Engineering Industry and Technics

流体动力润滑理论

l'Industrie Mécanique et Technipue

〔英〕O.平克斯　B.斯德因李希特　著

きかいこうぎょうぎじゅつとしょ

schinenbauindustrie und Technologie

ской Промышценности и Технике

机械工业出版社

流体动力润滑理论

〔英〕O. 平克斯　B. 斯德因李希特 著

西安交通大学轴承研究小组 译

机 械 工 业 出 版 社

本书是对流体动力润滑进行系统论述的技术基础理论书籍，是摩擦学领域内的一本名著。全书共十五章，包括四部分内容：导出一般形式的润滑微分方程和讨论滑动轴承的基本流体动力学问题；分别讨论各类滑动轴承的有关问题；讨论经典雷诺方程不能解的一些问题；从实验角度证明流体动力润滑基本命题的有效性。书中还介绍了求解润滑微分方程所用的解析、模拟和电子计算机等方法，给出了精确解或近似解，还提供了设计特殊滑动轴承的理论基础。

本书的主要对象为从事滑动轴承及润滑理论方面研究工作的技术人员和大专院校师生。

Theory of Hydrodynamic Lubrication

Oscar Pinkus and Beno Sternlicht

McGRAW-HILL BOOK COMPANY, INC. 1961

* * *

流体动力润滑理论

〔英〕 O. 平克斯 B. 斯德因李希特 著

西安交通大学轴承研究小组 译

*

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）

国防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 850×1168 1/32 · 印张 16 1/8 · 字数 423 千字

1980 年10月北京第一版 · 1980 年10月北京第一次印刷

印数 0,001—5,800 · 定价 2.15 元

*

统一书号：15033 · 4599

译者序

随着我国工业生产的迅速发展，在机械制造业、大型电站、钢铁联合企业以及化工联合企业的机器设备中广泛应用了各种类型的动压式滑动轴承，如普通圆柱轴承，椭圆轴承，三叶轴承，活支瓦块轴承等。这些轴承往往是机器能否正常可靠运转的关键部件。

近年来，由于机械设计制造和运行维护的需要，广大工人、工程技术人员迫切要求了解各种动压轴承的工作机理以及设计计算的理论基础。O. Pinkus 和 B. Sterlicht 两人合著的《流体动力润滑理论》正是这方面的一本基础理论参考书。虽然此书出版年代较早，但由于内容涉及基础理论较多，尤其起初几章对动压轴承原理讲得较详细，所以十余年来国内外润滑技术工作者仍把它当作一本主要参考书。国外近年来发表的润滑方面（尤其动压轴承）的论文，也常常仍将此书列为主要参考资料。

由于科研及教学工作的需要，我们小组集体译出此书，并曾选择部分章节油印以满足国内有关单位的迫切需要。粉碎"四人帮"后，我们决定推荐出版此书，以适应研究轴承的同志的要求。

在翻译过程中感到有下列情况需向读者作一说明：

1．此书出版较早，故未能包括近年来这一领域的最新内容，某些章节（如第五章气体轴承，第十五章实验证据）内容已有新的发展。读者如有需要可参阅专门著作。

2．此书中公式及插图还夹有英制（英寸、磅等）单位，由于线图大多作定性分析之用，故译文中未对其重新换算改画，读者如有需要，也可将其演化成公制单位。

3．译者对书中第1、2章中个别公式疑有错误处重新进行推导，作了订正并加了详细注释。此外还对全书中近40处错误作了更正。

4. 为了便于查阅资料，本书人名一律采用原文（在书末名词索引中附有常用中文译名）。对国内技术界尚未统一的疑难名词，均附有原文供参考。又各插图下资料来源说明一概略去，原书末名词索引现按汉语拼音字母排列。

参加本书翻译的同志有：乔孝纯（第五、八章）、沈三多（第一、二、六章）、朱家玮*（第三、四、十五章）、张言羊（第十二、十四章）、牛锡传（第十一章）、谢友柏（第十章）、黄宇中**（第七章）、朱均（第九章）、李质芳（第十三章）。林钧同志参加某些章节的初校。为了保证译文质量，我们曾进行了互校并统一译名，最后由乔孝纯同志进行总校。由于译者业务知识浅薄，译文中缺点错误在所难免，恳请读者批评指正。

在本书翻译出版过程中承西安交大印刷厂协助解决初稿誊写问题，在此致谢。

西安交通大学轴承研究小组

* 译注：现在上海同济大学。

** 译注：现在上海交通大学。

本书常用术语和符号

符号	含义
B	宽度，阔度（平行于运动方向）
C	半径间隙
D	直径
E	能，能量，弹性模数
F	摩擦力，力
G	重量流量（单位时间内流过的流体重量）
H	功率
I	转动惯量
J	热功当量
K	弹性系数
L	轴承长度（垂直于运动方向）
M	质量，力矩
N	单位时间内的转数
P	比压（单位面积上的负荷）$=W/LD$
Q	体积流量（单位时间内流过的流体体积）
R	轴承半径
$\mathscr{R}$	理想气体常数
Re	Reynolds 数（译注：通常译作“雷诺数”）
S	Sommerfeld 数 $=(\mu N/P)(R/C)^2$
T	温度
U	线速度
V	速度，体积
W	载荷
a	进口和出口处薄膜厚度之比
b	阻尼系数
c	比热
e	偏心距，总能量
f	摩擦系数，无量纲力 $=1/S$
g	重力加速度
h	薄膜厚度（译注：或译“膜厚”）
k	比热比，导热系数，弹性系数
m	质量
n	多变指数
p	压力
q	热流量，单位长度上的体积流量
$\bar{q}$	无量纲流量系数 $=Q/\pi RCNL$
t	时间
u, v, w	线速度分量
$\bar{x}$	压力中心
x, y, z	直角坐标
α	无量纲斜度，载荷角
β	轴承圆弧或扇形的张角
δ	斜度 $=(h_1-h_2)$，椭圆度
ϵ	偏心率 $=e/C$
Λ	轴承数 $=6\mu UB/p_a h_2^2$ 或 $(6\mu\omega/p_a)(R/C)^2$
μ	绝对粘度
ν	运动粘度

ρ	密度
τ	剪应力
ϕ	偏位角
ω	角速度

下　　标

H	水平方向的
L	层流的，载荷
P	载荷
R	径向的
T	切向的，紊流的
V	垂直方向的，体积
a	周围的或环境的
b	轴承
c	共同的，临界的
j	轴颈
l	层流的
r	径向的
s	滑块，供给
t	切向的，紊流的
avg	平均
max	最大
min	最小
opt	最佳
red	简化的
0	关于压力最大点的
1	起点，进口
2	终点，出口

上　　标

$\bar{\ }$	无量纲$(\bar{x}=x/B)$
$\cdot$	对于时间的一阶导数
$\cdot\cdot$	对于时间的二阶导数
$\cdots$	对于时间的三阶导数

目　　录

第一章　基本微分方程

从数学观点来看，流体动力润滑的研究，就是 Navier-Stokes 方程的一种特殊形式的研究。这种特殊的微分方程是由 O. Reynolds（雷诺）于 1886 年在 B. Tower 的卓越的实验之后提出的。从这个实验，人们初次观测到并懂得形成流体薄膜是流体动力润滑的基本机理。这种 Reynolds 方程可以从 Navier-Stokes 方程或者从流体力学基本原理推导出来，当然，在这两种方法中还须采取同样的假设。Reynolds 方程中含有粘度、密度、膜厚等参数。这些参数既决定着温度场和压力场，同时也取决于温度场、压力场以及轴承表面的弹性变形。因此，为了全面而精确地说明润滑膜的流体动力学规律，往往需要同时考虑 Reynolds 方程、能量方程、弹性方程和状态方程。本章将讨论这些方程的数学推导，并作为解决下面各章中轴承问题的基础。我们首先以尽可能简单的方式导出 Navier-Stokes 方程，然后把它化成 Reynolds 方程，从而指明用来解决润滑问题的方程中所作的假设和相应的限制。

1-1　Navier-Stokes 方程　在粘性流体中，互相垂直的三个平面上，各有三个应力，一共有九个应力分量。图 1-1 表示作用在垂直于 z 轴的平面上的应力分量。每一应力的第一个下标都是 z，就表明这一点。第二个下标则表示与该应力平行的轴。立方体的顶面上有三个相似的应力，而右面上还有三个。

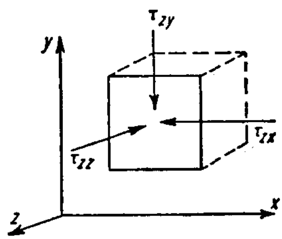

图 1-1　流体单元体一个面上的应力

要使作用在这立方体上的力互相平衡，所有应力必须是对称的，就是说，两下标的次序可以互换，即

$$\tau_{xy}=\tau_{yx},\ \ \tau_{xz}=\tau_{zx},\ \ \tau_{yz}=\tau_{zy}$$

这三种应力分量都切向作用于其分布的表面，因此是剪应力分量。此外，通常认为流体的压力 p 是三个法向分量的平均值，这三个法向分量分别垂直作用于各自的表面，即

$$\tau_{xx}+\tau_{yy}+\tau_{zz}=-3p$$

这里用负号是因为负的压力是压应力，而正的应力则是拉应力。

这些应力的值取决于流体的畸变率。对于大多数流体，这种关系具有下面的形式

$$\tau_{ij}=\mu\left(\frac{\partial u_i}{\partial x_j}+\frac{\partial u_j}{\partial x_i}\right)-\delta_{ij}p$$

式中　各 u 值是速度矢量的分量。流体的变形（与刚体运动不同）由括号中的项来量度。这方程表示应力分量的值与流体的畸变成正比，而比例常数则是粘度 μ。必须从法向应力分量（即两个下标相同的三个分量）中减去由流体静压力引起的附加应力 p。δ_{ij} 即单位张量（Kronecker delta），表示只有两个下标相同时才减去 p。

三个剪应力分量是：

$$\tau_{xy}=\mu\left(\frac{\partial u}{\partial y}+\frac{\partial v}{\partial x}\right)\quad \tau_{xz}=\mu\left(\frac{\partial u}{\partial z}+\frac{\partial w}{\partial x}\right)$$

$$\tau_{yz}=\mu\left(\frac{\partial v}{\partial z}+\frac{\partial w}{\partial y}\right)$$

式中　u、v、w 是速度的 x、y、z 分量。其他三个应力分量是法向分量：

$$\tau_{xx}=-p+2\mu\frac{\partial u}{\partial x}\quad \tau_{yy}=-p+2\mu\frac{\partial v}{\partial y}\quad \tau_{zz}=-p+2\mu\frac{\partial w}{\partial z}$$

这些法向分量的和是

$$\tau_{xx}+\tau_{yy}+\tau_{zz}=-3p+2\mu\left(\frac{\partial u}{\partial x}+\frac{\partial v}{\partial y}+\frac{\partial w}{\partial z}\right)=-3p+2\mu\theta$$

括号中这一项是速度矢量的散度，即扩张。它用来量度流体从各点向外流动的速率，也就是流体的膨胀。为简单起见，可用 θ 来表示。为了使三个法向分量的和等于 $-3p$，必须再加上等于 θ 的某个倍数的一项；必须重新定义这些法向分量：

$$\sigma_x=-p+\lambda\theta+2\mu\frac{\partial u}{\partial x}\qquad\sigma_y=-p+\lambda\theta+2\mu\frac{\partial v}{\partial y}$$

$$\sigma_z=-p+\lambda\theta+2\mu\frac{\partial w}{\partial z}$$

现在 θ 的系数 λ 还是一个未定量。这些法向分量的和可以是 $-3p$，条件是

$$\lambda=-\frac{2}{3}\mu$$

有些流体具有"体积粘度"这种性质，它可以量度流体对体积变化的阻力，正象通常由粘度量度流体对流动的阻力一样。对于具有体积粘度的流体，$\lambda+\frac{2}{3}\mu$ 不等于零。目前，方程中的 λ 和 μ 都可以保留；以后体积粘度可以假设为零，而 λ 则用 μ 来表示。

流体的三个加速度分量就是那三个全导数 Du/dt、Dv/dt 和 Dw/dt。尺寸为 dx、dy 和 dz 的流体单元体的质量等于 $\rho\,dx\,dy\,dz$；因此用来使这个单元体加速的力的分量是

$$\rho\frac{Du}{dt}dx\,dy\,dz\qquad\rho\frac{Dv}{dt}dx\,dy\,dz\qquad\rho\frac{Dw}{dt}dx\,dy\,dz$$

计算速度分量的全导数时，把速度看作 x、y、z 和 t 的函数，而 x、y、z 则又是 t 的函数。

$$\frac{Du}{dt}=\frac{\partial u}{\partial x}\frac{\partial x}{\partial t}+\frac{\partial u}{\partial y}\frac{\partial y}{\partial t}+\frac{\partial u}{\partial z}\frac{\partial z}{\partial t}+\frac{\partial u}{\partial t}$$

$$=u\frac{\partial u}{\partial x}+v\frac{\partial u}{\partial y}+w\frac{\partial u}{\partial z}+\frac{\partial u}{\partial t}$$

式中 x、y、z 关于时间的偏导数当然就是速度分量 u、v、w。速度分量关于时间的全导数，用来量度一个在空间运动的流体质点的速度分量的变化；而它关于时间的偏导数则用来量度任何流体质点处于某一特定位置时的速度分量变化。

使流体单元体加速所需的力，来自一个外力场（可能是重力）以及流体内部的压力梯度或应力梯度。如果每单位质量的外力场分量为 X、Y、Z，这些力就等于 $X\rho\,dx\,dy\,dz$、$Y\rho\,dx\,dy\,dz$ 和 $Z\rho\,dx\,dy\,dz$。