

飞机发动机操纵系统地面模拟电动加载变结构控制研究

王新民, 朱明辉, 刘卫国

(西北工业大学自动化学院, 西安 710072)

摘要: 研究了飞机发动机操纵系统地面模拟实验中用力矩电机进行电动加载控制问题。为了克服系统在运动过程中, 多余力的扰动及时变性等因素影响, 在线性化模型的基础上, 设计了变结构控制器作为加载系统的控制器。仿真结果表明, 变结构控制能达到较高的精度。

关键词: 力矩电机; 加载系统; 变结构控制

中图分类号: V228 **文献标识码:** A **文章编号:** 1001-3881 (2005) 9-127-2

Variable Structure Control for Aircraft Engine Manipulating System Simulator with Motor Load

WANG Xin-min, ZHU Ming-hui, LIU Wei-guo

(Automatic Control Department, Northwestern Polytechnic University, Xi'an 710072, China)

Abstract: Variable structure control was discussed for aircraft engine manipulating system simulator with motor loading. Due to some typical characteristics of extra torque load disturbance and time-varying in linear model, the sliding model controller was designed. Simulation results show that the variable structure control scheme is effective and achieves favorable tracking performance.

Keywords: Torque motor; Loading system; Variable structure control

为了研究和改进飞机发动机操纵系统, 需要对操纵系统运动机构各处的受力情况进行测量和分析, 为此建立了与飞机实物相同的地面机构传动模拟系统, 在机构的不同点上安装了测力传感器。机构的运动则用两个力矩电机驱动的电动系统来模拟, 主动系统用来模拟对操纵系统的施力情况, 从动系统用来模拟油门负载, 称为加载系统。

本文研究该系统的力矩电机驱动的加载控制问题。由于时变影响及干扰, 实际用的传统 PID 控制精度不能满足精度要求, 本文研究变结构控制器^[1-3]实现高精度控制。

1 系统模型

电动加载系统的模型建立如下。

直流力矩电机动态方程

$$T_m = \frac{G_0 K_T u_a(s) - G_0 \theta_3(s) [J_D L_a s^3 + (R_a J_D + K_D T_D) s^2 + (R_a K_D + K_T K_e) s]}{\{ (R_a + L_a s) (J_D s^2 + K_D s) + K_T K_e \} + G_0 (R_a + L_a s)}$$

设力矩变量为 T_m , 令 $[x_1 \ x_2 \ x_3]^T = [T_m \ \dot{T}_m \ \ddot{T}_m]^T$, 则其状态空间表达式:

$$\dot{x} = Ax + Bu + Dd(t), \quad y = c^T x \quad (1)$$

式中:

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \\ -a_3 & -a_2 & -a_1 \end{bmatrix}, B = [0 \ 0 \ b]^T$$

$$c = [1 \ 0 \ 0]^T, D = [0 \ 0 \ 1]^T$$

$$a_3(t) = \frac{(R_a J_D + K_D L_a)}{J_D L_a}, \quad a_2(t) = \frac{G_0 L_a + R_a K_D + K_T K_e}{L_a J_D},$$

$$a_1(t) = \frac{R_a G_0}{L_a J_D}, \quad b(t) = \frac{K_T G_0}{L_a J_D}$$

$$d(t) = G_0 \ddot{\theta}_3 + \left(\frac{R_a J_D + K_D L_a}{L_a J_D} \right) \ddot{\theta} + \left(\frac{R_a K_D + K_T K_e}{L_a J_D} \right) \dot{\theta}_3$$

电压方程: $u_a(s) = R_a i_a(s) + L_a s i_a(s) + e_a(s)$

力矩方程: $T_e(s) = J_D s^2 \theta_1(s) + K_D s \theta_1(s) + T_m$

$T_e(s) = K_T i_a(s)$

$T_m = G_0 [\theta_1(s) - \theta_3(s)]$

反电势方程: $e_a(s) = K_e s \theta_1(s)$

式中: $u_a(s)$, $e_a(s)$ 和 $i_a(s)$ 分别为直流力矩电机的电压、反电势和电枢电流, K_e 、 K_T 分别为力矩电机的反电势系数和电磁力矩系数, R_a 、 L_a 分别是电枢的电阻和电感, $\theta_1(s)$ 是力矩电机的角度, T_e 是电磁转矩, J_D 、 K_D 分别为电机的惯性系数和粘性系数, T_m 是负载力矩, G_0 是负载刚度系数, $\theta_3(s)$ 是主动力矩电机的角度。

T_m 进一步可表示成输入电压和干扰力矩的函数:

(1) 式方程中系统输入项有两部分, u 是控制器的输出, $d(t)$ 是操纵系统输出位移引起的干扰, 当 $u=0$ 时, $d(t)$ 作用的输出力矩被称为多余力, 是加载系统研究的核心问题。在实际中控制的方法是: 加载控制的输入为 $u = u_1 + u_2$, u_1 为 PID 控制, $u_2 \approx -d(t)$, 即测试操纵系统的位移速度信号, 前馈控制消除其影响。这一方法效果不是满意的, 原因是 $d(t)$ 含有高阶项, 补偿总是滞后的, 另外, 参数的非线性和不确定性使补偿偏离。变结构控制对干扰有较强的抑制作用, 本文研究用变结构改进其控制。

2 变结构控制

设力矩控制的期望值为 $T_d(t) = x_d(t)$, 实际值为 $T_m = x_1$, 控制跟踪误差为

$$e = x_d - x = [x_d - x_1 \ \dot{x}_d - \dot{x}_2 \ \ddot{x}_d - \ddot{x}_3]^T$$

定义滑膜控制

$$s = c^T e, c = [c_1 \quad c_2 \quad 1]^T$$

c_1, c_2 的选择通过极点配置保证滑模方程 $s(x) = 0$ 代入原方程后, 保证系统的渐进稳定性。

$$\text{由 } \dot{s}(x) = 0, c_1 \dot{e}_1 + c_2 \dot{e}_2 + \dot{e}_3 = 0$$

得到等效控制 u_{eq}

$$u_{eq} = \frac{1}{b(t)} [c^T \dot{x}_d - c^T A x - d(t)]$$

由于 $a_i(t), b(t), d(t)$ 的不准确性, 实际的等效控制用估计值^[3]

$$\hat{u}_{eq} = \frac{1}{\hat{b}(t)} [c^T \dot{x}_d - c^T \hat{A} x - \hat{d}(t)]$$

其中: $c^T \hat{A} = \hat{p}, \dot{\hat{p}} = -\lambda_1 Q^{-1} x s, \hat{p}$ 为对 $c^T \hat{A}$ 参数的估计矢量, Q 三阶正定对称矩阵, $c^T (A - \hat{A}) = p - \hat{p} = \tilde{\theta}_1^T$ 。

$\hat{d}(t) = d_1(t)z$, 为基于结构不变性原理设计的控制, 并设 $|d(t) - \hat{d}(t)| = T_1 < T_0$ 。

$\hat{b}(t) = \hat{\theta}_2^T \xi(x), \dot{\hat{\theta}}_2 = -\lambda_2 s \xi(x) u, \xi(x)$ 为固定的基函数矢量, $\hat{\theta}_2$ 为对 $b(t)$ 的参数自适应估计, 估计误差为 $b(t) - \hat{b}(t) = \tilde{\theta}_2^T \xi(x)$ 。对任意初态, 为保证系统达到滑动面, 并最终 $e \rightarrow 0$, 使

$$s \cdot \dot{s} \leq -\eta |s| \quad \eta > 0$$

设计控制规律

$$u = \hat{u}_{eq} + \frac{k_0}{\hat{b}(t)} \text{sgn}(s) \quad (2)$$

k_0 为一选取的常数, 系统稳定性证明: 取李亚普诺夫函数为

$$V = \frac{1}{2} [s^2 + \frac{1}{\lambda_1} \tilde{\theta}_1^T Q \tilde{\theta}_1 + \frac{1}{\lambda_2} \tilde{\theta}_2^T \tilde{\theta}_2]$$

λ_1, λ_2 为正的常数, 上式微分得

$$\dot{V} = s \dot{s} + \frac{1}{\lambda_1} \tilde{\theta}_1^T Q \dot{\tilde{\theta}}_1 + \frac{1}{\lambda_2} \tilde{\theta}_2^T \dot{\tilde{\theta}}_2$$

$$= s [c^T \dot{x}_d - c^T A x - b(x) u - d(t)] + \frac{1}{\lambda_1} \tilde{\theta}_1^T Q \dot{\tilde{\theta}}_1 + \frac{1}{\lambda_2} \tilde{\theta}_2^T Q \dot{\tilde{\theta}}_2$$

$$= s [c^T \dot{x}_d - c^T A x - b(x) u + \hat{b}(x) u - d(t) - c^T \dot{x}_d + c^T \hat{A} x + \hat{d}_1(t) z + k_0 \text{sgn}(s)] + \frac{1}{\lambda_1} \tilde{\theta}_1^T Q \dot{\tilde{\theta}}_1 + \frac{1}{\lambda_2} \tilde{\theta}_2^T \dot{\tilde{\theta}}_2$$

$$= s [- (c^T A - c^T \hat{A}) x - (b(x) - \hat{b}(x)) u + (\hat{d}(x) - d(t)) + k_0 \text{sgn}(s)] + \frac{1}{\lambda_1} \tilde{\theta}_1^T Q \dot{\tilde{\theta}}_1 + \frac{1}{\lambda_2} \tilde{\theta}_2^T \dot{\tilde{\theta}}_2$$

$$\leq -s \tilde{\theta}_1^T x + \frac{1}{\lambda_1} \tilde{\theta}_1^T Q \dot{\tilde{\theta}}_1 - \tilde{\theta}_2^T \xi(x) s u + \frac{1}{\lambda_2} \tilde{\theta}_2^T \dot{\tilde{\theta}}_2 + s T_1 + k_0 s \text{sgn}(s)$$

$$< \tilde{\theta}_1^T (-s x + \frac{1}{\lambda_1} Q \dot{\tilde{\theta}}_1) + \tilde{\theta}_2^T (-\xi(x) s u + \frac{1}{\lambda_2} \dot{\tilde{\theta}}_2) + |s| T_0 + k_0 |s|$$

$$\text{取: } \dot{\tilde{\theta}}_1 = -\dot{\hat{p}} = \lambda_1 Q^{-1} x s, \dot{\tilde{\theta}}_2 = -\dot{\hat{\theta}}_2 = \lambda_2 s \xi(x) u$$

从而, $\dot{V} < |s| T_0 + k_0 |s|$, 使 $|s| T_0 + k_0 |s| = -\eta_0 |s|$,

$\eta_0 > \eta$ 。

$$\text{取 } k_0 = -\eta_0 - T_0$$

$$\text{则 } \dot{V} < -\eta_0 |s|$$

结论表明, 在控制规律式 (2) 作用下, 系统李雅普诺夫意义下是渐进稳定的, 力矩控制的跟踪误差最终 $e \rightarrow 0$ 。

3 仿真

对于所研究的系统, 参数如下: $J_D = 0.1 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$, $K_D = 2 \text{ N} \cdot \text{m} / (\text{rad} \cdot \text{s}^{-1})$, $G_0 = 10^4 \text{ N} \cdot \text{m}$, $K_T = 2 \text{ N} \cdot \text{m} / \text{A}$, $K_e = 2.7 \text{ V} / (\text{rad} \cdot \text{s}^{-1})$, $R_a = 12 \Omega$, $L_a = 0.5 \text{ H}$ 。

在模拟驾驶员操纵油门施力时, 力矩指令通常为阶梯信号, 图 1 是变结构控制对方波加载信号的跟踪情况, 图 2 是多余力消除的效果。而实际中 PID 控制, 误差要大得多, 变结构控制在消扰方面显示了优越性。

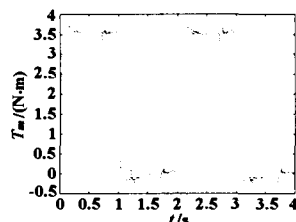


图 1 力矩指令信号调节

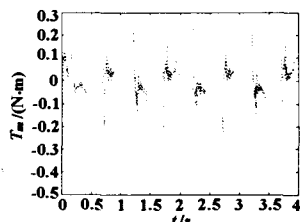


图 2 剩余多余力

变结构控制能跟踪信号变化, 对干扰鲁棒性强, 是一种较好的控制方法, 可结合参数估计方法, 有效的抑制多余力, 解决运动加载实际问题。

参考文献

- [1] Shang-The Wu. Dynamic transfer between sliding control and internal model control. Automatica, 1999, 35: 1953 ~ 1957.
- [2] Wen-Chun Yu. Discrete sliding mode control with forgetting dynamic sliding surface. Mechatronics, 2004. 01.
- [3] Jian-Xin Xu. On the sliding mode control for DC servo mechanisms in the presence of unmodeled dynamics. Mechatronics, 2003, 13: 755 ~ 770.

作者简介: 王新民 (1958 ~), 男, 西北工业大学自动化学院副教授, 博士研究生, 研究方向控制理论及自动化检测装置。电话: (029) 88495736, E-mail: wangxm878@sina.com。

收稿时间: 2004-04-15

(上接第 156 页)

系统研究 [J]. 计算机工程, 2002 (3): 27 ~ 29.

作者简介: 袁守华 (1964.4 ~), 男, 重庆人, 副教授, 从事 CAD/CAM 教学和科研工作。电话: (0371) 7698785, 7698771, 13623715303. E-mail: ysh@zzti.edu.cn。

收稿时间: 2004-05-18