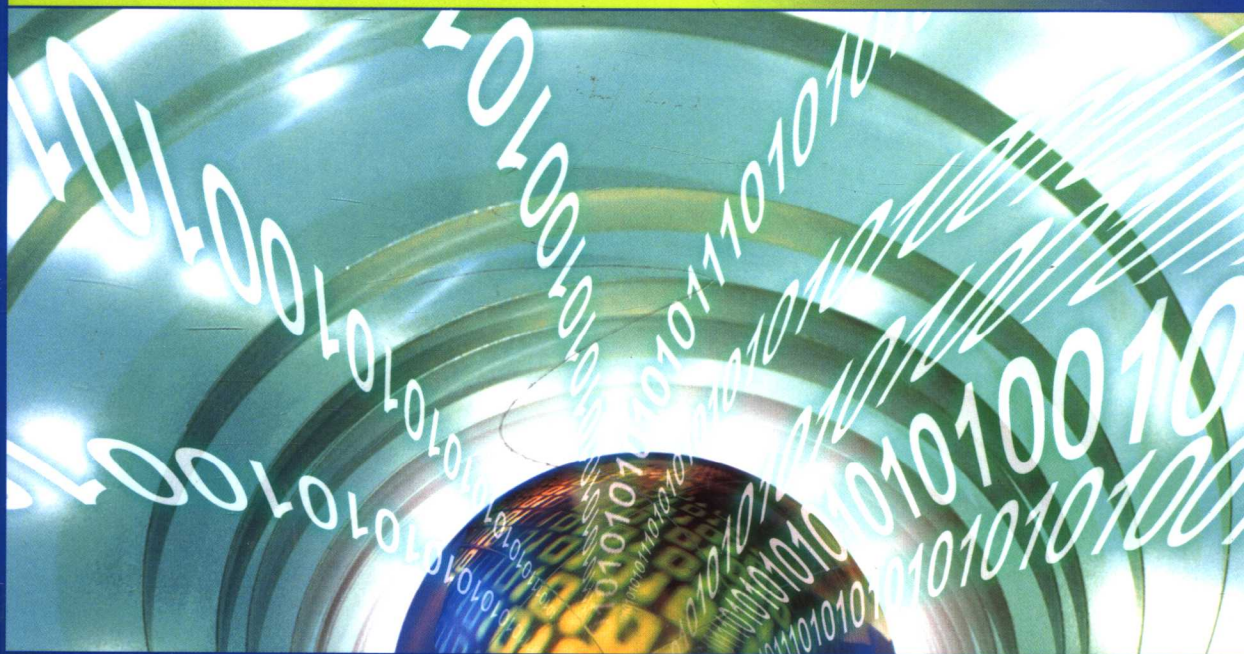


网络化控制系统

—— 理论、技术及工程应用

WANGLUOHUA KONGZHI XITONG
LILUN JISHU JI GONGCHENG YINGYONG

孙德辉 史运涛 李志军 杨扬 编著



国防工业出版社

National Defense Industry Press

TP273/492

2008

网络化控制系统

——理论、技术及工程应用

孙德辉 史运涛 李志军 杨扬 编著

国防工业出版社

·北京·

内 容 简 介

网络化控制系统是综合自动化技术发展的必然趋势,是控制技术、计算机技术和通信技术相结合的产物。本书基于现场总线技术及自动化北京市重点实验室的科研成果,系统地介绍了网络化控制系统的组成原理、控制结构、建模方法,网络拥塞闭环控制机理,网络时延闭环控制方法,现场总线控制技术的应用,基于工业以太网的控制系统设计,基于 Internet 和 Web 的网络远程控制系统设计,网络化控制系统软件开发技术,以及网络化控制技术在工业加热炉、工业锅炉和电厂锅炉湿法烟气脱硫中的应用。

本书主要面向自动控制领域中从事科学研究、产品开发与工程应用的科研人员和工程技术人员,也可以作为自动化、电气工程、测控、计算机、通信等专业高年级本科生及研究生的教材及参考用书。

图书在版编目(CIP)数据

网络化控制系统:理论、技术及工程应用 / 孙德辉等

编著. —北京:国防工业出版社, 2008.5

ISBN 978 - 7 - 118 - 05624 - 2

I. 网... II. 孙... III. 计算机网络 - 自动控制系统

IV. TP273

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2008)第 032427 号

※

国防工业出版社出版发行

(北京市海淀区紫竹院南路 23 号 邮政编码 100044)

北京诚信伟业印刷有限公司印刷

新华书店经售

*

开本 787 × 1092 1/16 印张 15 1/2 字数 450 千字

2008 年 5 月第 1 版第 1 次印刷 印数 1—4000 册 定价 33.00 元

(本书如有印装错误,我社负责调换)

国防书店:(010)68428422

发行邮购:(010)68414474

发行传真:(010)68411535

发行业务:(010)68472764

前 言

随着控制理论、控制技术、计算机技术和网络通信技术的发展,工业控制领域发生了巨大的变革:从原始的单回路控制系统,先后发展到了集散控制系统(DCS)、现场总线控制系统(FCS)和网络化控制系统(NCS)。网络化控制系统的出现,使分布在不同地域的控制节点和装置有机地联系成为一个整体,实现了宽广地域的管理、监视与控制,打破了自动化系统原有的信息孤岛的僵局,拓宽了控制系统的视野与作用的范围,为实现企业的管理控制一体化、实现远程监视与控制提供了基础条件,也极大地简化了控制系统的设计,提高了系统可靠性和控制质量,是未来综合自动化技术发展的必然形式。

网络化控制系统作为一种新型的控制方式,其研究方向主要有两大分支:一个是源于计算机网络技术以提高信息传输和远程通信服务质量(QoS)为目标;一个是源于自动控制技术以满足系统稳定及动态性能(QoP)为目标。前者实现的是对通信网络自身的控制,后者实现的是通过网络对系统的控制。

本书作者以现场总线技术及自动化北京市重点实验室为依托,以现场总线及网络自动化北京市学术创新团队成员的科研成果为素材,系统地介绍了网络化控制系统的基本理论、控制结构、建模方法,网络拥塞闭环控制机理,网络时延闭环控制方法,集散控制技术及应用,现场总线控制技术及应用,基于工业以太网的控制系统设计,基于 Internet 和 Web 的网络远程控制系统设计,网络化控制系统软件开发技术,以及网络化控制在工业加热炉、工业锅炉和电厂锅炉湿法烟气脱硫中的应用。

本书编写过程中按照理论、技术和工程应用三个层面编写,力求达到重点突出、层次分明,语言简练,易于理解。全书共分三篇 13 章:第一篇,网络化控制系统理论篇(第 1 章~第 5 章),主要介绍网络化控制系统的基本概念、组成原理、控制结构、网络技术基础、网络拥塞与网络时延的控制机理和控制方法、网络化控制系统的综合与分析等;第二篇,网络化控制系统技术篇(第 6 章~第 10 章),主要介绍集散控制系统、现场总线控制系统、基于工业以太网的控制系统、基于 Internet 和 Web 的网络远程控制系统以及网络控制系统的软件开发技术等;第三篇,网络化控制系统工程应用篇(第 11 章~第 13 章),主要介绍三个典型的网络化控制系统工程应用实例,即工业加热炉的网络化控制系统、工业锅炉的网络化控制系统和电厂锅炉湿法烟气脱硫的 DCS 仿真系统设计方法。

在这里要特别感谢清华大学周东华教授、叶昊教授,燕山大学关新平教授,华中科技大学方华京教授,北方工业大学李正熙教授等几位国内著名网络化控制方面的专家对本书进行了认真审阅,并提出了很多建设性的修改意见。本书的编写过程中得到了中国科学院自动化所综合自动化工程中心工程部部长龙洪胜副教授、高级工程师张喜东、王云以及北京和利时公司的向立志博士,西门子(中国)有限公司自动化与驱动集团的王应应工

程师等人的帮助,现场总线技术及自动化北京市重点实验室的刘大千、左佳儒、郝冬冬、吴力普等研究生为本书也付出了辛勤的劳动,在此表示衷心的感谢。

本书是由北方工业大学孙德辉教授、史运涛博士、李志军博士和杨扬执笔,在编写过程中参考了很多有关书籍和资料,在此谨向有关作者和单位表示衷心的感谢。最后恳请读者对本书不足之处提出宝贵意见,邮件地址:jt wang@ndip.cn。

孙 德 辉

北方工业大学现场总线技术及自动化北京市重点实验室

2008 年 2 月 18 日

目 录

第一篇 网络化控制系统理论

第 1 章 网络化控制系统概论	1
1.1 网络化控制系统的产生与发展	1
1.2 网络化控制系统的特点	3
1.3 网络化控制系统的理论、技术及工程应用	5
1.3.1 网络化控制系统的理论研究	5
1.3.2 网络化控制系统的技术发展	5
1.3.3 网络化控制系统的工程应用	7
1.4 本书的主要内容与安排	8
第 2 章 网络技术基础	9
2.1 网络体系结构	9
2.1.1 网络协议和层次结构	9
2.1.2 OSI 参考模型	10
2.1.3 TCP/IP 体系结构	11
2.1.4 TCP/IP 与 OSI 模型的主要区别	12
2.2 网络实体概述	13
2.2.1 中继器	13
2.2.2 集线器	13
2.2.3 网桥	14
2.2.4 交换机	15
2.2.5 路由器	15
2.2.6 网关	16
2.2.7 网卡	17
2.3 网络分类	18
第 3 章 网络拥塞控制概述	21
3.1 网络服务质量	21
3.1.1 网络服务质量概述	21
3.1.2 QoS 的控制和管理机制	22
3.2 网络拥塞控制	24
3.2.1 网络拥塞控制的一般原则	25
3.2.2 网络拥塞控制方法	26
3.3 TCP/IP 的拥塞控制	26

3.3.1	源端的 TCP 协议的拥塞控制	26
3.3.2	链路端路由器的拥塞控制	28
3.4	ATM 网络中的拥塞控制	30
3.4.1	开环预防控制	31
3.4.2	反馈流控制	32
3.4.3	连接接纳控制	32
3.4.4	优先级拥塞控制	33
3.4.5	信元丢弃控制	33
第 4 章	基于控制理论的网络拥塞闭环控制方法	35
4.1	基于速率调节的网络拥塞控制方法	35
4.1.1	基于输入速率的网络拥塞控制	35
4.1.2	基于输出速率调节的网络拥塞闭环控制方法	38
4.2	多节点网络拥塞闭环控制方法	41
4.2.1	多节点网络模型及控制结构	41
4.2.2	基于 OPNET 的仿真运行及性能评价	43
4.3	网络节点区分服务控制机制研究	44
4.3.1	网络区分服务闭环控制概述	44
4.3.2	多信种的网络区分服务控制机制	45
4.4	基于主动队列管理的网络拥塞闭环控制方法	46
4.4.1	网络信息的主动队列控制思想及结构	46
4.4.2	节点队列概率丢弃控制机制及实验分析	48
4.5	OPNET 网络仿真平台简介	51
4.5.1	网络层仿真模型的建模方法	52
4.5.2	节点层仿真模型的建模方法	53
4.5.3	进程层仿真模型的建模方法	54
4.5.4	典型网络 M/M/1 队列排队的仿真模型结构及实验分析	56
第 5 章	网络化控制系统的分析与综合	58
5.1	网络化控制系统的结构	58
5.2	网络化控制系统的基本问题	59
5.2.1	通信媒体类型及通信协议	59
5.2.2	节点的驱动方式	59
5.2.3	节点时钟同步方式与多率采样	60
5.2.4	网络时延	60
5.2.5	单包传输和多包传输	60
5.2.6	数据包时序错乱与数据包丢失	61
5.2.7	数据滤除和空采样	61
5.3	考虑网络时延的 NCS 分析与综合	61
5.3.1	系统建模与稳定性分析	62
5.3.2	控制器综合	64
5.4	考虑网络数据丢包的 NCS 分析与综合	65

5.4.1 系统建模	65
5.4.2 控制器综合	66
5.5 基于在线信息排队的网络化控制系统	68
5.5.1 基于在线信息排队的 NCS 控制结构	68
5.5.2 仿真实验	69
5.6 NCS 的仿真工具 Matlab/TrueTime	69

第二篇 网络化控制系统技术

第 6 章 集散控制系统(DCS)	72
6.1 DCS 的发展过程及其特点	72
6.1.1 第一代 DCS(初创期)	72
6.1.2 第二代 DCS(成熟期)	72
6.1.3 第三代 DCS(扩展期)	73
6.1.4 第四代 DCS(高速发展期)	73
6.2 DCS 的体系结构	75
6.2.1 DCS 的基本构成	75
6.2.2 DCS 的硬件构成	77
6.2.3 DCS 的软件构成	78
6.2.4 DCS 的网络构成	82
6.3 几种典型的 DCS 简介	85
6.3.1 Centum-CS3000 的体系结构	85
6.3.2 TDC3000 和 TPS 的体系结构	88
6.3.3 ABB 公司的 Industrial IT 系统	92
6.4 DCS 的工程应用与评价指标	92
6.4.1 DCS 的工程应用设计	92
6.4.2 DCS 的性能指标综合评价	94
第 7 章 现场总线控制系统(FCS)	96
7.1 现场总线的产生和发展	96
7.1.1 现场总线的概念	96
7.1.2 现场总线的发展过程	96
7.2 几种有影响的现场总线技术	98
7.2.1 FF 总线	98
7.2.2 LonWorks 总线	98
7.2.3 Profibus 总线	99
7.2.4 CAN 总线	99
7.2.5 HART 总线	100
7.3 现场总线的特点与优点	100
7.3.1 现场总线系统的技术特点	101
7.3.2 现场总线的优点	101

7.3.3	现场总线控制网络的特点	102
7.4	现场总线的工业应用与集成	103
7.4.1	工业企业综合自动化系统网络模型	104
7.4.2	现场总线工业应用与集成	104
第8章	基于工业以太网的网络化控制系统	107
8.1	工业以太网概述	107
8.1.1	工业以太网的发展历程	107
8.1.2	工业以太网的发展方向	108
8.2	工业以太网的特点与要求	109
8.3	工业以太网的关键技术	110
8.3.1	通信确定性和实时性技术	110
8.3.2	系统稳定性技术	111
8.3.3	应用层协议与 OPC 技术	112
8.3.4	网络安全性技术	112
8.3.5	以太网供电技术	113
8.3.6	本质安全与防爆技术	114
8.4	典型工业以太网	114
8.4.1	EPA 实时以太网	114
8.4.2	Ethernet/IP 实时以太网	115
8.4.3	Modbus - IDA 实时以太网	116
8.4.4	Profinet 实时以太网	116
8.5	基于工业以太网的温度闭环控制系统设计	117
8.5.1	系统的构成原理	117
8.5.2	对象参数辨识与控制器参数优化	119
8.5.3	控制器参数优化整定机制	121
8.5.4	附 PID 控制器参数整定 M 文件	122
8.5.5	控制器参数整定后的试验曲线	123
第9章	基于 Web 和 Internet 的网络化控制系统	124
9.1	Internet 与 Web 技术	124
9.1.1	基于静态文档的 Web 技术	124
9.1.2	基于动态交互页面的 Web 技术	124
9.1.3	Web 数据服务器访问	125
9.2	基于 Web 和 Internet 的网络化控制结构	126
9.2.1	基于 Internet 的控制网络体系结构	126
9.2.2	基于 Web 的嵌入式工控节点及其远程监控	128
9.2.3	Web 服务器独立式远程监控系统	129
9.3	基于 Internet 技术的典型网络化控制系统	130
9.3.1	网络远程闭环控制系统的组成原理	130
9.3.2	典型的网络化控制系统结构	132
9.3.3	基于 Internet 的水箱液位控制系统设计与实现	134

第 10 章 网络化控制系统软件开发技术	137
10.1 网络化控制系统的软件概述	137
10.1.1 网络化控制系统软件的层次及特点	137
10.1.2 网络化控制系统软件的基本内容	138
10.2 网络化控制系统中的软件开发技术	147
10.2.1 面向对象的程序设计方法	147
10.2.2 DDE 技术	148
10.2.3 COM/DCOM/ActiveX 技术	149
10.2.4 OPC 技术	151
10.3 网络化环境下先进控制软件开发	153
10.3.1 先进控制算法开发层次	153
10.3.2 先进控制软件体系结构及运行的硬件平台	155
10.3.3 先进控制开发的基本内容	157
10.3.4 先进控制开发相关问题	162
10.3.5 基于 OE 模型的单变量预测控制软件开发示例	167

第三篇 网络化控制系统工程应用

第 11 章 工业加热炉的网络化控制系统	175
11.1 工业加热炉概述	175
11.1.1 加热炉的工艺过程	175
11.1.2 加热炉的控制任务	176
11.2 某钢厂工业加热炉控制方案	177
11.2.1 基于内模的分层递阶智能控制总体解决方案	178
11.2.2 基于 IMC - PID 的主回路控制器设计	178
11.2.3 燃烧控制的空燃比智能优化	189
11.3 基于 PCS7 的工业加热炉网络化控制系统实现	194
11.3.1 基于 PCS7 的控制系统硬件组成与控制网络	194
11.3.2 基于 PCS7 的控制系统软硬件组态	196
11.3.3 加热炉先进控制策略实施效果	198
第 12 章 工业锅炉的网络化控制系统	201
12.1 工业锅炉概述	201
12.2 工业锅炉的综合控制策略	202
12.2.1 锅炉给水的三冲量控制系统	202
12.2.2 除氧器液位与压力控制	204
12.2.3 锅炉燃烧的多变量预测控制策略	205
12.3 工业锅炉网络化控制系统实现	212
12.3.1 西门子 Profibus 现场总线控制系统集成	212
12.3.2 西门子控制系统的编程调试	214
第 13 章 电厂锅炉湿法烟气脱硫 DCS 仿真系统	217

13.1	电厂锅炉烟气脱硫的工艺过程	217
13.2	湿法烟气脱硫 DCS 仿真系统的技术要求	218
13.3	基于爱默生 WDPF 的 DCS 仿真系统架构	219
13.3.1	基于 WDPF 的 DCS 仿真系统构架	219
13.3.2	模型机与 DCS 系统的通信集成	219
13.4	湿法烟气脱硫过程的仿真建模	220
13.4.1	建立过程模型是构建仿真系统的核心	220
13.4.2	湿法烟气脱硫定量定性仿真模型结构	221
13.4.3	模糊 TS 模型的模糊聚类建模	222
13.4.4	吸收塔脱硫率的 pH 值定量模型	224
13.4.5	用实际工业数据进行模型验证	226
13.4.6	WFGD 过程的连续直接辨识建模方法	227
13.5	WDPF 仿真系统的控制策略以及 HMI 组态工作	230
13.5.1	Ovation DCS 系统组态介绍	231
13.5.2	Ovation DCS 控制组态	232
13.5.3	Ovation DCS 界面组态	233
	参考文献	237

第一篇 网络化控制系统理论

第 1 章 网络化控制系统概论

1.1 网络化控制系统的产生与发展

在传统的计算机控制系统中,传感器和执行器都是与计算机实现点对点的连接,传递信号一般采用电压和电流等模拟信号。在这种结构模式下,控制系统往往布线复杂,从而增加了系统成本,降低了系统的可靠性、抗干扰性、灵活性和扩展性,特别在地域分散的情况下,传统控制系统的高成本、低可靠性等弊端更加突出。随着计算机技术和网络通信技术的不断发展,工业控制系统也发生了巨大的技术变革,网络化控制系统(Networked Control System, NCS)应运而生,其主要标志就是在控制系统中引入了计算机网络,从而使得众多的传感器、执行器、控制器等主要功能部件能够通过网络相连接,相关的信号和数据通过通信网络进行传输和交换,避免了点对点专线的铺设,而且可以实现资源共享、远程操作和控制,增加了系统的灵活性和可靠性。

在控制系统中使用网络并不是一个新的想法,它可以追溯到 20 世纪 70 年代末期集散控制系统(Distributed Control System, DCS)的诞生。在 DCS 出现之前,早期的计算机控制系统是直接数字控制(Direct Digital Control, DDC),在这种控制结构中,所有传感器和执行器都与同一台计算机点对点的连接。由于当时计算机昂贵,系统一般采用集中式的体系结构,整个生产过程和控制策略都由一台计算机完成,即使是计算机一个单一的故障也会使整个系统及其所有回路失效。伴随着计算机成本的下降和网络技术的发展,(计算机)控制网络被首次引入到了控制系统,导致了 DCS 的产生。DCS 将控制任务分散到若干小型的计算机控制器(也叫做现场控制站)中,每个控制器采用 DDC 控制结构处理部分控制回路,而在控制器与控制器、控制器与上位机(操作员站或工程师站)之间建立了计算机控制网络,这种控制结构使得操作员在上位机中能够对被控系统的实时运行状态进行监控,某个控制回路的控制策略的设计也可以在上位机中组态完成,通过控制网络下载到对应的控制器中实时运行。DCS 大大提高了控制系统的可靠性,并实现了集中管理和分散控制。

尽管在 DCS 中已经引入了控制网络,但由于当时传感器和执行器只能发送和接收模拟量信号,所以在传感器与控制器、控制器与执行器之间仍然采用点对点连接的 DDC 控制结构。采用模拟量信号进行信息传输,只是在控制器的输入、输出端进行信号的模拟量/数字量(A/D)和数字量/模拟量(D/A)转换。随着处理器体积的减小和价格的降低,带有微处理器的智能传感器和智能执行器出现了,这为控制网络在控制系统中更深层次的应用提供

了必要的物质基础,从而在 20 世纪 80 年代产生了现场总线控制系统(Fieldbus Control System, FCS)。FCS 把控制网络一直延伸到了生产现场的控制设备,信号的传输完全数字化,提高了信号转换的精度和可靠性,同时由于 FCS 的智能仪表(变送器、执行器)带有微处理器,能够直接在生产现场构成控制回路,控制功能也可完全下放,实现了完全的分散控制。

FCS 技术经过 20 多年的发展,取得了很高的成就,在很多领域都得到了广泛的应用,但仍存在一些问题制约其应用范围的进一步扩展。首先,现场总线标准的不统一,虽然目前的国际电工委员会(International Electrotechnical Commission, IEC)组织已经达成了国际总线标准,但总线种类仍然有 10 余种,并且各厂家自成体系,不能达到完全开放,难以实现互换与互操作。其次,现场总线仍是一种分层的专用网络,管理和控制分离,难以实现整个工厂的综合自动化及远程控制。

近十年来,以太网(Ethernet)技术的发展和广泛应用,已经使其从办公自动化走向工业自动化,从商用以太网发展到工业以太网,工业以太网也正在成为工业控制网络的主流技术。由于以太网具备开放性、价格低廉、软硬件资源丰富、通信速率高等特点,不但已经基本垄断了商业领域的网络通信市场,而且在工业控制领域也得到了大规模的应用。一些机构也开发出适合于工业环境的以太网器件,在 DCS 的过程管理层中大量使用,并且有向下延伸直接应用于现场设备间通信的趋势。现在多个现场总线行业性组织都在进行将以太网用作工业网络的研究并推出了相应的解决方案,这些研究不仅仅是将以太网用作高层网络,而且希望将它直接和现场设备连接,实现所谓的“E 网到底”。这种用于现场设备层的以太网也叫做实时以太网(工业以太网的一种,能够满足底层控制的实时性要求),我国也开发了第一个拥有自主知识产权并被 IEC 认可的基于以太网的工业自动化标准(Ethernet for Plant Automation, EPA)。美国权威调查机构 Automation Research Company 的报告指出,今后以太网不仅将继续垄断商业计算机网络通信和工业控制系统的上层通信市场,也必将领导未来现场总线的发展,以太网将成为现场总线的基础协议。

信息时代的发展趋势必然是信息网络与控制网络的无缝集成,即控制网络不仅要向下层的现场设备层发展,同时也要与企业上层的信息管理层进行连接,目的是实现综合自动化系统中的资源管理层、监控执行层和现场设备层的互连与兼容,以保证信息准确、快速、完整地传输,为企业将管理决策、市场信息和生产控制信息等结合成一个有机的整体,进而实现上层的企业资源规划(Enterprise Resource Planning, ERP)创造条件。从这个角度上来讲,以太网“E 网到底”的解决方案极大地简化了企业计算机网络系统(从信息网络到控制网络)的设计,提高了网络的可靠性,为企业形成统一真正意义上的全开放网络化系统提供了技术支持。

另外,近年来由于互联网(Internet)技术的出现与发展,控制网络与互联网技术的结合已经成为了 NCS 新的亮点。事实上,在现场总线设备之间数据通信与控制网络互联过程中,其技术发展趋势也明显受到互联网技术的影响。互联网采用传输控制协议/网际协议(Transmission Control Protocol / Internet Protocol, TCP/IP)进行广域网之间的数据传输与路由,接入互联网上的用户可以直接通过万维网(World Wide Web, WWW, 简称 Web)技术对互联网上的其他计算机进行访问和数据传输。互联网技术与企业以太网控制技术的结合能够形成 Ethernet + TCP/IP + Web 控制模式,从而能够实现企业内部的远程监控、远程管理和远程维护,这会给企业带来更大的经济效益,使得各行业综合自动化水平从 DCS、FCS 上升到一个更高的高度,即

NCS。在 NCS 中,只要安装一个客户端软件,一个拥有访问权限的控制工程师可以在世界上任何一台连接到 Internet 的计算机上对某个控制网络的控制回路进行监控,而无需返回到现场,从而能够大大地提高工作效率。此外,通过采用无线传感器等无线网络技术还可以实现一些具有特殊用途的网络化控制系统,基于无线网络的 NCS 也已经成为有线网络 NCS 的一个重要的补充。特别地,在应用对象为可运动的,或对象所在的环境很难用有线网络连接的情况,无线网络有着不可替代的作用。

图 1-1 给出了控制系统的发展历程以及在不同阶段控制系统测控能力的变化趋势,在图中以 DCS 的出现为界,将 DCS 以后的时间段称为网络化控制时代。从严格意义上讲,DCS 没有完全消除点对点的传统控制模式,还不能属于 NCS 的范畴。但是因为 DCS 最早在控制系统中引入了计算机网络,奠定了 NCS 进一步发展的基础,而且从某种角度上 FCS 不过是 DCS 中的计算机网络向现场控制层的扩展。基于以太网的 NCS 的出现在很大程度上是为了使工业控制网络的通信协议趋于统一,基于 Internet 和 Web 的 NCS 也不过是 DCS 中的计算机网络向上层网络的进一步延伸。同时,因为 DCS 在已有的控制系统中占有相当大的比例,而且新一代 DCS 已经出现了与 FCS 融合的趋势,传统的 DCS 也必将与其他的各种 NCS 长时间共同存在,因此本书将 DCS 的出现作为网络化控制时代的开端。

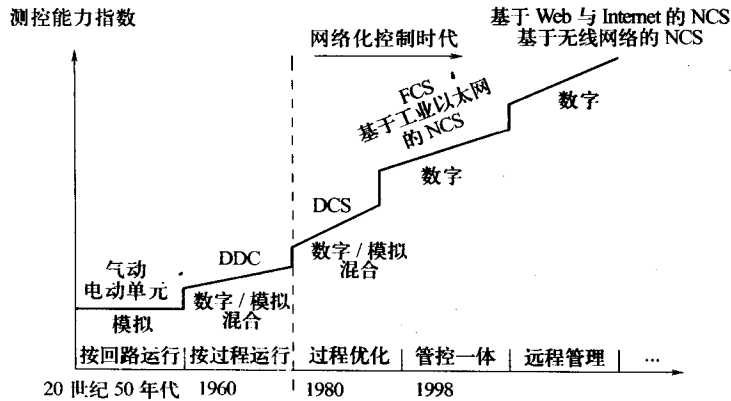


图 1-1 控制系统的发展历史及其测控能力

1.2 网络化控制系统的特点

通过上节对 NCS 产生和发展的历史回顾不难发现,NCS 是控制技术、计算机(软件与硬件)技术和网络通信技术等共同发展的结晶。受到当时这些技术的限制,不同时期的 NCS 具有不同的控制结构和表现形式,伴随着这些相关技术的不断突破和世界信息化浪潮,NCS 也在不断地向前发展,不断地进行技术革新。然而,由于 NCS 具有多种结构形式而且仍然在不断发展,因此若想给 NCS 一个具体的定义是很困难的,尽管如此,还是能够从各种 NCS 的结构形式中提取到它们的共同特点,从而展现 NCS 的基本概貌。

1. 控制系统的网络化

这是 NCS 的根本特点,正是由于控制网络的引入,将原来分散在不同地点的现场设备连接成网络,才打破了自动化系统原有的信息孤岛的僵局,为工业数据的集中管理与远程传送、为控制系统与其他信息系统的连接与沟通创造了条件。从这个角度上来看,NCS 的发展过程

也就是控制系统网络化程度不断提高的过程,是各种网络通信标准不断竞争而日趋统一的过程。

2. 信息传输的数字化

数字化与网络化相辅相成,如果网络化是从系统角度描述 NCS 的特点,那么数字化则是从信息的角度描述 NCS。与模拟信号相比,数字信号的抗干扰能力强,传输精度高,传输的信息更加丰富(不仅可传输测量信息和控制信息,还可传输状态信息、故障信息等),同时数字化进程也大大减少了控制系统布线的复杂性(总线既能够进行数据传输,也能够对控制仪表进行供电)。

3. 控制结构的层次化

控制系统的分层结构是引入控制网络后的另一个主要特点。在 DDC 控制结构中,一台计算机不仅要完成底层的回路控制和顺序控制,还需要完成系统实时监视、参数调试等任务。而在 NCS 中,这些任务分别有处在不同层次的不同计算机完成(比如在 DCS 中,现场控制层的现场控制站负责底层的回路控制和顺序控制,过程管理层的操作员站负责对系统的趋势显示、实时监视,工程师站负责完成回路的组态、调试、下载等),每台计算机各司其职,控制层次与控制任务得到了细分。

4. 底层控制的分散化与信息管理的集中化

这一特点是控制结构层次化的延伸。分层结构确定了 NCS 金字塔型的整体框架,而这种结构完全符合企业生产的要求(企业生产的底层特点是控制回路数目多,地域分散;而高层要求能够对现场的大量数据进行集中的监视、分析等),在底层 NCS 利用现场控制设备实现了分布式控制,增强了控制系统的可靠性,在高层实现了对底层数据的集中监视、管理,为上层的协调优化、甚至对宏观决策提供必要信息支持。

5. 硬件和软件模块化

从工程应用出发,各种 NCS 的软硬件目前都采用了模块化结构,硬件的模块化使得系统具有良好的灵活性和可扩展性,使系统的成本更低、体积更小、可靠性更高。软件的模块化使得系统的组态方便、控制灵活、调试效率高、操作简单。

6. 控制系统的智能化

这里所指的智能化包含两方面内容:现场设备的智能化和控制算法与优化算法的智能化。一方面,在底层由于微处理器的引入,现场设备不仅能够完成传感测量、回路控制等基本功能,还可以进行补偿计算、故障诊断等;另一方面,在高层 NCS 提供了强大的计算机硬件平台,为先进的控制算法、人工智能方法、专家系统的使用提供了条件,一些先进的控制算法软件包(如模型预测控制、模糊控制等)已经被开发并广泛使用,人工智能、专家系统也已开始用于操作指导、优化计算、计划调度、科学管理等各个方面。

7. 通信协议的渐近标准化

之所以将这一特点单独提出,因为它不仅能反映 NCS 过去的发展历程,也同样预示着 NCS 未来的发展趋势,协议的标准化意味着系统具有更好的开放性、互操作性。在互联网中,TCP/IP 已经成为了标准协议;而在控制网络中,传统的 DCS 系统各成体系,FCS 尽管已经达成了国际总线标准,但总线种类仍有 10 余种(如 Profibus,WorldFip,Can 等),甚至于工业以太网也出现了多种不同的国际标准协议,因此通信协议标准的统一必将是一个漫长的过程。

1.3 网络化控制系统的理论、技术及工程应用

NCS 的出现给传统的控制系统带来深刻的变革,它具备一系列的优点:可实现资源共享与远程监控、远程诊断,交互性好、减少了系统的布线、增加了系统的柔性和可靠性、安装维护方便等。同时,NCS 的出现对于传统的控制理论、技术与工程应用也产生深远的影响。在理论上,网络规模的不断扩大,网络本身的服务质量问题、拥塞问题等也变得越来越突出,给控制理论的研究带来了新的问题;而由于网络通信中不可避免存在传输延迟、丢包等问题,这也给传统的控制理论提出了新的挑战;在技术上,自动控制技术、计算机网络技术和通信技术的结合为网络化控制技术的发展提供了无限广阔的发展前景和挑战,NCS 本身由于不断吸取相关信息技术的最新成果而不断取得创新、突破和发展,使得 NCS 的硬件、软件和网络组成的发展日新月异;在工程应用上,NCS 的出现彻底改变了传统控制工程单一控制回路信息的封闭性,网络化控制工程中出现了新的内容、特点与优势。

1.3.1 网络化控制系统的理论研究

在对系统进行分析和综合时,传统的控制理论往往做了很多理想化的假定,如信息在网络中传输正确无误、计算延迟和传输延迟远远小于采样周期等。然而,在 NCS 中由于控制回路中网络的存在,上述假定通常是不成立的。因此,传统的控制理论需要重新评估才能应用到 NCS 中。

目前,NCS 的理论研究主要有两大分支:一个是源于计算机网络技术以提高多媒体信息传输和远程通信服务质量(Quality of Service, QoS)为目标;一个是源于自动控制技术以满足系统稳定及动态性能(Quality of Performance, QoP)为目标。前者的研究对象是网络本身,后者的研究对象是网络传输环境下的被控系统。前者的评价指标包括网络吞吐量、数据传输率、误码率、时延可预测性和任务可调度性,研究内容是围绕着网络的 QoS,从网络的拓扑结构、任务调度算法、网络拥塞控制等不同角度,运用运筹学和控制理论的方法,提出解决方案,以满足控制系统的实时性要求,同时减少网络时延和时延的不确定性;后者的评价指标包括系统的稳定性、快速性和准确性等,研究内容围绕着系统的 QoP,在现有的通信网络基础上,即以网络的拓扑结构、通信协议和时延特性为已知条件,针对 NCS 存在的延迟、丢包等基本问题,建立系统模型,研究闭环系统的稳定性与控制器综合方法,以保证系统具有良好的稳定性和高质量的控制性能。

本书在理论篇中主要讨论网络拥塞控制机理、基于控制理论的网络拥塞控制算法的研究、网络化控制系统的分析和综合等方面的内容。

1.3.2 网络化控制系统的技术发展

控制技术、计算机技术和网络通信技术是 NCS 产生与发展的技术基础和重要动力,是决定 NCS 从无到有不断变革、创新的关键因素。NCS 正是通过不断吸取相关技术的最新成果,直接推动了 NCS 从 DCS 控制系统、FCS 控制系统、工业以太网控制系统、基于 Web 及 Internet 的远程控制系统的不断发展。本节从技术发展的角度简要列举了 NCS 发展中的重大技术突破,试图总结影响 NCS 发展的核心技术要素,动态地呈现相关 IT 技术的发展对于网络化控制系统

的硬件组成、软件层次与网络结构等方面深刻影响。

(1) 综合利用网络通信技术形成的数据高速通路(Data Highway, DHW)是网络化控制系统的一项核心技术突破,DHW 又进一步推动了操作员站、工程师站和控制器等出现分化。

(2) 随着分布式软件技术的发展以及网络通信技术的推动,软件由 DDC 的集中监视软件体系结构逐渐分化为现场控制软件、操作员软件、工程师软件,出现了工程师组态、下装、在线网络调试的技术方法,出现了专门负责通信的软件功能模块。

(3) 网络化控制系统的另外一项核心技术突破是引入了局域网技术,按照网络节点的概念组织过程控制站、中央操作站、系统管理站及网关,并遵循开放的系统参考模型 7 层通信协议,符合国际标准。

(4) 针对不同功能设置了多个专用的功能节点,如为了解决大数据量的全局数据库的实时数据处理、存储和数据请求服务,设置了服务器;为了处理大量的报表和历史数据,设置了专门的历史站等。出现了网络实时数据库与相应的网络通信软件,实现与其他节点的信息沟通和运行协调。这些数据库将分布在不同的节点上,因此需要通过各个节点之间的网络通信软件将各个层次的数据库联系在一起,并对数据内涵的逐级丰富提供网络支持。

(5) 控制系统最底层的现场控制器和现场智能仪表互连采用实时控制通信网络,它遵循 ISO/OSI 开放系统互连参考模型的全部或部分通信协议以及现场总线系统形式,即信息传输的数字化、控制结构的分散化、现场设备之间的互操作化、技术和标准的全开放化。

(6) 在网络方面,各个厂家已普遍采用了标准的网络产品,工业控制网络逐渐开始采用新型工业以太网,物理层和数据链路层采用以太网和在以太网之上的 TCP/IP 协议,按照工业控制的要求,开发了适当的应用层协议,使以太网和 TCP/IP 技术延伸至现场层。出现了基于工业以太网的网络化控制系统,如 EPA、Ethernet/IP、Modbus—IDA、Profinet、Ethernet Powerlink、EtherCAT 等。

(7) Internet 技术的使用和迅速发展,使得企业网—现场总线的两级结构越来越受到 Web 技术的冲击,出现了基于 Internet 和基于 Web 的远程实时监控系统。运用嵌入式 Internet 技术,将以太网接口、TCP/IP 协议等直接内嵌在现场设备中,从而产生了基于 TCP/IP 协议的网络化智能现场仪表(或称其为 IP 传感器/执行器)。这种面向网络的 IP 传感器/执行器,将传感、信号处理、控制功能、以太网接口、TCP/IP 协议、RTOS 以及小型 Web Server 等软、硬件全部封装在一起,使现场设备成为名副其实的瘦 Web 服务器,在 Internet 上通过 IE 浏览器就可以直接对其进行组态和维护管理。

(8) COM/DCOM/ActiveX 技术、动态数据通信技术(Dynamic Data Exchange, DDE)、(OLE for Process Control, OPC)技术、实时数据库技术、动态图形显示技术、Internet/Intranet 技术、平台服务技术等直接推动网络化控制系统的相关软件技术得到进一步的丰富和扩展,功能逐渐增强,形成了包括通信与驱动模块、实时数据库、监控组态系统、现场设备管理模块、MES 的功能模块、Batch 过程控制、能源调度、生产计划等的 ERP 应用模块的应用软件系统。另外由于控制网络与信息网络的集成技术发展,网络化控制系统的软件进一步层次化,出现了直接控制层软件、监督控制层软件和高层管理软件。不同层次结构的软件与硬件一起完成对工业生产过程实现检测、控制、优化、调度、管理和决策。

(9) 工业以太网、CDMA(码分多址)、GPRS(通用分组无线业务)、无线局域网、无线广域