

高等学校教材

气体润滑技术

党根茂 主编



东南大学出版社

7.2

内 容 简 介

本书系电子工业部电子机械教材编委会无线电专用机械设备教材编审小组评审通过的全国统编教材。

本书内容根据气体润滑具有摩擦很小、无污染、发热微、精度高、耐高温、耐低温、抗辐射和抗电磁干扰等特点，且在机械、电子、仪器、仪表、航空航天、医疗器械、纺织机械等领域中已有广泛应用，着重介绍气膜形成原理、气膜支承的结构设计及其应用。全书八章，即绪论、基本方程、静压润滑、动压润滑、新型支承、雷诺方程的有限差分法、气体轴承材料与制造和气体润滑的应用实例。

本书主要作为高等院校电子精密机械、精密机械仪器等专业的教材，也可供有关科研单位、厂矿企业的科技人员参考。

气体润滑技术

党根茂 主编

东南大学出版社出版

南京四牌楼2号

江苏省新华书店发行 东南大学印刷厂印刷

开本787×1092毫米 1/32 印张8.5625 字数196.83千

1990年6月第1版 1990年6月第1次印刷

印数1—1500册

ISBN 7—81023—315—4

TH·17

定价：1.70元

责任编辑：洪焕兴

责任校对：刘娟娟

出 版 说 明

根据国务院关于高等学校教材工作分工的规定，我部承担了全国高等学校、中等专业学校工科电子类专业教材的编审、出版的组织工作。由于各有关院校及参与编审工作的广大教师共同努力，有关出版社的紧密配合，从1978年至1985年，已编审、出版了两轮教材，正在陆续供给高等学校和中等专业学校教学使用。

为了使工科电子类专业教材能更好地适应“三个面向”的需要，贯彻“努力提高教材质量，逐步实现教材多样化，增加不同品种、不同层次、不同学术观点、不同风格、不同改革试验的教材”的精神，我部所属的七个高等学校教材编审委员会和两个中等专业学校教材编审委员会，在总结前两轮教材工作的基础上，结合教育形势的发展和教学改革的需要，制订了1986~1990年的“七五”（第三轮）教材编审出版规划。列入规划的教材、实验教材、教学参考书等近400种选题。这批教材的评选推荐和编写工作由各编委会直接组织进行。

这批教材的书稿，是从通过教学实践、师生反映较好的讲义中经院校推荐，由编审委员会（小组）评选择优产生出来的。广大编者、各编审委员会和有关出版社为保证教材的出版和提高教材的质量，作出了不懈的努力。

限于水平和经验，这批教材的编审、出版工作还会有缺点和不足之处，希望使用教材的单位，广大教师和同学积极提出批评建议，共同为不断提高工科电子类专业教材的质量而努力。

电子工业部教材办公室

前 言

本教材是根据原电子工业部工科电子类专业教材1986~1990年编审出版规划,由电子机械教材编审委员会无线电专用机械设备教材编审小组征稿、审定并推荐出版。责任编辑为电子科技大学王庭树。

本教材由东南大学党根茂主编,东南大学汝元功主审。

本教材的参考教学时数为40学时。主要介绍气体润滑原理、分类、应用和发展简况,常用基本方程,静压润滑原理及设计方法,动压润滑原理及设计方法,新型气体支承,雷诺方程的有限差分法,气体轴承材料与制造,气体润滑的应用实例。全书采用国家法定计量单位。每章后有习题或复习要点。

本教材应在学完《机械原理》、《机械零件》、《液压及气动技术》等课程之后进行讲授。各校可根据自己的实际情况,对教材的内容作适当的增删。

本教材的第一至三章、第四章的第一至三节和五节、第五章的第三至四节、第八章由党根茂编写;第四章的第四节由莫江晓编写;第五章的第一至二节、第六章的第三节和第七章由刘嘉楨编写;第六章的第一至二节由张华富编写。

在编写过程中,王元明教授给予了热情支持和指导。在此,致以深切的谢意。

由于编者水平有限,书中难免有不当或错误之处,殷切希望读者批评、指正。

编 者

1989年8月

目 录

第一章 绪论

- 第一节 气体润滑原理 (1)
- 第二节 气体润滑分类 (2)
- 第三节 气体润滑的优缺点 (4)
- 第四节 气体润滑的应用 (6)
- 第五节 气体润滑技术的发展简况 (7)

第二章 气体润滑基本方程

- 第一节 纳维-斯托克斯方程 (11)
- 第二节 连续性方程 (13)
- 第三节 常用方程及参数 (15)
- 第四节 雷诺方程 (22)
- 第五节 曲线坐标系中的气体方程 (26)
- 第六节 惯性力的影响 (31)

第三章 气体静压润滑

- 第一节 气体静压润滑系统 (35)
- 第二节 节流器 (37)
- 第三节 气体静压径向轴承 (49)
- 第四节 气体静压推力轴承 (68)
- 第五节 多孔质气体静压轴承 (91)
- 第六节 气体静压组合装置 (101)
- 第七节 气体静压润滑的稳定性 (112)

第四章 气体动压润滑

- 第一节 动压效应 (118)
- 第二节 螺旋槽动压径向轴承 (124)
- 第三节 螺旋槽动压推力轴承 (141)

第四节	可倾瓦式动压轴承	(148)
第五节	气体动压润滑的稳定性	(172)
第五章	新型气体支承	
第一节	动静压混合轴承	(179)
第二节	挤压膜气体轴承	(186)
第三节	薄片动压轴承	(188)
第四节	气垫技术	(191)
第六章	雷诺方程的有限差分法	
第一节	差分与差分方程	(199)
第二节	雷诺方程及其有限差分解法	(209)
第三节	线性方程组的求解	(224)
第七章	气体轴承材料与制造	
第一节	气体轴承材料的选择	(237)
第二节	气体轴承的制造方法	(243)
第八章	气体润滑应用实例	
第一节	气体静压润滑应用实例	(250)
第二节	气体动压润滑应用实例	(258)
主要参考文献	(263)

第一章 绪 论

第一节 气体润滑原理

气体润滑技术是研究气膜形成原理、气膜支承结构设计及其应用的一门先进的实用技术。

气体润滑主要用作设备或仪器的精密、高速支承。气体润滑原理如图 1-1 所示。

气体支承是由支承件 1、被支承件 2 的内表面之间的细小间隙中充入气体而构成。静压润滑一般取间隙 $h=12\sim$

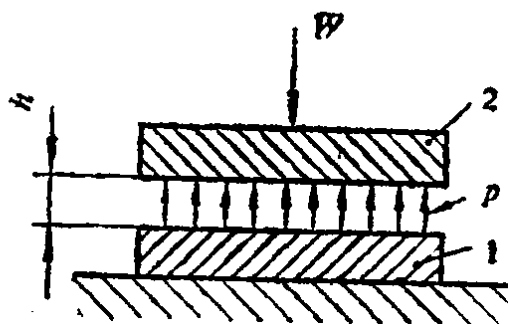


图1-1 气体润滑原理

50 μm ，动压润滑取 $h=10\sim 20\mu\text{m}$ 。该间隙称为润滑间隙。当润滑间隙充满气体，将形成具有一定压力的气膜，把被支承件浮起。只有当气膜厚度 h 大于两个润滑面的粗糙度时，被支承件才会悬浮起来，达到纯气体摩擦。气膜产生的总浮力与负载 W 相平衡时，气体支承才能工作在一定平衡位置，实现气体润滑。气膜浮力越大，其承载能力就越大。由于气体的可压缩性导致气膜厚度随负载增大而减小；反之，当负载减小时，气膜厚度就增大。工程上要求气膜厚度随负载的变化尽可能小，即气膜刚度要大。若气体润滑不稳定，则支承无法工作，因此，稳定性是气体润滑重要问题之一。总而言之，承载能力、气膜刚度、稳定性是气体润滑必须解决的基本问题，是极为重要的

技术指标。

第二节 气体润滑分类

气体润滑应用比较广泛，分类方法也不完全相同。目前，国内外气体润滑的分类方法有如下几种：

一、按用途分类

有：气体轴承、气浮导轨、气体联轴节、气体弹簧、气体丝杆螺母、气垫托盘、气垫船等。

二、按气膜承载机理分类

可分为气体静压润滑、气体动压润滑和挤压膜润滑三类。

气体静压润滑又称外部供压润滑，如图 1-2(a) 所示。气

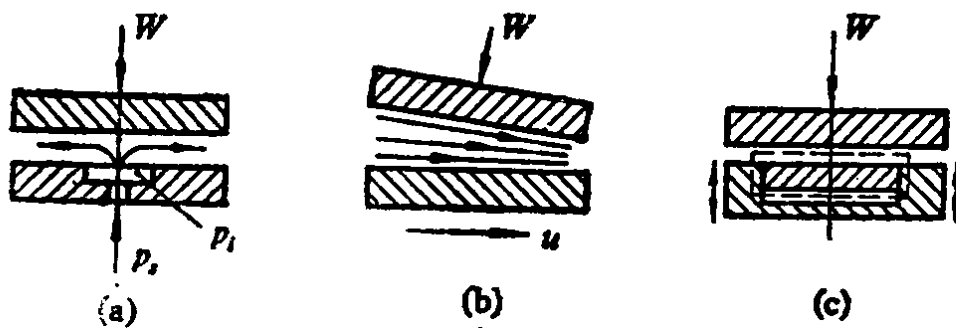


图1-2 气体润滑按气膜承载机理分类

体从外部气源设备供给，经过小孔进入润滑间隙，形成气膜压力，以支承负载。它具有较大的承载能力和刚度，在高速、低速、以至零速时均能正常工作。工作时，由于润滑间隙自始至终充满着压力气体，在支承件（如轴或导轨）的起动或停止工作时无固体接触，因此，无固体磨损。气体静压润滑的适应性强，应用广泛。但是，其突出缺点是要配备一套较为复杂的气源设备。

气体动压润滑又称自作用润滑，如图1-2(b)所示。气体动

压润滑的先决条件是高速转动。当一个润滑表面相对另一个润滑表面运动时，在运动方向又存在楔形间隙，因气体的粘性作用，将气体带入楔形间隙，产生气膜压力，形成动压气浮。由此可见，它无需配备供气设备，是一种最简单的支承系统。其缺点是承载能力小、刚度低，在轴承或导轨起动和停止运动过程中有接触磨损。它适用于高速、航空、航天仪器的支承。

挤压膜润滑如图1-2(c)所示。它是由压电陶瓷或磁致伸缩材料制成的换能器沿支承面的法线方向产生高频振动，使间隙内的气体不断受到挤压，形成压力气膜，产生承载能力。其优

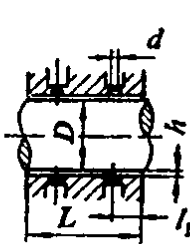
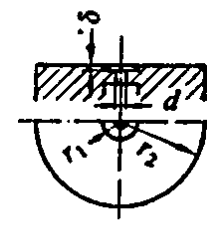
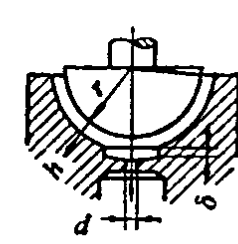
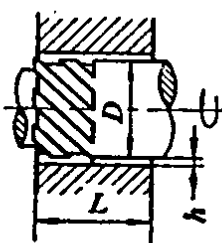
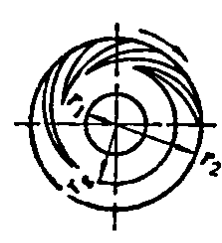
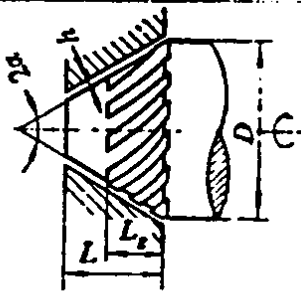
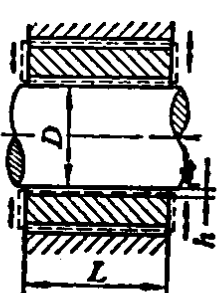
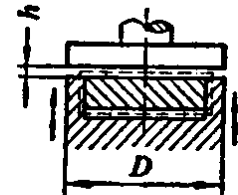
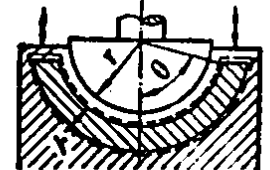



种类		柱形	平面	球形或锥形
静压	小孔节流			
	带螺旋槽			
动压	磁致伸缩			
	挤压膜			

图1-3 按润滑面的几何特征分类

点是结构简单、紧凑，容易调节。缺点是承载能力低，安装较复杂。目前，处在实验研究阶段，工程上还未见到推广应用。

三、按润滑面的几何特征分类

可分为柱面、平面、球面或锥面润滑三类，如图1-3所示。

圆柱形轴颈的径向支承为柱面润滑，常用作径向轴承或轴颈轴承。

圆形、环形或矩形平面的支承为平面润滑。圆形、矩形平面润滑一般用作气浮导轨。环形平面润滑用作推力轴承或止推轴承，以限定转轴的轴向位置，并承受轴向作用力。

球面或锥面支承为球面或锥面润滑，常用作球形轴承或锥形轴承。它可以同时承受径向和轴向负载。在超精密的轴系或分度头中应用较多。

第三节 气体润滑的优缺点

气体润滑同液体润滑比较，有如下的优点和缺点。

气体润滑的优点：

1. 摩擦系数和摩擦力矩很小。气体润滑的摩擦与润滑剂的粘度成正比。气体的粘度约为普通润滑油的 $\frac{1}{1000}$ 数量级，因此气体支承摩擦系数亦为油的 $\frac{1}{1000}$ ，适宜高速工作。例如转速可高达 $(4\sim 5)\times 10^5\text{r/min}$ 。

2. 气体支承可在最清洁的状态下工作。气体可经过过滤、干燥而净化，不污染环境，不腐蚀元器件，最适宜需要超净的电子机械、食品机械、药品机械、医疗机械等无油机械的支承。另外可直接采用系统内循环的气体作为润滑剂，以保持

系统内气体的纯度。如氦气膨胀机是成功地利用这一优点的例证。

3. 具有冷态工作的特点。气体润滑剂摩擦损耗很小，产生热量很小，所生热量又会被流动的气体带走，并且气体膨胀有冷却作用。为此温升小，设备热变形很小，这对精密机械有重要意义。

4. 运动精度高。充满润滑间隙的气体是可压缩流体，它比油更有柔性，使之能够在间隙内平滑地运转。具有一定厚度的润滑间隙，即使润滑面存在凹凸不平，由于气膜的均化效应，因此对运动也不会有什么影响。例如，气体润滑用于精密主轴的支承，由于气膜的均化效应使旋转精度可提高到小于轴表面圆度误差的四分之一，回转精度极高。

5. 寿命长。处于悬浮状态的运转表面，磨损很小，寿命长。气体静压轴承的寿命可长达20年之久，而不必维修。但动压润滑在起动和停止运动时要考虑防止磨损措施。

6. 可以在很宽的温度范围和恶劣环境中工作。例如在高温、低温、辐射、磁场、腐蚀环境中均可工作。高温运行其温度可高达轴承材料的耐热温度，如已应用于高温气体循环机及燃气透平机等机械上的支承。低温运行其温度可低到气体的液化温度，如已应用于膨胀透平机及深冷回转机械上的支承。气体轴承已用于原子反应堆的循环泵轴承。

7. 能够保持狭小的间隙。气体润滑间隙比油润滑间隙小得多，即以非常小的间隙而作无接触的相对运动。利用这一性质，可使电子计算机磁盘、磁鼓的滑块能以极其微小的间隙悬浮起来。

气体润滑的缺点有：

1. 承载能力低、刚度小。承载能力主要取决于润滑剂的

粘性，刚度取决于润滑剂的可压缩性。在低转速下，空气静压轴承的承载能力大约相当于液体静压轴承的二十分之一。

2. 润滑面需要高的加工精度。因为气体粘度很低，必须采用很小的间隙以限制气体的消耗。同时为了提高承载能力和刚度，需要形成很小的气膜厚度。为此，润滑面的制造精度和表面粗糙度必须很高。动压润滑比静压润滑要求更高。通常间隙为数微米至数十微米数量级。

3. 气体的可压缩性容易引起不稳定性。静压润滑易发生气锤现象。动压润滑可能发生涡动现象。设法抑制不稳定性，始终是气体润滑设计必须重视的课题。

4. 气体无自润滑性，润滑面易生锈。动压润滑有短时间的固体接触，需防止磨损。因此，必须注意气体润滑表面的材料选择和表面处理。

第四节 气体润滑的应用

气体润滑具有独特的优点，它是普通支承无法比拟的，因此获得越来越广泛的应用。概括起来有如下的应用领域：无油洁净运转，如电子机械、医疗器械、食品机械、药品机械等；低摩擦、高速运转，如航空、航天惯导系统、各种测试设备、纺织纤维机械等；耐热、耐冷、耐辐射，如高温运转、低温运转、在辐射场中工作等；保持微小间隙，如磁记忆装置等；高精度机械，如精密测量仪器、精密机床等。总之，凡是要求超净、精密、高速、长寿命的场合，均有气体润滑的应用。

气体润滑的应用举例见表1-1。

表 1-1 气体润滑的应用举例

应用举例	润 滑 种 类			润 滑 剂 类 型
	静 压	动 压	动静压	
图形发生器的导轨、减振装置	○			空气
内圆切片机的轴承	○			空气
砂轮切片机的轴承	○			空气
彩色显象管刻线机导轨	○			空气
光盘录制转台主轴的轴承	○			空气
录象机的轴承		○	○	空气
高速摄影机的轴承		○		空气
惯性导航陀螺仪轴承		○		空气
卫星姿态模拟装置支承	○			空气
圆度仪主轴的轴承	○			空气
原子能反应堆循环泵轴承			○	二氧化碳
气流纺织器轴承		○		空气
牙钻轴承		○	○	空气
低温膨胀机轴承		○		氮 气
透平机轴承	○	○		空气、氮气等
气垫托盘	○			空气
气垫船	○			空 气

第五节 气体润滑技术的发展简况

气体润滑技术的发展大致分为三个阶段：

一、萌芽阶段

1854年，法国希尔 (G. Hirn)首次提出了空气作为润滑剂的可能性，即在轴与轴套之间形成气膜，使活动面与静止面避免固体接触。1887年，美国金斯伯利 (A. Kinsbery) 制成了一个空气润滑的径向轴承。1913年，英国加里森 (Harrison) 提出无限宽平板及径向轴承的解，是对气体轴承进行理论分析的著名尝试。在此阶段，对气体润滑理论、工程设计的认识很浮浅，未能进入实用性的工业应用。

二、发展阶段

从20世纪30年代开始，由于仪器及精密机械制造的需要，气体润滑的研究有了新的发展。1932年，美国对陀螺仪上的气体轴承进行了第一次试验。1939年前后，德国为了提高导弹精度，研究出将气体动压轴承应用于惯性导航仪上。1959年，气体动压轴承在美国第一颗人造卫星上应用成功。

在民品方面也得到较多的应用，如高速空气涡轮、气体轴承牙钻、精密磨床轴承、精密镗床导轨、测力计、天平、高速摄影机等支承相继产生。

理论研究和学术空气也比较活跃。国际气体轴承会议(International Gas Bearing Symposium)召开了多届。以应用为主的气体润滑专著相继出版，有力地推动了气体润滑技术工业性应用的步伐。苏联 C. A 申别尔克提出具有决定意义的物理相似准则——可压缩性数 λ 。1962年，罗马尼亚 V. N. Constantinesco 《Gas Lubrication》问世，对气体润滑的理论研究作出了贡献。在动压轴承方面，美籍华人潘宏道博士(Pan. C. H. T)也进行了专门研究。

我国在气体润滑理论研究和工程应用方面起步比较早，取得了一定成绩。在动压润滑方面，20世纪50年代后期就在惯性导航的陀螺仪上着手作了研究，取得了一些成果。1962年第十卷第三期“机械工程学报”上发表了温诗铸等的“静压空气轴承性能的试验研究”论文，代表了当时国内实验研究的水平。1970年国产的DQR-1型圆度仪，使用了空气静压轴承。从1975年开始，召开了多届全国气体润滑学术交流会。中国机械工程学会摩擦学会气体润滑学组于1985年正式成立，将为我国气体润滑理论研究，交流气体润滑技术，加强与国外技术交流发挥积极的作用。

该阶段的特点是，理论与试验研究发展较快，学术空气比较活跃，工业应用比较显著。但是，理论上是近似的，工业设计是经验的、静态的，有待进一步提高。

三、提高阶段

象征气体润滑技术进入提高阶段的依据有以下几方面：

1. 过去多是采用一维流计算方法，它是近似的。现在已开始采用二维流雷诺积分为基础来解决气体润滑问题，这是比较严密的方法。

2. 过去只考虑静态稳定性，现在已认识到动态稳定性是气体润滑技术可靠性的最重要条件。

3. 过去大多采用人工计算方法，现在越来越多地使用计算机计算，为分析多维流提供了方便。

4. 应用现代设计方法分析气体润滑问题，使经验设计逐步向理论设计过渡。开始采用了有限差分法、有限单元法、优化设计、计算机辅助设计和绘图等现代设计方法。

今后，气体润滑技术的发展方向是：

1. 不断提高理论认识和分析方法的水平，向多维、动态、推广应用计算机等方向发展、提高。

2. 有效地提高气体支承的承载能力和刚度。

3. 进一步改进气体支承的制造工艺，提高气体支承的标准化、系列化，大大降低气体支承的成本。

复 习 要 点

1. 何谓气体润滑原理？为适应工程要求，必须着重解决的基本问题是什么？

2. 气体润滑按承载机理可分哪几种？试叙述其特点及应

用。

3. 气体润滑向哪几方面发展？为振兴我国气体润滑技术，我们应该怎么办？

