

分布式网络控制系统研究进展

魏利胜¹, 费敏锐²

(1. 安徽工程科技学院, 安徽 芜湖 241000; 2. 上海大学 机电工程与自动化学院, 上海 200072)

摘要:传感器、执行器以及控制器通过共享网络构成的分布式闭环反馈控制系统称为网络控制系统(NCSs)。该文在对网络控制系统进行介绍的基础上,分析了NCSs优缺点以及面临的问题,从建模与控制策略、网络调度算法以及仿真平台构建等不同的角度对网络控制系统的研究进展做了较为详细的综述,并指出NCSs研究中尚待解决的问题,为进一步研究和探索提供参考。

关键词:网络控制系统;建模;控制策略;调度算法;仿真平台

中图分类号: TP393 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000 - 0682(2009)02 - 0016 - 07

A survey of advance results in distributed network control system

WEILisheng¹, FEIMinrui²

(1. Anhui University of Technology and Science, Anhui Wuhu 241000, China;

2. School of Mechatronics and Automation, Shanghai University, Shanghai 200072, China)

Abstract: Networked control systems (NCSs) are spatially distributed systems for which the communication between sensors, actuators, and controllers is supported by a shared communication network. The merits and faults and some basic problems of NCSs are present in this paper. Then, some general survey results are given focused on modeling and control strategy, schedule algorithm, simulation platform, etc. Finally, the fields and development directions to be dealt with are pointed out which provided references for further research.

Key words: networked control systems (NCSs); modeling; control strategy; scheduling algorithm; simulation platform

0 引言

自上世纪90年代以来,伴随着控制技术、计算机技术以及网络技术的飞速发展,分布式网络控制在国民经济众多领域中得到越来越广泛的应用,它摆脱了传统点对点连接的束缚,打破了控制系统在空间位置上的限制,拓宽了控制活动的场所,降低了系统连接的复杂性,减少系统的重量和体积,增强了系统的灵活性和可靠性^[1~3]。

网络控制系统给实际工业控制带来诸多优点的同时,也给控制学科带来了新的挑战。一方面,网络控制系统中的各类信息以分时复用的方式共享有限

的网络资源,不可避免在控制回路中引入了网络诱导时延、数据包丢失、数据包时序错乱等问题,使得传统控制系统的研究方法难以直接应用于网络控制系统;另一方面,网络是信息传输的载体,由于通信带宽、承载能力和服务能力有限等特点,若采用的调度方法不当将会导致各节点数据和控制命令在传输时发生冲突、阻塞以致丢失,不仅降低了信息传输的实时性,且恶化了系统的控制性能。

对网络控制系统的研究可以追溯到1988年,当时Halevi和Ray^[4]在离散领域用增广模型的方法研究了“通信与控制集成系统(简称ICCS)”。而术语“Networked Control Systems(NCSs)”最先于1999年出现在美国马里兰大学Walsh等^[5]的论文中,他从连续系统的角度出发,讨论了网络控制系统的调度算法和稳定性。无独有偶,韩国学者Kim等^[6]于1996年也提出了“Network-based Control System”。

近年来,网络控制系统的研究已逐渐成为国际控制理论界的一个学术热点问题,IEEE、IFAC和Automatica等刊物相继出版了网络控制系统研究方

收稿日期:2008-03-06

基金项目:上海市重点学科项目资助(T0103);上海市教委曙光计划跟踪项目资助(06GG10);上海市科委登山行动计划项目国际合作计划项目资助(061107031);上海市电站自动化技术重点实验室资助。

作者简介:魏利胜(1978),安徽巢湖人,博士研究生,研究方向为网络控制及其可靠性分析,工业智能控制等。

面的专刊,国内的《自动化学报》、《控制理论与应用》、《控制与决策》、《信息与控制》等期刊和重要学术会议也有大量网络控制方面的研究报告。但以上成果主要从网络控制系统不同的角度进行讨论,较为分散,因此,该文旨在从网络控制系统建模,先进控制器的设计与性能分析,网络调度算法以及网络控制系统软、硬件仿真与实验平台的构建 4个方面对网络控制系统研究状况进行系统地分析与总结,以便为日后进一步的研究提供参考。

1 分布式网络控制系统建模的研究状况

网络控制系统的建模是分析和解决网络控制实际应用的前提,在网络控制研究过程中具有十分重要的意义。目前,关于网络控制系统的建模主要是从以下几个方面展开。

1.1 连续系统模型

连续系统模型是指将网络控制系统看成一个连续系统进行分析与设计,被控对象和控制器均采用连续状态方程描述,此种模型通常要求系统的采样周期足够小。Walsh等^[5]在忽略观测噪声等情况下,将网络控制系统建立成一个连续系统模型,并以此模型为例,利用摄动模型和 Lyapunov 第二法分析了系统的稳定性;Antonio等^[7]在此基础上进一步考虑了网络数据包丢失和延时等不确定性。

1.2 离散系统模型

Wu等^[8]在假设网络控制系统中传感器和控制器之间、控制器和执行器之间数据包丢失服从马尔可夫模型的情况下,构建了离散模型,并分析了系统稳定性;Ray等^[4]在没有考虑系统噪声的情况下,且各节点均采用时间驱动方式,提出了一种增广的确定性离散模型,但由于增广状态的维数与系统状态维数、输入维数以及时延大小有关,因而利用该模型描述系统时,增广状态方程的维数常常很大;Nilsson^[9]在基于网络诱导时延服从马尔可夫链模型假设的基础上,建立了系统的离散时间模型;另外,俞立等^[3]利用异步动力系统分析方法,研究了在一定数据包丢失率下的短延时网络控制系统离散时间模型的稳定性。

1.3 混合系统模型

Zhang在文献[2]中采用混合系统技术建立了网络控制系统的数学模型,并分析了时变传输周期、网络时延、丢包情况下的稳定性,该模型是一个既含有连续变量又含有离散变量的混合系统;Hu等^[10]在此基础上,考虑控制器采用时间驱动方式下,利用

线性矩阵不等式得出较小保守性的稳定性条件。

1.4 时滞系统模型

时滞系统模型一般能比较全面地考虑网络控制系统的各种情况,建立的模型比较符合实际。Gao等^[11]建立了状态变量包含多重延时的网络时滞系统模型,并基于 Lyapunov - Krasovskii 函数分析了系统的稳定性;Lian^[12]对多步时延下的单闭环网络化控制系统建立时滞可变系统状态空间模型,并将优化控制器的设计归纳为 LQG 最优控制问题。

1.5 多包传输模型

通常网络控制系统中的数据传输存在两种情况,即单包传输和多包传输。单包传输需要首先将数据打在一个数据包里,然后进行传输,而在实际网络控制中由于一些网络协议只允许传输比较小的数据包或传感器和驱动器分布在不同的物理位置,因此,需要将传感器数据或控制数据分在不同的数据包内,采用多包或多通道传输方式;Zhang等在文献[13]中将 NCS 中的多包传输问题考虑为异步开关系统进行建模,选通的传感器,正常传输数据,而其他传感器则采用上一状态的信息;樊卫华等^[14]针对传感器节点与控制器节点之间存在网络的多输入、多输出网络控制系统,给出了模型化描述和相关稳定性分析结果;邱占芝等^[15]研究了一类具有分布时滞、输入受限的多输入、多输出网络化控制系统的建模,并基于时滞系统时滞依赖的分析方法得到了具有较小保守性的时滞上界结果。

1.6 数据包丢失模型

在 NCS 中当节点故障或信息冲突时会发生丢包现象,而数据包的丢失可能会对控制系统的控制品质产生很大的影响,甚至造成系统的不稳定,因此有必要对这种现象进行建模与分析。Zhang等^[13]通过将 NCS 中的丢包问题看作为异步开关,以对系统进行建模;Huang等^[16]用一个具有两个状态的马尔可夫链来描述包丢失过程,将网络控制系统建模为一个具有两种运行模式的马尔可夫跳变线性系统。

此外,有一些研究人员还针对网络控制系统的特性,提出了一些其他描述模型,如切换系统模型、异速率采样模型等。

2 分布式网络控制系统控制策略的研究状况

2.1 基于确定性理论的 NCSs 控制方法

Luck等^[17]通过在控制器和执行器的接收端各设置一个 FIFO 缓冲器和移位寄存器来保存历史时刻的测量值,将网络的随机时变时延重构为确定性

时延,利用预测的方法补偿网络诱导时延,以改善系统的性能;陈辉堂等^[18]针对网络只存在于控制器和传感器之间的网络控制系统,设控制器与传感器均为时间驱动,利用文献[17]类似的方法将网络诱导时延转化为固定时延,设计了具有时延补偿功能的状态观测器,并证明了状态观测器的极点可以任意配置;Chan等^[19]根据已知的时延数据出现的概率计算而得到的两个均方意义上的最佳预报器的线性组合,提出了一种基于概率的预估器时延补偿控制方法,该方法虽然提高了预报的性能,但只考虑了传感器到控制器之间的时延,所以也只能补偿这部分

2.2 基于随机最优控制的 NCSs控制方法

Nilsson^[9]在假设网络时延小于采样周期的情况下,采用随机最优控制的方法来处理 NCSs中的随机时变时延,将时延的影响转化为一个线性二次高斯型问题;胡寿松等^[20]进一步将上述方法推广到了网络时延大于一个采样周期的情形,在控制器和执行器均为事件驱动方式下,给出了随机最优控制器的设计方法。

2.3 基于摄动理论的 NCSs控制方法

这种方法是使用非线性和摄动理论,假设系统观测噪声为零且采样周期较小的情况下,将网络系统中的时延影响看作一个连续的摄动。Walsh等^[5]在短延时的情况下,用摄动理论分析了非线性 NCSs的稳定性,得出了最大允许时延上界;Krtolica等^[21]在长延时且传感器、控制器和执行器采用时间驱动时,利用混合系统的方法分析了网络控制系统的稳定性;而Hassibi等^[22]利用跳跃线性系统的方法分析了文献[21]中所研究的网络控制系统的稳定性,并引入了一种用于设计系统反馈控制律的V-K迭代算法。

2.4 基于鲁棒控制理论的 NCSs控制方法

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,将其用于 NCSs中,关键是要将网络时延转化为系统的一个不确定块,同时考虑被控对象本身的不确定性,然后再针对转化后的系统设计鲁棒控制器,以同时保证 NCSs的鲁棒稳定性和性能指标的要求。Lemmon等^[23]针对时变多路时延且存在数据包丢失的网络控制系统,运用鲁棒控制理论设计控制器并进行了仿真分析;Antsaklis等^[24]把 NCSs中的控制器到执行器的时延以及传感器到控制器的时延看作扰动,然后利用网络时延的上下界来估计时延的值,在无需网络时延的概率分布信息

的情况下,从频域角度设计了 NCSs的鲁棒控制器。

2.5 基于智能控制理论的 NCSs控制方法

利用随机等理论研究网络控制系统,最根本的前提是假设网络延时的概率分布已知,故得出的结论仅适用于特定分布的时延。而实际的网络时延受到控制网络协议、网络中节点的数目以及网络调度算法等诸多因素的影响,要获得实际的网络时延的分布是不现实的。因此有学者考虑将智能控制引入到网络控制中,利用智能控制算法的优点来解决网络控制系统中的不确定性的影响^[25,26]。Marquez等^[27]针对一类单层网络控制系统,采用迭代学习理论设计网络控制器;Chow等^[28]利用设计中间件来估计网络诱导延时,预测机器人位置以及调整增益;方华京等^[29]则采用时间窗在线估计网络诱导延时,并以此修改模糊线性二次型调节器的参数;课题组针对这种情况也做了相关研究,并于2003年在中国智能自动化大会上提出了两层架构网络学习控制的新概念^[30],其现场的控制单元采用简单、易于实现的方式;而复杂的智能学习算法则通过网络连接的远端计算机实现,这既提高了闭环系统的控制性能,又充分利用了网络资源,降低了系统的成本。

3 分布式网络控制系统调度策略的研究状况

在网络控制系统中,网络作为信息传输的载体,承担着工业控制现场大量的数据和信息的传输,这些数据和信息以分时复用的方式共享有限的网络资源,若采用信息调度措施不当,网络资源则难以得到有效利用,甚至造成大量信息阻塞,最终恶化系统的性能。

当前,网络控制系统中的信息调度策略主要采用静态调度策略、动态调度策略以及协同优化调度策略,其中静态调度策略离线分配好各节点的网络带宽或者优先级,在系统运行过程中保持不变,因此灵活性较差;动态调度策略考虑网络控制系统中信息流的时变性,根据系统需求在线调整各节点的网络带宽或者优先级;而协同优化调度策略充分考虑控制性能与调度性能之间的交互影响,以满足控制系统总体性能的需求。

3.1 静态调度策略

静态调度方式是在任务集运行前产生一个静态的调度表,系统运行时总是按照调度表决定的任务序列执行。Liu和Layland^[31]率先提出单调速率调度算法(rate monotonic, RM),主要是根据任务执行周期来设定优先级,任务执行周期越短,其优先级别

越高; Zhang等^[13]考虑网络中信息传输的特征, 将RM调度策略推广到一类传输信息不可抢优的控制系统中; Gerhard^[32]针对静态调度系统中的混合任务集的联合调度问题, 提出了时间片移位算法, 以及单调时限算法(Deadline Monotonic, DM); Kopetz也在文献[33]中提出了一种先进先出算法(First in First out, FIFO)。此外, 还有基于时间窗的静态调度算法等。

3.2 动态实时调度策略

动态调度算法可以对任务集中不同的任务赋予不同的优先级, 而且可以在作业调度过程中改变作业的优先级, 从而使任务系统的总体调度执行过程趋于优化。

当前, 对网络控制系统动态实时调度策略的研究成果较多。最早时限优先调度(Earliest Deadline First, EDF)算法是经典动态实时调度算法之一, 其设计思想是按照任务截止时间给任务指定优先级, 截止时间越早, 任务被调度的优先级就越高; 文献[34]分析了考虑抢占开销的情况下EDF算法的性能, 并对算法做了进一步的改进; Walsh等^[35]在此基础上提出最大误差优先-尝试一次丢弃(MEF-TOD)的动态调度, 基于在线获取的网络诱导传输误差, 动态分配网络带宽, 当多个节点在传输中发生冲突时, 最大权误差的节点优先传输数据, 竞争失败的节点则放弃本次传输; Otanez等^[36]提出基于死区的动态调度策略, 通过对网络中的各节点设置传输死区, 控制访问网络的数据量; Kewon等^[37]利用业务平滑的技术控制Ethernet网的通信量, 通过在Ethernet网的UDP层和MAC层插入定速率业务平滑器和自适应业务平滑器以限定MAC层数据包的到达速率, 并且保证网络诱导时延的有界性, 从而提高网络的QoS; Cena等在文献[38]中采用优先级提升-分布式优先级排队(PP-DPQ)调度网络中的实时数据和非实时数据, 以保证实时数据传输最大间隔具有确定上界, 非实时数据在传输中公平地竞争网络资源; Raja^[39]则对时间窗的静态调度算法进行了改进, 提出一种优先级循环服务和动态时间窗的带宽分配策略; Hong等^[40]将基本传输周期分割成多个时间段, 每个时间段为一个时间窗口, 时间窗的长度取决于数据信息的长度以及网络的传输速率; 刘鲁源等^[41]将Hong的方法改进后提出基于同步相和异步相的时间窗调度策略, 同步相中的时间窗口用于传输控制回路产生的周期数据, 异步相中的窗口用于传输非周期数据; 白涛等^[42]将模糊控制理论引

入到NCS信息调度中, 利用基于IF-THEN规则的模糊逻辑确定数据传输的优先级。

此外, Stankovic等在文献[43]中提出了反馈控制实时调度的思想, 给调度器定义误差项, 监测误差并连续调整调度器来保持系统的稳定性, 而且还给出了一种结合PD控制和EDF调度器的反馈控制实时调度算法FC-EDF(Feedback Control Earliest Deadline First); Eker等^[44]针对数据传输执行时间不确定以及工作负载量不确定的问题, 用反馈调节器来调节控制回路采样间隔, 以优化性能指标函数, 使整个系统的性能达到最佳状态。

3.3 协同优化调度策略

协同优化是1996年Seto等人在文献[45, 46]中率先提出的, 其主要思想是从控制的角度出发, 讨论在系统稳定和资源有限的约束下, 如何获得最优的采样周期, 使数据能用RM、EDF等算法进行调度; Cervin^[47]在此基础上进一步研究了如何选择时延变化的网络控制系统采样周期, 并分析了短时延采样周期对系统性能的影响; Tip suwan^[48]在协同优化调度方面也做了一定的研究, 提出通过网络中间件在线获取网络当前的QoS状况, 然后基于QoS动态调节控制系统的采样周期和控制器的增益, 以得到可能最优的系统性能; Otanez等^[36]则提出了一种死区动态调度策略, 兼顾网络利用率与跟踪性能, 并探讨了传输死区门限优化问题; 何坚强等^[49]在上述研究的基础上讨论了系统采样周期和网络时延对NCSs的性能影响, 以优化系统性能为目标, 求取最优采样频率。

4 分布式网络控制系统仿真与实验研究状况

近几年来, 随着对NCSs研究的不断深入, 也有一些学者开始致力于网络控制系统仿真软件的开发以及实验平台的构建方面的研究。

4.1 仿真软件开发

1999年瑞典Lund工学院Dan Henriksson和Anton Cervin等^[50]针对网络控制系统的仿真, 开发出一种名为TrueTime的软件包, 它能与Matlab软件中的其他控制模块相结合, 简便而又快速地搭建实时NCSs; 美国加州大学的LNBL网络研究组于1989年开发了NS2网络仿真软件^[51], 利用它可以构造各种网络拓扑结构, 并测试网络性能, 具有良好的开放性和扩展性; 英国Sussex大学工程与设计系Yang^[52]开发了网络控制仿真软件包NCS_simu, 适用于在网络统计特性已知的情况下对网络控制性能

进行分析仿真研究。

4.2 实验平台构建

美国加州大学伯克利分校研制了一个通过 Internet 远程控制的种植花草的工业机器人手臂,用户通过机器人手臂上的摄像机所传输的图像,对花园内进行简单的操作;新加坡国立大学建立了允许用户通过 Internet 进行远程控制的虚拟实验室,可以远程完成机器人自动控制等实验项目;Lee 等^[53]建立了基于 Profibus - DP 总线的小车模糊控制系统,该方法能完全呈现真实的控制系统与网络系统,具有较为客观准确的仿真效果;Overstreet 等^[54]建立了因特网实时控制实验室,访问者可以通过互联网直接操作实验室的实验装置;刘国平等^[55]在格拉摩根大学通过 Internet 实现了一个真正意义上的预测控制网络实验平台;于之训等^[56]开发了由上位 PC 机、DSP 运动控制器、LonWork 现场总线网络、攻防驱动电路以及直流伺服电机等组成的 NCSs 实验平台;魏震等^[57]搭建 CAN 网络实验平台来验证在线时延预估算法;黄海、王树青等^[58]建立一个基于实际 Ethernet 的网络控制实验平台,该平台采用了以太网 + TCP/IP 技术,用户能够通过该平台来控制虚拟对象和实际对象,观察网络的基本情况,结合网络和控制来统一设计。

5 总结

随着控制系统规模的日益扩大,网络控制系统正以其独特的优势赢得越来越多的研究和关注,经过过去数年的探索,已取得一定的成果。但是,NCSS 理论还远没有成熟,现有的控制理论对于 NCSs 中涉及到的一些根本性问题常常显得无能为力,有许多难点和关键技术有待于进一步的研究和探索,如:在网络建模方面,如何针对多变量复杂对象的网络控制系统以及非线性动力特性进行建模,并能够准确地反映出网络通讯参量方面的特性对系统性能的影响;在网络控制策略设计方面,如何解决有限随机信息条件下网络控制系统的稳定性和鲁棒性,以及如何确定网络控制系统的性能极限;在网络调度与控制协同设计方面,如何从反馈的角度设计调度策略,合理分配拓扑结构复杂、资源有限的网络,以协调通讯网络与控制器之间的相互制约,将通讯网络与控制器的设计有机结合起来;网络控制平台的建设方面,如何针对实际工业工程中广泛存在的强实时网络控制系统,以及有线/无线异构多通道网络控制系统开发相应的仿真实验平台。

参考文献:

- [1] J Nilsson, B Bernhardsson, B Wittenmark. Stochastic analysis and control of real - time systems with random time delays[J]. Automatica, 1998, 34(1): 57 - 64.
- [2] Wei Zhang, Michael S Branicky, Stephen M Phillips. Stability of networked control systems[J]. IEEE Control Systems, 2001, 21(1): 85 - 99.
- [3] WenAn Zhang, Li Yu. Output Feedback Stabilization of Networked Control Systems with Packet Dropouts [J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2007, 52(9): 1705 - 1710.
- [4] Y Halevi, A Ray. Integrated Communication and Control System: Part I - Analysis [J]. Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control, 1988, (110): 367 - 373.
- [5] G C Walsh, H Ye, L Bushnell. Stability Analysis of Networked Control System [C]. San Diego USA: Proceedings of American Control Conference, 1999: 2876 - 2880.
- [6] Y H Kim, W H Kwon, H S Park. Stability and a Scheduling Method for Network - based Control Systems [C]. Taipei, Taiwan: Proceedings of the 22nd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, 1996: 934 - 939.
- [7] Mat á s Garc á - Rivera, Antonio Barreiro. Analysis of networked control systems with drops and variable delays [J]. Automatica, 2007, 43(12): 2054 - 2059.
- [8] Jing Wu, Tongven Chen. Design of Networked Control Systems With Packet Dropouts [J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2007, 52(7): 1314 - 1319.
- [9] J Nilsson. Real - time control systems with delays [D]. Lund, Sweden: Department of Automatic Control, Lund Institute of Technology, 1998.
- [10] Lisheng Hu, Tao Bai, Peng Shi. Sampled - data control of networked linear control systems [J]. Automatica, 2007, (43): 903 - 911.
- [11] Huijun Gao, Tongven Chen, James Lam. A new delay system approach to network - based control [J]. Automatica, 2008, 44(1): 39 - 52.
- [12] Fengli Lian. Analysis, Design, Modeling and Control of Networked Control Systems [D]. University of Michigan, 2001.
- [13] W Zhang. Stability Analysis of Networked Control Systems [D]. Case Western Reserve University, 2001.
- [14] 樊卫华, 蔡 骅, 周 川, 等. MMO 网络化控制系统的建模与分析 [J]. 控制理论与应用, 2005, 22(3): 487 - 490.
- [15] 邱占芝, 张庆灵. 一类多输入多输出网络控制系统的稳定性分析 [J]. 控制与决策, 2005, 20(5): 525 - 528, 544.

- [16] Minyi Huang, Subhrakanti Dey. Stability of Kalman filtering with Markovian packet losses [J]. Automatica, 2007, (43): 598 - 607.
- [17] R Luck, A Ray. An observer - based compensator for distributed delays [J]. Automatica, 1990, 26 (5): 903 - 908.
- [18] 于之训, 陈辉堂, 蒋平. 具有传输延迟的网络控制系统中状态观测器的设计 [J]. 信息与控制, 2000, 15 (3): 125 - 130.
- [19] H Chan, O Ozguiner. Closed - loop control of systems over a communication network with queues [J]. International Journal of Control, 1995, 62 (3): 493 - 510.
- [20] S Hu, Q Zhu. Stochastic Optimal Control and Analysis of Stability of Networked Control Systems with Long Delay [J]. Automatica, 2003, (39): 1877 - 1884.
- [21] R Krtošić, U Ozguner, H Chan. Stability of linear feedback systems with random communication delays [J]. International Journal of Control, 1994, 59 (4): 925 - 953.
- [22] L Xiao, A Hassibi, J P How. Control with random communication delays via a discrete - time jump system approach [C]. Chicago, Illinois: Proceeding of the ACC, 2000: 2199 - 2204.
- [23] L Qiang, M D Lemmon. Robust performance of soft real - time networked control systems with data dropout [C]. In Proceedings of the 41st IEEE Conference on Decision and Control: 2002 1225 - 1230.
- [24] H Lin, G S Zhai, Antsaklis. Robust stability and disturbance attenuation analysis of a class of networked control systems [C]. Maui, Hawaii USA: Proceedings of the 42nd IEEE Conference on Decision and Control, 2003: 1182 - 1187.
- [25] 周祖德. 基于网络环境的智能控制 [M]. 北京: 国防工业出版社, 2004.
- [26] Jianxin Xu, Jing Xu. Observer Based Learning Control for a Class of Nonlinear Systems with Time - Varying Parametric Uncertainties [J]. IEEE Transactions on Automatic Control, 2004, 49 (2): 275 - 282.
- [27] Y J Pan, H J Marquez, T Chen. Sampled - data Iterative Learning Control for a Class of Nonlinear Networked Control Systems [C]. Minnesota, USA: Proceeding of the 2006 American Control Conference Minneapolis, 2006: 3494 - 3499.
- [28] Y Tipsuwan, M Y Chow. Neural Network Middleware for Model Predictive Path Tracking of Networked Mobile Robot over IP Network [C]. IECON Proceedings, 2003: 1419 - 1424.
- [29] Z Li, H J Fang. A novel controller design and evaluation for networked control systems with time - variant delays [J]. Journal of the Franklin Institute, 2006, 343 (2): 161 - 167.
- [30] 费敏锐, 李力雄. 基于网络学习的控制系统 [C]. 香港: 中国智能自动化大会论文集, 2003: 180 - 185, 168.
- [31] Liu C L, Layland J W. Scheduling Algorithms for Multi - Programming in a Hard - Real - Time Environment [J]. Journal of the ACM, 1973, 20 (1): 46 - 63.
- [32] Gerhard F. Joint scheduling of distributed complex periodic and hard periodic tasks in statically scheduled systems [C]. Italy: 16th IEEE Real - Time Systems Symposium, 1995: 152 - 161.
- [33] Kopetz H. Real - time Systems: Design Principles for Distributed Embedded Application [M]. Boston, 1997.
- [34] Baruah S K, Howell R R, Rosier L E. Feasibility problems for recurring tasks on one processor [J]. Theoretical Computer Science, 1993, 118 (1): 3 - 20.
- [35] Walsh G C, Hong Ye. Scheduling of networked control systems [J]. IEEE Control System, 2001, 21 (1): 57 - 65.
- [36] Otanez P, Moyné J, Tilbury D. Using deadbands to reduce communication in networked control systems [C]. American control conference, 2002: 615 - 619.
- [37] Kewon S K, Shin K G, Zheng Z. Statistical real - time communication over Ethernet for manufacturing automation systems [C]. Vancouver: 15th IEEE real - time technology and application symposium, 1999: 192 - 202.
- [38] Gianluca Cena, Adriano Valenzano. An improved CAN fieldbus for industrial application [J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 1997, 44 (4): 553 - 564.
- [39] Raja P, Ullaoa G. Priority polling and dynamic time - window mechanisms in a multi - cycle Fieldbus [C]. Paris: Proceedings of the computers and design, manufacturing and production, 1993: 452 - 460.
- [40] HONG S H. Scheduling algorithm of data sampling times in the integrated communication and control systems [J]. IEEE Transaction on Control Systems Technology, 1995, 3 (2): 225 - 230.
- [41] 刘鲁源, 万仁君, 李斌. 基于 TTCAN 协议的网络控制系统静态调度算法的研究 [J]. 控制与决策, 2004, 19 (7): 813 - 816.
- [42] 白涛. 网络控制系统的性能分析与调度优化 [D]. 上海: 上海交通大学, 2005.
- [43] STANKOVIC J A, LU C Y, SON S H. The case for feedback control real - time scheduling [C]. York, England: The 11th Euro - micro Conference on Real Time Systems, 1999: 11 - 20.
- [44] Eker J, Hagander P, Arzen K E. A feedback scheduler

- for real - time controller tasks[J]. Control Engineering Practice, 2000, 8(12): 1369 - 1378.
- [45] SETO D, LEHOCZKYJ P, SHA L. On task schedulability in real - time control systems[C]. Washington D C: 17th IEEE Real Time Systems Symposium, 1996: 13 - 21.
- [46] SETO D, LEHOCZKYJ P, SHA L. Task period selection and schedulability in real - time systems[C]. Madrid: 19th IEEE Real - time Systems Symposium, 1998: 188 - 198.
- [47] Cervin A. Integrated Control and Real - time Scheduling [M]. Sweden, Lund Institute of Technology, 2003.
- [48] Tip suwan Y, Chow M Y. Network - based controller adaptation for network QoS negotiation and deterioration [C]. Denver: 27th annual conference of IEEE Industrial Electronics Society, 2001: 1794 - 1799.
- [49] 何坚强, 张焕春, 经亚枝. 网络控制系统中采样周期的优化选取方法 [J]. 吉林大学学报 (工学版), 2004, 34(3): 479 - 482.
- [50] Johan Eker A C. A matlab toolbox for real - time and control systems co - design[C]. HongKong, China: In Proceedings of the 6th International Conference on Real - Time Computing Systems and Applications, 1999: 320 - 327.
- [51] 许雷鸣, 庞博, 赵耀. NS与网络模拟 [M]. 北京: 人民邮电出版社, 2003.
- [52] Intro_NCS_simu.pdf [OL]. <http://www.sussex.ac.uk/Users/taiyang/>.
- [53] Lee Kyung Chang, Lee Suk, Lee Man Hyung. Remote fuzzy logic control of networked control system via Profibus - DP[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2003, 50(4): 784 - 792.
- [54] J W Overstreet, A Tzes. An Internet - based real - time control engineering laboratory [J]. IEEE Control Systems, 1999, 19(5): 19 - 34.
- [55] 聂雪媛, 刘国平. 基于 Simulink的嵌入式网络化控制仿真实现 [J]. 系统仿真学报, 2005, 17(7): 1613 - 1620.
- [56] 于之训. 闭环网络控制系统的理论与实验研究 [D]. 上海: 同济大学, 2000.
- [57] 魏震, 沈钢, 谢剑英. 基于 CANbus的分布式实时系统仿真平台 [J]. 系统仿真学报, 2002, 14(5): 588 - 591.
- [58] 黄海. 网络控制系统实验平台建设与算法设计 [D]. 杭州: 浙江大学, 2007.

中国工程院就我国可再生能源发展提出建议

中国工程院 2008年 12月 26日发布《中国可再生能源发展战略研究》丛书,对 2050年前我国可再生能源发展方向提出众多建议。

“中国可再生能源发展战略研究”重大咨询项目组长、中国工程院副院长杜祥琬院士在丛书发布会上表示,我国可再生能源开发利用必须遵循以下原则:符合我国能源发展的战略需求,大规模地替代化石能源、减少碳排放、降低能源对外依存度;资源相对丰富,有可靠的资源保障能力,可以大规模开发利用;技术成熟或有成熟发展的趋势,可以实现商业化或具有商业化发展前景;经济合理和环境友好,符合可持续发展的总体要求。

杜祥琬指出,未来我国可再生能源的发展方向可以概括为:

——重点发展发电技术。近、中期主要大规模发展水电、风力发电,适度发展生物质发电,中、远期积极发展太阳能光伏发电、因地制宜地发展太阳能热发电、深层地热发电和海洋能发电,达到大规模替代煤炭等化石能源,为改善能源结构和减排温室气体做出重要贡献。

——积极稳妥地发展生物质液体燃料和生物基工业制品替代石油。近期发展技术较成熟的以木薯、甜高粱等为原料的燃料乙醇,中、远期利用农林废弃物等纤维素类生物质生产燃料乙醇等第二代生物燃料,以及生物塑料和化工产品,大规模替代石油制品,为减少石油对外依存度做出一定的贡献。

——因地制宜地发展可再生能源热利用和燃气技术。近期主要发展和普及太阳能热水、地源热泵、地热采暖和制冷技术,中、远期积极研究和推广太阳能采暖、制冷等建筑应用技术以及工业太阳能热利用技术等,为改善城乡人民生活特别是农村居民生活用能条件做出较大贡献。

杜祥琬介绍,积极促进可再生能源的健康发展一直是中国工程院关注的重要问题。2005年 10月,在有关部委、科研院所和高校的大力支持下,中国工程院启动了“中国可再生能源发展战略研究”重大咨询项目。该项目分设风能、水能、太阳能和生物质能共 4个专业课题组和综合组,20余位两院院士、100多位专家参加了项目的研究。

——新华社北京 2008年 12月 29日电