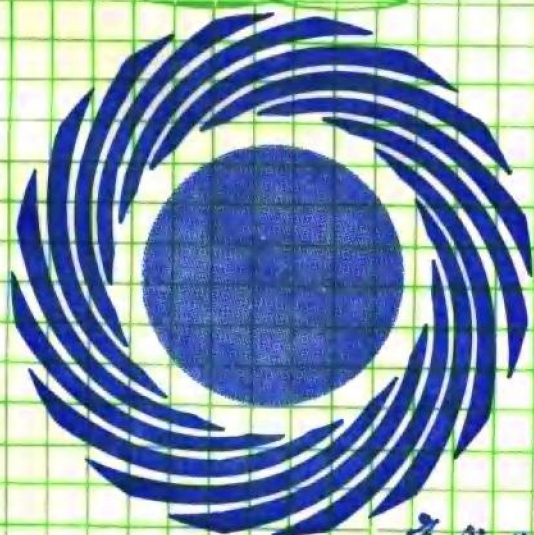
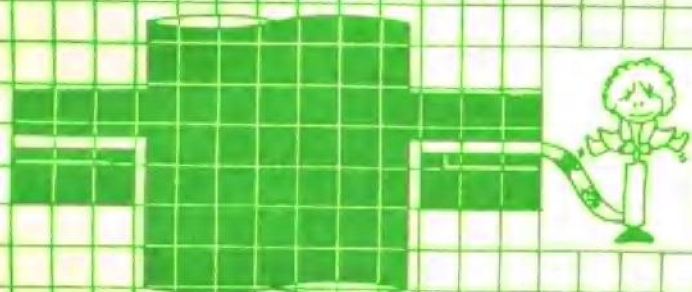


气体轴承

—设计、制作与应用—

〔日〕十合晋一 著 韩焕臣 译



宇航出版社

33.35

内 容 提 要

气体轴承技术是一门先进的实用技术。气体轴承是一种理想的支承元件,它几乎无摩擦、无磨损、无污染,并具有回转精度高,能耐高低温等优良特性。目前已广泛应用于机械工业、精密仪器工业、电子工业、航天航空、医疗器械、药品工业、食品轻纺等各个领域。

本书共6章,介绍气体轴承的特性、原理、设计、制作及应用。重点是结合实例阐明设计方法与制作技术。

本书可供上述专业的科研单位、工矿企业的科技人员,大专院校师生以及其它从事机械、仪器设计的人员使用,并可作为气体轴承设计的工具书。

气 体 轴 承

——设计、制作与应用——

〔日〕十合晋一 著

韩焕臣 译

责任编辑:崔素言

*

宇航出版社出版

新华书店北京发行所发行

各地新华书店经销

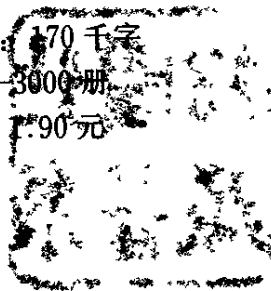
新华印刷厂印刷

★

开本: 787×1092 1/32 印张: 7.5 字数: 170千字

1988年3月第1版第1次印刷 印数: 1—3000册

ISBN 7-80034-049-X/TB·017 定价: 7.90元



译 者 的 话

气体轴承技术是随着高技术的出现而发展起来的先进技术。由于气体轴承是用气体代替油作为润滑剂，所以它几乎无摩擦，无磨损，不发热，对使用环境和使用部位没有任何污染。同时，它还具有回转精度高，能耐低温和高温及辐射等优良特性，因此是一种理想的支承元件。目前在机械工业、精密仪器工业、电子工业以及航天航空、医疗器械、药品工业、食品轻纺、矿山冶金、交通与能源等各个领域中都受到欢迎，得到了非常成功的应用，使用范围越来越广阔。

本书作者十合晋一博士，直接从事气体轴承的研制和应用研究工作近30年，积累了丰富的经验，本书正是在他多年实践的基础上总结编写出来的。本书最显著的特点是注意实际，重点放在设计、制造和应用方面，结合实例阐明设计方法，介绍气体轴承加工制造过程中的实用技巧和技术诀窍。

为了促进气体轴承技术在我国普及和推广，特将此书译出，供有关领域的广大科学工作者、工程技术人员、高等院校和中等专业学校的师生参阅，并可作为气体轴承设计工具书或将书中内容编入机械设计、精密仪器设计等课程教材之中。译者曾在日本京都大学森美郎

教授的指导下，作为气体轴承研究会的一员从事这方面的研究工作，愿同国内同行一道为发展我国的气体轴承技术贡献力量。

译 者

1987 年 2 月

原 著 者 序

19 世纪中期，法国人赫恩(G.Hirn)提出了用气体作为润滑剂的可能性。即，在轴与轴承之间构成气膜，使活动面与静止面避免直接地接触。这就是今日所说的气体轴承的原理。然而，其后相当长的时间，这种方法一直被埋没下来。人们谈起轴承，就认为是专指带油环的油轴承。从本世纪中期开始，气体轴承又迅速崛起，引起了人们的极大注目。随着多方面理论分析工作的广泛展开，气体轴承在许多领域中都得到了应用。如今由于气体轴承具有极其优良的特性，它完全能适应高技术所要求的苛刻的工作条件。

本书介绍了气体轴承的特征、原理、设计、制作方法以及应用现状。由于所论述的项目较多，本书将以实际制作时最有价值的技术知识为主，省略了复杂的理论分析。总而言之，笔者立意向对于气体轴承尚无太多经验的技术人员以及欲尝试应用气体轴承的人们，介绍一些关于气体轴承的制作技术。对气体轴承已有丰富经验的人，有可能稍感不足。为此，在每章之后附有详细的参考文献，在正文之后另附有计算程序等，谨请参阅。

值得庆幸的是，笔者在气体轴承方面承蒙许多卓越的导师和协助者的大力支持。他们是：最初使笔者有机会与气体轴承相识、一直给予亲切教导的恩师——佐藤健児先生；从 1966 年以来直到今天，使作者有幸参加气体轴承研究会的京都大学教授——森美郎先生；介绍给笔者许多宝贵研究成果的气体轴承研究会各位委员，

以及在电子技术综合研究所共同从事气体轴承研究开发的岡野真、水谷亘和川田正国枝官。本书是在他们的大力赞助下撰写成的，在此特向他们致谢。

最后，向给予作者执笔机会并赐予有益教诲的电子技术综合研究所极限技术部部长中山勝矢博士、以及在本书出版中给予多方面支持的共立出版株式会社的瀬水勝良先生也致以谢意。

本书中的插图是水谷浩子绘制的。

作者

1984 年 12 月

目 录

第一章 气体轴承的种类与特征	1
1.1 从滑动轴承、滚动轴承到气体轴承	2
1.2 气体轴承的分类	4
1.3 气体轴承的特征	8
1.3.1 气体轴承的优点及其应用	8
1.3.2 气体轴承的缺点	11
1.4 气体轴承的种类	12
1.4.1 动压气体轴承的种类	13
1.4.2 静压气体轴承的形式	16
参考文献	18
第2章 气体轴承的设计	19
2.1 气体轴承的基本方程式——雷诺方程	20
2.2 动压气体轴承的设计	23
2.2.1 全周动压气体轴承	23
2.2.2 人字槽动压径向气体轴承的设计	34
2.2.3 部分圆弧动压气体轴承——倾斜瓦动压气体 轴承	38
2.2.4 螺旋槽动压止推气体轴承	47
2.2.5 阶梯型动压止推气体轴承	53
2.3 静压气体轴承的设计	57
2.3.1 静压气体轴承的基本性能计算	57
2.3.2 多供气孔静压气体轴承的设计	65
2.3.3 多孔质静压气体轴承的设计	80
参考文献	106

第3章 气体轴承的性能计算	108
3.1 长方形静压止推气体轴承的性能计算	109
3.2 部分圆弧混合式气体轴承	120
第4章 气体轴承的不稳定现象与稳定化方法	130
4.1 气锤现象	131
4.2 同步振动	134
4.3 振摆回转不稳定性	136
参考文献	144
第5章 气体轴承的制作技术	146
5.1 气体轴承的制作要点	147
5.2 倾斜瓦动压气体轴承的制作	153
5.3 螺旋槽动压止推气体轴承的制作	157
5.4 多孔质静压气体轴承的制作	163
5.5 动压气体轴承的表面处理和起动-停止	168
参考文献	174
第6章 气体轴承的应用实例	175
6.1 气体轴承的应用实例一览	184
6.2 静压气体轴承的应用实例	185
6.3 动压气体轴承的应用实例	192
参考文献	199
主要符号	200
附录1 重力单位和 SI 单位的换算	206
附录2 气体常数和粘度	208
附录3—1 长方形静压止推气体轴承的性能计算程序	210
附录3—2 部分圆弧混合式气体轴承的性能计算程序	217

第 1 章 气体轴承的种类与特征

气体轴承的特征，用一句话来说，就是“轻巧、干净、运转平滑，是一种耐热、耐寒的轴承”。由于气体轴承具有这些优良特性，它可以完全满足高技术所要求的苛刻条件，在许多领域中得到应用。同时，对应不同的使用条件，出现了各种各样的轴承形式。



本章介绍气体轴承的原理及特征、应用领域、各种轴承形式，并与其他类型轴承作一些对照比较。从前仙人食薄雾为生，如今轴承不再吃油，而吃气体了。

1.1 从滑动轴承、滚动轴承到气体轴承

如图 1.1 所示，当需要搬动笨重的物体时，人类首先采用的是强拉硬拖而使之滑动的方法。但是，这种方法非常费力，而且与地面的高高低低、凸凹不平有着密切的关系。有一次，人们偶尔将水洒落在地面上，使地面与物体之间润湿。虽然物体被水沾污了，然而活动却轻快了一些。因此，后来当搬动重物时，人们学会了泼洒一些水或者油，这就是润滑的起源。

后来，人们又采用滚动的方法。这种利用圆木的方法，是一个看到圆木棒滚动的聪明人想出来的。即，在被搬动的物体下面，并排垫上数根圆木棒，拖拉物体使之移动。这样，可以使搬动变得很轻松。但是，依然没有摆脱地面高低不平的影响，且物体与圆木棒接触之处，仍旧会被弄脏。以上所述，看来是过去的事，但是如不采用气体轴承，技术水平实际上仍然停留在这样一个阶段上。

如果把需要搬动的物体，用某种方法使它悬浮起来，只要在物体和地面之间存在一层空气，就可以轻轻地使物体移动，且不受地面高低不平的影响，也不污染物体。使物体悬浮的方法有多种，例如：用气球吊挂，给物体装上翅膀，使用磁铁等等。然而，若想使物体仅微微浮起，可以利用笼罩在我们周围的气体的粘性，提高间隙中气体的压力来实现。这种方法，就是气体润滑的方法。

泼洒上油或者水，再来拖动物体，会变得轻松，这是由于在物体和地面之间形成了一个液体层。如果替代油或水，在

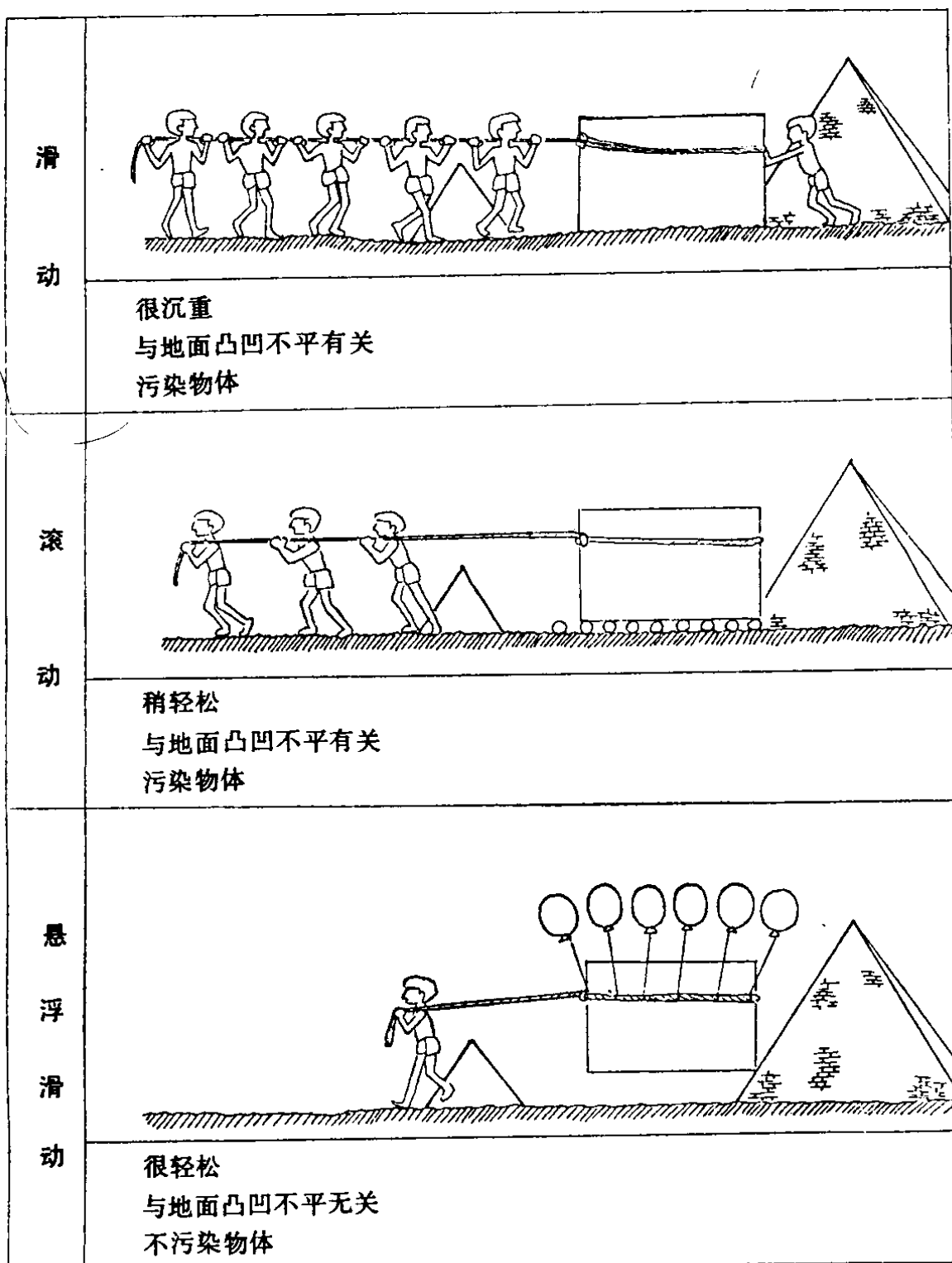


图 1.1 滑动、滚动、悬浮滑动

物体和地面之间能够形成一个以空气为主的气体层，这就是气体轴承。因此，从原理上说，气体轴承和采用油的滑动轴

承是相同的。可以说，只是用气体代替了油。这种应用气体的滑动轴承的设想，是在 19 世纪中叶由法国人赫恩提出的⁽¹⁾。19 世纪末期，金斯伯里 (A. Kingsbury) 对它们进行了实际验证⁽²⁾。其后很长时间，这种轴承被埋没。直到进入 20 世纪 50 年代，随着技术的进步，这种轴承才引起注目，真正发挥出其应有的独特效果。

1.2 气体轴承的分类

如前节所述，所谓气体轴承是利用气体的粘性，提高间隙中气体的压力，从而将物体悬浮起来的轴承。那么，究竟是如何提高气体的压力而使物体悬浮起来的呢？

根据压力产生的原理，如图 1.2 所示，气体轴承大体可以分为动压型、静压型和压膜型。

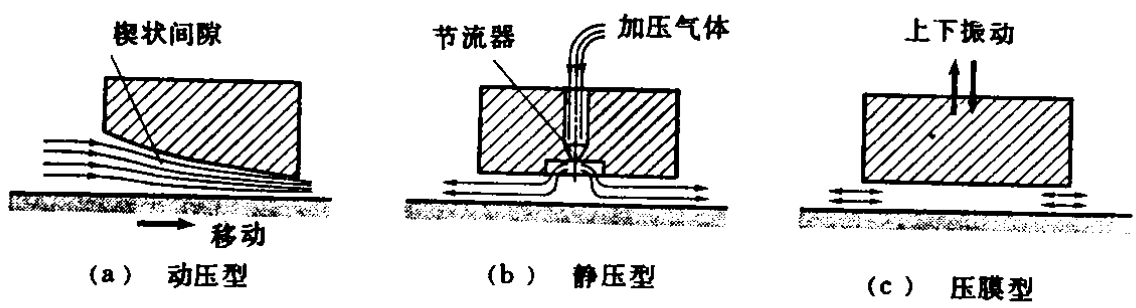


图 1.2 气体轴承的种类

动压型气体轴承，如图 1.2 (a) 所示，两个面相对移动，且间隙呈楔状，沿移动方向间隙逐渐变小。由于相对移动，气

体因其粘性作用，被拖带压入楔形间隙中，从而产生压力，构成动压悬浮。

静压型气体轴承，如图 1.2 (b) 所示，是将外部的压缩气体，通过节流器导入间隙中，借助其静压使之悬浮起来。如后所述，节流器的作用是当间隙变化时，调整间隙内的压力，从而使轴承具有刚度。

压膜型轴承如图 1.2 (c) 所示，是利用了相互接触的面沿垂直方向的振动，使间隙内压力的平均值高于周围环境的压力这一原理。即，由于气体具有粘性，间隙内的气体不能快速出入，从而压力增高。譬如，让一块玻璃板平行地落在一块平滑的板上时，玻璃板会轻轻地落下。从这一现象，就能够理解压膜轴承的原理。

以上三种轴承形式中，目前广泛应用的是动压型和静压型。因此，就这两种形式，以径向轴承为例，对其工作方法稍加详细说明。

图 1.3 所示出的是全周动压径向气体轴承。在此轴承中，轴以角速度 ω 回转，支承负载为 W 。当轴上有负载作用时，轴心 O_s 偏离轴承中心 O_B 而移动一距离 e ，成为偏心状态。偏心位移的方向由负载方向沿着回转方向偏转一角度 φ 。因此，

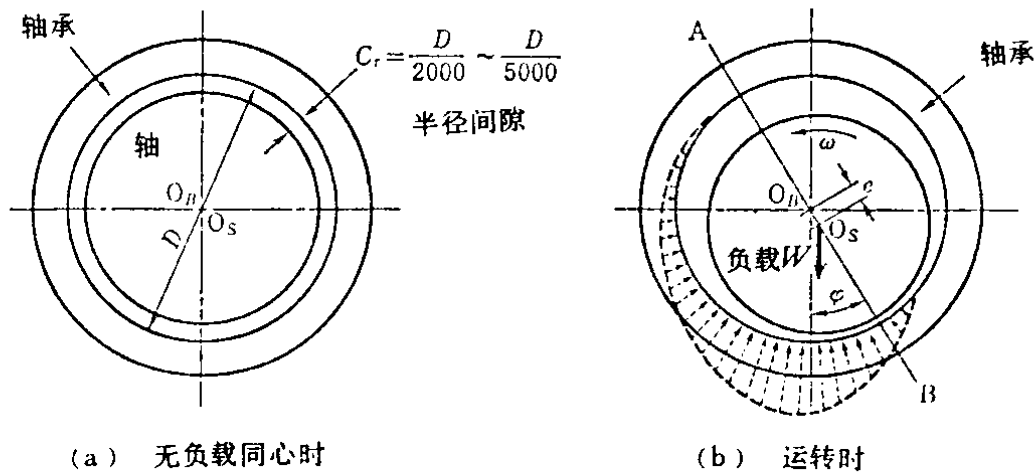


图 1.3 动压径向气体轴承

轴承间隙由 A 向 B 逐渐变狭, 形成楔状间隙。同时, 由于轴的回转, 气体被压入楔状间隙, 产生如图中虚线所示的压力, 由此来支承负载。角度 φ 称为偏心角, e 称为偏心量, e 被半径间隙 C_r 除, 得到值 ε , 称为偏心率。此外, 半径间隙 C_r 是轴颈与轴承直径差值的二分之一。对于动压气体轴承, C_r 的值是轴直径 D 的 $1/2000 \sim 1/5000$ 的量级。 φ 、 e 、 ε 等, 均由轴承尺寸和工作条件来决定。

下面谈谈静压气体轴承。这种轴承一般用于两个面的相对速度不太高, 或者是需要高负载、高刚度的条件下。图 1.4

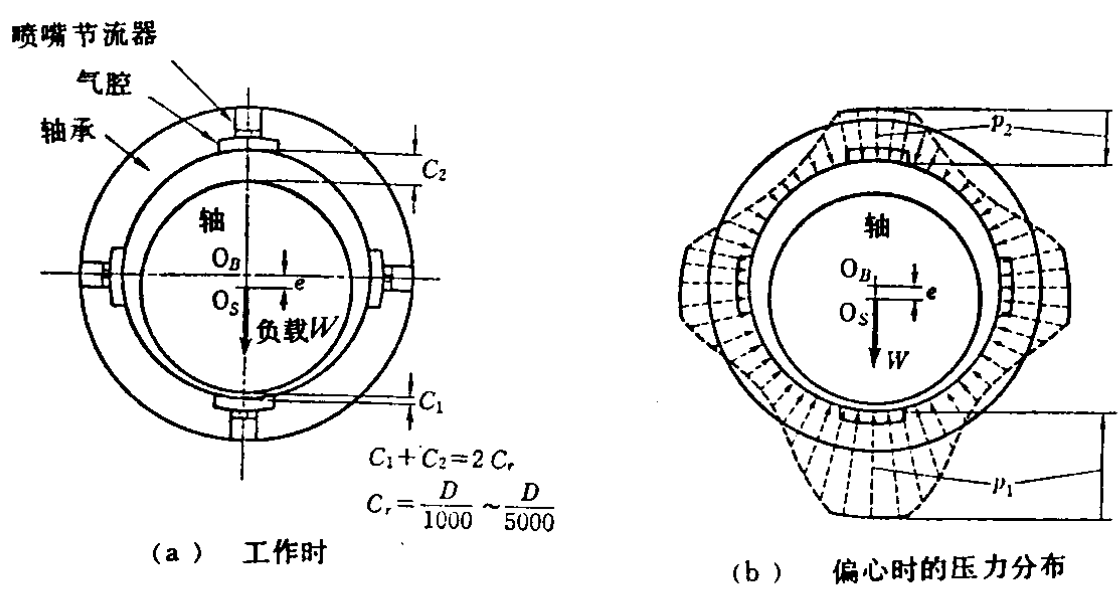


图 1.4 静压径向气体轴承

是带喷嘴节流器的静压径向气体轴承。气体从外部压力源经喷嘴节流器流入气腔, 再通过轴承间隙放出到外部。因此, 气腔中的气体压力取决于节流器的流体阻抗和间隙的流体阻抗。

当轴承上作用一负载 W 时，轴心 O_s 偏离轴承中心 O_B ，向着负载方向相应移动一偏心量 e 。静压型轴承与前述的动压型轴承不同，轴心移动的方向与负载的作用方向一致。但是，这是指相对速度低的情况，而当相对速度增高时，则也会产生偏心角。另外还有一种不能忽视动压效果的静压型轴承，称为混合式轴承。

图 1.4(a) 中，在轴与套靠近的一侧轴承间隙 C_1 变小，间隙的流体阻抗增加。同时，由于节流器的流体阻抗不变，使这一侧的气腔压力 p_1 升高。与此相反，在另外一侧，轴承间隙增加，气腔的压力 p_2 降低。结果，产生图 1.4 (b) 所示的压力分布。由于存在 p_1 和 p_2 的压力差，从而支承了负载。

对于静压气体轴承，半径间隙 C_r 的值一般取直径 D 的 $1/1000 \sim 1/5000$ 量级。在高速回转条件下使用时， C_r 取值较大；而对于测量仪器等低速且要求高的回转精度时， C_r 取值较小。

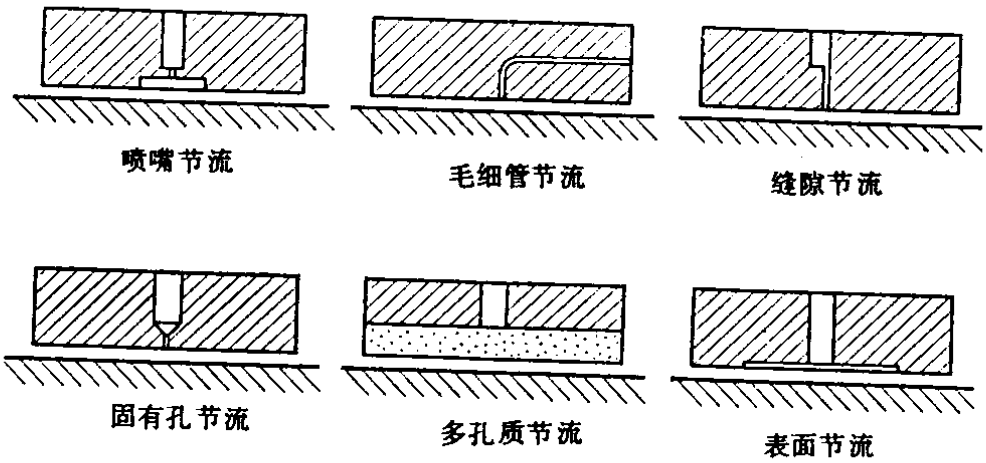


图 1.5 静压气体轴承的节流器

图 1.5 示出用于静压气体轴承的节流器的种类。喷嘴节流器、毛细管节流器及缝隙节流器是分别利用喷嘴、毛细管、缝隙的阻抗起到供气孔节流的作用。而固有孔节流器是由供气孔和轴承间隙所形成的假想圆柱面起到节流器的作用。表面节流器是在轴承面上设置与供气孔连通的极浅的沟槽，沟槽的阻抗就构成了节流。所谓多孔质节流器，是轴承面采用了具有透气性的多孔质材料，多孔质材料的阻抗，起到了供气孔节流器的作用。

1.3 气体轴承的特征

气体轴承的特征，无论是优点还是缺点，都同“不用油”有关。优点用一句话来概括，就是“轻巧、干净、转动平滑，耐热、耐寒、耐久”。而缺点是“承载低、不易掌握、费用昂贵”。

下面就其优点和缺点稍加详细说明，进而阐述在何种领域能够发挥其特长。

1.3.1 气体轴承的优点及其应用

图 1.6 示出了气体轴承的优点及能有效发挥其长处应用领域。以下按照此图，就各项内容加以说明。但是，图的应用例中仅列举了利用某个优点的项目。不言而喻，在实际应用中，往往是一个应用例同时体现几项优点。

(i) 回转轻巧。轴承的摩擦与润滑剂的粘度成比例。气体的粘度仅仅是普通润滑油的 $1/1000$ 数量级，因此轴承摩擦亦为油的 $1/1000$ 。所以，把气体轴承用于轴承摩擦会带来严重问题的高速机械上，或者用于摩擦构成误差来源的陀螺仪