

箔片空气轴承的新近技术突破与应用进展

邓 建, 胡连桃, 黄昌华, 孔 华
(空军后勤学院, 江苏 徐州 221006)

摘要: 介绍箔片空气轴承的承载能力、耐高温固体润滑剂涂层、箔片空气轴承和转子系统的计算机建模新近技术突破, 并列举了在这些技术推动下箔片空气轴承在先进微型燃气轮机、航空涡轮发动机、微型涡轮发动机上应用的新进展。回顾了箔片空气轴承技术在我国的发展情况, 并提出了今后发展的一些建议。
关键词: 箔片空气轴承; 固体润滑剂; 涂层; 计算机建模
中图分类号: TH133.33 文献标识码: B 文章编号: 1000- 3762(2004) 08- 0041- 04

箔片空气轴承(Foil Air Bearing) 是以周围环境中的空气作为润滑剂并采用箔片作为弹性支承元件的一种动压轴承。主要有悬臂型、缠绕型、波箔型和外楔型等。国外从 20 世纪 70 年代就已经商品化并广泛应用于飞机的空气制冷系统中。

箔片空气轴承与传统意义上的轴承相比, 其最大的特点和本质区别就是采用了有弹性的箔片作为支承元件。这样箔片空气轴承便能够随时建立它的工作气膜间隙厚度, 能接受转子与轴承轴线不平行而产生的角偏差并允许一定程度的局部间隙变化, 并且箔片空气轴承结构产生的阻尼效应大大抑制了转子的振动, 使轴承具有高稳定性、耐振动冲击、启停性能好、装对中要求低的优点。箔片空气轴承以周围环境中的空气作为润滑剂, 与静压气体轴承相比不需要额外的供气系统, 使系统得以简化并增加了经济性; 与油润滑轴承相比, 则去除了油润滑系统, 这样机器重量大幅度减少、轴承- 转子系统几乎不需要维护, 还有降低摩擦功耗、对工作介质和环境无污染等优点。

20 世纪 80 年代到 90 年代中期, 当研究人员将箔片空气轴承应用于燃气涡轮时遇到了以下技术障碍而受阻: 承载能力低的限制、相对低的工作温度范围、转子系统的建模和设计工具的限制。直到最近几年, 箔片空气轴承技术才在以下三个方面获得了突破。

1 承载能力的提高

1.1 承载能力的计算

2000 年美国 NASA Glenn Research Center 的 Della Corte 等人员发现, 箔片空气轴承的承载能力与其结构设计、尺寸及轴的运转速度有关, 并揭示了单凭经验的方法计算承载能力的公式^[1]

$$W = \mathcal{D} (L \times D) (D \times \Omega)$$

式中 W ——稳态时的最大承载能力, N
 \mathcal{D} ——轴承承载力系统系数, $N/(mm^3 \cdot 10^3 \cdot r \cdot \min)$
 L ——轴承轴向长度, mm
 D ——轴承直径, mm
 Ω ——轴承的运转速度, $10^3 \cdot r/\min$

由公式可以看出, 箔片空气轴承的长度和内径越大、轴的转速越高, 它的承载能力越强。在实际场合中由于空间限制, 长度和内径不能太大, 并且承载能力与转速成线性关系, 因此要想获得高的承载力, 轴的转速就要在每分钟几万转、甚至几十万转以上。

1.2 先进的第三代箔片空气轴承

目前箔片空气轴承已发展到第三代, 由于对弹性支承元件结构进行了精细的设计, 其承载能力已达到了早期箔片空气轴承的 5 倍。20 世纪 60 年代和 70 年代的箔片空气轴承被称为第一代, 其显著特点是由沿轴向和圆周方向一律相同的一层简单弹性支承元件组成, 由于边缘部分空气的泄漏使其载荷较低, 承载力系数 \mathcal{D} 仅为 0.1 ~ 0.3, 被认为具有相对比较低的承载能力。在 20 世纪 70 年代和 80 年代出现的第二代箔片空气轴承, 波箔具有沿圆周方向或轴向自适应的特点。圆周自适应型的波箔沿圆周方向被裁剪成条状, 每条波箔沿轴向的长度不同; 变节距型波箔的节

迫类型的横向振动、轴向振动和扭转振动分析。DyRoBeS[®] 还有模拟箔片空气轴承参数变化的能力, 改变轴承- 转子系统的直径、长度、厚度和轴承在主轴上的位置, 便能消除主轴各种模式的振动。并且 DyRoBeS[®] 有精确地建模和分析现有硬件与经验数据作对比的能力, 为确认并纠正轴承- 转子系统不正常的工作参数和现场发现并修理故障提供了强有力的工具。

4 箔片空气轴承应用的新进展

在箔片空气轴承承载能力的提高、耐高温固体润滑剂涂层的研制成功、箔片空气轴承和转子系统的计算机建模这三个方面的技术突破下, 使得箔片空气轴承应用到能承受重载荷、工作温度更高、更具有挑战性的高速涡轮机械中。

4.1 微型燃气轮机

Model 330 微型燃气轮机是世界上第一台采用了箔片空气轴承技术的燃气轮机^[4], 如图 2 所示。它的设计大修周期为 40 000 h 甚至更高(相当于 5 年以上), 而同功率等级柴油机仅为 4 000 h 左右。在 45%~ 100% 的额定转速($96 \times 10^3 \text{ r/min}$)下, 箔片空气轴承能够建立起几微米的空气保护屏障层, 使转子平稳运行。在机组启动和停机时, 箔片表面的减摩涂层可使轴颈与箔片之间的接触摩擦降至最低程度。

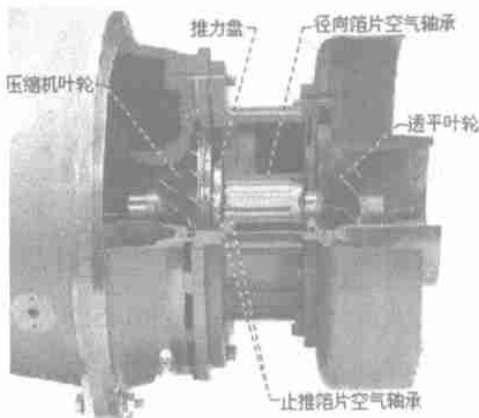


图 2 燃气轮机部分剖面图

4.2 航空用涡轮发动机

用箔片空气轴承替换油润滑系统可使发动机重量减轻 15%、成本减少 20%; 几乎免维护的耐高温涂层使发动机维护费用减少 50%; 发动机重量减轻和箔片空气轴承在高速高温下运转的能力还可提高功率密度 20%; 采用箔片空气轴承技术的发动机使能载 50 人的区域性喷气客机的直接运行费用减少 8%^[5]。

NASA 目前正在和 Williams International、MiTi 合作进行无油涡轮发动机技术项目的研究^[6], 其重点集中在制造 EJ- 22 型涡轮扇发动机的改进型身上——一种通过使用先进波箔型箔片空气轴承和 PS304 高温固体润滑剂涂层来革新原来的球轴承系统, 从而在历史上将第一次实现完全无油润滑的涡扇发动机。

4.3 微型涡轮发动机

2003 年初 MiTi 已对采用了微型箔片空气轴承的一个微型涡轮发动机模拟器进行了第一次成功的试验^[7], 使用了新近研制的沿径向剖分式的内径为 6 mm 的向心轴承和外径 15 mm、内径 8 mm 的推力轴承来支承微型涡轮发动机。

5 箔片空气轴承在我国的发展情况

在 20 世纪 90 年代初, 上海理工大学、中国航空工业第六〇九研究所、北京液体火箭发动机研究所等单位曾对波箔型和悬臂型箔片轴承进行了初步研究, 虽取得了一些进展, 但是鉴于箔片轴承在结构参数的选择、材料性能、加工工艺水平和装配精度等方面要求较高, 许多研究只限于理论分析而最终并没有进入实用。1997 年西安交通大学低温研究所在多年的研究基础上提出了一种新型结构的向心平箔型(Plate-Foil Type)箔片轴承^[8]: 该轴承由箔片元件和轴承座组成, 箔片元件采用一定厚度的热轧镀青铜片制成, 在其背面固定一定厚度的耐高温氟橡胶片作为弹性支承材料, 末端固定一根定位销, 安装时需将箔片元件逆转子旋转方向弯曲并沿着轴承定位销孔插入轴承座。随后在 150 m³/h 制氧机用低温透平膨胀机和 40 m³/h 空气制冷机用透平膨胀机上进行的一系列试验表明, 该箔片空气轴承具有良好的结构刚度和阻尼特性, 显示了良好的工作性能。目前, 苏州制氧机有限责任公司正在对这种箔片空气轴承进行工业试验考核。

2001 年由北京嘉捷博大电动车有限公司研制成功的我国第一辆混合动力大巴, 便是采用了两台 Capstone Turbines Corporation 生产的、采用了箔片空气轴承技术的 Model 330 微型燃气轮机作为动力。

由于我国还没有国产箔片空气轴承用于商业中, 对其研究还局限在低温领域应用和试验阶段, 与发达国家相比差距很大, 因此当前大力开发箔片空气轴承对于提高涡轮机械的经济性及扩大其应用范围是非常必要的。为此, 本文对我国发展

箔片空气轴承技术有如下建议:

(1) 鉴于箔片空气轴承的广阔应用前景, 建议在现有开发平箔型箔片空气轴承的经验和基础上, 进一步完善其承载机理的研究并优化其结构, 在保证性能和品质的基础上降低成本, 早日实现商品化, 使我国在箔片空气轴承领域占据一席之地。

(2) 产业部门尽快进口具有典型意义的箔片空气轴承产品进行分析和研究, 并与国外公司洽谈进行合作生产, 以积累知识、经验并形成自主开发能力。

(3) 具有优势的科研和制造部门联合攻关, 在箔片空气轴承的构造, 耐摩擦耐高温涂层的研制和转子-轴承系统的计算机建模方面作深入研究, 为实现产业化和扩展其应用范围铺平道路。

参考文献:

- [1] Della Corte C, Valco Mark J. Load Capacity Estimation of Foil Air Journal Bearings for Oil-Free Turbomachinery Applications [J], SFLE Tribology Transactions, 2000, 43 (4): 795-801.

- [2] Della Corte C, Edmonds BJ. Self-lubricating Composite Containing Chromium Oxide [P], US Patent # 5, 866, 518, 1999.
- [3] Heshmat H, et al. Oil-Free Turbocharger Demonstration Paves Way to Gas Turbine Engine Applications [J], ASME2000-GT-620, May 2000.
- [4] MTG Field Test Program: Interim Results, EPRI Solutions. Palo Alto, CA, California Energy Commission, Sacramento, CA: 2001 1006394.
- [5] Tribological Limitations in Gas Turbine Engines: A Workshop to Identify the Challenges and Set Future Directions [P], NASA/TM-2000-210059, 2000.
- [6] Compliant Foil Bearings for Advanced Oil Free Turbomachinery, Propulsion Directorate Monthly Accomplishment Report [R]. January 2003.
- [7] Tomaszewski M J., Slezak D G, Walton II J F, et al. Test of a Mesoscopic Turbine Simulator to Speeds in Excess of 700,000 rpm on Foil Bearings, International Joint Tribology Conference, 2003.
- [8] 侯 予等. 低温透平膨胀机用全动压气体轴承的设计与试验研究[J]. 深冷技术. 2002, (1): 6-9.

(编辑: 聂龙宣)

招 聘 启 事

上海弘隽贸易有限公司地处上海浦东新区, 专门从事各类轴承(尤其是汽车轴承)的开发和销售, 产品远销欧美市场。现诚招工程师2名, 要求如下:

一、工作内容

1. 配合业务人员解决客户提出的技术问题;
2. 帮助货源工厂开发新产品(绘制产品图纸, 核算产品成本等);
3. 产品出货前验货(需要出差);
4. 公司电脑局域网及软硬件维护。

二、工作经历

1. 熟悉轴承, 在轴承厂从事技术工作三年以上;
2. 洛阳工学院轴承专业毕业生优先考虑。

上海弘隽贸易有限公司

电话: 021-50945225 50945226 50945227 传真: 021-50945228

地址: 上海浦东东环龙路181弄35号申能龙阳公寓2601室(邮编: 200127)

E-MAIL: purchase@p-sh.com