

文章编号: 1001-0920(2004)04-0361-06

网络控制系统的时延分析及数据传输技术研究

杨丽曼, 李运华, 袁海斌

(北京航空航天大学 自动化学院, 北京 100083)

摘 要: 网络控制是计算机、通信技术和控制技术融合发展所形成的一个新领域。在综述网络控制系统研究现状的基础上, 指出网络时延特性是影响系统性能的关键因素。重点分析了时延的构成和不确定性, 结合数据特征探讨了几种与时延特性密切相关的数据传输技术和常用协议的技术构成。最后给出了网络控制系统的主要研究内容和发展趋势展望。

关键词: 网络控制系统; 时延分析; 数据传输技术; 网络协议

中图分类号: TP273

文献标识码: A

Analysis of time delay in networked control systems and study of data transmission technology

YANG L i-m an, L I Yun-hua, YUAN H ai-bin

(Institute of Automatic Control, Beihang University, Beijing 100083, China Correspondent: YANG L i-m an, Email: yang_yim@163.com)

Abstract: Networked control system (NCS) is a new study field that integrates computer, communication technology and control technology. Based on the survey status of networked control systems, it is presented that delay characteristic is a key factor to determine the system performances. And the components and uncertainty of the network delay are analyzed. Combined with data characteristics, several kinds of data transmission techniques closely related with delay character are discussed and the technique compositions of the usual network protocols are presented. Finally, the principal research directions and the development tendency of NCS are proposed.

Key words: NCS; time-delay analysis; data transmission technique; network protocol

1 引 言

网络控制系统(NCS),是指通过计算机网络和总线将传感器、执行器和控制单元作为网络节点连接起来共同完成控制任务的系统^[1-5]。分布式系统(DCS)、工业以太网和现场总线系统(FCS)都属于网络控制系统的范畴。NCS体现了控制系统向网络化、集成化、分布化以及节点智能化的方向发展趋势,在工业控制、运动体控制、楼宇自动化等领域得到了广泛的应用,从而成为控制界的研究热点。

NCS与传统的分层递阶控制系统相比,最大的特点是将闭环控制分布在串行总线上,将中央控制单元直接接收检测信号和发送控制信号的点到点多路并行信号传输方式,转变为通过总线实现数据交互的串行通信方式^[6]。NCS与早期的分布式控制相比也有所不同。20世纪70年代初,各大公司相继推出了基于串行总线的分布式控制系统,由控制模块组态而成,大部分的实时任务,如采样、控制律计算、驱动执行器等,都可在同一个模块内完成。各模块

收稿日期: 2002-12-02; 修回日期: 2003-03-18

基金项目: 北京市自然科学基金资助项目(3002008)。

作者简介: 杨丽曼(1975—),女,河北榕城人,博士生,从事网络控制等研究;李运华(1963—),男,河北邢台人,教授,博士生导师,从事机电控制、非线性控制、车辆工程学研究。

之间仅仅传递一些开关量、监测数据和报警信息,构成的是一种松散连接的NCS,网络传输特性对闭环控制的影响很小。随着嵌入式微处理机技术和网络技术的发展,嵌入了智能芯片的传感器和执行器等现场设备具有网络接口功能,可以作为独立的节点,直接连入网络,构成闭环控制回路,采样数据和给定(或控制)信号在网络上传输,各节点必须协同工作才能完成控制任务。由于信道竞争、物理信号编码和通信协议处理等带来的额外开销,在控制器、执行器和传感器之间不可避免地引入了不同类型的时延,这些时延统称为网络时延。根据所采用的网络协议和设备不同,这类时延可能是确定的、有界的或随机的,它们在不同程度上降低了系统的控制性能,甚至造成系统的不稳定。尤其当网络上存在多个控制回路时,网络时延会使各回路之间产生耦合,从而使网络控制系统的分析和设计更加复杂^[7,8]。

对NCS的评价通常有两个标准:网络服务质量(QoS)和系统控制性能(QoP)。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。但要达到性能要求,仅靠传统的控制理论是不够的,因为网络通信将一些不确定性因素带入了闭环控制,不再满足传统控制理论的理想假设。从这两种评价标准出发,目前对NCS的研究有两条主线:网络体系构架和控制器的设计。前者围绕网络服务质量,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,满足系统对实时性的要求,同时减小网络时延和时延的不确定性^[4,5,9-15];后者是指在现有的网络条件下,设计相适应的控制器,保证良好的控制性能和稳定性,基本思想是将网络协议、拓扑结构、信道负载和网络时延等作为已知条件,采用连续或离散的模型仿真NCS,给出系统的稳定性条件,设计一个鲁棒性强的控制器,实质是对复杂时延控制系统的研究^[2,3,16-20]。

从以上对NCS的研究现状分析中可以看出,网络通信带来的端到端的时延是研究NCS的关键因素,既要减小时延降低其不确定性,又要克服时延对控制系统的不利影响。因此,分析网络时延特性、掌握与时延特性密切相关的数据传输技术是深入研究NCS的基础。本文正是围绕这一主题展开的,首先分析了网络时延的关键构成以及时延的不确定性,阐述了NCS中不同的数据类型和对时延的不同要求;然后系统地讨论了NCS中用到的各种数据传输

技术,包括主导技术和辅助技术,比较分析了它们的时延特性和适用范围,并给出了几种常用协议的技术构成;最后对NCS的发展趋势和研究方向提出了设想。

2 网络时延分析

2.1 NCS的典型通信模型^[21,22]

NCS中最具代表性的是20世纪80年代兴起的现场总线技术,它将网络通讯与管理的观念融入工业控制领域,成为当今NCS的主流实现形式。另一方面,以太网技术以其成熟的高带宽、开放互联性以及深远的影响力,被各大公司和许多研究者看好,但要真正实现以太网向现场级的延伸,除了改进以太网的通信协议之外,还需要解决网络的传输效率、本安防爆、总线供电等技术问题。只有当这些问题解决之后,工业以太网技术才会成为NCS的主角。因此,这里仍以现场总线的3层协议作为NCS的典型通信模型。现场总线通信协议的结构是根据国际标准化组织(ISO)的开放系统互连参考模型OSI简化而来,忽略了一些中间层(LonWorks除外),主要包括物理层、数据链路层和应用层,其中数据链路层又分为逻辑链路控制子层(LLC)和介质访问控制子层(MAC)。MAC子层规定了当网络上的多个设备需要占用信道资源时如何分配资源,即介质访问控制机制,它与网络时延特性密切相关,是数据传输技术的具体实现。

2.2 网络时延的关键组成和不确定性分析^[8,23]

在NCS中,信息传输过程的实质是网络上的某设备(节点)由任务产生发送信息,经过各层协议的封装解析并通过网络达到另一个设备的任务。网络时延就是在这个过程中产生的。

在分析NCS的网络时延时,人们最为关心的是传感器到控制器和控制器到执行器的端到端时延,因为它直接影响到系统的稳定性和控制性能。假设网络上节点A向节点B发送一条信息,并得到响应,该过程所产生的时延如图1所示。根据时延的产生过程和不同特性,可将其分为4个组成部分:发送处理时延 T_{send} ,等待时延 T_{wait} ,传输时延 T_{ts} 和接收处理时延 T_{rev} 。其中 T_{send} 和 T_{wait} 在源节点产生, T_{rev} 在目标节点产生, T_{ts} 是信息发送时间与在信道传播时间之和。网络时延可表达为

$$T_{\text{delay}} = T_{\text{send}} + T_{\text{wait}} + T_{\text{ts}} + T_{\text{rev}} \quad (1)$$

1) 发送处理时延 T_{send} :包括源节点的应用程序产生应用层信息包的时间和将其转换为合适的网络传输格式所需要的时间,依赖于源节点设备软、硬件

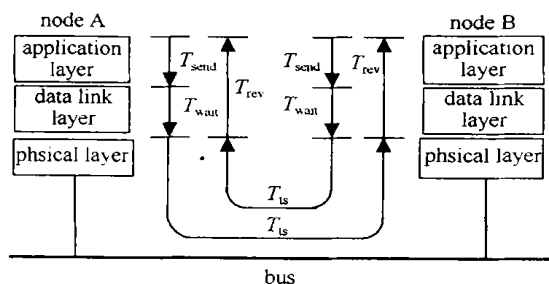


图 1 NCS 中端到端网络时延示意

的性能,是可预测的

2) 等待时延 T_{wait} : 数据链路层数据帧在发送缓存中等待 MAC 协议发送的时间,包括在缓存队列中的排队时间和进行信道竞争等待信道空闲的时间,其大小由源节点中待发送的数据量和此刻网络流量决定。影响等待时延 T_{wait} 的重要因素有 MAC 层协议、信息连接方式和网络负载。

3) 传输时延 T_{ts} : 包括物理层信号发送到信道上的发送时间和信号在物理信道上的传输时间。传输时延是控制网络中最具确定性的参数,因为它只依赖于网络带宽和两节点之间的距离,可用公式描述为

$$T_{ts} = N \times T_{bit} + T_s$$

其中: N 是所发送数据帧的位数, T_{bit} 是发送一位需要的时间, T_s 是信号在网络上任意两节点间的传播时间。由于信号在通信介质中的传播速度是 2×10^8 m/s, 在短距离范围 (100 m 或更小) 的控制网络内,传播时间可以忽略不计。

4) 接收处理时延 T_{rev} : 将数据帧解析还原为应用层信息并传递给任务的时间,与目标节点设备的软、硬件性能有关。

通过以上分析可知, NCS 中端到端时延是由网络和设备共同决定的。 T_{send} 和 T_{rev} 取决于设备的软、硬件性能,当系统给定时,它们是可以预测的。网络带宽决定信息的发送时间,传输时间在小范围内可忽略不计,因此传输时延 T_{ts} 是确定的。等待时延 T_{wait} 随网络节点数和数据量的增加而增大,即使在正常工作状态下,网络流量基本稳定,对于采用不同协议的系统,等待时延将随介质访问控制机制的不同而有很大差异,当网络流量波动时,这种差异会更大。因此, NCS 时延的不确定性主要来自 MAC 层的等待时延,优化 MAC 层协议便成为提高网络性能,满足系统实时性要求的关键环节。

3 网络控制系统中的数据特征^[15, 24]

网络时延是在数据传输过程中产生的,它是否

对所有数据都会产生不利影响,这首先需要了解信道中传输数据的类型和对实时性的不同要求。

在 NCS 中,需要传输的数据可分为 3 类: 周期数据、猝发数据和非实时数据。

1) 周期数据: 如各种传感器和控制器的 I/O 信号和部分系统状态监测数据。周期数据对时间有严格要求,一般不允许有秒级的时延,在某些特殊场合下甚至不允许有毫秒级的时延,并且有截止期限限制。此外,对周期数据而言,只有最新数据是有意义的,如果在某一时段内,一周期数据由于某种原因未能达到或出错,而此时下一个数据已经产生,则该数据将被丢弃,因此周期数据一般不要求重发。

2) 猝发数据: 如报警信号和紧急操作指令。猝发数据对实时性要求极高,一般应有比周期数据更高的优先级,并且要求准确无误,但数据长度一般较短,数据量相对较少,对带宽的占用率较低。

3) 非实时数据: 如用户编程数据和组态数据。它对时间的要求并不严格,允许有一定的时延,但这类数据的长度较长且不确定,数据量较大,对带宽的占用率较高,一般以小型或微型文件的形式出现。所传送的数据一般都是有意义的,不允许丢失,需要差错控制和重发机制保证数据的完整和准确。

上述 3 类数据中,周期数据和猝发数据属于实时数据,但对实时性的要求不同,前者应满足截止时间要求,对时延特性较为敏感,时延的不确定性影响闭环控制的稳定性和控制性能;后者则希望尽可能快地得到响应,时延越小越好,但并不介意时延是否具有确定性,同时对可靠性的要求高于周期数据。

4 数据传输技术^[22-26]

MAC 层协议所定义的数据传输技术分为主导技术和辅助技术。其中主导技术又分为事件触发式的总线争用技术和时间触发式的令牌控制技术,它直接决定介质访问控制机制。辅助技术必须和主导技术配合使用,但也是影响网络时延特性的重要因素。下面重点讨论几种具有代表性的主导技术和辅助技术及其各自的特点和适用范围,并分析 NCS 几种常用协议的技术构成。

4.1 主导技术

4.1.1 CSMA 技术

CSMA (载波监听多路访问) 是一种总线争用技术,这种介质控制方式对任何节点都没有预约发送时间,节点发送是随机的(或是由事件触发的),当多个节点同时向总线发送数据时,就需要一个竞争的规则。CSMA 规定任何要发送数据的节点首先监

听总线是否空闲,如果空闲则可以发送,如果总线忙,则需等待一段时间间隔后重发。在监听总线,决定是否发送时,可以采用3种退避算法:1)不坚持算法;2)1-坚持算法;3)P-坚持算法

CSMA 技术实现简单,能够及时响应猝发数据,但没有考虑周期数据的时间限制,即使满足了截止期要求,随机的争用信道使得时延的不确定性很大,因此被认为是不确定性的传输技术,要用于测控场合,必须与其他技术相结合或加以改进。它的典型应用是以太网和现场总线的 LonWork 协议, CAN 协议也采用了改进的 CSMA 技术

4.1.2 令牌轮询技术

令牌轮询技术又称为分布式令牌技术,是一种时间触发方式的介质访问控制机制,主要用于多主站系统。其基本工作原理是:总线中存在唯一的令牌,在由主站构成的逻辑环中循环传递,主站之间通过一定的逻辑调度算法获得令牌的调度权,然后由它发起对其他主站或所属从站的通信,其原理如图2所示。该技术最具代表性的协议是 Profibus

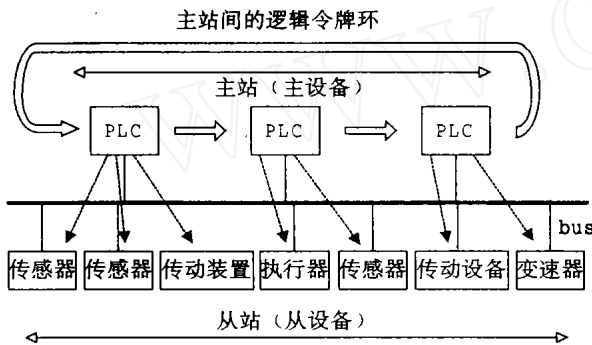


图2 NCS 中的令牌传递模式

令牌轮询技术通过任务调度来满足周期数据的不同实时性要求,即有静态的事先约定,也可以有动态的调整。其优点是周期任务的实时性好且具有确定的或可预测的最大网络时延,主要缺点在于它无法处理突发事件。为克服这一问题,出现了带宽预留方法,它将任何空闲处理能力(没有周期任务使用)都用于非周期任务,这样既保证了周期数据的实时性和时延确定性,又可实现对突发事件的快速响应

4.1.3 集中式令牌技术

该技术同样是时间触发的介质访问控制机制。其基本思想是:总线上只有一个节点拥有总线仲裁权,按内部的任务调度表指示其他节点按时发送相应的信息;某一节点得到指示后,获得信道使用权,将缓存中的指定数据发送到总线上,被某个或某些

节点接收;发送节点和接收节点的关系通过组态设定

集中式令牌技术适用于周期数据,根据周期数据的特征,如截止日期、执行时间和重要性等,利用相关的实时调度算法,在仲裁节点内部建立任务调度表(ST),运行时不断扫描 ST,发送信道使用权。该技术的优点是具有比令牌轮询更精确的周期数据响应时间和确定性的最大网络时延,缺点是无法处理突发事件。解决方法是在 ST 的剩余时间内放弃控制权,使其他节点有机会传送猝发数据。该技术的典型代表协议是 WorldFIP 和 FF,它们的仲裁节点分别称为总线仲裁器(BA)和活动链接调度器(LAS)。

4.2 辅助技术

4.2.1 数据分类技术

数据分类的思想在前面提到的主导技术中已有所体现,根据所传数据的类型和特征,对其通讯过程进行不同的处理。如 WorldFIP 将网络通讯分为3种类型:1)周期性通讯:对应周期数据,按时传输,如数据采集;2)事件性通讯:对应猝发数据,在事件发生时传输,如报警;3)报文通讯:对应非实时数据,被请求时传输,如程序下载。通过这种分类,WorldFIP 对实时性要求高的周期性通讯的时延是确定的。

FF 总线协议的 MAC 层对数据的存取也采用了分类传输的方法,分为调度传输和非调度传输两种。调度传输如周期数据按预定时序进行,由集中式令牌技术实现;非调度传输如猝发数据是随机无序的,由令牌轮询技术实现。

再如 Rockwell Automation 开发的控制网络,对网络的介质存取采用了“并行时域多路存取 CTDMA”方法,以控制各个节点在网络刷新时间(NUT)内传送信息的机会。网络刷新时间分为3部分:预定信息传送时间、非预定信息传送时间和网络维护时间。在预定信息传送时间内,每个预定的节点保证有一个机会传送信息,周期数据和猝发数据必须在这段时间内传送出去,而在非预定信息传送时间内传送非实时数据。

多数协议都采用了数据分类技术,与主导技术相结合,可满足不同数据的实时性要求。

4.2.2 优先级集中控制技术

该技术的基本思路是给网络上的节点或不同的数据帧分配不同的优先级,当发生通信信道竞争时,优先级高的节点或数据帧获得信道访问控制权。

这种技术一般与其他技术结合起来使用。如 WorldFIP 根据数据特征给 3 类数据分配不同的优先级, 按周期性通讯、事件性通讯和报文通讯优先级依次递减。又如 CAN 的 MAC 层所用的基于优先级的 CSMA/CA 方式, 不同于以太网的 CSMA/CD 方式, 在传输的每一个数据帧中加入了优先级标识, 用非破坏性仲裁技术避免冲突。当几个节点同时向网络发送信息时, 运用逐位仲裁规则, 借助帧中开始部分的标识符, 优先级低的节点主动停止发送数据, 而优先级高的节点可不受影响地继续发送信息, 从而有效避免了总线冲突, 使信息和时间均无损失。

一般情况下, 猝发数据的优先级最高, 然后是周期数据和非实时数据。在令牌控制技术中, 也可通过一定的算法给令牌赋予不同的优先级, 获得令牌的节点将要发送的数据优先级与令牌的相比较, 级别相同或较高的可以发送, 从而实现动态调度。

4.2.3 TOD 技术

TOD 即 Try-Once-Discarded, 针对 NCS 中周期数据的时间敏感性, TOD 技术保证了设备接收到的数据都是最新数据。周期数据如控制器或传感器的 I/O 信号在传输过程中发送一次, 如果传输未成功, 数据便被丢弃, 而延用上一周期的同类数据。因此, 要求网络的传输性能和准确率应尽可能的高。

由于不再重发出错的周期数据, TOD 技术大大降低了网络拥塞的概率, 同时缩短了数据传输的平均时延。此外, TOD 技术与优先级控制相结合, 可以实现某种动态的调度策略, 如最大误差优先的 TOD 技术 (MEF-TOD), 具有可预测的最大网络时延, 并具有比静态调度更优越的特性^[5]。

4.2.4 多信道广播技术

多信道广播技术也是 NCS 中普遍采用的一种通信技术, 它比请求应答方式具有传输速度快, 网络效率高的优点。特别是对组态信息、地址信息等公共数据, 多信道广播技术不失为一种有效的通信方式。此外, 也可用于周期数据和猝发数据, 以满足某些特殊要求, 如强制同步指令等。

FF 的通信采用了发布者/预定者模式, 该模式是基于多信道广播的。在控制网链路上, 由发布者发送的每个报文都包含一个连接标识符, 已经组态的预定者在收听广播时, 可以识别其应收报文的连接标识符; 如果此节点要发送数据, 则变为发布者。

4.3 几种常用协议的技术构成

任何数据传输技术都不是孤立存在的, 它们在实际应用中相互结合, 从而形成某种协议。表 1 给出

了几种常用协议的技术构成。其中: Profibus 协议以令牌轮询技术为主, 同时采用了数据分类和优先级控制; FF 用集中式令牌传递周期数据, 用令牌轮询 (分布式令牌) 传送猝发数据, 并赋予不同的优先级, 形成了独特的 MAC 机制; CAN 协议在 CSMA 的基础上采用优先级控制, 形成了冲突避免的 CSMA/CA 机制。这些技术的结合是为了满足控制领域特殊数据传输的特殊要求, 尤其是周期数据对实时性和端到端时延的确定性的要求。

表 1 几种常用协议的技术构成

协议	主导技术			辅助技术	
	CSMA	令牌轮询	集中式令牌	数据分类	优先级控制
Ethernet	√				
CAN	√			√	√
LonWork	√			√	√
Profibus		√		√	√
FF		√	√	√	√
WorldFIP			√	√	√

表 1 中列出的协议按所采用的主导技术可分为两类: 一类是事件触发式的协议, 如 Ethernet, CAN 和 LonWork, 各节点之间的信道竞争使得网络时延具有随机时变性, 只有优先级最高的节点和数据具有确定性的最大时延; 另一类是时间触发式的协议, 如 Profibus, FF 和 WorldFIP, 靠实时任务调度实现资源共享, 信道上没有冲突发生, 因此时延具有可预测性, 是固定不变的或有界的, 由调度算法来决定。因此, 了解了协议的技术构成, 特别是所采用的主导技术, 就能确定协议的时延特性和适用范围, 为构建网络或提出 NCS 建模的假设条件提供理论依据。

目前, 仍有许多学者致力于这方面的研究工作, 探讨新的技术或用现有技术不同组合来改进通信协议, 以期获得更好的网络服务性能, 为 NCS 的系统设计提供一个良好的基础。

5 趋势展望

NCS 的优点和重要意义是显而易见的, 但问题也不容忽视。从理论的角度看, NCS 是一个具有不确定性传输时延的 M/M/1 复杂系统, 网络传输时延的不确定性, 加上数据出错和丢失等现象, 使系统不再具有定常性、完备性和确定性, 同时事件驱动和时间驱动并存, 已不能再用简单的采样时间来刻画。因此, 对 NCS 的研究需要全新的视角和更多的理论支持, 包括传统控制理论、Agent 理论、复杂系统理论、优化理论、信息论等。其研究的主要内容应包括以下

几点:

- 1) NCS 的建模、稳定性与可控性研究;
- 2) NCS 的控制与优化算法研究, 协调控制与现场闭环联合工作的NCS, 多速率采样系统的研究;
- 3) 不同网络构架(拓扑结构、通信协议)下 NCS 的性能比较与应用分析;
- 4) NCS 性能评价体系的研究(包括网络性能、控制性能、可靠性以及综合评价指标);
- 5) NCS 仿真平台和工具软件的研究(有别于商业数据网, 除了拓扑结构、通信协议、网络设备模型外, 还应具备不同动态特性的受控对象模型和控制与规划工具).

从应用研究的角度看, NCS 目前最具应用前景的是运动体的综合控制和机群管制, 前者包括移动式机器人、大型车辆、先进飞行器、农业机械、工程机械等; 后者包括智能交通中的车辆编组运行控制、多机器人协同控制、盾构系统(TBM)和集成制造中的模块化加工系统等。应用研究要以工程实际为背景, 注重系统的需求、特点、效益和基本技术的标准化。

6 结 语

在先进技术和商业利益的推动下, NCS 的应用已从最初的化工过程控制向更多的领域延伸, 但是任何一个领域的纵深发展都需要大量的理论和应用研究作后盾。目前, 对NCS的研究工作相对较少, 距离一个完善的理论体系还相去甚远, 尤其在我国硬件设备的智能化程度较低背景下, 对NCS的研究多偏重于应用技术和系统实现, 真正意义上的理论和应用研究还处于起步阶段, 一系列富有挑战性的课题等待我们去拓展。

本文以网络时延为主线, 结合NCS的数据特征, 探讨了几种主要的数据传输技术和常用协议的技术构成, 并对NCS的发展趋势和有价值的研究方向提出了设想, 目的是希望引起控制领域的学者和工程技术人员对网络控制的广泛关注和研究热情, 使该领域的理论和应用研究取得长足的进展。

参考文献(References):

- [1] Raiji R S. Smart networks for control [J]. *IEEE Spectrum*, 1994, 31(6): 49-55
- [2] Halevi Y, Ray A. Integrated communication and control systems: Part I—Analysis [J]. *ASME J Dyn Syst, Meas and Contr*, 1988, 110(4): 367-373
- [3] Nilsson J. Real-time control systems with delays [D]. Lund: Lund Institute of Technology, 1998
- [4] Branicky M S, Phillips S M, Zhang W. Stability of

networked control systems: Explicit analysis of delay [A]. *Proc American Control Conf* [C]. Chicago, 2000. 2352-2357.

- [5] Walsh G C, Ye H. Scheduling of networked control systems [J]. *IEEE Contr Syst Mag*, 2001, 21(1): 57-65
- [6] 顾洪军, 张佐, 吴秋峰. 网络控制系统的机理描述模型 [J]. *控制与决策*, 2000, 15(5): 634-636
(Gu Hong-jun, Zhang Zhuo, Wu Qiu-feng. The mechanism description model of networked control system [J]. *Control and Decision*, 2000, 15(5): 634-636)
- [7] Zhang W, Branicky M S, Phillips S M. Stability of networked control systems [J]. *IEEE Contr Syst Mag*, 2001, 21(1): 84-99
- [8] Lian F L, Moyne J R, Tibury D M. Network design consideration for distributed control systems [J]. *IEEE Trans on Contr Syst Tech*, 2002, 10(2): 297-307.
- [9] Lian F L, Moyne J R, Tibury D M. Performance evaluation of control networks: Ethernet, control net and device net [J]. *IEEE Contr Syst Mag*, 2001, 21(1): 177-186
- [10] Ray A. Performance evaluation of medium access control protocols for distributed digital avionics [J]. *ASME J Dyn Syst, Meas and Contr*, 1987, 109(4): 370-377.
- [11] Halevi Y, Ray A. Performance analysis of integrated communication and control system networks [J]. *ASME J Dyn Syst, Meas and Contr*, 1990, 112(3): 365-371.
- [12] Kweon S K, Shin K G, Workman G. Achieving real-time communication over ethernet with adaptive traffic smoothing [A]. *Proc IEEE Int Conf Real-time Tech Appl Symp* [C]. Washington, 1999. 90-100
- [13] Hong S H. Scheduling algorithm of data sampling times in the integrated communication and control systems [J]. *IEEE Trans on Contr Syst Tech*, 1995, 3(2): 225-230
- [14] Tovar E, Vasques F, Burns A. Supporting real-time distributed computer-controlled systems with multi-shop P-net networks [J]. *Control Engineer Practice*, 1999, 7(8): 1015-1025
- [15] Park H S, Kim Y H, Kim D S, et al. A scheduling method for network-based control systems [J]. *IEEE Trans on Contr Syst Tech*, 2002, 10(3): 318-330
- [16] Ray A, Halevi Y. Integrated communication and control systems: Part II—Design considerations [J]. *ASME J Dyn Syst, Meas and Contr*, 1988, 110(4): 374-381.

(下转第 382 页)

布采样系统时间同步问题,有效地提高了漏点定位精度。基于逻辑判决的工况分析算法,结合了数理统计原理和管道运行经验知识,能够动态估计管道运行数据的正常值范围,且算法参数可调,具有自动更新能力,计算速度快,判别结果准确。依据本文思想设计出的系统,其有效性已经实际应用证明,完全符合工业现场要求。

参考文献(References):

- [1] Billman L., Isemann R. Leak detection methods for pipelines[J]. *Automatica*, 1987, 23(3): 381-385.
- [2] Verde C, Visairo N. Bank of nonlinear observers for the detection of multiple leaks in a pipeline[A]. *Proc of IEEE Conf on Control Application* [C]. Mexico City, 2001. 714-719.
- [3] Ashton S A., Shield D N., Daley S. Application of a fault detection method for pipelines [J]. *Int J of System Science*, 1997, 23(2): 97-109.
- [4] Butlen N C. Pipeline leak detection technique[J]. *Int J of Pipes and Pipelines*, 1982, 27(4): 202-208.
- [5] Verde C. Multi-leak detection and isolation in fluid pipeline [J]. *Control Engineering Practice*, 2001, (9): 673-682.
- [6] Zhang J. Statistical pipeline leak detection for all operating conditions [J]. *Int J of Pipeline and Gas*, 2001, 229(2): 42-45.
- [7] 李庄, 王立坤, 周琰. 基于虚拟仪器的原油管道泄漏检测系统[J]. *电子产品世界*, 2001, 9: 8-10.
(Li Z, Wang L K, Zhou Y. Virtual instrument-based oil pipelines monitoring system [J]. *Electronical Product World*, 2001, 9: 8-10.)
- [8] 冯健, 张化光, 伦淑娴, 等. 基于ANFIS非线性观测器的连续小波变换故障检测[J]. *东北大学学报*, 2003, 24(6): 519-522.
(Feng J, Zhang H G, Lun S X, et al. Method of fault detection based on ANFIS nonlinear observer using continuous wavelet transform [J]. *J of Northeastern University*, 2003, 24(6): 519-522.)
- [9] 冯健, 张化光, 伦淑娴, 等. 输油管道泄漏监测与定位系统的研制[J]. *东北大学学报*, 2003, 24(8): 731-734.
(Feng J, Zhang H G, Lun S X, et al. Development on leak detection and location system for oil pipeline [J]. *J of Northeastern University*, 2003, 24(8): 731-734.)
- [17] Liu L W., Ray A. A stochastic regulator for integrated communication and control systems: Part I — Formulation of control law [J]. *ASME J Dyn Syst, Meas and Contr*, 1991, 113(4): 604-611.
- [18] Krstolica R., Ozguner U., Chan H., et al. Stability of linear feedback systems with random communication delays [J]. *Int J Control*, 1994, 59(4): 925-953.
- [19] Chan H., Ozguner U. Closed-loop control of systems over a communications network with queues [J]. *Int J Control*, 1995, 62(43): 493-510.
- [20] Ray A. Output feedback control under randomly varying distributed delays [J]. *J of Guidance, Control and Dynamics*, 1997, 17(4): 701-711.
- [21] Gary A Mitchell, Christian Huitema. Ethernet in control [J]. *Control Engineering*, 2000, 47(5): 46-54.
- [22] 阳宪惠. 现场总线技术及其应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 1999. 47-67.
- [23] 王智, 王天然, Song Ye-qiong, 等. 工业实时通讯网络(现场总线)的基础理论与现状(上) [J]. *信息与控制*, 2002, 31(2): 146-163.
(Wang Zhi, Wang Tian-ran, Song Ye-qiong, et al. Survey of real-time schedule theory and the state-of-the-art of its application in industrial real-time communication system (Part I) [J]. *Information and Control*, 2002, 31(2): 146-163.)
- [24] 顾洪军, 张佐, 吴秋峰. 网络控制系统的实时特性分析及数据传输技术 [J]. *计算机工程与应用*, 2001, 37(6): 38-40.
(Gu Hong-jun, Zhang Zhuo, Wu Qiu-feng. Analysis of real-time property and data transferring technology of networked control system [J]. *Computer Engineering and Applications*, 2001, 37(6): 38-40.)
- [25] 周悦, 王智, 苑明哲, 等. 几种现场总线的通信介质访问控制方式 [J]. *工业仪表与自动化装置*, 2001, (3): 61-64.
(Zhou Yue, Wang Zhi, Yuan Ming-zhe, et al. The communication media access control mode of fieldbuses [J]. *Industrial Instrumentation and Automation*, 2001, (3): 61-64.)
- [26] Wang L., Hamdi M. Analysis of multimedia access protocol for shared medium network [A]. *Conf Record / IEEE Global Telecommunications Conf* [C]. San Francisco, 2000. 1176-1180.

(上接第 366 页)