

基于 xPC 网络控制的倒立摆伺服系统

李向国 梅志千 黄 宁

( 河海大学机电工程学院 江苏 常州 213022 )

摘要 :为实现倒立摆伺服系统的远程控制 ,设计了一种基于 xPC 网络控制的倒立摆伺服系统 ,建立了倒立摆伺服控制系统的数学模型 ,并利用 xPC 组件对该系统进行了运动控制试验 .试验结果表明 ,该系统具有响应速度快、实时性强、易于操作等特点 .  
关键词 xPC 网络控制 倒立摆伺服系统  
中图分类号 :TP23 文献标识码 :A 文章编号 :1000-198X( 2008 )02- 0271- 04

倒立摆伺服系统属于非线性、强耦合、多变量和自然不稳定系统 ,通常作为控制理论研究的试验对象 ,是一种优秀的教学试验平台 .由于试验平台的价格十分昂贵 ,因而建立倒立摆的网络控制伺服系统具有重要的实际意义 .本文采用 MatLab/Simulink/xPC 组件的双机( 宿主机-目标机 )模式控制策略 ,构建基于 xPC 网络控制的倒立摆伺服系统 ,并对其进行运动控制试验 .试验结果表明 ,基于 xPC 网络控制的倒立摆伺服系统具有响应速度快、实时性强、易于操作等特点 ,并且突破了传统的通过 RS232 串口线连接的空间限制 .

1 xPC 系统介绍

xPC 系统是 MathWorks 公司开发的基于 RTW( real-time workshop )体系框架的附加产品 .该产品可将 PC 机转变为一个实时系统 ,用于产品原型的开发和测试 .  
2 台 PC 机便可构成 xPC 的双机开发环境 ,其中 1 台作为宿主机 ,另 1 台作为目标机 .在宿主机上安装 MatLab 7.0 用于控制系统设计 .使用 xPC 前必须安装一个语言编译器 ,选用 Visual C + + 6.0 作为语言编译工具 .xPC 系统不需要在目标机上安装 DOS ,Windows ,Linux 等任何一种操作系统 ,用户只需用特殊的启动软盘启动目标机 .BIOS 是 xPC 系统实时内核所需的唯一软件 .  
宿主机和目标机通过以太网网络连接 ,生成用于启动目标机的启动盘 .在宿主机上运行 MatLab ,当在命令行中键入 xpcsetup 后 ,将弹出目标环境配置窗口 ,如图 1 所示 .配置完成后 ,插入软盘 ,单击 Bootdisk ,生成 xPC 实时内核 .以此装有 xPC 实时内核的软盘启动目标机 ,使目标机成为一台装有 xPC 实时内核的实时仿真计算机 .

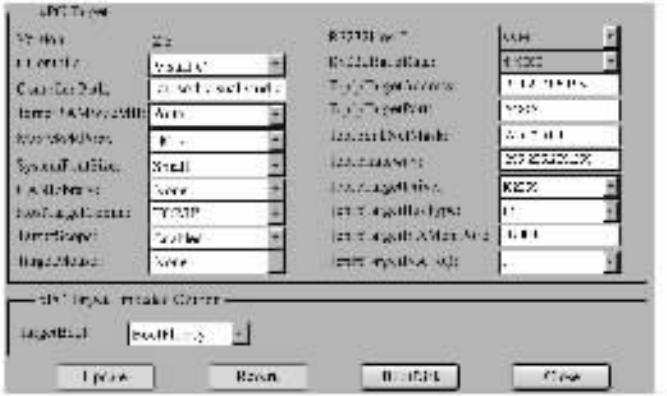


图 1 xPC 目标环境设置窗口  
Fig.1 The window of setting xPC

宿主机和目标机通过以太网连接后,不但增强了数据传输能力,传输数据速率最高可达 10 MB/s(串口通信速率最大为 115 kB/s),而且支持远距离通信,只需知道目标机的 IP 地址并正确设置网关,就可以实现倒立摆伺服系统的远程控制.而 1 个倒立摆试验平台可以对多台宿主机,由此实现了倒立摆伺服系统的网络控制<sup>[1-3]</sup>.

2 倒立摆数学模型

2.1 状态空间方程

在忽略了空气阻力等次要因素后,一阶倒立摆系统可抽象成由小车和匀质杆组成的系统,如图 2 所示.根据文献[4],将一级倒立摆的数学模型表示为

$\dot{x} = Ax + Bu$  (1)

$y = Cx + Du$  (2)

其中

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{-(I + ml^2)b}{J(M + m) + Mml^2} & \frac{-m^2gl^2}{J(M + m) + Mml^2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & \frac{mlb}{J(M + m) + Mml^2} & \frac{mgJ(M + m)}{J(M + m) + Mml^2} & 0 \end{bmatrix}$$

$$B = \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{I + ml^2}{J(M + m) + Mml^2} \\ 0 \\ \frac{-ml}{J(M + m) + Mml^2} \end{bmatrix}$$

$$C = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}$$

$$D = (0 \ 0)^T$$

$$x = \begin{bmatrix} x \\ \dot{x} \\ \theta \\ \dot{\theta} \end{bmatrix}$$

$$y = (x \ \theta)^T$$

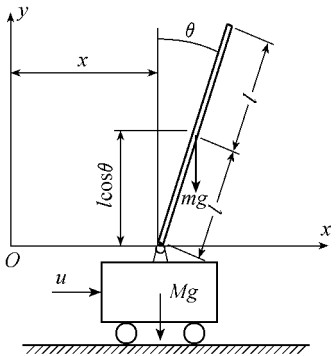


图 2 一阶倒立摆的结构原理

Fig.2 The structure of inverted pendulum

式中: $M$ ——小车质量; $m$ ——摆杆质量; $b$ ——小车摩擦系数; $l$ ——摆杆转动轴心到杆质心的长度; $I$ ——摆杆惯量; $u$ ——输入,即加在小车上的外力; $g$ ——重力加速度; $x$ ——小车位移; $\theta$ ——摆杆与  $y$  轴正向的夹角.

针对试验使用的倒立摆,以  $M = 1.096 \text{ kg}$ ,  $m = 0.109 \text{ kg}$ ,  $b = 0.1 \text{ N} \cdot \text{s/m}$ ,  $I = 0.0034 \text{ kg} \cdot \text{m}^2$ ,  $l = 0.25 \text{ m}$  代入式(1),得

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \ddot{x} \\ \dot{\theta} \\ \ddot{\theta} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & -0.1818 & 2.6727 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & -0.4545 & 31.1818 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ \dot{x} \\ \theta \\ \dot{\theta} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 1.8182 \\ 0 \\ 4.5455 \end{bmatrix} u$$
 (3)

2.2 控制器设计

利用 MatLab 可求得被控系统式(3)的特征值为(0.55651, -0.1428, -5.6041),在此特征值中有一个是位于右半平面的极点,因此被控系统不稳定,需通过控制器设计使其满足稳定要求.

倒立摆伺服系统的控制设计有多种方法,最基本的是状态反馈的极点配置法和最优控制的 LQR 法.最优控制理论主要依据庞德里亚金的极值原理,通过对性能指标的优化,寻找使目标极小的控制器,其中线性二次型性能指标可以通过求解 Riccati 方程得到.利用线性二次型性能指标设计的控制器被称为 LQR 控制器<sup>[5]</sup>.

设计线性二次型最优控制器的关键是选择加权矩阵  $Q$  和  $R$  ,一般情况下 , $R$  通常为单位对角阵.  $Q$  越大 ,调整时间越短 ,但控制量越大. 在对系统进行运动控制试验时 ,考虑实际系统实现的可能性 ,按  $Q = C^T C$  选择加权矩阵 ,最后求出最优状态反馈矩阵  $K$  ,即

$$K = ( - 1 , - 1.6567 ,18.6852 ,3.4594 )$$

( 4 )

3 运动控制试验

由 xPC 宿主机-目标机组成的实时控制系统模型如图 3 所示.

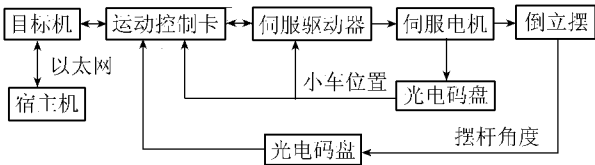


图 3 控制模型

Fig.3 The control model

在宿主机和目标机上安装 PCI 总线型的以太网卡( 与 NE2000 兼容 ) ,同时在目标机上安装 PCI6024E 和 PCI660I 运动控制卡. PCI6024E 控制卡将控制指令转换成模拟信号后输给伺服驱动器 ,由驱动伺服电机实现小车的运动 ;同时 PCI6024E 控制卡也可以将限位开关的电压跳变转换成数字信号输入到宿主机 ,而光电编码器的测量信号是经过 PCI660I 读入宿主机的.

根据式( 4 )建立倒立摆系统的控制模型 ,如图 4 所示.

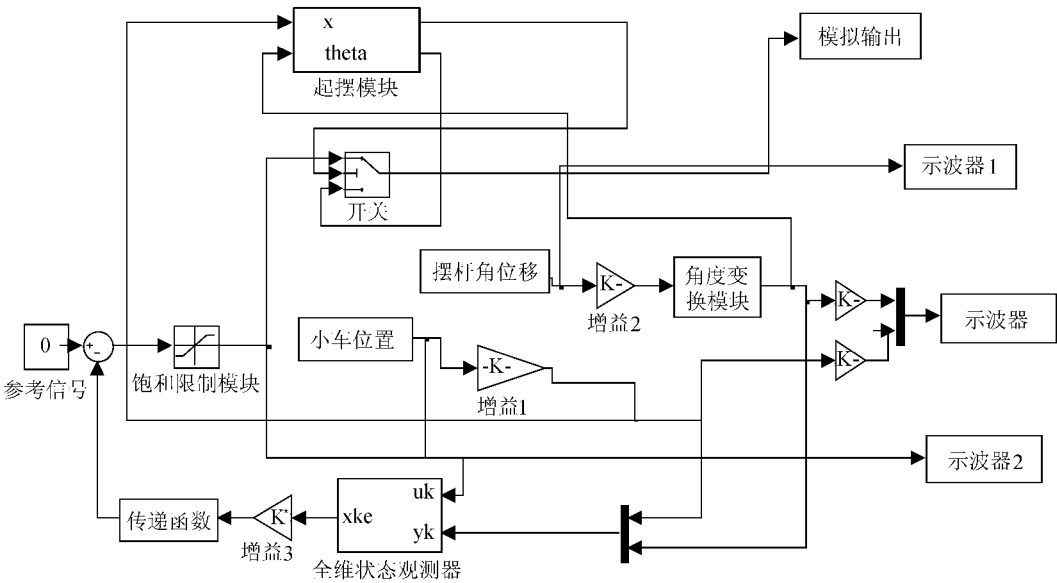


图 4 试验控制系统模型

Fig.4 The experimental control system model

在 MatLab 下建立倒立摆伺服控制系统模型 ,通过 RTW 生成 C 代码 ,并将其下载到目标机中 ,用以对倒立摆系统进行实时控制. xPC 提供多种操作实时控制的方法 ,可以在宿主机上用 MatLab 的命令行 ,或者通过宿主机上 xPC 的远程控制工具( 如 xpcrctool )进行实时控制 ,试验时采用 xpcrctool 对倒立摆伺服系统进行远程控制 ,同时在线调节系统参数<sup>[6-9]</sup>.

4 试验结果

摆杆初始位置为竖直向下 ,初始角度为  $\pi$ . 试验开始后 ,摆杆自动甩起<sup>[10-11]</sup>. 如图 5 所示 ,在 2 s 后基于 xPC 的倒立摆伺服控制系统进入稳定状态 ,摆杆竖直向上 ,角度为零.

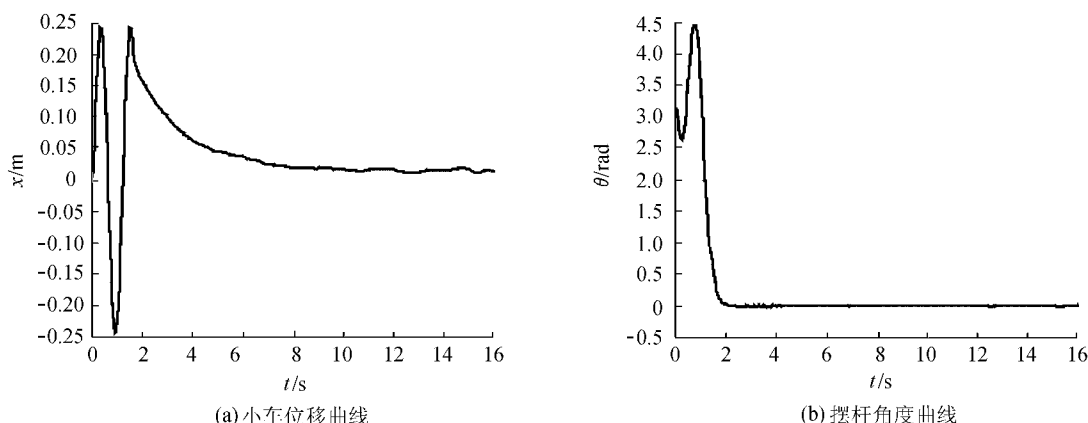


图5 试验曲线

Fig.5 Experimental curve

## 5 结 语

本文基于 MatLab/Simulink 设计了倒立摆伺服控制系统,利用 xPC 进行实时网络控制,并对该系统进行了运动控制试验.试验结果表明,基于 xPC 的倒立摆伺服控制系统具有快速性、实时性、易操作等特点,突破了传统的通过 RS232 串口线连接的空间限制,同时 1 个倒立摆试验平台可以对多台宿主机,节省了空间,进一步提高了设备的利用率.

### 参考文献:

- [1] 吴浩,张峰,李小波.基于 xPC 的地铁 TCU 实时仿真测试系统设计[J].系统仿真学报,2007,19(4):765-775.
- [2] 张乐飞,刘利,王旭永.基于 xPC 实时控制的中空液压马达伺服系统的研究[J].液压与气动,2005(6):45-47.
- [3] 杨涤,李立涛,杨旭,等.系统实时仿真开发环境与应用[M].北京:清华大学出版社,2002.
- [4] 彭自然,罗大庸,张航.单级倒立摆系统控制方法设计[J].湖南工业大学学报,2007,21(2):53-57.
- [5] 杨平,徐春梅,王欢,等.直线型一级倒立摆状态反馈控制设计及实现[J].上海电力学院学报,2007,23(1):21-32.
- [6] 王宁强,刘向东.卫星姿态控制系统硬件在回路仿真研究[J].计算机仿真,2005,22(10):78-81.
- [7] 翟坤,杨涤,刘振刚,等.采用 xPC 实现转台的位置伺服系统[J].系统工程与电子技术,2005,27(4):737-739.
- [8] 李升波,王建强,李克强.基于 xPC 的驾驶员辅助系统硬件在环仿真试验台[J].中国机械工程,2007,18(16):2012-2015.
- [9] 薛定宇,陈阳泉.基于 MATLAB/Simulink 的系统仿真技术与应用[M].北京:北京清华大学出版社,2002.
- [10] 肖力龙,彭辉.基于拉格朗日建模的单级倒立摆起摆与稳定控制[J].控制理论与应用,2007,26(4):4-8.
- [11] 王东亮,刘斌,张曾科.环形一级倒立摆起摆及稳定控制研究[J].微计算机信息,2007,23(2-1):1-14.

## Inverted pendulum servo system based on xPC network control

LI Xiang-guo, MEI Zhi-qian, HUANG Ning

(College of Mechanical and Electrical Engineering, Hohai University, Changzhou 213022, China)

**Abstract:** A remotely controlled inverted pendulum servo system was developed based on xPC network control. A mathematical model of the system was established, and a motion control experiment was carried out based on the xPC components. Experimental results show that the system has high response speed and real-time characteristics, and is easy to operate.

**Key words:** xPC; network control; inverted pendulum servo system