



普通高等教育“十一五”国家级规划教材
全国高职高专**电子信息类**系列规划教材



自动控制原理

- 主 编 胡 燕 胡自强
- 主 审 林文孚



华中科技大学出版社
<http://www.hustp.com>



中华人民共和国教育部 21 世纪中国高等教育出版社
教育部 2009 年 12 月 1 日 教育部 2009 年 12 月 1 日



自动控制原理

主编：张三、李四、王五、赵六
副主编：陈七、周八、吴九、郑十



中国出版集团
中国出版集团

全国高职高专电子信息类系列规划教材

自动控制原理

主 编 胡 燕 胡自强

副主编 郑德龙 黄桂梅 姜新桥

主 审 林文孚

华中科技大学出版社
(中国·武汉)

图书在版编目(CIP)数据

自动控制原理/胡 燕 胡自强 主编. —武汉:华中科技大学出版社,2007 年9 月
ISBN 978-7-5609-4084-7

I. 自… II. ①胡… ②胡… III. 自动控制理论 IV. TP13

中国版本图书馆CIP 数据核字(2007)第133631 号

自动控制原理

胡 燕 胡自强 主编

策划编辑:王红梅

责任编辑:王红梅

责任校对:张 梁

封面设计:秦 茹

责任监印:张正林

出版发行:华中科技大学出版社(中国·武汉)

武昌喻家山 邮编:430074 电话:(027)87557437

录 排:武汉众心设计室

印 刷:武汉大学出版社印刷总厂

开本:787mm×960mm 1/16

印张:11.75

字数:219 000

版次:2007 年9 月第1 版

印次:2007 年9 月第1 次印刷

定价:19.80 元(含1CD)

ISBN 978-7-5609-4084-7/TP·634

(本书若有印装质量问题,请向出版社发行部调换)

前 言

“自动控制原理”是控制工程学科和信息技术学科的专业基础课程,是后续专业课程学习以及今后工作的技术基础。

本书以介绍线性控制理论为主,从自动控制系统的基本概念入手,讲述自动控制系统数学模型的建立,时域法、根轨迹法、频率法等分析方法,系统的校正和离散系统分析。

编写本书的指导思想是通过本课程的学习,要求学生掌握自动控制的基本概念和基本原理,并具备对自动控制系统进行分析、计算、实验的初步能力,为后续专业课的学习和参加控制工程实践提供必要的理论基础。

参加本书编写的有:保定电力职业技术学院黄桂梅,负责编写第1、4章;武汉职业技术学院姜新桥,负责编写第2章及附录;福建电力职业技术学院胡自强,负责编写第5、6章;武汉电力职业技术学院郑德龙,负责编写第7章;中南民族大学胡燕,负责编写第3章以及全书的统稿和修订工作。与本书配套的光盘的内容由各章节的编写者分别制作完成。

本书是编者集多年自动控制原理课程教学的经验,充分吸收各校教学和教学改革成果,共同努力编纂而成的。在内容选取和编写思路,力图体现高职高专培养一线工程技术应用型人才的要求;本着“够学、够用”的原则,基础理论以应用为目的,力求层次清晰、内容简练、重点突出、简明易学。

随着教学工作由以教师为中心向以学生为中心的转变,教学实践中迫切需要由主教材和各种辅助教材组成的全方位、立体化教材系统供师生使用。编者充分利用“自动控制原理”省级精品课程资源,与本教材结合,建立了“自动控制原理”的网络课程及网站作为支撑平台。与本书配套的教学光盘中包含了学习指导、电子教案、典型例题精解、重难点知识解析等几个部分。其中学习指导包含了每章的教学目的和教学要求,以及重点和难点,用于学生课前预习和教师在讲授每章知识点之前的系统介绍。电子教案将书中每章的主要内容制作成幻灯片,有利于教师的课堂教学和学生的课后

自主学习。本书适合的教学学时数为 60 学时,使用本书的教师可自主选择章节及相关知识点进行讲授。全书结构合理、例题丰富、语言简洁,便于教学和自学。

武汉电力职业技术学院林文孚对本书进行了认真审阅和修订,对全书的编写质量的提高起了重要作用;中南民族大学谢勤岚对本书的内容组织提出了很多中肯的建议,编者在此一一表示深切谢意。

本书在编写过程中,参考了大量的专著、资料和文献,编者在此谨向有关作者致以诚挚的感谢。

由于编者水平有限,书中难免有错误与不妥之处,恳请广大读者批评指正。

编 者

2007 年 5 月



1 绪论	(1)
1.1 自动控制和自动控制系统的基本概念	(1)
1.1.1 人工控制与自动控制	(1)
1.1.2 自动控制系统中常用的名词和术语	(3)
1.1.3 自动控制系统的组成和方框图	(3)
1.2 自动控制系统的分类	(5)
1.2.1 按控制系统的结构不同分类	(5)
1.2.2 按给定值不同分类	(6)
1.2.3 按控制系统闭合回路数不同分类	(7)
1.2.4 其他分类	(7)
1.3 信号对控制系统的性能要求	(8)
1.3.1 典型的输入信号	(8)
1.3.2 自动控制系统的性能要求	(9)
本章小结	(13)
思考题与习题	(14)
2 自动控制系统的数学模型	(15)
2.1 系统的微分方程、传递函数、动态结构图	(15)
2.1.1 系统微分方程	(15)
2.1.2 传递函数	(19)
2.2 典型环节	(21)
2.2.1 比例环节	(22)
2.2.2 惯性环节	(23)
2.2.3 积分环节	(25)
2.2.4 微分环节	(27)

2.2.5 振荡环节	(29)
2.2.6 延迟环节	(31)
2.3 系统方框图及闭环传递函数的求取	(32)
2.3.1 系统方框图的画法	(32)
2.3.2 框图的变换与化简	(33)
2.4 自动调节器的基本动作规律	(40)
本章小结	(45)
思考题与习题	(46)
3 时域分析法	(49)
3.1 控制系统的时域性能指标	(50)
3.2 一阶系统的时域分析	(51)
3.3 二阶系统的时域分析	(54)
3.4 高阶系统的时域分析	(63)
3.5 控制系统的稳定性分析	(65)
3.5.1 系统稳定的充分必要条件	(65)
3.5.2 劳斯稳定判据	(66)
3.5.3 结构不稳定系统的改进措施	(70)
3.6 控制系统的稳态误差分析	(72)
3.6.1 给定信号作用下的稳态误差分析	(73)
3.6.2 扰动信号作用下的稳态误差分析	(76)
3.6.3 提高系统稳态精度的方法	(77)
本章小结	(78)
思考题与习题	(79)
4 根轨迹法	(81)
4.1 根轨迹的基本概念	(82)
4.1.1 根轨迹	(82)
4.1.2 根轨迹与系统性能	(83)
4.1.3 绘制根轨迹的基本条件	(83)
4.2 根轨迹的绘制	(85)
4.2.1 绘制根轨迹的基本规则	(85)
4.2.2 一般根轨迹绘制举例	(91)
4.3 用根轨迹分析系统性能	(93)
4.3.1 系统稳定性分析	(93)

4.3.2 系统动态性能的定性分析	(93)
4.4 用 Matlab 绘制控制系统的根轨迹	(96)
4.4.1 指令和函数	(96)
4.4.2 应用举例	(96)
本章小结	(98)
思考题与习题	(99)
5 频率法	(101)
5.1 频率特性	(101)
5.1.1 频率特性的基本概念	(101)
5.1.2 频率特性的几何表示法	(103)
5.1.3 对数频率特性	(103)
5.2 典型环节的频率特性	(105)
5.2.1 比例环节	(105)
5.2.2 积分环节	(105)
5.2.3 微分环节	(106)
5.2.4 惯性环节	(106)
5.2.5 一阶微分环节	(108)
5.3 最小相位系统与非最小相位系统	(108)
5.4 系统开环对数频率特性及稳定判据	(109)
5.4.1 开环对数频率特性	(109)
5.4.2 奈氏判据	(112)
5.4.3 对数频率稳定判据	(117)
5.4.4 稳定裕度及其工程意义	(119)
本章小结	(121)
思考题与习题	(122)
6 控制系统的校正	(123)
6.1 串联校正和反馈校正方法	(123)
6.1.1 系统校正的概念	(123)
6.1.2 校正装置与系统的连接方式	(124)
6.1.3 相位超前校正装置	(125)
6.1.4 频率法设计超前校正装置	(126)
6.1.5 反馈校正	(130)
6.2 前馈-反馈复合控制的校正方法	(132)

6.2.1 前馈补偿的复合控制	(132)
6.2.2 扰动补偿的复合控制	(133)
6.3 PID 控制器的工程整定	(134)
6.3.1 热工调节对象动态特性	(134)
6.3.2 控制器的参数整定	(138)
本章小结	(145)
思考题与习题	(145)
7 采样控制系统分析	(147)
7.1 采样控制系统的基本概念	(147)
7.1.1 采样控制系统的基本结构	(147)
7.1.2 采样过程与采样定理	(149)
7.1.3 采样信号的复现	(150)
7.2 采样控制系统的数学基础	(152)
7.2.1 z 变换的定义	(152)
7.2.2 求 z 变换的方法	(153)
7.2.3 z 变换的基本定理	(155)
7.2.4 z 反变换	(155)
7.2.5 用 z 变换解差分方程	(157)
7.3 采样控制系统的脉冲传递函数	(159)
7.3.1 脉冲传递函数的定义	(159)
7.3.2 开环系统的脉冲传递函数	(160)
7.3.3 闭环系统的脉冲传递函数	(161)
7.4 采样控制系统的稳定性分析	(163)
7.4.1 z 平面和 s 平面的关系	(163)
7.4.2 z 平面内的稳定条件	(164)
7.4.3 劳斯稳定判据	(165)
7.5 采样控制系统的稳态误差分析	(166)
7.6 采样控制系统的动态性能分析	(169)
本章小结	(171)
思考题与习题	(171)
附录 常用函数拉氏变换对照表	(175)
参考文献	(179)

1

绪 论

本章主要介绍自动控制的基本概念,自动控制系统的组成及方框图,自动控制系统的分类,自控系统的性能指标等。

1.1 自动控制和自动控制系统的基本概念

自动控制是实现生产过程现代化的重要技术措施之一,是确保生产安全、经济、可靠运行的重要手段。所谓自动控制,是指在没有人直接参与的情况下,采用自动控制装置使生产设备或生产过程按预定的规律进行来达到设计目标的一种技术。

1.1.1 人工控制与自动控制

1. 人工控制

自动控制是在人工控制的基础上发展起来的,为了说明自动控制的基本概念,先讨论人工控制。图 1-1 所示的是受压容器水位人工控制的示意图。其中 H 表示受压容器的水位, H_0 是水位的给定值(即正常运行希望的数值), W 是容器流入量, D 是容器的流出量,当水位 H 发生变化偏离 H_0 时,操作人员通过改变流入量 W 可改变容器的水位 H 。

人工对水位的控制过程:运行人员首先用眼睛观察水位计的水位指示值 H , 并通过大脑将水位指示值 H 与给定值 H_0 进行比较, 如有偏差, 就手动操作控制阀门, 改变流入量 W , 直到水位重新达到给定值 H_0 为止。例如, 当某种原因使流出量 D 增加时, 容器的水位将下降。操作人员手动开大控制阀门, 使流入量 W 相应增加, 就可相应使水位 H 上升, 回到原来的位置。从这个例子可以看出: 所谓人工控制, 就是指操作人员根据对被控参数变化原因的分析, 人工操作某一调节机构如某一阀门(或挡板)的开度, 改变输入量(或输出量), 使被控参数恢复到给定值的过程。

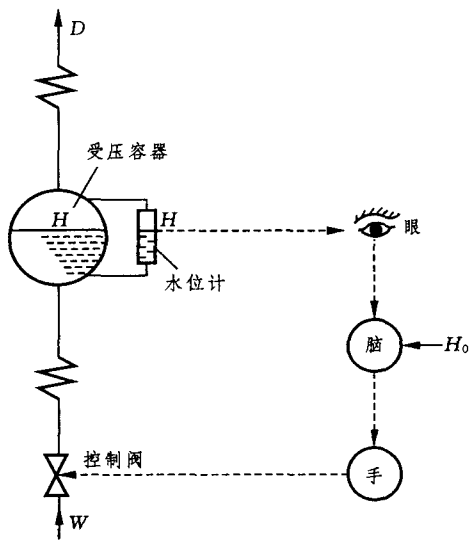


图 1-1 受压容器水位人工控制示意图

2. 自动控制

随着生产规模的扩大, 生产过程越来越复杂, 人工控制越来越不能满足生产需要。因此, 现代化大生产中, 为了保持被控量恒定或按预定规律变化, 要采用一整套自动控制装置来代替人工操作, 这种通过自动控制装置进行的操作称为自动控制。图 1-2 所示的为受压容器水位自动控制示意图。图中, 差压变送器代替人眼, 起着观察水位和转换的作用, 并把水位信号 i_b 传送给控制器; 控制器代替人的大脑进行水位信号与给定值 i_{b0} 的比较, 并用运算和放大后的电信号 i_i 控制执行器; 执行器代替人的手, 根据控制器的指令操作控制机构, 改变阀门的开度 μ 以改变流入量 W , 维持水位为给定值。由此可见, 自动控制是建立在人工控制的基础上的, 它既是模拟人工控制, 又是人工控制的发展。

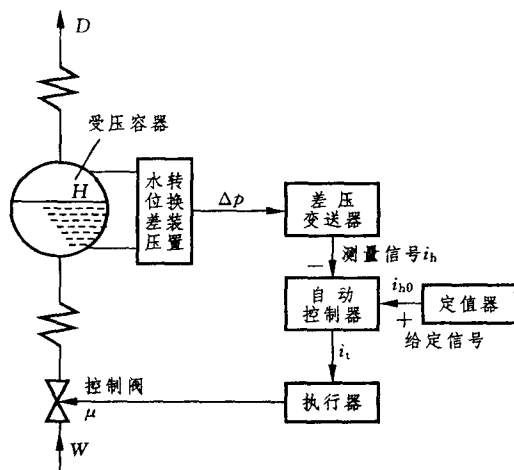


图 1-2 受压容器水位自动控制示意图

1.1.2 自动控制系统中常用的名词和术语

在上述水位自动控制系统中，受压容器是被控制对象，所要维持的正常水位 H_0 称为给定值，需要进行控制的实际水位 H 称为被控量。流出量（蒸汽流量） D 或控制阀前压力变化，都会使控制对象的平衡状态受到破坏，这种破坏平衡的作用称为扰动作用。当实际水位 H 等于给定水位 H_0 时，给水流量 W 等于蒸汽流量 D ，这时系统处于平衡状态。扰动作用下，被控量水位 H 发生变化偏离给定值 H_0 时，改变控制阀的开度，可使水位 H 恢复到给定值 H_0 。上，这种作用称为控制作用，而控制阀门则称为控制机构。

在自动控制领域广泛使用上述技术用语，现归纳如下。

控制对象：指被控制的生产过程或生产设备。

被控量：指表征生产过程是否正常进行而需要加以控制的物理量。

给定值：指被控量所应保持的希望值。

扰动：引起被控量偏离给定值的各种因素。

控制量：由控制机构改变的使被控量恢复到给定值的物理量。

控制机构：指实现控制作用的装置，如控制阀、挡板等。

1.1.3 自动控制系统的组成和方框图

如上所述，自动控制系统是由控制对象和自动控制装置组成的。自动控制装置起控制作用，如变送器、控制器（调节器）、执行器等；控制对象是在自动控制装置控制下

运行的生产设备。自动控制系统中的各种装置是通过信号的传递和转换相互联系的。

如图 1-2 所示的水位自动控制系统中,当蒸汽流量 D 发生变化时,水位 H 就会发生变化,反映水位高低的测量值 i_h 也随之变化, i_h 与给定值 i_{h0} 比较得到偏差信号 e 。在控制器中,按预定的规律对偏差信号 e 进行运算得到控制信号 i_i , i_i 在执行器中进行功率放大后去推动给水控制阀,改变控制阀的开度 μ ,从而改变给水流量 W ,以抵消蒸汽流量变化对水位的影响。系统的信号传递关系如图 1-3 所示,这种直观表达自动控制系统中各种装置之间相互作用与信号传递关系的示意图称为自动控制系统的方框图。

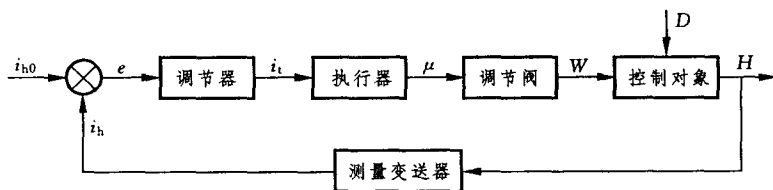


图 1-3 水位自动控制系统方框图

方框图是研究自动控制系统的重要工具,方框图中有信号线、信号综合点、信号分支点和环节四个要素,如图 1-4 所示。

(1) 信号线:用箭头表示信号“ X ”的传递方向的连接线,如图 1-4(a) 所示。

(2) 相加点:即信号综合点,表示两个信号“ X_1 ”与“ X_2 ”的代数和,如图 1-4(b) 所示。

(3) 分支点:表示把信号“ X ”分两路取出,如图 1-4(c) 所示。

(4) 环节:即方框图中的一个方块,如图 1-4(d) 所示。方框图中的每一个方块即一个环节,表示系统中一个元件或一个设备,或者几个设备的组合体。 X 为环节的输入信号, Y 为环节的输出信号。

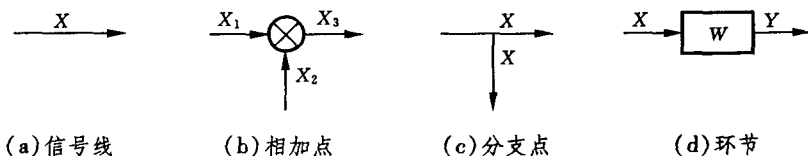


图 1-4 方框图的四要素

方框图中,环节的输入信号是引起环节变化的原因,而环节的输出信号则是环节在输入信号作用下变化的结果,如水位变化的原因可以是给水流量 W 或蒸汽流量 D 的变化,故给水流量和蒸汽流量都可以是受压容器的输入信号。蒸汽流量或给水流量变化都会引起受压容器内部工作状态发生变化,其结果是水位变化,因此,水位是这个环节的输出信号。应当注意,环节的输入信号与输出信号之间的因果关系

是不可逆的。如上例中,蒸汽流量或给水流量的变化都能引起水位变化,但水位的变化不能反过来影响给水流量或蒸汽流量,即信号只能沿箭头方向传递,具有单向性。同时,还要看到,方框图中的信号线只是表示环节之间信号的传递关系,不代表实际物料的流动。例如,蒸汽流量是“受压容器”环节的输入信号,是从蒸汽流量的变化会直接引起水位发生变化这一因果关系的意义来说的,故方框图与实际的生产流程图是有本质区别的。

自动控制系统的方框图一般是一个闭合回路。图 1-2 中水位 H 的信号,经过测量变送器、调节器和执行器等环节,反过来影响水位本身,系统中的信号是在闭合回路中传递的,所以这种系统称为闭环系统或反馈系统。传递到调节器的信号是给定水位信号 i_{h0} 与实际水位信号 i_h 的偏差值。当水位升高时,偏差信号 $e = i_{h0} - i_h$ 是一个负值,其意义是要关小给水控制阀门,使水位向反方向变化。因此,自动控制系统是一个“负反馈系统”,这种负反馈的实质就是“基于偏差,消除偏差”。如果不存在被控量与给定值的偏差,就不会产生控制作用,而控制作用的最终目的是要消除偏差,使被控量重新恢复到给定值。

1.2 自动控制系统的分类

在生产过程中,自动控制系统的类型是多种多样的。从不同的角度出发,可以有不同的分类。

1.2.1 按控制系统的结构不同分类

1. 开环控制系统

开环控制系统是指控制器与控制对象之间只有正向作用,而没有反向联系的系统,如图 1-5 所示。它的工作原理是直接根据扰动进行控制,也称为前馈控制。若按扰动进行控制的控制量合适的话,就可以及时抵消扰动的影响而使被控量保持不变。但由于没有被控量的反馈,控制结束后,很难保证被控量等于给定值。因此在生产过程中,这种系统是不能单独使用的。

2. 闭环控制系统

闭环控制系统是指控制器与控制对象之间既有正向作用,又有反向联系的系统,如图 1-6 所示,它是按反馈的原理工作的,即根据被控量的偏差进行控制,最终消除偏差,也称为反馈控制系统。

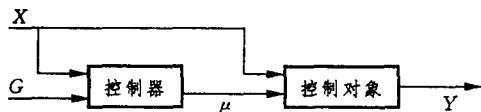


图 1-5 开环控制系统方框图

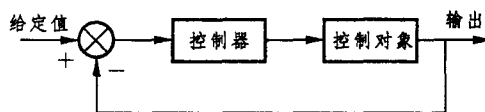


图 1-6 闭环控制系统方框图

3. 复合控制系统

在反馈控制系统的基础上加入对主要扰动实施前馈控制的补偿装置,就构成了复合控制系统,也称为前馈-反馈控制系统,如图 1-7 所示。复合控制与反馈控制相比,有更高的控制速度和更好的控制质量,因此得到了比较广泛的应用。图 1-7(a) 表示的是按给定值进行前馈补偿的系统,当输入指令发生变化时,系统的输出能比纯反馈控制系统更及时地作出响应;图 1-7(b) 表示的是按主要扰动进行前馈补偿的系统,当主要扰动发生时,补偿装置将扰动信号输入控制器,控制器输出一个力求抵消扰动影响的控制信号作用到控制对象,以减小扰动对输出的影响。如图 1-2 所示的水位控制系统中,流出量 D 可视为对水位的扰动,当 D 增加时,把扰动信号 D 引入调节器输入端,使控制器及时产生一个增加流入量 W 的信号,就能有效防止水位过多下降。

在热工自动控制系统中,这两种前馈控制都得到了广泛应用。

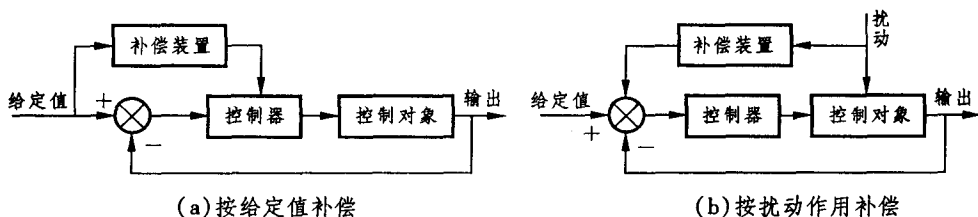


图 1-7 复合控制系统方框图

1.2.2 按给定值不同分类

1. 定值控制系统

被控量的给定值在运行中恒定不变的系统,称为定值控制系统。这种系统要求它的被控量在任何扰动的作用下能尽快地恢复到原有的稳态值,如发电厂锅炉的汽包水位控制系统、锅炉的过热汽温控制系统等。

2. 随动控制系统

被控量的给定值是时间的未知函数的系统,称为随动控制系统,又称伺服控制系统。随动控制系统的任务是使被控量按同样规律变化,并与输入信号的误差保持在规

定范围内。这种系统在军事上应用最为普遍,如导弹发射架控制系统、雷达天线控制系统等。控制系统中的执行器也可视为一个伺服控制系统,执行机构的位置始终跟随控制器的输出指令变化,其特点是输入量为未知。

3. 程序控制系统

被控量的给定值是时间的已知函数的控制系统,称为程序控制系统,如发电厂汽轮机自启动控制系统(转速控制系统)在一定调节下可视为程序控制系统等。

1.2.3 按控制系统闭合回路数不同分类

1. 单回路控制系统

单回路控制系统中,只有一个被控量反馈到调节器的输入端,只形成一个闭合回路,因此系统结构比较简单,如图 1-3 所示。单回路控制系统也称单级控制系统。

2. 多回路控制系统

为了改善系统控制性能,可引入局部反馈,因此闭合回路数不只一个,这就形成了多回路控制系统。如图 1-8 所示的具有两个闭合回路的控制系统,由于两个控制器是串接在一起的,因此也称为串级控制系统。

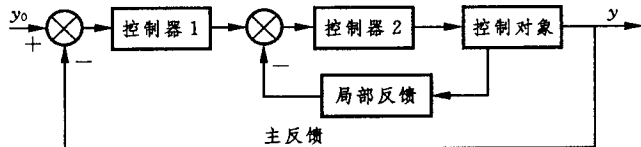


图 1-8 双回路控制系统方框图

1.2.4 其他分类

自动控制系统还可以根据其他特点进行分类。

1. 线性控制系统和非线性控制系统

可以(或近似可以)用线性方程式来描述的控制系统称为线性控制系统,必须用非线性方程式描述的系统称为非线性控制系统。

2. 连续控制系统和采样控制系统

系统各环节的输入、输出信号都是时间的连续函数,被控量被连续地测量和控制,这样的系统称为连续控制系统。每隔一段时间测量一次被控量与给定值的偏差,并对