

变偏置双交叉限幅燃烧控制系统设计及应用研究

李来春¹, 邓彩霞², 杨明极¹

(1. 哈尔滨理工大学 测通学院, 黑龙江 哈尔滨 150040;

2. 哈尔滨工程大学 自动化学院, 黑龙江 哈尔滨 150001)

摘要: 在双交叉限幅燃烧控制系统的基础上, 针对船用蒸汽动力装置主锅炉负荷变化频繁及幅度大的运行特点, 设计了一种变偏置双交叉限幅燃烧控制系统, 并对所设计的变偏置双交叉限幅燃烧控制系统在船用主锅炉燃烧控制系统中的应用进行了仿真实验研究, 给出了变偏置函数的最佳取值范围。

关键词: 船用主锅炉; 变偏置; 双交叉限幅; 控制系统

中图分类号: TK229; TK223.7 文献标识码: A

1 引言

船用蒸汽动力装置受船舶航行特点的决定, 主锅炉的负荷不但变化频繁, 而且变化幅度大, 一般负荷变化范围为 10%~100%。这就对主锅炉燃烧控制系统提出了非常高的要求, 首先要求燃烧控制系统具有良好的快速性, 即控制系统跟踪负荷变化的响应速度要快; 其次要求燃烧控制系统具有良好的经济性, 即主锅炉无论升负荷还是降负荷都要求具有较佳的风/油配比, 即不冒黑烟也不冒白烟。双交叉限幅燃烧控制系统由于采用燃料量与空气流量之间相互制约, 并限制过剩空气系数 μ 的瞬态变化的控制方法, 可以保证锅炉具有较高的燃烧效率, 因此具有良好的经济性, 同时也具有较好的安全性, 因此双交叉限幅燃烧控制系统目前在电站锅炉和工业锅炉上已经获得应用。但是, 双交叉限幅燃烧控制系统是用牺牲控制系统跟踪负荷变化的响应速度, 来换取燃料量与空气流量之间相互制约, 并限制过剩

空气系数 μ 的瞬态变化, 从而达到节约能源的目的。双交叉限幅燃烧控制系统特别适用于负荷基本稳定, 变化缓慢的锅炉, 这种控制系统显然不能满足船用主锅炉对变负荷快速性的要求。对双交叉限幅燃烧控制系统的原理分析可知, 影响控制系统响应性能的主要参数是限幅中的偏置值的选取, 由于双交叉限幅燃烧控制系统中偏置值采用了固定常数, 偏置值越大, 变负荷时系统响应速度越快, 但系统经济性会有所降低; 反之, 偏置值越小, 系统响应速度越慢, 但系统经济性会有所提高。由此得到启示, 若控制系统中偏置值不采用固定常数, 而是根据系统中某些参数的变化情况动态地进行改变, 于是在双交叉限幅燃烧控制系统的基础上, 通过对偏置值进行动态改变的设计, 便产生了变偏置双交叉限幅燃烧控制系统, 该控制系统兼顾了变负荷响应性能和经济性。

2 船用主锅炉变偏置双交叉限幅燃烧控制系统的设计

针对船用主锅炉的运行特点, 在双交叉限幅燃烧控制系统的基础上, 结合船用主锅炉燃烧系统的实际情况, 设计的变偏置双交叉限幅燃烧控制系统原理图, 如图 1 所示。本控制系统设计的重点在于变偏置函数的设计及变量的选取。船用主锅炉燃烧控制的目的是控制锅炉出口过热蒸汽压力为给定值, 以便适应主机负荷的变化要求。因此, 图 1 中将主蒸

收稿日期: 2002-04-02

作者简介: 李来春(1963-), 男, 吉林榆树人, 现在哈尔滨·第七 0 三研究所工作, 研究员。

[5] 张乃尧. 用遗传算法优化模糊控制器的隶属度参数[J]. 电气自动化, 1996(1): 4-6.

[6] 罗万金. 电厂热工过程自动调节[M]. 北京: 水利电力出版社, 1996.

汽压力的给定值与测量值的差值作为变偏置折线函数 $f_1(x)$ 的输入变量, 而变偏置折线函数 $f_1(x)$ 又作为正偏置运算函数 $f_4(x)$ 和 $f_6(x)$ 、负偏置运算函数 $f_5(x)$ 和 $f_7(x)$ 的输入变量, 由函数 $f_1(x) \sim f_7(x)$ 构成了变偏置双交叉限幅系统。图 1 中:

$$E = f_4(x) = F \cdot [1 + K_1 \cdot f_1(x)] \quad (1)$$

$$D = f_5(x) = F \cdot [1 - K_2 \cdot f_1(x)] \quad (2)$$

$$B = f_6(x) = f_3(X) \cdot [1 + K_3 \cdot f_1(x)] \quad (3)$$

$$C = f_7(x) = f_3(X) \cdot [1 - K_4 \cdot f_1(x)] \quad (4)$$

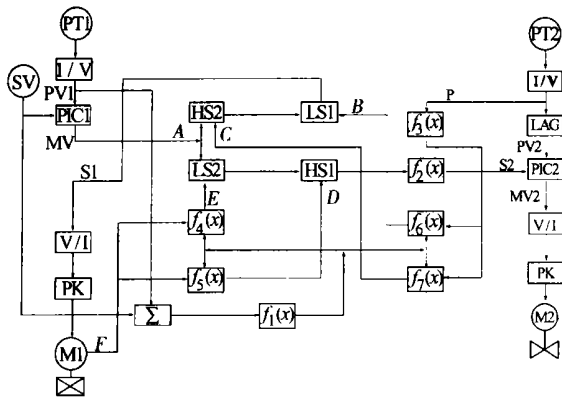


图 1 变偏置双交叉限幅燃烧控制原理图

图 1 中: PT1—主蒸汽压力变送器, PT2—炉前空气压力变送器, I/V—电流/电压变换环节, V/I—电压/电流变换环节, PIC1—主蒸汽压力控制运算环节, PK—手动操作器, M1—燃油流量电动调节滑阀组, M2—炉前空气压力调节阀, HS1、HS2—高值选择器, LS1、LS2—低值选择器, Σ —加法器, $f_1(x)$ —变偏置折线函数, $f_2(x)$ —油/风变换折线函数, $f_3(x)$ —风/油变换折线函数, $f_4(x)$ —正偏置运算函数, $f_5(x)$ —负偏置运算函数, $f_6(x)$ —正偏置运算函数, $f_7(x)$ —负偏置运算函数。

以上四公式中 $K_1、K_2、K_3、K_4$ 为变偏置放大系数。式(1)和式(2)中 F 为燃油流量电动调节滑阀组的开度, 因为滑阀组的开度与燃油流量为一一对应关系, 所以该开度在式(1)和式(2)中代表燃油流量。 $f_4(x)$ 表示燃油流量测量值加上变偏置值 $K_1 \cdot f_1(x)$, $f_5(x)$ 表示燃油流量测量值减去变偏置值 $K_2 \cdot f_1(x)$, $f_6(x)$ 表示根据空气压力测量值计算出的所需燃油量加上变偏置值 $K_3 \cdot f_1(x)$, $f_7(x)$ 表示根据空气压力测量值计算出的所需燃油量减去变偏置值 $K_4 \cdot f_1(x)$ 。

3 变偏置双交叉限幅燃烧控制系统的工作原理

根据船用主锅炉燃油调节系统配置情况, 图 1 中燃烧所需的空气流量通过控制主锅炉炉前空气夹层中空气压力的方法供给。系统中没有设置燃油流量调节器, 而是由主蒸汽压力调节器直接控制燃油流量调节滑阀组, 在该回路中, 由高值选择器 HS2 和低值选择器 LS1 来选通 MV、 $f_1(x)$ 、 $f_6(x)$ 其中一个量作为燃油流量调节滑阀的控制信号。在空气压力调节回路中, 由低值选择器 LS2 和高值选择器 HS1 来选通 MV、 $f_4(x)$ 、 $f_5(x)$ 其中一个量, 再经过油/风变换后作为空气压力调节器的给定值。

图 2 表示当负荷变化时, 变偏置双交叉限幅燃烧控制系统中有关参数的过渡过程曲线。下面分别对负荷稳定、升负荷和降负荷这三种状态进行分析。

当系统处于稳定状态时, 主蒸汽压力调节器 PIC1 的输出信号 A (MV) 同时作为燃油流量调节滑阀的控制信号和空气压力调节回路的给定值信号, 此时过剩空气系数等于给定值 μ_s , 如图 2(d) 所示。

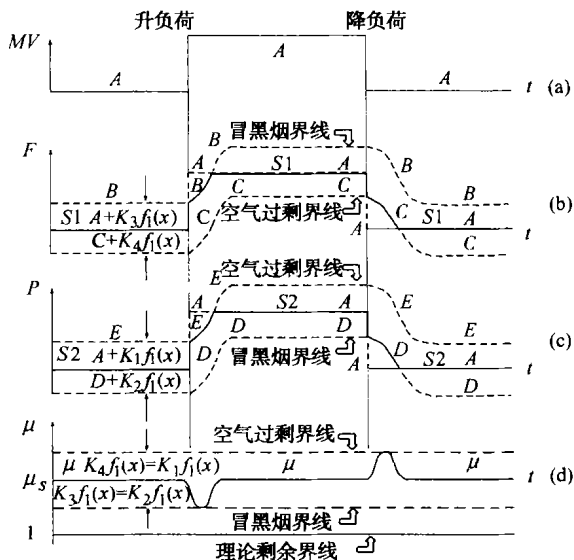


图 2 负荷变化时图 1 中有关参数的过渡过程曲线

当升负荷时, 信号 A 急剧上升, 发生正跳变, 如图 2(a) 所示。先看空气压力 (P) 调节回路的情况, 见图 2(c)。开始 $A < E$, LS2 选通 A 。当 A 正跳变到 $A > E$ 时, LS2 选通 E , A 被中断, 同时 $E > D$, HS1 又选通 E , 经过 $f_2(x)$ 油/风变换折线函数变换后作为空气压力给定值 $S2$, 使空气压力随着 E 的增加而增

加, 即空气压力随着燃油流量的增加而增加, 交叉限制开始。当 E 增加到 $E > A$ 时, LS2 选通 A , E 被中断, 同时 $A > D$, HS1 又选通 A , 经过 $f_2(x)$ 油/风变换折线函数变换后作为空气压力给定值 S_2 , 交叉限制结束, 此时系统恢复到稳定状态; 再看燃油流量 (F) 的调节情况, 见图 2(b)。开始时 $A > C$, HS2 选通 A 。当 A 正跳变到 $A > B$ 时, LS1 又选通 B , A 被中断, B 作为燃油流量调节滑阀的控制信号, 使燃油流量随着 B 值的增加而增加, 即燃油流量随着炉前空气压力的增加而增加, 交叉限制开始。当 B 增加到 $B > A$, 同时 $A > C$, HS2 选通 A , LS1 也选通 A , A 作为燃油流量调节滑阀的控制信号, 交叉限制结束, 此时系统恢复到稳定状态。至此, 升负荷的过渡过程结束。在这个动态过程中, 燃油流量和炉前空气压力互相影响交替增加, 实现了交叉限幅的功能。

当降负荷时, 信号 A 急剧下降, 发生负跳变, 如图 2(a)。先看燃油流量的调节情况, 见图 2(b)。起初 $A > C$, HS2 选通 A 。当 A 负跳变到 $A < C$ 时, HS2 选通 C , A 被中断, 同时 $C < B$, LS1 又选通 C , C 作为燃油流量调节滑阀的控制信号, 使燃油流量随着 C 值的减小而减小, 即燃油流量随着炉前空气压力的减小而减小, 交叉限制开始。当 C 减小到 $C < A$ 时, HS2 选通 A , 同时 $A < B$, LS1 也选通 A , A 作为燃油流量调节滑阀的控制信号, 交叉限制结束, 此时系统恢复到稳定状态; 再看空气压力调节回路的情况, 见图 2(c)。开始时 $A < E$, LS2 选通 A 。当 A 负跳变到 $A < D$ 时, HS1 又选通 D , 经过 $f_2(x)$ 油/风变换折线函数变换后作为空气压力给定值 S_2 , 使空气压力随着 D 的减小而减小, 即空气压力随着燃油流量的减小而减小, 交叉限制开始。当 D 减小到 $D < A$ 时, 同时 $A < E$, LS2 选通 A , HS1 也选通 A , 经过 $f_2(x)$ 油/风变换折线函数变换后作为空气压力给定值 S_2 , 交叉限制结束, 此时系统恢复到稳定状态。至此, 降负荷的过渡过程结束。在这个动态过程中, 空气压力和燃油流量互相影响交替减小, 实现了交叉限幅的功能。

上述升降负荷过程中, 空气压力给定值的上下限限幅曲线 (E 值和 D 值曲线) 及燃油流量调节滑阀控制信号的上下限限幅曲线 (B 值和 C 值曲线) 并不是平滑过渡, 而是随着变偏置函数 $f_1(x)$ 值的变化而上下波动, 也就是随着主蒸汽压力偏离给定值的大小而改变。当主蒸汽压力测量值与给定值的差值增大时, $f_1(x)$ 值也会增大, 系统加大偏置范围, 使

跟踪负荷变化的速度提高。反之, 当主蒸汽压力测量值与给定值的差值减小时, $f_1(x)$ 值也会减小, 系统减小偏置范围, 使系统经济性提高。由此分析得知, 系统变负荷时, 本控制系统也兼顾了经济性和系统响应性能。需要说明的是, 变偏置函数 $f_1(x)$ 的值不允许随着主蒸汽压力测量值与给定值差值的增大而无限制的增加, 其范围是有限制的, 是受过剩空气系数 μ 的允许范围限制的。图 2 中, 升降负荷时, 过剩空气系数 μ 的过渡过程曲线只表示变化趋势, 实际曲线也可能在此变化趋势曲线上上下下波动。

4 变偏置双交叉限幅燃烧控制系统的仿真实验

由于变偏置函数 $f_1(x)$ 值的给定范围是受过剩空气系数 μ 的允许范围限制的, 变偏置双交叉限幅燃烧控制系统就是在兼顾系统经济性和响应性能的情况下, 寻求偏置值的最佳取值范围。仿真实验的目的也就是确定偏置函数 $f_1(x)$ 值的最佳取值范围, 以供系统实际应用借鉴。图 3 中依次对应表 1 所给的四组不同的偏置函数 $f_{11}(x) \sim f_{14}(x)$ 值时, 所得到的仿真实验曲线, 图中以主蒸汽压力给定值的阶跃变化作为系统扰动, K 参数取值为: $K_1 = K_4 = 0.5$, $K_2 = K_3 = 1.0$ 。表 1 中 $x = SV - PV$ 。

表 1

$x/\%$	$f_{11}(x)/\%$	$f_{12}(x)/\%$	$f_{13}(x)/\%$	$f_{14}(x)/\%$
-100.0	8.0	12.0	18.0	24.0
-10.0	8.0	12.0	18.0	24.0
-8.0	6.0	8.0	12.0	16.0
-6.0	6.0	8.0	12.0	16.0
-3.0	4.0	4.0	8.0	12.0
0.0	4.0	4.0	8.0	12.0
3.0	4.0	4.0	8.0	12.0
6.0	6.0	8.0	12.0	16.0
8.0	6.0	8.0	12.0	16.0
10.0	8.0	12.0	18.0	24.0
100.0	8.0	12.0	18.0	24.0

图 3 每组曲线中: (1) 为空气过剩系数 μ 曲线, (2) 为主蒸汽压力给定值 SV 、测量值 $PV1$ 、控制输出值 A 曲线, (3) 为空气压力给定值 S_2 、测量值 $PV2$ 、控制输出值 $MV2$ 曲线。图 3(a) 只给出了升负荷过渡过程曲线, 图 3(b) ~ (d) 包括了升、降负荷过渡过程曲线。需要说明的是, 图 3 的每组曲线中 (3) 与 (1) 和 (2) 曲线在时间轴不一致, 原因是受仿真组态软件功能的限制, 一次变负荷实验只能记录两个参数的时时变化曲线, 因此, 图中曲线是在相同的条件下重

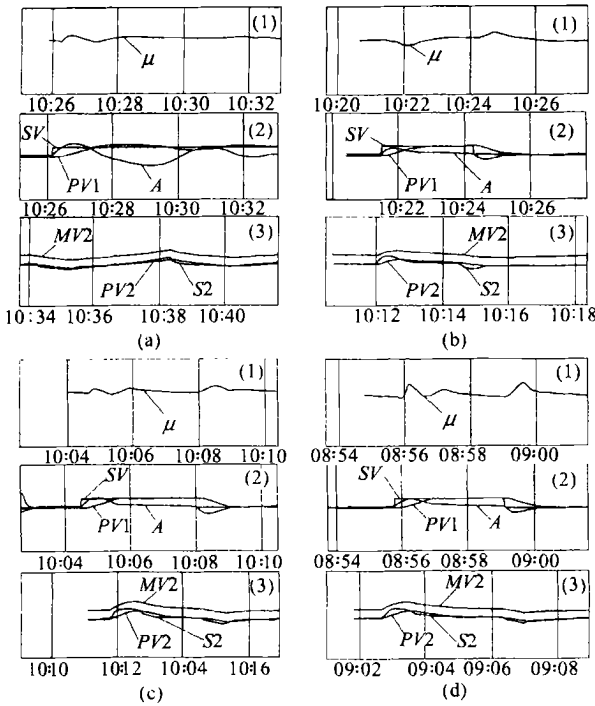


图 3 变偏置双交叉限幅燃烧控制系统仿真实验曲线

复两次实验所记录参数时时变化曲线。

5 结束语

(1) 从四组仿真实验曲线可以看出, 过剩空气系数 μ 的波动范围随着偏置函数 $f_1(x)$ 值的增加而

增大, 也就是系统的经济性随着偏置函数 $f_1(x)$ 值的增加而降低, 与原理分析一致, μ 的过渡过程曲线与理论分析相符;

(2) 控制系统的过渡过程时间随着偏置函数 $f_1(x)$ 值的增加而减小, 也就是系统跟踪负荷变化的速度随着偏置函数 $f_1(x)$ 值的增加而增加, 与理论分析一致;

(3) 从兼顾变偏置双交叉限幅燃烧控制系统的经济性和响应性能的观点出发, 结合四组实验曲线可得出如下结论, 变偏置函数 $f_1(x)$ 值的最佳取值范围介于 $f_{12}(x)$ 和 $f_{13}(x)$ 之间;

(4) 本文所研究设计的控制系统除可应用于船用主锅炉燃烧控制系统外, 还可以用于陆用负荷变化较大的燃油锅炉, 但对于不同的锅炉需要根据实际情况对变偏置函数 $f_1(x)$ 的取值范围进行调整。

参考文献:

- [1] 李来春, 许松男. 蒸汽动力主锅炉燃烧控制系统[J]. 热能动力工程, 2000, 15(2): 175-177.
- [2] 王锦标, 方崇智. 过程计算机控制[M]. 北京: 清华大学出版社, 1992.
- [3] 李 章, 张 宁. 舰用增压锅炉装置[M]. 北京: 海潮出版社, 2000.
- [4] 杨献勇. 热工过程自动控制[M]. 北京: 清华大学出版社, 2000.
- [5] 陈来九. 热工过程自动调节原理和应用[M]. 北京: 水利电力出版社, 1986.

(渠 源 编辑)

燃气轮机通流部分三维设计的现代方法

据《теплоэнергетика》2002 年 9 月号报道, 近年来 ЦИАМ (中央巴拉诺夫 П. И. 航空发动机研究所) 在燃气轮机空气动力学领域内取得了重要的研究成果。

ЦИАМ 根据部门内积累的试验资料, 制定了预测涡轮通流部分内气动力损失的方法; 制定了基于欧拉方程的涡轮通流部分内无粘性和准粘性气体流动快速的二维和三维计算方法; 制定了基于纳维尔-斯托克斯方程的粘性气体流动的二维和三维计算方法。

应用 ЦИАМ 制定的燃气轮机设计新技术可使现代高效高负荷冷却涡轮建造的时间缩短、费用降低。

(思娟 供稿)

ture of a Membrane Water-wall [刊, 汉] / LI Zhi-hong, LIU Shi (Institute of Engineering Thermophysics under the Chinese Academy of Sciences, Beijing, China, Post Code: 100080), LIU Wen-tie (College of Energy Sources under the Harbin Institute of Technology, Harbin, China, Post Code: 150001) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2003, 18(2). 173—176

By using a finite difference method a numerical calculation was performed of the temperature field distribution of membrane water-walls with rectangular fins and fillet welded fins. Concerning the above two kinds of finned tube waterwall the influence of such factors as fin size, heat flow density, working medium heat-exchange factor on wall temperatures are analyzed. Also discussed is the relationship between tube pitch and allowable wall temperature. Moreover, pertinent calculation procedures were worked out. All of the above may serve as reference information for the design and operation of boilers. **Key words:** membrane water wall, heat transfer, temperature field

离心叶轮过流截面沿流程变化的计算方法 = **A Method for Calculating the Changes of Flow Channel Section of a Centrifugal Impeller along Its Flow Path** [刊, 汉] / CHEN Ying, LI Yan-tao, GAO Hui-ying (Harbin No. 703 Research Institute, Harbin, China, Post Code: 150036) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2003, 18(2). 177-179

A method for calculating the variation of flow channel section of a centrifugal impeller along its flow path was obtained through a geometric analysis and strict mathematical deduction of the impeller flow path, thus providing an analytical solution of the flow channel section. In a specific engineering case a design method based on the above approach was employed followed by an adjustment of the impeller design. With the elimination of gas-flow separation phenomenon and the realization of higher impeller efficiency one can conclude that relatively good results have been achieved. **Key words:** centrifugal compressor, flow path, flow channel section

用FCGA 优化的锅炉给水自适应模糊控制系统的设计 = **The Design of a FCGA (Fuzzy Control Genetic Algorithm) Optimization-based Self-adaptive Fuzzy Control Scheme for a Boiler Feedwater System** [刊, 汉] / DOU Chun-xia (Electric Engineering Institute under the Yanshan University, Qinhuangdao, Hebei Province, China, Post Code: 066004) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2003, 18(2). 180—182

Taking account of the specific features of the water feeding process for a drum boiler, the authors have designed a type of self-adaptive fuzzy controller with its subordinate parameters being optimized by the use of a fuzzy control-based genetic algorithm. The results of a theoretical analysis and simulation indicate that the control scheme under discussion is highly effective in solving a variety of problems. The latter include the delay of inner perturbation characteristics of boiler feedwater and the emergence of "false water level" during steam flow rate and thermal load disturbances. The method features rapid adaptability and exceptional robustness, enjoying a high potential for engineering applications. **Key words:** self-adaptation, fuzzy control, genetic algorithm, robustness

变偏置双交叉限幅燃烧控制系统设计及应用研究 = **The Design and Applied Research of a Combustion Control System Featuring Variable Offset and Dual-crisscross Amplitude Limit** [刊, 汉] / LI Lai-cun, YANG Ming-ji (Survey and Communications College under the Harbin University of Science and Technology, Harbin, China, Post Code: 150040), DEN Cai-xia (Automation College under the Harbin Engineering University, Harbin, China, Post Code: 150001) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2003, 18(2). 183—186

Based on a combustion system featuring dual-crisscross amplitude limit and in the light of high frequency and wide range of load changes specific to the main boiler of a steam propulsion plant the authors have designed a combustion control system characterized by a variable offset and dual-crisscross amplitude limit. In addition, the application of the above-mentioned control system in the combustion control of a marine main boiler has been studied through simulation tests with an

optimum range of variable offset functions being eventually identified. **Key words:** marine main boiler, variable offset, double-crisscross amplitude limit, control system

椭圆封头旋压控制参数确定的研究 = **An Investigation Concerning the Determination of Spinning Control Parameters for an Elliptical Boiler Head** [刊, 汉] / LIU Xing-jia, WANG Zuo-min, SUN Ming-qi, et al (Thermal Energy Engineering Department, Harbin University of Science & Technology, Harbin, China, Post Code: 150080) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2003, 18(2). 187—189

The technical difficulty of a profile spinning method for making elliptical boiler heads consists in the determination of relevant technological control parameters. On the basis of analyzing the forming mechanism of elliptical-head profile spinning a locus equation for the spinning process has been worked out. Then, proposed in a relatively systematic way is a method for the determination of the following: the parameters of the involute profile form-plate for the control of a boiler head spinning, and the spacing and sequence of the spinning process. This was followed by a successful technological test. The above information can serve as a guide during the determination of profile (or numerical control) spinning control parameters for other similar rotating bodies. **Key words:** boiler head, spinning, control parameters, profile form plate

柴油机注汽涡轮增压系统 = **Steam-injected Turbocharged System of a Diesel Engine** [刊, 汉] / WEN Xue-you, LU Ben, XIA Jun-hong (Harbin No. 703 Research Institute, Harbin, China, Post Code: 150036) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2003, 18(2). 190—193

During the low load operation of a turbocharged diesel engine there may emerge a series of inherent characteristics, such as insufficient supercharged pressure, a small excess air factor for combustion and high exhaust-gas temperature, etc. To deal with the above deficiencies, a new method has been proposed. It involves the use of exhaust waste heat of a supercharger to produce water steam, which is to be injected into a turbine to enhance the pressure ratio and airflow rate of the supercharger. This will result in an improved matching of the turbocharger and diesel and a better diesel performance. **Key words:** turbocharging, steam injection

废旧含氯塑料热解及其能源利用研究 = **A Study of the Pyrolysis of Chlorine-containing Scrap Plastics and Their Waste Energy Utilization** [刊, 汉] / XIAO Rui, JIN Bao-sheng, ZHANG Ming-yao (Education Ministry Key Lab on Clean Coal Combustion and Power Generation under the Southeastern University, Nanjing, China, Post Code: 210096) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2003, 18(2). 194—196

Chlorine-containing plastics (polyvinyl chloride) in municipal waste are a major source of corrosion and secondary pollution in municipal solid-waste incinerators. With the use of a thermogravimetric-differential analyzer the pyrolytic characteristics are studied of PVC (polyvinyl chloride) and HDPE (high density polyethylene) both with a chlorine content of 53.8%, and CPE (chlorinated polyethylene) with a chlorine content varying from 10% to 46%. Based on the test results of the graded pyrolysis of chlorine-containing plastics the authors have proposed a technological process for the pyrolysis of the chlorine-containing plastics and the combustion of their residue. Furthermore, the performance of a power plant based on the above-cited process is calculated and analyzed. **Key words:** chlorine-containing plastics waste, pyrolysis, combustion, waste-energy recovery

一种新颖的高温高压静电除尘技术 = **An Innovative Technology of High-temperature and High-pressure Electrostatic Precipitation** [刊, 汉] / GU Zhong-zhu (College of Power Engineering under the Nanjing Normal University, Nanjing, China, Post Code: 210092), CAI Song, WEI Qi-dong (Research Institute of Thermal Energy Engineering under the Southeastern University, Nanjing, China, Post Code: 210096) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2003, 18(2). 197—199