



RflySim 底层飞行控制算法 开发系列课程

第九讲 姿态控制器设计实验拓展 ——基于ADRC的姿态控制器设计



大纲

1. ADRC的提出
2. ADRC的结构及参数整定
3. ADRC在多旋翼姿态控制中的应用实例
4. 控制器调试





ADRC的提出

把系统的模型作用当做系统的内扰，那么它连同系统的外扰一起，均可作为对系统的扰动。这个补偿分量并不区分内扰和外扰，直接检测并补偿他们的总和作用——对系统的总扰动。由于这个分量的补偿作用，被控对象实际上被化成积分器串联型而易于构造出理想的控制器，这个补偿分量的补偿作用实质上是一种抗扰作用。因此我们将此控制器称为“自抗扰控制器”（ADRC）。

韩京清. 自抗扰控制器及其应用. 控制与决策, 1998, 13 (1) : 19-23.



ADRC的提出

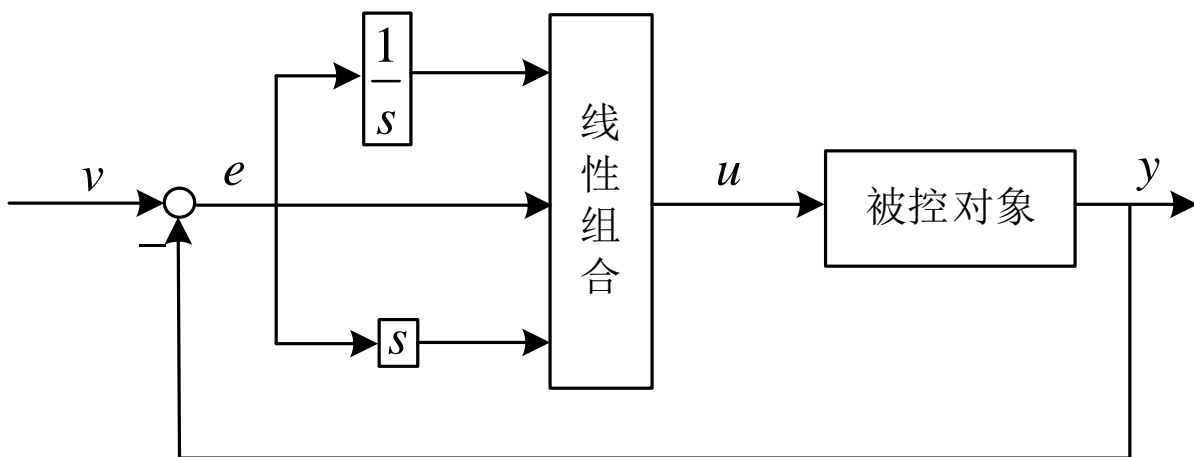


图. PID基本结构

PID控制器的缺陷：

- 直接接取目标与实际行为之间的误差并不是完全合理的。控制目标是在过程中可以“跳变”，但是对象输出 y 的变化都有惯性，不可能跳变，要求让缓变的变量 y 来跟踪能够跳变的变量 v 本身就不合理。
- 产生误差信号的微分信号没有太好的办法。控制界有一个紧箍咒——微分器物理不可实现，只能近似实现。PID 控制器除特殊情形之外，实际上都是 PI 控制器。





ADRC的提出

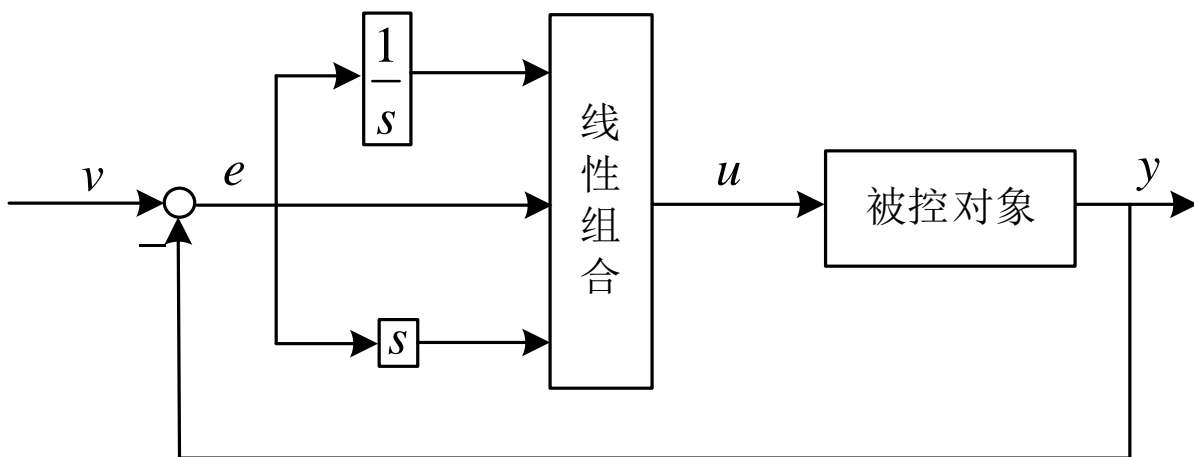


图. PID基本结构

PID控制器的缺陷：

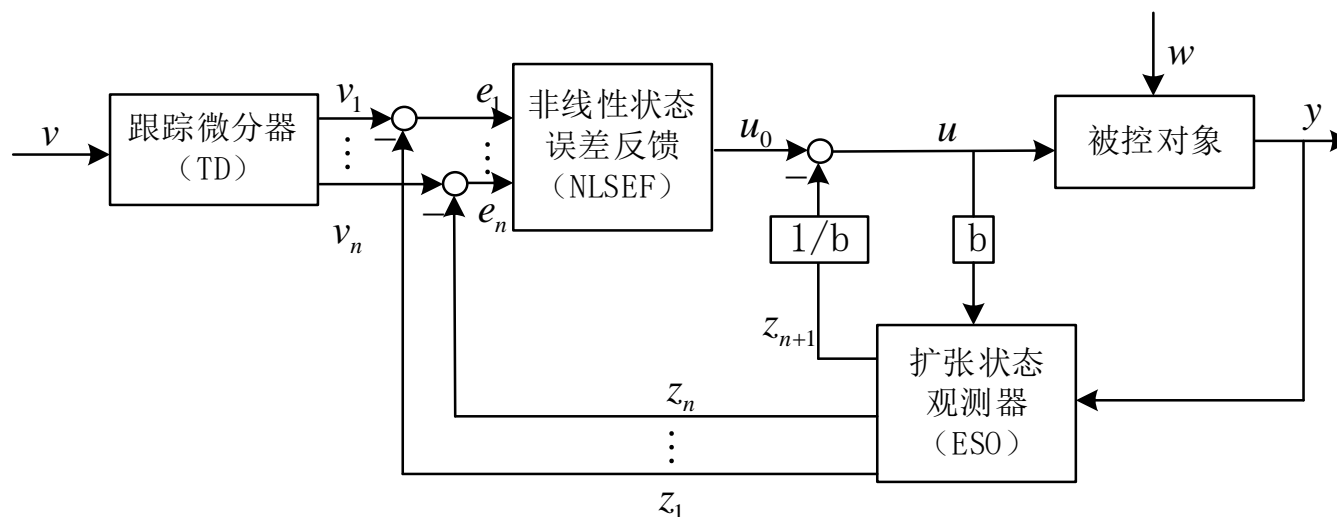
- 线性组合不一定是最好的组合方式。PID控制器给出的控制量是误差的现在、误差的过去、误差的将来三者的加权和,是这三者的线性组合。大量工程实践表明,三者的线性组合不一定是最好的组合方式。
- 误差信号的积分反馈的引入有很多负作用。大量工程实践表明,误差积分反馈的引入,使闭环变得迟钝,容易产生振荡,积分饱和引起的控制量饱和等。





ADRC的结构及参数整定

PID控制器的缺陷	解决方法
直接接取目标与实际行为之间的误差并不是完全合理的	安排过渡过程和微分信号提取
产生误差信号的微分信号没有太好的办法	
线性组合不一定是最好的组合方式	非线性状态误差反馈
误差信号的积分反馈的引入有很多负作用	扩张状态观测器



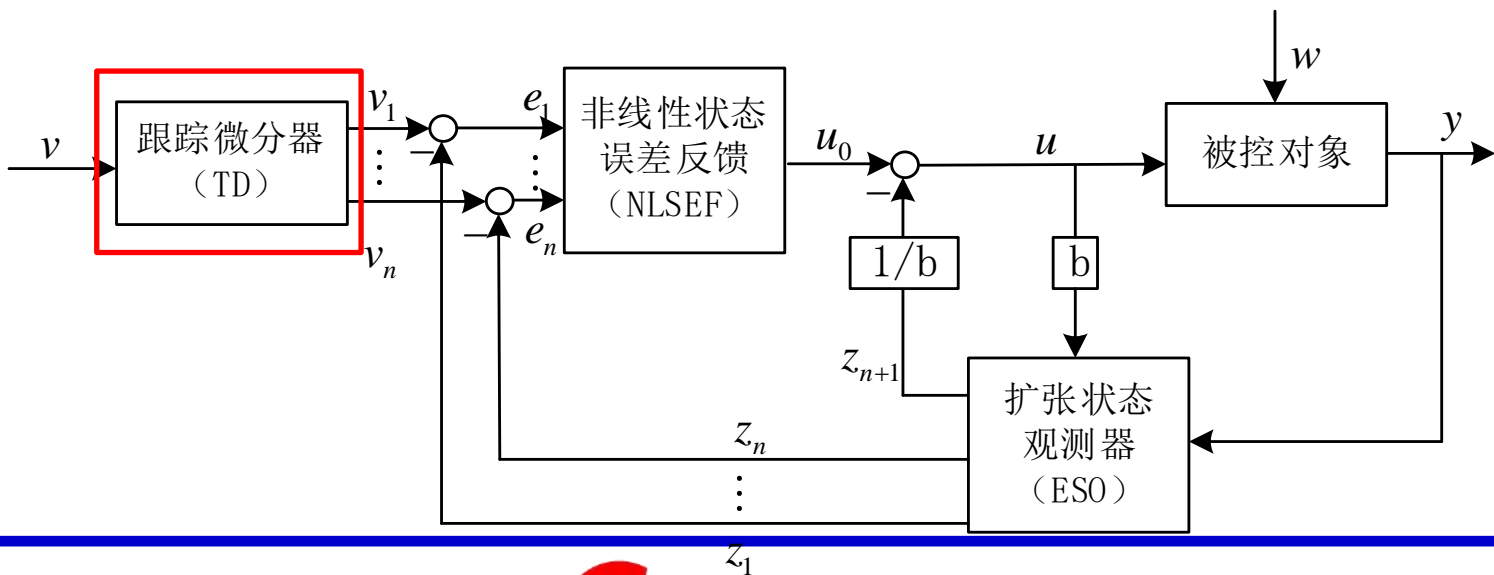


ADRC的结构及参数整定

□ 安排过渡过程和微分信号提取

(1) 定义及作用

期望值经过跟踪微分器 (TD) 会输出一个变化相对较慢且时刻跟踪期望值的过渡信号。被控对象时刻跟踪这个过渡信号，这样不仅可以解决超调与快速性矛盾，还可以使误差反馈增益和误差微分反馈增益的选取范围扩大，增强控制器的鲁棒性。另一方面TD可以得到输入的微分信号。





ADRC的结构及参数整定

□ 安排过渡过程和微分信号提取

(2) 跟踪微分器形式

二阶跟踪微分器的离散形式如下：

$$\begin{cases} u = fhan(v_1(k) - v(k), v_2(k), r, h_0) \\ v_1(k+1) = v_1(k) + hx_2(k) \\ v_2(k+1) = v_2(k) + hu \end{cases}$$

r 为可调参数， h 为控制器的执行周期，

$fhan(x_1, x_2, r, h_0)$ (最速反馈函数) 的表达式如下：

$$\begin{cases} d = rh_0^2 \\ a_0 = h_0x_2 \\ y = x_1 + a_0 \\ a_1 = \sqrt{d(d + 8|y|)} \\ a_2 = a_0 + \text{sign}(y)(a_1 - d) / 2 \\ a = (a_0 + y)\text{fsg}(y, d) + a_2(1 - \text{fsg}(y, d)) \\ u = -r(a / d)\text{fsg}(a, d) - r\text{sign}(a)(1 - \text{fsg}(a, d)) \end{cases}$$

其中 $\text{fsg}(x, d) = (\text{sign}(x + d) - \text{sign}(x - d)) / 2$



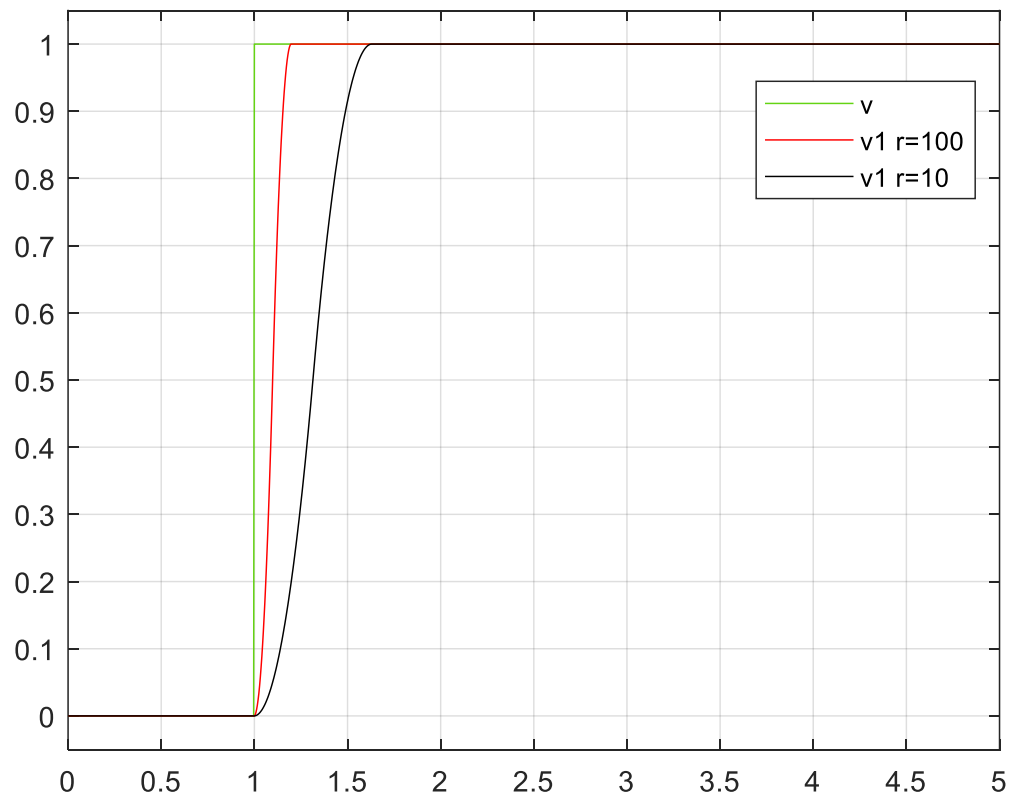
ADRC的结构及参数整定

□ 安排过渡过程和微分信号提取

(3) 参数性质

- r 越大，越快达到设定值，因此 r 被称为**速度因子**。
- 在 r 的限制下，这个方法对目标的跟踪是**时间最优**的。

$$\begin{cases} u = fhan(v_1(k) - v(k), v_2(k), r, h_0) \\ v_1(k+1) = v_1(k) + hx_2(k) \\ v_2(k+1) = v_2(k) + hu \end{cases}$$





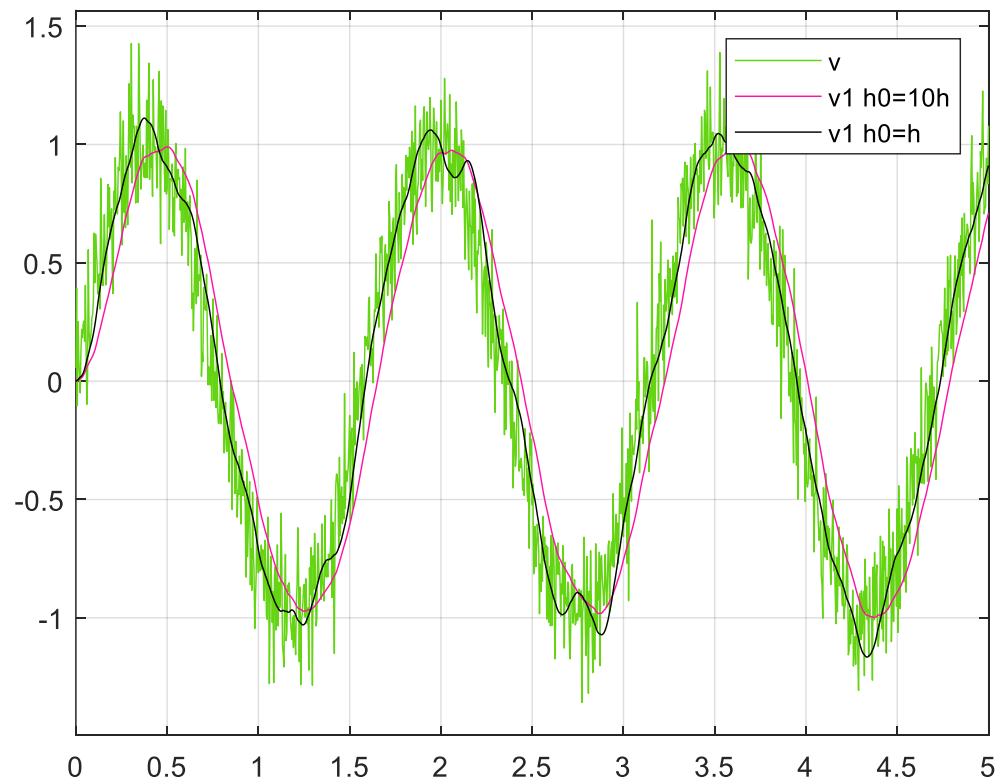
ADRC的结构及参数整定

□ 安排过渡过程和微分信号提取

(3) 参数性质

- 步长 h 越小对噪声抑制作用越强，当步长 h 确定时，增大 h_0 也能提高对噪声的抑制能力。

$$\begin{cases} u = fhan(v_1(k) - v(k), v_2(k), r, h_0) \\ v_1(k+1) = v_1(k) + hx_2(k) \\ v_2(k+1) = v_2(k) + hu \end{cases}$$



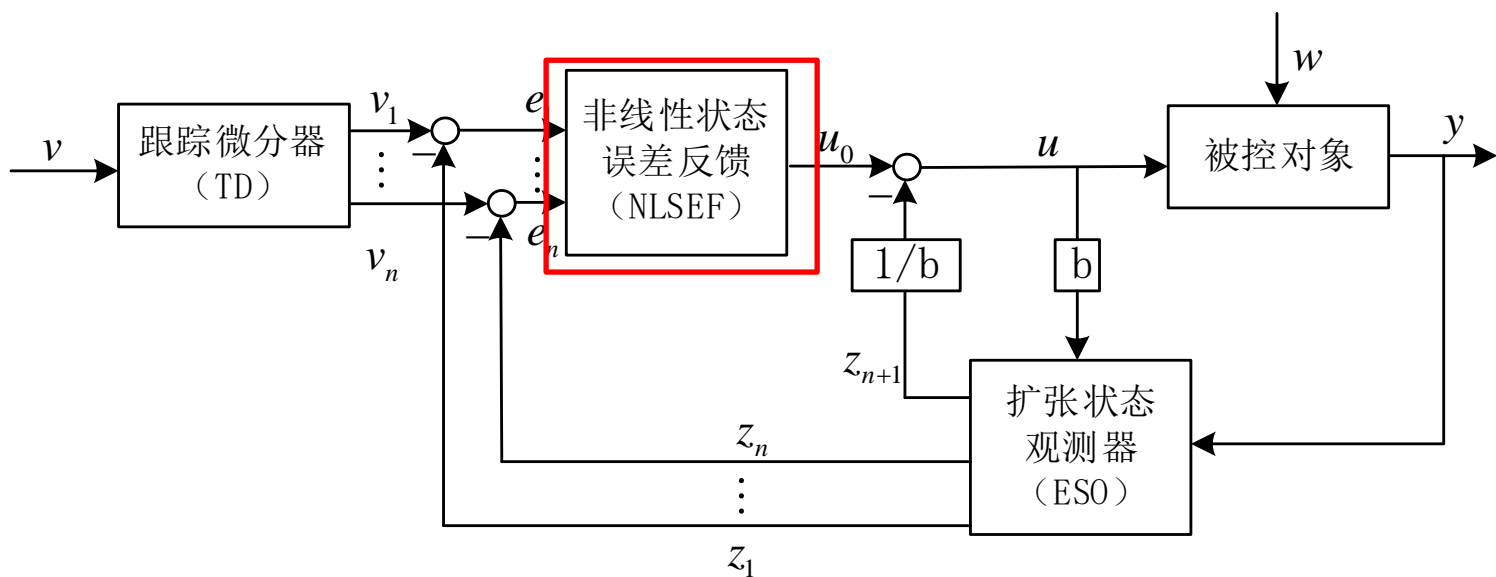


ADRC的结构及参数整定

□ 非线性状态误差反馈

(1) 定义及作用

反馈系统中有意识的引入合适的非线性结构，特别是非光滑结构，将显著改善闭环系统的动态特性。





ADRC的结构及参数整定

□ 非线性状态误差反馈

(2) 非线性状态误差反馈结构

对二阶纯积分器串联系统

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = u, |u| < r \end{cases}$$

使用如下反馈控制量

$$\begin{cases} e_1 = v_1 - z_1, e_2 = v_2 - z_2 \\ u_0 = -\text{fhan}(e_1, ce_2, r, h_1) \end{cases}$$

$\text{fhan}(e_1, ce_2, r, h_1)$ 在最速反馈函数中进一步引入阻尼因子

$$\begin{cases} d = rh_0^2 \\ a_0 = h_0ce_2 \\ y = e_1 + a_0 \\ a_1 = \sqrt{d(d + 8|y|)} \\ a_2 = a_0 + \text{sign}(y)(a_1 - d) / 2 \\ a = (a_0 + y)\text{fsg}(y, d) + a_2(1 - \text{fsg}(y, d)) \\ u = -r(a / d)\text{fsg}(a, d) - r\text{sign}(a)(1 - \text{fsg}(a, d)) \end{cases}$$





ADRC的结构及参数整定

□ 非线性状态误差反馈

(3) 参数性质

$$\begin{cases} e_1 = v_1 - z_1, e_2 = v_2 - z_2 \\ u_0 = -\text{fhan}(e_1, ce_2, r, h_1) \end{cases}$$

r : 相当于PID中的P, 加大能加快响应速度, 过大可能导致超调和大幅震荡。

c : 相当于PID中的d, 减小 c 能加快响应速度, 太小会导致超调, 大幅振荡甚至发散。

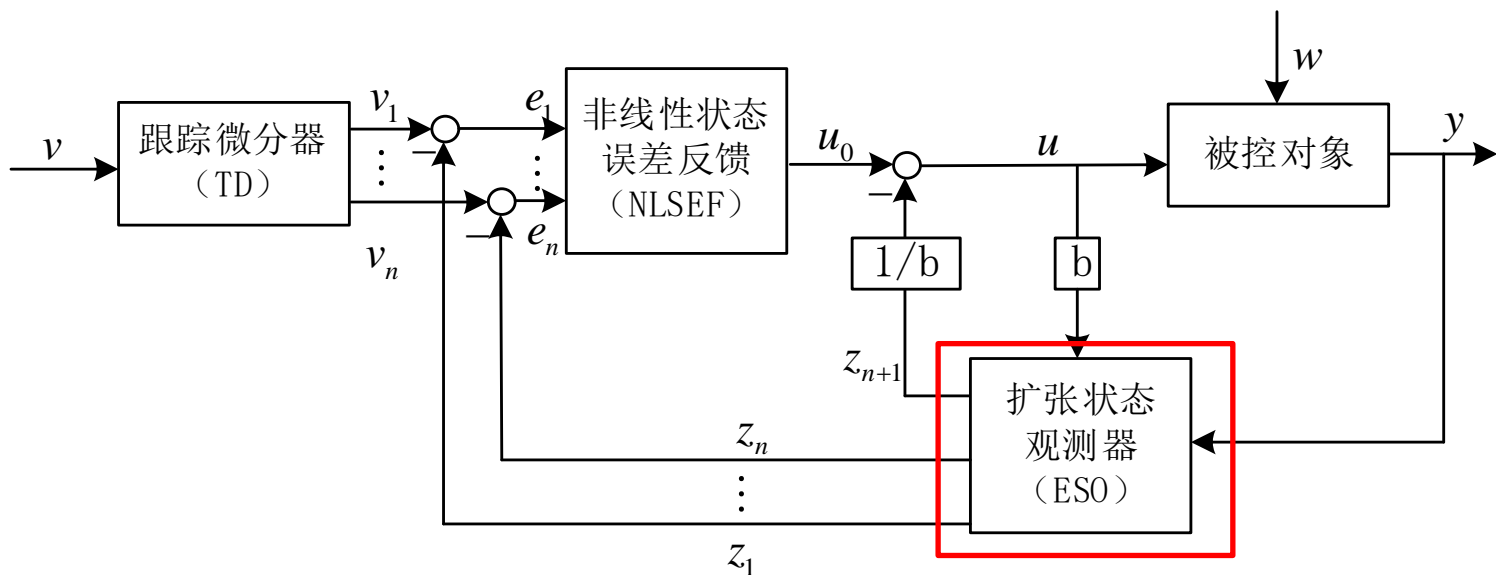


ADRC的结构及参数整定

□ 扩张状态观测器

(1) 定义及作用

自抗扰控制器的核心是扩张状态观测器 (ESO) 与扰动补偿。扩张状态观测器是将系统的各种扰动 (包括建模、未建模动态和外扰) 的总和观测出来, 并在控制量中添加总和扰动的补偿项, 将被控系统转换为简单的积分串联型结构, 运用简单的误差反馈控制策略就能实现对系统良好的控制效果。





ADRC的结构及参数整定

□ 扩张状态观测器

(2) 扩张状态观测器结构

对非线性系统

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = f(x_1, x_2) + bu, |u| < r \\ y = x_1 \end{cases}$$

我们把作用于开环系统的加速度 $f(x_1, x_2)$ 的实时作用量扩充成新的状态变量 x_3 , 记作 $x_3 = f(x_1, x_2)$ 并记 $\dot{x}_3 = w$ 。

那么系统可扩张成新的线性控制系统

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = \dot{x}_3 + bu, |u| < r \\ \dot{x}_3 = w \\ y = x_1 \end{cases}$$

对其建立观测器为

$$\begin{cases} e = z_1 - y, fe = \text{fal}(e, 0.5, \delta), fe_1 = \text{fal}(e, 0.25, \delta) \\ \dot{z}_1 = z_2 - \beta_{01}e \\ \dot{z}_2 = z_3 - \beta_{02}fe + bu \\ \dot{z}_3 = -\beta_{03}fe_1 \end{cases}$$





ADRC的结构及参数整定

□ 扩张状态观测器

(3) 参数性质

$$\begin{cases} e = z_1 - y, fe = \text{fal}(e, \alpha_1, \delta), fe_1 = \text{fal}(e, \alpha_2, \delta) \\ \dot{z}_1 = z_2 - \beta_{01}e \\ \dot{z}_2 = z_3 - \beta_{02}fe + bu \\ \dot{z}_3 = -\beta_{03}fe_1 \end{cases}$$

当 α 、 δ 确定，参数 β_{0i} 基本上与积分步长 h 有关，而积分步长 h 取决于被估计对象的函数 f 的作用范围。如果系统的变化比较灵敏而且快，那么要描述快速灵敏变化的运动，就需要比较小的积分步长。

δ 的取法对ESO的参数影响很大，如 δ 取大时，参数 β_{02} ， β_{03} 增大很多；相反 δ 取小时，参数 β_{02} ， β_{03} 减小很多。



ADRC的结构及参数整定

□ 扩张状态观测器

(3) 参数性质

参数 β_{01} ， β_{02} 和 β_{03} 对扩张状态观测器收敛速度有很大的影响。

- β_{01} 的值越大， z_1 跟踪对状态 y 的跟踪速度越快，通常它的大小和步长的倒数在同一数量级，而且在一定范围内变化对控制品质没有太大影响，但高于该数量级时观测器可能会发散。
- β_{02} 越大， z_2 对状态信号微分的跟踪速度越快，但是如果 β_{02} 太小会引起观测器振荡，过大会造成系统产生高频噪声。
- β_{03} 的大小会对扰动的估计很大影响， β_{03} 越大对扰动估计也就越快，但是太大会造成系统振荡。

ESO的参数 β_{01} ， β_{02} ， β_{03} 与 h 的近似关系：

$\delta=h$ 时

$$\beta_{01} \approx \frac{1}{h}, \beta_{02} \approx \frac{1}{1.6h^{1.5}}, \beta_{03} \approx \frac{1}{8.6h^{2.2}}$$

$\delta=5h$ 时

$$\beta_{01} \approx \frac{1}{h}, \beta_{02} \approx \frac{1}{2.4h^2}, \beta_{03} \approx \frac{1}{15.5h^3}$$





ADRC设计实例

针对如图所示四旋翼，其姿态动力学模型为：

$$\dot{\Theta} = \mathbf{W} \cdot \boldsymbol{\omega}$$

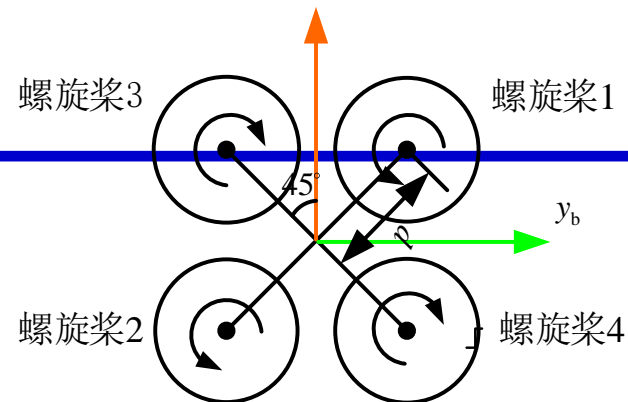
$$\mathbf{J} \dot{\boldsymbol{\omega}} = -\boldsymbol{\omega} \times (\mathbf{J} \cdot \boldsymbol{\omega}) + \mathbf{M} + \mathbf{d}$$

其中 $\Theta \triangleq [\phi \ \theta \ \psi]^T$ 为欧拉角， $\boldsymbol{\omega} \in \mathbb{R}^3$ 是机体系下的角速度， $\mathbf{J} \in \mathbb{R}^{3 \times 3}$ 表示多旋翼的转惯量；

$\mathbf{M} \in \mathbb{R}^3$ 表示总力矩，并且有 $\mathbf{M} = \mathbf{G}_a + \boldsymbol{\tau} + \mathbf{M}_d$ ， $\mathbf{G}_a \in \mathbb{R}^3$ 表示陀螺力矩， $\boldsymbol{\tau} \in \mathbb{R}^3$ 表示螺旋桨在机体轴上产生的力矩， $\mathbf{M}_d \in \mathbb{R}^3$ 表示气动力矩。 $\mathbf{d} \in \mathbb{R}^3$ 表示外部扰动。 \mathbf{W} 的形式如下

$$\mathbf{W} = \begin{bmatrix} 1 & \tan \theta \sin \phi & \tan \theta \cos \phi \\ 0 & \cos \phi & -\sin \phi \\ 0 & \sin \phi / \cos \theta & \cos \phi / \cos \theta \end{bmatrix}$$

在小角度假设下有 $\mathbf{W} = \mathbf{I}_{3 \times 3}$ 。





ADRC设计实例

四旋翼姿态动力学模型变为：

$$\dot{\Theta} = \omega$$

$$\dot{\omega} = f(\omega, \mathbf{G}_a, \mathbf{M}_d, \mathbf{d}) + \mathbf{J}^{-1}\boldsymbol{\tau}$$

$f(\omega, \mathbf{G}_a, \mathbf{M}_d, \mathbf{d})$ 表示内部扰动和外部扰动的和。

这里分别对三个欧拉角设计ADRC控制器。
以横滚角为例，若令

$$x_1 = \phi, x_2 = \omega_x, x_3 = f(\omega, \mathbf{G}_{a_x}, \mathbf{M}_{d_x}, \mathbf{d}_x), b = \mathbf{J}_x^{-1}, u = \boldsymbol{\tau}_x$$

将上式表述的二阶系统扩维成三阶系统，则有

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = x_2 \\ \dot{x}_2 = x_3 + bu \\ \dot{x}_3 = w(t) \\ y = x_1 \end{cases}$$

对其设计状态观测器为

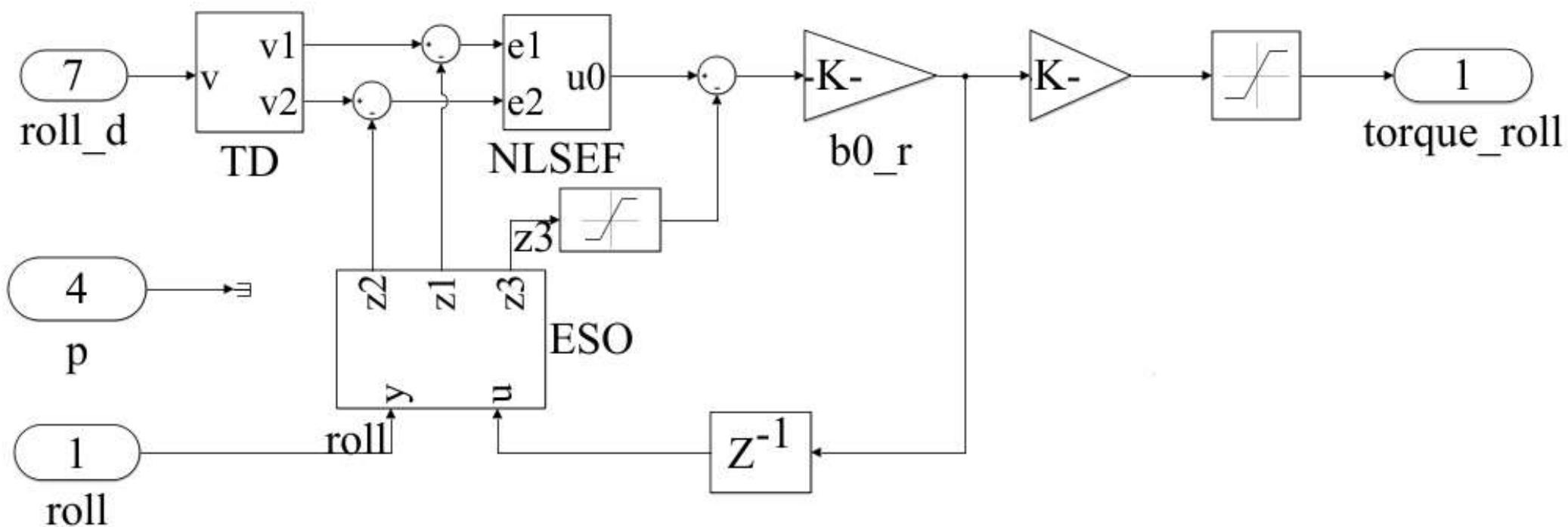
$$\begin{cases} e = z_1 - y \\ \dot{z}_1 = z_2 - \beta_{01}e \\ \dot{z}_2 = z_3 - \beta_{02}fal(e, 0.5, \delta) + bu \\ \dot{z}_3 = -\beta_{03}fal(e, 0.25, \delta) \end{cases}$$





ADRC设计实例

Simulink模型：





ADRC设计实例

实例操作步骤见“[RflySim3D\Exp02_FlightControl\e5-AttitudeCtrl\e5.5-ADRC\readme.docx](#)”



谢谢！