



基于互联网的控制系統

Internet-based Control Systems: Design and Applications

[英] 杨双华 著

曹江涛 姬晓飞 译

✎ 将互联网引入工业过程的监视与控制领域，具有开创性的理论和应用的双重价值，是自动控制理论与计算机网络工程和软件工程的完美结合——

✎ 如何选择基于互联网的控制系统结构？
如何实现稳定、可靠的互联网实时数据传输？

✎ 如何从计算机网络工程和控制理论的角度解决互联网数据传输中的时滞和数据丢失问题？

如何设计基于互联网的多速率控制系统？

如何进行基于互联网的控制系统的安全与保密防护？

✎ 本书系统地阐述了由作者提出的基于互联网的控制系统设计方法和实用案例等最新研究成果。



电子工业出版社
PUBLISHING HOUSE OF ELECTRONICS INDUSTRY
<http://www.phei.com.cn>

基于互联网的控制系统

Internet-based Control Systems: Design and Applications

[英] 杨双华 著

曹江涛 姬晓飞 译

電子工業出版社

Publishing House of Electronics Industry

内 容 简 介

本书是一本专门研究基于互联网的控制系统设计与应用的学术专著,书中主要针对工业界对使用互联网进行实时交互和远程监督与控制的需求,以及将互联网技术引入控制系统所带来的诸多技术难题和挑战,系统地阐述由作者提出的用于处理基于互联网的控制系统设计方法和最新研究成果。本书融合了计算机科学和控制工程两大学科领域,引申出一个交叉性、综合性的互联网控制研究新方向。书中论述的内容都是作者提出或者直接参与设计的,其中的研究成果都是已经由工业界实际验证并得到认可的,能够为该技术用于解决实际工程问题提供技术支持和保障。

本书适用于计算机科学和控制工程领域的高年级研究生和专家学者,以及在互联网控制领域从事具体应用的工程设计人员参考使用。

Translation from the English language edition:

Internet-based Control Systems: Design and Applications

By Shuang-Hua Yang

Copyright © Springer-Verlag London Limited 2011

Springer-Verlag London Limited is a part of Springer Science + Business Media

All Rights Reserved

本书简体中文专有翻译出版权由 Springer Science + Business Media 授予电子工业出版社。享有出版版权受法律保护。

版权贸易合同登记号 图字:01-2014-1811

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

基于互联网的控制系统/(英)杨双华著;曹江涛,姬晓飞译. —北京:电子工业出版社,2014.7

书名原文:Internet-based Control Systems: Design and Applications

ISBN 978-7-121-23533-7

I. ①基… II. ①杨… ②曹… ③姬… III. ①互联网络—控制系统 IV. ①TP393.4

中国版本图书馆CIP数据核字(2014)第128601号

策划编辑:郭穗娟

责任编辑:陈韦凯

印 刷:三河市鑫金马印装有限公司

装 订:三河市鑫金马印装有限公司

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:720×1 000 1/16 印张:11.5 字数:234千字

版 次:2014年7月第1版

印 次:2014年7月第1次印刷

定 价:59.80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 zlt@phei.com.cn, 盗版侵权举报请发邮件至 dbqq@phei.com.cn。

服务热线:(010) 88258888。

译者序

本书原著由英国拉夫堡大学（Loughborough University）教授杨双华（Shuang-Hua Yang）所著。该书是首次专门研究基于互联网的控制系统的一本专著，近年来，互联网的发展是惊人的，也是引领时代发展的。互联网作为一种得到广泛普及的信息交互和数据传输载体，已经对当今社会产生了重大的影响，也涉及了工业界的各个领域。本书中主要针对工业界对使用互联网进行实时交互和远程监督与控制的需求，以及将互联网技术引入控制系统所带来的诸多技术难题和挑战，系统地阐述由作者提出的用于处理基于互联网的控制系统设计方法和最新研究成果。

本书融合了计算机科学和控制工程两大学科领域，引申出一个交叉性、综合性的互联网控制研究新方向，书中论述的内容都是作者提出或者直接参与设计的，其中的研究成果已经由工业界实际验证并得到认可、能够为该技术用于解决实际工程问题提供技术支持和保障。这是一本将理论和应用有效结合的专著，集作者多年潜心研究工作之大成，因此译者非常希望通过对该书的翻译，将书中的先进理论和技术应用成果奉献给国内计算机科学和控制工程领域的科研工作者和工程设计人员，以期使基于互联网的控制系统研究在国内得到更多的关注。

本书由辽宁石油化工大学曹江涛教授和沈阳航空航天大学姬晓飞博士主笔翻译，参加翻译工作的还有译者指导的 2011 级和 2012 级研究生们。在翻译过程中，原著作者杨双华教授给予很多的指导和帮助，他严谨的态度、渊博的学识和敏锐的思维都让译者受益匪浅。

在此，对以上各位在翻译本书过程中辛勤的付出表示最衷心的感谢。另外，该书的翻译得到了国家自然科学基金项目（61203021）、辽宁省自然科学基金项目（2013020024）的资助，对此一并表示感谢。

译者：曹江涛 姬晓飞

原著序言

(此书献给我的爱妻丽丽和两位英俊的儿子 Bob 和 James)

如今,互联网不仅在我们日常的生活和工作中起到非常重要的作用,而且在实时的工业制造、规划和管理等领域也同样发挥着重要的作用。在最近的十年间,人们通过开展大量的研究,开发了一种新的技术,我们称之为基于互联网的控制系统。该研究使人们通过互联网对工业过程进行监视和控制成为了可能。互联网的使用为工业界的实时交互和远程监视与控制带来诸多的益处。尽管这种方法看起来是可行的,但是将互联网引入控制系统也带来了许多新的挑战。传统的控制系统设计方法对新的系统并不完全适用。因此,需要重新考虑的设计问题包括说明需求、结构选择、用户界面设计、互联网延迟以及网络控制系统稳定性、安全性和保密性。比如,互联网传输延迟可以导致传输数据的混乱和数据丢失,甚至在极端情况下,会导致整个系统的不稳定。我们同样需要关注保密性问题。如果恶意的黑客获得对互联网控制系统的操作权,后果将是灾难性的。

本书主要研究基于互联网的控制系统。该系统可以使用互联网作为通信网络,通过一个集中放置的集线器,对放置在不同区域的传感器和执行器进行统一的监视和控制。本书旨在系统地阐述由作者提出的用于处理以上各类关于互联网控制系统设计的方法和研究成果。此外,本书还通过一些实际的应用实例,探讨了互联网控制的应用前景。书中提到的最新的研究成果多数都是作者提出或者直接参与设计的。这些成果既是对现存问题的新的解决方案,也是对互联网控制系统未来应用的展望。本书是目前唯一的一本能够把多个研究方向,主要是计算机科学和控制工程领域,纳入一个总体研究主题的学术著作。每次当我与工业界的人士谈论基于互联网的控制系统时,都会马上被问到一个问题:冒着危及系统安全的危险,去实施基于互联网的控制系统值得吗?本书也许可以为您建立起足够的信心,将其中的新技术用于您自己的研究或者工业应用中。

本书包括引言和结论在内共计 13 章,第 2~10 章主要从控制工程的角度对上述的设计问题给出解决的方案,第 11~12 章从计算机网络的角度,对互联网控制系统未来的应用、远程性能监测、远程设计、测试和维护等方面进行了阐述。

本书既可以作为一本教材,也可以作为一本参考书。它适用于控制工程领域、计算机网络领域的控制和系统工程师、实时控制系统软件开发者和 IT 专业人士。本书也可以作为大学高年级学生的关于互联网系统设计的教科书,或者研究生阶段用于实时软件设计的高级例题,它还可以作为讲授通用互联网系统的教材。

作者:英国拉夫堡大学 杨双华 (Shuang-Hua Yang) 教授

反侵权盗版声明

电子工业出版社依法对本作品享有专有出版权。任何未经权利人书面许可，复制、销售或通过信息网络传播本作品的行为，歪曲、篡改、剽窃本作品的行为，均违反《中华人民共和国著作权法》，其行为人应承担相应的民事责任和行政责任，构成犯罪的，将被依法追究刑事责任。

为了维护市场秩序，保护权利人的合法权益，我社将依法查处和打击侵权盗版的单位和个人。欢迎社会各界人士积极举报侵权盗版行为，本社将奖励举报有功人员，并保证举报人的信息不被泄露。

举报电话：(010) 88254396；(010) 88258888

传 真：(010) 88254397

E-mail: dbqq@phei.com.cn

通信地址：北京市万寿路173信箱

电子工业出版社总编办公室

邮 编：100036

目 录

第 1 章 引言	1
1.1 网络控制系统	1
1.2 基于互联网的控制系统	2
1.3 NCS/ICS 的挑战	3
1.4 本书的目的	4
参考文献	4
第 2 章 基于互联网的控制系统需求分析	5
2.1 引言	5
2.2 需求分析	5
2.3 基于互联网的控制系统功能模型	7
2.4 信息系统框架	9
2.5 信息系统框架可能的实现形式	11
2.6 小结	12
参考文献	12
第 3 章 基于互联网的控制系统结构设计	14
3.1 引言	14
3.2 传统的双向远程操作系统	14
3.3 基于互联网的远程控制	17
3.4 基于互联网的控制系统规范结构	20
3.5 小结	22
参考文献	22
第 4 章 基于 Web 的用户界面设计	23
4.1 基于 Web 的用户界面特点	23
4.2 多媒体用户界面设计	23
4.3 应用实例	25
4.3.1 系统结构	25
4.3.2 设计原则	26
4.3.3 系统实现	27
4.4 小结	28
参考文献	28
第 5 章 基于互联网的实时数据传输	30
5.1 实时数据处理	30



5.1.1	实时数据传输的特点	30
5.1.2	小型和大型数据	31
5.2	基于 XML 的数据封装	33
5.2.1	结构映射	33
5.2.2	数据映射	34
5.3	实时数据传输机制	35
5.3.1	基于 RMI 的数据传输结构	35
5.3.2	数据对象优先级	36
5.4	应用实例	38
5.4.1	系统描述	38
5.4.2	数据传输的优先级	39
5.4.3	系统实现	40
5.4.4	仿真结果及分析	41
5.4.5	基于 RMI 数据传输的优点	43
5.5	小结	43
	参考文献	44
第 6 章	从网络角度处理网络传输延迟和数据丢失	45
6.1	基于互联网的控制对网络基础架构的要求	45
6.2	互联网通信的特点	46
6.3	TCP 和 UDP 的对比分析	47
6.4	面向基于互联网控制的网络基础架构	48
6.4.1	实时控制协议	49
6.4.2	服务质量管理和时间同步	50
6.5	基于互联网的控制系统典型实现	51
6.5.1	实验设置	51
6.5.2	系统实现	53
6.6	小结	55
	参考文献	56
第 7 章	从控制的角度处理网络传输延迟和数据的丢失	57
7.1	克服网络传输延迟	57
7.2	操作员位于远程的控制结构	58
7.3	带可变采样周期的基于互联网的控制	59
7.4	多速率控制	60
7.4.1	过程控制中的双层结构	60
7.4.2	多速率控制	61
7.5	时滞补偿器设计	63



7.5.1 反馈通道的补偿	64
7.5.2 前馈通道的补偿	65
7.6 仿真研究	66
7.6.1 多速率控制方案的仿真	66
7.6.2 采样周期为变量的时滞补偿器仿真	67
7.7 实验研究	73
7.7.1 虚拟监督参数控制	73
7.7.2 双速率控制的时延补偿	77
7.8 小结	82
参考文献	82
第 8 章 基于互联网的多速率 SISO 控制系统设计	84
8.1 引言	84
8.2 离散时间的多速率控制方案	85
8.3 设计方法	86
8.4 稳定性分析	88
8.5 仿真研究	89
8.6 实时应用研究	91
8.7 小结	94
参考文献	94
第 9 章 基于互联网的多速率 MIMO 控制系统设计	96
9.1 引言	96
9.2 系统建模	97
9.2.1 状态反馈控制	98
9.2.2 输出反馈控制	98
9.3 控制器设计	99
9.4 稳定性分析	101
9.5 设计过程	103
9.6 基于模型的时滞补偿	104
9.6.1 反馈通道传输延迟的补偿	106
9.6.2 前馈通道传输时滞的补偿	107
9.6.3 远程控制器的状态反馈控制统一形式	107
9.7 仿真研究	108
9.8 小结	110
参考文献	111
第 10 章 系统安全性和保密性	112
10.1 引言	112



10.2	安全性和保密性的相似性	112
10.3	保密性检查的框架	113
10.3.1	阻止可能的恶意攻击的系统框架	113
10.3.2	基于“ <i>What - If</i> ”的保密性检查框架	114
10.4	控制命令传输保密性	117
10.4.1	混合算法	117
10.4.2	实验研究	118
10.5	安全性检查	119
10.6	应用实例	122
10.6.1	保密措施	122
10.6.2	安全性检查	123
10.7	小结	124
	参考文献	124
第 11 章	基于互联网的远程控制性能监测与维护	126
11.1	引言	126
11.2	性能监测	127
11.2.1	数据的采集与存储	127
11.2.2	数据分析和性能辨识	128
11.2.3	性能监测的类别	128
11.3	控制系统的性能监测	129
11.3.1	控制性能监测的通用原则	129
11.3.2	控制性能指标和广义似然比检验	130
11.3.3	性能补偿器设计	132
11.4	远程控制性能维护	134
11.4.1	远程维护的架构	134
11.4.2	后端系统的实现	135
11.4.3	前端系统的实现	136
11.5	应用实例	137
11.5.1	系统描述	137
11.5.2	故障设置	138
11.5.3	故障补偿	140
11.6	小结	141
	参考文献	142
第 12 章	基于互联网的远程控制系统的设计与实现	143
12.1	引言	143
12.2	实时控制系统的生命周期	144



12.3 集成环境	145
12.3.1 现实世界与虚拟世界的交互	145
12.3.2 可用的集成框架	146
12.3.3 通用集成环境的结构	150
12.4 通用集成环境的典型实现	151
12.4.1 设计工作台	152
12.4.2 投运新设计的控制器	155
12.4.3 集成环境下的合作	157
12.5 应用实例	158
12.5.1 工作台测试	159
12.5.2 工作台上测试水箱模型和控制器	160
12.5.3 新设计的控制器的安装	161
12.6 小结	163
参考文献	164
第 13 章 结论	166
13.1 总结	166
13.2 未来的工作	167
参考文献	168
致谢	169

第 1 章

引言

1.1 网络控制系统

互联网由于其前所未有的信息共享能力，已成为过去十年来最成功的通信网络。由于它的存在，访问在线图书馆只需几秒，视频和音频文件瞬间可在数以百万计的消费者之间共享。随着越来越多的设备连接到互联网中，它也成为唯一的一种在全球范围内无处不在的信息传播和沟通工具。甚至随时就可以找到一个网络接入点，这也使得互联网的工作方式十分灵活，且费用低于其他网络。出于以上种种因素的考虑，互联网已经成为政府和工业界用于控制其遍布世界各地的被控对象的理想通信系统。正如之前的网络控制系统（Networked Control Systems, NCS）的出现一样，基于互联网的控制也必将为政府、工业界以及个人带来诸多的益处。

作为一个研究领域，网络控制系统显得尤为重要，也为社会带来了一系列的新的进步。它的主要研究内容是如何利用现有的通信网络，把分布在不同地点的控制器或控制中心与其对应的执行器和传感器等连接到一起。这样的网络可能是电话线等方式的硬连接，或者是蓝牙和 Wi-Fi 等的无线连接。需要特别指出的是，这里所提到的 NCS 是借助于网络这种载体实施具体的系统控制，而不是单纯为了提高网络通信质量而进行的网络系统自身的控制。

早期的控制系统，其结构主要是集中式的，即控制器、传感器和执行器必须点对点地直接连接，且相互之间的距离很近。虽然这可以使信号在传递过程中无时间延迟和信息损失，但是成本却非常昂贵。在 20 世纪 70 ~ 80 年代，一种在大规模分布式系统结构上实施控制的方法得到广泛应用，但是其集中式控制的传统模式使得系统规模太大且过于复杂。在这种模式下，一套生产系统将被分为多个子系统，每个子系统都有各自的控制器，这些独立的子系统之间没有信号传输；从而导致这种分散控制系统效率低下，不能达到所需的控制性能。因此，在 20 世纪 90 年代前后出现了一种准分散控制系统（Gajic, 1987）。顾名思义，就是将分散式和集中式进行结合的控制系统。在这种系统中，大多数信号在本地采集和处理，而一些信号在本地设备和远程控制器之间共享。这样，基于远程通信的在线控制是可以实现的，

但高昂的成本严重制约了用于共享的信号数量。

NCS 则利用现有的、具有强大共享通信能力的网络,获得原来在集中控制模式下的高效率以及从网络任意接入点进行控制的灵活性,同时大大降低了系统成本。当然,使用共享的通信网络会存在一定的风险,主要是由于网络拥塞导致的信号延迟和数据包丢失等,但是这种风险并不是固定存在的,随着网络通信服务质量(QoS)的不断改进,这些风险将会显著降低。

1.2 基于互联网的控制系统

基于互联网的控制系统(Internet-based Control System, ICS)(Yang, 2005)是使用互联网作为共享通信网络的网络控制系统。现在大量的设备具有连接互联网的功能,比如手机、手表、PDA、MP3 播放器等,因此这样的控制系统显然具有重要的用途。近年来,不仅仅是设备连接到互联网的功能在不断增强,同时更多的人开始通过各种设备使用互联网,这也意味着更多的人可以将更多的设备连接到基于互联网的 NCS 中。互联网技术具有迅速传播信息的能力,比如全球市场变化的信息等,而 ICS 不仅仅具有这种能力,还具有信息的控制能力,从理论上讲,ICS 可以使用在斯旺西的 PDA 直接控制、监控和维护一个在北京的生产系统。虽然这看起来有点不可思议,甚至令人略有担忧,但是,它却可以使跨国公司将大部分的控制工程师集中在一个中心机构中,比如集中在纽约市,同时控制那些安装在制造成本较低的中国、印度等地的设备。这将大大节省技术人员在不同地区之间出差带来的成本,并且可以通过直接的调整来适应市场的变化与需求。

与所有的远程控制网络类似,ICS 有以下几个主要组成部分。

- ★控制点:可以发布控制指令,监控运行数据。
- ★节点:可以执行指令和收集数据,通常包括传感器和执行器等。
- ★互联网:用于以上两部分之间的互相通信。

虽然远程控制网络工作所需的基本组成看起来很简单,但是随着各个组成部分的不同情况,比如带有多个控制点、传感器和执行器、使用不同类型的通信网络等,远程控制网络也会变得复杂得多。正如前面所提到的,互联网的成功是惊人的。它作为一种用于信息交流和数据传输的系统,对社会产生了重大的影响。许多依托互联网创建的应用系统正在世界各地兴起,其中大部分集中在远程机器人系统上。在互联网上创建的以教育为目的而开发的虚拟实验室也是其中的一个快速发展的领域。通常,我们认为 NCS 可以包含在基于互联网的“ICS”中。ICS 的研究重点包括指导设计过程、处理互联网延迟,以及确保其安全(security)和可靠。ICS 为控制工程师们提供了一个新的发展机遇,同时也具有广阔的应用前景,从军事部门的专业

监控到普通消费者实时观察一个具体生产过程的各个环节。

对于工业生产领域, ICS 可以为公司提供更大的灵活性, 控制工程师和专家可以在同一个地方远程地指导和监控分散在不同地理位置的生产系统, 从而大大节省时间和出差的开支。由于互联网具有大量的接入点, 这就使经验丰富的项目经理远程协助其他项目经理成为可能, 并可以进行远程的技术合作, 即使他们不在同一个地方, 甚至可能都不在实际的生产现场。ICS 也为营销团队提供了根据实际需求和市场波动改变产量的能力, ICS 还可以用于增加社会透明度, 比如提高政府监督机构和消费群体对工厂生产过程的监控能力, 通过公众监督保证产品的质量。

除了工业生产领域, ICS 还可以用于合作研究和教育项目, 它可以实现在大学和研究机构的多个组织之间共享实验室, 并开展一些自身不具备实验设备条件的研究项目。

1.3 NCS/ICS 的挑战

无论是建立在有线通信还是无线通信基础上, NCS 和 ICS 都面临着许多挑战 (Yang and Cao 2008)。最主要的三个挑战分别是网络延迟、网络安全和多用户访问。数据传输延迟是 NCS/ICS 区别于其他远程操作的主要因素, 大多数远程操作系统是基于局部介质, 对其传输延迟可以进行较准确的建模。然而, 互联网是一个公共且共享的资源平台, 各种终端用户通过网络同时传输数据。距离较远的两个终端节点间的数据传输路径是不固定的, 当太多的用户同时访问同一路径时就会造成网络拥塞。对任何公共网络的传输延迟进行建模和预测都是很困难的。

虽然在控制系统中引入了具有开放式框架的公共通信网络 (例如互联网) 带来了诸多益处, 但网络技术的应用也带来了各种各样的风险。一个典型的风险是由于网络恐怖分子的存在使得具体实施存在困难, 尤其是当系统用于军事或具有潜在危险的产业时。由于互联网采用开放式体系结构, 其对黑客也是开放的。黑客将尝试通过互联网触发并造成故障。一方面, 由于本地的控制系统有可能通过互联网被外界访问或篡改, 因此, ICS 所控制的生产系统的安全范围不能局限于局部的厂区内。另一方面, 远程授权用户可能因为互联网环境约束而导致实际系统的故障。

与本地控制系统相比, NCS 和 ICS 的特殊之处在于多用户、且不确定用户是哪些、有多少用户以及他们在哪里。在 NCS 和 ICS 中, 操作员之间互相看不到对方, 也可能永远不会见面。多个用户试图同时控制一个特定参数的情况是存在的。如果授权用户具有相同的控制整套生产系统的权限, 也将会引起一些问题。这都需要设计一些制度来解决在多用户下的控制冲突问题, 同时协调他们的操作。

尽管 NCS 和 ICS 的概念在控制界的学术领域仍处于起步阶段, 但是对于工业界



来说它并不新鲜。它已经被用于制造业、航空业、汽车、医疗保健、灾难救援等领域。大量的自动化仪器公司生产的硬件/或软件产品均具有连接互联网的功能,例如, National Instrument (NI) 公司生产的最新版本 LabView™ 有一个基于互联网的远程控制功能。Intuitive Technology 公司生产的“web@ aGlance”, 具有为互联网 Java 图形控制台提供实时数据的功能。西门子的 WinCC® 能够在本地控制系统与互联网之间建立连接。Sun Microsystems, Cyberonix, Foxboro, Valmet, Emerson 和 Honeywell 等公司生产的产品都具有接入互联网的功能。

然而, 如果你咨询工业界如何选择一种合适的 NCS 和 ICS 体系结构, 如何克服数据传输延时和数据丢失, 以及如何确保网络控制系统的安全, 你得到的答案可能不是很令人信服。原因很简单, 这些关于 NCS 和 ICS 设计的一些基本问题虽然引起世界各地许多研究人员的兴趣, 但从学术界还没有完整的答案, 很多问题仍处在研究中。

ICS 面临的事实是它通过网络进行通信, 但是这个网络在设计初期并没有考虑承载如此多的通信量。这导致出现多种网络拥塞方面的问题, 例如网络延迟、采样时间、抖动、数据包丢失和网络调度等。这些通常被认为是通信网络的控制问题, 它们会显著地影响 ICS 的性能。本书将从控制工程和计算机科学两个方面阐述如何处理这些问题。

1.4 本书的目的

本书可以作为本科生和研究生以及控制工程和信息技术的参考书籍或教材, 同时它对控制工程师、系统工程师、项目经理、实时互联网软件开发人员和 IT 专业人员也是有帮助的。本书着力于探寻和研究 ICS 的理论和应用、展示具体的应用实例、在该领域当前以及未来的研究情况。本书仅限于针对 ICS 的纯技术方面研究, 不涉及道德方面的影响, 如可能通过刚性集权增加政府和企业的权力, 给恐怖分子提供机会控制有害的制造工艺并造成严重损害等。然而对于任何打算实现 ICS 的人来说, 这些可能都是需要考虑的重要因素。

参 考 文 献

- [1] Gajic, Z., (1987) On the quasi-decentralized estimation and control of linear stochastic systems, Systems and Control Letter, 8, pp. 441-444.
- [2] Yang, S. H., (2005) Internet-based control: the next generation of control systems, Measurement and Control, 38 (1), pp. 11.
- [3] Yang, S. H., and Cao, Y., (2008) Networked control systems and wireless sensor networks: theories and applications, International Journal of Systems Science, 39(11), pp. 1041-1044.

第 2 章

基于互联网的控制系统需求分析

2.1 引言

基于互联网的控制系统开发设计过程包括需求分析、结构设计、控制算法设计、界面设计和安全性分析。确认需求是基于互联网的控制系统设计过程的首要任务。不同的需求可能会导致不同的控制架构，架构的设计应该满足需求分析。目前，存在许多需求验证技术，有的在建立系统拓扑结构或者可行性论证时使用，有的则要等到系统建立完成后再从整体上进行测试。后者进行的需求测试往往太迟，修改付出的代价太大，以至于测试以后也无法对控制系统的规范进行任何的修改（Levson 等，1994）。在本章，我们将讨论针对基于互联网的控制系统的需求确认方法，并建立一种函数模型来描述需求分析，然后将此函数模型扩展为信息层面的框架。这种信息层面的系统框架为基于互联网的控制系统体系结构的选择提供了指导性建议。

2.2 需求分析

一个系统通常由一组协同工作的部件构成并实现一些通用的功能或者目标。对于一个控制系统来说，它的目标就是在过程出现扰动的情况下，使系统输入和输出之间维持一种特定关系。

除了达到过程提出的基本目标需求之外，系统的操作条件也可能存在约束。这些约束将可接受的系统设计限定在一定集合内，这些约束来源于系统目标需求、物理限制和安全考虑等。

由于这些约束条件的影响，系统的目标不能完全实现。这些无法实现的目标不能作为系统的需求。需求分析的主要任务就是确定并解决目标函数和约束条件之间的一种平衡。基于互联网的控制系统需求应包括过程监测和控制目标。然而一些需求需要一个确定的时间，由于网络拥塞引起的传输延迟将导致这类的需求不能实现。像这一类在互联网上不能完全实现的需求，应该排除在系统需求之外。

在此，我们以过程控制为例来描述一个基于互联网的过程控制系统的需求确定



过程。如图 2.1 所示，过程控制系统的层次结构一般由管理、系统级优化、监督、调整和设备（传感器/执行器）等几部分组成。假设这些基于互联网的过程控制需求都是由可实现的需求组成的，需求分析的过程就是完善和规范目标的初级描述，形成一种正式的描述，这才是一个需求。这个过程可以分为水平和垂直两个方向。在水平方向，目标被分割成不同层次的子目标。通过规范这些子目标生成对应于不同控制级别的子需求，整合这些子需求就可以得到系统的需求，在垂直方向，较高层次的子目标需要低层次目标的支持，高层次的目标也可能生成新的子目标，并添加这些子目标到低层次中，因此它可以看作一个自上而下的过程。另外，根据初始需求的概念分析和对网络兼容能力以及客户输入的考虑，生成一些约束条件来改进初始需求。新生成的约束条件从下向上传播，改进各层次的需求。通过以上处理过程，最终的需求可以保证所设计的系统在约束条件下达到最大程度的可实现性。

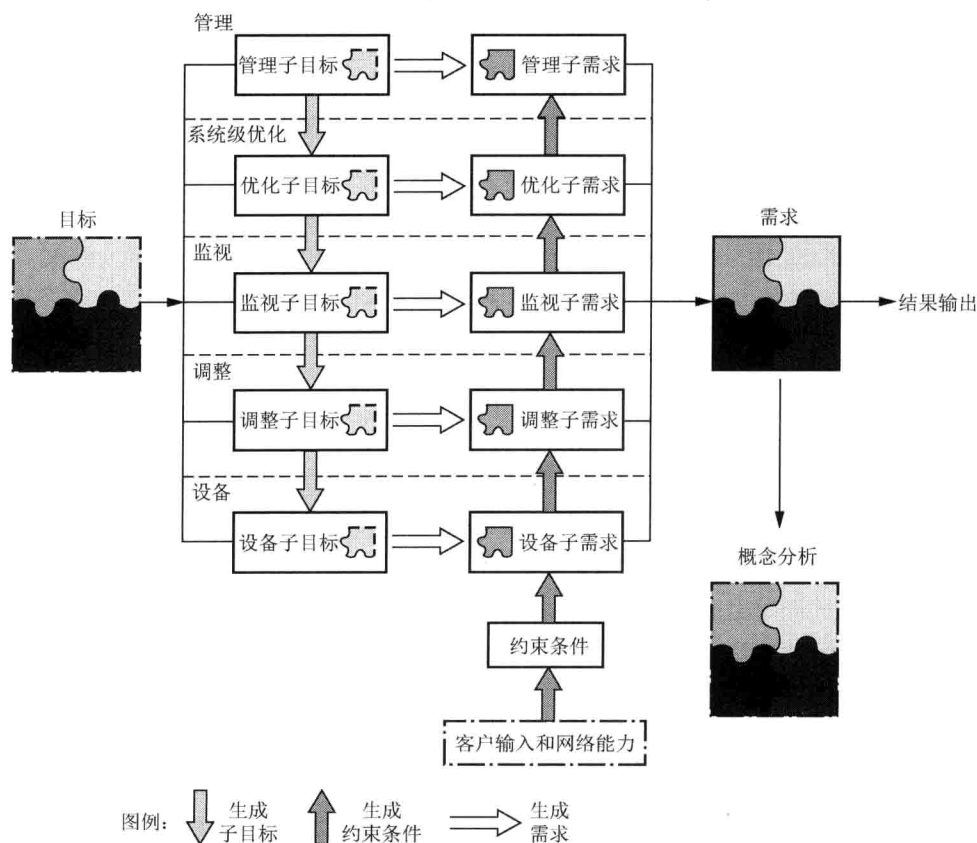


图 2.1 目标、约束和需求