

ICR 进展及关键技术

(海军工程学院) 刘永葆 张仁兴

摘要: ICR 燃气轮机继承了简单循环燃气轮机的一系列优点, 且具有优良的变工况性能。WR-21 代表了 ICR 的最先进水平。本文简述了 WR-21 燃气轮机的最新进展, 对中冷器、回热器、箱装体、数字控制系统等重要部件的关键技术进行了分析。

关键词: ICR 燃气轮机; 中冷器; 回热器; 箱装体; 控制系统

中图分类号: TK47

1 引言

简单循环燃气轮机以诸多优点, 如: 比功率大、比重量轻、振动噪声小、可不使用水以及优越的机动性等, 占据了世界大中型水面舰艇推进动力的主导地位。但是它本身也有弱点, 主要是在部分负荷工况时耗油率过高, 致使燃气轮机在使用方式上受到了限制。目前正在开发中的中冷回热燃气轮机 ICR (Intercooled Recuperated Gas Turbine) 有低的耗油率和非常优良的变工况性能[见图1], 克服了简单循环燃气轮机的弱点, 对大中型水面舰艇极具吸引力。

收稿日期: 1998-10-20; 修订日期: 1999-05-04

作者简介: 刘永葆(1967-), 男, 山东淄博市人, 讲师, 硕士, 主要从事动力装置热力循环分析、状态监控、故障诊断等方面的研究工作。通讯处: 430033 武汉市 海军工程学院 305 教研室

ICR 是在简单循环燃气轮机 和优良的油耗特性, 但寿命只有

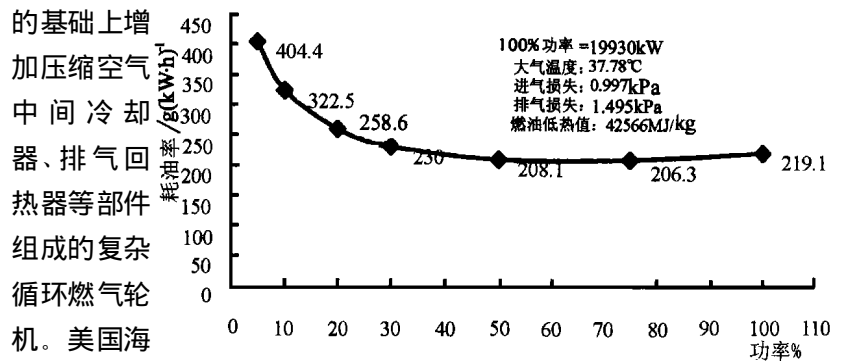


图1 WR-21 ICR 燃气轮机耗油率曲线

型中冷回热燃气轮机代表了 ICR 的最先进水平。图2 给出了该型机的组成。本文主要围绕 WR-21 对 ICR 的最新进展及其中的关键技术进行分析研究。

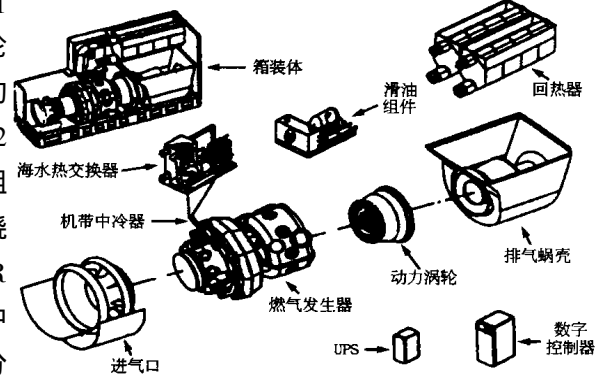


图2 WR-21 ICR 系统组成

2 ICR 进展概述

根据英国海军的订货, 1947 年 R·R 公司开始了 RM60 型机的研制, 这标志着 ICR 研制工作的起步。RM60 设计为两级中间冷却、带排气回热的三轴燃气轮机。台架试验及航行试验结果表明^[1]: 该机具有良好的机动性能

1000 小时, 不能满足舰船主动力的要求。加之, 该机结构及布置过于复杂等等原因, 致使 ICR 以后的发展基本处于停滞状态。自 80 年代以来, 美国海军投入大量经费支持 ICR 的研究, 促进了 ICR 研制工作的迅速发展。美国 GE 公司对 LM1600-ICR 进行了预研, 英国 R·R 公司自 1984 年以来有过三个发展机型。即:

SMAICR、ALLISON 1220 - B2、WR - 21。美国海军最终选中 WR - 21，以取代当前美国海军大量使用的 LM 2500 燃气轮机。1991 年 12 月威斯汀豪斯公司舰船部中标成为主合同商，负责系统总成、性能及包装设计，并委托 R·R 公司负责燃气发生器 (GG) 及动力涡轮 (PT) 的研制，Allied Signal Aeroplane System and Equipment 负责中冷器与回热器的研制，加拿大 CAE 公司负责数字控制系统的研制。绝大多数设计工作已于 1993 年 12 月以前完成^[2]。其主要性能指标为：

耗油率：(见图 1)

额定功率：21.6 MW

(29,000hp)

尺寸：长 8 m，宽 2.64 m，

高 4.83 m

重量(加箱装体)：54 431 kg

排气温度：在正常操作模式(非旁通)时，从慢车至 110% 工况小于 387.8℃。

MTBF：ICR 系统：1000 h

回热器：20 000 h

中冷器：14 000 h

控制系统：4500 h

更换燃气发生器最长时间：

48 h

更换动力涡轮最长时间：

72 h

更换中冷器最长时间：24 h

更换回热器最长时间：120 h

从上述数据可以看出与其它类型的推进动力相比 WR - 21 的整体性能是非常优异的。

1997 年 5 月底至 9 月 10 号由诺斯罗普·格鲁曼公司和 R·R 公司共同完成了 WR - 21 的 500 小时耐久试验。试验结果证明 WR - 21 已达到设计的耗油量要求，排气也已达到了美国规定的燃油排放标准，而且经过对试验

的 WR - 21 发动机进行分解检查，结果表明零部件的状态良好。

3 关键技术

在 WR - 21 的研制过程中，对功率和耗油率、箱装体、控制系统设计要求的实现是最具挑战性的技术难点。下面将重点对此进行分析研究。

3.1 功率和耗油率要求的实现

功率和耗油率变化的关系曲线是燃气轮机变工况性能的主要标志，也是 WR - 21 需解决的关键问题。下列技术对功率耗油率要求的实现具有决定性作用。

3.1.1 中冷回热

研究表明压缩空气的中间冷却可明显地提高机组比功率，同时对形成平坦的耗油率曲线具有一定的作用；而回热器的使用能大幅度地降低耗油率，形成优良的变工况性能。两者同时使用能获得较大的输出功率和满意的耗油率变化曲线。WR - 21 采用了压气机一级中冷器和排气回热器组成复杂循环。

研制 ICR 中冷器重点应考虑两方面的技术问题：一是中冷器的布置要与母型机的燃气发生器通流部分相匹配，形成良好的流动特性，同时要尽量减小轴向尺寸，以满足整个发动机的尺寸要求；二是解决中压压气机 (IPC) 出口空气中水分冷凝问题。WR - 21 的中冷器采用紧凑设计技术(见图 3)，冷却剂采用淡水与乙二醇 1:1 的混合物，这不仅

增强了冷却效果，而且缩短了 ICR 模件的轴向尺寸。最终设计结果，WR - 21 发动机的轴向尺寸比 LM 2500 发动机短 3 英寸。控制系统根据空气的相对湿度值和 IPC 出口压力值来调节冷却剂旁通阀的开度，从而有效地解决了出口空气中水分冷凝问题。

回热器采用 14Cr4MO 不锈钢代替了 Incoloy800。14Cr4MO 具有低价、高换热率和良好的抗腐蚀能力。对于回热器的污染问题采用了两种处理方式：短期使用后清洁时，只需旁通回热器并把换热部件加热至 482℃ 以上即可；使用较长时间后清洁时，需使用回热器顶部的蒸汽喷枪进行清洗。回热器腐蚀的防护措施是：控制中冷器旁通阀的开度，使 HPC 出口温度保持在 149℃ 以上以防止排出燃气中的硫酸冷凝在换热器的金属表面上。这些技术使新设计的回热器以较低的费用获得了高的效率和良好的可靠性。

3.1.2 涡轮叶片涂层及动力涡轮可调导叶 (VAN)

LM 2500 燃气轮机使用气膜

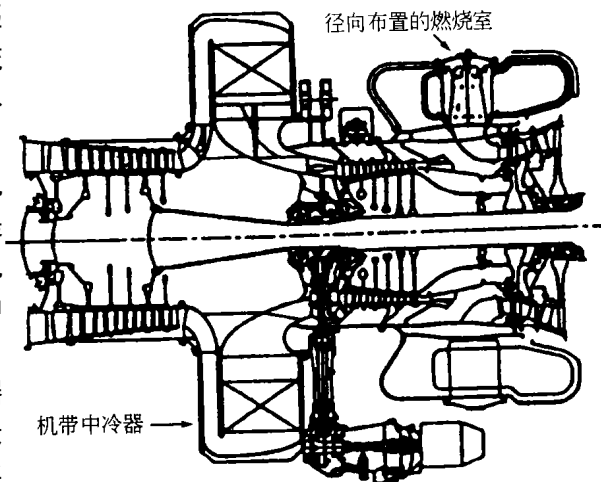


图 3 WR - 21 燃气发生器剖面图

冷却技术, 有效地提高了涡轮前温度, 但该方法需引用大量的冷却空气, 对机组效率有不良影响。WR-21 采用了技术难度更大的 HPT 和 IPT 涂层冷却技术, 涡轮叶型设计为 INCO378 加硅铝涂层, 能使最高的叶片温度保持在 950℃ 以下, 避免了高温燃气对叶片的氧化和腐蚀, 有效地保证了功率要求并降低了耗油率, 提高了可靠性。

研究表明回热循环中采用 VAN 与不采用 VAN 的动力涡轮相比较, 在 0.5 工况和 0.2 工况时可节约燃油分别为 18% 和 16%。WR-21 动力涡轮第一级静叶设计为 VAN, 并由滑油压力作动器驱动, 保证了稳定的喉部面积, 从而使机组能在 50% 工况下保持较高效率, 同时又不进入喘振边界。

在上述技术的共同作用下, 不仅满足了功率和耗油率的设计要求, 同时权衡了重量、尺寸等技术指标, 并保证了机组高的可靠性要求, 使之在整个变工况范围内稳定可靠地工作。

3.2 箱装体

图 4 所示为 WR-21 箱装体的结构。设计要求其底座尺寸必须与 LM 2500 箱装体底座尺寸完全相同, 以方便替换。箱装体四周以及顶部壁面由以下材料组成: 密封隔绝材料、隔声铅板、减振处理的表面钢板、304 打孔钢、氟化橡胶声密封等, 以满足隔热、防火、抗冲击、减振、气密及降噪要求。由上述可知, 在箱装体的设计中没有使用复合材料面板, 这可能是从性能费用比的角度考虑的结果。因为目前虽然复合材料的应用研究是一很热门的领域, 但可使用的复合材料费用昂贵, 而且复合材料对低频噪声的

阻尼较小, 对减轻重量效果也不明显。

在箱装体的设计中重点考虑了可维修性的要求, 除了回热器侧面及其后面的壁板为焊接连接(以提高强度)外, 其它壁面板均为螺栓连接, 可方便地拆换(见图 4 所示)。箱装体前半部分的垂直框架可拆卸, 每一侧的两块面板上均有综合门, 可通过此门或拆下面板的地方进入箱装体内进行维修活动。在进气道中装有水平导轨和转向导轨, 发动机模件可水平移动并通过进气道吊出, 在拆下回热器进气管后, 可从进气道中取出换热模件, 这些设计使机组具有较高的可维修性水平。在现代舰用装备的设计中可维修性已被视为重要的技术指标, 因为它对保证装备的可靠性要求至关重要。

3.3 控制系统

ICR 控制系统为全功能电子数字控制 (FADEC) 系统^[3]。全新设计的发动机电子控制

器 (EEC) 基于一种新的开式结构 Futurebus⁺ 而开发, 对软硬件资

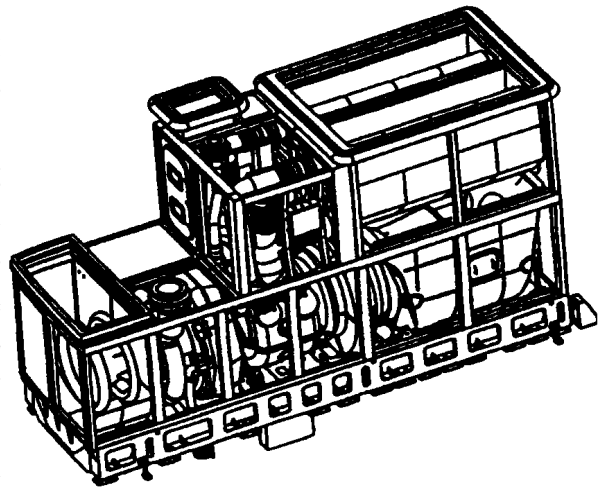


图 4 WR-21 箱装体结构

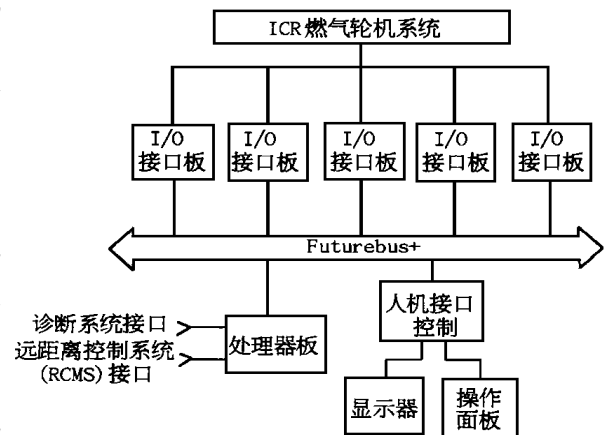


图 5 ICR 控制系统硬件结构

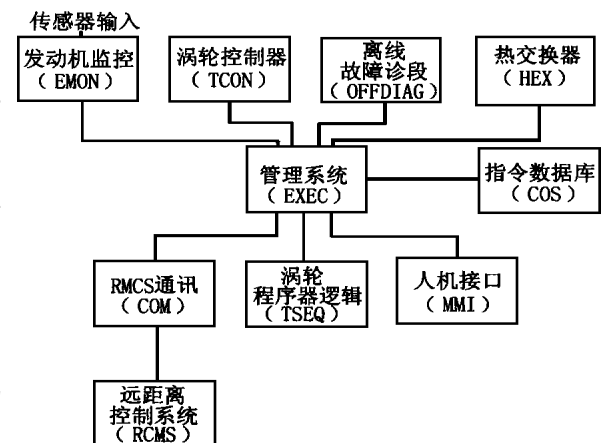


图 6 ICR 控制软件功能

源的计划、分配具有高度的灵活性。EEC 所有的关键性技术均为冗余设计。该控制器具有远距离和机旁两种控制方式。

3.3.1 EEC 硬件结构

EEC 被置于一标准化的防震的箱体。该箱体内装有 Futurebus⁺ 主板、电源调制与分配部件、人机接口设备及报警设备等。EEC 硬件结构原理如图 5 所示。

3.3.2 ICR 控制算法

系统软件按控制功能模块化设计,包括下列功能模块:

(1)管理功能(EXEC)

(2)人机接口功能(MMI)

(3)发动机监控功能(E-MON)

(4)离线故障诊断功能(OFFDIAG)

(5)涡轮控制器功能(TCON)

(6)涡轮程序器功能(TSEQ)

(7)热交换逻辑功能(HEX)

(8)RCMS 通讯功能(COM)

图 6 给出了控制功能结构原理图。在以上功能中, TCON 和 HEX 是 EEC 的核心功能。TCON 控制燃油计量阀、可调导叶以及压气机放气阀协调地工作。HEX 的功能主要是控制中冷器和回热器的换热量、防止中冷水器冷凝、防止回热器污染和腐蚀等。而相对于目前使用的

LM2500 燃气轮机的控制功能来说, WR-21 控制功能中的 MMI 和 OFFDIAG 是两种具有相当先进水平的新功能。

MMI 通过显示器屏幕页以集成动态图形的方式把 ICR 状态信息提供给操作人员。显示图形既可以是动态的也可以是静态的。动态显示可包含所有的数据信息,且一旦选定动态显示后,数据会实时变动。在动态图形显示功能中,可通过带箭头的管线连接相关的机械部件形成动态通路,以表达电力、燃气以及其它流体的传输过程,直观形象。屏幕页可有目的地选择,每页内容包括文本区和图形区,文本区用以显示事件、故障及报警。

OFFDIAG 是一检查并确定整个数字控制系统硬件故障的工具,固化在控制系统内部,当系统开机或复位时自动投入工作。OFFDIAG 能识别出最低可更换的单元部件,以使系统最大限度地处于全运行状态。

MMI 和 OFFDIAG 是提高现代化动力设备监控系统可操作性、可维修性的重要研究方向,已引起人们的高度重视。

4 结束语

ICR 燃气轮机继承了简单循环燃气轮机的一系列优点,而且在宽广的功率范围内具有优良的

变工况性能,非常适于用作舰船全工况推进燃气轮机。WR-21 的设计过程权衡研制费用、战术技术性能、后勤保障、可靠性、维修性、生命力等诸多因素^[2],不仅保障了其优异的性能,而且使全寿命周期费用最优。WR-21 的发动机模件及监控系统的设计为模块化、标准化^[3],充分利用了民用通用部件,并为机组进一步升级改造留有必备扩展空间及接口,这一系列特点说明 WR-21 是一种全新的富有生命力的燃气轮机,其先进的技术和优异的性能已引起世界各发达国家海军的高度重视,对我国 21 世纪初叶大中型水面舰艇的发展应有所启示。

参考文献

- [1] 刘德钟. 中冷回热燃气轮机(ICR)在舰船上的应用. 热能动力工程. 1990, 5(6): 5~9
- [2] Shepard, S B Bowen, T L Chiprich J M. design and Development of the WR-21 intercooled recuperated (ICR) marine gas turbine. *ASME Journal of Engineering for Gas Turbine and Power*, 1995, 117: 557~562
- [3] Carlson R J, Vest P M, Azouz D E. Digital control system development for Intercooled recuperated gas turbine. *ASME Journal of Engineering for Gas Turbine and Power*, 1995, 117: 172~175

(复 编)

ICR 进展及关键技术 = **New Developments in ICR Engines and Related Key Techniques** [刊, 中] / Liu Yongbao, Zhang Renxing (Naval Engineering Academy) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 1999, 14(6). — 415 ~ 418

In addition to a series of advantages specific to a simple cycle gas turbine ICR engines feature an excellent off-design performance with Model WR-21 engine being ranked as the most advanced. This paper gives a brief description of some new developments in WR-21 gas turbines. The key techniques relating to such major components as intercoolers, regenerators, engine enclosures and digital control systems are also analyzed. **Key words:** ICR gas turbine, intercooler, regenerator, enclosure, control system

气体燃料再燃对 NO_x 还原的影响 = **Effects of Gaseous Fuel Reburning on NO_x Reduction** [刊, 中] / Zhong Beijing, Fu Weibiao (Qinghua University) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 1999, 14(6). — 419 ~ 423

Gaseous fuel reburning pertains to one of the most effective methods being extensively studied for the reduction of NO_x content in flue gases. With the gases in a typical primary combustion zone serving as simulation gases the authors have studied the influence of different gaseous fuels (CH₄, C₂H₂ and C₂H₄) and the reburning zone combustion conditions (excess air coefficient and reburning temperature) on NO_x reburning process and its reduction. Through calculations it is found that different compositions of gaseous fuels, the excess air coefficient and firing temperature in the reburning zone exercise a significant influence on the NO_x reburning process and NO_x reduction rate. **Key words:** fuel reburning, gaseous fuel, NO_x reduction

煤粉锅炉炉膛燃烧、传热一维数学模型的研究 = **A Study of the Combustion and Heat Transfer One-dimensional Mathematical Model for a Pulverized Coal-fired Boiler Furnace** [刊, 中] / Dong Peng, Hong Mei, Qin Yukun et al (Harbin Institute of Technology) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 1999, 14(6). — 424 ~ 427

A combustion and heat transfer one-dimensional mathematical model has been set up for the analytical computation of one-dimensional distribution magnitudes of such thermodynamic parameters as furnace gas temperatures, water wall absorption heat flux density, heat release rate, etc. under various operating conditions. The calculation and analysis of three different models of boilers and a comparison of the calculated results with original design data have validated the rationality of the adopted mathematical model. **Key words:** furnace internal process, in-furnace heat transfer, mathematical model, pulverized coal combustion

折焰角结构对上部炉膛流场影响的数值研究 = **Numerical Simulation of the Effect of Arch Nose Structure on Furnace Upper Section Flow Field** [刊, 中] / Li Yanpeng, Xu Jinyuan (Xi'an Jiaotong University) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 1999, 14(6). — 428 ~ 430

Based on a porosity conception conducted is a numerical simulation of the flow field in a boiler furnace under various arch nose structures. The effects of such structures on the residual swirl at the furnace outlet and the velocity distribution at the inlet of horizontal gas-pass were studied. The study results have been verified by way of a cold-state simulation test. They can serve as useful reference data during the design and retrofitting of utility boilers. **Key words:** arch nose, residual swirl, thermal excursion, numerical simulation

椭圆锥急燃器对煤粉火焰的稳燃作用 = **The Combustion Stabilizing Role Played by an Ellipsoidal Cone Combustion Stabilizer** [刊, 中] / Jing Youyin, Wang Baosheng (North China Electrical Power University) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 1999, 14(6). — 431 ~ 433

By introducing the characteristics parameters of a gas-solid two-phase flow and proceeding from the structure of a pulverized-coal flow an analysis is performed of the combustion stabilizing action of an ellipsoidal cone combustion stabilizer on a pulverized-coal flame. **Key words:** ellipsoidal cone combustion stabilizer, characteristics parameter, pulverized-coal flame, ignition and steady combustion

600MW 锅炉机组膜式水冷壁壁温的试验研究及理论分析 = **Experimental Investigation and Theoretical Analysis of Membrane Water Wall Temperature in a 600 MW Boiler Unit** [刊, 中] / Yu Yanzhi, Tang Biguang, Liu Yong, et al (Wuhan University of Water Resources and Electrical Power) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 1999, 14(6). — 434 ~ 436