

国外机械工业基本情况

燃 气 轮 机

南京燃气轮机研究所

机械工业出版社

一九八七

内容简介 本资料为《国外机械工业基本情况》的燃气轮机部分。内容主要介绍了国外燃气轮机的概况和技术发展动向，并着重叙述了蒸汽燃气联合循环、燃煤燃气轮机和高温材料。此外，附有1984~1985年国外主要企业的燃气轮机产品表等。可供燃气轮机制造业及有关应用部门的科技人员、教学工作者参考。

燃 气 轮 机

南京燃气轮机研究所

*

机械工业部科学技术情报研究所编辑

*

机械工业出版社出版（北京阜成门外百万庄南里一号）

（北京市书刊出版业营业许可证出字第117号）

机械工业出版社印刷厂印刷

机械工业出版社发行·机械工业出版社书店经售

*

开本787×1092¹/₁₆·印张3³/₄·字数91千字

1987年2月北京第一版·1987年2月北京第一次印刷

印数 0,001—1,500·定价：1.10元

*

统一书号：15033·7065Q

出 版 说 明

机械工业肩负着为国民经济各部门提供技术装备的重任。为适应四化建设的需要，必须大力发展机械工业。上质量、上品种、上水平，提高经济效益，是今后一个时期机械工业的战略任务。为了借鉴国外机械工业的发展道路、措施方法和经验教训，了解国外机械工业的生产、技术和管理水平，以便探索我国机械工业具有自己特色的发展道路，我们组织编写了第三轮《国外机械工业基本情况》。这一轮是在前两轮的基础上，更全面、系统地介绍了国外机械工业的行业、企业、生产技术和科学研究等方面的综合情况，着重报道了国外机械工业七十年代末和八十年代初的水平以及本世纪末的发展趋向。

第三轮《国外机械工业基本情况》共一百余分册，参加组织编写的主编单位包括研究院所、工厂和高等院校共一百余个，编写人员计达一千余人。本书为《燃气轮机》分册。主编单位是南京燃气轮机研究所。参加编写人员有：刘家清、夏轶人、王生林、罗书尚、涂庆国，以及陈福湘、陈志良等。责任编辑：王觉。

机械工业部科学技术情报研究所

目 录

第一章 综述	1
第一节 概况	1
第二节 技术发展动向	4
第三节 在舰船和海上平台上的应用	9
第二章 燃气-蒸汽联合循环	12
第三章 燃煤燃气轮机	18
第一节 煤的转换燃料-气化煤和液化煤	18
第二节 煤的沸腾燃烧	21
第三节 超净细煤粉和煤水浆	23
第四节 闭式循环燃煤燃气轮机	25
第五节 烟气轮机	26
第四章 高温材料	28
附表 1 世界含有燃气轮机的联合动力装置的主要水面舰艇	32
附表 2 1984~1985年国外主要企业的燃气轮机产品	35
参考文献	57

第一章 综 述

第一节 概 况

燃气轮机作为动力机械，已在航空、电力、石油、冶金、化工等部门得到广泛的应用。按燃气轮机不同的应用场合，可以分为工业用固定式燃气轮机、航空发动机、舰船用燃气轮机、车用燃气轮机。对于工业用的固定式燃气轮机通称工业燃气轮机，包括：燃气轮机发电机组和机械驱动燃气轮机两种。

随着技术进步和发展，燃气轮机越来越多地为人们所揭示和了解，它不但具有重量轻、体积小、启动快、运行维护方便、便于集中控制、少用水或不用水的优点，而且随着热效率不断提高和采用燃气-蒸汽联合循环的方式运行，联合循环发电装置的热效率已超过大功率高参数火发电机组的水平。并且燃气轮机可以燃用多种燃料，其中有液体燃料，包括各种轻油和重油及原油；气体燃料，包括天然气、油田伴生气、矿井瓦斯气、高炉煤气、焦炉煤气和石油化工流程中的过程气等；固体燃料，包括直接燃煤粉和水煤浆及将煤气化、液化后作为燃料燃烧。目前直接燃煤的燃气轮机或燃煤/燃气-蒸汽联合循环已进入工业应用阶段。因此，六、七十年代工业发达的国家，燃气轮机工业发展迅速，装机容量增长、幅度较大，1964年至1976年，年平均增长率为30%。

七十年代初，由于西方与第三世界石油输出国之间的矛盾，敲响了石油短缺的警钟，引起了世界性能源危机，造成油价猛涨，对一向以烧油为主的燃气轮机的发展，产生过一定的影响。但是，即使在这种情况下，根据近年来的统计数据表明：燃气轮机依然以一个良好的势头向前发展。例如，燃气轮发电机组自1977年7月至1984年5月，这八年中世界各地燃气轮发电机组订货台数总计有2730台，虽然每个年度中订货量有升有降，但从总的趋势来看，还是回升的。表1-1为国外燃气轮发电机组订货情况。

表1-1 国外燃气轮发电机组订货情况

日期(年、月)	1977.7~ 1978.5	1978.7~ 1979.5	1979.7~ 1980.5	1980.7~ 1981.5	1981.7~ 1982.5	1982.7~ 1983.5	1983.7~ 1984.5
订货数量(台)	309	367	342	415	483	379	435

根据用户的具体要求，从表1-2，表1-3中明显看出对燃气轮机的功率等级方面的需求情况。四年(1980.7—1984.5)统计数字表明：所需单机功率，小的从1000千瓦到3500千瓦，大的以2万千瓦以上为大多数。前者占四年订货总量的43.6%，后者占33.4%。总计占77%。表1-2为国外所需燃气轮发电机组功率等级状况。

目前世界最大功率有12万千瓦带基本负荷的燃气轮机，预计在十年内，通过提高初温、压比和空气流量，功率可以达到20万千瓦。

燃料结构也有了一定的变化，燃用轻油的台数下降较明显，但四年中总台数为639台，仍居首位。其次是双燃料结构，总计571台。再其次为天然气422台，详见表1-3

表1-2 国外所需燃气轮发电机组功率等级状况

功率 (千瓦) \ 台数 (台)	日期 (年、月)				总计	
	1980.7~1981.5	1981.7~1982.5	1982.7~1983.5	1983.7~1984.5	台	%
1000~2000	48	82	115	76	321	18.8
2001~3500	127	108	107	82	424	24.8
3501~5000	4	2	19	107	132	7.7
5001~7500	24	24	2	22	72	4.2
7501~10000	14	17	6	4	41	2.4
10001~15000	36	24	17	18	95	5.5
15001~20000	17	21	11	7	56	3.2
20001~30000	68	76	52	55	251	14.7
30001~60000	34	59	21	28	142	8.3
60000以上	43	70	29	36	178	10.4
总计	415	483	379	435	1712	100

表1-3 国外燃气轮发电机组燃料状况

订货台数 (台) \ 燃料 日期 (年、月)	轻油	重油	双燃料	天然气
1980.7~1981.5	159	21	134	101
1981.7~1982.5	194	19	176	94
1982.7~1983.5	156	32	91	100
1983.7~1984.5	130	8	170	127

国外大多数燃气轮发电机组是用于作连续运行的基本负荷发电，其次是作为备用机组，作为尖峰负荷运行仅是极少数，详见表1-4所列。根据瑞士BBC公司的估计：在工业发达国家中，发电用燃气轮机装置在电网中作为尖峰机组、备用机组、以及组成燃气-蒸汽联合循环装置使用；在工业不发达的国家中则作为发电的主要设备。如自1980年7月至1984年5月的统计数字可以间接说明，在这四个年度中西欧各国总共只订购燃气轮机168台，而远东和中东地区则订购了738台，是西欧的4.4倍。世界上最大的燃气轮机电站就在中东地区的沙特阿拉伯。电站功率为125万千瓦，由25台燃气轮机组成，其中由16台5万千瓦组成的80万千瓦燃气轮机电站是1984年建成的。

表1-4 国外燃气轮发电机组使用情况

订货台数 (台) \ 工作方式 日期 (年、月)	备用	尖峰负荷	连续负荷
1980.7~1981.5	75	14	326
1981.7~1982.5	115	40	328
1982.7~1983.5	70	15	294
1983.7~1984.5	91	6	338

表1-5 国外主要企业部分燃气轮机性能参数

企 业	型 号	生 产 年 份	基本负荷		尖峰负荷		压 比	空 流 气 量 千克/秒	转 速 转/每分	燃气温度		燃 烧 室 数 目 个	级 数		重 量 吨	外 形 尺 寸 长×宽×高 米
			功率 效率	兆瓦	功率 效率	兆瓦				透进 平口 °K	透出 平口 °K		透 平	压 气 机		
瑞士BBC公司	9	1982	35.4	28.9	38.5	29.2	9.0	163	4500	—	783	1	4	15	79	10×3.2×7.6
	11	1980	72.5	31.1	78.9	32.0	11.0	290	3600	1313	793	1	5	17	165	11.2×7.2×5.1
	13	1982	88.9	31.8	97.3	32.3	11.8	373	3000	1283	768	1	5	18	210	14.5×4.6×9.8
美国GE公司	M5001	1978	25.4	27.9	—	—	10.1	122	5105	—	755	10	2	17	181	23.5×3.4×3.7
	M6001	1981	36.7	30.8	—	—	11.7	138	5105	1365	798	10	3	17	191	23.2×3.4×3.7
	M7001B	1971	61.8	31.3	—	—	9.8	248	3600	1278	780	10	3	17	266	21.4×8.9×4.0
	M7001E	1977	76.9	32.2	—	—	11.7	279	3600	1365	795	10	3	17	266	21.4×8.9×4.1
	M9001B	1976	85.2	31.1	94.4	31.4	9.4	345	3000	1278	780	14	3	17	295	25.3×4.6×5.8
	M9001E	1980	109.3	31.9	118.5	32.0	11.6	401	3000	1365	785	14	3	17	295	25.3×4.6×5.8
联邦德国KWU公司	V. 93.1	1971	64.2	29.2	67.1	29.5	8.7	345	3000	1143	712	2	4	16	228.2	15×11×8
	V. 93.2	1976	76.2	29.8	79.9	29.9	9.5	345	3000	1253	773	2	4	17	228.2	15×11×8
	V. 94.0	1975	91.2	30.9	97.9	31.4	9.9	480.5	3000	1153	693	2	4	16	302.1	16×12×9
	V. 94.2	1982	123.1	32.5	134.6	32.8	10.0	496	3000	1253	767	2	4	16	280	18×12×9
瑞典Stal Laval公司	GT 120G	1959	70.0	28.5	75.0	29.0	15	360	3000	1103	608	2	1/2/3	10/11	—	25.9×12.7×12.5
	GT 200	1977	75.0	33.1	85.0	33.7	16	350	3000	1275	727	8	1/1/2	7/9	125	26×9.2×8.4
美国WH公司	W251B	1980	38.9	28.5	42.0	28.8	12.4	168	5015	—	790	8	3	18	98	12.4×3.7×3.7
日本三菱公司	W501	1980	96.4	320	104.2	32.3	14.2	374	3600	1365	793	14	4	19	143	11.6×5.7×4.4
意大利Fiat 公司	MW701	1982	122.0	32.2	130	32.2	14.0	449	3000	1370	797	14	4	19	190	12.5×5.2×5.2
	W1101 (TG50)	1976	92.6	30.8	1000	31.1	12.0	393	3000	1340	778	18	4	20	160	14.2×4.3×4.5

以上是八年来燃气轮发电机组发展概况。但就工业燃气轮机而言，另一类作为机械驱动动力用的燃气轮机发展趋势也是相同的。根据1981年6月至1982年6月的统计表明：这一年全世界共生产了860台燃气轮机，其中580台用于发电，280台作为机械驱动动力用，燃气轮机总功率为1386万千瓦，与上一年度相比，其产量增长了25%，总功率增长了28%。又如联邦德国自1978年以来，除1981年外，共投运了60万千瓦燃气轮机，平均每年投运10万千瓦左右。

目前国外所用的各种型式的燃气轮机装置总装机容量已超过25000万千瓦（不包括航空和军用），其中有2/3用作发电，1/3作为驱动动力。在世界各地的分布，以盛产石油的中东地区最多，占总容量的25~30%，拉丁美洲为15%，非洲10%，美国约占9%，西欧为4%。

截止1981年的统计资料表明：在西方各国的工业中，共使用了16780台燃气轮机。其中美国制造占70%，英国占17%，法国占5%。而按用途分：其中49%用于发电，51%用于驱动动力。功率小于2.5万千瓦时制成双轴式，超过2.5万千瓦多制成单轴式。

目前燃气轮机制造企业西欧有25家，美国有10家，加拿大有2家。

国外主要企业在1976年至1982年期间投入运行的固定式燃气轮机装置的性能参数见表1-5。

显然，工业燃气轮机的发展与石油天然气工业的发展有着直接的关系。

第二节 技术发展动向

鉴于石油紧张，能源短缺等原因，国外制造燃气轮机的主要企业，为提高产品的竞争能力都在进一步设法提高燃气轮机的效率和单机功率，降低燃料消耗以节约能源。并且为燃气轮机能燃用多种燃料进行了大量的试验研究工作，如燃煤燃气轮机、组成装有煤气化设备的蒸汽燃气联合循环的发电装置以及燃用低热值气体或其他燃料的燃气轮机等，以使燃气轮机的应用开辟更加广阔的途径。同时，为保护环境，要求降低排气中 NO_x 排放量和消除振动与噪声以便达到国际规定标准。总起来说：当今世界燃气轮机技术发展趋势正在进一步提高机组效率和性能的基础上不断改进燃气轮机的热力循环，采用多种形式的联合循环装置；降低能源消耗；能燃用包括煤或其它劣质燃料在内的多种燃料；最大限度地减少对环境的污染。

一、提高热效率

提高燃气轮机热效率的方法在于提高透平初温和压比，改善叶片冷却；采用复杂循环，其中重要的发展方向之一是利用燃气轮机废热热能，并组成蒸汽-燃气联合循环等。

1. 目前发电用燃气轮机的透平初温约为1000~1100℃，试验研制性的燃气轮机约为1275~1460℃，日本1984年3月在东电公司袖浦火电站投运的AGTJ-100A型高效燃气轮机，其透平初温高压缸1300℃，中压缸1200℃，压比为55，综合效率达到50%（低热值）或45%（高热值）。

初温的数值大小随机型用途的不同差异较大，固定式燃气轮机（地面用工业燃气轮机）初温低于航空发动机，军用航空发动机又高于民用航空发动机。初温发展趋势是逐年增高，而且在一个较大范围内变化。根据国外资料，如图1-1所示。预计到2000年，地面固定式燃气轮机的初温可达1660℃。

初温的增加，使热效率提高，如图1-2所示，燃气轮机单机和蒸汽-燃气联合循环装置

的热效率都随着初温的上升而增加。同时，两种循环的比功率亦相应增加。在同一初温下采用蒸汽-燃气联合循环装置的效率是简单循环的1.4倍，而且随着初温的增加，两者的差别越大，当初温为1427℃时，可达1.6倍。

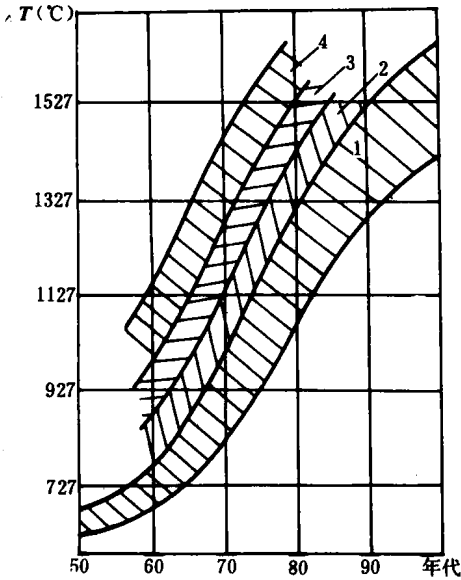


图 1-1 初温发展趋势

- 1—固定式燃气轮机 2—民用航空发动机
3—军用航空发动机 4—研究性机组

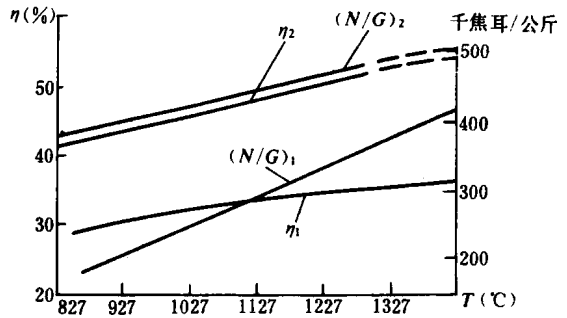


图 1-2 初温—效率曲线

- η_1 —燃气轮机效率 η_2 —联合循环效率
(N/G)₁—燃气轮机比功 (N/G)₂—联合循环装置比功。

初温的提高，使燃气轮机的性能得到改善。但是初温的提高有待高温材料的性能改进和热部件冷却技术的进步。比如采用定向凝固和单晶材料的叶片，采用冷却叶片。采用先进技术后，九十年代燃气轮机的初温可望达到1350℃以上。

2. 叶片冷却技术发展表明：无冷却的燃气轮机由于受到耐热材料的限制，初温只能达到900℃左右，而采用冷却技术使透平叶片冷却，则初温可达到1200℃左右。冷却的目的是既降低了整个零件的温度水平，又降低了局部温度梯度。温度的降低不仅使材料的热应力、氧化和蠕变减小，而且，因为材料的高温腐蚀反应与温度之间呈指数关系，同时减轻了材料的高温腐蚀。为了保持热部件的寿命，需将热部件的工作温度降到527~627℃。

目前实用的冷却方法仍采用空气冷却，即用从压气机引出来的冷却空气对高温部件进行强迫对流和冲击冷却。其次是水冷却和蒸汽冷却。采用水冷却和蒸汽冷却的方法目前仍在试验研究之中。用蒸汽冷却的历史最短，但因其具有较好的传热特性，已普遍引起有关国家的重视，现已作为提高热效率的重要技术途径而用于高温的燃气-蒸汽联合循环装置并加以研究。对于水冷却技术，普遍认为是很有前途的，如美国通用电器公司研制了水冷式透平喷嘴，当燃气温度为1349℃时，其透平喷嘴的自身温度仅为538℃（冷却水参数：进口压力87.7公斤力/厘米²，进口温度107℃，出口温度为201℃）。蒸汽冷却叶片的水平，目前已达到概念设计阶段，美国处于领先的地位，目前目标是研制能在透平进口温度为1207~1427℃级下工作的透平叶片。

气冷、水冷和蒸汽冷却这三种方法，就改善燃气轮机的热力参数而言，以采用蒸汽冷却效果最好。

3. 燃气轮机的应用前景日益受到能源价格的强烈影响。在世界范围内, 高效利用能源的联合循环装置得到迅速发展。这是因为: ①为节约能源提高经济效益; ②对提供电力起主要作用的火力发电站的热效率, 在技术上基本上已达到了极限。如图 1-3 所示。其中水平较高的发电站效率可以达到40%。因此有必要开发燃气轮机发电和用其产生的高温余热的汽轮机相结合的联合发电装置, 进而大幅度地提高效率。

目前, 世界上处于制造或设计阶段的燃气-蒸汽联合循环装置的总功率为700万千瓦; 加上已在运行的联合装置合计总功率在2400万千瓦以上。燃气-蒸汽联合循环装置进一步发展的基本趋势为: 提高功率和效率, 减少有害物质的排放, 提高可靠性, 简化维护工作和确保采用多种燃料。

燃气-蒸汽联合循环发电的热效率, 目前可达45%, 例如日本按“月光计划”正在建造并已部分投入运行的联合装置, 采用AGTJ-100A型高效燃气轮机, 功率为10万千瓦, 燃用液化天然气, 其联合装置的热效率可达45% (高热值), 年运行时间为4000~5000小时, 能承担中间负荷。与以前的发电方式相比, 其燃料消耗量可降低10%。又如1981年在联邦德国哈根哥本建造了一座装有两台7.75万千瓦的燃气轮机和一台8万千瓦的汽轮机组成的-燃气蒸汽联合循环电站, 燃料的利用率为60%, 单纯发电时, 发电机轴端效率为45%。联合装置的可靠性也在不断地提高, 如芬兰Mertaniemi热电站的一台热电联产联合装置, 从1975年至1983年已安全运行了8万小时。

国外对单独的燃气轮机装置、蒸汽轮机装置和联合循环装置, 在基本建设投资方面进行了比较, 结果表明: 若每年运行时间超过2000小时, 则联合装置优于其它装置。根据荷兰几家工厂的使用情况表明, 用联合装置发电比较经济, 发出1千瓦电所需基本建设投资约为500美元。

在燃气-蒸汽联合循环中, 用余热锅炉回收燃气轮机的排气余热, 可以发电, 供热以及热电联供。如美国佛罗里达州达德镇安装的一套热电联供的联合装置, 于1984年正式投运, 基本负荷为2.16万千瓦。在发电的同时, 还可提供5200吨/时蒸汽用于空调, 并且每分钟可提供1.1吨热水 (该联合装置的燃气轮机为英国Rolls Royce公司生产的SK 30型Olympus燃气轮机发电机组, 额定功率为1.7万千瓦)。也有的利用余热锅炉产生的蒸汽注入燃气轮机燃烧室进口, 以提高功率和效率, 如初温为1204℃的简单循环燃气轮机, 注入由余热锅炉产生的蒸汽 (蒸汽压力为2.254兆帕, 温度510℃), 注入量与空气流量之比为0.155:1, 耗水量约为1.13公斤/千瓦小时。结果燃气轮机效率由32%提高到40%, 比功率增大30%。

二、燃用多种燃料

历年来, 工业燃气轮机以燃用蒸馏油和天然气为主, 但由于石油危机, 能源短缺, 价格上涨, 以及自1976年以来供应燃气轮机的气体燃料出现中断现象等原因。因此目前世界各国正在研制使用代用燃料的燃烧系统以及燃煤技术。

代用燃料是指低热值气体, 其热值为175~4400千卡/标米³, 如高炉煤气, 焦炉煤气、

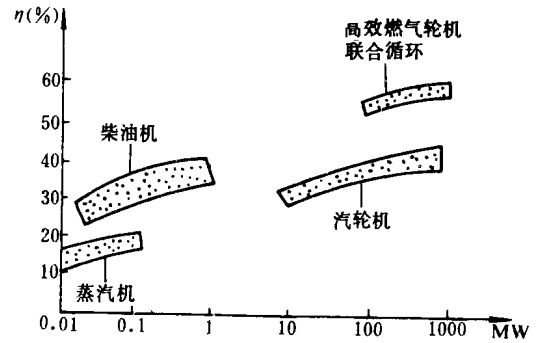


图 1-3 联合循环发电装置的热效率

电炉排气, 矿井瓦斯气、污泥发生气、垃圾堆积发酵气等。燃煤技术是指煤的液化、气化和直接燃烧煤粉和水煤浆的燃烧技术。其它燃气轮机燃料还有液化石油气、甲醇、丁烷、丙烷、氢气等。

近期各国研制的燃气轮机燃料使用情况, 经收集其主要部分列于表 1-6。

表 1-6 近期各国燃气轮机燃料使用情况

国家	机 型	性 能	燃 料 情 况	注
美	GT-35	供电1.2万千瓦	燃用甲烷与煤矿瓦斯气的混合物, 其热值为18~23兆焦耳/标米 ³ 。	计划1984年投运
日	MW-151S	初温1000℃高温燃气轮机	燃用高炉煤气, 热值670千卡/标米 ³ 。	1983年投运
日	SB60C-M	初温 1000℃, 排温 466℃, 热效率30.6%, 功率1.3万千瓦	可燃气体燃料, 液体燃料和混合燃料, 气体燃料不用助燃, 热值最低可达 600 千卡/标米 ³ 。	1982年完成
瑞士	11	27.5万千瓦联合循环电站用	重油	1983年投运
美	1E990	热电联产用	起动用高压天然气, 到达工作转速前用柴油, 以后自动转入气体燃料-天然气。事故备用燃料用石油残余燃料。	已投运
美	W501	37万千瓦联合动力装置	燃用天然气、蒸馏燃料、化工厂副产品 (主要是氢气)。	计划1985年投运
日	AGTJ 100A	单机功率12.2万千瓦	液化天然气	1984年投运
美	W191 (改)	功率15520 千瓦, 初温 816℃, 热电联产	原燃烧室改为外部流化床空气加热器, 烧煤。	1982年投运
美	AGT 5	汽车用燃气轮机	直接烧煤粉	正在试验中
美	EM610	功率6万千瓦	以沸腾炉中煤炭燃烧后的产物作为燃料	1981年制成

三、迅速发展的污染控制技术

排气污染控制的研究进展较快。在地面燃气轮机中, 目前研究的 NO_x 控制方法, 是喷水或水蒸汽 (湿法) 以及发展低污染燃烧室, 改进燃烧室设计 (干法)。干法又分为分级预混燃烧室和催化燃烧两种。目前, 湿法已进入实用阶段, 而干法处在研究阶段。

燃气轮机排气中有害成分含有 CO 、碳化氢、碳粒、 NO_x 、 SO_2 等, NO_x 直接参与光化学烟雾的形成。

根据美国专利, 降低排气中氧含量的方法可以采用余热锅炉的部分排烟在燃气轮机压气机进口处再循环, 这样可以减少氧的含量而增加二氧化碳含量。美国环保局对燃气轮机所排放的 NO_x 总量提出了严格的规定, 在最大间断和基本负荷下, 现用的排放 NO_x 的极限值为75ppmv (百万分之一体积)。

为了控制 NO_x 的生成, 各国都正在研究并已出现了一批研究成果。如日本于1982年6月提出一项在燃烧室出口处可以获得较低的氮氧化物浓度的专利, 具体方法是: 利用与燃气轮机整定功率和实际功率成正比的信号差, 经转换使它作为控制信号来调节燃料供给量, 又根据与氮氧化物的实际浓度和给定浓度成正比的信号差来调节燃烧室的喷水量或喷气量。又如美国于1981年提出, 在进入燃烧室氧化区和燃尽区的空气中加入一种添加剂, 可以使 NO_x 降

低,该方法能使 NO_x 浓度下降63%,等等。

目前所用的抑制 NO_x 生成的方法主要是降低火焰温度和减少燃料在火焰中停留的时间,但据美国1983年底发布的专利认为:由于紊流扩散火焰的特性所致,在实践中难以满意地抑制 NO_x 的生成。

为此,改进燃烧室设计,发展低污染的燃烧室已势在必行。例如,美国能源部/刘易斯研究中心对富-贫扩散火焰型燃烧室进行了试验,和美国Solar(索拉)公司对这种燃烧室所进行的设计和试验工作都表明:在不喷水的情况下,这种燃烧室具有很高的燃烧效率和很低的 NO_x 的排放量。又如美国1983年底提出的专利,确定两级燃烧系统为一种新型燃烧系统,它在燃用各种气体燃料和蒸馏油时,在各种工况范围内都能保证可以明显减少有害成份析出量的火焰温度。

催化型燃烧室的试验研究工作亦在加紧进行之中,如美国GE公司进行了初步设计和试验,在出力为8万千瓦的重型燃气轮机上,当采用低氮份的石油蒸馏燃料(含氮量为500ppm_v以下),催化反应出口温度为1097~1427℃,在基本负荷条件下, NO_x 生成物不超过20ppm_v,而燃烧效率和一般燃烧室相同。

四、其他方面

1. 目前燃气轮机已用来作连续基本负荷发电,或作驱动动力源使用。热电联供的能力亦将随着透平进口温度的提高而使透平排气温度稍加提高而增大。由于航空发动机具有轻便、灵巧等独特的优点,近年来在工业燃气轮机生产中广泛采用航空方面的技术,从而使燃气轮机的比功率大大提高,而总重量却大大减小。航空改型机在发电、舰船、交通运输、石油化工等部门的应用有着广泛的前景,如英国Rolls-Royce公司生产的工业型“埃汶”(“AVON”)型燃气轮机已达700余台。

2. 在监测方面:红外监测设备可在燃气轮机运转的情况下监测高温区零部件,如叶片的温度及其表面温度分布;柔性光纤探测镜可用来探测机体内曲折隐蔽处零部件的完好情况,光纤探头可将观测到的图象放大20倍,而且探头的方向可以任意改变。

近几年来,燃气轮机排气中烟粒子生成规律及其测量技术已成为化学和检测技术中比较活跃的研究领域。发展烟粒子测量技术对研究烟粒子生成机理、火焰辐射,火焰筒寿命及排气冒烟等是颇为重要的。

激光多普勒测速仪和测振仪的问世,代表了实验研究中测试技术发展的一种趋势。这种仪器对于探测转子叶片通道流场和燃气流场是十分有效的,也是唯一可行的。

3. 目前微处理技术和与此相联系的各种微型计算机系统得到迅猛发展,因而导致微型计算机控制的应用渗透到各个不同的技术领域,它使传统的测量与控制仪器仪表系统发生了巨大的变化。十多年来以微处理机为基础的智能仪器获得了迅速发展,并已成为八十年代测控自动化系统的核心,代表了发展方向。

在工业燃气轮机的监视和自动控制方面,目前微机已用于燃气轮机的稳态自动调节,起、停和两次变动时的程控,以及保安、数据监测,数据采集处理,並可实现遥控、机组故障预报等。

第三节 在舰船和海上平台上的应用

一、燃气轮机在舰船上的应用

近年来燃气轮机装舰使用又得到很大发展，现在已有四十多个国家的海军采用燃气轮机作为一部分舰艇的推进装置，其中以苏、美、英三国所占的比重最大，发展也最快。目前，世界上使用的舰用燃气轮机大都是由这三个国家制造的。

舰用燃气轮机主要由航空发动机改装而成，故仍保持航空发动机轻、小、可靠、反应快等优点，缺点是负荷低、经济性差。因此，燃气轮机常与其它主机或多机并车组成联合动力装置，扬长避短，加速舰船动力装置的发展。

舰船用动力装置，自七十年代中期以来，蒸汽轮动力舰艇明显减少，而装有包含燃气轮机的联合动力装置的舰艇却显著增加。主要原因是发达国家对护卫舰和轻型护卫舰的航速要求提高，而续航力又不降低，燃气轮机显示有很好的优越性。装配各种动力装置的主要水面舰艇数量按年代列于表 1-7。

表1-7 装配各种动力装置的主要水面舰艇数量

舰种 动力装置 舰艇数量(艘) 建造年代	护卫舰、轻型护卫舰			驱逐舰、巡洋舰、航空母舰			
	蒸汽轮机 动力	柴油机 动力	含燃气轮机 的联合动力	蒸汽轮机 动力	柴油机 动力	核 动力	含燃气轮机 的联合动力
1970~1974	53	35	79	27	3	1	15
1975~1979	5	49	110	10		6	31
1980~1984	4	66	164	13		2	28

从舰船的吨位来看，小到几十吨的舰艇，大到两万吨级的航空母舰，都装有燃气轮机联合动力装置。而这种动力装置的舰船经历了英、阿、马岛战争的实战考验，在双方参战的19艘舰只中，没有一艘因动力装置发生故障而退出战斗的。这一成功事实将对今后舰用燃气轮机的发展起到一定的促进作用。

舰船用燃气轮机的发展到目前为止已有三十余年的历史，已研制了许多不同功率等级的燃气轮机动力装置。其中以英、美、苏三国为主，并形成系列：小功率挡燃气轮机适合气垫艇、快艇用，如英国“苔茵”RM型机和美国570KF型机均已装舰使用。苏联小功率机仅作气垫艇和快艇主机，未作巡航机用；苏联五十年代研制并发展的M2型和M3型中等功率燃气轮机，性能较差。美国研制的LM1500型机仅在水翼艇上用过，目前正在研制LM1600型机，以提高中挡功率燃气轮机的性能。英国在七十年代中期开始研制“斯贝”SM型机；大功率舰用燃气轮机均由航空型改装过来的，其中以美国LM2500型最为先进，装舰台数占首位，使用范围广，可以从290吨快艇到万吨以上航空母舰上使用。国外舰用燃气轮机系列见表1-8所示。

二、燃气轮机在海上平台上的应用

从海底开采石油和天然气需要有浮动的或非浮动的海上平台，在这种平台上装有泵、压气机、发电机、钻孔装置等作业设备。这些设备的功率可达到3~4万千瓦，通常采用工业型燃气轮机和航空改型燃气轮机作为动力源。

表1-8 国外舰用燃气轮机系列

国家	机 型	功率 (千马力)	耗油率 (克/马 力·小时)	首次检修 时 间 (千小时)	装舰台数 (含已订货) (台)	装 舰 排水量 (吨)	装 舰 对 象			
							快艇	气垫艇	舰	水面舰艇
英 国	普鲁格斯1270	4~4.5	270~290	1~2	203	50~300	主机	主机		
	苔茵R M	4~5	210~220	2~3	154	60~5000	主机			中型, 巡航机
	斯贝S M	17.1	180	8	57				小型主机	
	奥林普斯T M	22~30	205~225	4	231	750~20000			大型主机	中小型加速机
美 国	T F	2.5~4	250		73	50~250	主机	主机		
	570K F	6~7	210				主机			中小型巡航机
	L M500	5~5.5	~215		4		主机		大型舰电站	
	L M2500	25~30	170	8	428	290~15000				中小型舰加速机、大中型舰主机
苏 联	船用A И -24	2	280	3				主机		
	船用A И -20	4	280	3	30			主机		
	船用H K -12M	12	270		216	350~1200			轻型护卫舰加速机、大型气垫艇主机	
	M - 2	15	260	1	48	~1000			轻型护卫舰加速机	
	M - 3	18	290	5	204	3000~4000			中型主机	
	船用H K -144	25	200		102	900~13000			中小型舰加速机、大型舰主机	

海上平台有单层和多层结构，燃气轮机可以安装在中间层或顶层上。海上平台使用燃气轮机装置的主要问题是防止海水和盐雾空气所引起的腐蚀。

目前，已有多种工业型和航空改型燃气轮机在海上平台上应用，例如：美国索拉公司约有800台工业型燃气轮机用于海上平台，累计运行时间超过2500万小时；英国罗斯顿公司约有250台工业型燃气轮机在32个国家的海上平台上使用，其中仅在北海油气田就安装了106台；美国GE公司已有120多台5000至30000马力的燃气轮机用于海上平台，主要型号有3000系列、5000系列的工业型燃气轮机和航空改型机LM1500、LM2500型燃气轮机；英国GEC公司已有48台燃气轮机，其中有45台是“埃汶”型航空改型燃气轮机用于海上平台，累计运行已达22万小时。

海上平台目前使用的比较多的燃气轮机主要技术参数列于表1-9。

表1-9 海上平台用燃气轮机主要技术参数

企 业	型 号	型 式	功 率		效率 (%)	压 比	转 速 转每分	重 量 (吨)
			马 力	千 瓦				
罗斯顿 (英)	T A 1750	工业型	1875		18.3	4.3	6600	6.38
"	T A 2500	"	2500		21.1	4.9	7950	9.08
"	T B 4000	"	3920		22.5	6.05	7950	12
"	T B 5000	"	4900		25.4	7.0	7950	13.62
加勒特 (美)	IE 831 800	"	690		20.8	11	41730	0.795
康斯贝尔格 (挪威)	K G 2	"		1470	17.4	4.1	18000	2.75
"	K G 5	"		2960	23.3	6.3	12000	3.76
"	K G 831	"		530	21.8	11	41730	0.77
索拉 (美)	土星	"		900	21.7	6.2	22300	5.22
"	半人马座	"		3130	24.6	9.0	14950	18.16
"	火星	"		8160	32	16	8100	68.2*
斯达尔拉伐尔 (瑞典)	G T 35	"		12600	28.7	12	3000**	50
GE (美)	P G 5341	"		24700	27.4	10.1	5150	254.4*
"	M3142	"	14600		26.7	6.0	6500	54.5
R - R (英)	S K 30, 奥林普斯	航改型		28100	30.6	11	3000	333.6*
R R (英)	S K 25, R B 211	"		23800	34.7	19.2	3000	172.6*
G E C (英)	E A S 1 33, 埃汶	"		12200	27.6	9.8	6500	32.9
GE (美)	L M2500	"		17550	34	18	3600**	100*
石川岛播磨 (日)	IM1500	"		10300	24.5	11.6	3600**	16.5
联合技术公司 (美)	F T 4C -3F	"	39000		31.9	14.5	3600**	13.16
古柏 (美)	古柏2348, 埃汶	"	16150		27.6	8.8	5200	22.68

* 发电机组总重量。

** 齿轮箱输出轴转速。

第二章 燃气-蒸汽联合循环

一、引言

燃气-蒸汽联合循环(以下简称联合循环),是指蒸汽轮机循环(Rankine循环)和燃气轮机循环(Brayton循环)的组合;因此,联合循环就是取燃气轮机循环的高温吸热和蒸汽轮机循环的低温放热之长,从而大大提高循环效率,即提高能源利用率。所以,联合循环是一项有效的节能措施。英国J.B燃气轮机工程公司对燃气轮机初温为1000℃的联合循环(以油和天然气为燃料)在能源的利用方面作过如下分析:

(1) 简单循环的燃气轮机发电厂,燃料能量中30%转换为电力,其中70%为热损失;

(2) 联合循环发电厂,以余热锅炉加凝汽式汽轮机的情况为例,燃料中30%由燃气轮机循环转换为电力,15%燃料能量由蒸汽动力厂循环转换为电力(合计循环效率为45%),热损失55%;

(3) 热电联产的联合循环,联合循环由燃气轮机循环加余热锅炉和背压式汽轮机组成。燃料中能量转换分配为:燃气轮机循环转换28.5%,蒸汽轮机循环转换9.5%,供热量占燃料能量的29%,因此,能量转换总效率达67%,热损失仅为33%;

(4) 供电和区域供热式联合循环,同样由燃气轮机循环加余热锅炉和背压式汽轮机组成。燃料中能量转换分配为:燃气轮机循环占30%,蒸汽轮机循环占10%,供热量占40%(合计能量利用效率达80%),热损失仅为20%。

与当前高参数大容量蒸汽轮机(30万千瓦、60万千瓦机组)的电站效率约40%相比,发电效率要高5%以上。与同功率蒸汽动力厂相比,投资可减少30~50%,建设周期可缩短20%,用水量可减少1/2到2/3,占地面积和对大气的污染都有减少,所以近一、二十年联合循环在国外得到了普遍采用。联邦德国1971年第一台联合循环才投入运行,而1971年~1978年间投入的联合循环设备已约占总投入装机容量的25%左右。联合循环用在改造老的蒸汽轮机电站,扩大动力,提高热能利用率,对于燃料为天然气或轻柴油的发电厂最有利。过去十余年中,用联合循环改造老电厂,扩大动力的容量达150万千瓦之多,其中多数集中在美国。

直至现在,联合循环主要还以天然气,轻柴油或重油为燃料。1973年世界第一次石油危机以来,各国以矿物燃料为燃料的发电厂开始研究从烧油转向烧煤;八十年代开始,对以煤为燃料的联合循环进行了广泛的宣传,美、英、联邦德国等国加速了对煤的气化、液化技术,以及对直接烧煤的沸腾床(流化床)联合循环的研究工作。在煤气化联合循环的研究方面,1984年6月24日美国10万千瓦级的“冷水工程”已投入商用化运行,被认为是当前在煤气化联合循环的方案中最有发展前途和成熟的气化工艺流程,它预示从煤转变成适合于燃气轮机使用的“干净燃料(或干净烟气)的制备过程中,“煤的高效率‘气化’及‘余热回收技术’包括气体净化技术”已达到实用阶段,且与蒸汽发电相比已能显示出它的技术经济效益和良好的投资效果。以煤为燃料的联合循环已进入了一个新的阶段,预期会在许多国家中迅速地得到推广应用。

二、联合循环发展现况

瑞士BBC公司1932年实现了废气涡轮增压器的正压锅炉(Velox锅炉);四十年代实

现了联合循环的实验装置,但直至六十年代初,联合循环发展缓慢,主要因为蒸汽动力厂循环在功率和效率上有了较大的发展(效率已达40%);而燃气轮机热效率和单机功率均较低、小,(效率低于29%,单机功率小于5万千瓦)。六十年代后期,特别在七十年代开始,由于航空发动机改型为地面工业燃气轮机和舰船主机,以及航空燃气轮机技术在工业领域内的推广应用,促使工业燃气轮机在热效率和可靠性方面有了很大提高。目前,工业型燃气轮机单机功率已超过10万千瓦,进气温度在1100~1200℃之间;简单循环效率达33%;航空发动机改型的LM2500、LM5000型工业燃气轮机简单循环效率达37%。目前世界上已运转的以天然气或液化煤气为燃料的联合循环效率已在47%以上;由于蒸汽动力厂循环的热效率在40%的基础上再想提高已很困难,所以联合循环已成为当前生产发展的必由途径之一,亦是一项节能主要措施。目前世界上已经建设的联合循环装置总功率已在2400万千瓦以上,广为人们所采用。这些以矿物油和天然气为燃料的联合循环设备,国外已商用化、大型化和系列化。

代表当前水平的美国通用电器(GE)公司;美国西屋(W.H)公司;以及英国的罗斯-罗伊斯(R.R)公司的联合循环产品系列如表2-1、2-2、2-3所示。

表2-1 美国通用电器(G.E)公司联合循环产品系列

型 号	功率范围 在标准态下,电机 端基本负荷时的功率 (百万瓦)		热 耗 (LHV) 千焦耳/ 千瓦小时	循环 效率 %	联合循环 输出功率 (兆瓦)	燃 气 轮 机				
	燃气轮机	蒸汽轮机				台数	型 号	进气温度 ℃	排气温度 ℃	废气排量 公斤/秒
S-205	49.6	21.7	9207.9	39.1	71.3	2	5001(P)	957	493	121.1
S-405	99.2	43.4	9207.9	39.1	142.6	4	5001(P)	957	493	121.1
S-206	73.2	32.0	8163.7	44.1	105.2	2	6001(B)	1104	543	136.4
S-406	146.4	62.3	8227	43.8	208.7	4	6001(B)	1104	543	136.4
S-107E	75.8	32.5	8058.3	44.7	108.3	1	7001(E)	1104	538	277.2
S-207E	151.6	64.7	8047.7	44.7	216.3	2	7001(E)	1104	538	277.2
S-407E	303.2	130.6	8047.4	44.7	433.8	4	7001(E)	1104	538	277.2
S-109E	108.8	42.7	8311.4	43.3	151.5	1	9001(E)	1093	528	397.8
S-209E	217.6	86.4	8290.3	43.4	304.0	2	9001(E)	1093	528	397.8
S-309E	326.4	130.2	8279.8	43.5	456.6	3	9001(E)	1093	528	397.8

注: 1. 计算循环热效率按蒸馏油低热值为43110.7千焦耳/公斤。
2. 废气排量为单台燃气轮机的数值。

表2-2 美国西屋(W.H)公司联合循环产品系列

型 号	功率范围 在标准态下,电机 端基本负荷时的功率 (兆瓦)		热 耗 (LHV) 千焦耳/ 千瓦小时	循环 效率 %	联合循环 输出功率 (兆瓦)	燃 气 轮 机				
	燃气轮机	蒸汽轮机				台数	型 号	进气温度 ℃	排气温度 ℃	废气排量 公斤/秒
PACE 5001	100.7	43.9	7773.5	46.31	144.6	1	501D	1107	521	367
PACE 5012	201.4	87.8	7773.5	46.31	289.2	2	501D	1107	521	367
PACE 5013	302.1	131.7	7773.5	46.31	433.8	3	501D	1107	521	367
PACE 5014	402.8	175.4	7773.5	46.31	578.2	4	501D	1107	521	367
PACE 5015	503.5	219.3	7773.5	46.31	722.8	5	501D	1107	521	367

注: 1. 计算循环效率按蒸馏油低热值为43110.7千焦耳/公斤。
2. 废气排量为单台燃气轮机的流量。