

GE 公司民用航空发动机发展战略

索德军, 邹迎春

(中国航发沈阳发动机研究所, 沈阳 110015)

摘要:进入 21 世纪, 美国 GE 公司在民用航空发动机市场的表现尤为突出, 研究其民用航空发动机发展战略, 可为中国民用发动机产品研制提供借鉴。介绍了 GE 公司为提高其新产品性能所做的技术预先研究计划和技术储备; 采用产品路线图方法总结了 GE 公司民用航空发动机产品布局和发展路线。研究结果表明: GE 公司重视民用发动机核心机和衍生型号发展, 为满足市场需求不断优化产品布局, 为降低发动机研制风险和成本采用先进的管理模式, 在不同产品中采取联合研制的策略。

关键词: 民用航空发动机; 大涵道比; 发展战略; 预先研究; 核心机; 合作共赢

中图分类号: V235.1

文献标识码: A

doi: 10.13477/j.cnki.aeroengine.2019.02.016

Development Strategies of Civil Aeroengine of GE Company

SUO De-jun, ZOU Ying-chun

(AECC Shenyang Engine Research Institute, Shenyang 110015, China)

Abstract: In the 21st century, the performance of American GE company in the civil aeroengine market was particularly outstanding. The research on the development strategies of its civil aeroengine could provide reference for the development of civil engine products in China. The technical pre-research plan and technical reserve of GE company for improving the performance of its new products were introduced. The product layout and development route of GE company civil aeroengine were summarized by using the product road map method. The results show that GE company attaches great importance to the development of core engines and derivative models for civil engines. The product layout is optimized unceasingly for meeting the market demand. The advanced management models are adopted for reducing risk and cost of engine development. The strategies of joint development are adopted in different products.

Key words: civil aeroengine; high duct ration; development strategy; pre-research; core engine; win-win cooperate

0 引言

现代航空运输的发展与大涵道比涡扇发动机的发展和应用密不可分。20 世纪 70 年代的民用航空发动机市场由 PW 公司的 JT9D 发动机所占据; 随着 CF6、RB211 和 CFM56 发动机的投入使用, 到 80 年代, 逐渐形成美国 PW、GE 和英国 RR 公司三足鼎立的格局; 90 年代以来, GE 公司研制的 GE90、GP7000 和 GENx 等宽体客机发动机的成功应用进一步提升了其民用发动机的市场地位; 进入 21 世纪, GE 公司以其优越的产品性能和合理的产品布局在民用航空发动机市场表现得更加突出, 颇有独占鳌头之势。

本文总结了 GE 公司民用航空发动机的发展历程和经验, 以期为中国航空发动机的研制和发展提供借鉴。

1 注重技术预先研究, 产品性能不断提高

大涵道比民用涡扇发动机追求更低的油耗、噪声、污染和成本等目标。为了保持技术领先, GE 公司从 20 世纪 70 年代开始参与和实施民用发动机相关的预先研究计划, 开展新技术的开发与验证, 提高技术成熟度, 随着新技术的成功应用, 形成了降低风险、避免后续颠覆性设计更改, 以及节约成本的良性循环。

收稿日期: 2018-05-16 基金项目: 航空动力基础研究项目资助

作者简介: 索德军(1978), 男, 高级工程师, 主要从事航空发动机情报研究工作; E-mail: sdj27@163.com。

引用格式: 索德军, 邹迎春. GE 公司民用航空发动机发展战略[J]. 航空发动机, 2019, 45(2): 85-90. SUO Dejun, ZOU Yingchun. Development strategies of civil aeroengine of GE company[J]. Aeroengine, 2019, 45(2): 85-90.

1.1 不断开发和验证创新技术

20 世纪 70 年代开始,GE 公司参与了 QCSEE、E³、UEET、IHPTET 和 VAATE 等政府级预研计划,并组织开展了如 TECH56 和 LEAP 等民用涡扇发动机专项研究计划(见表 1),将计划中开发和验证的先进气动、结构、材料以及燃烧技术等不断应用于大涵道比民用涡扇发动机研制中,持续降低发动机耗油率,如图 1 所示;通过对燃烧系统研究,采用新材料、新

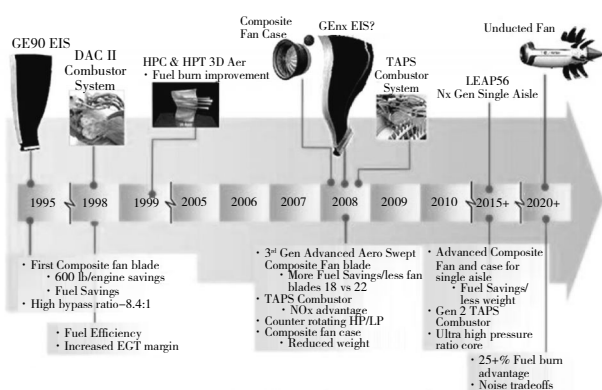


图 1 GE 公司为降低耗油率进行的技术研发^[1]

方案不断提高燃烧效率,形成其特有的 TAPS 燃烧室技术,污染物排放量远低于国际民用航空组织(International Civil Aviation Organization, ICAO)规定的水平,如图 2 所示;采用故障监测、任务优化、服役优化等措施,提高发动机的可靠性,延长发动机在役时间,

提升航空公司运营效率。这些先进技术的应用,保证了发动机的总体性能和经济可承受性不断提高,形成一系列先进产品,如图 3 所示,使得 GE 公司不断提高民用发动机市场占有率^[1-2]。

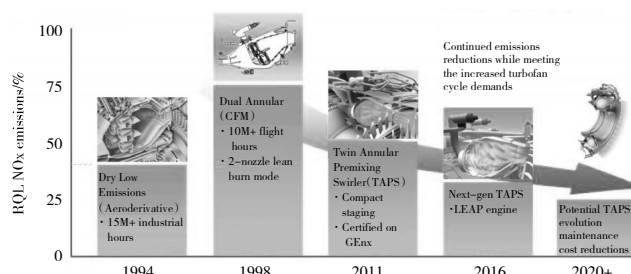


图 2 GE 公司为降低 NOx 排放所进行的燃烧室技术研发^[1]

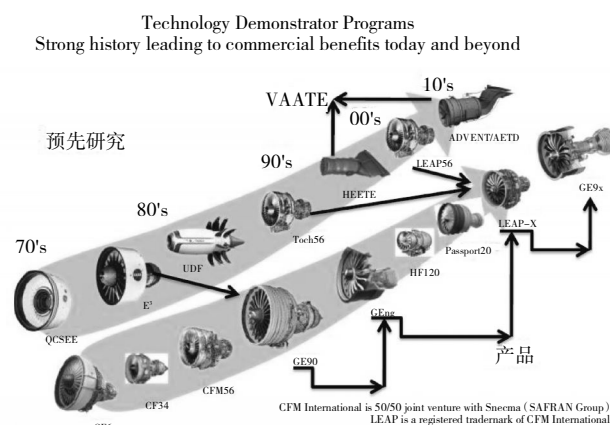


图 3 GE 公司利用预研计划技术成果开发的民用发动机产品^[1]

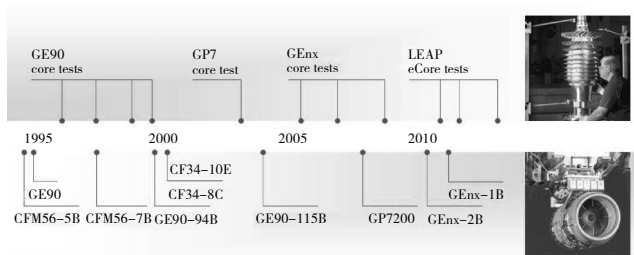
表 1 GE 公司开展的与民用发动机相关的预研计划

计划	QCSEE ^[3]	E ³	TECH56 ^[4]	UEET ^[5]	LAEP ^[6]
时间	1974 ~ 1978	1979 ~ 1984	1998 ~ 2003	1999 ~ 2009	2005 ~
目的	为 20 世纪 80 年代后应用的安静清洁的短程飞机推进系统开发先进技术	增大涵道比, 提高部件效率和改善飞发匹配, 为 20 世纪 80 年代末和 90 年代初投入使用的涡扇发动机提供技术基础	开发和验证未来民用涡扇发动机的先进部件技术, 为最终研制单级高压涡轮、中等压比的涡扇发动机提供技术储备	开发和验证创新、绿色、经济的发动机技术	为 CFM56 系列发动机未来超过 30 年的发展开发和验证先进技术
基准发动机 / 技术		JT9D-7A	CFM56 (1999 年)	GE90	CFM56 (2005 年)
耗油率降低 / %		≥ 12	4 ~ 7	10	16
NO _x 排放降低 / %	满足 EPA 要求 (1979 年)	满足 EPA 要求 (1981 年)	40 ~ 60 (CAEP2 标准)	70 (CAEP2 标准)	50 ~ 60 (CAEP6 标准)
计划指标					
噪声降低 / dB	95 (起降状态) 100 (反推状态)	满足 FAR-36 要求 (1978 年)	20 (FAR36 第 3 阶段标准)	10	10 ~ 15 (FAR36 第 4 阶段标准)
成本降低 / %		5 (使用成本)	15 ~ 25 (购置成本) 15 ~ 20 (维护成本)	50 (使用成本)	25 (维护成本)

注: 美国环境保护局 (Environmental Protection Agency, EPA); ICAO 航空环境保护委员会 (Committee on Aviation Environmental Protection, CAEP)

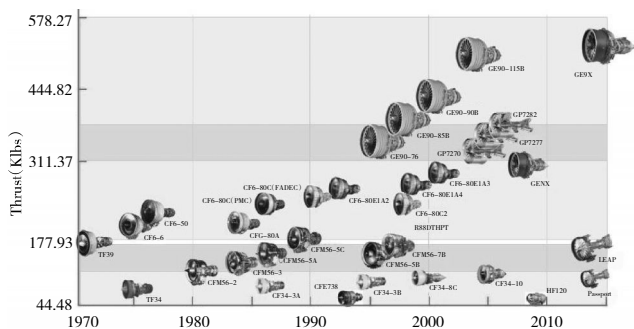
1.2 不断开发和验证核心机

GE 公司关注核心机的技术开发和验证,使其性能稳步提升,提高技术成熟度,增加技术储备,降低风险,缩短研制周期,为型号成功研制提供坚实的核心保障。20 世纪 90 年代以来 GE 公司所进行的与大涵道比民用涡扇发动机相关的核心机试验和所开发的新型发动机如图 4 所示。实际上,据不完全统计,自 1963 年美国提出 ATEGG 计划验证航空发动机核心机技术以来,GE 公司从 GE1 开始发展了 GE37 以及 XTE76、XTE77 等 40 多种核心机(发动机)验证机^[7],而真正应用的民用发动机只有 CF6 (TF39 发动机的核心机 GE1/6)、CFM56(F101 发动机的核心机 GE9)、CF34 (TF34 发动机的核心机 GE1)、GE90/GP7000/GE_{nx}(E³ 计划的核心机)和 LEAP(eCore 核心机)等。

图4 GE公司核心机试验和 product 发展^[1]

2 重视核心机系列发展,产品不断改型升级

利用成熟的核心机衍生发展适应需要的系列产品,是当前航空发动机降低研制风险和成本、缩短研制周期所采取的基本方法。GE 公司在成熟核心机基础上优化设计,既提升了核心机的性能又能兼顾可靠性,优化后的核心机可发展为新一代产品,能更好地满足飞机需求。GE 公司采用核心机系列发展策略,逐渐形成了庞大的民用发动机家族体系,如图 5 所示。

图5 GE 公司民用发动机的系列发展^[1]

2.1 由军用核心机衍生发展

民用大涵道比涡扇发动机在 20 世纪 70 年代才正式应用,因此,包括 GE、PW 和 RR 公司在内的航空发动机公司当时都是基于军用发动机核心机开展民用发动机研制的,只有这样才能满足迅速发展的民航运输的旺盛需求。GE 公司的 CF6、CFM56 和 CF34 系列民用发动机都是在军用发动机基础上衍生发展而来的。

2.1.1 基于 TF39 核心机的 CF6 系列发动机

GE 公司采用 TF39 军用发动机核心机和关键技术进行民用适应性设计, 形成 CF6-6、-80、-80C2、-80E 等系列发动机, 如图 6 所示。截至 2015 年已交付的 CF6-80C2/E1 系列发动机达到 5153 台, 预计到 2025 年还将生产 489 台^[8]。

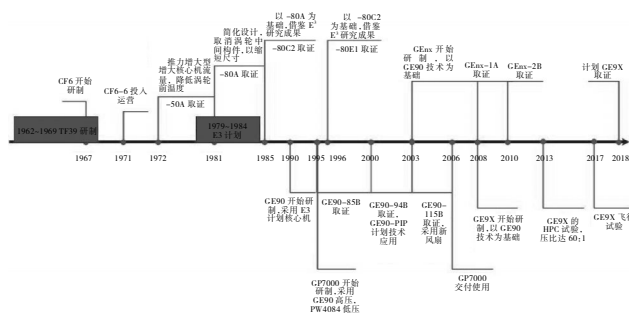


图6 GE公司宽体客机发动机采用核心机技术系列发展

2.1.2 基于 F101 核心机的 CFM56 系列发动机

GE 公司基于 F101 发动机核心机技术,而且在其他部件方面应用 CF6 发动机的实际经验,使得 CFM56 发动机具有费用低、周期短、继承性强、技术风险低、可靠性高、通用性和经济性好等特点,是世界民航史上最成功的发动机之一。CFM56 发动机系列发展如图 7 所示。截至 2015 年已交付 26984 台,预计到 2025 年还将生产 4614 台^[9-10]。

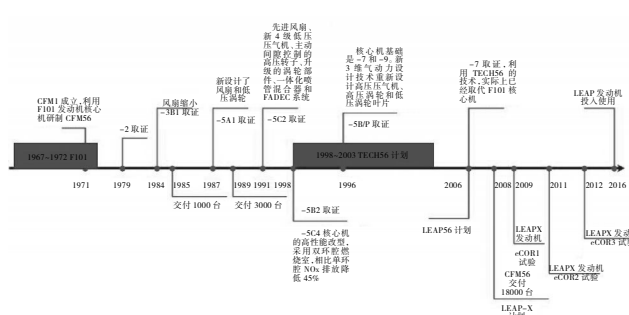


图7 GE公司窄体客机发动机采用核心机技术系列发展

2.1.3 基于 TF34 核心机的 CF34 系列发动机

CF34 发动机是利用了 TF34 的核心机技术改型研制的,主要用于支线客机和喷气式商务/公务机。发展了 CF34-3B、CF34-8、CF34-10A、CF34-10E 等系列发动机,CF34 发动机系列发展如图 8 所示。截至 2015 年已交付 9653 台,预计到 2025 年还将生产 1829 台^[11]。

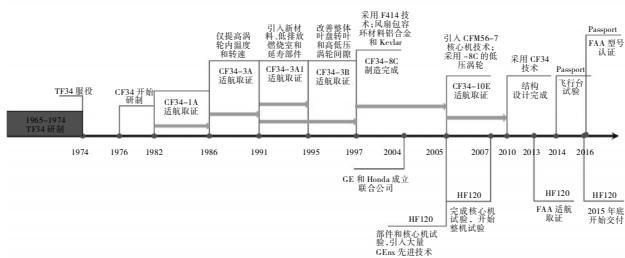


图 8 GE 公司支线客机和商务/公务机发动机采用核心机技术系列发展

2.2 由民用核心机衍生发展

20 世纪 70 年代开始,一系列针对大涵道比民用涡扇发动机的计划应需而立,不仅发展了节油、降噪、减排等特有的民用技术,而且开始民用核心机的开发和验证。在此基础上,研发了“真正”的大涵道比民用涡扇发动机。

20 世纪 90 年代,GE 公司采用高效节能发动机(E³)计划核心机开始研制 GE90 大涵道比发动机,在 GE90 发动机的基础上,形成 GE90-76B、-94B、-115B 和 GP7000、GENx 等一系列性能卓越、高效可靠的宽体客机发动机产品,截至 2015 年底,GE90、GENx 系列发动机产量分别为 2211、1039 台,预计到 2025 年,2 款发动机分别还将生产 1913、2008 台^[12-13]。GE90 发动机改型升级所作的改进如图 9 所示。

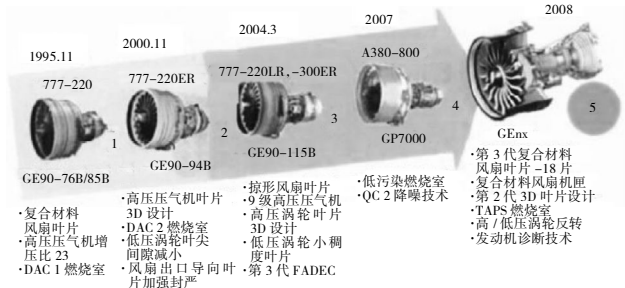


图 9 GE90 发动机改型升级所作的改进

LEAP 发动机虽然是 CFM 国际公司研制的 CFM56 系列发动机换代产品,但实际上该发动机采

用的是 LEAP56 计划中验证的 eCore 核心机,并且应用了 CFM56 和 GE90 系列发动机的成熟经验和先进技术,包括超高压比核心机、3D 编织树脂模传递成型(RTM)复合材料风扇叶片和机匣、更轻的风扇包容机匣、可变面积外涵喷管、第 3 代 3D 气动设计压气机和涡轮叶片设计、第 2 代双环预混旋流器(TAPS II)燃烧室技术、先进的冷却技术、新的耐高温材料、先进的控制诊断技术以及全新的性能保持技术等^[14]。

3 适应市场需要,产品布局不断优化

为满足各类民用飞机的动力需求,GE 公司开发了干线、支线飞机以及公务机等配装的不同推力等级的发动机(图 5)。

GE 公司研制的宽体干线客机发动机(如 CF6、GE90、GP7000 和 GENx 等)的应用相当广泛,而且在未来很长一段时间内将继续保持市场占有率领先地位。GE 公司正在研制的 GE9X 发动机是波音 777X 客机发动机的惟一选型,已于 2017 年 5 月进行型号认证试验,预计 2019 年完成取证试验,2020 年投入运营。

在 GE 公司研制的窄体干线客机发动机中,CFM56 系列发动机处于绝对领先的地位,其市场份额达到近 70%。截至 2016 年,CFM56 发动机订单产量近 30000 台;新研发 LEAP 系列发动机同样获得巨大成功,自 2016 年投入使用以来表现优异,订单量不断增加。在 2017 年 6 月的第 52 届巴黎航展上,LEAP 发动机成为参展的焦点,航展结束后发动机订单总量超过 14000 台。

在 GE 公司研制的支线客机和商务/公务机发动机中,CF34 系列发动机处于绝对优势地位,市场上 70~120 座的大型支线客机(包括中国 ARJ21 支线客机)几乎全部配装 CF34 发动机。2010 年,GE 公司利用 Tech56 计划的先进技术,结合 CF34 发动机经验和成熟技术研发了 Passport 发动机,于 2014 年完成飞行台试验,2016 年 4 月取得 FAA 适航许可证,2017 年投入批量生产。另外,GE 公司还与日本本田公司于 2004 年成立 GE/Honda 航空发动机公司,在原本本田公司的 HF118 发动机基础上利用 GENx 发动机先进技术研发 HF120 发动机,以弥补其 10 kN 推力级的小型发动机的不足。

4 坚持合作共赢,降低成本和风险

20 世纪 70 年代以来,GE 公司的民用航空发动机基本上采用联合研制、合作共赢的方式,按照投资比例和主导地位,将 GE 公司的合作分为 3 种方式:AA 制合作(2 家公司各占 50% 比例),产品为 CFM56、CFE38 和 HF120 发动机等(见表 2);AA+X 制合作(2 家公司占较大比例,处于主导地位,加其他公司),产品为 GP7000 发动机;A+X 制合作(以 GE 公司为主,加其他公司),产品为 GE90、GE_{nx} 和

GE9X 发动机等(见表 3)。

采用联合研制方式具有以下优点:(1)各合作公司具有不同的技术基础,根据能力和意愿共同投资,保证充足的资金运营;(2)各合作公司责任分担,形成技术互补,共享市场收益,能够规避技术竞争与市场竞争风险;(3)各合作公司收入共享而不是利润共享,每家公司的利润取决于各自的管理和运营;(4)各合作公司分担从方案论证、设计、生产、试验、直到销售等的所有工作,确保高的技术水平、工作效率和产品质量。

表 2 AA 制合作情况

项目	法国 Snecma 公司	美国加雷特公司	日本本田公司
型号	CFM56	CFE38	HF120
合作时间	1974 年	1987 年	2004 年
成立公司	CFM 国际公司	CFE 公司	GE/Honda 航空发动机公司
GE 公司负责项目	核心机、主燃油控制和系统集成	GE27 涡轴发动机的核心机	GE _{nx} 发动机技术
其他公司	风扇、低压压气机和涡轮、反推力装置和附件变速箱	1 级风扇和 3 级涡轮吸取 TFE731 发动机成功经验,齿轮箱	在 HF118 发动机基础上改进设计

表 3 AA+X 和 A+X 合作情况

项目	GP7000	GE90	GE _{nx}	GE9X
研制开始时间	1996 年成立发动机联盟公司	1990 年	2005 年	2013 年
合作公司、投资比例及负责项目	美国 GE 公司 30%, 全面负责核心机和第 3 代 FADEC 系统	美国 GE 公司 59.09%	美国 GE 公司约 64%	美国 GE 公司 75%
	美国 PW 公司 30%, 负责风扇、低压压气机、低压涡轮、传动机构和附件核心齿轮	法国 Snecma 公司 25.25%, 负责低压和高压压气机及增压级、滑油系统、FADEC 部件和起动机	日本三菱重工(MHI)15%, 负责低压涡轮转子和低压涡轮单元体装配,生产压气机叶片、风扇轴和燃烧室机匣	Safan 集团(法国 Snecma 和比利时 TA 公司)11%, 负责复合材料前风扇机匣和低压压气机
	MTU 航空发动机公司 22%, 负责高压涡轮第 1 级导向叶片、转子叶片、盘和转子前封严,第 2 级导向叶片和涡轮盘、涡轮内支架	日本石川岛播磨重工业公司(IHI)8.66%, 负责低压涡轮和主轴	意大利阿维奥(Avio)集团 12%, 负责 50% 的低压涡轮(静子件和机匣)、齿轮箱和滑油系统	日本 IHI 公司 10%, 负责低压涡轮和风扇的中间轴
	法国 Snecma 公司 10%, 负责高压压气机第 1 级整体叶盘,第 2~6 级转子叶片和盘,进口导流叶片和第 1~9 级静子,前后外机匣和高压压气机组装	意大利菲亚特(Fiat)公司 7%, 负责齿轮箱和传动系统,并参与低压涡轮的设计和研制	瑞典沃尔沃航空(Volvo Aero)公司 6%, 负责加工风扇轮毂、框架和低压涡轮后承力框架以及增压级轴	德国 MTU 公司 4%, 负责中间框架制造
	比利时宇航科技(TA)公司 8%, 负责风扇毂盘,风扇转子,出口外罩,低压压气机第 1、3、4 转子叶片和第 1 级静子叶片,短轴和前轴承组件	2001 年,瑞典 Volvo Aero 公司从 Snecma 公司购买了 -115B 的 1% 股份,生产部分高压压气机叶片,2005 年开始生产低压涡轮机匣、风扇机匣和涡轮后框架	比利时宇航科技公司(TA) 3%, 负责增压级静子叶片	瑞典 Volvo Aero 公司, 负责轻质钛铝低压涡轮转子叶片制造

5 结束语

从20世纪80年代开始,GE公司不断刷新民用发动机市场占有率,通过重视并实施技术预研、核心机研究和发展、研究市场需求和导向、合作研发等研制策略,实现了技术积累和突破。GE公司民用航空发动机已经形成了成熟的技术和产品发展路线,其产品发展和研发策略具有以下特点:

(1)通过开展预先研究计划对新技术进行验证,提高技术成熟度,之后进行产品应用。

(2)成功研制1款核心机,并在其基础上进行优化设计和流量缩放,用以发展不同推力级别的发动机,使产品的发展更加多元化,并能保证后续产品性能的先进性。

(3)有针对性地研究市场需求,合理配置资源发展不同类型产品,满足多种民用飞机的市场需求,使产品利润最大化,同时避免因单一机型运营不善而亏损的风险。

(4)采用军民结合的方式,通过转化和继承成熟军用航空发动机的技术,提高可靠性,相比全新研制,降低了研发成本和风险。

(5)通过联合研制的模式降低前期的研发成本和市场运营风险,在合作中实现互利共赢。

参考文献:

- [1] Carlson D. GE aviation: perspectives on clean, efficient engines [EB/OL]. [2013-05-14].<https://www.slideserve.com/garin/ge-aviation-perspectives-on-clean-efficient-engines>.
- [2] Chang C T, Ph D. NASA low-emissions research (and things related to

alternative fuels) [EB/OL]. NASA Glenn Research Center. [2018-4-25]. <https://ntrs.nasa.gov/archive/nasa/casi.ntrs.nasa.gov/20170004752.pdf>.

- [3] Carl C.A review of the QCSEE program[R]. NASA-TM-X-71818.
- [4] Benzakein M J. Propulsion strategy for the 21st century a vision into the future[R]. ISABE 2001-1005.
- [5] Shaw R J, Catherine L. Peddie overview of the Ultra Efficient Engine Technology (UEET) program[R]. NASA-CP-2003-212458.
- [6] LEAP-X program update [EB/OL]. CFM international proprietary information. [2018-5-29]. <https://www.airfinancejournal.com/docs/Events/NYFIED09/10.LEAP.pdf>.
- [7] 索德军,孙明霞,梁春华,等.美国战斗机发动机技术研究与产品研制的发展特点及趋势分析[J].航空发动机,2016,42(6):82-89.
SUO Dejun, SUN Mingxia, LIANG Chunhua, et al. Review on technical investigation and product development of fighter engine in US[J]. Aero-engine, 2016, 42(6): 82-89. (in Chinese)
- [8] Royce D. General Electric CF6-80C2/E1 [J]. Aviation Gas Turbine Forecast, 2016(5): 1-5.
- [9] Royce D. CFM International CFM56[J]. Aviation Gas Turbine Forecast, 2016(6): 1-5.
- [10] Royce D. CFM International Leap-X [J]. Aviation Gas Turbine Forecast, 2016(5): 1-4.
- [11] Royce D. General Electric CF34 [J]. Aviation Gas Turbine Forecast, 2016(6): 1-5.
- [12] Royce D. General Electric GE90 [J]. Aviation Gas Turbine Forecast, 2016(5): 1-5.
- [13] Royce D. General Electric GEnx [J]. Aviation Gas Turbine Forecast, 2016(5): 1-4.
- [14] 李杰,巨亚斌. LEAP-X发动机和Tech-X发动机先进技术分析[J].航空制造技术, 2013(10):56-59.
LI Jie, JU Yabin. Advanced technology analysis of LEAP-X engine and Tech-X engine[J]. Aeronautical Manufacturing Technology, 2013(10):56-59. (in Chinese)

(编辑:刘 静)