

文章编号: 1001-0920(2005)04-0471-03

## 一种新型控制器的设计方法

任永平, 李圣怡

(国防科技大学 机电工程研究所, 湖南 长沙 410073)

**摘要:** 提出一种新的控制器设计方法。该方法利用相平面上控制曲面与电容板极间的场强在变化上的相似性, 以构造电容板极间场强的方式来设计控制器, 通过调节板极电压和场强的构造系数, 可达到调节控制器的目的。该控制器具有物理意义清晰, 可灵活调节控制强度等优点。

**关键词:** 控制器; 电容; 场强; 变增益

**中图分类号:** TP13 **文献标识码:** A

## Design method of a kind of new controller

REN Yong-ping, LI Sheng-yi

(Institute of Mechatronics Engineering, National University of Defense Technology, Changsha 410073, China  
Correspondent: REN Yong-ping, E-mail: wateman4633@sina.com)

**Abstract:** A new design method of controller is presented and analyzed. Considering the similarities between the surface of a controller output and the field intensity of capacitor, the controller can be tuned in the same way of changing the voltage on the plate and the curvature of the field. The new design method has some advantages such as straightforward tuning meaning, flexible control gain, etc. Furthermore, conventional PD can be regarded as a special case of this method.

**Key words:** controller; capacitor; electric field; gain scheduling

### 1 引言

传统的控制器设计主要是线性控制器设计, 它的构造形式是将控制量表征为各误差状态的线性组合, 其频域表示是  $s$  变量的线性多项式。线性控制器在系统状态的全局范围内, 采用不变的结构和参数形式对系统进行调节。随着控制科学的不断进步, 这种控制方法面临越来越多的挑战。

被控对象一般具有非线性的特点, 即使是线性系统, 在不同的误差状态下, 系统性能要求的侧重点也不同, 这就要求控制器能根据系统的运行状态对控制策略作相应的调整。智能控制在控制策略的构造上具有较大的灵活性, 可满足控制器的这种要求。但就本质而言, 许多智能控制方法如专家系统、仿人智能控制、模糊控制等, 可看作是对系统运行状态进行分段决策的控制方法<sup>[1,2]</sup>, 这势必增加控制决策在

构造上的复杂性。变增益控制可以弥补这一缺陷, 然而现有的变增益控制都或多或少存在着不足: 传统的变增益控制在设计和执行时较为复杂<sup>[3~5]</sup>; 对于一些基于鲁棒思想的变增益控制器设计方法<sup>[6,7]</sup>, 由于存在保守性, 有时可能得不到满足要求的控制器。

本文提出一种新的变增益控制设计方法。利用电容极间的电场构造出一种板极模型, 即将被控对象看作电容极间的电荷, 受电容场强的作用, 代表被控对象的电荷将产生运动, 运动状态由电荷与电容板极的相对位置来表征, 对这个相对位置施加不同形式的约束, 可得到不同效果的控制器。

### 2 板极模型原理

设想一个正电荷处在两个带正电的电容板极中, 该正电荷最终将处在平衡场强处。将正电荷用被控对象代替, 板极电压改为一正一负, 则可在相平面

收稿日期: 2004-04-26; 修回日期: 2004-08-23

作者简介: 任永平(1966—), 男, 江苏溧阳人, 博士生, 从事智能控制、非线性控制等研究; 李圣怡(1946—), 男, 湖南长沙人, 教授, 博士生导师, 从事机电一体化等研究。

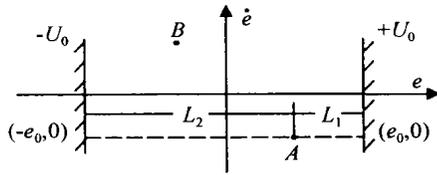


图1 板极模型示意

上构造出图1所示的“板极模型”。

当系统的误差状态处于A点时,由于A离正板极较近,根据场强理论,  $+U_0$  对A的作用要强于  $-U_0$  的作用,于是最终合成的作用  $u_A$  呈正的控制形式,使被控对象向板极平衡场强处(此处为0)运动;当处于B处时,则情况相反。

系统的状态用A点至正、负板极的距离  $L_1$  和  $L_2$  表示,控制作用  $u_A$  可通过对  $L_1$  和  $L_2$  的量化得到,这样便构成一种负反馈控制系统。对  $L_1$  和  $L_2$  采用不同形式的约束,可构成各种灵活的变增益控制。

设  $U_A^{+U_0}$  和  $U_A^{-U_0}$  分别为两板极对误差状态在A点的被控对象所施加的作用,则有

$$u_A = U_A^{+U_0} + U_A^{-U_0} = F(L_1, L_2)(+U_0) + F(L_2, L_1)(-U_0). \quad (1)$$

其中  $F(*, *)$  为约束函数,其形式可以多种多样,只要能反映出误差状态离板极越近场强越强的思想即可。 $F(*, *)$  常取双曲形式

$$\begin{cases} F(L_1, L_2) = \frac{L_1^m}{L_1^m + L_2^m}, \\ F(L_2, L_1) = \frac{L_2^m}{L_1^m + L_2^m}. \end{cases} \quad (2)$$

由式(1)和(2)可得到控制量的计算式

$$u(e) = \frac{L_1^m - L_2^m}{L_1^m + L_2^m} U_0 = \frac{(e_0 + e)^m - (e_0 - e)^m}{(e_0 + e)^m + (e_0 - e)^m} U_0, \quad (3)$$

其中  $e_0$  为板极至平衡场强处的距离。

当  $m = 1$ ,  $e_0$  固定为某一值时,上述单对板极模型约束即为标准的比例控制。令误差为  $e$ , 则有

$$u(e) = \frac{(e_0 + e)^m - (e_0 - e)^m}{(e_0 + e)^m + (e_0 - e)^m} U_0 = \frac{U_0}{e_0} e = K e \quad (4)$$

式(4)即为比例控制。

根据线性叠加原理,为了对  $e$  进行约束,可在  $e$  轴方向同样构造一对速度板极,这样便形成一个类似于PD的变增益控制器。同理,可在相平面的垂直正交轴方向构造累积误差的约束板极,从而形成一种由多对板极构成的板极模型控制器。当各对板极

的  $m = 1$  时,板极模型则变成PD的形式,因此PD是板极模型的一个特例。

当  $|e| > e_0$  时,系统处于板极之外,此时可采用外推的方法构造控制量,也可简单地采用如下截断方式:

$$e = \text{sign}(e)e_0 \quad (5)$$

式(5)将板极模型的作用域限定在  $[-e_0, +e_0]$  之间,作用域之外按最大值  $e_0$  进行计算。

板极模型方法与模糊控制细胞模型<sup>[8]</sup>在思想上有相似之处,二者都采用了误差距离的概念,所不同的是,细胞模型将相平面分割成许多小块,利用凸组合拟合控制曲面<sup>[9]</sup>;而板极模型则直接利用误差距离约束构造控制量。对于模糊控制的规则数而言,板极模型要简便得多。

### 3 板极模型的参数分析

#### (1) 参数 $m$ 的分析

参数  $m$  反映了控制器的刚度。设  $U_0$  为 10,  $e_0 = 1.01$ , 限定误差在  $[-1, +1]$  之间。当  $m$  取不同值时,板极模型的输出量(即控制量)与误差的关系如图2所示。

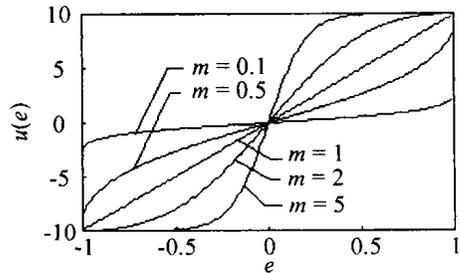
图2 板极模型的  $m$  参数分析

图2表明,  $m$  取不同值时,控制量  $u(e)$  的斜率不同。当  $m = 1$  时,  $u(e)$  对误差  $e$  的导数为常数;当  $m > 1$  时,  $u(e)$  关于误差  $e$  的导数变化参见图2。由函数  $u(e)$  的导数与  $m$  的这种关系,可根据具体对象的动力学特性以及指标要求选择合适的  $m$  值。

#### (2) 参数 $U_0$ 的分析

$U_0$  对控制量  $u(e)$  的作用是十分直接的。当参数  $m$  和  $e_0$  确定后,  $u(e)$  与  $U_0$  成正比关系,所以常用  $U_0$  来调节  $u(e)$  的幅值,而用  $m$  值来适应不同类型的对象。

#### (3) 参数 $e_0$ 的分析

参数  $e_0$  体现了对板极模型变增益能力的强调程度。它对控制量的作用可归纳如下:参数  $e_0$  增大,控制量  $u(e)$  减小,同时  $u(e)$  的导数减小,  $u(e)$  的线性度好;反之,参数  $e_0$  减小,控制量  $u(e)$  增大,同时  $u(e)$  的导数增大,  $u(e)$  的变化趋于剧烈。

## 4 仿真测试

### 4.1 系统延时承受能力

在控制系统环路中串入纯延时环节, 通过改变延时参数测试系统对延时的承受能力。这一能力在一定程度上反映了系统稳定裕度的大小

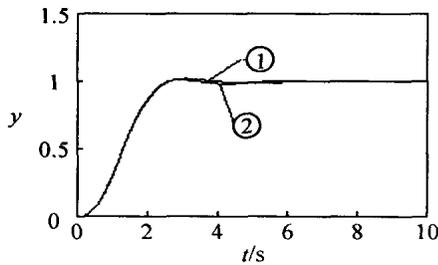


图 3 板极模型与 PD 的阶跃响应

设对象模型为  $\frac{1}{s(s+1)(s+2)}$ , 控制该对象的 PD 参数为:  $k_p = 4.6, k_i = 0, k_d = 4.1$ , 其阶跃响应如图 3 曲线所示。板极模型的参数选取如下:

误差  $e$  板极

$$U_e = 38, m_e = 0.1, e_0 = 1.01;$$

误差速度  $\dot{e}$  板极

$$U_{\dot{e}} = 30, m_{\dot{e}} = 0.2, \dot{e}_0 = 1.01;$$

由于对象本身具有积分作用, 累积误差  $e$  板极可不选取

将上述板极模型参数代入式(3), 按式(5)限定板极模型的作用域, 板极模型的阶跃响应如图 3 曲线所示。从图中可以看到, 在以上参数设定下, 板极模型与 PD 的动态响应大体是一致的(二者的采样时间均为 0.01 s)。

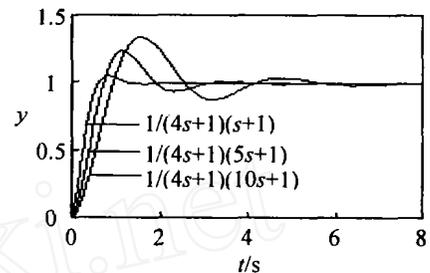
在以上控制环路中串入纯延时环节, 调节延时参数直至系统发生等幅振荡, 此时的延时参数即为系统的最大延时承受能力。在上述参数下测试结果为: PD 的最大延时 0.51 s (即延时 51 节拍), 板极模型的最大延时 0.98 s。

对板极模型延时测试中发现, 在延时 0.98 s 时, 系统出现等幅振荡; 取大于 0.98 s 的任意数值的延时, 系统仍表现为等幅振荡。而 PD 的延时在大于 0.51 s 时系统发散。

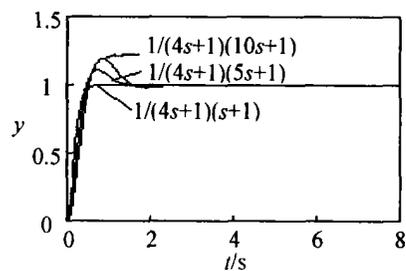
纯延时承受能力的测试表明, 在与 PD 具有相同的动态性能的情况下, 板极模型方法可获得更大的稳定裕度。也就是说, 对于系统动态响应性能与稳定性间的矛盾, 板极模型方法具有更大的折衷空间。

### 4.2 参数鲁棒性

对象模型的结构取  $\frac{1}{(4s+1)(Ts+1)}$ , 变动参数  $T$ , 测试系统的参数鲁棒性。按  $T = 1$  的模型进行控制器设计, 使 PD 与板极模型二者的动态特性大体相同。在此基础上进行参数鲁棒性测试, 结果如图 4 所示。



(a) PD 的参数鲁棒性



(b) 板极模型的参数鲁棒性

图 4 参数鲁棒性测试结果

比较图 4(a) 与 (b), 可以看出板极模型的参数鲁棒性明显优于常规的 PD。

## 5 结 论

在控制器设计中, 变增益是经常采用的一种手段。本文根据电容以及电容场强的思想, 提出一种新的控制器设计方法——板极模型方法, 并给出了该方法的参数分析和具体示例。仿真结果表明, 这种方法对于控制系统稳定性与响应速度间的矛盾具有较好的折衷能力, 对于系统的参数扰动具有良好的适应性。该方法物理意义清晰, 算法简便, 适合在工程中推广应用。

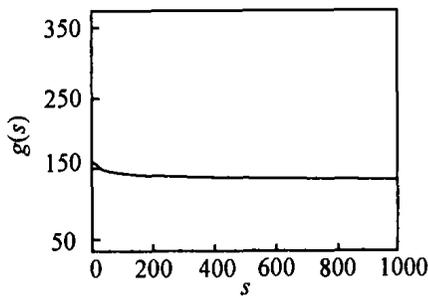
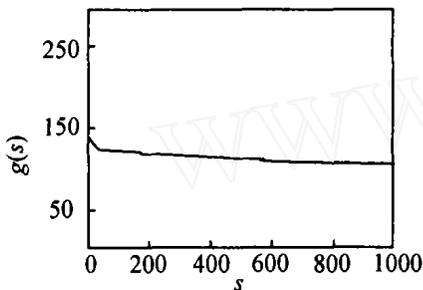
### 参考文献 (References)

[1] Tzafastas S, Papanikolopoulos N P. Incremental fuzzy expert PD control [J]. *IEEE Trans on Industrial Electronics*, 1990, 37(5): 365-371.

[2] Hu B G, Mann G K I, Gosine R G. A systematic study of fuzzy PD controllers——Function-based evaluation approach [J]. *IEEE Trans on Fuzzy Systems*, 2001, 9(5): 699-712.

(下转第 477 页)

## 7 结 论

图 1 采用 PSO 优化的  $g(s)$  曲线图 2 采用 hPSO 优化的  $g(s)$  曲线

从图 1、图 2 和表 1、表 2 的结果可以看出,在方差和平均计算时间基本相同的前提下,hPSO 方法

比 PSO 方法得到的平均全局值小,在优化  $J(M(s))$  时比 PSO 下降快,PSO 迭代 750 次后基本保持稳定 由此可见,通过 h 变换在很大程度上克服了陷入局部极小点的问题,提高了 PSO 方法对于多极值点函数的全局优化效率 该方法可推广到其他非线性系统最优控制问题的求解,为解决非线性系统最优控制问题提供了一种有效途径

## 参考文献(References)

- [1] Kennedy J, Eberhart R C. Particle swarm optimization [A]. *Proc of IEEE Int Conf on Neural Networks*[C]. Piscataway, 1995: 1942-1948
- [2] Kennedy J. The particle swarm: Social adaptation of knowledge[A]. *Proc of IEEE Int Conf on Evolutionary Computation*[C]. Indianapolis, 1997: 303-308
- [3] Clerc M, Kennedy J. The particle swarm-explosion, stability and convergence in a multidimensional complex space[J]. *IEEE Trans on Evolutionary Computation*, 2002, 6(1): 58-73
- [4] Rubio J E. *Control and optimization*[M]. Manchester: Manchester University Press, 1985
- [5] 胡跃明. *非线性控制系统理论与应用*[M]. 北京: 国防工业出版社, 2002

(上接第 473 页)

- [3] Shanma J S, Athans M. Analysis of nonlinear gain scheduled control system [J]. *IEEE Trans on Automatic Control*, 1990, 35(8): 898-907.
- [4] Shanma J S, Athans M. Gain scheduling: Potential hazards and possible remedies[J]. *IEEE Control System Magazine*, 1992, 12(3): 101-107.
- [5] Jiang J. Optimal gain scheduling controller for a diesel engine [J]. *IEEE Control System Magazine*, 1994, 14(4): 42-48
- [6] Apkarian P, Gahinet P. A convex characterization of gain scheduled  $H$  controller [J]. *IEEE Trans on Automatic Control*, 1995, 40(5): 853-863
- [7] Kajiwara H, Apkarian P, Gahinet P. LPV techniques for control of an inverted pendulum [J]. *IEEE Control System Magazine*, 1999, 19(1): 44-54
- [8] 李士勇. *模糊控制 神经控制和智能控制*[M]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学出版社, 1998: 365-368
- [9] Mandani E H. A misconception of theory and application[J]. *IEEE Expert*, 1994, 9(4): 27-28