

连续粘变条件下的速度场分析

曲庆文, 王梅, 陈海真, 柴山, 姚福生

(山东理工大学科学技术研究院, 山东淄博 255012)

[摘要] 流体的流动状态将直接影响轴承的润滑特性, 轴承的润滑特性主要由润滑剂的粘度决定。工作中润滑剂的粘度变化影响其运动速度的变化, 从而影响润滑剂的温升及内剪切稀化的程度等。尤其在薄膜润滑中, 润滑膜的厚度极小, 润滑剂流体粒子间的相对运动速度增大, 其润滑剂特性的变化更为突出。以连续变化的粘度修正模型来研究在微小间隙内润滑剂的速度特性, 得出间隙内速度的分布规律, 为研究薄膜流体温度场和剪切稀化问题提供计算数据。

[关键词] 薄膜润滑; 粘度; 连续模型; 速度

[中图分类号] TH117.2 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1009-1742(2002)06-0029-04

随着科学技术的发展, 纳米摩擦学的研究日渐深入, 微观的润滑理论研究不断产生。薄膜润滑(纳米级润滑)的研究在近年来也日渐增加, 出现了多种理论计算模型。例如曲庆文等提出的等效粘度模型^[1~2], 把同一间隙截面内的粘度统计处理为平均粘度。此种模型可以通过相对简单的间隙变化实验来测定平均粘度统计形成。Tichy等提出的、曲庆文等进一步推导的分层粘度模型^[3~4], 把流层分为三个固定层, 以层内等粘度处理。其困难在于层的划分, 层是通过润滑剂与固体表面的特性进行统计计算得到的。曲庆文等提出的指数型粘度模型^[5~6], 遵循吸附层内粘度是连续变化的规律, 总结上述两种情形粘度的变化规律, 进行模拟统计的结果。这些模型用于计算轴承的承载能力和摩擦阻力, 其误差很小, 对于一般的工程计算, 几乎可以等同应用。若考虑润滑剂内部的作用等于速度相关的量, 将会出现较大的误差。薄膜润滑时, 流体的速度分布与常规分布不同^[7]。由于间隙极小, 将使得润滑剂内部的相对运动速度增加, 润滑剂的性质也将产生变化。其一增加摩擦功耗, 热量

增大; 其二是润滑剂可能的剪切稀化, 导致润滑剂在同截面内有不同的性质。作者将以连续变化的指数型粘度修正模型为例进行速度分析, 以进一步了解薄膜润滑的特性, 为进一步研究剪切稀化等问题打下基础。

1 理论基础

滑动轴承的分析计算模型简化图及其稳态分析参阅文献[6], 轴承的边界条件为: $z=0: u=U, v=0$; $z=h: u=0, v=0$ 。变粘度下流体的运动速度可表示为

$$\begin{aligned} u &= \frac{\partial p}{\partial x} \left[f_1(z) - \frac{f_1(h)}{f_0(h)} f_0(z) \right] - U \frac{f_0(z)}{f_0(h)} + U \\ v &= \frac{\partial p}{\partial y} \left[f_1(z) - \frac{f_1(h)}{f_0(h)} f_0(z) \right], \end{aligned} \quad (1)$$

压力梯度由下述雷诺方程为

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{1}{12f_p} \frac{\partial p}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{1}{12f_p} \frac{\partial p}{\partial y} \right) = \frac{1}{2} U \frac{\partial}{\partial x} f_U, \quad (2)$$

上述方程中辅助函数的意义及计算见文献[6]。

[收稿日期] 2001-11-20; **修回日期** 2002-03-27

[基金项目] 国家九五攀登计划资助项目(PD9521900)、自然科学基金资助重大项目(19990510)和山东省自然科学基金资助项目

[作者简介] 曲庆文(1959-), 男, 山东荣成人, 山东理工大学科学技术研究院教授

2 连续粘度修正模型及参数无量纲化

采用文献〔6〕中的连续粘度计算模型，即间隙内粘度的变化规律为

$$\eta(z) = \eta_0 + (\eta_{w1} - \eta_0) \cdot \exp\left(-\frac{(h/2 - \delta_1)^2 z(h-z)}{(h/2 - z)^3 \cdot \delta_1}\right) H\left(\frac{h}{2} - z\right) + (\eta_{w2} - \eta_0) \exp\left(-\frac{(h/2 - \delta_2)^2 z(h-z)}{(h/2 - z)^3 \cdot \delta_2}\right) \cdot H\left(z - \frac{h}{2}\right), \quad (3)$$

H 为 Heaviside 阶梯函数，其性质为

$$\begin{aligned} H(x) &= 0 \quad x < 0 \\ H(x) &= 1 \quad x \geq 0, \end{aligned} \quad (4)$$

式 (3) 中，间隙的变化范围为 $0 \leq z \leq h$ ； η_w 为壁面粘度，不同于吸附层平均粘度； η_0 为常规粘度； h 为间隙高度。

参考文献〔6〕引入无量纲参数

$$\eta^* = \eta/\eta_0, z^* = z/h, \delta^* = \delta/h, \eta_w^* = \eta_w/\eta_0 \quad (5)$$

式 (4) 可改写为

$$\eta^* = 1 + (1 + \eta_w^*) \cdot \exp\left[-\left|\frac{(0.5 - \delta^*)^2 z^*(1 - z^*)}{(0.5 - z^*)^3 \delta^*}\right|\right]. \quad (6)$$

其参数对粘度的影响参阅文献〔6〕引进无量纲参数

$$\begin{aligned} p &= \frac{6\eta_0 UL}{h_b^2} p^* \\ x &= x^* L \quad u = u^* U \quad y = y^* B/2 \quad \lambda = B/2L \end{aligned} \quad (7)$$

公式 (2) 写成无量纲形式

$$\begin{aligned} \frac{\partial}{\partial x^*} \left(\frac{h^{*3}}{f_p^*} \frac{\partial p^*}{\partial x^*} \right) + \frac{1}{\lambda^2} \frac{\partial}{\partial y^*} \cdot \\ \left(\frac{h^{*3}}{f_p^*} \frac{\partial p^*}{\partial y^*} \right) = \frac{\partial}{\partial x^*} (h^* f_U^*), \end{aligned} \quad (8)$$

式中 $f_p^*(z^*; x, y) = \frac{h^3}{\eta_0} f_p = -1 / \left\{ 12 \int_0^1 \left[f_1^*(z^*) - \frac{f_1^*(1)}{f_0^*(1)} f_0^*(z^*) \right] dz^* \right\},$

$$f_U^*(z^*; x, y) = \frac{1}{h} f_U = 2 - 2 \int_0^1 \frac{f_0^*(z^*)}{f_0^*(1)} dz^*. \quad (9)$$

由此可得 x 向无量纲速度为

$$\begin{aligned} u^* &= 6 \frac{h^2}{h_{2b}} \frac{\partial p^*}{\partial x^*} \cdot \\ \left[f_1^*(z^*) - \frac{f_1^*(1)}{f_0^*(1)} f_0^*(z^*) \right] - \frac{f_0^*(z^*)}{f_{*0}^*(1)} + 1, \end{aligned} \quad (10)$$

$$\begin{aligned} f_1^*(z^*; x, y) &= \frac{\eta_0}{h^2} f_1(z) = \int_0^{z^*} \frac{z'}{\eta^*} dz', \\ f_0^*(z^*; x, y) &= \frac{\eta_0}{h} f_0(z) = \int_0^{z^*} \frac{1}{\eta^*} dz'. \end{aligned} \quad (11)$$

3 速度分析

根据式 (6) ~ (11) 可计算出无量纲速度分布规律，由于连续指数粘度模型积分的复杂性，一般得不出精确解，常采用数值解，本研究采用差分法解得的数值结果如图 1~图 4 所示。

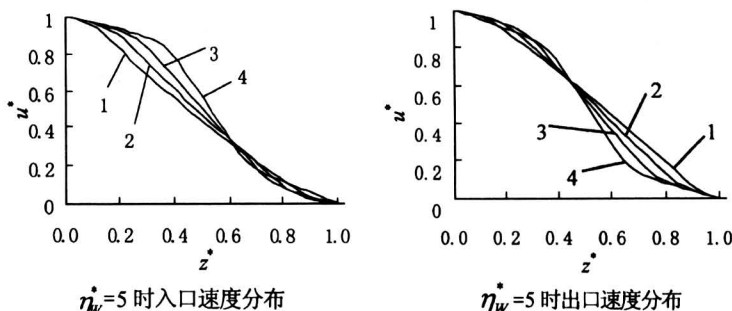


图 1 $\eta_w^* = 5$ 时入、出口无量纲速度分布

Fig.1 At $\eta_w^* = 5$ dimensionless velocity at entrance and exit

1- $\delta^* = 0.1$ 2- $\delta^* = 0.2$
3- $\delta^* = 0.3$ 4- $\delta^* = 0.4$

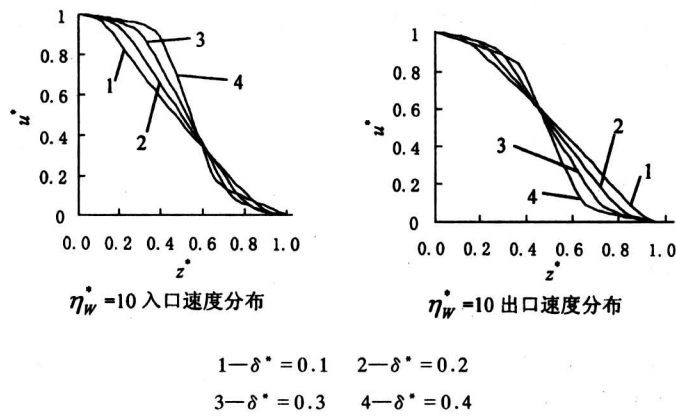


图 2 $\eta_w^* = 10$ 时入、出口无量纲速度分布

Fig.2 At $\eta_w^* = 10$ dimensionless velocity at entrance and exit

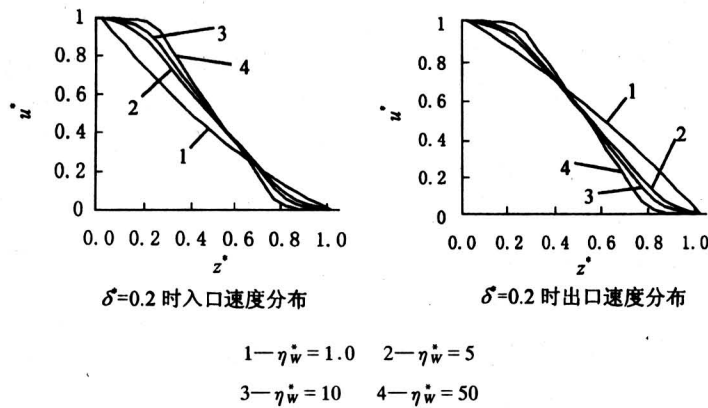


图 3 $\delta^* = 0.2$ 时入、出口无量纲速度分布

Fig.3 At $\delta^* = 0.2$ dimensionless velocity at entrance and exit

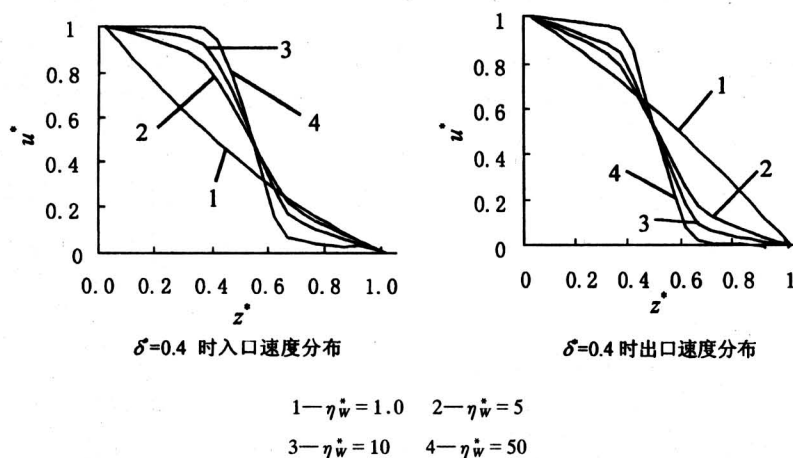


图 4 $\delta^* = 0.4$ 时的入、出口无量纲速度分布

Fig.4 At $\delta^* = 0.4$ dimensionless velocity at entrance and exit

根据图 3~图 4 的分析可知，随着无量纲壁面粘度 η_w^* 的增大，紧密吸附层的速度变化越来越小，变速区主要在中间层的低粘度区，在此区中，

速度梯度很大，轴承的摩擦特性主要由此区来决定。图中 $\eta_w^* = 1$ 所对应的曲线为按常规方法计算，即吸附层对润滑性能无影响。从图中的曲线对比可

以看出：**a.** 壁面粘度增大，对速度的影响越大，速度的变化集中在中层，此时，中层呈现大的速度梯度。**b.** 从不同粘度下的比值看出， δ^* 的增大明显显示出液体的非线性。**c.** 出口区吸附层的速度与入口区显著不同，出口区速度的变化率远大于入口区。同时吸附层内的流体由于强的吸附作用与固体壁面的速度差减小，从而可知，吸附层的作用类似于使微间隙进一步减小。由此可知，使薄膜润滑轴承的承载能力大增。但也应注意，吸附层的作用使得温度场发生变化，间隙减小，润滑剂的流量减少，由润滑剂带走的热量减少，温升增加，又将改变润滑剂的特性。

4 结论

流体的速度分析是流场分析的关键问题，本研究的结果将可推广到其他流场分析，根据计算简化分析得出如下结论供参考：

1) 本研究适用于微小间隙下的流场分析，如毛细管流、纳米间隙流等。其特点是壁面作用不可忽视，所以当间隙小到一定程度，将不能流动或者需要较大的压力差。

2) 流场分析中温度的变化是与流体的速度相

关的，由于壁面的强吸附性造成速度梯度的变化，形成较大的速度梯度，所以本研究也为温度场分析提供参考。

3) 由于大的速度梯度，润滑剂稀化问题必须考虑，该研究将为稀化研究提供数据。

参考文献

- [1] 曲庆文, 朱均. 粘度修正雷诺方程的全域解模拟计算[J]. 机械工程学报, 1997, 33(4): 26~30
- [2] 曲庆文, 李小江, 朱均. 薄膜润滑的等效粘度模拟计算[J], 机械科学与技术, 1996, 15(6): 883~886
- [3] Qu Qingwen, Hu Yahong, Zhu Jun. An adsorbent layer model for thin film lubrication [J]. Wear, 1998, (221): 9~14
- [4] Tichy J A. Modeling of thin film lubrication [J]. ASME J Tribol. 1995, (38): 108-111
- [5] 曲庆文, 朱均. 指数型粘度修正计算径向轴承特性[J]. 润滑与密封, 1999, (1): 32~33
- [6] 曲庆文, 王梅, 柴山, 等. 指数型粘度修正模型及应用[J]. 中国工程科学, 2001, 3(10): 53~58
- [7] Qu Qingwen, Wang Mei, Chai Shan, et al. Velocity analysis for layered viscosity model under thin film lubrication[J]. Tribology International, 2001, (34): 517~521

Velocity Field Analysis under the Condition of Continuous Viscosity Variation

Qu Qingwen, Wang Mei, Chen Haizhen, Chai Shan, Yao Fusheng
(Shandong University of Technology, Zibo, Shandong 255012, China)

[Abstract] The lubrication effect is directly affected by flowing characteristic of fluid. The viscosity distribution of lubricant is the key point to the bearing. The viscosity variation will directly influence flowing velocity of the lubricants. Apart from temperature rise, the speed change will result in rare faction of the cut in the fluid. In case thin film lubrication, the thickness of fluid film is tiny, relative moving velocity of interparticles is larger in the lubricant, therefore, the variation of lubricant properties will be more prominent. The velocity characteristics of lubricant in micro-clearance are researched with the continuous correcting model of viscosity. The distribution laws of velocity are obtained in the micro-clearance. The data are provided for the study of temperature field and rare faction of the cut under the thin film lubrication.

[Key words] thin film lubrication; viscosity; continuous model; velocity