

航空发动机改燃气轮机成套关键技术

The Key Technology of Aero Derivative Gas Turbine Packages

■ 张潇/中国航发动科 张世福/中国航发动力所

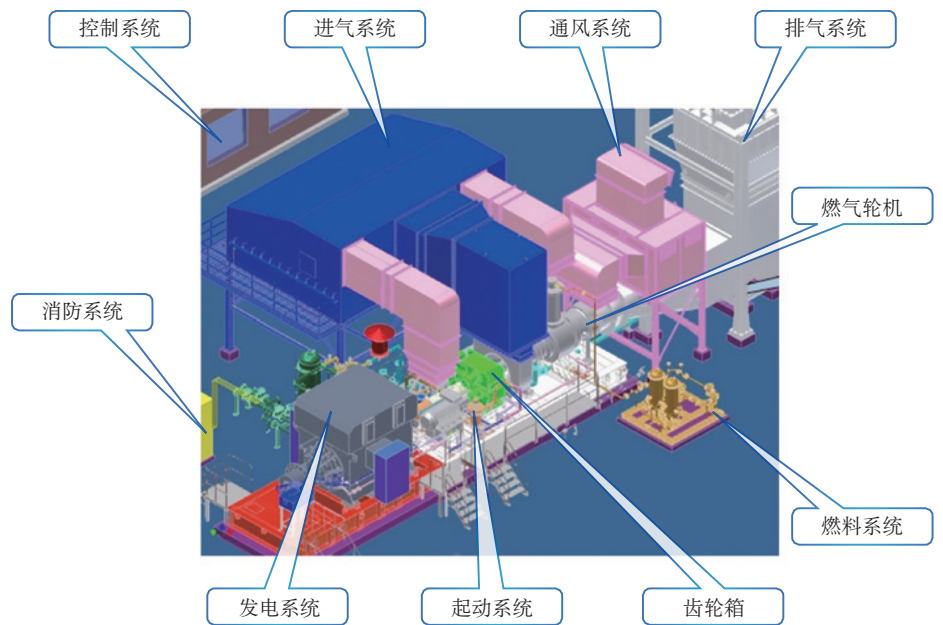
在实际应用中，必须通过不同的成套设计，配备相应的辅助系统，才能使航空发动机改燃气轮机满足发电、机械驱动、船舶推进等不同用途，其中所涉及到的通用关键技术包括燃气轮机机组辅助系统设计技术、试验验证技术以及燃气轮机机组智能化运行与维护技术等。

随着航空发动机的不断发展，由技术成熟、性能优良的航空发动机改型的燃气轮机（航改燃机），广泛应用于地面发电、舰船和机车动力、管道增压等能源、国防和交通领域，具有研制周期短，研发费用低，单机功率大，尺寸小，质量轻，起动快等特点。对于一台燃气轮机而言，除了主要部件外还必须有完善的调节安保系统并配备良好的辅助系统和设备，才能满足不同领域的用途。因此，燃气轮机成套是保证燃气轮机连续稳定运转的必要条件，除了燃气轮机本体外，还包括控制系统、进气系统、排气系统、起动系统、燃料系统、发电系统、消防系统、通风系统、齿轮箱等各类辅助装置。

航改燃机机组相关辅助系统设计

进气系统

航改燃机无论是在地面还是在海上的工作环境都较为特殊。为了保护压气机及整个燃气轮机，要针对进气系统采取一些特殊措施。



典型航改燃机机组的示意图

目前，大多数的燃气轮机机组的空气是由垂直于机组中心线的管道流入，然后转90°的弯变成环状轴向流动至压气机进口，完成这种功能的部件叫进气蜗壳。在舰用燃气轮机中，由于对燃气轮机机组的体积和质量的要求较高，进气蜗壳通常不可避免地设计成弯曲式的，但容易造成较严重的二次流和边界

层的脱离，以及压气机进口速度场的不均匀性，带来燃气轮机性能的不稳定。所以，评定进气蜗壳优劣的主要指标是其出口（即压气机进口）流畅速度、压力是否均匀、稳定，进口总压损失是否足够小。

由于燃气轮机需要将大量空气以很高的速度吸入压气机，伴随着速度的提高，气流温度将相应降低，

通常降低约10℃。在一定进口温度和湿度下，接触气流的冷金属面上将有沉淀冰和冷凝冰的出现。这种情况下，就需要进气系统具备防冰的功能，目前采用的防冰形式主要有两种。一种是在进气口喷入热空气，使之与进气流混合而达到给进气加温的目的，例如，DD963舰的进气防冰系统从LM2500的燃烧室、火焰筒混合段后部抽取二次冷却空气，送至进气装置的进口滤器，并喷入进气流，达到加温的效果。另一种是在机组易于产生沉淀冰的表面添加热空气防冰系统。例如，罗罗公司典型的燃气轮机机组的进气道通常制作成环形，整流罩为锥形，由轻质合金材料制成，采用双层结构，带有热空气防冰系统；奥林巴斯公司的燃气轮机各型的进气道也是环形，采用固定进口导向叶片和锥形整流罩，并有热空气防冰系统。

此外，舰用燃气轮机由于海盐的吸入，压气机叶片表面会沉积盐垢，使叶片型面发生变化而使其性能下降，因此需要增加清洗装置。

控制系统

控制系统是燃气轮机机组最重要的组成部分，它对整个机组的稳定运行、性能发挥、故障诊断、安全保障起到关键作用。控制系统主要采集燃气轮机、发电机、高压保护电器、减速齿轮箱、燃气轮机箱装体、滑油系统、压缩机和锅炉等系统的运行状态信号，同时接受来自控制面板发出的各种控制指令。

不同燃气轮机制造商生产的燃气轮机的控制系统具有各自的特性，是由燃气轮机热力性能和机械构造决定的。但不论各家燃气轮机的控制系统有多少特征差别，控制和保

护一个完整热力循环机组的自动化设备，都必须具有严谨完善的测量、控制、顺控、保护四大功能，以及设备维护和故障诊断的分析判断功能。对于一套完整的自动化系统，还必须具备完整的测量方法和控制策略。

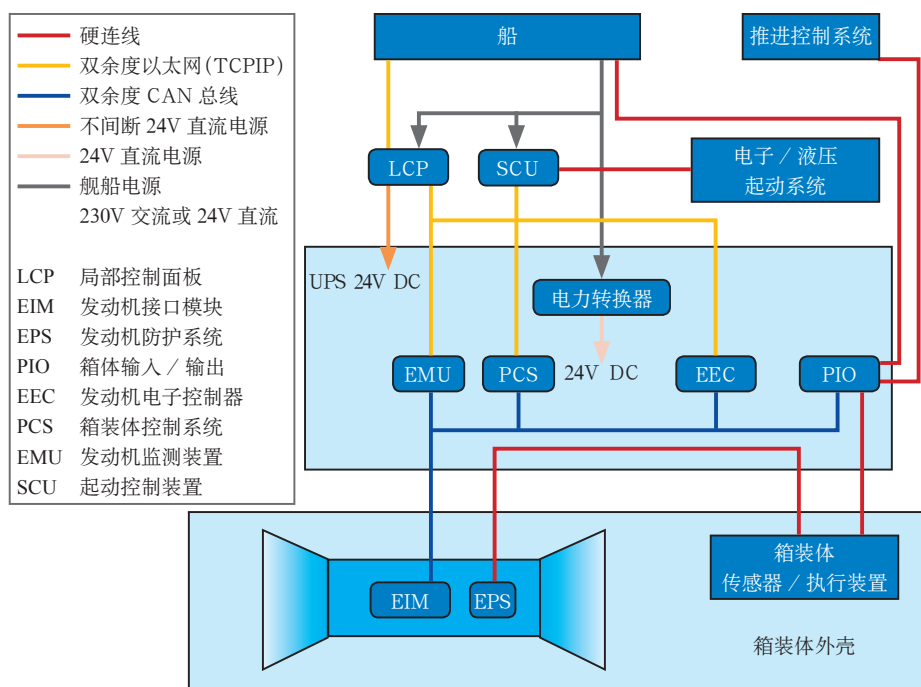
20世纪70年代中期，GE公司带有SPEEDTRONIC商标的燃气轮机控制盘被用于MS5001燃气轮机的控制，并渐渐发展成大型燃气轮机控制系统，广泛应用于各种用途的机组上。采用SPEEDTRONIC轮控盘商标的控制系统，从MARK-I，MARK-II，MARK-IV，MARK-V发展到MARK-VI，最终继承了GE公司经过几十年验证的涡轮控制和保护控制思想。同时，MARK-VI控制系统在系统网络机构、产品标准化、硬件设备功能、可靠性、人机界面（HMI）、系统开放性和全生命周期、

设备故障诊断等技术方面逐步进行了改进，是名副其实的数字式电子控制系统。

罗罗公司典型机组控制系统是由电子-液压式、电子式控制系统逐步发展为全权限数字式电子控制（FADEC）系统。工业RB211燃气轮机采用了电子-液压式控制系统，斯贝SM1A燃气轮机采用了电子式控制系统，后续开发的工业遑达、WR-21、MT30则采用了更为先进的FADEC系统。

燃料系统

燃气轮机的主要优点之一就是使用燃料的灵活性，可选择的燃料可以从气体、液体到固体。目前的航改燃机发展为普遍采用天然气或者液体轻质油的双燃料系统且允许交替工作，在任何的功率级可由一种燃料切换为另一种燃料。在整个功率范围内，也可以以不同的混合



MT30舰用燃气轮机控制系统设计

百分比同时使用两种燃料。例如，GE公司的LM1600和LM6000航改燃机都采用了双燃料系统，进一步提高了燃气轮机的燃料适应性。在双燃料系统中，还应加装控制两种燃料比例的装置。为了降低使用轻柴油时氮氧化物（NO_x）的排放，在机组使用轻柴油时要往燃烧室喷水或水蒸气。

燃料调节系统通常被称为执行机构，其主要功能是依据燃气轮机控制器的输出指令向燃烧室供给燃料，同时能精确控制流量大小。目前，燃气轮机燃料调节系统已由机械液压式燃油控制发展为电子控制，引领燃油控制系统新的发展方向。例如，罗罗公司的MT30高压燃油系统包括燃气轮机驱动燃料泵和液体燃料节流系统（FMS）两个主要部件。其中，FMS包括：1个燃油节流阀，在燃气轮机电子控制器（EEC）的控制下调节燃气轮机燃烧系统的燃料供应，溢出的燃料既能够重新回到油箱，也可以通过燃料冷却器再循环流入泵中；1个由EEC控制的高速节流阀，启动和关停燃气轮机并在停机的情况下能够从燃气轮机主燃油总管放出残余燃油；1个独立的控制回路，与燃气轮机电子保护系统（EPS）连接为燃气轮机提供超速保护。

排气系统

排气系统是按照需要的排气方向把动力涡轮出口的燃气排入大气或余热锅炉，各型燃气轮机的排气蜗壳结构形式各不相同，多采用箱式结构，而具体的结构要根据实际发动机需要来设计，以满足燃气轮机对排气系统的要求。如果燃气轮机作为陆用发电使用，对空间要求不是很严格，这样可以适当增加蜗

壳尺寸以降低排气阻力损失，但如果作为舰船动力应用，则要兼顾阻力损失和结构尺寸两方面来考虑蜗壳的设计。

罗罗公司的斯贝SM1C燃气轮机的排气蜗壳是一体化设计，扩压段和转向段被整合成为一部分，采用逐渐过渡的形式完成气流由轴向径向的转变。WR-21是采用轴流式、三轴、中间冷却回热的燃气轮机，用作水面战斗舰艇推进主机，为了与回热器结构相连接，排气蜗壳的出口较大，为了使回热器入口处的气流分布均匀，在蜗壳集气壳内部设置了多个气流导向片。MT30燃气轮机使用的排气蜗壳结构简单，由直线环状扩压器和外部集气壳构成，这也是目前排气蜗壳中广泛采用的结构形式。

滑油系统

燃气轮机滑油系统由滑油箱、滑油附件、滑油散热器、油气分离器、放油开关、滑油压力表和滑油温度表组成。它的功能是通过滑油压力循环，将压力滑油送往燃气轮机所有旋转件支点轴承、传动齿轮和传动装置的各摩擦表面进行润滑，以便满足减少零部件磨损、调节轴承工作环境温度、减少因机件摩擦所消耗功率等要求。该系统不仅是燃气轮机系统中配合机件的润滑剂和冷却剂，还是零件、部件出现故障的信息载体。

罗罗公司的燃气轮机滑油系统具有紧凑式设计、多功能部件设计的特点。例如，WR-21燃气轮机滑油系统为单元体式紧凑设计结构，降低了自身复杂度、减轻质量并提高了工作可靠性；具有冷却、存储和过滤燃气轮机滑油的功能，将功

能相关的部件进行集成，能够减少部件数量，有利于滑油系统的轻量化。

GE公司则采用一体化结构的滑油/液压油系统。例如，LM2500燃气轮机的滑油系统为燃气发生器和动力涡轮一体化的润滑、冷却系统，由轴转动的容积式（正排量式）供油泵、5个独立的回油泵、分配管路系统和1套滑油喷嘴构成。LM1600使用合成的滑油/液压油，为了控制燃气轮机的可调几何结构，配备了供油泵、回油泵、液压泵、油滤，另有两个液压蓄压箱用于平衡瞬态压力。

通风系统

燃气轮机机组须配备通风系统，目的是使燃气轮机保持在固定温度范围内，从而保证人员的安全和设备的防护；同时，通风系统还具有保持汽缸四周温度均衡，有助于维持燃气轮机动静叶片间隙的作用；此外，通风系统提供了稀释泄漏的烟气和燃气的功能。

通风系统普遍采用非压力冷却系统，在箱体出口上用风扇抽吸，使周围空气通过箱体输送到机组外。通风系统的主要作用是驱散任何雾化的泄漏燃油或滑油，以及冷却安装在燃气轮机和燃气轮机周围的子系统，尤其是电力设备。

起动系统

燃气轮机不能独立投入工作，需要用外界能源来帮助起动。通常，把提供能量带动燃气轮机旋转的机械称为起动机，使燃气轮机从静止状态起动加速到慢车工况的过程称为起动过程。完成燃气轮机起动过程的各工作部分，例如，起动机、起动燃油供给系统、点火系统、自

动控制装置等在内的一整套装置被称为燃气轮机起动系统。

起动系统用于燃气轮机燃烧室正常工作前的起动运行状态及燃气轮机的冷运转、假开车、启封、油封和清洗等工作状态的运行。根据燃气轮机对起动规律的要求，地面燃气轮机更适合用液压起动系统，液压起动系统由电控液压泵、电控液压马达、液压驱动电路等关键部件组成，可实现无级调节，起动特性不受大气温度影响，满足了燃气轮机对寿命、可靠性、使用环境条件的要求。

试验验证技术

航改燃机机组的试验验证包括调试试验、性能试验和耐久性/可靠性考核试验。其中，调试试验包括燃气轮机起动系统调试、控制系统调试、滑油系统调试、燃料系统调试、磨合试验、性能优化试验以及其他研究性试验。

性能试验是按照相关国家军用标准或国家标准进行的起动性能试验、机动性能试验、热力学性能试验、振动测量、安全性试验、空气噪声测量、结构振动加速度测量、烟度测量、燃油消耗率测量、抽气试验、清洗试验以及盐雾试验等其他需要的试验。

西门子公司在2015年成立了清洁能源中心(CEC)，CEC为燃烧系统测试提供了3个相对独立的测试单元，其中2个用于大型电厂的装机容量可达400MW的燃气轮机，另1个用于装机容量可达66MW的小型工业燃气轮机。该中心采用自主开发的工程寿命可视化(ELvis)软件来处理巨大的数据流并分析部件的特性，

通过使用现场音频和高清视频，在测试期间和之后交换即时反馈，并帮助确保关键的测试数据和决策可同时进行讨论和转移，加速了新机型的开发和产品进入市场的进程。

此外，西门子公司还运营着一个完整的燃气轮机测试机构——柏林燃气轮机试验电站，目前该试验电站的最大容量已达400 MW。该测试设施的一个重要特点是空气预热系统，利用水力测功器的热水和热交换器，可将周围空气温度提高30℃。这有助于模拟不同的气候条件，例如炎热的环境条件，或者可以在冬天模拟符合国际标准化组织(ISO)条件的整机试验

燃气轮机机组智能化运行与维护技术

现代化的工业领域维护策略已经从修理设备故障发展到有计划的整体性能维护。在燃气轮机应用领域，随着数字化、信息化、可视化和智能化的不断发展，机组运行的可靠性、可用性、经济性与安全性显著提高。

三菱日立电力系统株式会社(MHPS)的数字化燃气轮机电厂可实现远程无人监控，甚至是远程起停机。该公司建立了数字化燃气轮机电厂，通过数据分析，提供联合循环机组监视和诊断服务，包括人工智能检测、关键参数分析、报警智能导向、升级建议、提高可用性和24小时支援等功能。

西门子公司建立了智能化燃气轮机电厂，它能够依托数字孪生、三维可视化技术和数据分析技术，提高电厂运行的可靠性、可用性、经济性与安全性；依托联网机群的

数据收集和分析，通过先进的诊断功能提高市场响应速度和运营效率；运用VR/AR技术在全球范围内实时连接服务团队与主设备制造商。

大唐集团借力数字化手段，建立起国际电力数据监测诊断：一方面，帮助电厂利用系统数据和算法，对机组进行性能测评，监测到处于萌芽状态的问题，发出预警，实现防患未然；另一方面，提升自动化水平，控制燃料和运维成本，通过大数据优化资源的配置，以此实现降本增效。

京西热电公司将大数据、互联网和人工智能等数字技术引用到实际生产当中，成熟运用“一键启停”“移动智能两票”和“点检一体化系统”，最大程度减少人为干预，真正实现现代燃气电厂运检的高度自动化，使安全保障系数大幅提升；辅之仓储管理智能化，电厂管网数字集成化，燃气轮机经济性小指标分析系统，环保排放指标在线监测系统，编织起周密而强大的数据网络，实现生产与效益的实时互联互通，为提供高效、及时、精准运营决策提供有力支持。

结束语

目前，随着航改燃机成套技术水平不断提高，通过运用新技术、新材料及新设计，使可靠性更高；采用简化结构、易于维护、通用性设计等措施，使机组维修更容易；运用信息化手段，不断提升设备监测、控制、自动化、智能化水平，使得产品保障性、安全性不断提升。

航空动力

(张潇，中国航发动科，工程师，主要从事燃气轮机成套技术管理工作)