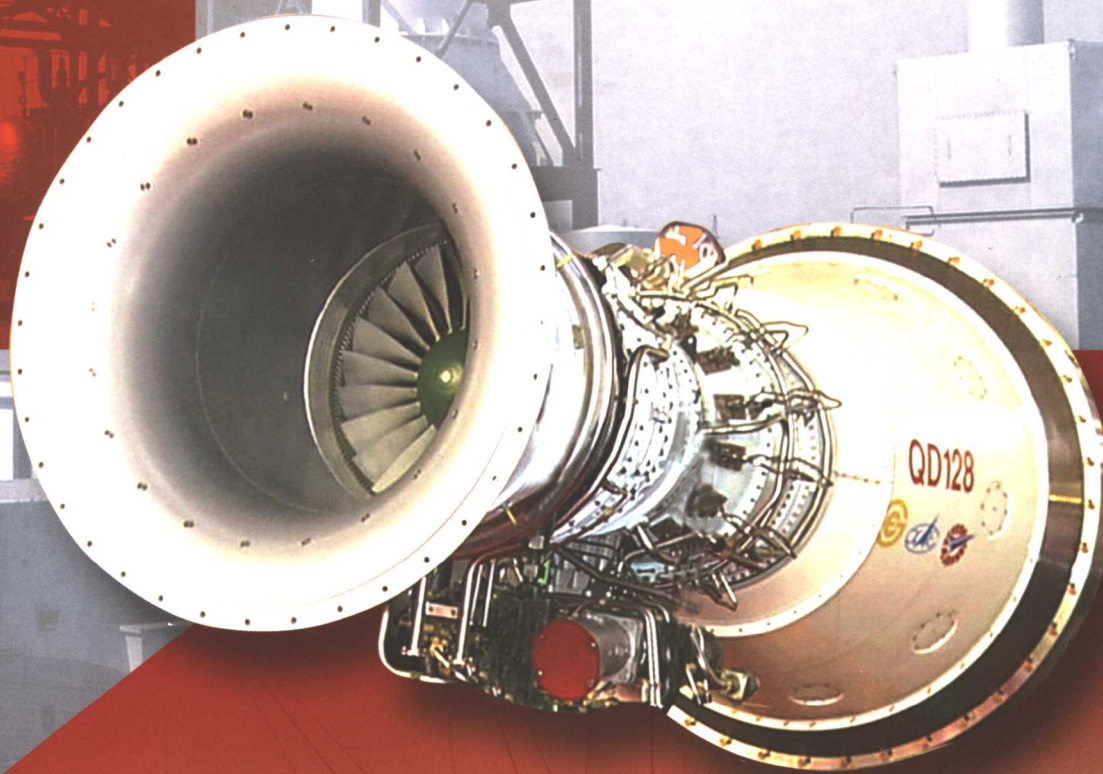




现代燃气轮机技术

李孝堂 侯凌云 杨 敏 编
侯晓春 尚守堂



航空工业出版社



现代燃气轮机技术

李孝堂 侯凌云 杨 敏 编
侯晓春 尚守堂

航空工业出版社

北 京

内 容 提 要

本书在简要回顾航空和地面（含海上）燃气轮机技术发展、应用概况的基础上，重点介绍了在现代燃气轮机的发展过程中解决的四大关键技术：高效节能，多种燃料燃烧适应性，降低排气污染和提高可靠性。叙述中突出以具有先进性能、结构、工艺的航空燃机技术作为先导，将其溶于轻、重型燃机技术之中，并引领其发展。本书取材新颖、实用，是一本燃气轮机工程专著。

本书可供高等院校航空、舰船、电力等动力专业及化工、冶金等热力专业的师生，以及相关专业的科研、生产、管理、使用部门的工程技术人员参考。

图书在版编目（CIP）数据

现代燃气轮机技术 / 李孝堂主编. —北京：航空工业出版社，2006. 11

ISBN 7 - 80183 - 750 - 9

I. 现... II. 李... III. 燃气轮机—技术
IV. TK47

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2006）第 082537 号

现代燃气轮机技术 Xiandai Ranqilunji Jishu

航空工业出版社出版发行

（北京市安定门外小关东里 14 号 100029）

发行部电话：010 - 64978486 010 - 64919539

北京地质印刷厂印刷

全国各地新华书店经售

2006 年 11 月第 1 版

2006 年 11 月第 1 次印刷

开本：787 × 1092 1/16

印张：23

字数：557 千字

印数：1—2000

定价：72.00 元

前 言

航空发动机就其工作原理而言,亦可称为航空燃气轮机(简称航空燃机、航机)。它和发电用地面燃气轮机(简称地面燃机)于1939年同时问世,前者逐步替代活塞式航空发动机用于各种类型飞机的动力,后者以及蒸汽轮机、内燃机广泛地用于电力、船舶和机械传动的动力。虽然航空燃机和地面燃机的工作原理及基本技术是相同的,但由于它们的使用对象和研制者不同等原因,在初始阶段是分别发展的。西方国家和前苏联为满足争夺空中优势的军用飞机发展要求,以及争夺世界民用飞机市场的要求,不惜投入巨资,集中高科技人才大力研发航空燃机,推动了航空燃机技术和制造业的迅猛发展。在航空燃机问世10年之后,用航空燃机改型的轻型燃机以其先天的技术优势,较广泛地用于电力、船舶和机械传动的动力。由于轻型燃机的出现,此前问世的地面燃机受蒸汽轮机设计技术的影响而结构笨重,相对地被称为重型燃机。重型燃机受技术发展投入的限制,其性能曾一度低于航空及航空改型的燃机。20世纪80年代以后,重型燃机在继承自身传统结构优点的基础上,大量吸收了航空燃机的先进技术,使性能水平大幅度提高,特别是大功率档次重型燃机的性能已超过轻型燃机。因此,航空和地面轻、重型燃机(有时三者可统称为燃气轮机,简称燃机)已成为热动力装置中最先进的类型。可以说,谁掌握了先进的燃气轮机技术,谁就掌握了21世纪动力的未来。

目前,国内外从业于燃机教学、科研、生产、使用的单位和人员众多,相关的教科书、专著、期刊杂志及其论文资料浩如烟海。本书作者之一的侯晓春于1998年撰写了《多种燃料燃烧技术在燃气轮机及工业炉上的应用》一书,对20世纪八九十年代国内外燃机改烧多种燃料的技术成果进行了较全面的归纳。近8年来,航空和地面燃机技术又有了更新、更高水平的发展成果,国外航空燃机已从第四代进入第五代研发阶段,90年代以来重型燃机加快了移植航空燃机先进技术的步伐,出现了一大批高性能的大功率重型燃机。非航空燃机订货台数1978~2002年增加了1倍,总功率容量增加了近9倍,2002年全球地面燃机销售收入为230亿美元,显示出燃机市场面临着极大的机遇和挑战,市场潜在需求巨大。国内航空燃机的新型号和在研型号性能水平也有较大提高,电力行业引进、开发、应用了大批先进的大功率重型燃机。由于石油价格的不断上涨,不少行业对可燃用多种燃料的先进性能轻型燃机有了新的需求。由于对分布式电源的应用前景看好,一些单位正在抓紧开发微型燃机。不少专家、学者呼吁加快建立我国燃机产业体系。还有读者对上述专著的相关内容很感兴趣,并希望补充新的内容。基于燃气轮机的新技术发展和应用前景,以及读者的热望,我们特撰写《现代燃气轮机技术》一书,力求突出重点,贴近实际,展示丰富、鲜活的新技术,为避免与国内已有燃机专著雷同,不再重复这类教科书

中成熟的基本原理和设计方法等内容。

在地面燃气轮机发展历程中,主要解决四大关键技术:高效节能、可用多种燃料、低排气污染和高可靠性。其中第1、3、4项正是航空燃机发展中重点解决的技术关键,这些技术也正在逐步被地面燃机所采用。而第2项是轻型燃机(航空燃机改型)与重型燃机争夺市场所面临的首要问题。上述关键技术问题的解决,使得具有先进结构、性能的航空燃机及其改型的轻型燃机引领了整个地面燃机技术的飞跃发展。因此,本书以上述四大技术关键作为重点内容,将以航空燃机技术作为先导,将其溶于轻、重型燃机之中而发展的高性能现代燃气轮机技术呈献给读者。

本书的第1章主要介绍国内外燃气轮机的发展、应用情况,回顾和展望了航空和地面燃机技术,让读者有一个全局性的认识;第2章介绍了燃机发展中第一个关键技术,即提高燃机性能的技术,以满足高效节能要求;第3章具体介绍航空燃机技术及它转移到各类地面燃机上的技术细节,以及如何促进燃机性能跨上新台阶;第4~第6章较深入地论述燃机发展中第二个关键技术,即适应多种燃料的相关技术,以满足当今全球都关注的综合利用能源的要求;第7章主要介绍燃机发展中的第三个关键技术,即低污染燃烧技术,以满足日益重视的环境保护要求;第8章主要介绍燃机发展中第四个关键技术,即提高燃机可靠性技术,以保证燃机安全可靠、长寿命工作,并对燃机相关系统有一个全面认识。

本书由中国一航沈阳发动机设计研究所李孝堂研究员、清华大学航天航空学院侯凌云副教授、中国一航发动机事业部杨敏研究员、原中航二集团株洲航空动力机械研究所侯晓春研究员和中国一航沈阳发动机设计研究所尚守堂研究员分头搜集资料、撰写(侯晓春执笔初稿)、补充、修改而成,并得到作者单位领导及有关专业人士的大力支持。

本书取材于作者的相关专著、科技论文以及国内外近期的书刊资料,力求成为内容新颖、全面、实用的现代燃气轮机技术专著。

我们热望该书能对高等院校相关专业的师生和企业、科研院所的相关技术及管理人员具有参考价值。如进而能推动我国航空燃机技术向地面燃机转移,促进地面燃机产业更快、更高水平地发展,我们将感到无限欣慰。

由于我们理论水平和实践经验有限,加之燃气轮机技术日新月异地发展,书中难免有不足之处,恳请读者批评指正。

作 者

2006年6月25日

目 录

第1章 概 论	(1)
1.1 热能动力装置的类型及其特点	(1)
1.1.1 热能动力装置的类型	(1)
1.1.2 内燃机、蒸汽轮机和燃气轮机的特点	(4)
1.2 国内外燃气轮机的发展概况	(5)
1.3 国内外地面燃机的应用概况	(9)
1.4 燃气轮机技术回顾和展望	(14)
1.4.1 燃机技术回顾要点	(14)
1.4.2 燃机技术前景展望	(18)
第2章 提高燃气轮机性能的技术	(20)
2.1 燃气轮机的主要性能指标	(20)
2.1.1 简单循环燃机的性能指标	(20)
2.1.2 简单循环的热力学参数对燃机性能的影响	(21)
2.1.3 联合循环的性能参数	(22)
2.2 提高燃机性能的途径	(23)
2.2.1 采用高循环参数	(23)
2.2.2 改善部件结构、性能	(25)
2.2.3 采用先进的热力循环	(29)
2.3 高温燃气轮机技术	(36)
2.3.1 热端部件的冷却技术	(36)
2.3.2 高温材料及结构的发展和应用	(59)
2.3.3 地面燃机热端部件的材料工艺特点	(66)
2.4 提高运行机组功率的技术措施	(68)
第3章 不同类型燃气轮机的技术	(71)
3.1 概述	(71)
3.2 轻型燃气轮机技术	(72)
3.2.1 轻型机快速发展的原因	(72)
3.2.2 航空燃机改型技术	(73)

3.3 重型燃气轮机技术	(80)
3.3.1 重型与轻型燃机的特点比较	(80)
3.3.2 重型燃机技术的发展	(83)
3.4 小型及微型燃机技术特点	(89)
3.4.1 航空小发和微发的应用范围	(89)
3.4.2 地面用新型微型燃机的发展与应用	(91)
3.4.3 小型及微型燃机的技术特点	(94)
3.5 超微型燃机技术	(108)
第4章 燃用液体燃料的燃气轮机技术	(113)
4.1 液体燃料的种类及其特性	(113)
4.2 燃油特性对燃烧过程及燃烧性能的影响	(117)
4.2.1 燃油特性对燃烧过程的影响	(117)
4.2.2 燃油特性对燃烧室性能的影响	(121)
4.3 燃机改烧柴油的燃烧技术	(130)
4.4 燃机改烧重油的燃烧技术	(133)
4.4.1 概述	(133)
4.4.2 燃用重油的燃烧室设计	(135)
4.4.3 燃用重油的燃烧室调试	(140)
4.4.4 航机改型燃用重油时相关的改造工作	(142)
4.4.5 燃用不同燃料的燃机燃烧室结构性能特点	(144)
4.5 燃气轮机燃用甲醇的技术研究	(153)
第5章 燃用气体燃料的燃气轮机技术	(157)
5.1 气体燃料的种类及其特点	(157)
5.1.1 气体燃料的特点	(157)
5.1.2 气体燃料的种类	(157)
5.1.3 气体燃料燃烧过程及特性	(165)
5.2 燃用高、中热值气体燃料的燃机技术	(167)
5.3 燃用低热值气体燃料的燃机技术	(174)
5.3.1 概述	(174)
5.3.2 航机原型燃烧室改烧发生炉煤气	(175)
5.3.3 改型机改烧稀释发生炉煤气	(176)
5.3.4 MS5001 型燃烧室改烧低热值煤气	(180)
5.3.5 MS5001 - Kilngas/MS6001 燃烧室方案试验	(183)
5.3.6 体外回流燃烧室燃用低热值煤气	(183)
5.3.7 国外燃用低热值煤气的燃烧室试验研究	(185)
5.3.8 变几何燃烧室方案	(187)
5.4 燃用超低热值气体燃料的燃机技术	(189)

5.4.1	高炉煤气燃料特性及试验研究	(189)
5.4.2	改烧高炉煤气的主要技术问题	(192)
5.4.3	高炉煤气在燃机上的应用	(193)
5.5	燃机改烧气体燃料的几个具体技术问题	(196)
5.5.1	燃烧室结构方案	(196)
5.5.2	燃烧室参数的确定原则	(197)
5.5.3	喷燃器设计	(199)
5.5.4	燃料气压缩功计算	(200)
5.5.5	主要燃烧性能测试	(202)
第6章	燃煤燃气轮机技术	(203)
6.1	固体燃料的特点及其燃烧过程	(203)
6.1.1	煤的分类及其性能	(203)
6.1.2	煤的燃烧过程及燃烧方式	(205)
6.2	国外燃煤燃机研究概况	(206)
6.2.1	国外燃煤燃机研究简况	(206)
6.2.2	直接燃煤燃机的技术关键	(211)
6.2.3	对直接燃煤方式的评论	(215)
6.3	国内燃煤燃机研究概况	(216)
6.4	水煤浆在燃机燃烧室上的应用研究	(217)
6.4.1	国内进行的研究工作	(217)
6.4.2	国外进行的研究工作	(224)
6.5	煤粉在燃机燃烧室上的应用研究	(228)
6.5.1	国内进行的研究工作	(228)
6.5.2	国外进行的研究工作	(233)
6.6	燃煤燃机技术综述	(235)
6.6.1	燃煤方式	(236)
6.6.2	燃烧组织及燃烧室结构	(236)
6.6.3	燃料制备及输送	(236)
6.6.4	净化系统	(237)
6.6.5	排气污染	(237)
6.6.6	燃煤燃机的应用前景	(237)
第7章	燃气轮机上采用的低污染燃烧技术	(243)
7.1	燃烧产物的污染物及防治原则	(243)
7.1.1	燃烧产物中的污染物及其危害	(243)
7.1.2	排气污染物的形成及防治的一般原则	(243)
7.2	低污染燃烧技术概况	(246)
7.3	常规的低污染燃烧技术	(250)

7.3.1	降低排气冒烟的燃烧技术	(250)
7.3.2	常规燃烧室全面控制排气发散的措施	(253)
7.4	以控制 NO_x 为中心的低污染燃烧技术	(256)
7.4.1	低污染燃烧新技术类别及原理	(256)
7.4.2	控制火焰温度降低排气污染物	(256)
7.4.3	干式低排放 (DLE) 燃烧室	(261)
7.4.4	超低 NO_x 燃烧室	(274)
7.5	低污染燃烧技术综合比较	(286)
7.6	洁净燃煤技术综述	(289)
第8章	提高燃气轮机可靠性的技术	(293)
8.1	燃机可靠性评定指标及其主要影响因素	(293)
8.1.1	可靠性的定义及其重要性	(293)
8.1.2	可靠性的主要评定指标	(296)
8.1.3	影响燃机可靠性的主要因素	(296)
8.2	进气系统	(299)
8.3	滑油系统与轴承	(306)
8.4	燃料和燃烧系统	(310)
8.5	热端部件	(312)
8.6	动力涡轮	(314)
8.7	监控系统	(317)
8.8	使用和维护	(323)
8.9	标准、规范	(328)
附录1	燃气轮机技术方面英文名词及缩写词	(331)
附录2	典型气体燃料成分及特性表	(334)
附录3	单一气体在标准状态下的主要特性值	(336)
附录4	一些单一气体的燃烧特性	(337)
附录5	国外典型燃气轮机参数	(338)
参考文献		(355)

第1章 概 论

1.1 热能动力装置的类型及其特点

1.1.1 热能动力装置的类型

热能动力装置包括锅炉（工业和生活用）和发动机。锅炉是将燃料中的化学能转换为蒸汽或热水的热能的热力设备，它可分为许多种类，此处略。而发动机可以分为如下类型：

- a. 内燃机（柴油机、汽油机、煤气机）动力装置；
- b. 蒸汽动力装置，通常指蒸汽轮机；
- c. 燃气轮机（航空、舰船、工业用）动力装置（燃机）；
- d. 火箭发动机（液体、固体燃料等）。

内燃机是燃料在汽缸内与吸入的空气混合燃烧，推动活塞往复运动，借助曲柄、连杆将往复运动转变为旋转运动而对外输出功率。它的功率范围从数千瓦至上万千瓦，应用范围很广，可以作为电站动力，飞机、舰船、机车动力，工程机械以及汽车动力等。这些动力装置可以使用不同燃料，如汽油、柴油、煤气或双燃料（油/气）等。煤气是以液化石油气（LPG）或压缩天然气（CNG）方式供入内燃机。

蒸汽轮机是由燃煤锅炉（或余热锅炉）产生蒸汽驱动蒸汽叶轮机对外输出功率，以水和水蒸气为工质的热机。很长一段时间，蒸汽轮机是电站动力的主力军。自1987年开始，美国发电用燃气轮机的年生产总功率数已超过蒸汽轮机的，这是一次重大的历史性转折。

燃气轮机是以空气为介质，靠高温燃气推动涡轮（透平）机械连续做功的大功率、高性能动力机械。它主要是由压气机、燃烧室和涡轮三大部件组成，再配以进气、排气、控制、传动和其他辅助系统。如图1-1所示为简单循环燃气轮机的工作原理图。由图可见，当机组起动成功后，压气机连续不断地从外界大气中吸入空气并增压，不断喷入燃烧室的燃料与空气混合后点火、燃烧，高温高压燃气在透平中膨胀做功，降压降温的气体经喷管或排气装置直接排入大气，或引入废热锅炉，回收部分余热后再排入大气。燃气在透平中所作的机械功，2/3左右被用来带动压气机，消耗在压缩空气上；剩余的那部分功，则通过机组的输出轴带动外界的各种负荷，如发电

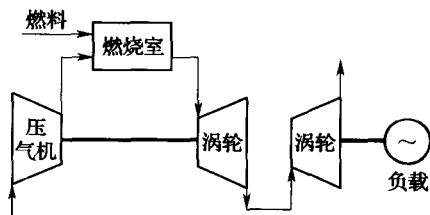


图1-1 简单循环燃气轮机的工作原理图

机、压缩机、螺旋桨、泵等。上述过程就是燃气轮机将燃料化学能转化为机械功的工作原理。

燃气轮机有不同的分类方法，一般情况如图 1-2 所示。本书叙述的主要内容是关于地面燃机（指工业用和舰船用）技术方面的，也就是轻型和重型燃机技术方面的内容。轻型燃机是由航空燃机改型而来，它利用了大部分航空燃机部件并吸收了航空燃机的先进技术。

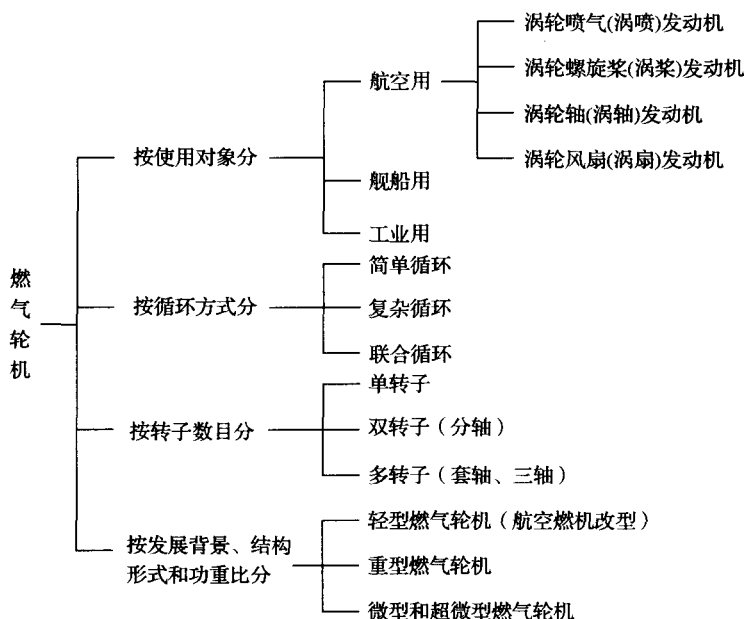


图 1-2 燃气轮机分类

由于受航空燃机母型机的限制，轻型燃机单台功率不很大，无力全面满足地面动力的要求，因此工业部门单独研制了功率等级较大的重型燃机。它早期吸收了蒸汽轮机技术，稍后主要不断吸收航空燃气轮机的先进技术和经验，使其性能有了很大提高。由此可见，轻、重型燃机都利用和借鉴了航空燃机的先进技术，因此本书也会涉及航空燃机技术的内容。

按不同热力循环区分燃机类型，是由于任何热机都必须借助一定的媒介物质（工质），经历一系列热力过程，才能实现热转功的循环而对外做功。按照循环工质流动与组织方式的不同，燃气轮机在性能、总体布局及结构上有很大差异。为了提高燃机性能（热效率和比功），除了一般简单循环外，探索和采用了多种热力循环方式。详细的热力循环类型如图 1-3 所示。

简单循环就是由压气机、燃烧室和透平三大部件组成的燃气轮机循环（见图 1-1）。由于它的结构最简单，最能体现燃机所特有的优点，而且随着燃机的增压比 π_c 、涡轮前温度 T_4 (t_4) 的增高，热效率已由 17% ~ 22% 增至 30% ~ 36%，更为先进的燃机可达 41% ~ 43%，因此，世界上大多数燃机都用此种循环方案。在图 1-3 中列出的其他循环方案将在第 2、第 4、第 6 章中根据实用的情况加以介绍。

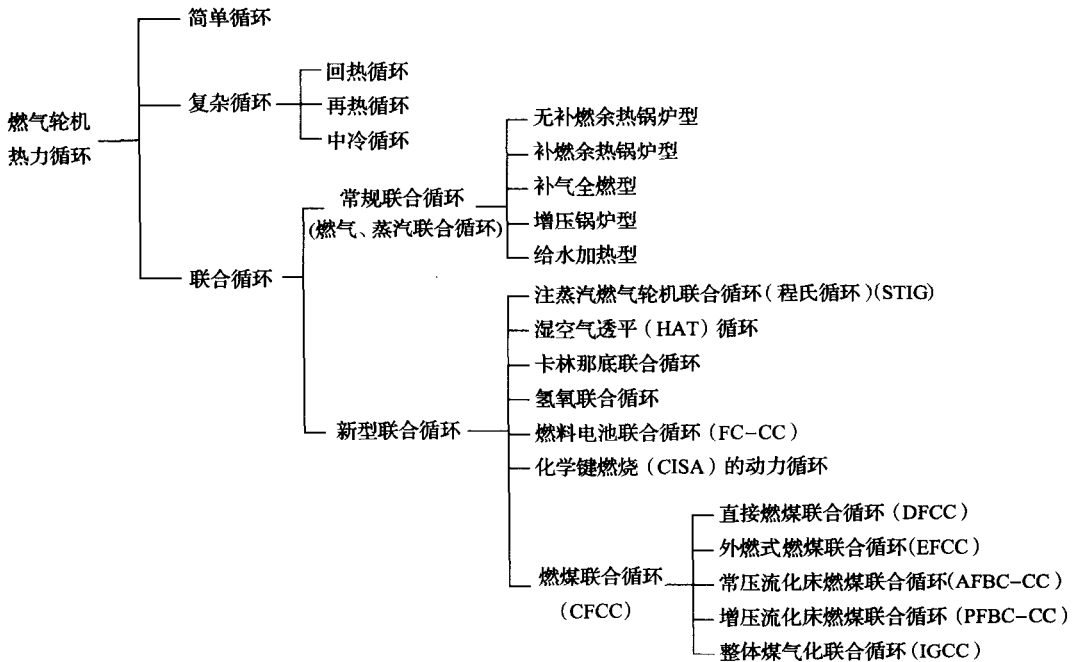


图 1-3 燃气轮机热力循环分类

在图 1-2 中还列出了按转子数目区分的燃机类型，也就是不同的轴系形式使燃机的结构、性能和应用范围有所差异。燃气轮机三种轴系方案如图 1-4 所示，其中单轴机组适合于恒速运行工况，分轴机组更适用于驱动变转速负荷或作为牵引动力，多轴（含双轴，即套轴及多轴）源于航空燃机，能更好地协调高、低压压气机，使其稳定工作，在低工况下不喘振和保持高效率。单轴燃机多用于发电设备，采取变几何等措施也可用于机车、舰船等的动力。分轴燃机采用放气防喘措施，在石油工业、舰船和机车等领域更适用。多轴（三轴燃机）多被航空燃机的改型采用。

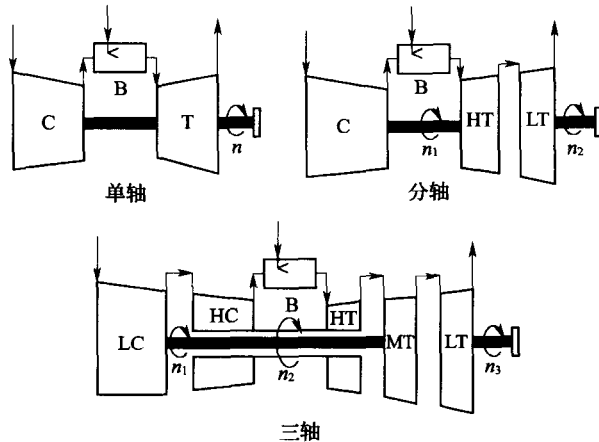


图 1-4 燃气轮机的轴系方案

C—压气机；B—燃烧室；T—透平；L—低压；M—中压；H—高压

在图 1-3 中所列的联合环循主要依据方案类型区分,也可按用途区分为:单纯发电型,热、电联产型,冷、热、电三联供型。

1.1.2 内燃机、蒸汽轮机和燃气轮机的特点

柴油机、蒸汽轮机与燃气轮机列车电站的某些特性指标数据见表 1-1。由表列数据及有关资料,可以归纳出表 1-2,进一步比较了三种动力装置的特点。

表 1-1 三种列车电站技术特性指标的比较

发动机 型式	功率 /kW	生产车 厢节数 /节	总长 /m	总重 /t	比功率 /(kW/m)	单位 重量 /(kg/kW)	值班 人数 /个	单位 投资 /%	发电 总成本 /%	起动 时间 /min	冷却 水量 /(t/h)
柴油机 (燃油)	1000	1	20	80	50	80	3	150	122	15	10
蒸汽轮机 (燃煤)	6000	13	251	1300	24	217	14	200	60	120	100
燃气轮机 (燃油)	6200	3	60	300	103	48.4	3	100	100	20	30

表 1-2 三种动力装置特点比较

项 目 \ 动力装置	柴油机	蒸汽轮机	燃气轮机
重量	大	大(金属耗量比燃机多 3~5 倍)	小
体积	大	很大(厂房比燃机大 2.5~4 倍)	小
功率	小	大	大
单位重量	大	很大	小
燃料消耗率(热效率)	低(热效率高)	较高(热效率较高)	高(大功率时,回热或余热利用与柴油机相当)
燃料适用性	柴油	燃煤	多种燃料
起动、加速	快(但 -16℃ 要预热起动)	很慢	快(-35℃ 可以起动)
运动平稳性	惯性力矩大,振动大	(类似燃机)	旋转件易平稳,平稳
维护保养	维护人员少,用水量少,润滑油消耗量少	维护人员很多,用水量很多	维护人员少,维护方便,不用或少用水

由表 1-1、表 1-2 可以看出:燃气轮机具有重量轻、体积小、起动快、建设周期短、运行维护方便、便于集中控制、少用或不用水、适宜燃用多种燃料及污染排放量少等优点,虽然燃气轮机比内燃机、蒸汽轮机稍后开发,但自 20 世纪 40 年代问世以来,半个多世纪已获得了飞速发展。从 50 年代开始,燃气轮机在航空领域取得绝对地位,取代了活塞式发动机(内燃机),60 年代开始军用水面舰船燃机化,70 年代末国外主战坦克开始

采用燃机, 80 年代高速客轮、高速船也采用燃机。近 30 年来, 工业领域的石油工业、石化、化工等部门率先采用燃机。城市发电方面, 由于常规燃煤蒸汽轮机电厂污染严重, 发电效率低, 而天然气供应量充裕, 使燃机电厂迅速发展, 成为火电的主导动力装置。

燃机也有弱点, 首先受高温材料限制, 机组的热效率不如往复式内燃机和高参数的蒸汽轮机高, 特别在部分负荷工况下, 热效率更低; 其次要采用优质耐热材料, 且热端部件的使用寿命较短, 从而影响了它的经济性和可靠性。但是随着燃气轮机 (特别是航空燃机) 技术及科技和工业水平的不断发展, 在材料、工艺、冷却技术不断进步, 采用先进热力循环的条件下, 燃机的弱点正在被克服, 显示出“青出于蓝而胜于蓝”的局面。

总之, 燃气轮机已是热动力装置中最为先进的类型, 被喻为机械工业皇冠上的明珠。燃气轮机产业是集技术密集、人才密集、资金密集于一体的高技术产业。先进的燃气轮机技术对国民经济持续发展有着重大影响, 是一个国家工业和科技水平的重要标志之一, 是增强综合国力与国际竞争力的一个重要方面, 也是实现我国中长期目标的核心技术和动力基础。可以说, 谁掌握了先进的燃气轮机技术, 谁就掌握了 21 世纪动力的未来。

1.2 国内外燃气轮机的发展概况

1939 年是载入人类科技史的重要年份, 在这一年, 有两类不同用途的燃气涡轮机械获得成功应用: 瑞士 BBC 公司研制出的世界上第一台 4000kW 发电用燃机 ($\pi_c = 4.38$, $t_4 = 575^\circ\text{C}$); 德国人奥海英设计的世界上第一台飞机用燃机 He - s3B 装在 He - 178 喷气式飞机上。从此以后, 西方工业国家开始了燃气轮机开发、应用的发展阶段。国外和国内燃气轮机发展的大事记见表 1-3。

表 1-3 国内外燃气轮机发展大事记

年 代	国 外	国 内
20 世纪 40 年代	1939 年瑞士研制出世界上第一台发电用燃机, 同年德国研制出世界上第一台航空燃机; 1941 年瑞士制造出第一台机车用燃机 (1640kW); 1944 年美国开始研发燃煤燃机 (连续 20 年); 1947 年英国第一台舰艇用燃机下水; 1948 年美国将航空燃机 J33 改型为 MS3002 型机车用燃机, 并开始发展重型燃机	(几乎空白) 但早在 11 世纪我国发明的走马灯是燃气轮机的雏形
20 世纪 50 ~ 60 年代	1950 年英国制成第一台汽车用燃机 (75kW); 1957 年苏联确定现代化舰艇采用燃机动力; 60 年代高性能 TF 发动机问世, TJ、TP、TS 发动机全面投入使用, 出现第一代轻型燃机; 1964 年开始研制坦克用燃机	1956 年自制航空燃机装在歼 5 飞机上; 1958 年自行设计、加工歼教 1 涡喷发动机; 1959 年开始发展燃机, 引进 BBC 公司的列车发电机组; 1962 年上海汽轮机厂 (上汽) 制成国内第一台船用燃机 (2940kW); 1964 年南京汽轮机厂 (南汽) 制成国内第一台发电用燃机 (1500kW); 1969 年哈尔滨汽轮机厂 (哈汽) 制成国内第一台机车用燃机 (2205kW)

续表 1-3

年 代	国 外	国 内
20 世纪 70 ~ 80 年代	1972 年德国建成世界上第一座 IGCC 示范电站; 1975 年美国将 TF39/CF6TF 发动机改型为 LM2500, 英国 Spey (斯贝)、RB211 发动机改型为工业型, 成为第二代轻型燃机; 1984 年美国“冷水”电站投入运行 (真正的 IGCC); 80 年代美国制定 E ³ 、ATPE、IHPTET、HOST 等航空燃机研发规划, 进入第三代航空燃机时代	1976 年全国协作研制成功 20000kW 发电燃机机组; 1975 ~ 1986 年定型生产 4 种、10 多个型号轻型燃机, 同时广泛研究燃用多种燃料的燃机; 80 年代制定和实施高性能航空燃机计划; 1986 年成都航机公司与美国合作生产 F118
20 世纪 90 年代 至 21 世纪初	1992 年美国制定和实施先进燃机系统计划 (ATS) 和联合先进燃气轮机 (CAGT) 计划, 研发高效、低污染、低成本燃机, 英、法、日本等国也有相应研发计划; 20 世纪末, 航空燃机技术移植到工业燃机上, 出现大批先进的重型和轻型燃机 (第三代), 以及第四代航空燃机产品; 90 年代出现先进的微型燃机产品, 并得到大力研发	90 年代南汽厂与美国通用电气 (GE) 公司合作生产 MS6001 大型发电燃机, 上汽、哈汽、南汽寻求国外合作, 生产大功率先进燃机, 并研发燃煤燃机; 2000 年制定“十五”燃机发展规划; 2003 年国家批建 23 套燃气联合循环电站; 2002 年, 中航一集团 606 所、黎明公司等单位研制成功自主知识产权的 QD128 (12800kW)、QD70 (7000kW) 航改燃机, 正在研制 R0110 重型燃机 (110000kW)

由表 1-3 及有关资料, 可以得出关于国外燃气轮机发展历程的如下结论。

(1) 国外燃机研发、应用起步早

西方国家经过 18 ~ 19 世纪的工业革命, 奠定了机械制造业的基础, 内燃机、蒸汽机、蒸汽轮机在交通运输、机械传动等行业获得广泛应用。加上热动力技术的创新, 以及热力学理论的成熟, 至 20 世纪 40 年代燃气轮机进入研发和应用阶段也就顺理成章了。

(2) 地面燃机发展的主要推动力源于沿袭了先进的航空燃机技术

航空燃机的迅猛发展始于第二次世界大战 (1939 ~ 1945 年), 其后经历了军备竞赛, 空中优势、民机市场争夺, 于 20 世纪 50 年出现航空燃机“喷汽化”, 60 年代出现航空燃机“涡扇化”。至此, 四种类型航空燃机获得应用, 其后军用飞机所用航空燃机经历了五个更新换代阶段, 其性能及相关技术突飞猛进, 表 1-4 列出了部分军用航空燃机的性能指标。从 20 世纪 50 年代至 90 年代, 40 年间压气机增压比 π_c 从 5 增加到 25; 涡轮进口温度 T_4 (t_4) 从 1200K (927℃) 增加到 1800K (1527℃), 每 10 年增加 150K; 推重比 F/W 由 4 增加到 10。21 世纪正在研发的航空燃机的 $\pi_c \approx 30$, $T_4 = 1700 \sim 2000\text{K}$, $F/W = 15 \sim 20$ 。不难看出, 航空燃机性能指标能有如此惊人的提高, 必然会发挥它对整个燃气轮机技术的促进作用。

地面燃机中的轻型燃机是直接的受益者, 表 1-4 给出了部分航空燃机改型为地面燃机的性能参数, 也是逐年提高。人们把它的发展划分为几个发展阶段, 从中可以发现在年代上轻型燃机比航空燃机正好滞后一段时间 (7 ~ 10 年)。这段时间是对新型航空燃机可靠性的考验, 一般要累计飞行考察数万小时; 另外改型机的研制周期也要计入。

表 1-4 国外燃气轮机性能水平变化及典型型号

年代	航空燃气轮机 (大型)		轻型燃气轮机			重型燃气轮机	
	性能参数	典型型号	母型机	轻型机	性能参数	典型机型	性能参数
20 世纪 60 年代 前	$\pi_c < 10$ 、 $t_4 < 870^\circ\text{C}$ 、 $F/W < 5$ (2 ~ 3)	J57、J79、 ATAR9C、BK1、 WP8、Pegasus、 J33 (第一代)	J33 (1948 年)	MS3000	与同期重型燃气轮机性能相近	第一台发电用燃气轮机 (1939 年) MS3000/ 3002A. B. C	$P = 4000\text{kW}$ 、 $\eta_{\text{gt}} = 0.18$ 、 $\pi_c = 7$ 、 $t_4 < 932^\circ\text{C}$ 、 $P < 10\text{MW}$ 、 $\eta_{\text{gt}} = 0.25$
20 世纪 60 ~ 70 年代	$\pi_c < 16$ (个别 < 20)、 $t_4 < 1280^\circ\text{C}$ 、 $F/W = 3 \sim 5$	J85、TF30、 M53、斯贝、WP7、 RB211、JT8D (第二代)	Pegasus	工业 Pegasus	$\pi_c = 7.32$ 、 $t_4 = 852^\circ\text{C}$ 、 $sfc = 347\text{g}/(\text{kW} \cdot \text{h})$ 、 $P = 3300\text{kW}$	如 MS5000 (Fr5)	$\pi_c < 8$ 、 $t_4 < 932^\circ\text{C}$ 、 $P < 22\text{MW}$ 、 $\eta_{\text{gt}} < 0.28$
			J79	LM1500 (第一代)	$\pi_c = 12.4$ 、 $t_4 = 847^\circ\text{C}$ 、 $sfc = 329\text{g}/(\text{kW} \cdot \text{h})$ 、 $P = 3300\text{kW}$ 、 $\eta_{\text{gt}} = 0.26$		
20 世纪 70 ~ 80 年代	$\pi_c < 25$ 、 $t_4 < 1350^\circ\text{C}$ 、 $F/W = 7 \sim 8$	F100-GE-100/200、F110-GE-100、F404-GE-100、RB199、RD-335、PW4082、Trent800 (第三代)	TF39/ CF6-2	LM2500	$\pi_c = 18$ 、 $t_4 = 1170^\circ\text{C}$ 、 $sfc = 233\text{g}/(\text{kW} \cdot \text{h})$ 、 $P = 2400\text{kW}$ 、 $\eta_{\text{gt}} = 0.30$	如 V94.2、 MS9001E、 701D	$\pi_c = 10 \sim 15$ 、 $t_4 < 850 \sim 1000^\circ\text{C}$ 、 $P < 200\text{MW}$ 、 $\eta_{\text{gt}} = 0.28/0.32$
			斯贝	SMIA 工业型	$\pi_c = 17.2$ 、 $t_4 = 1036^\circ\text{C}$ 、 $sfc = 246\text{g}/(\text{kW} \cdot \text{h})$ 、 $P = 11000\text{kW}$ 、 $\eta_{\text{gt}} = 0.30$		
			RB211	RB211	$\pi_c = 18$ 、 $t_4 = 1076^\circ\text{C}$ 、 $sfc = 252\text{g}/(\text{kW} \cdot \text{h})$ 、 $P = 19000\text{kW}$ 、 $\eta_{\text{gt}} = 0.35$		
			CF6-50	LM5000	$\pi_c = 29.3$ 、 $t_4 = 1149^\circ\text{C}$ 、 $P = 43440\text{kW}$ 、 $\eta_{\text{gt}} = 0.37/0.49$		
			JT8D	FT8 (第二代)	$\pi_c = 20.3$ 、 $t_4 = 1168^\circ\text{C}$ 、 $P = 24790\text{kW}$ 、 $\eta_{\text{gt}} = 0.38$		

续表 1-4

年代	航空燃机 (大型)		轻型燃机			重型燃机	
	性能参数	典型型号	母型机	轻型机	性能参数	典型机型	性能参数
20 世纪 80 ~ 90 年代	$\pi_c < 30$ 、 $t_4 = 1500 \sim 1700^\circ\text{C}$ 、 $F/W = 9 \sim 10$	F119、EJ200、 M88 - III、P2000 (第四代)	Trent	工业型 Trent	$\pi_c = 21$ 、 $P = 51/64\text{MW}$ 、 $\eta_{gt} = 0.416/0.52$	(见表 3-6)	$\pi_c = 15 \sim 23$ 、 $t_4 = 1300^\circ\text{C}$ 左右、 $P = 230/350\text{MW}$ (大型)、 $\eta_{gt} = 0.37 \sim 0.39/$ 0.58
			F404	LM1600	$\pi_c = 25$ 、 $t_4 = 1387^\circ\text{C}$ 、 $sfc = 229\text{g}/(\text{kW} \cdot \text{h})$ 、 $P = 15\text{MW}$ 、 $\eta_{gt} = 0.372$		
			PW4082	工业型 PW4082 (第三代)	$\pi_c = 36$ 、 $t_4 = 1370^\circ\text{C}$ 、 $P = 50\text{MW}$ 、 $\eta_{gt} = 0.43$		
20 世纪 90 年代 末至 21 世纪初	$\pi_c \approx 30$ 、 $t_4 > 1700^\circ\text{C}$ 、 $F/W = 15 \sim 20$	(尚未公布 型号)					$\pi_c = 15 \sim 23$ 、 $t_4 > 1430^\circ\text{C}$ 、 $P = 280/480\text{MW}$ 、 $\eta_{gt} > 0.39/0.60$

F/W —推重比; sfc —燃油消耗率, $\text{g}/(\text{kW} \cdot \text{h})$; P —功率; η_{gt} —热效率 (斜线下为联合循环 η_{cc}); t_4 —涡轮进口温度, 表中个别数据来源不一致, 可能有出入

重型燃机的早期发展是沿袭汽轮机技术, 其性能指标是处于低水平的, t_4 仅为 $600 \sim 700^\circ\text{C}$, 热效率 $\eta_t < 20\%$ 。20 世纪 60 年代后, 由于充分吸收先进的航空燃机技术, 并与传统的汽轮机技术结合, 重型燃机性能得以不断提高, 见表 1-4, 但是低于同期航空燃机和轻型燃机的性能水平。

(3) 统筹规划、统一组织、投入巨资促进了燃气轮机的发展

从表 1-3 及有关资料可以看出, 以美国为首的工业发达国家不断制定航空和地面燃机中长期发展规划, 由政府出面组织全国各有关公司、各军兵种总部、研究机构及高等院校的技术力量, 投入巨额研发资金, 分工合作对燃机总体方案、关键部件技术, 以与燃机相关的基础研究课题展开竞标性研究, 评选最佳方案。在世界范围内优胜劣汰, 逐渐形成美国通用电气公司、日本三菱重工 (MHI)、德国西门子公司 (Siemens-WH)、欧洲阿尔斯通公司 (Alstom-ABB) 以及俄罗斯列宁格勒金属工厂 (ЛМЗ) 五家大公司及其伙伴厂家燃机产量高度垄断的局面, 其份额占世界总量的 80% 以上。当然还有不少燃机公司, 如英国罗·罗公司、美国索拉 (Solar) 公司、美国艾利逊 (Allison) 公司等, 也具有独特技术和产品。

美国是当今世界燃机的“霸主”, 这主要是因为它的经济实力雄厚, 在航空和地面燃机的研发方面斥巨资而图发展。例如, 1984 年美国 GE 公司为加利福尼亚 Cool Water 电厂提供的燃气—蒸汽联合循环 (IGCC) 机组, 总投资达 2.63 亿美元, 运行费用达 2248 美