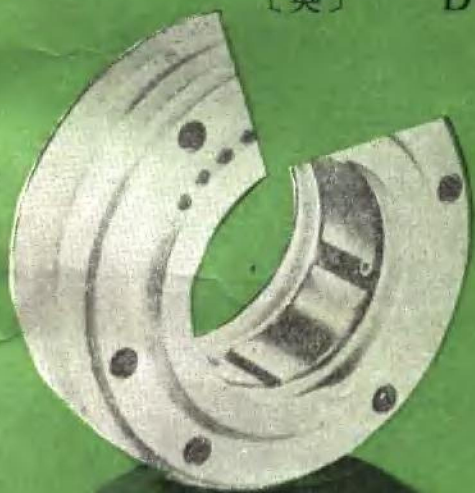


BALL BEARING
LUBRICATION

滚动轴承 润滑

〔美〕 B. J. 哈姆罗克 著
〔英〕 D. 道 森



机械工业出版社

序

认识和理解弹性流体动力润滑是20世纪在摩擦学方面的一大进展。揭示一种前所未有的润滑状态显然是摩擦学中一件相当重要的大事，这样就不仅解释了导致许多不吻合机械零件（如齿轮和滚动轴承）获得有效润滑的非凡物理作用，而且还搞清了从边界润滑状态到流体动力润滑状态的整个范围。

第一本关于弹性流体动力润滑的著作是由道森和希金森（1966年）所写的，该书几乎完全讨论名义线接触情况；本书则把读者引向名义点接触情况，特别是球轴承润滑的最新重要发展。名义线接触与名义点接触这两种情况的根本差别是：如压力和膜厚等主要变量在前一种情况下是一维的，而在后一种情况下则是二维的。将用数值分析和计算工作量表示的线接触转化为点接触，是本世纪50年代和60年代在弹性流体动力润滑研究方面的一大发展，而本书的目的是深入理解这些最新发展，并使滚动轴承和其它经过润滑的高应力机械零件的设计人员能较快地应用这些成果。

本书介绍目前所认识的椭圆接触区的弹性流体动力润滑，建立估算润滑膜厚度的经验关系式，并说明怎样用这些方程来分析滚动轴承和其它机械零件。最小膜厚具有两个重要意义：第一，它无需大于两个接触体的表面粗糙度。以免精制零件严重损坏；第二，它对轴承的疲劳寿命具有重大的影响。

第一章回顾弹性流体动力润滑的发展史，后面几章主要讨论球轴承问题。本书讨论球轴承的有关章节的编排方式是：第二章讨论无载无润滑轴承，第三章讨论承载无润滑轴承。第八章的 8.9 节讨论承载润滑轴承，第十三章的 13.2.2 节讨论应用。^③曾力图保证书中所用的符号只有一种意义，不过这不一定能做到。在本书的前面列出书中所用符号的完整一览表。

本书主要讨论名义点接触情况的弹性流体动力润滑理论，并将结论应用于球轴承的分析和设计。但是，也简要地讨论名义点接触理论在较广的弹性流体动力学领域中的地位。在 3.1 节中，概括地介绍椭圆接触变形基本理论，因而它可应用于各种各样的接触状态。在第十三章中，将所建立的椭圆接触区的弹性流体动力润滑理论应用于一系列润滑连接点：球和平板之间的连接点；凹面和凸面之间的连接点；滚子轴承和球轴承；渐开线齿轮传动装置和无级变速传动装置；在潮湿或油污钢轨上滚动的机车车轮；而最后是滑膜关节。

伯纳德·杰·哈姆罗克

邓肯·道森

1981年4月

符 号

A	方程 (3.113) 中用的常数
A^*, B^*, C^* D^*, L^*, M^*	$\left. \vphantom{\begin{matrix} A^*, B^*, C^* \\ D^*, L^*, M^* \end{matrix}} \right\}$ 松弛系数
A_0	球的摩擦面积, m^2
a	接触椭圆的半长轴, m
$\bar{a}$	$a / 2\bar{m}$
B	轴承的总吻合率
b	接触椭圆的半短轴, m
$\bar{b}$	$b / 2\bar{m}$
C	承受动载荷能力, N
C_v	阻力系数
$C_1, \dots, C_8$	常数
c	19609 N/cm^2
$\bar{c}$	半长轴的等分数
D	滚道曲率中心距, m
$\tilde{D}$	材料因数
$\bar{D}$	由方程 (5.63) 定义
De	德博拉数
d	球的直径, m
$\bar{d}$	半短轴的等分数
d_e	轴承外径 (图2.13), m
d_b	孔径, m
d_c	中径, m
d'_e	球上作用有动力效应后的中径, m
d_i	内圈滚道直径, m

d_o	外圈滚道直径, m
E	弹性模量, N/m^2
E'	有效弹性模量 $2/\left(\frac{1-\nu_a^2}{E_a} + \frac{1-\nu_b^2}{E_b}\right)$, N/m^2
$\tilde{E}$	制造因数
E_s	比内能, m^2/s^2
E_1	$[(\tilde{H}_{\min} - H_{\min})/H_{\min}] \times 100$
$\mathcal{E}$	模为 $(1 - 1/k^2)^{1/2}$ 的第二类椭圆积分
$\overline{\mathcal{E}}$	第二类近似椭圆积分
e	离差指数
F	法向作用载荷, N
F^*	单位长度上的法向作用载荷, N/m
$\tilde{F}$	润滑因数
$\bar{F}$	综合法向作用载荷, N
F_c	离心力, N
$F_{\max}$	最大法向作用载荷 (在 $\psi = 0$ 处), N
F_r	径向作用载荷, N
F_t	轴向作用载荷, N
F_ψ	ψ 角处的法向作用载荷, N
$\mathcal{F}$	模为 $(1 - 1/k^2)^{1/2}$ 的第一类椭圆积分
$\overline{\mathcal{F}}$	第一类近似椭圆积分
f	滚道吻合率
f_b	球的表面粗糙度 (均方根值), m
f_r	滚道的表面粗糙度 (均方根值), m
G	无量纲材料参数 αE
G^*	流体剪切模量, N/m^2
$\tilde{G}$	硬度因数
g	引力常数, m/s^2
g_E	无量纲弹性参数 $W^{8/3}/U^2$
g_V	无量纲粘度参数 GW^3/U^4

XW

H	无量纲膜厚 h/R_x
$\hat{H}$	无量纲膜厚 $H(W/U)^2 = F^2 h/u^2 \eta_0^2 R_x^3$
H_0	无量纲中央膜厚 h_0/R_x
$H_{0.0}$	缺油状态下的无量纲中央膜厚
H_f	摩擦热, $N \cdot m/s$
H_{min}	根据EHL椭圆接触理论求得的无量纲最小膜厚
$H_{min,p}$	矩形接触区的无量纲最小膜厚
$H_{min,0}$	缺油状态下的无量纲最小膜厚
$\tilde{H}_0$	根据最小二乘法数据拟合求得的无量纲中央膜厚
$\tilde{H}_{min}$	根据最小二乘法数据拟合求得的无量纲最小膜厚
$\bar{H}_0$	无量纲中央膜厚-速度参数 $H_0 U^{-0.5}$
$\bar{H}_{min}$	无量纲最小膜厚-速度参数 $H_{min} U^{-0.5}$
$\bar{H}_0$	膜厚方程中新的常数估计量
h	膜厚, m
h_0	中央膜厚, m
h_i	入口膜厚, m
h_m	最大压力点 (此处 $dp/dx = 0$) 上的膜厚, m
h_{min}	最小膜厚, m
h_0	润滑膜常数, m
I_d	直径过盈, m
I_p	球的转动惯量, $N \cdot s^2 \cdot m$
I_r	由方程 (3.76) 定义的积分
I_t	由方程 (3.75) 定义的积分
J	由方程 (3.8) 定义的 h 的函数
J^*	热功当量
$\bar{J}$	极惯性矩, $N \cdot s^2 \cdot m$
K	载荷-变形常数
k	椭圆率参数 a/b
$\bar{k}$	近似椭圆率参数

$\bar{k}$	导热率, $\text{N/s}^\circ\text{C}$
k_f	润滑剂的导热率, $\text{N/s}^\circ\text{C}$
L	疲劳寿命
L_a	修正疲劳寿命
L_c	根据方程 (6.21) 求得的转化流体动升力
$L_1, \dots, L_4$	图3.11中定义的长度, m
L_{10}	轴承总体中90%能维持的疲劳寿命
L_{50}	轴承总体中50%能维持的疲劳寿命
l	轴承长度, m
l	确定测泄区宽度用的常数
M	力矩, $\text{N} \cdot \text{m}$
M_g	回转力矩, $\text{N} \cdot \text{m}$
Ma_p	无量纲载荷-速度参数 $WU^{-0.75}$
M_s	产生自旋所需的扭矩, $\text{N} \cdot \text{m}$
m	球的质量, $\text{N} \cdot \text{s}^2/\text{m}$
m^*	溢油状态和缺油状态之间边界上的无量纲入口距离
$\bar{m}$	无量纲入口距离 (图7.1和图9.1)
$\bar{m}$	半长轴或半短轴的等分数
m_W	韦德文等人 (1971年) 所求得的无量纲入口距离边界
N	转速, rpm
n	球数
n^*	折射率
$\bar{n}$	确定出口区长度用的常数
P	无量纲压力
P_D	无量纲压力差
P_d	直径间隙, m
P_c	自由游隙, m

XV

P_{Hz}	无量纲赫兹压力, N/m^2
P	压力, N/m^2
P_{max}	接触区内的最大压力 $3F/2\pi ab$, N/m^2
$P_{iv,ab}$	等粘性渐近压力, N/m^2
Q	齐次雷诺方程的解
Q_m	热载荷参数
$\bar{Q}$	单位宽度上的无量纲质量流率 $q\eta_0/\rho_0 E' R^2$
q_f	折减压力参数
q_x	单位宽度上的 x 向体积流率, m^2/s
q_y	单位宽度上的 y 向体积流率, m^2/s
R	曲率和, m
R_a	方程 (4.1) 中定义的算术平均偏差, m
HRC	轴承材料的工作硬度
R_x	x 向有效半径, m
R_y	y 向有效半径, m
r	滚道曲率半径, m
$r_{ax}, r_{bx}, r_{ay}, r_{by}$	曲率半径, m
r_0, φ_0, z	柱面极坐标
$r_s, \varphi_s, \varphi_s^-$	球面极坐标
$\bar{r}$	图5.4中定义的
S	几何间距, m
S^*	线接触的几何间距, m
S_0	经验常数
s	肩高, m
T	τ_0/P_{max}
$\bar{T}$	切向力 (牵引力), N
T_a	温度, $^{\circ}C$
T_s^*	球的表面温度, $^{\circ}C$
T_f^*	润滑剂平均温度, $^{\circ}C$

ΔT^*	球的表面温升, $^{\circ}\text{C}$
T_1	$(\tau_0/p_{\max})_{k=1}$
T_0	粘滞阻力, N
t	时间, s
t_a	辅助参数
U	无量纲速度参数 $\eta_0 u/E'R_x$
u	沿运动方向的表面速度 $(u_a + u_b)/2$, m/s
$\bar{u}$	每转一转的应力循环数
Δu	滑动速度 $u_a - u_b$, m/s
u_B	球-滚道接触点的速度, m/s
u_c	球中心的速度, m/s
v	沿垂直方向的表面速度, m/s
IV	无量纲载荷参数 $F/E'R^2$
w	沿油膜方向的表面速度, m/s
X	无量纲坐标 x/R_x
Y	无量纲坐标 y/R_y
X_i, Y_i	方程 (6.14) 中的无量纲参数群
X_a, Y_a, Z_a	外力, N
Z	由方程 (3.48) 定义的常数
Z_1	粘压指数, 无量纲常数
$\left. \begin{array}{l} x, \bar{x}, \bar{x}, \bar{x}_1 \\ y, \bar{y}, \bar{y}, \bar{y}_1 \\ z, \bar{z}, \bar{z}, \bar{z}_1 \end{array} \right\} \text{坐标系}$	
α	润滑剂的压力-粘度系数, m^2/N
α_s	半径比 R_y/R_x
β	接触角, rad
β'	接触角的迭代值, rad
β_f	自由接触角或初始接触角, rad
Γ	曲率差

γ	粘滞损耗, $\text{N}/\text{m}^2 \cdot \text{s}$
γ_w	流动角, $^\circ$
$\dot{\gamma}$	总应变率, s^{-1}
$\dot{\gamma}_e$	弹性应变率, s^{-1}
$\dot{\gamma}_v$	粘性应变率, s^{-1}
δ	总弹性变形, m
δ^*	润滑剂的粘温系数, $1/^\circ\text{C}$
δ_D	由压力差引起的弹性变形, m
δ_r	径向位移, m
δ_t	轴向位移, m
δ_x	某位置 x 上的位移, m
$\bar{\delta}$	近似弹性变形, m
δ	矩形面积上的弹性变形, m
ε	可决系数
ε_1	轴向应变
ε_2	横向应变
ξ	球的回转轴线和轴承中心线之间的夹角(图3.10)
ξ_a	残存概率
η	计示压力下的绝对粘度, $\text{N} \cdot \text{s} / \text{m}^2$
$\bar{\eta}$	无量纲粘度 η / η_0
η_0	大气压力下的粘度, $\text{N} \cdot \text{s} / \text{m}^2$
η_∞	$6.31 \times 10^{-5} \text{N} \cdot \text{s} / \text{m}^2$ (0.0631cP)
θ	确定肩高用的角度
λ	润滑膜参数 (膜厚与综合表面粗糙度之比值)
λ	外圈控制时 λ 等于 1, 内圈控制时 λ 等于零
λ_a	第二粘度系数
λ_b	阿查德-考金侧泄系数 $(1 + 2/3\alpha_a)^{-1}$
λ_c	松弛因数
μ	滑动摩擦系数

μ^*	$\bar{\rho}/\bar{\eta}$
ν	泊松比
ξ	速度向量的散度 $(\partial u/\partial x) + (\partial v/\partial y) + (\partial w/\partial z)$, s^{-1}
ρ	润滑剂的密度, $N \cdot s^2/m^4$
$\bar{\rho}$	无量纲密度 ρ/ρ_0
ρ_0	大气压力下的密度, $N \cdot s^2/m^4$
σ	正应力, N/m^2
σ_1	轴向应力, N/m^2
τ	剪应力, N/m^2
τ_0	表面下的最大剪应力, N/m^2
$\bar{\tau}$	剪应力, N/m^2
$\bar{\tau}_e$	当量应力, N/m^2
$\bar{\tau}_L$	极限剪应力, N/m^2
Φ	最大剪应力的深度与接触椭圆的半短轴之比值
Φ^*	$PH^{3/2}$
Φ_1	$(\Phi)_{k=1}$
φ	辅助角
φ_T	热降低因数
ψ	偏位角
ψ_l	ψ 的极限值
Ω_i	内圈的绝对角速度, rad/s
Ω_o	外圈的绝对角速度, rad/s
ω	角速度, rad/s
ω_B	球-滚道接触点的角速度, rad/s
ω_b	球的自转角速度, rad/s
ω_o	球的公转角速度, rad/s
ω_s	球的自旋角速度, rad/s

目 录

符号

第一章 滚动轴承发展史	1
1.1 原始社会的滚子和车轮	2
1.1.1 滚子	3
1.1.2 车轮	3
1.2 古代社会（大约公元前900年~公元400年）对早期型 式的滚动轴承的研制	5
1.2.1 希腊人	5
1.2.2 罗马人	5
1.2.3 塞尔特人	9
1.2.4 中国人	9
1.3 中世纪（大约公元400~1450年）	10
1.4 文艺复兴时期（大约公元1450~1600年）	10
1.5 17世纪和18世纪前期（公元1600~1750年）轴承的发 展与滚动摩擦的早期概念	16
1.5.1 滚子轴承的应用	16
1.5.2 滚动摩擦的早期概念	20
1.6 工业革命（大约公元1750~1850年）	23
1.6.1 车辆轴承	23
1.6.2 风向标和起重机	25
1.6.3 彼得大帝塑像——圣彼得堡（大约公元1769年）	27
1.6.4 斯普罗斯顿风车（大约公元1780年）	29
1.6.5 库伦、莫林和杜普伊的滚动摩擦研究	30

1.7 精密球轴承的出现 (大约公元1850~1925年)	31
1.7.1 自行车轴承	31
1.7.2 钢球的材料和制造	32
1.7.3 精密球轴承公司的诞生	33
1.8 接触力学、球轴承和滚动摩擦的科学研究 (大约公元 1870~1925年)	35
1.8.1 接触力学	36
1.8.2 球轴承的研究	36
1.8.3 滚动摩擦	38
1.9 过去的50年	38
1.10 小结	40
第二章 球轴承概述	42
2.1 球轴承的型式	46
2.1.1 向心轴承	47
2.1.2 向心推力轴承	49
2.1.3 推力轴承	52
2.2 球轴承的几何学	53
2.2.1 吻合表面和不吻合表面	53
2.2.2 节径、间隙和滚道吻合度	54
2.2.3 接触角、端隙和肩高	56
2.2.4 曲率差和曲率差	60
2.2.5 两个椭球体的几何间距	63
2.3 运动学	64
2.4 材料和制造工艺	68
2.4.1 熔炼技术	70
2.4.2 材料的硬度	72
2.4.3 纤维的位向	72
2.4.4 粉末冶金	73
2.4.5 形变热处理	75

2.5 隔离罩	75
2.6 小结	77
第三章 球轴承力学	78
3.1 椭圆接触变形	79
3.1.1 表面应力和变形	80
3.1.2 次表面应力	84
3.2 椭圆接触变形的简化解	86
3.3 静载荷分布	90
3.3.1 径向载荷	91
3.3.2 轴向载荷	95
3.3.3 联合载荷	97
3.4 高速轴承上的载荷	102
3.5 疲劳寿命	111
3.5.1 载荷因数	111
3.5.2 润滑因数	118
3.5.3 材料因数	119
3.5.4 制造因数	120
3.6 轴承的润滑	121
3.6.1 润滑剂	122
3.6.2 润滑系统	125
3.7 小结	127
第四章 润滑基础知识	129
4.1 表面形貌	130
4.2 润滑状态	134
4.2.1 流体动力润滑或流体膜润滑	135
4.2.2 弹性流体动力润滑	135
4.2.3 边界润滑	136
4.2.4 混合润滑	136
4.2.5 各种状态之间的转化	136

4.3 弹性流体动力润滑简史	138
4.3.1 50年代前——马丁到格鲁宾	138
4.3.2 50年代——布洛克到道森和希金森	139
4.3.3 60年代——克鲁克到阿查德和考金	141
4.3.4 70年代——郑绪云到哈姆罗克和道森	144
4.4 小结	148
第五章 基本润滑方程	150
5.1 纳维-斯托克斯方程	151
5.1.1 表面力	151
5.1.2 体积力	153
5.1.3 惯性力	153
5.1.4 平衡	154
5.2 连续性方程	158
5.3 雷诺方程	159
5.3.1 根据纳维-斯托克斯方程和连续性方程推导雷诺 方程	159
5.3.2 根据粘滞流动定律和质量守恒原理直接推导雷诺方 程	164
5.3.3 标准简化形式	166
5.4 粘度	168
5.4.1 压力对粘度的影响	170
5.4.2 压力和温度对粘度的影响	171
5.5 密度	172
5.6 能量方程	173
5.7 弹性方程	175
5.8 小结	184
第六章 刚性椭球体的润滑	185
6.1 压力分布方程	186
6.2 边界条件	188

6.3	承载能力	189
6.4	膜厚公式	190
6.5	各种刚性椭球体润滑理论的比较	191
6.6	两个椭球体之间的压力分布	194
6.7	小结	196
第七章 弹性流体动力润滑理论		198
7.1	雷诺方程	198
7.2	润滑膜形状	200
7.3	Φ^* 解	202
7.4	边界条件和初始条件	205
7.5	松弛法	206
7.6	法向作用载荷和流率	207
7.7	框图	209
7.8	小结	210
第八章 溢油流体动力润滑椭圆接触区的理论结果		212
8.1	无量纲参数群	213
8.2	椭圆率参数的影响	215
8.3	速度的影响	222
8.4	载荷的影响	228
8.5	材料性能的影响	233
8.6	最小膜厚公式	235
8.7	线接触情况下的弹性流体动力润滑最小膜厚公式在椭圆 接触情况下的应用	236
8.7.1	为使矩形接触区所产生的最大压力与椭圆接 触区 所产生的最大压力相同而需要确定其有效长度	237
8.7.2	为使矩形接触区所产生的平均接触压力与椭圆 接 触区所产生的平均接触压力相同而需要确定其 有效长度	238
8.8	中央膜厚公式	240

8.9 球轴承中球-滚道接触区的弹性流体动力润滑	240
8.10 小结	247
第九章 缺油椭圆接触区的理论结果	249
9.1 溢油-缺油边界	250
9.2 缺油弹性流体动力润滑椭圆连接点的膜厚方程	253
9.3 计算结果的等值线图	256
9.4 入口边界条件	267
9.5 小结	269
第十章 实验研究	270
10.1 测试设备	270
10.1.1 圆盘试验机	271
10.1.2 四球试验机	272
10.1.3 双球试验机	273
10.1.4 交叉圆柱试验机	274
10.1.5 交叉轴滚动圆盘试验机	275
10.2 膜厚的测量	276
10.2.1 电测技术	276
10.2.2 X射线技术	278
10.2.3 光测技术	280
10.2.4 机械测量技术	283
10.3 理论膜厚与实验膜厚的比较	284
10.4 压力测量	296
10.5 温度测量	300
10.6 牵引力测量	307
10.7 小结	314
第十一章 低弹性模量材料的椭圆接触区的弹性流体 动力学	316
11.1 理论公式	317
11.2 最小膜厚和中央膜厚公式	319