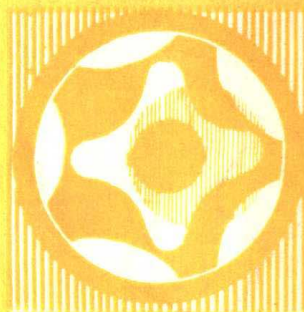
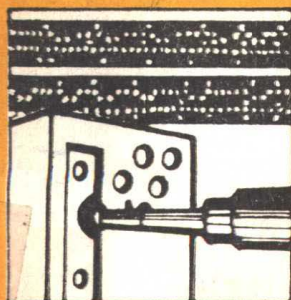
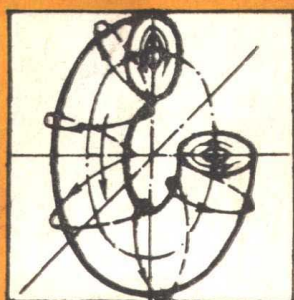
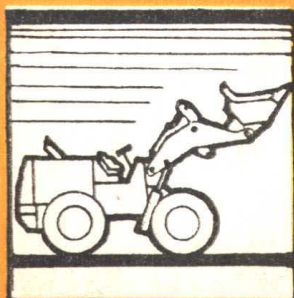


高等学校试用教材



燃气轮机装置

上海机械学院沈炳正 编



机械工业出版社

03003

TK47

1

高等学校试用教材

燃气轮机装置

上海机械学院沈炳正 编

机械工业出版社

燃气轮机装置

上海机械学院沈炳正 编

*

机械工业出版社出版(北京阜成门外百万庄南街一号)

(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

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

*

开本 $787 \times 1092 \frac{1}{16}$ · 印张 12 · 插页 2 · 字数 292 千字

1981 年 7 月北京第一版 · 1981 年 7 月北京第一次印刷

印数 0,001—2,800 · 定价 1.35 元

*

统一书号: 15033 · 5044

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誊清工作，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。

目 录

前言

第一章 绪论	1
§ 1-1 燃气轮机装置的组成	1
§ 1-2 燃气轮机发展史	1
§ 1-3 现代燃气轮机的结构特点	5
§ 1-4 现代燃气轮机的技术经济性	6
§ 1-5 当前国外燃气轮机主要问题与研制动向	8
§ 1-6 我国燃气轮机工业概况	10
第二章 燃气轮机热力循环	15
§ 2-1 燃气轮机热力循环	15
§ 2-2 燃气轮机循环的主要指标	15
§ 2-3 等压燃气轮机理想简单循环	16
§ 2-4 理想回热燃气轮机循环	19
§ 2-5 理想间冷循环及其压比最佳分配	20
§ 2-6 理想再热循环及复杂循环	22
§ 2-7 实际燃气轮机与理想循环的差距分析	24
§ 2-8 实际燃气轮机循环性能	30
§ 2-9 轴系方案对循环设计参数的关系	33
§ 2-10 喷气发动机循环	33
§ 2-11 闭式气轮机循环	37
§ 2-12 燃气蒸汽联合循环	39
§ 2-13 内燃机燃气轮机复合循环	42
§ 2-14 工业过程燃气轮机和总能量燃气轮机	44
§ 2-15 燃气轮机循环计算	45
第三章 燃气轮机燃烧室	55
§ 3-1 等压燃烧室的要求	55
§ 3-2 燃烧室结构与形式	58
§ 3-3 燃烧过程	62
§ 3-4 燃烧室气流的组织	64
§ 3-5 喷油嘴	65
§ 3-6 燃料及供应系统	67
§ 3-7 燃料灰分腐蚀与处理	70
§ 3-8 排气污染问题	72
§ 3-9 燃烧室设计与调试	72
第四章 热交换器	74
§ 4-1 燃气轮机回热器的作用和要求	74
§ 4-2 表面式回热器的形式与结构	75

IV

§ 4-3 管式及板式回热器的计算原理	77
§ 4-4 高压回热器	80
§ 4-5 再生式回热器	82
§ 4-6 回热器的变工况	84
§ 4-7 间冷器和冷油器	85
第五章 燃气轮机机组变工况	86
§ 5-1 研究燃气轮机变工况的意义与目的	86
§ 5-2 燃气轮机机组部分负荷的计算方法	87
§ 5-3 单轴燃气轮机变工况	93
§ 5-4 分轴式燃气轮机变工况	100
§ 5-5 双轴机组变工况	108
§ 5-6 回热、再热及间冷装置变工况	109
§ 5-7 三轴及多轴轴系方案变工况	111
§ 5-8 气候与海拔对燃气轮机工况的影响	114
§ 5-9 闭式气轮机的调节及变工况	118
§ 5-10 燃气轮机过渡工况、起动及加速	119
§ 5-11 起动机类型及选择	122
§ 5-12 燃气轮机变工况常遇的问题及对策	123
§ 5-13 各种轴系的部分负荷特性小结	124
第六章 燃气轮机的应用与构造	128
§ 6-1 燃气轮机的分类、应用范围及同环境资源的关系	128
§ 6-2 中、大型发电和机械动力用燃气轮机的特点和要求	129
§ 6-3 中、大型燃气轮机动力站的技术经济性	132
§ 6-4 原子能气轮机	133
§ 6-5 运输式燃气轮机的特点与要求	136
§ 6-6 PG5331 型 23000kW 单轴燃气轮机	147
§ 6-7 JT3D 涡扇发动机及 FT9 船用燃气轮机	153
§ 6-8 Spey 发动机及其陆海改型	156
第七章 燃气轮机的附属系统与监护	160
§ 7-1 管路系统和消音、滤气设备	160
§ 7-2 高温部件的冷却系统与热膨胀问题	162
§ 7-3 燃气轮机的基础、支承与布置	167
§ 7-4 燃气轮机的滑油系统	173
§ 7-5 燃气轮机的运行监视	175
§ 7-6 燃气轮机的维护	177
§ 7-7 燃气轮机的故障原因及处理	178
附录一 燃气热力性质曲线与热力性质表	179
附录二 本书的符号与单位表	186
附录三 本书中一些单位的换算	187

第一章 绪 论

§ 1-1 燃气轮机装置的组成

燃气轮机装置简称燃气轮机，是一种完整成套的动力装置，是由压气机、燃烧室、透平，有时还有换热器等主要分部组成的回转式热机。

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，同时都在连续不断地工作。因此燃气轮机是一种连续式热机。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，例如氦气。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，用水泵代替压气机加压，用锅炉加热，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。从广义上说，可以认为蒸汽燃气联合循环、内燃机增压器等也属于这个范畴。涡轮增压内燃机可以看作是燃气轮机与活塞式机械的联合形式。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

（一）1900年以前

人们对燃气轮机的向往已久，但由于社会生产能力的限制，二十世纪之前这个理想未能实现，仅有过一些零星的雏型创造。例如 690 年左右我国张遂（唐僧一行）曾用燃气激动铜轮；959 年前后，北宋以前，我国已有走马灯的创造（图 1-1）；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，约在十八世纪末年才开始。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。

二十世纪之前，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。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。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

能力和人们从实践得来的知识，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的。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，因此三十年代以前虽经试验，但仍未获得实用。

（二）1900~1939年

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，而具备了生产燃气轮机的条件。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马力等容燃烧式燃气轮机，它是第一台在工业上长期运转的装置。

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。1929年起BBC(曾改为BST)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。到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装置的效率达到18%。同年EW公司(现并入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又制成了第一台燃气轮机车，功率为2200马力，效率达16%。

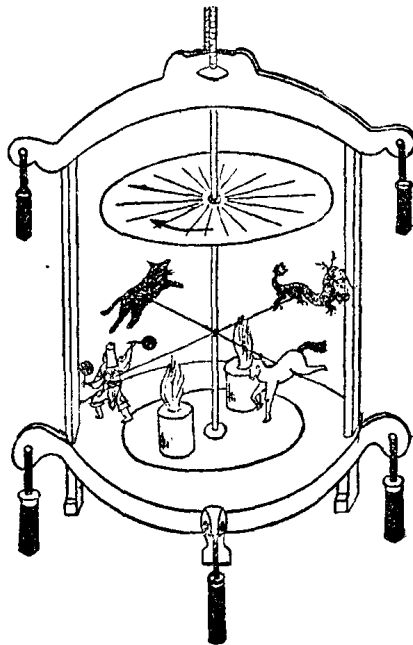


图1-1 走马灯-燃气透平锥型

（三）四十年代

第三阶段是生产了第一代工业上实用的燃气轮机和喷气发动机，并积累了运行经验。在这个阶段中，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。尤其是在40年代后期，航空上涡轮喷气发动机由于比活塞式轻小、功率大，所以得到迅速发展，在军用飞机方面已达到了广泛的程度。

（四）五十年代

第四阶段中，工业用燃气轮机在上述许多机组的设计及运行经验之上研制出来。喷气发动机在航空工业中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。它非但对陆海用燃气轮机的改革和发展起了决定性引导作用，而且对蒸汽轮机和透平式压气机工业也起了带动作用。这些轻型结构的燃气轮机在同根据蒸汽轮机传统设计的重型结构燃气轮机的竞争过程中，到50年代后期，占了优势。同一时期，自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。由于小功率装置的技术周期比较短，较成熟的小功率燃气轮机也在这个阶段的后半期制造出来。

（五）六十年代

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。喷气发动机

被成批地改装成陆海用装置，单机功率已达 10 万 kW，象蒸汽轮机那样分散式的重型结构燃气轮机逐渐被淘汰。在这种情况下，苏美英三国决策更新海军，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功率燃气轮机的推广，故在 60 年代这十年中，陆海用燃气轮机功率总容量猛增至 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 9500 万马力，其中 4500 万马力用于发电，800 万马力用于舰船。

(六) 七十年代

最近十年，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全自动化。透平进气温度近 1400℃，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 11 万 kW，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，功率可达 16~35 万马力。已在建造 60 万 kW 闭式气轮机和设计 130 万马力原子能氦气轮机。1975 年陆海用燃气轮机已有 26000 万马力，舰船用约占 2000 万马力。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有 70% 的零部件可以通用，其余 30% 的零件则需重新设计，以适应不同用途的要求，另外还要加配动力透平，所以航机改型的大修间隔有的已超过 5 万小时。70 年代中，由于产油国禁运石油，油价提高几倍，影响深远，西方国家工业萧条，用电量下降。且因燃气轮机效率不如蒸汽轮机和增压柴油机，高温燃气轮机又难以燃用重燃料，同时还由于某些国家空气污染严重，燃用劣质重燃料受到限制，故燃气轮机在西方电业界中发展遇到困难，制造厂及用户大都希望发展与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。这个时期，海军和石油、天然气方面用的燃气轮机继续增长，坦克也开始正式采用燃气轮机。到目前为止，陆海用燃气轮机已超过 3 亿马力。各年代开式燃气轮机性能的发展概况见表 1-1。七十年代各厂先进的中、大型机组参数见表 1-2。

表1-1 各年代燃气轮机性能发展概况

年 代	功率 kW		燃气温度	压 比		机组效率		大修间隔 小时		控制系统	维修要求	代表机组
	单 机	航机 组装	℃	单压 气机	双压 气机	简单 循环	回热 循环	航机 改型	工业型			
四 十	<2.7万	—	600~760	4~6	<12	<17%	<28%	—	<5万	液压调节、 手控	随时监护、 检修	EBC重型 27000kW
五 十	<4万	<3000	650~790	5~9	<16	<21%	<29%	<几千	<10万	电液调节、 半自动化	随时监护、 定期检修	GE工业型 17000kW
六 十	<5万	<10万	750~1000	6~11	<19	<29%	<33%	<2万	<10万	可遥控全自 动	定期小修， 备件更换，大 修停机	GE工业 大型箱装 PG7000
七 十	<12万	<32万	850~1400	7~17	<30	<36%	<38%	<5万	<15万	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
八 十 (预测)	<25万	<50万	950~1600 液冷2000	8~22	<35	<40%	<45%	<10万	<15万	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	

表1-2 70年代各厂先进中、大型机组参数

厂	型	功率	效率 %	压 比	燃气温 °C	流 量 kg/s	输出转速 rpm	轴 系*
GE	PG9111	9.44万kW	31.4	9.5	1065	344	3000	17C— ^{14分} 3T—N
	LM2500	2.68万PS	34.4	18	1260	65	3600	16C— ^{1环} 2HT, 6LT—N
	LM5000	3.7万kW	36	29	1260	122	3600	14HC— ^{1环} 2HT, 5LC—1MT, LT—N
PW	FT4C3F	3.9万PS	31.3	13	982	116	3600	7HC— ^{8环管} 1HT, 9LC—2MT, 3LT—N
	FT50 (GT200STAL)	8.5万kW	33.8	16	1150	347	3600 (3000)	10HC— ^{8环管} 1HT, 7LC—1MT, 2LT—N
	FT9	3.3万PS	35.7	18.8	1200	96	4000	11HC— ^{1环} 2HT, 6LC—1MT, 2LT—N
	Spey	1.38万kW	33.9	18.2	1030	55	5000	11HC— ^{10环管} 2HT, 5LC—2MT, 2LT—N
RR改型	RB211	2.38万kW	34.7	20	1010	85	3600	6HC— ^{1环} 1HT, 7LC—1MT, LT—N
	Olympus593	4.4万kW	~33	~14	~1200	~188	3000	7HC— ^{1环} 1HT, 7LC—1MT, LT—N
WH	W1501	9.9万kW	30.9	12	1180	380	3000	20C— ^{18环管} 4T—N
	W352	3.7万PS	29.2	8.7				17C— ^{8环管} 1HT, 1LT—N
		3.08万PS回热	37.9	7.9	1010	120	5000	16C
BBC	13	8.69万kW	30.4	9.7	1010	366.5	3000	17C— ^{1筒} 5T—N
KWU	V94.1	10万kW	31.4	10	950	482	3000	17C— ^{2筒} 4T—N
JM3	ΓT-100-750 间冷再热	10万kW	28.8	26.5	750	444	3000	13HC— ^{12环管} 3HT, 8LC— ^{12环管} 5LT—N

备注* C压气机, T透平, N负荷, H高压, M中压, L低压, “——”同轴, “,”不同轴, 大号数字 级数, 小号数字 个数, 汉字 燃烧室型式

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 及 70 年代的生产竞争中, 陆海用燃气轮机的制造企业通过兼并和协作, 以 GE、PW、RR、WH 和 BBC 五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。

上述五个最大集团的产量占世界陆海用大中型燃气轮机的绝大部分。其中产量最大的三家, GE、PW 和 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、轻型发展, 比较先进。而原来产量较多的 WH 和 BBC 则因不研制航空发动机, 缺少第一手先进的研制成果, 难以竞争, 于是从第二、三位逐渐退居到第四、五位。分析苏联陆海燃气轮机发展中的经验教训, 也可得出同样的结论。

§ 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蒸汽轮机两大工业。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, 反映在单位功率机重的指标上大致是: 轻结构 $< 10 \text{ kg/PS}$, 重结构 $> 15 \text{ kg/PS}$ 这两派在燃气轮机工业发展的过程中, 互相竞争对峙了二十年, 至 60 年代, 轻结构派在工业实践中取得了胜利。后来, 由于用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机改型与工业型两支。后者目前也称为重载负型, 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°C 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, 透平进气温度已有采用 $1050 \sim 1460^\circ\text{C}$ 的。

高温零件的热应力大小取决于零件尺寸、温度场的分布、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%, 有的可能膨胀几十毫米之多。因此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度。在燃气轮机自冷车快速起动时, 过渡工况剧烈变动, 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°C/mm 。装置起动若干次之后, 高温零件会由于热应力的原因产生疲劳、变形、断裂, 称为低周疲劳破坏, 于是发生漏气、振动、擦碰、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, 按蒸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, 热应力随零件厚度增加, 厚的零件反易变形或断裂。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, 开式燃气轮机的工作压力不很高, 气缸和转子等大零件完全没有必要设计得像蒸汽轮机那样厚, 而只要强度和刚度足够, 倒是越薄越安全, 厚了反而会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

体流动压力损耗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。减少压力损耗的方法主要是要求采用较大的通流截面,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很有利。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蒸汽轮机大数倍,故要求采用空气动力性能很高的叶型。

由于上述种种原因,蒸汽轮机的传统设计思想难于在燃气轮机上发展。

轻结构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。它非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,故喷管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、流动损耗小的短直管道、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、容积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。

经过了二十年的实践考验,得出了结论,即使是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)与六十年代崛起的航空改装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36%,有的寿命已超过2~5万小时,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,寿命为5~10万小时。

§ 1-4 现代燃气轮机的技术经济性

现在,较大功率的热机(>5万马力)仍以蒸汽轮机为主。然而近15年来世界上蒸汽轮机动力占总动力的百分比正在减少,燃气轮机却在很快上升。由于燃气轮机采用空气而不用水蒸汽作工质,故可免去锅炉、冷凝器、给水处理等大型设备,因此燃气轮机比蒸汽轮机动力装置轻小得多,站址可不受水源限制。从工质的热力性质上分析,燃气轮机与蒸汽轮机也有重大的差别。超高参数蒸汽轮机装置采用的蒸汽温度为500~600℃,相应的压力为100~350大气压,效率可达40~50%,功率可达200万kW。但是,假如要把蒸汽参数提高到700℃,则压力相应地需要激增至500大气压。显然,超高压力所引起的技术及强度问题将使进一步提高蒸汽轮机的经济性遇到严重的困难。正是由于压力高,蒸汽轮机装置才必须造得

厚实笨重。一般来说，目前燃气轮机的效率已超过中压蒸汽轮机动力厂，但还比超高压蒸汽轮机组的效率低些。然而，先进的开式简单循环三轴燃气轮机已采用 $1300\sim 1460^{\circ}\text{C}$ 和 30 大气压，效率已达 36% 左右，相当于耗油率为 $170\text{g/PS}\cdot\text{h}$ 。比较复杂的开式循环或闭式循环的效率也可达到 40~50%，已相当于超高参数蒸汽轮机动力厂的效率，而燃气轮机却要轻小得多。就功率而言，目前开式燃气轮机组装单机只有 10~32 万 kW，而 100 万 kW 的闭式燃气轮机已可公开订货。

现在，中、小功率的热机（< 5 万马力）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形式。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、润滑油及维修费用省，运转经济性已能同内燃机相匹敌。

综合地说，燃气轮机同蒸汽轮机装置和内燃机相比较，具有下列优点：

1. 装置轻小 机重及所占容积往往只有蒸汽轮机或内燃机的几分之一或甚至几百分之一。消耗材料少，也更宜作移动式动力装置。且因厂房基建省，投资成本仅为蒸汽轮机动力厂的 20~80% 或更少。技术周期短，从设计到投入运行有时只需几个月。

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而很少需要更动设备。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。噪音也可控制在规定的范围内。

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。厂用电和滑油费只占燃料费的 1%，而蒸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十秒到几十分钟，内燃机或蒸汽轮机装置起动到满载则往往需要几分钟到数小时。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。运行可靠系数高达 99.5%，利用系数也可达 95%。维修费用只有蒸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。所以在以往 15 年中全世界陆海用燃气轮机总功率猛增了 40 倍。目前

表1-3 目前各种燃气轮机参数范围

名 称	单 位	开 式 循 环	闭 式 循 环
单机功率	PS	2~35万	500~4万~(BEC设计130万)
转 数	rpm	大型 1200~20000 小型 20000~十几万	=
透平进气温度	$^{\circ}\text{C}$	650~1460	600~750~(BEC设计850~940)
压 力	bar	3~30	25~64~(GE设计140)
效 率	%	5~39	20~39~(BEC设计50)
比 功	PS/kg/s	150~700	<1500
单机功率机重	kg/PS	0.1~10	0.6~65
单机功率容积	m^3/PS	0.001~0.75	≤ 0.3
单机功率机价	¥/PS	120~400	~700

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、移动式多用途综合能源(发电、机械动力、供压缩空气、供暖及制冷等)、输气、输油管线、油田动力及坦克等方面有压倒趋势,中间载荷电站、新建或改建燃气蒸汽联合电站、化工厂流程及动力、高速动车和机车发动机在成批采用。还在试用考验的有:货船、汽车及基本载荷电站等。

目前各种燃气轮机参数范围见表1-3。

§ 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较低,往往需要加用回热器、废热锅炉等大型设备来弥补。新一代航机改型,温度压比高,故效率高,大修间隔已能超过5万小时,但只能燃用2号柴油以上的轻燃料,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继续上升的趋势,在美国已超过一半。七十年代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、PW和RR,都以航机改型为主要发展对象,而且他们在新型喷气发动机研制成功后,就马上发展陆海改型。

现在燃气轮机的使用,除了在峰载动力中已占压倒优势外,还在向基本载荷的领域渗透。如果要将燃气轮机作为基本载荷动力,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,故以往十多年中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。看来需待燃料供应及公害限制政策明确稳定之后,估计要到85年左右,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为:

(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、镍、涂陶瓷及复合材料等办法来提高燃用重燃料时的抗高温腐蚀性能;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 $1300\sim 1700^{\circ}\text{C}$,而且抗热震性也很好,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。近年来通过改善气冷方式平均每年可使燃气温度提高 25°C 。采用气膜、发散气冷后,可以降温 $500\sim 800^{\circ}\text{C}$,可能采用 1600°C 的燃气温度。但今后由于压比也要相应提高,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。故目前又在研究水冷及液态金属冷却的方式,希望能使 T_3 达到 2000°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 采用超跨音速级。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 还需要改善级际匹配。现代压气机采用可转导叶和双转子后,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总效率。

(1) 回热 回热循环燃气轮机效率已经能够达到 40% 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,可使总效率达到 $40 \sim 55\%$,是目前新建或改建电站常用的办法。

(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、压缩空气或制冷等。如果能充分利用余热的话,总能利用率可高达 $50 \sim 85\%$ 。

(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,煤则更不能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。燃用热值较低的煤气,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。

(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。近年来对各种类型的核电站经济性作了分析,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 100 万 kW 的机组。

3. 低污染的高温燃烧室 改善冷却结构及烧燃过程,需注意降低排气中 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 采用几台并联的喷气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 采用超跨音速压气机及透平,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。单机功率可望达到 $200 \sim 300$ 万 kW 。

(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探针的探测孔,不需开缸就能早期发现问题,视情维护,减少事故,提高可靠系数。

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，提高利用系数。

（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。改善措施有：

1. 可调静叶 压气机和透平都宜采用可调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、爆炸成形、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十五年中发展非常迅速。即使近年来受到能源问题的影响，可能比以前增长慢些，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，结果可能促使更快地发展。

§ 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汽和 410 厂，从无到有。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。三十年来所取得的成绩是巨大的。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成各种燃气轮机。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 62 年试制了船用燃气轮机，64 年与上海船厂合作制成 750PS 自由活塞燃气轮机，65 年制成 6000kW 列车电站燃气轮机。71 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、设计制造了 6000PS 和改装喷气发动机成 25000PS 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，设计试造了 25000kW 战备电站。

南京汽轮机厂 64 年制成 1500kW 电站燃气轮机，70 年试造了 50PS 泵用燃气轮机，72 年制成自行设计的 1000kW 卡车电站燃气轮机。77 年制成 21700kW 快装电站燃气轮机。

哈尔滨汽轮机厂 69 年制成自行设计的 3000PS 机车燃气轮机，制成 1000kW 自由活塞燃气轮机。另外改装航空发动机成 10000PS 及 22000PS 燃气轮机。73 年与 703 所合作设计制造成 6000PS 船用机组，与长春机车车辆厂合作设计制成 4000PS 燃气轮机，见图 1-3。

东方汽轮机厂 78 年试制成 6000kW 发电用（见图 1-4）及 3000PS 船用燃气轮机。

杭州透平机械厂和青岛汽轮机厂 72 年制成 200kW 燃气轮机。青岛汽轮机厂还制造了 1500kW 自由活塞卡车电站。

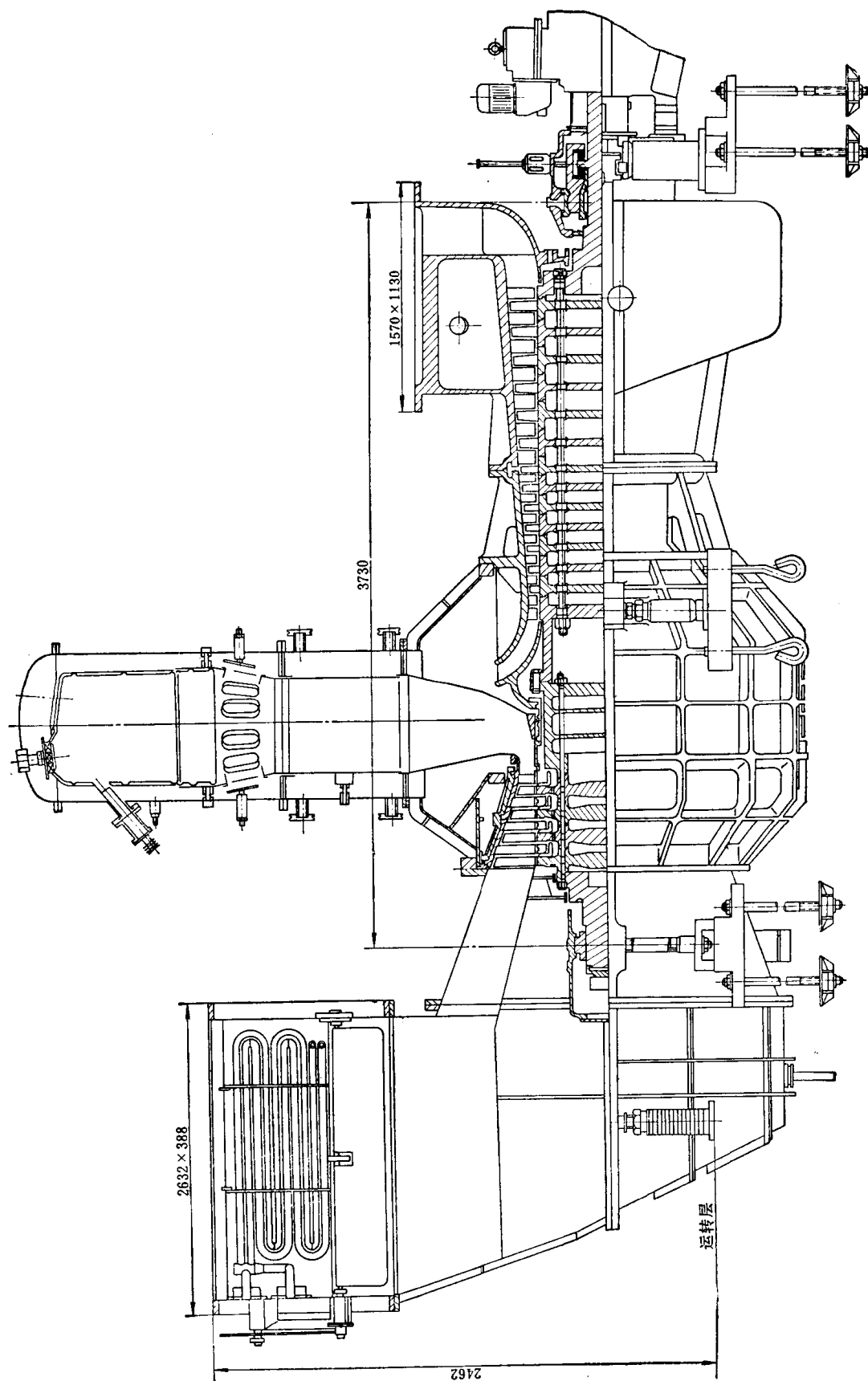


图1-2 6000kW发电机组 (可用于卡车电站)