



上海科技著作出版资金资助
上海交通大学学术出版基金资助

湿空气透平循环的 基础研究

THE BASIC RESEARCH OF HUMID
AIR TURBINE CYCLE

翁史烈 陈汉平 著

上海交通大学出版社

上海科技专著出版资金资助
上海交通大学学术出版基金资助

湿空气透平循环的基础研究

THE BASIC RESEARCH OF
HUMID AIR TURBINE CYCLE

翁史烈 陈汉平 著

上海交通大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

湿空气透平循环的基础研究/翁史烈,陈汉平著.

—上海:上海交通大学出版社,2008

(上海市科技专著出版资金资助)

(上海交通大学学术出版基金资助)

ISBN978-7-313-04959-9

I. 湿... II. ①翁... ②陈... III. 空气透
平—研究 IV. TK14

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2007)第 141617 号

本书出版由上海科技专著出版资金资助

湿空气透平循环的基础研究

翁史烈 陈汉平 著

上海交通大学出版社出版发行

(上海市番禺路 877 号 邮政编码 200030)

电话:64071208 出版人:韩建民

昆山市亭林印刷有限责任公司印刷 全国新华书店经销

开本:787mm×960mm 1/16 印张:14.75 插页:12 字数:280 千字

2008 年 1 月第 1 版 2008 年 1 月第 1 次印刷

印数:1~2200

ISBN978-7-313-04959-9/TK·076 定价:40.00 元

版权所有 侵权必究

出版说明

科学技术是第一生产力。21 世纪,科学技术和生产力必将发生新的革命性突破。

为贯彻落实“科教兴国”和“科教兴市”战略,上海市科学技术委员会和上海市新闻出版局于 2000 年设立“上海科技专著出版资金”,资助优秀科技著作在上海出版。

本书出版受“上海科技专著出版资金”资助。

上海科技专著出版资金管理委员会

前 言

世界上化石能源的储藏数量是有限的,消费需求数量却在不断增长。当前,能源问题已经愈来愈成为各国经济发展乃至引发国际争端的焦点。另一方面化石能源消费带来的环境污染将直接制约国家发展,成为危害国家软实力的重要因素。开发可持续发展的新能源,增加能源生产,提高传统能源的转换利用效率,降低污染排放是每一个能源工作者义不容辞的社会责任。

在相当长的一段时期中,化石能源在人类能源消费总量中仍将处于第一的位置,提高化石能源转换效率是一项长期而艰巨的任务。湿空气透平循环效率高,旋转部件少,排放污染低,因而是下一步最有可能成功进入市场的新型能源动力机型之一。

湿空气透平循环在工作原理上突破了传统单一工质动力循环的概念,从而引出了许多新问题。从国内外公布的资料分析,湿空气透平循环的基础研究尚需进一步开展,特别是湿空气的热物性、饱和器中的湿化加热过程、大湿度空气的燃烧过程、强化换热过程、以及整个装置的拓扑优化和动态过程组织都须从机理上深入研究,才能充分揭示湿空气循环的内在潜力,正确评价它的优越性,为市场化作好必要的准备。有鉴于此,国家重大基础研究中设立了《复合工质新型动力系统及动态仿真》课题。上海交通大学涡轮机研究所承担了该课题研究,所获得的研究成果通过国家科技部组织的专家评审验收。在上海交通大学大力支持下,课题组对全部研究工作进行了再分析、整理和总结,然后写成本书,作为进一步学术研究的基本积累,也供同行专家参阅并批评指正!

本书共分9章:第1章绪论,由翁史烈撰写;第2章湿空气透平循环的稳态特性,由刘永文撰写;第3章湿空气热物性参数计算模型,由陈汉平撰写;第4章空气湿化过程的理论基础和第5章空气湿化饱和器的实验研究,由王永泓撰写;第6章湿空气透平循环中的燃烧问题,由臧述升撰写;第7章新型紧凑式热交换器,由程惠尔提供素材,翁史烈整理;第8章湿空气透平循环的动态性能,由刘永文撰写;第9章燃料电池-燃气轮机混合装置,由张会生、翁史烈撰写。翁史烈、陈汉平、宋华芬担任全书的编辑、统稿、校核。

翁史烈

2007年2月于上海交通大学

目 录

第 1 章 绪论	1
1.1 能源形势	1
1.2 先进动力循环	1
1.3 湿空气透平循环简介	2
1.4 需要研究的问题和本书概要	5
参考文献	6
第 2 章 湿空气透平循环的稳态性能	8
2.1 湿空气透平循环的基本型式	8
2.2 湿空气透平循环主要部件的稳态性能模型	8
2.3 湿空气透平循环的稳态特性	15
参考文献	18
第 3 章 湿空气工质热物性计算模型	19
3.1 湿空气透平循环分析对湿空气热物性的要求	19
3.2 湿空气热物性研究现状	21
3.3 湿空气热物性 R-K 模型的发展	29
3.4 湿空气透平循环分析中湿空气热物性模型的选择	40
参考文献	44
第 4 章 空气湿化过程的理论分析与计算	49
4.1 空气湿化过程的传热传质机理	49
4.2 空气湿化饱和器构造与原理实验模型	53
4.3 空气湿化过程数值模拟	58
参考文献	84

第5章 空气湿化饱和器实验研究	86
5.1 实验装置和测量仪表	86
5.2 饱和器两相流场的实验测量	95
5.3 空气湿化饱和器总体性能实验研究	130
5.4 饱和器数学模型及无因次准则数	141
参考文献	151
第6章 湿空气透平循环中的燃烧	155
6.1 湿空气透平循环中的燃烧问题	155
6.2 湿空气扩散燃烧的实验研究	156
6.3 加湿旋流扩散燃烧的数值模拟	170
6.4 本章结论	179
参考文献	179
第7章 湿空气透平循环中的强化换热	181
7.1 简介	181
7.2 通道形面参数要求及计算方法	181
7.3 小通道的流动传热特性	183
7.4 一次表面换热器热性能计算及分析	184
7.5 一次表面换热器芯体试验件的性能测试	186
7.6 结论	188
参考文献	188
第8章 湿空气透平循环的动态性能	190
8.1 饱和器动态仿真模型	190
8.2 饱和器动态试验	194
8.3 湿空气透平循环的动态模型	196
8.4 动态仿真结果	199
8.5 面向对象建模和仿真	205
参考文献	210
第9章 燃气轮机—燃料电池混合装置	211
9.1 前言	211

9.2 系统结构及描述	211
9.3 系统建模	212
9.4 仿真结果及分析	221
9.5 主要结论	223
9.6 展望	223
参考文献	223

附录 彩图

图 3-1、图 4-9、图 4-10、图 4-11、图 4-12、图 4-13、图 4-14、图 5-22、图 6-1、图 6-2、图 6-7、图 6-8、图 9-1、图 9-2、图 9-3。

第1章 绪 论

1.1 能源形势

据国际能源机构 2003 年的报告,就当时已经探明的化石能源和铀矿的储量与能源消费的需求来分析,世界上石油大约可继续供应 37 年、天然气为 60 年、煤为 200 年、铀为 270 年。油气资源的行将枯竭不能不引起国际社会的高度重视。另一方面,环境、生态和社会的可持续发展要求,又对能源结构的合理性、能源的高效清洁转化、能源高效利用提出了苛刻的要求。因此,能源问题愈来愈成为各国经济发展乃至国际争端的焦点。

我国能源资源的人均储量为世界人均的 56%,而且结构不尽合理,优质能源比例较低。中国工程院资料(2005 年)表明:我国的石油探明人均储量仅为世界人均的 8%;天然气为 6%;水能资源主要分布在西南各省,开发利用在一定程度上受到生态和环境保护的制约;煤炭资源虽较丰富,但精煤储量不足;铀矿潜在资源丰富,但有待进一步查明。

众所周知,我国目前正处于工业化中期,能源消费强度不断提升。从 2002 年起至今,能源消费与能源供应之间的矛盾,一直处于相当紧张的状态。然而,在供需矛盾突出的同时,我国能源利用效率不高,浪费严重。与国际先进水平相比,节能潜力很大:火电煤耗的节能空间为 19.1%;吨钢能耗的为 19.5%;水泥综合能耗的为 31.3%;乙烯能耗的为 28.0%;载货车油耗的为 55.2%。另外,从环境的角度来看,到 2020 年能源消费增长 1.2 倍时,要使环境污染基本保持目前水平甚至有所改善,任务也十分艰巨。由此可见,我国的能源科技从开采、转化、利用到管理都面临严重的挑战。

1.2 先进动力循环

人类从大自然直接获得的能源称为一次能源。大体上可分为三类:即①化石能源。包括原油、煤炭、天然气、煤层气等;②可再生能源。包括水能、风能、太阳能、海洋(潮汐、风浪)能、生物质能等;③核能。形形色色的一次能源就其本质而言,无非是化学能、动能、势能、光能、核裂变和核聚变能而已。

人类生活和生产所消费的主要能量形式是热能、机械能和电能。如何从一次能源中取得社会大量消费的上述三种能量? 如何清洁、高效地实现不同能量形式的相互转换? 这是几百年来科技工作者处心积虑、奋斗不息的目标。他们不断地完善空气动力学, 组织高效的气体流动, 改进能量转换装置的性能; 不断地发展材料科学, 研制新材料, 以提高工作温度和压力, 使能量转换效率步步提高。从 20 世纪 80 年代起, 他们又以总能系统的理论为指导, 努力完善热力循环, 使能源转化效率提高了十几个到几十个百分点, 取得了惊人的进步。目前超临界循环效率可望突破 50%, 而燃气-蒸汽联合循环效率已在 60% 的门槛上! 先进热力循环的发展方兴未艾, 新的知识不断丰富, 许多探索已取得了进展。下一步可能成功进入市场的新循环和新机型估计会有以下几种:

- (1) 整体煤气化联合循环(IGCC);
- (2) 湿空气透平循环(HAT);
- (3) 整体煤气化湿空气透平循环(IGHAT);
- (4) 燃料电池-燃气轮机混合装置(Fuelcell-Gas Turbine Hybrid Plant);
- (5) 部分氧化燃气轮机循环(Partial Oxidation Gas Turbine Cycle)。

1.3 湿空气透平循环简介

湿空气透平循环(Humid Air Turbine Cycle)简称 HAT 循环, 由多组分两相混合气体为工质。基于现今已经成熟部件技术的 HAT 循环动力系统, 具有造价低、热功转换效率高、比功高、污染排放少以及变工况性能好等一系列优点, 从而引起了广泛的重视。HAT 循环被誉为极有发展前途的 21 世纪热力循环。

图 1-1 表示典型的 HAT 循环热力系统。从图中可见, 相对于常规燃气轮机循环而言, HAT 循环在高、低压压气机之间增设了一个中冷器, 在高压压气机出口增设了一个后冷器, 在回热器后面增设经济器, 在后冷器和回热器之间增设了一个饱和器。给水在中冷器、后冷器和经济器中分别加热后, 三股热水混合在一起, 从饱和器顶部喷雾到饱和器中。压气机出口的高压空气先经过后冷器冷却, 之后从饱和器底部进入饱和器。在饱和器内, 高压压缩空气和高温喷雾水滴(或填料饱和器内填料上的水膜)直接接触, 一部分水被蒸发。由于蒸发潜热和向空气的传热使水温下降, 而高压空气的温度则升高, 空气的相对湿度(含湿量)也升高, 形成空气和水蒸气的混合物。随后, 高含湿量的湿空气(含 10%~45% 水蒸气)经回热器加热升温后, 进入燃烧室, 与注入那里的天然气或者液体燃料混合燃烧, 产生的高温、高压的湿空气燃烧产物进入透平中膨胀做功。透平排气通过回热器和经济器逐步降温, 最后排向大气。HAT 循环由于充分利用了系统的各种余热和废热, 循环放热

温度很低($70\sim 100^{\circ}\text{C}$),比较好地体现总能系统的能量梯级利用原则。

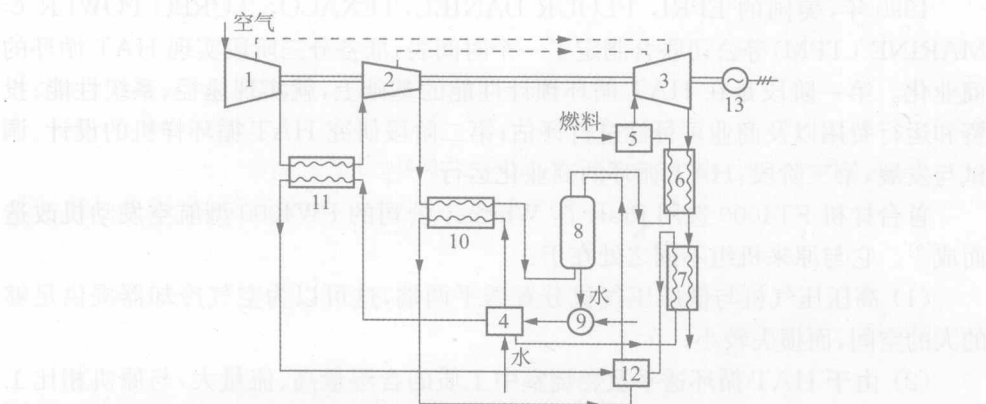


图 1-1 HAT 循环热力系统图

1. 低压压气机; 2. 高压压气机; 3. 透平; 4. 水混合器 A; 5. 燃烧室; 6. 回热器;
7. 经济器; 8. 饱和器; 9. 回水泵; 10. 后冷器; 11. 中冷器; 12. 水混合器; 13. 发电机

HAT 循环有以下优点:

(1) 与常规的燃气-蒸汽联合循环相比, HAT 循环的燃烧产物只在一个透平中膨胀做功, 这样可以省去蒸汽轮机及其系统, 使发电设备大为简化;

(2) 从中冷器和给水预热器中回收的低温热能都被完全利用来参与循环做功, 而且传热过程冷、热侧的工质都不发生相变, 平均传热温差较低, 能更最大限度地回收热能, 为提高循环热效率提供了条件;

(3) 由于水蒸气的加入使透平的流量增加, 水蒸气本来就具有做功能力大的特点, 因而 HAT 循环的比功很大;

(4) 空气的湿化在饱和器内完成, 传热传质的效率较高;

(5) HAT 循环的燃烧过程有大量水蒸气参与, 使 NO_x 的排放大大降低。

HAT 循环的概念由日本学者 Y. MORI 于 1983 年首先提出^[1], 当初学界普遍把它看成是一种特殊的回热式燃气轮机循环, 该循环带有喷水手段, 采用两相多组分的混合工质, 故也被称为水接触蒸发式多相多组分系统(MPCS/DEC)。后来研究发现 HAT 循环具有效率高、成本低等突出优点, 于是引起了广泛的重视。

美国的研究起步较早, 1985 年以来, 美国出现多项有关 HAT 循环的专利^[2,3]。美国能源部、电力部和动力装备制造公司对 HAT 循环都十分重视^[4~6], 几家联合推出一个“先进透平系统发展项目(ATSDP)”, 旨在应用新颖的循环概念和重大技术进步成果, 开发出先进的动力系统, 满足 21 世纪的需要。项目主要内容是 HAT 循环装置开发、高温透平技术(1427°C)和新材料(陶瓷材料)的应用, 整个项目为期

10年,总投资5亿美元。

1990年,美国的EPRI, FLOUR DANIEL, TEXACO, TURBO POWER & MARINE (TPM)等公司联合制定了一个时间表,准备分三阶段实现HAT循环的商业化。第一阶段是在HAT循环预计性能的基础上,就实现途径、系统性能、投资和运行费用以及商业可行性进行评估;第二阶段研究HAT循环样机的设计、调试与发展;第三阶段:HAT循环的商业化运行^[7,8]。

首台样机FT4000选用Pratt & Whitney公司的PW4000型航空发动机改造而成^[9]。它与原来机组不同之处在于:

(1) 高压压气机与低压压气机分置透平两端,这可以为空气冷却器提供足够的大的空间,而损失较小;

(2) 由于HAT循环透平及燃烧室中工质的含湿量高、流量大,与原机相比工质的热交换系数及空气动力学性能都发生了很大的变化,故FT4000燃烧室及透平结构与简单循环的原型机完全不同,需要重新设计^[10]。

美国其他公司进行的工作有:TPM公司从理论上研究了HAT循环中燃气轮机的设计,包括级数、进气排气管等,绘制了透平性能曲线、压气机性能曲线、部件温度分布等资料;GE公司提出的MS7001F改造方案;ABB公司设想的HAT专用的发动机方案,及其与TEXACO煤气化装置组成500MW的IGHAT型发电主力机组^[11]。另外鉴于HAT循环涉及空气湿化,必然会伴有水耗量大和水回收的问题。美国和日本都在研究大流量烟气中回收水和净化技术,不仅要求技术上可行,且经济上要合算。

根据GE、ABB和TEXACO等公司提供的数据,FLOUR DANIEL公司预测了HAT循环的性能,并与同等技术条件下的联合循环(CC)进行了比较。结果表明^[12],与IGCC相比,IGHAT装置热效率更高,单位千瓦发电量的初投资降低20%,电价降低了15%。对于以天然气为燃料的系统,HAT装置与CC相比,热效率高4%, NO_x 、 CO_2 减排占据优势,部分负荷性能也很好。

除美国外,其他发达国家对HAT循环的研究也已起步。瑞典国家工业技术开发委员会(NUTEK)开展了“发电发热新过程”的研究工作,主要目的是开发效率高、环境性能好的动力循环,蒸发式燃机循环是其中的一个重点。瑞典已率先建立了HAT试验电站,投入正常运行。此外,Lindegren等^[13]考虑了将HAT和IGHAT与区域供热结合起来的可能性,借助热泵,将燃气排热传给区域热水,热泵所需动力来自循环。

我国于1992年起对HAT循环进行研究,但基本上还限于理论研究,研究的重点是HAT循环的热力学分析、循环分析、HAT循环参数与流程的优化,从理论上进一步研究和探讨了HAT循环的本质及其性能。中科院林汝谋等发表了我国

第一篇关于 HAT 循环的论文,对循环的性能进行了分析和计算^[14]。此后,肖云汉等对整个循环进行了系统优化,得出了分别对应于最大比功和最佳热效率的系统结构,结果表明,透平初温 1260°C 时,循环最大比功可达 1298kJ/kg ,最高效率可达 60.33% ,论文首次提出了“HAT 循环更适合在低压比下工作”的观点^[15~18]。文献[19]建立了 HAT 循环的性能估算公式。文献[20]对 HAT 循环和其他一些循环进行了比较研究,分析了 HAT 循环的热力性能。文献[21]讨论了 HAT 循环的改进型——CHAT,指出 CHAT 循环的变工况特性优于 HAT 循环。上海交大的翁史烈等对 HAT 循环的流程进行了优化研究^[22]。703 研究所进行了注水回收研究,并于 2003 年宣布 100% 注水回收获得成功。

通过研究表明^[23~26],HAT 循环具有高效率、高比功、污染小、变工况性能好、系统简单等优点,但需要高压比、需分轴机组。基于现有的燃气轮机材料、气动力学和燃烧技术(初温 $=1300^{\circ}\text{C}$,压比 $=20\sim30$)建立的 HAT 循环机组,其循环效率可达 $55\%\sim58\%$,比注蒸汽循环高约 5% ,比余热锅炉联合循环高约 3% 。若加大湿化热量,即蒸汽空气混合比(X)提高到 $20\%\sim45\%$,则可望突破 60% ,这是目前纯输出功的热力循环所能达到的最高效率^[1]。

1.4 需要研究的问题和本书概要

从国内外公布的资料分析,湿空气透平循环的基础研究尚需进一步开展,特别是湿空气的热物性、饱和器中的湿化加热过程、大湿度空气的燃烧过程、强化换热过程,以及整个装置的拓扑优化和动态过程组织都须从机理上深入研究,然后才能充分揭示湿空气循环的内在潜力,正确评价它的优越性能。有鉴于此,国家重大基础研究中设立了《复合工质新型动力系统及动态仿真》课题,由上海交通大学涡轮机研究所承担,2005 年 4 月研究成果通过了国家科技部组织的专家评审验收。在上海交通大学大力支持下,课题组通过总结整理出此专著,作为学术研究的基本积累,也供同行专家参阅并批评指正!

本专著共分 9 章:第 1 章绪论,由翁史烈撰写;第 2 章湿空气透平循环的稳态特性,由刘永文撰写;第 3 章湿空气热物性参数计算模型,由陈汉平撰写;第 4 章空气湿化过程的理论基础和第 5 章空气湿化饱和器的实验研究,由王永泓撰写;第 6 章湿空气透平循环中的燃烧问题,由臧述升撰写;第 7 章新型紧凑式热交换器,由程惠尔提供素材,翁史烈整理;第 8 章湿空气透平循环的动态性能,由刘永文撰写;第 9 章燃料电池-燃气轮机混合装置,由张会生、翁史烈撰写。翁史烈、陈汉平、宋华芬负责全书的统稿和校核。

参考文献

- [1] 林汝谋,蔡睿贤. 跨世纪的 HAT 热力循环[J]. 燃气轮机技术, 1993, 6(2):1-6.
- [2] Nakamura H. Regenerative Gas Turbine Cycle [P]. US. Patent, No. 4537023. 1985.
- [3] Rao A D. Process For Producing Power [P]. US. Patent, No. 4829765. 1989.
- [4] William H Day, Ashok D Rao. Ft4000 HAT with Natural Gas Fuel, Turbomachinery International[J]. Feb. , 1993.
- [5] Dexter T Cook, Ashok D Rao. HAT Cycle Simplifies Coal Gasification Power. Mps, May, 1991.
- [6] Victor De Biasi. CHAT Rivals 51% Combined Cycle Plant Efficiency at 20% Less Capital Cost[J]. Gas Turbine World, May-June, 1995.
- [7] Cook D K, et al. HAT Cycle Simplifies Coal Gasification Power. MPS, May, 1991.
- [8] A Feasibility and Assessment Study for FT4000 Humid Air Turbine(HAT)[R]. EPRI RP-3251-05, 1993.
- [9] Day W H, et al. Redefined Natural Gas HAT Cycle Produces Higher Output[C]. MPS, June, 1993.
- [10] Stecco S S, et al. Humid Air Turbine Cycle; A Possible Optimization[C]. International Gas Turbine and Aeroengine Congress and Exposition, Cincinnati, Ohio USA, May 24-27, 93-GT-178, 1993.
- [11] Stecco S S, et al. The Humid Air Turbine Cycle; Some Thermodynamic Considerations. International Gas Turbine and Aeroengine Congress and Exposition, Cincinnati, Ohio USA, May 24-27[C]. 93-GT-77, 1993.
- [12] Rao A D, et al. A Comparison of Humid Air Turbine (HAT) Cycle and Combined Cycle Power Plants[R]. EPRI RP-2999-07, 1991.
- [13] Lindgren G, et al. The HAT Cycle, a Possible Future for Power and Cogeneration[C]. Proc. Of the Powers Congress, Florence Italy, 1992.
- [14] 林汝谋,方钢,蔡睿贤. HAT 循环性能分析研究[J]. 工程热物理学报, 1993, 14(2): 23-28.
- [15] 肖云汉,林汝谋,蔡睿贤. HAT 循环的系统优化[J]. 工程热物理学报, 1994, 15(2):133-136.
- [16] Yunhan Xiao, Rumou Lin, Ruixian Cai. System Optimization of Humid Turbine Cycle[C]. ASME, Netherlands, June 13-16, 1994, 94-GT-240.
- [17] 肖云汉,蔡睿贤,等. HAT 循环的模化与热力学评价[J]. 工程热物理学报, 1996, 17(3): 257-260.
- [18] Yunhan Xiao, Ruixian Cai, Rumou Lin. Modeling HAT Cycle and thermodynamic Evaluation[J]. Energy Convers. Mgmt. , 1996.

- [19] 王永青,严家骝,等. 一种新的热力循环性能的估算方法和 HAT 循环的性能估算公式[J]. 热能动力工程,1998, 13(5):345-347.
- [20] 黄欧,邹介棠,吴铭岚. STIG 循环和 HAT 循环的熵分析比较[J]. 燃气轮机技术,1996, 9(1):27-30.
- [21] 靳海明. HAT 循环的一种改型——CHAT 循环[J]. 热能动力工程, 1996, 11(1):37-39.
- [22] 孙晓红,王永泓,翁史烈. 湿空气透平循环流程优化分析[J]. 上海交通大学学报,1999, 33(3):309-312.
- [23] Irwin Stambler. Predict \$ 600/KW for HAT Cycle Compressed Air Storage Plants[J]. Gas Turbine World, July-August, 1992.
- [24] Fraize W E, Kinney C. Effects of Steam Injection on the Performance of Gas Turbine Power Cycles[J]. ASME, Vol. 101, Apr., 1979.
- [25] Rao A D, Day W H. HAT Cycle Status Report[C]. Eleventh Conference on Gasification Power Plants[C]. San Francisco, California USA, Oct. 21-23, 1992.
- [26] Kim T S, Song C H, Ro S T, Kauh S K. Influence of ambient condition on thermodynamic performance of the humid air turbine cycle. Energy[J], 2000, 25:313-324.

第2章 湿空气透平循环的稳态性能

2.1 湿空气透平循环的基本型式

从20世纪50年代开始,简单循环燃气轮机开始用作推进和发电装置。燃气轮机的优点包括效率高、低比投资、灵活、结构紧凑、快速启动和低维护要求。燃气轮机发展的一般趋势是更高的涡轮进口温度、更高的压比和更好地利用排气余热。利用排气余热的最普遍的方法是将蒸汽底层循环和燃气轮机循环结合在一起,这种系统构成方式称为联合循环。联合循环电站的效率可以达到55%~60%,占据了发电装置的主要市场。

在简单循环的基础上,提出了各种先进循环,其中包括湿空气透平循环。其基本工作原理如图2-1所示,其主要特点是压缩后的空气通过湿化器中水的蒸发进行加湿。湿化器中的水在冷却燃气轮机排气后将热量传递给压缩空气,实现了排气余热的利用。

根据图2-1所示的基本原理,湿空气透平循环可以有不同的具体结构形式,图2-2是典型的结构形式。其系统流程为:空气经低压压气机、中冷器、高压压气机、后冷器后进入饱和器底部;补充水在中冷器、后冷器、热水器中加热升温后从饱和器顶部进入。在饱和器中,空气和水逆流接触,空气被加热湿化,水被冷却并部分蒸发。从饱和器出来的湿空气回收透平排气高温余热后进入燃烧室,经燃烧加热,生成的高温高湿燃气在透平中膨胀做功,透平排气经回热器和热水器吸热后排入大气,完成一个工作流程。

2.2 湿空气透平循环主要部件的稳态性能模型

根据图2-2中湿空气透平循环的典型结构形式,评价湿空气透平循环的稳态性能需要建立压气机、涡轮、燃烧室、中冷器、后冷器、饱和器、经济器和烟气冷凝器等部件的稳态性能模型。

2.2.1 压气机稳态模型

压气机的目的是按照循环的要求增加气流的总压,同时尽可能少地消耗轴功

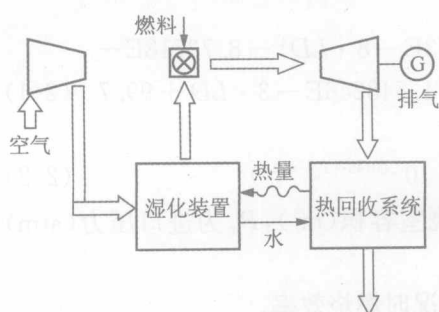


图 2-1 湿空气透平循环的工作原理

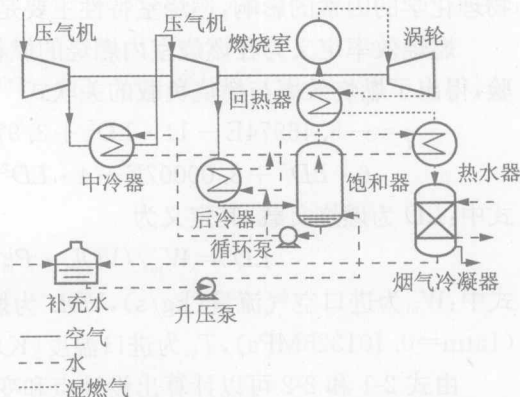


图 2-2 湿空气透平循环的典型结构形式

率。压气机的性能参数包括转速、压比、流量、效率等。由于性能参数随压气机进口参数的变化而变化,为方便起见,通常用折合参数来表示压气机的性能。一旦压气机的几何尺寸在设计点确定下来,就可以生成表示压气机变工况性能的压气机图,如图 2-3 所示。

在正常工作情况下(无旋转失速、喘振、进口畸变等),忽略雷诺数效应等二阶效应,压气机图有以下特点:

(1) 对于固定的几何尺寸,压气机图是唯一的。

(2) 压气机图上的工作点由折合转速、折合流量、压比和效率中的任何两个确定。

本书中采用的压气机模型的主要内容是以表格形式表示的压气机图,以折合转速和压比为输入,确定压气机图上的工作点。在确定压气机效率后,根据压气机进口总温,计算出压气机的出口总温。

2.2.2 燃烧室稳态模型

表征燃烧室工作特性的指标有燃烧效率、燃烧室压力损失、燃烧稳定性、燃烧室点火范围、出口温度分布等。由于燃烧室内流动十分复杂,而且燃烧过程受许多

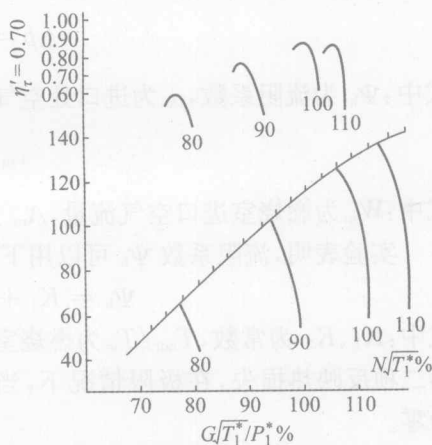


图 2-3 压气机变工况性能的压气机图