

教育部人才培养模式改革和开放教育试点教材

计算机应用专业系列教材

计算机控制技术

主编 高金源



中央广播电视大学出版社

计算机应用专业系列教材

计算机控制技术

主编 高金源

中央广播电视大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

计算机控制技术/高金源主编. —北京: 中央广播电视
大学出版社, 2001.2

ISBN 978- 7-304-01919-8

I.计… II.高… III.计算机控制—电视大学—教材
IV.TP273

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2001)第 08083 号

版权所有, 翻印必究。

计算机应用专业系列教材

计算机控制技术

主编 高金源

出版·发行: 中央广播电视大学出版社

电话: 发行部: 010-58840200 总编室: 010-68182524

网址: <http://www.crtvup.com.cn>

地址: 北京市海淀区西四环中路 45 号

邮编: 100039

经销: 新华书店北京发行所

印刷: 北京智慧源印刷有限公司 印数: 18001~21000

版本: 2001 年 1 月第 1 版 2007 年 8 月第 6 次印刷

开本: 787×1092 1/16 印张: 20.75 字数: 471 千字

书号: ISBN978 -7-304-01919-8

定价: 27.00 元

(如有缺页或倒装,本社负责退换)

计算机应用专业系列教材

计算机控制技术

策 划 钱辉镜

设 计 沈雅芬 徐孝凯 何晓新

顾 问 许卓群 任为民

课程建设指导小组 (按姓氏笔画排序)

陈 明 (石油大学 教授)

郑纪蛟 (浙江大学 教授)

侯炳辉 (清华大学 教授)

高金源 (北京航空航天大学 教授)

前言

计算机控制是计算机的一个重要应用领域。计算机控制系统在国民经济的各个领域以及国防事业方面已获得广泛应用。计算机控制技术正是为了适应这种需要而发展起来的一门专业技术。它主要研究如何将计算机技术和自动控制理论结合起来,用于各个不同领域,并设计出所需的计算机控制系统。因此“计算机控制技术”课必然成为自动化、电子与电气工程、计算机应用以及机电一体化等专业的主干课程。

本书是根据中央广播电视大学 1999 年制定的高等专科计算机应用专业(计算机控制方向)的“计算机控制技术”课的教学大纲编写的。根据大纲要求,本书前两章重点介绍了连续控制系统的基本理论和分析方法。在此基础上,讲述了计算机控制系统的信号特点、常用的数学描述方法及基本的分析方法。考虑到本课的教学目的和要求,在内容的选取上,舍弃了计算机控制系统设计方法的详细介绍,仅选取了连续域设计——离散化方法和数字 PID 设计的内容,而用了较多的篇幅,介绍计算机控制系统工程实现的有关问题,包括计算机控制系统硬件的配置、选用和集成;实时控制软件的设计;计算机控制系统的抗干扰和可靠性以及系统设计和调试技术等。对集散系统及 PLC 控制等也做了概要介绍。考虑到高等专科学子的接受能力,本书比较重视从物理概念上进行讲述,简化了数学推导,给出了较多的例题。为了帮助学生自学,每章开始都提出了内容提要、学习要求和教学建议。在每章结尾,又给出了小结、习题、思考题和自测题。在书中,对重要的结论、概念均给出了重点提示。同时对某些重要内容还提出了一些思考问题,以帮助学生深入学习。书末所列某些思考题的深度可能已超出了大纲要求,但对提高学生的思考能力是有好处的。书末附录给出了实验指导。

本书由北京航空航天大学高金源教授主编。第 1~6 章、第 9 章及附录 A1、A3~A4、A7~A8 由高金源编写;第 7~8 章、第 10 章及附录

A2、A5~A6 由北京航空航天大学夏洁副教授编写。

本书是在中央广播电视大学理工部沈雅芬副主任和刘晓星老师组织和指导下进行编写的，并在中央广播电视大学主持下进行了评审。由北京航空航天大学王醒华教授担任主审，北京理工大学张宇河教授、中央电大高松海教授参加了评审。清华大学杨行素教授主持了教学大纲及编写方案的评审。在此，对上述专家和老师的帮助与指导一并表示衷心的感谢。

在编写过程中学习和汲取了部分国内有关教材的内容，受益匪浅，在此表示谢意。

由于编者水平所限，书中不妥和错误在所难免，恳请读者和同行批评指正。

编 者

2000 年 11 月

课程组组长、主讲 高金源

课程组副组长 刘晓星

课程组其他成员 夏 洁

责任编辑 何勇军

目 录

第一章 自动控制的基本概念	[1]
1.1 自动控制的一般概念	[1]
1.2 自动控制系统组成	[5]
1.3 自动控制系统的分类	[7]
1.4 计算机控制系统组成及分类	[8]
1.5 自动控制系统的性能要求	[11]
第二章 连续控制系统的数学描述	[18]
2.1 连续控制系统的数学模型	[18]
2.2 拉氏变换	[23]
2.3 传递函数	[30]
2.4 典型环节的传递函数	[34]
2.5 动态结构图 (方块图)	[36]
第三章 连续控制系统分析与校正	[51]
3.1 连续控制系统时域分析	[52]
3.2 连续控制系统稳定分析	[59]
3.3 系统稳态误差分析	[63]
3.4 控制系统频域分析	[70]
3.5 改善系统性能的方法 (系统的校正)	[84]
第四章 计算机控制系统的信号	[94]
4.1 计算机控制系统信号特性分析	[94]
4.2 信号采样过程	[97]
4.3 信号的恢复与零阶保持器 (ZOH)	[101]

4.4 信号的整量化处理	[103]
--------------	-------

第五章 计算机控制系统数学描述及系统分析 [109]

5.1 差分方程	[110]
5.2 z 变换	[111]
5.3 脉冲传递函数 (z 传递函数)	[120]
5.4 离散系统的方块图分析	[122]
5.5 离散系统的稳定性	[129]
5.6 离散系统的稳态误差	[134]
5.7 采样系统动态响应	[138]

第六章 计算机控制系统控制算法 [147]

6.1 概述	[147]
6.2 连续控制算法的离散化方法	[148]
6.3 数字 PID 算法	[155]
6.4 数字 PID 控制算法改进	[158]
6.5 PID 算法参数的整定	[163]
6.6 控制算法的编排实现	[166]

第七章 控制用计算机系统 [174]

7.1 控制用计算机系统的一般要求	[174]
7.2 计算机系统的输入输出接口	[180]
7.3 实时控制软件	[200]
7.4 实时控制系统中采样周期的选取	[220]

第八章 计算机控制系统的抗干扰及可靠性技术 [228]

8.1 实时计算机控制系统运行环境	[228]
8.2 抗干扰措施	[230]
8.3 干扰的滤波技术	[236]
8.4 计算机控制系统的可靠性技术	[239]
8.5 软件可靠性	[243]

第九章 计算机控制系统的设计与系统调试 [251]

9.1 计算机控制系统设计原则与设计步骤 [251]

9.2 系统调试 [255]

9.3 设计举例 [259]

第十章 集散控制系统与可编程控制器 [265]

10.1 集散型计算机控制系统 [265]

10.2 可编程控制器 [273]

附录 A 实验指导 [281]

A1 概述 [281]

A2 实验设备及软件介绍 [284]

A3 实验一 一阶、二阶系统阶跃响应性能指标测试
及分析 [292]

A4 实验二 频率特性测试 [295]

A5 实验三 数字 PID 调节器控制算法实验研究 [299]

A6 实验四 实时控制应用软件的开发与调试 [302]

A7 实验五 计算机控制小功率伺服系统调试 [309]

A8 计算机控制系统的实验技术 [312]

附录 B 拉氏变换与 z 变换表 [314]

附录 C 部分习题答案 [315]

附录 D 主要参考文献 [318]

【符号说明】



本部分内容有录像



本部分内容配有实验



提问与思考题



作业



要求学生复习以前内容

第一章 自动控制的基本概念

【内容提要】

本章主要讲述自动控制系统的基本概念，包括自动控制系统的基本工作原理，系统的基本组成以及各组成部分的功用。在讲述一般自动控制系统基本概念的基础上，进一步讨论计算机控制系统的组成、特点和应用分类。最后，介绍自动控制系统的性能要求以及后续章节中常用的描述这些要求的主要指标。

【学习要求】

- 学习本章后应能够：
1. 掌握自动控制、闭环负反馈控制的基本概念；掌握自动控制系统和计算机控制系统的组成、特点和常用的术语；掌握对控制系统的性能要求以及描述这些要求的主要指标；掌握脉冲函数、阶跃函数及脉冲响应、阶跃响应的定义。
 2. 了解自动控制系统、计算控制系统的分类、应用与发展。

【教学建议】

建议学时：3 学时，其中录像课 1.5 学时。

 预备知识：复习“计算机组成结构与汇编语言”及“微机接口技术”。

1.1 自动控制的一般概念

1.1.1 自动控制实例及应用

控制和自动控制已经广泛地用于人们的日常生活以及国民经济的各个领域。但是什么是控制？什么是自动控制？为了说明这两个经常遇到的概念，首先让我们看看下面有关控制与自动控制的实例。

一、人工控制

例 1-1 水位的人工控制

图 1-1 (a) 是水位的人工控制示意图。控制的要求是保持水箱中的水位有一定的高度。由于水箱中的水可能不断流出, 所以操作者应不断地用眼睛监视水箱的水位 (可以从水箱外边的标尺刻度上看到), 不断地将实际观察到的水位与期望的水位比较, 并根据水位差值的大小来调节进水阀门, 直至水位差为零。从上述操纵过程中可以看到, 水箱是操纵者的被控对象, 其中水位的高度是具体的被控变量; 操纵者的手臂是执行控制的机构。

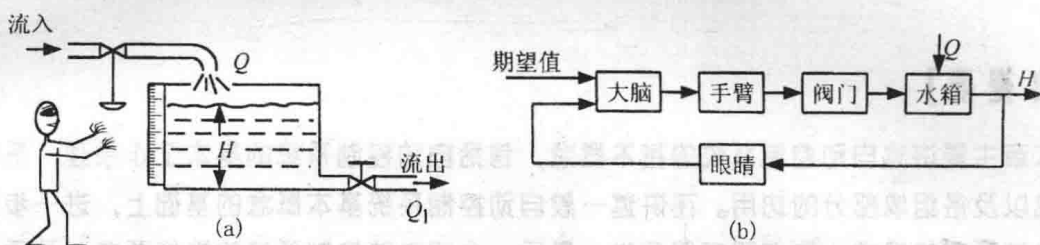


图 1-1 人工控制水箱的水位

人的大脑接收由眼睛所感觉到的水位 (被控量) 的实际值, 并与存在头脑中的期望值进行比较和决策, 从而产生一定的控制指令, 命令手臂按规定的方向操纵阀门, 使水箱中的水位接近理想的水位。通过这种不断地操纵, 在水箱中的水不断流出的情况下, 保持水箱中的水位在一定的高度上。整个控制过程中, 信号的流动如图 1-1 (b) 所示。其中流出的水可以看成是外界的干扰。

研究上述人工控制水箱水位的过程, 可以看到, 所谓控制就是指某个主体使其它的对象按照一定的目的来动作。在上例中, 主体是水箱的控制者, 对象是水箱, “一定的目的”就是使水箱的水位在不断放水的条件下, 保持在期望值上。在上述过程中, 还可以看到, 控制的基本过程就是测量偏差, 纠正偏差的过程, 并且通过人的眼睛、大脑、手臂、阀及水箱形成了一个人—水箱闭环的控制系统。

二、自动控制

例 1-2 水箱水位的自动控制

在上述水箱水位人工控制中操纵者必须随时观察水位的变化, 并及时调节阀门, 使操作者工作负担加重。如果水位变化得时快时慢, 变化频繁, 单纯依靠操纵者的人工调节, 实际上很难精确地保持水位的高度。这时就需要一套控制装置来代替人工操纵, 形成了水箱水位的自动控制。图 1-2 (a) 就是一套水箱水位的自动控制系统示意图。该系统是由浮子及电位计以及放大器、直流电机和阀门组成。其中浮子和电位计代替人的眼睛不断测量水位的高低并将其变成电信号; 放大器相当人的大脑, 它接收给定的水位高度期望信号和测得的水位实际高度信号, 进行比较产生误差, 对误差信号进行变换处理 (如信号滤波、电压放大等) 产生指令信号; 直流电机相当于人的手臂, 是执行控制阀门的机构。从图 1-2 (a) 的示意图中可以看到, 在不断放水的条件下, 水箱中浮子测量了水位的实际高度, 并把它换算成电信号

输出（通过图中的电位计）并与指令生成电位计产生的输入到运算放大器另一端的信号（代表期望的高度）比较，产生的误差信号代表了实际高度与理想高度的偏差。该偏差信号通过放大变换，作为控制信号控制电机转动并带动阀门增大放水量，从而使水位升高，减少了高度偏差，最终使偏差消失。依上述分析，可以知道，在水位的自动控制过程中，信号的流动及相互关系如图 1-2（b）所示。

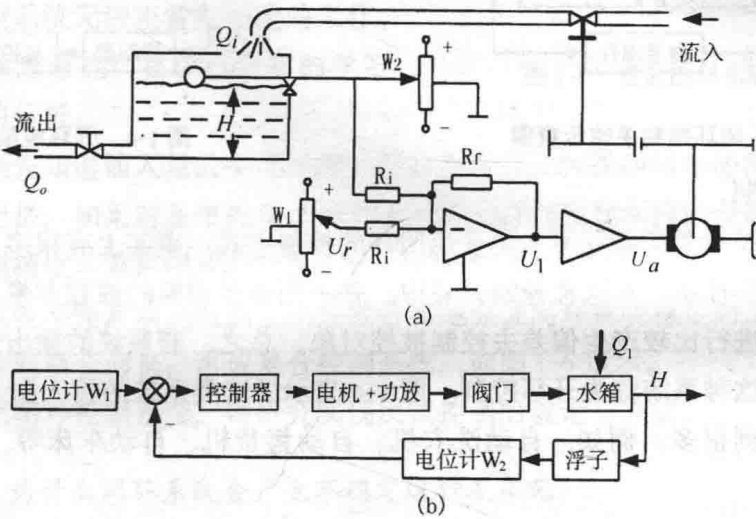


图 1-2 水箱水位自动控制示意图

比较上述两个系统，可以看到，自动控制与人工控制的基本原理是相同的，它们都是建立在“测量偏差，纠正偏差”的基础上。为了测量偏差，必须把系统的实际输出反馈送给控制器并以反号形式与输入信号相加（故称这种反馈为负反馈），从而形成一种闭环控制模式。这两种控制的不同在于，自动控制时，上述控制过程是在没有人直接参与下，由控制装置完成的。这里，控制器代替了人脑，直流电机代替了人的手臂，浮子和电位计代替了人的眼睛。总之，用控制器代替了人，完成了对水箱水位的控制。所以，自动控制就是在没有人直接参与的情况下，利用控制装置使被控对象自动地按预定规律运动的一种控制。由被控对象及控制装置所构成的，能自动按预定要求运行的整体，称为自动控制系统。无论有人参与还是无人参与的控制系统，控制系统的基本特征是，控制系统中各个组成部件之间存在着控制和信息联系，控制的目的是使被控对象的被控量按预定的规律运行，并达到预期的目标。

1.1.2 闭环负反馈控制与开环控制

一、闭环负反馈控制原理

由前述实例可知，不论是人工控制还是自动控制，它们都具有以下的共同点。一是要检测出系统的被控量，并与输入给定量进行比较，得出偏差；二是要用偏差产生控制指令，进而消除或减少偏差。在通常的自动控制系统里，该偏差是通过将被控量反馈到输入端，与输入给定值比较产生的，从而形成了信息的闭合回路。这种控制系统称为闭环负反馈控制系

统。“检测偏差，用以纠正偏差”的原理，称为**反馈控制原理**。如前所说，如果反馈信号的极性与输入信号相反，这种反馈被称为**负反馈**；反之，如果反馈信号的极性与输入信号的极性相同，称为**正反馈**。在自动控制系统里，一般均采用负反馈控制。通常，可以用图1-3所示框图来表示一个闭环控制系统，它反映了系统中信息传递的基本关系。

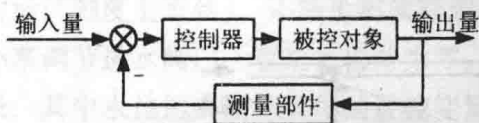


图 1-3 闭环控制系统示意图

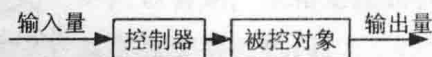


图 1-4 开环控制系统

二、开环控制

控制一个被控对象运动并不一定采用闭环的控制方式。事实上有很多系统采用的并不是闭环控制而是开环控制。在这种控制方式中，并不把被控对象的被控制量反馈到系统输入端与输入给定信号进行比较产生偏差去控制被控对象。总之，**若系统的输出量对系统的控制作用不产生影响，这种系统称为开环控制**。图1-4表示了这类系统的输入量与输出量关系。应用开环控制的实例很多。例如，自动洗衣机、自动售货机、自动车床等，一般都是开环控制。

图1-5所示的电阻丝加热炉就是一个典型的开环控制系统。炉子是被控对象，炉温是要求实现自动控制的物理量（被控量），电源接通开关K受时间继电器控制，按规定的时间（称为输入给定值）接通或断开电源，对炉温进行控制，使其达到并保持在期望值。开关K和电阻丝对被控量（炉温）起控制作用，称其为控制装置。开关K接通时间，一般可参照在正常情况下炉温可以达到期望值的经验数据来确定。在该系统里并没有测量实际的炉温，也没有将其引回来影响控制量，所以是一个开环控制系统。显然，在这种系统里，由于工作条件的变化（如炉门开闭次数的增加，被加热物体的增加），在同样的加热时间下，炉温难于达到希望值。这种使被控量偏离希望值的因素称为对系统的干扰（扰动）作用。由于开环控制的特点，控制装置只按给定的输入信号对被控对象进行单向的控制，而不对被控量进行测量并反向影响控制作用，因此它不具有修正由于扰动而引起的使被控制量偏离期望值的能力。

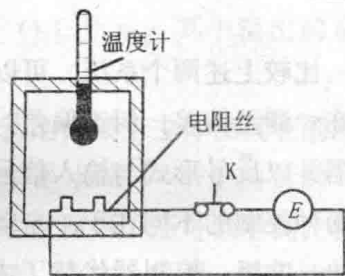


图 1-5 电阻丝加热炉

三、闭环控制与开环控制的比较

闭环控制与开环控制各有优缺点，采用哪种控制方式，应根据实际情况决定。

闭环控制系统突出的优点是，由于采用反馈并靠偏差进行控制，因此，当系统受到外界干扰或内部变化的影响，使被控量偏离给定值时，系统能及时发现并自动纠正偏差，使被控量有较高的控制精度，从而使系统对外界干扰或内部参数变化很不敏感。因而对于给定的被控对象就有可能采用不太精密的低成本的元部件，构成较为精确的系统。相反，开环系统由

于没有反馈，不能及时发现并自动纠正偏差，系统的精度难于保证，系统对外界干扰和内部参数的变化较为敏感。

但是，闭环系统也有缺点。与开环系统比较，闭环系统的结构比较复杂，建造较为困难。特别是，由于它存在信号的反馈，如果系统设计的不好，将会使系统无法正常和稳定的工作。为什么会产生这种现象呢？在以后各章的学习中将会进行详细的分析。

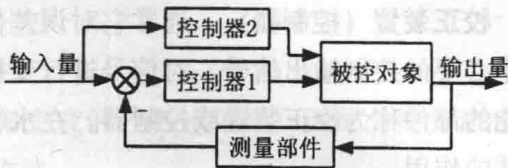


图 1-6 复合控制系统示意图

如果人们能预先知道输入量的变化规律，并且不存在任何扰动和内部参数的变化，采用开环控制较好。但是，如果对系统外部干扰无法预测，系统内部参数也经常变化，那么为了保持被控量的控制精度，采用闭环控制的优点就显得特别突出了。

如果对整个系统性能要求比较高，又能较容易地保证闭环系统稳定的工作，往往可以将开环控制与闭环控制结合起来，形成复合控制系统，如图 1-6 所示。

本书主要研究闭环控制系统，即研究实现反馈控制的理论与方法。

？ 考虑一下，为什么闭环系统会产生不稳定这种现象呢？

1.2 自动控制系统组成

1.2.1 自动控制系统的基本组成

一个闭环负反馈控制系统，不管其实际结构如何复杂，系统的功能如何不同，系统的结构组成，大体上都可以表示成如图 1-7 所示那样。其中各部分的功能如下：

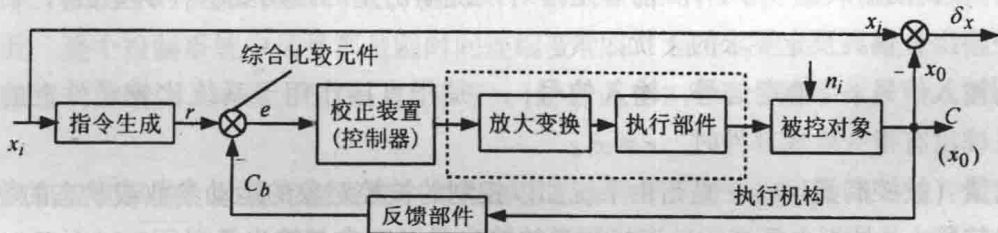


图 1-7 反馈控制系统的典型功能方块图

被控对象 它是控制系统所控制和操纵的对象，如图 1-2 中的水箱。它的输出量（水位）即为系统的被控制量。在被控对象上除作用有控制作用外，还常常有外界的干扰作用。

执行部件 它根据输入信号的量值和方向对被控对象进行操作，如图 1-2 系统中的直流电机。

放大变换部件 它将控制器输出信号进行放大并做能量形式的变换，使其在形式及幅

值、功率上满足执行元件的要求，如水箱自动控制系统中的功率放大器。在以后的应用中，常常将放大变换部件与执行部件组合在一起，简称为执行机构。

校正装置（控制器） 通常它对误差信号或系统的输出信号进行一定的变换和处理，并产生必要的控制输出信号。对信号进行变换和处理的目的是为了改善系统的性能。实现这种功能的部件称为校正装置或控制器。在水箱的自动控制系统中，电压放大器实际上起到了控制器的作用。

反馈部件 它用来测量被控对象的被控量的实际值，并经过信号处理，变换为与被控量有一定函数关系且与控制输入信号具有同一种能量形式的信号。在水箱自动控制系统中的浮子是水位的直接测量元件，电位计将水位的高度变化转变为电信号的变化，这与输入信号的能量形式是一致的。

综合比较部件 它用于对控制输入信号和反馈信号进行比较，得出偏差信号。在上述系统中，运算放大器就是它的综合比较部件。

控制指令生成部件 它是根据控制指令产生控制输入信号的装置，如上述系统中的指令电位计。

应说明，上述有些部件，在具体物理实现时，可能是由同一个具体的物理部件实现的，也就是说，在系统中的一个物理部件可实现多种功能，例如，常用的运算放大器经常可同时实现比较、放大和校正的作用。

除被控对象外，其它各组成部件的组合称为控制装置。

1.2.2 自动控制系统中常用的变量术语

为了以后学习方便起见，现将控制系统中常用的变量名称和术语统一描述如下（见图 1-7）：

输入量 是指对系统输出量（被控量）有直接影响的外界输入量，包括控制输入量 x_i （给定值）及扰动输入量 n_i 两种。前者是指对系统输出量的预期要求（期望值）；后者是指那些能使输出量偏离预定要求的干扰因素。

控制输入信号 r （给定信号，输入信号） 是指直接作用于系统比较元件上的输入信号。如系统没有指令生成部件时， $r = x_i$ 。

输出量（被控制量） x_0 是指由系统加以控制的被控对象的运动参数或状态的物理量。

输出信号 c 是指由反馈元件直接测量的输出量。它常与输出量混用。

反馈信号 c_b 是输出信号 c 经过测量和变换处理后再送到比较元件中的反馈量。

误差信号（误差） e 它是控制输入信号与反馈信号之差 $e = r - c_b$ 。

控制偏差 δ_x 它是系统被控制量与系统的理想值（即输入量）之差， $\delta_x = x_i - x_0$ 。应注意，误差与控制偏差是两个不同的概念，且用不同的物理量表示。

1.3 自动控制系统的分类

自动控制系统的种类很多，它们的结构性能和完成的任务也不同，因此分类方法很多。下面，仅从本课程研究方便出发，介绍两种分类方法。

1.3.1 按系统的功能分类

按系统的功能，通常可分为：

自动调节系统（又称恒值控制系统） 这种系统的控制输入量为一恒值，控制系统的任务就是在各种内外干扰因素的影响下，保持被控量恒定不变。工业生产中的温度、压力、流量、液位等参数的调节系统以及各种稳速系统都属此类。

伺服系统（又称随动系统） 这种系统的控制输入量是一个事先难于确定的任意变化的量，系统任务就是在各种干扰因素的影响下，使被控量迅速平稳地复现和跟随输入信号的变化。雷达天线的自动跟踪系统，高炮自动瞄准系统就是典型的随动系统。

程序控制系统 这种系统的控制输入量是事先可以确定的，按给定规律变化的量，系统的任务就是通过控制系统的作用，使被控量按给定规律运动。工业生产中的很多自动机床的控制系统，热处理炉温控制系统的升温、保温、降温过程的控制都属于这类系统。

1.3.2 按控制器实现方式分类

目前，从控制器的实现方式上来看，控制系统可分为连续模拟式控制系统和计算机控制系统。

连续模拟式控制系统 在这种系统里，控制器是由模拟部件（如模拟式电子部件）实现的，此外，系统中的被控对象及其它控制部件（如执行部件）的行为都是随时间连续变化的。因此，整个控制系统中信号都是随时间连续变化的，信号的幅值大小也都是可以任意取值的模拟量（如电压、电流、温度、位移等）。前述图 1-2 所示水箱水位控制系统就属于这种系统。

计算机控制系统 如若控制系统中的控制器是由计算机来实现的，即系统中对信号的处理变换以及控制指令的产生都是在计算机中通过数值计算来完成的，这种控制系统称为计算机控制系统。因此，计算机控制系统是计算机直接参与控制的一种控制系统。