

燃气-蒸汽联合循环机组数学仿真模型研究

刘忠源¹, 陈友良², 李炜², 黄小光², 樊蓉²

¹江苏华电昆山热电有限公司

²华电电力科学研究院有限公司

【摘要】本文基于 F 级燃气-蒸汽联合循环机组对数学仿真模型进行研究, 为燃气轮机及联合循环的变工况性能计算提供基础, 满足机组总体设计的重大技术要求。性能分析结果作为燃气轮机及联合循环总体设计的主要依据, 起到了至关重要的支撑作用。因此, 燃气轮机及联合循环建模仿真方法, 是重型燃气轮机及联合循环设计过程中一项关键的支撑技术, 模型的精度对设计结果有着重要影响。燃气轮机及联合循环仿真模型的精度是否能满足设计要求, 直接关系到能否有效地开展设计工作。

【关键词】燃气轮机; 联合循环; 数学模型; 仿真模型

【基金项目】浙江省“万人计划”科技创新领军人才(项目编号, 2019R52037)

【收稿日期】2022 年 11 月 8 日 **【出刊日期】**2022 年 12 月 21 日 **【DOI】**10.12208/j.ijme.20220069

Study on Mathematical Simulation Model of Gas Steam Combined Cycle Unit

Zhongyuan Liu¹, Youliang Chen², Wei Li², Xiaoguang Huang², Rong Fan²

¹Jiangsu Huadian Kunshan Thermal Power Co., Ltd.

²Huadian Electric Power Research Institute

【Abstract】 This paper studies the mathematical simulation model based on the F class gas steam combined cycle unit, which provides a basis for the off design performance calculation of gas turbine and combined cycle, and meets the major technical requirements of the overall design of the unit. As the main basis for the overall design of gas turbine and combined cycle, the performance analysis results play an important supporting role. Therefore, the modeling and simulation method of gas turbine and combined cycle is a key supporting technology in the design process of heavy gas turbine and combined cycle, and the accuracy of the model has an important impact on the design results. Whether the accuracy of gas turbine and combined cycle simulation model can meet the design requirements is directly related to whether the design can be effectively carried out.

【Keywords】 gas turbine; Combined cycle; Mathematical model; simulation model

1 引言

燃气轮机系统主要由压气机、燃烧室、透平等部件组成, 是一个复杂的非线性系统。特别在双轴、多轴燃气轮机中, 由多个压气机和多个透平加上燃烧室组成, 压气机、透平和燃烧室之间通过管路相连, 每个透平又通过转轴与对应的压气机或负荷联动。所以其部件之间有着紧密的机械联系和复杂的热力气动联系。除此之外, 燃气轮机系统也是一个复杂的流体网络, 其压力和流量之间存在耦合关系。对于压气机

和涡轮部件, 为了满足质量流量的连续条件, 其出口压力要受到下游部件流动过程的影响, 而入口压力也要受到上游部件流动过程的影响。

本文以某 F 级机组为研究对象, 对联合循环仿真计算模型的压气机、燃烧室、燃气透平、蒸汽透平、换热器等部件, 分别建立其数学模型, 从而建立联合循环的仿真模块库。

2 压气机数学仿真模型建立

压气机是燃气轮机中三大部件之一, 环境中的空

作者简介: 刘忠源(1971-)男, 汉族, 江苏常州, 工程师, 主要从事电厂检修和基建管理工作; 李炜(1988-)男, 汉族, 河南漯河, 硕士, 工程师, 燃气轮机节能; 陈友良(1985-)男, 汉族, 山东聊城, 硕士, 高级工程师, 数字化燃机电厂关键技术应用研究; 黄小光(1974-)男, 汉族, 湖南浏阳, 博士, 高级工程师, 研究发电设备故障预警诊断及运行优化等数字化智能运维技术及工程应用。

气经过过滤, 被吸入压气机, 其中高速旋转的叶片对空气进行做功, 将空气压缩成高温、高压的工质气体, 然后连续不断地将高压空气送入燃烧室。对于压气机的建模, 采用基于压气机特性线建立相应的压气机模型。压气机模块共有四个接口, 分别代表空气流参量输入、经过压气机压缩后的空气流参量输出、压气机轴功输入以及压气机轴功输出。在性能仿真计算中, 压气机的特性通常以特性图或曲线的形式给出。以压比 π_c 和折合转速 n_c 作为自变量, 压气机的折合流量 G_c 和效率 η_c 可表达为如下所示的函数关系式:

$$G_c = f_1(\pi_c, n_c) \quad (1)$$

$$\eta_c = f_2(\pi_c, n_c) \quad (2)$$

上述四个特性参数定义如下:

$$n_c = N / \sqrt{T_1} \quad (3)$$

$$G_c = G_1 \sqrt{T_1} / p_1 \quad (4)$$

$$\pi_c = p_2 / p_1 \quad (5)$$

$$\eta_c = (h_{2,i} - h_1) / (h_2 - h_1) \quad (6)$$

其中: 下标“1”代表压气机入口参数, 下标“2”代表压气机出口参数。由此便可以求出相应压气机的等熵效率和流经压气机工质的质量流量。

压气机消耗的功率 P_c 为:

$$P_c = G_1 \times (h_2 - h_1) \quad (7)$$

所以压气机需要输入的轴功 $P_{shaft,c}$ 为:

$$P_{shaft,c} = P_c / \eta_{mc} \quad (8)$$

式中: $P_{shaft,c}$ —压气机的净输入轴功, kW; η_{mc} —压气机机械效率。

3 燃烧室数学模型建立

空气经过压气机的压缩变为高压气体, 随后这些经压缩过的空气进入燃烧室。通常认为进入燃烧室的空气流量等于压气机出口处的空气流量。在燃烧室中, 高温、高压气体和燃料混合后燃烧生成高温、高压的燃气, 源源不断送入透平做功。在建模过程中假设燃料完全燃烧。由质量与组分守恒定律可知:

$$G_3 = G_2 + G_f \quad (9)$$

$$G_{3,N_2} = G_{2,N_2} + G_{f,N_2} \quad (10)$$

$$G_{3,Ar} = G_{2,Ar} + G_{f,Ar} \quad (11)$$

$$G_{3,CO_2} = G_{2,CO_2} + G_{f,CO_2} + G_{f,CO} \times \frac{44.0098}{28.0104} + G_{f,CH_4} \times \frac{44.0098}{16.0426} + G_{f,C_2H_6} \times \frac{2 \times 44.0098}{30.0694} + G_{f,C_3H_8} \times \frac{3 \times 44.0098}{44.0962} \quad (12)$$

$$G_{3,O_2} = G_{2,O_2} - (G_{f,H_2} \times \frac{15.9994}{2.0158} + G_{f,CH_4} \times \frac{4 \times 15.9994}{16.0426} + G_{f,C_2H_6} \times \frac{7 \times 15.9994}{30.0694} + G_{f,C_3H_8} \times \frac{10 \times 15.9994}{44.0962} + G_{f,H_2S} \times \frac{3 \times 15.9994}{34.0758} + G_{f,CO} \times \frac{15.9994}{28.0104}) \quad (13)$$

$$G_{3,H_2O} = G_{2,H_2O} + G_{f,H_2O} + G_{f,H_2} \times \frac{18.0152}{2.0158} + G_{f,CO} \times \frac{18.0152}{28.0104} + G_{f,CH_4} \times \frac{2 \times 18.0152}{16.0426} + G_{f,C_2H_6} \times \frac{2 \times 18.0152}{30.0694} + G_{f,C_3H_8} \times \frac{4 \times 18.0152}{44.0962} \quad (14)$$

$$G_{3,SO_2} = G_{2,SO_2} + G_{f,SO_2} + G_{f,H_2S} \times \frac{64.0588}{34.0758} \quad (15)$$

式中: 下标 f —燃烧室燃料入口参数, 下标 3—燃烧室燃气出口参数。

此外, 燃烧室模块满足能量守恒方程, 燃烧室模块会通过进出口工质在标况 (1.0bar, 25.0°C) 下的焓经过下式基于燃料的低位发热量 LHV 建立能量守恒方程:

$$(h_2 - \bar{h}_2) \times G_2 + (h_f - \bar{h}_f + HV) \times G_f = (h_3 - \bar{h}_3) \times G_3 \quad (16)$$

式中: 上标“-”—该接口处工质在标况下的焓。

考虑到在燃烧室的进出口会有一定的压损, 其定义如下:

$$p_3 = p_2 \times \sigma_b \quad (17)$$

式中: σ_b —燃烧室的总压恢复系数。

4 燃气透平数学模型建立

从燃烧室出来的高温、高压气体进入燃气透平, 在透平中膨胀做功, 将燃气的内能转化成机械能。燃气轮机的透平其输出的轴功带动压气机和负载转动。对于透平模块的建模采用基于透平特性线建立相应的透平模型。

透平模块有四个接口, 分别代表燃气流/蒸汽流参量输入、燃气流/蒸汽流参量输出、透平轴功输入以及透平轴功输出。

燃气透平的建模方式与压气机的建模类似:

$$G_t = f_3(\pi_t, n_t) \quad (18)$$

$$\eta_t = f_4(\pi_t, n_t) \quad (19)$$

上述四个参数各自的定义如下:

$$n_t = N / \sqrt{T_3} \quad (20)$$

$$G_t = G_3 \sqrt{T_3} / p_3 \quad (21)$$

$$\pi_t = p_3 / p_4 \quad (22)$$

$$\eta_t = (h_4 - h_3) / (h_{4,i} - h_3) \quad (23)$$

式中: 下标 3—透平入口截面; 下标 4—透平出口截面。透平由于燃气膨胀产生的总功 P_t 为:

$$P_t = G_3 \times (h_4 - h_3) \quad (24)$$

透平对外输出的净轴功 $P_{shaft,t}$ 为:

$$P_{shaft,t} = P_t \times \eta_{mt} \quad (25)$$

式中: η_{mt} —透平机械效率。

5 换热器数学模型建立

换热器是一种在不同温度的两种或两种以上流体间实现热量传递的设备, 使热量由温度较高的流体传递给温度较低的流体, 使流体温度达到流程规定的指标, 以满足工艺条件的需要, 同时也是提高能源利用率的主要设备之一。由于本模块用于两进两出的逆流式换热器建模, 因而换热器具有一个热源和一个冷源。换热器模块共有四个接口, 分别代表热流体参量输入、热流体参量输出、冷流体参量输入、冷流体参量输出。换热器作为一种将热流体的热量传递给冷流体的换热装置, 且换热器两个流体之间不混合, 因而其首先满足质量守恒方程, 即冷热流体各自进出口流量相等。

$$G_{h,out} = G_{h,in} \quad (26)$$

$$G_{c,out} = G_{c,in} \quad (27)$$

在换热器计算过程中, 基于传热学原理, 在已知冷热流体进出口压力、温度及流量的情况下, 可以由下式得到换热器的换热量:

$$Q = G_h \times (h_{h,in} - h_{h,out}) = G_c \times (h_{c,out} - h_{c,in}) \quad (28)$$

式中: 下标 h —热流体; 下标 c —冷流体; 下标 in —该流体在换热器入口处状态; 下标 out —该流体在换

热器出口处状态。同时在传热学中一般换热器进行设计、校核计算广泛采用对数平均温差公式, 用以计算换热量。因此针对本模块为逆流布置的换热器, 其换热器热端端差 Δt_{hs} 和冷端端差 Δt_{cs} 分别为:

$$\Delta t_{hs} = t_{h,in} - t_{c,out} \quad (29)$$

$$\Delta t_{cs} = t_{h,out} - t_{c,in} \quad (30)$$

式中: 下标 hs —热端; 下标 cs —冷端。

考虑换热器的对数平均温差 Δt_m :

$$\Delta t_m = (\Delta t_{cs} - \Delta t_{hs}) / \ln(\Delta t_{cs} / \Delta t_{hs}) \quad (31)$$

利用获取的对数平均温差以及公式 (2-28) 得到的换热量, 结合公式 (2-32) 换热量的计算, 即可获得换热器的换热特性, 即换热系数 \times 换热面积的值。

$$Q = k \times A \times \Delta t_m \quad (32)$$

式中: k —换热器传热系数; A —换热面积。

同时, 冷热流体的进出口压差定义为:

$$\Delta p_h = p_{h,in} - p_{h,out} \quad (33)$$

$$\Delta p_c = p_{c,in} - p_{c,out} \quad (34)$$

在换热器变工况计算中, 由于管道流量的平方与进出口压差成正比关系, 并忽略前后密度变化带来的影响, 可以得到变工况状态下, 冷、热流体经过换热器的压差与该流体流量之间的关系, 如下式所示:

$$\Delta p / \Delta p_0 = (G / G_0)^2 \quad (35)$$

式中: Δp —流体进出口压差; 下标 0—初始工况或者基准值

6 蒸汽透平模块数学模型建立

从余热锅炉来的高温、高压蒸汽进入蒸汽透平, 在透平中膨胀做功, 将蒸汽的内能转化成机械能。蒸汽轮机的透平输出的轴功带动负载转动。透平模块共有四个接口, 分别代表蒸汽流参量输入、蒸汽流参量输出、透平轴功输入以及透平轴功输出。根据质量平衡、能量平衡等方程, 可以列出蒸汽透平的以下方程:

$$G_{stout} = G_{stin} \quad (36)$$

$$G_{stout,i} = h(p_{stout}, s_1) \quad (37)$$

$$\eta_{st} = (h_{stout} - h_{stin}) / (h_{stout,i} - h_{stin}) \quad (38)$$

式中: η_{st} —蒸汽透平效率; 下标 $stin$ —蒸汽透平入口截面; 下标 $stout$ —透平出口截面。透平由于燃气膨胀产生的总功 P_{st} 为:

$$P_{st} = G_{stin} \times (h_{stout} - h_{stin}) \quad (39)$$

透平对外输出的净轴功 $P_{shaft,st}$ 为:

$$P_{shaft,st} = P_{st} \times \eta_{mt} \quad (40)$$

式中: η_{mt} —透平机械效率。

在蒸汽透平变工况计算过程中, 利用弗留盖尔公式 (2-57) 以及相对焓降比与相对效率比的函数关系 (2-58), 建立变工况点与设计工况点之间的关系。

$$\frac{G_{stin}}{G_{stin,0}} = \frac{\sqrt{p_{stin}^2 - p_{stout}^2}}{\sqrt{p_{stin,0}^2 - p_{stout,0}^2}} \frac{\sqrt{T_{stin,0}}}{\sqrt{T_{stin}}} \quad (41)$$

$$\frac{\eta_{st}}{\eta_{st,0}} = f\left(\frac{\Delta h}{\Delta h_0}\right) \quad (42)$$

式中: 下标 0—设计点工况值。

同时在汽机模型中考虑了轴封漏气的流量计算, 轴封漏气量 G_{leak} 与进出口压力之间关系的计算采用下述公式进行计算。

$$G_{leak} = K \times \sqrt{\frac{p_{in}^2 - p_{out}^2}{p_{in} \times v_{in}}} \quad (43)$$

式中: v —比体积。

7 凝汽器模块数学模型建立

凝汽器模块共有五个接口, 分别代表热流体参量输入 (蒸汽轮机低压缸排汽)、热流体参量输出 (凝汽器出水)、冷却循环水参量输入、冷却循环水参量输出以及凝汽器补水参量输入。在本模块建模中有以下假设: 认为凝汽器处于流量平衡及热平衡的状态, 即相当于凝汽器热并液面高度不变。

根据假设, 凝汽器模块遵守质量守恒:

$$G_{exh} + G_{rc} = G_{sat} \quad (44)$$

$$G_{cold,in} = G_{cold,out} \quad (45)$$

在凝汽器计算过程中, 基于传热学原理, 在已知低压缸排汽、补给水以及冷却循环水状态的情况下, 可以由下式得到换热器的换热量:

$$Q = G_{exh} \times h_{exh} + G_{rc} \times h_{rc} - G_{sat} \times h_{sat} = G_{cold,in} \times (h_{cold,out} - h_{cold,in}) \quad (46)$$

式中: 下标 exh —汽轮机排汽; 下标 rc —凝汽器补水; 下标 sat —从凝汽器被凝泵抽走的饱和水; 下标 $cold,in$ —冷却循环水来水; 下标 $cold,out$ —冷却循环水回水。定义过冷度为凝汽器压力下的饱和温度 t_{cond} 与凝结水温度 t_{sat} 的差, 即:

$$\Delta t_{sub} = t_{cond} - t_{sat} \quad (47)$$

定义凝汽器的热端端差 Δt_{hs} 和冷端端差 Δt_{cs} 分别为:

$$\Delta t_{hs} = t_{exh} - t_{cold,out} \quad (48)$$

$$\Delta t_{cs} = t_{sat} - t_{cold,in} \quad (49)$$

由于凝汽器是一种特殊的换热器, 因此与换热器类似, 根据对数平均温差的定义式 (31) 代入式 (32) 亦可得到凝汽器换热量 Q 的另一条方程, 从而获取凝汽器的换热特性, 即换热系数 \times 换热面积的值:

$$Q = k \times A \times \Delta t_m \quad (50)$$

8 结果验证及对比分析

建立的数学模块库具有通用性, 能够应用于不同型号燃气轮机仿真模型的建立。基于所建立的仿真模块库, 可根据燃气轮机相关设备资料, 建立该机组的系统仿真模型, 进行机组性能的仿真分析。通过比较模型计算的参数值与实际测量数据中的冗余参数值验证模型的准确性。选择的冗余参数包括: 高压过热器出口蒸汽温度、高压过热器出口蒸汽压力、高压过热器出口蒸汽流量。在全部运行时间点内, 各个冗余参数的误差统计结果如下表所示。由图表 1 可以看出, 对于绝大多数运行点模型能够实现冗余参数的准确计算, 除一级再热器出口蒸汽温度有个别点误差较大, 其余各点的计算误差可保持在 2% 以内。在计算误差较大的时间段内, 可以看出各个测点的计算误差均出现了波动。为减小异常波动数据对模型精度验证结果的影响, 根据燃气轮机功率, 选取典型稳定工况对模型计算误差进行分析, 结果如表 2 所示。从表 2 结果中可以看出, 除异常波动点外, 在所有工况下模型的计算误差均能满足 $\pm 3\%$ 的最大误差要求。

9 结论

本文以某电厂 F 级燃气轮机联合循环机组为对象, 基于联合循环仿真模块, 搭建了燃气轮机及联合循环机组仿真模型, 对机组实际运行过程中积累的两

年运行数据进行分析,并针对所搭建的模型开展了模型验证。

表 1 各参数误差统计结果

	高压过热器出口蒸汽温度误差	高压过热器出口蒸汽压力误差	高压过热器出口蒸汽流量误差
平均值	-0.34%	0.17%	0.75%
最大值	0.34%	0.54%	1.95%
最小值	-1.35%	-0.05%	-0.27%

表 2 不同工况下各参数误差统计结果

运行时间	燃机发电功率	工况	高压过热器出口蒸汽温度误差	高压过热器出口蒸汽压力误差	高压过热器出口蒸汽流量误差
163	311.1562	100.00%	-0.26%	0.01%	-0.06%
1090	281.0552	90.33%	-0.39%	0.01%	0.58%
471	264.4577	84.99%	-0.55%	0.06%	0.51%
1124	249.057	80.04%	-0.48%	0.08%	0.82%
1185	233.3098	74.98%	-0.37%	0.14%	0.90%
316	218.1057	70.10%	-0.26%	0.23%	0.83%
912	202.4664	65.07%	-0.35%	0.33%	1.09%
1156	189.7614	60.99%	-0.45%	0.34%	1.23%
1123	170.2277	54.71%	-1.09%	0.41%	1.38%
293	156.869	50.41%	-0.80%	0.50%	1.23%

对比模型计算的参数值与相应的实际测量数据之间的误差,均在±3%以内,所建立的模型能够满足精度要求。所建立的机组仿真模型可用于后续的机组性能监测和状态评估研究。

参考文献

- [1] 韩朝兵. 燃气-蒸汽联合循环机组的能效监测及经济性诊断[D]. 南京: 东南大学, 2015.
- [2] 赵春,王培红. 燃气-蒸汽联合循环热经济学分析评价指标研究[J]. 中国电机工程学报, 2013, 33(23): 44-50.
- [3] 赵欢, 王培红, 钱瑾,等. 基于模糊 C-均值聚类的锅炉监

控参数基准值建模[J]. 中国电机工程学报, 2011.

- [4] 赵明, 王培红, 梁俊宇, 杜景琦, 殷捷, 赵阳. 基于加权模糊 C-均值聚类的锅炉运行参数基准值建模[J]. 热力发电, 2019, 48(1):12-17.
- [5] 何怀昌, 李晓东, 罗肖, 等. 基于大数据的燃气-蒸汽联合循环机组性能分析及诊断系统[J]. 热力发电, 2020. 49(1): 14-19.

版权声明: ©2022 作者与开放获取期刊研究中心(OAJRC)所有。本文章按照知识共享署名许可条款发表。

<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>



OPEN ACCESS