

计算与仿真

热力系统数学模型自由度分析

(武汉水利电力大学) 周宇阳 胡念苏 樊天竞

[摘要] 利用自由度概念对火电厂热力系统进行了系统分析,提出了物流单元模型和结构模型自由度的求取及决策变量的确定方法,可以运用于流程模拟计算的数值特性分析。

关键词 热力系统 自由度 流程模拟

中图分类号 TM621.4 N94

1 前言

热力系统的安全性、经济性分析通常转化为对其单元设备和流程结构进行数学描述的数学模型的计算求解,这一过程称为流程模拟^[1]。流程模拟计算中处理的变量分为两类,一类是状态变量,它是计算过程中的中间变量;另一类是决策变量,又称设计变量或控制变量,它必须在设计计算中预先设定或者在实时计算中通过现场数据采集系统取值。决策变量的数目过多或过少都将使流程方程组无解,决策变量选择不当将使求解增加难度。自由度分析可以帮助我们选择确定决策变量。

2 自由度定义

热力系统的数学模型可以表示为:

$$F(x) = 0$$

式中, x 为 m 维向量, $x = (x_1, x_2, \dots, x_m)$

F 为 n 维向量方程 ($m > n$), $F = (f_1, f_2, \dots, f_n)$

该数学模型实际上为 m 个变量和 n 个模型方程构成的方程组,由数学知识可知, n 个不矛盾的独立方程可以而且只能求解 n 个未知变量。若该数学模型有确定的解,必须有 $m-n$ 个变量通过其它途径确定,这等于另外列出 $m-n$ 个方程。若定义模型方程组中的变量数与独立方程数之差值为自由度 D ,则

$$D = m - n$$

这 $m-n$ 个需预先确定的变量称为决策变量。

显然,自由度 D 有三种情况:

- (1) $d = 0$, 模型方程有解;
- (2) $d > 0$, 设定不足, 模型方程组无解;
- (3) $d < 0$, 设定过度, 模型方程组有不确定解

3 自由度分析

从功能上看,可以将热力系统数学模型分为物流、设备单元模型及系统结构模型三个层次。其中结构模型用来描述系统内的汽水流程,是流程模拟计算的依据;而物流与单元模型是构造结构模型的组成单元,其自由度分析是结构模型自由度分析的基础。

3.1 物流

流程模拟计算中的物流是指单元设备之间的汽水流。规定物流不发生化学变化,描述物流的物性参数仅与物流可能发生的分流、混合、因压损、散热引起的能量损耗等物理变化有关。一般取物流的质量流量变量以及其热力学状态变量作为物流变量。

物流的流量值决定了物流的一个自由度,物流的另一部分自由度由物流的热力学状态确定。由工程热力学可知,对于过热蒸汽,需要两个独立的热力学参数即可确定其热力学状态,此时物流的自由度为 3,为方便物流流动过程中的能量损耗分析及便于现场采集数据,通常取过热蒸汽的决策变量为流量值 G 、压力值 P 及温度值 T 。

表面式加热器疏水、混合式加热器出口给水等物流通常处于饱和水状态,此时其自由度为 2,取 G 和 R 、 T 中任意一个(实时计算中由现场测点布置情况确定)为决策变量;对于湿蒸汽,由于其状态通常出现在汽机排汽时,甚至末段汽轮机抽汽,若不计压损及散热,可以在末段汽轮机数学模型中仅考虑热

收稿日期 1997-06-25 收修改稿 1997-10-05

本文联系人 胡念苏 男 1952年生 教授 430072 湖北武昌珞珈山 武汉水利电力大学动力机械工程学院热能动力工程系 从事火电厂热力系统分析、模拟及监测方面的研究

功转换,取决策变量为流量值 G 和焓值 H ,此时其自由度为 2

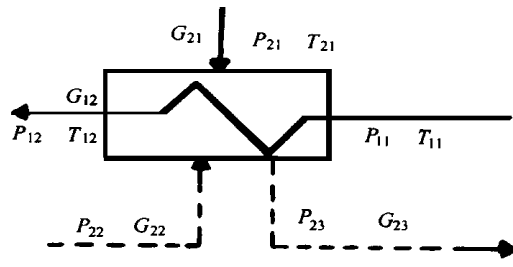


图 1 表面式加热器自由度分析简图

- 下标: 11 - 加热器进水,未饱和
- 12 - 加热器出水,未饱和
- 21 - 汽轮机抽汽,过热
- 22 - 前级加热器疏水,饱和
- 23 - 本级加热器疏水,饱和

3.2 单元模型
单元模型模拟单元设备中诸如混合、热交换、功转换等物理

过程,建模时以质量守恒、能量守恒、物性方程式等为依据。下面以表面式加热器为例,说明单元模型自由度的分析方法

图中标出了各输入输出物流的决策变量,列出模型方程式如下:

- (1) 质量平衡式: $G_{11} = G_{12}$
 $G_{21} + G_{22} = G_{23}$
- (2) 能量平衡式: $G_{12} \times H_{12} - G_{11} \times H_{11} = G_{21} \times H_{21}$
 $+ G_{22} \times H_{22} - G_{23} \times H_{23}$
- (3) 物性方程式: $H_{11} = f_{H11}(P_{11}, T_{11})$
 $H_{12} = f_{H12}(P_{12}, T_{12})$
 $H_{21} = f_{H21}(P_{21}, T_{21})$
 $H_{22} = f_{H22}(P_{22})$
 $H_{23} = f_{H23}(P_{23})$
- (4) 压力平衡式: $P_{23} = P_{21}$

独立方程总数为: $n = 9$

单元模型变量为 $P_{11} P_{12} P_{21} P_{22} P_{23}$
 $T_{11} T_{12} T_{21}$
 $H_{11} H_{12} H_{21} H_{22} H_{23}$
 $G_{11} G_{12} G_{21} G_{22} G_{23}$

单元模型变量总数为:

$$m = 18$$

所以,表面式加热器的自由度为:

$$D = m - n = 18 - 9 = 9$$

单元模型的决策变量必须选自输入输出物流的决策变量及满足流程模拟计算的需要。在运用计算机进行流程模拟计算时,是依照对结构模型进行回路切断后形成的一维序贯模块图中的模块序贯方向进行的,即沿主汽水流的流动方向^[2],因而入口给水

物流变量 P_{11}, T_{11}, G_{11} ,抽汽物流热力学变量 P_{12}, T_{12} 及入口疏水物流变量 P_{23}, G_{22} 分别通过前级计算可知;出口给水物流的热力学状态变量 P_{13}, T_{12} 可以根据现场数据采集系统获得实测值。确定了以上 9 个决策变量以后,就可以对该单元模型求解,求出其余的 9 个变量

在待定的变量中,各物流的焓值 H 仅在本单元模型的计算过程出现,不影响相邻的单元模型计算,可视为本单元模型状态变量,而 $p_{23}, G_{23}, G_{21}, G_{12}$ 等变量作为本单元模型的输出变量,可以作为相邻单元模型的决策变量供计算使用,视为结构模型状态变量。

3.3 结构模型

对于给定的热力系统,其设备单元的输入输出和设备单元之间物流的联系是确定的,结构模型的自由度就随之确定。由于单元模型的自由度是从结构模型中隔离出来分析的,考虑到单元模型之间的物流联系,相应地应该增加等同于该物流自由度数目的联接方程

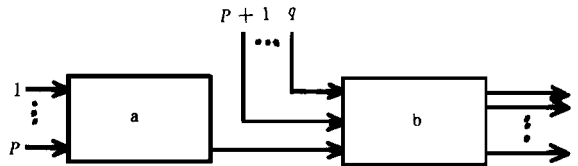


图 2 由两个单元模型 a b 构成的结构模型图

如图 2 所示,设单元模型的自由度分别为 D_a, D_b ,物流的自由度为 D_c ,则该结构模型的自由度 D 为:

$$D = D_a + D_b - D_c$$

因而,热力系统结构模型的自由度 D^S 等于组成该系统的各个单元设备对应的单元模型的自由度之和 D^U ,减去各单元设备之间联接流股对应的物流的自由度之和 D^L ,即:

$$D^S = D^U - D^L$$

3.3.1 实例分析

对于图 3 所示某热力系统流程简图,构造出相应的结构模型图,如图 4 所示。建模时假定混合式加热器出口给水及表面式加热器疏水均为饱和状态,末级抽汽为过热状态,末段汽轮机排汽为湿蒸汽。另为方便起见,不计因压损、散热造成的能量损失。分析各单元模型的自由度以及各联接物流的自由度,图 4 中标示 1 2... 13 的物流具有三个自由度,标示 A B C 的物流具有两个自由度。

各单元
模型自由度
之和为(从
ST1 模块开
始沿主汽水
流流动方
向):

$$\begin{aligned}
 D^U &= 6 \\
 + 6+ 6+ 5 \\
 + 5+ 5+ 7 \\
 + 7+ 4+ 7 \\
 + 5 &= 63
 \end{aligned}$$

各联接
股自由度
之和为:

$$\begin{aligned}
 D^L &= 13 \\
 \times 3+ 3 \times 2 \\
 &= 45
 \end{aligned}$$

从而该
热力系统结
构模型的自
由度为:

$$\begin{aligned}
 D^S &= D^U \\
 - D^L &= 63 - \\
 45 &= 18
 \end{aligned}$$

根据自
由度定义,欲

使结构模型有解必须预先确定 18 个结构模型决策变量。结构模型决策变量基于各单元模型的决策变量,但并不是其简单组合,而必须依据流程模拟计算的要求并以满足设计或现场实际为条件进行选择,其现实意义为确定数据采集的现场测点;选择时还须注意到以下两点:

- (1) 变量之间要相互独立。例如对于混合单元 MX(下标参见图 1),不能同时选择 G_{1k} 、 G_{12} 和 G_{21} 作为决策变量,因为它们之间是相互关联的: $G_{11} + G_{21} = G_{12}$
- (2) 不可逆函数的输出变量不能作为决策变量。例如混合单元中的压力平衡式 $P_{12} = \text{Min}(P_{11}, P_{12})$ 为不可逆,故 P_{12} 不能作为决策变量。

图 5 示出了对图 3 所示热力系统进行流程模拟计算所必需的基本测点^[3,4],其中的 16 个 R T 测点是结构模型决策变量中热力学状态变量的最简测点,此外单纯增加 R T 测点并不能增加独立方程数

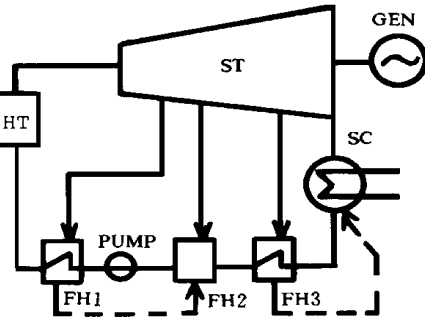


图 3 热力系统流程简图

ST: 汽轮机单元 PUMP: 给水泵单元
GEN: 发电机单元 SC: 凝汽器单元
HT: 锅炉单元 FH: 加热器单元

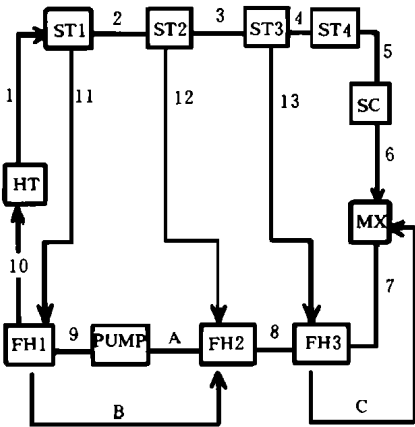


图 4 热力系统结构模型图
MX: 汽水混合单元

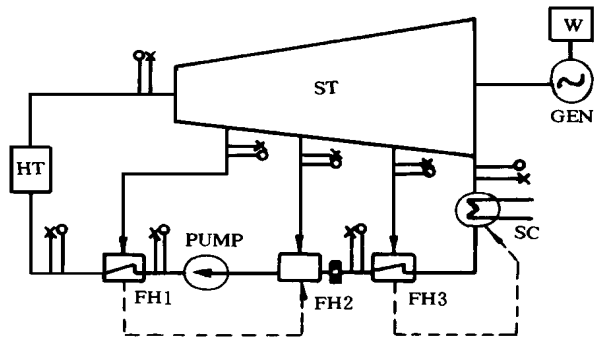


图 5 流程模拟计算基本测点参考图

目;结构模型的决策变量还包括辅助的功率测值、流量测值

将图 5 中 18 个测点的测值作为已知的决策变量,相当于增加了 18 个独立方程,使该热力系统的自由度为 0;不计物流的物性方程式,其结构模型成为一个线性方程组;同时由于热力设备单元稳态工作时各物流变量值的稳定性,可知数学模型的解存在且唯一。

3.3.2 推广

物流热力学状态的设定对结构模型的自由度没有直接的影响,因为物流状态的改变所引起的单元模型自由度变化与联接物流的自由度变化相互抵消,不影响结构模型自由度的数值。例如假设混合式加热器出口给水为过热状态,则结构模型的自由度为 $D^S = D^U - D^L = 64 - 46 = 18$ 而单元模型的自由度分析结果却直接影响到结构模型的自由度分析以及决策变量的设定。例如,在未段汽轮机单元模型中,假定该级与上级汽轮机相对内效率相同,以延长上级汽轮机热力过程线的方式确定排汽状态点,相当于给本单元模型增加了一个独立方程,此时 $D^S = 17$,可以取消功率或流量测量中的任意一个,依然可以保证流程模拟计算有唯一解;若再假定锅炉出口主蒸汽流量值为 1, $D^S = 16$,那么同时取消功率和流量测点可以计算得出各段抽汽的相对抽汽率。

当流程模拟计算运用于在线分析时,主蒸汽流量、调节级后温度、末级抽汽热力学状态以及排汽干度等都是难以实测的参数,在保证结构模型的自由度为 0 的前提下,通过适当地增加功率、流量测点以及安排控制参数等方式,可以得出这些参数的计算值

(下转第 279 页)

壁温的决定因素, 燃烧器出口壁温与炉温呈线性关系(图 3)

为了检验上述模型和计算结果的可靠性, 通过实验进行了验证: 用 EU-2 热电偶测量了华能南京

表 1 燃烧器各喷嘴出口实测平均壁温 ($^{\circ}\text{C}$)

状态	1	4	9	12	13	16
250 MW	926	868	983	1005	975	1084
200 MW	865	830	904	912	893	954

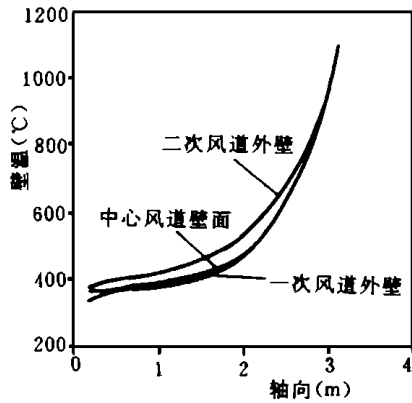


图 2 燃烧器轴向温度分布 (炉温 1500°C)

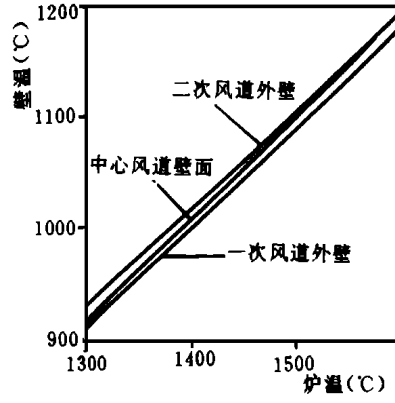


图 3 燃烧器出口壁温与炉温的关系

电厂旋流燃烧器出口壁温, 实验测量结果见表 1 (冷却风温在 350°C 左右) 电厂 225 MW 负荷时, 燃烧器区域的炉温为 1450°C 左右, 计算燃烧器出口壁温与实测平均壁温相近, 从而说明了前面的假设是合理的

4 结论

(1) 用本文给出的数学模型可以计算出燃烧器的轴向温度分布, 可用于指导燃烧器材料的选择, 并可指导燃烧器的安装, 且有足够的精度。

(2) 在电厂正常运行范围内停用的燃烧器如不采取任何保护措施, 其出口温度一般在 1000°C 以上。

(3) 燃烧器出口壁温和燃烧器区域炉温成线性关系。

(4) 进行燃烧器壁温数值计算时, 可忽略壁面导热的影响。

参考文献

- 1 卞伯绘 编著. 辐射换热的分析与计算. 清华大学出版社, 1988
- 2 郭宽良等 编著. 计算传热学. 中国科学技术大学出版社, 1988
- 3 Robert Segel John R. Howell. Thermal radiation heat transfer. Hemisphere Publishing Corporation, 1992

(上接第 276 页)

4 结束语

自由度是为表征热力系统数学模型数值计算特性而引进的参量, 是对热力系统进行系统分析的有力工具, 通过自由度分析, 可以为决策变量的选择提供具体指导, 能够有效地避免数据冗余或者因数据采集不当造成的流程模拟计算无解, 这种方法已经在热耗的在线计算以及汽轮机相对内效率的监测计算等软件的研究和开发中得到了广泛的应用。因

篇幅所限, 其应用部分拟在另文叙述

参考文献

- 1 杨冀宏, 麻德贤. 过程系统工程导论. 轻加工出版社, 1989. 9
- 2 周宇阳, 胡念苏. 热力系统流程模拟计算的模块序贯及动态收敛技术. 热力发电 (修改定稿待发表)
- 3 Kwauk M. A System for counting variable in separation processes. AIChE J., 1956(2): 240
- 4 吴季兰. 汽轮机试验技术. 水利电力出版社. 1994. 10

(渠 源 编辑)

流化床锅炉水冷绞龙冷渣器的试验研究 = **Experimental Study of a Water-cooled Spiral Conveyance Type Ash Slag Cooler for a Fluidized Bed Boiler** [刊,中]/Chen Hanping, Lu Jidong (Central China University of Science & Engineering) //Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 1998, 13(4). - 264~266

On the basis of the industrial operation and testing of a water-cooled spiral conveyance type ash slag cooler an analysis is conducted of the movement pattern of ash slag particles in the water-cooled spiral conveyer, and a formula for calculating the ash slag transport quantity given along with a heat transfer factor. Moreover, an analytical exploratory study of the ash slag transport and heat transfer characteristics has brought forth a number of useful conclusions and provided a major basis for the research and development, design improvement and wide application of such ash slag coolers. Key words water-cooled spiral conveyer, particle movement, ash slag transport, heat transfer characteristics

流化床气固传热特性的实验研究 = **Experimental Study of a Fluidized Bed Gas/Solid Heat Transfer Characteristics** [刊,中]/Ai Yuanfang, et al (Southern China Polytechnical University) //Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 1998, 13(4). - 267~270

An effective heat transfer factor has been derived through a simple analysis of fluidized bed gas/solid heat transfer characteristics and on the basis of the gas temperature profile of a steady-state operating condition active region. The experimental results are in good agreement with traditional empirical values. This justifies the rationality of the gas/solid heat transfer characteristics analysis and the feasibility of calculating a fluidized bed gas/solid effective heat transfer factor, thus providing helpful guidance for the study of fluidized bed gas/solid heat transfer characteristics. Key words fluidized bed, temperature profile, gas/solid heat transfer characteristics, effective heat transfer factor

PG9171E燃机余热锅炉的改造设计 = **Modification Design of a Heat Recovery Boiler for PG9171E Gas Turbine** [刊,中]/Ye Jianfei, Zhang Xiaohong (Shenzhen Nanshan Cogeneration Power Co. Ltd.) //Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 1998, 13(4). - 271~273

This paper describes the modification design of a heat recovery boiler for a large-sized gas turbine. The design features low weight, small physical size, fine cost effectiveness, low cost and innovative technology. Derived from engineering practices these design approaches can serve as a guide during the design of heat recovery boilers for use on gas turbines. Key words gas turbine, heat recovery boiler, modification design

热力系统数学模型自由度分析 = **Degree of Freedom Analysis of a Mathematical Model for a Thermodynamic System** [刊,中]/Zhou Yuyang, Hu Niansu, Fan Tianjing (Wuhan University of Water Resources and Electrical Power) //Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 1998, 13(4). - 274~276, 279

By utilizing the conception of the degree of freedom the authors have performed a systemic analysis for a thermal power plant thermodynamic system, presenting a method for evaluating the degree of freedom of a physical stream unit model and structure model as well as for determining decision variables. The above-cited method can be employed for the numerical characteristics analysis of on-line flow sheet analog calculation. Key words thermodynamic system, degree of freedom, flow sheet simulation

旋流燃烧器壁温计算数学模型 = **A Mathematical Model for Calculating the Wall Temperature of a Swirl Burner** [刊,中]/Sun Zhigao, Zhang Yongfu (Southeastern University) //Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 1998, 13(4). - 277~279

A brief description is given of a mathematical model for the axial wall temperature profile of a swirl burner. The use of this model allows one to evaluate the relationship between the burner outlet wall temperature and furnace temperature. The rationality of the mathematical model has been verified through a number of tests. Key words burner, wall temperature, radiation, mathematical model