

中冷回热循环(ICR)燃气轮机 在舰船的应用

刘德钟(海军工程学院)

〔摘要〕 本文回顾了舰用中冷回热循环(ICR)燃气轮机的发展历史及所取得的主要经验。叙述了采用中冷回热燃气轮机的历史必然性、发展现状与主要性能指标。分析了中冷器和回热器的结构型式、重量、体积和应进一步研究的问题。最后以实例说明中冷回热燃气轮机对舰船战技性能产生的影响。

关键词 中冷回热循环(ICR) 燃气轮机 舰船

前 言

中冷回热燃气轮机循环(ICR)在热力学上的优点是人们早已知道的。因此,早在舰用燃气轮机的发展初期,英国海军就与罗一罗公司签订了生产中冷回热燃气轮机(RM60)的合同,并将两台这样的装置装于艇上进行实船试验^[4-5]。然而,这类装置未被广泛采用。自那时迄今,三十多年来,舰用燃气轮机的阵地一直被简单循环燃气轮机所独占。

但是,自1980年以来,美国海军开始支持戴维——泰勒海军舰船研究与发展中心(DTNSRDC)对舰船采用中冷回热燃气轮机的技术可行性与成本效益的研究。1985年10月美国海军同时与美国通用电气公司和英国罗-罗公司(包括美国埃利森公司和加勒特公司)签订了两个研制中冷回热燃气轮机的合同,计划在1988年进行工程预研招标,中标方案将在1991年投产。此外,联邦德国

的MTU公司慕尼黑分部也在论证研制中冷回热舰用燃气轮机^[1]。因此,人们不仅要问,早在三十多年前未得到进一步应用的中冷回热燃气轮机,自八十年代以来为什么又引起人们这样大的兴趣?那时建成的RM60中冷回热循环燃气轮机为什么没有被广泛采用?中冷回热燃气轮机在舰船上有无发展前途?现在是否具备了发展这种燃气轮机的条件?采用这种燃气轮机对舰船的战术技术性能有何影响?这些就是本文所要讨论的问题。

历史的回顾

1946年罗-罗公司根据英国海军的订货并于次年开始了舰用燃气轮机的研制。该装置的设计功率为4400kW,寿命1000h,采用了两级中间冷却和回热的三轴线图(图1)。燃气初温为827℃,增压比16(这两个参数在当时来说均是较高的)。1954年两台这样的装置装于Grey Goose号炮艇开始

航行试验, 1955年6月该艇列入燃气轮机试验舰序列, 试验获得的主要结果有:

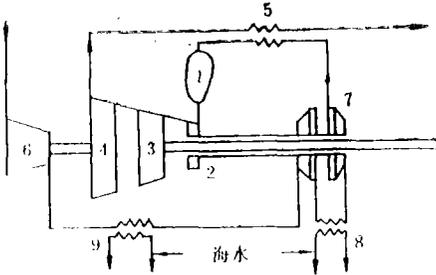


图1 RM60舰用燃气轮机原理图

1—燃烧室, 2—高压涡轮, 3—中压涡轮, 4—低压涡轮, 5—回热器, 6—低压压气机, 7—高压压气机, 8—高压中冷器, 9—低压中冷器

1. 装置未达到4 400 kW的设计功率, 试验所获得的最大功率为3 970 kW。

2. 获得了非常满意的燃耗率变化曲线(图2), 这是该装置与简单循环装置的显著区别。

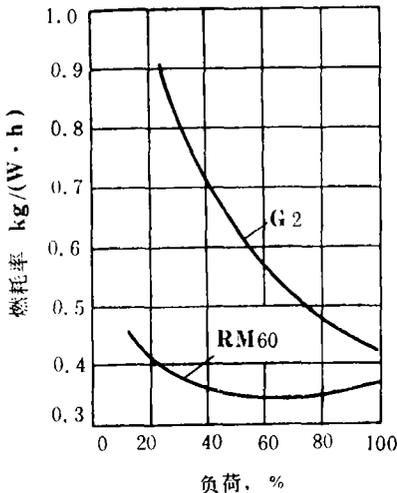


图2 RM60燃耗率随负荷的变化

3. 装置有良好的机动性。从冷状态到全功率只需要2—3分钟。

4. 影响装置可靠性的主要部件是滚珠和滚柱轴承。试验中曾出现轴承卡住的故障。

5. 换热器方面的问题主要是由于回热器燃气侧烟灰沉积使回热器效率下降(工作320小时后下降10%)。另一个与空气冷却器有关的故障是空气经中冷器凝出的水滴对高压压气机的铝制工作叶片有侵蚀作用。

6. 装置工作的噪声指标较高, 最大120分贝。主要是高压空气管道采用了薄壁结构, 以及未采取有效的隔音措施。

从该装置的试验结果看出, 中冷回热燃气轮机有优良的油耗特性, 装置的机动性和比重(1.76kg/kW)也令人满意。但装置的寿命仅1 000小时, 这显然不能满足对舰用全工况主动力装置的要求。某些部件, 特别是滚动轴承的工作可靠性尚不能使英国海军放心。另一方面, 由航空改型的简单循环燃气轮机在结构和布置的紧凑性方面有明显的优点, 当时燃气的初参数不高, 提高燃气的初参数可显著改善装置的效率和比功, 加之巡航——加速相结合的方案那时强烈地吸引着人们的兴趣, 由于这些原因, 使得那时建造中冷回热舰用燃气轮机的尝试未能成功。

发展现状与主要性能

从那时到现在的三十多年来, 舰用燃气轮机均采用简单循环, 英国、苏联, 西欧各国最初在其中、小型舰艇上多采用燃—燃(COGOG)柴—燃(CODOG)乃至蒸—燃(GOSOG)等各种型式的联合方案, 联合动力装置有其独特的优点, 但当舰艇在巡航——全速之间航行时, 加速装置仍要在部分负荷下工作, 而两种不同类型的装置必竟会给操纵管理和后勤供应带来不便。因此, 自第二代高性能的舰用燃气轮机装置建成后, 美、英、苏各国均先后在其大、中型水面舰艇上采用单一机型的全燃或其联合(COGAG)方案, 如美国的“斯普鲁恩斯”级驱逐舰、“佩里”级护卫舰; 苏联的“卡拉”级巡洋舰, “卡辛”级驱逐舰; 英国的“无畏”号

航母等均是。第二代舰用燃气轮机的工作参数(燃气初温,增压比)及各项性能指标比第一代均有很大提高,一方面继续提高工作参数会遇到更大的困难;另一个方面,即使工作参数再为升高,其低负荷时燃耗率的恶化趋势也不会发生本质的变化(图4)。这是简单循环燃气轮机难以克服的缺点,因此,自八十年代以来,美国转向了对中冷回热循环的研究。因为这种线图的燃耗率变化曲线对舰用动力装置有极大的吸引力。美国通用电气公司研制的中冷回热舰用燃气轮机LM1600-ICR是将该公司七十年代后期研制的F404航空涡扇发动机改型为LM1600再加中冷回热。英国罗一罗公司是以简单循环舰用斯贝SMIC机加中冷回热为斯贝SMA-ICR舰用燃气轮机。两方案的原理图相同(图3)。图4示出了LM1600-ICR机组在部分负荷时燃耗率的变化。从图中看出,LM1600-ICR机组在部分负荷下的燃耗率约

比LM2500减小30%,完全可以与优良的柴油机相比美,如以FT-8简单循环燃气机的参数为基础加中冷回热,根据初步计算^[8],在中冷变为0.9和回热温度为0.5的条件下额定工况下的燃耗率将由0.118 kg/(kW·h)下降到0.1036 kg/(kW·h),即降低12%。部分负荷的燃耗率曲线也非常平坦。

中冷回热循环燃气轮机的比功也大于简单循环,在同样参数下,可比简单循环高25~35%。比如:我们以FT-8的参数为基础的计算表明,功率由原来的24265 kW增加到30500 kW,即增加约25%。比功由323.5 kW/kg增加到406.6 kW/kg。也就是说,当两者功率相同时,中冷回热循环的空气流量比简单循环约减小1/4。

现在,舰用燃气轮机的寿命已超过1万小时,LM2500燃气轮机两次修理的平均间隔时间为13000小时;滚动轴承的工作可靠性已为长期的运行实践所证明。舰用燃气轮机发展初期的这些重要障碍已不复存在。

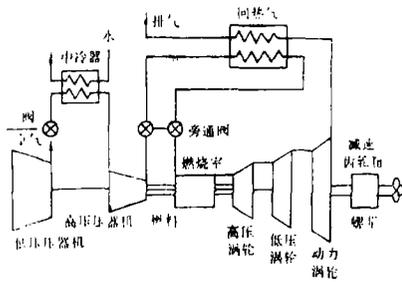


图3 中冷回热循环燃气轮机原理图

中冷器和回热器

中冷回热循环燃气轮机的中冷器和回热器自然要占有一定的重量和体积并增加了流道的流动阻力,由此而带来的这些新的问题可采用紧凑轻型的换热器和限制换热量等方法加以解决。

对中冷器可采用翅片管式,它对于两侧换热能力差别较大的液-气换热较为适宜(管外选用多回路空气通道,管内选用单水通道)。与光管相比,其传热面积可增大2~10倍,传热系数可提高1~2倍,根据国外的研究^[2],13970 kW燃气轮机中冷器的重量(包括海水)为3650 kg,体积为4.76 m³;以FT-8的参数计算所得中冷器的体积为6.7 m³,由此可知,中冷器的比重(包括海水)约为0.26 kg/kW,单位体积约为2.2~3.4 × 10⁻⁴ m³/kW。当中冷度为0.9时,空气

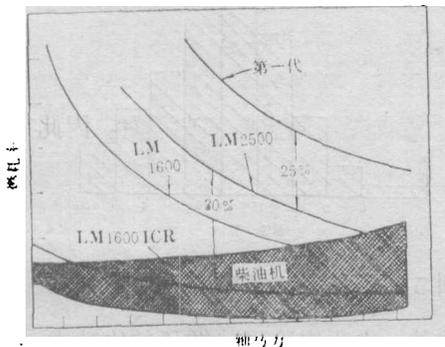


图4 燃耗率随负荷的变化

侧的压降为2.5%。

根据罗-罗公司研制 RM60 的经验，空气经中冷器凝出的水滴曾对压气机的铝制叶片发生严重侵蚀，改换成不锈钢材料后虽未再发生更大的侵蚀，但仍然要避免水微粒对叶片的长期冲击，这可以用适当限制中冷度的方法加以解决，国外的研究表明，当中冷度下降到70%时，甚至在最坏的运行条件下也不会出现冷凝。

对两侧换热系数都低的气-气换热的回热器采用板翅式较为适宜。板翅式结构更为紧凑，其单位体积的换热面积一般达1500~2500m²/m³。相当管壳式换热器的十几倍。初步的研究表明〔2〕当燃耗率改善25%时，回热器核心部分的重量：10 660 kW 的机组为8 000 kg，13 970 kW 的机组为10 000 kg，即核心部分的比重约为 0.4kg/kW。计及附加的重量约为 0.66 kg/kW。回热器的体积10 660 kW的机组为11 m³，13 970 kW 的机组为14m³，即单位体积约为6 × 10⁻⁴m³/kW。

为了减小回热器的尺寸和重量又保证低负荷时必需的回热度，可象 RM60 机组那样装设燃气旁通阀，高负荷时将部分燃气旁通。根据RM60燃气轮机的经验，回热器燃气侧烟灰的沉积会使回热器的效率下降。因此，燃气侧的清洁问题仍是需要进一步研究的问题。

对舰船的影响

中冷回热燃气轮机用于舰船后，将对舰船的战术性能产生重大影响。现以美国“斯普鲁恩斯”级驱逐舰为例，该舰的推进装置为四台 LM2500 燃气轮机，全速30节时推进装置的总功率为58 800 kW，续航力6 000 海里（20 节时），用两台 LM2500 燃气机在40%的负荷下工作，为保证上述续航力的燃油量约为1 200 t。如采用 LM1600-ICR 中冷回热燃气轮机在同样条件下所需的燃油量为

720 t。中冷回热燃气轮机的比重不大于 1.84kg/kW。LM2500 燃气轮机模件的重量为22 t。中冷回热燃气轮机设备的重量比 LM2 500增加约100 t。机械加燃料的总重量则比LM2500推进装置减少 380 t，即油仓重量可减轻近1/3。

以上未考虑中冷回热燃气轮机进排气道重量的变化，实际上，由于中冷回热燃气轮机的比功比简单循环约大30%。因此，同样功率的中冷回热燃气轮机的空气流量比简单循环约减少 1/3。此外，回热循环燃气轮机的排气温度比简单循环约低150—240℃，从而降低了排气的容积流量。以上这些因素将使进气道，特别是排气道的尺寸和重量大为减少。结果大大抵消了由于换热器所增加的重量。

低的排气温度还降低了由于排气所产生的红外辐射，这一点对舰艇有重要意义。回热器还可大大降低排气的噪声，甚至可取消排气消音器。

采用中冷回热燃气轮机不仅可改善舰船的上述战技性能，而且可降低舰船的年燃油耗量，仍以该级舰为例，假定其年航行总时数 3000h，航速的航行时间分配如图 5，其主推进装置的年燃油耗量约为 12000t，如采用 LM1600-ICR，其年燃油耗量为7300t，即每年可节约燃油4700t。

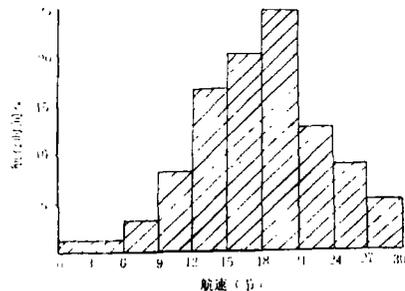


图 5 不同航速下航行时间的分配

此外，由于中冷回热循环的比功大，其机组的单机功率增大，例如 FT-8 中冷回热

后功率由24 235 kW增加到39 500 kW,通用电气公司已将58 839 kW(80 000马力)的中冷回热燃气轮机列入发展规划。这就扩大了燃气轮机在舰船的应用范围,即不仅在中、小型舰船上,而且在未来的大型水面舰船上也将广泛采用。

结 束 语

中冷回热循环燃气轮机是在简单循环燃气轮机的基础上发展起来的一种性能更为优良的发动机。它的一些重要性能指标优于简单循环发动机,特别是在很大的功率变化范围内具有良好的油耗特性,最适合用于舰船推进装置。简单循环燃气轮机的高度发展,在部件的气动性能、寿命和可靠性等方面的成就为发展中冷回热燃气轮机奠定了可靠的基础。中冷回热循环燃气轮机用于舰船的现实性已经来临。它的采用将会大大改善舰船的战技性能,同时会节约舰船的燃料耗量。由于单机功率的增大,将会扩大其在大型水面舰只的应用。因换热器而带来的某些

问题,需要并正在进行深入地研究。

参 考 文 献

- [1] 骆凤标. 舰用燃气轮机研制新动向, 热能动力工程, 1989, 4(1):7-13
- [2] Bowen T L, Grogan D A. 刘德钟译. 用于海军舰船推进装置的先进循环燃气轮机. 海工译文, 1988, (1):78-90
- [3] 徐建勇. 舰用中冷回热燃气轮机的决策优化及计算分析. 海军工程学院研究生学位论文, 1989, 2
- [4] Trewby G F A. British Naval Gas Turbine. ASME, 1955, 5:561-590
- [5] Стечкин Б С. Газовые Турбины. ЦЗДА-ТЕЛСТВО ЦНОСТАННОЙ ЛЦТЕР-АТУРЫ 1958, 66-71
- [6] Курзон А Г. СУДОВЫЕ ПАРОВЫЕ Ч ГАЗОВЫЕ ТУРБИНЫ. СУДПРО-МГИЗ 1958, 108-112
- [7] THOMAS W J R, HIGSON A J. An Intercooled Regenerative Rolls-Royce Spey Gas Turbine. TECHNICAL PAPERS PRESENTED AT 1985 BIGTSAE, 1985, 85-IGT-59

(渠源沥 编辑)

The Use of Intercooled and Regenerative gas turbines in Naval Vessels

Liu Dezhong

(Naval Academy of Engineering)

Abstract

This paper reviews the development history and main experience of using intercooled and regenerative gas turbine cycle for naval vessels. A description is given of the historical necessity of the application of the said gas turbines, their present status of development and main performance data with the configuration, weight and space requirements of intercoolers and regenerators being analysed and some problems for further study proposed. In conclusion, the effect of intercooled regenerative gas turbines on naval vessel combat performance and effectiveness has been illustrated by specific examples.

Key words: *intercooled regenerative cycle, gas turbines, naval vessels*