



---

# 多旋翼飞行器设计与控制 实践

## 姿态控制器设计实验拓展 ——基于ADRC的姿态控制器设计

王帅

wsh\_buaa@buaa.edu.cn

自动化科学与电气工程学院

北京航空航天大学



# 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

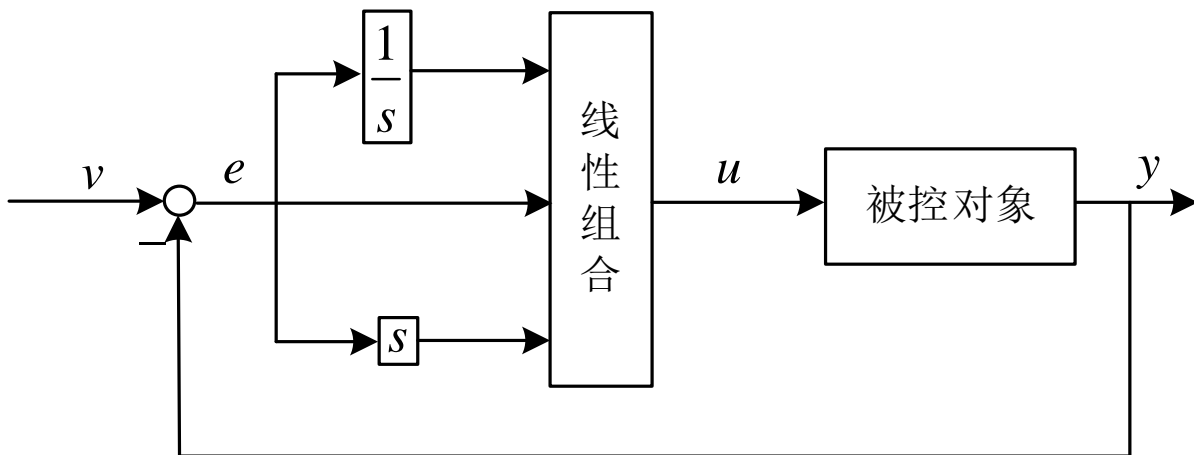


图. PID基本结构

## 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。

韩京清. 自抗扰控制技术[J]. 前沿科学, 2007(01):25-32.



# ADRC的提出

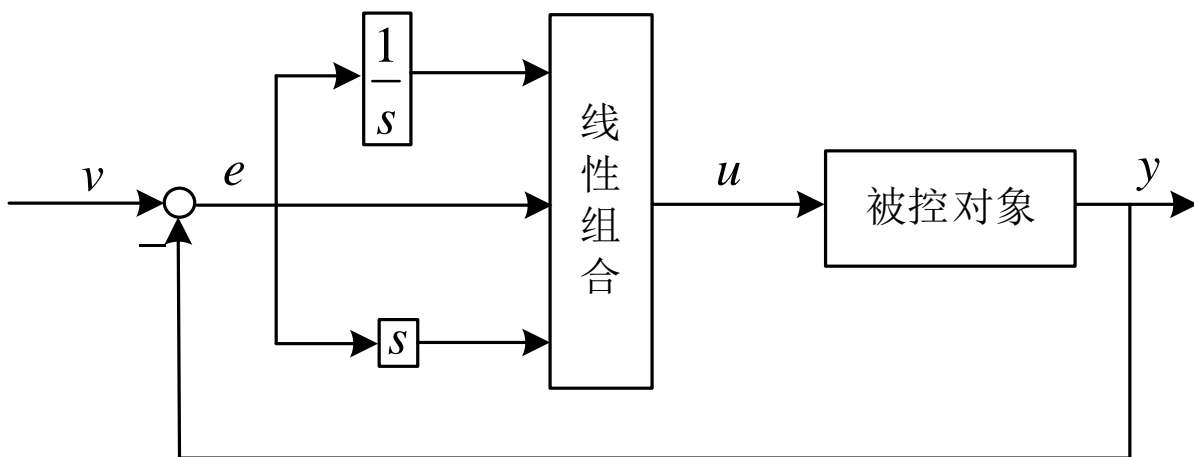


图. PID基本结构

## PID控制器的缺陷：

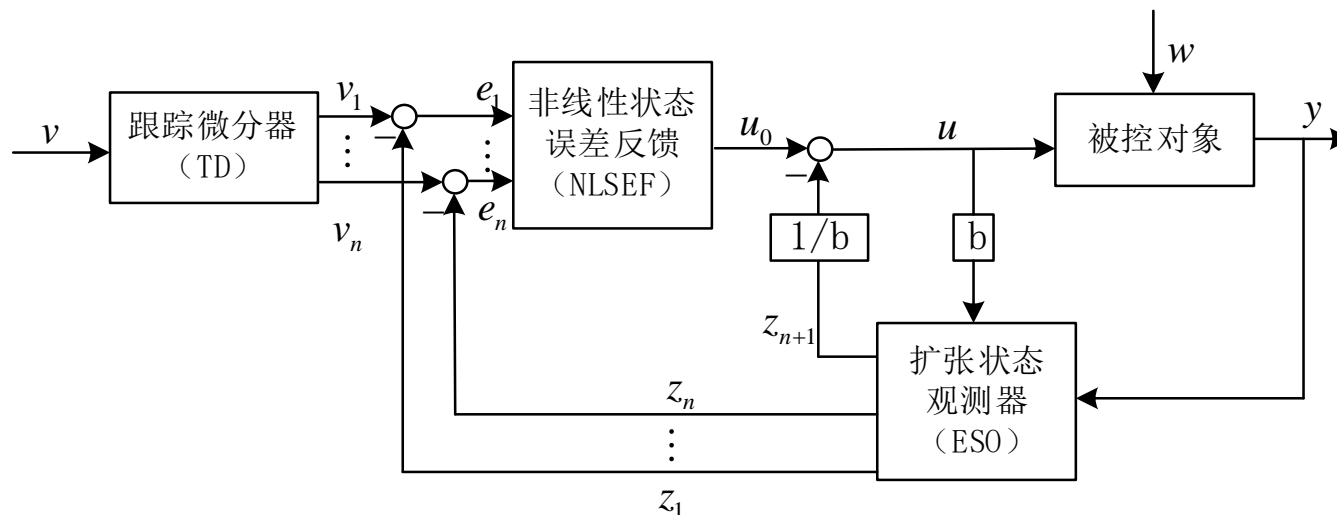
- 线性组合不一定是最好的组合方式。PID控制器给出的控制量是误差的现在、误差的过去、误差的将来三者的加权和,是这三者的线性组合。大量工程实践表明,三者的线性组合不一定是最好的组合方式。
- 误差信号的积分反馈的引入有很多副作用。大量工程实践表明,误差积分反馈的引入,使闭环变得迟钝,容易产生振荡,积分饱和引起的控制量饱和等。

韩京清. 自抗扰控制技术[J]. 前沿科学, 2007(01):25-32.



# 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



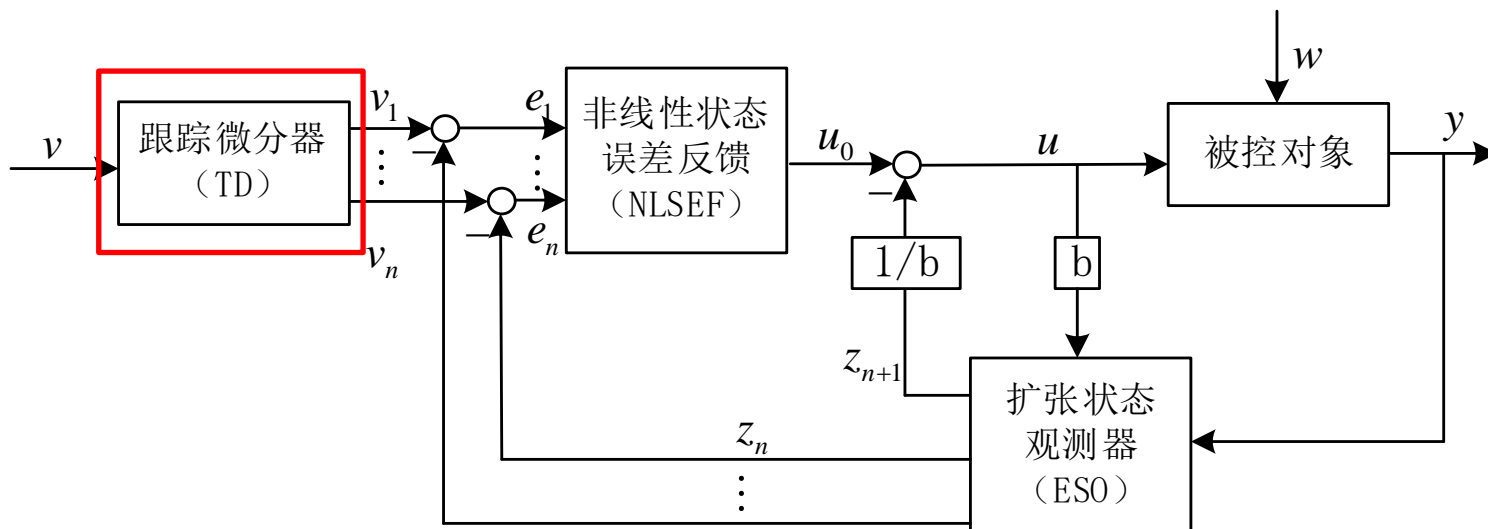


# ADRC的结构及参数整定

## □ 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：

$$\begin{cases} u = fhan(v_1(k) - v(k), v_2(k), r, h_0) \\ v_1(k+1) = v_1(k) + hv_2(k) \\ v_2(k+1) = v_2(k) + hu \end{cases}$$

$r$ 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：

$$\begin{cases} d = rh_0^2 \\ a_0 = h_0 x_2 \\ y = x_1 + a_0 \\ a_1 = \sqrt{d(d + 8|y|)} \\ a_2 = a_0 + \text{sign}(y)(a_1 - d) / 2 \\ a = (a_0 + y)\text{fsg}(y, d) + a_2(1 - \text{fsg}(y, d)) \\ u = -r(a / d)\text{fsg}(a, d) - r\text{sign}(a)(1 - \text{fsg}(a, d)) \end{cases}$$

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





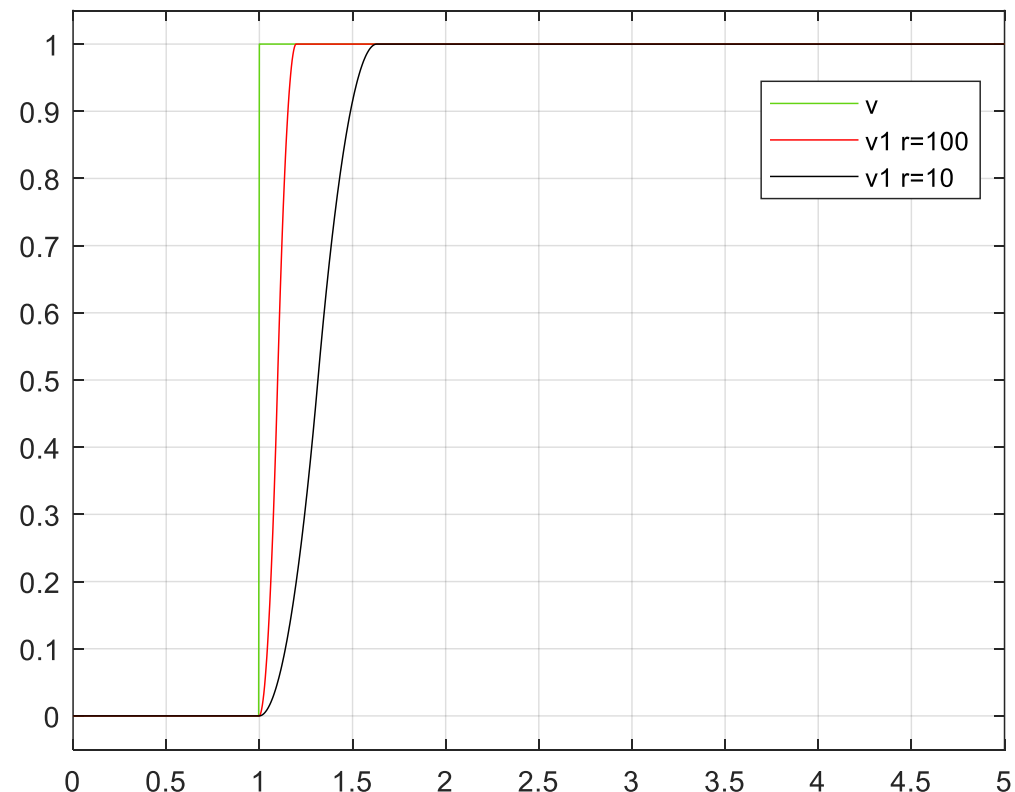
# ADRC的结构及参数整定

## □ 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。

$$\begin{cases} u = fhan(v_1(k) - v(k), v_2(k), r, h_0) \\ v_1(k+1) = v_1(k) + hv_2(k) \\ v_2(k+1) = v_2(k) + hu \end{cases}$$





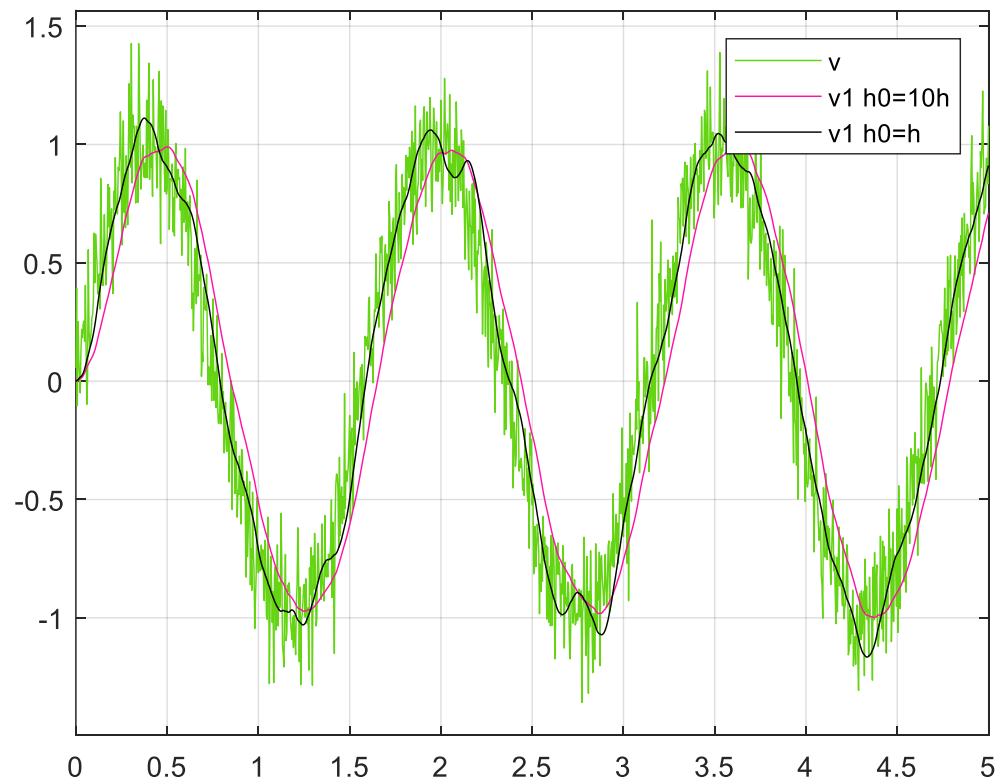
# ADRC的结构及参数整定

## □ 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。

$$\begin{cases} u = fhan(v_1(k) - v(k), v_2(k), r, h_0) \\ v_1(k+1) = v_1(k) + hv_2(k) \\ v_2(k+1) = v_2(k) + hu \end{cases}$$



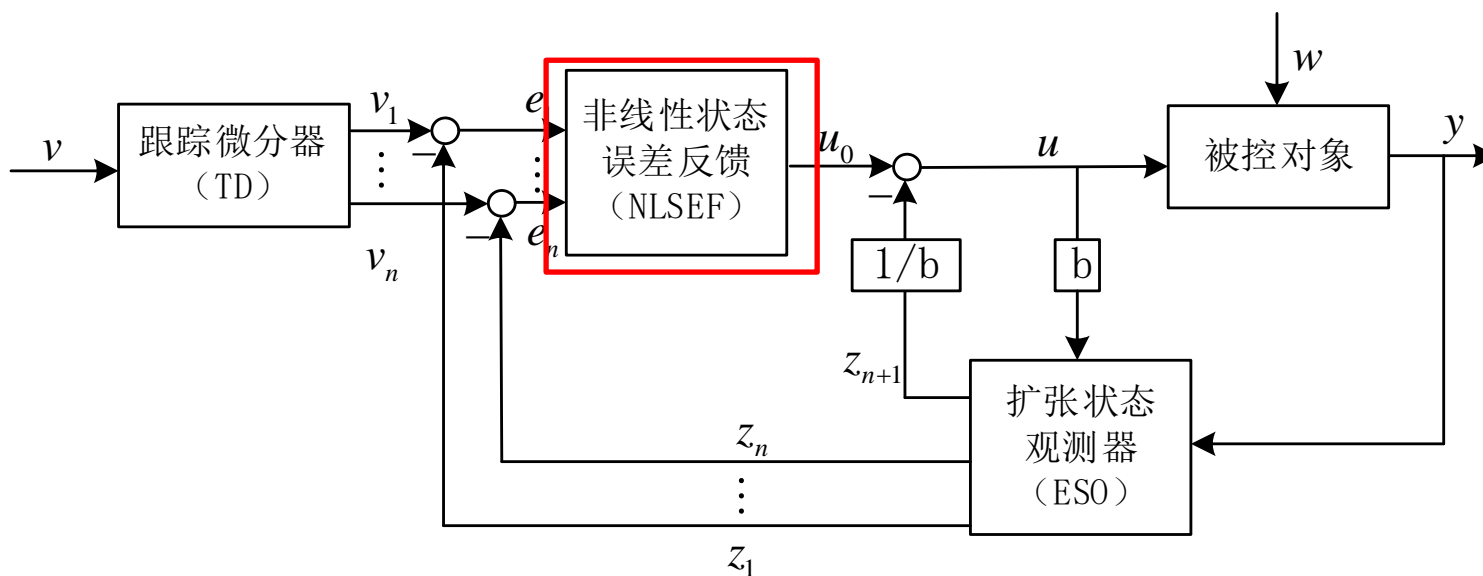


# ADRC的结构及参数整定

## □ 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。

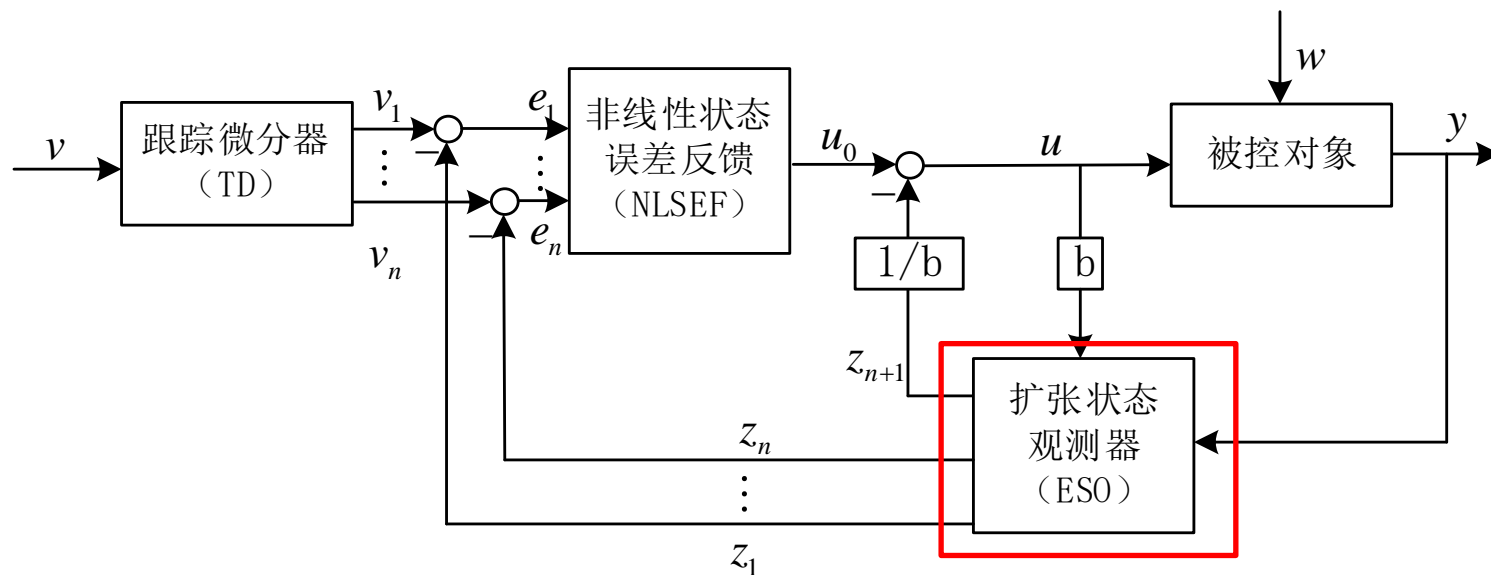


# ADRC的结构及参数整定

## □ 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

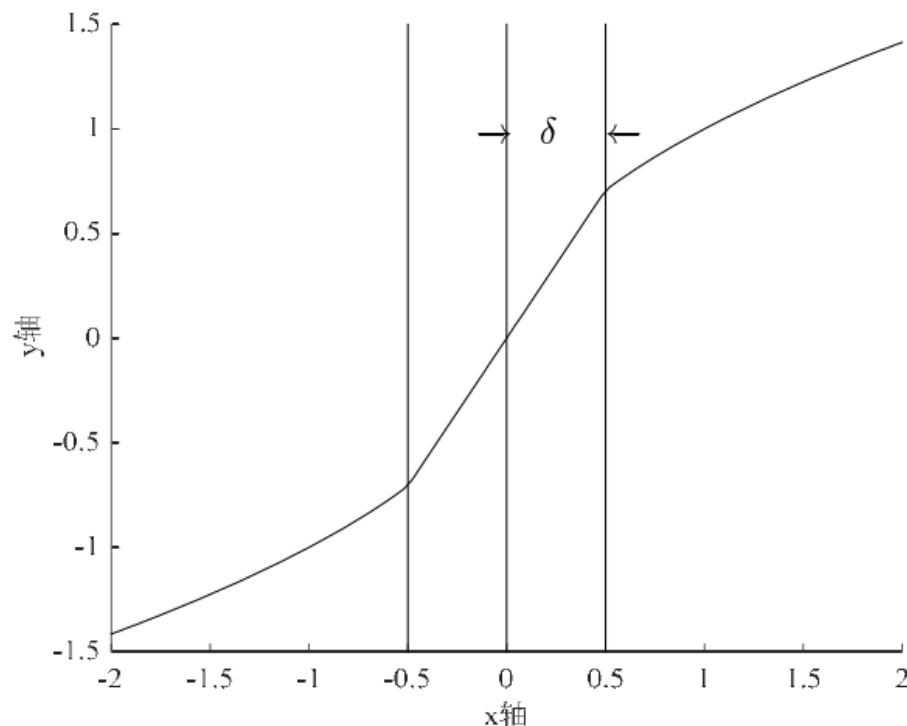
## □ 扩张状态观测器

### (2) 扩张状态观测器结构

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

其中

$$\text{fal}(e, \alpha, \delta) = \begin{cases} |e|^\alpha \text{sign}(e), |e| > \delta \\ \frac{e}{\delta^{\alpha-1}}, |e| \leq \delta \end{cases}$$



$\delta$ 越大，线性区间的宽度越大。 $\delta$ 过大，fal函数基本工作在线性区，对非线性信号的逼近能力变弱；如果过小，在原点附近容易引发高频震荡。 $\delta$ 一般取3h~10h.







# 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 $\alpha$ 、 $\delta$ 确定，参数 $\beta_{0i}$ 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。

$\delta$ 的取法对ESO的参数影响很大，如 $\delta$ 取大时，参数 $\beta_{02}$ ， $\beta_{03}$ 增大很多；相反 $\delta$ 取小时，参数 $\beta_{02}$ ， $\beta_{03}$ 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 $\beta_{01}$ ， $\beta_{02}$ 和 $\beta_{03}$ 对扩张状态观测器收敛速度有很大的影响。

- $\beta_{01}$  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。
- $\beta_{02}$  越大， $z_2$ 对状态信号微分的跟踪速度越快，但是如果 $\beta_{02}$ 太小会引起观测器振荡，过大会造成系统产生高频噪声。
- $\beta_{03}$  的大小会对扰动的估计很大影响， $\beta_{03}$  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 $\beta_{01}$ ， $\beta_{02}$ ， $\beta_{03}$ 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：

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

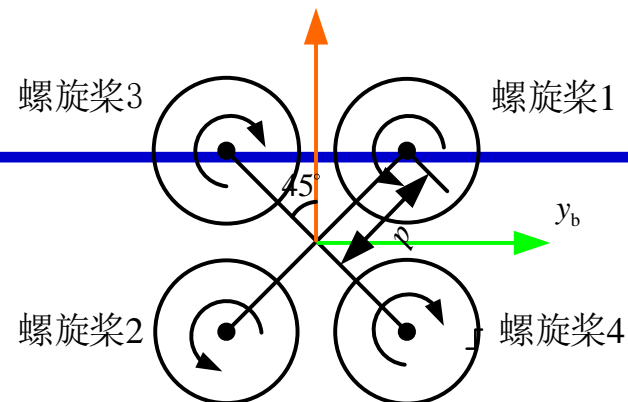
$$\mathbf{J} \dot{\boldsymbol{\omega}} = -\boldsymbol{\omega} \times (\mathbf{J} \cdot \boldsymbol{\omega}) + \mathbf{M} + \mathbf{d}$$

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

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

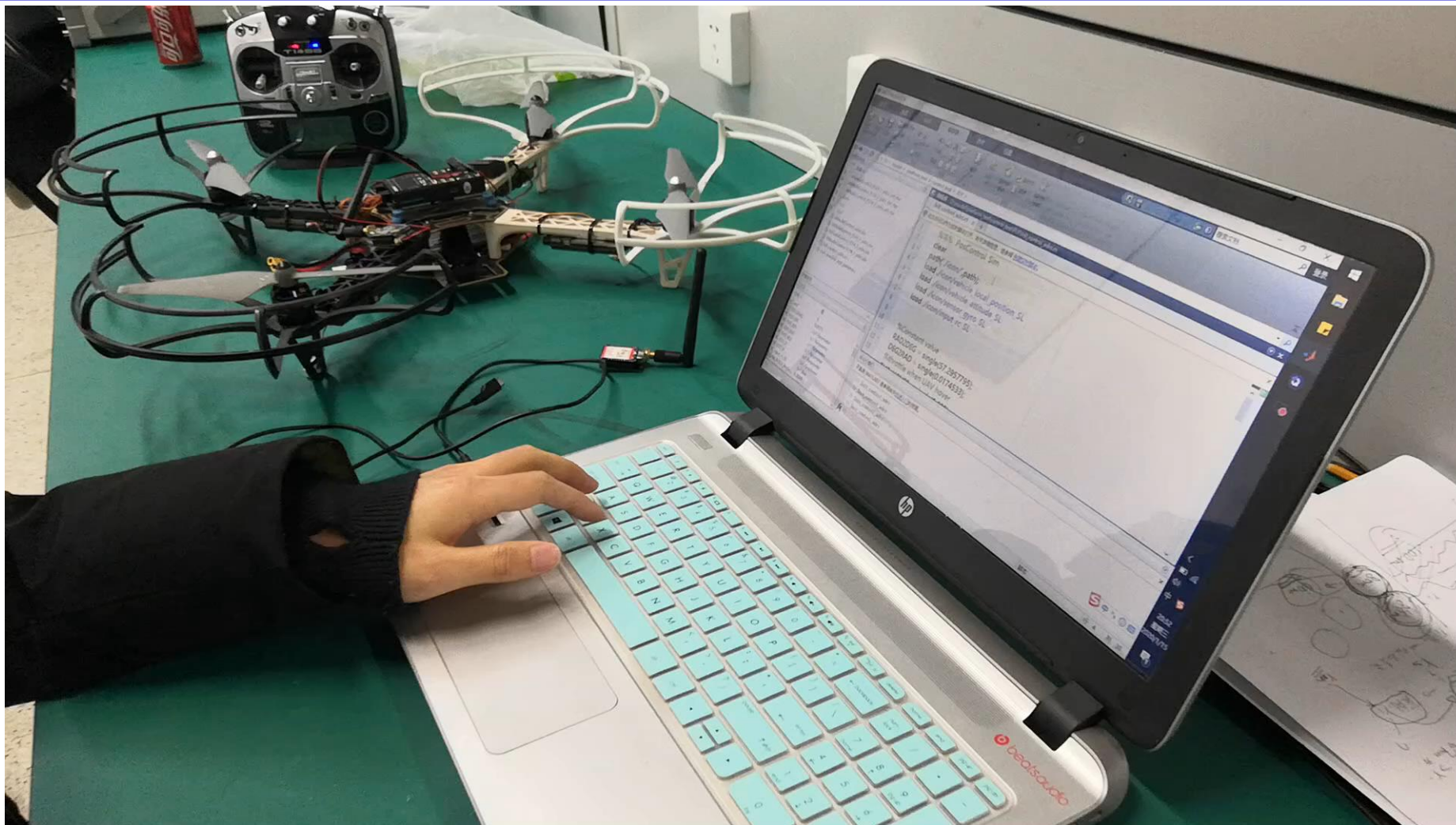








# ADRC设计实例





---

# 谢谢！