

# 中间冷却回热式斯贝燃气轮机

(英) W. J. R 托马斯

A. J. 希格森

---

**摘要** 本文首先对罗尔斯——罗伊斯18兆瓦的SMIC船用斯贝燃气轮机作了简明扼要的叙述,然后,示出如何通过增设冷却与回热使燃气轮机的功率增加到约22兆瓦,同时热效率增加到约43%。文章叙述了这种改进了的循环的主要原理,然后讨论了应用这种装置对军舰运行特性的影响,并与以不同安装布置方式采用简单循环的斯贝SMIC装置的军舰性能进行了比较。

---

## 前 言

今天的简单循环燃气轮机是长期发展的结果,要再进一步显著提高热效率,只能通过长时间并且耗费大量资金的设计和研制计划才能实现,其结果导致初始成本提高,而且,往往比较复杂。对于航空燃气轮机来说尤其如此,因为航空燃气轮机要求避免增加重量,或者最好是减轻重量,而这样的结果使本来就难以解决的问题变得更加严重了。船用斯贝SMIC利用航空燃气轮机的最新技术来获得预计约为37%的全功率效率。然而,在船用装置上,如果提高了的效率是以使总机械重量加上燃料重量得以减轻,则合理的额外重量是可接受的。正是这一设想促使美国海军开始了文献[2]中所述的研究,也正是这一设想使罗尔斯——罗伊斯参与了这种研究,其途径是打算对简单循环斯贝增设中间冷却及回热。最初为美国海军所作的这项工作是以14兆瓦的SMIA装置为基础的。这项工作由罗尔斯——罗伊斯公司、艾里森以及加勒特公司共同进行的。

在完成了该项最初的合同后,这几家公司又作了更多的工作,这次是用18兆瓦SMIC作为基础。本文简要叙述的即是这项工作,同时叙述了对船的一些研究来看看军舰的战斗力会有多大改善。

### 18兆瓦的斯贝SMIC

该装置在设计上是相当先进的,研制工作是英国国防部和罗尔斯——罗伊斯公司发起的。它基于已为人们熟悉的SMIA14兆瓦装置,但作了下列主要改动:

- 1) 采用了新型的低压压气机,其质量流量比SMIA装置约大13%。
- 2) 修改了燃烧设备,以使额外增加的燃料可以令人满意地燃烧。
- 3) 改善了高压涡轮中的冷却。
- 4) 更改了动力涡轮的设计并更换了材料。

借此机会也设计了一些与罗尔斯——罗伊斯航空发动机通用的新部件,这样,船用装置也可分享航机大量生产的经济性。SMIC的研制在文献[1]中有较详细的叙述。

## 中间冷却回热式斯贝——总体设计

文献[2]中详细叙述了简单循环燃气轮机带中间冷却与回热设计的各种影响因素。对于18兆瓦斯贝发动机，首先一个有利条件是，它是双转子发动机。压气机的两个部分可以很容易被分开，以允许在它们之间引入中间冷却器。图1示出了中间冷却回热式装置的布置原理图。

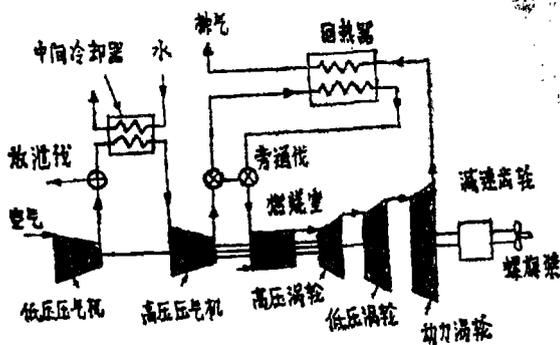


图1 中间冷却回热式船用斯贝的布置原理图

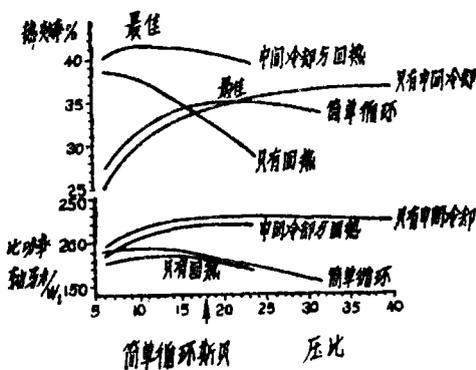


图2 在国际标准条件下燃烧室出口温度为1300°K时，基本循环特性

另一个有利条件是，简单循环斯贝的燃烧系统为环管型的，有10个燃烧室绕燃气发生器的机匣布置。它们在循环改进时将很容易重新布置，以使高压压气机排气转到回热器，然后，加热后的空气再返回到燃烧室。也还可以乘重新布置的机会为燃烧室及燃料喷嘴提供更多的接近通路以便进行检查和保养，因为对于纯船用的发动机来说，空间还不是太宝贵的。

### 1300°K下基本循环特性

图2示出燃烧室出口温度为1300°K时，简单循环，只有中间冷却，只有回热以及中间冷却回热式的斯贝的热效率与比功率（单位空气质量流量的功率）相对于压比的曲线。可以看出，简单循环热效率最高的压比比中间冷却回热式的要高，同时，中间冷却回热式的热效率特性比只采用回热的平坦得多。因此，压比变化对中间冷却回热式的影响就不那么大。

比功率的曲线图示出，加设中间冷却器的结果是在给定的空气流量下，使功率大大增加。

### 在1500°K下基本循环特性

其次必须研究的是改变燃烧室出口温度的影响。图3示出了燃烧室出口温度为1500°K时，与图2同样的参数。图3与图2比较表明，燃烧温度的这一升高有如下效果：

- 1) 比功率提高30%
- 2) 使最大热效率提高，在这种情况下从41%提高到43%。
- 3) 使最佳压比升高到16:1

这些结论非常重要，对燃气轮机的设计人员以及对船舶设计人员都有很大的意义。

比功率的改进意味着在给定功率下，进气道和排气道的面积可以缩小30%。这在很大程度上弥补了在排气道中设置回热器的缺陷，同时，在舰上最宝贵的上层甲板面积中，管道所占面积可以比同一功率的简单循环燃气轮机所要求的减少30%。

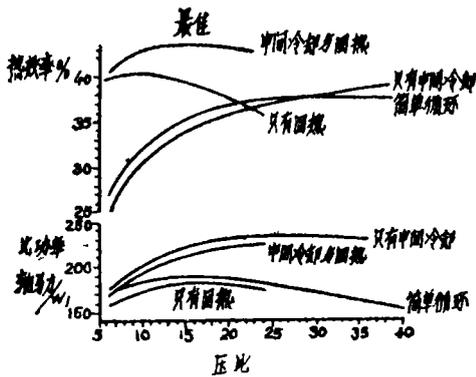


图3 在国际标准条件下, 燃烧室出口温度为1500°K时, 基本循环特性

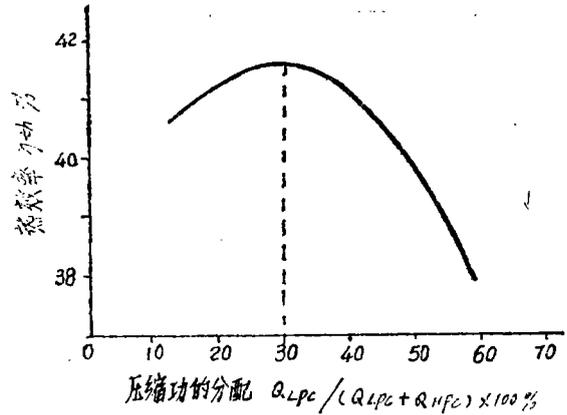


图4 在不变的低压涡轮进口温度下, 压缩功的分配对总性能的影响

较高燃烧温度下的最佳压比意味着现有的压比18:1的斯贝SMIC作为中间冷却回热循环的基础是足够完善的。

### 压缩功的分配

如果要采用单级中间冷却, 则压气机低压和高压部分所作的功之比是重要的。图4示出在不变的低压涡轮进气温度下, 改变这一比值对热效率和高压涡轮进口温度的影响。由图中可看出, 在低压压气机作功30%, 高压压气机作功70%时达到最佳。而斯贝SMIC采用了中间冷却后, 其燃气发生器中功的分配正是如此。因此, SMIC是一个理想的作为中间冷却回热装置基础的简单循环燃气发生器。

### 有效功率

图5示出在不同的环境温度下, 对于3种斯贝方案在动力涡轮输出法兰上的功率。

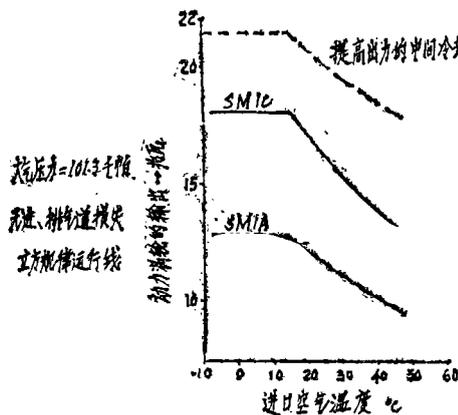


图5 动力涡轮输出功率随进口空气温度的变化

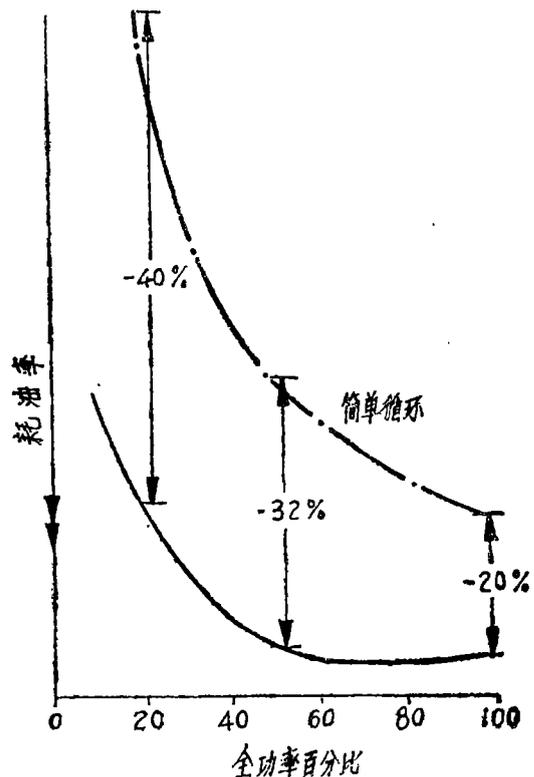


图6 中间冷却回热式与简单循环燃气轮机的部分负荷耗油率的比较(白天, 27°C)

这三种方案是：

- 1) 14兆瓦SMIA
- 2) 18兆瓦SMIC
- 3) 中间冷却回热式SMIC

### 效率

图6将简单循环斯贝SMIC在其功率范围内的效率与中间冷却回热式的效率进行了比较。

热效率在全功率下增长20%，这本身对舰船设计者有着直接的吸引力，而部分负荷的改善可能更为引人注目，它提供了取消巡航发动机的可能性，而在过去，巡航发动机是获得低速下可接受的舰船续航力的唯一途径。

图7比较了下述四种方案在不同功率下总的制动热效率。这四种方案是：

- 1) 简单循环斯贝
- 2) 中间冷却回热式斯贝
- 3) 典型的燃蒸复合系统(COGAS)
- 4) 典型的高速柴油机

中间冷却回热式斯贝的总性能完全可与典型的高速柴油机相比，并且，在低功率下，明显地优于以斯贝为基础的相当的燃蒸复合系统。

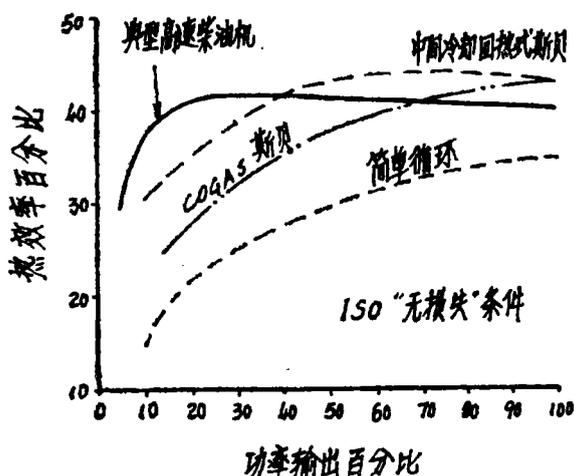


图7 热效率比较

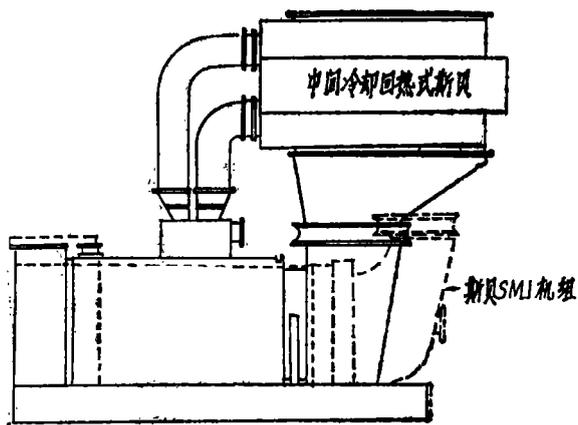


图8 中间冷却回热式船用斯贝推进装置

### 中间冷却回热式斯贝总布置

图8示出当今现有设计的中间冷却回热式斯贝装置的部分剖面图，虚线所示为用于比较的18兆瓦斯贝SMIC机组。装置的质量(包括中间冷却器和热交换器)可能约为36吨。

### 舰船设计的几个方面

中间冷却回热式的斯贝对舰船的设计人员来说具有一些非常明显的优点。下面讨论这些优点。

- 1) 发动机重量与空间

采用两台中间冷却回热式的斯贝，将有可能设计出轴功率约为41兆瓦，不需巡航燃气轮机或柴油机的双轴护卫舰。在不考虑减轻舰船结构和减少燃料储存的情况下，其重量减轻分

别约为50和30吨。空间的节省也是显著的，其中有机舱上方尤其宝贵的面积。对于机舱空间本身，其长度可以缩短，从而使装设武备的工程师在设计时有大得多的自由度，这是由于取消了巡航发动机的进、排气口使露天甲板上的可用空间增大。

这样，便真正有可能对于同样的使命设计出体积较小、价格较便宜的舰船。

#### 2) 噪音

取消船上的巡航柴油机将能够比较容易地达到水下噪音特性指标。

#### 3) 远红外特性

因为动力涡轮排气中的热量释放到回热器内了，所以，烟气温度将比22兆瓦左右的任何有竞争力的简单循环发动机的烟气温度的约低 150℃。这一点对舰船设计者来说是一个明显的

表 1 2500吨标准排水量的舰船油耗

机械布置	发动机型式	最大速度	燃料吨/1000小时
CODOG	2台SMIC 2台柴油机	30.8	1425
COGAG	2台中间冷却 回热式	32	1160

优点，因为这将减少任何烟气冷却装置或烟囱结构冷却装置所需的重量和空间，而上述冷却装置又可能是运行要求所需的。所以，中间冷却回热式斯贝会有助于改善船舶的稳定性。

#### 4) 可靠性

如果中间冷却器或者回热器发生故障，舰船可能降低功率和/(或)效率，但不会失去全部功率。回热器可以被旁通，这时功率损失不大，当然，热效率要下降。如果中间冷却器出故障，则功率和效率都将受到严重损失，同时将失去远行的灵活性。然而，仍有“返回基地”的能力。

#### 5) 维护与人力

如果将巡航柴油机从船上取消，那么，发动机舱内的人员也可以减少。不管是取消巡航燃气轮机还是柴油机，寿命维护费用当然都将降低。

#### 舰船性能

表1给出了每组装置按图9上所示的运行时间分配运行1000小时预计的油耗。从中不见，所装载的燃料大大减少(每运行1000小时减少265吨)，而且，这还未考虑缩小甲板尺寸使重量进一步减轻这一点。

#### 工作应用

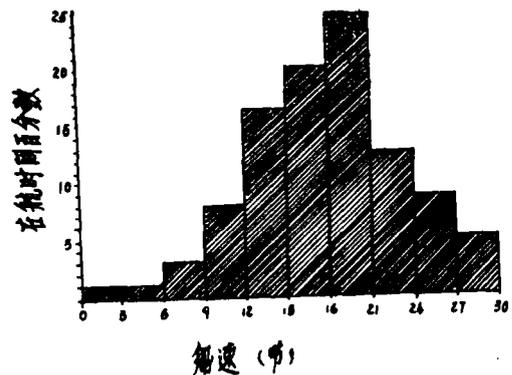


图 9 假定的运行结构方式

# 美国舰用主燃气轮机推进系统的维护和运行训练设施

## 一、前言

燃气轮机无论用作舰船主机或辅机,均需对机舱人员进行有效的维护保养和运行训练。美海军为此拟定了内容广泛的训练计划。1971年开始考虑建立实机操作训练设施,经过大量研究后,1976年选定以FFG-7和DD-963 两级舰的主机为对象。1978年3月在大湖海军训练中心开始进行概念设计,供选方案有三: A方案是将两种机组并排安放在两个单独隔间内,其布置尽量与实舰相同; B方案基本上与A方案类同,只是其设备布置有所展开,以便有更大的地方进行训练; C方案是直接先在工厂先把各分段制造好,接通所有管线,检查合格后再运往训练中心安装。审查后选定了费用最少的A方案,并开始了初步设计。

## 二、设计概述

初步设计旨在决定装置的各种基本要求,包括主设备规格、辅设施和其它运行参数。此阶段需设计和准备合同图纸及规范,并提供陆上装置全尺寸运行设施的建造详图。

### FFG-7训练装置

---

任何新型的燃气轮机都应该有尽可能广的应用范围以保证其生产能够维持下去。简单循环斯贝已经在生产中,将用于油、气泵唧及发电等用途,中间冷却回热式斯贝也将会有同样广泛的用途。

罗尔斯——罗伊斯RB211与中间冷却回热式斯贝的全功率大致相同。假设RB211与中间冷却回热式斯贝都用于煤气泵唧这一相同的用途,并且采用相同的运行模式,对其油耗计算结果表明,用中间冷却回热式斯贝时,燃料节省27%,按现在的燃料价格计算,相当于每年节省约930000美元。在用于发电时也将得到同样的效益。取得这种效益并不伴随因其他工作流体而带来的复杂性,因此,对运行维护人员的技术没有更高的要求。

## 参 考 文 献

- [1] Thomas W.J.R.the 18 MW Rolls-Royce Spey Marine Gas Turbine ASME Technical Paper No.of March 1985.
- [2] Bowen T.L.and Groghan D.A.-Advanced Cycle Gas Turbines for Naval Propulsion.Naval Engineers Journal Vol.96 №3 of May 1984.

[边晓京译自ASME 85-IGT-59陈金宝校,有删节]