DOI：10.16410/j.issn1000-8365.2025.5007

# 基于 3D 打印的轻量化静压空气轴承设计与流体动力学性能优化

王冬冬[1]，郑　刚[1]，郑作赟[2]，王　琦[2]，张喜辰[3]，相　敏[2]，张　鹏[2]

(1. 海军装备部，北京 100000；2. 西安欧中材料科技股份有限公司 西安市 3D 打印用金属粉末材料工程技术研究中心，陕西 西安 710018；3. 西安科技大学 机械工程学院，陕西 西安 710054)

**摘　要**：航空发动机对轴承的轻量化与高承载能力提出迫切需求，传统静压空气轴承因制造工艺限制难以实现复杂流道结构。为此，基于 3D 打印技术，通过拓扑优化设计了一种轻量化静压空气轴承，并利用 Fluent 流体动力学仿真软件对该轴承模型展开分析，旨在解决传统轴承质量大、气流分布不均等问题。结果表明，供气气压和气膜的承载力呈正线性相关，提高供气气压可提升空气轴承的承载能力。通过自由制造复杂流道与镂空结构，突破传统工艺瓶颈，为高精度气膜均匀性提供新途径。

**关键词**：3D 打印；空气轴承；有限体积；气膜压力；静态特性

**中图分类号**：TG669　　**文献标识码**：A　　**文章编号**：1000-8365(2025)09-0902-08

## Design and Fluid Dynamics Analysis of Air Bearings Based on 3D Printing

WANG Dongdong[1], ZHENG Gang[1], ZHENG Zuoyun[2], WANG Qi[2], ZHANG Xichen[3], XIANG Min[2], ZHANG Peng[2]

(1. Naval Equipment Department, Beijing 100000, China; 2. Xi'an ERC of 3D Printing Metal Powder Material, Xi'an Sino-Euro Materials Technologies Co., Ltd., Xi'an 710018, China; 3. School of Mechanical Engineering, Xi'an University of Science and Technology, Xi'an 710054, China)

**Abstract**: Traditional hydrostatic air bearings, which are constrained by manufacturing process limitations, have difficulty achieving complex flow channel structures. To meet the extremely lightweight requirements of aviation parts, a lightweight hydrostatic air bearing was designed through topology optimization on the basis of 3D printing technology. Additionally, Fluent computational fluid dynamics simulation software was used to analyse the bearing model, aiming to solve problems such as the heavy weight of traditional bearings and uneven air flow distribution. The results show that there is a positive linear correlation between the air supply pressure and the bearing capacity of the air film and that increasing the air supply pressure can increase the bearing capacity of the air bearing. This work provides a new method for further studying the performance and weight reduction work of aviation air bearings through relevant research.

**Key words**: 3D printing; air bearings; limited volume; gas film pressure; static characteristics

随着旋转机械向高速、重载方向发展，对轴承性能的要求日益提高[1-6]。空气轴承作为一种新型非接触式轴承技术，具有无接触运行、低摩擦磨损、高精度、清洁环保等诸多优点，在众多领域广泛应用。基于此，本文聚焦于静压空气轴承，融合 3D 打印技术，对轴承进行轻量化设计与流体动力学性能优化，通过 CFD(computational fluid dynamics)技术深入探究其内部流体气膜特性。

根据气膜形成原理，空气轴承主要分为两类：动压空气轴承(dynamic air bearing)和静压空气轴承(hydrostatic air bearing)。动压空气轴承通过使轴在轴承内旋转时产生离心力和流体动力效应，在轴和轴承间形成一个连续的高压气体薄膜，以此来实现轴的悬浮和无接触旋转，这种轴承不依赖滚珠或滚子等实体接触元件来支撑负荷，而是完全借助压缩空气或其他气体的压力分布来支撑旋转部件，同时

收稿日期：2025-01-14

基金项目：国家重点研发计划(2023YFB3712004)

作者简介：王冬冬，1989 年生，硕士生，工程师. 主要从事航空宇航科学与技术方面的工作. Email: 191851980@qq.com

通信作者：张　鹏，1985 年生，本科，高工. 主要从事金属粉末及粉末冶金制备技术方面的工作. Email: 694416597@qq.com

引用格式：王冬冬，郑刚，郑作赟，王琦，张喜辰，相敏，张鹏. 基于 3D 打印的轻量化静压空气轴承设计与流体动力学性能优化[J]. 铸造技术，2025, 46(9): 902-909.

WANG D D, ZHENG G, ZHENG Z Y, WANG Q, ZHANG X C, XIANG M, ZHANG P. Design and fluid dynamics analysis of air bearings based on 3D printing[J]. Foundry Technology, 2025, 46(9): 902-909.

中国知网　https://www.cnki.net

减少两者间的摩擦；静压空气轴承的工作原理基于帕斯卡定律，在这种轴承系统中，压缩空气或其他惰性气体通过精密设计的供气孔或节流器以一定压力被输送到轴承和轴之间的狭窄间隙中[7]。当高压气体进入该间隙后，会在轴和轴承表面间形成一层稳定的气体薄膜，这层气膜能够承受较大的载荷，并且由于气体分子间的相互作用力很小，因此摩擦损失非常低。在静压空气轴承中，轴承的承载能力不是由轴的旋转速度产生的动压效应提供，而是完全依赖于外部供给恒定压力的气体，即使在零转速或低速下也能提供足够的承载力。静压空气轴承适用于高精度、低摩擦、高速及需要避免金属间直接接触的场合，常见于精密测量仪器、高速旋转机械、半导体制造设备等高科技领域[8]。

目前，3D 打印在金属制造领域通常被称为增材制造，涵盖多种技术，常见的有选区激光熔化(selective laser melting, SLM)、激光金属沉积(laser metal deposition, LMD)、电子束熔化(electron beam melting, EBM)、黏结剂喷射成形(binder jetting, BJ)等，这些技术在精度和自由度方面各有特点。以 SLM 技术为例，其借助激光逐层熔化金属粉末，可实现高精度复杂结构制造，精度可达±0.1 mm，能自由成形高度复杂的内部流道；LMD 则通过激光熔池逐点沉积金属材料，适合制造大型零件，精度在±0.5 mm 左右，可实现一定程度的复杂结构制造；EBM 利用电子束在真空中熔化金属粉末，适合高温合金等难加工材料，精度约±0.3 mm，成形复杂结构能力中等；黏结剂喷射成形是将黏结剂喷射到金属粉末层使粉末黏结成形，精度相对较低，约±0.5 mm，但能在一定程度上制造复杂外形。本研究基于航空用静压空气轴承的轻量化设计需求，综合考虑精度与复杂结构制造能力，选用 SLM 技术进行 3D 打印。

3D 打印技术的出现颠覆了传统制造模式，实现了从数字设计到实体物品的一体化、个性化生产，显著提升制造效率、缩短产品研发周期，并降低了复杂结构部件的生产成本[9-10]。在航空空气轴承制造领域，3D 打印技术可实现复杂几何形状的自由制造[11]、轻量化与材料优化、快速响应与按需生产、降低成本与提高效率、创新设计验证、现场维修与在轨制造等优势。通过 3D 打印技术，工程师可在短时间内快速制作空气轴承原型，进行功能验证和迭代设计，加速新轴承设计方案的研发进程。3D 打印技术不仅在现有条件下提高了空气轴承的制造灵活性和效率，也为未来航空工业的发展开辟了新的可能性。

计算流体动力学(computational fluid dynamics, CFD)为目前国际上一个重要的研究领域，是进行三传(传热、传质、动量传递)及燃烧、多相流和化学反应研究的核心和重要技术，被广泛应用于热能动力、航空航天、机械、土木水力、环境化工等诸多领域。其中，Fluent 软件是一款强大的计算流体动力学工具，可用来模拟各种复杂的流体流动、传热和化学反应现象[12]。在空气轴承研究领域，Fluent 能够从空气轴承流场模拟、参数化分析、性能预测、优化设计、动态模拟等[13-18]多方面发挥重要作用，帮助工程师和研究人员设计、优化和分析空气轴承的工作特性。Fluent 软件为空气轴承的研发提供了有力的理论支持和定量化的分析手段，有助于提高空气轴承的可靠性和降低能耗，并拓宽其在航空航天、精密机械、高速电机以及其他需要高精度无接触支撑的应用场合中的使用范围。

本文采用有限体积法的计算流体动力学 Fluent 软件，对基于 3D 打印制造设计思想的静压空气主轴承内部流体的气膜压力分布进行图像分析，研究了轴承转速、供气压力等因素对气体静压轴承承载力和静态刚度的影响，为进一步研究静压空气轴承的其他性能及航空用空气轴承的减重工作提供了一种新的方法。

## 1　基于 3D 打印制造技术的静压空气轴承设计

传统航空用静压空气轴承为实心结构，无法响应航空零部件追求极致轻量化，以提升使用性能、燃油效率、有效载荷和续航的需求。此外，静压空气轴承使用过程中常面临气压波动变化、压力分布不均等问题，需从结构设计与制造工艺等方面对静压空气轴承进行优化。因此，本文使用 UG 三维设计软件建立静压空气轴承的三维模型，并结合 3D 打印制造技术特点，采用分区设计理念，优化静压空气轴承内部流道结构，保证空气能均匀分布到整个轴承表面，形成稳定的气膜。对 3D 打印静压空气轴承实物进行了设计，如图 1 所示。选择孔的类型为复杂六边形结构，相对于传统的减材制造不仅减少了制造工序，还提高了材料利用率，体现出 3D 打印的加工制造优势。静压空气轴承外环面进气孔如图 2 所示，外表面六边形孔的内切圆直径为 2 mm，横截面比较大的外表面孔，利于空气顺利进入轴承里面，内表面六边形孔的内切圆直径为 1 mm，内表面的小孔可以起到节流作用。静压空气轴承剖视图如图 3 所示，轴承内部采用镂空设计并利用加强筋强化，使得减重的

中国知网　https://www.cnki.net

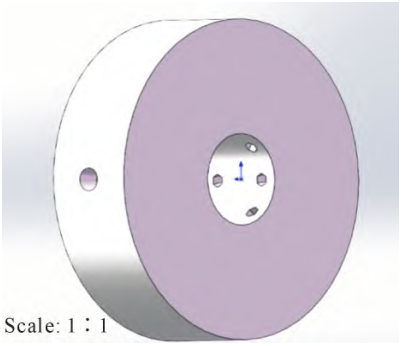


图 1 3D 打印静压空气轴承实物设计
Fig.1 Physical design of 3D-printed hydrostatic air bearings

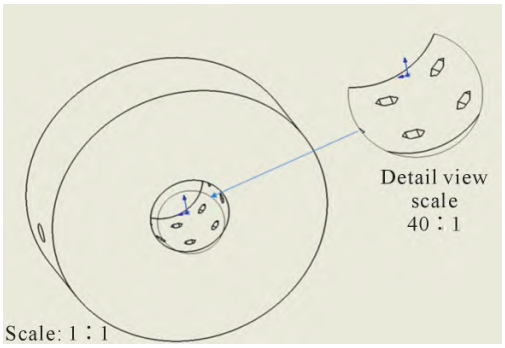


图 2 静压空气轴承外环面进气孔
Fig.2 Air inlet hole on the outer ring surface of a static pressure air bearing

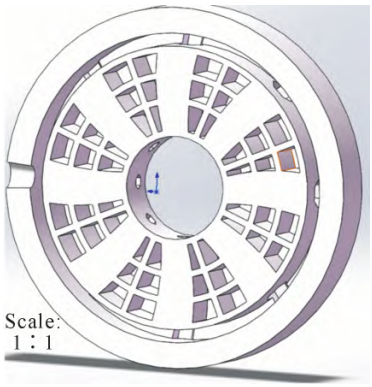


图 3 静压空气轴承剖视图
Fig.3 Section view of the static pressure air bearing system

同时不会影响轴承本身的刚度和承载能力，外环内测设有一圈气腔，可以保证空气等压送达到各个进气孔。经测算，采用 3D 打印制造技术，可使航空用静压空气轴承部件减重 43%，加工周期缩短 55%。

## 2 气膜模型的抽取及网格划分

在空气轴承的流体力学计算中，气膜抽取是对气体润滑膜形成的详细模拟过程，该过程利用 CFD 技术揭示了空气轴承运作时，高速旋转部件与固定部件间微小气隙内的气体动力学行为。通过高精度网格划分捕捉薄气膜区域的压力分布和流速变化，应用湍流模型描述气体流动特性，并设定合理的边界条件模拟气体抽取与填充动态平衡。计算过程中解析气膜厚度、承载力以及随载荷、转速变化的稳定性，确保空气轴承高效低摩擦运行，为工程设计提供关键数据支持。本文主要对轴承的承载力以及刚度进行分析，由于轴承的承载力以及刚度都是由轴承间的气膜所提供，所以结合 3D 打印静压空气轴承的设计模型，将轴承内部气体流动腔体物理模型简化为轴承间的气膜模型，用于后续计算与分析，气膜模型如图 4 所示。

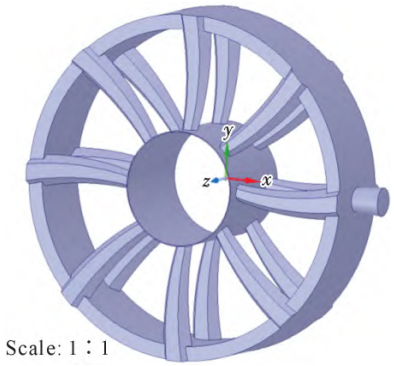


图 4 抽取后的气膜物理模型
Fig.4 Physical model of the extracted gas film

网格划分是实现对连续流场离散化以便于计算机求解的关键步骤，可将连续流场分割为离散单元的过程，旨在准确模拟流体行为、捕捉复杂现象、优化计算资源，并确保数值模拟的稳定性和收敛性。ICEM CFD 是高度智能化的高质量网格生产软件，是目前与 Fluent 配合最好的标准网格划分软件[19]。ICEM CFD 划分的网格主要有结构化与非结构化两种形式，结构化网格能够较好控制网格质量且网格数较少，使得其计算更易收敛；非结构化网格对模型的适应性好，使用人员对其进行网格划分的工作量较小，但其计算量比较大，网格质量不好控制，对计算机要求较高[20]。图 5 为静压空气轴承气膜网格的划分示意图。本文为更好地满足仿真分析的准确性和速率，同时尽量降低计算机的计算强度，根据前期 3D 打印设计的静压空气轴承结构特点，轴承进气孔

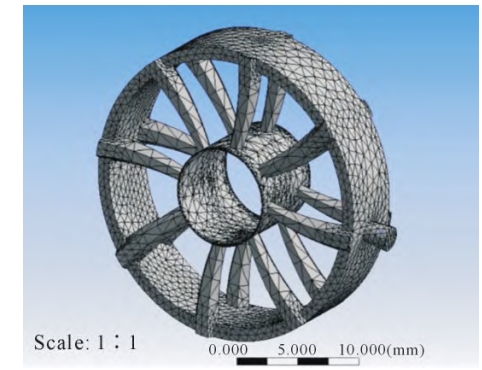


图 5 气膜的网格密度划分
Fig.5 Grid density division of the gas film

中国知网 https://www.cnki.net

处提供恒定压力，此处压力较大，相应网格进行加密处理；轴承气体出口处因为与大气压接触，此处压力较小，可适当降低网格密度。

## 3　计算模型及边界条件设定

Fluent 有压力求解器与密度求解器两种类型，均是将离散化的非线性控制方程线性化为每个计算单元变量的方程组，再依据其控制方程的线性化方式，对其进行隐式或显示求解。压力求解器是采用隐式方法进行求解，密度求解器则有隐式与显示两种处理方法。隐式解法的密度求解器求解过程中收敛速度较快，但会占用计算机较大内存，其所占内存一般为压力求解器的 1.5~2.0 倍[21-22]。本文研究的空气轴承润滑气体流动的马赫数较小，因此选择采用隐式算法的压力求解器进行计算。在选择压力求解器后需要定义求解器。由于流动工质是空气，为可压缩流动，故需选择能量方程；空气轴承节流孔出口附近可能存在气旋现象，而气旋区域的气体流动存在湍流，因此需选择湍流模型[23-24]。

$$P=\rho RT \tag{1}$$

式中，$P$ 为气体压力；$\rho$ 为气体密度；$R$ 为气体常数；$T$ 为气体温度。

$$\rho C_p\frac{\partial T}{\partial t}+\rho C_p u\cdot\nabla T=\nabla\cdot(k\nabla T)+S_h \tag{2}$$

式中，$C_p$ 为定压比热容；$t$ 为时间；$u$ 为气体速度矢量；$k$ 为热导率；$S_h$ 为热源项。

在本轴承–转子系统中，轴承采用铜合金，转子采用 AlSi10Mg 铝合金。因系统包含两种材料，故设定边界条件时需同步设定各自的导热系数，其中铜合金选用黄铜 HPb60-1-1，其导热系数为 315.2 W/(m·k)。其次，在轴承–转子系统的稳态热分析时，系统中只有轴承高速转动产生热量，因此无需对系统添加载荷约束，若轴承在超过 125 ℃的温度长期连转会降低轴承寿命，所以本文对轴承和转子之间设定一个 100 ℃的热源面，并且选择对流约束，由轴承的内径向外径对流，根据上述条件对气膜的稳态热分析、气膜压力云图及供气气压对轴承影响进行模拟与分析。

## 4　模拟结果

### 4.1　气膜的稳态热分析

将气膜与轴承的接触面作为热源，进行气膜的稳态热分析，得到气膜总热通量的分布，如图 6 所示。(因 $t$=0 s 时气膜热通量为 0，故不插入 $t$=0 时刻的分析结果)。图 7 是将气膜内节点 1s 内的热通向分布图数据化并进行图标绘制，得到气膜总热通量曲线图。

### 4.2　气膜压力云图

为更好地观测气膜的压力分布，将空气轴承气腔内的进气孔看作 16 个分别同时输送气体的进气口，气膜内环两个端面为出气口，边界条件设置为在轴承转速 60 000 r/min，供气气压 10 MPa，出口处的压强为标准大气压强 101.325 kPa 的条件下进行仿真分析，得到如图 8 所示的压力云图。

### 4.3　供气气压影响分析

进一步对供气气压对空气轴承特性的影响进行仿真分析，分析不同供气气压下气膜的承载力。根据承载力的理论公式对气膜进行边界条件的设定，偏心率 0.3，初步设定转速 60 000 r/min，得到转速为 6 283.19 r/s，分析切向力 $F_t$ 和法向力 $F_n$ 的曲线如图 11 和 12 所示。由图可知，在 7.5 到 15 MPa 的供气压力区间内，切向力的值在 14~30 N 之间，法向力的

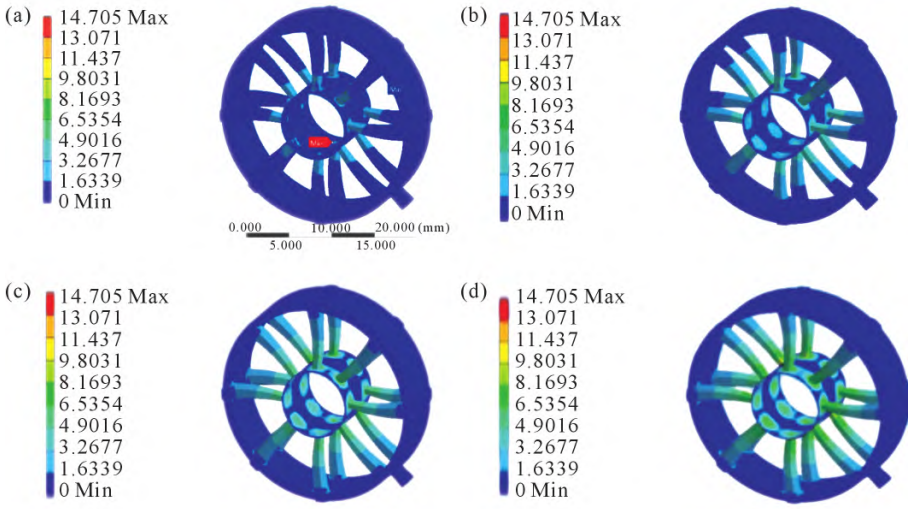


**图 6　不同时刻气膜的总热通量**：(a) $t$=0.25 s; (b) $t$=0.5 s; (c) $t$=0.75 s; (d) $t$=1 s

Fig.6　Total heat flux of the gas film at different time: (a) $t$=0.25 s; (b) $t$=0.5 s; (c) $t$=0.75 s; (d) $t$=1 s

中国知网　https://www.cnki.net

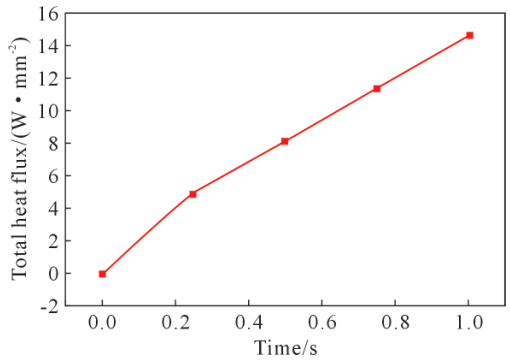


图 7 气膜总热通量曲线

Fig.7 Total heat flux curve of the gas film

值在 7~13.5 N 之间，将两个力进行合力计算，即可得到承载力。

## 5 模拟结果分析

### 5.1 气膜的稳态热结果分析

由图 6 可知，从热源开始向气膜外环进行扩散，温度主要集中在气体通道口处，这是因为气体在通道内流动时，与通道壁面发生热交换，导致热量在通道口附近积聚。从图 7 可知，气膜总热通量的变化趋势和轴承总热通量的趋势几乎相同，在 1 s 时达到最大值 15 W/mm²。这一结果表明，在该空气轴承的运行过程中，气膜在 1 s 内能够达到热稳定状态，且热通量最大值满足使用要求，为空气轴承的稳定运行提供了热学方面的保障。

### 5.2 气膜的压力云图结果分析

气体在气膜中的压力流动分布，总压为动压与静压之和，总压力云图体现了气体从进气口进入到出气口流出这一过程。其中静压是真实压力与操作压力之间的差值，静压是一种以操作压力为参考值的相对压力，它和轴承的承载力有关，静压云图如图 9 所示。动压是与速度有关的，动压的压力分布云图体现的是空气轴承的动压特性，动压的概念源于伯努利方程，动压的值是密度与速度乘积的一半，即 $0.5pv^2$，由此可知转速越大，动压越大，动压效应越明显，动压云图如图 10 所示。根据总压、静压及动压 3 种压力云图可知，3 种压力云图的变化趋势是相同的，此结构在气体入口处颜色最深、压力最大，压力值为给定的供气气压值；气膜中的压力分布较均匀，气体出口处压力最小，为 101.325 kPa。

### 5.3 供气气压影响结果分析

由图 11 和 12 可知，在 7.5 到 15 MPa 的供气压力区间内，切向力的值在 14~30 N 之间，法向力的值在 7~13.5 N 之间。由图 13 可知，当供气气压从

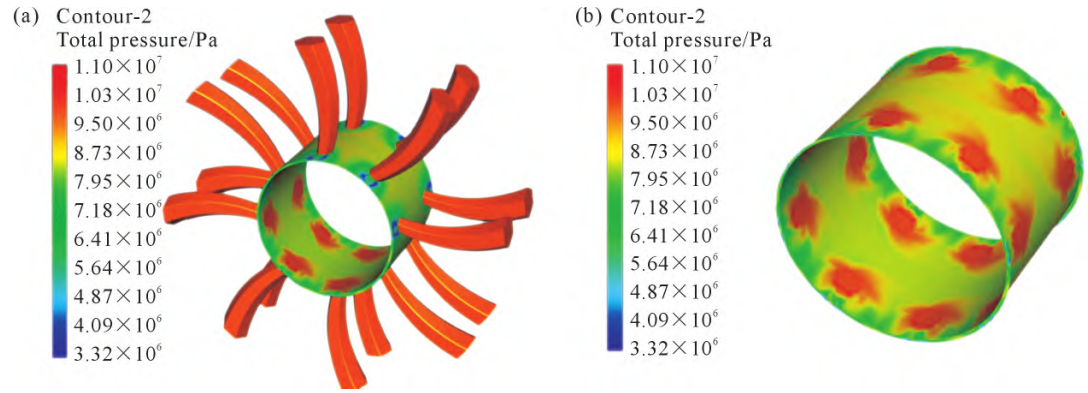


图 8 气膜总压力云图：(a) 壁和内膜；(b) 内膜

Fig.8 Cloud map of the total pressure of the gas film: (a) wall and inner membrane; (b) inner membrane

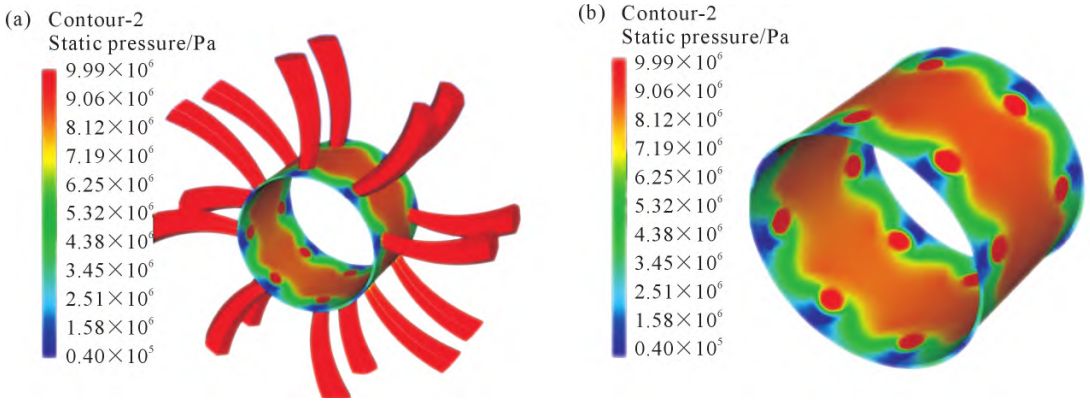


图 9 气膜静压力云图：(a) 壁和内膜；(b) 内膜

Fig.9 Cloud diagram of the static pressure of the gas film: (a) wall and inner membrane; (b) inner membrane

中国知网 https://www.cnki.net

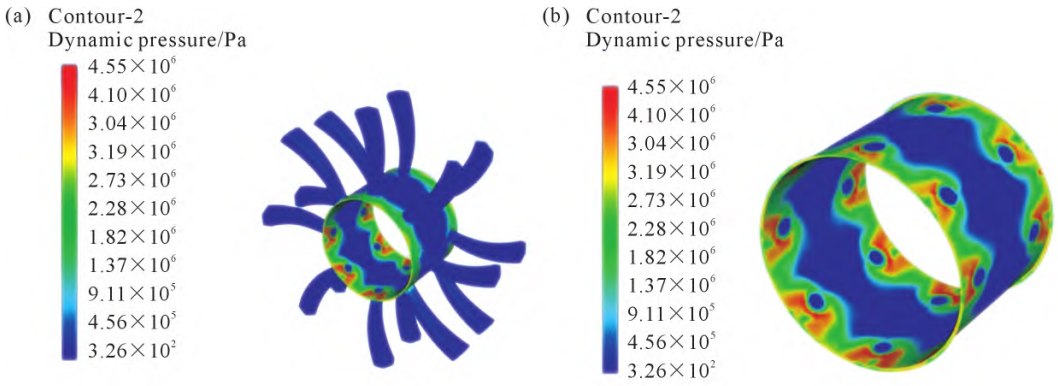


**图 10　气膜动压力云图：(a) 壁和内膜；(b) 内膜**

Fig.10　Aerodynamic pressure cloud map of the gas film: (a) wall and inner membrane; (b) inner membrane

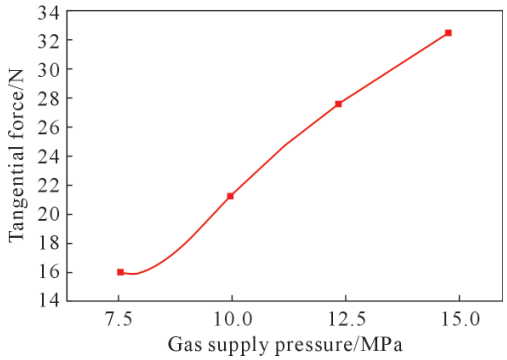


**图 11　切向力 $F_t$ 曲线**

Fig.11　Curve of the tangential force $F_t$

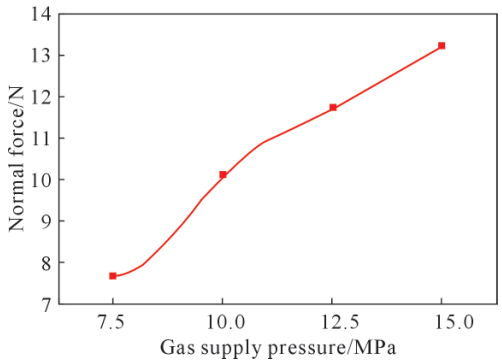


**图 12　法向力 $F_n$ 曲线**

Fig.12　Curve of the normal force $F_n$

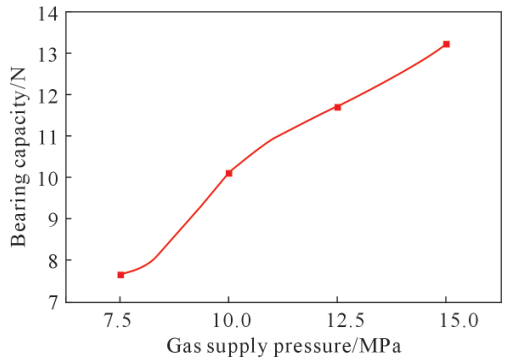


**图 13　供气气压对承载力的影响**

Fig.13　Effect of the gas supply pressure on the bearing capacity

**图 14　基于 SLM 技术打印新型结构轴承样件**

Fig.14　Printing new structural bearing samples via SLM

7.5 MPa 增加到 15 MPa，轴承的承载能力逐渐增加，从 19.977 8 N 提高到 32.501 0 N，且供气气压和气膜的承载力是成线性相关的，直线斜率几乎不变。

基于拓扑优化结构设计的动静压滑动轴承的制造采用的是德国 EOS M290 金属打印机。该机器用于批量生产模具、金属零部件，使用激光束对精细金属粉末以层为单位进行烧结，使得复杂的设计得以实现。本文金属打印过程中的工艺参数为：激光功率 320 W、扫描速度 1 250 mm/s、扫描间距 0.12 mm。图 14 为打印的轴承样件。轴承外径 50 mm，内径 20 mm，相比传统铸造轴承，3D 打印样件比强度提升 25%，表面粗糙度 Ra<6.3 μm。

在静态实验验证中，轴与轴瓦从启动到稳态各阶段、各个传感器点位的温度与压力变化数值各不相同。如表 1 所示，仿真与实验数据的误差控制在10%以内。通过分析影响该误差的参数，验证了本文所建数值模型的准确性。最终在低转速下基于拓扑优化

**表1 轴与轴瓦不同传感器点位温度与压力变化**

**Tab.1 Changes in temperature and pressure at different sensor points of the shaft and bearing bush**

| Supply pressure/MPa | Simulated load capacity/N | Experimental load capacity/N | Deviation /% |
|---|---|---|---|
| 7.5 | 19.98 | 21.5 | 7.6 |
| 10.0 | 24.30 | 26.1 | 7.3 |
| 15.0 | 32.50 | 35.2 | 8.3 |

中国知网　https://www.cnki.net

动静压滑动轴承温升约在13 ℃，承载力在 10 000 N，具有承载力较大，温升较小等优点，且结构设计呈现轻量化特点。实验表明，3D 打印轴承减重 43%，加工周期缩短 55%；供气气压从 7.5 MPa 增至 15 MPa 时，承载力从 19.98 N 提升至 32.50 N，线性相关性显著($R^2$=0.998)。

## 6 结论

(1)3D 打印制造技术的引入，显著提升了航空用静压空气轴承部件的整体性能并实现了减重目标。经测算，可使轴承部件减重 43%、加工周期缩短 55%。

(2)对气膜进行了稳态热分析，以轴承内某一点为分析对象得到 0~1 s 的曲线图，根据数据得到气膜总热通量最大值为 15 W/mm$^2$，达到使用要求。

(3)计算出不同供气压力下的切向力 $F_t$ 和法向力 $F_n$ 值，在 7.5~15 MPa 区间内 $F_t$ 值在 14~30 N之间，$F_n$ 值在 7~13.5 N 之间。供当供气气压从 7.5 MPa 增加到 15 MPa 时，轴承承载能力逐渐增加，从 19.977 8 N 提高到 32.501 0 N，且供气气压和气膜的承载力呈线性相关，直线斜率几乎不变。

### 参考文献：

[1] STOUT K J, BARRAUS S M. The design of aerostatic bearings for application to nanometre resolution manufacturing machine systems[J]. Tribology International, 2000, 33(12): 803-809.

[2] 刘壮壮，丁明路，谢建新. 金属 3D 打印数字化制造研究进展[J]. 金属学报，2024, 60(5): 569-584.
LIU Z Z, DING M L, XIE J X. Advancements in digital manufacturing for metal 3D printing[J]. Acta Metallurgica Sinica, 2024, 60(5): 569-584.

[3] 张赛博，赵俊淞，李小海，高胜学，丁兴平. 金属 3D 打印技术的应用与发展前景[J]. 装备制造技术，2022(11): 207-210.
ZHANG S B, ZHAO J S, LI X H, GAO S X, DING S P. Application and development prospect of metal 3D printing technology[J]. Equipment Manufacturing Technology, 2022(11): 207-210.

[4] 何伟，杨军红，杜小平，张曙香. 金属 3D 打印材料检测技术研究进展[J]. 世界有色金属，2018(24): 103-105.
HE W, YANG J H, DU X P. ZHANG S X. The studying progress of the inspecting technology in 3D printing metal materials [J]. World Nonferrous Metals, 2018(24): 103-105.

[5] MIYATAKE M, YOSHIMOTO S. Numerical investigation of static and dynamic characteristics of aerostatic thrust bearings with small feed holes[J]. Tribology International, 2010, 43(8): 1353-1359.

[6] BELFORTE G, COLOMBO F, RAPARELLIT, TRIVELLA A, VIKTOROV V. Experimental analysis of air pads with micro-holes[J]. Tribology Transactions, 2013, 56(2): 169-177.

[7] 郑海峰. 基于组合空气轴承的质量特性测量研究[D]. 哈尔滨：哈尔滨工业大学，2015
ZHENG H F. Mass property measurement using spherical air bearing[D]. Harbin: Harbin Institute of Technology, 2015.

[8] 李瑞锋，李客，周伟召. 激光金属 3D 打印技术的研究进展[J]. 粘接，2022, 49(7): 98-105.
LI R F, LI K, ZHOU W Z. Research progress in laser metal 3D printing technology[J]. Adhesion, 2022, 49(7): 98-105.

[9] 孙亮，石鑫. 3D 打印技术的应用与发展[J]. 浙江水利水电学院学报，2015, 27(2): 66-69.
SUN L, SHI X. Application of 3D printing technology[J]. Journal of Zhejiang University of Water Resources and Electric Power, 2015, 27(2): 66-69.

[10] 吴元辉. 基于 3D 打印的负泊松比结构高阻尼箔片气体动压轴承[D]. 长沙：湖南大学，2022.
WU Y H. A high damping gas foil bearing with negative Poisson's ratio structure manufactured by 3D printing[D]. Changsha: Hunan University, 2022.

[11] 史志利，常娅文. 基于 Fluent 流动电位法表征膜 Zeta 电位的流体模拟分析[J]. 广州化工，2024, 52(17): 64-66.
SHI Z L, CHANG Y W. Fluid simulation analysis of membrane Zeta potential characterization by streaming potential method based on Fluent[J]. Guangzhou Chemical Industry, 2024, 52(17): 64-66.

[12] 龙威，李军，包钢. FLUENT 软件在空气轴承研究领域的应用[J]. 机床与液压，2006(6): 151-153.
LONG W, LI J, BAO G. Application of FLUENT in the research of air bearing field[J]. Machine Tool & Hydraulics, 2006 (6): 151-153.

[13] 王三武，毛龙，杨涛，蒋益飞. 基于 FLUENT 的两种管道内流体分析[J]. 机械，2011, 38(6): 18-20.
WANG S W, MAO L, YANG T, JIANG Y F. Fluid analysis of different pipeline based on fluent radial[J]. Machinery, 2011, 38 (6): 18-20.

[14] 吴立春. FLUENT 软件在水力学中的应用进展[J]. 重庆教育学院学报，2009, 22(3): 66-68.
WU L C. Application progress of FLUENT software in the hydraulics[J]. Journal of Chongqing University of Education, 2009, 22(3): 66-68.

[15] 刘浩，须颖，王本明，姚建华，陶文彬. 多孔介质空气轴承静态特性仿真分析[J]. 液压与气动，2021, 45(11): 39-46.
LIU H, XU Y, WANG B M, YAO J H, TAO W B. Simulation analysis of static characteristics of porous media air bearing[J]. Chinese Hydraulics & Pneumatics, 2021, 45(11): 39-46.

[16] 薛义璇，陆金生，侯志勇，王燎原，单鸿波. 基于 Fluent 的小孔节流式空气静压轴承特性研究[J]. 自动化与仪表，2019, 34(4): 70-74.
XUE Y X, LU J S, HOU Z Y, WANG L Y, SHAN H B. Investigation on characteristics of orifice-type aerostatic bearing based on Fluent[J]. Automation & Instrumentation, 2019, 34(4): 70-74.

[17] 凌明祥，李明海，王珏，张荣，黎启胜. 空气轴承径向回转误差测量精度建模与仿真[J]. 计算机测量与控制，2013, 21(8): 2068-2070, 2073.
LING M X, LI M H, WANG J, ZHANG R, LI Q S. Modeling and simulation of precision in rotating error measurement of air-bear-

中国知网 https://www.cnki.net

ing[J]. Computer Measurement & Control, 2013, 21(8): 2068-2070, 2073.

[18] 胡坤，李振北. ANSYS ICEM CFD 工程实例详解[M]. 北京：人民邮电出版社，2014.

[19] 纪兵兵， 陈金瓶. ANSYS ICEM CFD 网格划分技术实例详解[M]. 北京：中国水利水电出版社，2012.

[20] 程志勇.小孔节流静压径向空气轴承承载力数值分析[D]. 武汉：华中科技大学，2017.
CHENG Z Y. Numerical analysis of load capacity of aerostatic radial air bearing with orifice restrictors[D]. Wuhan: Huazhong University of Science and Technology, 2017.

[21] 徐春冬. 空气轴承电主轴动力学特性分析[D]. 南京：东南大学，2015.
XU C D. Dynamic analysis of the motorized spindle with externally pressurized air bearings [D]. Nanjing: Southeast University, 2015.

[22] 潘春阳. 径向与球形静压气体轴承轴系设计及动力学特性分析[D]. 哈尔滨：东北林业大学，2017.
PAN C Y. Design and dynamic characteristics analysis of radial and spherical aerostatic bearing shafting [D]. Harbin: Northeast Forestry University, 2017.

[23] 于贺春，王广洲，王文博，张国庆，赵则祥. 基于 Fluent 的微孔节流气体静压止推轴承的参数设计与研究[J]. 机床与液压，2018, 46(13): 130-133.
YU H C, WANG G Z, WANG W B, ZHANG G Q, ZHAO Z X. Research on parameters design of micro-orifice restrictor aerostatic thrust bearings based on Fluent [J]. Machine Tool & Hydraulics, 2018, 46(13): 130-133.

[24] 曹炳章. 新能源汽车中静压空气轴承性能分析及优化设计[D]. 哈尔滨：东北林业大学，2020.
CAO B Z. Performance analysis and optimization design of hydrostatic air bearing in new Energy vehicles[D]. Harbin: Northeast Forestry University, 2020.

（责任编辑：杨浩雪）

中国知网　https://www.cnki.net