

新概念发动机——对转涡扇发动机

New Concept Engine: Counter Rotating Turbofan Engine

中航工业西安航空动力股份有限公司 李 杰 余锦涛



李 杰

中航工业西安航空动力股份有限公司动力国际分公司高级工程师,从事外贸技术与管理工作。

在欧盟的环保型航空发动机(VITAL- Environmentally Friendly Aeroengine)项目中,以法国斯奈克玛公司为首对对转涡扇项目进行了预研。

对转涡扇(Counter Rotating Turbofan, CRTF)发动机是一种新概念发动机,可在相同涵道比和相同的技术水平条件下为发动机带来更低的噪声和更低的燃油消耗。对转涡

目前,对转涡扇发动机还处在部件和子系统的相关技术的概念试验和验证阶段,虽然在欧盟启动的环保型航空发动机项目中,对一些相关技术进行了航空声学风洞测试和机械性能台架测试,但还没有到发动机整体方案设计阶段,还有许多关键技术需要突破。本文对对转涡扇发动机概念和研究进展做一概括性介绍,并对其研制中需要突破的关键技术和研究重点进行了阐述,可供航空发动机业界相关人士参考。

扇发动机的目的是通过降低两个对转风扇的转速来进一步降低噪声和燃油消耗,而不需要增加发动机风扇的直径。

本文就对转涡扇发动机作介绍的同时对欧盟环保型航空发动机项目一并做了简介以供航空发动机业界相关人士参考。

对转涡扇发动机原理概述

对转涡扇发动机的设计理念来源于对转桨扇(Counter Rotating Propfan, CRP)发动机或无涵道风扇(Unducted Fan, UDF)发动机。由于

石油危机,20世纪70年代和80年代对转桨扇发动机和无涵道风扇发动机成为研究的热门,但由于噪声、安全性,以及飞机安装上的复杂性使其没能获得应用。

对转涡扇发动机的原理很简单,是在常规风扇发动机的风扇中增加了一级对转的风扇,两级对转的风扇通过两个套在一起对转的轴分别与两组对转的低压涡轮组相连。在不带减速齿轮箱的前提下,降低风扇叶尖速度,从而提高风扇叶片的效率和可靠性。

为了使两组风扇对转,发动机的

结构为三转子结构。这种三转子结构与目前所用的常规三转子发动机机构有所不同,整个低压涡轮设计成两组对转的低压涡轮组,两组对转的低压涡轮叶片可以互为导向叶片,消除了常规发动机低压涡轮的静子,为发

在航空动力学、声学以及机械性能评估方面所提供的支持,首先完成了第一个对转涡扇的设计,称作 CRTF1 (见图 2),其前风扇叶片数为 10 片,后风扇叶片数为 14 片。

2006 年巴拉诺夫中央航空发动

改进进行研究。

2007 年对 CRTF1 样机进行了声学测试,同时应用 2006 年的研究成果分别设计了 CRTF2a 和 CRTF2b 两种对转涡扇用于进一步研究。声学测试在俄罗斯巴拉诺夫中央航空发动机研究所的 C3-A 消音室进行;巴拉诺夫中央航空发动机研究所负责 CRTF2a 的设计研究;德国航空航天中心负责 CRTF2b 的设计研究。在 CRTF2a 和 CRTF2b 两个设计方案中,一个方案的叶片数与 CRTF1 相同为前风扇 10 片/后风扇 14 片,一个方案的叶片数为前风扇 9 片/后风扇 11 片。

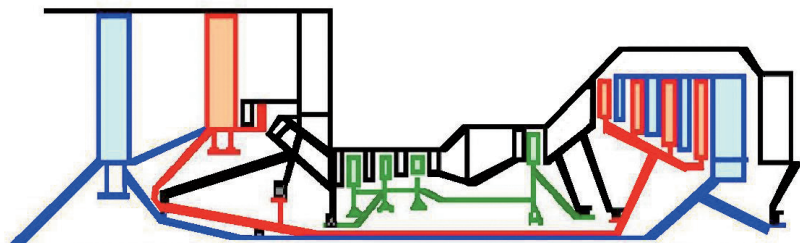


图1 对转涡扇发动机结构示意图

动机低压涡轮的设计带来革命性创新的机会。

图 1 描述了对转涡轮风扇技术的宏观设计理念:核心机高压转子标记为绿色,低压前风扇与其相连的低压涡轮转子标记为蓝色;低压后风扇以及与其相连的低压涡轮转子标记为红色^[1-2]。

由于两组风扇对转,第二级风扇的压比可以保持在相当高的水平之上,其压比约为 1.4~1.6。与常规同向旋转多级风扇相比,在风扇尺寸相同和达到相同压比的条件下可使风扇的转速大为降低。风扇转速的降低不但可以降低噪声,还可以实现风扇效率的最优化,从而降低燃油消耗。为此,用双级对转风扇替代传统风扇是一个解决风扇直径限制的良好解决方案。

对转涡扇发动机研究现状

在欧盟的环保型航空发动机项目中,由法国斯奈克玛公司领导对对转涡扇项目进行了预研并对实体样机进行了相关测试。研究的主要目的是为了验证对转涡扇概念的表现和可靠性。

2005 年斯奈克玛通过俄罗斯巴拉诺夫中央航空发动机研究所 (CIAM) 和德国航空航天中心 (DLR)

机研究所和罗马尼亚燃气涡轮发展研究所 (COMOTI) 制造了 CRTF1 实体样机,并进行了部件的台架测试。

同时为了研究 CRTF1 的设计与改进潜力,在法国国家航空航天研究中心 (ONERA) 和巴黎第六大学 (UPMC) 的支持下,德国航空航天中心、俄罗斯巴拉诺夫中央航空发动机研究所以及比利时宇航研究卓越中心 (Cenaero) 联合启动了一个大型的概念研究项目,应用先进的气动和声学设计工具对 CRTF1 的设计和潜在

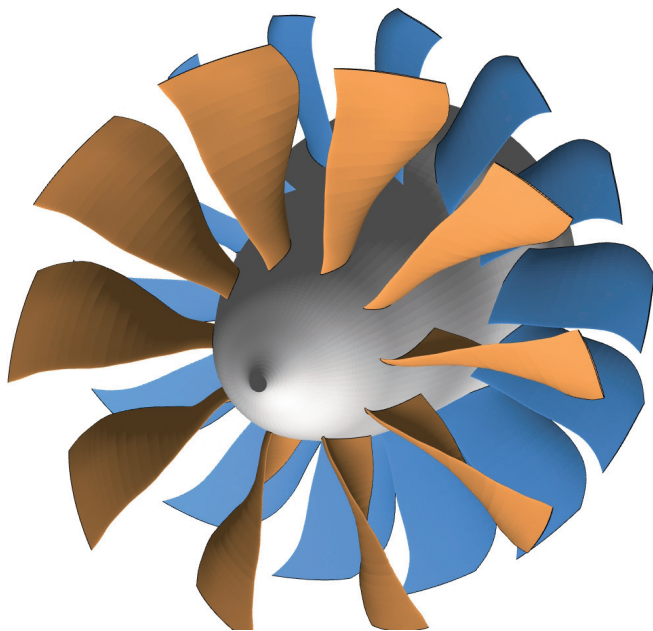


图2 斯奈克玛设计的CRTF1的3D样机

2008 年对最终确定结构的 CRTF1 样机进行了测试,图 3 是试验台上 CRTF1 的 1/4 实体样机。2008 年还进行了 CRTF2a 和 CRTF2b 两种对转涡扇样机的制造。CRTF1 的结构试验在巴拉诺夫中央航空发动机研究所完成。

2009 年对 CRTF2a 样机进行了测试,获得了相应的声学性能参数。同时还对 CRTF2a 样机和 CRTF2b 样机进行了空气动力学方面的测试。由于两级风扇间的交互



图3 试验台上CRTF1的1/4实体样机

噪声,首次声学性能测试结果没有预期的好,但气动性能测试结果令人非常满意,可以提高效益达2个百分点。

2010年制造了实体的CRTF2b,CRTF2b的风扇由菲利普飞机制造与工程集团制造,静子件由罗马尼亚燃气涡轮发展研究所制造,并于同年10月对其进行了测试。

对转涡扇发动机的研究重点和需要突破的关键技术

对转涡扇发动机是一种全新概念的发动机,尚处在研究的初始阶段,要使其得到应用还有很长的路要走,从目前的研制进展来看还有许多关键技术需要突破。

1 对转涡扇的降噪

从目前的测试结果来看,对转涡扇的降噪效果没有预期的好,这主要是两级风扇间的交互噪声造成的。在桨扇发动机和无涵道风扇发动机的研究中遇到过相同的问题,并没有得到很好的解决。由于有了外涵道,为对转涡扇发动机的降噪提供了更多的基础与条件,这是桨扇发动机和无涵道风扇发动机所不能比的,但如果不能很好地解决两级风扇间的交互噪声问题,仅靠在外涵道采取减噪措施是不够的。

影响对转涡扇噪声的因素很多,如风扇转子直径、风扇叶片的叶形设计、风扇轮毂的间距、每级

风扇叶片的数量和相互的匹配、前后对转风扇转子的转速和相互的匹配、风扇叶片的叶尖转速、风扇叶片的角度配置、机械配合和两级风扇间的交互影响等。但关键还是如何降低两级风扇间的交互噪声。由于影响因素众多,如何降低两级风扇间的交互噪声成为对转涡扇发动机研究的重点和关键。

2 高扭矩对转轴

由于风扇和低压涡轮对转,而且连接对转风扇和对转涡轮的轴又细又长,所要承受的扭矩很大。常规材料已很难满足对转涡扇发动机对轴的要求,所以需要研发出新的材料。目前欧盟在VITAL项目中对金属基矩阵复合材料(Metal Matrix Composite, MMC)轴和多金属材料(Multi Metallic)轴都做了相关的研究和测试,由于VITAL项目还处在研发阶段,离实际应用还有很长的路要走。

从目前的研究来看,金属基矩阵复合材料和多金属材料都是能够适应对转涡扇发动机轴大扭矩要求的新型材料。

3 新的低速低压压气机(增压级)概念和技术

由于风扇对转,降低了风扇转子的转速,如何在低速下保证增压级的效率和压比的同时减轻重量和缩小尺寸也是对转涡扇发动机要研究的重点和关键之一。因此需要新的低速低压压气机(增压级)概念并对相应的技术进行开发和研究。

4 对转低压涡轮技术

对转低压涡轮技术与目前已投入使用的高低压涡轮转子的反向旋转技术是完全不同的。高低压涡轮转子的反向旋转技术是英国罗·罗公司首先引入现代航空发动机的一项技术,并得到了应用和验证^[3]。GE

公司也把高低压涡轮转子的反向旋转技术应用在了新一代的GENx发动机上并获得成功。在高低压涡轮转子反向旋转技术中,依然保持了高压涡轮和低压涡轮的静子(导向器)。在对转低压涡轮技术中,整个低压涡轮设计成两组对转的涡轮组,两组对转涡轮组的涡轮转子叶片互为导向叶片,消除了发动机低压涡轮的静子,是对发动机低压涡轮的革命性创新设计。

在实现对转转子结构的同时还要保证减重和降噪的要求,这对对转低速低压涡轮的设计和制造技术都提出了挑战。对转涡轮的匹配和交互影响也成为对转涡扇发动机要研究的重点和关键之一。

5 发动机转子支撑

三转子发动机有三个相互套在一起的同轴转子,支撑结构复杂,轴承的润滑困难。对转涡扇发动机为三转子结构,但与目前的三转子发动机相比,对转涡扇发动机的支撑结构将更为复杂,轴承的润滑也将更加困难。如何处理好对转涡扇发动机的支撑及轴承的润滑将是需要突破的又一关键技术。

6 在飞机上的安装

与桨扇发动机和无涵道风扇发动机由于巨大的桨扇使其在飞机上的安装变得非常复杂不同,对转涡扇发动机在飞机上的安装对飞机的气动性能影响不大。同时,由于有了外涵道,风扇有了包容环的保护而大大提高了安全性。

但是,由于发动机内部结构的改变,特别是对转的转子结构使得发动机的整个受力状态与常规涡扇发动机有了本质上的区别,所以如何与发动机短舱、喷口和反推装置相匹配也是对转涡扇发动机的研究重点之一。

欧盟在环保型航空发动机项目中还对超高涵道比发动机相关的喷口、短舱、反推力装置的装配方案等

进行了研究和优化,以便减重、降噪、降低燃油消耗。

欧盟的环保型航空发动机项目简介

欧盟的环保型航空发动机(VITAL—enVironmenTALly friendly aero engine)项目是由欧盟航空研究和创新咨询理事会(ACARE—Advisory Council for Aeronautics Research and Innovation in Europe)发起的一项为期4年的新一代航空发动机技术预研项目。

欧盟环保型航空发动机项目有两大目标:一是,到2020年使飞机的噪音减少一半;二是,到2020年使飞机的二氧化碳排放减少一半。

欧盟环保型航空发动机项目的目标是为下一代商用飞机发动机提供正在研究的先进航空发动机技术,使欧洲航空发动机工业能够生产出高性能、低噪音和低排放的发动机,为其客户、乘客和社会带来更大的利益。

欧盟环保型航空发动机项目的关键是研究和验证未来将要应用的发动机技术,其内容包括以下创新技术和结构设计:

(1)两种创新的低速风扇结构为直接驱动涡轮风扇(DDTF)和齿轮传动涡轮风扇(GTF)和对转涡轮风扇(CRTF)。这两种发动机将包括超高涵道比(VHBR)发动机对重量和噪音的限制所要求的轻型材料的创新;

(2)应用新型材料的轻型结构以及创新性的结构设计和制造技术进行研究;

(3)需要通过材料和技术创新而满足新概念涡轮风扇发动机对大扭矩的要求和新型发动机轴的制造技术要求;

(4)与新概念涡轮风扇发动机概念相适应的可减重和降低噪音的低压涡轮新技术;

(5)可以减重、降噪、降低燃油消耗的与发动机相关的喷口、短舱、反推力装置的装配方案的研究和优化。

所有上述新技术将通过直接驱动涡轮风扇(DDTF)、齿轮传动涡轮风扇(GTF)和对转涡轮风扇(CRTF)3种结构发动机的预研来验证。

为了达到欧盟环保型航空发动机项目的目标,考虑了不同的发动机单元体,一些发动机单元体对三种结构发动机是通用的和非特殊的,一些则是特殊的。因此,在欧盟环保型航空发动机项目中的研究工作被分为几个不同的分项目:

分项目1为横向研究项目,主要是保证所研究的发动机单元体具备良好的综合性,其中包括对研究的发动机单元体的要求给出定义和对三种主要的发动机结构——直接驱动涡轮风扇(DDTF)、齿轮传动涡轮风扇(GTF)和对转涡轮风扇(CRTF)做出评估;分项目2为创新性风扇设计项目,包括轻型风扇和对转涡轮风扇技术;分项目3为高载荷增压机设计和技术项目;分项目4为轻型冷和热结构设计项目;分项目5为发动机低压轴所用新材料和新概念项目;分项目6为低噪音轻型高载荷和高扭矩低压涡轮项目;分项目7为发动机短舱和装配方案的研究和优化项目;在欧盟VITAL项目中,将负责管理和项目划分归为了分项目0(Sub Project 0)。

欧盟环保型航空发动机项目共有53个合作者参与,涵盖了欧盟国家中所有的主要发动机制造商、主要发动机制造商的供应商、制造工程协会的专家、欧盟及俄罗斯的相关大学和研究机构。总预算9000万欧元,其中包括来自欧盟的债券5000万欧元。欧盟环保型航空发动机项目的主要目的是在为下一代航空发动机的

研发储备技术。

结束语

对转涡轮发动机是一种全新概念的发动机,在欧盟环保型航空发动机项目研究的创新的低速风扇结构中概念最为先进,该项目已于2010年10月结束并取得了阶段性成果。

参与欧盟环保型航空发动机项目的伙伴多达53个,涵盖了欧盟国家中所有的主要发动机制造商、欧盟主要发动机制造商的供应商、制造工程协会的专家、欧盟及俄罗斯的相关研究机构和研究所。欧盟环保型航空发动机项目的主要目的是在为下一代航空发动机的研发储备技术。欧盟环保型航空发动机项目已于2010年10月结束并取得了阶段性成果。

目前,对转涡轮发动机还处在部件和子系统的相关技术的概念试验和验证阶段,虽然在欧盟启动的环保型航空发动机项目中,对一些相关技术进行了航空声学风洞测试和机械性能台架测试,但还没有到发动机整体方案设计阶段,还有许多关键技术需要突破。

本文对转涡轮发动机概念和研究进展做一概括性介绍,并对其研制中需要突破的关键技术和研究重点进行了阐述,可供航空发动机业界相关人士参考。

参考文献

[1] Bengue L M. Toward Acare 2020: Innovative engine architectures to achieve the environmental goals. 27th International Congress of the Aeronautical Sciences 2010.

[2] Stephen O, Pilidis P, Hales R. Tera—a tool for aero-engine modelling and management. Second World Congress on Engineering Asset Management and the Fourth International Conference on Condition Monitoring, 11–14 June 2007, Harrogate, UK.

[3] 李杰. 创新,让湍达之河不息—解析罗·罗商用发动机发展之路. 航空世界, 2009, (1): 34. (责编 晓立 三丰)