

基于 Internet 的远程控制系统网络时延分析研究

徐淑萍¹, 苏小会²

(1 西北工业大学 自动化学院, 陕西 西安 710072; 2 西安工业大学 计算机学院, 陕西 西安 710072)

摘 要: 提出并研究基于 Internet 的远程控制仿真, 在测量网络时延实际数据的基础上, 利用滑动模型和样条原理, 采用滑模均值代替滑模的常规输入值, 利用径向基神经网络建立了网络时延的模型. 仿真结果表明: 该模型能够反映并预测该测量数据所代表的网络路径之间的时延特性, 并能在基于 Internet 的闭环控制系统的设计中有效地替代实际网络进行研究. 该建模方法具有快速、准确的特点, 能用于在线学习网络模型并对网络的时延值进行预测, 为基于 Internet 的远程闭环控制提供了新的思路.

关键词: 远程控制; 网络时延; 神经网络; Internet

中图分类号: TM343

文献标识码: A

文章编号: 1000-7180(2011)07-0041-05

Study on Network Time—Delay Analysis in Telecontrol Systems Based on Internet

XU Shu-ping, SU Xiao-hui

(1 School of Automation, Northwestern Polytechnical University, Xi'an 710072, China;

2 College of Computer, Xi'an Technological University, Xi'an 710072, China)

Abstract: Realtime telecontrol of mechanical dynamic information with the Internet is attempted. The author analyses the ingredient causing the time—delay, measures the time—delay practically, uses the Slide—mode and spline function principles for reference, and substitutes the normal Slide—mode inputs with the mean of the Slide—mode, then adopts the RBF (radial basis functions) neural network setting up network time—delay model. The simulation results show that the model can effectively substitute the actual network in Internet—based closed loop control system research under time—delay condition; the methods used in the modeling, due to the virtue of speediness and exactness, is capable of learn and predict the network time—delay on line, this gives a new idea in Internet—based remote closed—loop control.

Key words: tecontrol; network time—delay; neural network; Internet

1 引言

网络控制系统是控制技术和网络通讯技术的融合, 稳定、快速、准确依然是网络控制系统中追求的最终目标^[1]. 基于 TCP/IP 因特网的远程控制系统越来越受到人们的重视, 但基于 TCP/IP 的因特网并不注重实时性, 网络延时及其不确定性会降低系统的控制品质. 因为在基于 Internet 的远程控制中, 由于控制信息与反馈信息都需要通过 Internet 进行传播, 使得系统的前向通道及反馈通道中总是存在

着随机延时, 这不但对系统的稳定性不利, 也增加了对实时性要求较高的控制系统的设计难度. 而且在这样的远程控制系统中, 响应速度是重要的性能指标, 远程控制不能以牺牲控制系统的品质为代价, 同时又要满足远程操作者实施实时控制的要求, 是一个较为困难的难题^[2]. 仅仅依靠控制器的补偿设计难以满足要求, 需要从系统总体的控制结构上寻求解决这一问题的方法.

同时, 因特网中路由器多是采用动态路由协议, 依据因特网负载状况来选择传递路由, 因特网负载

的实时变化会造成信息的传递路由动态变化,使信息传递时不但有时延,其时延还具有不确定性^[3]. 时延和时延的不确定性造成的系统不稳定甚至根本无法控制,是阻碍远程控制采用因特网的主要原因,但因特网的功能对机械运动的远程控制有着无限的吸引力,而且基于 TCP/IP 因特网的远程控制技术的发展和应用无论是对军工还是民用产品的研究、开发和应用均有变革性的深远意义^[4]. 因此基于因特网的远程控制系统的研究越来越受到世界各国研究人员的重视.

2 基于 Internet 的远程控制方案

基于 Internet 的远程控制系统方案如图 1 所示. 文中采用了以 DSP 控制器为内环,以 PC 服务器为外环的双闭环控制结构. DSP 构成的内环完成实时的、普通的电机闭环控制;以 PC 服务器为核心的外环完成远程的闭环控制. 这样的结构保证了在网络时延条件下的较为可靠、高效的控制效果.

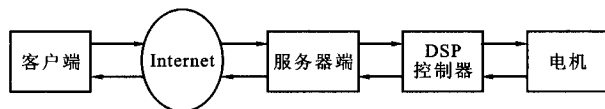


图 1 远程电机控制结构图

以直接连接于服务器端的由 DSP 控制的直流无刷电机为被控对象,远程控制者即图中的客户端发出的控制指令需要通过 Internet 传送到服务器端的 DSP 电机控制器中,而电机的运行参数又需要通过 Internet 才能传回给客户端. 可见,在客户端与被控对象之间存在着由 Internet 的特性决定的网络时延,并且本文的网络时延是指从用户发出控制指令到远端被控对象,或者从远端被控对象传回电机参数的过程中所花费的时间. 对基于 TCP/IP 协议的 Internet 来说,每一控制指令在传输过程中都会在如下的过程中产生延时:路由处理过程、用户数据单元在网络上传输过程以及服务器对请求进行处理的过程,这些处理过程中产生的时延的总和加上本地主机及远端主机数据处理延时就构成了一次控制信息数据报的延迟,而其中的路由处理过程产生的时延较大,且具有不确定性的特点,是网络时延研究的重要内容.

实验表明,在因特网信息的传递过程中将产生较大的延时并有一定的时延不确定性,这使得基于 Internet 的远程闭环控制系统中包含了时变的大延迟环节,而该环节往往使整个系统的控制品质严重变坏,是控制系统设计的一大难题,也是影响基于因

特网的远程控制技术发展的最大瓶颈. 可见,要实现远程的闭环控制,首先需要研究基于 Internet 的网络时延环节的数学模型.

3 因特网时延分析

在真实的网络中,网络状况是不断变化的,不具有周期性. 这样依靠实际的远程控制系统就很难进行算法的比较研究. 利用网络时延测试程序,对一段时间内的网络的各种时延状况进行记录,然后将这些时延信息按研究需要组合进仿真系统中,进行远程控制的仿真研究,以保证在同一网络时延情况下对不同的控制算法进行比较.

3.1 网络时延测试

为了分析网络的时延特性,最直接的办法就是实际测量. 利用 ICMP 协议的“Ping”命令,以请求应答报文的方式编制相应的软件,连续实际测量了清华大学与百度网站之间的网络时延,测试数据如图 2 所示. 测试时间从深夜开始,连续运行 3870 分钟,每分钟测量一次,获得样本大小为 3870 个. 由图 2 显示的时延曲线,可以看出网络时延确实是与网络的流量密切相关的. 晚上网络流量很小,网络时延也很小,而白天则随着网络流量的增大,网络时延也随之增大,并且相邻两天的时延特性较为相似,可见网络时延有一定的周期性和规律性.

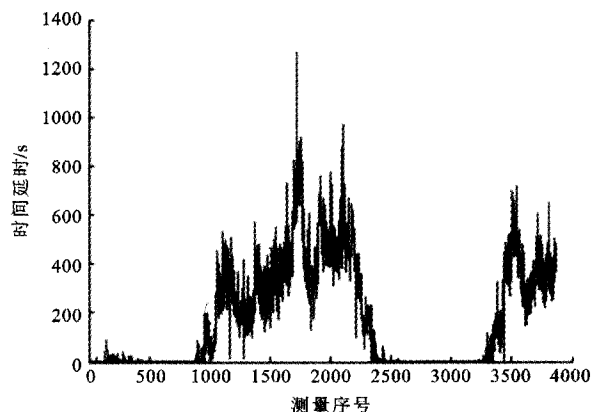


图 2 网络时延测试数据

3.2 采样信息的处理

在远程控制系统中本地端和远程端都按采样周期定期发送运动信息数据报. 由于网络时延的不确定性,不能保证在一个采样周期内恰好有一个数据报,远程端在 $k+1$ 与 $k+2$ 时刻之间没有收到任何数据报,即发生所谓空采样;而在 $k+2$ 时刻与 $k+3$ 时刻之间,远程端接收到一个以上的数据报,即发生所谓多采样. 多采样和空采样是采用因特网后由于网络时延的不确定性造成的特有现象,它不但使运

动信息在网上传送发生滞后,还会使运动信息发生变形,因此系统在远程控制端设置采样信息处理器,在稳定和控制精度的前提下对空采样和多采样进行处理.文中采用的是最简单的采样信息处理方法,即发生空采样时采用前一个采样时刻的值来填充;而发生多采样时则用最新发送的数据报 u ,丢弃发送时间比较早的数据报 u ,这样保证在远程端使用最新的数据报.

4 广义回归神经网络

神经网络最大的优点就是具有可以逼近任意的非线性的能力,理论上具有偏差和至少一个 S 型隐含层加上一个线性输出层就可以逼近任意非线性^[5].神经网络输入层的神经元的个数取决于取得的历史延时信息的个数,由一个滑动窗口根据网络延时的状态调整.中间层神经元的个数依据金字塔结构采取和输入层相等的数目.

径向基函数神经网络是指构成神经元的变换函数采用 radbas 函数,这种函数的输出为输入矢量与权值矢量的距离乘以阈值 b ,这与其它网络不同^[6].这样的神经元转移函数,使得径向基网络有了局部逼近的核心,保证了径向基网络的局部优化特性,有利于克服 BP 网络中易限于局部最小,收敛速度慢的缺点,保证了网络较快的收敛速度,使它非常适合于在线学习预估的场合.

广义回归神经网络是指隐含层采用了径向基函数,输出层为线性层的神经网络结构^[7].这种基于径向基函数的神经网络也是一种三层的前向网络,含有输入层、隐含层和输出层.只是隐层神经元采用了径向基函数作为激励函数,具有局部逼近能力,训练速度快、非线性映射能力强的优点,常常用于函数逼近中.径向基函数网络比一般的 BP 网络需要更多的神经元,但是训练的时间远远的短于 BP 神经网络.尤其适合于可以得到大量的训练数据的场合.径向基函数网络由两层组成:包含 S_1 个神经元的径向基隐含层,和包含 S_2 个神经元的线性输出层.它与普通 BP 网络的区别就在于径向基隐含层的神经元模型与普通 BP 网络不同.

如图 3 所示,在广义回归网络中,隐层的径向基函数一般取高斯函数,径向基函数的每一个神经元可以接收 m 个输入值, m 值是由神经网络的输入向量的大小决定的,对于单输入的系统 m 取 1,输入与隐层神经元的连接权值为 w_{ji} ,其中的第一个下标 i 表示第几个输入,第二个下标 j 表示第几个神经元,

则第 i 个神经元的输入为:

$$I_i = \sqrt{\sum_m (w_{mi} - p_{mi})^2} \times b_i$$

第 i 个神经元的输出为:

$$a_i = \exp(-(I_i)^2)$$

$$= \exp(-(\sqrt{\sum_m (w_{mi} - p_{mi})^2} \times b_i)^2)$$

输出层的输出为:

$$y = kx = k \sum_{i=1}^n a_i \times w_{2i}$$

其中, k 为输出层的线性函数的比例系数.可见,广义回归网络的训练过程为:首先,进行无教师的学习,确定训练输入层与隐含层间的权值 w_{1i} ;然后,确定隐含层与输出层间的权值 w_{2i} .广义回归神经网络具有结构自适应确定的特点,因此,只要提供输入矢量、目标矢量与径向基函数的阈值,就能通过获取最终的神经网络^[8].

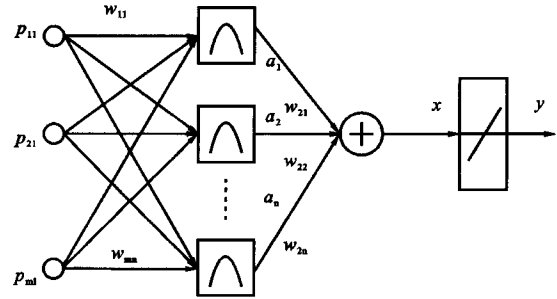


图3 广义回归神经网络的学习过程

5 建模仿真分析

5.1 建模过程

图 2 表明网络的时延具有区域连续性,以时间为准分为白天和晚上两个区段,区段之间及区段内部具有区域的连续性.即在某一区域,时延的均值符合一定的统计规律,可以断定网络模型的输入必须反映这一特性,即为了预测时刻 k 的时延值,需要 $k-n \cdots k-m$ 个过去时刻的数据,其中 n 为预测的步数, $m-n$ 为数据的长度.也就是用一个基于滑动模型的样条去定位时预测点在网络时延模型中的具体位置.取图 2 中所示的前 3200 个网络时延实际测试数据作为研究对象,并按序号的奇偶性将其分成两组,即令序号为奇数的 1600 个数据为训练数据,序号为偶数的 1600 个数据为测试数据.分别以 $k-n \cdots k-m$ 个滑模样条值的均值作为神经网络的输入,而将 k 时刻的延时值作为神经网络的输出进行训练.即 $Y(k) = \text{net}(\frac{1}{m-n} \sum_{i=1}^n x_{k-m-i})$,其中 K 为预

报的步数, n 为滑模样条的长度, net 为选用的神经网络, Y 为神经网络的输出. 分别选定 $n = 1, 2, 3$ 等值, $m = 1, 2, 3, 5$ 等值用同样的训练样本分别进行训练, 结果如图 4 所示, 模型训练时间仅为 12.9 秒左右.

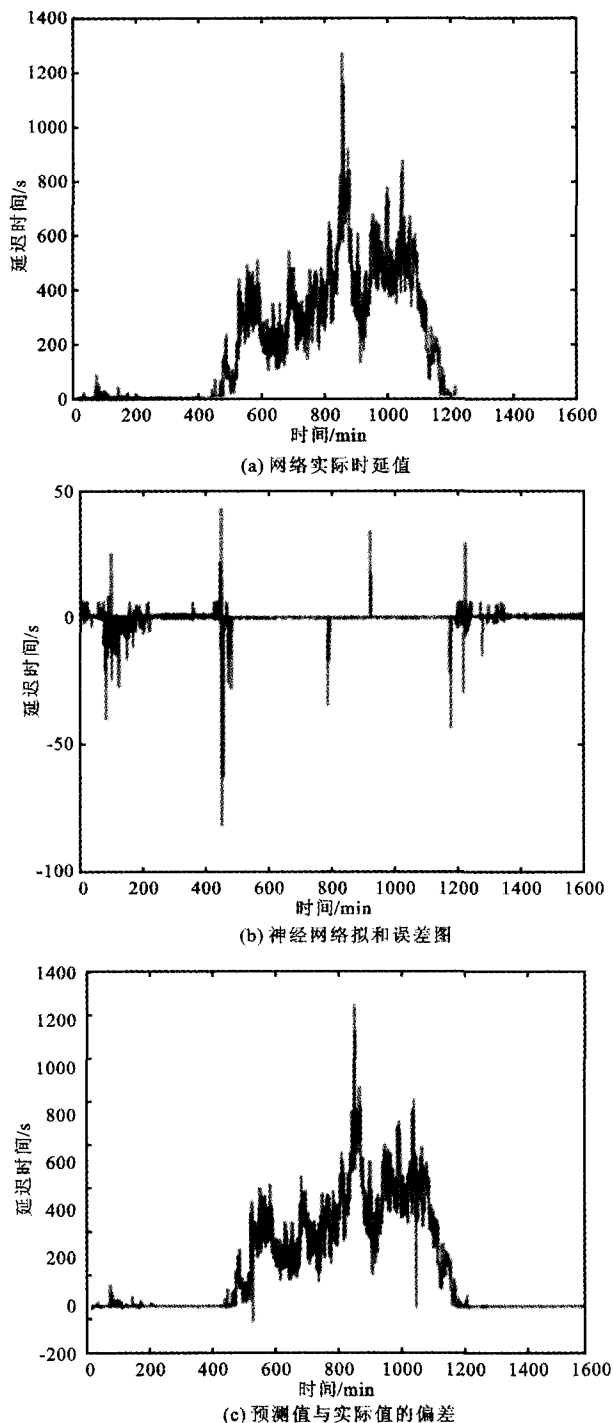


图 4 采用滑模样条的网络模型时延预测

图 4 的仿真结果表明, 该模型并未反映网络时延测试点时刻 k 、过去的 $m-n$ 个时刻的值与现在的 k 时刻的函数关系, 说明网络的输入输出并未提取

网络的特征, 不能作为网络时延模型的预测方法. 这也就是说, 该神经网络具有很强的学习能力, 但是泛化能力很差, 不能作为网络时延的模型进行在线预测, 因为作为预测模型时, 要求神经网络具有较强的泛化能力.

5.2 模型优化

为了分析原因, 再研究图 2 所示的原始数据, 发

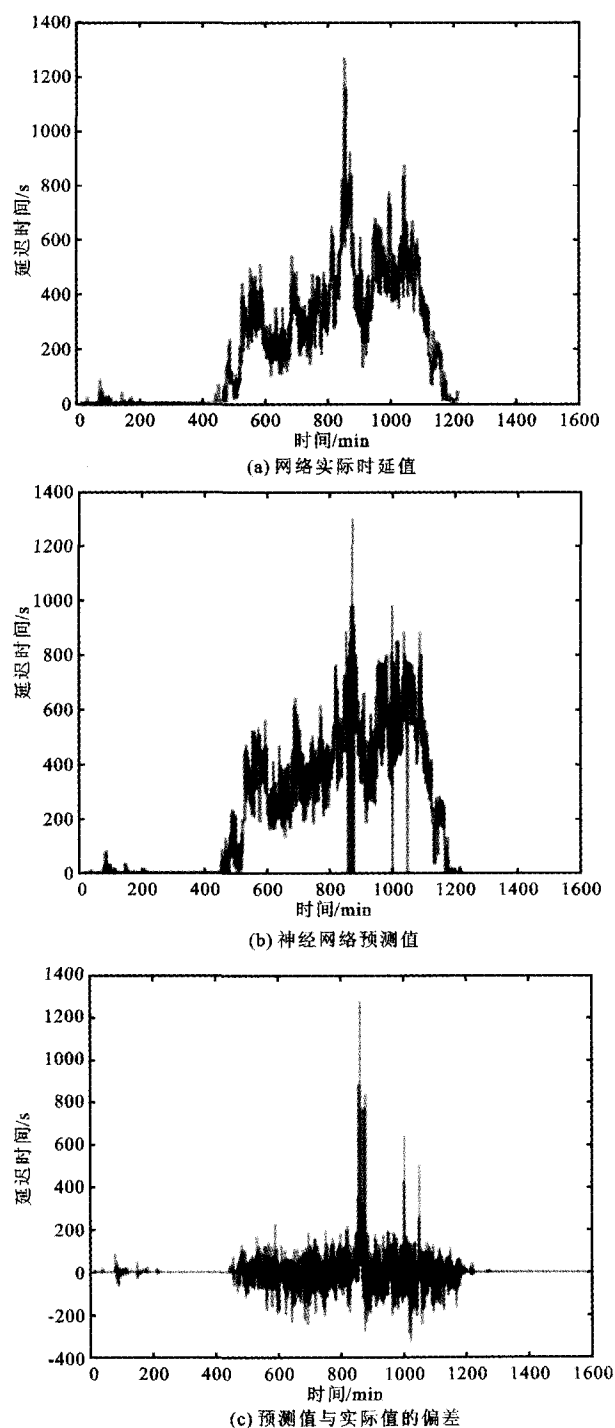


图 5 基于滑模样条均值的网络时延模型预测输出与实际输出结果比较

现图中曲线比较尖锐,并不光滑,具有明显特征的样条难以抽取,使得基于样条的滑动模型失效,而导致训练后的神经网络模型不能泛化,不能进行新值的预测.为此,为采用能够反映输入点的范围而对输出进行定位的样条方法,对该法进行了修改,以便既能提取样条特征,又能避开较大的毛刺.具体办法如下:用 $k-n \cdots k-m$ 个样条值的均值代替这 $(m-n)$ 个样条值作为神经网络的输入进行训练.再取与图2同样的训练及检测数据,该用样条均值的方法进行研究.分别选定 $n=1,2,3$ 等值, $m=1,2,3,5$ 等值用同样的训练样本分别进行训练,模型训练时间也仅为12.9秒左右,当 $n=2, m=1$ 时用检测样本对训练的模型的预测功能检测结果如图5所示.

从图5可以看出该径向基网络具有极快的收敛性和较强的泛化能力,该神经网络可以作为网络时延的模型,用于在时变的网络时延条件下学习并较为准确的预测网络的时延值,为进一步研究远程的闭环控制提供了参考.

6 结束语

文中以基于 Internet 的复杂的计算机网络为研究对象,研究了在控制信息网络中实现控制功能所必须面对的实时性问题,分析了影响控制系统品质的原因在于控制信息在网络的传输过程中产生的不可避免的随机延时的产生机理和特性,并通过实际测量建立了网络时延的神经网络模型.仿真结果表明,当采用基于样条均值的滑动模型训练神经网络时,得到的网络模型具有较好的泛化能力,能够预测网络的时延.研究表明,采用神经网络预测网络延时而来保证基于互联网的远程控制系统性能是有效的.

参考文献:

- [1] 王晓峰,吴平东,任长清,等.基于 TCP/IP 的远程控制系统中再现网络时延的研究[J].北京理工大学学报,2003,2,(1):58-61.
- [2] Almutairi Naif B, Chow Moyuen, PI parameterization using adaptive fuzzy modulation (AFM) for networked control systems — part I: partial adaptation[C]// IEEE Proceedings of IECON 2008. Sevilla, Spain: IEEE, 2008:3152-3157.
- [3] 王庆鹏,谈大龙,陈宁.基于 Internet 的机器人控制中网络时延测试及分析[J].机器人,2007,23:316-321.
- [4] Lee Kyung Chang, Lee Suk, Remote controller design of networked control system using genetic algorithm[C]// Proceeding of the international symposium Industrial Electronics. Pusan, KOREA: IEEE, 2007:1845-1850.
- [5] Huang J Q, Lew is FL, Liu K A, Neural predictive control for telerobot swith time delay [J]. Journal of Intelligent and Robotic Systems, 2008(29):1-25.
- [6] 付强,肖怀铁,马国君.时延神经网络目标识别实时算法软件开发研究[J].微电子学与计算机,2002(4):36-39.
- [7] Chen, S, Cowan C F N, Grant P M. Orthogonal least squares learning algorithm for radial basis function networks[J]. IEEE Transactions on Neural Networks, 1991,(2):302-309.
- [8] 赵长军,王从庆.基于神经网络延迟预测的 Internet 机器人远程控制[J].计算机测量与控制,2004(3):238-241.

作者简介:

徐淑萍 女,(1974-),博士研究生,副教授.研究方向为计算机控制方向.

(上接第40页)

- [3] Heinzelman W R, Chandrakasan A P, Balakrishnan H, et al. Energy efficient communication protocol for wireless microsensor networks [C]// Proceedings of Hawaii International Conference on System Sciences. Hawaii, USA: IEEE, 2000:3005-3014.
- [4] Heinzelman W R, Kulik J, Balakrishnan H, et al. Adaptive protocols for information dissemination in wireless sensor networks [C]// Proceedings of ACM MobiCom.

Seattle, USA: ACM, 1999:174-185.

作者简介:

缪成蓓 女,(1987-),硕士研究生.研究方向为无线传感器网络、网络安全.

白光伟 男,(1961-),博士,教授,博士生导师.研究方向为网络体系结构和协议、传感器网络、多媒体网络 QoS.

沈航 男,(1984-),博士研究生.研究方向为无线传感器网络.