

929405

化工自动化 及仪表

张蕴端 主编



华东化工学院出版社

化工自动化及仪表

第二版

张蕴端 主编

华东化工学院出版社

责任编辑 范荷英

化工自动化及仪表
Huagong Zidonghua ji Yibiao

张蕴端 主编

华东化工学院出版社出版

(上海市梅陇路 130 号)

新华书店上海发行所发行

上海中华印刷厂印刷

开本 850×1168 1/32 印张 12.375 字数 333 千字

1990年12月第2版 1990年12月第1次印刷

印数 1-10,000册

ISBN 7-5628-0107-X/TP·10 定价: 2.95 元

内 容 提 要

本书以自动控制系统为体系(包括检测、变送、控制、执行及显示等),着重叙述化工自动化系统和自动化仪表的原理,系统的组成,各组成的静、动态特性及其对控制质量的影响;分析了简单控制系统,包括系统设计、投运和参数整定;介绍了复杂控制系统的特点及适用场合,阐述了典型化工单元的控制方案,最后对计算机控制进行了简单介绍。

本书可作为高等学校化工工艺类专业《化工自动化及仪表》课程的教材,也可供从事化工工艺生产的工程技术人员参考。

前 言

当今化工工艺生产发展迅猛，为了适应生产过程工艺的复杂化、连续化、快速化以及高产优质和安全生产的需要，生产过程必需实现自动化操作。目前，自动化水平已从常规仪表的检测与控制逐渐走向计算机控制，各种控制系统层出不穷。

实现化工生产过程自动化，除了需要有自动化专业人员之外，还需要有各类工艺专业人员的互相配合，他们应懂得实现现代生产过程自动化方面的基本知识，以便于：(1)能为自控设计提供正确的工艺条件和数据；(2)能根据工艺和自动控制两方面的需要，与自控设计人员共同讨论，拟订出合理可行的自动控制方案；(3)能在生产启、停过程中了解自控系统的投运方法、参数整定等；(4)能有常见自动化仪表选择和使用的基础知识。

为了使工艺人员达到上述要求，我们编写了这本适合化工工艺专业学生使用的《化工自动化及仪表》教材。本书结合化工工艺类专业的要求和特点，以自动控制系统为体系，着重叙述化工自动控制和测量原理，系统的基本组成及在设计、运行中与工艺有关的知识要点，并结合实例进行分析，力求深入浅出，便于学生自学。

本书由华东化工学院张蕴端主编，张全福参加了编写，还有李忠民等也为本书的编写出版提供了帮助。浙江大学王骥程教授审阅了本书全稿，在此表示感谢。

本教材经过全国生产过程自动化专业教学指导委员会审查，通过作为认可教材。本书第一版由上海交通大学出版社出版。

教材建设是一项十分重要，又是十分艰巨、细致和需要不断总结、反复提炼的工作。由于我们水平、经验等诸方面的限制，书中如有错误和不妥之处，真诚地希望读者批评指正。

作者

目 录

| | |
|------------------------------------|--------|
| 1 自动控制系统概述 | (1) |
| 1.1 自动控制系统的类型 | (3) |
| 1.1.1 开环控制系统 | (3) |
| 1.1.2 闭环控制系统 | (4) |
| 1.2 静态和动态 | (8) |
| 1.3 闭环控制系统的过渡过程及其控制指标 | (9) |
| 1.3.1 闭环控制系统的过渡过程 | (9) |
| 1.3.2 闭环控制系统的控制指标 | (11) |
| 1.4 组成闭环控制系统的自动化仪表简介 | (14) |
| 思考题 | (15) |
| 2 过程特性 | (17) |
| 2.1 过程特性的一般分析 | (20) |
| 2.1.1 放大系数 K | (21) |
| 2.1.2 时间常数 T | (24) |
| 2.1.3 时滞 τ | (28) |
| 2.2 过程的数学描述 | (31) |
| 2.2.1 一阶过程的动态方程 | (31) |
| 2.2.2 二阶过程的动态方程 | (35) |
| 2.3 过程特性的实验测定 | (35) |
| 2.3.1 阶跃扰动法 | (36) |
| 2.3.2 矩形脉冲扰动法 | (38) |
| 2.3.3 周期扰动法 | (39) |
| 2.3.4 统计相关法 | (39) |
| 思考题 | (40) |
| 3 检测元件和变送器 | (41) |
| 3.1 仪表精度等级和量程的选择 | (42) |
| 3.2 温度的检测和变送 | (43) |
| 3.2.1 检测元件 | (43) |

| | | |
|------------|---|--------------|
| 5.2.2 | DBW 电动温度变送器 | (54) |
| 3.3 | 流量、液位、压力的检测和变送 | (62) |
| 3.3.1 | 检测元件 | (63) |
| 3.3.2 | 变送器 | (73) |
| 3.4 | 成分、物性的检测 | (84) |
| 3.4.1 | 成分检测 | (81) |
| 3.4.2 | 物性检测 | (88) |
| 3.4.3 | 成分、物性检测的静态特性、影响静态特性的误差因素 及排除措施 | (90) |
| 3.4.4 | 成分、物性检测的动态特性 | (91) |
| | 思考题 | (92) |
| 4 | 执行器——气动薄膜调节阀 | (94) |
| 4.1 | 气动薄膜调节阀的结构、类型及材质 | (94) |
| 4.1.1 | 气动薄膜调节阀的结构 | (94) |
| 4.1.2 | 气动薄膜调节阀的类型 | (97) |
| 4.1.3 | 气动薄膜调节阀的材质 | (101) |
| 4.2 | 调节阀的静态特性——流量特性 | (102) |
| 4.2.1 | 调节阀的理想流量特性 | (102) |
| 4.2.2 | 调节阀的工作流量特性 | (105) |
| 4.3 | 调节阀的动态特性 | (107) |
| 4.4 | 调节阀的选择与计算 | (109) |
| 4.4.1 | 调节阀的选择 | (109) |
| 4.4.2 | 调节阀的口径计算 | (113) |
| 4.5 | 调节阀的变差 | (116) |
| 4.6 | 阀门定位器 | (117) |
| 4.6.1 | 阀门定位器的工作原理 | (117) |
| 4.6.2 | 阀门定位器的作用 | (119) |
| 4.7 | 调节阀的安装、使用 | (120) |
| | 思考题 | (122) |
| 5 | 控制器特性 | (123) |
| 5.1 | 控制器的基本控制规律 | (123) |

| | | |
|----------|--------------------------------------|--------------|
| 5.1.1 | 连续 PID 控制算法 | (125) |
| 5.1.2 | 离散 PID 控制算法 | (144) |
| 5.2 | 控制器 | (146) |
| 5.2.1 | 单元组合式调节器 | (148) |
| 5.2.2 | 可编程调节器 | (167) |
| 5.2.3 | 气动集装式调节仪表 | (171) |
| | 思考题 | (173) |
| 6 | 显示仪表 | (175) |
| 6.1 | 模拟式显示仪表 | (175) |
| 6.1.1 | 电子电位差计 | (176) |
| 6.1.2 | 电子自动平衡电桥 | (180) |
| 6.2 | 数字式显示仪表 | (182) |
| | 思考题 | (184) |
| 7 | 组成自动控制系统的常用单元 | (185) |
| 7.1 | 计算单元 | (185) |
| 7.1.1 | 开方器 | (185) |
| 7.1.2 | 乘除器 | (186) |
| 7.1.3 | 加减器 | (186) |
| 7.1.4 | 比值器和分流器 | (187) |
| 7.2 | 转换单元 | (187) |
| 7.2.1 | 电-气转换器 | (187) |
| 7.2.2 | 频率转换器 | (188) |
| 7.3 | 辅助单元 | (189) |
| 7.3.1 | Q 型操作器 | (189) |
| 7.3.2 | 遥控板 | (191) |
| | 思考题 | (192) |
| 8 | 简单控制系统的设计、投运及调节器参数的工程整定 | (193) |
| 8.1 | 简单控制系统的设计 | (193) |
| 8.1.1 | 被控变量的选择 | (194) |
| 8.1.2 | 操纵变量的选择 | (196) |
| 8.1.3 | 检测变送环节对控制系统的影响 | (199) |
| 8.1.4 | 控制规律的选择 | (202) |

| | | |
|-------|------------------------|-------|
| 8.1.5 | 气动薄膜调节阀的选择 | (202) |
| 8.2 | 简单控制系统的投运 | (203) |
| 8.3 | 调节器参数的工程整定 | (206) |
| 8.3.1 | 经验法 | (207) |
| 8.3.2 | 衰减曲线法 | (210) |
| 8.3.3 | 临界比例度法 | (211) |
| | 思考题 | (213) |
| 9 | 复杂控制系统 | (215) |
| 9.1 | 串级控制系统 | (215) |
| 9.1.1 | 串级控制系统的基本概念 | (215) |
| 9.1.2 | 串级控制系统的特点及适用场合 | (219) |
| 9.1.3 | 串级控制系统的设计 | (222) |
| 9.1.4 | 串级控制系统的投运和参数整定 | (226) |
| 9.2 | 均匀控制系统 | (227) |
| 9.2.1 | 均匀控制系统的目的和要求 | (227) |
| 9.2.2 | 均匀控制系统的形式 | (229) |
| 9.2.3 | 调节器控制规律和调节器参数的选择 | (231) |
| 9.3 | 比值控制系统 | (232) |
| 9.3.1 | 比值控制系统的类型 | (232) |
| 9.3.2 | 比值系数 K 的计算 | (236) |
| 9.3.3 | 比值控制系统的构成方案 | (239) |
| 9.3.4 | 比值控制系统的整定 | (240) |
| 9.3.5 | 比值控制系统的变型式 | (240) |
| 9.4 | 分程控制系统 | (241) |
| 9.4.1 | 分程控制的应用 | (242) |
| 9.4.2 | 分程控制对调节阀的要求 | (245) |
| 9.5 | 前馈控制系统 | (247) |
| 9.5.1 | 前馈控制的基本概念 | (247) |
| 9.5.2 | 前馈控制系统的类型 | (249) |
| 9.5.3 | 前馈补偿装置的构成方法 | (251) |
| 9.5.4 | 前馈参数整定 | (254) |
| 9.5.5 | 前馈控制系统的应用 | (254) |

| | | |
|--------|--------------------------|-------|
| 9.6 | 选择性控制系统 | (255) |
| 9.6.1 | 选择性控制系统的概念 | (255) |
| 9.6.2 | 选择性控制系统的类型 | (256) |
| 9.6.3 | 积分饱和及其防止措施 | (259) |
| 9.6.4 | 选择性控制系统的选型 | (261) |
| 9.7 | 其他复杂控制系统 | (262) |
| 9.7.1 | 双重控制系统 | (262) |
| 9.7.2 | 非线性控制系统 | (263) |
| | 思考题 | (264) |
| 10 | 典型化工单元的控制方案 | (265) |
| 10.1 | 流体输送设备的控制方案 | (266) |
| 10.1.1 | 泵的控制方案 | (266) |
| 10.1.2 | 压缩机的控制方案 | (271) |
| 10.2 | 传热设备的控制方案 | (277) |
| 10.2.1 | 两侧均无相变的换热器的控制方案 | (277) |
| 10.2.2 | 载热体进行冷凝的蒸汽加热器的控制方案 | (281) |
| 10.2.3 | 载热体进行汽化的氨冷器的控制方案 | (283) |
| 10.2.4 | 管式加热炉的控制方案 | (285) |
| 10.3 | 锅炉设备的控制方案 | (288) |
| 10.3.1 | 锅炉汽包水位控制系统 | (289) |
| 10.3.2 | 燃烧过程控制系统 | (295) |
| 10.4 | 精馏塔的控制方案 | (297) |
| 10.4.1 | 工艺要求 | (297) |
| 10.4.2 | 扰动分析及操纵变量和被控变量的选择 | (298) |
| 10.4.3 | 产品质量的开环控制方案 | (301) |
| 10.4.4 | 按精馏段指标的控制方案 | (303) |
| 10.4.5 | 按提馏段指标的控制方案 | (308) |
| 10.4.6 | 压力控制 | (308) |
| 10.4.7 | 精馏塔的新型控制方案 | (312) |
| 10.4.8 | 精馏塔的节能控制方案 | (315) |
| 10.5 | 化学反应器的控制方案 | (318) |
| 10.5.1 | 反应器的控制要求及被控变量的选择 | (319) |

| | | |
|-----------|----------------------------------|--------------|
| 10.5.2 | 反应器的控制方案 | (321) |
| 10.5.3 | 化学反应器控制方案举例 | (324) |
| | 思考题 | (327) |
| 11 | 计算机控制系统 | (328) |
| 11.1 | 直接数字控制系统(DDC) | (328) |
| 11.2 | 计算机监督控制系统(SCC或SPC) | (330) |
| 11.2.1 | SCC加模拟调节器的控制系统 | (331) |
| 11.2.2 | SCC加DDC的控制系统 | (332) |
| 11.3 | 分级控制系统 | (334) |
| 11.4 | 过程动态数学模型 | (336) |
| 11.4.1 | 动态数学模型的类型 | (337) |
| 11.4.2 | 建立动态数学模型的途径 | (337) |
| | 思考题 | (339) |
| 附录 1 | 镍铬-铜镍(康铜)热电偶分度表 | (340) |
| 附录 2 | 镍铬-镍硅(镍铬-镍铝)热电偶分度表 | (345) |
| 附录 3 | 铂铑10-铂热电偶分度表 | (354) |
| 附录 4 | 铜热电阻分度表 | (366) |
| 附录 5 | 铂热电阻分度表(Pt 50) | (368) |
| 附录 6 | 铂热电阻分度表(Pt 100) | (373) |
| 附录 7 | 气动薄膜调节阀型号编制说明 | (378) |
| 附录 8 | 气动薄膜调节阀主要技术数据 | (380) |
| 附录 9 | ZMAS- $\frac{3}{2}$ 型气动薄膜调节阀技术数据 | (382) |
| 附录 10 | C值计算公式表 | (383) |
| | 参考文献 | (384) |

1 自动控制系统概述

在化工生产中,对各个工艺生产过程中的物理量(或称工艺变量),有着一定的控制要求。有些工艺变量直接表征生产过程,对产品的数量和质量起着决定性的作用。例如,精馏塔的塔顶或塔釜温度,一般在操作压力不变的情况下,必须保持一定,才能得到合格的产品;加热炉出口温度的波动不能超出允许范围,否则将影响分馏效果;化学反应器的反应温度必须保持平稳,才能使效率达到指标。有些工艺变量虽不直接地影响产品的数量和质量,然而保持其平稳却是使生产获得良好控制的前提。例如,用蒸汽加热反应器或再沸器,在蒸汽总压波动剧烈的情况下,要把反应温度或塔釜温度控制好将极为困难;中间贮槽的液位高度和气柜压力,必须维持在允许范围之内,才能使物料平衡,保持连续的均衡生产。有些工艺变量是决定安全生产的因素,例如,锅炉汽包的水位、受压容器的压力等,不允许超出规定的限度,否则将威胁生产的安全。还有一些工艺变量直接鉴定产品的质量,例如,某些混合气体的组成、溶液的酸碱度等。对于以上各种类型的变量,在化工生产过程中,都必须加以必要的控制。

为了实现控制的要求,可以有两种方式,一是人工控制,二是自动控制。后者是在人工控制的基础上发展起来的,使用了自动化仪表等控制装置来代替人的观察、判断、决策和操纵。

下面举例来说明什么是自动控制系统。

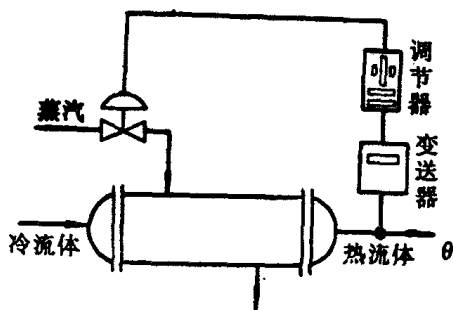


图 1-1 所示是一个温度 图 1-1 蒸汽加热器出口温度自动控制系统

控制系统，用蒸汽加热冷流体，工艺要求热流体出口温度保持一定。若忽略热损失，当蒸汽带进的热量与热流体带出的热量相等时，热流体出口温度保持在规定的数值上。由于冷流体流量、冷流体入口温度和蒸汽阀前压力等因素的波动，将会使出口温度下降或上升。为此设置此控制系统，它由电动单元组合仪表组成。

检测元件和变送器的作用是检测出口温度的高低，当温度与正常温度之间出现偏差时，调节器就立刻根据偏差数值和极性进行控制，开大或关小蒸汽阀门，使出口温度恢复到规定数值。

要实现蒸汽加热器出口温度的自动控制，至少必须要有检测元件和变送器、调节器、调节阀、蒸汽加热器等四个部分，它们组成一个简单的自动控制系统。流量、压力、液位、成分的控制系統同样也是由这四部分组成。将图 1-1 画成带控制点的工艺流程图则如图 1-2 所示。

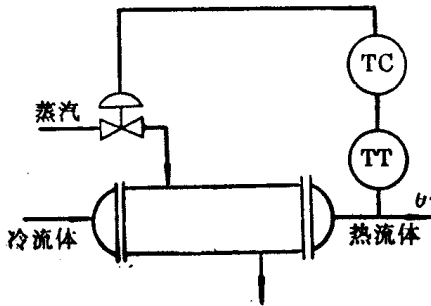


图 1-2 蒸汽加热器带控制点工艺流程图

现在我们结合蒸汽加热器出口温度控制的例子来说明控制系统中应用的几个术语。

被控对象或过程 需要实现控制的设备、机器或生产过程，称为被控对象或过程，例如蒸汽加热器。

被控变量 过程内要求保持设定数值（接近恒定值或按预定规律变化）的物理量，称为被控变量，例如热流体出口温度。

操纵变量 受到控制装置（如调节器操纵，用以使被控变量保持设定值的物料量或能量，称为操纵变量，如蒸汽。

扰动（干扰） 除操纵变量以外，作用于过程并引起被控变量变化的因素，称为扰动。负荷（处理量）变化就是一种典型的扰动。如蒸汽加热器出口温度控制中冷流体流量的变化。

设定值 被控变量的预定值称为设定值。

偏差 偏差理论上应该是被控变量的设定值与实际值之差。

但是,能够直接获取的信息是被控变量的测量值而不是实际值,因此通常把设定值与测量值之差作为偏差。

1.1 自动控制系统的类型

在生产过程中,被控变量偏离设定值的主要原因有以下三个方面:

1) 大多数情况下是由于扰动的出现,这时操纵变量必须作相应变动,否则被控变量将发生变化。以蒸汽加热器为例,当冷流体的流量增加时,若不相应地加大蒸汽流量,出口温度将会下降。

2) 在设定值改变时,若不改变操纵变量的数值,被控变量不可能适应新的要求。例如,要提高蒸汽加热器的出口温度,如果冷流体的流量和入口温度不变,则必须加大蒸汽量。

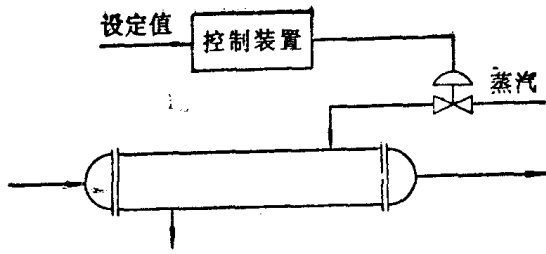
3) 即使设定值不变,扰动也不出现,在操纵变量不作调节的情况下,长期保持平衡也非常困难。以液体贮槽为例,即使流出量恒定不变,流入量也不可能非常精确地等于流出量,时间一长,累积误差将越来越大,从而引起液位变化。

由于种种原因,被控变量不可避免地会发生变化,因此,必须选择适当的控制系统对被控变量进行控制。

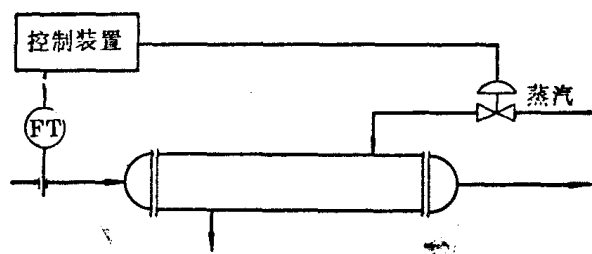
按控制系统的基本结构,可以分为开环控制系统和闭环控制系统两大类。

1.1.1 开环控制系统

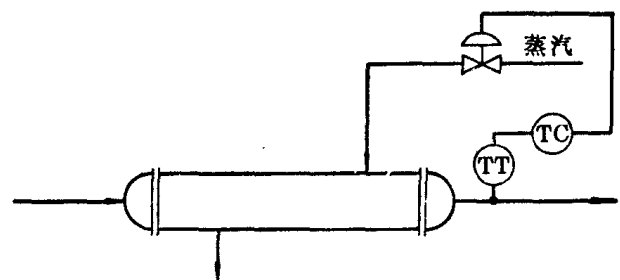
开环控制系统分两种,一种是按设定值进行控制,如蒸汽加热器,其蒸汽流量与设定值保持一定的函数关系,当设定值变化时,操纵变量随之变化,图 1-3 a 即为其原理图。另一种是按扰动进行控制,即所谓前馈控制。在蒸汽加热器中,如果负荷是主要扰动,则使蒸汽流量与冷流体流量保持一定的函数关系。当扰动出现时,操纵变量随之变化,图 1-3 b 即为其原理图。



(a) 按设定值而控制的开环系统



(b) 按扰动而控制的开环系统



(c) 闭环控制系统

图 1-3 控制系统的基本结构

1.1 2 闭环控制系统

闭环控制系统又称反馈控制系统，它是按偏差进行控制的。在蒸汽加热器的出口温度控制系统中，温度调节器接受检测元件及变送器送来的测量信息，并与设定值相比较，根据偏差情况，按一定的控制规律，调整蒸汽阀门的开度，以改变蒸汽量。图 1-3 c 即为其原理图。

由图 1-3 c 可以看出，操纵变量(蒸汽量)会通过过程去影响被控变量(温度)，而被控变量又会通过自动控制装置去影响操纵变

量。从信息的传送关系来看,构成了一个闭合的回路,所以称为闭环控制系统。被控变量的信息要送回到自动控制装置,所以也称为反馈控制系统。

1.1.2.1 闭环控制系统的类型

在闭环控制系统中,按照设定情况的不同,可分为三种类型。

A 定值控制系统

所谓定值控制系统,是指这类控制系统的设定值是恒定不变的。例如蒸汽加热器在工艺上要求出口温度按设定值保持不变,因而它是一个定值控制系统。定值控制系统的基本任务是克服扰动对被控变量的影响,即在扰动作用下仍能使被控变量保持在设定值或其附近。

化工生产领域里的自动控制系统,凡要求工艺变量平稳不变的,都属于这种范畴。

B 随动控制系统

随动控制系统也称为自动跟踪系统,这类系统的设定值是事先未知的时间函数。这类控制系统的主要任务是使被控变量能够尽快地、准确无误地跟踪设定值的变化,而不考虑扰动对被控变量的影响。在化工自动化中,有些比值控制系统就属于此类,例如要求甲流体的流量与乙流体的流量保持一定的比值,当甲流体的流量变化时,乙流体的流量能按一定比例随之变化。

C 程序(顺序)控制系统

这类控制系统的设定值也是变化的,但它是时间的已知函数、即设定值按一定的时间程序变化。在化工自动化中,间歇反应器,玻璃熔化炉的升温控制系统都属于此类系统。近年来,程序控制系统应用日益广泛,一些定型的和非定型的程序控制装置越来越多地被应用到化工生产中。

1.1.2.2 闭环控制系统的组成

任何一个自动控制系统,总是由过程和自动控制装置组成的。自动控制装置可以很简单,例如用浮球带动阀门的液位控制

器；也可以相当复杂，例如采用工业控制机及其外围设备和接口。不论其结构如何，闭环控制系统的自动控制装置总要实现检测、判断、决策和操纵的功能，可以用图 1-4 所示的方框图来表示。

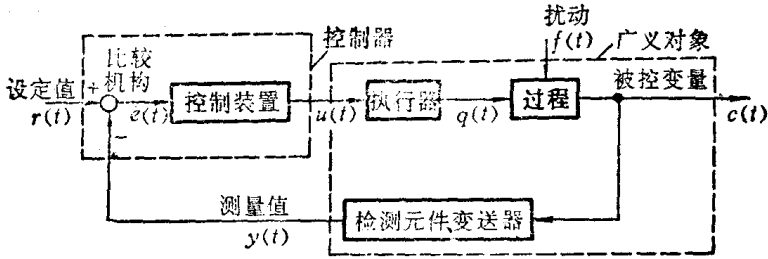


图 1-4 闭环控制系统的组成

采用下列符号：

$r(t)$ 设定值；

$y(t)$ 测量值；

$e(t)$ 偏差， $e(t) = r(t) - y(t)$ ；

$u(t)$ 调节器输出(控制作用)；

$c(t)$ 被控变量；

$q(t)$ 操纵变量；

$f(t)$ 扰动。

检测元件和变送器的作用是把被控变量 $c(t)$ 转化为测量值 $y(t)$ 。例如，用热电阻或热电偶测量温度，并用温度变送器转换为统一的气压信号（20~100 kPa）或直流电流信号（0~10 mA 或 4~20 mA）。

比较机构的作用是比较设定值 $r(t)$ 与测量值 $y(t)$ 并输出其差值。在自动控制系统分析中，把 $e(t)$ 定义为 $[r(t) - y(t)]$ 。然而在仪表制造行业中，却把 $[y(t) - r(t)]$ 作为偏差，两者的符号恰好相反。

控制装置的作用是根据偏差的正负、大小及变化情况，按某种预定的控制规律给出控制作用 $u(t)$ 。

比较机构和控制装置通常组合在一起，称为控制器。目前应用最广的控制器是气动和电动调节器，他们的输出 $u(t)$ 也是统一