

联合循环中蒸汽系统建模的通用性和精细性

邵艳军^{1,2}, 林汝谋¹, 金红光¹, 杨勇平²

(1. 中国科学院工程热物理研究所, 北京 100080; 2. 华北电力大学能源与动力工程系, 北京 102206)

摘 要: 联合循环系统特性研究的基础是理论建模, 而建模的核心问题是模型的通用性和精细性。本文研究联合循环中蒸汽系统建模时增强通用性和精细性的途径。首先, 应用建模新思路与方法, 建立高通用性的单元模块精细模型; 其次, 借助于关键因素对部件性能影响的通用修正公式对单元模块模型进行精细修正; 最后, 应用模块间网络联接通用手段来描述系统联接的逻辑关系和应用管道方程来精确定量模块间变量关联关系。大量实例应用验证了增强通用性和精细性措施的有效性和可行性。

关键词: 蒸汽系统; 建模; 通用性; 精细性

中图分类号: TK262 文献标识码: A

1 前言

随着能源动力系统的大型化和复杂化, 基于通用性组合思想的模块化建模将逐步取代传统的系统模拟分析方法, 成为动力系统数学模拟发展的新方向^[1~4]。系统及其部件热力特性研究的基础是理论建模, 而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, 常常要求有关模型同时具有高的通用性和精细性; 模型不但能应对所有候选部件筛选和系统优化的需要, 还能准确地表达物理过程本质。

目前, 针对联合循环蒸汽系统中的特定流程和设备, 已有比较成熟的基于设计工况的系统与部件模型。但当采用不同流程的余热锅炉和蒸汽循环时, 模型的通用性较差, 无法精确描述所有运行工况。另外, 在系统建模时为增强模型的通用性常常作许多粗糙的假定, 对影响部件与系统的因素描述不够精细或未予考虑, 使得模型精细性大为下降。

本文基于作者单位长期从事相关工作^[1~2, 5~8], 研究探讨增强联合循环中蒸汽系统模型通用性和精细性的途径和方法, 并通过实例研究, 验证了模型的通用性和精细性以及各种建模措施的有效性与其可行性。

2 高通用性典型部件全工况精细模型

目前已有的联合循环蒸汽系统及部件模型大都是基于设计工况建立的, 而实际上, 联合循环中的蒸汽系统由于受燃气轮机排气温度和流量等变化的影响, 经常处于变工况, 蒸汽参数、各部件的特性参数都会偏离设计工况点。应用全工况的概念建模, 能够更全面考虑蒸汽系统所有可能运行区域的特性, 更科学地描述联合循环蒸汽系统的复杂情况, 所建蒸汽系统模型能更好的适应各种工况模拟分析的需要。

联合循环中蒸汽系统是由不同压力等级和不同搭配方式的各集成部件组合而成, 且多以余热锅炉和透平两个典型模块为核心构成。因此, 蒸汽系统建模也主要围绕余热锅炉和蒸汽透平展开, 建立普适性更强的余热锅炉和蒸汽透平全工况精细模型至关重要。

2.1 余热锅炉全工况特性模型

余热锅炉(HRSG)是联合循环中蒸汽系统的主要部件, 汇集了系统大部分能量与物质交换过程, 是系统整体优化和各主要子系统匹配的关键环节。为此, 首先要建立较为完整的余热锅炉典型部件模型库; 然后基于“超结构”和温区概念建立高通用性的余热锅炉温区超结构模型。

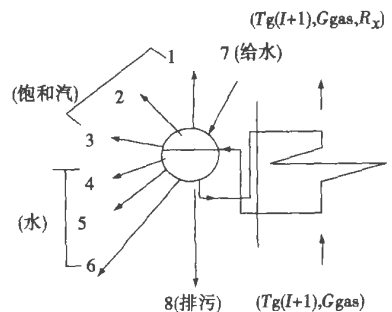


图 1 蒸发器模型

收稿日期: 2005-02-02; 修订日期: 2005-08-22

基金项目: 国家高技术研究发展计划(863B)基金资助项目(2002AA525012)

作者简介: 邵艳军(1979-), 男, 河北秦皇岛人, 华北电力大学与中国科学院联合培养硕士。 http://www.cnki.net

余热锅炉虽然在流程结构上多样化,但其主要组成可归纳为:过热器、再热器、蒸发器、省煤器和除氧器等典型部件单元模块。这些部件按一定流程组合即可构成余热锅炉主体。因此,要建立具有高通用性和精细性的部件模型,即组建典型部件模型库。以蒸发器模型(见图1)为例^[5~9]:该模型设置8个接口,在调用时,对于多余的接口可令其流量为零;若接口1~6中工质流动方向与图中相反,只需在输入数据时令其流量为负值即可。设汽包工作压力、温度为 $P_s(I)$ 、 $T_s(I)$,接近点温差为 $DT_a(I)$ 。模型中物流与能量交换主要依据以下方程。

质量平衡:

$$\sum_{K=1}^6 G_{hr1}(I, 1, K) + (\sum_{J=1}^3 G_{hr1}(I, 1, J))A(I) = G_{hr1}(I, 2, 1) \quad (1)$$

能量平衡:

$$Q_g(I) = (H_g(I) - H_g(I+1))\eta_{hr} \quad (2)$$

$$Q(I) = \sum_{k=1}^6 (G_{hr1}(I, 1, K)H_{hr1}(I, 1, k)) + (\sum_{J=1}^3 G_{hr1}(I, 1, J))A(I)H_{hr1}(I, 1, 1) - G_{hr1}(I, 2, 1)H_{hr1}(I, 2, 1) \quad (3)$$

$$Q(I) = Q_g(I) \times \eta_{hr} \quad (4)$$

式中: $Q_g(I)$ —烟气放热量; $G_{hr1}(I, 1, K)$ —不同接口的汽水流量; η_{hr} —余热锅炉热利用率; $A(I)$ —排污率; $H_{hr1}(I, 1, K)$ —不同接口的汽水焓; $Q(I)$ —汽水工质吸热量。

可见,此模型主要由具有严格物理意义的质量、能量平衡等基本方程组成,真实地反应过程的物理本质,具有较高的通用性和精度。

建立了足够的典型部件模块模型,还需要按一定的流程结构将其组合,从而建立余热锅炉子系统模型。传统的余热锅炉模型多是针对某一特定流程建立,适用范围小,当流程或部件改变时需要重新建模,且无法对受热面布置未知的余热锅炉进行系统建模。为此,我们提出了根据“温度对口,梯级利用”原理的温区概念建立的余热锅炉通用模型^[5~8]。图2为IGCC联合循环中余热锅炉温区流程超结构图。如图所示,余热锅炉按燃气温度由高到低分为多个温区,每一温区相当于一个热力学控制体,并列布置一个或多个换热器。温区内燃气放热都与相应的水或蒸汽加热的需求相适应,即满足温度对口原则;而受热面在各温区间的分布优化则依据梯级利用原则进行。例如,对于有 n 个等级的余热锅炉,其第 j 个温区内的能量平衡方程和传热方程为:

$$Q_{gi} \eta_q = \sum_{i=1}^n Q_{ji} \quad (5)$$

$$Q_{ji} = G_{di} (h_{ij, out} - h_{ij, in})$$

$$Q_{gj} = G_g (h_{gj, in} - h_{gj, out})$$

$$Q_{ji} = k_{ji} S_{ji} \Delta T_{ln, ij}$$

式中: Q_{gi} —第 j 个温区烟气放热量; Q_{ji} —第 j 个温区第 i 个换热器吸热量; G_g —烟气总量; η_q —余热锅炉当量效率; G_{di} —第 i 个换热器内工质流量; $h_{ij, out}$ 、 $h_{ij, in}$ —第 j 个温区第 i 个换热器出口、入口焓; $h_{gj, in}$ 、 $h_{gj, out}$ —第 j 个温区烟气入口、出口焓; S_{ji} —换热面积; $\Delta T_{ln, ij}$ —对数平均温差; k_{ji} —第 j 个温区第 i 压力等级换热系数。

所建模型既着眼于温区内总的热平衡,又强调受热面布置上的温度对口梯级利用原则,当同温度等级的换热器位置变换时,模型无需修改即可适用。当针对某选定机型时,还可根据余热锅炉的具体流程进行温区划分,然后将相关数据代入模型进行回归拟合,同时对有关控制变量进行精确选取(见表1)。从而使余热锅炉模型在兼顾不同机型通用的同时,能更精细地描述相关实例系统的实际情况。

表1 不同模型控制变量比较

	节点温差 $DT_p / ^\circ C$	接近点温差 $DT_a / ^\circ C$	排烟温度 $T_g / ^\circ C$	末级干度 X_{sb}
通用模型	8~20	5~20	80~130	> 0.85
精细模型 (选定炉型)	10±1	10±1	110	0.88

余热锅炉变工况时,其热力特性模型是以燃气轮机排气参数为自变量,在热平衡方程基础上建立的,而这时部件的几何尺寸和流程结构已经确定,主要是传热系数变化的问题。即模型需要对变工况下的相关系数进行修正,使得模型基于一个已知基准工况参数便可求出其它全部工况的性能参数。例如变工况时可对蒸汽换热系数 α_s 和燃气换热系数 α_g 进行以下修正(假设燃气成份变化不大时):

$$\alpha_s / \alpha_{s0} = (G_s / G_{s0})^m \quad (m=0.8) \quad (6a)$$

$$\alpha_g / \alpha_{g0} = (G_g / G_{g0})^m \cdot (T_g / T_{g0})^n \quad (m=n=0.6) \quad (6b)$$

式中: G_s —蒸汽流量; G_g —燃气流量; T_g —燃气温度;下标0—设计工况。

将温区概念与超结构方法相结合,对于系统建模是非常有意义的。超结构可使系统模型用于对不同流程方案的比较优选,并最终实现流程与参数的

同步优化。但是, 超结构模型常因太复杂而难以实现, 致使系统优化难以进行。采用温区概念建模很好地解决了以上问题, 即应用最基本的优化准则, 先排除那些温度不对口、不符合能量梯级利用的非优化方案。这样一方面使流程结构中各种换热器的排列组合方案减少到最小程度, 系统超结构大为简化, 并通过嵌入系统中的基本约束, 使独立变量个数大幅减少; 另一方面, 使模型更普遍适用于不同的候选部件和系统流程结构, 能更好地反映实际物理过程

及特性规律, 满足系统模拟分析特别是设计优化的需要。

2.2 蒸汽透平全工况特性模型

联合循环中的汽轮机通常采用调节阀处于全开状态的滑压运行, 而且由于余热锅炉能提供各温度等级的热量, 汽轮机一般不采用或较少采用抽汽回热装置, 因而使联合循环系统中的蒸汽透平模型与常规汽轮机模型有较大不同。

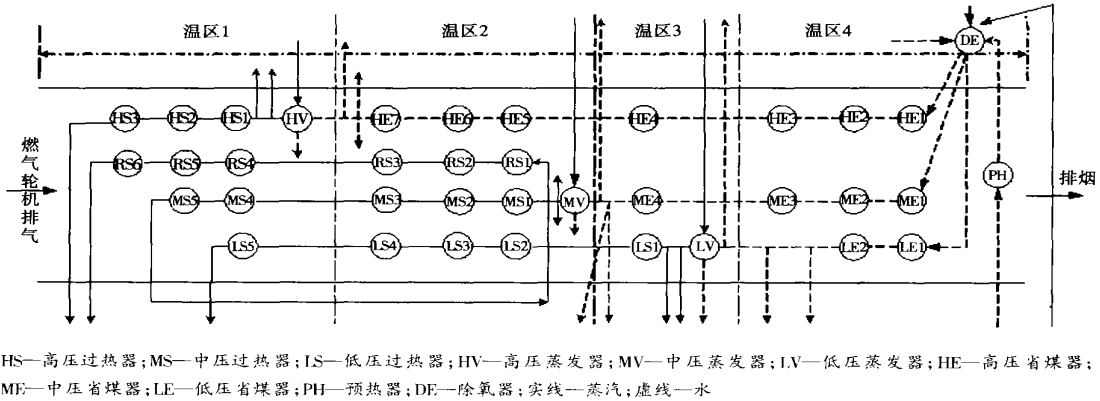


图 2 IGCC 系统中余热锅炉温区流程超结构图

对于工质流量不变各个蒸汽透平级组, 常用 Flügel 公式描述转速不变的亚临界流动的蒸汽透平通流特性。如蒸汽透平第 i 级和第 $i+1$ 级进汽点之间级组前后压力与蒸汽流量之间在变工况时的 Flügel 公式:

$$\frac{G_s}{G_{s0}} = \frac{\sqrt{\frac{(p_{si}^2 - p_{si+1}^2)}{p_{si,0}^2 - p_{si+1,0}^2}}}{\sqrt{\frac{T_0}{T_i}}} \quad (7)$$

式中: G_s —流过级组的蒸汽流量; T_i —一级前温度; 下标 0—基准工况; P_{si}, P_{si+1} —蒸汽透平第 i 级和第 $i+1$ 级进汽点之间级组前后压力。

而对流动状态变化大、级数较少的透平, Flügel 公式误差较大。为此, 我们提出准椭圆方程。它是通过理论分析与实验规律归纳相结合建立模型框架、应用数据处理手段整合已有实验数据求得相关系数而建立的:

$$\frac{G_s}{SS \cdot G_{s0}} \sqrt{\frac{T_s}{T_{s0}}} \sqrt{\frac{P_s}{P_{s0}}} = D \sqrt{\frac{(a_z + b_z \pi_t - \pi_t^2)}{(a_z + b_z \pi_{t0} - \pi_{t0}^2)}} \quad (8)$$

式中: π_t —透平膨胀比; D —转速修正系数; SS —透平通流面积调节系数; 常数 a_z, b_z 取决于透平级数、平均反动度以及工质热物性; 下标 0—基准点。

该准椭圆模型隐含更精细的热物理过程的变量关系, 可适用于不同级数、不同流动状态、转速一定或变化的透平, 精度有较大提高。当选定某机型时, 若有实测数据, 还可根据准椭圆方程(式(8))框架拟合出更精确的蒸汽透平全工况通用模型。

3 关键变量或因素对部件性能影响的通用精细修正

系统建模过程中, 在已有足够的高通用性典型部件全工况精细模型的基础上, 还需要充分考虑许多关键变量或因素变化对蒸汽系统及部件性能的影响。为此, 要建立关键变量或因素对部件性能影响的通用修正公式, 以便对部件模型进行精细修正。

3.1 透平高压缸效率随蒸汽初压变化的修正

蒸汽初压的变化将对透平高压缸效率产生一定影响, 随着蒸汽初压的升高, 汽轮机高压缸透平叶片变短, 缸内二次流损失及漏气量增大, 导致汽轮机高压缸效率下降^[9]。特别是联合循环系统中处于滑压运行的汽轮机组, 其蒸汽初压不断变化会对高压缸乃至整个汽轮机的内效率产生影响。目前, 现有汽轮机

特性模型中透平高压缸效率大都是根据经验取为某一定值($\eta_{sth} = \text{const}$), 模型比较粗糙。本文考虑蒸汽透平初压变化对漏气及二次流等损失的影响, 基于高压缸效率随蒸汽初压变化关系的统计规律, 建立蒸汽透平高压缸效率随蒸汽初压变化的修正公式:

$$\eta_{sth} = \eta_{sth0} [0.96 - \frac{a}{G_{sh0}} P_{sh} + b \frac{c}{1} P_{sh}^2] \quad (9)$$

式中: η_{sth0} —给定透平高压缸效率; l —动叶高度; P_{sh} —蒸汽初压; G_{sh0} —蒸汽流量; a 、 b —拟合系数; c —试验系数。

还对实例系统中的某汽轮机(设计初参数为 $p_{sh0} = 9.8 \text{ MPa}$, $t_{sh0} = 540 \text{ }^\circ\text{C}$)比较了应用公式(9)的汽轮机模型和 η_{sth} 为定值模型的计算结果。如图3所示, 随着透平初压的升高, 漏气损失和二次流损失随之增大, 造成高压缸内效率不断下降。 p_{sh0} 从 5.0 MPa 变化到 15.0 MPa , 高压缸效率由 85.55% 下降到 83.55% , 模型计算的 η_{sth0} 变化范围为 $0\% \sim 2\%$ 。

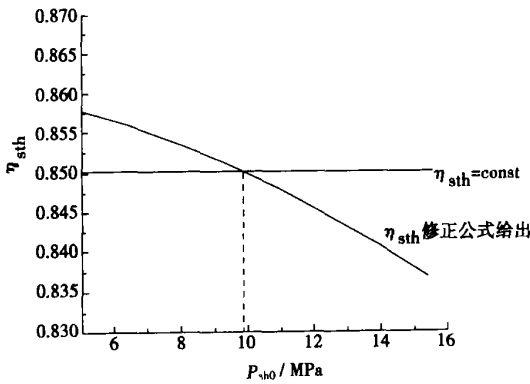


图3 透平高压缸效率随蒸汽初压变化关系 (各参数按最佳效率值选取)

3.2 透平低压缸效率随蒸汽干度变化的修正

透平末级干度是影响透平效率, 特别是透平低压缸效率的重要因素。目前, 多数汽轮机特性模型没有考虑透平末级干度变化对低压缸效率的影响, 仅简单地设定低压缸效率为一定值($\eta_l = \text{const}$)。也有模型采用理论方法推导蒸汽干度对透平低压缸效率影响的修正公式(10)¹⁹:

$$\eta_{ol} = (1 + \alpha_x) [\eta_{dry} (1 - \beta) + \eta_{dry} \beta (1 - (1/2 - x/2)^c)] \quad (10)$$

式中: α —重热系数; β —蒸汽膨胀过程中湿蒸汽段所占比例; x —末级出口蒸汽干度; c —经验系数, $c = 1.0 \sim 1.3$ 。

该公式物理意义明确, 比较准确地描述蒸汽透平低压缸效率随蒸汽干度的变化情况。但公式中涉及重热系数等参数, 在建模时难以获得, 因此应用不方便。

本文应用理论分析结合实验规律推导得到公式(11), 其中涉及的变量较少, 具有较高的精度和实用性:

$$\eta_l = \eta_{l0} [3 - (1 - x_{sb} / 2)^c] \{ 3 - (1 - x_{40} / 2)^c \} \quad (11)$$

式中: η_{l0} —选定基准低压缸效率 (0.89) (设计工况); c —经验系数; x_{sb} —低压缸末级干度; x_{40} —选定基准低压缸末级干度 (0.922) (设计工况); η_l —修正后的低压缸效率。

选用设计初参数为 $p_{sh} = 11 \text{ MPa}$, $t_{sh0} = 540 \text{ }^\circ\text{C}$ 的汽轮机实例对采用公式(11)和定干度值的两种汽轮机模型计算结果进行比较。图4为对实例进行分析的两种模型计算结果。可见, 末级干度 x_{sb} 从 100% 变化到 85% 时, 透平低压缸效率下降了近 3% , 两种模型计算的 η_{sl} 差别变化范围为 $0\% \sim 1.5\%$ 。

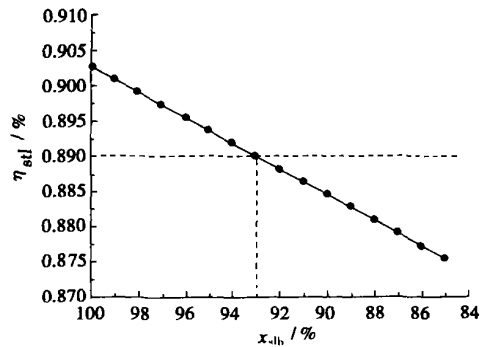


图4 透平低压缸效率随末级干度变化关系 (各参数按最佳效率值选取)

4 增强系统联接通用性和精细性的方法

系统模型的通用性和精细性不仅取决于各典型部件模型, 还与它们之间的联接方法密切相关, 即可借助于高通用性的模块间网络联接方法描述系统联接的逻辑关系^[5~9]; 借助于管道方程来精细量化模块间变量关联关系, 从而实现系统模块间的通用精细联接。

4.1 借助于高通用性的模块间网络联接方法

拟通过以下两种方法来描述蒸汽系统模型联接的逻辑关系。

4.1.1 模块间网络联接方程

网络联接方程法是基于一套规范的模块变量代号和网络连接代号, 通过预先设计好的连接程序来完成系统建模。借助于网络模型表达模块间的通用联接关系, 能够实现将各模块通用模型按系统的流程结构和具体特点进行组合建模, 即通过预先设计好的连接程序来组建模块间网络联接方程组。如令: 系统模块进出口变量代号: $X(Y(Z), K, I, J)$; 网络连接线路进、出口变量: $UX(Y, Z, K, I, J)$; 网络变量损失系数: XX_{UXY} ; 网络变量损失量: DX_{UXY} 。其中: X —工质变量; Y/Z —模块代号; K —进出口代号; I —工质代号; J —工质分流序号; U —管道网络代号。图 5 为 IGCC 蒸汽系统中 HRSG 与外界网络连接关系。例如 HRSG 与燃气轮机燃气管道网络(有向弧) U_{g45} 的网络联接方程(流量)为:

$$UG(4, 5, 1, 10, 1) = G(4, 2, 10, 1) \\ UG(4, 5, 2, 10, 1) = UG(4, 5, 1, 10, 1) - DG_{U_{g45}} \quad (12)$$

$G(5, 1, 10, 1) = UG(4, 5, 2, 10, 1)$
 式中: $UG(4, 5, 1, 10, 1)$ —燃气轮机至 HRSG 管道入口烟气流量; $G(4, 2, 10, 1)$ —燃气轮机出口烟气流量; $UG(4, 5, 2, 10, 1)$ —燃气轮机至 HRSG 管道出口烟气流量; $G(5, 1, 10, 1)$ —余热锅炉入口烟气流量; $DG_{U_{g45}}$ —燃气轮机至余热锅炉管道内烟气流量损失。

对其它管道网络有向弧 U_{w15} 、 U_{hs25} 等, 按同样方法都可得到相关的网络联接方程组模型。

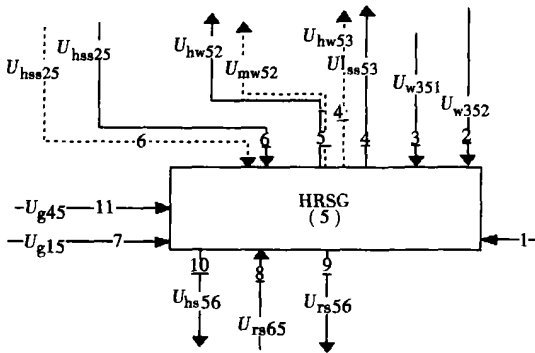


图 5 HRSG 子系统与外界物流交换示意图

4.1.2 系统流程超结构有向图法

我们采用图论的有向图来描述并建立蒸汽系统流程超结构。即对蒸汽系统中各单元模块模型用图的节点(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, 则蒸汽系统流程超结构可表示为节点和弧的集合 G :

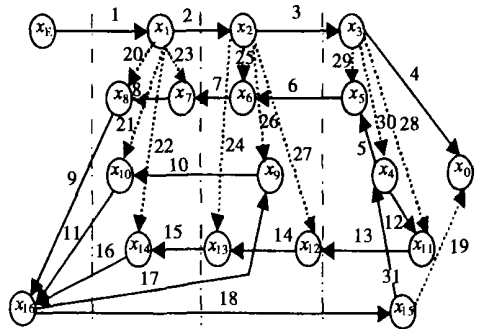
$$G = (X, U) \quad (13)$$

式中: $X = \{x_1, \dots, x_n\}$; $U = \{U_1, \dots, U_n\}$

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:

$$A = [a_{i,j}]_{n \times m} \quad (14)$$

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

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


(a) 有向图

	U_1	U_2	U_3	U_4	U_5	U_{26}	U_{27}	U_{28}	U_{29}	U_{30}
X_0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0
X_1	1	-1	0	0	0	0	0	0	0	0
X_2	0	1	-1	0	0	-1	-1	0	0	0
X_3	0	0	1	-1	0	0	0	-1	-1	-1
X_4	0	0	0	0	-1	0	0	0	0	1
X_{13}	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
X_{14}	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
X_{15}	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
X_{16}	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
X_E	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0

(b) 结构矩阵

图 6 蒸汽系统超结构的有向图及结构矩阵

图 6 为简化的蒸汽系统超结构的有向图(双压再热), 是应用图论的有向图和结构矩阵来描述蒸汽系统流程超结构, 它包含了联合循环中余热锅炉内主要部件及其与外界所有可能联接方案。例如, 当模型由应用于 IGCC 联合循环改为应用于常规联合循环时, 只需根据系统具体特点对超结构图中模块进行删减, 即对结构矩阵中相应系数取“0”值即可。

$$G_{HRSG} = (X_{HRSG}, U_{HRSG}) \quad (15)$$

式中: $X_{HRSG} = X = \{x_1, x_2, x_3, \dots, x_{16}, x_E\}$;

$U_{HRSG} = U = \{U_1, U_2, U_3, \dots, U_{30}\}$ 。

4.2 应用管道特性方程精细描述模块间变量关联关系

目前已有一些方法表达蒸汽系统结构和流体网

络的关联关系,但效果并不理想。如将管道损失分摊到两端模块上,系统建模时只需按流程来表述序贯连接关系,这样各单元模块模型的独立性和通用性都有所下降,且当流程结构改变时,往往需要重新建模。

为此,基于联合循环中蒸汽系统各单元之间多以管道连接,且其中压力和流量之间存在水力耦合关系的特性,可采用管道方程来精确定量表达模块间变量关联关系。

连续方程:

$$G_{j1} - G_{j2} = V_j \frac{d\rho_j}{d\tau} \quad (16)$$

能量守恒方程:

$$G_{j1} h_{j1} - G_{j2} h_{j2} - Q_j = V_j \frac{\rho_j (h_j - p_j / \rho_j)}{d\tau} \quad (17)$$

管道对环境的散热量:

$$Q_j = \alpha_j A_j (T_{wj} - T_a) \quad (18)$$

阻力方程:

$$p_{ji} - p_{j2} = \xi_j \frac{G_j^2}{\rho_j} \quad (19)$$

式中: G —工质流量, kg/s ; V —管道容积, m^3 ; ρ —工质密度, kg/m^3 ; h —工质比焓, J/kg ; p —工质压力, Pa ; α —放热系数, $\text{W}/(\text{m}^2 \cdot \text{K})$; τ —时间; A —管道外壁热交换面积, m^2 ; ξ —与管道粗糙度和几何尺寸有关的系数; T_w —管道壁温, K ; T_a —环境温度, K ; 下标: j —第 j 段管道平均值; j_1 —管道入口; j_2 —管道出口。

通过管道特性方程形式来表达相邻模块间关联关系,实现了对蒸汽系统各部件及子系统间联接数量关系的精确描述,既充分反映了管道内流动特性,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通用性。

5 结 语

本文研究了增强联合循环蒸汽系统模型通用性和精细性的途径与方法。包括:(1)应用建模新思路与方法建立高通用性的典型单元模块精细模型;(2)借助关键因素对部件性能影响的通用修正公式来精细修正单元模块模型;(3)应用模块间通用网络联接来描述系统联接的逻辑关系和应用管道方程来精确表达模块间变量关联关系。通过大量实例应用,验证了上述增强蒸汽系统建模通用性和精细性方法的有效性和可行性。

致谢:本文得到了徐钢博士的大力帮助。

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] 林汝谋,胡剑辉. 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.
- [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.
- [5] 林汝谋. 余热锅炉和汽轮机组合的蒸汽系统优化设计研究[R]. 北京:中国科学院工程热物理研究所,2000.
- [6] 江丽霞. 整体煤气化联合循环系统特性及其蒸汽系统综合优化的研究[D]. 北京:中国科学院,2000.
- [7] 林汝谋,金红光,段立强,等. IGCC中蒸汽系统流程与参数综合优化研究[J]. 燃气轮机技术,2003,16(2):1-8.
- [8] 胡剑辉,林汝谋. 联合循环中蒸汽底循环系统稳态全工况特性模型及计算分析[J]. 工程热物理学报,1997,18(3):277-280.
- [9] 王德慧,李政,徐大懋. 余热锅炉型联合循环蒸汽系统优化配置[J]. 燃气轮机发电技术,2001,3(4):6-11.
- [10] BOLLAND O. A comparative evaluation of advanced combined cycle alternatives[J]. ASME Journal of Engineering for Turbines and Power, 1991, 113(2): 190-197.

欢迎订阅 2006 年《热力发电》杂志

中国华能集团公司、中国大唐集团公司、中国华电集团公司、中国国电集团公司、中国电力投资集团公司 5 大发电公司联手重组的西安热工研究院有限公司与中国电机工程学会主办的热力发电(火电、地热、核电及其它新能源)技术科学杂志,创刊已 30 多年,技术水平高,影响范围广,在国内热能动力科学领域受到广泛好评,具有极高的声誉。

杂志每月中旬出版,全年 12 期,64 页,大 16 开,内文 80G 胶版纸精印,广告全铜板纸印刷。装帧精美大方,设计极具现代感。

邮发代号:52-103 联系信息:陕西省西安市兴庆路 136 号热力发电杂志社 邮编:710032

联系电话:029-82102475 E-mail:rlfdzsz@tpi.com.cn

高温 CO₂ 吸附/吸收剂的研究进展 = **Recent Advances in the Research of High-temperature CO₂ Adsorbents and Absorbents** [刊, 汉] / HUANG Yu-yu, LI Zhen-shan, CAI Ning-sheng (Key Laboratory for Thermal-energy Power Engineering and Thermal Sciences under the Tsinghua University, Beijing, China, Post Code: 100084) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2005, 20(6). — 557 ~ 561

Fossil fuel-fired thermal power plants are a major source of CO₂ emissions. The direct removal of the latter from high-temperature flue gases can contribute to a decrease in system energy losses. Hence, increasing attention has been directed to the research and development of high-temperature CO₂ adsorbents and absorbents. Analyzed and compared were the carbon-based adsorbents, zeolites and hydrotalcite-like compounds in high-temperature CO₂ adsorbents as well as lithium-based absorbents and calcium-based absorbents in high-temperature CO₂ absorbents. Chemically modified hydrotalcite-like compounds at a temperature in excess of 140 °C possess the highest CO₂ adsorbing capacity among high-temperature adsorbents. At a temperature of 600 °C or higher the precipitated calcium carbonate and CaO/Ca₁₂Al₁₄O₃₃ in calcium-based absorbents have a relatively high absorbing ability and cyclic reaction activity. In consideration of the existing problems regarding the above-mentioned high-temperature adsorbents and absorbents the authors have proposed as focuses of research the following items: high-temperature adsorption/absorption mechanism, the enhancement of the ability of cyclic adsorption/absorption of CO₂ and the improvement of related preparation technology. **Key words:** carbon dioxide, high temperature, adsorbent, absorbent

基于 Kohonen 神经网络的燃气轮机故障诊断 = **Kohonen Neural Network-based Gas Turbine Fault Diagnosis** [刊, 汉] / TIAN Zhi-guang, MENG Xian-yao (Automation Research Institute under the Dalian Maritime University, Dalian, China, Post Code: 116026), DONG Zhen-dong (Design Institute of Jinan Iron & Steel Co., Jinan, China, Post Code: 250002) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2005, 20(6). — 562 ~ 564

With respect to eight kinds of thermodynamic parameters-based gas turbine typical and common faults studied are the Kohonen neural network-based methods used for diagnosing gas turbine faults on the basis of diagnostic working principles and specific features of the Kohonen neural network. It has been found that the model of Kohonen network has the following merits: self-learning function, rapid operating speed and strong pattern-recognition ability. The Kohonen network is a relatively good neural network with characteristic features suitable for diagnosing various gas turbine faults. **Key words:** gas turbine, Kohonen neural network, fault diagnosis

联合循环中蒸汽系统建模的通用性和精细性 = **Versatility and Precision of the Steam System Modeling of Combined Cycle Systems** [刊, 汉] / SHAO Yan-jun, LIN Ru-mou, JIN Hong-guang (Institute of Engineering Thermophysics under the Chinese Academy of Sciences, Beijing, China, Post Code: 100080), YANG Yong-ping (Department of Power Engineering, North China University of Electric Power, Beijing, China, Post Code: 102206) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2005, 20(6). — 565 ~ 570

Theoretical modeling is the foundation for the characteristics research of combined cycle systems, while the versatility and precision of models constitute a central issue of modeling. The approaches for enhancing the versatility and precision of models were studied during the modeling of a steam system in a combined cycle. First, a new approach and method was

utilized to set up a unitary-module refined model of high versatility. Second, with the help of a general correction formula featuring the impact of key factors on component performance a refined revision was conducted for a model of unitary modules. Finally, by using the general means of network connection among modules the logic relationship of system connection is described with a pipe duct equation being used to effect a refined quantification of correlation relationship of variables among modules. A huge amount of engineering cases has demonstrated the validity and feasibility of the measures adopted for the enhancement of the versatility and precision. **Key words:** steam system, modeling, versatility, precision

振荡热管传热性能的试验设计与多因素分析 = Experimental Design and Multifactor Analysis of the Heat Transfer Performance of an Oscillating Heat Pipe [刊, 汉] / MA Yong-xi, ZHANG Hong (College of Mechanical and Power Engineering under the Nanjing Polytechnic University, Nanjing, China, Post Code: 210009) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2005, 20(6). — 571 ~ 574

A multitude of factors can affect the heat transfer in an oscillating heat pipe. The relationship between the heat-pipe heat transfer performance and the various factors is complicated and assumes a nonlinear character. By applying statistical techniques analyzed was the relationship between the heat-transfer performance of the oscillating heat pipe of a copper-water closed loop on the one hand and liquid filling rate, inclination angle and heat input on the other. First, tests were arranged by employing a central composite design method. Then, a fitting of the relationship between test variables and a response was achieved by using a least square method. Finally, through a variance analysis studied were three factors and the degree of their interacting influence. The results of the study indicate that the model of a second order equation can remarkably well reflect the relation between the heat transfer rate and the influencing factors. The three factors have a significant impact on the heat transfer rate with the inclination angle showing the most conspicuous impact. However, their interacting influence is not significant. Within the range of the study the optimum liquid-filling rate and the optimum inclination angle will be somewhat greater when the heating water flow rate undergoes an increase. **Key words:** oscillating heat pipe, central composite design, variance analysis

旋转圆筒表面对流质交换边界层实验研究 = Experimental Study of the Convective Mass-exchange Boundary Layer of a Rotating Cylindrical Surface [刊, 汉] / MA Hong-ting, ZHANG Yu-feng (Institute of Environmental Science and Engineering under the Tianjin University, Tianjin, China., Post Code: 300072), LUO Wan-jun (China National Air-to-air Missile Research Institute, Luoyang, China, Post Code: 471000) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2005, 20(6). — 575 ~ 578

Under the status of a stable convective mass-exchange the temperature field and concentration field of the porous-medium surface boundary layer of a horizontal rotating cylinder were measured by using a dry-wet bulb thermometer of micro thermocouple type. The results of the measurements indicate that the thickness of the boundary layer of the convective mass exchange will decrease with an increase in Re , and the thickness of the concentration boundary layer is greater than that of the temperature boundary layer. The temperature gradient of the heating mass-exchange boundary layer is smaller than that of the pure convective heat-exchange boundary layer. Rotation can produce a different impact on the convective mass-exchange at the consequent side and the inverse side. At the consequent side, due to the coincidence of the action direction of both the rotation-enforced convection and the natural convection, the result of this overlap has led to an increase in