

航空涡轮螺旋桨发动机发展现状与展望

Recent Advances and Prospectives of Turboprop Engines

罗安阳 周辉华 申余兵 / 中航工业航空动力机械研究所

摘要: 主要介绍了涡桨发动机产品和技术发展现状, 并分析涡桨发动机特点、优势和市场需求情况, 以及在与传统大涵道比涡扇发动机、齿轮传动风扇发动机等对比的基础上, 对涡桨发动机的未来发展进行了预测。

Abstract: The paper introduces the turboprop engine products and its technology development, analyzes the features, advantages and market requirements of turboprop enging. The future development of turboprop engines is forecasted based on the comparison with traditional highby-pass turbofan and geared turbofan.

关键词: 涡桨发动机; 发展现状; 市场需求; 发展趋势

Keywords: turboprop engine; recent advances; market requirement; trend

0 引言

自1942年英国研制出世界第一台涡桨发动机以来, 经过70多年的发展, 英国、美国、前苏联、法国和加拿大等国已先后研制成功涵盖各个功率等级的涡桨发动机数十种。从20世纪60年代后期开始, 随着涡扇发动机特别是大涵道比涡扇发动机的发展, 涡桨发动机在大型远程民用客机和运输机上逐步被大涵道比涡扇发动机取代, 不过由于其具有推进效率高和经济性好等优点, 在中小型运输机和通用飞机上仍占有一席之地。但是, 目前由于市场不确定等多方面原因, 涡桨发动机的未来发展尚不明朗。

根据近年来从事涡桨发动机技术研究的心得和与国外涡桨发动机研发、生产厂商的多次交流情况, 对涡桨发动机的发展现状和趋势进行一些分析。

1 基本概念和特点

1.1 基本概念

涡桨动力飞机的推进原理与传统

的活塞动力飞机大致相同, 都是以螺旋桨旋转时所产生的力作为飞机前进的推进力, 但是涡桨发动机驱动螺旋桨的动力来自燃气涡轮发动机, 并且其螺旋桨通常以恒定的速率运转, 而活塞发动机的螺旋桨转速是变化的。但是, 由于螺旋桨特性的限制, 装涡桨发动机的飞机飞行速度一般不超过900km/h。

涡桨发动机的工作原理与传统的涡扇发动机相近, 涡桨发动机驱动螺旋桨后的空气流相当于涡扇发动机的外涵道, 由于螺旋桨的直径比普通涡扇发动机的大很多, 空气流量也远大于内涵道, 因此涡桨发动机实际上相当于超大涵道比的涡扇发动机。但涡桨发动机和涡扇发动机在产生动力方面却有很大不同, 涡桨发动机输出驱动螺旋桨的轴功率, 尾喷管喷出的燃气产生的推力只占总推力的5%左右, 为驱动大功率的螺旋桨, 涡轮级数也比涡扇发动机要多。

1.2 特点和优势

与活塞发动机相比, 涡桨发动机具有尺寸小、重量轻、振动小、推进效率高和功率重量比大等优点, 涡桨发动机的最大功率可超过10000马力(活塞发动机不超过4000马力), 功重比为4以上(活塞发动机不超过2), 由于减少了往复运动的部件, 涡桨发动机的运转稳定性好、噪音小、工作寿命长、维修费用低。与涡扇发动机相比, 涡桨发动机具有耗油率低和起飞推力大的优点, 因此被广泛用于运输机、轰炸机和教练机的动力。

此外, 涡桨发动机配装飞机后还具备以下综合优势: 一是螺旋桨特性(含滑流增升、反桨)、飞机机翼构型决定了涡桨飞机较强的地面起飞/着陆性能, 可以大幅度缩短起飞/着陆距离(在同样载荷条件下, 与涡扇飞机相比, 起飞滑行距离可减少30%以上); 二是较低的燃气排放温度可以大幅度降低 NO_x 、噪声排放及红外辐射; 三是适中的热力循环参数带来的发动机成本效益。

2 涡桨发动机与涡扇发动机、齿轮传动风扇发动机的对比

图1、图2、图3分别给出了涡桨发动机、常规涡扇发动机和齿轮传动风扇发动机的基本构型。从结构布局上看,三者非常相似,都有一个单转子或双转子的燃气发生器,一个将燃气发生器排气能量转换成驱动螺旋桨或风扇转动的动力涡轮,涡桨发动机与齿轮传动风扇发动机更加接近,均有一个体内减速器。螺旋桨和风扇的作用相同,都是利用各自专门设计的桨叶或叶片对空气做功,将空气向后排,两者之间的作用力与反作用力便形成发动机的推力一部分。桨叶和风扇叶片作用的空气质量(相对于其燃气发生器空气质量)的相差较大,涡桨发动机螺旋桨作用的空气质量通常是其燃气发生器空气质量的50~100倍,涡扇发动机目前能够达到的最大比值约10倍。因此,各自产生的推力占发动机总推力的比例相差较大,涡桨发动机中螺旋桨产生的推力占总推力的90%~95%;大涵道比涡扇发动机中风扇产生的推力占总推力的70%~80%。由此推断,两种构型的燃气涡轮发动机推进效率可相差20%以上。如果转换到涡桨飞机与涡扇飞机进行综合比较,经济性差异更加明显。ATR公司曾经对实际运营的短程航线(500~800km)涡桨和涡扇飞机进行过比较,在每座千米直接运营成本方面,涡桨飞机较涡扇飞机低35%~43%。

分析近20年来用于运输类飞机的涡扇发动机(包括最新发展的齿轮传动涡扇发动机GTF)的发展趋势,可以看出以下发展趋势和规律:一方面不断提高燃气发生器热力循环参数(增压比、涡轮前燃气温度)以提高热效率,另一方面不断增加涵道比来提高推进效率。通过上述分析,可以得出以下结论:

- 1) 涡桨发动机与涡扇发动机并无实质性差别,可认为是一种无涵道或超高涵道比的涡扇发动机;
- 2) 涡扇发动机推进效率的提升极限不会超过涡桨发动机。

3 市场需求

在民用航空发动机市场,涡桨发动机一度是

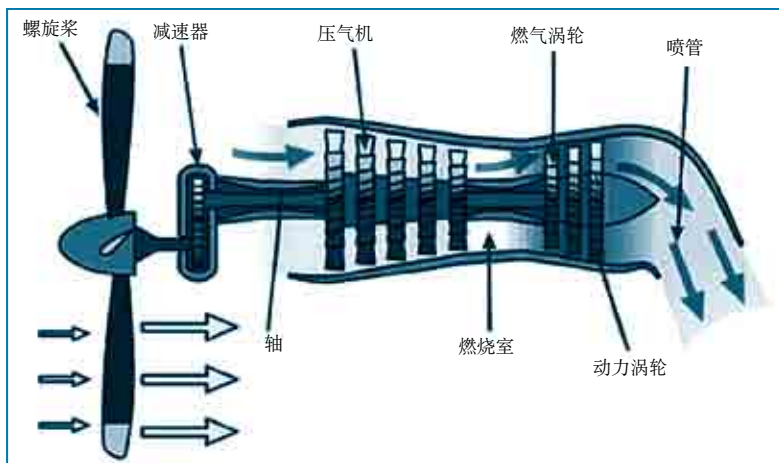


图1 涡桨发动机的基本结构

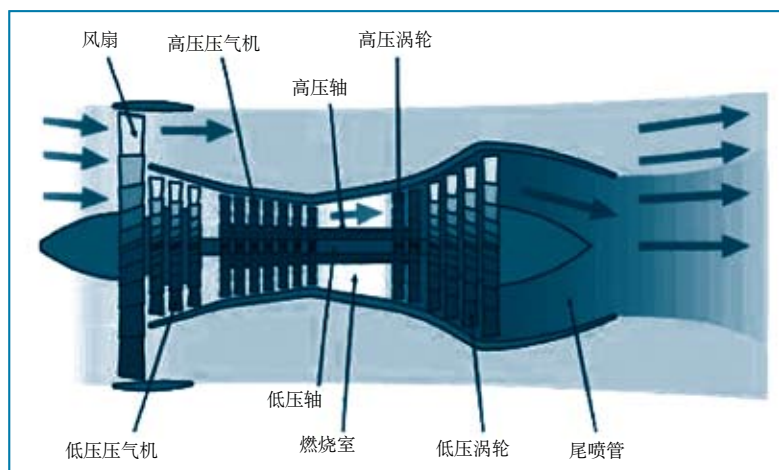


图2 大涵道比涡扇发动机的基本结构

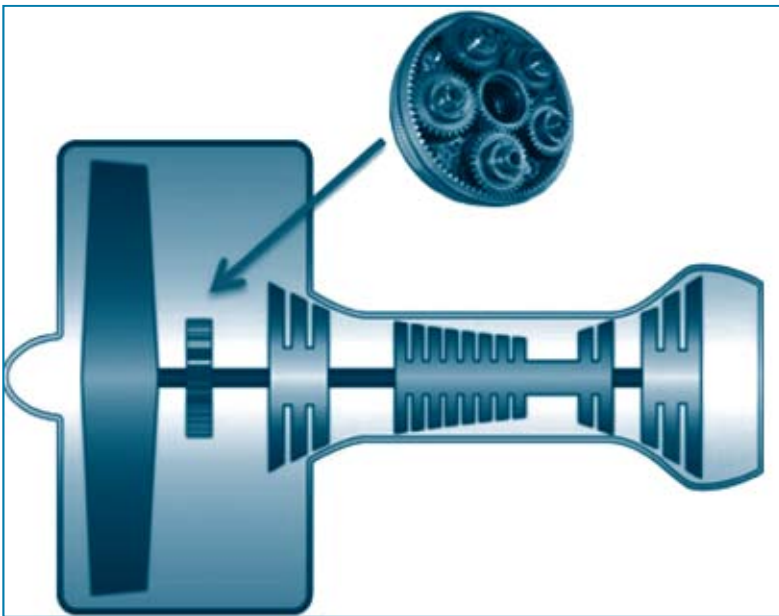


图3 齿轮传动涡扇发动机的基本结构

支线客机的主流动力,但后来不断受涡扇发动机挤压。究其原因,一是涡桨飞机的高速性能不理想;二是涡桨飞机乘坐的舒适性不佳;三是燃油价格低廉时,燃油成本对飞机总运营成本的影响有限;四是在很长一段时间内(甚至可延伸到今天),人类始终追求的是更高、更快、更远的目标,而没有意识到带来的能源消耗和环境影响,反而忽视了涡桨发动机亚声速短航程经济环保、采购和维护费用低、起降条件要求低、固有安全性好等优点。

上世纪70年代爆发的世界石油危机,给人类敲了一次警钟,而近年来环境恶化、资源日趋紧缺的局面,使人们重新认识到涡桨飞机环保优势和优良的经济性。同时,随着螺旋桨技术的不断进步,涡桨飞机在高亚声速飞行时的推进效率已大大提高,噪声水平也大幅度下降,乘坐舒适性已可以与涡扇发动机相当。在军用航空发动机市场,涡桨飞机具有良好的机场适应性,能在沙土、砂石、草地等跑道上起降,螺旋桨的滑流又可大大改善飞机的起飞/着陆性能,允许较短的起飞/着陆滑跑距离,因此以涡桨发动机为动力的中型运输机一直是遂行空运、空投和空降任务的战术运输装备体系的核心,以中型运输机为平台发展的预警机、电子战飞机、通信中继机等特种作战平台也是军队信息化作战体系的重要环节。此外,涡桨发动机因其燃油经济性良好,维修保养便捷,广泛用作初、中级教练机和侦察/攻击无人机的动力。

据预测,2012~2021年,全球涡桨发动机的需求数量约为1.5万台,总价值在154亿美元左右^[1],占整个航空发动机市场的1/10,主要用在民用支线客机、军民用运输机和通用飞机上,仍有相当广阔的应用前景。

4 发展现状

4.1 产品发展现状

在军用涡桨发动机领域,美国T56/501系列发动机和前苏联AI-20系列发动机都可称得上举足轻重。T56发动机于1956年投入使用,配装于C-130系列运输机、P-3系列侦察机和E-2系列预警机等多型飞机。经过不断改进改型,功率从2580kW发展到4414kW,共发展了4个军用产品系列和3个民用产品系列,目前已生产了17000多台,在该发动机基础上发展的AE2100发动机目前仍是最先进的大功率涡桨发动机之一。前苏联的AI-20发动机,装备安东诺夫设计局多个系列的运输机,出口到多个国家和地区。目前,伴随着欧洲A400M运输机的交付,8000 kW级的TP400-D6发动机开始正式服役。

在民用涡桨发动机领域,加拿大普惠公司的PT6A系列发动机无论是生产数量还是产值,都当之无愧为行业领导者。短短40年间,PT6A系列发动机已发展出数十个型别,功率范围涵盖350~1100kW,被144个国家的近百种飞机选做动力,目前已生产了30000多台^[2]。另外,加拿大普惠公司的PW100系列涡桨发动机是世界涡桨支线客机的主要动力,产品功率覆盖了2000~4000kW级,最新型号为PW150发动机。

国外成功的涡桨发动机都遵循了系列化的发展道路,在基本保持发动机结构形式的情况下,通过不断嵌入新技术,以较低的代价获得系列化的产品。如PT6A发动机在基本不改变外廓尺寸的条件下,采用最新技术,提高发动机的循环参数和部件效率,从而提高产品的综合性能。另外,由于涡桨和涡轴发动机在结构上较为相近,在成熟涡轴发动机平台上“轴改桨”快速发展涡桨发

动机也是一种常见的方式,“轴改桨”主要侧重于发动机工作点的调整、增加体内减速器和改进部分系统等。

涡桨发动机产品研发的另一个重要特征是军民融合发展。大部分军用涡桨飞机不追求高机动性,其动力装置相对于其他类型的航空发动机,易于进行民用型改进。如T56和AI-20发动机,均改进发展了民用型涡桨发动机。

先进涡桨发动机产品研发的重要途径之一是国际合作发展。为降低资金和技术风险,缩短研制周期,各大航空发动机制造厂商通常会基于自身在总体集成或单项部件/系统方面的技术优势,通过成立合资公司或项目组,划分各自的工作份额,合作研制新型涡桨发动机。如欧洲法国赛峰公司、英国罗罗公司、德国MTU公司、西班牙ITP公司等合作成立欧洲螺旋桨国际股份有限公司,共同研制了目前最先进的TP400-D6发动机。

4.2 技术发展现状

到目前为止,国外已经成功发展了四代涡桨发动机。第一代是指20世纪70年代以前投产的,主要有达特、PT6A系列和TPE331系列的早期型号、AI-20等型号的发动机;第二代是指20世纪70年代末或80年代初期研制的,主要有PW100系列早期型号和TPE331-14/15等型号的发动机;第三代是指20世纪90年代以后投入使用的发动机,主要有AE2100和PW150A;第四代的典型代表是欧洲的TP400-D6涡桨发动机^[3]。表1给出了国外四代涡桨发动机的性能参数。

第一代涡桨发动机循环参数水平较低,结构比较简单,耗油率高。压气机有轴流、离心和组合多种形式,主要采用单转子固定涡轮输出方式,发动机总增压比低于10,涡轮一般采用非冷却结构、涡轮前温度一般不超过1300K,耗油率

表1 国外四代涡桨发动机的性能参数

代别	国别	型号	起飞功率 (kW)	起飞耗油率 (kg/(kW·h))	总增压比	涡轮前温度 (K)	单位空气流量功率 (kW/(kg/s))	装备飞机
第一代	加	PT6A-27	507	0.34	6.3	1228	181	比奇B99、DHC-6等
	加	PT6A-65R	875	0.31	10	—	194	肖特360
	美	TPE331-10	746	0.34	10.8	1278	—	MU-2G/J/L/N
	英	达特7MK532	1495	0.41	5.6	—	141	F27、HS748
第二代	加	PW124	1790	0.29	14.4	1422	232	F50
	美	TPE331-3	626	0.38	10.4	1013	173	梅林III
第三代	英	AE2100	4474	0.25	16	—	250	Saab2000、IPTN N250
	美	CT7-5	1294	0.29	16	1533	285	CN-235
	美	PW150	3781	0.26	19	—	—	冲8
第四代	欧洲	TP400-D6	7979	—	25	—	—	A400运输机

在0.35~0.41kg/(kW·h)之间,单位空气流量功率在140~200kW/(kg/s)之间。

第二代涡桨发动机循环参数有较大幅度提高,结构基本采用自由涡轮形式,耗油率较第一代降低了15%左右。发动机总增压比范围在11~16,涡轮前温度提高到1300K左右,耗油率达到0.29~0.32kg/(kW·h)之间,单位空气流量功率在170~240kW/(kg/s)之间。

第三代涡桨发动机主要是在第二代发动机基础上继续提高发动机热力循环参数或采用新技术(冷却、数控、三维气动设计技术等)、新材料、新工艺进行改进改型,发动机总增压比达到13~20,涡轮前温度达到1500K左右,耗油率在0.25~0.31kg/(kW·h)之间,单位空气流量功率230~290kW/(kg/s)之间。

第四代涡桨发动机的总增压比超过20,涡轮前温度达到1600K左右,发动机耗油率降低到0.21~0.27 kg/(kW·h),单位空气流量功率280kW/(kg/s)以上。

虽然涡桨发动机目前的市场前景不十分明朗,但各大发动机厂家和研究机构始终没有停止先进涡桨发动机及其技术的发展。

近年来,为满足下一代90座级涡桨支线客机的发展需要,国外加大了涡桨发动机技术的研究步伐,2010年,加拿大普惠公司提出了功率3675~5145kW的下一代支线涡桨发动机(NGRT)方案,该发动机的油耗指标将比PW100系列发动机降低20%,维护成本降低30%,该发动机将采用全新的压气机设计;2012年,GE公司提出了功率在2940~4410kW的CPX38涡桨发动机方案,该方案油耗指标比PW100降低15%,该发动机由GE38发动机衍生而来,并借鉴了GENx发动机的高压压气机、高压涡轮以及新材料技术;2013年,法国赛峰集团也提出了将发展功率在3675kW左右的下一代支线飞机用涡桨发动机,该发动机的油耗二氧化碳排放比2000年的水平降低20%~25%,可在2018~2020年服役。

5 技术发展前景

随着石油资源减少,燃油价格的不断走高,环保压力的不断增大,人们对涡桨发动机有了新的认识,使其迎来了焕发青春的大好发展时机。未来其技术、产品发展的方向在宏观上与涡扇、涡轴发动机基本相似,继续朝高可靠

性、良好维护性、低使用成本的方向发展。具体体现在以下几个方面。

1) 在性能方面,压比将达到22~26,涡轮前温度将达到1600~1900K,耗油率将降到0.2kg/(kW·h),经济可承受性则可提高数倍。

2) 在总体结构方面,2000kW以下涡桨发动机将倾向于双转子结构(即单转子燃气发生器+动力涡轮转子),压气机为轴流+离心组合式,采用多级动力涡轮(即自由涡轮)以求得到最佳的效率;2000kW以上的涡桨发动机逐渐向三转子结构发展(双转子燃气发生器+动力涡轮转子),采用单元体设计和“视情”维护概念,简化外场维护保障要求,降低全寿命期使用成本等。

3) 在气动设计方面,采用逐渐成熟的新技术,如全三维黏性、非定常设计、流动控制、主动间隙控制、高效冷却等,以达到部件效率提高、稳定工作边界扩大、良好的性能保持、寿命更长、结构简单和零件数少的要求^[4]。

4) 在新材料和材料改进方面,双金属、陶瓷、低导热性热障涂层和复合材料等技术的逐步应用,将大幅提高涡桨发动机的性能、寿命及可靠性。

5) 控制系统方面,具备故障诊断、

航空机电系统综合技术发展分析

Development of Aviation Electromechanical System Integration Technology

郭生荣 / 中航工业金城南京机电液压工程研究中心

摘要: 航空机电系统综合技术是未来航空领域一大重点发展方向, 本文对其进行了较为系统地研究。首先阐述了机电系统综合技术的概念; 其次介绍了从控制综合到子系统综合的演变过程, 以及技术应用现状; 最后提出了机电系统综合技术需要发展的关键技术, 为未来机电系统综合技术的发展指明新的研究方向。

Abstract: In the future, electromechanical system integration technology will be one of key direction in aviation. In this paper, electromechanical system integration technology is surveyed. Firstly, the conception of electromechanical system integration technology is demonstrated. Then the developments of control integration and subsystems integration are introduced, including technology application. Lastly, the key technologies are presented, which will provide a new research direction for electromechanical system integration technology.

关键词: 机电系统; 综合化; 发展重点

Keywords: electromechanical system; integration; key development

0 引言

航空机电系统是保障飞机飞行必不可少的系统, 随着飞机性能的不断提高,

机电系统所承担的飞行保障任务越来越重, 使传统机电系统正从各自独立发展快速向机电综合方向发展, 如图1所示。

航空机电系统综合技术是指将提供二次能源的环境控制、第二动力、液压、电源、飞机燃油等机电子系统进行

健康管理和多变量综合控制功能的发动机/螺旋桨全权限数字式电子控制系统全面应用, 同时采用光电敏感元件、高温电子设备和灵活的控制逻辑。控制系统的重量将大幅度减轻, 环境适应性将进一步增强。

6) 减速器方面, 重载、高速、高效、轻质是其发展目标。其中新结构传动机构/零件(如面齿轮)、轴承/齿轮轴一体化设计、超高强度传动零件新材料和复合材料机匣等是研究方向。

7) 螺旋桨方面, 先进风扇气动设计技术、将逐步应用对转螺旋桨设计技术, 以提高涡桨飞机在高速飞行条件下的性能。螺旋桨的结构由铝合金大梁、玻璃钢外壳结构发展到碳纤维大梁、泡沫填充、玻璃钢外壳结构, 成形工艺有

预浸料层铺和编织外壳整体注射成形, 从而使螺旋桨重量大幅度减轻。

6 结束语

涡桨发动机在未来亚声速运输类飞机上的应用前景巨大。国外先进大涵道比涡扇发动机有逐渐向涡桨发动机构型、性能靠近的趋势给我们以启示: 是否可以直接以涡桨发动机为基础, 通过提高燃气发生器的性能和发展新构型的涡桨发动机(对转螺旋桨、开式转子、带外涵螺旋桨等)等途径实现在运输类飞机上先进动力技术的赶超。

AST

参考文献

[1] FORECAST INTEERNATIONAL

©2012. Analysis 3 The Market for Aviation Turboprop Engines 2012–2021, 2012.

[2] 世界中小型航空发动机手册编委会. 世界中小型航空发动机手册[M]. 北京: 航空工业出版社, 2006.

[3] 方昌德. 航空发动机的发展研究[M]. 北京: 航空工业出版社, 2009.

[4] 凌天铎. 中小型航空发动机用压气机性能水平的发展[Z]. 株洲: 中航工业航空动力机械研究所.

作者简介

罗安阳, 研究员, 中航工业发动机总体性能设计技术首席技术专家, 中航工业动研所副总设计师, 长期从事航空发动机型号、预研总体设计及规划论证工作。