

1. 填空题 (每空 0.5 分, 共 10 分, 按空顺序填到答题卡上)

1.1 如果一个控制系统对系统中的不确定性不敏感, 则称该系统是 (1) 鲁棒 的。

1.2 伺服系统的指令输入信号通常为 (2) 时变 (时变/时不变) 信号, 需要对输入信号进行频谱分析, 并依据频谱分析结果作为伺服系统 (3) 带宽 的设计依据, 输入信号及其导数的幅值大小是执行器、传感器的重要 (4) 选型 依据。

1.3 控制系统的被控对象都不可避免地存在不确定性, 频域不确定性可以描述为 (5) 增益 不确定性和 (6) 相位 不确定性等, 控制系统设计必须满足 (7) 鲁棒稳定性 要求。

1.4 顺馈可以改变控制系统的 (8) 响应 特性, 但不能改变系统的 (9) 稳态 特性。

1.5 PID 控制中, PD 环节的主要用于调节系统的阻尼, 随着微分时间常数的增大, 系统阶跃响应的调节时间 (10) 增大 (增大/减小)。

1.6 若执行器同时具有饱和及转换速率限制的数学模型描述如下:

$$u(t) = \text{Sat}(\dot{u}(t)) \triangleq \begin{cases} u_{\max} & \text{if } \dot{u}(t) > u_{\max}, \\ \dot{u}(t) & \text{if } u_{\min} \leq \dot{u}(t) \leq u_{\max}, \\ u_{\min} & \text{if } \dot{u}(t) < u_{\min}. \end{cases} \quad \dot{u}(t) = \text{Sat}(\dot{\dot{u}}(t)) \triangleq \begin{cases} \sigma_{\max} & \text{if } \dot{\dot{u}}(t) > \sigma_{\max}, \\ \dot{\dot{u}}(t) & \text{if } \sigma_{\min} \leq \dot{\dot{u}}(t) \leq \sigma_{\max}, \\ \sigma_{\min} & \text{if } \dot{\dot{u}}(t) < \sigma_{\min}. \end{cases}$$

则图 1-1 所示的该执行器模型框图中,  $A = \underline{(11) U_{\max}}$   $B = \underline{(12) U_{\min}}$   $C = \underline{(13) \Delta \sigma_{\max}}$   $D = \underline{(14) \Delta \sigma_{\min}}$

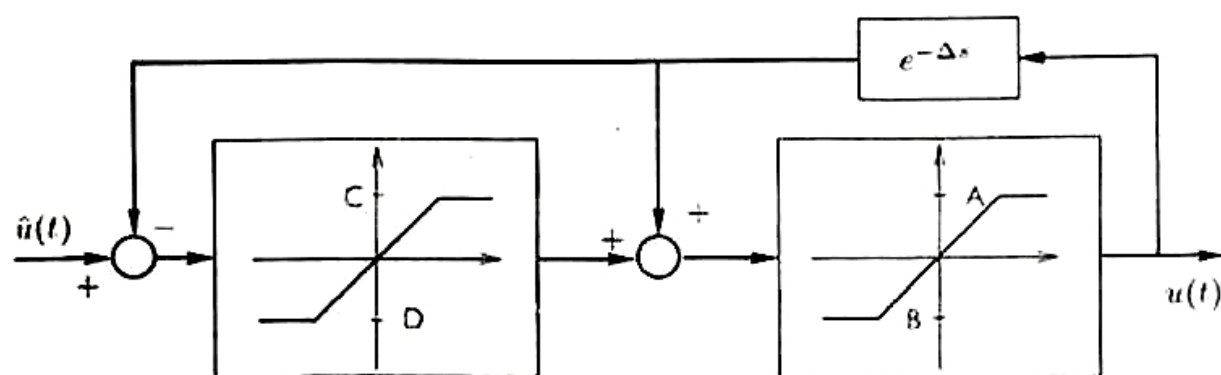


图 1-1 执行器约束模型

1.7 电站锅炉的主蒸汽温度是衡量锅炉运行质量的关键指标, 蒸汽流量、烟气热量、减温水流量的变化是导致主蒸汽温度发生变化的三个重要原因, 如图 1-2 所示的主蒸汽温度串级调节系统中, 主回路的输出应为 (15) 主蒸汽温度, 减温水流量信号是副回路的 (16) 控制量, 副回路作为 (17) 内 (内/外) 回路, 具有 (18) 快 (快/慢) 调, (19) 粗 (粗/细) 调的特点, 其主要作用是快速消除 (20) 减温水流量 的波动对主蒸汽温度的影响。

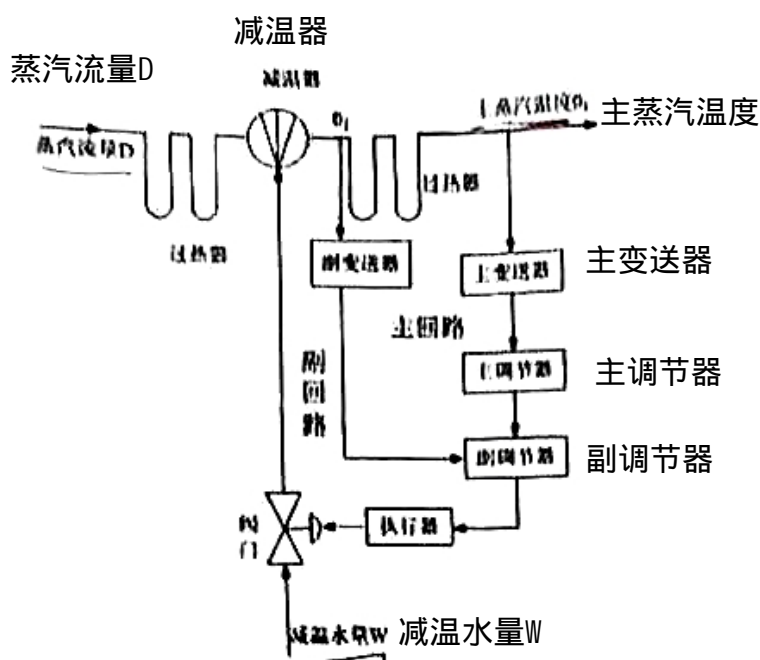


图 1-2 主蒸汽温度串级调节系统

## 2. 单项或多项选择题(每题 1 分, 共 15 分, 少选错选不得分)

2.1 对于实际控制系统, 下列哪些因素可能导致系统失稳 ABCDE。

A. 指令变化 B. 外部干扰 C. 测量噪声 D. 模型摄动 E. 工况变化

2.2 关于傅里叶分析在控制系统设计中的作用, 下列叙述正确的是 ABCDE。

A. 可以用于分析典型输入信号的频谱范围, 指导系统的带宽设计; ✓

B. 可以用于分析系统输出信号的频谱成分; ✓

C. 可以用于分析控制量中的频谱成分, 判断系统中是否存在谐振; ✓

D. 可以用于分析噪声的频谱成分, 指导噪声抑制; ✓

E. 可以用于分析干扰信号的频谱范围, 用于指导元部件选型; ✓

2.3 关于控制系统误差的叙述, 正确的有 AD。

A. 从时间上看, 控制系统的误差可以分为瞬态误差和稳态误差, 理论上稳态误差是指时间趋于无穷时系统的误差; ✓

B. 稳态误差可以分为动态误差和静态误差, 一定为 0、常数或无穷大; ✗

C. 从性质上看, 控制系统的误差也分为系统误差和随机误差, 指令带来的误差一般为系统误差, 干扰和噪声引起的误差是随机误差; ✗ *看信号是否随机*

D. 与随机误差相比, 系统误差通常具有重复性, 可以在指令上进行补偿; ✓

E. 对于随机误差可以用均方误差指标进行评价, 其均值一定为零; ✗ *有系统误差*

2.4 关于控制系统输入信号分析, 下面叙述正确的有 \_\_\_\_\_。

A. 分析的输入信号可以指导元部件选型; ✓

B. 分析典型输入信号的频谱有助于确定系统的带宽; ✓

C. 分析典型输入信号的各阶导数有助于确定系统的型别; ✓

D. 分析典型输入信号最终目的是获得它的解析表达式; ✗ *EA 求稳态误差*

E. 分析典型输入信号的数值方法有差分法和 FFT 分析; ✗ *差分法一般用于数据处理精度较高*

2.5 对于实际控制系统, 关于减小同一指令作用下系统的跟踪误差 (含瞬态误差和稳态误差) 的方法, 下列叙述正确的是 ABD。

- A. 不影响稳定的前提下, 提高增益一定可以减小稳态误差; ☒
- B. 不影响稳定的前提下, 增加型别一定可以减小稳态误差; ☒ ~~增加型别一定可以减小瞬态误差~~
- C. 若采用反馈环节, 一定可以同时减小瞬态误差和稳态误差; ☒
- D. 根据卷积公式, 脉冲响应函数不变的情况下, 系统的跟踪误差大小完全取决于指令; ☒
- E. 根据动态误差系数法, 系统的稳态误差是由系统的型别和增益, 还有指令及其各阶导数决定。 ☒ ~~稳态误差由系统的型别和增益决定~~

2.6 关于控制系统中噪声, 下列叙述正确的有 ABC。

- A. 一个系统的带宽越宽, 越容易受到噪声的影响, 一般可以采用等效噪声带宽来评价; ☒
- B. 噪声会通过反馈通道引入, 一般表现为量化噪声或白噪声; ☒
- C. 采用数字控制时, 处理器字长限制引起的截断误差以及运算过程中的舍入误差也可以等效为噪声; ☒
- D. 噪声的频带一般很宽, 低频段的噪声比较容易抑制, 而高频段的噪声则难于处理; ☒

E. 噪声抑制往往与系统的其它性能指标的提<sup>要求带宽, 同时也抑制噪声</sup>升相矛盾, 例如鲁棒稳定性。 ☒ ~~例如鲁棒稳定性~~

2.7 关于控制系统中的扰动, 下列叙述正确的有 ACE。

- A. 电机伺服系统建模时, 把反电势当作电流环扰动来处理是为了简化模型; ☒



内定 外定

- B. 对于高频扰动, 只能采用多回路控制, 利用内回路的高带宽进行抑制 $\times$
- C. 多回路控制系统中, 作用在内回路上的扰动, 在外回路设计时可以考虑;  $\checkmark$
- D. 风对作用于雷达会直接改变雷达的指向, 因此是输出端的扰动; 风会直接改变雷达 $\checkmark$
- E. 海浪对舰载雷达伺服系统的主要作用属于输出端扰动, 也会通过力的传递产生输入端扰动。

2.8 关于干扰观测器, 下列叙述正确的有 ABCD。

- A. 理论上, 干扰观测器对前向通道中噪声也有抑制作用。但在实际应用中, 干扰观测器本身也会引入噪声影响;  $\checkmark$
- B. 干扰观测器自身形成了一个闭合回路, 因此设计时必须考虑稳定性的问题;  $\checkmark$
- C. 如果系统的外扰过大, 干扰观测器会因饱和问题和无法进行扰动的有效观测 $\checkmark$
- D. 如果系统的模型摄动太大, 干扰观测器会失稳; $\checkmark$
- E. 对于双正则系统的干扰观测器设计, 滤波器的带宽可以任意拓展 $\times$

- B. 对于高频扰动, 只能采用多回路控制, 利用内回路的高带宽进行抑制;
- C. 多回路控制系统中, 作用在内回路上的扰动, 在外回路设计时可以考虑;
- D. 风对作用于雷达会直接改变雷达的指向, 因此是输出端的扰动;
- E. 海浪对舰载雷达伺服系统的主要作用属于输出端扰动, 也会通过力的传递产生输入端扰动。

2.8 关于干扰观测器, 下列叙述正确的有\_\_\_\_\_。

- A. 理论上, 干扰观测器对前向通道中噪声也有抑制作用。但在实际应用中, 干扰观测器本身也会引入噪声影响;
- B. 干扰观测器自身形成了一个闭合回路, 因此设计时必须考虑稳定性的问题;
- C. 如果系统的外扰过大, 干扰观测器会因饱和问题和无法进行扰动的有效观测;
- D. 如果系统的模型摄动太大, 干扰观测器会失稳;
- E. 对于双正则系统的干扰观测器设计, 滤波器的带宽可以任意拓展。

2.9 关于控制系统的灵敏度, 下列叙述正确的有 A。

- A. 灵敏度特性能够反应控制系统的综合性能;  $\checkmark$
- B. 灵敏度函数是变化量取微小增量时, 对象传函相对变化率与闭环传递函数相对变化率的比值;  $\varphi$
- C. 灵敏度函数最大值的倒数越大, 系统越容易失稳, 他反应了系统的鲁棒稳定性;  $\times$
- D. 灵敏度是频率的函数, 在低频段一定是单调递增的;  $\times$
- E. 灵敏度函数在 0 频率处会趋近于 0, 而在高频趋近于 1.  $\times$

$$S = \frac{-k_b H}{1 + k_b H} \quad \text{到 } H$$

2.10 关于控制系统的响应特性和反馈特性的叙述, 正确的有 ACE。

- A. 闭环系统才具有反馈特性, 它能够降低系统输出对模型摄动的敏感度; ✓
- B. 反馈特性好的系统, 噪声抑制能力就越强; ✗
- C. 反馈特性反映了控制系统的综合性能, 它比响应特性更重要; ✓
- D. 反馈特性好的系统响应特性一定好, 反之亦然; ✗
- E. 反馈特性的改善会受到 Bode 积分定理的限制, 不能任意提升; ✓

2.11 能够拓展闭环系统带宽的方法有\_\_\_\_\_。

- A. 引入比例微分环节 ✓
- B. 提高系统的增益 ✓
- C. 引入超前环节 ✓
- D. 引入顺馈环节 ✓
- E. 引入近似微分环节 ✓

2.12 对于控制器的 Anti-Windup 设计, 下列叙述正确的是 AD。

- A. 解决积分器饱和的一个思路是小误差时启动积分, 大误差时切断积分; ✓
- B. 系统是否会出现饱和只与系统特性、控制器、指令和执行器功率限制有关; ✗
- C. 因为积分的存在, I 型和 II 型系统更容易出现饱和; ✗ *积分要出现在控制器中*
- D. 控制器的 Anti-Windup 设计并不会改变线性区 (非饱和时) 原控制器的性能, 通常只会在系统出现饱和后起作用; ✓
- E. 对控制器进行有效的 Anti-Windup 设计后, 系统阶跃响应的超调量会减小; ✓ *若无饱和, 超调无作用*

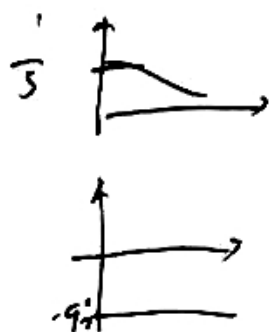
2.13 对于伺服系统的控制设计, 下列叙述正确的有 ABCE。

- A. 位置电机伺服系统被控对象模型中一定包含积分; ✓
- B. 伺服系统的控制器是通过期望开环特性与被控对象特性做差得到的; ✓
- C. 采用改进 I 型系统进行设计时, 要结合性能指标要求来确定系统的低频性能界; ✓
- D. 采用基本 I 型系统还是改进 I 型系统来进行设计是由被控对象模型特点决定的; ✗ *目标性能*
- E. 采用基本 I 型系统进行设计时无需考虑系统的稳定裕度问题; ✓

2.14 对于被控对象传递函数为  $G(s) = \frac{K}{Ts+1} e^{-\tau s}$  这类调节系统, 当采用 PID 进行控制时,

下列描述正确的有\_\_\_\_\_。

- A. 为了压低带宽, 一般会采用积分, 而且积分时间常数的倒数要小于剪切频率; ✓ *用积分是为了提高精度*
- B. 这类系统用幅值裕度作为稳定裕度指标更合理, 因为需要补偿的相角太多; ✗
- C. 若采用微分, 为了避免微分的引入改变系统原有剪切频率, 微分时间常数的倒数通常要远高于剪切频率; ✗
- D. 因为有纯延迟环节, 这类系统不适合用 Ziegler-Nichols 经验公式进行参数整定; ✓
- E. 为了避免积分项的引入导致过大的相位滞后, 积分项通常要加得比较弱; ✓





2.15 关于多回路控制（不考虑反馈），下列叙述正确的有 CD。

- A. 多回路控制中，可用内回路抑制扰动，用外回路拓展带宽。 ~~X~~
- B. 多回路控制设计时，通常内外回路带宽必须满足  $\omega_{n\text{内}} \leq 5\omega_{n\text{外}}$  ~~X~~
- C. 多回路控制是通过结构上的改变来解决单回路的约束和限制，但这种改变必然会增加系统设计的复杂度。 ☒
- D. 在进行多回路控制系统调试时，只能先调试内回路，再调试外回路。 ☒
- E. 多回路控制必须要增加传感器和执行器，这会带来额外的选型问题。 ☒

3. 判断题（每题 0.5 分，共 5 分）

- 3.1 按照指令的形式，可将控制系统分为运动控制系统和过程控制系统。 ~~(X)~~
- 3.2 对于零型系统，若要提高静态精度，可以直接系统提高型别，其稳定性不会受到影响。 ~~(X)~~
- 3.3 滞后环节在用来提高系统增益时，因为一般加到低频，离剪切频率较远，因此不会影响系统的相位裕度，但可能会引起条件稳定。 ☒
- 3.4 噪声和扰动对控制系统影响的主要区别在于他们的作用方式和机理不同。 ☒
- 3.5 随机性的扰动没法进行测量和补偿，只能通过闭环系统进行抑制。 ~~(X)~~
- 3.6 线性系统的 Bode 积分定理说明在控制系统设计时灵敏度函数不能任意设计，其根本原因是任何系统都存在功率限制。 ~~(X)~~
- 3.7 采用带有微分形式的反馈校正一般具有高通特性，在低频段相当于开环，通常不能单独使用。 ~~(X)~~
- 3.8 对于给定实际控制系统，反馈特性的提升更容易导致系统出现饱和问题。 ☒
- 3.9 基本 II 型系统的比基本 I 型系统的跟踪精度高。 ~~(X)~~
- 3.10 串级调节系统本质上是多个回路串联构成的，每个回路可以抑制不同的扰动。 ☒

4. 简答题（每题 4 分，共 20 分）

- 4.1 简述控制系统设计的主要内容和流程，并说明仿真在其中的作用和不足。
- 4.2 试列举四种扰动抑制方法，并说明他们的适用范围和利弊。
- 4.3 对伺服系统进行校正时，有串联校正和反馈校正两种方法，试从不同角度说明两种方法各自的特点。
- 4.4 系统框图如图 4-1 所示，已知输入信号的谱密度为  $\Phi_i(\omega)$ ，噪声信号的谱密度为  $\Phi_n(\omega)$ ，假设两个信号不相关，推导系统均方误差的表达式，并简述如何减小均方误差。
- 4.5 简述机械谐振的抑制方法及注意事项。

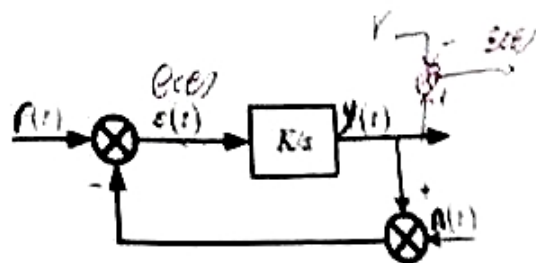


图 4-1 控制系统框图

## 5. 综合题 (共 10 分)

考虑如图 5-1 所示, 带有测速反馈的双回路角位置伺服系统。图示系统中,  $r$  为角位置指令,  $y$  为系统的角位置输出,  $d$  为动基座带来的角速度扰动,  $n_1$  和  $n_2$  分别为内回路和外回路的输入噪声。系统的系数分别为  $J=0.1$ ,  $K_I=0.5$ ,  $K_F=1.5$ 。已知内回路采用 PI 控制器, 内回路中电机模型的乘性不确定性在  $\omega > 100 \text{ rad/s}$  后幅值大于等于 1。具体的设计要求为

- 确定内回路 PI 控制器的参数  $K_p$  和  $T_i$ , 在尽可能克服扰动  $d$  影响的前提下使内环等效噪声带宽达到最小。(提示: 如图 5-2, 当  $\omega_3=\omega_4$  系统等效噪声带宽最小)
- 对于参考输入  $r = 0.002 \times t \text{ rad/s}$ , 要求  $e_{\max} \leq 0.0001 \text{ rad/s}$ , 同时尽可能抑制外回路高频噪声的影响, 确定外回路控制器  $C(s)$  的形式和参数。

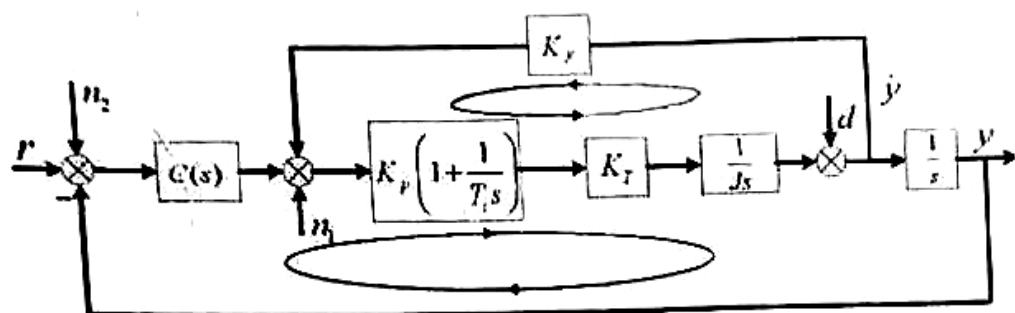


图 5-1 控制系统框图

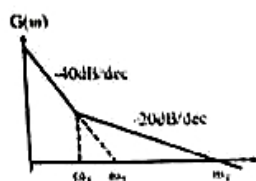


图 5-2 系统内回路特性波特图

(a) 内回路开环传递函数  $G(s) = \frac{k_p k_I k_F}{J T_i} \frac{T_i s + 1}{s} = k_0 \frac{T_i s + 1}{s}$

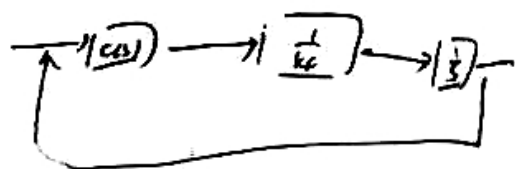
$k_0 = \frac{k_p k_I k_F}{J T_i} = \frac{1.5 \times 0.5 \times 1.5}{0.1 \times T_i} = \frac{1.125}{T_i}$   $k = \frac{\omega_4}{\omega_3} \quad k=1 \quad \omega_3 = \omega_4$

$\frac{1}{T_i} = \omega_3 \quad \left| \frac{G(j\omega)}{1+G(j\omega)} \right| \leq \frac{1}{(k-1)} \quad \text{当高频时} \quad |G(j\omega)| < \frac{1}{(k-1)}$

$\omega_3 = 100 \text{ rad/s}$  相交于角频率, 取  $\omega_3 = 100 \text{ rad/s} \Rightarrow \omega_4 = 100 \text{ rad/s} = \omega_3 = \omega_4$

(b)  $T_i = \frac{1}{\omega_3} = 0.01 \quad k_p = \frac{k_0 J T_i}{k_I k_F} = 13.3$

设计  $C(s) = \frac{k}{T_i s + 1}$



噪声  $\frac{0.002k}{s(T_i s + 1)} \quad e_{\max} = \frac{0.002}{0.007k} \leq 0.0001 \text{ rad/s}$

$k \geq 30 \quad \omega_{co} \leq \frac{\omega_c}{5} = 20 \text{ rad/s}$

$\frac{1}{T_i} = 0.007k = 20 \text{ rad/s} \quad T_i = 0.05 \text{ s}$