

摩
擦
学

摩擦学

余俊 徐真 赵冬初 刘珍莲 编著

TRIBOLOGY

湖
南
科
学



湖南科学技术出版社

TRIBOLOGY

摩 擦 学

余俊 徐真 赵冬初 刘珍莲编著

湖南科学技术出版社

摩 擦 学

余 俊 徐 真 编著

赵冬初 刘珍莲

责任编辑：李遂平

*

湖南科学技术出版社出版

(长沙市展览馆路14号)

湖南省新华书店发行 湖南省新华印刷二厂印刷

*

1984年1月第1版第1次印刷

开本：787×1092毫米 1/16 印张：17.75 字数：427,000

印数：1—4,200

统一书号：15204·113 定价：2.80元

内 容 提 要

本书全面地系统地介绍摩擦、磨损和润滑的原理，但偏重于润滑；着重于基本理论的论证、机理的阐明和主要公式的推导。在取材方面，既有基本的内容，又有较深的内容，还介绍近年来一些新的发展情况，因此，适用面较广。

本书可作为学习摩擦学的研究生及大学生的教材，便于自学，同时也可供教师及工程技术人员参考。

前 言

近十多年来,摩擦学才发展成为一门独立的学科。它所涉及的方面很广,与数学、力学、物理学、冶金学、材料科学及机械工程知识等等都有联系。目前已有各种有关摩擦学的书籍问世,有的偏重于一般原理的介绍,有的是原理与应用并重,有的用较多的篇幅来讨论磨损,有的则侧重于摩擦,有的只涉及润滑,有的以研究表面性质为主,有的则是手册。它们都是从不同的角度来阐述摩擦学的科学原理的。

这本《摩擦学》是一本教学参考用书,是在参阅了大量资料,并总结了我们自己近年来的教学经验的基础上编写成的,企图较全面地系统地介绍本门学科的原理,着重于摩擦学基本理论的论证、机理的阐述、主要公式的推导,供研究生和大学生使用,教师和工程技术人员也可参考。

本书目录中有*号的为较深的选学内容,没有*号的是基本内容。初学者或学时少的情况下可以只学习没有*号的内容。

本书不涉及或很少涉及从摩擦学的观点对种类繁多的机械零件的处理方法,这样就有可能在有限的篇幅内将基本的内容阐述清楚而不致使内容过于庞杂。例如在处理爬行问题时,着重讲边界润滑机理而不涉及机床导轨;在讲到动压轴承和静压轴承时,多讨论其润滑原理而不涉及它们的设计问题。

关于摩擦学的经典内容,如果属于基本理论性的,本书力求论证清楚。对于摩擦学的发展方向 and 某些分支,也稍有简明的介绍,以便读者了解本学科的全貌。

从总的看来,本书的内容侧重润滑原理,这是因为我们考虑到润滑原理在工程实际中被广泛地用作减少摩擦和降低磨损的手段的缘故。

摩擦学的实验方法是很重要的,但是它涉及很多特殊的知识,牵涉的范围也很广,本书没有编写这方面的内容。

本书的第一、二、三、四、五、十七、十八、十九各章是由华中工学院余俊编写的,第六、七、八、九、十、十一各章是由华中工学院徐真编写的,十二、十三、十五、十六各章是由上海交通大学赵冬初编写的,第十四章是华中工学院刘珍莲编写的。由余俊担任主编,由湖南科学技术出版社李遂平担任责任编辑。插图是由上海交通大学林乐琦设计、改画和描绘的。

这本书原是1980年6月在华中工学院出版的讲义,经过试用并修改后成为现在的版本。用这样的方式编写《摩擦学》,是我们的初次尝试,存在不少的缺点:取材未尽恰当,论证未正正确,专用名词的翻译未尽确切,等等。如果读者热情地指出其中的错误和不足之处,将是我们引颈以待的。

编 者

1983年8月

全 书 符 号

(括号内的数字是符号所在章数)

A ——面积。常数。 $=v(\bar{x}_m)/(1-\bar{x}_m)$ 。 $= (E'l/4P)(x_c^2/2R)$ (16)。油膜的有界域 (8)。系统中的元素 (19)。差分常数, $=3u_{i+1,j}+u_{i-1,j}$ (16)。
 (A) ——参数组, $= -h^3/24\eta\Delta$ (8)。
 A' ——塑性条件下全部接触面积 (2)。
 A_B ——边界润滑中边界油膜所占的总面积 (2), (17)。
 A_c ——小孔面积 (14)。
 A_e ——有效承载面积 (14)。
 A_f ——摩擦面积 (14)。
 A'_f ——塑性条件下一个凸峰的变形面积 (2)。
 A_m ——金属接触总面积 (17)。
 A_n ——名义接触面积 (2)。
 A_p ——轮廓接触面积 (2)。
 A_r ——实际接触面积 (3)。
 A_s ——滑阀端部受压面积 (14)。
 A_0 ——零件磨损时, 与磨损痕迹垂直的横断面积 (5)。小孔面积 (14)。
 A_2 ——最小收缩面积 (14)。
 a ——Hertz 接触区长半轴。常数。系数。加速度。幅值。油膜刚度矩阵 (14)。刚度系数 (13) (14)。
 a_p ——幅值 (17)。
 a_x, a_y, a_z —— x, y, z 方向的加速度 (7)。
 a_{xx}, a_{yy}, a_{zz} ——无量纲油膜刚度矩阵 (13)。
 B ——宽度。常数。系数。静压油腔宽度 (14)。综合共形率, $=f_o+f_i-1$ (16)。 $=3\epsilon\cos\theta$ (14)。 $= (4/E')^2(P/l)^3/12\eta_0 Ux_c^2$ (16)。
 b ——Hertz 接触区短半轴。油膜阻尼矩阵 (13)。油垫的周向封油面宽度 (14)。
 $\bar{b}$ ——无量纲宽度, $=b/2m$ (13)。
 $\bar{b}_{xx}, \bar{b}_{yy}, \bar{b}_{zz}$ ——无量纲油膜阻尼矩阵 (13)。
 b_1, b_2 ——热接触系数 (5)。
 C ——半径间隙 (14)。常数。系数。 $=\tau_f/\tau_b$ (3)。
 C_c ——控制滑阀系数的参数群 (14)。
 C_m ——控制薄膜系数的参数群 (14)。
 C_{ij} ——系数 (16)。
 c ——系数。常数。
 c_v ——定容比热 (10)。
 c_1 ——无流量的压强边界 (18)。
 c_2 ——流量边界 (8)。

D ——轴承直径。常数。系数。
 D_a ——分布因子 (2)。
 D_f ——分布函数, $=n/n_s$ (2)。
 d ——轴颈直径。尺寸。深度 (15)。
 d_c ——毛细管、小孔、滑阀的直径 (14)。
 d_1 ——每个接触斑点的平均尺寸 (5)。
 d_2 ——滑动方向每个接触斑点的平均直径 (5)。
 E ——弹性模量。能量。电压 (8)。系数。
 E' ——综合弹性模量。
 $^\circ E$ ——Engler 度。
 E_D ——单元 D 的电压 (8)。
 E_H ——滞后能量损失系数 (3)。
 E_i ——单位时间内传入微元素体中的能 (10)。
 E_o ——单位时间内由微元素体传出的能 (10)。
 E_R ——摩擦一次时粘结点所吸收的能 (5)。
 E_s ——单位时间内暂时储存在微元素体中的能 (10)。
 E_s, E_t ——轴颈涡动一周时, 附加力的能量 (13)。
 e ——轴承的偏心距。单位工作物质的能量。三角形单元中任一点 (8)。
 $e_{\sigma K}$ ——实际单元能量密度 (5)。
 e_f ——单位接触面积内因摩擦而损失的能量 (5)。
 e_R ——粘结点剪断所需的能量 (5)。
 e_{RB} ——磨粒从材料上脱落时所需的全部实际能量 (5)。
 $\bar{e}_{RB}$ ——磨粒从材料上脱落时所需的平均能量 (5)。
 e_{Re} ——粘结点摩擦一次时所吸收的能量, 即单元能量密度 (5)。
 e_r ——误差。
 F ——滑动摩擦阻力。力。函数。体积力 (8)。第一种椭圆积分 (15)。力的量纲符号 (8)。粘着力 (3)。
 $\widehat{F}$ ——第一类椭圆积分的逼近值 (16)。
 F_E ——因材料弹性变形所产生的阻力 (3)。
 F_h ——运动面上的摩擦阻力 (7)。
 F_p ——因材料塑性变形所产生的阻力 (3)。
 F_{pl} ——刻槽时的阻力 (3)。
 F_R ——滚动摩擦阻力。
 $F_{x(b)}$ —— x 方向的体积力 (7)。
 $F_{x(i)}$ —— x 方向的惯性力 (7)。
 $F_{x(s)}$ —— x 方向的表面力 (7)。
 F_0 ——静止面上的摩擦阻力 (7)。

F_i ——粘结点剪切所产生的阻力(3)。

f ——摩擦系数。

f_d —— f_0 的初值(17)。

f_c —— f_0 的极限值(17)。

f_{pl} ——刻槽时的摩擦系数(3)。

f_R ——滚动摩擦系数(3)。

f_s ——滑动摩擦系数(3)。

f_0 ——边界润滑的静摩擦系数(17)。

f_r ——粘结滑动的摩擦系数(3)。

G ——材料参数, $=\alpha E'$ (16)。

g ——重力加速度。参数。

g_E ——弹性参数, $=(P^2/\eta_0 U E' R)^{1/2}$ (16)。

g_f ——折算压力参数, $=(P^3/\eta_0 U R^2)^{1/2}$ (16)。

g_v ——粘度参数, $=(\alpha^2 P^3/\eta_0 U R^2)^{1/2}$ (16)。

g_a ——粘度对Hertz压力的影响参数, $=(2\pi/g_E)^{1/2}$ (16)。

g_{aE} ——无量纲参数, $=(\alpha^4 E'^3 \eta_0 U/R)^{1/4}$ (16)。

H ——硬度。高度。无量纲油膜厚度参数。单位时间、单位面积上的热传导量(10)。

H^* ——无量纲最小油膜厚度参数(16)。

H_a ——磨料硬度(4)。

H_B ——布氏硬度。

H_{fj} ——表面廓形高度的平均均方根偏差。

H_m ——金属本体硬度(4)。

H_V ——维氏硬度。

h ——油膜厚度。深度。高度。

$\bar{h}$ ——无量纲油膜厚度。

Δh ——每个接触斑点上磨去的平均厚度(5)。

h_B ——边界油膜厚度(2), (17)。

h_{IVE} ——恒粘弹性的无量纲最小油膜厚度(16)。

h_{IVR} ——恒粘刚性的无量纲最小油膜厚度(16)。

h_M ——用Martin公式计算的最小油膜厚度(16)。

h_R ——损失水头(14)。

h_b ——油腔深度(14)。

h_c ——节流间隙(14)。

h_{c1} ——在受载条件下薄膜节流器中的薄膜和圆台之间的间隙(14)。

h_c ——有效起始油膜厚度(17)。

h_b ——轴承油膜开始破裂处的油膜厚度(9)。

h_m ——薄膜节流器板厚(14)。压力最大处的油膜厚度(16)。

$h_{\min}$ ——最小油膜厚度。

$\bar{h}_{PVE}$ ——压粘弹性的无量纲最小油膜厚度(16)。

$\bar{h}_{PVR}$ ——压粘刚性的无量纲最小油膜厚度(16)。

h_s ——油槽模拟深度(8)。

Δh_t ——全部磨损厚度(5)。

h_u, h_l ——核的上界及下界厚度(11)。

h_0 ——两接触物体中心连线上的油膜厚度(16)。静压轴承空载时的油膜厚度(14)。零件磨损时的磨损深度(5)。

h_1, h_2 ——进、出口的油膜厚度(7)。

h_1 ——背载油垫油膜厚度(14)。

h_3 ——受载油垫油膜厚度(14)。

$\bar{h}_r$ ——用ГРУБИН公式计算的无量纲最小油膜厚度(16)。

$\bar{h}_b = (2R/b^2)h$ (16)。

$\bar{h}_c = (E'/4P)h_c$ (16)。

$\bar{h}_h = (E'/4P)h$ (16)。

$\bar{h}_m = (E'/4P)h_m$ (16)。

$\bar{h}_{\min} = h_{\min}P/\eta_0 UR$ (16)。

$h_R = h_0/R$ (16)。

$\bar{h}_0 = (2R/b^2)h_0$ (16)。

I ——磨损率。电流(8)。

I_G ——用磨损质量表示的磨损率(5)。

I_h ——用磨损厚度表示的磨损率(4)(5)。

I_V ——用磨损体积表示的磨损率(5)。

I_0 ——磨损系数(17)。

i ——电流密度(8)。

i, j, m ——节点(7)(14)。

i_h ——一个接触斑点的微观磨损率(5)。

J ——热功当量(10)。泛函(8)。Sommerfeld 变换的变量组, J_1, J_2, J_3 。积分式。

J^* ——热量量纲符号(10)。

$$J_2^{lm} = \int_{\theta_1}^{\theta_2} \sin^l \theta \cos^m \theta d\theta / (1 + \varepsilon \cos \theta)^2$$

$$J_3^{lm} = \int_{\theta_1}^{\theta_2} \sin^l \theta \cos^m \theta d\theta / (1 + \varepsilon \cos \theta)^3$$

K ——常数。系数。矩阵。油膜厚度放大系数(8)。

K_F, K'_F ——静止表面, 运动表面上的摩擦力系数(7)。

K_w, K_p ——承载能力系数(7), (12), (13)。 $K_p = W(C/r^2)/\eta UL$ (7), $K_p = W(C/r)/\eta_0 \dot{\varepsilon} Ld$ (12), $K_p = W\psi^2/\eta_0 \omega Ld$ (13)。

K_f ——摩擦系数(7)。

K_e ——压力中心系数(7)。

$K_{h,ij}$ ——油膜厚度变化流量矩阵中元素的通式(8)。

$K_{p,ij}$ ——压强流量矩阵中元素的通式(8)。

$K_{u_{zt}}$ —— x 方向速度流量矩阵中元素的通式(8)。

$K_{w_{zst}}$ —— z 方向速度流量矩阵中元素的通式(8)。

$K' = k_g \bar{k}_{im} / (k_E + \bar{k}_{im})$ (13)。

$[K]$ ——流量矩阵(8)。

$[K_F]$ ——体积力引起的流量矩阵(8)。

$[K_h]$ ——油膜厚度变化流量矩阵(8)。

$[K_p]$ ——压强流量矩阵(8)。

$[K_U]$ —— x 方向速度流量矩阵(8)。

$[K_{Wz}]$ —— z 方向速度流量矩阵(8)。

$[K_\rho]$ ——膨胀流量矩阵(8)。

k ——刚度。油膜刚度。弹簧刚度。系数。常数。电阻率(8)。轴承端的油膜开始破裂处的节点数(9)。导热系数(10)。

$\tilde{k}$ ——椭圆参数的逼近值(16)。

k_E ——轴的刚度(13)。

k_a ——与磨粒有关的磨损系数(5)。

k_c ——弹簧刚度(14)。

k_m ——与材料有关的磨损系数(5)。

k_{im} ——极限状态下的油膜刚度系数, $K_{im} = (W / K_p C) \bar{k}_{im}$ (13)。

k_0 ——随润滑油种类不同的常数(11)。

k_g ——微弧长上的承载能力系数, $K_g = \Delta \theta \Sigma k_g$ (7)。

L ——长度。寿命。电流流过的长度。滑动总长度(5)。轴承长度(9)。静压油腔的长度(14)。

L' ——油膜的轴向长度(9)。

L_R ——相对寿命(18)。

l ——长度。热流过的长度(10)。滚子长度(16)。油垫轴封油面的轴向长度(14)。

l_E, l_S, l_W, l_N ——一节点周围东、南、西、北四个边界长(8)。

l_c ——毛细管、小孔、节流缝隙的长度(14)。

M ——力矩(3)。数量(12)。系数, $= (Ll/Rb + 2\theta_1)$ (14)。无量纲弹性参数(16)。材料(19)。

M, M^*, M^ϕ ——积分式(12)。

M_F ——摩擦力产生的阻力矩(9)。

M_h ——轴颈表面处的摩擦阻力矩(7)。

M_{ij} ——系数(16)。

M_0 ——轴承表面处的摩擦阻力矩(7)。

M_I, M_{II} ——I区、II区的摩擦阻力矩(9)。

m ——节点数(8)。质量(13), (14)。决定进口区的长度系数(16)。充油边界(16)。

m^* ——缺油边界。

N ——单位时间的转速(7)。功(13)。形状函数, $N_i = \Delta_i / \Delta, N_j = \Delta_j / \Delta, N_m = \Delta_m / \Delta$ 。

$\bar{N}$ ——法线方向(16)。

N_F ——运动面上的摩擦功耗(7)。

N_P ——油泵功耗(14)。

N_R ——雷诺数(14)。

N_f ——摩擦功耗(14)。

N_i ——单位时间内, 外环境作用于微元体的功(10)。

N_s ——弹性功。

N_0 ——单位时间内, 微元体对外环境所作的功(10)。

n ——个数(2)。度量 Z_i 的数目(2)。单位面积内实际的接触斑点数(2), (5)。行程次数(5)。节点数(8), (9), (14)。长度系数(16)。

n' ——一个单元摩擦路程中的行程数(5)。

n_a ——单位面积内全部凸峰数(2)。

n_K ——产生磨粒时的摩擦次数(5)。

$n = 1 - e^{-\bar{\alpha} \bar{p}_p}$ (16)。

o_b ——轴承中心。

o_j ——轴颈中心。

P ——油膜承载力。凸峰的接触概率(2)。泊(6)。元素特性(19)。

$\bar{P}$ ——线接触单位长上的无量纲承载量, $= Ph_m / 12\eta_0 UR$ (16)。

P_r ——油膜恢复力(13)。

P_t ——油膜涡动力(13)。

p ——油膜的单位压力。比压。压力。接触区的单位压力。

p_A, P_B ——轴承投影面积上的压强(12)。

p_B ——边界润滑膜的屈服压强(17)。

p_D ——单元 D 的压力(8)。

p_H ——Hertz最大压力。

p_M ——Martin最大压力。

p_a ——凸峰承受的压力(18)。

p_b ——油腔压力(14)。

p_{b_1}, p_0 ——设计状态下(空载时)的油腔压力(14)。

p_{b_1} ——背载油腔压力(14)。

p_{b_1}, P_3 ——受载油腔压力(14)。

p_c ——平均油膜压力(16)。

p_{cr} ——极限破坏压力(18)。

p_f ——流体动压(18)。

p_i ——进口处的油膜压力(7)。

p_m ——最大压力

$\bar{p}_m$ ——无量纲最大压力。

p_s ——供油压力(14)。
 p_{sr} ——短轴承旋转运动所产生的油膜压力(12)。
 p_{sc} ——短轴承剪切运动所产生的油膜压力(12)。
 p_r ——接触区金属的屈服压强,或称流动压强(17)。
 p_0 —— $\theta=0^\circ$ 时的油膜压力(7)。
 p_1, p_2 ——节流前、后的油压(14)。
 p_θ ——任意角 θ 处的油膜压力(7)。
 p_∞ ——合成压力, $p_\infty = p_{sr} + p_{sc}$ (12)。
 p_{sr} ——无限长轴承旋转运动所产生的油膜压力(12)。
 p_{sc} ——无限长轴承剪切运动所产生的油膜压力(12)。
 $\bar{p}$ ——无量纲油膜压力。
 $\bar{p} = p/2(2\eta_0\omega)/\psi^2$, 式(13-1)。
 $\bar{p} = p/p_H$, 式(16-25-1)。
 $\bar{p} = ph_0^2/12\eta_0 U \sqrt{2Rh_0}$, 式(16-4-1)。
 $\bar{p}_p = plx_c/P$, 式(16-18-3)。
 $\bar{p}_m = h_m^2/12\eta_0 U \sqrt{Rh_m}$
 Q ——流量。总流量(10), (14)。
 Q_w ——加载后油腔向外流出的流量(14)。
 Q_c ——加载后节流器流入油腔的流量(14)。
 Q_{c0} ——空载时节流器流入油腔的流量(14)。
 Q_0 ——空载时油腔向外流出的流量(14)。
 Q_1 ——通过周向油封的流量(14)。
 Q_2 ——通过轴向油封的流量(14)。
 q ——单位流量(7)。恒粘度条件下的油膜压力(16)。
 频率(17)。
 $\bar{q}$ ——通过单位宽截面的流量(7)。无量纲 q 值,
 $\bar{q} = qlx_c/P$ (16)。
 $q_m, \bar{q}_m$ ——最大油膜压力处的 q 及 $\bar{q}$ 之值(16)。
 q_s ——润滑油所产生的流体动压力,即折算压力(16)。
 R ——半径。轴承半径。磨阻(4)。电阻(5)。液阻(14)。当量曲率半径。元素之间的关系(19)。
 R_s ——表面廓形的中线平均值(2)。
 R_{s0} ——空载时油腔的阻力(14)。
 R_{c0} ——空载时节流器的阻力(14)。
 R_f ——试件的磨阻(4)。
 R_{st} ——标准磨阻(4)。
 R_w ——相对磨阻(4)。
 r ——半径。轴颈半径。距离。

r_c ——毛细管半径(14)。
 r_{c1}, r_1 ——圆台进油孔半径(14)。
 r_{c2}, r_2 ——圆台半径(14)。
 r_e ——有效面积半径(14)。
 S ——Sommerfeld数, $= (\eta N/p) \cdot (R/C)^2$ (7)。
 比值, $= z/\sigma$ (2)。第二种椭圆积分(15)。
 S_0 ——挤压参数(17)。
 St ——Stoke, 斯。
 s ——距离。凸峰之间的距离(2)。滑动距离(4),
 (5)。接触物体表面之间的距离(15), (16)。
 s_r ——参考平面到光滑表面的距离(2)。
 s_v ——总磨损尺寸(5)。
 s_x ——受载后滑阀移动的距离(14)。
 $s(x)$ —— x 处二个接触物体未变形前的距离(15),
 (16)。
 T ——时间的量纲(8), (10)。温度(10)。周期。转
 换热(19), 热(19)。无量纲参数, $= 48\eta_0 UR$
 $/4E'h_m^2$ (16)。
 T_{ab} ——绝对温度(6)。
 T_b ——体积温度(5)。
 T_c ——平均温度(10)。无量纲参数 T 的特征值(16)。
 T_{cr} ——极限温度(18)。
 T_f ——闪发温度(5)。
 T_i ——进口温度(10)。
 T_m ——金属皂熔点的温度(17)。
 T_r ——反映温度(17)。
 T_s ——胶合温度(5)。
 T_v ——油温(18)。
 T_1, T_2 ——粘周期, 滑周期(17)。
 t ——时间。不接触时间(18)。
 t_f ——胶合因子, 产生胶合的时间(5)。
 t_0 ——全部时间。
 U, V, W_z ——物体在 x, y, z 方向的速度。
 u, v, w ——流体在 x, y, z 方向的速度。
 U ——弹性势能(2)。
 $\bar{U}$ ——速度参数, $= \eta_0 U/E'R$ (16)。有效速度
 (12)。
 U_{rel} ——轴承相对载荷的速度(12)。
 U_{rel} ——相颈相对载荷的速度(12)。
 u_c ——核速度(11)。
 u_1, u_2, u_3 ——核下区、核区、核上区的速度(11)。
 V ——体积(4)。
 ΔV ——实际磨损体积(5)。

V_d ——粘结点处的变形体积。

V_v ——磨粒体积(5)。

V_w ——磨损体积(4)。

$\mathbf{v}$ ——速度的矢量(8)。

v ——位移。变形。

$\bar{v}$ ——无量纲速度, $=v/C\omega$ (13)。

v_a ——平均速度(14)。

v_e ——油出口处的弹性变形(16)。

$v(D)$ ——因压力差引起的弹性变形(16)。

$v(H)$ ——因Hertz压力引起的弹性变形(16)。

$v(o)$ ——法向接近量(15)。

$v(x)$ ——弹性位移(16)。

$v(\bar{x})$ ——无量纲变形参数(16)。

W ——外载荷。重量(14)。承载能力。功(19)。

$\bar{W}$ —— $=W/A_s p_s$ (14)。线接触的无量纲载荷, $=P/E'R$ (P 为单位长度上的油膜承载能力)(16)。

W_s ——载荷变动幅度(14)。单分子膜破坏的边缘载荷(17)。

W_b ——边界膜区所承受的载荷(17)。单分子膜破坏的极限载荷(17)。

W_c ——油腔区所承受的载荷(17)。

W_{cr} ——极限载荷(17)。

W_e ——因挤压效应而产生的承载能力(17)。

W_i ——每个凸峰上的载荷(2)。

W_L ——单位长度上的载荷(12)。

W_m ——金属接触区所承受的载荷(17)。

W_p ——塑性条件下的载荷(2)。

W_r ——径向载荷(16)。

W_s ——胶合时的载荷(5)。

W_0 ——工作台自重(14)。

X, Y, Z —— x, y, z 方向单位质量上的体积力(7)。

x, y, z ——坐标。

$\{X\}$ ——系统的输入部分(19)。

x_R ——系数, $=e_{RB}/\bar{e}_{RB}$ (5)。

x_w ——载荷作用处的横坐标(7)。

$\bar{x}$ ——无量纲坐标。

$$\bar{x} = x/B(7)$$

$$\bar{x} = x/C(13)$$

$$\bar{x} = x/\sqrt{2Rh_0}(16)$$

$$\bar{x} = x/\sqrt{Rh_m}(16)$$

$$\bar{x}_b = x/b(16)$$

$$\bar{x}_s = x/x_s(16)$$

$$\bar{x}_m = x_m/x_s(16)$$

$\{Y\}$ ——系统的输出(19)。

$\bar{y}$ ——无量纲坐标, $=y/C$ (13)。

$\{Z\}$ ——系统的输出损失部分(19)。

Z_1 ——流体的压粘指数。

z ——参考线到凸峰顶端的距离(2)。

α ——角度。系数。常数。

$$\alpha_1 = p_s^2/\tau_b^2(3)。$$

α_1, α_2 ——前角, 后角(7)。

$$\alpha_1 = \beta_0 + i\omega_w, \alpha_2 = \beta_0 - i\omega_w(13)。$$

β ——轴承包角。节流比(14)。端泄系数(12)。相位角(13)。 $=A_r/A_s$ (5)。 $=\tan^{-1} \bar{x}$ (16)。

β' ——油膜承载弧所对的角(9)。

$$\beta_0 = b/2m(15)。$$

Γ ——剪切率(6), (7)。曲面体曲率差(15)。

γ ——常数。系数。液体重度(14)。 $=\tau_m/\tau_s$ (5)。 $=p(x_e)/p_m$ (16)。

γ_{lim} ——极限涡动比(13)。

γ_R ——修正系数, $=V_v/V_d$ (5)。

γ_x —— xy 平面上 x 方向的角应变(7)。

γ_y —— xy 平面上 y 方向的角应变(7)。

γ_2 ——2000个行程的 τ_m/τ_s 之值(5)。

δ ——变形, 趋近量, 位移量。表面粗糙度。阻尼率, $=a/2\sqrt{k_B m}$ (14)。

$\delta(x)$ ——单位线载荷在 x 处引起的变形量, $v(x) = \delta(x)W$ (15)。

δ_s ——凸峰最大变形量之和(17)。

δ_{ii} ——Kronecker delta(8)。

δ_{so} ——原始表面不平度(18)。

ε ——偏心率。摩擦学系统元素之间相互作用的几何关系(19)。

$\varepsilon_s, \varepsilon_r$ ——应变(7)。

ε_0 ——终点(12)。静平衡点的偏心率(13)。

ζ ——小孔局部阻力系数(14)。新变量, $\zeta = -(1 + \bar{x})$ (16)。不接触时间百分数(18)。

η ——绝对粘度。动力粘度(6), (14), (16)。积分变量, $\eta = 2x - \xi$ (16)。

$\bar{\eta}$ ——无量纲粘度(16)。

η_P ——塑性粘度(11)。

η_V ——体积粘度(7)。

η_0 ——大气压下的绝对粘度(6)。

Θ ——体积膨胀率(7)。

θ ——角度。温度量纲(10)。油腔中任一截面与中

心面的夹角(14)。

θ^* ——油压最强处或最弱处的位角(7)。

θ_f ——载荷方向角(12)。

θ_1, θ_2 ——油膜始角, 油膜终角(9), (12)。

θ_1, θ_2 ——径向油垫油腔张角之半, 径向油垫油腔中心线同周向封油面远边上的夹角(14)。

θ_8, θ_4 ——轴承始角, 轴承终角(9)。

$$A = \frac{48\eta_0 U \alpha}{b} \left(\frac{R}{b}\right)^2 (16)。$$

λ ——膜厚比(16), (18), 液阻比(阻力比)(14)。

$1/\lambda$ ——指数型分布的数学期望(2)。

λ_d ——动态条件下的膜厚比(18)。

$$\lambda_0 \text{——光滑表面的膜厚比(18)。} = \frac{m\omega_{\varphi}^2}{k_E - m\omega_{\varphi}^2} y_0 (13)。$$

ν ——泊桑比。接触密度, $= n/A$, (5)。运动粘度(6)。

ξ ——椭圆中心离坐标原点的距离(15)。坐标(16)。表面光洁度评价参数(17)。

$$\bar{\xi} = \xi / \sqrt{R h_m} (16)。$$

ξ_R ——修正系数, $= e_{as} / e_{Re}$

ξ_s ——胶合稳定准则(5)。

$$\xi_0 = \frac{m\omega_{\varphi}^2}{k_E - m\omega_{\varphi}^2} x_0 (13)。$$

ρ ——密度。

σ ——应力。法向应力。

σ_H ——最大Hertz应力。

σ_R ——合成应力(3)。

σ_{id} ——极限预应力(3)。

τ ——剪切应力。粘结点剪断时的剪切应力(3)。剪切屈服极限(5)。塑性流动开始变形时所需要的最低剪切应力(11)。

τ_B ——Bingham屈服应力(11)。

τ_b ——软材料的剪切强度(5)。

τ_f ——边界膜或污染膜的剪切强度(17)

τ_{hu}, τ_{ht} ——核上界, 核下界的剪切应力(11)。

τ_m ——金属接触区粘结点的剪切强度(17), (5)。

Φ ——函数。单位体积单位时间的动能变化率(10)。

ϕ ——角。载荷偏位角(7), (12)。凸峰接触概率(2)。流速系数(14)。

$$\phi_s = e^{-\sigma/\tau} (16)。$$

ϕ_0 ——初始位置的 ϕ 角(12)。

ψ ——液柱单元1与单元2之间的函数关系(8)。相对间隙(12)。孔口收缩系数(14)。

ψ_F ——塑性指数(2)。

ψ_s ——Sommerfeld变换位角(7)。

ω ——角速度。转速。

$\bar{\omega}$ ——有效角速度。

ω_b ——轴承旋转速度(12)。

ω_{B1} ——一阶临界转速(13)。

ω_f ——轴颈旋转速度(12)。

ω_l ——载荷旋转速度(12)。

ω_{lim} ——轴的失稳转速(13)

ω_w ——涡动角速度(13)。

脚标

min——极小值。

m——极大值(代表 $\max$)

目 录

第一章 概述 (1)	(六) 胶合..... (42)
一、摩擦学的定义及范围..... (1)	(七) 咬死..... (43)
二、摩擦学的意义..... (2)	三、磨料磨损..... (43)
三、结束语..... (3)	四、表面疲劳磨损..... (45)
第二章 固体的表面性质及接触 (5)	五、腐蚀磨损..... (46)
一、固体的表面性质..... (5)	(一) 氧化磨损..... (46)
(一) 表面形貌..... (5)	(二) 特殊介质腐蚀磨损..... (46)
(二) 表面组成..... (7)	(三) 气蚀浸蚀..... (46)
二、固体表面的接触..... (8)	(四) 微动磨损..... (47)
(一) 接触力学..... (8)	六、磨损理论..... (47)
(二) 接触面积..... (10)	(一) 磨损的剥层理论..... (48)
(三) 粗糙表面的接触..... (12)	(二) 磨损的能量传递过程理论..... (49)
(四) 接触物理学及接触化学..... (19)	第五章 磨损的计算 (51)
第三章 摩擦 (22)	一、磨损计算的特点..... (51)
一、概述..... (22)	*二、磨损计算过程的特性..... (51)
二、摩擦机理..... (23)	*三、磨损的能量计算方法..... (53)
(一) 分子机械理论..... (23)	*四、IBM磨损计算方法..... (55)
(二) 粘着理论..... (23)	五、几种类型磨损的计算方法..... (57)
三、滑动摩擦..... (27)	(一) 胶合的计算方法..... (57)
(一) 滑动摩擦机理..... (27)	(二) 粘着磨损的计算方法..... (59)
(二) 刚性体在弹性体上滑动..... (28)	(三) 磨料磨损的计算方法..... (60)
(三) 刚性体在刚性体上滑动..... (29)	第六章 润滑剂的性质 (62)
四、滚动摩擦..... (33)	一、润滑剂..... (62)
(一) 滚动摩擦机理..... (33)	二、润滑油的粘度..... (62)
(二) 刚性体在弹性体上滚动..... (35)	(一) 绝对粘度..... (62)
第四章 磨损 (39)	(二) 运动粘度和相对粘度..... (63)
一、概述..... (39)	(三) 润滑油的粘度与温度及压力的 关系..... (64)
(一) 磨损的定义..... (39)	三、润滑脂的性质..... (64)
(二) 磨损的分类..... (39)	(一) 润滑脂的结构..... (64)
二、粘着磨损..... (40)	(二) 润滑脂的表观粘度和稠度..... (64)
(一) 粘着磨损机理..... (40)	(三) 触散与安定性..... (65)
(二) 轻微磨损..... (41)	(四) 粘温关系..... (65)
(三) 涂抹..... (41)	
(四) 擦伤..... (42)	
(五) 划伤..... (42)	

•表示较深的内容，供选学用。

第七章 液体动压润滑 (67)

一、Navier-Stoke方程 (67)

(一) 粘性流体质点上所受的力 (67)

(二) 流体微元的变形 (68)

(三) 应力与应变的关系 (69)

(四) N-S方程 (70)

二、Reynold方程 (70)

(一) N-S方程的简化 (70)

(二) 一般性的Reynold方程 (71)

(三) 特殊情况下的Reynold方程 (72)

三、动压油膜的承载机理 (73)

(一) 油膜的承载能力 (74)

(二) 油流量 (76)

(三) 功率消耗 (77)

(四) 压力中心 (78)

(五) 算例 (79)

(六) 理想轴承 (80)

四、理想径向轴承 (80)

(一) 油膜厚度 (81)

(二) 压强分布 (81)

(三) 算例 (84)

(四) 承载能力 (86)

(五) 摩擦阻力 (87)

(六) 油膜承载弧图解 (88)

五、无限短轴承 (90)

(一) 压强分布 (90)

(二) 承载能力 (91)

(三) 载荷偏位角与轴心轨迹 (92)

(四) 摩擦力与摩擦功耗 (92)

第八章 二维Reynold方程解 (94)

一、解二维Reynold方程的方法 (94)

二、电模拟法 (94)

(一) 电解盆 (94)

(二) 模拟式 (95)

(三) 模拟 (96)

(四) 压强 p 的测算 (96)

三、有限差分法 (97)

(一) 网格 (97)

(二) 微差 (97)

(三) 解线性方程组 (99)

(四) 油膜下游边界 (99)

*四、有限单元法 (100)

(一) 概说 (100)

(二) Reynold方程和与它相应的泛

函 (100)

(三) 插值函数 (102)

(四) 离散化 (103)

(五) 简单算例 (108)

(六) Reynold方程的泛函推导 (112)

第九章 承载能力、流量与功耗 (114)

一、油膜承载弧与承载能力 (114)

(一) 油膜承载弧所对的包角 (114)

(二) 承载能力与轴承包角 (114)

二、油流量 (116)

三、功率消耗 (117)

(一) 摩擦阻力矩 (117)

(二) 摩擦功耗和摩擦系数 (118)

四、轴心轨迹 (118)

五、计算图表 (119)

*第十章 能量方程 (120)

一、轴承温升与热能 (120)

二、功能平衡 (120)

(一) 输出能与输入能 (120)

(二) 输入功与输出功 (121)

三、能量方程 (122)

(一) 平衡式的整理 (122)

(二) 方程的积分 (124)

四、能量方程的应用 (126)

(一) 概说 (126)

(二) 应用 (126)

五、近似解 (127)

第十一章 非Newton液 (129)

一、弹粘物质 (129)

二、流变动压润滑的流量 (130)

三、非Newton液的一些特征 (130)

(一) Bingham体 (130)

(二) 流变膜中的核 (131)

(三) 其他经验式 (133)

四、非Newton液中的压强分布 (134)

(一) 流速近似值 (134)

(二) 流量 (135)

(三) 差分方程 (135)

第十二章 挤压膜和变载荷 (136)

一、挤压膜 (136)

(一) 挤压膜润滑的Reynold方程 (136)

(二) 长方平板.....	(136)	(二) 有效承载面积.....	(175)
(三) 圆平板.....	(137)	(三) 承载能力.....	(176)
(四) 径向轴承.....	(138)	(四) 油膜刚度.....	(176)
*二、旋转载荷.....	(143)	(五) 摩擦力、功耗、温升.....	(177)
*三、变载荷.....	(144)	四、径向油垫.....	(178)
(一) 变载荷(或动态)条件的Reynold 方程.....	(145)	(一) 毛细管节流.....	(178)
(二) 无限长轴承.....	(145)	(二) 小孔节流.....	(181)
(三) 短轴承.....	(147)	(三) 滑阀节流.....	(183)
*第十三章 液体动压轴承的稳定性.....	(150)	(四) 薄膜节流.....	(187)
一、油膜涡动.....	(150)	五、平面油垫.....	(189)
(一) 油膜涡动的原因.....	(150)	(一) 毛细管节流.....	(189)
(二) 涡动速度.....	(151)	(二) 薄膜节流.....	(190)
二、油膜稳定性的理论分析.....	(151)	第十五章 弹性.....	(192)
(一) 无量纲Reynold 方程.....	(151)	一、接触问题的简化.....	(192)
(二) 油膜力.....	(152)	二、二维线接触问题.....	(192)
(三) 油膜附加力.....	(154)	(一) 线载荷.....	(192)
(四) 油膜刚度系数和阻尼系数的分 析解.....	(155)	(二) 分布载荷.....	(195)
(五) 油膜力对轴颈所作的功.....	(157)	(三) 椭圆压力分布.....	(196)
三、油膜轴承支承的转子系统的 稳定性.....	(159)	(四) Hertz 接触.....	(197)
(一) 振动方程.....	(160)	第十六章 弹性流体动压润滑.....	(201)
(二) 力学方程.....	(160)	一、弹性流体动压润滑机理.....	(201)
(三) 系统稳定性计算.....	(161)	二、线接触弹性流体动压润滑的基 本方程.....	(202)
(四) 油膜稳定性判据.....	(162)	(一) 方程的假设.....	(202)
四、油膜振荡.....	(163)	(二) 基本方程.....	(203)
(一) 油膜涡动的种类.....	(163)	三、恒粘-刚性线接触润滑—— Martin(1916) 解.....	(205)
(二) 涡动压强.....	(164)	(一) 压力分布.....	(205)
(三) 油膜振荡的特征.....	(165)	(二) 单位长度上的承载量 P	(207)
五、提高稳定性的措施.....	(165)	(三) 油膜厚度.....	(208)
第十四章 液体静压润滑.....	(168)	(四) 最大油膜压力.....	(208)
一、液体静压润滑简介.....	(168)	四、压粘-刚性线接触润滑—— Gatcombe(1945) 解.....	(209)
(一) 液体静压润滑原理.....	(168)	(一) 压力分布.....	(209)
(二) 液体静压润滑的分类.....	(168)	(二) 最大油膜压力.....	(209)
二、流量.....	(170)	(三) 油膜厚度.....	(210)
(一) 毛细管的流量.....	(170)	*五、恒粘-弹性线接触润滑—— Herrebrugh(1968) 解.....	(210)
(二) 小孔的流量.....	(172)	(一) 弹流(相关)方程和油膜厚 度.....	(210)
(三) 平行平板窄缝的流量.....	(172)	(二) 压力分布和承载量.....	(214)
(四) 平行圆缝隙的流量.....	(174)	(三) 形式解.....	(214)
(五) 封油面的流量.....	(174)		
三、主要参数和基本公式.....	(175)		
(一) 阻力比与节流比.....	(175)		

(四) 数值解..... (215)	四、边界膜润滑性能的影响因素 ... (242)
• 六、压粘-弹性线接触润滑——We- ber和Saalfeld(1954)解..... (217)	(一) 温度的影响..... (243)
(一) 弹性(相关)方程和油膜形 状..... (217)	(二) 对磨损的影响..... (243)
(二) 结果和应用..... (221)	五、边界膜的强度 (243)
• 七、重载线接触润滑——Грубин (1941)分析解 (224)	六、爬行..... (244)
(一) 润滑方程..... (224)	(一) 爬行现象..... (244)
(二) 接触区以外的油膜形状..... (224)	(二) 爬行运动及静摩擦随作用时间 而改变的基本特性..... (245)
(三) 相关方程——最小油膜厚度方 程..... (224)	(三) 爬行运动的极限速度与幅值... (246)
八、重载线接触润滑——Dowson- Higginson(1967)数值解..... (226)	第十八章 润滑状态的转化过程 (248)
九、不同润滑状态的油膜厚度 公式..... (228)	一、概述 (248)
(一) 弹流润滑的四种状态..... (228)	二、混合润滑的转化 (250)
(二) 无量纲油膜厚度表示法..... (228)	(一) 膜厚比 λ 及不接触时间百分数 ξ 准则..... (250)
(三) 四种润滑状态的油膜厚度公 式..... (229)	(二) 动态 EHD 接触准则..... (251)
(四) 无量纲油膜厚度等值线图..... (231)	(三) 二次转化准则..... (253)
(五) 具体应用——确定能建立全弹 流的厚度..... (234)	三、胶合的不稳定性 (254)
第十七章 边界润滑 (236)	四、影响润滑状态转化的因素 (255)
一、边界润滑机理..... (236)	(一) 温度对润滑状态转化的影响... (255)
二、边界膜..... (238)	(二) 极压添加剂对润滑状态转化的 影响..... (255)
(一) 物理吸附膜..... (239)	(三) 粘度对润滑状态转化的影响... (256)
(二) 化学吸附膜..... (239)	• 第十九章 摩擦学的系统分析 (258)
(三) 化学反应膜..... (240)	一、概述 (258)
三、油性及极压、抗磨添加剂 (241)	二、摩擦学系统的功能 (258)
(一) 油性及油性添加剂..... (241)	三、摩擦学系统的构成 (259)
(二) 极压及抗磨添加剂..... (242)	四、摩擦学系统的过程..... (260)
	(一) 功能平面..... (260)
	(二) 功平面..... (260)
	(三) 热平面..... (261)
	(四) 材料平面..... (262)
	五、摩擦学系统应用举例..... (262)

第一章 概 述

一、摩擦学的定义及范围

人类在生活的实践中,早就察觉到摩擦、磨损和润滑的重要性。摩擦、磨损和润滑作为一种现象,大量地存在于所有的工程部门、医药部门及人们生活的各方面。如果在相互接触的表面之间没有摩擦存在,人类是不可能生活的。

任何机器的运转都依赖其零件的相对运动来实现。而零件的相对运动必然伴随着产生摩擦和磨损。为了减少摩擦或降低磨损,往往要采用不同的润滑。因此,解决摩擦、磨损和润滑问题就成为大多数技术部门最普遍和最重要的问题之一。

摩擦在某些情况下是有益的,如传动和制动,必须尽可能地增大它。许多机器和运输机械的效能,生产率,可靠性和安全性的提高,取决于摩擦的增大。

摩擦在大多数情况下又是有害的,它造成能量损失和零件磨损,因此,必须尽可能地减少它。据统计,世界上的能源约有 $1/3 \sim 1/2$ 以各种形式消耗于摩擦。

磨损不仅会使零件造成不应有的损坏,更重要的是会使零件配合间隙增大,机器精度和效率降低。产生冲击载荷后,又往往会进一步导致磨损速度增大,使机器丧失工作能力或遭到破坏。据统计,磨损造成的损失是摩擦造成损失的12倍。因此,减少磨损,提高机器的耐磨性,会大大地提高机器的寿命和可靠性。同时还会减少维修时间和维修配件,节约原材料和能源,对国民经济有重要的经济意义。

磨损也有有利的一面。例如磨削加工以及用球磨机磨细水泥或矿物等等,就是明显的例子。

润滑是减少摩擦和磨损的重要手段之一。近年来由于空间技术、原子能技术、海洋开发等事业的迅速发展,在特殊环境下,如真空、高温、低温、辐照、海水腐蚀等条件下,润滑和密封问题显得更加重要和更加迫切了。

摩擦、磨损和润滑作为一门学科提出来,是60年代中期的事,这门学科称为“摩擦学”(Tribology)。

Tribology 一字来源于希腊字“Tribos”,其含义是磨擦(Rubbing),或“磨擦的科学”(The science of rubbing)。

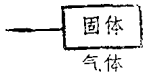
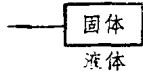
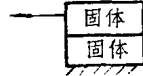
摩擦学的定义是“研究有相对运动时互相作用表面的科学、技术和有关实践”。定义强调摩擦副要有“相对运动”和“互相作用”,并且强调是研究摩擦副的“表面”。摩擦副的表面包含着很广泛的含义,它包括固体与气体、固体与液体或固体与固体之间的表面,见表1—1。表1—1中还列举了这些摩擦副所产生的阻力、出现的场所及失效机理。

以前很多人从力学的角度来研究摩擦、磨损和润滑现象。近年来,由于科学的发展,力学已不能概括这一复杂问题的各个方面,摩擦学已发展成为一门新兴的边缘学科,它的基础

是物理、化学、数学、材料科学与工程实际。

表1—1

表面运动形式及摩擦副的相对表面

表 面 运 动	举 例	运 动 的 阻 力	失 效 机 理
	空气轴承、飞机、汽轮机	气体摩擦	流体腐蚀
	液压装置、轮船、管道	粘性摩擦	气蚀腐蚀
	一般轴承、火车轮子与铁轨、刹车	固体摩擦	磨 损

近年来摩擦学得到了很快的发展，据统计，从1967年到1974年8年间，约有5万种论文发表。摩擦学发展很快的原因有：

①摩擦学问题大量地普遍地存在于所有的机器设备中。近代工业的机器设备的功率、速度、精度等参数日益提高，生产的连续性和自动化水平日益提高，尤其是要求高的可靠性。因此，摩擦，磨损和润滑问题显得更突出。依靠某种单独学科已不能解决有关的问题，摩擦学发展成为一门新兴的综合性的边缘学科，是必然的趋势。

②运用现有的知识来解决摩擦、磨损和润滑问题，一经重视，收效很快，而所花费只占节约所得的很小比例。例如，根据1965年的统计，1966年英国可因此节约5.15亿英镑。日本在1974年应节约27.3亿美元，美国应能节约120~160亿美元。西德每年可节约100亿马克。不注意摩擦学的研究和应用所引起的惊人的浪费，以及注意摩擦学的研究和应用所获得的巨大收益，促使各国不遗余力地去发展这门学科。

③现代机械装备的设计工作，要求在开始设计时应用摩擦、磨损和润滑的理论及实践去解决设计问题，并用这些理论及实践指导制造、运行和维修中的问题。因此，这种客观的要求有力地促进了这门学科的发展。另外，专用测试手段的发展，新型材料的应用，在各方面都取得了进展，也促进了摩擦学的发展。近年来，摩擦学运用于人工关节和人工心脏所取得的重要进展，是生物工程学发展迅速的原因之一。摩擦学新的应用领域不断得到开拓。

二、摩擦学的意义

在上节中已说明运用摩擦学的理论和实践，可以节约大量的资金。据统计，1977年美国能源消耗最大的四个部门（交通运输、电力工业、加工工业以及商业和民用）所耗能源占全国能源消耗的80%。但是，其中近乎一半是在使用过程中未经作功而损失掉的。1970年这一损失约46%，如果不采取措施，照这样的现状继续下去，到1990年，美国这四个部门中的能源将白白损失56%。

自从蒸汽机发明以来的近两个世纪中，能源节约的着重点是提高原动机热循环效率。但是，十多年来的历史证明，这方面的潜力是有限的。以汽车内燃机为例，燃烧油的热能转化为输出动力的不过30%。如果机械效率为80%，能量的有效利用率不过23%左右。而今后节约能源的着重点应该是从摩擦学的角度来进行改善，其结果可以节约原材料和动力，提高机