

# 电站燃煤锅炉燃烧计算机控制问题探讨

周怀春 韩才元

(华中理工大学煤燃烧国家重点实验室)

〔摘要〕本文对采用常规控制方法利用计算机进行电站燃煤锅炉的燃烧系统控制的问题进行了探讨,重点对仿真研究途径、适当的PID参数整定方法、燃料控制回路对可测内扰的补偿,以及风量控制回路中具有非线性特性的风机调节阀门的处理进行了阐述。并对新型燃烧控制方式提出了新的见解。

关键词 锅炉 燃烧控制 计算机应用

分类号 TK 223.7

## 1 概论

目前,世界各国对300MW以上的大型火电机组均有配置计算机进行自动控制的发展趋势<sup>(1)</sup>。在将先进的控制理论应用于电站锅炉的控制方面,国内外已做了多方面的工作。在国外,从建立锅炉被控对象的数学模型<sup>(2)</sup>,到进行机炉协调控制<sup>(3)</sup>等方面,均有不少成果。在国内,这方面的研究也取得了一定的进展<sup>(4)</sup>,但对200MW容量以下的国产机组,特别是已投运达十年以上的机组,采用计算机进行燃烧控制的并不多见,其主要原因在于燃烧系统的复杂性和相应的检测和执行机构不适应计算机控制的要求,如入炉煤粉流量不易准确测量、电动执行机构质量不可靠等。已有部分电厂采用计算机控制系统作为和常规控制仪表并行的控制手段,还不能单独依靠计算机控制系统完成燃烧系统的全程控制。

作者曾参加湖南鲤鱼江电厂计算机实时监控系统的設計工作,通过现场的测试和计

算机仿真研究,对锅炉燃烧计算机控制系统在电站实施的具体问题,主要针对电站锅炉燃烧系统与计算机控制系统的联结作了初步的探讨。希望对从事计算机燃烧控制研究和应用的有关人员有所裨益。

## 2 设计燃烧计算机控制系统的一般问题

电站锅炉燃烧控制系统的主要任务是:

(1)维持主汽压力在允许范围内,并尽可能稳定;(2)维持一定的炉膛负压;(3)维持一定的尾部烟道烟气含氧量。因此,燃烧控制系统分为三个主要子系统,包括燃料(主汽压力)控制系统,送风(氧量)控制系统,引风(炉膛负压)控制系统。图1是完整的燃烧控制系统方框图。在计算机仿真时,不必把它们均用传递函数作为单独的环节进行模拟,可以进行合并,把控制算法以外的环节统统归结到对象的特性中,例如对于燃料—汽压通道,可将其化简为如图2所示的等效串级回路,这是一

收稿日期 1993 03 01 收修改稿 1993 06 26

本文联系人 周怀春 男 29 博士研究生 430074 武汉

个典型的串级控制系统,传感器、执行机构均并入燃烧对象的特性中。这样,仿真研究就可

抓住问题的实质,有效地进行控制系统的设计和模拟。

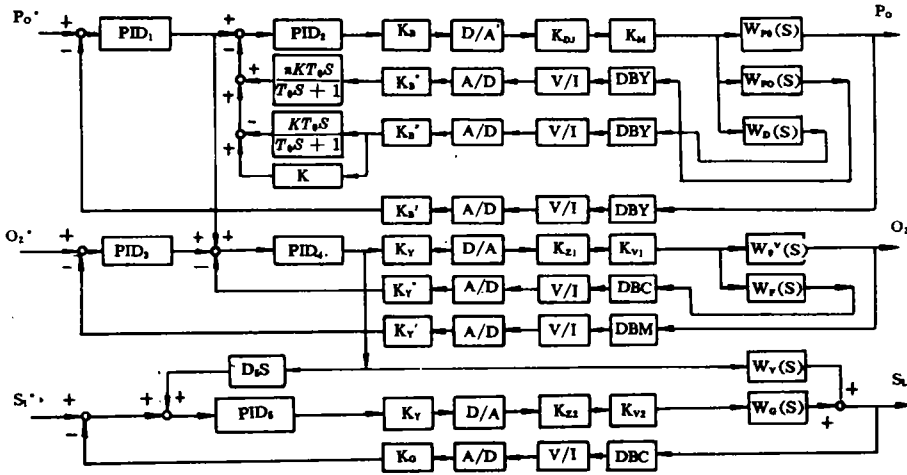


图 1 燃烧控制系统方框图

取  $K_G = 33, \tau = 34, T_0 = 330$ 。

文献[5]介绍的方法(称为方法 I)是将对象的传递函数改写为数字采样系统的模型,选择目标函数为调节误差绝对值积分最小,以确定 PID 调节参数。取采样时间为 5 秒,由该方法得到的一组 PI 参数为:

$$K_{P1} = 0.2614, T_{I1} = 114.4 \quad (2)$$

PI 控制规律用下式表示:

$$D(s) = K_P(1 + 1/T_I s) \quad (3)$$

文献[6]介绍的方法(称为方法 II),是将控制对象的传递函数和控制算法均化为有理函数的形式,给闭环系统一个期望的动态响应特性,来拟合控制参数。式(1)中含有纯延迟环节,采用文献[7]介绍的四阶 Pade 近似,可以很好地模拟 0-200 秒的纯滞后。将  $W_0(s)$  化为有理函数为:

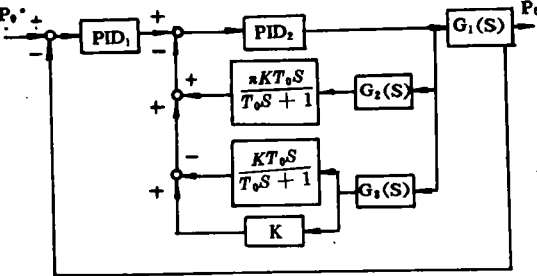


图 2 燃料-汽压通道等效系统图

对于 PID 控制参数,文献[5]和[6]分别介绍了几种简易的数字调节模型的参数整定方法。对于锅炉汽压被控对象,可取如下传递函数进行仿真,以比较这两种方法的优劣:

$$W_0(s) = \frac{P_0(s)}{\mu_0(s)} = \frac{K_G e^{-\tau s}}{T_0 s + 1} \quad \left( \frac{\text{MPa}}{100\%} \right) \quad (1)$$

$$W_0(s) = \frac{33e^{-34s}}{1 + 330s} = \frac{33}{1 + 330s} \cdot \frac{1 - \frac{1}{2} \cdot 34s + \frac{3}{28} \cdot 34^2 s^2 - \frac{1}{84} \cdot 34^3 s^3 + \frac{1}{1680} \cdot 34^4 s^4}{1 + \frac{1}{2} \cdot 34s + \frac{3}{28} \cdot 34^2 s^2 + \frac{1}{84} \cdot 34^3 s^3 + \frac{1}{1680} \cdot 34^4 s^4} = \frac{0.1s^4 - 0.0588s^3 + 0.0156s^2 - 0.00214s + 0.000126}{s^5 + 0.591s^4 + 0.157s^3 + 0.0218s^2 + 0.00132s + 0.00000381} \quad (4)$$

用方法 I 求出用 PI 调节器时的调节参数为:

$$K_{PI} = 0.1487, \quad T_{I1} = 330 \quad (5)$$

仍取采样时间为 5 秒, 利用双线性变换, 将对象  $W_0(s)$  和两种方法设计的控制器均转化为离散传递函数, 分别进行给定值 + 0.5 MPa 的扰动和内扰 + 0.05 的模拟, 系统动态响应如图 3 所示。其中  $K_{PI}$  的值在模拟过程中缩小了 0.3 倍, 否则超调量将更大。由图可见, 由方法 I 求出的 PI 调节器参数更能达到设计要求。

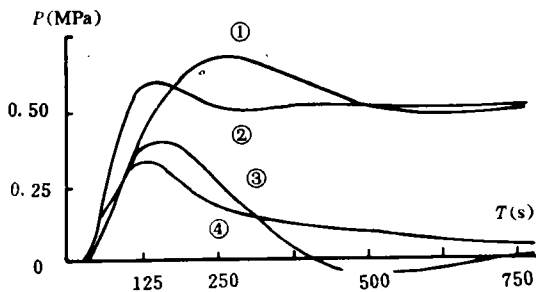


图 3 两种 PI 控制参数作用下的动态过程

- ①、③ 分别为方法 I 算出的 PI 控制参数下对给定值和内扰的响应。  
②、④ 分别为方法 I 算出的 PI 控制参数下对给定值和内扰的响应。

作者从仿真研究中发现, 对于具有较大纯延迟加一阶惯性环节的被调对象, 当采用本文介绍的方法 I 求解其 PI 参数时, 积分时间常常等于对象的惯性时间常数。还对其它不同的积分时间进行过仿真研究, 它们的调节效果远不如直接采用对象惯性时间常数作为积分时间的调节效果。这个现象还未从理论上加以分析, 现场人员不妨参照于此一试。

### 3 燃料控制回路的探讨

#### 3.1 对象数学模型的建立

我们在鲤鱼江电厂进行了锅炉燃烧系统动态特性的测试试验, 采用由飞升特性曲线求取对象传递函数的方法, 建立如下数学模型:

主汽压力:

$$G_1(s) = \frac{P_0(s)}{\mu_0(s)} = \frac{33e^{-34s}}{1 + 330s} \quad \left( \frac{\text{MPa}}{100\%} \right) \quad (6)$$

汽包压力:

$$G_2(s) = \frac{P_b(s)}{\mu_0(s)} = \frac{23.6e^{-21s}}{1 + 330s} \quad \left( \frac{\text{MPa}}{100\%} \right) \quad (7)$$

主汽流量:

$$G_3(s) = \frac{D_0(s)}{\mu_0(s)} = \frac{300e^{-21s}}{1 + 330s} \quad \left( \frac{\text{t/h}}{100\%} \right) \quad (8)$$

采用串级控制系统时, 燃料量的反馈通过热量信号来近似实现。模拟研究时, 根据热量信号的定义:

$$G_4(s) = \frac{D_Q(s)}{\mu_0(s)} = k \left[ \frac{D_0(s)}{\mu_0(s)} + C_b s \frac{P_b(s)}{\mu_0(s)} \right] \quad (9)$$

通过适当简化, 且从原理上加以分析, 从燃料量信号到热量信号的传递函数取为纯延迟信号; 由实际采样和计算需要时间, 取热量信号为:

$$G_4(s) = \frac{D_Q(s)}{\mu_0(s)} = \frac{e^{-21s}}{1 + 30s} \quad \left( \frac{100}{100\%} \right) \quad (10)$$

#### 3.2 燃料控制系统克服可测扰动的考虑

分析燃烧系统的扰动, 可将其分为可测扰动和不可测扰动。对于不可测扰动, 如煤质的突然变化等, 只能通过系统的控制作用加以克服; 对于可测扰动, 完全可以将其输入计算机, 通过补偿作用加以消除, 而不必等到被控参数—蒸汽压力产生变化时再通过控制作用来克服。燃烧过程产生的可测扰动, 根据鲤鱼江电厂的实际, 有以下几个方面:

(1)制粉系统运行方式改变时,给进入炉膛的燃料量很大的扰动。对于鲤鱼江电厂的7号炉,其两套制粉系统投入运行时,三次风带粉量占炉膛总进粉量的35%,一套制粉系统解列时,进入炉膛的煤粉量减少约18%。

(2)该厂锅炉运行过程中经常发生风粉管堵塞,这是由于煤粉不太干燥,或者下粉太多而造成的。运行人员根据一次风粉管的压力计来进行判断。一旦某个风粉管发生堵塞,相当于进入炉膛的煤粉量减少了5.4%(该炉共有12只燃烧器,当两套制粉系统运行时),虽然此时该给粉机的转速并没改变。

由此可见,可测扰动是比较大的,可采用前馈补偿的办法加以克服。方法很简单:当运行人员给计算机提供运行工况改变或堵粉的信息后,计算机计算出进入炉膛煤粉量的变化量,可将其均匀地分配到其它正在运行的燃烧器的燃料控制器(给粉机)的转速上,使实际进入炉膛的燃料量不因扰动而发生太大的变化。

### 3.3 燃料系统串级控制方案的模拟研究

设功率扰动至汽压通道的传递函数为:

$$G_5(s) = \frac{P_0(s)}{N(s)} = \frac{5}{1 + 40s} \quad \left( \frac{\text{MPa}}{100\%} \right) \quad (11)$$

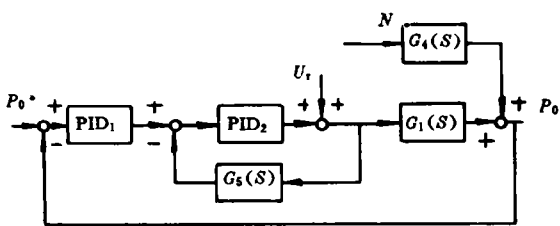


图4 串级控制系统仿真框图

仿真框图如图5所示。 $G_1(s), G_4(s), G_5(s)$ 已分别给出, $D_1(s), D_2(s)$ 依照方法Ⅱ设计如下:

$$\left. \begin{aligned} D_1(s) &= 0.0967 \left( 1 + \frac{1}{330s} + \frac{330s + 1}{330s + 1} \right) \\ D_2(s) &= 0.733 \left( 1 + \frac{1}{30s} \right) \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

以5秒为采样周期,化为离散形式,仿真结果见图5。

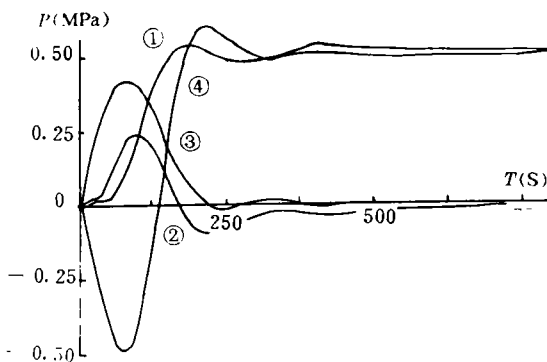


图5 串级PID汽压控制系统仿真结果

曲线①、②、③分别表示给定值扰动+0.5 MPa、燃料量内扰+5%、功率外扰-10%时的仿真结果,从图中可见,对于以上各种情况,控制系统作用下一般250秒后基本平稳,对于曲线④表示的给定值扰动+0.5 MPa、燃料量内扰-5%、功率外扰+10%同时出现时的情况,是运行中可能出现的最恶劣的工况,内、外扰动的结果使汽压降低,而此时汽压本身处于较低的水平,需要升高。汽压起初下降约0.5 MPa,随即上升,正向超调8%,以后趋稳定于+0.5 MPa。

由于对象的传递函数取为燃料量改变的百分率引起的汽压变化,故控制器输出燃料量需改变的百分率。在模出计算机之前,很容易根据控制给粉机的执行机构的特性参数作相应的换算,模出控制电压后,使给粉机转速改变的结果,进入炉膛的燃料量按控制规律的要求进行变化。不难理解这样处理对于设

计和实施控制方式的方便性。

### 4 风量控制回路的探讨

#### 4.1 串级送风控制系统

串级送风控制系统方框图如图 6 所示。系统采用燃料主调节器的输出值  $V_1$  作为送风调节器  $PID_4$  的给定值, 将检测到的风量值与其进行比较,  $PID_4$  对偏差值作控制计算, 输出送风挡板开度。外回路用氧量信号经氧量调节  $PID_3$  输出对内回路的修正值。这个方案的成功与否, 取决于风量及氧量的准确测量。图 6 的等效方框图如图 7 所示, 对象的传递函数取为:

$$G_6(s) = \frac{O_2(s)}{F_0(s)} = \frac{10}{(1 + 15s)^2} \quad \left( \frac{\%}{100\%} \right) \quad (13)$$

$$G_7(s) = \frac{F_1(s)}{F_0(s)} = \frac{10}{1 + 15s} \quad \left( \frac{\%}{\%} \right) \quad (14)$$

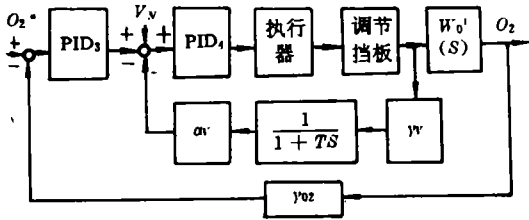


图 6 常规送风控制系统方框图

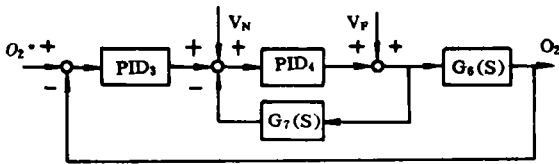


图 7 送风控制系统等效方框图

内外回路控制器的参数分别为:

$$K_{P4} = 3, \quad T_{i4} = 15 \quad (15)$$

$$K_{P3} = 0.333 \quad T_{i3} = 30 \quad (16)$$

取采样时间为 1 秒, 离散化后进行仿真,

结果如图 8 所示。图中曲线①、②、③、④分别表示燃料量增加 10%、燃料量减少 10%但氧量给定值增加 1%、氧量给定值增加 1%、氧量给定值增加 1%同时燃料量增加 10%的调节过程。

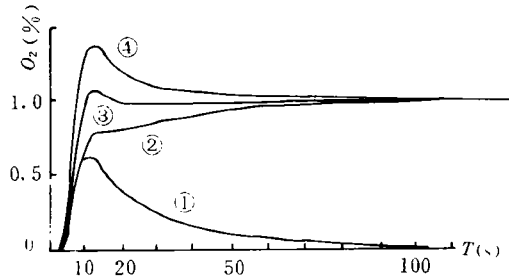


图 8 送风控制系统仿真结果

#### 4.2 对送风控制系统的分析

送、引风控制系统中, 均存在风量调节阀门的对数特性问题。在常规仪表控制系统中, 在一定负荷整定 PID 调节参数, 调节器的输出直接作用于风量控制挡板。这样做的问题是, 在不同的开度情况下, 风量调节挡板接受相同的控制命令, 动作的结果使风量改变的大小并不相同, 而控制器并没有自动跟踪风机挡板开度。由于控制器输出的风量改变的命令被执行的结果并没有使风量得到相应的改变, 故设计一个内控制回路, 通过测量实际风量的大小来实施控制作用, 使风量在不断调整中最终实现主控制器的指令, 而风量测量的不准确性使得控制效果恶化。

对数特性阀门的放大倍数为

$$K_v = \frac{d(Q/Q_{max})}{d(O/O_{max})} = 30^{(\frac{O}{O_{max}} - 1)} \ln 30 \quad (17)$$

式中  $Q/Q_{max}$  和  $O/O_{max}$  分别为风量和挡板开度与各自的最大值之比。

对数特性阀门在控制系统中实际上是一个非线性环节, 其存在导致控制质量不高。采用计算机控制时, 完全可以通过运算来消除这个非线性环节的影响。具体办法是将计算

机控制算法得到的风量的改变量被模出计算机之前,进行适当的换算,使其输出的控制指令对风机挡板控制作用的结果,是使得风量一次到位地改变相应的量,这样做将消除对数特性阀门的非线性的影响,改善调节品质。换算方法如下:

$$q = 30^{(u-1)} \quad (18)$$

$$\frac{dq/q}{du} = \ln 30 = 3.4 \quad (19)$$

$$\text{令 } \Delta q = q(n+1) - q(n) = dq,$$

$$[q(n+1) + q(n)]/2 = q,$$

$$\Delta u = u(n+1) - u(n) = du^{(8)} \text{ 则得:}$$

$$u(n+1) = \frac{q(n+1) - q(n)}{1.7[q(n+1) + q(n)]} + u(n) \quad (20)$$

计算机经控制运算后得到了风量控制信号  $q(n+1)$ ,通过上式计算得  $u(n+1)$ ,即挡板开度控制信号,模出计算机,驱动执行机构,使风量从  $q(n)$  改变到  $q(n+1)$ ,准确实现了风量控制的要求。

如果事先将风机挡板开度和风量的相关关系进行准确测量,存入计算机,计算机在得到风量控制指令后作上式所述的转换,就可使内回路在控制过程中的调节过程大大缩短,在风量和挡板开度关系准确的情况下甚至无需设置内回路即取消风量在线测量。

引风控制系统的设计在常规方法的基础上变化不大,只不过对风量和挡板开度的关系仍需要像送风控制系统设计时一样进行处理。

## 5 结 论

本文对采用常规控制方法利用计算机对电站燃煤锅炉的燃烧系统进行控制的问题进行了探讨,重点在于对适当的 PID 参数的整定方法、燃料控制回路的输入端可测内扰的补偿,以及风量控制回路中具有非线性的

风机调节阀门的处理进行了阐述,其结论无论是对从事燃烧计算机控制系统设计人员,还是对于采用常规仪表进行燃烧控制工作的人员,均有一定的参考意义。

值得说明的是,对于电站燃煤锅炉的燃烧控制而言,关键不在于采用多么先进的控制策略,而在于解决燃烧对象的测量和执行机构的问题,如入炉煤粉流量的测量、风量和风机挡板开度的关系的确定、以及电动执行机构的性能等。一旦解决了这些问题,即使采用 PID 控制方式,也能满足生产的需要。

另外,为了避开直接准确测量煤粉流量的困难,而又要准确知道入炉燃料量的变化,我们提出采用炉膛断面辐射能量来控制燃烧的思想,这个想法吸取了采用炉膛温度控制燃烧的思想<sup>(9)</sup>中的合理部分,又克服了其不足。炉膛断面辐射能量能快速响应入炉燃料量的变化,从物理意义上不难理解,而且,虽然炉内燃烧工况是波动的,但断面辐射能量的总和是相对稳定的。我们正在对此加以深入的研究。相信以此为基础的燃烧控制方式将可有效地改变目前燃烧控制不适应实际需要的落后局面。

## 参 考 文 献

- 1 廖鸿培. 发电厂的计算机控制. 水利电力出版社, 1987.8
- 2 Chien K L. et al. Dynamic analysis of a boiler. Transaction of the ASME. Nov. 1958
- 3 Rees N W. et al. Optimal co-ordinated control of boiler-turbines plant. IFAC Symposium, 1977
- 4 牛培锋等. 采用沸腾锅炉的单元机组汽压自适应控制系统. 热动力工程, 1992(6)
- 5 王永初. 自动调节系统工程设计. 机械工业出版社, 1983
- 6 北森俊行. 制御对象の部份的知识に基づく制御系统设计法. 第 14 回计测制御学会论文集, 1979
- 7 王永初. 滞后过程的预估与控制. 机械工业出版社, 1981
- 8 陈冬林. 工业锅炉微机控制的仿真研究. 华中理工大学硕士论文, 1988
- 9 郭显塘. 工业锅炉燃烧系统优化控制. 自动化仪表, 1988.6

cessed were the heat transfer data of the high-pressure two-phase steam/water flow in  $\Phi 32 \times 3$  mm slightly inclined tubes and satisfactory results have been obtained. **Key words:** *temperature field, source item, two-phase flow, heat release factor, boundary conditions, model*

- (98) **Numerical Simulation of Water Film Flow on a Rotating Plate** ..... Li Xuelai (*Harbin Marine Boiler & Turbine Research Institute*)

A numerical simulation is conducted of water film flows on a steam flow-swept rotating plate. The speed distribution of such water film flows has been determined along with the water film thickness distribution variation relationship. **Key words:** *rotating plate, water film, steam turbine, wetness removal*

- (104) **An Investigation of Built-up Laminated Sheet Characteristics under the Condition of Transverse Displacements** ..... Wang Xinfeng, Fang Honghui (*Nanjing Aeronautical Institute*)

By the use of Hellinger-Reissner variation functional the authors present a hybrid single-element model of multi-layer thin sheets and have made an analytical computation of the characteristics of built-up laminated sheets based on the use of hybrid single elements in the presence of transverse displacements. The correctness of the computation method has been corroborated by experiments. **Key words:** *built-up laminated sheet, hybrid single element, stress, calculation*

- (111) **An Exploratory Investigation of the Computer-Based Control of Utility Coal-Fired Boiler Furnace Combustion** ..... Zhou Huaichun, Han Caiyuan (*Key National Laboratory for Coal Combustion Research at Central China Polytechnical University*)

In this paper is discussed the problem concerning the coal-firing system computer-based control for utility coal-fired boilers through the use of conventional control techniques. The authors focus on the following aspects: simulation research approaches, proper PID parameter setting method, the compensation of measurable internal perturbation by the fuel control loop, the treatment of nonlinear fan regulation valve in the air flow rate control loop. Some new understanding as regards a new type of combustion control mode is also presented. **Key words:** *boiler, combustion control, computer applications*

- (117) **Rapid Determination of Coal's Proximate Analysis with the Help of a Thermogravimetric Method** ..... Zhu Qunyi, Zhao Guangbo, Huang Yimin, Chen Chongsu, Yu Hongbin (*Harbin Institute of Technology*)

The authors explore the possibility of determining coal's proximate analysis with the aid of thermogravimetric method and present the test conditions and results. It is found that the results of proximate analysis based on the TG method are in good agreement with those obtained with a standard method. **Key words:** *thermal balance, thermogravimetric method, coal's proximate analysis*

- (121) **The Finite-Time Thermodynamic Performance of Heat Pump Plants with the Heat Leak Effect being Taken into Account** ..... Chen Lingen, Sun Fengrui, Chen Wenzhen (*Wuhan Naval Academy of Engineering*)