

制导航空炸弹变结构控制器设计

王焕钢 沈毅 王冠珠

(哈尔滨工业大学 327 信箱, 哈尔滨, 150001)

VARIABLE STRUCTURE CONTROLLER DESIGN FOR GUIDED BOMB

Wang Huangang, Shen Yi, Wang Guanzhu

(Box 327, Harbin Institute of Technology, Harbin, 150001)

摘要 针对制导航空炸弹的滚转通道,设计了一种具有线性部分变结构控制器。基于弹体模型的时变特性,该控制器首先设计切换函数以确定滑动模态动态特性,附加以参数变化范围内的定常模型为对象的线性部分用以控制趋近模态。对某型号制导炸弹设计变结构控制律,仿真结果表明能较好地适应系统的参数变化,提高控制精度,系统具有良好性能。

关键词 变结构控制 滑动模态 制导炸弹

中图分类号 V448.23

Abstract A design scheme of variable structure control (VSC) with linear part for the roll channel of guided bomb control systems is proposed. Based on the time-varying character of the bomb body model, the VSC involves, first, the design of switching function for a desired sliding mode dynamic, and second, the design of linear part to control reaching mode such that the state reaches the switching surface as fast as possible. In the second part, the plant is simplified as a time-invariant model to make the design easy. The control law of some type guided bomb is designed, and the simulation results show that this method can adapt to the change of system parameters, improve the accuracy of the control, and the system has good performance.

Key words variable structure control, sliding mode, guided bomb

在60年代末期出现的具有制导功能的航空炸弹具有很高的精度,很快受到重视并逐步取代普通的航空炸弹。由于控制系统中作为被控对象的弹体特性极其复杂,因此在设计中控制器的性能有较高的要求。近年来,变结构控制所具有的特点使变结构控制系统(VSS)在各控制领域得到广泛的重视^[1]。由于VSS中的“滑动模态”可以设计与控制对象及扰动无关,这就使得VSS具有快速响应、对参数及外扰变化不灵敏等许多本质上的优点^[2~4],这些优点使VSS极适用于弹体控制。

1 制导炸弹滚转通道特性

在制导炸弹控制系统设计过程中,弹体沿其纵轴滚转角的控制(滚转控制通道)是非常重要的。弹体的横滚不但会造成俯仰、偏航和滚转通道间的耦合,而且会造成导引精度的下降。尤其对于目前大多数导引头采取四象限划分的制导炸弹,很小的静横滚角都会使制导失灵。

对一个控制系统而言,首要的问题是了解被控对象的基本特性,但对航空炸弹弹体的精确建模是很困难的。空间各点作用在弹体上的空气动力取决于该点的气动力导数,而气动力导数是与高度、速度、攻角等多方面因素有关的复杂非线性函数。这就造成航弹在飞行过

程中所表现出来的空气动力特性不仅是非线性的而且是时变函数。对于这样的被控对象, 普通的线性控制器是很难满足精度的。

变结构控制系统(VSS)是一种典型的非线性控制系统,“滑动模态”一致性使设计不用过多地受到被控对象的限制。虽然在“趋近模态”上没有这样的性质,但系统的静特性只与“滑动模态”的渐进稳定及相应的动态品质有关。故在设计制导炸弹的变结构控制器时可以用简化的线性模型满足精度。

按照滑模变结构原理,“趋近模态”应满足到达条件,即保证系统在有限时间内到达“滑动模态”。但是,应注意到达条件仅实现了在状态空间任意位置的运动点必然于有限时间内到达切换面的要求。至于在这段时间内,对运动点的轨迹未作任何规定。这里针对制导炸弹滚动控制通道控制器的设计,给出一种可以规定“趋近模态”运动的VSS设计方法。

考虑到炸弹在投放过程中所处高度及空速的时变,对称弹体滚转通道滚转角与舵偏角之间的变参数气动力简化传递函数为

$$\frac{R(s)}{\delta(s)} = \frac{-k(h, v)}{s[T(h, v)s + 1]} \quad (1)$$

其中: R 为滚转角; δ 为舵偏角; k 为滚动传递系数; T 为滚动时间常数。将执行舵机看成是广义被控对象的一部分,则广义被控对象(滚转角与控制器输出)的传递函数也是变参数的

$$\frac{R(s)}{U(s)} = \frac{-b_1(h, v)}{s[s^2 + a_2(h, v)s + a_1(h, v)]} \quad (2)$$

由于弹体投放高度及速度的变化是在一定范围之内,故各变参数也是有界的

$$\left. \begin{array}{ccc} a_{i\max} & a_i(h, v) & a_{i\min} \\ b_{1\max} & b_1(h, v) & b_{1\min} \end{array} \right\} \quad (3)$$

其中: $a_{i\max}, b_{1\max}$ 是各相应参数变化的最大值; $a_{i\min}, b_{1\min}$ 是各相应参数变化的最小值。

2 变结构控制器的设计

对系统设计具有线性部分变结构控制器,控制器的输出 u_c 为

$$u = u_c + u_D \quad (4)$$

式中: u_c 为控制器的线性部分; u_D 为控制器的变结构控制(非线性)部分。

对控制器线性部分 u_c 的设计,可以根据设计者的意愿进行,而且可以完全不用考虑控制器的变结构控制(非线性)部分。这样,控制器的两个部分可以分开独立设计。设计者凭自身的经验用零极点配置、状态反馈、最优控制等多种方法,其目的是使系统具有较好的动静态特性即可。虽然被控对象是变参数的,但在设计控制器线性部分时,可以随意选一工作点下的弹体特性作为控制对象。引入状态反馈,得控制器线性部分

$$u_c = L^T X, L^T = [l_1 \quad l_2 \quad l_3], X^T = [r \quad \dot{r} \quad \ddot{r}] \quad (5)$$

u_D 的设计分 2 部分: 切换函数和变结构控制量的设计。

(1) 切换函数的设计 首先由变结构控制理论,切换函数必须满足 $S(X)$ 过原点。从切换函数的形式,可以将切换函数分为 2 个部分: S_1, S_2 。系统在 S_1 所表示的平面上不产生“滑动模态”,而在 S_2 所表示的平面上才产生“滑动模态”,为便于实现可选择 S_2 为线性函数,即 $S_2 = C^T X$ 。在理论上,系统在滑动模态上满足 $S_2 = C^T X = 0$, 故滑动运动的趋近速度取决方程 $C^T X = 0$ 。因而,在保证滑动运动渐近稳定的基础之上,切换函数的设计应主要考虑 $C^T X = 0$ 解的归零速度。从控制理论角度讲,可用极点配置的方法设计切换函数。

(2) 变结构控制量的设计 变结构控制量 $u_D = \Psi_1 r$

$$\Psi_1 = \begin{cases} \alpha_1 & \text{当 } x_1 S(X) > 0 \\ \beta_1 & \text{当 } x_1 S(X) < 0 \end{cases} \quad (6)$$

式中: α_1, β_1 都是实数。取切换函数为

$$rS = r(\overset{\circ}{r} + c_2 \overset{\circ}{r} + c_1 r) \quad (7)$$

在切换面附近有

$$\begin{aligned} dS/dt = [c_1 - b_1(h, v)l_2 - a_2(h, v) - c_2^2 + b_1(h, v)l_3c_2 + c_2] \overset{\circ}{r} + \\ [-b_1(h, v)l_1 + c_1 - a_1(h, v) - c_2c_1 + b_1(h, v)l_3c_1 - b_1(h, v)\Psi_1]r \end{aligned} \quad (8)$$

根据滑动模态可到达条件, 在切换平面附近满足

$$\begin{cases} \dot{S} < 0 & \text{当 } S > 0 \\ \dot{S} > 0 & \text{当 } S < 0 \end{cases} \quad (9)$$

显然, $c_1 - b_1(h, v)l_2 - a_2(h, v) - c_2^2 + b_1(h, v)l_3c_2 + c_2 = F(h, v) = 0$ 。选择参数 c_1, c_2 使 $\max_{h, v} |F(h, v)| = 0$, 此时记 $F(h, v) = F_{\min}$ 。不失一般性设初态 $r > 0$ 则在切换平面附近 $r_{\min} < r < 0$ 得

$$\left. \begin{aligned} \alpha_1 &> \max_{h, v} b_1^{-1}(h, v) [-b_1(h, v)l_1 + c_1 - a_1(h, v) - c_1c_2 + b_1(h, v)l_3c_1 + F_{\min} r_{\min}] \\ \beta_1 &< \min_{h, v} b_1^{-1}(h, v) [-b_1(h, v)l_1 + c_1 - a_1(h, v) - c_1c_2 + b_1(h, v)l_3c_1 + F_{\min} r_{\min}] \end{aligned} \right\} \quad (10)$$

3 仿真结果

某制导炸弹工作在最大动压 h 取最小, v 取最大和最小动压 h 取最大, v 取最小两种极限状态下的广义对象传函分别为

$$\left. \begin{aligned} \frac{R(s)}{U(s)} &= \frac{-17.89}{s(0.024s^2 + 1.024s + 1)} \\ \frac{R(s)}{U(s)} &= \frac{-3.55}{s(0.024s^2 + s + 0.3155)} \end{aligned} \right\}$$

则参数变化范围

$$\left. \begin{aligned} 41.67 & \quad a_1(h, v) \quad 13.15 \\ 42.67 & \quad a_2(h, v) \quad 41.67 \\ 745.62 & \quad b_1(h, v) \quad 147.92 \end{aligned} \right\}$$

在最大动压下引入状态反馈设计控制器连续部分, 则控制器输入-输出方程

$$u = 0.099 \overset{\circ}{r} + 3.85 \overset{\circ}{r} + 43.5r + 19.25\Psi_1 r$$

取切换函数 $rS = r(\overset{\circ}{r} + 77.8\overset{\circ}{r} + 1719r)$, 得到变结构控制量

$$\Psi_1 = \begin{cases} \alpha_1 = 0 & \text{当 } rS > 0 \\ \beta_1 = -20 & \text{当 } rS < 0 \end{cases}$$

对该激光制导炸弹分别在最大、最小动压及 10 的初始滚转失调角情况下, 对弹体滚转角 $r(t)$, 舵机偏转角 $h(t)$ 进行仿真, 结果如图 1, 图 2 所示。

从仿真曲线可以看出该控制器的优越性能, 无论在最大动压或最小动压状态下系统经 0.2s 便能将弹体的滚转失调角调整到零, 而且动态过程几乎无超调。

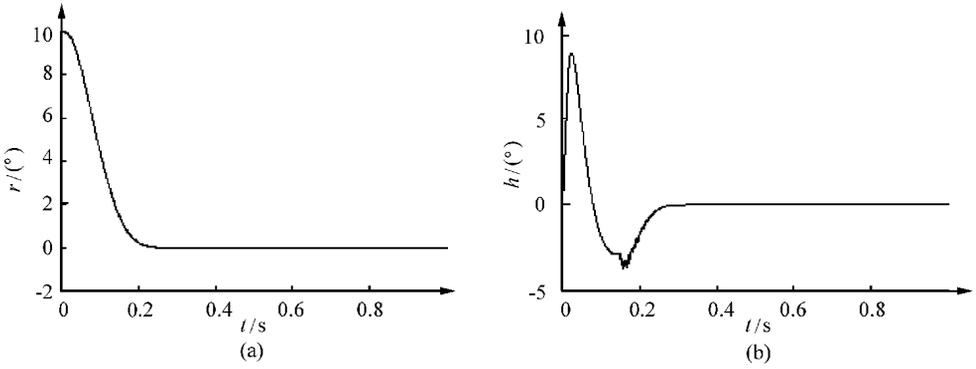


图 1 最大动压, 滚转失调角 10 时仿真结果

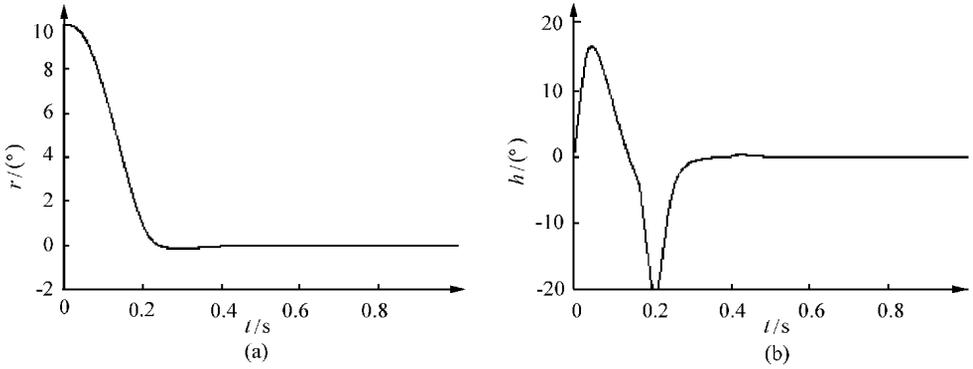


图 2 最小动压, 滚转失调角 10 时仿真结果

参 考 文 献

- 1 Utkin V I. Variable structure systems: present and future. *Automat Remote Contr*, 1984, 44(9):1105 ~ 1220.
- 2 Utkin V I. Variable structure system with sliding mode: a survey. *IEEE Trans Automat Contr*, 1964, AC-22(2): 212 ~ 222.
- 3 Ryan E P. A variable structure approach to feedback regulation of uncertain dynamic systems. *Int J Contr*, 1983, 38 (6): 1121 ~ 1134.
- 4 Hung J Y, Gao W B, Hung J C. Variable structure control: a survey. *Trans Ind Electron*, 1993, 40(1): 2 ~ 23.