

高等院校计算机系列教材

网络控制系统 与应用

关守平 周 玮 尤富强 编著

internet

internet

internet



电子工业出版社

PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY

<http://www.phei.com.cn>

高等院校计算机系列教材

网络控制系统与应用

Networked Control System and Its Application

关守平 周玮 尤富强 编著

电子工业出版社

Publishing House of Electronics Industry

北京 • BEIJING

内 容 简 介

本书介绍了网络控制系统研究的主要内容,包括基本概念、控制网络、网络调度与网络控制等,其中重点介绍了网络控制的基础知识和网络控制系统中控制器的设计方法。全书共分8章,包括网络控制系统绪论、网络与数据通信基础、实时控制网络、网络与控制性能分析、网络控制系统调度方法、网络控制系统常规控制器的设计、网络控制系统先进控制规律的设计,以及一个具体的网络控制实验系统研究开发的实例。本书在介绍这些内容时,注意理论联系实际,以便于读者对网络控制系统理论的理解与实际应用。

本书可作为高等院校自动化及相关专业的本科教材,也可供研究生、科研人员及工程技术人员学习参考。

未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。
版权所有,侵权必究。

图书在版编目(CIP)数据

网络控制系统与应用 / 关守平, 周玮, 尤富强编著. 北京: 电子工业出版社, 2008.7
(高等院校计算机系列教材)

ISBN 978-7-121-06946-8

I. 网… II. ①关…②周…③尤… III. 计算机网络—自动控制系统—高等学校—教材 IV. TP273

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2008) 第 090036 号

策划编辑: 李洁

责任编辑: 刘凡

印 刷: 北京市顺义兴华印刷厂

装 订: 三河市双峰印刷装订有限公司

出版发行: 电子工业出版社

北京市海淀区万寿路 173 信箱 邮编 100036

开 本: 787×1092 1/16 印张: 15.25 字数: 390.4 千字

印 次: 2008 年 7 月第 1 次印刷

印 数: 4 000 册 定价: 28.00 元

凡所购买电子工业出版社图书有缺损问题, 请向购买书店调换。若书店售缺, 请与本社发行部联系, 联系及邮购电话: (010) 88254888。

质量投诉请发邮件至 zltz@phei.com.cn, 盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

服务热线: (010) 88258888。

前 言

控制、计算机和网络通信是目前世界上三个热门的研究与应用领域，而三者的结合更是令人兴奋的研究课题。网络控制系统就是上述三种技术相结合的最新产物，是一个崭新而前沿的研究领域。

网络化控制系统的出现给控制系统与控制理论带来了新的机遇和挑战。网络化控制系统的研究集中在控制和网络两个方面。其研究内容主要是考虑网络系统的特性，将现有控制系统的设计方法和分析方法应用于网络控制系统，研究基于网络控制的新理论和新方法；并针对控制网络的特点，研究网络本身的调度、协调和建模问题。随着研究工作的深入和研究队伍的扩大，一年一度的美国控制会议（ACC）和 IEEE 的控制与决策会议（CDC）等重要的国际会议上已经开始设置网络化控制系统的专门分组，2001 年 IEEE Control Systems Magazine 中也刊出了网络与控制专辑。现在中国国内的国家自然科学基金重点项目和面上基金项目，都明确规定了网络化控制系统的研究课题。因此，作者在多年从事网络控制系统和实时控制网络理论研究的基础上，结合本科生“网络控制系统”和“现场总线技术”课程的教学经验，参考国内外网络控制系统的最新研究成果，编著了此书，以供自动化及其相关专业的本科生、研究生和相关科研人员参考学习使用。

本书共分为 8 章，第 1 章介绍了网络控制系统的概念、特性、发展历程及其主要研究内容；第 2 章介绍了网络与数据通信的基础知识；第 3 章介绍了控制网络的基本概念，并从介质层、物理层、数据链路层和应用层对控制网络协议进行了具体分析；第 4 章介绍了控制网络特性产生的原因及其对控制系统的影响，主要分析了网络时延产生的原因、采样周期的选择及网络控制系统的稳定性；第 5 章介绍了网络控制系统的调度方法，主要包括基于单处理器的调度算法和网络与控制的协同设计调度方法；第 6 章介绍了网络环境下常规控制器的设计方法，包括 PID 控制器和 Smith 预估控制器；第 7 章介绍了网络环境下先进控制规律的设计方法，包括极点配置、最优控制、鲁棒控制和预测控制；第 8 章介绍了一个基于实验室或校园网络的电机调速实验系统，包括硬件系统设计、网络协议设计、上/下位机软件设计及实验结果分析等。

本书第 1 章、第 4 章、第 5 章、第 6 章、第 8 章由关守平编写，第 2 章、第 3 章由周玮编写，第 7 章由尤富强编写，全书由关守平统稿。为方便教学，本书还配有电子课件等教辅资源，读者可登录电子工业出版社华信教育资源网（www.huaxin.edu.cn）下载。本书在编写过程中参考并选取了有关文献内容，这些文献均列入本书的参考文献目录中，在此对文献作者表示诚挚的谢意。

由于编著者水平有限和时间仓促，书中错误之处难免，希望读者批评指正。

编著者

2008 年 5 月

目 录

第1章 绪论	(1)	3.1.1 工业对象对网络的 基本要求	(48)
1.1 网络控制系统基本概念	(1)	3.1.2 控制网络的种类、功能和 特点	(50)
1.1.1 常规控制系统与网络控制 系统结构	(1)	3.1.3 网络协议与层次结构	(52)
1.1.2 网络控制系统定义 与特点	(3)	3.1.4 控制网络的体系结构	(52)
1.2 网络控制系统的产生和发展	(5)	3.2 介质层与控制网络	(53)
1.3 网络控制系统中的基本问题	(6)	3.2.1 双绞线和其他有线介质	(53)
1.4 网络控制系统的研究内容	(7)	3.2.2 无线介质	(56)
1.4.1 对网络的控制	(7)	3.2.3 光纤介质	(57)
1.4.2 通过网络的控制	(8)	3.3 物理层与控制网络	(61)
1.4.3 综合控制	(9)	3.3.1 EIA RS-232 物理层协议	(61)
第2章 网络与数据通信技术	(10)	3.3.2 EIA RS-422/ RS-485 物理层 协议	(63)
2.1 计算机网络基础	(10)	3.3.3 ISO 11898 物理层协议	(66)
2.1.1 计算机网络的形成 与发展	(10)	3.3.4 IEEE 802.3 物理层协议	(68)
2.1.2 计算机网络的概念	(12)	3.3.5 IEEE 802.11 物理层协议	(69)
2.1.3 计算机网络的拓扑结构	(15)	3.4 数据链路层与控制网络	(71)
2.2 数据通信技术	(17)	3.4.1 IEEE 802.3 MAC 子层协议	(71)
2.2.1 数据通信的基本概念	(17)	3.4.2 IEEE 802.4/802.5 MAC 子层协议	(73)
2.2.2 数据传输	(19)	3.4.3 ISO 11898 MAC 子层协议	(77)
2.2.3 信息交换技术	(26)	3.4.4 CC-Link MAC 子层协议	(79)
2.2.4 差错检测与控制	(28)	3.4.5 IEEE 802.11 MAC 子层协议	(82)
2.3 网络体系结构与协议	(30)	3.5 应用层与控制网络	(83)
2.3.1 网络体系结构的基本 概念	(30)	3.5.1 应用层基本控制模式	(83)
2.3.2 OSI 参考模型	(32)	3.5.2 CAN 总线应用层有界网络 解决方案	(88)
2.3.3 TCP/IP 协议集	(38)	3.6 常用网络协议的协议栈	(89)
2.4 局域网技术	(39)	3.6.1 DeviceNet 协议栈	(89)
2.4.1 局域网概述	(39)	3.6.2 ControlNet 协议栈	(90)
2.4.2 局域网访问控制方法	(40)	3.6.3 CC-Link 协议栈	(91)
2.4.3 高速局域网技术	(43)		
2.4.4 网络互连技术	(44)		
第3章 实时控制网络	(48)		
3.1 控制网络的基本概念	(48)		

3.6.4 工业以太网协议栈	(92)	5.5 网络控制系统调度与控制的协同设计	(123)
第4章 网络与控制性能分析	(93)	5.5.1 具有网络时延的 NCS 模型	(124)
4.1 控制网络的动态服务性能	(93)	5.5.2 NCS 采样周期的优化	(125)
4.1.1 网络控制系统中信息传递的时序过程与时延构成	(93)	5.5.3 仿真实例	(127)
4.1.2 控制网络动态服务性能的解析分析	(95)	5.6 TRUETIME 仿真工具箱	(128)
4.1.3 控制网络动态服务性能的仿真分析	(98)	5.6.1 实时内核模块 TrueTime Kernel	(129)
4.2 网络控制系统采样周期的选择	(99)	5.6.2 网络模块 TrueTime Network	(129)
4.2.1 采样周期和控制性能关系的定性分析	(100)	5.6.3 网络控制系统仿真	(130)
4.2.2 网络控制系统中采样周期的选取范围	(101)	第6章 网络控制系统常规控制器的设计	(137)
4.3 网络控制系统的稳定性分析	(102)	6.1 网络服务质量对常规控制系统的影响	(137)
4.3.1 网络传输时延对系统稳定性的影响	(102)	6.2 常规 PID 控制器及其参数修正方法	(139)
4.3.2 数据包丢失对系统稳定性的影响	(105)	6.3 网络控制系统模糊自适应 PI 控制器	(142)
4.3.3 同时具有时延和数据包丢失的网络控制系统的稳定性	(106)	6.3.1 模糊自适应 PI 网络控制器的结构	(142)
第5章 网络控制系统调度方法	(109)	6.3.2 局部模糊自适应 PI 控制器	(143)
5.1 网络控制系统中的调度问题	(109)	6.3.3 全局模糊自适应 PI 控制器	(145)
5.1.1 网络控制系统的调度	(109)	6.4 网络控制系统 Smith 预估控制	(148)
5.1.2 网络调度问题中几个基本概念	(110)	6.4.1 Smith 预估控制器的原理	(148)
5.1.3 网络调度的几种基本方法	(111)	6.4.2 网络控制系统基本 Smith 预估控制	(150)
5.2 实时系统及其任务调度	(113)	6.4.3 基本 Smith 预估控制——改进 1	(152)
5.2.1 实时系统概述	(113)	6.4.4 基本 Smith 预估控制——改进 2	(153)
5.2.2 实时调度与网络调度	(115)	6.5 基于单神经元 PID 的 NCS Smith 预估控制	(155)
5.3 静态 RM 调度算法	(116)	6.5.1 单神经元模型	(155)
5.3.1 实时系统的 RM 调度算法	(116)	6.5.2 几种典型的学习规则	(157)
5.3.2 网络控制系统的 RM 调度算法	(118)	6.5.3 单神经元的 PID 控制	(157)
5.4 动态 EDF 调度算法	(119)	6.5.4 自适应 PSD	(160)
5.4.1 实时系统的 EDF 调度算法	(119)		
5.4.2 网络控制系统 EDF 调度算法	(120)		

6.5.5 单神经元 PID-Smith 预估 控制	(160)	7.3.4 H_{∞} 扰动衰减分析	(187)
第 7 章 网络控制系统先进控制规律的 设计	(163)	7.4 预测控制设计方法	(192)
7.1 极点配置设计方法	(163)	7.4.1 概述	(192)
7.1.1 概述	(163)	7.4.2 模型描述与基本假设 ...	(192)
7.1.2 网络控制系统的模型 分析	(163)	7.4.3 GPC 控制算法简介	(193)
7.1.3 网络控制系统控制器 的设计	(166)	7.4.4 控制方案	(197)
7.2 最优控制设计方法	(173)	第 8 章 网络控制实验系统	(201)
7.2.1 概述	(173)	8.1 实验系统总体结构	(201)
7.2.2 网络控制系统随机最优 状态反馈控制规律	(173)	8.2 实验系统硬件组成	(202)
7.2.3 网络控制系统随机最优 状态估计	(175)	8.2.1 嵌入式网络接口模块设计	(202)
7.2.4 网络控制系统随机最优 控制器	(177)	8.2.2 数据采集模块设计	(206)
7.3 鲁棒控制设计方法	(179)	8.2.3 输出控制模块设计	(207)
7.3.1 概述	(179)	8.3 实验系统软件	(211)
7.3.2 模型描述与基本假设 ...	(179)	8.3.1 TCP/IP 协议分析	(211)
7.3.3 随机稳定与控制器 设计	(182)	8.3.2 下位机软件系统	(216)
		8.3.3 上位机监控软件系统 ...	(229)
		8.4 实验分析	(232)
		8.4.1 不同连接方式的实验 ...	(232)
		8.4.2 不同网络协议的实验 ...	(233)
		8.4.3 不同采样频率的实验 ...	(233)
		参考文献	(235)



第1章 绪 论

1.1 网络控制系统基本概念

1.1.1 常规控制系统与网络控制系统结构

控制是指对某一对象施加作用，使其按照预想的指标运行的过程。工业上的控制一般是闭环控制，由控制器和被控对象两大部分组成，其典型的常规控制系统结构如图 1.1 所示。

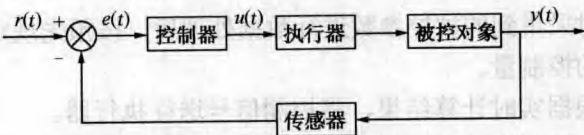


图 1.1 常规控制系统结构图

从常规控制系统来看，控制系统为了获得控制信号，要将被控量 $y(t)$ 与给定值 $r(t)$ 相比较，得到偏差信号 $e(t) = r(t) - y(t)$ 。然后利用 $e(t)$ 进行控制，产生控制量 $u(t)$ 作用于被控对象上，使系统的偏差减小，直到消除偏差，达到使被控量接近或等于给定值的目的。由于这种控制的控制量是控制系统的输出，被控量的变化值又反馈到控制系统的输入端，与作为系统输入量的给定值相减，所以称为闭环负反馈控制系统。上述 $y(t)$ 、 $u(t)$ 、 $r(t)$ 和 $e(t)$ 皆为连续时间信号。

在闭环反馈控制系统中，传感器对被控对象的被控量（如温度、压力、流量、成分、位移等物理量）进行测量，将物理信号转换成一定形式的电信号，反馈给控制器。控制器将与反馈信号对应的工程量和系统的给定值相比较，然后控制器根据误差信号，应用一定的控制算法（如 PID 控制）产生控制信号，驱动执行器进行工作，使被控参数与给定值相一致。一般可以认为，系统的执行器、传感器和被控对象组成了控制系统的广义被控对象，以后所指的控制对象，如不做特殊说明，都是指广义被控对象。

现在工业界应用的控制器，一般都是由计算机系统来实现的，这称为计算机控制系统，其典型结构如图 1.2 所示。

控制系统中引入计算机，就可以充分利用计算机强大的计算、逻辑判断和记忆等信息处理能力，运用微处理器或微控制器的丰富指令，编制出满足某种控制规律的程序。只要执行该程序，就可以实现对被控对象的控制。

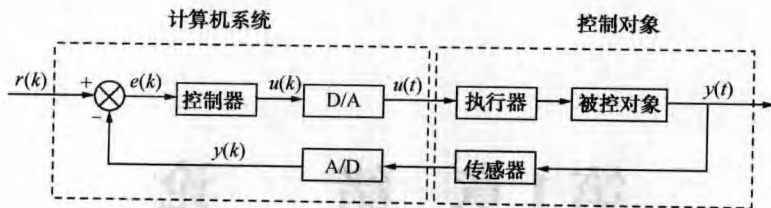


图 1.2 计算机控制系统典型结构图

在计算机控制系统中，计算机处理的都是数字信号。因此在这样的控制系统中，需要有将模拟信号转换为数字信号的模/数（A/D）转换器，以及将数字控制信号转换为模拟控制信号的数/模（D/A）转换器。所以，计算机控制系统也可以称为数字控制系统，该系统中，既有模拟信号 $y(t)$ 和 $u(t)$ ，也有数字信号 $y(k)$ 、 $r(k)$ 、 $e(k)$ 和 $u(k)$ 。

计算机控制系统执行控制程序的过程如下所述。

（1）实时数据采集：对被控参数按一定的采样时间间隔进行测量，并将采样结果输入计算机。

（2）实时计算：对采集到的被控参数进行数据处理后，按预先规定的控制规律进行控制律的计算，确定当前的控制量。

（3）实时控制：根据实时计算结果，将控制信号送往执行器。

上述测量、计算、控制的过程不断重复，使整个系统能够按照一定的动态品质指标进行工作，并且可以对控制对象出现的异常状态及时监督并迅速做出处理。

随着网络技术的发展，工业界、军事、机器人和航空航天等领域对远程、分布式实时控制有了越来越多的需求，并已经部分进行了基于网络控制的应用。网络控制就是在计算机控制系统的基础上，在控制器和被控对象之间加入通信网络（有线或无线网络），使传感器到控制器的反馈通道信息传输和控制器到执行器的前向通道信息传输通过通信网络进行，从而实现对被控对象的计算机远程控制。网络控制系统的简化控制结构如图 1.3 所示。

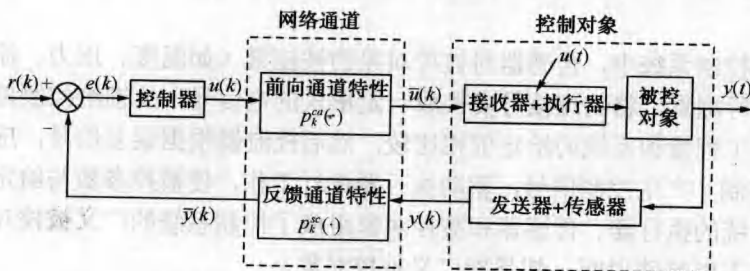


图 1.3 计算机网络控制系统的简化控制结构图

由于通信网络所表现出来的复杂性和不确定特性，相当于在控制器与控制对象之间增加了一个不确定的动态环节，其中反馈通道的动态特性用 $p_k^{sc}(\cdot)$ 表示，前向通道的动态特性用 $p_k^{ca}(\cdot)$ 表示，下角标 k 表示网络 k 时刻的动态特性。反馈通道的信息 $y(k)$ 经过网络传输到达控制器变成了 $\bar{y}(k)$ ， $\bar{y}(k) = p_k^{sc}[y(k)]$ ；前向通道的信息 $u(k)$ 经过网络传输到达执行器变成了 $\bar{u}(k)$ ， $\bar{u}(k) = p_k^{ca}[u(k)]$ 。网络的加入也使控制对象的结构发生了变化，增加了通信接收器和

通信发送器。通信接收器包括通信网络接口和 D/A 转换器,它通过网络接口接收数字控制信号并进行数/模转换后作用于执行器;通信发送器包括 A/D 转换器和通信网络接口,它将检测信号进行模/数转换后变成数字信号,再通过网络接口将数字信号打包发送到网络上。

因此,将通信网络引入控制系统后,在连接智能现场设备和自动化系统,实现现场设备控制的分布化和网络化的同时,也增加了控制系统的复杂性。与传统的点对点控制模式相比,这种网络化的控制模式具有信息资源共享、连接线数大大减少、易于扩展、易于维护、高效、可靠和灵活等优点,但同时由于网络通信带宽、承载能力和服务能力的限制,使数据的传输不可避免地存在时延、丢包、多包传输及抖动等诸多问题,导致控制系统性能的下降甚至不稳定,同时也给控制系统的分析、设计带来了很大困难,因此对这个问题的研究和探索是极为必要的,近年来国内外许多学者都积极地投入到了该领域的研究。

1.1.2 网络控制系统定义与特点

网络控制系统(NCS, Networked Control System)是指传感器、控制器和执行器机构通过通信网络形成闭环的控制系统。也就是说,在 NCS 中,控制部件间可通过共享通信网络进行信息(对象输出、参考输入和控制器输出等)交换。图 1.4 所示是网络控制系统的典型结构图。

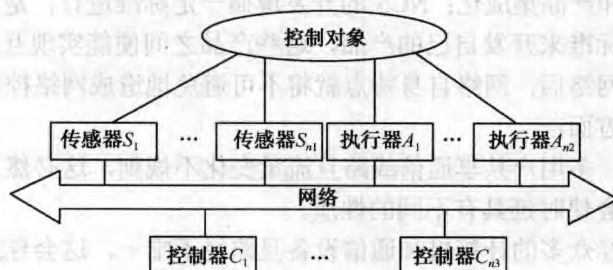


图 1.4 网络控制系统的典型结构

具体来说,网络控制系统存在两种结构:直接结构和分层结构,如图 1.5 和图 1.6 所示。



图 1.5 直接结构的网络控制系统

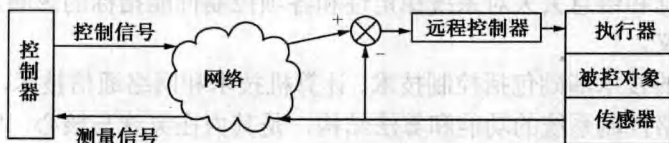


图 1.6 分层结构的网络控制系统

在直接结构中,控制信号封装在帧或报文中,然后通过网络发送到被控对象中;被控对象传感器的测量数据同样以帧或数据包的形式通过网络发送至控制器。直接结构的典型应用包括远程学习实验室和直流电动机的速度控制等。在分层结构中,主控制器通过网络将计算好的参考信号发送给远程系统,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,网络控制回路具有比本地控制回路更长的采样周期。这种结构的典型应用包括移动机器人、遥控操作系统、汽车控制及航天器等。

实际上,采用何种结构往往取决于应用的需求和设计者的方案选择。若将远程闭环控制系统抽象成主控制器的被控对象,对其进行建模与控制,则分层结构实际上可以转化成直接结构。因此若不做特殊说明,本书的研究着眼于直接结构的网络控制系统。

与常规计算机控制系统相比,网络控制系统具有如下的特点。

- (1) 结构网络化: NCS 最显著的特点体现在网络体系结构上,它支持如总线型、星型、树型等拓扑结构,与传统分层控制系统的递阶结构相比显得更加扁平 and 稳定。
- (2) 节点智能化: 带有 CPU 的智能化节点之间通过网络实现信息传输和功能协调,每个节点都是组成网络的一个细胞,且具有各自相对独立的功能。
- (3) 控制现场化和功能分散化: 网络化结构使原先由中央控制器实现的任务下放到智能化现场设备上执行,使危险分散,从而提高了系统的可靠性和安全性。
- (4) 系统开放化和产品集成化: NCS 的开发遵循一定标准进行,是一个开放的系统。只要不同厂家根据统一标准来开发自己的产品,这些产品之间便能实现互操作和集成。

控制系统中引入网络后,网络自身特点就将不可避免地造成网络控制系统的复杂性,其主要表现在以下几个方面:

- (1) 网络环境下,多用户共享通信线路且流量变化不规则,这必然导致网络时延,同时采用不同的网络协议会使时延具有不同的性质。
- (2) 传输数据流经众多的计算机和通信设备且路径不唯一,这会导致网络时延和网络数据包的时序错乱。
- (3) 在网络中由于不可避免地存在网络阻塞和连接中断,这又会导致网络数据包的时序错乱和数据包丢失。

对网络控制系统的评价通常有两个标准:网络服务质量(QoS, Quality of Service)和系统控制性能(QoP, Quality of control Performance)。前者的评价指标包括网络吞吐量、传输效率、误码率、时延可预测性和任务的可调度性;后者的评价指标和常规控制系统一样,包括稳定性、快速性、准确性、超调和振荡等。一个合理的通信协议可以确保网络服务质量;同时,只有充分考虑了控制系统网络化特点的控制算法或控制器设计方案,才能够保证网络控制系统的控制性能。网络协议的静态服务性能指标(如数据帧长度、通信速率、网络拓朴等)和动态服务性能指标(如网络时延特性、丢包率等)都将影响控制网络系统的整体性能。特别是考虑网络时延和信息丢失对系统稳定性和各项控制性能指标的影响,对网络控制系统研究具有重要的意义。

网络控制系统的技术基础包括控制技术、计算机技术和网络通信技术,它是三者的交集。控制技术构建了网络控制系统的功能和算法结构,是其内在灵魂与核心,它反映了被控对象的运动本质。计算机技术是网络控制系统各个节点和控制功能模块的实现方式,它是形成控制网络的软、硬件基础,是网络控制系统的血肉。网络通信技术连接了网络控制系统的各个

组成部分,是系统的连接架构,它构成了网络控制系统的躯干。三种技术有机结合,形成了完整的网络控制技术。

1.2 网络控制系统的产生和发展

最初的计算机控制系统是直接数字控制系统(DDC, Direct Digital Control),它在20世纪七八十年代占据了主导地位。DDC强调计算机直接参与到对象进程的控制中,传感器的模拟量输出和执行器的模拟量输入都和数字计算机点对点连接。DDC是完全集中的体系结构,全部的控制策略在一台计算机中完成。由于所有的功能集中在一台计算机中,即使计算机的一个单一的故障也会使整个系统及其所有的回路失效。

随着控制系统规模的日益扩大及计算机技术的进一步发展,集散控制系统(DCS, Distributed Control System)产生了。DCS比DDC在控制方面有了很大的进步,因为它将控制分散在几个小型的控制器中,而每个控制器处理部分控制回路,这样,一个故障只会影响系统的一部分。DCS在20世纪八九十年代占主导地位,在中国工业控制系统中得到了广泛的应用。在DCS系统中,测量变送仪表一般为模拟仪表,控制器是数字的,因而它是一种模拟数字混合系统。传统的DCS通常有4层结构:第1层是设备层,第2层是I/O层,第3层是控制层,第4层是企业信息层。除了第3、第4层之间采用以太网外,其他的都是专用的网络,控制设备及软件也是专用的,开放程度不够,给系统维护及升级带来不便,难以实现各个部件间的互换与互操作,组成更大范围信息共享的网络系统存在很多困难。DCS在设备配置上还要求网络、控制器、电源甚至模块等都为冗余结构,支持无扰切换和带电插拔。由于设计上的高要求,导致DCS成本太高。中国广大小型生产企业还没有DCS,只有大、中型企业使用DCS系统。DCS之所以一开始被冠名为“分散”的,是相对于DDC而言没有那么集中,但实际上,以今天的标准来看,DCS仍属于集中的控制。

DDC和DCS都属于点对点的连线结构。随着科学技术的发展、被控对象和控制系统日益复杂化,控制系统各部件间需要的信息越来越多,这种点对点结构的控制系统逐渐显示出一定的局限性,主要表现在连线繁杂,维护、升级、扩展困难等。此外这种控制系统结构也不适合如模块化、分散化、综合诊断、维护快速简易和低成本等一些新的控制要求。因此,这种点对点连接的控制网络越来越不能满足当今信息化的要求,这就为网络控制系统的产生提供了迫切的需求。另外,随着软、硬件产品价格的不断下降,传感器、执行机构和驱动装置等现场设备的智能化,也为通信网络在控制系统更深层次的应用提供了必要的物质基础。

现场总线控制系统(FCS, Fieldbus Control System)是20世纪80年代兴起的一种先进的工业控制技术,它是网络控制系统的初级阶段。现场总线出现以后,网络化、集成化、智能化便成为控制系统发展的一种必然趋势。现场总线把通信网络一直延伸到生产设备现场,信号传输的全数字化提高了信号转换的精度和可靠性,避免了模拟信号传输过程中存在的信号衰减、精度下降、干扰信号的引入等长期难以解决的问题。同时,在FCS中具有微处理器的智能I/O与设备构成独立的控制单元,控制功能直接下放到现场,达到了完全的分散控制。

FCS技术经过二十多年的发展,虽然取得了很大的成就,在很多领域都得到了广泛的应用,但也存在着许多问题,制约其应用范围的进一步扩展。首先是现场总线的选择,虽然目前的IEC组织已经统一了国际总线标准,但总线种类仍然有十余种,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。

现场设备控制需要进一步趋向于分布化、扁平化和智能化。控制技术和控制系统应该与企业的商业战略相联系,不仅需要将控制系统的各部分集成到一起,而且需要将控制系统(硬件和软件)集成到整个企业系统中。企业的这种组织管理模式客观上要求信息网络与控制网络的一体化,二者的分离必将会阻碍信息的上行下达,降低企业的生产管理效率。将控制网络融入企业信息网络,可以实现集中管理、高层监控和企业的综合自动化,为进一步接入更大的网络系统,如 Intranet、WAN、Internet 等打下基础,从而实现远程监控、远程诊断和远程维护。

因此,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。TCP/IP 协议是一个跨平台的通信协议组,能方便地实现异种机互连,它促成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全开放分布式网络,符合计算机、网络和控制技术融合的趋势,是发展的必然趋势。网络和微处理器技术的发展,使得网络频带不断加宽,微处理器体积不断缩小,运算能力不断增加。工业以太网、光纤网络和更高性能处理器的出现使 TCP/IP 协议有可能应用于实时测控系统中,从而导致了开放嵌入式控制网络系统的产生,测控仪表和家庭智能化领域已经出现了小型嵌入式设备以 TCP/IP 协议联网的应用,这种控制系统模式借助局域网和互联网使遥感、遥控成为可能。由于借鉴了成熟的计算机软硬件、件和网络技术,可以更大程度地降低系统成本,进一步增强系统开放性。除了应用层,通信协议的统一将不再有不同协议转换问题,为控制网络与信息网络集成提供最完美的解决方案。

1.3 网络控制系统中的基本问题

网络控制系统给控制领域带来极大利益的同时,也存在很多难以解决的问题。由于控制系统通过网络形成闭环控制,网络中存在的不确定因素必然给控制系统的分析和设计带来很多困难。

1. 共享资源的优化调度

当多个控制回路连接到同一控制网络时,网络带宽的优化调度问题就变得格外重要。这时控制性能的好坏不仅依赖于控制算法的设计,还依靠共享网络资源的调度。在计算机科学研究领域,单 CPU 或多 CPU 系统的实时调度算法已经得到充分的研究,但对网络控制系统来说,调度算法不仅要满足可调度性,还要满足控制系统的稳定性。

2. 网络诱导时延

多用户共享通信网络且流量变化不规则,导致网络诱导时延,降低系统的性能甚至引起系统不稳定。在 NCS 中可能存在多种不同性质的时延(常数、有界、随机时变等),属于哪一种主要由网络的协议、负荷、带宽等来决定。网络诱导时延的存在使得系统的分析变得非常复杂,虽然时延系统的分析和建模近年来取得很大进展,但由于网络控制系统中时延的不确定性,使得现有的方法一般不能直接应用。

3. 单包传输和多包传输

单包传输是指 NCS 中的传感器、控制器的一个待发送数据被捆在一个数据包中一起发

送。而多包传输是指 NCS 中的传感器、控制器的一个待发送的数据被分成多个数据包进行传输。在 NCS 中,当需要一次性传输的数据量过大,又受到单包字节大小的限制时,就必须将这些数据分成多个数据包进行传输。另外,由于 NCS 的传感器和执行器常常是分散分布的,要将这些数据放在一个数据包中往往是不可能的。

4. 数据包的时序错乱

在网络环境下,被传输的数据流经众多计算机和通信设备往往路径不唯一,这必然会导致数据包的时序错乱。时序错乱使得原来有一定先后次序的数据包,在从源节点发到目标节点时,其到达的时序与原来的时序不同。时序错乱必然导致该到达的数据包不能按时到达,使得控制系统不能及时的利用信息,难以实现实时性。

5. 数据包丢失

在 NCS 中,由于不可避免地存在网络阻塞和连接中断,这又必然会导致数据包的丢失。虽然大多数网络都具有重传机制,但它们也只能在一个有限的时间内传输,当超出这个时间后,数据就会丢失。传统的点对点结构的控制系统基本上都是同步和定时的系统,它可以对系统中参数或者未建模动态具有较强的鲁棒性,但可能完全不能容忍数据网络的结构和参数的改变(网络中的数据包丢失可以看成网络结构和参数的改变)。因此在 NCS 的设计中,对数据包的丢失问题必须寻找相应的解决方法。

6. 节点的驱动方式

NCS 的节点有两种驱动方式:时钟驱动和事件驱动。时钟驱动是指网络节点在一个确定的时间到达时开始动作,事件驱动是指网络节点在一个特殊事件发生时开始动作。NCS 的传感器一般采用时钟驱动,而控制器和执行器既可以是时钟驱动,也可以是事件驱动。一般情况下,控制器和执行器采用事件驱动优于时间驱动,因为这样能够及时地利用信息,减少了时延。但是当进行多包传输或产生时序错乱时,事件驱动机制将变得很复杂,在设计上存在很大困难。

1.4 网络控制系统的研究内容

对网络控制系统的研究包括三个方面:对网络的控制(Control of Network)、通过网络的控制(Control through Network)和着眼于网络控制系统总体性能指标的综合控制(Integrated Control and Network)。

1.4.1 对网络的控制

这方面的研究主要是围绕网络的服务质量,从拓扑结构、任务调度算法和介质访问控制层协议等不同的角度提出解决方案,以满足系统对实时性的要求,减小网络时延、时序错乱、数据包丢失等一系列问题。这些可以运用运筹学和控制理论的方法来实现。

(1) NCS 体系结构和通信协议的研究

结构决定功能,体系结构的每次发展都带来控制系统性能的极大提高。NCS 是一种先进的控制系统,它的先进性首先体现在结构上,那么这种体系结构为什么是先进的,有没有更先进更适合控制领域的体系结构?

网络技术的应用带来了通信协议的研究问题,ISO/OSI 参考模型、TCP/IP 协议、以太网、

令牌环网、无线通信协议等技术在计算机网络领域已经逐渐成熟并被广泛应用。这些技术能否用于控制领域,如何改造才能应用,已成为 NCS 的研究热点。

(2) NCS 时延分析和网络调度

实时性向来是控制系统面临的重要问题。对 NCS 来说,由于数据传输带来的延迟,实时性的研究就是要保证在特定环境下,各种设备间的通信能保证系统的实时性要求。

一方面,加强网络通信的实时性,采用合适的调度算法是减小时延的根本手段;另一方面,研究网络时延的特征,并建立相应的数学模型,可以为控制算法的设计提供支持和保证。

(3) NCS 数据包传送的问题

这些问题包括:单包传输和多包传输出现数据包时序错乱和数据包丢失问题,NCS 系统的稳定性问题,以及克服上述问题的方法。

(4) NCS 中带通信约束的控制问题

由于网络带宽及系统节点数目的限制,通信速率是有上限的。如何在保证系统稳定或一些其他性能指标的情况下得到每个 NCS 的通信速率上限,以及如何在有通信上限的情况下进行状态估计、控制器设计等就构成了带通信约束的控制问题。它包括位速率约束和信息速率约束。

位速率约束问题存在于拥有有限字长和常被噪声干扰的网络中,需要确定传感器采用何种编码发送数据、控制器如何进行解码,以及需要多快的通信速率。信息速率约束问题是从信息传送的级别来考虑通信约束问题的,是在假定网络无限精确及忽略由有限字长导致的量化误差前提下提出的。

(5) NCS 的系统与信息的集成

这方面的研究主要是研究不同厂家的产品如何实现设备间和系统间的信息传递与沟通,以及如何制定统一的标准使这种集成更方便、成本更低。

集成技术在实践上能解决远程实时控制中遇到的许多难题,理论上还可大大促进控制、计算机和通信技术等学科的交叉发展。

1.4.2 通过网络的控制

通过网络的控制指在现有的网络条件下,设计相适应的 NCS 控制器,保证 NCS 良好的控制性能和稳定性。它可以通过建立 NCS 数学模型用控制理论的方法进行研究。

(1) NCS 的数学模型

NCS 中被控对象的连续工作状态方程为:

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t - \tau) \\ y(t) = Cx(t) \end{cases} \quad (1.1)$$

节点的工作方式分为时间驱动和事件驱动两种。根据节点不同的工作方式,可以得到不同的系统离散事件模型。当时延为随机情况时,此时系统为随机不确定系统。

(2) NCS 的极点配置设计方法

这种设计方法是在 NCS 中,将随机时变时延转化为固定时延,然后针对转化后的固定时延设计控制器。控制器的设计分为控制规律的设计和状态观测器的设计。

这两种设计根据给定闭环系统的极点和观测器的极点分别设计控制规律和观测器,控制

规律的作用是根据系统的状态产生控制量,而观测器的主要作用是利用带延迟的部分状态信息计算系统的全状态。

(3) NCS 的最优化设计方法

在 NCS 中,将网络时延作为系统中的随机变量或随机过程,进而设计最优控制器,就是 LQG 设计问题,它包括最优控制规律设计和最优状态估计两个方面。

根据二次性能指标设计系统的最优控制规律,可由 Kalman 滤波器得到最优状态估计。控制规律的作用是根据系统的状态产生控制量,而观测器的主要作用是利用带延迟的部分状态信息计算系统的全状态。

(4) NCS 的鲁棒控制设计方法

鲁棒控制理论是针对实际工程中模型不确定性发展起来的,因此对于此类问题可以直接应用鲁棒控制器的设计方法来解决。

设计中可将 NCS 时延环节转化为系统的不确定性,同时考虑被控对象的不确定性,然后针对转化后的系统设计鲁棒控制器。该控制器能同时保证 NCS 的鲁棒稳定性和鲁棒性能指标,此性能指标是确定性的性能指标,而不是概率意义上的性能指标。

(5) NCS 的智能控制设计方法

高级控制和智能控制对于解决变化的问题和情况有较好的适应能力,因此可以用智能控制和先进控制策略来解决时延不确定和时延补偿问题,以提高系统的鲁棒性。常用的智能控制方法有 Fuzzy 控制方法、遗传算法、神经网络控制方法、专家控制方法等。

(6) NCS 的性能分析

NCS 的性能分析包括系统的能控/能观性分析、稳定性分析、可靠性与安全性分析等。随着控制系统向大型化和复杂化发展,故障诊断和容错控制也成为 NCS 的一个新的研究课题。

1.4.3 综合控制

综合控制是考虑在提高网络性能和控制性能的基础上,优化和提高整个 NCS 的性能。

(1) 协同考虑控制与调度

NCS 是网络和控制组成的控制系统,其闭环性能不仅依赖于控制算法的设计,还依赖于对网络资源的调度,因此在 NCS 中有必要同时考虑网络协议和控制器的设计。合适的传输协议可以保证网络的服务质量 (QoS),而先进的控制器设计是为了保证控制的品质 (QoP)。因此,应该综合这两个方面,设计智能型的可同时优化网络调度与控制器参数的算法。

(2) NCS 中的并行计算

控制系统中越来越多地应用先进和智能控制策略,因此存在大量费时的计算密集问题。将并行计算技术应用到控制系统中,可以解决控制算法过于复杂而难以在工业现场应用的问题。

并行计算需要多处理器协同工作和相互通信,NCS 为并行计算提供了必要的硬件环境。如何在 NCS 中应用并行计算以获得理想的先进控制效果是一个新的研究课题,其核心内容是如何设计适合于控制系统的并行算法。

第2章 网络与数据通信技术

2.1 计算机网络基础

2.1.1 计算机网络的形成与发展

1. 面向终端的计算机网络

在计算机问世后的一段时间内, 计算机的使用维持在单机运行状态。当时的计算机数量少、价格昂贵。为使多人能同时使用同一台计算机, 在 20 世纪 50 年代, 人们开始进行计算机网络技术的研究。最初, 用一台计算机作为主机, 通过通信线路与多台终端相连, 构成简单的计算机连机系统, 系统中所有数据处理都由主机完成, 终端没有任何处理能力, 仅起着字符输入、结果显示等作用, 这种连机系统被称为主机-终端系统, 或称为面向终端的计算机网络。这一系统的出现标志着将计算机技术与通信技术相结合进行研究的开始, 这时的连机系统与现在定义的计算机网络在概念上是不同的。

到了 20 世纪 60 年代, 随着计算机主机性能的提高, 计算机网络所连接的远程终端台数也不断增加, 如美国航空公司 20 世纪 60 年代初投入使用的飞机订票系统 SABRE1, 就是由一台中心计算机和全美范围内 2000 多台终端相连而成的。在大型主机-终端系统中, 随着终端数量的增加, 系统的矛盾也更加突出。其矛盾主要表现在: 作为主机的计算机既要进行数据处理, 又要承担与各终端间的通信, 主机负荷加重, 实际工作效率下降; 同时, 主机与每一台远程终端都用一条专用通信线路连接, 线路的利用率较低。为了解决这些矛盾, 人们开始研究如何将数据处理和数据通信进行分工, 即在主机前端用一台通信处理机或前端处理机 FEP (Front End Processor) 通过调制解调器与远程终端相连, 专门完成通信工作, 而计算机主机则专门进行数据处理, 使系统的运行效率得到提高, 如图 2.1 所示。另外, 在终端比较集中的地区设置终端控制器 (TC, Terminal Controller) 或集中器 C (Concentrator), 以提高远程线路的利用率。

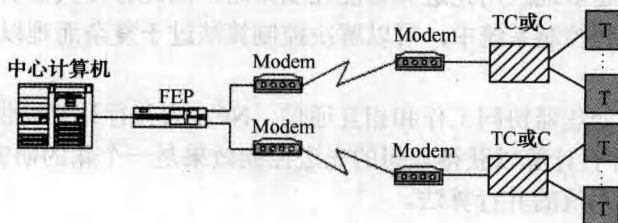


图 2.1 面向终端的计算机网络示意图