

# 基于内模控制 (IMC) 的主汽温度控制系统设计

孙 玥, 张 纲, 郑艳秋, 曾德良

(华北电力大学 控制与计算机工程学院, 北京 102206)

**摘要:** 主蒸汽温度和再热蒸汽温度直接影响火电厂的热效率和汽轮机等设备运行的安全性; 传统 PID 控制器的控制规律简单, 但是不能根据控制过程中的不确定性变化做出相应调整; 当被控对象参数实时变化时, 控制器参数不能做出实时调整, 这样会导致过程的品质指标变坏; 针对超超临界机组过热蒸汽温度和再热蒸汽温度, 提出了一种基于内模控制 (Internal Model Control, IMC) 的 PID 控制策略, 将 PID 控制、Smith 预估控制、确定性及线性二次最优反馈控制和多种预测控制归纳于同一结构之下; 以 1000 MW 的电厂机组为对象开展了额定工况下和 80% 额定负荷下的过热气温和再热气温的 PID-IMC 控制器设计。

**关键词:** 内模控制; 过热蒸汽温度; 再热蒸汽温度; 超超临界机组

## Design of main Steam Temperature Control System Based on Internal Model Control (IMC)

Sun Yue, Zhang Gang, Zheng Yanqiu, Zeng Deliang

(North China Electric Power University, School of control and Computer Engineering, Beijing 102206, China)

**Abstract:** The main steam temperature and reheated steam temperature directly affect the thermal efficiency of the thermal power plant and the safety of the steam turbine and other equipment. The control law of the traditional PID controller is simple, but it can not be adjusted according to the uncertainty in the control process. When the parameters of the controlled object change in real time, the controller parameters can not be adjusted in real time. This will lead to the deterioration of the quality of the process. A PID control strategy based on Internal Model Control (IMC) is proposed for superheated steam temperature and reheat steam temperature. PID control, Smith predictive control, deterministic and linear two times optimal feedback control and multiple predictive control are summed up under the same structure. PID-IMC controller design for overheated air temperature and reheat temperature under rated load and 80% rated load is carried out in 1000MW power plant.

**Keywords:** internal model control; superheated steam temperature; reheating steam temperature; ultra supercritical unit

### 0 引言

随着超超临界机组效率的提高, 煤耗降低、污染物排放量较少, 因此超超临界机组的经济效益十分可观。而过热蒸汽和再热蒸汽温度是 1000 MW 超超临界机组的两项重要指标, 这两项指标直接影响着机组的安全性和经济性<sup>[1-5]</sup>。过热蒸汽温度和再热蒸汽温度直接影响火电厂的热效率, 以及过热器和再热器及其管道、汽轮机等设备安全运行。无论是过热蒸汽、再热蒸汽温度过高还是温度过低对机组的运行都是不利的, 严重超限的情况下, 可能会造成电厂安全事故危机<sup>[6-9]</sup>。

目前国内外热电厂对过热器与再热器温度控制都使用闭环控制系统, PID 控制规律简单且并不需要精确的控制对象模型, 因此 PID 控制比较适合用于电厂大多数被控对象的控制。但是, 实际工业生产过程中大多数具有非线性、时变不

确定性, 传统 PID 控制不能根据控制过程中的不确定性变化做出相应调整, 不能达到理想的控制效果<sup>[10-13]</sup>。因此, 本文提出了一种基于内模控制 (IMC) 的 PID 控制策略。

内模控制是一种基于过程数学模型来进行控制器设计的一种新型控制策略<sup>[14]</sup>。它具有设计简单、控制性能好、易于在线分析等优点。在工业控制过程中, 与经典 PID 控制相比之下, 内模控制仅有一个待整定参数, 参数调整与系统动态品质和鲁棒性的关系明确, 所以采用内模控制原理可以提高 PID 控制器的控制水平, 可以有效改善过热蒸汽和再热蒸汽温度控制的动态特性<sup>[15]</sup>。

### 1 内模控制原理

#### 1.1 基本原理

内模控制 (Internal Model Control 简称 IMC) 是一种基于过程数学模型来进行控制器设计的一种新型控制策略。它不仅是一种实用的先进控制算法, 而且是研究预测控制等基于模型的控制策略的重要理论基础, 此外还是提高常规控制系统设计水平的有力工具, 其基本原理如图 1 所示<sup>[16]</sup>。

其中:  $R(s)$  为给定值信号,  $G_{IMC}(s)$  为 IMC 控制器,  $D(s)$  为扰动信号,  $Y(s)$  为输出信号,  $G_p(s)$  为被

收稿日期:2018-05-08; 修回日期:2018-05-23。

作者简介:孙 玥(1994-),女,黑龙江人,硕士,主要从事火力发电机组建模与优化控制及热经济性分析等方向的研究。

曾德良(1969-),男,四川人,工学博士,教授,主要从事博导热工过程建模与控制、复杂系统智能优化控制、热力系统分析、电厂信息系统等方向的研究。

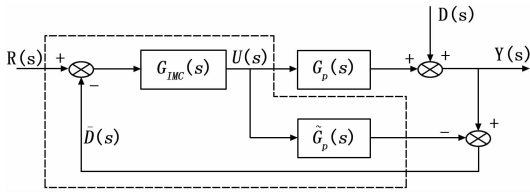


图 1 内模控制基本原理图

控对象,  $G_p(s)$  为估计模型。

内模控制器的特点:

1) 理想控制器: 若估计模型和被控对象完全匹配, 即  $G_p(s) = G\hat{p}(s)$ , 并且模型稳定情况下, 若设计的 IMC 控制器满足:

$$G_{IMC}(s) = G\hat{p}(s)^{-1} \quad (1)$$

同时, 估计模型  $G\hat{p}(s)$  存在且可以实现, 则得到:

$$Y(s) = R(s) \text{ 设定值扰动下} \quad (2)$$

$$Y(s) = 0 \text{ 外界干扰下} \quad (3)$$

这就意味着系统可以克服任何干扰, 而且可以实现对输入信号的无偏差跟踪。当被控对象非最小相位过程时候, 不能直接采用理想控制器, 需要进行模型分解, 再利用分解出来的有稳定零点和稳定极点的部分设计控制器。

2) 对偶稳定性: 在估计模型与被控对象传递函数有精确匹配的情况下, 即当 IMC 控制器和估计模型均开环稳定时, IMC 控制器的闭环也是稳定的。

3) 稳态无差性: 当估计模型精确匹配时候, IMC 控制器可以保证稳态无差。

当被控对象和估计模型失去匹配的时候, 只要控制器的稳态增益和模型的稳态增益乘积是 1, 对于阶跃输入和常值干扰均不存在稳态偏差。

4) 鲁棒性: 可以看到的是, IMC 控制器的对偶稳定性是在假设估计模型精确匹配实际对象的模型的基础上得出的。这个条件在实际中很难保证。因此, 在模型与对象失去匹配性的时候, 即使对象和控制器均稳定, 也不一定才能保证闭环系统的稳定性。所以, 需要专门考虑 IMC 控制器的鲁棒性问题。

在 IMC 控制器中, 通过在控制器前添加一个滤波器来实现的。

### 1.2 一阶惯性环节加纯延迟环节的内模控制器设计

本文中过热汽温和再热汽温控制系统的过程辨识模型, 最终均简化为一阶惯性环节加纯延迟环节模型, 该模型能够较好的模拟实际生产过程中单输入单输出过程<sup>[17]</sup>。

已知一阶惯性加纯延迟环节如下:

$$G(s) = \frac{K}{T_s + 1} e^{-\sigma} \quad (4)$$

将已知的过程模型分解为以下两部分:

$$Gp_1(s) = \frac{K}{T_s + 1} \quad (5)$$

$$Gp_2(s) = e^{-\sigma} \quad (6)$$

为了避免噪声的放大导致模型与实际过程失去匹配性,

需要引入一阶惯性环的滤波器, 即  $F(s)$ :

$$F(s) = \frac{1}{\theta s + 1} \quad (7)$$

根据 SIMC 整定规则:

内模控制的滤波器时间常数等于过程模型的等效滞后时间<sup>[4]</sup>。得到内模控制器:

$$G_{IMC} = Gp_1(s)^{-1} F(s) = \frac{T_s + 1}{K(\theta s + 1)} \quad (8)$$

IMC 控制器的优点是控制器的参数是唯一的且直接与模型的参数相关, 在 IMC 控制器中, 只有一个可以调节的参数  $\theta$ , 并且该参数决定了系统的响应速度。此外, 参数  $\theta$  近似的与闭环带宽成正比, 可以获得一个参数  $\theta$  的一个初始估计值, 可实现在线调整<sup>[18]</sup>。

## 2 系统设计

本文以 1000 MW 的电厂机组对象开展过热蒸汽温度和再热蒸汽温度控制策略设计, 分别选取了额定工况下和 80% 额定负荷下的过热汽温和再热汽温的传递函数作为研究模型对象, 分析了模型匹配情况下和模型失配情况下, 分析比较了传统 PID 控制器、IMC 控制器, 并分析比较不同控制器的抗干扰能力。此外, 分析当 IMC 控制器参数  $\theta$  发生变化时对控制效果的影响。

### 2.1 模型匹配情况下, 额定负荷 1000 MW 的温度控制系统 IMC 控制设计

#### 2.1.1 1000 MW 二级过热器出口温度控制

广义被控对象传递函数:

$$G(s) = \frac{-0.517}{50s + 1} e^{-7s} \quad (9)$$

由 1.2 章节 IMC 控制器的设计方法, 设计 IMC 控制器:

$$G_{IMC}(s) = Gp_1(s)^{-1} F(s) = \frac{50s + 1}{0.517(7s + 1)} \quad (10)$$

在 Matlab 软件的 Simulink 环境中搭建模型进行仿真:

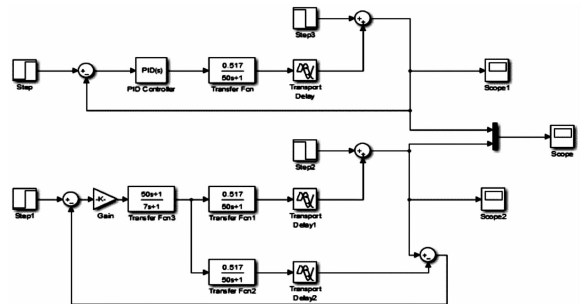


图 2 蒸汽温度控制系统加扰动信号的 IMC 控制器和 PID 控制器模型

图 2 中设计实际 PID 控制器为如下形式:

$$P + I \frac{1}{s} + D \frac{N}{1 + N \frac{1}{s}} \quad (11)$$

其中利用过程控制中介绍的工程整定法, 整定实际 PID 控制器参数, 进行微调得到如下参数:  $P = 3.085, I = 0.080, D = -22.676, N = 0.136$ , 用所得参数设定 PID 控制

器。调节 IMC 控制器参数，得到合适的控制效果，得到  $\theta = 7$  的相应仿真结果如图 3 所示。

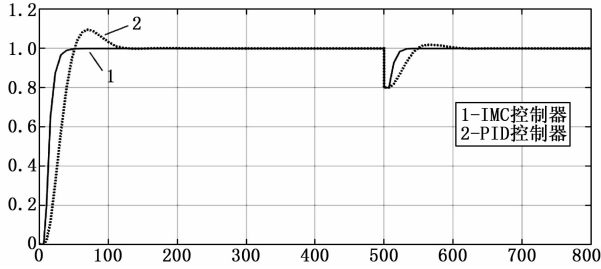


图 3 1000 MW 二级过热器出口温度加扰动信号 IMC 和 PID 控制

### 2.1.2 1000 MW 主蒸汽温度控制

广义被控对象传递函数：

$$G(s) = \frac{-0.7875}{44s+1} e^{-24s} \quad (12)$$

$$G_{IMC}(s) = Gp_1(s)^{-1}F(s) = \frac{44s+1}{0.7075(12s+1)} \quad (13)$$

在 Matlab 中搭建模型参考图 2，其中利用过程控制中工程整定法，整定实际 PID 控制器参数，进行微调得到如下参数： $P = 1.605, I = 0.049, D = 0.021$ ，用所得参数设定 PID 控制器。调节 IMC 控制器参数，得到  $\theta = 12$ 。得到相应仿真结果如图 4 所示。

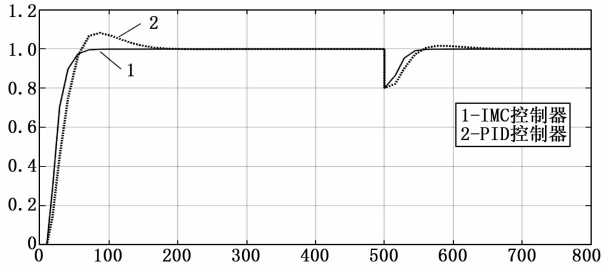


图 4 1000 MW 主蒸汽温度加扰动信号的 IMC 和 PID 控制

### 2.1.3 1000 MW 再热蒸汽温度控制

广义被控对象传递函数：

由 2.2 章节 IMC 控制器的设计方法，设计 IMC 控制器：

$$G(s) = \frac{-0.471}{32s+1} e^{-15s} \quad (14)$$

$$G_{IMC}(s) = Gp_1(s)^{-1}F(s) = \frac{32s+1}{0.47(15s+1)} \quad (15)$$

在 Matlab 中搭建模型参考图 2，其中利用过程控制中工程整定法，整定实际 PID 控制器参数，进行微调得到如下参数： $P = 1.839, I = 0.065, D = 9.322, N = 0.035$ ；调节 IMC 控制器参数，得到  $\theta = 15$ 。得到相应仿真结果如图 5 所示。

由以上三组仿真实验对 IMC 控制器和 PID 控制器进行比较可以知：实际 PID 控制器控制效果有超调，且反应速度较慢，调节时间较长；而采用 IMC 控制器，控制效果较好，无超调，且响应速度快，调节时间短。在  $t = 500$  s 时刻加入一个小扰动信号，观察 PID 控制器和 IMC 控制器的控制效果。可见 PID 控制器和 IMC 控制器均能完全消除干扰，但是 IMC 控制器反应速度快得多，而且控制效果无超

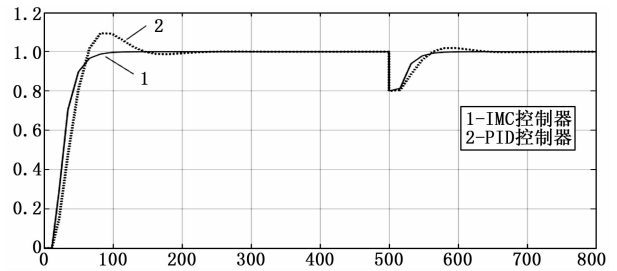


图 5 1000 MW 再热蒸汽温度加扰动信号 IMC 和 PID 控制

调，能实现快速调节作用，表现出良好的抗干扰性，具有更好的控制品质。

此外，IMC 控制器只有一个待整定参数，且待整定参数与期望的过程响应之间有着明确的关系，明确了参数整定的方法，预期目标值明确。这点是 IMC 控制器优于 PID 控制器的重点<sup>[19-20]</sup>。

IMC 控制器设计简单，调节参数少而且调节的方向明确，鲁棒性好，实际工程中可以采用 IMC 控制器与 PID 控制器相结合互补的原则，来设计工业控制器，将成为更为实用优质的控制方法。

### 2.2 模型失配情况下，80% 负荷 800 MW 温度控制系统 IMC 控制设计

本文在章节 2.1 中详细分析了在输入信号阶跃变化和扰动阶跃信号作用下，额定负荷 1000 MW 超超临界机组过热汽温和再热汽温控制系统输出响应。在模型匹配的情况下设计了 IMC 控制器与传统 PID 控制器控制效果相比较。在 80% 额定负荷下 800 MW 机组汽温控制系统与章节 2.1 中分析的额定负荷下 1000 MW 机组汽温控制系统类似，所以本小节主要针对模型不匹配的情况进行分析。

本章节主要选择 800 MW 二级过热器出口温度控制系统来进行分析，而 800 MW 主蒸汽温度控制系统和再热蒸汽温度控制系统与之相类似，在此不重复分析。广义被控对象传递函数：

$$G(s) = \frac{-0.629}{48s+1} e^{-12s} \quad (16)$$

由 1.2 章节 IMC 控制器的设计方法，设计 IMC 控制器：

$$G_{IMC}(s) = Gp_1(s)^{-1}F(s) = \frac{48s+1}{0.629(12s+1)} \quad (17)$$

根据 SIMC 整定规则，内模控制器的滤波器参数等于过程模型的等效滞后时间，即  $\theta = 12$ 。

另一种方法整定 IMC 控制器参数，基于最大灵敏度的 IMC 控制器参数整定：

最大灵敏度  $M_s$ ：是开环传递函数的 Nyquist 曲线到临界点  $(-1, j0)$  点的最短距离的倒数。一般情况下，鲁棒性指标是幅值裕度和相角裕度，而最大灵敏度指标能同时满足幅值裕度和相角裕度，因此可选择最大灵敏度作为闭环系统的鲁棒性指标<sup>[21]</sup>。

$$\text{幅值裕度: } hg > \frac{M_s}{M_s - 1} \quad (18)$$

$$\text{相位裕度: } \gamma > 2 \arcsin \frac{1}{2M_s} \quad (19)$$

一般, 最大灵敏度取值范围是  $[1.2, 2]$ , 此时对应幅值裕度取值范围  $[6.0, 2.0]$ , 对应相位裕度取值范围  $[49.2, 29.0]$ 。

取  $M_s=1.8$ , 由滤波器参数与  $M_s$  的对应关系得到  $\theta=7.6$ 。在 Matlab 的 Simulink 环境中搭建模型如图 6 所示。

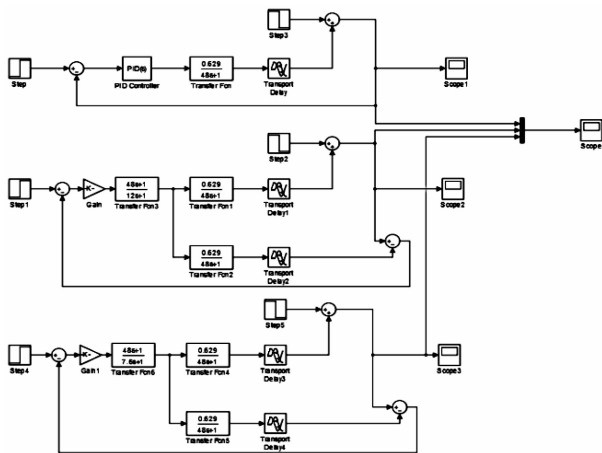


图 6 温度控制系统两种参数 IMC 控制与 PID 控制的比较模型

在 Matlab 的 Simulink 环境中搭建模型如下:

其中, 整定实际 PID 控制器得到如下参数:  $P = 2.752$ ,  $I = 0.065$ ,  $D = -6.484$ ,  $N = 0.044$ ; 根据 SIMC 整定方法, 得到 IMC 控制器参数  $\theta=12$ ; 基于最大灵敏度的参数整定方法, 得到 IMC 控制器参数  $\theta=7.6$ 。

得到仿真图形如图 7 所示。

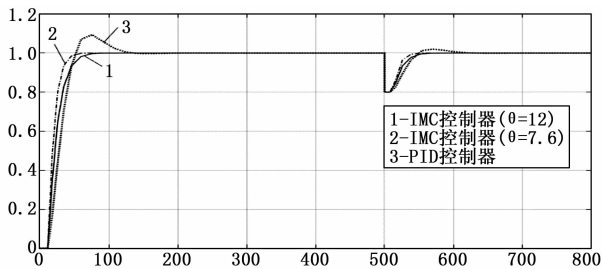


图 7 模型匹配时不同参数 IMC 控制和 PID 控制比较

由图 7 可知: 实际 PID 控制器控制效果有超调, 且反应速度较慢, 调节时间较长; 在模型匹配的情况下, IMC 控制器控制效果更好, 无超调, 调节时间短。随着可调节参数  $\theta$  的减小, 响应速度加快。

实际被控对象参数发生变化时, 实际系统参数是随环境和时间变化的, 为了考虑鲁棒性, 假定被控对象参数  $K$ ,  $T$  和  $\tau$  发生 20% 的参数摄动, 造成模型失配。

得到相应曲线如图 8 所示。由图 8 可知, 在实际被控对象参数发生变化时, IMC 控制器的控制效果虽然受到了影响, 但是相对比较稳定。当过程模型失配时, IMC 控制器可调参数  $\theta$  越大, 控制效果越稳定, 具有较好的鲁棒性。

考虑到实际系统的参数, 会随着环境和时间的变化而变化, 造成过程模型和实际过程的失配。一旦发生失配, 系统性能会变差, 甚至不稳定。在设计内模控制器的过程中, 要考虑到如何使得闭环系统对参数变化不敏感, 鲁棒

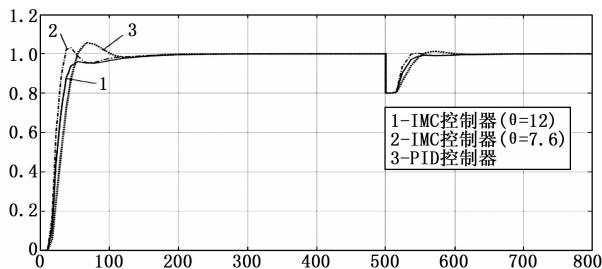


图 8 模型不匹配时不同参数 IMC 控制和 PID 控制比较

性成为闭环系统的一个重要特征。鲁棒性的指标一般有增益裕度和相位裕度。但是特设情况下, 如某系统有异常频率响应特性曲线, 这两个指标不能很好地表征系统鲁棒性。而满足灵敏度约束就一定满足增益裕度和相位裕度, 反之不一定成立。所以, 一般选择最大灵敏度作为闭环系统的鲁棒性指标。

根据最大灵敏度与 IMC 控制器唯一可调节参数  $\theta$  之间的函数关系, 整定 IMC 控制器; 根据 SIMC 整定方法, 整定 IMC 控制器得到不同的参数  $\theta$ 。结果表明, 当过程模型匹配时, 参数  $\theta$  越小, 响应随度越快, 调节时间越短, 无超调且 ITAE 值较小; 当过程模型不匹配时, 即被控对象参数  $K$ ,  $T$ ,  $\tau$  等发生数摄动, 参数  $\theta$  较大时, 调节过程更稳定, 抗干扰能力更强鲁棒性更好。

### 3 实验结果与分析

本文选取了超调量和调节时间作为比较指标, 对 PID 控制器效果与 IMC 控制器效果相比较, 更直观地体现 IMC 控制器的优越性。此外, 采用 SIMC 规则和最小灵敏度规则两种方法整定 IMC 控制器参数, 分析比较了过程模型匹配和模型失配两种情况下 IMC 控制器的控制效果。结果表明, 在模型失配情况下, 同一被控对象在变工况下 IMC 控制效果更加稳定, 并且在一定范围内 IMC 控制器可调参数  $\theta$  越大, 控制效果越稳定, 具有较好的鲁棒性。

#### 参考文献:

- [1] 侯建新. 外高桥 1000 MW 超超临界机组过热蒸汽温度控制的设计与研究 [D]. 上海: 上海交通大学, 2009, 9: 11-12.
- [2] 贺 伟. 主蒸汽压力温度过高或过低对运行汽轮机的危害 [J]. 电力安全技术, 2009.
- [3] 梁子航. 超临界机组过热汽温和再热汽温控制 [D]. 华北电力大学, 2015.
- [4] 田 涛. 过程计算机控制及先进控制策略的实现 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2006.
- [5] Hans H. Advantages of Ultra super critical technology in power generation [A]. International Conference on Clean Coal Technologies for our Future [C]. 2005.
- [6] 赵志诚, 文新宇. 内模控制及其应用 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2012.
- [7] 潘 笑, 钟伟勋. 基于 IMC 的 PID 控制器的设计实现 [J]. 计算机仿真, 2005, 8.
- [8] 王 建. 内模控制在火电厂主汽温系统中的应用 [D]. 华北电力大学, 2014.