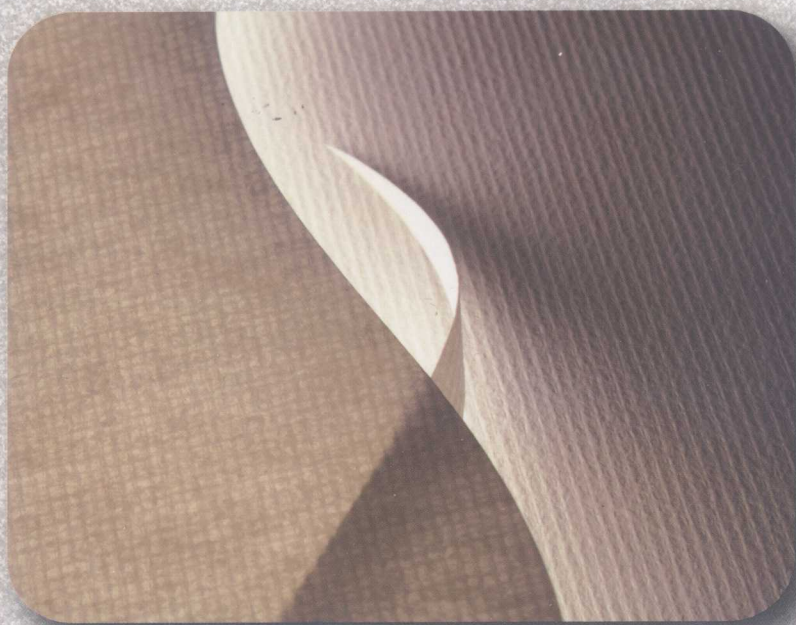


# 摩擦学 原理与设计

MOCAXUE YUANLI YU SHEJI

邱明 钱亚明 编著



国防工业出版社

National Defense Industry Press

014007963

0313.5  
07

# 摩擦学原理与设计

邱明 钱亚明 编著



0313.5  
07

国防工业出版社

·北京·



北航

C1694889

01000388

## 内 容 简 介

全书共分10章,内容包括摩擦学起源与定义、接触表面、摩擦原理与设计、磨损原理与计算、润滑材料、流体膜润滑、弹性流体动压润滑及边界润滑、摩擦学测试技术、摩擦学中的表面工程、摩擦学发展趋势。全书有丰富的习题,以适应教学需要;有详尽的参考文献,供学生深入学习、研究时参考。

本书可作为高等学校机械工程、仪器仪表及材料加工等相关专业的本科生教科书,也可供相关领域工程技术人员和研究生阅读与参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

摩擦学原理与设计 / 邱明, 钱亚明编著. —北京:  
国防工业出版社, 2013. 8  
ISBN 978 - 7 - 118 - 08833 - 5

I. ①摩... II. ①邱... ②钱... III. ①摩擦学  
IV. ①O313.5

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2013) 第 175875 号

※

国防工业出版社出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号 邮政编码 100048)

北京嘉恒彩色印刷责任有限公司

新华书店经售

\*

开本 710 × 1000 1/16 印张 14 1/4 字数 302 千字

2013 年 8 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—4000 册 定价 36.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店:(010)88540777 发行邮购:(010)88540776  
发行传真:(010)88540755 发行业务:(010)88540717

## 前 言

进入 21 世纪以来,随着我国节能减排国策的提出,摩擦学正积极地向传统制造和设计技术中渗透。机械设备零件设计从运动学设计、强度设计进入到摩擦学设计阶段。摩擦学的发展极大地推动了减摩耐磨材料、表面改性技术、润滑技术等方面的迅速发展,促进了机械装备的节能化、高效化,已成为提升我国汽车、交通、航空航天等领域国际竞争力的重要手段。

摩擦学涉及流体力学、固体力学、流变学、数学、材料学、物理、机械、化学、冶金等多学科领域,其原理与设计可广泛应用于机械基础件,如滚动轴承、滑动轴承、齿轮、凸轮等,以及汽车发动机、列车转向机构、直升机控制机构、轮船导航系统等关键部件。

编者长期从事摩擦学理论与应用技术的教学和研究工作。本书部分内容为编者长期教学和研究的成果。本书编写中力求在内容上反映摩擦学的多学科综合分析的特点,强调理论联系实际,学生通过讲授、习题和实验后能够在机械设计中掌握并应用摩擦学的基础知识解决实际工程问题。

本书根据我国“科教兴国”国策和科学技术发展对我国高等教育提出的要求,以及世界各国有关摩擦学研究的发展趋势,把握了科学技术发展和教学手段改革对摩擦学课程教学的影响和促进,在课程的体系结构和教学内容方面做了较大改进和探讨,加强了学生解决工程问题能力的培养。本书以摩擦、磨损和润滑为主线,比较系统地介绍了摩擦学理论和设计方法,并反映摩擦学的检测技术,尽可能地介绍新的研究领域和发展趋势。全书共分为 10 章,第 1 章、第 2 章、第 3 章、第 4 章、第 5 章、第 6 章、第 7 章、第 9 章、第 10 章由邱明撰写,第 8 章由钱亚明撰写。研究生闫佳飞、柏耀星、史朋飞、吕桂森、苗艳伟、李正国参加了本书的整理工作,在此表示衷心的感谢。

本书总结了作者多年的教学以及国家自然科学基金、河南省杰出青年科学基金、河南省高校科技创新人才支持计划项目的研究成果,在参考了大量国内外学者的研究成果基础上编写而成。期望本书的出版对我国制造和设计技术的发展有一定的帮助,并对该领域的人才培养有所裨益。最后诚挚地希望读者批评指正。

编者

2013.3

# 目 录

第1章 绪论 .....	1
1.1 摩擦学的起源与涉及领域 .....	1
1.1.1 摩擦学的起源 .....	1
1.1.2 摩擦学涉及领域 .....	3
1.2 摩擦学的定义与研究内容 .....	8
1.2.1 摩擦学的定义 .....	8
1.2.2 摩擦学的研究内容 .....	9
1.3 摩擦学问题的解决方法 .....	10
习题 .....	11
第2章 接触表面 .....	12
2.1 表面形貌 .....	12
2.1.1 表面形貌定义 .....	12
2.1.2 表面形貌参数 .....	13
2.2 表面性质 .....	19
2.3 表面接触 .....	21
2.3.1 赫兹弹性接触 .....	21
2.3.2 粗糙表面的接触 .....	23
习题 .....	29
第3章 摩擦原理与设计 .....	30
3.1 滑动摩擦机理 .....	30
3.1.1 基本特性 .....	30
3.1.2 简单的摩擦理论 .....	32
3.1.3 黏着摩擦理论 .....	33
3.1.4 摩擦二项式定律 .....	38
3.2 滚动摩擦机理 .....	39
3.2.1 微观滑移效应 .....	39
3.2.2 弹性滞后 .....	40
3.2.3 塑性变形 .....	40
3.2.4 黏着效应 .....	40

3.2.5	滚动摩擦定律 .....	40
3.2.6	滚动摩擦阻力的计算 .....	41
3.3	滑动摩擦副材料的设计及选用 .....	42
3.3.1	滑动摩擦副性能要求 .....	42
3.3.2	滑动摩擦副材料的选用 .....	43
3.4	滚动摩擦副材料的设计及选用 .....	46
3.4.1	滚动摩擦副的性能要求 .....	46
3.4.2	滚动摩擦副的选用 .....	47
3.5	设计案例 .....	51
习题	.....	53
<b>第4章</b>	<b>磨损原理与计算</b> .....	<b>55</b>
4.1	磨损机理 .....	55
4.1.1	磨损定义与研究内容 .....	55
4.1.2	磨损的分类 .....	56
4.1.3	磨损过程曲线 .....	58
4.1.4	磨损机理 .....	59
4.2	磨损的计算 .....	63
4.3	磨损规律在设计中的应用 .....	67
4.3.1	原理性设计 .....	68
4.3.2	保护层原理与耐磨设计基本准则 .....	69
4.3.3	置换原理 .....	71
4.3.4	转移原理 .....	71
4.4	耐磨材料 .....	71
4.4.1	耐磨钢 .....	71
4.4.2	耐磨铸铁 .....	72
4.4.3	非铸造类耐磨材料 .....	73
4.5	案例分析: 齿轮传动耐磨性可靠度计算 .....	74
4.5.1	轮齿磨损的基本规律 .....	74
4.5.2	在给定工作寿命下齿轮传动耐磨性的可靠度计算 .....	75
4.5.3	小结 .....	76
习题	.....	77
<b>第5章</b>	<b>润滑材料</b> .....	<b>78</b>
5.1	液体润滑剂 .....	78
5.1.1	润滑油的理化性质 .....	78
5.1.2	添加剂的选用 .....	83
5.1.3	合成润滑油 .....	85

5.2	润滑脂	87
5.2.1	主要性能指标	87
5.2.2	润滑脂的选用	88
5.3	固体润滑剂	88
5.3.1	固体润滑剂的优缺点	88
5.3.2	常用的几种固体润滑剂	89
5.3.3	固体润滑剂的选用及膜制方法	90
5.4	气体润滑剂	91
5.5	案例分析:冷挤压新型润滑剂的研究与应用	92
5.5.1	新型润滑剂的研究	92
5.5.2	润滑剂的实际选用	93
5.5.3	小结	94
	习题	94
<b>第6章</b>	<b>流体膜润滑</b>	<b>95</b>
6.1	润滑状态	95
6.2	流体动压润滑	96
6.2.1	流体润滑理论的基本方程	96
6.2.2	雷诺方程	97
6.2.3	流量和剪切应力方程	101
6.3	流体动压滑动轴承的设计计算	103
6.3.1	斜面推力轴承	103
6.3.2	阶梯轴承	104
6.3.3	径向轴承	106
6.3.4	动压滑动轴承在轧辊磨床上的应用	113
6.4	流体动力不稳定性	113
6.4.1	油膜不稳定性	113
6.4.2	半频涡动(半速涡动)	114
6.4.3	油膜振荡	115
6.4.4	油膜不稳定性抑制	116
6.5	流体静压润滑	116
6.5.1	概述	116
6.5.2	毛细管节流径向静压轴承计算	118
6.6	流体静压滑动轴承的设计	121
6.6.1	周向有回油槽的径向流体静压轴承的结构参数设计	121
6.6.2	流体静压止推轴承的结构参数设计	128
6.7	案例分析:静压轴承的应用	131



6.7.1	静压轴承在 C6140 上的应用	131
6.7.2	静压轴承在内圆磨具上的应用	131
	习题	132
<b>第 7 章</b>	<b>弹性流体动压润滑及边界润滑</b>	<b>135</b>
7.1	刚性接触润滑理论	135
7.1.1	几何模拟与间隙方程	135
7.1.2	马丁线接触润滑理论	136
7.2	弹性流体动压润滑理论	138
7.2.1	格鲁宾近似解	138
7.2.2	线接触弹流的数值解法—Dowson-Higginson 等温解	141
7.2.3	影响弹流润滑的压力分布和油膜形状的主要因素	144
7.2.4	线接触润滑公式选用及润滑状态图	144
7.2.5	点接触弹流润滑简介	146
7.2.6	点接触问题的润滑状态图	147
7.3	弹性流体动压润滑理论的应用	148
7.3.1	用途	148
7.3.2	案例分析	148
7.4	边界润滑理论	152
7.4.1	边界润滑概念	152
7.4.2	边界润滑的类型	152
7.4.3	影响边界润滑膜性能的因素	158
	习题	159
<b>第 8 章</b>	<b>摩擦学测试技术</b>	<b>163</b>
8.1	摩擦磨损试验机分类	163
8.1.1	往复滑动摩擦磨损试验机	163
8.1.2	旋转滑动摩擦磨损试验机	165
8.1.3	冲击磨损试验机	167
8.1.4	微动摩擦磨损试验机	169
8.2	摩擦力矩的测量方法	170
8.2.1	扭轴法	170
8.2.2	平衡力矩法	171
8.2.3	能量转换法	171
8.3	磨损量的测量方法	173
8.3.1	称重法	174
8.3.2	测长法	174
8.3.3	放射性同位素法	174

8.3.4	沉淀法或化学分析法	175
8.3.5	轮廓仪法	175
8.3.6	位移传感器法	175
8.4	摩擦温度测量方法	176
8.4.1	热电偶法	176
8.4.2	薄膜传感器法	177
8.4.3	红外测温法	177
8.5	磨损表面形貌参数的测量方法	178
8.5.1	表面结构	178
8.5.2	测量方法及仪器	179
8.6	试验设计方法	184
8.6.1	完全随机设计	184
8.6.2	配对设计	184
8.6.3	随机区组设计	185
8.6.4	析因设计	185
8.6.5	拉丁方设计	185
8.6.6	正交试验设计方法	186
8.6.7	均匀设计	187
	习题	188
<b>第9章</b>	<b>摩擦学中的表面工程</b>	<b>189</b>
9.1	表面工程与摩擦学的关系	189
9.2	表面改性	190
9.2.1	表面淬火	190
9.2.2	化学热处理	195
9.3	表面涂层	200
9.3.1	表面涂层设计	200
9.3.2	常用的表面涂层方法	201
9.4	表面工程设计案例	206
	习题	210
<b>第10章</b>	<b>摩擦学发展趋势</b>	<b>211</b>
10.1	生物摩擦学	211
10.1.1	生物摩擦学特点	211
10.1.2	人体的生物摩擦学	212
10.2	纳米摩擦学	214
10.3	空间摩擦学	216
10.3.1	空间摩擦学主要问题	216

173	10.3.2	空间摩擦学主要技术途径	217
173	10.3.3	空间摩擦学应用研究前沿领域	218
173	10.3.4	空间摩擦学前景展望	218
173	10.4	轴承摩擦学	219
173	10.4.1	轴承摩擦学应用	219
173	10.4.2	轴承摩擦学前景展望	224
	参考文献		225

178	1.1.1	空间摩擦学	1.1.1
178	1.1.2	空间摩擦学	1.1.2
178	1.1.3	空间摩擦学	1.1.3
178	1.1.4	空间摩擦学	1.1.4
178	1.1.5	空间摩擦学	1.1.5
178	1.1.6	空间摩擦学	1.1.6
178	1.1.7	空间摩擦学	1.1.7
178	1.1.8	空间摩擦学	1.1.8
178	1.1.9	空间摩擦学	1.1.9
178	1.1.10	空间摩擦学	1.1.10
178	1.1.11	空间摩擦学	1.1.11
178	1.1.12	空间摩擦学	1.1.12
178	1.1.13	空间摩擦学	1.1.13
178	1.1.14	空间摩擦学	1.1.14
178	1.1.15	空间摩擦学	1.1.15
178	1.1.16	空间摩擦学	1.1.16
178	1.1.17	空间摩擦学	1.1.17
178	1.1.18	空间摩擦学	1.1.18
178	1.1.19	空间摩擦学	1.1.19
178	1.1.20	空间摩擦学	1.1.20
178	1.1.21	空间摩擦学	1.1.21
178	1.1.22	空间摩擦学	1.1.22
178	1.1.23	空间摩擦学	1.1.23
178	1.1.24	空间摩擦学	1.1.24
178	1.1.25	空间摩擦学	1.1.25
178	1.1.26	空间摩擦学	1.1.26
178	1.1.27	空间摩擦学	1.1.27
178	1.1.28	空间摩擦学	1.1.28
178	1.1.29	空间摩擦学	1.1.29
178	1.1.30	空间摩擦学	1.1.30
178	1.1.31	空间摩擦学	1.1.31
178	1.1.32	空间摩擦学	1.1.32
178	1.1.33	空间摩擦学	1.1.33
178	1.1.34	空间摩擦学	1.1.34
178	1.1.35	空间摩擦学	1.1.35
178	1.1.36	空间摩擦学	1.1.36
178	1.1.37	空间摩擦学	1.1.37
178	1.1.38	空间摩擦学	1.1.38
178	1.1.39	空间摩擦学	1.1.39
178	1.1.40	空间摩擦学	1.1.40
178	1.1.41	空间摩擦学	1.1.41
178	1.1.42	空间摩擦学	1.1.42
178	1.1.43	空间摩擦学	1.1.43
178	1.1.44	空间摩擦学	1.1.44
178	1.1.45	空间摩擦学	1.1.45
178	1.1.46	空间摩擦学	1.1.46
178	1.1.47	空间摩擦学	1.1.47
178	1.1.48	空间摩擦学	1.1.48
178	1.1.49	空间摩擦学	1.1.49
178	1.1.50	空间摩擦学	1.1.50
178	1.1.51	空间摩擦学	1.1.51
178	1.1.52	空间摩擦学	1.1.52
178	1.1.53	空间摩擦学	1.1.53
178	1.1.54	空间摩擦学	1.1.54
178	1.1.55	空间摩擦学	1.1.55
178	1.1.56	空间摩擦学	1.1.56
178	1.1.57	空间摩擦学	1.1.57
178	1.1.58	空间摩擦学	1.1.58
178	1.1.59	空间摩擦学	1.1.59
178	1.1.60	空间摩擦学	1.1.60
178	1.1.61	空间摩擦学	1.1.61
178	1.1.62	空间摩擦学	1.1.62
178	1.1.63	空间摩擦学	1.1.63
178	1.1.64	空间摩擦学	1.1.64
178	1.1.65	空间摩擦学	1.1.65
178	1.1.66	空间摩擦学	1.1.66
178	1.1.67	空间摩擦学	1.1.67
178	1.1.68	空间摩擦学	1.1.68
178	1.1.69	空间摩擦学	1.1.69
178	1.1.70	空间摩擦学	1.1.70
178	1.1.71	空间摩擦学	1.1.71
178	1.1.72	空间摩擦学	1.1.72
178	1.1.73	空间摩擦学	1.1.73
178	1.1.74	空间摩擦学	1.1.74
178	1.1.75	空间摩擦学	1.1.75
178	1.1.76	空间摩擦学	1.1.76
178	1.1.77	空间摩擦学	1.1.77
178	1.1.78	空间摩擦学	1.1.78
178	1.1.79	空间摩擦学	1.1.79
178	1.1.80	空间摩擦学	1.1.80
178	1.1.81	空间摩擦学	1.1.81
178	1.1.82	空间摩擦学	1.1.82
178	1.1.83	空间摩擦学	1.1.83
178	1.1.84	空间摩擦学	1.1.84
178	1.1.85	空间摩擦学	1.1.85
178	1.1.86	空间摩擦学	1.1.86
178	1.1.87	空间摩擦学	1.1.87
178	1.1.88	空间摩擦学	1.1.88
178	1.1.89	空间摩擦学	1.1.89
178	1.1.90	空间摩擦学	1.1.90
178	1.1.91	空间摩擦学	1.1.91
178	1.1.92	空间摩擦学	1.1.92
178	1.1.93	空间摩擦学	1.1.93
178	1.1.94	空间摩擦学	1.1.94
178	1.1.95	空间摩擦学	1.1.95
178	1.1.96	空间摩擦学	1.1.96
178	1.1.97	空间摩擦学	1.1.97
178	1.1.98	空间摩擦学	1.1.98
178	1.1.99	空间摩擦学	1.1.99
178	1.1.100	空间摩擦学	1.1.100

# 第1章 绪论

据估计,全世界  $1/3 \sim 1/2$  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,改善润滑性能是节约能源和原材料、减少维修时间的重要措施。同时,研究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,因而引起各国的重视,成为近四十年来迅速发展的交叉学科。

## 1.1 摩擦学的起源与涉及领域

### 1.1.1 摩擦学的起源

人类对于摩擦学的应用古已有之,例如,旧石器时代钻木取火就采用了鹿角或骨头制作的轴承,制作陶器的转盘或碾谷物的石辊也使用了某些轴承,罗马附近的尼米湖曾发现了一个公元 40 年的推力球轴承。

公元前 3500 年,人们就开始利用车轮,这足以证明了人类已经知道如何在移动物体时降低摩擦。在公元前 1880 年,古埃及亚述人在运送巨大的石像时,采用圆木棍支撑重物,最终减少了人力的耗费,如图 1-1 所示。我国早在公元

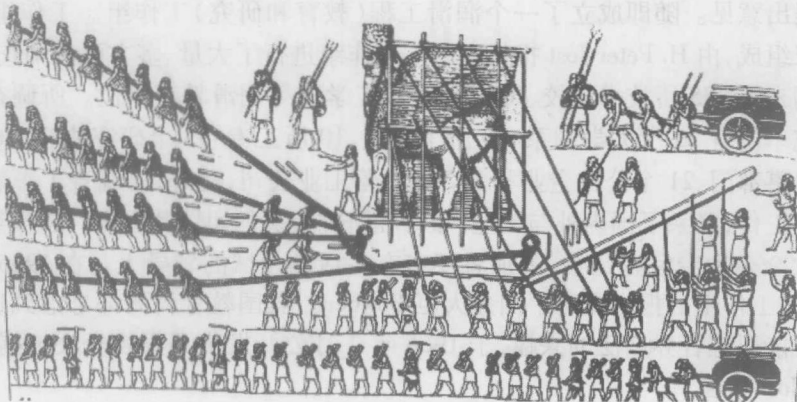


图 1-1 亚述人运输简图

前 2000 年左右已经开始将摩擦学运用到了实际生活中,如古战车、滑车以及木制滑动轴承等。但是长久以来,摩擦学的理论研究缓慢。首次将摩擦学引入理论研究途径的是 Leonardo da Vinci,他认识到摩擦力与载荷之间存在正比关系,但是与名义接触面积并没有关系。之后,法国的 Amonton 和 Coulomb 系统地 对摩擦进行了研究,进一步证实了 Leonardo da Vinci 提出的结论,并以固体摩擦的研究为代表,根据大量的试验归纳出滑动摩擦的经典公式。这一时期的研究是以试验为基础的经验研究模式。

与摩擦相比,润滑的研究相对较成熟。在英国蒸汽机车工程师 B. Tower 发现流体动力润滑现象之后,19 世纪末,英国的科学家 Reynolds 根据黏性流体力学揭示出润滑膜的承载机理,并建立表征润滑膜力学特性的基本方程,奠定了流体润滑的理论基础,从而开创了基于连续介质力学的研究模式。在 20 世纪 20 年代以后,由于生产发展的需要,摩擦学的研究领域得以进一步扩大。其间,W. B. Hardy 提出依靠润滑油中的极性分子与金属表面的物理化学作用而形成吸附膜的边界润滑理论,推动了润滑剂和添加剂化学研究;G. A. Tomlinson 从分子运动角度解释固体滑动过程的能量转换和摩擦起因;特别地,F. P. Bowden 和 D. Tabor 建立了以黏着效应和犁沟效应为基础的摩擦磨损理论,等等。这些研究不仅扩展了摩擦学的范畴,而且促使它发展成为一门涉及力学、材料科学、热物理和物理化学等的边缘学科,从而开创了多学科综合研究的模式。

摩擦学(Tribology)这个名词的出现,至今不超过 50 年,它的使用要从著名的“Jost 报告”说起。

“Jost 报告”,指的是 1966 年 2 月英国教育科研部所发表的关于摩擦学教育和研究报告。1964 年 12 月 22 日,当时的英国教育科研国务大臣 Bowden 勋爵邀请了 H. Peter Jost 先生和其他著名的润滑工程专家及有关团体的代表来磋商,一起来查明在英国有关润滑的教育和研究工作的现状,并且就工业在这方面的需要提出意见。随即成立了一个润滑工程(教育和研究)工作组。工作组由 15 名专家组成,由 H. Peter Jost 担任主席。工作组进行了大量、多方面的调查工作,共计调查了 385 所技术学校、40 所大学和工学院等润滑教育单位。所调查的润滑研究单位有 33 所大学的系、10 所工学院、10 所工专、53 个研究协会、16 个政府非军事部门、21 个公营企业和 112 个私营工业公司,此外,还调查了军事部门的研究工作,联系了国内外与工业、教育和研究有关的团体和个人。工作组举行了多次全会和专家鉴定会,参加者还有有关活动领域的领导人。在 1965 年 11 月 23 日工作组的报告交给了国务大臣 Bowden。英国教育科研部考虑到这个报告有可能引起各界广泛的兴趣,于 1966 年 2 月公开发表了报告全文,这就是著名的“Jost 报告”。

按照“Jost 报告”的估计,如果能合理运用润滑科学技术,在英国每年可节约资金 5.15 亿英镑,日本(1974 年)应能节约 11.34 亿美元,美国应能节约

50.4 亿~66.72 亿美元。这些表明了合理应用润滑技术能带来巨大的经济效益。

那么,在过去竟然会这样长期地普遍忽视这门经济上和技术上都十分重要的学科,其主要原因就是这门学科是一门边缘学科,它所包含的内容十分广泛,主要有机械、物理、冶金、材料、化学等。过去人们并没有把它们综合起来考虑,只是由于近年来生产工艺的改进以及技术的发展,人们才对这门边缘学科的重要性以及学科各组成部分的相互依赖加以注意。另外,就是人们狭义地理解了“润滑”一词的含义,以为“润滑”微不足道,以致妨碍了人们去充分理解这门学科的经济意义和技术意义。

为了消除继续对此发生的误解,避免不利的影响,这个工作组与牛津大学出版社英文词典增补版编辑磋商之后,建议使用一个新词 Tribology 来说明这门学科的内容。Tribology——摩擦学,即摩擦学和摩擦技术。

### 1.1.2 摩擦学涉及领域

随着科技的不断进步以及理论知识的不断更新,摩擦学的应用范围及其涉及的领域也越来越广泛。在 2006 年 1 月,由徐匡迪、张彦仲、谢友柏、薛群基以及徐滨士等组成的专家组对摩擦学在冶金、能源化工、铁道机车、汽车、航空航天、船舶、军事装备以及农业装备等八个领域的应用进行了调查,调查发现,我国通过摩擦学节约的经费占 2006 年 GDP 的 1.55%。下面通过举例对摩擦学在每一种领域的应用进行简单说明。

#### 1. 摩擦学在冶金领域的应用

我国冶金工业通过摩擦学应用可以节省的费用估计为每年 103.84 亿元。例如,早期的冶金系统所用的水泵密封填料一般都用石棉盘根,现在开始推广使用自润滑固体密封填料——柔性石墨,不仅改善了泵的密封性,还有效地降低了阻力矩,大大节省了电能。上海铁合金厂在 12SH9A、12SH13A、8SH13A、10SH9A 型水泵上,先后采用石墨填料和石棉盘根,运转同样天数,考核其功率消耗平均值。在阀门开度(流量)、压力、转速不变的条件下,在同一台泵上,柔性石墨填料泵节电效果十分明显,最高节电量(12SH9A 型泵)每台每天节电达 360~450kW·h,最低节电量(8SH13A 型泵)每台每天也有 30~40kW·h。石墨填料既能起良好的密封作用,又能比原来使用的石棉盘根节电。从现有统计数字来看,在 SH 型水泵上,能节电 2%~10%,按此比例数值估算,仅该公司一年期间的节电量就可达 50~60 万 kW·h。

据查,上钢三厂使用的 250t 热剪切机由 HG-11 和 HG-24 号润滑油润滑,改用 65 号润滑脂泵送润滑,可以减少摩擦,并且使磨损减慢,保证了铜轴承使用寿命延长到一年以上,润滑油年节约量达 26t,铜轴承和润滑剂两项总节约量每年可达 3.16 亿元。

## 2. 摩擦学在能源化工领域的应用

摩擦学在石化行业的应用很广泛,在炼制工艺过程中具有代表性的是常减压装置上采用机泵群油雾集控润滑和干气密封改造。其中,干气密封改造就用到了将原普通密封改造成为干气密封的摩擦学技术。普通密封是依靠密封材料之间的摩擦或油膜来实现密封,摩擦阻力较大,材料消耗较多,故障率和维修成本也较高。干气密封则利用了密封元件之间形成的涡旋气流来实现密封,摩擦阻力小,故障率和维修成本也明显降低。通过对某公司常减压装置上脱乙烷塔回流泵中采用干气密封后的调查发现,在该公司更换密封之后,至今尚未出现泄漏和故障。通过减小维修、备件库存、工人费用、电力消耗等,并扣除改造投资,按三年均摊费用,可产生的直接经济效益约为 5.2 万元/年,意味着 3.47 万元/(百万吨原油·年)。以国内处理原油 30650 万 t 计算,如果全部的常减压装置上脱乙烷塔回流泵都采用干气密封结构,每年可产生直接经济效益 4891.74 万元。

除此之外,在同属能源化工的煤炭行业和电力行业,摩擦学应用带来的益处更加不容忽视。

## 3. 摩擦学在铁道机车领域的应用

在铁道行业中摩擦学问题无处不在,例如,火车制动盘由于高温导致的烧伤甚至断裂(图 1-2),进而导致了刹车系统失灵现象;在电力机车行驶过程中,弓网连接系统的载流摩擦问题,产生电火花(图 1-3),导致弓网系统快速损坏。

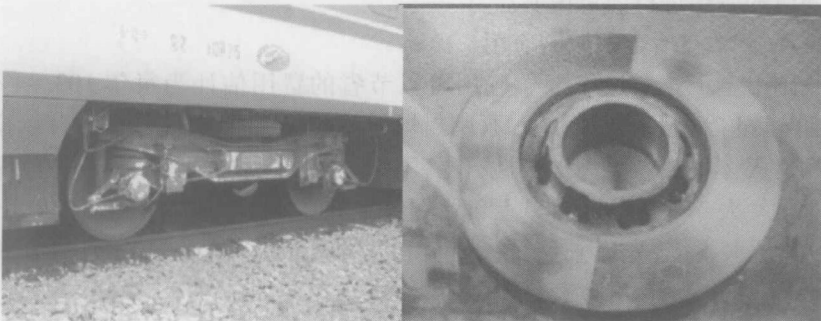


图 1-2 火车制动盘

据铁道部安检司调查,2003 年全年因车轮和钢轨损伤而更换所需的材料费和人工费分别为 34 亿元和 50 亿元。其中,钢轨的摩擦学失效占钢轨损伤量的 80% 以上。调查表明,淬火钢轨发生波磨较少,轨道打磨也可以延长波磨钢轨寿命 50% 以上。如采用淬火钢轨、侧面涂油和适时的钢轨打磨等已经成熟的技术,仅钢轨材料一项每年就可以节约费用 20 亿元。如果加上减少钢轨更换的人工费,则通过摩擦学应用每年可以节省钢轨更换费用 28.05 亿元。

对于转向架摩擦副中其他结构,如果将无导框式轴箱定位取代导框式轴箱

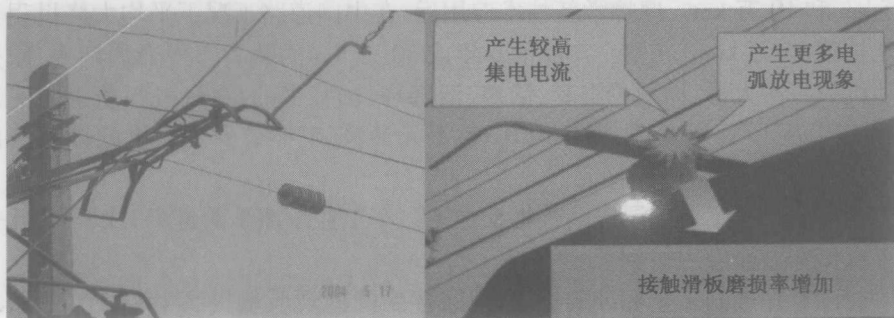


图 1-3 电力机车弓网连接系统

定位和弹性旁承取代摩擦式旁承等先进摩擦学设计技术推广到全路,可以分别节省修理费用 4520 万元和 7808 万元,总计 1.23 亿元。

据统计,如果合理运用摩擦学技术,整个铁路机车系统中关键摩擦副每年直接的节约费用为 61.26 亿元。

#### 4. 摩擦学在汽车领域的应用

摩擦学行为是导致汽车机械失效和能量消耗的主要原因。根据美国环保局测得的典型汽车能量分布情况可知,燃料能量除去 62% 的不可避免的热耗散之外,在剩下 38% 的有效机械能中,消耗在汽车中各种零部件的摩擦损失占 10.5%。汽车零部件的主要失效形式是磨损,它在发动机总成故障中占 47.2%,在变速器故障中占 65.3%,在驱动桥故障中占 72.9%。由此而带来的维修费用约占汽车使用费用的 25%。

在中国汽车行业推广使用载货车长寿命节能合成齿轮油,可创造巨大的经济效益和社会效益。根据中国第一汽车集团有限公司(简称一汽)技术中心、中国石油研发中心、长城润滑油应用技术中心和中国汽车工程学会的分析结果表明,应用国产长寿命节能型齿轮油,其价格仅仅是国外进口品种的 1/3 ~ 1/4,但提高传动效率后节省燃油 5% ~ 7%;全国同时期载货车保有量约 300 万辆,保守估计每辆载货车年平均行驶里程为  $5 \times 10^4$  km,按照为 20L 柴油/(t · 100km) 油耗燃料计算,每车年消耗柴油 10t,而节省量为 0.6t;全国年节省燃油消耗约 180 万 t,价值人民币约 90 亿元。此外,能把现在的普通矿油型齿轮油的更换里程从  $0.3 \times 10^4$  ~  $3 \times 10^4$  km 延长到  $50 \times 10^4$  km 以上,在一个换油间隔内,载货车减少更换齿轮油的次数 15 次以上,每辆载货车节省齿轮油的消耗 750L。因此,虽然载货车用户一次性加装的费用支出要高一些,但是,综合核算的结果,仍然给用户显著节约换油费用。在一个换油间隔内,预计全国节约 200 万 t 润滑油,折合人民币 150 亿元。

根据一汽技术中心和仪征双环活塞环有限公司的分析结果表明,以 2005 年中重型载货车的市场保有量约为 300 万辆计算,平均年行驶里程和大修里程为



5 万 km 和 10 万 km。摩擦学新技术应用后,在中国道路工况下平均大修里程至少延长到 15 万 km。在整个产品的 6 年或 30 万 km 的载货车寿命周期中,减少发动机的一次大修,即减少缸套、活塞、活塞环、轴瓦等的更换一次,价值人民币 0.5~0.8 万元/每组备件,以每组 0.65 万元计算,6 年减少发动机的维修费用 195 亿元,平均每年 32.5 亿元。

我国的汽车工业发展也间接推动中国汽车工业摩擦学的进步。以下为几个汽车摩擦学方面应用的例子。

通过对先进的工艺标准的应用,使摩擦副的微观质量提高 1~2 个级别,有利于摩擦副建立起正常的摩擦磨损工况。例如,齿轮的磨(珩)齿工艺、发动机缸孔的平台珩磨工艺、发动机零件的高压去毛刺工艺、发动机以及变速器(包括桥)的出厂磨合工艺等。

通过开展摩擦副表面微观质量的优化研究,对载货车的齿轮摩擦副,如采用的常规滚—磨加工工艺,齿面的粗糙度  $R_a$  值通常维持在  $0.8 \sim 1.6 \mu\text{m}$ 。在此基础上经过电化学加工,使齿轮表面的粗糙度  $R_a$  值可以达到  $0.1 \sim 0.2 \mu\text{m}$ ,齿面精度改善后,可以延长该摩擦副的使用寿命。

固体减磨剂在润滑油中的试验研究结果表明,一种含有纳米石墨减磨剂微粒的柴油发动机油,在 SRV 摩擦磨损试验中稳定摩擦系数为 0.03,而对比试验发动机油的稳定摩擦系数在 0.10~0.12 之间;发动机台架试验 200h 后的摩擦副的磨损量接近为 0,充分显示良好的摩擦磨损特性和应用潜力。

#### 5. 摩擦学在航空航天领域的应用

航空航天设备主要包括飞机、运载火箭和卫星。发动机是航空航天设备的核心部件,其中包括火箭发动机和航空发动机。发动机的全部组件涉及摩擦、磨损以及润滑的问题占 20%~30%。我国某重型战斗机的发动机故障统计表明,由摩擦学问题引起的事故占 88%。根据中国民用航空总局 1989 年—1999 年的统计资料,机械故障引起的重大飞行事故占 37.9%,而发动机系统的故障又占所有机械故障的 60%。在发动机各类事故中,磨损是主要的故障。

图 1-4 是卫星发射结构简图,从图中可以看出,在整个过程中有一个重要

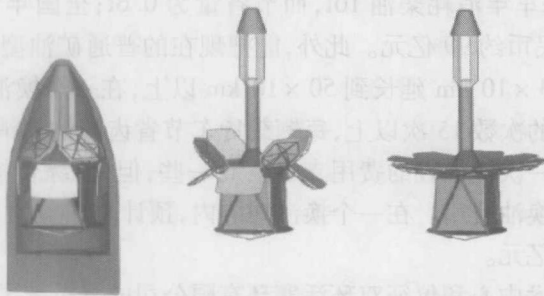


图 1-4 卫星发射结构简图