

文章编号:1671-6833(2008)01-0018-03

电站锅炉主汽温自适应PID控制

闫水保, 郑立军, 张营帅, 魏新利

(郑州大学 化工学院, 河南 郑州 450001)

摘要: 提出了热工过程对象拟线性数学模型, 导出了在变工况条件下PID控制器参数与热工对象模型参数之间的关系, 建立了新的PID参数调整算法. 增益函数可以根据热工过程的理论分析或稳态工况数据统计分析获得, 微分时间函数与积分时间函数之间的关系可以根据控制器内部不振荡原则来确定, 这样可将PID在线调整参数从3个减少到1个, 简化了现场整定算法. 针对锅炉主汽温控制对象, 提出了以动态超调量为准则的PID参数在线调整算法, 可提高锅炉主汽温控制品质, 并通过例子进行了验证.

关键词: 自动控制技术; PID控制; 锅炉; 主汽温; 数学模型

中图分类号: TP 13; TP 273.3 **文献标识码:** A

0 引言

在火电站中, 为了提高锅炉运行的安全性和经济性, 通常需要对主汽温实施精确控制, 比如要求暂态偏差不能超过 $\pm 8^\circ\text{C}$, 稳态偏差不能超过 $\pm 2^\circ\text{C}$ 等. 主汽温热工对象惯性大、阶次高, 且模型参数随工况变化大, 需采用变参数控制^[1-7]. 变参数方法一般是首先通过在若干负荷点的手工调整实验确定这些负荷点的PID控制器参数, 然后用分段线性插值方法来确定其它负荷点的PID控制器参数. 手工调整工作量大, 时间长, 不易获得最佳的控制参数, 难以对主汽温对象实施优化控制.

笔者试图建立PID控制器参数与有自平衡热工对象模型参数之间的一般函数关系. 根据这种函数关系简化PID控制器参数的调整方法, 实现对变参数热工对象的优化控制, 使PID控制器能够在变参数热工对象控制中发挥最佳作用. 将这种控制思想应用于电站锅炉主汽温控制中, 提高锅炉运行的安全性和经济性.

1 热工对象拟线性数学模型及整定方法

1.1 热工对象拟线性数学模型

为了考虑模型参数的变化, 需要在线性模型中引入稳态参数. 稳态参数变化比调节量和被调节量的变化要缓慢得多, 以致于在每一个稳态参

数工况点附近, 热工对象仍可视作线性对象, 故仍可用线性理论来处理. 而相对于所有的工况点, 热工对象模型是非线性的, 或称是拟线性的. 这时, 具有自平衡能力的热工对象数学模型可表示为

$$G_o(s) = \frac{k(x)}{\left(1 + \frac{T_c(x)}{n(x)}s\right)^{n(x)}} \quad (1)$$

式中: x 为稳态参数, 比如负荷率; $k(x)$ 为增益函数, 可以通过稳态工况数据进行拟合或理论分析得到, 在稳态时有 $G_o(0) = k(x)$; $T_c(x)$ 为一阶时间函数, 是整个热工对象用一阶惯性环节近似时的时间常数; $n(x)$ 为热工对象的阶次.

式(1)与有自平衡能力热工对象的经典模型有所不同, 除了将各模型参数视为稳态变量的函数之外, 还用 $T_c(x)/n(x)$ 代替了 $T_c(x)$. 这样做的理由是: ①若用理论分析法对一个热工对象建模型, 可以建立不同阶次的模型, 例如将热工对象分为不同的段分别建模, 再将各段模型合成为热工对象的整体模型, 可以得到不同阶次的热工对象模型, 这表明对象模型阶次与建模方法有关; ②对于实验建模, 时间常数与模型的阶次密切相关, 而模型阶次需要用整数来表示, 会带来较大的误差; ③时间常数和模型阶次近似以乘积的形式来影响PID调整参数的.

使用式(1)的模型, 一阶时间函数与模型的

收稿日期: 2007-10-31; 修订日期: 2007-12-24

基金项目: 河南省自然科学基金资助项目(0411051900); 河南省高校青年骨干教师项目

作者简介: 闫水保(1966-), 男, 河南辉县人, 郑州大学副教授, 博士, 主要从事火电厂节能理论、状态监测控制和运行优化研究, E-mail: yanshuibao@zzu.edu.cn

阶次无关,是一个热工对象特性参数,能更客观地表达对象特性;这时模型的阶次主要对阶跃响应曲线上最大变化率有影响,而对最大变化率发生点在时间轴上的位置几乎无影响,从而有可能用低阶对象来近似高阶对象。

为了使PID控制器具有非线性适应能力,其参数也应包含稳态参数,当然这里同样要求稳态参数比PID控制器的输入、输出参数变化慢得多。这时,PID控制器的数学模型可表示为

$$G_R(s) = \frac{1}{\delta(x, \psi)} \left(1 + \frac{1}{T_i(x)s} + T_d(x)s \right) \quad (2)$$

式中: ψ 为衰减率; $\delta(x, \psi)$ 为比例带函数; $T_i(x)$ 为积分时间函数; $T_d(x)$ 为微分时间函数。

虽然控制器有3个可调参数,但为了使PID控制器自身不产生振荡,又能具有较强的超前校正能力,可取

$$T_i(x) = 4T_d(x) \quad (3)$$

将PID控制器的比例带参数进行分离变量,得

$$\delta(x, \psi) = k(x)\delta'(\psi) \quad (4)$$

式中: $\delta'(\psi)$ 为单位增益热工对象的比例带; $k(x)$ 的作用是将热工对象增益补偿为单位增益。

1.2 三阶热工对象的理论整定方法

由于PID控制器结构的限制,只有三阶以下的热工对象才能得到较简单的整定参数分析解。笔者主要给出三阶对象的分析解,然后讨论将三阶对象的分析结果应用到高阶对象的可行性。当热工对象阶次为三阶时,对于单位增益热工对象,控制器与热工对象传递函数之积为

$$G(s) = \frac{1}{\delta'(\psi)} \cdot \frac{1}{T_i(x)s} \left(1 + \frac{T_i(x)}{2}s \right)^2 \left(1 + \frac{T_c(x)}{n(x)s} \right)^{n(x)} \quad (5)$$

为了使对象具有较低的阶数,在式(5)中取 $\frac{T_i(x)}{2} = \frac{T_c(x)}{n(x)}$,使传递函数降低两阶。当取 $n(x) = 3$ 时,得

$$T_i(x) = \frac{2}{3}T_c(x) \quad (6)$$

将式(6)代入式(5)得

$$G(s) = \frac{1}{\delta'(\psi)2T_c(x)s} \left(1 + \frac{T_c(x)}{3}s \right) \quad (7)$$

式(7)为二阶系统,可运用理论法整定,结果为

$$\delta'(\psi) = 2\xi^2(\psi) = \frac{2\ln^2(1-\psi)}{4\pi^2 - \ln^2(1-\psi)} \quad (8)$$

式中: $\xi(\psi)$ 为调节系统的阻尼比。当 $0.9 < \psi < 1$

时,有 $0.344 < \xi < 1$,相应地, $\delta'(\psi) = 0.24 \sim 2$ 。

三阶对象采用PID调节时,其PID参数整定可按式(3)、式(4)、式(6)和式(8)进行。

1.3 上述方法对高阶对象的适用性

上述整定方法虽然是根据三阶热工对象得出的,但对高阶对象有一定的适用性。为了说明其原理,将上述整定结果代入式(5),得

$$G(s) = \frac{1}{\delta'(\psi)2T_c(x)s} G_3(s) \frac{1}{\left(1 + \frac{T_c(x)}{n(x)s} \right)^{n(x)-2}} \quad (9)$$

其中, $G_3(s) = \left(\frac{1 + \frac{T_c(x)}{3}}{\frac{T_c(x)}{1 + \frac{n(x)}{3}}} \right)^2$, 为超前校正因子。

当 $n(x) > 3$ 时,式(9)中的 $G_3(s)$ 因子起着对热工对象超前校正的作用,而且热工对象的阶次越高,超前校正作用越强。因此,上述整定方法对高阶对象有一定的适用性。

2 火电厂主汽温调节系统整定方法

2.1 增益函数的确定

主汽温调节系统如图1所示。内回路采用P控制器,外回路采用PID控制器, $G_{a1}(s)$ 为导前区传递函数, $G_{a2}(s)$ 为惰性区传递函数。

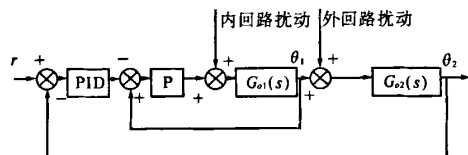


图1 主汽温调节系统控制方框图

Fig.1 Schema diagram of control system of main steam temperature

由于内回路是快速回路,故在对主回路进行整定时,可参照图2所示的方框图进行,主控制器的调节量是导前汽温信号(过热器进口温度)。根据文献[6]对锅炉过热器动态数学模型的理论分析可知,在稳态时,有 $k(x) = \Delta\theta_2(\infty)/\Delta\theta_1(\infty) = c_{p1}/c_{p2}$,其中 c_{p1} 、 c_{p2} 分别是过热器进口与出口处的蒸汽比热容值,可以通过实测参数间接计算得到。

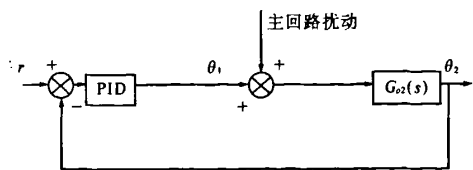


图2 主回路方框图

Fig.2 Schema diagram of main loop

2.2 一阶时间函数在线调整

一阶时间函数是需要在线调整的惟一参数. 该参数可以根据一组启发性规则来实现, 方法是: 首先给出系统的期望动态超调量及其允许变化范围, 并计算 δ' 值. 然后根据经验给出一阶时间函数初试探值, 若系统的动态超调量超出了允许的范围, 说明一阶时间函数试探值与实际值不符. 逐步调整试探值, 直到动态超调量回到允许的范围为止.

3 应用举例

某超临界 600 MW 机组锅炉过热器在典型工况下汽温对喷水扰动的动态特性如表 1 所示^[5].

表 1 典型负荷下主汽温对喷水扰动的动态特性
Tab.1 Dynamic performance of main steam temperature due to spray-water disturbance under typical loads

负荷率 $x/\%$	导前区 $G_{o1}(s)$	惯性区 $G_{o2}(s)$
37	$\frac{5.072}{(28s+1)^2}$	$\frac{1.048}{(56.6s+1)^8}$
50	$\frac{3.067}{(25s+1)^2}$	$\frac{1.119}{(42.1s+1)^7}$
75	$\frac{1.657}{(20s+1)^2}$	$\frac{1.202}{(27.1s+1)^7}$
100	$\frac{0.815}{(18s+1)^2}$	$\frac{1.276}{(18.4s+1)^6}$

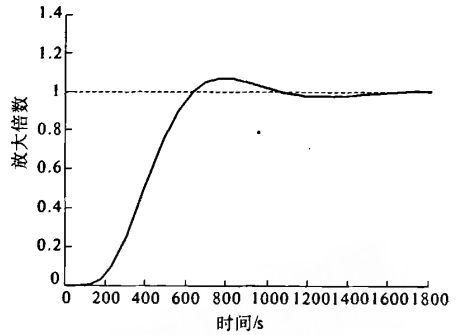
对主汽温对象在典型工况下的动态特性, 通过 MATLAB 进行了仿真实验. 在仿真实验中, 内回路采用 P 控制器, 衰减率取为 $\psi = 0.75$. 对于外回路, 期望动态超调量为 7%, 允许范围设定为 5%~10%. 可计算出 $\delta'(\psi) = 1.4$. 取一阶时间函数初值为 $T_c(x) = 300\text{ s}$, 当动态超调量大于 10% 时, 将 $T_c(x)$ 放大 5%; 当动态超调量小于 5% 时, 将 $T_c(x)$ 缩小 5%. 仿真结果如表 2 和图 3 所示.

从表 2 和图 3 中可能看出: 在机组变工况情况下, 尽管主汽温对象的动态特性发生了很大变化, 通过在线调整一阶时间函数试探值, 能使品质指标基本保持不变. 从初态到允许的动态超调量范围, 调整次数较少, 说明调整算法对初探值选取要求不高.

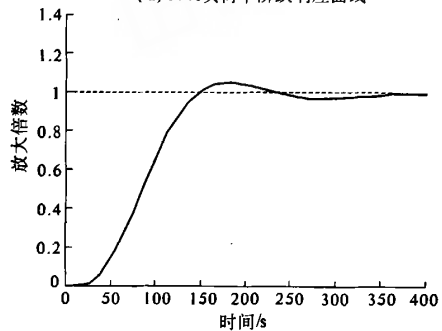
表 2 仿真结果

Tab.2 Simulation results

负荷率 $x/\%$	一阶时间函数 $T_c(x)/\text{s}$	动态超调量 $\%$	调整次数 /次
37	793	7	7
50	508	6	3
75	310	7	11
100	180	6	21



(a) 37% 负荷下阶跃响应曲线



(b) 100% 负荷下阶跃响应曲线

图 3 主汽温控制系统在变工况下阶跃响应曲线

Fig.3 Step response curves of main steam temperature control systems under variant loads

4 结论

提出了热工对象拟线性数学模型, 通过在热工对象线性动态数学模型中引入稳态参数来考虑热工对象模型的缓慢变化. 以有自平衡能力的三阶对象为例建立了 PID 参数与对象模型参数之间的关系式, 并讨论了将整定算法应用到高阶对象的可行性.

针对锅炉主汽温对象, 增益函数可以通过理论得到, 微分时间函数与积分时间函数之间的关系可以根据控制器不振荡条件来确定. 这样, PID 调整参数从 3 个减少到 1 个, 简化了现场整定方法. 可根据动态超调量准则来设计一组调整规则, 实现 PID 参数自适应在线整定.

参考文献:

- [1] 陈来九. 热工过程自动调节原理及应用[M]. 北京: 水利电力出版社, 1982.
- [2] 罗万金. 电厂热工过程自动调节[M]. 北京: 水利电力出版社, 1991.
- [3] 刘金琨. 先进 PID 控制 MATLAB 仿真[M]. 北京: 电子工业出版社, 2004.

- 成工艺的改进[J]. 化学试剂, 1992, 14(6): 377, 345.
- [3] 武引文, 梅和珊, 陈子明, 等. 叠氮磷酸二苯酯在有机合成及医药上的应用[J]. 河北医科大学报, 2001, 22(6): 380-382.
- [4] YAMADA S, YOKOYAMA Y, SHIOIRI T. A new synthesis of thiol ester[J]. Org Chem, 1974, 39(14): 3302-3305.
- [5] SHIOIRI T, YAMADA S. Diphenyl phosphorazidate[J]. Organic Syntheses, 1984, 62: 187-188.
- [6] WOLFF O, WALDVOGE S R. Reliable protocol for the large scale synthesis of diphenyl phosphora azidate (DPPA)[J]. Synthesis, 2004, (8): 1303-1305.
- [7] 吴范宏, 辛水波. 催化法制备叠氮磷酸二苯酯: 中国, 03128979.7[P]. 2006-09-20.
- [8] 苏碧泉, 盛丽. 有机合成反应中的相转移催化剂[J]. 化学工程师, 2003, 99(6): 67-68.
- [9] 田丹碧. 仪器分析[M]. 北京: 化学工业出版社, 2004: 142.

Determination of Content of Eiphenyl Phosphorazidate with HPLC

ZHAO Jian - hong, LI Lei, WU Hong - qi, WANG Liu - cheng, SONG Cheng - ying

(School of Chemical Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China)

Abstract: A HPLC method was established for the analysis of DPPA, which was synthesized by Diphenyl phosphorochloridate and sodium azide in the presence of a phase transfer catalyst. The experimental conditions were on a C_{18} (150 mm \times 4.6 mm i. d.), $V(\text{methanol}): V(\text{water}) = 70:30$ as the mobile phase, and ultraviolet detector (determination at 254 nm) was used. The result showed that coefficient of variation of precision test, average recovery percentage and linear regression coefficient were 0.3 %, 99.96 % and 0.9999, respectively.

Key words: HPLC; diphenyl phosphorazidaue; phase transfer catalysis

(上接第20页)

- [4] 刘志远, 吕剑虹, 陈来九. 智能 PID 控制器在电厂热工过程控制中的应用前景[J]. 中国电机工程学报, 2002, 22(8): 128-134.
- [5] 彭道刚, 杨平, 王志萍. 火电厂主汽温控制系统的免疫 PID 串级控制[J]. 动力工程, 2005, 25(2): 234-238.
- [6] 章臣樾. 锅炉动态特性及其数学模型[M]. 北京: 中国水利电力出版社, 1990.
- [7] 朱晓东, 范秉琪, 杨祖轩, 等. 基于 ITAE 标准函数的纯滞后系统控制[J]. 郑州大学学报: 工学版, 2006, 27(2): 73-76.

Adaptive PID Control of Main Steam Temperature of Boiler in Power Plant

YAN Shui - bao, ZHENG Li - jun, ZHANG Ying - shuai, WEI Xin - li

(School of Chemical Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China)

Abstract: Pseudo-linear mathematic model of thermal process object is proposed to conduct relations between parameters of PID controller and thermal process model when operating conditions change, and a new regulation algorithm of parameters of PID controller is established. Gain function can be obtained by theory analysis of thermal process object or by statistic analysis of operating data under stable conditions. Relation between derivative time function and integral time function can be determined according to no oscillation principle in controller. The number of regulation parameters of PID controller is reduced from three to one, which simplifies online regulation algorithm. Aimed at process object of boiler main steam temperature, a new algorithm based on the criterion of dynamic overshoot is used to regulate parameters of PID controller in real time, and this improves control quality of boiler main steam temperature system. The new algorithm is verified by an example.

Key words: automation technology; PID control; boiler; main steam temperature; mathematic model