

# 电厂负荷调度的智能决策方法

于国强<sup>1</sup>, 吕剑虹<sup>1</sup>, 龚 诚<sup>2</sup>

(1. 东南大学 动力工程系, 江苏 南京 210096; 2. 天生港发电有限公司, 江苏 南通 226000)

**摘 要:** 等微增法和动态规划法是目前常用的电厂负荷优化调度方法, 文中对这两种方法进行了分析比较, 指出了这两种方法在实际负荷调度过程中的缺点。在此基础上, 提出了基于减小电厂发电成本并融合实际负荷调度经验的电厂负荷智能决策算法, 并针对南通天生港发电有限公司的 4 台 125 MW 机组, 研制了基于负荷智能决策算法的优化负荷调度系统。

**关 键 词:** 负荷调度; 等微增法; 动态规划法; 智能决策算法; 规则库

中图分类号: TM73 文献标识码: A

## 1 引 言

随着厂网分开及电厂之间竞价上网政策的推行, 降低全厂煤耗及发电成本已成为电厂最关心的问题, 其中实现电厂负荷优化分配是降低全厂发电成本的途径之一。对于有多台发电机组的电厂, 在满足全厂总负荷一定的前提条件下, 各台机组所带的负荷有许多不同的组合, 而不同的负荷组合会使全厂的发电煤耗有所不同。电厂负荷优化分配系统就是要在这些许多不同的组合中挑选出使电厂煤耗最小的组合。只要使各台机组的负荷调整到这一组合所规定的负荷, 就一定会使全厂的发电成本最低。

## 2 常规的负荷分配方法

目前, 关于机组负荷优化分配的研究较多, 常见的两种方法为: 等微增法和动态规划法。

### 2.1 等微增法

等微增法是以燃料消耗量最小为优化目标, 其基本的原理为: 电厂各机组间负荷的经济分配, 可等效为一个函数求极值的问题, 即在电厂各机组负荷  $N_i (i = 1 \dots, n)$  之和等于电厂所需总负荷的前提条件下, 通过使全厂的总燃料消耗量  $B (= \sum B_i, B_i$  为

第  $i$  台机组的燃料消耗量) 为最小值, 从而确定各台机组应带的负荷  $N_i (i = 1 \dots, n)$ 。可以证明, 当  $\frac{dB}{dN}$

$$= \frac{dB_1}{dN_1} = \frac{dB_2}{dN_2} = \dots = \frac{dB_n}{dN_n}, \text{ 而且 } \frac{d^2 B_i}{dN_i^2} > 0 (i = 1, 2,$$

$\dots, n)$  时, 总燃料消耗量  $B$  可达到最小值, 其物理意义为: 若全厂的燃料消耗微增率与各机组燃料消耗微增率相等, 则全厂总燃料消耗量最少, 也就是说当电厂机组间负荷的分配达到了等燃料消耗微增率时, 就实现了负荷的最佳分配。在理论上, 基于等微增法的负荷分配是合理的, 但在实际的应用过程中会存在一定的问题: (1) 在用等微增法计算最优的负荷分配时, 首先需要获得各机组准确的性能曲线, 而机组性能曲线一般是通过某一次热力实验获得的, 但当机组运行一段时间后, 由于设备状态及煤种等多方面的原因会使各机组的性能曲线发生变化, 这样在负荷优化分配中所采用的机组煤量特性曲线与机组实际的煤量特性曲线会有较大的偏差, 必然会影响负荷分配结果的正确性; (2) 这种方法要求各机组的煤量特性曲线必须单调可微; (3) 在负荷的分配过程中除考虑机组的煤耗外, 没有考虑其它许多重要的因素, 如机组的安全性及负荷调整的复杂性等, 也没有融合值长的负荷分配经验, 其结果必然会造成许多负荷分配结果与人的决策思维不一致, 而且也会使机组的负荷改变过于频繁, 如: 优化结果可能会出现要求某一机组仅增加 1 kW (基于只有几百瓦), 而要求另一机组减少仅几百瓦的这种不合理的结果, 最终结果将使负荷优化分配系统难于使用。

### 2.2 动态规划法

动态规划属运筹学的范畴, 是研究对多阶段决策过程求最优策略的方法。基于贝尔曼提出的最优化原理, 对多阶段决策问题进行求解。最优化原理可归结为一个递推关系表达式。递推关系式一般没有明显的解析式, 常采用离散造表的方法<sup>[2]</sup>。当初

始条件已知时, 解题过程一般为逆顺序, 即从最终状态开始, 采用改进的枚举法, 遍历各种情况, 选择使目标函数最优的一种组合<sup>[1]</sup>。

采用动态规划法进行负荷调度的步骤:

(1) 列出目标函数(如等微增法, 以燃料消耗量最小为目标函数)。

(2) 通过实验, 求出机组燃料消耗特性曲线或特性表。

(3) 根据机组燃料消耗特性曲线或特性表, 求出按不同机组台数  $i$  组合的组合顺序, 依组负荷  $N_i$  的大小顺序, 求出与之对应的最小组合目标函数及单机负荷  $N_i$ , 得到各种可能情况。

(4) 在第(3)步得到的各种可能情况中, 采用逆序分配的方法, 求出每种负荷情况下, 目标函数最小的一种, 作为负荷分配时的机组负荷。

由于动态规划法并不需要对机组燃料特性曲线求导用动态规划法进行负荷调度并不要求机组性能曲线单调可微, 所以比等微增法具有更广的使用范围。但是动态规划法同样具有较多的缺点: (1) 该方法同样依赖于机组特性曲线; (2) 在实际的负荷调度中, 该方法没有考虑机组的当前负荷, 导致有时只改变一台机组就能满足负荷调度的情况下, 有可能要改变多台机组负荷, 这就必然导致机组负荷的频繁改变, 不利于经济性生产。

### 3 智能决策方法

人工智能是利用计算机程序和程序设计技术来认识普通的智能原理和具体的人类思想。它是计算机科学的一个重要分支, 它的研究领域十分广泛, 涉及模式识别、物景分析、自然语言理解、数据库的智能检索、博弈、自动定理证明、自动程序设计、专家系统、机器翻译、机器学习、机器人等领域<sup>[3~4]</sup>。

针对常规方法依赖于严格的机组特性曲线的缺陷, 结合动态规划法适应范围广的优点, 采用智能决策方法。通过对数据库的智能检索, 编程实现智能算法, 模仿运行人员的操作习惯, 在智能检索的结果中选出最优的规则, 作为决策输出。这样通过数据库的不断更新, 不依赖于机组特性曲线, 就能够实现机组负荷的改变, 并且使改变负荷机组的台数减到最少。

#### 3.1 规则库的建立

根据实际机组运行的负荷组合, 结算出成本电价。若认为该组合比较理想, 就可当作一条规则, 输

入规则库。当规则库中的规则数超过一万条以后(此时基本上已经覆盖了所有的组负荷与机组组合), 在输入新的规则时, 查找与所有已有规则中距离最小的一组覆盖。采用这种方法覆盖的原因在于: 随着机组的运行, 机组的性能会发生改变, 而老的规则是在原来的机组性能情况下产生的, 已经不适应当前的机组情况, 所以被覆盖掉是比较合理的。

#### 3.2 决策算法

在规则库已经建立的前提下, 遵循决策依据 A、B, 进行决策计算。其中: A—改动负荷机组台数最少; B—成本电价在允许范围之内。

(1) 得到负荷指令和当前机组负荷, 定出所需改变的总负荷及死区负荷;

(2) 根据负荷指令, 遍历规则库, 查找出总负荷处于指令负荷加减 20 MW 之间的所有规则;

(3) 在上述规则中剔除成本电价较高的规则, 并将剩余的规则按比例缩放, 使其总负荷等于指令负荷;

(4) 比较当前机组负荷与每条规则中对应机组负荷之差与死区负荷的大小, 若存在只有一台机组负荷差大于死区负荷的规则, 则以成本最低为原则, 选出成本电价最低的一条, 将负荷改变量加在负荷差超出死区负荷的那台机组上。若有超上(下)限, 则将该机组置为上(下)限, 剩余负荷改变量加在余下机组中距上(下)限最远的机组上;

(5) 若不存在符合(4)的规则, 则查找存在两台机组负荷差大于死区负荷的规则。同样以成本最低为原则, 选出成本电价最低的一条, 根据这两台机组距其上(下)限负荷的距离, 按比例将负荷改变量加在其上。若负荷超出上(下)限, 则同(4)处理;

(6) 依此类推, 直至结束所有机组负荷差都大于死区负荷情况的计算;

(7) 若不存在总负荷处于指令负荷加减 20 MW 之间的规则, 则根据各机组距上(下)限负荷的距离, 按比例将负荷改变量加在各台机组上。

#### 3.3 决策算法的应用(以三台机组为例)

##### 3.3.1 初始化

指令负荷为 310 MW, 当前总负荷为 250 MW, 三台机组负荷分别为 80 MW、80 MW 和 90 MW, 成本电价为 0.092 3 元/(kWh)。定出死区负荷  $D_{dead} = 20$  MW; 假设上限负荷为 125 MW, 下限负荷为 60 MW。

##### 3.3.2 遍历数据库, 得出满足负荷要求的规则

假设总负荷处于指令负荷加减 20 MW 之间的规则如表 1。

表 1 规则库中满足负荷要求的规则

总负荷 /MW	机组一 /MW	机组二 /MW	机组三 /MW	成本/元 $\cdot (\text{kWh})^{-1}$
310	110	110	90	0.093 4
	120	120	70	0.098 4
	100	100	110	0.095 5
325	125	100	100	0.093 9
	110	110	105	0.091 1
	100	110	115	0.093 0
	125	110	90	0.094 6

3.3.3 根据决策依据 B, 精简规则

剔除成本较高的规则后, 将所有规则按比例缩放至总负荷为指令负荷, 如表 2。

表 2 按比例缩放到指令负荷后的规则

总负荷 /MW	机组一 /MW	机组二 /MW	机组三 /MW	成本/元 $\cdot (\text{kWh})^{-1}$
310	105	105	100	0.091 1
	95	105	110	0.093 0
	110	110	90	0.093 4
	119	96	95	0.093 9

3.3.4 根据决策依据 A, 进行负荷调度

(1) 比较当前机组负荷与每条规则中对应机组负荷之差与死区负荷的大小, 得到只有一台机组负荷差大于死区负荷的规则(由于是规则负荷, 所以不存在剩余要加负荷一项), 见表 3;

(2) 显然机组一、三处于死区负荷之内, 则负荷不变, 将要加的负荷 60 MW 全加在机组二上, 则机组二超出负荷上限, 所以将机组二置为上限负荷, 见表 3;

(3) 在机组一、三中, 机组一距离上限负荷近, 所以将剩余负荷加在机组一上, 得最终的负荷分配结果, 见表 3。

表 3 负荷调度过程

步骤	总负荷 /MW	机组一 /MW	机组二 /MW	机组三 /MW	剩余要加 负荷/MW	成本/元 $\cdot (\text{kWh})^{-1}$
(1)	310	95	105	110	—	0.093 0
(2)	310	80	125	90	15	0.093 0
(3)	310	95	125	90	0	0.093 0

时, 根据所需调节的负荷量, 平均分配到各机组, 这样就未能充分利用各台机组的负荷特性, 使经济性降低。针对这一情况, 采用智能决策算法: 首先建立规则库, 然后根据指令负荷, 在数据库的规则中, 进行智能选择, 得到较好的负荷分配, 提高经济性。总的程序框图见图 1。

4.1 小负荷控制方法

当负荷改变量小于 8 MW 时, 再按人工智能决策算法进行负荷分配, 可能会导致某台机组负荷只改变 1 kW, 这显然违背了智能决策算法改变负荷机组尽量少的原则。所以当负荷改变量小于 8 MW 时, 考虑将所变负荷加在距其上(下)限负荷最远的一台机组上。若加上后, 超出负荷上(下)限, 则将剩余要改变的负荷加在余下机组中距其上(下)限负荷最远的一台机组上。以此类推, 直至加完。

4.2 平均分配方法

由于现行的负荷分配方法都是平均分配法, 为了实现过渡, 将平均分配法也编程实现。具体算法规则为: 将指令负荷按运行的机组数平均分配, 若平均负荷超过了某台机组的负荷上限, 则将该台机组置为上限负荷, 余下的负荷再按余下的机组台数平均。以此类推, 直至分配结束。

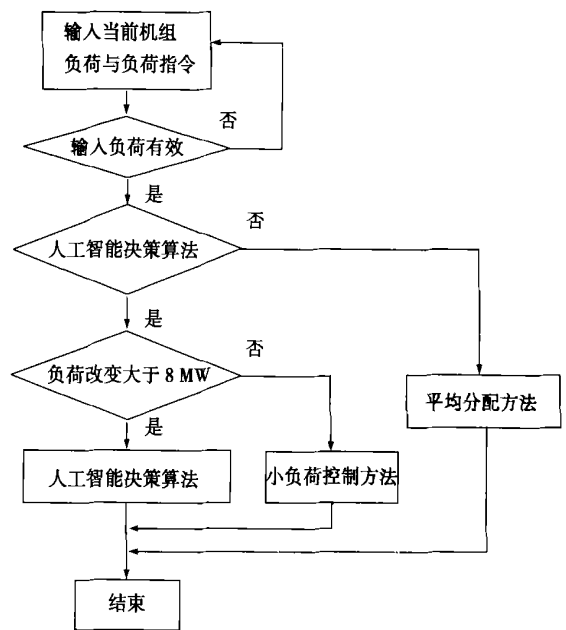


图 1 负荷分配总框图

4 智能决策方法的运用

南通天生港电厂 4 台 125MW 机组在负荷调度

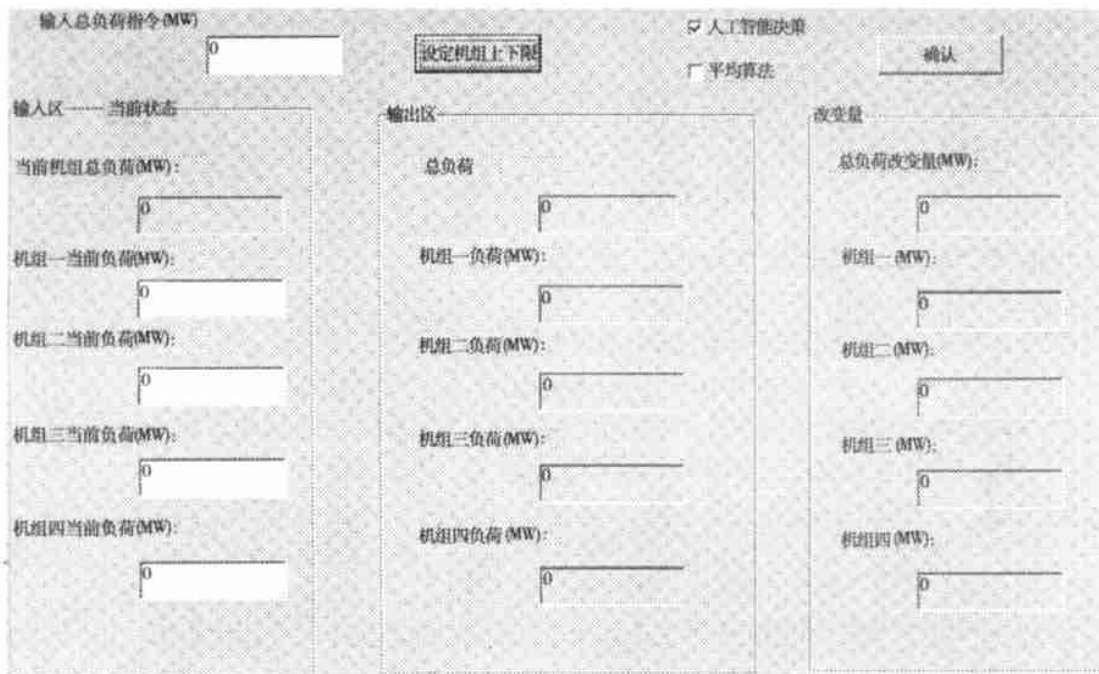


图 2 负荷查询图开机界面

表 4 数据库显示

总负荷/MW	机组一/MW	机组二/MW	机组三/MW	机组四/MW	成本/分°(kWh) <sup>-1</sup>	添加日期
260.000000	70.000000	62.000000	68.000000	60.000000	9.940000	2002-06-11-14:28:59
300.000000	86.000000	64.000000	90.000000	60.000000	9.900000	2002-06-11-14:29:37
350.000000	92.000000	65.000000	98.000000	95.000000	9.900000	2002-06-11-14:30:06
400.000000	101.000000	66.000000	108.000000	125.000000	9.830000	2002-06-11-14:30:41
252.000000	88.000000	0.000000	92.000000	72.000000	9.860000	2002-06-11-14:31:20
248.000000	88.000000	0.000000	92.000000	68.000000	9.890000	2002-06-11-14:32:04
244.000000	87.000000	0.000000	91.000000	66.000000	9.920000	2002-06-11-14:32:42
240.000000	87.000000	0.000000	90.000000	63.000000	10.060000	2002-06-11-14:33:18
256.000000	89.000000	0.000000	93.000000	74.000000	9.830000	2002-06-11-14:35:49
264.000000	90.000000	0.000000	94.000000	80.000000	9.770000	2002-06-11-14:36:55
276.000000	91.000000	0.000000	96.000000	89.000000	9.700000	2002-06-11-14:37:37
284.000000	92.000000	0.000000	98.000000	94.000000	9.650000	2002-06-11-14:38:11
288.000000	93.000000	0.000000	98.000000	97.000000	9.630000	2002-06-11-14:38:49
296.000000	94.000000	0.000000	99.000000	103.000000	9.590000	2002-06-11-14:39:29
308.000000	95.000000	0.000000	101.000000	112.000000	9.540000	2002-06-11-14:40:29
328.000000	98.000000	0.000000	105.000000	125.000000	9.470000	2002-06-11-14:41:18
348.000000	107.000000	0.000000	116.000000	125.000000	9.420000	2002-06-11-14:41:55
360.000000	112.000000	0.000000	123.000000	125.000000	9.370000	2002-06-11-14:42:42
372.000000	122.000000	0.000000	125.000000	125.000000	9.360000	2002-06-11-14:43:08
380.000000	97.000000	60.000000	103.000000	120.000000	9.430000	2002-06-11-14:43:55
396.000000	99.000000	66.000000	106.000000	125.000000	9.350000	2002-06-11-14:44:21
408.000000	104.000000	67.000000	112.000000	125.000000	9.330000	2002-06-11-14:45:13
432.000000	97.000000	112.000000	103.000000	120.000000	9.280000	2002-06-11-14:45:42
468.000000	110.000000	114.000000	119.000000	125.000000	9.240000	2002-06-11-14:46:17
476.000000	113.000000	114.000000	124.000000	125.000000	9.220000	2002-06-11-14:47:10
470.000000	110.000000	114.000000	121.000000	125.000000	9.380000	2002-06-11-14:47:54
472.000000	111.000000	114.000000	122.000000	125.000000	9.240000	2002-06-11-14:48:24
456.000000	105.000000	113.000000	113.000000	125.000000	9.250000	2002-06-11-14:48:57
448.000000	101.000000	113.000000	109.000000	125.000000	9.250000	2002-06-11-14:49:24
420.000000	95.000000	112.000000	101.000000	112.000000	9.430000	2002-06-11-14:59:04
404.000000	103.000000	66.000000	110.000000	125.000000	9.340000	2002-06-11-15:05:06
416.000000	107.000000	67.000000	117.000000	125.000000	9.330000	2002-06-11-15:06:54

发平台,建立友好的客户界面,方便离线负荷查询。软件介绍如下<sup>[5]</sup>：

## 5 智能决策算法的软件实现

### 5.1 总界面

基于上述的智能决策算法,以VC++6.0为开

发平台,建立友好的客户界面,方便离线负荷查询。软件介绍如下<sup>[5]</sup>：

色的是输入区。上部有两个复选框控件,从这可以选择使用智能决策算法还是平均分配算法。若当前负荷处于对应上下限负荷之间,则按“确认”可得到调整后的4台机组负荷与每台机组负荷的改变量。

按“设定机组上下限”按钮,可进行各台机组上下限负荷的设定。当上限设为零时,即可表示该机组停机。图2中的该机组当前负荷输入框也自动变为只读区。

## 5.2 数据库界面

本软件的决策规则存放于动态数据库中,数据库是非封闭式的,可以显示,按任何一列排序,并且根据需要,可以实现删除、添加的功能,如表4。

## 5.3 软件的运行环境

本软件的硬件要求:可以运行在 Windows 98、Windows 2000 等操作系统下,无需特殊的硬件辅助。

## 6 结论

(1) 采用智能决策的方法进行负荷优化分配,可以完全不受机组特性曲线形状的限制,因而具有通用性。

(2) 采用智能决策的方法进行负荷优化分配,

对于较小负荷变化做了较好的处理,避免了机组负荷频繁变动,有利于机组运行的经济性。

(3) 编程实现智能决策算法,友好的可视化界面,方便、易懂和易用。所有功能均可根据屏幕提示轻松完成,极大地减轻运行人员频繁操作的劳动负担。

(4) 该算法简单准确,负荷运行人员的操作习惯,便于被运行人员接受,并且分配结果准确、科学,经济效益也很明显。

(5) 本软件具有良好的推广前景。把算法改进,或者采用神经网络等先进算法,本软件可以运用于电网的负荷调度等其它需要优化分配的领域。

## 参考文献:

- [1] 郭斌,康松. 火电厂各机组间负荷调度实时优化自动控制系统的研究[J]. 发电设备, 2001(6): 26-30.
- [2] 李德存. 电厂经济负荷调度曲线的编制[J]. 山东电力技术, 1997(5): 80-92.
- [3] 陈世福,陈兆乾. 人工智能与知识工程[M]. 南京: 南京大学出版社, 1997.
- [4] 李士勇. 模糊控制、神经控制和智能控制论[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 1998.
- [5] 徐晓刚,高兆法,王秀娟. VC++ 6.0 入门与提高[M]. 北京: 清华大学出版社, 1999.

(何静芳 编辑)

(上接第492页)

## 7 结论

从焓的普遍化表达式出发,推导出了热力学体系焓函数的第一、二基本微分关系式。这两个基本微分关系式将焓这个不可测物理量表示为可测参数或可测参数之间偏导数的微分式。利用这两个基本微分关系式不仅可以通过实验的方法研究体系焓函数的特性,而且只要结合物质的状态方程式和比热容数据,积分求解后就可以得到体系的焓函数。对于结构复杂的体系,如果其状态方程无法确定,则可以利用基本微分关系式通过实验的方法拟合出焓函数的解析式。上述各微分式的导得,除根据焓的普遍化表达式、热力学基本定律和状态参数的性质外,没有涉及具体工质的特殊性质。这些关系式对于各种工质是普遍适用的,可称为热力学一般关系式,可用于研究工质的焓性质,制作工质的

焓图表等。如恰当的选择了自变量,体系的焓函数可以作为特征函数。只要已知焓与选定的自由变量之间的函数关系,可由此求出所有其它热力学函数。

## 参考文献:

- [1] 华贲. 工艺过程用能分析与综合[M]. 北京: 石油工业出版社, 1995.
- [2] 王松平. 寂态热力学发展的新趋势[J]. 自然杂志, 1998, 20(2): 79-81.
- [3] 汪志诚. 热力学·统计物理[M]. 第2版. 北京: 高等教育出版社, 1993.
- [4] 朱明善,陈宏芳. 热力学分析[M]. 北京: 高等教育出版社, 1992.
- [5] 韩光泽,华贲,陈清林,等. 热力学中焓的普遍化表达式[J]. 中国科学(A辑), 2001, 31(10): 934-938.
- [6] HAN GUANGZE, HUA BEN, CHEN QINGLIN, et al. Generalized expression of exergy in the thermodynamics[J]. Science in China(Series A), 2002, 45(1): 70-75.
- [7] 布罗章斯基 B M. 焓方法及其分析[M]. 王加璇,译. 北京: 中国电力出版社, 1996.

(何静芳 编辑)

[刊, 汉] / SHEN Xiang-zhi, YAN Jian-hua (Research Institute of Thermal Energy Engineering under the Zhejiang University, Hangzhou, China, Post Code: 310027), LU Tai (Power Engineering Department, Northeast Electric Power Institute, Jilin, China, Post Code: 132012) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2003, 18(5). — 497 ~ 500

On the basis of experimental research a method for designing J-shaped refeed valve was developed from the perspective of structural dimensions, air-charging pressure and quantity. Some engineering calculation examples are given, which can serve as reference data during the design of circulating fluidized bed boilers. **Key words:** circulating fluidized bed boiler, J-shaped refeed valve, design method

单级叶片倾角对百叶窗浓缩器分离特性影响的工业试验 = **Industrial Tests For Clarifying the Impact of Single-stage Blade Dip Angle on the Separation Characteristics of a Louver Concentrating Device** [刊, 汉] / YANG Long-bin, LI Zheng-qi, CHEN Li-zhe, et al (College of Energy Science & Engineering under the Harbin Institute of Technology, Harbin, China, Post Code: 150001) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2003, 18(5). — 501 ~ 503

On a 670 t/h bituminous coal-fired boiler equipped with a race pulverizer-based direct-fired pulverized-coal preparation system, single-stage blade and gas-solid two-phase tests were conducted to determine the separation characteristics of a louver concentrating device. It is found that with the dip angle of a single-stage movable blade set at  $32^\circ$  the share of fuel-rich primary air is relatively low, the separation and concentrating efficiency are relatively high. Meanwhile, the comprehensive resistance loss factor and pressure loss is respectively 0.92 and 471 Pa. **Key words:** boiler, concentrating device, louver, gas-solid flow

油田直热炉温度/流量的模糊控制 = **Fuzzy Control of the Temperature and Flow Rate of an Oil Field Direct-heated Furnace** [刊, 汉] PANG Li-ping, WANG Jun (Department of Flight Vehicle Design and Applied Mechanics, Beijing University of Astronautics and Aeronautics, Beijing, China, 100083) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2003, 18(5). — 504 ~ 506

The improper control of a direct-heated furnace installed at an oil field will give rise to bias-flows during its combustion, often resulting in coke formation in the heating tubes, which eventually have to be replaced. On the basis of analyzing the underlying causes of bias flows during the operation of the direct-heated furnace and possible measures for dealing with such flows a fuzzy control scheme for the temperature and flow rate has been proposed for the furnace. The implementation of the scheme has thoroughly solved the problem of bias-flows, eliminating the need for replacement of the heating tubes. Moreover, the use of a discrete fuzzy controller proposed by the authors can also solve the bias-flow problems in other control systems involving the distribution of fluids. **Key words:** fuzzy control, uniformity control, direct-heated furnace, bias flow

电厂负荷调度的智能决策方法 = **Intelligent Decision-making Methods for Load Dispatching in Power Plants** [刊, 汉] / YU Guo-qiang, LU Jian-hong (Department of Power Engineering, Southeastern University, Nanjing, China, Post Code: 210096), GONG Cheng (Tiansheng Harbor Power Generation Co. Ltd., Nantong, Jiangsu Province, China, Post Code: 226000) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. — 2003, 18(5). — 507 ~ 511

Iso-micro increase approach and dynamic planning are two methods of optimized dispatching of power plant loads currently in common use. After a comparison of the above two methods the authors have pointed out their defects in the actual dispatching of plant loads. On this basis an intelligent decision-making strategy is proposed to reduce the cost of power generation, taking advantage of the actual experience gained in load dispatching. With respect to four units of 125MW plant installed at Tiansheng Harbor Power Generation Co. Ltd in Nantong City an optimized load dispatching system was developed, based on load intelligent decision-making strategy. **Key words:** load dispatching, iso-micro increase method, dynamic planning method, intelligent decision-making strategy, rules base

用于现场测量深层岩土导热系数的简化方法 = **A Simplified Method for On-site Measurement of the Thermal**