



过程控制工程

GUOCHENG KONGZHI GONGCHENG

◎主编 梁昭峰 李兵 裴旭东



 北京理工大学出版社
BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

过程控制工程

梁昭峰 李 兵 裴旭东 主编



北京理工大学出版社

BEIJING INSTITUTE OF TECHNOLOGY PRESS

内 容 提 要

本书以工程应用为背景,详细介绍了过程控制工程的基本概念,重点介绍了各类控制策略的原理、结构、特点与应用。全书共分20章,第1章介绍过程控制基本概念、控制系统组成及控制技术的发展历程;第2章介绍过程检测和控制流程图用国际、国内石化行业部门、科学仪器厂商学会等图形符号、文字代号及工艺控制流程图的绘制;第3章~第11章介绍了常规控制系统,即简单控制系统、串级控制系统、比值控制系统、前馈控制系统、均匀控制系统、选择性控制系统、分程控制系统、双重控制系统、系统的关联与解耦;第12章~第15章介绍了典型化工单元的工业生产过程控制方案的应用,即流体输送设备的控制、传热设备的控制、精馏过程的控制、化学反应设备的控制;第16章介绍了控制系统工程设计;第17章~第20章介绍了几类常用的先进控制系统,即模糊逻辑控制、预测控制、自适应控制、神经网络控制。

本书可用做高等院校过程装备与控制工程专业及其他相关专业本科生专业课教材,也可用做从事过程控制领域工作的技术人员的参考书。

版权专有 侵权必究

图书在版编目(CIP)数据

过程控制工程/梁昭峰,李兵,裴旭东主编. —北京:北京理工大学出版社,2010.8

ISBN 978-7-5640-3284-5

I. ①过… II. ①梁…②李…③裴… III. ①过程控制-高等学校-教材 IV. ①TP273

中国版本图书馆CIP数据核字(2010)第117722号

出版发行/北京理工大学出版社

社 址/北京市海淀区中关村南大街5号

邮 编/100081

电 话/(010)68914775(办公室) 68944990(批销中心) 68911084(读者服务部)

网 址/http://www.bitpress.com.cn

经 销/全国各地新华书店

印 刷/保定市中国画美凯印刷有限公司

开 本/787毫米×1092毫米 1/16

印 张/25.75

字 数/601千字

版 次/2010年8月第1版 2010年8月第1次印刷

责任编辑/王玲玲

印 数/1~3000册

责任校对/张沁萍

定 价/60.00元

责任印制/边心超

图书出现印装质量问题,本社负责调换

前 · 言

本书是遵照过程装备与控制工程专业课程教学大纲要求编写的。它是北京理工大学过程控制教研室的教师们在多年教学实践基础上的经验总结；在编写过程中，编者参考了国内知名大学开设的过程控制工程专业本科生课程近 10 年教材的相关内容。

全书包括常规控制系统、先进控制系统、过程控制工程设计等基本内容。书中示例基本采自国内石油化工等流程工业中实际运行过或正在运行着的自动控制系统。编者将过程控制工程设计的主要内容涵盖在本书中介绍，以便于学生从工程角度对控制流程图与各章示例加以理解。对一些生产过程实际的控制问题采用解决方案不唯一的分析方法，以启发学生的创造性思维。

本书内容做到了主题突出，论述清楚，层次分明，每一种控制策略都介绍了其原理、结构、应用场合、工程实施中的问题等，并通过示例加以说明。整书编写由简单到复杂再到先进，符合循序渐进的科学思维方式。各章节内容符合我国工业化发展对过程控制工程师人才培养的社会需求。

全书由薛锦诚教授主审。共分 20 章，其中第 1 章 ~ 第 15 章由梁昭峰编写，第 16 章由裴旭东编写，第 17 章 ~ 第 20 章由李兵编写。

本书在编写过程中得到了北京理工大学教务处教材科、化工与环境学院、过程控制教研组有关老师的大力支持与帮助，特在此深表谢意。

鉴于编者水平所限，书中不足之处恳请读者批评指正。

编 者

目 录

第 1 章 绪论	(1)
1.1 生产过程自动化概念	(1)
1.2 生产过程及其特点	(1)
1.3 工业生产过程对控制的要求	(3)
1.4 生产过程自动化的发展历程	(4)
1.5 当前控制系统的发展趋势	(10)
第 2 章 过程检测和控制流程图用图形符号和文字代号	(14)
2.1 识图基础	(16)
2.2 识图练习	(29)
第 3 章 简单控制系统	(34)
3.1 简单控制系统的结构与组成	(34)
3.2 闭环控制系统的过渡过程及其性能指标	(37)
3.3 过程动态特性与建模	(40)
3.4 过程特性参数的实验测定方法	(48)
3.5 测量变送环节在控制系统设计中的问题	(50)
3.6 调节阀环节在控制系统设计中的问题	(54)
3.7 常规控制器的选型、整定和系统投运	(74)
3.8 被控变量和操纵变量的选择	(91)
3.9 简单控制系统设计举例	(94)
第 4 章 串级控制系统	(100)
4.1 串级控制系统的基本原理与结构	(101)
4.2 串级控制系统的设计和工程应用	(110)
第 5 章 比值控制系统	(120)
5.1 基本原理	(120)
5.2 比值控制系统的类型	(122)
5.3 比值系数 K' 的计算	(125)
5.4 比值控制系统的构成方案	(127)
5.5 比值控制系统的参数整定和投运	(130)
5.6 比值控制系统的几种变形	(130)
5.7 比值控制系统的设计和工程应用	(134)
第 6 章 前馈控制系统	(138)
6.1 前馈控制和不变性原理	(138)
6.2 前馈控制系统的设计和工程应用	(146)

第7章 均匀控制系统	(162)
7.1 均匀控制概述	(162)
7.2 均匀控制系统的类型	(164)
7.3 均匀控制系统的特点	(166)
7.4 其他需要说明的问题	(166)
7.5 调节器控制规律选择和调节器参数的整定	(167)
第8章 选择性控制系统	(169)
8.1 选择性控制系统概述	(169)
8.2 选择性控制系统的基本原理	(170)
8.3 选择性控制系统的基本结构和性能分析	(170)
8.4 选择性控制系统与其他控制系统的结合	(174)
8.5 选择性控制系统设计	(179)
第9章 分程控制系统	(183)
9.1 分程控制的基本原理、结构和性能分析	(183)
9.2 分程控制系统设计和工程应用中的问题	(187)
9.3 分程控制系统应用举例	(189)
9.4 分程阀总流量特性的改善问题(补充知识)	(191)
第10章 双重控制系统	(197)
10.1 基本原理、结构和性能分析	(197)
10.2 双重控制系统设计和工程应用	(201)
第11章 系统的关联与解耦	(206)
11.1 系统关联分析	(206)
11.2 相对增益法	(207)
11.3 解耦控制设计和工程应用	(214)
第12章 流体输送设备的控制	(224)
12.1 概述	(224)
12.2 泵和管路系统的静态特性与泵的控制方案	(225)
12.3 压缩机的控制	(229)
第13章 传热设备的控制	(243)
13.1 传热设备的特性	(243)
13.2 一般传热设备的控制	(245)
13.3 加热炉设备的控制	(252)
13.4 锅炉设备的控制	(255)
第14章 精馏过程的控制	(270)
14.1 精馏塔的控制	(270)
14.2 精馏塔的静态特性和动态特性	(274)
14.3 精馏塔质量指标的选取	(276)
14.4 精馏塔的基本控制方案	(280)
14.5 精馏塔的先进控制方案	(290)

第 15 章 化学反应器的控制	(300)
15.1 化学反应过程概述	(300)
15.2 反应器的数学模型	(303)
15.3 反应器的热稳定性分析	(304)
15.4 反应器的基本控制方案	(307)
15.5 反应器的复杂控制方案	(311)
第 16 章 过程控制系统工程设计简介	(317)
16.1 基本概念和任务	(317)
16.2 自控工程设计规定	(317)
16.3 自控专业工程设计文件的组成	(322)
16.4 自控专业工程设计文件深度的规定	(324)
16.5 自控工程设计阶段和职责划分	(327)
16.6 自控专业与其他专业的协作关系	(334)
第 17 章 模糊逻辑控制	(339)
17.1 概述	(339)
17.2 模糊集合及其运算	(341)
17.3 模糊关系	(345)
17.4 模糊逻辑推理	(347)
17.5 模糊控制的基本原理	(353)
第 18 章 预测控制	(364)
18.1 预测控制的基本原理	(364)
18.2 预测控制中的预测模型	(367)
18.3 模型算法控制 (MAC)	(369)
18.4 动态矩阵控制 (DMC)	(372)
第 19 章 自适应控制	(377)
19.1 概述	(377)
19.2 建模与系统辨识	(379)
19.3 自校正控制	(387)
第 20 章 人工神经网络控制	(395)
20.1 概述	(395)
20.2 感知器	(398)
20.3 多层前馈反向传播神经网络	(398)
参考文献	(402)

第 1 章

绪 论

1.1 生产过程自动化概念

生产过程自动化是指在石油、化工、电力、冶金、轻工、纺织、建材、医药、食品等工业中以连续性物流为主要特征的生产过程的自动控制，主要解决生产过程中的温度、压力、流量、液位（或物位）、成分（或物性）等过程参数的在线自动检测和控制问题。利用在生产设备、装置或管道上配置的自动化装置，部分或全部地替代现场工作人员的手动操作，使生产过程能在不同程度上自动地进行。这种用自动化装置来控制运转连续或间歇生产过程的综合性技术就称为生产过程自动化，简称为过程控制（Process Control, PC）。生产过程自动化是一门综合性的技术科学，涉及自动控制技术、检测技术、计算机技术以及生产工艺机理等相关知识。

1.2 生产过程及其特点

过程控制所面对的生产过程多种多样，其中生产设备的类型和规模差别比较大，过程进行的方式与方法也完全不同。只有对这些生产过程的特性进行深入的了解，才能有效地对它们实施自动控制。连续生产过程主要的形式有：传热过程、燃烧过程、化学过程、精馏过程、传质过程。

① 传热过程：一般是指通过冷、热流体之间的热量传递达到控制介质温度、改变介质相态或回收热量的目的。热量的传递方式有 3 种：热传导、热对流、热辐射。在实际传热过程中经常是几种方式同时发生。常见的传热设备有各种换热器、蒸汽加热器、再沸器、冷凝冷却器、加热炉等。

② 燃烧过程：是指通过燃料与空气混合后燃烧，并为生产过程提供动力和热源的过程。其中空气与燃料的比例是控制燃烧过程的关键因素。燃烧过程在过程工业中应用极广，比如热电厂的加热蒸汽锅炉、冶炼厂的各种冶炼炉及热处理炉、石化企业的加热炉、建材行业的干燥炉和各种窑炉等。

③ 化学过程：是指由两种或多种物料反应生成一种或多种目标产品的反应过程。决定化学反应质量的关键因素是反应条件的选择与控制。化学过程通常是在各类化学反应设备中进行，某些化学反应会在无任何外界干扰下突然发生变化，给生产过程造成事故或破坏。

④ 精馏过程：精馏过程是在多层塔板构成的精馏塔内进行的一种提纯或分离的过程。

由于塔板层数较多，塔内精馏过程作用较慢，但其对来自外界的干扰却很敏感，是一种难以自动控制的过程。

⑤ 传质过程：是指不同组分的分离与结合，比如液体和气体之间的解吸、汽提、去湿、湿润，不同非溶液体的萃取、结晶、蒸发或干燥等都是传质过程。该过程的目的是获得纯的出口物料，因此最终检验指标是物料的成分，这就对产品成分的测量与控制要求比较高。

上述各种生产过程的工作机理尽管不同，但它们并不独立存在，大多数生产工艺中通常是几种过程同时发生，比如，燃烧过程伴随着传热过程，精馏过程伴随着传热和传质过程，化学过程伴随着传热过程等。而且影响任何生产过程的参数都不止一个，不同参数的变化规律也不相同，对过程的影响作用也极不一样。即使对同一过程，在不同的操作条件或工况下，也会表现出完全不同的工作特性。有些生产过程的特性至今仍无法准确地用数学表达式来描述，只能用适当的简化方法来近似处理。

以上介绍说明生产过程具有复杂性、关联性、时变性、非线性、不确定性，在某些高温高压或有害介质存在的场合，还具有相当的危险性。生产过程的这些特点极大地促进了过程控制技术的发展，使得过程控制在自动控制领域乃至国民经济中都占有极其重要的地位。与其他自动控制系统比较，过程控制具有以下特点。

① 被控过程复杂多样。鉴于工业生产中工艺要求不同，产品品种不同，生产规模也有差异，从而使过程控制中被控过程的形式多样化。生产过程中充斥着物理变化、化学反应、生化反应，还有物质和能量的转换和传递。生产过程的复杂程度关系到对其进行控制的艰难程度，有的生产过程进行得缓慢，有的进行得迅速，不同生产过程要求控制的参数有异同，但要求控制的品质完全一样。不同过程参数的变化规律各异，参数之间相互影响，对过程的影响作用也极不一致。目前要正确描述这样复杂多样的对象特性尚不完全可能，工程上一般采用适当简化的方法来近似处理。虽然理论上存在适应不同对象的控制方法和系统，但出于对象特性辨识的困难，要设计出能适应各种过程的控制系统至今仍不是易事。

② 对象动态特性存在滞后和非线性。生产过程大多是在庞大生产设备中进行，比如热工过程中的锅炉、换热器、动力核反应堆等，对象的储存能量大，惯性也较大，设备内介质的流动或热量传递都存在一定的阻力，并且具有自动转向平衡的趋势。因此，当流入（或流出）对象的质量或能量发生变化时，由于存在容量、惯性和阻力，被控参数不可能立即产生响应，这种现象称为滞后。滞后的大小决定于生产设备的结构和规模，并同它的流入量与流出量的特性有关。生产设备规模越大，物质传输的距离越长，热量传递的阻力越大，造成的滞后就越大。一般说来，热工过程大多具有较大的滞后，它对任何信号的响应都会延迟一些时间，使输出、输入之间产生相移，容易引起反馈回路产生振荡，对自动控制产生十分不利的影晌。对象动态特性大多是随负荷变化而变化的，即当负荷改变时，其动态特性有明显不同，这就是非线性。如果只以较理想的线性对象的动态特性作为控制系统的设计依据，就难以得到满意的控制结果。

③ 过程控制方案丰富多样。实际工业过程复杂多样，生产过程中的工艺要求也越来越高，由此催生出多种类型的过程控制系统的控制方案。通常有单变量控制系统、多变量控制系统；有常规仪表过程控制系统，也有计算机集散控制系统；有提高控制品质的控制系统，也有实现特殊工艺要求的控制系统；有传统的PID控制，也有先进的控制系统，例如自适应控制、预测控制、解耦控制、推断控制和模糊逻辑控制等。

④ 过程控制系统主要分为定值控制和随动控制。定值控制是过程控制的一种主要控制形式,在多数过程控制系统中,设定值是保持恒定的或在很小的范围内变化,它们都采用一些过程变量,例如温度、压力、流量、物位、成分等作为被控变量,过程控制的主要目的在于减小或消除外界干扰对被控变量的影响,使被控变量能够稳定在设定值或者其附近,使工业生产达到优质、高产、低消耗与生产持续稳定的目的。随动控制系统的作用是克服一切扰动,使被控变量迅速、准确无误地跟踪给定值的变化。

⑤ 过程控制系统由规范化的过程检测、变送和控制仪表、执行装置组成,通过各种类型的仪表完成对过程变量的检测、变送和控制,并经执行装置作用于生产过程,实现对生产过程的自动监控。目前在生产上运行的控制系统都是通过必要的理论论证与计算,并经过长期的运行、试验、分析、总结出来的,通过采用现场工程整定即可获得满意的控制效果。

1.3 工业生产过程对控制的要求

工业生产对控制的要求是多方面的,随着工业技术的不断进步,生产工艺对控制的要求也越来越高,在目前发展阶段,主要归纳为安全性、稳定性、经济性3个方面。

① 安全性:是指整个生产运行过程中,能够及时预测、监控和防止发生事故,以确保生产设备和操作人员的安全,这是最重要、最基本的要求。为此,必须采用自动检测、故障诊断、越限报警、联锁保护以及容错技术等措施加以保证。

② 稳定性:是指当工业生产环境发生变化或受到随机因素的干扰或影响时,生产过程仍能连续地平稳运行,并保持产品质量稳定。生产过程中采用的各类控制系统主要是针对各种干扰而设计的,它们对生产过程的平稳运行起着关键性的作用。

③ 经济性:是指在保证生产安全和产品质量的前提下,以最小的投资、最低的能耗和成本,使生产装置在高效率运行中获取最大的经济效益。

目前,生产过程全局的最优化、环境保护,特别是资源的综合利用,随着市场经济发展竞争的日益加剧,对过程控制提出了一些新的高标准要求。例如,垃圾资源化处理生产中(垃圾焚烧产生热量用于发电或供热)的烟气净化处理系统,对二噁英、呋喃、重金属排放要严格执行国家或国际技术标准。工业生产中大系统的协调控制、最优控制以及决策管理系统正在研究之中,并逐步走向成熟。

过程控制的任务是在了解、掌握工艺流程和生产过程的各种特性的基础上,根据工艺生产提出的要求,应用控制理论对控制系统进行分析、设计和综合,并采用相应的自动化装置和适宜的控制手段加以实现,最终达到优质、高产、低耗的控制目标。

生产过程自动化对保证生产安全和稳定、降低成本与能耗、提高产品质量与产量、改善劳动条件、提高生产设备的使用率、促进文明生产和科技进步、提高企业经济效益和市场竞争能力、环境保护等都具有重要意义。目前,自动化装置已经成为大型生产设备不可分割的重要组成部分,没有自动控制系统,大型生产过程根本无法长时间正常运行。过程装备不仅指生产使用设备,而且包含自动化装置,现代化生产中二者缺一不可。将生产过程自动化的程度作为衡量工业企业现代化水平的一个重要标志的论点已经成为控制领域工程技术人员的共识。

1.4 生产过程自动化的发展历程

1. 过程控制系统的组成

过程控制系统通常是指工业生产过程中的自动化系统的被控变量如温度、压力、流量、物位、重量、尺寸、速度、成分等一些过程变量的系统，常规的过程控制系统流程示意图如图 1-1 所示。

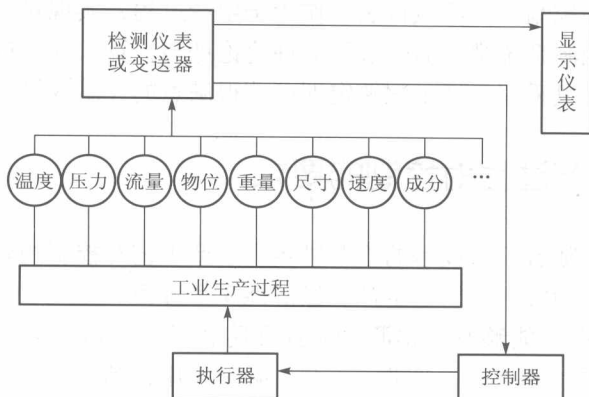


图 1-1 自动化仪表与生产过程之间的关系

在个人计算机还没有与工业自动化系统紧密结合的年代里，工业流程中发生的所有问题都是由训练有素且富有经验的操作员来检查和处理的。存在的问题是生产运行效率不高。计算机技术的产生与发展不仅催生了信息技术和网络技术，还推动了自动化技术的飞速发展。目前，以网络集成化系统为基础的企业信息管理系统广泛应用于各个工业现场。典型的工业自动化系统一般由这些部分组成：物理系统、传感器、设备驱动、数据输入/输出(I/O)、计算机主机、网络服务器和远程计算机。

物理系统、传感器、设备驱动、数据输入/输出(I/O)、计算机主机、网络服务器和远程计算机。

2. 过程控制系统的分类

过程控制系统的分类方法尚无原则性规定，按照被控参数划分，可分为温度控制系统、液位控制系统、压力控制系统、流量控制系统、成分控制系统等。按照控制系统处理信号划分，可分为模拟控制系统和数字控制系统。按照是否采用计算机划分，可分为常规仪表控制系统与计算机控制系统。按照控制系统功能划分，可分为串级、均匀、自适应等。按照系统控制算法规律划分，可分为P、PI、PID。按照系统组成回路划分，可分为单回路、多回路、开环控制、闭环控制。由于过程控制研究的主要是反馈控制系统的特性，按照设定值的形式不同，可将过程控制系统划分为以下几种。

(1) 定值控制系统

在工业生产过程中，大多要求将被控变量保持在规定的范围内变化，以保证生产过程平稳地顺利进行。此规定值就是控制器的设定值，这类系统引起被控量变化的因素是扰动信号，分为内扰或外扰。

(2) 随动控制系统

有些生产过程要求被控变量准确、及时地跟踪设定值的变化。随动控制系统的给定值可以随时间任意地变化，这类控制系统的主要作用是克服一切扰动，使被控量迅速、准确无误地跟踪给定值的变化，也称其为自动跟踪系统，在生产过程中多见于复杂控制系统。

(3) 程序控制系统

程序控制系统是指设定值按照生产工艺要求有规律变化的控制系统。此类控制系统将使

被控变量按规定程序自动变化，如间歇式生产干燥窖的周期作业，即加温—升温—保温—降温的过程控制；又如全自动洗衣机洗衣过程等均属于程序控制系统。

(4) 自动报警与联锁保护系统

这类系统是为生产安全运行设计的。在工业生产过程中，有时一些偶然因素，导致工艺变量超出允许的变化范围，若操作人员不采取措施就有可能引发事故。因此对一些关键的工艺变量，必须设置自动信号报警与联锁保护系统。当变量接近临界数值时，系统会发出声、光报警，提醒操作人员注意。当变量进一步接近临界值、工况接近危险状态时，联锁系统就立即采取紧急措施，自动打开安全阀或切断某些通路；必要时，紧急停车，以防止事故的发生和扩大。

3. 过程控制技术的发展

工业生产领域过程控制技术的发展是随着生产从简单到复杂，从局部到全局，从低级到高级的发展，经历了一个不断发展的过程。现代科技的进步出现了许多先进的自动化成套设备与装置，例如集散控制系统（Distributed Control System, DCS），现场总线控制系统（Field-bus Control System, FCS），可编程逻辑器（Programmable Logic Controller, PLC）等。生产过程控制逐渐由工业自动化仪表控制向计算机控制发展，常规 PID 控制向先进控制（Advanced Process Control, APC）、优化控制发展，生产过程自动化水平迅速从局部自动化向综合自动化发展。一般而言，过程控制技术的发展分为以下 3 个阶段（有些专家、学者将其分为 4 个阶段，二者的主要区别表现在 20 世纪 70 年代到现阶段的划分上）。

第一阶段（初级阶段）：20 世纪 30 年代工业生产规模比较小，设备相对简单，大多数生产过程处于手工操作状态，生产过程自动化局限于简单的检测仪表和笨重的基地式仪表，控制系统设计目的主要为维持生产平稳运行。20 世纪 40 年代末生产过程进入仪表化和局部自动化阶段，这个阶段用于系统设计和分析的自动控制理论主要是以频率法、根轨迹法为主体的经典控制理论。1942 年提出的 PID 控制回路的整定规则采用至今。对过程控制系统而言，其也称为模拟仪表控制系统（Analog Control System, ACS），检测控制仪表采用统一模拟信号（0.02~0.1 MPa, 0~10 mA）的基地式仪表、气动 I 型、电动 I 型系列单元组合仪表，将生产现场各处的参数送往集中控制室，操作人员在控制室综观生产过程控制指标的状况。控制系统结构是单输入—单输出单回路定值控制系统，主要解决当生产过程较为正常时，被控参数应满足工艺要求的控制指标问题。大多数测量仪表分散在各生产单元工艺设备上，操作人员巡视现场，查看仪表并采用相应的操作。常规单回路控制系统结构如图 1-2 所示。

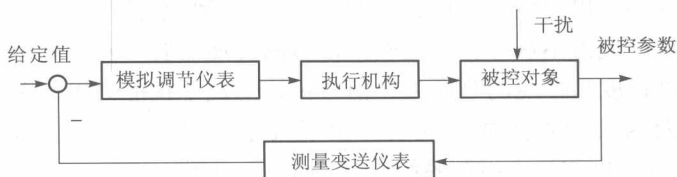


图 1-2 常规模拟单回路控制系统方块图

表 1-1 列出了在现代工业发展的各个阶段中过程控制系统的主要特点。

表 1-1 过程控制系统的发展

时间	技术背景及应用领域	过程控制系统的主要特点
1940—1950 年	技术背景：自动化生产雏形 应用领域：化工、钢铁、纺织、造纸	① 采用压缩空气作仪表动力源； ② 气动信号传输标准：20 ~ 100 kPa； ③ 少量电动仪表采用真空电子管； ④ 采用自动平衡记录仪作为记录仪表
1960—1970 年	技术背景：现代化工业过程规模大型化； 集成电路； 微处理器技术广泛应用 应用领域：工业生产各个领域	① 电动信号传输标准：DC 0 ~ 10 mA， DC 4 ~ 20 mA； ② 计算机辅助设计； ③ 自动机械工具； ④ 机器人； ⑤ 集散控制系统 DCS； ⑥ 可编程控制器 PLC
1980—1990 年	技术背景：办公自动化； 数字化技术； 通信和网络技术应用； 环境保护的要求 应用领域：工业生产各个领域	① 数字化仪表； ② 智能化仪表； ③ 先进控制软件
1990—现在	技术背景：智能化与优化控制。全集成自动化系统 CIPS 计算机集成过程系统出现 应用领域：工业生产各个领域	① 现场总线； ② 分析仪表的在线应用； ③ 优化控制

第二阶段（仪表化阶段）：20 世纪 60 年代以后，由于生产流程向大型化、连续化发展，工业过程呈现出非线性、耦合性、时变性，简单控制不能满足要求。为适应工业生产控制的要求，一些复杂的控制系统得以开发，并在实践中获得了良好的控制效果。在该阶段，气动 II 型（0.02 ~ 0.1 MPa）和电动 II 型（0 ~ 10 mA）单元组合仪表为主要控制仪表。控制系统结构出现多输入 - 多输出串级、比值、均匀、选择性等复杂控制系统。由于模拟控制器要完成复杂的控制运算已经力不从心，而且模拟信号的传递需要一对一的物理连接，所以信号变化缓慢，提高计算精度与速度的难度大，信号传输的抗干扰能力也较差。与此同时，数字计算机的发展与普及为实现直接数字控制提供了技术手段，产生了直接数字控制（Direct Digital Control, DDC），也称集中控制系统，如图 1-3 所示。

DDC 系统用一台计算机配以 A/D, D/A 转换器等输入/输出设备，从生产过程中获取信息，按照预先规定的控制算法算出控制量，并通过输出通道，直接作用在执行机构上，实现对生产过程的闭环控制。DDC 系统通过多路采样可以实现多路控制。DDC 控制方式不仅提高了系统的控制精度和控制灵活性，同时也集中了危险，一旦计算机出现故障，便会造成所

有控制回路瘫痪、停产的局面。而且由于只有一个中央处理单元（Central Processing Unit, CPU）在工作，多路分时操作，实时性差。系统越大，此缺点越突出。在 DDC 系统中，每个被控变量的给定值是预先设定并存入微机内存中的，它不能随生产负荷、操作条件、工艺信息的变化而及时修正，故此生产不能处于最优工况。该阶段除了仍然采用经典控制理论外，现代控制理论研究成功也为新的控制技术提供了理论基础。现代控制理论以状态空间为分析基础，包括以最小二乘法为基础的系统辨识，以极小值原理和动态规划为基础的优化控制和以卡尔曼滤波理论为核心的最优估计 3 个部分。因此，使分析系统的方法从外部现象深入到揭示系统的内在规律，从局部控制发展到了全局最优控制。现代控制理论在航天、航空和制导等领域取得了辉煌的成果，在过程控制领域内也得到了广泛应用，有模型预测控制算法、模糊控制算法、计算机仿真等。监督计算机控制系统（Supervisory Computer Control, SCC）是将操作指导和 DDC 结合起来的控制系统，计算机可以对生产过程中的参数进行巡检，按照所设计的控制算法进行计算，将计算出的最佳设定值直接传递给 DDC 系统的计算机，由 DDC 系统的计算机控制生产过程，实现分级控制。SCC 系统改进了 DDC 系统在实时控制时采样周期短的缺点，可以完成较为复杂的计算，可实时实现最优化控制。SCC 系统如图 1-4 所示。

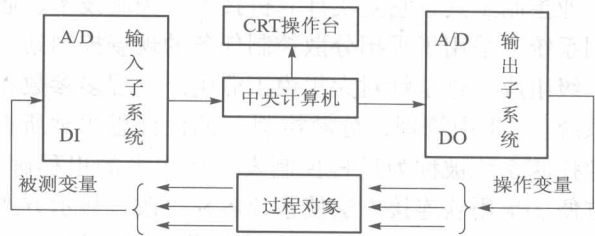


图 1-3 直接数字控制系统结构图

第三阶段（综合自动化阶段）：20 世纪 70 年代以后，为解决大规模复杂系统的优化与控制问题，现代控制理论和系统理论相结合，逐步形成了大系统理论（Mohammad, 1983）。其核心思想是系统的分解与协调，多级递阶优化与控制时应用大系统。实际上，除了高维线性系统外，大系统理论仍未突破现代控制理论的基本思想与框架，对其他复杂系统仍然束手无策。同时，基于专家知识的专家系统、模糊逻辑控制、人工神经网络控制、学习控制和基于信息论的智能控制也应运而生，并在很多领域得到了广泛应用。正是由于控制理论和其他学科相互渗透，从而形成了以大系统理论和智能控制理论为代表的所谓第三代控制理论。直到现在，尽管它还处于发展和完善中，但已受到极大的重视和关注，也取得了很大的进展。此阶段工业领域的一项最大成就是大规模集成电路和微处理器的产生，它加速了工业计算机的商品化和计算机技术的普及和发展。以微处理器为主要构成单元的智能仪表，PLC，DCS，工业 PC 机成为控制装置主流，最优控制、非线性分布式参数控制、解耦控制等控制系统相继出现。

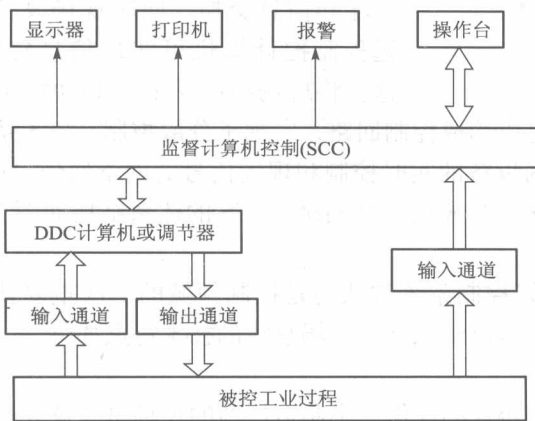


图 1-4 监督计算机控制系统的控制结构

集散控制系统（DCS）是为了满足工业计算机的可靠性和灵活性的需要而产生的一种全

新工业控制工具,它是集计算机技术、控制技术、通信技术和图形显示技术于一体的计算机控制系统,采用了承担分散控制任务的现场控制站与具备操作、监视、记录功能的操作监视站二级组成。这是针对大规模工业生产过程多参数和多控制回路特点而建立的一种分散型控制系统。“集中管理,分散控制”的设计思想被所有大型过程控制系统接受并应用到现在,集散控制系统被称为过程控制发展历史上的里程碑。DCS与模拟控制系统相比较,具有连接方便、采用软连接方法使系统容易更改、显示方式灵活、显示内容多样、数据存储量大等优点;与DDC系统比较,它具有操作监视方便、危险分散、功能分散等优点,因而迅速成为工业控制系统的主流,20世纪90年代DCS处于鼎盛时期。集散控制系统的基本组成如图1-5所示。

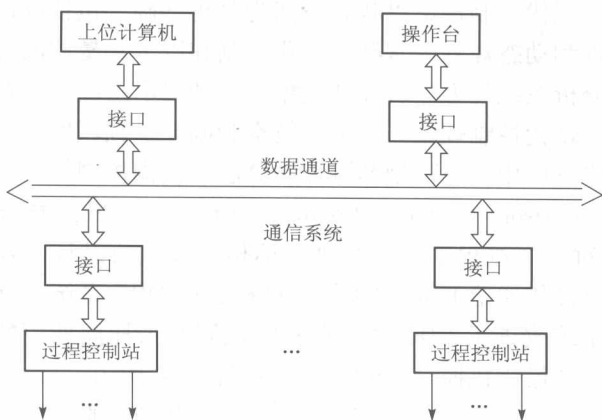


图 1-5 集散控制系统的基本组成

20世纪90年代后期,许多工控公司在DCS基础上着手开发一种适用于工业环境的网络结构与网络协议的现场总线及现场总线仪表。现场总线控制系统(FCS)就是通过现场总线将工业现场具有通信功能的智能化仪器仪表、控制器、执行机构、无纸记录仪等现场设备和通信设备连接成网络系统。连接在总线上的设备之间可直接进行数据传输和信息交换。同时现场设备和远程监控计算机可实现信息传输。这就将现场控制站的控制功能下移

到网络的现场智能设备中,通过现场仪表就可以构成控制回路,实现了分散控制。FCS系统较好地解决了过程控制的两大基本问题:现场设备的实时控制和现场信号的网络通信。FCS的主要特征是全数字化、全分散化、可互操作、开放式互连网络。FCS的体系结构如图1-6所示。

实现自动化的工具由DCS发展到现场总线控制系统被认为是控制领域的一次重要技术变革,所谓的过程控制发展的第四阶段提法正是出于此处。现场总线技术特点如下。

(1) 开放性

现场总线是开放网络。符合现场总线通信协议的任何一个制造厂商的现场总线仪表产品都能方便地连接到现场总线通信网,符合通信标准的不同制造商的产品可以互换或替换,而不必考虑该产品是否是原制造商的产品。因此,用户可以购置不同制造商的现场总线产品,把它们集成在一个控制系统中,并进行信息的互相交换。

(2) 智能化

现场总线仪表把微处理器引入仪表,使仪表本身成为网络的一个节点(网络上的通信设备,每个节点有不同的地址便于对其进行询问和发送信息),并参与通信。在现场总线仪表中可完成原来需在分散过程控制装置或回路控制器中才能完成的各种运算和控制。因此,在现场就可以完成控制系统的各种基本功能要求,送控制室的数据全部是数字信号,保证了功能的自治性(指现场设备可独立于中央控制计算机完成测量、控制、保护和自诊断等功能)。

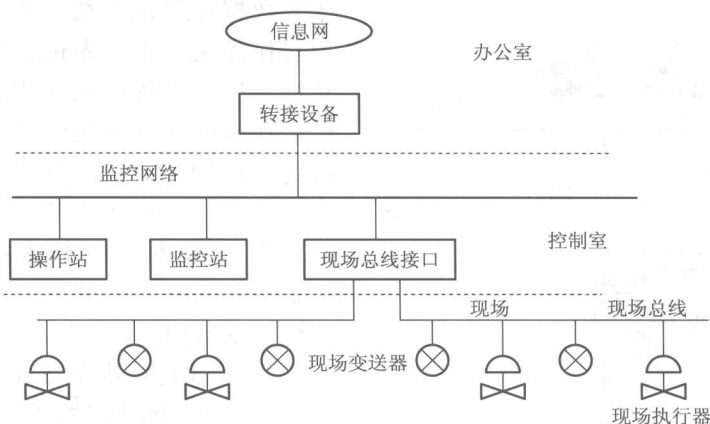


图 1-6 FCS 的体系结构

(3) 互操作性

互操作性包含设备的可互换性和可互操作性。可互换性是指不同厂商的设备在功能上可以用同一功能的其他厂商同类设备互换。可互操作性是指不同厂商的设备可互相通信，并能在各厂商的环境中完成其功能。

(4) 环境适应性

现场总线是专门为连接各类智能化现场监控设备设计的，因此必须能支持不同现场环境提供的各类通信介质，如双绞线、同轴电缆、电力线、无线介质、光缆等多种类型；对电磁干扰的抗扰性强；可实现本质安全防爆回路；可总线供电等。

(5) 系统认同 ISO/OSI 开放系统互连模型标准

现场总线控制系统作为一种开放式系统，无论采用自定义总线还是当前流行的各类现场总线，其体系结构都应符合 ISO/OSI 模型。现场总线技术的发展也推动了现场总线仪表的发展。为满足现场总线通信的开放和互操作性的要求，现场总线仪表应是智能仪表。它具有互操作性、互换性、可靠性、混合性、采用数字通信、智能化、分散性等特点。现场总线控制系统把控制功能彻底分散到现场总线仪表，真正实现了分散控制的功能。现场总线控制系统需要有类似 DCS 中分散过程控制装置的控制软件，一些要进行人-机信息交换的现场总线仪表还需有类似操作管理装置的人机接口及管理软件。现场总线控制系统软件包括现场总线组态软件、维护软件、仿真软件、现场设备管理软件和监控软件等。现场总线控制系统是适应综合自动化发展需要而诞生的，它是仪表控制系统的革命。

目前，现场总线技术已经从研发、试验、局部和小系统运用开始进入到复杂系统和大型工程项目的大量应用阶段。随着信息技术的发展，管控一体化、综合自动化已经成为生产过程控制的发展方向，这是以智能控制理论为基础，以计算机与网络为主要手段，对企业的经营计划、调度、管理、控制全面综合，实现从原料进库到产品出厂的自动化与整个生产系统信息管理的最优化。此类系统由生产管理高级控制层、优化层、基础控制层三部分组成。这种集控制、优化、调度、管理等于一体并将信号处理技术、数据库技术、通信技术与计算机网络技术进行有机结合的综合自动化系统称为计算机集成过程系统（Computer Integrated Process System, CIPS）。CIPS 系统的关键技术有计算机网络技

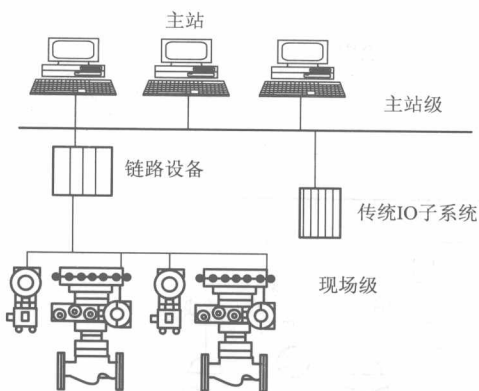


图 1-7 两层的自动化网络体系结构图

术、数据库管理系统、各种接口技术、过程操作优化技术、先进控制技术、软测量技术、生产过程的安全保护技术等。CIPS 已经在国内外的一些炼油与石油化工厂进行了应用。计算机集成制造系统 (Computer Integrated Manufacturing System, CIMS) 技术和 CIPS 技术在企业有着非常广阔的发展前景。图 1-7 是两层的自动化网络体系结构图。

图 1-8 是标准的主站级网络将分散的基于以太网标准协议的子系统集成在一起的效果图。

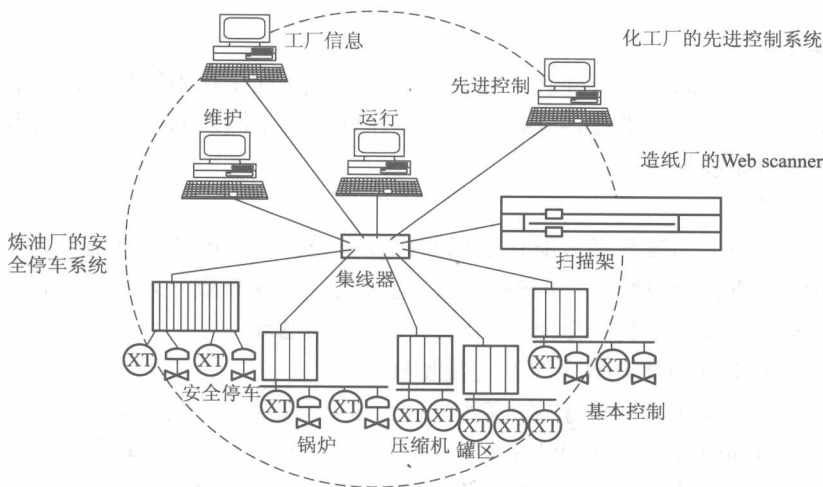


图 1-8 基于以太网标准协议的子系统集成图

1.5 当前控制系统的发展趋势

1. 生产装置实施先进控制成为发展主流

随着企业提出高柔性、高效益的要求，以及多变量预测等先进控制策略的提出与应用，先进控制受到了过程工业界的普遍关注。先进控制策略主要有解耦控制、时滞补偿控制、差拍控制、多变量预测控制、自适应控制、软测量技术及推断控制、稳健控制、专家控制、模糊逻辑推理和神经网络等智能控制，尤其智能控制已成为开发、研究和应用的热点。先进过程控制 (APC) 是指一类在动态环境中，基于模型、充分借助计算能力，为工厂获得最大利润而实施的一类运行技术策略。这种新的控制策略实施后，系统运行在最佳工况，实现了所谓的“卡边生产”。据相关资料报道，国外许多控制软件公司和 DCS 生产商都在竞相开发先进控制和优化控制的商品化工程软件包，西方国家大约有 45 家拥有一定规模的先进控制软