



第六章 控制系统的校正

6.1 控制系统的设计与校正问题

6.2 基本控制规律

6.3 串联校正

6.4 反馈(并联)校正

6.5 复合校正



6.1 控制系统的设计与校正问题

1. 控制理论的两大基本任务：

1. 系统分析：系统建模，性能分析（**稳快准**）；
2. 系统设计：系统综合，系统校正。

系统综合：设计一个控制系统，使其运动具有给定的性能和特征。

系统校正：一般而言，由基本部分组成的系统往往达不到给定的性能指标，甚至是不稳定的，此时需要在系统中接入附加装置，改善系统性能，并反复调整，直至满足要求。附加装置称为**校正装置**；引入附加装置、改善性能的过程称为**系统校正**。

校正的实质均表现为修改描述系统运动规律的数学模型。设计校正装置的过程是一个多次试探的过程并带有许多经验，计算机辅助设计(CAD)为系统校正装置的设计提供了有效手段。



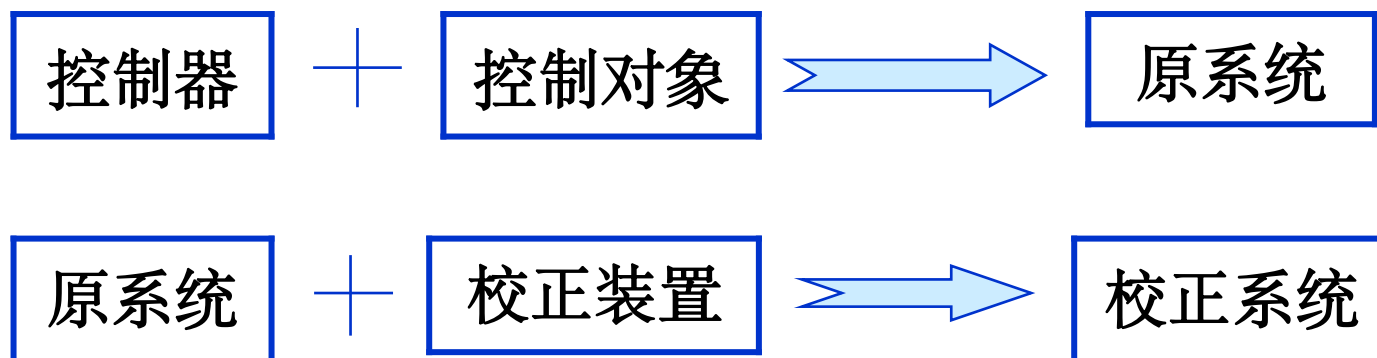
6.1 控制系统的设计与校正问题

2.设计一个自动控制系统一般经过以下步骤:

- ❖ 第一步：根据实际生产的要求选择被控对象。如温控系统选温箱，调速系统选电机等。
- ❖ 第二步：确定控制器，完成测量、放大、比较和执行等任务。但实际生产会对系统各方面的性能提出要求——时域和频域指标等。当把被控对象和控制器组合起来后，除了开环增益 K 可作适当调整外，其它都有自身的静态和动态特性（称为不可变部分）
- ❖ 第三步：确定控制方式——开环、闭环、复合控制等。
- ❖ 第四步：分析系统性能——时域、复域、频域。一般不满足要求，此时可在允许范围内调整 K ， $K \uparrow \rightarrow e_{ss} \downarrow$ ，但稳定性降低，若仍不满足要求，只能改进设计方法。如按 e_{ss} 设计的 K 可能使 $\gamma < 0$ ，系统不稳定，若 $K \downarrow \rightarrow \gamma \uparrow$ ，但 $e_{ss} \uparrow$ 又不满足。所以 K 不能 \downarrow ，**只能引入附加装置——校正装置。**



6.1 控制系统的设计与校正问题



系统综合与校正示意图



6.1 控制系统的设计与校正问题

3.设计方法

1.根轨迹法: 在系统中加入校正装置, 就是加入了新的开环零极点, 这些新的零极点将使校正后的闭环根轨迹, 也就是闭环极点, 向有利于改善系统性能的方向改变, 这样可以做到使闭环零极点重新布置, 从而满足闭环系统的性能要求。

2.频域法: 利用适当的校正装置的Bode图, 配合开环增益的调整, 来修改原有的开环系统的Bode图, 使得开环系统经校正与增益调整后的Bode图符合性能指标的要求。【Bode图“三频段”原则】

3.等效结构与等效传递函数方法: 将给定结构等效为已知的典型结构进行对比分析, 使问题变得简单。

4.时域法: 使系统的闭环零极点在 s 平面合理分布。



6.1 控制系统的设计与校正问题

4.控制目标——性能指标

$$\text{时域} \begin{cases} \text{动态: } t_r, t_p, t_s, \sigma\%, N \\ \text{静态: } e_{ss}(K_p, K_v, K_a) \end{cases}$$

$$\text{频域} \begin{cases} \text{开环: } \omega_c, \omega_g, \gamma, L_g, h \\ \text{闭环: } M(0), M_r, \omega_r, \omega_b \end{cases}$$



6.1 控制系统的设计与校正问题

- 对于二阶系统，**时域指标**和**频域指标**之间能用准确的数学式子表示出来。它们可统一采用阻尼比 ζ 和无阻尼自然振荡频率 ω_n 来描述，如所示。

□ 二阶系统的时域性能指标

$$t_r = \frac{\pi - \beta}{\omega_n \sqrt{1 - \zeta^2}}$$

$$t_p = \frac{\pi}{\omega_n \sqrt{1 - \zeta^2}}$$

$$\sigma\% = e^{-\zeta\pi/\sqrt{1-\zeta^2}} \times 100\%$$

$$t_s = \frac{3}{\zeta\omega_n} (\Delta = 5\%) \quad t_s = \frac{4}{\zeta\omega_n} (\Delta = 2\%)$$



6.1 控制系统的设计与校正问题

□ 二阶系统的频域性能指标

$$\omega_c = \omega_n \sqrt{\sqrt{1 + 4\zeta^4} - 2\zeta^2}$$

$$\gamma = \arctan \frac{2\zeta}{\sqrt{\sqrt{1 + 4\zeta^4} - 2\zeta^2}}$$

$$\omega_r = \omega_n \sqrt{1 - 2\zeta^2}, \quad \zeta < 0.707$$

$$M_r = \frac{1}{2\zeta \sqrt{1 - \zeta^2}}, \quad \zeta < 0.707$$

$$\omega_b = \omega_n \sqrt{1 - 2\zeta^2 + \sqrt{2 - 4\zeta^2 + 2\zeta^4}}$$



6.1 控制系统的设计与校正问题

□ 高阶系统的性能指标

谐振峰值 $M_r = \frac{1}{|\sin \gamma|}$

超调量 $\sigma\% = [0.16 + 0.4(M_r - 1)] \times 100\%, 1 \leq M_r \leq 1.8$

调整时间 $t_s = \frac{K_0 \pi}{\omega_c}, \Delta = 5\%$

$$K_0 = 2 + 1.5 \left(\frac{1}{\sin \gamma} - 1 \right) + 2.5 \left(\frac{1}{\sin \gamma} - 1 \right)^2, 1 \leq M_r \leq 1.8$$

$(35^\circ \leq \gamma \leq 90^\circ)$



6.1 控制系统的设计与校正问题

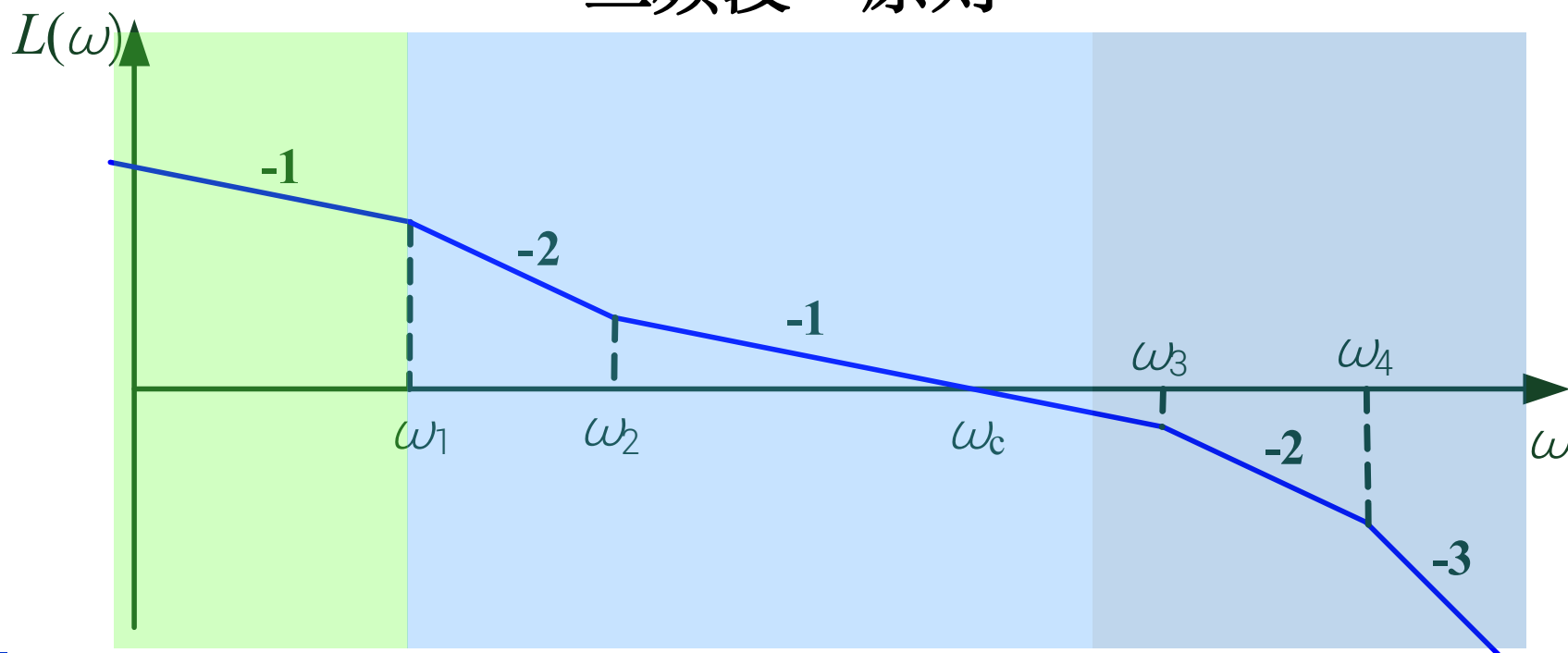
5. 预期开环频率特性设计

❖ 希望系统具有的频率特性 \longleftrightarrow 预期性能指标

频域

时域或频域

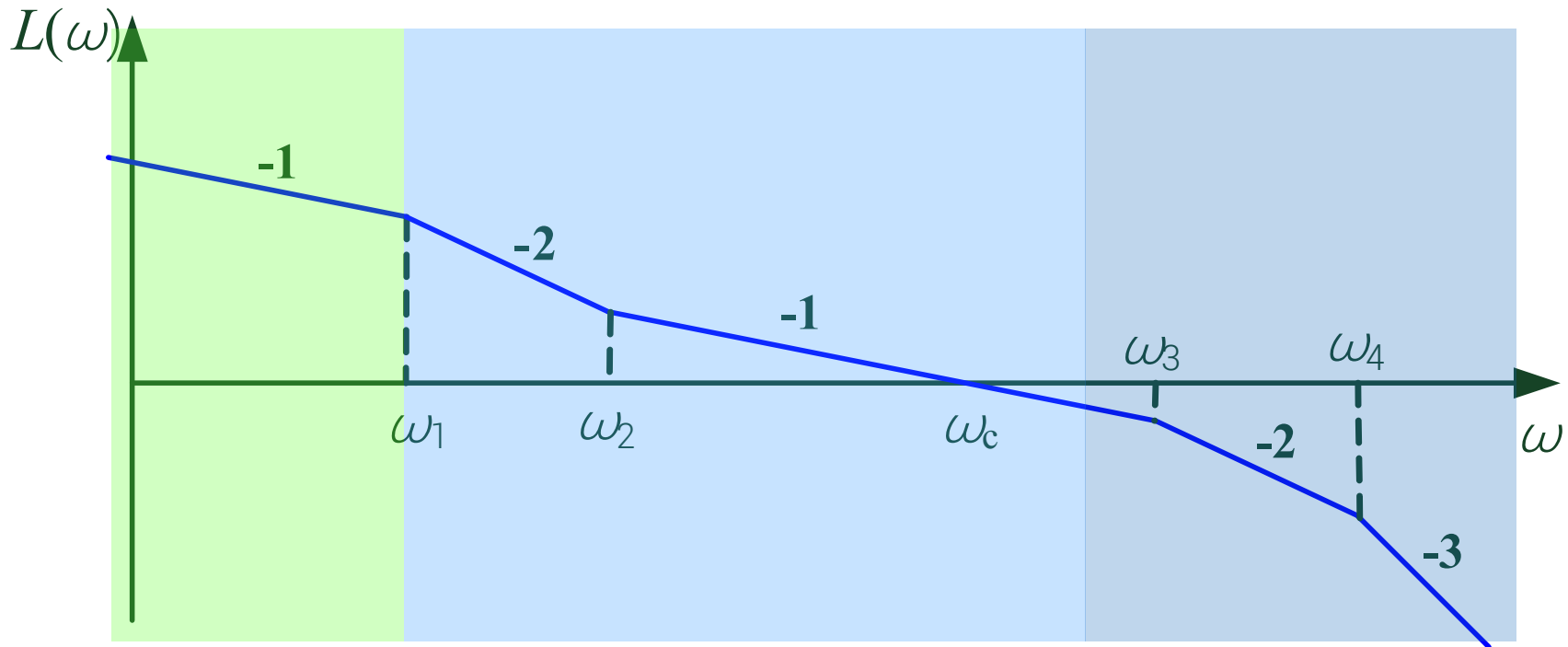
“三频段”原则





6.1 控制系统的设计与校正问题

“三频段”原则



低频段 (第一个转折频率 ω_1 之前的频段) → 影响稳态性能

中频段 ($\omega_1 \sim 10\omega_c$) → 动态性能: 快速性和平稳性

高频段 ($10\omega_c$ 以后的频段) → 抗干扰能力!



6.1 控制系统的设计与校正问题

低频段

$$G(j\omega) = \frac{K}{(j\omega)^v}$$

$$L(\omega) = 20 \lg \frac{K}{\omega^v} = 0$$

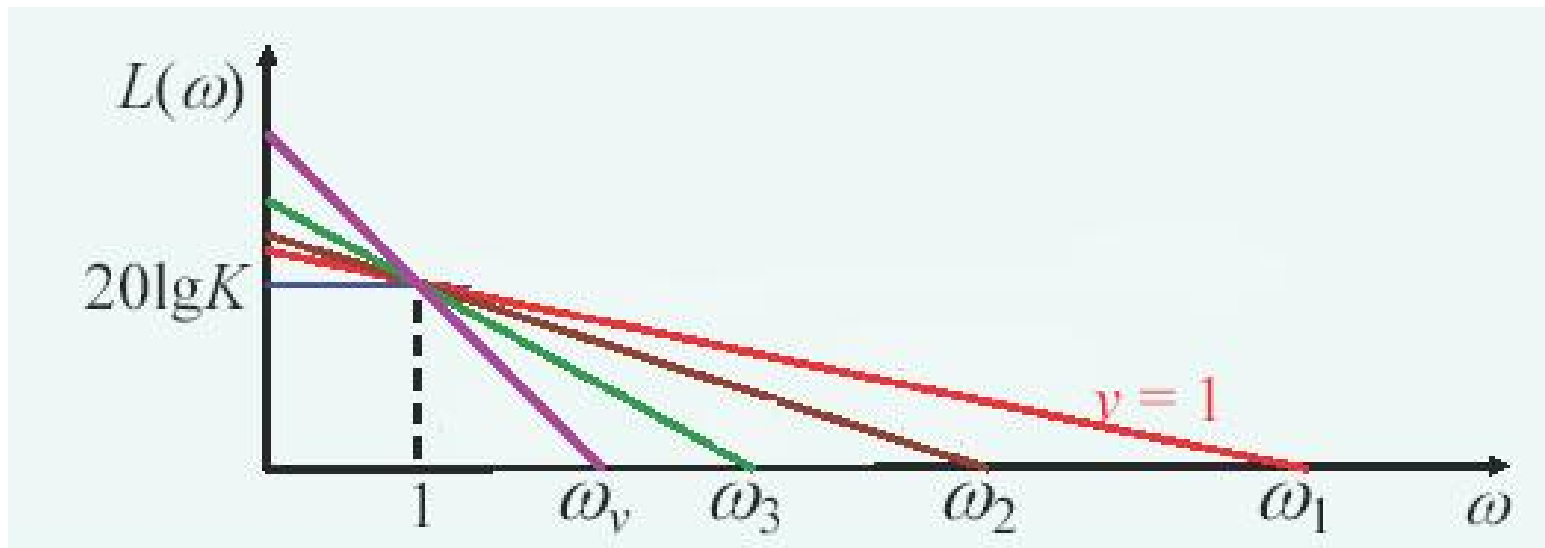
$$\Rightarrow K = \omega_v^v$$

静态误差系数:

0型系统 $K_p = K$; $K_v = K_a = 0$

I型系统 $K_p = \infty$; $K_v = \omega_1$; $K_a = 0$

II型系统 $K_p = \infty$; $K_v = \infty$; $K_a = \omega_2^2$





6.1 控制系统的设计与校正问题

中频段 $(\omega_1 \sim \omega_2)$

决定系统动态性能：快速性和平稳性

幅频折线以 -1 穿越 0dB 线，保持宽度：

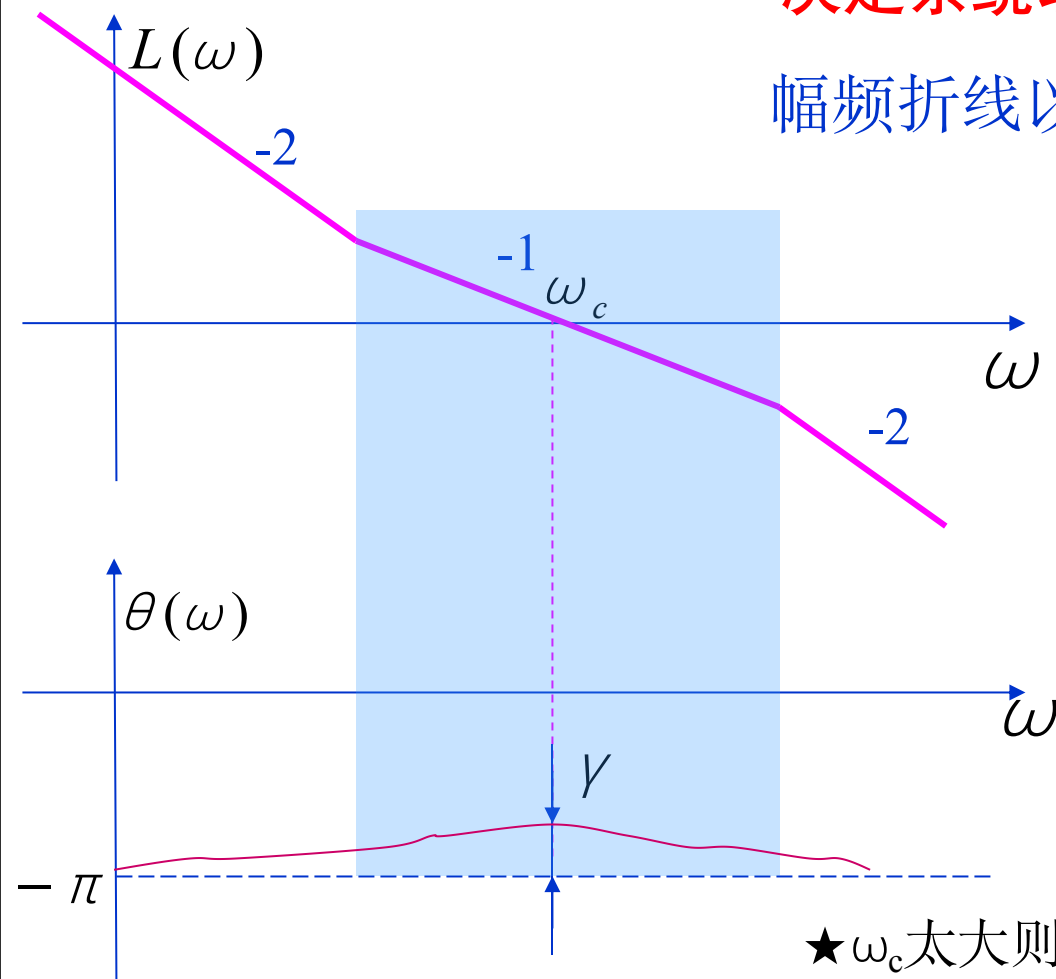
$$\gamma \uparrow \Rightarrow M_r = \frac{1}{\sin \gamma} \downarrow$$

$$\sigma\% = 0.16 + 0.4(M_r - 1) \downarrow \quad \text{平稳}$$

$$t_s \approx (4 \sim 9) / \omega_c$$

ω_c 大 \Rightarrow 系统快速性好

★ ω_c 太大则易引入高频干扰，降低控制精度。

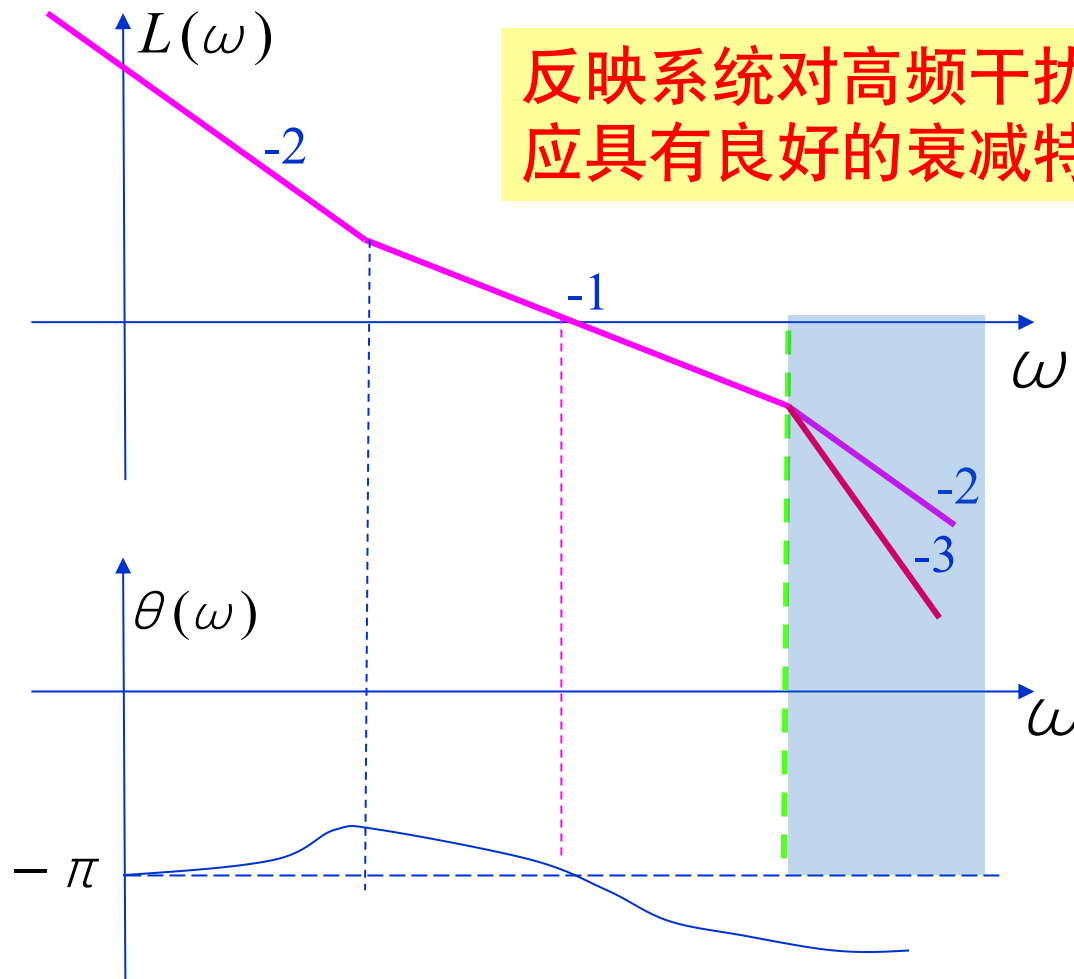




6.1 控制系统的设计与校正问题

高频段

(ω_2 以上)

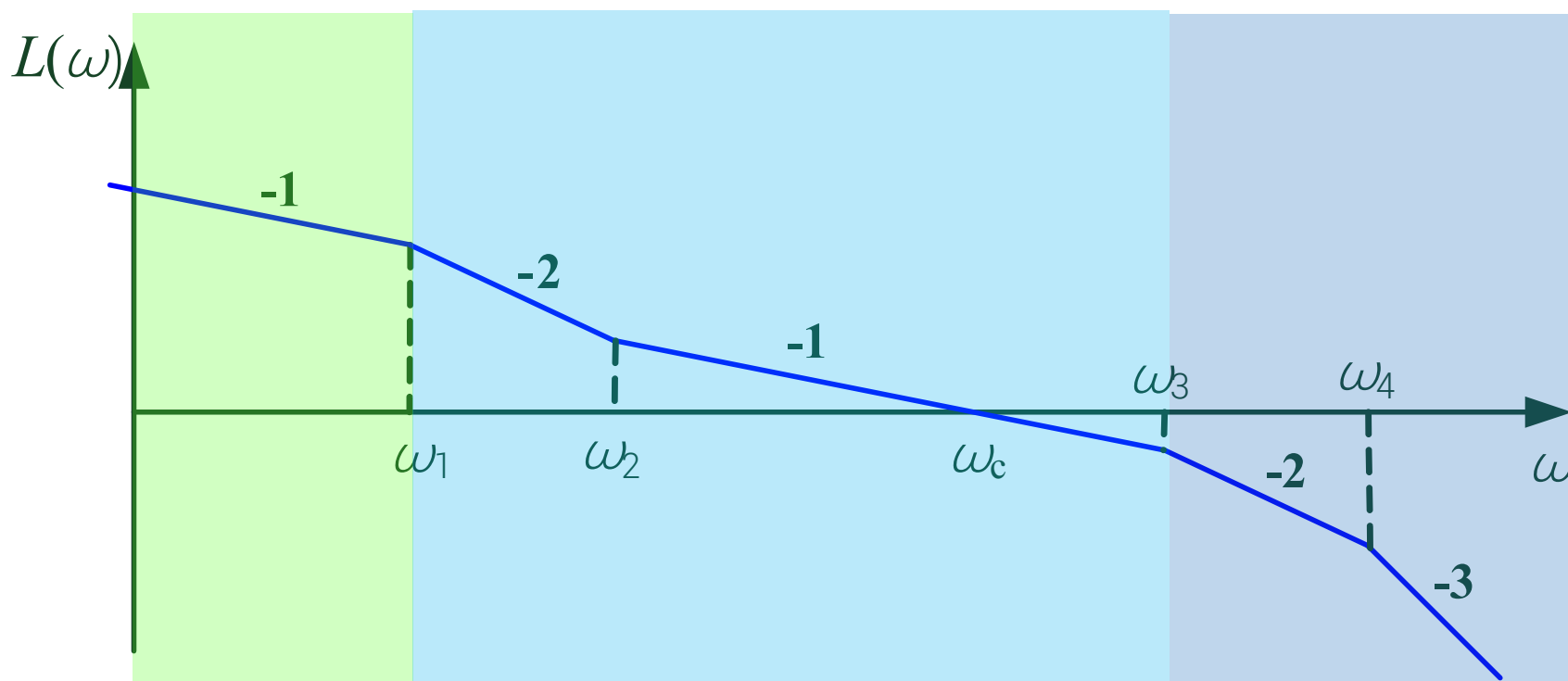


反映系统对高频干扰的抑制能力，
应具有良好的衰减特性。（陡、低）



6.1 控制系统的设计与校正问题

令人满意的“三频段”特征



低频段 (第一个转折频率 ω_1 之前的频段)：高增益，高精度；
中频段 ($\omega_1 \sim 10\omega_c$)：以 -1 斜率穿越 0dB 线，适当拉宽；
高频段 ($10\omega_c$ 以后的频段)：衰减快，抗干扰能力强。



6.1 控制系统的设计与校正问题

6.系统带宽的确定

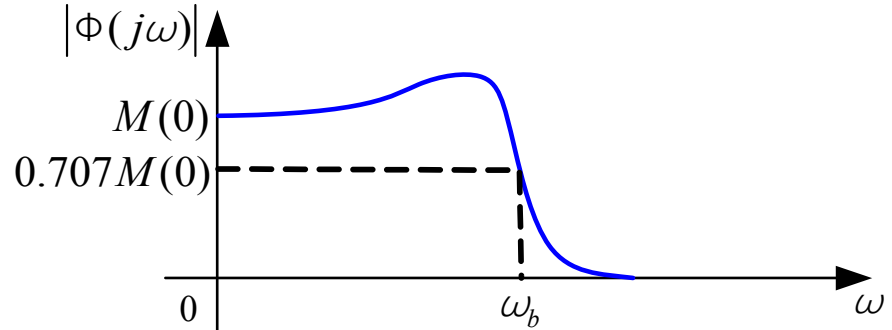
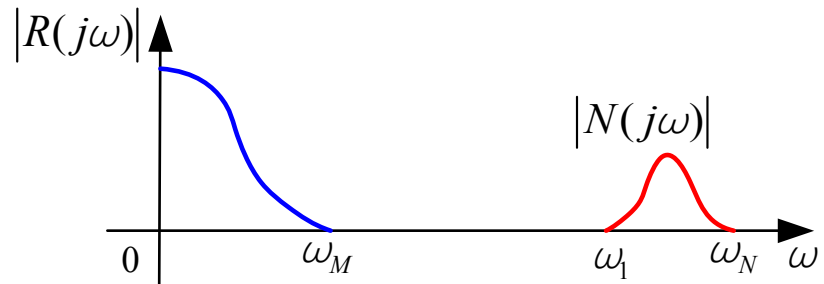
(1) 精确跟踪输入信号

(2) 抑制噪声

通常取:

$$\omega_b = (5 - 10)\omega_M$$

$$\text{且 } \omega_b < \omega_1$$



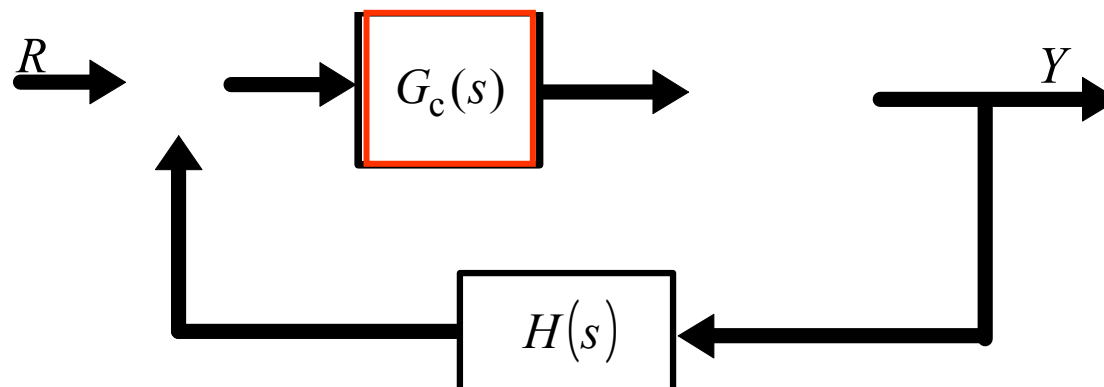
6.1系统带宽的确定



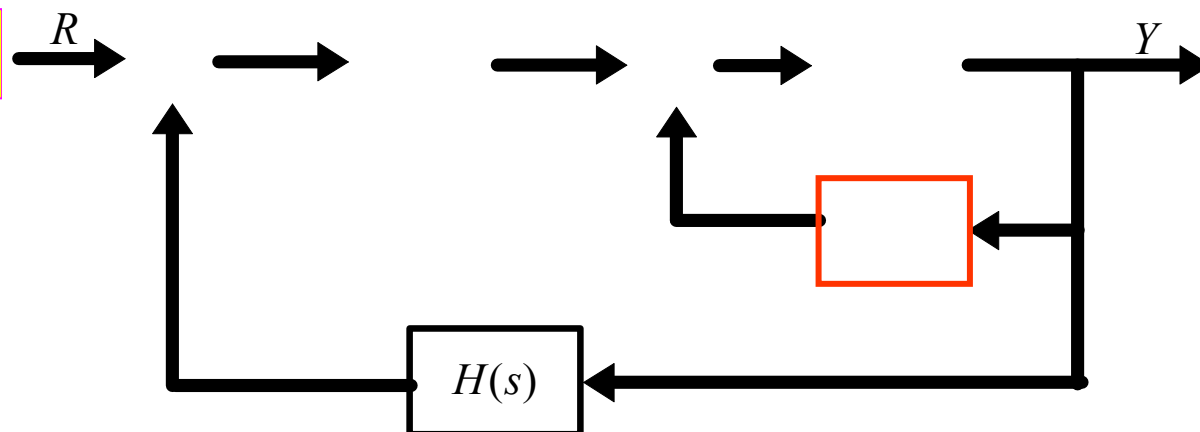
6.1 控制系统的设计与校正问题

7. 校正方式

1. 串联校正



2. 反馈校正





6.1 控制系统的设计与校正问题

3. 前馈校正

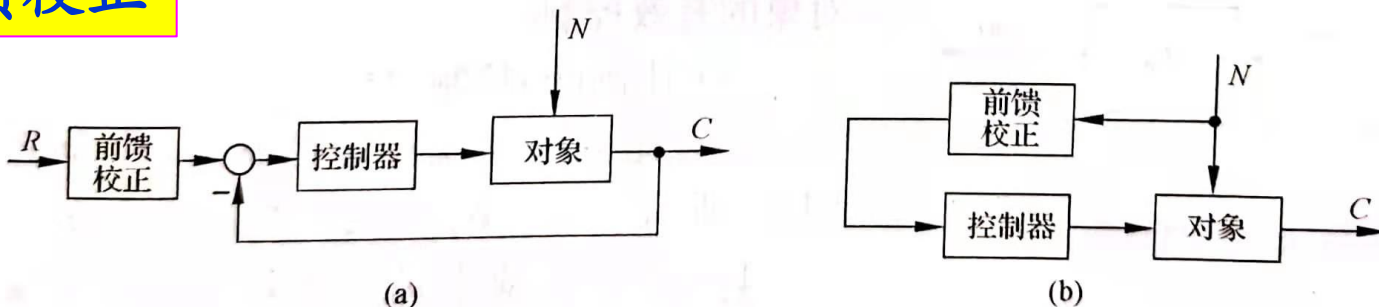


图 6-3 前馈校正

4. 复合校正

复合校正方式是在反馈控制回路中,加入前馈校正通路,组成一个有机整体,如图6-4所示。图中(a)为按扰动补偿的复合控制形式,(b)为按输入补偿的复合控制形式。

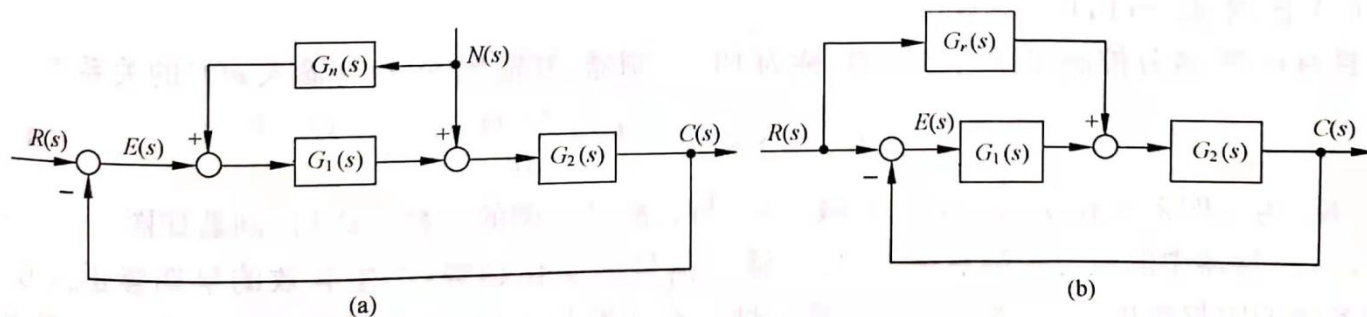
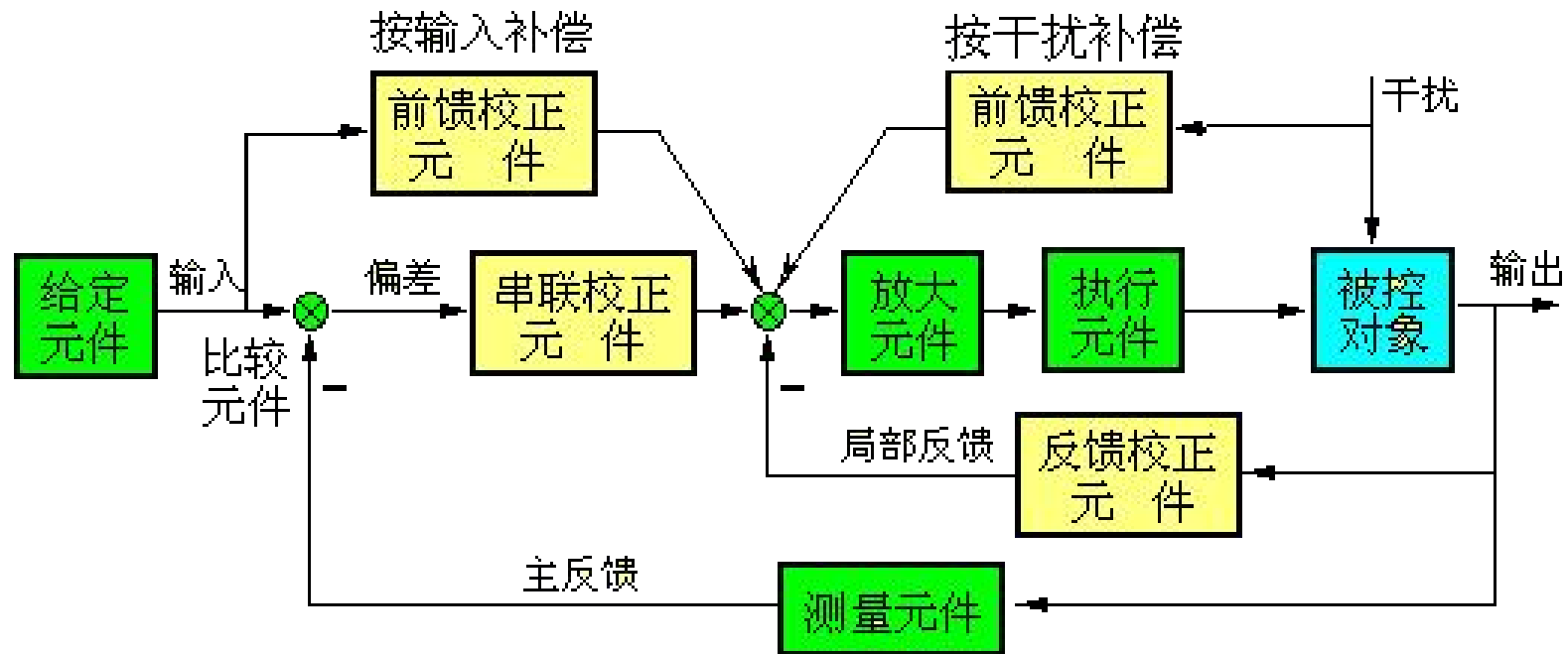


图 6-4 复合校正



6.1 控制系统的设计与校正问题





第六章 控制系统的校正

Thank You !