

A detailed technical drawing of a gas turbine engine in cross-section, showing the compressor, combustion chamber, and turbine sections. The drawing is repeated three times across the cover.

燃气轮机

朱梅林 编著

7
华中工学院出版社

内 容 简 介

本书较系统地、简明地阐述了燃气轮机的基本理论。全书共分六章：第一章，绪论，主要介绍燃气轮机的现状和发展情况；第二章，燃气轮机的热力循环，主要阐述各种不同因素对燃气轮机性能的影响；第三章，压气机，介绍轴流式和离心式压气机的基本理论和计算；第四章，涡轮，介绍轴流式和径流式涡轮的基本理论和计算；第五章，燃烧室，介绍燃烧室的结构和燃烧特点；第六章，燃气轮机变工况，介绍燃气轮机在部分负荷下的工作特点。

本书可作为动力机械类专业（如内燃机、热能动力、动力装置等）大学生教材，也可供有关专业的教师、工程技术人员参考。

燃 气 轮 机

朱 梅 林 编

责任编辑 叶见欣

※

华中工学院出版社出版

（武昌喻家山）

湖北省新华书店发行 各地新华书店经售

湖北省天门县印刷厂印刷

※

开本：787×1092毫米 1/16 印张：12.25 字数：307,000

1982年8月第一版

1982年8月第一次印刷

印数：1~3,000

统一书号：13255-004

定价：1.70元

目 录

第一章 绪 论	(1)
§1-1 燃气轮机简介	(1)
§1-2 燃气轮机的发展简史	(1)
§1-3 我国燃气轮机工业概况	(3)
§1-4 燃气轮机在舰船动力装置中的地位	(4)
§1-5 舰船燃气轮机的技术水平和发展动向	(6)
第二章 燃气轮机的热力循环	(10)
§2-1 燃气轮机热力循环的主要技术指标	(10)
§2-2 燃气轮机的简单循环	(12)
§2-3 燃气轮机的回热循环	(20)
§2-4 燃气轮机的中冷循环	(24)
§2-5 燃气轮机的再热循环	(26)
§2-6 燃气轮机的回热、中冷、再热复杂循环	(28)
§2-7 燃气轮机的复合循环 (COGAS)	(30)
§2-8 闭式循环气轮机	(32)
§2-9 燃气轮机的热力循环计算	(33)
第三章 压气机	(42)
§3-1 压气机级的简图和增压原理	(42)
§3-2 压气机级中的气体压缩过程	(46)
§3-3 作用在叶片上的力和工作轮所作之功	(49)
§3-4 压气机级的基本参数	(53)
§3-5 具有不同反力度的轴流级	(59)
§3-6 轴流级的径向平衡方程和叶片的扭转规律	(62)
§3-7 轴流式压气机叶栅的几何参数和气动参数	(69)
§3-8 压气机的叶栅特性	(74)
§3-9 径向和轴向间隙对级作功的影响	(79)
§3-10 轴流式压气机的超、跨音速级	(80)
§3-11 多级压气机的基本参数	(82)
§3-12 多级轴流式压气机通流部分的形状和压缩功的分配	(87)
§3-13 多级轴流式压气机的计算	(91)
§3-14 压气机的特性线	(99)
§3-15 压气机的失速和喘振	(108)
第四章 涡轮	(113)
§4-1 涡轮级的简图和基元级	(113)
§4-2 气体在工作轮中所作之功	(115)
§4-3 涡轮级的基本参数	(117)
§4-4 涡轮的叶栅特性	(121)
§4-5 长叶片的扭转方法	(131)
§4-6 涡轮叶片的冷却	(135)
§4-7 涡轮级中的能量损失和级效率	(137)

§4-8	多级轴流式涡轮的基本参数	(142)
§4-9	多级轴流式涡轮的通流部分型式和各级间焓降的分配	(146)
§4-10	多级轴流式涡轮的方案计算	(148)
§4-11	涡轮的变工况和特性的表示方法	(151)
§4-12	涡轮级的特性线	(152)
§4-13	多级轴流式涡轮的特性线	(154)
第五章	燃烧室	(157)
§5-1	燃烧室的简图和对它的要求	(157)
§5-2	燃烧室的结构型式	(158)
§5-3	燃烧室的主要技术特性参数	(159)
§5-4	燃烧室的工作过程	(163)
§5-5	燃烧过程的热平衡计算方法	(169)
第六章	燃气轮机的变工况	(173)
§6-1	燃气轮机变工况概述	(173)
§6-2	燃气轮机变工况的计算方法	(176)
§6-3	燃气轮机的联合运行工况	(178)
§6-4	单轴燃气轮机的变工况	(182)
§6-5	分轴燃气轮机的变工况	(185)
§6-6	平行双轴和三轴燃气轮机变工况的特点	(187)
§6-7	燃气轮机的过渡工况	(188)
附 录		(190)
	本书主要符号	(190)
	参考文献	(191)

第一章 绪 论

燃气轮机是一种新型的动力装置，它是连续流回转式热机。本章主要介绍燃气轮机的发展概况、在舰船上的应用、当前的技术水平和动向。

§ 1-1 燃 气 轮 机 简 介

燃气轮机主要由压气机、燃烧室和涡轮三大部件组成。图1-1是简单开式等压燃烧燃气轮机简图。它以空气作工质，用内燃的方式加热。燃气轮机工作时，压气机1从外界大气中吸入空气，并把它压缩使之具有一定的压力（同时空气的温度也相应地升高），然后将空气送入燃烧室2，与喷入的燃料相混合，点火燃烧，产生高温的燃气。具有高温高压的燃气进入涡轮3中膨胀做功，推动涡轮带着压气机转子一起作高速旋转运动。这样，燃气轮机就把燃料中的化学能部分地转变为机械功。

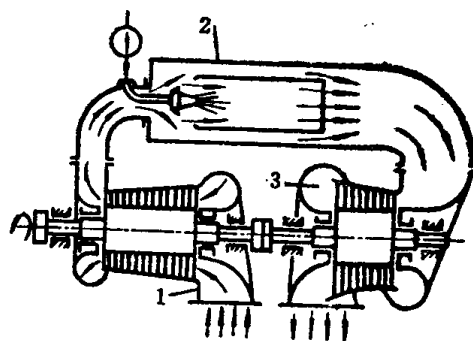


图1-1 等压燃烧式燃气轮机简图

一般地，燃气在涡轮中所作的机械功的大约三分之二左右被用来带动压气机，消耗在提高空气的压力和温度上，其余三分之一左右的机械功则通过机组的输出轴，去带动外界的负荷，如螺旋桨、发电机等。

燃气在涡轮中膨胀做功后，其温度和压力都降低了，可以直接排往大气；也可以引入余热利用器（如回热器、废热锅炉等）回收部分余热后再排往大气。

燃气轮机正常工作时，压气机的吸气和压缩过程，燃烧室中燃料的燃烧过程，涡轮中燃气膨胀做功过程，以及高温排气在大气中的自然放热过程，都是连续不断地进行的。与此同时，燃料中的化学能也将部分地、连续不断地转化为机械功。

为了保证燃气轮机的正常工作，除上述三大部件外，还需要有一些附属系统及其设备，例如燃料系统、润滑油系统、冷却水和冷却空气系统、起动系统、调节和保护系统等。此外，还可以根据需要安装一些热交换设备，如空气冷却器、空气预热器和废热锅炉等。

§ 1-2 燃气轮机的发展简史

人们对燃气轮机的简单原理很早就有所认识。例如，大约在十世纪，我国已出现了用烟气推动纸轮旋转的走马灯。约在十八世纪末提出了燃气轮机热力循环的初步原理。但是由于冶金工业还不能提供耐高温的高强度的涡轮叶片材料；制造工艺水平还比较低；人们对空气动力学的认识也还不足以设计出效率较高的压气机，所以在二十世纪以前，制造燃气轮机的尝试未能获得成功。随着工业生产水平的提高，到二十世纪初，燃气轮机才初步试验成功。

1908年，在法国制造的1.6马力燃气轮机试验成功，其效率仅约3%。同时，郝尔兹瓦斯（H. Holzwarth）设计了第一台工业上长期运转的50马力燃气轮机。这两台燃气轮机都是开式循环等容燃烧的装置，其工作原理如图1-2所示。从理论上说，等容燃烧式燃气轮机应具有较高的经济性（与等压燃烧式燃气轮机相比），因为进入燃烧室所必需的空气量和它的压力都比较小，所以压气机消耗的功率也就较小。但实际上，这种燃气轮机并未得到应用，因为它存在严重的缺点：具有进排气阀的燃烧室不仅结构复杂，而且可靠性差；燃烧室排出的气流是脉动的，不利于涡轮的工作，降低了它的经济性。

随着科学技术的发展，燃气轮机的设计制造水平逐步提高。在二十世纪三十年代末已经制造出具有工业价值的燃气轮机。此后，燃气轮机就迅速地在各个工业部门得到了实际应用。

在陆上，瑞士布朗·波佛利公司（BBC）于1939年制成了第一台功率较大的发电用燃气轮机。它是按图1-1的原理工作的等压燃烧式发动机。它的功率为4000千瓦。当涡轮前的燃气温度为550℃时装置的效率约为18%。1940年BBC又制成了第一台功率为2200马力的机车用燃气轮机，其效率约为16%。1950年罗沃公司（Rover）的第一辆燃气轮机汽车开始行驶。目前燃气轮机已在电站、机车、化工、汽车、坦克、原油和天然气输送等工业部门得到广泛应用。1975年世界陆用燃气轮机总功率已达24000万马力。

在航空上，1941年第一架使用燃气轮机（涡轮喷气发动机）的飞机试飞成功。由于航空燃气轮机（包括涡轮喷气发动机、涡轮风扇发动机、涡轮螺旋桨发动机等）具有功率大、重量轻、尺寸小等优点，逐步代替了活塞式发动机。到五十年代后期，燃气轮机便在航空上占了绝对优势。目前，在军用飞机上已完全淘汰了活塞式发动机。

在海上，燃气轮机首先在舰艇上得到应用。1947年第一艘用燃气轮机推进的英国炮艇MGB2009开始试航。从那时到现在，舰船燃气轮机的发展历史大致可分为三个阶段。第一阶段（1947~1958年）是小批试用阶段。在此期间，燃气轮机的功率为2500~13000马力，油耗率为270~480克/马力·小时，翻修周期一般小于1000小时。机型以加速机组为主，且多致用于炮艇、快艇和扫雷艇等辅助舰艇，其中具有代表性的是英国为舰艇专门设计的G6型机组（功率为7500马力，油耗率为350克/马力·小时）、航空改型的“普鲁鸠斯”（Proteus）机组（功率为3500马力，油耗率为280克/马力·小时）、以及瑞士BBC公司为西德“科隆”级护卫舰研制的从陆用电站燃气轮机改型的机组（功率为13000马力，油耗率为272克/马力·小时），它们至今还在一些国家的海军舰艇中服役。第二阶段是1958年~1967年。这十年间燃气轮机已大批量地装舰使用，并成功地用于护卫舰和驱逐舰等中型水面舰艇，除用作加速机组外，也使用全工况燃气轮机。机组的功率为3500~25000马力，油耗率为200~300克/马力·小时，翻修周期可达4000小时。典型的机组为美国的LM1500（功率为15000马力，油耗率为250克/马力·小时）和FT4A（功率为25000马力，油耗率为230克/马力·小时），还有英国的“太因”（Tyne）RM1A（功率为4250马力，油耗率为240克/马力·小时）和“奥林普

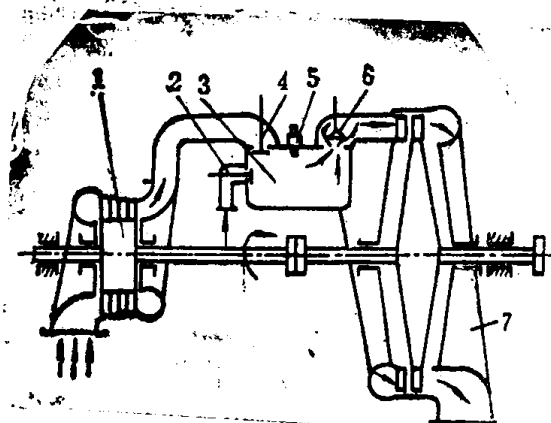


图1-2 等容燃烧式燃气轮机简图

1—压气机；2—燃料阀；3—燃烧室；4—空气阀；
5—点火装置；6—燃气阀；7—涡轮

斯”(Olympus) TM1A(功率为24000马力,油耗率为240克/马力·小时),其中RM1A是巡航机组, TM1A是加速机组。这个时期航空发动机技术发展迅速,性能指标显著提高,并且积累了长期使用的经验,因而使由航空发动机改装而成的舰艇燃气轮机,既保证了经济性和可靠性,又缩短了研制周期,节省了研制费用。此外,经过长期对燃气轮机的试验研究和实船运行,对海洋环境带来的积垢、腐蚀以及倒车等技术问题的研究,也取得了较大的进展,这就是舰船燃气轮机在这个时期得到迅速发展的重要原因。第三阶段(1968年~现在)是全燃气轮机化推进的发展阶段。英国于1968年首先宣布水面舰艇采用全燃气轮机推进作为海军的政策,其它工业先进国家的海军也陆续仿效。在此阶段,燃气轮机的功率增大至35000~50000马力,油耗率降低至170~180克/马力·小时,翻修周期延长至8000~12000小时。在热力循环方面出现了燃气-蒸汽复合循环装置(COGAS)。在结构上采用了箱装体和单元体结构,从而简化了机组的维修和更换。此时可以说,舰船燃气轮机已从第一代发展到了第二代。美国通用电气公司(GE)的LM2500全工况燃气轮机是这阶段的代表机型,其功率为26800马力,油耗率为170克/马力·小时,翻修周期为8000小时。图1-3是LM2500舰船燃气轮机简图。

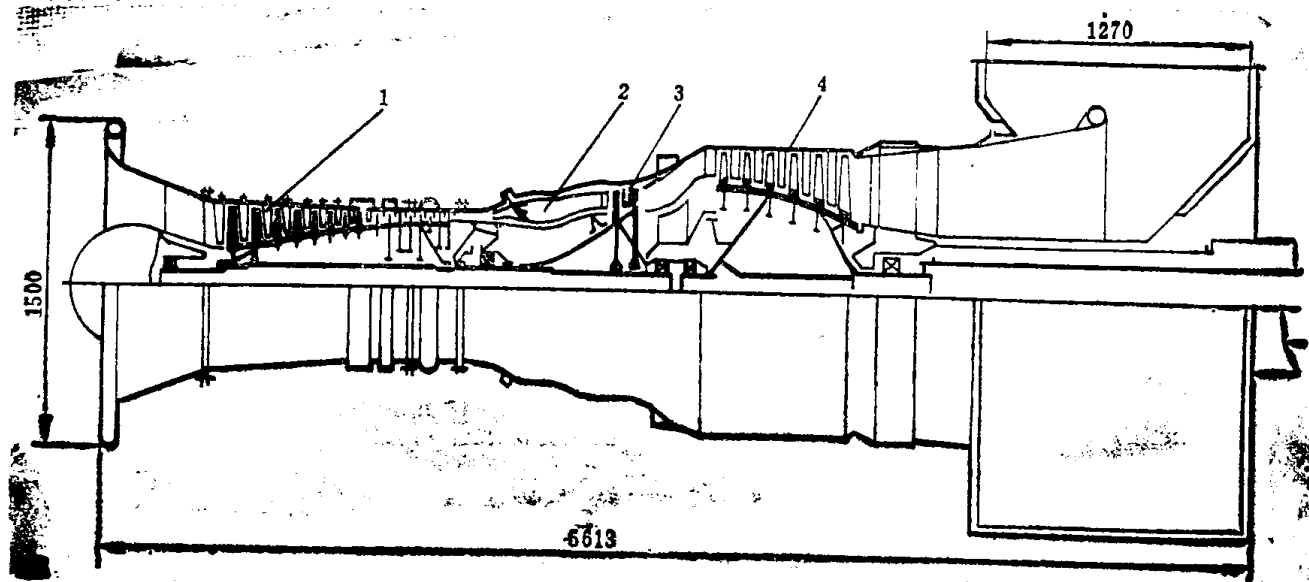


图1-3 LM2500舰船燃气轮机简图

1—压气机(16级);2—燃烧室;3—高压涡轮(2级);4—低压涡轮(6级)

综上所述,燃气轮机的应用范围几乎遍及各个主要经济部门,可以说没有任何一种动力机械具有这么广泛的应用范围。在近十五年中全世界陆海用燃气轮机的总功率猛增了40倍,已超过三亿马力。现在世界上已有二十多个国家一百多个企业生产近千种型号的燃气轮机,其中产量最大的是三家跨国生产集团,即美国的通用电气公司(GE)、普拉特-惠特尼公司(PW)和英国的罗尔斯-劳伊斯公司(RR)。它们都把航空发动机改型供应陆海用途,因此产品向高温、高压比、轻型发展,指标比较先进。

§ 1-3 我国燃气轮机工业概况

我国解放前没有燃气轮机工业,解放后从无到有,逐步建立了一批生产燃气轮机的工厂,现已初具规模。迄今全国各地已制成了数十种型号的陆海空用途的燃气轮机。

在航空上,我国自制的第一批喷气式飞机于1956年开始试飞。现已建立了一批较大规模的航空燃气轮机制造工厂,基本上满足了我国对飞机发动机的需求。

在陆用方面, 1957年上海内燃机配件厂曾试制过小功率燃气轮机。上海汽轮机厂与上海船厂合作于1964年制成750马力自由活塞燃气轮机, 1965年制成6000千瓦列车电站燃气轮机, 1971年制成自行设计的3000千瓦卡车电站燃气轮机, 后又制造了6000千瓦卡车电站燃气轮机发电机组, 还设计试造了25000千瓦战备电站。南京汽轮机厂于1964年制成1500千瓦电站燃气轮机, 1970年试造了50马力泵用燃气轮机, 1972年制成自行设计的1000千瓦卡车电站燃气轮机, 1977年制成了21700千瓦快装电站燃气轮机。哈尔滨汽轮机厂于1969年制成自行设计的3000马力机车燃气轮机, 1970年制成1000千瓦自由活塞燃气轮机, 后又与长春机车车辆厂合作设计制成4000马力燃气轮机车。东方红汽轮机厂于1978年试制成6000千瓦发电用燃气轮机。杭州透平机械厂和青岛汽轮机厂于1972年制成200千瓦燃气轮机。

在舰船用燃气轮机方面, 我国于1958年起开始研制工作, 采取了仿型、航空改装和自行研制三种发展方式。1958年开始仿制的404型燃气轮机, 功率为4000马力, 油耗率为410克/马力·小时, 翻修周期仅100小时。该机由上海汽轮机厂制造, 1964年开始试车, 1966年开始装艇进行海上试验, 情况良好。但由于机组的指标比较落后, 没有批量生产使用。1967年开始对航空发动机进行舰用化改装, 并试制成功了407型和409型等燃气轮机。从此, 我国舰船燃气轮机的工业生产与设计科研力量经过实践锻炼已经初具规模。

§ 1-4 燃气轮机在舰船动力装置中的地位

现代舰船动力装置有四种类型: 核动力、蒸汽轮机、柴油机和燃气轮机。

核动力装置的最大优点是, 能使舰船的续航力大大提高, 而且在工作过程中不需要空气。因此它特别适用于潜艇。通常, 核动力潜艇的水下续航力可达数月之久。但核动力装置造价昂贵。所以, 自1954年第一艘核动力潜艇出现以来, 核动力装置主要用在潜艇上。部分大型水面舰船, 如排水量超过一万吨的驱逐舰、巡洋舰和航空母舰也有采用核动力装置的。至于核动力的商船则为数很少, 因为在经济上要亏本。

蒸汽轮机动力装置的优点是功率大、工作可靠、寿命长、易维修和经验成熟。因此在六十年代以前, 在大型舰船中蒸汽轮机动力装置占优势。在军用方面, 它主要用于驱逐舰、巡洋舰和航空母舰上。在民用船舶方面, 它主要用于油船和集装箱船。由于蒸汽轮机动力装置存在设备重量大、系统复杂、起动时间长等缺点, 因此, 从六十年代起, 它便逐渐让位于燃气轮机动力装置。目前, 在大型水面舰船中, 采用蒸汽轮机装置的舰船仍有少量建造。

柴油机动力装置的显著优点是经济性好, 即油耗率低。因此, 它是用得最多的舰船动力装置。在现有船舶的总功率中, 柴油机占的比例最大。在军用舰艇方面, 常规动力潜艇几乎都采用柴油机(柴油机-电力推进系统); 大多数小型辅助舰艇也采用柴油机作为推进动力。在民用船舶方面, 柴油机动力占统治地位, 低速和中速柴油机广泛用于商船, 一般排水量为25000吨以下的商船多数采用柴油机。但柴油机单机功率较小, 致使它不能满足大、中型水面舰艇所需的全部功率要求, 因此只能用作巡航主机, 而加速机则采用燃气轮机。另外, 柴油机的振动较大, 影响反潜声纳的正常工作, 故目前大、中型水面舰艇的巡航主机也尽量不采用柴油机, 而选用燃气轮机。

燃气轮机是新型的舰船动力装置。它具有设备简单、工作可靠、续航力大、机动性好、振动小和运行维修方便等优点, 因而在军用舰艇上得到了日益广泛的应用。从六十年代末起, 美、英、苏等国的大、中型水面舰艇多数采用了燃气轮机动力装置。1976年全世界共有近千

艘燃气轮机舰船，总功率超过2000万马力。

实践表明，燃气轮机比蒸汽轮机和柴油机更能满足大、中型水面舰艇对动力装置提出的战术技术要求，这主要是：

1. 高速性

舰艇必须具有高速航行的性能。这就要求机组功率要大。一般地说，排水量为3000~8000吨的舰船的航速要达到30~40节，所需功率约为5~10万马力。美国DD963驱逐舰的排水量为7800吨，采用四台LM2500燃气轮机，总功率达到10万马力，航速大于30节。

2. 机动性

舰艇必须具有良好的机动性。这就要求机组能迅速起动、加速、换向和制动。燃气轮机的起动和加速时间是各类型动力装置中最短的，一般起动时间约1分钟，从停机到全工况只要数分钟。

3. 续航力

大、中型舰艇应具有较大的续航力。这就要求机组的重量轻、油耗率低。舰船燃气轮机的比重量仅为0.15~1公斤/马力。先进的燃气轮机的油耗率已下降至170克/马力·小时，还有进一步下降的趋势。

4. 生命力和可靠性

舰艇在受到较大的冲击负荷或部分破损情况下，机组应能持续运行。燃气轮机能较好地满足这项要求。

5. 隐蔽性

舰艇在运动时隐蔽性要好。这就要求机组的振动和噪音要小。燃气轮机的振动小，而且噪音已减小到可以接受的程度，如LM2500燃气轮机放进箱装体内，不仅使振动减小，而且噪音降至65分贝。

6. 自动化

现代舰艇应力求提高自动化水平。燃气轮机容易实现自动化控制。

表1-1列出了三种船用动力的先进机型的主要特性。从表中看出，燃气轮机在高速性（功率大）、续航力（比重量小）、机动性（起动和加速时间短）和隐蔽性（振动小）等方面都有较大的优越性，但它的油耗率稍高（与柴油机相比），寿命（翻修周期）较短，以及排气温度较高。由于燃气轮机的经济性较差，所以它在民船上的应用还较少。

采用燃气轮机动力装置的舰船，其推进方式有下列几种类型：

1. 全燃联合动力装置（COGAG）

每艘舰船装备两台以上相同型号的燃气轮机联合推进。例如，美国DD963驱逐舰装备四台LM2500燃气轮机，双轴推进，每轴并列安装两台燃气轮机。全速时，四台机组同时工作，总功率达10万马力，航速达30节以上。巡航时，每根轴上只要开动一台燃气轮机。

2. 全燃交替使用联合动力装置（COGOG）

每艘舰船装备不同型号的燃气轮机联合推进。其中功率较小、油耗率较低的燃气轮机作为巡航机组，功率较大的燃气轮机作为加速机组，两者交替使用。

3. 柴油机和燃气轮机联合动力装置（CODAG和CODOG）

同一舰艇上采用柴油机和燃气轮机联合推进。有两种型式：一种是柴油机和燃气轮机可同时使用的联合动力装置（CODAG）；另一种是柴油机和燃气轮机交替使用的联合动力装置（CODOG）。现有的柴-燃联合动力装置中，采用CODOG型的较多。这时柴油机作为巡航

机组，以利用其油耗率低的特点；燃气轮机作为加速机组，以利用其功率大、重量轻、尺寸小等特点。

4. 燃气轮机与蒸汽轮机联合动力装置（COGAS和COSAG）

COGAS型是燃气轮机和蒸汽轮机的复合动力装置。两者不仅在机械上，而且在热力系统上联接在一起。以燃气轮机产生基本功率，而利用废热锅炉回收燃气轮机高温排气的部分热能，产生蒸汽推动汽轮机发出附加功率，一般占总功率的25%左右。这可使输出功率增加和油耗率减少。

COSAG型是将蒸汽轮机和燃气轮机在机械上联接在一起产生推进动力，而热力系统是各自独立的。

表1-1 几种动力装置的性能比较

序 号	项 目 名 称	单 位	燃气轮机	蒸汽轮机	柴 油 机
1	型 号		LM2500	VAP (民船用)	PC2-5
2	最大功率	马 力	26800	27200	10200
3	单机重量	公 斤	21060 (机组)	55000 ^①	76000
4	比重量	公斤/马力	0.78	2.02 ^②	7.60
5	起动加速时间 (从0到最大工况)	分	2~3	~60	4~5
6	油耗率	克/马力·小时	170	175	152.6
7	振 动		小	小	大
8	排气温度	°C	525	~200	444
9	噪 音	分 贝	65 ^③	110	110
10	翻修周期	小 时	8000	100000	20000

注：①、②——未包括锅炉的重量；③——机组装在隔音箱体内。

§ 1-5 舰船燃气轮机的技术水平和发 展动向

一、舰船燃气轮机当前存在的主要问题

现有的舰船燃气轮机多由航空发动机改装而成，一般都采用简单开式热力循环，主要存在下列问题：

1. 油耗率较高，特别是变工况的经济性较差

现有的舰船燃气轮机的油耗率一般在200克/马力·小时以上，少数先进机型达到170~180克/马力·小时，比中速柴油机的油耗率要高。其主要原因是：（1）因受到材料和冷却技术的

限制,不能选用过高的燃气初温;(2)排气温度太高,一般在 $400\sim 500^{\circ}\text{C}$,有的超过 500°C ,造成很大的余热损失。例如,LM2500燃气轮机的热效率已达34%,但仍有66%的热能没有被利用而损失掉了。

舰船燃气轮机的变工况经济性较差,使得舰船续航力明显下降。一般水面舰艇以20~40%的总功率巡航,商船以85~90%的总功率航行。可见变工况的经济性对舰艇来说是重要的。燃气轮机变工况经济性较差的原因:一是压气机在变工况时性能恶化;二是燃气初温在低负荷时也要下降。

2. 舰船燃气轮机的寿命(翻修周期)较短

现有的舰船燃气轮机的寿命一般仅有4000~8000小时,例如LM2500、FT4A、SM1A等机型的寿命为8000小时,TM1A、TM3B等机型的寿命为4000小时,都比中速柴油机、蒸汽轮机的寿命要短得多。舰船燃气轮机的寿命较短是由于愈来愈高的燃气初温(高达 1200°C),以及高温热腐蚀所致。

3. 舰船燃气轮机的进、排气道尺寸过大

燃气轮机的进、排气压力低、流量大,使进、排气道尺寸太大。这不仅过多地占用舰船的宝贵的容积,而且在甲板上过大的开口,将引起舰船结构强度的降低。

4. 舰船燃气轮机的倒车、传动装置较复杂

现有的舰船燃气轮机本身不能倒车,全燃推进的舰船倒车均广泛采用倒车齿轮箱或变螺距桨,其构造和控制均较复杂。

上述缺点是舰船燃气轮机发展中的问题。随着燃气轮机技术的迅速发展,这些问题是可以逐步解决的。

二、舰船燃气轮机的技术水平和动向

1. 第二代舰船燃气轮机已经研制成功,并正在不断完善

第二代舰船燃气轮机与第一代相比,在循环参数和整机性能方面都有显著的提高,主要表现在:

(1)提高了燃气轮机的压比和初温。第一代舰船燃气轮机的压比小于12,燃气初温低于 1800°F (982°C)。第二代舰船燃气轮机的压比已提高到18~20,燃气初温提高至 $1100\sim 1200^{\circ}\text{C}$ 。

(2)经济性有了改善,油耗率有了较大的降低。第一代舰船燃气轮机的油耗率大于220克/马力·小时,一般在250克/马力·小时左右。第二代舰船燃气轮机的油耗率已降至170~180克/马力·小时。

(3)机组的翻修周期有了较大提高。第一代舰船燃气轮机的翻修周期一般小于2000~4000小时,而第二代产品的翻修周期已提高到8000~10000小时。

(4)比功和单机功率有了较大增加。压比和燃气初温提高了,可使每公斤工质所发出的功率(比功)显著增加。因而进、排气管的尺寸就能相对地减小。第二代舰船燃气轮机的单机功率已增至50000马力左右。

(5)在结构上,第二代舰船燃气轮机通常采用单元体结构和箱装体,使拆装、更换和维修十分简便。此外,机组的自动化水平进一步提高了,发展了状态监控技术。

第二代舰船燃气轮机的代表产品是美国通用电气公司(GE)的LM2500型。估计到1985年能研制成功的第二代舰船燃气轮机有美国GE公司的LM5000(最大功率为51600马力、燃气初温为 1202°C)、PW公司的FT9(最大功率为40000马力、压比为18、油耗率为

180克/马力·小时)英国RR公司的RB211(最大功率为29000马力、压比为19、燃气初温为092℃、油耗率为174~188克/马力·小时)、SM1A(最大功率为16750马力、压比为18.3、燃气初温为1036℃、油耗率为176~183克/马力·小时)等。

2. 继续采用高初参数的简单热力循环, 不断提高燃气初温, 相应地提高压比

燃气轮机在舰船上开始应用时, 主要从航空发动机进行舰用化改装而成。这样可保证机组具有结构紧凑、重量轻、尺寸小、操纵和维修简便、起动加速性能好等优点。现在燃气初温已达1200℃, 还将继续提高, 预计在八十年代末燃气初温将达到1600℃左右, 与此相适应的压比将提高到25以上。提高燃气初温的主要办法是:

(1) 发展先进的冷却技术

高温涡轮叶片、轮盘和燃烧室都需要冷却。目前涡轮叶片材料的允许温度约800℃。采用气膜、发散等气冷技术后, 可以降温400℃以上, 因此燃气初温已可达1200℃左右。近年来气冷技术的改善平均每年使燃气初温提高约25℃, 所以可望采用1600℃的燃气初温。但压比也相应地提高了, 致使压气机出口的空气温度大于400℃。要用它来冷却高温零件, 就须先将它冷却。

(2) 研制耐热的高强度材料

涡轮转子叶片在高温高转速下运转, 叶片材料将遇到热应力、热疲劳、热腐蚀和蠕变等严重影响强度和寿命的问题。目前有两种解决办法: 一种是采用叶片表面保护层(如渗钴、涂陶瓷等)及复合材料来提高其抗高温腐蚀性能; 另一种是研制工程陶瓷材料, 如 Si_3N_4 和 SiC 等, 其耐热度可达1600℃, 而且抗热震性能良好, 已在静叶片和燃烧室的高温零件上试用。近年来高温材料的发展, 平均每年可使燃气初温提高10℃左右。

3. 充分利用燃气轮机排气热量以提高机组的总效率

涡轮排气的温度一般为400~500℃, 这使大量的余热损失掉了。为了利用余热, 可以采用回热循环燃气轮机和燃气蒸汽复合循环装置。

(1) 回热循环燃气轮机

利用涡轮高温排气加热进入燃烧室的空气, 回收一部分余热, 可使燃气轮机的效率达到40%左右。目前正在研制高效轻小的回热器。

(2) 燃气蒸汽复合循环装置(COGAS)

利用涡轮排气的余热, 在废热锅炉内产生蒸汽以推动蒸汽轮机, 发出附加功率。这可使机组功率增加约25%, 油耗率下降约25%。因此, 不仅工业用燃气轮机已开始应用COGAS装置, 而且舰船上也已进入实船试验阶段。

在舰船上采用COGAS装置, 技术上没有特别的困难, 采用现有技术即可实现, 并可获得多方面的收益。现有的COGAS装置的油耗率为140~150克/马力·小时。采用COGAS循环的机组, 在变工况时经济性可得到明显改善, 这对舰艇用巡航机组来说是个重要的优点。

4. 进一步完善燃气轮机各主要部件的性能

轴流式压气机性能好坏是发展燃气轮机的关键。目前亚音速的轴流压气机的级压比小于1.5。正在研究级压比为2左右的跨音速级。整机压比提高后, 应改善级间匹配。采用可转导叶和双转子结构, 可使高压比的压气机仍有较宽的工作范围。当总压比达到16~18以上时, 高压涡轮的膨胀比平均可达2.5以上, 已属跨音速范围了。燃气初温的不断提高, 就必须对高压涡轮采用先进的冷却方法, 但强烈的冷却会使涡轮效率有所降低。目前在舰船燃气轮机中, 环管式燃烧室仍被广泛采用。随着压比的进一步提高(大于18), 全环形燃烧室将成为

发展方向。

5. 发展舰艇专用小功率巡航燃气轮机

在燃气轮机用于舰艇的初始阶段，它主要作为加速机组，而用柴油机作为低速巡航机组。随后，英国等国采用COGOG的装舰方式，用小功率燃气轮机进行巡航，大功率燃气轮机进行加速。由于近年来世界能源危机的影响，国外对专用小功率巡航机组的研制日益重视。例如美国正在研制PF-990、LM500、MARS，英国正在研制RM1C等机型，其主要性能参数见表1-2。

表1-2 几种小功率燃气轮机的性能

型 号	功 率(马力)	压 比	燃 气 初 温 (°C)	油耗率(克/马力·小时)
PF-990	5000	11.5	1093	218
LM500	5300	14	1113	204
MARS	12000	16	1093	191
RM1C	5340	13	1007	213

6. 改进舰用燃气轮机的倒车技术

目前舰船燃气轮机采用变距螺旋桨或倒车齿轮箱进行倒车，前者过于复杂，后者过于笨重。目前正在研制行星齿轮减速倒车装置，以实现大功率倒车，并大大减小尺寸和重量。但摩擦制动发热的问题尚未解决。此外，还研制直接倒车燃气轮机和低转速直接传动燃气轮机。

第二章 燃气轮机的热力循环

燃气轮机在发展初期曾采用过等容燃烧方式加热。但后来基本上都采用了等压燃烧方式加热，这是因为它更适宜于连续式机械不间断的工作特点。因此，本章只讨论等压燃烧燃气轮机。

§ 2-1 燃气轮机热力循环的主要技术指标

燃气轮机可以采用开式的、闭式的或半闭式的热力循环。开式循环燃气轮机从大气中吸取空气作工质，工质经过压缩、加热、膨胀做功后排回大气放热（见图1-1）。它通常采用内燃方式加热，即燃料直接喷入工质（空气）中燃烧。闭式循环燃气轮机可采用非空气（例如氮气等惰性气体）作工质，它采用外燃方式加热工质，而工质的压缩、加热、膨胀和放热过程都在封闭的装置中进行。半闭式循环也以空气作工质，循环中工质的主要部分在装置中循环使用，但向大气排出一部分燃烧后的废气，同时也吸入一部分新鲜空气作补充。现代燃气轮机中采用开式热力循环的最为普遍，如在航空和舰船燃气轮机中几乎都采用开式循环。

研究热力循环的目的在于：分析各种因素对燃气轮机性能的影响；合理选择循环参数，以提高机组的性能。为了评价燃气轮机不同热力循环的优缺点，一般采用下列主要技术指标。

一、热力参数

1. 压比 π

$$\pi = \frac{p_2^*}{p_1^*}, \quad (2-1)$$

式中， p_1^* ——压气机进口的气流滞止压力（总压）； p_2^* ——压气机出口的气流滞止压力〔巴〕。

压比说明工质在压气机内受压缩的程度。

2. 温比 τ

$$\tau = \frac{T_3^*}{T_1^*}, \quad (2-2)$$

式中， T_1^* ——压气机进口气流滞止温度（总温）； T_3^* ——涡轮进口燃气的滞止温度〔K〕。

温比是循环中工质最高滞止温度与最低滞止温度之比，代表工质被加热的程度。

二、性能参数

1. 比功 L

$$L = L_T - L_c, \quad (2-3)$$

式中， L_T ——涡轮的比功〔千焦/千克〕； L_c ——压气机的比功〔千焦/千克〕。

式（2-3）忽略了压气机和涡轮流量的差异以及机械损失。燃气轮机的比功是指进入压气机的单位质量工质完成一个循环后对外所能输出的机械功（净功或称轴功）。

燃气轮机比功的大小，在一定程度上反映了机组尺寸的大小。对于相同功率的燃气轮机，比功大时流经机组的工质流量较小，因而机组的尺寸也就可以造得小些。

2. 效率 η

燃气轮机循环效率 η 用下式表示, 即

$$\eta = \frac{L}{q_1} = \frac{L}{f H_u}, \quad (2-4)$$

式中, H_u ——燃料的低热值[千焦/千克]; f ——加给单位质量空气的燃料量, 即燃料空气比(公斤燃料/公斤空气)。

燃料空气比

$$f = \frac{G_f}{G}, \quad (2-5)$$

式中, G_f ——燃料流量[千克/秒]; G ——空气流量[千克/秒]。

循环效率 η 是工质在燃气轮机中完成一个循环时, 外界加给工质的热量 q_1 (输入) 转化为循环净功 L (输出) 的百分数, 也就是输出的净功与输入的热量之比值。

燃气轮机的经济性常用油耗率 g_s 来表示, 它是产生1千瓦·小时的功率所消耗的燃料量[千克], 即

$$g_s = \frac{3600 G_f}{N_s} = \frac{B}{N_s} [\text{千克/千瓦} \cdot \text{小时}], \quad (2-6)$$

式中, B ——每小时的燃料消耗量[千克/小时]; N_s ——燃气轮机输出的功率[千瓦]。

显然

$$N_s = GL [\text{千瓦}]. \quad (2-7)$$

油耗率 g_s 和效率 η 有下列关系:

$$\eta = \frac{L}{f H_u} = \frac{GL}{G_f H_u} = \frac{3600 N_s}{B H_u} = \frac{3600}{g_s H_u}. \quad (2-8)$$

或

$$g_s = \frac{3600}{\eta H_u}. \quad (2-9)$$

显然, 燃气轮机的热效率 η 愈高, 则机组发出相同功率所消耗的燃料量就愈少。

3. 有用功系数 φ

有用功系数 φ 是燃气轮机比功 L 与涡轮比功 L_T 之比值, 即

$$\varphi = \frac{L}{L_T} = \frac{L_T - L_c}{L_T} = 1 - \frac{L_c}{L_T}. \quad (2-10)$$

系数 φ 说明, 涡轮发出的比功中有多少部分用来带动负荷。例如, $\varphi = 0.35$, 则说明涡轮发出的比功中有65%用来带动压气机, 而只有35%用来带动负荷(如螺旋桨或发电机等)。

利用系数 φ 可以评定涡轮和压气机中的能量损失对机组循环比功的影响程度。假定涡轮比功 L_T 变化 ΔL_T , 压气机的比功 L_c 变化 ΔL_c , 则循环比功变化

$$\Delta L = \Delta L_T - \Delta L_c,$$

$$\text{即} \quad \frac{\Delta L}{L} = \frac{\Delta L_T}{L} - \frac{\Delta L_c}{L_T - L_c} = \frac{\Delta L_T}{L_T} \cdot \frac{L_T}{L} - \frac{\Delta L_c}{L_c} \cdot \frac{\frac{L_c}{L_T}}{1 - \frac{L_c}{L_T}}.$$

考虑到公式(2-10), 则有

$$\frac{\Delta L}{L} = \frac{1}{\varphi} \cdot \frac{\Delta L_T}{L_T} - \frac{1 - \varphi}{\varphi} \cdot \frac{\Delta L_c}{L_c}. \quad (2-11)$$

式(2-11)说明, 系数 φ 愈大, 则涡轮比功的相对变化 $\Delta L_T/L_T$ 和压气机比功的相对变化 $\Delta L_c/L_c$ 对循环比功相对变化 $\Delta L/L$ 的影响愈小。例如, 在变工况时涡轮和压气机的比功各减少1%, 即: $\Delta L_T/L_T = -1\%$ 及 $\Delta L_c/L_c = -1\%$, 那么根据公式(2-11), 当 $\varphi = 0.30$ 时,

循环比功相对变化 $\Delta L/L = -5.7\%$ ；当 $\varphi = 0.40$ 时，则 $\Delta L/L = -4\%$ 。

有用功系数 φ 大者，其循环比功 L 占涡轮比功 L_T 的比例就大，故相等功率的机组中， φ 大的可造得小些。 φ 大时压气机比功 L_C 占涡轮比功 L_T 的比例小，故压气机对机组性能的影响也较小。

§ 2-2 燃气轮机的简单循环

在工质运动的主要流程中，只有压气机、燃烧室和涡轮三大部件组成的燃气轮机循环，称为简单循环，如图2-1所示。在图中：

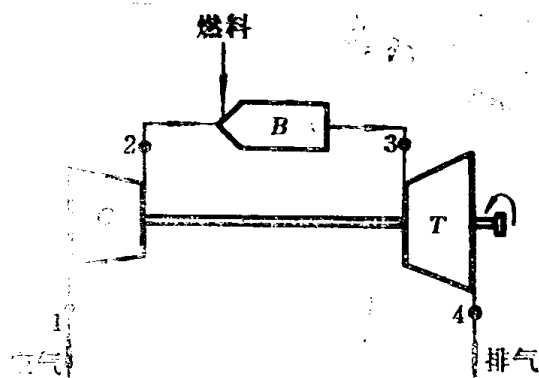


图2-1 燃气轮机简单循环原理图

C—压气机；B—燃烧室；T—涡轮

- 1——压气机的进口；
- 2——压气机的出口（燃烧室的进口）；
- 3——涡轮进口（燃烧室的出口）；
- 4——涡轮的出口。

往后将采用上述标号作为该处气体状态参数的注脚，如 p_1^* ， T_1^* 分别表示压气机进口处气体的滞止压力和滞止温度。

一、理想简单循环

燃气轮机的理想简单循环由四个热力过程组成：气体在压气机中进行的等熵压缩过程；空气和燃料在燃烧室中进行的等压燃烧过程；燃气在涡轮中进行的等熵膨胀过程；燃气从涡轮排出后的等压放热过程。

在研究循环时，利用热力学中的温-熵（ $T-S$ ）图和压-容（ $p-v$ ）图是很方便的。它可以形象地表示出循环中的热力过程及其气体参数变化的特点。为此，图2-2绘出了理想简单循环的 $T-S$ 图和 $p-v$ 图。

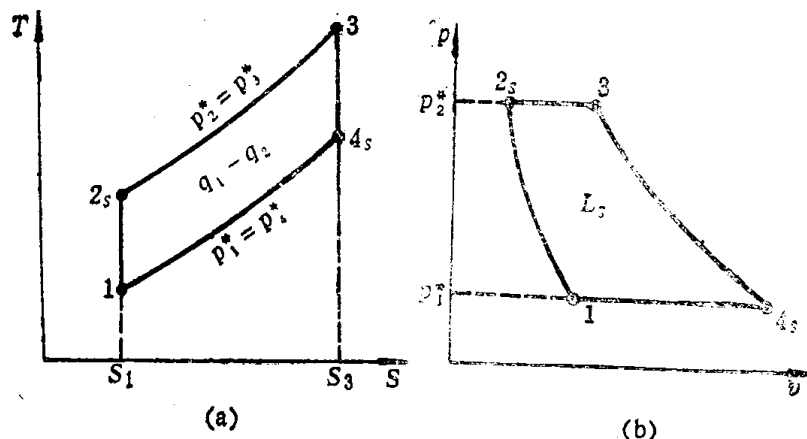


图2-2 理想简单循环的 $T-S$ 图(a)和 $p-v$ 图(b)

下面分析理想循环的热力过程，并讨论循环的比功和热效率。

1. 热力过程

(1) 等熵压缩过程 气体在压气机中从进口状态1（ p_1^* ， T_1^* ）等熵压缩至出口状态2s（ p_{2s}^* ， T_{2s}^* ）。这时，气体和外界没有热交换（ $dq=0$ ），且熵不变化（ $dS=0$ ）。因此，热力过程线1~2s，在 $T-S$ 图上是一条等熵线，而在 $p-v$ 图上是一条压力逐渐增高、比容逐渐减小的过程线，气体参数的变化遵守 $pv^k = \text{常数}$ （ k 是定压比热和定容比热的比值）的规律。

等熵压缩比功

$$L_{cs} = c_p (T_{2s}^* - T_1^*) \text{ [千焦/千克]},$$

式中, c_p —— 气体的定压比热 [千焦/千克·K]。

等熵压缩比功 L_{cs} 可以用 p - v 图和 T - S 图上的相应面积来表示, 如在 p - v 图上为

$$L_{cs} = \text{面积} 12_s p_2^* p_1^*.$$

(2) 等压燃烧过程 当气体在燃烧室中和燃油混合并在恒定压力下燃烧时, 气体在等压下从燃料燃烧中吸收热量 q_1 , 从而导致气体的温度和比容增大, 即 $T_3^* > T_{2s}^*$ 及 $v_3 > v_{2s}$. 热力过程线 $2_s \sim 3$ 在 p - v 图上是一条平行于横坐标轴的水平线, 而在 T - S 图上是一条温度和熵值逐渐增加的等压线.

吸热量为

$$q_1 = c_p (T_3^* - T_{2s}^*) \text{ [千焦/千克]},$$

而在 T - S 图上

$$q_1 = \text{面积} 2_s 3 S_3 S_1 2_s.$$

(3) 等熵膨胀过程 气体在涡轮中从进口状态 3 (p_3^*, T_3^*) 等熵膨胀至出口状态 4_s (p_4^*, T_{4s}^*). 这时, $dq = 0$ 及 $dS = 0$. 热力过程线 $3 \sim 4_s$ 在 T - S 图上是一条等熵线, 而在 p - v 图上是一条压力逐渐降低、比容逐渐增大的曲线. 气体状态参数的变化遵守 $pv^k = \text{常数}$ 的规律.

涡轮的等熵膨胀功

$$L_{Ts} = c_p (T_3^* - T_{4s}^*) \text{ [千焦/千克]},$$

而在 p - v 图上

$$L_{Ts} = \text{面积} 3 4_s p_1^* p_2^*.$$

(4) 等压放热过程 工质从涡轮排出后, 在等压下向外界放出热量 q_2 , 使工质的温度在等压下逐渐降低至压气机进口温度 T_1^* . 因此, 放热过程的 $dq < 0$, $dT < 0$. 热力过程线 $4_s \sim 1$ 在 p - v 图上是一条平行于横坐标的水平线.

工质的放热量

$$q_2 = c_p (T_{4s}^* - T_1^*) \text{ [千焦/千克]},$$

而在 T - S 图上

$$q_2 = \text{面积} 4_s S_3 S_1 4_s.$$

2. 理想简单循环的比功

$$L_s = L_{Ts} - L_{cs} = c_p (T_3^* - T_{4s}^*) - c_p (T_{2s}^* - T_1^*)$$

$$= c_p (T_3^* - T_{2s}^*) - c_p (T_{4s}^* - T_1^*) = q_1 - q_2 \text{ [千焦/千克]}. \quad (2-12)$$

循环比功 L_s 可以用 p - v 图或 T - S 图上的面积 $12_s 3 4_s 1$ 表示.

公式 (2-12) 可变为

$$\begin{aligned} L_s &= c_p T_3^* \left(1 - \frac{T_{4s}^*}{T_3^*} \right) - c_p T_1^* \left(\frac{T_{2s}^*}{T_1^*} - 1 \right) \\ &= c_p T_3^* \left(1 - \frac{1}{\pi^{\frac{k-1}{k}}} \right) - c_p T_1^* \left(\pi^{\frac{k-1}{k}} - 1 \right) \end{aligned}$$