

资源受限网络控制系统中的信息调度

宣慧明, 文利燕, 彭 晨

(南京师范大学 电气与自动化工程学院, 江苏 南京 210042)

[摘要] 针对网络控制系统(NCS)中网络带宽等网络资源受限的情况,对目前NCS信息调度的研究现状进行了综述.首先介绍了NCS的背景和基本概念,阐述了网络的引入带来的各种影响.然后研究了NCS的动态特性,对现有的信息调度策略和调度方法进行了总结与分析.进一步分析了在资源受限时如何进行有效的信息调度以保证较高的网络服务质量(QoS, Quality of Service)和较好的控制品质(QoC, Quality of Control),对一些控制与调度协同设计的研究进行了说明.最后,结合前面的研究分析,讨论了该领域今后进一步的研究方向.

[关键词] NCS, 资源受限, 信息调度, QoS, QoC, 协同设计

[中图分类号] TP273.5 **[文献标志码]** A **[文章编号]** 1672-1292(2012)02-0011-07

Message Scheduling of Networked Control Systems With Resource Constraints

Xuan Huiming, Wen Liyan, Peng Chen

(School of Electrical and Automation Engineering, Nanjing Normal University, Nanjing 210042, China)

Abstract: According to the case that network resources such as bandwidth are always constrained, the paper has an overview on the open literature of message scheduling in Networked Control Systems. The background and basic concept of NCS are firstly introduced, and so are a variety of effects caused by introducing the networks. Then, dynamic characteristics of NCS are studied, existing scheduling strategies and scheduling algorithms are summarized and analyzed. Further studies on effective scheduling to guarantee high Quality of Service of network and Quality of Control with resource constraints are conducted, co-design of control and scheduling is also considered. In addition, on the basis of the previous analysis, future work in the further study is discussed.

Key words: NCS, constraint resource, message scheduling, QoS, QoC, co-design

随着现代计算机技术的发展,计算机控制被应用于控制领域,一台计算机可以控制多个节点.由于计算机控制系统日趋庞大和复杂,各节点之间的数据传输成为影响系统运行性能的重要因素.在此背景下,网络的引入克服了信息传递布线的复杂和距离上的限制.这种在控制系统中利用网络进行各节点间信息传递的系统被称作网络控制系统 NCS(Networked Control System),即指传感器、控制器和执行器通过网络形成闭环反馈控制系统,集计算、通信和控制于一体.网络控制系统的两种结构类型如图 1^[1]所示.其中,左图为多输入多输出 MIMO(Multiple Input Multiple Output)模式,所有被控对象共用一个控制器;右图则是由一系列子系统构成的,每个被控对象的状态和子系统间的输入输出都是相互独立的.

相对于传统的点对点控制系统,NCS具有连线少、布局广、运行成本低等优点.另外,由于NCS特殊的结构,使其易于故障诊断和维护,具有较强的灵活性.但在实现了资源共享的同时,网络的引入加大了控制系统分析和设计的难度.随之而来的还有网络诱导时延,数据包丢失和数据包时序错乱等问题.在NCS中,各个控制回路的性能不仅取决于控制算法,还依赖于对共享资源的调度.调度对控制任务的影响主要体现在采样抖动、输入输出时延和时延的抖动等方面.在网络带宽等网络资源受限的情况下,如何进行有效信息调度关系到整个控制系统的性能和稳定.

收稿日期: 2011-10-25.

基金项目: 国家自然科学基金(61074024)、江苏省自然科学基金(BK2010543).

通讯联系人: 彭 晨, 教授, 研究方向: 网络控制系统和鲁棒控制. E-mail: 63050@njnu.edu.cn

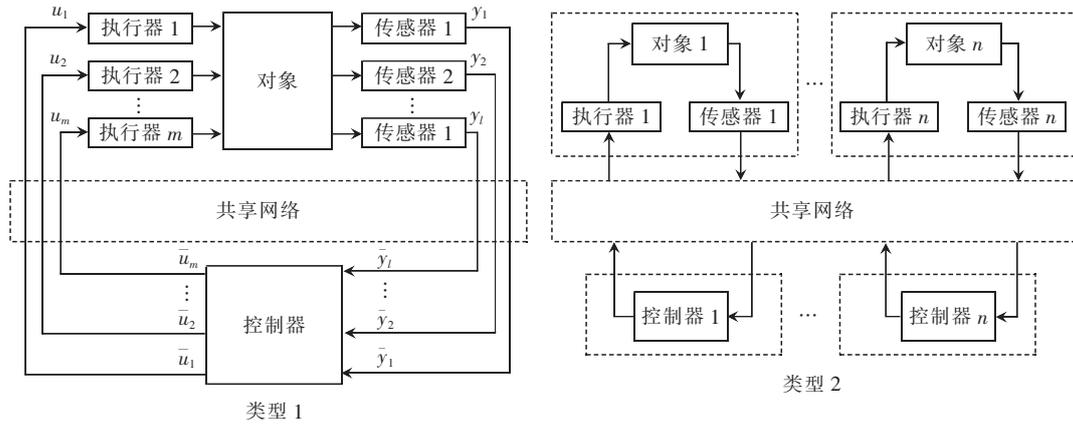


图 1 网络控制系统的一般结构图

Fig.1 General structure graph of networked control system

1 NCS 的动态特性分析

NCS 的动态特性主要体现在网络诱导时延、数据包传输、控制网络特点等方面,在网络资源受限的情况下,对它们的研究是至关重要的,也是进行有效的网络调度的基础.本章主要对网络诱导时延、数据包传输、控制网络进行分析.

1.1 网络诱导时延

NCS 中的时延包括各节点处的计算处理时延、网络传输时延.网络传输时延的大小与网络的速率、传输信息的大小、媒体访问协议(MAC)等有关,主要包括数据包产生时延、排队时延、信道传输时延和发送时延等.其中数据包产生时延、信道传输时延和发送时延波动范围小,一般可以定值考虑.而各节点的处理时延较小,一般可忽略.因此,信息调度中所考虑的主要是排队时延.NCS 的一般结构简图如图 2 所示,可以看到在传感器到控制器、控制器到执行器分别具有网络时延 τ_{sc} 和 τ_{ca} ,在控制器节点处有计算时延 τ_c .有的研究还会把 τ_c 归到 τ_{ca} 中,则时延 $\tau = \tau_{sc} + \tau_{ca}$.对于不同的节点信息,时延可能是常数、有界的、随机的.

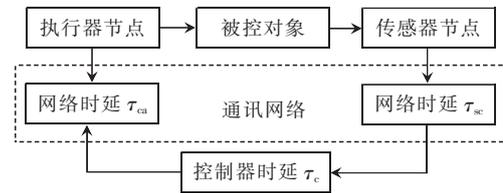


图 2 网络控制系统中的时延

Fig.2 Delay in networked control system

1.2 NCS 数据传输

在控制系统中引入网络构成 NCS 是为了能够有效地传输诸如控制器、传感器各节点之间的信息数据.然而网络的引入却同时带来了数据包丢失、单包传输与多包传输和数据包时序错乱等问题.

数据包丢失主要有两种情况:主动丢包和被动丢包.主动丢包是指在拥塞算法里面主动丢弃未按时到达的数据以保证信号的及时更新和采样数据的有效性,被动丢包则指由于网络阻塞和连接中断而导致数据包的丢失.NCS 中采用单包传输还是多包传输,要依据所选的控制网络和设备的空间位置而定.在网络环境下,由于路径和时延的不同会导致发送数据包的时序错乱.以上数据传输问题都可能使得系统的结构和参数发生较大变化,导致系统的不稳定.

1.3 控制网络

NCS 中控制网络的时延特性和节点驱动方式都会影响控制系统的性能.按网络类型和介质访问控制方式划分,控制网络主要有随机访问和轮询服务两大类.随机访问网络采用载波监听多路访问协议,通常支持事件驱动,主要有以太网和 CAN 总线,其中以太网采用带有冲突检测的载波监听多路访问协议,而 CAN 总线采用的是带有信息优先级仲裁的载波监听多路访问协议.轮询服务网络采用令牌传递协议,通常支持时间驱动,主要有令牌总线和令牌环网.

2 网络信息调度

在 NCS 中网络带宽等网络资源受限的情况下,对信息传输的有效调度影响到控制系统的性能和稳定.本章主要阐述了网络调度的基本概念和对现有的调度策略和调度算法的研究.

2.1 网络调度基本概念和参数

所谓网络调度是指系统节点在共享网络中发送数据出现碰撞时,规定各节点的优先级发送次序、发送时刻以及时间间隔.从网络层次来看,NCS 信息调度可分为网络底层调度和应用层调度.网络底层调度通过特定的网络协议实现调度算法,缺乏灵活性和适应性.应用层调度是上层的应用程序根据需要主动地决策发送规则,还可以调度采样周期和采样时刻,避免数据冲突,减小传输时延.

网络调度的相关时间参数如图 3 所示^[2].其中 a_i 表示到达时间,通常指一个传输任务的开始; s_i 表示数据包开始传输的时刻; $b_i = s_i - a_i$ 表示闭锁时间; f_i 表示数据包传输结束时刻; c_i 表示数据包的传输时间,在理想情况下,仅与数据包大小的网络传输速率有关; τ_i 表示数据包从到达传输队列到传输完毕所经历的时间; d_i 表示截止时间,即保证系统控制性能不受影响的数据包传输结束的最大值,一般而言 $d_i \leq a_i + h_i$, h_i 为第 i 个控制回路的采样周期.

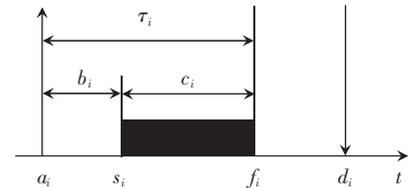


图 3 网络调度的相关时间参数

Fig.3 Correlative time parameters of network scheduling

对于一组网络传输任务,在某一调度策略下,所有任务均能在截止期 d_i 之前结束,则称这组任务是可调度的,或称这一调度策略是可行的.

2.2 调度策略

下面主要介绍了对网络控制系统的调度中现有的一些调度策略,分别是基于优先级的调度策略、基于通信序列的调度策略、基于时间窗的调度策略、基于采样周期和采样时刻的调度策略、基于死区的调度策略、基于开环的调度策略和基于闭环的调度策略,以及其他一些最近新提出的调度策略.

2.2.1 基于优先级的调度策略

基于优先级的调度策略主要有静态调度策略、动态调度策略和混合调度策略.静态调度策略简单且易于实现^[3],但对于突发调度问题不能有效处理,适用于周期性系统.相比于静态调度策略,动态调度策略在调度器设计和实现上有难度,但是实时性较好,对突发的信息问题和非周期信息能够有效处理^[4].混合调度策略则是动、静态调度策略二者的结合.

2.2.2 基于通信序列的调度策略

基于通信序列的调度策略是指将时间轴以 τ 为基数划分成若干段,对各个不同传输任务划分不同的时间长度并且周期运行的,避免了冲突和拥塞.李祖欣等应用周期通信序列概念及混合逻辑动态构架,将网络控制系统建模成一类基于 MLD 的集成控制与调度的资源约束系统,采用线性矩阵不等式来描述离散周期系统的周期通信序列和 H_∞ 控制的协同优化问题^[5].

2.2.3 基于时间窗的调度策略

基于时间窗的调度策略是指将采样周期 T_i 划分为 r 个时间窗 (T_i 为第 i 个控制回路的采样周期, $i = 1, 2, \dots, n$),由各节点共享.文[6]在考虑周期信息和突发信息的传输时,提出将时间窗分配和优先级分配相结合,确定各节点的信息传输开始时刻.

2.2.4 基于采样周期和采样时刻的调度策略

由其在网络带宽等资源受限的情况下,网络诱导时延对系统的控制性能和稳定性的影响很大.Yong 等^[7]给出了具有网络诱导时延的网络控制系统的连续和离散模型,并由李亚普诺夫定理得到保证网络控制系统(NBCS)稳定所允许的最大允许时延上界(MADT),即传感器节点发出信息到执行器节点发出信息的最大时间间隔.利用其对周期、非周期和非实时 3 种信息的调度,给节点分配带宽,调节各回路的采样周期,保证了 3 种信息的及时传输,在采用令牌控制和星型控制的网络协议下分别进行了测试,验证其有效性.

2.2.5 基于死区的调度策略

在网络资源受限的情况下可以适当地减少网络上的数据流量,以减少冲突和碰撞等问题. Otanez^[8]提出了动态死区的方法. 根据系统的动态性能,使某些节点处于死区状态,以减少控制访问网络的数据量. 该调度策略虽然减轻了网络的负荷,但容易导致局部采样点的控制品质降低. 王家栋等^[9]在前人对死区调度策略研究的基础上提出了流动式死区反馈调度方法 FDFS(Floating Dead-band Feedback Scheduling),在 NCS 基础上增加反馈调度回路. 反馈调度器包括优先级分配和死区分配. 其中,优先级分配即按照把最高优先级给性能最差的回路的原则. 死区使用权总是掌握在 QoC 最高的节点那里,而确定该节点是否落入死区的死区范围 $d_{i(k)}$ 也是可调的. 最后还提出了对死区范围等级化的方法. 进一步地,将死区范围等级化之后的总体的控制性能会更好.

2.2.6 基于开环的调度策略

开环调度即设计的调度策略不随系统输出品质的变化而变化,对于网络环境和负载变化不大的系统,开环调度能够较好地满足实时调度的要求. 而对于系统模型不确定,网络环境复杂的闭环控制系统而言,其适应性较差. RM 算法和 EDF 算法分别是经典的静态调度算法和动态调度算法,它们都属于开环调度.

2.2.7 基于闭环的调度策略

随着网络环境的复杂,开环调度策略已经不能满足系统的实时要求. 闭环调度的思想引起了人们的重视,如: 反馈调度、自适应调度、智能调度等. Feng Xia^[10]设计了基于反馈的调度器,根据应用需求动态分配网络资源;文[11]则提出了自适应优先权调度;岳东等^[2]提出了外加模糊增益调制器改变控制器输出增益的调度策略;王艳^[4]等采用动态分阶段的蚁群算法,在动态闭环调度策略下对 NCS 进行建模与控制器设计;陈惠英^[12]设计了基于 LS_SVM 预测的动态反馈调度器,并建立了一个基于模糊逻辑的回路控制性能评价指标;魏利胜^[13]提出一种灰色预测动态反馈调度方法,根据控制性能指标 J 完成对动态优先级的配置和对数据更新周期的调节;文[14]提出基于免疫遗传算法的最优调度.

2.2.8 其他调度策略

随着 NCS 信息调度研究的深入,更多的调度策略被提出. 例如,文[15]在网络控制系统受带宽约束的情况下采用切换型调度策略,即传感器信息和控制器信息轮流切换占用传输网络,并给出了 MIMO 系统在该调度策略下的稳定性定理. 文[16]提出了双层调度策略,第一层是建立总线型多回路 NCS 模型,对传感器和控制器节点都采用事件驱动以减少网络负载,第二层则是设计模糊反馈调度器. 另外,文[17]还提出了依据是否需要网络使时延系统在开闭环回路间转换的调度策略.

2.3 调度算法

实时调度中,任务是可抢先的,而在网络调度中信息的调度是不可抢先的. 常见的实时调度方法主要有速率单调 RM(Rate Monotonic)、截止期单调 DM(Deadline Monotonic) 和最小截止期优先 EDF(Earliest Deadline First). RM 和 DM 算法是静态调度的典型算法, RM 依据任务周期制定优先级,周期越短则优先级越高, DM 则依据截止期指定优先级,截止期越小优先级越高. EDF 算法是动态调度的典型算法,该算法任务的优先级是变化的,根据任务时间距离任务周期最小来决定最高优先级.

由于网络调度与实时调度有很多的相似性,因此,可以借鉴实时调度理论,将实时系统的任务调度方法推广到网络调度中. 由于网络的信息调度是不可抢先的,故有如下可调度性引理^[12]:

引理 1 RM 的可调度条件满足下式:

$$\frac{c_1}{h_1} + \frac{c_2}{h_2} + \dots + \frac{c_i}{h_i} + \frac{\bar{b}_{ij}}{h_i} \leq i(2^{\frac{1}{i}} - 1), \quad (1)$$

其中 \bar{b}_{ij} 是第 i 任务被低优先级任务阻塞的最坏情况,即 $\bar{b}_{ij} = \max_{j=i+1, \dots, N} c_j$. N 为独立的、不可抢先的周期性任务个数(其中序号是根据优先级递减顺序排列的,即 $i=1$ 的任务优先级最高, $i=N$ 的任务优先级最低).

引理 2 EDF 的可调度条件满足下式:

$$\frac{c_1}{h_1} + \frac{c_2}{h_2} + \dots + \frac{c_i}{h_i} + \frac{\bar{b}_{ij}}{h_i} \leq 1, \quad (2)$$

其中 \bar{b}_{ij} 是第 i 任务被低优先级任务阻塞的最坏情况,即 $\bar{b}_{ij} = \max_{j=i+1, \dots, N} c_j$.

另外,由 Wash 等^[18]首先提出 MEF-TOD 调度算法(Maximum Error First-Try Once Discard)也得到了广泛应用.其分为两部分,一是 MEF 调度策略,即拥有最大加权误差的节点优先传输,这里的误差是指节点需要传送的信息和该节点上一次传输给控制器的信息之差.另一部分是 TOD 协议,TOD 协议的基本思想是,对于实时控制系统,最新的数据是最好的数据,如果能得到新的采样数据,那么旧的尚未传输的数据将被丢弃.定义任务传输时限 T_d ,如果数据在 T_a 时刻到达,那么其必在时间区间 $(T_a, T_a + T_d]$ 内完成传输过程. MEF-TOD 偏重于保持系统的平均性能^[19].文[20]在多种算法的基础上提出了 MEF-TOD 和 EDF 的混合调度算法,并利用 QoS 调度器形成闭环网络调度控制.文[21]讨论了无线网络控制系统 WINCS(Wireless Networked Control Systems)中,利用遗传算法得到信息的传输路径和调度算法,仅考虑了传感器节点信息的传递.

3 控制与调度协同设计

对于一个控制系统,首先追求的是它每个回路和总体的控制效果,即控制质量.在网络带宽资源受限的情况下,减小一些回路的采样周期可以提高它们的 QoC,但势必导致其他回路的采样周期变长.网络服务质量主要体现在网络利用率、数据包丢失状况和时延等方面.网络控制系统中 QoC 和 QoS 是密切相关的,合理的信息调度策略关键在于结合调度策略选取合适的表征系统控制性能的指标.

NCS 中网络的带宽、量化、可靠性和信息时延等和控制的稳定、性能以及容错、适应性等息息相关,控制与调度的协同设计显得尤为重要.协同设计算法中,假设每个控制回路的性能用关于周期 h_i 的函数 $J_i(h_i)$ 表示,则转化为可调度条件和稳定性条件双重约束下的最优控制问题:

$$\min imize(\max imize) J(h_i) = \sum_{i=1}^N J_i(h_i). \quad (3)$$

满足调度算法可调度条件和 NCS 稳定性条件:

$$h_i \leq h_{\text{suff } i} - \bar{b}_i, \quad i = 1, 2, \dots, N, \quad (4)$$

式中, $h_{\text{suff } i}$ 为第 i 个控制回路对应的传输间隔上界; \bar{b}_i 表示第 i 个控制回路的传输阻塞时间,包括高优先级任务造成的阻塞时间.何坚强等^[22]针对采用 RM 情况下提出采样时间的求取过程就是优化模型最优解的求取过程,给出了基于遗传算法的求解方法.

同时,很多智能方法被应用于 NCS 的动态调度策略与控制器综合设计,如遗传算法、模糊逻辑、神经网络等. Paul 等^[23]提出了将包含网络诱导延时的模糊控制与调度算法相结合的 NCS 管理模糊控制方法.文[24]针对网络诱导时延,提出单神经元 PID-Smith 预测控制与动态调度算法 EDF 协同设计的想法.文[1]于 MIMONCS 中存在时延和通信约束的情况,分别设计了预测控制器和通讯约束补偿器,利用 RM 算法调度预测控制序列,达到减少时延和通信约束的影响,但是控制过程较慢,如果采用动态调度策略效果会更好.

4 总结与展望

在资源受限情况下如何进行有效地网络调度对一个 NCS 来说是一个很重要的问题,本文概述了在网络带宽等网络资源受限的情况下对系统进行信息调度的研究现状,主要对现有调度策略、调度算法以及调度与控制协同设计相关方面的研究进行了总结和分析.基于 NCS 中信息调度的研究已经越来越多,各种新的调度策略和调度算法被逐渐提出,很多智能方法也被引入,调度与控制协同设计也开始得到广泛的关注.但是,仍有很多工作需要深入研究和展开:

(1) 在对带宽约束方面的研究比较多,融合通信协议、网络拓扑结构、传输速率等因素考虑控制与调度的综合设计,值得进一步探究.

(2) 所提出的方法多是针对特定性质的对象或一些线性对象,对于具有不确定性和非线性对象的研究还不成熟.需要引入先进控制技术,提出智能化强、实时性好、鲁棒性强的调度方法.

(3) 目前,许多调度算法都是基于一些假设条件,研究成果也是通过仿真得到验证,缺乏实际应用性.应该在结合实际情况方面多做努力,使提出的调度策略和算法能够应用于实际对象.

(4) 虽然控制与调度协同设计的思想已渐渐受到重视,但控制性能的指标的选取比较单一.如果在考虑协同设计的时候能够引入更多合适的性能评价指标,将对提高协同设计的控制效果有一定的意义.

[参考文献](References)

- [1] Wang Wei, Zhang Lijun, Yin Xunhe, et al. 存在时延和带通路制的网络控制系统的控制与调度协同设计[C]// 2011年电子信息与控制工程国际会议. 武汉: 美国电气与电子工程师协会, 华中科技大学, 2011: 1 224-1 228.
Wang Wei, Zhang Lijun, Yin Xunhe, et al. Co-design of control and scheduling in networked control system with delay and access constraint[C]// Proceedings of the 2011 International Conference on Electric Information and Control Engineering (ICEICE). Wuhan: IEEE, HUST, 2011: 1 224-1 228. (in Chinese)
- [2] 岳东, 彭晨, Qinglong Han. 网络控制系统的分析与综合[M]. 北京: 科学技术出版社, 2007
Yue Dong, Peng Chen, Qinglong Han. Analysis and Synthesis for Networked Control System[M]. Beijing: Science and Technology Press, 2007. (in Chinese)
- [3] 刘怀, 黄建新, 史国生. 基于非抢占 RMS 的分布式控制系统中实时任务调度算法[J]. 南京师范大学学报: 工程技术版, 2005, 5(2): 10-13.
Liu Huai, Huang Jianxin, Shi Guosheng. Real-time task scheduling algorithm based on non-grab RMS in distributed control system[J]. Nanjing Normal University Transaction: Engineering and Technology Edition, 2005, 5(2): 10-13. (in Chinese)
- [4] 王艳, 陈庆伟, 吴晓蓓, 等. 网络控制系统中动态调度策略与控制器的综合设计[J]. 控制与决策, 2007, 22(6): 680-684, 688.
Wang Yan, Chen Qingwei, Wu Xiaobei, et al. Co-design of dynamic scheduling strategy and controller[J]. Control and Decision, 2007, 22(6): 680-684, 688. (in Chinese)
- [5] 李祖欣, 王万良, 雷必成, 等. 资源约束系统的控制与调度协同优化方法[J]. 控制理论与应用, 2009, 26(1): 97-102.
Li Zuxin, Wang Wanliang, Lei Bicheng, et al. Co-optimization of control and scheduling in system with constraint source[J]. Control Theory and Application, 2009, 26(1): 97-102. (in Chinese)
- [6] 杨丽曼, Liu Guilin, Zheng Qi. 网络控制系统中的关于决定性时限的带宽调度策略[C]// 北京: 2011年工业电子与应用国际会议, 美国电气与电子工程师协会, 北京航空航天大学, 2011: 2 011-2 016.
Yang Liman, Liu Guilin, Zheng Qi. Bandwidth scheduling strategy with deterministic time-constraint for networked control systems[C]// Beijing: Proceedings of the 6th IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications, IEEE, BUAA, 2011: 2 011-2 016. (in Chinese)
- [7] Hong Seong Park, Yong Ho Kim, Don-Sung Kim, 等. 一种网络控制系统中的调度方法[J]. IEEE 控制系统技术, 2002, 10(3): 318-330.
Hong Seong Park, Yong Ho Kim, Don-Sung Kim, et al. A scheduling method for network-based control systems[J]. IEEE Control Systems Technology, 2002, 10(3): 318-330. (in Chinese)
- [8] Otanez P G, Moyne J R, Tilbury D M. 利用死区减少网络控制系统中的通信[C]// 阿克雷奇: 美国控制会议, 2002, 4: 3 015-3 020.
Otanez P G, Moyne J R, Tilbury D M. Using dead-bands to reduce communication in networked control systems[C]// Anchorage: Proceedings of the American Control Conference, 2002, 4: 3 015-3 020. (in Chinese)
- [9] 王家栋, 汤贤铭, 俞金寿. 一种网络资源受限情况下的 NCS 反馈调度方法[J]. 信息与控制, 2008, 37(3): 339-345.
Wang Jiadong, Tang Xianming, Yu Jinshou. A scheduling algorithm based on feedback under the constraint source[J]. Information and Control, 2008, 37(3): 339-345. (in Chinese)
- [10] 夏峰, 戴晓华, 王智, 等. 基于反馈的网络控制系统的信息调度[C]// 布达佩斯: IEEE 2005年控制与自动化国际会议, 2005, 2: 1 231-1 236.
Xia Feng, Dai Xiaohua, Wang Zhi, et al. Feedback based network scheduling of networked control systems[C]// Budapest: Proceedings of the International Conference on Control and Automation (ICCA), IEEE, 2005, 2: 1 231-1 236. (in Chinese)
- [11] Liu Dianting, Zhou Dejian, Li Mingtao. 基于自适应优先调度任务对单控制器和多回路网络控制系统的研究和设计[C]// 上海: 2009年人工智能和计算智能国际会议, 美国电气与电子工程师协会, 2009, 3: 366-369.
Liu Dianting, Zhou Dejian, Li Mingtao. Study and design on single-controller and multi-Loops networked control system based on the task scheduling with self-adaptive prior[C]// Shanghai: Proceedings of the 2009 International Conference on Artificial Intelligence and Computational Intelligence, IEEE, 2009, 3: 366-369. (in Chinese)
- [12] 陈惠英. 资源受限网络控制系统控制与调度方法研究[D]. 浙江: 浙江工业大学信息学院, 2008: 19-20.
Chen Huiying. The study of control and scheduling in networked control system with constraint source[D]. Zhejiang: Doctor Papers of Zhejiang University School of Information, 2008: 19-20. (in Chinese)
- [13] 魏利胜. 多变量网络控制系统建模、控制与调度初探[D]. 上海: 上海大学机电工程与自动化学院, 2009: 108-119.
Wei Lisheng. Preliminary search of modeling and control and scheduling of multi-variables networked control system[D].

- Shanghai: Doctor Papers of Shanghai University School of Mechatronics Engineering and Automation, 2009: 108-119. (in Chinese)
- [14] 张向锋,王致杰,Liang Zhaoxia. 网络控制系统中基于免疫遗传算法的最优调度[C]// 厦门: 2009年世界资源研究院全球智能系统会议,美国电气与电子工程师协会,2009,1: 32-35.
Zhang Xiangfeng, Wang Zhijie, Liang Zhaoxia. An immune-genetic algorithm-based scheduling optimization in a networked control system[C]// Xiamen: Proceedings of the 2009 WRI Global Congress on Intelligent Systems, IEEE, 2009, 1: 32-35. (in Chinese)
- [15] 魏利胜,江明,宋杨,等. 多输入多输出网络控制系统的调度方法和稳定性[C]// 桂林: 中国控制与决策会议, 2009: 533-537.
Wei Lisheng, Jiang Ming, Song Yang, et al. Scheduling methodology and stability of MIMO networked control systems[C]// Guilin: Proceedings of the Control and Decision Conference, Chinese, 2009: 533-537. (in Chinese)
- [16] 潘卫华,韩璞,张丽静,等. 基于BP神经网络和模糊反馈的网络控制系统调度策略[C]// 保定: 第八届机器学习与电脑控制学国际会议, 2009, 2: 806-810.
Pan Weihua, Han Pu, Zhang Lijing, et al. Scheduling strategy based on BP neural network and fuzzy feedback in networked control system[C]// Baoding: Proceedings of the Eighth International Conference on Machine Learning and Cybernetics, 2009: 806-810. (in Chinese)
- [17] Dai Shilu, Lin Hai, Shuzhi Sam Ge. 资源受限网络控制系统中基于切换系统的调度方法[C]// 上海: 第四十八届IEEE控制与决策会议与第二十八届中国控制会议, 2009: 4991-4996.
Dai Shilu, Lin Hai, Shuzhi Sam Ge. A switched system approach to scheduling of networked control systems with communication constraints[C]// Shanghai: Proceedings of the 48th IEEE Conference on Decision and Control and 28th Chinese Control Conference, 2009: 4991-4996. (in Chinese)
- [18] Wslsh G C, Octavian Beldiman, Linda G Bushnell. 非线性网络控制系统的渐近性行为[J]. IEEE自动控制学报, 2001, 46(7): 1093-1097.
Wslsh G C, Octavian Beldiman, Linda G Bushnell. Asymptotic behavior of nonlinear networked control systems[J]. IEEE Transaction on Automation Control, 2001, 46(7): 1093-1097. (in Chinese)
- [19] 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.
Liu Luyuan, Wan Renjun, Li Bin. Study of static scheduling algorithm based on TTCAN protocol in networked control system[J]. Control and Decision, 2004, 19(7): 813-816. (in Chinese)
- [20] 韩璞, Li Chao,董泽,等. 工业过程网络控制系统中的混合调度算法研究[C]// 桂林: 2009控制与决策会议, 2009: 2289-2292.
Han Pu, Li Chao, Dong Ze, et al. Research on mixed scheduling algorithm in industrial process networked control systems[C]// Guilin: Proceedings of the 2009 Control and Decision Conference, 2009: 2289-2292. (in Chinese)
- [21] 何坚强,胡国文,徐顺清. 无线网络控制系统中信息最优调度策略研究[C]// 武汉: 2011电子信息和控制工程国际会议,美国电气与电子工程师协会,华中科技大学, 2011: 2679-2682.
He Jianqiang, Hu Guowen, Xu Shuenqing. Study on message optimization scheduling scheme of wireless networked control systems[C]// Wuhan: Proceedings of the 2011 International Conference on Electric Information and Control Engineering (ICEICE), IEEE, HUST, 2011: 2679-2682. (in Chinese)
- [22] 何坚强,张焕春. 基于遗传算法的网络控制系统调度优化研究[J]. 工业仪表与自动化装置, 2004, 4: 37-42.
He Jianqiang, Zhang Huanchun. Scheduling optimization in networked control system based on genetic algorithm[J]. Industrial Instrumentation and Automation, 2004, 4: 37-42. (in Chinese)
- [23] Paul E Mendez, Hector Benitez-Perez. 网络控制系统中基于模糊控制和调度的协同设计[C]// 墨西哥: 2011年网络传感和控制国际会议, 2011: 221-226.
Paul E Mendez, Hector Benitez-Perez. Co-design strategy based upon fuzzy control for networked control systems and a scheduling algorithm[C]// Mexico: Proceedings of the International Conference on Networking, Sensing and Control, 2011: 221-226. (in Chinese)
- [24] Jin Yongxian, Che Gaofeng, Chen Fengzhen, 等. 网络控制系统中控制和调度的协同设计[C]// 合肥: 第五届计算机科学和教育国际会议, 2010: 1208-1213.
Jin Yongxian, Che Gaofeng, Chen Fengzhen, et al. Co-design of control and scheduling for networked control systems[C]// Hefei: Proceedings of the 5th International Conference on Computer Science and Education, 2010: 1208-1213. (in Chinese)

[责任编辑:刘健]