



5.4 控制性能评估与调优



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

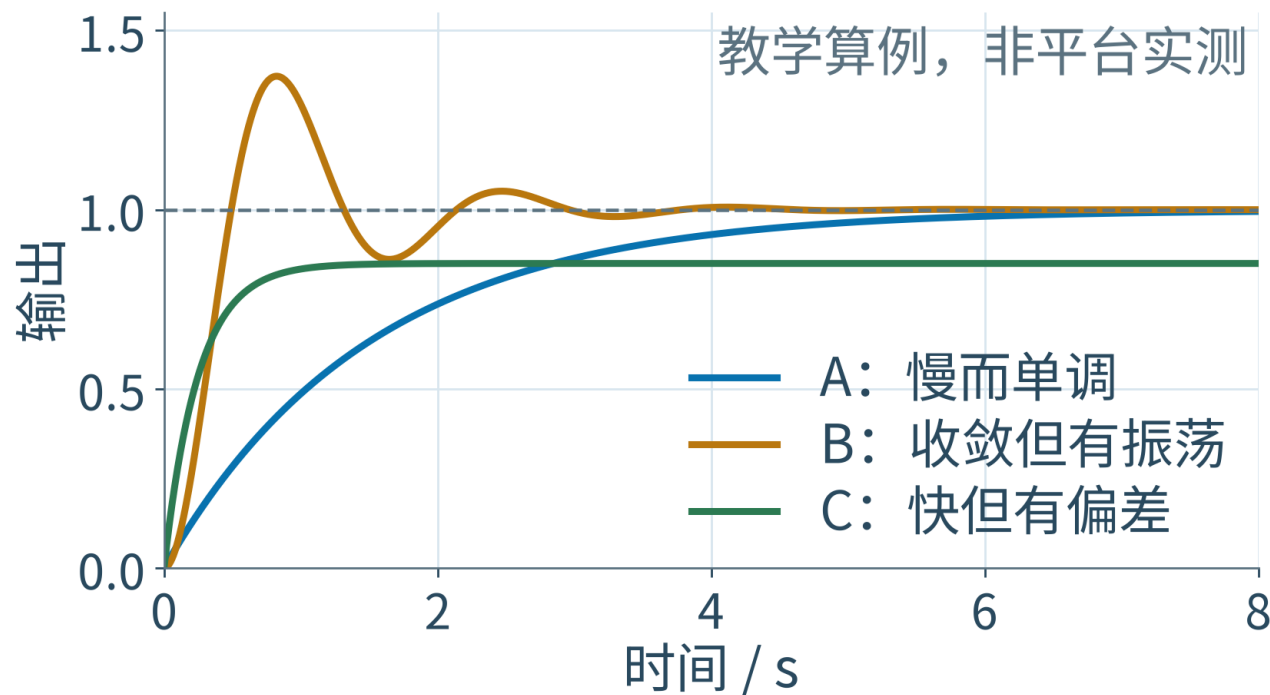
5.4.4 整机性能调优

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

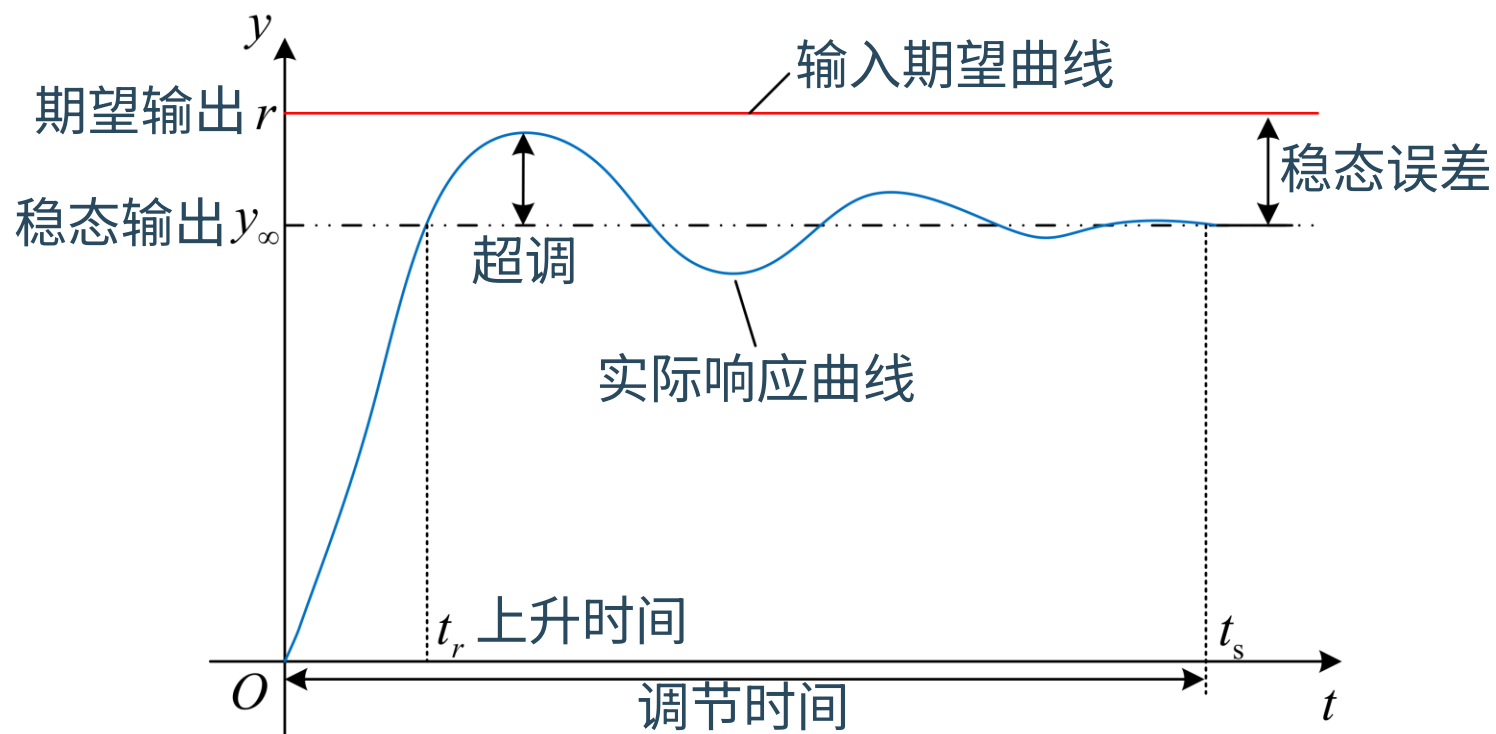


图5.3 阶跃响应性能评价指标

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。

软件常用10%–90%上升与2%带；本节表格按此口径。

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。

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

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

5.4.1 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 $\leq 15\%$ ；2%调节 $\leq 5\text{ s}$
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。



5.4 控制性能评估与调优



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

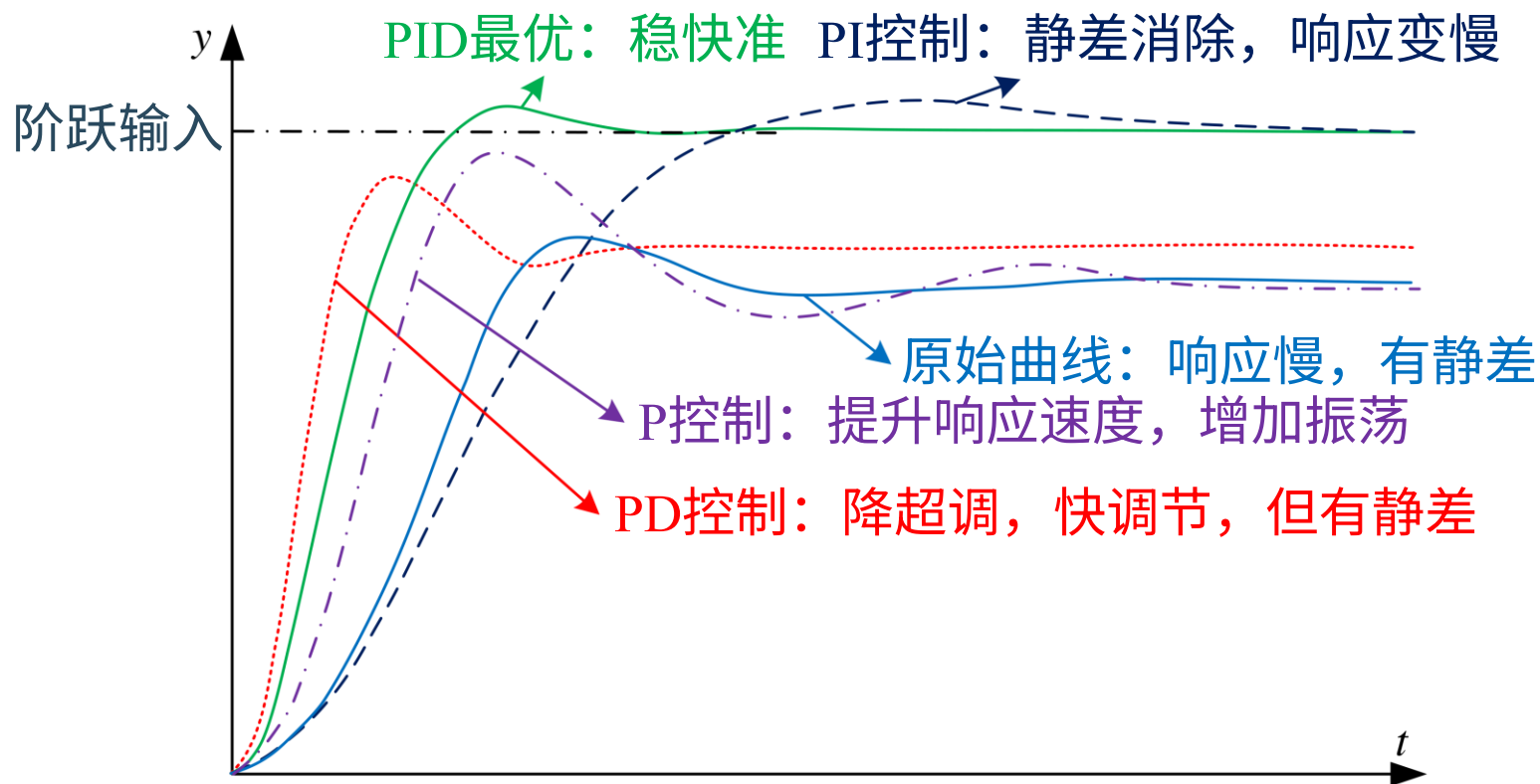


图5.4 PID控制调优效果图

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。

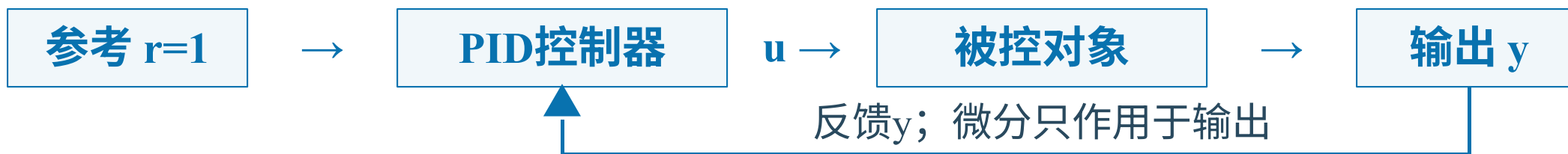
PID：兼顾快准稳的
一组折中。

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

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

$$u = K_p(1 - y) + K_i I - K_d \dot{y}, \quad \dot{I} = 1 - y$$



I 为误差随时间的累积；零初值、单位阶跃，时间单位s。

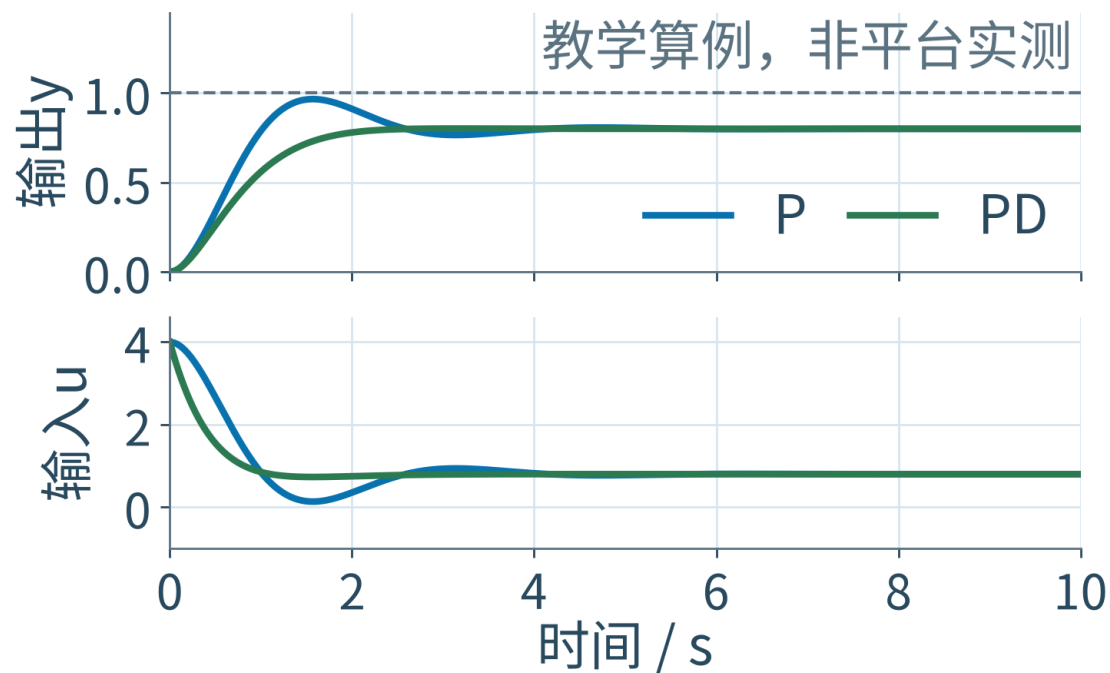
输出与输入无量纲；积分增益单位1/s，微分增益单位s。

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。

$$[K_p, K_i, K_d]: P = [4, 0, 0], PD = [4, 0, 2], PI = [4, 2, 0], PID = [4, 2, 2]$$

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

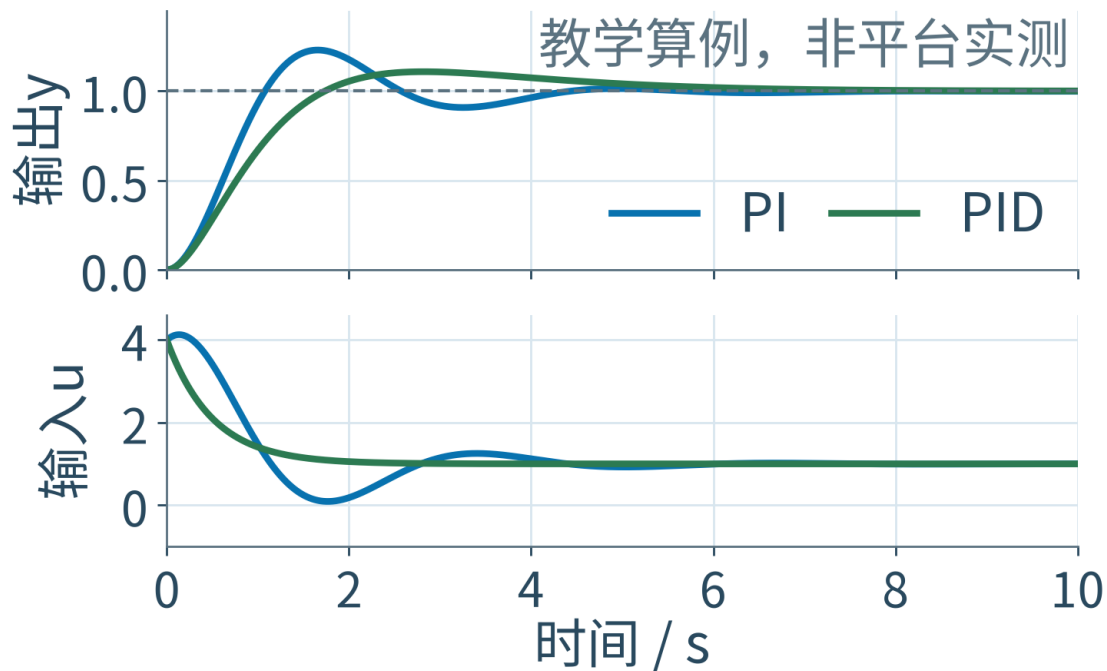


指标	P	PD
终值	0.800	0.800
超调/%	20.79	0.19
上升/s 10-90%	0.689	1.278
2%调节/s	3.736	2.075

图：P与PD的输出y（上）和输入u（下），单位阶跃

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

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



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

图：PI与PID的输出y（上）和输入u（下），单位阶跃

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

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 $\leq 15\%$	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 控制性能评估与调优



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 控制性能评估与调优

5.4.2 PID参数与调优步骤：判据、停止与逐级验证

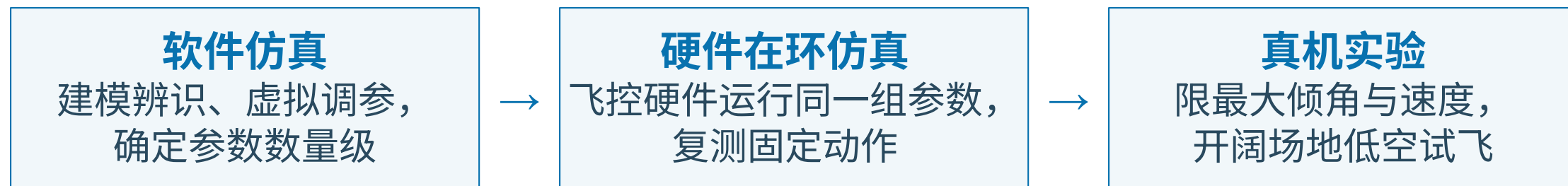
达到预设指标即停，再逐级走向真机

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：



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

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

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

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

$$\mathbf{K} = \text{place}(\mathbf{A}, \mathbf{B}, \mathbf{p});$$

线性二次调节器（LQR）：指定代价

$$J = \int_0^{\infty} (\mathbf{x}^T \mathbf{Q} \mathbf{x} + u^T \mathbf{R} u) dt$$

$$\mathbf{K} = \text{lqr}(\mathbf{A}, \mathbf{B}, \mathbf{Q}, \mathbf{R});$$

例程采用极点配置；LQR另选 $\mathbf{Q}$ （状态权重）、 $\mathbf{R}$ （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。

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

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

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

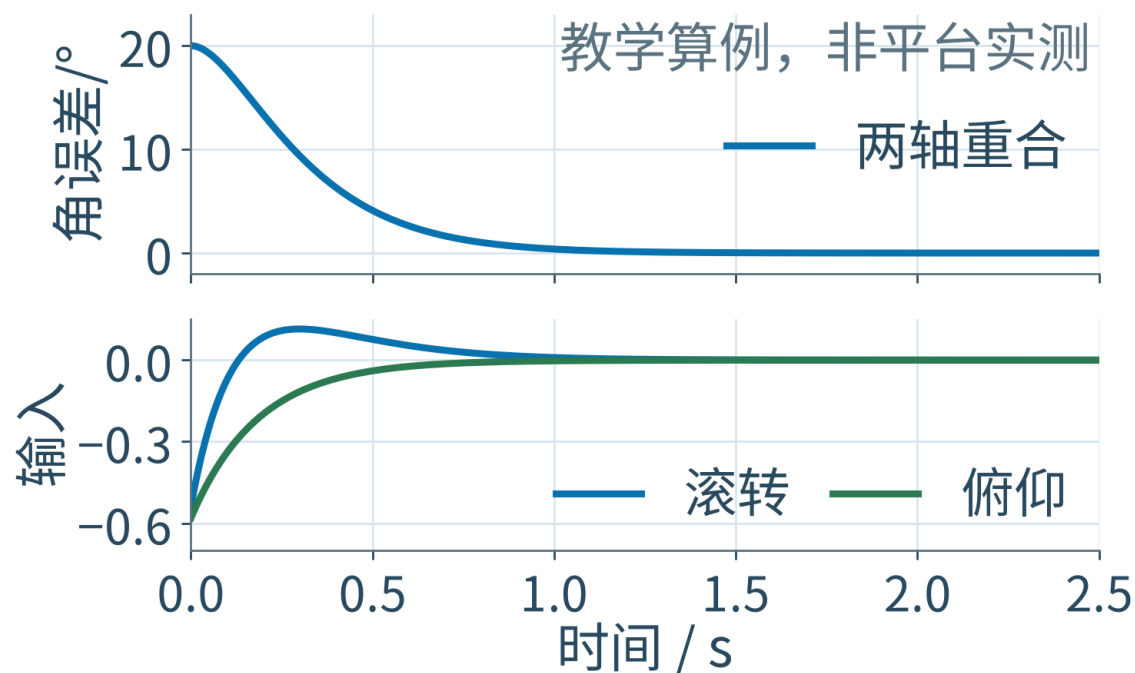
$$\mathbf{K}_{\text{roll}} = \left[\frac{35.51 - 5.8}{19.27}, \frac{12 - 0.59}{19.27} \right] = [1.5418, 0.5921]$$

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

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



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。

$$J = \int_0^{\infty} (\mathbf{x}^T \mathbf{Q} \mathbf{x} + \mathbf{u}^T \mathbf{R} \mathbf{u}) dt$$
$$\mathbf{A}^T \mathbf{P} + \mathbf{P} \mathbf{A} - \mathbf{P} \mathbf{B} \mathbf{R}^{-1} \mathbf{B}^T \mathbf{P} + \mathbf{Q} = 0$$

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

常用充分条件： $Q \geq 0$, $R > 0$ ； (A, B) 可稳定， $(Q^{1/2}, A)$ 可检测。
 $\geq$ 为半正定， $>$ 为正定；不衰减的模式须可控制，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 $P=\sqrt{R}$ 作稳定化解

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

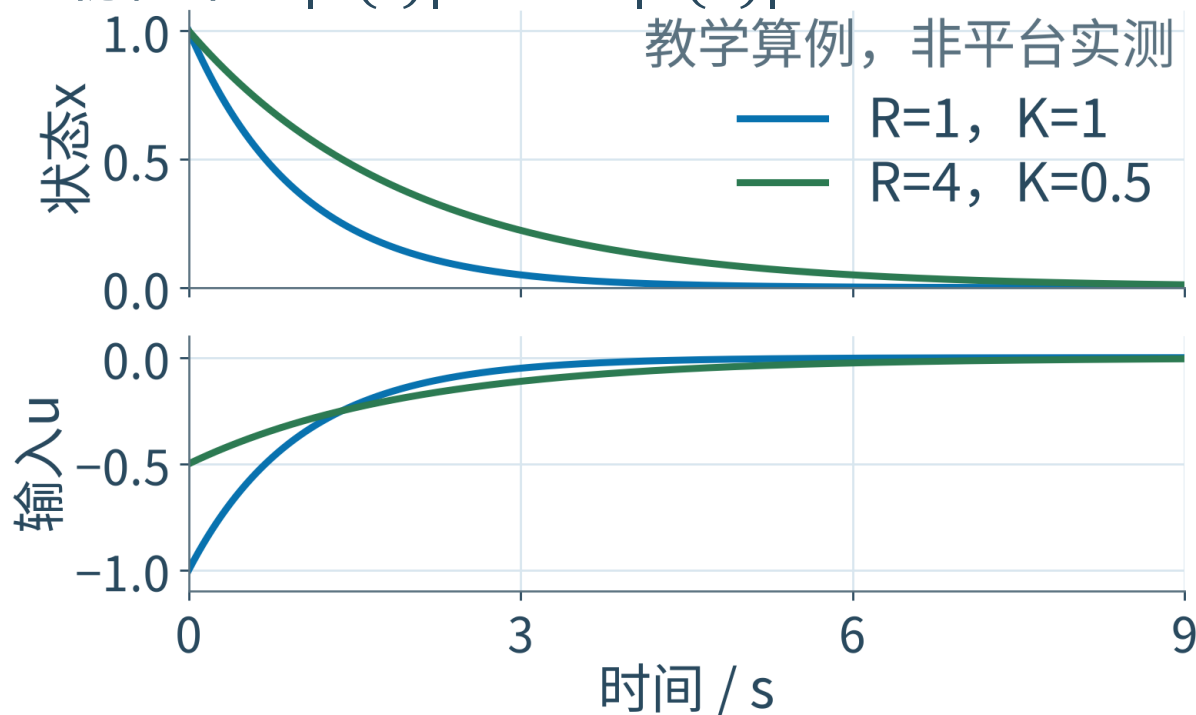
$$-\frac{P^2}{R} + 1 = 0 \quad \Rightarrow \quad P = \sqrt{R}, \quad K = \frac{P}{R} = \frac{1}{\sqrt{R}}$$

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

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

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： $|x(t)| \leq 0.02|x(0)| = 0.02$



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： $J_{\text{ref}} = \int_0^{\infty} (x^2 + u^2) dt$

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。

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

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

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

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

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

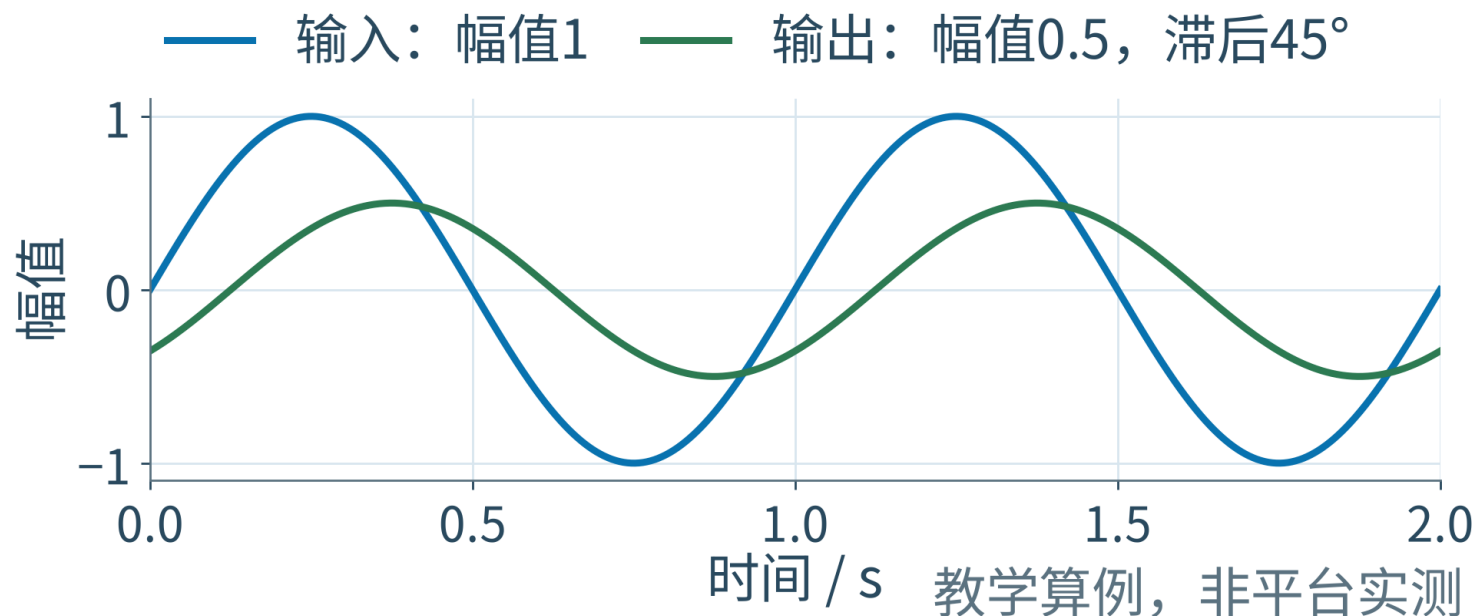
5.4.4 整机性能调优

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。

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

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

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

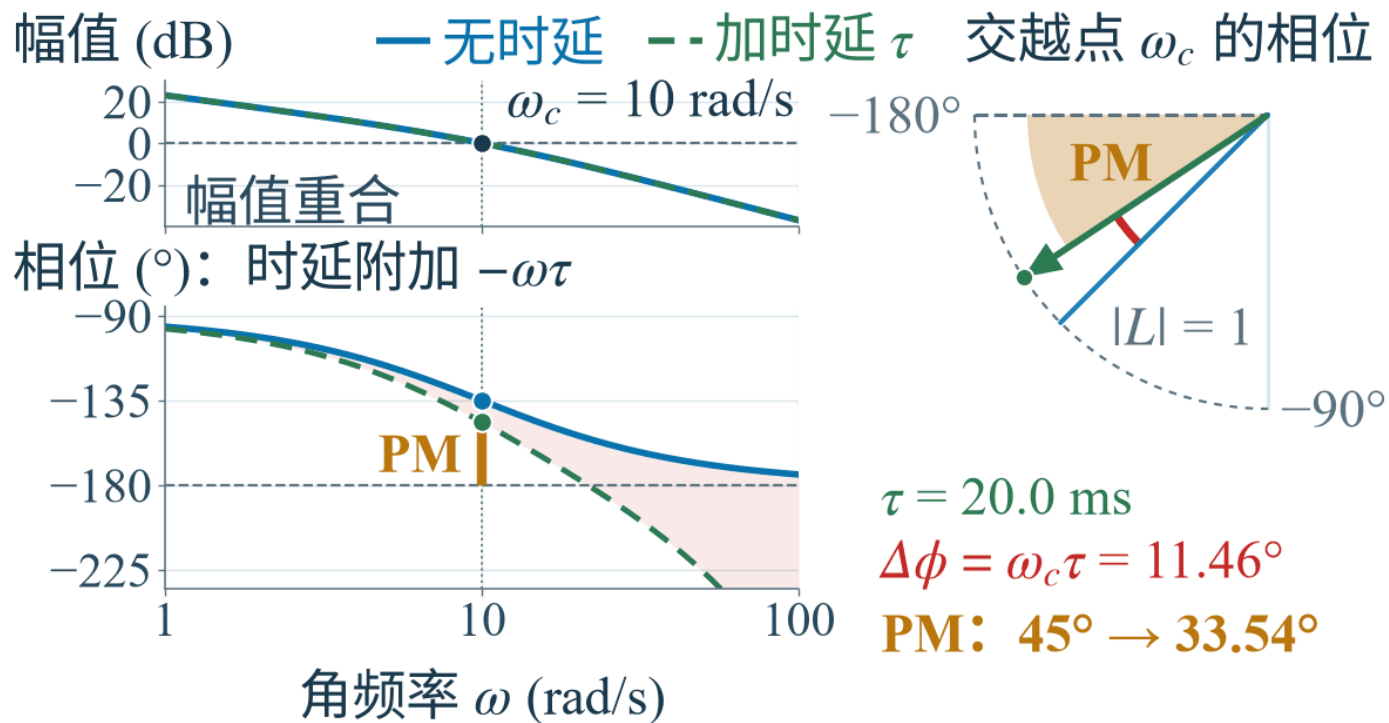
图：正弦教学示例；换算见课件4.4「频率单位与相位时间差」页

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°

对应实验： e5.2扫频画Bode图，在幅值穿越频率处读相位裕度



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

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

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

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

$$= 11.46^\circ$$

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

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。

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。