考研辅导丛书

自动控制原理
典型例题解析与习题精选

宋申民　陈兴林　主编

高等教育出版社

需要全本请访问 www.ertongbook.com

内容提要

本书比较系统、全面而清晰地总结了自动控制原理课程中的基本概念、基本原理及典型方法，不仅包括了线性系统的经典控制原理和现代控制理论的分析和综合方法，而且还包括了非线性系统和系统稳定性的基本理论与方法。对于一些典型例题在解答后又作了较为深入的讨论。所选例题与习题来源于哈尔滨工业大学本科生的自动控制原理的课程结业考试试题与各重点工科院校研究生入学试题，具有典型性和代表性。书后附有哈尔滨工业大学1996年至2004年硕士研究生入学考试控制原理试题和部分解答。

本书的特点是：内容全面，重点突出，讲解透彻，能使学习者对重点、难点内容有清晰而深刻的掌握。本书可作为本科生学习自动控制原理课程系统全面的学习参考书和报考自动化类专业研究生有价值的复习资料，同时对于研究生阶段控制理论的学习也有一定的参考意义。

图书在版编目(CIP)数据

自动控制原理典型例题解析与习题精选 /宋申民，陈兴林主编. —北京：高等教育出版社，2004.7
ISBN 7-04-014560-X

Ⅰ.自… Ⅱ.①宋…②陈… Ⅲ.自动控制理论—高等学校—解题 Ⅳ.TP13-44

中国版本图书馆CIP数据核字(2004)第056921号

策划编辑 韩 颖 **责任编辑** 郑 欢 **封面设计** 李卫青
责任绘图 尹文军 **版式设计** 马静如 **责任校对** 殷 然
责任印制

出版发行	高等教育出版社	**购书热线**	010-64054588
社 址	北京市西城区德外大街4号	**免费咨询**	800-810-0598
邮政编码	100011	**网 址**	http://www.hep.edu.cn
总 机	010-82028899		http://www.hep.com.cn
经 销	新华书店北京发行所		
印 刷			
开 本	787×960 1/16	**版 次**	年 月 第1版
印 张	33.5	**印 次**	年 月 第 次印刷
字 数	630 000	**定 价**	40.90元

本书如有缺页、倒页、脱页等质量问题，请到所购图书销售部门联系调换。

版权所有 侵权必究

前　言

随着工业生产和科学技术的发展，自动控制技术已经深入而广泛地应用于工农业生产、交通运输、国防现代化和航空航天等领域，自动控制原理作为工科院校的技术基础课，是自动化专业的必修课程，同时对于电气、机械、机电一体化、仪表及测试、动力、计算机、管理、交通等相关专业的学生也是一门重要的课程。

目前，控制科学与工程已经发展到以复杂系统为研究对象的智能控制阶段，有各种不同的研究方向。一方面，自动控制技术与机械、动力、计算机等技术相结合，广泛地应用于航空、航天等领域，形成了不同的先进技术研究方向，如飞行器控制、仿真精密测试系统、智能机器人、物流控制、社会经济控制等。另一方面，控制科学与数学、物理、系统论、生物进化等科学领域的结合愈加紧密，形成了内容丰富的理论研究方向，如鲁棒控制、H_∞ 控制、神经网络控制、模糊控制、遗传算法、免疫算法等。但是，即使最先进的控制技术领域，最高深的理论研究方向，我们都可以在自动控制原理中找到它的发展源头的思想脉络，找到它的思想方法的最初起源。这正是学习自动控制原理这门课程的意义所在。

为了帮助本科生、自动控制原理的学习者学好这门课程，也为了满足报考研究生的读者进行系统复习的需求，针对这门课程的特点，并结合作者多年的教学经验，编写了此书。

本书以国家教育部关于自动控制原理课程教学大纲的要求，对控制及线性系统的各部分内容进行了系统的归纳总结。通过典型例题与系统从不同的方面说明基本概念和基本原理的含义以及对问题解答的应用。尤其对于频率分析和设计方法、非线性系统的分析、系统的运动稳定性、线性系统的分析与综合等内容作了全面深入、详细而清晰的阐述，并将非线性分析部分的内容与稳定性的内容结合对比，以期对非线性系统有更深刻的理解，这也是本书的特点之一。同时本书选取了各重点工科院校的研究生入学自动控制原理试题中的典型题型，作为例题和习题，并加以分析和归纳整理。因此，本书不仅对自动控制原理中概念的理解和基本原理的掌握有较大的帮助，同时也是一本具有系统性、实用性、针对性的研究生入学应试教程。

本书由十二章和附录 A、B、C 组成，每章以一定的思路归纳了最基本的内容，包括说明性例题，随后是典型例题和启发总结性的评注，最后是精选出的习

题。附录 A是哈尔滨工业大学 1996年至 2004年研究生入学考试控制原理的历年考题和部分解答。附录 B清晰而深入地总结了掌握自动控制原理的经典部分和现代部分所必备的数学基础,供读者查询。附录 C是每章习题的部分答案。

下面对各章的重点内容以及各工科院校自动控制原理 (或线性控制理论,或自动控制理论,或控制理论)研究生入学常考内容归纳说明如下:

1. 自动控制的一般概念。本章定性地讲解自动控制及自动控制系统所必要的概念,是理解以后内容的基础。对于从概念上理解控制系统、控制系统的性能和分类至关重要,建议在学习开始和结束时认真阅读。

2. 控制系统的数学描述。自动控制的研究对象是控制系统,首先要建立它的数学模型,控制系统的数学模型有微分方程、传递函数、状态空间表达式等。一般由系统的物理特性可以写出系统的微分方程表示,通过拉氏变换将系统中的微分运算转化为复数域上的代数运算,用传递函数来描述系统。可以结合系统的状态空间描述来理解系统的数学模型,同时要思考用传递函数描述系统对于分析和综合系统有什么优点;将高阶微分方程转化为一阶微分方程组形式的状态空间描述有什么用处。是不是只是形式上的转化而没有实质上的意义。

本章常考内容是方框图的化简和梅森公式。

3. 线性系统的时域分析。本章主要研究系统在输入信号的作用下,系统输出信号的形式。要掌握:

- 一阶系统、二阶系统对于典型输入信号,尤其是阶跃信号的响应形式;系统响应与传递函数极点或系统参数的对应关系,以及与系统的性能指标之间的对应关系。
- 系统稳定性的劳斯判据。这里所说的稳定的概念实际上是李亚普诺夫稳定性中的渐近稳定,应与稳定性一章中的输入输出稳定相结合理解。
- 系统稳态误差的求取。要认识到应用公式求系统稳态误差的前提是系统稳定,同时要会分析不同类型的系统对不同的典型输入信号的稳态误差。
- 高阶系统的单位阶跃响应与系统零点与极点之间的定性关系。振型 (即系统的闭环极点)、系统零点与系统振动分量的关系。

4. 线性系统的根轨迹法。系统参数变化时闭环极点在复平面的变化轨迹。掌握绘制根轨迹的几条规则,并理解主导极点对系统性能的影响。同时参数根轨迹和 0°根轨迹对于分析和综合系统也很重要。

5. 线性系统的频域分析方法。常考的内容有以下几个重要方面:

- 利用系统的频率特性求取系统的稳态输出或由系统的稳态输出求系统的传递函数。
- 奈氏图的绘制和奈奎斯特稳定性判据。要注意这里奈奎斯特稳定性判

据是用开环传递函数的奈氏图来判别闭环系统的稳定性。

● 对数频率特性分析。包括对数频率特性曲线的绘制，对数频率的稳定性判别和由系统的对数频率特性曲线确定系统的传递函数等。系统的对数频率特性图要分别分析系统的低频、中频和高频特性。

6. 系统的校正与综合。本章一般综合考察前几章的知识，尤其是系统的对数频率特性描述。通常的校正方式是串联校正和反馈校正。要清楚掌握校正环节的作用，校正前系统的频率特性和要求的性能指标在频率特性曲线中的反映，以及校正后系统的频率特性。

在实际控制系统中常用到的是 PID 校正方法，深刻理解 PID 控制对系统的校正作用、系统性能的改进，应用 Matlab对校正前和校正后的系统进行仿真，对今后设计实际系统大有益处。

7. 线性系统的状态空间分析。深刻体会系统状态的概念，用状态方程与输出方程来描述系统的动态过程有何优点。掌握：系统状态空间表达式的求取，系统的状态转移矩阵，系统的状态响应和输出响应，能控能观性的基本概念和判别方法，能控能观标准型和系统的能控能观性分析，系统的输入输出表示的实现及最小实现。

8. 线性系统的状态空间综合。最基本的内容是状态反馈的极点配置、系统的镇定、观测器的设计、系统的跟踪和系统的解耦控制。

7、8两部分的内容，在研究生入学考试中内容较简单，不同的学校要求也不同，以上所述是最基本的要求。

这一部分要注意对于概念的理解，要体会状态空间表示方法对系统的分析、综合与经典控制理论的研究方法有什么不同之处。学习这一部分要用到线性代数中线性空间的知识，矩阵的基本概念和运算。因此，掌握数学基础对于清晰掌握这部分内容是非常重要的。

9. 离散控制系统。包括采样控制系统和离散系统的状态空间表示。一般常考的内容是采样系统脉冲函数的求取、系统稳定性的判别和稳态误差的求取。离散系统状态空间表示的求取，系统能控能观性等。

10. 系统的运动稳定性。系统的运动稳定性是本课程的一个难点，但在自动控制的知识体系中又是一个不可缺少的重要内容。本书比较详细而深入地总结了关于李亚普诺夫稳定性和输入输出稳定性的基本内容，重点是对于概念的理解，对于基本定理的掌握。本书给出了大量的例题和习题，并给出了详细的说明解释。牢固掌握本章的内容对于自动控制原理的学习，后续课程学习以及研究生阶段知识体系的深入理解将会是有益的。

研究生入学考试中，如何选取李亚普诺夫函数是解题关键。

11. 非线性控制系统分析。在本课程中，主要讲述了非线性系统的两种分

需要全本请访问 www.ertongbook.com

析方法:相平面方法和描述函数方法。对于描述函数方法,实际上是对一类非线性系统的工程分析方法,要掌握自振荡的条件以及自振荡振幅和频率的求取。对于相平面方法,重点掌握分段线性化相轨迹的绘制。在各线性区域绘制相轨迹时,先求出系统奇点并判断其类型,结合等倾线方程即可绘制各区域的相轨迹;若无奇点,则应找出相轨迹的渐近线。

本章中还有一个重要的概念是极限环的概念。以上两种方法均可以分析系统的极限环现象。

可以将本章的内容与稳定性一章的内容相互参照学习,以期对非线性系统有更深入的理解。

12. 最优控制。重点掌握泛函的极值、极小值原理以及线性二次型的最优控制问题。

自动控制原理是一门工程应用非常广泛的基础课程,所讲述的是控制科学与工程中的基本原理,因此要深刻理解它的概念、定理与方法,才能深入掌握这门课程的知识,并在工程实践中灵活应用。并且,这门课程不同于其他技术基础课的特点是理论性较强,与数学的结合比较紧密。因此,在学习的过程中要不断复习并加深对数学的理解。

在本书的编写中,王彤老师参加了第四章、第九章的编写工作,宁永臣博士参加了第四章、第十章、第十二章的编写工作,由宋申民、陈兴林统稿全书。

作者衷心感谢浙江大学邹伯敏教授对书稿的审阅,邹老师仔细审阅了全部内容并提出了不少有价值的修改建议,使作者受益匪浅。

作者还要感谢哈尔滨工业大学自动控制教学带头人裴润教授,长江学者段广仁教授,哈尔滨工业大学控制科学与工程系系主任马广富教授对作者的支持以及日本千叶大学张秀杰女士对作者工作的巨大帮助。

作者要感谢陈兴杰女士,王根民先生以及作者的研究生刘义先、王舰、周茂林在打印、校对等方面所作的艰苦而繁琐的工作。

限于作者的知识水平,本书难免有不妥之处,恳请读者批评指正。

宋申民　陈兴林

2004年 2月 10日于哈尔滨工业大学

目　　录

第 1章　控制系统的基本概念 …… 1

1.1　控制系统的基本概念 …… 1

1.2　典型例题解析 …… 4

1.3　习题精选 …… 7

第 2章　控制系统的数学模型 …… 9

2.1　控制系统的数学模型 …… 9

2.2　传递函数 …… 9

2.3　方框图的化简 …… 10

2.4　信号流图 …… 11

2.5　典型例题解析 …… 13

2.6　习题精选 …… 28

第 3章　控制系统的时域分析 …… 32

3.1　典型输入信号 …… 32

3.2　一阶系统的时域分析 …… 33

3.3　二阶系统的时域分析 …… 34

3.4　高阶系统的时域分析 …… 38

3.5　线性系统的稳定性与稳定性判据 …… 39

3.6　反馈控制系统的误差与稳态误差 …… 42

3.7　典型例题解析 …… 45

3.8　习题精选 …… 61

第 4章　线性系统的根轨迹分析方法 …… 67

4.1　反馈系统的根轨迹 …… 67

4.2　绘制根轨迹的规则 …… 67

4.3　广义根轨迹 …… 69

4.4　典型例题解析 …… 70

4.5　习题精选 87

第 5章　线性系统的频域分析 …… 91

5.1　频率响应及其描述 …… 91

5.2　典型环节的频率特性 …… 93

5.3 Nyquist稳定性判据 …… 98
5.4 控制系统的相对稳定性 …… 100
5.5 频域指标与时域指标之间的关系 …… 101
5.6 典型例题解析 …… 104
5.7 习题精选 …… 135
第 6章 控制系统的综合与校正 …… 141
6.1 反馈校正 …… 141
6.2 串联超前校正 …… 142
6.3 串联滞后校正 …… 144
6.4 滞后 —超前校正 …… 148
6.5 典型例题解析 …… 151
6.6 习题精选 …… 168
第 7章 控制系统的状态空间分析 …… 172
7.1 状态空间表达式 …… 172
7.2 线性时变系统分析 …… 179
7.3 线性定常系统分析 …… 183
7.4 系统的能控性 …… 185
7.5 状态的能观性和对偶原理 …… 190
7.6 线性系统的能控规范型和能观规范型 …… 193
7.7 线性系统的结构分解 …… 196
7.8 线性系统的实现问题 …… 198
7.9 典型例题解析 …… 208
7.10 习题精选 …… 225
第 8章 线性定常系统的状态空间综合 …… 233
8.1 线性系统的常规控制律 …… 233
8.2 极点配置 …… 236
8.3 镇定问题 …… 237
8.4 渐近跟踪问题——定常参考信号的情形 …… 239
8.5 观测器设计 …… 241
8.6 解耦控制 …… 247
8.7 典型例题解析 …… 251
8.8 习题精选 …… 256
第 9章 线性离散系统 …… 259
9.1 信号的采样与 Z变换 …… 259
9.2 零阶保持器 …… 261

9.3 脉冲传递函数的求取 …… 262
9.4 稳定性分析 …… 263
9.5 稳态误差 …… 264
9.6 采样控制系统的综合 …… 265
9.7 离散系统的状态空间描述 …… 266
9.8 离散系统的能控性和能观性 …… 266
9.9 典型例题解析 …… 268
9.10 习题精选 …… 283
第 10章 系统的运动稳定性 …… 288
10.1 李亚普诺夫稳定性的定义 …… 288
10.2 李亚普诺夫函数 …… 295
10.3 李亚普诺夫稳定性的主要定理 …… 296
10.4 线性时变系统的稳定性分析 …… 298
10.5 线性定常系统的稳定性分析 …… 300
10.6 李亚普诺夫第一方法——一次近似 …… 304
10.7 构造李亚普诺夫函数的方法 …… 306
10.8 线性离散系统的稳定性 …… 307
10.9 线性系统的有界输入有界输出 (BIBO)稳定性 …… 311
10.10 典型例题解析 …… 312
10.11 习题精选 …… 330
第 11章 非线性控制系统分析 …… 336
11.1 非线性系统特点 …… 336
11.2 典型非线性环节 …… 337
11.3 相平面分析方法 …… 339
11.4 描述函数的分析方法 …… 346
11.5 典型例题解析 …… 348
11.6 习题精选 …… 399
第 12章 最优控制 …… 408
12.1 泛函和变分 …… 408
12.2 用变分法求解最优控制问题 …… 410
12.3 极小值原理 …… 412
12.4 线性二次型最优控制 …… 413
12.5 典型例题解析 …… 415
12.6 习题精选 …… 426
附录 A 数学基础 …… 429

A1 拉普拉斯变换 …… 429
A2 Z变换对照表 …… 432
A3 常用非线性元件的描述函数 …… 433
A4 线性空间和矩阵理论 …… 435
A5 矩阵的 Jordan分解 …… 440
A6 函数的线性无关 …… 443
附录 B 哈尔滨工业大学 1996～2004年研究生入学考题（控制原理）及部分参考答案 445
附录 C 部分习题参考答案 …… 504
参考文献 …… 521

第 1 章　控制系统的基本概念

1.1 控制系统的基本概念

1.1.1 自动控制的基本概念与术语

自动控制：利用控制装置自动地操纵机器设备或生产过程，使其具有希望的状态或功能。

自动控制系统：由控制器和被控制对象组成，能够实现自动控制任务的系统。

对象：被控的设备或生产过程。它的输出量称系统的被控制量。

控制量：要求被控制量按预定的规律变化而加给系统的输入量，也称为控制输入。

扰动量：干扰系统按预定规律运行的信号。有内扰动、外扰动。

反馈：通过测量变换装置将系统或元件的输出量馈送到它的参考输入端，并与参考输入量比较，这个馈送到输入端的信号称为反馈信号。反馈信号与输入信号相减，其差称为偏差信号，这种反馈形式称为负反馈，反之称为正反馈。

反馈控制原理：反馈信号在输入端与给定输入量比较得到偏差信号，产生控制作用使被控制量回复到或趋近于要求的输入值，从而使偏差减小或消除，这就是反馈控制系统的工作原理。

开环控制系统：系统的输入输出之间不存在反馈回路，输出量对系统的控制作用没有影响，这样的系统称为开环控制系统。开环控制分为无扰动补偿和有扰动补偿两种：

⑴无扰动补偿开环控制原理方框图如图 1.1 (a)所示。信号由控制信号到被控制信号单向传递，对扰动引起的误差无补偿作用。

⑵有扰动补偿开环控制如图 1.1 (b)所示。利用对扰动信号的测量，补偿扰动对被控制量的影响。由于扰动信号经测量装置、控制器至被控对象是单向传递的，所以属于开环控制。这种控制方式对于不可测量的扰动和各元件内部参数变化给被控制量造成的影响，没有抑制作用。

需要全本请访问 www.ertongbook.com

闭环控制系统：系统的输出量与输入端存在反馈回路，即输出量对控制作用有直接的影响，这一类系统称为闭环控制系统。如图 1.2所示，在系统中，当设定值变化或扰动产生时，就会出现误差信号，从而产生控制作用，以减小系统的误差。当系统中存在无法预计的扰动和参数的变化时，应当采用闭环负反馈控制系统。这种控制方式可使用低成本的元器件构成精确的控制系统。

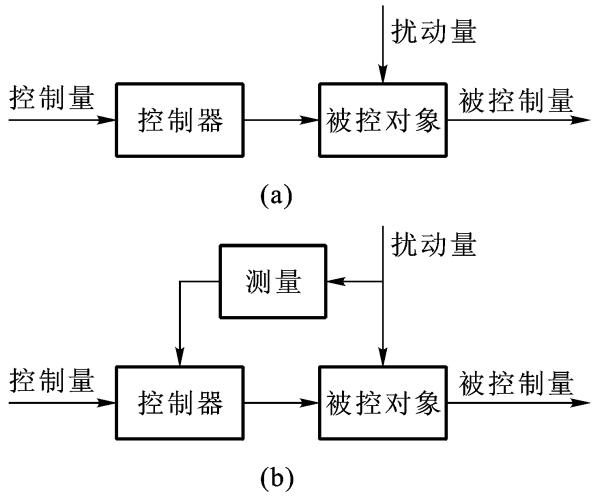


图 1.1　无扰动补偿和有扰动补偿的开环控制

复合控制系统：复合控制系统是开环控制和闭环控制相结合的一种控制方式。它是在闭环控制回路的基础上，附加一个输入或扰动信号的顺馈通道，用来提高系统的控制精度。顺馈通道是由对输入信号的补偿器或对扰动信号的补偿器组成。

前向通道：从给定信号到被控变量的通道。

反馈通道：从被控变量到比较点的通道。

误差：期望输出值与实际输出之间的偏差。

1.1.2　反馈控制系统的构成

闭环负反馈控制系统的典型结构如图 1.2所示，其主要元部件说明如下：

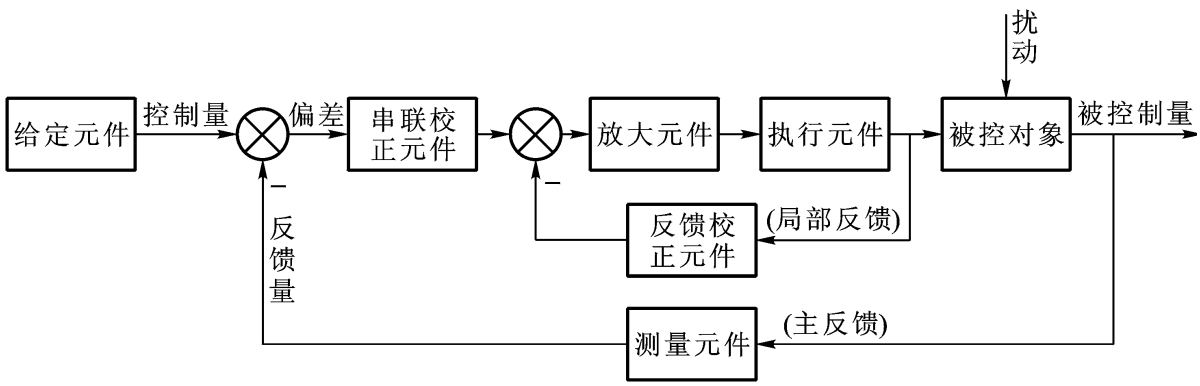


图 1.2　典型负反馈控制系统结构

1. 给定元件

其作用是：给出与被控制量希望值相对应的控制输入信号，即给定信号，这个控制输入信号的量纲与主反馈信号的量纲相同。给定元件通常不在闭环回路中。

2. 测量元件

测量元件也称为传感器，用于测量被控制量。它的测量值和参考输入进行比较后产生相应的控制信号。

3. 比较元件

用于比较控制量和反馈量并产生偏差信号。

4. 放大元件

比较元件产生的误差信号一般比较弱，无法直接驱动被控对象，因此，放大元件对偏差信号进行幅值或功率的放大。

5. 执行元件

接收放大元件提供的功率，直接驱动被控对象，改变被控对象的输出。

6. 校正装置

在系统中引入用于改善其动态、静态性能的附加装置，这种附加装置称为校正装置。校正装置串联在由偏差信号到被控制信号间的前向通道中称为串联校正；校正装置在反馈回路中称为反馈校正。

1.1.3 控制系统的分类

自动控制系统有各种不同的分类方法。例如，按信号的传递路径，可分为开环、闭环和复合控制系统；按系统的物理特性，可分为机械系统、电气系统、液压和气动系统等。此外，还可以按系统的控制功能和系统的特性进行分类。

按系统的控制功能分类，有以下几种情况：

⑴ 恒值控制系统：系统的输入量为常值或慢时变的量，系统的主要任务是克服各种扰动使系统的输出量保持为恒定的希望值。如水位控制系统、恒压调节系统等。

⑵ 随动系统：又称为伺服系统，系统的输入量随时间任意变化，系统的主要任务是要求它的输出量快速精确地复现输入信号的变化。系统的输出量常为位置、速度和加速度信号。火炮控制系统、自动化仪表系统等属于这一类。

⑶ 过程控制系统：系统的输入量按既定规律变化，系统的控制过程按既定的程序进行。系统的输出量常为温度、压力、流量等物理量。如化工过程中的反应塔，加热炉的自动温度控制等。

⑷ 最优控制系统：根据系统的动态方程和系统的约束条件设计系统的控制策略，使系统的某一性能指标为最优值。

⑸ 自适应控制系统：系统的控制器能自动地改变参数或结构，以适应系统本身参数或环境条件的不可预计的变化。

按系统的特性分类，有以下几种情况：

⑴ 线性与非线性系统。可用线性微分方程或线性差分方程描述的系统，

称为线性系统。如果线性系统的参数为常数，则称为线性定常系统，否则为线性时变系统。用非线性方程描述的系统，称为非线性系统。

⑵ 连续系统与离散系统。输入量和输出量都是时间连续函数的系统，称为连续系统。在连续系统中，信号在全部时间上都是已知的。若在系统的信号中有离散时间信号，称为离散系统。在离散系统中，信号仅定义在离散时间上。

⑶ 确定性与不确定性系统。系统的结构、参数和输入量都是确定的、已知的系统称为确定性系统。反之，当系统本身的结构和参数以及作用于该系统的信号有不确定性或模糊性时，则系统为不确定性系统。实际的控制系统多为不确定性系统。

1.1.4 对控制系统的要求

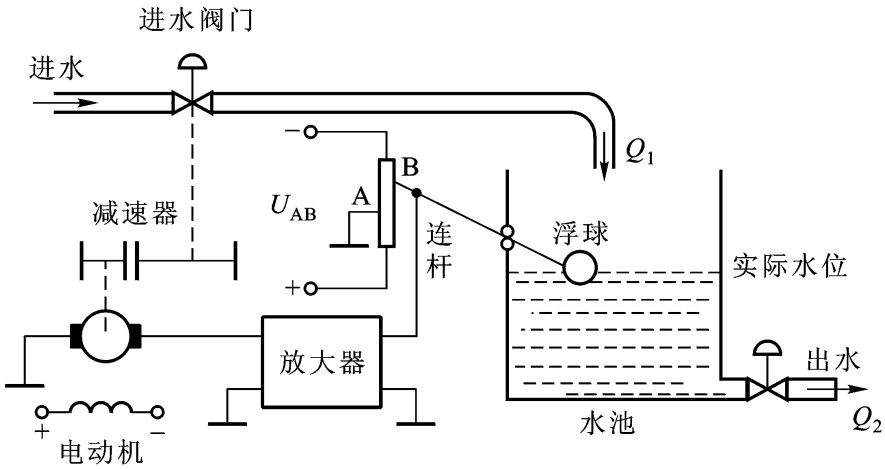
⑴ 稳定性：是控制系统正常工作的必要条件。

⑵ 稳态性能：系统经过过渡过程达到稳态后对系统稳态精度的要求，要求系统的稳态误差要小。

⑶ 动态性能：系统的快速性，系统的超调量等要求

1.2 典型例题解析

例 1.1 一个水池水位自动控制系统如例图 1.1所示。试简述系统工作原理，指出主要变量和各个环节的构成，画出系统的方框图。



例图 1.1 水池水位控制系统原理图

解：在该系统中，水池的进水量 Q_1 来自电动控制开度的进水阀门，出水量 Q_2 由用户的需要确定。该系统能在用户用水量 Q_2 随意变化的情况下，保持水箱水位在希望的高度上基本不变。

希望水位高度由电位器角头 A设定，浮子测出实际水位高度。由浮子带动的电位计触头 B的位置反映实际水位高度。A、B两点的电位差 U_{AB}反映希望水位与实际水位的偏差。当实际水位低于希望水位时，$U_{AB}>0$。通过放大器驱使电动机转动，开大进水阀门，使进水量 Q_1 增加，从而使水位上升。当实际水位上到希望值时，A、B两个触头在同一位置，$U_{AB}=0$，电动机停转，进水阀门开度不变，这时进水量 Q_1 和出水量 Q_2 达到了新的平衡。若实际水位高于希望水位，$U_{AB}<0$，则电动机使进水阀门的开度关小，以使进水量 Q_1 减少，实现水位下降到原有位置的要求。

这个系统是个典型的自镇定系统，在该系统中：

控制量：希望水位的设定值。

被控制量：实际水位。

扰动量：出水量 Q_2。

被控对象：水池。

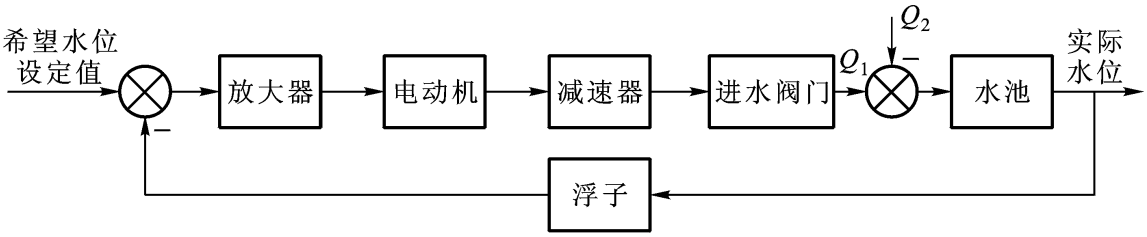
测量元件：浮子。

比较元件：电位器。

放大元件：放大器。

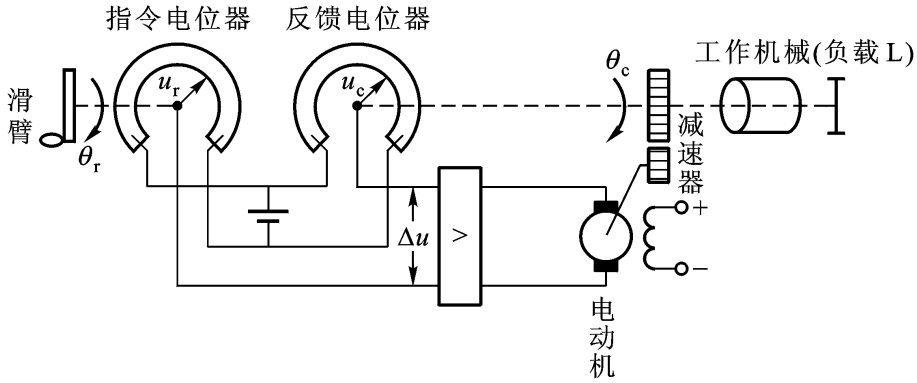
执行元件：电动机、减速器、进水阀门。

系统的方框图如例图 1.2所示。



例图 1.2　水池水位控制系统方框图

例 1.2　一个位置自动控制系统如例图 1.3所示，试分析系统的工作原理，画出系统的方框图。

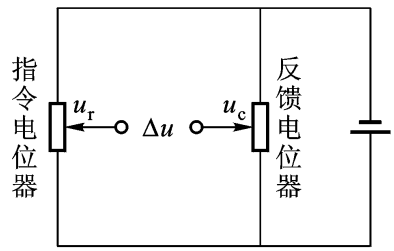


例图 1.3　位置控制系统原理图

解：该系统的作用是使负载 L的角位移 θ_c 随给定角度 θ_r 的变化而变化，即要求被控制量 θ_c 精确复现控制量 θ_r。

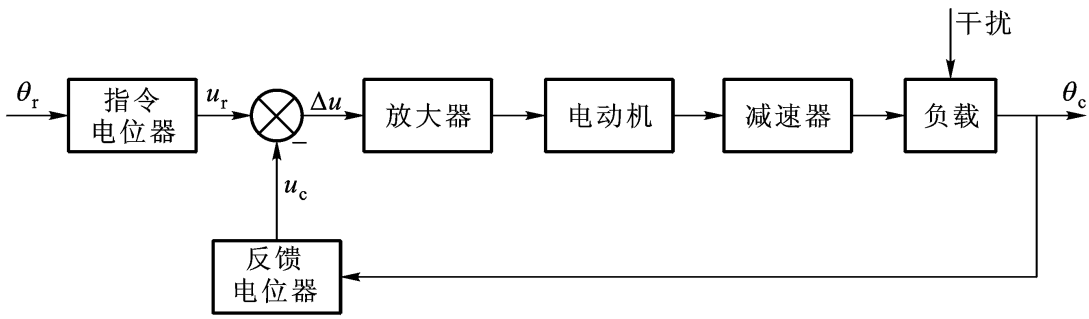
指令电位器和反馈电位器组成的桥式电路是测量比较环节。其作用是测量控制量——输入角度 θ_r，被控制量——输出角度 θ_c，并使之转变为相应的电压信号 u_r 和 u_c，电桥对角线上的端电压即为系统的偏差电压 $\Delta u = u_r - u_c$。由两个电位器构成的桥式电路的原理图如例图 1.4所示。

当负载的实际位置 θ_c 与给定位置 θ_r 相符时，则 $\Delta u = 0$，电动机不转动。当负载的实际位置 θ_c 与给定位置 θ_r 不相符时，u_r 和 u_c 不相等，即偏差电压 $\Delta u = u_r - u_c \neq 0$。偏差电压 Δu 经放大器放大，使电动机转动，通过减速器移动负载 L，使负载 L和反馈器向偏差减小的方向转动。



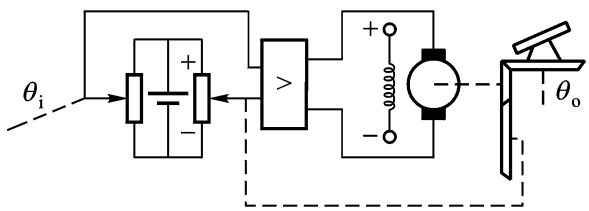
例图 1.4 电位器组成的桥式电路

在该系统中，负载 L是被控对象，放大器是放大元件，电动机和减速器是执行元件。这是一个位置随动系统。系统的方框图如例图 1.5所示。



例图 1.5 位置随动系统方框图

例 1.3 例图 1.6 (a)表示一个火炮跟踪系统。图中 θ_i 是输入角度，θ_o 是输出



(a)



(b)

例图 1.6 火炮跟踪系统

角度。电动机通过齿轮传动装置使火炮旋转。试分析该跟踪控制系统的工作原理，并画出方框图。

解：当输入角 θ_i 变化时，输入角度 θ_i 和输出角度 θ_o 的差会发生变化，于是在电位器上产生差动电压。该差动电压被放大后带动电机转动，再通过传动装置使火炮转动。直到火炮转动角度 θ_o 与输入角度 θ_i 完全相等为止。为保证跟踪精度，除了需要足够的功率外，还需要具有适当的动态特性，所以系统中应包括某种校正装置。系统方框图如图 1.6(b)所示。

例 1.4　下列方程中，r(t)、c(t)分别表示系统的输入和输出，判断各方程所描述的系统的类型（线性或非线性，定常或时变，动态或静态）。

(1) $2t\ddot{c}(t)+5\dot{c}(t)+e^{-t}c(t)=r(t)$

(2) $c(t)=\dot{r}^2(t)+t\ddot{r}(t)$

(3) $\dddot{c}(t)+3\dot{c}(t)+6c(t)+10=r(t)$

(4) $c(t)=e^{-r(t)}$

(5) $\ddot{c}(t)+3\dot{c}(t)\dot{c}^2(t)+2c(t)\dot{r}(t)-\dot{r}^2(t)=0$

(6) $c(t)=\begin{cases}0, & c(t)<2\\ 2r(t), & c(t)\geqslant 2\end{cases}$

解：(1)线性时变动态系统。(2)非线性时变动态系统。(3)线性定常动态系统。(4)非线性定常静态系统。(5)非线性定常动态系统。(6)非线性定常静态系统，也是分段线性定常静态系统。

【评注】 线性定常系统是经典控制理论研究的主要内容，描述线性定常系统的微分方程是线性常系数的微分方程。一般形式如第 2 章公式(2.1.1)所示。线性系统的本质特征是满足叠加原理。如上(3)中的系统，方程中含有常数项的输入，表面上不满足叠加原理，实际上，令 $\bar{r}(t)=r(t)-10$ 作为新的系统输入，则满足叠加原理；即使不进行输入的变换，该系统也满足输入和初值的叠加原理。因此，该系统本质上满足叠加原理，属于线性系统的范畴。例如平面上的一条直线，其代数方程为 $y=kx+2$，如果作为系统，该系统是线性的静态系统，输入输出满足一次线性的代数关系。

1.3　习 题 精 选

题 1.1　题图 1.1是仓库大门自动控制系统原理示意图，试说明自动控制大门开关的工作原理并画出系统原理方框图。

题 1.2　题图 1.2中 U_0 是某电源电压，非常稳定，且等于发电机端电压的

需要全本请访问 www.ertongbook.com