

四旋翼无人机 TD-PD 控制律设计

冯长辉¹, 齐晓慧¹, 苏立军¹, 刘海波²

(1. 军械工程学院, 石家庄 050003; 2. 北方机电工业学校, 河北 张家口 075000)

摘要: 针对四旋翼无人机姿态控制中反馈信号存在强噪声干扰时 PID 控制效果变差的问题, 提出了一种基于跟踪微分器的 PD 控制器设计方法, 并利用粒子群优化算法 (PSO) 整定跟踪微分器参数。首先, 针对跟踪微分器对信号的跟踪与滤波作用, 分别提出了基于跟踪误差的跟踪性能评价指标与基于高频信息能量的滤波性能评价指标, 然后利用跟踪性能评价指标和滤波性能评价指标的加权和作为适应度函数设计 PSO 算法整定跟踪微分器参数; 最后的仿真实验证明, 当四旋翼飞行器的传感器量测噪声较强时, 基于该方法的控制器具有良好的控制性能。

关键词: 四旋翼无人机; 姿态控制; PSO 算法; 跟踪微分器; 参数优化

中图分类号: V279

文献标志码: A

文章编号: 1671-637X(2016)03-0036-05

Design of TD-PD Control Law for Quadrotor UAV

FENG Chang-hui¹, QI Xiao-hui¹, SU Li-jun¹, LIU Hai-bo²

(1. Ordnance Engineering College, Shijiazhuang 050003, China;

2. North Mechanical and Electrical Industrial School, Zhangjiakou 075000, China)

Abstract: To the problem that the traditional PID controllers has low effectiveness when there is strong noise in feedback signal Quadrotor UAV's attitude control process, a PD controller based on Tracking-Differentiator (TD) is proposed, in which Particle Swarm Optimization (PSO) algorithm is applied to tune parameters. First, according to the tracking and filtering performance of TD to signals, the index for evaluating the tracking performance and filtering performance is proposed respectively based on tracking error and high-frequency information energy. Then, the weighted sum of them is used as fitness function of PSO algorithm. The simulation results verify that the proposed PD controller has good effectiveness in attitude control under the condition of strong noise.

Key words: quadrotor UAV; attitude control; PSO algorithm; Tracking-Differentiator (TD); parameter optimization

0 引言

四旋翼无人机是一种能够垂直起降的多旋翼飞行器, 具有体积小、结构简单、易于维护等特点, 成为国内外研究的热点。其动力学模型复杂、建模不易精确等问题对其控制器的鲁棒性和抗干扰性提出了高要求。

自抗扰控制是基于 PID 控制“利用误差消除误差”的思想而提出的新型控制方法, 克服了 PID 控制误差选取不合理、没有误差微分提取部分等缺点, 具有很强的鲁棒性、抗干扰性^[1]。跟踪微分器 (Tracking-Differentiator, TD) 是自抗扰控制的重要组成部分, 其作用

是解决从被噪声污染的信号中合理提取微分信号的问题。随着对跟踪微分器的进一步研究及应用^[2-3], 跟踪微分器的滤波性能引起大家关注^[4]。为解决实际数字控制中, 连续微分器数值解算容易产生高频抖振的问题, 文献[5]设计了离散形式的微分跟踪器, 并推导了最速控制综合函数 $f_{han}()$, 使跟踪微分器得到广泛应用^[6-8]。文献[9]针对 $f_{han}()$ 函数只是离散系统最速控制综合函数的简化这个问题, 详细推导了离散系统真正最速控制综合函数 $f_{sun}()$, 完善了自抗扰控制技术的理论框架。但是在跟踪微分器中存在未知参数需要整定的问题, 这些未知参数的选取是否合理直接影响到微分跟踪器性能, 目前, 其参数大都采用人工经验的方法, 对其滤波性能和跟踪性能没有进行有效优化。文献[10]利用神经网络对跟踪微分器进行了参数设计, 基于跟踪信号与原信号的误差对未知参数

收稿日期: 2015-04-01

修回日期: 2015-05-14

作者简介: 冯长辉 (1990—), 男, 河北邢台人, 硕士生, 研究方向为四旋翼无人机姿态控制。

进行修正,但这种方法只考虑了跟踪微分器的跟踪性能,未考虑其滤波效果,导致在原信号存在强干扰时获得的跟踪信号也含有较强噪声,而在实际控制中获得的信号都存在较强烈的干扰。

针对四旋翼姿态控制器反馈环节噪声干扰的问题,提出了一种 TD-PD 控制方法,以 PSO 算法整定 TD 的参数,兼顾 TD 的滤波和跟踪效果。通过仿真说明了本文所提方法的可行性和有效性。

1 四旋翼无人机模型

根据文献[11],四旋翼无人机的非线性动力学模型为

$$\begin{cases} \ddot{x} = U_1 (\sin \psi \sin \phi + \cos \psi \sin \theta \cos \phi) m^{-1} \\ \ddot{y} = U_1 (\sin \psi \sin \theta \cos \phi - \cos \psi \sin \phi) m^{-1} \\ \ddot{z} = U_1 \cos \phi \cos \theta m^{-1} - g \\ \ddot{\phi} = U_2 I_x^{-1} \\ \ddot{\theta} = U_3 I_y^{-1} \\ \ddot{\psi} = U_4 \lambda I_z^{-1} \end{cases} \quad (1)$$

式中: x, y, z 为飞行器的位置向量; ϕ, θ, ψ 分别为滚转角、俯仰角以及偏航角; m 为飞行器的质量; l 为一个旋翼的末端到机体中心的长度(臂长); λ 为随升力产生的扭转力矩与升力之间的比例; I_x, I_y, I_z 分别为机体分别绕 x, y, z 轴的转动惯量; $U = (U_1 \ U_2 \ U_3 \ U_4)^T$ 为把四旋翼飞行器非线性耦合模型分解成 4 个独立控制通道的输入量。

$$\begin{cases} U_1 = F_1 + F_2 + F_3 + F_4 \\ U_2 = F_4 - F_2 \\ U_3 = F_3 - F_1 \\ U_4 = F_2 + F_4 - F_3 - F_1 \end{cases} \quad (2)$$

式中, F_i 为第 i 个旋翼产生的升力。

2 跟踪微分器(TD)

跟踪微分器是这样—个动态系统:对它输入信号 $v(t)$,它将输出两个信号 $x_1(t)$ 和 $x_2(t)$,其中 $x_1(t)$ 跟踪 $v(t)$,而 $x_2(t)$ 是 $x_1(t)$ 的微分,从而可以把 $x_2(t)$ 作为 $v(t)$ 的“近似微分”。跟踪微分器的离散系统形式为

$$\begin{cases} x_1(k+1) = x_1(k) + hx_2(k) \\ x_2(k+1) = x_2(k) + hf h \end{cases} \quad (3)$$

式中: h 为积分步长; fh 为最速控制综合函数,其算式为

$$fh = fhan(x_1(k) - v(k), x_2(k), r, h) \quad (4)$$

式中, $fhan$ 的算式为

$$\begin{cases} d = rd \\ d_0 = hd \\ y = (x_1(k) - v(k)) + hx_2(k) \\ a_0 = \sqrt{d^2 + 8r|y|} \\ a = \begin{cases} x_2(k) + \frac{(a_0 - d)}{2} \operatorname{sgn} y & |y| > d_0 \\ x_2(k) + \frac{y}{h} & |y| \leq d_0 \end{cases} \\ fhan = - \begin{cases} r \operatorname{sgn} a & |a| > d \\ r \frac{a}{d} & |a| \leq d \end{cases} \end{cases} \quad (5)$$

式中, r 为决定跟踪快慢的参数, r 越大, $x_1(t)$ 越能更快地跟踪输入信号 $v(t)$ 。当输入信号被强噪声污染时, $x_1(t)$ 也会被强噪声污染,适当的 h 可以滤除 $v(t)$ 中所含的噪声,然而 h 越大, $x_1(t)$ 跟踪 $v(t)$ 的相位损失越大,跟踪效果也越差。在这种情况下, h 与 r 选取是否合适,将直接影响到跟踪微分器的精确跟踪和滤波效果。

大部分文献利用人工经验的方法选择参数 r 与 h ,这种方法一般能够得到多组可用的参数,但是由于没有量化的评价指标,尤其是在多个参数互相影响的情况下,无法从中选择较优的参数。文献[10]基于跟踪信号与原信号的误差对未知参数进行修正,这种方法在原信号未被噪声污染情况下可以获得良好效果,但是当原信号存在强噪声干扰时,跟踪信号也会被强噪声信号干扰,失去了跟踪微分器的滤波能力。因此,合理设计跟踪微分器滤波性能与跟踪性能的评价指标,对跟踪微分器的参数调整具有指导性意义。

3 基于 PSO 的 TD 参数整定方法

在本节中首先给出 PSO 算法寻找最优值的一般步骤,然后针对跟踪微分器的跟踪与滤波作用分别提出其跟踪性能评价指标与滤波性能评价指标,并以两者的加权和作为 PSO 算法的适应度函数。

3.1 PSO 算法基本理论

PSO 算法模拟鸟群的觅食运动,为迭代随机搜索算法,具有易于实现、鲁棒性好、并行处理能力强的优点。PSO 算法的一般步骤如下所述。

1) 粒子群初始化,设解空间的维数为 D ,粒子群的数量为 m ,则在解空间内随机产生 m 个粒子,为每个粒子赋予初始位置 x_{ij} 和初始速度 v_{ij} ,其中, $i = 1, 2, 3, \dots, m, j = 1, 2, \dots, D$ 。

2) 设置每个粒子的位置向量 x_{ij} 成为跟踪微分器的参数,分别计算其当前适应度值 f ,初始化 p_i (粒子 i 在空间内搜索到的最优位置) 和 p_g (整个粒子群在空间内搜索到的最优位置)。

3) 更新粒子的速度和位置,即

$$\begin{cases} v_{ij}(t+1) = \omega v_{ij} + c_1 r_1 (p_{ij}(t) - x_{ij}(t)) + \\ c_2 r_2 (p_g(t) - x_{ij}(t)) \\ x_{ij}(t+1) = x_{ij}(t) + v_{ij}(t+1) \end{cases} \quad (6)$$

式中: ω 为惯性因子; c_1 和 c_2 称为学习因子,也叫加速常数,是一个非负常数; r_1 和 r_2 为 $[0,1]$ 范围内的随机数。

4) 更新个体最优位置 p_i 。计算每个粒子的适应度值 f ,将第 i 个粒子的历史最优位置 p_i 与当前代数的最优位置 $p_i(t)$ 进行对比,若 $p_i(t)$ 优于 p_i ,则 p_i 更新为 $p_i(t)$,否则 p_i 不变。

5) 更新全局最优位置 p_g 。计算每个粒子的适应度值 f ,选出当前代数的全局最优位置 $p_g(t)$,将历史全局最优位置 p_g 与当前代数的全局最优位置 $p_g(t)$ 进行对比,若 $p_g(t)$ 优于 p_g 则 p_g 更新为 $p_g(t)$,否则 p_g 不变。

6) 判断结束条件,如果满足则结束算法,否则,跳转到2)。

3.2 适应度函数设计

为对信号存在强干扰情况时的跟踪微分器参数进行整定,需要综合考虑其滤波性能和跟踪性能。

跟踪微分器的跟踪性能是指跟踪信号与原信号的相似程度。跟踪信号与原信号的差值越小,跟踪微分器的跟踪性能越好,故跟踪性能的评价指标设计为跟踪信号 $x_1(t)$ 与 $v_1(t)$ 的误差,其适应度函数为

$$f_1 = \sum_{i=1}^k |(x_1(i) - v(i))| \quad (7)$$

考虑到无人机所处的电磁环境可分为内部电磁环境和外部电磁环境。内部电磁环境主要由发动机和机载设备产生,而外部电磁环境则是由无人机所处的自然环境产生。从内部环境来说,噪声干扰的来源主要有动力点火装置、高频数字电路、无线电设备干扰等,其中,除高频数字电路的干扰为高频信号以外,文献[12]还针对小型无人机的电机由无刷电机更改为汽油发动机以后所产生的噪声干扰进行了研究,同样验证了汽油发动机的点火装置会产生高频干扰;从外部环境来说,主要噪声为高斯白噪声,噪声的频率覆盖范围为全频段,相对有用信号所占的低频段来说,可以将噪声信号视为高频信号。故本文以全频段的随机信号作为噪声信号进行研究,跟踪微分器的滤波性能设计为跟踪信号的高频能量信息。当原信号设为 $v(t) = 0.2 \cdot \text{rands}(1) + \sin t$ 时,其时域图形和频谱图形分别如图1和图2所示。

由图1和图2可以看出,有用信号的频率很低,若利用高通滤波器将低频信息滤除,则剩余信号为噪声信号,噪声信号的能量越小,则跟踪微分器的滤波效果越好。跟踪信号 $x_1(t)$ 通过滤波以后的时域和频域波形如图3所示。

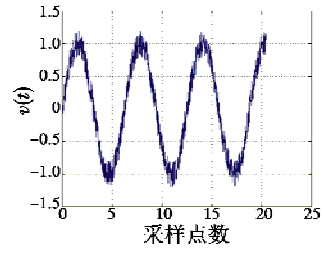


图1 原信号时域图形

Fig. 1 Time domain plot of original signal

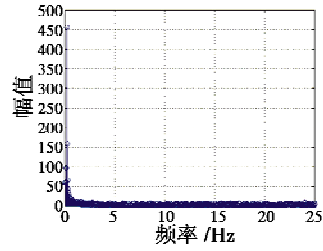


图2 原信号频域图形

Fig. 2 Frequency domain plot of original signal

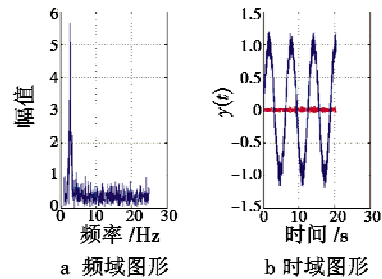


图3 高通滤波后时域波形和频域波形

Fig. 3 Time domain and frequency domain plots after high-pass filtering

由图3a的频域图形可以看出,原来低频部分的信号被滤除掉,剩下了噪声信号的频谱,这一点在图3b时域图形中得到了验证,跟踪信号 $x_1(t)$ 经过滤波以后剩下了噪声信号 $y(t)$ 。 $y(t)$ 的能量代表了跟踪信号 $x_1(t)$ 中剩余噪声的多少,则将跟踪微分器的滤波评价指标设计为 $y(t)$ 的能量,其适应度函数为

$$f_2 = \sum_{i=1}^k y(i)^2 \quad (8)$$

综合考虑跟踪微分器的滤波性能和跟踪性能,PSO算法的适应度函数设计为 f_1 与 f_2 的加权和 $f = \alpha_1 f_1 + \alpha_2 f_2$, $\alpha_1 + \alpha_2 = 1$ 。当跟踪微分器的滤波性能较好时,适应度 f_2 的值将变小,适应度 f_1 的值相应变大,使得 f_2 的评价作用下降,故需要适当提高 f_2 的权重以保证滤波评价指标的有效性,评价指标的权重系数选择为

$$\alpha_1 = \frac{1}{3}, \alpha_2 = \frac{2}{3} \quad (9)$$

故 PSO 算法的适应度函数选择为

$$f = \frac{1}{3} f_1 + \frac{2}{3} f_2 \quad (10)$$

4 实验仿真

4.1 跟踪与滤波

设定粒子群总数 $m = 10$, 解空间维数 $D = 2$, 学习因子 $c_1 = c_2 = 2.05$, 惯性系数 $w = 0.7$ 。利用 PSO 整定跟踪微分器参数, 其寻优过程与微分跟踪器的跟踪效果如图 4 所示。

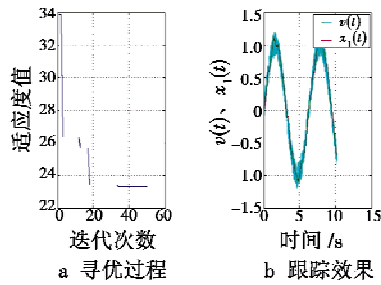


图 4 PSO 寻优过程与跟踪微分器跟踪效果
Fig. 4 PSO algorithm optimization process and the tracking effect of TD

由图 4b 可以看出, 经过 PSO 整定参数后的跟踪微分器在滤波性能和跟踪性能上都有很好的表现。而 PSO 算法迭代结束后适应度值依然较大, 主要是跟踪微分器的滤波功能使得跟踪信号与原信号存在了差值。将经过 PSO 整定的参数与文献[1]和文献[10]中的参数分别进行对比, 其参数选择与跟踪效果对比如表 1 和图 5 所示。

表 1 参数选择

Table 1 Parameter selection

| 参数 | PSO 算法 | 文献[1]参数 | 文献[10]参数 |
|-----|-----------|---------|----------|
| r | 55.35 | 30 | 10 000 |
| h | 0.005 142 | 0.001 | 0.021 15 |

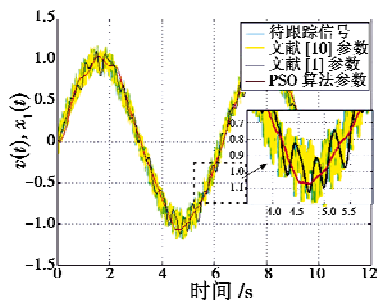


图 5 跟踪效果对比

Fig. 5 Tracking effect comparison

由图 5 可以看出, 经过 PSO 整定过的参数对具有强干扰信号的跟踪效果比文献[1]中人工经验选择的方法效果更好, 且具有更好的滤波性能。而文献[10]的方法只选择了跟踪效果作为其评价指标, 虽然跟踪速度很快, 但是包含的噪声信号与原信号基本相似, 导

致跟踪微分器的滤波性能较差。

4.2 控制效果仿真

参考文献[13]获得实验数据, 系统的主要参数见表 2。

表 2 模型参数

Table 2 Parameters of model

| 项目 | 数值 |
|------------------------------------|----------------|
| m/kg | 0.75 |
| l/m | 0.25 |
| $I_x/(\text{kg} \cdot \text{m}^2)$ | $19.688e^{-3}$ |
| $I_y/(\text{kg} \cdot \text{m}^2)$ | $19.688e^{-3}$ |
| $I_z/(\text{kg} \cdot \text{m}^2)$ | $3.938e^{-2}$ |
| λ | $7.5e^{-7}$ |

以四旋翼俯仰通道的控制为例, 其控制流程如图 6 所示。

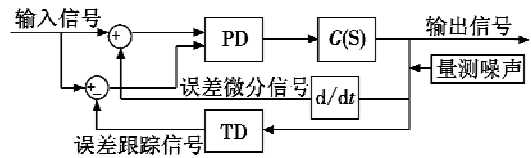


图 6 俯仰通道控制流程

Fig. 6 Control flow chart of the pitch channel

考虑到传感器数据采集过程中的量测噪声干扰, 在反馈通道中加入随机噪声干扰, 干扰信号如图 7 所示。控制效果与经典 PD 控制做比较 ($k_p = 5, k_d = 0.2$), 仿真结果如图 8 ~ 图 10 所示。从图中可以看出, 在 PD 控制的反馈环节引入经过 PSO 参数整定的 TD 过程可以减小传感器反馈环节量测噪声对系统的影响。

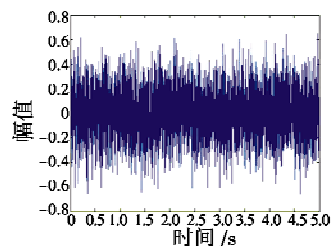


图 7 量测噪声

Fig. 7 Measurement noise

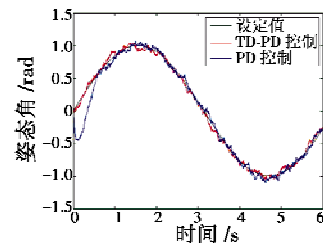


图 8 俯仰通道控制效果

Fig. 8 Pitch channel control results

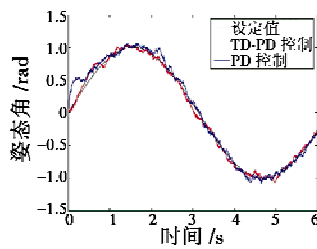


图9 滚转通道控制效果

Fig. 9 Roll channel control results

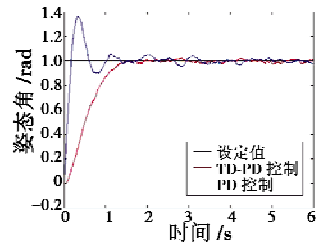


图10 偏航通道控制效果

Fig. 10 Yaw channel control results

5 结语

本文在四旋翼无人机模型的基础上,设计了一种基于 TD-PD 方法的控制器,利用 PSO 算法整定跟踪微分器参数,仿真结果证明 TD-PD 控制器能有效抑制反馈环节中的噪声影响,具有较好的控制结果。

参考文献

- [1] 韩京清. 自抗扰控制技术[M]. 北京:国防工业出版社,2013. (HAN J Q. Active disturbance rejection control technique—the technique for estimating and compensating the uncertainties[M]. Beijing: National Defense Industry Press, 2013.)
- [2] 史永丽,侯朝桢. 改进的非线性跟踪微分器设计[J]. 控制与决策,2008,23(6):647-650. (SHI Y L, HOU C Z. Design of improved nonlinear tracking differentiator[J]. Control and Decision, 2008, 23(6):647-650.)
- [3] ZHU F G, CHEN X Y. Analysis and improvement of the nonlinear tracking-differentiator[J]. Control Theory and Applications, 2004, 16(4):651-653.
- [4] 武利强,林浩,韩京清. 跟踪微分器滤波性能研究[J]. 系统仿真学报,2004,16(4):651-653. (WU L Q, LIN H, HAN J Q. Study of tracking differentiator on filtering[J]. Journal of System Simulation, 2004, 16(4):651-653.)
- [5] 韩京清,袁露林. 跟踪微分器的离散形式[J]. 系统科学与数学,1999,19(3):268-273. (HAN J Q, YUAN L L. The discrete form of tracking differentiator[J]. Journal of Systems Science and Mathematical Sciences, 1999, 19(3):268-273.)
- [6] 张海丽,张宏立. 微分跟踪器的研究与应用[J]. 化工自动化及仪表,2012,40(4):474-477. (ZHANG H L, ZHANG H L. Research and application of differential tracker[J]. Control and Instruments in Chemical Industry, 2012, 40(4):474-477.)
- [7] 金岳,宋金来,王维军. 跟踪微分器在某无人机定高控制律设计中的应用[J]. 飞行力学,2008,26(3):82-85. (JIN Y, SONG J L, WANG W J. Application of the tracking differentiator in height control of UAV[J]. Flight Dynamics, 2008, 26(3):82-85.)
- [8] 付瑞玲,李文方. 跟踪微分器在生物雷达中的应用[J]. 自动化技术及应用,2014,33(3):59-61. (FU R L, LI W F. Application of the tracking differentiator in bioradar[J]. Instrumentation and Measurement, 2014, 33(3):59-61.)
- [9] 孙彪,孙秀霞. 离散系统最速控制综合函数[J]. 控制与决策,2010,25(3):473-477. (SUN B, SUN X X. Optimal control synthesis function of discrete-time system[J]. Control and Decision, 2010, 25(3):473-477.)
- [10] 王坤,蔡远利. 基于神经网络的跟踪-微分器设计[J]. 计算机与数字工程,2014,42(3):378-381. (WANG K, CAI Y L. Tracking differentiator based on artificial neural network[J]. Computer & Digital Engineering, 2014, 42(3):378-381.)
- [11] 国情倩. 微型四旋翼飞行器控制系统设计及控制方法研究[D]. 吉林:吉林大学,2013. (GUO Q Q. Study on design and control method for mini-quadrotor UAV control system[D]. Jilin:Jilin University, 2013.)
- [12] 林冰洋. 无人机传感器数据采集与处理[D]. 广州:华南理工大学,2014. (LIN B Y. Sensor data acquisition and processing of unmanned aerial vehicle[D]. Guangzhou: South China University of Technology, 2014.)
- [13] 吴桐,赵健康,杨磊. 四旋翼无人机的系统模型与辨识[J]. 计算机仿真,2012,29(8):89-92. (WU T, ZHAO J K, YANG L. System modeling and identification for quadrotor unmanned air vehicle[J]. Computer Simulation, 2012, 29(8):89-92.)