

文章编号: 1001-0920(2009)05-0769-04

## 新型增益调度变结构控制器的性能比较研究

胡剑波, 辛海良

(空军工程大学 工程学院, 西安 710038)

**摘要:** 为了提高变结构控制系统的控制效率, 从节省控制能耗、消除颤振、快速进入滑动模态、获取稳定滑动模态等基本要求出发, 将变结构控制器设计成具有增益调度控制器参数的增益调度变结构控制器, 并提出了增益调度变结构控制器的设计方法. 通过选择不同的调度变量、调度变量函数以及调度变量的变化范围, 给出 6 种不同的增益调度变结构控制器, 并进行了仿真研究, 以比较其控制性能.

**关键词:** 增益调度; 变结构控制器; 控制性能

**中图分类号:** TP273 **文献标识码:** A

## Performance comparison for new gain-scheduling variable structure controllers

HU Jianbo, XIN Hai-liang

(Engineering College, Air Force Engineering University, Xi'an 710038, China. Correspondent: HU Jianbo, E-mail: autosys@vip.sina.com)

**Abstract:** The design methods of the variable structure controllers are provided with the gain-scheduling parameters in order to improve the control effectiveness of the control system, decrease the cost of control power and the chatting of the controller, go into sliding mode fast, and get the stable sliding mode. Six kinds of controllers are derived from the proper choicing for the gain-scheduling variables, scheduling functions and their varying fields. The complex simulations are shown to compare the control performances for these controllers.

**Key words:** Gain-scheduling; Variable structure controller; Control performance

### 1 引言

变结构控制是一种对外界扰动和系统参数的时变性具有不敏感性的鲁棒控制方法, 近年来已引起控制界诸多学者的关注<sup>[1-3]</sup>. 然而, 一般的变结构控制系统存在以下严重影响其实际应用的亟待解决的难题:

1) 控制信号含有不连续控制项. 实际系统很难实现不连续控制项的理想快速切换, 致使控制系统在滑动模上来回切换控制信号, 导致控制信号发生颤振, 且控制系统的能耗大、控制效率偏低.

2) 滑动模的参数必须合理选择. 若选择不合适, 则会导致进入滑动模态的过渡过程时间太长或太短. 若过渡过程时间太长, 则将导致整个控制系统的控制性能下降; 若过渡过程时间太短, 则将导致控制信号的剧烈改变, 控制量幅值过大, 实际系统很难到达.

3) 控制器的增益参数必须合理选择. 如果选择过小, 则将导致进入滑动模态的过渡过程时间偏长, 影响整个控制系统的控制性能; 如果选择过大, 则将导致所需的控制能量过大, 达不到节能的要求.

针对上述难题, 文献[3]等提出用含有边界层参数的饱和函数来替代符号函数, 以避免控制信号的不连续所带来的实现困难和控制信号的颤振; [4, 5]等采用自适应方法, 根据系统状态来改变滑动模参数, 以达到控制量缓慢改变, 避免控制量剧烈变化等目的; [6, 7]等采用参数自适应、模糊逻辑等方法来改变控制增益, 以达到降低控制能耗的目的. 这些研究对于促进变结构控制系统的实用化, 改进控制系统的控制性能以及提高控制系统的控制效率发挥了重要作用. 然而, 这些研究存在以下不足:

1) 所选择的边界层是一个特定的常数, 一般很难预先已知, 需要大量的实际调试和试验才能确定.

收稿日期: 2008-04-08; 修回日期: 2008-06-24.

作者简介: 胡剑波(1965—), 男, 浙江慈溪人, 教授, 博士生导师, 从事先进控制理论与应用、飞行控制、装备信息化等研究; 辛海良(1982—), 男, 陕西周至人, 博士生, 从事先进控制理论与应用的研究.

实际上,边界层的选择应该考虑系统所处的状态,在接近滑动模、进入滑动模以及滑动模态等不同阶段应该采用不同的边界层,若采用同一个常数则不能兼顾不同阶段的控制性能要求。

2) 所选择的滑动模参数变化规律是一种固定的等间隔变化规律,其间隔和时机均需要在线调整,一般很难预先给定调整时机和间隔大小。实际上,滑动模参数的选择影响着系统进入滑动模的快速性和控制规律算法,需要根据系统所处的状态自动调整。

3) 当采用自适应方法来调整控制器增益参数时,必须考虑这些增益参数的收敛性,有待进一步改进。而所采用的模糊控制算法存在不连续性,同样会带来控制信号的不连续,影响控制系统的性能。鉴于上述原因,文献[8]提出用增益调度方法来改进变结构控制系统的控制性能,给出了2种不同的途径:对于几个典型状态,采用变结构控制器代替常规控制器,然后用增益调度来实现系统在完整状态下的变结构增益调度控制;采用统一的变结构控制规律,用增益调度方法来改变变结构控制器参数,包括边界层参数、滑动模参数和控制增益系数,实现在完整状态下的增益调度变结构控制。

本文采用增益调度方法研究变结构控制系统,将滑动模的范数或滑动模范数的函数作为调度变量来调度变结构控制器参数,既能保证变结构控制系统的控制效率,又能节省控制能耗、消除颤振、快速进入滑动模态、获取稳定滑动模态。通过选择不同的调度变量、调度变量函数以及调度规律,给出6种不同的增益调度变结构控制器。仿真研究验证了各种方法的有效性,并给出了控制性能比较。

## 2 系统描述及一般滑动模态变结构控制器

考虑如下对于状态  $x = [x_1, x_2, \dots, x_n]^T$  为非线性,对于输入  $u$  为线性的含有不确定性和外部干扰的单输入非线性系统:

$$\begin{aligned} \dot{x}_1 &= x_2, \\ \dot{x}_2 &= x_3, \\ &\dots \\ \dot{x}_{n-1} &= x_n, \\ \dot{x}_n &= f(x) + B(x)u + d, \quad \gamma > 0. \end{aligned} \quad (1)$$

其中

$$\begin{aligned} f(x) &= f(x_1, x_2, \dots, x_n) = \\ & f(x) + f(x), \\ B(x) &= B(x_1, x_2, \dots, x_n) = \\ & B(x)(1 + B(x)), \\ & = \wedge(1 + ), \end{aligned}$$

$d$  为系统所受到的外部干扰,  $f(x)$  和  $B(x)$  为系统的不确定性。假设该系统的不确定性和干扰均有

界,则有

$$\begin{aligned} |f(x)| & \leq \sum_{i=1}^n |x_i|; \\ |B(x)| & \leq \gamma, \quad \gamma < 1; \\ |d| & \leq d_0; \\ |f(x)| & < \gamma, \quad \gamma < 1. \end{aligned} \quad (2)$$

对于系统(1)和(2),有如下关于一般滑动模态变结构控制器的定理:

**定理1** 对于系统(1)和(2),选择如下滑动模切换函数:

$$s = \left( \frac{d}{dt} + \gamma \right)^{n-1} x_1. \quad (3)$$

其中:  $\gamma > 0$  为滑动模参数,而  $s = 0$  是滑动模。在控制律

$$\begin{aligned} u &= \hat{u} + \tilde{u}, \\ \hat{u} &= B^{-1}(x) \hat{g}(x), \\ \hat{g}(x) &= f(x) + \sum_{p=1}^{n-1} C_{n-1}^p x_{n-p+1}, \\ \tilde{u} &= -k(x) \operatorname{sgn}(s), \\ k(x) &= \\ & B^{-1}(x) \left( \sum_{p=1}^{n-1} C_{n-1}^p |x_{n-p+1}| + \right. \\ & \left. | \hat{g}(x) + \sum_{i=1}^n |x_i| \right) / (1 - \gamma) \end{aligned} \quad (4)$$

作用下,将在有限时间内到达滑动模  $s = 0$ 。系统一旦进入滑动模,则将保持在滑动模上,并具有稳定的滑模运动。

证明略。

**注1** 显然,控制规律(4)是不连续的,致使控制系统中存在高频控制信号颤振。为了减弱控制系统颤振,引入如下采用边界层函数的修正控制律:

$$u = \hat{u} - k(x) \operatorname{sat}(s/\phi). \quad (5)$$

其中

$$\operatorname{sat}\left(\frac{s}{\phi}\right) = \begin{cases} s/\phi, & |s| \leq \phi; \\ \operatorname{sgn}(s), & |s| > \phi \end{cases} \quad (6)$$

边界层参数  $\phi$  为大于零的正数。该控制律将保证系统状态一致有界稳定。

## 3 基于增益调度的变结构控制器设计

首先给出变结构控制器参数的增益调度规则:规则1(参数  $\gamma$  的调度规则) 选择一个关于  $|s|$  的单调递增函数  $S_N = T(|s|)$  来增益调度  $\gamma = \gamma / \max$ 。其增益调度规则可描述为

$$\begin{aligned} \text{If } (S_N \text{ is Zero}) \text{ Then } (\gamma \text{ is Zero}); \\ \text{If } (S_N \text{ is Medium}) \text{ Then } (\gamma \text{ is Medium}); \\ \text{If } (S_N \text{ is Big}) \text{ Then } (\gamma \text{ is Big}); \\ \text{If } (S_N \text{ is Bigger}) \text{ Then } (\gamma \text{ is Bigger}). \end{aligned} \quad (7)$$

**规则 2**(参数  $\phi$  的调度规则) 选择一个关于  $|s|$  的单调递增函数  $S_N = T(|s|)$  来增益调度  $N = (\phi - \phi_{\min}) / (\phi_{\max} - \phi_{\min})$ , 规则如下:

- If ( $S_N$  is Zero) Then ( $N$  is Bigger);
- If ( $S_N$  is Medium) Then ( $N$  is Big);
- If ( $S_N$  is Big) Then ( $N$  is Medium);
- If ( $S_N$  is Bigger) Then ( $N$  is Zero). (8)

**规则 3**(参数  $\phi$  的调度规则) 选择一个关于  $|s|$  的单调递增函数  $S_{N\phi} = T_\phi(|s|)$  来增益调度  $\phi_N = (\phi - \phi_{\min}) / (\phi_{\max} - \phi_{\min})$ , 规则如下:

- If ( $S_{N\phi}$  is Zero) Then ( $\phi_N$  is Zero);
- If ( $S_{N\phi}$  is Medium) Then ( $\phi_N$  is Medium);
- If ( $S_{N\phi}$  is Big) Then ( $\phi_N$  is Big);
- If ( $S_{N\phi}$  is Bigger) Then ( $\phi_N$  is Bigger). (9)

根据规则 1 ~ 规则 3, 给出以下变结构控制器参数  $\phi, \phi_{\min}, \phi_{\max}$  的增益调度算法:

**算法 1** 选择单调递增函数

$$T(|s|) = T_\phi(|s|) = T(|s|) = T(|s|).$$

按照规则 1 ~ 规则 3, 分别给出参数  $\phi, \phi_{\min}, \phi_{\max}$  的调度函数

$$\begin{aligned} \phi &= \frac{\phi_{\max} - \phi_{\min}}{2} h + \frac{\phi_{\max} + \phi_{\min}}{2}, \\ &= \frac{\phi_{\max} - \phi_{\min}}{2} h + \frac{\phi_{\max} + \phi_{\min}}{2}. \end{aligned} \quad (10)$$

其中

$$h = \text{sat}\left(\frac{T(|s|) - S_{\max}}{S_{\max}}\right), S_{\max} > 0.$$

并记单调递增函数  $T(|s|)$  的导数为  $T'$ , 反函数为  $T^{-1}$ . 于是, 通过选择不同的  $T(|s|)$  和  $S_{\max}$ , 便可以得到如下 5 种基本的增益调度变结构控制器和 1 种混合的增益调度变结构控制器:

**控制器 1** 对于增益调度变结构控制器 (4) 和 (10), 选择  $T(|s|) = \phi / |s|, S_{\max} = \phi$ , 其中  $\phi > 0$ . 此时

$$h = h_1 = \text{sat}\left(\frac{\phi / |s| - \phi}{\phi}\right).$$

**控制器 2** 对于增益调度变结构控制器 (4) 和 (10), 选择  $T(|s|) = 0.5 / |s|^2 + 0.5 / |s|, S_{\max} = 2 / |s|, \phi > 0.5$ . 此时

$$h = h_2 = \text{sat}\left(\frac{0.5 / |s| + 0.5 - \phi}{2}\right).$$

**控制器 3** 对于增益调度变结构控制器 (4) 和 (10), 选择  $T(|s|) = 0.5 / |s|^2 + 0.5 / |s|, S_{\max} = 3 / |x_1|, \phi > 0$ . 此时

$$h = h_3 =$$

$$\text{sat}\left(\frac{0.5 / |s|^2 + 0.5 / |s| - \phi / |x_1|}{3 / |x_1| + \phi}\right).$$

**控制器 4** 对于增益调度变结构控制器 (4) 和 (10), 选择  $T(|s|) = 0.5 / |s|^2 + 0.5 / |s|, S_{\max} = 4(\phi_{\max} - \phi), \phi > 0$ . 此时

$$h = h_4 = \text{sat}\left(\frac{0.5 / |s|^2 + 0.5 / |s| - \phi(\phi_{\max} - \phi)}{4(\phi_{\max} - \phi)}\right).$$

**控制器 5** 对于增益调度变结构控制器 (4) 和 (10), 选择  $T(|s|) = |s|, S_{\max} = 5(\phi_{\max} - \phi), \phi > 0$ . 此时

$$h = h_5 = \text{sat}\left(\frac{|s| - \phi(\phi_{\max} - \phi)}{5(\phi_{\max} - \phi)}\right).$$

**控制器 6** 对于增益调度变结构控制器 (4) 和 (10),  $h = \phi_6(h_{\max} - h_{\min}) + h_{\min}$ . 其中

$$\begin{aligned} h_{\max} &= \max(h_1, h_2, h_3, h_4, h_5), \\ h_{\min} &= \min(h_1, h_2, h_3, h_4, h_5). \end{aligned}$$

注 2  $\phi > 0$ , 这里取  $\phi = 0.1$ .

**4 数值仿真研究**

对于以下仿真对象:

$$\dot{z} = w, c_m \dot{w} = c_d w + T_z + F_d. \quad (11)$$

假设

$$\begin{aligned} & c_m \text{ min } \quad c_m \quad c_m \text{ max }, \\ & c_d \text{ min } \quad c_d \quad c_d \text{ max }, \\ & F_d \text{ min } \quad F_d \quad F_d \text{ max }. \end{aligned}$$

系数及初值为:  $w_d = z_d = 0, z_{t=0} = 20, \hat{c}_d = 200, \hat{c}_m = 80, c_m \text{ min} = 60, c_m \text{ max} = 120, c_d \text{ max} = 350, c_d \text{ min} = 100, \phi_{\max} = 25, \phi_{\min} = 0, \phi_{\max} = 10, \phi_{\min} = 1, \phi_{\max} = 2, \phi_{\min} = 0.3, F_d \text{ max} = 11, F_d \text{ min} = 9$ .

在仿真研究中, 设  $c_m = 100 + 200 \sin t, c_d = 225 + 125 \sin t, F_d = 10 + \sin t$ .

对于控制器 1 ~ 控制器 6, 在选择不同的调度算法参数  $\phi_i (i = 1, 6)$  或  $\phi_j (j = 2, 3, 4, 5)$  时进行系统仿真. 从仿真结果可以看出:

- 1) 对于控制器 1, 当采用  $\phi_1 = 2$  时具有比较理想的性能, 此时过渡过程时间比较短, 且最大控制幅度比较小.
- 2) 对于控制器 2, 当采用  $\phi_2 = 3/4$  时具有比较理想的性能, 此时过渡过程时间比较短, 且最大控制幅度比较小.
- 3) 对于控制器 3, 当采用  $\phi_3 = 0.17$  时具有比较理想的性能, 此时过渡过程时间比较短, 且最大控制幅度比较小.
- 4) 对于控制器 4, 当采用  $\phi_4 = 0.068$  时具有比较理想的性能, 此时过渡过程时间比较短, 且最大控制幅度比较小.



5) 对于控制器5,当采用  $\delta_5 = 0.04$  时具有比较理想的性能,此时过渡过程时间比较短,且最大控制幅度比较小.

6) 对于控制器6,选择控制器1的参数为  $\delta_1 = 2.8$ ,控制器2的参数为  $\delta_2 = 3/4$ ,控制器3的参数为  $\delta_3 = 0.17$ ,控制器4的参数为  $\delta_4 = 0.07$  以及控制器5的参数为  $\delta_5 = 0.038$  来构成控制器6.可以看出,当  $\delta_6 = 0.5$  时具有比较理想的性能,此时过渡过程时间比较短,且最大控制幅度比较小.

综合上述6种控制器的仿真结果,各种控制器在最佳情形下的控制指标比较如表1所示.

表1 各种控制器最佳情形下的控制性能比较

控制器	参数	过渡过程时间	控制能耗	最大控制量	最小控制量
1	2	10.1	5318	5400	-19.9
2	3/4	10.5	4581	2650	-17.1
3	0.17	10	4905	2690	-19.9
4	0.068	10	5003	13100	-20.0
5	0.04	10	4603	1970	-19.9
6	0.5	10	4728	2150	-19.9
7	VSC	2	20840	33262	-42920
8	VSC	5	3152	5700	-11
9	VSC	23	4953	2507	-11
10	VSC	15	5304	2993	-20

定义控制能耗为

$$E = \int_0^{50} |u| dt.$$

其中:控制器7为一般VSC的控制结果,选择  $\delta = 25$ ,  $\delta_0 = 10$ ,  $\phi = 0.5$ ;控制器8为一般VSC的控制结果,选择  $\delta = 5$ ,  $\delta_0 = 1$ ,  $\phi = 0.5$ ;控制器9为一般VSC的控制结果,选择  $\delta = 1$ ,  $\delta_0 = 1$ ,  $\phi = 0.5$ ;控制器10为一般VSC的控制结果,选择  $\delta = 1$ ,  $\delta_0 = 10$ ,  $\phi = 0.5$ .

由表1可以看出,当采用控制器2,控制器5和控制器6时,具有比较小的能耗和比较小的控制量最大值,且过渡过程时间比较适中.从控制性能和所付出的代价综合考虑,这些控制器均优于一般的VSC控制结果,尤其是能耗低、最大控制量幅度小,明显优于一般VSC,从而验证了这些增益调度控制

器的有效性.最好的应该是  $\delta_5 = 0.04$  时的控制器5.

## 5 结 论

本文系统地研究了多种基于增益调度思想的滑动模态变结构控制器.与常规控制器相比,这些控制器均具有控制效率高、控制信号变化幅度小、能耗低等特点.通过合适的调度算法参数选择,可以在获取动态控制性能的同时,保证控制能耗低、无颤振.这一研究可直接应用于变结构控制系统的设计和工程实践.目前,作者已经展开有关结合自适应方法、模糊方法的增益调度算法研究,并将研究结果推广到多变量系统、时滞系统和其他不确定系统.

## 参考文献(References)

- [1] Utkin V I. Sliding modes in control and optimization [M]. Berlin: Springer-Verlag, 1992.
- [2] DeCarlo R A, Zak S H, Matthews G P. Variable structure control of nonlinear multivariable systems: A tutorial[J]. IEEE Proceedings, 1988, 76(3): 212-232.
- [3] Slotine Jean-Jacque E, Weiping Li. Applied nonlinear control [M]. New Jersey: Prentice Hall, Englewood Cliffs, 1991.
- [4] Itkis Y. Control systems of variable structure[M]. New York: Wiley, 1976.
- [5] 段学超,仇原鹰,盛英.平面二级倒立摆的圆周行走与镇定控制[J].自动化学报,2007,33(12):1337-1340. (Duan X C, Chou Y Y, Sheng Y. Circular motion and balance control of the planar double inverted pendulum [J]. Acta Automatica Sinica, 2007, 33(12): 1337-1340.)
- [6] Wheeler G, Su C-Y, Stepanenko Y. A sliding mode controller with improved adaptation laws for the upper bounds on the norm of uncertainties[J]. Automatica, 1998, 34(12): 1657-1661.
- [7] Zhang Yanxin, Zhang Siying. Fuzzy indirect sliding mode tracking control for a class of nonlinear interconnected systems [J]. Acta Automatica Sinica, 2003, 29(5): 658-665.
- [8] 胡剑波.非线性系统的变结构控制与增益调度[D].杭州:浙江大学,2001. (Hu J B. Variable structure control theory and gain-scheduling for the nonlinear system [D]. Hangzhou: Zhejiang University, 2001.)