基于能量调节的电动静液作动器设计与仿真

康荣杰 陈丽莎 焦宗夏

(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：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. 相比阀控作动器，电动静液作动器的效率和可靠性获得提高，但是带宽和刚度受到限制，因此提出了一种基于能量调节的新型电动静液作动器. 能量调节器根据不同的控制响应需求向系统提供附加流量. 液压锁用于切换系统工作模式，保持液压缸的输出位置. 基于能量调节器的数学方程分析，得出其容积优化原则，并对系统控制策略进行了专门的设计. 仿真结果验证了系统响应速度和频宽的改善.

关 键 词：电动静液作动器；能量调节器；转移体积；液压锁；频宽；刚度

中图分类号：V 245；TH 137

文献标识码：A **文 章 编 号**：1001-5965(2010)01-0018-04

Design and simulation of power regulator based electro-hydrostatic actuator

Kang Rongjie Chen Lisha Jiao Zongxia

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

Abstract: The electro-hydrostatic actuator(EHA) is a kind of power-by-wire actuator that converts the electrical power into local hydraulic power which combines the benefits of conventional hydraulic system and direct drive electrical actuators. Compared to the servovalve controlled actuator, the efficiency and reliability of EHA are increased. However, the frequency width and stiffness are limited. A novel structure EHA with power regulator and hydraulic lock was proposed to overcome these problems. The power regulator managed the power distribution in EHA system according to different control requirements. The hydraulic lock helped to keep the output in desired position. Based on its mathematic equations, the optimization principle of power regulator was discussed and the control strategy was specifically designed for this EHA. The simulation results verify the improvements in response and frequency width.

Key words: electro-hydrostatic actuator; power regulator; transfer volume; hydraulic lock; frequency width; stiffness

1 传统 EHA 结构

功率电传(PBW, Power-By-Wire)飞行控制系统是极具吸引力的下一代飞行器发展方向. 在功率电传系统中，取消了中央油源，作动能量通过电缆传递，而不是液压管路. 因此，飞行器的能量效率和可靠性将获得显著提高[1].

电动静液作动器(EHA, Electro-Hydrostatic Actuator)是功率电传作动器的一种. 它把电能输入转化为局部液压能来驱动飞行器控制面. 电机和液压泵的控制方式通常有 3 种形式[2-3]：定排量变转速控制，变排量定转速控制和变排量变转速控制. 目前，定排量变转速方式(FPVM, Fixed-Pump-Displacement Variable-Motor-Speed)由于结构简单、效率高等因素，获得了更多的应用.

在 FPVM-EHA[4]中(图 1)，双向液压泵由电

收稿日期：2008-12-18

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

机驱动,转速可调.油箱由一个低压蓄能器和两个单向阀组成,用于保持系统最低压力并补偿外泄漏.旁通阀和安全阀用于系统保护.尽管 FPVM-EHA 已经部分应用于商业飞机,如空客 A380,但仍存在一些问题制约其进一步发展.它的最大频宽通常只有 5 Hz,对于军用飞行器来说偏低.当系统带载时,即使输出位置保持不变,电机仍然持续消耗能量,这将导致散热困难.相比阀控作动器,EHA 的刚度也有所下降.为解决这些问题,本文提出了一种基于能量调节器的 EHA 结构.

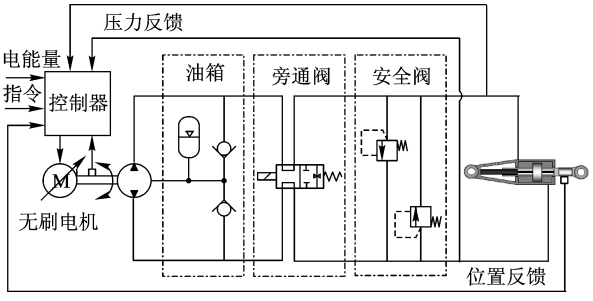


图 1　FPVM-EHA 结构原理图

2　结构设计

2.1　结构与工作模式

图 2 为基于能量调节器的 EHA 原理结构.能量调节器可以被看作系统的第 2 能源,与传统的 FPVM-EHA 并行工作.电液比例方向阀控制能量调节器的输出,为系统提供一个附加流量.液压锁实际上是一个电磁开关阀,可根据系统工作模式和状态锁定作动筒.图 2 中省略了旁通阀和安全阀,但在实际系统中,它们是存在的.

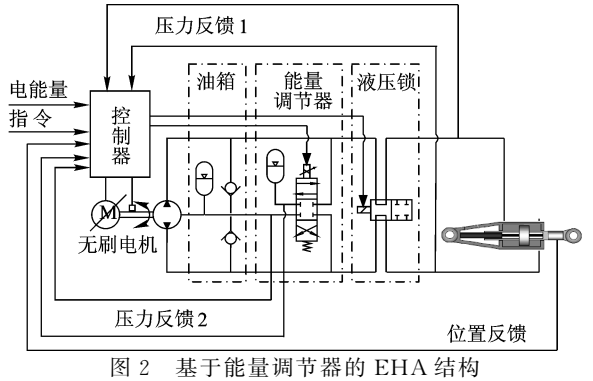


图 2　基于能量调节器的 EHA 结构

基于能量调节器的 EHA 具有 3 种工作模式.

1) 高效率模式.比例阀处于中位,能量调节器出口被关闭,不参与工作.此时,系统实际上是一个传统的 FPVM-EHA 结构.

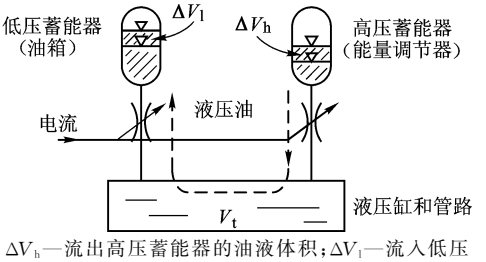
2) 高快速性模式.此模式下,快速响应成为首要目标.比例阀控制能量调节器的输出流量用于补偿电机-液压泵模块输出流量的不足.这种双重控制策略可以在短时间内满足系统快速动作的大流量需求.

3) 锁定模式.当作动器输出处于稳态,并且稳态误差小于一个可接受值,电磁阀将锁定作动筒.此时,电机和液压泵可以对能量调节器进行补油.如果系统解锁或者能量调节器的压力达到预设值,补油过程终止.

2.2　能量调节器

能量调节器由高压蓄能器和比例阀构成,储存并管理液压能量,用于高机动飞行.

能量调节器的输出流量帮助系统运动加速或减速.这些附加的流量将最终进入油箱.因此,能量调节器的压力会逐渐下降,而油箱的压力会逐渐上升.图 3 描述了这种油液转移过程.高压蓄能器和低压蓄能器的容积需要仔细优化,确保它们工作在合适条件下.大的容积可以提供更多的能量,但是会带来尺寸和重量方面的问题.



ΔV_h—流出高压蓄能器的油液体积;ΔV_l—流入低压蓄能器的油液体积;V_t—液压缸和管路的总容积.

图 3　两蓄能器间的油液转移

压力和体积的变化可以由气体状态方程和流量连续性方程计算,表达式为

$$\left.\begin{aligned} P_h V_h^k &= P_e (V_h + \Delta V_h)^k \\ \Delta V_h - \Delta V_l &= \frac{V_t}{B}(P_e - P_t) \\ P_l V_l^k &= P_e (V_l - \Delta V_l)^k \end{aligned}\right\} \tag{1}$$

其中,P_h 为高压蓄能器的初始压力;V_h 为高压蓄能器的初始气体体积;P_l 为低压蓄能器的初始压力;V_l 为低压蓄能器的初始气体体积;P_e 为平衡后的系统压力;B 为油液的体积弹性模量;k 为气体的多变指数.相对于气体,油液的可压缩性可以忽略,所以有 $\Delta V_h \approx \Delta V_l$,式(1)可以简化为

$$\left.\begin{aligned} P_h V_h^k &= P_e (V_h + \Delta V)^k \\ P_l V_l^k &= P_e (V_l - \Delta V)^k \end{aligned}\right\} \tag{2}$$

其中,ΔV 为油液的转移体积,由上式可得

$$\Delta V = \frac{\sqrt[k]{P_h/P_l} - 1}{(\sqrt[k]{P_h/P_l} - 1)/V_l + 1/V_l + 1/V_h} \tag{3}$$

ΔV 是衡量能量调节器能力的重要参数,表现为 P_h,P_l,V_h 和 V_l 的函数.通常,P_h 和 P_l 分别

设为系统的最高压力和最低压力，因此，可以把 $\sqrt[k]{P_h/P_l}$ 看作常数 $N(N>1)$. 式(3)为可重写

$$\Delta V=\frac{N-1}{(N-1)/V_l+1/V_l+1/V_h} \tag{4}$$

式(4)说明，为了得到相对更大的 ΔV，提高 V_l 比提高 V_h 有效.

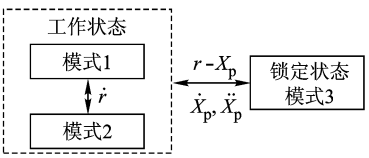
2.3 液压锁

在系统中，液压锁与能量调节器配合工作，具有2个作用：①如果控制器检测到系统输出处于稳态，并且稳态误差小于给定值，液压锁将把作动筒从系统中隔离出去，因此外负载力不会作用于电机；②如果能量调节器的压力不足，电机可以从油箱中吸油进行补充，以备下次使用.

一旦外力或者位置指令发生变化，系统的稳定状态将被打破，作动器立即解锁.

3 控制设计

控制器接受位置指令和反馈信号，生成控制信号. 电机和比例阀的输入为连续信号，液压锁的输入为开关信号. 模式切换原则如图4. 其中，如果稳态误差 $r-X_p$，速度 $\dot{X}_p$ 和加速度 $\ddot{X}_p$ 均小于预设门限值，作动器将被锁定. 在工作情况下，模式1和模式2的切换取决于指令的微分量 $\dot{r}$.



r—位置指令；X_p—活塞位移；$\dot{X}_p$— 速度；$\ddot{X}_p$— 加速度.

图4 模式切换原则

3.1 电机控制

在模式1，电机是系统的唯一动力源，在模式2，电机和能量调节器联合工作. 考虑 EHA 为一个五阶系统，具有以下状态变量[5]：

$$\boldsymbol{X}=[i \quad \omega \quad P_f \quad X_p \quad \dot{X}_p]^T \tag{5}$$

其中，i 为电机电流；ω 为电机旋转角速度；P_f 为作动筒两腔压力差. 系统状态方程可表达为

$$\dot{\boldsymbol{X}}=\begin{bmatrix} -\frac{R}{L} & -\frac{K_c}{L} & 0 & 0 & 0 \\ \frac{K_t}{J} & -\frac{K_{vm}}{J} & -\frac{D}{J} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{4BD}{V_t} & -\frac{4BK_l}{V_t} & 0 & -\frac{4AB}{V_t} \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & \frac{A}{M} & 0 & -\frac{K_{vp}}{M} \end{bmatrix}\boldsymbol{X}+\begin{bmatrix} \frac{1}{L} \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}u_m \tag{6}$$

输出向量：

$$\boldsymbol{Y}=[0 \quad 0 \quad 0 \quad 1 \quad 0]\boldsymbol{X} \tag{7}$$

其中，R 为电机电阻；L 为电机电感；K_c 为电机速度常数；K_t 为电机力矩常数；K_{vm} 为电机粘性阻尼系数；J 为电机和泵的总惯量；D 为泵排量；K_l 为总泄漏系数；K_{vp} 为活塞粘性阻尼系数；A 为活塞有效面积；M 为活塞及负载总质量；u_m 为电机输入电压.

用 Matlab 可以方便地计算出系统的状态反馈矩阵. 为了消除由压力反馈带来的稳态误差，可以在压力反馈回路上增加一个高通滤波器，形成动态压力反馈. 在模式3，为了给能量调节器补油，电机采用 PID(Proportion Integration Differentiation)控制方法. 如果能量调节器的压力达到 P_h，可以关闭电机以减小能耗.

3.2 比例阀控制

$\dot{r}$ 反映了系统对快速性的要求，可以用来决定系统应当工作于模式1或模式2.

比例阀采用变增益比例微分控制方法：

$$u_p=G(\dot{r})\left(K_p e+K_d\frac{de}{dt}\right) \tag{8}$$

其中，u_p 为比例阀的输入信号；e 为系统位置误差；K_p 为比例项系数；K_d 为微分项系数；$G(\dot{r})$ 为变增益部分：

$$G(\dot{r})=\begin{cases} 0 & |\dot{r}|<b \\ K|\dot{r}| & |\dot{r}|\geqslant b \end{cases} \tag{9}$$

其中，b 为切换速度；K 为 $|\dot{r}|$ 的增益. 如果 $|\dot{r}|$ 大于或等于 b，能量调节器在 u_p 控制下工作(模式2)，反之，$u_p=0$，能量调节器被禁止(模式1).

在模式3，为了给能量调节器补油，比例阀开口处于最大位置，连接能量调节器、液压泵和油箱. 若能量调节器的压力达到 P_h，比例阀关闭.

3.3 液压锁控制

当作动筒输出稳定在期望位置时，将被锁定. 锁定的具体判定原则如下：①稳态误差低于设定值 E_s，即 $e<E_s$；②活塞速度低于设定值 V_s，即 $\dot{X}_p<V_s$；③活塞加速度低于设定值 A_s，即 $\ddot{X}_p<A_s$. 其中，E_s 由实际系统的稳态误差指标给出，V_s 和 A_s 可分别取系统最大速度、最大加速度的1%左右. 这3个参数很接近零，但过小的取值有可能导致误切换或者系统失稳，应当通过仿真和试验进行验证.

非线性跟踪微分器[6]可以用来计算 $\dot{X}_p$ 和 $\ddot{X}_p$，能够获得比传统微分算法更光滑的结果.

4　仿真分析

通过框图建模方法,在 Matlab/Simulink 中建立了基于能量调节器的 EHA 模型[7].

图 5 是基于能量调节器的 EHA 和传统 FPVM-EHA 的阶跃响应对比(40%最大行程). 2.5 s时,对系统施加外力(50%最大负载)以观察系统刚度. 可见,能量调节器有效提高了响应速度和刚度. 系统的频率特性也得到相应改善:幅频特性−3 dB 点从 5 Hz 提升到 8 Hz;相频特性−90°点提高到 10 Hz 以上,可以满足机载作动系统的控制要求(图 6).

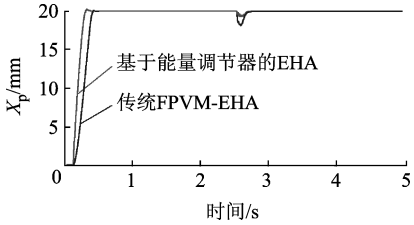


图 5　位置响应

为了确定图 3 中两个蓄能器的合适尺寸,考察不同 V_h 和 V_l 对系统性能的影响,进行表 1 所示的对比测试. 取 $P_h=28$ MPa,$P_l=2$ MPa,$k=1.3$,$N=7.61$,闭环系统的位置指令为 $r=0.01\cdot\sin(4\pi t)$. 每组测试的 ΔV 值由式(4)计算得到(表 1),同时被仿真结果所验证(图 7).

很明显,增加 V_l 比增加 V_h 能更有效地增大 ΔV. 这意味着能量调节器能够提供更多的能量来帮助系统运动.

图 8 为跟踪性能对比. 测试 1 和测试 2 没有明显区别,但是测试 3 具有更长的跟踪时间,因为其 ΔV 相对较大.

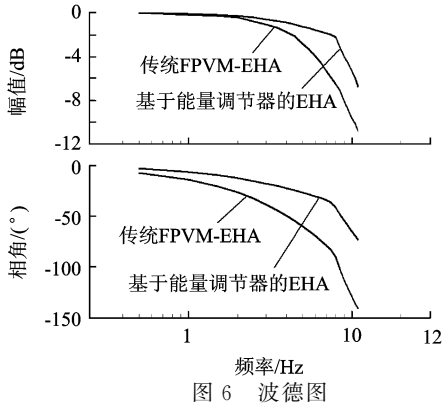


图 6　波德图

表 1　测试参数　　mL

参数	测试 1	测试 2	测试 3
V_h	300	600	300
V_l	300	300	600
ΔV	230.3	244.5	412.8

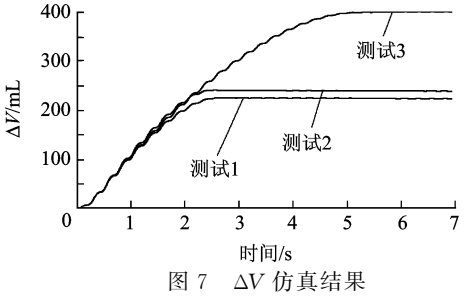


图 7　ΔV 仿真结果

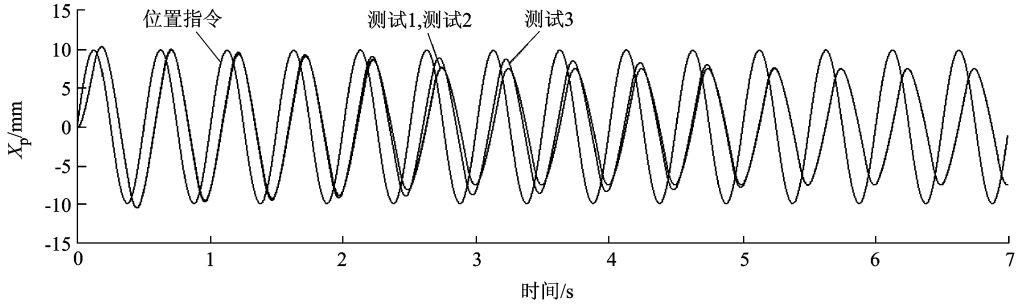


图 8　跟踪性能对比

5　结　论

基于能量调节的 EHA 是一种新的高性能作动器解决方案. 它可以处理不同的控制需求:在高效率模式,像传统 FPVM-EHA 一样工作,具有较高的能量效率;在高快速性模式,利用能量调节器提高响应速度,扩展频宽. 此外,液压锁有助于保持系统刚度和降低负载时的电机能耗. 计算和仿真的结果均证明:增加低压蓄能器的初始气体体积是提高能量调节器持续工作能力的有效方法.

参考文献(References)

[1] Alden R E. Flight demonstration, evaluation and proposed applications for various all electric flight control actuation system concepts[R]. AIAA Paper 93-1171,1993

(下转第 30 页)