

燃气轮机与 燃气-蒸汽联合循环

刘万琨 魏毓璞 赵萍 李银凤 编著



化学工业出版社
环境·能源出版中心

燃气轮机与燃气-蒸汽 联合循环

刘万琨 魏毓璞 赵 萍 李银凤 编著



化学工业出版社
环境·能源出版中心

· 北京 ·

图书在版编目 (CIP) 数据

燃气轮机与燃气-蒸汽联合循环/刘万琨等编著. —北京:
化学工业出版社, 2006. 3
ISBN 7-5025-8252-5

I. 燃… II. 刘… III. ①燃气轮机②蒸汽-燃气联合循
环 IV. ①TK47②TK14

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2006) 第 017249 号

燃气轮机与燃气-蒸汽联合循环

刘万琨 魏毓璞 赵萍 李银凤 编著

责任编辑: 郑宇印 戴燕红

文字编辑: 陈喆

责任校对: 宋玮

封面设计: 胡艳玮

*

化学工业出版社 出版发行
环境·能源出版中心

(北京市朝阳区惠新里 3 号 邮政编码 100029)

购书咨询: (010) 64982530

(010) 64918013

购书传真: (010) 64982630

<http://www.cip.com.cn>

*

新华书店北京发行所经销

北京市兴顺印刷厂印装

开本 850mm×1168mm 1/32 印张 11½ 字数 323 千字

2006 年 3 月第 1 版 2006 年 3 月北京第 1 次印刷

ISBN 7-5025-8252-5

定 价: 38.00 元

版权所有 违者必究

该书如有缺页、倒页、脱页者, 本社发行部负责退换

序

燃气轮机是大型动力设备。

国家实施“西气东输”的能源战略，以解决东部沿海经济发达地区的能源需要。天然气燃烧后，通过燃气轮机转为电能，以满足东部对电力的需求。

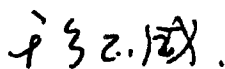
燃气轮机将天然气、浅层煤气、液化天然气、柴油等燃料的燃烧热量高效转化为电能。涉及燃烧学、空气动力学、热力学、传热学等学科；另外，同样涉及材料、强度、振动、转子动力学、自动控制等学科。

本书以浅显语言，深入浅出地向读者介绍燃气轮机。此书原为东方汽轮机厂技术人员、管理人员和工人学习燃气轮机之用，是一本集制造、管理、进一步研究燃气轮机的入门书。

作者刘万琨同志，为研究员级高级工程师，一生从事燃气轮机、汽轮机的设计工作，对上述机械知之甚深。因工作需要，工厂及国家发展动力设备的需要，精心耕耘，收集资料，潜心创作，特将其心得供给读者。

愿此书为读者提供一个愉快的学习途径。

东方汽轮机厂厂长



2005. 6. 23

前 言

燃气轮机是一种高技术的动力机械，在一定程度上反映了一个国家的综合国力和工业化水平。即便如此，目前世界上也只有少数几个工业发达的国家有能力研制、开发燃气轮机设备。

我国在 20 世纪 50 年代后期，就开始了燃气轮机的自行开发研制。哈尔滨汽轮机厂从 1959 年开始自行设计、制造 3000 马力（1 马力=735.499W）机车用的燃气轮机，用模化法设计压比为 4.6 的压气机，这台设备曾在铁路上运行过，作者曾参加了这台燃气轮机的设计和试制，有较多的收获和体会；20 世纪 60 年代初，上海汽轮机厂测绘制造了 BBC 公司的 6200kW 移动式列车电站燃气轮机，并制造过多台在电网远端应用，后来又自行设计过 25000kW 的固定电站燃气轮机；20 世纪 60 年代末期，由哈尔滨汽轮机厂援建的四川东方汽轮机厂，根据国家需要，设计了青藏高原铁路用的 8000 马力分轴式机车燃气轮机，用加零级的方法设计了压比为 6 的压气机，后来改为试制 6000kW 固定电站燃气轮机。这些燃气轮机的设计指标水平，与国外当时的水平是相差不大的。由于综合国力方面的原因，技术储备不足，材料和机械加工等不能满足需要，燃气轮机的发展缓慢。到 20 世纪 70 年代后期，三大厂不得不先后停止了燃气轮机的开发与研制。

改革开放 20 余年来，我国的综合国力和工业化水平得到很大的发展，进口了数百台各国的燃气轮机电站。2001 年，国家计委又采取“设备换技术”的方针，打捆招标了 21 台燃气轮机联合循环电站。东方汽轮机厂与三菱公司中标 10 台，哈尔滨汽轮机厂与 GE 公司中标 11 台，再一次拉开了在我国开发研制大型工业用燃气轮机的序幕。

燃气轮机的发展迫切需要一大批专业人才，目前高校一时又不能满足工厂发展对人才的紧迫需求，在这种形势下，编著了本书。

本书适合有一定热力机械基本知识的制造厂设计、制造人员，电厂运行和电厂项目立项管理人员，在短期内掌握有关燃气轮机的必备基础知识，尽快适应从事燃气轮机工作的需要。

本书共分7章，第1~4章介绍有关燃气轮机和联合循环的基本原理和主要计算；第5章介绍燃气轮机和联合循环的调节、辅机和启动运行特点，燃气轮机虽然主要用于发电和航空发动机，但也适用于几乎所有的设备拖动；第6章介绍燃气轮机最主要的应用；第7章介绍一些世界上最典型的燃气轮机制造商、最典型的燃气轮机和联合循环的性能参数和比造价，据此对燃气轮机和联合循环的现状与世界发展水平会有一个基本的了解。附录介绍了一些燃气轮机的特殊问题，例如大气对燃气轮机性能的影响；热部件寿命消耗和更换问题；机组热性能的老化修正的必要性和修正方法；世界上最典型的一些燃气轮机制造标准等。

本书的编著得到电机工程学会热电专业委员会的帮助，特别是科教中心的大力支持，他们对辅机、运行部分提出很多有用的建议；本书还得到马爱梅绘图师等的大力协助，并参考了相关文献，在此一并表示感谢。

由于编者水平有限，疏漏之处在所难免，恳请读者批评指正。

编者
2005.9

内 容 提 要

本书介绍了燃气轮机的基本工作原理，工程适用的燃气轮机计算方法；对燃气轮机的结构、调节及其运行、维护等特点进行了说明和分析；还对燃气轮机的各种用途，特别是用于燃气-蒸汽联合循环进行了详细的介绍；最后列出了目前世界上最先进的典型燃气轮机、联合循环的性能数据、比价以及最先进燃气轮机制造商的设计、制造和燃气轮机系列。全书可分为两大部分，第一部分是基本原理，第二部分是工程应用。对燃气轮机的一些特殊问题，例如技术经济分析、寿命预估、大气条件对性能的影响等，在附录里作了介绍。

本书适合于在制造厂从事设计制造的技术和管理人员、电厂运行技术人员以及电厂项目立项的管理人员阅读，也适合作为高等院校热能专业的教学参考书。

目 录

| | |
|--|-----|
| 第 1 章 基本知识 | 1 |
| 1.1 燃气轮机发展简史 | 1 |
| 1.2 燃气轮机和蒸汽轮机比较 | 15 |
| 第 2 章 燃气轮机基本原理和计算 | 19 |
| 2.1 燃气轮机循环的过程方程 | 19 |
| 2.2 等压燃气轮机理想简单循环 | 27 |
| 2.3 轴流式压气机原理和计算 | 37 |
| 2.4 燃料燃烧理论和燃烧室计算 | 65 |
| 2.5 透平原理和计算 | 87 |
| 第 3 章 燃气轮机结构特点 | 114 |
| 3.1 燃气轮机的分类 | 114 |
| 3.2 各种燃气轮机的特点 | 116 |
| 3.3 典型制造商的燃气轮机结构特点 | 120 |
| 3.4 PG5331 型单轴燃气轮机结构特点 | 141 |
| 3.5 高温部件的冷却系统与热膨胀问题 | 148 |
| 3.6 燃气轮机的基础和支承 | 156 |
| 第 4 章 燃气-蒸汽联合循环原理和计算 | 165 |
| 4.1 燃气-蒸汽联合循环原理 | 165 |
| 4.2 燃气轮机循环计算 | 171 |
| 4.3 燃气-蒸汽联合循环效率计算 | 176 |
| 第 5 章 燃气轮机和联合循环的调节、辅机、运行与维护 | 178 |
| 5.1 燃气轮机和联合循环的调节系统 | 178 |
| 5.2 燃气轮机和联合循环辅机系统 | 198 |
| 5.3 燃气轮机和联合循环的启动、运行与维护 | 248 |
| 第 6 章 燃气轮机应用 | 259 |
| 6.1 联合循环发电 | 259 |
| 6.2 航空发动机用燃气轮机 | 262 |
| 6.3 原子能气轮机 | 270 |

| | | |
|-------------|------------------------------|------------|
| 6.4 | 驱动用燃气轮机 | 273 |
| 6.5 | 船用燃气轮机 | 274 |
| 6.6 | 机车燃气轮机 | 278 |
| 6.7 | 移动电站燃气轮机 | 281 |
| 6.8 | 小功率燃气轮机及燃气轮机汽车 | 283 |
| 6.9 | 微型燃气轮机和分布式电源系统 | 287 |
| 第7章 | 世界上典型的燃气轮机和联合循环 | 295 |
| 7.1 | 典型的燃气轮机制造商 | 295 |
| 7.2 | 典型的燃气轮机 | 316 |
| 7.3 | 典型的燃气-蒸汽联合循环 | 321 |
| 附录 | | 325 |
| 附录 1 | 燃气轮机性能变化分析 | 325 |
| 附录 2 | 元件特性对燃气轮机性能的影响 | 327 |
| 附录 3 | 燃气轮机性能老化修正方法 | 328 |
| 附录 4 | 燃气轮机维修周期和零件寿命预估 | 334 |
| 附录 5 | 燃气轮机维修规范 | 341 |
| 附录 6 | 燃气轮机电厂发电经济性分析 | 345 |
| 附录 7 | 联合循环用汽轮机特点 | 351 |
| 附录 8 | 联合循环余热锅炉参数规范 | 354 |
| 附录 9 | 燃气轮机国外标准 | 356 |
| 参考文献 | | 359 |

第 1 章 基本知识

燃气轮机的原理并不陌生，早在一千多年前，我国民间流行的走马灯就是一种最典型的燃气轮机。由于燃气轮机的高技术要求，直到 20 世纪 40 年代，它才得以工业应用。由于它的优势，其后得到迅速发展。本章将介绍燃气轮机的发展简史和与汽轮机相比较的各种优点。

1.1 燃气轮机发展简史

燃气轮机是一种涡轮式热力流体机械，由压气机、燃烧室、透平等主要部件组成。涡轮式热力流体机械除燃气轮机外，还有闭式循环气轮机和蒸汽轮机，以及多种联合形式的热力流体机械。典型的燃气轮机结构如图 1-1 所示，左侧是压气机，中间是燃烧室，右侧是透平。

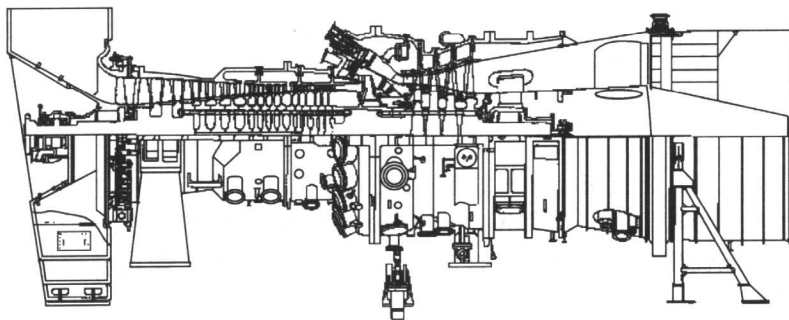


图 1-1 典型的燃气轮机 (F 级)

大多数燃气轮机采用开式等压循环，以空气作工质（工作介质），用内燃方式吸热，膨胀做功后的废气排向大气，完成循环排热。热力循环中的压缩、加热与膨胀做功过程，分别由压气机、燃

烧室与透平完成，并连续不断地工作。因此，燃气轮机是一种连续流动式热机，如图 1-2 所示。

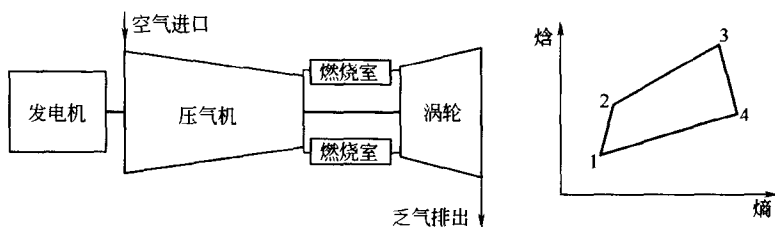


图 1-2 燃气轮机开式循环

闭式循环的气轮机，工质被加压后用外燃方式（例如用空气锅炉、原子能反应堆或其他热交换器）加热，膨胀做功后的工质用热交换器冷却排热，经冷却后的工质再回到加压器的进口，形成闭式循环。气轮机可以采用空气作为工质，也可采用其他气体，例如氦气作为工质。

蒸汽轮机动力厂实质上也是闭式“气”轮机的一种变相形式，它以水及其蒸汽作工质，用给水泵代替压气机加压工质，用锅炉加热和冷凝器冷却排热。

燃气轮机或者它的部件——压气机或透平，还可同化工工艺流程、冶金工艺流程或其他热力机械组成“工业过程式燃气轮机”。

例如，在化工、冶金等工业过程中，工艺流程需要高压空气和产出有一定压力的高温废气，燃气轮机的压气机可向工艺流程提供压力空气；工艺流程产出的有一定压力的高温废气，可供透平膨胀做功，带动压气机和发电机，这种透平一般称为“乏气透平”，从而组成优化的工艺流程，这就是综合利用能量的工业过程式燃气轮机。

带涡轮增压的内燃机是燃气轮机与活塞式内燃机相联合的一种热力循环形式。高压压缩过程、燃烧过程和高温高压膨胀过程是在活塞式内燃机汽缸内进行的间歇式过程，低压压缩过程和低压膨胀过程在增压器和废气透平中进行，组成带涡轮增压的内燃机循环。

燃气-蒸汽联合循环是燃气轮机和汽轮机组成的另一种废热利

用式热力循环 [图 1-3(a)], 燃气轮机的高温低压排气, 在余热锅炉中加热水, 变成高温高压蒸汽, 再导入汽轮机中膨胀做功。图 1-3(b) 是燃气-蒸汽联合循环的热力焓/熵图, 顶部是燃气轮机开式循环, 底部是蒸汽轮机闭式循环。

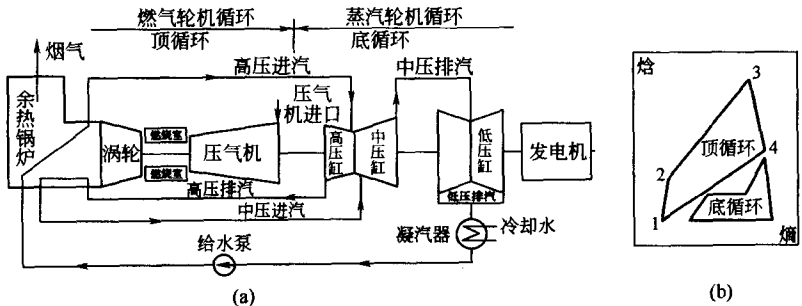


图 1-3 燃气-蒸汽联合循环

1.1.1 燃气轮机的最早雏形

公元 690 年左右, 我国张遂曾用燃气使铜轮转动; 公元 959 年前后 (北宋前), 我国民间广泛流行的走马灯 (图 1-4) 就是一种轴流式燃气轮机雏形, 空气被冲压吸入, 经灯燃烧后的热燃气推动一个纸质转轮, 并带动走马。该装置包含了空气压缩、油燃烧和燃气膨胀几个最基本的燃气轮机热力过程, 发出的功带动负荷——走马。

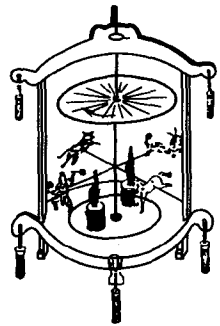


图 1-4 走马灯

外国对燃气轮机雏形的认识要晚得多, 1550 年, 达·芬奇 (Leonardo da Vinci) 才设计出利用壁炉中的烟气来转动叶轮。至于有意识地根据热力循环知识来设计燃气轮机的活动, 约在 18 世纪末才开始。1791 年, 巴贝尔 (J. Barber) 建议过用往复式压气机组成的燃气轮机, 但未能实现。1900 年前后, 司徒尔兹 (F. Stolze)、拉马尔 (C. Lamale) 和阿尔芒哥 (R. Armengaud) 等人分别试验了一些雏形燃气轮机, 可是由于效

率低，都不能发出功率。

1907 年左右，法国涡轮机协会制造的燃气轮机获得了 3% 的效率。同时，霍尔兹瓦斯 (H. Holzwarth) 设计了 50 马力 (1 马力 = 735.499W, 下同) 的等容燃烧式燃气轮机，它是第一台在工业上能长期运转的燃气轮机装置。

以后十年中，内燃机用的废气涡轮增压器得到了较多的注意和试验。从 1929 年起，BBC 公司制造了许多同 Velox 蒸汽锅炉联用的增压燃气轮机。1936 年，制成了石油工业 Houdry 催化裂化过程中采用的增压燃气轮机，积累了较多的经验。

1939 年，BBC 又制成了第一台功率较大的发电用燃气轮机，这台 4000kW 燃气轮机装置的效率达到 18%。同年，EW 公司 (后并入 BBC) 造成第一台闭式循环气轮机，效率达 31.5%。同年，Heinkel 工厂的第一台涡轮喷气式发动机试飞成功。1940 年，BBC 又制成了世界上第一台燃气轮机车，功率为 1618.1kW，效率 16%。

20 世纪 40 年代，世界生产了第一代工业上实用的燃气轮机和喷气发动机，并积累了较多的运行经验，同时，燃气轮机工业和科学系统开始形成。在一些中等功率的动力用途中，第一代燃气轮机经受了考验，人们也得到了更多的经验。1947 年，MV 公司 (现为 GEC) 制造的第一台舰用燃气轮机试航成功。尤其是在 20 世纪 40 年代后期 (第二次世界大战期间)，航空涡轮喷气发动机由于比活塞式发动机轻、小、功率大，所以得到迅速发展，在军用飞机方面已获得了最广泛的应用。

20 世纪之前，冶金工业还不能提供耐高温和高转速运转的燃气轮机叶片材料，制造工艺也不能达到燃气轮机所要求的加工水平，人们对空气动力学的认识，还不足以设计出效率较高的压气机，这些客观的低下的社会生产力，限制了燃气轮机成功的可能。而要求较低的热机，如蒸汽机首先获得成功，从而开始了第一次产业革命。通过产业革命，提高了社会生产力和人们的社会实践知识，为以后发展更新型的机械创造了条件。

燃气轮机工业是从蒸汽轮机和航空发动机两大工业发展而来，

燃气轮机对压气机的要求，比一般用途的透平压气机要高，对燃烧室的要求比锅炉高，对透平的要求比蒸汽轮机高，因此，20世纪30年代以前虽经多次试验，但仍未获得实用。

1939年，瑞士BBC公司成功制造世界上第一台电站用燃气轮机。随着高温材料、工程热物理、机械制造以及自动控制等领域的科技进步，燃气轮机技术得以迅速发展，它比较集中地反映了多理论学科和多工程领域科技发展的综合水平。

按技术特征，燃气轮机的发展可分为四代：过去的半个世纪，世界发展了头两代工业燃气轮机，其传统的提高性能的途径是不断提高透平初温，相应地增大压气机压比和完善有关部件；未来50年，可能利用新材料和新技术的突破，再开发出两代新的燃气轮机。

1.1.2 第一代燃气轮机

20世纪50年代初，透平初温 t_3 只有600~700℃，那时主要靠耐热材料性能的改善来提高透平初温，每年平均上升约10℃；20世纪60年代后，开始借助空气冷却技术提高透平初温，每年平均上升约20℃；到了20世纪80年代，透平初温已升至850~1000℃。

初期由于参数低、性能差，曾采取多轴、间冷、再热、回热等复杂循环和烧廉价重油等措施来提高燃气轮机的经济性，但这却带来系统、结构复杂化，燃气轮机的优点得不到体现，运行可靠性也下降。所以，很快又回到高参数、高性能、大型化的发展方向。

第一代燃气轮机技术特点：单轴重型结构（航空移植型除外），初期用高温合金，简单空冷技术，亚音速压气机，机械液压式/模拟式电子调节系统。性能参数特征：燃气温度 $t_3 < 1000^\circ\text{C}$ ，简单循环效率 $\eta_c < 30\%$ 。

最典型的第一代燃气轮机介绍如下。

(1) 前苏联H3JI工厂生产的GT-600-1.5型燃气轮机（图1-5）燃气温度600℃，压气机压比4.6，燃气轮机功率1500kW，压气机级数16级，透平级数5级，单轴，转速5000r/min。

(2) 前苏联JIM3工厂生产的GT-12-3型燃气轮机 前苏联JIM3工厂生产的型号为GT-12-3型的12000kW燃气轮机，比较

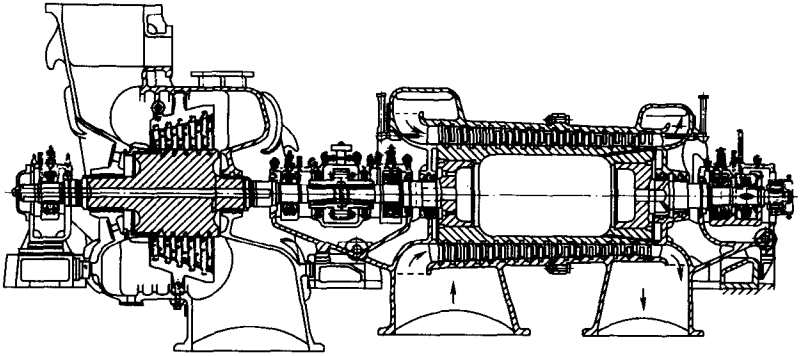


图 1-5 前苏联 H3JI 厂 GT-600-1.5 型燃气轮机总剖面图

典型地代表了 20 世纪 50 年代燃气轮机的发展趋向。由于燃气温度不高，提高装置效率的方式采用多轴、多次压缩、两次燃烧和回热循环（图 1-6）。

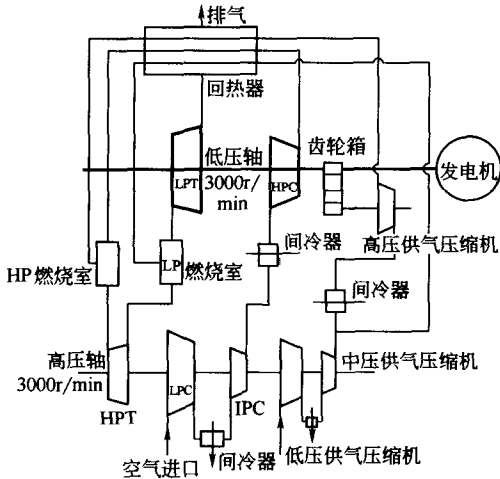


图 1-6 前苏联 JIM3 工厂 GT-12-3 型燃气轮机系统

低压压气机 (LPC) 和中压压气机 (IPC) 在低压轴 (3000r/min)，由高压透平 (HPT) 带动。高压压气机 (HPC) 在高压轴

(3000r/min)，由低压透平(LPT)带动。低压透平的排气在回热器中加热高压压气机排出的空气，被回热加热的空气在高压燃烧室中加燃料燃烧。高温燃气(650℃)在高压透平中膨胀做功，排气在低压燃烧室中加燃料再燃，再燃的燃气(650℃)在低压透平中膨胀做功。中、低压压气机和高、中压压气机之间都有空气冷却器，以减小压气机耗功，提高装置效率。高压轴只带动燃料供气压气机，低压轴除带动燃料供气压气机外，还带动一个12000kW的发电机。

装置总压缩比为12.2，低、中、高压气机压比分别为2.7、2.1、2.5，级数分别为20、13、10，透平级数分别为5、4。空气流量70kg/s(252t/h，相当于一台60MW汽轮机的进汽量)，装置效率27%。

(3) 瑞士BBC 6000kW燃气轮机(图1-7) 燃气温度750℃，压气机压比5.5，压气机级数17级，透平级数7级，转速4750r/min，燃气轮机装置效率19%。

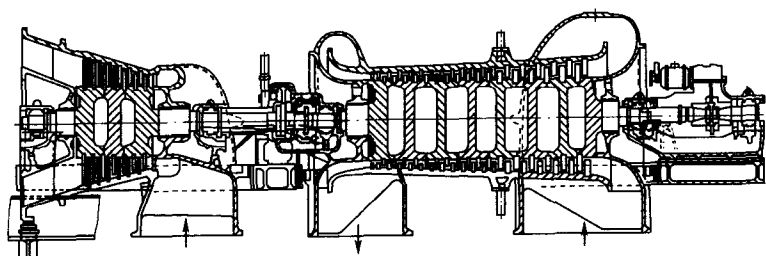


图 1-7 瑞士 BBC 6000kW 燃气轮机总剖面图

(4) 美国 GE 公司 21500kW 燃气轮机(图 1-8) 燃气温度750℃，压气机压比6，压气机级数15级，透平级数2级，压气机流量123kg/s，燃气轮机装置效率20%。

在上述许多机组的设计及运行经验基础上，工业用燃气轮机被研制出来；在航空工业中，喷气发动机基本上取代了活塞式发动机，航空轻型结构的设计经验应用到运输式及固定式燃气轮机结构设计上。到20世纪50年代后期，这些轻型结构的工业用燃气轮机，在和根据蒸汽轮机传统设计的重型结构燃气轮机的竞争中，占据了优势。

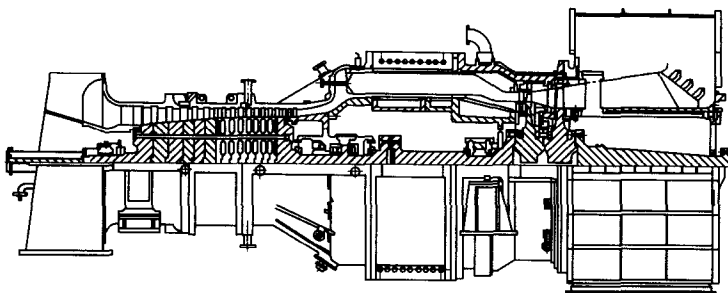


图 1-8 美国 GE 公司 21500kW 燃气轮机总剖面图

从 1950 年起, Rover 公司第一辆燃气轮机汽车成功行驶后, 小功率的燃气轮机也获得了很大发展。小功率装置的技术周期短, 较成熟的小功率燃气轮机也在这个阶段的后半期被制造出来。

20 世纪 60 年代, 轻型结构燃气轮机的经济性和可靠性经受了考验, 为用户所接受。喷气发动机被成批地改型设计成陆海用工业用燃气轮机装置, 单机功率已达 $1.0 \times 10^5 \text{ kW}$, 像蒸汽轮机结构那样的分散式、重型结构燃气轮机逐渐被淘汰。在这种情况下, 前苏联、美国、英国三国决定更新海军动力, 使舰艇燃气轮机化。1965 年, 美国又遇到东北电网大停电事故, 由于网内没有可不用外电源的紧急备用电源, 整个电网解列后, 因无电不能在短时间再次启动, 损失惨重。因此, 各国电业界决定在网内添建大批燃气轮机, 用作峰载应急发电机组。再加上输气、输油管线的建设以及中小功率燃气轮机的推广, 在 20 世纪 60 年代这十年中, 陆海用燃气轮机功率的总容量猛增 13 倍, 其中大都以发展简单循环、单轴或分轴机型为主。至 1970 年, 全世界陆海用燃气轮机达到了 $6.9873 \times 10^7 \text{ kW}$, 其中 $3.3098 \times 10^7 \text{ kW}$ 的燃气轮机用于发电, $5.884 \times 10^6 \text{ kW}$ 燃气轮机用于舰船驱动。

1.1.3 第二代燃气轮机

20 世纪 70 年代是燃气轮机技术飞速发展的十年。燃气温度、压气机压比和机组性能大幅度提高, 实现了用电子计算机监视的遥控全自动化。透平进气温度近 1400°C , 压比近 30, 开式简单循环