

航空电动燃油泵二次型积分滑模控制研究

丁润泽 肖玲斐

(南京航空航天大学 能源与动力学院, 江苏 南京 210016)

(联系电话 15005170182 E-mail lfxiao@nuaa.edu.cn)

摘要: 本文针对含有不匹配不确定性的航空电动燃油泵系统, 考虑负载、燃油粘性、泄漏等因素, 建立了航空电动燃油泵状态空间模型, 相比稳态点线性化模型, 该模型能够在大范围内有效描述燃油泵响应。提出了一种新颖的基于二次型积分滑模面的鲁棒控制方法, 能够使得闭环系统渐近稳定, 并且响应速度快, 超调小, 并具有良好的稳态性能, 同时对不确定性具有鲁棒性。基于李雅普诺夫稳定性理论, 证明了滑模面的可达性及闭环系统的稳定性。仿真实验验证了本文所提方法的有效性, 该方法能够使系统迅速稳定, 并具有上升时间短、稳态误差小等优势, 对于不匹配不确定性具有强鲁棒性。

关键词: 航空电动燃油泵, 二次型积分滑模控制, 不确定性, 容错控制

1 引言

航空电动燃油泵是多电发动机的核心部件之一, 其使用将对传统燃油系统产生极大影响。现役航空发动机增压泵大多采用离心泵, 主燃油泵和加力燃油泵通常采用齿轮泵, 这些都是定量泵。由于齿轮泵转速与发动机转速直接相关, 因此在某些飞行状态下, 齿轮泵提供的燃油量远高于发动机所需燃油量, 为此有大量燃油重新流回燃油箱, 从而导致回油温度升高, 因此带来回油冷却、消耗轴功率、增加系统复杂性、增加功率损失等一系列问题^[1-3]。

而多电航空发动机采用电力作为航空发动机和飞机上的次级功率系统原动力, 即用电动泵取代机械传动的滑油泵及燃油泵。航空电动燃油泵是将电机与齿轮泵相结合, 并具有一个单独的控制器。具有智能控制器的电动燃油泵转速与发动机转速无关, 电动燃油泵可实时调整电机转速来控制燃油量, 无需燃油回流。同时, 多电发动机精简了附件机匣, 这减轻了系统重量, 降低了系统复杂性, 增加了系统可靠性^[4, 5]。

采用了航空电动燃油泵, 多电发动机性能很大程度取决于智能控制器是否具有良好的稳态和动态性能、兼顾流量控制与运动控制, 能够控制航空电动燃油泵供给所需燃油, 同时具有可靠性和鲁棒性。且航空发动机长期工作在高温、高转的条件下, 使得部件出现不确定性和干扰的可能性大大提高。因此, 具有鲁棒性的高精度燃油控制技术成为其技术难点。目前已有学者针对航空电动燃油泵控制技术展开了广泛研究。高毅军^[6]等人对航空电动燃油泵分布式控制进行了研究, 郝振洋^[7]等人针对航空电动燃油泵中使用的永磁容错电机进行了研究, 提出了一种直接转矩控制策略。林全喜^[8]等人针对电动燃油泵中的无刷直流电机进行了深入地研究, 主要集中在电机的特性研究。王立国^[9]等人利用电动燃油泵的稳态流量特性进行泰勒展开并进行最小二乘法拟合, 得到电动燃油泵流量的稳态模型, 并设计了变参数 PID 控制器, 实现对电动燃油泵流量的控制。由于采用稳态模型, 很难

反应出燃油泵的动态特性，且在控制器设计上也有进步的空间。可以发现，针对航空电动燃油泵控制方法的研究还较少，且很多学者的研究对象都是针对电动燃油泵的稳态特性建立的稳态下传递函数模型或是无刷直流电机模型进行研究，很少直接针对整个航空电动燃油泵的动态模型去研究，很难反映系统的动态特性，这同时也使得先进控制算法的应用受到了限制。

滑模控制(Sliding Mode Control, SMC)是一类特殊的非线性控制，由于滑动模态可以进行设计且与对象参数及扰动无关，这就使得滑模控制具有快速响应、对应参数变化及扰动不灵敏、无需系统在线辨识、物理实现简单等优点。滑模控制现在已形成一套比较完整的理论体系，并已广泛应用到各种工业控制对象之中，对非线性系统具有良好控制性能。滑模控制具有很好的鲁棒性，当系统处于滑动模态时，对被控对象的模型误差、对象参数的变化以及外部干扰有极佳的不敏感性。滑模控制已在非线性不确定系统上取得一系列应用，谢建^[10]等人针对液压泵控马达系统，设计了滑模控制器，仿真结果表明,与普通 PID 控制方法相比,滑模控制方法有较强的抗干扰能力和良好的跟踪性能,提高了液压泵控马达系统的控制精度和稳定性。Fang S^[11]等人针对无刷直流电机系统，基于带有单相辅助面的滑模面，设计了自适应鲁棒控制器，实现对滑模抖振的抑制。Monteiro J^[12]等人针对无刷直流电机系统设计了带有模拟切换函数的滑模控制器，在无需调整参数的条件下，实现对抖振的抑制，并对干扰具有鲁棒性。苗卓广^[13]等人针对航空发动机系统，提出了一种自适应全局快速非奇异 Terminal 滑模控制器设计方法，具有良好的动态性能，无超调，未发生奇异现象。Ginoya D^[14]等人针对一类含有不匹配不确定性系统，设计了含有增广干扰观测器的滑模控制器，仿真结果表明系统能够克服系统中的不匹配不确定性。可见滑模控制已在航空发动机、无刷直流电机、燃油泵等系统中得到广泛应用，且具有良好的性能，并具有鲁棒性。然而滑模控制的鲁棒性体现在其对于匹配干扰(干扰发生在控制通道，满足匹配条件)的完全抑制。对于不满足匹配条件的扰动，其鲁棒性得不到保证。

本文针对航空电动燃油泵不确定系统鲁棒容错控制问题，建立了航空电动燃油泵状态空间模型，针对该模型，考虑到系统存在的非匹配不确定性及扰动，基于二次型积分滑模面，提出了一种新颖的二次积分滑模控制方法，实现了对燃油流量的精确控制并对不匹配不确定性及扰动具有鲁棒性。

2 航空电动燃油泵流量控制系统数学模型

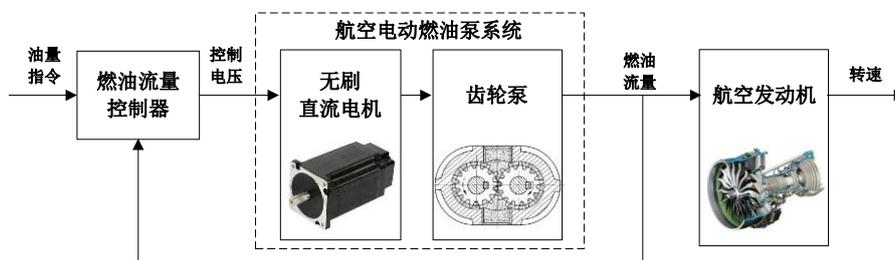


图 1 航空电动燃油泵系统

如图 1 所示，本文研究的航空电动燃油泵系统由无刷直流电机及外啮合齿轮泵构成，电机与齿轮泵直接相连，通过无刷直流电机带动外啮合齿轮泵转动，输出燃油。

由于齿轮传动效率一般在 0.95~0.99，在分析其运动时，忽略齿轮传动效率的影响。无刷直流电

机默认空间上相互差 120°电角度，电机定子、绕组上电阻电感都完全一样，不计涡流损耗，气隙磁场是均匀的。由电机的对称性，当合理设计无刷直流电机驱动电路，能够以较小脉动完成换相过程时，忽略换向时的脉动。此时，一对外啮合齿轮可由以下运动方程描述^[15-17]：

$$\begin{cases} \frac{d\theta_1}{dt} = \omega_1 \\ (J_1 + J_3) \frac{d\omega_1}{dt} = 2K_e i_a - R_e k_1 (\omega_1 - \omega_2) - R_e k_2 (\theta_1 - \theta_2) - M_1 \\ \frac{d\theta_2}{dt} = \omega_2 \\ J_2 \frac{d\omega_2}{dt} = R_e k_1 (\omega_1 - \omega_2) + R_e k_2 (\theta_1 - \theta_2) - M_2 \\ \frac{di_a}{dt} = \frac{-R}{L} i_a - \frac{K_e}{L} + \frac{1}{2L} (u_a - u_b) \end{cases} \quad (1)$$

式(1)中 θ_1 为主动轮角位移， θ_2 为从动轮角位移， ω_1 为主动轮角速度， ω_2 为从动轮角速度， J_1 为主动轮转动惯量， J_2 为从动轮转动惯量， M_1 为主动轮所受等效力距， M_2 为从动轮所受等效力距， k_1 为等效阻尼系数， k_2 为等效刚度系数， K_e 为每相电机反电动势系数。 i_a 为无刷直流电机某相定子电流， u_a 、 u_b 为某两相的定子电压， L 为等效互感。

对于齿轮泵，其瞬时流量 q_v 满足^[18]

$$q_v = \frac{1}{2} \omega_1 B (2R_1(h_1 + h_2) + h_1^2 + h_2^2 \frac{R_1}{R_2} - (1 + \frac{R_1}{R_2}) f^2) \quad (2)$$

式(2)中 R_1 为主动齿轮的节圆半径， R_2 为从动齿轮的节圆半径， h_1 ， h_2 分别为主动轮和从动轮的齿顶高， f 为啮合点与节点的距离。本文研究对象为一对齿数相同的渐开线齿轮泵，既有 $R_1 = R_2 = R$ ， $h_1 = h_2 = h$ ，由齿轮结构的几何构造可知 $h = R_e - R_1$ 。则齿轮泵瞬时流量公式为：

$$q_v = \omega_1 B (R_e^2 - R^2 - f^2) \quad (3)$$

当齿轮泵无卸荷槽时^[19]，齿轮泵理论流量 Q_v (L/min) 为

$$Q_v = \omega_1 B (R_e^2 - R^2 - \frac{kt_0^2}{12}) \quad (4)$$

式(4)中 $k = 4 - 6\varepsilon + 3\varepsilon^2$ ， $\varepsilon = \frac{f_0}{t_0}$ ， t_0 为齿轮基节， f_0 为实际啮合线的长度。则理论流量可写为

$$Q_v = K_Q \omega, \text{ 其中 } K_Q = B(R_e^2 - R^2 - \frac{kt_0^2}{12}).$$

由于齿轮泵的构造限制，出现内泄漏是不可避免的，且内泄漏对齿轮泵性能具有较大影响。因此在建模过程中需要考虑到内泄漏现象。齿轮泵内泄漏途径主要分为径向泄漏以及端面泄漏^[20]。

端面泄漏 Q_l 一般采用经验公式(5)进行描述^[21]

$$Q_l = B \left(\frac{p}{6\mu S z_0} h^3 - 2\pi\omega_1 h \right) \quad (5)$$

式(5)中 p 为齿轮泵高低压腔压差， μ 为工作介质的动力粘度， S 为齿顶厚， z_0 为啮合区齿数。

径向泄漏 Q_s 可用式(6)进行描述^[20]

$$Q_s = \frac{2\pi h^3 p}{6\mu \ln(\frac{R_f}{R_z})} \quad (6)$$

式(6)中 R_f 为齿根圆半径， R_z 为齿轮轴半径。

因此齿轮泵实际流量为 $Q_r = Q_v - Q_l - Q_s$ 。

航空电动燃油泵性能受到温度、工质、压强等许多非线性影响，其模型易出现不确定性。且航空发动机工况复杂，工作环境恶劣，同时承受着高转速、高载荷的影响，导致电动燃油泵驱动电路可能出现突变、时变型等故障。因此在建模过程中需要考虑上述情况的影响。

综上所述，选择状态变量 $[x_1 \ x_2 \ x_3 \ x_4 \ x_5]^T = [\theta \ \dot{\theta} \ \omega \ \dot{\omega} \ i_a]^T$ ，控制量

$u = u_a - u_b$ ，则航空电动燃油泵数学模型可写为

$$\begin{cases} \dot{x} = f(x) + \Delta f(x) + g(x)u + \Delta g(x)u + M \\ y = \bar{C}x + \omega D \end{cases} \quad (7)$$

$$\text{其中 } f(x) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ \frac{-R_e k_2}{(J_1 + J_3)} & \frac{R_e k_2}{(J_1 + J_3)} & \frac{-R_e k_1}{(J_1 + J_3)} & \frac{R_e k_1}{(J_1 + J_3)} & \frac{2K_e}{(J_1 + J_3)} \\ \frac{R_e k_2}{J_2} & \frac{-R_e k_2}{J_2} & \frac{R_e k_1}{J_2} & \frac{-R_e k_2}{J_2} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{-K_e}{L} & 0 & \frac{-R}{L} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \\ x_5 \end{bmatrix},$$

$$g(x) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{1}{2L} \end{bmatrix}^T, \quad M = \begin{bmatrix} 0 & 0 & -\frac{1}{2}Bp(R_e^2 - R_1^2) & 0 & -\frac{1}{2}Bp(R_e^2 - R_1^2) \end{bmatrix}^T, \Delta f(x)$$

与 $\Delta g(x)$ 为燃油泵系统参数不确定性, u 为控制电压, ω 为输出扰动增益矩阵, D 为输出扰动,

$$D = \frac{Bp}{6\mu S z_0} h^3 + \frac{2\pi h^3 p}{6\mu \ln(\frac{R_f}{R_z})}, \quad \bar{C} \text{ 为输出矩阵, } \bar{C} = [0 \quad 0 \quad K \quad 0 \quad 0], \text{ 其中 } K = K_Q - 2\pi B h \text{。}$$

3 二次型积分滑模控制器设计

由于航空发动机燃油泵采用齿轮泵, 其性能易受到工作环境、油温等影响, 甚至出现困油等未建模的情况, 使得模型具有不确定性。同时, 由于齿轮泵端面泄漏以及所受复杂的液体力距, 系统不可避免的受到扰动。因此, 对含有不匹配不确定性的系统(7), 设计具有鲁棒性的控制算法成为本文研究的重点。

设计系统(7)的滑模控制律为 $u = u_0 + u_1$, 其中 u_0 为等效控制, 保证标称系统 (不含不确定性的系统) 的闭环稳定及可靠响应。 u_1 为切换控制, 补偿不确定性对系统的影响。

定义航空电动燃油泵系统(7)的二次型积分滑模面为

$$\bar{s} = \frac{1}{2} [x^T(t)x(t) - x_0^T x_0] - \int_0^t \{x^T(t)[f(x) + g(x)u] - u_1\} dt \quad (8)$$

其中 x_0 为状态变量初值, 当滑模面 $\bar{s} = 0$ 可到达时, 有

$$\frac{1}{2} [x^T(t)x(t) - x_0^T x_0] - \int_0^t \{x^T(t)[f(x) + g(x)u] - u_1\} dt = 0 \quad (9)$$

由航空电动燃油泵系统(7)可知

$$\begin{aligned} & \frac{1}{2} x^T(t)x(t) \Big|_0^t - \int_0^t \{x^T(t)[f(x) + g(x)u] - u_1\} dt = 0 \\ \Rightarrow & \int_0^t x^T(t)\dot{x}(t) dt - \int_0^t \{x^T(t)[f(x) + g(x)u] - u_1\} dt = 0 \\ \Rightarrow & \int_0^t \{x^T(t)[\dot{x}(t) - f(x) - g(x)u] + u_1\} dt = 0 \\ \Rightarrow & \int_0^t \{x^T(t)[\Delta f(x) + \Delta g(x)u + M] + u_1\} dt = 0 \end{aligned}$$

此时航空电动燃油泵二次型积分滑模面为

$$\bar{s} = \int_0^t \{x^T(t)[\Delta f(x) + \Delta g(x)u + M] + u_1\} dt = 0 \quad (10)$$

对系统(7)设计二次型积分滑模控制律为

$$u = u_0 - [(\lambda_0 + \lambda_1 \|x\|)s + (\eta_0 + \eta_1 \|x\| + \eta_2 \|x\|^2 + \eta_3 \|x\|^3) \text{sgn}(s)] \quad (11)$$

其中

$$\lambda_0 \geq 0 \quad (12)$$

$$\lambda_1 \geq 0 \quad (13)$$

$$\eta_0 \geq 0 \quad (14)$$

$$\eta_1 \geq \xi_0 + \zeta_0 \beta_0 + \varepsilon \tau + \sigma + \gamma_1 \quad (15)$$

$$\eta_2 \geq \xi_1 + \zeta_1 \beta_0 + \zeta_0 \beta_1 + \gamma_2 \quad (16)$$

$$\eta_3 \geq \zeta_1 \beta_1 + \gamma_3 \quad (17)$$

$$u_0 = (CB)^{-1}(-CAx + \dot{\delta}) \quad (18)$$

式(12)-(18)中 $\gamma_1 > 0$ 、 $\gamma_2 > 0$ 、 $\gamma_3 > 0$ 。(29)中 $\delta = Cx$ 为辅助变量， $\dot{\delta} = -k\delta$ ，且满足 $k > 0$ 。

4 航空电动燃油泵闭环系统鲁棒性分析

下面引入本文所需假设以及定理 1。值得注意的是，假设的引入是为了便于对系统的稳定性等进行分析，假设均符合实际系统。

假设 1 $\|\Delta f(x)\| \leq \xi_0 + \xi_1 \|x\|$ ，其中 $\xi_0 > 0$ ， $\xi_1 > 0$ ，

$\|\Delta g(x)\| \leq \zeta_0 + \zeta_1 \|x\|$ ，其中 $\zeta_0 > 0$ ， $\zeta_1 > 0$ ，

$\|M\| < \sigma$ ，其中 $\sigma > 0$ ， $\|\cdot\|$ 表示欧氏范数。

假设 2 存在等效控制 u_0 使得标称系统 $\dot{x}(t) = f(x) + g(x)u_0$ 渐近稳定。

定理 1 对于航空电动燃油泵系统(7)，当二次型积分滑模控制律满足(12)-(18)时，系统的状态变量可在有限时间内到达二次型积分滑模面(10)，之后保持在(10)上。

证明：

对二次型积分滑模面(10)进行求导，并考虑航空电动燃油泵系统(7)，可得

$$\begin{aligned} \dot{\bar{s}} &= x^T(t)[\Delta f(x) + \Delta g(x)u + M] + u_1 \\ &= x^T(t)\Delta f(x) + x^T(t)\Delta g(x)u + x^T(t)M + u_1 \end{aligned}$$

考虑二次型积分滑模控制律(22)，以及**假设 1**与**假设 2**，可得

$$\begin{aligned}
\bar{s} \dot{\bar{s}} &= \bar{s}x^T(t)\Delta f(x) + \bar{s}x^T(t)\Delta g(x)u + \bar{s}x^T(t)M + \bar{s}u_1 \\
&\leq \|x\|\|\Delta f(x)\|\bar{s} + |\bar{s}|\|x\|\|\Delta g(x)\|(\beta_0 + \beta_1\|x\|) + |\bar{s}|\|x\|\varepsilon\tau \\
&\quad + |\bar{s}|\|x\|\sigma - (\lambda_0 + \lambda_1\|x\|)\bar{s}^2 - (\eta_0 + \eta_1\|x\| + \eta_2\|x\|^2 + \eta_3\|x\|^3)|\bar{s}| \\
\bar{s} \dot{\bar{s}} &\leq \|x\|(\xi_1\|x\| + \xi_0)|\bar{s}| + |\bar{s}|\|x\|(\xi_1\|x\| + \xi_0)(\beta_0 + \beta_1\|x\|) + |\bar{s}|\|x\|\varepsilon\tau \\
&\quad + |\bar{s}|\|x\|\sigma - (\lambda_0 + \lambda_1\|x\|)\bar{s}^2 - (\eta_0 + \eta_1\|x\| + \eta_2\|x\|^2 + \eta_3\|x\|^3)|\bar{s}| \\
\bar{s} \dot{\bar{s}} &\leq \|x\|\bar{s}(\xi_1\|x\| + \xi_0 + \zeta_0\beta_0 + (\zeta_1\beta_0 + \zeta_0\beta_1)\|x\| + \zeta_1\beta_1\|x\|^2 + \varepsilon\tau + \sigma) \\
&\quad - (\lambda_0 + \lambda_1\|x\|)\bar{s}^2 - (\eta_0 + \eta_1\|x\| + \eta_2\|x\|^2 + \eta_3\|x\|^3)|\bar{s}| \\
&= \|x\|\bar{s}\left[\left(\xi_0 + \zeta_0\beta_0 + \varepsilon\tau + \sigma - \eta_1\right) + \left(\xi_1 + \zeta_1\beta_0 + \zeta_0\beta_1 - \eta_2\right)\|x\| + \left(\zeta_1\beta_1 - \eta_3\right)\|x\|^2\right] \\
&\quad - (\lambda_0 + \lambda_1\|x\|)\bar{s}^2 - \eta_0|\bar{s}|
\end{aligned}$$

于是

$$\bar{s} \dot{\bar{s}} \leq \left(-\eta_0 - \gamma_1\|x\| - \gamma_2\|x\|^2 - \gamma_3\|x\|^3\right)|\bar{s}| - (\lambda_0 + \lambda_1\|x\|)\bar{s}^2 \leq 0 \quad (19)$$

满足进入滑动模态的条件，因此二次型积分滑模面(10)可在有限时间内到达，并保持在滑模面上。

证明完毕。

对于航空电动燃油泵闭环系统稳定性证明见本文的**定理 2**。

定理 2 对于航空电动燃油泵系统(7)，在二次型积分滑模控制律(11)的作用下，航空电动燃油泵闭环系统鲁棒渐近稳定。

证明：

构造 Lyapunov 函数为

$$V_2(x) = \frac{1}{2}x^T(t)x(t) \quad (20)$$

$$\dot{V}_2(x) = x^T(t)\dot{x}(t) = x^T(t)[f(x) + \Delta f(x) + (g(x) + \Delta g(x))u + M] \quad (21)$$

由**定理 1**可知二次型积分滑模面(10)是可达的。则当系统在滑模面上时，有

$$x^T(t)[\Delta f(x) + \Delta g(x)u + M] + u_1 = 0 \quad (22)$$

将式(22)代入式(21)中可得

$$\dot{V}_2(x) = x^T(t)[f(x) + g(x)u] - u_1 \quad (23)$$

在滑模面上时有 $u_1 = 0$ ，则

$$\dot{V}_2(x) = x^T(t)[f(x) + g(x)u_0] \quad (24)$$

由(24)可得，当设计等效控制量 u_0 能够使得系统 $\dot{x}(t) = f(x) + g(x)u_0$ 渐近稳定时，依(11)-(18)

设计 u_1 后的 $u = u_0 + u_1$ 能够保证 $\dot{x}(t) = f(x) + \Delta f(x) - (g(x) + \Delta g(x))u$ 渐近稳定，即 $\dot{V}_2(x) < -C$ 。

目前针对标称系统的控制方法已有大量成果，如 LQR、极点配置法等，只需根据实际性能要求选择合适方法设计 u_0 ，保证标称系统渐近稳定即可。

证明完毕！

5 仿真验证

本节仿真中系统参数如表 1 所示。

表 1 航空电动燃油泵参数表

参数	单位	数值	参数	单位	数值
m	mm	3	B	mm	10
z		10	p_s	MPa	1
α	°	20	R	Ω	0.488
a	mm	33	$L-M$	mH	1.19
ϕ_{in}	mm	12	J_1	Kgm^2	1.89×10^{-6}
ϕ_{out}	mm	12	J_2	Kgm^2	0.362×10^{-3}
r	mm	20.5	K_e	V / rad	0.0482
ε		1.37	K_T	Nm / A	0.0522
R_1	mm	16.5	μ	Pa · s	0.048
R_e	mm	19.5	ρ	kg / m ³	960
h	mm	1			

将数据代入系统(18)中可得

$$f(x) = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ -43.5489 & 43.5489 & -0.0435 & 0.0435 & 132.4374 \\ 43.7762 & -43.7762 & 0.0438 & -0.0438 & 0 \\ 0 & 0 & -40.5020 & 0 & -410.0800 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \\ x_5 \end{bmatrix}, \quad g(x) = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 420.1681 \end{bmatrix},$$

$\Delta f(x)=0.05f(x)$, $\Delta g(x)=0.05g(x)$, $\bar{C}=[0 \ 0 \ 0.057 \ 0 \ 0]$, $D=0.1216$, $\omega=1$,
 $M=[0 \ -15.27 \ 0 \ -15.27]^T$ 。

选择 $\mu=0.1$, $c=0.1$, $\varphi=0.01$, $p=7$, $q=5$, $r=7$, $d=7$, $l_g=1$, $\eta=1$

针对系统(7), 当系统初始条件为 $x_0=[0 \ 0 \ 5 \ 5 \ 1]^T$ 时, 在二次积分滑模控制器 (QSMC)、积分滑模控制器(ISMC)以及线性滑模控制器(SMC)的作用下进行仿真。当 $\sigma=1$, $\zeta_0=0$, $\zeta_1=0$, $\lambda_0=60$, $\lambda_1=0$, $\eta_0=1$, $\eta_1=4$, $\eta_2=0.1$, $\eta_3=0.004$ 仿真结果如图(2)-(5)所示。

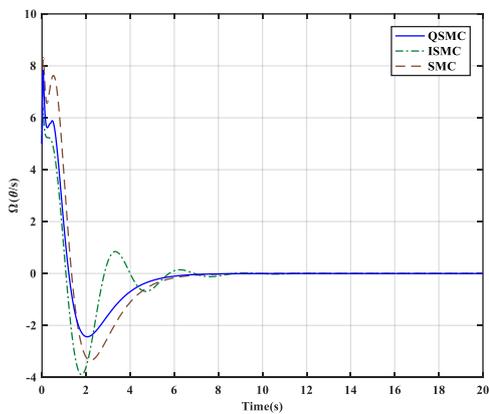


图2 主动轮转速

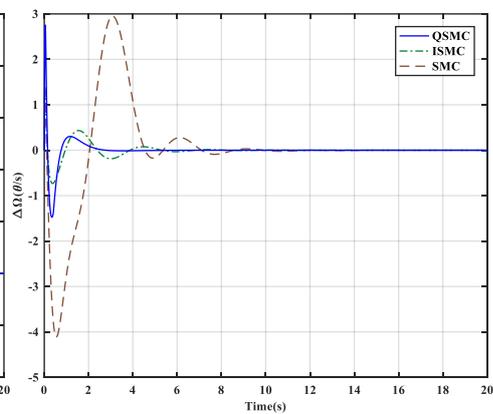


图3 主从动轮转速差

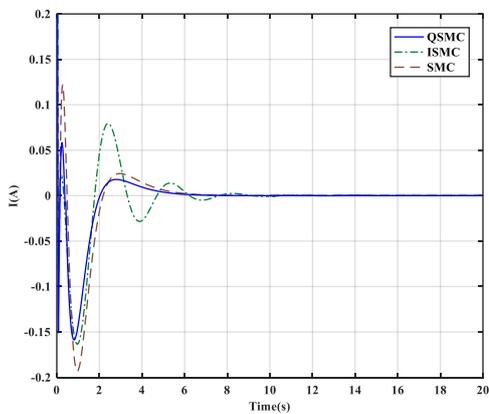


图4 电机电流

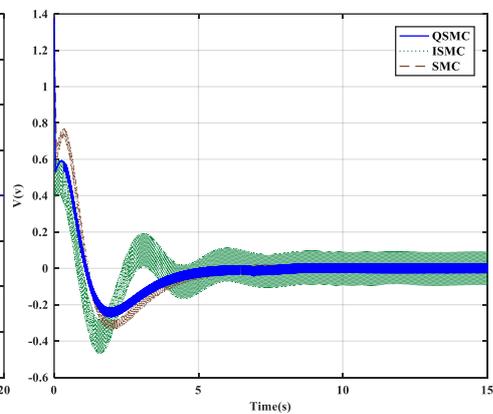


图5 控制电压

由仿真结果可以看出, 当系统无执行机构故障时, QSMC 响应速度快, 超调小, 曲线平滑, 稳态精度高。同 SMC 相比, QSMC 响应更快, 具有更小的稳态误差。同 ISMC 相比, 稳态误差相差不多, 响应速度慢于 ISMC, 但能够大幅减小超调量, 改善系统动态性能, 减小控制量振幅, 延长系统寿命。需要说明的是, 通过调整控制器参数可进一步改善系统性能, 本文仅为验证所提方法的有效性, 并没有继续调整控制器参数。

6 总结

本文针对一类采用无刷直流电机与外啮合齿轮泵直连的航空电动燃油泵系统, 对其控制方法展

开研究, 达到如下目的:

- (1) 针对系统存在的不确定性及扰动, 提出了一种新颖的二次型积分滑模控制器的设计方法, 该方法使得系统具有良好稳态与动态性能, 并对不确定性及扰动具有鲁棒性, 满足航空电动燃油泵控制要求。
- (2) 考虑泄漏、不确定性等因素的影响, 建立了航空电动燃油泵状态空间模型, 相比稳态点线性化模型, 该模型具有更广的有效范围。
- (3) 给出了二次型积分滑模面可达性证明以及闭环系统渐近稳定的证明
- (4) 通过仿真实验, 将二次型积分滑模控制器(QSMC)与线性滑模控制(SMC)及积分滑模控制(ISMC)进行了对比, 验证了本文所提控制方法的有效性。仿真结果表明二次型积分滑模控制器能够具有较快的响应速度, 较小的超调量及稳态误差, 具有良好的动态性能及稳态性能, 并对非匹配不确定性及干扰具有较强的鲁棒性。

参考文献

- [1] NEWMAN R. The More Electric Engine Concept: World Aviation Congress & Exposition, 2004[C].
- [2] WHEELER P, BOZHKO S. The More Electric Aircraft: Technology and challenges[J]. IEEE Electrification Magazine, 2014,2(4):6-12.
- [3] HIRST M, MCLOUGHLIN A, NORMAN P J, et al. Demonstrating the more electric engine: a step towards the power optimised aircraft[J]. Iet Electric Power Applications, 2011,5(1):3-13.
- [4] ABDELHAFEZ A A, FORSYTH A J. A Review of More-Electric Aircraft: Electrical Machines and Systems for the More Electric Aircraft (Ref. No. 1999/180), IEE Colloquium on, 2009[C].
- [5] 孙莉. 多电航空发动机关键技术在某型航空发动机上的初步应用: 2015年第二届中国航空科学技术大会, 中国北京, 2015[C].
- [6] 高毅军, 黄金泉, 唐世建. 基于分布式控制的航空发动机电动燃油泵方案研究[J]. 燃气涡轮试验与研究, 2012(S1):36-40.
- [7] 郝振洋, 胡育文, 沈天珉. 永磁容错电机的直接转矩控制策略[J]. 电工技术学报, 2014(03):180-188.
- [8] 林全喜. 航空电动燃油泵用无刷直流电动机研究[D]. 西北工业大学, 2006.
- [9] 王立国, 郑铁军, 邓罗泉, 等. 变PID参数控制在电动齿轮燃油泵中的应用[J]. 宇航计测技术, 2015(04):34-39.
- [10] 谢建, 张力, 谢政, 等. 液压泵控马达系统转速滑模控制优化设计研究[J]. 计算机仿真, 2016(05):295-298.
- [11] FANG S, HU C, HU X, et al. Adaptive Robust Control of Brushless DC (BLDC) Motor Based on Sliding Mode Control (SMC) with Unidirectional Auxiliary Surfaces[J]. 2015 CHINESE AUTOMATION CONGRESS (CAC), 2015:1565-1570.
- [12] MONTEIRO J R B A, OLIVEIRA C M R, AGUIAR M L. SLIDING MODE CONTROL OF BRUSHLESS DC MOTOR SPEED WITH CHATTERING REDUCTION[M]//Proceedings of the IEEE International Symposium on Industrial Electronics. 2015:542-547.
- [13] 苗卓广, 谢寿生, 张波, 等. 航空发动机自适应全局快速非奇异Terminal滑模控制[J]. 航空动力学报, 2013,28(11):2634-2640.
- [14] GINOYA D, SHENDGE P D, PHADKE S B. Sliding Mode Control for Mismatched Uncertain Systems Using an Extended Disturbance Observer[J]. IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRIAL ELECTRONICS,

2014,61(4):1983-1992.

- [15] LI, YULONG, LIU, et al. Dynamic Model of Gears with Trapped Oil and Coupled Analysis in External Spur-Gear Pump[J]. Applied Mechanics & Materials, 2012,130-134:610-615.
- [16] 贾洪平, 魏海峰. 无刷直流电机滑模变结构电流控制[J]. 微电机, 2010(02):58-61.
- [17] 黄志峰, 胡育文, 高瑾, 等. 无刷直流电机仿真模型的建立与不同控制策略的仿真研究[J]. 电机与控制应用, 2006(09):3-7.
- [18] 孔繁余, 何玉洋, 郑德, 等. 外啮合齿轮泵流量特性影响因素分析[J]. 排灌机械工程学报, 2014,32(2):108-112.
- [19] 张永祥, 金健. 齿轮泵的瞬时流量及流量脉动的抑制[J]. 液压与气动, 2015(3):46-49, 31.
- [20] 马军. 外啮合齿轮泵的泄漏分析与计算[J]. 煤矿机械, 2011(02):30-31.
- [21] 王强. 纯水液压齿轮泵及试验系统研究[D]. 昆明理工大学, 2003.