

高等学校教材

燃气轮机装置

(第二版)

上海机械学院 沈炳正 黄希程 编著

GAO DENG XUE
XIAO JIAO CAI

机械工业出版社

前 言

本书是根据1978年4月高等学校一机部对口专业座谈会的精神及1978年6月在黄山召开的蒸汽轮机与燃气轮机专业教材会议上所拟定的“燃气轮机装置”课程教学大纲编写的。

本书专门讨论燃气轮机装置的热力循环、变工况，并对其总体、应用、燃烧室和回热器作扼要的叙述。此外，酌加了绪论和附属系统方面的内容，以便使学者对燃气轮机装置的总体与发展有一个较开阔的认识。本书可作为高等学校蒸汽轮机与燃气轮机及动力机械等专业的试用教材，也可供有关工程及研究人员参考。

作者于1955年曾写了“燃气轮机装置原理设计与实用”一书，曾蒙陈大燮、吴仲华、朱麟五、陈学俊、袁轶群五位教授审阅，1957年由高等教育出版社出版为高等学校教学参考书，多年来曾在交通大学、清华大学、西安交通大学、上海机械学院及上海汽轮机厂作为讲授内容。作者鉴于燃气轮机自卅年代末在航空和动力界初露头角以来，已经茁壮成长，近十多年中发展尤为迅速，因此，根据近几年国内外燃气轮机发展的形势和新订统编教学大纲的要求，重新写成本书，愿为早日实现我国四个现代化尽一分棉力。

本书曾请清华大学燃气轮机教研室审阅，由赵士杭同志担任了主审，更蒙上海交通大学王兆华教授、清华大学倪维斗副教授、焦树建副教授、上海机械学院李燕生副教授和一机部教编室朱骥北同志提出了宝贵的意见，作者特致深切谢意。此外，对张荣年、黄希程、潘金发三位同志绘制计算了全书的图表曲线和协助誉清工作，也在此一并致谢。

限于作者水平，本书内容有不当之处，恳请大家指正。

作者 1980年7月

新 版 序

第二版本是在1981年机械工业出版社出版由沈炳正编写的高等学校试用教材《燃气轮机装置》基础上,根据1987年12月高等工业学校《热力涡轮机》专业教学指导委员会审定的修改大纲修订的。除原作者外,黄希程参加了第二版本的编写。

由于《工程热力学》、《流体力学》、《传热学》和《透平机械原理》是本教材的先修课,因此本书除了对透平和压气机的特性等作必要的复习外,其他涉及上述领域的内容不再收入。在学习本书时,应具备透平和压气机方面的基本知识。由于各校专业课程的安排不尽相同,在授课时可以侧重本教材的某些部分,或酌情补充其他内容。

鉴于最近十年燃气轮机在国内外发展更新较快,故第二版本增加了若干新技术的内容,例如引进了计算机的应用,介绍了当前国内外有代表性的先进燃气轮机及燃气轮机技术发展的新动向,并增加了正在大力发展的燃气蒸汽联合循环等内容。

对于本书重点和难点内容之一的燃气轮机机组变工况部分,尽量作了由浅入深的阐述和加强对一些问题的说理分析,使初学者易于理解和自学。

燃烧室部分酌增了气体燃料和原油、渣油的燃烧和燃煤等问题。

热力循环部分的航空发动机循环中增加了双转子发动机的计算内容。

在修订过程中,除了更新了上述部分内容外,还新增了习题。

本书第一章1、3、4、5节和第八章前六节由沈炳正修订,其余部分由黄希程修订,最后全书共同定稿。清华大学赵士杭主审。

在修订本书时,曾向上海交通大学、清华大学、西安交通大学、哈尔滨工业大学等校的有关同志征求了对教材的意见,也曾向机械电子工业部、航空航天部、中国科学院的有关厂所收集了资料。

本书蒙钟芳源教授、王乃宁教授、吴铭岚教授和李才修高级工程师、李燕生教授、伍贻文副教授参加了会审,提出了许多宝贵的修改意见。还得到了南京燃气轮机研究所范懋谦高级工程师的很多帮助。对此,作者特致深切的谢意。

由于作者水平所限,本书难免有不当之处,恳切希望读者批评指正。

作者 1990年4月

目 录

第一章 绪论.....1	§ 3-10 降低排气污染问题.....90
§ 1-1 燃气轮机装置的组成.....1	§ 3-11 燃烧室的设计与调试.....92
§ 1-2 燃气轮机发展史.....1	习题.....93
§ 1-3 现代燃气轮机的结构特点.....5	第四章 热交换器.....94
§ 1-4 现代燃气轮机的技术经济性.....7	§ 4-1 燃气轮机回热器的作用和要求.....94
§ 1-5 当前国外燃气轮机主要问题与 研制动向.....8	§ 4-2 表面式回热器的型式与结构.....96
§ 1-6 我国燃气轮机工业概况.....11	§ 4-3 表面式回热器的计算原理.....99
第二章 燃气轮机热力循环.....16	§ 4-4 高压回热器.....102
§ 2-1 燃气轮机热力循环.....16	§ 4-5 再生式回热器.....103
§ 2-2 燃气轮机循环的主要指标.....16	§ 4-6 回热器的变工况.....105
§ 2-3 等压燃气轮机理想简单循环.....18	§ 4-7 间冷器和冷油器.....106
§ 2-4 理想回热燃气轮机循环.....20	第五章 燃气轮机机组变工况.....108
§ 2-5 理想间冷循环及其压比最佳 分配.....21	§ 5-1 研究燃气轮机变工况的意义和 目的.....108
§ 2-6 理想再热循环及复杂循环.....23	§ 5-2 燃气轮机机组部分负荷的计算 方法.....109
§ 2-7 实际燃气轮机与理想循环的差距 分析.....26	§ 5-3 单轴燃气轮机变工况.....117
§ 2-8 实际燃气轮机循环性能.....33	§ 5-4 分轴燃气轮机变工况.....125
§ 2-9 轴系方案对循环设计参数的 关系.....36	§ 5-5 双轴机组变工况.....138
§ 2-10 航空发动机循环.....36	§ 5-6 三轴轴系方案变工况.....142
§ 2-11 闭式气轮机循环.....42	§ 5-7 回热、再热和间冷对机组变工况 的影响.....144
§ 2-12 内燃机燃气轮机复合循环.....44	§ 5-8 气候与海拔对燃气轮机性能的 影响.....147
§ 2-13 工业过程燃气轮机和燃气轮机总能 系统.....46	§ 5-9 单轴和分轴机组的无因次相似 特性网图.....149
§ 2-14 燃气轮机循环计算.....47	§ 5-10 燃气轮机过渡工况、起动及 加速.....153
习题.....60	§ 5-11 起动机类型及选择.....157
第三章 燃气轮机燃烧室.....62	§ 5-12 闭式气轮机变工况特点.....158
§ 3-1 等压燃烧室的基本要求.....62	习题.....159
§ 3-2 燃烧室的结构与型式.....66	第六章 燃气轮机的应用与结构.....161
§ 3-3 燃烧过程.....71	§ 6-1 燃气轮机的分类、应用范围及 同环境资源的关系.....161
§ 3-4 燃烧室气流的组织.....73	§ 6-2 中、大型发电和机械动力用燃 气轮机的特点和要求.....162
§ 3-5 喷嘴.....75	§ 6-3 中、大型燃气轮机动力站的技 术经济指标.....166
§ 3-6 燃料及供应系统.....78	
§ 3-7 气体燃料的燃烧.....82	
§ 3-8 原油、渣油的燃烧问题.....84	
§ 3-9 直接燃煤的燃气轮机.....88	

§ 6-4 油气管道增压用燃气轮机及其 技术经济指标.....169	§ 7-5 燃气轮机的维护.....224
§ 6-5 运输式燃气轮机的特点与要求.....171	§ 7-6 燃气轮机的故障原因及处理.....225
§ 6-6 核能气轮机.....190	第八章 燃气蒸汽联合循环.....227
§ 6-7 PG6531B型36.6MW单轴燃气 轮机.....193	§ 8-1 燃气蒸汽联合循环概述.....227
§ 6-8 JT8D 涡轮风扇发动机及 FT8 工业用、船用型燃气轮机.....197	§ 8-2 燃气蒸汽联合循环的指标参数.....231
§ 6-9 KG2、KG5 型径流式工业燃气 轮机.....200	§ 8-3 联合循环中各部分的热力方程.....233
§ 6-10 GE 公司 LM2500, 5000, 1600 系列燃气轮机.....202	§ 8-4 余热及补燃锅炉型联合循环计算 结果分析.....238
第七章 燃气轮机的附属系统与维护205	§ 8-5 美国 Cool Water 示范性煤气化 燃气蒸汽联合电站.....246
§ 7-1 管路系统、消声、滤气设备和进 排气装置.....205	§ 8-6 日本月光计划燃气蒸汽混合循环 研究装置.....247
§ 7-2 高温部件的冷却系统与热膨胀 问题.....210	§ 8-7 注蒸汽燃气轮机循环及其GE公司 等的应用实例.....248
§ 7-3 燃气轮机的基础、支承与布置.....215	附录252
§ 7-4 燃气轮机的滑油系统.....221	一、燃气热力性质曲线与热力性质表252
	二、国内主要燃气轮机的技术性能257
	参考文献.....258

第一章 绪 论

§ 1-1 燃气轮机装置的组成

燃气轮机是将气体压缩、加热后在透平中膨胀，把其部分热能转换为机械能的高速回转式动力机械。它一般由压气机、燃烧室、透平、控制系统及基本的辅助设备组成，它输出的机械功率用来驱动发电机、泵、鼓风机、螺旋桨或车轮等负荷。燃气轮机及其负荷通称燃气轮机装置或燃气轮机机组。燃气轮机动力装置是以燃气轮机为动力的成套装置，它包括燃气轮机和产生有用的动力所需要的基本设备，如果用于发电，就包括发电机及其有关的基本设备在内，如果用于机械驱动，燃气轮机动力装置就是燃气轮机本身。

大多数燃气轮机采用开式等压循环，就是以空气作工质，用内燃的方式在燃烧室中加热，并把废气放回大气来排热。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（有时还有回热器）与透平分工，它们同时都在连续不断地工作。因此，燃气轮机是一种连续流式的热机，结构轻小。本书中，燃气轮机通常是指开式机组，其它形式将另行注明。

少数气轮机采用闭式循环。工质在加压后，用外燃方式（空气锅炉、原子能反应堆或其它热交换器）加热，膨胀做功后，用热交换器排热，再周而复始、循环不息。闭式气轮机可以采用非空气工质，例如氮气。汽轮机动力装置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，用水泵代替压气机加压，用锅炉代替燃烧室加热，用冷凝器排热。

有的燃气轮机同其它工业设备有工质上的联系，通称为工业过程式燃气轮机。例如在化工、冶金等工业过程中的压气机和乏气透平等，可以组成强化工艺过程或综合利用能量的燃气轮机装置。从广义上说，可以认为燃气蒸汽联合循环、内燃机增压器也属于这个范畴。涡轮增压内燃机可以看作是燃气轮机和活塞式机械的联合形式。燃气轮机同内燃机联合工作时，压缩过程（一部分或全部）、燃烧过程和高压膨胀过程是在活塞式机械内进行的间歇式过程。低压压缩过程有时在涡轮增压器中进行，而低压膨胀过程在废气透平中进行。

§ 1-2 燃气轮机发展史

了解燃气轮机发展的历史，以便更好地了解燃气轮机的现在，准确地展望燃气轮机的未来。

一、萌芽阶段

人们对燃气轮机的向往已久，但由于社会生产能力的限制，20世纪之前这个理想未能实现，仅有过一些零星的雏形创造。如690年左右我国张遂（唐僧一行）曾用燃气推动铜轮；959年前后，北宋以前，我国已有走马灯（图1-1）的创造；1550年达·芬奇（Leonardo da Vinci）也曾设计过利用壁炉烟道中的烟气来转动叶轮等。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世纪末年才开始。1791年巴贝尔（J. Barber）建议过有往复式压气机的气轮机，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燃气轮机, 可是都不能发出功率, 未获成功。

20世纪之前, 冶炼工业还不能提供在足够高的温度和转速下运转的叶片材料, 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效率较高的压气机和透平。因此, 这些客观的社会生产能力限制了燃气轮机成功的可能性。而此时要求较低的热机, 如蒸汽机首先获得成功, 它促进了第一次产业革命。通过产业革命, 提高了社会生产能力和人们从实践中得来的知识, 为以后发展更新型的动力机械创造了条件。

燃气轮机对压气机的要求比通用的透平压气机高, 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30年代以前虽经试验, 但仍未获得实用。

二、工业试用阶段

第二个历史阶段是从燃气轮机初步试验成功, 发展到制造出有工业价值的装置, 前后花了约40年时间。在这个阶段中, 工业较先进的欧洲开始在冶炼工艺和空气动力知识方面有了提高, 从而具备了生产燃气轮机的条件。1906年, 法国涡轮机协会的拉马尔和阿尔芒哥等人制造的压比为4, 透平前温为 560°C 的燃气轮机获得了3%的效率。同时, 霍尔兹瓦斯 (H. Holzwarth) 设计了37kW 等容燃烧式燃气轮机, 经不断发展, 至1920年功率达370kW, 效率达13%, 它是第一台在工业上长期运行的燃气轮机动力装置。

以后10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。1929年起 BBC(曾改为 BST, 现合为 ABB) 制造了许多同 Velox 蒸汽锅炉联用的增压压气机和透平, 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。到1939年, BBC 又制成了第一台功率较大的发电用的简单循环燃气轮机, 这台压比为4.38, 透平前温为 575°C 的4MW 装置的效率达到18%。同时 Heinkel 工厂的第一台涡轮喷气式发动机试飞成功。这期间, 英国和德国进行了大量的航空燃气轮机的研制工作。1940年 EW 公司造成了第一台闭式循环燃气轮机, 功率2MW, 效率达30%。1941年 BBC 又制成了第一台燃气轮机机车, 功率为1.62MW, 效率达16%。

三、实用阶段

在第二次世界大战期间, 已有运用涡轮喷气发动机的成功之例, 如英国采用离心式压气机和德国采用轴流式压气机的涡轮喷气发动机。战后几年, 生产了不少第一代工业上实用的燃气轮机和涡轮喷气发动机及涡轮螺桨发动机, 并积累了运行经验。在一些中等功率的机车、发电等动力用途中, 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2500hp (1860kW) 的燃气轮机试航。航空涡轮喷气发动机由于比活塞式的轻小、功率大, 所以得到迅速发展, 到50年代已基本上取代了活塞式发动机, 并且大量的航空结构设计经验被这些工厂用到运输式及固定式燃气轮机上去。它对陆海用燃气轮机的改革和发展起了决定性引导作用。这些轻型结构的燃气轮机在同根据汽轮机

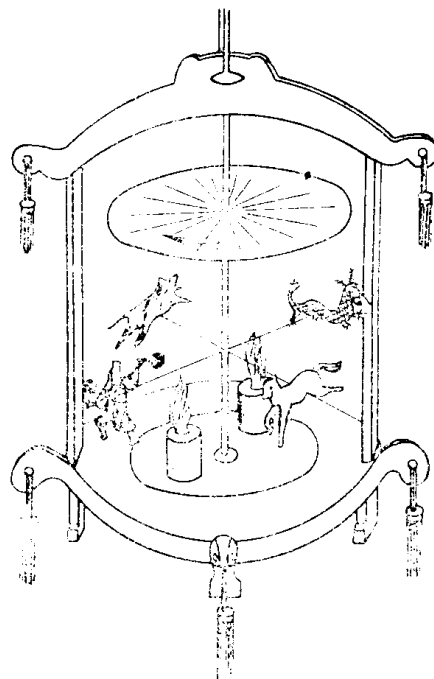


图1-1 走马灯——燃气透平雏形

传统设计的重型结构燃气轮机竞争过程中，到50年代后期，占了优势。1950年 Rover公司第一辆燃气轮机汽车行驶后，小功率燃气轮机获得了很大发展。

四、发展阶段

60年代，轻型结构燃气轮机的经济性和可靠性经受了考验，并被众所公认。高压比、高透平进气温度的采用、材料的改进、透平冷却技术及燃气轮机各部件的改进，低函道比涡轮风扇发动机的应用，可将油耗率降低15%左右，回热燃气轮机的采用，可使油耗率降低36%左右。航空发动机被成批地改装成陆海用装置，苏、英等国决策更新海军，使舰艇燃气轮机化。1965年美国又遇到东北电网大停电事故，损失惨重，因此各国电业界决定添建大批燃气轮机峰载应急发电机组。再加上输气、输油管线的建设以及中小燃气轮机的推广，故在60年代这10年中，陆海用燃气轮机功率总容量猛增13倍，其中大都以发展简单循环单轴、分轴机型为主。1970年，全世界陆海用燃气轮机达到了 $70 \times 10^3 \text{ MW}$ ，其中 $33 \times 10^3 \text{ MW}$ 用于发电。

70年代，指标更高的新一代燃气轮机问世，实现了用电子计算机监视的遥控自动化。高函道比的涡轮风扇发动机比60年代低函道比涡轮风扇发动机油耗率又降低20%左右。一些透平进气温度近 1400°C ，压比近30:1，开式简单循环燃气轮机效率高达36%，回热式效率高达38%，单机功率达110 MW，多台喷气发动机燃气发生器组装，各配或合配一台动力透平，驱动一台发电机时，功率可以达120~260 MW。还试图建造600 MW 闭式气轮机。当时航机改型的已占陆海用燃气轮机中的1/3左右。这些改型机组同航机原型约70%的零部件可以通用，其余30%的零部件则需重新设计，以适应不同用途的要求，另外还要加配动力透平。70年代中，由于产油国禁运石油，燃油的燃气轮机在电业界中发展遇到困难，制造厂和用户大都希望发展和选用以高效为主的机型。为此，往往是新型航空发动机刚刚投产，就研制其陆海改型，以应对高效率机型的需要。70年代，海军和石油、天然气方面用的燃气轮机继续增长，坦克也开始正式使用燃气轮机。当时，陆海用燃气轮机已超过 $0.3 \times 10^6 \text{ MW}$ 。

70年代能源危机之后，各国大力开发节能新技术，西方工业先进国家电站容量有剩余，故80年代新建电站较少，汽轮机产量下降，燃气轮机生产量也一度停滞，但经过研制，新一代

表1-1 各年代燃气轮机性能发展概况

年代	功率/MW		压比		燃气温度 / $^\circ\text{C}$	机组效率		大修间隔/h		控制系统	维修要求	代表机组
	单机	组装或联合	单压气机	双压气机		简单循环	回热循环	航机改型	工业型			
40	<27	—	4~6	<12	600~760	<17%	<28%	—	< 50×10^3	液压调节、手控	随机监护检修	BBC重型27MW
50	<40	<3	5~9	<16	650~790	<21%	<29%	<几千	< 100×10^3	电液调节、半自动化	随时监护、定期检修	GE工业型17MW
60	<50	<100	6~11	<19	750~1000	<29%	<33%	< 20×10^3	< 100×10^3	可遥控全自动	定期检修备件更换，大修停机	GE工业型箱装PG7000
70	<120	<320	7~17	<30	850~1350	<36%	<38%	< 50×10^3	< 150×10^3	试用电子计算机监控	定期光纤检查，积木式组装，现场维修	GE航机改型LM5000
80	200, <290 (空气贮存)	<750	8~22	<35	950~1460	<40%	<47%	< 100×10^3	< 150×10^3	电子计算机全系统监控	定期光纤检查，积木式组装，现场维修	GE MS9001F

表1-2 70、80年代各厂先进中、大机组参数

厂	型 号	功率/MW	效 率	压 比	燃气温/°C	流量/ (kg·s ⁻¹)	输出转速/ (r·min ⁻¹)	排气温/°C	轴 系①
GE	PG9151(E)	105.9	32.0%	11.8	1093	401.6	3000	528	17C ^{14分} 3T-P
	LM2500PE	22.0	37.0%	18.7	794	66.7	3600	513	16C ^{1环} 2HT, 6LT-P
	LM2500PHSTIG	26.8	40.25%	19.3	802	73.9	3600/3000	—	16C ^{1环} 2HT, 6LT-P
	LM5000PC	34.3	37.3%	25.3	692	122.9/ 126.1	3600/3000	446	14HC ^{1环} 2HT, 5LC-1MT, 3LT-P
	LM5000PDSTIG	52.4	44.4%	32.2	678	156.5	3600	411	14HC ^{1环} 2HT, 5LC-1MT, 3LT-P
PW	FT4C-3F	29.5	31.3%	13.6	1047	135	3600	453	7HC ^{8环} 1HT, 5LC-2MT, 3LT-P
	FT9	24.6	35.7%	18.8	1200	347	3600(3000)	—	11HC ^{1环} 2HT, 6LC-1MT, 2LT-P
	FT8	24.8	38.7%	18.9	1180	86.4	3000(3600)	454	7HC ^{9筒} 1HT, 8LC-2MT, 4LT-P
GEC-RR 政型	Spey	14.5	39.94%	18.5	1051	58	3600	600	2HC ^{10环} 2HT, 5LC-2MT, 2LT-P
	RB211	29.1	41.7%	19	1161	99	3600	717	6HC ^{1环} 1HT, 7LC-1MT, 3LT-P
	Olympus593	44	~33%	~14	~1200	~188	3000	—	7HC ^{1环} 1HT, 7LC-1MT, LT-P
WH	W501D	107.5	34.1%	14.2	1180	369	3600	519	19C ^{18环} 4T-P
	CW352RM A	266/247	38/37.1%	7.3/8.5	—	97/113	5000	365/375	16/17C ^{8环} 1HT, 1LT-P
	CW352LM A	261/297	28.6/ 29.6%	8.2/9.3	—	112/127	5000	540/520	16/17C ^{8环} 1HT, 1LT-P
ABB	GT13E	142.9	33.7%	14.3	1010	506	3000	525	21C ^{1筒} 5T-P
KWU	V84/V94	104.9~ 152.7	33.93%~ 33.98%	10.6~10.7	1050	355~509	3000~3600	555	17/16C ^{2筒} 4T-P
JM3	PT-100-750	95	28.82%	26.5	745	997	3000	—	13HC ^{12环} 3HT, 8LC ^{12环} 5LT-P

① C为汽机, T透平, P负荷, H高压, M中压, L低压, “——”同轴, “.”不同轴, 横线上的数字为个数, 其它数字为级数, 汉字为燃烧室型式。

的燃气轮机效率可达39%。同时,燃气蒸汽联合循环电站因效率较高,故发展甚快,其效率已达47%,单套功率已大于500MW。新型的燃气蒸汽联合循环机组的燃气部分功率比蒸汽部分功率大得多,故1987年美国生产的燃气轮机千瓦数量为2910MW,超过了当年该国汽轮机的产量(1940MW)。另外,在航空发动机方面,在开发新一代桨扇发动机,油耗率可省25%左右。

五、展望

90年代先进燃气轮机的改进目标是:大功率机组的热效率,对于简单循环,超过40%;对于联合循环,可达50%~55%,热电联供的热利用率将超过87%;蒸汽回注节能技术将在燃气轮机上扩大应用,其它燃气轮机总能系统也将加速发展。燃料除柴油、天然气外,重油、原油及化工尾气等低中比能燃料也可供轻型燃气轮机使用,燃气轮机的燃料适应性将提高,以煤基为燃料的燃气轮机有可能进入实用阶段。全功能数字式电子控制技术广泛应用于燃气轮机机组的控制、状态监控和自动保护。

今后在能量转换过程的系统中,燃气轮机将占更重要的位置,并将大量采用燃气轮机总能系统。

各年代燃气轮机性能的发展概况见表1-1。70、80年代燃气轮机各厂先进的中、大型机组参数见表1-2。

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。国外在60~80年代的生产竞争中,燃气轮机的制造企业通过兼并和协作,以GE、PW、GEC-RR、ABB、KWU、WH六家大厂为中心形成若干个跨国生产集团,有些工厂同时和两个以上集团挂钩。

上述六个最大集团的产量占世界大中型燃气轮机的绝大部分。其中产量最大的三家,GE、PW和GEC-RR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、轻型箱装式发展,比较先进。GE、ABB、KWU和WH公司则开发能燃用较重燃料的发电用燃气轮机。

在70年代初,由于世界性能源危机,世界燃气轮机产品的订货量曾受到一定影响。但是从70年代中、后期已有回升,到1987年,美国燃气轮机的产量首次超过了汽轮机。据美国预测公司预计,世界工业和船用燃气轮机市场情况良好,1986~1995年这10年间订货总台数达7859台,价值 23.5×10^9 美元。其中500~1000kW级的有4946台,10~30MW以上的有2044台,30~60MW级的有372台,60MW以上的492台。按价值10~30MW级的占40%;60MW以上约27.6%。

§ 1-3 现代燃气轮机的结构特点

燃气轮机工业的两个基础是航空发动机和汽轮机两大工业。这两类工厂的设计传统很自然地使燃气轮机在发展过程中形成两种具有明显差别的结构形式:轻型结构和重型结构。这两种结构形式有许多不同特点,反映在质量功率比的指标上大致是:轻结构小于 $3 \sim 5 \text{ kg/kW}$,重结构大于 5 kg/kW ,这两派在燃气轮机工业发展的过程中,互相竞争,对峙了20年,至60年代,轻结构派在工业实践中取得了胜利。后来,由于航空发动机直接改型在海上陆地试用满意,故较轻的燃气轮机又相继分成航空改型和工业型两支。目前后者也称为重载荷型,可以认为是介乎原来轻型与重型结构之间的产品设计型式。

在高温下，金属材料的强度以及寿命大大减弱。因此，为了提高燃气轮机性能而提高温度，就要求有更好的耐热材料，或者采用更有效的冷却方法。高级的耐热合金很贵重，又受到资源及冶金工艺的限制，而且目前金属的耐热极限约在1100℃左右，再提高很多是有困难的。因此，加强冷却就成为发展燃气轮机的关键问题之一。目前由于加强冷却，透平进气温度已采用1050~1460℃，1600℃也在开发之中。

高温零件的热应力大小，取决于零件尺寸、温度场分布、允许热膨胀的程度及材料的性质等因素。有些高温零件的热应力，往往会超过机械应力很多。某些零件自冷车至全负荷时，可能膨胀本身全长的1%，有时可能膨胀十几毫米之多。因此，在结构设计中，必须考虑到每一受热零件都有足够的膨胀余地，并且膨胀时能够保持必需的同心率。在燃气轮机自冷车快速起动时，工况剧烈变动，形成零件上很大的温度梯度，例如透平叶片上温度梯度可能高达50℃/mm。装置起动若干次之后，高温零件会由于周期变化的热应力和离心应力的原因产生疲劳、变形或断裂，这种现象称为低周疲劳破坏，于是发生漏气、振动、碰擦、破坏等事故。由于这种热震（热冲击）现象以及热疲劳现象所引起的事故不少。

在重结构燃气轮机中，按汽轮机中的传统习惯采用粗厚的零件。粗厚的零件在一般温度下刚度较好，但是在温度剧变时，热应力随零件厚度而增加，厚的零件反而容易变形或断裂。因此在重结构设计中，难于采用温度梯度较大的强烈冷却方法以及较高的燃气温度，还要靠长时间的逐步暖机盘车等措施来避免零件产生过大的热应力，而且还往往难以保证零件不变形。其实，开式燃气轮机的压力不很高，气缸和转子等大零件完全没有必要设计得象汽轮机那样厚，而只要有足够的强度和刚度，倒是越薄越安全，厚了反而使热应力增大和易于热疲劳。

燃气轮机的压比不很高，因此管道、燃烧室、热交换器、空气滤清器以及消音器中的气体流动压力损失对装置性能的影响很大，要求在结构设计中尽量减少流阻损失。减少压力损失的方法主要是要求采用较大的流道截面，使流速较低，采用短而直的管道和较佳的流线型零件。重结构装置中，流速虽选得较低，但是机体庞大。布置分散、管道弯长，对降低压力损耗而言，不是很有利的。另外，在燃气轮机的压气机中，气体工质逆着压力梯度流动，因此空气动力问题要比膨胀过程中的问题困难得多，而燃气轮机中叶片的效率对装置总效率的影响却又比汽轮机大数倍，故要求采用空气动力性能很高的叶型。

由于上述种种原因，汽轮机的传统设计思想难于在燃气轮机上发展。

轻结构的设计则吸取了大量航空发动机上的科研成果与技术经验，不论在投资、成本或是运行性能方面都很有利。它不但大大节省了材料消耗和厂房投资，还由于零件薄、尺寸小、采用浮动差胀结构、拼装法以及热膨胀间隙大，故热应力小。而且，因级数少，级热降大，故静叶出口燃气温度较级数较多的更低，加以采用强烈气冷等缘故，在高温材料的强度和寿命与可靠性方面，可以弥补或克服因燃气温度高、速度高所引起的不良影响，并能适应快速起动和剧烈的工况变动。换言之，相同的材料，由于冷却较强烈，轻结构设计可以采用高得多的燃气温度。况且一些被冷却的高温零件采用热膨胀系数小、导热性好的铁素体或珠光体材料要比用昂贵的奥氏体材料强度更好，这样可以较多地降低轻结构装置的高温金属成本。同时在效率方面，虽然流速较高，循环简单，但由于能够采用高得多的燃气温度及压比、流动损失小的短直管道、高效的叶型设计以及余速扩压利用等特点，轻结构装置的效率早已超过重结构装置。此外，由于质量惯性、容量惯性和热量惯性的减少，利于快速起动，运行调节

特性也可以改善很多，且设备简单紧凑，更适合于采用全自动化控制。

经过了廿多年的实践考验，得出了结论，即使固定式燃气轮机装置，采不采用轻结构也成为动力界中竞争的关键之一。于是，重结构派的许多工厂也不得不转移阵地，改变其原来习惯传统而吸收轻结构设计思想的优点，从而使在燃气轮机工业发展过程中的一个大矛盾得到了解决。现在重结构燃气轮机虽已淘汰，然而另一对矛盾又突出了。轻结构燃气轮机中的两种类型，即工业型轻结构（现又称重载荷型）与60年代崛起的航空改型燃气轮机又在相继竞争，目前还各有特点，有待进一步在实践中考验。最新一代的航机陆用改型燃用轻柴油或天然气的效率已近40%，有的寿命已超过 $(50\sim 100)\times 10^3\text{ h}$ ，而且可以利用航机的大量科研成果、生产线及次品，故成本低，近年发展甚快，而工业型轻结构燃气轮机可以燃用较重的油料，寿命大于等于 $100\times 10^3\text{ h}$ 。

§ 1-4 现代燃气轮机的技术经济性

现在，较大功率的热机（大于35MW）仍以汽轮机为主。然而近15年来，世界上汽轮机动力占总动力的百分比正在减少，燃气轮机却在上升。由于燃气轮机采用空气而不用水蒸气作工质，故可免去锅炉、冷凝器、给水处理等大型设备，因此燃气轮机装置比汽轮机装置轻且小得多，站址可不受水源的限制。从工质的热力性质上分析，燃气轮机和汽轮机也有重大的差别。超高参数汽轮机采用的蒸汽温度为 $500\sim 600^\circ\text{C}$ ，相应的压力为 $10\sim 35\text{ MPa}$ ，效率可达40%~50%，功率可达2000MW。但是，假如要把蒸汽参数提高到 700°C ，则压力相应地需要剧增至50MPa。显然，超高压所引起技术及强度问题将进一步提高汽轮机的经济性遇到严重的困难。正是由于压力高，汽轮机装置才必须选得厚实笨重。一般来说，目前燃气轮机的效率已达到40%，同超高压汽轮机机组的效率相当。比较复杂的联合循环效率也达到40%~50%，却要比纯蒸汽电站轻小得多。就功率而言，目前开式燃气轮机单机只有150MW，而组合或联合的发电装置单套可达500~600MW。

现在，中、小功率的热机（小于35MW）以内燃机为主，其中尤以柴油机的经济性较高。现代的柴油机大都采用涡轮增压器，已是内燃机同燃气轮机的一种特殊的联合方式。开式燃气轮机轻小，机动性比内燃机好得多。即使效率较低些，但是由于燃料差价、润滑油及维修费省，运转经济性已能同内燃机接近。

综合地说，燃气轮机装置同汽轮机装置和内燃机相比较，具有下列优点。

1. 装置轻小 机重和所占容积往往只有汽轮机装置或内燃机的几分之一或甚至几十分之一。消耗材料少，也更宜作移动式动力装置。且因厂房基建省，投资成本往往比汽轮机装置少。技术周期短，有时当年就能从设计到投入运行。

2. 燃料适应性强、公害少 可以燃用较便宜的燃料，如重油、煤气、核燃料。同一台机往往能燃用不同的液体和气体燃料。排气比较干净，除 NO_x 一项需要采取措施外。对空气污染较少。噪声也可控制在规定的范围之内。

3. 节省厂用水、电、润滑油 不用水作工质，冷却水用量很少，可在缺水地区运转。厂用电极少。宜作无电源起动。润滑油很省。厂用电和润滑油只占燃料费的1%，而汽轮机或内燃机则要占6%。

4. 起动快、自动化程度高 从冷车起动到满载只需几分钟到几十分钟，汽轮机装置起

动到满载则往往需要数小时。燃气轮机在严寒下也容易起动,并且自动化程度高,便于遥控,现场可不需要运行人员。

5. 维修快、运行可靠 设备简单,磨损件少,系列化、标准化、通用化程度高。能设计成部套单元体快装结构。有的运行可靠性可达99.5%,可用性也可达95%。维修费用只有汽轮机装置或内燃机的80%左右。

因此,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有这么多的应用方式。目前已大量采用燃气轮机的领域有:

空——占全面压倒优势。有涡喷、涡扇、涡桨、涡轴、桨扇发动机及起动辅机。

海——舰艇加力机、水翼船、气垫船及海上钻采平台中占压倒优势;舰艇主机、巡航机及油船成批采用。

陆——峰载应急发电机、移动电站、移动式多用途总能系统(发电、机械动力、供应压缩空气、供暖及制冷等)、输气、输油管线、油田动力等方面有压倒趋势,中间载荷及基本载荷电站、新建或改建燃气蒸汽联合循环电站、化工厂流程及动力、总能系统、坦克在成批采用。还在试用考验的有:货船、汽车及高速动车和机车发动机等。

目前各种燃气轮机参数范围及价格见表1-3。

表1-3 目前各种燃气轮机的参数范围

名 称	单 位	开 式 循 环
单机功率	MW	10~150
转数	r/min	大型1200~20000, 小型20000~十几万
透平进气温度	°C	650~1460(开发1700)
压力	kPa	300~3000
效率		15%~40%
比功	kW/(kg·s ⁻¹)	100~700
单机质量功率比	kg/kW	0.1~10
单机功率容积	m ³ /kW	0.001~0.75
单机功率机价	美元/kW	150~500

§ 1-5 当前国外燃气轮机主要问题与研制动向

近年来,能源问题和污染问题对动力机械提出了互相矛盾的要求。工业型燃气轮机可燃用便宜的重油,但污染多,容易腐蚀叶片,故难采用很高的温度而致效率不高,往往需要加用回热器、余热锅炉等大型设备来弥补,新设计的燃气蒸汽联合循环电站发展很快。新一代航机改型,温度、压比高,故效率高,但只能燃用 DST2 柴油以上的轻燃料,较重的油则还正在试用考验中,目前航机改型占陆海燃气轮机总功率的比例有上升的趋势,在美国已超过一半。70年代 GE 公司也在发展航机改型的新系列。因此,目前世界上最大的三家陆海用燃气轮机工厂 GE、GEC-RR 和 PW 都大量生产航机改型机组,而且他们在新型航空发动机研制成功后,就马上发展航机的陆海改型。

现在燃气轮机的使用,除了在航空、舰船以及峰载动力中已占压倒优势外,联合循环正在基本载荷的领域崛起。如果要将燃气轮机本身作为基本载荷动力,当前主要问题是要提高效率,还要求能使用便宜的燃料、减少污染公害、提高单机功率和简省维修等。如果燃气轮

燃气
一
燃

机作为变速运输动力,则还要着重改善变工况性能和降低材料工艺成本。尤其在汽车工业中,因产量极大,影响面广,工艺流水线昂贵,有世界性的维修问题,故以往燃气轮机汽车研制工作几上几下,生产企业举棋不定,不敢轻易决策。看来需待经济性及公害问题解决之后,才有可能大量生产燃气轮机汽车。

目前国外燃气轮机的重点研究发展课题分述如下。

一、提高效率问题

1. 提高燃气温度是提高燃气轮机效率的主要手段

(1) 研制高温材料 透平转子叶片在高温下高速运转,还要适应温度剧变,叶片材料遇到热应力、热疲劳、热腐蚀及蠕变等严重的强度寿命问题。近年来高温合金的发展,平均每年可使燃气温度提高 10°C 。但高温合金的耐温极限约为 1100°C 。所以目前有两种发展措施:一种是叶片表面保护层,采用渗铝、铬、钴、镱、涂陶瓷及复合材料等办法来提高燃气温度;另一种是大力研制特种陶瓷叶片,如 Si_3N_4 及 SiC ,其耐热度可达 $1300\sim 1700^{\circ}\text{C}$,而且抗热震性也好,已在静叶上试用,动叶转子上还在研究。

(2) 改进冷却技术 高温叶片和燃烧室都需要冷却。近年来通过改善材料及气冷方式平均每年可使燃气温度提高 $20\sim 25^{\circ}\text{C}$ 。采用气膜、发散气冷后,可能降温 $500\sim 800^{\circ}\text{C}$,采用 $1600\sim 1700^{\circ}\text{C}$ 的燃气温度有可能实现。但今后由于压比也还要相应提高,致使压气机出口空气温度高达 $400\sim 500^{\circ}\text{C}$ 左右,如不先被冷却,就难以用它来冷却高温零件。故目前又在研究水、蒸汽冷却方式,希望能使 t_3 达到 1800°C 左右。

2. 提高压比 简单循环燃气轮机为了提高效率,在增加燃气温度的同时,需要提高压比来配合。

(1) 提高单级压比 采用超跨声速级。目前轴流式压气机的级压比高达 $1.5\sim 2.0$ 时仍可维持尚好的级效率,正在研究的级压比高达 3.5 。

(2) 提高整机压比 还需要改善级间匹配。现代压气机采用可转静叶和双转子后,总压比达到 30 以上,仍可有较宽的运转范围。

3. 余热利用 充分利用燃气轮机排气热量以提高机组热效率。

(1) 回热 回热循环燃气轮机效率已经能够达到 45% 左右,故而近年来又有趋向采用回热器。目前正在研制高效轻小的回热器。

(2) 燃气蒸汽联合装置 利用余热产生蒸汽发电,可使发电热效率提高到 $45\%\sim 55\%$,是新建或改建电站常用的办法,近十年来发展甚快。煤气化燃气蒸汽联合循环也在进一步开发。

(3) 总能量综合利用 燃气轮机可制成一机多用,同时用来供电、供热、机械动力、压缩空气、制冷或化工产品等。如果能充分利用余热的话,热能利用率可高达 $50\%\sim 87\%$ 。

4. 蒸汽回注技术 余热产生蒸汽回注至燃气可使现有机组在透平进气温度不变的情况下,功率提高 30% ,热效率提高 25% 。同时,大气污染减少,若用蒸汽回注技术代替联合循环中的汽轮机,则结构可大大简化。

二、燃用便宜燃料同时限制污染及腐蚀问题

1. 重燃料处理 燃重油的高温燃气轮机透平叶片容易腐蚀,煤则更不宜在燃气轮机中直接燃用。所以重燃料都需经过处理。

(1) 煤气化、液化 煤先经过气化或液化再燃用。燃用比能较低的煤气,需要改变燃

烧设备,同时还要从压气机抽气来供应煤气炉。煤气化设备较大,还需除去飞灰。正在研究煤粉精细处理、液态排渣燃烧、燃气高温除灰、透平叶片涂层或采用陶瓷叶片的直接燃煤燃气轮机。

(2) 重油处理 重油先经过沉淀、过滤、水洗和加料处理后再燃用。

2. 使用核燃料 目前国外核电站发电成本已经比火力发电站低,但仍以压水堆、沸水堆为主。对各种类型的核电站经济性作了分析后,有人认为高温快速堆闭式氦气轮机比较合算。已设计了单机功率超过1000MW的机组。但近十年来,由于节能技术发展,油价回跌、核恐惧及还有一些技术问题未能解决和研制费巨大等因素,核电站开发与发展缓慢。

3. 低污染的高温燃烧室 改善冷却结构及燃烧过程,注意降低排气中的 NO_x 的含量。

三、增加单机功率问题

燃气轮机的单机功率除受到燃气温度的限制之外,主要还受到流量的限制。流量又由通流面积、流速和密度所决定。

1. 增加通流面积

(1) 增加叶片长度 除通过设计改善强度振动外,还要考虑三元流动影响。

(2) 并联组装 采用几台并联的航空发动机改型的燃气发生器,同配一台低压动力透平。因低压透平温度不高,故许用应力较大,叶片可以制造得较长。

2. 增加流速 采用跨声速压气机及透平,也需要考虑三元流动的影响。

3. 增加密度 采用闭式循环可以提高基础压力,使工质密度成比例增加。单机功率达到 $(2 \sim 3) \times 10^3 \text{MW}$ 也是可能的。

四、简省维护问题

1. 加强监护 采用电子计算机自动监控,并在全机关键部位都布置测点和光纤孔检测仪的探测孔,不需开缸就能早期发现问题,视情维护,减少事故,提高可靠性。

2. 快装简修 采用组装单元体结构设计及现场巡回维修方式,可以快速更换损坏单元体;简化维修过程,提高可用性。

五、高效变工况问题

燃气轮机变工况时,压气机运转性能较易恶化,同时低负荷时燃气温度也要下降,致使机组变工况性能较差。改善的措施有以下几条。

1. 可转静叶 压气机和透平都宜采用可转静叶以改善级间和压气机与透平间的协调。

2. 多轴轴系 采用分轴、双轴、三轴轴系方案以改善变工况经济性。

3. 回热 采用回热器,对改善低负荷时的效率很有利。

4. 闭式循环 闭式循环气轮机可以用流量调节法来适应工况变化,低负荷时效率下降很少。

六、降低材料工艺成本问题

由于燃气轮机叶片对型线要求高,高温合金硬度高,加工又困难,故常要采用特种工艺和设备。为了降低成本,正在大力推广和改进的新工艺有:精铸、多次真空冶炼、定向结晶、粉末冶金、陶瓷冶金、纤维复合材料、高速挤锻、温加工强化、喷丸强化、激光加工、数控加工、电蚀加工、爆炸成型、强力旋压、陶瓷或金属等离子喷镀、电子束焊、氩弧焊、激光焊和钎焊等。

综观以上,可知国外燃气轮机在以往数十年中发展迅速。即使近年来受到能源问题的影

响,曾一度减产,但这反过来对有发展前途的动力机械提出了更高的要求,更有力地推动和促进研制工作,结果开发出了新一代的高效燃气轮机,产量再度大增。

§ 1-6 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,首先建立了上海汽轮机厂和410厂,从无到有。迄今全国各地已制成了数十种型号陆海空用途的燃气轮机。四十多年来所取得的成就是巨大的。1956年我国自制的第一批喷气式飞机试飞,1957年上海内燃机配件厂试制过小功率燃气轮机。1958年全国各地又有不少工厂单位设计试制各种燃气轮机。以下为我国燃气轮机生产的概貌(未包括航空发动机及涡轮增压器):

上海汽轮机厂1962年试制了船用燃气轮机,1964年与上海船厂合作制成750PS(550kW)自由活塞燃气轮机,1965年制成6000kW列车电站燃气轮机。1971年制成自行设计的3000kW卡车电站燃气轮机。另外同703所合作制成4000PS(3295kW),设计制造了6000PS(4410kW)和改装喷气发动机成25000PS(18380kW)几种船用燃气轮机。现已设计制造成6000kW可用于卡车电站的发电机组,见图1-2。

南京汽轮电机厂1964年制成1500kW电站燃气轮机,1970年试造了50PS(37kW)泵用燃气轮机,1972年制成自行设计的1000kW电站燃气轮机。1977年制成20MW快装电站燃气轮机。80年代它同GE公司技术协作,生产出MS6001型36.6MW燃气轮机并将开发其联合循环电站。

哈尔滨汽轮机厂1969年制成自行设计的3000PS(2.24MW)机车燃气轮机,制成1MW自由活塞燃气轮机。另外改装航空发动机成10000PS(7.35MW)及22000PS(16.18MW)燃气轮机。1973年与703所合作设计制造成6000PS(4.41MW)船用机组,与长春机车车辆厂合作设计制成4000PS(3.295MW)燃气轮机,见图1-3。80年代又试验重油燃烧和匹配紧凑式回热器,以改善其技术经济性指标。

东方汽轮机厂1978年试制成6MW发电用(见图1-4)燃气轮机。

杭州汽轮机厂和青岛汽轮机厂1972年制成200kW燃气轮机。青岛汽轮机厂还制造了1.5MW自由活塞卡车电站。

北京重型电机厂1979年改装涡轮螺旋桨发动机2MW机组,在中原、克拉玛依等油田运行。

成都发动机公司与PW公司和TPM公司于1986年签订了一起研制、生产,并推销PW公司JT8D涡扇发动机的工业变型FT8型燃气轮机的合同。功率为24.8MW,效率为38.7%。成都发动机厂承担部分的制造、组装和试验,并负责组装,约占全部工作量的三分之一。此项合作提供了生产具备目前此领域内最高效率的简单循环机组的机会,使我国一步跻身于工业燃气轮机先进行列。

沈阳黎明公司从1984年推出航机改型的WP-6G燃气轮机,组成了一支专业开发研制队伍,建立了燃机成套公司,采用多种经营方式,已取得了很好的效果。目前,在大庆油田,已有4台机组在运行,年运行率达92.3%,并向中原、胜利油田推广使用,并在此基础上开发出3DR热电并供的工业燃气轮机。近年在研制WP-7AG工业燃气轮机,其初温为915℃,压比为7.92,发电功率为9.65MW,热效率23.5%,热电联供时热能利用率72%。

南方动力机械公司WJ-6燃气轮机改型用于发电、舰船、机车的动力机组的可靠性和寿

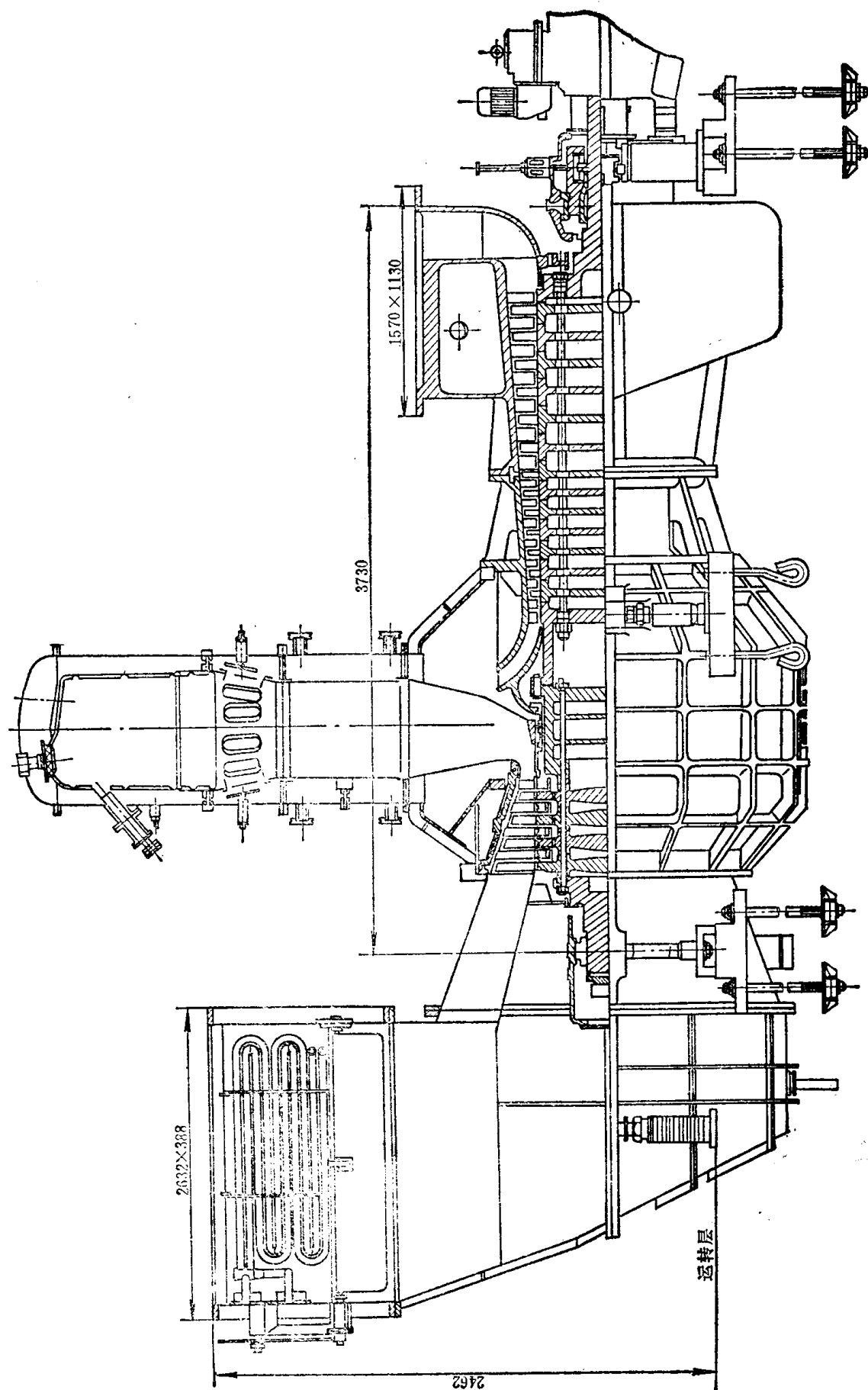


图1-2 6000kW发电机组 (可用于卡车电站)