

文章编号: 1000-8055(2008)06-0981-05

发动机技术进步对飞机先进性的重要作用

陈大光

(北京航空航天大学 能源与动力工程学院, 北京 100083)

摘 要: 推进技术的创新曾经是空中运输进步的基本推动力. 研制大型客机, 必须认识发动机技术进步对飞机性能先进性的重要作用. 以用于波音公司 B787 梦幻飞机的美国通用电气公司(GE) 的 GEnx 发动机为例, 分析发动机技术先进性对飞机高效、低污染、智能化、低成本和舒适性的作用. 最后从国外的技术发展途径, 提出发展我国发动机技术的一些想法.

关 键 词: 涵道比; 耗油率; 智能发动机; 状态监视; 故障诊断; 排放污染; 噪声污染

中图分类号: V231

文献标识码: A

Significant impact of engine technical innovation on airplane performance advancement

CHEN Da guang

(School of Jet Propulsion,

Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China)

Abstract: The innovation of propulsion technology used to be and will be continuously to be the primary motive power to the advancement of air transportation. To develop large passenger plane, it is necessary to recognize the role played by the engine technical progress on the advancement of airplane performance. The new engine GEnx for Boeing dreamliner B787 developed by general electric aircraft engines (GEAE) was used as an example to analyze the impact of new engine technology on airplane efficiency, environment pollution, intelligent airplane, low cost and comfort of riding. At last, based on the experiences of technical development in foreign countries, some suggestions of the way to develop our engine technology were proposed.

Key words: bypass ratio; specific fuel consumption; intelligent engine; condition monitoring; fault diagnosis; pollution

1 B787 客机的技术先进性

按已公布的资料, B787 飞机的先进性比较突出地表现在以下几方面:

1) 高效、快捷: 与现有飞机相比油耗降低 20%, 其中发动机油耗降低的贡献约占 8%. 先进的飞机机翼设计, 提高了高速飞行的气动性能, 尽管如此, 使巡航马赫数达到 0.85 总离不开发动机

能提供足够的推力.

2) 对环境污染小: 主要指排放污染和噪声污染, 这些都取决于发动机性能.

3) 智能化: 主要是指先进的监视系统, 它可实时监视飞机的健康状态, 并可监视到的问题实时向地面报告, 及早做好维修准备. 这套系统既提高了飞行安全性, 又能节约维修工时, 缩短地面维修时间, 减少延误、降低运营成本.

4) 舒适性: 除座舱布局外, 座舱能保持较高

的增压压力,特别是对座舱湿度的控制,提高了乘坐舒适性.

上述先进性都离不开发动机的技术进步,或者说, B787 选用的两种发动机,即美国 GE 公司的 GEnx 和英国 RR 公司的遑达 1000 都是按照飞机的技术要求进行优化设计的,两台发动机有许多相像之处,它们的研制成功保证了 B787 飞机的先进性.由于 GEnx 发动机公布的资料较多,下面从 GEnx 的一些设计特点,分析发动机技术进步在飞机技术先进性方面做出的贡献.

2 发动机技术进步对飞机技术先进性的影响

与飞机性能有关的发动机先进技术主要有以下几点:

2.1 发动机油耗低

前已指出, B787 飞机油耗比现有飞机低 20%,其中发动机的贡献占 8%.据资料介绍, GEnx 发动机耗油率比 CF6-80C2 低 15%,比 GE90 低 7% 以上^[1](图 1).其所以能获得如此显著的进步,主要有以下原因:

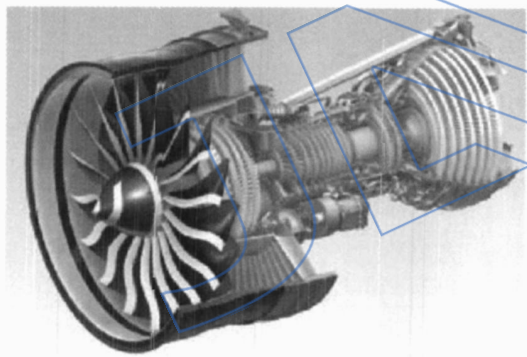


图 1 GEnx 发动机油耗的降低

Fig. 1 Reduction of GEnx fuel consumption

1) 提高涵道比: CF6 涵道比约为 5.3, GE90 约为 8.4, 而 GEnx 接近 10(遑达 1000 涵道比约为 10~11). 众所周知提高涵道比能有效地降低发动机耗油率, 单此一项措施可使耗油率降低 12%~14%, 除此之外, 提高涵道比在设计上必然要降低风扇压比, 于是使排气速度降低, 降低了排气噪声.

一般说涵道比提高会使风扇直径加大, 导致发动机短舱直径增加, 飞行阻力加大, 抵消了油耗降低带来的好处, 另外使起落架加高, 导致飞机重量增加. 这是发展中涵道比提高很慢的原因. GEnx 风扇采用了后掠高流通能力三维设计叶

片, 控制了风扇直径, 缓解了提高涵道比的限制. 新的设计方法, 使叶片数目从 GE90 的 22 片减少到 18 片(CF6 为 36 片), 而效率和稳定工作裕度都还有所提高(图 2).

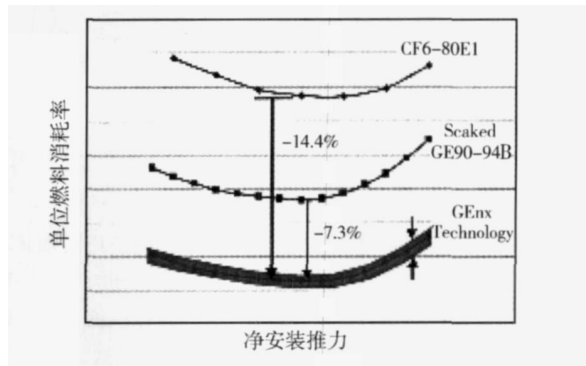


图 2 GEnx 风扇叶片

Fig. 2 GEnx fan blades

2) 提高部件效率: GEnx 发动机的叶片采用了先进的三维设计. 高压压气机是在 GE90 发动机基础上改进的(图 3). 高压压气机压比达到 23:1, 级数只有 10 级, 级负荷大, 其效率和稳定性还有明显提高, 被称为“无喘振设计”. 涡轮采用高低压对转设计, 据资料介绍, 无论是模型试验还是发动机地面和空中试验其效率皆有所改善. 低压涡轮采用高升力叶片设计, 使效率提高, 叶片数目大量减少. 不难看出, 发动机各类叶片都以提高效率、减少叶片数目为改进目标. 部件效率的提高, 不但降低了耗油率, 还使排气温度下降 35%, 在这一点上, 高低压涡轮效率的提高, 作用特别明显. 从性能分析可知, 涵道比提高必须相应提高涡轮前温度, 带来涡轮叶片材料耐热问题或冷却问题难以解决. 所以为了涡轮的寿命和可靠性, 在提高涵道比的同时, 必须改进部件效率. 部件设计的改进还使零件数目减少了 30%, 这一点主要是压气机(风扇)和涡轮设计改进的结果. 减少发动机零件数目, 是降低发动机成本的有效措施.

GEnx 总压比约为 39~41, 和 CF6 及 GE90 相当, 之所以没有提高总压比, 提高发动机热效率来降低油耗, 是考虑了排放污染的限制, 在对环境影响和油耗间进行权衡的结果.

3) 采用可调放气阀门(VBV)技术: 运行中调节低压压气机后的放气量, 以便在不同工作状态下得到最佳的低压压气机压比, 改进非设计点的油耗.

4) 采用多种措施降低使用中的性能衰退: 在高压压气机内设计了内置的喷水冲洗装置, 根据排气温度和耗油率的监视, 视情喷水冲洗. 冲洗是

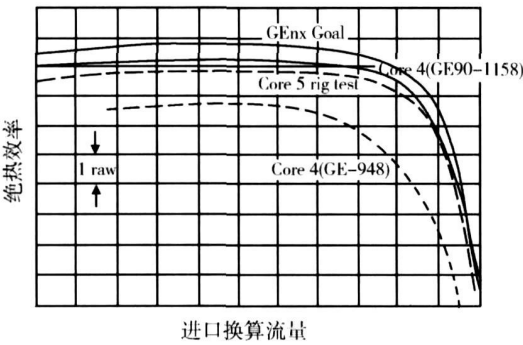


图 3 高压压气机性能的改进

Fig. 3 Performance improvement of high pressure compressor

在地面慢车状态下进行的, 只需冲洗 30 min(过去发动机的冲洗约需 4 h). 另外利用涡轮叶片径向间隙主动控制技术控制叶片间隙. B787 飞机被称为全电飞机, 即座舱增压、飞机防冰等全采用电能, 不从发动机引气, 使性能有所改进.

2.2 低污染

低污染包括低排放污染和低噪声污染^[2].

低排放污染又包括低 CO₂ 排放和 NO_x 排放. 前已指出, GENx 发动机油耗明显降低, 这样不仅是对经济性的考虑, 同样也是考虑降低 CO₂ 排放. 应当指出, 目前对降低污染的呼声越来越高, 所以对使用碳氢燃料的发动机, 降低油耗不只是为了经济性, 减少对大气的污染也同样重要.

在降低 NO_x 排放方面则采用了双环腔预掺混旋流器(TAPS)燃烧技术(图 4). 这一技术是为改进 CFM56 发动机研制的, 到 1998 年已在 CFM56-7 型发动机上试验成功. 将这项技术移植到 GENx 发动机后, 试验结果证明, 可使 GENx 发动机的 NO_x 排放比 ICAO 规定的 CAEP 4 标准低 50%. GE 公司仍在继续进行降低排放污染的研究, 预计 2015 年 CO₂ 排放比 GE90 发动机可低 20%, NO_x 排放, 预计可比 CAEP 4 标准低 60%. 前已指出, GENx 发动机的总增压比与 GE90 基本相同, 并没有为了降低油耗而提高. 众所周知, 燃烧室内压力的提高会使 NO_x 排放增加, GENx 没有选用更高的压气机压比显然是出于控制污染排放的考虑.

GENx 发动机涵道比高达 10: 1, 与 GE90 发动机相比有明显提高, 其原因不只是为了降低油耗, 同样也是出于对降低噪声的考虑. 为了进一步降低噪声, 一方面采用了带加长消声衬的发动机短舱, 以吸收风扇的前传噪声, 另一方面采用了 GE 公司



图 4 双环腔预掺混旋流器

Fig. 4 Twin annular pre mixing swirler

研发的人字形喷管(图 5). 人字形喷管可加强喷流和外界大气的掺混, 有效降低噪声, 但要付出一定的推力损失代价. GE 公司正在研究主动控制或使用记忆合金方案以减少其对性能的影响.

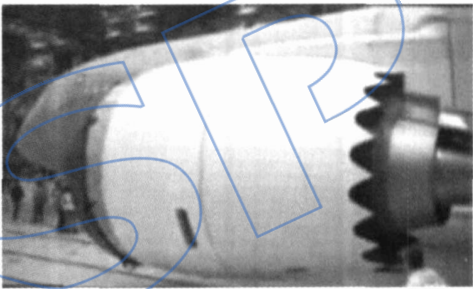


图 5 人字形消声喷管

Fig. 5 Chevron noise suppression nozzle

2.3 发动机的智能化

发动机的性能衰退直接影响飞机的飞行性能; 发动机的故障可影响空中停车率、飞机延误率等可靠性指标, 严重时还可引起飞机的灾难性事故. 为解决这一问题, 目前趋势是发动机向智能化发展. 智能化的一项最主要内容是实现对发动机状态进行实时监视和诊断. 发动机智能化是飞机智能化的主要内容, 只有发动机智能化飞机的智能化才能真正实现. GE 公司在发动机智能化方面作了大量研究. 智能技术和发动机的状态监视与故障诊断技术的综合形成了智能化发动机. 长期以来, 一直认为增加传感器数目可以提高发动机的状态监视和故障诊断精度, 但是增加传感器数目既带来机遇也带来风险. 风险主要来自传感器可能失效. 根据多年经验, GE 公司采取了控制传感器数目的发展思路. GENx 发动机将已有的监视与诊断技术加以利用和发展, 建立了一套先进的监视与诊断系统. 该系统包括必需的传感器和一台专用机算计. 利用 1 000 多台发动机, 几十

年使用经验在专用计算机中建立了数据库. 诊断系统不但可以实时预诊将要发生的故障, 还可对性能变化作趋势分析以及对关键件进行使用寿命管理. 这套系统将故障定位到部件的水平比过去提高了 75%. 该系统不但可以预诊故障还可提出何时应该维修或更换故障件, 可以大大节省维修工时, 减少备件数量, 总之可以提高经济性和工作可靠性. 发动机轴承出现故障的机率较高, 在 GENx 发动机上, 每个轴承都分别进行监视. 办法是利用各轴承发生故障时引起的振动频率不同加以判别故障部位, 对于将要发生故障的轴承进行严格监视, 到必须更换的时候加以更换. 另外, 诊断系统可直接测量高压涡轮叶尖间隙, 监视间隙变化. 工作中当监视到间隙过大, 使性能下降时, 主动控制系统自动增加冷却涡轮机匣的冷却空气量, 使机匣收缩, 恢复合适的间隙保证发动机性能. 当监视到排气温度裕度不足时, 提醒地面维修人员, 利用发动机的内置清洗系统, 在地面慢车状态下进行冲洗. 冲洗的时间间隔视发动机的使用情况而定, 一般是 300~500 h. 前已指出, 冲洗只需 30 min, 而过去发动机的冲洗约需 4 h. B787 飞机 GENx 发动机的状态监视与故障诊断系统设计成发动机全权电子数控系统的一个部分, 监视到的信息汇总到数控系统后通过高速互联网向地面传输, 地面可对发动机的状态进行实时分析. 如遇航线可更换单元出现故障, 可及时通知目的机场, 提前作好准备, 飞机到达后立即更换, 减少航班延误.

2.4 关于座舱环境控制

B787 飞机被称作全电飞机, 其防冰和座舱增压全靠发动机提供的电能完成. 发动机提供电能, 所以不需从发动机引气, 减少引气损失. 电机发电的效率, 且使用灵活. 用电机带动增压器 (小型空气压气机) 向座舱供增压空气, 不但座舱增压能力提高, 还便于采取控制湿度的措施, 大大改善了旅客的乘坐舒适性. 这一点应该说代表了向多电发动机的发展方向.

2.5 改进维修性并降低成本

GE 公司设计发动机时把简化结构、降低成本和提高可靠性作为重要的追求目标. GE90 发动机采用了空心碳纤维复合材料风扇叶片, 据记录, GE90 在过去使用的 9 年中, 共遭受鸟撞击 85 次, 但风扇叶片都没有受到严重损伤. 在 GENx 发动机上又将这一优点扩展到风扇机匣和包容层的设计. 经试验验证风扇单元体的可靠性和耐久性

大大提高, 可以可靠工作 9 000 个循环 (大约相当工作 10 年), 在 3 个翻修期内不需更换, 因此被称之为不需维修的单元体. 由于这一特点, 碳纤维复合材料风扇部件设计成为一个独立的单元体, 维修时可先将这一单元体分解下来, 维修发动机其他部分, 维修完成后再将风扇单元体装回, 形成一个完整的发动机. 这样作不仅降低维修工作量, 也可减少发动机备件数量, 维修成本大大降低.

在高压压气机内设计了内置的喷水冲洗装置, 减少冲洗时间, 大大减少了维修工作量.

发动机智能化可以大大节省维修工时, 是今后重要发展方向.

3 GENx 发动机研发对我们的启发

GENx 中的“nx”可解释为下一代 (Next generation), 它也被称之为 GE90 系列发动机的第 5 代发动机. 这个称呼恰当地说明了研发 GENx 发动机的技术途径, 即, 一是以已经使用证明的、可靠的 GE90 发动机为基础, 二是在 GE90 基础上, 又引入了许多从未在其他发动机上应用过的、经验证明可靠的新技术. 长达 1000 的研发也采取了同样的技术途径.

GE90 发动机除性能先进外, 可靠性也极高. 以 GE90-115 为例, 使用中从未遇到过空中停车, 累计的 8 000 000 飞行小时内只更换了 3 个风扇叶片. 前已指出, GE90 发动机经 85 次鸟撞击后, 没有对风扇叶片造成明显损伤. 显然 GE90 发动机是发展 GENx 发动机的可靠的基础.

GE 公司一直在不断发展自己的新技术. 在其针对改进 CFM 56 的“TECH 56”计划中对改进压气机和涡轮设计方面作了大量研究, 其目的在于减少级数 (叶片数) 的同时, 提高效率^[3]. 研究成果无疑对 GENx 发动机的压气机和涡轮设计有极大帮助. 另外, 为降低污染, 在燃烧室方面也作了大量研究工作, 发展了双环腔预掺混旋流器燃烧室. 这种设计概念曾在 UEET 计划中得到了验证. 双环腔预掺混旋流器的贫油燃烧燃烧室的研发工作开始是在印度班加洛尔的 GE 研究中心进行的, 共用了 5 年时间, 并成功地在 CFM 56-7 发动机上完成了地面与飞行验证. 这项成熟技术用于 GENx 发动机上的移植过程中又作了 4 种燃烧室的选型试验, 最后将选出的两个方案在 GENx 发动机上作了 2 次筛选与验证试验. 计算起来, 从开始研究到 2008 年投入使用, 花了 10 年时间. 另一具有特色的复合材料风扇部件, GE 公司花了

20 年时间进行研究开发. 开始在 GE 公司, SNECMA 公司和 NASA 格林研究中心对缩尺复合材料叶片进行选型, 2006 年又进行全尺寸试验验证. 2004 年在专门试验台上多次进行模型叶片折断的包容试验. 2006 年后期在专门试验台上进行全尺寸叶片折断试验. 经过系列验证后, 用到 GENx 发动机上, 获得单台减重 185 kg(考虑由于风扇减重使发动机在飞机上安装的承力结构重量减轻), 包容性能提高 30% 的收益. 由于碳纤维复合材料不易变形, 它减缓了发动机的性能衰退.

前面图 3 已给出了高压压气机的改进过程. 它首先在 GE90 基础上改进, 一共作了 6 个核心机试验, 每一步都有改进. 第 7 个核心是为 GP7000 研制的, 第 8 个核心(压气机)用于 GENx 发动机. 再举一例, 为了对 GENx 发动机进行结冰试验, 专门在加拿大蒙特利尔建造了试验台(图 6). 该设备是一个露天台, 发动机前方是一个 7.6 m 直径, 内装 7 台 2.4 m 直径风扇的风洞, 供气量达 1 365 kg/s.

总之, 从 GE 公司的发展道路看, 研发一个新的、先进的发动机离不开一个成熟的发动机作为平台, 另外还必须要有成熟的经过验证的新技术. GE 公司在新技术研究方面持续不断地作了大量研究与试验验证工作, 这是他们成功的基石. 这一经验具有普遍意义. 美国著名的 IHPTET 计划对美国航空发动机的发展起着极其重要的推动作用. 这个计划内容是从军民用各类市场需求中归纳出来的, 总的来说是要提高发动机的推进能力. IHPTET 第二阶段计划完成后总结的一句话是: “以推进能力为基础的技术成果转化是我们致力于快速满足军机需求的基石”^[4].



图 6 防冰试验装置
Fig. 6 Anti icing test facility

我国正式提出研制大型客机, 表示了国家在发展航空方面的决心, 给我们发展航空发动机技术提供了机遇. 但相比之下, 我国无论是可作为平

台的发动机, 还是可用的技术储备都与国际先进水平有较大差距. 在这种条件下开展大客的发动机研制, 对发动机行业无疑是一种严峻的挑战. 在当前形势下, 按科学发展观, 采取有效措施与途径发展我国自己的发动机技术至关重要. 国外的成功经验无疑值得借鉴. 当务之急是根据飞机的技术需求分析归纳出发动机必需突破的关键技术, 然后集中人力、财力和物力进行研发. 在经过理论分析、方案筛选和试验验证, 取得可以应用的成果后, 开始工程研制, 将研究成果转化到发动机的研制中去才是又好、又快、又省的道路. 这个过程中必然要作大量试验, 包括基本的模型试验甚至基础验证试验和部件试验以及核心机乃至整机验证试验. 按照“兵马未动, 粮秣先行”的精神, 在制定研发计划时, 应同时启动试验和测试设备的技术改造和建设. 发动机行业在这个难得的机遇中能否取得胜利, 科学起步至关重要.

4 结束语

从 GE 公司研发 GENx 发动机过程中不难看出出以下几个特点和经验:

- 1) 研发一个技术先进、工作可靠的发动机必须以一个成熟可靠的发动机为基础, 为了满足飞机的新的技术要求, 必须在成熟的发动机基础上利用经过验证的新技术成果加以改进;
- 2) 新一代发动机的设计, 参数选择必须考虑多方面的影响, 特别要在发动机性能和发动机对环境的影响间进行权衡;
- 3) 降低发动机成本和提高维修性十分重要, 因此新发动机应该结构简单, 智能化程度高;
- 4) 重视试验验证工作, 及时建立必要的试验设备.

参考文献:

[1] Benzakien M J. GEAE propulsion vision for the 21st century[C]// 航空百年高层学术论坛论文集. 北京: 中国航空学会动力专业分会, 2003.

[2] Gliebe P, Doods W. Practical technology solutions for future aircraft engine noise and emission reduction[R]. Monterey, California: AIAA/AAAF Aircraft Noise and Emission Reduction Symposium, May 24-26, 2005.

[3] Benzakien M J. Propulsion strategy for the 21st century A vision into the future[R]. ISABE 2001-1005, 2001.

[4] Gahn S M, Morris R W. Turbine engine technology A century of power for flight[R]. <http://www.pr.afri.af.mil>.