

信息化与工业化 两化融合
研究与应用丛书

网络化控制系统 分析与设计

——切换系统处理方法

俞立 张文安 著

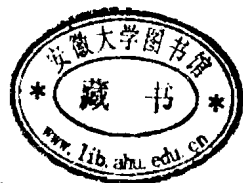
 科学出版社

信息化与工业化两化融合研究与应用丛书

网络化控制系统分析与设计

——切换系统处理方法

俞立 张文安 著



科学出版社

北京

内 容 简 介

本书结合作者的研究工作,详细介绍了基于切换系统处理的网络化控制系统建模、分析和设计方法。介绍了具有时延、丢包和通信受限网络化控制系统需要解决的几个根本问题,切换系统的一些基本概念和主要分析方法;重点介绍了具有时变时延网络化控制系统的建模、分析与设计方法,提出了解决指数时变项和时序错乱的一些有效方法;介绍了具有丢包的网络化控制系统建模、分析、稳定化控制器和滤波器的设计方法,建立了丢包过程特征参数与系统性能之间的定量关系;分析了具有丢包的网络化控制系统采样周期与系统性能之间的关系;介绍了具有通信受限网络化系统的建模、稳定化控制器和滤波器的设计方法;最后还介绍了 TrueTime 工具箱。

本书可作为从事自动控制工作的科研人员、工程技术人员,以及高等院校自动化及其相关专业教师、高年级本科生和研究生的参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

网络化控制系统分析与设计:切换系统处理方法/俞立,张文安著. —北京:科学出版社,2012

(信息化与工业化两化融合研究与应用丛书)

ISBN 978-7-03-033711-5

I. ①网… II. ①俞… ②张… III. ①计算机网络-自动控制系统-研究
IV. ①TP237

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2012) 第 039497 号

责任编辑:姚庆爽/责任校对:桂伟利

责任印制:赵 博/封面设计:黄华斌

科学出版社 出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码:100717

<http://www.sciencep.com>

北京佳信达欣艺术印刷有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2012 年 3 月第 一 版 开本: B5(720 × 1000)

2012 年 3 月第一次印刷 印张: 15 3/4

字数: 300 000

定价: 55.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

《信息化与工业化两化融合研究与应用丛书》序

传统的工业化道路，在发展生产力的同时付出了过量消耗资源的代价：产业革命 200 多年以来，占全球人口不到 15% 的英国、德国、美国等 40 多个国家相继完成了工业化，在此进程中消耗了全球已探明能源的 70% 和其他矿产资源的 60%。

发达国家是在完成工业化以后实行信息化的，而我国则是在工业化过程中就出现了信息化问题。回顾我国工业化和信息化的发展历程，从中国共产党的“十五大”提出“改造和提高传统产业，发展新兴产业和高技术产业，推进国民经济信息化”，到党的“十六大”提出“以信息化带动工业化，以工业化促进信息化”，再到党的“十七大”明确提出，“坚持走中国特色新型工业化道路，大力推进信息化与工业化融合”。这充分体现了我国对信息化与工业化关系的认识在不断深化。

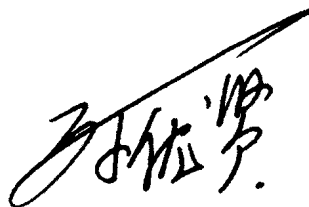
工业信息化是“两化融合”的主要内容，它的主要内容包括生产设备、过程、装置、企业的信息化，产品的信息化和产品设计、制造、管理、销售等过程的信息化，其目的是建立起资源节约型产业技术和生产体系，大幅度降低资源消耗；在保持经济高速增长的社会发展过程中，有效地解决发展与生态环境之间的矛盾，积极发展循环经济，这对我国科学技术的发展提出了十分迫切的战略需求，特别是对控制科学与工程学科提出了十分急需的殷切期望。

“两化融合”将是今后一个历史时期里，实现经济发展方式转变和产业结构优化升级的必由之路，也是中国特色新型工业化道路的一个基本特征。为此，中国自动化学会与科学出版社共同策划出版《信息化与工业化两化融合研究与应用丛书》，旨在展示两化融合领域的最新研究成果，促进多学科多领域的交叉融合，推动国际间的学术交流与合作，提升控制科学与工程学科的学术水平。丛书内容既可以是新的研究方向，也可以是至今仍然活跃的传统方向；既注意横向的共性技术的应用研究，又注意纵向的行业技术的应用研究；既重视“两

化融合”的软件技术，也关注相关的硬件技术；特别强调那些有助于将科学技术转化为生产力，以及对国民经济建设有重大作用和应用前景的著作。

我们相信，有广大专家、学者的积极参与和大力支持，以及编委的共同努力，本丛书将为繁荣我国“两化融合”的科学技术事业、增强自主创新能力、建设创新型国家做出应有的贡献。

最后，衷心地感谢所有关心本丛书并为丛书出版提供帮助的专家，感谢科学出版社及有关学术机构的大力支持和资助，感谢广大读者对本丛书的厚爱。



中国自动化学会理事长

2010年11月

前 言

在过去的十多年里，通信、控制和计算机技术的迅猛发展极大地影响了控制系统的结构。随着控制对象日益复杂、分布区域不断扩大，传统的点对点控制系统结构所呈现出来的布线复杂、维护困难、可扩展性差、成本高等一系列问题显得日益突出，难以满足不断提高的控制系统性能要求。正是在这一背景下，通过共享通信网络来交换控制器和执行器、传感器之间信息的网络化控制系统 (Networked Control Systems, NCSs) 应运而生。和点对点控制结构相比，网络化控制系统具有共享信息资源、减少系统布线、易于扩展和维护、增加系统的灵活性和可靠性等优点，使得网络化控制系统在工业界得到越来越多的关注和应用，如应用于汽车控制系统中的 CAN 总线技术、流程工业控制中的现场总线技术、智能楼宇中的总线技术等，网络化控制系统正在受到人们越来越多的关注，其应用范围和作用也在不断扩大。

然而，控制系统中共享通信网络的引入使得信息传输模式发生了根本变化。一个网络化控制系统通常由一个用于信息传输的通信网络和诸多用于信息采集和实施的节点构成。网络化控制系统的重要特点是其用于信息传输的网络是带宽有限的，各节点要通过竞争获得网络资源。因此，有限的网络带宽使得信息传输可能出现延滞、丢失等。从而，点对点控制系统中关于传感器、执行器和控制器之间的数据交换是无限制的假定在网络化控制系统中不再成立，现有的许多控制系统分析和设计方法不再适用。

网络诱导时延、数据包丢失和通信受限是网络化控制系统中的几个主要问题，是引起系统性能下降甚至失稳的主要原因，在过去十多年间引起人们的极大关注，相关研究成果也非常丰富。然而，许多研究尚没有充分认识并利用网络化控制系统中网络的特点，从而使得不少结论还比较保守，分析和设计也缺乏系统性。无论从理论还是应用上，网络化控制系统还不完善，还有许多重要问题有待解决，目前尚未形成一个完整的理论体系。

本书通过深入分析网络化系统中信息传输的特点，用一个切换系统模型来描述网络化控制系统中的时延、丢包和通信受限问题，进而应用切换系统处理方法给出了网络化控制系统的分析和设计。结合作者的研究工作，针对网络诱导时延，本书重点介绍了用切换系统方法研究具有时变时延的网络化控制系统建模和设计问题、时变时延引起的指数时变项和时序错乱问题、突发性大时延影响下网络化控制系统的鲁棒稳定性问题。针对系统中的丢包现象，用切换系统方法重点研究了具有

丢包的网络化控制系统建模、分析和设计问题、丢包特征参数与系统性能之间的定量关系问题、具有丢包情况下网络化控制系统采样周期与系统性能之间的定量关系问题。针对系统中的通信受限,用切换系统方法研究了具有通信受限的网络化控制系统建模、分析和协同设计问题。

在本书的撰写过程中,宋洪波、刘安东、宋海裕、王铭等研究生对书中提出的一些理论和方法做了大量仿真和实验工作,同时也多次阅读了本书的原稿,提出了许多宝贵的意见。

本书的研究工作和撰写得到了国家自然科学基金和教育部博士点基金的资助,在此表示衷心的感谢。

限于作者的水平,书中不妥之处在所难免,恳请广大读者批评指正。

作者

2011年11月

主要符号对照表

\mathcal{R}^n	n 维实欧几里得空间 (n -dimensional real Euclidean space)
$\mathcal{R}^{n \times m}$	n 行 m 列实矩阵集合 (set of $n \times m$ real matrix)
I	适当维数的单位矩阵 (identity matrix with appropriate dimension)
$\text{diag}\{A_1, \dots, A_n\}$	以 $A_j (j = 1, 2, \dots, n)$ 为对角元素的分块对角矩阵 (block diagonal matrix with A_j on the diagonal)
X^T	矩阵 X 的转置 (transpose of matrix X)
X^{-1}	方阵 X 的逆 (inverse of square matrix X)
$X \geq 0$	对称正半定矩阵 X (symmetric positive semi-definite matrix X)
$X > 0$	对称正定矩阵 X (symmetric positive definite matrix X)
$X \geq Y$	$X - Y$ 是对称正半定矩阵 (symmetric positive semi-definite matrix $X - Y$)
$X > Y$	$X - Y$ 是对称正定矩阵 (symmetric positive definite matrix $X - Y$)
*	对称矩阵的对称块 (symmetric terms in a symmetric matrix) 如 $\begin{bmatrix} X & Y \\ * & Z \end{bmatrix}$ 中的 * 代表 Y^T
$\sigma_{\max}(X)$	矩阵 X 的最大奇异值 (maximum singular value of matrix X)
$\lambda_{\min}(X)$	矩阵 X 的最小特征值 (minimum eigenvalue of matrix X)
$\lambda_{\max}(X)$	矩阵 X 的最大特征值 (maximum eigenvalue of matrix X)
$\ \cdot\ $	向量或矩阵范数 (vector or matrix norm)
<u>def</u>	定义为 (define)

目 录

《信息化与工业化两化融合研究与应用丛书》序

前言

主要符号对照表

第 1 章 绪论	1
1.1 网络化控制系统的提出和含义	1
1.2 网络化控制系统的发展历程	2
1.3 网络化控制系统的构架	5
1.3.1 网络化控制系统的典型结构	5
1.3.2 网络化控制系统的控制模式	6
1.4 网络化控制系统的基本问题	7
1.5 时延、丢包和通信受限问题的处理方法	9
1.5.1 时延问题	11
1.5.2 丢包问题	24
1.5.3 通信受限问题	30
1.6 本书主要内容	31
参考文献	33
第 2 章 切换系统概述	39
2.1 切换系统的一些基本概念	39
2.1.1 概述	39
2.1.2 切换系统的分类	43
2.2 切换系统的稳定性	44
2.2.1 关于切换系统稳定性的两个基本问题	44
2.2.2 单 Lyapunov 函数和多 Lyapunov 函数	48
2.2.3 连续时间线性切换系统指数稳定性分析	49
2.2.4 离散时间线性切换系统指数稳定性分析	53
2.3 总结与讨论	57
参考文献	57
第 3 章 具有时变短时延的网络化控制系统建模与设计	58
3.1 网络化控制系统的建模	59
3.2 指数稳定性分析	61

3.3	稳定化状态反馈控制器设计	65
3.4	示例	66
3.5	总结与讨论	71
	参考文献	72
第 4 章	具有时变长时延的网络化控制系统建模与设计	74
4.1	大时延发生率与网络化控制系统稳定性的关系	76
4.1.1	问题描述	76
4.1.2	网络化控制系统的建模	77
4.1.3	指数稳定性分析	82
4.1.4	稳定化状态反馈控制器设计	86
4.1.5	示例	87
4.2	大时延扰动下的网络化控制系统鲁棒控制	92
4.2.1	网络化控制系统的 $M-\Delta$ 结构描述	93
4.2.2	输入输出稳定性分析	95
4.2.3	稳定化状态反馈控制器设计	99
4.2.4	示例	101
4.3	总结与讨论	103
	参考文献	104
第 5 章	具有丢包的网络化控制系统建模与设计	106
5.1	具有丢包的网络化控制系统状态反馈控制	107
5.1.1	网络化控制系统的建模	107
5.1.2	指数稳定性分析	111
5.1.3	保性能状态反馈控制器设计	113
5.1.4	示例	119
5.2	具有丢包的网络化控制系统输出反馈控制	122
5.2.1	网络化控制系统的建模	123
5.2.2	指数稳定性分析	126
5.2.3	输出反馈控制器设计	129
5.2.4	示例	131
5.3	总结与讨论	134
	参考文献	135
第 6 章	同时具有丢包和时延的网络化控制系统状态反馈控制	138
6.1	问题描述与系统建模	138
6.2	指数稳定性分析	143
6.3	状态反馈控制器设计	146

6.4 示例	147
6.5 总结与讨论	152
参考文献	153
第 7 章 网络化控制系统性能与采样周期之间的关系	154
7.1 网络化控制系统的建模	156
7.2 指数稳定性分析	158
7.3 状态反馈控制器设计	163
7.4 示例	165
7.5 总结与讨论	167
参考文献	167
第 8 章 具有丢包的网络化系统 H_∞ 滤波	169
8.1 问题描述与系统建模	169
8.2 H_∞ 滤波性能分析	172
8.3 H_∞ 滤波器设计	176
8.4 示例	179
8.5 总结与讨论	182
参考文献	182
第 9 章 具有通信受限网络化控制系统的控制与滤波	184
9.1 通信序列方法	185
9.2 具有通信受限和分布式时延网络化控制系统的调度策略与控制 协同设计	189
9.2.1 问题描述	189
9.2.2 时序分析	192
9.2.3 闭环网络化控制系统模型	193
9.2.4 稳定性分析	195
9.2.5 控制器与调度策略协同设计	197
9.2.6 示例	200
9.3 具有通信受限网络化系统的 H_∞ 滤波	203
9.3.1 滤波误差系统模型的建立	204
9.3.2 滤波误差系统的 H_∞ 性能分析	206
9.3.3 H_∞ 滤波器设计	210
9.3.4 示例	212
9.4 总结与展望	216
参考文献	217

附录 A TrueTime 工具箱介绍与案例设计	219
A.1 TrueTime 工具箱简介	219
A.1.1 安装和编译流程	219
A.1.2 主要模块介绍	221
A.2 仿真案例设计	222
A.2.1 节点模块设计及参数设置	223
A.2.2 编写各节点初始化函数和任务代码函数	227
A.2.3 仿真结果	232
附录 B 以太网时延测试界面与主要代码	234
B.1 时延测试界面	234
B.2 时延测试软件的主要代码	234

第1章 绪 论

1.1 网络化控制系统的提出和含义

在过去的十多年里,通信、控制和计算机技术的迅猛发展极大地影响了控制系统的结构。随着控制对象日益复杂、分布区域不断扩大,传统的点对点控制系统结构所呈现出来的布线复杂、维护困难、可扩展性差、成本高等一系列问题显得日益突出,难以满足不断提高的控制系统的性能要求。正是在这一背景下,通过共享通信网络来交换控制器、估计器、执行器和传感器等多个节点之间信息的网络化控制系统应运而生^[1~4]。与点对点控制结构相比,网络化控制系统具有共享信息资源、减少系统布线、易于扩展和维护、增加系统的灵活性和可靠性等优点,使得网络化控制系统在工业界得到越来越多的关注和应用,如应用于汽车控制系统中的CAN总线技术、流程工业控制中的现场总线技术、智能楼宇中的总线技术,网络化控制系统的应用范围和作用还在不断扩大,并将成为一种使能结构^[5~9]。目前,网络化控制系统已经成为国际自动控制领域的一个热点研究课题^[10~17]。

一个典型的网络化控制系统结构如图 1.1 所示,简化的单回路网络化控制系统结构如图 1.2 所示。对于图 1.2 所示的网络化控制系统,有如下概念。

- (1) 上行链路 (up-link): 传感器至控制器的通信链路。
- (2) 下行链路 (down-link): 控制器至执行器的通信链路。
- (3) 节点: 通常将传感器、控制器、执行器等数据采集和处理单元称为节点。

在一些应用场合^[18],控制器和执行器可能处于同一地方,此时控制器输出直接传给执行器,没有下行链路。这样的网络化控制系统称为非对称的网络化控制系统。

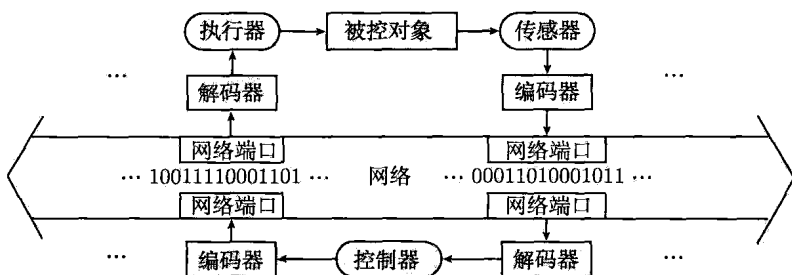


图 1.1 典型的网络化控制系统结构图

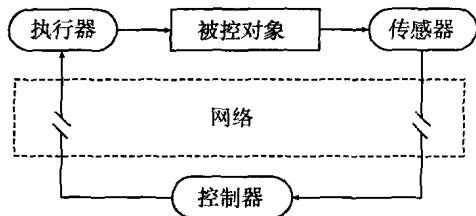


图 1.2 简化的单回路网络化控制系统结构图

一个网络化控制系统通常由一个用于信息传输的通信网络和诸多用于信息采集、处理和实施的节点构成。共享通信网络的引入使得网络化控制系统的信息传输模式发生了根本变化。网络化控制系统区别于传统点对点控制系统的一个重要特点就是其用于信息传输的网络是带宽有限的，各节点要通过竞争以获得网络资源。因此，有限的网络带宽使得信息传输可能出现延滞、丢失等现象；信号需要经过量化处理后才能进行传输；多个控制回路之间需要进行适当的带宽调度和网络访问优先权调度以达到总体性能最优等。这些都是网络化控制系统中出现的新问题。从而，点对点控制系统中关于传感器、执行器和控制器之间的数据交换是无限制的假定在网络化控制系统中不再成立，现有的许多控制系统分析和设计方法不再适用。例如，文献 [19] 在研究一类具有随机丢包的线性时不变系统最优控制时，发现当控制器无法确切知道网络中的丢包情况时，分离性原理将不再成立；传统的鲁棒控制理论能处理未建模动态和参数不确定性，但可能无法处理发生于通信链路中的网络诱导时延摄动和不确定丢包。因此，通信网络的引入在为控制系统带来各种好处的同时，也为控制系统的分析和设计提出了新的挑战，迫切需要对网络化控制系统中出现的各种新问题探寻解决的新思想、新方法。

1.2 网络化控制系统的发展历程

计算机技术、网络通信技术及微电子技术的不断发展，促进了控制系统在体系结构、单元部件和控制技术方面的一系列变革，使得控制系统不断朝着网络化、集成化、分布化和节点智能化的方向发展 [20]。计算机控制系统的控制方式，先后经历了直接数字控制 (DDC)、集散控制 (DCS) 和网络化控制 (NCS) 三种主要控制方式。

1. DDC

在直接数字控制系统中，通常由一台计算机（微控制器）代替模拟设备的调节器实施控制，是由模拟控制转向数字控制的标志。典型的直接数字控制系统如图 1.3 所示，其中，传感器和执行器都直接与作为控制器的计算机相连，传感器输

出经 A/D 转换后传输给控制器, 控制器输出经 D/A 转换后传输给执行器。DDC 结构简单, 一般不考虑通信上的延时, 可以看成是网络控制系统最简单的特殊情况, 事实上很多对网络控制系统的算法分析也都是简化为 DDC 的模型来讨论的, 它适用于独立、小规模对象的控制。如果添加对应的通信接口, 也可用于构成集散控制系统 (DCS)、现场总线控制系统 (FCS) 和网络化控制系统 (NCS)。

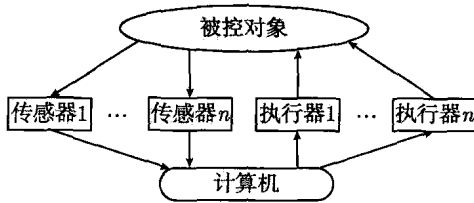


图 1.3 DDC 系统结构图

2. DCS

随着控制系统规模的扩大及生产过程的复杂化, 控制计算必须越来越多地在分布式、部分异步的环境中完成, 现场级的实时控制和高层的监控、管理必须由不同的单元处理以减轻处理单元的计算负担。显然, 直接数字控制由于结构集中、布线复杂已经无法胜任这些任务。于是, 在 20 世纪 70 年代中期, 集散控制系统开始发展起来。集散控制系统是对生产过程进行集中管理和分散控制的分布式计算机控制系统。一个典型的集散控制系统如图 1.4 所示。

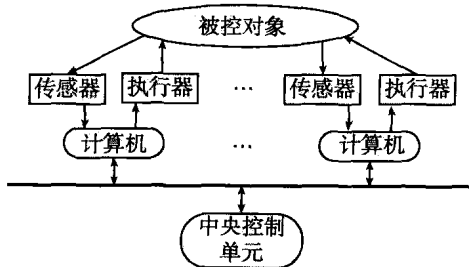


图 1.4 DCS 系统结构图

DCS 的结构主要有以下特点: 具有现场级的控制单元 (PLC、MCU 等), 现场级控制单元与现场设备用电缆连接, 采用标准 4~20mA 模拟信号传输; 具有中央控制单元 (CPU), 中央控制单元与现场级控制单元之间采用 RS-232/485 等专用非开放协议通信。应该说, 集散控制系统具有了一定的网络化思想, 它与当时的计算机和网络技术水平相适应。但在 DCS 中, 现场级的实时信号, 如传感信号、控制信号等都在本地传输, 并没有通过网络传输, 网络中传输的大多是开关信号、报警信号、监控信息等。

集散控制系统还不是真正意义上的分布式网络化控制系统,在实际应用中也反映出了其不足。首先,集散控制系统仍然是模拟数字混合系统,模拟信号的转换和传输使系统精度受到限制。其次,它在结构上遵循主从式思想,没有完全突破集中控制模式的束缚,一旦主机出现故障,系统可靠性就无法保障。更重要的是,DCS系统采用非开放式专用网络,各系统互不兼容,不利于提高系统可维护性和组态灵活性。

3. FCS

20世纪90年代,微处理器技术和通信网络技术的快速发展,促成了现场总线控制系统(FCS)的诞生和发展。现场总线控制系统是用开放的现场总线作为通信网络,将作为独立智能节点的现场控制器及现场智能仪表等设备进行互连和通信,它弥补了集散控制系统中采用专用网络的缺陷,把专用封闭协议变成标准开放协议。同时,它使系统具有完全数字计算和数字通信能力。结构上采用了全分布式方案,把控制功能彻底下放到现场,提高了系统可靠性和灵活性。

与DCS相比,FCS具有很多优点:它使现场设备之间的通信可采用点对点、点对多点或广播的多种方式;利用统一组态与任务下载,使得如PID、数字滤波、补偿处理等简单的控制任务可动态下载到现场设备;可减少传输线路与硬件设备数量,节省系统安装维护的成本;同时还增强了不同厂家设备间的互操作性和互换性。现场总线控制系统已经是真正意义上的分布式网络化控制系统。

现场总线控制系统的主要不足是:尽管各种现场总线都是开放协议,遵循同一种协议的不同厂家产品可以相互兼容。但是,各种协议并没有统一,不同总线协议的系统不易互连。而且,现场总线通信协议与上层管理信息系统或进一步的Internet所广泛采用的TCP/IP协议是不兼容的,也存在协议转换问题。这些问题增加了控制和管理信息一体化网络的实现难度。

4. NCS

多种现场总线的共存与计算机网络发展中多种局域网协议共存的时期是相对应的。控制系统采用统一的网络协议和结构模型是当今控制界的共识,而TCP/IP协议是一个跨平台的通信协议族,能方便地实现异种机互连,它促使了计算机信息网络及Internet近十年的飞速发展。因此,TCP/IP协议由信息网络向底层控制网络延伸和扩展,形成控制与信息一体化的分布式全开放网络,符合计算机、网络和控制技术融合的趋势,是逻辑发展的必然。

近年来,工业以太网的广泛应用、Internet等异质网络的互连,以及无线局域网和无线传感网的快速发展和应用,极大地丰富了网络化控制系统的体系结构,也使得控制系统网络化、分布化和智能化的发展趋势更加明显和具体。尽管网络化控制已经在实际中取得广泛应用,但网络化控制系统这一概念最早是在1999

年才由 Walsh 等提出的 [3, 21]。这一概念的雏形却可追溯到 20 世纪 80 年代后期 Halevi 和 Ray 等提出的集成通信与控制系统 (integrated communication and control systems, ICCS)[22, 23]。

1.3 网络化控制系统的构架

公共总线式的网络结构是用尽量少的导线, 以比点对点式结构更少的维护将传感器、执行器、控制器等设备连接在一起。它也使得将处理功能和运算负荷分散给一些小单元成为可能。而且, 在多处理器间的分布控制使系统更具鲁棒性和容错能力, 而中央处理式的控制模式中, 某一点的故障对整个系统影响较大。在最近十年, 网络被用做简化信息传递的首选途径, 因此工业界对网络的兴趣快速增长。通常, 计算机网络可以分为控制网和数据网。控制网在相对较多的节点设备间传输大量小而频繁的控制信号以满足控制系统对实时性的要求。相对来说, 数据网使用较大的数据包在大区域内进行相对不频繁的数据交换, 利用较高的数据通信率来传送较大的数据包。区分数据网和控制网的关键因素是对实时性支持的能力有多大。但实时性是相对的, 与控制对象及实现技术有很大关联。从目的来划分控制网和数据网似乎更合理, 也更直观, 即用于控制系统的网络属于控制网, 纯属数据交换的网络属于数据网。而不应从物理介质上划分控制网或数据网, 同一条网络链路上可能同时传送着控制信息和非控制信息, 这时的网络就属于混合型的。

1.3.1 网络化控制系统的典型结构

网络的分层结构有许多方案, 但都大同小异。文献 [25] 提出的五层网络结构比较全面, 如表 1.1 所示。

表 1.1 网络控制系统分层结构

层次	设备	协议	应用范围
公司管理层	工作站、服务器	同下	广域网
工厂管理层	工作站	同下	局域网
监督层	工作站、计算机	MAP、TCP/IP、EtherNet/IP、Modbus/TCP	局域网
单元控制层	PLC、CNC、计算机	ControlNet、Profibus、LonWorks、WorldFip	现场总线
传感-执行层	传感器、执行器	CAN、Bitbus、P-Net、Interbus、DeviceNet	传感器总线

五个层次中每个层都有不同的目的、通信能力、协议和复杂程度。实际系统并不一定用到所有层, 可根据需要选择合适的分层结构和网络协议。而且每层所使用的设备、协议和应用范围都不是绝对的, 如以太网可以直接连入传感-执行层, CAN 总线也可用于局域网。在现代制造系统中, 第一层是设备层或者叫传感-执行层, 是用来连接控制器、传感器和执行机构的。第二层是单元控制层, 在制造车间里被用