

哈尔滨工业大学控制与仿真中心

# 智能系统控制实践 实验指导书

---

伺服系统控制器设计与分析  
(二)

# 1. 实验概述

伺服系统控制器的设计目标通常包括提高系统的精度、稳定性、响应速度以及适应各种工作条件的能力。这些目标需要在设计过程中综合考虑，确保控制器能够满足系统的实际需求。本实验首先需要完成对转台伺服系统的参数辨识；其次，通过选用合适的控制器，使得系统能够跟上给定的指令信号；在此基础上，需要测试系统的闭环带宽，使得被控系统至少在 8Hz 及以下满足双十指标动态性能要求（双十指标：指在该频率正弦信号的激励下，系统输出信号相较于指令信号幅值衰减不大于 10%，相位滞后不大于 10 度），并需要设计扰动观测器以减弱扰动对于跟踪性能的影响。本实验要求通过合理的设计步骤和性能分析方法以确保控制系统能够满足系统的实际对于跟踪精度和动态性能的需求并具有良好的性能表现。

## 2. 实验目的和要求

### 2.1 实验目的

设计合适的控制器，使得实际系统达到相应的指标要求。

### 2.2 实验具体要求

- 1) 结合的频谱分析结果，设计超前/滞后环节，使得闭环系统在至少 8Hz 处带宽满足双十指标；
- 2) 结合校正环节，设计扰动观测器，对扰动进行抑制，使得闭环系统跟踪误差在 20-25s 时小于  $5 \times 10^{-3}$ ，在 25-30s 时小于  $7 \times 10^{-5}$ 。

## 3. 实验内容和步骤

### 3.1 控制器设计（在 Controller\_validation.slx 文件中进行）

#### 3.1.1 超前滞后环节设计

超前滞后环节主要用于改善系统的稳定性和性能，主要应用于反馈控制系统中，用于校正系统的频率响应特性。它们通常作为一个独立的环节或者与其他控制器（如 PID 控制器）结合使用。超前环节用于提高系统的响应速度和稳定性，通过引入一个比例增益和相位提前来增强系统的频率响应，还可以改善系统的相位裕度，减小系统的超调和振荡，提高系统的稳定性，而滞后环节用于改善系统的稳定性和消除稳态误差。滞后环节通过引入一个比例增益和相位滞后来调整系统的频率响应。滞后环节可以降低剪切频率，降低频信号的增益，提高系统的稳定性并减小稳态误差。

超前环节传递函数为：

$$G_c(s) = \frac{1 + \alpha\tau s}{1 + \tau s}, \alpha > 1 \quad (3)$$

其中， $\omega_m = \frac{1}{\tau\sqrt{\alpha}}$  为超前环节的中心频率， $\alpha = \frac{1 + \sin\phi_m}{1 - \sin\phi_m}$ 。

滞后环节的传递函数为：

$$G_c(s) = \frac{\tau s + 1}{\alpha\tau s + 1}, \alpha > 1 \quad (4)$$

其中， $\omega_m = \frac{1}{\tau\sqrt{\alpha}}$  为中心频率，对高频增益的衰减幅值为  $20\log\alpha$ 。

#### 3.1.2 控制系统带宽分析

控制系统带宽（通常称为闭环带宽或带宽频率）是指当闭环系统的幅频特性下降到-3dB 时对应的频率。它反映了系统能够响应的输入信号的频率范围。带宽大的系统能复现输入信号的频率范围大，因此具有更快的响应速度。然而，过高的带宽也可能导致系统对高频噪声敏感，从而降低系统的信噪比。增加带宽可以提高系统的响应速度，但可能会增加调整时间，也可能导致系统变得不

稳定。在实际应用中，通常需要根据控制系统的要求和被控对象的特性来选择适当的闭环带宽。而较低的闭环带宽虽可提高系统的稳定性，但响应速度会相应变慢。因此，在选择带宽时需要在稳定性和响应速度之间做出权衡。实际设计中，带宽常用的有双十指标，即在给定频段内，幅值误差不大于百分之十，相位滞后不大于 10 度。类似的还有双五、双三等指标。扩展系统带宽的方法有串联校正环节和开环补偿环节。

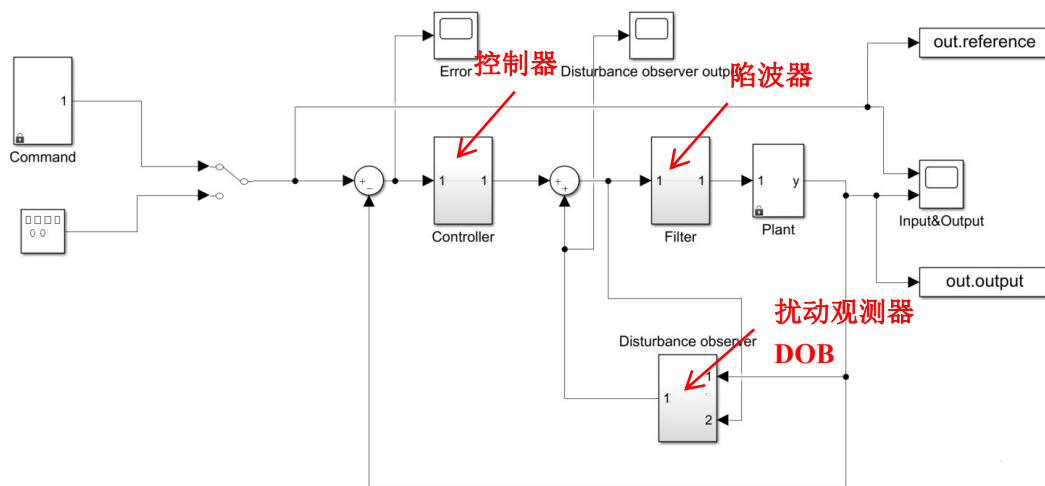


图 1 系统整体框图

本节实验要求：（即使谐振环节已经被抑制，依然需要保证在谐振频率之前穿越 0dB 线）根据如上给出的超前、滞后环节的设计方法，结合对于指令信号的频谱分析结果，设计控制器使得在小于 8Hz 的频段范围满足双十指标的动态性能要求。利用 part1 中 3.2 节的扫频方法进行“开环扫频”，给出校正后的 Bode 图，并在一幅曲线中给出 8Hz 正弦信号激励下的响应曲线和指令信号曲线以及一个周期峰值和过零点处的局部放大图，要求给出：

- （1）超前、之后环节的设计思路与超前之后环节的参数，包括各个超前环节的  $\omega_m$  和  $\phi_m$  以及各个滞后环节的  $\omega_m$  和  $\alpha$ ；
- （2）校正前、后的开环 Bode 图；
- （3）校正后的闭环 Bode 图（需将输入输出设置为“Input Perturbation”与“Output Measurement”）；
- （4）8Hz 正弦信号激励下的响应及指令曲线，要求在峰值及过零点处放大曲线并标出峰值点与过零点。

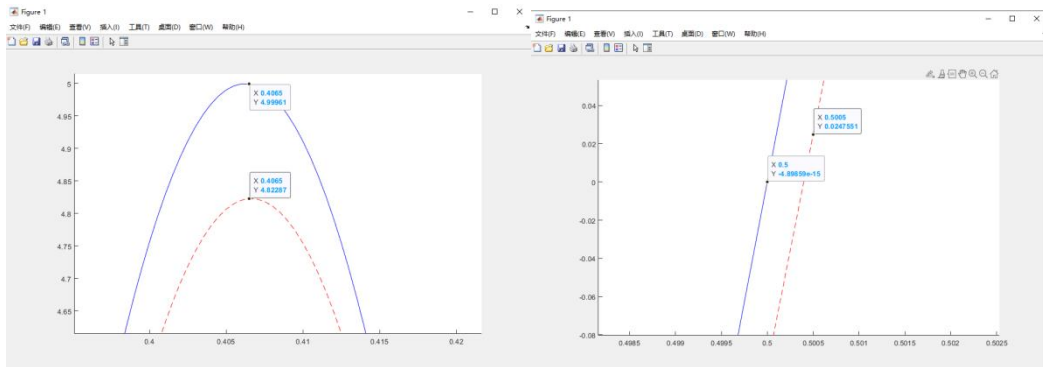


图 2 峰值与过零点处放大示意图（报告中不要使用截图）

**提示：**

在绘制控制器设计前后的 Bode 图时，扫频信号应选取 **Fixed sample time sinestream**，采样周期设置为 **0.0005s**。

### 3.2 扰动观测器设计——提高系统精度（在 **Controller\_validation.slx** 文件中进行）

系统干扰是指影响系统正常运行和性能的外部或内部因素。这些因素可以是随机的、周期性的或持续存在的，它们可能干扰系统的输入、输出或内部状态，导致系统产生误差或不稳定。为了减小扰动误差，可以增加偏差点到扰动作用点之间积分环节个数或者抬高增益，但增益不能任意增大，积分环节也不能太多，否则会影响系统的稳定性。此外，也可以采用比例加积分、滞后环节减小扰动产生的误差。设计扰动观测器也是一种常见提高系统扰动抑制能力的方法。

干扰观测器的基本思想是将外部干扰及模型参数变化造成的实际模型与理想模型输出的差异系统等效为控制输入，即观测出等效干扰，并在控制中引入等量的补偿，实现对干扰的完全抑制。其原理图如图 3。在低频段，干扰观测器应使实际对象的响应与名义模型的响应一致，以实现低频干扰的有效补偿，保证较好的鲁棒性。滤波器在干扰观测器设计中起着关键作用。设计合适的低通滤波器是观测器最为关键的部分，滤波器的带宽设计是一个重要参数，需要在干扰观测器的鲁棒稳定性和干扰抑制能力之间找到平衡。

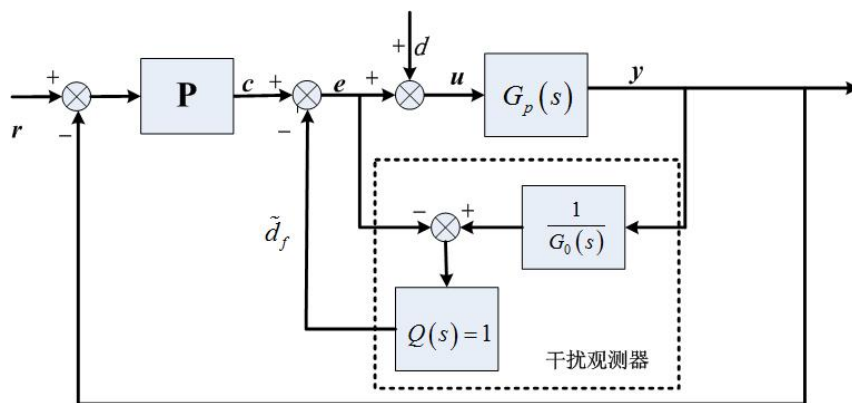


图3 观测器原理图(1)

其中， $G_0(s)$ 为名义对象， $Q(s)$ 为低通滤波器， $\hat{d}_f$ 为扰动估计值。

若被控对象是严格正则的，则扰动观测器框图为：

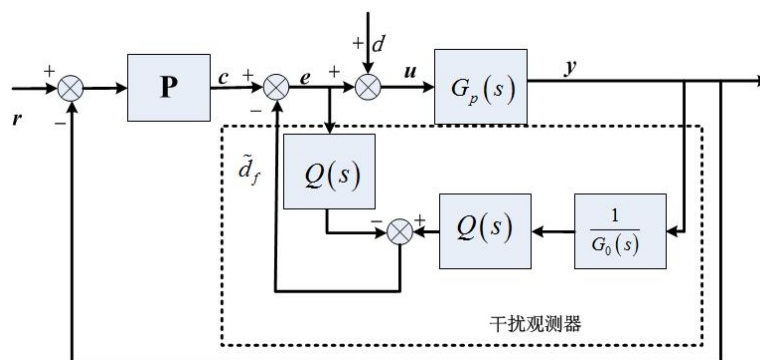


图4 观测器框图(2)

$$Q(s) = \frac{\sum_{k=0}^{N-r} \alpha_{Nk} (\tau s)^k}{(\tau s + 1)^N}$$

$$\alpha_{Nk} = \frac{N!}{(N-k)!k!}$$

其中，N 和 r 分别为  $Q(s)$  的阶次和相对阶， $\tau$  为滤波时间常数。

本节实验要求：设计扰动观测器，使得闭环系统跟踪误差在 20-25s 时小于  $5 \times 10^{-3}$ ，在 25-30s 时小于  $7 \times 10^{-5}$ ，要求给出：

- (1) 扰动观测器的设计思路及框图；
- (2) 有扰动观测器的/无扰动观测器的误差曲线对比；
- (3) 给出扰动观测器的输出；
- (4) 将有扰动观测器的系统误差在 20-25s 与 25-30s 处分别放大以体现跟

踪误差。

## 4. 实验结果记录

实验报告需包含如下内容：

- 1) 给出用超前滞后校正环节前后的开环波特图，要求校正后波特图在谐振前穿越，标记相应的幅值点；
- 2) 给出闭环校正环节在 8Hz 正弦信号激励下响应曲线；
- 3) 给出观测器设计的详细过程，给出扰动观测器观测输出以及加入观测器前后的对比图，并分析加入观测器后跟踪误差的精度是否满足实验要求。

**曲线要求：Simulink 仿真曲线需使用 To Workspace 导出至 Matlab 工作区使用 plot()命令绘制，有 x 轴、y 轴名称，同一图中不同曲线有颜色和线型的区别，请不要在示波器 Scope 中直接截图。**

## 5. 实验结论

分析伺服系统控制设计的整个流程，总结设计合适控制器使得伺服系统达到相应指标的设计方法和经验。