doi:10.11918/j.issn.0367-6234.2016.09.030

四旋翼无人飞行器 ADRC-GPC 控制

陈增强[1,2,3],李 毅[1,2],孙明玮[1,2],张 青[3],孙青林[1,2]

(1. 南开大学 计算机与控制工程学院,天津 300350;2. 智能机器人技术天津市重点实验室(南开大学),天津 300350;
3. 中国民航大学 理学院,天津 300300)

摘 要:针对四旋翼无人飞行器的姿态控制系统,需要研究先进控制策略来达到满意的性能.将自抗扰控制(ADRC)与广义预测控制(GPC)相结合,设计一种新型自抗扰广义预测控制器(ADRC-GPC),利用 ADRC 中的扩张状态观测器(ESO)来估计和补偿非线性系统的模型不确定性以及外部扰动作用,将原始对象模型转化为积分器形式,然后针对积分器设计广义预测控制器.阶跃响应系数矩阵能被解析地求解出来,可有效地解决广义预测控制计算量大的问题.研究结果表明:所提出的 ADRC-GPC控制方法能够对四旋翼无人飞行器姿态系统进行实时控制,可满足控制精度及快速性要求,并能有效地克服系统的外部干扰和多变量耦合作用.自抗扰广义预测控制器能够有效地控制欠驱动非线性多变量系统.

关键词:姿态控制;自抗扰控制;扩张状态观测器;广义预测控制;四旋翼无人飞行器

中图分类号:V448.22 **文献标志码**:A **文章编号**:0367-6234(2016)09-0176-05

ADRC-GPC control of a quad-rotor unmanned aerial vehicle

CHEN Zengqiang[1,2,3], LI Yi[1,2], SUN Mingwei[1,2], ZHANG Qing[3], SUN Qinglin[1,2]

(1. College of Computer and Control Engineering, Nankai University, Tianjin 300350, China;
2. Key Laboratory of Intelligent Robotics(Nankai University), Tianjin 300350, China;
3. College of Science, Civil Aviation University of China, Tianjin 300300, China)

Abstract: Aiming to the attitude control system of quad-rotor unmanned aerial vehicles, advanced control scheme should be studied to obtain the satisfied performance. A novel active disturbance rejection generalized predictive control (ADRC-GPC) is presented by combining the technique of active disturbance rejection control (ADRC) and generalized predictive control (GPC). The extended state observer (ESO) of active disturbance rejection control is employed to estimate and compensate the existing uncertainties and disturbance of the nonlinear dynamics systems, such that an integrator form can be obtained to serve as the model for GPC design. By using this scheme, the step response coefficient matrix can be derived analytically and the computational complexity can be substantially reduced. The experiment results show that the designed ADRC-GPC scheme can be applied in the real-time control for the attitude system of the quad-rotor unmanned aerial vehicle (UAV), it can not only meet the need of control accuracy and rapidity, but also have strong disturbance rejection ability and stability. Therefore, the proposed active disturbance rejection generalized predictive control scheme can be used to control under-actuated nonlinear multivariable plants effectively.

Keywords: attitude control; active disturbance rejection control (ADRC); extended state observer (ESO); generalized predictive control (GPC); quad-rotor unmanned aerial vehicle

科学技术的不断发展,也要求控制的精确性、快速性以及对变化的适应性等控制性能指标不断提升.经典 PID 控制器具有不依赖被控对象的精确模型的特点,在实际控制中得到了广泛的应用.但在面对更为复杂的受控对象(例如多变量耦合、强非线性、参数时变、大时滞、以及其他内部及外部不确定因素)时,PID 控制器仍存在一定的局限性,因此要发展具有更强适应能力的先进控制方法.中国学者韩京清提出的自抗扰控制技术(ADRC)[1-3],是一种不依赖于精准对象模型的新型控制方法,能实时估计并补偿系统在工作时受到的各种外扰及自身内扰的综合作用,再结合特殊的误差反馈机制,就能得到优良的适应能力和的控制品质.ADRC 技术具

收稿日期:2015-03-29
基金项目:国家自然科学基金(61573199,61573197,61273138);
天津市自然科学基金(14JCYBJC18700)
作者简介:陈增强(1964—),男,教授,博士生导师
通信作者:陈增强,chenzq@nankai.edu.cn

有抗干扰能力强、超调小、响应快等特点. 美国学者高志强提出了基于线性扩张状态观测器(LESO)的线性自抗扰控制(LADRC)[4]，使得自抗扰控制算法更加简化、可调参数有效地减少，非常宜于数字化实现，推动了这种控制技术在实际工程中的应用[5]. 目前 ADRC 技术已经成为有效的控制工具，在理论上得到了极大的丰富与发展[6-11]，而且在机电控制、航空航天控制、过程工业控制等多个领域的工程实践中获得成功的应用[12-13]. 但是 ADRC 在复杂非线性系统中的应用，如果要获得更优的控制性能，需要与其他先进控制方法有机结合.

广义预测控制(GPC)[14-15]是由英国学者 Clarke 等提出的，具有模型预测、滚动优化和在线反馈校正等特征，适合运用于模型不确定、大滞后、开环不稳定、非最小相位等系统. 但是 GPC 的缺点在于预测对于模型参数比较敏感，同时需要在线求解丢番图方程组，当预测步长较大时，计算量太大.

四旋翼无人飞行器是一种具有 6 个自由度(位置和姿态)和 4 个控制输入的欠驱动非线性系统，其具有多变量强耦合、强非线性、以及对扰动敏感等特性，这使得控制系统的设计十分困难，而整个飞行控制系统的关键就是姿态控制. 目前常见的控制方法包括四元反馈控制[16-17]、反步控制[18-19]、最优控制[20]、H_∞ 鲁棒控制[21]、滑模控制[22-23]等. 这些控制系统的设计较多地依赖于对被控对象建模的精确性，而且控制算法复杂，不易实时地实现.

本文尝试将 ADRC 与 GPC 这两种先进控制方法有机地结合，推导出自抗扰广义预测控制算法(ADRC-GPC). 通过引入线性扩张状态观测器(LESO)，对被控系统进行反馈补偿及化简，使每一个控制通道近似化为单积分器. 然后，针对单积分器这种简单线性对象设计 GPC，通过分析丢番图方程的求解过程，可直接获得阶跃系数矩阵的解析解形式，未来输出的预测可由输出采样值直接计算得到，避免了在线求解丢番图方程组所带来的计算量大的问题. 最后通过在四旋翼飞行系统的实验装置上进行的实时控制结果，验证了 ADRC-GPC 对多变量欠驱动非线性系统具有良好的稳定性和控制性能.

1　自抗扰控制 ADRC 的基本原理

ADRC 是由跟踪微分器(TD)、扩张状态观测器(ESO)、非线性状态误差反馈律(NLSEF)这 3 部分所构成. 其中通过 TD 得到光滑的输入信号及其微分信号，为系统的输入安排过渡过程. 通过 ESO 来估计出系统的状态和受到的总扰动. 这里总扰动指系统的模型不确定性(内扰)和外扰的综合作用. 将估计出来的总扰动量补偿进入到控制器中，可将原非线性控制系统转化为线性化的串联型积分器系统. 这种动态估计并补偿总扰动的功能就是 ADRC 的核心技术. 非线性状态误差反馈律 NLSEF 是通过适当的非线性函数，将 TD 产生的跟踪信号及其微分与 ESO 估计出的系统的状态进行组合，得到系统的当前反馈控制量 u_0. 而最终的控制量 u 由虚拟控制量 u_0 再加上总扰动估计的补偿值来确定.

2　自抗扰广义预测控制器(ADRC-GPC)

2.1　非线性系统的动态补偿线性化

设一个被控回路的非线性系统为

$$\ddot{x} = f(x,\dot{x}) + bu. \tag{1}$$

其中：x 为系统状态，$f(x,\dot{x})$ 为未知函数，u 为对应的控制量.

令 $x_1 = x, x_2 = \dot{x}, x_3 = f(x,\dot{x})$，得到状态方程

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2, \\ \dot{x}_2 = x_3 + bu, \\ \dot{x}_3 = f(x,\dot{x}), \\ y = x_1. \end{cases} \tag{2}$$

针对式(2)设计 ESO 为

$$\begin{cases} \dot{z}_1 = z_2 - \beta_{01}\mathrm{fal}(\bar{y} - y, a_1, \delta), \\ \dot{z}_2 = z_3 - \beta_{02}\mathrm{fal}(\bar{y} - y, a_2, \delta) + b_0 u, \\ \dot{z}_3 = -\beta_{03}\mathrm{fal}(\bar{y} - y, a_3, \delta), \\ \bar{y} = z_1. \end{cases} \tag{3}$$

其中：$\beta_{01} \sim \beta_{03}$ 为 ESO 的设计参数，fal(·)函数为

$$\mathrm{fal}(e,a,\delta) = \begin{cases} |e|^a \mathrm{sign}(e), & |e| > \delta; \\ \dfrac{e}{\delta^{1-a}}, & |e| \leqslant \delta. \end{cases} \tag{4}$$

选择合适的 ESO 增益 $\beta_{01} \sim \beta_{03}$，可使

$$z_3 \approx f(x,\dot{x}). \tag{5}$$

令

$$u = \frac{u_0 - z_3}{b_0} \approx \frac{u_0 - f(x,\dot{x})}{b_0}, \tag{6}$$

其中：u_0 为虚拟控制量，b_0 为决定补偿作用大小的补偿因子. 将式(6)代入(1)式中，得到 $\ddot{x} \approx u_0$. 其传递函数为

$$\frac{x(s)}{u_0(s)} \approx \frac{1}{s^2}. \tag{7}$$

于是，通过 ESO 的动态补偿线性化，将原非线性被控系统转化为线性积分器系统，为后续设计 GPC 提供了便利. GPC 设计过程就与非线性模型的具体形式和参数取值无直接关系了，故而有效地降

低了控制系统对于模型的敏感性.

2.2 非线性系统的 ADRC-GPC 算法

基于模型(7)进行 GPC 设计,先对其离散化为

$$G_{\mathrm{M}} = z^{-1}\frac{B(z^{-1})}{A(z^{-1})}. \tag{8}$$

式中 $A(z^{-1}) = 1 - 2z^{-1} + z^{-2}$, $B(z^{-1}) = \frac{h^2}{2}(1 + z^{-1})$, 其中 h 为采样步长.

GPC 的性能指标为

$$J = \sum_{j=1}^{N}[y(k+j) - y_r(k+j)]^2 + \lambda\sum_{j=1}^{N_u}\Delta u(k+j-1)^2. \tag{9}$$

式中: $\lambda > 0$ 为控制加权因子,N 为预测步长,$N_u \leqslant N$ 为控制步长.

当 $J > N_u$ 时,控制量不再变化, $u(k+j-1) = u(k+N_u-1)$,$\Delta u(k+j-1) = 0$;$y(k+j)$ 为 j 步向前的预测输出,$y_r(k+j)$ 为柔化后的参考轨迹,参考轨迹的形式为

$$\begin{cases} y_r(k) = y(k), \\ y_r(k+j) = \alpha y_r(k+j-1) + (1-\alpha)w(k). \end{cases} \tag{10}$$

其中 $w(k)$ 为当前设定值, $0 \leqslant \alpha < 1$ 为柔化因子.

j 步后输出 $y(k+j)$ 的预测值为

$$y(k+j) = G_j(z^{-1})\Delta u(k+j-1) + F_j(z^{-1})y(k) + H_j\Delta u(k-1), \tag{11}$$

式中 $F_j(z^{-1})$,$G_j(z^{-1})$ 和 $H_j(z^{-1})$ 为关于 z^{-1} 的多项式,可由如下两个方程求出:

$$1 = E_j(z^{-1})A(z^{-1})\Delta + z^{-j}F_j(z^{-1}), \tag{12}$$

$$B(z^{-1})E_j(z^{-1}) = G_j(z^{-1}) + z^{-j}H_j(z^{-1}). \tag{13}$$

其中 $\Delta = 1 - z^{-1}$. 由于 $A(z^{-1})$ 和 $B(z^{-1})$ 的形式已由式(8)给出,可由数学归纳法算得 $E_j(z^{-1})$, $F_j(z^{-1})$, $G_j(z^{-1})$, $H_j(z^{-1})$ 分别为

$$\begin{cases} E_j(z^{-1}) = 1 + 2z^{-1} + \cdots + \frac{1}{2}j(j+1)z^{-j+1}, \\ F_j(z^{-1}) = \frac{1}{2}(j+1)(j+2) - (j^2+2j)z^{-1} + \\ \qquad \frac{1}{2}(j+1)(j+2)z^{-2}, \\ G_j(z^{-1}) = \frac{h^2}{2}(1 + 4z^{-1} + \cdots + j^2z^{-j+1}), \\ H_j(z^{-1}) = \frac{h^2}{2}\frac{1}{2}j(j+1). \end{cases} \tag{14}$$

定义:

$$\begin{cases} \boldsymbol{U} = [\Delta u(k), \Delta u(k+1), \cdots, \Delta u(k+N_u-1)]^{\mathrm{T}}, \\ \boldsymbol{Y}_r = [y_r(k+1), y_r(k+2), \cdots, y_r(k+N)]^{\mathrm{T}}, \\ \boldsymbol{Y} = [y(k+1), y(k+2), \cdots, y(k+N)]^{\mathrm{T}}. \end{cases}$$

将式(9)写成向量形式,并令 $\frac{\partial J}{\partial U} = 0$, 有

$$\boldsymbol{U} = (\boldsymbol{G}^{\mathrm{T}}\boldsymbol{G} + \lambda\boldsymbol{I})^{-1}\boldsymbol{G}^{\mathrm{T}}[\boldsymbol{Y}_r - \boldsymbol{F}y(k) - \boldsymbol{H}\Delta u(k-1)].$$

其中: $\boldsymbol{F} = [F_1, \cdots, F_N]^{\mathrm{T}}$; $\boldsymbol{H} = [H_1, \cdots, H_N]^{\mathrm{T}}$; $\boldsymbol{G}$ 为由 $\boldsymbol{G}_j(z^{-1})$ 的系数构成的 $N \times N_u$ 维矩阵,其定义可参见文献[14-15]; 具体的虚拟控制量 $\boldsymbol{u}_0$,是取 $\boldsymbol{U}$ 的第 1 行分量,即

$$\boldsymbol{u}_0 = [1 \quad 0 \quad \cdots \quad 0]\boldsymbol{U}.$$

3 四旋翼飞行器姿态实时控制

针对加拿大 Quanser 公司生产的四旋翼盘旋实验装置,本文采用 ADRC-GPC 方法,来研究其姿态控制问题.

3.1 四旋翼无人机姿态控制系统模型

四旋翼系统姿态控制状态空间方程[24]为

$$\begin{bmatrix} \dot{y} \\ \dot{p} \\ \dot{r} \\ \ddot{y} \\ \ddot{p} \\ \ddot{r} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0&0&0&1&0&0 \\ 0&0&0&0&1&0 \\ 0&0&0&0&0&1 \\ 0&0&0&0&0&0 \\ 0&0&0&0&0&0 \\ 0&0&0&0&0&0 \end{bmatrix}\begin{bmatrix} y \\ p \\ r \\ \dot{y} \\ \dot{p} \\ \dot{r} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0&0&0&0 \\ 0&0&0&0 \\ 0&0&0&0 \\ \frac{k_{t,c}}{J_y}&\frac{k_{t,c}}{J_y}&\frac{k_{t,n}}{J_y}&\frac{k_{t,n}}{J_y} \\ \frac{lk_f}{J_p}&-\frac{lk_f}{J_p}&0&0 \\ 0&0&\frac{lk_f}{J_r}&-\frac{lk_f}{J_r} \end{bmatrix}\begin{bmatrix} V_f \\ V_b \\ V_r \\ V_l \end{bmatrix}$$

其中: y 为偏航角,p 为俯仰角,r 为滚转角,V_f、V_b、V_r、V_l 分别为控制 4 个方向旋翼转速的电压, $k_{t,n}$ 为螺旋桨顺时针力矩系数,$k_{t,c}$ 为螺旋桨逆时针力矩系数, k_f 为螺旋桨升力系数,J_y 为偏航轴转动惯量,J_p 为俯仰轴转动惯量,J_r 为滚转轴转动惯量,l 为旋转中心与螺旋桨中心距离.

将三自由度四旋翼盘旋系统分为偏航、俯仰和滚转 3 个通道,则姿态控制系统框图如图 1[25]所示,对每个通道本文分别采用一个 ADRC-GPC 控制器,算出 3 个通道的控制量 u_1、u_2、u_3, 再通过控制量转换成 V_f、V_b、V_r、V_l, 作用到模型上.

3.2 四旋翼飞行器姿态实时控制

采用第 3 节中的 ADRC-GPC 控制方案,对四旋翼盘旋实验装置进行实时控制. 实时控制系统的硬件包括机械部件(见图 2)、功率放大器和数据采集卡,软件用到了实时控制软件 Quarc. 经调试选取

ADRC-GPC 控制器参数，其中 3 个通道均相同的参数为 $a_1 = 0.8$，$a_2 = 0.01$，$a_3 = 0.65$，$\delta = 0.05$，$\beta_{01} = 75$，$\beta_{02} = 1\,875$，$\beta_{03} = 15\,625$，$N = 40$，$N_u = 15$.

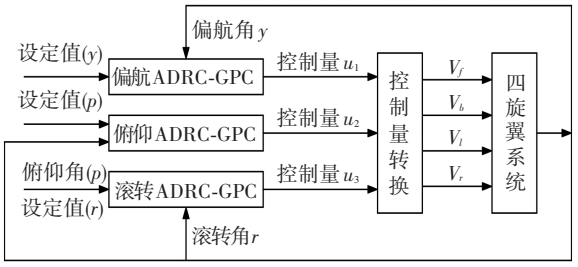


图 1　三自由度四旋翼系统姿态控制框图

Fig.1　Block diagram of the attitude control of three DOF quadrotor system

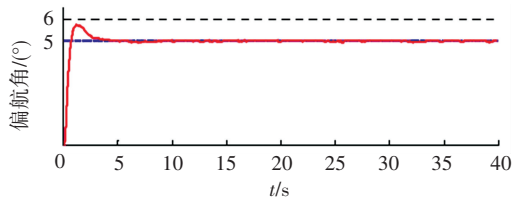


图 2　三自由度四旋翼系统实验装置

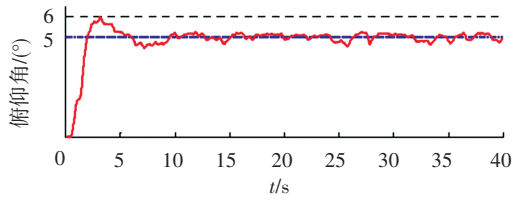
Fig.2　Three DOF quadrotor experimental apparatus

系统的初始状态均为 0，自抗扰预测控制器参数如下. 偏航通道：$b_0 = 0.001$，$h = 0.001$，$\lambda = 0.000\,05$；俯仰通道：$b_0 = 0.01$，$h = 0.015$，$\lambda = 0.000\,2$. 由图 3 可见，每个通道的设定值均为比较严苛的 5°时，控制器也可使系统的上升时间保证在 2 s 内，充分体现了 ADRC-GPC 控制器的快速性，尽管有一定量的超调量，但是稳定控制的效果还是令人满意的. 图 4 中，设定值是幅值为 4°，频率为 0.04 Hz 的方波信号，实时结果表明，在 3 个通道的设定值同时具有较大突变的情况下，控制器也能取得优良的控制效果，超调量合理，这说明了控制器是具有一定稳定控制能力和动态解耦能力的.

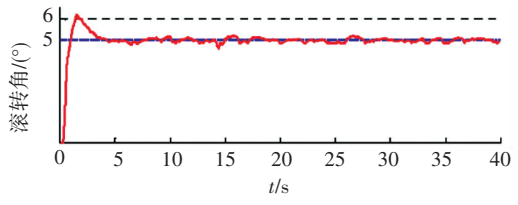
图 5 中，在实时控制 10 s 时给入一个幅值为 5°，持续时长为 1 s 的脉冲干扰信号. 图 6 中，在 15 s 时给入幅值为 5°，持续时长为 1 s 的脉冲干扰信号. 可以看出，设定值越平和，ADRC-GPC 使受到干扰的系统恢复到初始设定状态的速度就越快. 图 5 和图 6 的实验结果充分表明自抗扰预测控制器在四旋翼姿态实时控制中的强抗扰性和强鲁棒性.



(a)跟踪常值时偏航角曲线



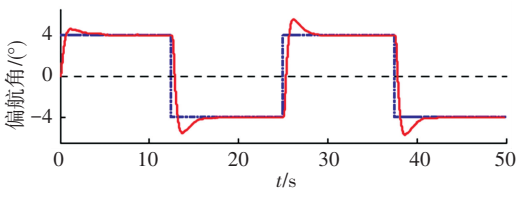
(b)跟踪常值时俯仰角曲线



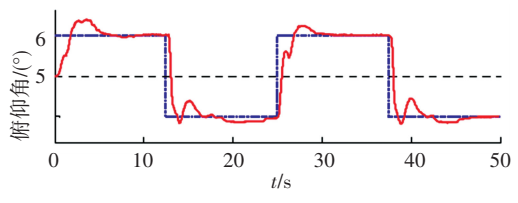
(c)跟踪常值时滚转角曲线

图 3　实时控制跟踪常值

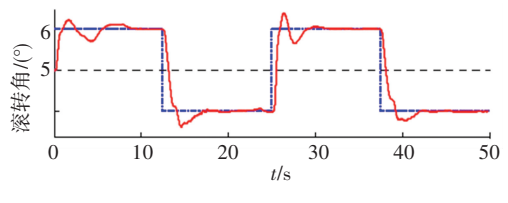
Fig.3　The tracking constant for real time control



(a)跟踪方波时偏航角曲线



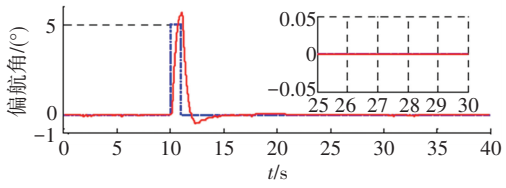
(b)跟踪方波时俯仰角曲线



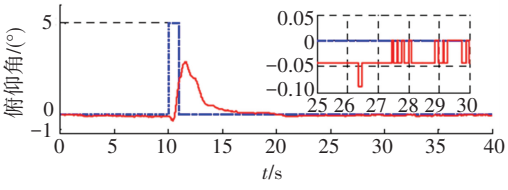
(c)跟踪方波时滚转角曲线

图 4　实时控制跟踪方波

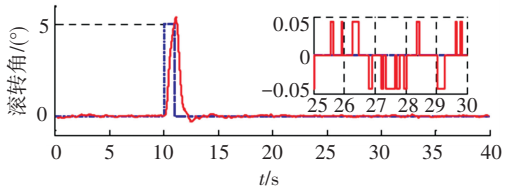
Fig.4　The tracking square waves for real time control



(a) 偏航角零状态抗扰动曲线



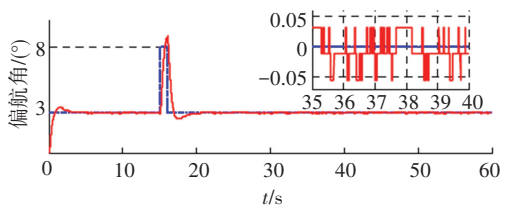
(b) 俯仰角零状态抗扰动曲线



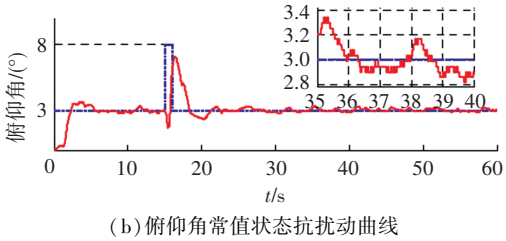
(c) 滚转角零状态抗扰动曲线

图 5 零状态抗扰动实验

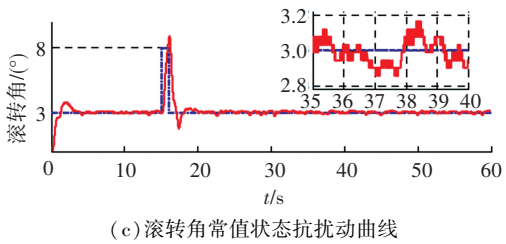
Fig.5 The zero state disturbance rejection experiment



(a) 偏航角常值状态抗扰动曲线



(b) 俯仰角常值状态抗扰动曲线



(c) 滚转角常值状态抗扰动曲线

图 6 常值状态抗扰动实验

Fig.6 The constant state disturbance rejection experiment

本文在实时控制四旋翼姿态的过程中也发现：预测步长 N 取得越大，系统稳定性越好，但是计算量也就越大；控制加权因子 λ 增加，系统控制量越平稳，但是跟踪精度会降低；柔化因子 α 主要与系统跟踪特性有关，α 越大，超调越小，跟踪速度越慢，反之超调越大，跟踪速度越快. 采样步长 h 需要根据性能的要求从一个合理的区间内进行选取，在这个区间内，h 取值越小，系统的响应速度越快.

4 结 论

1)将 ADRC 与 GPC 相结合，推导了自抗扰广义预测控制器(ADRC-GPC)，该控制器兼具 ADRC 和 GPC 两者优点，并且易于在线计算.

2)针对四旋翼欠驱动系统，采用自 ADRC-GPC 进行控制，实时控制结果表明 ADRC-GPC 控制器具有很好的鲁棒稳定性、抗干扰性能、以及对多变量系统的解耦能力，是一种先进实用的控制方法.

3)进一步研究工作是对这种控制方法进行理论上的定量分析，准备采用内模控制原理和频域方法对自抗扰预测控制进行鲁棒性和稳定性分析，并给出使系统达到一定鲁棒稳定性能的参数范围.

参考文献

[1] 韩京清. 自抗扰控制器及其应用[J]. 控制与决策, 1998, 13(1): 19-23.
HAN Jingqing. Auto-disturbances-rejection controller and its applications[J]. Control and Decision, 1998, 13(1): 19-23.

[2] 韩京清. 自抗扰控制技术：估计补偿不确定因素的控制技术[M]. 北京：国防工业出版社, 2008.
HAN Jingqing. Active disturbance rejection control technique: the technique for estimating and compensating the uncertainties[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2008.

[3] HAN Jingqing. From PID to active disturbance rejection control[J]. IEEE Trans on Industrial Electronics, 2009, 56(3): 1-7.

[4] GAO Zhiqiang. Scaling and bandwidth-parameterization based controller tuning[C]//Proceedings of the 2003 American Control Conference. Denver: IEEE, 2003: 4989-4996.

[5] ZHENG Qing, GAO Zhiqiang. On practical applications of active disturbance rejection control[C]//Proceedings of the 29th Chinese Control Conference. Beijing: IEEE, 2010: 6095-6100.

[6] HUANG Yi, XUE Wenchao. Active disturbance rejection control: methodology and theoretical analysis[J]. ISA Transactions, 2014, 53(4): 963-976.

[7] XUE Wenchao, HUANG Yi. On performance analysis of ADRC for a class of MIMO lower-triangular nonlinear uncertain systems[J]. ISA Transactions, 2014, 53(4): 955-962.

[8] GUO Baozhu, ZHAO Zhiliang. On the convergence of an extended state observer for nonlinear systems with uncertainty[J]. Systems and Control Letters, 2011, 60(6): 420- 430.

[9] GUO Baozhu, ZHAO Zhiliang. On convergence of nonlinear active disturbance rejection control for MIMO systems[J]. SIAM J Control and Optimization, 2013, 51(2): 1727- 1757.

[10] YANG Ruiguang, SUN Mingwei, CHEN Zengqiang. Active disturbance rejection control on first-order plant[J]. Journal of Systems Engineering and Electronics, 2011, 22(1): 95-102.

[11] 陈增强，孙明玮，杨瑞光. 线性自抗扰控制器的稳定性研究[J]. 自动化学报，2013, 39(5): 574-580.
CHEN Zengqiang, SUN Mingwei, YANG Ruiguang. On the stability of linear active disturbance rejection control[J]. Acta Automatica Sinica, 2013, 39(5): 574-580.

(下转第 188 页)