

大涵道比涡扇发动机发展研究

沈锡钢, 齐晓雪, 郝 勇

(中航工业沈阳发动机设计研究所, 沈阳 110015)



沈锡钢(1963),男,自然科学研究员,中航工业沈阳发动机设计研究所副所长,主要从事大涵道比涡扇发动机总体设计工作。

收稿日期: 2013-08-15

摘要:大涵道比涡扇发动机用途广泛、市场巨大,对国民经济发展、国防建设和科技进步具有重大推动作用和战略意义。概述了国内外大型军民运输机的发展现状,归纳了其性能与适航要求更高、经济性与环保性更好的发展趋势,总结了其多继承少创新,共用核心机系列化和军民融合的发展途径。针对中国目前和未来的需求,提出了需要突破的总体设计、稳定性、高压高效叶轮机、高性能燃烧室、先进空气系统等通用技术和适航、大尺寸弯掠风扇叶片、复合材料风扇叶片、低噪声设计、低污染燃烧室、反推力装置等特有技术。

关键词:大涵道比涡扇发动机;发展思路;关键技术

Investigation of High Bypass Ratio Turbofan Engine Development

SHEN Xi-gang, QI Xiao-xue, HAO Yong

(AVIC Shenyang Engine Design and Research Institute, Shenyang 110015, China)

Abstract: High bypass ratio turbofan engine has been widely used in global market, and it has remarkable promotion and strategy meaning on economy development, national defense construction, and science and technology improvement. The future development trend was summarized that including the performance is higher, the airworthiness requirement is stricter, the affordability and environmental protection ability are better. The development road was overviewed that is more inherent and less innovation, and is derivatives from common core, and could be used in both military and civil. For future advanced high bypass ratio turbofan engine, the common and special technologies to be developed and demonstrated are proposed. The common technologies include general engine design, stability, high pressure and high efficiency turbomachinery, high performance combustor, advanced second air system, etc. The special technologies include airworthiness, large size lean-swept fan blade, composites fan blade, low noise design, low emission combustor, thrust reverser, etc.

Key words: high bypass ratio turbofan engine; development ideas; key technology

0 引言

大型运输机及其动力装置是一个国家国力和军力的象征,是一个民族屹立于世界强国之林的标志之一,在维护国家安全和国民经济建设中起着重要作用。国外从 20 世纪 70 年代开始开展大涵道比涡扇发动机的研制,经过几十年的发展,如今已达到技术成熟,研制出系列化产品。虽然目前中国大涵道比涡扇发动机的研制已经取得了一定的成果,但是与国际上同类先进的发动机相比仍存在一定差距。所以在现阶段,应认清形式,梳理发展思路,制定正确的发展策略,为大涵道比涡扇发动机的发展提供支持。

本文针对大涵道比涡扇发动机的研制和发展进

行研究。

1 运输机动力装置需求分析及预测

据美国波音公司预测,未来 20 年(2012~2031 年),全世界民航市场将需要民用飞机 34000 架,市场总价值为 4.5 万亿美元,其中单通道飞机需求量为 23240 架,占总需求的 68.4%,市场价值为 2.06 万亿美元,占总价值的 45.8%;双通道飞机需求量为 7950 架,占总需求的 23.4%,市场价值为 2.08 万亿美元,占总价值的 46.2%;大型宽体飞机需求量为 790 架,占总需求的 2.3%,市场价值为 2800 亿美元,占总价值的 6.2%;支线飞机的需求量为 2020 架,占总需求的 5.9%,市场价值为 800 亿美元,占总价值的 1.8%。

由此可见,未来民机市场需求量和市值最大的是单通道和双通道飞机。

中国民航业发展的预测表明,在未来 20 年,中国的旅客周转量年均增长 7.4%, 客机数量年均增长 6.9%。到 2030 年,为满足运量的增长和替换退役飞机,中国客机新机交付量为 4600 余架,其中单通道喷气客机超过 3000 架,双通道客机 800 余架,支线客机 600 余架。

在大型军用运输机方面,目前中国装备部队的大型军用运输机主要为从俄罗斯购买的伊尔-76 大型运输机,配装 Д-30K II II 发动机,由于装备的飞机数量有限,还不能完全满足运输的需求。

未来军用运输机将向着载质量更大、航程及作战半径更大、巡航高度更高、速度更快以及安全性、可靠性和维护性更高的方向发展,战术运输机、战略运输机及战略战术运输机需求量将逐步增大,对应需要大量不同推力等级的、更为先进、可靠的大涵道比涡扇发动机。

2 大涵道比涡扇发动机发展概况及趋势

2.1 大涵道比涡扇发动机发展概况

目前,在国际市场上,大型飞机发动机的研制主要依赖 GE、PW 和 RR 3 大公司, 各公司发动机系列化发展,已成垄断格局, 推力范围覆盖了 100~500 kN。而俄罗斯研制的大涵道比涡扇发动机主要配装本国生产的大型飞机。

国外主要的军、民用大涵道比涡扇发动机参数见表 1、2。

为了满足未来大涵道比发动机需求,国外制定了大量的技术发展计划,旨在提高发动机性能和部件效率,降低污染排放、噪声及维护成本。包括美国的 VAATE 计划、UEET 计划, 欧洲的 ANTLE 计划、CLEAN 计划等, 这些计划所取得的研制成果已逐步贯彻到新研的产品中,使发动机的性能、经济性、安全性、可靠性和环保水平将进一步提高。

2.2 大涵道比涡扇发动机发展特点和趋势

军、民用运输机的基本功能均为运送有效载荷,因此其配装的发动机技术特点和发展趋势基本类似。但由于其使用环境和用途及目的不同,造成其技术发展趋势稍有差异。

(1)采用成熟的大涵道比涡扇发动机。为降低技

表 1 大型军用运输机及特种飞机发动机参数

飞机型号	起飞质量 / t	发动机型号 (×台数)	单台起飞推力 / kN	巡航油耗 / (kg/(daN·h))	涵道比
安-225 重型运输机	600	D18T(×6)	229.8	0.581	5.6
安-124-100 重型运输机	392	D18T(×4)	229.8	0.581	5.6
C-5A/B 重型运输机	380	TF39-GE-1A(×4)	182.6	0.594	8.0
E4B B747-200B 空中指挥	363	CF6-50E2(×4)	232.5~273.6	0.663	5.0~5.1
C-17 军用运输机	279	F117-PW-100(×4)	185.5	0.574	5.9
A330MRTT 多用途空中加油 / 军用运输机	230	Trent 772B(×2)	316.3	0.573	
伊尔 76MF 军用运输机	210	Π C 90A-76(×4)	156.9	0.607	4.6
E-10MC2A B767-400ER 空中指挥	204	CF6-80C2B8 / PW4062(×2)	275.8	0.587	4.8~5.0
伊尔-76 军用运输机	190	Д-30K II II(×4)	117.7	0.710	2.4
E-3 B707-320B 预警机	152	TF33-PW-100 / CFM56-2(×4)	106.8	0.683	6.0

术风险,提高可靠性,大型运输机动力装置普遍采用成熟的大涵道比涡扇发动机。同时针对军、民用发动机技术通用性强的特点,充分考虑军民共用,避免了由于更换发动机引起的技术风险。如在伊尔-76MF 军用运输机,选用了已经在伊尔-96 和图 214 客机上使用验证的 Π C-90A 发动机。同样在 A330 客机基础上改进研制的 MRTT 多用途加油机 / 军用运输机仍然采用原 A330 客机的 Trent700 发动机。

(2)为了降低技术难度和风险,强调继承性,采用缩放技术,系列化发展。大涵道比涡扇发动机的研制和发展强调“继承”,在充分利用已有经验基础上逐渐创新,同时通过发动机整机或核心机缩放快速获得不同推力级的发动机产品,以实现降低研制费用,缩短周期,降低技术风险的目标。CFM56 发动机就是基于 F101 发动机核心机技术基础而研制的,其系列化发展(如图 1 所示)始终以保证可靠性、延长使用寿命、满足环保要求为目标,坚持走“大部分继承,少部分更

表 2 民用大涵道比涡扇发动机参数

推力级/kN	发动机型号	飞机型号	巡航耗油率/ (kgdaN·h)	总压比	涵道比
100~200	CFM56	B737, A340, A318/319/320/321	0.610~0.680	22~37	5.0~6.6
	V2500	A319/320/ A321, MD-90	0.598	25~31	4.6~5.4
	PW2037	B757	0.605	28	6.0
	PW6000	A320, A318	0.669	26~28	4.8~5.0
	RB211-535E4	B757, Tu-204	0.629	25	4.3
	PS-90A	TU-204, 伊尔-96	0.607	32~37	4.6~4.8
	200~340	Trent 1000	B787	0.503	50
Trent 700		A330-200/300	0.573	33~35	5.0
Trent 500		A340-500/600	0.545	34~36	7.5~7.6
RB211-524		B747	0.669	28~29	4.4~4.5
CF6-80C2		B767-200/300, B747, A300	0.592	27~31	4.98~5.06
CF6-80E1		A300-300/200	0.578	32~34	5.3
PW4056		B747, B767-200/300	0.587	26~32	4.8~5.0
>340	PW4168	A330-200/300	0.581	32~35	4.8~5.2
	Trent 900	A380	0.528	36~39	7.7~8.5
	Trent 800	B777-200/300	0.571	34~41	5.7~6.2
	GE90	B777-200	0.538	39~45	8.3~8.6
	PW4090	B777-200/300	0.565	34~42	5.5~6.3

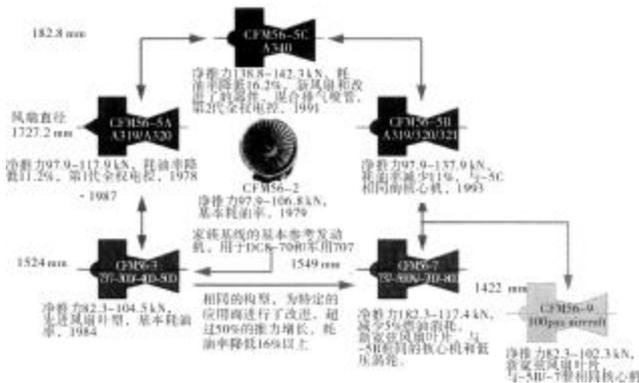


图 1 CFM56 发动机系列发展

改”的道路。而 Trent 系列发动机(如图 2 所示)通过缩放核心机也已经发展至第 6 代, 推力范围覆盖 235~422 kN。

(3)成熟技术与新技术结合,发展新型号。对于新研的大涵道比涡扇发动机, 主要在成熟技术的基础上,采用部分已有发动机或研究计划中验证的新技术来提高和改善发动机性能。GP7200 发动机的研制是

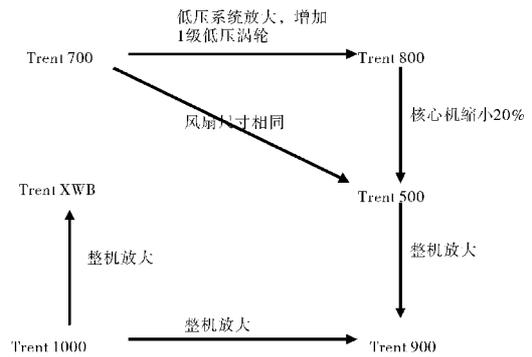


图 2 Trent 发动机系列发展

GE 和 PW 公司在原有的 PW4090 和 GE90 发动机基础上,研究和突破了 3 维气动设计、噪声控制、低排放燃烧室、新材料和第 3 代 FADEC 等关键技术。同时如 GE90、Trent XWB、CFM56 系列发动机采用的先进技术,均在 E3E、Tech56 等发动机或研究计划中得到充分验证。

(4)进一步提高发动机部件效率和总体热力水平。为满足未来军、民用运输机对性能、环保性和可靠性的要求,进一步提高发动机部件效率水平和总体热力循环参数是必然采取的措施。由于军用运输机使用频率比民用运输机的低,且对经济性及成本要求也没有民机要求苛刻,因此军用运输机发动机的涵道比不会增加太多,基本保持在目前水平,但是民用发动机涵道比有进一步增加的趋势。

(5)满足适航要求。随着适航要求的逐步提高,未来大型军、民用大涵道比涡扇发动机的发展趋势仍然是进一步减少污染排放,降低发动机噪声,提高安全性并减少寿命期运行成本。

(6)新型结构大涵道比涡扇发动机。常规结构涡扇发动机技术在国外发展已相当成熟,发展的空间已经有限。在石油价格需求日益增加的情况下,齿轮传动风扇(GTF)发动机和桨扇发动机等新型结构发动机,由于其能有效降低噪声和耗油率,将得到一定的发展。

3 中国大涵道比涡扇发动机发展方向及途径

3.1 中国大涵道比涡扇发动机发展方向

根据军、民用飞机对动力装置的需求以及中国航空工业的发展,未来大涵道比涡扇发动机的研发可考虑以下几个方向。

(1)战略运输机和战略战术运输机动力装置。该

型发动机可双发配装于战术运输机,或 4 发配装于战略战术运输机,具有广泛的应用前景。目前中国在研的战术运输机主要是小型运输机,运载能力相对较小,无法满足空军运力以及发展需求;同时根据目前国际发展的趋势,既具有战略运输机功能又具有战术运输机特点的新型运输机受到了重视,需要配装推力较大的大涵道比涡扇发动机。

(2)更大推力级的军、民用大涵道比涡扇发动机。中国目前还没有自主研制的大载质量长航程重型运输机,从而制约了空军对重型装备的空中运载能力。美、俄等国家拥有的 C-5、安-124、安-225 等重型运输机已经具备相当的数量,国内的运力无法与之抗衡。同时根据民航飞机的发展,民用发动机具有很大的市场空白和发展前景。

(3)新型结构大涵道比涡扇发动机。目前传统结构大涵道比涡扇发动机的发展已经接近极致,因此提高效率和经济性是发动机未来主要发展方向,即要开展新型结构大涵道比涡扇发动机的发展,如发展齿轮传动涡扇发动机和桨扇发动机等,在国外已经得到了初步验证。

3.2 中国大涵道比涡扇发动机发展途径

根据中国的大涵道比涡扇发动机水平和发展方向,大涵道比涡扇发动机的发展应采取以下途径。

(1)充分利用已有的研制基础,转化应用研制成果,以发展为主线,坚定不移地坚持自主创新,掌握知识产权。通过自主开展技术攻关,突破主要关键技术,解决技术落后的被动局面。

(2)虽然中国已经开展了大涵道比涡扇发动机的研制,并取得了一些成果,但与国际先进水平相比还存在技术基础薄弱,部分关键技术尚未掌握等差距。因此在坚持自主创新的同时,积极开展对外合作,在合作中汲取先进技术,锻炼设计队伍,提升研制能力。

(3)重视军民融合,同时认识各自的特性,在民用发动机适航、经济性、安全性等方面开展深入研究,形成军、民用大涵道比涡扇发动机独立而完善的发展体系。

4 需突破的关键技术

虽然军、民用大涵道比涡扇发动机技术具有较强的通用性,但由于使用方法和侧重不同,仍有一些各自的技术特点。同时大涵道比涡扇发动机与中国研制

的军用小涵道比涡扇发动机相比,除在技术原理、理论基础等方面有一定的通用性之外,在涵道比的大小、使用要求和侧重点等方面存在不同,从而带来了关键技术上的差异。军、民用发动机关键技术对比见表 3。

表 3 军民用发动机关键技术对比

民用特有技术	民用关键技术	军民共用技术	军用关键技术	军用特有技术
大尺寸风扇和桨扇	高压比增压级和	CFD 设计	掠形气动技术	低探测性
间冷、回热技术	高压压气机	先进燃烧	高温涡轮	材料
噪声控制	低污染燃烧	气动/冷却技术	高转速金属基	喷管
多种燃料	高效多级低压涡轮	先进控制	化合物转子	进气道
污染控制	先进齿轮箱	轻量化结构/制造	变循环	热力循环
	低阻力短舱	先进轴承	稳定性处理	短寿命发动机
		先进材料	对转技术	推力矢量

4.1 大涵道比涡扇发动机共用关键技术

(1)总体方案设计技术(含飞发一体化和经济性分析)。

(2)稳定性设计技术研究和验证。

(3)整机动力学设计与减振技术。

(4)叶尖间隙控制技术。

(5)高压比、高效高压压气机设计技术。

(6)高效、高负荷高压涡轮设计技术。

(7)高效、低噪声多级低压涡轮设计技术。

(8)空气系统设计技术及验证。

4.2 民用大涵道比涡扇发动机特有关键技术

(1)发动机/飞机整机噪声预测分析及控制技术。

(2)高性能大尺寸风扇转子叶片 3 维弯掠设计技术。

(3)宽弦空心/复合材料风扇叶片设计及制造技术。

(4)复合材料风扇机匣及包容环包容技术。

(5)风扇/增压级低噪声设计技术。

(6)风扇机匣及其降噪结构设计及制造技术。

(7)低排放、长寿命燃烧室设计技术。

(8)低排放燃烧室组织燃烧技术。

(9)燃用航空替代燃料燃烧室设计技术。

(10)排气系统噪声预测及降噪关键技术。

(11)控制系统安全性、可靠性设计和高可靠性、高寿命部件设计技术。

(12)预测与健康管(EPHM)技术。

(13)适航技术。

(14)齿轮传动发动机总体设计技术。

(15)大功率减速齿轮箱设计及制造技术。

5 结束语

大涵道比涡扇发动机是自主研制大型飞机的关键,发动机技术不突破,就无法掌握大型飞机研制的主动权。由于大涵道比涡扇发动机的研制技术难度大、研制周期长、费用高,为了提升国内发动机研制水平,满足军、民用飞机需求,应尽早明确发展方向,理清思路,开展关键技术研究 and 应用研究,同时开展新型循环发动机论证和探索,以实现中国大涵道比涡扇发动机研制水平的飞跃。

参考文献:

- [1] 潘振文. 21 世纪初军用运输机研制趋势分析 [J]. 运输机工程, 2001(1):12-18.
PAN Zhenwen. Development of military transport aircraft by the early 21st Century [J]. Transport Engineering, 2001(1): 12-18. (in Chinese)
- [2] 胡晓峰. 论发展我国军用运输机 [J]. 运输机工程, 2001(5): 2-8.
HU Xiaofeng. On the development of military transport aircraft [J]. Transport Engineering, 2001(5):2-8. (in Chinese)
- [3] 李广义. 国外大型军用运输机发展现状与趋势[J]. 航空制造技术, 2005(9):36-43.
LI Guangyi. Development status and trends of large foreign military transport aircraft [J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2005(9):36-43. (in Chinese)
- [4] 世界飞机手册编写委员会. 世界飞机手册[M]. 北京:航空工业出版社, 2001:601-910.
World Aircraft Handbook Writing Committee . World aircraft handbook [M]. Beijing: Aviation Industry Press, 2001: 601-910. (in Chinese)
- [5] 沈虹, 李兆庆. 干线客机发动机的研制特点 [J]. 航空航天, 2007(2):21-26.
SHEN Hong, LI Zhaoqing. Main characteristics of trunk liner engine development[J]. Aerospace, 2007(2):21-26. (in Chinese)
- [6] 梁春华. 欧盟大涵道比涡扇发动机技术研究计划[J]. 航空发动机, 2007, 33(2):57-58.
LIANG Chunhua. Program of European Union high bypass ratio turbofan engines technology [J]. Aeroengine, 2007, 33(2):57-58. (in Chinese)
- [7] 胡晓煜. 下一代窄体客机发动机最新进展 [J]. 航空发动机, 2010, 36(1):53-57.
HU Xiaoyu. Latest development of next generation narrow aircraft engine [J]. Aeroengine, 2010, 36(1):53-57. (in Chinese)
- [8] Benzakein M J. Propulsion strategy for the 21st Century a vision into the future[R]. ISABE-2001-1005.
- [9] Jeffrey K Schweitzer. Propulsion technology readiness for next generation transport systems [R]. AIAA-2003-2787.
- [10] 方昌德. 大涵道比涡扇发动机特有关键技术[J]. 国际航空, 2008(1):38-40.
FANG Changde. Specific key technologies of high bypass ratio turbofan engine [J]. International Aviation, 2008(1): 38-40. (in Chinese)

PW 公司加速推进下一代军用发动机技术

PW 公司网站 2013 年 10 月 25 日报道, PW 公司和美国空军实验室(AFRL)已开始进行自适应超声速军用发动机风扇台架试验, 用于验证“第三气流”相关的自适应外涵气流技术。该风扇基于 F135 发动机的全尺寸风扇而研发, 是用于下一代军用发动机的技术。

现代军用涡扇发动机具有双流路——主流路和旁通流路, 变循环自适应发动机还有 1 个“第三气流”结构。在飞机起飞时, “第三气流”关闭, 减小涵道比和转移更多的空气流进入到核心机增加推力; 在巡航时, “第三气流”打开, 增大涵道比和减少燃油消耗。“第三气流”还可冷却用于发动机热端部件的冷却空

气, 用作飞机系统热沉的燃料, 加力燃烧室和喷口的壁板, 减小飞机的阻力。进气道按起飞时最大空气流量设计, 但在巡航时进入的气流大于发动机的需要, 便会造成溢流。“第三气流”便能够旁路额外的空气, 减小溢流阻力, 而且增加的流量可填充到飞机尾锥部, 减小底部阻力。

经美国空军实验室计算, 与 F-35 战斗机的 F135 发动机相比, 采用自适应技术可使燃料效率提高 25%, 使飞机作战半径扩大 25%~30%, 留空时间增加 30%~40%。自适应风扇方案是美国下一代军用飞机夺取制空权的关键技术。

(中航工业动力所 张世福)