

基于 PI-PD 控制器的四旋翼姿态控制

文/唐健杰 王鑫

摘要

四旋翼姿态控制通常选用 PID 控制器作为主控环节,但 PID 控制器的参数不易整定,调控结果也存在较大的系统超调量,难以获得满意的控制效果。因此设计了 PI-PD 控制器的四旋翼姿态控制方式,其中 PI 控制器能够使系统快速无稳态误差的收敛,PD 控制器可以有效的抑制系统超调量。仿真结果表明:PI-PD 控制器能够很好的抑制系统超调量,缩短系统收敛时间,具有良好的控制效果。

【关键词】四旋翼姿态控制 PI-PD 控制器 控制效果 参数整定

近年来,随着微型系统、微型传感器、惯导技术以及飞行控制等技术的发展,四旋翼飞行器(以下简称四旋翼)引起了人们的广泛关注。四旋翼是通过改变四个旋翼的转速来调整其在空中的飞行姿态,包括俯仰角 θ 、横滚角 φ 、偏航角 ψ ,从而控制机体水平方向上的运动,因此四旋翼的姿态控制是决定其飞行性能的关键所在。在工业过程控制和航空航天控制等领域中,PID 控制的应用达到 80% 以上,不过由于四旋翼系统的强非线性、惯性和延迟,PID 控制器对四旋翼姿态的调整效果往往出现较多的系统超调量,或者调整时间较长,控制效果并不令人满意。因此,设计一种能够抑制系统超调量,并且保证系统快速收敛的控制器,可以提高四旋翼系统的稳定性和控制性。

1 PID 控制器基本原理

PID 控制器结构简单、方便调试,广泛应用于工业生产中。PID 控制器是根据系统输出的误差值调节系统输出的控制形式,包含比例控制(P)、积分控制(I)和微分控制(D),

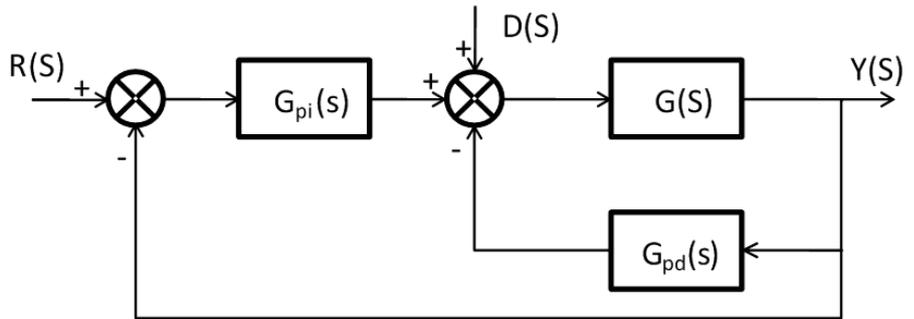


图 1: PI-PD 控制器结构图

其连续 PID 控制的结构形式为:

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(t) dt + K_d e(t) / dt \quad (1)$$

其中 $u(t)$ 为系统输出, K_p 、 K_i 、 K_d 分别为比例、积分和微分系数, $e(t) = y(r) - y(t)$ 为期望值与输出量的差值,即输出误差。而对于数字控制系统,可将 PID 控制器离散化,得到离散 PID 的结构形式:

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \sum_{i=1}^t e(i) + K_d \Delta e(t) \quad (2)$$

其中, $\sum_{i=1}^t e(i)$ 为所有误差值累加之和, $\Delta e(t) = e(t) - e(t-1)$, 等效微分运算。当期望值在相邻的采样周期保持不变时, $y(r) = y(r-1)$, $\Delta e(t) = -y(t) + y(t-1)$, $\Delta e(t)$ 即为系统输出的变化量。

若基于 PID 控制器来对四旋翼的姿态进行调控,参数整定难度较大,调控效果不佳。鉴于此,本文基于文章 [6] 提出的 PI-PD 控制器,设计了基于 PI-PD 控制器的四旋翼姿态控制方式,用于减小系统超调量,缩短系统收敛时间,提高四旋翼在空中飞行的稳定性和控制性。

2 PI-PD 控制器

PID 控制器对于高阶时滞系统、复杂的模糊系统以及不确定系统而言,控制效果不佳。而在 PID 控制器基础上演变而来的 PI-PD 控制器,对于含有积分、振荡或不稳定环节的控制对象,可以实现较好的闭环控制。PI-PD 控制器其结构图如图 1 所示。

设 PI 控制器和 PD 控制器的传递函数为:

$$G_{pi}(S) = K_p(1 + 1/t_s) \quad (3)$$

$$G_{pd}(S) = K_f(1 + t_d s) \quad (4)$$

其中 K_p 、 T_i 分别 PI 控制器的比例和积分系数, K_f 、 T_d 分别为 PD 控制器的比例和微分系数。图中,PI 控制器仍处于主控环节上,根据期望值调节输出量,具有决定系统收敛快慢和消除稳态误差的作用。而 PD 控制器成为了反馈环节,具有抑制系统振荡和超调量的作用,并且只与系统输出变化量有关,与期望值无关。

为了简化 PI-PD 控制器结构,将其进行结构变换,得到图 2 所示的等效结构图。

可得到主控环节 PI+PD 控制器为:

$$G_{pi}(S) + G_{pd}(S) = K_p(1 + 1/t_s) + K_f(1 + t_d s) \quad (5)$$

设 PID 控制器传递函数为:

$$G_{pid}^*(S) = K_p^*(1 + 1/T_i^* s + T_d^* s) \quad (6)$$

其中 K_p^* 、 T_i^* 、 T_d^* 分别为 PID 控制器的参数。于是可将式 (5) 整理成式 (6) 的类

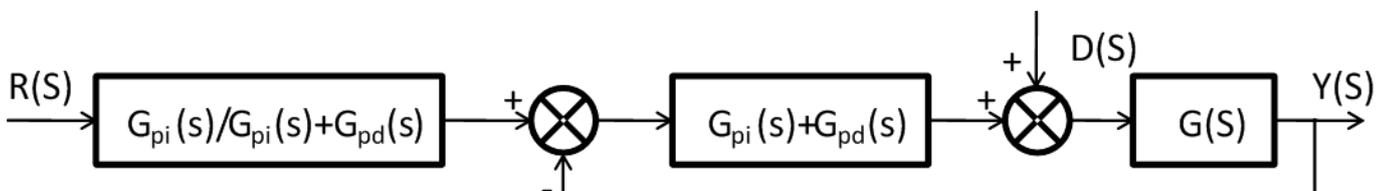


图 2: PI-PD 控制器等效结构图

基金项目:广西自动检测技术与仪器重点实验室基金项目(项目编号:YQ14203)。

似形式：

$$G_{pi}(s) + G_{pd}(s) = (K_p + K_f) \left[1 + \frac{K_p}{(K_p + K_f)T_i s} + \frac{K_p}{K_p + K_f} T_d s \right] \quad (7)$$

设 $K_p = \beta K_f$ ，参数 β 表示 K_p 与 K_f 的关系，式 (7) 可变换为：

$$G_{pi}(s) + G_{pd}(s) = (1 + \beta) K_f \left[1 + \frac{1}{(1 + \beta) T_i s} + \frac{1}{1 + \beta} T_d s \right] \quad (8)$$

比较式 (6) 与式 (8)，可得出 K_p^* 、 T_i^* 、 T_d^* 与 K_p 、 T_i 、 K_f 、 T_d 之间的关系表达式：

$$K_p = \beta K_p^* / (1 + \beta) \quad (9)$$

$$K_f = K_p^* / (1 + \beta) \quad (10)$$

$$T_i = \beta T_i^* / (1 + \beta) \quad (11)$$

$$T_d = (1 + \beta) T_d^* \quad (12)$$

根据式 (9) 和 (11) 可得：

$$\frac{K_p}{T_i} = \frac{\beta K_p^* / (1 + \beta)}{\beta T_i^* / (1 + \beta)} = \frac{K_p^*}{T_i^*} \quad (13)$$

根据式 (10) 和 (12) 可得：

$$K_f T_d = \frac{K_f^*}{1 + \beta} (1 + \beta) T_d^* = K_f^* T_d^* \quad (14)$$

由此可以看出，根据 PID 控制器的 K_p^* 参数以及 β 值可以计算出 PI-PD 控制器的 K_p 和 K_f 参数， β 决定了 K_p 与 K_f 的分配比例。式 (13) 和 (14) 表明，PI-PD 控制器的积分控制和微分控制与 PID 控制器的参数相同。

因此 PI-PD 控制器可以根据 PID 控制参数和 β 值计算得出 K_p 、 T_i 、 K_f 、 T_d 参数，通过参数再次整定，能使系统在超调量较小、收敛时间较短的情况下平稳收敛，具有良好的调控效果。

3 仿真分析

通过 Adams 软件建立四旋翼动力学虚拟样机，将 Adams 所建模型与 Matlab/Simulink 进行联合仿真，研究控制器对四旋翼姿态控制的调节效果。本文研究的四旋翼参数为：机体质量 $m=0.67\text{kg}$ ，对称电机轴距 $l=450\text{mm}$ ，旋翼转速与升力关系 $8000r/m=9.8\text{N}$ ，角度初始值俯仰角 $\theta=0^\circ$ 、俯仰角期望值 $y(r)=0^\circ$ ，仿真步长 $t=0.01\text{s}$ 。横滚角 φ 与偏航角 ψ 的仿真结果类同，本文不再赘述。

(1) 使用 PID 控制器调节俯仰角 θ 的角度，整定一组参数 $K_p=18$ 、 $K_i=0.2$ 、 $K_d=260$ 。而根据 PID 控制器参数，设定不同的 β 值，计算出 PI-PD 控制器的 K_p 、 T_i 、 K_f 、 T_d 的参数，仿真结果如图 3 所示。

在 1s 的时刻，期望值 $y(r)$ 从 0° 变为 1° ，俯仰角 θ 在 PID 控制器的调节下，收敛时间约为 1.8s，系统超调量约为 30%。

与 PID 控制器的仿真结果比较，当 β 不同时，PI-PD 控制器具有不同的调节效果。而当 $\beta=3.6$ 时，系统超调量极小，且收敛时间与 PID 控制器基本相同。由此可以证明，选取合适的 β 值，PI-PD 控制器可以有效的抑制系统超调量，提高了系统的稳定性。

(3) 为了使系统收敛时间更短，根据 PI-PD 控制器的调节特性，重新整定参数 K_p 、 K_i 、 K_d 和 β ，仿真结果如图 4 所示。

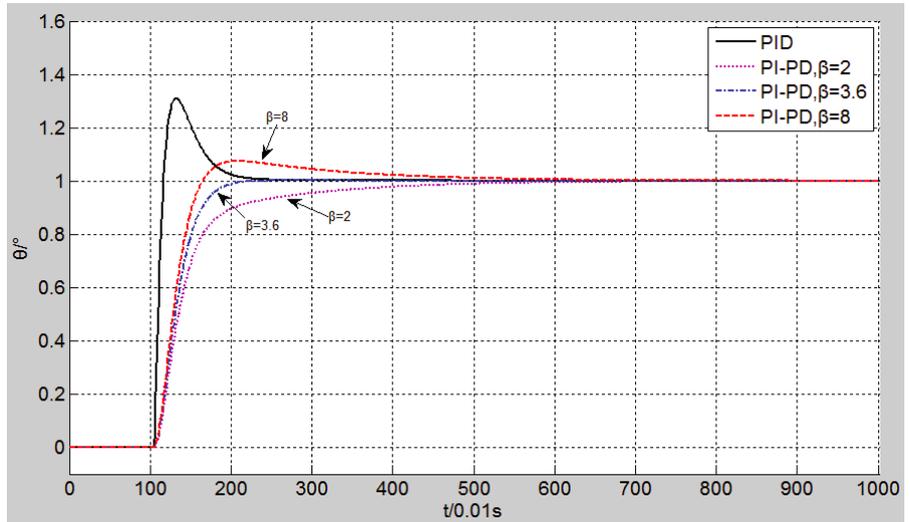


图 3：PI-PD 控制器不同 值仿真结果

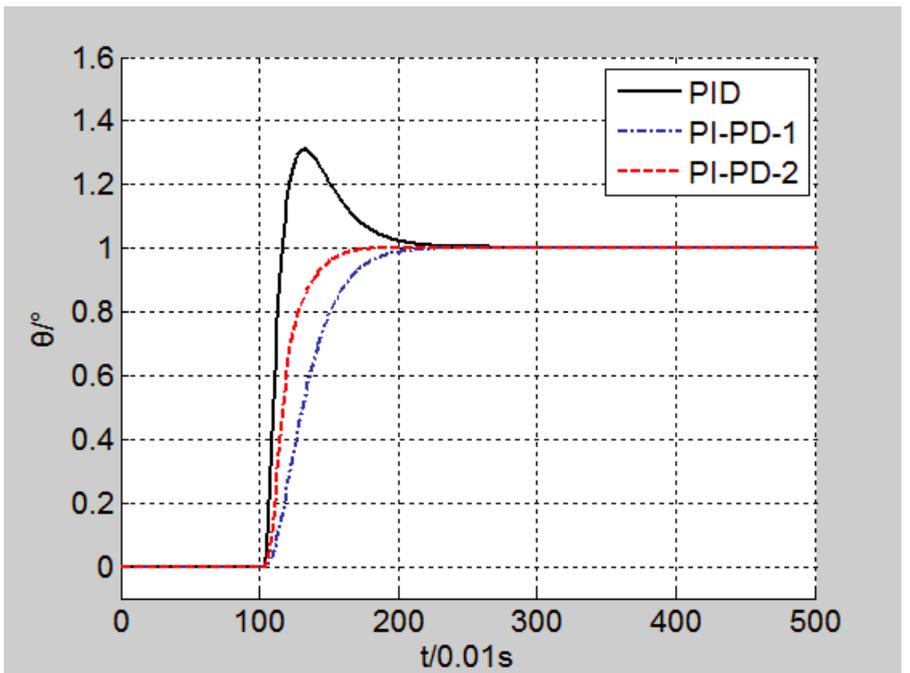


图 4：PI-PD 控制器不同整定参数仿真结果

仿真结果表明：PID 与 PI-PD-1 的收敛时间约为 1.8s，而 PI-PD-2 的收敛时间约为 0.8s，明显快于前两种控制效果。由此证明 PI-PD 控制器对于不同的整定参数，可以在系统无超调量的情况下，缩短系统收敛时间，提高了系统的控制性。

4 结束语

由于四旋翼的非线性和时滞特性，基于 PID 控制器的四旋翼姿态控制方式的调节效果较难满足人们需求。本文基于 PI-PD 控制器，设计了新的四旋翼姿态控制方式。PI-PD 控制器方式可以利用已经整定好的 PID 控制器的参数，根据 β 值计算出控制参数。仿真结果表明

PI-PD 控制器能够使系统稳定收敛，且很好的抑制了系统超调量，获得了良好的控制效果。在今后的工作中，将继续研究 PI-PD 控制器的参数整定、响应时间、鲁棒性等问题，获得更好的四旋翼姿态控制效果。

作者简介

唐健杰 (1986-) 男，广西壮族自治区桂林市人。硕士研究生学历。研究方向为智能控制与算法应用。

作者单位

桂林电子科技大学计算机科学与工程学院 广西壮族自治区桂林市 541004