

文章编号: 1671-7848(2004)06-0521-04

基于 DSP 的二轮小车-倒立摆系统

段旭东, 魏衡华, 陈 星

(中国科学技术大学 自动化系, 安徽 合肥 230027)



摘 要: 为了提高倒立摆运动的自由度, 同时也提高了控制难度, 以便实现更多的控制内容, 利用 DSP 的强大功能, 设计了一种基于 DSP 的二轮小车-倒立摆系统。介绍了以 DSP 芯片 TMS320LF2407 为核心的二轮小车-倒立摆的硬件系统的开发, 以及运用现代控制理论设计的控制软件, 实现小车-倒立摆的倒立平稳控制和在小车-倒立摆保持倒立状态下的自由位置移动控制。控制结果表明了二轮小车-倒立摆系统的设计是成功的, 原先的控制设想也是可行的。

关 键 词: 二轮小车-倒立摆系统; DSP; TMS320LF2407 倒立摆控制; 硬件系统; 软件设计

中图分类号: TP 273 文献标识码: A

1 引 言

倒立摆系统作为受控对象是非线性、强耦合、多变量和自然不稳定的系统, 是检验各种控制理论的理想模型。在控制过程中倒立摆系统能有效地反映诸如稳定性、鲁棒性、随动性以及跟踪性等许多控制中的关键问题。随着现代工业的要求和微电子技术的进步, 一种体积更小、运算速度更快、功能更强大的特种微处理器 DSP (Digital Signal Processor, 数字信号处理) 应运而生, 并且迅速而广泛地运用于数据处理、语音识别、视觉处理、运动控制等数据量多、运算速度要求高和实时性强的系统。由于 DSP 这些优点, 本文将 DSP 应用到倒立摆系统的控制中, 设计了基于 DSP 的二轮小车-倒立摆系统。比起台式倒立摆, 它有更多的运动自由度, 并可以脱离计算机独立工作, 实现更多、实时性更好的控制功能, 更方便地加入附加功能, 扩展性强等特点。

2 系统建模

二轮小车-倒立摆系统由一对直流力矩电机、一对光电码盘、一个安装了电池盒的摆杆、一个陀螺仪、一个 DSP 芯片板和一个底盘及一对小轮构成, 如图 1 所示。

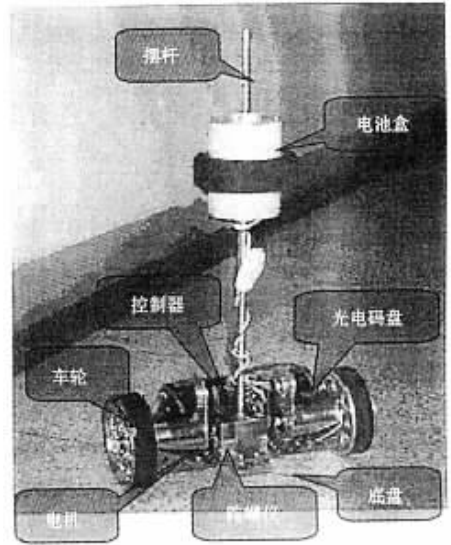


图 1 二轮小车-倒立摆系统实物图

根据系统的动态特性及经典牛顿力学原理, 经理想化处理以后, 即假设车体和小轮为刚体, 忽略滑动摩擦力和电机电感, 不考虑车体与小轮之间的摩擦力矩, 建立系统的动态模型如下:

对车体建模:

$$\begin{cases} \ddot{X}_p M_p = N \\ \ddot{Y}_p M_p = V - M_p g \\ \ddot{\theta}_p J_p = VL \sin \theta_p - NL \cos \theta_p - C \end{cases} \quad (1)$$

对车轮建模:

收稿日期: 2004-01-30; 收修定稿日期: 2004-03-19

作者简介: 段旭东 (1978-), 男, 安徽合肥人, 硕士研究生, 主要研究方向为控制工程, 智能控制等。

万方数据

$$\begin{cases} \dot{X}_r M_r = N_r - N \\ \dot{Y}_r M_r = V_r - M_r g - V \\ \dot{\theta}_p J_r = C - N_r R \end{cases} \quad (2)$$

式(1)式(2)中第 1 个方程为小车、车轮在 X 轴方向上的运动方程;第 2 个方程为小车、车轮在 Y 轴方向上的运动方程;第 3 个方程为小车、车轮的转动方程。

式中, M_p 为车体质量, kg; M_r 为小轮质量, kg; J_p 为车体转动惯量, $\text{km} \cdot \text{g}^2$; J_r 为小轮转动惯量, $\text{km} \cdot \text{g}^2$; R 为小轮半径, m; L 为质心到转轴的距离, m; X_p 为车体质心水平位移; Y_p 为车体质心竖直位移; X_r 为小轮质心水平位移; θ_p 为车体摆角, rad; θ_r 为小轮转角, rad; C 为电机转矩, N/m; N_r 为地面对系统的横向作用力, N; N 为系统内部横向作用力, N; V_r 为地面对系统的支持力, N; V 为系统内部竖直作用力, N。

在 $\theta_p = 0^\circ$ 附近进行线性化处理, 进而得出系统的状态空间方程。

$$\begin{bmatrix} \dot{X}_r \\ \dot{V}_r \\ \dot{\theta}_p \\ \dot{\omega}_p \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & A_{23} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & A_{43} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_r \\ V_r \\ \theta_p \\ \omega_p \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ B_{21} \\ 0 \\ B_{41} \end{bmatrix} C$$

式中,

$$A_{23} = \frac{M_p^2 L (g + \ddot{Y}_r)}{M_p^2 L^2 - (M_p L^2 + J_p \ddot{\theta}_p + M_r + J_r (R^2 \cos \theta))}$$

$$A_{43} = \frac{-M_p (g + \ddot{Y}_r) (M_p + M_r + J_r (R^2 \cos \theta))}{M_p^2 L^2 - (M_p L^2 + J_p \ddot{\theta}_p + M_r + J_r (R^2 \cos \theta))}$$

$$B_{21} = \frac{1}{(M_p + M_r + J_r (R^2 \cos \theta)) R} - \frac{M_p L}{M_p + M_r + J_r (R^2 \cos \theta)}$$

$$B_{41} = \frac{M_p L + (M_p + M_r + J_r (R^2 \cos \theta)) R}{M_p^2 L^2 - (M_p L^2 + J_p \ddot{\theta}_p + M_r + J_r (R^2 \cos \theta))}$$

根据所得的状态空间方程, 运用现代控制理论可以实现二轮小车-倒立摆系统的平衡及其在保持倒立状态下的自由位置移动。

3 状态测量

建立了动态的状态空间方程之后, 需要相应的传感器来测量系统的状态, 再将这些测量值反馈回控制器以实现期望的反馈控制。

小车位移是通过光电码盘测量的车轮转动角度 θ_R 与摆杆的转动角度 θ_p 的差值 θ_{PR} 换算成弧度后乘以小车半径得到, 摆杆的转动角度 θ_p 的测量比小车的直线位移和速度的测量要困难许

多。由于倾角仪响频低, 难以满足系统实时性的要求, 而角加速度仪容易受到干扰的影响, 难以满足系统稳定性的要求, 选用陀螺仪来测量摆杆的角速度 ω_p , 再通过积分运算获得摆杆的转动角度 θ_p 。由于陀螺仪的测量误差比较大, 而且需要进行积分运算, 会出现误差累积, 使得系统对陀螺仪的测量误差十分敏感, 必须进行滤波。在实验中, 选用软件滤波, 经过反复试验最后在实际操作中, 在 DSP 过采样的基础上首先进行均值滤波和限幅滤波后, 再运用无限冲激响应 (IIR) 数字滤波的方法来抑制陀螺仪的噪声信号。在无限冲激响应 (IIR) 滤波器的设计中, 为了能够在滤掉噪声信号的同时尽可能不影响有用信号, 同时兼顾 DSP 的计算能力, 采用三阶 Butterworth 低通模拟滤波器原型 $G(S_N)$ 这种滤波器的最大特点就是在通带内具有最大平坦的幅频特性, 通过频率转换 $S_N = S/W_c$, 将其变成一个截止频率为 W_c 的模拟滤波器, 再利用冲激不变法将模拟滤波器转换成数字滤波器, 得到数字滤波器传递函数 $H(z)$, 来完成无限冲激响应 (IIR) 滤波器的设计, 无限冲激响应 (IIR) 滤波器对随机干扰信号的滤波, 大大减少了陀螺仪的测量误差, 从而基本上满足了小车-倒立摆控制要求。数字滤波器的滤波效果如图 2 所示。

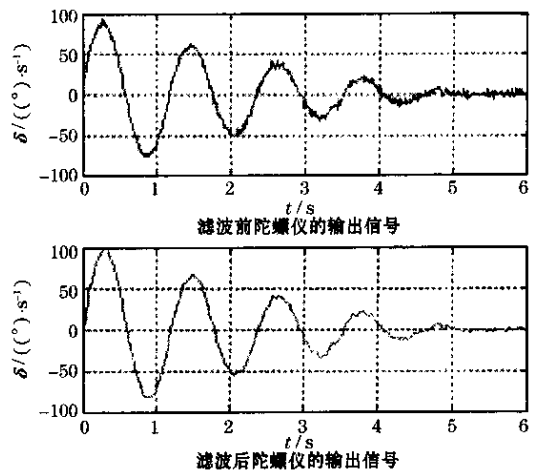


图 2 滤波前后效果比较图

4 控制器设计

1) 控制器的硬件设计 在控制器的设计中, 选用美国 TI 公司生产的 TMS320LF2407DSP 芯片, 因为该芯片不仅处理速度快, 操控灵活, 而且拥

有丰富的片内资源包括 10 位 16 通道片内 A/D 转换器、两个事件管理器模块 EVA 和 EVB，分别具有两个通用定时器、3 个比较单元和 8 路 PWM 输出、同步串口和异步串口、以及 CAN 模块等片内外设、6 个 8 位标准 I/O 口、大容量片内存储器、多种外围器件接口。可以说该芯片将实时处理能力和外设控制功能集于一身，使之特别适用于二轮小车-倒立摆系统测量值多、程序大、扩展功能多的特点和实时性强的控制要求。再以该芯片为核心，结合其他相关外围芯片，包括 Allegro 公司生产的全桥式 PWM 电机驱动芯片 A3952SB，MAXIM 公司生产的 SMITH 式脉宽调制 DC-DC 降压芯片 MAX831，北京方圆公司生产的 24 V 转 5 V 电压转换模块 SF5W，5 V 转 3.3 V 电压转换芯片 AS1117，3 V 精准电压芯片 REF193，64 K 高速外接存储器 IS61LV6414 及 SCHMITT 触发器 CD40106B 等构建了二轮小车 - 倒立摆系统的外围电路。运用电路设计计算机辅助软件 PROTELSE99 完成整个控制板的设计，较为完美地实现了小车-倒立摆的硬件系统。控制板的相关功能说明如图 3 所示。

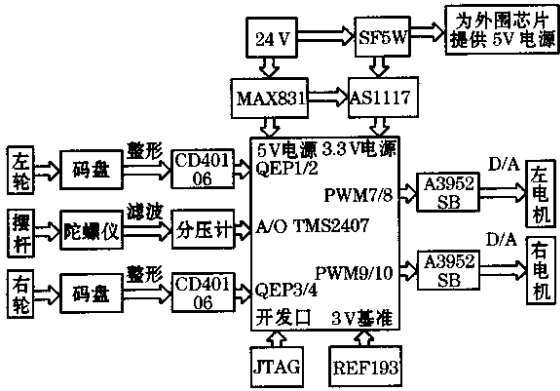


图 3 硬件功能说明图

2) 控制器的软件设计 控制器的软件设计采用的是 TI 公司提供的 CCS 软件开发系统。使用循环周期中断触发机制对系统进行高度实时的控制，每个周期中完成了对输入的模拟信号的软件滤波，实时计算反馈向量及给出控制量，实现反馈控制，其程序流程图如图 4 所示。

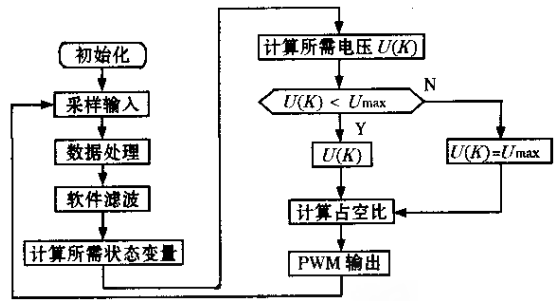


图 4 程序流程图

5 实验结果

在完成系统的硬软件设计后，就要在基于本文所建立的数学模型方程的基础上实现闭环控制。为了最大限度达到控制要求，根据小车倒立摆系统的控制要求和以下 3 个控制性能来决定闭环期望极点的选取：

- ① 反馈系统零状态响应的响应时间；
- ② 反馈系统零状态响应的最大超调量；
- ③ 小车倒立摆系统实际所能达到的控制能力。

首先，电机的实际控制能力决定了闭环期望极点实部不能取得离虚轴太远，否则电机的功率达不到，而倒立摆本身的控制要求决定了反馈系统零状态响应的响应时间应该尽可能的小，要有比较好的瞬态性能，闭环期望极点实部也不能取得离虚轴太近，要减少超调量，阻尼比 ζ 选取应该在 $\pm 0.5 \sim \pm 0.9$ 之间。通过以上分析，可以大致确定闭环主导极点实部的范围应在 $[-2 - 0.5]$ ，阻尼比 ζ 在 ± 0.707 左右，其他两个极点的实部离虚轴的距离应该是主导极点离虚轴距离的 4 倍以上，然后再通过 Matlab 仿真和实控测试后，最终选定的平衡倒立情况时的期望闭环极点为： $Z_1 = [-7.5 - 7.5i, -7.5 + 7.5i, -1.5 + 1.5i, -1.5 - 1.5i]$ ，相应的反馈矩阵 $K_1 = [-5.7869, -4.6846, -15.0684, -3.0847]$ ，其 Matlab 仿真结果如图 5 所示，最终选定的保持倒

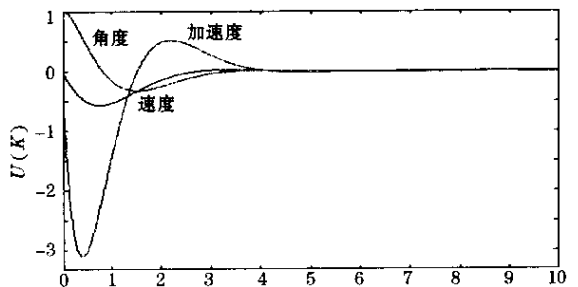


图 5 小车-倒立摆的倒立控制仿真图

立状态下的自由位置移动情况下的期望闭环极点为： $Z_2 = [-8.4 - 8.4i, -8.4 + 8.4i, -1.75]$ ，相应的反馈矩阵 $K_2 = [-3.07, -108.88, -20.82]$ 其 Matlab 仿真结果如图 6 所示。

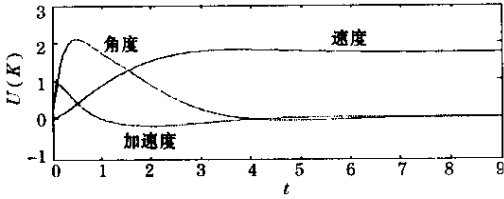


图 6 小车-倒立摆自由移动仿真图

从图中可以发现该期望极点已经比较好地实现了以上 3 点的要求。在实控中，小车倒立摆的

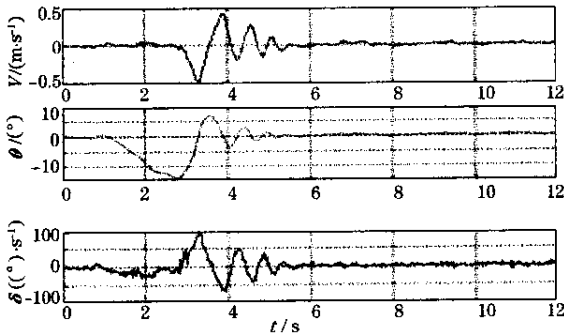


图 7 小车-倒立摆的倒立实控图

两台电机的电机常数并不完全一致，控制中不能简单地加上相同的电压，而是要根据两个电机各自的机电特性分别给出两个电机实际所需的电压 U_1 和 U_2 ，再分别加给两个电机以实现两个小轮的同步转动，且当电机转速比较大时，会难以获得大的力矩来实现倒立摆的控制，所以小车-倒立摆自由运行时的速度不能选得过快。超过电机最大转矩和死区范围内的力矩将由电机力矩上限和下限来取代。结合以上措施，得到小车-倒立摆在上面选定的闭环期望极点作用下的平衡倒立情况和保持倒立状态下的自由位置移动情况下的实控结果，如图 7，图 8 所示。

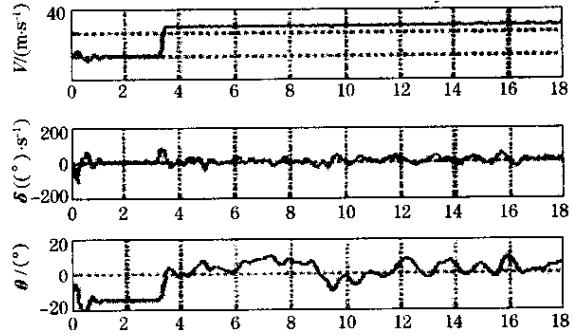


图 8 小车-倒立摆自由移动实控图

6 结 论

完成设计之后，小车可以在离线的情况下，迅速地实现倒立或保持倒立状态下的自由位置移动大约 15 min 左右。可以说二轮小车-倒立摆系统的软硬件设计基本上达到了预先设定的目标。下一步将在原来的系统上加入更好的算法，如鲁棒性和瞬态响应性能都比较好的控制或更似人化的模糊控制等，加入更多的接口，如红外线遥控接口，语音识别系统等来实现更多的功能。

参考文献：

- [1] 刘和平等. TMS320LF240x DSP 结构、远离及应用 [M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2001.
- [2] Felix G, Aldo D A, Silvio C, et al. JOE: A mobile inverted pendulum [J]. IEEE Transaction on Industrial Electronics, 2002, 49(1): 8-12.
- [3] Parkin R E. Applied robotiv analysis [M]. Cliff: Prentice Hall Englewood, 1991.
- [4] 吴昊, 秦志强, 朱学峰等. 直线性连接两级倒立摆控制器设计 [J]. 控制工程, 2003, 10(6): 497-499.
- [5] 宋君烈, 肖军, 徐心和. 倒立摆系统的 Lagrange 方程建模与模糊控制 [J]. 东北大学学报(自然科学版), 2002, 23(4): 333-337.

Dual-wheel Cart-inverted Pendulum System Based on DSP

DUAN Xu-dong, WEI Heng-hua, CHEN Xing

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

Abstract: Traditional inverted pendulums have many types. But all these types of the inverted pendulums are restricted in fix tracks. To control the inverted pendulums more unrestricted, more plenty and more challenging, a dual-wheel cart-inverted pendulum is designed by using the great function of DSP. The hardware which is in center of TMS320LF2407 and the control software of dual-wheel cart-inverted pendulum system are introduced emphazisely, by using modern control theory. Upright control of dual-wheel cart-inverted pendulum system is realized as well as and free movement while cart-inverted pendulum keep its upright.

Key words: cart-inverted pendulum system; DSP; TMS320LF2407; control of inverted pendulum; hardware system; software design

基于DSP的二轮小车-倒立摆系统

作者: 段旭东, 魏衡华, 陈星
作者单位: 中国科学技术大学, 自动化系, 安徽, 合肥, 230027
刊名: 控制工程 
英文刊名: CONTROL ENGINEERING OF CHINA
年, 卷(期): 2004, 11(6)
引用次数: 4次

参考文献(5条)

1. 刘和平 TMS320LF240x DSP结构、远离及应用 2001
2. Felix G. Aldo D A. Silvio C JOE: A mobile, inverted pendulum 2002(1)
3. Parkin R E Applied robotiv analysis 1991
4. 吴昊, 秦志强, 朱学峰 直线性连接两级倒立摆控制器设计 2003(6)
5. 宋君烈, 肖军, 徐心和 倒立摆系统的Lagrange方程建模与模糊控制[期刊论文]-东北大学学报(自然科学版) 2002(4)

相似文献(2条)

1. 学位论文 段旭东 基于DSP的二轮小车-倒立摆系统 2004

该论文详细介绍了一种自行研制的二轮小车倒立摆系统以及对这种倒立摆的多种方式的控制, 并对系统的设计和控制方法进行了相应的比较、分析和总结。全文一共包含六个部分, 从六个方面阐述了二轮小车倒立摆系统设计、加工、控制、分析的全过程。首先引言部分说明了设计这种二轮小车倒立摆系统的动机和目的, 对这种二轮小车倒立摆系统的特性加以分析、介绍, 并给出我们所希望达到的结果, 然后从四个方面分别是机电系统、DSP控制板、软件系统、数学模型建立对整个二轮小车倒立摆系统的设计内容进行了具体仔细的介绍。在阐述二轮小车倒立摆的机电系统这一部分中, 它包含构建小车倒立摆的基本部件。它包括机械部分、信号采集系统、直流力矩电机、DSP控制器和电源五个部分, 对于机械设计部分我们给出了设计的图纸和关键部件的主要尺寸。对于所用电子设备部分我们给出了元器件的型号、用途和主要的技术参数。对于二轮小车倒立摆的DSP控制板, 从设计原则和设计过程两方面介绍了二轮小车倒立摆的DSP控制板的开发。在给出设计内容之前, 对开发软件PROTEL99进行了简要的概述。在DSP控制板的设计内容中, 我们根据所实现的功能将DSP控制板划分成五个模块(DSP最小系统及JTAG接口模块、电机驱动模块、采样模块、电压转换模块、滤波和信号整形模块)来加以说明。在介绍各个模块时, 还给出了每个模块的设计原理和主要器件的性能参数。在所构建的硬件基础上, 我们从理论和实践两个方面介绍了软件系统的设计。首先对开发平台CC2000的功能加以说明, 再给出软件系统的流程图, 并对软件部分各个程序模块所实现的功能和作用进行详细的描述, 尤其是对陀螺仪输出信号的进行数字滤波的程序模块, 从设计原理、参数确定、滤波仿真、结果分析等几个方面加以详细描述。之后针对二轮小车倒立摆系统, 选用牛顿力学分析的方法进行受力分析, 再建立二轮小车倒立摆系统的动态数学模型, 并且给出在平衡点附近领域线性化后的状态空间方程和传递函数, 然后又进行了离散化处理, 建立离散数学模型, 并运用控制理论对系统的控制性能进行了相关分析, 提出了二轮小车倒立摆系统的控制策略: 闭环极点配置和LQR控制, 并且对控制策略进行了分析, 计算了相应的控制器参数。然后运用Matlab软件对上述两种控制策略分别进行了仿真, 并对仿真结果进行分析、比较。之后对二轮小车倒立摆系统进行了实际控制, 结合控制结果, 对控制器的选择和参数的选择做出了最终的选择。该文最后对二轮小车倒立摆系统的构建和控制进行了简要的总结, 对整个系统的开发及性能做出评价, 指出了二轮小车倒立摆系统的成功之处和尚待改进的部分, 然后提出了进一步的研究内容。

2. 学位论文 关世勇 拟人智能控制算法在倒立摆系统中的应用研究 2006

本文根据充分利用拟人智能控制算法鲁棒性强的特点和遗传算法良好的全局收敛性的特点, 采用遗传算法寻优参数的拟人智能控制律来解决二轮小车倒立摆系统的控制问题。文章在设计中添加了DSP和PC机实时通信模块, 可以采用有线和无线两种方式使得DSP采集的数据可以实时传给PC机, 并在PC机端的用户界面中显示, 大大地提高了实验效率。同时, 为了整个系统的安全稳定工作, 新添加了一个接收模块, 在该模块中应用6N137芯片将DSP与PC机双向隔离。

引证文献(4条)

1. 阮晓钢, 刘江, 狄海江, 李欣源, 赵建伟 两轮自平衡机器人系统设计、建模及LQ控制[期刊论文]-现代电子技术 2008(18)
2. 薛彦诚, 魏衡华 二轮小车倒立摆系统避障控制研究[期刊论文]-计算机仿真 2008(06)
3. 孙汉旭, 曹志杰, 贾庆轩 基于CANopen协议的双轮移动倒立摆控制系统[期刊论文]-机电工程 2008(03)
4. 关世勇, 魏衡华, 陈星 拟人智能控制在二轮小车倒立摆系统中的应用[期刊论文]-控制工程 2006(05)

本文链接: http://d.g.wanfangdata.com.cn/Periodical_jczdh200406013.aspx

下载时间: 2010年5月1日