

基于 anti-windup 技术的四旋翼模糊 PID 控制

耿玉豪, 肖文生, 崔俊国, 王鸿雁
(中国石油大学(华东)机电工程学院, 山东 青岛 266580)

摘要: 四旋翼飞行器在受到风力等大扰动的情况下,单纯的PID控制受到积分环节和饱和限幅环节的共同作用,容易产生windup现象,系统动态响应变差,造成飞行器大超调甚至失调。通过建立四旋翼飞行器的动力学仿真模型,分析了windup现象产生的原因,设计了参数模糊可变的anti-windup PID控制器,用于缓解windup现象。对比分析了该控制器与现有的模糊PID控制器、参数为定值的anti-windup PID控制器的性能,仿真结果表明,基于anti-windup技术的模糊PID控制器,能够更加有效地抑制windup现象,加快飞行器的姿态调节过程。

关键词: 四旋翼飞行器; anti-windup技术; PID控制器; 模糊控制

中图分类号: V279; TP273 **文献标志码:** A **文章编号:** 1671-637X(2016)09-0096-05

Fuzzy PID Control of Quad-Rotor Aircraft Based on Anti-windup Technology

GENG Yu-hao, XIAO Wen-sheng, CUI Jun-guo, WANG Hong-yan
(College of Electrical and Mechanical Engineering, China University of Petroleum, Qingdao 266580, China)

Abstract: When quad-rotor aircraft is trapped in the great disturbance of wind, windup phenomenon may appear for simple PID controller, under the combined action of integration element and saturation limit element. Thus may lead to deterioration of system's dynamic responses, and big overshoot or imbalance of quad-rotor. A dynamics simulation model is established for the quad-rotor aircraft, and the causes of windup phenomenon are analyzed. An anti-windup PID controller with fuzzy variable parameters is designed to alleviate the windup phenomenon. Contrastive analysis is made to the controller with the existing fuzzy PID controller and the anti-windup PID controller with constant parameters. The results of simulation indicate that, the fuzzy PID controller based on anti-windup technology can effectively restrain the windup phenomenon, and speed up the attitude adjustment process of quad-rotor.

Key words: quad-rotor aircraft; anti-windup technology; PID controller; fuzzy control

0 引言

目前四旋翼飞行器大多采用线性PID控制^[1],对于四旋翼这种多变量、强耦合的非线性系统,单纯的PID控制器存在固有弊端,其表现之一就是,在大的干扰输入信号作用下,飞行器因为“饱和限幅”这个非线性控制环节的存在而产生windup现象,控制量无法及时退出饱和区,从而导致整个系统的闭环响应变差,飞行姿态迟迟不能稳定。

事实上,在任何同时含有积分环节与饱和限幅环

节的PI/PID控制系统中,windup现象都普遍存在^[2],针对该现象,anti-windup技术与PID相结合的方法在多领域均有应用。文献[3]提高了感应电动机转速和转矩控制的稳定性;文献[4]改善了水下自主航行器(AUV)纵向游动和侧向游动的控制响应;文献[5]增强了二自由度机器人机械手控制的鲁棒性和抗干扰能力。但是,目前anti-windup技术在四旋翼控制中的研究较少,而且对于anti-windup引入的新参量“补偿系数”如何选择,尚无统一的原则可循。文献[6]仅给出了几种定值补偿系数的经验选择方法;文献[3-5]中anti-windup PID控制器的补偿系数均采用定值,而参数为定值的控制器难以适应环境的变化,其性能还有待进一步提高。

本文提出一种参数模糊可变的anti-windup PID方

法,引入四旋翼的飞行控制中,并通过与另外两类现有的控制器进行仿真对比分析,验证了该方法的有效性。

1 四旋翼的动力学模型

动力学建模的目的就是描述出控制通道的输入量和飞行姿态之间的数学关系表达式。四旋翼飞行器结构如图 1 所示。

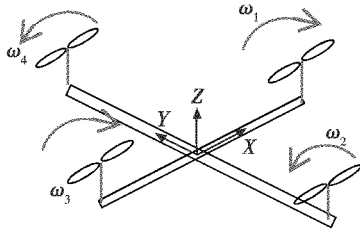


图 1 四旋翼飞行器简图

Fig. 1 Diagram of quad-rotor aircraft

四旋翼飞行器的姿态一般是用欧拉角来描述,即 Ψ 为偏航角、 θ 为俯仰角、 Φ 为滚转角,对飞行姿态控制通道的输入向量值的大小确定为

$$\begin{bmatrix} u_a \\ u_b \\ u_c \\ u_d \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} F_1 + F_2 + F_3 + F_4 \\ F_1 + F_3 - F_2 - F_4 \\ F_1 - F_3 \\ F_2 - F_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} b_k \cdot \sum \omega_i^2 \\ d_k (\omega_1^2 + \omega_3^2 - \omega_2^2 - \omega_4^2) \\ b_k \cdot (\omega_1^2 - \omega_3^2) \\ b_k \cdot (\omega_2^2 - \omega_4^2) \end{bmatrix} \quad (1)$$

式中: u_a 为垂直速度控制量; u_b 为偏航控制量; u_c 为俯仰控制量; u_d 为滚转控制量; F_i 分别为 4 个旋翼所受的拉力; ω_i 为旋翼转速, $i=1,2,3,4$; b_k, d_k 为与飞行器结构相关的参数。

拉力 F_i 与电机的输入电压 U 之间的关系近似用一阶惯性环节描述为

$$G_m(s) = F(s)/U(s) = 2.3/(0.4s + 1) \quad (2)$$

为简化模型的设计,三轴角速度变量 p, q, r 与对应的欧拉姿态角变量 Ψ, θ, Φ 之间近似为导数关系,即 $\dot{\Psi} = p, \dot{\theta} = q, \dot{\Phi} = r$,再结合线运动方程^[7]给出俯仰通道的传递函数为

$$G_3(s) = \frac{\Psi}{u_c} = \frac{35s + 3962}{s^3 + 96s^2 + 563s + 4096} \quad (3)$$

同理,可继续给出关于偏航通道、滚转通道、 x 轴与俯仰角、 y 轴与滚转角、 z 轴速度的传递函数。

2 四旋翼姿态控制中的 windup 现象

2.1 windup 现象的成因分析

为把 PID 控制量限制在一个可控的范围内,控制器最后必须要串联一个饱和限幅环节,在小输入信号作用下,限幅环节并不会生效,但是在在大输入信号作用下,控制量饱和,控制器脱离线性工作区,即 PID 的输出控制量和飞行器的输入控制量不相等,这种非线性

饱和特征会对 PID 的积分部分产生不良影响,使系统发生大的超调和震荡,该现象称为 windup 现象^[2]。windup 现象的产生需要 2 个基本条件:1) 控制器存在饱和和限幅这个非线性环节;2) 控制量进入饱和状态。其中,大信号输入是造成饱和状态的常见因素。

以四旋翼的俯仰控制为例,大多数四旋翼的 PID 参数都是设定在小扰动情形下整定的,整定过程中系统并未深度饱和,不满足上述条件 2), windup 现象不显著,因此调试出的参数对于系统饱和特性的适应能力不足。然而,当飞行器受到大的风力或人为干扰时,相当于给控制器施加了大信号输入,结合图 2 可知,此时虽然俯仰通道控制量 u_c 的比例分量 u_{cp} 和微分量 u_{cd} 都能迅速响应,但是积分分量 u_{ci} 深度饱和,导致控制量 u_c 因超过饱和限幅值而被削平为 u_{c2} ,如果不采取措施,会使得控制系统退饱和时间延迟,动态性能严重下降。偏航控制、滚转控制中也存在同样的问题。

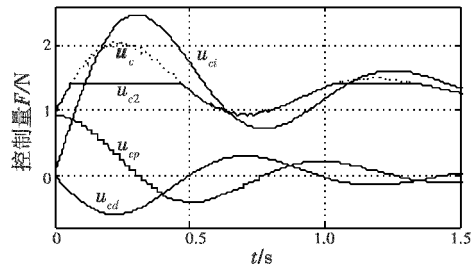


图 2 俯仰控制中的 windup 现象

Fig. 2 Windup phenomenon in pitch control

2.2 anti-windup PID 控制器设计

常用的 anti-windup 技术可分为 2 类^[6]:1) 条件积分法,当控制器的输出未饱和时,PID 在线性区正常工作,当控制器的输出量饱和时,PID 进入了非线性区,此时立即削弱或者停止积分作用,从而抑制过饱和与超调,事实上,这个思路与变速积分 PID 颇为相似,但是条件积分法存在开关作用,属于非线性结构,鲁棒性差;2) 一种补偿方法,反计算算法属于其中比较有代表性的一种,在实际中应用较为广泛。

以俯仰通道的控制为例,按照反计算算法搭建 Simulink 仿真模型,如图 3 所示。图中的虚线框部分为 PID 控制器,windup 现象的典型表现就是大干扰情形下,PID 控制器的输出 u_n 过饱和,超过了被控对象的输入 u_s ,此时有 $u_n \neq u_s$,反计算思想把这两者的差值信号 $u_n - u_s$ 作为反馈信号,经过放大环节 $-\alpha/k_i$ 放缩后,反过来作用于 PID 控制器的积分部分,从而削弱积分控制作用、抑制超调,因此该算法也被称为积分重置法或者跟踪法;而当控制器未饱和时,即 $u_n = u_s$ 时,Switch 环节无动作,积分器的输入量仍然保持为原始的偏差信号 $e(n)$,上述过程用表达式描述为

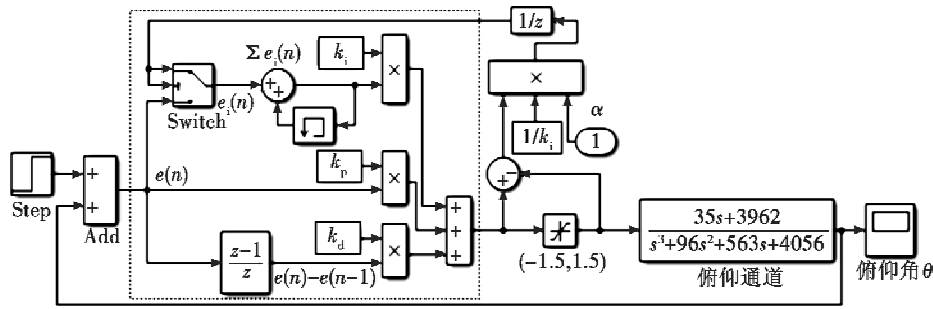


图3 俯仰通道的 anti-windup PID 控制

Fig.3 Anti-windup PID control in pitch channel

$$e_i(n) = \begin{cases} -\alpha \frac{u_n - u_s}{k_i} & u_n \neq u_s, e(u_n - \bar{u}) > 0 \\ e(n) & u_n = u_s \end{cases} \quad (4)$$

式中： $e_i(n)$ 为积分器的输入偏差(见图3)； $e(n)$ 为原始偏差； u_n 为控制器的原始输出； u_s 为控制器的饱和输出； $\bar{u} = (u_s - u_n)/2$ ； α 为补偿系数， $\alpha > 0$ 。补偿系数 α 的大小直接影响到反馈回路对积分环节抑制力的强弱， α 的值越大，抑制作用越强烈，反之则越弱。

3 anti-windup PID 参数的模糊自整定

3.1 模糊自整定的原理

模糊控制器以专家经验为基础，具备任意的非线性拟合能力，但是由于其缺乏积分环节，不能实现无静差调节^[8]，故一般不能直接用于飞行器的控制，而是用来给其他控制器调参，该过程被称为“模糊自整定”，其原理如图4所示。

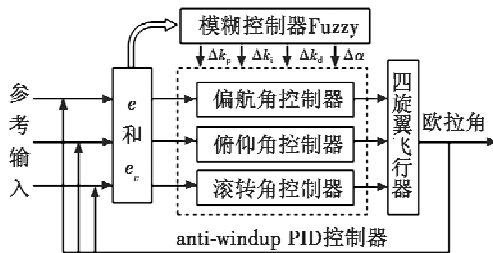


图4 控制器参数自整定原理图

Fig.4 Diagram of controller's parameter self-tuning

在图4中：虚线框的内部包含3个结构完全相同的 anti-windup PID 控制器，对于每个控制器的4个参数，即比例系数 k_p 、积分系数 k_i 、微分系数 k_d 和补偿系数 α ；二维模糊控制器一般是以偏差 e 和偏差变换率 e_c 作为输入，以相应的参数增量 $\Delta k_p, \Delta k_i, \Delta k_d, \Delta \alpha$ 作为输出，从而实现控制器参数的模糊自适应。参数 Δk_p 的自适应过程可描述为

$$k_p = k_{p0} + \sum_{i=0}^n \Delta k_p \quad (5)$$

式中： k_{p0} 为参数初值； t 为离散采样周期的整数倍。其余3个参数 k_i, k_d, α 具有完全类似的过程。

3.2 模糊自整定的实现方法

1) 输入变量的模糊化。

模糊控制器的输入语言变量为 e 和 e_c ，输出语言变量为 $\Delta k_p, \Delta k_i, \Delta k_d, \Delta \alpha$ ，利用高斯隶属度函数对语言变量进行模糊化处理^[9]，结果如图5所示，其中，NB, NS, ZO, PS, PB 分别代表负大、负小、零、正小、正大。

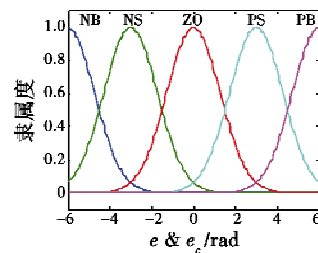


图5 语言变量的高斯隶属函数

Fig.5 Gaussian membership function of linguistic variables

2) 补偿系数增量 $\Delta \alpha$ 的模糊规则。

模糊推理的核心是规则表的设计，规则表本质就是把人工控制经验用模糊语言变量来描述。对于补偿系数增量 $\Delta \alpha$ ，本文提出控制经验如下：当偏差 e 为“大”（包括正大和负大），且偏差变化率 e_c 为“零”或“小”时，积分项无需抑制，即 $\Delta \alpha$ 应减小；当 e 为“零”或“小”，且 e_c 为“大”时，系统有超调的趋势，应加强对积分项的抑制，即 $\Delta \alpha$ 取“正大”；当 e 为“零”或“小”，且 e_c 为“零”或“小”时，表明飞行器较为稳定， $\Delta \alpha$ 可取“负小”，进一步削弱超调，使控制器更加稳定。其余未阐述到的规则可参考表1。

表1 补偿系数增量 $\Delta \alpha$ 的模糊规则表

Table 1 Fuzzy rule table of compensation factor's increment $\Delta \alpha$

e_c	e				
	NB	NS	ZO	PS	PB
NB	ZO	PS	PB	PS	ZO
NS	NS	PS	PS	PS	NS
ZO	NB	PS	NS	PS	NB
PS	NS	PS	PS	PS	NS
PB	ZO	PS	PB	PS	ZO

anti-windup PID 控制器的其余3个参数 k_p, k_i, k_d

的模糊自整定的相关研究较多,其规则表不再一一列举,详文献[10]。

3) 解模糊。

利用重心法,将模糊输出清晰化为精确的数字量,用于四旋翼控制器的参数调节。

4 仿真实验

4.1 仿真条件

在 Matlab Simulink 中搭建 3 个不同的控制器做对比分析,具体如下:控制器 1,即文献[11]采用的“模糊 PID 控制器”;控制器 2,即文献[4-6]采用的“参数为定值的 anti-windup PID 控制器”;控制器 3,即本文采用的“参数模糊可变的 anti-windup PID 控制器”。

通过给 3 个控制器施加大阶跃输入信号,研究三者对 windup 现象的作用。阶跃输入分别设为:俯仰角 $\theta_{in} = 0.6 \text{ rad}$ 、偏航角 $\Psi_{in} = 0.8 \text{ rad}$ 、滚转角 $\Phi_{in} = 0.7 \text{ rad}$,控制器的离散采样周期均设为 2 ms。

4.2 实验结果与分析

以俯仰角的控制为例,对比上述 3 个不同控制器的阶跃响应曲线,如图 6 所示,其性能指标对比,如表 2 所示。

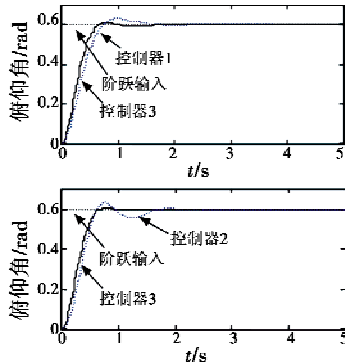


图 6 控制器 1,2 与 3 的俯仰角阶跃响应对比

Fig. 6 Step response of quad-rotor's Euler angles

表 2 3 个控制器的性能指标

Table 2 The performance of three controllers

性能指标	超调量 M_d/rad	调节时间 T_s/s
控制器 1	0.040	1.30
控制器 2	0.035	1.37
控制器 3	0.017	0.84

1) 控制器 1 和 3 的差别在于是否应用了 anti-windup 技术,实验表明,应用了 anti-windup 技术的控制器 3 性能优于控制器 1,超调量 M_d 减小了 0.023 rad,调节时间 T_s 缩短了 0.46 s;

2) 控制器 2 和 3 均应用了 anti-windup 技术,二者的差别在于参数是否可变,实验表明,参数可变的 anti-windup 控制器 3 性能优于控制器 2,超调量减小了 0.018

rad,调节时间缩短了 0.53 s。

从饱和特性的角度分析上述现象的原因,如图 7 所示。

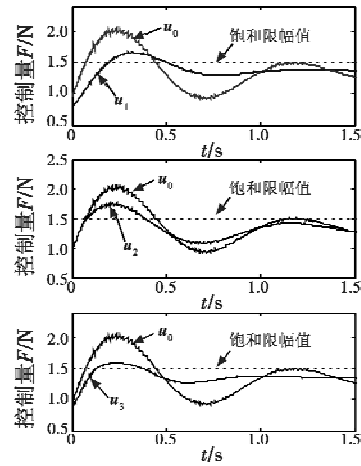


图 7 俯仰控制量的饱和特性

Fig. 7 Saturation characteristic of pitch control

图中: u_0 为传统 PID 控制器“未经限幅的原始控制量(即图 2 中的 u_c)”; u_1, u_2, u_3 分别为上述 3 个控制器的原始控制量。仿真结果表明,在大阶跃输入下,传统 PID 的控制量 u_0 易发生深度饱和,会造成俯仰角超调,而模糊 PID 控制器 1 的控制量 u_1 进入饱和区的程度比 u_0 低,与文献[11]相吻合;控制器 2 的控制量 u_2 在未达到饱和值之前,anti-windup 环节无动作,因此 u_2 与 u_0 重合,当 u_2 进入了饱和区,anti-windup 环节开始削弱 u_2 的积分分量,从而使 u_2 得以快速退饱,其退饱时间优于 u_0 和 u_1 ,但是 u_2 的反向超调性能不及 u_1 ;控制器 3 的 anti-windup 作用强度可以随着饱和程度的加深而自动加强(如图 8 所示),在限幅环节生效的时间段内,控制量 u_3 能够始终维持在饱和值附近,使得产生 windup 现象的条件 2) 不再显著,从而有效地抑制 windup 现象发生。

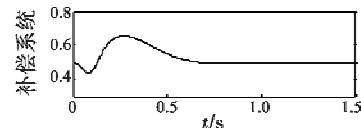


图 8 补偿系数 α 的模糊自整定过程

Fig. 8 Fuzzy self-tuning of compensation factor

5 结束语

提出把 anti-windup 技术、PID 算法和模糊控制三者结合用于四旋翼的控制,针对补偿系数提出了一种模糊整定规则,给出了参数模糊可变的 anti-windup 控制器设计方法。该控制器与模糊 PID 控制器、参数为定值的 anti-windup PID 控制器相比,能更加有效地抑制 windup 现象,减小超调,缩短调节时间,控制性能显著改善。

参 考 文 献

- [1] 甄红涛, 齐晓慧, 夏明旗, 等. 四旋翼无人直升机飞行控制技术综述[J]. 飞行力学, 2012, 30(4): 295-299. (ZHEN H T, QI X H, XIA M Q, et al. Survey of flight control technology for quad-rotor unmanned helicopter [J]. Flight Dynamics, 2012, 30(4): 295-299.)
- [2] HODEL A S, HALL C. Variable-structure PID control to prevent integrator windup[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2001, 48(2): 442-451.
- [3] 张兴华, 聂晶, 王德明. 感应电机直接转矩控制系统的变结构 anti-windup 控制器[J]. 电机与控制学报, 2013, 17(1): 77-81. (ZHANG X H, NIE J, WANG D M. Variable-structure anti-windup controller for direct torque controlled induction motor drives[J]. Electric Machines & Control, 2013, 17(1): 77-81.)
- [4] KIM M, JOE H, PYO J, et al. Variable-structure PID controller with anti-windup for autonomous underwater vehicle [C]//IEEE Oceans, San Diego, 2013: 1-5.
- [5] IZADBAKHSH A, KALAT A A, FATEH M M, et al. A robust anti-windup control design for electrically driven robots — theory and experiment[J]. International Journal of Control Automation & Systems, 2011, 9(5): 1005-1012.
- [6] 杨明, 徐殿国, 贵献国. 控制系统 anti-windup 设计综述[J]. 电机与控制学报, 2006, 10(6): 622-626, 631. (YANG M, XU D G, GUI X G. Review of control system anti-windup design [J]. Electric Machines and Control, 2006, 10(6): 622-626, 631.)
- [7] 王史春. 四旋翼飞行器 PID 优化控制[J]. 河北科技大学学报, 2013, 34(5): 457-463. (WANG S C. Optimal PID control for the four-rotor quadrotor [J]. Journal of Hebei University of Science & Technology, 2013, 34(5): 457-463.)
- [8] LIAN K Y, HONG C W. Simple integral fuzzy control for converters with highly nonlinear dynamics[J]. Journal of Marine Science & Technology, 2014, 22(5): 557-565.
- [9] 黄卫华, 方康玲, 章政. 典型模糊控制器的隶属函数设计及分析[J]. 模糊系统与数学, 2010, 24(5): 83-90. (HUANG W H, FANG K L, ZHANG Z. Analysis and design of membership function for a typical fuzzy controller [J]. Fuzzy Systems & Mathematics, 2010, 24(5): 83-90.)
- [10] 王述彦, 师宇, 冯忠绪. 基于模糊 PID 控制器的控制方法研究[J]. 机械科学与技术, 2011, 30(1): 166-172. (WANG S Y, SHI Y, FENG Z X. A method for controlling a loading system based on a fuzzy PID controller [J]. Mechanical Science and Technology for Aerospace Engineering, 2011, 30(1): 166-172.)
- [11] 张镞, 李浩. 四旋翼飞行器模糊 PID 姿态控制[J]. 计算机仿真, 2014, 31(8): 73-77. (ZHANG L, LI H. Attitude control of four-rotor aircraft via fuzzy PID [J]. Computer Simulation, 2014, 31(8): 73-77.)
- (上接第 72 页)
- [2] BAUER H, SCHARBARG J L, FRABOUL C. Improving the worst-case delay analysis of an AFDX network using an optimized trajectory approach[J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2010, 6(4): 521-533.
- [3] CRUZ R. A calculus for network delay, part I: network elements in isolation [J]. IEEE Transactions on Information Theory, 1991, 37(1): 114-131.
- [4] SCHARBARG J L, RIDOUARD F, FRABOUL C. A probabilistic analysis of end-to-end delays on an AFDX network [J]. IEEE Transactions on Industrial Informatics, 2009, 5(1): 38-49.
- [5] CHARARA H, SCHARBARG J L, ERMONT J, et al. Methods for bounding end-to-end delays on an AFDX network [C]// In Proc. 18th ECRTS, Dresden, Germany, 2006: 193-202.
- [6] SCHARBARG J L, FRABOUL C. Simulation for end-to-end delays distribution on a switched Ethernet [C]// The 2nd Conference on Emerging Technologies & Factory Automation, IEEE, Patras Greek, 2007: 1092-1099.
- [7] CHEN X, LU J, ZHOU Y J. Simulation of AFDX redundancy management mechanism [J]. Computer Engineering, 2008, 34(23): 92-94.
- [8] LIU C, WANG T, ZHAO C X, et al. Worst-case flow model of VL for worst-case delay analysis of AFDX [J]. Electronics Letters, 2012, 48(6): 327-328.