

机械工业出版社高水平著作出版基金资助项目

气体润滑理论与气体轴承设计

Gas Lubricated Theory and Design Manual of Gas Bearings

王云飞 编著



机械工业出版社

ISBN 7-111-06845-9/TB·268

封面设计 / 电脑制作 : 海之帆



ISBN 7-111-06845-9



9 787111 068457 >

定价: 49.00 元

机械工业出版社高水平著作出版基金资助项目

气体润滑理论与气体轴承设计

Gas Lubricated Theory and Design Manual of Gas Bearings

王云飞 编著



机械工业出版社

本书系统地论述了气体润滑的基础理论, 详尽而全面地讨论了各类气体轴承的实用设计方法, 给出了相关的技术数据。全书共分 8 章, 第 3、4、5 章是重点, 详细阐述了气体轴承的三个主要类型的设计理论和方法, 并附有设计实例。第 6、7 章介绍了两种新型气体轴承——多孔质轴承和浮环轴承的设计理论与设计实例。第 8 章介绍气体轴承材料及制造方法。

本书可作为科研人员和机械行业工程师设计气体轴承的指南, 也可作为大学教师、研究生的教学与科研参考书。

图书在版编目 (CIP) 数据

气体润滑理论与气体轴承设计/王云飞编著. —北京:
机械工业出版社, 1999. 2
ISBN 7-111-06845-9

I. 气… II. 王… III. ①润滑理论②气体轴承-设计
IV. TH117. 2

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (98) 第 27385 号

出版人: 马九荣 (北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)
责任编辑: 刘文伯 蒋有彩 版式设计: 霍永明 责任校对: 张莉娟
封面设计: 海之帆 责任印制: 王国光
北京京丰印刷厂印刷·新华书店北京发行所发行
1999 年 2 月第 1 版第 1 次印刷
787mm×1092mm¹/₁₆·29.5 印张·761 千字
0 001—2 000 册
定价: 49.00 元

凡购本书, 如有缺页、倒页、脱页, 由本社发行部调换

序

王云飞同志的《气体润滑理论与气体轴承设计》一书，经过多年的努力终于面世了。这是一件好事。之所以好，在于当前市场经济大潮下，学术著作限于印量和经费难以出版，而此书在出版社的大力支持下顺利出版，表明社会上有识之士对科教兴国大计是理解和支持的。它之所以好，还在于打破了气体润滑界这几年的沉寂，带了一个开展学术工作的好头。希望此后，能有更多的专著、编著、译著接踵而来。

作者王云飞自 60 年代末即承担了气体轴承的研究工作，直至今日。中间，他曾师承北京航空航天大学张锡圣教授，作为张教授的博士生，在科学研究和理论分析方面，经过了严格的训练。本书正是作者积多年的经验和工作的积累而成的。

气体润滑是一门既古老又新颖的学科，它的基础已奠定多年，但它的发展还在日新月异地变化着。国内外的专家、学者作出了不少宝贵的贡献。本书就是在此基础上，结合作者的实践经验编著而成，以期满足国内广大读者的需要。

事实上，气体润滑的应用领域正在不断地拓广，还有许多理论和实际问题有待解决，王云飞同志的书应该是投“玉”引玉的。

本书的特点，诚如作者在前言中所说，在于“提供一个百花园，理想的蜜源还得读者自己去寻觅”。书中以八章的内容，概括了当今静压和动压气体轴承的大多数领域，确有不少的“蜜源”可供采寻，因此是一本十分珍贵的好书。

气体润滑专业委员会

刘 瞰

1997 年 5 月

前 言

笔者从事润滑理论研究工作几十年，主持或参加研制、开发的气体轴承产品近百种，有成功的经验，也有失败的教训。最令人遗憾的是在当时未能找到一本理想的专著，作为研究的导引和设计的指南，致使走了许多弯路，浪费不少时光。因此，很早就萌发出要写一本“专著”的念头，希望能为后来者提供一块引玉的砖。今天，润滑技术已获得蓬勃发展，气体轴承的研究与应用，正如日行中天，方兴未艾。许多新作相继问世，如格劳斯 W A 等编者的《Fluid Film Lubrication》(1980)，周恒、刘延柱的《气体动压轴承的原理及计算》(1981)，刘敞等著的《静压气体润滑》(1990)等，都是目前本领域里很有影响的论著，对笔者后期的研究工作有很大帮助和促进。《气体润滑理论与气体轴承设计》这部专著，也是在这些大作的基础上，结合近十年来国内外的最新研究成果及作者的实践认识编著而成的。在本书的写作过程中，得到国内同行的大力支持和鼓励。特别是在当前科技图书出版艰难时期，获得了机械工业出版社的全力资助，本书才得以顺利出版。但愿这部拙著能对气体润滑技术的发展和进步有所裨益。

全书是根据作者多年从事研究、设计工作所形成的体系作为主线进行编排的。同时，也充分地参考和援引了国内外著名专家、学者在本领域发表的有关著述。对有些名家较成熟的理论，不吝笔墨地详加介绍；对不同派系的学说，也酌情分别列入。其目的就是使本书尽可能完善、系统、全面地反映出这项新技术的全貌和最新成就，使各方读者都能在其中找到各自所需要的东西。书中同时列出不同学派的理论和方法，是出于两种考虑：一是这项高新技术尚在发展中，各家理论各有特色，尚未形成统一的模式，所以不便硬性归一；二是希望能给读者一个主动选择和独立思考的机会。正如蜜蜂采蜜一样，这里只提供一个百花园，理想的蜜源还得读者自己去寻觅。书中引用的内容均标明来源。书末列出了主要参考文献。

本书的编写，力求理论叙述系统、完善，设计方法切实、可行，提供的数据确切、可靠。在各章中，均给出相应的设计实例，以便具体地给读者以启发和引导。

全书共有八章。第 1 章概述了气体轴承发展的历史，简介了气体轴承的特点与分类，并讨论了气源问题。第 2 章较系统地论述了润滑气体力学和气体润滑机理，是全书的理论基础。第 3、4、5 章是全书的核心内容，分别对动压、静压和动静压混合润滑气体轴承的设计理论与设计方法，作了全面系统的介绍，并配以实例说明。这部分是气体轴承全乐章的主调，也是最常演奏的章节。第 6、7 章介绍气体轴承近年发展起来的两支新秀——多孔质轴承和浮环轴承。它们具有承载能力强，高速稳定性好的特点，这是气体轴承所追求的目标。它们是两支很有发展潜力和应用前景的新类型。由于新，所以其理论不够系统、方法不尽完善。这里尽笔者所知，尽量把当前最新、最成熟的成果反映出来。第 8 章是气体轴承材料及制造方法。

未纳入本书的部分有：气体压膜轴承、箔带轴承及超薄膜润滑问题。主要是其理论与设计方法都很不完善，实际应用很少。希望能在将来作专题介绍。

在此要特别感谢北京航空航天大学张锡圣教授，他对全书文稿做了详细地审阅，提出许多

宝贵意见和建议。感谢哈尔滨工业大学刘瞰教授，他为本书作序，并提供设计实例。毛谦德教授、陈纯正教授等在本书写作过程中给予了大力支持和鼓励，作者表示衷心感谢。

由于时间仓促、水平所限，书中存在的缺点和错误之处，笔者诚心欢迎广大读者批评、指正。

王云飞

1997年4月

于洛阳

符 号 表

<p>a——节流小孔半径、每段狭缝长度</p> <p>A_0——节流面积</p> <p>b——槽台副总宽度,滑子宽度</p> <p>$b_1(b_g), b_2(b_r)$——槽宽度、台宽度</p> <p>B——轴承宽度,阻尼系数</p> <p>c——平均半径间隙或气膜平均厚度</p> <p>C_D——流量系数</p> <p>d_0——供气小孔直径</p> <p>d_1——气室直径</p> <p>d_s——供气腔或节流孔直径</p> <p>D——轴或轴承直径</p> <p>e——偏心量</p> <p>F——力,摩擦力</p> <p>g——重力加速度, $g=9.81\text{m/s}^2$</p> <p>h——轴承间隙或气膜厚度</p> <p>h_0——平均间隙或零偏心时气膜厚度</p> <p>\bar{h}——无量纲间隙, $\bar{h}=h/c$ 或 h/h_0</p> <p>H——多孔质轴承衬厚度</p> <p>k——轴承刚度</p> <p>k_s——静刚度</p> <p>$k_a: k_A$——角刚度</p> <p>K_g——表压比, $K_g=(p_d-p_a)/(p_s-p_a)$</p> <p>\bar{K}——无量纲刚度</p> <p>l——供气孔(缝)至轴承一端距离</p> <p>L——轴承总长度</p> <p>m——(轴)质量</p> <p>\bar{m}——质量比</p> <p>M——稳定性判别质量</p> <p>n——转速(r/min)</p> <p>N——孔(或缝)数、槽数、阶梯数等</p> <p>p——压力函数</p> <p>p_a——环境压力</p> <p>p_s——供给压力或供气压力</p> <p>p_d——节流末端压力</p> <p>\bar{p}——无量纲压力, $\bar{p}=p/p_a$</p> <p>P——功率</p> <p>P_μ——摩擦功率</p>	<p>P_p——泵功率</p> <p>q_v——体积流量</p> <p>q_m——质量流量</p> <p>\bar{q}——无量纲流量</p> <p>r——轴或轴承半径</p> <p>\bar{r}——无量纲半径</p> <p>R——球半径或气体常数</p> <p>S——轴承面积</p> <p>t——时间</p> <p>T——温度,摩擦力矩</p> <p>\bar{T}——无量纲力矩</p> <p>W——载荷,承载力</p> <p>\bar{W}——无量纲承载</p> <p>α——角度或因子</p> <p>β——角度或压比($\beta=p_d/p_s$)</p> <p>γ——半锥角或载荷角, $\gamma=\arctan(e_z/e_R)$</p> <p>δ——槽、腔或阶梯深度,补偿因子, $\delta=a^2/(d_1c)$</p> <p>ϵ——偏心率, $\epsilon=e/c$</p> <p>ξ, η, ζ——无量纲坐标</p> <p>θ——周向角度坐标</p> <p>κ——等熵指数</p> <p>λ——长径比, $\lambda=L/D$</p> <p>$\bar{\lambda}$——分子平均自由程</p> <p>λ_s——透气因子, $\lambda_s=c/\phi^{1/2}$</p> <p>μ——气体动力粘度</p> <p>ν——涡动频率</p> <p>ρ——密度</p> <p>σ——挤压数</p> <p>τ——无量纲时间, $\tau=\omega t$</p> <p>φ——子午向角度坐标</p> <p>ϕ——姿态角或透气系数</p> <p>ω——角速度</p> <p>ω_{cr}——临界速度</p> <p>ω_{on}——涡动初始速度或限速度</p> <p>Ω——涡动速度</p> <p>$\bar{\Omega}$——涡动比, $\bar{\Omega}=\Omega/\omega$</p> <p>$\Lambda$——压缩数</p>
---	--

目 录

序

前 言

符号表

第 1 章 绪论	1	3.3 对置半球型轴承的设计	127
1 概述	1	3.4 综合设计实例	139
2 气体轴承的特点及分类	2	第 4 章 静压气体轴承的设计	144
2.1 气体轴承的优点	2	1 静压气体轴承的静态设计	144
2.2 气体轴承的缺点	3	1.1 静态特性及主参数	144
2.3 气体轴承的分类	3	1.2 节流器及其特性	145
3 气源	7	1.3 静压气体轴承静态性能的简单 估算	153
3.1 气源发生器	8	1.4 孔式供气轴承的静态设计	154
3.2 空气过滤器	9	1.5 缝式供气轴承的静态设计	181
3.3 压力控制阀	10	1.6 靠径向排气润滑的止推肩轴承	188
第 2 章 气体润滑理论	12	1.7 孔式供气静压空气轴承的“通用 曲线”设计方法	189
1 润滑气体力学概述	12	1.8 复位势理论及对气体静压轴承的 解法	196
1.1 润滑气体的基本性质	12	1.9 环面止推轴承供气孔位置的最佳 设计	202
1.2 润滑气体的流动特性	18	1.10 具有均压槽的孔式供气轴承的 设计	204
2 气体润滑机理	28	2 静压气体轴承的动态设计	213
2.1 气体动压润滑机理	28	2.1 静压气体轴承的涡动失稳问题	213
2.2 气体静压润滑机理	30	2.2 静压气体轴承的气锤振动问题	243
2.3 气体压膜润滑机理	32	2.3 改善静压气体轴承稳定性 的措施	249
2.4 气体弹性润滑机理	34	2.4 设计计算实例	251
2.5 超薄膜气体润滑理论	35	第 5 章 混合型气体润滑轴承	254
第 3 章 动压气体轴承的设计	37	1 基本概念及特点	254
1 动压气体径向轴承的设计	37	2 动—静压混合润滑气体轴承的稳态 设计	255
1.1 普通动压气体径向轴承的设计 原理	37	2.1 孔式供气动静压混合型气体润滑 轴承的设计	255
1.2 螺旋槽动压气体径向轴承 的设计	45	2.2 缝式供气动静压混合气体轴承的 设计	263
1.3 可倾瓦动压气体径向轴承 的设计	69	2.3 孔-腔型动静压混合气体轴承的 设计	266
2 动压气体止推轴承的设计	87		
2.1 阶梯型动压气体止推轴承的设计	87		
2.2 螺旋槽型动压气体止推轴承的 设计	96		
3 径向-止推联合型轴承的设计	117		
3.1 H 型轴承的设计	117		
3.2 对置锥型轴承的设计	122		

3 动静压混合润滑气体轴承的动态设计	273	5.1 多孔质轴承材料及主要性能	395
3.1 挤压数 σ 对轴承动态性能的影响	274	5.2 复合多孔质材料	396
3.2 压缩数 Δ 对轴承动态性能的影响	285	5.3 多孔质材料的制备与加工方法	397
3.3 节流器系数 Δ_s 对轴承动态性能的影响	290	6 设计实例	399
4 球面气体润滑轴承的设计	294	第7章 气体浮环轴承	407
4.1 球面轴承的基本润滑方程及解法	294	1 气体浮环轴承的特点与分类	407
4.2 孔式供气球面气体轴承的设计方法	299	1.1 特点	407
4.3 缝式供气球面气体轴承的设计方法	304	1.2 分类	408
4.4 对球型气体轴承设计的几点建议	315	2 动压气体浮环轴承概述	408
4.5 中心小孔供气单向受载球面气体轴承的设计	315	2.1 结构特点及工作原理	409
4.6 计算实例	318	2.2 浮环轴承环的动态平衡及环速比	409
5 锥面气体润滑轴承的设计	319	2.3 浮环轴承的功耗	411
5.1 孔式供气锥面轴承的性能计算	320	2.4 浮环轴承的稳定性	412
5.2 锥型气体轴承设计参数推荐值	321	3 静压气体浮环轴承的设计	418
5.3 计算实例	322	3.1 浮环不旋转型	418
第6章 多孔质静压气体润滑轴承	325	3.2 浮环旋转型	421
1 气体通过多孔介质的流动规律	325	3.3 设计实例	425
2 不同物理模型下的基本方程及边界条件	328	4 动静压混合润滑气体浮环轴承的设计	427
2.1 等价间隙模型	328	4.1 浅腔动静压气体浮环轴承的设计	428
2.2 表面小孔模型	328	4.2 浅腔浮环动静压气体轴承支承的超高速精密主轴	451
2.3 表面毛细管模型	329	第8章 气体轴承材料及加工方法	457
2.4 边界条件	330	1 气体轴承的材料	457
3 多孔质静压气体轴承的静态设计	330	1.1 选用原则	457
3.1 多孔质静压气体轴承的结构类型及设计要点	330	1.2 分类与特点	457
3.2 多孔质静压气体止推轴承的静态设计	331	1.3 几种常用的气体轴承材料及主要性能	458
3.3 多孔质静压气体径向轴承的静态设计	347	1.4 材料的表面强化处理	458
4 多孔质静压气体轴承的动态设计	370	1.5 复合材料	459
4.1 径向轴承	370	2 气体轴承的加工方法	459
4.2 止推轴承	387	2.1 小孔的加工方法	459
5 多孔质轴承材料及其加工方法	395	2.2 阶梯、浅腔的加工方法	460
		2.3 螺旋槽、人字槽的加工方法	460
		2.4 精密铰削、拉削和挤压加工方法	461
		2.5 精磨和精研的几个问题	461
		参考文献	462

第 1 章 绪 论

气体润滑技术是本世纪中期迅速发展起来的一项高新技术。它的出现,打破了液体润滑的一统天下,使润滑技术产生了质的飞跃。气体轴承就是从这项技术开发出的核心产品,它是利用气膜支承负荷或减少摩擦的机械构件。气体轴承作为滑动轴承的一个新类型,已经加入了机械基础件之一的“轴承”大家族之中了。与滚动轴承及油滑动轴承相比,气体轴承具有速度高、精度高、功耗低和寿命长的四大优点。它使轴承速度提高了5~10倍,支承精度提高2个数量级,功耗降低了3个数量级,而轴承的工作寿命则增长了数十倍。同时,打开了常规支承所长期回避的一些润滑禁区。无疑这是支承形式与润滑技术上的一次革命。

目前,就润滑技术与支承形式的总体分析来看,气体轴承在四个领域里占有绝对的应用优势,即高速支承、低摩擦低功耗支承、高精密支承和特殊工况下的支承。在这四个应用领域中,滚动轴承和油滑动轴承往往难以胜任,或根本无法实现。近年在计算机领域用于支承高速磁头和磁盘的气膜润滑问题,是一项超薄膜润滑技术,是润滑技术向微观世界发展、向“分子润滑”技术迈进。所谓“分子润滑理论”,就是研究接近于分子活动范围的润滑现象的理论。气体超薄膜润滑技术的出现,意味着润滑技术又向新的高度跃进。

综上所述可以看出,气体润滑技术的开发潜力很大,气体轴承的应用前景十分可观。

1 概述

人类在减少摩擦,提高效率的进程中,首先是将滑动变成滚动,进而又使干磨转向润滑。油、脂润滑轴承,从它出现至今,已有近千年的历史;然而,气体润滑的问世,充其量也不过是百年历史。从油、脂润滑变成气体支承,这是轴承发展史的一大进步,也是摩擦学史的一次飞跃。就节约能耗而论,也是一项惊人的壮举。更何况,在轴承支承精度的提高、工作寿命的增长,以及适用于高、低温及辐射条件等方面,更是油、脂润滑不能比的。

自19世纪末,人们初探到气体润滑的效果以来,到1949年半个多世纪里,只有几十篇原理性文章公诸于世。1950~1959年的10年间,理论、实验和应用方面的文章,就有近300篇,发表在多种杂志及会刊上,气体润滑轴承已从理想变成现实。一项崭新的支承技术,以其独特的姿态加入了滑动轴承的家族。1959年,在美国华盛顿举行了第一届国际气体润滑轴承学术会议。从此,气体润滑技术在美、英等几个发达国家迅速发展起来。60~70年代,是气体轴承大发展时期,是从理论研究进入实用设计及推广应用的阶段。各种各样的设计方案竞相抛出,稳态设计理论逐渐完善,动态性能的理论分析和基础实验文章日渐增多。与稳态性能的研究相比,动态性能的研究尚且不足。轴承类型上,除纯动压和纯静压轴承外,又出现了动、静压混合轴承、压膜轴承、箔带轴承及多孔质轴承等新类型。气体轴承产品,也从初期的军品为主而转向以民品居多,军品、民品同时发展的新格局。在一些发达国家,有些气体轴承产品已开始商品化,如空气主轴、高速空气牙钻等。有些军品轴承,如惯导陀螺马达动压气体轴承,已正式服役。继第一届学术会议之后,又相继召开了第二、三、……、第八届国际气体轴承学术会议,其中后六次均在英国的南埃普敦(Southampton)大学召开的。每次会议都有一批新的研究成果

公诸于世, 总结过去, 展望未来。这期间, 有些发展中国家如印度、埃及、罗马尼亚等, 也开始了这方面的研究和应用。

我国从 1962 年开始对气体轴承展开正式研究。首先, 在机械工业部洛阳轴承研究所建立起气体轴承研究基地。1968 年首次成功地研制出我国第一代气体轴承产品——陀螺马达动压气体轴承, 并在主机上获得成功应用。随后, 在高速主轴、透平膨胀机、高速空气牙钻、精密仪器及空间技术等领域, 气体润滑技术在我国获得迅速发展。1975 年夏, 在北京召开了第一次全国气体轴承学术交流会, 之后每隔 2~3 年召开一次, 到 1994 年已召开了六次。并于 1982 年成立了摩擦学会下属的“气体润滑”专业委员会。专业委员会对组织国内培训、加强行业技术交流、促进课题协作等方面, 做了大量工作, 使气体润滑这项新技术在我国得以健康发展。

进入 80 年代后, 随着气体润滑理论的逐步完善和气体轴承技术的不断进步, 其实用化和商品化的程度日益提高, 并在高速度、高精度和低摩擦三个应用领域, 显示出十分强大的生命力, 常常是滚动轴承与油滑动轴承无法替代。与电磁轴承相比, 又具有结构简单、制造容易和便于推广应用的优点。高速空气精密主轴, 在油嘴行业已应用多年; 高速空气牙钻, 在一些大医院也在临床应用; 空气轴承支承的圆度仪, 在轴承厂广泛应用; 此外, 如三坐标仪、低速伺服转台、空间模拟装置等, 现在也都采用气体轴承支承。

这个时期的气体轴承理论, 是以动静压混合润滑的研究为主, 特别是对气体轴承的高速稳定性的理论计算和实验测试方法的探讨, 更是研究的重点。“环面浅腔二次节流气体浮环动静压混合轴承高速稳定性”问题, 首先为中国学者所攻克, 并开创了这类轴承的实用性研究新阶段。在结构设计上, 近年相继出现了表面节流, 浅腔二次节流、多孔质节流及浮环轴承等新类型。对这些新型轴承的结构分析及性能计算, 是当前气体轴承研究的热门课题。

气体轴承在实用中的主要问题是“可靠性”问题。尤其是在高速下应用的气体轴承及在恶劣工况下工作的气体轴承, 其可靠性问题更加突出, 往往由于可靠性差而导致应用失败, 甚至影响轴承的进一步发展和推广应用。对气体轴承进行“可靠性”的研究, 已是当务之急, 而且是关系到这项新技术的进步与实用化的重大课题。

2 气体轴承的特点及分类

高速、精密、低摩擦三大特点, 是气体轴承得以立足于世界轴承之林、并不断向前发展的基础, 而承载小、刚度低、可靠性差, 又影响了它的广泛应用, 是美中不足之处。

2.1 气体轴承的优点

1. 速度高 国际上已成商品的高速空气轴承牙钻, 转速达 $50 \times 10^4 \text{r/min}$, 我国研制成功的超高速精密空气主轴, 转速达 $33 \times 10^4 \text{r/min}$, 其线速度已达 $130 \sim 140 \text{m/s}$; 而小型氦透平膨胀机转速达到 $65 \times 10^4 \text{r/min}$, 线速度为 238m/s 。若按 dn 值计算 (轴承内径乘转速值), 主轴为 $264 \times 10^4 \text{mm} \cdot \text{r/min}$, 膨胀机为 $455 \times 10^4 \text{mm} \cdot \text{r/min}$ 。这速度是滚动轴承与油滑动轴承所望尘莫及的 (滚动轴承的 dn 值, 一般不超过 $200 \times 10^4 \text{mm} \cdot \text{r/min}$)。

2. 精密度高 气体轴承本身的制造精度高, 气膜又具有匀化作用, 所以气体轴承的精度比滚动轴承高 2 个数量级, 且振动、噪声值也低。比如, 美国西北太平洋实验室研制的一种 Omega 纳米车床 (空气轴承支承), 加工精度达到 $0.075 \mu\text{m}$, 表面粗糙度为 $R_a 0.0011 \mu\text{m}$ 。日本芝浦电

器有限公司研制的空气轴承超精密镗钻头,加工表面粗糙度最大值在 $R_a 0.06 \sim 0.02 \mu\text{m}$,平面度达 $0.1 \mu\text{m}$ 。目前,国际上超精密镜面车床(空气轴承)主轴回转精度已达到 $0.025 \mu\text{m}$,国内试制的同类车床主轴回转精度为 $0.05 \mu\text{m}$ 。

3. 摩擦损耗小 气体粘度仅为油粘度的千分之一,所以,由气膜引起的摩擦力矩比油膜低3个数量级。轴承摩擦低,对主机的干扰力矩小,功率损耗小,这是理想支承技术所追求的目标。

4. 具有耐高温、低温及原子辐射的能力 油、脂润滑剂,高温挥发、低温凝固,原子辐射下分解变质。气体润滑剂不存在这些问题。高温气体轴承可承受 $300 \sim 500^\circ\text{C}$,低温可在 -263°C 下工作。

5. 无污染或少污染 气体轴承一般用空气或惰性气体做润滑剂,所以,润滑剂排放对环境无任何污染。少数采用如 CO_2 、 CH_4 等作润滑剂的轴承,一般都在封闭状态下工作,对环境影响也不大。气体轴承的振动、噪声低,也比滚动轴承对环境的污染小。

6. 寿命长 寿命短、寿命分布离散,是滚动轴承致命的弱点;特别是高速轴承更甚,一般工作寿命只有几十小时到几百小时。气体轴承在正常工作时,无金属接触,理论上无磨损,轴承寿命应该是无限长。考虑其他条件的限制,轴承寿命至少也在一万小时以上,而且能始终保持精度不变。就是纯动压气体轴承,由于存在起停瞬间的接触摩擦,寿命受一定影响,但在选配合适的轴承材料时,其寿命仍比同类滚动轴承高得多。陶瓷动压轴承起停次数可达5万次,一般钢制轴承起停次数也有数千次。

7. 结构简单,便于推广应用 多数气体轴承都是圆柱形或平板形构件,采用通用设备,制造方便。少数特殊结构,如螺旋槽动压轴承,需要专用设备加工,也不难解决。润滑气体取自环境,或外部加压供给,只须过滤净化;余气自由排放,无须回收,使装置大大简化。

2.2 气体轴承的缺点

1. 承载小、刚度低 气体轴承的承载能力比油轴承大约低1~2个数量级。以比承载(单位面积的承载力)计算,油轴承一般为 $(0.5 \sim 2) \times 10^6 \text{N/m}^2$,而气体轴承只有 $(2 \sim 4) \times 10^4 \text{N/m}^2$ 。气体轴承适用于轻载精密支承。

2. 可靠性差 一方面是气体轴承容易失稳,出现气锤振动或涡动现象;另一方面是轴承易卡滞,乃至发生咬合或抱轴现象。

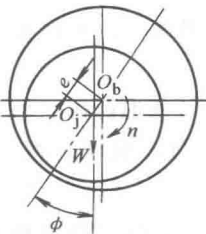
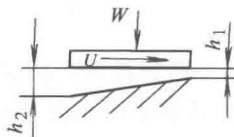
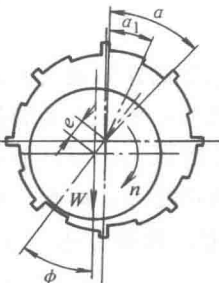
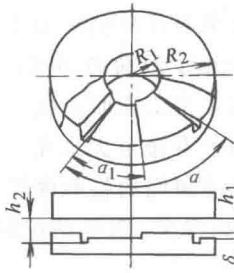
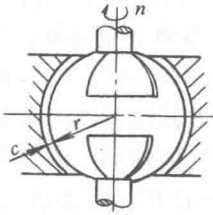
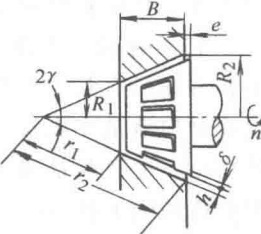
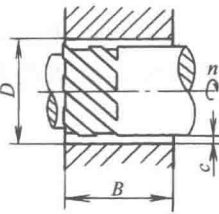
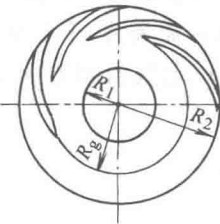
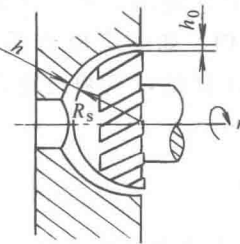
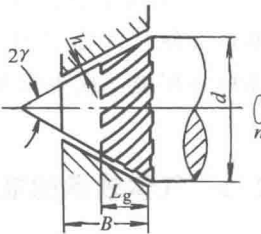
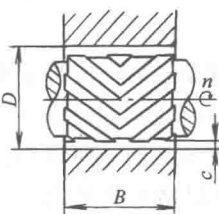
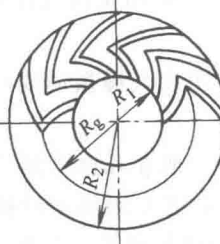
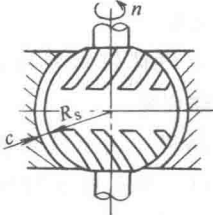
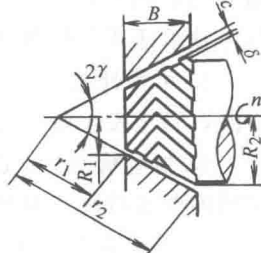
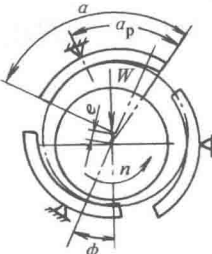
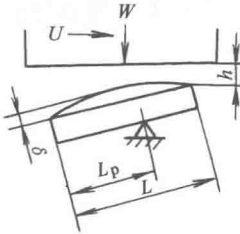
3. 制造精度高、造价昂贵 由于气膜很薄,一般在几微米到十几微米之间,所以对部件加工精度要求较高。对螺旋槽、多孔质等特殊轴承,需专用加工设备,所以造价比较高。

4. 工作条件苛刻 主要是清洁条件及严格的操作规程。气体轴承从部件加工到总体装配,都要求严格的清洗和全面净化,对轴承工作环境也要求净化和干燥;轴承工作必须严格遵守规定的程序。这些苛刻条件,确能保证轴承正常工作,不出现意外损坏,但却在一定程度上限制了它的推广应用。

2.3 气体轴承的分类

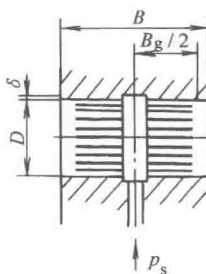
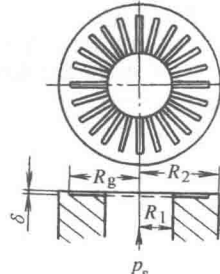
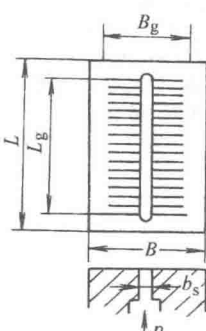
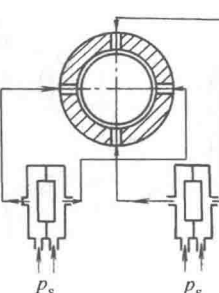
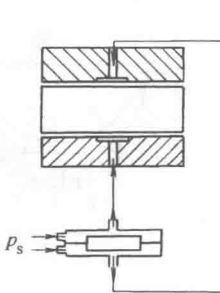
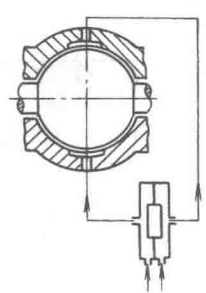
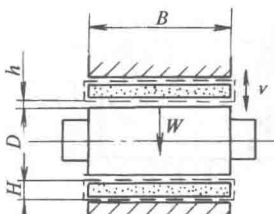
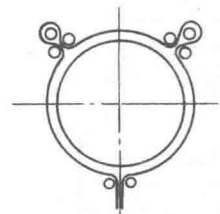
气体轴承的分类及主要用途见表1-1。

表 1-1 气体轴承类型、材料及主要用途

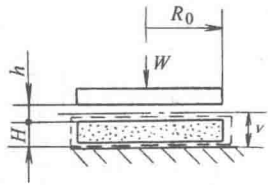
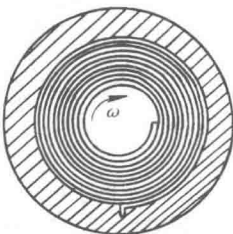
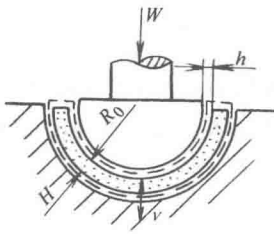
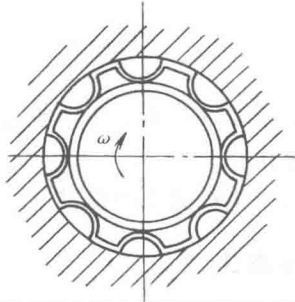
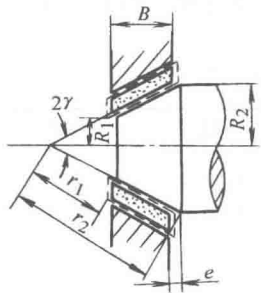
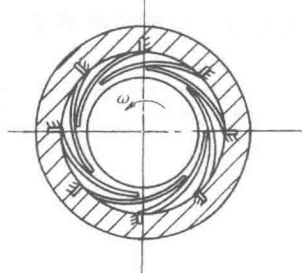
1. 气动压润滑轴承				
	径向轴承	推力轴承	球型轴承	锥型轴承
普通型				
阶梯型				
螺旋槽型				
人字槽型				
摆动瓦型				

(续)

1. 气体动压润滑轴承				
	径向轴承	推力轴承	球型轴承	锥型轴承
轴承材料	1) 硬质合金: WC+Co, TiC+WC+Co 2) 金属陶瓷: Al ₂ O ₃ +Cr, TiC+Cr+Ho+Ni 3) 精细陶瓷: SiC, Al ₂ O ₃ , ZrO, SiN 4) 铁基粉末冶金: Fe+石墨, Fe+Cu+石墨 5) 钢: GCr15, 9Cr18, W18Cr4V		6) 烧结碳化硼、碳硅硼 7) 钛合金、铍合金、铍 8) 钢表面渗氮、渗铬, 渗硅 9) 钢表面喷涂 Al ₂ O ₃ , ZrO, TiC, SiC, WC, SiN 10) 铝表面磁质阳极化	
主要应用	1) 惯导陀螺马达轴承 2) 小型低温透平膨胀机轴承 3) 录像机轴承 4) 高速纺锭轴承 5) 电子计算机高速磁头			
2. 气体静压润滑轴承				
	径向轴承	止推轴承	球面轴承	锥面轴承
小孔节流				
环面节流				
狭缝节流				
多孔质节流				

		2. 气体静压润滑轴承			
		径向轴承	止推轴承	球面轴承	锥面轴承
表面节流					
	可变节流				
轴承材料	<ol style="list-style-type: none"> 1) 黄铜、青铜 2) 钢: GG15, 9Cr18 3) 钛合金、铍合金 4) 铜石墨 		<ol style="list-style-type: none"> 5) 多孔质青铜、多孔质石墨 6) 铝合金表面硬化 7) 尼龙、塑料 		
主要用途	<ol style="list-style-type: none"> 1) 精密机床主轴轴承 2) 高速砂轮轴轴承 3) 高速动力头轴承: 镗头、铣头 4) 精密仪器轴承: 圆度仪、摩擦力矩仪等 5) 滚动轴承实验机支承 		<ol style="list-style-type: none"> 6) 低温透平膨胀机轴承 7) 低速伺服转台轴承 8) 高速牙钻轴承 9) 高速纺锭轴承 10) 高速离心机轴承 		
		3. 气体压膜轴承和气体箔轴承			
		气体压膜轴承		气体箔轴承	
轴承结构类型	径向轴承				
	拉伸型				
				三叶拉伸箔轴承	

(续)

3. 气体压膜轴承和气体箔轴承				
气体压膜轴承		气体箔轴承		
轴 承 结 构 类 型	止推轴承 	弯 曲 型 悬 臂 型	缠绕箔轴承 	缠绕箔轴承
	球面轴承 		波箔轴承 	波箔轴承
	锥面轴承 		悬臂型 	悬臂型箔轴承
轴承材料	1) 压电陶瓷 2) 磁致伸缩材料	1) 弹簧钢带 2) 铜、铝箔带 3) 尼龙、塑料 4) 铍及铍合金	5) 表面涂层材料: Cr ₂ O ₃ 、Co-20Ni+TiB ₂ B ₄ C、Co-20Ni+Cr ₂ O ₃ TiC、MoS ₂	
主要用途	1) 浮子陀螺仪轴尖支承 2) 精密仪器支承 3) 压膜阻尼器	1) 飞机座舱冷却透平膨胀机轴承 2) 小型真空吸尘器轴承 3) 高速气流纺纱机轴承 4) 高速主轴轴承		

3 气源

外压气体轴承，需要外部提供加压过滤气源。外部加压气源，一般由空气压缩机或高压气瓶及过滤器、调压稳压器、气阀和管路组成。气源框图如图 1-1 所示。