多旋翼飞行器设计与控制

第十二讲 基于半自主自驾仪的位置控制

全权　副教授

qq_buaa@buaa.edu.cn

自动化科学与电气工程学院

北京航空航天大学

东方智慧

登高望远

核心问题

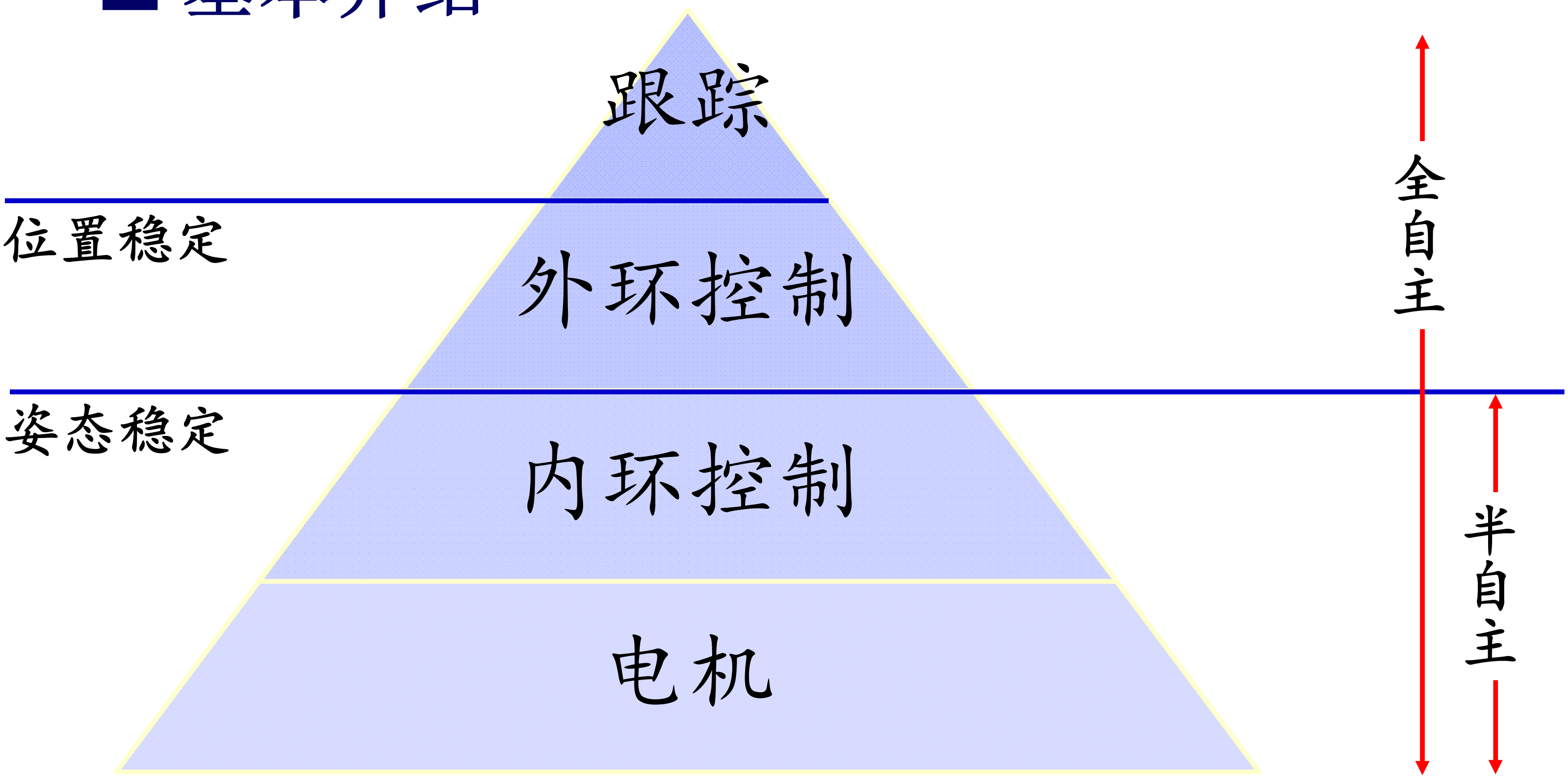
如何利用半自主飞控平台控制多旋翼完成对指定目标位置的跟踪？

大纲

1. 问题描述
2. 系统辨识
3. 位置控制器设计
4. 仿真研究
5. 本讲小结

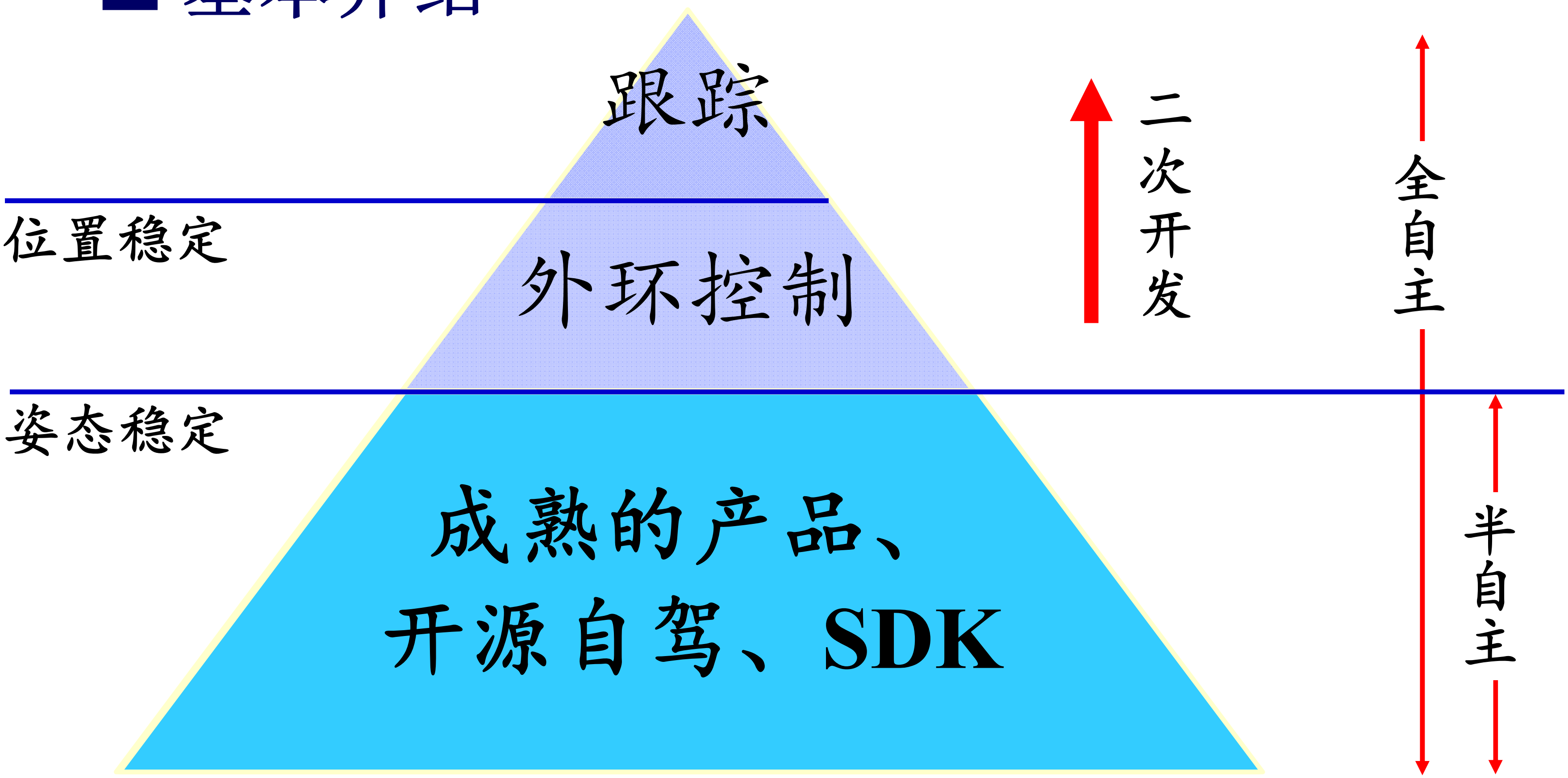
1. 问题描述

◻ 基本介绍



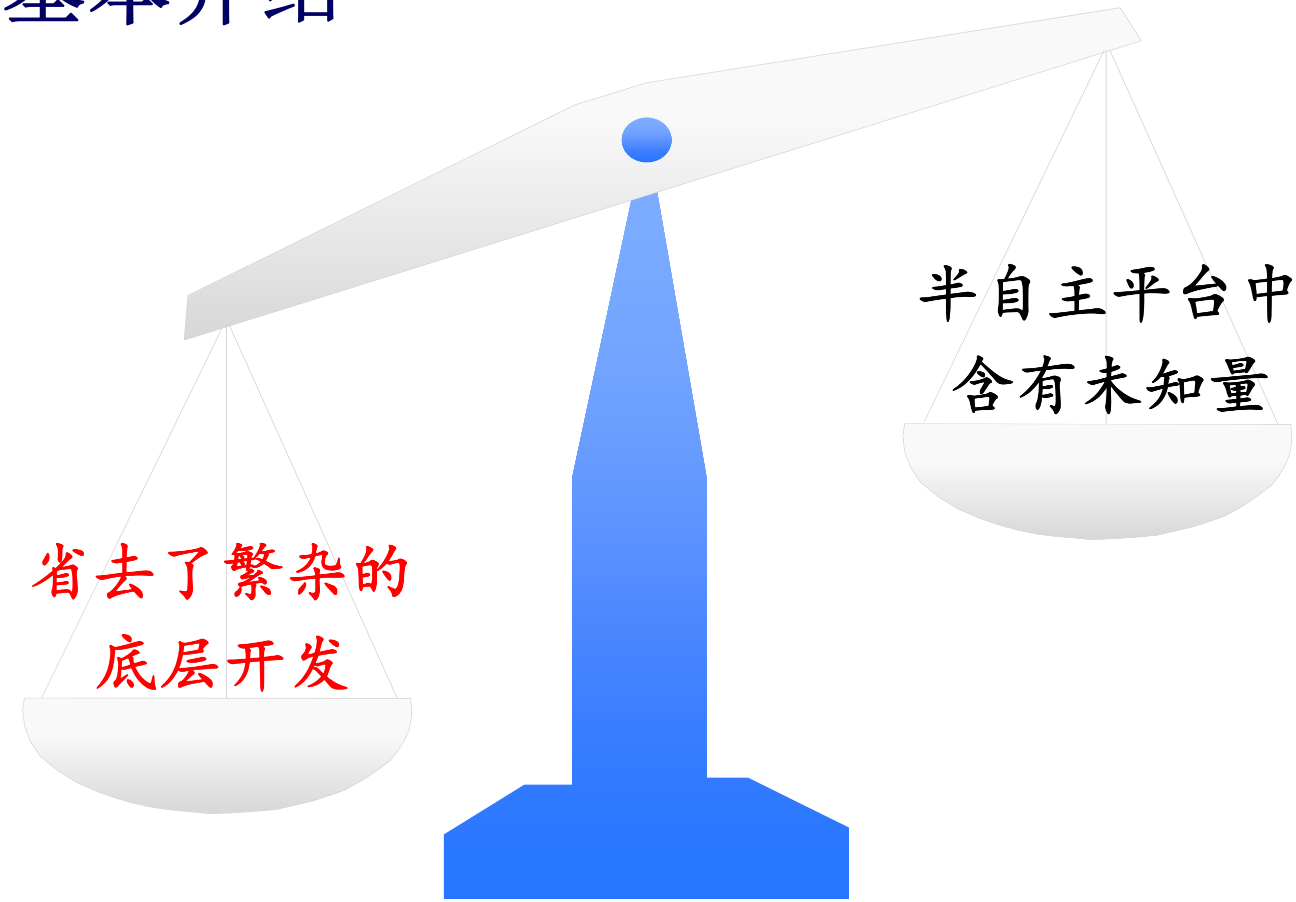
1. 问题描述

◻ 基本介绍



1. 问题描述

□ 基本介绍



1. 问题描述

☐ 基本介绍

飞行模式

- 自稳定模式 ✔ 以此作为范例进行展开
- 定高飞行模式 ✔ AR. Drone 可定高
- 定点飞行模式 ✔
- ……

1. 问题描述

□ 数学模型

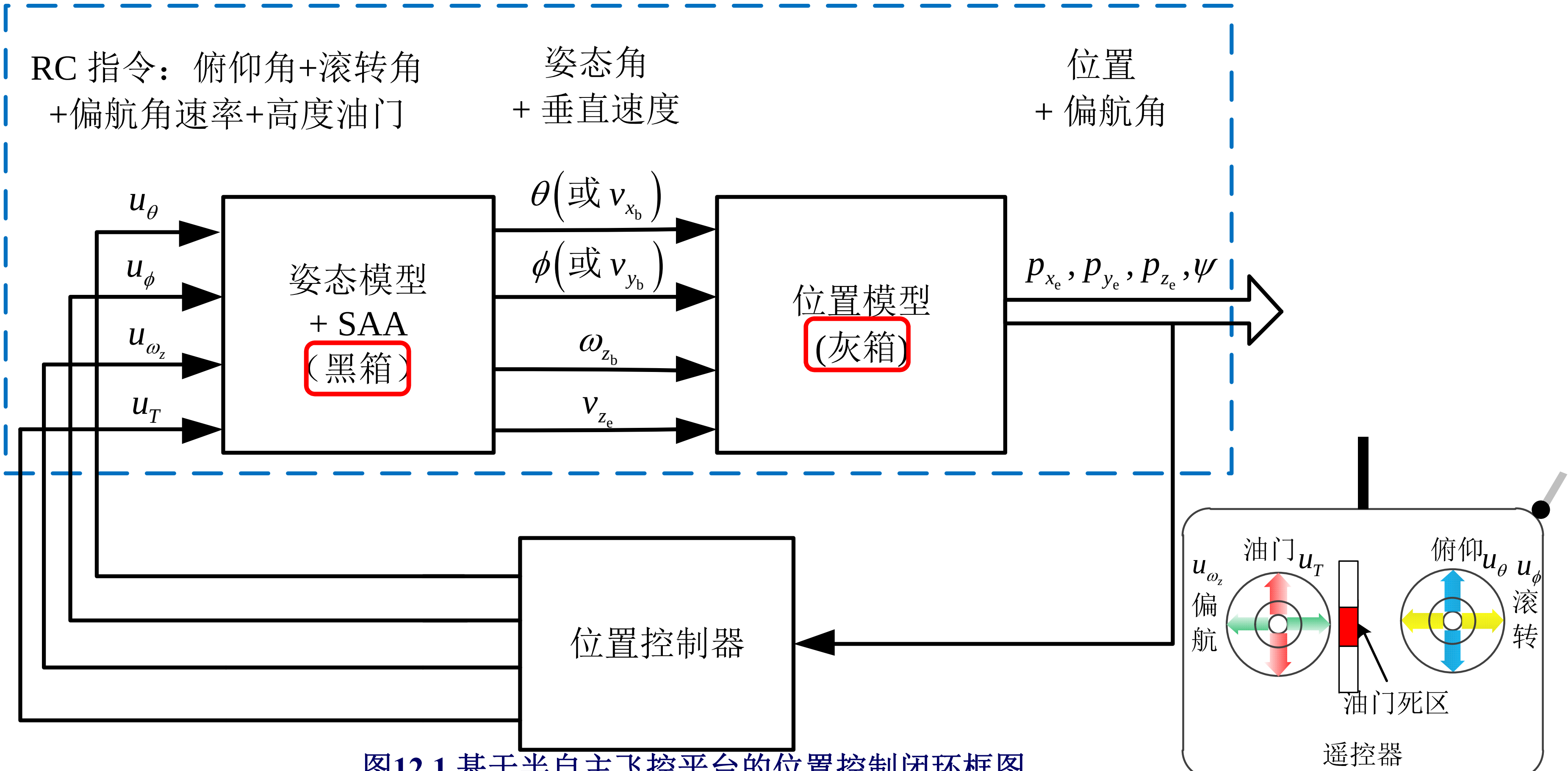
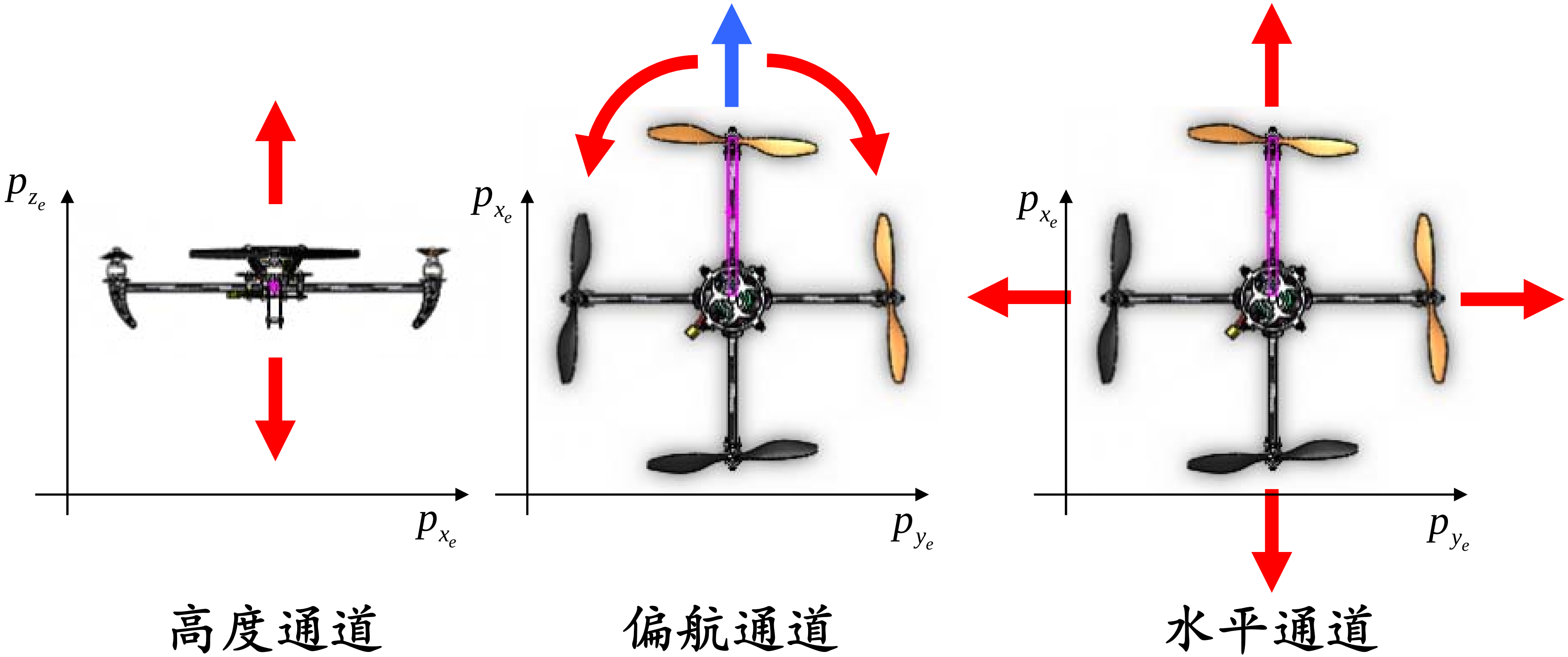


图12.1 基于半自主飞控平台的位置控制闭环框图

1. 问题描述

□ 数学模型

在半自主飞控平台的作用下解耦为三个相对独立的通道



1. 问题描述

数学模型（假设）

高度通道

$$\dot{p}_{z_e} = v_{z_e}$$

$$\dot{v}_{z_e} = -\boxed{k_{v_z}} v_{z_e} - \boxed{k_{u_T}} u_T$$

偏航通道

$$\dot{\psi} = \omega_z$$

$$\dot{\omega}_z = -\boxed{k_{\omega_z}} \omega_z + \boxed{k_{u_{\omega_z}}} u_{\omega_z}$$

水平通道

$$\dot{\mathbf{p}}_h = \mathbf{R}_\psi \mathbf{v}_{h_b}$$

$$\dot{\mathbf{v}}_{h_b} = -\boxed{\mathbf{K}_{\mathbf{v}_{h_b}}} \mathbf{v}_{h_b} - g \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -1 & 0 \end{bmatrix} \mathbf{\Theta}_h$$

$$\dot{\mathbf{\Theta}}_h = \mathbf{\omega}_{h_b}$$

$$\dot{\mathbf{\omega}}_{h_b} = -\boxed{\mathbf{K}_{\mathbf{\Theta}_h}} \mathbf{\Theta}_h - \boxed{\mathbf{K}_{\mathbf{\omega}_{h_b}}} \mathbf{\omega}_{h_b} + \boxed{\mathbf{K}_{\mathbf{u}_h}} \mathbf{u}_h$$

$$\mathbf{u}_h = \begin{bmatrix} u_\phi & u_\theta \end{bmatrix}^T$$

参数取决于半自主飞控平台和飞行器本身，未知

1. 问题描述

□ 目标

对于一条期望轨迹，可以分解为位置和偏航两个部分，即

$$\boxed{\mathbf{p}_{\mathrm{d}}(t) \text{ 和 } \psi_{\mathrm{d}}(t)}$$

对接目标：$\left\|\mathbf{x}(t)-\mathbf{x}_{\mathrm{d}}(t)\right\| \rightarrow 0$ 或者 $\mathbf{x}(t)-\mathbf{x}_{\mathrm{d}}(t) \rightarrow \mathcal{B}(\mathbf{0}_{4\times1},\delta)$

其中，$\mathbf{x}=\begin{bmatrix}\mathbf{p}^{\mathrm{T}} & \psi\end{bmatrix}^{\mathrm{T}}$，$\mathbf{x}_{\mathrm{d}}=\begin{bmatrix}\mathbf{p}_{\mathrm{d}}^{\mathrm{T}} & \psi_{\mathrm{d}}\end{bmatrix}^{\mathrm{T}}$

$\mathcal{B}(\mathbf{0}_{4\times1},\delta)$ 表示原点附近的以 δ 为半径的邻域。

2. 系统辨识

目的

在进行二次开发时，我们仍然希望对模型的信息有所了解。但此时模型是由“四旋翼本身+半自主飞控平台”构成的。而其中包含有很多未知信息，系统辨识则可以把这些未知信息解算出来。

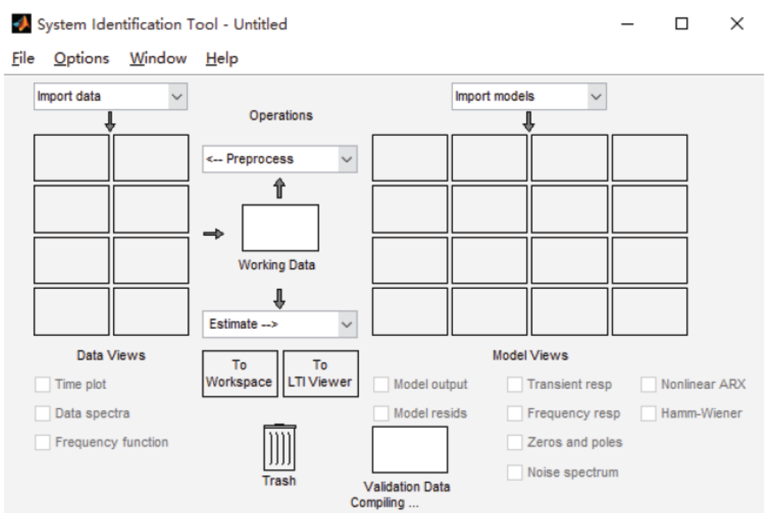


图12.2 Matlab 系统辨识工具箱

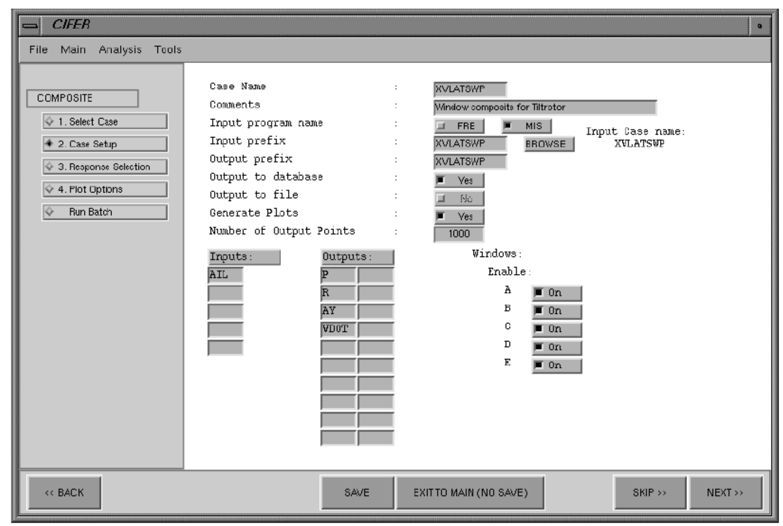


图12.3 CIFER 工具箱

2. 系统辨识

□ 流程

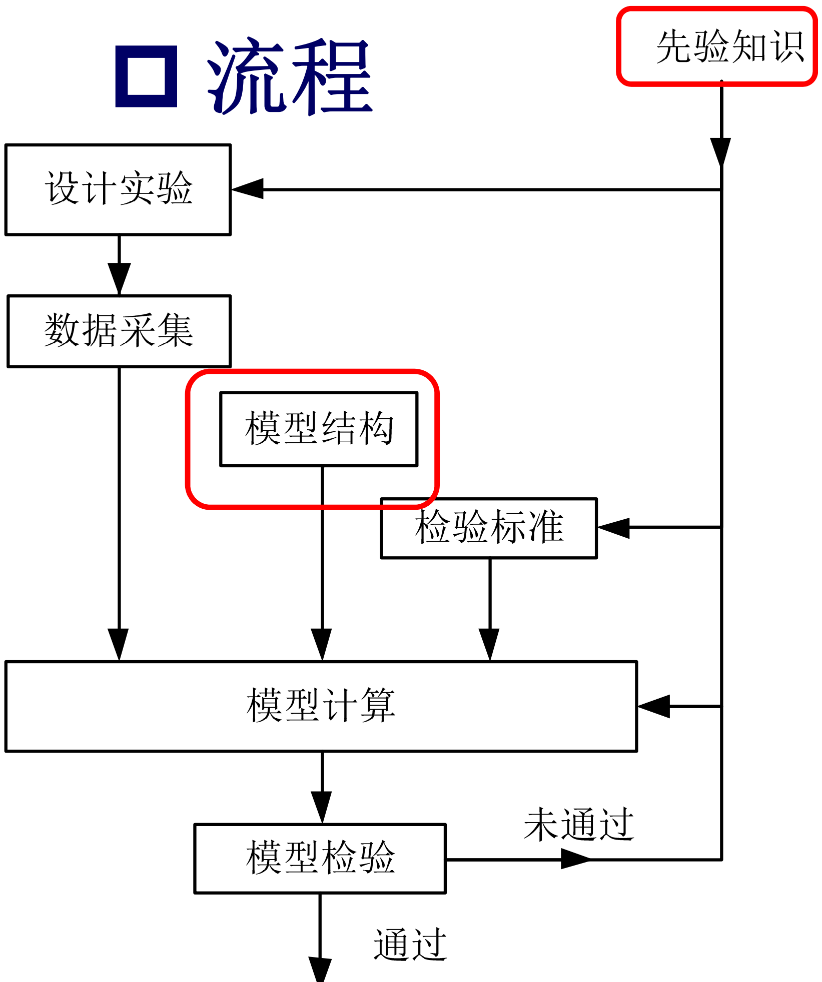


图12.4 系统辨识流程图

1. 先验知识：先验知识指关于系统运动规律、数据以及其他方面的已有知识。有时它也包含了使用者的工程经验与直觉。这些知识对选择模型结构、设计实验、决定辨识方法和检验准则等都有重要作用。用于不同的辨识目的，同一系统的先验知识可能会有很大差别。

2. 系统辨识

□ 流程

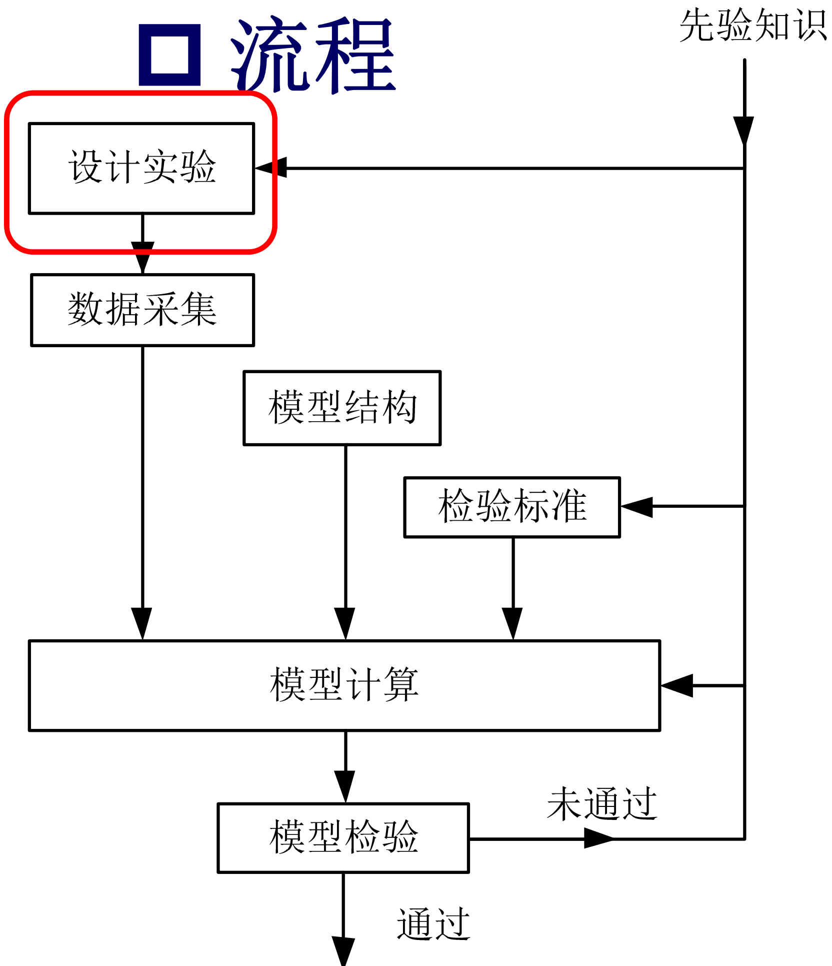


图12.4 系统辨识流程图

2. 实验设计：输入输出数据的采集常常是需要进行特殊的辨识实验设计的。在实验设计中，可能要确定测量哪些信号，什么时候测量以及选择输入等。设计实验的目的就在于通过这些选择使输入输出数据在已知的约束下，能最大化的表现出系统的信息。

2. 系统辨识

◻ 流程

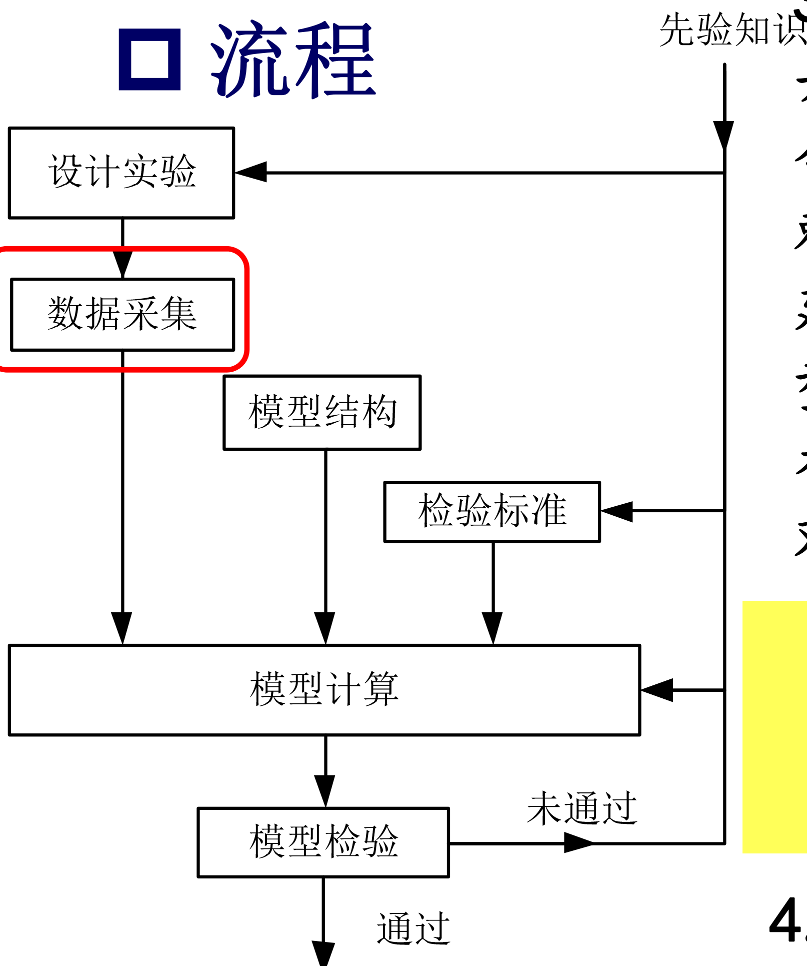


图12.4 系统辨识流程图

3. 模型结构：选择一系列备选模型，并通过后续的验证工作从中确定出最合适的模型。这一系列模型的确定依赖于先验知识与工程经验。有些时候，建立精细的物理模型可以引导备选模型的选择，从而得到一个未知参数的参数化模型。然后通过参数估计方法对模型中的参数进行计算。

线性/非线性？连续/离散?
传递函数/状态空间？系统阶数？……

4. 数据采集：通过真实实验得到数据

2. 系统辨识

□ 流程

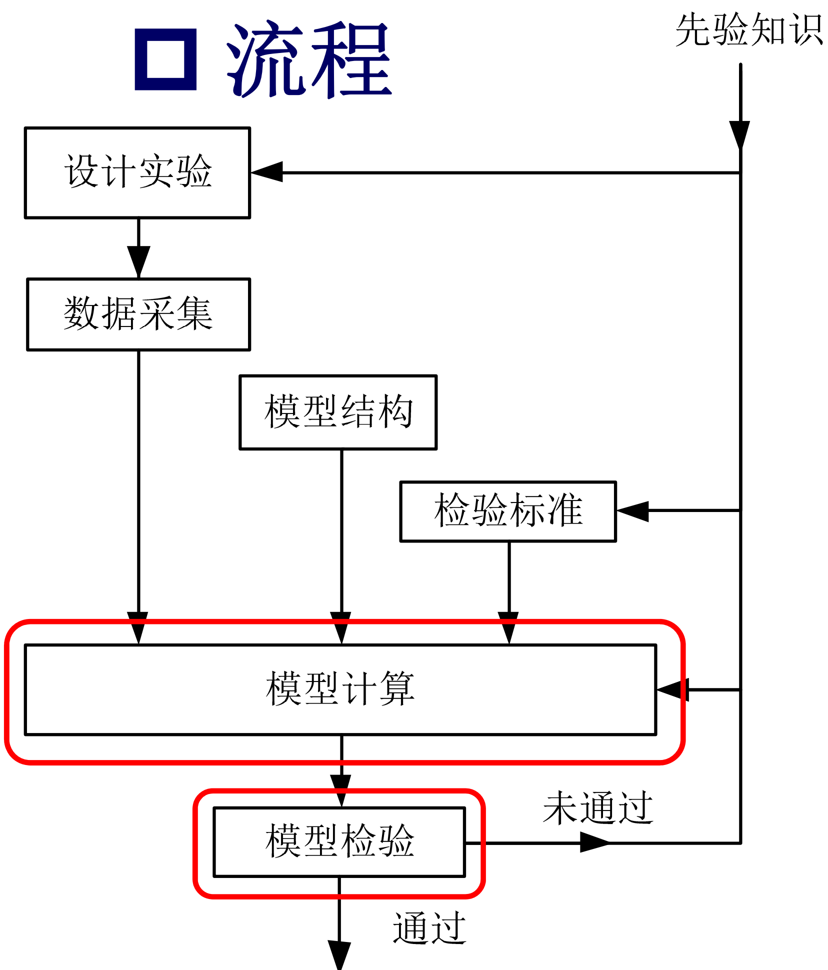


图12.4 系统辨识流程图

5. 模型计算：模型计算就是根据某一给定的优化指标，采用合适的优化方法来优化备选模型的未知参数。

6. 模型检验：建立一个标准来检验备选模型与计算出的参数是否满足要求。通常，该标准的确定依赖于观测数据、先验知识以及待辨识模型的用途。检验通过，则得到最终模型，否则重复上述步骤。

2. 系统辨识

两种辨识

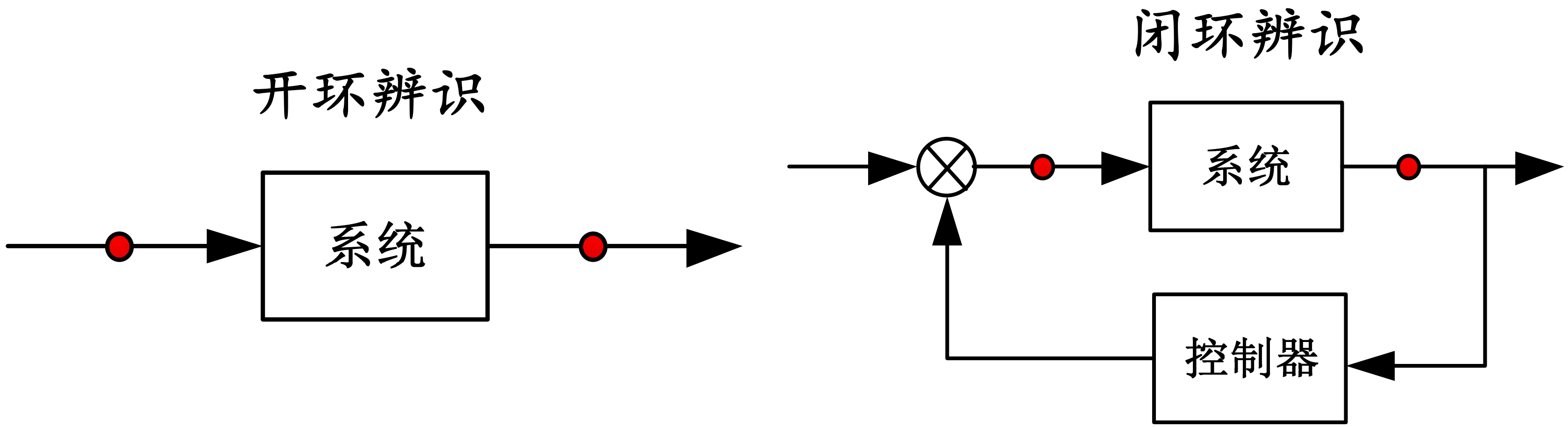


图12.5 系统辨识的两种实验方法

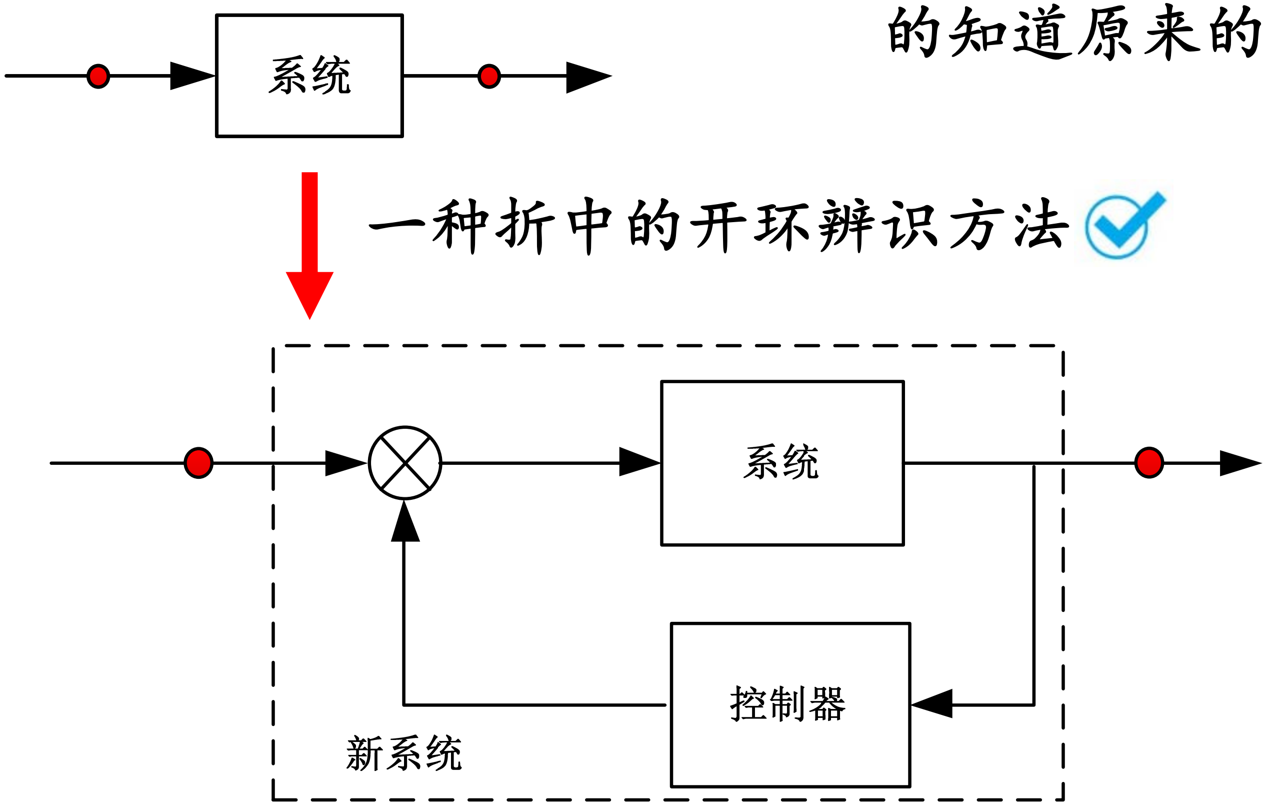
系统稳定时采用的方法
激励往往比较充分

系统不稳定时采用的方法
但由于控制器的存在，激励往往不充分

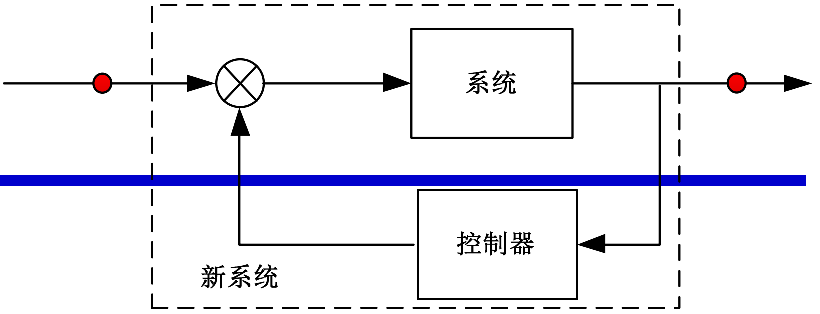
2. 系统辨识

□ 两种辨识

可以应对不稳定系统，激励充分，但不能精确的知道原来的辨识对象



2. 系统辨识



□ 应用流程-高度通道

不稳定

$$\dot{p}_{z_e} = v_{z_e}$$

$$\dot{v}_{z_e} = -k_{v_z} v_{z_e} - k_{u_T} u_T$$

加入自定义控制器

$$u_T = k_{p_z} p_{z_e} + u_{p_z}$$

稳定

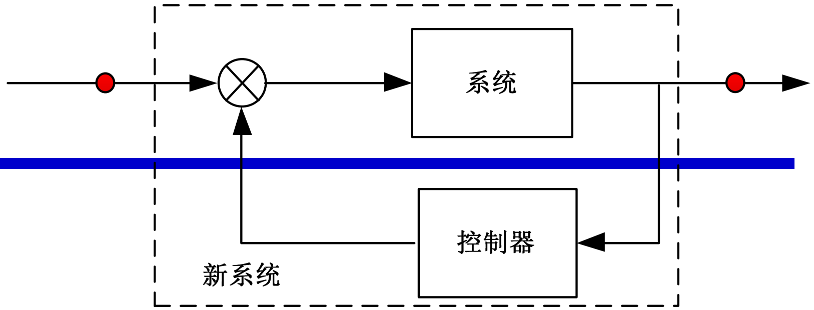
$$\dot{p}_{z_e} = v_{z_e}$$

$$\dot{v}_{z_e} = -k_{u_T} k_{p_z} p_{z_e} - k_{v_z} v_{z_e} - k_{u_T} u_{p_z}$$

所选模型

$$\boxed{p_{z_e}(s)} = G_{p_z u_{p_z}}(s) \boxed{u_{p_z}(s)}$$

2. 系统辨识



应用流程-高度通道

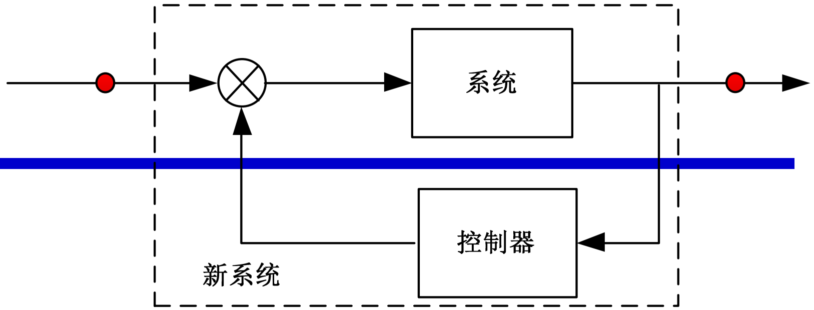
需要说明的是如果垂直速度是可以直接测量的，那么从 u_T 到 v_{z_e} 的通道是稳定的，并不需要额外设计控制器就可以直接进行辨识。此时，该通道相应的传递函数为

$$v_{z_e}(s)=G_{v_{z_e}u_T}(s)u_T(s)$$

进而有

$$p_{z_e}(s)=\frac{1}{s}G_{v_{z_e}u_T}(s)u_T(s)$$

2. 系统辨识



■ 应用流程-偏航通道

不稳定

$$\dot{\psi} = \omega_z$$

$$\dot{\omega}_z = -k_{\omega_z}\omega_z + k_{u_{\omega_z}} u_{\omega_z}$$

$$u_{\omega_z} = -k_\psi \psi + u_\psi$$

稳定

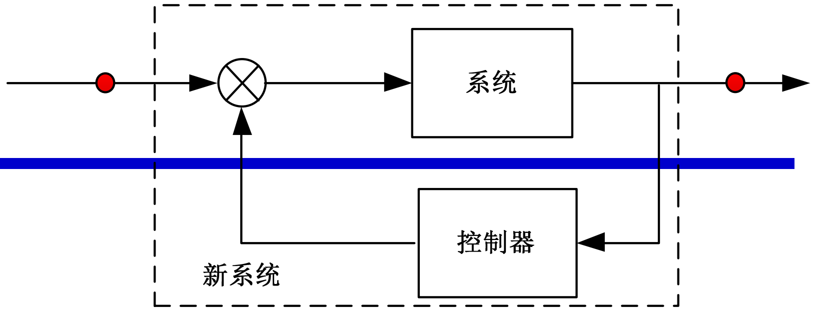
$$\dot{\psi} = \omega_z$$

$$\dot{\omega}_z = -k_{u_{\omega_z}} k_\psi \psi - k_{\omega_z}\omega_z + k_{u_{\omega_z}} u_\psi$$

所选模型

$$\boxed{\psi(s)} = G_{\psi u_\psi}(s)\boxed{u_\psi(s)}$$

2. 系统辨识



□ 应用流程-偏航通道

需要注意的是，如果能直接测量到 ω_z，那么从 u_{ω_z} 到 ω_z 的通道是稳定的，所以对此通道可以直接进行辨识而不需要额外设计控制器。在这种情况下，该通道相应的传递函数为

$$v_{z_e}(s)=G_{v_{z_e}u_T}(s)u_T(s)$$

进而有

$$p_{z_e}(s)=\frac{1}{s}G_{v_{z_e}u_T}(s)u_T(s)$$

2. 系统辨识

□ 应用流程-水平通道

水平通道的辨识是在对高度通道和偏航通道实现了控制后进行的，因此，在控制器的作用下，偏航通道满足 $\psi \approx \psi_{\mathrm{d}}$ 。为了得到一个更好的辨识结果，通常将偏航角固定于一个合理的期望偏航角 上。那么，$\mathbf{R}_{\psi}$ 为一个常数矩阵。该通道可以用如下传递函数形式表达

$$
\begin{aligned}
\mathbf{p}_{\mathrm{h_e}}(s) &= \mathrm{diag}\left(\frac{1}{s},\frac{1}{s}\right)\mathbf{R}_{\psi}\mathbf{G}_{\mathbf{v}_{\mathrm{h_b}}\mathbf{u}_{\mathrm{h}}}(s)\mathbf{u}_{\mathrm{h}}(s) \\
&= \mathbf{R}_{\psi}\mathrm{diag}\left(\frac{1}{s},\frac{1}{s}\right)\mathbf{G}_{\mathbf{v}_{\mathrm{h_b}}\mathbf{u}_{\mathrm{h}}}(s)\mathbf{u}_{\mathrm{h}}(s)
\end{aligned}
$$

由于$\mathbf{R}_{\psi}$的存在，水平通道较其他两个通道控制难度更大。因此，下面将会为水平通道设计速度控制器。

2. 系统辨识

▫ 应用流程-水平通道

如果半自主自驾仪考虑了速度反馈，那么水平通道中的$\mathbf{G}_{\mathbf{v}_{\mathrm{h_b}}\mathbf{u}_{\mathrm{h}}}(s)$是稳定的，可以直接进行系统辨识。如果没有引入速度反馈，那么需要设计控制器如下

$$\dot{\mathbf{v}}_{\mathrm{h_b}} = -\mathbf{K}_{\mathbf{v}_{\mathrm{h_b}}}\mathbf{v}_{\mathrm{h_b}} - g\begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -1 & 0 \end{bmatrix}\mathbf{\Theta}_{\mathrm{h}} \qquad \mathbf{u}_{\mathrm{h}} = -\mathbf{K}'_{\mathbf{v}_{\mathrm{h_b}}}\mathbf{v}_{\mathrm{h_b}} + \mathbf{u}_{\mathbf{v}_{\mathrm{h}}}$$

$$\dot{\mathbf{\Theta}}_{\mathrm{h}} = \boldsymbol{\omega}_{\mathrm{h_b}}$$

$$\dot{\boldsymbol{\omega}}_{\mathrm{h_b}} = -\mathbf{K}_{\mathbf{\Theta}_{\mathrm{h}}}\mathbf{\Theta}_{\mathrm{h}} - \mathbf{K}_{\boldsymbol{\omega}_{\mathrm{h_b}}}\boldsymbol{\omega}_{\mathrm{h_b}} + \mathbf{K}_{\mathbf{u}_{\mathrm{h}}}\mathbf{u}_{\mathrm{h}}$$

$$\Big\downarrow\ \mathbf{u}_{\mathrm{h}} = -\mathbf{K}'_{\mathbf{v}_{\mathrm{h_b}}}\mathbf{v}_{\mathrm{h_b}} + \mathbf{u}_{\mathbf{v}_{\mathrm{h}}}$$

$$\dot{\mathbf{v}}_{\mathrm{h_b}} = -\mathbf{K}_{\mathbf{v}_{\mathrm{h_b}}}\mathbf{v}_{\mathrm{h_b}} - g\begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -1 & 0 \end{bmatrix}\mathbf{\Theta}_{\mathrm{h}}$$

$$\dot{\mathbf{\Theta}}_{\mathrm{h}} = \boldsymbol{\omega}_{\mathrm{h_b}}$$

$$\dot{\boldsymbol{\omega}}_{\mathrm{h_b}} = -\mathbf{K}_{\mathbf{u}_{\mathrm{h}}}\mathbf{K}'_{\mathbf{v}_{\mathrm{h_b}}}\mathbf{v}_{\mathrm{h_b}} - \mathbf{K}_{\mathbf{\Theta}_{\mathrm{h}}}\mathbf{\Theta}_{\mathrm{h}} - \mathbf{K}_{\boldsymbol{\omega}_{\mathrm{h_b}}}\boldsymbol{\omega}_{\mathrm{h_b}} + \mathbf{K}_{\mathbf{u}_{\mathrm{h}}}\mathbf{u}_{\mathbf{v}_{\mathrm{h}}}$$

$$\boxed{\mathbf{v}_{\mathrm{h_b}}(s)} = \mathbf{G}_{\mathbf{v}_{\mathrm{h_b}}\mathbf{u}_{\mathbf{v}_{\mathrm{h}}}}(s)\boxed{\mathbf{u}_{\mathbf{v}_{\mathrm{h}}}(s)}$$

3. 位置控制器设计

☐ PID控制器

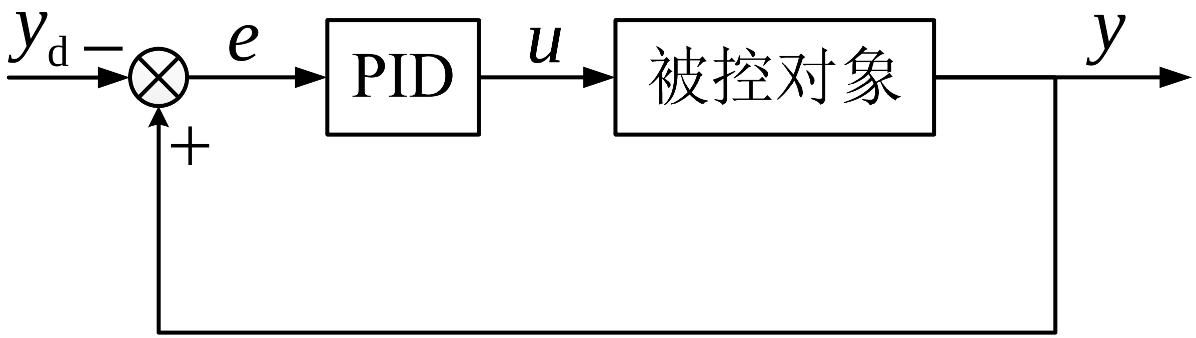


图12.5 PID控制框图

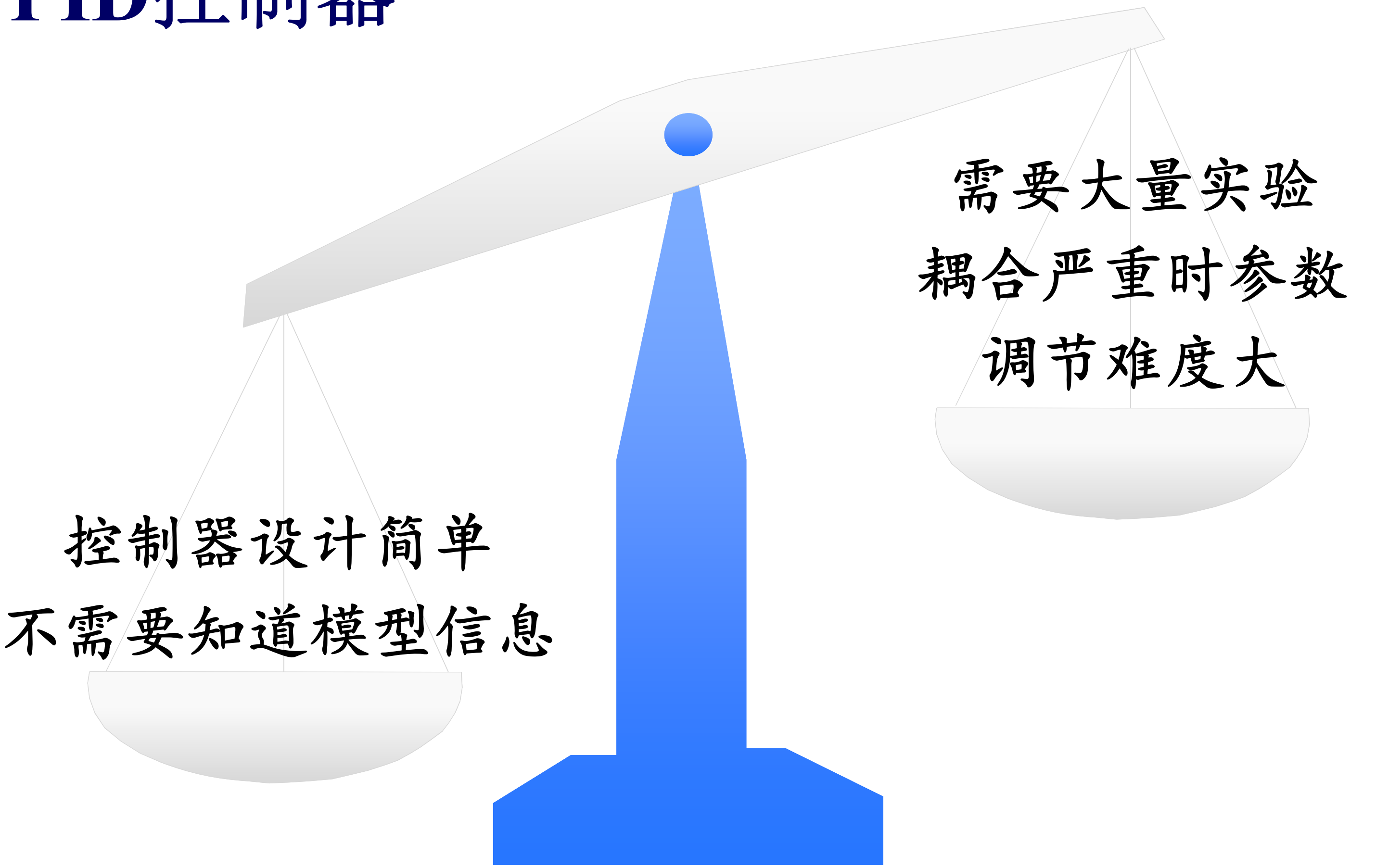
$$u_T = -k_{p_z\mathrm{p}}\left(p_{z_e} - p_{z_e\mathrm{d}}\right) - k_{p_z\mathrm{d}}\left(\dot{p}_{z_e} - \dot{p}_{z_e\mathrm{d}}\right) - k_{p_z\mathrm{i}}\int\left(p_{z_e} - p_{z_e\mathrm{d}}\right)$$

$$u_{\omega_z} = -k_{\psi\mathrm{p}}\left(\psi - \psi_\mathrm{d}\right) - k_{\psi\mathrm{d}}\left(\omega_z - \dot{\psi}_\mathrm{d}\right) - k_{\psi\mathrm{i}}\int\left(\psi - \psi_\mathrm{d}\right)$$

$$\mathbf{u}_\mathrm{h} = -\mathbf{K}_\mathrm{hp}\mathbf{R}_\psi^{-1}\left(\mathbf{p}_\mathrm{h} - \mathbf{p}_\mathrm{hd}\right) - \mathbf{K}_\mathrm{hd}\mathbf{R}_\psi^{-1}\left(\dot{\mathbf{p}}_\mathrm{h} - \dot{\mathbf{p}}_\mathrm{hd}\right) - \mathbf{K}_\mathrm{hi}\int\mathbf{R}_\psi^{-1}\left(\mathbf{p}_\mathrm{h} - \mathbf{p}_\mathrm{hd}\right)$$

3. 位置控制器设计

□ PID控制器

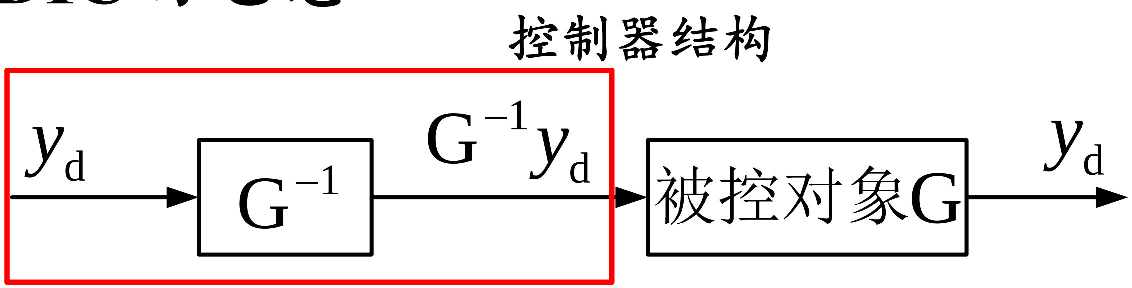


3. 位置控制器设计

基于加性分解的动态逆控制器

基于加性输出分解的动态逆控制器

（1）DIC的思想



1. 实际过程中 G 是未知的，可以辨识得到近似的 $\hat{G}$

2. G 与 $\hat{G}$ 之间往往有差距，如何设计进行弥补？

3. 位置控制器设计

□ 基于加性分解的动态逆控制器

（2）加性分解过程

对于传递函数的加性输出分解：

$$\text{原系统:}\ y = Gu + d$$

$$y_s \triangleq y - y_p$$

$$\text{主系统:}\ y_p = G_p u_p \qquad \text{辅系统:}\ y_s = Gu + d - G_p u_p$$

$$y = y_p + y_s$$

Quan Quan, Kai-Yuan Cai. Additive-Output-Decomposition-Based Dynamic Inversion Tracking Control for a Class of Uncertain Linear Time-Invariant Systems. The 51st IEEE Conference on Decision and Control, 2012, Maui, Hawaii, USA, 2866-2871.

3. 位置控制器设计

□ 基于加性分解的动态逆控制器

(3) 以高度通道为例进行设计

原系统：$p_{z_e}(s) = G_{p_z u_{p_z}}(s) u_{p_z}(s)$

主系统

$$p_{z_e\mathrm{p}}(s) = \hat{G}_{p_z u_{p_z}}(s) u_{p_z p}(s)$$

辅系统 $p_{z_e\mathrm{s}} \triangleq p_{z_e} - p_{z_e\mathrm{p}}$

$$p_{z_e\mathrm{s}}(s) = G_{p_z u_{p_z}}(s) u_{p_z}(s) - \hat{G}_{p_z u_{p_z}}(s) u_{p_z p}(s)$$

$$p_{z_e} = p_{z_e\mathrm{p}} + p_{z_e\mathrm{s}}$$

$$d_{p_z\mathrm{l}} = \left(G_{p_z u_{p_z}}(s) - \hat{G}_{p_z u_{p_z}}(s)\right) u_{p_z}(s)$$

$$u_{p_z p}(s) = u_{p_z}(s)$$

$$\boxed{\begin{aligned} p_{z_e\mathrm{p}}(s) &= \hat{G}_{p_z u_{p_z}}(s) u_{p_z}(s) \\ p_{z_e}(s) &= p_{z_e\mathrm{p}}(s) + d_{p_z\mathrm{l}}(s) \end{aligned}}$$

3. 位置控制器设计

基于加性分解的动态逆控制器

(3) 以高度通道为例进行设计

基于加性分解的动态逆控制器：$u_{p_z}(s)=\hat{G}_{p_z u_{p_z}}^{-1}(s)\left(p_{z_e\mathrm{d}}(s)-d_{p_z\mathrm{l}}(s)\right)$

物理不可实现，引入低通滤波器 $Q_{p_z u_{p_z}}(s)$ 使得 $Q_{p_z u_{p_z}}(s)\hat{G}_{p_z u_{p_z}}^{-1}(s)$ 物理可实现，且 $Q_{p_z u_{p_z}}(0)=1$

$$u_{p_z}(s)=Q_{p_z u_{p_z}}(s)\hat{G}_{p_z u_{p_z}}^{-1}(s)\left(p_{z_e\mathrm{d}}(s)-d_{p_z\mathrm{l}}(s)\right)$$

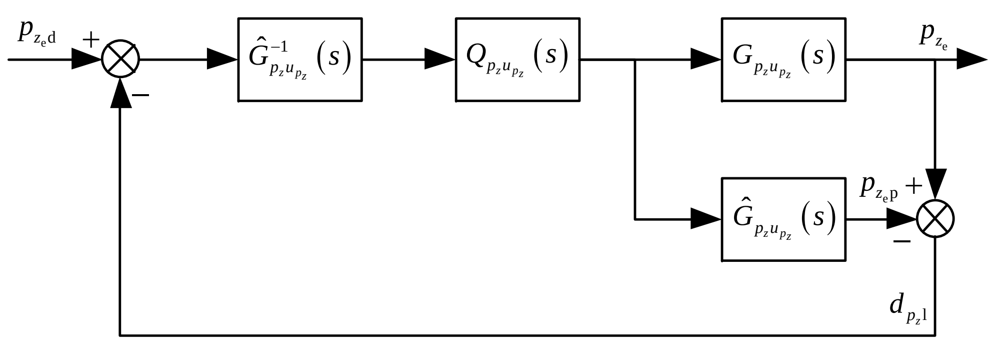


图12.6 基于加性输出分解方法的控制器设计

3. 位置控制器设计

◻ 基于加性分解的动态逆控制器

(3) 以高度通道为例进行设计

收敛性分析：

若满足 **(1)** $\hat{G}_{p_z u_{p_z}}(s)$ 是最小相位的；

(2) $Q_{p_z u_{p_z}}(s)$ 和 $G_{p_z u_{p_z}}(s)$是稳定的，且 $Q_{p_z u_{p_z}}(0)=1$；

(3) $\sup_{\omega}\left|\left(1-G_{p_z u_{p_z}}(j\omega)\hat{G}^{-1}_{p_z u_{p_z}}(j\omega)\right)Q_{p_z u_{p_z}}(j\omega)\right|<1$；

(4) $p_{z_e\mathrm{d}}$为常数。

那么，u_{p_z} 是有界的，且当$t\rightarrow\infty$时，$\left|e_{p_z}(t)\right|\rightarrow 0$，其中 $e_{p_z}\triangleq p_{z_e}-p_{z_e\mathrm{d}}$

Quan Quan, Kai-Yuan Cai. Additive-Output-Decomposition-Based Dynamic Inversion Tracking Control for a Class of Uncertain Linear Time-Invariant Systems. The 51st IEEE Conference on Decision and Control, 2012, Maui, Hawaii, USA, 2866-2871.

3. 位置控制器设计

□ 基于加性分解的动态逆控制器

(4)另外两个通道

$$u_{\psi}(s)=Q_{\psi u_{\psi}}(s)\hat{G}_{\psi u_{\psi}}^{-1}(s)\left(\psi_{\mathrm{d}}(s)-d_{\psi \mathrm{l}}(s)\right)$$

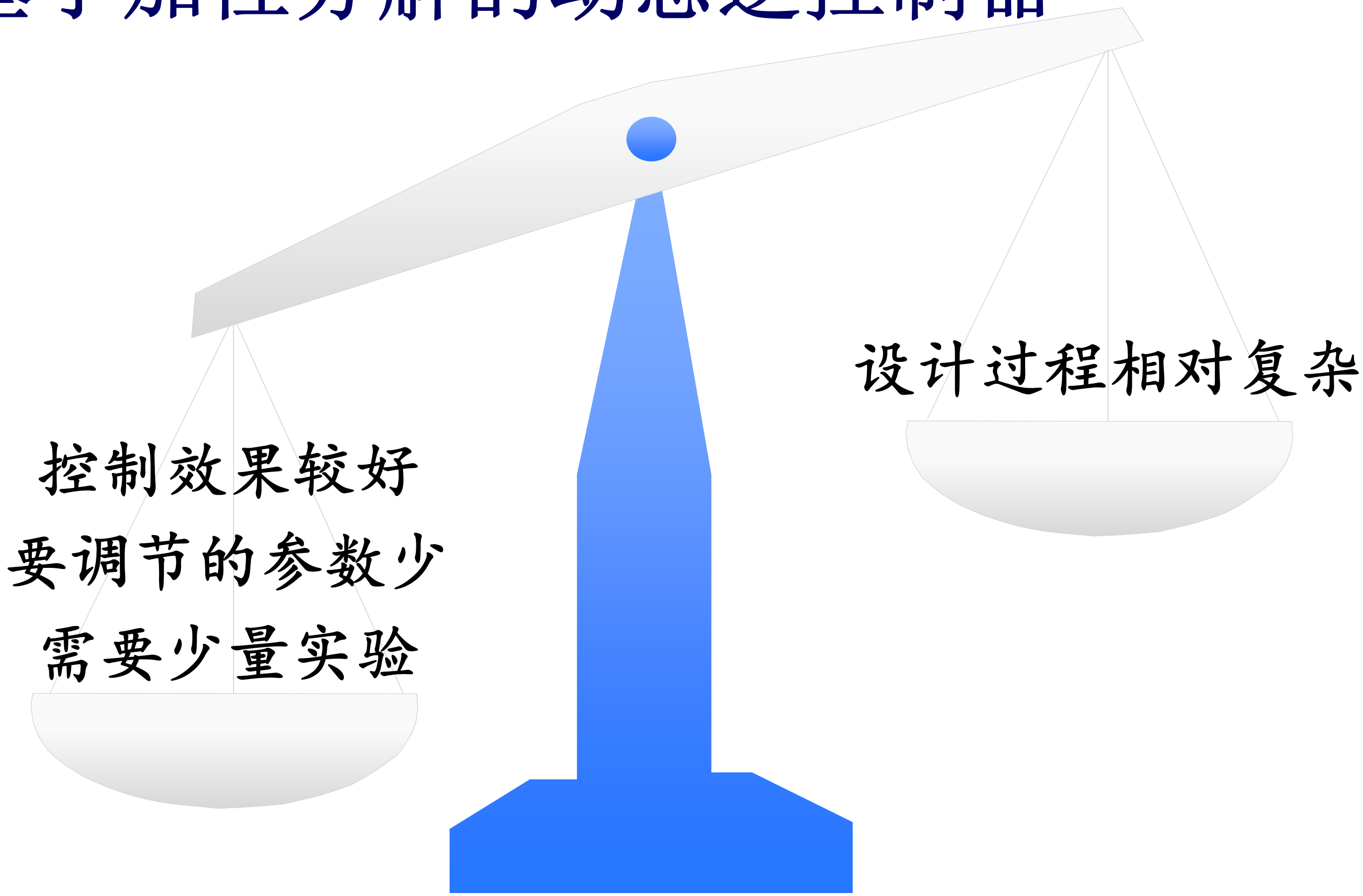
$$d_{\psi \mathrm{l}}(s)=\psi(s)-\hat{G}_{\psi u_{\psi}}(s)u_{\psi}(s)$$

$$\mathbf{u}_{\mathbf{v}_{\mathrm{h}}}(s)=\mathbf{Q}_{\mathbf{v}_{\mathrm{h_b}}\mathbf{u}_{\mathrm{v_h}}}(s)\hat{\mathbf{G}}_{\mathbf{v}_{\mathrm{h_b}}\mathbf{u}_{\mathrm{v_h}}}^{-1}(s)\left(\mathbf{v}_{\mathrm{h_b d}}(s)-\mathbf{d}_{\mathbf{v}_{\mathrm{h}}\mathrm{l}}(s)\right)$$

$$\mathbf{d}_{\mathbf{v}_{\mathrm{h}}\mathrm{l}}(s)=\mathbf{v}_{\mathrm{h_b}}(s)-\hat{\mathbf{G}}_{\mathbf{v}_{\mathrm{h_b}}\mathbf{u}_{\mathrm{v_h}}}(s)\mathbf{u}_{\mathrm{v_h}}(s)$$

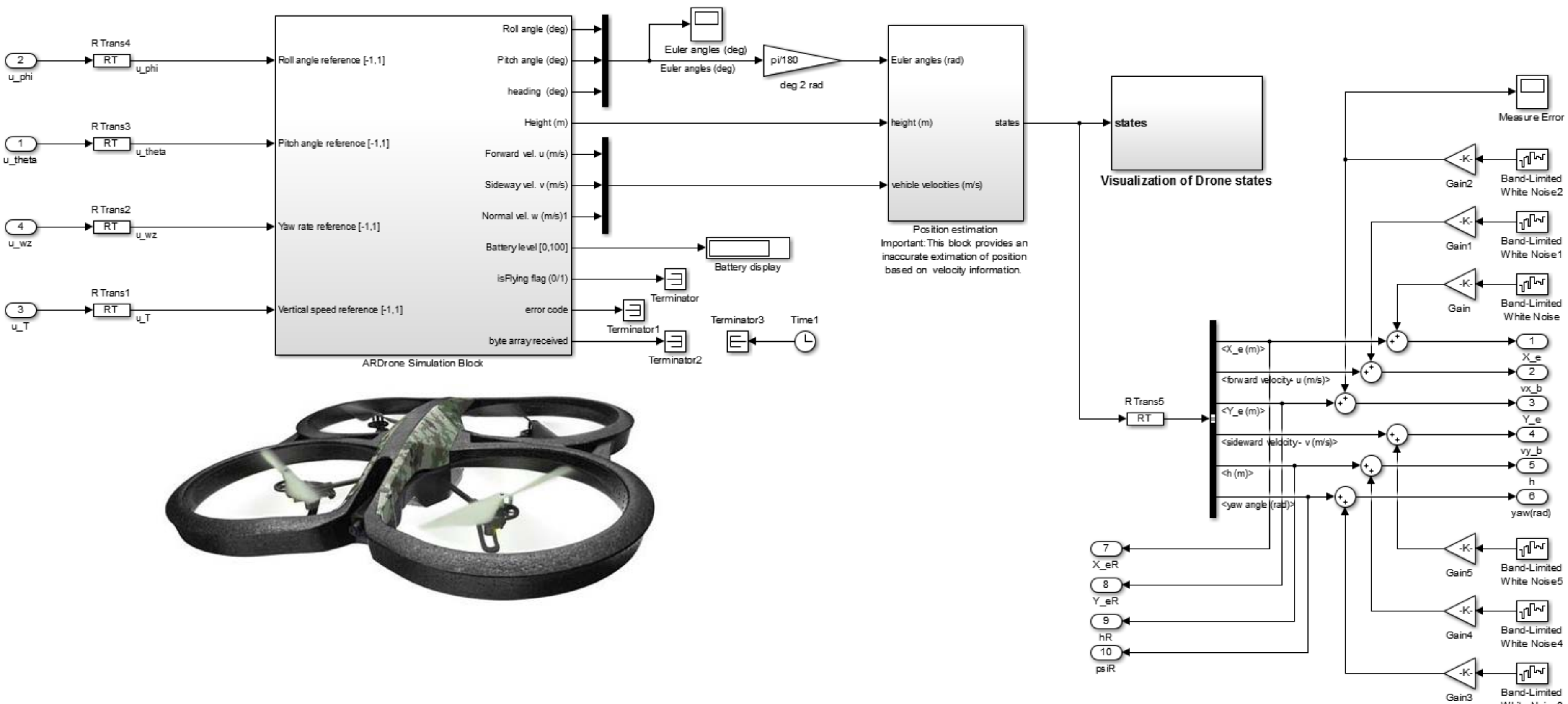
3. 位置控制器设计

□ 基于加性分解的动态逆控制器



4. 仿真研究

□ 被控对象——内部参数当做未知



Zander J (2013) AR Drone Simulink. https://github.com/justynazander/AR Drone Simulink. Accessed 20 Jan 2016

4. 仿真研究

□ 系统辨识

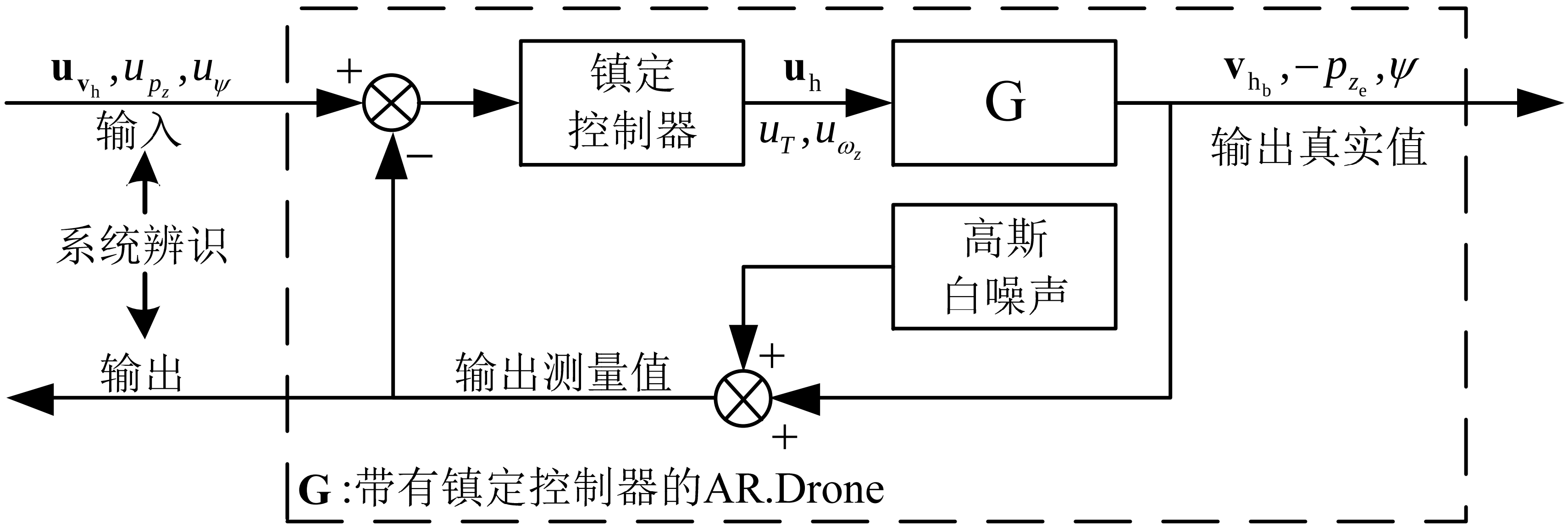


图12.7 系统辨识仿真实验

4. 仿真研究

□ 系统辨识

1. 先验知识：之前所述的模型，可以得到阶数等信息。

高度通道

$$\dot{p}_{z_e} = v_{z_e}$$

$$\dot{v}_{z_e} = -k_{v_z} v_{z_e} - k_{u_T} u_T$$

偏航通道

$$\dot{\psi} = \omega_z$$

$$\dot{\omega}_z = -k_{\omega_z} \omega_z + k_{u_{\omega_z}} u_{\omega_z}$$

水平通道

$$\dot{\mathbf{p}}_{\mathrm{h}} = \mathbf{R}_{\psi} \mathbf{v}_{\mathrm{h_b}}$$

$$\dot{\mathbf{v}}_{\mathrm{h_b}} = -\mathbf{K}_{\mathbf{v}_{\mathrm{h_b}}} \mathbf{v}_{\mathrm{h_b}} - g \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -1 & 0 \end{bmatrix} \mathbf{\Theta}_{\mathrm{h}}$$

$$\dot{\mathbf{\Theta}}_{\mathrm{h}} = \boldsymbol{\omega}_{\mathrm{h_b}}$$

$$\dot{\boldsymbol{\omega}}_{\mathrm{h_b}} = -\mathbf{K}_{\mathbf{\Theta}_{\mathrm{h}}} \mathbf{\Theta}_{\mathrm{h}} - \mathbf{K}_{\boldsymbol{\omega}_{\mathrm{h_b}}} \boldsymbol{\omega}_{\mathrm{h_b}} + \mathbf{K}_{\mathbf{u}_{\mathrm{h}}} \mathbf{u}_{\mathrm{h}}$$

4. 仿真研究

□ 系统辨识

2. 实验设计：首先设计PD或P控制器使相应的通道稳定。

$$u_T = k_{p_z} p_{z_e} + u_{p_z}$$

$$u_{\omega_z} = -k_\psi \psi + u_\psi$$

$$\mathbf{u}_\mathrm{h} = -\mathbf{K}'_{\mathbf{v}_{\mathrm{h_b}}} \mathbf{v}_{\mathrm{h_b}} + \mathbf{u}_{\mathbf{v}_\mathrm{h}}$$

其中，令 $\psi_\mathrm{d} = 0$，则 $\mathbf{R}_\psi = \mathbf{I}_2$，此时水平位置通道解耦为$x, y$两个通道。

$$\mathbf{v}_{\mathrm{h_b}}(s) = \mathrm{G}_{\mathbf{v}_{\mathrm{h_b}}\mathbf{u}_{\mathbf{v}_\mathrm{h}}}(s)\mathbf{u}_{\mathbf{v}_\mathrm{h}}(s) = \begin{bmatrix} G_{v_x u_{v_x}}(s) u_{v_x}(s) \\ G_{v_y u_{v_y}}(s) u_{v_y}(s) \end{bmatrix}$$

选取 $k_{p_z} = 1, k_\psi = 1, \mathbf{K}'_{\mathbf{v}_{\mathrm{h_b}}} = \mathrm{diag}(0.1, 01).$

系统辨识

2. 实验设计：水平两个通道的阶跃响应(不含测量噪声)。

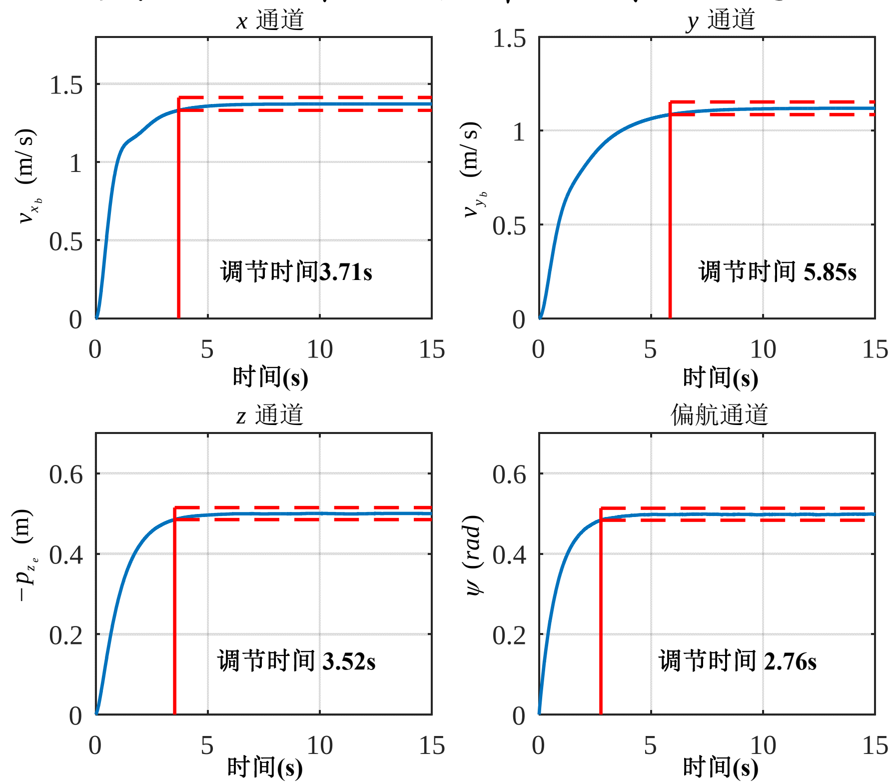


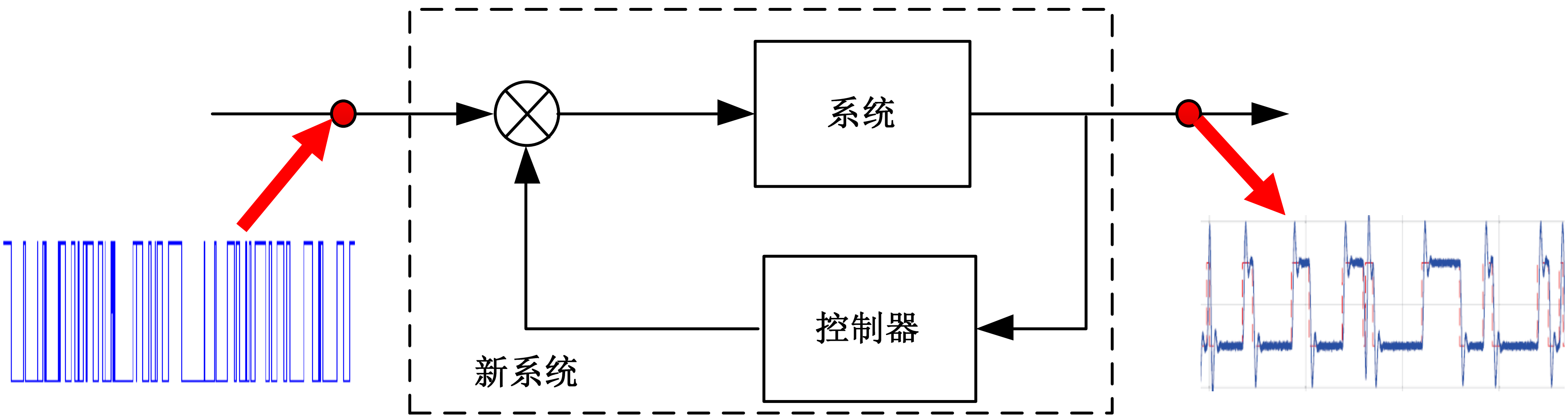
图12.8 加入镇定控制器后各通道的阶跃响应

所有通道都是稳定的，但调节时间太长，不满足要求

4. 仿真研究

□ 系统辨识

3. 数据采集：采用伪随机二进制白噪声(Peudo-Random Binary Signals, PRBS)对系统进行激励，并记录输入输出。



改进的开环实验方法

4. 仿真研究

□ 系统辨识

3. 数据采集

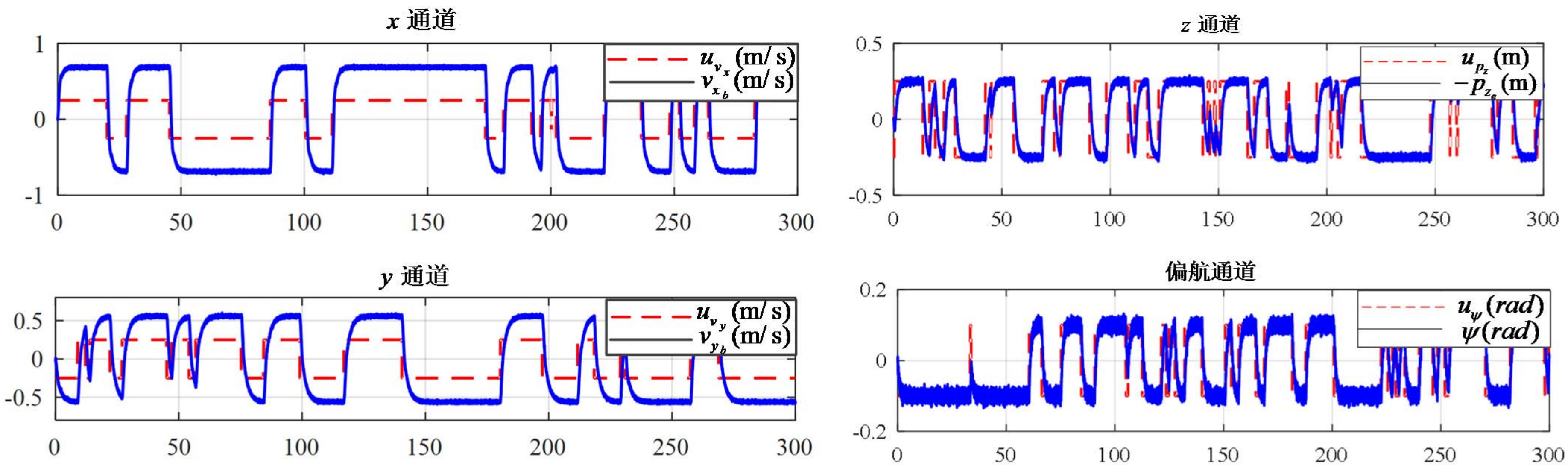


图12.9 用于系统辨识的输入输出数据

4. 仿真研究

□ 系统辨识

4. 模型结构：由于基本可以认为系统是线性的，所以采用传递函数来进行辨识。其阶数的选择原则如下：

(1) 阶数的选择需要保证辨识出的系统是最小相位的。

(2) 阶数的选择需要保证辨识的结果能通过检验标准。

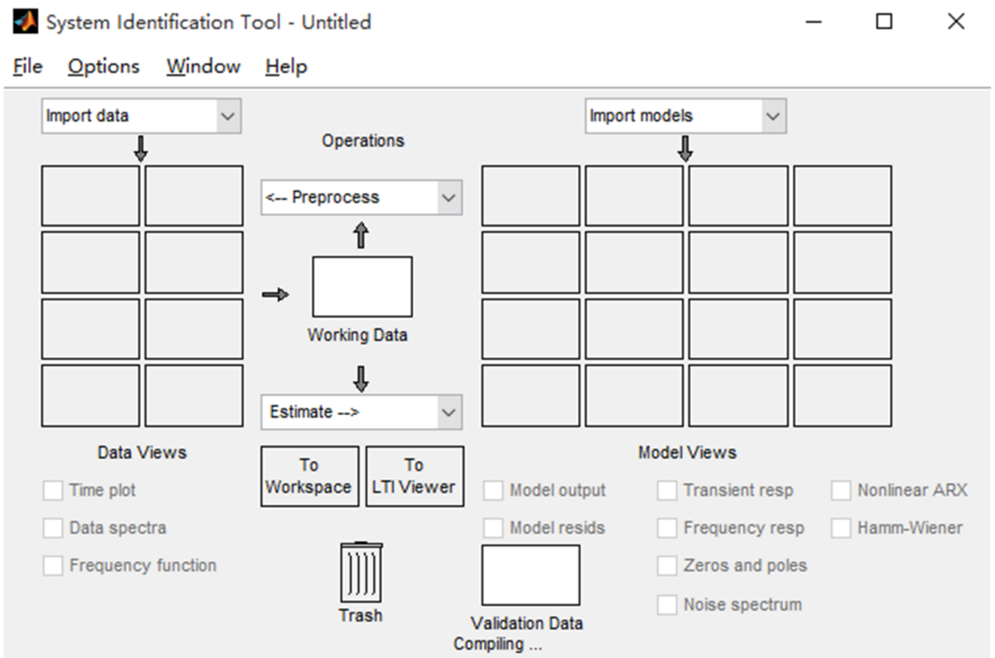
(3) 在以上两条都满足的情况下，阶数越低越好。

从先验知识中，我们可以了解，水平两个通道的阶数为4，另外两个通道阶数为2。可以在此基础上根据实际情况微调。

4. 仿真研究

☐ 系统辨识

5. 模型计算：采用Matlab的系统辨识工具箱。



The math works. System identification toolbox. http://www.mathworks.com/help/ident/index.html. Accessed 20 Jan 2016

4. 仿真研究

□ 系统辨识

5. 模型计算：辨识结果。

$$G_{v_x u_{v_x}}(s)=\frac{15.48s+29.9}{s^3+4.642s^2+16.09s+10.91}$$

$$G_{v_y u_{v_y}}(s)=\frac{7.086s+17.02}{s^3+4.742s^2+15.49s+7.063}$$

$$G_{p_z u_{p_z}}(s)=-\frac{6.25}{s^2+7.077s+6.249}$$

$$G_{\psi u_\psi}(s)=\frac{1.277s+3.506}{s^2+4.045s+3.522}$$

4. 仿真研究

□ 系统辨识

6. 模型检验：以拟合度Fitness作为标准，越接近1说明效果越好。

$$1 - \|y - \hat{y}\| / \|y - \bar{y}\|$$

四个通道的拟合度分别为：98.56%,98.08%,95.84%,90.40%。

由于仿真环境比较理想，所以可以把标准定到80~90%，但在实际实验中由于其他扰动因素的存在，一般辨识到达70%就可以了，太高会出现过拟合现象。

4. 仿真研究

□ 基于加性分解的动态逆控制器

需要注意的是，水平通道用基于加性输出分解的动态逆控制器来控制水平速度而不是水平位置，因此期望的水平速度可根据期望水平位置与当前位置计算得到。首先，过渡过程若满足

$$\dot{\mathbf{p}}_{\mathrm{h}}-\dot{\mathbf{p}}_{\mathrm{hd}}=-\mathbf{K}_{\mathbf{p}_{\mathrm{h}}}\left(\mathbf{p}_{\mathrm{h}}-\mathbf{p}_{\mathrm{hd}}\right)$$

其中，$\mathbf{K}_{\mathbf{p}_{\mathrm{h}}}\in\mathbb{R}^{2\times 2}\cap\mathcal{D}\cap\mathcal{P}$，则有 $\lim\limits_{t\to\infty}\left\|\mathbf{p}_{\mathrm{h}}(t)-\mathbf{p}_{\mathrm{hd}}(t)\right\|=0$

4. 仿真研究

基于加性分解的动态逆控制器

因为 $\dot{\mathbf{p}}_{\mathrm{h}}=\mathbf{R}_{\psi}\mathbf{v}_{\mathrm{h_b}}$，期望的水平速度应满足

$$\mathbf{R}_{\psi}\mathbf{v}_{\mathrm{h_b d}}=\dot{\mathbf{p}}_{\mathrm{hd}}-\mathbf{K}_{\mathbf{p}_{\mathrm{h}}}(\mathbf{p}_{\mathrm{h}}-\mathbf{p}_{\mathrm{hd}}).$$

由于 $\dot{\mathbf{p}}_{\mathrm{hd}}$ 很小，于是期望的水平速度可以简化为

$$\mathbf{v}_{\mathrm{h_b d}}=-\mathbf{R}_{\psi}^{-1}\mathbf{K}_{\mathbf{p}_{\mathrm{h}}}(\mathbf{p}_{\mathrm{h}}-\mathbf{p}_{\mathrm{hd}}).$$

这样便可设计基于加性分解的动态逆控制器了。

4. 仿真研究

基于加性分解的动态逆控制器

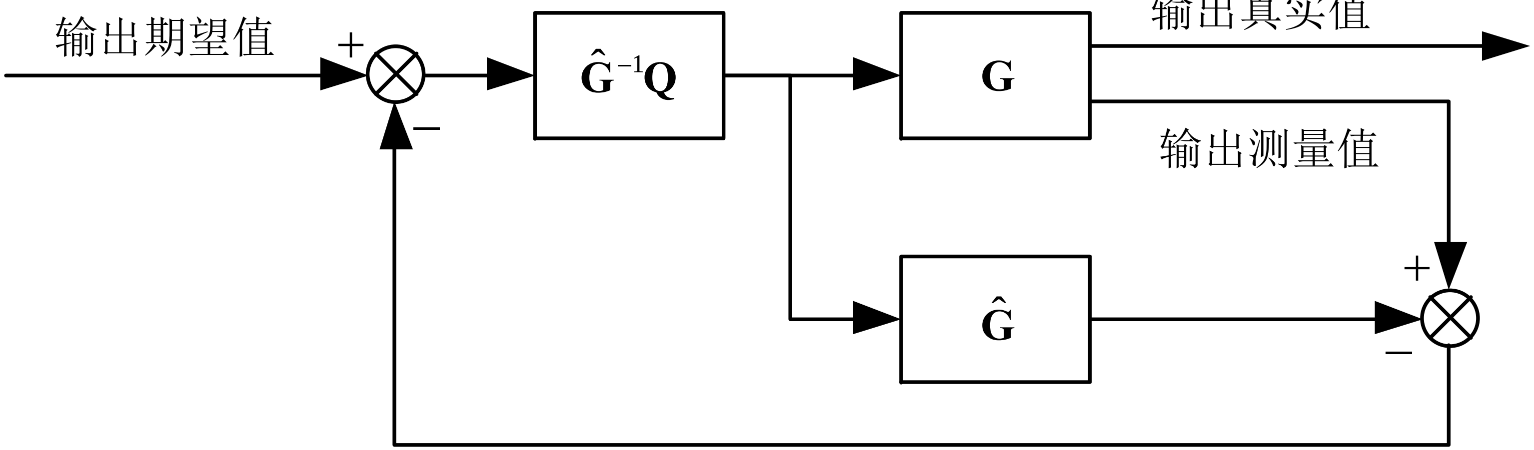


图12.10 基于加性输出分解方法的控制器设计

$$\mathbf{Q}_{\mathbf{v}_{\mathrm{h_b}}}\mathbf{u}_{\mathbf{v}_{\mathrm{h}}}(s)=\mathrm{diag}\left(\frac{1}{(\eta_x s+1)^2},\frac{1}{(\eta_y s+1)^2}\right)$$

$$Q_{p_z u_{p_z}}(s)=\frac{1}{(\eta_z s+1)^2}$$

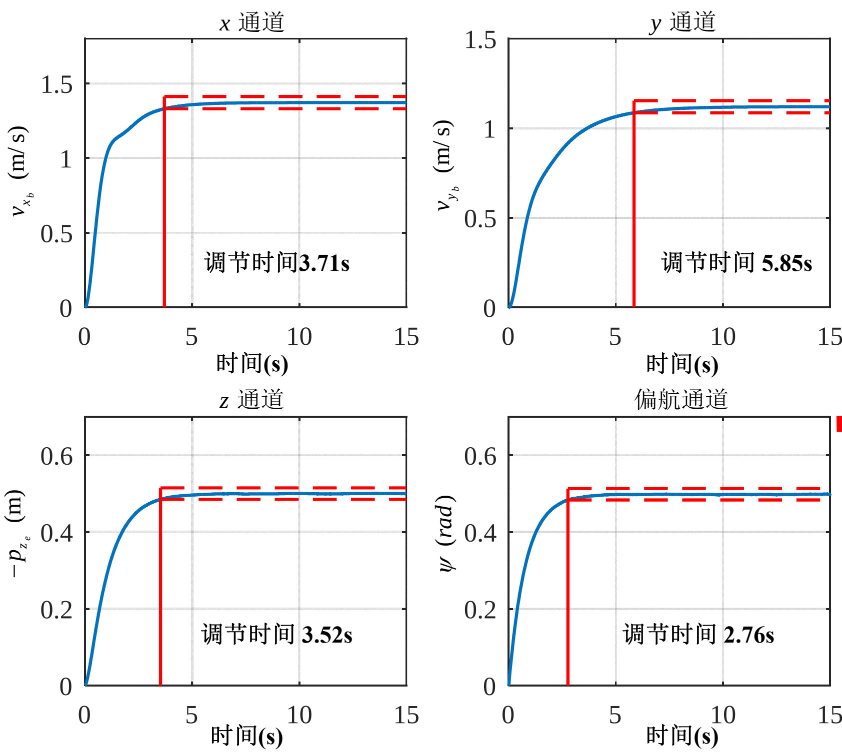
$$Q_{\psi u_\psi}=\frac{1}{(\eta_\psi s+1)^2}$$

$$\eta_x=0.2,\eta_y=0.2,\eta_z=0.3,\eta_\psi=0.3$$

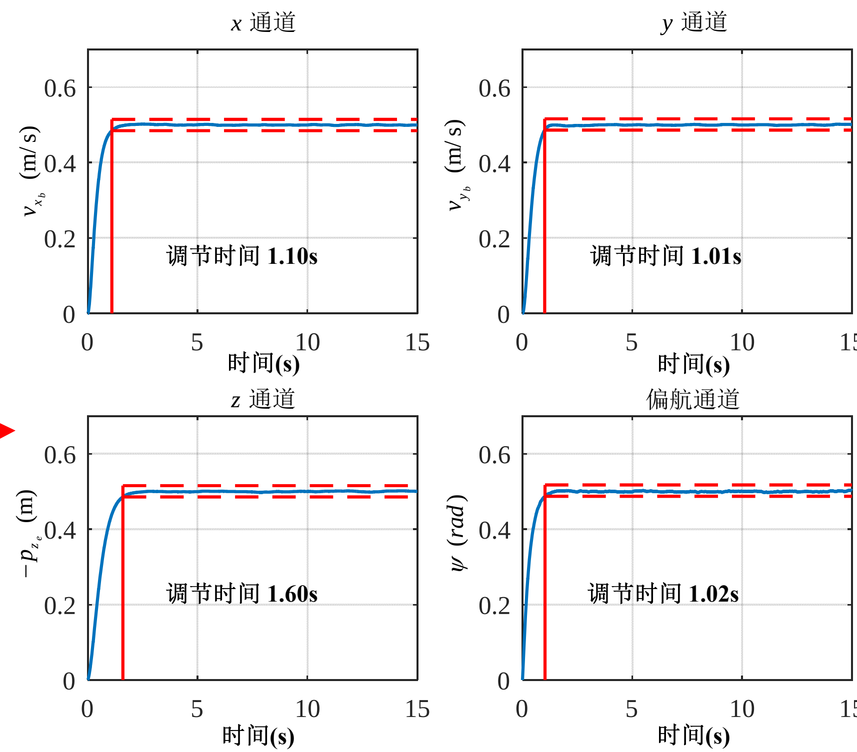
4. 仿真研究

◻ 基于加性分解的动态逆控

跟踪性能得到提高



简单的PID镇定控制



基于加性分解的动态逆控制器

5. 本讲小结

1. 有大量成熟的四旋翼产品或自驾，他们已经完成了良好的内环控制，在此基础上进行二次开发一方面可以获得良好的硬件基础，也能节省工作量。

2. 本讲给出了两种二次开发中用到的位置控制器设计方法，并比较了二者的优缺点和试用场合。

3. 由于基于加性分解的动态逆控制器的设计需要，本讲还详细介绍了对于多旋翼的基本系统辨识方法，有助于使用者了解带有半自主飞控平台的多旋翼的内部信息。

资源

(1)可靠飞行控制研究组主页课程中心(全部课件下载)

http://rfly.buaa.edu.cn/course

(2) 关注可靠飞行控制研究组公众号 buaarfly(文章、资讯等)

(3) 多旋翼设计与控制交流QQ群:183613048

(4) 视频课程(MOOC)同步发布，网易云课堂搜索“多旋翼”

http://study.163.com/course/introduction/1003715005.htm

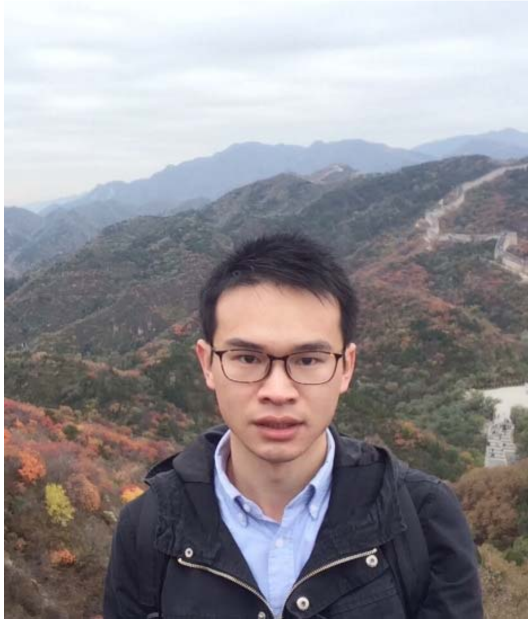
(5) 同名中文书本教材《多旋翼飞行器设计与控制》即将在电子工业出版社出版，敬请期待

(6) 有疑问可联系课程总助教戴训华，邮箱：dai@buaa.edu.cn

致谢

感谢控制组同学

张婧



戴训华

为本节课程准备作出的贡献。

谢谢

更详细的内容可以参考我们的教材：《多旋翼飞行器设计与控制》，电子工业出版社。

中文版目前在亚马逊、当当、京东、天猫（电子工业出版社旗舰店）等网站有售。

英文版本*Introduction to Multicopter Design and Control*，在Springer出版，在亚马逊有售。