

Engineering Industry and Technics

潤滑理論基礎

l'Industrie Mécanique et Technipue

〔英〕 A. CAMERON 著

きかいこうぎょうぎじゅつとしょ

chinenbauindustrie und Technologie

Промышленности и Технике

机械工业出版社

滑 理 论 基 础

A. CAMERON 著

汪一麟 沈继飞 译



机 械 工 业 出 版 社

本书是关于润滑理论基础的教學参考书。全书共分十七章，介绍了粘度、雷诺方程和收敛-发散楔的基本概念、影响因素和计算方法；並介绍了可倾瓦块和固定瓦块推力轴承、圆盘、径向轴承、多孔轴承和流体静压轴承等的潤滑问题；还对轴承中的热量、交变载荷和挤压膜、油膜振荡、弹性流体动力潤滑、摩擦和发热、以及边界极压潤滑和胶合等专题，作了清晰的阐述，最后还介绍了工业实用中的典型的薄膜潤滑实验方法；还编入了一套习题。书末附有内容索引和参考资料。

本书可供机械工稯科研人員、技術人員和工科大学師生阅读。

BASIC LUBRICATION THEORY

[英] A. CAMERON

[美] JOHN WILEY & SONS

1976年

SECOND EDITION

* * *

潤滑理论基础

A. CAMERON 著

汪一麟 沈继飞 译

*

机械工业出版社出版 (北京阜成門外百万庄南街一号)

(北京市书刊出版业营业許可証出字第 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

*

开本 $850 \times 1168^{1/32}$ · 印张 $6^{3/8}$ · 字数 157 千字
1980年9月北京第一版·1980年9月北京第一次印刷

印数 00,001—11,300 · 定价 0.80 元

*

统一书号: 15033 · 4918

序 言 (摘译)

编写本书的动机是简单的。Longman 出版公司刚刚出版了我和其他几人写的一本大型教科书《润滑原理》(Principles of Lubrication)，就有人问我是否愿意再写一本供学生用的缩本，我同意了。

近十年来，我一直对流体膜润滑的讲授方式感到不满。运用平面可倾瓦块的方程来探索压力产生原理以及列出圆盘方程来求边界条件，要化费很多时间，以致这一课题在数学方面令人费解。后来知道，指数曲线膜很易积分，列出压力或载荷方程并不困难。如果将一收敛的和一发散的指数曲线楔连接起来，就能运用同样的数学来处理边界条件。用了这种方法就可以大大加以简化，因此我本人今后决不再用传统方法讲授流体膜润滑的数学问题了。帝国学院中我的同事们也曾试用了这种方法，由于他们的注释，在列方程方面给了我很大帮助。

对于径向轴承来说，短轴承理论是最简单的处理方法。本书选入了大学课程中一般不讲的一些论题。这些论题目前作为选修课程内容。但是，油膜振荡非常重要，要经常加以研究。我认为，我有一种研究振荡也包括阻尼在内的新方法，它表明振荡的主要特征。在本书各章中，我都按非常简单的一维形式来处理问题，然后引用计算值。其目的是为了理解问题。现在，没有人再用解析法求值了。这些数值总是用计算机求得。

书中，我还写了弹性流体动力学中的重要一节。这节不仅讲了油膜的形成，而且还讲了油膜的破裂和由此引起的表面胶合。对于提出的理论，应该重视其实际应用，特别是在第一门课程中，这一点尤其重要。

我认为，流体静压轴承目前已获得了广泛应用，所以我专门写了一章，而在前一本书中我认为是不值得写的。至于空气轴

IV

承，我仍旧没有写，因为目前已有一些优秀的教科书专讲其应用，但是我仍认为其应用是非常有限的。

本书在某种程度上可以看作是原来写的《润滑原理》一书的摘要，但是在论述方面不尽相同。如果本书中的论述缺乏充分的证据，可以在那本书里得到论证。因此，本书除了引用1964年以后出版的著作（与作者索引结合在一起）外，只列出很少的参考文献。

在帝国学院，我们曾为设计人员和维修人员开设了关于润滑实践的一系列课程。这些课程由终身从事工业的讲师来讲授。本书的姊妹篇《润滑实践基础》（Basic Lubrication Practice）一书讲述轴承金属的选择、干轴承材料、油和润滑剂。因此，本书就不考虑这些课题了。

最后一章，我编入了一套少量的习题。这些习题取材于指导教师的手稿和帝国学院多年来出的试题。这些习题与其说是有助于学生，不如说是有助于创造能力日益减退的教师。我要恳求他们寄给我他们想出的任何合适的问题。

1968年4月

再版序言

由于 Horwood 出版公司的出力和守信，本书的再版本得以出版，这样就使本书不致成为“售缺”书而绝迹。本版除了第四章作了重写外，其余章节与初版相同。在我的同事 C. M. Mc. Ettles 博士的帮助下，本版中发展了一种更加简单的正割曲线油膜，以代替原来采用的指数曲线油膜。

由于本版是初版的再版本，单位仍保持与 1966 年的版本一样，当时已对粘度单位的不明之处作了一些纯理论的修改。目前，粘度通常以帕斯卡-秒 PaS (牛顿-秒/米²) 计，厘泊在数值上等于毫帕斯卡-秒 mPaS，这是一种非常有利的巧合。这样就避免了按国际单位制 (SI) 计量时引起的许多麻烦。

符 号 表

- $\text{\AA}$ ——埃 (10^{-8} 厘米)
- B ——沿运动方向的长度
- C ——常数 $(1 + Cp)^n$; 压缩系数; 浓度 (第十五章)
- D ——轴的直径
- D ——油孔直径 (§ 7.6)
- E ——弹性模量
- E_L ——拉美 (Lame) 常数 $\equiv \pi E / 2 (1 - \sigma^2)$
- F ——总摩擦阻力
- G ——剪切模量
- H ——径向烧结厚度
- J ——热功当量
- K ——斜度 $(h_1 - h_0) / h_0$; 导热系数
- L ——长度 (垂直于运动方向)
- M ——质量; 轴的转速 (千转/分); 偏心系数 (§ 7.6g)
- P ——单位投影面积上的载荷
- Q ——总流量
- R ——半径; 电阻
- T ——时间; 温度
- U ——沿 x 向的表面速度
- V ——容积; 沿 y 向的表面速度
- W ——总载荷
- $\tilde{W}$ ——点载荷
- X ——压力中心
- a ——Slotte 常数; Hertz 半径或半宽
- b ——Vogel 常数; 油槽的周向长度; $\Delta = a \exp (be)$ 中的常数
- c ——半径间隙
- cP——厘泊
- cS——厘施
- d ——直径间隙

- e —— 偏心距
 f —— 频率 (油的涡动)
 g —— 重力加速度 (386 英寸/秒²)
 h —— 油膜厚度
 k —— Vogel 常数
 l —— 油槽的轴向长度; 带的总宽 (第十四章)
 m —— Slotte 常数; 轴的挠度 (从轴承中点到边缘)
 p —— 压力
 q —— 单位宽度内的流量; 单位宽度上的热源强度 (第十四章)
 r —— 离开原点的距离
 s —— Slotte 常数
 t —— 温度
 u —— 质点的 x 向速度
 v —— 质点的 y 向速度
 w —— 质点的 z 向速度; 表面变形 (第十三章)
 x —— U 向坐标
 y —— V 向坐标
 z —— 沿油膜的坐标

希腊字母

- α —— 压力-粘度系数 ($\eta = \eta_0 \exp \alpha p$); 热膨胀系数; 油膜厚度的指数系数 ($h = h_0 \exp \alpha x$); 超过 π 的角度 (在此角度下 $dp/d\theta = 0$)
 β —— 无量纲轴转速 ($\omega \sqrt{c/g}$)
 γ —— 圆盘和径向轴承的代换角; 轴心位移系数 $\left[\frac{\eta R \dot{e}}{W/L} \left(\frac{R}{c} \right)^2 \right]$ (第九章和第十章)
 δ —— 间隙比 ($\equiv 10^3 d/D$); 变形系数 (§ 13.9 和 § 13.10)
 Δ —— Sommerfeld 数 $\Delta \equiv \frac{W/L}{U\eta} \cdot \frac{c^2}{R^2}$ (注意 $S \equiv \frac{Pc^2}{N\eta R^2}$)
 e —— 偏心率 ($e \equiv e/c$)
 $\dot{e}$ —— 中心速度 ($\dot{e} \equiv de/dt$)
 η —— 绝对粘度 (泊), 也称动力粘度
 θ —— 径向轴承的角度; Vogel 常数 (无限粘度温度)
 κ —— 散热系数
 λ —— 频率方程的解

- μ ——摩擦系数
 ν ——运动粘度 (滯)
 ρ ——密度
 σ ——比热, 泊桑比
 τ ——剪应力
 ϕ ——圆盘的实际角度
 Φ ——烧结金属的渗透度 (面积)
 ψ ——渗透系数 ($H\phi/c^3$)
 ω ——角速度
 Ω ——轴的转速 (§ 10.4)

上标和下标

- 例如 $\bar{h}$ 、 $\bar{\theta}$ 、 $\bar{x}$, 适用于 $dp/dx = 0$ 时
 0 例如 h_0 , 出口条件
 1 例如 h_1 , 入口条件
 * 无量纲参数
 0 $p_0 \equiv (1 - \exp(-\alpha p))/\alpha$ (在 p_0 中)
 0 在大气压力下的粘度 (在 η_0 中)
 p 在压力 p 下的粘度 (在 η_p 中)
 c 传热系数 (在 h_c 中) (第十四章)

无量纲参数群

$$a_f = W / \pi p_s r_0^2$$

$$H_f = q_f / a_f$$

$$H = E_L h / (W/L)$$

$$H_0 = E_L h_0 / (W/L)$$

M

$$n = f \sqrt{(c/g)}$$

$$p^* = p h_0^3 \alpha / U \eta$$

$$= p h_0^3 / 6 U \eta \sqrt{2 R h_0}$$

$$= p h_0^3 / 6 U \eta B$$

$$p_0^* = p_0 W^2 / (L^2 E_L^2 6 U \eta \alpha)$$

载荷系数, 流体静力学

功率系数, 流体静力学

油膜厚度, 弹性流体动力润滑
EHL (第十三章)

最小油膜厚度, 弹性流体动力润滑
EHL (第十三章)

偏心系数 (§ 7.6 g)

频率

压力, 指数曲线瓦块

压力, 圆盘

压力, Michell 瓦块

压力数, 弹性流体动力润滑 EHL
(第十三章)

XV

$$\tilde{p} = p/p_a$$

$$Q^* = 2Q/UcL$$

$$q_f = \pi/3(1 - r_1^2/r_0^2)$$

$$R = R_x/R_y$$

$$S = Pc^2/N\eta R^2$$

$$t = m/c$$

$$W^* = h_0^2 \alpha^2 W/U\eta L$$

$$= (h_0^2 W/L)/6U\eta B^2$$

$$W = \left(\frac{W}{B} h_0^2 \right) / U\eta L^2$$

$$x^*$$

$$y^*$$

希腊字母无量纲参数群

$$\beta = \omega \sqrt{(c/g)}$$

$$= (\kappa/U)^{1/2}/K$$

$$\gamma = \frac{\eta R \dot{\epsilon}}{W/L} \left(\frac{R}{c} \right)^2$$

$$\delta = 10^3 d/D$$

$$\Delta = \frac{W/L}{U\eta} \frac{c^2}{R^2}$$

$$\varepsilon = e/c$$

$$\lambda = 6\eta UB/c^2 P_a$$

$$\psi = H\phi/c^2$$

气体轴承中的压力

流量系数, 径向轴承

瓦块流量系数, 流体静力学

半径比

Sommerfeld数

轴的倾斜度

载荷, 指数曲线瓦块

载荷, Michell 瓦块

载荷, 人字形轴承

x 座标

y 座标

轴的转速 (第十章)

温度参数 (第十四章)

轴心速度

间隙比 $\times 1000$ (第八章),

变形参数 (§ 13.9 和 § 13.10)

Sommerfeld 数

偏心率

压缩系数或 Harrison 数

渗透系数

目 录

符号表

第一章 绪论	1
§ 1.1 概述	1
§ 1.2 收敛楔的作用	1
第二章 粘度	3
§ 2.1 基本定义	3
§ 2.2 换算	4
§ 2.3 动力粘度	5
§ 2.4 测量	5
§ 2.5 粘温特性	6
§ 2.6 ASTM 线图	8
§ 2.7 粘度指数	9
§ 2.8 油的等级	9
§ 2.9 聚合物稠化油	10
§ 2.10 粘压特性	12
§ 2.11 多泡油和气体溶度	14
§ 2.12 气体的粘度	15
§ 2.13 压缩系数和热膨胀系数	16
第三章 雷诺方程	18
§ 3.1 引言	18
§ 3.2 通过量纲分析求雷诺方程	18
§ 3.3 完整方程的推导	20
§ 3.4 假设	20
§ 3.5 流体柱的流动连续性	21
§ 3.6 单元体的平衡	23
§ 3.7 完整雷诺方程	25
§ 3.8 简化	26
§ 3.9 无限长轴承	27

§ 3.10 无限短轴承	28
§ 3.11 变密度和可压缩性	29
第四章 收敛-发散楔	31
§ 4.1 楔角	31
§ 4.2 正割曲线油膜	31
§ 4.3 收敛-发散槽	34
§ 4.4 全Sommerfeld条件	35
§ 4.5 半Sommerfeld条件	36
§ 4.6 雷诺条件	36
§ 4.7 载荷	38
§ 4.8 有限长楔	39
§ 4.9 压力中心	39
§ 4.10 摩擦力	40
§ 4.11 指数曲线油膜	40
§ 4.12 指数曲线油膜的摩擦力	41
§ 4.13 指数曲线油膜的摩擦系数	44
第五章 可倾瓦块和固定瓦块推力轴承	45
§ 5.1 几何关系	45
§ 5.2 压力方程	45
§ 5.3 载荷	47
§ 5.4 压力中心	49
§ 5.5 可倾瓦块的摩擦力	50
§ 5.6 固定瓦块的几何形状	52
§ 5.7 W^* 的减小	52
§ 5.8 斜面平台轴承	53
§ 5.9 Rayleigh阶梯轴承	53
§ 5.10 粘性板轴承和人字形轴承	55
第六章 圆盘	56
§ 6.1 引言	56
§ 6.2 几何关系	56
§ 6.3 压力方程	59
§ 6.4 起点的边界条件	60
§ 6.5 全Sommerfeld条件	60

§ 6.6	半Sommerfeld条件	61
§ 6.7	雷诺条件	62
§ 6.8	雷诺载荷	63
§ 6.9	球的润滑	65
第七章 径向轴承		67
§ 7.1	引言	67
§ 7.2	几何关系	67
§ 7.3	压力方程——短轴承	68
§ 7.4	载荷	69
§ 7.5	偏位角	71
§ 7.6	油的流量	73
§ 7.7	用 Sommerfeld 法分析无限长轴承	81
§ 7.8	Sommerfeld 变量	85
§ 7.9	包角对 Sommerfeld 变量的影响	89
§ 7.10	径向轴承中的摩擦力	90
§ 7.11	可倾轴	92
§ 7.12	附录——径向轴承计算中所要用的积分式	93
第八章 轴承中的热量		96
§ 8.1	引言	96
§ 8.2	传导热量与对流热量之比	96
§ 8.3	近似法	98
§ 8.4	快速法	102
§ 8.5	$\Delta t/cS$ 网格	104
§ 8.6	进一步的计算	104
§ 8.7	设计概述	105
第九章 交变载荷和挤压膜		107
§ 9.1	挤压项的相对值	107
§ 9.2	挤压力	107
§ 9.3	有限长轴承	109
§ 9.4	e 随时间的变化	111
§ 9.5	冲量	111
§ 9.6	回转载荷	111
§ 9.7	两板之间的压力	112

第十章 油膜振荡	114
§ 10.1 引言	114
§ 10.2 无阻尼的单自由度振动	114
§ 10.3 有阻尼的单自由度振动	115
§ 10.4 半频率状态	118
§ 10.5 完整方程和计算解	119
§ 10.6 判断和消振	123
第十一章 多孔轴承	127
§ 11.1 引言	127
§ 11.2 几何关系	127
§ 11.3 渗透度	127
§ 11.4 雷诺方程	128
§ 11.5 方程的求解	128
§ 11.6 升力	130
第十二章 流体静压轴承	131
§ 12.1 流体静力学的特点	131
§ 12.2 立式推力轴承的分析	132
§ 12.3 补偿器	134
§ 12.4 补偿器的作用	136
§ 12.5 最优化	137
§ 12.6 实际问题	139
§ 12.7 发展史	140
第十三章 弹性流体动力润滑	142
§ 13.1 引言	142
§ 13.2 有关章节的安排	142
§ 13.3 弹性方程	143
§ 13.4 弹性压力	143
§ 13.5 弹性公式	144
§ 13.6 接触区外的变形	145
§ 13.7 考虑粘压特性的雷诺方程	146
§ 13.8 接触区的油膜压力	147
§ 13.9 接触区外的油膜形状	148
§ 13.10 最终压力方程	149

§ 13.11	弹性流体的动载荷	150
§ 13.12	出口收缩	151
§ 13.13	精确公式	151
§ 13.14	球的润滑	152
§ 13.15	高压大剪切率粘度计	152
第十四章	摩擦和发热	153
§ 14.1	混合摩擦	153
§ 14.2	实验关系式	153
§ 14.3	滑动摩擦理论	154
§ 14.4	热流动方程	155
§ 14.5	接触温度	157
§ 14.6	热量分配	158
§ 14.7	对流	159
第十五章	边界极压润滑和胶合	161
§ 15.1	边界摩擦	161
§ 15.2	光滑滑动和粘滑	162
§ 15.3	临界温度	162
§ 15.4	胶合机理	162
§ 15.5	抗磨损添加剂	164
§ 15.6	抗胶合添加剂	164
§ 15.7	粘性表面层	165
第十六章	实验方法	166
§ 16.1	研究方法	166
§ 16.2	实用方法	167
第十七章	习题	170
	作者索引和参考文献	180
	内容索引	183

第一章 绪 论

§ 1.1 概 述

任何摩擦表面，只要其某处有油，润滑油膜就进入两表面之间，从而承受一部分载荷。油的承载机理是各种各样的。在某些情况下，例如在推力轴承和径向轴承中，为了保证能够承受载荷，配合零件要专门设计。在其他的情况下，例如齿轮和滚子轴承元件，压力对油的作用和金属零件的弹性变形二者相互配合而形成油膜。还有第三类情况，例如机床的滑轨，金属的热变形产生油楔。油膜可以不承受全部载荷，但是它能卸除金属所承受的大部分载荷。即使油能承受95%的载荷，金属与金属表面上不平处的接触状态仍是至为重要的。在正常运转中，划破油膜和互相干涉的两表面上凹凸微凸体为表面一层活性分子所保护。这些油分子是从油本身所含的材料中产生的。在极端状态下，天生的油分子不再能保护表面，因而必须在润滑油中添加一种持久性更好的添加剂。极端状态几乎都是在高温下产生的。压力（或载荷）本身是次要的。这种分子保护层一旦消失，表面上的微凸体偶然发生接触就会引起胶合，导致整个系统毁坏。

在第一门润滑课程中一般不讲承载添加剂的化学，但是它很重要，所以准备在最后几章中简短地介绍一下。

§ 1.2 收敛楔的作用

在任何润滑副中都会产生收敛楔，收敛与速度和粘度相结合就产生了压力油膜。德国人曾用压力峰（Druckberg）一词来加以说明，这尚未译成英语。

油压产生过程可以想象如下。一个运动表面将粘性油液带入该表面与另一个（通常固定）表面之间的间隙内。人们常常写成

玄妙的“粘性流体”，但在各种情况下几乎都用油作为润滑剂。其他流体如水、空气或合成液体等很少采用，也许是极其罕见的。

图 1.1 中，下表面将油带入口间隙。油一进入间隙就可以看出，当油向前流动时，

它所占的空间愈来愈小。油实质上是不可压缩的，所以它不得不产生压力，从而阻止油进入间隙，因为油遇到了升压（压力

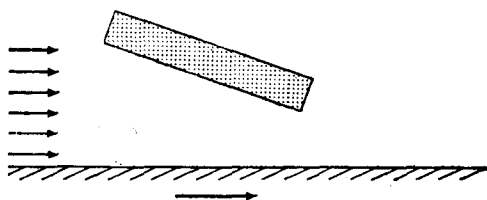


图1.1 油楔

峰)。对于间隙中的油来说，当油压一超过最大压力，压力梯度就迫使油通过缩小的空间在收敛块端部流出。

这一过程的数学表达式是一切润滑理论的基本表达式。它将占本书的很大篇幅。在推导了这些方程后，下一步是研究如何应用于工程中所用的各种结构形状，即推力块、滚子和齿轮以及径向轴承。