

电动轮缘风扇与无轴涡轮电发动机概念研究*

Concept Study of Electric Rim Fan and Shaftless Turbine Electric Engine

■ 姚轩宇 蒋承志 满运堃 赵晨彦 / 中国航发研究院

随着电气化的深入，除了进一步提升电动机各项性能外，将电动机设计融入到现有航空动力系统的设计中，通过电动机转子部分与轮缘风扇的叶片或轮缘结合，定子部分布置于涵道短舱或机匣中，实现叶轮机械与电机结构的融合设计，成为动力系统集成优化的潜在技术方向。

电动轮缘风扇将电动机与风扇融合，具有结构紧凑、控制灵活、布置便利等优点，可应用于航空电推进系统的推进单元设计，也可集成在航空发动机设计中用于实现变工况调节、启动/发电一体化、功率提取等功能，支撑航空发动机电气化设计与总体性能提升。基于这一技术路线提出的无轴涡轮电发动机概念方案，则是将电机与叶轮机械一体化，摆脱轴系设计约束，使得发动机设计匹配与能量输出方式更为灵活，可为航空动力电气化提供新思路。

电机/风扇一体化设计的提出与发展

将电机与叶片或风扇结合的技术思路并非首次提出，在舰船和航空领域均有团队开展了相关概念研究与技术研制。

在舰船推进领域，研究人员提出了将环形同步电动机与导管式推进器一体化设计的推进方案。挪威布鲁伏尔（BRUNVOLL）公司与德国福伊特（VOITH）公司在2005年

先后推出了推进器样机^[1]；马伟明院士团队在2017年针对潜艇动力需求提出了一种无轴泵喷推进器^[2]，将螺旋桨与电动机转子结合，在螺旋桨外边加一个环状导管，以屏蔽螺旋桨旋转产生的噪声，并通过定子与导管改善进流条件，使流场更均匀、流速更快，从而提高推进效率。

在航空推进领域，美国国家航空航天局（NASA）于2006年在基础

航空计划中对磁悬浮涵道风扇开展研究^[3]。项目由格伦研究中心团队承担，提出磁悬浮涵道风扇方案，将磁悬浮技术应用于电动轮缘风扇设计，通过应用磁悬浮轴承将传统机械连接变为非接触式连接，使风扇的疲劳寿命提高一倍^[4]，如图1所示。

在项目支持下，格伦研究中心团队针对磁悬浮涵道风扇技术开展了方案设计、理论模型开发和仿真

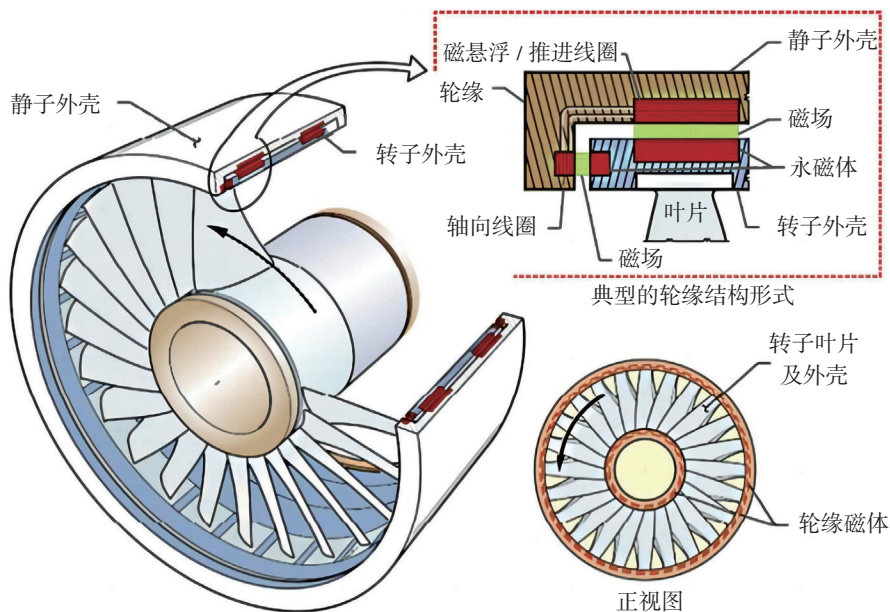


图1 磁悬浮涵道风扇原理示意

*基金项目：先进航空动力创新工作站项目（HKCX2019-01-011）

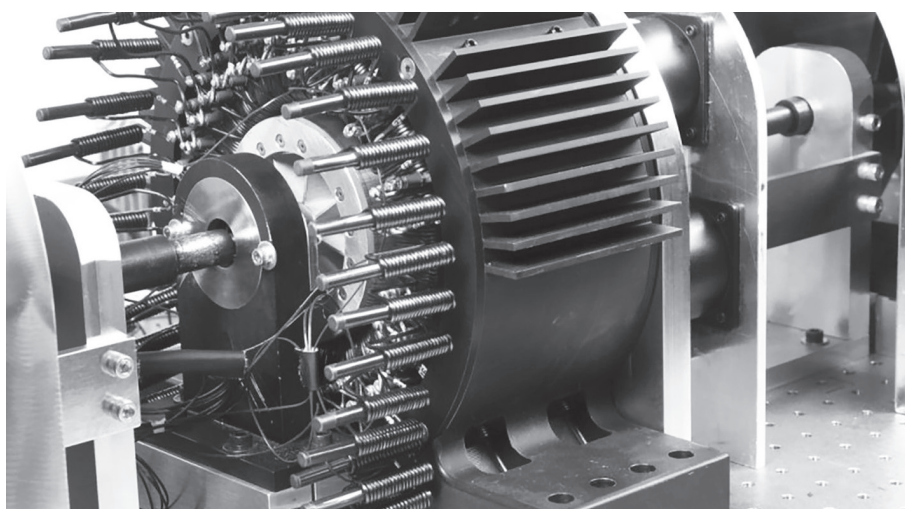


图2 10cm磁悬浮涵道风扇

模拟分析、硬件试制和试验。开发了理论模型来推导和预测磁悬浮涵道风扇的悬浮和推进性能，通过有限元分析成功完成了理论推导验证。2008年该团队完成了10cm磁悬浮涵道风扇的试制^[5]，如图2所示，通过样机试验验证了磁悬浮涵道风扇基本原理可行性，以及提出的理论分析方法。研究表明该技术有望为航空推进带来显著性能提升，同时也具备应用于发电机和飞轮等其他领域的技术潜力^[4]。

2020年，美国SBA（SonicBlue

Aerospace）公司基于前期的研究，提出了将电动轮缘风扇应用于高超声速组合动力中的发动机概念方案Hyscram^[6]，如图3所示。方案中采用了全电化设计，风扇、压气机采用超导电动机驱动，涡轮则带动超导发电机提取电能，通过磁悬浮、超导等技术应用，实现风扇和压气机解耦设计，满足宽马赫数工况范围内的流量调节，大幅提高发动机整体效率。

2019年，先进航空动力创新工作站围绕未来航空电推进发展，布

局了基于电机与叶轮机械一体化设计的推进方案概念研究，开展磁悬浮轮缘风扇原理样机设计与验证，提出了电功率分配输出取代传统高低压轴机械功率传递的无轴涡轮电发动机概念方案。通过风扇、压气机、涡轮等独立转速调控与设计优化，实现发动机宽工况调节与性能优化，结合分布式电推进设计还可进一步支撑航空电推进系统综合能力提升。

在航空推进中的应用前景

电机与叶轮机械的一体化设计可为航空电推进系统设计与性能提升带来多方面的收益，按照应用场景与集成难度，可将其应用于以下3个方面。

一是直接用于电推进风扇设计，作为分布式电推进系统中的推进单元使用。在传统电动涵道风扇方案中，电动机的布置往往是重要的制约因素。由于电动机功重比与转速、外廓尺寸、工作温度等密切相关，为兼顾电动涵道风扇推进性能与质量，给内置式电动机设计与热管理带来挑战。特别是当一些飞行器布局方案对推进单元尺寸约束严格、或者风扇功率较大时，电动涵

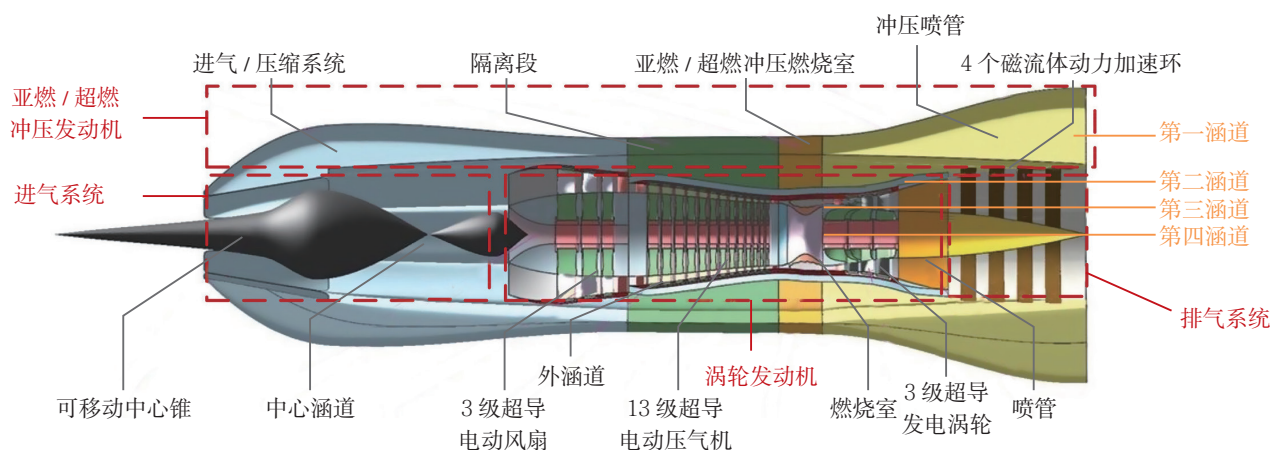


图3 Hyscram概念发动机

道风扇往往采用外置电动机配合传动系统的设计方式，这既带来了系统质量与复杂度的增加，也使得推进风扇在飞行器上安装位置受到更多限制，不利于发挥电推进系统飞推一体化优势。采用电动轮缘风扇的方式，可降低电磁设计环节由于空间与散热约束带来的难度，避免了内置电动机带来的对内流道气动设计的影响，并使得推进风扇结构更为紧凑，便于在飞行器上安装布置，有利于分布式电推进与飞行器气动设计的结合。此类应用作为航空电推进系统中的独立功能单元使用，可成为现有推进涵道风扇的替代方案，实现难度相对较低。

二是用于对航空发动机电气部件集成设计，将发动机一级或多级叶片与电机融合作为起动/发电一体化电机替代方案，或作为轴功率提取与轴转速调节手段。内置式起动/发电一体化电机设计主要挑战包括内部空间紧张、冷却不足易过热等问题，采用轮缘风扇结构将定子外置于机匣，结构与冷却易于实现，且可支持的电功率设计上限更高。通过在高低压轴分别布置并配合能量管理控制，还可为转子系统功率分配与转速调节控制提供支持。虽然与电动机转子融合导致该级风扇或压气机叶片气动性能可能有所牺牲，但通过整机集成优化可以减小负面影响。在应用中发动机现有轴系设计与支撑形式不会出现较大变化，可在不对发动机总体性能和结构带来颠覆性改变的前提下实现局部电气化改造。MTU公司在对涡喷发动机的起动/发电一体化电机优化时曾采用叶轮机械与电机一体化的设计方案^[7]，通过发动机中高压压气

机与发电机的集成来实现减轻质量和优化安装空间，并可减少发电机的拆卸和维护成本。此类应用具备一定的可用性，但作为航空发动机部件集成到发动机中涉及气动、结构、控制等多方面的匹配设计与集成优化，具有一定的实现难度。

三是用于对航空发动机局部或全部的电气化改造，用于单级风扇独立控制以实现流量调节等特定功能，或将全部叶轮机械电气化以摆脱传统轴系约束。传统轴系设计高效、紧凑且可靠，优点突出，但也带来转速上的限制。风扇、压气机以及涡轮转速设计的最佳点各不相同，同一轴上各级叶轮机械的转速设计匹配以及调节控制受到制约。通过三转子或齿轮传动等方式能够在一定程度上解决转速制约问题，但在结构、传动等方面设计难度明显提升。电动轮缘风扇可作为独立的风扇级或压缩级集成在发动机中，通过电磁驱动实现转速按需灵活调节，满足当前工况需求。电驱动不仅具有转速调节快速、灵活、精确的优点，还易实现转向变化，可用于对转设计。如果将全部叶轮机械电气化，利用电功率传输完全取代了传统的高低压机械轴功率传输，风扇、压气机及涡轮之间不再有机机械连接，发动机既可输出推力也可以电能为主要动力输出形式，形成无轴涡轮电发动机概念方案。该方案中每级风扇、压气机是独立电驱动单元，每级涡轮是一个独立的涡轮发电单元，这样机械解耦后的发动机在整个飞行过程中，各级单元能迅速响应不断变化的飞行工况和飞机动力需求，分别调整至最佳转速。通过转速调节与匹配控制，使

得各部件能达到较高的效率，进而也能提高压比、减少压缩系统级数。还可通过调节进气流量及分配，达到调节涵道比、改变循环参数的效果。初步概念研究表明通过转速调节可实现部件效率显著提升，功率输出提升18%；结合优化调节，实现比同量级传统发动机耗油率降低10%以上。同时由于功率输出以电能为主，可配合分布式电推进实现综合效能提升。此类应用方向面临的技术挑战更多，除对叶轮机械与电机一体化设计技术提出更高要求，还离不开对磁悬浮、高效电功转化等相关技术提升，在航空领域应用尚有一定距离。

技术挑战与未来关注方向

通过一体化设计，电动轮缘风扇获得多方面性能收益的同时，也有不少待解决的技术问题，其中既包括了航空推进电气化过程中的一些共性问题，也有由于一体化和集成设计带来的新难题。

航空推进电气化发展回避不了由于电能与机械能转化带来的效率损失问题，与之同时产生的还有额外的散热和质量问题，电动轮缘风扇作为一种将叶轮机械电气化的技术方案也面临类似的挑战。采用常规电磁设计方案，电动轮缘风扇工作在电动或发电模式下的效率与常规电动机相当。随着应用功率和电气化程度提升，需要在超导等技术应用方面有所突破，否则质量等代价将使得性能取得的收益大打折扣。

叶轮机械的电气化与轴承支撑的电气化有着非常高的契合度，应用磁悬浮轴承的磁悬浮电动轮缘风扇理论上能够将电机与叶轮机械一

体化设计的优势放大^[8]。但目前大尺寸的磁悬浮轴承设计技术还有待突破,在已完成的磁悬浮电动轮缘风扇样机中,由于磁悬浮系统带来的质量代价占到了总质量的一半,同时带来转速、振动、尺寸以及控制设计方面的问题,单一磁悬浮支撑形式还难以满足需求。除常规轴承外,采用磁悬浮轴承与空气轴承等组合式支撑方案也可能成为一种可选方案,大幅减轻整体结构质量和缩小尺寸。

轮缘风扇与电机的一体化设计本身也面临着一些难点。目前受材料强度等制约,布置于轮缘或叶片上的电机转子部分可承受的线速度往往低于现有叶尖线速度。采用开关磁阻式等电磁驱动设计带来的转矩脉动等问题与叶片本身气动、结构等设计间存在一定耦合,需要结合应用需求从性能匹配、尺寸约束、结构方案、材料选取以及控制实现等多方面综合考虑,完成满足多种约束下气动、结构及电磁设计与优化。

从系统集成的角度,除了电动轮缘风扇自身的轻量化与小型化,还需要解决与整机或系统集成中的结构集成、热管理、电力输配问题。作为部件的电动轮缘风扇虽然可以实现转速自由调节,但在适配不同工况、能量分配过程中,特别是在多级、对转等情况下,系统匹配与综合优化更为复杂。摆脱轴系的耦合付出的代价是系统复杂度的大幅提升,使得系统控制设计与可靠性设计变得更具挑战。

结束语

电动轮缘风扇体现的是一种将电机与叶轮机械融合的设计思路,虽然距离工程化还有着不少需要解决的问题,但在结构形式、效率提升、功能拓展等方面展现出了独特优势,为未来航空动力更深度电气化、模块化设计提供了新思路,罗罗公司在“暴风”战斗机上也采用了相应的轮缘结构进行起动/发电一体化电机的设计,如图4所示。该设计

不仅适用于航空电推进系统,还可应用于高超声速组合动力、宽速域变循环动力中,具有广阔的应用前景。

航空动力

(姚轩宇,中国航发研究院,高级工程师,主要从事航空新型动力技术研究)

参考文献

- [1] 谈微中,严新平,刘正林,等.无轴轮缘推进系统的研究现状与展望[J].武汉理工大学学报(交通科学与工程版),2015,39(3):601-605.
- [2] 王群.无轴泵喷推进器:下一代核潜艇的推进系统[N].中国国防报,2017-07-21.
- [3] EICHENBERG D J, EMERSON D C, GALLO C A, et al. Levitated Duct Fan (LDF) Aircraft Auxiliary Generator[R]. 2011.
- [4] EICHENBERG D J, SOLANO P A, THOMPSON W K, et al. Development of a 32 inch diameter levitated ducted fan conceptual design[R]. 2006.
- [5] EICHENBERG D J, GALLO C A, THOMPSON W K. Development and testing of a radial halbach magnetic bearing[R]. 2006.
- [6] 刘腾跃,刘金超,李明.美国卢格系列高超声速组合发动机概念研究[J].航空动力,2020(3):15-18.
- [7] SHARP J. Jet engine comprising an integrated electric motor/generator unit: U.S. Patent 7,973,421[P]. 2011-7-5.
- [8] QIAN Y P, LUO Y W, HU X Y, et al. Improving the performance of ducted fans for VTOL applications: A review[J]. Science China Technological Sciences, 2022, 65(11): 2521-2541.



图4 轮缘发电机在罗罗公司“暴风”战斗机上的应用