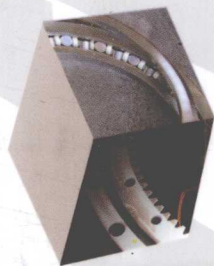
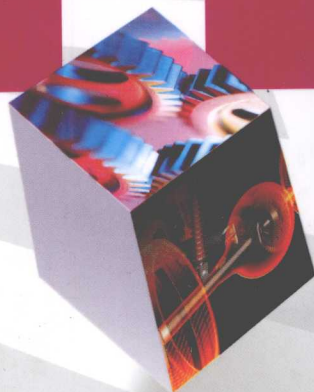


国家自然科学基金资助项目

# 轴承间隙 非牛顿润滑剂的 非线性动力学

王海林 / 著



 **北京理工大学出版社**  
BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

国家自然科学基金资助项目

# 轴承间隙非牛顿润滑剂的 非线性动力学

王海林 著

 北京理工大学出版社  
BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

## 内 容 简 介

本书以轴承间隙非牛顿润滑剂的流动为主要研究对象,分析非牛顿润滑介质对润滑油膜层流失稳的影响。全书共分7章,主要包括国内外相关研究的综述、粘弹性流体的流态分析、基于微观力学的添加剂分子动力学行为研究、聚合物稀溶液的流动分析及其非线性动力学分析、实验研究润滑油膜失稳过程及影响因素。

本书适合于机械设计理论与方法、润滑力学、轴承润滑及动力学等专业或研究领域的研究生及从事相关领域的教学科研或技术人员参考。

版权专有 侵权必究

---

### 图书在版编目(CIP)数据

轴承间隙非牛顿润滑剂的非线性动力学/王海林著. —北京:北京理工大学出版社,2009. 10

ISBN 978 - 7 - 5640 - 2887 - 9

I. 轴… II. 王… III. 非牛顿流体力学 IV. O373

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 188134 号

---

---

出版发行 / 北京理工大学出版社

社 址 / 北京市海淀区中关村南大街 5 号

邮 编 / 100081

电 话 / (010)68914775(办公室) 68944990(批销中心) 68911084(读者服务部)

网 址 / [http:// www. bitpress. com. cn](http://www.bitpress.com.cn)

经 销 / 全国各地新华书店

刷 / 北京圣瑞伦印刷厂

开 本 / 880 毫米 × 1230 毫米 1/32

印 张 / 4.25

字 数 / 109 千字

版 次 / 2009 年 10 月第 1 版 2009 年 10 月第 1 次印刷

印 数 / 1 ~ 1500 册

定 价 / 15.00 元

责任校对 / 陈玉梅

责任印制 / 边心超

---

图书出现印装质量问题,本社负责调换

# 前 言

随着旋转机械向高速化发展,多数轴承工作在由层流向湍流转变的过渡区,甚至完全工作在湍流区,增大了能耗。同时,油膜涡动给轴承运行安全性造成很大的隐患。本研究采用高分子添加剂改变润滑油的性质,以实现推迟油膜层流失稳的目的,提高轴承的工作性能。

以旋转圆柱间流体的流动为主要研究对象,系统深入地研究了高分子添加剂对流动稳定性的作用。分析了高分子添加剂在流体中的宏观效应,建立了有效黏度湍流减阻模型;建立了添加剂分子的椭球-珠簧二元模型,分析了分子链在稀溶液中的动力学行为;选用 Oldroyd-B 型黏弹性本构方程,建立了小间隙同心旋转圆柱间溶液的非线性动力学模型,分析了添加剂对系统稳定性的影响;采用有机玻璃滑动轴承实验分析了添加剂对油膜层流稳定性的作用,并讨论了轴承振动对油膜层流失稳的影响。

理论分析表明,少量高分子添加剂能显著提高油膜的层流稳定性,推迟流体由层流向湍流的转变。添加剂分子在油膜流动作用下受剪切拉伸,分子链得到柔顺伸展,增大了流体对扰动流场的干涉作用,减小了漩涡的产生,抑制了漩涡的发展,提高了流体的层流稳定性。由于分子的变形和旋转,增大了流体内部能量耗散,宏观上表现为有效黏度的增大,而且间隙比越小,剪切率越大,效果越显著。

对油膜非线性动力系统分析表明,临界 Taylor 数不仅与轴向波长有关,而且与流体性质有关。当 Taylor 数达到某一临界值  $Ta_c$  时,系统出现两个稳定的分岔,对应 Taylor 涡的发生。弱弹性流在  $Ta = Ta_c$  时,系统出现超临界分岔,大扰动下,系统出现同宿轨道,最终发生混沌;而强弹性流在  $Ta = Ta_c$  时,系统存在亚临界分岔,最终以倍周期分岔走向混沌。

实验研究表明, 高分子添加剂的减阻作用主要发生在过渡区和湍流区, 而对层流区几乎没有影响。轴承的振动加速了油膜的层流失稳, 其中振动强度和低频振动影响较大, 而高频振动影响较小。

本研究得到国家自然科学基金项目资助 (No. 10602019)

# 目 录

|                                        |      |
|----------------------------------------|------|
| <b>第 1 章 绪论</b> .....                  | (1)  |
| 1.1 对轴承间隙非牛顿润滑剂的非线性动力学<br>研究的意义 .....  | (1)  |
| 1.2 国内外研究现状综述 .....                    | (4)  |
| 1.3 主要研究工作和技术路线 .....                  | (13) |
| <b>第 2 章 流态分析及有效黏度模型</b> .....         | (16) |
| 2.1 概述 .....                           | (16) |
| 2.2 黏弹性流体的两种层流状态 .....                 | (17) |
| 2.3 有效黏度模型 .....                       | (18) |
| 2.4 无限长同心旋转圆柱间溶液的流动分析 .....            | (21) |
| 2.5 算例与分析 .....                        | (27) |
| 2.6 本章小结 .....                         | (32) |
| <b>第 3 章 聚合物的流体动力学行为研究</b> .....       | (33) |
| 3.1 概述 .....                           | (33) |
| 3.2 模型的建立 .....                        | (34) |
| 3.3 动力学行为研究 .....                      | (38) |
| 3.4 聚合物稀溶液的黏度特性 .....                  | (41) |
| 3.5 本章小结 .....                         | (45) |
| <b>第 4 章 无限长偏心圆柱间聚合物稀溶液的流动分析</b> ..... | (47) |
| 4.1 概述 .....                           | (47) |
| 4.2 层流解 .....                          | (48) |
| 4.3 过渡区流动分析 .....                      | (57) |

|      |                          |       |
|------|--------------------------|-------|
| 4.4  | 聚合物添加剂——流体耦合 .....       | (64)  |
| 4.5  | 计算结果与分析 .....            | (65)  |
| 4.6  | 本章小结 .....               | (72)  |
| 第5章  | 聚合物稀溶液流动的非线性动力学分析 .....  | (73)  |
| 5.1  | 概述 .....                 | (73)  |
| 5.2  | 数学模型的建立 .....            | (74)  |
| 5.3  | 稳定性分析 .....              | (82)  |
| 5.4  | 数值分析 .....               | (87)  |
| 5.5  | 本章小结 .....               | (93)  |
| 第6章  | 聚合物稀溶液层流失稳实验研究 .....     | (95)  |
| 6.1  | 概述 .....                 | (95)  |
| 6.2  | 实验装置 .....               | (96)  |
| 6.3  | 添加剂 .....                | (97)  |
| 6.4  | 实验结果 .....               | (99)  |
| 6.5  | 本章小结 .....               | (105) |
| 第7章  | 轴承振动对油膜层流失稳影响的实验研究 ..... | (107) |
| 7.1  | 概述 .....                 | (107) |
| 7.2  | 实验方案 .....               | (108) |
| 7.3  | 实验结果与讨论 .....            | (110) |
| 7.4  | 分析与讨论 .....              | (113) |
| 7.5  | 本章小结 .....               | (116) |
| 后记   | .....                    | (117) |
| 参考文献 | .....                    | (120) |

# 第 1 章

## 绪 论

### 1.1 对轴承间隙非牛顿润滑剂的 非线性动力学研究的意义

设计滑动轴承时,一般设定润滑油膜在层流工况下工作。然而,随着低黏度润滑油的广泛使用和高转速、大尺寸转子的发展,多数机组轴承均工作在超层流速度——Taylor 涡旋区,甚至在湍流条件下。当润滑油膜工作在层流向湍流的过渡区或湍流区时,会导致轴承的摩擦阻力矩迅速增加,功耗增大,并使轴承的工作性能大大恶化,严重时会发生轴系断裂,造成严重事故。1972 年,我国朝阳电厂的 200 MW 机组投入运行时出现油膜失稳和油膜振荡;1985 年,韶关电厂 8 号机组、通辽电厂 2 号机组和徐州电厂 6 号机组先后出现油膜失稳和油膜振荡;同年 10 月,大同电厂一台 200 MW 汽轮发电机组发生重大毁机事故;1988 年,秦岭电厂一台 200 MW 汽轮发电机组作超速试验时,30 多米长的转子断为 13 段,直接经济损失达几千万元。专家调查指出<sup>[1]</sup>,这次事故是由油膜振荡开始的突发性、综合性的大振动引起轴系的严重破坏,该机组的轴系稳定性裕度偏低和转速急剧飞升到 3 500 ~ 3 600 r/min 是酿成这次事故的重要条件。引起转子振荡的因素很多,而滑动轴承是轴承转子系统中的重要部件,它的工作性能对系统的稳定性有重要的影响。因此,对润滑理论及滑动轴承的研究一直受到人们的高度重视。

研究轴承油膜的 Taylor 涡动对研究轴承流体动力油膜稳定性具有重要意义。自 1923 年 Taylor<sup>[2]</sup>发现无限长同心旋转圆柱之间的流体,当圆柱旋转速度提高到一定值后出现有规律的沿轴向均匀分布的环状

涡动以来,国内外许多学者<sup>[3]~[10]</sup>在 Taylor 涡动的产生、发展及其影响等问题上进行了大量的研究工作。特别是 1950 年,Willcock<sup>[11]</sup>发现在高速旋转的同心轴承的润滑油膜中也存在着和无限长旋转圆柱间相似的 Taylor 涡,并在实验中发现,当旋转轴速度超过某一数值后,轴承的摩擦力矩、功耗及油膜温升等有一个突然增加现象以后,对 Taylor 涡动现象的研究得到了更进一步的重视和发展。Gardner 等人<sup>[12]</sup>在研究实际工作的汽轮机轴承的静特性随转速的变化情况时发现,在其工作转速范围内,随转速由低到高的增加,轴承功耗及油膜温升曲线有一个明显的转折点,说明轴承中润滑油膜也存在着从层流到湍流的转换点。

湍流的出现对轴承的安全运行产生不利影响,所以要设法推迟湍流的发生,或者研究湍流的机理改进轴承的设计。由于湍流运动的复杂性,目前对湍流的认识尚不完全清楚,对其机理的研究没有一致的认识,相应的湍流润滑机理尚不完善,设法推迟湍流的发生是提高轴承性能的重要途径之一。

从轴承运行角度考虑,在轴颈转速不变的工况下,可以通过减小轴承中油膜相对轴承的速度来达到推迟湍流的目的。Bently 转子动力学研究所<sup>[13]</sup>在气体轴承上采用反涡动技术,如图 1-1 所示,使进气速度与轴颈速度方向相反,降低空气相对轴承的速度,从而达到推迟湍流发生,稳定轴承运行的目的。在油润滑轴承中若采用这一技术必须有很高的进油压力,这势必会增大辅助设备的投入。李小江<sup>[14]</sup>从

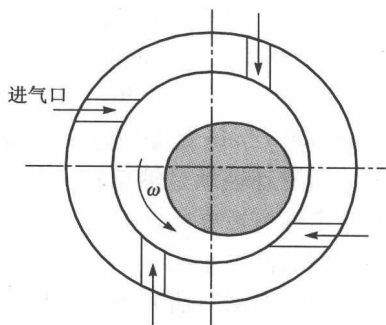


图 1-1 Bently 气轴承简图

结构角度考虑, 在油轴承中的径向安装径向挡板来阻挡油的流动, 达到推迟湍流的目的, 如图 1-2 所示。

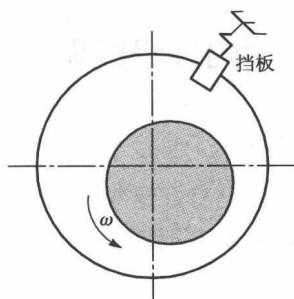


图 1-2 挡板轴承结构简图

在牛顿流体中加入少量高分子聚合物或其他有关物质（如细颗粒泥沙等），均可以使流体发生某种变化，从而使流体的运动稳定性提高，使湍流阻力大幅度降低，形成减阻流。这种现象首先由 Toms<sup>[15]</sup>发现，目前已引起了化学界、物理学界和流体力学界的广泛关注，进行了大量的实验研究。由于利用这种性能，可以在工程技术上和节约能源方面取得重要效果，许多领域的科技人员都在开展这方面的应用研究。目前在工程技术上的应用研究主要集中在管道运输、消防以及军事领域等，而且已进行了大量的实验和理论研究<sup>[16-18]</sup>。对 Taylor-Couette 流的研究也得到了相似的结论，高分子添加剂具有推迟流体层流失稳和提高流体稳定性的作用<sup>[19-21]</sup>。本研究从添加剂的角度考虑，研究高分子添加剂推迟轴承间油膜层流失稳，提高轴承油膜稳定性的机理，探讨高分子添加剂在轴承润滑油中的应用前景。对减阻添加剂减阻机理的研究，不仅在工程上具有现实的应用价值，而且对流体润滑理论的进一步发展，对湍流发生机理的研究等均具有重要的理论意义。

对实际滑动轴承油膜运动的研究，要求解的 Navier-Stokes 方程是一个三维的高阶非线性偏微分方程组，比较复杂，困难很大。由于滑动轴承和两个旋转圆柱之间的流动具有某些相似性，因此研究旋转圆柱间流体的流动问题，对径向滑动轴承的研究具有重要的指导意义和

参考价值。本研究主要针对旋转圆柱间油膜流动工况,探讨高分子添加剂的作用机理和应用前景。

## 1.2 国内外研究现状综述

### 1.2.1 润滑理论的研究

人类对润滑作用的认识已有几千年的历史。早在五千年以前,我国及古埃及等国家的人民就知道把动物脂肪加于车轮的轴承中去,以减少机件间的摩擦和磨损<sup>[22]</sup>。但对润滑理论的系统研究则要源于英国铁道工程师 B·Tower 发现的有趣现象。1883 年, Tower<sup>[23]</sup> 在改进机车车轮的轴承润滑时个意外发现在轴承的受力面存在流体动压现象。这个意外地发现启发了英国流体力学家 Reynolds, 他应用数学和流体力学理论完善地解释了 Tower 的实验, 推导了著名的雷诺方程, 奠定了流体润滑理论的基础<sup>[24]</sup>。此后, Sommerfeld 和 Michell 分别于 1904 年和 1929 年对有限长圆柱轴承和无限短轴承求得了雷诺方程的解析解和近似解<sup>[22]</sup>, Ocvirk 等<sup>[25]</sup> 于 1953 年进一步发展了短轴承理论, 使之在工程上获得了实际应用。

“二战”后, 由于数值计算技术的进步, 流体润滑理论的发展得到繁荣。有限长径向轴承以及油膜破裂边界条件的数值解的研究使之得到更为实用的价值。随着高速旋转机械的发展, 流体动力的稳定性以及非稳恒运转工况下的润滑性能成为研究的对象。

20 世纪 40 年代末期, Ertel 和 Глубин 针对线接触和点接触摩擦副的润滑问题, 考虑表面弹性变形和润滑油黏压效应, 将 Reynolds 润滑理论和 Hertz 弹性接触理论结合起来, 奠定了弹性流体动力润滑的基础<sup>[26]</sup>。此后, Dowson<sup>[27]</sup>、Higginson<sup>[28]</sup>、H·S·Cheng<sup>[29]</sup> (郑绪云) 及温诗铸<sup>[30]</sup> 等许多学者都对此作了深入的研究, 使弹性流体动力润滑理论日趋完善, 已经形成了润滑理论中的一个重要分支。

随着对轴承工作要求的提高和科学技术的发展, 尤其是计算机技术的长足进步, 使过去被认为是次要的因素, 如温度、湍流问题、惯性效应、非牛顿流体等对润滑性能的影响都成为研究的课题。此外,

在流体动力润滑被用到间隙厚度极小的工况时,还考虑了表面粗糙度以及润滑剂不能被当做连续介质看待等因素的影响。虽然这些问题目前尚未完全解决,但已取得了一定的进展,使润滑理论不断趋于完善。

在润滑技术中,流体动力润滑由于其较高的可靠性,一直是润滑设计的目标,在润滑技术中占据着中心位置。但是建立流体动力润滑需要一定的工况,如滑动的相对速度、供压及载荷的大小、润滑剂的黏度等。如这些条件不能实现,边界润滑便起着举足轻重的地位。虽然边界润滑的应用历史很久,但对它的认识还很少。在常温下,润滑剂内的极性分子吸附在金属表面上或形成物理吸附膜或同金属化合为金属皂而形成化学吸附膜;在重载条件下,接触温度较高,吸附膜溶解失效,此时必须在润滑剂中加入含硫、磷或氯等元素的“极压”添加剂,这些元素在高温中能够同金属表面生成化学反应膜,以达到减摩的作用。“极压”添加剂的研究近年来发展迅速,一些含硼、铜、氮及稀土等元素的新型润滑剂得到广泛使用,起到了很好的润滑效果<sup>[31]~[33]</sup>。对极压条件下边界润滑的研究,近年来还开拓了薄膜润滑等新领域<sup>[34][35]</sup>。但目前对于边界润滑膜的承载能力、摩擦力大小及具体的生成条件等仍不能定量地推算。

润滑理论经过一个多世纪的发展,已取得了很大的成就。但针对各种工况下流体动力润滑的建立仍需深入细致地研究,如本研究对轴承油膜由层流向湍流过渡区的研究,旨在从一个侧面完善流体动力润滑理论,为工程应用和机械设计提供参考依据。

### 1.2.2 油膜过渡区的研究

对油膜过渡区的认识始于1923年Taylor<sup>[2]</sup>对两同心旋转圆柱间的流动流体的观察。实验发现,随着转速的逐步提高,流体的流态由层流发展而出现一种有规律的涡动状态,即所谓的Taylor涡,如图1-3所示,这是第一次发现由层流到湍流过渡区域的状态。此后,Coles<sup>[3]</sup>等许多人在过渡区的研究领域做了大量工作,分别从理论和实验上研究了无限长同心旋转圆柱间流体的失稳过程。研究表明,这种涡动状态与时间无关,而且是轴对称的。

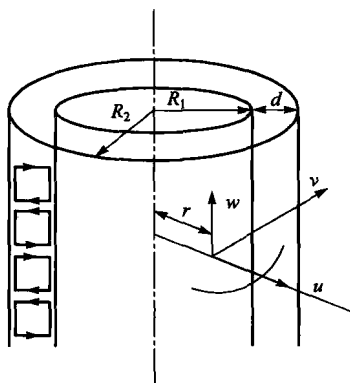


图 1-3 Taylor 涡动示意图

### 1. 无限长同心情况

由于无限长同心问题比较简单,因而对它的研究也比较完善,实验数据比较丰富,理论计算方法也较多。目前,对无限长同心旋转圆柱间流体流动的实验研究主要有两种方法。一种是采用示踪法,这种方法一般适用于间隙较大的情况,用一个透明的有机玻璃作外圆柱,当内圆柱转速达到一定值出现涡动后,以便观察和拍照<sup>[2]~[10]</sup>。另一种方法是摩擦阻力矩法,常用于间隙较小的工况,通过测量圆柱表面上摩擦阻力矩随转速变化直线斜率的转折点判断流体的层流失稳点<sup>[36][37]</sup>。实验结果表明,在较低转速下,旋转圆柱间的流体呈层流状态,即 Couette 流;当转速提高到一定值后,轴向出现有规律的均匀分布的环状涡动,即所谓的 Taylor 涡,此时涡动的强度不大,摩擦阻力矩随转速变化基本上保持直线关系;随转速的进一步提高,涡动强度迅速增加,摩擦阻力矩随转速变化的直线斜率也突然增加,发生转折,此时涡动保持着稳定的状态,与时间无关;随着转速的继续增加,稳定的涡动状态开始失稳,在周向也出现了扰动,进入所谓的 Wavy 涡旋区,此时周向涡动随时间周期性变化;如果再提高转速,流体最终进入湍流状态。实验观察发现,流体出现 Taylor 涡后,涡动是稳定的,并且涡的轴向波长近似相等。据此, Taylor 对同心旋转圆柱间的流体流动问题进行理论分析时作了假设:临界状态时,涡动与

时间无关, 波长在轴向均等, 同心条件下, 涡是轴对称的。Taylor 利用简正模法在层流解上加一个小扰动, 将流体流动的稳定性问题化简为特征值问题, 采用贝塞尔函数理论分析了层流失稳后涡的流场及压力场分布状态和涡的结构, 得出涡的轴向波长近似等于圆柱的直径间隙。经过相当烦琐的推导后得出了表征无限长小间隙圆柱间层流失稳的量纲为 1 的特征数, 即临界 Taylor 数

$$Ta = \frac{R\omega c}{\nu} \sqrt{\frac{c}{R}} \quad (1.1)$$

式中  $R$  ——内圆柱半径, m;

$\omega$  ——旋转角速度, rad/s;

$c$  ——半径间隙, m;

$\nu$  ——运动黏度,  $\text{m}^2/\text{s}$ 。

Taylor 得到其临界值为  $Ta = 41.2$ , 并由实验得到了验证。张直明<sup>[38]</sup>和徐海波<sup>[10]</sup>采用同样的假设, 用差分法求解了无限长同心问题, 结果比较令人满意。陈守德<sup>[39]</sup>和诸文俊<sup>[8]</sup>用 Simpler 算法, 胡浩川<sup>[9]</sup>用有限元法求解了同样的问题, 也得到了比较满意的结果。此外, Alouso<sup>[40]~[47]</sup>等许多学者都对剪切流失稳的 Taylor 涡进行了计算, 得到了一致的结论。

从式 1.1 可以得到, 当间隙趋于零, 而 Taylor 数趋于定值 41.2 时, 轴的转速趋于无穷, 也就是说间隙越小, 流体失稳时轴的旋转速度越高。Pan 和 Vohr<sup>[48]</sup>指出, 只有当  $c/R > 10^{-4}$  时才会出现 Taylor 涡, 否则流体将直接进入湍流。Diprima<sup>[49]</sup>假设出现湍流的临界雷诺数为 2 000, 推导出只有在  $c/R > 4 \times 10^{-4}$  时才会出现 Taylor 涡。

## 2. 无限长偏心情况

在无限长偏心情况下, 无论在实验方面还是理论计算方面对 Taylor 涡的研究远不及同心情况。由于间隙较小, 实验测量流场的速度和压力困难较大。Raj 和 Lakshminarayana<sup>[50]</sup>采用三维探针测量了流场的速度分布, 但由于探针体积大, 对流场影响较大。此外, 偏心情况下, 周向有压力梯度, 油膜容易破裂, 给实验带来较大困难。目前多数研究者采用示踪法和摩擦阻力矩法研究临界 Taylor 数。其中, Coles<sup>[51][52]</sup>采用示踪法、Bai<sup>[53]</sup>用示踪法和高速摄影技术观察了流态

的变化过程, Vohr<sup>[37]</sup>、徐海波<sup>[10]</sup>用示踪法和摩擦阻力矩法观察和测量了流态的转变历程和临界 Taylor 数。实验结果表明, 在偏心工况下, 临界 Taylor 数随偏心率的增大而单调增加, 涡的轴向波长近似相等。实验发现, 采用摩擦阻力矩法得到的临界值比用示踪法直接观察的结果要大。

在理论计算方面, Diprima<sup>[49]</sup>和 Ritchie<sup>[54]</sup>最先用局部理论在小间隙假设下用不同方法进行计算。结果表明, 流动在最大间隙处最先失稳。此后, Diprima 和 Stuart<sup>[55]</sup>于 1972 年用线性整体理论进行分析, 以偏心率为小参数, 用参数展开法求解了偏心情况下的临界 Taylor 数, 计算结果在偏心率较小时与实验数据比较吻合。1975 年 Diprima 和 Stuart<sup>[56]</sup>又采用非线性理论分析计算了临界 Taylor 数, 1978 年又进一步作了改进<sup>[57]</sup>, 计算结果与实验数据取得了基本一致。此外, 许多学者还采用了诸如流函数-涡量法<sup>[9]</sup>和原始变量法<sup>[10]</sup>等多种方法进行了研究。流函数-涡量法求解  $N-S$  方程是用流函数代替连续方程, 将速度和压力分开来求解, 求解较为方便, 但它只适用于二维问题。三维情况下多采用原始变量法, 这种方法必须解决约束方程中连续方程时满足这个条件, 给问题的处理带来较大的难度。对无限长偏心工况的研究虽然取得了一些成果, 但如何准确、简便地求解  $N-S$  方程以求得速度场和压力场仍然是目前需要研究的主要问题。

### 3. 有限长情况

在有限长情况下分析的流动控制方程是三维的, 理论分析难度更大, 但由于对它的分析具有最现实的意义, 所以许多学者都作了大量工作, 目前对它的理论研究落后于实验研究。在有限长情况下, 由于端部的影响, 实际 Taylor 涡并不是突然发生的, Coles<sup>[51]</sup>和 Jackson<sup>[58]</sup>的实验观察表明, 涡的发展是从端部开始逐步向中间发展的。徐海波<sup>[10]</sup>也发现了同样的现象, 并且指出, 轴向流动提高层流失稳的临界转速, 而且无论在同心还是偏心情况下, 由于端部影响都有涡动强度分布不均现象, 以及大涡夹小涡现象。理论研究的焦点在于如何高效准确地求解三维  $N-S$  方程。虽然许多学者提出过不少方法, 如 Chien<sup>[59]</sup>引出了一个节点衰减函数, 用局部一维的概念, 发展了一种差分格式, 使差分格式在中心差与前后差之间随雷诺数自动调节;

Roscoe<sup>[60]</sup>发展了一种二阶精度的差分格式,在低雷诺数下取得了较好的结果;Patankar 和 Spalding<sup>[61]</sup>将 N-S 方程简化为抛物型方程求解三维黏性流场;何子干等<sup>[62]</sup>将求解区域分成若干层,把层间的差分法和层内的二维计算方法结合在一起,在每层上利用涡函数-流量法求解;苏明德等<sup>[63]</sup>用谱方法求解 N-S 方程等,但是目前还没有真正简便、有效、准确的方法求解三维 N-S 方程。徐海波<sup>[10]</sup>曾花了大量时间,找到了一种降低非线性作用的方法,从而可以使用中心差分格式,既提高了差分格式精度又不使计算发散,效果比较理想。

总之,无论从实验上还是理论上,对旋转圆柱间层流流动失稳问题均取得了一定成果,但对实际轴承中油膜在过渡区流动问题的研究还处在初步阶段,认识还不够完善,深入开展这项研究对提高高速旋转机械的运行稳定性和安全性具有重要的理论和实用价值。

### 1.2.3 湍流减阻的研究

所谓湍流减阻是指在流体中溶入少量的长链高分子添加剂或其他物质可以降低流体在湍流流动时的阻力,提高流体的稳定性,推迟流体层流失稳的现象。这种现象首先是由 Toms 发现的,所以又称 Toms 效应。1948 年 Toms<sup>[15]</sup>将少量的聚甲基丙烯酸甲酯溶于氯苯,让此溶液通过一根管子,并测定流经管子的阻力,他发现溶液在湍流时的流动阻力比原来纯氯苯溶剂的流动阻力还小得多。高分子化合物的这种异常性能引起了科学界和工程界的广泛关注,尤其在 20 世纪六七十年代,对 Toms 效应的研究最为繁荣。从 1967—1975 年,每年在公开刊物上发表的关于添加剂减阻的论文均在百篇左右<sup>[64]</sup>。尽管如此,由于对添加剂减阻的研究涉及高分子物理、化学、流体力学、流变学、动力学等多种学科,非常复杂,目前有关减阻机理的许多问题还远未解决。例如,在现有理论中还没有一种可以全面解释减阻的各种特征。近年来,涉及基础性质的研究工作已明显减少,这种变化表明,经过多年密集的研究工作之后,湍流减阻进入了更艰难的新的研究阶段。

#### 1. 实验研究

经过 50 多年的研究,在实验工作方面取得了很多成果,尤其在

管流方面。对管流的研究主要关注的是流体阻力的下降,这可以从管口的压力降得到方便的验证。Virk<sup>[65]</sup>、Paterson 和 Abernathy<sup>[66]</sup>、Kenis<sup>[67]</sup>等许多学者均对此作了深入的研究。结果证明:减阻现象仅仅发生在湍流流动区域;在给定添加剂和给定浓度条件下,管径越小,减阻效果越明显;减阻现象存在一个起始临界和最大极限,这个阈值与添加剂的种类、分子量、浓度等有关;高分子存在降解失效现象。

近年来,激光多普勒测速仪(LDV)被许多学者用来研究高分子减阻的机理。Pinho 和 Whitelaw<sup>[68]</sup>测量了管流中的三维速度场,Harder 和 Tiederman<sup>[69]</sup>以及 Wei 和 Willmarth<sup>[70]</sup>等用二维 LDV 系统对明渠流作了研究。研究指出,添加剂不只简单地抑制了湍流运动,而且改变了湍流结构。总的来看,实验研究工作经过了对宏观现象的观察到流场结构的研究,逐渐向分子微观结构方向发展。目前实验研究工作主要可以归纳为以下几个方面。

### (1) 最小临界浓度

具有减阻能力的高分子聚合物都存在一个浓度阈值,称临界浓度,它与高分子聚合物的种类有关,其最小值称最小临界浓度。Toms<sup>[15]</sup>发现减阻效应时所用的减阻剂为聚甲基丙烯酸甲酯,在氯苯中的最小临界浓度约为 2 000 wppm<sup>①</sup>。1970 年, Peterson 和 Abernathy<sup>[66]</sup>使用经抗自然降解处理的聚氧化乙烯(PEO)进行实验,在 0.1 wppm 开始发生减阻,是当时所能达到的最小值。1983 年, Oliver 等<sup>[71]</sup>用聚丙烯酰胺 E10 及 MG-200 等作减阻剂,在水溶液中的最小临界浓度为 0.02 wppm,与 Peterson 等的实验相比再降一个数量级。如此极稀的溶液说明促使减阻的基本单元应当是分散的个体。而在剪切流中,分散个体可能通过两种途径作用:一种是若干大分子局部物理化学凝结;另一种是大分子强烈旋转及变形导致动力学远场效应。最小临界浓度的研究对认识减阻剂分子的作用模式以及从微观水平研究减阻机理具有重要意义。

### (2) 湍流猝发过程的测量

① 1 ppm =  $10^{-6}$ 。1 wppm 表示质量百万分之一。