

# 摩擦、磨损与润滑手册

[苏]И.В.克拉盖尔斯基等主编

(第一册)

Трение  
изнашивание  
и смазка

I

本手册是苏联的许多知名学者的集体创作，分第一、二两册。第一册内容包括：固体的接触、摩擦系数与预位移，磨损计算、材料选择、摩擦中金属的转变与提高金属耐磨性的方法、减摩金属材料、润滑材料及影响润滑性质的因素、侵蚀介质中的磨损、磨料磨损、真空与低温下的摩擦、微动腐蚀磨损等。

本手册可供从事机械研究、设计、制造、使用、维修的人员参考，也可供学习摩擦学知识的人阅读。

**Трение, изнашивание и смазка**

Справочник • книга 1

И.Р.Крагельский

В.Б.Алисин

МОСКВА «МАШИНОСТРОЕНИЕ» 1978

\* \* \*

**摩擦、磨损与润滑手册**

(第一册)

〔苏〕 И.В.克拉盖尔斯基 等 主编

余梦生 吴永伟 等 译

邵荷生 等 校

\*

机械工业出版社出版 (北京阜成门外百万庄南街一号)

(北京市书刊出版业营业许可证出字第 117 号)

机械工业出版社印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

①

\*

开本 787×1092<sup>1</sup>/<sub>32</sub>·印张 18<sup>1</sup>/<sub>4</sub>·字数 399千字

1986年9月北京第一版·1986年9月北京第一次印刷

印数 0,001—6,700·定价 3.75元

\*

统一书号: 15033·5962

## 译 序

本书是苏联许多较有名的摩擦学者集体编写的有关机器摩擦、磨损与润滑的手册。第一册主要为摩擦与磨损部分，内容包括固体的摩擦与磨损理论、材料的选择、润滑剂与添加剂以及特殊工况（如真空与低温）下的摩擦等，具有一定的现代知识水平，并列有可供参考的设计计算方法与图表。

本书在翻译过程中给小节加了编号，给图表加了章号，所用单位尽量用国际单位制表示。

本书由荆元昌翻译第一、二、三章；吴永伟翻译第四、十一、十三、十四、十五章；周平安翻译第五、六、七、八章；余梦生翻译第九、十章；郑铉翻译第十二章。由邓锡鹏初校；邵荷生终校。

由于译校者的水平有限，书中难免有错误，望读者指正。

一九八三年四月

## 序 言

随着机械科学的发展，新开拓了许多为实际所需要的领域。

例如，最早的机器设计计算要对相对移动的机器部件作运动学分析，以后，随着大功率发动机的出现，开始了强度计算。

当今，我们是机器科学第三领域即摩擦学（取自希腊语 *tribos*——摩擦）形成和发展的见证者。这个领域的实际任务在于研究相互移动的固体的相互接触作用。在这个接触区产生了摩擦力。这些摩擦力不仅消耗能量，而且改变了零件联接尺寸和机器的工作精度。在不良的条件下，外摩擦向内部发展，产生摩擦表面的擦伤，它将导致咬死即机器损坏。在许多情况下，摩擦力却是有益的（制动、摩擦传动等等）。

苏联的学者在这个领域里作出了很大的贡献。他们在摩擦和磨损范围内所作的研究以及为各种机器的联接和使用要求所研制的润滑材料和添加剂都收集在本手册里。

手册是知名学者的集体创作。它有助于设计师根据指定的摩擦状态选择材料和润滑剂，对修理工程师及运转工程师同样有益。这样的手册在苏联是首次出版，有待进一步完善。

## 基本符号

- $A_n$ : 名义接触面积 (НПК)  
 $A_o$ : 轮廓接触面积 (КПК)  
 $A_r$ : 实际接触面积 (ФПК)  
 $N$ : 标准负荷; 法向载荷  
 $T$ : 摩擦力  
 $W$ : 摩擦功  
 $P_n, P_o, P_r$ : 与名义, 轮廓和实际接触面积相对应的压力  
 $M$ : 外力矩  
 $M_f$ : 摩擦力矩  
 $t$ : 时间  
 $\omega$ : 角速度  
 $v$ : 线速度  
 $\tau$ : 切向应力  
 $\sigma$ : 法向应力  
 $\mu$ : 泊松比  
 $E$ : 弹性模量  
 $\sigma_y$ : 屈服极限  
HB, HRC, HV: 与布氏, 洛氏和维氏相应的硬度  
H: 显微硬度  
 $\alpha_r$ : 滞后损失系数  
 $\sigma_0$ : 摩擦疲劳参量  
 $t_y$ : 弹性接触区摩擦疲劳曲线指标

$n$ : 产生变形体积破坏的周期数; 转数

$\rho$ : 密度

$\Theta = \frac{1 - \mu^2}{E}$ : 材料的弹性常数 (对二个变形表面  $\Theta_1 = \Theta_2 + \Theta_2$ )

$d$ : 接触斑点直径

$R_{\max}$ : 轮廓不匀度的最大高度

$H_p$ : 轮廓支撑线长度

$t_p$ : 轮廓相对支撑线长度

$\rho$ : 轮廓断面水平

$H_b$ : 波高

$R_b$ : 波半径

$L_b$ : 波距

$R_n$ : 轮廓的平均算术偏差

$R_z$ : 在十个点处轮廓不平度高度

$S_m$ : 不平度平均间距

$\Delta_0$ : 形状的最大偏差

$r_n$ : 横截面不平度半径

$r_{np}$ : 纵截面不平度半径

$r = \frac{r_n r_{np}}{r_n + r_{np}}$ : 不平度折合半径

$b, v$ : 支撑曲线参数

$e$ : 相对连接

$\Delta = \frac{R_{\max}}{rb^v}$ : 粗糙度综合 (复量) 特性

$f$ : 滑动摩擦系数 (无量纲); 振动频率

$f_x$ : 摩擦系数的分子分量

$f_n$ : 摩擦系数的机械分量 (变形分量)

- $I$ : 线磨损强度  
 $I_m$ : 质量磨损强度  
 $i_m$ : 比线磨损  
 $\tau_0$ : 当正压力外推至零时的剪切阻力  
 $\beta$ : 分子键的强化系数 (无量纲)  
 $U$ : 线磨损  
 $U_m$ : 质量磨损  
 $U_v$ : 体积磨损  
 $h$ : 压入深度  
 $V_m$ : 接触点间空间体积  
 $h_m$ : 缝隙平均宽度  
 $a_r$ : 切向接触位移  
 $\gamma$ : 磨损速度  
 $\theta_{s.s.}$ : 表面平均温度  
 $\theta$ : 体积温度  
 $\eta$ : 动力粘度  
 $\nu$ : 运动粘度  
 $N_m$ : 负载周期数

# 目 录

序言

基本符号

第一章 固体的接触 .....	1
1.1 理想光滑表面的接触 .....	1
1.2 机械零件表面性质 .....	5
1.2.1 表面层的物理-机械特性 .....	5
1.2.2 表面微观几何特性 .....	6
1.2.3 确定微观几何特性的方法 .....	11
1.3 粗糙表面的接触 .....	23
1.3.1 接触表面间微凸体相互作用 .....	23
1.3.2 实际接触面积和轮廓接触面积 .....	24
1.3.3 实际接触面积和实际压力的计算 .....	25
1.3.4 轮廓接触面积和轮廓压力的计算 .....	30
1.3.5 表面相接量的计算 .....	34
1.3.6 接触点间的空间体积的计算 .....	35
1.3.7 实际接触斑点数, 各点平均面积和相互间平均 距离的计算 .....	37
1.4 接触的流变性质 .....	38
1.5 研究接触特性的仪器和方法 .....	40
1.5.1 测量实际接触面积 .....	40
1.5.2 测量接触变形 .....	46
文献目录 .....	47
第二章 外摩擦系数和预位移计算 .....	48
2.1 基本概念和定义 .....	48



## VI

2.2	固体的相互作用	50
2.3	影响静外摩擦系数的因素	66
2.3.1	轮廓压力	67
2.3.2	表面粗糙度	71
2.3.3	接触材料的机械性能	75
2.3.4	接触物体的温度	78
2.4	确定计算静外摩擦系数所需值的方法	80
2.5	摩擦系数的计算方法	89
2.6	预位移	98
文献目录		103
第三章 材料磨损强度计算		106
3.1	材料磨损过程的一般特性	106
3.2	磨损的物理模型	108
3.3	基本的计算关系	118
3.4	影响磨损强度的因素	121
3.5	计算例题	125
文献目录		126
第四章 接点磨损计算		127
4.1	接点的磨损	127
4.1.1	材料磨损的基本规律	127
4.1.2	表面及接点的磨损	128
4.1.3	按磨损条件对接点进行分类	131
4.2	接点的磨损算法	134
4.2.1	利用接触条件	134
4.2.2	直线运动导轨	138
4.2.3	具有变接触条件的接点	141
4.2.4	制作不精确或已变形的零件的磨合问题	147
4.2.5	相对位移不大的摩擦副	150
4.3	考虑刚性的磨损计算	153

4.3.1	受磨接点的接触条件	153
4.3.2	静压力图向动压力图的过渡	156
4.3.3	刚性相联的接点	158
4.4	磨损的极限状态计算	160
4.4.1	最大许用磨损量	160
4.4.2	多杆机构的极限磨损	162
4.5	接点可靠性计算	163
4.5.1	可靠性指标	163
4.5.2	计算零件的磨损寿命和无事故率的例题	166
4.5.3	接点磨损的预测	168
4.5.4	磨损对机器输出参数的影响	169
4.5.5	机器可靠性计算简图	170
	文献目录	174
	第五章 摩擦零件材料的选择	175
5.1	使用条件的分析和技术任务的确定	176
5.2	材料的预选择	179
5.2.1	材料的一般知识	179
5.2.2	以聚合物为基础的材料	179
5.2.3	带状(层状)材料	205
5.2.4	碳素石墨材料	209
5.2.5	金属型陶瓷材料	212
5.3	用计算-设计方法来评定摩擦副的工作能力	214
5.4	材料的最终选择	224
	文献目录	225
	第六章 摩擦副中的金属	226
6.1	金属摩擦时组织的转变	226
6.1.1	一般原理	226
6.1.2	组织和性能	226
6.1.3	强化处理	228

6.1.4	摩擦时产生的二次过程	231
6.1.5	研究组织的基本方法	233
6.1.6	建议	235
6.2	用化学热处理方法提高金属的耐磨性	236
6.2.1	处理过程的特征	236
6.2.2	化学热处理XTO的形式及其应用	237
6.2.3	评定化学热处理的效果	245
6.3	高滑动速度下金属的摩擦和磨损	248
	文献目录	252
	第七章 金属型减摩材料	253
7.1	轴承合金的简述	253
7.1.1	巴比特合金	253
7.1.2	铜基合金	256
7.1.3	铝基合金	259
7.1.4	锌基合金	262
7.1.5	铁基合金	264
7.1.6	用粉末冶金方法制造的合金	266
7.2	用比较方法来评定轴承材料的性能	266
7.2.1	疲劳强度	266
7.2.2	磨合性能	277
7.2.3	耐磨性能	279
7.2.4	摩擦配对元件的相容性	280
7.2.5	抗咬合能力	284
7.3	轴承合金的选择	287
	文献目录	290
	第八章 提高摩擦材料和摩擦副耐磨性的工艺方法	291
8.1	一般概念	291
8.2	零件的切削加工	298
8.3	用表面塑性变形的的方法加工零件(ППД)	299

8.4	热处理(表面淬火)	310
8.5	镀敷保护层	311
8.6	表面堆焊	314
8.7	材料的喷涂	321
	文献目录	328
	第九章 润滑剂与添加剂	329
9.1	内燃机油	329
9.1.1	粘度等级与主要选择原则	330
9.1.2	按照使用性能分类及主要选择原则	333
9.2	汽车拖拉机传动油	335
9.2.1	粘度与粘温性能	336
9.2.2	油与添加剂的选择原则	343
9.2.3	添加剂的类型与性能	349
9.2.4	对油的要求	356
9.3	工业设备用油	362
9.3.1	主要性能	367
9.3.2	现代油品	376
9.4	塑性润滑剂	383
9.4.1	性能指标	383
9.4.2	品种及其应用范围	389
9.5	固体润滑剂与在真空中工作的表面涂层	407
9.5.1	固体润滑剂	407
9.5.2	自润滑材料	411
9.5.3	固体润滑剂与自润滑材料的摩擦特性	414
9.5.4	含聚合物粘结剂的固体润滑剂涂层	419
9.5.5	软金属涂层	421
	文献目录	424
	第十章 边界润滑膜与固体润滑剂涂层的耐热性	426
10.1	油、添加剂与塑性润滑剂性质的影响	429

# X

10.2	摩擦表面材料的影响	434
10.3	气体介质的影响	439
10.4	固体润滑涂层的耐热性	441
文献目录		443
第十一章 侵蚀介质中的摩擦和磨损		444
11.1	腐蚀-机械磨损	444
11.2	材料的耐磨性能	446
11.3	摩擦副的材料	448
11.3.1	钢及合金	448
11.3.2	碳(石墨碳)基减磨材料	449
11.3.3	高硬度的非金属材料	454
11.3.4	聚合材料	458
11.3.5	硅酸盐涂层(瓷漆)	460
11.4	液体磨料磨损和侵蚀磨损	460
文献目录		464
第十二章 磨料磨损		466
12.1	影响磨损量的各种因素	466
12.2	磨损类型	470
12.3	提高零件的耐磨性	485
文献目录		487
第十三章 真空摩擦		489
13.1	概述	489
13.2	对摩擦副提出的要求	494
13.3	静摩擦	505
13.3.1	静摩擦副的优越性	505
13.3.2	静摩擦系数的确定	506
13.3.3	长时期静摩擦的摩擦副研究	509
13.4	滑动摩擦	512
13.5	滚动摩擦	515

文献目录 .....	523
第十四章 低温下的摩擦 .....	524
14.1 低温摩擦部件和所应用的材料 .....	524
14.2 实验研究方法要素 .....	529
14.3 低温下的摩擦系数 .....	534
14.4 端面摩擦部件中温度场的计算 .....	540
文献目录 .....	545
第十五章 微动腐蚀磨损 .....	547
15.1 概述 .....	547
15.2 微动腐蚀磨损试验 .....	549
15.3 影响微动腐蚀磨损发展的因素 .....	550
15.4 微动腐蚀磨损机理 .....	562
15.5 定量评价微动腐蚀磨损 .....	563
15.6 微动腐蚀磨损的预防 .....	564
文献目录 .....	569

# 第一章 固体的接触

只有考虑到机械零件表面的微观几何形状，才能正确评价在摩擦区内发生的物理和机械过程中固体相互作用的情况。粗糙表面相互接触的理论是根据弹性和塑性接触问题的典型结论以及表面性质的研究成果来建立的。

固体接触问题的解决是从具有正确的几何形状和理想的物理—机械性质的物体的研究获得的。由于机械零件实际表面的波峰呈现出各种形状，且其性质远非是理想的，因此使用统计方法来计算固体接触特性。这种统计方法可以描述某些平均高度的变形并考虑到表面的波峰和波形的分布规律。以此为出发点可得到精确的计算公式，这对于工程计算来说是足够精确的。

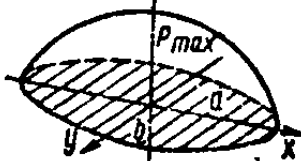
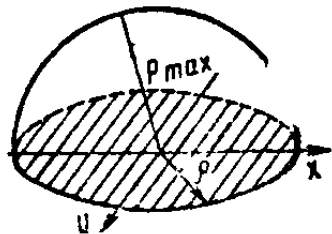
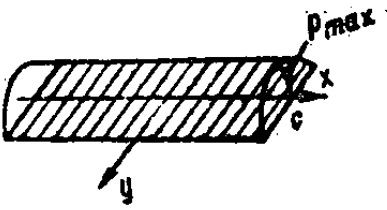
## 1.1 理想光滑表面的接触

按表面接触区应力状态的类型可分为弹性和塑性接触。

弹性物体接触变形的理论考虑到两种情况：第一种情况，表面最初以点接触；第二种情况，表面最初以线接触。事先假定接触物体是完全光滑的同类物体、在接触区只有弹性变形、压力与接触表面的切线相垂直，并且实际接触面积小于名义接触面积、忽略加载时相互接触表面摩擦的影响<sup>⊖</sup>。赫兹指出：在一般情况下，接触面积是椭圆形，其特殊情况是圆形，或是平直的矩形。第一种情况限于球形表面的两个物体或具有彼此轴线垂直的两个相同圆柱体的接触。第二种情况是轴线平行的两个圆柱体的接触。

<sup>⊖</sup> 在工程计算中往往不考虑接触摩擦。

表1.1 二个曲线形物体弹性接触面的压力分布

初始接触情况和接触物体的形状	压力分布规律	示意图
点接触， 双曲率表面	$p(x, y) = p_{max} \sqrt{1 - \left(\frac{x}{a}\right)^2 - \left(\frac{y}{b}\right)^2}$ 椭圆形接触面积半轴 $a, b$	
球形表面或具有相交轴等半径的圆柱体表面，点接触	$p(x, y) = p_{max} \sqrt{1 - \left(\frac{p_{x,y}}{\rho}\right)^2}$ 圆形接触面积	
轴线平行的圆柱体，线接触	$p(x, y) = p_{max} \sqrt{1 - \left(\frac{y}{c}\right)^2}$	

图中符号：

$p(x, y)$  —— 坐标  $x, y$  点的压力；

$p_{max}$  —— 最大压力；

$\rho$  —— 圆形接触面的半径。

不同形状物体接触面压力分布见表1.1。

椭圆形和圆形接触面的平均压力  $P_m$  与最大压力  $P_{max}$  的关系如下：

$$P_m = \frac{2}{3} P_{max}$$

在光滑表面弹性接触的各种情况下，最大压力。接触面近似的计算公式见表 1.2。

塑性变形时，接触表面的平均压力可用下式表示：

$$P_m = C\sigma_s$$



表1.2 二个曲线形物体弹性接触的最大压力、  
接触面近似计算公式

接 触 情 况	计 算 公 式																												
1.二个球形物体，圆形接触面	$\rho = 0.909 \sqrt[3]{\Theta_{\Sigma} r N};$ $P_{max} = 0.578 \sqrt[3]{\frac{N}{\Theta_{\Sigma} r^2}};$ $h = 0.825 \sqrt[3]{\frac{\Theta_{\Sigma} N^2}{r}}$																												
2.同平面接触的球形物体，圆形接触面	计算公式和情况1相同，但应规定式中 $r = r_m$ ( $r_m$ ——球半径)																												
3.同凹面接触的凸面球形物体 ( $r_1 \gg r_2$ )，圆形接触面	计算公式和1相同，但式中 $r = \frac{r_1 r_2}{r_1 - r_2}$																												
4.具有相互垂直轴的两个圆柱体，椭圆接触面其半轴为 $a_0$ 、 $b_0$	$a_0 = \beta_1 \sqrt{r \Theta_{\Sigma} N}; \quad b_0 = \beta_2 a_0;$ <p>接触面积 <math>A = \pi a_0 b_0 = \pi \beta_2 a_0^2;</math></p> $P_{max} = \frac{1.5N}{A}; \quad h = \beta_3 \sqrt[3]{\frac{N}{\Theta_{\Sigma} r}}$ <table border="1" style="margin-top: 10px;"> <thead> <tr> <th><math>r_1/r_2</math></th> <th>1</th> <th>1.5</th> <th>2</th> <th>3</th> <th>6</th> <th>10</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td><math>\beta_1</math></td> <td>1.144</td> <td>1.317</td> <td>1.459</td> <td>1.701</td> <td>2.226</td> <td>2.740</td> </tr> <tr> <td><math>\beta_2</math></td> <td>1.000</td> <td>0.765</td> <td>0.632</td> <td>0.482</td> <td>0.308</td> <td>0.221</td> </tr> <tr> <td><math>\beta_3</math></td> <td>1.651</td> <td>1.635</td> <td>1.607</td> <td>1.548</td> <td>1.405</td> <td>1.280</td> </tr> </tbody> </table>	$r_1/r_2$	1	1.5	2	3	6	10	$\beta_1$	1.144	1.317	1.459	1.701	2.226	2.740	$\beta_2$	1.000	0.765	0.632	0.482	0.308	0.221	$\beta_3$	1.651	1.635	1.607	1.548	1.405	1.280
$r_1/r_2$	1	1.5	2	3	6	10																							
$\beta_1$	1.144	1.317	1.459	1.701	2.226	2.740																							
$\beta_2$	1.000	0.765	0.632	0.482	0.308	0.221																							
$\beta_3$	1.651	1.635	1.607	1.548	1.405	1.280																							
5.具有相互垂直轴线和相同半径的两圆柱体，圆形接触面	$\rho = 0.909 \sqrt[3]{\Theta_{\Sigma} r N};$ $P_{max} = 0.578 \sqrt[3]{\frac{N}{\Theta_{\Sigma} r}};$ $h = 0.825 \sqrt[3]{\frac{\Theta_{\Sigma} N^2}{r}}$																												