

doi: 10.7690/bgzd.2019.05.004

基于 H_∞/S 面混合算法的无人机速度控制

赵兴成, 原梅妮, 陈鹏云, 李盼, 李瑶

(中北大学机电工程学院, 太原 030051)

摘要: 针对无人机速度控制系统在飞行过程中易受到参数摄动和外部扰动的影响, 鲁棒性较差等不足, 以某型无人机的数学模型为基础, 提出一种鲁棒 H_∞/S 面模型控制算法。内环采用具有较强鲁棒性的鲁棒 H_∞ 控制, 外环采用具有较强非线性的 S 面控制算法, 并在无外界干扰、有外界干扰、参数摄动的情况下进行仿真验证。结果表明: 该系统具有快速性、精确性、鲁棒性和动态性能, 更适合无人机的速度控制。

关键词: 鲁棒 H_∞ 控制; S 面控制; 速度控制; 稳定性; 鲁棒性

中图分类号: TP301.6 **文献标志码:** A

UAV Speed Control Based on H_∞/S -surface Hybrid Algorithm

Zhao Xingcheng, Yuan Meini, Chen Pengyun, Li Pan, Li Yao

(College of Mechanical & Electrical Engineering, North University of China, Taiyuan 030051, China)

Abstract: For the UAV speed control system, it is susceptible to parameter perturbation and external disturbance during flight, and the robustness is poor. Based on the mathematical model of certain type UAV, a robust H_∞/S surface model control algorithm is proposed. The inner ring adopts robust H_∞ control with strong robustness, and the outer ring adopts S-surface control algorithm with strong nonlinearity. The simulation results are verified without external disturbance, external disturbance and parameter perturbation. The results show that the control system is fast, accurate, robust and dynamic, and is more suitable for speed control of UAV.

Keywords: robust H_∞ control; S-surface control; speed control; stability; robustness

0 引言

随着应用的需要和航空技术的发展, 无人机以其低损耗、低成本、零伤亡、便于维修保养和高机动性等优点在军事和民用领域都得到广泛应用和发展^[1-2]。在军事方面, 无人机可作为空中侦察和武器平台, 通过携带不同的设备和装备来执行侦察、空战、对地攻击、电子干扰、目标定位、区域搜索和效果评估等任务, 同时还可以拥有超高过载的机动能力, 有利于攻击和摆脱威胁。在民用方面, 无人机可用于进行地图测绘、资源勘查、通信中继、人工降雨、气象探测、环境监测、大气和海洋取样研究等繁重重复或具有一定危险的任务^[3]。无人机完成飞行任务时, 需要飞行控制系统能够精确快速地控制飞行姿态、飞行高度以及飞行速度, 并且在受到外界干扰和内部扰动时能迅速地消除扰动影响; 因此, 设计无人机控制系统时, 不仅要考虑响应速度, 而且要兼顾抗干扰能力和鲁棒性能。

无人机速度控制系统建立在俯仰角控制系统的基础上, 即俯仰角控制系统是它的内回路, 而速度

反馈则形成外回路。常用的无人机速度控制方法有 PID 控制^[4]、改进 PID 控制^[5-6]、增量非线性动态逆控制^[7]和神经网络控制等控制方法^[8-9]。对于无人机这种非线性易受干扰的被控对象来说, 传统 PID 控制简单可靠, 易于实现, 但抗干扰能力不强; 改进 PID 算法一般在积分项的基础上进行改进, 本质上还是积分算法, 具有一定的局限性; 增量非线性动态逆控制方法是基于对象具有精确的数学模型而建立的, 对建模误差较为敏感, 鲁棒性较差; 神经网络控制拥有很强鲁棒性和非线性拟合能力, 但控制算法复杂, 控制过程中容易丢失信息。一般来说, 控制模型越简单, 控制精度和抗干扰能力越高, 越能满足无人机这一特殊载体的需要^[10]。

笔者将在水下机器人领域已得到广泛应用的 S 面控制模型运用到无人机速度控制中, 其模型简单, 控制精度较高。同时利用鲁棒控制模型对其进行改进, 设计了一种基于 H_∞/S 面模型的控制算法, 对无人机的速度进行控制。对比传统 PID 控制效果, 验证了 H_∞/S 面模型控制的快速性、精确性、鲁棒性和动态性能。

收稿日期: 2019-01-11; 修回日期: 2019-01-26

基金项目: 国家自然科学基金项目(51775518、51201155); 飞行器结构完整性技术工业和信息化部重点实验室基金项目

作者简介: 赵兴成(1992—), 男, 河北人, 硕士, 从事飞行控制与导航制导研究。

1 鲁棒 H_∞ 与 S 面混合的速度控制

无人机速度控制系统是建立在俯仰角控制系统的基础上，即俯仰角控制系统是其内回路，速度反馈形成外回路。笔者以 S 面控制作为速度控制器的外环，以鲁棒控制作为速度控制器的内环，将二者结合以提高系统的各项性能。

1.1 鲁棒 H_∞ 控制器设计^[11-13]

内回路为对俯仰角控制系统的控制，主要采用加权混合灵敏度问题的鲁棒 H_∞ 控制理论对控制系统进行设计。混合灵敏度问题控制结构如图 1 所示。

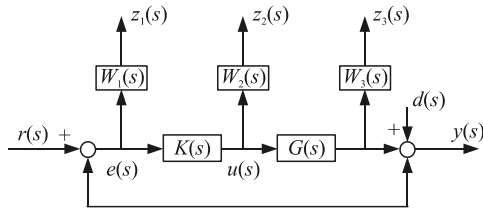


图 1 混合灵敏度问题控制结构

图中： $W_1(s)$ 是对闭环灵敏度函数 S 的加权； $W_2(s)$ 表示加性摄动的范数界； $W_3(s)$ 是对补灵敏度函数 T 的加权函数，表示乘性摄动的范数界。从 $r(s)$ 到 $e(s)$ 、 $u(s)$ 、 $y(s)$ 的闭环传递函数为：

$$\left. \begin{aligned} S &= (I + GK)^{-1} \\ R &= K(I + GK)^{-1} \\ T &= GK(I + GK)^{-1} \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

考虑加权的混合灵敏度问题的标准框架为：

$$\begin{bmatrix} W_1 e \\ W_2 u \\ W_3 y \\ e \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} W_1 & -W_1 G \\ 0 & W_2 \\ 0 & W_3 G \\ I & -G \end{bmatrix} \begin{bmatrix} r \\ u \end{bmatrix} \quad (2)$$

其中广义受控对象飞机的状态空间表达式为：

$$P_0 = \begin{bmatrix} W_1 & -W_1 G \\ 0 & W_2 \\ 0 & W_3 G \\ I & -G \end{bmatrix} \quad (3)$$

系统的闭环传递函数矩阵为

$$P = \begin{bmatrix} W_1 S \\ W_2 R \\ W_3 T \end{bmatrix} \quad (4)$$

混合灵敏度问题就是求一真实有理函数控制器 $K(s)$ ，使得闭环系统稳定，且满足 $\|P\|_\infty < 1$ 。

选取加权函数为

$$\left. \begin{aligned} W_1(s) &= \frac{0.00075s + 0.075}{s + 0.001} \\ W_2(s) &= 0.1 \\ W_3(s) &= 0.002(s + 0.005) \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

利用 Matlab 解 2 个 Riccati 方程，求得 H_∞ 最优控制器为

$$K_\infty = \frac{81.939(s^2 + 0.03392s + 0.04641)(s^2 + 4.979s + 12.95)}{(s + 132.1)(s + 0.02984)(s + 0.001)(s^2 + 6.2765s + 11.93)}$$

绘制在控制器作用下系统的闭环单位阶跃响应曲线和开环 Bode 图如图 2、图 3 所示。

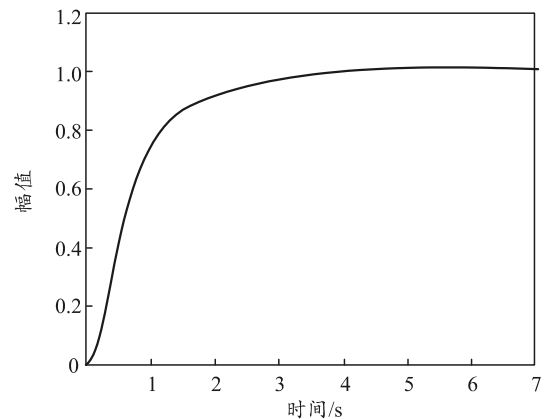
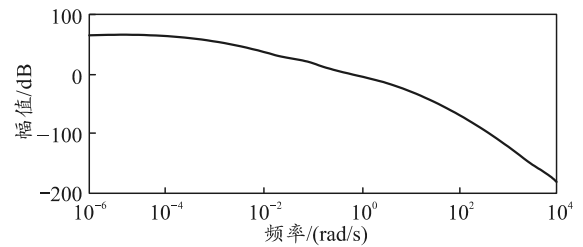
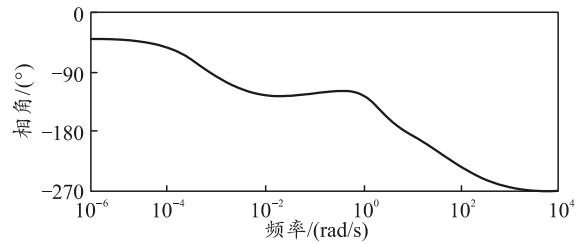


图 2 系统闭环阶跃响应



(a) 幅值



(b) 相角

图 3 系统开环 Bode 图

由图可见：相频特性曲线在 $L(w) > 0$ 的频段内对 -180 相位线没有穿越，即正负穿越之差： $N=0$ ；开环传递函数在右半 s 平面的极点数为 $P=0$ 。根据对数幅相频特性稳定判据，闭环传递函数在右半 s 平面的极点数为 $Z=P-2N=0$ ，闭环系统稳定，所以笔者设计的鲁棒 H_∞ 控制器稳定。

1.2 S 面控制器设计^[14-16]

S 面控制方法的控制模型为:

$$u = \frac{2.0}{(1.0 + e^{(-k_1 e - k_2 \dot{e})})} - 1.0 + \Delta u \quad (6)$$

其中: k_1 、 k_2 为控制参数; e 和 \dot{e} 分别为偏差和偏差变化率, 即速度偏差和速度偏差变化率; u 为控制输出; Δu 为环境干扰项。

与 PD 控制相比, S 面控制具有较强的非线性。S 面控制方法的输出值大小与输出值变化率相反, 呈非线性状态; 所以, S 面控制方法适合于无人机这种非线性被控对象。S 面控制方法中参数 k_1 用于控制收敛速度, 参数 k_2 用于控制系统的超调量。最终确定控制参数为: $k_1=2.775$, $k_2=3.485$ 。

2 无人机速度控制原理及仿真模型

无人机速度控制系统对飞机来说有 2 种实现方法: 1) 采用升降舵面实现速度控制; 2) 使用发动机油门杆对速度进行控制^[4]。笔者采用控制升降舵面实现无人机速度控制, 即通过改变俯仰角而达到对速度的影响, 俯仰角改变后, 会增加或减少机体重力在速度轴上的投影, 最终将会明显改变速度的大小。速度控制系统原理如图 4。

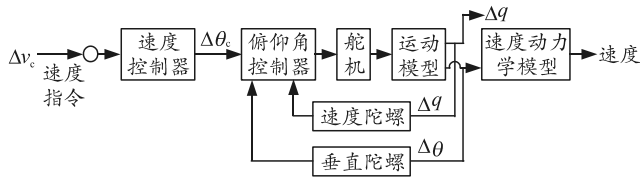


图 4 速度控制系统原理

由图可知: 速度控制系统由内外 2 个回路组成, 外环采用 S 面控制器控制速度偏差和偏差变化率, 通过控制算法计算俯仰角变化, 通过鲁棒 H_∞ 控制来控制俯仰角的变化, 同时对自身不确定性和外界干扰做出控制, 从而完成整个无人机速度控制的过程。

在定常对称直线水平飞行的平衡运动条件下, 无人机的小扰动线性化纵向运动方程为:

$$\begin{bmatrix} \Delta \dot{v} \\ \Delta \dot{\alpha} \\ \Delta \dot{q} \\ \Delta \dot{\theta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} X_v & X_\alpha & 0 & -g \\ Z_v & Z_\alpha & 1 & 0 \\ M_v & M_\alpha & M_q & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta v \\ \Delta \alpha \\ \Delta q \\ \Delta \theta \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} X_{\delta_e} & X_{\delta_T} \\ Z_{\delta_e} & Z_{\delta_T} \\ M_{\delta_e} & M_{\delta_T} \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \delta_e \\ \Delta \delta_T \end{bmatrix} \quad (7)$$

式中: v 为飞行速度; α 为迎角; q 为俯仰角速率; θ 为俯仰角; $\Delta \delta_e$ 和 $\Delta \delta_T$ 分别为升降舵和油门杆的扰动增量; 矩阵为常系数矩阵。

给出某无人机纵向运动的标称模型为

$$\left. \begin{aligned} \dot{x} &= Ax + Bu \\ y &= Cx + Du \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

$$\text{式中: } A = \begin{bmatrix} -0.045 & 1.929 & 0 & -9.81 \\ -0.0071 & -2.02 & 1 & 0 \\ 0.0062 & -6.969 & -2.948 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix};$$

$$B = \begin{bmatrix} 0 \\ -0.16 \\ -11.87 \\ 0 \end{bmatrix}; C = [0 \ 0 \ 0 \ 1]; D = 0。$$

3 仿真试验及结果分析

笔者以某型无人机的标称模型为研究对象, 采用飞机纵向短周期模态的飞机模型, 选取舵回路传递函数为:

$$G_\delta(s) = \frac{-20}{s+20} \quad (9)$$

基于 Matlab 的 Simulink 工具箱, 搭建无人机速度控制的仿真平台。仿真中, 设无人机平飞时速度为 53.5 m/s, 在无外界干扰和有外界干扰的条件下给无人机速度增量指令为 +5 m/s 的阶跃信号, 即飞机速度增加 5 m/s, 同时对比 PID 控制, 观察分析文中控制器的有效性。

3.1 无外界扰动的速度控制

笔者设计鲁棒 H_∞ /S 面控制系统和 PID 控制系统, 给系统速度增量指令为 +5 m/s 的阶跃信号及飞机速度增加 5 m/s, 运行仿真系统得到 2 种控制系统对速度值变化的曲线如图 5。

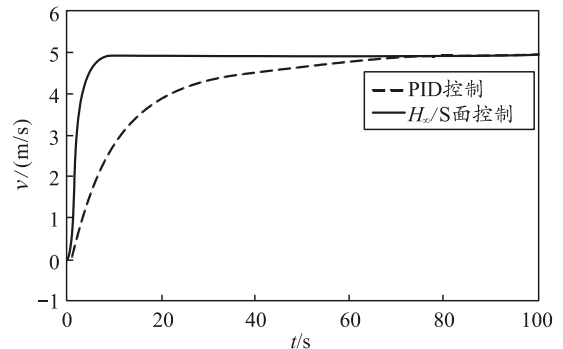


图 5 无干扰时速度仿真

从图中可以看出: H_∞ /S 面控制系统在大约 10 s 时达到稳定状态, PID 控制系统在大约 80 s 时达到稳定状态, 用时是 H_∞ /S 面控制系统的 8 倍, 充分说明了 H_∞ /S 面控制系统的快速性。但 H_∞ /S 面控制系统相对于 PID 控制系统后期波动较大, 这是由于

仿真试验是在相对理想的条件下进行的, 缺乏对自身误差或者外界环境模拟, 导致 PID 控制系统这种偏线性且非常简单的控制算法在系统稳定后优势更大一些。为了让仿真更真实, 仿真试验会通过加入外界扰动来研究哪种控制系统抗干扰效果更好。

3.2 有外界扰动的速度控制

在飞行过程中, 无人机常常要受到不定向气流扰动。此扰动可采用 Simulink 工具箱中的 Band-Limited White Noise 模块进行仿真。此模块可产生指定幅值的高斯白噪声, 利用定时干扰模块(如图 6 所示)将扰动限制在 140~160 s。运行仿真程序得到控制结果如图 7 所示。

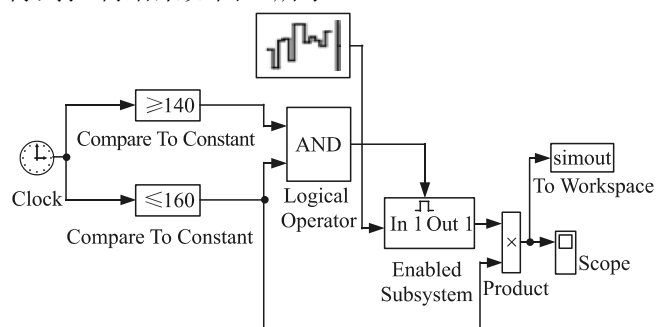


图 6 定时干扰模块

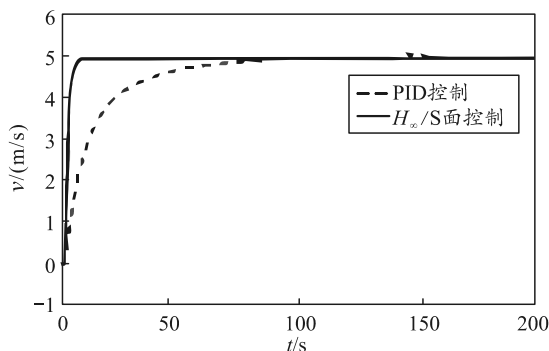


图 7 不定向气流扰动下速度仿真

从图可知, H_∞/S 面控制系统在不定向气流扰动下波动较小且波动较为均匀。为了更直观地观察波动情况, 截取干扰阶段的放大图如图 8 所示。

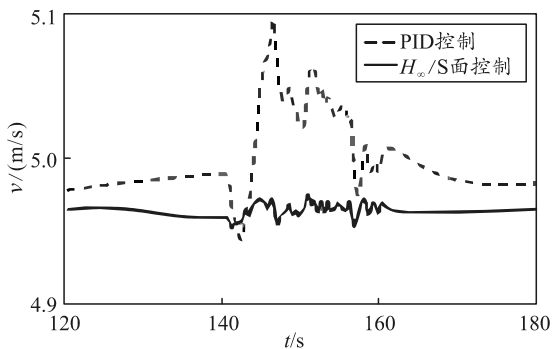


图 8 不定向气流扰动局部放大

从图可以看出: H_∞/S 面控制系统在整个扰动时间内的波动较小且变化较为均匀, 速度变化范围为 4.96~4.98 m/s 之间, 即波动范围为 0~0.02 m/s。而 PID 控制系统在整个扰动时间内的波动较大且变化不均匀, 速度变化范围为 4.95~5.10 m/s, 即波动范围为 0~0.15 m/s。由此可知, H_∞/S 面控制系统的抗不定向气流扰动能力增强了 7 倍。在扰动消失后, H_∞/S 面控制系统大约经过 3 s 便恢复到原来的稳定状态, 而 PID 控制系统在扰动消失后大约经过 10 s 才能恢复到稳定状态。充分说明了 H_∞/S 面控制系统的快速性和较强的抗干扰能力。

在无人机飞行过程中还常常受到垂直阵风的干扰, 严重影响飞行的稳定性。仿真时可采用 Simulink 工具箱中的方波模块来模拟垂直风作用, 在 50 s 时加入干扰, 干扰采用周期为 50 s、脉冲宽度为 1、幅值为 5 的方波来进行。仿真曲线如图 9 所示。

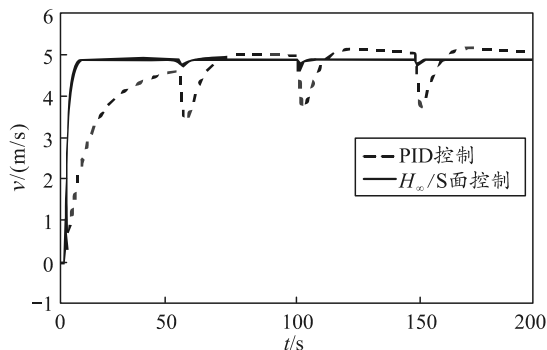


图 9 垂直风扰动下速度仿真

由图可知: 在稳定后加入垂直风干扰, H_∞/S 面控制系统将速度控制在 4.8~5.0 m/s 内, 且大约经过 5 s 的时间就达到原有的稳定速度。PID 控制系统将垂直风干扰时的速度控制在 3.5~5.1 m/s 内, 且大约经过 15 s 才达到原有的稳定速度。表明 H_∞/S 面控制系统扰动时的速度波动较小, 并且可以快速达到原有稳定状态, 说明其控制系统具有较强的抗干扰能力和较快速的自稳能力。

由图 7—图 9 可知: H_∞/S 面控制系统具有较强的抗干扰能力, 同时也具有快速的自稳能力。

4 结束语

笔者以无人机飞行速度控制为研究对象, 设计了基于 H_∞/S 面模型控制的控制器, 外环采用 S 面控制算法具有较强的非线性控制特点, 内环俯仰角的控制回路采用基于混合灵敏度的鲁棒控制, 提高了系统的鲁棒性能。采用仿真试验分别验证了无外界扰动和在不定向气流扰动和垂直风扰动作用下的

控制性能, 结果表明, H_∞/S 面混合控制算法具有较好的快速性、稳定性和强抗干扰能力。

参考文献:

- [1] 李一波, 李振, 张晓东. 无人机飞行控制方法研究现状与发展[J]. 飞行力学, 2011, 29(2): 1-4.
- [2] KATRINA H. Development of unmanned aerial verial vehicle market: forecasts and trends[J]. Air & Space Europe, 2000, 2(2): 25-27.
- [3] 代威, 张洪涛, 惠俊鹏. 无人机在未来海战场中的应用分析[J]. 兵器装备工程学报, 2018, 39(1): 21-24.
- [4] 徐军. 飞行控制系统—设计、原型系统及半物理仿真实验[M]. 北京: 北京理工大学出版社, 2015: 66-108.
- [5] 朱石林, 潘海鹏. 积分分离PID算法在变频调速系统中的实现[J]. 电气传动与自动控制, 2010, 32(1): 33-35.
- [6] 高俊, 王鹏, 侯中喜. 基于改进PID算法的无人机变速度控制[J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2015, 43(增刊 I): 1-5.
- [7] 郑积仕, 蒋新华, 陈兴武. 增量非线性动态逆小型无人机速度控制[J]. 系统工程与电子技术, 2013, 35(9): 1923-1927.
- [8] 张敏, 胡松寿. 基于动态结构自适应神经网络的非线性鲁棒跟踪控制[J]. 南京航空航天大学学报, 2008, 40(1): 76-79.
- [9] BU X W, WU X Y, ZHU F J, et al. Novel prescribed performance neural control of a flexible air-breathing hypersonic vehicle with unknown initial errors[J]. ISA Transactions, 2015, 13(7): 125-136.
- [10] 陈鹏云, 张鹏飞, 赵兴成, 等. 无人机的专家 S 面控制方法[J]. 航天控制, 2018, 36(4): 65-71.
- [11] 王曦, 林永霖, 吴永康. H_∞ 控制在飞行/推进综合控制系统中的应用[J]. 航空动力学报, 2004, 19(5): 695-702.
- [12] 何森磊, 贺继林, 周烜亦. 小型无人直升机鲁棒飞行控制[J]. 机器人, 2016, 38(3): 337-342.
- [13] MAHMOOD A, KIM Y, PARK J. Robust H_∞ autopilot design for agile missile with time-varying parameters[J]. IEEE Transactions on Aerospace & Electronic Systems, 2014, 50(4): 3082-3089.
- [14] 刘学敏, 徐玉如. 水下机器人运动的 S 面控制方法[J]. 海洋工程, 2001, 19(3): 81-84.
- [15] ZHANG L, PANG Y J, SU Y M, et al. Expert S-surface control for autonomous underwater vehicles[J]. Journal of Marine Science and Application, 2008, 7(4): 236-242.
- [16] SUN Y S, WAN L, LI Y M, et al. S plane control based on parameters optimization with simulated annealing for underwater vehicle[C]//Proceeding of 2011 International Conference on Electronic and Mechanical Engineering and Information Technology. Harbin, China, 2011: 552-556.