普通高等教育“十三五”规划教材
电气工程、自动化专业规划教材

计算机过程控制系统

李向舜　编著



中国工信出版集团
電子工業出版社
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY
http://www.phei.com.cn

华信
欢迎登录 免费 获取本书教学资源
http://www.hxedu.com.cn



计算机过程控制系统

计算机过程控制系统是自动化专业必修的专业课程。本书根据该课程特点，介绍了计算机过程控制系统各组成部分的工作原理，在此基础上又分别介绍了简单回路系统和复杂控制系统的设计与分析方法。具体内容包括计算机过程控制系统组成和发展概况；检测技术及常用的仪表和信号接口标准；执行器，主要是调节阀的工作原理和流量特性；被控过程的机理建模与动态特性；PID控制器特点；简单回路设计及控制器参数整定；前馈、比值、大滞后、串级、多输入多输出系统的设计及控制器参数整定的方法。通过学习，读者可以系统地掌握过程控制系统的基本组成、原理、分析与综合的理论和方法，针对各种生产过程设计出相应的过程控制方案，并能解决系统设备选型、控制器设计、参数整定等具体问题，为解决自动化专业领域的复杂工程问题打下坚实的基础。

本书取材新颖、阐述严谨、内容丰富、重点突出、推导详细、思路清晰、深入浅出、富有启发性，便于教学与自学。

本书既可作为高等学校理工科本科生和研究生计算机过程控制、仪表与过程控制课程的教材或参考书，也可作为科技人员的参考手册。

策划编辑：张小乐
责任编辑：底　波
封面设计：徐海燕



• 访问在线课程 •

ISBN 978-7-121-37762-4



定价：52.00元

普通高等教育“十三五”规划教材
电气工程、自动化专业规划教材

计算机过程控制系统

李向舜　编著

電子工業出版社
Publishing House of Electronics Industry
北京 · BEIJING

内 容 简 介

计算机过程控制系统是自动化专业必修的专业课程。本书根据该课程特点，介绍了计算机过程控制系统各组成部分的工作原理，在此基础上又分别介绍了简单回路系统和复杂控制系统的设计与分析方法。具体内容包括计算机过程控制系统组成和发展概况；检测技术及常用的仪表和信号接口标准；执行器，主要是调节阀的工作原理和流量特性；被控过程的机理建模与动态特性；PID 控制器特点；简单回路设计及控制器参数整定；前馈、比值、大滞后、串级、多输入多输出系统的设计及控制器参数整定的方法。通过学习，读者可以系统地掌握过程控制系统的基本组成、原理、分析与综合的理论和方法，针对各种生产过程设计出相应的过程控制方案，并能解决系统设备选型、控制器设计、参数整定等具体问题，为解决自动化专业领域的复杂工程问题打下坚实的基础。

本书取材新颖、阐述严谨、内容丰富、重点突出、推导详细、思路清晰、深入浅出、富有启发性，便于教学与自学。

本书既可作为高等学校理工科本科生和研究生计算机过程控制、仪表与过程控制课程的教材或参考书，也可作为科技人员的参考手册。

未经许可，不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。
版权所有，侵权必究。

图书在版编目(CIP)数据

计算机过程控制系统/李向舜编著. —北京：电子工业出版社，2019.9
ISBN 978-7-121-37762-4

Ⅰ. ①计… Ⅱ. ①李… Ⅲ. ①计算机控制系统－过程控制－高等学校－教材 Ⅳ. ①TP273

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2019）第 240055 号

策划编辑：张小乐
责任编辑：底 波
印 刷：北京虎彩文化传播有限公司
装 订：北京虎彩文化传播有限公司
出版发行：电子工业出版社
北京市海淀区万寿路 173 信箱 邮编 100036
开 本：787×1 092 1/16 印张：17 字数：435.2 千字
版 次：2019 年 9 月第 1 版
印 次：2019 年 9 月第 1 次印刷
定 价：52.00 元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题，请向购买书店调换。若书店售缺，请与本社发行部联系，联系及邮购电话：（010）88254888，88258888。

质量投诉请发邮件至 zlts@phei.com.cn，盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

本书咨询联系方式：（010）88254462，zhxl@phei.com.cn。

前　言

计算机过程控制系统是自动化专业重要的专业必修课程，在自动化专业课程中占有重要地位。笔者有幸承担了“计算机控制技术”与“仪表与过程控制系统”的教学工作。通过多年的教学发现，两门课程之间的联系非常紧密，内容上相辅相成。计算机控制技术侧重于计算机输入/输出接口及数字控制算法的设计，仪表与过程控制系统侧重于仪表技术和模拟控制系统的工程设计。事实上，两门课程的内容都不够全面，大多数学校一般只选择其中的一门课程来讲授，也没有一本教材能将计算机控制与过程控制内容很好地融合在一起。而在实际的工程控制系统中，需要技术人员有扎实的理论基础的同时，还要求其能设计数字控制算法并能用软硬件实现。鉴于此，笔者将计算机控制技术和仪表与过程控制系统的内容进行融合，对学生进行教学，效果显著，得到了学生的认可和好评。

笔者在 10 多年来的过程控制教学生涯中，深感计算机过程控制系统知识更新十分迅速，而教材的内容也很难保持与时俱进，甚至很多书上讲的内容在实践中已经很少应用或基本上被淘汰。在编写本书的过程中，笔者参考了国内外已经出版的同类教材，吸收了许多精华和优点，对有些知识点做出了取舍，适当补充了一些新内容。

本书取材新颖、阐述严谨、内容丰富、重点突出、推导详尽、思路清晰、深入浅出、富有启发性，便于教学与自学。

本书由李向舜副教授编写。本书既可作为高等学校理工科本科生和研究生计算机过程控制、仪表与过程控制课程的教材或参考书，也可作为科技人员的参考手册。出好书，使千百万莘莘学子受益，一直是笔者追求的目标，但由于水平所限，书中可能还会有很多不妥甚至是错误之处，敬请广大读者给予批评指正。

本书配有相关在线学习资源，包括视频、PPT、习题等，欢迎各位读者访问使用。在线资源网址：https://www.xueyinonline.com/detail/204384544，选择“加入课程”，注册后登录，选择当前教学期次，进入学习，如有问题请联系 53290323@qq.com。

反侵权盗版声明

电子工业出版社依法对本作品享有专有出版权。任何未经权利人书面许可，复制、销售或通过信息网络传播本作品的行为，歪曲、篡改、剽窃本作品的行为，均违反《中华人民共和国著作权法》，其行为人应承担相应的民事责任和行政责任，构成犯罪的，将被依法追究刑事责任。

为了维护市场秩序，保护权利人的合法权益，我社将依法查处和打击侵权盗版的单位和个人。欢迎社会各界人士积极举报侵权盗版行为，本社将奖励举报有功人员，并保证举报人的信息不被泄露。

举报电话：（010）88254396；（010）88258888
传　　真：（010）88254397
E-mail：　dbqq@phei.com.cn
通信地址：北京市海淀区万寿路 173 信箱
　　电子工业出版社总编办公室
邮　　编：100036

目　录

第 1 章　绪论……1
1.1　过程控制系统应用举例……1
1.2　过程控制系统组成……3
1.2.1　控制系统……3
1.2.2　过程……5
1.2.3　控制……6
1.2.4　过程控制系统……6
1.2.5　计算机过程控制系统……7
1.3　过程控制系统的性能指标……11
1.3.1　过程控制系统的一般性要求……11
1.3.2　系统响应……12
1.3.3　系统单项性能指标……12
1.3.4　系统积分性能指标……14
1.4　过程控制系统的发展概况……14
1.4.1　机械控制系统……14
1.4.2　气动控制系统……17
1.4.3　电子控制系统……18
1.4.4　现代计算机控制系统……19
1.5　过程和仪表图……20
习题 1……21
第 2 章　检测技术……23
2.1　检测仪表概述……23
2.1.1　检测仪表的技术性能指标……23
2.1.2　变送器输出信号标准……25
2.2　温度测量……27
2.2.1　温度测量简史……27
2.2.2　填充式温度计……27
2.2.3　金属电阻……28
2.2.4　热电偶……29
2.2.5　电阻温度检测器（RTD）……31
2.2.6　热敏电阻……32
2.2.7　集成温度传感器……33
2.2.8　辐射式高温计……33

2.2.9 智能温度变送器及其应用……33
2.3 压力测量……34
2.3.1 压力的定义……35
2.3.2 表面压力和绝对压力……35
2.3.3 差压计……35
2.3.4 机械式压力表……36
2.3.5 电位计式压力表……36
2.3.6 压力变送器的应用……37
2.3.7 智能压力变送器……38
2.4 物位测量……38
2.4.1 视觉式液位计……39
2.4.2 压力式液位计……39
2.4.3 电气式液位计……40
2.4.4 超声式液位计……41
2.4.5 辐射式液位计……41
2.4.6 雷达式液位计……42
2.4.7 智能液位变送器……42
2.5 流量测量……43
2.5.1 流量的定义……43
2.5.2 流速、流量和压差的关系……43
2.5.3 雷诺系数……44
2.5.4 流量测量原理……44
2.5.5 差压式流量计……45
2.5.6 速度式流量计……46
2.5.7 容积式流量计……48
2.5.8 质量式流量计……49
2.5.9 转子流量计……49
习题 2……50
第 3 章 计算机输入/输出接口技术……51
3.1 工业控制计算机……51
3.1.1 工控机……51
3.1.2 PLC……52
3.1.3 嵌入式系统……52
3.1.4 智能调节器……53
3.2 计算机输入/输出通道……53
3.2.1 数字量输入/输出通道……53
3.2.2 模拟量输入通道……58
3.2.3 采样定理与信号重构……59
3.2.4 采样保持……62

3.2.5 A/D 转换与接口技术……65
3.2.6 模拟量输出通道……72
3.3 工业控制网络……77
习题 3……79
第 4 章 执行器……81
4.1 调节阀……81
4.1.1 气动调节阀的组成……81
4.1.2 调节阀的流量特性……87
4.1.3 闪蒸、气蚀、阻塞流……92
4.1.4 调节阀的气开式和气关式……93
4.2 其他阀……94
4.2.1 电动阀……94
4.2.2 电磁阀……95
4.2.3 安全阀……95
4.2.4 减压阀、止回阀、手动球阀……95
4.3 步进电动机……96
4.3.1 步进电动机的工作原理与驱动方式……96
4.3.2 数字程序控制……101
4.3.3 逐点比较法……102
习题 4……107
第 5 章 过程……110
5.1 机理建模……110
5.1.1 质量守恒方程……112
5.1.2 能量守恒方程……113
5.1.3 物种（成分）守恒方程……114
5.1.4 动量守恒方程……115
5.2 增量法线性化……116
5.3 过程动态特性……120
5.3.1 一阶过程……120
5.3.2 二阶过程……122
5.3.3 滞后特性……125
5.4 经验建模……127
5.4.1 最小二乘法……128
5.4.2 过程响应曲线法……131
习题 5……136
第 6 章 反馈控制器……138
6.1 反馈控制与闭环系统……138
6.2 断续控制……139
6.3 连续控制……141

6.3.1 PID（比例积分微分）控制……141
6.3.2 比例控制……141
6.3.3 积分控制……143
6.3.4 比例积分控制……144
6.3.5 微分控制……145
6.3.6 比例积分微分控制……146
6.3.7 改进型 PID……148
6.4 数字控制器……156
6.4.1 差分方程……156
6.4.2 数字控制系统建模……157
6.4.3 数字控制器连续化设计……161
6.4.4 数字式 PID……166
6.4.5 工程二阶法……169
6.4.6 直接数字控制……173
6.4.7 最少拍有纹波控制……175
6.4.8 最少拍无纹波控制……178
习题 6……183
第 7 章 简单回路设计……185
7.1 控制器参数整定……185
7.1.1 直接综合法……186
7.1.2 内部模型法……190
7.1.3 工程整定法……193
7.2 简单回路设计步骤……196
7.3 被控变量的选择……196
7.4 控制变量的选择……198
7.5 控制器的正反作用……202
7.6 简单控制系统设计实例……204
习题 7……206
第 8 章 复杂控制系统……208
8.1 前馈控制系统……208
8.1.1 前馈控制的原理……208
8.1.2 数字式前馈控制……211
8.2 串级控制系统……213
8.2.1 串级控制系统简介……213
8.2.2 串级控制系统的特点……216
8.2.3 串级控制系统设计及参数整定……222
8.2.4 数字式串级控制算法……223
8.3 比值控制系统……224
8.3.1 比值控制系统的结构……224

8.3.2 比值控制系统的设计……226
8.3.3 比值控制系统方案及参数整定……228
8.4 大滞后过程控制系统……229
8.4.1 大滞后过程的采样控制……229
8.4.2 大滞后过程的 Smith 预估补偿控制……229
8.4.3 数字 Smith 预估控制器……231
8.4.4 大林算法……236
8.5 多输入多输出系统……247
8.5.1 控制变量与被控变量的匹配……247
8.5.2 相对增益矩阵……250
8.5.3 解耦控制……253
8.5.4 对角矩阵解耦……253
8.5.5 前馈补偿解耦……254
8.5.6 解耦器的简化……255
8.5.7 数字解耦控制算法……256
习题 8……257
参考文献……258

第 1 章

绪论

1.1 过程控制系统应用举例

本节先给出几个过程控制系统的实例，以便同学们对过程控制系统有一个感性认识。

首先来看一个生活中常见的例子——淋浴过程。如图 1.1 所示，热水管和冷水管连接手动的三通控制阀，阀经管道连接到淋浴喷头，于是人站在喷头下就可以完成淋浴了。在这个过程中，为了洗澡舒服，需要将水温和水的流量调到合适的程度（水温高了会烫坏皮肤，水温低了会觉得冷；流量大了皮肤会感觉疼，流量小了又觉得洗得不过瘾，还可能洗不干净），于是我们需要控制的变量（被控变量）就为出水的温度和流量。如何实现感知温度和流量呢？答案是依靠皮肤，人的皮肤就是很好的温度和压力传感器。人在发现水温过高时就会用手去调节控制阀，将阀手柄的位置向左或向右，通过调节冷水和热水的混合比例改变温度，流量可以通过改变阀的开度来实现。由上述分析我们可以知道，淋浴过程中有人脑的决策，有温度和流量变量的检测，还有改变温度和流量的手动调节阀，最终完成这个管路系统出水温度和流量的调整。很明显，系统具备控制功能（人脑决策）、检测功能（感知温度和流量）、执行作用（手动调节阀），最终实现某些输出变量的控制，这是典型的过程控制系统。图 1.2 给出了该控制系统方框图。给定值为期望的温度，实际温度通过皮肤感知后传给大脑，这需要花一点时间（非常短），大脑通过期望值和实际感知值比较得到偏差，然后根据该偏差做出决策，若偏差大则需要改变阀的角度也大，偏差小则改变阀的角度也小。偏差为正时，即温度低了，阀的位置应偏向热水管；偏差为负时，即温度高了，阀的位置应偏向冷水管。大脑做出决策后输出命令给手，手去调节控制阀，调整好位置后，混合后的水经一段时间（与管道长度有关）后输出到喷头。

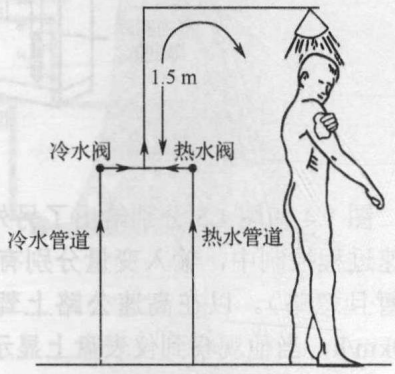


图 1.1 淋浴过程

第 2 个例子——室内加热过程。如图 1.3 所示，温度控制装置通过温度传感器（可以为热电阻或者集成温度传感器）检测室内温度，与期望的温度值比较，得到偏差，根据偏差的正负去控制继电器，以便实现对加热炉送风装置的开关控制。控制过程为：当温度高于设定值时，偏差为负，控制装置输出“0”信号，将加热炉及送风装置关闭；当温度低于设定值时，

偏差为正，控制装置输出“1”信号，将加热炉及送风装置打开。这个过程能实现室内温度的调节，也是典型的过程控制系统。

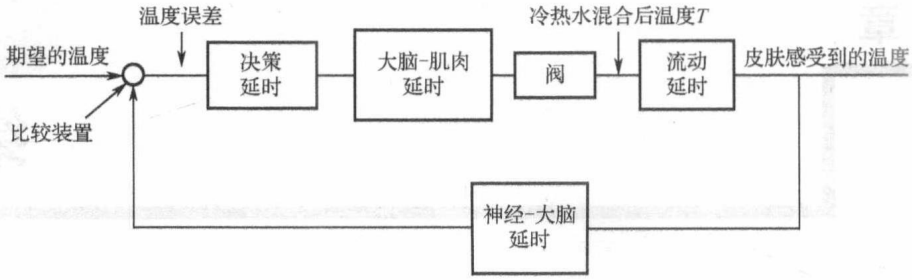


图 1.2　淋浴过程控制系统方框图

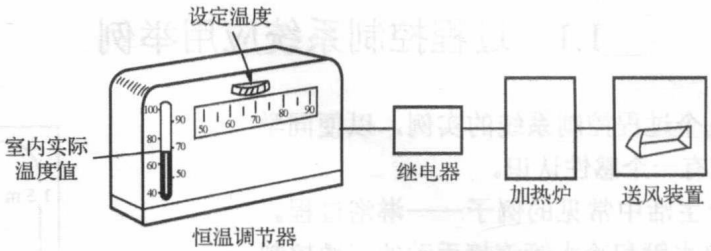


图 1.3　室内加热控制系统

图 1.4 和图 1.5 分别给出了另外两个过程——汽车车速过程控制和锅炉汽包水位。在汽车车速过程控制中，输入变量分别有摩擦力、发动机牵引力（当然还有风阻力和其他干扰，这里暂且忽略）。以在高速公路上驾驶为例，驾驶员希望以最高的不受惩罚的速度行驶，如 110km/h，当他观察到仪表盘上显示的车速超过 110km/h 时，大脑很自然地做出判断将油门减小，这样发动机牵引力减小，车速就会降下来；当驾驶员观察到车速低于 110km/h 时，他做出的决策就是增大油门，增加发动机输出扭矩，牵引力增大，车速得到提升。很明显，这个时候的控制器就是驾驶员，传感器就是人的眼睛，执行装置包括人的脚和油门装置。值得一提的是，在高速公路上驾驶时，驾驶员通常会使用自动巡航功能，这时他所做的任务就是将期望的行驶速度设定好，将注意力保持在方向控制上而不去管控油门，此时油门的控制由车载的 ECU 装置自动完成，此时的控制器是通过计算机实现的。

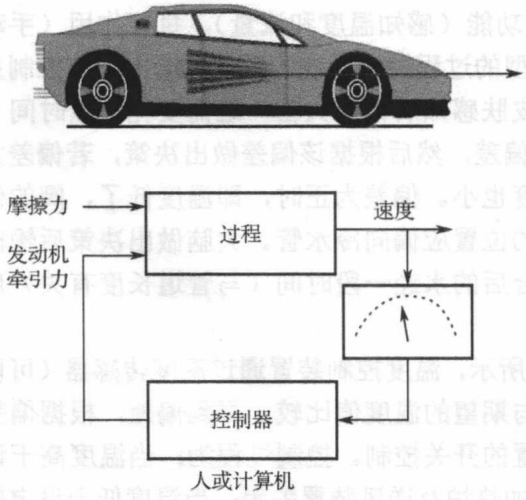


图 1.4　汽车车速过程控制

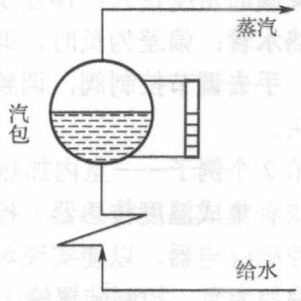


图 1.5　锅炉汽包水位

在锅炉汽包水位过程控制中，锅炉被加热后会产生蒸汽，当有蒸汽输出时，水位会下降，因此要及时补水。液位过低，会影响产汽量，且易烧干而发生事故；液位过高，影响蒸汽质量（可能会混入水），因此对汽包液位应严加控制。这样的系统是非常典型的工业过程控制系统。

以上示例属于较为简单的过程控制系统，工业上还有很多更加复杂的过程控制系统，如精馏过程、发酵过程、火电站或核电站，都是较为复杂的大型过程控制系统。图 1.6 所示为压水堆核电站典型三回路。图中，核反应堆产生热量将一回路中的水加热，一回路中的热水将蒸汽发生器中二回路中的水变成蒸汽，输出蒸汽推动汽轮机，带动发电机发电并输出给电网，整个电站涉及温度、压力、流量、液位的诸多控制回路，是典型的复杂过程控制系统。

当然过程控制系统的案例还有很多，这里不再一一列举。

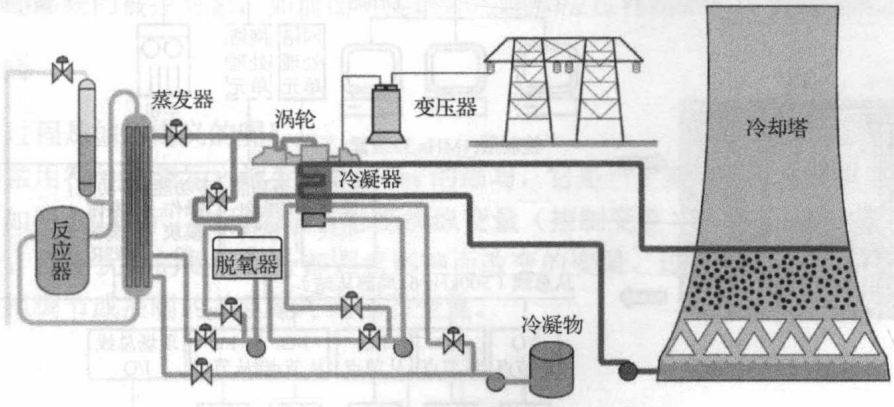


图 1.6　核电站

1.2　过程控制系统组成

本节介绍过程控制系统（控制系统）的基本概念和组成。

首先，我们来了解一下控制系统的基本功能。控制系统的功能为：在外部干扰的影响下，保持重要过程变量维持在期望值。在这里，过程变量往往是一些工厂中需要控制的变量，而外部干扰通常包括一些市场因素、经济因素、气候因素，以及一些其他的不确定干扰。控制系统就是能够克服这些扰动以保持重要变量满足要求，最终使得工厂或系统更加安全、利润更高、环境更友好。

控制系统的最终目标是为了确保以下几个方面的内容。

（1）使过程具有良好的操作性能，如使工厂工作效率更高。

（2）使过程更加安全，如使工厂不出生产安全事故、不爆炸等。

（3）使产品质量得到保证或者更高，例如，牛奶厂生产的奶粉要求含水量为 3%～5%，如果超过这个范围，则奶粉质量就易变差，而精确的控制可以保证质量。

（4）使整个系统对环境的影响最小化，如污水处理厂排放出的废水必须经过处理达标后才能排出，这依赖于污水处理控制系统。

1.2.1　控制系统

那么，什么是控制系统？它又由哪几部分组成的呢？

控制系统是由过程、检测元件或变送器、执行器和控制装置（控制器，通常是计算机系统）组成，并被设计和整定用来确保过程安全和赢利的系统。

如图 1.7 所示，控制系统通过传感器感知工厂的信息，并将该信息传输、处理、逻辑运算与决策，最终通过执行器来操作或控制工厂的过程变量。

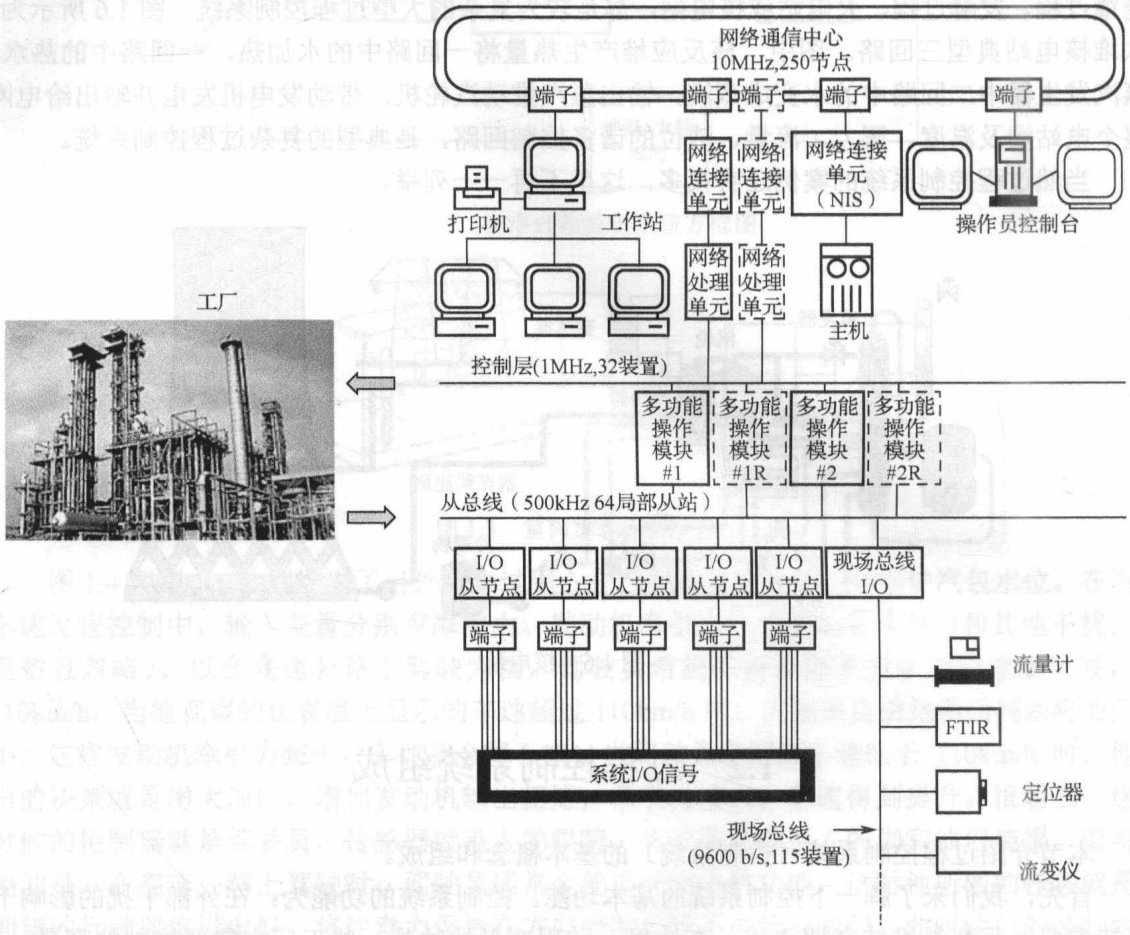


图 1.7　某工厂的控制系统

前面已经介绍过，控制系统由过程、检测元件或变送器、执行器和控制装置组成。图 1.8 所示是一个典型的控制系统的原理框图。

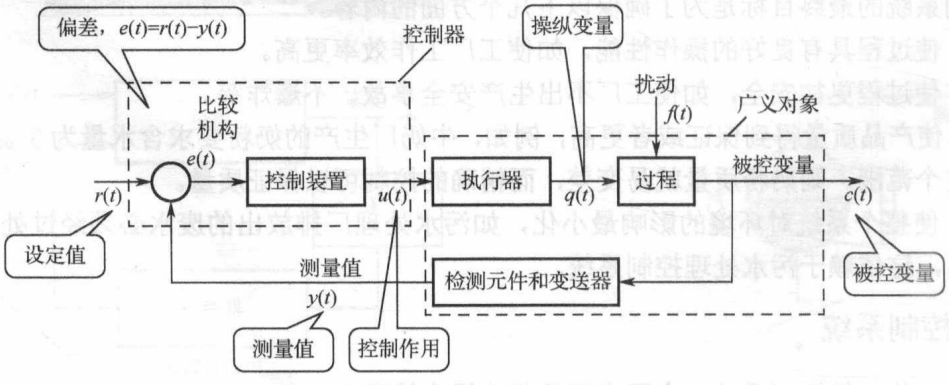


图 1.8　控制系统的原理框图

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 $y(t)$。

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，即偏差 $e(t)$。

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或控制信号 $u(t)$。通常这里的控制装置由硬件平台和软件控制规律组成，硬件平台通常由计算机（工控机、DSP、ARM、MCU 等数字平台搭建而成）搭建，软件控制规律通常是用某种语言（汇编语言、C 语言等）实现的 PID、MPC 或其他控制算法。比较机构和控制装置通常组合在一起，称为控制器。

执行器的作用是接收控制器送来的控制作用 $u(t)$，相应地去改变操纵变量 $q(t)$。常见的执行器包括电动机、水泵、调节阀、开关阀等。

过程即为系统的被控对象，如前面讲的锅炉汽包水位过程控制中，被控过程就是锅炉。

1.2.2　过程

那么，过程是如何定义的呢？

过程通常用符号 P 表示，是英文 Process 的缩写，它是一个接收输入变量并给出输出的装置或设备。如图 1.9 所示，过程的输入包括操纵变量（控制变量）和干扰，操纵变量就是可以操作的变量，而干扰指的是受到外部因素影响而改变的变量。过程的输出指的是被控变量，被控变量是拟调节或控制的并且是可观测的变量。

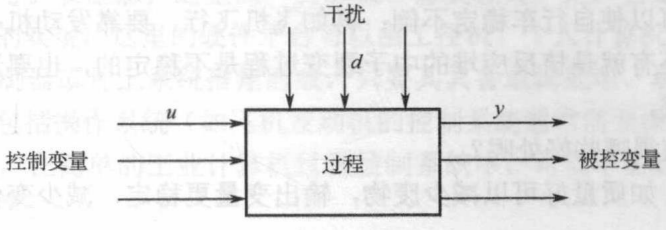


图 1.9　过程

接下来我们给出两个过程的例子。

第 1 个过程的例子是搅拌罐加热器，如图 1.10 和图 1.11 所示。在搅拌罐加热器这个过程中，温度为 T_{in}，流量为 ω 的物料进入加热器，被热功率为 Q 加热并被搅拌均匀后排出，出口的温度为 T，流量为 ω 不变。对于这个过程，T_{in}、ω、Q 是输入变量，输出变量为出口温度 T，输入变量中任意一个变量的改变都会影响出口温度 T。在 3 个输入变量中选择 1 个作为操纵变量，则其余不被操纵的变量称为干扰。

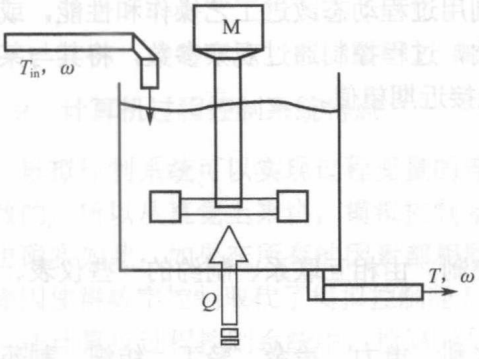


图 1.10　搅拌罐加热器

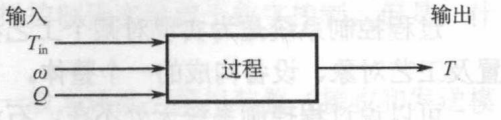


图 1.11　过程输入和输出

第 2 个过程的例子为汽车速度的过程，如图 1.12 所示，该过程输出变量为汽车的速度，输入变量有两个，一个为外部的摩擦力，另一个为汽车内部发动机提供的牵引力。通常发动机牵引力可以选为操纵变量，其可以通过控制油门踏板来实现；而外部摩擦力，如地面摩擦力，它是不能操纵或改变的变量，因此对于这个过程，摩擦力就是干扰。

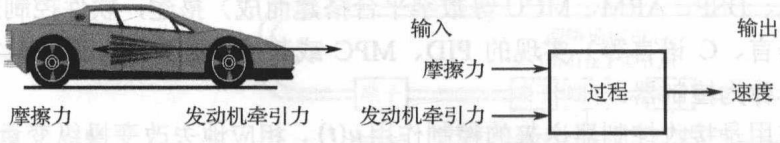


图 1.12　汽车速度的过程

思考：列举一个过程，并且指出它的输入变量和输出变量。

1.2.3　控制

前面我们已经介绍了过程，接下来介绍控制，什么是控制呢？它的具体作用如下。

（1）在有干扰的条件下调节过程的输出。

如驾驶汽车，保持一定的速度；控制化学反应器的温度，并且能克服温度和流量的影响；减少柔性结构中的振动现象。

（2）控制的另外一个作用是能够稳定不稳定的变量，如骑自行车，自行车本身是不稳定的系统，人骑上去可以使自行车稳定不倒；再如飞机飞行，要靠发动机去控制这个不稳定系统使其稳定飞行；还有就是核反应堆的中子裂变过程是不稳定的，也要通过控制其裂变过程获得稳定的链式反应。

那么控制可以获得哪些好处呢？

一是经济利益，如质量好可以减少废物，输出变量更稳定，减少变化，从而节省能源、材料和人力。

控制的另一个好处就是可操作性，并且能获得安全与稳定，可操作性保证获得高性能、高效率和准确性，可靠性和可稳定性都可使系统更安全。

什么是控制器？

控制器是用来调节被控过程的系统，过程通常服从物理和化学定律，而控制器则遵循数学和逻辑规律，甚至有时还是智能的。例如，骑自行车这个系统的控制器是人脑，人开车时的控制器也是人脑，如果是自动控制，其控制器通常是程控计算机。

接下来，我们给出过程动态和过程控制的概念。

过程动态是研究过程的暂态行为，过程控制是利用过程动态改进工艺操作和性能，或者使用过程动态来缓解不良（不稳定）过程行为的影响，过程控制通过观察参数，将其与某个期望值进行比较，并且启动控制动作，使参数尽可能接近期望值。

1.2.4　过程控制系统

过程控制系统的定义如下。

过程控制系统是为实现对某个工艺参数的自动控制，由相互联系、制约的一些仪表、装置及工艺对象、设备构成的一个整体。

可以说过程控制系统无处不在，石油、化工、水利、电力、冶金、轻工、纺织、制药、