

基于 LabVIEW 的倒立摆控制系统的设计与实现*

丁康,方敏,吴震宇

(合肥工业大学 电气工程与自动化学院,安徽 合肥 230009)

摘要: 基于 NI 公司的 PXI-1050 工控机和 PXI-7344 运动控制卡,在 LabVIEW 环境下开发了直线二级倒立摆 LQR 控制系统的仿真与实时控制实验平台。该平台提供了 LQR 控制器的设计与仿真验证工具,以及实时监控环境,同时利用 LabVIEW 软件中的 3D 控件设计了可视化的人机交互界面。该平台可以为控制理论与教学提供良好的硬件在环实验环境,操作方便并且具有一定的开放性。

关键词: 倒立摆;最优控制;运动控制卡;硬件在环;人机交互

中图分类号: TU411.01

文献标识码: A

文章编号: 1674-7720(2011)13-0080-03

Design and implementation of inverted pendulum system based on LabVIEW

Ding Kang, Fang Min, Wu Zhenyu

(School of Electrical Engineering and Automation, Hefei University of Technology, Hefei 230009, China)

Abstract: Linear double pendulum of LQR control system simulation and real-time control experiment platform was developed based on NI PXI-1050 chassis and PXI-7344 motion control card. This platform provided a LQR controller design, simulation tool and real-time monitoring environment, while using LABVIEW 3D controller to design visualization's man-machine interface. It provided good hard in the loop experiment environment for control theory researching and teaching while easy to operate and owning a certain opening.

Key words: inverted pendulum; optimal controller; motion controller; good hard in the loop; man-machine interface

LabVIEW 是由美国国家仪器公司(NI)开发的一种图形化编程语言,它广泛地被工业界、学术界和研究实验室所接受,视为一个标准的数据采集和仪器控制软件,具有可视化、编程方便等特点^[1]。NI 公司的 PXI-1050 工控机带有 8 个 PXI 插槽,配合图像处理、数据采集、运动控制、嵌入式系统等模块,可以构成快速原型开发系统。在 PXI-1050 工控机上,利用 LabVIEW 软件可以开发硬件在环仿真实验平台。与 MATLAB 软件工具相比较,LabVIEW 在硬件接口驱动、人机交互界面的设计方面更为方便。

倒立摆是一种典型的非线性不稳定系统,在控制理论算法验证和课程教学中,将倒立摆作为经典被控对象开发的实验装置有广泛的应用价值。本文以 LQR 控制算法为例,介绍了直线二级倒立摆控制系统的设计与实现。该系统提供了一个控制器设计、仿真和实时控制实验平台。根据二次型最优指标,用户可以进行控制器参

数设计、仿真调试和倒立摆的实时控制验证,并且通过倒立摆 3D 模型和响应曲线图直观地显示实际倒立摆运动情况。

1 二级直线倒立摆的数学模型

二级倒立摆物理系统是由小车和安装在小车上的一级摆杆和二级摆杆组成。其中实际模型的参数如表 1 所示。

表 1 实际模型参数

参数	参数名称	参数值
M	小车质量	1.096 kg
m_1	摆杆 1 质量	0.05 kg
m_2	摆杆 2 质量	0.13 kg
L_1	摆杆 1 到转动中心的距离	0.0775 m
L_2	摆杆 2 到转动中心的距离	0.25 m

分别以小车位置 x 、小车速度 \dot{x} 、摆杆 1 的角度 θ_1 、摆杆 1 的角速度 $\dot{\theta}_1$ 、摆杆 2 的角度 θ_2 、摆杆 2 的角速度 $\dot{\theta}_2$ 为状态变量,以小车位置 x 、摆杆 1 的角度 θ_1 、摆杆 2 的

* 基金项目:安徽省重点教学研究项目(2008jyxm048)

角度 θ_2 为输出变量,建立倒立摆的状态空间模型如下^[2]:

$$\dot{X}(t)=AX(t)+Bu(t)$$

$$Y(t)=CX(t)$$

$$X=[x \quad \dot{x} \quad \theta_1 \quad \dot{\theta}_1 \quad \theta_2 \quad \dot{\theta}_2]^T \quad Y=[x \quad \theta_1 \quad \theta_2]^T$$

$$A=\begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 77.06 & -21.19 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -38.53 & 37.82 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad B=\begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \\ 5.7 \\ -0.0728 \end{bmatrix}$$

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

倒立摆控制的任务是使两个摆杆的角度均保持为 180° (竖直向下为 0°),并使小车的位置到达给定值,实现定位的功能。希望的输出值可以用向量表示为:

$$Y^*=[x^* \quad \theta_1^* \quad \theta_2^*]^T$$

2 倒立摆系统的硬件设计

本文设计的倒立摆控制系统采用 NI 公司的 PXI-1050 工控机为核心,控制系统的硬件结构如图 1 所示。

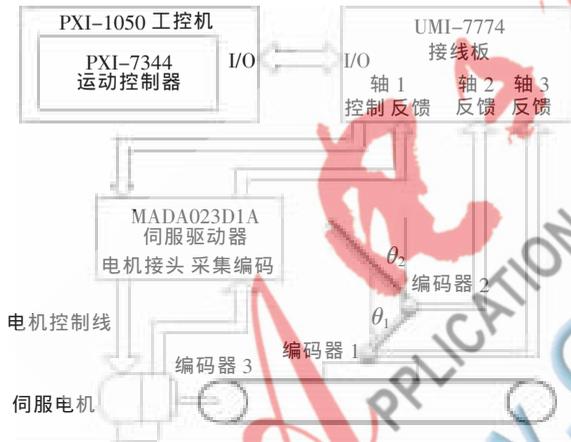


图 1 倒立摆系统硬件框图

摆杆角度和小车位置的测量采用 3 个 OVW2-06-2MD 编码器。

PXI-7344 的运动控制卡是 NI 公司的一款中档的 4 轴步进/伺服控制器,每轴可通过软件设置步进/伺服控制器的类型和参数,结合 LabVIEW Motion 驱动软件,可实现各种类型的控制任务。运动控制卡内部高性能微处理器(DSP)完成控制器计算后,向交流伺服电机的驱动器发出控制指令^[3]。

UMI-7774 接线板为运动控制卡提供了丰富的布线和连接点,从而简化了 PXI-7344 控制器与第三方驱动器、放大器、编码器和限位开关之间的集成,同时也起到了过电流保护和信号隔离的作用^[4]。

交流伺服电机驱动器采用日本松下公司的 MSDA023D1A,它的作用是接收外部控制信号控制 PWM

输出,调节电机转速。同时可在其内部形成速度控制环。

在图 1 所示倒立摆系统中,交流伺服驱动器一方面采集编码器 3 的信号,在其内部形成速度控制环,同时将编码器 3 的信号送入 UMI-7774 接线板。PXI-7344 运动控制卡通过接线板采集编码器 1~3 的脉冲信号,以及倒立摆底座上两个限位开关的数字信号。通过 PXI-1050 工控机的 LabVIEW 软件系统,将编码器 1 和编码器 2 的脉冲计数转化为摆杆 1 和摆杆 2 的角度读数,将编码器 3 的脉冲计数转化为小车的水平位置,并按照一定的控制策略计算出小车的给定加速度,经运动控制卡内部控制器计算得到的控制量送入伺服电机驱动器,控制电机的加速度,实现对直线二级倒立摆的控制。限位开关输出的数字信号用来决定相应的关闭操作^[5]。

3 倒立摆系统控制器的设计与仿真

3.1 倒立摆 LQR 控制器

本文采用 LQR 控制器实现倒立摆控制,控制系统的结构如图 2 所示。LQR 控制器的输出 $u(t)$ 为小车的给定加速度 a^* 。 x, θ_1, θ_2 为小车位置、摆杆 1、摆杆 2 的实际值, $x^*, \theta_1^*, \theta_2^*$ 是相应的给定值。内环是加速度控制环,采用 PD 控制器以保证伺服电机实际加速度能够快速跟随给定加速度 a 。

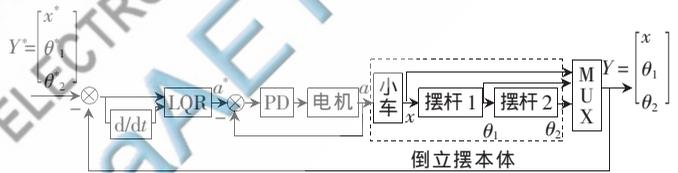


图 2 倒立摆 LQR 控制系统方框图

选择最优控制性能指标为^[6-8]:

$$J=\int_0^{\infty}[\tilde{x}^T(t)Q\tilde{x}(t)+u^T(t)Ru(t)]dt$$

其中 $Q=Q^T \geq 0, R=R^T > 0$ 为了便于计算,权矩阵 Q 和 R 均取为对角阵。 $\tilde{x}^T Q \tilde{x}$ 表示控制过程中的状态偏差, $u^T R u$ 表示控制过程中消耗的能量。其中:

$$\tilde{x}=[(x^*-x)(x^*-x)'(\theta_1^*-\theta_1)(\theta_1^*-\theta_1)'(\theta_2^*-\theta_2)(\theta_2^*-\theta_2)']^T$$

$$\text{控制量 } u(t)=-K\tilde{x}$$

$$\text{反馈矩阵 } K=-R^{-1}(t)B^T(t)P(t)$$

其中, $n \times n$ 维对称非负矩阵 $P(t)$ 为下列黎卡提矩阵微分方程的解:

$$-\dot{P}(t)=P(t)A(t)+A^T(t)P(t)-P(t)B(t)R^{-1}B^T(t)P(t)+Q(t)$$

3.2 LQR 控制器在 LabVIEW 中的实现

LabVIEW 中的控制与仿真工具箱提供了 LQR 函数,该函数允许输入两个参数 Q 和 R ,这两个参数用来分配性能指标中控制量和状态偏差量的权重。LQR 函数的输出参数是使二次型性能指标最优的状态反馈矩阵 K 。

在倒立摆 LQR 控制中,设 R 为某一固定值, $Q=\text{diag}(Q_{11}, Q_{22}, Q_{33}, 0, 0, 0)$,其中 Q_{11} 代表小车位移的权

重, Q_{22} 代表摆杆 1 角度偏差的权重, Q_{33} 代表摆杆 2 角度偏差的权重。权重值增大, 对相应的偏差量抑制能力增强。

本文通过二级倒立摆模型与 LQR 函数结合设计了倒立摆仿真 VI。图 3 是 VI 的前面板。用户可通过前面板的左侧修改模型参数、 R 值以及 Q 阵的权值, 在前面板的右侧可得出仿真的曲线图, 同时在图 4 的程序框图中, 还可设置系统的仿真步长和仿真时间, 默认的仿真步长为 0.01。

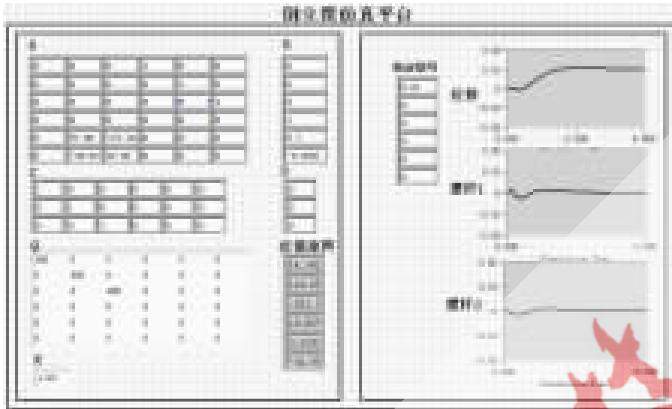


图 3 倒立摆仿真 VI 的前面板

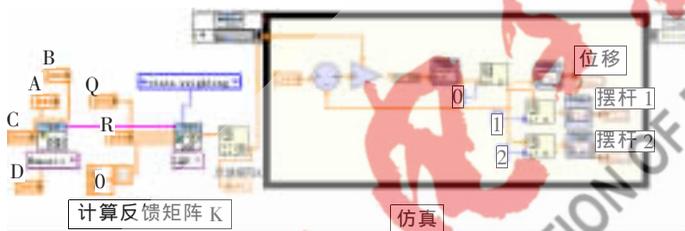


图 4 倒立摆仿真的程序框图

当取参数 $Q_{11}=200$, $Q_{22}=400$, $Q_{33}=400$, 仿真步长为 0.01, 仿真时间为 10 s 时, 在 LabVIEW 仿真平台上可以得到小车位置、摆杆 1 以及摆杆 2 的仿真曲线图。由图 3 可以看出三者的超调量很小, 上升时间也很短, 具有一定的抗扰能力。

4 二级倒立摆的实时控制

4.1 角度测试 VI 程序

在倒立摆实时控制系统设计中, 为了测试所编写的程序能否正常采集摆杆 1 和摆杆 2 的角度数据, 本文编写了摆杆角度测试程序。

通过运动控制卡 PXI-7344 采集的摆杆角度数据可以在程序的前面板上显示出来。程序开始执行时, 摆杆处于垂直向下静止状态, 编码器输出的脉冲数和换算后的弧度值均为 0。当人为地提起摆杆时, 上述两个数值立即随着摆杆角度变化, 可以方便地用来对编码器进行角度标定。

图 5 是角度测试的框图程序。倒立摆控制对实时性要求高, 本文设置的定时循环的采样时间是 10 ms。程序

包括控制器初始化, 控制器各个轴的设置和复位以及定时循环采样。在每次循环中, 调用了采集角度编码器的驱动函数, 对各个摆杆采集一次数据。在显示控件中将编码器的实际脉冲数读出来, 换算成弧度值。

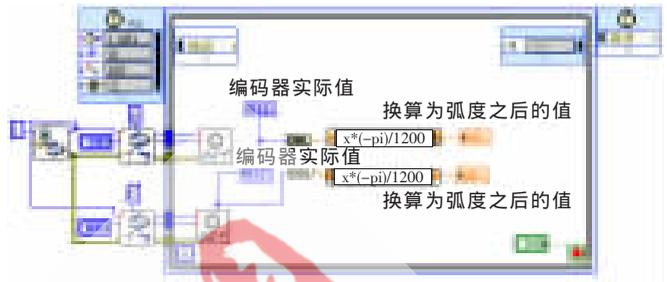


图 5 角度测试的程序框图

4.2 倒立摆实时控制系统的设计

在倒立摆实时控制系统设计中, 本文利用 LabVIEW 良好的人机交互功能, 设计用户操作界面。使用 LabVIEW 8.6 版本所提供的 3D 控件功能, 搭建了一个直线二级倒立摆 3D 模型。在实时控制过程中, 根据采集的小车位置和两个摆杆角度的数据, 将倒立摆实际运动情况反映到虚拟的 3D 模型中。

在二级直线倒立摆 LQR 控制实验平台的用户操作界面上, 选择“实时控制”选项卡时, 并选择“参数设置及显示界面”如图 6 所示, 设置反馈矩阵 K 的值, 这六个值来自于仿真的结果。点击“开始控制”按钮, 小车位置、摆杆 1 弧度值、摆杆 2 弧度值以及左右限位开关状态等数字信号反映到前面板上, 从而达到监控的目的。

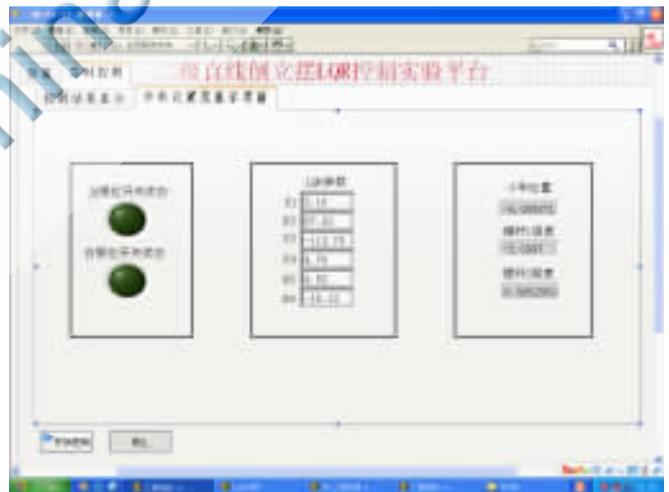


图 6 控制结果显示

选择“数据显示界面”选项卡, 如图 7 所示, 可显示直线二级倒立摆 3D 模型和小车位置、摆杆 1 角度、摆杆 2 角度的曲线图, 并观察各个摆杆的振荡情况, 而且可以通过在 3D 图形中旋转操作, 选择从不同的角度观察 3D 演示。

点击图 6 下方的“停止”按钮, 整个倒立摆控制程序

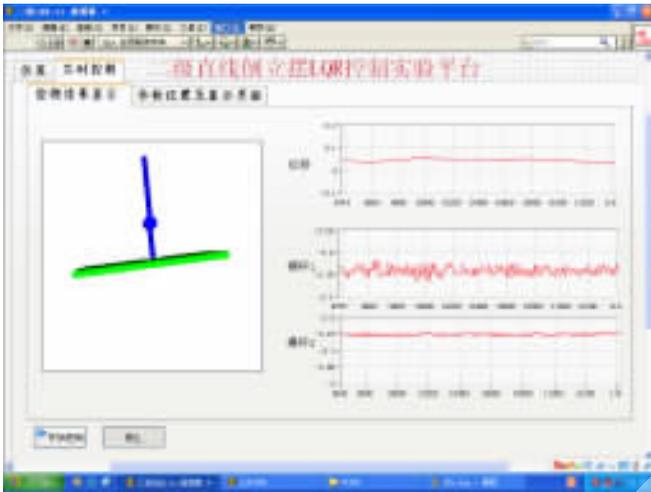


图7 参数设置及显示界面

停止运行。

本文基于 NI 公司的 PXI-1050 工控机和 PXI-7344 运动控制卡, 在 LabVIEW 环境下开发了直线二级倒立摆 LQR 控制系统的仿真与实时控制实验平台。该平台提供的仿真工具可以根据给定的二次型指标, 方便地完成最优状态反馈矩阵 K 的设计和仿真验证。利用系统提供的实时控制工具, 可以进行参数设置和监控。用户界面提供的倒立摆 3D 运动模型、输出响应曲线和实时数据可以全面显示倒立摆的实时控制效果。该平台具有开放性和扩展性。

参考文献

[1] 杨忠仁. 基于 LABVIEW 数据采集系统[J]. 重庆大学学报(自然科学版), 2007, 24(2): 32-35.

- [2] 刘文斌, 干树川. 二级倒立摆的建模与 MATLAB 仿真[J]. 自动化与仪器仪表, 2008(5): 6-7.
- [3] Motion Control National Instruments 7344 User Manual. <http://sine.ni.com/psp/app/doc/p/id/psp-493/lang/zhs/>
- [4] Motion Control National Instruments Universal Motion Interface (UMI)-7774/7772 User Manual. <http://sine.ni.com/nips/cds/view/p/lang/zhs/nid/12534>.
- [5] 李艳萍. 基于 LabVIEW 的运动控制系统的设计[J]. 中国科技信息, 2009(22): 95-96.
- [6] Chaiporn Wongsathan, Chanapoom Sirima. Application of GA to Design LQR Controller for an Inverted Pendulum System [C]. International Conference on Robotics and Biomimetics, 2009, 951-954.
- [7] Jyoti Krishen, Victor M. Becerra. Efficient Fuzzy Control of a Rotary Inverted pendulum Based on LQR Mapping [C]. International Symposium on Intelligent Control, 2006, 2701-2706.
- [8] Hongliang Wang. Design and Simulation of LQR Controller with the Linear Inverted Pendulum [C]. 2010 International Conference on Electrical and Control Engineering 699-702.
- (收稿日期: 2011-02-10)

作者简介:

丁康, 男, 1985 年生, 研究生, 主要研究方向: 电气工程与自动化。

方敏, 女, 1950 年生, 教授, 主要研究方向: 电气工程与自动化。

吴震宇, 男, 1983 年生, 研究生, 主要研究方向: 电气工程与自动化。