

文章编号: 1671-4598(2015)05-1519-03 DOI: 10.16526/j.cnki.11-4762/tp.2015.05.024
中图分类号: TQ015.9; TP391.9; O6-39 文献标识码: A

基于 GA 的主汽温系统内模控制研究

宋伟鑫, 许必熙, 顾廉, 杨伟斌

(南京工业大学 自动化与电气工程学院, 南京 211816)

摘要: 主汽温控制系统是典型的大延迟、大惯性、时变控制系统, 一直以来都是火电厂自动控制的难点; 为此将内模控制引入主汽温控制系统, 并提出采用遗传算法对滤波器参数 λ 优化整定, 该方法简单易行, 相较于传统 PID 参数整定方法具有一定的优越性; 并对内模控制为主控制器的 IMC-PID 控制系统进行 SIMULINK 仿真, 与 PID-PI 控制系统进行对比, 仿真结果表明 IMC-PID 控制系统相比于传统 PID-P 串级控制系统过渡时间短、超调量小、鲁棒性好等特点; 其控制效果好于常规串级 PID 控制系统, 适用于大延迟、大惯性过程的控制, 并且易于在工业上实现。

关键词: 主汽温; 内模控制; 遗传算法; 串级控制

Internal Model Control for Main Steam Temperature System Based on GA

Song Weixin, Xu Bixi, Gu Lian, Yang Weibin

(Department of Automation and Electrical Engineering, Nanjing Tech University, Nanjing 211816, China)

Abstract: The main steam temperature control system is a typical large delay, large inertia and time-varying control system. It has always been the difficulty of the automatic control in power plants. Therefore introduce the internal model control to the main steam temperature control system, and use genetic algorithm to optimize the filter parameter. Adopts internal model control as master controller and build its simulation model by computer simulation software MATLAB/SIMULINK. Compared with PID-PI control system, the results show that the IMC-PID control system has the shorter transition time, smaller overshoot and better robustness. Its better than the conventional cascade PID control system, easy to implement in the industry and suitable for the large delay and large inertia process control.

Keywords: main steam system; cascade control; internal model control; GA

0 引言

锅炉和涡轮机中的主汽温度是电厂安全运行的重要参数, 主汽温过高或者过低都会影响着电厂机组的安全生产和经济效益。主汽温过高, 可能造成过热器、蒸汽管道和汽轮机的高压部分金属损坏。主汽温过低, 又会降低电厂的热效率并且影响汽轮机的安全经济运行。

主汽温自动控制的任务是保持过热器出口蒸汽温度在允许范围内, 保护过热器, 使过热器壁管温度不超过允许的工作温度。并且主汽温控制系统是典型的大延迟、大惯性、时变控制系统, 所以一直以来都是火电厂自动控制的难点^[1]。

本文通过对某电厂 300 mW 机组过热汽温对象在 80% 负荷下进行仿真研究, 针对主汽温控制对象的特点在传统串级控制系统上结合内模控制方法从而能够有效克服对象的大延迟特性, 并利用遗传算法进行滤波器参数的寻优, 仿真结果表明该方法与普通串级控制系统相比方法简单, 易于实现, 鲁棒性强, 对于工业实际应用有一定的参考价值。

1 主汽温系统特性

1.1 普通串级控制系统

火电厂主汽温被控对象具有大延迟、大惯性、时变等特性, 工业电厂应用中大多采用串级控制方案。串级控制与单回路控制系统相比较增加一个副回路, 所以控制系统具有较好的抗干性^[2], 更快的响应速度及一定的自适应能力等特点。传统

主汽温系统串级控制系统如图 1 所示。

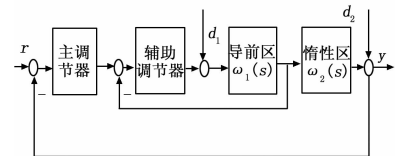


图 1 串级控制结构图

$W_1(s)$ 是导前区传递函数, $W_2(s)$ 惰性区传递函数, d_1 控制量干扰, d_2 输出量干扰, 主控制器为 PID 控制, 副控制器为 PI 控制, 参数整定采用 ZN 整定法。工程上主汽温控制系统在负荷变化时其动态变化明显, 并且有扰动多的特点, 所以普通串级控制效果并不理想。

1.2 串级控制系统的改进

结合内模控制的优点与主汽温控制的特性, 本文采用基于 IMC-PID 方法。该方法结合了内模控制、串级控制的优点, 针对主汽温大延迟等特性, 本方法中控制系统的主控制器选择内模控制器, 其控制系统如图 2 所示。

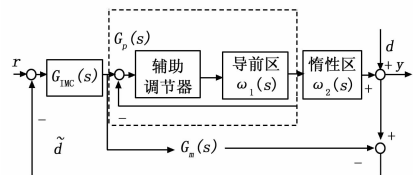


图 2 主汽温内模控制器结构图

2 内模控制系统

内模控制理论由 Garcia 和 Morari 于 1982 年提出, 该理论是基于过程数学模型设计的控制策略。该策略设计过程简单,

收稿日期: 2014-09-30; 修回日期: 2015-03-19。

作者简介: 宋伟鑫(1989-), 男, 江苏南京人, 硕士研究生, 主要从事智能控制及其应用方向的研究。

具有较好的跟踪性和鲁棒性，且对不可测的干扰具有一定的抑制性，从而被广泛应用于工业控制，内模控制结构如图 3 所示。

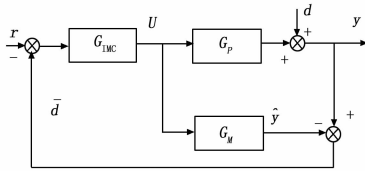


图 3 IMC 系统结构图

其中： G_{IMC} 是内模控制器， G_p 是控制对象， G_m 是控制对象的模型， r 和 y 分别是被控对象输入和输出信号， d 为干扰信号， \tilde{d} 为误差反馈信号， U 是控制器的输出，即被控制对象的输入信号。

根据图 3 结构的表示，内模系统的闭环输出响应函数为：

$$y = \frac{G_{IMC}G_p}{1 + G_{IMC}[G_p - G_m]}r - \frac{1 - G_{IMC}G_m}{1 + G_{IMC}[G_p - G_m]}d \quad (1)$$

且 IMC 控制系统的反馈信号为：

$$\tilde{d} = (G_p - G_m)U + d \quad (2)$$

当控制系统模型匹配且不存在干扰 ($G_p = G_m, d = 0$) 时，控制系统输出 y 与系统动态模型输出 \hat{y} 相同，则误差反馈通道的输出为零 $\tilde{d} = 0$ 。所以当控制对象不存在模型不确定性和干扰时，IMC 系统是一个具有开环特性的系统。为了消除模型不确定性和扰动对系统的影响，可以通过增加反馈通道来克服。在实际工况过程中模型不确定性的影响难以消除，因此为了提高系统性能只能从抗扰动性方面入手，而内模控制的反馈通道能够消除上述两种因素的影响，并与开环部分构成闭环系统。

2.1 主气温内模控制器设计

2.1.1 内模控制器的设计^[3]

$G_m(s)$ 可以分解：

$$G_m(s) = G_{m+}(s)G_{m-}(s) \quad (3)$$

在模型中 $G_{m+}(s)$ 为时滞与不稳定零点部分， $G_{m-}(s)$ 部分在模型中是最小相位部分。

IMC 控制器的设计需要确保系统的鲁棒性及稳定性，需在 $G_{m-}(s)$ 的逆上增加滤波器

$$G_{IMC}(s) = G_{m-}^{-1}(s)f(s) \quad (4)$$

2.1.2 滤波器的选择

滤波器选择的原则是根据不同的输入信号类型，选择与之相匹配的滤波器 f 。一般在内模控制中，对于接近常值的输入信号，为了满足系统零稳态偏差特性，可以按照下面的原则选择滤波器：

$$G_{m+}(0) = f(0) = 1 \quad (5)$$

式 (5) 能够衍生出不同形式的滤波器。主要考虑以下两种形式：

1) 1 型滤波器：

$$f = \frac{1}{(\lambda s + 1)^n} \quad (6)$$

2) 2 型滤波器：

$$f = \frac{n\lambda s + 1}{(\lambda s + 1)^n} \quad (7)$$

式中， λ 表示滤波调节参数；采用合适阶数 n 确保控制器正则。本文采用 1 型滤波器并使 $n = 1$ 即 $f(s) = \frac{1}{1 + \lambda s}$ 。为滤波器时间常数，也是内模控制系统中唯一的可变参数。将 $f(s)$ 带入

式 (4) 可得到内模控制器的形式为：

$$G_{IMC}(s) = \tilde{G}_{m-}^{-1}(s)f(s) = \frac{T_s + 1}{K(\lambda s + 1)} \quad (8)$$

要使内模控制系统闭环稳定，

$$|G_{m+}(s)f(s)| \leq \frac{1}{l_m}, \forall \omega \quad (9)$$

l_m 是模型不确定上界，即有 $|\frac{G_p(s) - G_m(s)}{G_p(s)}| \leq l_m$ ，现实

中 l_m 的高频段甚至会超过 1，因此 λ 的取值范围受到对象与模型不匹配程度的限制，并且可调参数 λ 的大小决定系统的响应速度与鲁棒性， λ 增大，系统的鲁棒性增加； λ 减小，响应加快，系统的鲁棒性变弱。并且 λ 近似地与闭环带宽成正比，这样可以获得滤波器参数范围，应用遗传算法进行优化寻解^[4]。

3 用遗传算法寻找最优解

3.1 遗传算法简介

遗传算法 (genetic algorithm) 是模拟生物学中的自然选择与遗传变异而发展起来的逐次迭代自适应寻优随机搜索算法^[5]。其主要特点是群体搜索策略和群体中个体之间的信息交换，搜索不依赖于梯度信息。

参数编码：编码是遗传算法的基础，将目标问题离散化，方便计算机处理。本文选择双精度向量编码。

适应度函数的建立：遗传算法中使用适应度这个概述来评价个体的优劣程度，适应度越大个体越好，反之适应度越小则个体越差。

$$\text{选择 } J = \int_0^{\infty} te^2(t) dt \quad (10)$$

作为目标函数该函数综合考虑了稳定性、快速性和准确性三方^[5]。因为 J 的取值以最小为优，所以在本文中，适应度函数为：

$$f = \frac{1}{J} \quad (11)$$

种群繁殖：步骤如下。

1) 选择：

选择是指在种群中挑选适合目标函数的优良个体，挑选依据是个体适应度函数值。

2) 交叉：

交叉运算是遗传算法中产生新个体的主要手段。交叉是将选择出来的群体按一定的交叉概率随机地选择出一部分个体，任意两两配对，并按选定的交叉方式，相互交换一个或多个基因序列。

3) 突变：

多次交叉后，一般很难产生新个体。因为交叉操作是父代基因的重组，基因全部来源于父代。变异是随机较小概率的改变某一位的值改 1 为 0，或改 0 为 1。所以变异操作会改变父代的基因类型，更容易突变出新的个体，增加群体的多样性，避免了算法陷入局部收敛。变异的位置按变异概率 P_m 随机确定。一般 P_m 很小，通常在 $[0, 0.1]$ 这个区间内。

3.2 滤波器参数寻优应用遗传算法的步骤

遗传算法的滤波器参数优化应用过程概述下来有以下几个步骤。^[6]

1) 确定滤波器参数的初始化，即随机产生一组初始个体构成的种群，并对其中每一个个体进行编码。

2) 制定适应度函数，按照式 (11) 的适应度函数对初始种群里的个体进行适应度计算，判定是否满足算法收敛准则。

选择适应度值合适的个体进行操作。

3) 设定算法的种群、交叉与变异的参数, 以及进化代数。

4) 进行交叉与变异操作。

5) 返回步骤 (2), 检验是否满足条件。若满足进化代数或连续几代的解均不变, 则停止操作, 保存最优滤波器参数并结束。不满足则重复步骤 (4) 直到满足。

4 仿真研究

本文针对某电厂 300 mw 机组过热汽温对象在 80% 负荷下进行仿真研究。采用遗传算法对滤波器参数优化整定, 并对 PID-PI 控制系统与 IMC-PID 控制系统进行性能比较。

该主汽温系统导前区与惰性区传递函数如下。

$$\text{导前区: } W_1(s) = \frac{K_1}{(T_1 s + 1)^2}$$

$$\text{惰性区: } W_2(s) = \frac{K_2}{(T_2 s + 1)^2}$$

其中: $K_1 = -1.1081$; $T_1 = 14.1091$, $K_2 = 1.0247$; $T_2 = 45.6781$ 。

广义被控对象模型的建立, 可以采用基于阶跃响应的最小二乘方法, 根据对象的阶跃响应曲线、最小偏差获得对象的近似模型^[7]。

$$G_m = \frac{1.2047}{110s + 1} e^{-90s}$$

为了让仿真具有可比性, 内回路辅助控制器统一选择 PI 控制, 参数通过 ZN 整定得到 $K_p = 1.6666$; $T_i = 20$ s;

主控制器若采用 IMC-PID 控制方法主控制器为内模控制, 滤波器参数运用遗传算法寻优, 本文选择双精度向量编码, 种群大小设定为 30, 交叉概率 $PC = 0.60$, 突变概率 $PM = 0.05$ 。经过 50 代进化, 得到优化参数 $\lambda = 60$ 。

主控制器若采用传统 PID-PI 控制方法, 主控制器为 PID 控制, 参数由 ZN 整定方法结果为 $K_p = 0.5$, $T_i = 60$ s, $T_d = 20$ s。

图 4 为两种控制系统 80% 负荷下的单位阶跃响应输出曲线。从图中可以看出 IMC-PI 控制系统响应速度快, 超调量小, 控制品质明显好于 PID-PI 控制系统。

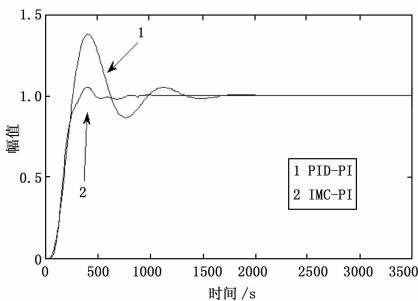


图 4 80% 负荷下两种控制系统的输出曲线

如图 5 在 1800 s 处加入幅值为 0.5 的外环阶跃干扰。从增加外部扰动的控制对比效果看出 IMC-PI 系统的抑制扰动速度较快, 超调量更小, 鲁棒性更好。

在工业现场对象参数往往是时时变化的, 而以上仿真是在主汽温控制对象特定负荷、固定参数下进行仿真得到的结果, 所以控制系统必须具有较强的鲁棒性。现对主汽温系统主要特性区域惰性区进行参数变化研究。当惰性区系数 K_2 , T_2 存在 10% 的误差时选择相同的滤波调节参数 λ 以及 PID 参数, 其他的仿真条件不变, 曲线输出如图 6 所示。

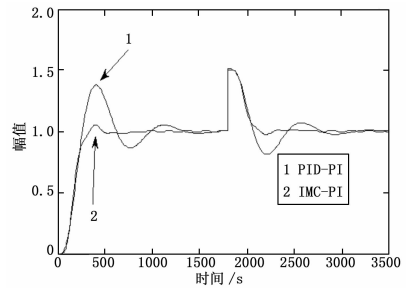


图 5 外环阶跃扰动下的输出响应曲线

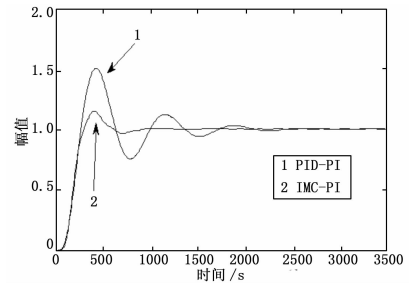


图 6 K_2 、 T_2 同时增大 10% 的阶跃曲线

图 6 对应 K_1 、 T_1 同时增大 10% 时的阶跃响应曲线。从图中可以看出 IMC-PI 控制输出超调量更小, 控制效果明显好于 PID-PI 控制。因此得出对于参数 K_2 , T_2 改变的情况, IMC-PI 控制也能克服扰动产生的误差信号, 并达到系统输入设定值。

和传统 PID-PI 串级控制系统相比, 利用遗传算法进行滤波器参数整定的 IMC-PI 控制系统过渡过程时间短, 超调量较小, 说明遗传算法的参数寻优的可行性, 并且内模串级控制能够较好地解决响应快速性和准确性的问题, 有助于提升控制性能。

5 结论

本文提出基于全局寻优的遗传算法整定参数 IMC-PID 控制器设计方法。通过遗传算法对内模控制器的滤波器参数进行优化自整定, 使整个 IMC-PID 控制系统快速稳定, 解决了传统 PID-PI 算法适应性差和参数整定困难的缺点。IMC-PID 设计使得串级控制结构具有内模控制的优点并较好地解决响应快速性和准确性的矛盾, 适用于大延迟、大惯性过程的控制。其控制效果好于常规串级 PID 控制系统。并且易于在工业上实现。

参考文献:

- [1] 金 飞. 基于内模控制的直流炉主汽温控制策略应用研究 [D]. 北京: 华北电力大学, 2011.
- [2] 王小龙, 许必熙, 宋伟鑫. 双口内模在主汽温系统中的仿真应用 [J]. 计算机与应用化学, 2014, 31 (3): 350-352.
- [3] 杨 平, 彭道刚, 王志萍, 等. 热工过程时滞对象的神经网络内模控制 [J]. 计算机测量与控制, 2004, 12 (9): 835-837.
- [4] 陈 娟, 闫 聪, 潘立登, 等. 基于遗传算法时滞系统的滤波器参数自调整内模控制 [J]. 北京交通大学学报, 2005, 29 (5): 47-51.
- [5] 杨 磊, 田作华, 刘 山, 等. 时滞系统控制参数优化的遗传模拟退火算法 [J]. 计算机仿真, 2006, 23 (2): 155-156.
- [6] 雷英杰, 张善文, 李续武, 等. Matlab 遗传算法工具箱及应用 [M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2005.
- [7] 程光坤, 赵文杰, 丁艳军, 等. 基于串级 PID 的过热汽温多模型切换控制 [J]. 电站系统工程, 2008, 24 (6): 55-57.