

直流锅炉启动分离器数学模型与仿真*

王宗琪 王陶 (华北电力大学)

章臣樾 (东南大学)

〔摘要〕 从对象工作过程的机理出发,建立了直流锅炉启动分离器的解析数学模型,在此基础上建立对象的仿真模型并进行仿真试验,验证了所建模型的正确性,为进一步建立直流锅炉机组全工况数学模型提供了必要条件。

关键词 直流锅炉 启动分离器 数学模型 仿真

分类号 TK223 TM621

0 引言

直流锅炉因其启、停速度快,负荷适应性好,适用于各种参数等特点,在现代化大型火电厂的装机容量不断增加,已成为我国电力生产的主力机组之一。然而,由于设计、制造、运行管理等多方面的原因,使已投运的这类机组存在着这样或那样的问题,其主要原因之一是设计人员和运行管理人员对设备特性,尤其是动态特性了解不够。解决这一问题的主要途径是应用既安全又经济的仿真方法。不论是工程分析仿真,还是运行培训仿真,前提是要建立描述对象特性的数学模型。对直流锅炉数学模型的研究过去也只局限于本体部分^[1-3]。本文从对象工作过程的机理出发建立启动分离器的解析数学模型;在此基础上建立仿真模型,进行仿真试验;然后通过仿真结果对所建模型做出评价。为建立直流锅炉机组全工况动态模型提供必要条件。

1 数学模型

启动分离器的形状和结构类似于一只低、中压汽包,不同之处是启动分离器在投运过程中作为扩容产汽之用,并且其产生的蒸汽除了通往过热器外,还可通往凝汽器、除氧器、高压加热器或再热器等,因此,在建立模型时要充分考虑这些特点。图1为启

启动分离器的简化物理模型。

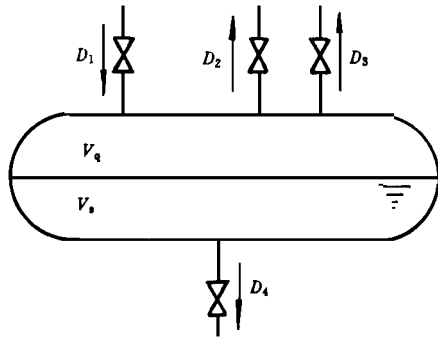


图1 启动分离器简化物理模型

D_1 — 进入分离器的工质流量, kg/s;

D_2 — 由分离器通往过热器的蒸汽量, kg/s;

D_3 — 由分离器通往凝汽器、除氧器、高压加热器等处的蒸汽量, kg/s;

D_4 — 启动分离器排水量, kg/s;

V_q — 启动分离器汽空间容积, m^3 ;

V_s — 启动分离器水空间容积, m^3 。

1.1 建模时假设

- 分离器内各点工质的相应参数相同,且同步变化,即将分离器内工质按集总参数来处理;
- 分离器部分有效金属温度与工质温度相同,且与工质温度同步变化。

* 本文获得国家教委博士基金资助

1.2 启动分离器数学模型如下

1.2.1 连续性方程

$$D_1 - D_2 - D_3 - D_4 = \frac{d}{dt}(V_s d_s + V_q d_q) \quad (1)$$

式中:

d_s, d_q ——分离器内水和蒸汽的密度, kg/m^3

1.2.2 能量平衡方程

$$D_1 H_1 - (D_2 + D_3) H_2 - D_4 H_4 = \frac{d}{dt}(V_s d_s u_s + V_q d_q u_q + M_{yx} c t_j) \quad (2)$$

式中: H ——工质焓, kJ/kg ;

u ——工质内能, kJ/kg ;

M_{yx} ——分离器有效金属量, kg ;

c_j ——分离器有效金属比热, $\text{kJ}/(\text{kg} \cdot ^\circ\text{C})$;

t_j ——分离器有效金属温度, $^\circ\text{C}$ 。

1.2.3 容积方程

$$V = V_s + V_q \quad (3)$$

式中: V ——分离器总容积, m^3

1.2.4 压力变动公式

$$\frac{dP}{dt} = \frac{D_1 H_1 - (D_2 + D_3) H_2 - D_4 H_4 - \frac{d_s u_s - d_q u_q}{d_s - d_q} (D_1 - D_2 - D_3 - D_4)}{V_s (d_s \frac{\partial u_s}{\partial P} + \frac{u_q - u_s}{d_s - d_q} d_q \frac{\partial d_s}{\partial P}) + V_q (d_q \frac{\partial u_q}{\partial P} + \frac{u_q - u_s}{d_s - d_q} d_s \frac{\partial d_q}{\partial P}) + M_{yx} c \frac{\partial t_j}{\partial P}} \quad (4)$$

式中: P ——分离器压力, Pa

由上述假设条件,式(4)中的分离器有效金属温度 t_j 即分离器内工质的温度。

1.2.5 分离器产汽量

当进入分离器的工质温度达到其压力下的饱和温度时,分离器中即有蒸汽产生,且产汽量为

$$D_q = D_1 x \quad (5)$$

式中: D_q ——分离器产汽量, kg/s ;

x ——进入分离器的工质干度。

由热力学理论可知^[4],分离器工质入口阀门前后工质的焓值相等,故干度为

$$x = \frac{H_1 - H'}{r} \quad (6)$$

式中: H' ——分离器压力下饱和水焓, kJ/kg ;

r ——汽化潜热, kJ/kg

1.2.6 分离器水位方程

图 2 为分离器水位简化物理模型 图中 D_1 为进入分离器总的工质流量。

由上述产汽量方程(5)可知,产汽后进入分离器的水量为

$$D_{1s} = (1 - x) D_1 \quad (7)$$

根据分离器水侧质量平衡有

$$(1 - x) D_1 - D_4 = \frac{d}{dt} (d V_s) \quad (8)$$

式中: d ——分离器压力下饱和密度, kg/m^3 。

由图 2 所示,显然,分离器水空间的容积是水位的函数,即有

$$V_s = V_s(h) \quad (9)$$

故,水位方程式为

$$\frac{dh}{dt} = \frac{(1 - x) D_1 - D_4}{d \frac{dV_s}{dh}} \quad (10)$$

这里忽略了 d 的变化。

2 仿真试验

2.1 仿真计算

由上述方程式(1)~(10),再加上工质的状态方程等相应的公式即组成了描述直流锅炉启动分离器动态特性的数学模型。所建模型是否正确需通过仿真试验来验证,这一过程的关键环节之一是根据对象的特点,在数学模型的基础上建立仿真模型并确定仿真计算方法。

由于本文建模对象在运行时要作大幅度的工况

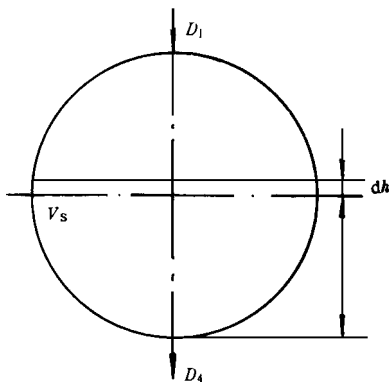


图 2 分离器水位简化物理模型

变动,因此在进行仿真计算时对所建模型不再做任何简化而直接进行数值求解。数值计算方法多种多样,选择哪一种则要根据具体情况而定。在实时仿真中,要求所选算法在保证精度和稳定的前提下计算速度达到实时。即,在实时仿真中,算法的选择主要决定于它的稳定性、计算速度及计算精度。

目前常用的实时算法,如欧拉法、两点的 Adams-Bashforth 算法、二阶 Runge-Kutta 公式等。这些算法具有各自的精度和稳定域。表 3.1 列出了三种实时仿真算法的一些特性。由表可见,三种算法具有相同的稳定域,而计算精度却不同。根据上述算法选择的基本原则,本文采用二阶 Runge-Kutta 公式作为仿真算法,从而使仿真既达到一定的精度,又能满足实时的要求。

表 1 算法精度和稳定域

算 法	精度	稳定域
欧拉法	1	$ \lambda h < 2$
二阶 Runge-Kutta 法	2	$ \lambda h < 2$
二阶 Adams-Bashforth 法	2	$ \lambda h < 2$

2.2 对有关参量的处理

由于水侧工质的密度随其它参数的变化一般比较小,因此在仿真计算时将其作为常数处理,这样做对计算结果的准确性影响不大,然而却可以减少计算量,提高仿真计算速度。

对于模型中的分离器有效金属量,因分离器是一厚壁部件,其时间常数与工质的时间常数为同一个数量级^[1]。本文仿真对象的壁厚为 30 毫米。根据这些情况及特点,在仿真计算时取分离器金属量的 60% 作为有效金属参加计算,并将其作为一个常数,这样做不会明显地影响动态计算结果^[1]。

2.3 仿真试验结果分析

根据上述数学模型及对有关参数的处理方法,建立启动分离器动态仿真模型。建模对象为国产 1025 t/h 亚临界压力直流锅炉所配启动分离器。仿真计算的初始条件为分离器压力 0.1 MPa,工质初温 320 K。

仿真试验是在作者参与研制的一个专用的电站设备仿真环境中进行的。图 3~ 图 5 所示为仿真试验的部分结果。

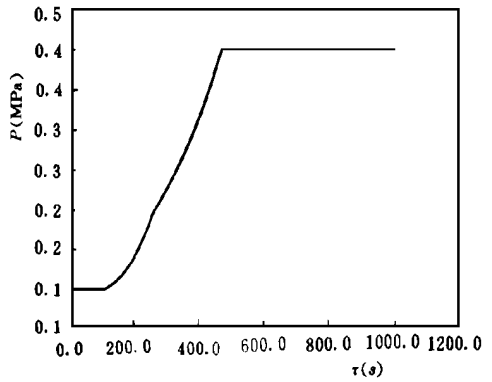


图 3 分离器压力

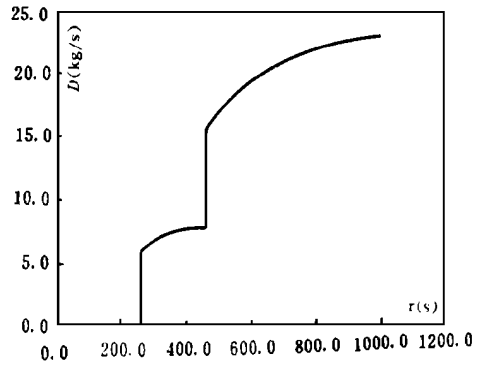


图 4 分离器工质温度

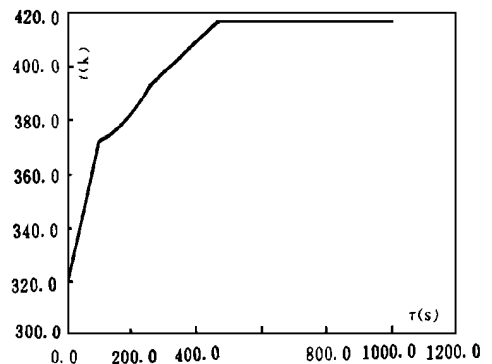


图 5 分离器蒸汽流量

图 3 所示为分离器压力的动态变化过程。由图所示,在工质温度达到分离器初压所对应的饱和温度以前,由于产汽量为零,分离器压力保持为初压不变。随着过程的进行,工质温度不断上升,在约 100 秒时,进入分离器的工质温度达到与初压对应的饱和温度(见图 4 所示),这时开始产汽,而分离器压力也相应地开始上升。随着压力的升高,分离器内工质的饱和温度也相应提高。在第 260 秒时打开启动分离器蒸汽阀门,并控制阀门开度,使分离器压力以一定速度上升。由图 5 所示,蒸汽阀门开启后,蒸汽流量逐渐增加,这是由于产汽量增加的缘故。在第 460 秒时又一次开大蒸汽阀门,并控制分离器压力保持不变,相应地工质饱和温度也维持定值,同时蒸汽流量继续增加。

通过上述分析可知,用本文所建直流锅炉启动分离器动态数学模型所做仿真得到的结果真实反映了对象的动态过程,该数学模型完全能够按照运行规程的要求,如启动时工质的升温速度、升压速度、定压暖机等,对实际对象进行模拟研究。

作者简介 王宗琪,男,1956年6月出生,现为华北电力大学动力工程系副教授(博士学位),主要从事电站热力设备的数学模型,动态特性,故障诊断,人工智能的应用等方面的教学和研究工作。(071003 河北省保定市华北电力大学 69号信箱)

3 结束语

本文根据基本科学定律建立了直流锅炉启动分离器解析数学模型,该模型能够正确描述建模对象的动态过程,可以用于对象实际过程的仿真研究。这一工作为进一步建立直流锅炉机组全工况动态模型提供了必要条件,为进行直流锅炉运行特性的工程分析研究,以及建立直流锅炉机组仿真培训系统打下了基础。

参 考 文 献

- 1 章臣樾. 锅炉动态特性及其数学模型. 水利电力出版社, 1987, 6
- 2 朱金荣. 直流锅炉的模块化建模及汽温诊断. 东南大学博士学位论文, 1990. 9
- 3 上海锅炉厂研究所. 锅炉单相区段动态特性的计算方法. 电力技术通讯, 1975, (5)
- 4 曾丹苓等. 工程热力学. 人民教育出版社, 1987. 1

探测并排除燃机叶片的故障

据 "Power" 1995年 11- 12月号报道,燃气轮机的全部故障约有 40% 起因于叶片问题,现代化的状态监测技术将有助于避免或使故障减到最少并在故障产生时就能发现并排除它。

在当前的燃机中,起重要作用的叶片故障机理和受影响的部件包括:

- 低循环疲劳—— 压气机和涡轮轮盘。
- 高循环疲劳—— 压气机动叶片、涡轮动叶片、压气机和涡轮的轮盘、压气机静叶。
- 热疲劳—— 喷嘴、燃烧室。
- 环境侵袭,如氧化、硫化、热腐蚀、其它腐蚀—— 高温部分动叶和静叶,过渡段和燃烧室。
- 蠕变破坏—— 高温部分的喷嘴和动叶。
- 侵蚀和磨损。
- 冲击过载破坏。
- 热老化。
- 联合故障机理,如需变 疲劳、腐蚀 疲劳、氧化 侵蚀等。

避免燃气轮机叶片出问题则要求满足两个条件:首先也是最重要的是基本设计必须坚固,具有合适的安全系数。其次,必须保持正常的运行方式。介绍了各种探测并排除叶片故障的方法。

(学生 供稿)

燃气轮机联合循环在沿海地区的应用 = **The Application of Gas Turbine-based Combined Cycle Units in Coastal Regions of China** [刊, 中] / Liu Dingyuan, Zhang Xiaosu (Shenzhen Nanshan Cogeneration Co. Ltd.) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. -1997, 12(1). -52- 55

Described in this paper is the development of gas turbine-based combined cycle units in the coastal area of China with a brief account of the experience gained by the Shenzhen Nanshan Cogeneration Co. Ltd. in burning heavy oil. **Key Words** gas turbine, combined cycle, burning of heavy oil

锅炉烟管管束阻力最优匹配的研究 = **A Study on the Optimum Matching of a Boiler Flue Gas Tube Bank Resistance** [刊, 中] / Xu Shiming, Yuan Yi (Dalian University of Science & Engineering) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. -1997, 12(1). -56- 59

Discussed in this paper is the optimum distribution of flue gas speed in the flue gas tube bank of an industrial smoke tube boiler. The aim is to achieve a maximum tube bank heat exchange rate under the conditions of a given flue gas resistance and heat exchange area or attain a minimum convection heat exchange area under the condition of a given heat exchange rate, and set up a calculation model with an optimum matching of pressure drop in the flue gas tube bank. **Key words** industrial boiler, flue gas tube bank, optimization, resistance

直流锅炉启动分离器数学模型与仿真 = **A Mathematical Model of the Start-up Separator for an Once-through Boiler and Its Simulation** [刊, 中] / Wang Zongqi, Wang Tao (North China Electric Power University) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. -1997, 12(1). -60- 63

Starting from the mechanism of the working process of an object under study established is an analytical mathematical model of the start-up separator for an once-through boiler. On this basis a simulation model was set up to conduct a simulation test. The validity of the model was verified, thus providing essential conditions for the establishment of a full-load operating condition mathematical model of the once-through boiler unit. **Key words** oncthrough boiler, start-up separator, mathematical model

火电厂监控与信息管理的计算机网络系统——PPIS100 = **Computer Network System PPIS100 for the Monitoring and Information Management of Thermal Power Stations** [刊, 中] / Wang Tongqing, Wang Peihong, et al. (Southeastern University) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. -1997, 12(1). -64- 67

Described in this paper is a computer network system for the monitoring and information management of the production process of several thermal power stations. With the system employing a distributed intelligent data acquisition device serving as its basis the whole network is divided into a management level and process monitoring level to conduct data exchange, which makes it possible for various workstations of the management level to readily obtain real-time information and to provide real-time information service for production management. The system from the hardware system to software one features good configuration possibility.

Key words network system, computer monitoring, information management, intelligent data acquisition device

锅炉燃料加工新工艺的研究 (I)——新工艺原理及其关键技术 = **A Study on the New Technology for Processing Boiler Coal (I) — Theory of the New Technology and Its Key Techniques** [刊, 中] / Yang Guohua (China Mining University) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. -1997, 12(1). -68- 70

In the light of the present status of coal use in industrial boilers and coal processing the author has come up with a new technology for processing boiler fuel and proposed two items of its key techniques. **Key words** industrial boiler, profiled coal, fuel processing, grading of coal, modification of profiled coal