

网络控制系统中的调度问题

李祖欣^{1,2},王万良¹,雷必成¹,陈惠英^{1,2}

LI Zu-xin^{1,2},WANG Wan-liang¹,LEI Bi-cheng¹,CHEN Hui-ying^{1,2}

1.浙江工业大学 信息工程学院,杭州 310032

2.湖州师范学院 信息工程学院,浙江 湖州 313000

1.College of Information Engineering,Zhejiang University of Technology, Hangzhou 310032, China

2.School of Information Engineering,Huzhou Teachers College,Huzhou,Zhejiang 313000, China

E-mail: zuxin1224@163.com

LI Zu-xin,WANG Wan-liang,LEI Bi-cheng,et al.Some issues of scheduling in Networked Control Systems.Computer Engineering and Applications,2007,43(16):241-245.

Abstract: The control performances of Networked Control Systems (NCSs) are considerably constrained by sharable computing and networked resources. Therefore, how to effectively schedule the periodic and aperiodic stream of information in NCS is a pivotal factor that impacts the system performances. From a real-time control perspective, the timing analysis and the theory of real-time scheduling in NCS are illustrated respectively, with special focus on real-time CPU scheduling strategies, network scheduling methods in NCSs, problems induced in scheduling and their compensatory techniques, schedulability analysis and scheduling optimization, and control and scheduling co-design. Furthermore, farther research directions in this field are also discussed in detail.

Key words: Networked Control Systems(NCS); scheduling; real-time control; control and scheduling co-design

摘要: 网络控制系统(NCS)的控制性能受限于共享的计算资源和网络资源,如何对NCS中的周期和非周期的复杂信息流进行有效的调度成为影响系统控制性能的关键因素。从实时控制角度,分析了NCS中的时态特性和NCS的实时调度问题。同时从实时CPU调度策略、NCS网络调度方法、调度诱导问题及其补偿方法、可调度性分析和调度优化、控制与调度协同设计等方面综述了现有的NCS中的调度理论和方法,并讨论了今后进一步的研究方向。

关键词: 网络控制系统; 调度; 实时控制; 控制与调度协同设计

文章编号:1002-8331(2007)16-0241-05 文献标识码:A 中图分类号:TP273

1 引言

网络控制系统(NCS)^[1-2]是通过实时通信网络形成的闭环反馈控制系统。它将不同地域的传感器、控制器、执行器等分布对象通过网络连接起来,信息通过公用或专用计算机网络在分布对象之间进行交互。与传统控制系统相比,它具有全分布、集成化、网络化以及节点智能化等诸多优点。目前,NCS不仅在大范围区域的广域分布式系统(如自动化制造工厂、工业过程控制系统等)中,而且在集中的小型局域系统(如新型高性能汽车、飞机、船舶、机器人等)及其它过程控制中得到越来越广泛的应用^[3-6]。

NCS由于通过网络形成多个反馈控制回路,使得对此类控制系统的分析变得更为复杂^[7]。从NCS时态特性可知,控制回路的实时性很大程度上依赖于处理器中任务的执行时间以及网络信息的排队时延,而它们的大小分别与CPU实时调度和网络消息调度策略息息相关。因此,如何对NCS中的周期和非

周期的复杂信息流进行有效的调度成为影响系统控制性能的关键因素。本文正是围绕这一主题展开,从实时控制角度出发,对NCS中调度理论的研究进展进行了综述,并试图指出这一领域进一步的研究方向。

2 NCS中调度问题描述

2.1 NCS的时态特性

一个典型的网络控制系统结构图如图1所示,它由传感器、控制器、执行器等分布对象以及一些其它的无关节点组成,这些分布对象通过通信网络进行信息交互。通常一个网络可以由多个控制回路或节点共享,同时网络上的周期和非周期的信息流可以由同一个控制器或多个控制器进行实时计算。在NCS中,单个CPU可以充当多个回路的控制器,控制回路的时延主要由CPU计算时延和网络通信时延组成,其中通信时延主要包括数据包产生时延、排队时延、网络传输时延和发送时延等

基金项目:国家自然科学基金(the National Natural Science Foundation of China under Grant No.60573123, No.60573056)。

作者简介:李祖欣(1972-),男,副教授,博士研究生,研究方向:网络控制系统、智能控制、嵌入式系统等;王万良(1957-),男,教授,博士生导师,主要研究方向为计算机控制与智能自动化、计算机集成自动化系统、生产计划与调度等;雷必成(1974-),男,讲师,博士研究生,研究方向:网络控制系统、嵌入式系统等;陈惠英(1979-),女,助教,博士研究生,研究方向:网络控制系统。

组成^[1]。计算时延相对于通信时延来讲比较小且变化不大,而产生时延、传输时延和发送时延的波动范围较小,排队时延成为影响时延抖动的关键因素。因此,对共享 CPU 和网络资源的多控制回路采取不同的调度策略直接影响到计算时延和通信时延的大小,从而影响了 NCS 的实时性能。

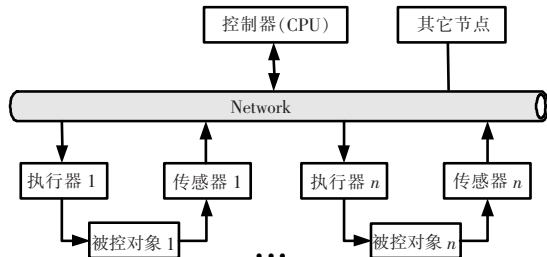


图1 典型的网络控制系统结构图

2.2 NCS 中的实时调度

网络的加入使之不同于传统点对点连接的控制系統,NCS 中的调度可分为基于共享 CPU 资源的控制任务可抢优的实时任务调度和基于共享传输介质的数据传输不可抢优的网络调度两类。它们共同点是均受到共享资源的限制,是否具有抢优性是它们的区别之处。

实时任务调度主要考虑在多个控制任务共享同一 CPU 的情况下,如何设置处理器执行各控制任务的先后次序,以最大限度地满足控制系统的实时性。各控制任务的优先级不同的设置策略将会影响到其占用处理器资源所处的优劣地位。

网络调度主要考虑在多个回路的数据包共享通信网络的情况下,如何决定数据包有序的传送以满足控制系统的实时性要求。它可以涉及网络底层的传输协议或是应用层上的调度策略。

3 NCS 中的调度问题

3.1 实时 CPU 调度策略

实时 CPU 调度可以分为离线调度和在线调度两类。离线调度是指在离线的情况下根据一定的优化算法产生任务执行的时间分配表。它的调度决策由于在离线情况下制定,因此调度器的功能被弱化,只具有分派器的功能;在线调度是指大部分或全部调度决策在系统运行时,由调度器执行某种调度算法来决定。两类调度策略在时间复杂度、空间复杂度以及算法优劣等方面各具特色。Liu^[9]最早对实时任务调度理论进行开创性的研究,随后经过 Lehoczky^[9,10]、Cervin^[11,12]等学者的不断发展,目前它已发展成为较为成熟的一个研究分支。

3.1.1 开环调度

调度算法是在某一特定时刻决定一个任务是否被执行的规则集合,根据任务的优先级分配原则可分为静态调度、动态调度和混合调度等三种^[9]。RM 算法和 EDF 算法分别是典型的静态调度算法和动态调度算法, RM 算法实际上是 DM 算法在任务的最后截止期限等于任务周期时的一个特例。它们都属于开环调度算法,在可预见环境下能够很好地工作,但是在不可预见环境下性能就很差,因此它们的任务模型对复杂应用的时间需求的表现能力较弱。

3.1.2 闭环调度

随着在不可预期开放环境中运行的实时系统应用的飞速发展,近年来出现了反馈调度、自适应调度、智能调度等调度策

略。在设计一个网络控制系统时,如果是基于最差执行时间的优先级调度设计会带来采样周期慢、利用率低、遇上所有任务的截止期和低控制性能等情况,而如果基于平均执行时间优先级调度设计会导致较快的采样、高利用率、错过一些截止期和较差的控制性能等情况,文献[13]的基于反馈机理的动态调度较好地解决了上述问题。反馈调节器根据任务执行时间的反馈来计算 CPU 利用率,从而动态调整采样周期使其保持在较高的设定期望值。另外,该控制器有不同的控制模式算法,当控制模式进行切换时通过前馈回路与反馈调节器进行信息传递,从而提高系统的控制性能。Lu^[14]等也提出了反馈控制实时调度把反馈控制理论和调度算法结合在一起,用控制理论分析和建立实时系统的调度模型及实时系统性能评价体系,通过实时调整调度器来保持最优的性能。在每个采样时刻, QoS 调节器根据控制输入调整任务的 QoS 等级,这样就能动态调整总的预计利用需求^[15]。基本调度器用某种调度算法来调度进入系统的任务,在设计反馈控制实时调度系统时,首先为基本调度器选择调度算法,然后根据具体的调度算法相应地设计整个反馈控制调度系统。近年来,遗传算法、模糊逻辑、神经网络等许多人工智能方法也被应用到网络控制系统调度与控制中来^[16-18]。

3.2 NCS 网络调度方法

3.2.1 实时 CPU 调度在网络调度上的推广

NCS 中网络调度的思想与 CPU 调度类似,它们均需要为并发任务分配共享信道资源、周期性激发并发任务以及满足任务截止期要求等^[20]。在网络调度中,各节点对网络带宽的竞争的资源和实时任务调度中的处理器资源相对应;各控制回路中的节点向网络发送的消息与处理器中被调度的多个任务相对应^[19]。因此,可以借鉴任务调度的理论和方法对网络调度进行研究,把实时系统的任务调度方法推广到网络调度中,如非抢优 RM 可调度条件^[21]和非抢先 EDF 可调度条件^[22]。Branicky 提出了 RM 算法来调度 NCS 的多个传感器节点信息,给出了相应的稳定性定理,并提出了 RM 调度和 NCS 稳定性约束条件下的最优调度问题^[20]。

3.2.2 网络协议层调度

从网络层次来看,网络控制系统的调度方法可以分为协议层的调度和应用层的调度两类。协议层调度通常是网络接口设备按照特定的协议规范来决定那些并发数据包发送的顺序,如基于 TOD 传输协议的动态规划算法^[23]和基于轮询机制的中间件调度^[24]。它是通过特定的网络协议来实现某些调度算法,因此缺乏灵活性,只能适应少数的算法。另外并不是所有的网络协议都有调度数据包的功能,如以太网就不能对将要发送的数据包进行调度。

3.2.3 网络优先级调度

虽然在网络的不同层面上都存在相应的调度协议,但由于现有商用网络中的应用层以下的调度协议都是固定的,故用户一般在应用层以上设计协议,即规定网络节点的发送数据的次序。网络优先级的调度是指网络应用层上的调度,它是上层应用程序根据调度算法而主动地决策数据的发送规则。该规则和具体的网络协议无关,但网络优先级调度须在基于优先权的网络上实现,如 CAN 和 DeviceNet,其中消息的优先权可以并入到消息识别符中。文献[25,26]各提出了基于误差的优先调度策略,进一步地,文献[27]受最大误差优先(Large Error First)^[25]和 MEF-TOD 调度算法^[23]的启发,对不同控制回路赋予不同的权

重,提出了一种基于反馈的最大紧急度优先(Maximum Urgency First)的网络消息调度算法。它按照当前事件的紧急度来动态调整控制回路的优先级,使控制性能得到改善,类似思想文献[28]也提及。

3.2.4 采样周期和采样时刻的调度

NCS 中各个控制回路的采样周期将影响到系统的控制性能的优劣,同时各个回路的采样时刻也会影响到数据包对网络信道的争用。第一种方法是采用了基于时间窗口的环路采样时间算法^[29,30],对 NCS 的每一个控制回路的采样时间进行调度并应用于周期性服务网络。

第二种方法是基于最大允许时延(MADB,Maximum Allowable Delay Bound)的采样时间调度,因为网络诱导时延一般与网络的结构和协议有关,而 MADB 从对象的模型中获得,与网络的协议无关。计算 MADB 的方法各不相同,如采用 Lyapunov 理论方法^[31,32]、黎卡提方程来计算 MADB^[33]、线性矩阵不等式(LMI)方法^[34]等。通过这些方法获得能保证系统稳定的每一个回路均不超过 MADB 的最大采样时间,并且对每一个采样周期进行了带宽分配,保证周期性数据和偶发性数据传输的实时性,同时使非实时数据传输带宽利用率变得最小化。但是前两种方法获得的 MADB 较保守,而通过 LMI 方法由于采用不同的放大技术使得结论也不尽相同。

第三种方法是基于带宽管理的回路采样时间算法,它的基本原理是当控制过程在近平衡点时,控制回路所需的带宽就少;如果控制过程遇到干扰,控制回路的带宽应马上增加以改善系统的性能,状态误差越大,分配带宽越多,采样周期越小。如文[35]采用一种增广状态变量的方法,基于带宽管理来动态计算回路的采样周期,在每个采样周期中随着状态变量的更新,每个控制回路的带宽也随即动态更新分配。

3.3 调度诱导问题及其补偿方法

对控制任务进行调度的同时也对控制系统带来了一些影响,主要体现在采样抖动、输入输出时延和时延的抖动上^[36]。在理想情况下,控制任务要求具有严格的执行周期,在点对点连接的系统中,这类执行周期都等于采样周期。在实际系统中,系统一般能承受 10% 以内的采样抖动^[36]。而使用慢采样和小相角裕度的系统对抖动的鲁棒性不强,容易导致系统失稳。从理想控制角度看,从读取输入信号到控制量的输出的时延期望为零。但实际系统的控制任务在执行和调度的过程中会带来时延,固定的时延会减小控制系统的相位裕度,从而降低闭环控制系统的性能^[37]。

对于这些问题可以通过控制器的设计来进行补偿:一种方法是在设计控制器时具有一定的鲁棒性;另一种方法是在每个周期中对时序的变化进行动态补偿。Pau Martí 等^[38,39]详细归纳了抖动的类别和出现抖动的情况,对相应的情况进行了补偿设计。文献[40]在满足实时性要求的前提下,通过确定网络控制系统中各控制闭环节点的采样周期及其在最小倍周期时段内的数据传输序列,提出折衷网络带宽资源的占用和传输周期抖动的两步优化调度算法。在兼顾周期抖动对控制闭环动态性能影响的同时合理地调配了带宽资源,使系统具有较高的网络资源利用率。文献[41]提出一种反馈调度方法在线调节控制任务的截止时限,反馈控制器采用比例算法,通过对其参数的自调整以动态满足整个任务集的可调度性,从而减少输出抖动。

3.4 可调度性分析和调度优化

一个调度算法应该考虑两方面的内容,即可调度性分析和

和调度优化^[19]。在单处理器环境下,在调度分析中每个任务主要由三个特性来描述:任务周期 T_i ,截止期 D_i 和最大执行时间 C_i 。可调度分析主要解决对每个被控对象的传感器同时获得的采样数据传输进行调度。

分析算法方式^[42]是目前被广泛采用的一种可调度分析方法,它可分为基于 CPU 利用率的分析方法和基于最大响应时间的分析方法。基于 CPU 利用率的分析方法是首先计算处理器的利用率,然后通过一个与该利用率相关的测试条件来判断系统的可调度性,文献[8]即采用了此种方法;基于最大响应时间的分析方法是先分析各任务的最大响应时间,再将分析得到的最大响应时间与该任务的最后期限进行比较,如果所有任务的最大响应时间都不大于其自身的最后期限,则系统是可调度的。这种基于最大响应时间的方法在文献[43-45]中被广泛采用。

调度优化是寻找一个最优的调度规则使性能计算函数取得最小(或最大)。当网络资源有限而网络上负载较多时,合理调度网络上传输的数据,提高网络资源的利用率,减少数据在网络上的传输时延,成为影响系统控制性能的关键因素。Walsh^[46]讨论了在 TOD 协议下,不同的调度策略对系统的影响,提出了最大误差优先调度技术和 TOD 协议,保证误差最大的数据的优先传输,并丢弃过时的数据而使用最新的数据。更进一步,Walsh 还研究了基于静态和 TOD 调度的多包传输问题,并对此情况下 NCS 稳定性进行了证明^[5]。Branicky 等^[20]提出了 RM 算法来调度 NCS 的多个传感器节点信息,给出了相应的稳定性定理,并提出了 RM 调度和 NCS 稳定性约束条件下的最优调度问题。文献[29,30,47]讨论了针对网络中可能存在的三种类型的数据(周期性、非周期性实时数据和非实时数据)如何有效地实现调度,在保证实时数据的实时性能基础上,进一步提高网络的利用率。文[48]讨论了一种在通信带宽受限情况下的离线优化调度算法,从而提高系统的控制性能。在文献[49]中,将受带宽约束的多变量线性系统建模为混合逻辑动态系统(Mixed Logical Dynamical)来解决控制和调度的优化问题,并且讨论了在线和离线的优化调度算法。随后,作者应用这种建模方法,综合了在线调度和离线调度的优缺点后,提出了一种视为折衷的优化在线调度方法,并应用到汽车的悬架系统中^[50]。

3.5 控制与调度协同设计

NCS 的性能不仅与控制算法有关,还与网络资源的合理使用和调度有关。首先,由于控制器作为控制系统中一个主要计算环节,承担了控制算法的实现,直接影响到系统的控制性能,这一点可以归纳为 NCS 的 QoP(Quality of Performance)问题。其次,NCS 对于网络消息的调度由于争用信道从而直接影响到系统的时延大小,这一点可以归纳为 QoS(Quality of Service)问题。因此,NCS 的调度算法应当兼顾 QoP 和 QoS 两个方面,根据系统构成的差异来设计具体的调度策略,在一定约束条件下取得总体性能的折衷。最终目标就是在集成控制和调度的前提下,找到系统 QoS 与 QoP 之间一个最佳的结合点,以求最有效地利用系统资源,实现系统的控制目标。随着 NCS 研究的深入,兼顾控制与调度的集成设计策略越来越受到人们的关注^[49-52]。这个设计思想利用调度理论的成果把共享资源的有效性和控制设计结合起来。

Seto^[9]在 1996 年率先对实时系统调度与控制的集成进行了研究,提出了将控制性能指标用于多任务的调度中,给出了控制系统的性能与采样周期的关系,即在所有任务都可调度的前提下,通过优化采样频率提高系统的性能。在文[53,54]中,作

者提出了一个优化采样周期和输入输出延迟的策略,控制性能采用静态误差、超调量、上升时间、稳定时间来描述。在此基础上,作者提出了一个用来在满足可调度性分析的前提下优化这些性能指标的启发式迭代算法。Kim^[59]等进一步探讨了这个算法,而 Seto^[59]同样涉及最优采样周期的选择,并提出了相应的求解算法。Branicky^[20]等基于 RM 算法研究了在满足网络可调度性和系统稳定性双重约束条件下,使网络利用率与 NCS 系统性能达到最优的采样周期优化问题。

在控制与调度协同设计中,主要问题是寻找一个适合工程实践的能对控制系统整体性能进行合理评价的指标。文[26]提出自适应控制器和反馈调度策略的协同设计方法,自适应控制器克服了在线自调整的一些限制,并且通过信息调度来动态管理控制质量(QoC),从而优化整个系统的控制性能。文献[57]提出了一种反馈控制和实时调度相集成的模糊反馈调度方法,通过对控制任务周期的动态调整,在可用的 CPU 资源受限和负载不确定的情况下,系统仍能得到较好的控制质量。

4 结语

对于资源受限的多回路 NCS,一个有效的符合工程实际的调度策略对系统性能的重要性是显而易见的。但无论从 CPU 调度或网络调度,还是控制与调度协同设计等角度来看,NCS 的调度理论与应用的研究在以下一些方面还有待进一步关注。

(1) 非固定执行时间调度策略

在传统的实时控制系统设计中,通常把控制器任务当作具有固定采样周期和已知最差情况下的执行时间(WCET)的实时任务。但通过调整任务属性,如增加采样时间或者减小任务的最大允许执行时间(MAET)等方法,可以减小系统的负载^[51]。后一种方法即为非固定执行时间(Anytime)调度策略,它使控制器动态调整任务的执行时间,从而提高系统的控制性能。文献[58]的模型预测控制(MPC)的实时调度策略即是非固定执行时间调度策略的一个例子。通过对此类动态执行时间调度,提高控制回路的实时性,使一些复杂算法推广至硬实时控制系统成为可能。

(2) 基于先进控制理论的反馈调度策略

在资源受限、网络负载动态变化的环境中,反馈调度提供了一种保证控制系统性能的有效的设计方法,但这方面研究工作才刚刚展开。利用现有的发展较为成熟的模糊控制、预测控制和自适应控制等先进控制理论对反馈调度系统进行建模、设计和分析成为可能。

(3) 多处理器并行计算及其调度管理

并行计算可以减少算法执行时间,从而获得更高的计算效率来解决更大、更复杂的问题并加快求解过程,其中 NCS 并行化体系结构、任务的分解与协调控制、质量衡量标准和服务质量管理等问题值得研究。特别当每个 CPU 具有不同的处理速度,每个任务的执行时间在不同类型的处理器上是不相关的情况下,即在异构的多处理器平台上进行调度管理值得探讨。

(4) 兼顾网络特性与控制特性的仿真平台开发

从通讯的角度看,NCS 的仿真过程应能体现网络特性,包括总线类型、网络速率等。对这一特性的常用建模与仿真软件有 OPNET, ns-2 等,但这些软件不能很好地反映控制方面的特性;从控制的角度看,NCS 的仿真过程应能体现控制特性,包括超调量、上升时间、稳定时间等,其常用的软件为 Matlab/

Simulink 平台。但这一平台不能有效反映网络特性。近几年来,一些研究学者开发了若干适合 NCS 研究的仿真工具,例如: ns-2 network simulator with Agent/Plant, Jitterbug 和 TrueTime 等^{[11]-[12]},促进了 NCS 的深入研究,但还需要进一步开发能同时体现控制系统动态性能和网络特性的仿真工具。
(收稿日期:2007年1月)

参考文献:

- [1] Mo-Yuen Chow, Yodyium Tipsuwan. Network-based control systems: a tutorial[C]//IECON'01 on Industrial Electronics Society, Denver, USA. [S.l.]: IEEE Press, 2001(3): 1593-1602.
- [2] Yang T C. Networked control system: a brief survey[J]. IEE Proceedings-Control Theory and Applications, 2006, 153(4): 403-412.
- [3] Yang Qing-yu, Wu Hong-jiang, Ju Lin-cang, et al. Development of network control system of tobacco packing machine[C]//Proceedings of the 6th World Congress on Intelligent Control and Automation, Dalian, China. [S.l.]: IEEE Press, 2006(2): 6641-6644.
- [4] Lian Feng-li, Moyne J R, Tilbury D M. Control performance study of a networked machining cell[C]//Proceedings of the American Control Conference, Chicago, USA. [S.l.]: IEEE Press, 2000(4): 2337-2341.
- [5] Walsh G C, Ye Hong. Scheduling of networked control systems[J]. IEEE Control Systems Magazine, 2001, 21(1): 57-65.
- [6] Lim D, Anbuky A. A distributed industrial battery management network[J]. IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2004, 51(6): 1181-1193.
- [7] Yodyium Tipsuwan, Mo-Yuen Chow. Control methodologies in networked control systems[J]. Control Engineering Practice, 2003, 11(10): 1099-1111.
- [8] Liu C L, Layland J W. Scheduling algorithms for multiprogramming in a hard-real-time environment[J]. Journal of the ACM, 1973, 20(1): 46-61.
- [9] Seto D, Lehoczky J P, Sha L, et al. On task schedulability in real-time control systems[C]//Proceedings of the IEEE Real-Time Systems Symposium, Washington, USA. [S.l.]: IEEE Press, 1996: 13-21.
- [10] Lee C, Lehoczky J, Siewiorek D, et al. A scalable solution to the multi-resource QoS problem[C]//Proceedings of the IEEE Real-Time Systems Symposium, Phoenix, USA: IEEE Press, 1999: 315-326.
- [11] Cervin A, Henriksson D, Lincoln Bo, et al. How does control timing affect performance? analysis and simulation of timing using Jitterbug and TrueTime[J]. IEEE Control Systems Magazine, 2003, 23(3): 16-30.
- [12] Ohlin M, Henriksson D, Cervin A. Truetime 1.5-reference manual [EB/OL]. Lund, Sweden: Lund University, [2007-01-16]. <http://www.control.lth.se/truetime/>.
- [13] Cervin A, Eker J. Feedback scheduling of control tasks[C]//Proceedings of the 39th IEEE Conference on Decision and Control, Sydney, Australia. [S.l.]: IEEE Press, 2000: 4871-4876.
- [14] Lu Chen-yang, Stankovic J A, Tao Gang. Feedback control real-time scheduling: framework, modeling, and algorithms[J]. Real-Time Systems Journal, Special Issue on Control-theoretical Approaches to Real-Time Computing, 2002, 23(1/2): 85-126.
- [15] Ren Xu-dong, Li Shan-bn, Wang Zhi, et al. A QoS management scheme for paralleled networked control systems with can bus[C]//IECON'03 on IEEE Industrial Electronics Society, Virginia, USA. [S.l.]: IEEE Press, 2003(1): 842-847.
- [16] 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,2004,36(4):37-39.
- [17] Li Zhang,Fang Hua-jing.Fuzzy controller design for networked control system with time-variant delays[J].Journal of Systems Engineering and Electronics,2006,17(1):172-176.
- [18] Xia Feng,Li Shan-bin,Sun You-xian.Neural network based feedback scheduler for networked control system with flexible workload[C]//Proceedings of First International Conference,ICNC'05,Changsha,China.[S.I.]:Springer-Verlag,2005:237-246.
- [19] Zhang W.Stability analysis of networked control systems [D].Cleveland:Case Western Reserve University, 2001.
- [20] Branicky M S,Phillips S M,Zhang Wei.Scheduling and feedback co-design for networked control systems[C]//Proceeding of IEEE Conference on Decision and Control,Las Vegas,USA. [S.I.]:IEEE Press,2002(2):1211-1217.
- [21] Sha L,Rajkumar R,Lehoczy J.Priority inheritance protocols:an approach to real-time synchronization[J].IEEE Transactions on Computers,1990,39(9):1175-1185.
- [22] Baker T.Stack-based scheduling of priority real-time[J].Real-Time Systems,1991,3(1):67-79.
- [23] Walsh G C,Ye H,Bushnell L G.Stability analysis of networked control systems[J].IEEE Transactions on Control Systems Technology,2002,10(3):438-446.
- [24] Liberatore V.Scheduling of network access for feedback-based embedded systems[J].Quality of Service over Next-Generation Internet, SPIE,2002,4866:73-82.
- [25] Yépez J,Martí P,Fuertes J M.Control loop scheduling paradigm in distributed control systems[C]//Proceedings of the 29th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society,Roanoke,USA.[S.I.]:IEEE Press,2003:1441-1446.
- [26] Martí P,Yépez J,Velasco M,et al.Managing quality-of-control in network-based control systems by controller and message scheduling co-design[J].IEEE Trans on Industrial Electronics,2004,51(6):1159-1167.
- [27] Xia Feng,Dai Xiao-hua,Wang Zhi,et al.Feedback based network scheduling of networked control systems[C]//International Conference on Control and Automation,Budapest,Hungary. [S.I.]:IEEE Press,2005:1231-1236.
- [28] Wang Zhi-ming,Zhu Xue-mei.EI based scheduling for thermal process control[C]//International Conference on Control and Automation,Budapest,Hungary.[S.I.]:IEEE Press,2005:656-660.
- [29] Hong S H.Bandwidth allocation scheme for cyclic-service field-bus networks[J].IEEE/ASME Transactions on Mechatronics,2001,6(2):197-204.
- [30] Hong S H,Kim Y C.Implementation of a bandwidth allocation scheme in a token-passing field-bus network [J].Instrumentation and Measurement,2002,51(2):246-251.
- [31] Kim Y H,Kwon W H,Park H S.Stability and a scheduling method for network-based control systems[C]//The 22nd Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society,Taipei,Taiwan.[S.I.]:IEEE Press,1996(2):934-939.
- [32] Kim Y H,Park H S,Kwon W H.A scheduling method for network-based control systems[C]//Proceedings of the American Control Conference,Philadelphia,Pennsylvania,USA.[S.I.]:IEEE Press,1998(2):718-722.
- [33] Park H S,Kim Y H,Kim D-S,et al.A scheduling method for network-based control systems[J].IEEE Transactions on Control Systems Technology,2002,10(3):318-330.
- [34] Kim D-S,Lee Y S,Kwon W H,et al.Maximum allowable delay bounds of networked control systems[J].Control Engineering Practice,2003,11(11):1301-1313.
- [35] Velasco M,Fuertes J M,Lin C,et al.A control approach to bandwidth management in networked control systems[C]//The 30th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society,Busan,Korea.[S.I.]:IEEE Press,2004:2343-2348.
- [36] Cervin A.Towards the integration of control and real-time scheduling design[R].Lund,Sweden:Lund Institute of Technology, 2000.
- [37] Luo Li-heng,Zhou Chuan,Cai Hua,et al.Scheduling and control co-design in networked control system[C]//Proceedings of 5th World Congress on Intelligent Control and Automation,Hungzhou,China.[S.I.]:IEEE Press,2004:1381-1385.
- [38] Martí P,Fuertes J M,Fohler G,et al.Jitter compensation for real-time control systems[C]//Proceedings of 22nd IEEE Real-Time Systems Symposium,London,UK.[S.I.]:IEEE Press,2001:39-48.
- [39] Martí P,Fuertes J M,Fohler G.Sampling jitter compensation in real-time control systems[C]//Proceedings of 22nd IEEE of Real-Time Systems Symposium,Delft,Netherlands.[S.I.]:IEEE Press,2001:39-48.
- [40] 白涛,吴智铭,杨根科.网络化控制系统中的抖动优化调度算法[J].控制与决策,2004,19(4):397-401.
- [41] 周平方,谢剑英,刘俊.反馈调度减少实时控制任务的输出抖动[J].上海交通大学学报,2005,39(12):2052-2056.
- [42] 窦强.分布式强实时系统中可调度性分析算法的研究[D].长沙:国防科学技术大学博士论文,2001.
- [43] Joseph M,Pandya P.Finding response times in a real-time system[J].The Computer Journal,1986,29(5):390-395.
- [44] Audsley N,Burns A,Richardson M,et al.Hard real-time scheduling:the deadline monotonic approach[C]//Proceedings of IEEE Workshop on Real-time Operating Systems and Software,Atlanta,USA[S.I.]:IEEE Press,1991:133-137.
- [45] Katcher D,Arakawa H,Stronsnider J.Engineering and analysis of fixed priority schedulers[J].IEEE Transaction on Software Engineering,1993,19(9):920-934.
- [46] Walsh G C,Ye H,Bushnell L.Stability analysis of networked control systems[C]//Proceedings of American Control Conference, San Diego,USA.[S.I.]:IEEE Press,1999:2876-2880.
- [47] 白涛,吴智铭,杨根科.网络化控制系统带宽配置的一种新策略[J].自动化学报,2004,30(6):961-967.
- [48] Rehbinder H,Sanfridson M.Scheduling of a limited communication channel for optimal control[J].Automatica,2004,40(3):491-500.
- [49] Gaid M B,Cela A,Hamam Y.Optimal integrated control and scheduling of systems with communication constraints [C]//Proceedings of the Joint 44th IEEE Conference on Decision and Control and European Control Conference,Seville,Spain. [S.I.]:IEEE Press,2005:854-859.
- [50] Gaid M B,Cela A,Hamam Y.Optimal integrated control and scheduling of networked control systems with communication constraints:application to a car suspension system[J].IEEE Transactions on Control Systems Technology,2006,14(4):776-787.
- [51] Árzén K E,Cervin A,Eker J.An introduction to control and scheduling co-design [C]//Proceedings of the 39th IEEE Conference on Decision and Control,Sydney,Australia.[S.I.]:IEEE Press,2000(5):4865-4870.