

火电厂主汽温 PID 控制器 参数带宽分析及应用

侯树文¹,段爱霞¹,黄伟锋¹,黄永志²

(1. 华北水利水电学院 动力系,河南 郑州 450008;
2. 郑州大学 化工学院,河南 郑州 450004)

摘要: PID 控制器广泛应用于火电厂主汽温控制。PID 参数变化影响串级主汽温控制系统频率特性。分别分析了比例、积分、微分参数增大时的系统阶跃响应图和波德图,总结了各参数变化对系统响应速度、超调量、稳定性的影响,对高、中、低三种频段幅值和相位的影响,以及模值稳定裕度、相位稳定裕度、穿越频率、剪切频率的变化趋势。采用频率带宽分析方法,综合各参数变化对波德图的影响,设计出一组合适的 PID 控制参数,改善了主汽温调节品质。

关键词: 火电厂主汽温; PID 控制器; 频率特性; 带宽分析

中图分类号: TP 214; TM 621.4 **文献标识码:** A **文章编号:** 1006-6047(2005)05-0077-04

在我国火电厂热工过程控制中,95 % 以上的控制回路具有 PID 结构^[1]。本文从 PID 参数变化对主汽温频率特性影响出发,详细讨论了火电厂主汽温 PID 控制器的频率特性,并得出相应的规律。实例分析表明,应用本方法对火电厂主汽温 PID 控制器参数进行整定,可以获得满意的结果。

1 PID 参数对串级主汽温频率特性影响

1.1 串级主汽温控制系统^[2]

串级主汽温控制系统结构如图 1 所示。

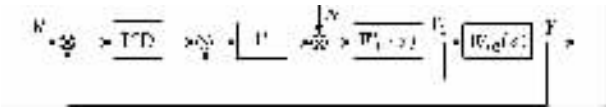


图 1 系统结构

Fig.1 The system structure

图中 Y_1 为导前汽温(过热器入口汽温), Y 为主汽温(过热器出口汽温), P_1 为副调节器, PID 为主调节器, N 为扰动量, R 为减温水喷水量^[3]。

设导前区传递函数为

$$W_{01}(s) = K_1 / (\tau_a s + 1)^2$$

惰性区传递函数为

$$W_{02}(s) = K_2 / (\tau_b s + 1)^3$$

1.2 PID 控制器参数变化对控制系统性能影响

PID 控制器的传递函数^[4]为

$$W_{PID}(s) = K_p (1 + 1/\tau_I s + \tau_D s)$$

PID 控制器的频率特性为

$$W_{PID}(j\omega) = K_p (1 + 1/\tau_I(j\omega) + \tau_D(j\omega))$$

对于一般的自动控制系统,常常利用波德图进行频率分析,在对数频率特性曲线上低频段主要决定系统余差等稳态性能,中频段主要决定系统稳定程度等动态性能,而高频段主要决定系统对高频干

扰的灵敏程度;相角裕度和剪切频率等一些参数则用来表征系统的稳定裕度。

PID 控制器通过 K_p, τ_I, τ_D 3 个参数进行调节。这 3 个参数取值不同,所表现的频率特性也就不相同^[5,6]。下面以火电厂主汽温串级控制系统为例进行讨论^[7]。

1.2.1 导前区 K_{p1} 变化对频率特性影响

在 Matlab 窗口输入以下命令:

```
G1 = tf([ 0.035 6], [1, 0.667]);
```

```
G2 = tf([ 1], [1, 0.667]);
```

```
G12 = G1 * G2; Kp1 = 0.4:0.2:1.2;
```

```
For i = 1: length(Kp1);
```

```
Gc = feedback(Kp1(i) * G12, 9);
```

```
Step(Gc), hold on[8]
```

```
End
```

由此得到阶跃响应如图 2 所示(y 为系统输出量;下同)。

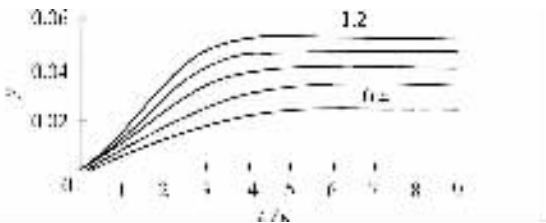


图 2 导前区 K_{p1} 变化阶跃响应图

Fig.2 The step response diagram to different K_{p1} s of front part

从图 2 可以看出,随着 K_{p1} 值的增大,响应速度加快。在 Matlab 窗口输入以下命令:

```
For i = 1: length(Kp1);
```

```
Gc = feedback(Kp1(i) * G12, 9);
```

```
bode(Gc), hold on
```

```
End
```

其波德图如图 3 所示(图中 A 为幅值, ϕ 为相位;下同)。

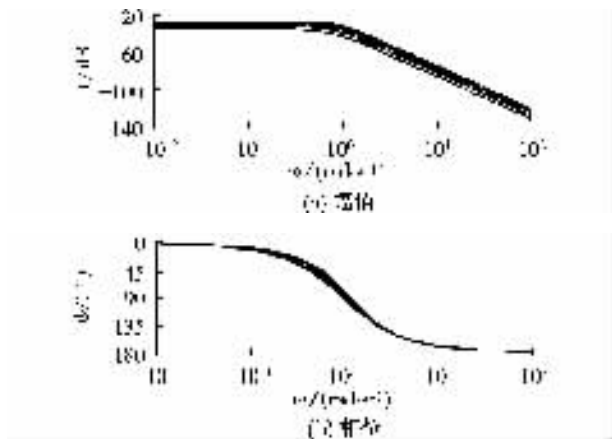


图 3 导前区 K_{p1} 变化时的波德图

可以看出, K_{p1} 的变化对低频段幅值和相位基本无影响,而在中频段幅值和相位影响较大,在高频段幅值变化较大但相位基本不变。

1.2.2 惰性区 PID 控制参数变化对频率特性影响

1.2.2.1 比例参数 K_p 变化对频率特性影响

设 $K_p = 1 \sim 5, \tau_i = 0, \tau_d = 0, K_{p1} = 1$ 。
在 Matlab 窗口输入以下命令：
 $G1 = tf([0.035\ 6], [1\ 0.667])$;
 $G2 = tf([1], [1\ 0.667])$; $G12 = G1 * G2$;
 $K_{p1} = 1$;
 $Gc = feedback(K_{p1} * G12, 9)$;
 $G3 = tf([1], [1\ 0.04])$;
 $G4 = tf([0.001], [1\ 0.04])$;
 $G34 = G3 * G3 * G4$; $K_p = 1:1:5$;
For $i = 1: \text{length}(K_p)$;
 $Gcc = feedback(K_p(i) * Gc * G34, 1)$;
 Step(Gcc), hold on
End
得到阶跃响应如图 4 所示。

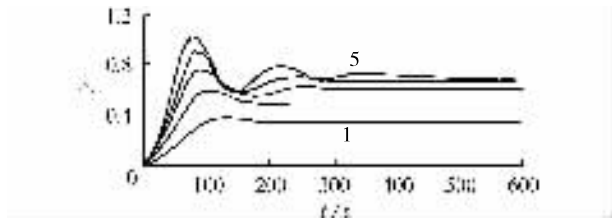


图 4 惰性区 K_p 变化时系统的阶跃响应

Fig.4 The step response diagram to different K_p s of inert part

从图 4 可以看出随着 K_p 值增大,系统的超调量增加,响应速度加快,控制时间加长,稳态误差减小,但不能完全消除误差;随着 K_p 值继续增大,系统的稳定性变差。

在 Matlab 窗口输入命令：
For $i = 1: \text{length}(K_p)$;

$Gcc = feedback(K_p(i) * Gc * G34, 1)$;
bode(Gcc), hold on

End

波德图如图 5 所示。

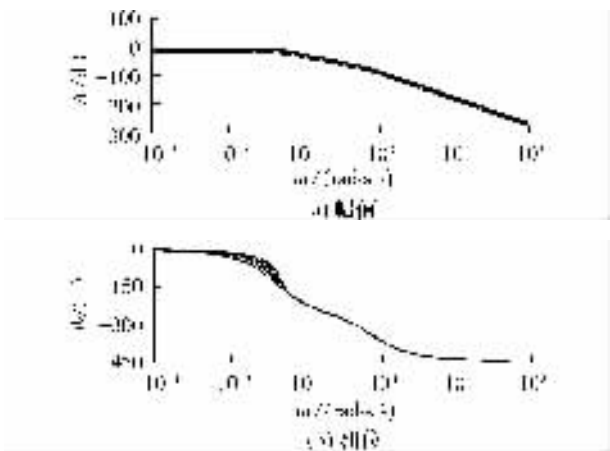


图 5 惰性区 K_p 变化时系统的波德图

Fig.5 The bode diagrams for different K_p s of inert part

可以明显看出 K_p 变化对闭环系统的中频段和频段影响较大,对低频段影响较小,在低频段向中频段过渡中相位值变化较大^[5]。

输入命令：

$[G_m, P_m, \omega_{cp}, \omega_{cg}] = \text{margin}(Gcc)$

得到一组数据如表 1 所示。

表 1 惰性区 K_p 变化时对应的 $G_m, P_m, \omega_{cp}, \omega_{cg}$ 值

Tab.1 The values of $G_m, P_m, \omega_{cp}, \omega_{cg}$ to different K_p s

K_p	G_m/dB	$P_m/(\text{°})$	$\omega_{cp}/(\text{rad} \cdot \text{s}^{-1})$	$\omega_{cg}/(\text{rad} \cdot \text{s}^{-1})$
1	11.702 0	Inf	0.063 7	Nan
2	5.360 2	Inf	0.063 7	Nan
3	3.240 9	Inf	0.063 7	Nan
4	2.183 4	49.562 7	0.063 7	0.047 9
5	1.544 0	21.215 4	0.063 7	0.056 3

注： G_m 为模值稳定裕度; P_m 为相位稳定裕度; ω_{cp} 为穿越频率; ω_{cg} 为剪切频率;下同。

从表 1 可看出,随着 K_p 的增大, G_m 与 P_m 由大变, ω_{cp} 恒定不变, ω_{cg} 逐渐变大。

1.2.2.2 积分参数对频率特性影响

设导前区 $K_{p1} = 1$, 惰性区 $K_p = 1.1, \tau_i = 28 \sim 36, \tau_d = 0$ 。

在 Matlab 窗口输入以下命令：

$G1 = tf([0.035\ 6], [1\ 0.667])$;
 $G2 = tf([1], [1\ 0.667])$; $K_{p1} = 1$;
 $G12 = G1 * G2$; $Gc = feedback(K_{p1} * G12, 9)$;
 $G3 = tf([1], [1\ 0.04])$;
 $G4 = tf([0.001], [1\ 0.04])$;
 $G34 = G3 * G3 * G4$;
 $K_p = 1.1; \tau_i = 28:2:36$;
For $i = 1: \text{length}(\tau_i)$
 $Gc1 = tf(K_p * [\tau_i(i)\ 1], [\tau_i(i)\ 0])$

```
Gcc = feedback( Gc1 * Gc * G34,1 );  
step( Gcc ), hold on  
End  
得到阶跃响应如图 6 所示。
```

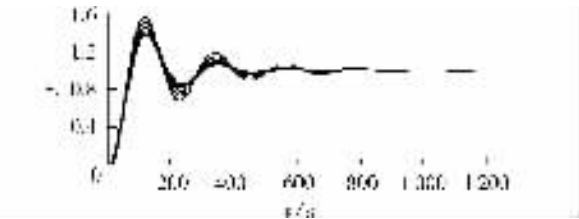


图 6 τ_1 变化时系统的阶跃响应

Fig.6 The step response diagram to different τ_1 s
可以看出随着 τ_1 值增大,系统超调量减小,响应速度变慢。从阶跃响应可得到一组数据见表 2。

表 2 τ_1 变化时系统参数变化表

Tab.2 The parameter values for different τ_1 s

τ_1	最大值	超调量 / %	响应时间 / s
28	1.53	53.1	124
30	1.48	48.1	124
32	1.44	43.6	131
34	1.40	39.6	132
36	1.36	36.0	131

从表 2 可以看出,随着 τ_1 的增大,最大值、超调量逐渐变小,而响应时间略有增大后又渐愈平缓。在 Matlab 窗口输入以下命令:

```
For i = 1: length(  $\tau_1$  )  
Gc1 = tf(  $K_p$  * [  $\tau_1(i)$  1 ], [  $\tau_1(i)$  0 ] );  
Gcc = feedback( Gc1 * Gc * G34,1 );  
Bode( Gcc ), hold on  
End  
得到波德图如图 7 所示。
```

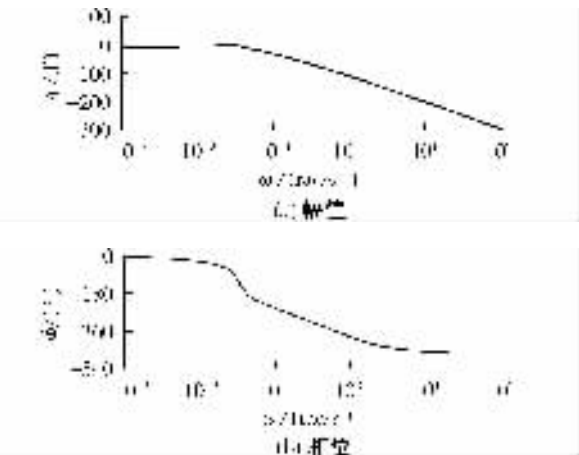


图 7 τ_1 变化时系统的波德图

Fig.7 The bode diagrams for different τ_1 s
从图 7 可以看出 τ_1 变化对系统的中频段和高频段影响较大,对低频段影响较小。

输入命令:
 $[G_m, P_m, \omega_{cp}, \omega_{cg}] = \text{margin}(Gcc)$

得到一组数据如表 3 所示。

表 3 τ_1 变化时对应的 $G_m, P_m, \omega_{cp}, \omega_{cg}$ 值

Tab.3 The values of $G_m, P_m, \omega_{cp}, \omega_{cg}$ to different τ_1 s

τ_1	G_m / dB	$P_m / (^\circ)$	$\omega_{cp} / (\text{rad} \cdot \text{s}^{-1})$	$\omega_{cg} / (\text{rad} \cdot \text{s}^{-1})$
28	1.588 7	19.739 5	0.042 1	0.036 2
30	0.917 8	-2.793 0	0.037 8	0.038 6
32	1.096 3	3.235 3	0.039 0	0.038 0
34	1.269 5	8.971 4	0.040 1	0.037 4
36	1.433 9	14.458 7	0.041 1	0.036 8

从表 3 可以看出,随着 τ_1 的增大, G_m, P_m 和 ω_{cp} 先变小后又变大, ω_{cg} 逐渐变大,然后又逐渐变小。

1.2.2.3 微分环节分析

设惰性区 $\tau_1 = 1.2, K_p = 1.1, \tau_D = 10 \sim 90$ 。
 $G1 = \text{tf}([0.0356], [1, 0.667]);$
 $G2 = \text{tf}([1], [1, 0.667]); G12 = G1 * G2;$
 $K_{p1} = 1; Gc = \text{feedback}(K_{p1} * G12, 9);$
 $G3 = \text{tf}([1], [1, 0.04]);$
 $G4 = \text{tf}([0.001], [1, 0.04]);$
 $G34 = G3 * G3 * G4; K_p = 1.1;$
 $\tau_1 = 30; \tau_D = 10: 20: 90;$
For $i = 1: \text{length}(\tau_D)$
Gc1 = tf(K_p * [$\tau_1 * \tau_D(i)$ τ_1 1], [τ_1 0]);
Gcc = feedback(Gc1 * Gc * G34,1);
step(Gcc), hold on

End
得到阶跃响应如图 8 所示。

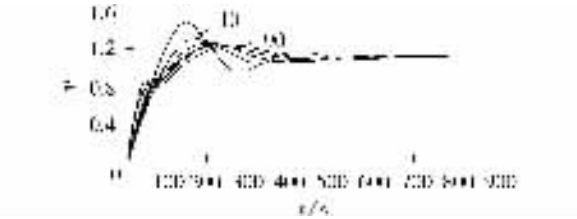
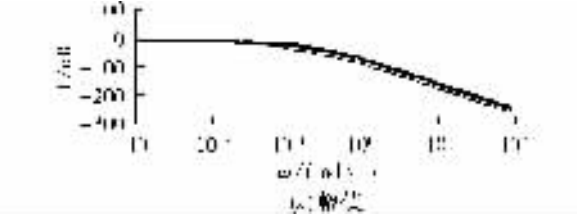


图 8 τ_D 变化时系统阶跃响应图

Fig.8 The step response diagram to different τ_D s
可以看出,随着 τ_D 值的增大,系统的超调量减小,响应速度加快,但随着 τ_D 值的继续增大,在上升过程中出现振荡,系统稳定性变差。

```
For i = 1: length(  $\tau_D$  )  
Gc1 = tf(  $K_p$  * [  $\tau_1 * \tau_D(i)$   $\tau_1$  1 ], [  $\tau_1$  0 ] );  
Gcc = feedback( Gc1 * Gc * G34,1 );  
bode( Gcc ), hold on
```

End
得到波德图^[7]如图 9 所示。



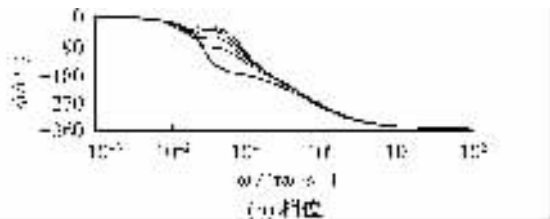


图 9 τ_D 变化时系统的波德图

Fig.9 The bode diagrams for different τ_D s

输入命令：

$$[G_m, P_m, \omega_{cp}, \omega_{cg}] = \text{margin}(G_{cc})$$

得到一组数据如表 4 所示。

表 4 τ_D 变化时对应的 $G_m, P_m, \omega_{cp}, \omega_{cg}$ 值

Tab.4 The values of $G_m, P_m, \omega_{cp}, \omega_{cg}$ to different τ_D s

τ_D	G_m/dB	$P_m/(\circ)$	$\omega_{cp}/(\text{rad}\cdot\text{s}^{-1})$	$\omega_{cg}/(\text{rad}\cdot\text{s}^{-1})$
10	7.064 6	42.169 0	0.069 6	0.033 4
30	16.628 3	98.369 5	0.168 7	0.023 7
50	11.334 8	121.490 0	0.182 8	0.018 1
70	8.334 0	132.592 2	0.188 5	0.015 0
90	6.483 1	139.190 7	0.191 5	0.013 1

可以看出随着 τ_D 的增大, G_m 逐渐先变大后又变小, P_m 和 ω_{cp} 逐渐变大, ω_{cg} 逐渐变小。

2 应用举例

设某火电厂中小型机组锅炉主汽温被控对象的各个区域传递函数如下：

$$\text{导前区传递函数 } W_{01}(s) = 0.036 / (s + 0.67)^2$$

$$\text{惰性区传递函数 } W_{02}(s) = 0.001 / (s + 0.04)^3$$

主汽温控制系统结构如图 1 所示,采用频率带宽分析方法对该控制对象进行分析,根据以上系统参数变化对波德图的影响,即可得出一组合适的比例、积分、微分参数如下：

$$K_{PI} = 1, K_P = 1.1, \tau_I = 46, \tau_D = 0.1$$

主汽温控制系统阶跃响应如图 10 所示(曲线 1 为用频率带宽分析法校正 PID 参数;曲线 2 为常规 PID 调节)。

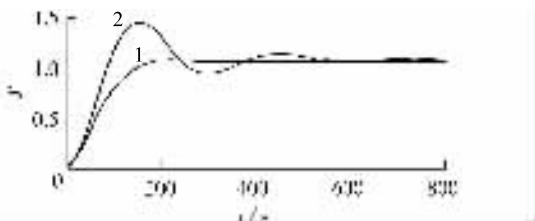


图 10 系统的阶跃响应对照图

Fig.10 Comparison of system step responses

可以看出,引入频率带宽校正法优于常规 PID 参数整定法,明显改善主汽温的调节品质,使火电厂实现更安全更经济运行。

3 结语

本文对火电厂主汽温 PID 参数 K_P, τ_I, τ_D 的变

化对频率特性的影响进行了详尽的分析,并取得了较好的结果,实例分析也证明了其有效性和实用性。该方法可改善 PID 控制器参数整定的有效性,并提高主汽温控制的动态特性。

参考文献：

[1] 张玉铎,王满稼. 热工自动控制系统[M]. 北京:中国水利水电出版社,1993.

[2] 李遵基. 热工自动控制系统[M]. 北京:中国电力出版社,1997.

[3] 周雪斌,刘延泉,苗广祥,等. 基于神经网络预测自整定 PID 在锅炉主汽温控制中的应用[J]. 仪器仪表用户, 2004,11(5): 38-40.

ZHOU Xue-bin, LIU Yan-quan, MIAO Guang-xiang, et al. Application of neural network PID with nonlinear forecasting in the control of boiler main-steam temperature[J]. **Instrument and Apparatus Customer**, 2004, 11(5): 38-40.

[4] 王国玉,梅 华,韩 璞,等. 主汽温系统模糊自适应预测函数控制[J]. 中国电机工程学报,2003,23(10): 230-235.

WANG Guo-yu, MEI Hua, HAN Pu, et al. Fuzzy adaptive predictive functional control in main-steam temperature system[J]. **Proceedings of the CSEE**, 2003, 23(10): 230-235.

[5] 黄忠霖. 控制系统 MATLAB 计算及仿真[M]. 北京:国防工业出版社,2003.

[6] 熊静琪. 计算机控制技术[M]. 北京:电子工业出版社, 2003.

[7] 邹伯敏. 自动控制理论[M]. 北京:机械工业出版社, 2003.

[8] 范从振. 锅炉原理[M]. 北京:中国水利水电出版社, 1995.

[9] 张晓萍,侯国莲,张建华,等. 锅炉串级控制系统设计方法研究[J]. 山西电力技术,1998,(3): 5-9.

ZHANG Xiao-ping, HOU Guo-lian, ZHANG Jian-hua, et al. Design method research of boiler cascade temperature control system[J]. **Shanxi Power Knowledge**, 1998, (3): 5-9.

[10] 黄成静,刘红军,王东锋. DMC-PID 串级控制及其应用研究[J]. 华北电力大学学报,2003,30(2): 53-55,67.

HUANG Cheng-jing, LIU Hong-jun, WANG Dong-feng. DMC-PID cascade main-steam temperature control[J]. **Journal of North China Electric Power University**, 2003, 30(2): 53-55,67.

[11] 杨献勇. 热工自动控制[M]. 北京:清华大学出版社, 1993.

[12] 于希宁. 热工自动控制理论基础[M]. 北京:中国水利水电出版社,2001.

(责任编辑:李育燕)

作者简介：

侯树文(1953-),男,河北唐山人,副教授,主要从事计算机智能控制方面的研究(E-mail:eyouia@163.com)。