

# 蒸汽动力装置废汽总管压力控制系统改进研究

王 鹏<sup>1</sup>, 李斯琪<sup>3</sup>, 刘 猛<sup>2</sup>, 葛宪新<sup>2</sup>

(1. 哈尔滨工程大学 自动化学院 黑龙江 哈尔滨 150001; 2. 中国船舶重工集团公司第七〇三研究所 黑龙江 哈尔滨 150078;  
3. 南京航空航天大学 自动化学院 江苏 南京 211106)

**摘 要:** 在某船舶原蒸汽动力装置废汽总管压力控制系统基础上,综合运用前馈控制、专家控制和自适应控制,提出了一种改进的方案并应用于实船。通过改进前后运行数据的对比,表明了改进后的废汽总管压力控制系统能够更好地适应控制过程中外来扰动对系统的影响。废气总管压力在除氧器蒸汽流量扰动下调节时间由 60 s 缩短至 36 s。改进后的系统响应更迅速、超调量更小、更稳定。

**关 键 词:** 蒸汽动力装置; 废汽总管压力; 压力控制系统; 扰动影响

中图分类号: TK223; TP273 文献标识码: A

## 引 言

船舶蒸汽动力装置废汽系统采用全船总管制。增压锅炉产生的过热蒸汽经过各辅机做功后变成废汽排入废汽总管,用于凝水、加热、除氧及造水,多余的废汽再排入主冷凝器。蒸汽动力装置中各辅机排汽均排入废汽总管,并以废汽总管压力为背压运行。将废气排入总管废汽的辅机种类多,废汽用户数量多,因此扰动源多、扰动频繁,会造成废汽总管压力经常性、大幅度的波动。废汽总管的波动又会造成各辅机工作不正常,从而影响整个蒸汽动力系统运行。

国内关于船舶蒸汽动力装置废汽压力控制方面的研究较少,特别是与增压锅炉相匹配的废汽总管压力控制尚属空白。文献[1]讨论了模糊控制在废汽压力控制过程中的一种应用方法。但模糊控制很难取得完整的控制规则,而且无法从根本上消除稳态误差,因而控制精度较低,应用范围受到一定的限制。本研究针对实际运行当中废汽总管压力控制系统的非线性和时变性以及阀门切换频繁、除氧器扰动等问题,在原蒸汽动力装置废汽总管压力控制系统基础上,综合运用前馈控制、专家控制和自适应控

制,对其进行了改进。并将改进前后的运行数据进行了对比。结果表明,改进后的废汽总管压力控制系统具有更好的控制品质。

## 1 废汽总管压力控制系统概述

以一套蒸汽动力装置单元为例,向废汽总管排放废汽的辅机包括涡轮增压机组、汽轮给水机组、汽轮燃油泵、汽轮滑油泵。废汽的用户包括除氧器、电站造水机。

蒸汽动力装置废汽总管压力控制系统采用排汽和补汽相结合的方式控制废汽总管内压力为定值。当废汽总管压力低时,通过废汽总管压力补汽阀 PCV1109C(以下简称补汽阀)将微过热蒸汽补入废汽总管。当废汽总管压力高时,通过废汽总管压力排汽大阀 PCV1109A(以下简称排汽大阀)、废汽总管压力排汽小阀 PCV1109B(以下简称排汽小阀)将废汽排入主冷凝器。系统中设置大小两只排汽调节阀是为了改善低负荷控制性能。

原设计废汽总管压力控制系统原理如图 1 所示。 $G(s)$  为废汽总管压力传递函数;  $G_A(s)$ 、 $G_B(s)$ 、 $G_C(s)$  分别为排汽大阀、排汽小阀、补汽阀的传递函数; PIC1109A、PIC1109B、PIC1109C 分别为排汽大阀、排汽小阀和补汽阀控制器; PI1109 为废汽总管压力测量值; PK1109A、PK1109B、PK1109C 分别为排汽大阀、排汽小阀和补汽阀的手动/自动切换信号;  $r$  为废汽总管压力给定值。在本系统中,控制器 PIC1109A、PIC1109B、PIC1109C 均采用 PID 控制算法,给定值采用内给定方式。PIC1109A、PIC1109B 回路为正作用; PIC1109C 为反作用。

系统中各个调节阀的控制信号和手动/自动切换信号通过一定的切换规则作用到各调节阀的输出上。切换规则逻辑框图如图 3 所示。图中 SEL 模

收稿日期: 2013-04-27; 修订日期: 2013-09-07

作者简介: 王 鹏(1979-)男,黑龙江哈尔滨人,中船重工集团公司第 703 所工程师。

块为选通模块,其功能为当第一个输入为0时,选通第二个输入作为输出;当第一个输入为1时,选通第3个输入作为输出。

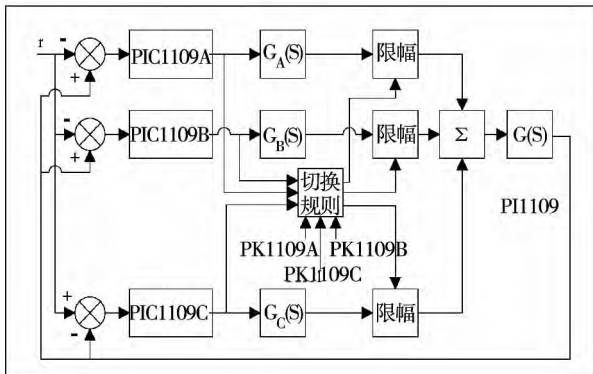


图1 原废汽总管压力控制系统原理图  
Fig.1 Schematic diagram of the original exhaust steam mainline pressure control system

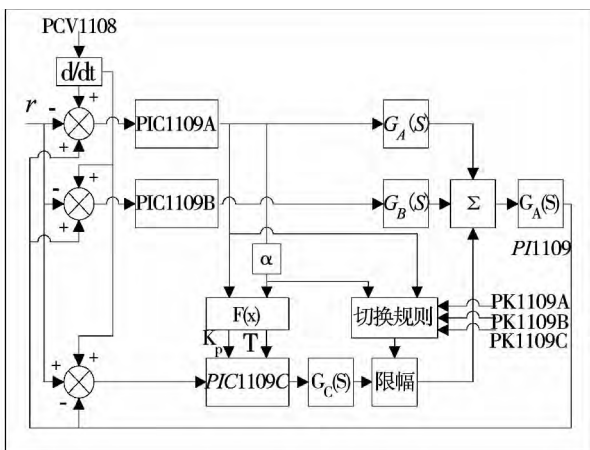


图2 改进的废汽总管压力控制系统原理图  
Fig.2 Schematic diagram of an improved exhaust steam mainline pressure control system

## 2 改进的控制方法

实际运行中发现,原设计中未考虑的除氧器波动会对系统稳定性造成的影响,切换规则由于逻辑复杂存在阀门切换频繁和固定参数的PID控制器不能很好的适应由于扰动源多、扰动频繁所导致的系统的非线性和时变性问题,因此,在原控制系统基础上进行了改进:

(1) 将流入除氧器的废汽流量通过微分环节引入各控制器的前馈环节。

(2) 基于专家经验,优化了系统内3个阀门切换规则。

(3) 将固定参数的补汽阀控制器改为自适应控制器。

改进后的废汽总管压力控制系统原理如图2所示。图中各符号意义同图1。PCV1108为除氧器压力调节阀的开度控制信号,它代表当前流入除氧器的废汽流量。 $F(x)$ 为补汽阀PI控制器的参数自适应环节。

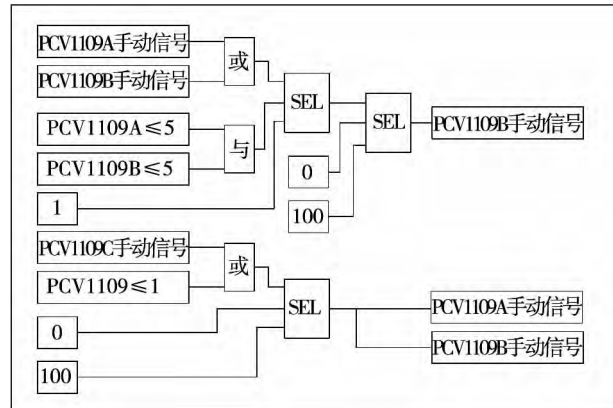


图3 原切换逻辑  
Fig.3 Original switch-over logic

### 2.1 除氧器的废汽流量信号引入前馈

当对象受到干扰频率较高,要求系统快速反应实现控制目的时,反馈控制系统的控制效果往往不够理想。前馈控制系统很好地弥补了反馈控制这一缺点<sup>[2]</sup>。前馈控制系统能够及时有效消除扰动,减小被调量的动态偏差。可以认为反馈控制是针对系统全部干扰进行补偿,而前馈控制则是针对系统的某种特定干扰进行补偿<sup>[3]</sup>。

系统中各回路控制器均采用PID控制算法。这种方式显然具有滞后性。特别是当流入除氧器的废汽流量出现较大波动的情况下,只采用简单的PID调节规律是不能满足实际运行要求的,为此必须考虑引入微分或前馈控制。由于在系统中存在3个控制器,采用微分控制算法无法保证3者动作的一致,因此采用前馈控制方式。在不增加流量测量装置的情况下,流入除氧器的废汽流量可用除氧器压力调节阀PCV1108的开度表示。将除氧器压力调节阀开度控制信号通过微分环节作为3个控制器的前馈输入。前馈环节叠加在废汽总管压力的测量值上,作为针对除氧器流量扰动的补偿。引入前馈环节的作用是:当流入除氧器的废汽流量变化时,废汽总管

压力未偏离给定值时,就改变各阀门开度,迅速适应流入除氧器的废汽流量变化引起的废汽总管压力波动。由于采用的是除氧器压力调节阀开度控制信号的微分信号,前馈信号只在流入除氧器的废汽流量变化的初期起作用,在其稳定后迅速消失,不影响控制系统的稳态特性。通过前馈环节的作用,显然可以使废汽总管压力控制系统的调节品质得到改善,被调参数在流入除氧器的废汽流量扰动下的调节速度明显提高,动态偏差明显减少。

### 2.2 基于专家控制的阀门切换规则优化

专家系统是指在某一特定的领域内,运用人类专家的知识进行推理求解的系统<sup>[4]</sup>,可以根据该领域内专家的经验知识,构造出专家系统,对废汽总管压力系统的阀门切换规则进行设计。在总结操作人员经验的基础上,提出将排汽大阀和排汽小阀作为一个整体的思想。这里引入一个系数  $\alpha$ ,它表示排汽小阀和排汽大阀的废汽排放量的比值。 $PCV1109A + PCV1109B\alpha$  就代表当前废汽系统总的排汽量。当  $(PCV1109A + PCV1109B\alpha) > 40\%$  时,即废汽总排放量达到两个排汽阀门的最大总排放量的 40% 时,可以认为此时废汽总管压力大幅高于设定值,应当关小补汽阀。在切换规则作用下, $PCV1109C$  的输出上限在当前阀位的基础上逐渐减小,这样就起到了输出限位的作用。这种方法简化了原废汽总管压力系统的切换规则,其原理上易于理解,逻辑上也更为清晰。改进后的废汽总管压力控制系统阀门切换规则如图 4 所示。

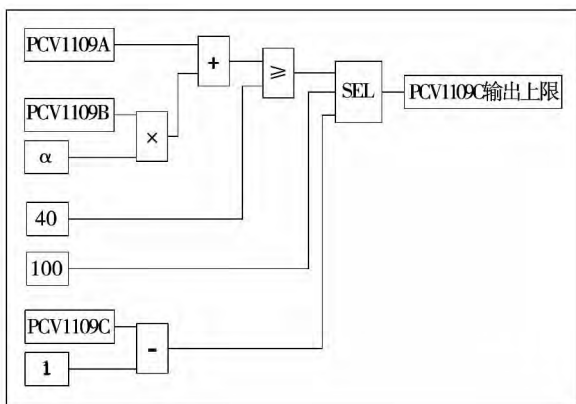


图 4 改进的切换逻辑  
Fig. 4 Improved switch-over logic

### 2.3 废汽压力补汽阀自适应控制

在实际的工业控制中,被控对象往往都是非线性、时变的系统。常规的 PID 控制对于这样的系统

的控制效果不是很理想,这是因为常规 PID 不能根据现场的情况进行在线自我调节参数。对于时变系统的控制,自然要考虑应用自适应控制方法。另一方面,系统的剧烈时变可看成是一种干扰,因此,克服时变的适应控制能力与抗干扰能力具有密切的联系<sup>[5]</sup>。

图 2 中  $F(x)$  为补汽阀 PI 控制器的参数自适应环节。其输入为当前废汽系统总的排汽量  $PCV1109A + PCV1109B\alpha$ 。输出为补汽阀 PI 控制器的放大倍数  $K_p$  和积分时间  $T_i$ ,其对应曲线如图 5 所示。

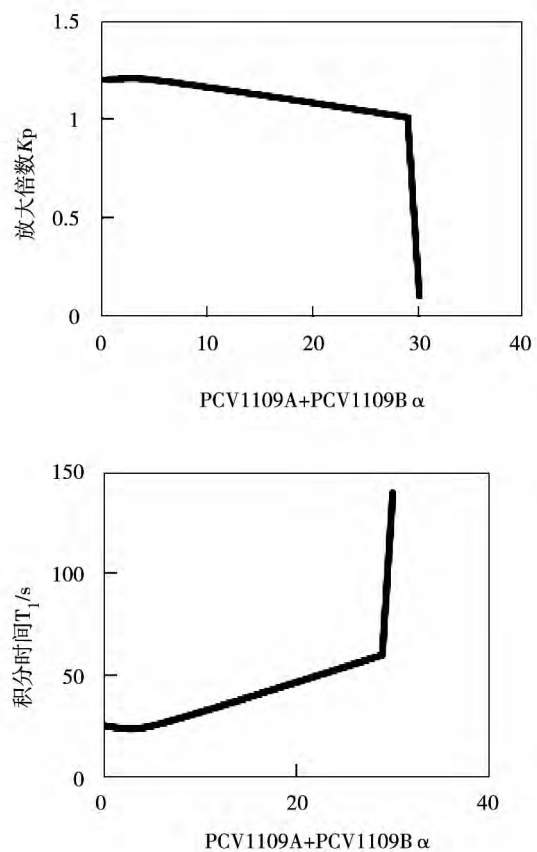


图 5 总排汽量与  $K_p$ 、 $T_i$  对应关系曲线  
Fig. 5 Curves showing the relationship among the total exhaust steam flow rate,  $K_p$  and  $T_i$

PID 参数自适应整定的实现思想是在运行中根据总排汽量对 PID 参数进行在线修改,以满足总排汽量变化时对 PID 控制器参数的不同要求。对应不同的总排汽量,参数  $K_p$ 、 $T_i$  采用如下的自适应整定原则:

- (1) 总排汽量小于最大排汽量的 30% 时  $K_p$  随

着总排汽量的增加缓慢减小,  $T_1$  随着总排汽量的增加缓慢增加。这是因为总排汽量越大, 说明此时废汽总管压力越高, 补汽阀调节速度应该随之逐渐放慢。

(2) 总排汽量大于最大排汽量的 30% 时  $K_p$  迅速降低, 比例作用迅速减小,  $T_1$  迅速增加。这是因为此时废汽总管压力偏高, 正在大量排汽, 补汽阀应暂时停止调节作用。直到总排汽量达到 40% 以上, 在 2.2 节中的切换规则作用下补汽阀输出被限位, 或总排汽量回落至 30% 以下, 补汽阀按自适应整定原则 1 所确定的参数工作。

### 3 运行结果比较分析

在实际运行中, 对废汽系统加入各种扰动, 利用 ABB 公司的组态软件 Digivis 的趋势显示功能, 对改进前后的控制效果进行了比较。

#### 3.1 除氧器的废汽流量扰动下系统的响应

当蒸汽动力系统稳定在 50% 负荷情况下, 手动

开大除氧器压力调节阀, 造成除氧器流量的改变。改进前后的废汽总管压力控制效果对比如图 6 所示。图中 a、b 分别为改进前后手动将氧器压力调节阀除氧器压力调节阀由 25% 开至 40% 时, 废汽总管压力的响应曲线。改进前系统的响应时间为 7 s, 调节时间为 60 s。改进后响应时间为 5 s, 调节时间为 36 s。废汽总管压力在除氧器的废汽流量扰动下调节时间有较大缩短。

#### 3.2 辅机排汽扰动下系统的响应

当辅机的废汽排放量随着蒸汽动力系统的负荷升高而增大时, 改进前后的废汽总管压力控制效果对比如图 7 所示。图中 a、b 分别为蒸汽动力系统负荷由 50% 升至 100%, 各辅机排出废汽量增加情况下, 改进前后的废汽总管压力的响应曲线。改进前控制系统的响应时间为 30 s, 调节时间为 240 s。改进后控制系统的响应时间为 12 s, 调节时间为 210 s。废汽总管压力在辅机排汽扰动下响应有所加快。

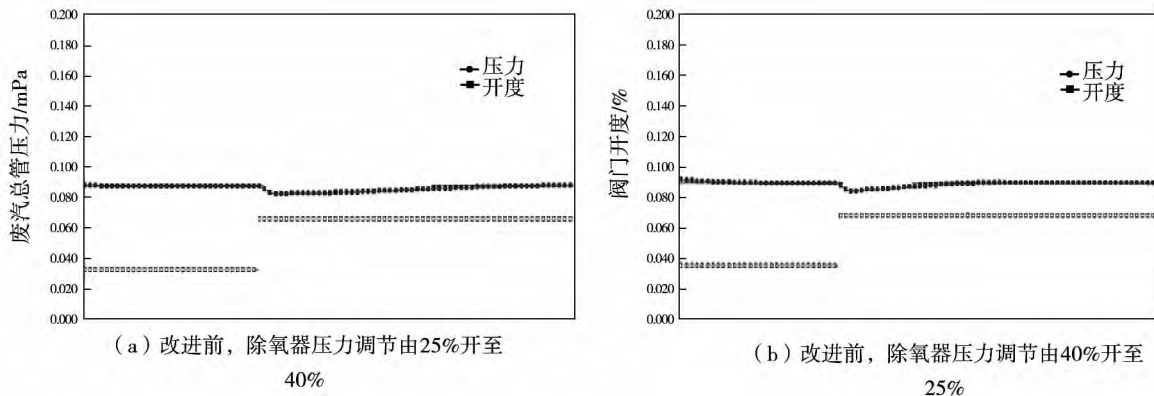


图 6 除氧器的废汽流量扰动下系统的响应

Fig. 6 Response of the system under the disturbance of the exhaust steam from the deaerator

#### 3.3 阀门扰动下系统的响应

在 3 个调节阀投入自动、蒸汽动力系统稳定在 60% 负荷的情况下, 分别将排汽大阀和补汽阀转为手动操作, 并增大 30% 的开度。图 8 为改进前后废汽总管压力的响应曲线和各个阀门的开度。从图 8 的 (a)、(c) 中可以看到, 当排汽大阀开大 30% 时, 排汽小阀自动关闭、补汽阀自动开大。改进前的控制系统由于补汽阀波动过大, 在系统响应后约 80 s 时

排汽小阀又自动打开。这是由于补汽阀的控制器参数不适应系统的剧烈变化, 且阀门的切换规则过于复杂造成的。在改进后由于补汽阀控制器参数采用自适应整定, 补汽阀的波动较小, 以及切换规则的简化, 排汽小阀始终处于关闭状态, 既减少了阀门的波动, 又缩短了调节时间。改进前废汽总管压力进入稳态时间为 120 s, 改进后的稳态时间为 80 s。改进后废汽总管压力的超调量从 25% 减小到 15%。

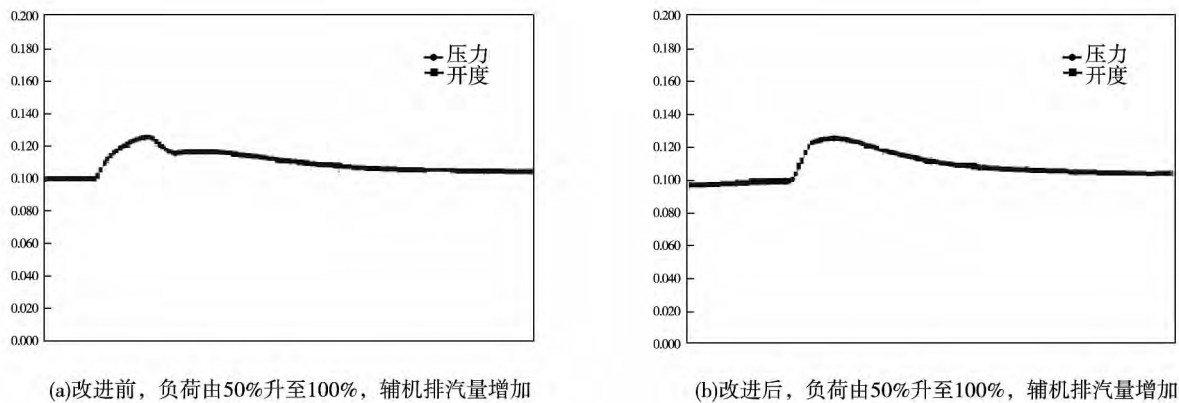


图 7 辅机排汽扰动下系统的响应

Fig. 7 Response of the system under the disturbance of the exhaust steam from the auxiliary equipment items

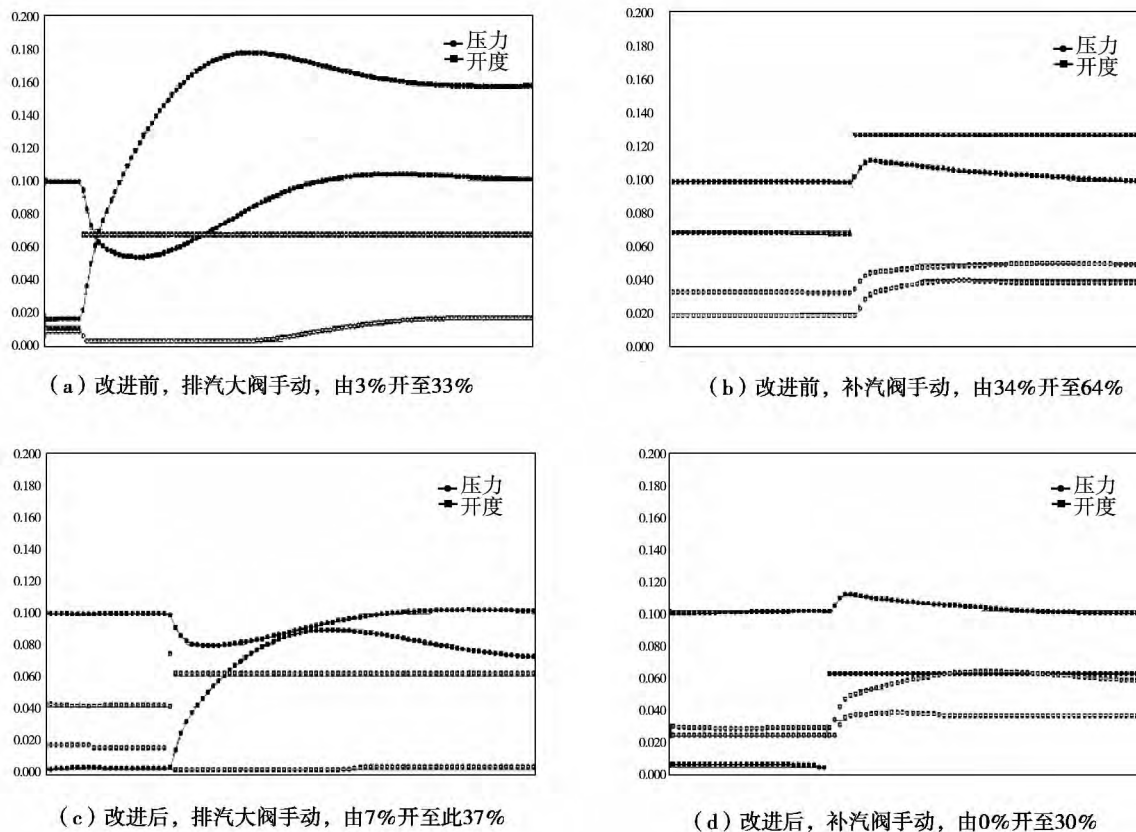


图 8 阀门扰动下系统的响应

Fig. 8 Response of the system under the disturbance of the valves

同样条件下,当补汽阀开大 30% 时,排汽大、小阀自动开大。从图 8 的 (b)、(d) 中可以看到,当改进前后的阀门动作规律一致,改进后在自适应控制

器作用下补汽阀的波动较小。改进前废汽总管压力进入稳态时间为 84 s,改进后的稳态时间为 60 s,废汽总管压力的调节时间缩短。

### 4 结 论

针对蒸汽动力装置实际运行当中废汽总管压力控制系统存在的问题,提出了改进的废汽总管压力控制系统。通过与原控制系统运行数据的对比,结果表明:

(1) 通过将除氧器流量引入控制器前馈,可改善系统的动态性能。废汽总管压力在除氧器废汽流量扰动下调节时间由 60 s 缩短至 36 s。

(2) 根据专家经验,将系统中废汽排放量看作一个整体,优化系统中各阀门的切换规则,可改善原控制系统中阀门切换频繁的问题,提高系统稳定性。

(3) 利用自适应控制能够克服系统的非线性和时变性的特点对补汽阀控制器进行改进,可使改进后的控制系统在各种扰动下都能在更短的时间内达到稳定,超调更小。

该改进方法简单易行,不需要额外增加系统设备,目前已在实船上得到应用。但该改进方法尚处于起步阶段,没有考虑除氧器压力控制系统对废汽总管压力控制系统的影响,在未来应重点对两者之间的耦合关系进行研究。

### 参考文献:

[1] 黎 南. 模糊控制在废汽压力控制系统中的应用[J]. 辽宁师范大学学报(自然科学版),1997,01:29-32.  
LI Nan. Application of the fuzzy control in the exhaust steam pressure control systems [J]. Journal of Liaoning Teachers University (Natural Science Edition),1997,01:29-32.

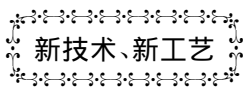
[2] 王正林,郭宽阳. Matlab/simulink 与过程系统仿真. [M]. 北京:电子工业出版社.2011.  
WANG Zheng-lin, GUO Kuan-yang. Matlab/simulink and process system simulation [M]. Beijing: Electronic Industry Press 2011.

[3] 王建辉,顾树生. 自动控制原理 [M]. 北京:清华大学出版社.2007.  
WANG Jian-hui, GU Shu-sheng. Automatic control theory [M]. Beijing, Tsinghua University Press 2007.

[4] 李海涛,邓樱. Matlab 程序设计教程 [M]. 北京:高等教育出版社.2002.  
LI Hai-tao, DENG Ying. Courses for Matlab program design [M]. Beijing: Higher Education Press 2002.

[5] 刘金琨. 先进 PID 控制与 Matlab 仿真 [M]. 北京:电子工业出版社.2007.  
LIU Jin-kun. Advanced PID control and Matlab simulation [M]. Beijing: Electronic Industry Press 2007.

(陈 滨 编辑)



## 1981 - 2012 年各种主动力装置的装舰情况

源于国外相关期刊最新的数据资料,经过加工、整理形成世界各国海军 1981 - 2012 大中型水面战舰各种主动力装置的装舰情况:

1981 - 2012 年各种主动力装置的装舰情况

舰种	主动力装置					合计
	核动力(艘)	锅炉汽轮机(艘)	燃气轮机(艘)	柴油机燃气轮机联合(艘)	柴油机(艘)	
航空母舰	10	4	7* 1	1	0	22
巡洋舰	3	0	33	0	0	26
驱逐舰	0	23	152	37	15	227
护卫舰	0	6	114	248* 2	152	520
总计	13	33	306	286	167	805
百分比(%)	1.61	4.10	38.0	35.5	20.7	100

注: \* 1 含日本 2 艘直升机航空母舰。\* 2 含美国濒海战斗舰和各国轻型护卫舰。

(吉桂明 摘译)

Nm<sup>3</sup>. **Key words:** 660 MW ultra-supercritical opposed combustion swirling burner ,CO ,NO<sub>x</sub>

蒸汽动力装置废汽总管压力控制系统改进研究 = **Study of the Improvement of the Exhaust Steam Mainline Pressure Control System of a Steam-driven Power Plant** [刊 ,汉] WANG Peng ( Automation College ,Harbin Engineering University ,Harbin ,China ,Post Code: 150001) ,WANG Peng ,LIU Meng ,GE Xian-xin ( CSIC Harbin No. 703 Research Institute ,Harbin ,China ,Post Code: 150080) ,LI Si-qi ( Automation College ,Nanjing University of Aeronautics and Astronautics ,Nanjing ,China ,Post Code: 211106) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. -2014 29( 1) . -65 ~70

On the basis of the exhaust steam mainline pressure control system of a warship prototype steam-driven power plant , proposed was an improved version by employing the forward feed control ,expert control and self-adaptive control in a comprehensive way. Such a version had been applied in real vessels. A comparison of the operating data before and after the improvement shows that the improved system can better adapt itself to any influence caused by interference from the outside world during the control process. The control duration will be shortened from 60 seconds to 36 seconds under the disturbance caused by the flow rate of the steam admitted by the deaerator. The improve system has a quicker response ,smaller overshoot and shorter stabilization time. **Key words:** steam-driven power plant ,exhaust steam mainline pressure ,self-adaptive control ,expert control

火电厂石膏旋流器分离性能强化研究 = **Study of the Enhancement of the Separation Performance of a Gypsum Cyclone in a Thermal Power Plant** [刊 ,汉] AN Lian-suo ,YANG Yang ,LIU Chun-yang ,SHEN Guo-qing ( National Research Center for Thermal Power Generation Engineering Technology ,North China University of Electric Power ,Beijing ,China ,Post Code: 102206) // Journal of Engineering for Thermal Energy & Power. -2014 29( 1) . -71 ~75

In the light of such problems as the presence of an air column in gypsum cyclones in thermal power plants and the low separation efficiency ,a study was performed to enhance the separation performance. By using the software Fluent and the RSM Reynolds stress turbulent flow model ,VOF ( volume of fluid) fluid volume model as well as the DPM ( discrete particle model) model ,a numerical simulation was performed of the characteristics of the flow field in the gypsum cyclone. Furthermore ,a test rig was set up to test the performance of a gypsum cyclone without a central rod ,with a cylindrical central rod and an upside-down cone-shaped central rod being inserted respectively in order to obtain the law governing the variation of the production capacity ,split flow ratio ,and separation efficiency etc. performance indexes. The research results show that a negative pressure zone in the gypsum cyclone is present ,leading the air coming from outside world to form an air column by a reverse flow from outlets at both ends. The spiral movement of the air may bring about an energy loss and to use a central rod can effectively eliminate the air