

船舶燃气轮机装置 原理与设计

刘光宇 编

哈尔滨船舶工程学院出版社

371530

船舶燃气轮机装置 原理与设计

刘 光 宇 编



哈尔滨船舶工程学院出版社

(黑)新登字第9号

内 容 简 介

本书系统地讨论了燃气轮机作为舰船动力装置的工作原理、总体性能初步设计和技术论证的方法。

全书内容主要由三部分组成：即船舶燃气轮机的技术性能与燃气轮机的实际循环理论，详细地分析了循环基本热力过程参数对装置特性及结构的影响，主要参数间的相互联系和基本计算方法；其次是系统地论述了船舶燃气轮机总体性能设计的方法；最后讨论了船舶燃气轮机装置的变工况原理（包括部分负荷工况及过渡工况）与特性分析等内容。因为变工况计算结果是评定装置方案设计的适用性、工作稳定性、机动性、可靠性等方面的重要基础，其参数变化规律（静、动态特性）也是拟制调节和控制系统设计任务的重要依据，因此在书中做了重点介绍和论述。

本书着重讨论了燃气轮机装置初步设计阶段的总体性能设计、性能分析、方案论证与选型、技术任务的编制方法等方面的知识与有关内容。

本书可作为高等院校热力涡轮机、热能动力机械等专业高年级教材，也可供有关专业的工程技术人员、研究生参考。

船舶燃气轮机装置原理与设计

刘光宇 编

*

哈尔滨船舶工程学院出版社出版

新华书店首都发行所发行

哈尔滨船舶工程学院印刷厂印刷

*

开本 787×1092 1/16 印张 21.5 字数 500 千字

1992年12月第1版 1992年12月第1次印刷

印数：1—1000册

ISBN 7-81007-219-6/U·26

定价：5.50元

前 言

本书系根据1986年全国船舶动力专业统编教材会议通过的“船舶燃气轮机装置原理与设计”大纲编写的,可供高等学校船舶燃气轮机与船舶燃气轮机动力装置专业使用(计划学时为60~80学时)。

燃气轮机装置原理与设计课程是热力轮机专业专修船舶燃气轮机、船舶燃气轮机动力装置、船舶联合动力装置的必修或指定选修课程。

学习本课程的目的是使学生能系统地了解与掌握燃气轮机作为舰船动力装置的工作原理与应用,学习整个装置系统总体初步设计和技术论证以及发动机特性和特性分析方法。深入学习燃气轮机装置的实际循环理论、循环基本热力过程的主要参数:燃气初温、空气压比、部件效率、流程中压力损失对装置特性(如循环效率、耗油率、耗气率等)以及装置结构的影响,循环主要参数间的互相联系和基本计算方法,学习装置原理方案与主要设计参数的选择、确定的技术论证方法;学习装置变工况工作原理(部分负荷工况及过渡工况)与基本计算方法和特性分析方法。

全书内容主要由三部分组成,即船舶燃气轮机实际循环理论、船舶燃气轮机总体性能设计及船舶燃气轮机装置的变工况原理与特性分析等内容。在总体性能设计中,重点介绍了根据规定寿命确定发动机初温以及其它基本参数和性能(涡轮、压气机、燃烧室和换热器)或者根据燃气初温、给定其它初始参数(各部件几何尺寸、参数)及运行工况分配确定发动机的寿命(如航空发动机的舰用化改装即属于逆命题)等问题的技术论证和一般计算方法。因为变工况的计算结果是评定燃气轮机装置设计(或航机改装)方案的适用性、工作稳定性、可靠性、机动性等方面的重要基础,其参数变化的基本规律(如动态特性和静态特性)也是调节和控制系统设计的重要依据,因此,在本书中做了重点的介绍。

本书从基本原理出发,对基本概念、设计计算公式的推导、性能分析等方面均做了比较详细的阐述。

本书注意了基本理论的介绍,对技术解决途径同技术上的可行性、适用性、技术经济效益相结合的论证方法也做了重点的阐明。

本书主要是针对船舶燃气轮机装置初步设计阶段中总体性能设计、性能分析、方案论证与选型、参数选择、技术任务书的编制与要求等方面的知识而编写的。

本书由哈尔滨工业大学王仲奇教授主审。王仲奇教授、哈尔滨船舶工程学院李赫教授及上海交通大学王永泓副教授对原稿进行了详细审阅,并提出许多宝贵意见和建议。在编写过程中,还得到杨光升教授、贾锡印副教授及郑洪涛硕士的大力帮助。在此,对以上同志表示衷心的感谢。

本书吸收了兄弟院校相应课程中的一些内容和经验,并在本人讲授手稿和讲义基础上编写的,由于编者水平有限,书中缺点错误在所难免,殷切希望读者批评指正。

编 者

主要符号说明

- B, B_r —— 燃油的质量流量, $\text{kg/h}, \text{kg/s}$;
- B_u —— 涡轮导向叶栅出口气体相对速度与绝对速度速比的平方;
- B_r —— 涡轮工作叶栅出口气体绝对速度与相对速度比的平方;
- C_p —— 比热, $\text{kJ}/(\text{kmol}\cdot\text{K}), \text{kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K})$;
- D —— 涡轮或压气机叶栅平均装配直径, m ;
- F —— 换热器加热(冷却)表面, m^2 ; 部件横截面积, m^2 ; 函数关系表示;
- G —— 空气、燃气或冷却水的质量流量, $\text{kg/s}, \text{kg/h}$;
- H —— 热降, kJ/kg ; 焓, $\text{kJ/kmol}, \text{kJ/kg}$;
- J —— 转子(或转动系统)的转动惯性矩, kJ/kg ;
- L —— 工作介质的压缩(膨胀)功, kJ/kg ;
- M —— 马赫数;
- M —— 转矩或弯矩, $\text{N}\cdot\text{m}, \text{kN}\cdot\text{m}$; 分子量, kg/kmol ;
- N, N_e —— 发动机输出轴功率, kW ;
- P —— 质量, 燃油储备量, kg ;
- Q —— 热量, kJ/kg ;
- Q_p^H —— 燃料低发热值, kJ/kg ;
- R —— 气体常数, $\text{J}/(\text{kg}\cdot\text{K})$; 燃料价格, 元/kg ; 船体拖曳推力, kN ;
- S —— 熵, $\text{kJ}/(\text{kmol}\cdot\text{K}), \text{kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K})$; 船舶航行距离, m ; 海裡;
- T —— 绝对温度, K ;
- V —— 无因次等熵压缩功; 空气燃气流通的容积, m^3 ;
- W —— 无因次等熵膨胀功;
- W_o —— 表面换热器海水冷却倍率;
- X —— 各种系数;
- a —— 舰船自给力, h, s ; 各种系数;
- b_e —— 耗油率, $\text{kg/kJ}, \text{kg}/(\text{kW}\cdot\text{h})$;
- b_M —— 单位航程燃油消耗, kg/m ;
- b —— 各种系数;
- c_p —— 平均等压比热, $\text{kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K})$;
- c_v —— 平均等容比热, $\text{kJ}/(\text{kg}\cdot\text{K})$;
- C —— 涡轮、压气机通流中的绝对速度, m/s ;
- e —— 涡轮内膨胀比, 涡轮叶栅内膨胀比;
- e^* —— 涡轮内或叶栅内滞止参数总膨胀比;

e^* —— 空气或燃气在燃气轮机装置流道内各段的节流膨胀比;
 e —— 同上, 静压节流膨胀比;
 f —— 换热器单位加热 (冷却) 表面积, m^2/kW ; 涡轮级叶栅出口截面积, m^2 ;
 g —— 耗气率, kg/kJ , kg/kW ;
 h —— 轴流涡轮机械的叶片型面弦长, m ; 工质的焓, kJ/kg ;
 k —— 空气在压缩过程中的绝热指数; 表面换热器内的换热系数, $\text{kW}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$;
 l —— 叶片出口边高度, m ;
 l_0 —— 1kg 燃料完全燃烧时的理论空气量, kg/kg ;
 n —— 涡轮、压气机转子及轴的转速, r/min , (rpm) ;
 p —— 工作介质的压力, N/m^2 , kN/m^2 ($1\text{N}/\text{m}^2 = 1\text{Pa}$);
 r —— 回热度 (回热系数);
 t —— 温度, $^{\circ}\text{C}$; 叶栅间距, m ; 时间, s , h ; 伴流系数;
 u —— 圆周速度, m/s ;
 v —— 比容, m^3/kg ; 金属蠕变速度, $\%/h$; 船速, m/s ;
 w —— 涡轮通流中的相对速度, m/s ; 回热器内及燃气轮机装置流通各段管路中的空气和燃气速度, m/s ;
 x —— 实际循环中燃气膨胀 (压缩) 过程中的绝对指数;
 y —— 燃气轮机装置中的涡轮数目;
 z —— 燃气轮机装置中的压气机数目, 涡轮中的级数, 叶栅的叶片数, 回热器内空气行程交叉次数;
 Δ —— 数值的终变量; 涡轮通流部分的扩张度;
 Λ —— 可压缩气体的无因次速度 (克洛克数);
 Θ —— 换热器单位加热表面的质量, kg/m^2 ;
 Π —— 连乘积符号;
 π —— 空气在压缩过程的增压比;
 Σ —— 求和符号;
 α —— 空气过量系数; 换热器内局部放热系数, $\text{kW}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$; 涡轮导向叶栅和工作叶栅的气体出气角;
 β —— 摩尔燃料系数, 涡轮导向和工作叶栅气体相对运动速度气流出气角; 回热器内压力损失引起的功率损失系数, kW/m^2 ; 各种系数;
 δ —— 燃气轮机装置用于自身或全船性需要的燃油相对质量流量; 叶栅叶型转折角;
 ε —— 蠕变相对变形量, $\%$;
 ζ —— 叶栅之间的能量损失系数; 燃气轮机装置流道内动能损失系数;
 η —— 实际循环经济 (有效) 效率;
 η_i —— 理想循环热效率;
 η —— 各种效率;
 μ —— 燃气轮机装置循环内燃料与空气的质量流量比; 流量系数;
 λ —— 可压缩介质气流折合速度 (速度系数); 热传导系数, $\text{kW}/(\text{m} \cdot \text{K})$;
 λ_s —— 压气机特性线工作点纵坐标函数;

ν ——涡轮级特征速度 $\left(\nu = \frac{u}{c_1}\right)$, 运动粘度, m^2/s ;

ξ ——可压缩介质的气流密度;

π_0 ——等熵过程方程中的相对压力;

ρ ——密度, kg/m^3 ; 涡轮工作叶栅反动度;

σ ——正压力, N/m^2 , kN/m^2 ;

τ ——温比; 涡轮叶栅内气体总膨胀比及出口截面流密的气动函数;

φ^2 ——涡轮级导向叶栅效率;

φ ——不同系数;

Φ ——折合流量;

χ ——沿叶高变截面卸荷系数;

ψ^2 ——涡轮及工作叶栅效率;

ω ——旋转角速度, rad/s ;

M ——相对分子质量。

循环内空气和燃气参数注脚

a ——大气参数;

b ——叶片、叶片根部参数;

d ——扩压器前;

c_r ——临界参数;

H ——导向叶栅前;

P ——工作叶栅前;

r ——回热器前; 涡轮出口;

z ——压气机气流路最后一级后面; 涡轮通流部分最后一级导向和动叶前;

1——压气机进口;

2——压气机出口;

2_r——回热器出口 (空气);

3——高压涡轮进口 (燃烧室出口);

4, 5——涡轮之间。

效率的注脚

α ——压气机压缩过程效率 (包括进口和出口导管);

m ——机械效率 (考虑轴承内的损失);

p ——主齿轮传动效率 (减速器);

i ——涡轮内效率;

e ——有效效率。

目 录

主要符号说明	(I)
第一章 绪 论	(1)
§1-1 舰船燃气轮机的发展与应用	(1)
§1-2 船舶燃气轮机装置的技术性能指标或战术技术要求	(7)
§1-3 简单燃气轮机装置的基本系统工作原理方案	(16)
§1-4 燃气的热力性质与变比热循环热力过程	(20)
第二章 舰船燃气轮机装置的热力循环理论	(27)
§2-1 燃气轮机装置的理想简单循环	(27)
§2-2 燃气轮机装置的实际循环、实际循环的效率、空气耗量及燃油耗量	(33)
§2-3 初始温度、循环压比、部件效率对燃气轮机装置效率的影响	(41)
§2-4 燃气轮机装置燃气和空气通流部分中气体流量与参数的确定	(53)
§2-5 提高燃气轮机装置循环热效能的方法	(61)
§2-6 燃气轮机装置循环中的回热	(62)
§2-7 回热器内压力损失对回热效能的影响, 最大回热度的确定	(67)
§2-8 回热对装置总重量及燃油储备量的影响, 最佳回热度的确定	(74)
§2-9 回热器的补偿期及其对回热度选择的影响	(77)
§2-10 燃气轮机装置循环中的空气中间冷却	(79)
§2-11 燃气轮机装置循环中的燃气中间再热	(88)
§2-12 空气中间冷却及燃气中间再热的经济上合理条件	(93)
§2-13 燃气轮机装置燃气空气流程中的压力损失	(100)
§2-14 燃气轮机装置燃气空气管路中压力损失对循环有用功及效率的影响	(104)
第三章 闭式燃气轮机装置	(109)
§3-1 闭式循环效率及其与开式循环的比较	(110)
§3-2 闭式循环燃气轮机装置的功率	(111)
§3-3 压缩过程开始阶段改变工作介质(空气)压力的可能方法	(112)
§3-4 气冷核反应堆燃气轮机装置及装置设计中的主要问题	(115)
第四章 舰船燃气轮机装置的设计与计算	(118)
§4-1 工作原理图的选择	(119)
§4-2 舰船燃气轮机装置循环空气燃气参数选择的基本条件	(124)
§4-3 额定负荷工况的循环初次近似计算	(131)
§4-4 压气机的样机选择与给定空气流量的特性换算	(138)
§4-5 高压涡轮通流部分(几何尺寸)的初步近似计算理论	(145)
§4-6 涡轮通流部分的气动计算方法	(163)

§4-7	工作叶片根部截面上的应力和温度计算·····	(169)
§4-8	燃气轮机装置循环的详细计算 (第二次近似计算) ·····	(180)
§4-9	舰船燃气轮机装置质量的近似计算·····	(193)
§4-10	舰船燃气轮机装置主要部件的尺寸估算·····	(197)
第五章	燃气轮机装置变工况性能的计算基础·····	(205)
§5-1	燃气轮机装置的部分负荷工况和过渡工况·····	(205)
§5-2	燃气轮机装置各主要部件的特性与分析·····	(207)
§5-3	大气参数变化对燃气轮机装置性能的影响·····	(215)
§5-4	燃气轮机装置的外特性·····	(224)
§5-5	燃气轮机装置的变工况计算数学模型和计算方法概述·····	(230)
第六章	利用部件特性曲线的燃气轮机装置变工况计算方法及变工况性能分析···	(236)
§6-1	分轴燃气轮机装置变工况计算与性能分析·····	(236)
§6-2	双轴燃气轮机装置变工况计算与性能分析·····	(255)
第七章	初步设计阶段中燃气轮机装置的变工况计算 (涡轮特性参数算法) ···	(274)
§7-1	确定任意给定负荷工况的膨胀功 (第一步计算) ·····	(274)
§7-2	确定给定负荷工况下的特性线工作点位置 (第二步计算) ·····	(282)
§7-3	确定装置性能 (第三步计算) ·····	(289)
§7-4	部分负荷计算的特殊情况·····	(292)
§7-5	部分负荷工况计算的近似方法·····	(293)
第八章	船舶燃气轮机装置的过渡工况计算·····	(308)
§8-1	概论·····	(308)
§8-2	具有一个动能惯性环节的涡轮压气机组的过渡过程计算·····	(311)
§8-3	考虑回热器加热表面热惯性的过渡过程计算·····	(317)
§8-4	考虑涡轮压气机之间流道容积有容积惯性的过渡过程计算·····	(327)
§8-5	船舶燃气轮机装置加速性的近似估算方法·····	(333)

第一章 绪 论

§1-1 舰船燃气轮机的发展与应用

一、舰船燃气轮机的发展概况

燃气轮机作为舰船动力装置,从40年代末50年代初开始研制和试用以来,到现在已有40多年的历史,发展非常迅速,已有30多个国家装舰使用。尤其在一些技术发达的国家,燃气轮机得到了广泛的应用,在航空、舰船、发电、石油化工、天然气输送及铁路运输等工业交通运输部门都得到了普遍的采用。

根据有关资料统计,截止1984年,燃气轮机作为主机使用的装舰台数如下:

	舰艇	机组	功率 (kW)
舰艇推进用	813	1802	19 153 102
舰艇辅助用	268	543	351 838
共 计	1 081	2345	19 504 940

根据1978年的资料统计,民用船舶使用情况如下:

	船舶	机组	功率 (kW)
船舶主机	74	139	679 438
船舶辅机	166	213	278 970
共 计	240	352	958 408

在舰船上,燃气轮机已由应用在快艇、炮艇、扫雷艇等小型辅助舰艇发展到大中型水面舰艇如护卫舰、驱逐舰、巡洋舰,尤其象水翼艇、气垫艇等特殊类型舰艇上几乎全部使用了燃气轮机动力装置。

作为舰船动力装置,特别是中型以上水面舰船,世界各国都把燃气轮机作为优先考虑采用的动力。由于燃气轮机具有单机功率大、体积小、重量轻、起动加速性好、操作维护简单、运转平稳、保养方便、工作可靠性好等优点,是其它机种不能相比的。

回顾世界各国发展舰用燃气轮机的历史,大致可分为三个阶段:

第一阶段,1947~1957年的十年。英国于1947年由 Metropolitan Vickers CO 研制的G1型航空改装的燃气轮机装在100吨级炮艇上作为加速机组使用。

该机组在大气温度15℃、大气压力101320Pa条件下的性能为:1838kW,耗油率为639.2g/(kW·h),发动机重量为1830 kg;发动机的工作参数为:燃气初温为1023K(750℃),空气压比为3.2。这是第一次把燃气轮机装在舰艇上试用。

在此阶段,除采用航空燃气轮机改装之外,还发展了舰艇专用机组,如罗尔-罗依斯公司(Rolls-Royce Ltd)于1951年研制的RM60型燃气轮机装在灰鹅号高速炮艇上进行海试,它是复杂循环的专用燃气轮机,功率为4412kW(6000马力),燃气初温为1100K(870℃),耗油率为380g/(kW·h),发动机重量为13000kg(包括减速器)。

英国的联合电气公司 (AEC) 还研制了 G6 型舰艇专用机组: 功率为 5 515 kW, 耗油率为 462 g/(kW·h), 燃气初温为 1 068 K, 压比为 6.3, 发动机重量为 18 000 kg。于 1962 年装在州级驱逐舰上, 作为 COGAS 机组使用。苏联研制了 M1 型航空改装的燃气轮机。

此外, 还研制了重型机组, 如英国的 EL60A, 瑞士的 TA80072 工业燃气轮机派生的重型结构舰用燃气轮机。

在此阶段, 由于燃气轮机在舰上的使用经验不足, 主要还是处于研制、试用和探索阶段, 其主要注意力还不是轻小型化。因而, 研制的舰用燃气轮机既有航空改装的, 也有为舰用专门设计的, 而且, 还有重型结构型式的燃气轮机。

第二阶段, 1958~1968 年 (一直到 70 年代初期)。这一阶段是第一代燃气轮机发展到成熟实用阶段, 燃气轮机开始大量装舰。

在此阶段中, 陆用派生的重型结构燃气轮机已被淘汰。

由于航空发动机技术发展迅速, 性能指标显著提高, 积累了长期生产和使用经验, 为舰用燃气轮机的航空改装工作建立了牢固的基础, 也为研制舰用燃气轮机提供了充分条件。并且在第一阶段期间积累了许多实船运行经验, 对海洋环境下工作所带来的问题, 如积垢腐蚀等问题, 以及倒车技术等方面取得了较大进展。通过装舰运行, 证明了燃气轮机使用的可靠性和许多其它优点。因此, 这一阶段的特点是以航机改装为主, 大批量装舰使用。

1958 年, 英国 R&R 公司研制的航空改装的海神燃气轮机装在勇敢级鱼雷艇上, 其功率为 3 310 kW, 耗油率为 360 g/(kW·h), 燃气初温为 1 098 K, 压比为 7.2, 发动机重量只有 1 400 kg。

1962 年, 苏联卡辛级驱逐舰下水, 这是首次把燃气轮机装在比较大型的水面舰艇上, 作为全燃型动力装置使用, 燃气轮机总功率为 $8 \times 8\,823$ kW。

1963 年, 英国将航空 Olympus 201 发动机改装为船用型 TM1A 燃气轮机, 于 1965 年装在 Exmouth 号护卫舰上, 使用一台 TM1A 机组作为加速机组, 二台海神作为巡航机组。于同年法国研制 M38 型燃气轮机装在 Balny 护卫舰上。

1964 年, 丹麦的 Peder Skram 护卫舰采用了柴-燃交替的联合动力装置 (CODOG), 利用美国普-惠公司 (P&W) 的 FT4A 作为加速机组, 二台柴油机 (AGO 高速柴油机, 单机功率为 2 206 kW) 作为巡航机组。

1964 年, 美国联艺公司 (United Technologies) 的 P&W 公司研制的 J75 改装的 GG4 作为燃气发生器, 由动力分部 (Power Systems Devesion) 研制的动力涡轮组成 FT4 系列舰用燃气轮机装在一系列舰船上。如美国的汉密尔顿号 (Hamilton) 警备艇, 加拿大的 DDH280 驱逐舰上, 采用燃-燃交替的动力装置 (COGOG)。1966 年, 用一台 LM1500 功率为 10 295 kW, 耗油率为 337.5 g/(kW·h), 作为加速机组装在 Asneville 炮艇上。

第三阶段, 从 70 年代中期至今, 进入全燃化推进的发展阶段。

在这一阶段中, 在中型以上水面舰艇上, 大量采用燃气轮机作为主推进装置, 比较先进的第二代燃气轮机开始装舰使用。

1971 年, 英国的 42 型导弹驱逐舰首舰 Sheffield 号下水, 该舰采用 COGOG 装置, 巡航机组为 RM1A (Tyne), 加速机组采用 Olympus TM3B。

1970年, 美国决定建造Sprunce 导弹驱逐舰, 采用双轴推进, 每轴由二台LM2500燃气轮机驱动, 采用燃-燃联合动力装置 (COGAG), 首舰DD963于1973年下水, 1975年投入现役。

1977年, 意大利的Lupo导弹护卫舰, 采用 (CODOG) 装置, 其中一台 LM2500 作为加速机组, 一台柴油机作为巡航机组。

在此阶段中, 可以看到研制的舰用燃气轮机的功率继续加大, 耗油率进一步降低, 而翻修期不断加长。

在结构上采用箱装体、单元体结构、简化了维修和更换, 倒车技术有较大发展, 装舰技术已得到解决。

除了采用航机改装进一步提高产品性能和寿命外, 开始重视产品系列化, 以满足对燃气轮机各档功率的要求。

在这一阶段中, 以美国研制的LM2500为代表, 其主要性能参数如表1-1所列

表1-1 LM2500主要性能参数表

主 要 参 数	LM2500 (ISO标准功率)
大气温度 K	288
大气压力 Pa	101 320
轴功率 kW	20 220
燃气发生器转速 r/min	8 948
动力涡轮转速 r/min	3 600
燃气初温 K	1 443
压气机出口压力 Pa	1 864 380
压气机出口温度 K	703
动力涡轮进口温度 K	1 041
动力涡轮进口压力 Pa	390 100
第一级高压涡轮动叶金属温度 K	1 011
第一级高压涡轮静叶金属温度 K	1 086
最大短时功率 kW	22 059
最大短时功率的耗油率 g/(kW·h)	228.48
最大短时功率的空气流量 kg/s	67.0
发动机排气温度 K	803
最大短时功率压比	22
最大连续功率 kW	20 220
最大连续功率的耗油率 g/(kW·h)	233.92
最大连续功率的空气流量 kg/s	65
发动机排气温度 K	776
最大连续功率压比	17.8
燃气发生器转速范围 r/min	4 950~9 600
发动机重量 kg	4 676
发动机外形尺寸 (长×宽×高) mm	6 629×2 134×2 134

压气机为16级轴流压气机, 前6级的静叶和进口导叶均为可转导叶, 压气机没有中压机构。第8级静叶后的轴向宽度较大, 以便从内部抽气。压气机从第8、9、13、16、

级都有抽气（其中第8级为3.6kg/s，第16级为7.3kg/s），用于涡轮叶片冷却和船体及螺旋桨的降噪减阻气幕。高压涡轮有二级叶列，采用从第13级的抽气来冷却叶片，燃气的初温高达1 443K，但叶片金属温度不超过1 086K。动力涡轮有6级，设计成低转速、低应力、长寿命的轴流式涡轮。

LM2500与第一代LM1500比较，性能已有显著提高，耗油率的变化如图1-1所示。

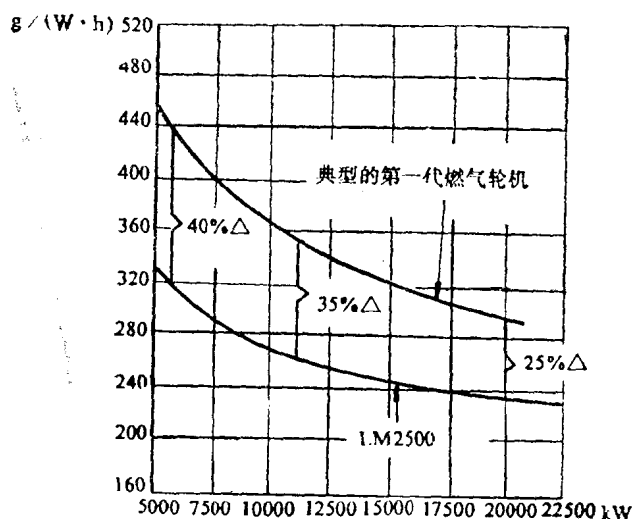


图1-1 耗油率变化曲线

燃气轮机的热效率与第一代比较已由29%提高到37%，耗油率降低约25%。压比从10~13增加到17~22，燃气初温从1 173K增加到1 443K，即提高了约300K。空气流量减少约37%，箱装体总重量降低了约31%，大修期延长约1~2倍，LM2500发动机的工作条件最恶劣部件（如高压涡轮第一级动叶、轴承等）寿命已超过8 000~10 000h。

现在燃气轮机已发展到第三代，其特点是压比进一步提高，采用双转子燃气发生器，进一步提高燃气轮机燃气初参数，如LM5000功率为36 765kW，压比高达30，耗油率为223g/(kW·h)，初温为1 473K。由于燃气轮机性能进一步提高，在大中型水面舰船上，燃气轮机已处于绝对优势，日益受到重视。早在1958年，苏联舰队技术委员会，鉴于常规蒸汽动力装置已不能满足现代舰艇对动力的要求，就提出大力发展舰用燃气轮机和核动力装置的计划。英国海军于1968年决定，在以后设计制造的大中型水面舰艇上，要全部采用燃气轮机，并把二台RM1A (Tyne) 2×3 000kW和二台TM3B (Olympus) 2×20 000kW组成的燃气轮机联合动力装置COGOG作为“标准推力单元”使用。美国从60年代以后在舰用燃气轮机研制和使用方面取得了明显进展，并研制出技术先进、具有代表性的一、二、三代产品。

目前，燃气轮机的发展除了继续完善简单开式循环燃气轮机、提高循环燃气初参数外，为了提高发动机的经济性及其它性能，还采用联合循环的燃气轮机装置，如燃气-蒸汽轮机联合动力装置，柴-燃联合动力装置。采用柴油机及燃-蒸联合装置作为巡航机组使用，是舰船燃气轮机发展的重要方面。此外，随着技术的发展，采用间冷回热 (ICR

循环)的复杂循环燃气轮机又受到重视。ICR研究表明,其热效率可达42%,设计点耗油率可比简单循环燃气轮机低约15~20%,而比功高约35%。在ISO条件下预计最低耗油率可达178g/(kW·h)。

二、舰船燃气轮机装置的使用方式

按燃气轮机在舰船上的作用,可分为主推进装置(主机)和辅助燃气轮机装置(如用作电站发动机,输油、排水泵的发动机,应急电站发动机等)。用于主推进装置的燃气轮机根据其用途可分为巡航机组、加速机组和全工况机组。根据不同舰艇的需要一台燃气轮机也可以选作巡航机组或加速机组。

巡航机组仅提供舰艇巡航速度以下的推进动力,要求机组单机功率较小,因为巡航功率一般仅为最大航速功率的10~40%,而巡航时间却占整个航行时间的95%以上。

巡航燃气轮机在满足巡航功率要求的情况下,应有尽可能低的耗油率,以及尽可能长的翻修期。巡航机组的功率范围一般在2900~5900kW左右(如英国的Tyne rmia为2800kW, Rmic为4300kW,美国的PF990为3680kW, FF12为2757kW,苏联的AI20为2200kW, AI24为3125kW)。

加速燃气轮机提供舰艇巡航速度以上的动力,要求单机功率大、比重要小、耗油率尽可能低的机组。这种机组可以采用较高的燃气初温和压比。机组功率一般为18400~36800kW左右(如英国的Olympus为18382kW, TM3C为21760kW;美国的LM2500为20200kW, FT9为24264kW,苏联的HK144为18700kW)。

全工况燃气轮机要满足各种航速下的推进动力,但无论在全速或低航速下,发动机都能长期稳定运行,而且,在各种工况(部分负荷工况下),耗油率都尽可能低,以满足续航力的要求,翻修期尽可能长。

显然,一台燃气轮机很难满足全工况燃气轮机的要求。因此,在舰艇上常常采用多台异型机组或多台同型机组组成的全燃型式的燃气轮机联合装置,交替或一起同时使用机组。

由于简单循环燃气轮机装置在低工况下运行时耗油率增高,会降低舰艇的续航力。因此,在全燃推进的舰船上,一般都采用燃-燃交替(COGOG)或燃-燃联合(COGAG)的动力装置。

燃气轮机还可与其它型式动力装置组成联合装置。因此,采用燃气轮机的舰船,其动力装置可能有以下的联合型式。

型 式	名 称	巡航机组	全速机组
COSAG	蒸-燃联合动力装置	蒸汽轮机	蒸汽轮机+燃气轮机
CODAG	柴-燃联合动力装置	柴油机	柴油机+燃气轮机
CODOG	柴-燃交替动力装置	柴油机	加速燃气轮机
COGAG	燃-燃联合动力装置	燃气轮机	燃气轮机+燃气轮机
COGOG	燃-燃交替动力装置	巡航燃气轮机	加速燃气轮机
GOGAS	燃-蒸复合动力装置	燃气轮机+蒸汽轮机	

此外,还可采用燃气轮机注蒸汽双工质复合循环装置,燃-蒸-电联合动力装置等等。COSAG已很少采用,只是在燃气轮机发展的初期曾采用。1958年,英国在“部落”

级护卫舰上对蒸汽动力装置改装,仍以蒸汽轮机(9 190kW)作为巡航,以便在燃气轮机一旦发生事故时,舰艇仍能以85%的全速航行,选用一台G6型机组作为加速机组使用。燃气轮机使用的可靠性表明,不仅完全可以可靠地运行,而且经济性也比蒸汽轮机好,因此,这种改装是不必要的。

在小型舰艇上,由于柴油机耗油率较低,为提高续航力,多数还采用柴油机作为主机或巡航发动机。但是在吨位较大、船速较高的舰艇上,由于柴油机单机功率较小,难于满足动力要求。这时采用CODOG或CODAG可以发挥两种机型各自的优势。CODOG在巡航时采用柴油机,以保证续航力,在全速时采用燃气轮机,以保证对动力的要求。这种装置1964年在丹麦的“Peder Skralm”护卫舰首次使用,实践证明,这种联合装置是一种较好的使用方式。

COGGA型式在全速时尽管把柴油机功率加上,航速提高并不显著,因为负荷与航速是三次方关系。由于柴油机平均功率小,对航速的改进是不大的,最高航速只不过提高1~2节,但花费的代价是巨大的,往往得不偿失,不仅使调节控制系统增加设备,而且联合并车装置也很复杂。因此,70年代以后的柴-燃联合动力装置都普遍采用了CODOG型式。

全燃型联合动力装置使用比较普遍,无论是COGAG或COGOG,都得到发展。苏联“卡辛”级导弹驱逐舰,美国DD963导弹驱逐舰,都采用了COGAG型式,巡航时使用一台机组单机单桨航行,偏转船舵,保证航向。同型并车、维护、后勤保障方便,可以批量生产,使造价降低。采用COGOG型式巡航时,由巡航机组单独工作,由于此时巡航机组是在高工况或设计工况下工作,其耗油率要比COGAG型式单机低工况下工作时变低,更易保证续航力,COGOG型式在英国Exmoor号护卫舰、42型导弹驱逐舰以及加拿大DOH280驱逐舰上得到应用。

COGAS型式在陆用燃气轮机上早已得到运行经验,在舰船上还使用的较少,[在苏联Смирнов“船长”号集装箱干货船得到实际应用。主机功率为13 970kW,蒸汽轮机给出4 411kW(提高功率30%),还可提供6 000kg/h的过热蒸汽及全船性使用的2 000kg/h的蒸汽。采用COGAS型式,无须克服太大的困难,也不破坏燃气轮机的直流性和紧凑性,即可获得多方面经济效益。只要在排气道中加装一套热交换器(或称废热锅炉,由经济器、蒸发器和过热器组成)及一个蒸汽轮机之后,即可提高装置的效率和功率。这方面的技术也比较成熟,尤其在民用船舶上有广泛发展的应用前途。在舰艇上亦可作为巡航机组使用。

三、航空发动机的舰用化改装工作

航空发动机的发展为舰用燃气提供了坚实的基础。由于航空发动机舰用化改装可以充分利用航空发动机的研究成果、试验条件和生产基地,使舰用化改装工作研制周期短、研制经费降低。由于航空发动机性能的提高,以及在改装技术、空冷技术、防腐涂层、抗冲击研究、测试技术、拆装维修等方面的完善,为航空发动机的舰用化改装创造了十分有利的条件。舰用燃气轮机应能在海洋环境条件下长期可靠地工作,并能满足舰船对发动机在性能、结构、寿命与可靠性、运行、维护等方面的要求。与航空燃气轮机相比工作条件更加恶劣,技术要求也更加苛刻。

舰用化改装工作一般包括下面几方面的内容

1. 去掉航空发动机的尾喷管, 加装动力涡轮。动力涡轮的设计原则是长寿命(一般与舰艇服役期限相同)、低应力、低负荷。为适应负荷变化范围, 必须保持相当平缓的效率特性, 多级亚音速设计, 改善强度和振动, 在轮盘和叶片材料以及应力和承力系统结构、高速轻载抗震轴承等方面采取措施, 增加刚性, 降低应力, 减少磨损, 防止断裂。

为改善装置的部分负荷效率, 应研制变几何、可转导叶的动力涡轮, 使低工况的耗油率特性得到改善。

2. 为了适应改烧柴油的要求, 必须重新设计或改进火焰筒、喷油嘴、燃油泵和燃油调节系统, 防止壁温升高、燃烧不良、冒黑烟或在卸荷时发生熄火的可能。由于柴油比航空煤油粘度和比重都大, 因此喷雾压力、喷射角度、空气雾化粒度、涡流角都应适当调整。

3. 对燃气发生器选型, 确定燃气发生器的参数, 在高效率和满足寿命方面进行协调。为满足舰用燃气轮机的寿命要求, 燃气初温一般比母型机的燃气初温低 $100\sim 200\text{K}$, 压气机的转速也应做适当变化。

4. 为了满足抗盐雾和海水腐蚀, 一些部件应更换材料, 或进行表面处理或加防腐涂层。压气机的机匣由镁合金改为铝合金, 压气机叶片由铝合金改为钛合金或不锈钢, 高压涡轮叶片由抗蠕变、高温强度高的合金改为抗热腐蚀性能高的高温高强合金, 在设计中应考虑低周疲劳破坏、高温疲劳及腐蚀的影响, 提高强度储备系数。

在进气装置中, 必须加装空气滤清器, 以减少进气中的海水成份, 降低盐份含量。

在燃油滑油系统中加装油水分离器, 并在压气机通流中安装清洗系统, 在涡轮通流中考虑去掉污垢和沉积、积炭的措施。

5. 由于舰用燃气轮机在海平面工作, 轴承负荷要大于航空发动机, 应采取措施增大轴承承载能力, 或改进轴承结构以及支承方式。

6. 为满足部分负荷的工作要求, 必须提高变工况条件下的工作稳定性, 使平衡运行共同工作线在整个负荷范围内都有足够的喘振裕度。为此, 舰用燃气轮机必须考虑防喘措施。

7. 为满足抗冲击要求, 应加装减振系统, 加强燃气发生器机匣和支承系统。

应使燃气轮机能在横摇和纵倾状态下可靠工作, 通常在横摇 30° 、周期 10s , 纵倾 8° 、周期 6s 下仍能持续工作。

8. 降低机舱内的温度和噪音, 加装箱装体和通风系统。并使箱装体能隔音、隔热、防原子、生物和化学污染。

9. 由于舰用燃气轮机磨损程度高于航空发动机, 因此, 对某些部件的定位表面、接触表面应进行表面硬化, 提高耐磨性, 以延长使用寿命。

§1-2 船舶燃气轮机装置的技术性能指标或战术技术要求

船舶动力装置是各种技术设备(包括各种部件、机械和设备)的综合体。在这些技术设备中实现能量转换、能量传递的热力和机械过程。船舶动力装置是按舰船要求, 将燃料

的热能转变为机械功或其它形式能量的机械设备的复杂组合系统，其基本用途是保证舰船的推进运动以及舰船上各种技术设备与武器装备的正常工作，保证舰上人员的战斗及正常生活条件。通常把动力装置中用来保证舰船推进的这一部分机器设备单独地分出，称为主机或主推进装置，而其余技术设备称为辅机或辅助系统。

主机或主推进装置系统包括主发动机、齿轮传动装置、轴系、换向设备、螺旋桨及附属主装置的燃油、滑油系统、控制系统、循环水系统、冷却系统等主机辅助机械和设备。本课程的重点是讨论主发动机装置（或称机组），是指发动机输出轴以前各部件的基本问题。

除主推进装置外，在舰艇上还有全船性机械：如通讯、照明、通风、人工气候系统，甲板机械、输油、消防、排水系统，淡水蒸馏装置、生活用汽、辅助锅炉，保证战斗的各种技术装备等，以上这些设备的能量消耗不应包括在主推进装置内。但是，主推进装置附属系统的能量消耗应统计在主推进装置的燃油消耗之中，一般所占比例为3~5%。因此在进行比较时，无论是同种类机型，还是与其它种类发动机，都应注意比较条件，以防造成错误。尽管附属系统的燃油消耗量所占比例不大，但是，对于大吨位舰船及续航力大的船舶是不容忽视的。

船舶燃气轮机的技术性能指标（对于舰艇通常称为战术技术要求）一般包括以下内容

一、单机功率

单机功率是指一台燃气轮机所能发出的额定功率，即最大持续功率。

单机功率是一个综合性评定指标，它决定于燃气轮机设计制造能力和技术水平。

单机功率通常根据为保证舰艇具有一定航速的总功率、装置方式、螺旋桨数目、发动机台数以及发动机设计能力和制造水平等因素确定，通常在战术技术要求中规定。

舰用燃气轮机的单机功率可达18~22MW，在试制的有30~37MW。单机功率大，不需并车即可满足螺旋桨功率要求，可以减少并车传动装置的复杂性。

由于柴油机单机功率小，通常为3~4.5MW，法国的PC中速柴油机虽单机功率可达20MW，但因尺寸、重量过大，不能满足装舰要求。

因此，中型以上舰艇只能选用蒸汽轮机装置和燃气轮机装置。由于燃气轮机装置在许多方面都比蒸汽轮机装置具有明显的优越性，通常优先考虑采用燃气轮机作为主动力装置。

目前，航空母舰采用核动力装置，其蒸汽轮机功率可达56MW，对于轻型航母燃气轮机仍有许多优势。

二、比重量

装置的总重量与额定功率之比称为装置的比重量，即装置发出每单位功率时的装置重量。根据定义，可写出

$$G_s = \frac{G_j}{N_j} \quad (1-1)$$

式中 G_j ——燃气轮机装置的总重量；

N_j ——装置的总功率。

在比较装置的比重量时，应首先明确前提条件，即主装置中是否包括了主推进装置的附属系统等部件之重量，还是只指机组本身的重量（涡轮、压气机、燃烧室、管路，有时包