

王万良 蒋一波 李祖欣 雷必成 著
徐新黎 郑建炜 陈伟杰 陈惠英

网络控制与调度方法 及其应用



科学出版社
www.sciencep.com

网络控制与调度方法及其应用

王万良 蒋一波 李祖欣 雷必成 著
徐新黎 郑建炜 陈伟杰 陈惠英

国家自然科学基金面上项目(No:60573123)资助

浙江工业大学专著与研究/教材出版基金(No:20090101)资助

科学出版社

北 京

内 容 简 介

网络控制使得自动化技术发生了革命性的变化,成为国内外控制领域的一个研究热点。但同时网络系统的分析和设计也变得更为复杂,迫切需要发展与网络控制系统相适应的分析和设计理论。本书阐述了网络控制系统的性能分析和控制算法设计,分析了网络控制系统的调度方法,深入研究了控制与调度的协同设计方法。本书紧密结合实际,介绍了作者研究开发的水电站、旅游景区、海上石油平台等多个工程项目网络控制系统的设计。

本书可供计算机、控制、通信及与之相关的工程应用领域的科研人员阅读,也可作为相关专业研究生和高年级本科生的教材或教学参考书。

图书在版编目(CIP)数据

网络控制与调度方法及其应用/王万良等著. —北京:科学出版社,2009
ISBN 978-7-03-024825-1

I. 网… II. 王… III. ①计算机网络-自动控制系统②计算机网络-调度-自动化 IV. TP273

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2009)第 102132 号

责任编辑:王志欣 张艳芬 / 责任校对:李奕莹
责任印制:赵 博 / 封面设计:耕者设计工作室

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>

双 青 印 刷 厂 印 刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2009 年 7 月第 一 版 开本:B5(720×1000)

2009 年 7 月第一次印刷 印张:20

印数:1—2 500

字数:388 000

定价:60.00 元

(如有印装质量问题,我社负责调换〈双青〉)

前 言

随着计算机网络通信和智能传感技术的飞速发展,自动化技术发生了革命性的变化,为控制领域的扩展提供了空前的机遇和挑战,引领了计算机控制系统从传统的集中式控制过渡到集散控制以及现场总线控制,直至现今的基于网络的分布式控制。这种分布式工作方式彻底地改变了传统控制系统中反馈的应用。

网络控制系统通过数据网络甚至无线网络实现复杂环境下的大系统控制和远程控制,具有交互性好、系统布线少、易于扩展和维护、系统的柔性和可靠性高等优点,这些都是传统控制系统无法比拟的。但通信网络介入传统的控制系统使得网络控制系统的分析和设计变得更为复杂,迫切需要发展与网络控制系统相适应的分析和设计理论。目前,网络控制系统已经成为国内外计算机控制领域的一个研究热点。

本书的主要内容来源于作者多年理论与工程实践的积累,最显著的特点是理论与工程实践相结合。书中不仅阐述了网络控制系统的性能分析和控制算法设计,而且讨论了网络控制系统的调度方法,特别是深入研究了网络控制系统中控制与调度协同设计方法。本书紧密结合工程实际,针对多个实际控制系统,研究网络控制与调度方法。作为网络控制与调度方法的典型的工程应用,书中介绍了在水电站、旅游景区、海上石油平台等多个实际网络控制系统中的应用。

本书涉及的科研成果是作者在国家自然科学基金面上项目“网络控制系统智能调度与控制协同方法及其仿真平台研究”(No:60573123)、教育部高等学校博士学科点专项科研基金“网络化系统智能控制与调度方法及其仿真平台研究”: (No: 20060337002)、浙江省科技计划重点科研工业项目“小水电站远动监控系统与优化运行软件开发”(No:2003C21005)、浙江省服务业电子化重大科技攻关专项“旅游景区网络化综合管理与服务平台研究及应用示范”(No:2004C13015)、浙江省高校实验室建设项目“综合自动化研究生实验室建设”等项目资助下取得的。本书的出版得到了浙江工业大学专著与研究生教材出版基金(No:20090101)资助。

由于作者水平有限,书中难免存在不妥之处,敬请广大读者批评指正。

浙江工业大学

王万良

2009年2月

目 录

前言

第 1 章 绪论	1
1.1 引言	1
1.2 网络控制系统概述	2
1.2.1 网络分类与通信协议	2
1.2.2 网络诱导时延	4
1.2.3 网络中数据的传输	4
1.2.4 网络控制系统典型结构	6
1.3 网络控制系统中的调度问题	8
1.3.1 实时任务调度	8
1.3.2 网络层的数据包调度	9
1.3.3 应用层的控制任务调度	10
1.3.4 可调度分析及调度优化	14
1.4 网络调度的研究现状	15
1.4.1 实时调度理论的推广方法	15
1.4.2 优先级调度方法	16
1.4.3 通信序列调度方法	16
1.4.4 采样周期调度方法	17
1.4.5 带宽及其优化调度方法	19
1.4.6 调度与控制协同设计	21
1.5 网络测量	23
1.5.1 工业现场网络与远程监控系统	23
1.5.2 网络测量技术现状	24
1.5.3 国内外网络测量的研究机构	26
参考文献	27
第 2 章 网络测量与预测	36
2.1 引言	36
2.2 网络测量与预测研究进展	37
2.2.1 网络测量的基本原理	37
2.2.2 网络性能预测研究进展	40

2.2.3	网络控制研究进展	42
2.3	基于 ϵ -SVR 的监控网时延测量与预测	45
2.3.1	概述	45
2.3.2	网络时延测量工具	46
2.3.3	时延预测算法	47
2.3.4	支持向量回归模型	48
2.3.5	误差分析标准	50
2.4	基于 ϵ -SVR 的静态时延预测模型	51
2.4.1	端到端时延测量模型	51
2.4.2	时延数据分析与校验	52
2.4.3	静态样本数据的预测建模	53
2.4.4	实验结果与分析	55
2.5	基于 ϵ -SVR 的动态时延预测模型	59
2.5.1	动态时延变量的参数化	59
2.5.2	预测算法设计	60
2.5.3	基于多项式核的预测	62
2.5.4	基于高斯径向基核的预测	63
2.5.5	基于 Sigmoid 核的预测	64
2.5.6	实验结果与分析	65
2.6	本章小结	66
	参考文献	66
第3章	网络资源调度与网关流量控制	71
3.1	引言	71
3.2	监控网关 QoS 控制中的非合作博弈	73
3.2.1	混合监控系统特点	73
3.2.2	各种新监控技术带来的问题	74
3.2.3	非合作博弈问题	74
3.3	基于非合作博弈的监控网关资源调度	75
3.3.1	监控子系统的参数化	75
3.3.2	多监控子系统的非合作博弈建模	77
3.3.3	调度策略中 Nash 均衡的描述	78
3.3.4	调度策略中 Nash 均衡的存在性及其证明	79
3.3.5	调度问题模型	80
3.3.6	基于遗传算法的求解方法	82
3.3.7	实验结果与分析	83

3.4 基于网络行为识别的监控网关流量控制	84
3.4.1 网络测量与网络行为学	84
3.4.2 各类控制系统网络行为特征分析	86
3.4.3 基于行为判断的控制策略描述	87
3.4.4 控制算法的设计	88
3.4.5 实验结果与分析	90
3.5 对等网中控制系统网络行为的识别与控制	92
3.5.1 对监控网中 P2P 流量的识别	92
3.5.2 对 P2P 流量的控制算法	94
3.5.3 实验结果与分析	96
3.6 分布式网络测量与联动控制系统的设计与实现	97
3.6.1 国内外研究进展	98
3.6.2 系统架构与分块	99
3.6.3 主要功能与特色	100
3.6.4 几种关键技术	105
3.6.5 在大型旅游景区企业网中的应用	107
3.6.6 在水电站远程监控系统中的应用	109
3.7 本章小结	111
参考文献	112
第4章 网络控制系统的调度	115
4.1 引言	115
4.2 基于模糊逻辑的反馈调度	116
4.2.1 基于误差的优先级调度	116
4.2.2 基于反馈的网络调度结构	116
4.2.3 基于模糊反馈调度的原理	118
4.2.4 实验结果与分析	119
4.3 基于 RM 和 EDF 的二维调度策略	123
4.3.1 概述	123
4.3.2 二维调度策略结构	124
4.3.3 可调度性分析	125
4.3.4 二维调度策略的实现及性能分析	127
4.3.5 实验结果与分析	128
4.4 基于误差阈值的网络调度	131
4.4.1 概述	131
4.4.2 具有通信调度功能的网络控制模型	132

4.4.3	NCS 的稳定域分析	134
4.4.4	实验结果与分析	136
4.5	基于模糊逻辑的带宽优化管理	139
4.5.1	系统结构与问题描述	140
4.5.2	基于模糊逻辑的带宽管理器	141
4.5.3	带宽动态管理的上下界	142
4.5.4	利用 QoC 和 RoB 管理来优化 NCS 性能	144
4.5.5	实验结果与分析	147
4.6	基于神经网络的多目标优化调度	150
4.6.1	系统结构和问题描述	151
4.6.2	带宽动态管理的多目标优化	152
4.6.3	基于神经网络的优化调度	153
4.6.4	实验结果与分析	155
4.7	本章小结	157
	参考文献	157
第 5 章	网络控制系统中控制与调度的协同设计	162
5.1	引言	162
5.2	网络调度与能控性、能观性分析	163
5.2.1	网络控制系统的输出反馈调度模型	163
5.2.2	能控性与能观性定义	165
5.2.3	输出反馈静态调度分析	166
5.2.4	能控性与能达性分析	167
5.2.5	能观性分析	169
5.2.6	实验结果与分析	169
5.3	具有通信约束和时延的网络控制系统的反馈镇定	171
5.3.1	概述	171
5.3.2	基于状态反馈的网络控制系统控制与调度协同设计方法	172
5.3.3	基于输出反馈的网络控制系统控制与调度的协同设计	180
5.4	网络控制系统鲁棒控制与调度的协同设计	186
5.4.1	网络控制系统状态反馈调度模型	187
5.4.2	预备知识	188
5.4.3	网络控制系统状态反馈静态调度分析	189
5.4.4	网络控制系统静态调度稳定性和鲁棒性分析	191
5.4.5	鲁棒 H_∞ 控制器设计	192
5.4.6	实验结果与分析	194

5.5 网络调度与最优保性能控制的协同设计	197
5.5.1 不确定网络控制系统静态调度模型	197
5.5.2 保性能控制	198
5.5.3 最优保性能控制	202
5.5.4 实验结果与分析	203
5.6 变采样网络控制系统的分析与设计	205
5.6.1 变采样周期的网络控制系统建模	206
5.6.2 变采样网络控制系统镇定	209
5.6.3 变采样网络控制系统保性能控制器设计	211
5.6.4 网络控制系统 H_∞ 控制器设计	215
5.7 基于混合逻辑动态模型的集成控制和调度的协同优化	221
5.7.1 集成控制和调度的信息调度模型	222
5.7.2 渐近稳定的控制器设计	225
5.7.3 调度与 H_∞ 控制协同优化方法	231
5.8 本章小结	238
参考文献	239
第6章 网络控制的工程实现	245
6.1 引言	245
6.2 网络通信技术	245
6.2.1 TCP/IP 协议族	245
6.2.2 传输层协议 TCP 和 UDP 的特点	247
6.2.3 基于套接字的网络编程	247
6.3 基于宽带的网络控制系统	252
6.3.1 宽带网络的结构	252
6.3.2 视频服务端程序设计	253
6.3.3 视频客户端程序设计	254
6.4 基于调制解调器的网络控制系统	255
6.4.1 调制解调器基本原理	255
6.4.2 数据校验技术	256
6.4.3 基于调制解调器监控系统架构	257
6.5 基于无线网络的网络控制系统	258
6.5.1 无线网络监控系统架构	258
6.5.2 基于无线公网通信方案设计与实现	259
6.5.3 基于无线私网通信方案设计与实现	261
6.6 基于卫星通信的网络控制系统	262

6.7 本章小结	263
参考文献	263
第7章 网络控制在远程监控中的应用	265
7.1 远程监控技术	265
7.1.1 远程监控的概念	265
7.1.2 远程监控系统的功能	265
7.1.3 基于视频的远程监控技术	267
7.1.4 远程监控系统现状和发展方向	268
7.2 水电站远程监控系统	269
7.2.1 水电站视频监控系统总体架构	270
7.2.2 监控系统硬件架构	271
7.2.3 视频服务器软件总体架构	272
7.2.4 视频数据流的采集	272
7.2.5 宽带视频服务器设计	274
7.2.6 窄带视频服务器设计	274
7.2.7 云台控制服务器设计	275
7.2.8 视频数据存储模块设计	276
7.2.9 历史视频的回放	277
7.2.10 视频监控系统客户端设计	278
7.2.11 云台客户端设计	282
7.3 旅游景区视频展播系统	282
7.3.1 视频展播系统架构	283
7.3.2 视频展播系统服务端设计	284
7.3.3 用户并发性管理调度策略	286
7.3.4 客户端连接管理模块设计	288
7.3.5 视频展播系统客户端设计	289
7.4 海洋石油平台油气混输控制监视系统	294
7.4.1 概述	294
7.4.2 系统硬件组成	296
7.4.3 系统组态与软件编制	298
7.4.4 上位机监控软件实现	303
7.5 本章小结	308
参考文献	308

第1章 绪 论

1.1 引 言

控制论奠基人诺伯特(Norbert)在《控制论》第二版的序言中写到:“如果一门新的学科是真正有生命力的,它的引人入胜的中心就必须而且应该随着岁月而转移。因此控制论科学家应该继续走向新的领域,应该把他的大部分注意力转移到近十年发展的新兴思想上去。”网络控制系统是近十年来随着控制技术、计算机网络技术和通信技术飞速发展而形成的一门综合性交叉学科,它反映了在以信息科学为砥柱的新世纪中,各学科理论和应用的交叉、渗透及融合的发展趋势。网络化控制系统刚一出现便受到了中外研究学者极大的关注,并且呈方兴未艾之势。

通过通信网络实现典型空间分布的传感器、控制器和执行器之间的信息交互,以达到被控对象的反馈控制,这样一类控制系统被称之为网络控制系统或网络化控制系统(networked control systems, NCS)^[1~4]。与传统控制系统采用点对点的信息无损传送方式相比, NCS 可以通过数据网络和无线网络实现复杂环境下的大系统控制和远程控制,且具有交互性好、减少系统布线、易于扩展和维护、增加系统的柔性和可靠性等诸多优点,这些都是传统控制系统无法比拟的。不过计算机网络介入传统控制系统使得这类 NCS 的分析和设计变得更为复杂,与传统控制系统相比, NCS 主要有两方面的变化^[4,5]。第一,空间分布的器件通过网络的接入对控制系统的动态行为必然产生重大的影响,如网络资源的共享、不同的介质访问控制方式导致的时延和数据包的丢失、无线网络产生的信道衰落和时变的吞吐量等。第二,分布式控制系统(distributed control system, DCS)设计时涉及的重点发生了转移,如涉及调度和路由的通信协议对系统的稳定性及可靠性的重要影响、算法的实时性、长时间无信息反馈时系统的自治性,甚至连网络介入传统控制理论后的前馈与反馈的基本问题也应重新审视。所有这些变化都迫切要求发展与 NCS 相适应的分析和设计理论。

在实际工业生产中,随着经济的全球化和信息技术的广泛应用,特别是计算机和网络技术的发展,引发了控制领域深刻的技术变革。控制系统结构向网络化、开放性方向发展将是控制系统技术发展的主要潮流。远程监控不但包括设备的远程数据采集、工业流程的远程监视、设备控制系统的远程调试和配置、设备的远程控制 and 设备的远程维护等,而且还要实现企业内部和企业之间全方位的信息融合。

必须通过对工业监控网进行网络测量、预测和控制,才能使其更好地为各个控制系统和监控系统工作。如何在一个包含许多互相独立的、异构的、特性不同的监控系统的开放网络中进行网络时延测量与预测、网络资源的调度与容错、流量的识别与控制等,已成为维持工业网络可靠、正常运行的关键问题。

目前,NCS 已经成为国内外计算机、控制等领域的研究热点。国际控制领域最具权威的 IEEE 控制系统分会(Control System Society)的自动控制杂志(*IEEE Transaction on Automatic Control*)在 2004 年第一次设立了 NCS 专刊^[6]。两位客座主编(Antsaklis 和 Baillieul)在评论中提到,该专刊已尽可能地覆盖了当时 NCS 研究非常活跃的方面。时隔三年,他们在电气与电子工程师协会会报(*Proceedings of the IEEE*)上又一次客座主编了 NCS 专刊^[4]。另外,国际自动控制联合会世界会议(International Federation of Automatic Control World Congress, IFAC-WC)和它的自动化期刊(*Automatica*)、IEEE 的控制与决策会议(Conference on Decision and Control, CDC)、美国的控制会议(American Control Conference, ACC)、国内的中国控制会议(CCC)、中国控制与决策学术年会(CCDC)等重要学术期刊和会议都有 NCS 的专题和各种研讨会。这反映了 NCS 的理论和应用有诸多问题亟待解决,同时也从另一个侧面说明了该领域的研究具有重要意义。

控制技术、计算机技术和通信技术的交叉融合催生了这一学科领域的出现,同时它也代表了下一阶段信息科学的发展趋势。NCS 在实践应用中可以解决远程控制、特殊环境下的系统控制及复杂大系统控制,同时在理论上又促进了控制、计算机、通信、微电子技术等多学科的交叉渗透,从而使理论与应用都进入了一个崭新的阶段。

1.2 网络控制系统概述

NCS 中的网络可以是控制网络,也可以是数据网络。不同的网络具有不同的协议,不同类型的网络介入传统控制系统而产生的网络时延也不尽相同。另外,NCS 中由于不同网络以及不同的调度策略,使得信息的传输方式及先后次序不尽相同,同时也带来了丢包及数据包的时序错乱等问题。本节将对这些基本内容进行简短的回顾,更详细的介绍可以参见文献[7]~[13]。

1.2.1 网络分类与通信协议

NCS 中涉及的网络是一个大的范畴,包括了现场总线、以太网、异步传输模式以及无线网络等多种形式。现场总线控制系统(fieldbus control systems, FCS)为一种狭义上的 NCS,也是本节的研究对象之一。广义的 NCS 是通过广域网将地域分布的应用节点的信息通过交换机和路由器来传递,从而与控制对象构成闭环。

因此 NCS 中的网络一般可分为控制网络和数据网络两种类型^[14]。控制网络是针对分布式控制而发展起来的,它支持小容量数据包(如测量信号、控制命令)频繁的传送,并且满足一定的实时性。总线拓扑结构是控制网络中常用的一种结构。数据网络主要是支持不频繁或突发的大容量数据的传送,如以太网。与控制网络相比,基于数据网络的控制系统则要更多地考虑数据包的丢失及系统的实时性等要求,如工业以太网^[15,16]。

NCS 中常见的工业通信网络及其介质访问控制(MAC)层协议如表 1-1 所示。对于公用通信网络和无线网络的协议和架构可参阅文献[17],[18]。多样性的工业网络可以适应工业现场各异的现状,这也给协议的规范带来了相当大的难度。目前,各种控制网络处于一种百花齐放的竞争态势。

表 1-1 NCS 中常见的工业通信网络及其 MAC 层协议

MAC 协议		随机访问网络	循环服务网络
CSMA	CSMA/CA	WLAN(IEEE802.11)	
	CSMA/BA	DeviceNet, CAN	
	P-坚持 CSMA/CD	Ethernet	
	预测 P-坚持 CSMA/CD	LonWorks	
令牌	集中式令牌		FF, WorldFIP
	分布式令牌		PROFIBUS, FDDI
	虚拟令牌		P-Net, ControlNet
TDMA		TTCAN, FTTCAN	TTCAN, FTTCAN, FireWire, SwiftNet

根据 CAN 的 MAC 协议,有文献将其归类为 CSMA/UID(carrier sense multiple access/unilateral interface detection)^[19]、CSMA/PCR(priority collision resolution)^[20]、CSMA/DCR(deterministic collision resolution)^[21]、CSMA/AMP(arbitration on message priority)^[22,55]。本文将此类协议归为逐位仲裁 CSMA/BA(bitwise arbitration)类型。从广义上讲,它也是冲突避免的一种方法,只是采用的接入技术不同。但和 IEEE802.11 采用的基本方案或 RTS/CTS(request to send/clear to send)方案又有较大的区别,故单独归为 CSMA/BA 以示区别。

传统的计算机控制系统假设被控对象的采样都是等周期的,这种假设使得对系统的分析大大简化。在 NCS 中这种假设不一定成立,它将取决于 MAC 协议。MAC 协议一般分为随机存取和调度两种类型^[7]。载波侦听多路访问(CSMA)是随机访问网络最常用的一种协议,它不能保证等间距的采样;而令牌传递(token passing)和时分多路访问(time division multiple access, TDMA)是调度网络中最常用的协议,它的每一个节点可以根据预定的时间调度表来传送信息,因而在理论上可以提供等间隔采样,但实际上还要取决于同步通道的抖动。因此采用不同的 MAC 协议将会导致 NCS 时变的传输周期。

1.2.2 网络诱导时延

虽然近年来时滞系统的分析和建模取得了很大的进展^[23],但由于 NCS 存在着多种不同的时延特性,难以将现有的时滞系统理论应用于 NCS 的分析和综合。

网络介入传统的控制系统而导致信息传送产生的时延称之为网络诱导时延。它存在于控制系统的信息传送通道中,对网络的稳定性和动态特性具有重要的影响,甚至能导致系统不稳定^[24~27]。网络诱导时延与采用的网络协议、节点驱动方式(时间驱动或事件驱动)、数据包是否丢失等因素有关。时延可能大于一个采样周期,也可能小于一个采样周期。NCS 中存在着不同特性的网络时延,它可能是恒定的,或是有界的,或是随机的,这主要取决于通信网络的协议。对于采用 CS-MA/CD 协议的 Ethernet 网络,它的时延类型是随机的、无界的;对于采用 CS-MA/BA 协议的 CAN 总线,它的时延类型是随机的、有界的;对于采用令牌传递协议的网络,它的时延类型是确定的、周期有界的。因此网络诱导时延可以建模成常数时延、随机时延和时变时延三种方式^[28]。一般而言,网络诱导时延可表示为^[22,29,30]

$$T_{\text{delay}} = T_{\text{pre}} + T_{\text{wait}} + T_{\text{tx}} + T_{\text{post}} \quad (1-1)$$

式中: T_{pre} 为发送处理时延; T_{wait} 为等待时延; T_{tx} 为传输时延; T_{post} 为接收处理时延。

NCS 的时延主要来自等待时延。等待时延随网络节点数和数据量的增加而增大,即使在正常工作状态及网络流量基本稳定的情况下,对于采用不同协议的系统,等待时延也将随着介质访问控制机制的不同而有很大差异,并且当网络流量波动时,这种差异会更大。因此, NCS 中网络诱导时延的不确定性主要来自 MAC 层的数据包排队等待时延。不同的 MAC 协议网络诱导时延分析可进一步参阅文献[31],[32]。

如果时变的网络诱导时延大于采样间隔,则有可能在控制器的采样间隔内到达多个传感器数据包,而控制器只使用最新的数据,这就导致了样本拒绝(data rejection);另外,在一些控制器采样间隔内如果没有传感器数据包到达,则会产生空采样(vacant sampling)^[33]。这两种情况不但会降低系统的性能,而且会使控制信号产生失真,这种高频噪声会加剧执行器的额外磨损。

1.2.3 网络中数据的传输

空间分布的传感器节点、控制器节点和执行器节点的信息交互是通过将数据或控制命令封装成数据包的形式借助网络传输来实现的。同时,不同的网络协议和一些具有优先权的网络(如 CAN 或 DeviceNet 总线)也将影响到数据包的传输情况。因此 NCS 中数据的传输会涉及多种情况,如数据打包的容量大小、传输路

径及传输次序的调度、数据包传输过程中是否会丢失等。

一般而言,数据包的传输涉及单包和多包传输、数据包乱序以及丢包等问题。

1. 单包和多包传输

单包传输是指 NCS 中的传感器节点或控制器节点的待发数据按相应的数据帧格式封装在一个数据包中进行发送。多包传输是指 NCS 中的传感器节点或控制器节点的待发数据按相应的数据帧格式封装在多个数据包中进行发送。采用多包传输主要有两方面的原因。一方面,封装数据的大小要取决于单包字节容量的限制,不同的网络适合不同类型的传输,如 Ethernet 在一个数据包中最多可以容纳 1500 个字节,因此它适合单包传输大批量的数据文件;DeviceNet 在一个数据包中只能容纳 8 个字节,因此它适合对传感器数据分成多包进行快速传输^[7]。另一方面,如果 NCS 的传感器和执行器分布在一个很大的物理空间时,要将这些数据放入一个数据包中往往是不太可能的。因此采用多包传输的 NCS 的被控对象本身不一定是多输入多输出(MIMO)系统,而采用单包传输的 NCS 的被控对象也有可能是 MIMO 系统。

2. 数据包乱序

数据包乱序是指目标节点接收到多个数据包的排序与源节点的发送次序存在差异。它一般发生在具有路由、网关等中继环节的网络控制系统中。数据包在中继环节的队列中等待时间往往不同,同时路由器(或带路由功能的中继设备)会根据网络的实际情况选择合适的网络途径传输数据,因而从源节点出发的数据包可能会经过不同的路径到达目标节点,从而造成数据包的时序错乱。数据包乱序可分为单包传输的乱序和多包传输的乱序两种情况。在单包传输的 NCS 中,每个数据包的数据都是完整的,从源节点出发的数据包到达目标节点的先后次序发生错乱。在多包传输的 NCS 中,一个数据被分成多个数据包进行传输,当这些数据包从源节点出发到达目标节点时,其到达的排序与原来的排序不同。在这种情况下,不仅不同时刻的数据包的时序会发生错乱,而且同一时刻发出的不同数据包的到达时间也会不同。

3. 丢包

丢包是指源节点的数据包无法到达目标节点的现象。网络的阻塞、连接中断、带重发机制的网络协议均会导致数据包丢失。丢包可分为主动丢包和被动丢包两类。在一些网络的拥塞控制算法中,有时会有意地丢弃一部分数据包来防止网络阻塞,但这些数据包往往是非实时的数据,这种现象称之为主动丢包。主动丢包始终传输最新的数据,不进行信息的重发,可保证信息的实时性。在一些带有重发机

制的网络中数据包超过了允许重发次数仍未能成功发送时,数据包将被丢弃,这种现象称之为被动丢包。如采用 IEEE802.3 标准的 Ethernet 利用二进制指数后退算法(binary exponential backoff algorithm)在产生 16 次冲突后即宣告发送失败^[17]。被动丢包会使网络时延加剧,甚至会连续发生数据包丢失。如果传感器数据在一个采样周期内不能及时到达控制器,就会产生空采样问题^[33]。一般而言,反馈控制系统只能容忍一定比例的丢包,当丢包率达到一定的界限时,系统将变得不稳定^[7]。

1.2.4 网络控制系统典型结构

一般而言,NCS 存在三种结构,即径直结构(direct structure)、分层结构(hierarchical structure)^[34]和混合结构(heterogeneous structure)。

径直结构的 NCS 如图 1-1 所示。

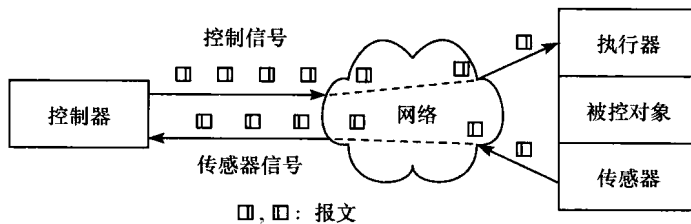


图 1-1 径直结构的 NCS

径直结构是由控制器、传感器、执行器及被控对象组成的一个远程系统。空间分布的传感器、控制器和执行器的信息封装在帧或报文内(数据包),通过控制网络或数据网络进行传送。在实际应用中,多个控制器可以封装在一个主控制单元中来管理多个 NCS 控制回路。径直结构的典型应用包括远程学习实验室^[35]和直流电机的速度控制^[36]等。

分层结构的 NCS 如图 1-2 所示。

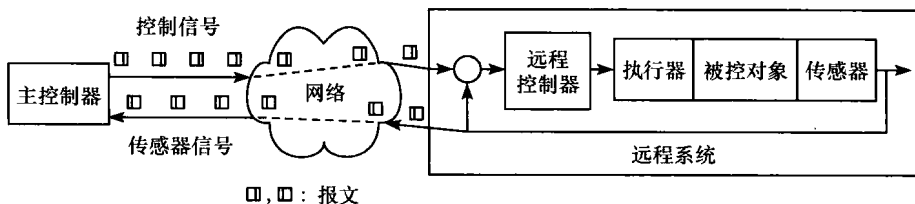


图 1-2 分层结构的 NCS

分层结构是由主控制器和一个远程闭环系统组成。主控制器周期性地通过数据网络将计算好的参考信号发送到远程系统,远程系统根据参考信号来执行本地

的闭环控制,并将传感器测量数据返回给主控制器。一般而言,远程网络控制回路比本地控制回路具有更长的采样周期。这是因为远程控制器在处理新到达的参考信号之前假定已经满足参考信号。与径直结构类似,在分层结构中主控制器可以管理多个远程系统。这种结构的典型应用包括移动机器人^[37,38]、航天器^[39,40]、遥控操作系统^[41]等。

混合结构的 NCS 如图 1-3 所示。

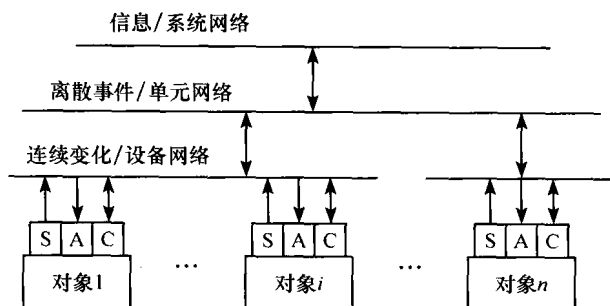


图 1-3 混合结构的 NCS

混合结构可能同时采用径直结构和分层结构两种结构,并且由不同协议的通信网络组成。它一般应用于企业内部网络中,最上层的系统网络主要是企业网络与外界信息网络的互联,提供远程查询或控制。它收集整个企业的每小时或每日的生产信息以及下达生产任务等,这种信息具有大容量、低频率、非实时的特点。中间层是子系统或单元网络,主要传输控制命令或各个子系统的任务更新指令以及子系统之间的协调问题。信息传输可能是周期性的,也可能是偶发的或实时的。最底层网络是设备层,它对被控对象连续变化的信号进行采样并通过控制算法对其进行有效的控制。该层的信息传输具有周期性、实时性、数据包容量小且传送频繁等特点。文献[7]给出了基于可重构单元的集成制造网络控制系统,可重构单元采用美国的 Eaton 公司的可重构装配单元(reconfigurable assembly cell, RAC)。该系统由 FireWire^[43,44]、DeviceNet 和 Ethernet 三种网络组成:FireWire 用于宽带和较大的数据吞吐量的场合,如传送面向控制的视频流;DeviceNet 用于窄带的场合,如开关量等周期性的信息传送;Ethernet 用于上位机与控制器之间的大容量的数据传送。另外,罗克韦尔自动化(Rockwell Automation)公司推出了开放网络三层体系结构,其设备层、控制层和信息层分别采用 DeviceNet、ControlNet 和 Ethernet。它的一个实际应用是一汽—大众 AUDI/BORA/GOLF 的总装生产线^[42]。

实际上,采用何种结构往往取决于具体的应用要求和设计者的选择。例如在直流电机的控制中,由于设计者要求网络控制系统具有快速的反应能力,这个情况就偏向于采用径直结构。而在机器人应用中,机械手往往要求多个电机能够在其