

十字梁实验系统的分层变结构控制

吴雪雨

(大庆时代广场管理处, 黑龙江 大庆 163000)

摘 要:为了探索到一种适用于实际系统,能消除常值干扰的分层变结构控制系统,本文依据十字梁控制系统的特点、分层控制理论和变结构控制理论,提出将系统分成多层,对每一层进行变结构控制器的设计思想.在前人理论推导的基础上,设计了十字梁实验系统的分层变结构控制器,并进行了仿真.仿真结果表明,该系统具有较好的抗干扰性和鲁棒性.

关键词:十字梁; 分层控制; 变结构; 控制系统; 仿真

中图分类号: TP13 **文献标识码:** A **文章编号:** 1007-2683(2009)01-0028-03

The Layer VSS Control of Cross Beam Experiment System

WU Xue-yu

(Daqing Epoch Square Management Division, Daqing 163000, China)

Abstract: To find an approach to the elimination of interferences, a practical layered variable structure control system, this research puts forward a design solution: the system is divided into multi-level, design variable structure of hierarchical control theory. On the basis of the previous theoretical derivations, the cross-beam experimental system of stratification variable structure controller is designed and simulated as well. The simulation results show that the system is of better anti-interference and robustness.

Key words: cross beam; layer control; VSS; control system; simulation

变结构控制(又称滑动模态控制)是非线性系统的一种综合方法.即使受控对象是线性的,闭环系统本身也由于反馈控制部分是系统状态或输出偏差的非线性函数而具有明显的非线性特点^[1].

分层控制是自动控制系统的一种设计思想.分层控制理论的基本要点就是将高阶的复杂系统划分成耦合程度很低的多个低阶子系统层次,然后对每个子系统分别设计控制器并实施控制.在设计某个子系统层的控制器时,不需考虑其他的子系统层,也就是说各层控制器的设计可以互不相关,各控制器对相应系统层实施控制,达到控制整个复杂系统的目的^[2].

分层变结构控制是滑模变结构控制的发展,本文在文[1]的基础上,根据十字梁控制系统的特点,

通过理论推导,提出了一种适用于实际系统,能消除常值干扰的分层变结构控制.他的设计思想是将系统分成多层,对每一层进行变结构控制器的设计.它具有设计简单、调试方便、控制效果明显,鲁棒性能好等特点.

1 分层变结构控制

现针对一般的仿射系统(对控制量是线性的)作分层变结构控制设计的说明.

令系统的模型为

$$\left. \begin{aligned} \dot{x} &= f(x) + Bu \\ y &= x \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

式中, $x, y \in R^n, u \in R^m$. 选择超曲面为

$$S(x) = G(x - x_0) + G_p \left(\int_0^t (x - x_0) dt \right) \quad (2)$$

式中

$$\begin{aligned} G &= \text{diag}\{g_1 \cdots g_n\} \\ G_p &= \text{diag}\{g_{p1} \cdots g_{pn}\} \end{aligned} \quad (3)$$

G 为比例系数矩阵, G_p 为积分系数矩阵.

对式 (2) 取微分并将系统的模型代入, 得到

$$\begin{aligned} \dot{S} &= G(\dot{x} - \dot{x}_0) + G_p(x - x_0) = Gf(x) + \\ &GBu - G\dot{x} + G_p(x - x_0) \end{aligned} \quad (4)$$

令式 (4) 中 $\dot{S} = 0$, 于是可以得到变结构等效控制

$$u_{eq} = -(GB)^{-1} [Gf(x) - G\dot{x} + G_p(x - x_0)] \quad (5)$$

这里假定 (GB) 可逆.

设计变结构控制首先要满足滑动模态的存在性条件, 同时还要满足滑动模态的可达性条件. 当选取的控制切换面 (即超曲面 S) 满足广义滑模条件, 系统滑动模态的存在性条件和可达性条件必然同时得以满足. 因此, 我们只需使切换面 S 满足广义滑模条件就可以了, 即

$$S \cdot \dot{S} \leq 0$$

当 $S < 0$ 时, $\dot{S} \geq 0$, 即得

$$u \geq u_{eq}$$

当 $S > 0$ 时, $\dot{S} \leq 0$, 即得

$$u \leq u_{eq}$$

为了满足上述条件, 可以选择变结构控制为

$$u = -(GB)^{-1} [Gf(x) - G\dot{x} + G_p(x - x_0) + K \text{sgn}(s)] \quad (6)$$

式中: $K = \text{diag}\{k_1 \cdots k_n\}$, K 为切换系数矩阵.

设计 $\dot{x}$ 使之成为下面微分方程的解:

$$\begin{aligned} \dot{\tilde{x}} &= G^{-1}CG(x - x_0) + G^{-1}G_p(x - x_0) + \\ &G^{-1}CG_p \left(\int_0^t (x - x_0) dt \right) \end{aligned} \quad (7)$$

式中

$$C = \text{diag}\{c_1 \cdots c_n\}$$

C 为待确定的稳定系数矩阵. 在设计时只要合理选择 C , 就可以保证系统有稳定的输出, 下面对此进行说明, 由式 (4) 有

$$\dot{S} = G(\dot{x} - \dot{x}_0) + G_p(x - x_0)$$

将 (7) 式代入后得到

$$\dot{S} = G\dot{x} - C[G(x - x_0) + G_p \left(\int_0^t (x - x_0) dt \right)] = G\dot{x} - CS$$

于是

$$\dot{S} + CS = G\dot{x}$$

由于 C 和 G 均为对角矩阵, 因此各分量为

$$\dot{s}_i + c_i s_i = g_i \dot{x}_i$$

或

$$\frac{s_i}{\dot{x}_i} = \frac{g_i}{p + c_i}$$

其中, $p = \frac{d}{dt}$. 因而, 只要合理地选择 C 阵, 就可保证系统有稳定的输出.

将式 (8) 代入变结构控制表达式 (6), 可以得到

$$u = -(GB)^{-1} [Gf(x) - CG(x - x_0) - CG_p \left(\int_0^t (x - x_0) dt + K \text{sgn}(s) \right)] \quad (8)$$

对于实际系统, 只要根据它的阶次分成若干层, 每一层都按照上式设计出控制器^[3].

2 十字梁实验系统偏航通道分层变结构控制器的设计

由文 [2] 的十字梁数学模型公式可知, 考虑到不确定的常值干扰, 十字梁系统的状态方程可写为

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = -a_2 x_2 + bu + T_d \end{cases} \quad (9)$$

$$y = x_1 = \psi \quad (10)$$

其中, $a_2 = -\frac{f}{J}$, $b = \frac{l}{J}$, $-T_{d\max} \leq T_d \leq T_{d\max}$.

这是一个二阶系统, 可以分成二层来设计变结构控制器^[4].

2.1 第一层变结构控制器的设计

由方程 (9) 可知:

$$\dot{x}_1 = x_2 = f_1 + B_1 x_2$$

式中: $f_1 = 0, B_1 = 1$.

根据变结构控制表达式 (8), 可以得到第一层的变结构控制器, 即

$$\begin{aligned} u_1 &= -(g_1 B_1)^{-1} [g_1 f_1 - c_1 g_1 (x_1 - x_0) - \\ &c_1 g_{p1} \left(\int_0^t (x_1 - x_0) dt + k_1 \text{sgn}(s_1) \right) = \\ &c_1 (x_1 - x_0) + \frac{c_1 g_{p1}}{g_1} \left(\int_0^t (x_1 - x_0) dt - \right. \\ &\left. \frac{k_1}{g_1} \text{sgn}(s_1) \right) = c_1 [\psi(t) - \varphi(t)] + \\ &\frac{c_1 g_{p1}}{g_1} [\psi(t) - \varphi(t)] dt - \frac{k_1}{g_1} \text{sgn}(s_1) \end{aligned} \quad (11)$$

式中, s_1 是该层变结构控制切换面 (或超曲面).

$$s_1 = g_1 (x_1 - \bar{\psi}) + g_{p1} \left(\int_0^t (x_1 - \bar{\psi}) dt + \bar{\psi}(t) \right) + g_{p1} \left[\int_0^t (\dot{\psi}(t) - \dot{\bar{\psi}}(t)) dt \right]$$

2.2 第二层变结构控制器的设计

由方程式 (9) 可知

$$\dot{x}_2 = -a_2 x_2 + bu + T_d = \dot{f}_2 + B_2 u + T_d$$

$$\text{式中: } \dot{f}_2 = -a_2 x_2 = -\frac{f}{J} x_2; B_2 = b = \frac{1}{J}.$$

同样,可以得到第二层的变结构控制器,即

$$u_2 = -(g_2 B_2)^{-1} [g_2 \dot{f}_2 - c_2 g_2 (x_2 - \bar{\psi}) - c_2 g_{p2} \left(\int_0^t (x_2 - \bar{\psi}) dt + \bar{\psi}(t) \right) + \frac{a_2}{b} \dot{\psi}(t) + \frac{c_2}{b} (\dot{\psi}(t) - \dot{\bar{\psi}}(t)) + \frac{c_2 g_{p2}}{b g_2} (\dot{\psi}(t) - \dot{\bar{\psi}}(t)) - \frac{k_2}{g_2 b} \text{sgn}(s_2)] \quad (12)$$

式中 s_2 是第二层变结构控制的切换面 (或超曲面).

$$s_2 = g_2 (x_2 - \bar{\psi}) + g_{p2} \left(\int_0^t (x_2 - \bar{\psi}) dt + \bar{\psi}(t) \right) + g_{p2} \left[\int_0^t (\dot{\psi}(t) - \dot{\bar{\psi}}(t)) dt \right]$$

$$k_2 > |g_2 T_{d_2}|$$

根据上面设计的分层变结构控制器,可以得到十字梁实验系统偏航通道的控制框图,如图 1 所示.

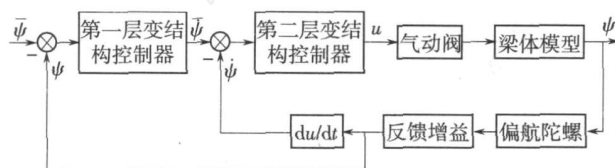


图 1 十字梁实验系统偏航通道的控制框图

2.3 控制器参数的设计

仿真时模型参数设置如下:气动阀 $K_F = 1.96$, 陀螺增益 $K_G = 1$, 反馈增益 $K = 0.5$, 梁体模型参数 $a_2 = 4.2172$, $b = 2.8885$, $\bar{\psi} = 2^\circ$ 。为了设计简单,在不影响控制精确度的情况下,本文在设计中令第二层的积分系数为零,即 $g_{p2} = 0$, 且令 $g_1 = g_2 = 1$ 。这样需要调整的参数有五个 g_{p1} , c_1 , k_1 , c_2 , k_2 。经过反复仿真并分析仿真结果得出,设计出控制器的参数为: $g_{p1} = 0.02$; $c_1 = 16.2$; $k_1 = 0.000001$; $c_2 = 1.003$; $k_2 = 6.09$, 此时对应的实验与仿真曲线如图 2 和图 3 所示。

图 3 是为了研究系统的鲁棒性,使梁体模型中的参数分别向上和向下摄动 50% 所作出的仿真曲线,由仿真结果可看出,系统具有很强的鲁棒性。

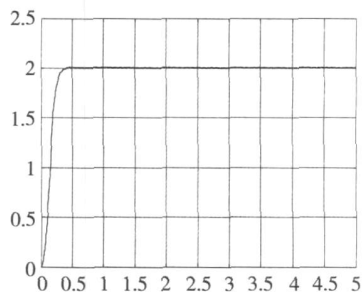


图 2 偏航通道仿真曲线

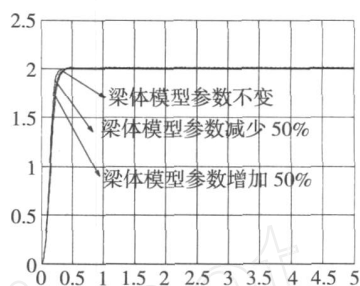


图 3 偏航通道模型参数上下摄动 50% 仿真曲线

3 十字梁实验系统三通道分层变结构控制器的设计

第二节内介绍的回路设计是在三个通道互相解耦的情况下进行的。实际上,三个通道是互相交耦的。对象控制器的联接方式,采用并联同样的控制器,由于分层变结构控制器具有强鲁棒性,可以把三通道的耦合项看成是外部干扰。十字梁控制系统的总仿真方框图如图 4 所示。

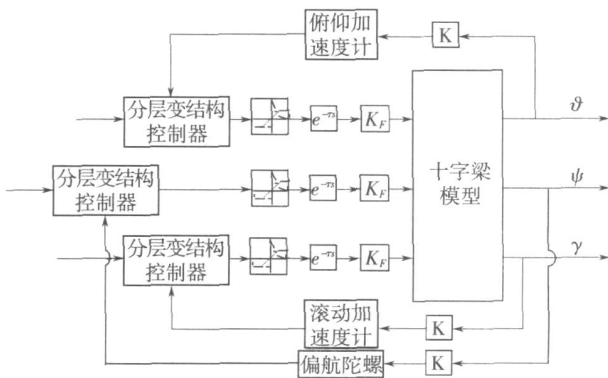


图 4 十字梁控制系统三通道仿真方框图

根据图 4 所示的十字梁控制系统进行了仿真研究。仿真数据为:俯仰通道参数为 $c_1 = 10.2$, $g_{p1} = 0.02$,

(下转第 34 页)

表 1 实例结果数据分析

数值	函数 Rosenbrock		函数 Griewank	
	CPSO	RP - CPSO	CPSO	RP - CPSO
最大值	90 004. 64	17. 202 4	90. 038	0. 048 90
最小值	0. 000 007	4. 664 6	0	0
平均值	3 818. 891	12. 254 1	3. 634	0. 009 78
标准差	17 785. 66	1. 699 1	17. 813	0. 011 52

5 结 语

针对粒子群优化算法不能应用到离散领域,参数选择过多地依赖经验取值,以及容易过早收敛、陷入局部最优解,从而不能精确逼近全局最优解的缺点,本文提出一种改进的复合粒子群优化算法——随机摄动复合粒子群优化算法,在复合粒子群优化算法的基础上,根据粒子种群的相对独立性,引入随机摄动种群算法,不仅扩大了粒子群算法的应用领域,根据实际问题优选了参数,而且能在搜索后期跳出局部最优,提高了训练精确度,缩短了训练时间.

数值实验表明,该算法收敛速度快、解的精确度高、优化性能稳定.

参 考 文 献:

[1] KENNEDY J, EBERHART R C. Particle Swarm Optimization Proceedings[C]//Perth, Australia: IEEE Service Center, 1995, 1942 - 1948.

[2] 赵会洋,王 爽. 粒子群优化算法研究综述[J]. 福建电脑, 2007(3): 40 - 41.

[3] 俞欢军,张丽平,陈德钊,等. 复合粒子群优化算法在模型参数估计中的应用[J],高校化学工程学报, 2005, 19(5): 676 - 677.

[4] SHI Y, EBERHART R C. A Modified Particle Swarm Optimization [C]//IEEE International Conference on Evolutionary Computation Alaska, USA: IEEE Press, 1998: 69 - 73.

[5] WRIGHT A. Genetic Algorithms for Real Parameter Optimization - Foundations [M]. San Mateo: Morgan Kaufmann Publishers, 1991.

[6] 余柄辉,袁晓辉,王金文,等. 随机摄动粒子群优化算法[J]. 计算机工程, 2006, 32(12): 189 - 190.

(编辑:付长纓)

(上接第 30 页)

$c_2 = 2\ 510$, $k_1 = 0.000\ 001$, $k_2 = 6.09$, $J_x = 3.03\ \text{kg} \cdot \text{m}^2$; 航向通道参数为 $c_1 = 10.2$, $c_2 = 3\ 913$, $g_{p1} = 0.02$, $k_1 = 0.000\ 001$, $k_2 = 6.09$, $J_y = 6.08\ \text{kg} \cdot \text{m}^2$; 滚动通道参数为 $c_1 = 10.2$, $g_{p1} = 0.02$, $c_2 = 2\ 503$, $k_1 = 0.000\ 001$, $k_2 = 6.09$, $J_z = 3.03\ \text{kg} \cdot \text{m}^2$; 三通道均取 $h = 0.005\ \text{s}$, $g_{p2} = 0$, $g_1 = g_2 = 1$, $\tau = 0.001\ 5\ \text{s}$, $K_F = 1.96$, 陀螺仪与加速度计增益 $K_{G\phi} = K_{Q\psi} = K_{G\gamma} = 1$, $K = 0.5$ $f_{x1} = f_{y1} = f_{z1} = 1.76\ \text{N} \cdot \text{m} \cdot \text{s}$; 理想姿态角 $\phi^* = 10^\circ$; $\psi^* = 5^\circ$; $\gamma^* = -10^\circ$. 仿真结果如图 5 所示.

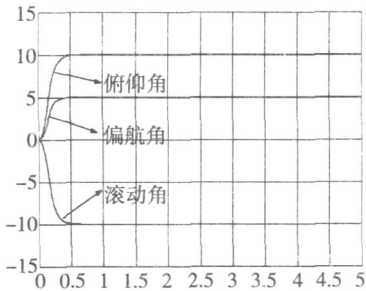


图 5 三通道仿真曲线

4 结 语

从仿真结果可以看出,系统具有较好的动态性能和稳态性能. 本文实现了十字梁三通道一体化的分层变结构控制. 该方法具有很多优点,如抗干扰性,其中最突出的是系统具有较好的鲁棒性. 这里提供的仿真结果实现了模型参数 50% 的上下摄动.

参 考 文 献:

[1] 顾文锦,韦 峰,姚 洪. 导弹分层变结构控制[J]. 宇航学报, 2000(2): 43 - 49.

[2] 郭振凯,顾文锦. 基于离散非线性 PD 控制的十字梁实验系统研究[J]. 系统仿真学报, 2003, 15(9): 1322 - 1324.

[3] 高为炳. 变结构控制的理论及设计方法[M]. 北京:科学出版社, 1998.

[4] 徐胜红. 十字梁控制系统设计及仿真实验环境的建立[D]. 烟台:海军航空工程学院, 1999.

(编辑:付长纓)