

我国轻型燃气轮机的研究与发展

航空 航天部轻型燃气轮机开发中心 王祖浒^{**} 李怀悌

【摘要】 重点介绍近十年来在我国航空发动机基础上衍生的轻型燃气轮机的发展情况。在开展预研及应用研究工作中包括满足工业、海上用户对燃气轮机性能的特殊需要、适应不同的环境、提高燃机成套装置的自动控制水平及燃用各种替代燃料等。提高我国轻型燃气轮机及其成套装置的可靠性、运行率是当前用户最关心的课题。

关键词： 轻型燃气轮机 预研 应用研究 综述

工业与船舶用的轻型燃机是在成熟的航空发动机技术的基础上研究发展的，因此它具有性能高、研制周期短、风险小、投资小、可靠性高等优点，这也是近年来轻型燃机迅速发展的主要原因。但是航空发动机从空中转用于地面和海上决不是简单的使用环境和负载变化，而是必须开展一系列研究与发展工作才能满足新的用户要求。近十年来我们在实践中不断地总结经验提高认识开展了在航机基础上紧密围绕满足用户要求为中心的应用研究工作，主要有：(1) 对航机进行适应性的气动性能和结构上修改；(2) 提高连续运转寿命和可靠性；(3) 要求使用多种劣质燃料；(4) 解决进气过滤以保证空气品质及排气消音和减少 NO_x 污染以满足环保法规要求；(5) 研制适应地面状态长期稳定运行的控制、检测和保护系统；(6) 成套工程应用研究。

1 燃气发生器或轻型燃气轮机动力装置的研制

在航发基础上改型研制的轻型燃机有单轴（前输出）、分轴（后输出）。对涡喷发动机来讲必须新设计研制动力涡轮，与燃气发生器（涡喷发动机主体）组成分轴式燃气轮机。WP6G 系列燃气轮机即是利用 WP6 航空发动机的压气机、燃烧室及涡轮部件配上由南京汽轮机厂设计、黎明公司加工的重型结构的动力涡轮，配上减速箱，组成了 WP6G1 分轴式燃气轮机。对涡扇发动机除新设计研制动力涡轮外，还必须新设计低压压气机或采用顶切低压压气机及重新设计低压涡轮。中美合作研制的 FT8 燃气轮机就是在 JT-8D219 涡扇发动机基础上新设计了 3 级低压压气机，前 3 级导向叶片可调以扩大燃机工作范围，燃烧室重新设计采用双燃料喷嘴，新设计了高效率的 4 级轻结构动力涡轮等组成分轴式燃机，效率可达 38.7%；WS9G 燃机系列是在斯贝 202 涡扇发动机基础上改型发展的，共有 3 种方案。WS9G1 是以斯贝的核心机为燃气发生器配以新设计的动力涡轮；WS9G2 是在斯贝 202 的基础上顶切 5 级风扇、去掉外涵通道、调整低压涡轮负荷配以新设计的动力涡轮而成；WS9G3 是新设计低压压气机和低压涡轮并配以新设计的动力涡轮组成。涡桨、涡轴发动机进行适当的改进可分别发展为单轴或分轴燃机。南方动力机械公司在 WJ6 航空发动机基础上开发出 5 种型号燃机，见表 1。

表 1 5 种型号燃机

型 号	WJ6G1	WK6G1A	WJ6G2	409 机	WJ6G4B	WJ6G4A
功率 (kW)	2000	2000	2059	2354	3016	3015
输出轴转速 (r/min)	1000	3000	12000	12000	12000	12000
压 比	7.45	7.45	7.45	7.5	7.77	7.77
涡轮前温度 (°C)	721	721	720	761	852	
热效率			0.21	0.219	0.241	
燃 料	天然气	天然气	天然气	天然气	天然气	重 油
	柴 油	柴 油	柴 油	柴 油	柴 油	
重量 (kg)	1200	1200	1350	1350	1350	< 1700
型 式	单 轴	单 轴	分 轴	分 轴	分 轴	分 轴

WJ6G1 和 WJ6G1A 是前输出型, 为适应发电机转速, 减速器改了速比, 有输出 1000r/min (WJ6G1) 和 3000r/min (WJ6G1A) 两种, 为适应一般燃料, 改烧 0 号柴油后又以天然气和原油伴生气为燃料, 现已有 40 多套机组用于生产上。WJ6G2 是分轴后输出型, 它去掉前端的体内减速器, 把第 3 级涡轮改成动力涡轮, 其轴向后伸经过鼓形套齿联轴器或挠性盘联轴器对外传递功率, 支承机组的主安装节改在新设计的动力涡轮机匣上, 为了扩大工作范围把压气机进气导流叶片改可调。WJ6G2 船用型燃机 409 号机是根据海军要求, 由 703 所与南方公司合作发展的船用动力装置, 压气机除进气导流叶片可调外, 第 1 至第 3 级静叶也改为可调, 为了进一步满足海军提出将功率加大的要求, 重新分配各级涡轮功使功率增加到 2354kW。

根据铁道部提出采用燃机作动力, 要求功率为 3000kW、烧 200 号重油、低噪音和长寿命等。为适应多用途研制该机型分轻油型和重油型两种, 前者称 WJ6G4B, 后者称 WJ6G4A。改型的内容一是加大功率, 二是改烧重油。加大功率是采用空心气冷涡轮叶片提高涡轮前温度 90°C, 改烧重油是把现有环形燃烧室改成单管回流式并增加燃烧室长度以达到燃烧完全。WJ6G 系列通过十几年研制工作得出: 涡轮前温度增加 18%, 压比提高 4%, 热效率提高 14%, 功率增加 50%, 可适应燃料范围由天然气、柴油扩大到可燃重油及中热值气体燃料等。

2 多种燃料的应用研究

2.1 应用油田天然气或伴生气燃料

航空发动机由烧煤油改烧气体燃料的应用结果很好。改烧天然气时火焰筒不需改变, 但从供气管、燃料调节器直到喷嘴都需改动以适应气体容积的要求。WJ6G 系列在改用天然气时采用的是小孔球形喷嘴, 喷嘴总面积比油喷嘴大 40 倍, 喷嘴前后压力差控制不到 98kPa, 使其喷射速度符合燃烧室要求。在试验用天然气燃料时, 点火是否及时是个关键, 否则可能引起爆燃, 在点火试验中摸清了着火边界, 并用监控装置进行控制, 确保了燃气轮机在油田烧天然气点火可靠。采用油田伴生气燃料时严防液体燃料混入燃机, 必须事先作予处理。WZ6 发动机是采用电油盘式供油的回流式环形燃烧室, 改为烧天然气比用喷油嘴的燃烧室要困难得多, 经过多种方案比较、试验采用了从燃烧室机匣轴向扩压器叶片前端处周向均匀地开 3 个孔径向插入 3 根管子, 然后使天然气经供气环组件的多排小孔射进火焰筒内。上述部件试验后选定了一种 3 环室, 3 排孔的供气环组件结构,

达到出口温度场温度分布系数为 0.22, 径向温度分布也符合叶片强度要求。该方案已经受长期运行的严峻考核^[1]。

2.2 重油作为轻型燃机燃料的研究

重油是炼油过程中残余的重馏分, 是最差的碳氢化合物液体燃料, 它的产量将随炼油工艺水平的提高而减少。南方公司及 608 所在研究了重油与航空煤油及轻柴油的差别后, 再从燃烧室结构和燃料系统上采取一系列措施取得了燃机燃重油的成功。重油具有挥发性差、粘度大、凝固点高及有害金属元素含量多的特点, 因此燃用重油必须解决燃烧、积垢、高温腐蚀和储运等问题。608 所根据 WJ6G 原型情况, 为满足燃用重油确定用 8 个平行外插的回流式燃烧室方案来保证压气机、涡轮等主要部件及燃机的轴向尺寸不变, 并采用回流式结构以增加火焰筒的长度。在火焰筒的设计及调试中主要是选择合理的空气流量分配规律以解决低负荷工况下的积炭问题和高负荷工况下火焰过长以及火焰筒壁温过高问题。喷嘴设计主要是提高雾化质量。针对重油粘度大, 不易流动和不易雾化的特性, 对油进行两级预热、采用了柴油和重油双燃料供给系统(即启动时用柴油为燃料, 达到慢车后切换改为重油, 停机前改用柴油冲清)和空气雾化喷嘴用高压空气增强雾化。在使用前必须对重油作水洗处理, 要求 $\text{Na} + \text{k} < 1 \text{ ppm}$ 。经过了单管、双管预研试验较完满地解决了联焰、低负荷工况下积炭等问题, 燃烧性能达到了设计要求, 最大状态燃烧效率达 96% 以上, 总压恢复系数达 95%, 最高壁温不超过 750°C ^[2]。

2.3 燃机应用中低热值气体燃料的研究

我国轻型燃机燃用中低热值燃料气的工作始于 1985 年。614 所和北航通力合作以内蒙达旗化肥厂的合成二气开始的, 它的热值 $11244 \sim 14128 \text{ kJ/Nm}^3$ ($2688 \sim 3378 \text{ kcal/Nm}^3$) 之间且含 H_2 量高达 50%, 选用 WZ-5 发动机的燃料喷射系统进行改型设计并用其燃烧室扇形段完成了点火试验和常压燃烧试验。最后用 WZ-5G 燃气发生器, 以孝感化肥厂半水煤气作燃料进行台架性能试验。其结果表明: 燃机在只改动喷嘴情况下, 完全可燃热值在 8360 kJ/Nm^3 以上的气体燃料。90 年 614 所在完成 WZ-5 蒸汽回注燃机原理试验时用无锡县洛社化肥厂的半水煤气作燃料顺利地达到了设计要求, 再一次证明燃机可用半水煤气作燃料的结论。608 所、430 厂用 WJ6G4 扇形段进行的低热值气化炉煤气点火燃烧试验, 燃料热值从 5434 kJ/Nm^3 降到 2926 kJ/Nm^3 其点火性能良好, 燃烧稳定, 排气成份符合环境要求^[3,4]。

3 提高燃气轮机可靠性研究

轻型燃机在长期工作中总体性能和工作可靠性, 主要取决于航空发动机原型机的设计和加工质量, 在改型设计中除继承和充分利用原型机的经验外需结合用户特殊要求、工程特点、运行经验通盘考虑。粗略估计改型过程中一般可利用原型机的 50%~80% 零部件。

轻型燃机的寿命是以航空发动机为基础发展的, 由于轻型燃机的载荷谱及工作条件较航空发动机简单稳定, 特别是起、停次数少, 工作转速及涡轮前温度都比原型机下降 5%, 都有利于寿命提高。但由于我国部分航机的寿命较短, 改型后仍满足不了用户希望年累计运行时间达 7000~8000h 的要求。经过 10 年运行经验及出现的各种故障和采取解决措施, 目前 WJ6G、WJ5G 系列燃机基本上可达到平均大修寿命为 7000~8000h, 最长的已达 12000h。WP6G 系列燃气发生器平均大修寿命可达 2000~3000h。围绕着提高可靠性开展的研究工作叙述如下。

(1) 提高燃机轴承寿命的应用研究。目前从燃机主轴承工作温度发展趋势看, 相当于 50 年代的 3 倍, 且轴承工作温度范围也扩大, 以上两因素会降低轴承的疲劳寿命。另外, 燃机在地面工作

空气密度增大,作用在叶片上的气体动力增大,压气机功增加,推力轴承负荷也增加,再有根据燃机不同用途进行改装有可能改变转子轴向力,这也影响主轴轴承可靠性。WJ5、WJ6 航机改为分轴式燃气轮机,是将航机的涡轮分成燃气发生器涡轮和动力涡轮两部分,动力涡轮的主轴轴承仍采用航机使用的滚动轴承。经耐久性试验发现压气机前轴承内环端面、滚子都严重磨损,燃气发生器后轴承端面磨损出现点状剥落区,滚子磨损出现锥度。经几年实践,把主轴轴承精度提高,采用离子注入表面处理使轴承内滚道和滚子表面处理硬度高,耐磨性能好,抗氧化性能和耐热疲劳性能强,提高了轴承寿命。WJ6G 系列为解决压气机前轴承磨损,安装时选择小游隙配合,并将滑油喷孔直径加大,改变供油喷射方向等,经外场试验效果良好^[5]。

(2) 改变航空发动机部件材料提高燃机寿命。如 W P6 压气机前 5 级铝叶片改为钢叶片,前 5 级铝半环改为钢半环,使燃机寿命提高 1 倍以上。

(3) 制定有关燃机产品的国家和部标准规范,以控制产品质量,提高产品信誉。制定了燃气轮机产品鉴定程序、确定了燃气轮机产品测试中心及制定出发放燃气轮机产品许可证规定等。

4 燃气轮机数控系统的应用研究

为了提高燃气轮机机组调节控制水平,“七五”期间北航、113 厂与 606 所分别研制了模拟式电调系统及全数字电调系统。北航与 606 所的样机先后都在 608 所压气机试车台进行了性能试验,结果都达到了设计要求。113 厂研制的 RST-6 数字式电调系统已在 QS6 注水机组上成功运行。由于 606 所研制的数字式电调系统调节简单,价格便宜,受到用户欢迎。

606 所自行研制的 QSK-06 全数字式电调系统经历了性能验证、寿命考核和投入使用 3 个阶段。性能验证阶段是以 WJ6G2B 为对象在 608 所完成的,进行了约 2500h 部件试验完成了寿命考核。其中 405h 是系统物理模拟试验,在试验室条件下连续运行 50h,剩余时间是在 WJ6G2B 发动机上完成的。QSK-06 设计控制功能有:按负载转速调节发动机的供油(气)量;按燃气发生器的换算转速调节压气机导向叶片角度;机组自动程序启动和加、减速控制;监视发动机和控制系统是否正常等。606 所生产了一台以 QDR-45 燃机机组为对象的样机在大庆油田北压电站进行了外场使用联试,并网发电成功连续运行 6000h 以上。当前 QSK-06 控制系统在南方动力公司 QD20 电站上已完成产品定型前的长试工作。还增加了自动并网功能^[1]。

5 充分利用燃气轮机余热提高经济性

在“七五”期间,各厂、所开发成套的燃机机组大多数都成功地采用了热电联供、热动联供形式,使机组的热利用率达 65% 以上,弥补了我国燃气轮机热效率低的不足。如 WP6G1 燃气轮机发电效率约 19%,但组成热电联供机组后其热利用率达 65%;WJ6G1 燃气轮机发电效率为 21%,组成热电联供机组热利用率达 68~70% 左右。热电联供方式虽给用户带来经济效益,但由于一年四季用户对热(蒸汽)的需求变化大,冬天蒸汽可全发挥作用,而到了夏天,蒸汽大量放空,这不仅浪费了能源,还污染了环境。QDR45 热电联供机组在大庆油田北压电站投入使用,每小时产生蒸汽 13t 左右,冬天可全供给油田作加热用,而夏天只用 3~5t/h。

为了解决上述热、电不平衡问题,根据国外蒸汽回注先进技术成功经验开展了蒸汽回注燃气轮机技术的应用研究工作。北航、黎明公司开展了 WP6G 燃机采用蒸汽回注技术的计算及初步方案设计工作。614 所进行了 WZ-5 燃气发生器蒸汽回注技术的原理试验,重新设计了进气导流盆、前后测量段、当量喷口、气体燃料喷嘴及燃料气和蒸汽总管等部件,扩大了涡轮 I 导及 II 导叶片面积并自行研制了电调控制系统。在无锡化肥厂利用半水煤气作燃料,利用化肥厂现有的过热蒸汽回注

到压机出口扩散机匣处(前排注汽)或燃烧室掺混段(后排注汽),进行了不同注汽量(1.8t/h、2.7t/h、3.6t/h)对燃机性能影响,不同注汽位置对性能和温度场影响,改变注汽速度对燃机性能及温度场的影响等。最后得出 WZ-5 燃气发生器注汽 3.6t/h,其功率和效率比不注汽(已扩大 I 导 II 导面积)分别增大 40% 和 20%。摸清了注汽后发动机参数变化规律,为蒸汽回注工业性试验提供了设计依据^[6]。

6 燃机配套设备的应用研究

为了使轻型燃机长寿命可靠的运行以发挥最好的经济效益,同时还要控制对周围环境产生噪音与污染,以符合国家标准,正确选定燃机进气系统是非常重要的。轻型燃机需要空气气流量很大,对进气气流品质要求很严格,如灰尘或大气污染物被吸入可能造成压机机叶片表面积垢、叶片磨损、燃机功率下降,严重时由于局部应力增加导致叶片断裂。为此对燃机进气的过滤要求是限制 10 μm 以上的空气悬浮物的颗粒数量。国外规定进入燃机的颗粒总数中只允许 5% 的颗粒数目是 10 μm 和大于 10 μm 的。另外当燃机进气气流中含有钠、钾、钒、铅这些对燃机高温部件有腐蚀作用成分时可能导致燃机燃烧室、涡轮叶片及排气壳体等产生严重腐蚀,国外资料报导在过滤后空气中的盐分含量不应超过 0.01ppm(近年来提高要求达 0.005ppm)。对长期连续运行的燃气轮机机组近年来多采用带自动清灰系统的高效空气过滤装置,当前国外较广泛使用的是带筒式滤芯元件的脉冲自清式高效空气过滤装置。1984 年航空工业规划院自行研制生产的由 GL-320 II、III 型筒式过滤元件和 W-140 型文式管组成的“脉冲自清式高效空气过滤装置”已达到了国外同类产品水平,现除应用在国产轻型燃机机组上并于 1987 年成功地将 GL-30 型圆筒式高效过滤元件替代国外引进的杜纳逊公司生产的过滤元件应用在大庆油田、胜利油田及中伦输气管线首站上的进口燃机机组上。此产品于 1988 年通过原航空部及江苏省的鉴定并获省产品金奖^[7]。

适用于压缩天然气的与轻型燃机燃料系统相配的前置增压装置是关键配套装备,1990 年 614 所与无锡压缩机厂联合研制开发了螺杆式前置增压装置,样机在胜利油田 QDR 20 热电联组供机上正常运行 8000h 以上,于 1991 年通过了部级技术鉴定。

优化选用配套设备及定点生产是保证燃机成套机组可靠性的重要措施。如余热锅炉、电机及各种阀门及电气元件等。

参 考 文 献

- 1 606 所. QSK-06 轻型燃气轮机数字电子控制器的研制与发展. 燃气轮机应用于石油及石化工业论文集, 1988
- 2 吕其颐, 陈孝先. 航机改型重油型燃气轮机的研制. 燃气轮机应用于石油及石化工业论文集, 1988
- 3 汤传军. 国内中低热值燃料分布及应用燃气轮机的前景. 轻型燃气轮机论文集, 第二集, 1989
- 4 周康成. 涡轴五燃气轮机燃用半水烃气的试验研究. 航空动力学报, 1993, 8 (2)
- 5 陈孝先. 提高燃气轮机轴承寿命的途径. 轻型燃气轮机论文集, 第三集, 1990
- 6 钱研生, 李怀悌. 利用蒸汽回注技术提高国产燃机性能. 航空动力学报, 1993, 8 (2)
- 7 刘希贤. 关于燃机进气过滤、防冰、降温和消声等诸问题的研究报告. 燃气轮机应用于石油及石化工业论文集, 1988

(责任编辑 魏星禄)

decision. The program is based on the Mean-Stream-Line Method. It is given in detail how to select the independent design functions of this method in programming. This program enables to be operated with a very small computer, even a pocket computer such as the Sharp PC-1500.

SPECIAL COLUMN: LIGHT-WEIGHT GAS TURBINE R & D OF LIGHT WEIGHT GAS TURBINE IN CHINA

Wang Zuhu and Li Huaiti

(China National Light-Weight Gas Turbine Development Centre)

ABSTRACT This paper introduces the engineering research of aeroderivative gas turbines in recent ten years in aspects of such as generator modified; power turbine research; alternative-fuel combustibility. The advanced and applied researches aim at meeting the demands for industrial and marine propulsion, such as prolonged life, improved performance, enhanced reliability and satisfactory variability.

ACOUSTICAL PROPERTIES OF SOUND ABSORBING STRUCTURES AT HIGH TEMPERATURE

Liu Wei, Tang Daomin

(Design Institute of Xian Aero-Engine Corporation)

ABSTRACT The acoustical properties of sound absorbing layers used in gas turbine exhaust silencing component at high temperature with temperature gradient were investigated by analysing the effect of temperature on the acoustical properties of porous materials. Some experimental results are given and a good agreement is found between theoretical prediction and measurements of acoustical properties at various temperatures up to 500°C.

PERFORMANCE IMPROVEMENT OF GAS TURBINE WITH STEAM INJECTION

Qian Yansheng

(Wuxi Engine Research Institute)

Li Huaiti

(China Light Weight Gas Development Center)

ABSTRACT This paper describes how to choose and modify the WZ-5 gas turbine for steam injection testing and how to evaluate testing parameters and programmes. Testing results indicate that when the steam is injected 3.6t/h into the WZ-5 gas turbine, its power output and thermal efficiency increase 40% and 25% respectively. Moreover, the steam injection does not deteriorate the exit temperature profile in the turbine, which ensures a long term reliability of operation for the engine.