

文章编号:1000-6893(2005)01-0079-05

# 一体化电动静液作动器(EHA)的设计与仿真分析

马纪明,付永领,李 军,高 波

(北京航空航天大学 自动化科学与电气工程学院,北京 100083)

## Design, Simulation and Analysis of Integrated Electrical Hydrostatic Actuator

MA Ji-ming, FU Yong-ling, LI Jun, GAO Bo

(School of Automation Science and Electrical Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, Beijing 100083, China)

**摘 要:**一体化电动静液作动系统兼备传统液压作动系统和直接驱动的机电作动系统的优点,也就是同时具备高转距和大功率密度,并且易于模块化。本文阐述了一种一体化电动静液作动器(EHA)的总体结构和工作原理,对电机、泵和液压缸的选用以及系统设计提出了明确的要求,并对其各个模块进行了建模和仿真分析。结果表明,EHA 的性能能够满足现代飞机对作动系统的要求,在未来功率电传(PBW)的飞控系统中具有很好的应用前景。

**关键词:**电动静液作动器(EHA); 液压; 一体化; 功率电传(PBW); 仿真

**中图分类号:** TH137 **文献标识码:** A

**Abstract:** Integrated electrical hydrostatic actuate system has the advantages of both traditional hydraulic system and direct drive electrical mechanical system, and it can be modularized easily. This paper describes the structure and operating principle of EHA, and it gives the specific requirements of the system design and selective principles of the motor, pump and hydraulic cylinder. Furthermore, it creates the mathematic model of each module. Simulation results show that the EHA can meet modern aircraft's requirements to the actuate system, and it can be used widely in the future PBW flight control system.

**Key words:** electrical hydrostatic actuator(EHA); hydraulic; integrated; power by wire(PBW); simulation

液压系统所具备的体积小、功率大、惯性小的优点使它在飞机作动系统中得到了广泛的应用。然而,由于液压传动本身的一些诸如泄漏、噪声、效率低和管路复杂等缺点,在机载作动系统中,液压系统的应用需求正在逐渐下降。飞控系统正在向功率电传(PBW)方向发展。功率电传是指由飞机次级能源系统至作动系统各执行机构之间的功率传输是通过电导线以电能量传输的方式完成的。PBW 作动系统在飞行控制技术中是将是一个主要的技术突破口。就像 Fly-By-Wire 控制系统不再需要机械连接一样,PBW 作动器也不再需要中央液压系统,从而在可靠性、生存力、可维护性、效率、故障容错能力、飞机整体性能上都有可观的提高<sup>[1,2]</sup>。

美国、英国、德国等国家的功率电传作动器相关技术研究、实验、试验、试飞及应用发展已经进行了很长一段时间。美国空军和 NASA 还制定了专门研制一体化作动系统的 EPAD 计划(Elec-

trically Powered Actuation Design)。到上个世纪末,新型的功率电传作动系统已经完成了在 F-18、F-16、C-141 等战斗机上的试飞计划,并开始装备到最新的 JSF 战斗机和波音 777、空中客车 A-380 等民用飞机中。国内在这方面的研究刚刚起步,并且大都处在原理论证和样机设计阶段<sup>[3~5]</sup>。



图 1 一种 EHA 的三维造型图<sup>[6]</sup>

Fig. 1 The 3-D model of one kind of EHAs

目前,功率电传作动器主要有两种形式,即机电作动器(EMA, Electrical Mechanical Actuator)

和电动静液作动器(EHA)<sup>[7]</sup>。本文主要阐述了电动静液作动器的系统组成,对其数学模型进行描述,并针对实际飞控系统的负载特征,对EHA模型进行仿真。仿真数据表明,可以设计出一种电动静液作动器,以代替传统的液压作动系统。

### 1 电动静液作动器系统组成

一体化电动静液作动器按其调速方式分3种类型:定排量泵变转速型(EHA-FPVS)、变排量泵恒转速型(EHA-VPFS)和变排量泵变转速型(EHA-VPVS)。本文中的EHA采用定排量变转速(FPVS)方案,通过控制电机的转速和转向来控制作动器动作的方向和速率。系统构成如图2所示。

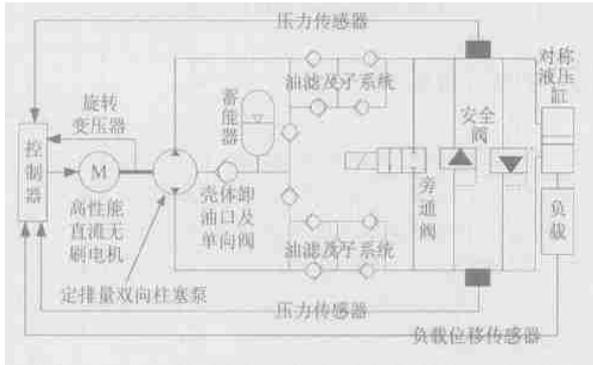


图2 EHA系统组成

Fig.2 Components of EHA

直流电机的最高设计转速为12000r/min,柱塞泵也能高速运行;蓄能器用来防止液压油中产生气穴以及对液压油的泄漏进行补充;安全阀用来防止在系统内部产生过高的压力;旁通阀在系统出现故障时打开,液压油直接经旁通阀返回油泵,起到隔离故障的作用。由于在此系统中液压缸和泵直接相连,所以需要有一个对称的液压缸,它的输入和输出流量相等。速度、压力和位移传感器和控制器相连,能够对系统运行状态进行监测并根据这些传感器的参数对系统进行实时控制。

### 2 电机模型建立及仿真

参照表1,电机的电枢电流和输入电压的关系可以通过一个一阶传递函数来描述

$$I_c = G(V_c - C_E) \quad (1)$$

$$G = \frac{1/R_c}{T_1s + 1} \quad (2)$$

其中: $R_c$ 为电机绕组电阻; $T_1$ 为电机的电气时间常数。

电机产生的转矩表达式为

$$T = CI_c \quad (3)$$

其中: $I_c$ 为电机电枢电流; $C$ 为电动机磁力矩常数; $T$ 为电机输出转矩。考虑到电机和泵直接相连,施加在泵上的转矩表达式如下

$$T = (J_m + J_p) \dot{\omega} + (K_v + K_f) \omega + T_{DB} + D_p(P_a - P_b) \quad (4)$$

其中: $J_p$ 和 $J_m$ 分别为泵和电机转动惯量; $\omega$ 为泵和电机的角速度; $K_f$ 和 $K_v$ 分别为电机摩擦和粘度系数; $T_{DB}$ 为摩擦引起的转矩损失; $P_a$ 和 $P_b$ 为泵的出入口压力; $D$ 为泵的排量; $D_p = D/2$ 。

把式(1)~式(3)代入式(4)可以得出泵的角速度表达式

$$\dot{\omega} = \frac{C \cdot V_c - D_p(P_a - P_b) - T_{DB}}{(J_p + J_m)s + (K_v + K_f + C_E C \cdot G)} \quad (5)$$

其中: $V_c$ 为电机电枢电压; $C_E$ 为电机反电势常数。得出电机和泵的参考模型如图3所示。

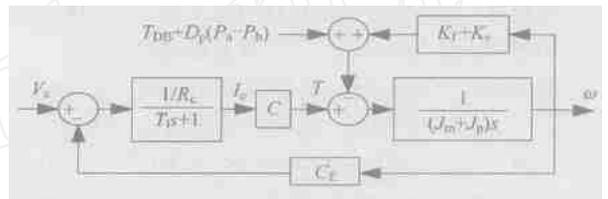


图3 未加控制的电机模型

Fig.3 Model of motor uncontrolled

在EHA系统中,电机单独使用一个控制器,为了即能防止电枢电流过载,又能保证电机的响应速度和动态性能,对电机采用了电流、速度双闭环调速方案,两环均采用PI控制加前馈补偿的方式。根据电机参数和系统要求设计PI控制器<sup>[8]</sup>,加上控制器之后的电机模型如图4所示(注: $T_{oi}$ 和 $T_{on}$ 分别为电流滤波时间常数和转速滤波时间常数):

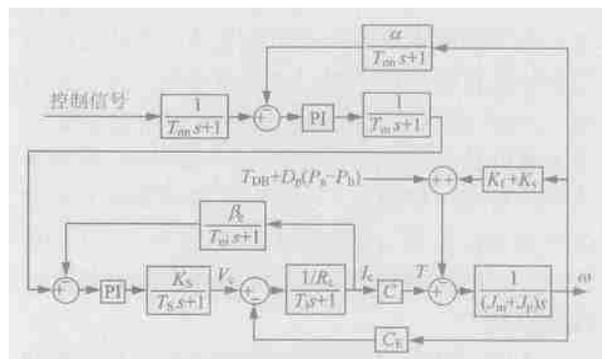


图4 电机及其控制系统模型

Fig.4 Model of motor and control system

模型中的 $\frac{K_s}{T_s s + 1}$ 部分是电机控制器中的晶闸管整流环节的传递函数。由于在此控制系统中,控制信号的输入电压范围是-10V到10V,选

用开关频率为 20 KHz 的晶管,所以整流装置的滞后时间常数  $T_S = 0.05 \times 10^{-3} \text{ s}$ ,而  $K_S = 27$ ,电机额定电压为 270V。

在输入控制信号为 +10V 的阶跃信号、负载转矩为 0.1N·m 时,电机转速和电枢电流的仿真结果如图 5 所示。从仿真图形可以看出,电机的响应时间很短,电枢电流在电机的过载电流之内,电机能够满足系统要求。

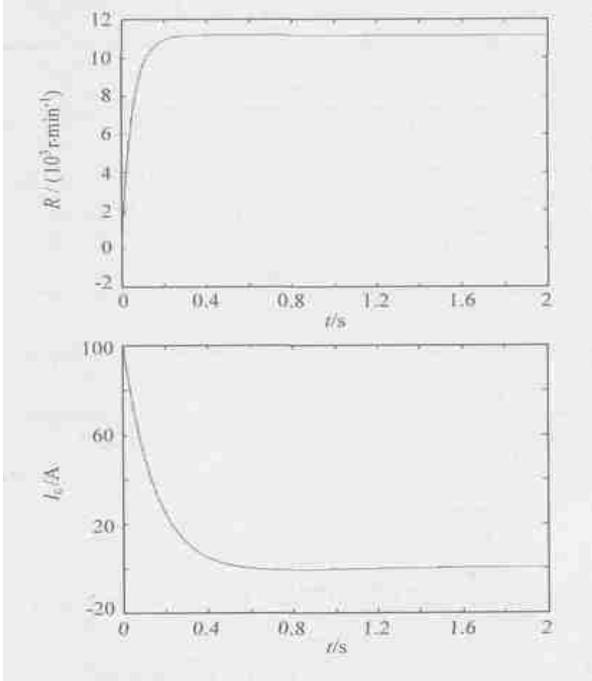


图 5 电机响应和电枢电流仿真结果

Fig. 5 Simulation results of motor's response and armature's current

### 3 泵和液压缸模型建立

在此系统中使用了一个双向柱塞泵,排量是 1ml/r。泵能够承受最大 30MPa 的压力。在蓄能器和泵中间使用了一个单向阀。泵的选用是基于 EHA 系统对速度和负载力的要求。不考虑液压油的容积变化,泵的输入输出流量  $Q_a$ 、 $Q_b$  如下

$$Q_a = D_P - (P_a - P_b) - L(P_a - P_{case}) \quad (6)$$

$$Q_b = D_P - (P_a - P_b) - L(P_b - P_{case}) \quad (7)$$

其中: 为泵的内部泄漏系数;  $L$  为泵的外部泄漏系数;  $P_{case}$  为泵的卸油口压力。

忽略液压缸的内部泄漏,对称液压缸输入和输出流量分别为<sup>[9]</sup>

$$Q_1 = A \dot{x} + \frac{(V_0 + Ax)}{e} \frac{dP_1}{dt} + L_{ext} P_1 \quad (8)$$

$$Q_2 = A \dot{x} - \frac{(V_0 - Ax)}{e} \frac{dP_2}{dt} - L_{ext} P_2 \quad (9)$$

其中:  $A$  为液压缸受力面的面积;  $x$  为液压缸活

塞杆位移;  $V_0$  为管路和液压缸平均容积;  $e$  为液压油等效容积弹性模数;  $L_{ext}$  为液压缸的外部泄漏系数;  $P_1$ 、 $P_2$  为液压缸活塞腔压力。

由于 EHA 的对称性,泵和液压缸之间的压降  $P_{pipe}$  的值在 0 到大约 35 KPa 之间,具体大小取决于流量的大小。泵的出口压力和液压缸工作腔压力之间的关系为

$$\begin{aligned} P_a &= P_1 + P_{pipe} \\ P_b &= P_2 - P_{pipe} \end{aligned} \quad (10)$$

为了得到简化的泵、液压缸模型,假设泵的外部泄漏系数  $L$  同液压缸的外部泄漏系数  $L_{ext}$  相等。在正常的运行状态中,蓄能器和壳体泄漏的流量假设为 0,所以  $Q_a = Q_1$ ,  $Q_b = Q_2$ ,由于 EHA 的对称性,假设泵的输入、输出流量等于液压缸的输出、输入流量,负载流量  $Q_L$  就为

$$Q_L = \frac{Q_1 + Q_2}{2} = \frac{Q_a + Q_b}{2} \quad (11)$$

将式(11)代入式(6)~式(9),可以得到

$$\begin{aligned} D_P - (P_a - P_b) &= A \dot{x} + \frac{V_0}{2e} \left( \frac{dP_1}{dt} - \frac{dP_2}{dt} \right) + \\ &\frac{Ax}{2e} \left( \frac{dP_1}{dt} + \frac{dP_2}{dt} \right) + \frac{L}{2} (P_1 - P_2) \end{aligned} \quad (12)$$

在上述表达式中,由于  $\frac{dP_a}{dt}$ ,  $\frac{dP_1}{dt}$ ,  $\frac{dP_b}{dt}$ ,  $\frac{dP_2}{dt}$  并且由于作动器的对称性,  $\frac{dP_1}{dt}$ ,  $\frac{dP_2}{dt}$ , 这样就可以得出一个简化的泵、作动器模型

$$\begin{aligned} D_P &= A \dot{x} + \frac{V_0}{2e} \left( \frac{dP_1}{dt} - \frac{dP_2}{dt} \right) + \\ &(\frac{+}{+} + L/2) (P_1 - P_2) + 2 P_{pipe} \end{aligned} \quad (13)$$

其中:  $\frac{+}{+} + L/2$  是系统总的泄漏系数。

在这里应当注意到,  $2 P_{pipe}$  是由于管路压降引起的流量损失,它导致了整个系统在运行时的死区,所以在外环的控制方案和元器件选择时,应当通过精确选择连接器件和管路尺寸以减少  $P_{pipe}$  的值(比如大口径、短距离管路)。另外,还要尽量减小滤油子系统的压降。

### 4 整体模型

对称液压缸是整个系统的执行部件,其负载力方程是

$$F = (P_1 - P_2) A = M \ddot{x} + B \dot{x} + Kx + F_L \quad (14)$$

其中:  $M$  为液压缸活塞与负载的总质量;  $B$  为活塞与负载的粘性阻尼系数;  $K$  为负载的弹性刚度;  $F_L$  为液压缸的外干扰力。

把  $P_1 - P_2$  代入式(13),得到 EHA 系统液压

部分的传递函数如下

$$x = \frac{D_p - 2 P_{pipe} - F_L \left[ \frac{V_0}{2A e} s + \frac{+L/2}{A} \right]}{\left\{ \frac{V_0 M}{2A e} s^3 + \left[ \frac{V_0 B}{2A e} + \frac{M(+L/2)}{A} \right] s^2 + \left[ A + \frac{KV_0}{2A e} + \frac{B(+L/2)}{A} \right] s + \frac{K(+L/2)}{A} \right\}}$$

在此系统中,弹性负载相对于惯性负载很小,可以忽略,  $K=0$ 。由于阻尼力  $B dx/dt$  远小于液压缸的输出力,泄漏损失的流量  $(+L/2)(P_1 - P_2)$  远小于活塞运动所需要的流量  $A dx/dt$ ,所以  $B(+L/2)/A$  与  $A$  相比可以忽略不计,式(15)可以简化为

$$x = \frac{\frac{D_p - 2 P_{pipe} - F_L \frac{+L/2}{A^2} \left[ \frac{V_0}{2 e(+L/2)} s + 1 \right]}{s \left[ \frac{V_0 M}{2A^2 e} s^2 + \left[ \frac{V_0 B}{2A^2 e} + \frac{M(+L/2)}{A^2} \right] s + 1 \right]}}{s \left[ \frac{s^2}{h} + \frac{2b}{h} s + 1 \right]}} = \frac{D_p - 2 P_{pipe} - F_L \frac{+L/2}{A^2} \left[ \frac{V_0}{2 e(+L/2)} s + 1 \right]}{s \left[ \frac{s^2}{h} + \frac{2b}{h} s + 1 \right]} \quad (16)$$

其中:液压固有频率

$$h = \sqrt{\frac{2A^2 e}{V_0 M}} \quad (17)$$

液压相对阻尼系数

$$h = \frac{B}{2A} \sqrt{\frac{V_0}{e M}} + \frac{(+L/2)}{2A} \sqrt{\frac{2 e M}{V_0}} \quad (18)$$

未加控制器的情况下整个系统的模型如图6。

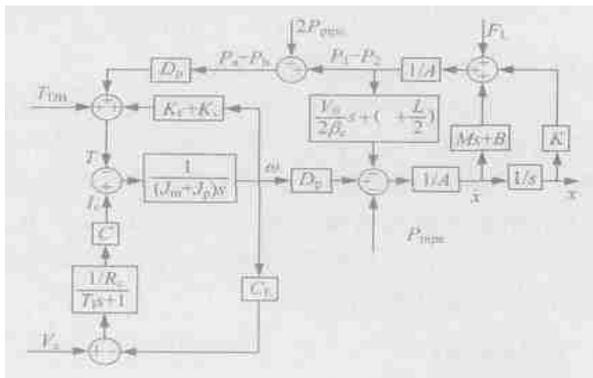


图6 EHA系统模型

Fig. 6 Model of EHA system

### 5 系统仿真

整个EHA系统的位置环采用PID控制,使用Matlab/Simulink进行仿真分析。整个系统模型如图7所示,其中Motor-pump是电机、泵子系

统,Actuator是液压子系统。输入位置信号是0.030m,静摩擦转矩取0.1N·m,在2s时刻加上20000N的负载力。仿真结果如图8所示,系统仿真所用参数参考表1。

表1 参数表

Table 1 Parameters			
参数	$K_f$ (N·m)/(rad·s <sup>-1</sup> )	$K_v$ (N·m)/(rad·s <sup>-1</sup> )	$C_f$ (V)/(rad·s <sup>-1</sup> )
值	0.0002	0.002	0.215
参数	$C_l$ ((N·m)/A)	$J_m$ /(kg·m <sup>2</sup> )	$J_p$ /(kg·m <sup>2</sup> )
值	0.179	$1.49 \times 10^{-3}$	$1.2 \times 10^{-4}$
参数	$D_l$ /(m <sup>3</sup> /rad)	$\rho$ /(m <sup>3</sup> /(s·Pa))	$T_{DB}$ /(N·m)
值	$1.0 \times 10^{-6}$	$1.0 \times 10^{-14}$	0.1
参数	$P_{pipe}$ /Pa	$\rho$ /(N/m <sup>2</sup> )	$L_l$ /(m <sup>3</sup> /(s·Pa))
值	$2.0 \times 10^4$	$6.86 \times 10^8$	$1.5 \times 10^{-14}$
参数	$L_l$ /H	$P_g$ /Pa	$P_b$ /Pa
值	$8.528 \times 10^{-5}$	$30 \times 10^6$	$2 \times 10^6$
参数	$K_s$	$T_l$ /s	$T_m$ /s
值	27	$0.05 \times 10^{-3}$	0.1046
参数	$T_l$ /s	$V_0$ /m <sup>3</sup>	$A$ /m <sup>2</sup>
值	$3.99 \times 10^{-4}$	$1.5 \times 10^{-4}$	$1.83 \times 10^{-3}$
参数	$M$ /kg	$R_l$	$B_l$ /(kg·s <sup>-1</sup> )
值	1.42	0.214	$7.4 \times 10^{-5}$

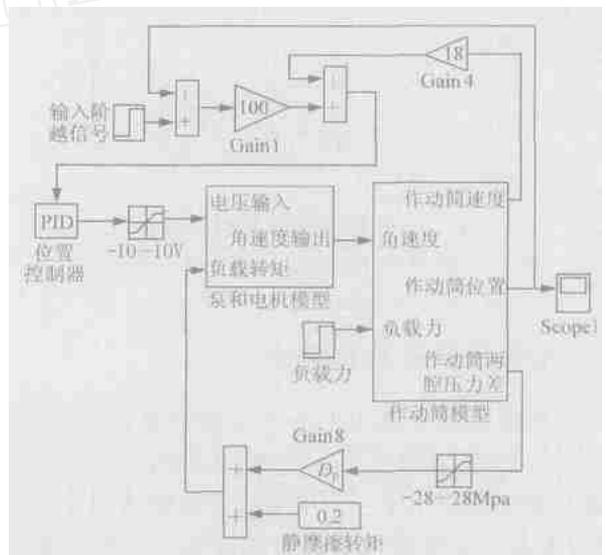


图7 EHA的Matlab仿真模型图

Fig. 7 Simulation model of Matlab of EHA

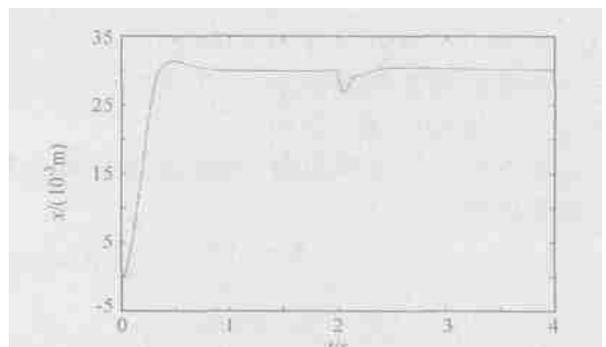


图8 EHA的位置阶跃响应

Fig. 8 Step response of EHA

从仿真结果可以看出,系统的响应时间能够满足要求,加上负载力之后能够很快的回位,并不产生静差,能够满足系统对快速性和精度的要求。

## 6 结 论

一体化电动静液作动器(EHA)同传统的液压作动系统功率密度相当,但它的模块性比较好,并且自成系统,不再需要中央能源系统,在很大程度上降低了对应用场合的要求;在EHA系统中不再使用一些昂贵的液压元件(比如电液伺服阀),降低了使用费用;EHA系统中没有伺服阀,通过调节电机的转速实现对整个系统的伺服控制,即可以降低液压系统的复杂程度,又由于使用对称液压缸作为执行机构,系统溢流损失可忽略不计,缓解了由于系统集成化之后带来的散热问题;另外,此EHA系统使用高速低转动惯量无刷直流电机和高性能柱塞泵,减小作动器体积的同时也在很大程度上提高了整个系统的性能。

在EHA设计时,为了达到理想的状况,需要考虑以下几个方面:

(1)设计高性能的电机,选用合适的控制方案以达到对其快速性和稳定性要求;

(2)合理选用元件,尽量减小泵和液压缸连接区间引起的压降,以降低由于管路压降导致的死区;

(3)要使用对称作动器;

(4)另外在对EHA设计时,还要综合考虑由于集成化带来的一系列问题,比如散热,各种传感器的安装以及干扰等问题。

一体化电动静液作动器的研究和研制是一个前景非常广阔的课题,国外的研究已经相当成熟,并在航空航天领域得到了应用。在国内,EHA已经在一些工业液压系统中得到了应用,它的应用消除了现有技术中的很多的缺点,还可以在更多的液压应用中发挥作用。

## 参 考 文 献

- [1] 徐步力. 一体化机载作动系统原理样机的性能研究[D]. 北京:北京航空航天大学. 2002.
- [2] 陈斌,王占林,裘丽华. 机载液压系统的主要发展趋势[J]. 航空学报,1998,19(s):1-6.  
(Chen B, Wang Z L, Qiu L H. Main developmental trend of aircraft hydraulic system[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 1998,19(s):1-6.)
- [3] Joel R S. F-18 systems research aircraft facility[R]. NASA Technical Memorandum 4433. 1992.
- [4] Stephen C J. Flight test experience with an electromechanical actuator on the F-18 systems research aircraft[R]. NASA. 1998.
- [5] Robert N. Performance of an electro-hydrostatic actuator on the F-18 systems research aircraft[R]. NASA TM-97-206224, 1997.
- [6] Richard M, Crowder. Electrically powered actuation civil aircraft, actuator technology: current practice and new developments[R]. IEE Colloquium on (Digest No: 1996/110), 1996.
- [7] 祁晓野,付永领,王占林. 功率电传机载作动系统方案分析[J]. 北京航空航天大学学报,1999,25(4):426-430.  
Qi X Y, Fu Y L, Wang Z L. Scheme analysis of power-by-wire airborne actuation systems[J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 1999,25(4):426-430. (in Chinese)
- [8] 张东立. 直流拖动控制系统[M]. 北京:机械工业出版社, 2000. 55-71.  
Zang D L. DC Motor's drive and control system[M]. Beijing: China Machine Press, 2000. 55-71. (in Chinese)
- [9] 王占林. 近代液压控制[M]. 北京:机械工业出版社, 1997. 183-195.  
Wang Z L. Modern hydraulic control[M]. Beijing: China Machine Press, 1997. 183-195. (in Chinese)

### 作者简介:

马纪明(1979-) 男,河南周口人,博士研究生,专业为机械电子工程,从事一体化作动器的研究。E-mail: ssmjm2000@yahoo.com.cn. Tel: 010-82316839

付永领(1966-) 男,河北迁西人,北京航空航天大学自动化科学与电气工程学院教授,博士,主要从事液压伺服控制、机器人方面研究。

李 军(1973-) 男,重庆忠县人,博士研究生,专业为机械电子工程,主要从事一体化作动器的研究。

高 波(1975-) 男,山东临沂人,博士研究生,主要从事液压伺服控制系统的研究。

(责任编辑:李泓洁)