电液复合调节作动器的精确线性化建模与控制

郎 燕 李运华

(北京航空航天大学 自动化科学与电气工程学院, 北京 100191)

摘 要: 针对经典泵控电液作动器固有频率低的问题,对原系统增加了一个新设计的总压力控制阀,它可保证作动筒两个工作腔的压力之和始终为一常数并使两腔压力可控,从而使泵控系统达到和阀控系统相当的固有频率.这种改进型作动器称为 EHCA(Electro-Hydraulic Compound regulating integrated Actuator).针对存在的相乘非线性控制问题,通过分析 EHCA 和总压力控制阀的工作原理,设计了基于精确线性化方法的滑模控制器,并分析了电机转速和变量泵排量在不同工况下的控制量大小配合问题.分析和仿真证明,该设计思想是有效实现高效率、节能和快响应的电液组合作动器方案.

关 键 词: 精确线性化; 电液作动器; 非线性系统; 滑模控制; 总压力控制阀; 电液复合调节组合作动器

中图分类号: TH 137

文献标识码: A **文 章 编 号**: 1001-5965(2009)09-1062-05

Exact linearization based modeling and control for electro-hydraulic compound regulating integrated actuator

Lang Yan Li Yunhua

(School of Automation Science and Electrical Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100191, China)

Abstract: A new designed total pressure control valve, which can keep the sum of high and low pressures of actuating cylinder be a constant and also make the two chambers pressures be controllable, was added to the classic pump controlled electro-hydraulic actuator (EHA) to enhance its natural frequency. This improved EHA is called electro-hydraulic compound regulating integrated actuator (EHCA) which has the same response frequency with valve controlled actuator. For the multiplicative nonlinear problem of system flow, the principle of EHCA and the total pressure control valve operation scheme was analyzed, and exact linearization based modeling and controller design were implemented. The best matching of motor speed and pump displacement regulation in the different working conditions was discussed. Analysis and simulation show that, exact linearization based on EHCA sliding mode control concept achieves the control purposes of high efficiency, energy saving and faster response for dual-variable compound regulation.

Key words: exact linearization; electro-hydraulic actuators (EHA); nonlinear systems; sliding mode control; total pressure control valve; electro-hydraulic compound regulating integrated actuator (EHCA)

现代多平台战场环境对战斗机的机动性能、生存能力、能量利用和信息综合等方面提出了越来越高的要求,也对作为飞控和机载机电系统关键部件之一的舵面作动器提出了更高要求.目前 EHA(Electro-Hydraulic Actuator)主要有 3 种工作方式:①排量恒定、转速调节;②转速恒定、排量

收稿日期: 2008-09-19

基金项目: 航空科学基金资助项目(04E51018)

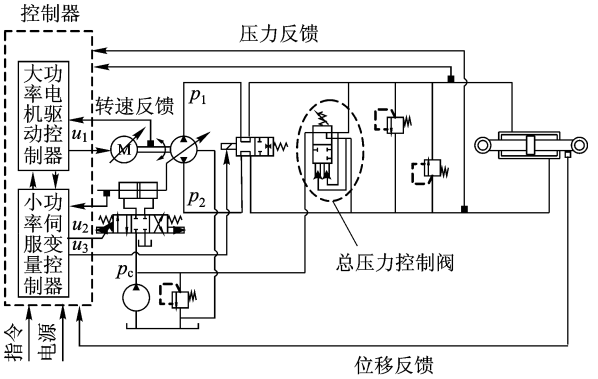
作者简介: 郎 燕(1981—),女,山西太原人,博士生,yan.lang@126.com.

调节;③排量和转速同时调节.相比而言,第③种双变量模式不仅可以提高系统动态响应,还能使电机功率与系统要求完全匹配,并提高系统的刚度.但相比传统阀控作动器,EHA 是泵控系统,其作动筒只有高压腔可控,其固有频率比阀控作动器要低.如果基于双变量模式的电液组合作动器能具有与液压阀控作动器相同的固有频率,那么就能设计出集高效率和快响应于一体的新一代舵面作动器.基于此出发点,本文将讨论一种改进的电液作动器 EHCA(Electro-Hydraulic Compound regulating integrated Actuator),及相应的精确线性化建模的滑模控制器设计.

1　EHCA 的设计特点

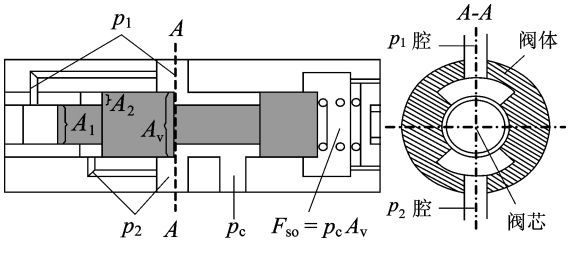
1.1　EHCA 的特点

图 1 为 EHCA 原理图.EHCA 的最大特点是设有总压力控制阀.总压力控制阀将系统两腔压力之和 p_1+p_2 作为被控量,保证 $p_1+p_2=2p_c$,即实现了作动筒两腔均为控制腔,可达到与阀控舵机相当的固有频率[1].高压补油泵为系统提供基准压力,且其压力的提高使排量控制的响应速度也提高.考虑到目前机载液压系统最高工作压力多在 35 MPa 以下,故 p_c 设为 18 MPa.



u_1—电机控制电压; u_2—伺服阀控制电压; u_3—安全阀切换信号;
p_1—高压腔压力; p_2—低压腔压力; p_c—补油泵出口压力; M—电机.

图 1　EHCA 的系统原理图



A_1—p_1 的作用面积; A_2—p_2 的作用面积;
A_v—阀芯最大圆面积; F_{so}—弹簧预紧力.

图 2　总压力控制阀的结构图

1.2　总压力控制阀的结构特点

如图 2 所示,总压力控制阀主要由阀体、阀芯、调压装置等组成,其中阀芯为圆柱滑阀.系统的 p_1,p_2 以及 p_c 分别通过阀套中特定的油路作用到阀芯上.与一般伺服阀不同的是,总压力控制阀中系统高、低压腔油液的进出油口为非全周开口,目的是避免二者混合在一起,而补油泵油液的入口为全周开口.

分析可知,稳态时阀芯的力平衡方程为 $p_1A_1+p_2A_2=p_cA_v$.当 $A_1+A_2=A_v$,$A_1=A_2=A_v/2$ 时,即可实现 $p_1+p_2=p_c$.

1.3　总压力控制阀的工作原理

总压力控制阀本身是一个具有自动调节功能的压力闭环控制系统,它通过比较 p_1+p_2 与 F_{so} 之间的差值来调节阀芯的开度,从而保证 $p_1+p_2=2p_c$ 的实现.设阀芯的平衡位置如图 2 所示,阀芯和阀套之间有一个预开口.由于 $p_2<p_c<p_1$,补油泵的输出流量和高压腔中的油液都会经过预开口被节流,而后进入阀腔中.这两部分节流流量就是阀芯产生稳态液动力的原因.作用在阀芯上的力平衡方程可写为 $p_1A_1+p_2A_2+F_s=K_s(x_0+x_s)$,其中,$x_s$ 为阀芯位移,K_s 为弹簧刚度,x_0 为弹簧预压缩量,F_s 为稳态液动力.当阀芯开度远远小于 x_0 且 $F_{so}=K_sx_0=p_cA_v$ 时,可得阀芯受力关系式 $p_1A_1+p_2A_2+F_s=p_cA_v$.

当外负载力增大使得 p_1 随之增大时,p_1+p_2 作用在阀芯左侧面积上的合力 $p_1A_1+p_2A_2$ 就增大了,故使得阀芯开口减小.由于 F_s 的大小与阀芯开度成正比,因此 F_s 也随之减小,这将使得阀芯将向左运动,最终回到平衡位置;同理,当外负载减小时,阀芯右移将恢复到平衡位置.可见,通过改变阀芯开口使得 F_s 变化是实现 $p_1A_1+p_2A_2+F_s=p_cA_v$ 的关键.实际上,由于 F_s 远远小于 $p_1A_1+p_2A_2$,即认为总压力控制阀的控制目标是 $p_1A_1+p_2A_2=p_cA_v$.

2　EHCA 的建模

2.1　双绕组无刷直流电机的建模

飞机上的一些关键的飞行控制面,驱动电机内部及其功率电路都必须设计成容错结构.文献[2]中介绍了双绕组无刷直流电机的原理结构及模型,这里直接引用其建模结果如下:

$$\left.\begin{aligned}\frac{\mathrm{d}i_{s1}}{\mathrm{d}t}&=\frac{1}{5.6L_m}(u_{s1}-15R_mi_{s1}+13R_mi_{s2}-e_1)\\\frac{\mathrm{d}i_{s2}}{\mathrm{d}t}&=\frac{1}{5.6L_m}(u_{s2}-15R_mi_{s2}+13R_mi_{s1}-e_2)\end{aligned}\right\}\tag{1}$$

其中，u_{s1} 和 u_{s2} 分别为两套绕组控制电压；e_1 和 e_2 分别为两套绕组中任两相产生的感应电动势之和；i_{s1} 和 i_{s2} 分别为两套绕组的相电流；R_m 和 L_m 分别为相绕组的电阻和电感. 其机械特性为

$$\frac{d\omega_m}{dt}=\frac{1}{J_m}[K_m(i_{s1}+i_{s2})-B_m\omega_m-K_p\gamma_p p_L] \tag{2}$$

其中，K_p 为泵的排量系数；γ_p 为斜盘倾角；B_m 为电机阻尼系数；p_L 为负载压力；K_m 为总反电势系数；J_m 为电机的等效转动惯量；ω_m 为转速.

2.2 液压环节的建模

变量泵的变量机构模型为

$$\frac{d\gamma_p}{dt}=\frac{1}{T_p}(-\gamma_p+K_r x_v) \tag{3}$$

$$\frac{dx_v}{dt}=\frac{1}{T_v}(-x_v+K_v u_p) \tag{4}$$

其中，x_v 为变量机构中伺服阀的阀芯位移；u_p 为伺服变量机构控制电压；T_p 为斜盘倾角调节时间常数；T_v 为变量机构控制阀调节时间常数；K_r 为斜盘倾角调节系数；K_v 为变量机构控制阀电压调节系数.

作动筒活塞的受力模型为

$$\frac{dx_c}{dt}=\frac{1}{A_c}(K_p\gamma_p\omega_m-K_{tp}p_L) \tag{5}$$

其中，A_c 为作动筒活塞端面积；x_c 为活塞位移；K_{tp} 为 EHCA 总泄漏系数；F_L 为空气动力负载.

2.3 EHCA 总体的建模

为适当简化 EHCA 的模型阶数，这里忽略液压油的可压缩性，且认为舵面质量 m_c 较小. 令 $x_1=i_{s1}+i_{s2}$，$x_2=\omega_m$，$x_3=\gamma_p$，$x_4=x_v$，$x_5=x_c$. 设 $u_{s1}=u_{s2}=u_s$. EHCA 的模型为

$$\left.\begin{aligned}
\dot{x}_1&=\frac{1}{2.8L_m}(u_s-R_m x_1-K_m x_2)\\
\dot{x}_2&=\frac{K_m}{J_m}x_1-\frac{B_m}{J_m}x_2-\frac{K_p^2B_c x_2x_3^2}{A_c^2J_m+K_{tp}B_cJ_m}+\\
&\quad\left(\frac{K_pB_cK_{tp}F_L}{A_c^3J_m+K_{tp}A_cB_cJ_m}-\frac{K_pF_L}{A_cJ_m}\right)x_3+\\
&\quad\left(\frac{K_cK_pB_cK_{tp}}{A_c^3J_m+K_{tp}A_cB_cJ_m}-\frac{K_pK_c}{A_cJ_m}\right)x_3x_5\\
\dot{x}_3&=\frac{1}{T_p}(-x_3+K_r x_4)\\
\dot{x}_4&=\frac{1}{T_v}(-x_4+K_v u_p)\\
\dot{x}_5&=\frac{K_pA_c x_2x_3-K_cK_{tp}x_5-K_{tp}F_L}{A_c^2+K_{tp}B_c}
\end{aligned}\right\} \tag{6}$$

其中，B_c 为作动筒的粘性阻尼系数. 由式(6)可知，EHCA 模型是具有两个控制输入 u_s 和 u_p 以及相乘非线性的仿射非线性系统.

3 基于精确线性化的滑模控制器

3.1 EHCA 控制系统的特点

由于 EHCA 中存在电气和液压通道之间的交联和相乘非线性问题，且其工作点范围变化很大，若在指定状态的小范围内，将非线性状态方程进行线性化，将产生较大的误差. 而基于微分几何的精确线性化方法，通过适当的非线性状态和反馈变换，可实现非线性模型的输入输出精确线性化，将非线性系统综合问题转化为线性系统的综合问题[3]. 本节将利用精确线性化方法为 EHCA 模型设计控制器，通过仿真分析来验证其非线性解耦和协调控制能力.

3.2 EHCA 的控制目标[3-4]

通过控制希望 EHCA 达到以下目标：①当施加一个期望位置指令，调节电机转速和泵的排量使 EHCA 对期望指令有满意的阶跃响应；②若在作动筒未到达期望位置时负载发生突变，这时需维持电机转速不变，通过调节泵的斜盘倾角使作动筒两腔压差尽快满足负载需要；③当系统需在一段时间内维持在期望位置上，而空气负载有突变时，负载转矩的变化会引起电机转速的变化，需对电机转速加以主动控制；④通过匹配泵的排量和电机转速维持一定的系统流量，可使得电机的转矩最小，以使电机的发热量最小；⑤在不同负载下，调节泵的排量使电机工作在合适的速度与转矩下，满足负载每一点的功率需求.

3.3 EHCA 模型的精确线性化

要实现上述控制目标，须对相互关联的 EHCA 的双变量非线性复合控制进行解耦[3,5-6]. 两输入两输出仿射非线性系统的标准形式为

$$\begin{cases}\dot{\boldsymbol{x}}=\boldsymbol{f}(\boldsymbol{x})+\boldsymbol{g}_1(\boldsymbol{x})u_1+\boldsymbol{g}_2(\boldsymbol{x})u_2\\ \boldsymbol{y}=\boldsymbol{H}(\boldsymbol{x})\end{cases}$$

其中，$\boldsymbol{f}(\boldsymbol{x})$，$\boldsymbol{g}_1(\boldsymbol{x})$，$\boldsymbol{g}_2(\boldsymbol{x})$ 为充分光滑的向量函数；输入和输出分别为

$$\boldsymbol{u}=[u_1\quad u_2]^{\mathrm{T}}=[u_s\quad u_p]^{\mathrm{T}}$$

$$\boldsymbol{y}=[y_1\quad y_2]^{\mathrm{T}}=[h_1(\boldsymbol{x})\quad h_2(\boldsymbol{x})]^{\mathrm{T}}=[x_2\quad x_5]^{\mathrm{T}}$$

验证可得式(6)描述的系统的总相对阶为 5，正好等于状态变量的个数，故式(6)可被完全线性化. 令 ω_{md} 和 x_{cd} 分别为驱动电机期望转速和作动筒活塞期望位移. 选择非线性坐标变换

$$\boldsymbol{Z}=[z_1\quad z_2\quad z_3\quad z_4\quad z_5]^{\mathrm{T}}=\boldsymbol{\Phi}(\boldsymbol{x})$$

$$z_1=h_1(\boldsymbol{x})=x_2\qquad z_2=L_fh_1(\boldsymbol{x})=\dot{x}_2$$

$$z_3=h_2(\boldsymbol{x})=x_5\qquad z_4=L_fh_2(\boldsymbol{x})=\dot{x}_5$$

$$z_5=L_f^2h_2(\boldsymbol{x})=\ddot{x}_5$$

其中,$L_f^n h_i(\boldsymbol{x})$为 $h_i(\boldsymbol{x})$在 $\boldsymbol{f}(\boldsymbol{x})$方向上的 n 阶李导数.经计算知,对于一切非零的 $\boldsymbol{x}$,雅可比矩阵 $\boldsymbol{J}_{\boldsymbol{\Phi}}=\partial\boldsymbol{\Phi}/\partial\boldsymbol{x}$ 非奇异,故所选映射为局部微分同坯,是合格的坐标变换,可得如下两个可控标准型:

$$\left.\begin{aligned}\dot{\boldsymbol{Z}}_1&=\boldsymbol{A}_1\boldsymbol{Z}_1+\boldsymbol{B}_1 v_1\\ y_1&=z_1=x_2\end{aligned}\right\}\tag{7a}$$

$$\left.\begin{aligned}\dot{\boldsymbol{Z}}_2&=\boldsymbol{A}_2\boldsymbol{Z}_2+\boldsymbol{B}_2 v_2\\ y_2&=z_3=x_5\end{aligned}\right\}\tag{7b}$$

其中,$\boldsymbol{Z}_1=[z_1,z_2]^{\mathrm{T}}$,$\boldsymbol{Z}_2=[z_3,z_4,z_5]^{\mathrm{T}}$,$\boldsymbol{A}_1=\begin{bmatrix}0&1\\0&0\end{bmatrix}$,$\boldsymbol{A}_2=\begin{bmatrix}0&1&0\\0&0&1\\0&0&0\end{bmatrix}$,$\boldsymbol{B}_1=\begin{bmatrix}0\\1\end{bmatrix}$,$\boldsymbol{B}_2=\begin{bmatrix}0\\0\\1\end{bmatrix}$,$v_1$ 和 v_2 分别为控制输入,其表达式为

$$v_1=L_f^2h_1(\boldsymbol{x})+L_{\boldsymbol{g}_1}L_fh_1(\boldsymbol{x})u_{\mathrm{s}}+L_{\boldsymbol{g}_2}L_fh_1(\boldsymbol{x})u_{\mathrm{p}}\tag{8}$$

$$v_2=L_f^3h_2(\boldsymbol{x})+L_{\boldsymbol{g}_1}L_f^2h_2(\boldsymbol{x})u_{\mathrm{s}}+L_{\boldsymbol{g}_2}L_f^2h_2(\boldsymbol{x})u_{\mathrm{p}}\tag{9}$$

可见 EHCA 的控制量 u_{s} 和 u_{p} 可以通过经坐标变换后的线性系统的控制量 v_1 和 v_2 求得.

3.4　EHCA 的滑模控制器设计

精确线性化建模也存在局限性:①只适用于数学模型精确且非线性是光滑的系统;②存在参数不确定性或未建模动态特性时,系统的鲁棒性没有保障.因此通过设计滑模控制器来得到 v_1 和 v_2.定义 EHCA 系统的速度和位移跟踪误差分别为 $e_\omega=x_2-\omega_{\mathrm{md}}$ 和 $e_x=x_5-x_{\mathrm{cd}}$,对应滑模面分别为

$$s_1=c_1(x_2-\omega_{\mathrm{md}})+L_fh_1(\boldsymbol{x})-\dot{\omega}_{\mathrm{md}}\tag{10}$$

$$s_2=c_2(x_5-x_{\mathrm{cd}})+c_3[L_fh_2(\boldsymbol{x})-\dot{x}_{\mathrm{cd}}]+L_f^2h_2(\boldsymbol{x})-\ddot{x}_{\mathrm{cd}}\tag{11}$$

其中,c_1,c_2,c_3 均为正常数.电机调速子系统和作动筒位移控制子系统的滑模趋近律和滑模控制律可分别表示为

$$\left.\begin{aligned}\dot{s}_1&=c_1\dot{e}_\omega+(L_f^2h_1(\boldsymbol{x})-\ddot{\omega}_{\mathrm{md}})=\\&\quad-\rho_1\operatorname{sgn}(s_1)-k_1s_1\\ \dot{s}_2&=c_2\dot{e}_x+c_3\ddot{e}_x+(L_f^3h_2(\boldsymbol{x})-\dddot{x}_{\mathrm{cd}})=\\&\quad-\rho_2\operatorname{sgn}(s_2)-k_2s_2\end{aligned}\right\}\tag{12}$$

$$\left.\begin{aligned}\xi_1(x_2)&=\ddot{y}_1=L_f^2h_1(\boldsymbol{x})=\ddot{\omega}_{\mathrm{md}}-c_1\dot{e}_\omega\\ \xi_2(x_5)&=\dddot{y}_2=L_f^3h_2(\boldsymbol{x})=\dddot{x}_{\mathrm{cd}}-c_3\ddot{e}_x-c_2\dot{e}_x\end{aligned}\right\}\tag{13}$$

其中,ρ_1,ρ_2,k_1,k_2 均为正常数.故可得式(7)中两个线性子系统的闭环跟踪误差分别为

$$\ddot{e}_\omega+c_1\dot{e}_\omega=0\tag{14a}$$

$$\dddot{e}_x+c_3\ddot{e}_x+c_2\dot{e}_x=0\tag{14b}$$

由式(12)、式(13)可得 v_1 和 v_2 分别为

$$v_1=-\rho_1\operatorname{sgn}(s_1)-k_1s_1+\ddot{\omega}_{\mathrm{md}}-c_1[L_fh_1(\boldsymbol{x})-\dot{\omega}_{\mathrm{md}}]\tag{15}$$

$$v_2=-\rho_2\operatorname{sgn}(s_2)-k_2s_2+\dddot{x}_{\mathrm{cd}}-c_3[L_f^2h_2(\boldsymbol{x})-\ddot{x}_{\mathrm{cd}}]-c_2[L_fh_2(\boldsymbol{x})-\dot{x}_{\mathrm{cd}}]\tag{16}$$

若定义式(7)的两个 Lyapunov 函数分别为 $V_1=s_1^2/2$ 和 $V_2=s_2^2/2$,则可证得 $\dot{V}_1\leqslant 0$ 且 $\dot{V}_2\leqslant 0$.故上面设计的滑模控制律是稳定的.

4　EHCA 的控制系统仿真

为了验证上述基于精确线性化理论的滑模控制器设计的有效性,本文在 MATLAB/simulink 中建立 EHCA 的微分方程及控制器模型.仿真中所需的一些模型参数如表 1 所示.

表 1　仿真中相关参数值

参　数	数　值
R_{m}/Ω	0.6
$J_{\mathrm{m}}/(\mathrm{kg}\cdot\mathrm{m}^2)$	0.0016
$L_{\mathrm{m}}/\mathrm{H}$	0.00085
$A_{\mathrm{c}}/\mathrm{m}^2$	0.0018
$K_{\mathrm{c}}/(\mathrm{N}\cdot\mathrm{m}^{-1})$	5.3×10^{-7}
$T_{\mathrm{p}}/\mathrm{s}$	0.1
$T_{\mathrm{v}}/\mathrm{s}$	0.01
$K_{\mathrm{m}}/(\mathrm{V}\cdot\mathrm{s}\cdot\mathrm{rad}^{-1})$	2.72
$B_{\mathrm{m}}/(\mathrm{N}\cdot\mathrm{m}\cdot\mathrm{s}\cdot\mathrm{rad}^{-1})$	0.0006
$B_{\mathrm{c}}/(\mathrm{N}\cdot\mathrm{m}\cdot\mathrm{s}\cdot\mathrm{rad}^{-1})$	0.00057
$K_{\mathrm{tp}}/(\mathrm{m}^3\cdot(\mathrm{s}\cdot\mathrm{Pa})^{-1})$	4×10^{-14}
$K_{\mathrm{p}}/(\mathrm{m}^3\cdot\mathrm{rad}^{-2})$	3.82×10^{-6}
$K_{\mathrm{r}}/(\mathrm{rad}\cdot\mathrm{m}^{-1})$	105
$K_{\mathrm{v}}/(\mathrm{m}\cdot\mathrm{V}^{-1})$	0.02

设仿真模型中状态变量的初值分别为:$x_{10}=0.1\,\mathrm{A}$,$x_{20}=200\,\mathrm{r/min}$,$x_{30}=0.02\,\mathrm{rad}$,$x_{40}=0.001\,\mathrm{m}$,$x_{50}=0.01\,\mathrm{m}$.设仿真时间为12 s,为验证所设计的控制器能否满足 3.2 小节所述的控制目标,令 F_{L}在 0～6 s内为1 N,在 6～12 s 内变为5 N.ω_{md}分别取 2 000,5 000 和 8 000 r/min,x_{cd} 为 0.1 m.控制器调节参数分别取 $c_1=30$,$c_2=680$,$c_3=660$,$\rho_1=0.05$,$\rho_2=0.007$,$k_1=90$,$k_2=850$.仿真结果如图 3 和图 4 所示.

图 3 说明所设计的一组滑模控制器参数就能满足 EHCA 全部工作点范围的解耦控制要求,且当 F_{L} 突变时能够通过控制器调节保证电机转速和作动器输出位移基本不变.此外也可看出,电机转速越高,定子电流就越小,即发热越少.图 3 中的位移曲线在6s时受F_{L}突变的影响较大,但能

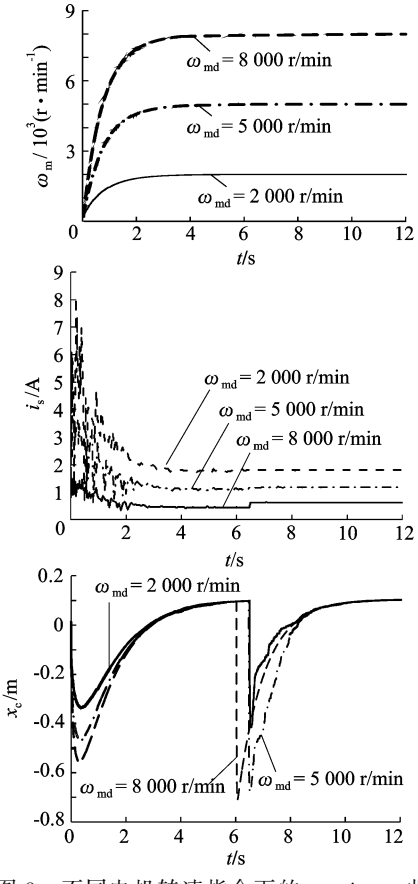


图 3 不同电机转速指令下的 ω_m, i_s, x_c 曲线图

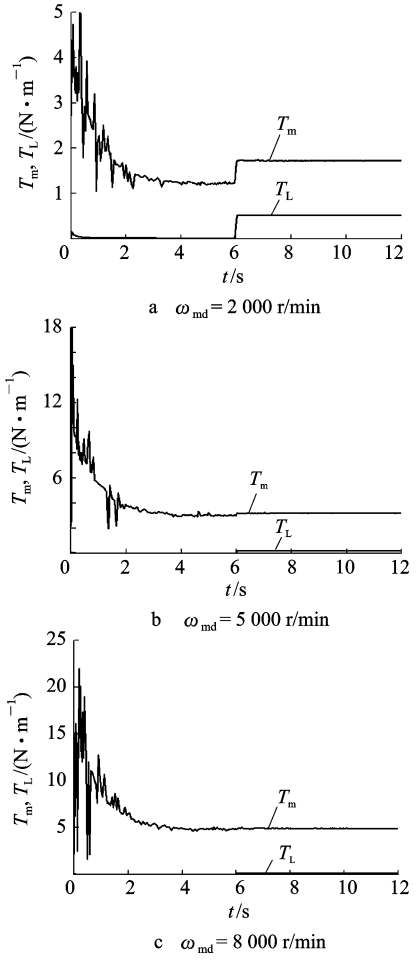


图 4 不同电机转速指令下的 T_m, T_L 曲线图

较快地调整到期望输出，说明系统鲁棒性能够满足控制要求. 图 4 表明 EHCA 系统的输出转矩 T_m 是随着负载转矩 T_L 的要求而调节的，并且在不同负载时，能满足负载每一点的功率需求.

5 结 论

本文讨论了一种改进型的带总压力控制阀的电液作动器 EHCA. 仿真结果表明，本文所设计的 EHCA 系统概念及其相应的精确线性化滑模控制器方案，不仅能给出最优功率匹配条件下的电机转速和变量泵排量的控制量，而且有效解决了系统的非线性控制问题. 文中所得到的理论结果，对其它应用中的液压泵控系统和多输入多输出系统的控制器设计也具有很好的借鉴意义.

参考文献（References）

[1] 郎燕，李运华 . 电液复合调节作动器的建模与 AMESim 仿真[J]. 航空学报，2007，28(8)：152－157
Lang Yan，Li Yunhua. Modeling and AMESim simulation of electrohydraulic compound regulating integrated actuator (EHCA)[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica，2007，28(8)：152－157(in Chinese)

[2] 周元钧. 双绕组无刷直流电动机的数学模型与转矩特性[J]. 电工技术学报，2004，19(4)：12－16
Zhou Yuanjun. Mathematical model and torque characteristics on a brushless DC motor with dual-windings[J]. Transactions of China Electrotechnical Society，2004，19(4)：12－16(in Chinese)

[3] 李运华 ，王占林. 电气液压复合调节容积式舵机的精确线性化控制[J]. 机械工程学报，2004，40(11)：21－25
Li Yunhua，Wang Zhanlin. Exact linearization control for the displacement type of actuator with electrical and hydraulic compound adjustment[J]. Chinese Journal of Mechanical Engineering，2004，40(11)：21－25(in Chinese)

[4] 高波，付永领. 伺服变量泵在一体化电动静液作动器中的应用分析[J]. 液压与气动，2005，2：70－72
Gao Bo，Fu Yongling. Application analysis of the servo-variable pump in integrated electrical hydrostatic actuator (EHA) [J]. Chinese Hydraulics & Pneumatics，2005，2：70－72(in Chinese)

[5] Lang Yan，Li Yunhua. Dissimilar redundancy measurement of swashplate angle of variable pump based on the exact linearization model of EHCA[C]//Yang Guilin. 2008 IEEE Conference on Robotics，Automation and Mechatronics. Chengdu：[s. n.]，2008：560－565

[6] Zribi M，Chiasson J. Position control of a PM stepper motor by exact linearization[J]. IEEE Trans on Automatic Control，1991，36(5)：620－625

（责任编辑：刘登敏）