

文章编号: 1000-8152(2003)06-0849-06

基于 TCP/IP 协议的远程控制系统中变结构动态补偿器的研究

黄 杰, 吴平东, 王晓峰, 任长清, 陈之龙, 马树元

(北京理工大学 机电一体化中心, 北京 100081)

摘要: 对网络时延及其不确定性造成的单采样、空采样和多采样三种情况进行了分析, 阐述了采样信息处理器的原理. 为了解决网络时延的滞后补偿问题, 提出了一种变结构动态补偿器方案. 仿真和实验证明, 基于 TCP/IP 协议的远程控制系统中采用了该补偿器后, 利用网络数据传送时的时间戳, 可对因特网的时延进行实时补偿, 使基于因特网的远程位置伺服控制成为可能, 同时也避免了网络时延的预报精度对补偿的影响, 改善了系统的控制性能.

关键词: 变结构动态补偿器; TCP/IP 协议; 远程控制系统

中图分类号: TP273 **文献标识码:** A

Variable structure compensator in telecontrol system based on TCP/IP protocol

HUANG Jie, WU Ping-dong, WANG Xiao-feng, REN Chang-qing, CHEN Zhi-long, MA Shu-yuan

(Mechatronics Centre, Beijing Institute of Technology, Beijing 100081, China)

Abstract: Analysis was made of the following three cases in datagram transfer, which were caused by network time delay and its uncertainty property: one sampling, more sampling and empty sampling. The principle of sampled information processor was introduced. Variable structure compensator was adopted in order to solve the problem of network hysteresis. The simulation and experiment proved that the variable structure compensator, by inspecting timestamp in the process of datagram transfer, could compensate network time delay in the real time, achieve the feasibility of positional control servo to control on internet, prevent the influence of prediction error of network time delay, and improve the control performance.

Key words: variable structure compensator; TCP/IP protocol; telecontrol system

1 引言 (Introduction)

延伸被控对象的控制距离一直是远程控制的主要目标. 随着计算机及网络技术的发展, 远程控制距离也在增加. 本文所指的远程控制系统如图 1 所示, 前向通道和反馈通道分别组合进了基于 TCP/IP 协议的因特网. 可以实现在任何时间, 任何地点, 对接在因特网上的任何设备进行控制的目的, 因此这一技术的发展和运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, 倍受国内外研究人员的注目^[1]. 但是 TCP/IP 协议并不注重实时性, 对图 1 中传送的信息量不大, 但强调实时性的系统, 其前向通道和反馈通道同时存在网络时延及其不确定性的问题^[2], 将会影响系统的动态性能. 时延及其变化进一步增大时, 还会导致系统不稳定. 这一问题阻碍远程控制采用因特网的主要原因. 本

研究组已发表了对网络时延进行预测的动态补偿器的论文, 在保证系统稳定的同时有效地改善了系统的动态特性^[3,4]. 但系统的动态特性和预测精度相关. 本文提出一种新的动态补偿器的结构, 通过实时检测网络时延, 由补偿器中的变结构调节器对系统进行补偿, 避免了预测精度的影响, 改善了远程控制系统的控制性能.

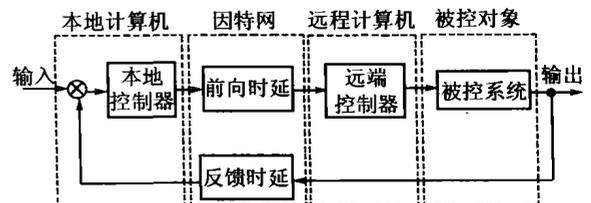


图 1 基于 TCP/IP 协议的远程控制系统

Fig. 1 Telecontrol system based on TCP/IP protocol

2 采用因特网的远程控制系统中的补偿原理 (Principle of compensator in telecontrol system based on internet)

远程控制系统如图2所示,前向和反馈通道由因特网来传送控制信息和反馈信息,网络传输存在时延,被控对象的运动状态不能及时反馈和输入信号进行比较或控制信息不能及时加到被控对象上,系统处在非正常状态,系统的性能降低,甚至不能正常工作.为此,需要在系统中接入补偿器.补偿器中被控对象的数学模型和控制器组成的闭环回路相当于没有接

入因特网时的控制回路.动态补偿器中的变结构调节器 Φ 按实时测出前向通道和反馈通道的网络时延,实时构建和实际开环回路相同的虚开环回路,并对两回路的状态进行比较,以抵消网络时延的影响.由于本地计算机在发送控制信息时,会在数据报上打上时间戳,远程计算机在收到该数据报后,也会打上时间戳,同时将被控对象的输出作为反馈信息,连同前面的两个时间戳一同发送回本地计算机,本地计算机可以实时对网络环境进行监控,根据前向通道和反馈通道网络环境决定变结构调节器 Φ 的结构.

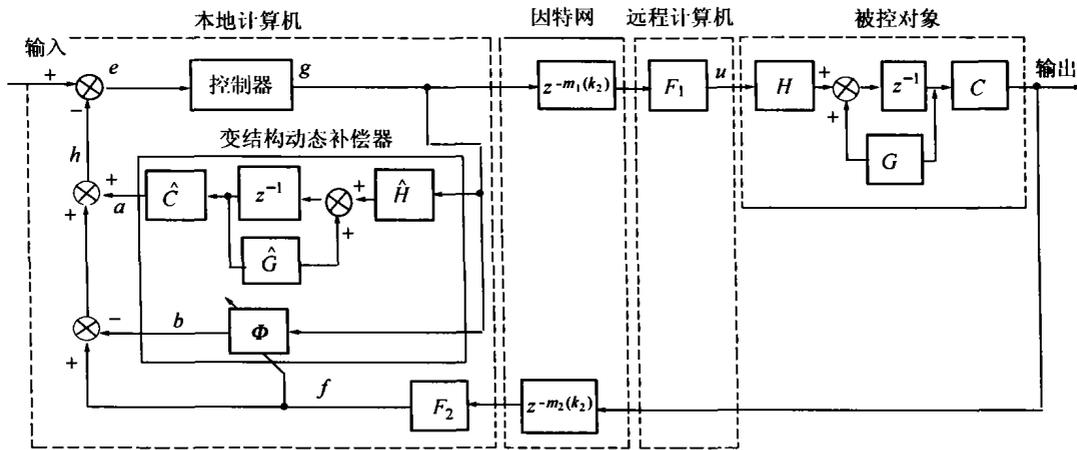


图2 带有采样信息处理器和变结构动态补偿器的远程控制系统
Fig. 2 Telecontrol system with variable structure compensator and sampled information processors

为了保证数据传输的可靠性,前向通道和反馈通道中数据报传输采用了TCP协议.而且采用了定时发送和定时接收数据报的机制.

由于本地计算机和远程计算机对收到的数据报进行采样处理,无论是前向通道,还是反馈通道,由于网络时延的不确定性,时延和采样周期之间的不同关系,会使接收端发生多采样或空采样,为此在系统中设有采样信息处理器 F ,当发生多采样或空采样时进行适当的处理,以保证控制系统正常工作.

3 变结构动态补偿器的理论解析 (Theory of variable structure compensator)

3.1 采样信息处理器 (Sampled information processor)

将图2远程控制系统中前向和反馈通道中的因特网都简化为网络时延环节 $z^{-m(k)}$.前向通道的网络环节是 $z^{-m_1(k_1)}$,其中 $m_1(k_1) = d_1(k_1)/T_s$, $d_1(k_1)$ 是 k_1 时刻的网络时延.反馈通道的网络环节是 $z^{-m_2(k_2)}$,其中 $m_2(k_2) = d_2(k_2)/T_s$, $d_2(k_2)$ 是 k_2 时刻的网络时延. T_s 是采样周期.

采样信息处理器 F :

当 $m(i) = m(i-1)$ 时,在一个采样周期内,只采样到一个信息,接收端发生单采样.

当 $m(i) < m(i-1)$ 时,在一个采样周期内,采样到多于一个信息,接收端发生多采样.

当 $m(i) > m(i-1)$ 时,在一个采样周期内,没有采样到任何信息,接收端发生空采样.

接收端发生多采样和空采样后,在因特网上传送的控制信息发生变形,直接影响系统的稳态和动态性能,为此对采样信息要进行适当处理.图2中的 F_1 和 F_2 分别是前向通道和反馈通道的采样信息处理器,其处理算法限于篇幅在别文章中说明.本文中的基本想法是将采样信息处理器 F 看作一个滞后环节 $F = z^{-p(i)}$,如图3所示, i 时刻的信息 $q(i)$,通过网络时延环节和采样信息处理器后,成为 k 时刻的信息 $w(k)$,即

$$w(k) = q(i), k = i + m(i) + p(i), \quad (1)$$

$p(i)$ 的初始条件是 $p(0) = 0$,当 $i > 0$ 时, $p(i)$ 满足下面的关系

$$p(i) = \begin{cases} 1, & m(i-1) - m(i) + p(i-1) \leq 0, \\ m(i-1) - m(i) + p(i-1), & \\ m(i-1) - m(i) + p(i-1) > 0. \end{cases} \quad (2)$$

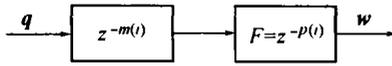


图 3 网络时延环节及采样信息处理器

Fig. 3 Network time delay and sampled information processor

3.2 变结构动态补偿器的设计 (Design of variable structure compensator)

如图 2 所示,系统的变结构动态补偿器由被控对象的数学模型和变结构调节器 Φ 组成.

被控对象的数学模型:

$$\begin{cases} x(k+1) = \hat{C}x(k) + \hat{H}g(k), \\ a(k) = \hat{C}x(k). \end{cases} \quad (3)$$

以下按控制系统的三种采样情况(式(2)的采样信息处理器将在前向和反馈通道消除多采样的情况,而仅存单采样和空采样情况)进行分析,以确定变结构调节器 Φ 的结构.

第一种情况,反馈通道是单采样;前向通道是单采样.

反馈通道网络环节及其采样信息处理器:

$$f(k) = \text{Output}(i), \quad k = i + m_2(i) + p_2(i). \quad (4)$$

被控对象:

$$\begin{aligned} x(i+1) &= Gx(i) + Hu(i), \\ \text{Output}(i) &= Cx(i). \end{aligned} \quad (5)$$

前向通道网络环节及其采样信息处理器:

$$u(i) = g(j), \quad i = j + m_1(j) + p_1(j). \quad (6)$$

可得

$$\begin{cases} x(i+1) = Gx(i) + Hg(j), & i = j + m_1(j) + p_1(j), \\ f(k) = Cx(i), & k = i + m_2(i) + p_2(i). \end{cases} \quad (7)$$

j 时刻本地计算机的控制信息 $g(j)$, 经前向通道网络环节及其采样信息处理器, 于 i 时刻到达远程计算机成为 $u(i)$, 并作用到被控对象上. 输出反馈 $\text{Output}(i)$, 经过反馈通道网络环节及其采样信息处理器, 于 k 时刻回到本地计算机成为 $f(k)$.

第二种情况, 反馈通道是单采样; 前向通道是空采样.

反馈通道网络环节及其采样信息处理器如式(4)所示.

被控对象:

$$x(i+1) = Gx(i), \text{Output}(i) = Cx(i). \quad (8)$$

可得

$$\begin{cases} x(i+1) = Gx(i), \\ f(k) = Cx(i), \quad k = i + m_2(i) + p_2(i). \end{cases} \quad (9)$$

由于前向通道空采样, 所以 $u(i) = 0$. 被控对象在 i 时刻进行零输入响应 $\text{Output}(i)$. $\text{Output}(i)$ 经过反馈通道网络环节及其采样信息处理器, 于 k 时刻回到本地计算机成为 $f(k)$.

第三种情况, 反馈通道是空采样.

系统输出反馈:

$$f(k) = f(k-1). \quad (10)$$

对任何网络环境下, 在该采样信息处理器的作用下, 只会出现上述三种情况. 这三种情况分别对应着变结构调节器 Φ 的不同结构.

第一种情况, 变结构调节器 Φ 的结构如图 4 所示. 切换函数是监测到的 k 时刻网络状况. 变结构调节器 Φ 根据收到数据报中的反馈信息 $f(k)$ 和时间戳信息 i 和 j , 来模拟信息经过前向网络时延环节、前向通道采样信息处理器、被控对象、反馈网络时延环节和反馈通道采样信息处理器的传递过程. 从而达到对反馈信息 $f(k)$ 进行补偿的目的.

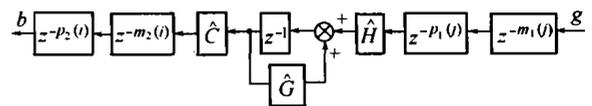


图 4 第一种情况下, 变结构调节器 Φ

Fig. 4 Variable structure regulator Φ in first instance

第二种情况, 变结构调节器 Φ 的结构如图 5 所示. 切换函数是监测到的 k 时刻网络状况. 变结构调节器 Φ 根据收到数据报中的反馈信息 $f(k)$ 和时间戳信息 i , 来模拟信息经过被控对象、反馈网络时延环节和反馈通道采样信息处理器的传递过程. 从而达到对反馈信息 $f(k)$ 进行补偿的目的.

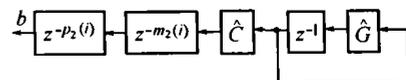


图 5 第二种情况下, 变结构调节器 Φ

Fig. 5 Variable structure regulator Φ in second instance

第三种情况, k 时刻变结构调节器 Φ 的输出是 $b(k)$, 满足

$$b(k) = b(k-1). \quad (11)$$

切换函数是监测到的 k 时刻网络状况. 变结构调节器 Φ 发现在反馈通道发生了空采样, 从而将 $b(k)$ 设为上一个时刻的数值, 保证与反馈通道采样信息

处理器的工作过程一致。

3.3 理论分析(Analysis in theory)

第一种情况下,根据图4,变结构调节器:

$$\begin{cases} x(i+1) = \hat{C}x(i) + \hat{H}g(j), & i = j + m_1(j) + p_1(j), \\ b(k) = \hat{C}x(i), & k = i + m_2(i) + p_2(i). \end{cases} \quad (12)$$

当被控对象的数学模型绝对精确时,即 $\hat{G} = G, \hat{H} = H, \hat{C} = C$. 由式(3)、式(7)、式(12)可得

$$\begin{aligned} x(k+1) &= Gx(k) + Hg(k), \\ h(k) &= a(k) + f(k) - b(k) = Cx(k). \end{aligned}$$

当控制器 Controller = 1 时,而且 $h(k) = \text{Input}(k) - g(k)$, 得出

$$\begin{cases} x(k+1) = (G - HC)x(k) + H \text{Input}(k), \\ h(k) = Cx(k). \end{cases} \quad (13)$$

在任一时刻 k , 反馈信息 $h(k)$ 与网络环境无关, 而只与被控对象参数 G, C, H 有关, 可以通过极点配置的方法, 调整这 3 个参数, 从而保证系统的稳态和动态性能。

第二种情况下, 根据图 5, 变结构调节器

$$\begin{cases} x(i+1) = \hat{C}x(i), \\ b(k) = \hat{C}x(i), & k = i + m_2(i) + p_2(i). \end{cases} \quad (14)$$

当被控对象的数学模型绝对精确时, 由式(3)、式(9)、式(14)可得

$$\begin{cases} x(k+1) = Gx(k) + Hg(k), \\ h(k) = a(k) + f(k) - b(k) = Cx(k). \end{cases}$$

同样可以得出式(13)一样的结论, 此时 $h(k)$ 也与网络环境无关。

第三种情况下, 采样信息处理器 F_2 的输出是 $f(k) = f(k-1)$. 由式(11), 由于在前两种情况下, 都存在 $f(k) = b(k)$, 所以在第三种情况下, 也必有 $f(k) = b(k)$. 同样可以得出式(13)的结论, 此时 $h(k)$ 也与网络环境无关。

由式(13)可以推出控制器 Controller = 1 时, 输出的控制信息:

$$\begin{cases} x(k+1) = (G - HC)x(k) + H \text{Input}(k), \\ g(k) = \text{Input}(k) - h(k) = -Cx(k) + \text{Input}(k). \end{cases} \quad (15)$$

进而得到整个控制系统的输出方程:

$$\begin{cases} x(ki+1) = Gx(ki) + Hu(ki), \\ \text{Output}(ki) = Cx(ki). \end{cases} \quad (16)$$

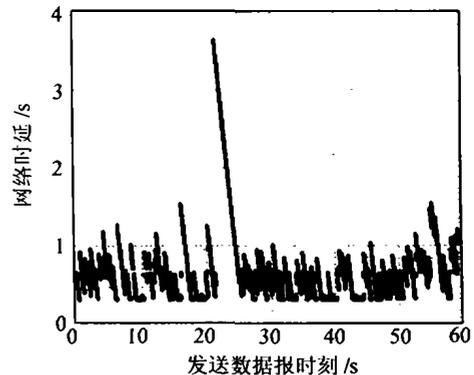
其中

$$u(ki) = \begin{cases} g(k), & \text{单采样 } ki = k + m_1(k) + p_1(k), \\ 0, & \text{空采样 } \forall k \in [0, ki], \exists ki \neq k + m_1(k) + p_1(k). \end{cases}$$

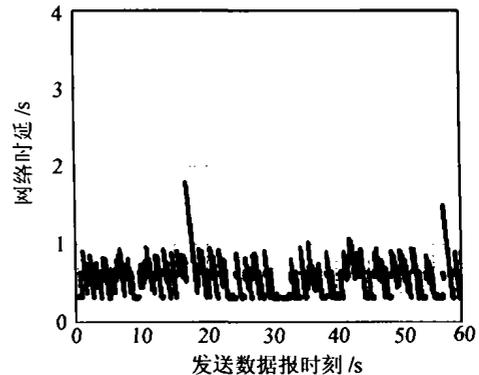
4 仿真与实验(Simulation and experiment)

4.1 仿真与实验条件(Condition of simulation and experiment)

仿真与实验时, 前向和反馈通道的网络环境如图 6 所示(TCP 协议下测试), 是作者从北京和日本东京工业大学北川研究室之间, 测试得到的因特网时延状况实例, 从北京到美国、加拿大、经台湾台北、东京共 27 个路由器, 最后进入东京工业大学北川研究室, 发送流量为 91.2 kb/s.



(a) 前向通道网络时延



(b) 反馈通道网络时延

图 6 网络时延

Fig. 6 Network time delay

实验是在基于因特网的远程液压控制系统实验台上进行, 见图 7, 由电液伺服阀、伺服阀放大器、液压油缸、位移传感器、放大器、AD/DA 转换器、本地计算机、远程计算机和模拟因特网等组成. 其中被控对象是液压阀控缸伺服系统, 系统输出是液压缸的位置信号. 为保证仿真与实验条件的一致性, 采用模拟因特网环境, 前向和反馈通道组合进图 6 所示的网络环境.

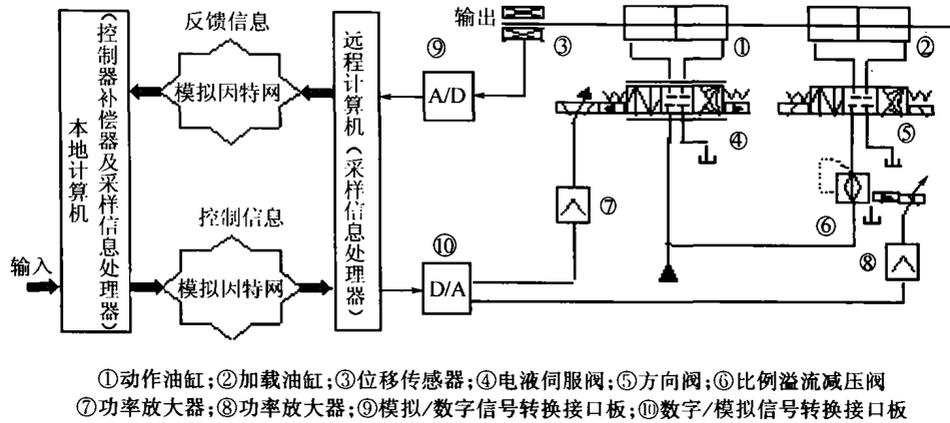


图 7 基于因特网的远程控制系统的实验装置

Fig. 7 Experimental facility of telecontrol system based on internet

仿真时,被控对象即液压伺服系统的传递函数如下式所示,是通过辨识得到的:

$$G(z) = \frac{0.004334z^{-1} + 0.013865z^{-2} + 0.005830z^{-3}}{1 - 0.303794z^{-1} - 0.330965z^{-2} - 0.365057z^{-3}} \quad (17)$$

仿真和实验时,本地计算机内采用比例控制器 Controller = 5. 实验时油压系统的工作压力为 5 MPa, 油温为 30℃.

4.2 单位阶跃输入的仿真与实验响应 (Unit step response in simulation and experiment)

图 8(1 为单位阶跃输入信号;2 为没有网络时延的仿真响应;3 为没有网络时延的实验响应)是前向和反馈通道中的网络时延为零的情况下,单位阶跃输入的仿真和实验响应,仿真和实验结果基本一致.

图 9(1 为单位阶跃输入信号;2 为存在网络时延,不补偿时的仿真响应;3 为存在网络时延,不补偿时的实验响应)是前向和反馈通道中的网络时延如图 6 所示的情况下,不采用变结构动态补偿器时,单位阶跃输入的仿真和实验响应.由于网络时延的影响,又没有补偿器,所以响应完全发散.实验响应曲线中出现了平台区,是由于液压缸达到了最大行程的缘故.

图 10(1 为单位阶跃输入信号;2 为有网络时延,有补偿时的仿真响应;3 为有网络时延,有补偿时的实验响应)是前向和反馈通道中的网络时延如图 6 所示的情况下,系统中采用变结构动态补偿器后,单位阶跃输入的仿真和实验响应,此时系统从发散又恢复稳定,证明了本文提出的理论和方法是有效的.但和图 8 相比,在网络时延环节、采样信息处理器和变结构动态补偿器的作用下,仿真响应相当于不存在网络时延环节的响应(图 8)向后平移了一段时间,其波形比较好的保持了原系统的响应波形,

失真小.但是观察实验结果,有比较明显的稳态控制误差.比较仿真和实验的条件,在仿真时补偿器中被控对象的数学模型和被控制对象是完全一致的,而实验时两者会有比较大的差异,所以响应结果出现了差异.

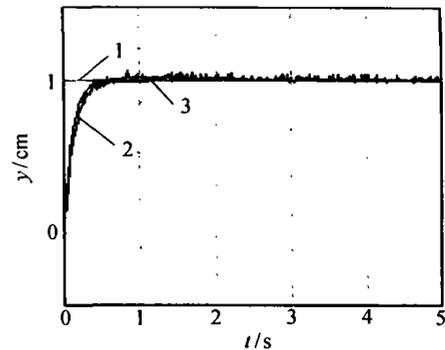


图 8 没有网络时延,单位阶跃输入的仿真和实验响应
Fig. 8 Unit step response in simulation and experiment, without network time delay

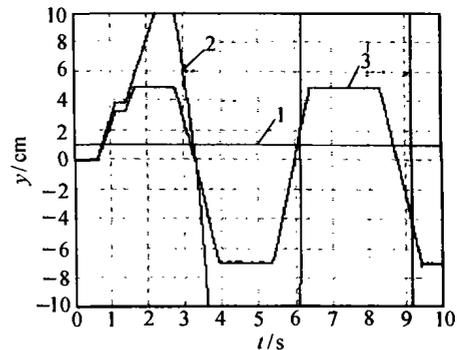


图 9 存在网络时延,不采用补偿时,单位阶跃输入的仿真和实验响应
Fig. 9 Unit step response in simulation and experiment, with network time delay and without variable structure compensator

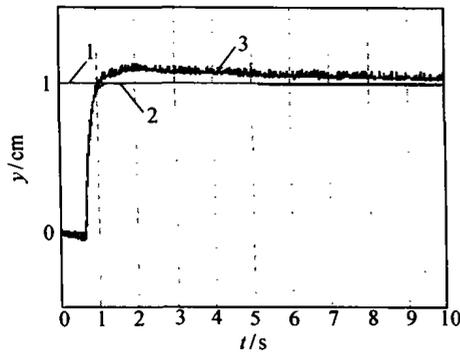


图 10 网络时延和补偿时,单位阶跃输入的仿真和实验响应

Fig. 10 Unit step response in simulation and experiment, with network time delay and variable structure compensator

5 结论(Conclusion)

仿真和实验证明,基于 TCP/IP 协议的远程控制系统中采用了变结构动态补偿器后,利用数据报传送时的时间戳,可对因特网的时延进行实时补偿,使基于因特网的远程位置伺服控制成为可能,同时也避免了网络时延预报精度的影响,改善了系统的控制性能。

但变结构动态补偿器中的被控对象数学模型的误差对该系统的稳态特性会有影响.因此,今后要进一步研究被控对象数学模型的在线辨识及滑模变结构控制器,以改善基于因特网的远程控制系统的抗扰动和抗扰动的性能。

参考文献(References):

- [1] 任长清,王晓峰,吴平东,等.基于 TCP/IP 网络的远程控制系统的研究[A].中国电工技术学会第7届学术年会论文集[C].北京:中国电工技术学会,2001,5:193-197.
(REN Chang-qing, WANG Xiao-feng, WU Ping-dong, et al. Research of telecontrol system based on TCP/IP [A]. Proc on the 7th

Annual of the Electrotechnical Society of China [C]. Beijing: Electrotechnical Society of China, 2001, 5: 193-197.)

- [2] 王秀英,周俊林,李晓. Internet 网络延迟分析与评测[J]. 计算机应用研究, 1999, 19(3): 18-20.
(WANG Xiu-ying, ZHOU Jun-ling, LI Xiao. Measure and analysis of net delay [J]. Application Research of Computers, 1999, 19(3): 18-20.)
- [3] 任长清,吴平东,王晓峰,等.基于互联网的液压远程控制系统的延时预测算法的研究[J].北京理工大学学报,2002,22(1):85-89.
(REN Chang-qing, WU Ping-dong, WANG Xiao-feng, et al. Research of forecast arithmetic of hydraulic telecontrol system based on internet [J]. J of Beijing Institute of Technology, 2002, 22(1): 85-89.)
- [4] 王晓峰,吴平东,任长清,等.基于 TCP/IP 的远程控制系统中动态补偿器的仿真研究[J].北京理工大学学报,2002,22(6):695-698.
(WANG Xiao-feng, WU Ping-dong, REN Chang-qing, et al. Simulation study on dynamic compensator in telecontrol system based on TCP/IP [J]. J of Beijing Institute of Technology, 2002, 22(6): 695-698.)

作者简介:

黄杰 (1973—),男,北京理工大学机电一体化中心博士生,研究方向为基于因特网的远程控制系统. E-mail: bit_huangjie@sohu.com;

吴平东 (1942—),男,北京理工大学机电一体化中心教授,东京工业大学控制工程学科工学博士.研究方向:基于因特网的远程伺服控制系统,基于因特网的三坐标远程测量系统,无限制手写体数字识别,人的动态思维活动特征和性格行为特征研究. E-mail: wupindon@bit.edu.cn;

王晓峰 (1974—),男,北京理工大学机电一体化中心博士生. E-mail: Wang_martin@163.net;

任长清 (1971—),男,北京理工大学机电一体化中心博士生. E-mail: changqing.ren@dccbj.icbc.com.cn;

陈之龙 (1952—),男,北京理工大学机电一体化中心副教授. E-mail: chenzhilong@bit.edu.cn;

马树元 (1960—),男,北京理工大学机电一体化中心教授. E-mail: bitmc@bit.edu.cn.