

航改燃气轮机技术发展

Development of Aero-Derivative Gas Turbines Technology

■ 吕二立 周亚峰 张轲 / 中国航发动力所 赵勇 / 中国航发燃机

轻型燃气轮机航改化或重型燃气轮机移植航空发动机技术，不仅是燃气轮机的研制捷径，也是航空发动机回收投资、取得更大经济效益和社会效益的有效途径。

受政治、军事和经济等方面因素的影响，航空发动机技术的发展要快于燃气轮机。燃气轮机和航空发动机存在大范围的技术共性，在设计体系、制造体系、人才体系和试验体系等方面可实现共用共享，因此基于燃气轮机巨大的市场需求、明显的应用优势，依托高性能、成熟的航空发动机和先进的工业技术、设计方法发展燃气轮机已成为业界共识。航空发动机技术向燃气轮机转移有两种方式，如图1所示：一是直接将成熟的航空发动机改型衍生，形成航改燃气轮机；二是将航空发动机技术向重型燃气轮机移植，研制和开发新一代重型燃气轮机。

航改燃气轮机发展历程

伴随着航空发动机技术的发展和先进循环技术的应用，航改燃气轮机的技术发展经历了技术探索阶段、技术发展阶段和应用先进循环阶段，实现了航改燃气轮机从简单改型到高性能核心机优化设计，从简单循环到复杂循环的应用，从继承航空发动机成熟设计体系、材料体系到新部件的设计、新材料的应用，使得航改燃气轮机的设计水平、使用性能、可靠性和寿命都得到了长足的发展。

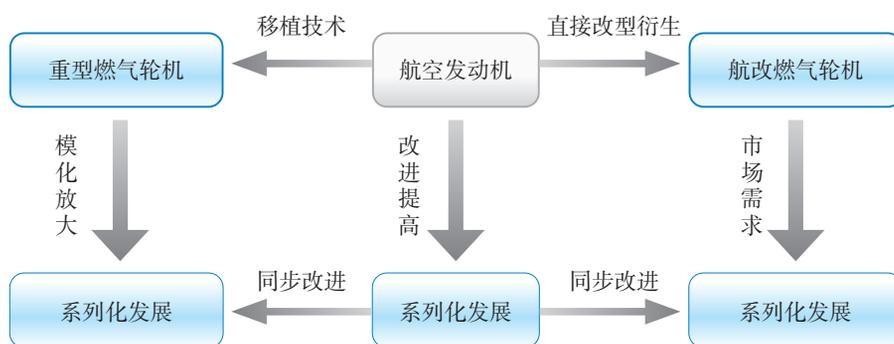


图1 航改燃气轮机转移路径

技术探索阶段

1943年，世界上首台航改燃气轮机研制成功，之后罗罗、GE和普惠公司依据成熟的航空发动机改型设计了首批航改燃气轮机，典型的有工业用埃汶（Avon）、工业用奥林帕斯（Olympus）、斯贝（Spey）燃气轮机、LM1500和FT4等。在此阶段，航改燃气轮机的技术处于探索时期，结构上直接继承航空发动机核心机，通过配装合适的动力涡轮达到输出功率的目的；整机性能也不高，循环效率一般都小于30%；涡轮前初温小于1000℃，压比为4~10；压气机一般还都是亚声速；涡轮叶片采用简单的空冷技术；材料采用初期高温合金；控制系统普遍采用机械液压式或模拟式电子调节系统。

技术发展阶段

随着航空发动机的成熟应用，为航改燃气轮机的快速发展提供了高性能、高可靠性的母型机和先进的设计技术。同时，英、美等国海军对先进航改燃气轮机的需求也提供了广阔的应用舞台，使航改燃气轮机获得快速发展、性能显著提升，推出了一系列性能良好、可靠性高的航改燃气轮机。如LM2500系列、工业用遄达（Trent）、FT4000和MT30等，在舰船动力、发电等领域获得广泛应用。

技术发展阶段的航改燃气轮机的热端部件普遍采用超级合金和保护涂层以提高耐温能力，应用先进的空冷技术、低污染燃烧技术；涡轮前初温达到1400℃，功率可达40~50MW，单机热效率超过40%，联合

循环效率可达60%；采用数字式电子控制系统，控制精度和控制性能获得明显提升。

应用先进循环

随着对航改燃气轮机高性能尤其是耗油率、输出功率等指标的要求提高，先进循环航改燃气轮机获得了广泛的工程实践。在燃气轮机热力循环的基础上增加中间冷却或间冷回热循环，可使航改燃气轮机输出功率及低工况性能均获得显著提升，如LMS100间冷燃气轮机功率等级达到100MW、效率高达46%，WR21间冷回热燃气轮机低工况热效率大大高于简单循环燃气轮机，作为舰船动力，大大提高了舰船的经济性和作战半径。

采用间冷或间冷回热循环的先进循环航改燃气轮机的输出功率大幅提升、全工况热效率获得改善，如功率等级可达到100MW，设计点热效率高达46%；低工况性能显著提升，50%负载下热效率可达40%；间冷使得高压压气机比功降低，整机设计压比可达到40以上。

技术发展模式

纵观发展历程，航改燃气轮机具有谱系化发展、系列化发展、采用先进循环技术和应用联合循环模式等技术发展模式。

谱系化发展

谱系化发展是在同一航空发动机基础上衍生发展出不同类型和不同功率级别的燃气轮机，充分体现出航改燃气轮机“一机为本、满足多用、节省周期、降低成本、衍生多型、形成谱系”的特点。

以CF6-80C2航空发动机为例，LM6000燃气轮机直接利用CF6-80C2的核心机，并保持低压涡轮的最大通用性；LMS100继承CF6-80C2的核心机技术，结合F级重型燃气轮机技术及中间冷却技术，功率达到100MW；MS9001G/H全面采用CF6-80C2航空发动机成熟技术，通过与重型燃气轮机技术相结合，涡轮前温度由F级的1287℃提高到1430℃，功率达到282MW。三型燃气轮机的成功开发使得CF6-80C2航空发动机的航改化发展实现了“一机多型，发展不同类型和不同功率的燃气轮机”。

系列化发展

系列化发展是在一型成功的燃气轮机基础上不断地升级改进、提高性能和降低排放，实现航改燃气轮机的系列化发展，其中以LM2500系列最为典型，如图2所示。LM2500燃气轮机沿用母型机TF39/CF6-6的核心机，并将母型机的低压涡轮改为动力涡轮；LM2500+燃

机是在LM2500燃机的压气机前增加1级，从而使空气质量流量和输出功率获得提高；LM2500+G4是在LM2500+的基础上通过改进压气机叶片叶型、增大涡轮喉道面积等措施增大燃机空气流量，以达到持续提升输出功率的目的。随着LM2500系列化发展，产品持续升级改进，功率范围覆盖20~35MW，全球装备数量超过1000台，是迄今为止应用最广泛的机型。

由于研制和生产难度大，以成功燃气轮机为基础的不断升级改进、提高性能和降低排放的系列化发展是航改燃气轮机重要的技术发展模式。航改燃气轮机的系列化发展和谱系化发展类似，既可缩短研制周期，还可保证较好的可靠性、先进性，大幅降低设计、研制、试验和制造成本。

采用先进循环技术

航改燃气轮机采用间冷和间冷回热技术，通过在高、低压压气机之间引入间冷器、在排气装置出口引入回热器等，达到大幅提升额定功率及全工况热效率的目的。例如，LMS100燃气轮机充分运用航空发动机技术，采用间冷循环，输出功率为100MW，热效率高达46%，是迄今为止性能最好的产品；WR-21燃气轮机以RB211发动机为基础，采

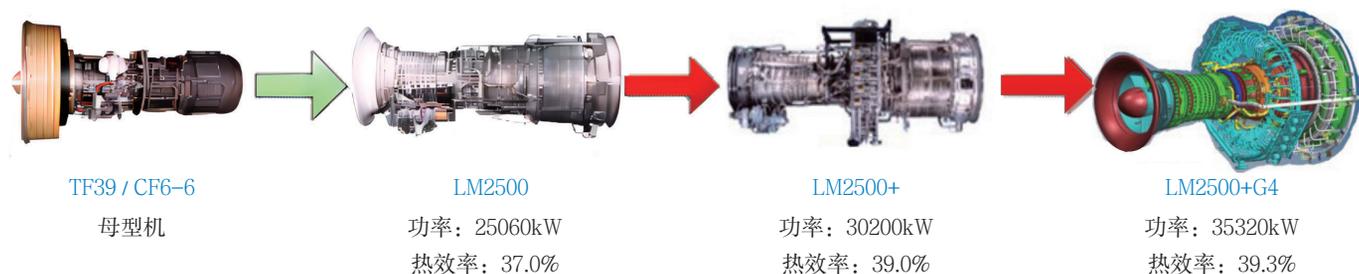


图2 LM2500燃气轮机的系列化发展

用间冷回热，输出功率21624kW，热效率为42%，成为英国45型驱逐舰的主动动力。

应用联合循环模式

由于燃气轮机的排气仍具有较高品位的能量，通过应用联合循环模式，能够实现能量的梯度利用，燃气轮机-蒸汽联合循环已在世界电力工业中获得了广泛应用。燃气轮机-蒸汽联合循环中，以大功率的航改燃气轮机或航改重型燃气轮机为核心，单机功率可超过100MW，联合循环系统综合能源利用效率在70%以上，由于燃气轮机的燃料适应性强，联合循环的燃料类型还可实现多样化，极大地提高了经济效益和社会效益。

技术发展趋势

航改燃气轮机的技术发展将继续基于航空发动机先进技术，围绕着更高功率、更高热效率、更低污染排放、更高的可靠性和长寿命等方面展开，朝着高效化、低碳化、新质化和数

智化的方向发展。

高效化

高效化的目标是不断提高整机性能，尤其是整机输出功率和全工况热效率等，主要的方式有以下几个方面。

一是应用先进循环。应用先进循环可以不断提高航改燃气轮机性能，如再热循环、蒸汽回注循环、化学回热循环、湿空气循环、串联湿空气先进涡轮循环和卡利那(Kalina)循环等。应用先进循环后，不仅航改燃气轮机单机的性能得到改善，整个机组的功率和热效率也会得到明显提高，氮氧化物排放显著降低。

二是高效化部件设计。高效化部件设计集中在高效化压气机设计和高效化涡轮设计，高效化压气机设计将持续攻克压气机面临的高转速高效率 and 低转速高喘振边界的技术难题，如图3所示，涡轮的设计将继续朝着高效率、耐高温和长寿命的方向发展。

三是高效化空气系统设计。高效化空气系统的技术发展方向有开发低泄漏、耐磨损的高效密封技术，如蜂窝密封、薄叶密封、刷式密封和组合式密封；提升空气流动性能的高效减阻设计技术，如去旋减阻设计、流动高效可控设计；进一步提高预旋效率的先进预旋设计技术，如气动型预旋孔设计、叶栅型预旋孔设计；可提升空气系统鲁棒性、可靠性的不确定性量化分析方法等。

低碳化

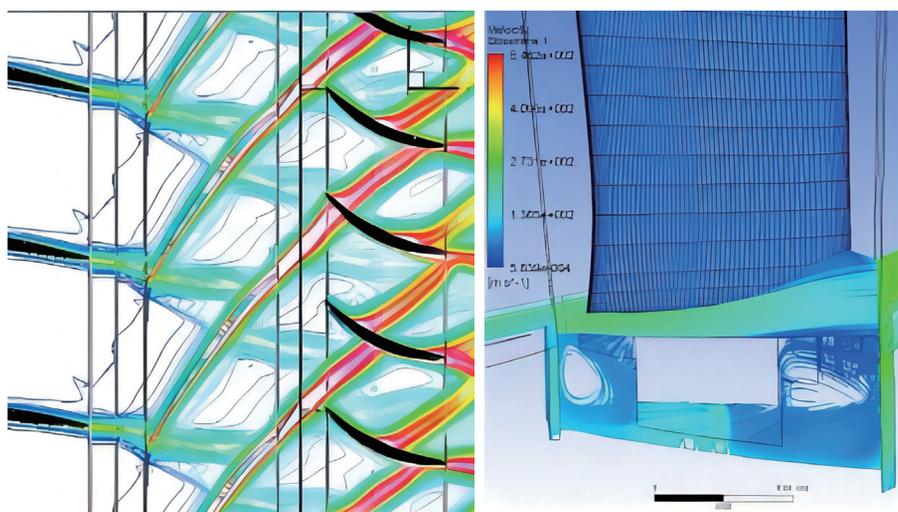
低污染物排放技术，如贫油预混和催化燃烧等，可明显降低氮氧化物排放，并能使燃烧更稳定。高效率、低损失燃烧室设计技术可使燃烧室更加紧凑，具有更低的损失，还能带来更宽的稳定燃烧范围、适应更高的温升、具有更长的寿命。发展多种燃料燃烧技术可使氢燃料、生物质燃料获得普遍应用，使用氢燃料可彻底解决排放污染问题。

新质化

随着航改燃气轮机对更高涡轮前温度、更长使用寿命和更长检修周期的需求，材料的新质化已成为航改燃气轮机技术发展的一个重要方向。

复合材料、新型耐腐蚀单晶合金、高温钛合金和高温耐腐蚀热障涂层等新材料的研制，以及单晶铸造、增材制造等新工艺的应用，可满足航改燃气轮机长寿命、高可靠性需求，且能适应高湿含盐雾环境使用条件。

热障涂层、耐高温复合材料、单晶叶片壁厚高精度超声测量、盲区射线检测以及焊缝、焊接结构的无损检测技术，蠕变/疲劳交互作用长时测试技术、高温疲劳裂纹扩展



(a) 使用非定常计算工具的时序效应设计 (b) 考虑篦齿封严效应修正的根部角圆选取

图3 高效化压气机设计

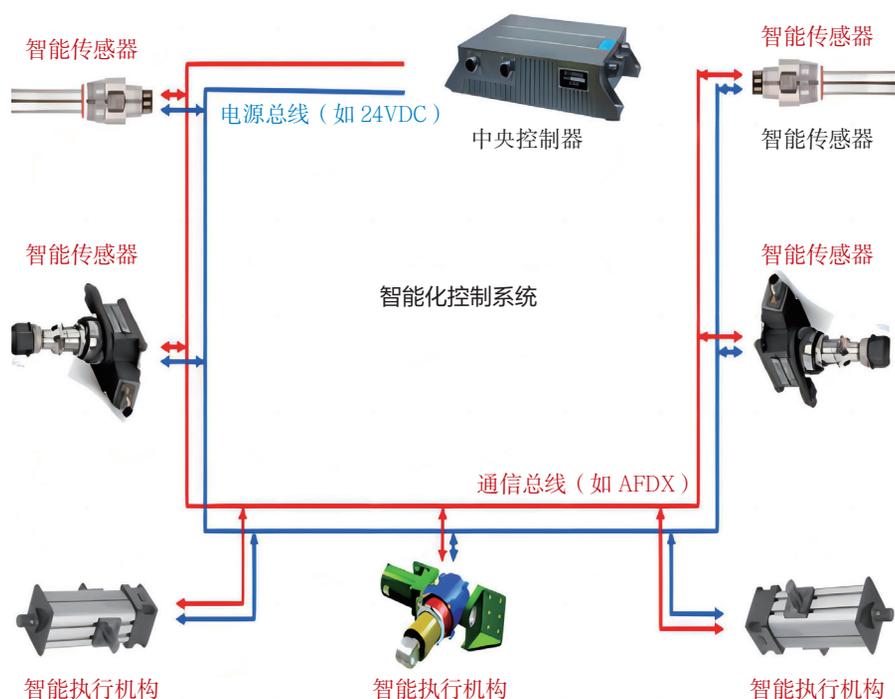


图4 智能化控制系统

成先进控制方法、复杂控制策略以及运算机载自适应模型等，如图4所示。智能化控制技术的发展和实施可大幅减少人力，明显提升软件容错能力、故障识别与检测能力，还可实现软件自我完善和故障智能处理，将是航改燃气轮机控制继数控技术之后的又一次飞跃。

数智化发展的另一个主要方向是智能化健康管理技术，包括气路性能监测和故障诊断技术、振动监测与故障诊断技术、滑油监测与故障诊断技术、辅机附件在线监视诊断技术和燃气轮机寿命管理技术等。随着航改燃气轮机的广泛应用、长期运行数据的积累、大数据挖掘技术的发展，航改燃气轮机的运行维护将越来越依赖智能化健康管理技术，支撑航改燃气轮机的寿命管理、故障和性能衰减分析及远程综合决策，维修保障也将由定期维护向视情维修转变。

结束语

航改燃气轮机因其功率范围广、热效率高、机动性好、寿命长和可靠性高，在舰船动力、电力、机械传输、海上石油平台、战车动力和分布式能源等方面得到大量应用。随着航空发动机技术的日新月异和新设计、新技术的不断应用，航改燃气轮机将朝着高效化、低碳化、新质化和数智化的方向上快速发展，航改燃气轮机的设计制造技术也将获得长足进步，在经济性、低污染排放、可靠性和维修性等方面逐渐改善，应用前景必然更加广阔。 航空动力

（吕二立，中国航发动力所，工程师，主要从事航改燃气轮机总体性能设计）

阈值测试技术、缺口敏感性评价技术等新型的性能表征与测试技术，可精准定位航改燃气轮机的问题区域、“把脉”燃气轮机状态，为燃气轮机的维修和保障提供更快速、更高效的方案。

为适应航改燃气轮机长寿命设计要求，亟须联合多专业和行业内力量建立航改燃气轮机长寿命材料数据库，为航改燃气轮机长寿命设计建立材料体系，提供坚实的物质基础。

数智化

航改燃气轮机的数智化发展趋势将是数字化仿真技术、智能化控制技术和智能化健康管理技术的综合发展和深度融合。

为提升航改燃气轮机设计水平、节约试验成本、降低试验风险、提高全生命周期质量，数字化仿真技术在航改燃气轮机设计中将发挥越

来越重要的作用。具有高效智能计算方法和更高仿真精度的稳态及过渡态仿真，具备控制系统、电力负载、热力系统、燃烧流动等多专业系统仿真，可实现舰船综合电力推进系统、燃-蒸联合循环动力系统的全系统仿真，多维度联合仿真及可实现智慧设计与运维的数字孪生技术等将是今后数字化仿真技术的发展方向。

随着航改燃气轮机性能需求的不断提高、先进控制方法和复杂控制策略的应用，集中式数字电子控制技术已逐渐不能适应未来航改燃气轮机对控制系统的需求。在数字控制技术、工业通信技术逐渐成熟的基础上，航改燃气轮机智能控制技术研究 and 工程应用已经兴起。智能化控制技术将智能传感器、智能执行机构通过分布式控制通讯总线与中央控制器相连，中央控制器完