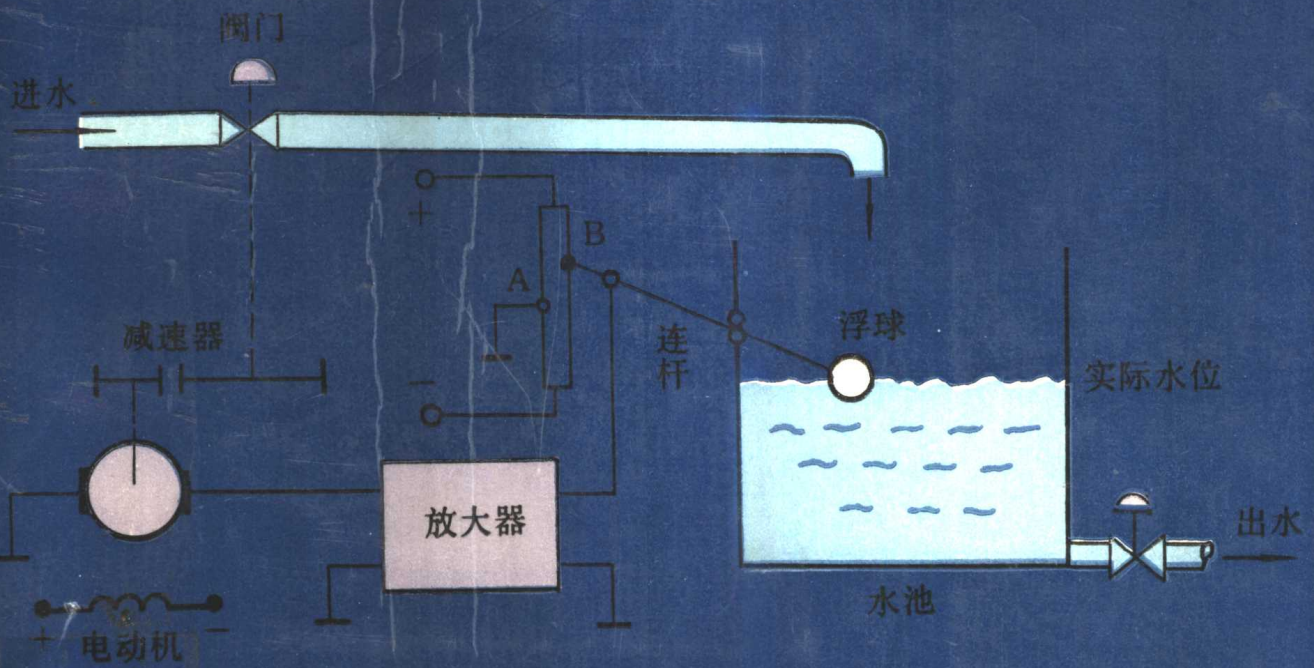


自动控制理论

郁顺康 编著



同济大学出版社

自动控制理论

郁顺康 编

同济大学出版社

(沪)新登字 204 号

内 容 简 介

本书系统地介绍了经典控制理论的内容,全书共八章,其内容包括自动控制系统的概念、数学模型、时域分析、根轨迹法、频率特性法、系统设计与校正、非线性系统的分析和采样控制系统的分析。

本书注重基本概念、基本理论的分析,文字通俗易懂,有较多的实例,每章末附有大量的习题,并有小结。适宜 80 学时左右的教学。

本书可作为普通高等院校和成人高校电气自动化专业的教材,也可作为自动化仪表、计算机、自动控制及相近专业的教材,并可供有关专业师生及从事自动化方面工作的工程技术人员参考。

责任编辑 张智中

封面设计 陈益平

自 动 控 制 理 论

郁顺康 编

同济大学出版社出版

(上海四平路 1239 号)

新华书店上海发行所发行

上虞科技外文印刷厂排版

常熟市文化印刷厂印刷

开本: 787×1092 1/16 印张 23.5 字数: 424 千字

1992 年 12 月 第 1 版 1992 年 12 月 第 1 次印刷

印数: 1-2500 定价: 6.45 元

ISBN 7-5608-1029-2/TP·102

前 言

本书是按高等工科院校《自动控制理论》教学大纲编写的。

本书内容包括经典控制理论的线性定常系统理论、非线性系统理论和线性采样系统理论。

编者根据多年讲授该课程的教学经验,在编写本书时力求做到重点突出,概念清晰,由浅入深,通俗易懂。为便于读者自学和更好地掌握自动控制系统的基本概念、基本理论及分析与综合系统的基本方法,每章正文前有学习指导,每章末有小结。各章有较多的典型例题和习题,每阶段还有一定数量有代表性的测验作业题,这些不仅有利于自学,而且还能减少部分课堂教学时数。

在编写过程中,参考和汲取了兄弟院校教材的部分内容,在此表示衷心的感谢。

由于编者水平有限,书中谬误之处在所难免,希望广大读者批评指正。

编者 1991.4.

绪 论

自动控制技术是一门涉及多学科、应用广泛的综合性的技术科学,它在工业、农业、国防和科学技术现代化中起着极为重要的作用。

所谓自动控制,就是在没有人直接参与的情况下,利用控制装置(控制器)使被控对象(如机器、设备或生产过程等)自动地按照预定的规律运行(或变化)。例如导弹能够准确地命中目标,人造卫星能按预定的轨道运行并返回地面,宇宙飞船能准确地月球着陆并重返地球,都是自动控制技术高速发展的结果。又比如在工业生产过程中,对压力、温度、湿度、流量、频率以及原料、燃料成分比例等方面的控制,也都是自动控制技术的重要组成部分。

自动控制技术在国民经济和国防建设的各个领域中得到广泛应用,不仅使生产过程实现了自动化,提高了劳动生产率和产品质量,改善了劳动条件,而且在人类征服自然、探索新能源、发展空间技术和改善人民物质生活等方面都有十分重要的作用。

“自动控制理论”是自动控制技术的基础理论,是一门理论性较强的工程科学。根据自动控制技术发展的不同阶段,自动控制理论目前一般可分为“经典控制理论”和“现代控制理论”两大部分。

“经典控制理论”是以传递函数为基础,研究单输入、单输出一类自动控制系统的分析和设计问题。这些理论由于发展较早,现已日趋成熟,在工程实践中也得到了广泛的应用。本书限于介绍经典控制理论。

“现代控制理论”是60年代在“经典控制理论”的基础上,为了适应现代控制工程的复杂化和性能指标高精度、最优化的要求而发展起来的。它无论在数学工具、理论基础,还是在研究对象和方法方面都不是经典控制理论的简单延伸和推广,而是认识上的一次飞跃。

“现代控制理论”是以状态空间分析法为基础,主要研究多输入、多输出、变参数、非线性、离散等控制系统的分析和设计问题。例如最优控制、最佳估计、自适应控制等理论都是这一领域研究的主要课题。特别是近几年来由于电子计算机技术和现代应用数学研究的迅速发展,使现代控制理论又在研究庞大的系统工程的大系统理论和模仿人类智能活动的智能控制等方面有了重大发展。目前,现代控制理论正随着现代科学技术的发展而仍在不断向前发展着。

一、课程的性质、任务、主要内容和基本要求

本课程是工业电气自动化专业的一门专业基础课。它的任务是通过全部教学内容的学习,掌握分析和设计自动控制系统的基本理论及基本方法,为后续专业课学习、毕业设计以及今后从事各项工程技术工作打下必要的基础。

本课程主要内容是研究线性定常连续控制系统、非线性控制系统和离散控制系统的基本理论、分析和设计系统的一般方法。线性定常连续控制系统的分析和设计是本课程的基本内容,主要介绍自动控制系统的基本概念、数学模型的建立、系统的时域分析以及用频率法、根轨迹法分析和设计控制系统。非线性控制系统主要是讨论用描述函数法和相平面法来分析几种

典型非线性系统的特性。离散系统的分析相似于线性定常连续系统。

学完本课程后,应达到的基本要求为:

- (1) 掌握自动控制系统的基本概念;
- (2) 学会建立典型自动控制系统数学模型的方法;
- (3) 掌握系统时域分析法;
- (4) 掌握用频率法分析和设计系统的方法;
- (5) 掌握用根轨迹法分析和设计系统的方法;
- (6) 一般掌握非线性系统的基本理论和分析方法;
- (7) 掌握离散控制系统的特点和一般分析方法;
- (8) 学会自动控制理论的实验方法,增强实验技能。

二、课程的特点和学习方法

本课程的特点是理论性强,数学要求高。为此要求学生必须具有高等数学、线性代数、复变函数等数学基础。

函授教学的特点是以自学为主、并辅以适当的面授。教师根据教学计划要求,将本课程各教学环节的时间、内容和要求,安排在“自学周历”中,学生在一般情况下应严格按照“自学周历”中的要求,完成各个教学环节。现根据“自动控制理论”课程的特点,就各个教学环节和学习方法作一简要说明,供大家参考。

1. 阅读教材

学习本课程的主要方法是自学教材。自学时必须认真、细致、刻苦钻研。建议自学时将必读内容先通读,然后精读。通读时应侧重于对每章、节内容作概念性了解。精读时则要求对每章的重点内容一定要学深学透,做到概念清楚、能举一反三。对于难点但不是重点的内容则不必花费过多的时间去钻研,以免影响其它重要内容的学习。自学教材既要循序渐进,逐步深入,又要注意其反复性。要搞懂一个问题需要有反复,学到后面往往要去复习前面已看过的有关内容,就会对原来不甚理解的内容有新的认识。特别是自学,往往很难一遍而成。

2. 面授

面授是函授教学的一个重要的辅助教学环节。它不是单纯的一般性讲课,而是对一章或一阶段教学内容的总结。面授时不仅讲解重点、难点的内容,而且还介绍解题的一般方法和容易出错的地方等,所以,面授是自学基础上的总结和提高,如果没有充分的自学基础,面授可能会收效甚微。鉴于本课程的特点,面授环节更是不可缺少的一个教学环节。

3. 复习思考题

每章的复习思考题,包含了复习本章内容的自我检查题和深化内容的问题。通过对复习思考题的解答,可以衡量学生对本章内容的掌握程度。

4. 习题和测验作业

为了巩固和加深所学知识,培养学生分析和解决实际问题的能力,训练必要的计算技能、按时完成一定数量的习题是十分必要的。

在完成一阶段的学习任务后,教材中安排了适量的测验作业,这是教师检查学生在一个阶段中是否完成学习任务的主要依据。

测验作业和习题必须独立完成,并按时交任课教师批改。

5. 实验

实验是不可缺少的重要教学环节。通过实验,不仅可以验证和巩固所学的理论,而且在实验技能与实验手段方面也会得到训练和培养。

目 录

绪 论	
第一章 自动控制系统的基本概念	1
第一节 自动控制基本原理	2
第二节 自动控制系统的分类	10
第三节 对自动控制系统的的基本要求	13
小结	17
复习思考题	17
习题	18
第二章 自动控制系统的数学模型	22
第一节 系统微分方程式的建立	23
第二节 非线性数学模型的线性化	30
第三节 传递函数	33
第四节 系统结构图及其传递函数	42
第五节 信号流图	53
小结	61
复习思考题	62
习题	62
第一次测验作业	68
第三章 自动控制系统的时域分析	72
第一节 控制系统稳定性分析——代数稳定判据	73
第二节 控制系统瞬态响应分析	82
第三节 控制系统的稳态误差	95
小结	108
复习思考题	109
习题	109
第四章 根轨迹法	114
第一节 根轨迹的基本概念	115
第二节 绘制根轨迹的基本规则	119
第三节 控制系统的根轨迹分析	132
第四节 特殊控制系统的根轨迹	136
小结	145
复习思考题	145
习题	146
第二次测验作业	149
第五章 频率特性法	152

第一节	频率特性的基本概念	153
第二节	频率特性的几种表示方法	155
第三节	典型环节的频率特性	159
第四节	系统开环频率特性的绘制	169
第五节	奈魁斯特稳定判据	182
第六节	系统稳定裕量	194
第七节	开环对数幅频特性与系统稳态误差、稳定性和瞬态响应的关系	197
第八节	闭环系统的频率特性	199
第九节	闭环频域响应和时域响应的关系	206
	小结	210
	复习思考题	211
	习题	212
第六章	自动控制系统的设计和校正	218
第一节	控制系统设计和校正的基本概念	219
第二节	系统设计中常用校正装置及其特性	221
第三节	用频率法设计控制系统	228
第四节	用根轨迹法设计控制系统	244
	小结	252
	复习思考题	253
	习题	254
第三次测验作业		256
第七章	非线性控制系统的分析	259
第一节	非线性系统的基本概念	260
第二节	描述函数法	264
第三节	用描述函数法分析非线性系统	276
第四节	用相平面法分析非线性系统	296
	小结	310
	复习思考题	311
	习题	312
第八章	采样控制系统的分析	315
第一节	采样控制系统的基本概念	316
第二节	采样过程与采样定理	317
第三节	采样信号的复现与保持器	319
第四节	Z 变换	321
第五节	脉冲传递函数	330
第六节	采样系统的性能分析	339
	小结	351
	复习思考题	352
	习题	353
第四次测验作业		366

附录 I 常用函数拉氏变换.....	359
附录 II 拉氏变换的一些定理.....	360
参考文献	361

第一章 自动控制系统的基本概念

近几十年来,自动控制技术得到了迅速的发展。它在国民经济各部门的广泛应用,已日益成为实现工业、农业、科学技术和国防现代化所不可缺少的一门技术。为此,各领域的工程技术人员和科学工作者,都必须具备一定的自动控制知识。

自动控制系统是自动化技术的核心内容。在本章中我们介绍自动控制系统的基本原理、自动控制系统的分类和对自动控制系统的基本要求。

学 习 指 导

一、本章基本要求

1. 掌握自动控制系统的工作原理、组成和各部分的作用;
2. 掌握负反馈在自动控制系统中的作用(即区分开环系统与闭环系统);
3. 熟悉对自动控制系统的基本要求。

二、本章重点和难点

本章重点内容:

1. 典型自动控制系统的组成及各部分的作用;
2. 负反馈的作用;
3. 对一般自动控制系统的基本要求。

本章难点内容是如何根据各类自动控制系统的原理图画出它的方框图,并分析工作原理。

三、说明

1. 本章叙述自动控制系统的基本概念,它包括自动控制系统的基本原理、分类方法和基本要求等三大部分内容。它是全书的基础,必须深刻理解,切实掌握这些内容。

2. 控制系统可分为开环控制系统和闭环控制系统。后者又称为自动控制系统或反馈控制系统。反馈通常有负反馈和正反馈。反馈控制系统中的反馈,一般是指负反馈。由于正、负反馈在控制系统中的作用完全不同,因此,它们的正、负号接线决不能接错。

3. 描述自动控制系统,除了原理图,在自动控制理论中常常出现方框图(又称方块图)和结构图。系统方框图是从控制理论角度分析系统工作原理的基础。读者通过本章学习必须学会从控制系统原理图改画出系统的方框图,从而分析系统的工作原理。

4. 自动控制系统的分类方法甚多,但按其共性来分即为本章叙述的几种。对这些不同类型自动控制系统命名的含义,需要清楚的了解。

5. 对一个自动控制系统的基本要求一般有三个方面,即稳定性、静态(稳态)特性和动态特性。不同控制对象的自动控制系统,除了对稳定性有普遍要求外,对静、动态特性的要求,各不相同。因此,作为电气工作者,必须努力处理好系统静、动态之间的关系,以满足不同工艺的需要。

第一节 自动控制基本原理

一、自动控制系统工作原理

在各种生产过程或生产设备中，为了维持正常的工作条件，常常需要使其中某些物理量（如温度、压力、位置、转速等），以一定的精度维持某一数值，或使它们按一定的规律变化。要满足这种需要，就应对该生产过程或设备进行合适的控制，以抵消外界的干扰和影响。那么，自动控制系统是怎样维持对温度、压力、转速等恒定而实现自动控制呢？下面我们先来研究一个温度恒值控制的例子。

实现恒温控制一般有两种方法，即人工控制和自动控制。图 1-1 表示温度人工控制系统原理图。所谓人工控制系统就是由人直接参与对一些物理量进行控制的系统。人工控制的任务是克服外来干扰，维持某一物理量恒定。对图 1-1 而言，就是克服电源电压波动、环境温度变化、被加热工件放入与取出等干扰，保持恒温箱的温度恒定，以满足被加热工件对温度的要求。通常可以通过移动调压器的滑动触头位置来改变加热电阻丝的电流，以达到控制温度的目的。箱内温度是用温度计人工测量的。人工温度控制过程大致可以归纳如下：首先观察由测量元件（温度计）测出的恒温箱的实际温度（被控制量）；然后将测出的实际温度与恒温箱内要求达到的温度（给定量）进行比较，得出两者相差（偏差）的大小和方向；最后根据偏差的大小和方向再进行控制。当恒温箱温度高于所要求的给定温度值，就移动调压器可动触头将电流减小，使箱温减小到正常范围内；若箱温低于给定温度，则移动调压器触头将电流增加，使箱温增大到正常范围。

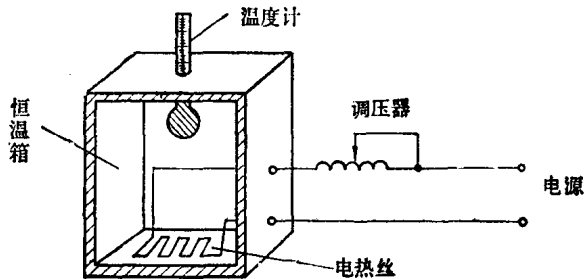


图 1-1 温度人工控制系统原理图

由此可见，人工控制过程的实质就是“检测偏差，纠正偏差”的过程。对电动机转速控制、水位控制以及位置控制等等，都可用类似的方法进行，以保证相应的物理量恒定。

虽然人工控制系统能克服某些干扰的影响，但它也有许多缺点，有的甚至无法实现。具体来讲，首先，人工控制系统的控制精度不高，或者说控制精度完全取决于操作者的经验，其次，由于有些控制过程反应极快，人的反应不能适应。第三，有些场合如高温、放射性、有毒气体等对人体有危害，人无法直接参与控制，因此，为了进一步改善控制系统性能，必须应用电气的、机械的、液压的等自动装置来代替人的职能，这样人工控制系统就发展成为自动控制系统。图 1-2 (a) 就是一个温度自动控制系统原理图。

在这个控制系统中，恒温箱的温度是由给定信号电压 u_1 控制的。当干扰引起箱内温度变化后，作为测量元件的热电偶，将用与温度相对应的电压信号 u_2 测量出，并反馈回去与给定信号电压 u_1 相比较，所得结果即为温度的偏差信号电压 $\Delta u = u_1 - u_2$ ，偏差电压经过电压、功率放大器放大后，以控制电动机的旋转速度和方向，并通过机械减速传动装置拖动调压器滑动触

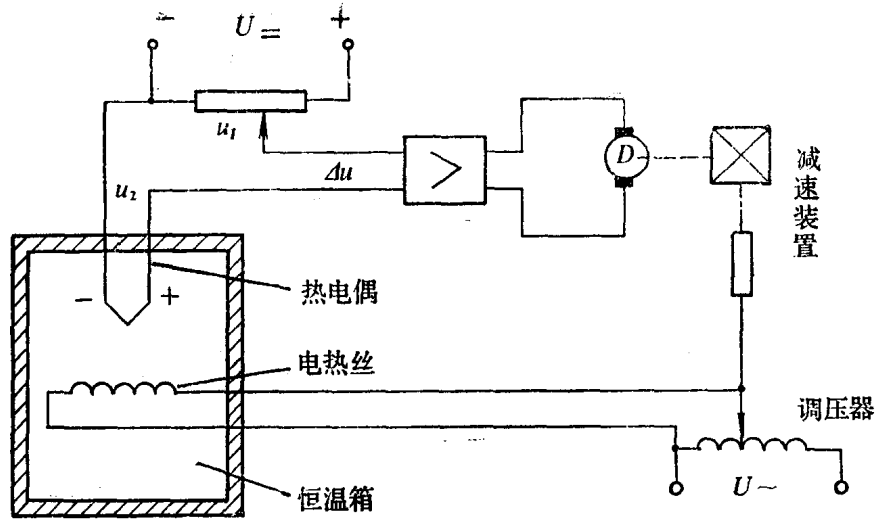


图 1-2(a) 温度自动控制系统原理图

头。当恒温箱内温度偏高时,使调压器减小加热电流,反之加大电流,直到温度达到给定值为止。此时偏差电压 $\Delta u = 0$,电机停转。这样就完成了所要求的恒温控制任务,而所有这些装置便组成了一个温度自动控制系统。

上述人工控制系统和自动控制系统是极相似的。误差测量装置类似于操纵者的眼睛(测量作用);自动控制器(除控制对象,如恒温箱以外的装置均可称为自动控制器)类似于操纵者的头脑(比较作用);执行机构类似于操纵者的肌体(执行作用)。所以,实际上人体本身就是一个高级的自动控制系统。

通过上面的分析可以看出:不论是人工控制还是自动控制,它们都有两个共同点,即一是要检测偏差,二是要利用检测到的偏差去纠正偏差。通常在自动控制系统中,这一偏差就是通过反馈建立起来的。给定量又称为控制系统的输入量,被控制量又称为系统的输出量。反馈就是指输出量通过适当的测量装置将信号的全部或部分返回输入端,使之与输入量进行比较的意思。比较的结果称为偏差。控制系统就是根据这一偏差信号的大小和方向进行工作,以使偏差减小或消除,从而使输出量和输入量保持一致或基本保持一致。因此基于反馈基础上的“检测偏差用以纠正偏差”这一原理又称为反馈控制原理。利用反馈控制原理组成的系统称为反馈控制系统。

这里要特别指出的是:反馈控制系统中的反馈,一般均是指负反馈,所谓负反馈就是输入量与输出量是相减的。如上例中偏差信号 $\Delta u = u_1 - u_2$, u_2 就是负反馈电压,否则系统是不能正常工作的。所以,通常所指的反馈控制系统或自动控制系统均是指负反馈控制系统。

现将图 1-2(a) 改画成温度自动控制系统的方框图,如图 1-2(b) 所示。图中方框代表系统各组成部分,⊗代表比较元件,方框两边直线及其标注代表该组成部分在控制过程中相互作用的物理量,箭头代表作用的方向。方框图对于了解系统的作用原理是显而易见的。同时还可看出,被调量(温度)是系统的输出量,给定的电压信号是系统的输入量。偏差(电压)是通过测量元件热电偶将输出量反馈到输入端与输入量比较(相减)而得。控制对象是恒温箱。影响被调量的各种因素称为干扰或扰动,干扰一般都加在控制对象上。

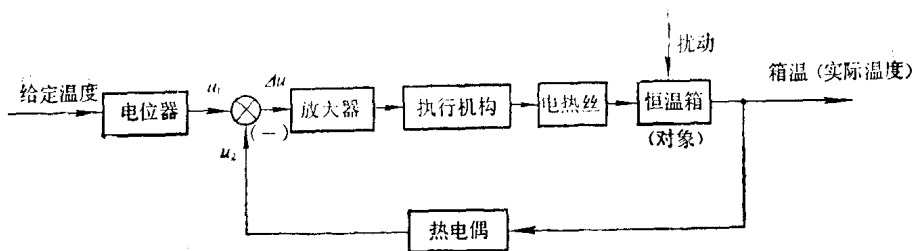


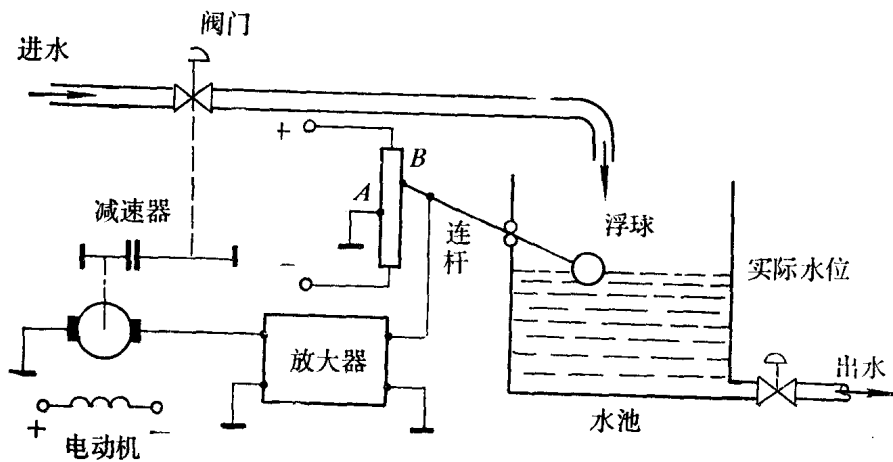
图 1-2(b) 温度自动控制系统方框图

为了叙述按反馈控制原理构成自动控制系统的普遍规律，下面再举两个例子加以说明。

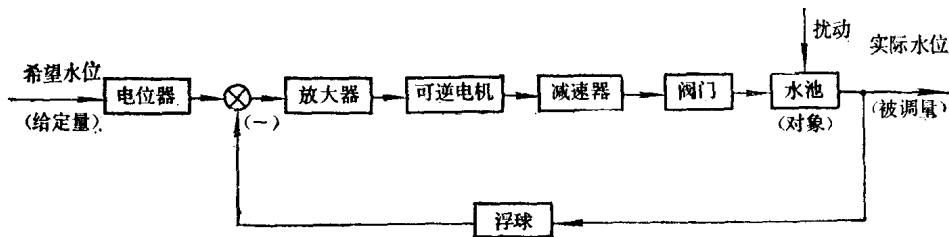
例 1-1 水位自动控制系统

图 1-3(a) 是水池水位自动控制系统原理图。水池中的水自水泵通过管道和阀门流进水池，同时又由各出水管道流出，满足各用户需要。若要求在用水量随意改变的情况下，保持水池水位高度不变，则可以用自动控制的方法来实现之。当用水量增加，实际水位迅速下降（即实际水位低于给定水位），此时浮球带动电位器滑动触头 B ，使电位器触头 B 与触头 A 不在同一位置上，就有电位差输入放大器。又假设极性已接对，可逆电机就带动阀门向上移动，进水量增加，水位亦上升。要电机停转，必须使电机电枢电压为零，即放大器输入为零，电位器两触头 A 和 B 在同一位置上，即实际水位和给定水位一致时才行，这时进水量和出水量达到了新的动态平衡。

图 1-3(b) 是水位自动控制系统的方框图。通常我们把控制系统水位给定值经电位器转换成电信号后即为系统的给定量（即系统输入量），水位给定值的大小可以调节动触头 A 的



(a) 水位自动控制系统原理图



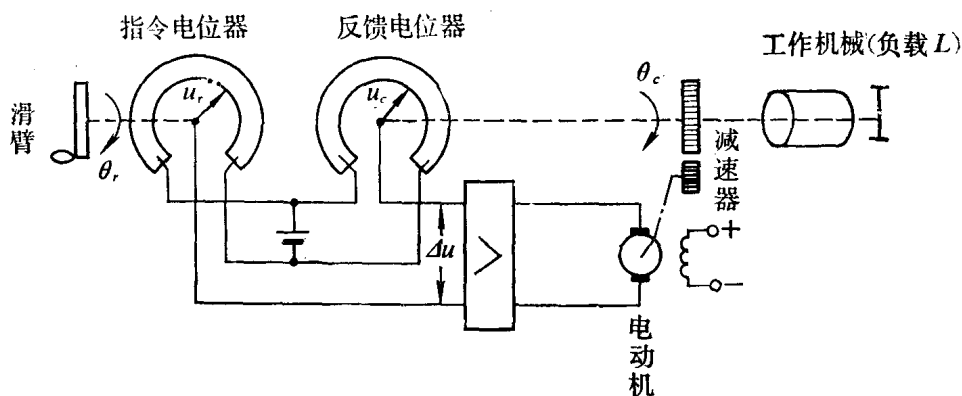
(b) 水位自动控制系统方框图

图 1-3

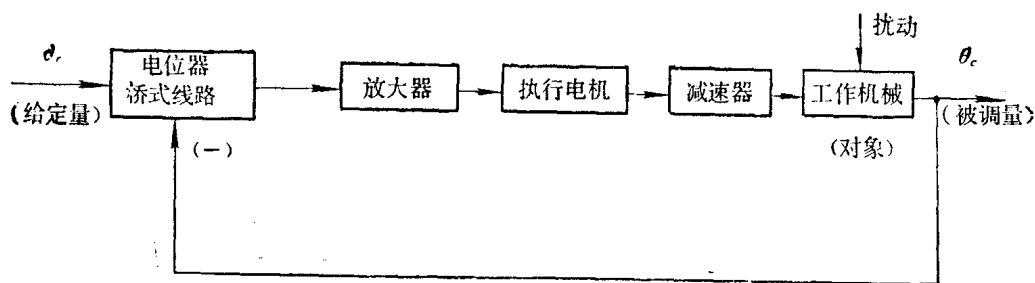
位置。系统的实际水位称为系统的被调量(即输出量),经测量元件浮球和连杆作用转换成电信号,通过电位器进行比较,得到偏差电信号,于是系统的比较元件是指电位器和连杆。放大器是放大元件。可逆电机和减速器是调节元件。阀门是执行元件。系统的控制对象是水池。系统的干扰(即扰动)是出水量,代表用水量大小。用水量大小直接影响水池的水位,所以系统的干扰信号加在控制对象上是有道理的。

例 1-2⁷ 位置自动控制系统(即位置随动系统)

图 1-4(a)和图 1-4(b)为一控制负载 L (控制对象)的位置自动控制系统的原理图和方框图。该系统由指令电位器、反馈电位器、放大器、直流电动机、减速器、负载、电源等组成。该控制系统的目的是控制对象(负载 L)的位置,使之按指令电位器给定的数值变化。操作者移动指令电位器的滑臂,滑臂的角度位置 θ_r 被转换成控制电压 u_r 。被控制对象(负载)的位置由反馈电位器检测,转换成电压 u_o 。当给定角位置 θ_r 与负载 L 的实际角位置 θ_o 不相等时,通过由两个电位器接成的桥式电路而得到偏差电压 $\Delta u = u_r - u_o$ 。开始时,指令电位器和反馈电位器的滑臂都处于右端位置, $u_r = 0, u_o = 0$,故 $\Delta u = u_r - u_o = 0$,即没有偏差信号,负载处于静止状态。若突然给一指令信号,将指令电位器的滑臂移到中间位置,假设此时 $u_r = 10$ 伏,而在负载



(a) 位置自动控制系统原理图



(b) 位置自动控制系统方框图

图 1-4

改变位置之前瞬间,反馈电压 $u_o = 0$,所以负载和指令信号位置间的偏差电压 $\Delta u = 10 - 0 = 10$ 伏。该偏差电压经电压和功率放大后加在直流电动机的电枢上。设直流电动机的激磁电流 i_f 恒定。电动机电枢加上电压后,电动机旋转,经与电枢轴相联的减速器减速(减速比 N_1/N_2),再驱动负载 L 和反馈电位器的滑动臂朝着减小误差的方向转动。直到反馈电位器滑臂也达到中间位置, $u_o = 10$ 伏,此时偏差电压 $\Delta u = 0$,电动机停止转动。这样给定位置 θ_r 和负载位

置完全相等,即输出完全复现输入。如果指令电位器滑臂的位置不断改变,则控制对象(负载)的位置也跟着不断变化。

图 1-4(b) 是该系统的方框图。系统的控制对象是负载 L 。影响负载位置的各种因素称为干扰(即扰动)。电动机包括减速器是执行元件。放大器是放大元件。指令电位器是给定元件。反馈电位器是测量元件(或称反馈元件)。两电位器组成的桥式电路是比较元件。系统的被调量是位置。从这个例子可以看出:为了使被调量不断复现控制量,系统需不断地对被调量进行检测,并把测得的输出量返回到输入端,使之与输入量进行比较得出偏差信号,利用这个偏差信号来控制系统运动,以便随时消除偏差。从而实现负载的位置(被调量)按照指令电位器位置(给定量)变化而变化的目的。也就是完成了负载(即工作机械)的位置跟踪指令电位器的转角位置,因此该系统又称为位置随动系统。

二、开环控制系统和闭环控制系统

控制系统根据有无反馈作用,一般可分为两类:一是开环控制系统,另一是闭环控制系统。

1. 开环控制系统 如果系统的输出端和输入端之间不存在反馈回路,输出量对系统的控制作用没有影响时,这样的系统就称为开环控制系统。图 1-5 为一直流电动机转速开环控制系统。

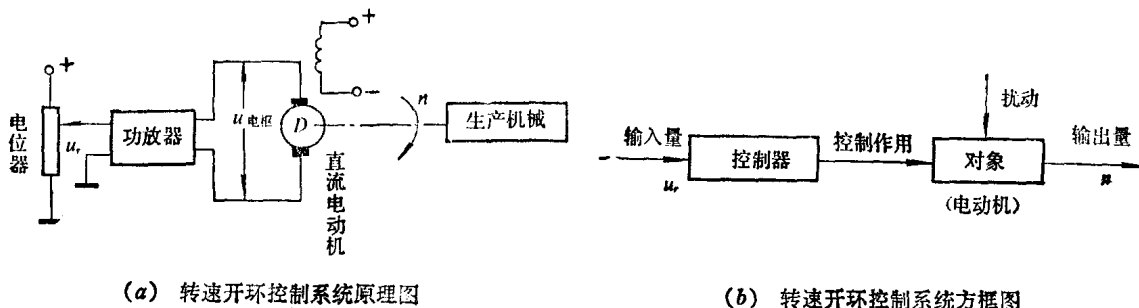


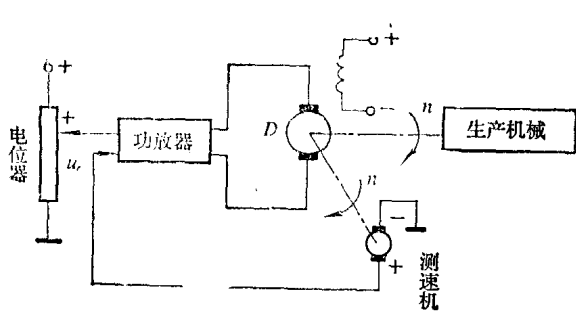
图 1-5

它根据给定电压的大小和方向来控制电动机转速的大小和方向。图 1-5(a) 是系统原理图。电动机激磁电压为常数,采用电枢控制方式。给定值是电压 u_r ,改变电位器动臂,可得到不同的 u_r 值。 u_r 值经放大后得到不同的电枢电压 u 值,从而控制电动机转速 n 。当负载力矩不变时, u_r 和 n 有一一对应关系,因此可由给定电压直接控制转速。从相应的系统方框图(图 1-5(b))可见,这里没有反馈,信号通路不闭合。因此,开环控制系统的精度主要取决于系统的“校准”的精度,取决于在工作过程中保持校准值以及组成系统的元件特性和参数值的稳定程度。

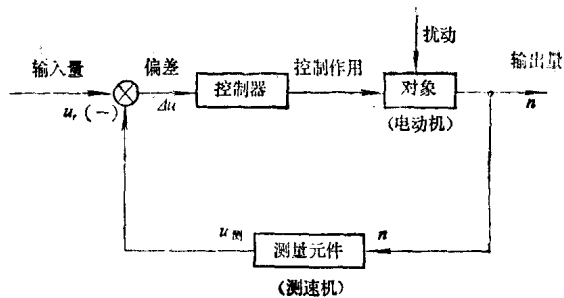
如果系统不存在干扰和元件参数比较稳定的话,开环系统比较简单,而且可以保证足够的精度。但当系统存在扰动情况下,因为没有反馈,就没有办法自动校正输出量达到给定值,因此使开环系统精度降低。为了对其进行补偿就必须借助人工改变输入量。

2. 闭环控制系统 凡是系统的输出端与输入端存在反馈回路,即输出量对给定值有直接影响的系统,叫做闭环系统。所以,反馈控制系统也是一个闭环控制系统。如果对图 1-5 所示的开环控制系统引入反馈回路,即用测速机直接检测被调量(转速),然后反馈到输入端,就构成了闭环控制系统,如图 1-6 所示。

闭环控制系统突出的优点是精度高,不管任何干扰,只要被调量的实际值偏离给定值时,闭环控制就会产生控制作用来减小这一偏差。



(a) 转速闭环控制系统原理图



(b) 转速闭环控制系统方框图

图 1-6

但是，闭环系统也有它的缺点，如使用元件多，线路复杂。另外，由于组成系统的元件的惯性，传动链的间隙等因素存在，如配合不当，将会引起反馈控制系统的振荡，从而使系统不能稳定工作。

3. 闭环和开环控制系统比较 闭环系统的优点是采用了反馈，因此对外扰动和系统内参数的变化引起的偏差能够自动的纠正。这样就可以采用精度不太高而成本比较低的元件组成一个精确的控制系统。而开环系统却相反，因为没有反馈，故没有纠正偏差的能力。外扰和系统内参数的变化将引起系统的精度降低。

从稳定性方面来看，开环系统结构简单，成本低，而且不存在稳定性问题。而闭环系统则不然，稳定性始终是一个重要问题。这是因为参数如果选得不恰当，将会造成系统振荡，甚至会使系统完全失去控制。

应当指出，开环和闭环控制系统各有其特点，要解决不同的任务可以分别选用开环系统或闭环系统。

三、复合控制系统

复合控制系统是一种将开环控制和闭环控制适当结合在一起，能实现复杂而准确度较高控制任务的控制系统。实质上，它是在闭环控制的基础上，用开环通路提供一个附加的输入量，以提高系统的控制精度和动态性能。开环通路通常是由对输入量的补偿装置或对扰动作用的补偿装置组成，分别称为按输入补偿和按扰动补偿，如图 1-7(a) (b) 所示。

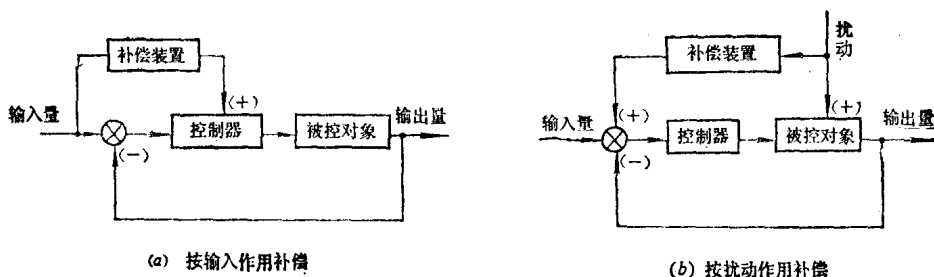


图 1-7 复合控制系统方框图

复合控制与仅按偏差控制的闭环控制相比，不仅有更高的精度和快速性，而且结构简单、可靠，因此获得了广泛应用。目前，在许多平台、火炮和雷达站随动系统以及飞机自动驾驶仪系统中，都广泛使用复合控制系统。

图 1-8 是火炮自动跟踪系统方框图。它是按输入量补偿的复合控制系统。高炮对空射击时，要求炮身方位角 θ 和指挥仪给定的方位角 θ_c 一致。为了保证炮身能准确跟随高速飞行的