

能源利用系统的优化及
工程热物理问题的解析解

(申请中国科学院工学博士学位论文)

培养单位： 中国科学院工程热物理研究所

专 业： 工程热物理

研 究 生： 张 娜

导 师： 蔡 睿 贤 院 士

一九九九年九月

OPTIMIZATION OF ENERGY UTILIZATION SYSTEMS
&
ANALYTICAL SOLUTIONS OF ENGINEERING
THERMOPHYSICS

Submitted to the *Chinese Academy of Sciences*
for applying the degree of
Doctor of Engineering



Candidate:

ZHANG Na 章

Supervisor: CAI Ruixian Academician

Specialty: Engineering Thermophysics

Date: September, 99

摘 要

总能系统为当代能源利用系统的发展主流，以燃气轮机为核心的总能系统近年来获得越来越广泛的应用，对其进行全面的性能分析研究十分必要。另外，解析解有其不可替代的理论与实用价值，应努力导出可能有的解析解。

本论文主要工作包括：对热力系统进行热力、经济和环境方面的综合研究；探讨燃气轮机总能系统变工况特性的新思路；寻找工程热物理问题的解析解。

一、结合经济与环保因素的热力分析与优化

1. 工业排气污染物的罚款数量级

作为推行环保措施的辅助手段之一，对污染排放实施罚款在现阶段是一种行之有效的途径。为了切实收到促进环保之效，必须定出合理的罚款数量级。结合我国电力工业的具体国情，本论文提出对工业排气污染罚款尺度的两大原则：一是罚款数额应至少与污染治理投资费用相当；二是罚款数额应只比效益收入低一、两个数量级。并由此定出我国目前情况下，对 SO_2 、 NO_x 和 CO_2 的排放罚款数量级。另外，考虑环保因素的热力分析也希望有罚款的数据。

2. 考虑经济性和环保因素的热力系统优化分析

在进行动力机械的循环热力分析时，结合经济因素和环保因素来定量进行，是实际生产的要求，也是热力循环分析的一次创新。

本论文结合经济和环保考虑不单纯以效率为目标函数而改用经济效益最大为目标函数进行热力分析，给出了更结合实际的理论分析框架并得出一系列新的结论，例如存在最佳效率值，对非基本负荷机组此值已低于目前机组所达到的数值，对燃气轮机有最佳温比，最佳压比值可能比传统分析的结果要低等。考虑对 CO_2 排放实施罚款时，热力参数将朝着提高效率的方向变化。

3. 可再生能源动力装置的评价指标及优化方向

对可再生能源动力装置的评价指标及优化方向进行了研究。分析了目前常用的动力装置性能评价指标应用于不同能源系统时的区别与联系，指明了它们对于

常规能源与可再生能源存在的概念上的差异或重要性上的不同。以定量的公式论证了目前可再生能源动力装置首要的优化方向应该是降低装置单位实用功率的造价，而不是提高其效率。

二、动力机械变工况的解析分析方法

动力机械经常在变工况条件下运行，因此变工况性能的研究十分重要。本文提出新颖的动力机械变工况解析分析方法，并成功地应用在单轴燃气轮机及其功热并供装置、单轴回热燃气轮机等其它动力装置的变工况研究中，例如总结出了燃气轮机的效率（或油耗）的变化曲线等等，表明这种分析途径可用于全面深入地研究装置变工况的典型特性，便于发现和总结规律，是对常规分析方法的一次创新。

这方面的工作还包括：小功率单轴恒速燃气轮机（用离心式压气机）及其功热并供装置变工况性能解析特性；单压过热蒸汽余热锅炉变工况解析解；燃气轮机联合循环变工况解析解等。

三、工程热物理基本方程与基本过程的解析解

解析解既有重大的学术理论价值，又可作为标准解发展和检验数值解法。本文导出的多个工程热物理分支学科的解析解对于丰富学科的理论研究和数值计算方法都有重大价值。主要包括：

- ◆ 超临界压力锅炉蒸发受热面动态数学模型的一个解析特解
- ◆ 考虑中心孔影响的汽轮机转子不定常温度场显式解析解
- ◆ 两相混合材料瞬态导热系统模型偏微分方程组的一个显式解析解
- ◆ 集成电路芯片非 Fourier 导热方程的显式解析解
- ◆ 球体内不定常超急速非傅立叶导热的显式解析解
- ◆ 生物导热基本方程的一维不定常解析解

关键词：燃气轮机、联合循环、效率、经济、环境
变工况性能、解析解

ABSTRACT

Total energy system represents the main development tendency of the contemporary energy utilization systems. The gas turbine total energy system has drawn warmer attention and gotten wider application recently. It therefore deserves a comprehensive analysis concerning its 3E performances and design/off-design performances. In addition, analytical solutions have their irreplaceable theoretical and practical meaning, it is worth deriving analytical solutions as more as possible.

The main contents of this thesis include:

1. Preliminary Thermodynamic Analysis of Power System Considering Efficiency, Economics & Environment

1.1 The Proper Order of Magnitude of Penalty for Pollutant Emission

Imposing penalty to pollutant emission is regarded as one of the effective subsidiary measures to promote the practice of environmental protection. However, its effectiveness is dependent on the proper penalty order.

Based on the domestic condition of the Chinese Electrical Industry, the order of magnitude of penalty for pollutants from the power station is discussed according to the following two points of view: a) The penalty amount should be equivalent to the equipment investment for pollution control; b) The penalty amount should be lower than the pure income of the power station by only 1 to 2 orders of magnitude.

1.2 Preliminary Thermodynamic Analysis of Power System Considering Economic and Environmental Impacts

A new methodology is presented to introduce economic and environmental impacts into the gas turbine thermal cycle analyses. It is founded through the preliminary quantitative analyses that: higher thermal efficiency and pressure ratio may not necessarily be the sensible choice when COE (Cost of Electricity) is considered to be the optimization target, and even an optimum temperature ratio exists, especially for the peak load plant. Environmental penalties can serve as an incentive factor to improve the optimum values, and its influence varies according to the pollutant charge levels.

1.3 The Evaluation Criteria and Optimization Direction of Renewable Energy Power Systems

To promote the development of renewable energy power systems, it is pointed out that appropriate emphasis should be paid on the economic factors in their commercialization process. The commonly used performance evaluation criteria are discussed. From the quantified analyses in this paper, it is concluded that to popularize practicable renewable energy power systems, the first optimization direction is lowering the specific price per unit useful power output instead of improving efficiency.

2. The Power System Part-Load Performance Analysis with Analytical Solutions

Most of the power plants often run under off-design situations due to the change of the load or ambient conditions or both. Particular attention therefore should be given to the part-load study. However, compared with that of the design point performance, the understanding of part-load behavior, especially some quantitative rules, is far from enough because of its complexity.

A new method is proposed for the typical part-load performance prediction of power system with the analytical solutions. Because of the simplicity and mathematical precision of analytical solutions, a systematical and thorough analysis can then be made with them and from which the typical characteristics of part-load performance can be summarized. Analyses have been made for the part-load performances of constant rotating speed single shaft gas turbine and its cogeneration, single shaft recuperative gas turbine, single pressure level HRSG, combined cycle and so forth. For the gas turbine installation, it is found out that the relative gas turbine efficiency variation can almost be summarized as a single curve, which is consistent with the practical data.

3. The Analytical Solutions for Engineering Thermophysics Fundamental Equations

The analytical solutions have very important theoretical meaning, besides, they also can be used as the standard solutions to check numerical solutions and develop skills of various numerical computational methods.

The analytical solutions derived in this paper include:

- ◆ Analytical solution for dynamic mathematical model of evaporating heat surface in supercritical pressure boilers
- ◆ Explicit analytical solutions of unsteady temperature field in steam turbine rotor with center hole
- ◆ An explicit analytical solution of the partial differential equation set describing transient heat conduction in mixed two phase materials
- ◆ Explicit analytical solutions of non-Fourier heat conduction equation for IC chip
- ◆ One-dimensional algebraic explicit analytical solutions of unsteady non-Fourier heat conduction in a sphere
- ◆ Unsteady one-dimensional analytical solutions for bioheat transfer equations

Key Words: Gas Turbine, Combined Cycle, Efficiency, Economics, Environment, Part-load performance, Analytical solution

目 录

第一章 绪 论.....	1
第一节 课题背景及意义.....	1
第二节 燃气轮机技术的发展概况.....	2
第三节 燃气轮机总能系统.....	5
第四节 热力系统几种分析方法简述.....	13
第五节 本论文主要研究内容.....	18
第二章 结合经济与环保因素的热力分析与优化	20
第一节 SO ₂ 、NO _x 与 CO ₂ 排气罚款的应有数量级.....	20
第二节 燃气轮机发电机组初步考虑经济性和环保因素的热力分析.....	25
第三节 初步考虑经济性的联合循环发电机组热力学分析.....	33
第四节 论可再生能源动力装置的评价指标及优化方向.....	36
第三章 动力机械变工况特性的解析分析法.....	42
第一节 单轴燃气轮机及其功热并供装置的变工况解析解.....	42
第二节 单轴燃气轮机及其功热并供装置的典型变工况特性.....	51
第三节 小功率单轴燃气轮机及其功热并供装置变工况典型解析特性..	64
第四节 单轴恒速回热燃气轮机的变工况解析特性及初步经济分析....	70
第五节 单轴燃气轮机联合循环变工况典型解析特性.....	76
第四章 工程热物理问题的解析解.....	86
第一节 超临界压力锅炉蒸发受热面动态数学模型的一个解析特解..	86
第二节 考虑中心孔影响的汽轮机转子不定常温度场显式解析解.....	90
第三节 两相混合材料瞬态导热系统模型偏微分方程的一个显式 解析解.....	95
第四节 集成电路芯片非傅里叶导热方程的显式解析解.....	98
第五节 球体内不定常非傅里叶导热的一维代数显式解析解.....	103
第六节 生物导热基本方程的一维不定常解析解.....	109
第五章 结束语.....	115
参考文献.....	119
在读期间发表论文目录.....	130
在读期间参加科研项目.....	132

第一章 绪 论

第一节 课题背景及意义

能源问题日益突出。全球范围内出现的能源短缺、温室效应加剧、生态平衡破坏等现象，直接威胁着人类自身的生存环境和持续发展。

同自然界其它资源一样，能源资源与环境资源都是有限的，不可能无限开发有限资源，来满足无限膨胀的需求。为此，人们在努力寻求和开发利用太阳能、核能、风能、潮汐能等可再生能源资源的同时，花费了大量的人力、物力和财力研究、探索更加高效、节能、低污染和节约资源的能源利用原理与装置。人类对能源的需求，导致了能源理论和装置的发展，促进了社会生产力的进步。

总能系统的概念体现了能量梯级利用的思想。它将能源转化与利用提高到系统高度来认识，不局限于单一部件或过程的性能优劣。广义总能系统则更注重整个系统热力、经济和环保各方面的综合效果。以燃气轮机为核心的总能系统近年来获得越来越广泛的应用。这一领域的研究工作也成为一个热点。

由于负荷及大气状态的变化，实际上所有动力装置经常是在变工况下运行。因此，在一定程度上，比起设计点的性能，变工况性能更为重要。但是因其复杂性，目前对动力机械的变工况性能了解还不是十分深入和全面。因此，探讨新的变工况计算方法和全面分析变工况性能具有十分重要的理论和现实意义。

人类社会的生产和发展离不开技术和经济。技术上的先进性并不等同于经济上的可行性。60年代初我国制订的第二部科学技术发展规划中指出，任何科技工作，必须既有技术上的优越性，又有经济上的合理性。同时人类的任何活动都会以某种方式影响环境。保护环境已经成为人类的共识。我国明确提出了经济与环境协调可持续发展的战略方针，要在发展经济的同时，减缓环境污染。科学技术的发展为更合理地利用资源、能源和控制排放、治理污染提供了可能性。对于热

力系统的研究，只有综合考虑系统的热力、经济和环保等特性，才有可能对该系统做出全面和完善的评价。

本论文研究工作是国家攀登B计划85-39项目“能源利用中的气动热力学前沿问题和新设计体系的研究”子课题——“联合循环的热力、经济、环境学研究”和国家自然科学基金资助项目“工程热物理基本方程的解析解”的部分内容。

第二节 燃气轮机技术的发展概况

现代燃气轮机出现在20世纪30年代末。半个多世纪以来，借助高温材料、叶轮机械气动热力学和机械制造工艺的发展，燃气轮机技术取得长足进步，在航空、航海、动力、石油、化工、冶金、运输等部门和领域获得广泛应用。尤其是近一、二十年中，世界各大燃气轮机制造厂商投入大量人力、物力和财力，技术不断推陈出新，性能水平已登上一个新的台阶。

由美国能源部 DOE 发起的先进透平系统 ATS (Advanced Turbine Systems)项目旨在应用新颖热力循环和最新技术成果来实现设计概念上的突破，目前已经到了它的最后实施阶段，世界范围内各燃气轮机厂家都在力图使自己的 ATS 产品在2001年达到商业化^[1]。

世纪之交，超过30种新型号的燃气轮机将被推向市场，从1.5MW的小机组到280MW的大型单轴发电机组（采用蒸汽冷却），简单循环效率从25%到近42%，透平进口温度达到约1449°C (2640°F^[2])。

80年代末90年代初开发的“F”级机组透平前温已达1260~1288°C，其简单循环机组的热效率为36~38%，不补燃的联合循环效率为55%。但是未来几年内，其在燃气轮机重型机组市场上的统治地位就将被空冷和汽冷的“G”型和“H”型机组（透平前温1430°C）取代^[2-4]。

Siemens-Westinghouse公司及其合作伙伴三菱重工共同研制的新型“G”系列高温燃气轮机，501G(60Hz, 230MW)透平前温高达1430℃，显示出及其优良的设计性能：ISO条件下燃用天然气时简单循环效率38.5%，不补燃的联合循环效率58%。后继的701G(50Hz, 300MW)简单循环效率38.7%值，透平前温2640°F。501G压气机压比为19。4级透平，前两级透平叶片采用定向结晶技术，借鉴了Rolls-Royce公司先进的航空发动机技术，叶片带隔热涂层。不同于一般惯用的空气冷却，“G”系列采用蒸汽冷却燃烧室和透平，从而减少通常从压气机抽出的冷却空气量，相对增加压气机流量和效率。

GE公司的“G”系列重型单轴发电机组，包括MS9001G和MS7001G，出力分别为282MW和240MW，透平前温达到1430℃，简单循环效率为39.5%，采用空气冷却系统；相应的联合循环Stag109G(420MW)和Stag107G(350MW)，热效率为58%。“H”级技术的概念发展始于1991年，以先进蒸汽冷却系统和隔热涂层两项尖端技术为标志^[5]。联合循环效率突破60%大关，透平前温仍为1430℃。该系列包括Stag109H(480MW)和Stag107H(400MW)，采用封闭循环的蒸汽冷却系统，核心燃气轮机分别是MS9001H和MS7001H。首台MS9001H于1998年初在美国进行全速空负荷测试。1999年结束该实验后，首台9H联合循环机组将于2000年开始全速满负荷性能测试，预计于2001年进行首次商业运行发电。

Siemens KWU生产的V84.3A(170MW)和V94.3A(240MW)在基本负荷下运行时简单循环的热效率为38%，V64.3A(70MW)则接近37%。“3A”系列设计综合了Pratt&Whitney公司航空领域的科研成果与Siemens公司重型单轴燃气轮机的设计经验，尤其是透平叶片冷却、材料、陶瓷热涂层技术等，透平采用了单晶叶片。承担基本负荷时，透平前温为1310℃，可望提高到1371℃，性能也会有相应改善。同ABB一样，西门子也逐渐以结构更为紧凑的环型燃烧室取代了早期的双筒型燃烧室，有利于形成平稳的火焰和温度分布，也有助于控制NO_x排放。

ABB公司近期技术途径有其独到之处，在现有超级合金和冷却技术的条件下，通过高压比和再热进一步提高性能。新型机组GT24和GT26初温1235℃，低于“F”级，采用22级轴流式亚音速压气机，压比30，环管式DLN燃烧室，简单循环的效率分别为37.5%和37.8%，联合循环效率达到58.5%。

ABB stal 推出一个新型单轴机组GTX100。ISO条件下基本负荷出力43MW，热效率达37%，组成联合循环后效率超过54%。

许多新机组有的已经进入市场，有的则正处在设计或工业试验的最后阶段。下表是1996年至2000年期间进入或计划进入市场的新机组一览表^[2]，包括航空型和工业型，用于机械传动、舰船驱动及发电等领域，单机功率从1.5MW到280MW，简单循环效率超过40%，透平进口温度接近1450℃。

型号	基本负荷 (kW)	热效率 (%)	透平前温 (°C)	面市年代	制造厂商
OP-16	1550	25.5	---	1997	Optimal Radial
IM270	2045	26.2	1121	1996	Ishikawajima-Harima
ST30	3270	31.6	---	1999	P&W Cnanda
ASE50	3885	30.8	1104	1999	AlliedSignal
TB5000	4000	27.5	941	1997	Alstom
Mercury 50	4200	39.4	1163	1998	Solar
TF50A	5365hp	---	1060	1998	AlliedSignal
601-K9	6710s	33.7	1100	1997	R-R Allison
601-K11	8200s	34.0	1100	1997	R-R Allison
ASE120	9740	34.8	1271	1998	AlliedSignal
THM1304D+	10,000	28.7	991	1998	GHH Borsig
GTG-10	10,400	34.9	1082	1998	Mashproekt
Titan 130	12,800	33.0	1121	1998	Solor
Cyclone	12,870	33.7	1249	1998	Alstom
GTU-12PE	12,900	35.4	1060	1997	Aviadvigatel
GTU-16PE	16,500	37.0	1149	1997	Aviadvigatel
AGT25000	26,200	35.8	1227	1997	Ansaldo
WR-21	33,850	43.0	852 _(PT)	1997	RR-Northrop Grumman
LM2500+	27,050	38.1	1232	1996	Genl Elec IAD
DR61P	28,800	38.3	1232	1998	Dresser-Rand
Coberra 6761	31,800	40.1	1238 _(est)	1998	Cooper Rolls
GTX100	43,000	37.0	1199	1998	ABB Stal
Trent	51,200	41.6	1227 _(est)	1996	Rolls-Royce

GT8C2	57,300kW	34.7	1100	1998	ABB
V64.3A	70,000	36.5%	1310	1996	Siemens KWU
401	85,900	36.6	1316	1997	Siemens-WH
V94.2A	190,000	36.4	1260	1997	Siemens KWU
501G	230,000	38.5	1430	1997	Siemens-WH/MHI
PG7321G	240,000	39.5	1430	1997	GE
701G	270,000	38.7	1449	1997	MHI
PG9391G	282,000	39.5	1430	2000	GE

第三节 燃气轮机总能系统

近代燃气轮机依靠初温和压比的提高不断改善性能，促进了高温材料和冷却技术的发展。但是在一定技术条件下，简单循环单机效率提高的幅度不会很大，原因在于排气带走的热量占很大比例。如果进一步把燃气轮机和其它装置关联起来，从系统角度布置能量的梯级利用，就能大大提高能源利用水平，并扩展燃气轮机的应用范围^[6,7]。

八十年代以来，以燃气轮机为核心的总能系统本着能源利用总体效果最佳的原则，在热力学、生态环境、经济及社会效益等各个方面显示出良好的综合性能，得到广泛重视和应用。它的主要形式有联合循环、功热并供、多联产等。

一、联合循环

从Brayton循环和Rankine循环各自的工作温度区间考虑将二者串联起来形成燃气-蒸汽联合循环，不仅可以发挥燃气轮机的高温优势，而且低品位的能量也能得到较好的应用，从而效率得以大幅度提高。联合循环是目前世界上效率最高的实用动力机械，现在已经运行的机组最高效率为55%~58%，应用先进的燃气轮机技术，本世纪内将突破60%。它也是老电厂动力更新的途径之一，与纯蒸汽电站

相比，联合循环电站具有投资少、建设周期短、用水少、占地小和污染小等优点。

视燃气侧与蒸气侧组合方式的不同，联合循环有余热锅炉型、排气补燃型、排气全燃型、增压锅炉型和加热锅炉给水型等方案^[8]。以余热锅炉型最为常用，此种形式的联合循环做功能力的损失主要发生在燃气轮机的燃烧过程和余热锅炉的换热过程，因此性能改进的方向就是减少这两个过程的不可逆损失。除此之外，还有Kalina循环和各种先进的燃煤联合循环等；近年来发展起来的注蒸汽循环和湿空气透平循环则可以看成是并联型的联合循环，下面将分别予以简单介绍。

1、串联型联合循环

串联型联合循环目前多以简单燃气轮机循环为顶循环，性能改进集中于底循环的革新和顶、底循环匹配^[9,10]。以水蒸气为工质的 Rankine 循环底循环，蒸发过程有定温相变而存在节点温差是导致效率低的主要原因。为了减小传热焓损，提高效率，应尽量使T-S图上冷、热工质的换热过程线平行，即开发“三角形”底循环。应用双压和三压余热锅炉可以有效减小节点温差的影响。除此之外，各种新颖底循环的开发研制方兴未艾。

(1) Kalina循环

提出于70年代末，其特点是采用变浓度的氨水混合物为工质，在吸热段形成变温蒸发过程，改善了燃气轮机排气和工质间的匹配性能，使传热温差减小，损失减小。而在放热过程，通过降低氨浓度来达到基本等温放热，增加做功量，避免了一般定组份混合工质冷凝时不可逆性增大的弊端。此外，Kalina循环的排汽为过热蒸汽，因而没有Rankine循环中凝汽透平湿蒸汽损失和对叶片的冲刷侵蚀问题。Kalina循环中，氨水混合工质的浓度是一个重要的性能参数，对效率而言，存在最佳值。

Kalina循环比相应的Rankine循环出力提高10~15%，效率提高25%，是对现有底循环的重大改进。

(2) 有机工质底循环

底循环采用超临界蒸汽参数，就可避免余热锅炉节点温差的限制，改善循环匹配，但由于膨胀过程会出现湿度过大等而无法实际应用。解决的办法是利用某些临界参数较低的有机工质^[9] (如R113、R114等)，但需根据不同的顶循环和环境条件来选择。

(3)空气底循环

采用工作温度区间内无相变的工质(如空气)，就无节点温差问题，也容易调整循环的匹配。GE公司提出的ABC循环就体现了这种考虑，主要部件是间冷压气机、空气锅炉和空气透平等。预计系统出力可增加30~35%，效率提高25%。缺点是空气传热性能差导致空气锅炉体积庞大，不易大型化。

2、并联型联合循环

增压锅炉型联合循环是典型的并联型联合循环，而注蒸汽燃气轮机循环和湿空气透平循环是近期相继提出两种并联型联合循环，它们的共同特点是在燃气轮机中应用燃气和蒸汽的混合工质，取消了常规联合循环中蒸汽侧的硬件设备，结构更为紧凑，成本相应降低。还具有大比功、高效率、低污染及变工况性能好等优点。

(1)注蒸汽燃气轮机循环

燃气轮机注水或注蒸汽技术在注蒸汽循环出现以前已有应用。如可在燃烧室中注入少量蒸汽来减少 NO_x 生成量，降低排放污染；航空燃气轮机也有向燃烧室中喷水暂时增加或恢复推力的应用例子，然而它们都不是以提高效率为目的。而注蒸汽燃气轮机循环则是利用燃气轮机排气在余热锅炉中产生回注蒸汽，回收了燃气余热，在提高出功的同时还可显著提高效率。计算表明，燃气初温为1300K、循环压比为10的注蒸汽燃气轮机可比相应的简单循环燃气轮机，出功增大60~85%，热效率提高35~45%^[7,11]。 NO_x 排放量的典型值为25ppm。此外，注蒸汽燃气轮机变工况性能好，特别是在功热并供时，可以满足功热比较大范围的变化要求。余热锅炉补燃还可以进一步增加系统灵活性。缺点是排气中的水不易回收，余热锅炉对水质要求高，耗量大，增加了运行费用。除了温比和压比，注汽

率（注蒸汽量与燃气轮机空气流量之比）也是注蒸汽循环的重要参数，三个参数必须综合考虑以求达到最佳配合。注蒸汽循环现已小批量投入商业应用。

(2) 湿空气透平循环（HAT循环）

最早由日本Y.Mori教授于1983年提出，称为蒸发-回热式双流体循环。它是应用湿化手段来增加透平工质的流量，相应减少工质压缩耗功和大幅度增加有效功的输出，并在充分发挥Brayton循环高温优势的同时，有效回收和利用系统的各种低品位余热和废热，形成很低的循环排放温度(70~100℃)，系统内较好地实现了能量的梯级利用，在当前技术水平下，效率可突破60%。

HAT循环与注蒸汽循环类似，都利用了空气和蒸汽的混合工质，取消了蒸汽轮机及其附属设备，简化了系统构成，但比注蒸汽循环效率还要高。尽管其发展仍处于初期阶段，但初步的研究成果表明它具有高效率、大比功、低污染、低成本及变工况性能良好等特点^[12,13]，文献[14-16]采用复杂循环系统流程和参数同步优化的新方法，在HAT循环的研究中突破了自该循环提出以来国际上普遍认为的“高压比高效率”的结论。它还可与洁净煤燃烧技术相结合，发展前景十分广阔。

4、燃煤联合循环

根据目前的消费水平，煤炭储备足够使用200多年，占已查明矿物能源储备的三分之二。因此，煤在今后相当长的时间内仍将是发电的主要燃料。自从70年代出现石油危机后，工业发达国家都在大力进行燃气轮机燃煤的研究工作。燃煤联合循环种类很多，它们处在不同的发展阶段^[17-22]，其中整体煤气化联合循环和增压流化床循环在世界范围内已开始进入实用商业化阶段。

(1) 整体煤气化联合循环(IGCC)

将煤气化系统和燃气-蒸汽联合循环组合在一起就形成了煤气化联合循环(GCC)。煤先在气化炉中气化，气化煤气经净化后进入燃烧室燃烧产生高温烟气到透平中膨胀，燃气轮机排气在余热锅炉中产生蒸汽驱动蒸汽轮机发电。煤的气化过程需要空气和蒸汽，可以分别从压气机和汽轮机(或余热锅炉)中供给，这样将各个子系统有机地联系起来，就形成整体煤气化联合循环(IGCC)^[23,24]。煤气化

主要技术有固定床、流化床和喷流床。除尘与脱硫的方法有干式和湿式两种。发展IGCC的关键技术是高温净化技术，提高煤气转化效率。

近年，又提出了与湿空气透平相结合的IGCC方案，简称IGHAT循环，与HAT循环类似，它也去掉了蒸汽轮机及其附属设备，简化了系统结构，并降低投资和运行费。由于IGHAT系统充分利用水来吸收煤气化系统、空气间冷器中及回热器后燃气中的低位热量，因而效率较高。

(2) 增压流化床燃煤联合循环 (PFBC-CC)

在增压流化床燃煤联合循环中，煤被破碎成颗粒状加入流化床锅炉中，压气机输来的压缩空气从流化床底部布风板喷入与煤粒形成沸腾燃烧，流化床中需加入适量的石灰石或白云石脱硫。为了保持高效脱硫及防止灰分软化结焦和产生碱金属，流化床的床温应保持在850~900℃左右。床内设有蒸汽埋管产生蒸汽轮机所需的蒸汽。增压锅炉与燃气轮机之间设有高温除尘设备对流化床锅炉出口的烟气进行净化，以防止对透平通流道的腐蚀磨蚀作用。

PFBC-CC中以蒸汽轮机出功为主，占75~80%，燃气轮机出功仅占20~25%。PFBC与AFBC相比，结构更为紧凑，燃烧效率和脱硫率更高，适用的燃料范围广，但目前高温净化和透平通流部件磨损问题还需进一步解决^[18,22]。

在PFBC-CC方案中，燃气初温受到流化床床温的限制，只能在830~850℃左右，严重影响了整个联合循环的效率，即使应用超临界参数的蒸汽轮机系统，供电效率一般也只能达到41~42%。为此提出了第二代PFBC-CC循环方案，即在第一代PFBC-CC的基础上加装炭化炉和燃气轮机前置燃烧室^[25]。煤先在炭化炉中热解成为低热值煤气和焦炭，焦炭送入增压流化床燃烧室，而煤气则送到顶置燃烧室进行燃烧，将燃气床温提高到1100~1300℃，联合循环的效率可望达到50%以上^[26,27]。

目前发展第二代PFBC-CC技术的关键在于：(1)流化床式的炭化炉或部分气化炉(2)高温除尘技术(3)顶置燃烧室中低热值煤气的燃烧技术。

(3) 常压流化床燃煤联合循环 (AFBC-CC)

与增压流化床相比，常压流化床联合循环技术难度较小。压气机输出的压缩空气在流化床空气埋管中吸热，从而避免了高温除尘的问题。由常压流化床燃烧

室出来的含尘烟气温度很高，一般在800℃左右，可输入蒸汽发生系统产生蒸汽轮机所需主蒸汽^[28]。

由于目前常压流化床内空气埋管材质的限制，不补燃时的透平前温仅为700~800℃。与第二代PFBC-CC类似，也可以加装前置燃烧室和炭化炉形成第二代AFBC-CC的方案^[29]，来大幅度提高效率。

总体上看，常压流化床燃煤联合循环的特点是燃煤系统简单，可燃烧高灰分低热值的劣质煤。燃烧过程中可进行脱硫处理，环境污染小，成本低。由于燃气轮机工质是干净的空气，减少了高温部件的磨蚀、腐蚀，降低了对材料和工艺的要求。存在问题：空气埋管的耐高温和抗腐蚀、磨蚀性能；空气锅炉体积较大，初投资高。

我国煤炭储量位居世界前列，煤炭在能源消费结构中占75%，为世界煤炭总消费量的四分之一。传统的煤炭利用技术能源利用率低，浪费严重，已经在许多地区造成了较严重的环境污染^[30]。只有尽快采用先进技术改造现有电站和建造新电站才能彻底改变生态环境恶化和能源资源浪费的现状。开发应用高效、洁净的燃煤发电技术对我国有着特殊重要的意义。

二、功热并供和多联产系统

功热并供或热电联产的典型应用包括：生产工业用热或取暖用热，形式有蒸汽、热水及过热水等；多联产时除热之外还可联产冷及各种化工产品或可燃气等等。一般传统的动力设备只利用燃料能量的35~40%(其余60~65%以热的形式损失掉)，而热电联产还可利用余热，这就意味着更低的成本和更高的经济效益。对于功热并供系统，应该在满足用户功热比的条件下追求尽可能高的焓效率^[31-34]，而不能简单地用总能利用率来衡量它的性能好坏。

许多涉及更广、性能更完善的多联产系统正在研究开发之中，应用前景良好。如IGCC和煤化工结合起来形成以煤为燃料的“三联供”系统，可同时生产热、电和化工产品。目前世界上已有数套工业规模的三联供系统在运行。

三、新颖总能系统的发展和下世纪的先进动力系统