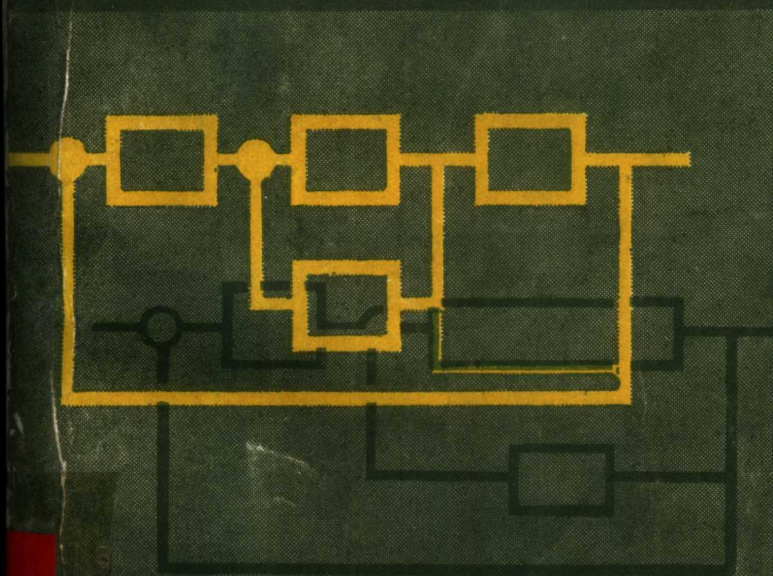


胡祐德 张富有 编著

# 反馈控制系统设计



北京工业学院出版社

# 反馈控制系统设计

胡祐德 张富有 编著

北京工业学院出版社

## 内 容 简 介

本书以自动控制理论为基础,介绍反馈控制系统的工程设计方法。内容包括:系统元、部件的选择及稳态计算,系统传递函数的建立,校正装置的综合,降低对参数变化的灵敏度,复合控制系统的设计,线性系统的最优传递函数法,以及系统参数优化的计算机辅助设计等。

本书可作为自动控制专业高年级教材,同时可作为从事自动控制的工程技术人员的参考书。

## 反 馈 控 制 系 统 设 计

胡祐德 张富有 编著

\*

北京工业学院出版社出版

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

通县张家湾印刷厂印刷

\*

787×1092毫米 32开本9.25印张 207千字

1987年12月第一版 1987年12月第一次印刷

印数: 1—3,000册

统一书号: 15434.71

定价: 1.55 元

# 前 言

《反馈控制系统设计》是在原有教材《自动控制系统设计》基础上改写而成的，作为自动控制专业本科生的专业课教材。目的是培养学生综合运用所学理论，掌握反馈控制系统工程设计的特点和基本的设计方法。经过实践环节的训练，使学生初步具备设计反馈控制系统的能力。

本课程要求学生先修完控制电机、模拟电子技术、自动控制理论、电力拖动、调速系统、随动系统等有关内容；考虑到与计算机控制系统课程的分工，本教材利用先修课程的知识，着重介绍线性连续定常的反馈控制系统的工程设计方法，且只讨论单输入单输出系统。关于多输入多输出系统和离散控制系统的设计问题均未涉及。

本教材包含反馈控制系统的稳态设计和动态设计两大部分，并将它们有机地联系在一起。从运动规律的分析，各主要元、部件的选择与计算，系统数学模型的建立，直到根据品质要求综合校正装置。利用描述函数介绍了某些非线性系统的设计方法，用灵敏度观点讨论了参数变化时系统的设计问题。具体阐述了设计系统的 *Bode* 图法、根轨迹法和最优传递函数法，最后还介绍了反馈控制系统参数优化的计算机辅助设计。附录中有求代数方程的根、画波德图、画奈奎斯特图、画根轨迹以及求闭环系统输出响应等用 BASIC 语言编制的程序。可为读者对反馈控制系统的设计，提供一个较为实际、较为完整的认识。

原教材《自动控制系统设计》由北京工业学院1983年出版，经过北京工业学院和太原机械学院多次教学使用，这次改写在篇幅上有较大的删节，又适当地补充了新的内容。书稿经北京航空学院潘维瀚老师和卢伯英老师仔细审阅，并提出许多宝贵意见；改写过程中太原机械学院董国川老师提过许多建设性意见，北京工业学院马东升老师和窦惠芳同志曾给予大力协助，在此表示衷心的感谢。

本书前六章及附录由胡祐德执笔，第七章由张富有执笔。鉴于我们的水平和经验有限，改写的时间比较仓促，难免还有错误和欠妥之处，欢迎大家批评指正。

编著者 1986年7月

# 目 录

前 言 .....	1
<b>第一章 技术要求与设计步骤</b> .....	<b>3</b>
§ 1.1 引 言 .....	3
§ 1.2 一般性的技术要求 .....	4
一、对调速系统的一般技术要求 .....	4
二、对随动系统的一般技术要求 .....	6
§ 1.3 设计计算内容和步骤 .....	7
一、系统线路方案的制订与稳态设计 .....	8
二、建立系统动态数学模型 .....	8
三、系统的动态设计计算 .....	9
<b>第二章 反馈控制系统的稳态计算</b> .....	<b>10</b>
§ 2.1 引 言 .....	10
§ 2.2 系统典型负载的分析 .....	11
一、摩擦负载 .....	12
二、惯性负载 .....	15
三、负载的综合特性 .....	18
§ 2.3 执行电动机及传动装置的确定 .....	23
一、执行电动机的类型 .....	24
二、力矩式执行电动机的选择 .....	28
三、一般高速执行电动机的选择 .....	32
§ 2.4 反馈控制系统测量装置的确定 .....	41
一、调速系统测量装置的选择 .....	42
二、随动系统测量装置的选择 .....	47

三、特、粗信号选择电路的计算	51
§ 2.5 反馈控制系统的放大装置	55
练习	57
参考文献	58
<b>第三章 建立系统的数学模型和选择校正(补偿)形式</b>	<b>59</b>
§ 3.1 关于建立系统数学模型的问题	59
一、建立系统数学模型的途径	59
二、常用的线性化办法	60
§ 3.2 利用元件铭牌数据和经验公式近似推导系统的传递函数	63
一、控制直流电动机电枢的随动系统的传递函数推导	64
二、以两相异步电机为执行电机的随动系统的传递函数推导	70
三、可控硅控制滑差电机的调速系统的传递函数推导	74
§ 3.3 选取校正(补偿)形式	77
一、串联校正	77
二、反馈校正	78
三、负反馈校正	80
四、正反馈校正	82
五、选择性反馈	82
六、复合控制	82
练习	84
参考文献	85
<b>第四章 对数频率特性综合法</b>	<b>86</b>
§ 4.1 希望特性的绘制	86
一、引言	86
二、品质指标与系统开环对数幅频特性	86
三、画希望特性	91
§ 4.2 校正(补偿)装置的综合	94

一、串联校正(补偿)装置的综合 .....	94
二、负反馈校正(补偿)装置的综合 .....	96
§ 4.3 降低系统品质对参数变化的灵敏度 .....	102
一、灵敏度函数及其频域表示 .....	102
二、按限定的灵敏度综合负反馈校正(补偿)装置 .....	105
§ 4.4 提高系统抗负载扰动的能力 .....	107
§ 4.5 复合控制系统的设计 .....	111
§ 4.6 借助描述函数考虑系统的非线性因素 .....	115
一、用描述函数分析非线性系统 .....	115
二、几种常见非线性特性及其描述函数 .....	118
三、非线性控制系统的设计 .....	121
练习 .....	123
参考文献 .....	124
<b>第五章 根轨迹综合法</b> .....	<b>125</b>
§ 5.1 串联校正(补偿)装置的综合 .....	125
一、串联微分校正装置的综合 .....	128
二、串联积分校正装置的综合 .....	133
§ 5.2 反馈校正(补偿)装置的综合 .....	137
一、速度负反馈的综合 .....	137
二、加速度负反馈参数的综合 .....	140
§ 5.3 根灵敏度及其计算 .....	142
一、根灵敏度及其性质 .....	142
二、根灵敏度的计算 .....	147
练习 .....	149
参考文献 .....	150
<b>第六章 最优传递函数综合法</b> .....	<b>151</b>
§ 6.1 最优传递函数及其计算 .....	151
一、最优传递函数的推导 .....	152
二、最优传递函数的具体计算 .....	157



三、检验最优传递函数对应的品质指标 .....	164
§ 6.2 全状态反馈的设计 .....	168
§ 6.3 部分状态反馈的设计 .....	171
§ 6.4 复合控制系统的设计 .....	179
练习 .....	182
参考文献 .....	182
<b>第七章 系统参数优化的计算机辅助设计 .....</b>	<b>183</b>
§ 7.1 引言 .....	183
§ 7.2 系统的数学模型 .....	184
§ 7.3 递推计算函数平方积分的基本定理——阿斯撞姆(AstrÖm)	
定理 .....	189
一、为引出阿斯撞姆定理先引出的定义 .....	190
二、对上叙定义的进一步讨论 .....	191
三、阿斯撞姆定理 .....	194
四、阿斯撞姆定理的算法与程序 .....	203
§ 7.4 以ISEU 指标优化系统参数 .....	205
一、目标函数 .....	205
二、目标函数 $f(x)$ 的递推算法 .....	207
三、约束优化算法 .....	208
§ 7.5 以ISTSEU指标优化系统参数 .....	212
一、误差性能指标简述 .....	212
二、ISTSEU指标的计算 .....	214
三、 $\phi(s)$ 的计算 .....	217
四、优化算法的简要说明 .....	219
五、程序框图 .....	223
六、算例比较 .....	225
参考文献 .....	225
<b>附录 I 常用拉普拉斯 (Laplace) 变换表 .....</b>	<b>229</b>
<b>附录 II 对数频率特性相角的估算 .....</b>	<b>231</b>

<b>附录III 常用校正网络</b> .....	233
<b>附录IV 几个用BASIC语言的程序</b> .....	241
一、求解高次代数方程根的程序.....	241
二、绘制波德(Bode)图及向量轨迹奈奎斯特(Nyquist)图的程序...	244
三、绘制根轨迹的程序.....	264
四、求闭环系统输出响应的程序.....	279
参考文献 .....	288

# 前 言

《反馈控制系统设计》是在原有教材《自动控制系统设计》基础上改写而成的，作为自动控制专业本科生的专业课教材。目的是培养学生综合运用所学理论，掌握反馈控制系统工程设计的特点和基本的设计方法。经过实践环节的训练，使学生初步具备设计反馈控制系统的能力。

本课程要求学生先修完控制电机、模拟电子技术、自动控制理论、电力拖动、调速系统、随动系统等有关内容；考虑到与计算机控制系统课程的分工，本教材利用先修课程的知识，着重介绍线性连续定常的反馈控制系统的工程设计方法，且只讨论单输入单输出系统。关于多输入多输出系统和离散控制系统的设计问题均未涉及。

本教材包含反馈控制系统的稳态设计和动态设计两大部分，并将它们有机地联系在一起。从运动规律的分析，各主要元、部件的选择与计算，系统数学模型的建立，直到根据品质要求综合校正装置。利用描述函数介绍了某些非线性系统的设计方法，用灵敏度观点讨论了参数变化时系统的设计问题。具体阐述了设计系统的 *Bode* 图法、根轨迹法和最优传递函数法，最后还介绍了反馈控制系统参数优化的计算机辅助设计。附录中有求代数方程的根、画波德图、画奈奎斯特图、画根轨迹以及求闭环系统输出响应等用 BASIC 语言编制的程序。可为读者对反馈控制系统的设计，提供一个较为实际、较为完整的认识。

原教材《自动控制系统设计》由北京工业学院1983年出版，经过北京工业学院和太原机械学院多次教学使用，这次改写在篇幅上有较大的删节，又适当地补充了新的内容。书稿经北京航空学院潘维瀚老师和卢伯英老师仔细审阅，并提出许多宝贵意见；改写过程中太原机械学院董国川老师提过许多建设性意见，北京工业学院马东升老师和窦惠芳同志曾给予大力协助，在此表示衷心的感谢。

本书前六章及附录由胡祐德执笔，第七章由张富有执笔。鉴于我们的水平和经验有限，改写的时间比较仓促，难免还有错误和欠妥之处，欢迎大家批评指正。

编著者 1986年7月

# 第一章 技术要求与设计步骤

## § 1.1 引言

本课程的任务是介绍反馈控制系统的工程设计方法。鉴于反馈控制系统种类繁多,各类系统的构成、物理性态和功用又是千差万别,不可能在一本书里对它们的设计都一一讨论。这里将以电气随动系统的设计为主线,阐述系统的设计原则、考虑问题的着眼点和设计计算的方法。其中若干原则和设计方法有普遍意义,在一定领域内可以推广运用。

仅就随动系统而言,现有的设计计算方法也很多,这里仅介绍工程实践中用得较普遍的。特别是控制系统计算机辅助设计的发展,设计方法更是千变万化,本书将用一章的篇幅介绍一种。

需要强调的是:每种方法都有它的长处和局限性,在实践中还将继续发展和完善。学习时应注意掌握每种方法考虑问题的着眼点,处理问题的思路,如何将具体工程实际要求转化成定量计算,每种方法适应的场合等等,而不应把它们当作一成不变的万能公式。

系统的工程设计不仅仅局限于理论设计计算,更重要的

是工程实践（包括加工、制造、安装、调试等）。理论设计计算只是提供一个设计方案。当然，一个先进的、合理的、便于工程实现的设计方案对指导工程实践是有重大意义的。

## § 1.2 一般性的技术要求

工程上对系统的技术要求都是很具体的。由于系统种类不同、用途殊异，技术要求不可能相同。这里仅以随动系统（位置控制系统）和调速系统（速度控制系统）为例，简单介绍工程上对它们的一般性的技术要求。

这两种系统的共同之点是：通过系统的执行元件直接（或经过机械传动装置）带动被控制对象，完成控制规律要求的机械动作。系统带动被控对象运动的过程中，执行元件输出轴上必然要承受各式各样的负荷，能承受这些负荷是系统能工作的起码要求。

### 一、对调速系统的一般技术要求

1. 最高输出转速  $n_{\max}$  [r/min]（或最大输出角速度  $\Omega_{\max}$  [rad/s]）或最大输出速度  $V_{\max}$  [m/s]，通常指被控对象运动的最高速度。

2. 输出的最低平稳转速  $n_{\min}$  [r/min]（或  $\Omega_{\min}$  [rad/s]）或最低平稳速度  $V_{\min}$  [m/s]，亦指被控对象的平滑运行的最低速度。

有时用调速范围  $D$

$$D = \frac{n_{\max}}{n_{\min}} = \frac{\Omega_{\max}}{\Omega_{\min}} = \frac{V_{\max}}{V_{\min}}$$

3. 速度调节的连续性与平滑性要求。

系统带动负载由 $n_{\max}$ 到 $n_{\min}$ 要求是有级调速，还是平滑的无级调速；要求系统转速是可逆的，还是要求单向运行的；要求系统可逆运行是容许间断的，还是要求连续的、平滑的可逆调速。

4. 静差率 $\delta$ 或转速降 $\Delta n$ （或 $\Delta Q$ 或 $\Delta V$ ）。

转速降 $\Delta n$ 是指控制信号一定的条件下，系统理想空载转速 $n_0$ 与满载时转速 $n$ 之差

$$\Delta n = n_0 - n_c。$$

静差率是指控制信号一定的条件下， $n_0$ 与 $\Delta n$ 之百分比

$$\delta = \frac{n_0 - n_c}{n_c} \times 100\% = \frac{\Delta n}{n_c} \times 100\%$$

5. 阶跃输入信号作用下系统的响应特性。

系统处于稳态时，给系统施加一阶跃输入信号，通常调速系统具有振荡性响应特性，通常取最大超调量 $\sigma\%$ 与响应时间 $t_s$ （以偏差 $\pm 5\%$ 或 $\pm 2\%$ 计）为技术指标。有时明确规定不允许有超调量，但仍有响应时间 $t_s$ 的要求。

6. 负载扰动作用下系统的响应特性。

转速降和静差率只能反映系统稳态特征。在具体工程中，常需对负载扰动引起的过渡过程予以限制。一般取最大转速降 $\Delta n_{\max}$ 与响应时间 $t_{st}$ 来衡量。

7. 对系统工作制（有长期连续运行、间歇循环运行和短时运行的差别）、故障率、可靠性、以及使用寿命的要求。

8. 系统需适应的环境温度、湿度，防水、防化、防辐射、抗振动、抗冲击的要求。

9. 对系统体积、重量、结构外型、安装特点的限制。

10. 对系统经济性要求（如生产成本、构成元件的通用

性和标准化程度、能源消耗、维护使用条件等），以及对系统能源条件（如电源种类、规格、容量）的限制等等。

## 二、对随动系统的一般技术要求

### 1. 系统静误差 $e_s$ 。

随动系统通常设计成无静差系统。用线性理论分析，系统静止协调时没有位置误差。但是系统的测量元件（或称敏感元件）的分辨率有限，系统输出轴承受于摩擦造成的死区，都是造成系统有静误差的原因。

2. 速度误差  $e_v$  和正弦跟踪误差  $e_m$ ，速度品质系数  $K_v$  和加速度品质系数  $K_a$ 。

衡量随动系统稳态运行精度的主要指标有  $e_v$ 、 $e_m$ 、 $K_v$  和  $K_a$ 。当随动系统处于等速跟踪状态时，系统输出轴与输入轴（即主令轴）之间瞬时的位置误差（可以是角度，也可以是位移量）称为速度误差  $e_v$ 。当系统处于等幅、等频正弦摆动跟踪时（系统处于稳态），输出轴与输入轴之间瞬时误差的振幅值称为正弦跟踪误差  $e_m$ 。

速度品质系数  $K_v$  是在斜坡信号输入时，系统稳态输出角速度  $\Omega_s$ （或速度  $V_s$ ）与速度误差  $e_v$  的比值。加速度品质系数  $K_a$  是在抛物线函数信号（即等加速信号）输入时，系统输出稳态角加速度  $\epsilon$ （或加速度  $a$ ）与其对应的系统误差之比值。

3. 最大跟踪角速度  $\Omega_{max}$ （或速度  $V_{max}$ ）、最低平稳跟踪角速度  $\Omega_{min}$ （或速度  $V_{min}$ ）、最大跟踪角加速度  $\epsilon_{max}$ （或加速度  $a_{max}$ ）。

在系统跟踪误差不超出容许值的前提下，随动系统能达到稳定运行的最大输出角速度，即  $\Omega_{max}$ 。系统匀速跟踪时



所能达到的最低平稳角速度，即 $Q_{min}$ 。系统跟踪时，在误差不超出容许值的前提下，系统输出轴所能达到的最大角加速度，即为 $e_{max}$ 。

#### 4. 振荡指标 $M$ 和频带宽度 $\omega_b$ 。

随动系统闭环幅频特性 $A(\omega)$ 的最大值 $A(\omega_c)$ 与 $A(0)$ （由于随动系统多为无静差系统，因此 $A(0) = 1$ ）的比值，称为振荡指标 $M$ 。当闭环幅频特性 $A(\omega_b) = 0.707$ 时所对应的角频率，即 $\omega_b$ ，称为系统的带宽。

#### 5. 阶跃信号输入时系统的响应特性。

随动系统处于静止协调状态（即零初始条件）下，输入阶跃信号，系统的最大超调量 $\sigma\%$ 、过渡过程时间 $t_s$ 和振荡次数 $\mu$ 均应有具体的限制。

#### 6. 等速跟踪状态下，负载扰动引起的系统响应特性。

随动系统作等速跟踪运动时，系统负载作阶跃或脉冲扰动的情况下，系统的最大瞬时误差 $e_{mf}$ （角度或位移）和过渡过程时间 $t_{sf}$ 均应有具体的限制。

此外，调速系统的第7、8、9、10项要求，对随动系统或其它反馈控制系统也适用。

除以上对系统工作性能提出的技术要求外，在工程设计计算和分析中，常常还引用一些便于计算的间接的技术指标要求。在以下章节中，将结合不同的设计方法予以说明，故在此从略。

## § 1.3 设计计算内容和步骤

每套反馈控制系统都是为自己的控制对象服务的。按照对象的特点和需要，制订出技术条件，作为设计系统的依据。