

基于滑膜自抗扰的四旋翼控制研究

周铂焱

(江苏航空职业技术学院 江苏 镇江 212134)

摘要: 滑模控制 (Sliding Mode Control, SMC) 作为一种典型的变结构控制方法, 被广泛应用于直升机和多旋翼无人机的控制。在滑模控制方法中, 被控系统的结构跟随当前切换函数值的正负按开关特性变化, 以使系统状态依照事先预定的滑动模式轨迹运动。这种控制策略与其他控制方法的不同之处在于系统的不固定, 系统的滑动模式是可以独立设计的, 且系统的特性和参数只取决于设计的切换超平面, 与对象参数及外界扰动无关。因此, 滑模控制具有响应快速, 对参数变化及扰动不敏感, 鲁棒特性

关键词: 滑模控制; 变结构系统; 四旋翼控制

强, 无需系统线上辨识、低模型依赖性, 物理实现简单等显著优点。

四旋翼无人机作为一个典型的多输入、多输出、非线性、强耦合的欠驱动系统。优异的控制算法对于四旋翼无人机的稳定飞行起着至关重要的作用。四旋翼无人机在空间中可以进行上下、前后、左右、俯仰、滚转和偏航 6 个自由度的运动, 但仅有 4 个可控变量输入, 即 4 个电机的转速。可控变量对无人机的姿态控制存在耦合, 且易受干扰影响, 这也使得四旋翼的控制更为困难。传统的 PID 控制以其原理简单、控制技术成熟、易于实现等优点被用于四旋翼无人机的控制。但 PID 控制系统的鲁棒性能却不够理想, 易受外界干扰影响, 在实现稳定控制方面存在一定的局限性。

一、滑模控制原理

滑模控制的概念是由前苏联学者 Utkin 和 Emelyanov 提出的一种结构简单, 鲁棒性强的非线性控制, 目前广泛应用于无人机控制领域。变结构自动控制系统是一类表现为非线性的控制系统, 其结构在控制过程中不断地改变, 滑模控制也是变结构控制的策略之一。它具有对被控对象数学模型精度要求低, 能自适应内部的摄动、外界环境的扰动, 控制算法简单、易于工程实现等优点。与常规控制方法的最大区别在于“不连续性”, 利用不连续的控制规律, 沿着状态空间中一特殊超平面不断地变换系统的结构, 迫使系统状态沿着这个平面向平衡点滑动, 最终逐渐稳定于平衡点或某个允许范围内。

以单输入线性二阶连续系统为例, 说明滑膜变结构控制的原理。此二阶系统的状态方程为:

$$\ddot{x} = f(x, \dot{x}) + b(x, \dot{x}) \cdot u \quad (1-1)$$

其中 x 为系统状态, $\dot{x}$, $\ddot{x}$ 分别为 x 的一阶导数和二阶导数。

u 控制器输入, f 和 b 为关于 x 与 $\dot{x}$ 的非线性函数, b 可逆。对于系统 (1-1), 假设控制目标为令系统状态 x 跟踪理想的状态轨迹 x_d , 即实际状态与理想状态间的误差 $e = x - x_d$ 随时间变化逐渐收敛于 0。为此, 可以设计如下切换函数 s :

$$s(x) = ce + \dot{e} \quad (1-2)$$

其中 c 为满足系统要求的正常数。由切换函数的设计式可知, 当 s 在控制器作用下到达对应的滑模面并一直保持在滑模面 $s=0$ 上时, e 与 $\dot{e}$ 之间的数学关系为 $ce + \dot{e} \propto 0$, 求解可得 $e = \exp(-ct)$ 。即着时间的推移, e 将渐进收敛于原点, 控制目标得以实现。为此需要设计选取合适的控制率, 使得切换函数能够

一直保持在滑模面上。如图 1 所示, 整个被控系统的运动由两部分组成: 系统状态从初始位置开始运动直至到达滑模面的这个阶段被称为“趋近阶段”, 期间称系统状态进行“趋近运动”。到达滑模面后沿滑模面运动的过程被称为“滑模阶段”, 期间系统状态作“滑模运动”。

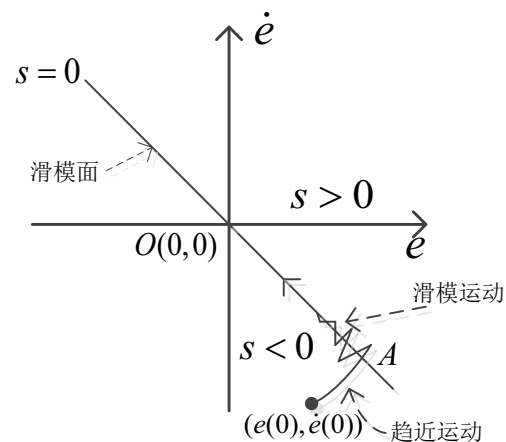


图 1 滑模控制系统状态跟踪误差轨迹

由上述例子可以进一步概括滑模控制的基本内容, 假设系统表达式如下

$$\dot{x} = f(x, u, t) \quad x \in R^n, u \in R^m \quad (1-3)$$

要实现系统状态的控制, 首先需要确定切换函数

$$s(x) \quad s \in R^m \quad (1-4)$$

进而设计控制方案

$$\begin{cases} u_i^+(x), & s_i(x) > 0 \\ u_i^-(x), & s_i(x) < 0 \end{cases} \quad (1-5)$$

滑动模式的存在是实现滑模控制的前提。当被控系统状态构成的切换函数 $s(x)$ 不在滑模面上 ($s(x) \neq 0$) 上时, 控制器的首要任务是使其趋向切换面。只有当 $s(x)$ 到达滑模面后, 系统状态的滑动模式才能启动。连续时间系统中, 滑动模式到达条件的数学表达式为

$$s(x) \cdot \dot{s}(x) < 0 \quad (1-6)$$

二、基于趋近律的滑膜控制器

如前所述, 完整的滑模控制过程由两部分组成: 趋近运动和滑模运动。滑动模式的存在条件和到达条件中, 仅要求系统状态变量由任意初始位置在有限时间内到达滑模面, 而并未规定系统状态构成的切换函数在趋近阶段内的运动轨迹。滑模控制的趋近律直接规定了系统切换函数 s 在趋近阶段中的动态性能, 在实际运用中, 也将影响处于滑动阶段中的切换函数表现, 进而影响系统状态。因此, 可以通过合理地设计趋近律来满足控制任务对滑模控制器的要求。下面以等速趋近律为例, 说明趋近律对系统状态运动轨迹的影响。

等速趋近律表达式如下:

$$\dot{s} = -k_0 \cdot \text{sgn}(s), \quad k_0 > 0 \quad (2-1)$$

其中 $\text{sgn}(s)$ 为 s 的符号函数。该式规定了切换函数 s 在趋近阶段中做等速运动, 速度大小为 k_0 。通过改变 k_0 的大小, 可以调整系统状态的趋近速度。

采用达到条件 $s(x) \cdot \dot{s}(x) < 0$ 可以验证, 若切换函数运动遵循该趋近律规定, 则系统状态轨迹能够到达滑模面。将 (1-2) 对时间求导后与 (2-1) 联立, 带入 $e = x - x_d$ 可得到控制器的表达式如下:

$$u = u_{eq} + u_r \quad (2-2)$$

其中

$$u_{eq} = -b^{-1}(f(x, \dot{x}) + c\dot{e} - \ddot{x}_d) \quad (2-3)$$

$$u_r = -b^{-1}(k_0 \cdot \text{sgn}(s)) \quad (2-4)$$

若令 $\dot{s} = 0$ 求解控制器形式, 则可得到 $u = u_{eq}$, 因此 u_{eq} 也被称为“等效控制器”; 当切换函数不在滑模面 $s = 0$ 上时, u_r 的作用是驱动向滑模面运动。采用控制器 (2-2), 可以使得设计的系统切换函数从初始位置向滑模面运动, 到达滑模面后沿滑模面运动直至系统状态误差 e 与 $\dot{e}$ 到达原点。对等速趋近律表达式 (2-1) 左右两端做积分运算, 可以求得从切换函数初始位置第一

次到达滑模面 $s = 0$ 所需的时间 t_0 为

$$t_0 = \frac{|s_0|}{k_0} \quad (2-5)$$

可见, k_0 可表征切换函数 s 向切换面运动的速度, k_0 数值较小时, 趋近时间长; k_0 取值较大时, 趋近时间缩短, 但在切换面附近的系统抖振幅度也相应增大。因此, 可通过选取合适的 k_0 , 在保证收敛速度的同时来抑制抖振。

三、实验与仿真

在相同的室内环境下, 设计串级 PID 控制算法与趋近律滑模控制算法的对比实验, 以验证趋近律滑模控制算法的性能。本文主要对四旋翼无人机进行阵风干扰下的姿态控制飞行实验。分别将串级 PID 算法和趋近律滑模控制算法写入四旋翼无人机平台, 然后通过遥控手柄发送给定信号, 进行姿态跟踪实验。为了验证趋近律滑模控制算法的抗干扰性能, 在室内通过使用落地风扇的相同档位模拟阵风干扰, 进行抗干扰实验。在第 5 秒启动风扇, 引入阵风干扰, 第 45 秒关闭风扇。

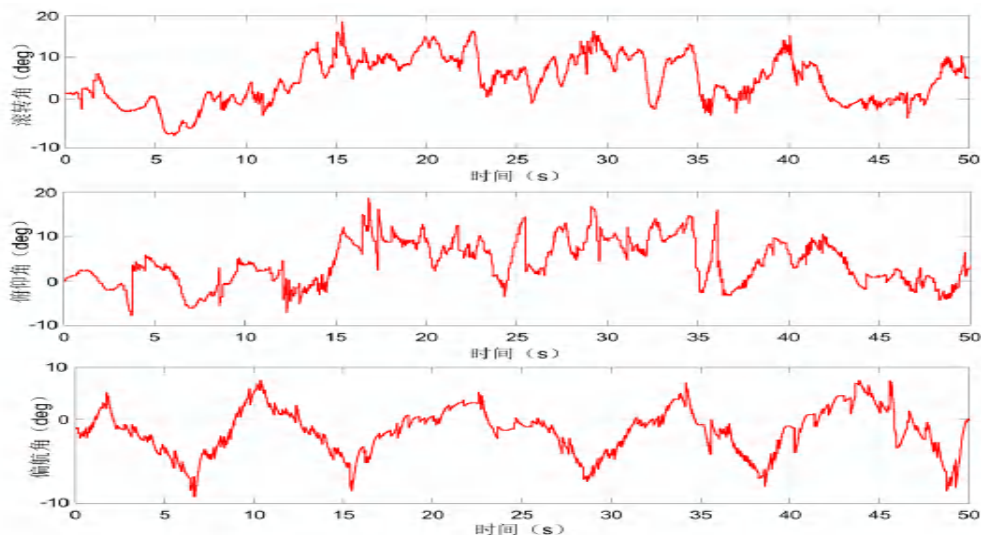


图2 串级 PID 控制抗干扰误差曲线

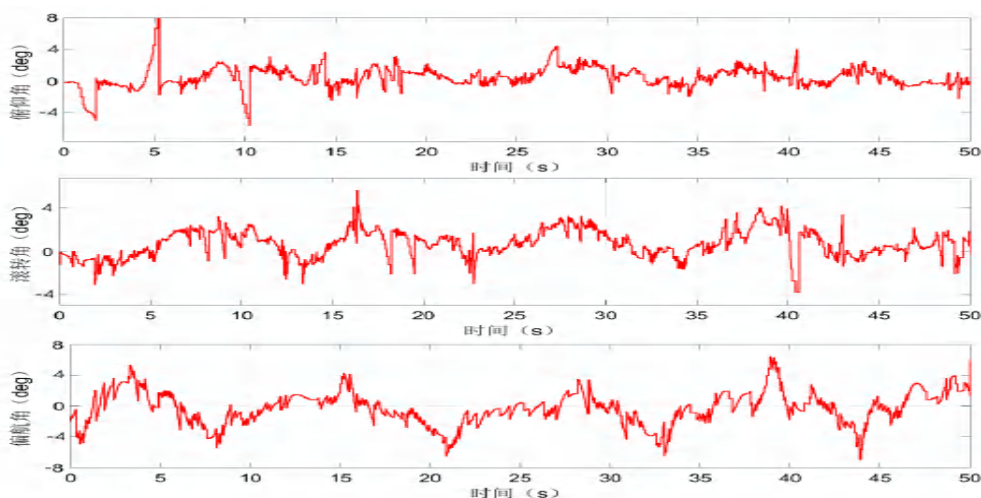


图3 趋近律滑膜控制抗干扰误差曲线

关于新冠病毒疫情期间社会心理调查及分析

赵路晓

(人大附中朝阳分校太行学院(高一班), 北京 100028)

摘要: 2020年初新冠疫情暴发至今, 目前仍在全球各地流行肆虐, 尽管各国都采取了相应的措施进行防护, 如采取隔离、停课停工、禁止聚集等方式使人们保持健康、远离病毒。然而, 这些措施在保护的同时也使社会生活受到了冲击, 并对人们的正常心理产生了影响。

关键词: 疫情期间; 心理调查; 影响

为了解疫情防控措施带来社会生活改变而导致公众心理状况变化, 特设计了专项问卷, 并通过问卷星平台进行发放, 调查时间为2020年4月20日到4月30日, 共收到有效问卷584份。全部通过手机终端提交和参加。

问卷共设计问题11个, 其中8道单选题, 3道多选题。主要以选择题的方式呈现, 部分选项(如选项“其他”)为个性化回答内容。根据问卷反馈信息, 我们可以分析如下:

一、基本信息

根据联合国年龄划分最新标准, 13岁及以下为幼儿及儿童。14-18岁为少年(青少年)。19-25岁为青年人。25-64岁为成年人。65岁及以上则为老年人。

按照这个标准, 采集到参与问卷的对象主要年龄分布在26-64岁成年人之间, 占比为85.96%。其次为19-25岁之间, 占比为10.1%。具体信息如图1:

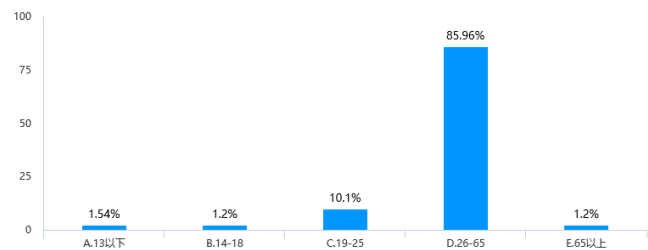


图1 参与问卷对象年龄分布图

由于成年人是社会的主要组成部分, 同时也是手机用户高占比人群, 从问卷对象来看数量较多。与社会实际人群分布基本吻合。

从性别来看, 女性占比74.49%, 男性为25.51%。是否女性对心理学以及心理调查具有更多兴趣, 或居家期间, 女性使用手机时间更长有关系? 有待证实。

二、状态描述

疫情期间, 人们被迫居家进行学习与工作, 多数人对此表示能够接受并且在此期间可自由安排时间比较满意, 占比49.66%, 将近一半; 但也有一定数量的人对于每日居家工作感到迷茫焦虑, 变得无目标、十分随性, 占比33.22%。部分选择“其他”的人们

如图2所示, 可以看出在阵风干扰下, 串级PID控制器的滚转角、俯仰角和偏航角跟踪误差较大, 滚转角的跟踪误差范围在-9.1~19.8, 俯仰角的跟踪误差范围在-9.4~19.6, 偏航角的跟踪误差范围在-9.7~9.3。相比之下, 趋近律滑模控制器的跟踪误差明显减小。如图3所示, 滚转角的跟踪误差范围在-1.9~2.8, 俯仰角的跟踪误差范围在-3.7~3.7, 偏航角的跟踪误差范围在-6.1~6.8。对比可以看出, 趋近律滑模控制器对于外界干扰具有更强的鲁棒性, 且响应速度更快。

参考文献:

- [1] AGRAWAL A, CHELLAPPA R, RASKAR R. An algebraic approach to surface reconstruction from gradient fields[C]//IEEE International Conference on Computer Vision, 2005: 174-181.
- [2] ANG K H, CHONG G, LI Y. PID control system analysis, design, and technology[J]. IEEE Transactions on Control Systems Technology, 2005, 13(4): 559-576.
- [3] UTKIN V. Variable structure systems with sliding modes[J]. IEEE Transactions on Automatic control, 1997, 22(2): 212-222.
- [4] Besnard L, Shtessel Y B, Landrum B. Quadrotor vehicle control via sliding mode controller driven by sliding mode disturbance observer[J]. Journal of the Franklin Institute, 2012, 349(2): 658-684.

- [5] Fallaha C J, Saad M, Kanaan H Y, et al. Sliding-Mode Robot Control With Exponential Reaching Law[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2011, 58(2): 600-610.

- [6] 刘金琨. 滑模变结构控制 MATLAB 仿真[M]. 北京: 清华大学出版社有限公司, 2005.

- [7] Gao W, Wang Y. Discrete-time variable structure control systems[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 1995, 42(2): P.117-122.

- [8] BARTOSZEWIC A. Remarks on discrete-time variable structure control systems[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 1996, 43: 235-238.

- [9] BARTOSZEWICZ A, LATOSISKI P. Discrete time sliding mode control with reduced switching - a new reaching law approach[J]. International Journal of Robust and Nonlinear Control, 2016, 26(1): 47-68.

- [10] Ma H, Wu J, Xiong Z. A Novel Exponential Reaching Law of Discrete-Time Sliding-Mode Control[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2017, PP(5): 1-1.

本文系江苏航空职业技术学院校级课题: 四旋翼飞行器控制与地面站设计(课题编号: JATC20010206)的成果论文。