兵器装备工程学报
Journal of Ordnance Equipment Engineering
ISSN 2096-2304
CN50-1213/TJ
主管单位：中国兵器装备集团有限公司
主办单位：重庆市兵工学会
重庆理工大学

基于K观测器的高平机电液系统动态面控制

杨善平， 尹强， 羊柳

【信息科学与控制工程】 doi: 10.11809/bqzbgcxb2020.05.025

基于 K 观测器的高平机电液系统动态面控制

杨善平,尹 强,羊 柳

(南京理工大学 机械工程学院, 南京 210094)

摘要:提出了一种基于 K 观测器的动态面控制策略,成功地解决了某火炮高平机电液系统非线性非匹配问题。使用所设计的自适应律,估计了系统状态方程中的未知参数,通过定义边界层误差及 Lyapunov 函数,证明了控制器的稳定性。通过 AMESim 和 Matlab 联合仿真的方法验证了所设计控制器的跟踪性能,仿真结果表明该控制策略具有较好的动态跟踪性能和较高的鲁棒性。

关键词:高平机;电液系统;K 观测器;动态面控制;联合仿真

本文引用格式:杨善平,尹强,羊柳. 基于 K 观测器的高平机电液系统动态面控制[J]. 兵器装备工程学报,2020,41(05):129 – 133.

Citation format: YANG Shanping, YIN Qiang, YANG Liu. Dynamic Surface Control for Elevating Equilibrator Electro-Hydraulic System Based on K Observer[J]. Journal of Ordnance Equipment Engineering,2020,41(05):129 – 133.

中图分类号:TP273 **文献标识码:**A **文章编号:**2096 – 2304(2020)05 – 0129 – 05

Dynamic Surface Control for Elevating Equilibrator Electro-Hydraulic System Based on K Observer

YANG Shanping, YIN Qiang, YANG Liu

(School of Mechanical Engineering, Nanjing University of Science and Technology, Nanjing 210094, China)

Abstract: A dynamic surface control algorithm based on K observer was proposed to solve the problem of strong nonlinearity and mismatch with disturbances in the elevating equilibrator electro-hydraulic system. The total uncertain parameters in real time of the state equation can be estimated by a designed adaptive law. The stability of the controller was proved by defining the error of boundary layer and Lyapunov function. The tracking performance of the designed controller was verified by the method of co-simulation using the software of AMESim and Matlab. The co-simulation results show the proposed control algorithm has higher tracking accuracy and better robustness.

Key words: elevating equilibrator; electro-hydraulic system; K observer; dynamic surface control; co-simulation

高平机是火炮武器系统的关键部件,其作用是驱动起落部分绕耳轴做俯仰运动至期望射角[1-2]。其位置控制精度的高低将直接影响到火力打击的准确性[3]。高平机以液压为驱动力,是一个典型的电液伺服系统。同时,高平机电液系统是一个典型的非线性非匹配系统。建立其精确的数学模型有一定的难度,而且使用 PID 等线性控制很难达到满意的效果。由于滑模控制算法具有设计简单、抗干扰能力较强的特点,使其在电液控制领域的得到广泛应用[4-6]。然而滑模控制不能解决非匹配问题[7],必须结合鲁棒控制、backstepping 理论等方法。文献[8]采用动态面自适应控制策略,有效解决了液压起竖系统非线性以及参数不确定性等问题,仿真结果表明动态面自适应控制具有较好的跟踪性能。受此启发,本文提出了一种基于 K 观测器的某火炮高平机电液系统动态面控制策略(KDSSMC),设计了自适应控制律实时估计状态方程中的未知参数,最后通过联合仿真的方法验证了所提出的控制策略具有良好的动态跟踪性能及较小的问题误差。

收稿日期:2019 – 06 – 25;**修回日期:**2019 – 07 – 11

基金项目:江苏省自然科学基金青年基金项目(BK20140773;BK20180481)

作者简介:杨善平(1992—),男,硕士研究生,主要从事火炮电液系统传动与控制研究,E-mail:18669990162@163.com。

1　高平机电液系统非线性模型

高平机电液系统结构如图 1 所示，其主要由高平机油缸、身管、耳轴、伺服阀、液压油源等组成。其中高平机油缸(后文简称油缸)为三腔并联式结构，A、B 两腔活塞面积相等，C 腔与蓄能器相连起到平衡部分重力的作用，由于其并非传统的两腔式油缸，内部结构相对复杂，很难使用 AMEsim 中的标准液压库进行建模。为使建模方便，将其作用力等效为对称缸作用力和一与油缸位移相关作用力的矢量“叠加”。控制器输出电压信号的大小，控制伺服阀阀口的开度，进而控制油缸的伸缩及速度。图 1 中，坐标原点 O 为油缸下铰点，O_1 为身管回转点，O_2 为油缸上铰点。l 为身管重心到身管回转点的距离，l_1 为零射角时高平机油缸的初始安装距，l_2 为耳轴距高平机油缸前支点的距离，l_3 为耳轴距离高平机油缸后支点的距离，θ 为身管当前角度。

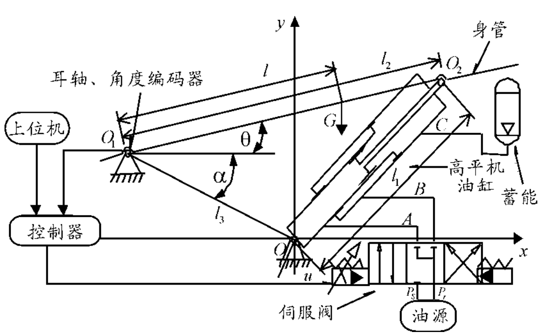


图 1　高平机电液系统结构示意图

$$Q_L = c_d w x_v \sqrt{\frac{1}{\rho}(P_s - P_L)} = K_x c_d w \sqrt{\frac{1}{\rho}(P_s - P_L)}\, u \tag{1}$$

式(1)中：c_d 为伺服阀阀口流量系数；w 为伺服阀节流窗口面积梯度；ρ 为油液密度；P_s 为系统供油压力；P_L 为负载压力；x_v 为伺服阀阀芯位移，由于伺服阀的固有频率远远大于系统的固有频率，故伺服阀的阀芯位移 x_v 与输入到伺服阀放大器的控制电压 u 可等效为比例环节，即 $x_v = K_x u$。

根据流量连续性方程，得：

$$\begin{cases} Q_1 = A\dfrac{dx}{dt} + \dfrac{V_1}{\beta_e}\dfrac{dP_L}{dt} + C_t P_L \\ Q_2 = -A\dfrac{dx}{dt} - \dfrac{V_2}{\beta_e}\dfrac{dP_L}{dt} - C_t P_L \end{cases} \tag{2}$$

式(2)中：A 为活塞有效作用面积；x 为油缸位移；C_t 为总泄露系数；$V_1 = V_{01} + Ax$ 为 A 腔(含与伺服阀相连接的管路部分)工作容积；$V_2 = V_{02} - Ax$ 为 B 腔(含与伺服阀相连接的管路部分)工作容积；β_e 为油液体积弹性模量。

设油缸总的容积为 V_t，即 $V_t = V_1 + V_2$，将式(2)中两式合并得

$$Q_L = A\frac{dx}{dt} + \frac{V_t}{4\beta_e}\frac{dP_L}{dt} + C_t P_L$$

由牛顿第二定律得：

$$2(P_L A + F_c) = m_t\frac{d^2x}{dt^2} + B\frac{dx}{dt} + Kx + F \tag{3}$$

式(3)中：m_t 为油缸等效质量；x 为活塞杆的位移；B 为活塞的粘性阻尼系数；K 为负载弹簧刚度，由于本系统中负载主要是惯性负载，所以设其为 0；F 为外负载。

由波义尔气体定律可推得

$$F_c = P_0 A_c\left(\frac{V_0}{V_0 + Ax}\right)^n \tag{4}$$

式(4)中：F_c 为 C 腔平衡力；P_0 为蓄能器初始气压；A_c 为 C 腔有效作用面积；V_0 为蓄能器初始容积；n 为气体多变指数，这里取 1.25。

$$Fl_F = J_{eq}\frac{d^2\theta}{dt^2} + Bl_F\frac{d\theta}{dt} + mgl\cos\theta + T_d \tag{5}$$

式(5)中：F 为负载力；J 为系统转动惯量；B 为油缸活塞和负载的粘性阻尼系数；T_d 为系统不平衡力矩即外部扰动和未建模特性的综合作用。

可以证明油缸作用力的力臂为

$$l_F = \frac{l_2 l_3 \sin(\alpha + \theta)}{\sqrt{l_2^2 + l_3^2 - 2l_2 l_3\cos(\alpha + \theta)}}$$

取状态变量 $\boldsymbol{\theta} = [\theta_1, \theta_2, \theta_3]^{\mathrm{T}} = \left[\theta, \dot{\theta}, \dfrac{P_L A}{m}\right]^{\mathrm{T}}$，系统的状态空间描述为

$$\begin{cases} \dot{\theta}_1 = \theta_2 \\ \dot{\theta}_2 = \beta_1\theta_3 - \beta_2\theta_2 - d(t) \\ \dot{\theta}_3 = -\beta_3\theta_3 - \beta_4\theta_2 + \beta_5 u \\ y = \theta_1 \end{cases} \tag{6}$$

式(6)中，

$$\beta_1 = \frac{ml_F}{J},\ \beta_2 = \frac{B}{J},$$

$$d(t) = \frac{T_d + mgl\cos\theta_1 - P_0 A_c l_F\left(\dfrac{V_0}{V_0 + Ax}\right)^n}{J}$$

$$\beta_3 = \frac{4C_t\beta_e}{V_t},\ \beta_4 = \frac{4l_F A^2\beta_e}{mV_t},\ \beta_5 = \frac{4A\beta_e K_x c_d w}{mV_t}\sqrt{\frac{1}{\rho}(P_s - P_L)}$$

2　基于 K 观测器的动态面控制

2.1　状态空间描述变换

为减少传感器的数量，将式(6)进行变换，使其第三个式子中不含 θ_2 和 θ_3，仅使用角度反馈便可实现对身管位置的控制。将 $d(t)$ 简化为 $\beta_6\cos\theta_1$，其中 β_6 为未知参数。

由式(6)可得

$$D^2 y = \beta_1\theta_3 - \beta_2\theta_2 - \beta_6\cos\theta_1 \tag{7}$$

式(7)中，D^n 表示 d^n/dt。于是

$$\theta_3 = \frac{1}{\beta_1}(D^2 y + \beta_2 Dy + \beta_6\cos y) \tag{8}$$

对式(8)求导得

$$\dot{\theta}_3 = \frac{1}{\beta_1}(D^3 y + \beta_2 D^2 y + \beta_6 D\cos y)$$

于是

$$D^3y+(\beta_2+\beta_3)D^2y+(\beta_2\beta_3+\beta_1\beta_4)Dy+\beta_6\cos y = -\beta_3\beta_6\cos y+\beta_1\beta_5 u \tag{9}$$

式(9)中,$a_1=\beta_2+\beta_3$,$a_2=\beta_2\beta_3+\beta_1\beta_4$,$a_3=\beta_3$,$a_4=-\beta_3\beta_6$,$d_0=\beta_1\beta_5$。

定义:$z_1=y$,$z_2=Dy$,$z_3=D^2y+a_1Dy+a_2y+a_3\cos y$,则系统的状态方程可转化为

$$\begin{cases}\dot z_1 = z_2\\ \dot z_2 = z_3-a_1z_2-a_2z_1-a_3\cos z_1\\ \dot z_3 = a_4\cos z_1+d_0u\end{cases}$$

利用z_1作为系统反馈量,并通过K观测器求出状态$\boldsymbol z=[z_1,z_2,z_3]^{\mathrm T}$,然后通过设计控制律$u$以使系统输出$z_1$跟踪$z_{1d}$,从而实现基于信号$\theta_1$的跟踪。

2.2 K观测器设计

参照非线性状态方程形式,将系统状态方程改写为

$$\begin{cases}\dot{\boldsymbol z}=\boldsymbol A\boldsymbol z+a_1\boldsymbol f_1+a_2\boldsymbol f_2+a_3\boldsymbol f_3+a_4\boldsymbol f_4+\boldsymbol d u\\ y=\boldsymbol c^{\mathrm T}\boldsymbol z\end{cases}$$

式中 $\boldsymbol z=\begin{bmatrix}z_1\\z_2\\z_3\end{bmatrix}$, $\boldsymbol A=\begin{bmatrix}0&1&0\\0&0&1\\0&0&0\end{bmatrix}$, $\boldsymbol f_1=\begin{bmatrix}0\\-z_2\\0\end{bmatrix}$, $\boldsymbol f_2=\begin{bmatrix}0\\-z_1\\0\end{bmatrix}$, $\boldsymbol f_3=\begin{bmatrix}0\\-\cos z_1\\0\end{bmatrix}$, $\boldsymbol f_4=\begin{bmatrix}0\\0\\\cos z_1\end{bmatrix}$,$\boldsymbol d=\begin{bmatrix}0\\0\\d_0\end{bmatrix}$, $\boldsymbol c=\begin{bmatrix}1\\0\\0\end{bmatrix}$。

设计如下K观测器

$$\begin{cases}\dot{\boldsymbol\alpha}=\boldsymbol A_0\boldsymbol\alpha+\boldsymbol k z_1\\ \dot{\boldsymbol\delta}_1=\boldsymbol A_0\boldsymbol\delta_1+\boldsymbol f_1\\ \dot{\boldsymbol\delta}_2=\boldsymbol A_0\boldsymbol\delta_2+\boldsymbol f_2\\ \dot{\boldsymbol\delta}_3=\boldsymbol A_0\boldsymbol\delta_3+\boldsymbol f_3\\ \dot{\boldsymbol\delta}_4=\boldsymbol A_0\boldsymbol\delta_4+\boldsymbol f_4\\ \dot{\boldsymbol v}=\boldsymbol A_0\boldsymbol v+\boldsymbol e_3u\end{cases} \tag{10}$$

式(10)中,$\boldsymbol\alpha,\boldsymbol\delta_1,\boldsymbol\delta_2,\boldsymbol\delta_3,\boldsymbol\delta_4,\boldsymbol v$均为观测器状态向量,$\boldsymbol k=[k_1\quad k_2\quad k_3]^{\mathrm T}$,$\boldsymbol e_3=[0\quad 0\quad 1]^{\mathrm T}$,$\boldsymbol v=[v_1\quad v_2\quad v_3]^{\mathrm T}$。

由于

$$\boldsymbol A_0=\boldsymbol A-\boldsymbol k c^{\mathrm T}=\begin{bmatrix}0&1&0\\0&0&1\\0&0&0\end{bmatrix}-\begin{bmatrix}k_1\\k_2\\k_3\end{bmatrix}[1\ 0\ 0]=\begin{bmatrix}-k_1&1&0\\-k_2&0&1\\-k_3&0&0\end{bmatrix}$$

由于$\boldsymbol A_0$满足Hurwitz,求其特征值,令$|\lambda\boldsymbol I-\boldsymbol A_0|=0$得

$$\lambda^3+k_1\lambda^2+k_2\lambda+k_3=0$$

取极点为$-a$,则$(\lambda+a)^3=0$,于是$k_1=3a$,$k_2=3a^2$,$k_3=a^3$。

于是

$$\boldsymbol A_0\boldsymbol v+\boldsymbol e_3u=\begin{bmatrix}-k_1v_1+v_2\\-k_2v_1+v_2\\-k_3v_1+u\end{bmatrix}$$

由此得K观测器状态估计量

$$\hat{\boldsymbol z}=\boldsymbol\alpha+\boldsymbol a_1\boldsymbol\delta_1+\boldsymbol a_2\boldsymbol\delta_2+\boldsymbol a_3\boldsymbol\delta_3+\boldsymbol a_4\boldsymbol\delta_4+d_0\boldsymbol v$$

取K观测器的估计误差为$\tilde{\boldsymbol z}=\boldsymbol z-\hat{\boldsymbol z}$,由于

$$\begin{aligned}\dot{\hat z}&=\boldsymbol A_0\alpha+kz_1+a_1(\boldsymbol A_0\boldsymbol\delta_1+\boldsymbol f_1)+a_2(\boldsymbol A_0\boldsymbol\delta_2+\boldsymbol f_2)+\\&a_3(\boldsymbol A_0\boldsymbol\delta_3+\boldsymbol f_3)+a_4(\boldsymbol A_0\boldsymbol\delta_4+\boldsymbol f_4)+d_0(\boldsymbol A_0\boldsymbol v+\boldsymbol e_3u)=\\&\boldsymbol A_0\hat{\boldsymbol z}+\boldsymbol k z_1+a_1\boldsymbol f_1+a_2\boldsymbol f_2+a_3\boldsymbol f_3+a_4\boldsymbol f_4+d_0\boldsymbol e_3u\end{aligned}$$

由于$\boldsymbol b u=d_0\boldsymbol e_3u$,$\boldsymbol k c^{\mathrm T}z=\boldsymbol k y=\boldsymbol k z_1$,于是

$$\begin{aligned}\dot{\tilde z}&=\dot z-\dot{\hat z}=\boldsymbol A\boldsymbol z+a_1\boldsymbol f_1+a_2\boldsymbol f_2+a_3\boldsymbol f_3+a_4\boldsymbol f_4+\boldsymbol d u-\\&(\boldsymbol A_0\dot z+kz_1+a_1f_1+a_2f_2+a_3f_3+a_4f_4+d_0\boldsymbol e_3u)=\\&(\boldsymbol A_0+kc^{\mathrm T})z+du-(\boldsymbol A_0\dot z+\boldsymbol k z_1+d_0\boldsymbol e_3u)=\\&\boldsymbol A_0(z-\dot z)=\boldsymbol A_0\tilde z\end{aligned}$$

2.3 控制器设计

根据K观测器重构系统的未知状态,实现对火炮身管的角度位置跟踪,并避免微分爆炸现象,采用一阶低通滤波器计算虚拟控制的导数,可以简化控制器的设计,并有效减少控制器的求解时间。

第1步,定义系统第一个误差子系统,

$$e_1=z_1-z_{1d} \tag{11}$$

式(11)中:z_1为实际角度;z_{1d}为期望角度。对e_1求导得

$$\begin{aligned}\dot e_1&=z_2-\dot z_{1d}=\alpha_2+a_1\delta_{12}+a_2\delta_{22}+a_3\delta_{32}+\\&a_4\delta_{42}+d_0v_2+\tilde z_2-\dot z_{1d}=\\&d_0\Big(v_2+\frac{a_1}{d_0}\delta_{12}+\frac{a_2}{d_0}\delta_{22}+\frac{a_3}{d_0}\delta_{32}+\\&\frac{a_4}{d_0}\delta_{42}+\frac{1}{d_0}(\alpha_2-\dot z_{1d}+\tilde z_2)\Big)\end{aligned}$$

定义

$$\begin{aligned}\boldsymbol\zeta&=[\delta_{12}\quad\delta_{22}\quad\delta_{32}\quad\delta_{42}\quad l_1e_1+\alpha_2-\dot z_{1d}]^{\mathrm T}\\ \boldsymbol\gamma&=[\gamma_1\quad\gamma_2\quad\gamma_3\quad\gamma_4\quad\gamma_5]^{\mathrm T}=\\&\left[\frac{a_1}{d_0}\quad\frac{a_2}{d_0}\quad\frac{a_3}{d_0}\quad\frac{a_4}{d_0}\quad\frac{1}{d_0}\right]^{\mathrm T}\end{aligned} \tag{12}$$

式(12)中,l_1为大于零的常数。

设计虚拟控制

$$\bar v_2=-\hat{\boldsymbol\gamma}^{\mathrm T}\boldsymbol\zeta \tag{13}$$

式(13),$\hat{\boldsymbol\gamma}=[\hat\gamma_1\quad\hat\gamma_2\quad\hat\gamma_3\quad\hat\gamma_4\quad\hat\gamma_5]^{\mathrm T}$为$\boldsymbol\gamma$的估计值。

取参数估计值的自适应律为

$$\dot{\hat{\boldsymbol\gamma}}=\boldsymbol Q\boldsymbol\zeta e_1-\boldsymbol Q\eta\hat{\boldsymbol\gamma} \tag{14}$$

式(14)中:$\boldsymbol Q$为正定对称矩阵;η为大于零的常数。

取v_{2d}为$\bar v_2$的低通滤波器$\dfrac{1}{\tau_2s+1}$的输出,并满足

$$\begin{cases}\tau_2\dot v_{2d}+v_{2d}=\bar v_2\\ v_{2d}(0)=\bar v_2(0)\end{cases} \tag{15}$$

第2步,定义第2个误差子系统:

$$e_2=v_2-v_{2d} \tag{16}$$

对式(16)求导得:

$$\dot e_2=-k_2v_1+v_3-\dot v_{2d}$$

设计虚拟控制

$$\bar v_3=-l_2e_2+k_2v_1+\dot v_{2d} \tag{17}$$

式(17)中,l_2为大于零的常数。取v_{3d}为$\bar v_3$的低通滤波器$\dfrac{1}{\tau_2s+1}$的输出,并满足:

$$\begin{cases}\tau_3\dot v_{3d}+v_{3d}=\bar v_3\\ v_{3d}(0)=\bar v_3(0)\end{cases} \tag{18}$$

第3步,定义第3个误差子系统:

$$e_3=v_3-v_{3d} \tag{19}$$

对式(19)求导得：

$$\dot{e}_3 = -k_3 v_1 + u - \dot{\bar{v}}_{3d}$$

于是，最终得到控制律：

$$u = -l_3 e_3 + k_3 v_1 + \dot{v}_{3d} \tag{20}$$

式(20)中，l_3 为大于零的常数。

2.4 稳定性证明

首先定义边界层误差

$$\begin{cases} x_2 = v_{2d} - \bar{v}_2 \\ x_3 = v_{3d} - \bar{v}_3 \end{cases} \tag{21}$$

由式(15)、式(18)和式(21)可得：

$$\begin{cases} \dot{v}_{2d} = -\dfrac{x_2}{\tau_2} \\ \dot{v}_{3d} = -\dfrac{x_3}{\tau_3} \end{cases}$$

然后定义参数估计误差：

$$\tilde{\gamma} = \hat{\gamma} - \gamma$$

由于 $v_i = e_i + z_i + \bar{v}_i\ (i = 2,3)$，所以系统误差的导数可以转化为

$$\dot{e}_1 = d_0 e_2 + d_0 x_2 - d_0 \tilde{\boldsymbol{\gamma}}^{\mathrm{T}} \boldsymbol{\zeta} - l_1 e_1 + \tilde{z}_2$$

$$\dot{e}_2 = -k_2 v_1 + e_3 + x_3 + \bar{v}_3 - \dot{v}_{2d} = e_3 + x_3 - l_2 e_2$$

$$\dot{e}_3 = -l_3 e_3$$

对边界层误差求导得：

$$\dot{x}_2 = -\frac{x_2}{\tau_2} - \dot{\bar{v}}_2 = -\frac{x_2}{\tau_2} + \dot{\hat{\boldsymbol{\gamma}}}^{\mathrm{T}} \boldsymbol{\zeta} + \hat{\boldsymbol{\gamma}}^{\mathrm{T}} \dot{\boldsymbol{\zeta}}$$

$$\dot{x}_3 = -\frac{x_3}{\tau_3} - \dot{\bar{v}}_3 = -\frac{x_3}{\tau_3} + l_2 e_2 - k_2 \dot{v}_1 + \frac{\dot{x}_2}{\tau_2}$$

存在连续非负函数 $B_i\ (i = 2,3)$ 满足

$$\begin{cases} \left| \dot{x}_2 + \dfrac{x_2}{\tau_2} \right| \leqslant B_2(e_1, e_2, x_2, \tilde{\gamma}, \tilde{z}, z_{1d}, \dot{z}_{1d}, \ddot{z}_{1d}) \\ \left| \dot{x}_3 + \dfrac{x_3}{\tau_3} \right| \leqslant B_3(e_1, e_2, e_3, x_2, x_3, \tilde{\gamma}, \tilde{z}, z_{1d}, \dot{z}_{1d}, \ddot{z}_{1d}) \end{cases} \tag{22}$$

由式(22)可推得：

$$x_i \dot{x}_i \leqslant -\frac{x_i^2}{\tau_i} + B_i |x_i|,\ i = 2,3$$

定义 Lyapunov 函数

$$V = V_1 + V_2 + V_3 \tag{23}$$

式(23)中，$V_1 = \dfrac{1}{2}\sum_{i=1}^{3} e_i^2$，$V_2 = \dfrac{1}{2}\sum_{i=2}^{3} x_i^2$，$V_3 = \dfrac{1}{2} d_0 \tilde{\boldsymbol{\gamma}}^{\mathrm{T}} \boldsymbol{\zeta}^{-1} \tilde{\boldsymbol{\gamma}} + \tilde{z}^{\mathrm{T}} \boldsymbol{P} \tilde{z}$，且对称阵 $\boldsymbol{P}$ 为方程 $\boldsymbol{A}_0^{\mathrm{T}} \boldsymbol{P} + \boldsymbol{P}\boldsymbol{A}_0 = -\boldsymbol{I}$ 的正定解。

对 V_1、V_2、V_3 分别求导，并由杨氏不等式和不等式 $2\tilde{\boldsymbol{\gamma}}^T \hat{\boldsymbol{\gamma}} \geqslant \|\tilde{\boldsymbol{\gamma}}\|^2 - \|\boldsymbol{\gamma}\|^2$ 得：

$$\begin{aligned} \dot{V} \leqslant\ & (d_0 + \frac{1}{2} - l_1) e_1^2 + (1 + \frac{d_0}{2} - l_2) e_2^2 + \\ & (\frac{1}{2} - l_3) e_3^2 + (\frac{d_0}{2} + \frac{B_2^2}{2} - \frac{1}{\tau_2}) x_2^2 + \\ & (\frac{1}{2} + \frac{B_3^2}{2} - \frac{1}{\tau_3}) x_3^2 - \frac{\eta d_0 \tilde{\boldsymbol{\gamma}}^{\mathrm{T}} \boldsymbol{Q}^{-1} \hat{\boldsymbol{\gamma}}}{2\lambda_{\max}(\boldsymbol{Q}^{-1})} + \\ & \frac{\eta d_0}{2} \|\boldsymbol{\gamma}\|^2 + 1 + E(\tilde{z}) \end{aligned} \tag{24}$$

式(24)中，λ 为 $\boldsymbol{Q}^{-1}$ 的特征值，$E(\tilde{z}) = \dfrac{\tilde{z}_2^2}{2} - \tilde{z}^{\mathrm{T}} \tilde{z}$。假设在 $V \leqslant p$ 时 B_i 的最大值为 M_i。选取设计参数 $l_1 \geqslant d_M + \dfrac{1}{2} + \sigma l_2 \geqslant d_M + 1 + \sigma$，$l_1 \geqslant \dfrac{1}{2} + \varepsilon$，$\dfrac{1}{\tau_2} \geqslant \dfrac{d_M}{2} + \dfrac{M_2^2}{2} + \sigma$，$\dfrac{1}{\tau_3} \geqslant \dfrac{M_3^2}{2} + \dfrac{1}{2} + \sigma$，$\eta \geqslant 2\varepsilon \lambda_{\max}(\boldsymbol{Q}^{-1})$。

其中 σ 为正常数。故

$$\dot{V} \leqslant -2\sigma V + P + E(\tilde{z}) + \sum_{i=2}^{3} (\frac{B_i^2}{M_i^2} - 1) \frac{M_i^2}{2} \tag{25}$$

式(25)中，$P = 1 + \dfrac{\eta d_0}{2} \|\boldsymbol{\gamma}\|^2$。

由于 $\tilde{z}$ 按指数趋于零，得到 $E(\tilde{z}) \leqslant \varepsilon$ 因此在 $t \to \infty$，$\varepsilon \to 0$。于是

$$\dot{V} \leqslant -2\sigma V + P + \varepsilon$$

解之得

$$V \leqslant \frac{P}{2\sigma} + (V(0) - \frac{P - \sigma}{2\sigma}) e^{-2\sigma t}$$

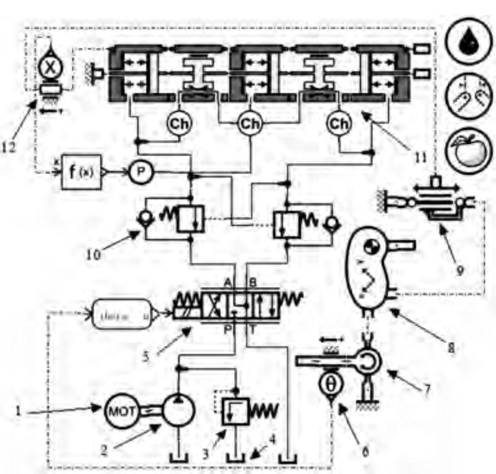
于是

$$\lim_{t \to \infty} V \leqslant \frac{P}{2\sigma}$$

故整个控制器是渐趋稳定的。

3 仿真分析与验证

根据高平机电液系统组成及工作原理，结合键合图理论，搭建了高平机电液系统 AMESim 模型，如图 2 所示。



1. 电机；2. 齿轮泵；3. 溢流阀；4. 油箱；5. 伺服阀；6. 角度传感器；7. 旋转铰；8. 三端口实体；9. 复合驱动铰；10. 双向平衡阀；11. 高平机油缸；12. 位移传感器

图 2 高平机电液系统 AMESim 模型示意图

使用 Matlab 中的 S-function 模块编写控制程序，并设计与 AMEsim 联合仿真的接口，经调试得到联合仿真参数 $\boldsymbol{k} = [k_1 \quad k_2 \quad k_3]^{\mathrm{T}} = [0.36 \quad 0.04 \quad 0.001]^{\mathrm{T}}$，$l_1 = 0.000\ 14$，$l_2 = 0.005$，$l_3 = 0.03$，$\tau_2 = \tau_3 = 0.01$，$\boldsymbol{Q} = \mathrm{diag}[0.000\ 01 \quad 0.78 \quad 2 \quad 0.51 \quad 0.000\ 078]$，$\boldsymbol{\eta} = 0.1$。最终得到联合仿真的结果分别如图 3 ~ 图 7 所示。

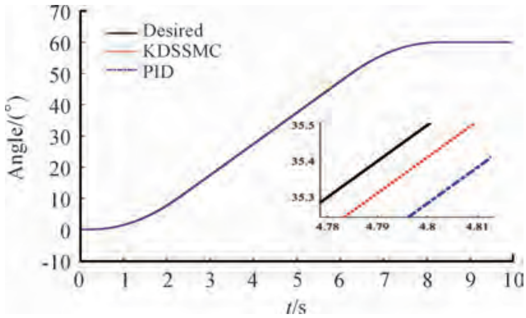


图 3 角度跟踪曲线

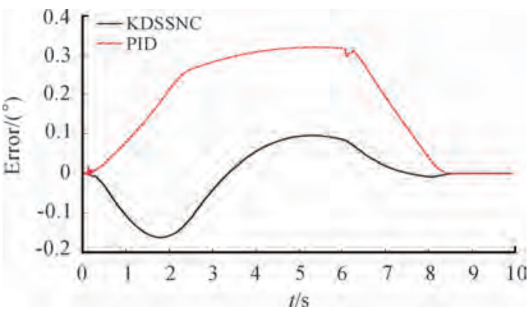


图 4 角度跟踪误差曲线

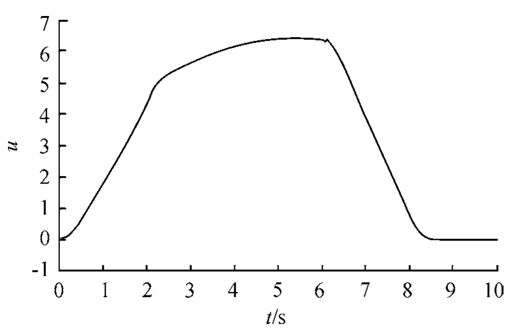


图 5 控制器输出

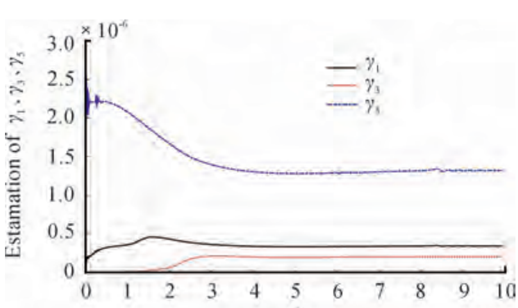


图 6 γ_1、γ_3 和 γ_5 的估计值曲线

由图 3 和图 4 可知:所设计控制器的最大动态跟踪误差约为 0.18°,最大稳态误差约为 0.03°,整个跟踪过程平稳,无明显冲击。与 PID 控制相比,最大动态跟踪误差下降约 0.18°,最大稳态误差下降约 0.05°。所设计的控制器仅使用角度传感器即可达到输出反馈控制的目的,而且引入滤波器有效解决了微分膨胀问题。由图 5 可知:控制器的输出信号曲线圆滑,无高频抖动。由图 6 和图 7 可知:所设计的自适应律可以根据系统外部扰动,实时调整未知参数值的大小,并且各未知参数的估计值均为有界的,这也证明了所设计控制器具有较高的鲁棒性。

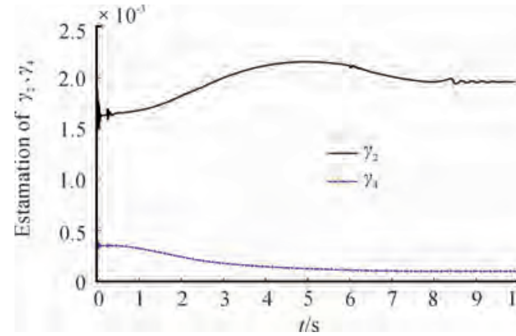


图 7 γ_2 和 γ_4 的估计值曲线

4 结论

1)建立了某火炮高平机电液系统的非线性数学模型,通过状态方程等效变换的方法,将系统状态方程等效转化,仅使用角度传感器便可得到系统状态方程所有的状态变量。

2)针对火炮高平机电液系统存在非线性非匹配的特点提出了一种基于 K 观测器的动态面控制策略,引入反演方法有效解决了非匹配问题,通过所设计的自适应律估计出系统状态方程的未知参数,使用联合仿真的方法验证了所提出的控制策略具有较好的动态跟踪性能及较高的鲁棒性。

参考文献:

[1] 王力. 某武器随动系统负载模拟器多余力矩辨识与抑制技术研究[D]. 南京:南京理工大学,2014.

[2] 项军,陈机林,侯远龙. 基于 RBF + NTSMC 的舰载火箭炮随动系统控制研究[J]. 火炮发射与控制学报,2019(2):77 – 81.

[3] 陈传彬. 火炮高低机双阀电液伺服控制系统研究[D]. 哈尔滨:哈尔滨工业大学,2015.

[4] 刘金琨. 机器人控制系统的设计与 MATLAB 仿真先进设计方法[M]. 北京:清华大学出版社,2017.

[5] 谢郑,谢建,杜文正. 大型发射装置液压起竖系统的滑模控制研究[J]. 兵工学报,2015,36(4):674 – 680.

[6] 郑婉容,郑婷婷,张毛银. 直觉模糊熵改进的公理化定义和计算公式[J]. 重庆工商大学学报(自然科学版),2019,36(1):27 – 31.

[7] 李良,李锋. 基于自适应模糊滑模的大型液压起竖系统控制策略研究[J]. 兵工学报,2016,37(1):71 – 76.

[8] 谢建,李良,黄建招. 起竖系统建模及动态面自适应滑模控制[J]. 系统工程与电子技术,2014,36(2):75 – 79.

科学编辑 齐鸥 博士(陆军装甲兵学院士官学校讲师)
责任编辑 唐定国