

文章编号: 1000-6893(2010)06-1177-08

混合作动系统的工作模式研究

付永领, 齐海涛, 王利剑, 刘和松

(北京航空航天大学 自动化科学与电气工程学院, 北京 100191)

Research on Operating Modes in Hybrid Actuation Systems

Fu Yongling, Qi Haitao, Wang Lijian, Liu Hesong

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

摘要: 具有非相似余度的混合作动系统(HAS)由功率电传作动器和传统的阀控液压伺服作动器(SHA)所组成,是未来多电飞机作动系统的发展趋势。阐述混合作动系统的结构组成及工作原理,建立其数学模型。对工作于两种传统模式——主动/主动模式和主动/被动模式时的混合作动系统进行了建模和理论分析。在此基础上,论述在一种全新的工作模式——主动/无载模式下,混合作动系统的结构组成和工作原理,并对其进行建模和理论分析。最后,对混合作动系统工作于每种模式下的优缺点进行了对比分析。分析结果对确定不同情况下混合作动系统的具体工作模式提供了依据。

关键词: 混合作动系统; 功率电传; 作动器; 工作模式; 力纷争

中图分类号: V227; TH137 **文献标识码:** A

Abstract: Hybrid actuation system (HAS) with dissimilar redundancies conforms to the development trend of future actuation systems in more electric aircraft. It is composed of a power-by-wire actuator and a traditional servo valve controlled hydraulic actuator (SHA). The structure and operating principle of HAS are represented, and its mathematic model is established. Modeling and theoretical analysis for the HAS operating in conventional operating modes, i. e., the active/active mode and active/passive mode, are carried out. Furthermore, a new operating mode of HAS, the active/no-load mode, is proposed. The structure, operating principle and modeling of HAS in this new mode are respectively discussed. Finally, comparative analysis is performed when HAS operates in these three modes. The analysis results provide a guideline to determine the specific operating mode of the HAS in different circumstances.

Key words: hybrid actuation system; power-by-wire; actuators; operating mode; force fighting

在现代飞机中,采用冗余的中央恒压液源(通常是3套)供油的信号电传、功率液传的阀控液压伺服作动器(Servo Valve Controlled Hydraulic Actuator, SHA),代表了当前主流主飞控作动系统的技术发展水平。近年来,随着对多电飞机(More Electric Aircraft, MEA)研究的深入及一些多电化理论、技术和产品的不断完善,为进一步提高飞控作动系统的可靠性,减轻重量,降低成本,可以通过引入功率电传作动器与传统SHA构成的混合作动系统(Hybrid Actuation System, HAS)来节省一套中央液源,并成为当前机载飞控作动系统发展的新趋势。采用功率电传作动系统对于减小安装和维护成本具有很大的潜力,同时还可以减轻系统重

量,提高飞机的可靠性和战伤生存力^[1-2]。

空客A380的飞控作动系统所采用的“2H/2E”(两套液源/两套电源)双体系结构^[3],就是一种混合的飞控作动系统,即把用于备份的功率电传作动器与主动控制的常规SHA结合起来,形成4套独立的主飞控作动系统。其中2套系统采用传统的中央液源为动力,另外2套以电为动力,装备了用于操纵舵面的功率电传作动器。这使得A380飞机的飞行控制在系统独立性、余度和可靠性上达到了前所未有的水平。

典型的功率电传作动器主要包括两种:电动静液作动器(Electro-Hydrostatic Actuator, EHA)和机电作动器(Electro-Mechanical Actuator, EMA)^[1]。从目前的使用情况来看,功率电传作动器一般还是作为备份系统,与传统的采用中央液源的液压作动器一起构成余度系统来使用。功率电传作动系统引入飞控作动系统中以

收稿日期: 2009-06-10; 修订日期: 2009-07-21

基金项目: 国家自然科学基金(50675009); 新世纪优秀人才支持计划(NCET-05-0192)

通讯作者: 齐海涛 E-mail: haitao8642@163.com

后,将会对传统的作动系统工作模式产生很大影响。在传统的采用余度配置的飞控作动系统中,作动器一般采用配置完全一致的几套元部件构成相似余度,有两种常见的工作模式:主动/主动(Active/Active, A/A)模式和主动/被动(Active/Passive, A/P)模式。关于传统的余度作动系统在这两种工作模式下的控制及减小其所产生的力纷争问题等均有较好的解决方案,且应用十分成熟^[4-9]。但对于由功率电传作动器(特别是EMA)与SHA所组成的具有非相似余度的HAS来说,工作于两种传统的模式下是否为最优值得探讨。

德国汉堡技术大学的O. Cochoy等^[10-11]针对HAS提出了一种全新的工作模式:主动/无载(Active/No-Load, A/NL)模式。目前只有德国汉堡技术大学和法国国立应用科学学院^[12]对该工作模式下的力纷争现象及力均衡控制策略进行了初步研究。但由于该工作模式也有其自身的优缺点,对其在HA中的适用性并没有进行相关研究。

本文在阐述HAS结构组成和工作原理的基础上,通过数学建模、理论分析和仿真研究分别对HAS工作于上述3种不同工作模式下的快速性和力纷争等进行了详细分析,并对3种工作模式进行了对比分析,为不同情况下HAS具体工作模式的选择提供了依据。

1 HAS的结构组成与工作原理

本文所研究的HAS的原理图如图1所示。

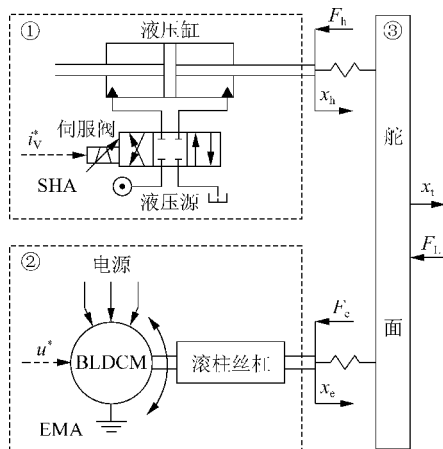


图1 混合作动系统的原理图

Fig. 1 Schematic of hybrid actuation system

图1的第1部分为SHA,由中央液压源、流量伺服阀、对称液压缸和其他液压附件组成,其输入信号为伺服阀的控制电流 i_v^* 和外负载力 F_h , 输出信号为液压缸的位移 x_h ;第2部分为EMA,

由无刷直流电机(Brushless Direct Current Motor, BLDCM)和可逆旋转的滚柱丝杠组成,其输入信号为电机的控制电压 u^* 和外负载力 F_e , 输出信号为丝杠的位移 x_e ;第3部分为飞控舵面,其输入信号为 x_h 、 x_e 和空气动力载荷 F_L , 输出信号为舵面位移 x_t 和分别作用于SHA和EMA上的外负载力 F_h 和 F_e 。

2 HAS的数学模型

2.1 SHA

由于组成SHA的液压附件,如旁通阀、溢流阀等,在正常的工作条件下不起作用,因此在建模过程中没有加以考虑。假设伺服阀放大器为比例环节,其增益为 K_v , 伺服阀的响应为二阶环节,则基本方程为

(1) 流量控制方程

$$Q_t(s) = \frac{K_Q K_V \frac{v}{2}}{s^2 + 2 \zeta_v \omega_v s + \omega_v^2} i_v^*(s) - K_c p_r(s) \quad (1)$$

(2) 流量连续性方程

$$Q_t(s) = A_t s x_h(s) + \frac{V_t}{4} s p_r(s) + G p_r(s) \quad (2)$$

(3) 力平衡方程

$$A_t p_r(s) = m_p s^2 x_h(s) + B_h s x_h(s) + F_h(s) \quad (3)$$

式中: K_Q 为空载流量增益; v 为伺服阀的阻尼系数; ω_v 为伺服阀的特征频率; K_c 为流量压力系数; p_r 为负载压力; A_t 为活塞面积; V_t 为SHA的总容腔体积; G 为体积弹性模量; G 为泄漏系数; m_p 为活塞质量; B_h 为SHA的黏滞阻尼系数。

由式(1)~式(3)可得SHA的方块图,如图2所示。

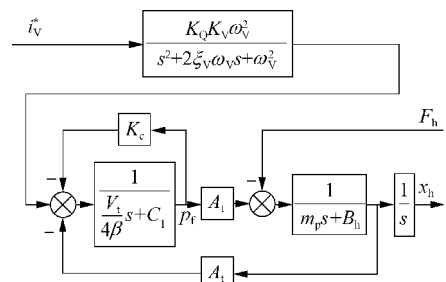


图2 SHA的方块图

Fig. 2 Block diagram of SHA

2.2 EMA

所研究的EMA为直驱式,丝杠螺母由电机直接驱动,并通过丝杠来直接传递位移。忽略换相过程对BLDCM的影响,则基本方程为

(1) 电势平衡方程

$$u^*(s) = E(s) + R_c i_c(s) + L_c s i_c(s) \quad (4)$$

(2) 转矩平衡方程

$$T_m(s) = T_L(s) + J_e s \omega(s) + B_e \omega(s) \quad (5)$$

(3) 反电势方程

$$E(s) = C_e \omega(s) \quad (6)$$

(4) 电磁转矩方程

$$T_m(s) = C_m i_c(s) \quad (7)$$

(5) 滚柱丝杠负载力及输出位移方程

$$F_e(s) = \frac{1}{r} T_L(s) \quad (8)$$

$$X_e(s) = \frac{1}{s} r \omega(s) \quad (9)$$

式中: E 为反电势; R_c 为电枢电阻; L_c 为电枢电感; i_c 为电枢电流; T_m 为电磁转矩; T_L 为负载转矩; J_e 为 EMA 的转动惯量; B_e 为 EMA 的黏滞阻尼系数; ω 为 BLDCM 的转速; C_e 为 BLDCM 的反电势系数; C_m 为 BLDCM 的电磁转矩系数; $r = l / (2 \pi)$ 为传送比, l 为丝杠导程。

由式(4) ~ 式(9)可得 EMA 的方块图,如图 3 所示。

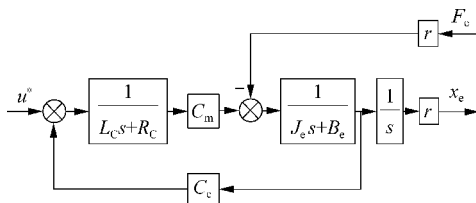


图 3 EMA 的方块图

Fig. 3 Block diagram of EMA

2.3 舵面

将舵面作为一个刚性体来建模表示负载的惯量,并考虑作动器与舵面的连接刚度,则舵面的运动方程为

$$m_t s^2 x_t(s) = F_h(s) + F_e(s) - F_L(s) \quad (10)$$

$$F_h(s) = K_t (x_h(s) - x_t(s)) \quad (11)$$

$$F_e(s) = K_t (x_e(s) - x_t(s)) \quad (12)$$

式中: m_t 为舵面的等效质量; K_t 为舵面的连接刚度。

由式(10)和式(12)可得舵面的方块图,如图 4 所示。

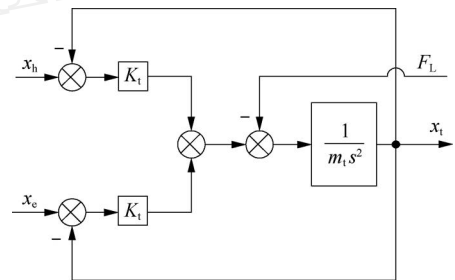


图 4 舵面的方块图

Fig. 4 Block diagram of control surface

2.4 整个 HAS 的数学模型

基于上述分析,可以得出整个 HAS 未加控制器时的数学模型,其方块图如图 5 所示。

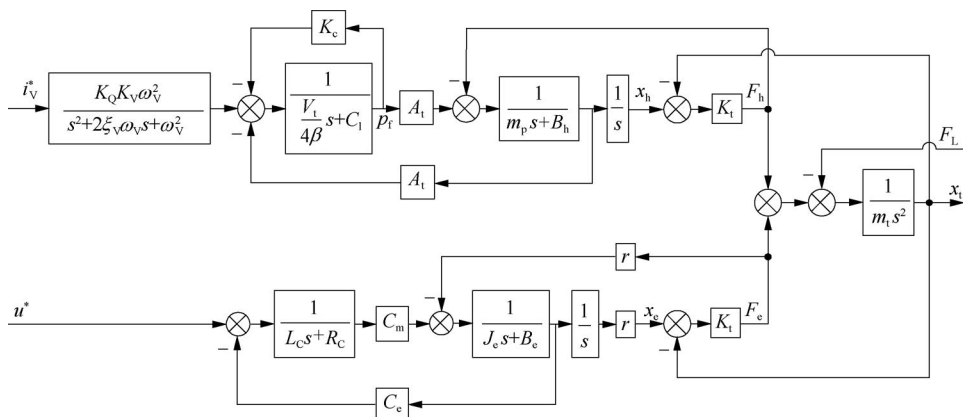


图 5 未加控制器时整个 HAS 的方块图

Fig. 5 Block diagram of whole HAS without controller

3 混合作动系统的工作模式

由于 HAS 的配置不同于传统的相似冗余作

动系统,因此对其最优工作模式的选择需要进行深入研究。下面分别对可供 HAS 选择的不同工作模式进行详细分析。

3.1 A/A工作模式分析

在该模式下,组成余度作动系统的两个作动器都需要进行主动控制。由于两个独立的作动器均驱动同一舵面,系统中存在的交叉耦合和通道差异将导致力纷争的产生,严重时还会导致舵面

的疲劳破坏^[13]。当 HAS 工作于该模式时,SHA 采用比例控制,EMA 采用双闭环控制,内环为速度环、采用比例积分(Proportion-Integral, PI)控制,外环为位置环、采用比例控制。该模式下整个 HAS 的方块图如图 6 所示,图中, x^* 为位置指令。

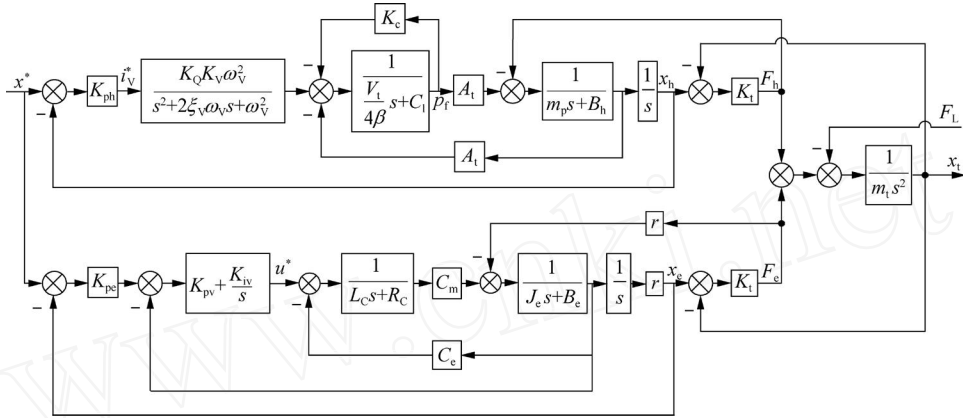


图 6 A/A 工作模式下整个 HAS 的方块图

Fig. 6 Block diagram of whole HAS operating in A/A mode

根据图 6 所示的方块图,可以得出该模式下 SHA 的输出位移表达式为

$$x_h = \frac{\frac{K_o K_v K_{ph}}{s^2 + 2\xi_v \omega_v s + \omega_v^2} x^* - \frac{1}{A_t} \left(\frac{V_t}{4} s + K_{ce} \right) F_h}{G_h(s)} \quad (13)$$

式中: K_{ph} 为 SHA 比例控制器的比例系数; $K_{ce} = K_c + G$ 为总流量压力系数。

$$G_h(s) = \frac{V_t m_p}{4 A_t} s^3 + \left(\frac{K_{ce} m_p}{A_t} + \frac{V_t B_h}{4 A_t} \right) s^2 + \left(\frac{K_{ce} B_h}{A_t} + A_t \right) s + \frac{K_o K_v K_{ph}}{s^2 + 2\xi_v \omega_v s + \omega_v^2} \quad (14)$$

EMA 输出位移表达式为

$$x_e = \frac{\frac{K_{pe} (K_{pv} s + K_{iv})}{s} x^* - \frac{r(L_c s + R_c)}{C_m} F_e}{G_e(s)} \quad (15)$$

式中:

$$G_e(s) = \frac{L_c J_e}{C_m r} s^3 + \frac{L_c B_e + R_c J_e}{C_m r} s^2 + \left(\frac{R_c B_e}{C_m r} + \frac{C_e + K_{pv}}{r} \right) s + \left(K_{pe} K_{pv} + \frac{K_{iv}}{r} \right) + \frac{K_{pe} K_{iv}}{s} \quad (16)$$

式中: K_{pe} 为 EMA 外环比例控制器的比例系数; K_{pv} 和 K_{iv} 分别为 EMA 内环 PI 控制器的比例系数和积分系数。

忽略气动载荷 F_L 的影响,则舵面输出位移为

$$x_t(s) = \frac{F_h(s) + F_e(s)}{m_t s^2} \quad (17)$$

式中:

$$F_h(s) = K_t (x_h(s) - x_t(s)) \quad (18)$$

$$F_e(s) = K_t (x_e(s) - x_t(s)) \quad (19)$$

由式(13)~式(19)可以推导出该模式下的力纷争为

$$F(s) = F_h(s) - F_e(s) = \frac{2 \left[\frac{K_o K_v K_{ph}}{s^2 + 2\xi_v \omega_v s + \omega_v^2} G_e(s) + \frac{K_{pe} (K_{pv} s + K_{iv})}{s} G_h(s) \right]}{G_1(s) - G_2(s)} x^*(s) - \frac{(G_1(s) + G_2(s)) m_t s^2 + G_3(s)}{G_1(s) - G_2(s)} x_t(s) \quad (20)$$

式中:

$$G_1(s) = \frac{1}{A_t} \left(\frac{V_t}{4} s + K_{ce} \right) G_e(s) \quad (21)$$

$$G_2(s) = \frac{r(L_c s + R_c)}{C_m} G_h(s) \quad (22)$$

$$G_3(s) = \frac{2(m_t s^2 + 2K_t)}{K_t} G_h(s) G_e(s) \quad (23)$$

3.2 A/P工作模式分析

在该模式下,组成余度作动系统的两个作动器中只有一个作动器进行主动控制,其他作动器作为主动控制作动器的负载跟随舵面的运动。传

统的采用伺服阀控制的液压作动器工作于该模式下较容易实现,因为当液压作动器处于被动工作模式时,可以通过阻尼旁通阀来导通液压缸的两腔,这样既能提供一定的阻尼,又不会给主动控制的作动器带来较大的负载。若 HAS 工作于该模式下,则会产生两种情况:一种是 SHA 主动控制,EMA 被动跟随;一种是 EMA 主动控制,SHA 被动跟随。虽然不管工作于哪种情况下都

不会存在力纷争,但每种情况下作动器所需要克服的由被动跟随作动器所产生的外负载力不同。下面分别进行分析。

(1) SHA 主动/ EMA 被动

该模式下,SHA 采用比例控制器进行主动控制,EMA 不进行控制,作为 SHA 的负载被动跟随 SHA 的运动。此时的系统方块图如图 7 所示。

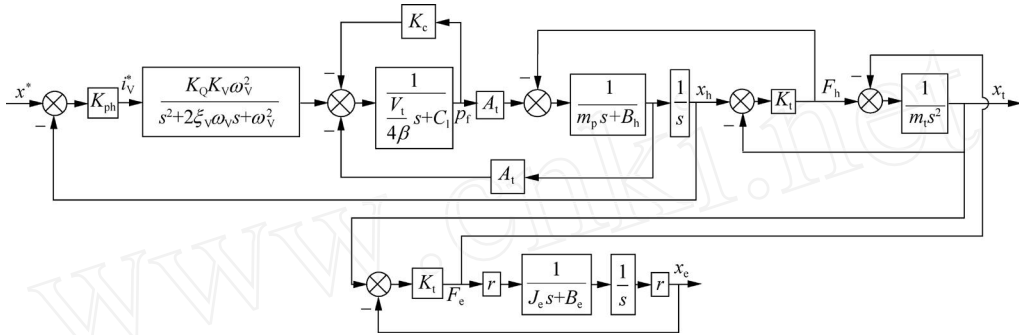


图 7 SHA 主动/ EMA 被动模式下整个 HAS 的方块图

Fig 7 Block diagram of whole HAS operating in SHA active/ EMA passive mode

根据图 7 所示的方块图,可以得出该模式下,SHA 输出位移表达式同式(13)。EMA 输出位移表达式为

$$x_e(s) = \frac{r^2}{(J_e s + B_e) s} F_c(s) \quad (24)$$

忽略空气动力学 \$F_L\$ 的影响,则舵面输出位移为

$$x_t(s) = \frac{F_h(s) - F_c(s)}{m_t s^2} \quad (25)$$

式中:

$$F_h(s) = K_t (x_h(s) - x_t(s)) \quad (26)$$

$$F_c(s) = K_t (x_t(s) - x_e(s)) \quad (27)$$

由式(13)、式(24)~式(27)可以推出该模式下 SHA 的输出力为

$$F_h(s) = G_5(s) \cdot$$

$$\frac{K_o K_v K_{ph} K_t \frac{2}{v}}{G_h(s) K_t + G_4(s) G_5(s)} x^*(s) \quad (28)$$

式中:

$$G_4(s) = \frac{1}{A_t} \left(\frac{V_l s}{4} + K_{ce} \right) K_t + G_h(s) \quad (29)$$

$$G_5(s) = \frac{K_t (J_e s + B_e) s}{(J_e s + B_e) s + K_t r^2} + m_t s^2 \quad (30)$$

(2) EMA 主动/ SHA 被动

该模式下,EMA 采用双闭环控制器进行主动控制,内环为速度环、采用 PI 控制,外环为位置环、采用比例控制,SHA 不进行控制,但将其作动筒两腔导通,使其作为 EMA 的负载被动跟随 EMA 的运动。此时的系统方块图如图 8 所示。

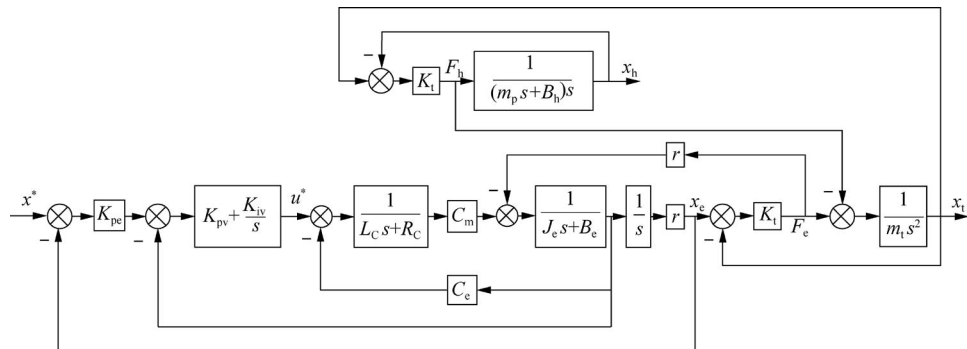


图 8 EMA 主动/ SHA 被动模式下整个 HAS 的方块图

Fig 8 Block diagram of whole HAS operating in EMA active/ SHA passive mode

根据图 8 所示的方块图,可以得出该模式下,EMA 输出位移表达式同式(15)。SHA 输出位移表达式为

$$x_h(s) = \frac{1}{(m_p s + B_h) s} F_h(s) \quad (31)$$

忽略气动载荷 F_L 的影响,则舵面输出位移为

$$x_t(s) = \frac{F_e(s) - F_h(s)}{m_t s^2} \quad (32)$$

式中:

$$F_e(s) = K_t (x_e(s) - x_t(s)) \quad (33)$$

$$F_h(s) = K_t (x_t(s) - x_h(s)) \quad (34)$$

由式(15)、式(31)~式(34)可以推出该模式下 EMA 的输出力为

$$F_e(s) = G(s) \frac{K_{pe} K_t (K_{pv} s + K_{iv})}{G_e(s) K_t + G_6(s) G_7(s)} x^*(s) \quad (35)$$

式中:

$$G_6(s) = \frac{K_t r(L_c s + R_c)}{C_m} + G_e(s) \quad (36)$$

$$G_7(s) = \frac{K_t (m_p s + B_h) s}{(m_p s + B_h) s + K_t} + m_t s^2 \quad (37)$$

3.3 A/NL 工作模式分析

A/NL 工作模式是一种全新的余度系统工作模式,其原理如图 9 所示。该模式下,仍然需要对组成 HAS 的两个作动器同时进行控制,但与传统 A/A 模式的不同在于:正常工作状态下,只对 SHA 进行位置控制,而对 EMA 则通过力控制使其只跟随舵面的运动,但不承受任何外负载力;在异常情况下(SHA 通道故障),通过模式切换开关,将 EMA 切换为位置控制,SHA 通过阻尼旁通阀无载运动。

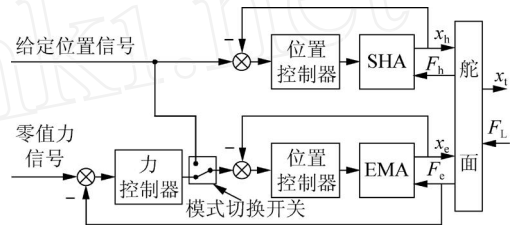


图 9 A/NL 工作模式的原理图

Fig. 9 Schematic of A/NL operating mode

该模式下,SHA 采用比例控制,EMA 在位置双闭环控制的基础上,增加一个力控制的外环,则整个 HAS 的方块图如图 10 所示。

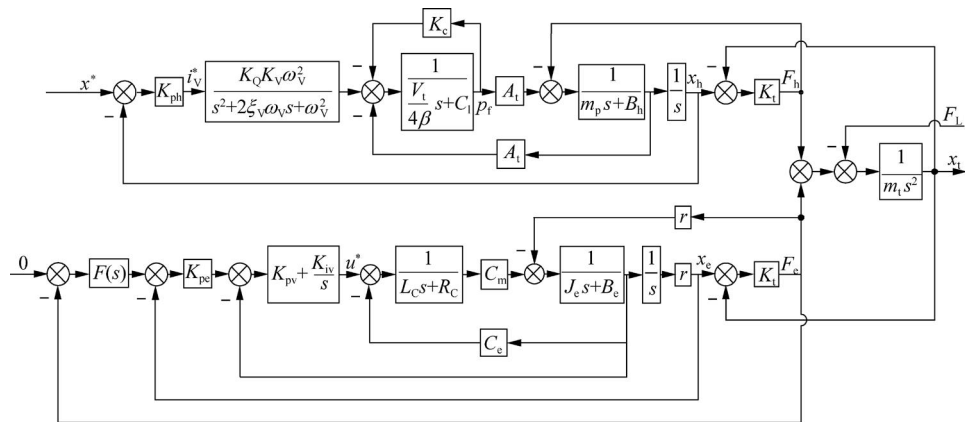


图 10 A/NL 模式下整个 HAS 的方块图

Fig. 10 Block diagram of whole HAS operating in A/NL mode

该模式下,SHA 输出位移表达式同式(13),EMA 输出位移表达式为

$$x_e(s) = - \frac{K_{pe} (K_{pv} s + K_{iv})}{s} F(s) + \frac{r(L_c s + R_c)}{C_m} F_e(s) \quad (38)$$

式中: $F(s)$ 为力控制器的传递函数。

忽略气动载荷 F_L 的影响,则舵面输出位移为

$$x_t(s) = \frac{F_h(s) + F_e(s)}{m_t s^2} \quad (39)$$

式中:

$$F_h(s) = K_t (x_h(s) - x_t(s)) \quad (40)$$

$$F_e(s) = K_t (x_e(s) - x_t(s)) \quad (41)$$

由式(13)及式(38)~式(41)可以推导出该模式下的力纷争为

$$F(s) = F_h(s) - F_e(s) =$$

$$\frac{2 \frac{K_o K_v K_{ph} \frac{2}{v}}{s^2 + 2 \frac{v}{v} s + \frac{2}{v}} G_e(s)}{G_1(s) - G_2(s) - G_8(s)} x^*(s) - \frac{(G_1(s) + G_2(s) + G_8(s)) m_t s^2 + G_3(s)}{G_1(s) - G_2(s) - G_8(s)} x_t(s) \quad (42)$$

式中:

$$G_8(s) = \frac{K_{pe} (K_{pv}s + K_{iv})}{s} F(s) G_h(s) \quad (43)$$

3.4 3 种工作模式的对比分析

对于 A/P 工作模式来说,当 SHA 主动/EMA 被动工作时,由于 EMA 本身的惯性和摩擦都比较大,导致了功率损耗的增加,同时系统的快速性也大大降低。当 EMA 主动/SHA 被动工作时,类似于传统的主动/被动模式,虽然系统性能还可以,但由于目前 EMA 作动器尚存在诸如卡死等致命问题未解决,这种模式尚无法在实际中被采用。因此,当前技术条件下 HAS 不适合工作于 A/P 工作模式下。

对于 A/A 和 A/NL 工作模式来说,二者都会产生力纷争,但其实质却不同。A/A 模式下的力纷争主要是由于 SHA 和 EMA 的响应不同步造成的;而 A/NL 模式下的力纷争则是由于该模式下只有 SHA 先运动产生差值力 EMA 才会运动造成的,其存在固有的相位滞后。通过对比 A/A 模式下的力纷争表达式式(20)和 A/NL 模式下的力纷争表达式式(42)可以看出,理论上无法确定两种工作模式下力纷争究竟谁大谁小。因此,基于以上两种工作模式下的方块图,在 Simulink 下建立仿真模型对其进行研究。

通过仿真发现,当 SHA 与 EMA 各自的响应时间不同时,在两种工作模式下的力纷争和快速性响应也会不同。根据 SHA 与 EMA 各自响应快慢的不同,可以分为以下 3 种情况,图 11 为不同情况下的阶跃响应曲线,图 12 为不同情况下的力纷争曲线。

(1) 当 SHA 与 EMA 的快速性响应相当时, A/A 模式下的快速性优于 A/NL 模式,如图 11(a) 所示。同时, A/A 模式下的力纷争小于 A/NL 模式,如图 12(a) 所示。

(2) 当 SHA 的响应比 EMA 慢许多时, A/A 模式下的响应时间介于 SHA 和 EMA 各自的响应时间之间,而 A/NL 模式下的响应时间略长于 SHA 的响应时间,因此 A/A 模式下的快速性远优于 A/NL 模式,如图 11(b) 所示。但此时, A/A 模式

下的力纷争也远大于 A/NL 模式,如图 12(b) 所示。

(3) 当 SHA 的响应比 EMA 快许多时, A/A 模式下的响应时间比 A/NL 模式下的长,如图 11(c) 所示,但两种模式下的力纷争相差不大,如图 12(c) 所示。

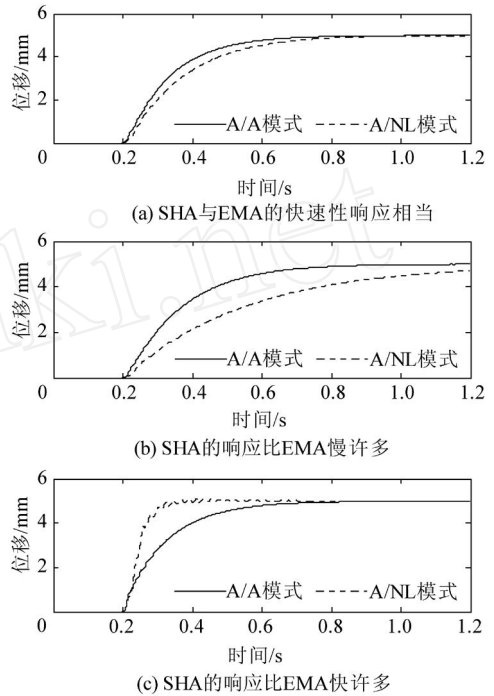


图 11 不同情况下的阶跃响应

Fig. 11 Step response in different conditions

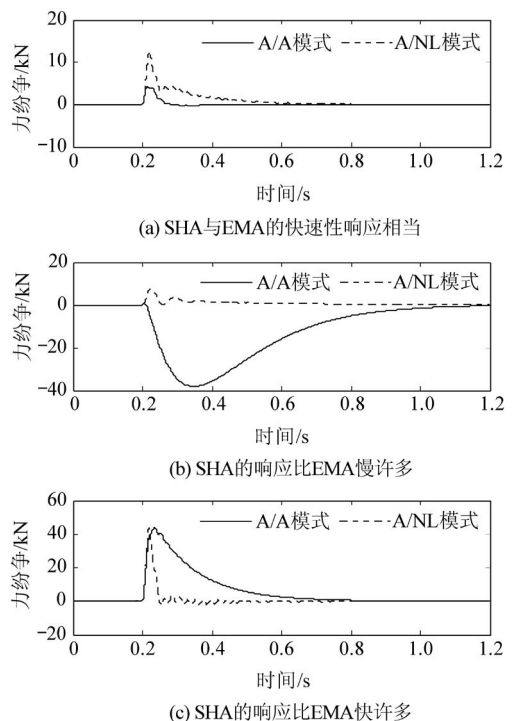


图 12 不同情况下的力纷争

Fig. 12 Force fighting in different conditions

除了快速性和力纷争的对比之外, HAS 工作于 A/NL 模式下可以减少 EMA 的磨损损耗, 提高系统效率, 但其控制更为复杂。主要原因在于该模式下除了对 SHA 进行位置控制以外, 还需要对 EMA 进行力控制。同时, 在该模式下, 当作为位置控制的 SHA 发生故障时, 需要立即将 EMA 从力控制切换为位置控制, 同时需要将 SHA 的位置控制信号切断, 并打开阻尼旁通阀导通液压缸的两腔, 系统转入 EMA 主动/SHA 无载工作模式。其故障监测和冗余管理也较 A/A 模式复杂。

4 结 论

(1) 目前 EMA 受技术发展水平的限制, 当其主动工作时, 存在卡死等致命问题未解决, 无法采用; 当其被动工作时, 将导致系统功率损耗增加, 快速性降低, 因此 A/P 工作模式不适用于混合作动系统。

(2) 组成混合作动系统的 SHA 和 EMA 的响应快慢不同时, 所对应的最优工作模式也不同。当二者响应快慢相当时, 宜采用 A/A 工作模式, 此时具有很好的快速性, 且力纷争也较小; 当 SHA 的响应比 EMA 慢许多时, 若 HA 的响应仍能满足系统要求, 则采用 A/NL 工作模式, 可大大减小力纷争, 否则采用 A/A 工作模式, 但需对其进行力均衡控制; 当 SHA 的响应比 EMA 快许多时, 宜采用 A/NL 工作模式, 可大大提高系统的快速性。

(3) A/NL 工作模式作为一种全新的工作模式, 在 SHA 的响应比 EMA 慢许多时可以减小力纷争, 当 SHA 的响应比 EMA 快许多时可以提高快速性, 同时还具有减少 EMA 的磨损损耗, 提高系统效率的优点, 因此为混合作动系统的工作模式提供了一种不错的选择。

参 考 文 献

- [1] Moir I, Seabridge A. Aircraft systems: mechanical, electrical, and avionics subsystems integration [M]. 3rd ed. England: John Wiley & Sons, Ltd., 2008: 30-34.
- [2] Botten SL, Whitley CR, King AD. Flight control actuation technology for next generation all-electric aircraft[J]. Technology Review Journal—Millennium Issue, 2000, Fall/Winter: 55-68.
- [3] Charrier J J, Kulshreshtha A. Electric actuation for flight & engine control system: evolution, current trends & fu-

ture challenges[C]. Collection of Technical Papers—45th AIAA Aerospace Sciences Meeting. 2007: 16421-16440.

- [4] Schaeffer W S, Inderhees L J, Moynes J F. Flight control actuation system for the B2 advanced technology bomber [J]. SAE (Society of Automotive Engineers) Transactions, 1991, 100(1): 284-295.
- [5] Qi H T, Mare J C, Fu Y L. Force equalization in hybrid actuation systems[C]. Proceedings of the Seventh International Conference on Fluid Power Transmission and Control. 2009: 342-347.
- [6] 王占林, 石立. 力均衡式冗余电液伺服系统的优化设计[J]. 航空学报, 1989, 10(8): B366-B372.
Wang Zhanlin, Shi Li. The optimal design of multipass electric-hydraulic servo systems with force balance type [J]. Acta Aeronautica et Astronautica Sinica, 1989, 10(8): B366-B372. (in Chinese)
- [7] Mare J C, Moulaire P. The decoupling of position controlled electrohydraulic actuators mounted in tandem or in serie[C]. Proceedings of the Seventh Scandinavian International Conference on Fluid Power. 2001: 93-108.
- [8] Li J, Fu Y L, Gao B, et al. Force balancing control of multi-electro-hydrostatic actuators for aircraft [C]. Proceedings of the Sixth International Conference on Fluid Power Transmission and Control. 2005: 9-13.
- [9] Jacazio G, Gastaldi L. Equalization techniques for dual redundant electro hydraulic servo actuators for flight control systems [C]. Bath/ASME Symposium on Fluid Power and Motion Control. 2008: 543-557.
- [10] Cochoy O, Hanke S, Carl U B. Concepts for position and load control for hybrid actuation in primary flight controls [J]. Aerospace Science and Technology, 2007, 11(2/3): 194-201.
- [11] Cochoy O, Carl U B, Thielecke F. Integration and control of electromechanical and electrohydraulic actuators in a hybrid primary flight control architecture [C]. International Conference on Recent Advances in Aerospace Actuation Systems and Components. 2007: 1-8.
- [12] Qi H T, Fu Y L, Mare J C, et al. Investigation in hybrid actuation for duplex actuators operating in active/no-load modes[C]. Proceedings of the 2009 IEEE/ASME International Conference on Advanced Intelligent Mechatronics. 2009: 993-997.
- [13] 程涛, 王占林. 灵巧式舵机并行驱动的研究[J]. 北京航空航天大学学报, 1996, 22(2): 167-170.
Cheng Tao, Wang Zhanlin. Study of the parallel actuation of smart actuators [J]. Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics, 1996, 22(2): 167-170. (in Chinese)

(编辑: 孔琪颖)