ 10—7 现代表面微观测试技术 .....	274
一、扫描电子显微镜 (SEM) .....	275
二、俄歇电子能谱仪 (AES) .....	277
三、电子探针X射线显微分析仪 (EPMA) .....	278
四、离子探针分析仪 (IMA) .....	280
五、X射线光电子能谱仪 (XPS) .....	280
六、低能电子衍射仪 (LEED) .....	281

## 附录

润滑油粘度ISO标号与我国目前标号对照表	28
常用润滑油的牌号、性质和主要用途	283
抗氧化防锈工业齿轮油质量指标	285
中负荷工业齿轮油质量指标	286
重负荷工业齿轮油质量指标	287
汽轮机油质量指标	288
低凝抗氧化防锈 (RO & 型) 工业齿轮油	288
低凝中负荷工业齿轮油	289
低凝高负荷工业齿轮油	290
合成蜗轮蜗杆油 (沈化)	290
100号齿轮联轴节油 (沈化)	290
常用添加剂名称与牌号	291
添加剂的应用举例	292
常用润滑脂主要质量指标、性能和用途	293
减速机润滑脂 (汉古石化厂)	299
7020号窑车轴承润滑脂 (一坪厂)	299
耐油密封润滑脂 (一坪厂)	300
国内外工业齿轮油对照表	301
国内外汽车后桥和变速箱齿轮油对照表	302
国内外汽轮机 (透平) 油对照表	302
国内外内燃机油对照表	303
国内外船舶内燃机油对照表	304
国内外一般工业润滑脂对照表	305
国内外精密机床油对照表	306
参考文献	307

# 第一章 绪 论

## § 1—1 摩擦学的由来及研究摩擦学的重要性

摩擦学 (Tribology) 这个名词是1965年英国学者H.P.Jost提出来的。为什么还要建立新的学科摩擦学呢? 详细论证载于H.P.Jost调查报告。

1964年H.P.Jost受英国教育与科研国务大臣Bowden的委托,调查英国润滑教育和科研现状。Jost组成了15人的调查组,调查了385所技术学校,40所大学,133个企业于1965年11月提出了以Jost命名的调查报告。报告中列举事实论证了开展摩擦学的巨大经济意义,并强调指出以“润滑”概括摩擦、磨损、润滑三个方面是不恰当的,必须“正名”。“润滑”这个词来源于拉丁语Lubrication,意思是“容易滑动”。从通俗的意义上讲,使之“容易滑动”的主要办法是“加油”。也正因为是这样,工厂里把搞润滑工作的人叫做“抹油的”。这种状态妨碍了人们去充分理解这门学科的重要意义。为了明确任务,消除误会,Jost与牛津大学英文字典部磋商用“Tribology”(Tribology来源于西希腊语Tribos意思是“摩擦”)一词命名这门科学。并给“摩擦学”下了个明确的定义:“摩擦学是研究具有相对运动的相互作用表面间的科学、技术和有关实践的科学”。

Jost的报告在国际上引起了巨大的反响。使分散在各个领域中从事这方面工作的人,在摩擦学这面旗帜下集合起来了,形成一支包括不同专业专家在内的庞大队伍。1973年成立了国际摩擦学学会。近年来许多国家先后成立了摩擦学学会,我国在1979年全国第二次摩擦、磨损、润滑学术年会以后也正式成立了中国摩擦学学会。目前,世界上每年发表的属于摩擦学方面的文章近8000篇。

摩擦学的经济意义,一向是被忽视的。其所以被忽视原因有二:第一摩擦、磨损的后果要在相当长的时间后才表现出来,是“慢性病”;第二摩擦、磨损问题大量地、普遍地存在于生产的各个方面,人们误认为摩擦、磨损现象是正常的,是客观的自然规律,不可抗拒。

1965年H.P.Jost报告发表以后,摩擦学的经济意义受到各国广泛重视,相继发表了很多很有说服力的资料。1965年Jost报告指出在摩擦学方面采取措施,英国每年可以节约5亿英镑(相当英国全国年设备投资的四分之一);1977年美国机械工程师学会发表了题为“通过摩擦学节约能源的战略”的专论。文章指出当前解决能源危机的关键是节能,节能的主要途径是发展摩擦学技术。通过摩擦学技术的应用,美国每年可以节约能源11%(约合160亿美元)。发展摩擦学所需科研费约为2300万美元,支出占收益的0.144%。以上说明摩擦学研究是发展国民经济的重要手段,又是一本万利的事业。

在中国,最早提出关于摩擦学的调查报告是1982年大庆油田的“大庆市摩擦学工业调查报告”。这个报告比较详细地分析了应用摩擦学的经济效益,这个效益主要来源于以下四个方面:

- 1、提高设备利用率,延长设备大修周期。1) 油田高压注水泵日耗电量达424万度,占

油田总耗电量的43.8%。注水泵的节能潜力，主要反映在泵的效率上，1981年油田平均泵效为60.8%，经过测算，泵效每提高1%，全年可节电3000余万度，大庆油田试制成功的D300×150×11型泵，平均效率已达73.62%，如果每台泵按75%泵效计算，每年可节电16.78万元，全油田每年可节约2430万元。2) 降低钻机部件的更换率，油田钻井作业的条件相当恶劣，钻机部件消耗量很大。钻井二公司两个钻井队，1981年1~6月份分别打井11口，其中一个队更换钻机部件1件，更换率为0.10件/口井，另一个队，换24件，更换率为2.18件/口井。后者与前者的差距很大，主要原因是润滑管理。据分析把钻机部件更换率降到0.5件/口井，每年可节约700万元。3) 延长设备大修周期，节约设备维修费，如果全油田各种车辆都能延长一个大修期，将节约9100万元，按平均四年大修一次，每年将节约大修费2275万元。

各种铲运机，挖土机和筑路机等延长一个大修期，可以节约1731万元。

各类压缩机和输油泵、深井泵改善润滑提高泵效，可节电及维修费800万元。

以上总计每年可节约1亿元

2、节约润滑剂费用，大庆油田每年消耗润滑油4193吨，润滑脂232吨。通过加强润滑管理；降低润滑剂的消耗；加强对滤清系统的保养；开展按质换油；废油回收和再生代用，每年可节约润滑剂885吨，折合88.5万元。

3、节约材料配件费用，大庆油田每年用于设备维修费1亿元，其中材料费占60%，材料费中有30%属于非正常消耗，还有一部分属于各类事故造成的损失，杜绝这些浪费，每年可节约3000万元。

4、用油对路，合理润滑，减少故障的节约

故障损耗无法确切估计，举两个例子加以说明。1) 101—BJ一段炉引风机用的齿轴联轴节，原用国产2号防锈锂基润滑脂润滑，由于这种润滑脂不耐高温，长期运转润滑脂干涸，联轴节的齿被磨秃，1973年引风机突然停转，炉顶被烧坏，全厂停工3天，经济损失达900万元。改用7014润滑脂后，至今润滑良好。2) 油田6台美国菲亚特铲运机，仅运行3000余小时，即因润滑油不清洁和长期怠速低温运行，造成烧瓦和活塞积炭，4台停运，2台带病运行，造成损失40万元。

根据以上分析，在摩擦学方面采取一些措施大庆油田每年可节约1.8亿元。

1984年铁道部发表了题为“铁路运输中的摩擦学与节能”的调查报告。文章论述了铁路系统中节能的主要途径。它们是：1) 降低列车阻力，减少动力消耗；2) 降低部件磨损，延长使用寿命；3) 减少机车车辆与线路故障；4) 节约润滑油、脂消耗。通过具体分析和核算提出应用摩擦学现有的知识铁道部每年可节约燃料、动力与材料费3亿元以上。

## § 1—2 摩擦学的研究范围和研究方法

### 一、研究范围

根据Jost的定义：“摩擦学是研究具有相对运动的相互接触表面间的科学技术和有关实践的科学”，它概括了摩擦、磨损、润滑的整个领域。在科学高度发展的20世纪，进入了高度分工和高度综合的时代，一个人精通摩擦学的所有领域是不可能的，但是只钻研摩擦，对磨损和润滑技术一窍不通，或者只钻研润滑，对摩擦和磨损不感兴趣，则遇到生产实际问题

也会困难重重。因之，每个人应当根据所从事的具体行业有所侧重，但对整个摩擦学领域必须有广泛的、丰富的知识，不能偏废。

本课程的对象，是大专院校机械系的学生以及从事机械设计、机械制造、机械维护运转的工程技术人员。本课的重点是研究摩擦、磨损机理和润滑技术。讨论摩擦、磨损的种类，和控制措施；讨论润滑剂的种类、润滑机理及润滑剂的具体选择方法；讨论密封技术和摩擦学测试技术，以便在实际工作中从理论上分析产生事故的原因；能从摩擦学的角度提出对策。

## 二、研究方法

摩擦学是实践科学，解决问题的办法必须建立在“客观存在”的基础上，与理论力学、材料力学等课程有所不同，公式运算必须通过实验来修正。处理问题要考虑多方影响因素。摩擦学研究应当遵循以下两条原则：

### 1、从实践到理论又从理论到实践

摩擦学问题是生产实际中的问题影响因素很多，完全从理论分析，写出一个确切反应客观一切因素的公式是困难的甚至是不可能的，同时也不一定必要。切实可行的办法是：理论与简化实验相结合的理论-实验方法。例如要研究一对运动副的磨损性能（图1—1），需要确定该运动副的磨损率  $\dot{Q}$ 。磨损率的影响因素很复杂，它受摩擦副材料种类、表面粗糙度、润滑状态、压力强度  $P$ 、滑动速度  $v$ ，以及环境介质等影响。怎样确定磨损率  $\dot{Q}$ 呢？解决办法是实验。首先确定主要参数： $p$ ； $v$ ，然后把不易数量化的量做为实验保证条件。可以列出方程式。

$$\dot{Q} = K p v \quad (1-1)$$

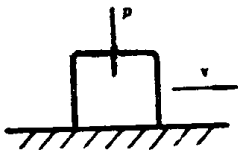


图1—1 磨损简图

式中  $K$ —磨损系数，它包含不易数量化的诸因素。

在简单实验机上，改变  $p$ 和 $v$ ，测出每种状态下的磨损率，把这些数据代入式（1—1）即可确定磨损系数 $K$ 。确定 $K$ 以后，就可利用式（1—1）很容易地计算出已知  $p$ 和 $v$ 时的磨损率。从上边的实例可以看出模拟实验是摩擦学研究的有效方法。

### 2、用系统分析的方法研究摩擦学问题

所谓系统分析，就是将所有影响因素作为一个整体进行分析研究。以齿轮减速器为例（图1—2）：过去对齿轮减速器承载能力和寿命的分析，主要研究大、小齿轮的几何参数，

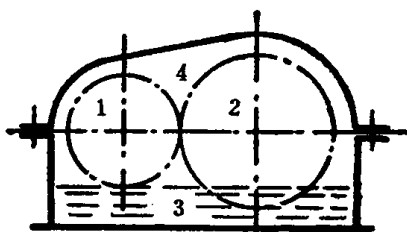


图1—2 系统分析

元素1—小齿轮  
元素2—大齿轮  
元素3—润滑剂  
元素4—环境介质

材料的牌号及热处理，加工精度，安装精度等项目，也就是，就两个齿轮讨论这两个齿轮。

实际上润滑油和环境介质对齿轮传动的影响很大，从摩擦学的角度看，齿轮减速器的组成元素不只是大、小齿轮两个，而是包括润滑油和环境介质在内的四个元素。从这四个元素出发，就可以较正确地分析减速器的承载能力和寿命。润滑剂的种类、粘度、性能以及新旧程度等直接影响轮齿啮合区的润滑状态，从而影响减速机的承载能力和寿命。例如1974年某厂新安装一台1200 mm悬臂式矫直机，其主减速机原来使用50号机械油，投产后运转五个月，所有齿面都产生严重擦伤，改用28号轧钢机油以后，情况立即好转，擦伤痕迹逐渐消失。实践证明合理使用润滑油，机器寿命可以成倍增长。环境介质影响齿轮的腐蚀；影响润滑剂的使用寿命。相同设备使用场所不同，寿命差别很大。比如：车间比较潮湿；设备安装在化工厂，甚至工厂位于沿海城市都会影响设备寿命。

学习摩擦学，应当建立起从摩擦学的角度看问题；应当建立起系统科学的观点；应当善于应用实验这个有力武器。



## 第二章 固体表面

由于摩擦学是研究相互作用表面间的科学技术和有关实践的科学，所以研究摩擦学问题都离不开研究表面。本章主要讲表面形貌、表面的接触和表面的性质。

### § 2--1 表面形貌

零件的加工表面用肉眼看似乎是光滑的，但在显微镜下仔细观察，零件表面犹如大地，布满了峡谷和山岳。这是因为任何机械零件的表面，都是通过各种不同的方法加工而成。由于加工过程中的刀痕，切屑分离时的塑性变形以及机床-刀具-工件系统的振动等原因，造成实际表面与理想存在着一定的几何形状误差。图2—1a是一般概念的表面，它可以分解成三部分，分别表示成图2—1b，图2—1c和图2—1d，把实际表面看成是后三者的叠加。

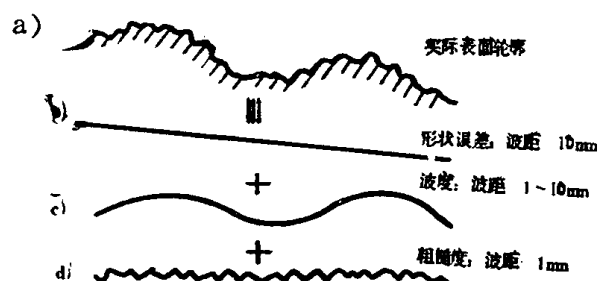


图2—1 固体表面的几何要素

(1) 形状误差。它是由加工过程的固有误差所引起的。例如锥度、不圆度、不平行度。

(2) 波度。它是表面上有规则的凹下与凸起，一般波长比波峰高度大40倍以上，它是由加工过程中机床或刀具的振动引起的。

(3) 粗糙度，它是表面上微小尺度的凹凸不平，它与表面加工时的加工方法有关。波长较短，约为 $2\sim 800\mu\text{m}$ ，高度较小，约为 $0.03\sim 400\mu\text{m}$ 。从摩擦学观点看，由于实际接触区域很小，粗糙度对接触状态影响很大。这一节里重点讲粗糙度。

#### 一、表面粗糙度

##### 1、粗糙度的现有的表示方法

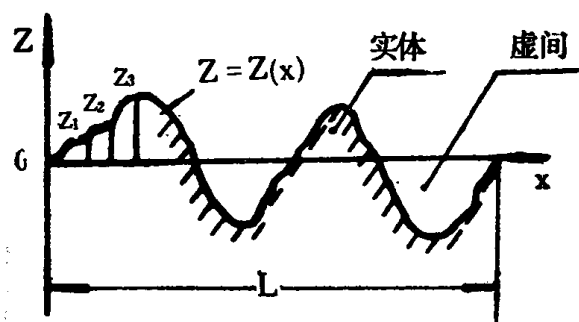


图2—2 中线平均值

##### (1) 中线平均值 $R_a$

$R_a$ 的定义是在基本长度范围内，被测表面轮廓上各点至轮廓中线距离的绝对值的算术平均值（图2—2）即：

$$R_a = \frac{1}{L} \int_0^L |z(x)| dx \approx \frac{1}{n} \sum_{j=1}^n z_j \quad (2-1)$$