

# 基于 TCP/IP 的远程触觉交互系统力反馈数据传输方法

蒋峥嵘<sup>1</sup> 高瞻<sup>1</sup> 顾翔<sup>1</sup> 陈翔<sup>1,2</sup>

(南通大学计算机科学与技术学院 南通 226019)<sup>1</sup>

(南京大学计算机软件新技术国家重点实验室 南京 210093)<sup>2</sup>

**摘要** 时延、丢包是影响远程触觉交互性能和用户体验的重要因素。以实时传输和真实再现力反馈数据为目的,提出了一种基于 TCP/IP 的实时力反馈数据传输方法,该方法通过时延处理和插值预处理降低网络通信过程中对远程触觉感知造成的不利影响。实验结果证明,该方法有效地解决了远程触觉交互系统中实时力反馈的信息再现与信息交互问题,在远程医疗、远程教学、虚拟现实等领域具有重要的应用价值。

**关键词** 触觉交互,远程协作,力反馈,TCP/IP,实时数据传输

**中图分类号** TP39 **文献标识码** A

## Real Time Force Feedback Data Transmission for Remote Haptic Collaboration System Based on TCP/IP Protocol

JIANG Zheng-zheng<sup>1</sup> GAO Zhan<sup>1</sup> GU Xiang<sup>1</sup> CHEN Xiang<sup>1,2</sup>

(Department of Computer Science and Technology, Nantong University, Nantong 226019, China)<sup>1</sup>

(State Key Laboratory for Novel Software Technology, Nanjing University, Nanjing 210093, China)<sup>2</sup>

**Abstract** Network time delay and packet loss are important factors which affect the performance of remote haptic collaboration system. For the purpose of real-time transmission of force feedback data, a new method for real time force feedback data transmission based on TCP/IP Protocol was proposed and developed. By the means of delay processing and interpolation preprocessing, the negative impacts of remote haptic perception caused by network communication are reduced to minimum. The experimental results have justified the feasibility of the method. The proposed method can be used to tele-medicine, tele-education and virtual reality applications.

**Keywords** Haptic interaction, Remote collaboration, Force feedback, TCP/IP, Real-time transmission

## 1 引言

计算机网络技术的迅速发展实现了以力反馈信息为参考的精确的、跨空间的行为延展,从而提供完全意义的与远程环境的交互功能,以满足更多应用领域的需求,如远程医疗、远程培训、远程制造、远程故障排除等<sup>[1]</sup>。但是网络时延的存在性、随机性以及数据包丢失和乱序等问题严重地影响着远程触觉交互系统的沉浸感和用户体验。因此,对远程触觉交互系统中力反馈数据传输的时延控制、丢包补偿进行分析和研究具有非常重要的意义。

文献[2]中周芝庭通过在触觉传感器上增加冗余触觉传感阵列的方法,利用冗余信息实现信息的快速实时重构,以减少本地触觉显示器获取原地触觉信息的时间;文献[3]中 Ramtin Rakhsha 等人设计了一种被动式变频波变量方法,实现了恒定时延和低速率网络下的远程触觉协作;文献[4]中

Julius Kammerl 等人改进了触觉感知信号静带压缩方法,即在发送前对触觉感知信号进行压缩编码,从而减少数据传输时延对感知体验造成的影响;Kian Meng Yap 在文献[5,6]中,分别基于 IP 网络和无线网络,构造了对等架构的远程触觉交互原型系统,其将由 phantom 产生的本地虚拟对象移动的位置差数据传递给远程用户,在远程终端计算出虚拟对象的位置,从而减少接收端的力觉失真;Dongjun Lee 在文献[7]中提出了一种被动式的对等分布式控制方法,即网络中每个用户与本地共享虚拟环境副本互动,然后将这个副本与本地阻尼器通过弹簧相连,以同步各网络节点的配置,从而为网络用户提供一致的触觉体验;文献[8]中徐兆红等人采用 Newton-Euler 法建立 Novint Falcon 力反馈设备的动力学模型,提出一种实时力反馈控制策略;文献[9]中张海青等人在力反馈的基础上,针对颅-颌面骨科手术操作的特点和要求,设计了医生与机械臂的协调操作策略,即采用 Ardenze RTX 实现同

到稿日期:2013-01-30 返修日期:2013-05-02 本文受国家自然科学基金面上项目(61170171),江苏省高校自然科学基金项目(12KJB520014),南通市虚拟现实与高性能仿真技术公共技术服务平台(DE2010003),南京大学计算机软件新技术国家重点实验室开放课题(KFKT2012B29),南通市应用研究计划项目(BK2011011, BK2012029)资助。

蒋峥嵘(1980-),女,硕士,讲师,主要研究方向为计算机网络、无线传感器网络,E-mail:jiang.zz@ntu.edu.cn;高瞻(1972-),男,博士,副教授,主要研究方向为虚拟现实技术及应用;顾翔(1973-),男,博士,副教授,主要研究方向为计算机网络、无线传感器网络;陈翔(1980-),男,博士,讲师,主要研究方向为软件测试。

步,将采集到的力信号进行平滑滤波后发送给力反馈设备以实现实时力反馈;文献[10]中 Bhattachadee 等人应用术区力预测系统,通过力传感器提供力反馈信息来有效地追踪外科机器人工作臂的位置,使远程外科手术更加安全;Natarajan 等在文献[11]中指出,力反馈系统在整合同步技术后可以更充分地发挥其作用,让外科医生能够及时感知异地患者术区的力学信息,从而减少手术意外。

目前在大多数的研究集中从控制理论入手来解决远程触觉交互的实时性问题,而从网络传输的角度来解决这类问题的研究,则较为少见。本文研究基于 TCP/IP 协议的数据传输方法,针对远程触觉交互的特点,提出了一种新的力反馈数据实时传输的方法,主要内容有:(1)针对网络状况选取合适的时间偏移值,将网络随机时延转化为固定时延;(2)在接收端增加插值预处理,减少因丢包造成的输出误差。该方法不用测量人手和环境的力,在应用层实现,方法简单,计算量小。现阶段,大部分网络的物理层采用以太网架构,而这些网络也是基于 TCP/IP 协议的。因此,本文的方法既可以应用到基于 Internet 的远程触觉交互系统中,也可以应用到基于以太网的远程触觉交互控制中。

## 2 系统架构

人手的皮肤、肌肉、关节等能感测从静态到 1kHz 范围的力信号,使得人手能够实现与接触物配合的灵巧运动,力反馈设备使操作者真实地感受到低频的和高频的环境的信息,尤其在远程手术的应用中,更需要这些高频的机械臂与环境的瞬态力反馈信息。美国 Sensable 公司生产的 PHANTOM Desktop 力反馈设备是目前应用最广的力/触觉反馈设备,具有 6 自由度的输入和 3 维力觉/触觉反馈,最大可支持 1kHz 的采样频率。本文构建了配备 PHANTOM Desktop 设备的远程触觉交互系统,如图 1 所示。系统主要由 PHANTOM Desktop 设备、个人计算机以及基于 TCP/IP 的计算机网络系统构成。操作者操控 PHANTOM 设备,通过网络把力信息传递给远程计算机终端,由连接在远程计算机终端上的 PHANTOM Desktop 将力信息反馈给远程操作者,使远程操作者通过感知器官感受到此信息,从而实现远程触觉信息交互和触觉协作。



图 1 远程触觉交互系统结构图

远程触觉交互系统作为虚拟现实技术的重要组成部分,给远程操作者提供逼真的力觉感受,是系统性能的重要评价指标<sup>[2]</sup>。基于 TCP/IP 的计算机网络由于采用了分组交换协议,每个分组在网络中独立的选择传输路径,会造成时延、丢包、乱序等问题,导致触觉信息不能及时到达远程交互对象,从而降低系统的性能,成为影响远程触觉交互系统稳定性的主要因素,必须采取有效的技术手段缓解或消除网络通信时延对远程触觉感知造成的不利影响。

## 3 设计与实现

在 TCP/IP 体系中,传输层协议主要有 TCP 和 UDP 两

种。UDP 协议系统资源开销小,传输速度快,但可靠性不如 TCP 协议。基于远程触觉交互系统的高实时性要求,本文的方法采用 UDP 协议实现。

### 3.1 总体设计

双方在正式发送力反馈数据前需要进行协商,以便接收端准备好缓冲区,通信过程如图 2 所示。

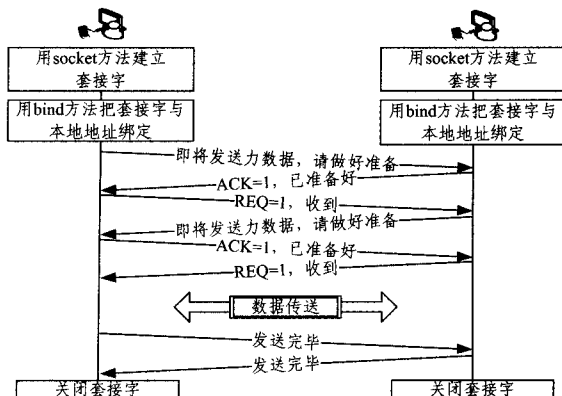


图 2 双方的通信过程

为避免数据包乱序到达引起的不正常操作,本文在发送的每个力信息数据包中加入序列号标签,由远程接收终端根据该标签判断包的顺序,若该包的顺序早于已到达的包,则丢弃该包,以避免引起不正常的操作结果。传输力反馈数据的报文设计如图 3 所示。

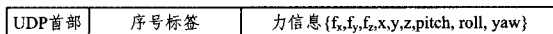


图 3 力反馈数据报文格式

接收端设计一个接收缓冲区对收到的报文进行预处理,减少因时延、丢包、乱序造成的输出误差,处理过程如图 4 所示。

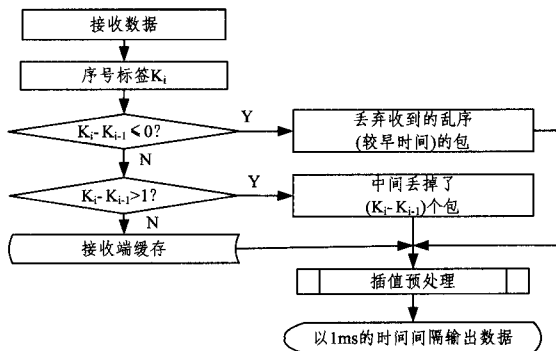


图 4 接收端处理流程

### 3.2 主要算法

#### 3.2.1 网络时延处理

将基于 TCP/IP 的网络作为力反馈信息的传输环节,不可避免地会带来时延问题,网络时延可由式(1)计算:

$$t_{delay} = t_{transmission} + t_{propagation} + t_{process} + t_{queue} \quad (1)$$

式中,  $t_{transmission}$  表示发送时延,与发送速率成反比,与发送帧长成成正比;  $t_{propagation}$  表示传播时延,与传输距离有关;  $t_{process}$  表示处理时延,与网络节点的个数及处理能力有关;  $t_{queue}$  表示排队时延,与网络的通信量有关,当网络的通信量很大时,会造成分组丢失,  $t_{queue} = \infty$ 。从式(1)可以看出,网络时延的大小取决于传输距离、网络带宽、信道质量、链路长度和路由器状态等条件,并且时延大小具有动态随机特性和不可预测性。到底多大的时延才不会明显影响人的操作能力呢? 文献[12]中专

家共同认为,当来回时延在 330ms 范围内时,远程手术还能相对比较轻松地进行,有些专家感觉当时延大到 500ms 时不会影响手术的效果。因此我们认为当时延超过 500ms 的范围时,时延会给远程操作者带来一些感觉上的问题,从而影响远程触觉交互的效果。

基于以上分析,本文在用户终端设置接收缓冲区来暂存接收的力反馈信息,根据预先测得的网络时延值,计算时间偏移量  $\Delta\tau$ 。为了保证以 1kHz 的频率输出数据,同时保证插值计算的正确,接收端在等待  $\Delta\tau * 4$  时间后,以 1kHz 的频率从缓冲区中将力反馈数据输出,从而将随机时延转化为固定时延,克服因随机时延造成的系统不稳定性。时间偏移量  $\Delta\tau$  的计算过程:

```

For i=0 to 500 do
    使用 ping 工具测试两个远程终端网络延时,将 reply 包的 time 值
    记入 {RTTi}
    If reply 包返回“request timed out” then
        500 → {RTTi}
        TimeoutCount++
    End if
End for

```

计算时间偏移量:

$$\Delta\tau = \left( \sum_{i=1}^{500} RTT_i - 500 * \text{TimeoutCount} \right) / (500 - \text{TimeoutCount})$$

### 3.2.2 插值预处理

丢包和乱序是另一个导致远程触觉反馈系统不稳定的重要因素,会显著影响用户对远程力反馈服务的体验质量。研究表明,现实网络环境中的丢包受网络负荷、节点数目、网关节路由策略等因素影响,与网络时延一样具有突发性和不可预测性。

在 3.1 节系统总体设计时,乱序的数据包已被接收端丢弃,因此处理乱序与丢包可以一并完成。发送方严格按照 1ms 的定时周期发送力反馈数据,丢包会导致接收方产生严重失真。为减少接收方的误差,本文采用内插的方法对接收缓冲区中的丢包数据进行插值计算,基于减少计算量考虑,本文采用二次样条函数进行内插计算。样条函数与其他内插函数的主要区别是  $f_i(x)$  仅连接前后 2 个相邻数据点  $x_i$  和  $x_{i+1}$ ,相邻的 2 条  $f_i(x)$  曲线共用一个数据点,这样得到的样条函数的幅值波动要比其他内插函数小。通过计算出参数  $(a_i, b_i, c_i)$  得到  $f_i(x)$  曲线,从而计算出插值,计算过程如下:

定义 时间序列中第  $i$  个时间间隔的二次样条函数通式为:

$$f_i(x) = a_i + b_i x + c_i x^2, 0 \leq i \leq N-2, x_i \leq x \leq x_{i+1}$$

假设:  $(x, y)$  表示要计算的插值,4 个相邻数据点分别为  $A(x_i, y_i), B(x_{i+1}, y_{i+1}), C(x_{i+2}, y_{i+2}), D(x_{i+3}, y_{i+3}), x_{i+1} \leq x \leq x_{i+2}$ 。

因为 4 个数据点构成 3 个时间间隔,得到:

$$y_{i+1} = a_0 + b_0 x_{i+1} + c_0 x_{i+1}^2 \quad (2)$$

$$y_{i+1} = a_1 + b_1 x_{i+1} + c_1 x_{i+1}^2 \quad (3)$$

$$y_{i+2} = a_1 + b_1 x_{i+2} + c_1 x_{i+2}^2 \quad (4)$$

$$y_{i+2} = a_2 + b_2 x_{i+2} + c_2 x_{i+2}^2 \quad (5)$$

函数  $f_0(x)$  和函数  $f_2(x)$  分别经过点 A、D, 得到:

$$y_i = a_0 + b_0 x_i + c_0 x_i^2 \quad (6)$$

$$y_{i+3} = a_2 + b_2 x_{i+3} + c_2 x_{i+3}^2 \quad (7)$$

由 B、C 节点上的一阶导数必须相等,得到:

$$b_0 + 2c_0 x_{i+1} = b_1 + 2c_1 x_{i+1} \quad (8)$$

$$b_1 + 2c_1 x_{i+2} = b_2 + 2c_2 x_{i+2} \quad (9)$$

样条插值规定,函数  $f_0(x)$  的二阶导数为 0, 得到:

$$c_0 = 0 \quad (10)$$

将式(2)~式(10)连立方程组,解出  $(a_0, b_0, c_0), (a_1, b_1, c_1), (a_2, b_2, c_2)$ , 由  $x_{i+1} \leq x \leq x_{i+2}$  知  $(x, y)$  位于第二根曲线上,代入式(11),计算出插值  $(x, y)$ 。

$$y = a_1 + b_1 x + c_1 x^2 \quad (11)$$

## 4 实例验证

为验证本文方法的有效性,在 2 台配有 PHANTOM Desktop 设备的计算机上进行实验(如图 1 所示)。网络介质采用 100Mbps 的高速以太网,由教育网接入 Internet。系统用 winsock 实现远程计算机的连接,通过 UDP 协议进行数据交换。

### 4.1 网络时延测试

本文以 Visual Studio 2008 作为编程工具, c# 作为编程语言,采用 ICMP 协议编写一个类似 Ping 功能的软件,将测得的时延数据以文本格式保存,丢包的时延值按超时的时延值(500ms)计算,将实验数据绘制成曲线,如图 5 所示。实验中,两台计算机分别位于南通和北京,以位于南通大学的主机作为测试的源主机,以位于北京某高校的主机作为测试的目标主机,测试网络时延情况。图中,  $t_{delay}$  是实测的网络时延,  $t'_{delay}$  是接收方减去时间偏移  $\Delta\tau$  后的时延。根据实际的测试结果,往返时延平均值在 30~40ms 之间,  $\Delta\tau = 34.22\text{ms}$ , 插值处理的计算量很小,以现今计算机的处理速度来看,接收端对接收缓冲区中数据的处理时间较  $\Delta\tau$  小很多,因此,从发送端发出数据到达接收端输出的总时延远远小于文献[12]给出的 500ms 的时延上限,不会影响远程触觉交互的效果。

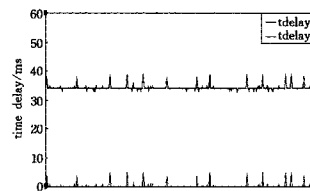
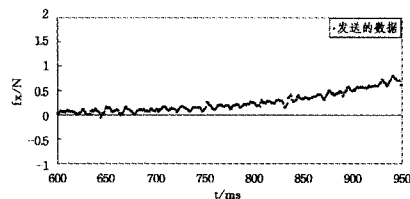
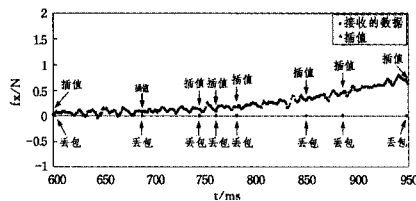


图 5 两台主机之间的时延情况

### 4.2 插值计算实验



(a) 发送方发送的  $f_x$  数据



(b) 接收端经插值后输出的  $f_x$  数据

图 6 发送/接收反馈力数据散点图

(下转第 69 页)

- [6] Vahdat A, Becker D. Epidemic Routing for Partially Connected Ad Hoc Networks [R]. TR CS-200006. 2000
- [7] Intanagonwiwat C, Govindan R, Estrin D. Directed Diffusion: A Scalable and Robust Communication Paradigm for Sensor Networks [C]//Proceedings of the 6th Annual International Conference on Mobile Computing and Networking. Boston, Massachusetts, USA: ACM, 2000; 56-67
- [8] Xie P, Cui J, Lao L. VBF: Vector-based Forwarding Protocol for Underwater Sensor Networks [C]//Proceedings of Networking 2006. LNCS 3976, Heidelberg; Springer-Verlag, 2006; 1216-1221
- [9] Yan H, Shi Z, Cui J. DBR: Depth-based Routing for Underwater Sensor Networks [C]// Proceedings of the IFIP Networking 2008. Singapore: Springer Press, 2008; 72-86
- [10] Yang X. Firefly Algorithms for Multimodal Optimization [C]// Lecture Notes in Computer Science 5792. Springer, 2009; 169-178
- [11] Yang X, Hosseini S, Gandomi A. Firefly Algorithm for Solving Non-convex Economic Dispatch Problems with Valve Loading Effect[J]. Applied Soft Computing, 2012, 12(3): 1180-1186
- [12] Toussaint G. The Relative Neighborhood Graph of A Finite Planar Set[J]. Pattern Recognition, 1980, 12(4): 261-268
- [13] Bose P, Devroye L, Evans W, et al. On the Spanning Ratio of Gabriel Graphs and Beta-Skeletons [C]// Proceedings of the Latin Theoretical Informatics Conference. Berlin, Springer-Verlag, 2002; 479-493
- [14] Supowit K. The Relative Neighborhood Graph with An Application to Minimum Spanning Trees[J]. Journal of Association for Computing Machinery, 1983, 30(3): 428-448
- [15] Xie P, Zhou Z, Peng Z, et al. Aqua-Sim: An NS-2 Based Simulator for Underwater Sensor Networks [C]// OCEANS 2009, MTS/IEEE Marine Technology for Our Future: Global and Local Challenges. Biloxi, USA: IEEE Computer Society, 2009; 1-7

(上接第 60 页)

图 6(a)是发送方发送的  $f_x$  力数据散点图,图 6(b)是接收方经插值计算后输出的力数据散点图。为了更清楚地展示插值计算的效果,将图 6 中 840ms~860ms 之间的数据进行放大。图 7(a)显示了发送的完整的  $f_x$  数据,图 7(b)显示了接收到的有丢包的数据,图 7(c)显示了插值后的输出效果,从图中不难看出,3.2.2 节采用的差值预处理算法误差较小,取得了良好的效果。

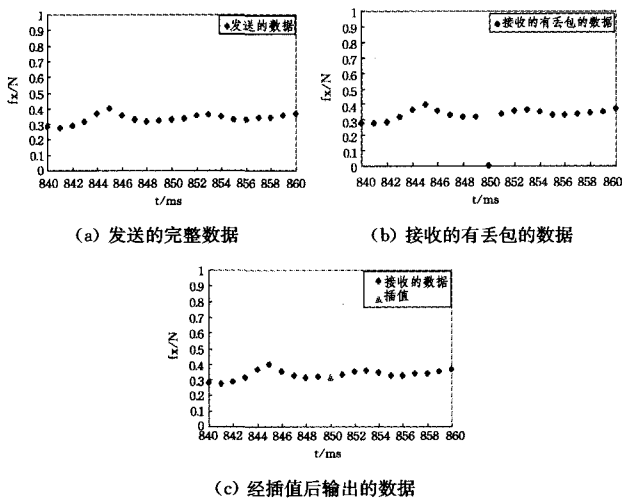


图 7 部分放大的发送/接收反馈力数据散点图

**结束语** 力反馈数据的实时、可靠传输是远程触觉交互的关键技术之一。本文针对在远程触觉交互系统中由网络性能导致系统实时性、稳定性差的问题,以实时传输和真实再现力反馈数据为目的,提出了一种新的基于 TCP/IP 的实时力反馈数据传输方法,主要工作有:(1)针对网络状况选取合适的时间偏移值,将网络随机时延转化为固定时延;(2)在接收端增加插值预处理,减少因丢包、乱序造成的输出误差。实验结果证明:本文提出的方法可以有效地解决远程触觉交互系统中实时力反馈信息再现与信息交互问题,在远程医疗、远程教学、虚拟现实等领域具有重要的应用价值。在此基础上,下一步的研究可以考虑利用接收者的历史数据构建合理的数学模型进行力反馈的预测,进一步增强远程触觉交互体验。

## 参考文献

- [1] 史英海,王越超.基于 Internet 力反馈技术研究[J]. 机器人, 2004, 26(4): 331-332
- [2] 周芝庭,等.互联网应用中触觉通信时延问题分析[J]. 测控技术, 2008, 27(4): 53-55
- [3] Rakhsha R, Constantinescu D. Distributed haptic cooperation with passive multirate wave communications[C]//IEEE Haptics Symposium 2012. Canada, 2012; 117-123
- [4] Kammerl J, Vittorias I, Nitsch V, et al. Perception-based data reduction for haptic force-feedback signals using adaptive deadbands[J]. MIT Press Journals, Presence: Teleoperators and Virtual Environments, 2010, 19(5): 450-462
- [5] Yap K M. Supporting Collaborative Interaction with Real Time Force Feedback in Distributed Haptic Virtual Environments over IP Networks[C]//Proceedings of the IEEE Fourth International Conference on Genetic and Evolutionary Computing (ICGEC-2010). Shenzhen, 2010; 497-500
- [6] Yap K M, Lee T H. A Study to Support Haptic Collaboration with Real Time Force Feedback over Wireless Networks[C]// 2011 First International Conference on Robot, Vision and Signal Processing(RVSP). Kaohsiung, 2011; 348-351
- [7] Lee Dong-jun, Huang Ke. Peer-to-peer control architecture for multiuser haptics collaboration over undirected delayed packet-switching network[C]//Proc. IEEE International Conference on Robotics & Automation(ICRA). 2010; 1333-1338
- [8] 徐兆红,宋成利,吴文武.微创外科机器人力反馈跟踪控制[J]. 生物医学工程学杂志, 2012, 29(3): 407-410
- [9] 张海青,栾楠,张诗雷,等.基于力反馈的颅颌面骨科手术机器人协调控制[J]. 机械与电子, 2012(5): 62-65
- [10] Bhattacharjee T, Son H I, Lee D Y. Haptic control with environment force estimation for tele surgery[C]// Conf Proc IEEE Eng Med Biol Soc. 2008; 3241-3244
- [11] Natarajan S, Ganz A. Efficient force feedback transmission system for tele-surgery[C]//Conf Proc IEEE Eng Med Biol Soc. 2008; 3245-3248
- [12] Hu Ling-yan, Xin Yong, Peng Jie, et al. The excitation controller of synchronous generator employing PID and fuzzy integrated algorithm based on S3C2410A[C]//Proceedings of ISECS International Colloquium on Computing, Communication, Control, and Management. Guangzhou, 2008; 44-48