

电气液压复合调节容积式舵机的精确线性化控制*

李运华 王占林

(北京航空航天大学自动化学院 北京 100083)

摘要: 针对先进歼击机功率电传作动系统舵面控制的需求, 提出了一种具有电气—液压复合调节容积式舵机的结构方案, 并讨论了这种舵机的操纵状态和工作特性。在此基础上, 推导了描述舵机动态特性的非线性状态方程。然后, 采用非线性系统的几何控制理论, 证明了系统满足精确线性化的条件, 并给出了基于时间—误差性能指标(ITAE)最小的最优控制律, 成功地解决了复合舵机控制系统存在的交联问题和相乘非线性问题。所提出的控制方法奠定了电气—液压复合舵机非线性控制理论的基础。

关键词: 舵机 电气伺服系统 液压伺服系统 非线性控制 微分几何

中图分类号: TH137

0 前言

随着战斗机在机动性、生存能力、能量利用性、信息综合与自动化等方面要求的提高, 对飞控系统的关键部件—舵机在功率传输及调节、通信及控制、可靠性、能量利用、体积及重量等方面提出了越来越高的要求。电动舵机虽然具有功率传输和控制综合方便等优点, 但在定位刚度(即伺服系统抵抗外负载干扰的能力)、响应速度和功率质量比等方面相比电液阀控舵机还有较大的差距; 而另一方面电液阀控舵机也存在着效率低、对油液污染敏感等不足之处。因此将两者结合形成功率电传, 电气—液压复合调节的作动系统是非常有意义的。人们在比较了功率电传作动系统可能实现的四个方案即电动机—机械传动驱动舵面方案(EMA)、电液阀控舵机方案(EHV)、电动机—泵控作动方案(EPA)和电液容积复合作动方案(EPCA)后发现, EPCA 可望成为大功率电传作动系统的功率转换与执行部件。通过合理配置余度并设计高性能的直接与总线接口的数字控制器, EPCA 可能成为第四代和第五代战斗机的副翼舵机。

参考文献[1]对泵控舵机进行了原理描述和特性分析。参考文献[2]对电动机一定量泵电液舵机进行了分析与仿真。参考文献[3~5]给出了仿射非线性系统精确线性化反馈控制的理论与设计方法。参考文献[6,7]将非线性系统几何控制理论引入液压伺服控制领域, 提出了液压伺服系统的非线性控制与非线性优化设计理论与方法。参考文献[8,9]进一步研

究了电液速度系统和单杆非对称缸伺服系统的非线性控制方法。参考文献[10]基于线性控制理论研究了电机一定量泵电液舵机的控制策略。与电气舵机和电液伺服舵机不同, 电液复合调节容积式舵机存在着电气通道与液压通道之间的交联问题和相乘非线性问题, 因此采用线性控制理论设计控制器难以奏效。这里通过对舵机系统的特性分析, 提出了基于精确线性化的 ITAE 最佳控制方法, 奠定了电气—液压复合舵机非线性控制理论的基础。

1 基本描述

电液复合调节容积式舵机如图1所示。它由电气伺服系统(一般是直流无刷电动机速度伺服系统)和泵控缸位置伺服系统复合而成。系统中, 三个液控阀的作用是对舵面产生锁定作用同时使变量泵处于卸荷状态; 并在液压缸两腔之间的切断阀起旁通液压缸两腔的作用, 这些阀在余度控制时都要用到。对于这种舵机, 通过对电动机电枢和变量机构的电液伺服阀的线圈施加合适的控制量做到舵机位置对

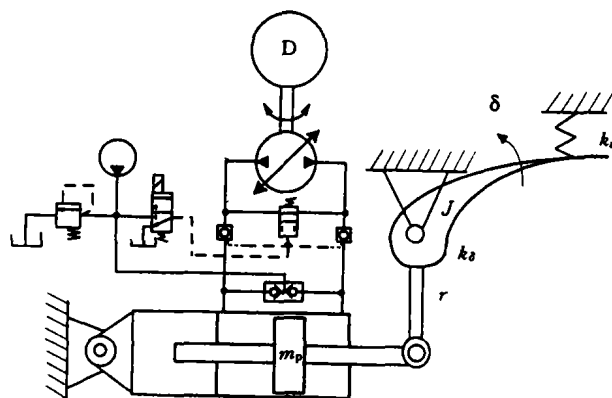


图1 电液复合调节容积式舵机

* 航空基础科学基金资助项目(97E51002)。20040403 收到初稿, 20040728 收到修改稿

指令位置的响应有满意的动态品质,同时使电动机经常运行在额定转速附近。

2 电液复合调节舵机的数学模型

2.1 电动机的动态方程

电液复合调节舵机的电动机一般采用直流无刷电动机或交流永磁同步电动机,通过 PWM 调制、矢量控制和变频驱动等措施可以转化为等效的直流电动机调速系统。对于设有电流环的直流电动机伺服系统,在电流环采用 PI 调节且忽略粘性阻尼的条件下,其动态方程为

$$J_m \dot{\omega}_m = (K_t / R_a) u_i(t) - D_p(t) p_p(t) \quad (1)$$

式中 D_p ——变量泵的排量

K_t ——电动机的转矩系数

R_a ——电动机的等效电枢电阻

J_m ——电动机的等效转动惯量

ω_m ——电动机的角速度

p_p ——变量泵工作油腔之间的压差

2.2 变量泵的动态方程

电液复合调节舵机的变量泵为电液伺服变量泵,其变量调节机构为一电液位置伺服系统。若忽略变量泵的调节力矩、液压油的可压缩性和斜盘质量对变量泵的动态特性的影响,变量泵的变量调节机构的动态方程为

$$T_p \dot{D}_p(t) + D_p(t) = K_p u_p(t) \quad (2)$$

式中 u_p ——变量泵电液伺服变量机构的控制电压

K_p ——变量泵的排量调节增益($\text{m}^3 \cdot \text{V}^{-1} \cdot \text{rad}^{-1}$)

T_p ——变量泵的时间常数

2.3 变量泵—液压缸动力机构的动态方程

对于图 1 所示的电液复合调节舵机,根据液压控制理论,可以写出动力机构的动态方程为

$$\begin{cases} \omega_m D_p = C_L p_p + (V_t / 2K_e) \dot{p}_p + A_p \dot{y}_p \\ p_p A_p = m_p \ddot{y}_p + k_s (y_p / r - \delta) / r \\ k_s (y_p / r - \delta) = k_a \delta + J \ddot{\delta} \end{cases} \quad (3)$$

式中 V_t ——变量泵至液压缸的总容积^[10]

C_L ——液压动力机构的泄漏系数

A_p ——液压油的有效作用面积

k_s ——舵面铰轴的扭转刚度

k_a ——舵面的气动力矩刚度

r ——舵面的摇臂长度

y_p ——液压缸活塞杆的输出位移

J ——舵面的转动惯量

δ ——舵面的摆动角度

m_p ——活塞的质量

K_e ——有效体积模量

如果 m_p 和 J 甚小,并忽略液压油可压缩性的影响,可将式(3)简化为

$$\dot{y}_p + \omega_s y_p = \omega_m D_p / A_p \quad (4)$$

式中 $\omega_s = C_L k_a k_s / ((k_a + k_s) A_p^2 r^2)$

2.4 电液复合调节舵机的动态方程

将式(1)、式(2)和式(4)联立,并选取状态变量 $x_1 = y_p, x_2 = D_p, x_3 = \omega_m$,可以得到被控对象的状态方程为

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = -\omega_s x_1 + \frac{1}{A_p} x_2 x_3 \\ \dot{x}_2 = (-1/\tau_p) x_2 + (K_p/\tau_p) u_p \\ \dot{x}_3 = -\frac{A_p \omega_s}{J_m C_L} x_1 x_2 + \frac{K_t}{R_a J_m} u_i \end{cases} \quad (5)$$

由式(5)可以看出,被控对象是具有两个控制输入 u_i 和 u_p 且具有相乘非线性的仿射非线性动态系统。对这类系统的控制,采用常规的线性系统理论难以奏效。将式(5)与标准形式 $\dot{X} = f(X) + g(X)U$ 比较

$$f(X) = [f_1, f_2, f_3]^T = [-\omega_s x_1 + (1/A_p) x_2 x_3, (-1/\tau_p) x_2, -(A_p \omega_s)/(J_m C_L) x_1 x_2]^T$$

$$g(X) = [g_1, g_2] = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ K_p/\tau_p & 0 \\ 0 & K_t/(R_a J_m) \end{bmatrix}$$

$$u_1 = u_p \quad u_2 = u_i$$

3 非线性系统的几何控制理论

非线性系统的几何控制理论的基本思想是:通过施加非线性状态反馈使非线性系统精确线性化,然后再采用线性系统理论对线性化后的系统进行分析综合,最后通过逆变换求出非线性系统的控制量。以下以两输入两输出仿射非线性系统为例,给出精确线性化控制的设计方法及过程。

3.1 系统的关系度

系统的关系度 r (Relative degree) 是系统从输入—输出角度来看所具有的不变性。考虑两输入两输出仿射非线性系统,即

$$\begin{aligned} \dot{X} &= f(X) + g_1(X) u_1 + g_2(X) u_2 \\ y_1 &= h_1(X) \\ y_2 &= h_2(X) \end{aligned} \quad (6)$$

对每一个输出 $y_i = h_i(X)$ 有一个相应的关系度 r_i 。系统的关系度是一个集合,即 $r = \{r_1, r_2\}$ 。下面给出系

统关系度的定义。

定义 1 对于如式(6)所描述的仿射非线性系统, 如果在 X^0 的邻域内, 有以下条件成立, 即: 对于 $k_i < r_i - 1$ 有 $L_{g_j} L_f^{k_i} h_i(X) = 0, j=1,2; i=1,2$; 且

$$2 \times 2 \text{ 维矩阵 } B(X) = \begin{bmatrix} L_{g_1} L_f^{r_1-1} h_1(X) & L_{g_2} L_f^{r_1-1} h_1(X) \\ L_{g_1} L_f^{r_2-1} h_2(X) & L_{g_2} L_f^{r_2-1} h_2(X) \end{bmatrix} \text{ 是}$$

非奇异的, 则 $r = \{r_1, r_2\}$ 为系统的关系度集合。

3.2 系统的精确线性化方法及设计过程

当系统的关系度 $r = r_1 + r_2 = n$ 时, 可以通过施加非线性坐标变换, 使得非线性系统转化成可控标准型。具体方法及设计过程由定理 1 给出。

定理 1 对于式(6)所描述的仿射非线性系统, 如果在 X^0 的邻域内满足 $r = r_1 + r_2 = n, n$ 为状态向量的维数, 这时可选择坐标变换 $Z = \Phi(X)$, 即

$$\begin{aligned} z_1 &= h_1(X), z_2 = L_f h_1(X), \dots, z_{r_1} = L_f^{r_1-1} h_1(X) \\ z_{r_1+1} &= h_2(X), z_{r_1+2} = L_f h_2(X), \dots, z_n = L_f^{r_2-1} h_2(X) \end{aligned} \quad (7)$$

使系统转化为以下标准型, 即

$$\begin{aligned} \dot{z}_1 &= z_2, \dots, \dot{z}_{r_1-1} = z_{r_1} \\ \dot{z}_{r_1} &= L_f^{r_1} h_1(X) + L_{g_1} L_f^{r_1-1} h_1(X) u_1 + \\ &L_{g_2} L_f^{r_1-1} h_1(X) u_2 = v_1 \\ \dot{z}_{r_1+1} &= z_{r_1+2}, \dots, \dot{z}_{n-1} = z_n \\ \dot{z}_n &= L_f^{r_2} h_2(X) + L_{g_1} L_f^{r_2-1} h_2(X) u_1 + \\ &L_{g_2} L_f^{r_2-1} h_2(X) u_2 = v_2 \end{aligned} \quad (8)$$

式中, 前 r_1 个方程和后 $r_2 = n - r_1$ 个方程分别组成两个可控的线性系统。采用线性系统控制理论(例如 LQR)可以确定 v_1 和 v_2 , 然后由下式, 即

$$\begin{bmatrix} u_1 \\ u_2 \end{bmatrix} = B^{-1}(X) \begin{bmatrix} v_1 - L_f^{r_1} h_1(X) \\ v_2 - L_f^{r_2} h_2(X) \end{bmatrix} \quad (9)$$

确定原非线性系统的控制量。

3.3 精确线性化 ITAE 最优控制

基于微分几何的精确线性化控制尽管将非线性系统转化为线性系统的可控标准型, 但确定线性系统的最优控制量需要确定加权矩阵和求解复杂的 Riccati 方程, 实际应用仍存在一定困难。为了克服这个困难, 将精确线性化与 ITAE 最优控制结合, 构成精确线性化 ITAE 最优控制。具体设计方法和过程由定理 2 给出。

定理 2 对于式(6)所描述的仿射非线性系统, 如果在 X^0 的邻域内满足 $r = r_1 + r_2 = n, n$ 为状态向量的维数, 这时可选择坐标变换 $Z = \Phi(X)$ 将系统化为可控标准型。如果选择如式(10)所确定的控制量 v_1 和 v_2 , 则构成 ITAE 精确线性化最优控制。

$$\begin{aligned} v_1 &= \beta_{r_1} y_{d1} - \beta_1 z_{r_1} - \dots - \beta_{r_1} z_1 \\ v_2 &= \beta_{r_2} y_{d2} - \beta_2 z_n - \dots - \beta_1 z_{r_1+1} \end{aligned} \quad (10)$$

式中, y_{d1} 和 y_{d2} 分别为系统的两个期望输出。当子系统的阶次为 3 阶或 3 阶以下时式(10)中的系数 β_i 由下表给出。

表 ITAE 最优控制系数与性能指标

阶次	系数	性能指标
1	$\beta_1 = \omega_n$	$t_r = 3.0/\omega_n, \sigma_p = 0$
2	$\beta_1 = 1.413\omega_n$ $\beta_2 = \omega_n^2$	$t_r = 3.4/\omega_n, \sigma_p = 4.3\%$
3	$\beta_1 = \omega_n$ $\beta_2 = 0.702\omega_n^2$ $\beta_3 = 0.187\omega_n^3$	$t_r = 5.5/\omega_n, \sigma_p = 1.92\%$

4 精确线性化 ITAE 最优控制

4.1 控制问题的提法

对于由式(5)所描述的电液复合调节容积式舵机, 通过控制希望做到: ①当对系统施加一个期望位置指令时, 调节电动机和泵使得舵机对期望位置指令有满意的阶跃响应。②当舵面气动力矩(这里为舵面气动力矩刚度)发生突然变化时, 通过调节能使电动机转速和舵机位置基本保持不变。由于在过渡过程中, 不可避免地要引起电动机转速的变化, 因此对电动机的转速主动加以控制, 使其始终维持在额定转速的附近是十分必要的。以往采用 SISO 线性系统理论, 只能近似解决单独调节电动机(将泵的排量固定为一定值)或单独调节泵的排量(将电动机的转速固定为一定值, 实际若不控制无法做到)时舵机的控制问题。采用精确线性化控制, 可以一举解决复合舵机控制系统存在的交联问题和相乘非线性问题。

控制问题的提法是: 对于由式(5)所描述的电液复合调节容积式舵机, 通过非线性变换, 将系统转化为可控标准型, 并按 ITAE 性能指标确定最佳控制量。

4.2 精确线性化 ITAE 最优控制律的设计

选择系统输出 $y_1 = h_1(X) = x_1 = y_p, y_2 = h_2(X) = x_3 - \omega_{md} = \omega_m - \omega_{md}$, 这里 ω_{md} 为电动机的期望转速。根据关系度的定义进行计算得

$$\begin{aligned} L_f h_1(X) &= [1 \ 0 \ 0] [-\omega_\delta x_1 + (1/A_p)x_2 x_3, (-1/\tau_p)x_2, \\ &-\frac{A_p \omega_\delta}{J_m C_L} x_1 x_2]^T = -\omega_\delta x_1 + (1/A_p)x_2 x_3 \\ L_f h_2(X) &= [0 \ 0 \ 1] [-\omega_\delta x_1 + (1/A_p)x_2 x_3, (-1/\tau_p)x_2, \\ &-\frac{A_p \omega_\delta}{J_m C_L} x_1 x_2]^T = -\frac{A_p \omega_\delta}{J_m C_L} x_1 x_2 \end{aligned} \quad (11)$$

$$L_{g_1}h_1(X)=[1 \ 0 \ 0][0, K_p/\tau_p, 0]^T=0$$

$$L_{g_2}h_1(X)=[1 \ 0 \ 0][0, 0, K_t/(R_a J_m)]^T=0 \quad (12)$$

$$L_{g_1}L_f h_1(X)=K_p x_3/(A_p \tau_p)$$

$$L_{g_2}L_f h_1(X)=K_t x_2/(A_p J_m R_a)$$

$$L_{g_1}h_2(X)=[0 \ 0 \ 1][0, K_p/\tau_p, 0]^T=0$$

$$L_{g_2}h_2(X)=[0 \ 0 \ 1][0, 0, K_t/(R_a J_m)]^T= \quad (13)$$

$$K_t/(J_m R_a)$$

$$B(X)=\begin{bmatrix} L_{g_1}L_f h_1(X) & L_{g_2}L_f h_1(X) \\ L_{g_1}h_2(X) & L_{g_2}h_2(X) \end{bmatrix} = \quad (14)$$

$$\begin{bmatrix} K_p x_3/(A_p \tau_p) & K_t x_2/(A_p J_m R_a) \\ 0 & K_t/(R_a J_m) \end{bmatrix}$$

显然，有 $r_1=2, r_2=1, r=r_1+r_2=3$ ，且 $B(X)$ 可逆，所以系统满足精确线性化的条件。选择非线性变换 $z_1=h_1(X)=x_1=y_p, z_2=L_f h_1(X)=-\omega_\delta x_1+x_2 x_3/A_p, z_3=h_2(X)=x_3-\omega_{md}$ ，则系统式(5)可化为可控标准型，即

$$\dot{z}_1=z_2$$

$$\dot{z}_2=L_f^2 h_1(X)+L_{g_1}L_f h_1(X)u_1+L_{g_2}L_f h_1(X)u_2=$$

$$\omega_\delta^2 x_1-x_2 x_3(\omega_\delta+1/\tau_p)/A_p-\frac{\omega_\delta}{C_L J_m} x_1 x_2^2+$$

$$\frac{K_p}{\tau_p A_p} x_3 u_1+\frac{K_t}{A_p J_m R_a} x_2 u_2 \quad (15)$$

$$\dot{z}_3=L_f h_2(X)+L_{g_1}h_2(X)u_1+L_{g_2}h_2(X)u_2=$$

$$-\frac{A_p \omega_\delta}{C_L J_m} x_1 x_2+\frac{K_t}{J_m R_a} u_2$$

根据定理 2，取 $v_1=-1.414\omega_{n1}z_2-\omega_{n2}^2(z_1-y_{pd})$ ， $v_2=-\omega_{n2}z_3$ ，式(15)可分解成一个具有 ITAE 最佳控制的二阶系统和一个具有 ITAE 最佳控制的一阶系统，且之间不存在交联，式中 ω_{n1} 和 ω_{n2} 根据希望动态特性由表 1 确定，而 u_1 和 u_2 由式(9)确定。这样，就确定了基于精确线性化的电液复合调节舵机 ITAE 最佳控制量，具体实现过程如图 2 所示。

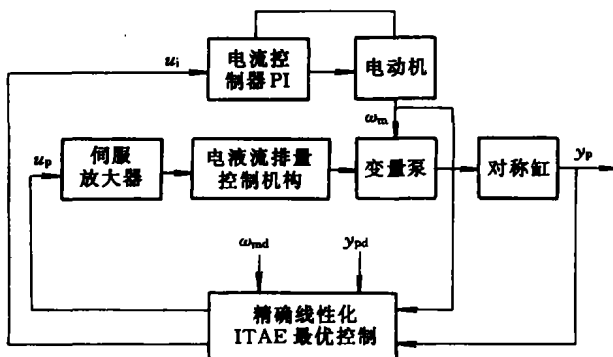


图 2 精确线性化 ITAE 最优控制实现过程

5 结论

通过对电气—液压复合调节舵机的理论分析和研究，推导了描述系统动态特性的支配方程并进行了合理简化。证明了系统满足精确线性化条件，给出了 ITAE 最佳控制器的设计方法及实现过程。所提出的设计理论奠定了电气—液压复合调节舵机控制策略的理论基础。

参 考 文 献

- 1 Thayer W J. Redundant electro-hydraulic servo actuator pumps. SAE871863, 1987
- 2 徐步力, 付永领. 一种新型作动系统. 机床与液压, 2002 (5): 52~53
- 3 Isidori A. Nonlinear Control Systems: An Introduction. Lecture Notes in Control and Information Sciences(71). Berlin Springer, 1985
- 4 Khalil H K. Nonlinear systems. Third Edition. New Jersey: Prentice Hall, 2002
- 5 Cheng D. Global linearization of the nonlinear systems via feedback. IEEE Trans. Aut. Control., 1985, 30(8): 808~811
- 6 李运华, 王占林, 史维祥, 等. 液压伺服系统的非线性控制. 机械工程学报, 1995, 31(5): 58~63
- 7 李运华, 史维祥, 王孙安, 等. 液压伺服系统的非线性优化设计. 宇航学报, 1996, 17(2): 116~120
- 8 Jen Y, Lee C. Robust speed control of a pump-controlled motor system. IEEE Proc. D on control theory and application. 1992, 139(6): 503~510
- 9 Yao B. Adaptive robust motion control of single-rod hydraulic actuators: theory and experiments. IEEE/ASME Trans. on Mechatronics, 2000, 5(1): 79~91
- 10 Habibi S. Design of a new high-performance electro-hydraulic actuator. IEEE/ASME Trans. on Mechatronics, 2000, 5(2): 158~164

EXACT LINEARIZATION CONTROL FOR THE DISPLACEMENT TYPE OF ACTUATOR WITH ELECTRICAL AND HYDRAULIC COMPOUND ADJUSTMENT

Li Yunhua Wang Zhanlin

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

Abstract: Aiming at the requirement of the pilot surface control system with power by wire for the advanced fighter, a kind of the structure scheme of the displacement type of actuator with the reasonable electrical and hydraulic adjusting configuration is proposed, and its operation states and the main characteristics are discussed. On the basis of the mentioned work, the nonlinear state equation to describe the dynamic characteristics of this kind of the actuator is derived. Then, by means of the geometric control theory of the nonlinear control system, it is proved that this system satisfies the exact linearization condition, a kind of the optimal control law with the least time-error cost function(ITAE), and the problems of cross coupling and multiplica-

tion non-linearity existed in the actuator control system are successively solved. The control method proposed here finds the nonlinear control theory for the actuator with electrical and hydraulic compound control.

Key words: Actuator Electric servo systems

Hydraulic servo systems Nonlinear control

Differential geometry

作者简介: 李运华, 男, 1963 年出生, 工学博士。研究领域涉及机电控制与自动化, 流体传动与控制 and 车辆工程等。发表论文 70 余篇, 其中 SCI 和 EI 收录 18 篇。获教育部基础类科技进步二等奖 1 项, 国防科技进步二等奖 1 项。出版著作和教材有《近代机电控制工程》和《机电控制》。
E-mail: yunhua.l@263.net

(上接第 20 页)

STUDY ON MULTI-BIFURCATION AND PERSISTENCE OF CONFIGURATION TO FIVE-BAR MECHANISM

Wang Yuxin

*(School of Mechanical Engineering,
Tongji University, Shanghai 200092)*

Liu Xueshen

*(School of Mechanical Engineering,
Tianjin University, Tianjin 300072)*

Abstract: The relationship between the dimension of the mechanism and the singularity configuration is investigated based on an example of five-bar mechanism, and a method that

can distinguish singularity configuration considering the dimension of the mechanism is also provided. The research also analyzes the intricacy of the bifurcation of the mechanism and provides the distinguish condition of the first rank bifurcation and the second rank bifurcation. The persistence of the configuration about the singularity point is studied using universal unfolding method of nonlinear-singularity theory. The influence of the disturbance factors such as assemble error and payload on the configuration persistence at the singularity point are analyzed.

Key words: Mechanism Singularity

Persistence of configuration Controllable motion

作者简介: 王玉新, 男, 1964 年出生, 教授, 博士生导师。主要研究方向为机器人机构学和机械系统虚拟创新设计及其自动化。

E-mail: Wang_Yuxin@eyou.com