电动静液作动器框图建模与控制

康荣杰 焦宗夏 王少萍

(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：功率电传作动系统是未来飞行控制的发展方向，它取消了传统的中央液压油源.电动静液作动器是功率电传系统的执行机构，在作动器端把电能转化为局部液压能，兼具传统液压系统和直接电力驱动作动器的优点.根据其元部件数学方程，建立非线性框图子模型，构造了一种定排量变转速电动静液作动器，完善了补油回路和摩擦特性的描述.通过考察作动器稳定性、静态刚度和动态性能指标，对单环比例、积分、微分(PID，Proportion Integration Differentiation)、多环PID、全状态反馈控制等方法进行了设计及比较分析.仿真结果表明，结合动态压力反馈策略的全状态反馈控制器能有效改善系统的动、静态性能.

关 键 词：电动静液作动器；框图模型；仿真；控制

中图分类号：V 245；TH 137

文献标识码：A **文 章 编 号**：1001-5965(2009)03-0338-04

Block diagram modeling and control of electro-hydrostatic actuator

Kang Rongjie Jiao Zongxia Wang Shaoping

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

Abstract: Power-by-wire (PBW) actuation is the future direction of flight control system in which the need for a central hydraulic system is eliminated. The electro-hydrostatic actuator (EHA) is a kind of PBW actuator that converts the electrical power into local hydraulic power and combines the benefits of the conventional hydraulic system and the direct drive electrical actuators. Based on the mathematic equations, all the EHA components were modeled by the block diagrams and assembled to a fixed-displacement variable-speed architecture, which contained the refeeding circuit and the friction. Furthermore, the single proportion integration differentiation (PID) controller, cascade PID controller and state feedback controller are designed for comparison analysis that focused on the system stability, stiffness and dynamic characteristics. The simulation results prove that the state feedback controller along with dynamic pressure feedback strategy efficiently improves the static and dynamic performance of EHA.

Key words: electro-hydrostatic actuator; block diagram model; simulation; control

传统液压系统由于泄漏、噪声、管路复杂等原因，将逐步退出机载伺服作动领域，取而代之的是采用功率电传技术(PBW，Power-By-Wire)的飞行控制系统.功率电传使飞机次级能源系统至各作动执行机构之间的功率传输可以通过电缆以电能量方式完成.PBW作动系统也不再需要中央液压系统和遍布机身的液压管路，从而大幅提高了飞行器的可靠性、可维护性、效率和生存能力，有助于实现多电/全电飞机.

电动静液作动器(EHA，Electro-Hydrostatic Actuator)是国内外获得率先发展的功率电传作动器.20世纪90年代末，EHA开始在F-18 SRA、F-16等飞机上进行试验，并获得成功，目前，已经在美国F-35联合攻击机和空中客车A-380上少量装备.国内对这方面的研究刚刚起步，主要工作集中在方案设计、建模仿真及相关控制理论，

收稿日期：2008-05-14

作者简介：康荣杰(1981—)，男，福建龙岩人，博士生，kangrongjie@vip.163.com.

采用的数学方法通常是基于微分方程的拉普拉斯变换,求解系统传递函数进行分析设计[1-3].

考虑到传递函数本质上是一种针对线性定常系统的数学模型,与实际的 EHA 系统不尽相符.此外,由于传递函数的局限性,目前已有的 EHA 模型,大都忽略了补油环节,并且简化了摩擦.针对这些不足,可以采用基于数学方程的框图建模方法构建 EHA 系统模型,更有利于描述非线性特征,提高了模型的精确性.

1　电动静液作动器结构分析

EHA 是一种基于闭式回路的电液伺服系统,根据驱动电机和液压泵的不同工作模式,目前主要有:定排量变转速、变排量定转速和变排量变转速 3 种形式.其中,定排量变转速 EHA 通过控制电机的转向和转速来控制作动器作动的方向及速率,相比其它 2 种方案,在效率和结构简化上更具优势.图 1 描述了一种典型定排量变转速 EHA 的结构原理.

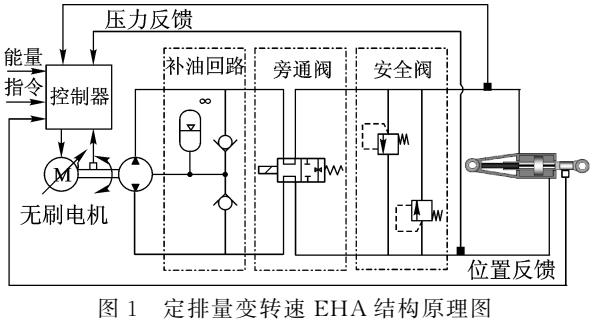


图 1　定排量变转速 EHA 结构原理图

2　EHA 系统建模

定排量变转速 EHA 可分解为驱动电机、液压泵、补油回路、作动筒等子模块,同时考虑摩擦环节,分别构建子模型,最后组装成为完整系统.

2.1　补油环节建模

闭式回路是 EHA 区别于传统液压系统的一个重要特点,因此需要通过蓄能器和单向阀构建补油环节.其主要作用是:维持系统最低压力;防止气穴;对液压油外泄漏进行补充[4].EHA 补油环节的流量、压力关系见图 2.其流量方程为

$$\left.\begin{aligned} Q_a &= Q_e - Q_{c1} - Q_{c2} \\ Q_{1f} &= Q_1 + Q_{c1} \\ Q_{2f} &= Q_2 - Q_{c2} \end{aligned}\right\} \tag{1}$$

其中,Q_a 蓄能器输入流量;Q_e 为泵的外泄漏;Q_1 和 Q_2 分别为液压泵的出口和进口流量;Q_{c1} 和 Q_{c2} 为流经的单向阀流量,取决于 $\sqrt{P_a-P_1}$ 和 $\sqrt{P_a-P_2}$,可以用查找表或函数拟合来描述,P_1 和 P_2 分别为液压泵的出口和进口压力,P_a 为蓄能器的压力:

$$P_a = G_c / V_g \tag{2}$$

式中　$G_c = P_{ai} V_{gi}^k$　　$V_g = \left(V_{gi} - \int Q_a \mathrm{d}t\right)^k$

其中,P_{ai}为蓄能器初始压力;V_{gi}为蓄能器内气体的初始体积;k 为气体的多变指数,取值范围在 1.0～1.4 之间.

根据上述分析,可得到补油环节的框图模型见图 3,图 4 是蓄能器(式(2))的框图模型.可见,框图模型便于处理非线性数学函数,适合多层次复杂模型的构建.

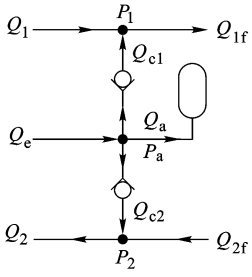


图 2　补油环节的流量与压力

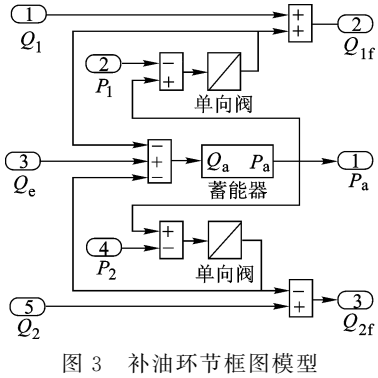


图 3　补油环节框图模型

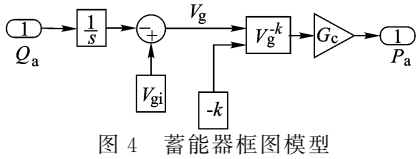


图 4　蓄能器框图模型

2.2　摩擦建模

过去的 EHA 模型通常把摩擦简化为一个粘滞阻力,大小与速率成正比.事实上,摩擦是一种非常复杂的非线性现象,它不仅与速度有关,还与位置、温度、润滑等有关[5-6].典型的摩擦通常表现为粘性摩擦、库仑摩擦和静摩擦(对于摩擦力矩同样适用):

$$F_f(\dot{x}_p) = [F_c + (F_s - F_c)\cdot \mathrm{e}^{-|\dot{x}_p|/\alpha} + K_v |\dot{x}_p|]\cdot \mathrm{sign}(\dot{x}_p) \tag{3}$$

其中,F_s 为最大静摩擦力(矩);F_c 为库仑摩擦力(矩);K_v 为粘性阻尼系数;$\dot{x}_p$ 为运动速度;α 为速度参考量;sign(·)为符号函数,为使模型连续,可对其做一个改进,用双曲正切函数 tanh(·)来

实现：

$$F_f(\dot{x}_p)=[F_c+(F_s-F_c)\cdot e^{-|\dot{x}_p|/\alpha}+K_v|\dot{x}_p|]\cdot\tanh(\dot{x}_p/\beta) \quad (4)$$

其中，β为速度参考量. 式(4)所描述的摩擦如图5所示，其框图模型如图6所示.

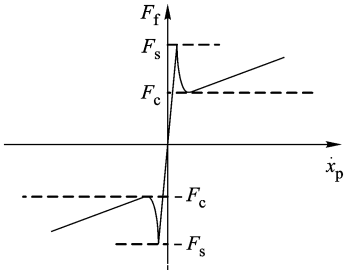


图5 摩擦模型

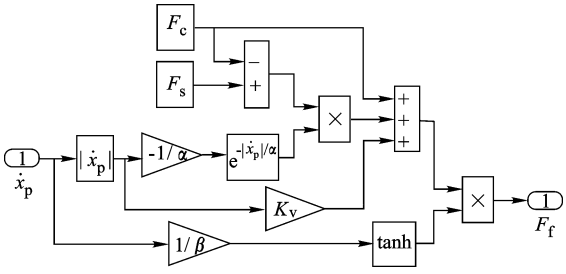
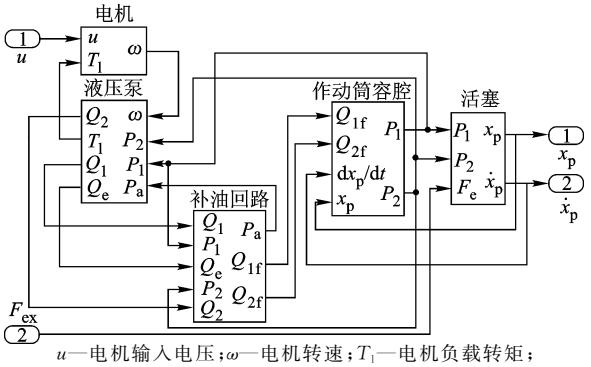


图6 摩擦力框图模型

2.3 EHA开环模型

通过以上方法，可以得到EHA其它所有元部件的框图模型，在Simulink中将它们封装后，依照输入输出关系联接，构成图7所示的完整开环系统. 框图建模的优点在于：模块化的子模型；可根据需要添加或删除元部件；便于观察系统所有的状态变量.



u—电机输入电压；ω—电机转速；T_l—电机负载转矩；x_p—活塞位移；F_{ex}—外力.

图7 EHA开环系统

3 EHA控制方法研究

EHA包含有电气元件和液压元件，特性相比传统液压系统更为复杂. 本节通过考察系统稳定性、静态刚度和动态性能等指标，对单环比例、积分、微分(PID，Proportion Integration Differentiation)、多环PID、全状态反馈等控制方法进行了比较分析.

3.1 单环PID控制

单环PID控制由于其结构简单，在工程领域得到大量应用. 在Simulink中进行仿真，输入20mm位置阶跃，并在2.5 s时加入30 kN负载. 图8为位置响应曲线，图中，系统上升时间大约为0.4 s，通过提高控制器增益，可以进一步提高响应速度，但是会造成超调. 2.5 s后，由于带载造成了很大的稳态误差，可见系统刚度较低. 图9的压力曲线中存在振荡，其频率接近系统液压固有频率，说明该系统的液压阻尼偏低.

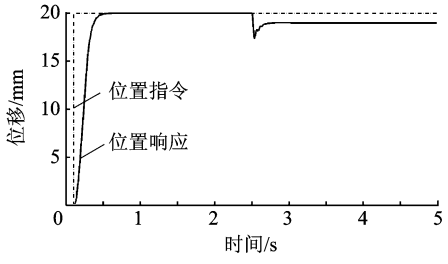


图8 位置响应曲线(单环PID控制)

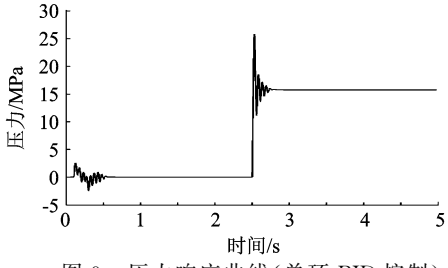


图9 压力响应曲线(单环PID控制)

综合上述分析，很难通过PID 3个参数的调节，使单环PID控制的EHA系统获得理想性能. 作为改进，引入了多环PID控制.

3.2 多环PID控制

多环PID控制将外环的输出作为内环的输入，具有抗干扰性强、刚度好、速度快等优点. 对于EHA而言，由内至外依次是电机电流环、电机速度环和作动筒位置环. 图10给出了多环控制下的位置响应曲线(输入条件不变).

仿真结果表明，系统的快速性较单环控制有所提高，静态刚度和带载能力也有了明显增强，但是，压力振荡较单环控制更加剧烈. 因此，进一步引入了全状态反馈控制方法.

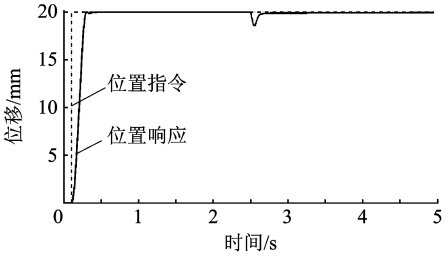


图10 位置响应曲线(多环PID控制)

3.3　全状态反馈控制

全状态反馈控制充分利用了系统的全部状态信息,考虑 EHA 为一个 5 阶系统,具有如下状态变量:电机电流 I,ω,$\Delta P=P_1-P_2$,x_p,$\dot{x}_p$.将系统在零点附近做线性化处理后,得到 EHA 系统的状态方程,根据指定的闭环极点,通过 Matlab 软件可以计算出状态反馈矩阵:

$$\boldsymbol{K}=[K_1 \quad K_2 \quad K_3 \quad K_4 \quad K_5]$$

为了消除压力负反馈造成的稳态误差,可以进一步引入动态压力反馈措施:在压力反馈回路上串入一个高通滤波器,既保留了压力反馈对动态性能的改善,又消除了它对静态性能的影响.高通滤波器截止频率可选为系统液压固有频率的 15%左右.改进后的控制结构如图 11 所示.

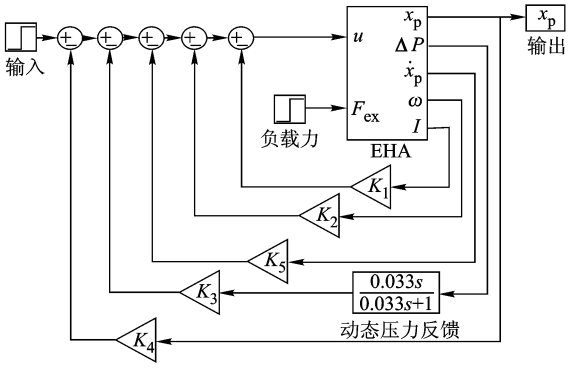


图 11　结合动态压力反馈策略的全状态反馈控制

图 12 为系统压力响应曲线,图 13 为系统在全状态反馈控制下的位置响应曲线.可见,全状态反馈控制的 EHA 系统响应速度进一步被提高(大约为 0.2 s),压力振荡也得到了很好的抑制.系统具有良好的动静态性能,完全能够满足机载作动的控制性能要求.

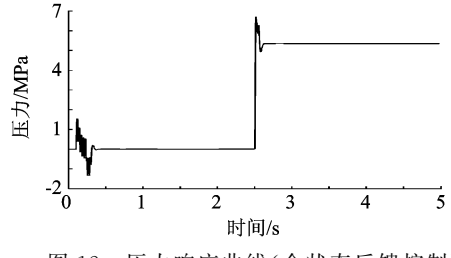


图 12　压力响应曲线(全状态反馈控制)

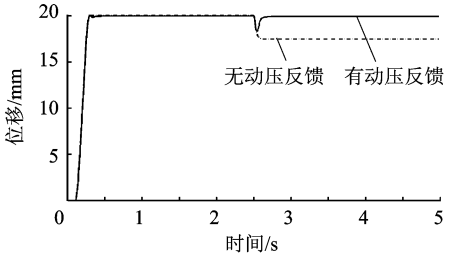


图 13　位置响应曲线(全状态反馈控制)

4　结　论

通过一种不依赖于传递函数的框图建模方法,完成了 EHA 子系统建模与系统综合.在此基础上,对 EHA 性能进行优化设计,分析对比了包括单环 PID、多环 PID、全状态反馈、动态压力反馈在内的多种控制方法,得到如下结论:

1) 框图模型本质上是一种非线性模型,相比传统的传递函数模型包含有更多的信息,更精确地反映了系统本质;

2) 单环 PID 不能满足 EHA 控制要求,存在响应慢、刚度低、振荡明显的缺点;

3) 多环 PID 能大大改善系统性能,提高了响应速度和静态刚度,但是依然存在压力振荡明显的缺点;

4) 结合动态压力反馈策略的全状态反馈控制能有效改善系统动、静态特性,可以满足机载伺服作动的性能要求.

参考文献(References)

[1] Gao Bo, Fu Yongling, Pei Zhongcai, et al. Research on dual-variable integrated electro-hydrostatic actuator[J]. Chinese Journal of Aeronautics,2006,19(1):77－82

[2] 马纪明, 付永领, 李军,等. 一体化电动静液作动器(EHA)的设计与仿真分析[J]. 航空学报,2005,26(1):79－83
Ma Jiming, Fu Yongling, Li Jun, et al. Design, simulation and analysis of integrated electrical hydrostatic actuator [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica,2005,26(1):79－83 (in Chinese)

[3] Habibi S,Goldenberg A. Design of a new high performance electro-hydraulic actuator[C]//Proceedings of the IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics. Atlanta:Pergamon, 1999:227－232

[4] 王占林. 近代液压伺服控制[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社,2005:16－20
Wang Zhanlin. Modern electrical and hydraulic servo control [M]. Beijing: Beijing University of Aeronautics and Astronautics Press,2005:16－20(in Chinese)

[5] 王晓东,华清,焦宗夏,等. 负载模拟器中的摩擦力及其补偿控制[J].中国机械工程,2003,14(6):67－70
Wang Xiaodong, Hua Qing, Jiao Zongxia, et al. Friction and its compensation method in load simulator[J]. China Mechanical Engineering,2003,14(6):67－70(in Chinese)

[6] Papadopoulos E G,Chasparis G C. Analysis and model-based control of servomechanisms with friction[C]// Proceedings of the IEEE/RSJ International Conference on Intelligent Robots and Systems. Lausanne, Switzerland:Springer-Verlag, 2002:2109－2114

(责任编辑:赵海容)