

DEB 的新认识——增益调度控制

(哈尔滨工业大学能源学院) 于达仁 徐志强
(哈尔滨·第七〇三研究所) 翁一武 李月华

摘要: DEB (Direct Energy Balance) 协调控制系统是美国 Leeds & Northrup 公司首先提出, 并在国内获得了广泛应用的单元机组协调控制策略。分析了 DEB 协调控制系统的设计思想和控制机理, 指出 DEB 系统实际上是采用了增益调度的思想, 有效消除了由单元机组对象的动态特性随负荷变化的改变, 提高了单元机组在不同负荷下的性能。这是对 DEB 系统的一种新的认识, 同时对 DEB 系统调试中的参数整定也有重要意义。这种设计思想对于一些较复杂的非线性对象的控制系统设计也有一定的借鉴作用。

关键词: 单元机组; 非线性; DEB 协调控制系统;
增益调度控制

中图分类号: TK223.7

1 前言

锅炉单元机组是一具有较强的非线性的对象, 随着负荷变化, 其动态特性发生了很大变化。因此采用常规的基于小偏差线性化方法设计的协调控制系统, 在机组变动工况运行时, 难以保证最佳的控制品质。

DEB (Direct Energy Balance) 协调控制系统是美国 Leeds & Northrup 公司首先提出并获得了广泛应用的一种单元机组协调控制策略, 经过不断的发展和完善, 到目前为止已经经历了四代。其中最新的 DEB IV 系统是目前较为成功的一种单元机组协调控制系统设计。

本文分析了 DEB IV 系统的设计思想和控制原理, 以及单元机组的动态特性随负荷产生变化的原因, 指出 DEB 系统实际上是一种根据单元机组的特点设计的构思精巧的增益调度控制设计: 随着负荷

改变, 自动调整控制器参数, 使之适应对象动态特性随负荷不同的变化, 改善部分负荷下单元机组的性能。这是对 DEB 协调控制系统的一种新的认识, 同时对 DEB 系统调试中的参数整定也有重要意义。

2 单元机组的动态特性

2.1 单元机组的非线性动态数学模型

图 1 中给出了一个单元机组的锅炉数学模型^[1], 这个模型虽然简单, 但是其中包括了主要的非线性特性。模型中主要参数的物理意义和参考数值如表 1 中所示。

表 1 锅炉非线性数学模型主要参数的物理意义

C_B	锅炉蓄热系数 (176s)
K_{sh}	过热器阻力系数 (0.07)
T_F	燃烧通道的时间常数 (48s)
f	燃烧通道的延迟时间常数 (9s)
u_T	汽轮机阀门开度 (0~1)
u_B	燃烧率指令 (0~1)
P_d	汽包压力 (14.14 MPa)
P_T	主蒸汽压力

2.2 单元机组参数随负荷变化的原因分析

目前热工界一般认为锅炉是一变参数对象, 由图 1 中可见, 从非线性角度研究锅炉的模型, 锅炉实际上是一固定参数的非线性模型, 锅炉的非线性主要来自于过热器压降的平方阻力特性以及汽机调节阀开度与机前压力的乘积。由于过热器的阻力系数 K_{sh} 很小, 其中的压降与锅炉的主蒸汽压力相比其值很小, 因此当忽略过热器中的压降带来的非线性

收稿日期: 1998-12-16; 修订日期: 1999-03-01

基金项目: 国家自然科学基金资助项目 59776047

作者简介: 于达仁 (1966-), 男, 博士生导师, 现任哈尔滨工业大学能源学院教授, 主要从事汽轮机、锅炉及电站热力系统的建模、仿真、控制和故障诊断研究。通讯处: 150001 哈尔滨工业大学能源学院

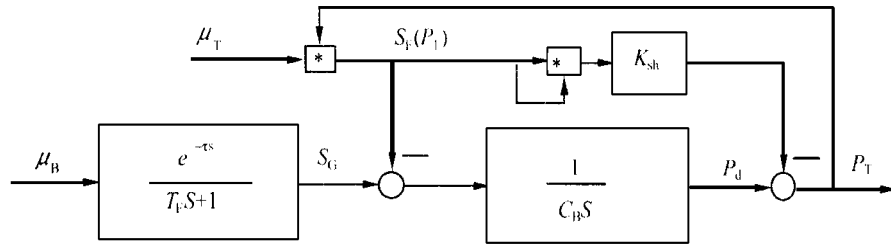


图 1 锅炉的非线性数学模型

细微变化,而且只对阀门的开度变化有反映,不受燃料量变化(内扰)的影响。将 (P_1/P_T) 乘以主汽压力的给定值 P_s ,即构成了所谓能量平衡信号 $(P_s \times P_1/P_T)$,它是机炉耦合的基本信号。它准确反映了汽机对锅炉的能量需求,协调机炉间的能量平衡。而且它只反映外扰,即汽机调节阀开度变化的影响,而不受内扰(燃料量变化)的影响。同时也消除了其它可能作为负荷前馈的信号,如蒸汽流量或汽机第一级压力 P_1 ,在锅炉侧扰动时的正反馈的作用。

时,不会带来很大的误差。从而单元机组的主要非线性特性可如图 2 所示,

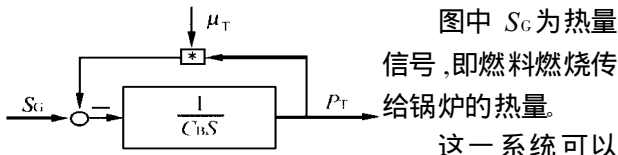


图 2 锅炉汽泡对象的框图

图中 S_G 为热量信号,即燃料燃烧传给锅炉的热量。这一系统可以看作是一变反馈增益系统,系统的反馈增益随着汽机阀位的变化而变化,机组的增益和时间常数也随之改变,增益及时间常数与阀门的开度成反比关系(1)

$$\frac{P_T(s)}{S_G(s)} = \frac{1}{\frac{C_B}{T_i} s + 1} \quad (1)$$

当机组的负荷较低时,汽机阀门的开度较小,反馈也较小,系统的增益和时间常数较大;反之,当系统的负荷较高时,汽机的阀门开度较大,反馈较强,系统的增益和时间较小,从而使整个系统的动态特性随机组工况的改变发生了很大的变化。所以,单元机组动态特性随负荷变化的根本原因在于锅炉系统的非线性

3 DEB系统的设计思想

3.1 直接能量平衡的含义

在锅炉的 DEB 协调控制系统中^[2](图 3),均采用了能量平衡信号 $(P_s \times P_1/P_T)$ 为锅炉侧的前馈给定信号,以热量信号 $(P_1 + C_B dP_d/dt)$ 为锅炉主控制器的反馈。理论和实践表明,汽机的第一级压力 P_1 与主蒸汽压力 P_T 的比值 (P_1/P_T) 线性代表了汽轮机的有效阀位,能灵敏反映阀位的

细微变化,而且只对阀门的开度变化有反映,不受内扰(燃料量变化)的影响。同时也消除了其它可能作为负荷前馈的信号,如蒸汽流量或汽机第一级压力 P_1 ,在锅炉侧扰动时的正反馈的作用。

热量信号 $(P_1 + C_B dP_d/dt)$ 中,汽机的第一级压力 P_1 代表了进入汽机的蒸汽流量,即锅炉的能量输出, P_d 为锅炉的上锅筒压力, C_B 为锅炉的蓄热系数, $C_B dP_d/dt$ 则代表了锅炉上锅筒蓄热的动态变化。 $(P_1 + C_B dP_d/dt)$ 代表了单位时间内,燃料燃烧传给锅炉的热量

锅炉的主调节器前的入口参数为

$$BD = P_s \times P_1/P_T - (P_1 + C_B dP_d/dt)$$

当稳态时,上式中的微分项为零,从而有 $P_s \times P_1/P_T = P_1$,即 $P_s = P_T$ 此时,汽机的能量需求和锅炉的能量输出达到平衡,这也就是所谓直接能量平衡的含义。从上式中可见,DEB 系统固有保持 $P_s = P_T$ 的能力,因此可以取消机前压力的闭环校正回路,从而避免了调节过程中的超调和振荡。因而与其它类型的协调控制系统相比,DEB 的系统较为简单,机、炉之间的配合更为直接,系统的工作也更为平稳^[3,4]。

3.2 DEB的增益调度思想分析

由前文的分析可知,单元机组的动态特性随负荷改变的原因是由对象的非线性造成的。而且随着

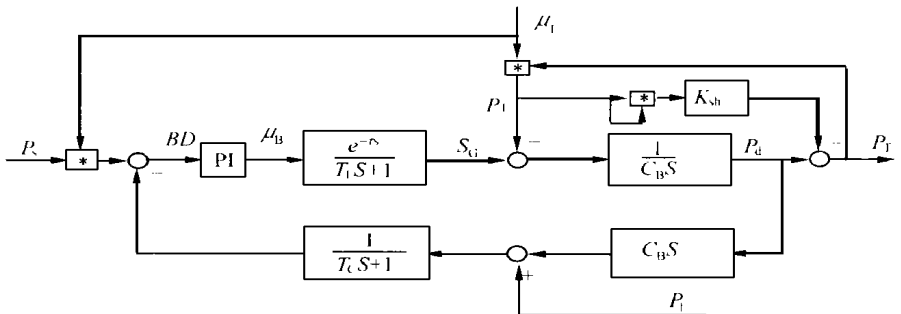


图 3 DEB协调控制系统框图

负荷的改变,汽轮机的调节阀的开度发生变化,系统的动态特性也随之立即发生变化,这一过程是很快,因此单元机组的协调控制系统也应能适应这一变化。

由式 (1) 可以看出,锅炉系统的稳态增益随阀门开度的变化为 $1/_T$,如果将锅炉的给定 P_s 乘上阀门的开度 $_T$,成为 $P_s \times _T$,则正好可以与增益的变化相抵消,能消除对象的稳态增益的变化,从而使锅炉的稳态增益成为常数。注意到 P_1/P_T 实际上就是汽轮机阀门的开度 $_T$,则锅炉的给定信号可写为 $(P_s \times P_1/P_T)$,这正好是能量平衡信号的表达式。从这个角度看,DEB 系统实际上一种增益调度控制:自动调整给定值的大小,使之与对象增益的变化相抵消,消除对象的稳态增益随负荷的变化。

同时考虑到锅炉具有较强的蓄热能力,因此和汽轮机相比,其动态相应速度相对较慢;而且虽然由过热器压降造成的非线性的数值较小,但是也还是会对机组的动态特性产生影响,为了克服它们的影响,由

$$P_d = P_T + P_1^2 K_{sh} \quad (2)$$

式中 P_d 代表了锅炉的蓄热,将上式微分,则锅炉蓄热的动态变化为

$$C_B \frac{dP_d}{dt} = C_B \frac{dP_T}{dt} + (2C_B K_{sh}) P_1 \frac{dP_1}{dt} \quad (3)$$

式 (3) 表明锅炉蓄热的动态变化可分为两部分,前一项是由主汽压改变而引起的锅炉蓄热量的变化,后一项则是由过热汽压降引起的,该项具有非线性。这两项应用于锅炉指令中,将能进一步改善系统的性能。但是直接应用过程变量 P_T 和 P_1 构成锅炉的指令信号是不行的,因为过程扰动将干扰指令信号。因此,在实际系统中使用的锅炉的指令信号中,以 P_s 代替 P_T ,以汽机的预期功率代替 P_1 ,从而有

$$-B = \left(\frac{P_1}{P_T} \right) P_s + \left(\frac{P_1}{P_T} P_s \right) K_1 \frac{d \left(\frac{P_1}{P_T} P_s \right)}{dt} + K_2 \frac{dP_s}{dt} \quad (4)$$

由式 (4) 中可以看出锅炉的燃烧率给定信号中,除能量平衡信号,还包括了锅炉的变汽压蓄热项,以补偿锅炉主汽压变化和过热器压降引起的锅炉动态特性的变化,同时后两项还起到增加 PI 调节器偏差的作用以进一步提高锅炉的响应速度,加强锅炉调节系统的调节作用。

4 仿真计算结果

图 3 中给出了机组在不同负荷下运行时,汽压给定值扰动下的机前压力 P_T 的过渡过程曲线。汽压给定扰动为 -2% ,速率为每分钟 0.5% ,图中实线为机组在 100% 负荷时汽压扰动下的过渡过程曲线,虚线为 70% 负荷下的过渡过程曲线。

图 4 中给出了机组在不同负荷时,在投入汽机侧功率控制系统的机前压力 P_T 的过渡过程曲线。图中实线为机组在 90% 负荷下,功率指令以每分钟 1% 的速率增加到 100% 负荷的过渡过程曲线,虚线为机组的功率指令以同样速率从 70% 负荷增加到 80% 负荷时的过渡过程曲线。

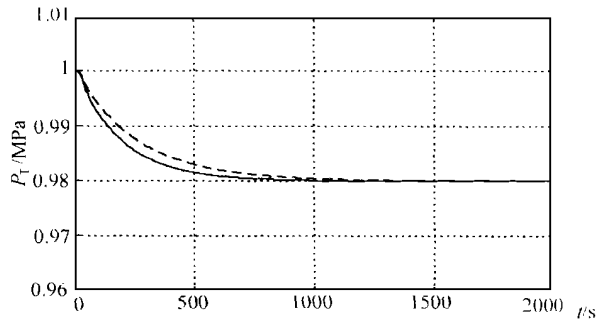


图 4 DEBIV 系统在压力给定值扰动下的过渡过程

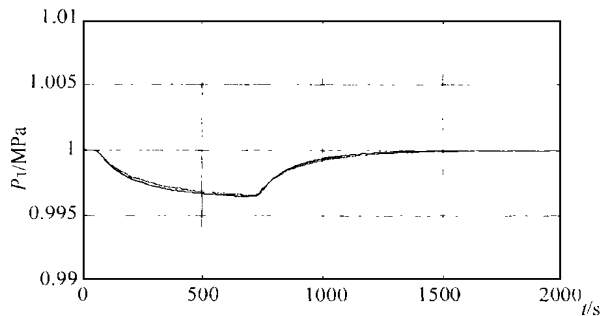


图 5 DEBIV 系统在功率给定扰动下的过渡过程

由图 3 和图 4 中可以看出,DEBIV 系统在不同负荷下,机组在汽压定值扰动和功率指令扰动的过渡过程差别显著减小。基本上消除了非线性特性对机组性能的影响,使机组在不同负荷下都具有较好的控制性能。

(下转 396 页)

化,可调节泵运行台数,以使其工作点更集中,泵更加高效稳定运行。各方案某时段循环泵的工作点分布可由逐时模拟计算得到的该时段热网的流量以及相应流量下循环泵进出口压力差获得。图4为方案3三台循环泵并联运行时全年循环泵的工作点分布。可以看出:采暖季、空调季和过渡季泵的工作点在图中分布成三段。由于各段中泵的扬程和流量的平方近似成正比,且各工作点的分布没有出现较大的发散,如果泵的选型合理,将始终保持较高的效率。以上模拟计算得出的泵工作点分布,对于水力工况复杂的冷热联供热水网设计阶段泵更加合理的选型,具有主要的指导作用。

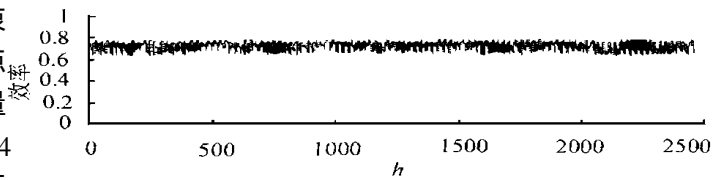


图5 空调期方案2主循环泵效率逐时变化

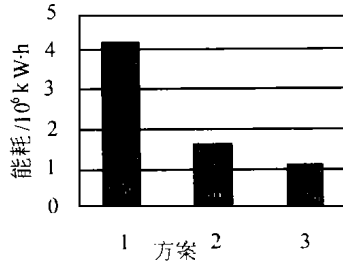


图6 各方案泵耗比较

4 结束语

对于流量变化频繁,调整幅度大的冷热联供热水网,水力工况变化复杂,即使对应于同一个热网总流量,也会有不同的

水力工况。因此,水力工况模拟计算对于冷热联供热水网的技术经济分析、设计及运行方案的选择等是很有必要的。同时,主循环泵一天内流量变化幅度很大,扬程以及效率亦随之变化,其能耗通过逐时计算才能获得较为准确的结果。

参考文献

[1] 江 亿. 冷热联供热水网的用户回水加压泵方案. 区域供热, 1996(2): 12~ 16.

(挥 编)

3.2 泵的能耗

众所周知,常规采暖热水网的输送能耗占整个热网能耗的比例很大,而冷热联供热水网流量在很大范围内调整,使得循环水泵的效率变化较大。同时,由于空调期热网大部分时间在部分工况下运行,各用户调节阀消耗的能能量大。因而这种热网的输送能耗比常规热网更大。所以,输送能耗的精确计算是对一个冷热联供热水网进行技术经济分析的重要环节。

在获得泵的工作点逐时分布后,根据泵的特性方程可以计算出泵的逐时效率(如图5),进而得出泵的能耗。图6为杭州冷热联供热水网全年方案1、方案2主循环泵能耗以及方案3主循环泵和各用户回水加压泵能耗之和的模拟计算结果。

(上接 381页)

同时应该指出的是:DEB系统仅仅使用了一种简单的乘法补偿对象的非线性,这种补偿是不彻底的,它仅仅消除了对象的增益随工况的变化,而不能消除由非线性造成对象时间常数随机组工况的变化,在不同负荷下机组的动态特性还是有一定变化。因此,如图3和图4中所示,当机组在部分工况下工作时,系统的过渡过程时间比在额定负荷下有所延长,性能还是有所降低。

5 结论

单元机组动态特性随负荷不同而变化的根本原因在于系统的非线性,而DEB系统根据单元机组的特点,以能量平衡信号为锅炉的给定信号,实现了增益调度的思想,消除了由对象的非线性特性造成的对象的增益随负荷的变化,明显改善了单元机组不

同负荷下动态特性,提高了部分负荷下控制的品质。这是对DEB系统的一种新的认识。同时对DEB系统调试中的参数整定也有重要意义。

对于一些较复杂的非线性对象,如果能根据对象的特点,采用类似于DEB系统的设计思想进行控制系统的设计,将能简化控制系统的设计并改善系统的控制质量。

参考文献

[1] Cheres E. Small and medium size drum boiler models suitable for long term dynamic Response. IEEE Transaction on Energy Conversion, Dec 1990, 5(4): 686~ 692.
 [2] 陈来九. 单元机组协调控制系统策略——兼议 I&N公司协调控制的发展. 火电厂热工自动化, 1993(1).
 [3] 陈允济,易凡. DEBIV——协调控制系统的特点及分析. 华东电力, 1996(4).
 [4] 郑昶,曹在基. DEB协调控制系统. 动力工程, 1989(4).

(何静芳 编辑)

series boilers with standard elliptical heads. Discussed is the difference of perature stress variation among the above-cited boilers, KZL and arch-shaped tube plate boilers. Also presented are the basic structural parameters of DZL series boilers, in the belief that they can be helpful for the further study and development of such boilers. **Key words** boiler, structure, elliptical head, design

回转式空气预热器非接触式漏风控制系统 = **Non-contact Air-Leakage Control System for Rotary Air Heaters** [刊,中] / Dong Yong, Lu Zhaoda, et al (Harbin Institute of Technology) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 1999, 14(5). - 371~ 373

This paper describes a non-contact automatic control system of seal clearance containing fan-shaped plates. It employs Chinese-made high-temperature resistant eddy-current displacement sensors, suitable for use in power stations. Programmable logic controllers are installed to carry out all control functions. In conclusion, given are some results of the system's practical use on work-site. **Key words** air heater, fan-shaped plate, high-temperature displacement sensor, PLC

CAD在工业锅炉房工艺设计中的开发应用 = **The Application and Development of CAD Technology in the Technological Design of Industrial Boiler Houses** [刊,中] / Wang Yongzheng, et al (Shandong Polytechnic University) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 1999, 14(5). - 374~ 375, 378

A detailed description is given in this paper of the composition and application of a computer-aided technological design system for industrial boiler houses. **Key words** computer-aided design, application, engineering design

电厂大型风机的故障诊断和整机平衡 = **Failure Diagnosis and Full-Scale Machine Balancing of Power Station Large-sized Air Blowers** [刊,中] / He Shizheng (Zhejiang University) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 1999, 14(5). - 376~ 378

This paper covers the common types of centrifugal fan mechanical failures, frequency spectrum characteristics and the methods used for their diagnosis and correction. A full-scale machine balancing technology is presented with specific examples cited to illustrate its practical engineering applications. **Key words** fan, mechanical failure, diagnosis, dynamic balancing

DEB的新认识——增益调度控制 = **A New Understanding of DEB- Gain Scheduling Control** [刊,中] / Yu Daren (Harbin Institute of Technology) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 1999, 14(5). - 379~ 381

DEB (Direct Energy Balance) coordinated control system was first initiated by Leeds & Northrup Co. of U. S. A. It represents a kind of coordinated control strategy widely used in China for boiler-turbine monoblock units. After an analysis of the design philosophy and control mechanism of the DEB coordinated control system the authors explained that the DEB system by incorporating the idea of gain scheduling effectively eliminates the variation of dynamic characteristics of a monoblock unit during operating load changes. Hence, it can enhance the monoblock performance under various operating loads. This constitutes a new understanding of the DEB system. Meanwhile, such an understanding is deemed to have great significance for the setting of parameters in the course of DEB system commissioning test. The design philosophy proposed in the present paper may as a useful experience benefit the design of control systems for some relatively complicated nonlinear units. **Key words** monoblock unit, nonlinearity, DEB coordinated control system, gain scheduling control

振动故障诊断系统中的征兆获取 = **Symptom Acquisition in a Vibration Fault Diagnostic System** [刊,中] / Ruan Yue (Envada Co. under the North China Electric Power Research Institute) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. - 1999, 14(5). - 382~ 384

An analysis is conducted of the types of symptoms in a vibration fault diagnostic system and the principles of symptom acquisition are proposed. Discussed also are the methods for calculating the symptom cred-