

文章编号: 1671-7848(2008)02-0204-05

一种用于移动机器人遥操作的传输协议

周亚金^{1,2}, 李 帅^{1,2}, 林子敬^{1,2}, 孟庆虎¹, 梁华¹

(1. 中国科学院 合肥智能机械研究所, 安徽 合肥 230031;

2. 中国科学技术大学 自动化系, 安徽 合肥 230027)



摘 要: 针对移动机器人 Internet 遥操作系统中存在着将无线丢包误认为拥塞丢包的问题, 提出了一种传输协议 TFRC-PROBE。它使用了一个探测主机来实时监测移动机器人和网关服务器之间的无线连接状态, 从而区分移动机器人发送视频反馈及其他反馈信息的时候数据包丢失的类型。然后远程移动机器人使用一个基于 TFRC 的改良的发送速率计算公式来计算发送视频反馈及其他反馈信息的速率。使用 NS-2 的仿真结果显示 TFRC-PROBE 能大幅度提高网络的吞吐量, 并且具有 TCP 友好的特性。

关键词: 遥操作系统; 传输协议; TCP 友好; TFRC-PROBE 协议

中图分类号: TP 273

文献标识码: A

Transmission Protocol for Teleoperator Systems of Mobile Robots

ZHOU Ya-jin^{1,2}, LI Shuai^{1,2}, LIN Zi-jing^{1,2}, MENG Qing-hu¹, LIANG Hua-wei¹

(1. Institute of Intelligent Machines, Academy of Science of China, Hefei 230031, China;

2. Department of Automation, University of Science and Technology of China, Hefei 230027, China)

Abstract: Aiming at the problem that wireless packet loss is misunderstood as crowded packet loss in Internet based teleoperator system of mobile robots, a novel transmission protocol TFRC-PROBE is presented. A detecting host is adopted to monitor and detect wireless connection status between mobile robot and net server in real time, so as to tell the type of packet loss when mobile robot sends video feedback and other feedback informations. Then remote mobile robots compute sending rate using an improved formulation of sending rate based on TFRC. The simulation result of NS-2 shows that TFRC-PROBE can greatly increase the throughput, and possess TCP friendly characteristic.

Key words: teleoperation system; transport protocol; TCP friendly; TFRC-PROBE

1 引言

随着机器人技术和 Internet 的发展, 对基于 Internet 的机器人遥操作的研究越来越受到重视。1998 年, Kevin Brady 等开发了一个控制 PUMA 机器人的遥操作系统, 操作者和被控制的机器人之间距离大约为 1 500 km, 通信采用 UDP 协议^[1]。此外, 还有其他系统如 KephOnTheWeb^[2], Xavier^[3], Rhino^[4], MINERVA^[5]等。

使用 Internet 进行机器人遥操作, 不确定的网络延时以及通信是最主要的问题^[6], 研究者提出的解决方法大致分为两类。一些研究人员使用新的控制策略和预测方法来补偿 Internet 造成的延时, 如文献[7]提出了一种自适应控制算法, 文献[8]提出了基于事件的控制方法; 另外一些研究人员从遥操作中的数据通信入手, 提出了新的网络协议来最大程度地提高网络吞吐量、降低网络延时以及改善延时抖动, 从而改善 Internet 的服务质量。文献[9],

[10]提出了一种新的端到端的网络协议 TTP。

但是上述的网络协议并不适合于直接使用在移动机器人遥操作系统中。因为发生丢包时, 它不能区分数据包丢失是因为网络拥塞还是无线信道衰减, 或是信道错误, 因此会盲目地降低发送速率, 从而造成网络吞吐量的降低和网络延时的增大。为了解决这个问题, 本文提出了一种基于 TFRC^[11]的用在移动机器人遥操作系统中的数据传输协议 TFRC-PROBE。

2 相关工作

在机器人遥操作系统中, 操作者和远程机器人之间有多种类型的数据需要传输, 包括控制命令和视频、音频、坐标等反馈信息。在网络数据传输中, 有两种常用的传输协议: TCP 和 UDP。TCP 由于延时比较大而不适合直接使用在遥操作系统中, 因此, 大部分的遥操作系统都直接采用 UDP 作为传输协议^[1,12,13]。然而, UDP 协议不会根据网络状

收稿日期: 2007-01-31; 收修定稿日期: 2007-03-06

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(60475027); 国家自然科学基金重点资助项目(60535010)

作者简介: 周亚金(1982-), 男, 江苏淮安人, 研究生, 主要研究方向为移动机器人遥操作等。

况调整发送速率，因此，如果直接采用 UDP 协议，有可能给整个 Internet 带来问题^[10]。通常使用在 Internet 中的协议需要是 TCP 友好的，如 TFRC^[11] 和 TTP^[10]。在有线网络中，网络丢包是网络拥塞的体现；而在移动机器人遥操作系统中，移动机器人使用无线连接与网关服务器相连，无线信道错误以及网络拥塞都有可能造成数据包丢失。这些协议不能区别拥塞和无线信道错误丢包的丢包区别算法 (LDAs)。针对无线环境下数据传输的这一特点，研究人员提出了一些解决方法。

文献[14]提出了一种端到端的丢包区别算法 ZBS。ZBS 由 Zigzag^[14]、Biaz^[15] 和 Spike^[16] 三个 LDAs 组成。Biaz^[15] 和 Zigzag^[14] 使用数据包的到达时间间隔 (Packet Inter-arrival Time)；而 Spike^[16] 使用相对单向延时 (Relative One-way Delay) 来区分丢包的类型。因 Zigzag、Biaz 和 Spike 在不同网络状况下性能不同，ZBS 根据网络的情况在这三个算法中进行切换。

文献[17]提出了一种“去随机化” (De-Randomizing) 的方法来提高无线网络中 TCP 的性能。它基于这样的一个假设：当网络拥塞发生时，路由器首先丢弃一种由发送者标记过的数据包，然后再丢弃其他的数据包。这样做的结果是，当网络拥塞发生时，数据包的丢弃模式不是随机的，而无线信道错误所造成的丢包模式是随机的。数据接收者通过一个判别函数来判断丢包的模式是否具有随机性来区分丢包类型。仿真结果显示，该方法可使网络性能提高 100% 以上。

文献[18]提出了一种基于 TFRC 的速率控制方法。其思想是测试 RTT，然后发送端调整发送数据的连接数目，直到达到最优化的值。如果无线带宽没有被全部利用，说明网络中没有拥塞，增加发送数据的连接数目将会增加带宽的利用率而不会增加 RTT 的值和包的丢失率。在发送数据的连接数目过多的情况下，路由器将会丢弃一些数据包，RTT 的值将会增大。接收者测量 RTT 的值并将该值反馈给发送者，然后发送者根据该值调整发送数据的连接数目。AIO-TFRC 是上述方法的一种改进^[19]。

然而，上述方法都不能直接用在移动机器人遥操作系统中。ZBS^[14] 的高误分类比率使得 ZBS 不能高效地利用无线带宽；而 Biaz 的“去随机化”方法^[17] 依赖于路由器的包队列管理策略，它要求在网络路由器中，必须具有类似于 RIO (RED In/Out) 的包队列管理方法，而这个前提条件在目前的 Internet 中并不满足。文献[18]提出的方法假定无线连接是网络中的瓶颈连接，且是网络中的最后一跳。而在移动机器人遥操作系统中，无线连接是移动机器人发送视频反馈信息的第一跳，且它不是网

络中的瓶颈连接，因为 802.11 标准的传输速率 (从 11 Mbps 到 108 Mbps) 通常高于 Internet 的传输速率。

3 TFRC-PROBE 的提出

移动机器人遥操作系统示意图，如图 1 所示。

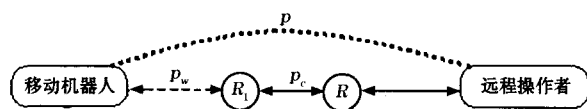


图 1 移动机器人遥操作系统示意图

Fig.1 Sketch map of teleoperation system of mobile robot

图中， R_1 代表网关服务器，也就是将移动机器人接入 Internet 的网关； R 代表 Internet 中其他路由节点。从图中可以看出，移动机器人将视频以及其他反馈信息通过 Internet 发送给操作者，操作者根据这些信息做出判断，然后通过 Internet 向移动机器人发送控制命令。本文提出的协议用于移动机器人发送视频及其他反馈数据。由于 Internet 是系统中的瓶颈连接，假定它的拥塞丢包率是 p_c ，无线信道错误丢包率是 p_w ，数据接收者 (操作者) 观测到的端到端的丢包率是 p 。用文献[11]给出的数学模型进行分析，TCP 的响应公式^[11] 为

$$T = \frac{s}{R(2p/3 + t_{RTO}(3(3p/8)^{1/2})p(1 + 32p^2)^{1/2})} \quad (1)$$

式(1)给出了发送端发送速率 T (byte/s) 的上界，它是包大小 s ，RTT 时间 R ，稳定状态下的丢包率 p 以及 TCP 的超时重传时间 t_{RTO} 的函数^[11]。一个协议只有在发送速率不大于 T 也不能小于 T 的情况下才可以说是 TCP 友好的。不过在无线网络中，无线信道错误也会引起丢包，扣除由于无线信道错误而引起丢包的因素后，式(1)变成如下形式：

$$T = \frac{s}{R(2p_c/3 + t_{RTO}(3(3p_c/8)^{1/2})p_c(1 + 32p_c^2)^{1/2})} \quad (2)$$

式中， p_c 表示因为网络拥塞而导致的丢包的概率，其他变量含义同式(1)。

假设发送端发送 N 个数据包，那么可以计算出由于无线信道错误而丢失的数据包是 $N * p_w$ ，由于网络拥塞而丢失的数据包是 $N * (1 - p_w) * p_c$ 。因此，端到端的丢包率 p 可以由式(3)计算：

$$p = \frac{N * p_w + N * (1 - p_w) * p_c}{N} \quad (3)$$

由式(3)可以推导出拥塞丢包率 p_c ：

$$p_c = \frac{p - p_w}{1 - p_w} \quad (4)$$

结合式(2)和式(4)，移动机器人就可以在发生丢包的情况下恰当地调整反馈信息的发送速率。

要使用式(4)计算网络拥塞丢包率 p_c ，就必须实时得到无线信道错误丢包率 p_w 。为了能得到 p_w ，本文在移动机器人和网关服务器之间增加了一个探测主机。使用探测主机的移动机器人遥操作系统示意图，如图 2 所示。

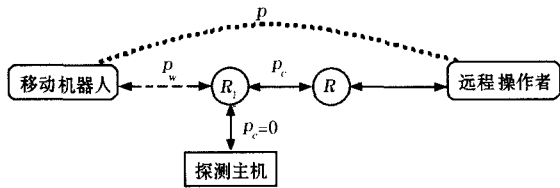


图 2 使用探测主机的移动机器人遥操作系统示意图

Fig.2 Sketch map of teleoperation system of mobile robot with probe host

由于探测主机和网关服务器位于同一个局域网中，因此，可以假定在探测主机和网关服务器之间不存在拥塞丢包现象，因为局域网的 100 Mbps 的带宽远远超过它们之间传输数据所需要的带宽。在探测主机上检测到移动机器人和探测主机之间的端端丢包率即等于移动机器人和网关服务器之间无线信道错误的丢包率，也就是 p_w 。得到 p_w 后，根据式(4)就可以得到网络拥塞丢包率 p_c 。

TFRC-PROBE 的工作流程如下：

探测主机和远程操作者所在的主机将实时的端端丢包率作为反馈信息发送给移动机器人；移动机器人收到探测主机发来的反馈信息时，从反馈信息中得到当前的无线丢包率 p_w ；移动机器人收到远程操作者发来的反馈信息时，从反馈信息中得到端端丢包率 p ；然后根据式(4)计算出拥塞丢包率 p_c ，并且根据式(2)调整发送速率。

如果移动机器人在一定的时间间隔内 (t_{RTO}) 没有从操作者主机收到反馈信息，则说明网络中发生了拥塞导致操作者主机发送的反馈信息数据包丢失，移动机器人必须降低视频及其他反馈数据的发送速率，降低的比率由式(5)计算：

$$f(p_c, p_w) = 0.5 * (1 + \frac{p_w}{p_w + p_c}) \quad (5)$$

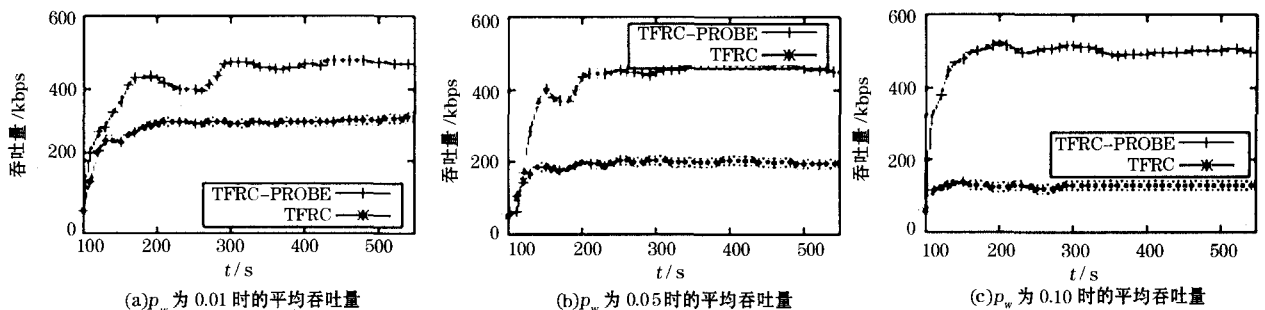


图 4 有 4 个 TCP 背景连接的情况下平均吞吐量

Fig.4 Average throughput of receiver with 4 TCP background traffics

由式(5)可以看出，如果没有无线信道错误，即 $p_w = 0$ ，则 $f(p_c, p_w) = 0.5$ 发送速率减半，这与 TFRC 及 TCP 协议是一致的。如果没有拥塞丢包，即 $p_c = 0$ ，则 $f(p_c, p_w) = 1$ ，移动机器人不降低自身的发送速率，因为这时所有丢失的数据包都是由无线信道错误造成的。

4 仿真结果

本文使用 NS-2 来评估 TFRC-PROBE 的性能。

1) 仿真的参数 在仿真中所使用的拓扑示意图，如图 3 所示。

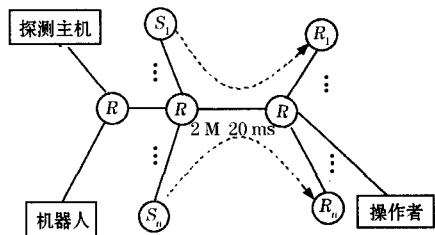


图 3 仿真的网络拓扑示意图

Fig.3 Simulated topology sketch map of the network

仿真中无线连接采用的协议为 802.11 b，无线信道错误模型是指数分布，在仿真中 p_w 的范围为 0.01 ~ 0.10。网络中节点采用 DropTail 队列管理。Internet 的带宽为 2 Mbps，是整个系统中的瓶颈连接；Internet 的延时为 20 ms。系统中还有 N 个 TCP 背景连接，它们从 S_n 发送数据到 R_n ， N 值从 0 到 8 变化。在仿真中，测试 TFRC-PROBE 的两个方面的性能。一是 TFRC-PROBE 的吞吐量情况，如果网络吞吐量得到提高，则意味着在相同时间内，移动机器人可以发送更多的视频及其他反馈信息；二是 TFRC-PROBE 是否可以和 TCP 及 TFRC-PROBE 本身公平地共享带宽，即 TFRC-PROBE 是否具有 TCP 友好的特性。仿真运行的时间为 100 ~ 550 s，每秒采样一次吞吐量的数据。

2) TFRC-PROBE 的性能 有 4 个 TCP 背景连接的情况下平均吞吐量，如图 4 所示。

图中, 从左到右依次为 p_w 为 0.01, 0.05 和 0.10 的情况下 TFRC-PROBE 的平均吞吐量的情况。与 TFRC 相比, TFRC-PROBE 的吞吐量得到了明显的提高; 并且无线信道错误所造成的丢包率越高, 吞吐量的提高就越明显。这主要是因为 TFRC-PROBE 能够区别无线信道错误造成的丢包以及网络拥塞造成的丢包, 从而不至于盲目降低发送速率。由图可以看出, 当无线丢包率达到 10 % 的时候, 吞吐量的

改进超过 300 %。

有 8 个 TCP 背景连接的情况下平均吞吐量, 如图 5 所示。

TFRC-PROBE 的公平性包括 TFRC-PROBE 是否可以和其他协议以及 TFRC-PROBE 本身公平地共享带宽。

TFRC-PROBE 和 TCP 共享带宽的公平性情况, 如图 6 所示。

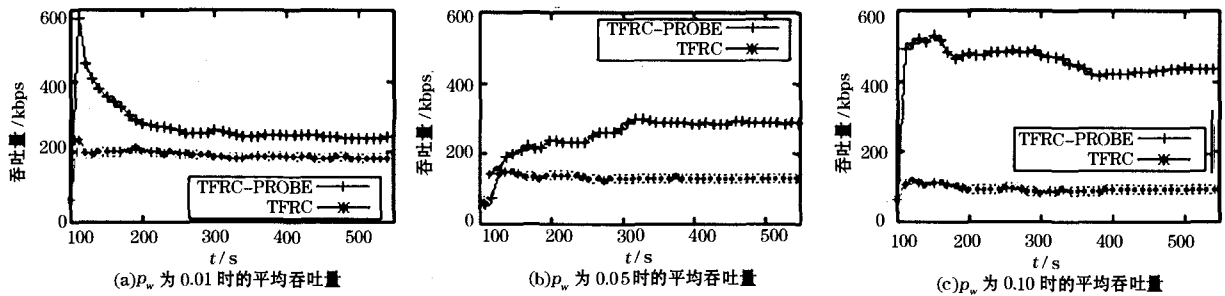


图 5 有 8 个 TCP 背景连接的情况下平均吞吐量

Fig.5 Average throughput of receiver with 8 TCP background traffics

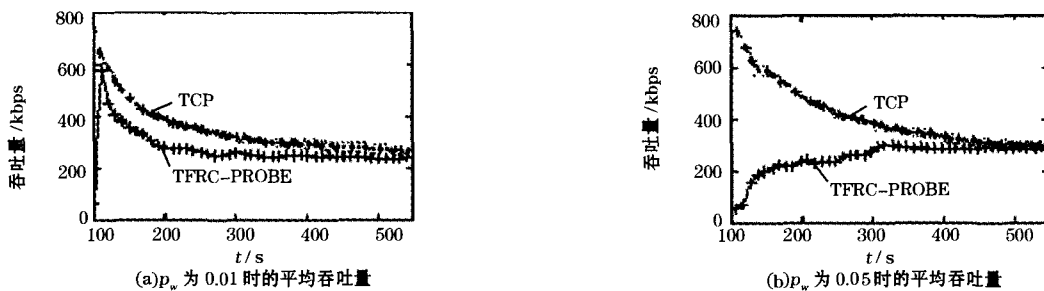


图 6 TFRC-PEOBE 的协议间友好特性

Fig.6 Inter-fairness with TCP

在仿真中, 8 个 TCP 的连接和 TFRC-PROBE 共享瓶颈连接, 图中从上到下为 p_w 为 0.01 和 0.05 情况下的示意图。在前 300 s 内, TFRC-PROBE 的吞

吐量低于 TCP。在 300 s 以后, 两者的吞吐量大致相当。

TFRC-PROBE 协议内的公平性, 如图 7 所示。

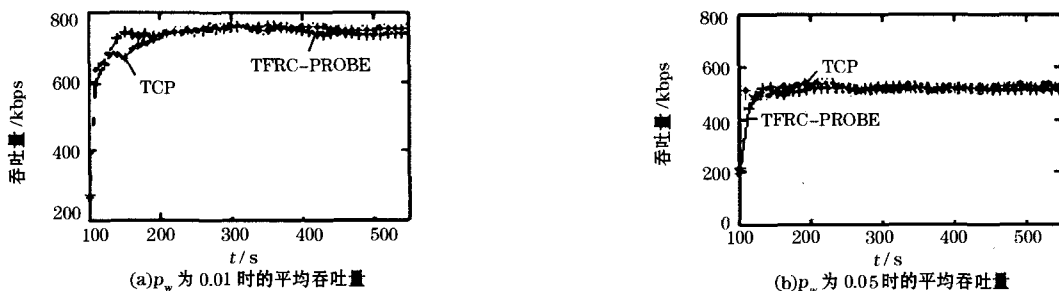


图 7 TFRC-PEOBE 的协议内友好特性

Fig.7 Intra-fairness with TFRC-PROBE itself

两个运行 TFRC-PROBE 的协议共享瓶颈连接。仿真结果显示, p_w 的值为 0.01 和 0.05 的情况下, 两者都可以公平共享带宽。

据传输的网络协议 TFRC-PROBE。从仿真结果可以看出, 与 TFRC 相比, 网络吞吐量明显得到提高。这主要是因为 TFRC-PROBE 能够分辨无线丢包和拥塞丢包, 而 TFRC 不具备这个能力。TFRC-PROBE 还可以和 TCP 协议公平地共享带宽, 也就是说它具有 TCP 友好的特性。

5 结 语

本文提出了一种用于移动机器人遥操作反馈数

参考文献 (References):

- [1] Brady K, Tarn T J. Internet-based remote teleoperation[C]. Belgium: IEEE Conf Robotics and Automation, 1998.
- [2] Saucy P, Mondada F. Keph on the web; open access to a mobile robot on the Internet[C]. San Francisco: IEEE Robot Automat, 2000.
- [3] Simmons R, Fernandez J, Goodwin R, et al. Lessons learned from Xavier[C]. USA: IEEE Robotics and Automation Magazine, 2000.
- [4] Bugard W, Cremers A, Fox D, et al. The interactive museum tour-guide robot[C]. Menlo Park: The 15th National Conference on Artificial Intelligence, 1998.
- [5] Thrun S, Bennewitz M, Burgard W, et al. Minerva: a second-generation museum tour-guide robot[C]. Michigan: International Conference on Robotics and Automation, 1999.
- [6] Luo R C, Su K L, Shen S H, et al. Tsai networked intelligent robots through the Internet: issues and opportunities[M]. USA: IEEE Proceedings, 2003.
- [7] Liu P, Meng M Q H, Jason G, et al. Control and data transmission for Internet robots[C]. Taiwan: IEEE Robot Automat, 2003.
- [8] Xi N, Tam T J. Action synchronization and control of Internet based telerobotic systems[C]. Michigan: IEEE Conf Robotics and Automation, 1999.
- [9] Liu P, Meng M, Ye X F, et al. An UDP-based protocol for Internet robot[C]. Shanghai: The 4th World Congress on Intelligent Control and Automation, 2002.
- [10] Liu P X, Meng M Q H, Liu P R, et al. An end-to-end transmission architecture for the remote control of robots over IP network[C]. USA:

- IEEE Trans on Mechatronics, 2005.
- [11] Floyd S, Handley M, Padhye J, et al. Equation-based congestion control for unicast application[C]. Stockholm: ACM SIGCOMM, 2000.
- [12] Fraisse P, Agniel C, Andren D, et al. Teleoperations over an IP network: virtual PUMA robot[C]. Slovenia: IEEE Conf on Industrial Technology, 2003.
- [13] Shim K, Ro Y S. The mobile robot teleoperation to consider the stability over the time-delay of wireless network[C]. Korea: The 7th Korea-Russia International Symposium, 2003.
- [14] Cen S, Cosman P C, Voelker G M. End-to-end differentiation of congestion and wireless losses[C]. USA: IEEE/ACM Trans on Networks, 2003.
- [15] Biaz S, Vaidya N. Discriminating congestion losses from wireless losses using inter-arrive times at the receiver[C]. Texas: IEEE Symp Application-Specific Systems and Software Engineering and Technology, 1999.
- [16] Tobe Y, Tamura Y, Molano A, et al. Achieving moderate fairness for UDP flows by path-status classification[C]. Florida: The 25th Annual IEEE Conf Local Computer Networks, 2000.
- [17] Biaz D, Vaidya N H. De-randomizing congestion losses to improve TCP performance over wire-wireless networks[C]. USA: IEEE/ACM Trans on Networking, 2005.
- [18] Chen M H, Zakhor A. Multiple TFRC connections based rate control for wireless networks[J]. IEEE Trans on Multimedia, 2006, 8(5): 1045-1062.
- [19] Chen M H, Zakhor A. AIO-TFRC: a light-weight rate control scheme for streaming over wireless[C]. Hawaii: International Conf on Wireless Networks Communications and Mobile Computing, 2005.

(上接第 174 页)

4 系统仿真

对于上述系统, 采用直线永磁同步电动机进行了仿真^[6], 直线电动机参数如下:

$$R_s = 1.2 \Omega, L_d = L_q = 0.0185 \text{ H}, \tau = 36 \text{ mm}, \\ M = 24 \text{ kg}, k_p = 248.7, k_1 = 23.62, D = 1.2 \text{ N}\cdot\text{s/m}, \\ \lambda_m = 0.286 \text{ Wb}, K_T = 25 \text{ N/A}, v = 1.0 \text{ m/s}.$$

在 $t = 0.05 \text{ s}$ 时, 在电动机轴上突加 56 N 阶跃干扰的情况下, 系统响应如图 3 所示。

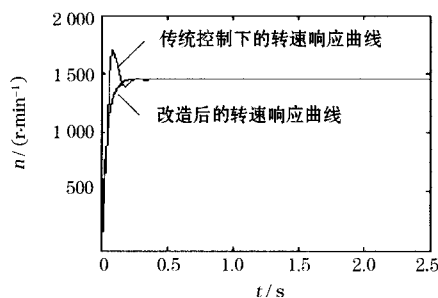


图 3 转速响应曲线

Fig.3 The response curve of rotating speed

5 结语

本文将定子电流的滞环宽度模糊控制方法和模糊神经元自适应加权 PID 控制应用于对直线永磁同步伺服电动机 (LPSM) 的转速控制中。结果表明, 该控制系统具有电流响应快、控制精度高和自适应能力强的优点, 基本达到设计目标。

本次改造对象 RA500-37198 主轴颈磨床^[7], 更

换了控制系统及电气控制柜, 这样从根本上解决了因数控系统严重老化造成的故障率高、维修困难等问题。在本文中使用了 840D 特殊功能驱动主/从功能, 即在以后的工程中对于具有类似结构的曲轴磨床可使用此功能, 这样可降低工程成本、缩短工期, 机床投入使用后, 机床的原有功能完全恢复, 工件磨削精度、加工效率满足用户加工要求。

参考文献 (References):

- [1] 关新, 程谋勇. 直线电机驱动的磁悬浮平台推力动态解耦控制[C]. 哈尔滨: 2005 中国控制与决策学术年会, 2005. (Guan Xin, Cheng Mouyong. Thrust dynamic decoupling control of linear motor driver planar magnetic suspension stage[C]. Harbin: 2005 Chinese Control and Decision Conference, 2005.)
- [2] 李蒙, 冯梯尊. 老式 150 镗床的电气改造[J]. 机床电器, 2004, (1): 52-55. (Li Meng, Feng Tizun. Improving on electrical system of 150 boring machine[J]. Machine Electric Appliance, 2004, (1): 52-55.)
- [3] 孙宜标, 郭庆鼎. 西门子 M15 型拉线机恒张力系统模糊自整定 PI 控制研究[J]. 沈阳工业大学学报, 2002, 24(3): 220-223. (Sun Yibiao, Guo Qingding. Research on fuzzy self-adaptive PI control SIEMENS M15 pulling wire machine constant tension system[J]. Journal of Shenyang University of Technology, 2002, 24(3): 220-223.)
- [4] 郭庆鼎, 王成元. 直线交流伺服系统的精密控制技术[M]. 北京: 机械工业出版社, 2000. (Guo Qingding, Wang Chengyuan. Precision control technology of AC servo system[M]. Beijing: China Machine Press, 2000.)
- [5] 卢绍良, 刘福才. SC125 大型 CNC 数控车床控制系统的改造[J]. 机床电器, 2004, (2): 20-22. (Lu Shaoliang, Liu Fucui. Rebuilding of control system of large module SC125CNC vertical lathe[J]. Machine Electric Appliance, 2004, (2): 20-22.)
- [6] 刘金琨. 先进 PID 控制及其 Matlab 仿真[M]. 北京: 电子工业出版社, 2003. (Liu Jinkun. Advanced PID control and Matlab simulation[M]. Beijing: Electronics Industry Press, 2003.)
- [7] 关新, 郭庆鼎. 龙门铣床模糊神经元自适应加权 PID 控制的研究[J]. 组合机床自动化加工技术, 2006, (1): 47-49. (Guan Xin, Guo Qingding. Research on NC gantry milling machine with fuzzy-neural cell self-adaptive PID control method[J]. Modular Machine Tool and Automatic Manufacturing Technique, 2006, (1): 47-49.)