本章目录

控制性能评估与调优

第五章 滤波估计与底层控制

5.1 滤波估计与底层控制基础

5.2 传感器标定与滤波估计

5.3 控制器设计与控制分配

5.4 控制性能评估与调优

5.5 PX4架构与控制开发接口

5.6 底层控制开发与实验验证

5.7 其他机型与进阶控制案例

5.8 习题与课堂讨论

本节 4 个教学单元

5.4.1 控制性能评价指标

教材对应：第5.1.4节第1、2条

5.4.2 PID参数与调优步骤

教材对应：第5.1.4节第3、4条

5.4.3 基于模型的参数设计

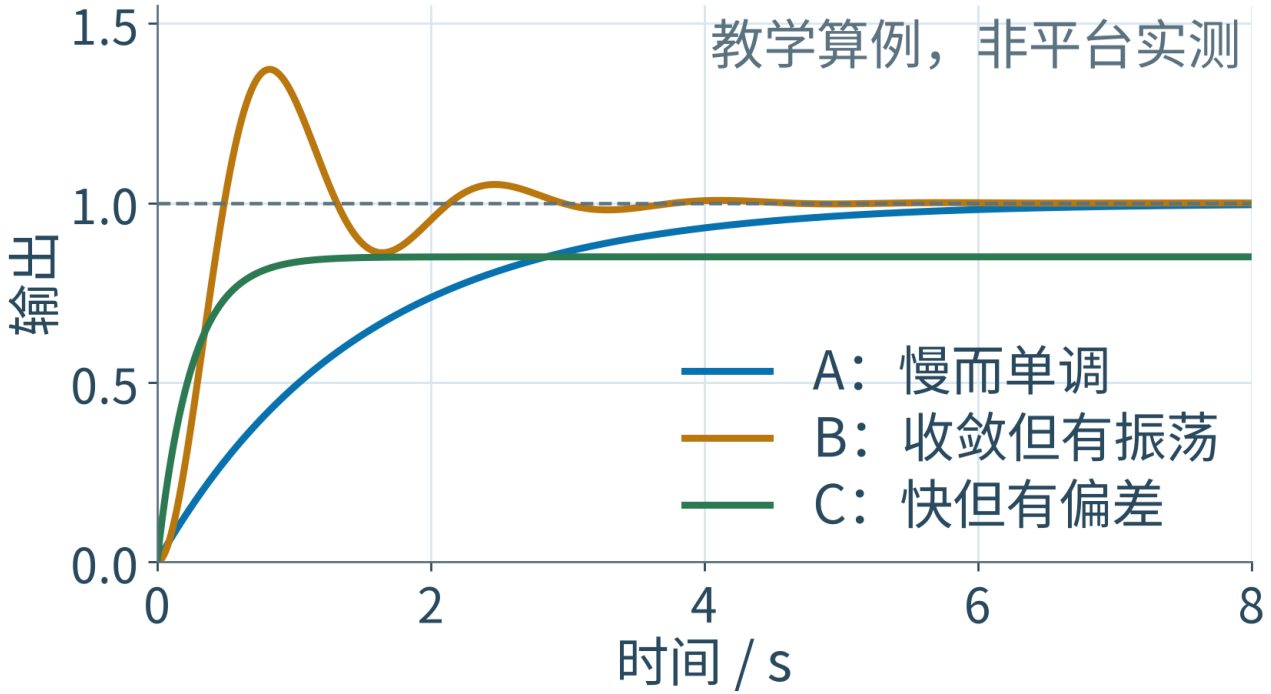
教材对应：第5.1.4节第5条

5.4.4 整机性能调优

教材对应：第5.1.4节第6条，另加频域与时延

5.4.1 控制性能评价指标：稳定性、快速性与精度

到达同一目标，响应仍可能不同



图：三组教学响应，目标均为1

稳定性：扰动后响应是否收敛。

平稳性：振荡幅度与次数是否合适。

快速性：目标改变后需要多久。

准确性：稳定后还差多少。

5.4.1 控制性能评价指标：阶跃响应指标

一条阶跃曲线包含四类读数

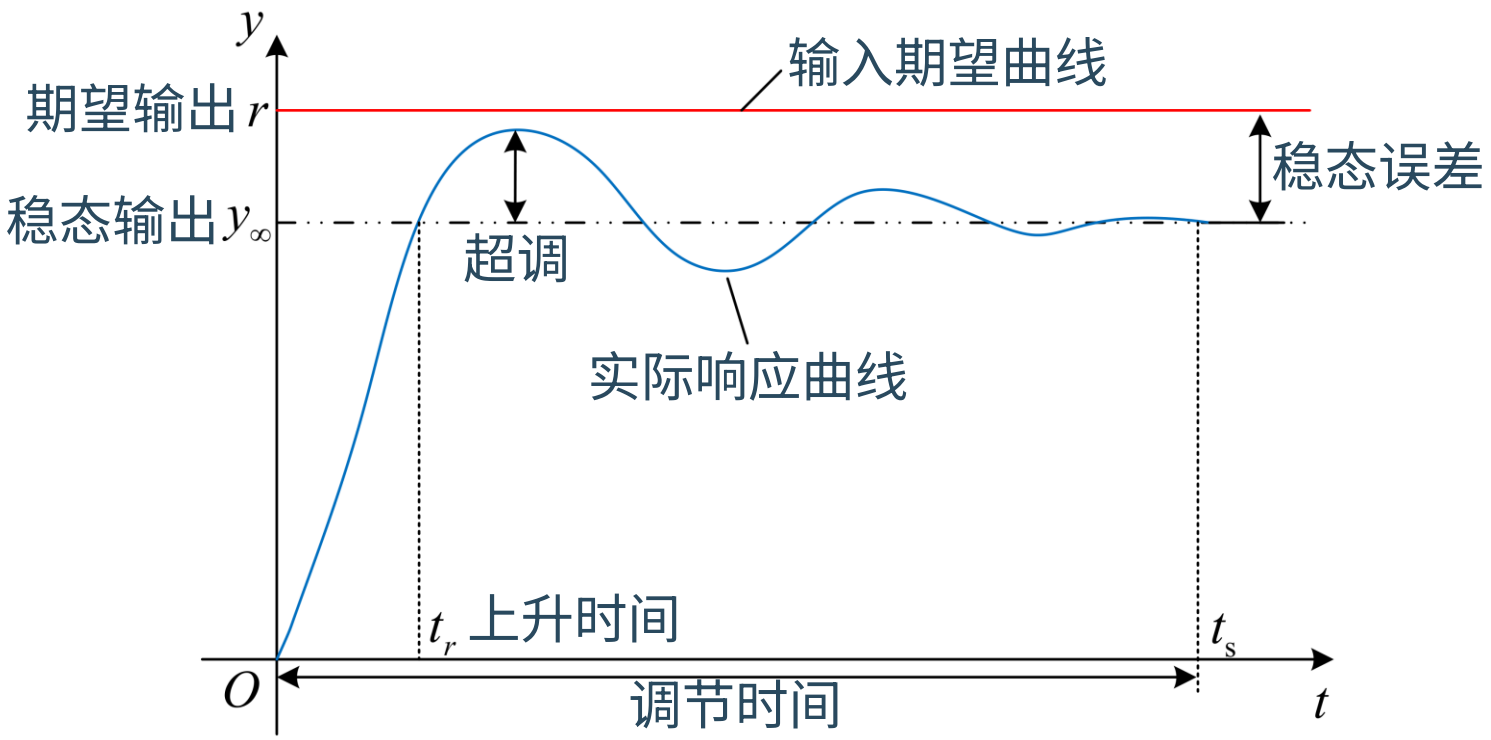


图5.3 阶跃响应性能评价指标

上升时间：教材取0至首次到达终值。

超调量：峰值超出终值的相对比例。

调节时间：进入并持续留在容差带（教材取5%）。

稳态误差：终值与参考值的绝对差。

本节算例统一采用10%–90%上升区间与2%终值带。

5.4.1 控制性能评价指标：指标读取算例

读数、分母与阈值决定指标值

教学读数：$r = 1.00,\ y_\infty = 0.98,\ y_{\max} = 1.10$；初值为0。

$$e_{ss} = |r - y_\infty| = |1.00 - 0.98| = 0.02$$

$$\sigma\% = \frac{y_{\max} - y_\infty}{y_\infty} \times 100\% = \frac{1.10 - 0.98}{0.98} \times 100\% = 12.24\%$$

到达阈值0.098与0.882的时刻，分别为0.20 s与1.10 s。
10%–90%以终值0.98为基准；调节时间要在曲线上确认此后不再出带。

$$t_{r,10\%-90\%} = 1.10 - 0.20 = 0.90\ \text{s}$$

$$0.98(1 \pm 5\%) = [0.931,\ 1.029]$$

5.4 控制性能评估与调优

5.4.1 控制性能评价指标：测试输入与验收

不同输入检验不同控制能力

输入或工况	主要观测	教学任务判据
单位阶跃	上升、超调、调节、稳态误差	超调≤15%；2%调节≤5 s
恒定扰动0.2	最大偏离与恢复过程	偏离≤0.05；末值恢复至1
连续轨迹	目标、输出与时间对齐	同时报告均方误差与滞后
负载或时延改变	响应与距限幅的余量	保持约束，重复同一输入

公平比较：初值、模型、输入、采样、滤波与输出上限保持一致。
记录控制输入及触限时间占比，避免只挑最好的一条输出曲线。

本章目录

控制性能评估与调优

第五章 滤波估计与底层控制

5.1 滤波估计与底层控制基础

5.2 传感器标定与滤波估计

5.3 控制器设计与控制分配

5.4 控制性能评估与调优

5.5 PX4架构与控制开发接口

5.6 底层控制开发与实验验证

5.7 其他机型与进阶控制案例

5.8 习题与课堂讨论

本节 4 个教学单元

5.4.1 控制性能评价指标

教材对应：第5.1.4节第1、2条

5.4.2 PID参数与调优步骤

教材对应：第5.1.4节第3、4条

5.4.3 基于模型的参数设计

教材对应：第5.1.4节第5条

5.4.4 整机性能调优

教材对应：第5.1.4节第6条，另加频域与时延

5.4.2 PID参数与调优步骤：PID参数与性能关系

PID参数影响表给出典型趋势

参数增加	上升时间	超调量	调节时间	稳态误差	稳定性
K_p增加	减小	增加	小幅增加	减小	下降
K_i增加	小幅减小	增加	增加	大幅减小	下降
K_d增加	小幅增加	减小	减小	几乎不变	提高

表5.1 PID参数与性能关联表（典型趋势）

比较时固定被控对象与其余参数；同时看噪声、限幅和稳定余量。
比例–积分–微分（PID）：P看当前误差，I累积历史误差，D看变化率。

5.4.2 PID参数与调优步骤：PID调优效果总览

P提速、I消静差、D抑超调，组合需折中

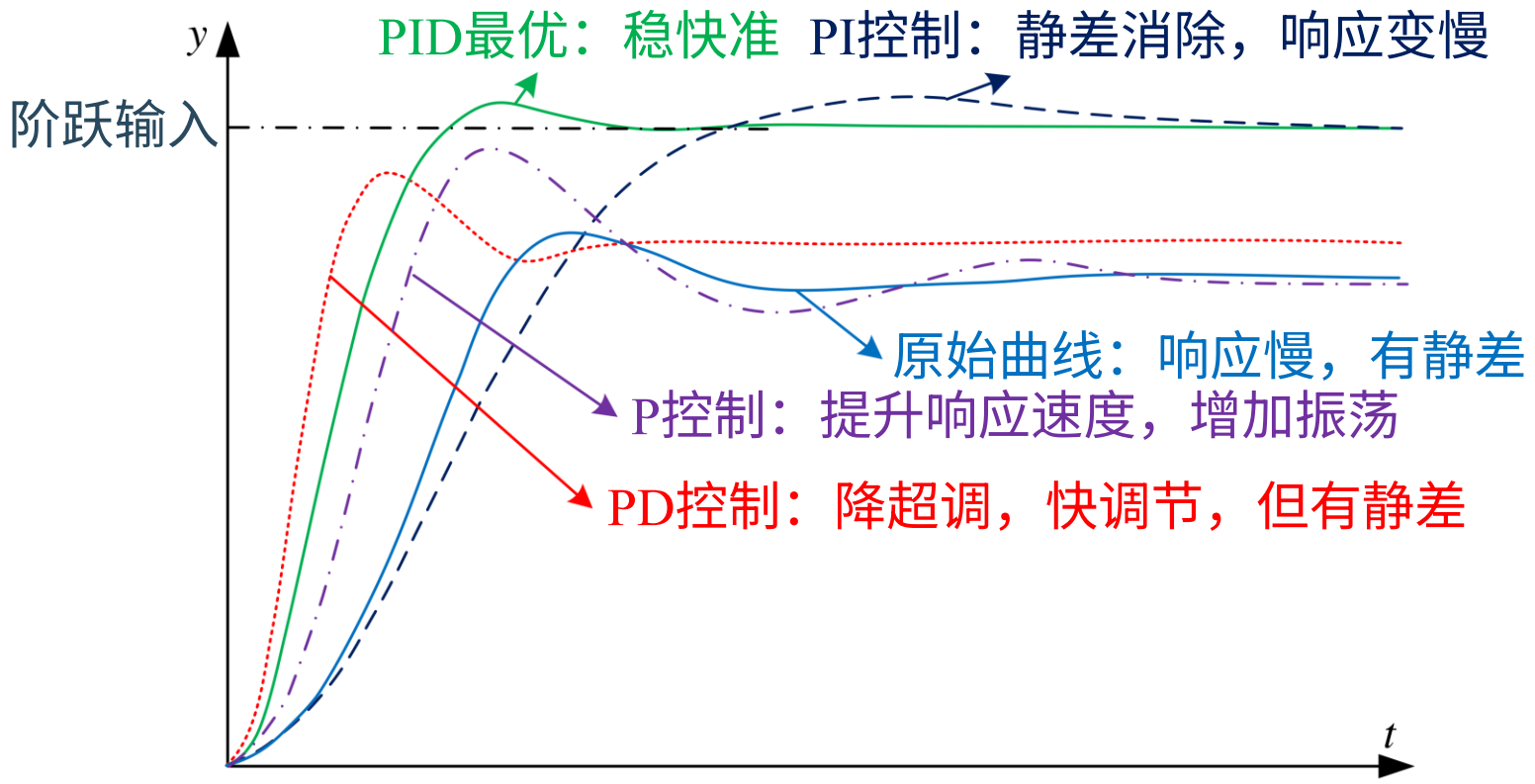


图5.4 PID控制调优效果图

原始：慢且有静差（即稳态误差）。

P：加快响应，可能增振荡。

PD：减小超调，仍可能有静差。

PI：消除静差，响应变慢。

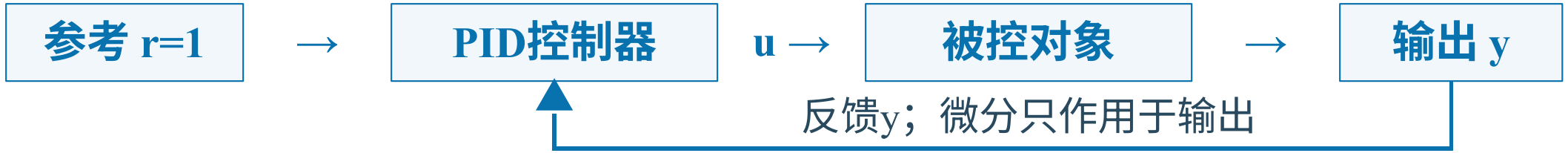
PID：兼顾快准稳的一组折中。

5.4.2 PID参数与调优步骤：共同教学模型

先固定模型与控制律，再比较参数

$$\ddot{y} + 2\dot{y} + y = u, \quad y(0) = \dot{y}(0) = I(0) = 0$$

$$u = K_{\mathrm{p}}(1 - y) + K_{\mathrm{i}} I - K_{\mathrm{d}}\dot{y}, \qquad \dot{I} = 1 - y$$

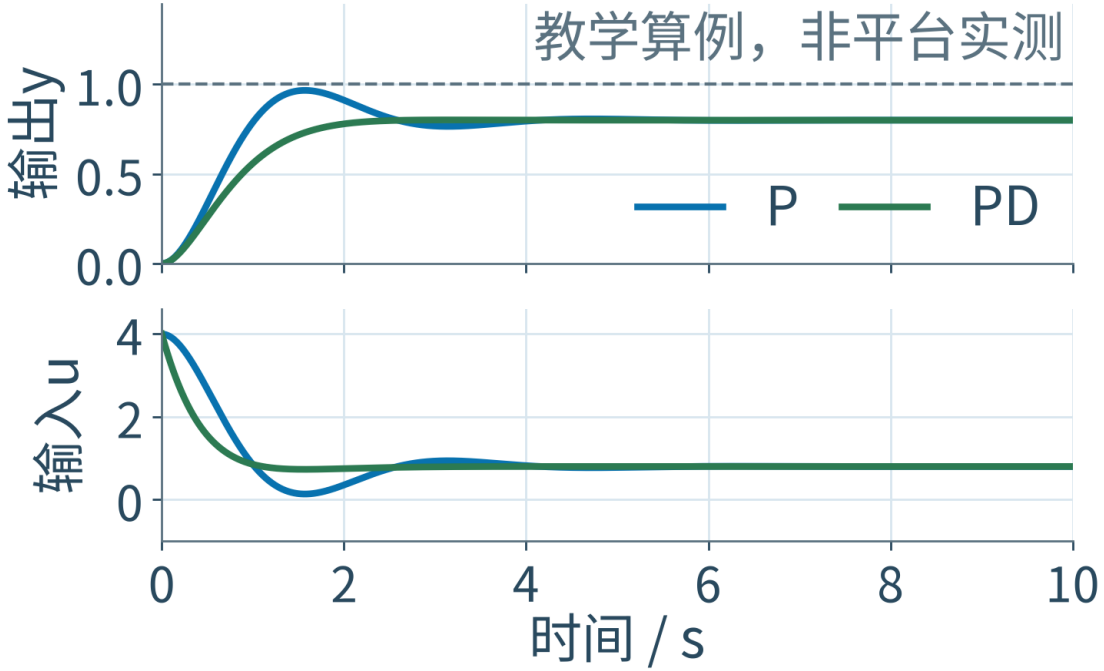


I为误差随时间的累积；零初值、单位阶跃，时间单位s。
输出与输入无量纲；积分增益单位1/s，微分增益单位s。
微分作用于输出、未滤波；未加限幅，输入峰值≤4.2，低于±5比较边界。

$$[K_{\mathrm{p}}, K_{\mathrm{i}}, K_{\mathrm{d}}]\text{: P} = [4,0,0],\ \text{PD} = [4,0,2],\ \text{PI} = [4,2,0],\ \text{PID} = [4,2,2]$$

5.4.2 PID参数与调优步骤：P与PD计算对照

微分降低超调，但上升更慢



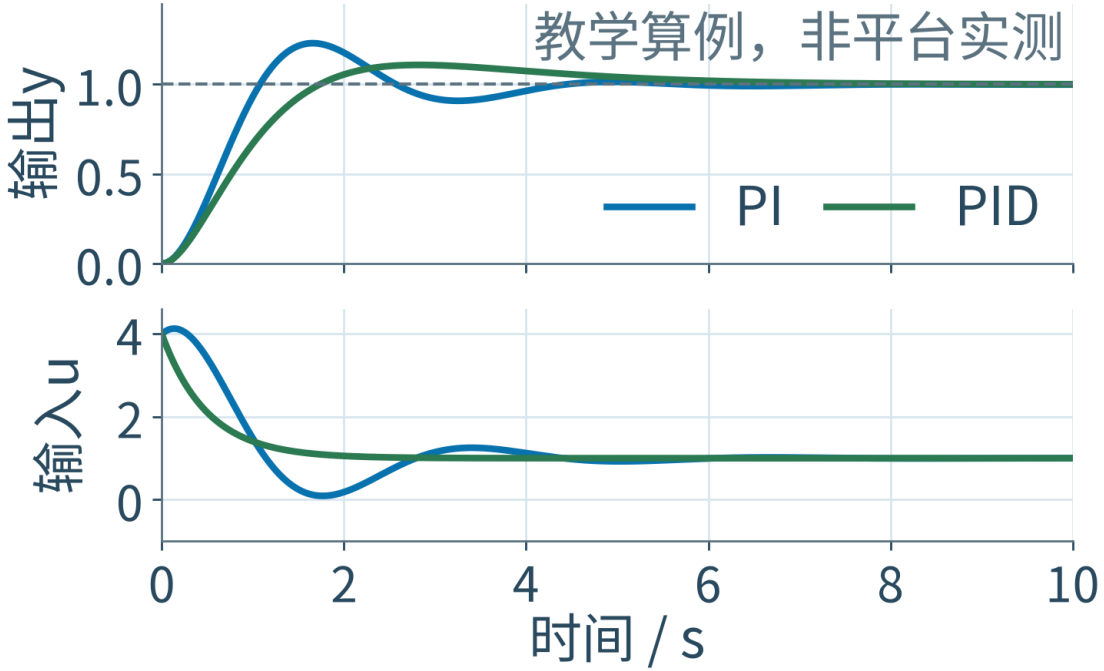
图：P与PD的输出y（上）和输入u（下），单位阶跃

指标	P	PD
终值	0.800	0.800
超调/%	20.79	0.19
上升/s 10–90%	0.689	1.278
2%调节/s	3.736	2.075

$$\ddot{y} + 2\dot{y} + y = u, \quad K_p = 4, \quad K_i = 0, \quad K_d = 0\,(\mathrm{P}) \text{ 或 } 2\,(\mathrm{PD})$$

5.4.2 PID参数与调优步骤：PI与PID计算对照

积分消除静差，瞬态仍需权衡



图：PI与PID的输出y（上）和输入u（下），单位阶跃

指标	PI	PID
终值	1.000	1.000
超调/%	22.96	10.84
上升/s 10–90%	0.727	1.173
2%调节/s	4.172	5.990

$$\ddot{y} + 2\dot{y} + y = u, \quad K_{\mathrm{p}} = 4, \quad K_{\mathrm{i}} = 2, \quad K_{\mathrm{d}} = 0\ (\mathrm{PI})\ 或\ 2\ (\mathrm{PID})$$

5.4.2 PID参数与调优步骤：联合验证结果

同一候选必须通过同一组工况

沿用共同教学模型；基准PI $[K_p, K_i, K_d] = [4,2,0]$，候选PID $[4,2,2]$。

① 阶跃试验

参考1，无扰动、无噪声。

读超调与2%调节时间。

② 扰动试验（独立）

参考1，8 s在对象输入端

叠加+0.2，无测量噪声。

③ 噪声试验（独立）

参考0，无扰动；测量叠加

$n(t) = 0.02\sin(30t)$。

输入均方根（RMS）取15–20 s。

观测与判据	PI	PID	判读
阶跃超调≤15%	22.96%	10.84%	候选通过
2%调节≤5 s	4.172 s	5.990 s	候选不通过
扰动最大偏离≤0.05	0.04147	0.03343	两组通过
噪声单独作用时输入均方根	0.05693	0.84610	噪声代价高

5.4.2 PID参数与调优步骤：参数与日志证据

一次参数改变对应一组完整结果

记录项	基准PI	候选PID
参数向量	$[K_p, K_i, K_d] = [4,2,0]$	$[K_p, K_i, K_d] = [4,2,2]$
工况	同模型，阶跃、扰动、噪声	同模型，阶跃、扰动、噪声
阶跃判定	超调未通过，调节通过	超调通过，调节未通过
扰动与噪声	扰动通过，噪声代价低	扰动通过，噪声代价高

日志例程：[安装目录]/RflySimAPIs/5.RflySimFlyCtrl/0.ApiExps/5.Log-Write-Read/Readme.pdf

日志记录目标、状态、请求与实际输出及时间戳，并确认新参数已生效。

5.4.2 PID参数与调优步骤：多旋翼调优步骤

从稳定内环开始逐项验证

阶段	主要动作	保留证据
建立基准	核对方向与限幅；I、D置0，P取小初值	版本及初值
比例调节	增大P至轻微振荡，再略减	阶跃及输入
积分引入	加适量I消除静差，防积分饱和	静差及积分
微分引入	加带低通滤波的D，比较阻尼与噪声	响应及噪声
内外环复测	内环稳定后调外环；每次只改一项	相同工况
阶段验证	仿真→硬件在环→真机；首飞限倾角、限速	阶段通过项

对应实验：e5.2姿态调优，目录、步骤与判据见“e5.2姿态调优实验”页。

5.4.2 PID参数与调优步骤：e5.2姿态调优实验

先调内环角速度，再调外环角度，最后扫频

目录：[安装目录]/RflySimAPIs/5.RflySimFlyCtrl/1.BasicExps/e5-AttitudeCtrl/e5.2/

入口：Readme.pdf；运行Init_control.m，自动打开AttitudeControl_tune.slx。纯仿真，需MATLAB 2022b及以上。

①内环比例：I、D置0；在AttitudeControl子模块把期望角速度换成阶跃，记录阶跃与q信号，逐步增大Kp_PITCH_AngleRate。

②每次改参：改完Init_control.m后重新运行它，再点Run，在Simulation Data Inspector中看阶跃响应。

③积分、微分与外环：再调Ki_PITCH_AngleRate、Kd_PITCH_AngleRate；内环满意后把期望俯仰角换成阶跃，由小增大外环Kp_PITCH_ANGLE。

④扫频：期望俯仰角设为Open-loop Input，实际俯仰角设为Open-loop Output，扫频得到Bode图。

5.4.2 PID参数与调优步骤：判据、停止与逐级验证

达到预设指标即停，再逐级走向真机

预期与判据：阶跃响应的超调和调节时间达到预设指标、无持续振荡；在幅值穿越频率处读相位裕度，相位穿越频率处读幅值裕度。

停止调参：固定高度做悬停、转向、前飞等固定动作并重复测试，响应迅速、无明显超调且均稳定即可停止，转入下一级验证。

常见问题：改参后未重新运行Init_control.m，模型仍用旧参数；调参顺序与读裕度方法见Readme常见问题Q1、Q2。

逐级验证：

软件仿真	→	硬件在环仿真	→	真机实验
建模辨识、虚拟调参，确定参数数量级		飞控硬件运行同一组参数，复测固定动作		限最大倾角与速度，开阔场地低空试飞

固件版本：硬件在环与真机所用固件的确认方法见课件5.5「控制输出的版本边界」页。

本章目录

控制性能评估与调优

第五章 滤波估计与底层控制

5.1 滤波估计与底层控制基础

5.2 传感器标定与滤波估计

5.3 控制器设计与控制分配

5.4 控制性能评估与调优

5.5 PX4架构与控制开发接口

5.6 底层控制开发与实验验证

5.7 其他机型与进阶控制案例

5.8 习题与课堂讨论

本节 4 个教学单元

5.4.1 控制性能评价指标

教材对应：第5.1.4节第1、2条

5.4.2 PID参数与调优步骤

教材对应：第5.1.4节第3、4条

5.4.3 基于模型的参数设计

教材对应：第5.1.4节第5条

5.4.4 整机性能调优

教材对应：第5.1.4节第6条，另加频域与时延

5.4.3 基于模型的参数设计：参考模型来源

模型先说明状态、输入与来源

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}\mathbf{x} + \mathbf{B}u, \qquad \mathbf{x} = \begin{bmatrix} \theta_{\text{err}} \\ \omega_{\text{err}} \end{bmatrix}$$

状态（实际量减目标量）：θ_{err}为角误差（rad），ω_{err}为角速度误差（rad/s）。
固定目标、目标角速度为0；输入为归一化力矩。

滚转参考模型

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -5.8 & -0.59 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{B} = \begin{bmatrix} 0 \\ 19.27 \end{bmatrix}$$

俯仰参考模型

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -1.36 & -6.81 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{B} = \begin{bmatrix} 0 \\ 20.54 \end{bmatrix}$$

缺文件、缺A或B、非有限值或拟合率低于60%时，该轴改用随包参考模型。
参考模型来自FEISI-J150扫频辨识；拟合率指模型输出与日志的吻合度。

入口：5.RflySimFlyCtrl/2.AdvExps/e5_LQR-CtrlExp/2.ModelID2LQRSimple/Readme.pdf

5.4.3 基于模型的参数设计：两种状态反馈设计

极点配置与LQR的设计目标不同

极点配置：指定期望极点

$$\mathrm{eig}(\mathbf{A}-\mathbf{BK})=\{p_1,p_2,\dots\}$$

```
K = place(A,B,p);
```

线性二次调节器（LQR）：指定代价

$$J=\int_0^{\infty}(\mathbf{x}^{\mathsf{T}}\mathbf{Q}\mathbf{x}+u^{\mathsf{T}}\mathbf{R}u)\,\mathrm{d}t$$

```
K = lqr(A,B,Q,R);
```

例程采用极点配置；LQR另选Q（状态权重）、R（输入权重）。

极点配置接口　https://www.mathworks.com/help/control/ref/place.html

LQR求解接口　https://www.mathworks.com/help/control/ref/lti.lqr.html

5.4.3 基于模型的参数设计：参考模型极点配置计算

期望极点通过系数匹配得到增益

固定目标；θ表示角误差；a, d, b为参考模型A=[0,1;−a,−d]、B=[0;b]的元素。

$$\ddot{\theta} = -a\theta - d\dot{\theta} + bu, \quad u = -k_1\theta - k_2\dot{\theta}$$

$$(s + 6.7)(s + 5.3) = s^2 + 12s + 35.51$$

$$s^2 + (d + bk_2)s + (a + bk_1) \Rightarrow d + bk_2 = 12, \quad a + bk_1 = 35.51$$

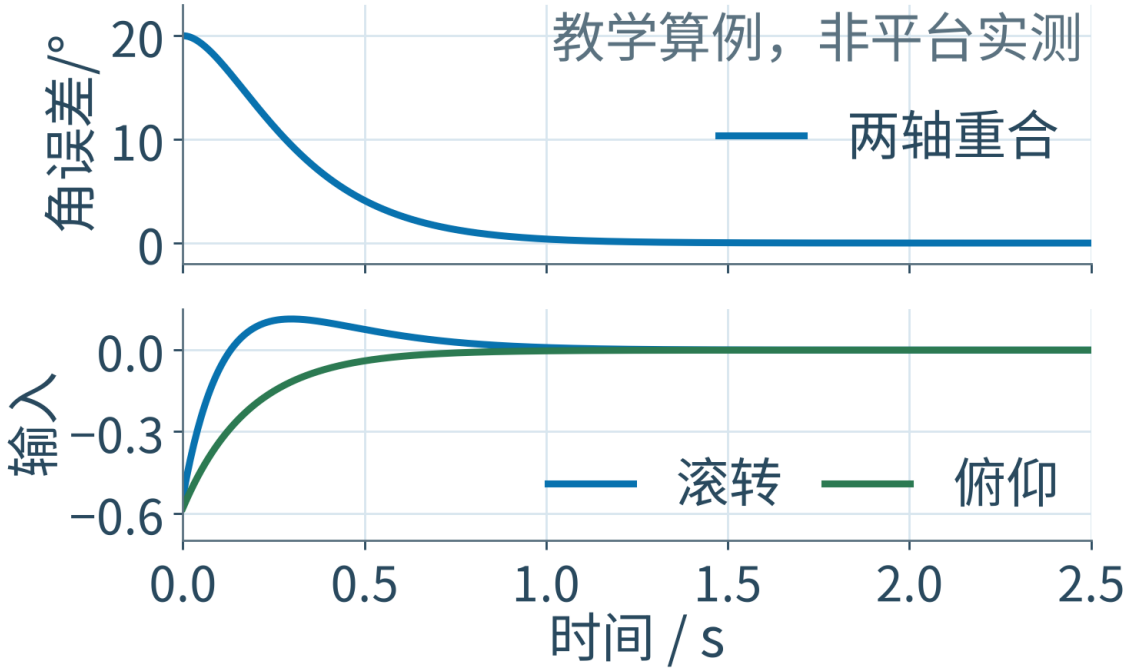
$$\mathbf{K}_{\text{roll}} = \left[\frac{35.51 - 5.8}{19.27}, \frac{12 - 0.59}{19.27}\right] = [1.5418,\ 0.5921]$$

$$\mathbf{K}_{\text{pitch}} = [1.6626,\ 0.2527], \quad p_1 = -6.7,\ p_2 = -5.3$$

5.4.3 基于模型的参数设计：参考模型完整结果

本例相同初值下，两轴角误差曲线重合

初值：$\theta_{\mathrm{err}} = 20^\circ$，$\omega_{\mathrm{err}} = 0\ \mathrm{rad/s}$。



图：两轴角误差（上）与归一化输入（下），无限幅

读数	滚转	俯仰
起始输入	−0.5382	−0.5804
0.5 s角差	4.1059°	4.1059°
1.0 s角差	0.3846°	0.3846°
2.5 s角差	均约0.000164°	

两轴闭环特征式与初值相同；
归一化输入仍不同。

5.4.3 基于模型的参数设计：权重与Riccati方程

LQR把状态误差与输入写进同一代价

连续时间、无限时域、无硬约束；先按允许状态与输入尺度归一化。
Q为状态权重，R为输入权重，P为Riccati方程的稳定化解。

$$J = \int_0^\infty (\mathbf{x}^\top \mathbf{Q}\mathbf{x} + \mathbf{u}^\top \mathbf{R}\mathbf{u})\, \mathrm{d}t$$

$$\mathbf{A}^\top \mathbf{P} + \mathbf{P}\mathbf{A} - \mathbf{P}\mathbf{B}\mathbf{R}^{-1}\mathbf{B}^\top \mathbf{P} + \mathbf{Q} = 0$$

$$\mathbf{K} = \mathbf{R}^{-1}\mathbf{B}^\top \mathbf{P}, \qquad \mathbf{u} = -\mathbf{K}\mathbf{x}$$

常用充分条件：$Q \succeq 0,\ R \succ 0$；(A, B)可稳定，$(Q^{1/2}, A)$可检测。
$\succeq$为半正定，$\succ$为正定；不衰减的模态须可控制，并计入状态代价。

5.4.3 基于模型的参数设计：一维LQR数值算例

一维LQR手算：取正根P=√R作稳定化解

$$\dot{x} = u, \quad x(0) = 1, \quad A = 0, B = 1, Q = 1$$

$$-\frac{P^2}{R} + 1 = 0 \quad \Rightarrow \quad P = \sqrt{R}, \quad K = \frac{P}{R} = \frac{1}{\sqrt{R}}$$

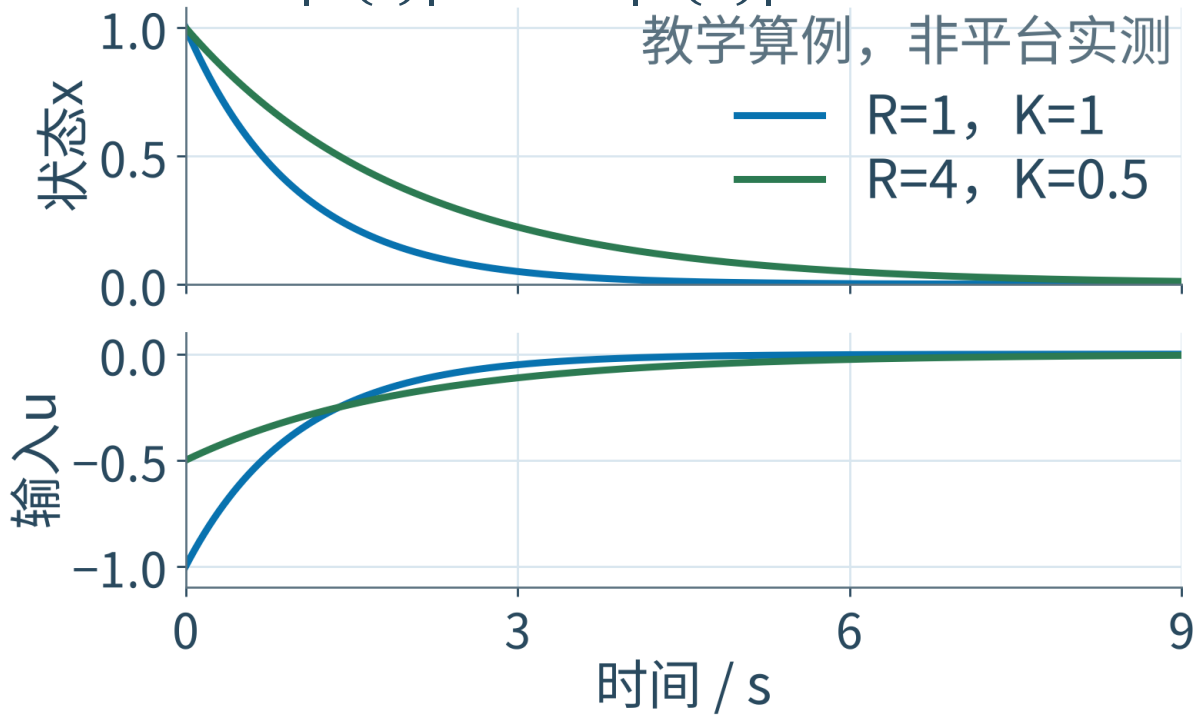
输入权重	稳定化解	反馈增益	闭环极点
$R = 1$	$P = 1$	$K = 1$	-1
$R = 4$	$P = 2$	$K = 0.5$	-0.5

$$x(t) = e^{-Kt}, \qquad u(t) = -Ke^{-Kt}$$

5.4.3 基于模型的参数设计：LQR完整计算与共同代价

较小输入需求对应更慢收敛

2%初值带：$|x(t)| \le 0.02|x(0)| = 0.02$



图：R=1与R=4的状态x（上）与输入u（下）

两组均按$Q = R = 1$评价。

指标	$R = 1$	$R = 4$
最大|u|	1.000	0.500
2%调节/s	3.912	7.824
输入平方积分	0.500	0.250
共同代价	1.000	1.250

共同代价：$J_{\mathrm{ref}} = \int_0^{\infty} (x^2 + u^2)\,\mathrm{d}t$

5.4.3 基于模型的参数设计：可实现性检查

反馈增益先算请求，再检查可实现性

一步算例：$K = [4,3]$为另设的教学增益。

$$\mathbf{x} = \begin{bmatrix} 0.1\ \text{rad} \\ 0.2\ \text{rad/s} \end{bmatrix}, \qquad \mathbf{K} = [4,\ 3]$$

$$u = -\mathbf{K}\mathbf{x} = -(4 \times 0.1 + 3 \times 0.2) = -1.0$$

量	含义与单位
$k_1 = 4$	角误差增益：1/rad
$k_2 = 3$	角速度误差增益：s/rad

执行器限幅±0.6：请求−1被截为−0.6；受限后须重新仿真检验极点结论。

$$u_{\text{actual}} = \text{clip}(u, -0.6, 0.6) = -0.6$$

5.4.3 基于模型的参数设计：设计与PID实现

状态反馈映射取决于控制结构

$$u = -k_\theta(\theta - \theta_{\mathrm{sp}}) - k_\omega(\omega - \omega_{\mathrm{sp}})$$

下标sp表示设定值；状态取实际量与设定值之差。

可对应的结构	映射条件
二状态PD	固定目标：k_θ即K_{p}，k_ω即作用于测量的K_{d}
含积分的反馈	新增误差积分状态，重建增广模型再求增益
串级PID	确认各环输入、量纲、采样、滤波与分配关系

模型设计给出有依据的起点；限幅、估计、时延和实际结构决定能否使用。

本章目录

控制性能评估与调优

第五章 滤波估计与底层控制

5.1 滤波估计与底层控制基础

5.2 传感器标定与滤波估计

5.3 控制器设计与控制分配

5.4 控制性能评估与调优

5.5 PX4架构与控制开发接口

5.6 底层控制开发与实验验证

5.7 其他机型与进阶控制案例

5.8 习题与课堂讨论

本节 4 个教学单元

5.4.1 控制性能评价指标

教材对应：第5.1.4节第1、2条

5.4.2 PID参数与调优步骤

教材对应：第5.1.4节第3、4条

5.4.3 基于模型的参数设计

教材对应：第5.1.4节第5条

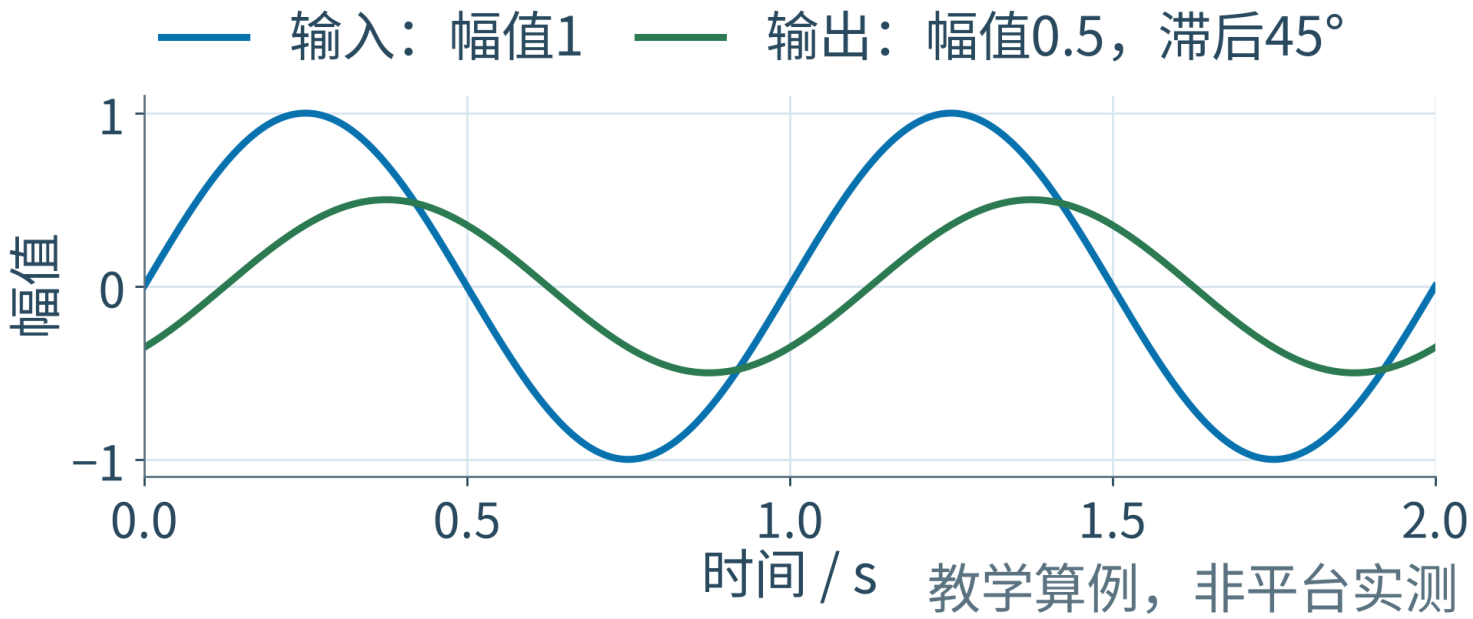
5.4.4 整机性能调优

教材对应：第5.1.4节第6条，另加频域与时延

5.4.4 整机性能调优：频率响应入门

同一频率下，先读幅值比与时间滞后

时延在交越频率附近叠加相位滞后，削弱稳定余量。



1 Hz：每秒重复1次。
峰值相差0.125 s。

$$\frac{A_{\text{out}}}{A_{\text{in}}} = 0.5$$

$$20\log_{10}(0.5) = -6.02\ \text{dB}$$

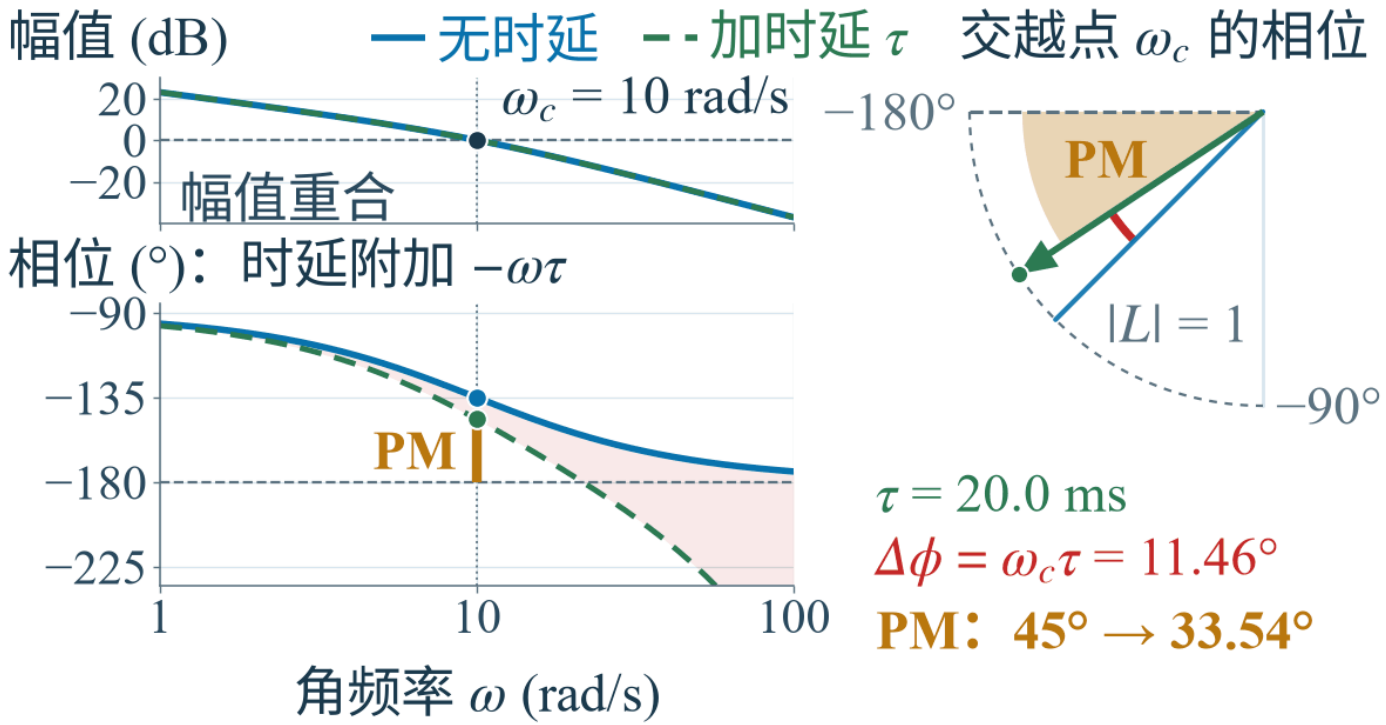
$$\phi_{\text{lag}} = 360^\circ f\,\Delta t = 360^\circ \times 1 \times 0.125 = 45^\circ$$

图：正弦教学示例；换算见课件4.4「频率单位与相位时间差」页

单位负反馈：开环$L(s)$，闭环$T(s) = L(s)/(1 + L(s))$；稳定裕度在开环上判读。

5.4.4 整机性能调优：相位裕度判读

本例20 ms时延在交越点损失11.46°



图：单位负反馈单环开环教学计算，时延0→20 ms；PM越小越接近临界，超调与振荡通常越明显。

对应实验：e5.2扫频画Bode图，在幅值穿越频率处读相位裕度

$$L(s)=\frac{100\sqrt{2}}{s(s+10)}$$

$$\omega_c = 10\ \text{rad/s}$$

$$\text{PM} = 180^\circ - 135^\circ = 45^\circ$$

$$\Delta\phi = 10 \times 0.02 \times \frac{180^\circ}{\pi}$$

$$= 11.46^\circ$$

$$\text{PM}_{\text{delay}} = 33.54^\circ$$

5.4.4 整机性能调优：结构、感知与执行器排查

先排查结构、隔振与滤波，再调控制参数

① 结构耦合
证据： 固定频率振荡随机架变化
验证： 检查刚性、紧固与共振

→

② 隔振/温漂
证据： IMU噪声、偏置随环境变化
验证： 对照安装、振动和温度

→

③ 滤波估计
证据： 状态平滑但明显落后目标
验证： 对照原始量与估计的时间戳

④ 调度/链路
证据： 时间戳间隔不均或数据滞后大
验证： 统计周期、耗时和丢样

→

⑤ 执行器
证据： 请求变化，实际输出停在上限
验证： 查分配余量与输出映射

→

⑥ 模型/工作点
证据： 变负载后跟踪明显变差
验证： 复核参数、配平和辨识

课堂练习

响应变慢时，先加大增益吗

任务：先遮住后两列，根据日志写出原因和一项能区分原因的验证。

已知日志	初步判断	参考验证动作
A：反馈落后60 ms	滤波过强或数据滞后	对齐原始、估计与目标时间
B：输出持续停在上限	执行能力或限幅瓶颈	比较请求、分配与实际输出
C：输入小、反馈及时	控制强度不足 是候选原因	同条件小步提高比例再复测

参考要点：先查反馈是否可信，再查执行量能否实现，最后验证参数方向。
每项判断都要附一项能缩小原因范围的观察或对比。

本节小结

调优方向由条件与证据共同决定

指标口径：上升区间、超调分母和容差带必须明确。

参数比较：固定对象、工况和约束，同时报告输出与输入；达标即停，逐级验证。

模型方法：极点配置指定极点，LQR指定代价；映射到PID要核结构。

整机排查：先查结构、隔振与滤波；时延在交越频率处削减相位裕度。

易错点：单项改善当整体通过；不同权重的代价直接比较；限幅后沿用线性极点结论。