

doi:10.19306/j.cnki.2095-8110.2018.06.007

基于 LESO 状态反馈的无人机速度控制

侯营东, 胡肖, 丛岳, 黄屹, 刘长林

(航天科工三院无人机技术研究所, 北京 100074)

摘要: 无人机速度回路的控制受外界环境、构型变换等不确定性干扰因素的影响较大, 采用基于线性扩张状态观测器(LESO)的自抗扰控制方法能准确估计并补偿不确定性干扰, 在观测器的基础上加入状态反馈和指令前馈, 能获得良好的稳态、动态品质。性能分析与仿真结果表明, 基于 LESO 状态反馈的无人机速度控制方法具有良好的干扰抑制能力, 能够实现对控制指令的精确跟踪。

关键词: 线性扩张状态观测器; 速度控制; 状态反馈; 指令前馈

中图分类号: V249.1

文献标志码: A

文章编号: 2095-8110(2018)06-0048-05

Airspeed Control System Design for UAV Based on LESO State Feedback

HOU Ying-dong, HU Xiao, CONG Yue, HUANG Yi, LIU Chang-lin

(UAV Technology Institute, HIWING Technology Academy of CASIC, Beijing 100074, China)

Abstract: Considering the influence brought by the uncertainty of the UAV airspeed control loop which results from the complicated aviation environment and flight configuration changing process, an auto disturbance rejection control method based on LESO (Linear Extended State Observer) is used to estimate the unknown disturbance and perform compensation in real time. By adding the state feedback and command feedforward to LESO, the airspeed control system can obtain high quality of steady and dynamic states. The analysis and simulation results show that the UAV airspeed control system based on LESO state feedback can track the control command precisely with good performance against disturbance.

Key words: LESO; Airspeed control; State feedback; Command feedforward

0 引言

速度控制是无人机飞行控制系统的重要组成部分, 其性能和品质对无人机的飞行安全和任务执行效率具有直接影响^[1-2]。特别针对自主着陆、编队协同及空中加油等特殊使用环境, 由于外界环境的复杂不确定性(外部干扰)以及被控对象在全工作剖面内所表现出的非线性特性(内部干扰), 增加了

无人机速度控制系统设计的难度, 也对飞行控制系统的鲁棒性提出了更高的要求。

近年来, 由于参数物理意义明确且便于进行性能分析, 以线性扩张状态观测器(Linear Extended State Observer, LESO)为核心的自抗扰控制在工程中得到了成功应用, LESO 可以实时估计系统中存在的各种内外部干扰, 并在控制通道进行动态补偿以达到提升系统鲁棒性的目的^[3-4]。本文针对无人机速度回路受

收稿日期: 2018-05-23; 修订日期: 2018-08-29

基金项目: 装发预研项目(41411030101)

作者简介: 侯东营(1984-), 男, 高级工程师, 主要从事飞行器控制方面的研究。E-mail: houyingdong04132@163.com

飞行机动动作、起落架与减速板收放气动构型变换、外界环境变化等多方面干扰因素影响的问题,采用 LESO 对各项不确定性干扰进行实时估计,并在此基础上加入状态反馈补偿和指令前馈,以获得无人机飞行速度良好的动态品质和稳态性能。

1 无人机速度控制模型

从飞行动力学来说,无人机速度控制可以通过升降舵的偏转或者发动机油门状态的改变来实现。如果采用升降舵来控制速度,那么这种速度控制系统的核心依然是俯仰角控制系统,其姿态和高度是不确定的;而采用发动机油门来控制速度,实际就是通过对发动机拉力或推力的控制,达到对速度控制的目的^[5-6]。

在本文设计过程中,通过实时调整发动机油门实现对无人机飞行速度的控制,速度控制模型 $G_P(s)$ 主要由发动机近似一阶惯性动力学环节 $G_T(s)$ 与油门电压至速度的一阶简化模型 $G_V(s)$ 串联组成,如式(1)~式(3)所示。

$$G_T(s) = \frac{\Delta\delta_T}{\Delta\delta_{Tc}} = \frac{1}{s + \frac{1}{T_e}} \quad (1)$$

$$G_V(s) = \frac{\Delta V}{\Delta\delta_T} = \frac{b}{s + a} \quad (2)$$

$$G_P(s) = G_V(s) \cdot G_T(s) = \frac{K}{s^2 + k_1s + k_0} \quad (3)$$

式中, $\Delta\delta_{Tc}$ 、 $\Delta\delta_T$ 、 T_e 分别为发动机油门指令、油门响应与响应时间常数; ΔV 、 a 、 b 为速度与归一化传递系数; $k_0 = a/T_e$ 、 $k_1 = a + 1/T_e$ 、 $K = b/T_e$ 为模型对应典型二阶环节的系数。以某型中程高速

轮式起降无人机为例,选取包含起飞爬升、巡航平飞、纵向机动、进场着陆等若干典型状态点进行设计分析与验证。

2 基于 LESO 状态反馈的速度控制设计

常规反馈控制回路在前向通道设计单一控制器,导致系统难以较好地处理稳定指令跟踪与快速干扰抑制之间的矛盾,只能在两种特性之间进行折中选择。采用二自由度的设计思路,一方面由 LESO 状态反馈补偿对回路不确定扰动进行快速抑制,同时完成系统期望闭环动态特征的极点配置,以使系统具有较好的动态性能;另一方面,在闭环回路外设计速度指令前馈补偿环节,使速度控制系统在保证闭环动态鲁棒稳定的前提下,具有良好的稳态跟踪性能。

LESO 设计时将扰动作为系统之外的一个单独状态,通过引入合适的观测误差反馈,可以保证观测器的稳定性、时效性,实现将系统中的内部扰动和外部扰动进行实时估计的目的。当系统扰动被准确估计出来后,可以在控制回路中施加扰动补偿策略,进而通过反馈线性化手段将系统补偿为确定性系统^[7-8]。

对于被控特性已知的确定性系统,通过引入前馈回路可以在不损失稳定性的前提下,提高系统的响应速度。通过对影响无人机速度回路的各种干扰进行 LESO 实时估计,在扰动实时补偿的基础上,根据所要求的闭环系统动态特性,通过组合状态反馈自由配置极点位置,简化控制参数整定过程,并通过指令前馈进行增益补偿,优化系统响应快速性,如图 1 所示。

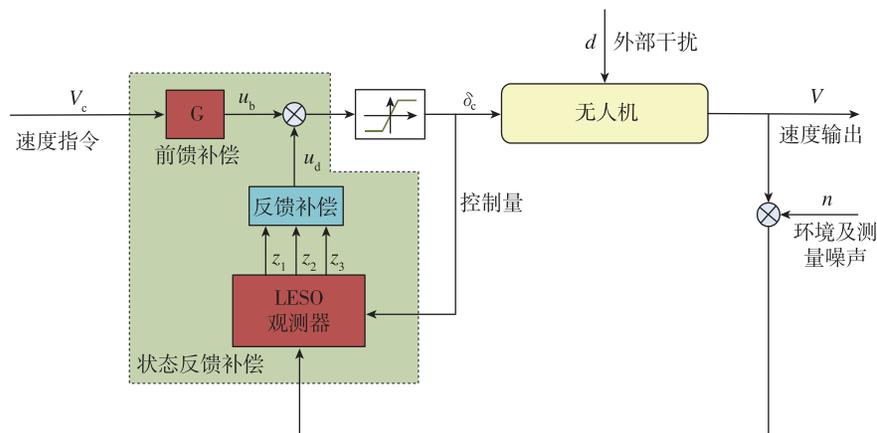


图 1 基于 LESO 的速度控制系统结构图

Fig. 1 Block diagram of airspeed control system based on LESO

2.1 LESO 与状态反馈补偿控制器设计

针对式(3)描述的速度控制模型,取 $x = [\Delta V \quad \Delta \dot{V}]^T$, $u = \Delta \delta_{Tc}$, $y = \Delta V$, 转换成状态空间描述如式(4)所示:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = -k_1 x_2 - k_0 x_1 + f(\Delta) + Ku \\ y = x_1 \end{cases} \quad (4)$$

定义扩张状态变量 $x_3 = -k_1 x_2 - k_0 x_1 + f(\Delta)$, x_3 包含系统建模动态和各种不确定扰动信息,为使控制系统对设计模型不确定因素具有鲁棒性,将以上信息作为未知状态设计 LESO, 如下所示:

$$\begin{cases} \dot{z}_1 = z_2 + \beta_{01}(y - z_1) \\ \dot{z}_2 = z_3 + Ku + \beta_{02}(y - z_1) \\ \dot{z}_3 = \beta_{03}(y - z_1) \end{cases} \quad (5)$$

将 LESO 极点配置在带宽 ω_o 处,即:

$$\Delta(s)_{LESO} = s^3 + \beta_{01}s^2 + \beta_{02}s + \beta_{03} = (s + \omega_o)^3 \quad (6)$$

假定设计期望的闭环系统二阶自然振荡频率和阻尼比分别为 ω_{nc} 、 ξ_c , 状态补偿反馈控制律为:

$$U_d = -\frac{b_0 z_1 + a_0 z_2}{K} - \frac{z_3}{K} \quad (7)$$

$$\begin{cases} a_0 = 2\xi_c \omega_{nc} \\ b_0 = \omega_{nc}^2 \end{cases} \quad (8)$$

式中,反馈补偿控制律第一项为极点配置对应的状态反馈,第二项为针对环境扰动及被控对象特性偏离标称设计模型产生的扰动补偿项。

LESO 状态补偿反馈可以等价为一个双反馈控制器结构,包括指令输入端负反馈和控制输出端负反馈,如图 2 所示。

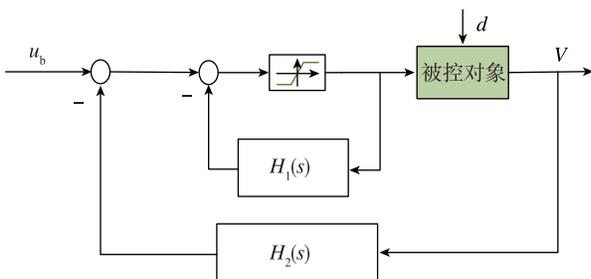


图 2 LESO 扰动补偿等效反馈结构

Fig. 2 Equivalent feedback loop for LESO disturbance compensation

综合式(4)~式(8),图 2 中反馈通道的传递函数分别为:

$$H_1(s) = \frac{a_0 s^2 + (b_0 + a_0 \beta_{01})s - \beta_{03}}{s^3 + \beta_{01}s^2 + \beta_{02}s + \beta_{03}} \quad (9)$$

$$H_2(s) = \frac{(a_0 \beta_{02} + b_0 \beta_{01} + \beta_{03})s^2 + (a_0 \beta_{03} + b_0 \beta_{02})s + b_0 \beta_{03}}{K(s^3 + \beta_{01}s^2 + \beta_{02}s + \beta_{03})} \quad (10)$$

根据图 2,LESO 状态反馈补偿后,式(4)描述的不确定性系统转换为:

$$G_P^{LESO}(s) = \frac{G_P}{1 + H_1 + G_P H_2} \quad (11)$$

假定具有足够的观测带宽,经过扰动补偿和状态反馈后,式(4)描述的不确定被控对象理想形式如式(12)所示。

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = Ku_b - a_0 x_2 - b_0 x_1 \\ y = x_1 \end{cases} \quad (12)$$

随 LESO 估计状态的收敛,系统在稳态满足:

$$y(t) \Big|_{t \rightarrow \infty} = \frac{K}{b_0} u_b \quad (13)$$

2.2 速度指令前馈补偿控制器设计

为达到系统对速度指令的良好跟踪,设计指令前馈补偿控制如下:

$$u_b = G_A \cdot G_{pc}(s) \quad (14)$$

$$\begin{cases} G_A = \frac{b_0}{K} \\ G_{pc} = \frac{1 + \alpha T_c s}{1 + T_c s} \end{cases} \quad (15)$$

前馈控制 u_b 中,第一项 G_A 为回路增益补偿项,用于实现对 LESO 反馈补偿后确定性系统稳态增益的补偿;第二项 G_{pc} 为在不损失系统稳定鲁棒性的前提下,为进一步改善闭环响应特性增加的指令调理环节。

2.3 复合控制输出

复合控制输出即为速度控制中对发动机油门的实时调节指令 δ_{Tc} , 由基于 LESO 的状态反馈补偿控制量 u_d 与指令前馈补偿量 u_b 两部分组成。

$$\delta_{Tc} = u_b + u_d \quad (16)$$

3 性能分析与仿真

选取设计点发动机调节时间常数 $T_c = 2.5$ 、速度模型传递系数 $b = 0.45$, 取控制参数 $\omega_{nc} = 0.15 \text{ rad/s}$ 、 $\xi_c = 1.0$ 、 $\omega_o = 5 \text{ rad/s}$ 、 $T_c = 13.0322$ 、 $\alpha = 0.589$ 。通过 LESO 状态反馈补偿后,式(4)中描述

的不确定性系统开环频域特性如图 3 所示,在 LESO 补偿回路的基础上,加入前馈补偿环节,速度控制闭环阶跃响应如图 4 所示。

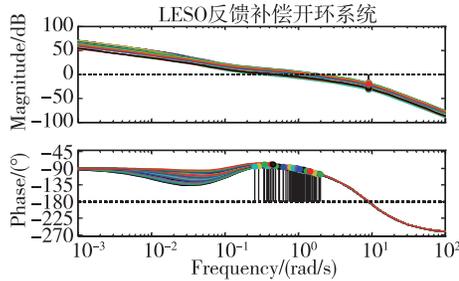


图 3 LESO 反馈补偿后的速度开环频域特性
Fig. 3 Open-loop frequency domain responses after LESO state feedback compensation

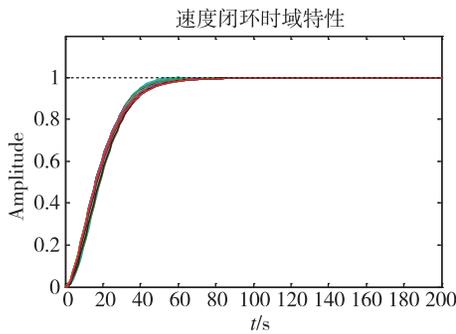


图 4 速度闭环阶跃响应
Fig. 4 Closed-loop step responses of airspeed control system

由图 3 可以看出,通过引入 LESO 状态补偿反馈,系统开环在低频段具有足够高的增益,可确保系统具有良好的稳态性能;同时,在全设计剖面内系统具有良好的动态性能,相位裕度均不低于 75° ,幅值裕度裕度不低于 15dB。图 4 表明速度闭环系统在各状态点具有较好的指令跟踪性能,系统过渡段具有良好的阻尼特性,系统表现出较强的鲁棒性。

无人机在飞行过程中不可避免地会受到各种干扰,如紊流、突风等复杂环境^[9],同时需要进行爬升、下滑等机动飞行,需要评估分析基于 LESO 状态反馈的速度控制回路在各种干扰条件下(如减速板、襟翼构型变换对控制模型的偏离干扰,纵向高度变化带来的势能动能转换干扰,外部环境风干扰等情况)的响应特性。

图 1 中,外部干扰 d 一般表现为由升阻特性变化、高度势能迁移导致的低频模型不确定性干扰,而环境及测量噪声 n 则表示由大气数据系统在扰动风场中感受到的高频脉动量信息。考虑不同的 LESO

观测器带宽 ω_o ($\omega_o = 2\text{rad/s}, 5\text{rad/s}, 10\text{rad/s}$),在典型扰动作用下,系统工作特性如图 5、图 6 所示。

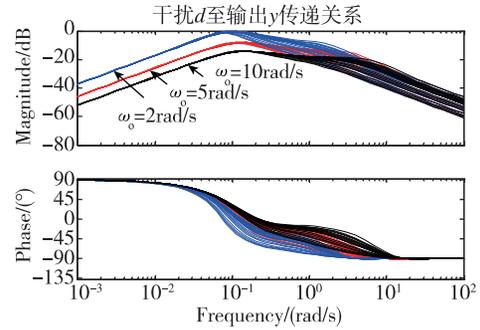


图 5 不同观测带宽下干扰 d 对控制输出 V 影响特性
Fig. 5 Relationship between d and V with different ω_o

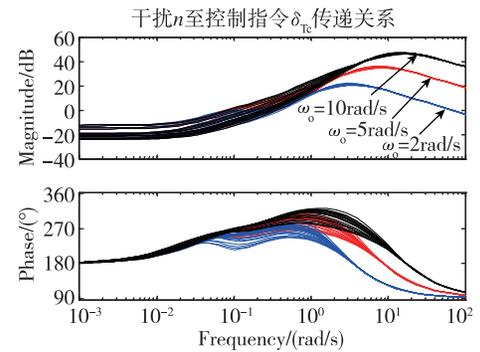


图 6 不同观测带宽下测量噪声 n 对控制输入 δ_{τ_c} 影响特性
Fig. 6 Relationship between n and δ_{τ_c} with different ω_o

由图 5 可以看出,在 LESO 动态观测与实时补偿的作用下,控制输出对于低频模型不确定性干扰不敏感,表明控制回路可以快速抑制由于无人机构型变化、高度机动等对于速度控制的影响,使速度输出具有强鲁棒性;随观测器带宽 ω_o 的增大,LESO 对干扰状态的估计和补偿更为迅速及时,表现出对扰动的抑制作用增强。由图 6 可以看出,经过状态反馈补偿环节后,低频测量噪声对发动机油门指令的影响不大;随着噪声频率的增加,在观测带宽 ω_o 附近可使控制输入指令产生波动,且随 ω_o 的增大而变得更为敏感,根据 Bode 积分定理^[10-11],主要由于速度控制输出鲁棒性的增强,回路调节对输出变化更为敏感,为使发动机在随机风扰动环境中推力平静,可采用低通滤波或使用纵向加速度组合滤波提升参控信号品质。

结合某型无人机非线性模型进行六自由度仿真验证,仿真 700s 时,在无人机平飞过程中加入突风干扰,突风干扰采用符合 MIL-F-8785C 的 $1-\cos$ 模型;仿真 1960s 时,无人机进行下滑机动,速度控制的

同时进行减速控制;仿真 2660~2730s 之间时,在无人机着陆进场段完成襟翼下拉、减速板张开以及起落架放下等构型变换动作;在仿真 3200s 后,无人机进行着陆减速、下滑以及减速板角度变换等动作。以上条件下,仿真结果如图 7~图 9 所示。

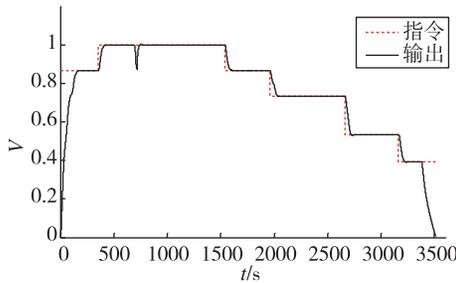


图 7 无人机速度变化曲线

Fig. 7 Response curve of UAV airspeed

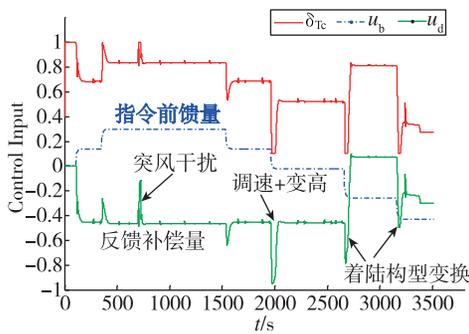


图 8 发动机油门状态及组成参数变化曲线

Fig. 8 Response curve of engine work state and component parameters

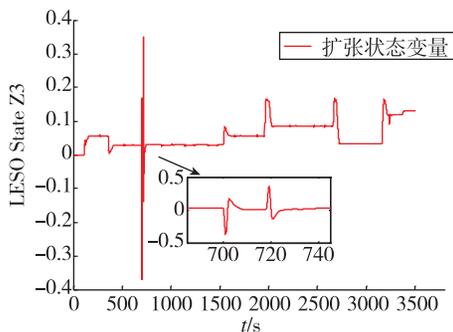


图 9 LESO 扩张状态变量

Fig. 9 Curve of LESO extended state variable

由仿真结果可以看出,控制回路可以稳定跟踪给定的速度指令,由于 LESO 对系统状态的实时观测与补偿,可以快速抑制飞行过程中施加的环境突风干扰、高度机动及起降构型变换对速度调节的影响。

4 结论

本文针对无人机速度回路受飞行机动动作、构型变换及外界环境变化等干扰因素影响较大的问题,采用 LESO 对各项不确定性干扰进行实时估计与动态补偿,并在此基础上加入指令前馈补偿,以获得良好的跟踪性能。通过性能分析与仿真表明,通过引入 LESO 状态补偿反馈,可确保系统具有良好的稳态与动态性能,可以快速抑制由于无人机构型变化、高度机动等干扰因素对速度控制的影响,系统表现出较强的鲁棒性。

参考文献

- [1] 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(s1): 1-5.
- [2] 袁博,杨军. 无人机空中加油自主会合制导律研究[J]. 导航定位与授时 2015,2(1):6-10.
- [3] 韩维,陈志刚,张勇,等. 基于 LESO 的无人机飞行姿态动态逆控制[J]. 飞行力学,2018,36(1):43-44.
- [4] Gao Z. Active disturbance rejection control: a paradigm in feedback control system design [C]// Proceedings of the American Control Conference. Minneapolis, Minnesota, 2006:2399-2405.
- [5] 曲东才,曹栋,刘爱元,等. 基于升降舵控制的飞机飞行速度控制系统仿真[J]. 海军航空工程学院学报, 2012,27(2):138-142.
- [6] Enomoto K, Yamasakiy T, Takano H, et al. A study on a velocity control system design using the dynamic inversion method [C]// Proceedings of the American Institute of Aeronautics and Astronautics Guidance, Navigation, and Control Conference. 2010:1-15.
- [7] Zhang D, Wang X. Autonomous Landing control of fixed-wing UAVs: from theory to field experiment [J]. Journal of Intelligent & Robotic Systems, 2017, 88(2-4):619-634.
- [8] Gao Z. Active disturbance rejection control: from an enduring idea to an emerging technology [C]// Proceedings of the 10th International Workshop on Robot Motion and Control. Poznan Poland, 2015:269-282.
- [9] 周健,王新民,魏宏坤. 紊流风场下的无人机飞行状态卡尔曼滤波估计[J]. 飞行力学,2012,30(2):125-127.
- [10] Gunter Stein. Respect the unstable [J]. IEEE Control Systems Magazine, 2003,23(4):12-25.
- [11] 何朕,王广雄,张静,等. 控制系统的脆弱性分析[J]. 控制理论与应用,2013,30(1):95-99.