

机修手册

(修订第一版)

第七篇 设备的润滑

中国机械工程学会
第一机械工业部 主编

机械工业出版社

目次

前言

第一章 摩擦、磨损与润滑

一、摩擦	1-1
(一) 摩擦的意义	1-1
(二) 摩擦的分类	1-2
1. 按摩擦运动形式分类	1-2
2. 按摩擦副的运动状态分类	1-3
3. 按摩擦是否发生在同一物体分类	1-3
4. 按摩擦表面润滑状态分类	1-4
(三) 摩擦机理	1-4
1. 干摩擦机理	1-4
2. 液体摩擦机理	1-6
3. 混合摩擦机理	1-7
(四) 摩擦力和摩擦系数	1-8
(五) 摩擦的作用	1-13
二、磨损	1-14
(一) 磨损现象	1-14
(二) 磨损的分类	1-15
(三) 磨损的过程	1-15
(四) 影响磨损的因素	1-16
1. 材料对磨损的影响	1-16
2. 表面加工质量对磨损的影响	1-17
3. 机件工作条件对磨损的影响	1-17
4. 润滑对磨损的影响	1-17
5. 装配质量对磨损的影响	1-17
6. 维护、保养对磨损的影响	1-18
(五) 几种典型的磨损	1-18
1. 粘着磨损	1-18
2. 磨料磨损	1-21
3. 表面疲劳磨损	1-24
4. 腐蚀磨损	1-26
三、润滑	1-30
(一) 润滑的意义	1-30
(二) 润滑的作用	1-31
1. 控制摩擦	1-31
2. 减少磨损	1-31
3. 降温冷却	1-31

4. 防止摩擦面锈蚀	1-32
5. 密封作用	1-32
6. 传递动力	1-32
7. 减振作用	1-32
(三) 润滑的分类	1-32
(四) 液体润滑的原理	1-33
1. 流体动压润滑	1-33
2. 紊流动压润滑	1-39
3. 弹性流体动压润滑	1-40
4. 流体静压润滑	1-45
5. 动、静压润滑原理	1-46
(五) 边界润滑的原理	1-47

第二章 润滑材料

一、润滑材料概述	2-1
(一) 润滑材料的分类及其性能	2-1
1. 润滑材料的分类	2-1
2. 润滑材料的性能	2-1
(二) 润滑材料的选用	2-2
1. 润滑材料的质量指标	2-2
2. 润滑部件的工作条件	2-3
3. 运动部件的结构特点	2-4
(三) 润滑油的代用和掺配	2-4
(四) 几种苛刻条件下的润滑	2-5
1. 高温条件下的润滑	2-5
2. 低温和深冷条件下的润滑	2-6
3. 真空装置和外层空间装置的润滑	2-7
4. 磨蚀环境下的润滑	2-7
5. 锈蚀环境下的润滑	2-8
二、矿物润滑油	2-8
(一) 润滑油的性能、分类及炼制	2-8
1. 矿物油的理化性能	2-8
2. 矿物油的分类	2-9
3. 润滑油的炼制	2-9
(二) 矿物润滑油的成分	2-13
(三) 矿物油的性质及其用途	2-17
1. 通用机械油	2-17
2. 专用机械油	2-19
3. 内燃机用润滑油	2-25
4. 蒸汽机油	2-26
5. 电气用油	2-26
6. 其他油种	2-27

三、润滑脂	2-31
(一) 润滑脂的组成及结构	2-31
1. 稠化剂	2-31
2. 润滑脂的基础油	2-32
3. 润滑脂的添加剂	2-35
4. 润滑脂的结构	2-35
(二) 润滑脂的生产过程	2-36
(三) 润滑脂的品种及其适用范围	2-37
1. 钙基脂	2-39
2. 钠基脂	2-40
3. 铝基脂	2-40
4. 锂基脂	2-41
5. 钡基脂	2-41
6. 合成基脂	2-42
7. 混合基脂	2-42
8. 复合皂基脂	2-42
9. 非皂基脂	2-42
四、润滑油添加剂	2-43
(一) 添加剂的作用、性能和分类	2-43
(二) 各类添加剂的性能及其应用	2-44
1. 清净分散添加剂	2-44
2. 抗氧化和抗腐蚀添加剂	2-46
3. 抗锈添加剂	2-47
4. 降凝添加剂	2-48
5. 增粘添加剂	2-48
6. 油性添加剂	2-50
7. 极压抗磨添加剂	2-51
8. 抗泡剂	2-52
9. 密封膨胀添加剂	2-52
10. 防腐剂	2-53
11. 颜色稳定剂和染料	2-53
12. 气味控制剂	2-53
13. 金属减活化剂	2-53
14. 乳化剂	2-53
五、固体润滑材料	2-55
(一) 固体润滑的基本知识	2-55
1. 固体润滑的简单原理	2-55
2. 固体润滑材料应有的性能	2-55
3. 固体润滑材料的种类及应用方法	2-56
4. 固体润滑材料的优缺点	2-57
(二) 二硫化钼	2-60
1. 二硫化钼的理化和润滑性能	2-60

2. 以粉末形式直接应用的二硫化钼	2-63
3. 二硫化钼作为油脂的添加剂	2-66
4. 二硫化钼粘结涂层	2-68
5. 利用化学方法在金属表面就地形成的润滑膜	2-72
6. 用二硫化钼浸渍和烧结零件	2-73
7. 等离子喷射二硫化钼膜	2-74
(三) 石墨	2-74
1. 石墨的理化及润滑性能	2-74
2. 石墨润滑剂的应用	2-76
(四) 聚四氟乙烯	2-77
1. 聚四氟乙烯的理化及润滑性能	2-77
2. 聚四氟乙烯的应用	2-78
(五) 尼龙	2-80
1. 尼龙的理化及润滑性能	2-80
2. 尼龙的应用	2-81
(六) 软金属	2-82
1. 软金属的一般性能	2-82
2. 软金属的润滑薄膜	2-82
(七) 近来新发展的几种固体润滑材料	2-84
1. 聚酰亚胺	2-84
2. 聚对羟基苯甲酸	2-84
3. 氟化石墨	2-85
4. 氮化硼	2-85
六、几种特殊润滑材料	2-86
(一) 合成润滑油脂	2-86
1. 合成润滑油脂的来源、分类及要求	2-86
2. 合成润滑油的理想性能	2-87
3. 几种常用的合成润滑油	2-89
4. 合成润滑油应用的方向	2-94
5. 我国生产的几种合成润滑脂	2-98
(二) 动植物油脂	2-100
(三) 气体润滑材料	2-101
1. 气体润滑材料的用途	2-101
2. 气体润滑材料的优点	2-101
3. 气体润滑材料的缺点	2-102
(四) 水	2-102
(五) 液体金属	2-103
七、液体润滑材料的粘度	2-104
(一) 润滑油的流动性能——粘度	2-104
1. 润滑油的粘度	2-104
2. 脂的表现粘度	2-111
(二) 各种液体的流动性能	2-111

1. 牛顿液体的流动性能	2-111
2. 非牛顿液体的流动性能	2-112
3. 液体流动性能的粘弹性原理	2-113
4. 液体的湍流和雷诺数	2-113
(三) 粘度的测量	2-114
1. 粘度计的设计原理	2-114
2. 现场快速测量法	2-114
3. 试验室测量法	2-115
4. 脂的表现粘度测量法	2-120
(四) 热稳定性	2-122
1. 粘度比	2-122
2. 粘度系数	2-122
3. 粘度指数	2-123
(五) 粘压性能	2-126
八、润滑油脂的理化性能及其试验	2-128
(一) 润滑油液的理化性能及其试验	2-128
1. 密度、比重和热膨胀	2-128
2. 压缩性与容积模数	2-133
3. 油性	2-135
4. 润滑油的氧化安定性	2-136
5. 乳化和泡沫	2-137
6. 水解安定性	2-139
7. 闪点和燃点	2-140
8. 浊点、凝固点和析蜡点	2-142
9. 蒸发和挥发	2-143
10. 中和值(酸值和碱值)	2-144
11. 皂化值	2-146
12. 腐蚀性	2-146
13. 机械杂质	2-147
14. 残碳	2-148
15. 水分	2-149
16. 绝缘强度	2-150
17. 灰分	2-150
18. 颜色	2-151
19. 表面张力和界面张力	2-151
20. 接触角、润湿性和流散性	2-153
21. 苯胺点	2-154
(二) 润滑脂的理化性能及其试验	2-154
1. 外观和结构	2-154
2. 滴点(或叫融化点)	2-154
3. 针入度	2-155
4. 水分	2-156

5. 腐蚀	2-156
6. 游离有机酸及游离碱	2-156
7. 机械杂质	2-157
8. 胶体安定性	2-157
9. 皂分	2-158
10. 灰分	2-158
11. 抗水性 (或水淋性)	2-159
12. 氧化安定性	2-160
13. 蒸发损失	2-160
14. 机械安定性	2-160
15. 转矩特性	2-161
16. 轴承流失	2-161
(三) 润滑油的红外线分析法	2-162
1. 红外线分析的作用	2-162
2. 红外线分析的原理	2-162
3. 红外线分析用仪器及其分析的过程	2-163
4. 红外线的定性定量分析举例	2-164
5. 发射光谱仪	2-167
(四) 摩擦磨损与润滑的试验方法	2-167
1. 试验的步骤及其作用	2-167
2. 试验条件的选择	2-169
3. 试验机的选择	2-170
4. 摩擦磨损润滑的试验方法	2-171
5. 各种试样试验机	2-173

第三章 设备的润滑方法和润滑装置

一、设备的润滑方法及添加油脂装置	3-1
(一) 对润滑的要求和润滑分类	3-1
1. 对润滑的要求	3-1
2. 润滑方法的分类	3-1
(二) 各种润滑方法及其供油脂装置	3-3
1. 手工润滑	3-3
2. 滴油润滑	3-4
3. 油绳和毡块润滑	3-5
4. 强制送油润滑	3-7
5. 油雾润滑	3-7
6. 几种自带油润滑	3-12
7. 几种简单机件润滑	3-14
8. 喷油润滑	3-16
9. 压力循环润滑	3-18
10. 脂杯、脂枪润滑	3-19
11. 油脂集中润滑系统	3-22

12. 内在润滑	3-34
二、润滑系统装置	3-34
(一) 润滑油液的净化方法和装置	3-34
1. 净化方法及装置	3-35
2. 净化装置的选择和配置	3-44
(二) 润滑油箱	3-46
1. 油箱的容量	3-46
2. 油箱长宽高的比例	3-47
3. 油箱的位置	3-47
4. 回油管道	3-47
5. 挡板	3-47
6. 吸油管道	3-48
7. 排污管道	3-48
8. 油箱的通风	3-50
(三) 润滑油泵	3-50
1. 润滑油泵的分类及其性能比较	3-50
2. 齿轮泵	3-51
3. 叶片泵	3-52
4. 蜗杆泵	3-52
5. 离心泵	3-52
6. 对泵吸端的要求	3-53
7. 传动的选择及需要的功率	3-53
(四) 油管	3-53
1. 管子规格	3-53
2. 压力损失	3-54
3. 喷嘴	3-55
4. 油管的结构	3-55
(五) 冷油器和热油器	3-55
1. 冷油器的设计数据	3-56
2. 冷油器的简单计算方法	3-56
3. 冷油器的结构及其选择	3-57
4. 小型冷油器的标准结构	3-58
5. 热油器	3-59
6. 冷油器和热油器的维护	3-59
(六) 显示控制仪表和反馈安全装置	3-59
1. 显示控制仪表的结构和作用	3-60
2. 典型设备采用的显示和控制仪表	3-62
三、密封装置	3-64
(一) 密封装置的基本性能及其比较	3-64
1. 密封装置的作用和种类	3-64
2. 密封的选用方法	3-64
(二) 径向唇形密封装置	3-70

1. 径向唇形密封装置的作用	3-70
2. 径向唇形密封的工作原理	3-70
3. 唇形密封的结构类型	3-71
4. 密封环唇部结构	3-72
5. 唇形密封装置用材料	3-72
6. 密封元件失效的原因	3-73
7. 提高密封环寿命的措施	3-73
8. 密封环的装配	3-73
(三) 机械表面密封装置	3-74
1. 表面密封装置的结构和作用	3-74
2. 表面密封装置的优缺点	3-75
3. 表面密封装置的结构	3-75
(四) 软填料密封	3-78
1. 对软填料密封的主要要求	3-78
2. 软填料密封的设计结构	3-78
3. 软填料密封的选择	3-81
4. 软填料密封用材料	3-82
5. 软填料密封的故障及其排除方法	3-84
(五) 毡圈密封	3-84
1. 毡圈密封的作用及其优点	3-84
2. 毡圈的制作方法	3-86
3. 毡圈的结构设计	3-87
(六) 垫片密封	3-88
1. 垫片的作用和类型	3-88
2. 垫片用材料	3-90

第四章 典型零部件和设备的润滑

一、滑动轴承	4-1
(一) 滑动轴承的分类和性能	4-1
1. 滑动轴承的分类	4-1
2. 各种滑动轴承的结构和性能	4-2
3. 各种滑动轴承的适用范围	4-6
(二) 滑动轴承的磨损、故障及其解决办法	4-6
1. 轴承的磨损分析	4-8
2. 轴承故障的检查和析	4-10
3. 轴承磨损和故障的解决办法	4-11
(三) 滑动轴承的润滑	4-12
1. 滑动轴承的油孔和油沟	4-12
2. 润滑材料的选择	4-17
二、滚动轴承	4-22
(一) 滚动轴承的磨损和故障分析	4-22
1. 滚动轴承的各种故障	4-22

2. 滚动轴承故障的分析	4-26
(二) 滚动轴承的润滑	4-29
1. 滚动轴承润滑油脂的选用	4-29
2. 油润滑	4-30
3. 脂润滑	4-35
三、几种常用传动装置的润滑	4-37
(一) 齿轮、蜗轮和减速器	4-37
1. 齿轮的磨损和破坏分析	4-37
2. 齿轮的润滑	4-46
3. 蜗轮的摩擦、磨损与润滑	4-51
(二) 滑动丝杠和丝母	4-53
1. 丝杠、丝母的摩擦和磨损	4-53
2. 丝杠、丝母的润滑	4-53
(三) 钢丝绳	4-54
1. 钢丝绳的摩擦和磨损	4-54
2. 钢丝绳的润滑	4-55
(四) 动力传动链条	4-58
1. 链传动装置的摩擦和磨损	4-58
2. 精密传动链条的润滑	4-59
四、导轨	4-61
(一) 导轨的分类及其作用	4-61
1. 导轨的分类	4-61
2. 导轨的工作条件	4-62
3. 对导轨的技术要求	4-63
4. 导轨的作用和润滑对导轨的重要意义	4-64
(二) 滑动导轨的摩擦	4-64
1. 滑动导轨的摩擦特点及其分类	4-64
2. 边界摩擦	4-64
3. 混合摩擦	4-65
4. 影响导轨润滑的各种因素	4-65
5. 导轨动压的来源	4-67
6. 改变导轨摩擦性能的措施	4-68
7. 导轨的液体摩擦	4-68
(三) 机床导轨的爬行	4-69
1. 爬行的影响及其来源	4-69
2. 影响导轨低速爬行的各种因素	4-70
3. 爬行的实例说明	4-71
4. 提高导轨运动稳定性的方法和措施	4-71
(四) 导轨的磨损	4-73
1. 直线运动导轨磨损的主要原因	4-73
2. 导轨磨损的类型	4-73
(五) 机床导轨润滑油的选择	4-75

1. 走刀和移置导轨用油原则	4-75
2. 导轨油的应用	4-76
(六) 机床导轨材料	4-77
1. 不淬火铸铁导轨	4-77
2. 淬火铸铁、钢板及其他高硬度材料镶接的导轨	4-77
3. 有色金属镶导轨	4-78
4. 塑料镶接或喷涂导轨	4-78
(七) 导轨保护装置	4-80
1. 常用的导轨保护装置	4-80
2. 密封保护装置	4-81
3. 纵向和横向护板	4-82
4. 搭接伸缩罩	4-83
5. 折棚形罩	4-84
6. 卷带式保护装置	4-86
五、金属切削机床	4-87
(一) 减少机床摩擦热, 防止热变形的措施	4-88
(二) 金属切削机床润滑材料的选择	4-88
(三) 典型金属切削机床的润滑	4-88
1. 车床的润滑	4-88
2. 自动车床的润滑	4-89
3. 立式车床的润滑	4-89
4. 钻床及铰丝机的润滑	4-91
5. 磨床的润滑	4-92
6. 龙门刨床的润滑	4-94
7. 数控机床的润滑	4-94
8. 电火花加工用介电油品	4-94
六、液压系统用油	4-95
(一) 对液压油液的要求	4-95
(二) 液压油液的种类	4-96
1. 矿物油基液压油	4-96
2. 水基液压油	4-98
3. 合成液压油	4-99
(三) 液压油液的选择	4-100
(四) 液压工作故障及维护	4-101
七、电动机的润滑	4-103
(一) 不同规格电动机轴承的润滑	4-103
(二) 不同壳体形式电动机轴承的润滑	4-103
(三) 电动机润滑用油脂	4-104
八、气体压缩机	4-107
(一) 气体压缩机润滑的特点	4-107
1. 气体压缩机的润滑	4-107
2. 压缩气体的分类及其润滑特点	4-108

(二) 空气压缩机和风动工具的润滑	4-108
1. 空气压缩机的工作特点及其对润滑的要求	4-108
2. 风动工具的工作特点及其对润滑的要求	4-108
3. 空气压缩机及风动工具的润滑材料	4-109
4. 空气压缩机的润滑方法	4-109
5. 空气压缩机的润滑故障及防治措施	4-111
(三) 其他气体压缩机的润滑	4-111
(四) 冷冻设备的润滑	4-113
1. 常用冷冻剂的性能	4-113
2. 冷冻机对润滑材料的要求	4-114
3. 冷冻机油的性能及其维护	4-114
4. 典型冷冻机的润滑	4-116
5. 冷冻机润滑的故障及其防治措施	4-117

第五章 冷却 润 滑 液

一、冷却润滑液的作用	5-1
(一) 冷却作用	5-1
(二) 润滑作用	5-2
(三) 清洗作用	5-3
(四) 防蚀作用	5-3
二、冷却润滑液的分类和组成	5-4
(一) 切削油	5-4
1. 矿物油	5-4
2. 油脂(脂肪油)	5-5
3. 复合油	5-5
4. 极压油	5-5
(二) 乳化液	5-6
1. 表面活性剂的作用	5-6
2. 表面活性剂的种类	5-8
3. 乳化剂的选择和乳化液的稳定	5-8
4. 主要乳化剂的 HLB 值	5-11
5. 乳化各种油所需的 HLB 值	5-12
6. 乳化液的种类	5-12
(三) 水溶液	5-12
1. 透明冷却水	5-12
2. 防锈冷却水	5-13
(四) 固体润滑剂和气体冷却剂	5-13
1. 固体润滑剂	5-13
2. 气体冷却剂	5-13
三、冷却润滑液的选用	5-13
(一) 加工刀具	5-13
(二) 加工材料	5-14

(三) 机床	5-14
(四) 加工方法	5-15
1. 车削	5-15
2. 铣削	5-15
3. 螺纹加工	5-15
4. 铰孔	5-16
5. 拉削 (内拉削和平面拉削)	5-16
6. 钻孔	5-16
7. 齿轮加工	5-16
8. 磨削	5-17
四、冷却润滑液的使用方法和净化装置	5-20
(一) 冷却润滑液的使用方法	5-20
1. 人工法	5-20
2. 浇注法	5-20
3. 喷雾法	5-22
4. 致冷液体降温法	5-23
(二) 冷却润滑液的净化装置	5-24
1. 沉淀、分离装置	5-24
2. 介质过滤装置	5-27
五、冷却润滑液的配制工艺	5-28
(一) 切削油配制工艺	5-29
1. 硫化油配制	5-29
2. 其他极压油配制工艺	5-29
(二) 乳化油、乳液和透明冷却水的配制工艺	5-30
1. 配制乳化油和乳液应注意的事项	5-30
2. 乳化油配制工艺举例	5-30
3. 透明冷却水配制工艺	5-32
六、冷却润滑液的配方和使用	5-33

第六章 润 滑 管 理

一、润滑管理的“五定”	6-1
(一) “五定”的内容	6-1
(二) 润滑管理工作的主要内容	6-1
二、润滑油脂的维护	6-3
(一) 润滑油脂的储运和发放	6-3
1. 油脂的质量变化	6-3
2. 油脂变质及其防治	6-3
(二) 润滑材料在使用中的维护	6-4
1. 润滑油的维护	6-4
2. 润滑脂的维护	6-5
(三) 设备漏油及其防治	6-5
1. 设备漏油的原因	6-5

2. 漏油的防治	6-5
(四) 合理安排加油、换油周期	6-7
(五) 各种设备的润滑油消耗定额	6-7
三、设备的净化	6-13
(一) 设备内外积垢的分类和净化方法	6-13
1. 设备积垢的分类	6-13
2. 净化用材料	6-13
3. 设备净化的方法	6-16
(二) 润滑系统的清洗和净化	6-16
1. 安装后的清洗(直接联接系统)	6-16
2. 长期运行后的清洗	6-17
(三) 各种油料及净化材料的安全技术	6-20
1. 影响燃烧和爆炸的因素	6-20
2. 对潜在危险的认识和控制	6-22
3. 防火防爆的重要措施	6-23
四、润滑油的废旧油回收和再生利用	6-24
(一) 润滑油的废旧过程	6-24
1. 废旧过程	6-24
2. 废旧机理	6-26
(二) 废旧程度的鉴定	6-27
1. 鉴定方法	6-27
2. 废旧质量指标	6-29
(三) 废油的回收与保管	6-29
(四) 废油的再生	6-30
1. 再生方法的选择	6-30
2. 再生方法示例	6-33
3. 再生润滑油的质量参考标准	6-37
4. 再生油的应用范围	6-37
5. 无法再生的废油处理	6-39
附录	附-1
1. 国产各种油料标准	附-1
2. 国产润滑脂标准	附-15
3. 国产机械油与外国油对照表	附-22
4. 国产机床用油与外国油对照表	附-23
5. 外国润滑油种的试验数据	附-26

第一章 摩擦、磨损与润滑

摩擦、磨损与润滑是研究相互接触的摩擦面之间作用状态的边缘科学。它涉及到流体力学，固体力学，材料科学，应用数学，热物理，流变学，物理化学以及化学和物理学等多门科学的综合应用。最近半个世纪以来，这个学科已得到比较深入的研究和发展。

摩擦、磨损与润滑三者之间的关系是：摩擦是两摩擦表面间存在的阻碍相对运动的一种现象，磨损是摩擦的结果；而润滑是控制摩擦面间摩擦、磨损的重要措施。由此可见，三者是密切相关的，而润滑是搞好设备维护保养的基础。实践证明：盲目地使用润滑材料，光凭经验搞润滑是不行的，应根据摩擦面间的摩擦磨损规律，选定润滑材料，确定适宜的润滑方式方法，并把选定的润滑剂按一定的量加到摩擦面上去。因此，要搞好润滑，就必须首先掌握摩擦、磨损的本质和规律，才能收到实际的效果。

关于摩擦、磨损规律和润滑理论，人们从各个不同的方面进行了探索和研究，已使之大大接近于实际，为搞好设备润滑，提供了理论基础。

一、摩擦

(一) 摩擦的意义

当外力作用在两个相互接触的物体上时，就在其接触面间产生一种阻碍物体运动的阻力，这种阻力就称为摩擦。

摩擦现象最先是1508年意大利文艺复兴时期的艺术家兼工程师列奥那多·达芬奇提出来的；1699年法国人阿蒙顿又通过实验提出了摩擦定律；后再由库仑于1780年完成了现在的摩擦定律，即库仑摩擦定律，或称为阿蒙顿-库仑摩擦定律，其内容如下：

- 1) 滑动摩擦力的大小与接触面积无关；
- 2) 滑动摩擦力的大小与滑动速度无关；
- 3) 滑动摩擦力的大小与接触面间的法向载荷成正比；
- 4) 静摩擦系数大于动摩擦系数。

这一摩擦定律常用下式表示：

$$F = \mu N$$

式中 F ——摩擦力；

N ——摩擦面的法向载荷；

μ ——摩擦系数(其中又分为静摩擦系数 μ_s 和动摩擦系数 μ_k)。

这一定律在当时是符合于实际经验的，但在今天，则有其一定的局限性：

1) 当摩擦表面非常光滑，分子力的作用增强时，摩擦力就会随接触面积而变化；摩擦面是粘弹性材料的，摩擦面的接触面积也同样影响摩擦力的大小。

2) 不管摩擦面的状态和材料如何，摩擦面间滑动速度的大小，都对摩擦力产生影响。

3) 在摩擦面承受极大压力 (压力 = $\frac{1}{3}$ 硬度), 使其实际接触面积接近名义接触面积时, 就会出现严重摩擦, 使摩擦力与摩擦面间的法向载荷失去正比例关系。对于极硬和极软材料组成的摩擦副也是这样。

4) 摩擦面是粘弹性材料的, 其静摩擦系数就不一定大于动摩擦系数。今天对于粘弹性材料是否具有静摩擦系数还有争议。

另外, 1704 年帕朗也提出了: 静止物体在水平面或倾斜面上开始滑动时的摩擦系数, 其大小为摩擦力 F 与法向反力 N 的合力和法向反力夹角 θ 的正切函数值 (图 1-1-1)。即:

$$\mu = \operatorname{tg} \theta = \frac{F}{N}$$

图中 W 为摩擦力 F 与法向反力 N 的合力; N 为法向反力; F 为摩擦力; F' 为作用力 (水平反力)。当作用力 F' 小于摩擦力 F 时, 物体静止; 当作用力 F' 大于摩擦力 F 时, 物体就开始滑动。

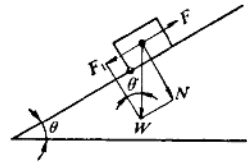


图1-1-1 静止物体
在斜面上的滑动

(二) 摩擦的分类

摩擦的种类很多, 可视摩擦的测重点的不同而有不同的分类。现将常见的几种分类叙述如下:

1. 按摩擦运动形式分类

(1) 滑动摩擦 两个相互接触的物体, 在外力作用下, 沿接触表面相对滑动 (或具有相对滑动趋势) 时, 存在于接触分界面的摩擦, 称为滑动摩擦 (图 1-1-2)。如滑动导轨面间的滑动, 滑动轴承间的转动以及活塞在汽缸中的往复运动等都是滑动摩擦。

滑动摩擦力的大小与接触面积无关, 而与接触面间的法向载荷成正比。即:

$$F = \mu N$$

式中 F ——滑动摩擦力 (公斤力);

μ ——滑动摩擦系数, 它是与材料性质, 表面状态, 工作条件等因素有关的常数;

N ——接触滑动面间的法向载荷 (公斤力)。

上式就是前面提到的库仑摩擦定律, 可用于一般工程的近似计算。

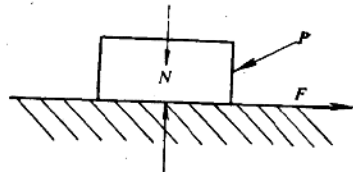


图1-1-2 滑动摩擦示意图

(2) 滚动摩擦 当一物体在一力矩 M 的作用下, 沿另一物体表面滚动时, 如滚动轴承, 滚动导轨, 滚动丝杠等, 由于接触处的局部区域产生弹性-塑性变形, 致使在以接触点 (或接触线) 为中心的接触压力分布不对称, 支承面的反力 N 发生偏心 (图 1-1-3)。此反力对接触点 (或接触线) 之力矩, 就叫做滚动摩擦力矩。

滚动摩擦力矩可用下式表示:

$$M_k = kN$$

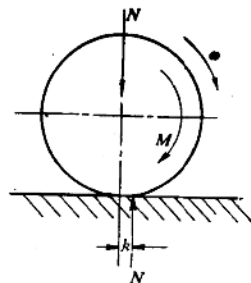


图1-1-3 滚动摩擦
示意图

式中 M_k ——滚动摩擦力矩。其方向与物体滚动的方向相反；其大小与法向载荷 N 成正比；
 N ——法向载荷；
 k ——滚动摩擦系数。它是一个长度物理量，相当于最大的滚动摩擦力矩的力臂，其大小与接触表面的材料及表面状态等因素有关。

2. 按摩擦副的运动状态分类

(1) 静摩擦 当一物体在外力的作用下，对于另一物体只具有相对运动趋势，并未有作相对运动，但已处于静止临界状态。这种情况下的摩擦叫做静摩擦。

静摩擦的特点是：

- 1) 静摩擦力的方向与运动趋势的方向相反；
- 2) 静摩擦力的大小与垂直载荷成正比，并永远小于或等于最大静摩擦力；
- 3) 静摩擦系数值，除与接触表面的材料和条件（如表面光洁度、润滑条件、温度和湿度等）有关外，还与接触时间有关（图 1-1-4）。

大量试验结果表明，静摩擦系数 f ，在接触时间极短（如 0.1 秒）时，随时间的变化极其显著；而在以后的长接触时间中，静摩擦系数随接触时间 t 的增加则变化不大。一般静摩擦接触时间每增加 10 倍，而静摩擦系数仅增加百分之几，变化甚微。

(2) 动摩擦 当一物体受到外力的作用，越过静止临界状态，而在另一物体表面发生相对运动时，此时的摩擦叫做动摩擦。

动摩擦的特点是：

- 1) 动摩擦力的方向，与物体运动的方向相反；
- 2) 动摩擦力的大小与加在物体上的压力成正比，并小于最大静摩擦力；
- 3) 动摩擦系数的值，除了与接触表面的材料和条件（如表面光洁度，润滑条件，温度和湿度）有关外，还与物体运动速度有关。图 1-1-5 是表示动摩擦系数 f' 与运动速度 v 的关系的示意图。试验表明：动摩擦系数 f' 在低速时，一般有上升的倾向，而在高速时，则不断地下降。动摩擦系数 f' 与滑动速度 v 之间呈对数变化。因为动摩擦系数 f' 随滑动速度 v 的增加变化率不大，因此，可把动摩擦系数 f' 当成常数，视为与滑动速度无关。

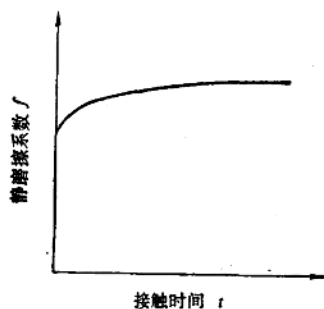


图1-1-4 静摩擦系数 f
随时间 t 的变化

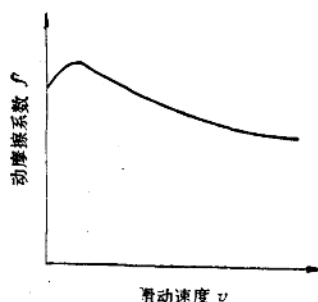


图1-1-5 滑动摩擦系数 f' 随滑
动速度 v 的变化

3. 按摩擦是否发生在同一物体分类

(1) 内摩擦 内摩擦是同物体各部分之间的相对移动而产生的摩擦。如流体润滑情况