

WR-21——新一代的船用燃气轮机

(哈尔滨七〇三研究所) 闻雪友
(海军装备部) 李伟

[摘要] WR-21是21世纪初的新一代船用燃气轮机,由于采用了间冷、回热技术,使其具有优良的变工况性能。本文综述了该机的研制历程,发动机的性能,各主要部件的设计和维护特点。

关键词 ICR 燃气轮机 燃气轮机

船用燃气轮机

中图分类号 U664.13

1 前言

近来,船舶及工业燃气轮机领域的人们总是情不自禁地把关注的目光投向WR-21燃气轮机的研制工作。WR-21是一个带有中间冷却器和回热器的燃气轮机,与简单循环相比(如LM2500),不仅输出功率增加,额定功率下的耗油率降低,而且在大部分功率范围内具有一平坦的耗油率曲线,同时又具有低噪声及低的排气红外特征。使采用该动力装置的舰船年燃油消耗量与美国海军现役的燃气轮机推进动力水面舰船相比降低约30%,成为新一代船用燃气轮机的象征。

本文对WR-21的研制历程,发动机的性能、设计和维护特点作一综述。

2 历程

约50年前,船用燃气轮机的

先驱——英国,认识到船用燃气轮机要求在整个功率范围内有低的耗油率(尤其是部分负荷),为实现这一点,尝试选择了包括三个压气机、两个中间冷却器、一个回热器、三个涡轮的复杂循环,即RM60燃气轮机。它于1951年作陆上试验,功率达到3898kW(5300马力)。作为船用燃气轮机,这个装置还是值得注意的,因为尽管装置复杂,仍然达到了3.59kg/kW(2.64公斤/马力)的比重,它在40%~80%功率范围内的耗油率曲线平坦。1954年装于“灰鹅”号炮艇在海上航行,证实了它的可靠性。然而RM60虽然达到了良好的部分负荷性能,却使发动机的购置成本大大提高,体积庞大,控制复杂循环系统的损失也是困难的,再加上不久其性能即被改进的简单循环发动机(海神)所超越,因而未获进一步发展。

几十年过去,由于燃气轮机及热交换器方面的技术进展,使间冷——回热循环在达到最高的循环效率、优良的变工况性能的同时仍能使装置结构紧凑,这使它可能特别适于舰用。

1981年Rolls-Royce公司向美国海军提出发展间冷回热燃气轮机(ICR)的设想。

1985年秋美国海军首次招标

38℃,17897kW ICR高效舰用燃气轮机。Rolls-Royce公司与Allison、Garrett公司合作提出了TF41/Sper改型方案,并与GEM&I提出的LM1600改型和P&W的PW2037改型方案先后于1985年底至1986年得到一年的概念设计合同。1986年续一年预研合同。

1987年底美海军决定将功率提高到19686kW并考虑全电力推进方案,至1989年底美海军也只是维持GE及Rolls-Royce公司的预研工作。

1990年美海军恢复ICR计划,重新招标,确认19686kW并有10%的增长潜力,尺寸适合与LM2500换装。Rolls-Royce公司与Westinghouse公司合作,结合RB211系列航空发动机单元体结构,获得了与航空型零件高度通用的最佳ICR方案。

1991年12月,美国海军将ICR燃气轮机机组的设计和发展合同授与Westinghouse Electric Coporation(WEC)船舶分部,分承包商主要有Rolls-Royce公司工业与船用燃气轮机分部(负责燃气轮机),Allied Signal公司航空系统和设备集团(负责回热器和中间冷却器)和CAE电子公司(负责控制设备)。

1991~1995 年为前期发展阶段(设计、发展、调试和确认主要性能参数)。

1994~1999 年为全尺寸发展阶段(美国海军试验、调试、训练、编写说明等)。

1997 年 5~9 月由 Northrop Grumman 船用系统公司(新的美国总承包商)与 RR 公司共同在英国国防评估和研究机构的 Pyestock 试验场完成了产品型标准系统的最新 500 小时耐久性试验,共试验 503 小时,69 次起动,相当于在海上实际运行 1500~2000 小时。预计 1998 年美国海军在 Philadelphia 的海军水平舰船中心的 Carderock 分部建的第二个试验场上进行第二台机的试验。

原计划在 1999 财政年度分批装备 DDG-51“Arleigh Burke”级导弹驱逐舰。但按美国海军目前计划,第一台间冷回热燃气轮机要到 2004 财政年度才装备于战舰,比预计的晚五年,装备最后 9 艘 DDG-51 级舰。

从 1994 年 7 月首台前期发展型 WR-21 开始试验以来,多台 WR-21 试验型、发展型以及生产型样机已相继完成各项性能试验和耐久性试验。至 1997 年,总试验时数已超过 1200 小时,其中包括 110% 负荷的重要试验。在首台样机试验前完成了各模块和部件试验。预计 3000 小时验收试验将在 1999 年进行。WR-21 表现出的高性能,已引进世界各国海军的极大兴趣,目前考虑采用此新型动力装置的舰船有:美海军 DD-21 级驱逐舰、DDG-51 级驱逐舰,英国新型航母(以替代 2010 年退役的三艘“无敌”级轻型航母),英、法、意“地平线计划”中的新一代“前景”级护卫舰(CNGF)。为此,英国和法国海

军根据 1994 年 6 月和 1995 年 9 月分别签订的协议备忘录,负担该计划项目的部分经费。

3 设计要求

简单循环与 ICR 循环的线图见图 1

WR-21 的纵剖面图见图 2

ICR 循环与简单循环燃气轮机不同的是:

(1) 在两个压气机之间设有一个中间冷却器,使得空气在进入高压压气机前被冷却,从而减少高压压气机所需的耗功,改进高压轴的效率并增加发动机的功率(在 WR-21 上约增加 25% 的功率)。此外,间冷也降低了高压压气机出口的空气温度,提高了空气与燃气排气温度的温差,从而增加了回热器的效率。

(2) 从高压压气机出口的空

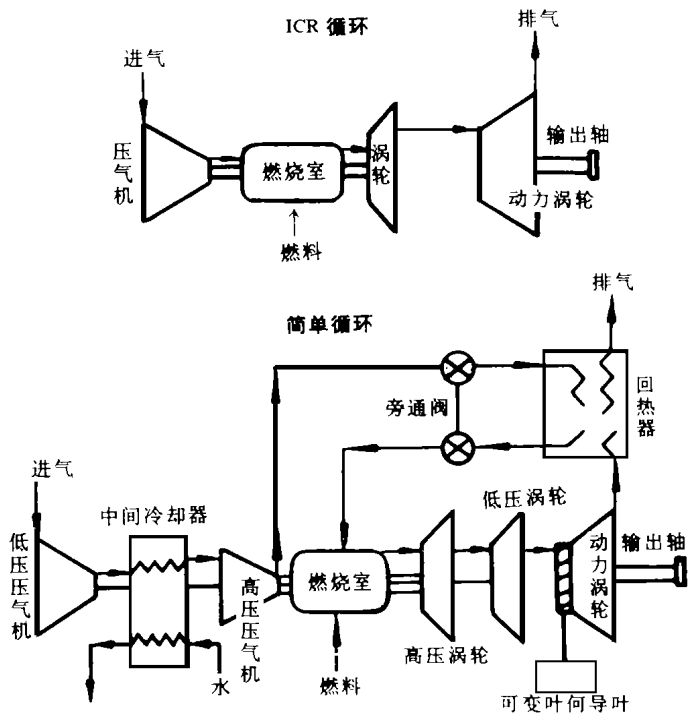


图 1 简单循环与 ICR 循环线图

气先进入回热器,利用燃气排气余热对空气进行预热,然后进入燃烧室,这就降低了为达到预定的燃气初温所需的燃料量,提供了在耗油率方面的重要改进。

(3) 从燃气发生器出来的燃气,通过第一级可变几何导叶(VAN)进入动力涡轮。随着功率减少,动力涡轮质量流量减少,可变几何导叶逐渐关小。因此,对一给定的部分负荷可保持高的燃气初温(在 WR-21 中,全工况和 30% 工况下动力涡轮入口燃气温度均为 852℃,出口温度则从全工况的 355℃ 降为 30% 工况时的 272℃),这使回热器空气/燃气的温差增加,改进了回热器的传热,致使部分负荷下的耗油率获得改善。在 WR-21 上回热加 VAN 约能节省 30%~40% 的燃油。

回热器、中间冷却器和涡轮可变几何导叶是使 WR-21 相对

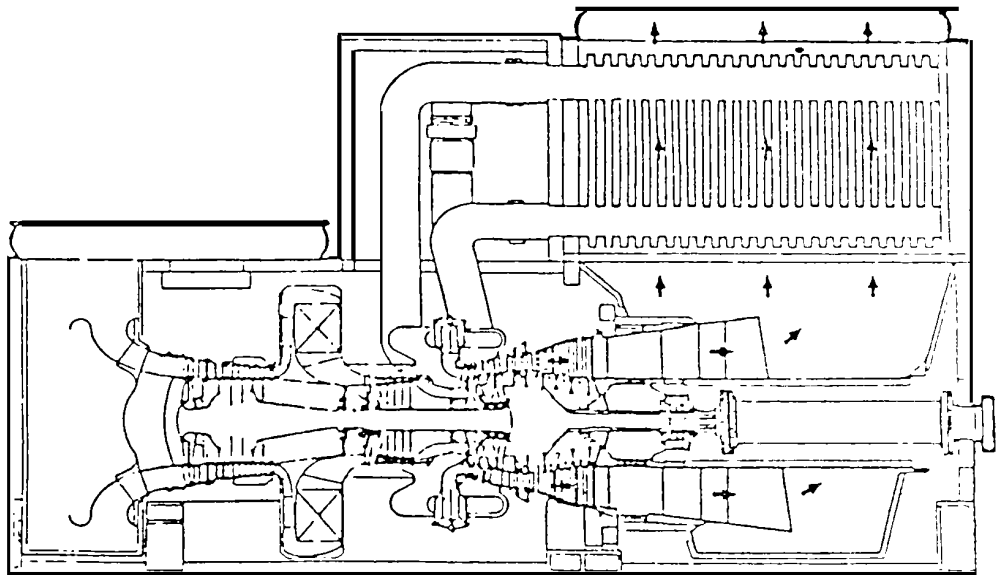


图 2 WR-21

于简单循环获得耗油率减小, 功率增大的三个关键特征。

对 WR-21 的主要技术要求见表 1

表 1 中的功率和耗油率是在美国海军规定的条件下的性能

值: 大气温度 38 °C, 海平面, 湿度 40%, 进气损失 0.98 kPa, 排气损失 1.47 kPa, 海水温度 29 °C。

在 ISO 条件下的全工况性能 (对发展成熟的发动机) 和低工况性能的对比见表 2。

印”要相同, 以便换装。

WR-21 藉增加中间冷却器、回热器和涡轮可变几何导叶, 使与典型的美国海军燃气轮机相比明显改进了性能。按通常的概念。硬件的增加会降低可靠性, 增加维护和支援费用, 使维护更困难。为了解决这一个问题, 从一开始就始终对可维性坚持了高标准要求。

WR-21 采用单元体设计思

此外, 美国海军从便于舰艇现代化改装出发, 一开始就规定 WR-21 的尺寸不能大于 LM2500 箱装体, 两者的“脚

表 1

项 目	技 术 要 求
功率	19.4 MW (26400 马力) + 10%
耗油率	222.4 g/(kW·h) (163.6 克/马力·小时) 100% 功率
尺寸	233.6 g/(kW·h) (171.8 克/马力·小时) 30% 功率
重量	8 m × 2.64 m × 4.83 m
可靠性	54.55 t
寿命	1000 h MTBF
模块化	40 年
主要部件更换	主要组件可单独更换
燃气发生器	通过船舶进气道
动力涡轮	48 h 平均换装时间
中间冷却器	72 h 平均换装时间
回热器	24 h 平均换装时间
船上可修的	120 h 平均换装时间
控制	2 h MTTR
润滑油单元	9.75 h MTTR
可维修	适于船上使用
船上维护 (O 和 I 级水平)	24 小时 MTTR
舰员预防性维护 (计划)	4.5 小时/周
舰员维护 (计划和计划外)	6.75 小时/周

表 2

	100% 工况	30% 工况
功率	24.86 MW	9.19 MW
耗油率	203 g/(kW·h)	208 g/(kW·h)
动力涡轮入口温度	852 °C	852 °C
排气温度	355 °C	272 °C
压比	16.2	8.1
空气流量	73.2	39.1
输出轴转速	3600 r/min	2600 r/min
重量		45975 kg
箱装体长		8080 mm
箱装体高		4830 mm

想,共分 16 个单元体,它们是:低压压气机、中介机匣、高压核心支承、高压涡轮导向器、高压涡轮、低压涡轮导向器、低压涡轮、动力涡轮进口可变几何导叶、动力涡轮、动力涡轮支承结构、管系、附件传动、中间冷却器组件、控制系统和回热器。

4 部件特点

4.1 压气机

高、低压压气机均是由 RR 公司的 PB211-535 航空发动机派生而来的,低压压气机为焊接式钛鼓转子,上有六级钛合金叶片,静叶则装在铝合金的可中分机匣上,机匣上带有放气阀。高压压气机也是六级,压比 4.9。

4.2 中间冷却器

中间冷却器是一个双回路系统。一个是在发动机上的淡水—乙二醇(两者 1:1)闭式中间回路与空气的热交换系统,它是由五个铜—镍鳍片板式逆流热交换器组成,冷却剂流量为 3400 L/min;另一个是在机外的淡水/海水热交换器,海水流量 5300 L/min,由船上的海水循环系统提供。控制装置可根据入口空气的温度和相对湿度及低压压气机出

口空气压力自动控制冷却剂绕过海水热交换器的旁通度,以防止在高压压气机中产生冷凝。

4.3 燃烧室(图 3)

燃烧室由九个径流式火焰筒组成。高压压气机排出的空气经排气总管到回热器进口,从回热器来的空气经总管入燃烧室。该径流式结构与干式低排放燃烧室发展计划相容,将能允许方便地翻新改进。每个火焰筒均可在箱装体内部单独拆换。

4.4 涡轮

高压涡轮由 RB211-524 航空发动机的高压涡轮派生,单级、轴流,导叶、动叶均为气膜冷却叶片。为降低涡轮的通流能力叶片作了修改。

低压涡轮由 RB211-535 的低压涡轮派生,单级轴流涡轮,为增加涡轮的通流能力,叶型作了修改。

动力涡轮入口可变几何导叶在 40% 功率时处于全关(最小流量位置),在 100% 功率时全开,54 片导叶由齿环带动,齿环则是由 WR-21 发动机的控制器控制的两个液压作动器所驱动,每个导叶均可单独更换。

动力涡轮共五级,是基于 Trent700 和 800 发动机设计的一个新设计。动力涡轮在 100% 功率时的转速为 3600 r/min。

4.5 箱装体

WR-21 箱装体为弹性安装。箱装体也提供了与船上各供应系统的接口,诸如电、起动空气等。箱体表面温度的设计值为

不大于 52℃,对海军型,箱体是可防核、生物和化学污染并隔声、隔热。

箱体的侧壁板和垂直构架在维护需要时可拆卸,当大规模维修时,发动机全长上都是可接近的。在箱体侧壁上有标准的海军门,船员可入内作日常和预防性维护。底板上有附加的板,分别供辅助齿轮箱维护和通往发动机后支承及排气室用。

辅助齿轮箱安装在燃气发生器下,上有起动机、燃油泵、滑油泵、通气装置。所有附件可从箱体侧面拆卸。此外,直接在辅助齿轮箱下的底板上增加了一个通道,这样,燃油泵、滤器、起动机(与 RR 公司 Trent 发动机的起动机相同)注油口、磁力捕屑器和盘动高压转子的插口均可从侧面开口或底板开口方便地接近。

主要部件的拆换通过进气道完成。为此,箱体前部的侧板和顶板是可拆的,箱体内也有安装发动机拆卸导轨、回热器拆卸导轨的结构物安装界面。

在进气喇叭口的上方,装有一个外物防护网(图 4),当要拆除发动机时,先将装于箱体顶部的外物防护网从进气道中吊出。因为箱装体是以某一设定的倾角弹性安装在基座上的,因此装有倾角档块,以降低在任何时候可能发生的箱装体“下蹲”而导致的发动机与齿轮箱间的不对中量。倾角档块是两个附加的,各可承受 2270 公斤力的支座,轴向地设置在箱装体的端面,使箱体免于倾角增加。除倾角档块外,在箱装体的角上还装有销、环系统。测量并记录箱装体初始安装时销相对于环的值,以后任何测量数据的差别意味着发动机相对于船体结构已经移动。倾角档块和销、

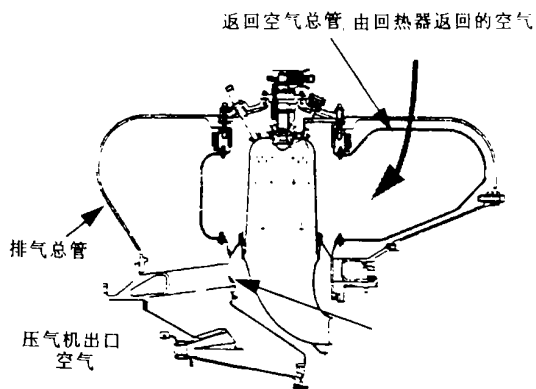


图 3 燃烧室

环系统预期可减轻美国海军在现今发动机上反复进行的计划维护的工作量(现有发动机是在高速联接轴上测量偏斜和平行偏移)。



图 4 外物防护网

4.6 回热器

回热器是板翅式逆流热交换器,采用 14-4 不锈钢。回热器可以正常方式运行,也可旁通运行。旁通时空气从回热器的进气管直接进入出气管返回燃烧室,而不经回热器。发动机可以用旁通方式在全工况运行,但是耗油率高。

当旁通运行时,回热器模块的温度升高,因为空气侧的流量为零。这种较高温度的运行模式用于回热器短期运行后的清洁。除了短期运行后的清洁(在旁通方式是自动完成的),回热器的维护仅限于目视检查。

4.7 控制系统

WR-21 控制系统是基于一个开式结构 Futurebus⁺ 母板的全功能控制器。控制系统对发动机进行控制和监测,并提供机旁操纵台的接口,必要时就地操纵和诊断发动机。该系统在所有关键

的运行控制功能上都有充分的冗余,控制装置位于一个 1520 mm×610 mm×610 mm 的环境密封的柜内。控制器的主要功能是程序起停、稳态和瞬态控制、监视、故障探测和超速、振动超限、滑油压力过低、涡轮进口温度过高等状况下的应急停机保护。控制器也对涡轮可变几何导叶以及中间冷却器和回热器的旁通进行控制。

控制器有自诊断能力。故障诊断降至船上维修级,失效元件可由船员及维修人员更换。控制器也能隔离失效的系统传感器。

正常运行时,控制器监测遍布 WR-21 各系统的数百个温度和压力,确定发动机的状态,作出控制发动机性能的逻辑决定。如有需要,还可向用户提供最新的数字健康诊断系统和低价位的自动记录装置。

表 3

部 件	孔 探 位 置
低压压气机	在每级的左、右弦侧
高压压气机	在每级的左、右弦侧
部件	孔探位置
高压涡轮	在相对于燃烧室火焰筒的九个位置
低压涡轮	在相对于燃烧室火焰筒的九个位置
动力涡轮	在每级的左、右弦侧
涡轮可变几何导叶	在 54 个导叶的每一个
燃烧室	每个火焰筒,燃气收集器
中间冷却器芯	每个芯通过水洗喷嘴孔进行孔探

表 4

项 目	频 度
燃烧室孔探	半年
低压涡轮孔探	半年
高压压气机孔探	半年
高压涡轮孔探	半年
中间冷却器孔探	半年
低压压气机孔探	半年
动力涡轮孔探	半年
涡轮变几何导叶孔探	半年
更换燃油滤	半年+视情
附件传动连接检查	季
喇叭口密封检查	月
通气器检查	年
排气管支承检查	半年
泄放系统检查	年
电缆接头检查	年
发动机与中间冷却器的结合部检查	日
发动机支架检查	年
排气室密封检查	季
火焰探测器	季
异物防护网	半年
燃油管与发动机的连接	日
齿轮箱连接检查	月
热探测	半年
高压压气机放气系统	月
温度传感器	季
点火器导线	周
低压压气机放气系统	月
中间冷却器旁通	月
滑油滤器	月
滑油油位	周
磁力捕屑器	周
回热器管道	半年
检查轴的对中	半年
起动机油	月
通气档板	半年
清洗雾化状况	季
系统漏泄检查	周
进行发动机清洗	24-48 运行小时
中间冷却器乙二醇取样	周

5 其它维护

5.1 孔探能力

WR-21 孔探能力综合于表

3

5.2 流道清洗

通流部分流道用水洗喷嘴清洗。因为 WR-21 装有中间冷却器, 因而水洗喷嘴装在两处, 装在喇叭口处的前 20 个喷嘴向低压气机的内下方喷射, 清洗低压气机。另一组喷嘴装在中间冷却器的外壳上, 雾化颗粒很小, 覆盖整个热交换器的外表面, 在液体流过热交换器后继续去清洗高压气机。第二级喷嘴由 40 根小而均布的水洗总管组成, 每根上装有 3 个细雾化喷嘴。

WR-21 水洗系统可以离线清洗也可在线清洗, 用美国海军批准的清洗剂来帮助清洗发动

机, 也指定使用与 DDG-51 上其它燃气轮机曾用的同等质量的漂洗水。

5.3 计划维护

在美国海军内部, 计划维护是指预防性维护系统。已要求 WR-21 将计划维护量降至最低, 以减少船员维护成本。美国海军 DDG-51 驱逐舰目前估计是 4.4 时/周。WR-21 的计划维护综合如表 4。

6 结束语

21 世纪高性能水面战舰将采用综合全电力推进 (IFEP) 系统, 美、英、法等国海军都制定了他们的 IFEP 系统发展计划。美国海军海上系统指挥部预计, 如果采用 ICR 燃气轮机可使总运行油耗下降 23% ~ 25%, 如果采用综合电力系统可使总运行油耗降低

15% ~ 19%, 这两种技术的结合可使油耗降低 36% ~ 38%。WR-21 燃气轮机正被考虑作为综合全电力推进系统的主要设备。

参考文献

- 1 闻雪友. 舰船燃气轮机的历史与展望. 航空燃气轮机船用化改装文集 (第一集), 703 研究所情报室, 1982. 9.
- 2 闻雪友. 船舶与工业燃气轮机的发展. 703 研究所, 1996. 10.
- 3 Ken Fulton Marine WR-21 succeeds in 500-hour ICR production engine test program Gas Turbine World, Dec, 1997.
- 4 Carl L. Weiler, Alastair Broadbelt, Bernard Law WR-21 design and maintenance. 96-GT-328.
- 5 Electric Propulsion: Wave of the future Gas Turbine World, Dec 1997.
- 6 舰船技术经济简报第 12 期. 714 所, 1997. 6.
- 7 舰船技术经济简报第 10 期. 714 所, 1998. 5.

新技术

ATS 计划正顺利推进

据“Gas Turbine World”1998 年 1—2 月号报道, 美国能源部 (DOE) 规划的先进燃气轮机系统 (ATS) 的性能目标是大型燃蒸联合循环发电装置热效率超过 60%, 较小工业燃机的效率改善 15%, 同时具有极低的排放并使电力成本比常规设计减少 10%。

GE 公司和西屋公司正致力于高达 420 MW 功率的机组设计并使用蒸汽冷却技术。Solar 透平公司和 Allison 发动机公司正致力于 20 MW 以下工业燃机的设计, 一种是回热循环 (Mercury 50), 另一种是简单循环, 均要使热效率超过 40%。

西屋公司在 501 系列最新型号 501G (简单循环输出功率 230 MW, 压比 19, 涡轮进口温度 1417 °C, 联合循环效率 58%), 基础上重新设计的 501ATS300 燃机简单循环输出功率将增加到 420 MW, 压比 29, 涡轮进口温度 1510 °C 并采用闭合回路冷却。

GE 公司 ATS“H”型设计从一开始就指望涡轮动叶和静叶广泛采用蒸汽冷却。研究的问题包括材料与蒸汽的相容性, 蒸汽的品质, 蒸汽冷却旋转部件中的传热, 联合循环的性能及系统起动的要求。作为第三阶段工作的一部分, 全尺寸的单晶涡轮动叶和静叶已经铸造, 第一级静叶试验已经完成。7001 H 和 9001 H 两型燃机均使用由 CF6-80C2 航空发动机和工业用 LM6000 中使用的高压气机改型得到的气压机。两型发动机的燃烧温度均超过 1427 °C, 压比为 23。

Allison 公司总的设计目标是拥有一型较小功率的发动机 (701-K), 在 13.5 MW 输出功率时达到 40% 的热效率, NO_x 排放达到 1 位数。

(思 娟 供稿)

WR-21——新一代的船用燃气轮机=WR-21——A New Generation of Marine Gas Turbines[刊,中]/Wen Xueyou, et al(Harbin No. 703 Research Institute)//Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. —1999, 14(1). —1~6

WR-21 pertains to a new generation of marine gas turbines of the twenty first century. The adoption of inter-cooling and regeneration technology enables WR-1 to have an outstanding off-design performance. This paper gives a comprehensive description of the WR-21 research and development history, engine performance as well as the design and maintenance features of its main components. **Key words:** IC R gas turbine, marine gas turbine, gas turbine

具有热阻、热漏和内不可逆性的联合热机性能=The Performance of a Combined Heat Engine Featuring Heat Resistance, Heat Leak and Internal Irreversibility[刊,中]/Chen Lingen, Sun Fengrui, Ni Ning(Naval Engineering Institute)//Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. —1999, 14(1). —7~9

A steady flow combined heat engine cycle model involving heat resistance, heat leakage and internal irreversibility was set up and the performance optimization of the model studied. Derived are the optimization relation between power output and efficiency, the variation of maximum power output with its corresponding efficiency, as well as the variation of maximum efficiency with its corresponding power output. **Key words:** combined cycle, heat engine, optimization

从发电煤耗看热电冷联供系统的热经济性=Thermodynamic Economic Analysis of Heating, Electricity and Refrigeration Triple-generation System from the Viewpoint of a Gross Coal Consumption Rate[刊,中]/Fu Lin, Jiang Yi(Qinghua University)//Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. —1999, 14(1). —10~13

The conception of gross coal consumption rate(GCCR)of heating, electricity and refrigeration triple-generation(HERT)system is first introduced. Then, from the viewpoint of the system as a whole, a thermodynamic economic analysis is given of the HECT system. **Key words:** gross coal consumption rate, heating/electricity/refrigeration triple-generation system, thermodynamic economy

进口轴向叶片旋流器管内阻力和换热的研究=A Study of the In-tube Resistance and Heat Exchange of an Inlet Axial Vane Swirler[刊,中]/Wu Huiying, Cheng Hui, et al(Shanghai Jiaotong University)//Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. —1999, 14(1). —14~16

An experimental study is conducted of the in-tube friction and heat exchange characteristics of an inlet axial vane swirler. By analyzing the influence of in-tube Re number, test-section length-to-diameter ratio and swirler construction parameter on the in-tube resistance and heat exchange obtained is the in-tube resistance and heat exchange criterion correlation. In addition, a quantitative analysis is performed of the thermodynamic performance of the swirler intensified in-tube heat exchange. **Key words:** inlet axial vane swirler, in-tube intensified heat transfer, thermodynamic performance

等截面钉肋的熵产优化研究=The Entropy Generation Optimization Study of Cylindrical Fins[刊,中]/Su Ya-

xin, Luo Zhongyang, Cen Kefa(Zhejiang University)//Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. —1999, 14(1). —17~19

Based on the entropy generation concept of thermodynamics, the authors has with a minimum entropy generation serving as an end objective set up a theoretical model for the analysis of entropy generation of fins. Moreover, a