

Y 2763
2-1



QITI ZHOUGHENG DE SHEJI YU ZHIZAO

气体轴承的设计与制造

〔日〕十合晋一 著

刘 湘 译

徐桢基

乔孝纯

陈纯正

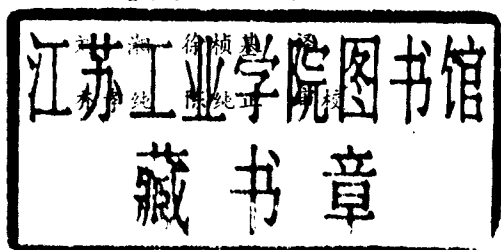
审校



黑龙江科学技术出版社

气体轴承的设计与制造

[日]十合晋一 著



黑龙江科学技术出版社

1988年·哈尔滨

气体轴承-设计
气体轴承-制造

内 容 简 介

气体轴承是近30年发展起来的一种新型支承元件,目前已广泛应用于陀螺仪、精密机床、精密测量仪器、高温及低温透平机械等方面。

《气体轴承的设计与制造》一书,由气体轴承的种类及特征、气体轴承的设计、气体轴承的性能计算、气体轴承的不稳定现象及稳定方法、气体轴承的制造技术、气体轴承的应用实例等章构成,并附有设计例题和计算机计算程序。本书可供从事气体轴承设计制造的工程技术人员和高等院校有关专业的师生参考。

责任编辑:王德新

封面设计:赵元音

气体轴承的设计与制造

[日] 十合晋一 著

刘 湘 徐桢基 译

乔孝纯 陈纯正 审校

黑龙江科学技术出版社出版

(哈尔滨市南岗区建设街 35 号)

哈建工学院印刷厂印刷·黑龙江省新华书店发行

787×1092毫米32开本7印张8插页180千字

1988年3月第1版·1988年3月第1次印刷

印数: 1—1000册

定价: 2.50元

ISBN 7-5388-0299-1/TB·21

作 者 的 话

这本书译成中文，使中国的读者得以阅读，对此我深感欣慰。

当代的技术开发速度惊人。与此同时，对于润滑技术的要求也日益严格。气体轴承以其优良的特征恰恰满足了这种要求。正因为如此，以往只是作为研究对象的气体轴承，目前在很多企业正得已研究开发，其应用领域不断扩大。

作为一本设计、制造气体轴承的入门书，它将使初次从事研制气体轴承的技术人员，更容易领会气体轴承设计与制造的要点。

但愿这本书在中国如同在日本一样，也能为推进气体轴承的开发起到一定作用，这将使我倍感荣幸。

最后，向竭力将本书推荐给中国读者的诸位深表谢意。

十合晋一

1988年2月18日

原 版 序 言

19世纪中期,法国人 G. Hirn 提出了用气体作为润滑剂的方法,即在轴与轴承之间构成气膜,使移动面与静止面不直接接触并指出这种方法具有可行性。这就是当今气体轴承的设计原理。然而,在此后的很多年内,人们似乎忘记了这种方法,总以为轴承就是离不开注油器的东西。直至本世纪中期,气体轴承突然重新引起人们的瞩目,并随着大量的理论研究,在广泛的应用领域中也得到了尝试。目前,气体轴承已经以其优良的特性,充分满足了尖端技术所要求的苛刻的工作条件。

本文论述了有关气体轴承的特征、原理、设计方法、制造方法以及应用现状。由于难以面面俱到,故以气体轴承的制造技术为主,基本省略理论部分。这样做的目的是为那些想采用气体轴承却又缺乏气体轴承制造经验的人们介绍有关气体轴承的制造方法。另外,考虑到已经研制过气体轴承的人们也许会稍感缺憾,所以本书特引用有关文献以供补充参考。

幸运的是笔者在气体轴承研究方面有许多优秀的指导者和协作者,其中有最先给予我接触气体轴承的机会,并承蒙指教的恩师——佐藤健儿先生;有使我自1966年一直参加气体轴承研究会的京都大学教授——森美郎先生;有为我介绍珍贵研究成果的研究会的各位委员;还有在电子技术综合研究所共同致力于气体轴承研究开发的冈野真和水谷亘的两位技

术员以及川田正国技术员。正因为承蒙诸位的协助，本书才得以编成。

最后，向给予我为本书执笔机会，并承蒙有益建议的电子技术综合研究所的极限技术部部长——中山胜矢博士表示衷心的感谢。另外，在本书完稿之际，还得到了共立出版社（株）瀨水胜良先生的大力相助。

本书的插图由水谷浩子绘制。

作 者

1984年12月

译者前言

本书译自日本工业技术院电子技术综合研究所著名工学博士十合晋一所著的《气体轴承——設計から製作まで——》（1984年12月25日版）。本书与其他气体轴承的专著相比，具有以下特点：

①内容丰富。全面介绍动压气体轴承和静压气体轴承的特征、原理、设计方法、制造方法以及各种气体轴承的应用现状。

②重点突出。通过有关设计图表、例题，详细地论述了气体轴承制造技术的要点，基本省略了复杂的理论解析部分。

③技术新、形式多。书中特别介绍了可倾瓦动压气体轴承和多孔质静压气体轴承以及在启动、停车时使用的磁力轴承。相信这将有助于读者了解目前国外气体轴承的现状与发展趋势。

本书由哈尔滨制氧机厂刘湘和江苏吴县制氧机厂徐桢基共同翻译，由中国摩擦学会理事、西安交通大学乔孝纯教授和陈纯正副教授审校。由于时间仓促，译者水平有限，译文中难免有错误和不妥之处，热诚欢迎广大读者批评指正。

目 录

第一章 气体轴承的种类及特征	1
1.1 从滑动、滚动发展到气体轴承	1
1.2 根据原理对气体轴承分类	3
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 静压气体轴承的种类.....	17
参考文献.....	18
第二章 气体轴承的设计	19
2.1 气体轴承的基本方程式——雷诺方程式	19
2.2 动压气体轴承的设计	23
2.2.1 圆柱形动压气体轴承.....	23
2.2.2 人字槽动压径向气体轴承设计.....	34
2.2.3 部分圆弧动压气体轴承——可倾瓦动压气体 轴承.....	40
2.2.4 螺旋槽动压止推气体轴承.....	48
2.2.5 阶梯形动压止推气体轴承.....	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 多数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	81
参考文献	107
第三章 气体轴承的性能计算	109
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	121
第四章 气体轴承的不稳定现象及稳定方法	132
4.1 气锤	132
4.2 同步涡动	134
4.3 自激涡动	137
参考文献	143
第五章 气体轴承的制造技术	145
5.1 气体轴承的制造要领	145
5.2 可倾瓦动压气体轴承的制造	151
5.3 螺旋槽动压止推气体轴承的制造	156
5.4 多孔质静压气体轴承的制造	163
5.5 动压气体轴承的表面处理及启动、停车的方法	168
参考文献	174
第六章 气体轴承的应用实例	175
6.1 气体轴承应用实例一览	175
6.2 静压气体轴承的应用实例	176
6.3 动压气体轴承的应用实例	183
参考文献	189
附录 1 重力单位与SI单位的换算	190
附录 2 气体常数和粘度	191
附录3—1 长方形静压止推气体轴承性能的计算程序	193
附录3—2 部分圆弧混合式气体轴承性能的计算程序	199
主要符号表	211

第一章 气体轴承的种类及特征

气体轴承的特征，简而言之就是：“运转轻快、洁净、平滑、耐高温、耐低温”。正由于具有如此优良的特征，气体轴承才能充分满足尖端技术对轴承所要求的苛刻条件，才能在广泛的领域中得以应用，并且针对不同的使用条件产生了种类不一的形式。

本章介绍气体轴承的原理、特征、应用领域及各种形式，也将各种形式作了比较。

1.1 从滑动、滚动发展到气体轴承

很久以前，当人们要移动很重的物体时（如图1.1所示），最早的方法是滑动法，即用力拖拉。然而，沉重的物体经过地面凸凹处时，会受到无法逾越的阻力。当偶然洒落的水润滑了物体与地面之间的摩擦面时，尽管水污染了物体，却使物体的移动或多或少变得轻快起来。于是人们在移动物体时，便在摩擦面上洒些水。这就是人类运用润滑技术的开始。

而后，人们又掌握了滚动的方法。有人在看到圆木滚动时，产生了利用圆木的灵感——将圆木并排地放到物体下面，当物体受到力的作用时，圆木必然会滚动，这样一来，物体的移动就变得容易了。即便如此，物体不但依然会卡在凸凹的地面上，而且物体与圆木相吻处仍然受到了污染。虽然这都已

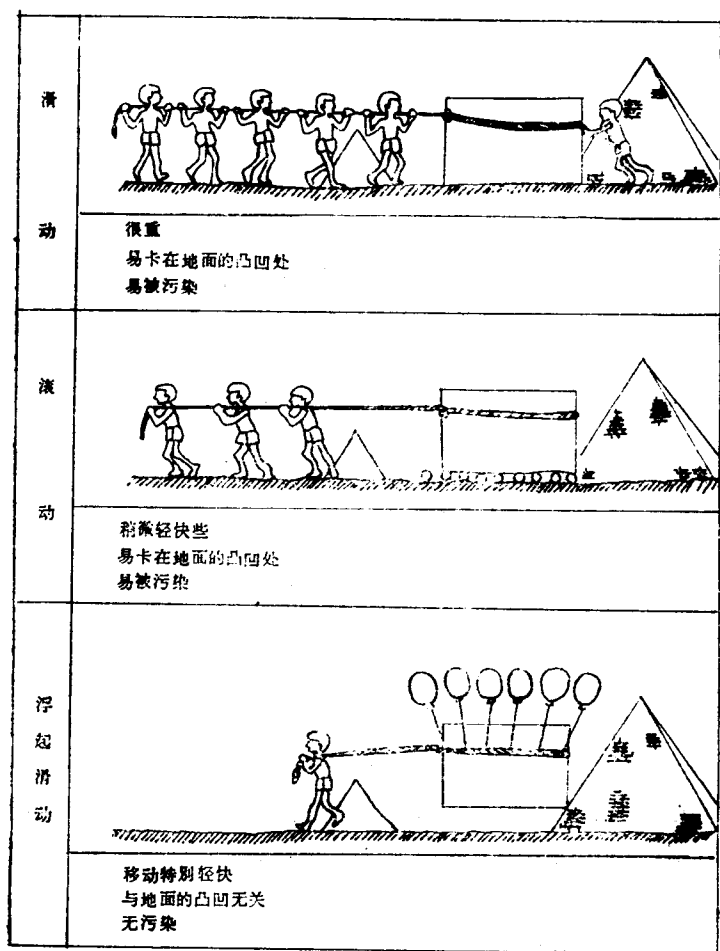


图1-1 滑动、滚动、浮起滑动示意

经成为过去，然而，如果不采用气体轴承的话，那么，当今的轴承技术水平，就将停滞不前。

于是有人设想，如果能采用某种方法使移动的物体浮起来就好了。因为物体与地面之间只有空气相隔，物体的移动就会变得既轻快，又不受地面凹凸不平的影响，而且也不会被污染。要使物体浮起来，一般利用诸如气球、翼以及磁力等方法。假如只是想把物体稍微地浮起来，那么仅需利用物体周围的气体粘性来提高间隙内气体压力便可以了。这种方法就是气体润滑法，也是气体轴承的基本原理。

人们在洒上了油或水的地面上牵引物体之所以感到轻快，其原因是在物体与地面之间形成了油或水的液膜。用空气取代油或水，以空气为主的气体层介入该空间的轴承就是气体轴承。可见，气体轴承与使用油润滑的滑动轴承相比，就其原理而言是大同小异的。所不同的仅仅是，气体轴承是用气体取代了油而已。气体轴承实际应用的可能性，早在19世纪的中叶，法国的 G. Hirn 就提出了^[1]。并且在这一世纪的后期，又被 A. Kingsbury 所证实^[2]。遗憾的是，这种轴承在以后很长一段历史时期被人们所冷落。直至本世纪50年代，随着科学技术的进步，这种轴承才重新为世人所瞩目。这种由气体代替油的作用才得以真正地发挥出来。

1.2 根据原理对气体轴承分类

如上所述，气体轴承所采用的方法就是利用气体的粘性来提高其间隙内的气体压力，从而使物体浮起。那么具体地说，气体轴承究竟是采用什么方法来提高气体压力，而使物体浮起的呢？

根据气体轴承产生这种压力的原理，气体轴承大致分为图1.2 所示的自作用式或称动压式(Self acting type, Hydrodynamic type),外供压式或称静压式(Externally pressurized type, Hydrostatic type)以及挤压膜式(Squeeze film type)。

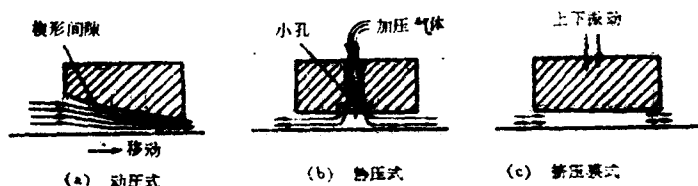


图1.2 气体轴承的种类

动压式如图1.2(a)所示。这种形式有相对移动的两个面，还有被称为楔形的间隙。当其形状沿着移动方向逐渐变窄时，便构成了这种方式。由于摩擦面的相对移动，气体因其自身的粘性作用而被带动，并被压缩到楔形间隙内，由此产生了压力。

静压式如如图1.2(b)所示。该形式是使加压的气体从外部经节流器 (Restrictor) 导入间隙，在间隙内产生静压而使物体浮起的一种形式。节流的作用就在于轴承间隙变化时，改变间隙内的压力。正如本章后半部所述，利用这种作用可使轴承产生刚度(Stiffness)。

挤压膜式如图1.2(c)所示。该形式是根据相互接触的两个面在垂直方面上的振动，能使间隙内的平均压力值比周围压力值高这一原理而构成的。对此可通过下述现象去理解：由于气体的粘性作用使间隙内的气体不能迅速地通过，平行于某平面而垂直降落的玻璃板会稳静地落到该平面上。

在上述三种轴承形式中，当今广泛应用的是动压式和静压式。有鉴于此，下面仅以这两种形式的径向轴承为例，详细介绍其工作原理。

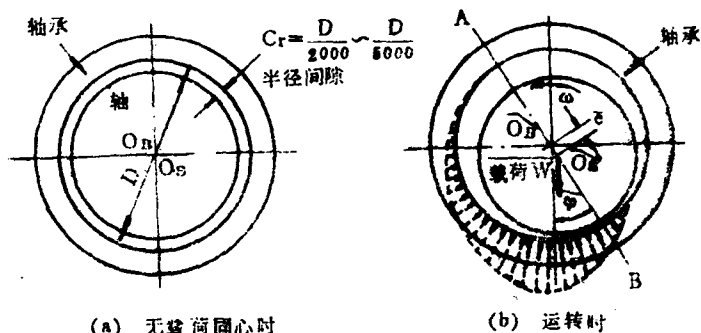


图1.3 动压径向气体轴承

圆柱形动压径向气体轴承的工作原理如图1.3所示。设轴以角速度 ω 旋转，载荷为 W ，受载后轴心 O_N 由轴承中心 O_S 移动一定距离为 e 后，轴处于偏心状态。移动方向与载荷方向仅偏离角度 φ 。其结果轴承间隙从 A 向 B 逐渐变窄，并在该段形成楔形间隙。由于轴的旋转使气体受到压缩，产生了图中虚线所示的压力。利用这种压力便能支承起载荷。其中角度 φ 称为偏位角 (Attitude angle)， e 称为偏心距 (Eccentricity)。用半径间隙 C_r (Radial clearance) 除以 e 所得到的值 ϵ 称为偏心率 (Eccentricity ratio)。另外，由于半径间隙 C_r 是轴与轴承直径之差的二分之一，所以动压气体轴承的 C_r 值约占轴直径 D 的 $1/2\ 000 \sim 1/5\ 000$ 。 φ 、 e 、 ϵ 等值的大小，可根据轴承的尺寸和轴承的运转条件来确定。

静压气体轴承，一般说来，当轴与轴承的相对速度较低，并且在要求具有较高承载能力或较高刚度的条件下，通

常使用静压气体轴承。图 1.4所示为具有小孔节流的静压径向气体轴承。由于气体是从外部压力源经小孔节流后流入气囊，然后再通过轴承间隙而排出的，因而气囊处气体压力的大小，便取决于节流孔与间隙内两个流动阻力间的平衡状态。

当轴承所承受的载荷为 W 时，转子的轴心 O_s 由轴承的中心 O_b 沿载荷方向移动偏心距为 e 。静压式与上述动压式不同，其移动方向与载荷方向一致。但这只限于低转速的条件，如果相对速度增加到一定的限度，就会与动压式一样产生偏位角。这种不能忽视动压影响的静压式轴承，称为混合式（动、静压）轴承（Hybrid bearing）。

在图1.4(a)中，随着轴与轴承相接近一侧的轴承间隙 C ，逐渐变小，流动阻力也会不断增大。结果，一方面，由于小孔的流动阻力不变，与轴接近一侧的气囊内的压力逐渐增大；另一方面，在远离轴一侧，随着轴承间隙的不断增大，气囊内的压力 p_2 则逐渐减小，于是便产生了如图(b)所示的压力分布。利用 p_1 与 p_2 的压差便能支承起相应的载荷。

静压气体轴承的半径间隙 C_r ，一般为支承的轴直径 D 的 $1/1\,000 \sim 1/5\,000$ 。在要求高转速的条件下，取其较大值，而在诸如测量装置之类的要求具有较高旋转精度、较低转速的仪器中，则取其较小值。

静压气体轴承节流孔的种类如图 1.5 所示。图中的小孔节流、毛细管节流以及狭缝节流，分别利用小孔、毛细管、狭缝对流体的阻力，使供气孔产生节流作用。其中，自成节流是将节流作用转换到供气孔与轴承所构成的假想圆柱面上来实现的；表面节流则利用设置在轴承面与供气孔相连的浅槽而产生节流作用；所谓多孔质节流，是指在轴承表面使用具

有透气性的多孔质材料，以其小孔对气体的流动阻力来产生节流作用。

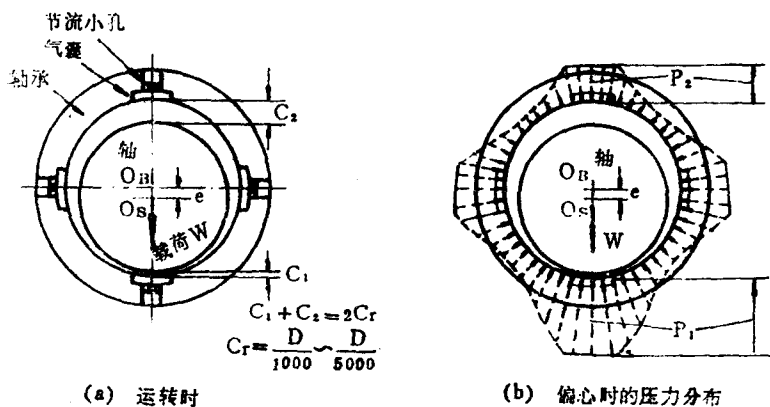


图1.4 静压径向气体轴承

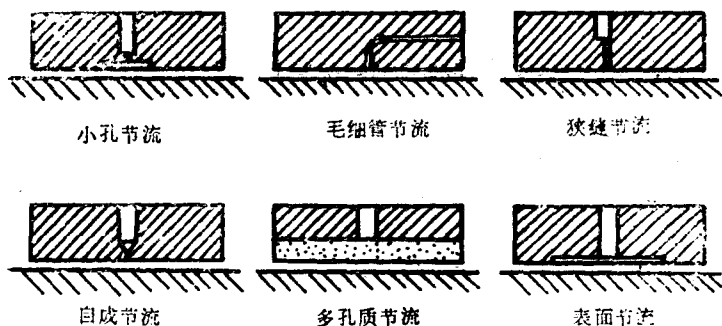


图1.5 静压气体轴承的节流种类

1.3 气体轴承的特征

就气体轴承的特征来评价其优劣,必须以其“不使用油”作为基点来谈。其优点是:“运转轻快、干净、平滑、耐高温、耐低温、耐用”等等。就其缺点而论,又有“脆弱、适用条件苛刻、制造成本较高”这些不尽人意之处。

下面就气体轴承的优劣,再比较具体地说明一下,然后进一步论述在哪些领域更能发挥出气体轴承的特长。

1.3.1 气体轴承的优点及其应用

气体轴承的优点及其能够发挥效力的领域,如图 1.6 所示。下面按图逐项说明。要指出的是图中所示的应用实例,仅仅是最有代表性的,而气体轴承在实际应用中所体现出的长处是不胜枚举的。

1) 旋转轻快 由于轴承的摩擦阻力与润滑剂的粘度成正比,而气体的粘度仅为普通润滑油的 $1/1\,000$,所以气体轴承的摩擦阻力仅仅是普通油轴承摩擦阻力的 $1/1\,000$ 。正因为具有这种特征,气体轴承才得以广泛应用于高速旋转机械及陀螺仪等仪器中。这样即可防止高速旋转机械因轴承摩擦而产生故障,又可防止陀螺仪等仪器因轴承摩擦而造成误差。

2) 洁净状态下运转 一提起机械,就会使人联想到机械表面那种油腻的样子。这是因为在轴承内注入了大量的润滑油,使机械表面产生油膜的缘故。由于气体轴承使用的是以空气为主的润滑剂,在轴承与轴之间产生了人们早已期待的气膜,所以没有油污染。因此气体轴承特别适用于食品、药品及医疗设备等忌油的机械。