

仪器科学与技术学科研究生系列教学参考书

YIQI KEXUE YU JISHU XUEKE YANJIUSHENG XILIE JIAOXUE CANKAOSHU

JIDIAN XITONG JICHENG JISHU

# 机电系统 集成技术

JIDIAN XITONG JICHENG JISHU

董景新 刘桂雄 邓焱 编著



配电子课件



机械工业出版社  
CHINA MACHINE PRESS

仪器科学与技术学科研究生系列教学参考书

# 机电系统集成技术

董景新 刘桂雄 邓 焱 编著



机械工业出版社

集成化是机电系统的发展趋势。本教材较全面地论述和介绍了机电系统集成技术,包括系统集成的基本概念、系统集成的建模与仿真、系统集成的控制技术、系统集成中的接口和总线标准,以及仪器仪表系统集成技术、智能仪器软硬件集成技术、基于虚拟仪器技术的系统集成、微纳机电系统集成技术等。

本书适用于机械类、仪器类的高年级本科生、研究生和工程技术人员作为教材或从事工程技术工作时的参考。

### 图书在版编目(CIP)数据

机电系统集成技术/董景新等编著. —北京:机械工业出版社, 2009. 3

(仪器科学与技术学科研究生系列教学参考书)

ISBN 978-7-111-26266-4

I. 机… II. 董… III. 机电系统-系统工程-研究生-教学参考资料 IV. TH-39

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 020358 号

机械工业出版社(北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

策划编辑:王小东 贡克勤 责任编辑:王小东 版式设计:张世琴

责任校对:李 婷 封面设计:马精明 责任印制:李 妍

北京铭成印刷有限公司印刷

2009 年 5 月第 1 版第 1 次印刷

184mm×260mm·21.25 印张·527 千字

标准书号: ISBN 978-7-111-26266-4

定价:44.00 元

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

销售服务热线电话:(010)68326294

购书热线电话:(010)88379639 88379641 88379643

编辑热线电话:(010)88379728

封面无防伪标均为盗版

# 前 言

随着科学技术的发展和机电产品更新速度的加快，集成化已经成为机电系统的一种趋势。对于机电系统来说，系统的集成意味着将不同的功能模块，包括不同的传感器、中间变换装置、数据处理器、执行器、控制器和终端输出装置，以最优的形式结合在一起，以形成针对目标任务的功能实体或系统。集成往往还贯穿着利用计算机进行信息和信息的传递，包括了信息的采集、传输、转换、处理、存储、显示和利用，将属于一个系统的各功能部件或模块，采用计算机软件集成技术按照一定的功能关系有机地组合在一起。

鉴于技术发展的这种趋势，迫切需要有相应的教材对其进行介绍。本教材正是在这种需求背景下，在仪器科学与技术学科研究生系列教学参考书编审委员会会议上被推荐编写的。

本教材较全面地论述和介绍了机电系统集成技术，包括系统集成的基本概念、系统集成的建模与仿真、系统集成的控制技术、系统集成中的接口和总线标准，以及仪器仪表系统集成技术、智能仪器软硬件集成技术、基于虚拟仪器技术的系统集成、微纳机电系统集成技术等，同时本教材还提供了系统集成应用的3个实例。

本教材的第4章由刘桂雄教授编写，第7章和第9章的9.1节由邓焱副教授编写，其余各章节由董景新教授编写，全书由董景新教授汇总统编。

本教材的编写得到了教育部仪器仪表教学指导委员会和全国仪器仪表学会专家和机械工业出版社领导的支持，在此一并表示衷心的感谢！

**编著者**

# 目 录

前言	
第 1 章 绪论	1
1.1 系统集成的提出和发展	1
1.2 系统集成的基本概念	5
1.2.1 系统	5
1.2.2 系统集成	6
1.2.3 系统集成的特点	7
1.2.4 系统集成的原则与方法	7
1.2.5 网络要求	8
1.2.6 递阶控制	9
1.3 网络系统集成	9
1.3.1 集成的基本结构形式	9
1.3.2 物理层配置	11
1.3.3 应用层	12
习题与思考题	12
第 2 章 系统集成的建模与仿真	13
2.1 系统需求分析	13
2.2 系统建模	13
2.2.1 数学模型的定义和一般描述	14
2.2.2 模型的分类	15
2.2.3 数学建模及其过程	16
2.2.4 数学建模方法	16
2.2.5 机电设备系统建模	19
2.2.6 计算机信息集成系统建模	21
2.2.7 系统辨识技术	21
2.2.8 计算机辅助建模	27
2.2.9 系统建模的发展趋势	28
2.3 系统的仿真	28
2.3.1 模拟仿真	29
2.3.2 仿真数字机系统的结构体制	29
2.3.3 计算机仿真	30
2.3.4 多媒体仿真技术	31
2.3.5 虚拟现实与分布式虚拟现实技术	32
2.3.6 一体化仿真技术	33
2.3.7 MATLAB/SIMULINK 仿真平台	34
2.3.8 速度环仿真实验	43
2.3.9 位置环仿真实验	49
习题与思考题	53
第 3 章 系统集成的控制技术	54
3.1 分布式控制系统	54
3.1.1 分布式控制系统的结构	54
3.1.2 分布式控制系统的特点	54
3.1.3 工程师工作站和组态软件	55
3.1.4 分布式控制系统的评价与选择	55
3.1.5 分布式关系数据库系统	56
3.2 现场总线控制系统	57
3.2.1 现场总线的本质含义	57
3.2.2 几种典型的现场总线	57
3.2.3 系统组态	57
3.3 可编程逻辑控制	63
3.3.1 可编程序控制器的组成、原理及工作过程	63
3.3.2 可编程序控制器的逻辑表示及特性	64
3.3.3 可编程序控制器的常用编程指令	66
3.3.4 典型标准程序单元	70
3.3.5 编程方法	73
3.3.6 可编程序控制器的故障和抗干扰问题	79
3.3.7 可编程序控制器的简单应用实例	80
3.4 数字信号处理器	88
3.4.1 数字信号处理技术的发展	88
3.4.2 数字信号处理器芯片体系结构的主要特点	89

3.4.3 TMS320 系列数字信号处理器	89	5.2.1 接口概述	166
3.4.4 数字信号处理器的硬件开发过程	91	5.2.2 I/O 接口	167
3.4.5 数字信号处理器的软件开发过程	91	5.2.3 A/D 和 D/A 接口	170
3.5 嵌入式控制器	92	5.2.4 中断	175
3.5.1 嵌入式系统的含义及分类	92	5.3 仪器仪表应用于计算机集成系统	177
3.5.2 PC-104 总线嵌入式微计算机	93	5.3.1 数据的融合与综合利用	177
3.5.3 单片机的发展和应 用	95	5.3.2 网络体系结构与网络协议	178
习题与思考题	98	5.3.3 Internet/Intranet	184
<b>第 4 章 系统集成中的接口和总线标准</b>	99	习题与思考题	189
4.1 系统集成中的接口标准	99	<b>第 6 章 智能仪器软硬件集成技术</b>	190
4.1.1 RS-232 串行数据通信接口标准	99	6.1 智能仪器及其组成	190
4.1.2 RS-485 串行数据通信接口标准	103	6.1.1 智能仪器的工作原理	190
4.1.3 USB 串行数据通信接口标准	107	6.1.2 智能仪器的组成及特点	191
4.1.4 IEEE1394 串行数据通信接口标准	114	6.2 智能仪器的硬件智能处理	194
4.1.5 GPIB 并行数据通信接口标准	120	6.2.1 硬件故障的自检	194
4.2 系统集成中的系统总线标准	126	6.2.2 自动测量功能	196
4.2.1 VME 总线标准	127	6.3 模糊理论	197
4.2.2 VXI 总线标准	133	6.3.1 模糊理论的产生和发展	197
4.2.3 PCI 总线标准	139	6.3.2 模糊数学的相关概念	198
4.2.4 PXI 总线标准	146	6.3.3 模糊推理	201
4.2.5 PC-104 总线标准	149	6.3.4 模糊控制系统的基本结构及控制原理	203
4.2.6 工业现场总线标准	153	6.3.5 模糊控制器的基本类型	205
习题与思考题	160	6.3.6 MATLAB 模糊逻辑工具箱	210
<b>第 5 章 仪器仪表系统集成技术</b>	162	6.4 神经网络	211
5.1 仪器仪表系统集成	162	6.4.1 神经网络的产生和发展	211
5.1.1 仪器仪表系统集成的基本设计方法	162	6.4.2 人工神经元模型	213
5.1.2 现代传感技术在仪器仪表集成系统中的作用	164	6.4.3 网络结构及工作方式	216
5.1.3 仪器仪表系统集成的一体化设计	165	6.4.4 神经网络的学习方法	218
5.2 仪器系统集成中的计算机接口技术	166	6.4.5 BP 算法	220
		6.5 遗传算法	226
		6.5.1 遗传算法的产生和发展	226
		6.5.2 遗传算法中的基本概念和术语	228
		6.5.3 遗传算法的基本设计步骤	229
		6.5.4 遗传算法的基本操作	232
		6.5.5 借助 MATLAB 软件工具运行遗传算法	234

习题与思考题 .....	237	8.3 微机电集成系统设计 .....	281
<b>第7章 基于虚拟仪器技术的系统集成</b> .....	238	8.3.1 基本设计方法 .....	281
7.1 虚拟仪器技术概述 .....	238	8.3.2 SoC 技术 .....	281
7.1.1 虚拟仪器技术的产生和发展 .....	238	8.4 纳机电系统概述 .....	285
7.1.2 虚拟仪器系统的组成 .....	238	8.4.1 纳机电系统的特性 .....	285
7.1.3 虚拟仪器系统的技术特征 .....	239	8.4.2 纳机电系统的应用 .....	286
7.1.4 虚拟仪器系统的特点 .....	240	8.4.3 纳机电系统的相关基础理论 .....	288
7.1.5 虚拟仪器软件技术基础 .....	240	8.4.4 纳机电系统的制作方法 .....	288
7.1.6 虚拟仪器硬件技术基础 .....	242	8.4.5 纳机电系统器件的驱动与检测 .....	288
7.2 独立仪器系统集成 .....	245	习题与思考题 .....	289
7.2.1 独立仪器系统集成的应用背景 .....	245	<b>第9章 典型系统集成应用实例</b> .....	290
7.2.2 独立仪器系统集成的核心技术——仪器控制 .....	245	9.1 基于虚拟仪器技术的图像采集分析系统集成实例 .....	290
7.2.3 独立仪器系统集成的实现 .....	246	9.1.1 引言 .....	290
7.3 模块化仪器系统集成 .....	252	9.1.2 TVS—2000 红外热像采集分析系统 .....	291
7.3.1 模块化仪器系统集成的应用背景 .....	252	9.1.3 系统性能的实验验证 .....	294
7.3.2 模块化仪器系统集成的核心技术——PXI 总线 .....	252	9.1.4 结论 .....	297
7.3.3 模块化仪器系统集成的实现 .....	255	9.2 惯性仪表自动测试系统实例 .....	298
7.4 网络化仪器系统集成 .....	256	9.2.1 性能指标要求 .....	298
7.4.1 网络化仪器系统集成的应用背景 .....	256	9.2.2 总体方案 .....	298
7.4.2 网络化仪器系统集成的核心技术——DataSocket 协议 .....	257	9.2.3 部件选择 .....	301
7.4.3 网络化仪器系统集成的实现 .....	258	9.2.4 控制器及接口电路 .....	307
习题与思考题 .....	264	9.3 梳齿式微机电系统加速度计实例 .....	314
<b>第8章 微纳机电系统集成技术</b> .....	265	9.3.1 功能和指标要求 .....	314
8.1 微机电系统概述 .....	265	9.3.2 总体方案 .....	314
8.1.1 微机电系统的产生和发展 .....	265	9.3.3 微机电系统加速度计敏感元件结构的设计 .....	315
8.1.2 微机电系统的基本概念 .....	266	9.3.4 微机电系统加速度计敏感元件结构工艺 .....	320
8.1.3 微机电系统集成的主要特点 .....	267	9.3.5 微机电系统加速度计伺服电路结构 .....	327
8.2 微机电系统的主要制作工艺 .....	269	9.3.6 梳齿式微机电系统加速度计测试结果 .....	329
8.2.1 表面加工技术 .....	270	参考文献 .....	332
8.2.2 体加工技术 .....	271		
8.2.3 键合封装技术 .....	279		

# 第 1 章 绪 论

在机电系统飞速发展的今天，创新和效率形成时代旋律中频频出现的加强音。人们发现，很多新产品从构思到出现在市场的周期越来越短，很多新产品是俗称“攒”出来、雅称“集成”出来的。人们还发现，原来很多孤立的仪器和机电设备有机地联系起来，产生了 $1+1>2$ 的效果，学科的交叉产生了性能优越的新产品；计算机以及计算机网络使一个个孤立的个体作为模块连成有机的整体，使自动化的规模越来越大，并从机电产品的自动化制作扩展到自动化设计、以至自动化规划。机电系统集成技术正是在这样的一些理念下发展起来的。

## 1.1 系统集成的提出和发展

系统有大有小，大的机电系统集成最典型的是计算机集成制造系统(Computer Integrated Manufacturing System, CIMS)，小的机电系统集成可以是一台设备、一台仪器、甚至是整个系统集成在半导体芯片上(System-on-a-Chip, SoC)。

计算机集成制造的概念最早是美国人 Harrington J. 于 1973 年提出来的<sup>[1]</sup>，主要强调的一是系统集成的观点，二是信息的观点。

1988 年，我国 863 计划 CIMS 主题专家组提出“CIMS 是未来工厂自动化的一种模式。它把以往企业内相互分离的技术(如 CAD、CAM、FMC、MRP II 等)和人员(各部门、各级别)，通过计算机有机地综合起来，使企业内部各种活动高速度、有节奏、灵活和相互协调地进行，以提高企业对多变竞争环境的适应能力，使企业经济效益取得持续稳步的发展。”<sup>[2]</sup> 1998 年我国 863 计划提出的新定义进一步将计算机集成制造发展到现代集成制造。

为了降低成本、缩短开发周期和提高系统的可靠性，现代机电系统研制中广泛选用各种成品，而尽量减少自制元部件和自制专用设备的数量。硬件集成技术正是要解决如何以最优的性能价格比把来自不同供应商的硬件模块/单元进行整合，形成满足用户需求的机电系统。硬件集成技术贯穿于整个机电系统的设计与工程实现过程。随着大量货架产品的出现，机电系统的集成也变得越来越方便与快捷。但是，由于机电系统硬件集成涉及机电对象、测试设备、计算机软/硬件等多方面的理论和实践知识，所以硬件集成技术不仅依赖于思维的创新，也依赖于专业知识的扩展和交叉。

早在 20 世纪 60 年代，工业控制领域中就已引入了计算机。当时的计算机只是控制调节器的设定装置，具体的控制则由电子调节器来执行，这种系统又称为计算机监控系统。这种系统现在还有所应用，所不同的是当时所用的调节器是模拟量的电子调节器，而现在则使用了数字式的调节器。这种系统既采用了计算机，又采用了调节器，系统复杂，投资大，于是在 20 世纪 60 年代末期出现了用一台计算机直接控制一个机组或一个车间的控制系统。但是一旦计算机发生故障，整个机组或车间就会停顿工作，影响了这种系统的进一步推广应用。到 20 世纪 70 年代，随着电子技术的飞速发展，大规模集成电路的出现，其生产成本的大幅



度降低,出现了微处理器,为以微机为基础的分散控制系统奠定了物质基础。

1975年美国 Honeywell 公司首先推出了以微处理器为基础的 TDC-2000 总体分布式控制(Total Distributed Control, TDC)系统,实现集中管理、分散控制,称之为集散控制系统。

随后,世界上各著名仪表厂商都纷纷以数字控制代替了模拟控制,推出各种分布式控制系统(Distributed Control System, DCS)。起初的产品,多数是用一个 CPU 控制 8 个 PID 调节器回路。当 CPU 发生故障时,只影响 8 个回路。对车间而言,故障仅限于局部范围内,若及时采取措施,不至于影响全车间的生产,将危险分散化。随着 CPU 的大量生产及价格下降,出现了一个 CPU 控制 4 个或两个回路,以至用一个 CPU 控制一个回路的单回路数字式调节器。由于这种系统以数字控制代替了模拟控制,精度有所提高,而且具有集中管理、分散控制、危险分散、可靠性高、组态容易和扩展性强的优点,因此,很快得到了广泛的应用。

DCS 的出现使系统的控制方式发生了质的变化,是控制史上的一个里程碑。继 TDC-2000 之后,其他厂商吸收了计算机技术(Computer)、自动控制技术(Control)、数据通信技术(Communication)、CRT(Cathode Ray Tube)显示技术的所谓“4C 技术”,不断地完善和改进自己的产品。这个时期的代表产品有:日本横河公司的 GENTUM-XL,美国西屋公司的 WDPF, Honeywell 公司的 TDC-3000, ROSE-MOUNT 公司的 SM3, Foxboro 公司的 I/A 系列。值得一提的是西屋公司的 WDPF 系统,它采用了广播通信方式,在体系结构上采用“水平式”结构,使系统内各站处于平等的地位,而 Foxboro 公司的 I/A 系统是一种开放式的智能化体系,采用了这种开放式系统后可以方便地与其他厂商的设备进行互连。这个时期产品的特点是:精度高、可靠性强、模块化结构、智能化体系,系统已趋于成熟,得到用户的普遍接受。

20 世纪 80 年代迅速发展起来的个人计算机由于价廉及性能的扩展,很快从办公室自动化领域走进了控制自动化领域。在此基础上发展起来的工业控制计算机的出现更加快了 this 进程。从开始只限于小型的、专门的、局部的控制方式的应用,逐步扩大应用范围,将多个从事局部的或专门的控制功能的 PC 通过网络连接起来,形成分布式计算机系统。由于 Distributed 的中文含义可以是分布,也可以是分散,所以有人认为以 PC 组成的分布式计算机系统也可称为 PCS 系统。进入 90 年代以来,以工业 PC 为基础的 DCS 已成为一种新的发展潮流,将 DCS 又推到了一个新的发展高度。

由于技术的进步,工业 PC 的平均故障间隔时间(Mean Time Between Failure, MTBF)已大幅度提高,各种控制软件和应用软件也为 PC 进入控制领域铺平了道路。另外,适合于工业应用的网络技术的发展,对 PC 方式的 DCS 的广泛应用也起到有力的推进作用。

DCS 是以微处理器为基础的。进入 20 世纪 80 年代中后期,可编程序逻辑控制器(Programmable Logic Controller, PLC)也开始应用微处理器,而且也是分布式的,从这个意义上讲也可将其列入 DCS 的范畴。由于 PLC 应用了微处理器之后不再局限于逻辑功能,所以又有人称之为可编程控制器(Programmable Controller, PC)。由于个人计算机(Personal Computer, PC)的出现,为避免两者名称的混淆,可编程序控制器多数仍沿用 PLC 的名称。

PLC 早先是用继电器构成的逻辑型控制系统,广泛用于电气控制,如电动机的顺序控制。随后采用了半导体器件,但由于输出电流很小,最后仍需用继电器输出,所以一度限制了它的使用。当采用微处理器后,再加上其他方面的改进,使 PLC 的输出电流变大,且带

有PID调节的功能,所以相应得到了进一步的扩大使用。例如在炼铁高炉上料系统中已广泛采用PLC。在化工厂发生泄漏有毒气体等事故所采用的紧急事故切断装置也使用PLC。还有在核电站发生事故时采用的PLC有三重保护,用投票表决(1:2)的方法来决定是否产生保护作用,这也从一个侧面表明PLC在可靠性方面起到的重要作用。

由上所述,从广义上讲,DCS可分为仪表型、PLC型和PC型3种类型。

在系统越来越复杂,同时技术上进入数字化后,各厂商便开始独立创建相互关联产品相互连接的专有协议。不同厂商的产品由于协议不同而缺乏互操作性,这样就出现了一系列阻碍生产技术进一步发展的新问题。由于很难有厂商能提供一系列的优质优价产品来满足工业用户的全部需求,因此用户常常需要选择一些其他厂商的产品。不同厂商的产品采用不兼容的协议,导致将各个部分集成于同一网络时发生困难,从而形成了自动化生产的一个个“孤岛”。同时,由于协议的不同,也造成了现场仪表不能与系统集成而不能进一步发挥仪表的智能。

也有些大的产业集团着力开发出专有大系统,但这些大系统一方面在选择部件方面不可能是最优的,另一方面其用户又可以说实际上是被该厂商“锁定”了。为了保持系统的集成,用户不得不从该厂商购买不一定是最好但又很昂贵的部件,而且也只有该厂商才能对该系统进行扩展。此时,厂商已不再面对竞争,而是形成了垄断,其产品质量很容易停滞发展,而且备件及附件还可以漫天提价,这对用户会造成极大负担。

解决以上矛盾的出路就是制定一种独立于卖方的系统集成标准,标准化的总线网络顺势而生。网络是开放式系统的关键要素,因此进一步开发出具有互操作性的现场总线(Fieldbus)成为市场的迫切需求。

现场总线控制系统(Fieldbus Control System,FCS)于20世纪80年代开始发展,专家们开发新技术作为标准的国际通行的现场总线,以满足总线供电、安全运行、远距离通信等方面的要求,不少系统的供应商看到了市场发展的趋势,也纷纷参加了标准的开发。标准化打击了垄断,激发了竞争,促进了科学技术的进步。

为了加快建立开放的现场总线标准,相关的开放性的组织既开发又维护这些技术,促进具有国际标准的开放性工作的进展。对于过程控制行业,1994年,世界各大厂商在原有基础上成立了现场总线基金会,制定现场总线标准和进行产品开发。到1994年已经形成了现场总线基金会及Profibus国际组织。

由于基金会现场总线及Profibus都源自ISP(In System Programmability)技术,因此两种技术中模块的概念、参数、模式及状态都非常相似。1996年已经颁布了低速总线H1标准,并使其进入实用阶段。现场总线可以节省硬件投资、节省安装费用,可提高系统准确性与可靠性。在基金会的H1技术发布后,现场总线基金会的高速以太网(High Speed Ethernet,HSE)在2000年推出。

由于某些大公司及国家希望自己现有的技术及国家标准被采纳成为国际的现场总线,推迟了对单一的现场总线标准的认可。尽管全世界至今还无法唯一认可某个标准协议,但已逐渐形成了一些大家相对认可的标准,包括基金会现场总线(Fieldbus Foundation,FF)、过程现场总线(PROcess Field BUS,PROFIBUS)、可寻址远程传感器数据通路(Highway Addressable Remote Transducer,HART)、控制器区域网(Controller Area Network,CAN)、局部操作网络(Local Operating Network,Lon Works)和世界工厂仪表协议(World Factory Instrument Protocol,

WorldFIP)等。各种协议相互之间不完全兼容。

标准一经建立,使用它们的工厂便开始受益,避免了系统因受制于某个单一厂商而产生的诸多弊端。标准的建立使得多个供应商可提供兼容的设备,这样就促进了开放竞争的市场,并进而促进设备价格的降低。采用该标准的工厂在设备及软件方面有更多的选择,选择的拓宽使它们为工厂各种各样的应用找到更好的解决方案,而无须在通信协议上花费太多精力。

在车间级或工厂级引入网络的计算机集成制造系统发展的同时,单台机电仪器设备的系统集成也随着嵌入式计算机的出现而迅速发展。

20世纪70年代,微处理器的出现,使嵌入式系统(Embedded Systems)成为可能。人们开始考虑将微型机嵌入到机电仪器设备中,实现对象体系的智能化控制。例如,将微型计算机经电气加固、机械加固,并配置各种外围接口电路,安装到舰船中构成自动驾驶仪系统。人们把嵌入到对象体系中,实现对象体系智能化控制的计算机系统,称为嵌入式计算机系统。

起初,人们将通用计算机系统进行改装,在机电设备中实现嵌入式应用。然而,对于大量如家用电器和仪器仪表等对象,采用嵌入通用计算机系统从结构的匹配到性能的采用都显得不协调。嵌入式系统与通用计算机系统的发展方向是不同的,前者侧重于控制功能和环境适应性等,而后者侧重于高速海量的数据文件处理能力。于是,嵌入式系统快速独立发展起来。

嵌入式系统发展的核心是单芯片化的发展。嵌入式系统迅速地将传统的电子系统发展到智能化的现代电子系统时代。嵌入式系统的定义为:“嵌入到对象体系中的专用计算机系统”。“嵌入性”、“专用性”与“计算机系统”是嵌入式系统的3个基本要素。对象系统则是指嵌入式系统所嵌入的宿主系统。只要满足定义中三要素的计算机系统,都可称为嵌入式系统。嵌入式系统按形态可分为设备级(工控机)、板级(单板、模块)和芯片级(MCU、SoC)。

嵌入式系统虽然起源于微型计算机,然而,微型计算机的体积、价位、可靠性都无法满足众多对象系统的嵌入式应用要求,因此,嵌入式系统走上芯片化道路,将计算机做一个芯片上,从而开创了嵌入式系统的单片机时代。

在探索单片机的发展道路过程中,有过两种模式,即“ $\Sigma$ 模式”与“创新模式”。“ $\Sigma$ 模式”本质上是通用计算机直接芯片化的模式,它将通用计算机系统的基本单元进行裁剪后,集成在一个芯片上,构成单片微型计算机;“创新模式”则完全按嵌入式应用要求设计全新的,满足嵌入式应用要求的体系结构、微处理器、指令系统、总线方式、管理模式等。Intel公司的MCS-48、MCS-51就是按照创新模式发展起来的单片形态的嵌入式系统(单片微型计算机)。MCS-51是在MCS-48探索基础上,进行全面完善的嵌入式系统。

单片机诞生于20世纪70年代末,经历了单片微型计算机(Single Chip Microcomputer, SCM)、微控制器(Micro Controller Unit, MCU)和单芯片系统(System on Chip, SoC)3大阶段。

单片微型计算机(SCM)主要是寻求最佳的单片形态嵌入式系统的最佳体系结构,在开创嵌入式系统独立发展道路上,Intel公司做出了很大贡献。

微控制器(MCU)主要的技术特点是:在满足嵌入式应用的同时,不断扩展对象系统要求的各种外围电路与接口电路,突显其对象的智能化控制能力。在发展MCU方面,Philips公司以其在嵌入式应用方面的巨大优势,将MCS-51从单片微型计算机迅速发展发展到微控

制器。

专用单片机的发展自然形成了单芯片系统(SoC)化趋势。随着微电子技术、IC设计、EDA(Electronic Design Automation)工具的发展,基于SoC的单片机应用系统设计还在不断发展。

嵌入式系统本身就是系统集成的成功实例。嵌入式系统包括了通信(Communication)、计算(Computation)、自动控制技术(Control)等功能,形成3C融合的信息产品;嵌入式系统包括数字模拟融合,微机电融合,电路板硅片融合,硬软件设计融合;嵌入式整机的开发工作从传统的硬件为主向软件比重越来越大的方向发展。

嵌入式系统是以应用为中心,以计算技术为基础,软件硬件可剪裁的应用系统,是对功能、可靠性、成本、体积、功耗等有严格综合性要求的专用计算机系统。它是一个技术密集,资金密集,高度分散,不断创新的基于硅片的知识集成系统。今天的嵌入式系统已普遍应用于国防电子、数字家庭、工业自动化、汽车电子、医学科技、消费电子、无线通信、电力系统等国家经济的主要行业。随着嵌入式技术的发展,嵌入式系统将更广泛地应用于机电集成系统中。

## 1.2 系统集成的基本概念

### 1.2.1 系统

系统至今尚没有统一的定义。

系统论创始人L.V.贝塔朗菲把系统定义为相互作用的诸要素的综合体。

国际标准化组织技术委员会(International Standards Organization Technical Committee, ISOTC)对系统的定义是:能完成一组特定功能的,由人、机器以及各种方法构成的有机集合体。

美国国家标准协会(American National Standards Institute, ANSI)对系统的定义是:各种方法、过程或技术结合到一块,按一定的规律相互作用,以构成一个有机的整体。

美国韦氏(Webster)大辞典对系统的定义:有组织的或被组织化的整体;结合着的整体所形成的各种概念和原理的综合由有规则的相互作用、相互依存的形式组成的诸要素集合。

日本的JIS标准对系统的定义为:许多组成要素保持有机的秩序,向同一目的行动的集合体。

《中国大百科全书·自动控制与系统工程》对系统的定义为:由相互制约、相互作用的一些部分组成的具有某种功能的有机整体。

系统从广义上可以定义为两个或两个以上事物组成的相互依存,相互作用,共同完成某种特定功能或形成某种事物现象的一个统一整体的总称。在工程领域,系统可以是机械的、电力的、电子的,其他物理的(声、光、热等)、化学的、生物的、医学的、……,或者是这些系统的某种组合。例如,机电系统是机与电的组合系统,特别是精密机械与微电子的综合集成系统。

大系统可以分解为若干小系统来进行研究,小系统可以组合成大系统,完成更为复杂的功能。

对于实际应用，系统一般可以定义为任何存在某种因果关系的物理装置或事物。“因”通常是输入或激励，“果”通常为输出或响应。通常，输入和输出都是物理变量，例如位移、速度、温度、压力、电压、电流等。一台机电设备可以成为系统，一款仪器仪表可以成为系统，一个元部件也可以成为系统，许多设备和仪器仪表还可以组成多输入多输出的大系统。

### 1.2.2 系统集成

把相互分离、彼此孤立的模块协调组成有机的整体就形成了系统集成的概念。集成能使组成整体的各部分彼此有机协调地工作，以发挥整体效益，达到整体优化的目的。因此集成不是各个分离部分简单捏合在一起组成的“拼盘”，而应理解为经过了充分的相互融合，形成了优化的统一整体。

系统集成可以减少数据冗余、实现资源和信息共享，便于对数据的合理规划和分布，便于组成部件的协调规划，有利于并行工作、提高工作效率。

集成的大系统通常包含着许多不同型号的各类计算机、控制器、传感器和执行装置，它们配置在不同的层次上，需要纵向和横向的数据通信。根据“集成”和“柔性”的要求，大系统集成网络平台在物理上包含着多个连接多种异构设备的异构网络，而在逻辑上又是统一的网络，以包容多样性和各种传输动作。状态、系统、控制和终端的连接多样性，以及开放、集成、高速和网络管理智能化是系统集成的特征。

系统集成是根据应用的需求，将机电硬件平台、网络设备、系统软件、工具软件及相应的应用软件等集成为具有优良性能价格比的机电系统的全过程。

所谓的系统集成就是按照应用需求，对众多的技术和产品进行合理地选择，最佳配置各种硬件和软件产品与资源，组合成完整的、能够解决具体应用需求的集成方案，使系统的整体性能最优，在技术上具有先进性，实现上具有可行性，使用上具有灵活性，发展上具有可扩性，投资上具有受益性。

系统集成工作包括硬件集成、软件集成和工具集成3个方面。

(1) **硬件集成** 指根据用户的需求，确定硬件平台设备的选型，这里还包括网络和服务。系统集成需要对已产品化的部件模块进行产品测试、验收以及提供对异种机、异种网络结构、异种数据库之间的连接技术，要求大量、广泛地掌握和积累各种产品特性，了解国内外有关的规范和标准，准备各厂商有关的产品的检测验收及工程安装施工标准。

(2) **软件集成** 指以操作系统为核心的软件平台的构建，已有应用软件和将要开发的应用软件的集成。应用软件开发部分的技术集成包括在软件开发管理、软件质量管理、文档管理及软件可维护性可靠性等多方面对应用软件开发商进行约束，以使得集成时可以取得对相应应用软件系统的控制权和维护权。必要时，可以通过预留接口对应用子系统进行适当的调整，以实现各个应用子系统的可互连、可互操作、可运行。集成工作实施的办法即在生成一大堆有关软件开发管理的规范、标准，并在集成工作中予以实施。

(3) **工具集成** 指使用开发工具进行系统开发，以迅速建立系统原型，结合应用实际，不断优化。使用开发工具更重要的是使系统的可维护性增强，系统扩充容易，提高系统开发的质量。开发工具本身要尽可能开放，符合开放系统的标准，独立于硬件平台及系统软件平台的选择，甚至能够独立于数据库的选择。这样才有利于系统的扩充和联网。开发工具本身

要有与高级语言的接口,有结构优良的数据字典,使各分立产品容易集成。同时,还要考虑开发工具制造厂商的技术支持、售后服务和厂商本身的稳定性等因素。

“系统集成”不只是“网络系统集成”,也包括单个机电仪器设备本身作为系统的集成。

### 1.2.3 系统集成的特点

系统集成特点如下:

(1) **系统分析和建模** 系统集成首先需要从系统的角度进行分析,包括系统目标、系统约束、系统联系、系统实现等,分析过程中需要通过建模仿真分析达到系统优化。

(2) **集成和优化** 系统强调总体,单元技术强调局部,单元通过集成形成总体,在系统集成过程中达到总体优化。

(3) **接口的重要作用** 接口是系统集成的技术关键点之一。系统集成的实质是让不同产品、不同设备互连,让不同网络、不同系统互连。对于系统集成,不仅要对产品、技术和系统有全面深入的了解和分析,还应具备设计开发接口的能力。

(4) **系统协调与优化** 系统协调与优化是系统集成的技术难点。当一个系统建造完成以后,可能会存在许多问题,需要进行调整或优化。产生问题的主要原因是:在系统集成过程中,注重的往往是产品、设备、技术、功能的集成或局部的系统调整,而一旦系统规模较大、结构较复杂时,就很难面面俱到,因此在系统集成过程中需要从全局着眼,保证全局最优。

### 1.2.4 系统集成的原则与方法

系统集成通过硬件平台、网络通信平台、数据库平台、工具平台、应用软件平台将各类资源有机、高效地集成到一起,形成一个完整的工作台面。系统集成的工作好坏对系统开发、维护有极大的影响,技术上应遵循以下原则:

(1) **开放性** 开放性是系统集成的需要,也是现代科学技术的时代标志,应在开放性的基础上进行机电系统的集成。

系统硬软件平台、通信接口、软件开发工具、网络结构的选择要遵循工业开放标准,这是关系到集成系统生命周期长短的重要问题。

一个集成系统,必然是一个开放的系统。只有开放的系统,才能满足可互操作性、可移植性以及可伸缩性的要求,才可能与另一个标准兼容的系统实现“无缝”的互操作,应用程序才可能由一种系统移植到另一种系统,不断地为系统的扩展、升级创造条件。

(2) **模块化** 集成系统设计的最基本方法是模块化系统分析设计方法。把一个复杂集成系统分解成相对独立和简单的子系统,每一个子系统又分解成更简单的模块,这样自顶向下逐层模块化分解,直到底层每一个模块都是可具体说明和可执行为止。这一思想是复杂集成系统设计的精髓。

(3) **先进性** 集成系统的先进性是建立在技术先进性之上的,只有先进的技术才有较强的发展生命力,系统采用先进的技术才能确保系统的优势和较长的生存周期。集成系统的先进性还表现在系统设计的先进性上:先进技术有机的集成、问题合理的划分、应用软件符合人们认知特点等。系统设计的先进性贯穿在系统开发的整个周期乃至整个系统生存周期

的各个环节。

(4) 主流化 集成系统构成的每一个产品应尽可能属于该产品发展的主流,这样便于有可靠的技术支持,成熟的使用环境,并具有良好的升级发展势头。

在系统集成的整个过程中,首先需要开展全面的调研工作。通过调研,收集大量技术资料,尤其是所选择的硬件产品、网络产品和软件产品的技术资料。在资料收集基础上,结合实际工作背景和经验、知识,剖析系统软硬件特性,全面掌握各种设备的配置、安装和测试方法。

其次,需要深入研究目标系统的特点。在全面体现需求的基础上,从系统上、全局上做好应用软件的集成工作。同时,密切关注新技术的发展,在系统开发中运用成熟、先进的技术。

在调研及分析研究基础上,制定详细系统集成方案。其中,开放性、可靠性、可扩展性以及可维护性是方案的重点研究内容,在方案中一定要分清哪些是当前必需的,哪些是后期工程所需的。

总之,系统集成的思想改变了以往所有元部件都要自己制作的开发模式,以前的模式开发速度慢、开发出来的产品落后,阻碍了我国创新产品的发展。现在系统集成给人们的新思想是:利用国内外所有先进成果,站在前人的肩膀上,别人已经做出的先进产品,不管是中国人做的还是外国人做的,要想办法拿来为我所用。这样做不仅可以为整个系统打下一个高质量的基础,建立高水准的开发起点,还可以减少大量的低水平的重复开发,大大加快机电系统建设的步伐。

### 1.2.5 网络要求

网络系统在大系统集成中扮演重要角色,需要基于网络系统来考虑可支持的计算机系统、数据库系统、开发工具等因素。经过对网络用户需求的分析,在网络方案设计时采用如下原则:

(1) 系统成熟可靠 在保证系统先进性的同时,最重要的设计原则是保证系统的可用性和可靠性,在方案设计中尽量采用成熟的、经过用户使用认可和公开评测中认可的网络产品。

(2) 标准化 所选用设备尽量符合国际和国家标准,保证系统提供一个标准、开放的网络平台。根据整个系统的实际需要,采用高可靠性设备和容错技术。

在网络通信协议、数据格式等方面遵从国际标准。网络的体系结构应尽量靠拢国际标准化组织(International Standards Organization, ISO)制定的开放系统互连参考模式(Open System Interconnect reference model, OSI) OSI/ISO;特别是低层连接通信子网所选的网络产品应该符合电气与电子工程师学会(Institute of Electrical and Electronics Engineers, IEEE)的 802 系列标准和国际电报电话咨询委员会(International Telephone and Telegraph Consultative Committee, CCITT)所规定的 X.25 公用分组数据网络规程等国际流行的标准。

网络低层应有支持多种通信体系标准的能力,它反应网络低层的开放性、互连性,便于适应不断发展的各种先进通信技术,连接各种通信网络以增加网络系统配置的灵活性,也便于局域网(Local Area Network, LAN)与广域网(Wide Area Network, WAN)的互连。

(3) 先进性 系统方案采用先进的技术,保证系统具有一定的前瞻性。采用的产品也

应该是业界一流的产品，并且是厂商重点研发的产品。网络系统能满足未来网络应用和扩充的需求。

(4) **投资保护** 所选用的设备易于升级、便于维护，符合技术发展方向，保护用户投资。

(5) **易于管理** 网络设备具有全面的网管功能，便于网管人员对系统的维护与管理。

(6) **产品与服务的长期性** 在该网络中，不仅选用生命力强的产品，还要求网络集成方有能力提供长期的专业化服务。

### 1.2.6 递阶控制

递阶控制方法是实现大系统集成控制的一种方法。递阶控制有下列几种不同的形式：

(1) **分层控制** 它是一种按控制任务进行分解的结构方案。它把控制任务分成几个不同的层次，由各层控制器分别完成。下层任务的目标函数受上层控制器决策的影响。

(2) **分级控制** 这是一种按对象结构进行分解的结构方案。它将对象划分成若干个系统，由各局部控制器完成现场控制任务，协调控制器通过控制递阶控制器完成局部控制器之间的协调。

(3) **分段控制** 这是按控制过程的时序进行分解的结构方案。它把控制过程分成若干段，在每段时间内由不同的控制器完成对现场的控制。

实际上，3种控制形式并不是绝对的，一种典型的控制结构中同时具有分级和分层两种形式是很常见的。这种同时具有多种递阶控制形式的控制结构有时又称为分级分布式控制。

## 1.3 网络系统集成

大系统集成很重要的方面是网络系统集成。系统通常包含着许多不同厂商的各种计算机、控制器和执行装置，它们配置在不同的层次上，需要纵向和横向的数据通信。根据“集成”和“柔性”的要求，大系统集成网络平台在物理上包含着连接多种异构设备的异构网络，而在逻辑上又是统一的网络，以包含多种设备的多样性，传输动作和状态要求的多样性，以及系统、控制和终端的连接多样性。开放、集成、高速和网络管理智能化是计算机网络发展的主要特征，它包括现场总线技术和工业 IT 技术。

### 1.3.1 集成的基本结构形式

现场的信号传输与系统的体系结构紧密相关，信号传输的每一次改进都促进系统在更大程度上的分散化以及对现场仪表更好的访问。

在早期的机械式仪表到气动仪表时代，控制器一般位于现场并就地进行操作，系统性很差。随着模拟电流回路的出现，实现了将现场仪表的信号传输到位于控制室的中央控制器，然后中央控制器再向现场的执行机构发出控制信号的控制。在集中统一的直接数字控制 (Direct Digital Control, DDC) 体系机构中，全部的控制策略是在同一计算机中完成的。由于所有的功能集中在一台计算机中，即使是计算机的很小的单一的故障也会使整个系统及其所有的回路瘫痪。其解决方法通常是在现场采用备用部件，一旦 DDC 出现故障，备用部件即投入运行。显然，集中的体系结构有着相当严重的有效性问题。到了 20 世纪 70 年代初期，分散控制系统 (DCS) 及可编程序控制器 (PLC) 体系结构便应运而生。



## 1. DCS 及 PLC 体系结构

DCS 与 PLC 是随着数字通信和计算机的发展而诞生发展的。因为 DCS 与 PLC 将控制分散在几个较小型的控制器中，每个控制器处理数十个左右的控制回路，因而它们在控制方面克服了 DDC 控制过于集中带来的弊端。这样，一个故障只会影响生产的一部分，而不像 DDC 会影响全厂。换言之，较大程度的分散增加了系统的有效性。

DCS 及 PLC 的体系结构的特点在于有常规 I/O(输入/输出)子系统，其中 I/O 模板组合通过 I/O 子系统网络分别连入中央控制器。现场仪表的主体是常规的模拟设备，通过控制层网络，控制器彼此间以及控制器同工作站间组成网络。在最顶层，还可以有一个工厂层网络将工作站连接到商务环境。经过多年的演变，DCS 可以带有使用专有协议的智能仪表相兼容的通信接口，因而也可提供某种程度的组态与检查。一个 DCS 系统通常有多达 4 层的不同网络，每层都有其不同的技术，即设备、I/O 子系统、控制器以及商务与全厂的集成。传统 DCS 及 PLC 体系结构含多个网络层次，如图 1-1 所示。

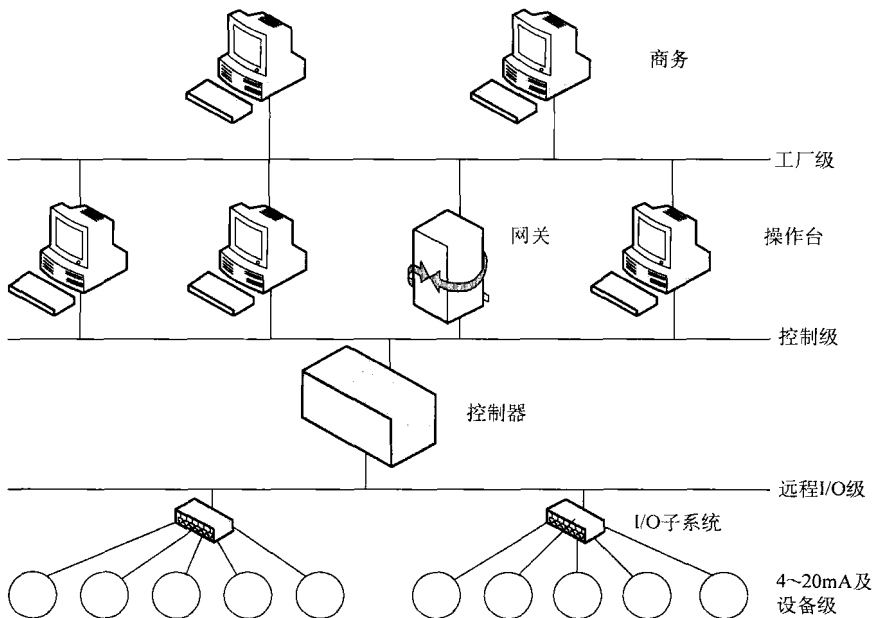


图 1-1 传统 DCS 及 PLC 体系结构含多个网络层次

尽管 DCS 相对 DDC 体系结构来说已经分散，但仍然相对集中。在这种体系结构下，一个故障虽然不会造成全厂瘫痪，但也会造成一定范围的影响。正因为如此，控制器、I/O 子系统网络、I/O 模板等不得不采取冗余技术，以避免整体失控，而每个层次的冗余也带来结构的复杂化和价格的上升。这样就进一步发展了分散性更大的现场总线控制系统(Field Control System, FCS)。

## 2. FCS 体系结构

FCS 体系结构是一种基于现场设备能力的更新型的体系结构，它不再以控制器为核心，现场总线把单个分散的测量控制设备变成网络节点，并把它们连接起来相互沟通信息，共同完成自动控制任务，如图 1-2 所示。FCS 同其他网络技术的差异在于，它不仅是一个通信协议，而且还是一个建立控制策略的编程语言。标准的编程语言同强有力的通信功能相结合使