

纪念吴仲华教授 学术报告会论文集

中国工程热物理学会
中国科学院工程热物理研究所

机械工业出版社

纪念吴仲华教授学术 报告会论文集

中国工程热物理学会
中国科学院工程热物理研究所

1988/10



机械工业出版社

(京) 新登字 054 号

内 容 简 介

为纪念我国杰出科学家、叶轮机械三元流动通用理论的创始人吴仲华教授75岁寿辰和三元流动理论创立40周年,中国工程热物理学会和中国科学院工程热物理研究所举办了学术报告会。本文集收录了吴仲华教授的助手和学生在科研工作中取得的最新研究成果,其内容涉及工程热力学和总能系统、叶轮机械气动热力学、传热传质学、煤的高效洁净燃烧、电站仿真技术、航空发动机舰用和工业改型等。

本文集的作者均系我国从事工程热物理、动力工程研究和教学并取得显著成绩的专家和教授。

本文集可供工程热物理学科、航空发动机、动力工程和能源利用等领域的科研及技术人员以及有关专业师生参考。

纪念吴仲华教授学术报告会论文集

中国工程热物理学会

中国科学院工程热物理研究所

*

责任编辑:王 琳 责任校对:丁莉莉

封面设计:姚 毅 版式设计:李松山

责任印制:李 奇

*

机械工业出版社出版(北京阜成门外百万庄南街一号)

邮政编码:100037

(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 $787 \times 1092^{1/16}$ ·印张 13·字数 312 千字

1993年8月北京第1版·1993年8月北京第1次印刷

印数 00 001—1 000·定价:23.00 元

*

ISBN 7-111-03859-2/TK·146(G)



吴仲华教授

序 言

1992年是我国杰出科学家吴仲华教授的75岁寿辰，也是著名的“吴氏三元流动通用理论”创立的40周年。为了庆祝这个有意义的日子，在京的吴仲华教授的部分老同事、助手和学生于7月27日吴教授75寿辰这一天，举办了一个小型的茶话会，庆贺他在事业上的成就和寿辰。与会者欢聚一堂，畅叙几十年来“三元流动理论”的不断发展和对航空发动机及其他叶轮机械研究的巨大推动作用，畅叙工程热物理学科的蓬勃发展和在国民经济中日益重大的影响，度过了一个难忘的夜晚。吴教授的助手和学生相约，在11月中国工程热物理学会第八届年会时，再举行一次学术报告会，详细报告在吴教授的指导、带动下和在他的理论启发下各自在科研工作中取得的成果。正当学术报告会的筹备工作顺利进行的时候，吴仲华教授不幸于9月19日与世长辞。吴教授的助手和学生，怀着极大的悲痛，认真地完成了报告会的各项准备工作，确保了论文的质量是高水平的。在中国工程热物理学会的支持下，开了一个很好的学术报告会。

吴仲华教授是一位对科学技术发展做出了卓越贡献的科学家。他在叶轮机械气动热力学方面开创性的工作，是举世公认的；“吴氏通用理论”至今仍然是当代高性能叶轮机械气动设计的理论基础和有力工具。他在工程热力学和能源利用方面，也建树颇多，影响很大。他根据科学发展的规律和国民经济、国防建设的需要，在我国创建了工程热物理学科，又先后创立了中国工程热物理学会和中国科学院工程热物理研究所，对我国工程热物理事业的发展 and 科学技术的进步发挥了重大的作用。

作为一位杰出科学家，吴教授不仅高度重视基础性的工作，而且十分关注理论的应用，强调在工程实践中，不但要知其然，而且要知其所以然，才能够把科研成果转化为生产力。在奠定“三元流动理论”的基础后，他一方面将理论进一步加以发展，同时亲自领导编制了一整套计算机程序，并将它们用于工程设计的实践。今天，我们欣喜地看到，以吴教授的理论方法为基础的三元流动设计体系已在我国逐步形成；我国一些重要的航空发动机，蒸汽轮机及其他叶轮机械的气动设计，都以这一体系中的设计方法为基础，并取得了很好的效果。近年来，为了采用国际上最新的技术来发展我国的能源工业，他虽身患癌症，仍奔波于国内外，多方调研，经常与助手研究工作至深夜。

吴仲华教授学识渊博，学风严谨，学术上卓有成就，对祖国无限热爱。当年在美国，他怀着爱国激情去聆听新中国代表在联合国第一次发言的事迹，早已传为佳话。正当他的事业蒸蒸日上、生活条件越来越优越的时候，他和夫人李敏华教授一道，克服了重重困难，回到了祖国。从此，他把毕生的精力都奉献给了祖国的科技事业。直到生命的最后一息，他所惦

念的仍然是他为之奋斗了一生的科技工作。

在缅怀吴仲华教授之际，作为与他一道历尽艰辛、创建工程热物理学科和中国工程热物理学会的老同事、老朋友，我们百感交集，难以言表。吴仲华教授在工程热物理方面的贡献是不可磨灭的。为了纪念他的成就，在他逝世一周年之际，出版了这部《纪念吴仲华教授学术报告会论文集》，希望能对从事工程热物理学科的研究、应用以及能源利用方面的同行有所帮助，并以此表示我们对吴仲华教授的深切怀念。

梁宇槃 史绍熙

宁捷 陈学俊 孙宝

1993.4. 北京

目 录

序言

工程热物理研究所建所以来热力循环分析研究工作综述	1
热动力装置模块化建模动态分析系统	12
烃类燃料的燃气热力性质表——吴氏燃气表的继续和发展	21
与物质导数有关问题的研究	30
航空风扇发动机改为燃气轮机的方案和性能	35
关于叶轮机机械 S_1/S_2 全三元迭代解	44
跨音速轴流压气机准三元无粘——粘性迭代解	52
吴氏理论在发展跨音速离心式压气机中的重要地位和作用	61
一台先进跨音速离心式压气机的研究	69
四号风扇的设计、调试与吴氏三元流动理论	77
吴氏通用理论在汽轮机长叶片设计中的应用	85
可控扩压叶栅的设计方法与不同工况下性能的试验研究	91
应用 Euler 方程研究二维叶栅大攻角分离流动	98
旋转叶片扭转恢复的气动弹性力学耦合变分理论	106
关于叶轮机机械气体动力学方程的守恒型问题	113
吴仲华三元流动理论的某些进展	122
串列叶栅内粘性可压缩紊流流场有限分析数值计算	129
粘性流动数值求解方法的研究	134
轴对称有源喷管工作过程数值仿真	142
两类流面反问题通用理论研究	149
STELE用熵关联的时均 N—S 方程组模拟复杂剪切湍流的二维通用计算方法与程序	161
建立湍流模型的理性方法	168
高温涡轮叶片尾部典型冷却结构的传热研究	175
循环流化床燃烧技术的研究与开发	182
以水煤浆为燃料的燃气轮机研究工作在我国的进展	189
火灾科学的兴起与发展	194

工程热物理研究所建所以来热力 循环分析研究工作综述

蔡 睿 贤

(中国科学院工程热物理研究所)

摘 要

本文概述了中国科学院工程热物理研究所建所以来在热力循环分析领域的主要工作及其成果。提出一种新的分析方法——比较法,以便简捷、全面地分析复杂循环,并给出了若干实例。我们提出应重视循环分析中的评价准则问题,并应用正确的概念推出更合理的评价标准,从而得出许多全新的分析结论。对一些新颖动力循环也进行了深入分析,如:注蒸汽燃气轮机循环,燃煤联合循环,氢燃料联合循环以及 HAT 循环等。此外,还分析研究了各种动力循环的变工况性能,并进行多种工质热物性的研究。

一、概述

工程热力学是工程热物理研究所的一个重要研究方向。我所以在叶轮机机械气动力学、叶片冷却技术、热管、循环流化床、代用燃料、燃烧喷嘴以及动力循环分析等等方面的研究而著称。1991年本所工程热力学室因其10年来在总能系统工程热力学分析领域所取得的成就荣获中国科学院自然科学二等奖。本文对建所以来有关热力循环分析领域的工作做一回顾。按照思路、方法及研究对象的不同主要阐述以下五个方面的情况:分析复杂循环的比较法;热力循环评价准则的探讨及由此引出的全新结论;其它一些新型热力循环分析,包括注蒸汽燃气轮机循环、燃煤联合循环、氢氧联合循环、HAT 循环等;余热锅炉及一些循环的变工况性能;以及工质的热物性研究。

二、分析复杂循环的比较法

为改进基本热力循环的特性,经常会引进各种各样的复杂循环布置,如加再热、或改为联合循环等等。应用常规的循环计算方法来分析各种复杂循环可以得到较为准确的结果,但计算量较大,且往往很难简单明了地概括出各计算参数间的相互关系。其实在绝大多数复杂循环中,都会有一个主要的基本循环,它对复杂循环的性能起着决定性或主要的影响,而且它本身的性能又早已被分析的清楚而详尽。于是很自然地会提出将复杂循环性能与其主要基本循环的众所周知的性能相比较而求解。将此方法命名为比较法。它又可以进一步分为两种。第一种还需要进行一些简化的正规循环计算,此法的主要优点是可以利用众所周知的基本循环性能来简明扼要地表达复杂循环的性能,而且循环复杂化后的收益显而易见。第二种办法简单地以复杂循环及其主要基本循环的相应理想循环的性能比值来表示实际循环的性能比值,必要时加上简单的修正系数。除了上述优点外,此法的全部计算特别简单,计算结果也具有明显的概括性。

此法详细的论述见文献[1]。应用比较法对一些复杂循环进行了成功的分析,下面给出已发表的应用实例:

对于不补燃单压余热锅炉型常规联合循环,主要由燃气轮机承担功率输出,因此,联合循环的效率可由与燃气轮机循环效率相比较而得,应用上述第二种比较法,可以得到如下的简单结果[2]:

$$\eta_{c.c.}/\eta_g = A \{ \pi^{1/4} - 1 / [(\tau/\pi^{1/4} - 1)/4 + 1] \} / (\pi^{1/4} - 1) \quad (1)$$

其中 A 为修正系数,可通过将式(1)与实际数据关联而得。计算表明,当 A 值取1.096时,其或然误差值小于3%。有关联合循环最佳压比的问题曾有许多个别情况下的分析,但很少见有普遍意义的论述,而借助式(1)及燃气轮机众所周知的特性关系,我们可以全面地估计余热锅炉型联合循环的最佳压比,结果见图1。可见:联合循环的效率最佳压比值近似于相应的燃气轮机比功最佳压比。也许可以如下解释:由于燃气轮机的排热在联合循环中可被利用,因此带有出功最大的燃气轮机的联合循环会有更高的效率[2]。

这一结论后来在国际上一再被指出,如可见文献[3,4]。

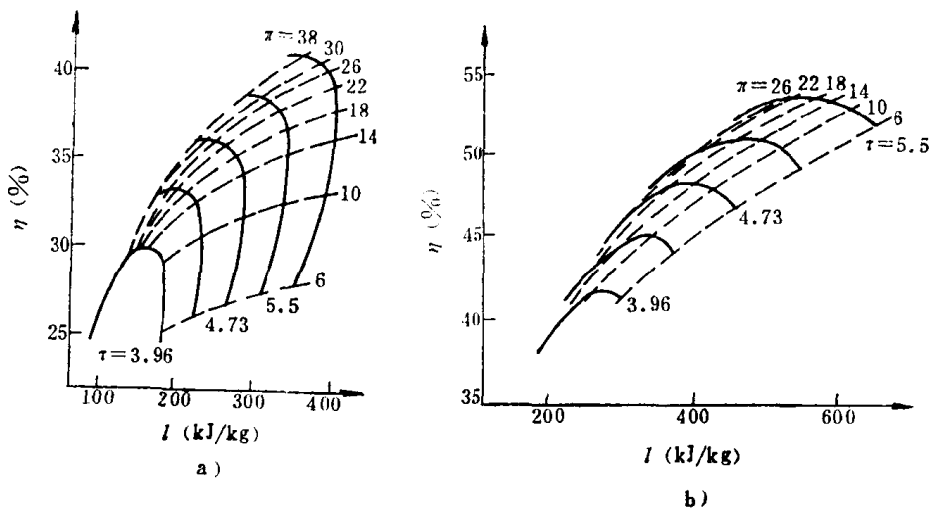


图1 燃气轮机与常规联合循环的基本性能图

a) 简单循环燃气轮机 b) 常规联合循环

对于注蒸汽燃气轮机循环,可以进行类似分析。对于接近于最佳状况的注蒸汽燃气轮机循环,可以得到[5]:

$$\eta_i/\eta_g = \pi^{1/4} \times (F + \pi^{1/4} - 1) / [(F + \pi^{1/4}) \times (\pi^{1/4} - 1)] + 0.19 \quad (2)$$

式中 F 定义为:

$$F = \tau(1 - \pi^{1/4}) / [0.7(\tau\pi^{1/4} - 1) + 3]$$

与详细的理论分析[6]比较发现:对常用范围的循环参数,式(2)的相对误差通常小于2%。且注蒸汽循环的 η_i/η_g 值比较稳定,约为1.35~1.4左右,其最佳压比值高于常规联合循环。

内燃机(包括燃气轮机)的余热也可用于余热锅炉中以预热或加热离解液体燃料。可以认为这种方案是注蒸汽循环的变种,但它利用现成的燃料本身来回收余热,而无需消耗大量的处理水。应用第一种比较法对此方案进行分析[7],可以得到如下简明扼要的效率关系式:

$$\eta_r/\eta_g = (1 + \Delta h_f/H) \quad (3)$$

此式对于任何利用余热加热燃料以提高装置性能的措施都是普遍有效的, 式中 Δh_f 是由余热利用引起的燃料焓增, 包括汽化和离解过程所需热量。被加热的燃料流量通常远小于燃气流量, 此时, 余热锅炉无节点温差^[8], 而过热蒸汽出口温差成为余热锅炉传热中的最小温差。因而, 可以方便地由发动机排气温度定出 Δh_f 值。由式 (3) 可见, 此种循环方案比较适用于低热值且有可能受热离解的代用液体燃料。文献[9]中有一个在燃气轮机中利用余热加热离解甲醇燃料的实验报告, 式 (3) 的计算结果与其试验数据符合较好。

图2 a 所示为一种利用余热的燃煤常压流化床联合循环方案, 装置出功主要由蒸汽轮机输出, 因此应将其性能与蒸汽轮机性能关联起来。计算结果的典型数据如图2 b^[10]所示。事实上, 若循环性能均以 $\Delta\eta = \eta_{c,c} - \eta_g$ 及 N_s/N_g 来表示, 不同参数下的性能曲线都很相似, 而且在相当广的参数变化范围内: $D = 0.1 \sim 0.15$, $T_3 = 973 \sim 1073 \text{ K}$, $\eta_s = 25\% \sim 35\%$ 和 $\eta_B = 85\% \sim 90\%$, 性能数据基本不变: $\pi_{opt} \approx 7$, $\Delta\eta = 2\% \sim 3\%$ 以及 $N_s/N_g = 4 \sim 7$ 。

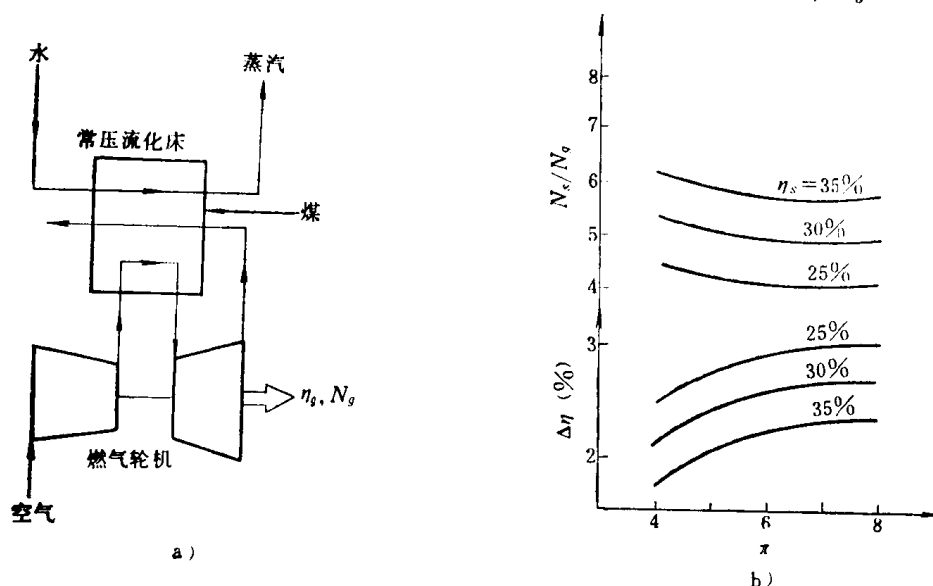


图2 常压流化床排气燃煤联合循环方案

曾应用类似的方法对另一种燃煤常压流化床联合循环系统进行分析^[11]。所建议的系统方案中, 空气首先进入流化床内管并被加热, 然后依次流经透平、余热锅炉、冷却器和压气机, 最后作为燃烧空气进入流化床。因此常压流化床空气加热管两端的压力近似相等, 管子仅承受高温影响, 这样对材质的要求可以降低, 计算结果类似图2 b, 但效率增益较少。

三、热力循环的评价准则

评价准则对于所有的循环分析和优化都至关重要, 热力分析也不例外。举例来说, 若采用热力学第一定律效率来评价功热并供装置, 结论是最好去掉动力装置, 只出热不出功, 这显然是不合理的。文献[12]曾应用第一定律效率为准则分析燃气轮机功热并供系统, 而得出最佳压比为1的推论! 因而正确选择评价准则的问题, 一直是工程热物理研究所的研究重点之一。应用新的更为合理的评价准则会得出全新的分析结论。

文献[13]对燃气轮机功热并供系统给出了一个基本概括的分析。为正确区分功、热品位的差异, 引入:

$$\eta = (N + BQ)/fH \quad (4)$$

为评价准则。当 B 为热量中最大可用能的比例时, 式 (4) 定义的是当量炯效率^[14], 当 B

为热与功的售价比时,它就成为经济焓效率 θ [15]、商业效率 [16] 或当量效率 [17]; 当 B 取1时,它就退化为第一定律效率。然而文献 [14, 16, 17] 都没有应用此准则对功热并供装置进行进一步深入的分析。

以式 (4) 为依据, 可以导出燃气轮机功热并供系统焓效率、最佳压比及功热比的表达式, 实际分析时, 为使结果更简洁概括, 做了若干典型的假设 [13], 这样各参数的影响显而易见。图 3 是典型的循环性能曲线, 对于不同的参数和 B 值, 相应有不同的最佳比值。与简单循环相比, 改为功热并供装置可将效率绝对值提高10%以上 (当量焓效率) 或几个百分点 (经济焓效率)。燃气轮机功热并供系统的可用功热比范围一般为0.3~1.0, 在最佳压比附近, 它主要受压比影响。因而对于给定的现有最高温比, 可通过在最佳压比附近调节压比值来满足实际要求的功热比。

文献 [47] 运用类似准则, 分析了复杂燃气轮机循环采用功热并供时的性能情况。

为考虑不同燃料价格的差异, 文献 [13] 和 [18] 分别提出经济焓系数和价值加权焓利用系数的概念:

$$\theta' = [N + (P_h/P_w)\theta] \cdot (P_w/P_f)/fH \quad (5)$$

文献 [19] 曾利用此系数就燃煤的蒸汽轮机功热并供装置与燃油或天然气的燃气轮机功热并供装置及联合循环功热并供装置进行了对比分析。结果表明, 通常情况下燃气轮机功热并供较蒸汽轮机功热并供具有较高的效率; 但由于煤价较低, 后者可能会具有更高的经济焓系数。

在考察燃气轮机回热循环及回热器性能时, 常采用回热度作指标。然而, 深入的分析表明 [20], 回热度对于回热器并非如压气机或透平的内效率那样, 能代表压气机或透平真实的性能优劣或研制难度, 它更接近于对回收能量的愿望或达到的程度——燃气轮机排气余热所能回收的百分数。实际上更合适的准则应是回热器冷热流体传热的平均温差 ΔT 或其无因次数 $\delta = \Delta T/T_a$, 因其能更好地代表回热器的传热难度以及热力学的完善程度 (焓损失分析)。文献 [20] 以此为依据进行了概括的分析, 其结果示于图 4。可以看出, 采用新准则后主要的不同是效率最佳压比明显减小, 而且随温比与传热温差的不同而变化不大。在目前技术条件下简单回热循环的效率最佳压比基本在3左右。为保证变工况性能, 提高比功, 降低回热器运行温度, 建议可把设计工况压比选得略大于效率最佳压比。

通常采用类似于常规锅炉的效率准则来评价余热锅炉。然而, 余热锅炉流程中有节点存在, 节点温差是设计余热锅炉的关键因素, 因而更有理由成为评价的标准。节点温差与其它设计参数如冷、热侧两种工质进、出口的温度及蒸汽压力的定量关系式见文献 [8]。实际上

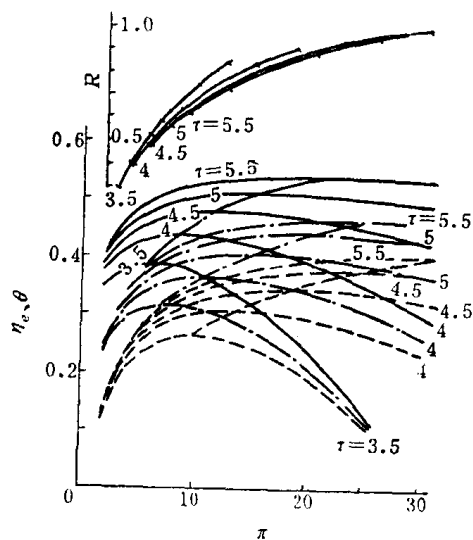


图 3 典型计算结果

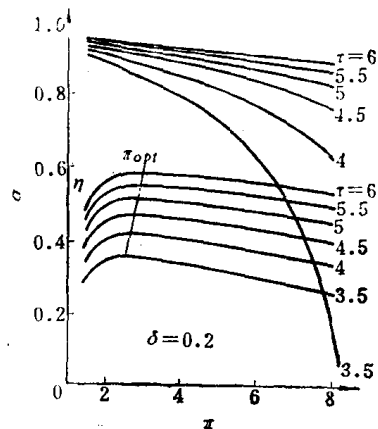


图 4 燃气轮机回热循环的典型性能

当联合循环燃气侧参数及余热锅炉节点温差给定时, 蒸汽侧的性能收益就基本确定了。这一评价准则曾被应用到多种余热锅炉的其它应用场合[6, 21, 22, 13, 45], 尤其是成功地分析了注蒸汽燃气轮机循环(程循环)。这种循环的 $\eta = f(x)$ 效率曲线的“尖端现象”最早由文献[23]提出, 但是未做任何解释, 下节中使用节点温差的分析使我们能更清楚地认识这一现象。

补燃对常规联合循环效率的影响究竟有无好处, 众说不一, 近期发表的一篇长文[44]则认为绝无好处。我们在文献[45]中通过定性与基本定量的热力分析及正确地运用恰切的评论准则(例如上述的节点温差), 明白地指出当补燃后只增加蒸汽流量时是只会降低联合循环效率; 但当补燃用以提高蒸汽参数时, 是有可能提高效率的, 但因余热锅炉最小传热温差的限制, 提高联合循环效率的潜力不大。

四、某些其它热力循环分析

除了上面提到的循环类型, 工程热物理研究所还就另一些新颖的热力循环进行了深入分析, 其中代表性的工作有:

关于注蒸汽燃气轮机循环(STIG)我们曾有多篇论著, 除提出了近似的概括关系式(2)外, 详细的分析表明[6, 21, 22], 当蒸汽压力和压气机后空气压力存在某种关系时, 装置存在四个独立的设计变量, 建议取为: 燃气轮机温比 τ , 压比 π , 余热锅炉节点温差 ΔT_p 及出口蒸汽温度 T_s 。对于给定的 τ 和 T_s , 图5示出了典型的STIG性能曲线。可以看出, τ 和 ΔT_p 不变时存在效率最佳压比值, 且此值大于一般常规联合循环的最佳压比, 而接近于原燃气轮机的 π_{opt} 值。另外提高温比 τ 的收益, 比简单燃气轮机循环时明显得多。 ΔT_p 的影响十分显著。由于存在节点温差的限制, 蒸汽与空气流量比 x 不能任意选取。在选定 ΔT_p 值时, 当增加 x 达到一个极限值后, 若再升高 x 值, 蒸汽过热温度会被逼随之下降, 这正是效率曲线 $\eta = f(x)$ 出现“尖端现象”的原因。由于注蒸汽循环与带补燃的余热锅炉联合循环存在某些共同之处, 文献[24]将二者做了比较分析。上述文献的共同结论是: 注蒸汽循环的效率可接近常规联合循环, 其功率相对于原燃气轮机最高可提高2/3。然而必须考虑透平与压气机的匹配问题。

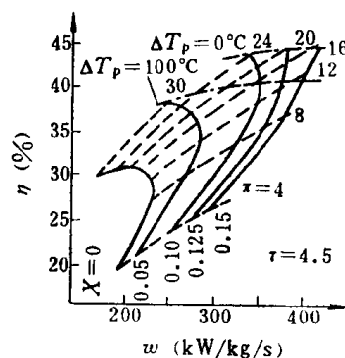


图5 注蒸汽Brayton
循环性能图

全燃型联合循环的设计工况性能分析见文献[25]。这一循环方案尤其适合改建现有的蒸汽动力装置以提高其效率。主要的结论如下: 燃气轮机压比在其通常的取值范围内(6~28), 对性能的影响不大。建议采用一个无因次流量系数——与锅炉相匹配的燃气轮机排气流量与原锅炉空气流量之比做为评价准则。分析发现, 此比值越大, 则总效率越高。当燃气轮机无法与锅炉相匹配时, 最好选一台较小的燃气轮机并用风机来补充新鲜空气。

除了前面提到的常压流化床联合循环, 文献[26]还采用 ASPEN 软件对各种燃煤增压流化床联合循环进行了详细的分析, 结果表明: Velox 增压锅炉型循环的效率同普通的蒸汽动力装置相差无几, 再热可以提高循环性能, 部分气化的前置燃烧室效果最佳, 每一循环类型都有与之相对应的最佳床压。

文献[43]对用部分气化办法提高常压流化床联合循环的措施进行了热力分析, 给出了性

能的基本变化情况并指出了提高燃气轮机高温潜力的优势。

基于完全的氢氧反应生成水的原理,文献[27]提出并分析了一种新型的氢氧联合循环方案,探讨了其中的两种类型。它们的方案布置和热力过程分别示于图6和7。这种循环的突出优点之一是无任何污染。图6循环的优点是把Brayton循环与Rankine循环结合得更紧密,它的性能主要取决于温比,压比对效率影响甚微,当温比 $\tau = 6.5$ 时,循环效率可达64%,比常规联合循环至少提高了5%绝对值。图7的氢氧联合循环采用常规的再热蒸汽底循环。分析表明,此循环在采用常压反应器时性能最好;在较低温比(低于4.5时),这种循环效率较高,工程上也较易实现。

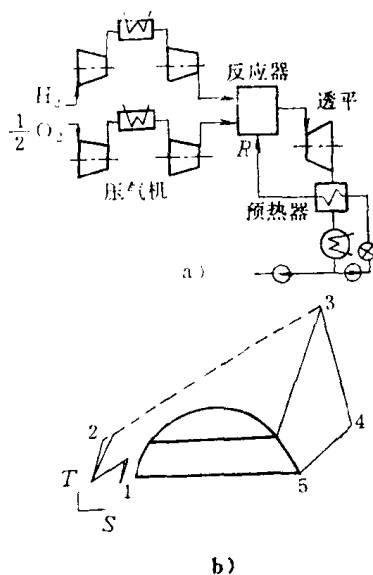


图6 混合式氢氧联合循环
a) 系统示意图 b) 循环过程

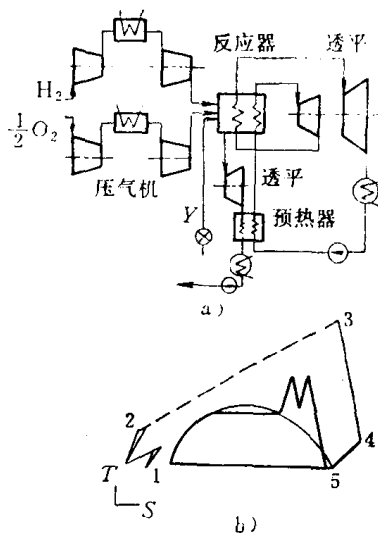


图7 面式氢氧联合循环
a) 系统示意图 b) 循环过程

利用总能系统的概念,文献[28]分析了余热锅炉型联合循环的性能潜力,推导了循环性能指标与传热温差、顶循环温比、压比及排气温度的关系式,探讨了将燃气轮机回热循环同有机工质的超临界底循环相结合的可能性。这样做的目的是为了在 $T-S$ 图上形成三角形的底循环以更有效地回收燃气余热。分析发现,这种循环的效率比常规联合循环高约3%~4%。

文献[29]分析了用于空间动力系统的太阳能布雷顿循环,结论是:当循环最高温度选定后,温比须取一个折衷的值以兼顾循环效率和排热器面积。

湿空气透平(HAT)循环和整体煤气化湿空气透平循环是近年刚提出的新型循环。它利用湿化手段增加透平工质流量,以相应地减少工质压缩耗功和大幅度地增加有效功输出,具有高效率、低污染、低成本等特点,是很有发展前景的新颖热力循环。文献[42]阐述了其基本概念和主要特点,揭示了其高效节能的原理,并对参数优化匹配关系做了探讨。

文献[48]对压气储能电站的评价准则与系统性能进行了初步分析,指出了在国内的应用前景。

五、变工况性能

实际上所有的动力装置常常是在变工况条件下运行的,因而其变工况性能可能比设计工

况性能更为重要。工程热物理研究所有关这方面的工作概括如下:

文献[30]提出了一套燃气轮机全工况特性分析的方法和程序,它可处理独立轴数目在3以内的不同燃气轮机简单循环方案的全工况性能分析,并且考虑了工质热物性的变化。此文提出了解析表达部件实验特性以及处理部件特性突变的方法。这一程序曾多次用于解决实际的工程问题。

在进行联合循环、功热并供的系统分析时,常常要做余热锅炉的变工况分析,在各部件能量平衡及传热方程的基础上,文献[31]对这一问题进行了分析,文献[32]则进一步完善了上述工作,并提出两种分析途径。

第一种考虑了变工况时传热系数的变化,但不需任何余热锅炉结构方面的细节说明;通过解非线性联立代数方程组,可以得到数值解。这个方法较适用于余热锅炉未完全设计好时进行的实际系统热力分析。

第二种方法不考虑变工况条件下传热系数的变化,得出一个简洁显式代数方程组来表达余热锅炉全部自变量,使得分析和求解特别地简单。它适用于对热系统进行预先的热力分析。两种方法得到的计算结果 $G_s = f(T_s, G_s)$ 同实测数据符合较好。尽管这种简单的分析方法因精度不足而无法用于估计过热蒸汽出口温度,但是它所得到的计算结果在燃气流量接近于设计值时是足够精确的。因此这种方法可以应用于燃气流量变动不大的场合,例如,一台定转速单轴燃气轮机的余热锅炉。

众所周知,变工况下输出功、热的匹配是功热并供装置的关键问题。对于燃气轮机功热并供系统,通过回注蒸汽及补燃的方式可以达到大范围调节的目的。详细分析^[33]指出:这时系统存在三个独立的自变量,即燃气轮机温比 τ 或燃烧室燃料流量 f ; 燃烧室中的回注蒸汽量(其它蒸汽用于供热)与空气质量流量的比值 x ; 补燃用燃料流量 f_2 。 $N-Q$ 图上的运行范围可分为下列三个区:区1是补燃区,区2是注蒸汽区,而区3两者都有。运行区的边界限制是:压气机喘振边界,补燃时余热锅炉允许最大进口温度,压气机最大转速及余热锅炉最小逼近温差。但是限制的情况对于单、分轴机组又各不相同。这种系统的运行灵活性很高:在小于各自相应最大值的任何功与热匹配条件下均能良好运行。带注蒸汽的系统最大功率值约是原设计参数的160%~170%,而补燃后最大热输出值可达原设计值的两倍以上。推荐使用焓效率、最好是上文提到的经济焓效率作为系统的评价准则^[15]。

全燃型联合循环功、热并供装置的变工况分析见文献[34]。量纲分析表明:除了燃气轮机的独立变量外,蒸汽侧仅有一个独立的无因次变量,可表示为 $G_s \sqrt{T_s} / P_s$ 。采用无因次参数可以方便地计及环境条件变化带来的影响。相似工况时,蒸汽流量与压气机空气流量成正比。因此从冬季运行的安全性及经济性出发,建议取略小于锅炉产汽能力的值做为实际供应蒸汽的设计值。若可在锅炉中补充一定量的新鲜空气,则可大为提高运行的灵活性。产出的蒸汽量在锅炉容量限度内可大范围地变化。此时增加了一个独立参数,当燃气侧的无因次参数、锅炉无因次空气流量及锅炉侧蒸汽输出量保持恒定时,相似条件得到满足。随蒸汽输出量的提高,补充的新鲜空气量也相应提高;在燃气轮机温比不变时,这对第一、第二定律效率都是不利的。

文献[35]对前文提及的氢氧联合循环做了变工况初步分析,运行中独立控制参数选为压气机折合转速和冷凝回水与反应生成水流量之比 R 。与普通的燃气轮机相似,若采用分轴透平和变转速压气机,则变工况性能将会得到改善。对于图7b所示的循环,如采用常压反应

器, 则建议底循环采用滑压运行, 而用氢(氧)流量控制功率输出。为维持低负荷下顶循环的折合蒸汽流量和防止超温, 应在反应器中额外补充一定的冷水量。图7 b所示循环负荷的变化对效率的影响并不很大。

文献[49]讨论了燃用变热值气体燃料时, 分轴燃气轮机的动力透平试验特性及其计算, 并指出一些参数的测量精度要求。

文献[46]分析了单轴与分轴燃气轮机在注蒸汽时的稳态全工况特性, 并以国产WZ5与WJ5A1两种实用机型作实例进行说明。

六、工质热力性质

热力循环分析中常要精确计算燃气的热物性。文献[36]提供的燃气性质数学表达式可用以计算任意C—H—O—N'—S型气体、液体或气体燃料燃烧产物的内能、焓、比热等。燃气轮机及其总能系统常会用到含不可燃组分的混合气体燃料, 文献[37]提供了其热力性质的计算方法, 适用于炼厂气、油田气和高炉煤气的计算。在需计算多种任意C—H—O—N'—S型气体、液体或固体燃料混烧或多级燃烧后燃气热力性质时, 可采用文献[38]提供的简捷算法。文中引入等效系统当量燃料的概念, 推导出焓、焔及当量燃料分子式的关系式, 此外还进行了误差分析。这一方法可精确计算多级燃料多级燃烧的全燃型联合循环。实际气体热过程变平均比热法的计算误差分析见文献[39], 结论是常规的平均比热法误差较大。文献[40]探讨了多种气体燃料与空气完全混合燃烧的燃料系数计算方法, 给出了一种精确的方法和另一些简单的近似算法。文献[41]讨论了氢、空气及其燃烧产物的热力学性质, 并给出了它们在不同状态区间内随温度、压力变化的不同函数。

作者感谢国家自然科学基金的支持, 同时对成文过程中方钢及何咏梅同志的有益帮助亦深表谢意。

附注: 本文原以“工程热物理研究所近十年来热力循环分析研究工作综述”为题以英文发表于《工程热力学与能源利用1992年国际学术会议ECOS'92》, 后经补充最新资料并由张娜同志译成中文在此发表, 林汝谋同志在译校与增订中也做了部分工作。

符 号 说 明

A 相关系数	x 蒸汽/空气流量比
B 热功价值比	α 过量空气系数
D 压损系数	Δ 增量
F 方程(2)中变量	η 效率
f 燃料流量	θ 经济焔效率
G 质量流量	π 燃气轮机压比
H 热值	σ 回热度
h 焓	τ 燃气轮机温比
N 功率	下标
P 价格	a 大气的
Q 热量	B 锅炉
R 功热比	c, c 联合循环
T 绝对温度	

e 烟	P 节点值
f 燃料	r 热回收
g 燃气或燃气轮机	s 蒸汽或蒸汽轮机
h 热	W 功
i 注蒸汽循环	2 补燃
o 初始值	3 循环最高温度
opt 最佳值	

参 考 文 献

- 1 蔡睿贤. 能的梯级利用与燃气轮机总能系统. 北京: 机械工业出版社, 1988
- 2 蔡睿贤. 余热锅炉式燃气——蒸汽轮机联合循环近似热力学分析. 工程热物理学报. 1981, 2卷(4期): 304~309
- 3 Mirandola A, Macor A and Pavesi G. Investigation into Design, Criteria, Matching and Performance of Gas-Steam Binary Cycle Plants, Analysis and Design of Advanced Energy System: Applications, ASMEAES3—2, pp. 53—60, 1987
- 4 Huang F F and Naumowicz T. Overall Performance Evaluation of Combined Cycle Gas-Steam Power Plants Based on First-law as well as Second-law Analysis. Proc. FLOWERS'90, pp.681-693, 1990
- 5 蔡睿贤, 张世铮, 逯根寿, 林汝谋. 注蒸汽燃气轮机实际循环效率的近似简明热力学关系. 科学通报. 1986, 31卷(6期): 477
- 6 林汝谋, 张世铮, 逯根寿, 金洪光, 蔡睿贤. 注蒸汽燃气轮机循环及其特点分析. 工程热物理学报. 1986, 7卷(3期): 195-200
- 7 Cai R. Alcohol Fuel Gas Turbine and Its Efficiency, Proc, International Symposium on Alcohol Fuels. pp. 939-944, 1988
- 8 蔡睿贤. 余热锅炉节点温差及其对联合循环性能的影响. 工程热物理学报, 1983, 4卷(3期): 223~226
- 9 Karpuk M E and Schell D J. Testing of a Small Combustion Turbine Burning Reformed Methanol, Proc. VI International Symposium on Alcohol Fuels Technology, pp. I. 236~I. 241, 1984
- 10 蔡睿贤. 一些常压流化床燃煤联合循环方案. 工程热物理学报. 1985, 6卷(3期): 218~221
- 11 周基智, 蔡睿贤, 林汝谋. 管内外压力平衡的常压流化床燃煤联合循环的初步分析. 燃气轮机技术. 1989, 3期: 1~5
- 12 佐藤豪. カプスタービンサイクル论. 东京: 山海堂, 1972
- 13 蔡睿贤. 功热并供评价准则及燃气轮机功热并供基本分析. 工程热物理学报. 1987, 8卷(3期): 201~205
- 14 El-Masri M A. On Thermodynamics of Gas Turbine Cycle: Part. 1—Second Law Analysis of Combined Cycle. ASME paper 85-GT-129, 1985
- 15 蔡睿贤. 燃气轮机功热并供设计参数基本分析(1)——简单循环燃气轮机余热利用. 中国工程热物理学会工程热力学和能源利用学术会议报告. 1986
- 16 Gasparovic N. Efficiencies of Cogeneration Thermal Power Plant: A Comparison. 1987 ASME COGEN-TURBO IGTI-Vol. 1, pp. 337-340, 1987
- 17 Timmerman A R J. Combined Cycle and Their Possibilities, Combine Cycles for Power Generation, VKI, p. 12, 1978
- 18 Horlock J H. Cogeneration: Combined Heat and Power. Pergamon Press, Oxford; pp.

26~28, 1987

19 方钢, 蔡睿贤, 林汝谋. 燃气轮机与汽轮机功热联产基本产数的分析. 动力工程. 1988, 总48期: 48~54

20 蔡睿贤. 回热循环新析. 工程热物理学报. 1989, 10卷(1期): 1~6

21 Zhang S, Lin R, Lu G, Jin H and Cai R. Analysis and Appraisal of Performance of Steam Injected Gas Turbine Cycle. Proc. 1987 Tokyo International Gas Turbine Congress, pp. 287-290, 1987

22 逯根寿, 张世铮. 注蒸汽燃气轮机循环与燃气——蒸汽联合循环热力性能的比较. 工程热物理学报. 1987, 8卷(2期): 116~118

23 Cheng D. Parallel-Compound Dual-Fluid Heat Engine. U. S. Patent 3978661, 1976

24 Chen M. A Comparison Between Steam Injection Cycle and Combined Cycle by Energy Balance. Proc. TAIES'89, pp. 386-389, 1989

25 Jin H, Cai R and Lin R. Optimization and Option of Parameters for Fully-Fired Combined Cycle Cogeneration. Proc. TAIES'89, pp. 373-378, 1989.

26 张世铮. 燃煤增压流化床燃气蒸汽联合循环的热力性能. 工程热物理学报. 1988, 9卷(1期): 1~3

27 Cai R and Fang G. Analysis of a Novel Hydrogen and Oxygen Combined Cycle. Int. J. Hydrogen Energy, Vol. 16, pp. 249-254, 1991.

28 方钢, 蔡睿贤, 林汝谋. 余热锅炉型联合循环性能潜力分析与超临界底循环初探. 工程热物理学报. 1991, 12卷(2期): 130~134

29 刁正纲. 空间站电源布雷登循环分析. 中国工程热物理学会工程热力学和能源利用学术会议报告. 1987

30 张世铮, 逯根寿. 燃气轮机设计点和非设计点性能计算方法和计算机程序. 工程热物理学报. 1983, 4卷(4期): 321~323

31 刁正纲. 余热锅炉变工况分析及其在总能系统中的应用. 工程热物理学报. 1987, 8卷(4期): 306~310页

32 Cai R and Hu Z. Off-Design Performance Calculations for Heat Recovery Steam Generators. Chinese Journal of Engineering Thermophysics. 1990. Vol. 2: pp. 275-283

33 胡自勤, 蔡睿贤. 燃气轮机热电并供系统变工况性能. 工程热物理学报. 1990, 11卷(4期): 357~360

34 Fang G, Cai R and Lin R. Off-design Performances of Fully-Fired Combines Cycle Cogeneration. ASME paper 90-GT-370, 1990.

35 方钢, 蔡睿贤. 氢氧联合循环——设计点及变工况初步分析. 工程热物理学报. 1991, 12卷(3期)

36 张世铮. 燃气热力性质的数学公式表示法. 工程热物理学报. 1980, 1卷(1期): 10~16页 1980年.

37 赵秉增. 混合气体燃料(含不可燃成分)燃气热力性质的计算及讨论. 工程热物理学报. 1987, 8卷(3期): 212~214

38 林汝谋, 方钢. 多种燃料多级燃烧的燃气热力性质简捷算法. 工程热物理学报. 1989, 10卷(2期): 137~139

39 张世铮, 逯根寿. 变比热气体热力过程的计算. 工程热物理学报. 1982, 3卷(3期): 216~218

40 吴文东. 多成分燃料混合气与空气完全燃烧时的燃料系数(β)的计算方法. 工程热物理学报. 1986, 7卷(2期): 102~105

41 张世铮, 纪军. 氢、空气及其燃烧产物的热力学性质. 工程热物理学报. 1989, 10卷(1期): 13-15