

# 第6章 控制系统的校正与设计

## ○ 内容提要

○ 控制理论包括系统分析和系统设计。针对系统的不同任务会提出不同的性能要求，当系统的动态、稳态性能不能满足工作要求时，就需要对原系统进行校正与设计。本章主要介绍线性系统的基本控制规律，说明校正装置的原理及其特性，并利用频域分析法对系统进行串联校正。简单介绍反馈校正和复合校正的特点。

## ○ 知识要点

○ 线性系统的基本控制规律、无源校正网络、有源校正网络；超前校正、滞后校正、滞后超前校正；反馈校正和复合校正。

## ○ 教学重点

○ 重点掌握PID控制规律的特点，熟练掌握串联超前校正、滞后校正、滞后-超前校正装置的特点及设计方法。



# 引言

## 1. 线性控制系统理论的基本内容

- **系统建模**：微分/差分方程、传递函数、方框图、信号流程图、频率特性、状态空间表达式等
- **系统分析**：时域分析、频域分析、根轨迹分析、状态空间分析等
- **系统综合**：校正、状态空间综合法、鲁棒优化法等



## 2. 控制系统设计和校正

- **设计问题**：根据给定被控对象和自动控制的技术要求，**进行控制器设计**，使控制器与被控对象组成的系统能较好地完成自动控制任务。
- **校正问题**：一种**原理性的局部设计**。在系统的基本部分（通常指对象、执行机构、测量元件等主要部件）已确定的条件下，设计校正装置的传函和调整系统放大倍数，使系统动态性能满足一定的要求。
- **两者区别**：设计问题要求设计整个控制器(包括设备选型、可靠性、经济性等实际问题)，而校正问题设计的只是控制器的一部分（校正装置）。



### 3. 校正问题的三要素

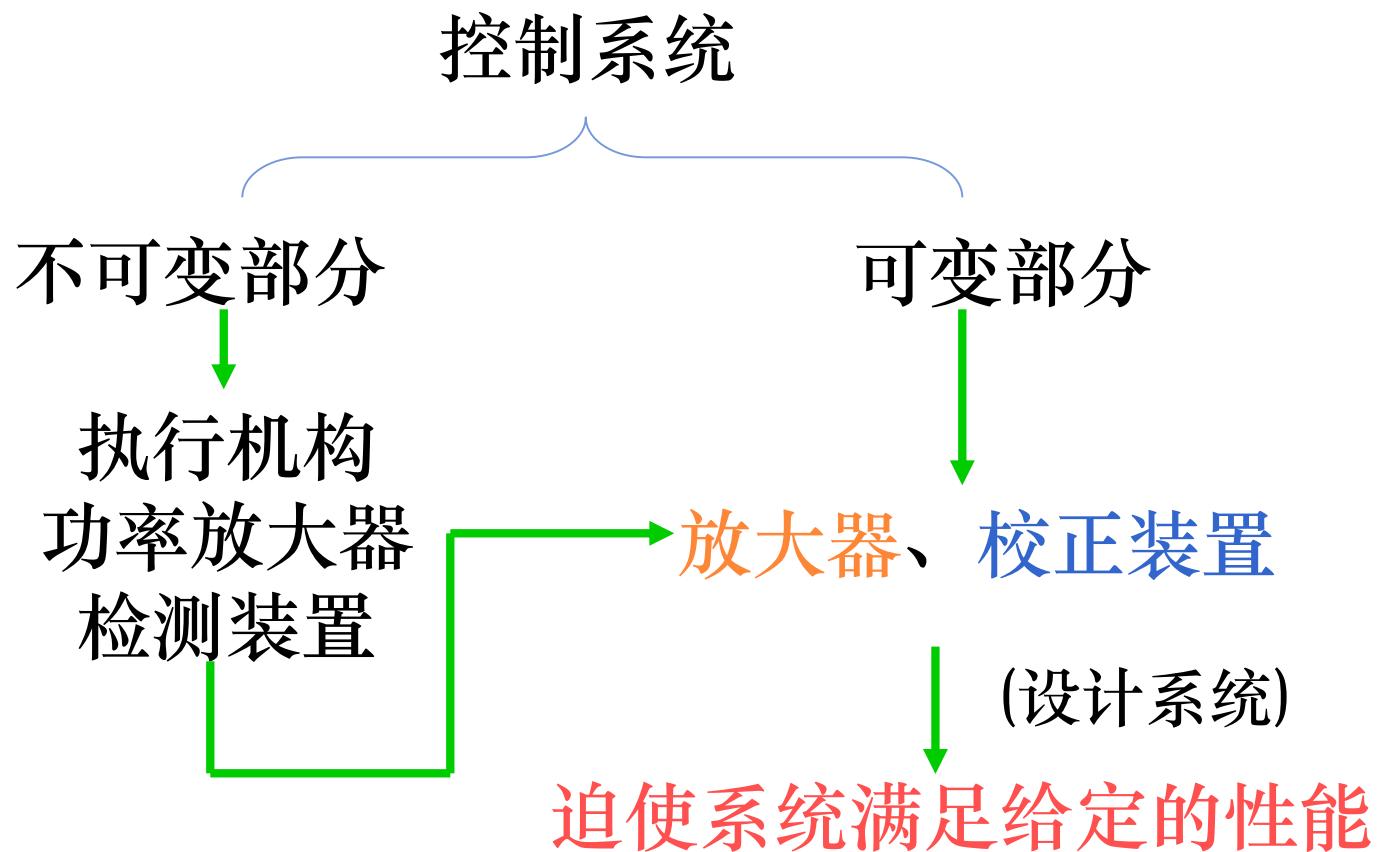
- ① **系统基本部分**（原有部分、固有部分）：被控对象、控制器基本部分（放大元件、测量元件）。放大元件增益可调，其余参数固定——给定
- ② **系统的性能要求**——给定
- ③ **校正装置**：当通过调整放大元件增益仍不能满足系统性能时，需要增加附加装置来改善系统性能——需设计（未知）

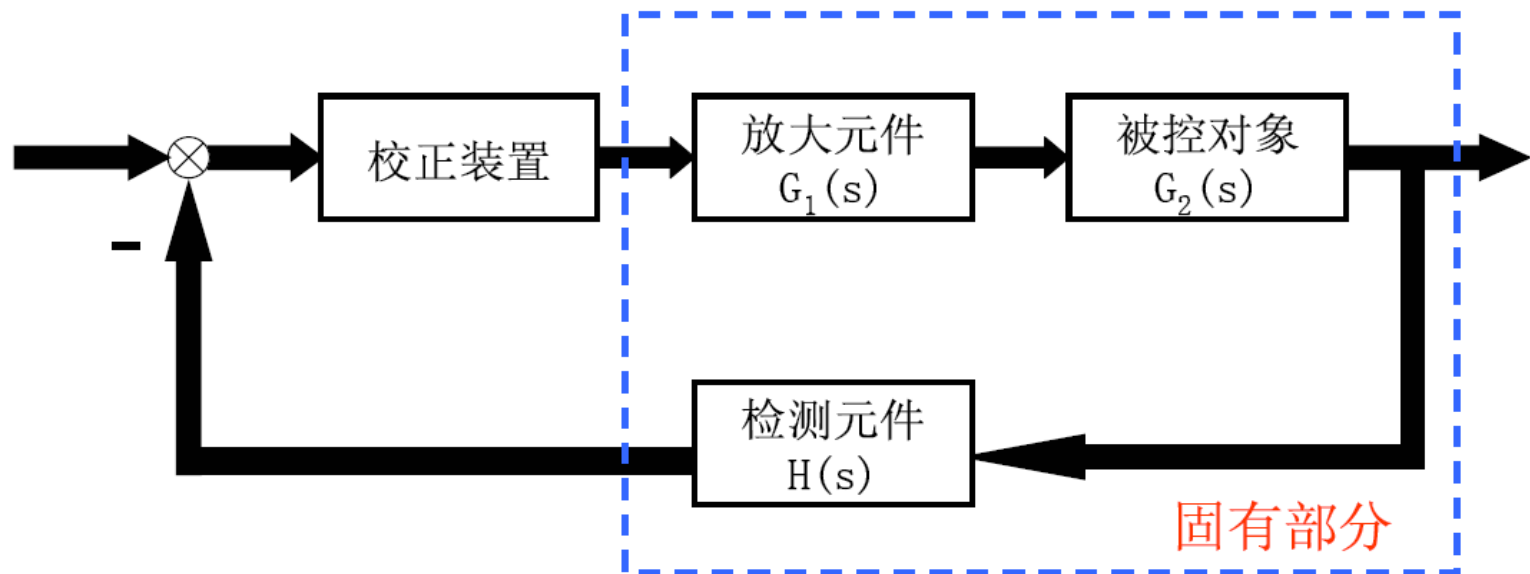
### 4. 校正的实质

- 通过改变系统的零极点来改变系统性能。



•控制系统的组成





## 5. 校正装置的实现

- 通常是参数易于调整的专用装置（模电或数电装置）
- 校正方式多样化：串联校正、反馈校正、前馈补偿等
- **注意**：校正方案不唯一



## 6. 1 概述

### ○ 6. 1. 1 系统的常见性能指标

**评价控制系统优劣的性能指标是由系统在典型输入下输出响应的某些特点统一规定的。**



# 1、控制系统的性能指标

- **稳态精度**

稳态误差 $e_{ss}$

- **过渡过程响应特性**

时域：上升时间 $t_r$ 、超调量 $\sigma_p$ 、调节时间 $t_s$

频域：谐振峰值 $M_r$ 、增益交界频率 $\omega_c$ 、谐振频率 $\omega_r$ 、带宽 $\omega_b$

- **相对稳定性**

增益裕量 $h$ 、相位裕量 $\gamma(\omega_c)$

- **扰动的抑制**

带宽 $\omega_b$

## 二阶系统频域指标与时域指标的关系

谐振峰值  $M_r = 1 / 2\zeta \sqrt{1 - \zeta^2} \quad (\zeta \leq 0.707)$

谐振频率  $\omega_r = \omega_n \sqrt{1 - 2\zeta^2} \quad (\zeta \leq 0.707)$

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

截止频率  $\omega_c = \omega_n \sqrt{\sqrt{1 - 4\zeta^4} - 2\zeta^2}$

相角裕度  $\gamma = \arctg \frac{2\zeta}{\sqrt{\sqrt{1 + 4\zeta^4} - 2\zeta^2}}$

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

调节时间  $t_s = 3.5 / \zeta\omega_n \quad \omega_c t_s = 7 / \operatorname{tg}\gamma$



## 高阶系统频域指标与时域指标的关系

谐振峰值  $M_r = 1 / \sin \gamma$

超调量  $\sigma = 0.16 + 0.4(M_r - 1)$

调节时间  $t_s = K\pi / \omega_c$

$$K = 2 + 1.5(M_r - 1) + 2.5(M_r - 1)^2 \quad (1 \leq M_r \leq 1.8)$$



## 几点说明:

- 上述这些性能指标之间有一定的换算关系，但有时很复杂。
- 动态性能各指标之间对系统的参数与结构的要求往往存在矛盾。
  - 稳态误差与稳定性对系统开环增益、积分环节数目的要求；
  - 系统快速性与抑制噪声能力对带宽的要求。

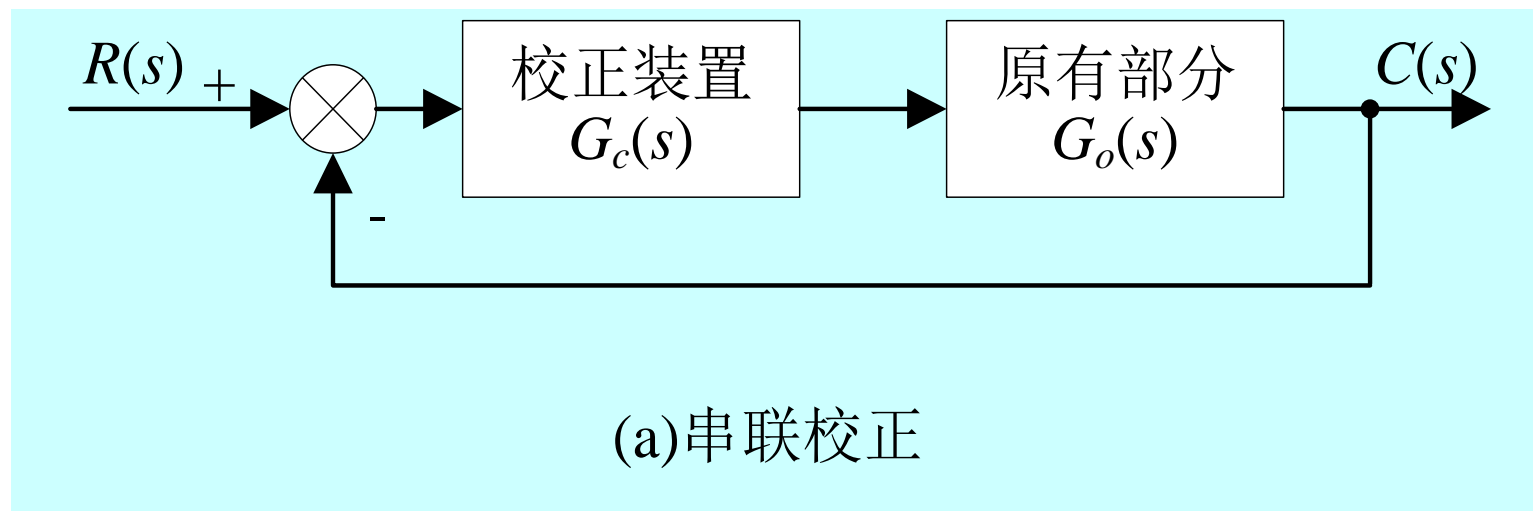


- **性能指标通常由控制系统的使用单位或被控对象的制造单位提出。**
- **一个具体系统对指标的要求应有所侧重**
  - **调速系统对平稳性和稳态精度要求严格；**
  - **随动系统对快速性期望很高。**
- **性能指标的提出要有依据，不能脱离实际**
  - **负载能力的约束；**
  - **能源功率的约束等。**



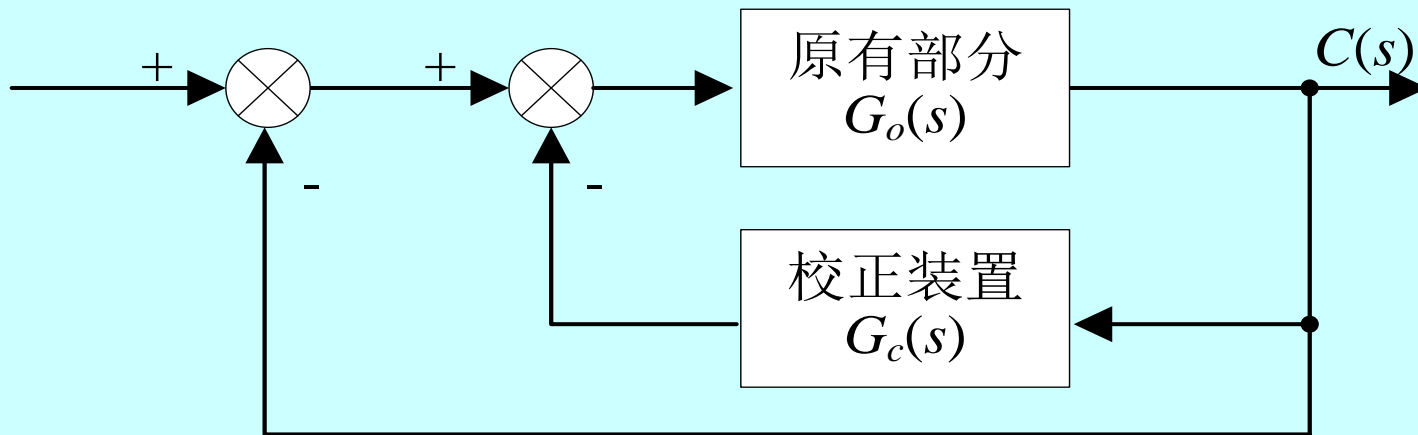
## 6. 1. 2 校正方式

根据校正装置加入系统的方式和所起的作用不同，可将其作如下分类：

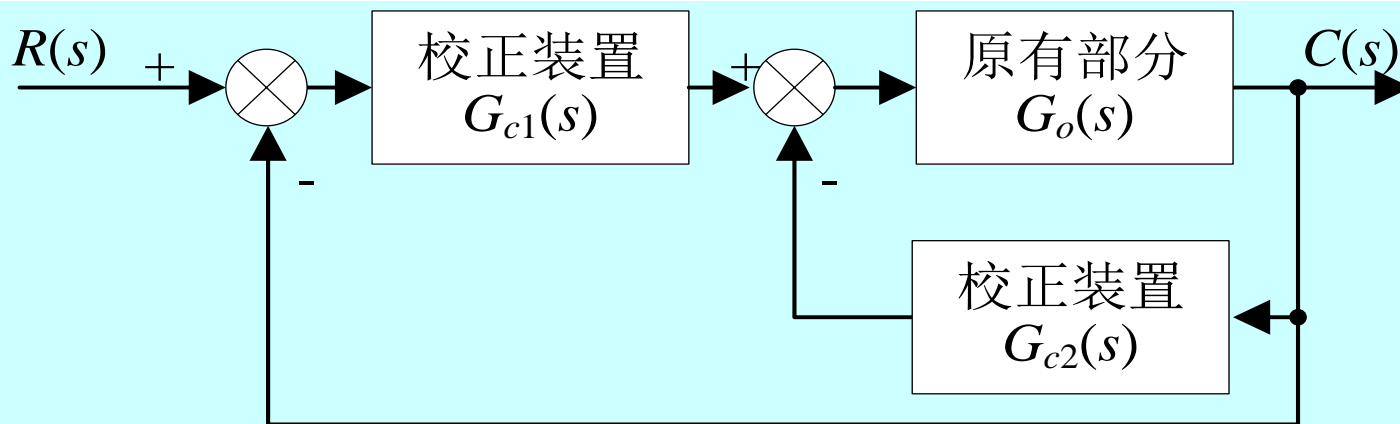


主反馈回路之内的校正





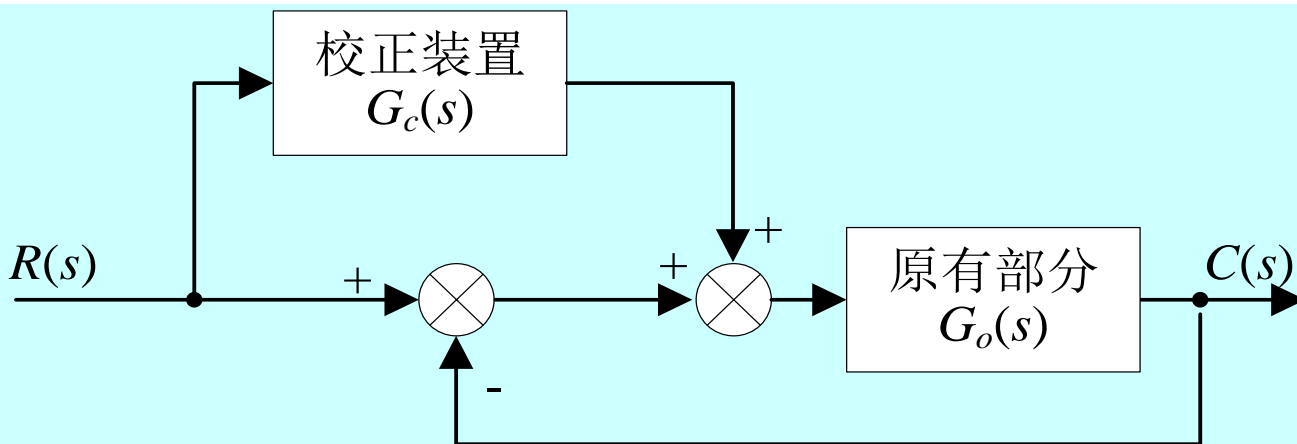
(b)反馈校正



(c)串联反馈校正

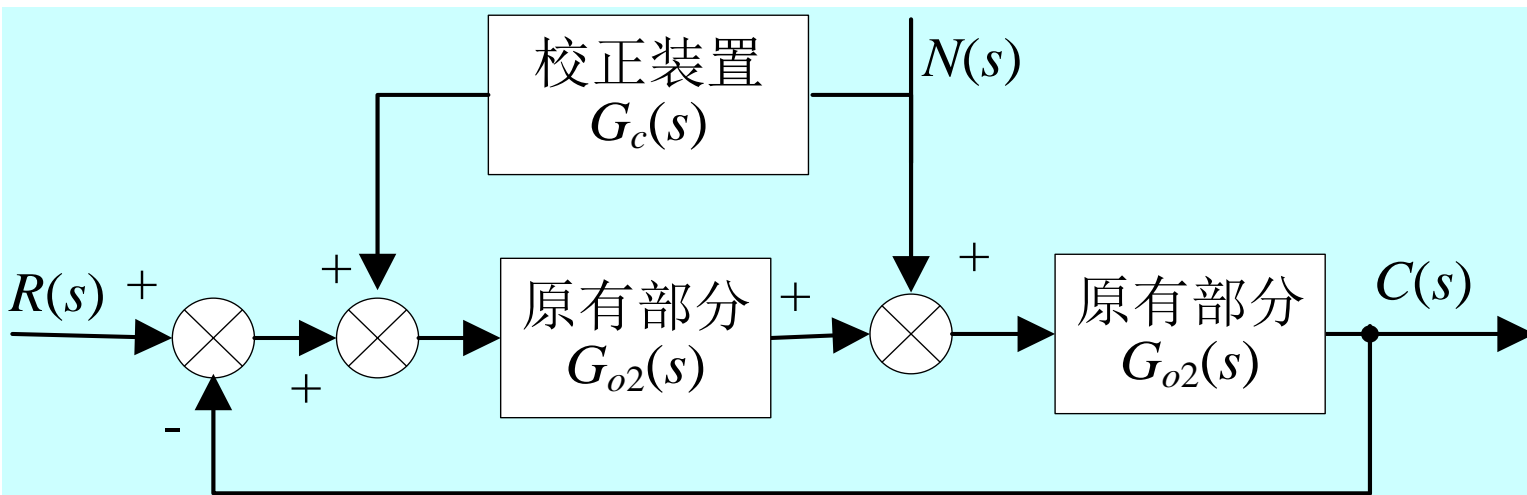
主反馈回路之内的校正

相当于对给定值信号进行整形和滤波后再送入反馈系统



(d)前馈补偿

对扰动信号直接或间测量，形成附加补偿通道



(e)扰动补偿

主反馈回路之外的校正

➤ **校正方式选择需要考虑的因素**

系统中信号的性质；技术方便程度；可供选择的元件；其它性能要求（抗干扰性、环境适应性等）；经济性…

➤ **串联校正的特点**

设计较简单，容易对信号进行各种必要的变换，但需注意负载效应的影响。

➤ **反馈校正的特点**

可消除系统原有部分参数对系统性能的影响，元件数也往往较少。

➤ **同时采用串联、反馈校正**

性能指标要求较高的系统。

## 说明:

- 串联校正和反馈校正属于主反馈回路之内的校正。
- 前馈补偿和扰动补偿属于主回路之外校正。
- 对系统校正可采取以上几种方式中任何一种，也可采用某种组合。

## 6. 1. 3 常见系统校正方法

(1) 根轨迹法校正 时域性能指标：单位阶跃响应的峰值时间、调节时间、超调量、阻尼比、稳态误差等；

(2) 频率法校正 频域性能指标：相角裕度、幅值裕度、谐振峰值、闭环带宽、静态误差系数等。



## 根轨迹法

- **在系统中加入校正装置，相当于增加了新的开环零极点，这些零极点将使校正后的闭环根轨迹，向有利于改善系统性能的方向改变，系统闭环零极点重新布置，从而满足闭环系统性能要求。**



# 频率法

- **基本思想：利用适当校正装置的Bode图，配合开环增益调整来修改原来开环系统Bode图，使得开环系统经校正和增益调整后的Bode图符合性能指标要求。**

在实际应用中频率法校正更加广泛。

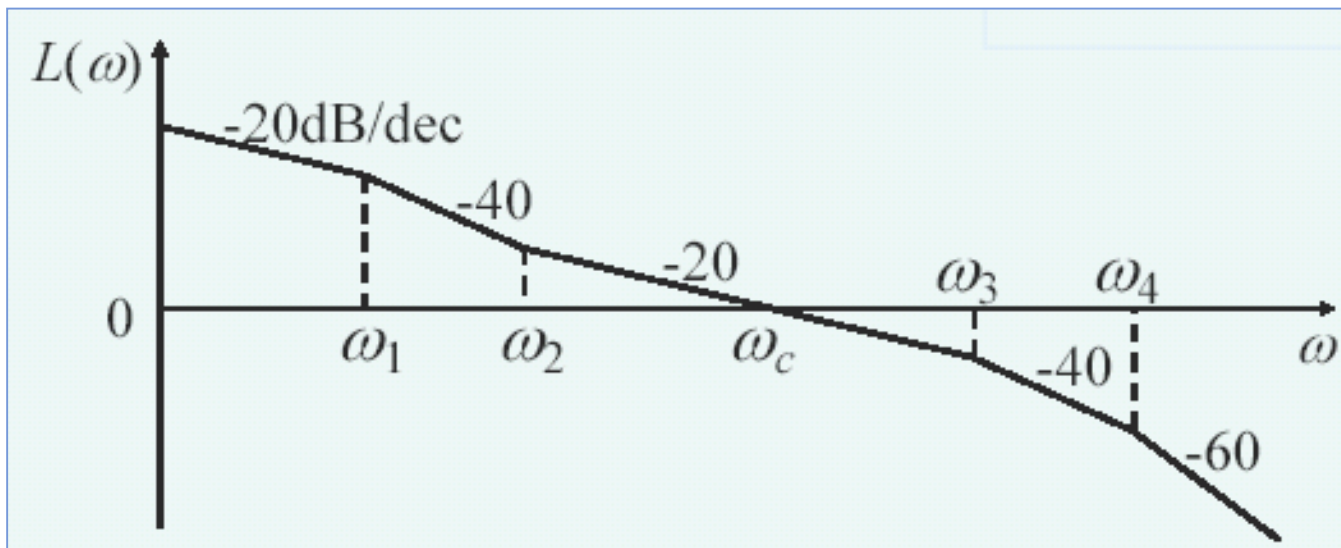


# 频率响应设计法

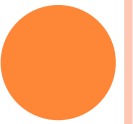


- 频率特性图可以**清楚表明系统改变性能指标的方向**。
- 频域设计通常通过Bode图进行处理起来十分简单。
- （当采用串联校正时，使得校正后系统的Bode图即
- 为原有系统Bode图和校正装置的Bode图直接相加）
- 对于某些数学模型推导起来比较困难的元件，如液压和气动元件，通常可以通过频率响应实验来获得其Bode图。
- 在涉及到高频噪声时，频域法设计比其他方法更为方便。

# 三频段



- 低频段 (第一个转折频率 $\omega_1$ 之前的频段)  $\rightarrow$  稳态性能
- 中频段 ( $\omega_1 \sim 10\omega_c$ )  $\rightarrow$  动态性能
- 高频段 ( $10\omega_c$  以后的频段)  $\rightarrow$  抗干扰



## 6. 2 基本控制规律—PID控制器

### 问题的提出

- 确定校正装置的具体形式时，应先了解校正装置所提供的控制规律，以便选择相应的元件。
- 比例、微分、积分，或其组合，如比例 - 微分、比例 - 积分、比例 - 积分 - 微分等，是最基本的控制规律。



- 增加校正**装置**，可改变描述系统运动过程的**微分方程**，从而改变**系统响应**。
- 具有不同**比例关系**的校正器可改变微分方程系数，调整系统零极点分布，从而改变系统响应。
- 具有**微分和积分**功能的校正器可在更大程度上改变系统运动方程，使系统具有所要求的暂态和稳态性能。



**PID (Proportional Integral Derivative )控制**：对偏差信号 $e(t)$ 进行比例、积分和微分运算变换后形成的一种控制规律。



- P、PI、PD 或PID 控制
- 适用于数学模型已知及大多数数学模型难以确定的控制系统或过程。
- PID 控制参数整定方便，结构灵活

# PID控制器

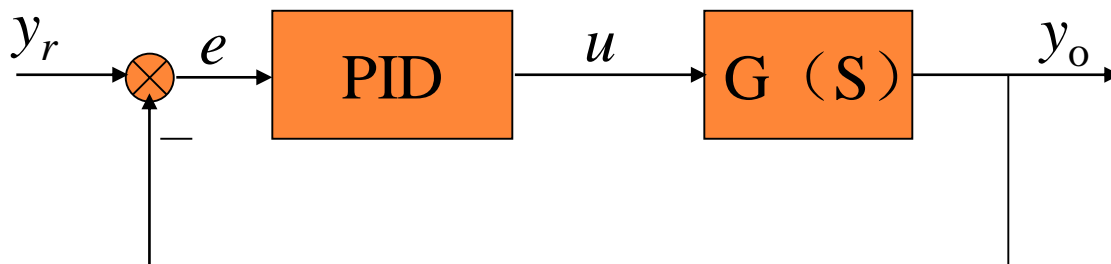
PID控制器是实际工业控制过程中应用**最广泛、最成功**的一种控制方法。

## PID控制器基本结构

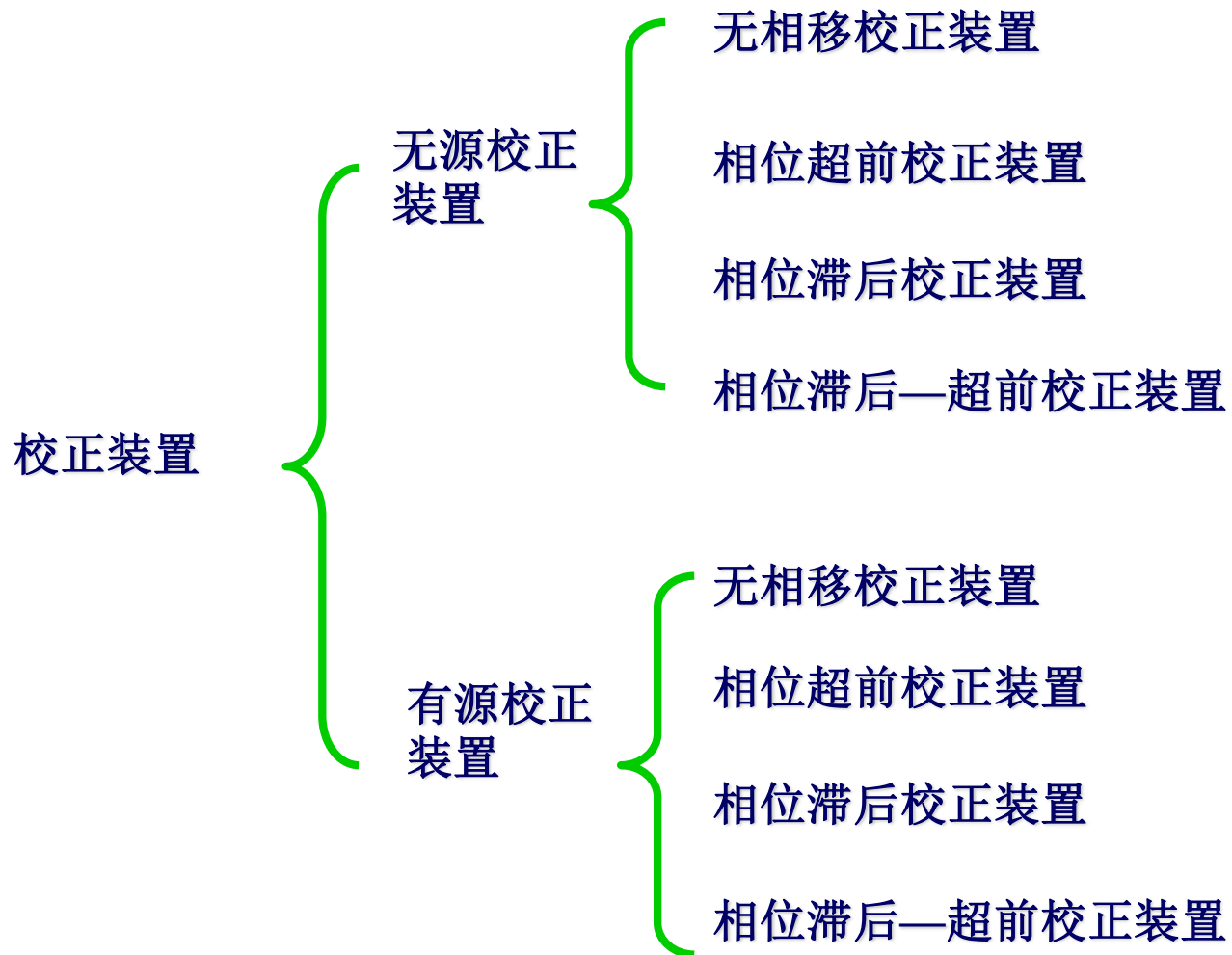
PID: **P**roportional **I**ntegral **D**erivative

**PID控制**: 对偏差信号 $e(t)$ 进行比例、积分和微分运算变换后形成的一种控制规律。

**“利用偏差、消除偏差”**



## 6.3 常见校正装置及串联校正



## 无源校正网络：阻容元件

优点：校正元件的特性比较稳定。

缺点：由于输出阻抗较高而输入阻抗较低，需要另加放大器并进行隔离；  
没有放大增益，只有衰减。

使用这种校正装置时，应特别注意它与前、后级部件间的阻抗匹配

## 有源校正网络：阻容电路+线性集成运算放大器

优点：带有放大器，增益可调，使用方便灵活。

缺点：特性容易漂移。

有源校正装置一般能与系统中的其他部件较好地实现阻抗匹配，用起来更加方便。

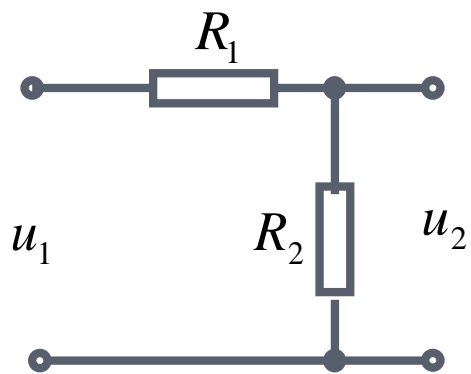
## 无相移校正装置（比例控制）

### 1、传递函数

$$G_c(s) = K$$

### 2、实现形式

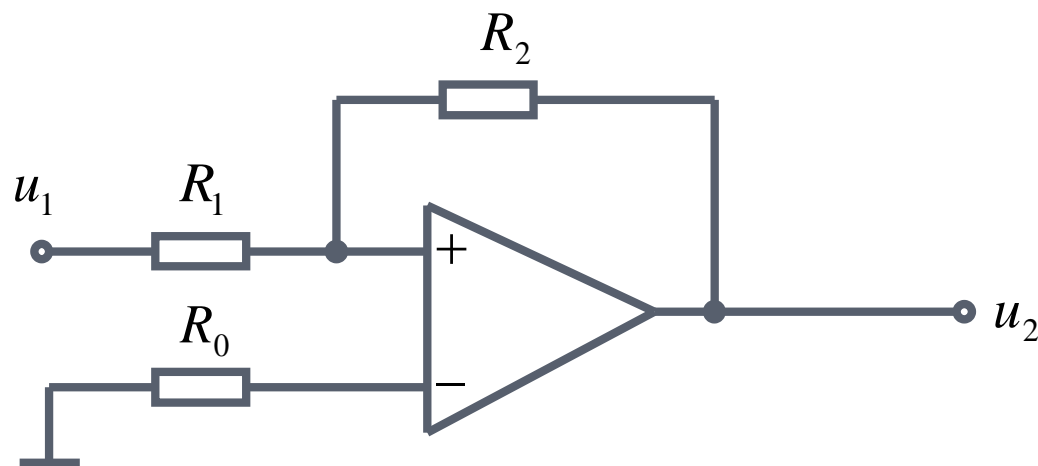
#### 无源网络



$$K = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \quad K \leq 1$$

#### 有源网络

#### 放大器



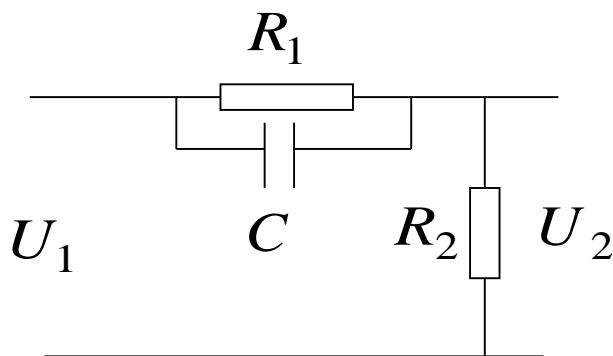
$$K = \frac{R_2}{R_1}$$

### 3、Bode图

## 无源校正网络

### 6.3.1 无源超前网络

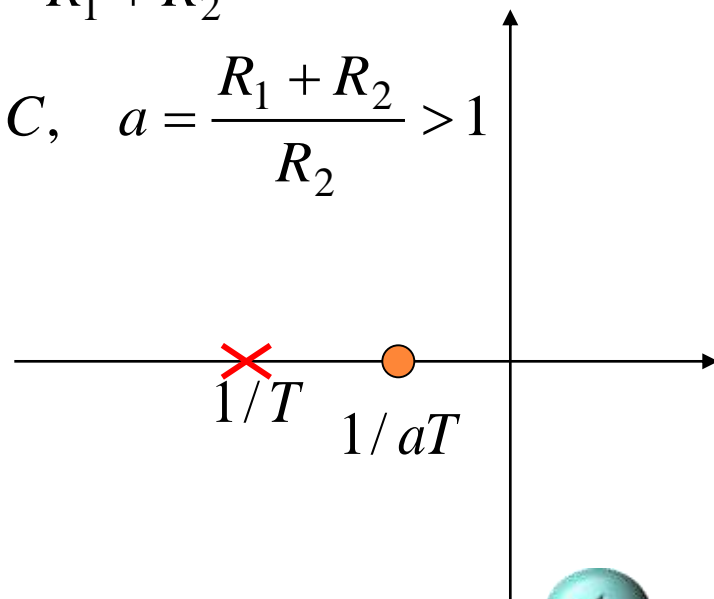
相位超前校正装置 (PD校正)



$$G_c(s) = \frac{R_2}{R_2 + (R_1 // \frac{1}{Cs})} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \frac{(R_1 Cs + 1)}{\frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} Cs + 1}$$
$$= \frac{1}{a} \frac{aTs + 1}{Ts + 1} \quad T = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} C, \quad a = \frac{R_1 + R_2}{R_2} > 1$$

进一步可研究

$$aG_c(s) = \frac{aTs + 1}{Ts + 1}$$



对数频率特性



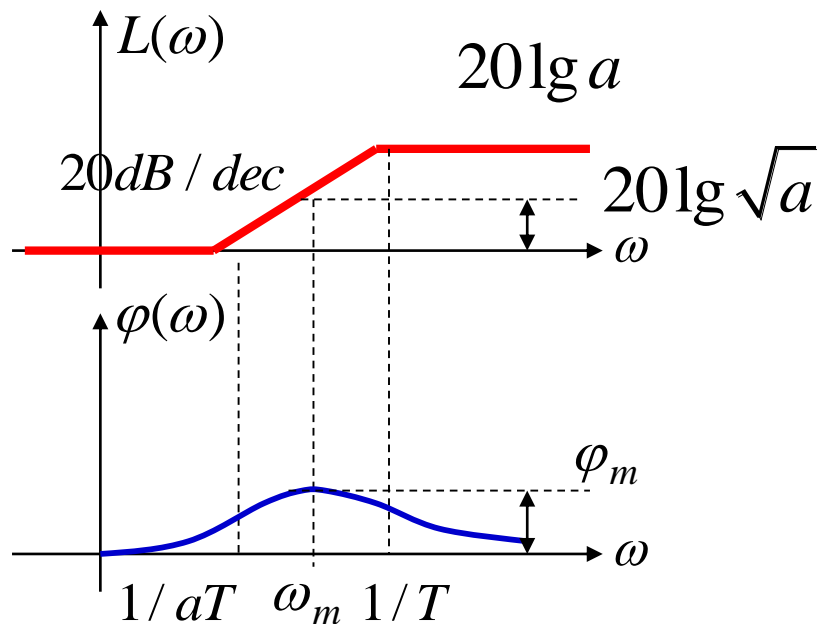
$$L_c(\omega) = 20\lg|aG_c(j\omega)| = 20\lg\sqrt{(aT\omega)^2 + 1} - 20\lg\sqrt{(T\omega)^2 + 1}$$

$$\phi_c(\omega) = \arctgaT\omega - \arctgT\omega = \arctg\frac{(a-1)T\omega}{1+aT^2\omega^2}$$

$$\frac{d\phi_c(\omega)}{d\omega} = 0, \quad \omega_m = \frac{1}{T\sqrt{a}}, \quad \phi_m = \arctg\frac{a-1}{2\sqrt{a}} = \arcsin\frac{a-1}{a+1}$$

由bode图求得:

$$\begin{aligned} L_c(\omega_m) &= 20\lg|aG(j\omega_m)| \\ &= 20\lg\sqrt{a} = 10\lg a \end{aligned}$$



## 最大超前角

$$\frac{d\varphi}{d\omega} = 0 \Rightarrow \varphi_m = \sin^{-1} \frac{a-1}{a+1}$$

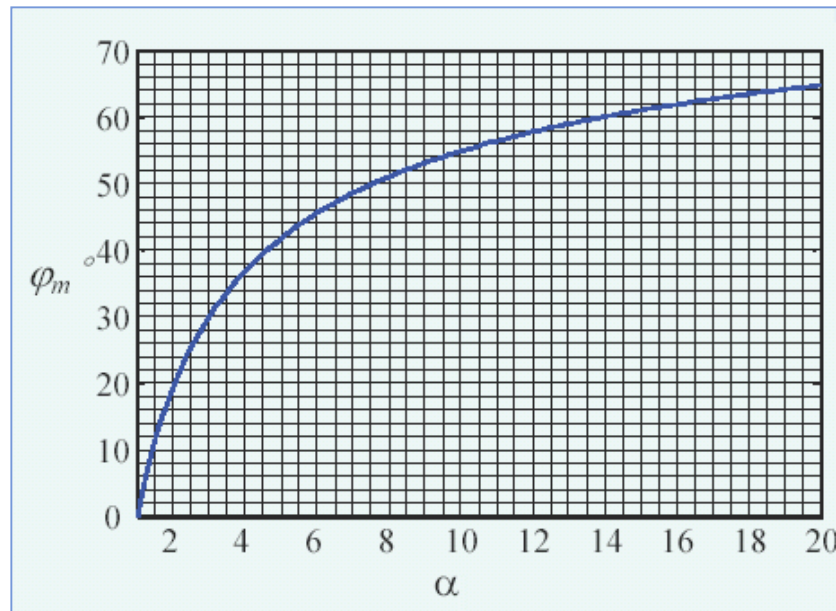
$$a = \frac{1 + \sin \varphi_m}{1 - \sin \varphi_m}$$

➤  $a \uparrow \rightarrow \varphi_m \uparrow$

$a=20$ 时,  $\varphi_m \cong 65^\circ$

➤ 高通滤波特性,  $a$  值过大对抑制系统高频噪声不利。

➤ 为保持较高的系统信噪比, 通常选择  $a=10$  (此时  $\varphi_m=55^\circ$ )。



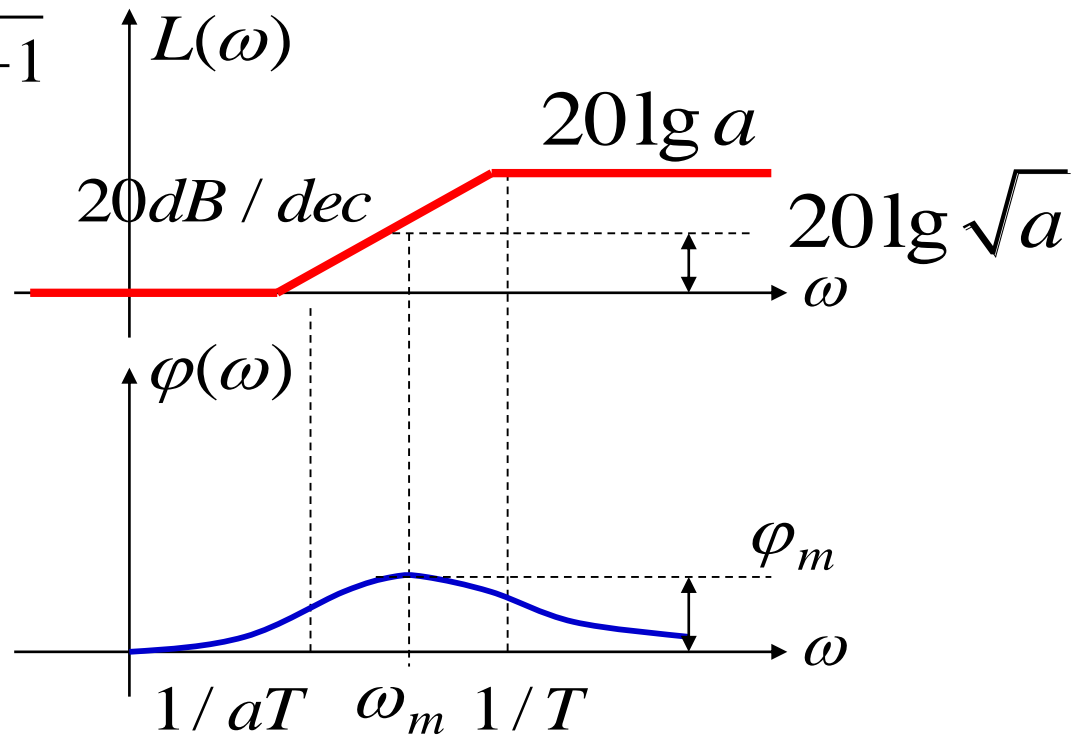
相位超前 $\uparrow \rightarrow$  系统带宽 $\uparrow$   
动态性能 $\uparrow$   
噪声 $\uparrow$

求两端交接频率的中点（即几何中心）：

$$\lg \omega_1 = \frac{1}{2} (\lg \frac{1}{aT} + \lg \frac{1}{T}) = \lg \frac{1}{T\sqrt{a}}, \quad \omega_1 = \omega_m = \frac{1}{T\sqrt{a}}$$

$$\omega_m = \frac{1}{T\sqrt{a}}, \quad \phi_m = \arcsin \frac{a-1}{a+1}$$

$$\begin{aligned} L_c(\omega_m) &= 20 \lg |aG(j\omega_m)| \\ &= 20 \lg \sqrt{a} = 10 \lg a \end{aligned}$$



## 串联相位超前校正设计举例

- 例 设I型单位反馈系统原有部分的开环传递函数为

$$G_o(s) = \frac{K}{s(s+1)}$$

要求设计串联校正装置，使系统具有  $K = 12$  及  $\gamma > 40^\circ$  的性能指标。



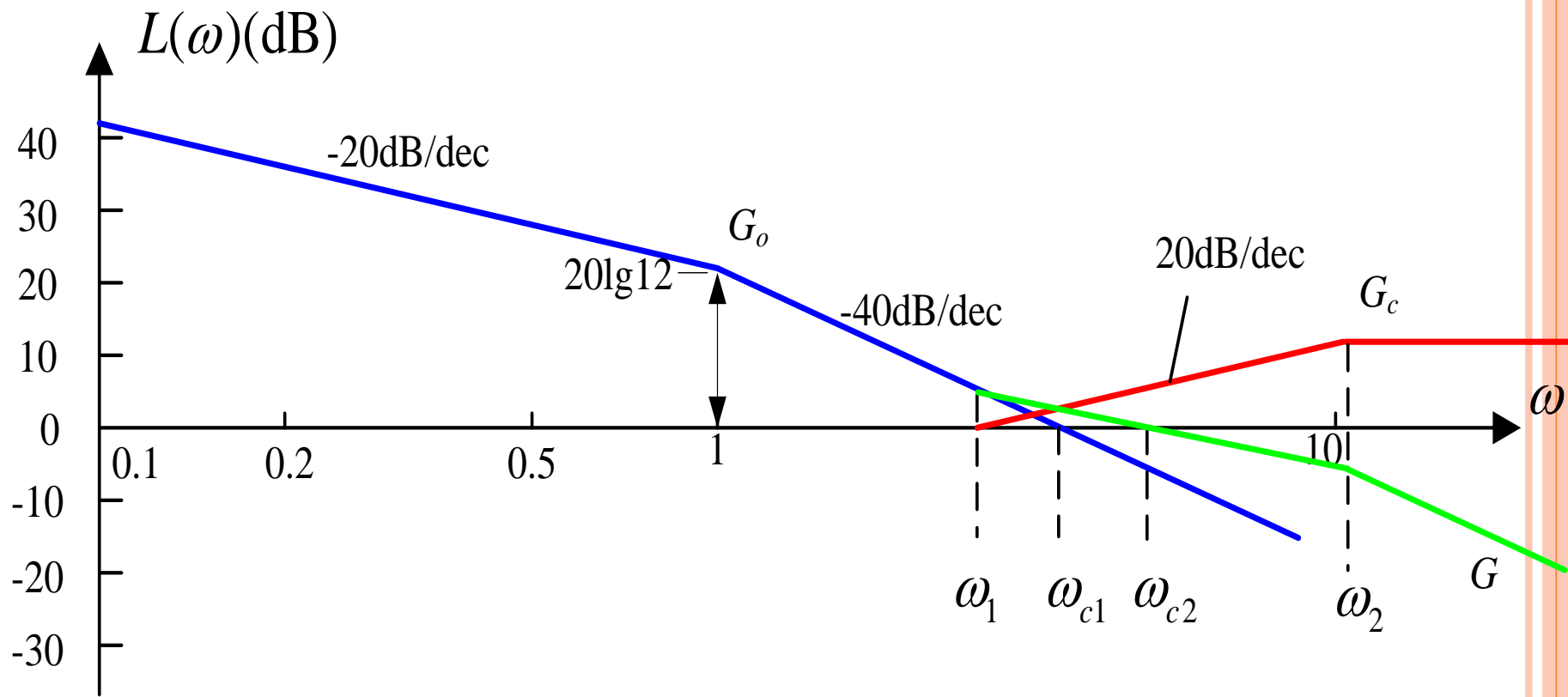
- 解 当 $K = 12$ 时, 未校正系统的Bode图如下图中的曲线 $G_0$  (蓝线), 可以计算出其剪切频率 $\omega_{c1}$ 。由于Bode曲线以  $-40\text{dB/dec}$ 的斜率与零分贝线相交于 $\omega_{c1}$ , 故存在下述关系:

$$\frac{0 - 20 \lg 12}{\lg \omega_{c1} - \lg 1} = -40$$

所以

$$\omega_{c1} = \sqrt{12} = 3.46\text{s}^{-1}$$





- 于是未校正系统的相角裕度为

$$\gamma_0 = 180^\circ + \varphi(\omega_{c1}) = 180^\circ - 90^\circ - \arctg \omega_{c1}$$

$$= 90^\circ - \arctg 3.46 = 16.12^\circ < 40^\circ$$

- 为使系统相角裕量满足要求，引入串联超前校正网络。在校正后系统剪切频率处的超前相角应为(也可取其他值)

$$\varphi_0 = 40^\circ - 16.12^\circ + 16.12^\circ = \varphi_m$$



以上内容仅为本文档的试下载部分，为可阅读页数的一半内容。如要下载或阅读全文，请访问：<https://d.book118.com/048012105053007012>