

燃气轮机建模的通用性和精细性研究

徐 钢, 林汝谋, 邵艳军, 金红光

(中国科学院工程热物理研究所, 北京市 海淀区 100080)

STUDY ON UNIVERSALITY AND PRECISION OF GAS TURBINE MODELING

XU Gang, LIN Ru-mou, SHAO Yan-jun, JIN Hong-guang

(Institute of Engineering Thermophysics, Chinese Academy of Sciences, Haidian District,
Beijing 100080, China)

ABSTRACT: The aim of this paper is to investigate the methods that can enhance the universality and precision of gas turbine modeling. Many effective methods are proposed and summarized in the paper. Firstly, by means of some new modeling measures, such as the concept of fully operating regions and the combination of theoretical analysis and data fitting method, the models with high universal and precise are set up for gas turbine components. Then, several amendment formulas, including the relationship between compressor efficiency and pressure ratio, are used to upgrade the precision of these models. Finally, the universality and precision of system connection is strengthened through the application of superstructure vector diagrams and fundamental flow equations. The validity and feasibility of these methods have been well verified in case studies.

KEY WORDS: Gas turbin; Modeling; Universality; Precision

摘要: 该文研究燃气轮机系统建模中增强模型通用性和精细性问题, 归纳开拓相关的途径与方法。首先, 应用新的建模方法建立高通用性的典型单元模块精细模型; 其次, 通过建立关键变量或因素对燃气轮机系统及部件性能影响的修正公式, 来进一步提高单元模块模型的精度; 最后, 应用系统流程超结构有向图法和管道方程来增强系统联接的通用性和精细性。大量实例应用研究验证了燃气轮机系统建模中增强通用性和精细性措施的有效性和可行性。

关键词: 燃气轮机; 建模; 通用性; 精细性

基金项目: 国家自然科学基金项目 (90210032); 国家 863 高技术基金项目 (2002AA525012)。

Project supported by National Natural Science Foundation of China (90210032); Project supported by The National High Technology Research and Development of China (863 programme) (2002AA525012).

1 引言

随着能源动力系统大型化、复杂化, 传统的系统模拟分析方法面临着严峻挑战, 基于通用性组合思想的模块化建模已成为动力系统数学模拟发展的新方向^[1-5]。系统模拟的基础是部件与系统模型, 而系统建模的核心问题是模型的通用性和精细性。为了满足系统模拟分析和设计优化的需求, 常常要求有关的模型具有很高的通用性, 以便适应对所有候选部件筛选和系统综合优化的需要。但增强模型的通用性常常是以降低其精度为代价的。因此, 在提高系统和部件模型通用性的同时要采取措施确保其具有足够的精细性, 即使其具有一定的精度, 能与实际机型较好地符合。目前, 燃气轮机系统模型大都基于传统建模理论建立, 能较精确地描述设计工况下的系统热物理过程, 但对于非设计工况下的系统性能分析就不再适用, 即通用性较差。对于联合循环特别是 IGCC 联合循环系统中的燃气轮机, 技术方案变化较大, 往往需要逐个重新建模; 另外, 部件建模时为了考虑模型通用性常常作较粗糙的假定, 对影响部件与系统的因素描述也不够精细或未予考虑。

本文基于作者单位长期相关工作^[5-13], 研究总结增强燃气轮机系统模型通用性和精细性的途径和方法。即: 应用建模理论的新思路和方法建立高通用性的典型单元模块精细模型; 借助关键变量或因素对部件性能影响的修正公式来进一步提高单元模块模型的精度; 借助于系统流程超结构有向图法和管道方程增强系统联接的通用性和精细性。最后通过多个燃气轮机实例的模拟分析, 验证了所提

出的增强模型通用性和精细性措施的有效性和可行性。

2 高通用性的典型部件全工况精细模型

2.1 典型部件建模的新思路与方法

为建立普适性更强的单元模块全工况精细模型，必须在建模理论上有所突破，尝试采用新的建模思路和方法，即：应用全工况的新概念，采用理论推导与实验数据拟合相结合的建模方法以及采用一维四化两级模型统一格式。

(1) 全工况的新概念：目前已有的燃气轮机系统模型及各单元部件模型大都基于设计工况建立的；而实际上由于环境大气条件、外界负荷或系统本身特性等的变动，联合循环系统总是处于变工况下运行，各部件及系统的性能参数都会偏离原设计工况点。应用全工况概念建模^[5-6]将突破传统 ISO 基准工况框架，全面考虑系统所有可能运行工况，更科学地描述联合循环系统的复杂情况，能更好地适应设计工况、变工况或两者混合等情况下模拟分析的需要。

(2) 理论推导与实际数据拟合相结合的建模方法：目前，通过试验法得到的特性曲线簇最为准确，但花费昂贵，很少公开，且多针对具体机型，通用性不高。而现有理论计算方法的精度大都不高，这是由于为得到可解的特性方程，往往要做大量的假定和简化，从而导致特性方程的应用范围受限、准确性降低。采用理论推导与实际数据拟合相结合的建模方法可以解决以上问题^[8-9]，即：首先应用理论分析结合实验规律凝练推导出比较好的模型函数框架；再应用数理处理手段，借助已有实验数据，求得相关系数。所建全工况通用模型隐含较严格的物理过程和变量关系，能适用于不同形式的系统构成和不同类型的候选部件，具有较强的通用性；并能把必须计及的影响因素综合归纳到模型的常系数中，保证了模型具有较高的精度。

(3) 一维四化两级模型统一格式：采用“一维四化两级”的单元模块模型统一格式，可以最大程度地提高模型的通用性^[5,10]。所谓“一维”，即一维稳态的全工况特性：不考虑流程截面上参数的不均匀性，采用平均值，但充分考虑所有可能运行区域的稳态特性。“四化”为方程化、通用化、标准化、规范化：对于不同部件的模块模型，都将其化为统一格式，都以方程形式表达，若部件特性为非

数学形式时，则通过数理手段转化为数学解析式。

“两级模型”，即对相关单元模型建立两种模型：严格模型和简单模型。前者是对该设备物理本质的精确描述；后者是基于前者推导出来的线性或弱非线性的简化方程组。这样，由于不考虑流程截面上参数不均匀性而充分考虑了所有可能运行区域的稳态特性，使模型具有很高的通用性；方程化、通用化、标准化、规范化的统一格式，可以简化建模过程，并进一步增强模型的通用性；严格和简单两级模型体系可根据需要应用于不同精度要求的场合，以利于系统模型的求解。

2.2 典型部件全工况特性精细模型

(1) 燃气透平全工况特性模型

现有描述透平通流特性最常用的是 Flügel 公式

$$\frac{G_t}{G_{t0}} = \sqrt{\frac{T_{30}}{T_3}} \sqrt{\frac{(P_3^2 - P_4^2)}{(P_{30}^2 - P_{40}^2)}} \quad (1)$$

式中 G_t 为透平流量； T_3 为透平前温； P_3 、 P_4 分别为透平入口压力和排气压力，MPa；下标 0 为基准点。

式(1)比较适合于级数较多和转速不变的亚临界流动的蒸汽透平，当应用于流动状态变化较大、级数较少的透平时误差较大，在很多情况下仍显粗糙。为此，本文通过理论分析与实验规律归纳相结合的方法建立模型框架，并应用数理处理手段整合已有实验数据求得相关系数，建立了燃气透平全工况特性模型^[8]。所建立的通用模型突破了椭圆规律的限制，但仍保持椭圆方程的平方幂次项，故称之为准椭圆方程

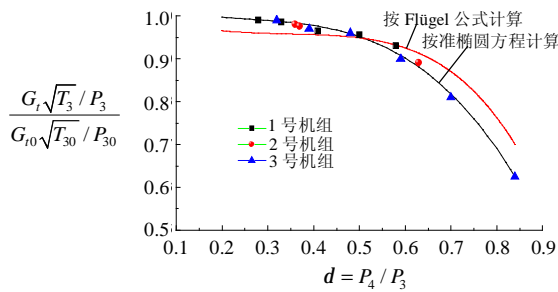
$$\frac{G_t \sqrt{T_3} / P_3}{S_s^* G_{t0} \sqrt{T_{30}} / P_{30}} = D \sqrt{\frac{(a_z + b_z p - p^2)}{(a_z + b_z p_0 - p_0^2)}} \quad (2)$$

式中 p 为透平膨胀比； D 为转速修正系数； S_s^* 为透平通流面积调节系数；常数 a_z 、 b_z 取决于透平级数、平均反动度及工质热物性；下标 0 为基准点。

该准椭圆模型可适用于不同级数、不同流动状态、转速一定或变化的透平情况，比已有的同类模型（如 Flügel 公式）在精度方面有较大改进。

本文还对应用 Flügel 公式和准椭圆方程计算恒速两级透平通流特性的计算结果进行了比较，如图 1 所示，应用 Flügel 公式所得结果和实测数据（图中各离散点）在大多数情况下存在较大误差，只在少数情况比较接近；而应用准椭圆方程所得结果和实测数据极为吻合，各工况点的误差多在 1%

以内。



注：离散点为各机组实测数值

图1 两级透平通流特性

Fig. 1 Flow characteristics of two-stage turbine

(2) 压气机全工况特性模型

对实测得到的特定部件特性参数进行曲线拟合，总可以找到一个回归函数来表征复杂的相关关系，但这种纯数学手段对不同压气机的通用性较差。统计法（即基于统计规律归纳出特性解析式）常在一定精度范围内具有普遍性，适用于一定范围的类似部件，但精度较差。有鉴于此，我们通过大量部件特性的统计归纳和理论分析，推导出压气机特性方程的通用函数形式，并汇集实测数据应用回归分析法推导出相关系数，从而建立压气机特性通用模型^[9]。例如，在等转速线上相对效率和相对流量的关系式为

$$\bar{h}_{n,i} = 1 - s \left[\frac{G_{n,i}}{G_{n,opt}} \left(\frac{e_{n,opt}}{e_{n,i}} \right)^{1/3} - 1 \right]^2 \quad (3)$$

式中 $\bar{h}_{n,i}$ 为不同转速下压气机相对效率； G 为空气流量，kg/s； e 为压比； $s = s(\bar{n})$ ，为折合转速 \bar{n} 的函数。下标： i 为任意工况点； opt 为最佳运行线； n 等转速线。

一组类似于式(3)的关系式共同组成压气机特性模型的数学表达式，式中系数由实测数据拟合回归得到。这些特性关系式既体现大量实际情况的统计规律，又隐含着一定的物理背景；既保留统计法简捷的特点，又不完全依赖于统计数据，具有很强的通用性与实用性。

(3) 适用于不同燃料的燃气热物性模型

在吴仲华燃气热力性质表的基础上，应用等效系统当量燃料概念，可以将传统的以标准燃料 C_8H_{16} 为基准的燃气热力性质计算模型推广到多种任意 C-H-O-N-S 类型的气体、液体或固体燃料，混烧或多级燃烧的复杂情况^[12]。研究表明，对于由多种气体组成的混合气体燃料，或多种 C-H-O-N-S 类型的液体、固体燃料的混烧，或多种燃料的混烧和多级燃烧，当采用适当计算体系时便可用一种单一

组分的等效当量燃料 $C_xH_yO_zN_uS_v$ 来代替。另外，在很多情况下，通过燃空比 f 求得燃料系数 b ，更为简便。求得当量燃料分子式 $C_xH_yO_zN_uS_v$ 和燃料系数 β 后，就可以很方便地利用道尔顿定律和燃烧方程推导出燃气的热力性质。当燃气温度不超过 $1500^\circ C$ 时，忽略气体离解现象而认为燃气遵循理想气体状态方程，其内能、焓、比热、比热比、相对压比等均为燃料成分、燃料系数 b （或燃空比 f ）和温度的函数。所建立的燃气热物性模型仅与燃料成分、摩尔燃料系数和燃气温度有关（熵和焓还与压力有关），可具有较高的精确度与通用性。

3 关键因素对部件性能影响的精细修正

系统建模过程中，在建立高通用性的典型部件全工况精细模型基础上，通过建立关键变量或因素对燃气轮机系统及部件性能影响的修正公式，并将其嵌入模型中，能进一步提高部件模型的精细性。

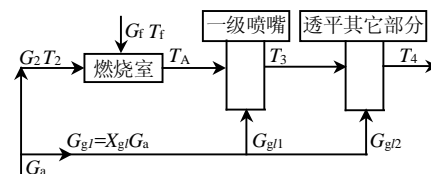
(1) 冷却空气量随透平初温变化的修正公式

在燃气轮机中，冷却空气量是一个关键变量，它的选取将对燃气轮机性能产生重要影响。而冷却空气量的取值主要受透平初温的影响，一般来说，透平初温越高，冷却空气量也越大。因此，冷却空气量随透平初温变化的修正关系将对燃气轮机模型的精细性产生重要影响。

如图2所示，冷却空气 G_{gl} 一般是从压气机出口抽取的，其中一部分 G_{gl1} 用来冷却透平一级喷嘴，它的掺混使燃气从燃烧室出口温度降到透平转子入口温度；另一部分 G_{gl2} 的掺混，将影响燃气透平排气温度。所以参与透平做功的燃气折合流量为：

$$G_t = G_a + G_f - G_{gl} + G_{gl1} X_{gl1} \quad (4)$$

式中 X_{gl1} 为冷却空气做功能力折合系数；其它参数见图2。



注： G_a —压气机出口空气流量； G_{gl} —冷却空气流量； X_{gl1} —冷却空气系数； G_2 —进入燃烧室空气流量； T_2 —进入燃烧室空气温度； G_f —进入燃烧室的燃料流量； T_f —进入燃烧室的燃料温度； T_A —燃烧室出口温度； T_3 —燃气透平入口温度； G_{gl1} —一级喷嘴冷却空气流量； T_4 —透平排气温度； G_{gl2} —其它部份冷却空气量；流量单位为 kg/s；温度单位为 K。

图2 典型空气冷却流程

Fig. 2 Typical case of air cooling flow

可见，冷却空气量的大小及其在第1级喷嘴和

其它部件冷却空气量的分配将直接影响着参与做功的燃气流量，进而影响燃气透平的功率和效率。现有燃气轮机性能特性模型多取冷却空气量为定值，没有考虑冷却空气量随透平初温变化而变化，误差比较大。本文基于透平初温和冷却空气量之间变化关系的统计规律，建立了冷却空气系数随透平初温变化的修正公式

$$X_{gr} = a + b(T_3/T_{30}) + c(T_3/T_{30})^2 + d(T_3/T_{30})^3 \quad (5)$$

式中 T_{30} 为选定的基准温度，K； a 、 b 、 c 、 d 为拟合系数。

由式(5)可见，冷却空气系数 X_{gr} 是透平初温 T_3 的函数。当 T_3 提高时， X_{gr} 也有较大幅度的增长。与取冷却空气系数为定值的燃气轮机模型相比，嵌入修正公式(5)的燃气轮机模型能更好地考虑冷却空气量随燃气初温的实际变化情况，使系统模拟的结果更接近实际值。本文通过实例计算对此进行了分析，结果如图 3 所示。该图反映了采用两种模型时燃气轮机热效率随温比 t (压比取该温比下的最佳压比 e_{opt}) 的变化情况：在 $t=4.0$ 时两个模型计算结果相同；当 $t<4.0$ 时，冷却空气系数取定值模型的计算结果低于考虑修正的模型；当 $t>4.0$ 时，冷却空气系数取定值模型的计算结果高于考虑修正的模型；在 $t=2.5\sim 6$ 变化范围内，两模型计算结果差值为 0~3%。

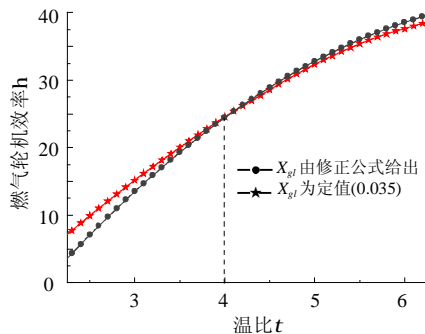


图 3 冷却空气系数对燃气轮机效率的影响

Fig. 3 Influence of cooling air coefficient to gas turbine efficiency

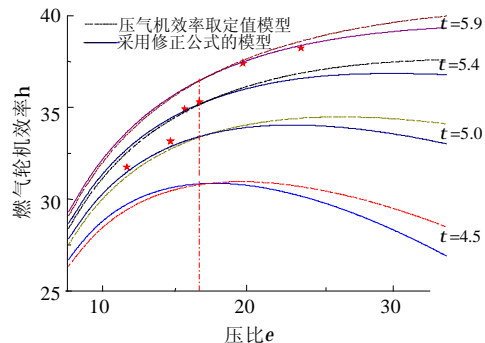
(2) 压气机效率随压比变化的修正公式

基于压气机气动特性，压气机效率一般都随压比升高而降低。已有的燃气轮机模型大都建立在压气机效率为定值 ($h_c = \text{常数}$) 的基础上，模型比较粗糙。本文在分析大量数据的基础上，探索压气机效率和压比之间变化关系的统计规律，建立了压气机效率随压比变化的修正公式

$$h_c = h_{c0}(a - be + ce^2) \quad (6)$$

式中 h_c 为压气机效率； h_{c0} 为选定的基准压气机效率 (如 0.88)； e 为压比； a 、 b 、 c 为拟合系数。

本文通过实例计算，比较分析了应用式(6)的燃气轮机模型和未考虑压气机效率随压比变化修正 ($h_c = \text{常数}$) 模型的计算结果。图 4 为两种模型计算的燃气轮机效率 h 随温比 t 和压比 e 变化情况。可见，在 $e=16$ 时两种模型计算出的燃气轮机效率相等；当 $e<16$ 时，压气机效率取定值模型的计算结果低于采用修正公式的模型；当 $e>16$ 时，压气机效率取定值模型的计算结果高于采用修正公式的模型。在实例计算范围 $e=6\sim 35$ 内，两模型计算差值为 0~3%。随着压比的继续升高，压气机效率将进一步下降，两种模型计算出的燃气轮机效率差值有进一步扩大的趋势。图中各离散点为几种机型燃气轮机的实际效率值，可以看出，嵌入修正公式的燃气轮机模型的模拟结果更接近于实际值。



注：★为几种燃气轮机效率的实测值

图 4 压气机压比对燃气轮机效率的影响

Fig. 4 Influence of pressure ratio to gas turbine efficiency

4 增强燃气轮机系统联接的通用性和精细性的方法

提高系统模型的通用性和精细性不仅取决于各单元模块模型，还与它们之间的联接方法密切相关。为此，可采用系统超结构有向图法描述系统联接的逻辑关系，并借助于管道方程来精细化模块间变量关联关系，进而实现了系统模块间的通用精细联接。

(1) 系统流程超结构有向图方法

应用包容所有可能技术方案的“超结构”概念来建立系统模型，能够使模型的通用性得到很大程度的提高。系统流程的超结构模型应能够包容所有可能的技术方案和流程、包容影响该系统综合优化的所有关键因素的合理变化区域；并充分考虑热力学和工程上的制约与要求以及可根据需要进行方便的扩展与删除。这样，无论是简单循环、常规联

合循环或如 IGCC 等复杂联合循环，都可借助于系统超结构模型按系统的具体特点对相关模块进行组合，而且所建系统模型能够适用于各种类型的循环系统，具有很高的通用性。

本文采用图论的有向图来描述并建立燃气轮机系统流程超结构。即将系统各单元模块模型都用图的节点 (x_1, x_2, \dots, x_n) 表示，系统网络联接关系（模块间工质流和能量流）采用有向弧 (U_1, U_2, \dots, U_n) 表示，则联合循环系统流程结构可表示为节点和弧的集合

$$G = (X, U) \tag{7}$$

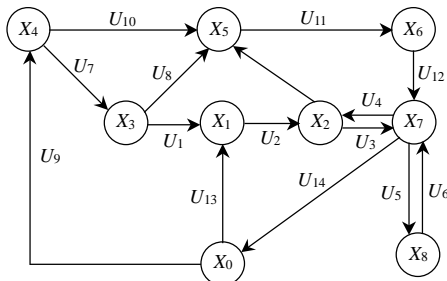
式中 $X = \{x_1, x_2, \dots, x_n\}$; $U = \{U_1, U_2, \dots, U_n\}$ 。

有向图在数学上还可用 $n \times m$ 阶结构矩阵或 n 阶结构方阵来表示

$$A = [a_{i,j}]_{n \times m} \tag{8}$$

式中 $i = 1, 2, \dots, n$; $j = 1, 2, \dots, m$ 。

图 5 为 IGCC 系统超结构有向图，其下为对应的结构矩阵，它涵盖了各子系统的主要部件及所有可能联接方案。该图也清晰地描述了 IGCC 中燃气轮机子系统内主要部件间及其与其它子系统间的联接关系。



(a)有向图

注：X₀—环境；X₁—煤气化系统；X₂—煤气净化系统；X₃—空分装置；X₄—压气机；X₅—燃烧室；X₆—燃气透平；X₇—余热锅炉；X₈—蒸汽透平

$$A = \begin{matrix} & U_1 & U_2 & U_3 & U_4 & U_5 & U_6 & U_7 & U_8 & U_9 & U_{10} & U_{11} & U_{12} & U_{13} & U_{14} \\ X_0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 0 & 0 & -1 & 1 \\ X_1 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ X_2 & 0 & 1 & -1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ X_3 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ X_4 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -1 & 0 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ X_5 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ X_6 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 \\ X_7 & 0 & 0 & 1 & -1 & -1 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & -1 & 0 \\ X_8 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & -1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{matrix}$$

(b)结构矩阵

图 5 IGCC 系统的有向图及结构矩阵

Fig. 5 Vector diagram and structure matrix of IGCC system

当其应用于常规燃气蒸汽联合循环系统时，只需删除图中煤气化 (X₁)、净化 (X₂) 和空分 (X₃) 等模块，并对结构矩阵中相应系数取“0”值即可。

即

$$G_{cc} = (X_{igcc}, U_{igcc}) \tag{9}$$

式中 $X_{igcc} = X = \{X_0, X_1, X_2, \dots, X_8\}$

$U_{gt} = U = \{U_1, U_2, U_3, \dots, U_{14}\}$

$$a_{ij} = \begin{cases} -1 & \text{弧 } U_j \text{ 发源于节点 } x_i \\ 1 & \text{弧 } U_j \text{ 止于节点 } x_i \\ 0 & \text{弧 } U_j \text{ 和节点 } x_i \text{ 无联系} \end{cases}$$

(2) 应用管道特性方程精细描述模块间变量关联关系

研究表明，精确描述模块间变量的数量关系，进而建立系统模块间的精细联接能够明显提高系统模型的精度。目前已有一些方法可用于表征燃气轮机系统结构和流体网络的数量关联关系，但效果并不理想。例如一种常用的方法是将管道损失分摊到两端模块上，在系统建模时按流程来设定序贯连接关系。但这样做会使各单元模块模型的独立性下降，当燃气轮机系统的流程结构改变时往往需要重新建模。

鉴于燃气轮机系统各设备之间多通过管道进行连接，且其中压力和流量存在水力耦合关系的特性，可采用管道方程来精细量化模块间的参数变化关系^[10,13]，如

$$\text{连续方程: } G_{j1} - G_{j2} = V_j \frac{dr_j}{dt} \tag{10}$$

能量守恒方程:

$$G_{j1}h_{j1} - G_{j2}h_{j2} - Q_j = V_j \frac{r_j(h_j - p_j/r_j)}{dt} \tag{11}$$

管道对环境的散热量: $Q_j = a_j A_j (T_{wi} - T_a)$ $\tag{12}$

$$\text{阻力方程: } p_{j1} - p_{j2} = x_j \frac{G_j^2}{r_j} \tag{13}$$

式中 G 为工质流量，kg/s; V 为管道容积，m³; r 为工质密度，kg/m³; h 为工质比焓，J/kg; p 为工质压力，Pa; a 为放热系数，W/m²·K; t 为时间; A 为管道外壁热交换面积，m²; x 为与管道粗糙度及几何尺寸有关的系数; T_w 为管道壁温，K; T_a 为环境温度，K; 下标: j 为第 j 段管道平均值; j_1 为管道入口; j_2 为管道出口。

通过管道特性方程来表达相邻模块间关联的数量关系，实现了对燃气轮机系统各部件间联接数量关系的精确描述。既充分反映了管道内的流动特性，又使得管道损失独立于各单元模块，避免了由于将管道损失分摊到两端模块而影响单元模块的

独立性和系统模型的通用性。

5 小结

本文研究探讨了增强燃气轮机系统模型通用性和精细性的途径与方法。包括: ①应用建模理论的新方法, 建立高通用性的典型单元模块精细模型; ②借助考虑关键变量或因素对部件性能影响的通用修正公式来进一步提高单元模块模型的精度; ③借助于系统流程超结构有向图法和管道方程增强系统联接的通用性和精细性。通过对相关燃气轮机实例的模拟分析, 验证了上述增强燃气轮机建模通用性和精细性方法的有效性和可行性。

参考文献

- [1] 林汝谋, 金红光. 燃气轮机发电动力装置及应用[M]. 北京: 中国电力出版社, 2004.
- [2] 邓世敏, 危师让, 林万超. IGCC 系统专用单元模型研究[J]. 中国电机工程学报, 2001, 21(3): 34-36.
Deng Shimin, Wei Shirang, Lin Wanchao. IGCC system special unit module study[J]. Proceedings of the CSEE, 2001, 21(3): 34-36.
- [3] 倪维斗, 徐向东, 李政, 等. 热动力系统建模与控制的若干问题[M]. 北京: 科学出版社, 1996.
- [4] 任挺进. 热动力装置模块化建模及新算法探讨[D]. 北京: 清华大学, 1992.
Ren Tingjin. Development and application of modular modeling dynamic analysis system for thermal power systems[D]. Beijing: Tsinghua University, 1992.
- [5] 林汝谋, 胡剑辉, 刘泽龙. 总能系统全工况特性数学模拟的研究[J]. 工程热物理学报, 1998, 19(5): 541-544.
Lin Rumou, Hu Jianhui, Liu Zelong. Study on mathematics modeling of TES in all operating regions[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 1998, 19(5): 541-544.
- [6] 林汝谋, 段立强, 邓世敏, 等. IGCC 联合循环系统全工况特性分析研究[J]. 燃气轮机技术, 2003, 16(1): 1-8.
Lin Rumou, Duan Liqiang, Deng Shimin *et al.* Study on characteristics of combined cycle system of IGCC in all operating states[J]. Gas Turbine Technology, 2003, 16(1): 1-8.
- [7] 段立强, 林汝谋, 蔡睿贤, 等. 整体煤气化联合循环 (IGCC) 底循环系统变工况特性[J]. 中国电机工程学报, 2002, 22(2): 26-30.
Duan Liqiang, Lin Rumou, Cai Ruixian *et al.* Off-design characteristic of bottom cycle system in IGCC[J]. Proceedings of the CSEE, 2002, 22(2): 26-30.
- [8] 卢韶光, 林汝谋. 燃气透平稳态全工况特性通用模型[J]. 工程热物理学报, 1996, 17(4): 404-407.
Lu Shaoguang, Lin Rumou. Gas turbine steady-state design and off-design characteristic general model[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 1996, 17(4): 404-407.
- [9] 张娜, 林汝谋, 蔡睿贤. 压气机特性通用数学表达式[J]. 工程热物理学报, 1996, 17(1): 21-24.
Zhang Na, Lin Rumou, Cai Ruixian. General formulas for axial compressor performance estimation[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 工程热物理学报, 1996, 17(1): 21-24.
- [10] 林汝谋. IGCC 发电分系统优化和整体优化的初步研究[R]. “九五”国家重点科技攻关项目专题研究报告. 中国科学院工程热物理研究所. 2000, 8.
Lin Rumou. The optimization study of the power generation subsystem and the entire system of IGCC[R]. The Special Research Report of National Key Project. Institute of Engineering Thermophysics, Chinese Academy of Science. 2000, 8.
- [11] 段立强, 徐钢, 林汝谋, 等. IGCC 系统热力与环境性能结合的评价准则[J]. 中国电机工程学报, 2004, 24(12): 263-267.
Duan Liqiang, Xu Gang, Lin Rumou *et al.* Study on new multi-objective evaluation criterion of igcc system performance[J]. Proceedings of the CSEE, 2004, 24(12): 263-267.
- [12] 林汝谋, 方钢. 多种燃料多级燃烧的燃气热力性质简捷算法[J]. 工程热物理学报, 1989, 10(2): 137-139.
Lin Rumou, Fang Gang. Concise calculation of combustion gas thermal properties of multiple fuel and multistage combustion[J]. Journal of Engineering Thermophysics, 1989, 10(2): 137-139.
- [13] 郑莉莉. 整体煤气化联合循环燃气侧子系统热力学研究[D]. 北京: 中国科学院, 1999.
Zheng Lili. Research of gas turbine cycle thermodynamical performance in igcc[D]. Beijing: Chinese Academy of Science, 1999.

收稿日期: 2005-05-28.

作者简介:

徐 钢(1978-), 男, 安徽舒城县人, 中国科学院研究生院博士研究生, 主要从事能源动力系统研究;

林汝谋(1938-), 男, 福建古田人, 研究员, 博士生导师, 主要从事工程热物理和能源动力系统基础研究和相关的高技术开发与创新;

邵艳军(1979-), 男, 河北秦皇岛人, 华北电力大学与中科院工程热物理研究所联合培养硕士研究生, 主要从事能源动力系统研究;

金红光(1957-), 男, 朝鲜族, 吉林人, 研究员, 博士生导师, 主要从事能源动力系统和化学环境学研究。