

动力先行——来自GE航空发动机产业发展的启示

| 陈楠 刘洁 田晔

纵观全球航空发动机产业发展历程，百年老店的美国通用电气（GE）公司作为参与者之一，书写了许多浓墨重彩的篇章。1942年，GE成功造出美国第一台喷气式航空发动机I-A，助力美国第一架喷气式战机XP-59飞上蓝天，美国由此进入喷气时代。尽管在此之前英国和德国已先后研制出自己的涡轮喷气发动机并实现喷气飞行，但随着美国航空动力产业的跨越式发展，美国作为“后起之秀”一步步实现赶超，成为当今世界航空工业的霸主。这其中，GE航空发动机产业发展起着至关重要的作用，众多成功与失败都在诠释和印证：动力先行是航空产业发展的关键。

下好一招先手棋

20世纪60年代末，为了应对苏联米格-23和米格-25等先进飞机装备的威胁，F-14、F-15等全球闻名的战机应运而生，但是飞机和发动机研制、交付和使用的全过程并非一帆风顺，作为战机动力之一的F100发动机由于研制周期太短、验证不充分，后期故障频发，一度让美国军方伤透了脑筋。美国军方总结的宝贵经验其中之一便是——发动机的研制比飞机要难得多，需要的研制开发周期比飞机要长得多。这也早已成为全球飞机与发动机生产制造商的共识——谁能“动力先行”，谁就掌握了竞争的主动权。

1962年，波音联合GE向美国空军建议，研制能够运送坦克等大型武器装备的运输机，能较大幅度地提高美军的战略转移能力，并指出当时C-141运输机动力不足，需要开发划时代的新型发动机。美国军方对未来装备进行了认真分析和研究后，开启

了C-5A“银河”大型军用运输机项目，并明确要求“动力先行”。

GE公司在GE1核心机的基础上设计了新一代TF39大涵道比涡扇发动机。TF39凝聚了GE公司十几年的研究精华，以及众多开创和突破性尖端科技。得益于GE公司始终坚持的部件研制试验和不断持续优化，使发动机每个部件的效率都达到极致。美国军方在没有选定飞机制造商之前就宣布，GE公司的TF39获得了C-5A的订单，并要求GE与三家飞机制造商波音、洛克希德和道格拉斯分别签署合作协议，最终洛克希德在竞争中胜出，承担C-5A的研制重任。

由于研制时间充分，以及前期技术积累深厚，TF39发动机共完成了17700小时的整机试验，12万小时的部件和系统试验，于1968年顺利通过美国空军鉴定定型后开始批产。1970年，以4台TF39为动力的C-5A运输机如期开始装备部队。

C-5A大型军用运输机和TF39先进大涵道比涡扇发动机的成功研制，不仅为部队远距离投放大型武器装备和军需物资提供了高效、快捷、大容量的空中运输通道，也为后来大型民用客机和大涵道比涡轮风扇发动机的研究与开发打下了坚实的基础。

改写命运之役

动力先行不只是军方的经验和要求，竞争激烈的民用市场上，机会稍纵即逝，如果发动机不能按时交付，或者产品性能不能满足客户需求，都会造成极其严重的后果。

1967年10月，美国民航当局解除了对机票价格的管制，航空公司开始追求最大限度地降低飞机的运营成本，提高其竞争性和盈利性，加上当时FAA适航取证要求飞机在跑



道上滑跑的关键位置，一台发动机意外失效，飞机必须靠剩余的发动机安全起飞。三发250座级大型宽体客机的构想受到美国各大航空公司的欢迎。道格拉斯公司和洛克希德公司分别推出了DC-10和L-1011三发250座级宽体飞机的设计方案，分别由GE和罗罗公司提供动力。

GE公司初始设计的CF6-6发动机已经适合DC-10和L-1011的设计要求，但是GE根据多年的经验，认为在飞机设计和研制过程中，随着航空公司用户要求的飞机航程越来越远，飞行速度越来越快、运载能力越来越强，飞机对发动机推力的需求也越来越大，所以在设计阶段就留有一定的增强空间，但是仍无法满足客户要求，于是又在CF6-6的基础上推出了CF6-50发动机。1970年8月，DC-10飞机进行了首飞。而事实上，在此之前，GE公司的飞行试验团队已经将CF6-50安装在自己的B-52飞行试验平台上进行过多次飞行试验测试。

而另一边，罗罗公司的RB211发动机陷入了技术“沼泽”。1970年12月，RB211发动机风扇的一揽子技

术问题仍得不到有效解决，直接影响了L-1011飞机的研制、取证、制造、交付等进程，洛克希德公司和订购了L-1011飞机的航空公司都开始向罗罗公司索要高额赔偿。大量资金被吞噬，罗罗公司不得不申请破产保护，英国政府全面接管罗罗公司的债务，并对其进行了重组。尽管最终RB211发动机走出了泥潭，和L-1011飞机一起在技术上获得了成功，但是由于发动机交付时间比预期推迟了6年，L-1011飞机的市场早已被吞食干净。洛克希德公司因为销售不畅未能收回成本，宣告停止了自身的商用飞机业务。

科技创新的先遣队

然而，动力先行，绝不是简单的“一念成行”。航空发动机领域几十年的实践经验证明，企业投入大量的真金白银，聚集数以万计的各相关专业精英，经过精心的组织策划和数十年坚持不懈的奋力拼搏，才有可能开发出符合市场需求、具有市场竞争力、被客户所钟爱的发动机。航空发动机研制涉及到产品设计、制造、工艺、材料、试验验证等多个技术领域，只有打好

技术基础，才能研制出高性能的产品，从而在航空发动机高科技领域处于领先地位，在市场竞争中占据优势。

“为未来业务的需求做好技术准备，当市场出现需求时即一切就位。”这是GE始终践行的理念。GE通常要花10~20年的时间进行飞机发动机高新技术的预先研究和开发，以掌握先进技术，积累经验，规避风险，从而得到性能先进、经济性良好的发动机型号设计方案。

自20世纪50年代初期，GE就在涡轮喷气发动机事业部设立了发动机设计、材料、工艺、能源等先进技术的研究开发分部，科技创新成为GE公司喷气发动机技术进步的重要标志。

20世纪60年代，GE伊文代尔材料实验室开发出Rene镍基合金，起初被用于J79发动机，后来被广泛应用于GE4、TF39、CF6、F101、T700等型号发动机，对提高发动机性能起到了关键作用。

20世纪70年代，GE全面开展了发动机和飞发一体化各个领域技术的研究、开发、设计、试验工作，这些先进技术也在20世纪80年代甚至进入21世纪后都得到了充分利用，并发挥了举足轻重的作用。

同时，GE公司借助于美国政府资助的一系列航空发动机高科技发展计划，不断开发发动机高科技，并应用于新型发动机产品的研制和对现有产品性能的改进与完善。荣获波音777飞机的GE90发动机在设计过程中就大量采用了美国飞机发动机关键技术研究计划中取得的重要成果。

GE在飞机发动机科研和高新技术开发方面的高投入，成为其产品在市场上立足并取胜的先决条件。

GE航空集团每年都拿出约占其营业额10%~15%的经费，数额高达十

亿甚至几十亿美元，用于飞机发动机先进技术的研究与开发。其中，20%用于基础科学，即与航空发动机直接相关的基础科学研究与开发，如新材料、新工艺、新的计算分析程序和软件、燃烧基础理论、空气动力学、结构力学分析、计算机辅助设计、检测技术等。

30%用于应用技术，即发动机高科技的工程应用、加工制造以及质量监控；50%用于产品开发，即发动机及相关部件和系统的设计、工艺、工程制造、试验、适航取证、售后服务等。

动力先行，人才也要跟得上脚步。GE能够设计出世界上最先进的飞机发动机，离不开其拥有一支完备而出色的项目管理和工程技术人员队伍。GE的全球研发中心总部和分部吸引着世界上出色的科技专业人才，总部2000人50%以上具有博士学位。GE的传奇总裁韦尔奇在自传中写到，GE飞机发动机集团就像一家卓越工程师和管理人员的职业培训中心。这些工程师和管理人员同甘共苦，研究、开发、制造出性能卓越的飞机发动机，以理性的价格卖给客户，为GE公司创造巨额的销售价值和合理的利润，也让所有参与者和合作者都从中受益。

跟随GE的时间轴看向各国航空发动机产业的发展，即使工业基础强大如德国宝马公司，也曾由于在现代航空发动机行业缺少“懂行”的人才队伍，白交了数十亿美元给罗罗公司而无所斩获。印度更是早在20年前就开始了其卡韦瑞发动机研制，也因为缺乏既有专业技能又有实际经验的项目管理和工程技术人员，到头来落得个竹篮打水一场空。

无数事例证明，发动机技术是买不来的，也无法靠“引进、仿造”获得，没有任何捷径，动力要先行，预研必须先先行，人才更要先行。

小管道大学问——航空发动机尾喷管

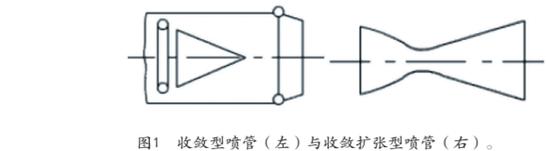


图1 收敛型喷管（左）与收敛扩张型喷管（右）。

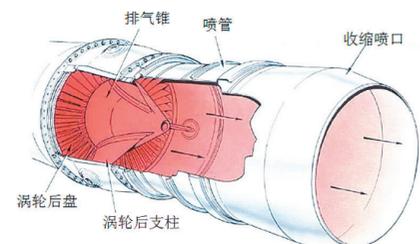


图2 基本的尾喷管排气系统结构。

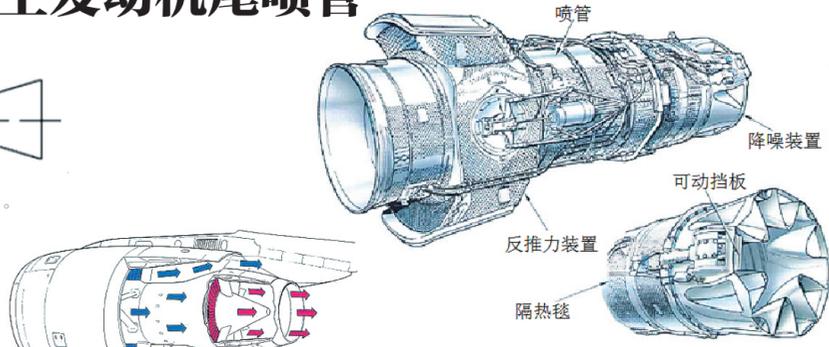


图3 尾喷管上的反推力装置和降噪装置。

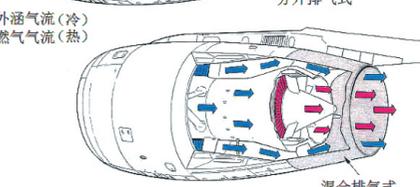


图4 分开排气式和混合排气式喷管。

| 中国航发研究院基础与应用研究中心 张静

收敛还是扩张？这是个问题

根据尾喷管出口气流喷射速度的不同，可以分为亚声速喷管和超声速喷管两类。亚声速喷管为收敛型喷管，超声速喷管为收敛扩张型喷管，如图1所示。

为什么对于不同速度的气体喷管要采用不同的形式呢？这就从气体的特性讲起：对于亚声速气体（气体速度低于当地声速），其在截面不断变小的管道中会加速，这和我们的传统认知是一致的；而对于超声速气体（气体速度高于当地声速），则恰恰相反，其中截面不断变小的管道中会减速，在截面增大的管道中会加速。

从这一特性可知，对于收敛形喷管，当增大来流气体压差时起初喷出气体速度会不断增大，当来流气体总压高于临界值（对于理想气体一般为1.893个大气压）时，出口速度达到声速，此后进一步增加来流气体总压并不会使得出口速度更大，此时出口压强大于环境压强，喷出气体离开喷管后继续膨胀，气体能量造成浪费。因此为使气流在喷管内充分膨胀，实现能量利用的最大化，当喷管前气体总压较大时，尾喷管应由收敛喷管改为收敛扩张喷管，最理想的状态为扩张形喷管出口的静压恰好等于外界大气压，此时称为完全膨胀。

如果气体在扩张段的扩张程度超出需要，则会造成过度膨胀，此时出口静压低于外界大气压，在过度膨胀区内产生激波，或者造成回流，使得喷管推力减小，严重时还会影响发动机的工作。如果扩张段的扩张程度不能满足需要，则会造成不完全膨胀，此时喷管出口静压大于外界大气压，

气体流出喷管后会继续膨胀，在出口外产生激波系，也会造成能量的浪费。

为实现喷管内气流的能量利用最大化，喷管的形式、喉道面积和出口面积应该和发动机设计流量、压比相匹配，使得流出喷管的气流达到完全膨胀状态，因而对于不同速度的气体喷管要采用不同的形式。此外，发动机在工作时提供给尾喷管的空气流量和压强（膨胀比）并不是一个设计的固定值，往往随着其工作状态不断发生变化，因此有必要对喷管的喉道面积和出口面积不断进行调节，尽量避免过度膨胀或不完全膨胀现象的发生。

民航飞机上的尾喷管

目前的民航飞机或军用运输机多是亚声速或低超声速的，因此多使用不可调的收敛型喷管，基本结构如图2所示。

气体由涡轮后盘流出，经排气锥、涡轮后支柱流入喷管，从收缩喷口流出。其中排气锥的作用是将尾喷管中气流速度降低以减小摩擦损失。可以看出，尾喷管排气锥和喷管壁面的流通道面积沿流动方向不断增大，在流量不变的情况下，流速的速度会逐渐降低，从而实现降噪的目的。经过尾喷管整流锥后，喷管中的速度一般可保持在290米/秒左右（12级台风的速度为32~37米/秒，和尾喷管内的气流速度比起来简直是小儿科了）。涡轮后支柱可起到梳理气流，降低进入尾喷管气流中的旋流的作用，以减小气流在尾喷管中的气动损失。

除去基本结构，一些尾喷管上还铺有反推力装置和降噪装置，如图3所示。

对于大涵道比涡轮风扇发动机，其尾喷管还分内外涵道，因此排气方式有分开排气式和混合排气式两种，如图4所示。其中分开排气式喷管的外涵道气流和内涵道燃气气流分别从各自的管路排气，而混合式排气喷管的这两股气流则在一个混合器中掺混，然后从同一个喷管排气。

矢量喷管

矢量喷管是第四代战斗机的标配，与飞机的超声速巡航能力、短距起降能力、过失速机动能力和隐身能力密切相关。矢量喷管可实现喷管机械偏转或气动偏转，使推力方向偏离发动机轴线方向，产生附加力矩，它可以不仅为飞机提供向前飞行的推力，而且还可补充或取代飞机的气动舵面对飞机进行控制的技术。

矢量喷管可分为轴对称矢量喷管、二元矢量喷管和气动矢量喷管三类。

轴对称矢量喷管与轴对称收敛喷管的结构相近，仅扩展了流道偏转功能，具有良好的气动性能，同时使飞机不需要做较大的改装即可实施矢量推进，可最大限度减少飞机的风险；其矢量作用效果明显，喷管结构轻质高效。缺点是运动机构复杂，隐身性能差。

二元矢量喷管具有矩形构型，在红外隐身方面相比轴对称矢量喷管具有明显的优势，同时更有利于实现与飞机后机身高度一体化的设计，其在美国的F-22战机上已实现装机应用（F119发动机）。

气动矢量技术是依靠二次流注入使喷管主流发生偏转从而形成推力矢量的技术，主要针对未来高推重比发动机排气系统，具有重量轻、零件数

量少等特点，目前仍处于预研阶段。

尾喷管的结构和材料

一般尾喷管的入口温度为550至850摄氏度，如果之前经过加力燃烧室，则入口温度可高达1500摄氏度。因此，为避免变形和开裂，采用合适的材料和结构进行尾喷管的设计是十分必要的。

考虑到尾喷管必须承受高温气流，尾喷管的材质多选用镍或钛。同时，尾喷管设计时还应尽量避免喷管中高温向周围飞机机体的热传导。通常设计时会在喷管外布设通风气流，或者在喷管壁增设隔热毯。隔热毯一般由两层构成：内层为纤维化隔热材料，外层为凹坑状不锈钢表皮。有时，根据需要，喷管外还会增设吸声材料以降低噪声。

尾喷管上温度变化剧烈，因此安装时其各个部件间要留有余地，使得结构发生膨胀或者收缩时不产生变形或损伤。

总结来看，尾喷管对于发动机起着重要的作用，主要概括为两点：以最小的总压损失把气流加速到很高的速度和使气流出口压力尽可能接近外界大气压力。根据发动机、飞机和任务的综合要求及适当权衡分析可以选择适当的喷管类型。随着飞机、发动机的不断发展和对现代作战及民航运输的更高要求，对于尾喷管也提出了更多的挑战，推力矢量喷管技术、拨瓣混合器、锯齿形喷口等隐身降噪技术、尾喷管与飞机后体一体化技术等问题得以重视和应用，尾喷管和发动机/飞机的性能关系也会变得越来越密切。

罗罗宣布和空客合作研发先进涡扇发动机UltraFan

近日，罗罗和空客签署协议，共同研发新型民用涡扇发动机UltraFan，与目前罗罗旗下的遑达系列发动机相比，燃油效率将进一步提高25%。

罗罗公司正在寻求UltraFan发动机的装机对象，以确保其长远的商业前景。在短时期内，它的重点是解决波音787客机上遑达1000发动机的问题，其中一些部件的磨损比预期要早。

罗罗公司还透露，UltraFan测试阶段的部分资金将由“Clean Sky 2”项目提供，“Clean Sky 2”项目是一个专注于研发减少排放技术的欧盟研究项目。

罗罗公司补充说，UltraFan是一种“可扩展”的设计，这意味着它既可以适用于宽体客机，也可以适用于窄体客机，而窄体客机发动机市场一直是罗罗公司想开拓的商业领域。

根据罗罗公司之前公布的计划，

该公司计划分两个阶段进行的未来10年航空发动机技术和产品发展道路：第一阶段的目标是以遑达XWB发动机为起点，开发和验证Advance核心机与发动机；第二阶段的目标是以Advance核心机为基础开发和验证具有颠覆性技术特征的UltraFan发动机。

UltraFan发动机的涵道比将达到15，总增压比将达到70，燃油消耗和排放将比目前的遑达700发动机降低25%，计划于2025年投入使用。

值得一提的是，UltraFan发动机将采用像美国普惠齿轮涡扇发动机类似的齿轮传动结构，并于去年9月份，成功完成了动力齿轮箱的测试，在德国达勒维茨专用设施上测试时成功达到了7万马力功率，创下了全球航空领域动力齿轮箱最大功率新纪录。

（王小米）

阿蒂丹3C、阿赫耶2H获欧洲航空安全局型号认证

近日，赛峰直升机发动机公司的阿蒂丹3C和阿赫耶2H发动机获得欧洲航空安全局（EASA）发动机型号认证。

阿蒂丹3C发动机由赛峰直升机发动机公司与中国航发东安和中国航发研究所联合研制，为中国航空工业直升机AC352提供动力。该发动机在中国被称作涡轴16，预计将于2019年获得中国民用航空局（CAAC）认证。阿蒂丹3C/涡轴16将成为首款同时获得CAAC和EASA认证的直升机发动机。

赛峰直升机发动机公司首席执行官Franck Saudo表示：“该认证是阿蒂丹3C/涡轴16项目中的一个重大里程碑。确认了该发动机十分出色的性能表现，代表着AC352试飞项目重要的一步。我们同样期待完成CAAC的取证，随着该直升机即将投入市场，我们将尽一切力量为中航直升机公司提供支持。”

阿蒂丹3C/涡轴16是1700至2000轴马力的新一代涡轴发动机。其采用极其紧凑的模块化构造，能提供同级别产品中最佳的功率重量比，并为运营者带来较低的运行成本。与同功率等级的发动机相比，其燃油油耗要低10%。

随着2016年12月AC352开始试飞，阿蒂丹3C发动机也同时加入了试飞项目进程。另外一款衍生型号阿蒂丹3G还被俄罗斯直升机公司选中，为2017年5月首飞的卡-62提供动力。



阿蒂丹（Ardiden）3C发动机。

自阿蒂丹3的两种型号首次地面测试以来，其成熟度和取证测试阶段已拥有累计超过10000小时的测试时间，并将在投入市场时呈现出高度的产品成熟度。

阿赫耶2H发动机于2015年被选定为中国航空工业直升机的AC312E提供动力。AC312E直升机由中国航空工业哈飞研制，于2016年7月完成首飞。

赛峰直升机发动机公司负责轻型直升机发动机项目的副总裁Nicolas Billecoq表示：“该认证是阿赫耶项目中的一个重大里程碑。这再次印证了阿赫耶仍然是新型旋翼机的超强与高性能发动机解决方案。我们期待着AC312E的后续发展进程。”

阿赫耶2H是在阿赫耶2+的基础上研发而成，是阿赫耶系列中动力最强、衍生型号多，起飞功率达到986轴马力。（梁坤）