

舵机电动加载系统的最优控制设计与仿真

李晓珊, 杨波

(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: 针对无人机等飞行器的舵机电动加载系统中存在多余力矩扰动问题, 提出了线性二次型最优控制和比例-积分-微分(PID)控制结合的复合控制策略, 实现舵机电动加载系统的加载力矩控制。巧妙选取状态变量, 建立了系统的状态空间模型并求得最优控制律, 较好地抑制了舵机运动带来的干扰。仿真表明, 该复合控制策略控制精度较高, 且具有较强的抗干扰能力, 与电动加载领域常用的小脑模型关节控制器(CMAC)和PID复合的控制策略相比, 算法简单、计算量小、仿真速度快、输出曲线更加光滑。

关键词: 电动加载系统; 无人机; 线性二次型最优控制; PID; 复合控制; 抗干扰性

中图分类号: V279; TP273 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-637X(2014)12-0071-05

The Optimal Control Design and Simulation of Actuator Electric Loading System

LI Xiao-shan, YANG Bo

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

Abstract: Considering the problem of surplus torque disturbance existed in the UAV actuator electric loading system, we proposed a compound control strategy combining linear quadratic optimal control with PID control for realizing the load torque control of the actuator electric loading system. The state space model was established with skillfully selected state variables for the electric loading system, and the optimal control law was obtained, which suppressed the disturbance caused by actuator movement effectively. Simulation result shows that the control strategy has good control precision and anti-interference capability. Compared with the compound control strategy combining CMAC neural network with PID, which is commonly applied in electric loading field, the proposed method is simpler and has smaller amount of calculation, faster simulation speed and smoother output.

Key words: electric loading system; UAV; linear quadratic optimal control; PID; compound control; anti-interference

0 引言

舵机电动加载系统用于在实验室条件下采用力矩电机模拟无人机等飞行器在飞行过程中舵面承受的气动载荷, 根据飞行控制仿真系统的需求, 在一定的频宽内精确跟踪载荷谱。当舵机在一定角度范围内做往返运动时, 力矩电机的连接轴通过连接机构跟随舵机一同运动。此时, 力矩电机内部将产生反电动势, 作用于电枢产生电枢电流, 进而产生电磁转矩, 称为加载系统的多余力矩, 多余力矩会影响加载系统的控制精度、带

宽和稳定性。如何抑制多余力矩的影响是舵机电动加载系统必须解决的关键问题。传统控制方法有结构不变性原理^[1]和PID控制加指令前馈的复合控制策略^[2], 这些方法实现简单, 但需要相对准确的数学模型。智能控制策略有滑模控制、神经网络、 H_∞ 最优控制^[3-5]等, 此外, 小脑模型(Cerebellar Model Articulation Controller, CMAC)神经网络与PID相结合的复合控制^[6]也经常被用于电机控制当中。上述方法均有优势和不足, 实际控制效果很大程度上依赖于人的经验和对算法的认知与改进, 相比而言, 最优控制的方法实现起来比较简单, 有较大的工程价值。线性二次型(Linear Quadratic, LQ)最优控制是最优控制理论中最为成熟的部分, 在电动转向系统、无人机控制、航空发动机等领域均有广泛应用^[7-9]。

收稿日期: 2014-01-15 修回日期: 2014-02-20

基金项目: 国家自然科学基金(51277008)

作者简介: 李晓珊(1989—), 女, 山东潍坊人, 硕士生, 研究方向为电动加载系统智能控制。

在加载系统及电机控制方面,文献[10]给出了LQ最优控制的仿真结果,分析了系统的阶跃响应曲线,但没有给出跟踪特定信号的结果,也未分析系统的抗干扰性;文献[11]引入带有期望衰减度的性能指标,通过工程近似简化了计算的复杂度,但是跟踪精度并不高;文献[12]针对被控系统负载变化带来的不确定性对LQ最优控制进行了改进,给出了位置调节和定点控制的仿真结果。基于上述问题,本文通过对状态变量的巧妙选取,建立了系统的状态空间模型求得最优控制律,提出采用LQ和PID相结合的控制策略,提高了跟踪精度,降低了干扰输入对系统的影响,并与传统CMAC和PID的复合控制方法^[13]的控制结果进行了对比分析。仿真结果表明,该方法具有较高的跟踪稳态精度和抗干扰性,算法易于实现,控制系统结构简单,仿真速度较快,占用硬件资源相比CMAC和PID复合算法大大减少。

1 舵机电动加载系统的模型

舵机电动加载系统一般由上位机、控制器、驱动器、加载电机、扭矩传感器、舵机以及联轴器等构成,其结构如图1所示。

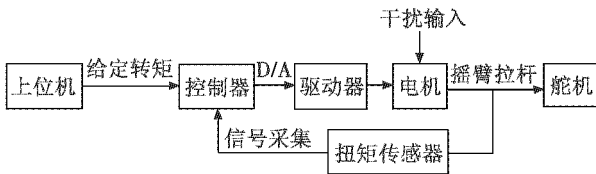


图1 电动加载系统的结构

Fig. 1 The structure diagram of electric loading system

根据上述结构框图,由电机各参数之间的平衡方程式^[14]以及各模块的数学模型,得到电动加载系统的传递函数如图2所示。

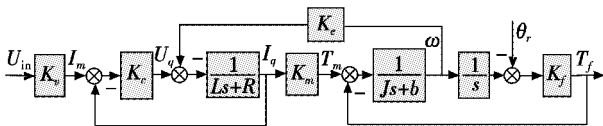


图2 电动加载系统的传递函数框图

Fig. 2 Transfer function block diagram of the electric loading system

忽略舵机干扰输入的影响,输入 U_{in} 到输出 T_f 的传递函数为

$$\frac{T_f}{U_{in}} = \frac{K_v K_c K_m K_f}{G(s)} \quad (1)$$

$$G(s) = J L s^3 + (b L + J R + J K_c) s^2 + (K_m K_e + K_f L) s + K_f R + K_c K_f \quad (2)$$

考虑舵机干扰输入 θ ,系统的数学模型为

$$T_f = G_1 U_{in} + G_2 \theta \quad (3)$$

式(3)中

$$G_1 = \frac{K_v K_c K_m K_f}{G(s)} \quad (4)$$

$$G_2 = -\frac{C(s)}{G(s)} \quad (5)$$

$$C(s) = K_f J L s^3 + K_f (b L + J R + J K_c) s^2 + K_f (b R + b K_c + K_e K_m) s \quad (6)$$

式(1)~式(6)中: U_{in} 为给定的输入电压(V); T_f 为输出转矩(N·m); R 为电枢电阻(Ω); L 为电枢电感(H); b 为电机摩擦系数(N·m·s); J 为转动惯量(kg·m²); K_e 为电势系数(V·s/rad); K_m 为力矩系数(N·m/A); K_f 为扭矩传感器扭转刚度(N·m/rad); K_c 为电流控制增益; K_v 为输入电压 U_{in} 和电流 I_m 之间的比例系数(A/V)。

2 LQ最优控制

2.1 LQ最优控制理论

线性系统可描述为

$$\begin{cases} \dot{X}(t) = A(t)X(t) + B(t)U(t) \\ Y(t) = C(t)X(t) + D(t)U(t) \end{cases} \quad (7)$$

式中: $X(t) \in \mathbf{R}^{n \times 1}$; $U(t) \in \mathbf{R}^{m \times 1}$; $Y(t) \in \mathbf{R}^{r \times 1}$; $A(t) \in \mathbf{R}^{n \times n}$; $B(t) \in \mathbf{R}^{n \times m}$; $C(t) \in \mathbf{R}^{r \times n}$; $D(t) \in \mathbf{R}^{r \times m}$; 最优控制问题就是寻找一个最优控制 $u^*(t)$,使性能指标 $J \rightarrow \min$ 。假设系统可控(或至少可稳)且可观,定义性能指标函数为

$$J = \int_0^T (X^T(t)Q(t)X(t) + U^T(t)R(t)U(t)) dt \quad (8)$$

式中: $Q(t) \in \mathbf{R}^{n \times n}$,为对称半正定阵; $R(t) \in \mathbf{R}^{r \times r}$,为对称正定阵。则使 J 为极小的最优控制是存在且唯一的。构造Hamilton函数求得协态方程 $\lambda(k)$,由状态方程和控制方程^[15]最优控制律可表示为

$$u^*(t) = -R^{-1}B^T P(t)X(t) = -K(t)X(t) \quad (9)$$

式中: $K(t)$ 为反馈增益阵; $P(t)$ 为矩阵Riccati微分方程的解,当满足一定条件时, $P(t)$ 为常数阵 P ,满足如下矩阵Riccati代数方程

$$-PA - A^T P + PBR^{-1}B^T P - Q = 0 \quad (10)$$

根据上述理论基础,按照如下步骤设计LQ最优控制律。

- 1) 选择状态变量、定义输入输出变量,给出系统的数学模型, $\dot{X} = AX + BU, Y = CX + DU$ 。
- 2) 定义性能指标函数 J 。
- 3) 选择加权矩阵 Q, R ,通常选用常数对角阵。
- 4) 求解Riccati方程,先求方程的解 P ,再求反馈增益矩阵 K 。若 K 阵各元素的值太大,不易在系统中实现,则调整 Q, R 阵,返回3);否则进行5)。

5) 构成闭环系统,求解在典型输入或初始条件下状态变量的动态响应,若不满足要求,则进一步改变 Q, R 阵,返回 3); 否则停止计算。

2.2 舵机电动加载系统的 LQ 控制

本文所研究的无人机舵机电动加载系统在较为理想的实验室条件下,不考虑系统受随机干扰噪声等非线形因素影响,采用线性定常系统的方法加以分析和设计,建立如式(7)所示的状态空间方程。将舵机运动 θ , 视为干扰输入,选取系统的状态变量为

$$X = [x_1 \ x_2 \ x_3]^T = [I_q \ \theta - \theta_r \ \omega]^T \quad (11)$$

输入变量为

$$U = [u_1 \ u_2]^T = [U_{in} \ \omega_r]^T \quad (12)$$

输出变量为

$$Y = y = T_f \quad (13)$$

式中: I_q 为电枢电流(为了获得线性状态方程,通常采用 d 轴电流 $I_d = 0$ 的矢量控制方式); θ 为电机转角; θ_r 为舵机干扰转角; ω 为电机转速; U_{in} 为输入控制电压; ω_r 为舵机的角速度干扰; T_f 为舵机的总负载力矩。在这里,把状态变量选为电机与舵机的转角差,当舵机主动运动带来干扰时能够抑制其对计算控制规律的影响,从而提高系统的抗干扰性。

由图 2 可得 I_q 与 U_{in} 之间的关系为

$$[(U_{in} \times K_v - I_q) \cdot K_c - \omega \cdot K_e] \cdot \frac{1}{Ls + R} = I_q \quad (14)$$

舵机负载力矩为

$$T_f = K_f \cdot (\theta - \theta_r) \quad (15)$$

电枢电流 I_q 与电机转速 ω 的关系为

$$(I_q \cdot K_m - T_f) \cdot \frac{1}{Js + b} = \omega \quad (16)$$

根据式(11)~式(16),得到式(7)所示的系统状

态方程,其中: $A = \begin{bmatrix} -\frac{R+K_c}{L} & 0 & -\frac{K_c}{L} \\ 0 & 0 & 1 \\ \frac{K_m}{J} & -\frac{K_f}{J} & -\frac{b}{J} \end{bmatrix}; B = \begin{bmatrix} \frac{K_v K_c}{L} & 0 \\ 0 & -1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix};$

$C = [0 \ K_f \ 0]; D = [0 \ 0]。$

舵机电动加载系统的模型参数值见表 1。

表 1 舵机电动加载系统的模型参数值

Table 1 Parameter values of the actuator electric loading system model

参数	数值	参数	数值
R/Ω	3.1744	L/H	0.0409
$K_v/(V \cdot s \cdot \text{rad}^{-1})$	0.7855	$K_m/(N \cdot m \cdot A^{-1})$	1.1783
$J/(\text{kg} \cdot \text{m}^2)$	0.0010	$b/(N \cdot m \cdot s)$	0.3514
$K_f/(N \cdot m \cdot \text{rad}^{-1})$	46.1050	$K_v/(A \cdot V^{-1})$	0.7900
K_c	80.0000		

将表 2 参数代入状态方程可得

$$A = \begin{bmatrix} -2034 & 0 & -19 \\ 0 & 0 & 1 \\ 1178 & -46105 & -351 \end{bmatrix}, B = \begin{bmatrix} 1545.2 & 0 \\ 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}, C =$$

$[0 \ 46.105 \ 0], D = [0 \ 0]$,由线性系统的可控性和可观性判据

$$\text{rank}[B \ AB \ \dots \ A^{n-1}B] = 3 \quad (17)$$

$$\text{rank}[C^T \ A^T C^T \ \dots \ (A^T)^{n-1} C^T] = 3 \quad (18)$$

可知该系统可控且可观,选择加权矩阵 $Q = I_3, R = 1$, 则目标函数

$$J = \int_0^t (I_q^2 + (\theta - \theta_r)^2 + \omega^2 + U_{in}^2 + \omega_r^2) dt \quad (19)$$

求得闭环系统的特征根 λ 分别为 $-2430.6, -773.1, -62.7$, 实部均为负值,闭环系统稳定。Matlab 提供了求解代数 Riccati 方程的函数,调用格式为

$$[K, P, E] = \text{lqr}(S_{\text{sys}}, Q, R) \quad (20)$$

式中: S_{sys} 为给定对象的系统模型; K 为状态反馈向量; P 为 Riccati 方程的解; E 为闭环系统特征根。经计算,

$$\text{Riccati 方程的解为 } P = \begin{bmatrix} 0.0004 & -0.0059 & 0.0004 \\ -0.0059 & 39.9579 & -0.0009 \\ 0.0004 & -0.0009 & 0.0010 \end{bmatrix},$$

最优反馈增益 $K = [0.5703 \ -9.1298 \ 0.5419]$ 。

采用无限时间定常输出跟踪问题的工程近似,定义参考输入和系统输出的误差 $e = T_0 - T_f$, 为了消除误差,加入积分控制作用,此时系统的控制律为

$$u^*(t) = -KX + K_I \int edt \quad (21)$$

式中, K_I 为积分系数。通过跟踪指令信号,发现在该条件下得到的跟踪误差存在一定的相角滞后。本文提出将误差的积分环节改为 PID 环节,一方面可以修正相角滞后,改善系统的动态性能,另一方面降低跟踪稳态误差,改善系统的稳态性能。加入 PID 以后的仿真结构如图 3 所示。

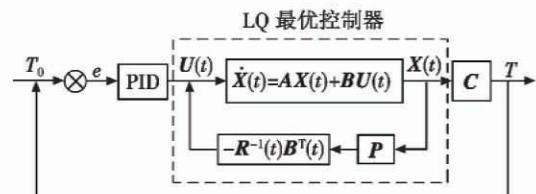


图 3 LQ 最优控制结合 PID 仿真结构图
Fig. 3 Simulation diagram of optimal control combined with PID

3 仿真结果

对基于 LQ + PID 复合控制策略的舵机加载系统模型进行仿真实验验证。加权矩阵 Q, R 的选取影响到最优控制的解,工程中考虑到系统整体可实现性,通常根据所需的系统性能指标进行试凑,在一定范围内选出

一个最佳的 Q 、 R 阵,使闭环系统的极点配置满足要求。当 Q 固定时, R 越大,系统稳态误差越小。另一方面, R 值的选取会影响 LQ 最优控制的控制输出量,控制效果和控制量相互制约,选取的加权矩阵需要使控制效果相对最优。参数选取如下: Q 取为单位阵, $R = 1$;电机模型参数见表 1。PID 参数分别是: $K_p = 3, K_i = 0.25, K_d = 0.1$,采样时间 $t_s = 1 \text{ ms}$ 。

3.1 跟踪精度仿真研究

跟踪加载指令 $T_0 = 5 \cdot \sin(2\pi \cdot f \cdot n \cdot t_s)$,信号频率 $f = 5 \text{ Hz}$ 。CMAC + PID 控制的学习率为 0.02, $K_p = 3, K_i = 0.25, K_d = 0.1$,CMAC 学习跟踪误差,量化级数为 30。由图 4、5 可知,CMAC 和 PID 复合控制的跟踪稳态误差为 $0.21 \text{ N} \cdot \text{m}$,LQ + PID 的跟踪稳态误差 $0.18 \text{ N} \cdot \text{m}$ 。

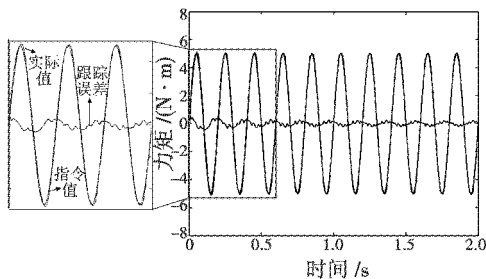


图 4 CMAC + PID 的跟踪结果, $f = 5 \text{ Hz}$

Fig.4 Tracking result of CMAC control with PID when $f = 5 \text{ Hz}$

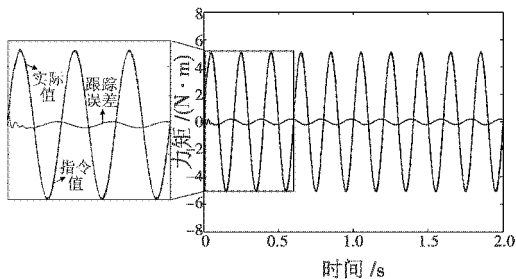


图 5 LQ 最优控制 + PID 的跟踪结果, $f = 5 \text{ Hz}$

Fig.5 Tracking result of LQ optimal control with PID when $f = 5 \text{ Hz}$

当跟踪的加载指令 $T_0 = 5\sin(2\pi \cdot f \cdot n \cdot t_s)$, $f = 10 \text{ Hz}$ 时,控制结果如图 6、7 所示。CMAC + PID 的稳态误差为 $0.57 \text{ N} \cdot \text{m}$,LQ 最优控制的稳态误差 $0.4 \text{ N} \cdot \text{m}$ 。

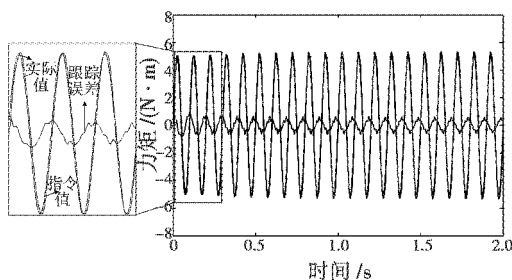


图 6 CMAC + PID 的跟踪结果, $f = 10 \text{ Hz}$

Fig.6 Tracking result of CMAC with PID when $f = 10 \text{ Hz}$

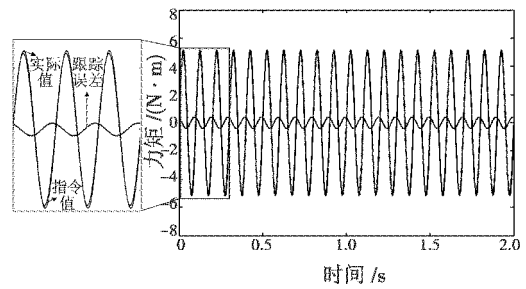


图 7 LQ 最优控制 + PID 的跟踪结果, $f = 10 \text{ Hz}$

Fig.7 Tracking result of LQ optimal control with PID when $f = 10 \text{ Hz}$

由上图可知,LQ + PID 控制下的电机加载系统能够快速跟踪给定的指令信号,稳态误差优于 CMAC 复合控制算法,且满足加载系统常用的“双十指标”(即控制系统幅差小于 10%,相差小于 10%)。图 8 所示为两种方法的误差平滑度比较,相比 CMAC + PID 复合控制,该方法输出平滑度明显提高,从而减少由于电机频繁往复转动引起的抖动现象,对电机的使用寿命、加载频宽等均有利。

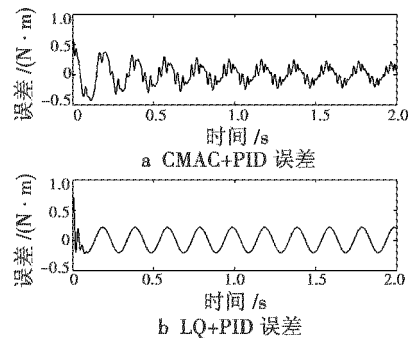


图 8 CMAC 与 LQ 复合控制跟踪误差平滑度比较

Fig.8 The tracking error smoothness comparison

仿真 5 s 时,CMAC+PID 复合控制实际用时 59.21 s,LQ + PID 复合控制用时 8.18 s。CMAC 控制策略需要经过设置泛化参数、参数初始化、量化、求解控制输入、神经网络训练学习等一系列步骤。LQ 最优控制的算法简单,运行初始和过程中不需要开辟、占用较大的内存空间,因而其仿真速度优于 CMAC + PID 的复合控制策略。

3.2 抗干扰及稳定性仿真

为了验证该控制策略对舵机干扰,即舵机主动运动 θ ,引起多余力矩的抑制效果,进行了系统抗干扰的仿真。跟踪 $T_0 = 5\sin(2\pi \cdot f \cdot n \cdot t_s)$, $f = 5 \text{ Hz}$ 的信号,在 t 为 5 ~ 8 s 之间加入 5 rad/s 的舵机角速度干扰,仿真 15 s 结果如图 9 所示,在 $t = 5 \text{ s}$ 和 $t = 8 \text{ s}$ 时,误差有一个幅值跳变,但在干扰消失后,系统能够很快恢复到稳定跟踪状态,即系统的抗干扰性较好。

当加载指令 $T_0 = 5\sin(2\pi \cdot f \cdot n \cdot t_s)$, $f = 5 \text{ Hz}$ 时,连续仿真 300 s 的误差结果如图 10 所示,跟踪误差一

直保持稳定不会发散,证明该控制策略的稳定性较好。

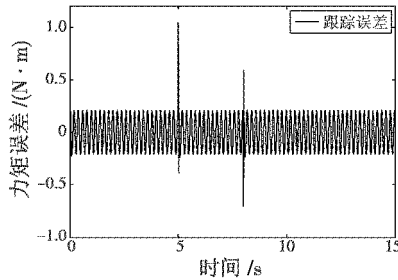


图 9 LQ 最优控制 + PID 的抗干扰仿真

Fig. 9 Anti-interference simulation of LQ optimal control combined with PID

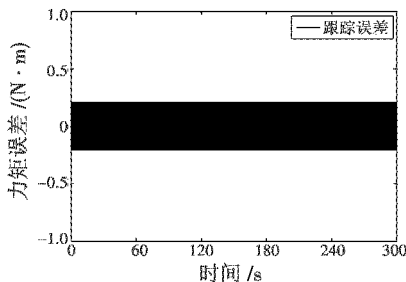


图 10 LQ 最优控制 + PID 的稳定性仿真

Fig. 10 Stability simulation of LQ optimal control combined with PID

4 结论

本文针对舵机电动加载系统,提出了一种基于 LQ 最优控制和 PID 结合的控制策略。在利用 LQ 建模时,恰当选取状态变量,较好地抑制了舵机运动的干扰。将 LQ 最优控制和 PID 进行结合,能够提高加载指令的跟踪精度,减小跟踪的相位滞后。仿真结果表明,该复合控制策略的控制精度高,且具有较强的抗干扰能力,与该领域常用的 CMAC + PID 的复合控制策略相比,该算法简单、计算量小,输出曲线更加光滑,仿真速度更快。

参考文献

[1] HAN S S, JIAO Z X, SHANG Y X, et al. Compensation control for the supply pressure fluctuation in electro-hydraulic load simulator [C]//International Conference on Fluid Power and Mechatronics (FPM), Beijing, China, 2011: 914-919.

[2] 陈康,黄勇,孙力. 电动直线舵机方波加载系统研究 [J]. 宇航学报, 2008, 29(5): 1515-1520.

CHEN K, HUANG Y, SUN L. The research of linear rudder square direction electric loading system [J]. Journal of Astronautics, 2008, 29(5): 1515-1520.

[3] RUBAAI A, CASTRO-SITTIRICHE M J, OFOLI A R. DSP-based laboratory implementation of hybrid fuzzy-PID controller using genetic optimization for high-performance mo-

tor drives [J]. IEEE Transactions on Industry Applications, 2008, 44(6): 1977-1986.

- [4] ZHANG H J, QUAN L. Permanent magnet synchronous motor servo system with adaptive observer [C]//International Conference on Computer, Mechatronics, Control and Electronic Engineering (CMCE), Changchun, China, 2010: 120-123.
- [5] TEDDY S D, QUEK C, LAI E K. PSECMAC: A novel self-organizing multi-resolution associative memory architecture [J]. IEEE Transactions on Neural Networks, 2008, 19(4): 689-712.
- [6] 杨波,王哲. 新型小脑模型关联控制器复合控制在电动加载系统中的结构及算法 [J]. 控制理论与应用, 2011, 28(6): 827-833.
- YANG B, WANG Z. Structure and algorithm of hybrid control in cerebella model articulation controller for electric loading system [J]. Control Theory & Applications, 2011, 28(6): 827-833.
- [7] CHITU C, LACKNER J, HORNET M, et al. Controller design for an electric power steering system based on LQR techniques [J]. COMPEL: The International Journal for Computation and Mathematics in Electrical and Electronic Engineering, 2013, 32(3): 763-775.
- [8] AKSIKAS I, FUXMAN A, FORBES J F, et al. LQ control design of a class of hyperbolic PDE systems: Application to fixed-bed reactor [J]. Automatica, 2009, 45(6): 1542-1548.
- [9] KAHVECI N E, IOANNOU P A, MIRMIRANI M D. Adaptive LQ control with anti-windup augmentation to optimize UAV performance in autonomous soaring applications [J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2008, 16(4): 691-707.
- [10] 刘军,谭港,慕晓静. 电液伺服系统线性二次型最优控制仿真研究 [J]. 微型机与应用, 2012, 31(14): 67-69.
- LIU J, TAN G, MU X J. Study on pull straightening mechanical electro-hydraulic servo system's optimal control for linear-quadratic systems [J]. Microcomputer & Its Applications, 2012, 31(14): 67-69.
- [11] 范金华,吕鸣,彭学锋. 舵机加载系统的最优控制 [J]. 电光与控制, 2008, 15(9): 73-76.
- FAN J H, LÜ M, PENG X F. Optimal control for actuator loading system [J]. Electronics Optics & Control, 2008, 15(9): 73-76.
- [12] LIU A M, LIANG Y R, GAO S, et al. Modified linear quadratic optimal control method and application in linear brushless direct current motor [C]//International Conference on Electrical Machines and Systems, Seoul, 2007: 1829-1834.

加算法实时性。在实际使用中,超球体采样 UKF 算法可提升姿态估计精度,缩短反应时间,降低处理器功耗,对低成本动中通姿态估计的应用有着重要意义。

5 结束语

本文采用超球体采样 UKF 算法融合微机械陀螺、加速度计和单基线 GPS 信息的动中通低成本姿态估计方案,解决了传感器受机动加速度和侧滑角等外界干扰时估计精度差的问题。针对 EKF 精度不高、传统 UKF 计算量大的问题,采用超球体采样 UKF 算法,提高了算法精度的同时缩短了运算时间,并使姿态估计效率明显改进,对低成本动中通姿态估计有着重要的实际意义。实验结果表明:超球体采样 UKF 滤波算法计算相对简单,实时性好,姿态估计精度较高,很好地满足了低成本宽带移动卫星通信波束对准要求。

参 考 文 献

- [1] JUNG Y B, EOM S Y, JEONS I. Novel antenna system design for satellite mobile multimedia service [J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2010, 59(9): 4237-4247.
- [2] 田方浩,姚敏立,周淑华,等. 宽带移动卫星通信系统 LCAE 算法[J]. *西安交通大学学报*, 2013, 47(6): 64-68.
TIAN F H, YAO M L, ZHOU S H, et al. The LCAE algorithm for broad-band mobile satellite communication system [J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2013, 47(6): 64-68.
- [3] MAEDER U, MORARI M. Attitude estimation for vehicles with partial inertial measurement [J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2011, 60(4): 1496-1504.
- [4] 闫林波,贾维敏,姚敏立,等. 基于扩展卡尔曼滤波的动中通低成本姿态估计[J]. *电光与控制*, 2013, 20(7): 53-57.
YAN L B, JIA W M, YAO M L, et al. Low-cost attitude estimation based on extended Kalman filter for satcom-on-the-move [J]. *Electronics Optics & Control*, 2013, 20(7): 53-57.
- [5] 沈晓卫,姚敏立,李琳琳,等. 宽带移动卫星通信低成本组合姿态确定算法[J]. *西安交通大学学报*, 2011, 45(6): 64-68.
SHEN X W, YAO M L, LI L L, et al. A hybrid attitude determination method with low cost for broadband mobile satellite communication [J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2011, 45(6): 64-68.
- [6] TITTERTON D H, WESTON J L. 捷联惯性导航技术 [M]. 张天光,王秀萍,王丽霞,等译. 2 版. 北京:国防工业出版社, 2007: 27-31.
TITTERTON D H, WESTON J L. Strapdown inertial navigation technology [M]. Translated by ZHANG T G, WANG X P, WANG L X, et al. 2nd ed. Beijing: National Defense Industry Press, 2007: 27-31.
- [7] 伍宗伟,姚敏立,马红光,等. 移动卫星通信低成本多传感器融合姿态估计方法[J]. *西安交通大学学报*, 2012, 46(12): 55-61.
WU Z W, YAO M L, MA H G, et al. An attitude estimation method using multi-sensor fusion for low-cost mobile satellite communication [J]. *Journal of Xi'an Jiaotong University*, 2012, 46(12): 55-61.
- [8] WU Z W, YAO M L, MA H G, et al. Low-cost antenna attitude estimation by fusing inertial sensing and two-antenna GPS for vehicle-mounted SatCom-on-the-move [J]. *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2013, 62(3): 1084-1096.
- [9] GRIP H F, FOSSEN T I, JOHANSEN T A. Attitude estimation using biased gyro and vector measurements with time-varying reference vectors [J]. *IEEE Transactions on Automatic Control*, 2012, 57(5): 1332-1338.
- [10] WU Z W, YAO M L, MA H G, et al. Low-cost attitude estimation with MIMU and two-antenna GPS for SatCom-on-the-move [J]. *GPS Solutions*, 2013, 17(1): 75-87.
- [11] 孙洪波,王哲. 基于扩展卡尔曼滤波的动中通低成本姿态估计[J]. *机械工程与自动化*, 2010(2): 82-83.
SONG J, WANG X Y. Electric load simulator system establishment and identification of the model [J]. *Mechanical Engineering & Automation*, 2010(2): 82-83.
- [12] 张洪钺,王青. 最优控制理论与应用 [M]. 北京:高等教育出版社, 2006: 70-75.
ZHANG H Y, WANG Q. Optimal control theory and application [M]. Beijing: Higher Education Press, 2006: 70-75.
- [13] 杨波,王哲. 舵面电动加载系统的自适应 CMAC 复合控制[J]. *北京航空航天大学学报*, 2010, 36(3): 333-337.
YANG B, WANG Z. Adaptive CMAC hybrid control for rudder electric loading systems [J]. *Journal of Beijing University of Aeronautics and Astronautics*, 2010, 36(3): 333-337.
- [14] 宋晶,王学勇. 电动负载模拟器系统模型的建立与辨

(上接第 75 页)