

面向对象的先进循环燃气轮机工质热物性计算方法

刘国库¹, 潘福敏², 郑洪涛²

(1. 海军驻沈阳地区发动机专业军事代表室, 沈阳 110015; 2. 哈尔滨工程大学 动力与能源工程学院, 哈尔滨 150001)



刘国库(1978), 男, 工程师, 从事舰船燃气轮机、航空发动机的故障诊断、测试、维修与全寿命保障技术研究。

基金项目: 燃气轮机工程研究项目资助

收稿日期: 2013-10-28

摘要: 先进循环是燃气轮机发展的重要方向, 1 套通用先进循环工质热物性计算方法对先进循环研究具有重要意义。以工质最为复杂的化学回热循环为例, 建立了 1 套通用的工质热物性计算方法, 并论证了该方法也适用于其他先进循环。基于面向对象方法建立了 1 套计算系统并采用 C++ 语言编制其计算程序, 验证了空气和水蒸气的热物性计算精度, 最大误差为 0.00852%。采用该热物性计算方法计算了 1 个化学回热循环的热力过程; 在给定的条件下其效率比简单循环效率提升 32%, 达到 47.32%。结果表明: 所提出的热物性计算方法计算准确, 通用性强, 为先进循环研究提供了基础。

关键词: 工质热物性; 燃气轮机; 先进循环; 面向对象; 化学回热循环

Calculation Method of Working Fluids Thermophysical Parameters for Object-Oriented in Advanced Cycle Gas Turbines

LIU Guo-ku¹, PAN Fu-min², ZHENG Hong-tao²

(1. Naval Consumer Representative Office of Engine in Shenyang, Shenyang 110015, China;

2. College of Power and Energy Engineering, Harbin Engineering University, Harbin 150001, China)

Abstract: Advanced cycle is the important development direction of the gas turbine. General thermophysical properties calculation methods are the foundations of the research. The working fluids in the Chemically Recuperated Gas Turbine (CRGT) were analyzed, and a general thermodynamic parameters calculation were built. The method applied to other advanced cycle was demonstrated. Object-oriented method was used to build a calculation system, and C++ was used to code a program. The calculation precisions for air and the steam were verified, and the highest difference was 0.00852%. The program was used for performance calculation of a CRGT, and the thermal efficiency was 47.32, 32% elevation. The results show that the thermodynamic parameters calculation method is of high precision and general used, and it forms the foundation of the advanced cycle.

Key words: thermodynamic parameters; gas turbine; advanced cycle; object-oriented; chemically regenerative cycle

0 引言

现代社会的高速发展导致能源需求量高速增长, 环境污染问题也愈加严重。先进循环燃气轮机是应对现阶段能源危机和解决环境污染问题的 1 个重要方式^[1-2]。先进循环主要是回收燃气轮机高温余热来提高能源利用率, 并改善燃烧状况以减少污染物排放。先进循环的研发较为复杂, 采用计算机仿真是 1 种简便的预研方法。计算机仿真需要准确的计算模型, 特别是先进循环的复杂工质需要精确的热物性计算模型。

目前涉及复杂工质物性的先进循环主要有化学回热循环 (CRGT, Chemically Recuperated Gas Turbine Cycle)、联合循环 (CC, Combined Cycle)、注蒸汽

循环 (STIG, Steam Injected Gas Turbine Cycle)、湿空气循环 (HAT, Humid Air Turbine Cycle)、湿压缩循环 (WCC, Wet Compression Cycle) 等。这些循环的工质主要是空气、水蒸气和燃气的不同比例的混合物。简单循环燃气轮机的燃气物性计算方法已经有很多研究, 但在各种先进循环仿真研究中, 研究者都是针对各自的研究对象计算其工质的热物性, 没有形成通用的工质热物性计算方法。

王绍忠等人采用 VC 和 Matlab 混合编程的方法编制了 CRGT 中工质 (水 - 水蒸气和空气 - 湿燃气) 的热力性质计算程序。空气和干燃气的热力性质采用理想气体掺混模型, 水和水蒸气的热力性质采用 LAPWS-IF97 标准模型, 湿燃气的热力性质采用改进

的工程计算方法进行处理,结果获得了较高的计算精度和较快的计算速度^[3]。哈尔滨工业大学的周伏秋研究了注蒸汽燃气轮机循环(STIG)的工质热力性质,首先建立了燃气-蒸汽混合物的理想模型,据此确立了湿燃气热力性质计算的二次线性插值方法^[4]。上海交通大学的翁史烈在进行燃气轮机的湿空气循环(HAT)性能分析时,建立了湿化工质的热物性计算模型,采用R-K方程从相平衡机理出发计算饱和含湿量,从而摆脱了对道尔顿分压定律的依赖,可以精确计算湿化空气实际气体的含湿量,并利用余函数修正法计算了湿空气的焓、熵、定压比热等热力学参数^[5]。哈尔滨工业大学王永青等人建立了湿压缩循环(WCC)燃气轮机数学模型,在计算水蒸气及干湿空气的热物性时采用了水和水蒸气热力性质图表与湿空气和燃气热力性质图表^[6]。上海交通大学杨文滨在湿空气透平循环动态仿真的研究中,对湿空气工质的热物性进行了研究,分析了3种计算湿空气的热物性的方法:理想混合气体的计算方法、基于维里方程的余函数修正计算方法以及基于R-K方程的余函数计算方法。结果发现HAT循环工质的使用范围内无论采用哪种计算方法,其比容、比热、比焓以及饱和含湿量的计算结果相差都很小,只是熵值的计算结果有些许差异^[7]。

在对各种不同的先进循环进行研究时,各研究者都提出了针对所面对研究对象的工质热物性计算方法。而各种先进循环的工质主要成分相似,可以编制1套通用的计算程序,然后建立1套统一的调用方法,以节约工作量。本文将工质最为复杂的化学回热循环为例,建立1套通用的工质热物性计算方法,并论证该方法应用于其他先进循环的可行性。然后采用面向对象的方法建立1套计算系统,采用C++语言编制计算程序,并应用于化学回热循环性能计算的1个实例中。

1 先进循环工质计算模型

化学回热循环(如图1所示)是各种先进循环中工质成分最为复杂的循环方式。在化学回热器中,燃料和蒸汽在催化剂的作用下吸收烟气余热,发生强吸热的重整反应,生成易于燃烧的、富氢的燃料重整气,

燃料重整气通过双燃料喷嘴喷入燃烧室,在燃烧时释放出重整反应过程中吸收的烟气余热。经过化学回热器换热的烟气在蒸汽系统中继续释放出烟气余热,加热给水,产生化学回热反应所需的蒸汽。化学回热循环燃气轮机的回热度不受压比限制,发动机本体无需改造,排气余热利用度高,热效率可达45%,NO_x排放低至0.76 mg/m³^[8]。

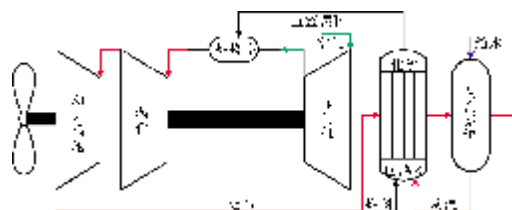


图1 化学回热循环

在此系统中,涉及到的工质有空气、水和水蒸气、富含氢气的燃料重整气、以及燃烧室燃烧后产生的烟气。其中,化学回热器中产生的富含氢气的燃料重整气进入燃烧室燃烧产生高温烟气,在此系统中经历较少的热力过程,只是作为能量的携带者进入燃烧室。因此,可以考虑建立1套工质计算方法,从而不需要计算富氢气体的燃料重整气的工质热物理性质。

燃料重整气进入燃烧室燃烧,产生高温烟气。在这个过程中,对循环热力过程主要产生2个效果:决定燃烧的温度,这主要由重整气带入燃烧室的能量决定;决定烟气的成分,这由重整气的组成决定。

1.1 化学回热循环重整反应模型

重整气带入燃烧室能量由燃料自身携带的燃烧热值、燃料和蒸汽的显焓,重整反应从烟气中吸收的能量构成。为便于计算,这些能量可以折算为燃料带入系统的折合热值。由物质守恒和能量守恒,可以得到以下2个关系式

$$G_r = G_f + G_s \quad (1)$$

$$\bar{h}_u = h_u + (G_f h_s + Q) / G_f \quad (2)$$

式中: G_r 为燃料重整气的总质量流量; G_f 为加入化学回热器的原始燃料质量流量; G_s 为加入化学回热器的水蒸气质量流量; $\bar{h}_u$ 为单位质量原始燃料的重整气带入燃烧室的总能量; h_u 为重整气带入燃烧室的原始燃料的显焓; h_f 为重整气带入燃烧室的原始燃料低热值; h_s 为重整气带入燃烧室的水蒸气显焓; Q 为重整反应从烟气中吸收的热量。

根据式(1)与式(2),可以得到进入燃烧室的重整

气的总质量流量 G_f 和总能量 $G_f \times \bar{h}_u$, 进而可以考察重整气燃烧后得到的高温烟气的组成。

1.2 化学回热循环烟气组成分析

重整气的燃烧可以理解为燃料和水蒸气发生重整反应生成短链的分子, 然后短链分子与空气燃烧获得燃烧产物。由于短链分子容易燃烧, 假设燃烧过程为完全燃烧, 由物质守恒可以得知, 最终的产物相当于初始燃料完全燃烧后与水蒸气的混合物, 以此可以获得高温烟气的成分。

因此, 最终烟气的成分可以按照如下方法进行计算。假设 1 kg 空气与 f kg 燃料($C_xH_yO_zN_uS_v$)和 d kg 水蒸气混合燃烧(f 为油气比, d 为水气比), 燃烧后生成了 $f(1+L)$ kg 纯燃气、剩余 $(1-f \cdot L)$ kg 空气和 d kg 水蒸气的混合物。则烟气的摩尔质量如下

$$M_G = \frac{1+f+d}{f(1+L)/M_g + (1-f \cdot L)/M_a + d/M_s} \quad (3)$$

式中: M_G 为烟气的摩尔质量 (kg/kmol); L 为燃料理论耗气量 (以 1 kg 燃料为基数); M_g 为纯燃气的摩尔质量; M_a 为空气的摩尔质量; M_s 为水蒸气的摩尔质量。

此时, 可以按照下式来求解烟气的热物性性质

$$A_g = \frac{f(1+L)A_g + (1-f \cdot L)A_a + d \cdot A_s}{1+f+d} \quad (4)$$

式中: A 为与下标相对应组分的摩尔质量的倒数, 称为比参数。

1.3 其他先进循环的工质计算模型

其他先进循环的工质的热物性计算也可以采用与化学回热循环相同的方法进行。

注蒸汽循环(STIG)利用烟气余热产生蒸汽并将蒸汽注入燃烧室, 效率可达 51.6%^[4]。其工质包括空气、水蒸气和烟气。其中, 烟气是由燃料、水蒸气和空气在燃烧室中燃烧产生。假设完全燃烧, 则其烟气的热物性计算方法完全与化学回热循环相同。

湿空气循环是压缩空气在饱和器内与热水逆流接触, 进行热量交换; 空气被加温加湿后, 进入燃烧室燃烧作功, 效率可达到 57%^[9]。湿压缩循环将水注入压气机中, 提高压气机部件效率, 从而提高循环效率达到 43%^[10]。从计算烟气的热物性性质角度来看, 它们都是空气将水带入燃烧室与燃料进行燃烧, 假设完全燃烧, 最终其烟气的热物性计算方法完全与化学回热循环相同。

联合循环(CC)是利用燃气轮机余热产生蒸汽并进入汽轮机作功, 其效率高于 55%^[11-12], 最高可达

60%^[13]。从计算工质热物性的角度, 其工质中最为复杂的烟气就是燃料和空气燃烧的产物。

因此, 各种先进循环的工质热物性计算, 就是获得空气、水和水蒸气以及纯燃气的热物性计算方法, 按照式(4)计算烟气的热物理性质。计算中需要的参数就是烟气的状态参数以及决定其成分的油气比 f 和水气比 d 的值。其中, f 和 d 按照下式即可获得。

$$f = G_f / G_a \quad (5)$$

$$d = G_s / G_a \quad (6)$$

2 主要工质热物性计算

2.1 空气的热物性计算方法

在工质热物性的计算中, 往往将干空气视为理想气体。这时, 它遵循理想气体的状态方程 $pV=RT$; 可认为空气的一切热力参数都是温度的单值函数。空气物性的数学模型采用文献[15]的计算公式, 具体如下

定压比热容

$$c_p(T) = \sum_{N=0}^4 A(N) T^N \quad [\text{kJ/kg} \cdot \text{K}] \quad (7)$$

比焓

$$h(T) = \sum_{N=0}^3 B(N) T^N \quad [\text{kJ/kg}] \quad (8)$$

比熵函数

$$e(T) = \sum_{N=0}^1 C(N) T^N + C(2) \ln(T) \quad [\text{kJ/kg} \cdot \text{K}] \quad (9)$$

将焓值计算结果与文献 [15] 中的参考值进行对比, 见表 1。由计算结果可见, 空气热物性的计算准确性很高。

表 1 焓值计算值与参考值对比

温度 / K	计算值 / (kJ/kg)	参考值 / (kJ/kg)	误差 / %
300	299.7109	299.71	3.00E-04
500	502.6165	502.62	6.96E-04
700	714.1245	714.12	6.30E-04
900	933.9644	933.96	4.71E-04

2.2 水蒸气的热物性计算

IAPWS-IF97 标准下的 5 个子区域如图 2 所示, 分别为未饱和水区域、过饱和蒸汽区域、临界区域、饱和区域和高温区域^[14], 各区域应用的范围见表 2。根据温度和压力可求出水和水蒸气的比焓值、比熵值、比热、密度、比容、导热系数和动力黏度等参数。

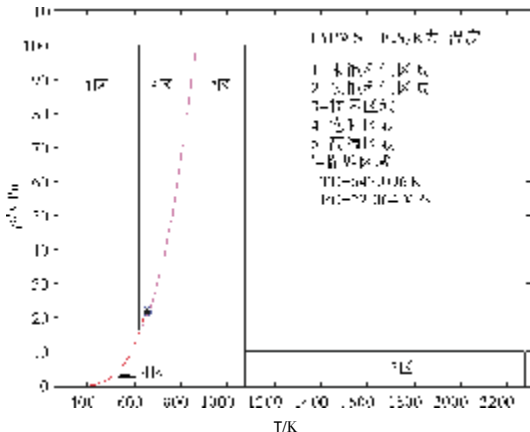


图 2 IAPWS-IF97 标准 p-T

表 2 IAPWS-IF97 各区域应用范围

区域	基本方程	适用范围
1	吉布斯自由能 $g(p,T)$	$T \in [273.15 \text{ K}, 623.15 \text{ K}]$ $p \in [ps(T), 100 \text{ MPa}]$
2	吉布斯自由能 $g(p,T)$	$T \in [273.15 \text{ K}, 1073.15 \text{ K}]$ $p \in [0, 100 \text{ MPa}]$
3	亥姆霍兹自由能 $f(\rho,T)$	$T \in [623.15 \text{ K}, T_{23}(p)]$ $p \in [p_{23}(T), 100 \text{ MPa}]$
4	饱和压力方程 $ps(Ts)$	$T \in [273.15 \text{ K}, 647.096 \text{ K}]$
5	吉布斯自由能 $g(p,T)$	$T \in [1073.15 \text{ K}, 2273.15 \text{ K}]$ $p \in [0, 10 \text{ MPa}]$

选取水蒸气几个具有代表性的状态作为参考,计算值与理论值的对比见表 3。由计算结果可见,水蒸气的热物性计算具有很高的准确性。

表 3 水和水蒸气的热力性质计算校核

压力 / MPa	温度 / K	计算值 / (kJ/kg)	参考值 / (kJ/kg)	误差 / %
0.25	283.15	42.2636	42.26	8.52E-03
0.25	303.15	125.9691	125.97	7.14E-04
0.25	323.15	209.5411	209.54	5.25E-04
0.25	343.15	293.1966	293.20	1.16E-03
0.25	373.15	419.2106	419.21	1.43E-04
16.00	373.15	431.0760	431.08	9.28E-04
16.00	473.15	858.5662	858.57	4.43E-04
16.00	573.15	1337.1998	1337.20	1.50E-05
16.00	673.15	2947.4554	2947.46	1.56E-04
16.00	773.15	3297.3095	3297.31	1.52E-05

2.3 纯燃气的热物性计算方法

2.3.1 纯燃气摩尔组分计算

假定燃料的化学式为 $C_xH_yO_zN_uS_v$, 空气的成分为 O_2 和类氮气体 N_2' , 1 mol 燃料完全燃烧时的化学平衡方程式为

$$C_xH_yO_zN_uS_v + \left(x + \frac{y}{4} + v - \frac{z}{2}\right) O_2 + p \left(x + \frac{y}{4} + v - \frac{z}{2}\right) N_2' =$$

$$\left(xCO_2 + \frac{y}{2}H_2O + vSO_2\right) + p \left(x + \frac{y}{4} + v - \frac{z}{2}\right) N_2' + \frac{u}{2}N_2 \quad (10)$$

式中: p 为空气的氮氧比 3.77382。

根据式(10)可见,只要知道燃料的化学式,就可以根据化学平衡来计算当燃料为 1 mol 时,下面的一系列值。

理论空气量摩尔数 (1 mol 燃料完全燃烧所需的空气摩尔数)

$$n_a = (1+p) \left(x + \frac{y}{4} + v - \frac{z}{2}\right) \quad (11)$$

理论燃气量摩尔数 (1 mol 燃料完全燃烧所产生的燃气摩尔数)

$$n_g = n_a + \frac{y}{4} + \frac{z}{2} + \frac{u}{2} \quad (12)$$

理论消耗空气质量 (1 kg 燃料完全燃烧所消耗的空气质量)

$$L = \frac{n_a \cdot M_a}{M_f} \quad (13)$$

烟气各成分的摩尔组分

$$\begin{cases} r_{CO_2} = x/n_g \\ r_{H_2O} = y/2n_g \\ r_{SO_2} = v/n_g \\ r_{N_2'} = \left[p \cdot \left(x + \frac{y}{4} + v - \frac{z}{2}\right) + \frac{u}{2}\right] / n_g \end{cases} \quad (14)$$

烟气摩尔质量

$$M_g = \sum_{i=1}^4 M_i \cdot r_i \quad (15)$$

烟气物性

$$A_g = \sum_{i=1}^4 A_i \cdot r_i / M_g \quad (16)$$

式中: A_g 为比质量参数,而各热物性参数 A_i 采用的计算模型是比摩尔参数。

2.3.2 纯燃气中各气体物性计算

纯燃气中各气体纯净物的热物性均按照统一的公式计算,定压比热、焓和熵值的计算公式^[15]如下

$$c_p = \sum_{i=1}^7 a_{c,i} \left(\frac{T}{1000}\right)^{f_i} \quad [kJ/(kmol \cdot K)] \quad (17)$$

$$H = A_h + \sum_{i=0}^8 a_{h,i} \left(\frac{T}{1000}\right)^{f_i} + b_h \cdot \ln\left(\frac{T}{1000}\right) \quad [kJ/kmol] \quad (18)$$

$$S = A_s + \sum_{i=1}^7 a_{s,i} \left(\frac{T}{1000}\right)^{f_i} + b_s \cdot \ln\left(\frac{T}{1000}\right) \quad [kJ/(kmol \cdot K)] \quad (19)$$

以上各式的系数可从参考文献[15]中获得,然后

可以编制程序进行计算。

3 面向对象编程及其计算结果

3.1 面向对象分析

由以上分析可知,先进循环的工质热物性计算主要包含空气,水蒸气,和纯燃气的热物性计算;而其主要调用参数是工质的状态参数。另外,进行烟气的热物性计算时,需要知道供给燃料的化学组成,油气比 f 和水气比 d 。根据工质热物性计算的需求分析,列出整个计算体系的用例如图 3 所示。

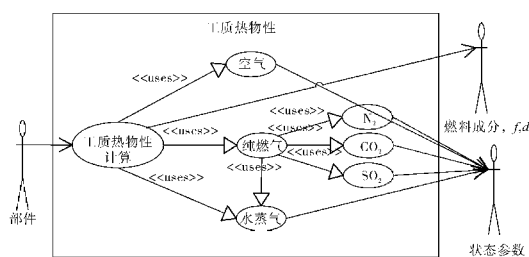


图 3 工质热物理性质计算用例

分析以上用例图,可以将该工质热物性求解体系编制为 1 套库函数,以便于各种先进循环计算的调用。所有工质的计算方法可以编入 CFluit 类中,下面给出 C++ 语言描述的 CFluit 类主要的属性和方法。

3.2 CFluit 类

CFluit 类提供 1 套各种工质热物性计算的方法,主要参数是状态参数。而求解烟气的热物性时需要燃料化学式以及决定烟气组成的参数 f 和 d 。这样,编制的 C++ 类是一系列方法函数的集合。

空气热物性计算函数: `int air (double T, double * pp)`。

水和水蒸气热物性计算函数: `int steam(double p, double T, double x, double * pp)`。

纯燃气热物性计算函数: `int gas (double p, double T, double x, double y, double z, double u, double v, double * pp)`。

烟气的热物性计算函数: `int Gas (double p, double T, double x, double y, double z, double u, double v, double f, double d, double * pp)`。

其中, p 为压力, T 为温度。这些函数都用返回的 `int` 数值来确定函数调用是否正确,指针 `pp` 来携带计算结果信息。在这些热物性计算函数的基础上,还可以编制温度求解函数等。

4 化学回热循环简单性能计算

本文选取某型 3 转子分轴燃气轮机作为原型机,假设化学回热循环的设计点与原型机设计点的压气机处在相同的运行工况,且有相同的供油量,求解此时化学回热循环的主要性能参数。该求解过程可体现本文提出的工质热物性求解方法的应用。按照第 1 章中建立的重整模型,需要计算重整过程燃料折合热值。然后可以获得烟气的热物性计算参数,计算涡轮输出功,最终获得化学回热循环的功率和效率。原型机的主要性能参数见表 4。

表 4 原型机的主要性能参数

输出功率 /MW	效率 /%	供油量 /kg/s	燃烧室出口温度 /K	排气温度 /K
25	35.85	1.625	1528.8	790.7

4.1 柴油重整热力计算

选取柴油的分子式为 $C_{10}H_{18}$, 热值为 42618.485 kJ/kg, 与原型机燃料热值 42700 kJ/kg 接近。这里使用的重整反应计算方法是最低吉布斯最优能法,以体系最终产物达到最低吉布斯自由能为体系达到热力学平衡的判据,其数学模型如下。假定燃料的分子式为 $C_xH_yO_z$, 与蒸汽重整反应的最终产物为 C, CO, CO_2, H_2, CH_4 和 H_2O 。此时反应的化学方程式如下



体系的吉布斯自由能计算式为

$$GT = \sum_{i=1}^N (n_i \mu_i) \quad (21)$$

对于理想气体, 上式中的 μ 可以表达为式(22), 其中 f 是气体的摩尔逸度

$$\mu_i = G_i^0 + RT \ln \left(\frac{f_i}{f_i^0} \right) \quad (22)$$

最终体系的吉布斯能计算式为

$$GT = \sum_{i=1}^N (n_i G_i^0) + \sum_{i=1}^N \left(n_i RT \ln \left(\frac{f_i}{f_i^0} \right) \right) \quad (23)$$

整个过程的求解就转变为求解上式的最小值, 计算的边界条件如下式。

元素平衡约束条件

$$C: x = b + c + d + f \quad (24)$$

$$H: y + 2a = 2e + 4f + 2g \quad (25)$$

$$O: z + a = c + 2d + g \quad (26)$$

非负约束条件

$$b, c, d, e, f \geq 0 \quad (27)$$

原型机在设计点的烟气温度为 790.7 K, 假设重整反应的入口条件为 673.15 K(400 °C), 即柴油和蒸汽能被烟气加热到 673.15 K, 然后进行重整反应。另外, 根据重整反应的研究结论, 水碳比(水分子和 C 原子的数量比)为 4 时, 重整反应有较高的性能。参照式(2)即可计算获得重整燃料的折合热值, 其计算结果为 55372.14 kJ/kg。

4.2 总体性能参数计算

按照上面所获得的燃料折合热值进行燃烧室的热平衡计算, 可以获得燃烧室出口烟气的焓值, 并根据其焓值求解此时烟气的温度。计算过程如下

$$G_G = G_f + G_s + G_a \quad (28)$$

$$h_G = (G_a h_a + \bar{h}_u \cdot G_f) / G_G \quad (29)$$

然后进行循环功率和效率的计算

$$N_e = \eta (h_G - h_{G0}) G_G - G_a \cdot (h_a - h_{a,in}) / \eta_c \quad (30)$$

$$\eta = \frac{N_e}{G_f Q^h} \quad (31)$$

最终结果为, 燃烧室出口烟气的温度为 1310 K, 输出功率为 33.27 MW, 效率为 47.32%, 效率提升 32%。此时化学回热循环的燃烧温度降低, 而较低的燃烧温度理论上可以减少 NO_x 的排放量; 同时燃油转化为短链分子, 易于燃烧, 避免由于温度降低导致的燃烧不完全。在给定的情况下, 相同的燃料供给量, 循环热效率大大提高, 证明了化学回热循环的经济性。

5 结论

以工质最为复杂的化学回热循环为例, 建立了 1 套通用的工质热物性计算方法, 并论证了该方法也适用于其它先进循环。提供工质的状态参数以及工质的种类, 可以计算其热物理性质。而针对烟气, 需给定循环燃料的化学组成, 以及循环的燃料-空气流量比和蒸汽-空气流量比, 即可计算其热物性参数。采用面向对象方法建立 1 套计算系统并采用 C++ 语言编制其计算程序, 验证了空气和水蒸气的热物性计算精度, 最大误差为 0.00852%。最后采用该物性计算方法计算了 1 个化学回热循环的热力过程; 在给定的条件下其效率比简单循环效率提升 32%, 达到 47.32%, 证明了化学回热循环的经济性。由此可见, 最终得到的工质热物性计算方法适用于燃气轮机先进循环的计算。

参考文献:

- [1] 孙鹏, 任静, 蒋洪德. 先进燃气轮机的特征及发展趋势[C] // 2011 年学术研讨会论文集. 北京: 中国动力工程学会透平专业委员会, 2011: 78-82.
SUN Peng, REN Jing, JIANG Hongde. Characteristics and development tendency of advanced gas turbine [C] // 2011 Proceedings of Academic Seminar. Beijing: Professional Association of Turbine, Chinese Society of Power and Energy, 2011: 78-82. (in Chinese)
- [2] Heppenstall T. Advanced gas turbine cycles for power generation: a critical review [J]. Applied Thermal Engineering, 1998 (18): 837-846.
- [3] 王绍忠, 刘国库, 杨仁. 化学回热循环中工质热力性质的处理方法[J]. 航空发动机, 2011, 37(3): 38-40, 62.
WANG Shaozhong, LIU Guoku, YANG Ren. Treatment method of thermodynamic properties of working fluid in CRGT system [J]. Aeroengine, 2011, 37(3): 38-40, 62. (in Chinese)
- [4] 周伏秋, 王克光. 注蒸汽燃气轮机循环工质热力性质研究[J]. 热能动力工程, 1992, 7(1): 8-13.
ZHOU Fuqiu, WANG Keguang. Study of steam injected gas turbine cycle working medium thermodynamic properties [J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 1992, 7(1): 8-13. (in Chinese)
- [5] 翁史烈, 蒲强, 卫琛喻, 等. 燃气轮机的湿空气循环性能分析与试验[J]. 电力与能源, 2011, 32(6): 453-456.
WENG Shilie, PU Qiang, WEI Chenyu, et al. Property and experimental on the performance of humid air turbine [J]. Power and Energy, 2011, 32(6): 453-456. (in Chinese)
- [6] 王永青, 刘铭, 严家驷. 燃气轮机装置中湿压缩过程的数学模型[J]. 热能动力工程, 2001, 16(2): 130-132.
WANG Yongqing, LIU Ming, YAN Jialu. Mathematic models of humid air turbine cycle [J]. Journal of Engineering for Thermal Energy and Power, 2001, 16(2): 130-132. (in Chinese)
- [7] 杨文滨. 复合工质新型动力系统—湿空气透平循环动态仿真的研究[D]. 上海: 上海交通大学, 2005.
YANG Wenbin. New type power system of complex working substance the dynamic simulations on the humid air turbine cycle [D]. Shanghai: Shanghai Jiao Tong University, 2005. (in Chinese)
- [8] Kesser K F, Hoffman M A, Baughm J W. Analysis of a basic chemically recuperated gas turbine power plant [J]. Journal of Gas Turbines Power, 1994, 116: 264-277.
- [9] Traverso A, Massardo A F. Thermodynamic analysis of mixed gas-steam cycles [J]. Applied Thermal Engineering, 2002, 22: