

碳达峰碳中和政策 对航空轴承的影响与对策思考

中国航发哈尔滨轴承有限公司总工程师 马芳

【摘要】航空运输是交通运输碳排放中的重要组成部分，全球航空业、航空公司、制造商、零部件供应商均在不断提升技术，通过各种方式寻求实现碳中和目标。在当前发展预期下，重新审视航空轴承尤其是航空发动机轴承面临的影响与对策极为必要，为应对双碳政策在航空运输领域推进所带来的空前机遇与挑战，我国航空轴承领域亟待在产品创新和应用创新方面开展新技术与新产品研究，实现大尺寸高速圆锥/圆柱滚子轴承、开式转子发动机配套轴承、电磁悬浮轴承等关键产品创新；形成新型介质润滑、轴承绿色制造、低碳化试验评价等先进应用创新，构建分阶段全流程的航空轴承“碳优化”技术发展路径，为实现双碳目标与助力清洁能源发展贡献轴承力量。

【关键词】碳中和；碳达峰；航空轴承；航空发动机

0. 引言

2019年12月11日，欧盟公布了《欧洲绿色协议》，设定了2050年欧洲实现碳中和的目标。根据联合国政府间气候变化专门委员会（IPCC）的定义，碳中和是指当一个组织在1年内的二氧化碳排放通过二氧化碳去除技术应用达到平衡。碳中和已成为国际社会的环境管理工具，其实现途径分为碳排放和碳吸收两大类。2020年9月22日举行的第75届联合国大会一般性辩论上，习近平主席提出：中国二氧化碳排放力争于2030年前达到峰值，努力争取2060年前实现碳中和。2020年12月12日，习主席在气候雄心峰会进一步承诺：到2030年，中国单位国内生产总值二氧化碳排放将比2005年下降65%以上，非化石能源占一次能源消费比重将达到25%左右。实现碳达峰、碳中和目标。

在当前的技术实践与新能源发展趋势之中，不论是氢能航空还是电能汽车都已成为最为关注的焦点产品，而交通运输业也正是碳排放存量与增量的

最大来源。从全球范围看，交通运输行业的二氧化碳排放量占人类碳排放总量的四分之一；在我国，交通运输行业是国内碳排放三大行业之一，当前我国交通行业碳排放年均增速保持在 5% 以上，交通运输领域碳排放占全国终端碳排放约 10~15%。

交通运输的碳排放中，航空运输是重要组成部分，据统计，2020 年全球航空运输业每年的二氧化碳排放量超过 10 亿吨，约占全部人类活动碳排放的 2.8%；我国航空碳排放占交通运输中的 17.67%。数年来，全球航空业、航空公司、制造商、零部件供应商不断提升技术，通过各种方式寻求实现碳中和目标。在当前发展预期下，基于现有传统航空技术的进步，仍难以实现 2050 年碳排放量减少至 2005 年 50% 的目标，迫切需要新技术甚至是颠覆性技术改变航空技术现状以满足碳排放的要求。

在这一背景下，重新审视航空轴承尤其是航空发动机轴承面临的影响与对策极为必要，为应对双碳政策在航空运输领域推进所带来的空前机遇与挑战，我国航空轴承领域亟待在产品创新和应用创新方面迈出新的一步，攀登新的高峰。

1. 产品创新

1.1 大尺寸高速圆锥/圆柱滚子轴承

GTF（齿轮传动风扇）发动机已建立了对圆锥/圆柱滚子轴承的创新性应用，主要体现为在动力齿轮箱中采用大尺寸高性能圆锥/圆柱滚子轴承，作为构成齿轮传动结构的基础支承和重要构件，其中圆锥滚子轴承由于采用锥角设计，可承受较大的（单向）轴向和径向的联合负荷，应用潜力更大。目前普惠 PW100G 齿轮风扇发动机已投入商业运行，罗罗基于齿轮传动的 UltraFan 超扇发动机即将于 2022 年结束验证阶段，燃油效率可较遑达 700 提高 25%。国外主要轴承企业在齿轮传动风扇发动机用圆锥滚子轴承方面已处于领先地位。

位，FAG 已经形成了系统化的研究与产业化的应用，重点在圆锥滚子轴承承载能力、可靠性、高速性、低摩擦、低振动等性能指标提升方面获得突破，并且仍在进行着持续的优化改进。

此类产品的关键技术在于高度关注与航空动力制造商的联合研发，开展圆锥滚子轴承的结构设计和应用技术研究，建设专用大尺寸圆锥滚子轴承交付能力，重点满足高速、可靠性高、寿命长、低摩擦等要求，形成与 GTF 发动机方案协同的技术路线，并预先开展配套设计、工艺、检测、使用等方面技术研究，实现高性能圆锥滚子轴承的自主化研制。

1.2 开式转子发动机配套轴承

开式转子发动机出现于 20 世纪 70 年代末，也称无涵道风扇发动机或桨扇发动机，其兼具涡扇发动机巡航速度高（ $Ma0.7\sim 0.82$ ）和螺旋桨发动机推进效率高（ >0.8 ）特点。当前研究路线集中于采取先进的桨扇推进器作为产生拉力或推力的主体，对现有的涡扇发动机进行革新，即“超涵道比风扇”概念。先进桨扇推进器的应用提出了对反向旋转齿轮箱的需求，AVIO 发展了 PGB 反向旋转齿轮箱行星齿轮轴承方案，由行星齿轮单列调心滚子轴承以及配套新材料、表面处理、状态检测技术构成。

此类产品的关键技术基础为先进行星齿轮轴承设计与应用技术，与直升机减速/传动系统行星齿轮存在着一定技术差异。主要研究工作包括提升高速、无机匣气动负荷下轴承工况适应性设计、先进集成结构行星轮双列圆柱滚子及单列调心滚子轴承设计及制造、高承载/重量比与对中补偿工作状态下轴承承载分析与评价技术等。

1.3 电磁悬浮轴承

磁悬浮轴承是利用磁力将被控对象稳定悬浮于给定的位置，实现无接触的高性能轴承。常用的主动磁悬浮轴承由传感器、被悬浮物体（转子）、控制

器和执行器四大部分组成。用磁悬浮轴承取代传统滚动轴承设计的多电发动机(也称全电发动机)是航空发动机的未来发展方向,发达国家已将其列为 21 世纪先进航空发动机高效率与轻量化的关键高新技术,并开始应用研究;电磁悬浮轴承在小型发动机以及智能发动机中有很大的应用前景。

此类产品的关键技术基础为磁悬浮轴承的航发适应性改进与失效预防保护技术,航空特殊条件下磁悬浮轴承的应用技术等。在航空发动机应用中,磁悬浮轴承需要适应相应环境参数,如 250℃以上的高温,周期性不稳定气动附加载荷,对发动机高速转子的位置进行检测实现悬浮等。为满足这些极端特殊环境要求,需要在材料、结构、加工制造工艺和控制算法等方面采取一系列的专门措施,并且需要相应的试验条件以及跨学科协同攻关。



图 1 未来航空动力技术

2. 应用创新

2.1 新型介质润滑

随着航空动力系统革新,燃油、液氢等工作介质直接润滑可以提供更低的温度输入或更小的结构重量,对轴承系统提出了全新的技术要求。

此类应用关键技术基础为介质材料相容性分析及润滑影响分析技术

等。主要研究新润滑介质与轴承材料相容性问题、新润滑介质对钢材、高分子材料、陶瓷等材料的相容性问题。尤其针对高温、高压的工况条件下，是否会对材料的热稳定性、化学稳定性产生不良影响。新润滑介质对轴承润滑性能的影响方面，主要研究针对工况的润滑剂材料性能，极压性能、化学性能、热性能、低温特性、电磁特性等。通过轴承台架试验，验证其是否能够满足润滑要求，同时对轴承疲劳寿命进行评估。

2.2 轴承绿色制造

轴承的绿色制造主要涵盖锻造、热处理、冷工艺、再制造等环节，相对传统轴承工艺发生了显著改变。

该领域重点为发展近净成型技术，改革自由锻制坯-辗环工艺，采用精密锻造方法，并全线控制金属流线，提高轴承疲劳寿命。近净成形是在材料再结晶温度以上进行锻造，成形后只需要进行少量机加或不再机加即符合最终零件质量和形状要求的成形技术，是先进制造技术的重要组成部分。不仅节约材料、能源，减少加工工序，显著提高生产率和产品质量，降低生产成本，还可以使金属流线沿零件轮廓合理分布，获得更好的材料组织结构与性能，从而提高产品可靠性和使用寿命。

2.3 低碳化试验评价

低碳化试验评价是在航空轴承产品研制方式改进和试验验证技术革新两方面共同基础上发展的新型轴承试验体系。

在改进产品研制模式方面，是通过绿色试验理念，实现试能源、物资消耗根本性下降。搭建完善的四级试验体系，开展一级材料评估试验形成材料基础数据库，结合二级标准轴承寿命修正系数评估试验，完善轴承实际寿命预测，补充三级全尺寸轴承工况适应性考核试验，替代耗时长、任务量大，能耗高的传统寿命可靠性试验，更加准确更加绿色的完成产品试验。

同时，采用新技术开展轴承试验平台开发，试验设备节能减耗淘汰升级，结合四级试验体系，针对电混/全电环境等新技术概念轴承，建设试验设备、平台，保证新技术概念轴承的工况适应性充分考核，通过数据积累支撑设计迭代优化，解决新技术概念轴承工作环境中可能面临的污染、电蚀、脆性、冲击蠕变等化学、物理损伤问题，实现新技术概念轴承的可靠性设计，为航空发动机绿色发展提供可靠性验证保障。

3. 总结与展望

通过以上对双碳政策下航空轴承产品创新与应用创新的思考，建议应以全面布局，重点突破，循序渐进，阶段提升的模式开展航空轴承“碳优化”体系构建，走出中国高端航空轴承的发展新路。

具体的航空轴承领域碳优化发展可规划为三个主要阶段。

(1) 第一阶段 当前~2025年

推进碳优化技术基础研究，以减少现有轴承生产交付能源消耗为基础，常规结构技术改进为主导，实现初步的航空轴承碳优化技术储备，应对“双碳”政策、产业革新等不确定性风险。

(2) 第二阶段 2025年~2035年

开展碳优化技术原理验证，关注航空领域重点发展的低碳动力系统技术路线，进一步巩固碳优化轴承产品预研优势能力，验证并提升相关技术成熟度。

(3) 第三阶段 2035年~2050年及未来

推进碳优化技术全流程应用，立足航空配套领域发展趋势，推进自主研发能力建设，推进各项前期关键技术研究工程化应用与产品转化。

【参考文献】

- [1]韩玉琪, 王则皓等.通向碳中和的航空新能源动力发展路径分析[J].航空动力, 2022,000(003): 13-15.
- [2]邱明.轴承关键共性技术研究现状和发展趋势[J].2016 上海国际轴承峰会论文集, 2016,40(6): 68-72.