

基于遗传算法 PID 的旋转式倒立摆控制

柳志远, 张湘平

(国防科技大学 机电工程与自动化学院, 湖南 长沙 410073)

摘要: 旋转式倒立摆系统是一个多变量、强非线性、强耦合的不稳定系统, 是人们检验、比较各种控制理论和方法的理想试验平台, 国内外许多机构对它进行了广泛的研究, 如何对其进行有效控制一直是控制界的一大热点。分析了旋转式倒立摆的数学模型, 然后用 Matlab 建立了它的仿真模型, 利用 PID 控制器对其进行控制。为了避免手工整定 PID 参数的繁琐过程, 用遗传算法对旋转式倒立摆 PID 控制器的控制参数进行寻优, 并以此来控制旋转式倒立摆。仿真结果表明利用遗传算法寻优设计的 PID 控制器来控制旋转式倒立摆可以获得很好的动态品质和稳定性。

关键词: 旋转式倒立摆; PID 控制器; 遗传算法

中图分类号: TP273

文献标识码: A

文章编号: 1673-629X(2008)02-0180-04

Control of Revolving Inverted Pendulum Based on GA PID Controller

LIU Zhi-yuan, ZHANG Xiang-ping

(College of Electromechanical Engineering and Automation,
National University of Defense Technology, Changsha 410073, China)

Abstract: Revolving inverted pendulum is an unstable system with multi-value, strong nonlinearity and strong coupling. It is always the ideal research platform, many organizations have done lots of works. How to control it effectively is a focus of control field. In this paper, analyze the math mode of revolving inverted pendulum, then build its emulator model use Matlab and control it use PID controller. It is an effective approach to use GA to find the global optima of the three parameters for a PID controller of a revolving inverted pendulum. The simulation result shows that the PID controller based on GA has a good dynamic quality and stability.

Key words: revolving inverted pendulum; PID controller; GA

0 引言

旋转式倒立摆系统是一个强非线性、强耦合的不稳定系统, 是检验各种控制理论和方法的典型装置, 控制过程中的许多关键问题, 如非线性问题、鲁棒性问题、随动问题、镇定问题和跟踪问题等都可以以旋转式倒立摆为例进行研究, 旋转式倒立摆系统稳定效果非常明了, 可以通过摆动角度、位移和稳定时间直接度量, 控制性能好坏一目了然。并且, 由于倒立摆系统的运动特性与控制火箭稳定飞行和双足步行机器人关节运动有很大相似性, 因此研究倒立摆具有重要的实践意义, 一直受到国内外学者的广泛关注。

PID 控制作为一种经典控制器已经广泛应用于各种工业过程控制系统中。PID 控制器通过调整 k_p ,

k_i , k_d 这 3 个参数来使系统的控制性能达到给定的要求, 从优化的角度来说, 就是在 k_p , k_i , k_d 这 3 个变量的参数空间寻找最优值, 使系统的在某个特定条件下的控制性能达到最优, 而 k_p , k_i , k_d 这 3 个变量的参数空间是很大的, 用经验规则加试凑的方式来调整 PID 控制参数, 往往费时且难以满足控制要求, 而基于其它的一些解析优化法也常常因对象模型的不确定而难以得到全局最优解。

遗传算法为 PID 参数的优化整定提供了新的途径。遗传算法是一种公认的具有全局最优搜索能力的优化方法, 它只依赖于适应度函数, 不需知道对象的全部信息, 这样即使在对象模型不确定的情况下, 它仍然可以根据对象的输出情况对 k_p , k_i , k_d 进行优化, 而且遗传算法的群体优化机制使得它能找到全局最优解^[1-3]。

文中为旋转式倒立摆系统设计了一个基于遗传算法的 PID 控制器, 利用遗传算法对控制器的 3 个参数进行寻优, 并以此来控制旋转式倒立摆, 仿真结果表明, 用此方法对旋转式倒立摆进行控制, 效果较好。

收稿日期: 2007-05-24

作者简介: 柳志远(1981-), 男, 河北沧州人, 硕士研究生, 研究方向为控制理论及应用; 张湘平, 教授, 研究方向为系统辨识与建模, 制导、控制与仿真, 武器系统小子样试验分析与鉴定, 大型复杂系统可靠性分析与评估等。

1 旋转式倒立摆的数学模型

在忽略各种摩擦等影响情况下,旋转式倒立摆的力学分析示意图如图 1 所示。

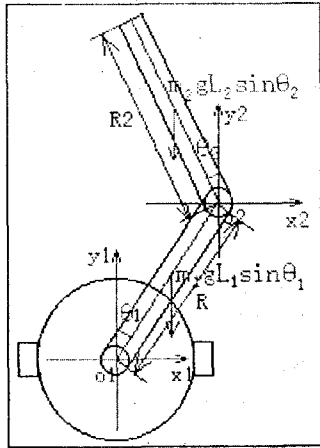


图 1 力学分析示意图

对摆杆,在非惯性系 $o2-x2-y2$ 中有

$$J_2\ddot{\theta}_2 + f_2\dot{\theta}_2 = M_{12} + m_2gL_2\sin\theta_2 \tag{1}$$

其中, M_{12} 为旋臂对摆杆的力矩,为惯性力矩,角度、力矩顺时针为正。

$$M_{12} = m_2L_2[R\ddot{\theta}_1\sin(\theta_1 - \theta_2) - R\dot{\theta}_1^2\cos(\theta_1 - \theta_2)] \tag{2}$$

对旋臂,在惯性系 $o1-x1-y1$ 中,有

$$J_1\ddot{\theta}_1 + f_1\dot{\theta}_1 = M_0 + M_{21} + m_1gL_1\sin\theta_1 \tag{3}$$

式中, M_0 为电机输出转矩,

$$M_0 = K_m(u - K_e\dot{\theta}_1) \tag{4}$$

M_{21} 为摆杆对旋臂的作用力矩,有

$$M_{21} = m_2gR\sin\theta_1 - m_2R^2\ddot{\theta}_1 - m_2RL_2\ddot{\theta}_2\sin(\theta_1 - \theta_2) - m_2RL_2\dot{\theta}_2^2\cos(\theta_1 - \theta_2) \tag{5}$$

综上所述,消去中间变量 M_{12} 和 M_{21} ,并将 M_0 代入,得非线性数学模型为:

$$\begin{bmatrix} J_1 + m_2R^2 & m_2RL_2\cos(\theta_1 - \theta_2) \\ m_2RL_2\cos(\theta_1 - \theta_2) & J_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{\theta}_1 \\ \ddot{\theta}_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} f_1 + K_mK_e & m_2RL_2\sin(\theta_1 - \theta_2)\dot{\theta}_2 \\ m_2RL_2\sin(\theta_2 - \theta_1)\dot{\theta}_1 & f_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\theta}_1 \\ \dot{\theta}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} K_m \\ 0 \end{bmatrix} u + \begin{bmatrix} m_1gL_1\sin\theta_1 + m_2gR\sin\theta_1 \\ m_2gL_2\sin\theta_2 \end{bmatrix} \tag{6}$$

根据非线性模型,令 $\theta_1 \rightarrow 0, \theta_2 \rightarrow 0$,则有线性化模型为:

$$\begin{bmatrix} J_1 + m_2R^2 & m_2RL_2 \\ m_2RL_2 & J_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \ddot{\theta}_1 \\ \ddot{\theta}_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} f_1 + K_mK_e & 0 \\ 0 & f_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \dot{\theta}_1 \\ \dot{\theta}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (m_1L_1 + m_2R)g & 0 \\ 0 & m_2gL_2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \theta_1 \\ \theta_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} K_m \\ 0 \end{bmatrix} u \tag{7}$$

其中各主要参数见表 1^[4]。

表 1 主要机械参数

旋臂质量 m_1	0.200kg	摆杆质量 m_2	0.052kg
旋臂长度 $R_1(R)$	0.20m	摆杆长度 R_2	0.25m
旋臂质心到转轴距离 L_1	0.10m	摆杆质心到转轴距离 L_2	0.12m
电机力矩-电压比 K_m	0.0236 N·m/V	电机反电势-转速比 K_e	0.2865 V·S
旋臂绕轴转动摩擦力矩系数 f_1	0.01 N·m·S	摆杆绕轴转动摩擦力矩系数 f_2	0.001 N·m·S
旋臂绕轴转动惯量 J_1	0.004kg·m ²	摆杆绕轴转动惯量 J_2	0.001kg·m ²

2 遗传算法的基本思想

遗传算法 (Genetic Algorithms, 简称 GA) 是美国 Holland 教授于 1962 年提出的。它模拟生物界自然选择和自然遗传机制,是一种并行随机搜索方法。它从某一随机产生的或特定的初始解集出发,按照一定的操作规则,如选择、复制、交叉、变异等,不断地迭代计算以得到新一代解集,并根据给它的适应度,按照适者生存和优胜劣汰的原则,引导搜索过程向“最适应环境”的个体(最优解)逼近,逐代演化出越来越好的近似解,最终收敛到问题的最优解或满意解^[5]。

遗传算法的基本操作是复制、交叉和变异。复制操作选择旧种群中生命力强的个体位串,复制到新种群中。其算子有轮赌选择、最佳个体保持、排序选择等。交叉操作从种群中任选两个染色体,在一点或多点交叉换位。它决定了遗传算法的全局搜索能力,是产生新个体的主要方法。变异操作以很小的概率随机地改变个体位串中某一位的值。它使遗传算子具有局部随机搜索能力,并能维持群体多样性,使问题得到较高质量的优化解。遗传算法能在解空间进行高效启发式的全局搜索,而且它对问题的依赖性小,计算效率高。这些特点使得遗传算法适合于复杂非线性系统的控制参数寻优。

3 用遗传算法整定 PID 控制参数

根据旋转式倒立摆系统的各部分结构及数学模型,可以用 Simulink 建立如图 2 所示的仿真模型,其中控制器封装在 PID 模块中,旋转式倒立摆系统封装在 IP 模块中。

根据遗传算法的基本原理,可以在 Matlab 中按步骤进行遗传算法的 PID 控制参数的整定^[6-9]。

(1)确定寻优参数及其编码。

与二进制编码相比,实数编码在求解复杂函数的优化问题时效率和精度更高。因此文中采用实数编码机制对 PID 控制器的 3 个参数 k_p, k_i, k_d 进行编码,

它们的范围分别选为 $[-120, -90]$, $[-2, 0]$, $[-2, 0]$ 。在 Matlab 中, 每个参数的精度可达小数点后四位。

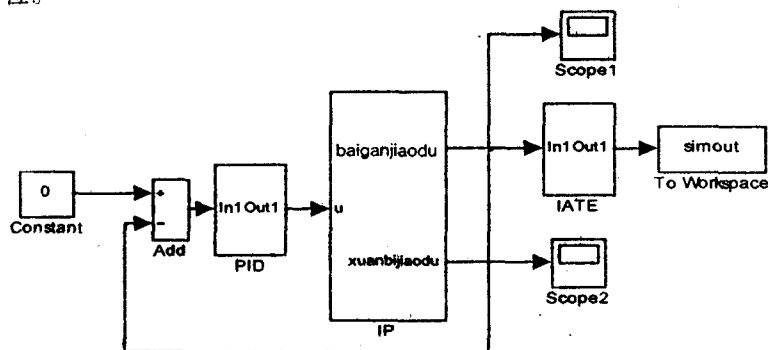


图 2 倒立摆仿真模型

(2)生成初始种群,选择遗传代数。

为了提高遗传算法的搜索范围,从而得到全局最优解,随机生成 80 个初始个体。考虑到寻优的实际要求和遗传算法的效率,把遗传代数设为 100 代。

(3)确定适应值函数。

常见的优化目标函数 J 有如下几种:IE, ISE, ITSE, ISTSE, IAE, ITAE, ISTAE 等。通过比较上述各指标的实用性和选择性,ITAE 比较理想。所以选择 ITAE 作为控制系统优化的目标函数,即目标函数 J 为:

$$J = \int_0^{\infty} t |e(t)| dt$$

选 ITAE 作为优化 PID 控制器参数的目标函数,并用遗传算法来寻找最优解,实际是将 ITAE 最佳调节律、PID 控制和遗传算法三者结合起来。ITAE 最佳调节律对误差 $e(t)$ 加以时间 t 的权,在过渡过程之初,权 t 对 $e(t)$ 的影响极小;在中频段,随着权 t 的增加,逐渐加强对 $e(t)$ 的权 t 的作用,以抑制误差的增大,促进它加快收敛。所以 ITAE 最佳调节律具有快速而又平稳的过渡过程^[5,10]。

把待寻优的 3 个 PID 控制器参数值设置到图 2 的 PID 模块中,设 t 为 60s,运行图 2 的仿真模型,得到性能指标 J ,并计算适应值 f 。这个过程可以用如下的 Matlab 函数实现:

```
function [sol,f]=fit(sol,options)
global kp;
global ki;
global kd;
kp=sol(1);
ki=sol(2);
kd=sol(3);
```

```
sim('dlbpid'); %运行仿真模型
[m,n]=size(simout);
J=simout(m,1); %提取性能指标
```

```
f=1/(J+1e-4); %计算适应值
```

当参数 kp, ki, kd 的大小改变时,引起性能指标 J 的变化,从而适应值 f 变化。

(4)对 80 个个体进行遗传操作。

按步骤 3 分别计算每代种群中 80 个个体的适应值 f , 然后进行遗传操作。其中,复制算子采用轮赌选择算子。交换和变异概率越大,算法探测能力越强,但个体的平均适应度值波动越大;反之,则算法的开发能力越强,较优个体不易被破坏,所以在此交叉算子设为 0.80。变异算子采用自适应算子。

(5)重复第 4 步,直到完成 100 代操作。

用 Matlab 编程实现上述过程,运行后即可得到 PID 控制器的寻优参数。

4 仿真结果

在 Matlab 命令主窗口运行程序,得到 PID 控制器的 3 个优化参数: $kp = -107.7240$, $ki = -0.8875$, $kd = -0.1408$ 。

把寻优得到的参数写入仿真模型,运行时间 t 设为 60s,运行仿真模型,可得到悬臂和摆杆的输出曲线,如图 3、4 所示。

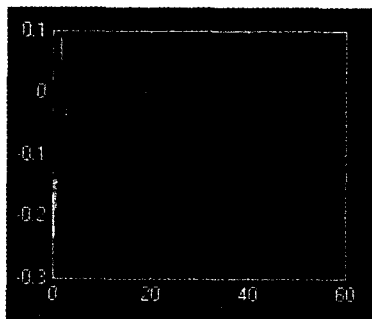


图 3 旋臂曲线

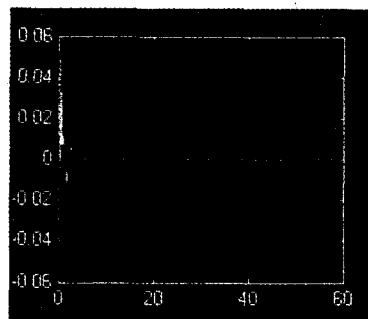


图 4 摆杆曲线

可以看出,寻优得到的参数能使系统取得较好的控制效果,稳态误差非常小,超调和稳定时间也都控制在可接受的范围内。

5 结论

分析了旋转式倒立摆的模型并设计了旋转式倒立摆系统的 PID 控制器,然后利用遗传算法进行 PID 参数寻优。实验证明,遗传算法的操作简单、并行计算能力强、具有较强的搜索能力,利用遗传算法得到的控制器参数,控制系统性能良好,避免了手工整定的繁琐过程。基于遗传算法设计 PID 控制器是一种简单而有

效的方法。因此在控制领域中可以利用遗传算法的全局寻优能力去完成控制参数的自整定。对于遗传算法在控制中应用的一个难题是:如何实现控制参数的在线实时调整?这一点极大地制约着遗传算法在控制中的应用,也将是今后研究的方向。

参考文献:

- [1] 席育棕. 基于遗传算法的 PID 参数整定与优化[J]. 工程建设与设计, 2005(8): 91-92.
- [2] 陈祥光. 遗传算法在 PID 控制器参数寻优中的应用研究[J]. 计算机仿真, 2001(3): 30-32.
- [3] 宋胜利, 左敦稳, 王珉, 等. 基于遗传算法寻优的 PID 控制技术及应用[J]. 系统工程理论与实践, 2003(9): 135-139.
- [4] 科大创新股份有限公司. XZ-II 型旋转式倒立摆系统实验指导书[R]. [出版地不详]: 科大创新股份有限公司自动化分公司, 2002.

- [5] 周德俭, 吴斌. 智能控制[M]. 重庆: 重庆大学出版社, 2005.
- [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.
- [7] 赵亮, 付兴武. 基于遗传算法的 PID 控制及其 MATLAB 仿真[J]. 微计算机信息, 2004, 20(5): 19-20.
- [8] Zuo Xin, Zhang Jun feng, Luo Xiong lin. Tuning PID Parameters Based on a Combination of the Expert System and the Improved Genetic Algorithms[J]. Petroleum Science, 2005, 2(4): 71-76.
- [9] Deb K. Genetic algorithms for function optimization[C]// Herrera F, Verdegay J. In Genetic algorithms and soft computing. Heidelberg: Physica-Verl., 1996.
- [10] 张福波, 王国栋, 张殿华, 等. PID 控制器参数的 ITAE 最佳设定公式[J]. 东北大学学报, 2005, 26(8): 755-757.

(上接第 176 页)

或忽略外部的同步脉冲。在同步脉冲 FSX 有效后, DX 引脚连续传输了两个 8 位数据 76 和 3d。

4 结束语

文中所完成的同步串口电路是采用 Verilog 硬件描述语言设计的, 并利用 Candence 公司的 NCverilog 仿真工具进行了功能仿真, 保证了同步串口的设计正确性。

该同步串口电路采用了 IP 核的方法设计, 既可以单独使用, 又可以嵌入到 ASIC 或 FPGA 的电路设计中去, 增加了电路设计的通用性和可移植性; 重用时只需要修改少量的参数, 就支持不同型号的数字信号处

理器, 大大缩短了产品的开发周期。

参考文献:

- [1] 陶伟, 唐玉兰, 于宗光. 16 位高速 DSP 增强型同步串行口的设计[J]. 微电子学, 2006, 36(1): 94-96.
- [2] 马庆春, 迟宝全. TMS320C54XX 系列 DSP 的 McBSP 串行接口技术及应用[J]. 自动化技术与应用, 2006, 25(2): 52-55.
- [3] Texas Instruments. TMS320C3x User's Guide[M]. [s.l.]: Texas Instruments, 1997.
- [4] 郑红, 吴冠. TMS320C54x DSP 应用系统设计[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2003.
- [5] Cileti M D. Advanced Digital Design with the Verilog HDL[M]. 北京: 电子工业出版社, 2006.

(上接第 179 页)

4 结束语

汽车试验集成系统是用于实现远程通信, 现场试验数据收集存储、整理分类、计算统计、报表生成、统一管理、资源共享、决策支持的信息系统。文中主要针对其中的试验数据采集子系统的数据库设计要求引入了基于树形结构的概念^[9]。它的应用将实现安徽江淮汽车企业汽车试验数据管理的自动化、规范化、智能化, 并减少了因日后汽车产品制造技术的提升与汽车检测试验方法的改进所带来的软件维护工作量。

参考文献:

- [1] 姚文琳, 王存刚. 基于 Oracle 的分布式数据库设计与技术[J]. 计算机工程, 2006, 32(20): 89-91.
- [2] 萨师焯, 王珊. 数据库系统概论[M]. 第 3 版. 北京: 高等

教育出版社, 2000.

- [3] 王喜珍, 陈步云. 基于树形结构的地震数据库系统设计方法[J]. 地震学报, 2005, 27(1): 96-101.
- [4] 史永胜, 宋云雪. 故障知识库中树状结构的表示与实现[J]. 计算机工程, 2002, 28(10): 236-237.
- [5] 张选平, 雷咏梅. 数据结构[M]. 北京: 机械工业出版社, 2002.
- [6] Vieira R. Professional SQL Server 2000 Programming[M]. [s.l.]: Wrox Press, 2000.
- [7] 石伟未, 谭秀娟. 房产信息系统数据库设计中的三库分离技术[J]. 计算机工程, 2006, 32(5): 58-59.
- [8] 刘洋, 王斌. 一种面向应用扩展的树状数据库设计模型[J]. 计算机工程与设计, 2006, 27(22): 4074-4080.
- [9] Pressman R S. Software Engineering: A Practitioner's Approach[M]. [s.l.]: McGraw-Hill, 2000.