

一种补偿非最小相位特性的汽包锅炉单冲量给水调节器设计

于达仁 杨永滨
(哈尔滨工业大学)

[摘要]在锅炉汽包水位控制系统中,若采用沸腾式的省煤器,当给水流量突然增加时,会出现比较严重的虚假水位现象,归结到控制模型上就是控制系统为非最小相位系统,它将使控制质量变坏。为了克服这种缺点,本文提出了一种补偿非最小相位特性的设计方法来提高汽包水位调节质量。这一方法原理简明,易于实施,仿真结果表明它具有良好的控制效果。

关键词 非最小相位特性 Smith 预估器 汽包水位 锅炉给水调节

分类号 TK223/525

1 引言

汽包锅炉给水调节的任务是使锅炉的给水量适应锅炉的蒸发量,维持汽包水位在规定的范围内。汽包水位反映了汽包锅炉蒸汽负荷与给水量之间的平衡关系,是锅炉运行中一个非常重要的监控参数,保持汽包水位正常是保证锅炉和汽轮机安全运行的必要条件。汽包水位过高,会影响汽包内汽水分离装置的正常工作,造成出口蒸汽水分过多而使过热器管壁结垢,容易导致过热器烧坏。汽包出口蒸汽中水分过多也会使过热汽温产生急剧变化,直接影响机组运行的经济性和安全性。汽包水位过低,则可能破坏锅炉水循环,造成水冷壁烧坏而破裂。而在水位控制过程中,存在特殊的“虚假水位”现象。归结到控制模型上,就是控制系统为非最小相位系统,它将使控制质量变坏。为了克服这种现象,本文将 Smith 预估方法应用于非最小相位系统的

设计中,改善了水位调节质量。

2 汽包锅炉水位对给水流量的传递函数

在负荷不变的情况下,给水流量作阶跃变化时,如果不考虑其它因素的影响,则由于给水流量大于蒸汽流量而使汽包水位按图1曲线 $H_1(t)$ 直线上升,但从另一方面考虑,当给水流量变化刚加入时,由于给水的过冷度的影响,温度较低的给水从原有饱和汽水混合物中吸取了一部分热量,这就使水面下汽包容积减少,水位下降,由于阶跃增加的给水流量是一定值,吸取的热量也是有限的,因而水位的下降速度逐渐减小,最后不再降低而稳定在 K_2 的数值。其变化过程为 $H_2(t)$ 曲线所示。汽包水位的实际变化曲线为 $H(t)$,也是由 $H_1(t)$ 和 $H_2(t)$ 叠加而成。曲线 $H_1(t)$ 相

收稿日期 1992 11 10 修改定稿 1993 01 20

本文联系人 于达仁 男 29 副教授 150006 哈尔滨工业大学动力系

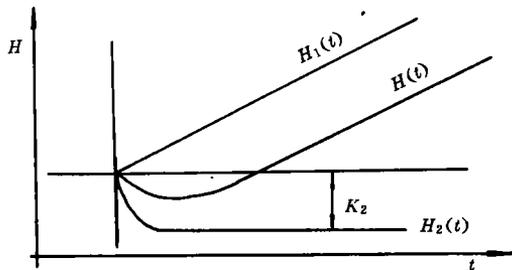


图 1

当于积分环节的阶跃反应曲线, 传递函数为 $W_1(S) = \frac{\epsilon}{s}$, 曲线 $H_2(t)$ 相当于惯性环节的阶跃反应曲线, 传递函数为 $W_2(S) = \frac{K_2}{1 + T_2 S}$ 。所以, 在给水量作用下汽包水位的动态特性, 可以近似为一个积分环节和一个惯性环节的并联, 即

$$\begin{aligned} G(s) &= \frac{\epsilon}{s} - \frac{K_2}{1 + T_2 s} = \frac{\epsilon + \epsilon T_2 s + K_2 s}{s(1 + T_2 s)} \\ &= \frac{\epsilon[1 - (K_2/\epsilon - T_2)S]}{S(1 + T_2 S)} \\ &= \frac{\epsilon(1 - \tau S)}{S(1 + T_2 S)} \end{aligned}$$

3 对 Smith 预估器的回顾

过程控制系统分析中经常遇到的一个问题就是控制对象在很多情况下具有纯滞后, 这表现在其传递函数中含有 $e^{-\tau s}$ 项。由于纯滞后的存在, 给系统的稳定问题带来了许多麻烦, 降低了控制质量。

为了克服纯滞后的影响, 一个十分有效的控制方案是 Smith 预估控制系统, 即常称为 Smith 预估器。

典型的 Smith 预估器如图 2 所示。

其中 $(1 - e^{-\tau s})G(S)$ 为加入的 Smith 局部反馈通道。 $G(S)e^{-\tau s}$ 为具有纯滞后的被控对象传递函数。 $G_c(S)$ 为控制器的传递函数。

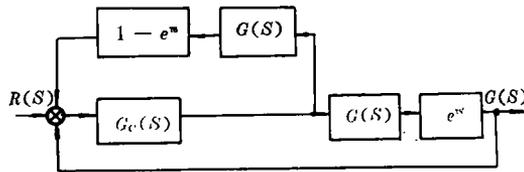


图 2

对于这个系统, 其闭环传递函数为

$$\begin{aligned} \frac{G(S)}{R(S)} &= \frac{G(S)G_c(S)e^{-\tau s}}{1 + \frac{G(S)G_c(S)(1 - e^{-\tau s})}{1 + G(S)G_c(S)e^{-\tau s}}} \\ &= \frac{G(S)G_c(S)e^{-\tau s}}{1 + G(S)G_c(S)} \end{aligned}$$

很显然, 在这个系统的特征方程式中, 不包含 $e^{-\tau s}$ 项, 也就是说, 这个系统已经消除了纯滞后对系统稳定的影响。

4 消除非最小相位特性的汽包锅炉给水调节器的设计

水位对给水量的传递函数为 $G(S) = \frac{\epsilon(1 - \tau s)}{s(1 + T_2 s)}$ 。如果采用传统的 PI 调节器, 则汽包水位调节系统的方块图如图 3 所示。

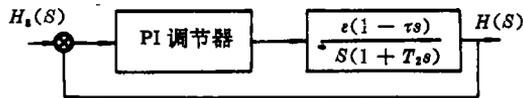


图 3

从图可以看出, 系统为非最小相位系统, $(1 - \tau s)$ 环节使系统的相位滞后, 不利于系统的稳定性, 降低了控制质量。为了克服这

一现象,把 $(1 - \tau s)$ 看作 $e^{-\tau s}$,将 Smith 预估器的方法应用于此系统,消除 $(1 - \tau s)$ 环节对系统稳定性的影响。这种情况下的系统方块图如图 4 所示。

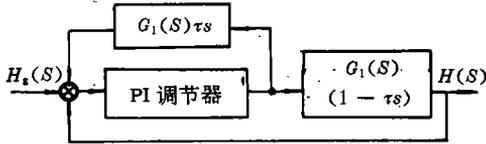


图 4

其中 $G_1(S) = \frac{\epsilon}{S(1 + T_2s)}$,水位对给水量的传递函数 $G(S) = G_1(S)(1 - \tau s) = \frac{\epsilon(1 - \tau s)}{S(1 + T_2s)}$,PI 调节器的传递函数 $G_c(S) = K_1(1 + \frac{1}{T_1S})$ 。

Smith 预估部分 $G_1(S)\tau s = \frac{\epsilon\tau s}{S(1 + T_2s)}$
 $= \frac{\epsilon\tau}{1 + T_2s}$ 为惯性环节,常规仪表很容易实现,故结构简单。由此可望大大改善水位调节的稳定性。

但是,从图 4 可看出,加入的 Smith 预估部分形成的局部反馈将 PI 调节器包围在内,降低了系统的无差度,从而降低了稳态精度。为了克服这一缺陷,在 Smith 预估部分设置传递函数为 $\frac{TS}{1 + TS}$ 的环节,如图 5 所示。

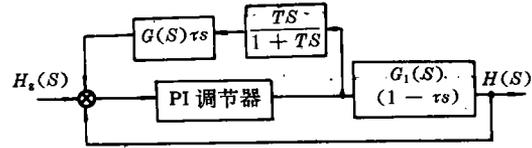


图 5

其中 T 应选得较大,这样在高频段,此环节近似为 1,不影响 Smith 预估器的动态补偿作用,在低频段,由于微分的存在,可以认为 Smith 预估部分的反馈断开,故消除了 Smith 预估部分对稳定精度的影响。

5 仿真结果

将参数代入图 5,得:

$$G(S) = G_1(S)(1 - \tau s) = \frac{0.033(1 - 70S)}{S(30S + 1)}$$

$$\text{故 } G_1(S)\tau s = \frac{2.31}{30S + 1}$$

PI 调节器的传递函数 $G_c(S) = K_1(1 + \frac{1}{T_1S})$ 。当考虑给水量扰动和蒸发量 D 产生的扰动,则水位调节系统的方块图如图 6 所示

不加 Smith 预估反馈的传统 PI 水位调节系统方块图如图 7 所示。

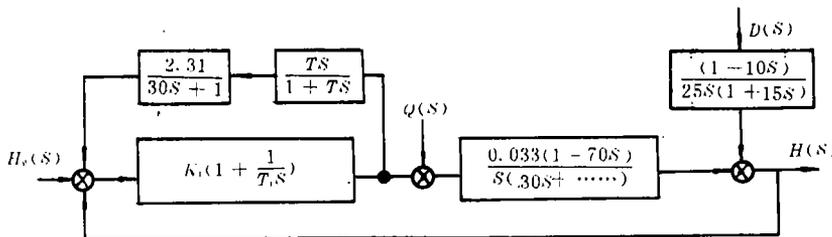


图 6

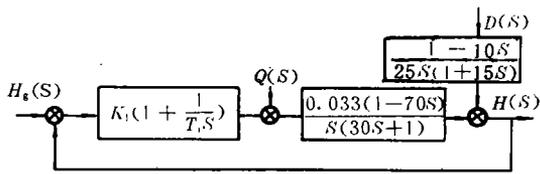


图 7

分别对加 Smith 预估器局部反馈的水位调节系统(图 6 所示系统)和传统的 PI 水位调节系统(图 7 所示的系统)按 $ITAE = \int_0^{\infty} t|e|dt$ 准则寻优,选取最佳参数 K_i, T_i, T , 得到图 6 和图 7 在干扰作用下的过渡过程曲线,如图 8 和图 9 所示。

过程曲线。图 9 是传统的 PI 水位调节系统在相同阶跃干扰作用下的过渡过程。从图看出,图 8 所示的过渡过程曲线的 ITAE 指标大约是图 9 所示过渡过程曲线的 ITAE 指标的十分之一。故对非最小相位特性进行补偿的汽包锅炉给水调节系统的调节质量大大提高了。

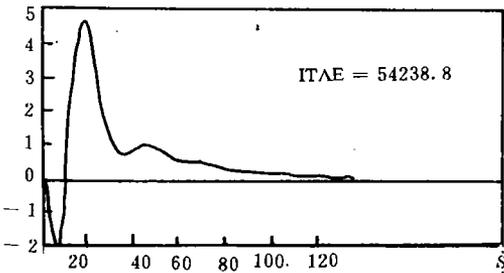


图 8

$K_i = 0.98 \quad T_i = 103s \quad T = 457s$

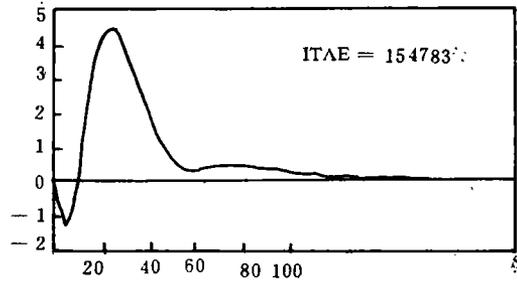


图 10

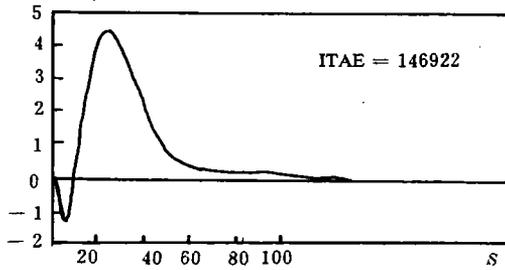


图 11

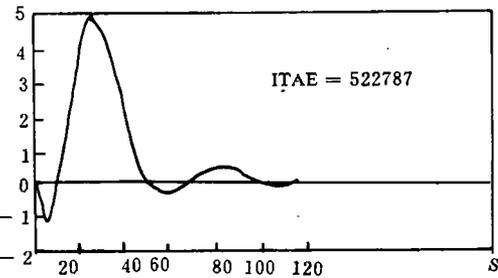


图 9

$K_i = 0.245 \quad T_i = 83s$

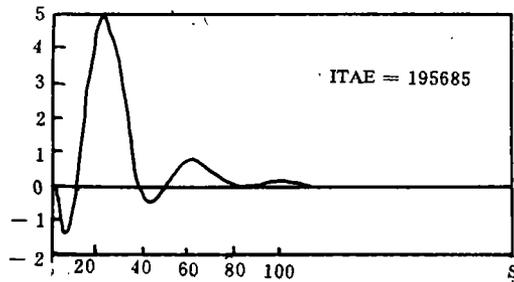


图 12

图 8 是补偿非最小相位特性的汽包锅炉给水调节系统在干扰(阶跃)作用下的过渡

但是,我们知道,在具有纯滞后环解 $e^{-\tau}$ 的系统中加 Smith 预估器后,系统的鲁棒性很差。也就是说当 Smith 预估器的参数不能

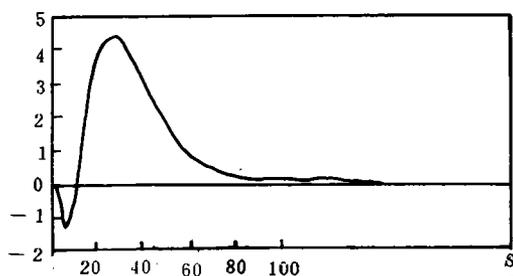


图 13

准确地与对象部分的参数相匹配,系统的控制质量将大大下降。对此,我们考查了消除非最小相位特性的汽包锅炉给水调节系统的鲁棒性。我们将 Smith 反馈通道的 $G(S)\tau_s = \frac{2.31}{30S+1}$ 中的 30 改为 20,其在干扰作用下的过渡过程曲线见图 10 所示,其 ITAE 值为 154 783。将 $G(S)\tau_s$ 中的 30 改为 40,其过渡过程见图 11 所示,其 ITAE 值为 146 922。将 $G(S)\tau_s$ 中 2.31 改为 1.5,其过渡过程见图 12 所示,其 ITAE 值为 195 685。将 $G(S)\tau_s$ 中 2.31 改为 3,其过渡过程见图 13 所示,其 ITAE 值为 180 981。故可见当预估器部分的参数与对象部分的参数不相匹配时,过渡过

程仍然比较理想,其 ITAE 值均小于图 9 所示的传统 PI 调节系统的 ITAE 值(其值为 522 787)。

从仿真结果可以表明其鲁棒性是比较理想的。

6 结论

本文提出了一种补偿非最小相位特性的设计方法来提高锅炉汽包水位调节质量。仿真结果表明此设计方法大大提高了水位调节系统的调节质量。将 Smith 预估方法应用到具有非最小相位特性 $(1 - \tau_s)$ 的系统中,不会象 Smith 预估方法应用到纯滞后系统中出现的鲁棒性很差的情况。故本文提出的设计方法对调节对象模型的辨识精度要求并不高,易于工程实施。

参 考 文 献

- 1 陈勤奇等. 热力过程自动化. 水利电力出版社, 1985 年
- 2 徐基豫等. 锅炉汽轮机自动调节. 机械工业出版社, 1985 年

技术改造

汽轮发电机的现代化改造

据“Modern Power Systems”1993 年 8 月号报道,中国龙源(音译)电力技术开发公司和美国西屋电力公司已签订组成联合投资公司的协议,以便使正遍及中国运行的汽轮发电机现代化。

该协议首先着眼于每机额定功率为 200 MW 的 150 台汽轮发电机的改造和现代化。

该联合投资最终将建立一个基地,它将为中国 400 多个电站提供技术和先进的现场服务功能。联合投资使双方各拥有 50% 投资额。西屋公司将为该现代化计划提供技术管理、技术现场服务和一些关键的部件。龙源电力技术开发公司将与电站和当地电力局协调工程计划,取得并管理当地的资金,并管理当地的财产和设施。

(学牛 供稿)

fully attesting to the fact that the recommended method is an effective and analytical one suited to engineering applications. **Key words:** *time-dependent, numerical calculation, turbomachine, three-dimensional flow field*

(234) Some Technical Issues Related to the Land-based Testing of a 4400 kW Gas Turbine Power PlantXiao Lide (*Harbin Marine Boiler & Turbine Research Institute*)

The author describes three technical issues encountered during the land-based testing of a 4400 kW gas turbine power plant; engine low-frequency vibrations, power turbine overspeed and engine-borne noise. Some observations on the analysis and solution of the above-cited issues are given and related conclusions presented. **Key words:** *gas turbine, vibration, overspeed, noise*

(237) Automatic Control System for a 130 t/h Gangue-fired Fluidized Bed boiler Fan Bening (*Computer Application and Development Research Centre of Hei Long Jiang Province*)

The control functions of a microcomputer-based control system for a 130 t/h fluidized bed boiler is described. Presented are the configuration approach applicable to fluidized bed combustion control, provision of indications in case of interruption of coal feeding and measures to cope with unfavorable effect of coal quality fluctuations on control quality. The said control system has been put into commercial operation with satisfactory results. **Key words:** *fluidized bed boiler, automatic control system, system structure, gangue*

(241) The Design of a Drum Boiler Single-element Feedwater Regulator with compensation of Non-minimum Phase Characteristics..... Yu Daren, Yang Yongbin(*Harbin Institute of Technology*)

When a steaming economizer is used there will emerge in the boiler drum water level control system a relatively serious phenomenon of indicating a false water level in the case of a sudden increase in feedwater flow rate. In terms of control model this exhibits itself as a non-minimum phase system of control system, resulting in a deterioration of control quality. To overcome this defect, the authors have come up with a design method with compensation of non-minimum phase characteristics to enhance the drum water level regulation quality. The said method features a simplified principle and easily lends itself to the realization of simulation results, thus attaining a good control effectiveness. **Key words:** *non-minimum phase Characteristics, regulation, Smith Pre-evaluator, boiler drum level, classification*

Edited and Published by Harbin Marine
Boiler & Turbine Research
Institute and Editorial Staff
of this Journal

Printer; Printing House of Harbin Institute
of Technology

Address: P. O. Box 77, Harbin China

Cable: 6511, Harbin, China

Post Code Number 150036

ISSN1001-2060
Periodical Registration:
CN23-1176/TK

Distributed by China International

Book Trading Corporation,

P. O. Box 399, Beijing, China