

锅炉过热蒸汽出口压力的串级专家 PID 控制

Cascade Expert PID Control of Boiler Superheated Steam Outlet Pressure

王恒飞 陈永良 郭春裕

(中国计量学院质量与安全工程学院 浙江 杭州 310018)

摘要: 针对常规 PID 锅炉过热蒸汽出口压力控制效果不佳的问题,提出并编写了基于 PCS7 系统的专家 PID 控制器。运用 Matlab 软件进行专家 PID 的仿真,并利用高级多功能过程控制实训系统(SMPT 1000)以及 PCS7 对控制效果进行了进一步试验验证。实验中 PCS7 主要负责建立控制系统,实现专家控制。运行结果表明,该控制方案的调节时间短、超调量小,并且具有较好的抗干扰能力,可以实现过热蒸汽出口压力的稳定控制。

关键词: 过热蒸汽 专家控制 PID 控制 PCS7 系统组态

中图分类号: TH81; TP273

文献标志码: A

DOI: 10.16086/j.cnki.issn1000-0380.201510025

Abstract: To solve the problem of conventional PID, i. e., poor control effect for boiler superheated steam outlet pressure, the expert PID controller based on PCS7 system is proposed and compiled. The expert PID is simulated by adopting Matlab, and further test and verification of the control effect are conducted with advanced multifunction process control training system SMPT 1000 and PCS7, PCS7 is mainly responsible for setup the control system to implement expert control. The results of tests and operation show that the control scheme features shorter regulation time, smaller overshoot, and possesses high anti-interference capability, it is able to realize stable control for superheated steam outlet pressure.

Keywords: Superheated steam Expert control PID control PCS7 System configuration

0 引言

锅炉过热蒸汽出口压力是蒸汽供需平衡的标志,是影响系统蒸汽平衡的重要热力学参数,直接关系到操作的平稳与生产的安全^[1]。蒸汽出口压力控制系统具有时变、高阶次、大滞后等特点,利用常规的 PID 很难对其实现准确的控制,于是引进先进的控制算法来解决此问题。

本文选择专家 PID 算法来解决过热蒸汽出口压力过渡过程时间过长这一缺点^[2]。专家 PID 控制是对常规 PID 控制算法的一种改进,能很好地与实际工业相结合。西门子的 Simatic PCS7 集散系统实现了机电一体化^[3],其中 SCL 模块可以实现编写专家 PID 控制算法。通过 SCL 编写 PID 控制与专家系统结合,优化了过热蒸汽压力控制器的输出,大大提高了控制系统的稳定性和控制效果。

1 过热蒸汽出口压力控制系统结构

过热蒸汽出口压力控制系统就是对出口负荷的压

力进行控制的系统。影响过热蒸汽出口压力的变量有燃料流量、过热蒸汽出口流量以及过热蒸汽出口温度等。其中燃料流量是对过热蒸汽出口压力影响最显著的变量,而且可控性好。如图 1 所示是压力串级控制系统结构图。在串级控制系统中加入专家 PID 控制器 PIC1104,通过主、副环的联合控制,使整个压力控制系统的性能提高。

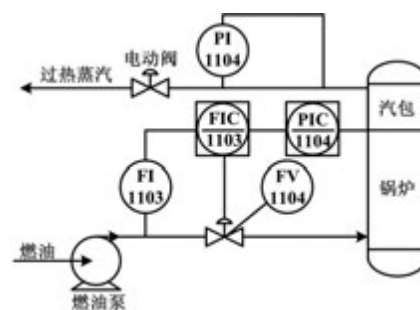


图 1 过热蒸汽出口压力控制系统

Fig. 1 The control system of the superheated steam outlet pressure

2 PCS7 系统组态

西门子 PCS7 将传统的 DCS 和 PLC 控制系统的优点相结合,系统所有的硬件都基于统一的硬件平

修改稿收到日期: 2014-12-12。

第一作者王恒飞(1990-),男,现为中国计量学院检测技术与自动化装置专业在读硕士研究生;主要从事计算机控制、电子测量及虚拟仪器技术的研究。

《自动化仪表》第 36 卷第 10 期 2015 年 10 月

99

台,可以根据需要选用不同的功能组件进行系统组态^[4]。PCS7 基于 Profibus 现场总线技术,把现场设备集成在过程控制系统中,现场设备通过 ET200 系列分布式 I/O 连接到 Profibus 总线上。系统结构图如图 2 所示。

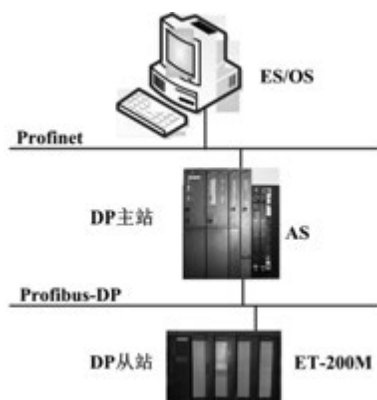


图 2 系统总体结构

Fig. 2 Architecture of the system

PCS7 的系统组态是指使用工具软件对计算机及软件的各种资源进行配置,使计算机或软件按照预先设置的指令参数,自动执行指定的任务的过程。PCS7 的组态过程一般分为以下四个步骤。

① 新建项目工程

整个项目工程的新建都由工程向导(new project wizard)完成,主要进行 CPU 套件的选型、项目层级的设置以及创建操作员站(OS)。

② 应用服务器(AS)、OS 硬件的组态

项目建立完成之后,需要进行硬件组态,实现 SMPT1000(小型过程控制仿真平台)和 PCS7 的数据通信。根据过热蒸汽出口压力控制系统的需求,将所需采集与输出的信号线接到 ET200 对应的 I/O 接口上。其中 AS 组态就是将电源、CPU、CP443-1 等订货号与实际硬件订货号匹配,配置 CPU412-3H 的 MPI/DP 接口。该接口支持 Profibus DP 通信,可实现 CPU 直接与远程 I/O 通信。

OS 组态与 AS 类似,需要在工程师站(ES)中组态真实的 OS,并且双方通信成功。

③ 控制算法组态

控制算法组态主要是指连续功能图(CFC)组态。在 CFC 编辑器中放置控制系统所需要的功能块,配置相关的参数。这些功能块是具有特定功能的预置功能块,连接相应的端子即可。本文所需要的专家 PID 功能块需要使用 SCL 语言进行编写,编译后才能生成专家 PID 控制器。

④ 监控画面组态

监控画面组态就是通过 WinCC 人机界面组件完成的上位机界面,实现锅炉过热蒸汽出口压力的监控的可视化和过程任务控制。操作员在 OS 界面可以以图形化的方式控制和监视出口压力控制系统的数据变化。

3 专家 PID 控制器设计

在设计专家控制器时选用了经典的控制器模型,进一步提高专家 PID 控制器对数据的处理能力,提高最终的控制效果。专家控制通过模拟专家的推理过程和知识,能以专家的水平解决问题。本文使用知识工程方法,应用专家系统的设计规则和实现形式构建一个实时专家智能控制系统^[5-6]。专家 PID 控制器结构图如图 3 所示。

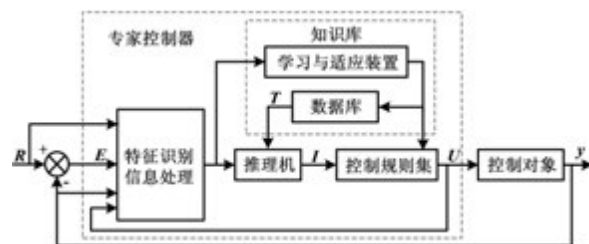


图 3 专家 PID 控制器结构图

Fig. 3 Structure of the expert PID controller

由图 3 看出专家控制器选用的模型为^[7]:

$$U = f(E, T, I) \quad (1)$$

式中: $U = (u_1, u_2, \dots, u_l)$ 为控制器输出集; $E = \{e_1, e_2, \dots, e_m\}$ 为控制器输入集; $T = \{t_1, t_2, \dots, t_n\}$ 为系统中的数据项集; $I = \{i_1, i_2, \dots, i_p\}$ 为推理机构的输出集。

f 为智能算子,其基本形式为:

$$\text{If } E \text{ and } T \text{ then (if } I \text{ then } U) \quad (2)$$

专家 PID 控制器就是依据这个模型理论设计的。图 4 所示的是典型的二阶系统单位阶跃响应误差曲线^[2]。

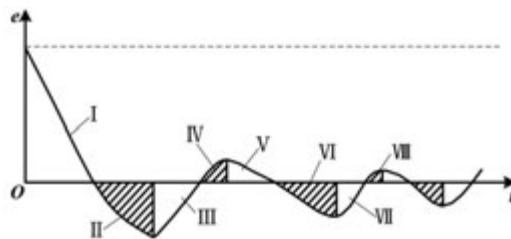


图 4 典型二阶系统单位阶跃响应误差曲线

Fig. 4 The unit step response error curve of the typical second-order system

$e(k)$ 的采样误差 $e(k)$ 、 $e(k-1)$ 、 $e(k-2)$ 分别表示前一次和前两次采样时刻的误差值,则有:

$$\Delta e(k) = e(k) - e(k-1)$$

$$\Delta e(k-1) = e(k-1) - e(k-2)$$

根据误差及其变化,并结合图 4 对专家 PID 控制器的规则进行如下定性分析。

① 当 $|e(k)| > M_1$ 时,说明误差的绝对值已经很大。不论误差变化趋势如何,都应考虑控制器的输出按定值输出,以达到迅速调整误差、同时避免超调的目的。此时,它相当于实施开环控制。控制器输出为 $u(k) = u_{sp}$ 。

② 当 $e(k) \Delta e(k) > 0$ 时,说明误差在朝误差绝对值增大方向变化,或误差为某一常数,未发生变化。

如果 $|e(k)| \geq M_2$,说明误差较大,可考虑由控制器实施较强的控制作用,使误差绝对值朝减小方向变化,迅速减小误差的绝对值。控制器输出为:

$$u(k) = u(k-1) + K_1 \{ K_p \Delta e(k) + K_i e(k) + K_D [e(k) - 2e(k-1) + e(k-2)] \} \quad (3)$$

如果 $|e(k)| \geq M_2$,说明尽管误差朝绝对值增大方向变化,但误差绝对值本身并不是很大,可考虑实施一般的控制作用,扭转误差的变化趋势,使其朝误差绝对值减小方向变化。控制器输出为:

$$u(k) = u(k-1) + K_p \Delta e(k) + K_i e(k) + K_D [e(k) - 2e(k-1) + e(k-2)] \quad (4)$$

③ 当 $e(k) \Delta e(k) < 0$, $\Delta e(k) \Delta e(k-1) > 0$ 或 $\Delta e(k) = 0$ 时,说明误差的绝对值朝减小的方向变化,或者已经达到平衡状态。此时,可考虑采取保持控制器输出不变。

④ 当 $e(k) \Delta e(k) < 0$ 、 $\Delta e(k) \Delta e(k-1) < 0$ 时,说明误差处于极值状态。如果此时误差的绝对值较大,即可考虑实施较强的控制作用;如果误差的绝对值较小即 $|e(k)| < M_2$,可考虑实施较弱的控制作用,即:

$$e(k) = u(k-1) + K_1 K_p e_m(k) \quad |e(k)| > M_2 \quad (5)$$

$$e(k) = u(k-1) + K_2 K_p e_m(k) \quad |e(k)| \leq M_2 \quad (6)$$

⑤ 当 $|e(k)| \leq \varepsilon$ (精度) 时,说明误差的绝对值很小,此时可加入积分环节,减少稳态误差。

以上各式中 $e_m(k)$ 为误差的第 k 个极值; $u(k)$ 为第 k 次控制器的输出; K_1 为增益放大系数 $K_1 > 1$; K_2 为抑制系数 $0 < K_2 < 1$; M_1 、 M_2 为设定的误差界限, $M_1 > M_2 > 0$ 。

以上规则就是通过对误差控制信号的瞬时响应进行模式识别。在常规 PID 控制器的基础上构建专家 PID 控制器,可以更好地优化主控制器的输出,充分发挥专家控制的优点,能对时变、非线性和易受到各种干

扰的受控过程给出有效的控制策略。串级专家 PID 控制系统方块图如图 5 所示。

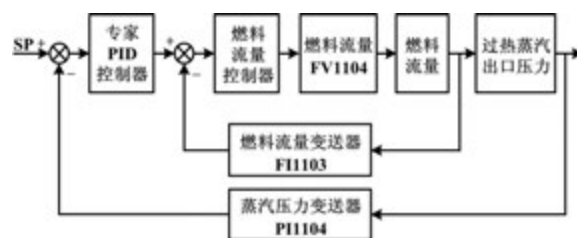


图 5 控制系统方块图

Fig. 5 Block diagram of the control system

4 仿真与验证

4.1 对象特性辨识

在进行 Matlab 仿真之前,需要获取最接近被控对象的精确数学模型。运用 WinCC 控件中的 Visual Basic 的脚本语言读取压力模型的输入(燃油流量)与输出(蒸汽压力),再利用行列式比定阶法来估计压力模型的阶次;然后利用递推最小二乘法实现对压力模型的辨识;最终确定最精确的过热蒸汽出口压力的数学模型^[8-10]。在 Matlab 中编写模型阶次辨识语言,对多组压力模型的输入输出进行计算,得到行列式比 $DR^*(n)$,从而实现对过热蒸汽出口压力模型阶次的辨识。行列式比数据如表 1 所示。

表 1 行列式比数据

Tab. 1 The data of determinant ratio

序号	$DR^*(1)$	$DR^*(2)$	$DR^*(3)$	$DR^*(4)$
1	0.214 3	0.886 9	1.197 1	1.302 8
2	0.479 3	0.825 7	1.052 2	1.138 1
3	0.513 8	0.980 6	1.353 7	1.567 4

通过数据比较可知,当 n 等于 2 时行列式比显著增加,故压力模型的阶次可定为 2 阶。

获得压力模型的阶次之后,进一步分析论证得到最接近的压力辨识模型的差分方程为:

$$y(k) = -1.011\,05y(k-1) + 0.025\,6y(k-2) - 0.000\,6u(k-1) + 0.000\,5u(k-2) \quad (7)$$

4.2 专家 PID 控制的仿真

根据式(7)的模型,先在 Matlab 上进行仿真,分别进行常规 PID 与专家 PID 的仿真,PID 控制器是通过数字 PID 控制算法程序实现的^[11]。整定的专家 PID 控制参数为:

$$K_p = 5.4 \quad K_i = 0.8 \quad K_D = 30 \quad K_1 = 1.2 \quad K_2 = 0.6$$

利用 Matlab 绘出各自的压力曲线如图 6 所示。

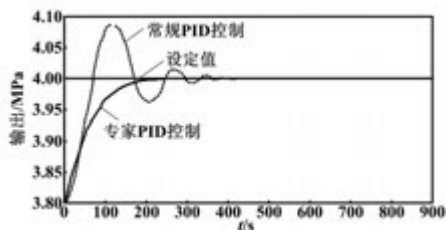


图6 常规 PID 与专家 PID 控制的输出比较

Fig. 6 Comparison of the outputs of conventional PID control and expert PID control

由图6的输出曲线可以看出,专家PID控制过渡时间短且基本无超调。仿真结果表明专家PID的控制效果更加优越。

4.3 实验验证

由仿真结果可以明显看出专家PID控制器的优越性。再根据前面所述的专家PID控制器的设计规则,在PCS7中运用SCL模块编写专家PID控制器功能块进行实验验证。生成的专家控制器功能块如图7所示。

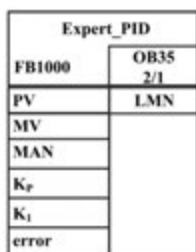


图7 专家PID控制器功能块

Fig. 7 Function blocks of expert PID controller

在PCS7中将整个锅炉过热蒸汽出口压力控制系统搭建完成后,副回路控制器使用燃料流量控制器,主回路控制器分别采用常规和专家PID控制器,准备工作完成以后运行上位机程序进行实验。两种PID控制的输出结果比较如表2所示。

表2的对比结果进一步表明,专家PID控制使控制器的输出更加稳定,专家PID控制在快速性、抗干扰性等方面优于常规PID控制。

表2 常规/专家PID控制的比较

Tab. 2 Comparison of the expert PID control and conventional PID control

控制器	最大误差 E/MPa	超调量 $\sigma/\%$	过渡时间 t/s
常规PID	0.093	2.33	674
专家PID	0.000	0.00	465

5 结束语

本文首先利用Matlab搭建的出口蒸汽压力的数学模型,验证了专家系统在PID控制器运用中的优越性,并通过西门子先进的PCS7系统进行进一步实验验证。与常规的PID控制相比较,专家PID控制提高了系统的抗干扰性能,在实际生产环节中可以起到节能减排、提高经济效益的作用。

参考文献

- [1] 马昕,张贝克.深入浅出过程控制:小锅带你学过控[M].北京:高等教育出版社,2013:175-177.
- [2] 刘金琨.先进PID控制及其Matlab仿真[M].北京:电子工业出版社,2003.
- [3] 西门子A&D集团.用于小型应用的紧凑而经济的过程控制系统—SIMATIC PCS 7BOX[P].北京:西门子(中国)有限公司,2005.
- [4] Sandro C. Control system PCS7 and M. I. S. together for the complete automation of the process in the sugar beet factory of Co. Pro. B. -Minerbio-Italy [J]. Computer Aided Chemical Engineeringr 2007 24: 842-845.
- [5] 吴兴纯,赵金燕,杨秀莲,等.智能PID算法在炉温度控制系统中的运用[J].机电工程,2011(8):949-950.
- [6] 郭楠,李智.专家PID算法在伺服系统中的应用与仿真[J].机械工程与自动化,2009(6):61-63.
- [7] 韩力群.智能控制理论及应用[M].北京:机械工业出版社,2007.
- [8] Ljung L, Soderstrom T. Theory and practice of recursive identification[M]. MIT Press, Cambridge, Massachusetts, London, England, 1983.
- [9] 方崇智,萧德云.过程辨识[M].北京:清华大学出版社,1988.
- [10] 潘立登,潘仰东.系统辨识与建模[M].北京:化学工业出版社,2004.
- [11] 葛宝明,林飞,李国国.先进控制理论及其应用[M].北京:机械工业出版社,2007.

(上接第98页)

参考文献

- [1] 刘成瑞,傅惠民.相关系数平稳序列自适应算法[J].机械强度,2003 25(6):661-665.
- [2] 赵小川,罗庆生,韩宝玲.基于伪随机序列自相关性的新型超声波测距系统[J].压电与声光,2009 31(6):856-861.
- [3] 陶建平,尹文庆,柳军.基于DSP和单片机的超声波测距系统[J].科学技术与工程,2010 10(6):762-765.
- [4] 苏炜,龚壁建,潘笑.超声波测距误差分析[J].传感器技术,2004 23(6):8-11.
- [5] 童峰,许水源,许天增.一种高精度超声波测距处理方法[J].厦

门大学学报:自然科学版,1998 37(4):507-512.

- [6] 程晓畅,王跃科,苏绍,等.基于相关函数包络峰细化的高精度超声测距法[J].测试技术学报,2006 20(4):320-324.
- [7] 付光怀,杨惠中.基于双正交样条小波的超声回波信号检测[J].仪器仪表学报,2008 29(4):309-310.
- [8] 李戈,孟祥杰,王晓华,等.国内超声波测距研究应用现状[J].测绘科学,2011 36(4):60-62.
- [9] 邹晓红.小波分析在超声回波测量中的应用[J].传感器技术,2005 24(7):78-82.
- [10] 陈先中,侯庆文,叶琳,等.超声测距系统的高精度中心椭圆算法[J].北京科技大学学报,2007 29(11):1154-1157.