

网络控制系统时延分布分析与建模

李健勇¹, 罗永平², 黄道颖¹, 李建春¹

(1. 郑州轻工业学院 计算机与通信工程学院, 河南 郑州 450001;
2. 郑州大学 电气工程学院, 河南 郑州 450001)

摘要:针对网络控制系统中随机时延的建模问题,在对网络时延产生原因和构成进行分析的基础上,通过搭建网络时延采集平台获得真实网络系统的随机时延数据,根据试验结果建立了网络时延数学模型.该模型能够更加准确地描述网络时延的特征,可用于网络时延预测和高性能时延补偿控制研究.

关键词:网络控制系统;随机时延;时延采集;时延模型

中图分类号:TP273 **文献标志码:**A **DOI:**10.3969/j.issn.2095-476X.2014.04.012

Time delay distribution analysis and modeling of network control system

LI Jian-yong¹, LUO Yong-ping², HUANG Dao-ying¹, LI Jian-chun¹

(1. College of Computer and Communication Engineering, Zhengzhou University of Light Industry, Zhengzhou 450001, China;
2. School of Electrical Engineering, Zhengzhou University, Zhengzhou 450001, China)

Abstract: Aiming at the problem of the modelling of stochastic time delay in network control system (NCS), a time delay dynamic model was put forward based on the experimental data by analyzing the cause and construction of the time delay in NCS and constructing an experimental platform to acquire the real time stochastic delay data. The proposed model could describe the characteristics of the network time delay more accurately and be used in time delay prediction and high performance time-delay compensation controller design of NCS.

Key words: network control system; stochastic time delay; time-delay data acquisition; time delay modelling

0 引言

网络控制系统是通过计算机网络形成的闭环控制系统^[1].系统中传感器、控制器、执行器等通过网络进行连接,控制信号或数据也通过网络进行传输和交换,从而实现远程操作和资源共享.此外,网络控制系统能够避免传统控制系统中点对点专线的

的铺设,降低前期投入和后期维护费用,提高系统的灵活性和可靠性.目前,网络控制系统已在汽车制造、火炮系统^[2-4]等复杂控制系统中得到成功应用.

相对于传统控制系统,通信网络的引入使得网络控制系统的分析与设计变得更加复杂^[1].特别地,通信网络的带宽不仅有限且为网络中所有节点

收稿日期:2014-03-10

基金项目:国家自然科学基金项目(60974005,61473265);河南省教育厅科学技术研究重点项目(13A520379)

作者简介:李健勇(1969—),男,河南省孟州市人,郑州轻工业学院副教授,硕士,主要研究方向为网络控制与计算机网络.

共享,当传感器、控制器和执行器节点之间通过网络相互通信时,因为网络拥塞、数据碰撞和丢失等原因,不可避免地会造成不确定传输时延、时序错乱和数据丢包,导致网络控制系统失去定常性、完整性、因果性和确定性,从而使其动态性能大大降低,甚至变得不稳定。

为了提高网络控制系统的动态性能,需要对网络时延进行建模和补偿。目前对网络时延的分析和建模已经取得了研究成果。J. B. Nilsson^[5]提出了网络时延的 Markov 模型,并基于随机性理论对网络控制系统进行了分析。文献[6]建立了网络控制系统长时延随机模型。文献[7]根据试验数据建立了网络控制系统的平均时延模型并进行了预测控制研究。王天宝等^[8]研究了包含丢包情形的非均匀网络控制系统离散数学模型。目前,在网络控制系统研究中常见的网络时延建模方法主要有2种:一是在节点处添加缓冲区,将网络随机时延转变成定值,但这种方法会人为造成系统时延的增加;二是假定时延的分布符合某种已知的分布,但网络时延具有典型的随机性和不确定性,该假设不符合实际随机时延的分布情况,基于这种时延模型所设计的控制器在实际系统中往往难以取得良好的控制效果。

本文在对网络随机时延产生的原因和时延的主要组成进行分析的基础上搭建网络时延采集试验平台,通过试验获取真实网络系统的随机时延数据并研究其分布情况,进而根据采样的网络时延的分布建立时延的数学模型,以期对网络时延预测和补偿控制研究提供参考。

1 网络时延分析

图1所示为典型的网络控制系统结构图。

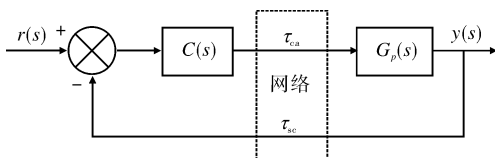


图1 网络控制系统结构图

网络控制系统中数据和信号通过通信网络传输时不可避免地存在时延,网络时延主要包括节点执行时延和数据传输时延。假设控制器、执行器和传感器节点的执行时延分别为 τ_c, τ_a, τ_s , 从传感器到控制器的传输时延为 τ_{sc} , 从控制器到执行器的传

输时延为 τ_{ca} , 网络控制系统的总时延可以表示为

$$\tau = \tau_{ca} + \tau_{sc} + \tau_c + \tau_a + \tau_s$$

如果软件、硬件选择合适,则传感器和执行器节点的执行时延较小,在网络时延分析过程中可以忽略不计。控制器节点的执行时延 τ_c 与控制算法的复杂程度以及对网络的实时性要求有关。如果控制算法复杂且系统实时性要求较高,则需要考虑计算控制器时延 τ_c 的影响;如果时延 τ_c 较小而传输时延很大时,可忽略不计。

显然,传输时延是网络控制系统时延的主要组成部分且具有很强的随机性。为了定量分析网络时延的组成,考虑图2所示第 k 个采样周期网络节点的数据传输过程,其中 t_k^{sc} 为传感器节点发送数据包的时间, t_k^{cs} 为控制器节点收到传感器节点发送的数据包的时间, t_k^{cf} 是控制器节点将控制信号发出的时间, t_k^{as} 是执行器节点接收到控制信号的时间。

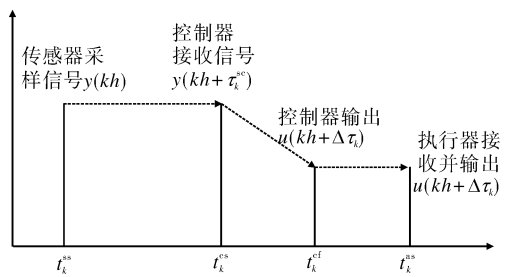


图2 网络控制系统中第 k 个采样周期节点数据传输时序

由图2可知,在1个周期内,有

$$\tau_k^{sc} = t_k^{cs} - t_k^{ss}$$

$$\tau_k^{ca} = t_k^{as} - t_k^{cf}$$

$$\tau_k^c = t_k^{cf} - t_k^{cs}$$

如果网络系统中各节点同步,理论上可以根据数据包的时间戳数据得到系统在 k 时刻 $t_k^{ss}, t_k^{cs}, t_k^{cf}, t_k^{as}$ 的值。但实际上 τ_k^{ca} 对于控制器来说是即将发生的时延,在本采样周期内不可测量,所以影响网络控制系统动态性能和稳定性的主要因素是 τ_k^{ca} 。在实际系统控制中,往往采用预测方法来近似地估计 τ_k^{ca} 的大小。

2 传统时延分布模型

为了准确地估计和预测网络时延,研究时延对网络控制系统的影响,需要建立网络时延的分布模型。显然,通信协议、节点调度策略、系统中所采用的设备等影响时延分布,因此,常见的网络时延

模型主要有固定时延模型、相互独立的随机时延模型和 Markov 时延模型。

2.1 固定时延模型

固定时延模型是对网络系统的随机时延进行分析和建模中最简单的模型。它将一定范围内不断变化的时延转化为一个定值,该定值一般为有界随机时延的上界。考虑到实际网络控制系统中时延具有典型的随机性,要将随机时延转化为固定时延,就需要在网络控制系统各节点中添加数据缓存,当数据缓存的长度大于最差情况下的时延,就可以将网络系统的传输时延转换成固定时延。固定时延建模方法可以将时变非线性网络控制系统转化为具有固定时滞的线性系统,能有效降低网络控制系统分析和设计的难度。但是数据缓存的引入会增大网络时延,降低系统的实时性。

2.2 相互独立的随机时延模型

网络控制系统中造成网络时延的因素很多,比如网络通信状态是否空闲、网络中数据传输是否成功,传输失败后是否重发,重发时若 2 个以上的节点同时发送数据就会造成数据冲突,发生冲突时哪个节点等待、等待多少时间等,这些问题都会导致网络时延的随机性。在建立网络时延模型时,一般假设网络时延符合某种概率分布,但每个采样周期的时延是相互独立的。

2.3 Markov 时延模型

在假设时延分布互相关时可以建立 Markov 时延模型,该模型中每个采样周期的传输时延都与以前时刻的时延相关,其概率关系用 Markov 链表示。具体地,设网络控制系统时延的 Markov 序列为 $\{r_k\}$,有

$$P(r_{k+1} | r_k, r_{k-1}, \dots, r_1) = P(r_{k+1} | r_k)$$

其中, $P(r_{k+1} | r_k)$ 为转移概率, r_k 为 Markov 状态, r_k 在有界范围内取值,令

$$r_k \in \{1, 2, \dots, s\}$$

$$q_{ij} = P(r_{k+1} = j | r_k = i)$$

则 q_{ij} 满足

$$\sum_{j=1}^s q_{ij} = 1 \quad q_{ij} \geq 0$$

Markov 概率分布向量的概率分布为

$$\begin{cases} \alpha(k) = [\alpha_1(k), \alpha_2(k), \dots, \alpha_s(k)] \\ \alpha_i(k) = P(r_k = i) \\ \alpha(k+1) = \alpha(k)Q \end{cases}$$

其中 Q 为概率转移矩阵。

3 网络时延试验测试及建模

为了验证传统时延分布模型的有效性,笔者搭建试验平台对网络传输时延进行测试和分析,并以实际测试数据为基础提出新的网络时延分布模型。

3.1 时延分布试验测试

时延分布试验测试平台结构如图 3 所示。

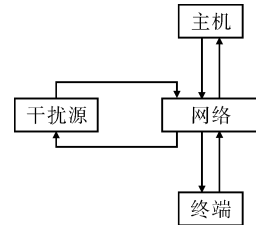


图3 网络时延分布试验测试结构图

其中互相通信的 2 个网络节点分别为主机和终端,主机节点采用时间驱动方式,终端节点采用事件驱动方式,通信采用 CSMA/CD 通信协议,速率为 80 000 b/s。当终端节点收到主机节点发送的数据时,不对数据进行操作,直接转发给主机,主机节点根据时间戳计算出信息往返传递的实际通信时延。在数据传输过程中加入干扰源,干扰源节点会随机地向通信网络发送数据占用信道,从而模拟真实网络控制系统的通信状态。

试验测试网络时延分布结果如图 4 所示。采集的时延数据为 100 组,图中网络时延为 0,表示该时刻数据发生丢包。具体时延数据如表 1 所示。

由表 1 可以看出:网络控制系统的随机时延是有限的随机数,采用固定时延模型显然不能表征时延特性;时延随着通信距离的增加而增加,网络时延之间具有一定的相关性;数据在通信过程中会发生丢包,通信距离越远,同一时刻访问终端的节点越多,数据丢包越严重。但是在 Markov 时延模型中难以表征丢包特性。

根据时延分布试验测试结果,在对网络时延建模时,需要将其表达为有界、随机、时延之间互相关且符合某种未知分布的、存在一定丢包概率的模型,从而更加准确地描述真实时延的分布情况。

3.2 网络时延建模

根据试验测得的实际网络系统时延分布情况,假定网络时延是有界的,时延之间具有某种未知关系的模型,可以建立网络系统的随机时延模型如下:

$$\tau(k+1) = \text{sat}(x, \tau_{\max}) = \begin{cases} \tau_{\max}, & x > \tau_{\max} \\ x, & \tau_{\max} \geq x \geq \tau_{\min} \end{cases}$$

$$x = \varphi(m)\tau(k)$$

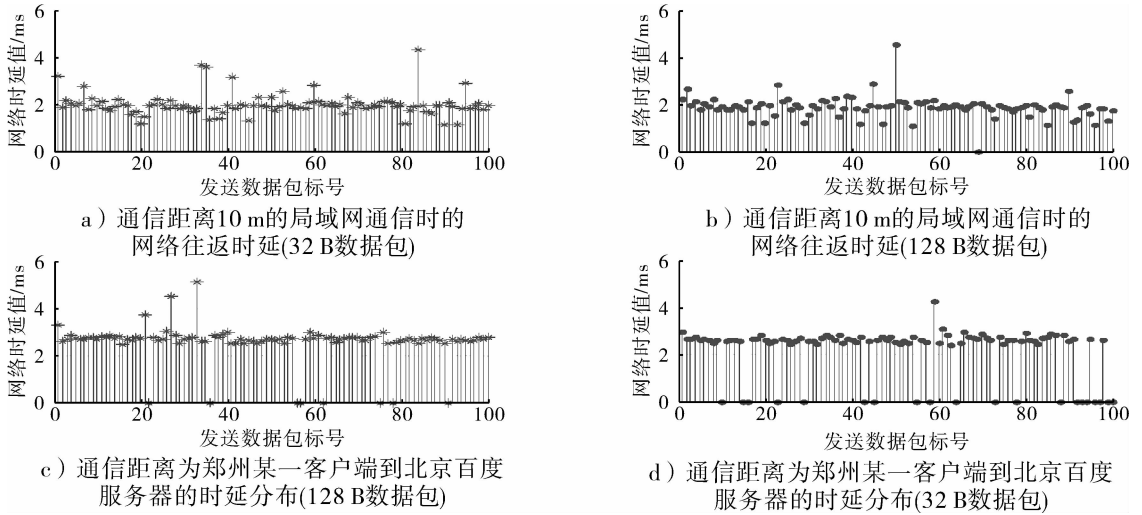


图4 试验测试网络时延分布结果

表1 4种条件下网络时延数据统计表

组号	主机地址	终端地址	网络类型	数据包尺寸/B	最小时延/ms	最大时延/ms	平均时延/ms	时延方差	丢包率/%
1	172.21.2.139	172.21.2.156	LAN	32	1.085	4.311	1.974	0.477	0
2	172.21.2.139	172.21.2.156	LAN	128	1.078	4.545	1.893	0.427	1
3	172.21.2.139	119.75.217.56	WAN	128	12.279	25.516	13.805	1.758	8
4	172.21.2.139	119.75.217.56	WAN	32	12.012	21.218	13.374	1.107	20

其中, $\tau(k+1)$ 为下一时刻的时延值, $\varphi(m)$ 为时延之间的关系矩阵, m 为阶数, τ_{\min} 和 τ_{\max} 分别表示网络时延的最小值和最大值. 基于该模型, 当时延值大于 τ_{\max} 时, 认为系统发生丢包, 将当前时刻的时延值设为 τ_{\max} . 关系矩阵 $\varphi(m)$ 可以根据网络控制系统结构和特性以及所采用的时延预测算法进行动态调整.

4 结论

本文针对网络系统随机时延产生的原因和组成进行了讨论, 分析了目前随机时延常见模型以及各建模方法的利弊. 通过搭建试验平台测试网络时延的实际分布情况, 并在此数据基础上建立了网络时延的模型, 该模型能够更为完整地表述实际网络时延的特征, 为网络时延预测和补偿控制器设计提供参考.

参考文献:

[1] You K Y, Xie L H. Survey of recent progress in networked

control systems [J]. Acta Automatica Sinica, 2013, 39 (2) 101.

[2] 南金瑞, 孙逢春, 王建群. 纯电动汽车电池管理系统的设计及应用[J]. 清华大学学报: 自然科学版, 2007, 47 (S2): 1831.

[3] 焦晓伟, 刘志远, 麻亮. 车身网络控制系统开发的模块化设计方法[J]. 控制工程, 2009, 16(S1): 67.

[4] 范志国, 李菊香, 刘琮敏, 等. 大口径自行火炮弹药自动装填控制系统网络化设计[J]. 火炮发射与控制学报, 2012(3): 41.

[5] Nilsson J B, Wittenmark B. Stochastic analysis and control of real time systems with random time delays [J]. Automatica, 1998, 34(1): 57.

[6] 樊卫华, 蔡骅, 陈庆伟, 等. 时延网络控制系统的稳定性[J]. 控制理论与应用, 2004, 21(6): 880.

[7] 王国敬, 穆志纯. 基于网络控制系统平均时延的模糊控制器设计[J]. 控制与决策, 2009, 24(8): 1214.

[8] 王天宝, 吴成东, 张云洲, 等. 具有丢包和非均匀分布时延的网络控制器设计[J]. 东北大学学报: 自然科学版, 2012, 33(8): 1084.