基于定量反馈理论的 EHA 控制器设计

马纪明 付永领 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)

摘 要: 定量反馈理论(QFT,Quantitative Feedback Theory)是一种鲁棒控制器设计方法,具有很好的工程实用性,在液压伺服控制领域得到了广泛应用. 建立电动静液作动器(EHA,Electrical Hydrostatic Actuator)模型并简化后,基于定量反馈理论进行了内外环控制系统的设计. 内环控制电动机转速,主要保证其快速性;外环控制舵面的转角,要兼顾跟踪性能、鲁棒稳定性和抗干扰能力. 设计过程中考虑到了电动机、液压系统的参数不确定性和各种飞行状态下的负载变化情况,并根据内外环性能指标生成边界条件. 仿真结果表明:控制器不仅对参数变化具有鲁棒性,还能很好地抑制输出干扰带来的影响,使一体化电动静液作动系统充分发挥其转矩高、功率密度大、易于维修和模块化的优点,对整个飞控系统的性能提高有很大帮助.

关 键 词: 功率电传; 电动静液作动器; 定量反馈理论; 鲁棒控制

中图分类号: TH 137

文献标识码: A **文 章 编 号**: 1001-5965(2006)05-0553-05

EHA controller design based quantitative feedback theory

Ma Jiming Fu Yongling Gao Bo

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

Abstract: QFT (quantitative feedback theory) is a robust controller design method. It has good practicability and has been widely used in hydraulic servo control system. After creating the EHA(electrical hydrostatic actuator)'s model, the inner and outer loop controllers were designed based on QFT. Inner loop controlled motor's rotate speed and ensured that it had good response time. Outer loop controlled the position of flight surface and ensured that it had good robust stability, tracking capability and disturb restraining ability. Design process considered the parameters' uncertainty of electronic and hydraulic system, and aero load changing under all flight conditions. Performance bounds defining took all the inner and outer loop requirements into account. Simulation results show that this control system has good robust stability and can restrain the output disturbance efficiently, which can fully utilize some strongpoint of integrated EHA like high torque and power density, easiness to maintain and modularize. It can greatly improve the performance of flight control system.

Key words: power by wire; electrical hydrostatic actuator; QFT(quantitative feedback theory); robust control

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,Power By Wire)方向发展. 就像电传操纵系统(FBW,Fly-By-Wire)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[1-2]. 目前,功率电传作动器主要有 2 种形式:机电作动器(EMA,Electrical Mechanical Actuator)和电动静

收稿日期: 2005-05-10

作者简介: 马纪明(1979-),男,河南周口人,博士生, ssmjm2000@yahoo.com.cn.

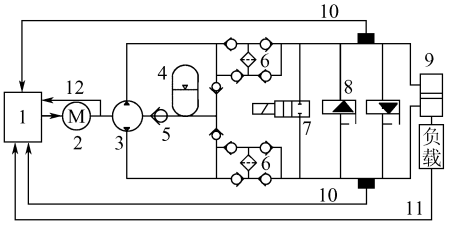
液作动器(EHA, Electrical Hydrostatic Actuator)[3]. 本文主要阐述了电动静液作动器的系统组成及数学模型,并针对系统的实际情况分析了模型中不确定参数的变化范围,基于定量反馈理论设计了系统的内外环控制器.

定量反馈理论是一种频域设计方法,由 Issac. Horowitz 教授在 20 世纪 60 年代提出,是一种鲁棒控制设计理论[4-7]. 它将经典控制理论中的频域校正器设计思想推广应用到对不确定性系统的鲁棒控制律设计,将对象的不确定范围和系统的性能指标用定量的方式在 Nichols 图上形成边界,进而以基准对象的开环频率曲线满足边界条件为要求在图上对系统进行设计与综合. 由于定量反馈理论是从工程应用角度提出的,并不一定需要知道对象的精确模型,而且控制器参数直接由对象的不确定范围、干扰大小以及设计指标高低来决定,因而它是目前鲁棒控制领域中具有较强工程实用价值的一种设计方法[8]. 定量反馈理论已经成功地在液压系统中得到了应用. 在容错控制系统的设计,尤其是液压伺服系统的设计中,能够解决由于系统泄漏、压力波动带来的控制对象参数不确定问题,得到很好的控制效果.

基于定量反馈理论(QFT, Quantitative Feedback Theory)的控制器设计是一个循环往复的过程. 首先要确定控制对象的不确定部分并在 Nichols 图表中绘制出对象模板;再根据要求确定一系列的性能指标,比如跟踪性、稳定性、抗干扰性等;然后根据对象模板和性能指标在频域内设定边界,根据所得边界,通过往复循环得到最终需要的控制器,如果需要的话,还要设计前置滤波器,以保证系统的跟踪性能;最后通过仿真或试验进一步验证控制器的性能是否满足要求.

1 EHA 组成及工作原理

本文中的 EHA 系统构成如图 1 所示. 通过控制电动机的转速和转向来控制作动器动作的速率和方向;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隔离故障;对称液压缸的输入和输出流量相等;速度、压力与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.



1—控制器;2—高性能直流无刷电动机;3—定排量双向柱塞泵;4—蓄能器;5—壳体卸油口及单向阀;6—油滤及子系统;7—旁通阀;8—安全阀;9—对称液压缸;10—压力传感器;11—负载位移传感器;12—旋转变压器(速度传感器)

图 1 EHA 系统组成

2 EHA 模型

EHA 模型见图 2. ①电动机部分参数:V_c 为电动机的电枢电压;I_c 为电枢电流;T_L 为电动机的电气时间常数;R_c 为电枢电阻;J_p,J_m 为泵和电动机的转动惯量,J 为二者之和; B_{fric},B_{pvisc}分别为电动机的摩擦系数和泵的粘度系数,B 为二者之和;C_t 为电动机电磁力矩常数;C_e 为反电势常数;ω_m 为电动机输出角速度;T_{load}为电动机负载转矩. ②液压部分参数:Q_p 为泵输出流量;$D_p = D/(2\pi)$,D 为泵排量;$K = V_0/(2\beta_e)$,$C = \xi + L/2$,其中,V_0 为管路和液压缸平均容积,β_e 为液压油等效容积弹性模数,ξ 为泵的内部泄漏系数,L 为泵的外部泄漏系数;A 为液压缸受力面的面积;P 为作动筒两腔的压力差. ③负载部分参数:EHA 的负载包括 2 个部分:舵面本身的惯性负载和空气动力负载,后者在飞行中才会存在. 惯性负载与舵面尺寸、质量相关. 空气动力负载 T_{aero}是一个与舵面面积、舵面转动半径、空气动压 $\bar{q}$ 和舵面偏转角相关的函数,而空气动压 $\bar{q}$ 又和飞行的速度、高度相关,是一个变化范围比较大的参数[9]. 图 2 负载部分模型中,F_A 为作动筒输出力;R_h 为舵面转动半径;$\overset{*}{M}_p$ 为活塞和负载的等效质量;$\overset{*}{B}_p$ 为活塞和负载的等效阻尼系数;X_p 为作动筒活塞杆位移;F_{load}为空气动力负载与舵面转角 θ 之间的函数关

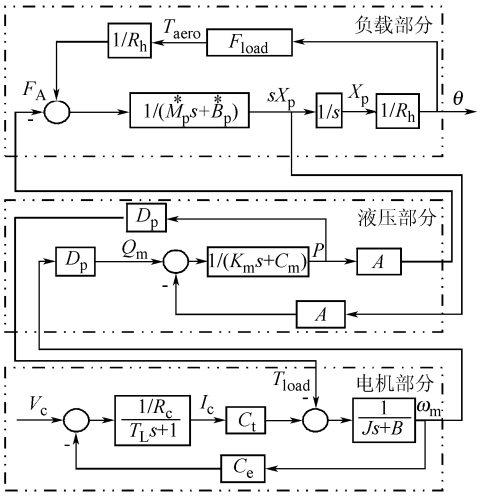


图 2 EHA 模型

系.

3　内环控制器设计

在进行 QFT 控制器设计之前,首先要把控制对象化为传递函数的形式,并把它分为内环和外环 2 部分,见图 3. 其中内环控制器主要用来控制电动机的转速和转向,电动机转向控制液压油的流向,进而控制作动筒的运动方向,外环控制舵面的转角. 对于电动机来说,快的速度响应和换向非常重要,因为整个系统主要是由外环对控制指令进行跟踪,内环没有必要对控制指令进行准确的跟踪,内环控制器主要保证电动机的响应时间以及鲁棒稳定性,尽量减少内环在整个系统中的不确定因素.

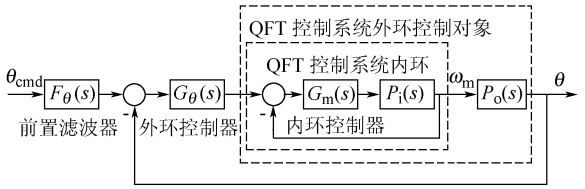


图 3　QFT 控制系统结构

内环的 QFT 设计时考虑到的不确定参数为 $\bar{q}, T_L, J, D, B, \beta_e, C_m, \overset{*}{B}_p$ 和 $\overset{*}{M}_p$. 根据这些参数的变化范围生成控制对象模板之后,就可以根据控制要求制定边界. 本文制定边界时考虑到内环系统以下 2 个方面的性能要求.

3.1　闭环鲁棒稳定性

闭环鲁棒稳定性限制条件表达式为 $|PG/(1+PG)| \leqslant \delta_n(\omega)$. 此条件是关系系统稳定性的限制条件,闭环传递函数的幅值增益 $|PG/(1+PG)|$ 小于一定的值就可以保证闭环系统的稳定性. 式中,P, G 分别为开环控制对象和控制器的传递函数;δ_n 为定义的性能指标. δ_n 越小,则系统的稳定裕度越大,能够容忍的干扰越强,稳定性越好. 对于频域内的控制器设计来说,幅值和相位裕度最能反映稳态特性. 幅值裕度 G_M、相位裕度 ϕ_M 同 δ_n 的关系表达式[10] 为 $G_M \approx 20\lg[(\delta_n+1)/\delta_n]$, $\phi_M = 20\arcsin[1/(2\delta_n)]$. 在内环控制器设计时,此限制条件为

$$|PG/(1+PG)| \leqslant \delta_n(\omega) = 1.2 \qquad (1)$$

3.2　跟踪性能

因为内环主要考虑的参数是电动机的响应时间以及鲁棒稳定性,对跟踪性能要求不严格,所以可以放宽对跟踪性能的限制.

$$|T_{rl}(j\omega)| \leqslant \left| F(j\omega)\frac{PG(j\omega)}{1+PG(j\omega)} \right| \leqslant |T_{ru}(j\omega)| \qquad (2)$$

根据系统的时域和频域要求,定义:

上边界:$T_{ru}(s) = \dfrac{100}{s+100}$

下边界:$T_{rl} = \dfrac{60^2}{s^2 + 2\times 2.5\times 60s + 60^2}$

设计出控制器:$G_m(s) = \dfrac{51.39(s/6+1)}{s(s/0.025+1)}$

由于内环不把电动机的跟踪性能作为主要的性能参数,所以不再设计前置滤波器 $F_\theta(s)$. 对象模板和边界的生成方法以及控制器的拟合过程见文献[11]. 限制条件确定之后生成的边界和控制器设计完成之后内环的开环 Nichols 图如图 4 所示. 内环阶跃响应同上下边界比较见图 5.

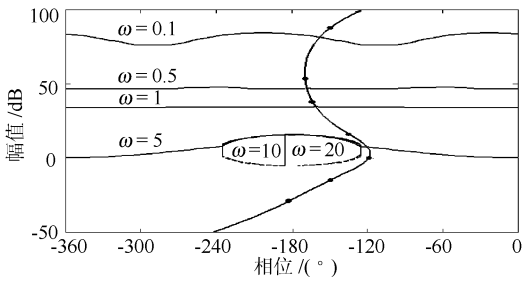


图 4　内环综合边界与开环 Nichols 图(含控制器)

(ω 单位:rad/s)

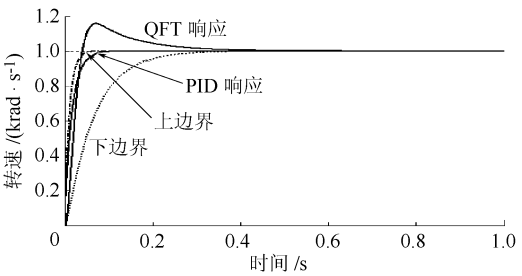


图 5　内环阶跃响应与上下边界比较

4　外环控制器设计

系统内环控制器设计完成之后,首先要对系统的内环进行简化. 因为在内环控制器设计时已经考虑到了内环控制对象参数的不确定性,整个内环已具有了一定的鲁棒性,所以在进行简化时,把它作为一个参数不变的确定的控制对象. 下一步内容是设计外环控制器 $G_\theta(s)$ 和前置滤波器 $F_\theta(s)$,以满足系统对整个一体化作动器的要求.

通过对外环传递函数 $P_o(s)$ 的表达式进行分析得出:外环只对参数 $D, \beta_e, C_m, \overset{*}{M}_p$ 和 $\overset{*}{B}_p$ 相关,所以在外环中就只考虑这些参数变化对系统的影响. 根据参数变化范围,在各个频率点($\omega = 0.1, 0.5, 1, 5, 10, 20, 100, 200, 500$ rad/s)生成对象模板如图 6 所示.

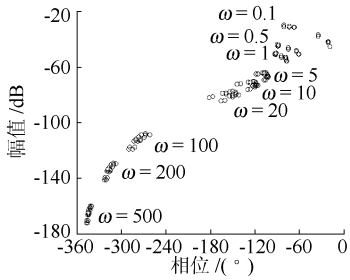


图6 外环对象参数变化时的模板(ω单位:rad/s)

对于外环控制系统来说,主要任务是保证EHA对控制指令的跟踪性能. 由于不同飞机、不同舵面对作动器的要求不一致,本文以替代F/A-18 SRA左副翼液压作动筒的EHA作动器为例进行设计. 根据要求的性能参数,可以给EHA确定一条跟踪边界(上下边界),确保EHA的响应在此边界范围之内既可保证系统的跟踪性能,同时设计的控制器也要能保证具有一定的鲁棒稳定性和抗干扰能力.

4.1 闭环鲁棒稳定性

闭环系统超调 M_p 同主导极点阻尼比 ζ 的关系式为 $M_p = e^{-\left(\zeta/\sqrt{1-\zeta^2}\right)\pi} \times 100\%$. 闭环鲁棒稳定性限制条件表达式(1)中闭环幅值限制值 δ_n 同闭环主导极点的阻尼比有一定的关系表达式:

$$\delta_n = 1/\left(2\zeta\sqrt{1-\zeta^2}\right) \tag{3}$$

从表达式(3)可以看出,闭环鲁棒稳定性限制条件表达式(1)通过对闭环系统主导极点阻尼比的限制,从而限制了闭环系统的幅值上限,因此也就间接地确定了系统阶跃输入的超调上限. 对于液压系统来说,比较合理的幅值裕度是 $G_M = 4.5$ dB[12]. 此时 $\delta_n \approx 1.45$ dB,超调达到30%,这同EHA系统最大超调不得超过5%的要求不符,如果超调过大,也增加了前置滤波器设计的难度. 为了尽量减少前置滤波器设计难度,在此设计环节把超调量限制在9%的范围内,最后闭环鲁棒稳定性限制条件表达式取值为

$$|L/(1+L)| < \delta_n = 1.035 \tag{4}$$

4.2 跟踪性能

由式(2)可看出,跟踪性能的确定主要是确定上下边界. 其中上边界 $T_{ru}(s)$ 由一个欠阻尼二阶系统衍生得来,主要考虑到阶跃响应的超调、峰值时间、调节时间、上升时间等因素;下边界 $T_{rl}(s)$ 由一个过阻尼二阶系统衍生得来,也是主要考虑时域特性. 最初的上下跟踪边界设定为

$$T_{ru}(s) = \frac{(s/8+1)}{(s/9+1)(s/30+1)^2}$$

$$T_{rl}(s) = \frac{1}{(s/10+1)(s/20+1)}$$

上边界最大超调量为2.5%,误差为2%时调节时间为0.26 s;下边界是一个过阻尼系统,误差为2%时调节时间为0.46 s. 由于上下边界零极点阶数差都为2,所以在高频阶段,BODE图的幅频特性曲线斜率相同. 然而在QFT设计中,在大于某个频率时($\omega > \omega_{hf}$),要求上下边界之间的间隔距离$|T_{ru}(j\omega)| - |T_{rl}(j\omega)|$开始增大,其中 ω_{hf} 是上边界幅值为-12 dB时的频率[13]. 这里 $\omega_{hf} = 56$ rad/s. 为了使上下边界之间的间距在 $\omega > \omega_{hf}$ 时开始增大,给上边界添加1个位于 $s=-120$ 的零点,而给下边界添加2个 $s=-190$ 的极点. 这样上下边界就重新定义为

$$T_{ru}(s) = \frac{(s/8+1)(s/120+1)}{(s/9+1)(s/30+1)^2} \tag{5}$$

$$T_{rl}(s) = \frac{1}{(s/10+1)(s/20+1)(s/190+1)^2} \tag{6}$$

外环控制器:

$$G_\theta(s) = \left[2.306 \times 10^6\left(\frac{s}{1.5}+1\right)\left(\frac{s}{15}+1\right)\cdot\left(\frac{s^2}{54.33^2}+\frac{2\times 0.7709s}{54.33}+1\right)\right]\Big/\left[\left(\frac{s}{0.025}+1\right)\cdot\left(\frac{s}{1\,000}+1\right)\left(\frac{s^2}{11\,259^2}+\frac{2\times 0.9472s}{11\,259}+1\right)\right] \tag{7}$$

前置滤波器:

$$F_\theta(s) = \left[\left(\frac{s^2}{15^2}+\frac{2\times 0.4}{15}s+1\right)\right]\Big/\left[\left(\frac{s^2}{20^2}+\frac{2\times 0.707}{20}s+1\right)\left(\frac{s^2}{15^2}+\frac{2\times 0.5}{15}s+1\right)\right] \tag{8}$$

限制条件确定之后生成的边界和控制器设计完成之后内环的开环Nichols图如图7所示.

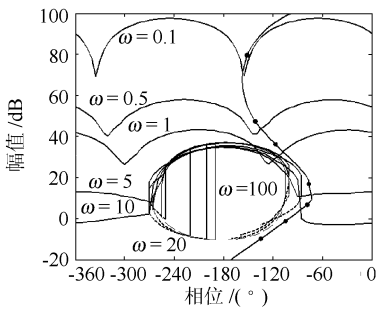


图7 外环综合边界与开环Nichols图(含控制器)
(ω单位:rad/s)

外环控制器的拟合设计过程同内环类似,现在 MATLAB 已经有了专门用于 QFT 设计的工具箱,通过这些计算工具在计算机上反复循环可以得到符合要求的控制器和前置滤波器. 设计完成之后,对整个系统的时域特性、频域特性和抗干扰性能进行了仿真分析,结果分别如图 8 ~ 图 10 所示. 从仿真结果可以看出,系统的时域和频域特性都能满足边界条件要求,同普通的大增益比例控制相比,对输出干扰的抑制效果更好.

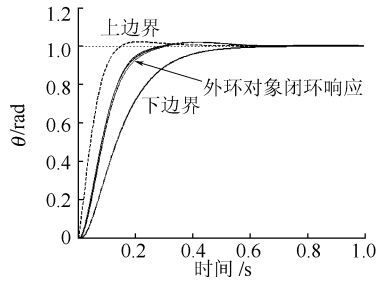


图 8　外环阶跃响应与上下边界比较

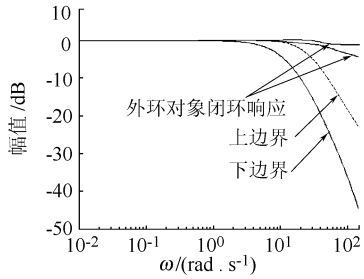


图 9　上下边界与闭环响应的 BODE 图比较

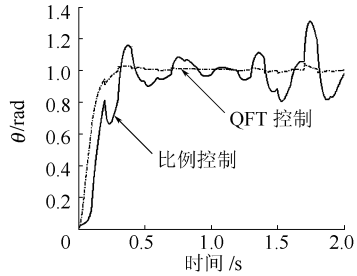


图 10　QFT 和大增益比例控制抑制干扰能力比较

5　结 束 语

本文在已经建立的 EHA 模型基础上,基于定量反馈理论设计了此作动系统的内环和外环控制器. 设计过程中根据电动机部分、液压部分和负载部分的不确定参数以及它们的波动范围得到系统控制对象模板,又根据模板和性能要求反复循环拟合得到控制器,这样在系统参数变化时它仍能够保证闭环系统的特性要求,同时对干扰有一定的抑制能力. 分析结果也表明 QFT 具有很好的控制效果,能够在模型难以精确建立和控制对象参数经常变动的领域得到应用.

参考文献 (**References**)

[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:北京航空航天大学自动化科学与电气工程学院, 2002
Xu Buli. Research on an EHA prototype of flight control system [D]. Beijing: School of Automation Science and Electrical Engineering, Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 2002 (in Chinese)

[2] 陈斌,王占林,裘丽华. 机载液压系统的发展趋势[J]. 航空学报,1998,19(7):1-6
Chen Bin, Wang Zhanlin, Qiu Lihua. Main developmental trend of aircraft hydraulic system[J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 1998, 19(7): 1-6 (in Chinese)

[3] 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 Xiaoye, Fu Yongling, Wang Zhanlin. 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)

[4] Horowitz I. Synthesis of feedback systems [M]. New York: Academic Press, 1963

[5] Horowitz I M, Sidi M. Synthesis of feedback systems with large plant ignorance for prescribed time domain tolerances[J]. International Journal of Control, 1972, 16(2): 287-309

[6] Horowitz I. Survey of quantitative feedback theory (QFT) [J]. International Journal of Control, 1991, 53(2): 255-291

[7] Horowitz I, Loecher C. Design of a 3×3 multivariable feedback system with large plant uncertainty[J]. International Journal of Control, 1981, 33(4): 677-699

[8] 肖永利, 张琛, 陈文华. 定量反馈理论(QFT)及其设计应用[J]. 信息与控制,1999,28(6):437-445
Xiao Yongli, Zhang Chen, Chen Wenhua. Quantitative feedback theory and its design application[J]. Information and Control, 1999, 28(6): 437-445 (in Chinese)

[9] 肖顺达. 飞行自动控制系统[M]. 北京:国防工业出版社, 1982:35-39
Xiao Shunda. Automatic flight control system[M]. Beijing: National Defence Industry Press, 1982: 35-39 (in Chinese)

[10] Yaniv O. Quantitative feedback design of linear and nonlinear control systems[M]. Norwell, MA: Kluwer Academic Publishers, 1999

[11] Borghesani C, Chait Y, Yaniv O. The QFT frequency domain control design toolbox for use with MATLAB [EB/OL]. http://www.eng.tau.ac.il/yaniv, 1999/2005-04-10

[12] Niksefat N, Sepehri N. Fault tolerant control of electrohydralic servo positioning system [C]//Proceedings of the American Control Conference. Arlington: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc, 2001, 6: 4472-4477

[13] Houpis C H, Rasmussen S J. Quantitative feedback theory fundamentals and applications [M]. New York: Marcel Dekker, 1999

[14] 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)

(责任编辑:文丽芳)