

文章编号: 1001-0920(2006)01-0068-05

网络控制系统的时延和负载分析

杨丽曼, 李运华

(北京航空航天大学 自动化学院, 北京 100083)

摘要: 针对运动体机械和大型制造装备多机电子系统协调运动控制所涉及的控制网络的特殊性, 分别从控制和网络两方面给出了回路时延和网络时延的界定, 并从目的、性质和获取方法等角度进行了比较。通过对网络时延的特性和评价指标的理论分析和数学描述, 指出在系统运行过程中网络负载和负载波动是产生时延和时延抖动的直接原因, 进一步讨论了控制网络中的负载构成和具体的估计方法。仿真结果验证了理论分析方法的有效性。

关键词: 网络控制系统; 时延; 网络负载

中图分类号: TP273

文献标识码: A

Analysis of Delay and Load in Networked Control Systems

YANG L i-m an, L I Yun-hua

(School of Automation Science and Electrical Engineering, Beihang University, Beijing 100083, China
Correspondent: YANG L i-m an, E-mail: li-m an-yang@sina.com)

Abstract: Aiming at the particularity of control network, involved in the coordinated motion control of multi-mechatronic-subsystem in large manufacturing devices and mobile machines, the conceptions of loop-delay and network-delay in view of control and network are proposed, and their intentions, properties and acquiring methods are compared. Theoretical analysis and mathematical description about characteristics and evaluating indicators for network-delay, indicate that network load and load fluctuation are the direct causes of delay and delay jitter during the system running. Furthermore, the network load composition and an estimating method are discussed. The simulation results verify the validity of the proposed theoretical analysis methods.

Key words: Networked control systems; Time delay; Network load

1 引言

网络控制系统(NCS)是指通过现场总线、工业以太网或无线网络将分散的、智能化的现场检测、控制及执行设备作为网络节点连接起来共同完成控制任务的实时系统^[1,2]。它是基于开放通信网络的分布式计算机控制系统,通过数据在网络节点间传输实现采样与控制信号发送。网络上所传送的数据包括周期性数据和少量猝发数据,数据类型一般为短信息,但对截止期有严格要求。任务确定时,网络负载在很大程度上取决于采样周期的大小。控制网络中的节点数较多,信号发送频率较高,因此要求系统能合理分配网络资源,并对信息有足够快的反应。在

NCS中,网络传输引起的时延出现在闭环回路中,随负载变化呈现不确定性,使原本等间隔的数字采样变得不再等间隔,造成反馈和控制信号产生随机的相位滞后。而包丢失、空采样和样本拒绝等现象可归结为时延抖动(突发的非规律性变化),这些都会对系统的控制性能和稳定性产生不利影响。

控制网络的分析和设计应该着重从实时性的角度出发,其中时延和时延抖动是网络能否良好服务于控制的关键因素。通过协议改进和整体调度策略优化在一定程度上可以抑制时延和时延抖动,或者在掌握时延分布特征的前提下在控制算法中进行补偿^[3~5]。关于时延分析的代表性研究成果有:Nilsson

收稿日期: 2004-12-01; 修回日期: 2005-03-21

基金项目: 北京市自然科学基金项目(3052011)

作者简介: 杨丽曼(1975—),女,河北裕城人,博士生,从事机电网络控制的研究;李运华(1963—),男,河北邢台人,教授,博士生导师,从事机电控制、非线性控制等研究。

将时延建模成 Markov 链^[6]; Bauer 提出了最新采样保持模型和延迟最大化模型^[7]; Feng-li Lian 对时延的构成做了详尽的分析, 并研究了时延和控制性能之间的关系^[8]。但是, 这些研究有的对控制网络自身的特点没有给予足够重视, 有的未能正确区分网络传输过程中的实际时延与控制算法中用于状态预测的时延参数

针对上述情况, 本文基于控制网络的特点, 提出了回路时延和网络时延的概念, 通过分析比较重点阐述了它们的理论分析方法, 进而对产生时延和时延抖动的直接原因——网络负载作了进一步研究, 并设计了一个具体 NCS 的仿真试验, 对理论进行了验证

2 控制网络中的时延分析

2.1 网络时延与回路时延

从图 1 可以看出网络时延和回路时延在概念上的差异。网络时延是指信息从网络中的一个节点被传输至另一个节点所需要的时间, 是一个随机变量, 用 d 表示。通常从统计学角度用时延概率分布来描述, 是评价网络性能的一个重要指标, 与传输协议、网络负载和调度策略等因素有关。回路时延是指闭环控制回路中的传感或控制信号经网络传输造成的延迟, 用 τ 表示, 包括传感器到控制器的反馈回路时延 τ_{sc} 和控制器到执行器的前向回路时延 τ_{ca} 。它是设计控制算法时需要补偿或预估的参数, 与网络传输方式、节点触发方式、网络接口设置和时钟差异等因素有关

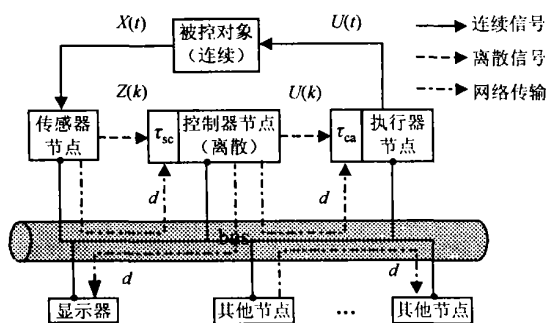


图 1 控制网络中的网络时延和回路时延

网络时延和回路时延在研究目的、性质和获取方法上既有很大差异, 同时又密切相关。网络时延反映的是一段时间内的网络运行状况, 需要大量的测量样本作依据。由于控制网络(不含基于 Internet 的遥控网络)中的大部分任务可预测, 当其他参数已知时, 可预先通过理论分析得到网络时延的估计值, 便于系统设计。回路时延是从控制的角度考察控制回路中特定的端到端数据传输的延迟。作为控制器设计的一个参数, 在计算控制量时总希望得到本次采

样的时延确定值, 通常采用两种方式来实现。一是通过接口设置将网络时延转化为固定的回路时延。例如, 当控制器为时间触发, 接收缓存长度为 l , 满足 FIFO 排队规则时, 网络时延被最大化, 得到反馈回路时延 $\tau_{ca} = lT$ (T 为采样周期, 最大网络时延小于 lT), 显然只有了解网络时延的分布才能正确设计接口。二是进行在线时延估计, 通过读取信息的时间戳, 采用相应的算法可以估计出时延的大小, 并根据具体的接口设置和时钟差异加以修正, 得到能用于控制算法补偿的回路时延。不难看出, 回路时延是以网络时延为基础的, 在进行系统的初步设计时, 首先要从全局上把握网络时延的分布特点和规律

2.2 网络时延的特性分析

在包交换网络中, 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打成数据包通过网络信道达到另一个设备的任务, 网络时延在这个过程中产生, 由发送处理时延 d_{send} 、等待时延 d_{wait} 、传输时延 d_{tp} 和接收处理时延 d_{rev} 四个部分组成^[10]。 d_{send} 、 d_{tp} 和 d_{rev} 的含义和计算详见文献[9]。这里仅对等待时延进行分析

等待时延: 在数据链路层, 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 d_{que} 和进行信道竞争等待信道空闲的时间 d_{cont} , 其大小由源节点中待发送的数据量、此刻网络流量和 MAC 机制决定。影响等待时延的重要因素有缓存队列长度、MAC 层协议和网络负载

控制网络中主要的传输信息是周期数据, 通常以采样周期为截止期, 当待发送的数据在截止期到来时仍未发送成功则由新产生的数据覆盖, 即 TOD (Try Once Discard) 规则, 此规则下排队时间为 0。但在常规协议中, 都是设置缓存队列长度和数据截止期, 在截止期内遵循 FIFO (first in first out) 规则, 排队时间虽然不能给出确定值, 但其上界可由最大截止期和队列长度确定。信道竞争时间主要受 MAC 机制、网络负载和调度策略(应用层)的影响, 很难给出一个统一的数学描述。调度式介质访问机制如 Token Passing, 由于令牌的有序分配, 可由网络规模和发送任务给出信道竞争时间的定量描述^[8]。而争用式介质访问机制是基于需求的事件触发方式, 如以太网的 CSMA/CD 技术, 信道竞争时间的随机性很大, 理论上只能以概率加以描述。为了与仿真结果作比较, 这里给出 CAN 协议的信道竞争时间的定量分析。由于猝发数据的信息量较小且产生时间不可知, 这里仅考虑周期性任务, 每个任务对应一个信息, 并假设网络中的所有节点和发送任务的优先级为静态已知, 任务周期和每个任务产生的

信息量已知, 则各发送任务的信道竞争时间满足如下迭代关系, 并收敛^[10].

$$d_{\text{cont}}^{(i)}(k+1) = dx^{(i)} + \bigvee_{j \in hp^{(i)}} \left[\frac{d_{\text{cont}}^{(j)}(k) + d_{\text{bit}}}{T^{(j)}} \right] d_{\text{p}}^{(j)}, \quad i \in N_{\text{ms}} \quad (1)$$

式中: N_{ms} 表示网络中的所有发送任务的集合, $d_{\text{cont}}^{(i)}$ 表示待发送信息 i 的信道竞争时间, $dx^{(i)}$ 代表信息 i 等待信道空闲的时间, 其上界是最大传输时延 $\max_{m \in N_{\text{ms}}} d_{\text{p}}^{(m)}$, $hp^{(i)}$ 是优先级高于信息 i 的所有信息(发送任务)的集合, $T^{(j)}$ 表示任务 j 的周期, d_{bit} 是发送 1 bit 需要的时间, $d_{\text{p}}^{(j)}$ 表示信息 j 的传输时延, $[x]$ 表示大于和等于 x 的整数. 显然, 优先级最高的信息, 只需等待信道空闲即可发送, 信道竞争时间等于 dx ; 其他优先级的发送信息按照式(1)估计, 需要给出初值, 推荐采用 $d_{\text{cont}}^{(h)}$ (信息 h 的优先级高于 i), 这种迭代关系表明理论上的最大时延来自优先级最低的信息, 是可以预测的. 此外, 式(1)直接反映了等待时延会随网络节点数和数据量的增加而增大, 重负载时产生时延抖动的可能性较大.

除等待时延外, 其他 3 种时延主要取决于设备的软、硬件性能, 当系统给定时, 是可以预测的. 而等待时延一般随着网络节点数和数据量的增加而增大, 对于不同的 MAC 机制和调度策略, 其变化规律不同, 但在一个特定的网络中, 等待时延会随着网络负载的波动产生抖动, 即使在正常工作状态下, 也会呈现有规律的变化. 因此, 网络时延的不确定性主要来自 MAC 层的等待时延, 它和排队规则、MAC 机制、网络负载和调度策略直接相关, 虽不能统一刻画, 但可以通过定量分析估计出其变化范围.

2.3 网络时延的评价

设计 NCS 的控制器时, 一般都要假设网络时延满足某种概率分布和临界值, 因此在评价网络时延时, 也希望用概率密度函数来描述, 但这种处理方法难度较大. 考虑到控制算法并不直接采用网络时延, 可用简单的平均时延和时延抖动来描述时延分布特征, 两者都是建立在大量统计样本的基础上, 通过测量得到. 当试验条件不足时, 也可以用理论分析法加以估计.

假设 NCS 中共有 M 个周期发送任务, 对于某一发送任务 i , 时延抖动的上下界可由下式得到:

$$\begin{aligned} d_{\text{min}}^{(i)} &= d_{\text{send}} + d_{\text{rev}} + d_{\text{p}}^{(i)}, \\ d_{\text{max}}^{(i)} &= d_{\text{min}}^{(i)} + \text{Max}(d_{\text{wait}}^{(i)}). \end{aligned} \quad (2)$$

假设任务 i 的周期为 $T^{(i)}$, 在运行时间 T_{run} 内, 发送一个信息的平均时延可以描述为

$$d_{\text{avg}} = \frac{\sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^{R^{(i)}} d^{(i,j)}}{R^{(i)}}, \quad R^{(i)} = T_{\text{run}}/T^{(i)} \quad (3)$$

式中 $d^{(i,j)}$ 表示发送任务 i 在运行时间内第 j 次发送的网络时延, 随着网络负载的波动发生变化, 但满足 $d_{\text{min}}^{(i)} \leq d^{(i,j)} \leq d_{\text{max}}^{(i)}$.

3 网络负载分析

网络负载是产生时延的直接原因. 在作网络规划时, 负载分析是考察网络的可调度性和了解时延分布特征的重要环节. 网络负载包括理论负载和实际负载. 前者是指在理想情况下(无信道冲突和干扰)由发送任务产生的信息总量的单位时间平均值; 后者是指网络运行过程中, 单位时间内成功发送到信道上的数据(包含冲突重发的数据), 即单位时间内占用信道资源的信息量. 网络负载的构成如图 2 所示.

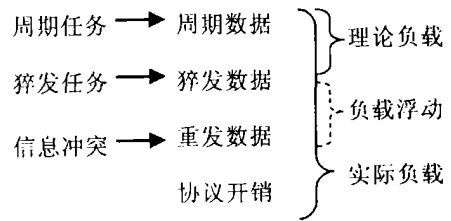


图 2 网络负载的构成

理论负载包括周期任务产生的周期性数据, 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, 以及报警信号、紧急操作指令产生的猝发数据. 在系统运行开始和结束时产生的用户编程和组态数据等非实时数据不影响运行状态, 可以不计算在内. 由于控制网络的周期性发送任务主要是传感器数据和控制信号的发送, 发送周期和控制回路的采样周期一致, 在确定了各回路的采样周期后, 就可以估计出一段时间内的理论负载. 而猝发数据由突发事件产生, 不可预知, 但通常产生的信息量较小, 可以按上界计算. 假设 NCS 中共有 M 个周期发送任务, 选取所有任务周期的最小公倍数作为运行时间 T_{run} , 这段时间内的理论负载描述为

$$\begin{aligned} P_{\text{th}} &= \frac{\sum_{i=1}^M N^{(i)} T_{\text{run}}/T^{(i)} + s}{T_{\text{run}}}, \\ T_{\text{run}} &= \text{LCM}(T^{(1)}, T^{(2)}, \dots, T^{(M)}). \end{aligned} \quad (4)$$

式中: $N^{(i)}$ 表示任务 i 发送的信息量(比特数), $T^{(i)}$ 表示任务 i 的周期, s 表示运行时间内产生的猝发信息量.

实际负载除了包含理论负载外, 还包括协议开销(时钟同步、令牌传输等)和由各种原因产生的重

传信息量 Δ , 它的平均值可表示为 $\bar{P}_{ph} = P_{th} + \Delta$ 实际负载 P_{ph} 是一个瞬时值, 猝发数据和信息冲突造成的重传数据引起了负载波动 在网络运行过程中, 其他导致时延不确定性的因素不再发生变化, 因此负载波动是产生时延抖动的直接原因

考虑网络负载是否和网络承载能力相适应时, 通常采用带宽利用率 U 作为衡量指标 带宽利用率可以定义为网络上传输信息的总时间(包括由于信道冲突或误码引起的信息重传时间)和网络总运行时间之比, 或者实际负载的平均值和网络带宽之比, 其表达式为

$$U = \bar{P}_{ph} d_{bit} = \sum_{i=1}^K d_{\varphi}^{(i)} M t(i) / T_{run} \quad (5)$$

式中: K 代表所有周期发送任务和可能的猝发任务总数; $M t(i)$ 表示在运行时间 T_{run} 内, 任务 i 成功发送的次数(包括重发次数); $d_{\varphi}^{(i)}$ 表示任务 i 的传输时延 显然 $M t(i)$ 是不确定的, 只能通过试验得到测量值 在设计规划阶段, 带宽利用率可按照网络的理论负载来估计, 即用 P_{th} 代替公式中的 \bar{P}_{ph} 当 U 在小、中、大 3 个不同的数值范围内时, 对应的网络状态可称之为轻负载、中等负载和重负载 轻负载网络, 信道多处于空闲状态, 传输时延成为主导因素, 因此时延抖动较小 随着 U 的增大, 信息冲突增多, 势必造成时延抖动加剧, 平均时延也随之上升 当 U 接近 1 时, 网络趋于饱和, 说明网络资源被使用殆尽, 网络的可调度性变差, 很可能出现截止期丢失, 应尽量避免

4 仿真研究

为了检验本文提出的时延和负载分析方法, 在 PC 机上进行数值仿真研究 研究对象是一个双电机同步控制的 NCS 系统, 选择 CAN 2.0B 协议, 带宽为 125 kbit/s, 网络上共有 7 个节点, 分别是干扰节点 (i)、传感器 1 ($s1$)、控制器 1 ($c1$)、执行器 1 ($a1$)、传感器 2 ($s2$)、控制器 2 ($c2$)、执行器 2 ($a2$), 组成两个控制回路, 采样周期选取为 10 ms 和 5 ms, 产生的发送任务和信息量如表 1 所示

表 1 NCS 中的发送任务

发送任务及触发方式	源节点和目标节点	任务周期/ms	有效数据量/byte
1 (T)	$s1 \rightarrow c1$	5	6
2 (E)	$c1 \rightarrow a1$	5	8
3 (T)	$s2 \rightarrow c2$	10	10
4 (E)	$c2 \rightarrow a2$	10	12

注: T 表示时间触发, E 表示事件触发; 设网络上的猝发数据量 10 ms 内不超过 2 byte

在 MATLAB 环境下, 利用 Truetime 软件包建立 NCS 的系统模型, 模拟各网络节点和 CAN 协议,

采用基于优先级的静态调度策略, 按照表 1 产生周期性发送任务, 干扰节点以 1 ms 为周期, 以 10% 的概率随机产生猝发数据, 发送和接收处理时延设置为 20 μ s 在 2.4 s 运行时间内, 测量各任务的网络时延和负载变化, 结果如图 3 和图 4 所示

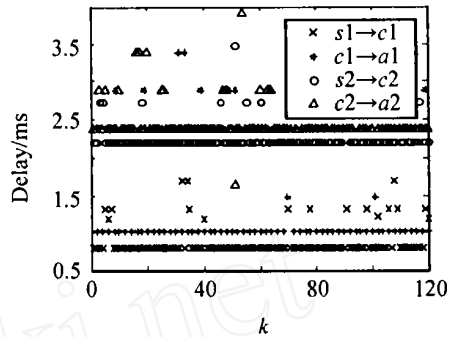


图 3 网络时延的测量值

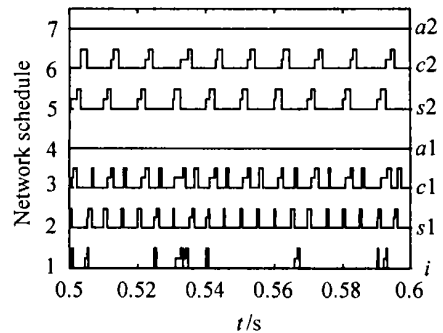


图 4 各节点产生的网络负载

图 3 为 4 个周期任务产生的网络时延分布, 为了清晰显示仅选取 120 个周期内的测量数据, 可以看出网络时延不是在某一范围内均匀分布的, 且不同任务的时延分布密度不同, 优先级越高时延分布的区域就越低 图 4 所示为各节点在 0.5 s 至 0.6 s 内的网络负载和带宽占用示意图, 1~7 的基线代表节点无发送任务, 基线+0.25 表示节点有数据要发送, 正在等待网络空闲或处于信道竞争状态, 基线+0.5 表示正在发送数据 图 4 中 4 和 7 代表执行器节点, 无发送任务, 始终处于基线状态, 节点 $c2$ 的优先级最低, 信道竞争的时间也最长, 且每次发送的信息量最大, 因此它所产生的发送任务 4 的时延最大

为了检验上述理论分析方法的正确性, 表 2 中列出了由式(1)~式(5)所得的估计时延和网络负载的评价指标, 并和仿真得到的测量数据进行了比较 结果显示, 各任务的平均时延和图 3 中显示的时延分布特征相同, 但时延抖动的范围在数值上有一定的差异 最小时延是无竞争状态下的数据传输延迟, 因此实测值和估计值基本一致, 而时延抖动的上界是按照最坏情况估计的, 测试时最坏情况并不一定

发生,因此最大时延的估计值有可能大于实测值,如任务1,3,4系统平均时延和网络利用率的实测值都略高于估计值,这是由于理论计算未考虑猝发数据、重发数据和协议开销的影响,说明当系统的猝发数据较多,或者网络负载较重时,理论分析得到的数据不能代表真实的情况,需要通过仿真或试验的手段检测网络性能

表2 仿真结果与理论分析值比较

发送任务	1	2	3	4
任务平均时延	0.884	1.746	2.286	2.507
最大时延	1.696 (2.256)	3.391 (3.320)	3.496 (4.768)	3.912 (6.216)
最小时延	0.811 (0.808)	1.003 (0.936)	1.483 (1.448)	1.648 (1.576)
系统平均时延	1.675 (1.628)			
网络利用率	64.09% (60.96%)			

注:时延单位为ms,()内为理论估计值,()外为实测值

5 结 语

时延和时延抖动是NCS系统设计的一个关键问题。本文基于控制网络的特殊性,界定了回路时延和网络时延的概念,从目的、性质和获取方法等角度进行了比较,给出了网络时延特性及其评价指标的数学描述,指出在系统运行过程中,网络负载和负载波动是产生时延和时延抖动的直接原因,进而讨论了控制网络中的负载构成和具体的估计方法。仿真研究表明,所提出的网络时延和负载的理论分析方法是有效的,为NCS的网络规划提供了理论依据和实现手段。

参考文献(References)

- [1] Halevi Y, Ray A. Integrated Communication and Control Systems: Part I Analysis [J]. *ASME J Dyn Syst, Meas, and Control*, 1988, 110(4): 367-373
- [2] 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 H J, Zhang Z, Wu Q F. The Mechanism Description Model of Networked Control System [J]. *Control and Decision*, 2000, 15(5): 634-636)
- [3] Walsh G C, Ye H. Scheduling of Networked Control Systems [J]. *IEEE Contr Syst Mag*, 2001, 21(1): 57-65
- [4] Branicky M S, Phillips S M, Zhang W. Scheduling and Feedback Co-Design for Networked Control Systems [A]. *Proc of the 41st IEEE Conference on Decision and Control*, 2002, 12: 1211-1217.
- [5] Hu S S, Zhu Q X. Stochastic Optimal Control and Analysis of Stability of Networked Control Systems with Long Delay [J]. *Automatica*, 2003, 39(11): 1877-1884
- [6] Nilsson J. *Real-time Control Systems with Delays* [D]. Lund: Lund Institute of Technology, 1998
- [7] Bauer P, Sichiuti M, Premaratne K. On the Nature of the Time-Variant Communication Delays [A]. *IASTED Conference Modeling, Identification and Control* [C]. 2001: 792-797.
- [8] Lian F L, Moyne J R, Tibury D M. Network Design Consideration for Distributed Control Systems [J]. *IEEE Trans on Contr Syst Technol*, 2002, 10(2): 297-307.
- [9] 杨丽曼,李运华,袁海斌. 网络控制系统的时延分析及数据传输技术研究[J]. *控制与决策*, 2004, 19(4): 361-366
(Yang L M, Li Y H, Huan H B. Analysis of Time Delay in Networked Control Systems and Study of Data Transmission Technology [J]. *Control and Decision*, 2004, 19(4): 361-366)
- [10] Tindell K, Burns B, Wellings A J. Calculating Controller Area Network (CAN) Message Response Times [J]. *Contr Eng on Practice*, 1995, 3(8): 1163-1169

稿 约 声 明

本刊已入编《中国学术期刊网》(光盘版)、《万方数据——数字化期刊群》重庆维普咨询公司《中文科技期刊数据库》和(中国·台湾)华艺数位艺术股份有限公司《中文电子期刊服务》其作者文章著作权使用费与本刊稿费一次性付清。凡不同意入编的稿件,请作者在投稿时声明。