

# 火电厂热力系统热平衡的拓扑算法

岳 洪

(重庆大学)

〔摘要〕 热力系统拓扑分析的热平衡计算方法是火电厂热平衡计算中最成功的计算机处理方法。本文首次提出并深入研究了这一问题,对方法的理论基础、软件设计中的有关问题和应用前景进行分析。该文是对热力系统热平衡计算的全新认识。

关键词 热力系统 拓扑分析 热平衡

分类号 O189 TK 284.1

## 0 前言

火电厂热力系统热平衡计算是热力工程的一项重要技术工作,其基本原理是系统的质量守恒方程和能量守恒方程。火电厂设计、技术改造以及运行优化等方面均需对火电厂热力系统作详细的热平衡计算。由于机组容量不断增加,热力系统也越来越复杂,火电厂热力系统的热平衡计算变得越来越繁琐,手工计算既费时又易出错。随着计算技术的发展以及计算机的大量普及,采用计算机来计算火电厂热力系统热平衡问题是必然的。国内外围绕开发这类软件作了大量工作<sup>[1]</sup>,主要困难是通用性问题。尽管通过分析热力系统的通常连接方式,可提出一些较为通用的方法<sup>[2,3]</sup>,但这些方法均引入了一些系统连接方式上的假定,如单元制、加热器疏水逐级自流等等,仍然限制了应用范围。本文提出的拓扑分析计算,不引入对系统连接的任何假定,可以应用于任意的热力系统连接方式,此时热力系统的连接方式将以变量形式被带入计算机。系统连接方式的描述必然应用拓扑分析的结果,这是现代数学在传统问题上的应用实例。

## 1 热力系统的拓扑分析

### 1.1 几个定义

热力系统由热力设备(换热、做功、压缩、减温减压、混合、分离等)及相应的管道组成。热力系统的拓扑图指的是将所有热力设备视为一点,相应的管道视为一线,则由此而构成的网络图。若考虑工质在管道内的流动方向,则构成了有向拓扑图。

### 1.2 热力系统拓扑关联矩阵

若有  $m$  个设备,它们由  $n$  根管道相连接 ( $m < n$ ),定义关联矩阵  $T(m \times n)$  表示  $m$  台设备(行)与  $n$  根管道(列)的连接关系。

$$T = [T_{ij}] \quad \begin{matrix} i = 1, 2, \dots, m \\ j = 1, 2, \dots, n \end{matrix} \quad (1)$$

其中

$$T_{ij} = \begin{cases} 0, & \text{若管道 } j \text{ 与设备 } i \text{ 不相连;} \\ +1, & \text{若管道 } j \text{ 内工质流向设备 } i \\ -1, & \text{若管道 } j \text{ 内工质流出设备 } i \end{cases}$$

显然,关联矩阵是系统拓扑图的数学表述,也是热力系统连接方式的表述。

关联矩阵是由  $\pm 1$  组成的稀疏矩阵。若分析关联矩阵的秩,我们会发现  $T$  不是满秩矩阵,这是因为

$T$  的每一列均只有两个非零元素, + 1和 - 1,其物理意义即是每一根管道均同两个设备相连接,工质在内从一个设备流出(其值为 -1)进入另一设备(其值为 + 1) 既如此,将  $T$  内各行相加,其结果必然为零。故  $T$  为降秩矩阵。又由于每一列只有两个元素,当去掉任一行后,某些列就只剩下一个非零元素,它不可能由其他行组合而成,故关联矩阵的秩为  $(m - 1)$  认识到这一点对程序设计很重要。

## 2 关联矩阵与热力系统的热平衡

火电厂热力系统热平衡计算的目的是确定在给定负荷或给定燃料量情况下系统各处汽、水流量及热经济指标

设  $D_j$  代表管道  $j$  内的流量,  $h_j$  代表其内工质的比焓,定义向量  $d$  及矩阵  $H$

$$d = [D_1, D_2, \dots, D_n]^T$$

$$H = \text{Diag}[h_1, h_2, \dots, h_n]$$

$$T \cdot d = 0 \tag{2}$$

即为热力系统的质量守恒方程

定义  $f = [f_1, f_2, \dots, f_m]^T, f_i$  为设备  $i$  中工质与环境的能量交换。则

$$T \cdot H \cdot d = f \tag{3}$$

代表了热力系统的能量方程式

方程 (2) 的物理意义是流入节点的流量等于流出节点的流量(代数和为零)。热力系统中有些设备如面式加热器等,按此法考虑其质量方程时,信息有丢失。如图 1 所示,若将面式加热器视为一点,则按式 (2) 可给出  $D_1 + D_3 = D_2 + D_4$ , 它丢失了  $D_1 = D_2$  或  $D_3 = D_4$  的信息。这是因为表面式换热器其内工质不混合,只有能量交换,无质量交换,从质量平衡来讲应属两个节点,但为了使其能量方程简单,仍将其考虑成一个节点,只是凡遇到表面式换热设备,质量方程均需补充一个。

如前所述,关联矩阵  $T$  的秩为  $(m - 1)$ ,故质量方程式中关联矩阵应以去掉任何一行后的满秩矩阵代入。

式 (2) (3) 及有些设备补充的质量方程,便构成了整个热力系统热平衡计算完备的方程组,其中,关联矩阵起了非常重要的作用。

## 3 简例

考虑如图 2 所示的简单系统,将设备编号 1, 2, ..., 6, 管道编写为 ①, ②, ..., ⑦。显然,系统连接的关联矩阵

$$T = \begin{matrix} & \textcircled{1} & \textcircled{2} & \textcircled{3} & \textcircled{4} & \textcircled{5} & \textcircled{6} & \textcircled{7} \\ \begin{matrix} 1 \\ 2 \\ 3 \\ 4 \\ 5 \\ 6 \end{matrix} & \left[ \begin{array}{ccccccc} -1 & & & & & +1 & \\ +1 & -1 & & & & & -1 \\ & +1 & -1 & & & & \\ & & +1 & -1 & & & \\ & & & +1 & -1 & & +1 \\ & & & & +1 & -1 & \end{array} \right] \end{matrix}$$

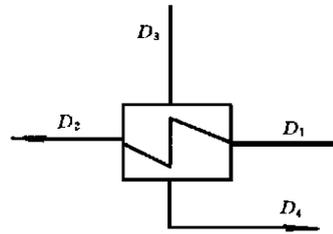


图 1

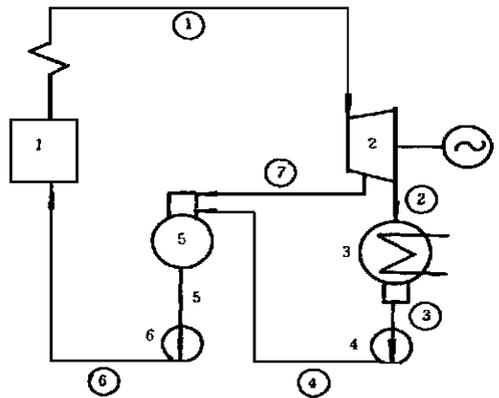


图 2

任意去掉  $T$  中的一行后,代入式 (2) 得质量方程,由于该系统中没有表面式加热器,质量方程没有丢失。由此可得 5 个质量方程。代入式 (3) 后可得 6 个能量方程式。对应的 11 个未知数分别在①~⑦管道内流量  $D_1 \sim D_7$ , 加入锅炉有效热量  $Q$  或汽机功率  $N$  (两者必须先知其一), 给水泵和凝结水泵需加入电功率及凝汽器的换热量。

如已知的是汽机功率  $N$ , 则 11 个方程如下:

$$\begin{aligned} & -D_1 + D_6 = 0 \\ & D_1 - D_2 - D_7 = 0 \\ & D_2 - D_3 = 0 \\ & D_3 - D_4 = 0 \\ & D_4 - D_5 + D_7 = 0 \\ & -D_1 h_1 + D_6 h_6 = Q_1 \\ & D_1 h_1 - D_2 h_2 - D_7 h_7 = N \\ & D_2 h_2 - D_3 h_3 = Q_3 \\ & D_3 h_3 - D_4 h_4 = Q_4 \\ & D_4 h_4 - D_5 h_5 + D_7 h_7 = 0 \\ & D_5 h_5 - D_6 h_6 = Q_6 \end{aligned}$$

将  $Q_1, Q_3, Q_4, Q_6$  移至左边即可进行求解, 解算出  $Q$  为正时, 表明循环向环境释放热量,  $Q_i$  为负时, 则从环境中吸取热量。

整个求解是封闭的。

## 4 拓扑分析热平衡计算与传统方法比较的特点

传统计算方法属串行方法, 其基本特点是信息流与计算顺序方向一致。一旦系统的拓扑结构发生变化, 计算顺序就要改变, 从而限制了这一方法的通用性。串行方法的优点是占用机器内存少, 计算速度快, 用户输入的信息少, 这是因为该方法已将系统结构大致确定, 用户只需输入诸如有几级回热, 哪一级是除氧器、是否再热等信息, 不需要对系统结构作详细描述。

### 4.1 输入量大

拓扑分析法是并行方法, 通用性好, 对系统结构无任何限制。但本方法要求输入的信息量很大。这些输入信息包括两部分, 一是系统连接关系的详细描述; 二是热力参数赋值。显然, 不论何种方法, 热力参数赋值都是等同的, 但拓扑分析法则要求输入系统

结构。故研制出简便的输入方式则成为本方法推广应用的关键之一。

为此有些研究者专门开发了一种对系统拓扑结构描述的语句, 如文献 [4], 但这种语句的可读性不强, 使用不方便。受到一致公认的较好的方法是实现图形化预处理, 用户通过图形模块的拼装完成热力系统结构的输入。

笔者现有程序采用的是另一种输入方式, 用户首先对系统设备和管道进行编号, 然后以管道编号为顺序, 分别输入与该管道相连接的设备号码。例如, 编号 40 的管道连接着设备 21 和 25, 并且工质在管道内是从 21 流向 25, 则输入

40, 21, 25

依此类推, 便可完成系统结构的描述。例如上述简例中系统结构的描述为

1, 1, 2  
2, 2, 3  
3, 3, 4  
4, 4, 5  
5, 5, 6  
6, 5, 1  
7, 2, 5

经实践证明这种方法易读, 程序实现简单。

### 4.2 占用机器内存大, 算法要求高

例如, 对一台国产 N200 机组热力系统进行详细计算时, 程序要解算一个近百阶的非线性方程组 (化为线性迭代), 算法要求高。这些方程组中, 系数矩阵元素大多为零, 为此, 采用稀疏矩阵技术是减小内存占用量和提高运算速度的有效方法。

## 5 结论及应用前景分析

本方法及开发的软件有以下特点

(1) 通用性: 用户能利用该程序作任何一个火电厂热力系统计算, 而无须改变程序结构。

(2) 方便性: 用户使用本软件仅需了解其定义的热力系统结构和初始热力参数, 不要求用户懂得热力计算的原理和步骤。

(3) 可扩充性: 不仅可用于火电机组, 也可用于其他热力系统, 若将水和水蒸气性质程序独立出来,

(下转 392 页)

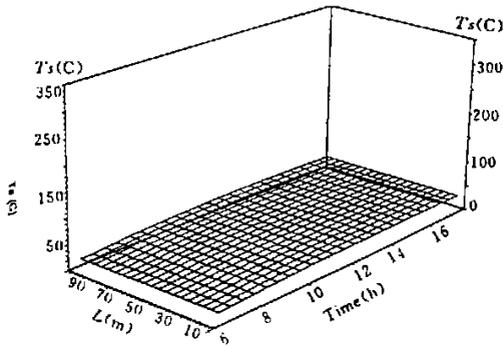


图 7 保温层外表面温度  $T_s$  沿长度  $L$  和  
随时间的分布

3.4 在切换至热用户之前,吸收器各部件进出口温差较小,切换至热用户后,吸收器各部件进出口温差明显加大;

3.5 由图可见腔体壁温  $T_{ic}$  比管簇温度  $T_b$  高  $10^{\circ}\text{C}$  以上,管簇温度比工作介质温度  $T_{in}$  高  $4^{\circ}\text{C}$  左右。

## 4 结语

作者简介 乔力,男,1963,博士生,主要从事太阳能、暖通工程方面的研究。现工作在中国科技大学。(通讯处 230026 安徽合肥 中国科大 13系)

(上接 387页)

则还可用于其它工质。

(4)快速性:程序计算时间不长,一般几分钟内即可完成。

本方法具有广泛的适应性,即使对于同一机组的计算,其允许考虑程度不同。细致的考虑可涉及火电机组的任一根小管道,如蒸汽管道疏水、排污管、轴封漏汽等;粗略的考虑可只涉及机组原则性热力系统,而计算程序没有任何变化,只是输入的拓扑结构发生变化。因此,利用同一程序可以进行不同程度上的计算,这些都由用户根据自身需要确定,从而使该方法及这种软件具有广泛的应用前景。

作者简介 岳洪,男,1964年生,讲师,主要研究现代火电厂热力系统;蒸汽—燃气联合循环;热电联产;动力设备仿真等。曾先后在国内外杂志上发表论文十余篇。现重庆大学热能工程学任教。(通讯处 400044 重庆沙坪坝)

通过程序演算证明四维热阻、热容网络对腔体式吸收器—槽形抛物镜太阳能集热器系统的动态仿真是可行的,其结果与国内外的类似装置运行参数相仿。四维热网络模型把传统模型中的系统部件的“集总”热容法发展成对该部件众多分节点热容的求解,因而极大地提高了动态仿真精度,使“集总”热容法随时间的一维动态仿真,扩充为沿轴向一维、沿径向二维和随时间一维的四维动态仿真;由于忽略了除工作介质以外的其它部件沿轴向的传热过程,从而又极大地简化了模型计算量。

四维热网络可方便地运用于其它以传热为主要能量转换形式的闭式循环能源工程进行动态仿真,如对闭式循环的锅炉供热系统、压缩式制冷循环、供热或供冷管路等进行动态仿真,对于以可用能为主要能量转换形式闭式循环能源工程,如果辅之以流场计算模,则仍有望对其进行动态仿真。

## 参 考 文 献

- 1 葛斯石等.太阳能工程——原理和应用,北京:学学期刊出版社,1988

## 参 考 文 献

- 1 Kam W Li. Power plant system design. John Wiley & son Ltd. 1985
- 2 郭炳然. 火电厂计算机分析,水利电力出版社,1989
- 3 岳洪. 回热系统通用热平衡及其应用. 汽轮机技术, 1990, 32(3)
- 4 Perz E. A computer method for thermal power cycle calculation. ASME Journal of Engineering for Gas Turbine and power, 1991, 113
- 5 Sonnenschei H. A modular optimal calculation method of power station energy balance and plant efficiency. ASME Journal of Engineering for Power. 1982, 104

sation heat exchange, heat exchange model, correlation

穿孔金属薄板温度场和导热热阻的测定与计算 = **The Determination and Approximate Calculation of Perforated Metal Sheet Temperature Field and Heat Conduction Thermal Resistance** [刊, 中] / Yang Zifen, Hong Bo, et al (Shanghai Jiaotong University) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 1997, 12 (5). - 381- 384

Instead of the rather complicated analytical method and computer-aided numerical method for solving two-dimensional steady-state heat conduction problem of perforated metal sheets this paper proposes an electroconductive paper-based thermoelectrical analogy method. The said method has been used to solve the temperature field and heat conduction thermal resistance of six kinds of typical perforated metal sheets in a simple and speedy manner and also with a relatively high accuracy. The derived approximate calculation formula features rationality, simplicity and a relatively high precision, which contribute to its practical value for making engineering evaluations. **Key words** metal sheet, steady-state heat conduction, thermoelectrical analogy, approximate calculation

火电厂热力系统热平衡的拓扑算法 = **Topology-based Calculation of the Thermodynamic System Heat Balance of a Thermal Power Plant** [刊, 中] / Yue Hong (Zhongqing University) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 1997, 12(5). - 385- 387

The thermodynamic system heat balance calculation method based on a topological analysis is considered as the most successful computer-based method for calculating thermal power plant heat balance. For the first time this paper makes an in-depth study of this subject, including an overview of the said method, related issues in software design and an analysis of the prospects of its application. It provides a totally new view point in thermodynamic system heat balance calculation. **Key words** thermodynamic system, topological analysis, heat balance

叶栅风洞试验微机监控系统 = **A Computer-based Monitoring System for Turbine Cascade Wind Tunnel Tests** [刊, 中] / Liu Wendong, Sun Zhaoqiang, et al (Harbin NO. 703 Research Institute) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 1997, 12(5). - 393- 394

**Key words** turbine cascade wind tunnel test, microcomputer, monitoring system

**Edited and Published** by Harbin 703  
Research Institute and Editorial Staff  
of this Journal

**Printer** Printing House of Harbin Institute of Technology

**Address** P. O. Box 77, Harbin, China

**Tel** (0451) 5650888-2092

**Fax** (0451) 5662885

**Post Code** 150036

**Periodical Registration** ISSN 1001-2060  
CN 23-1176 / TK

**Distributed by China International**

**Book Trading Corporation**

**P. O. Box 399, Beijing, China**