

引用格式:王美刚,白建云. 基于遗传算法优化的双回路模糊控制倒立摆系统[J]. 科学技术与工程, 2018, 18(13): 92—97
Wang Meigang, Bai Jianyun. Dual loop fuzzy control inverted pendulum system based on genetic algorithm optimization[J]. Science Technology and Engineering, 2018, 18(13): 92—97

基于遗传算法优化的双回路模糊控制倒立摆系统

王美刚 白建云
(山西大学自动化系,太原 030013)

摘要 通过遗传算法、模糊控制、PID 的结合,对直线一级倒立摆的平衡控制问题进行了优化控制。首先用牛顿-欧拉法建立倒立摆的动力学模型,得出系统的传递函数和状态空间表达式,分析系统的稳定性和可控性。以此为基础,先设计了 PID 单回路和双回路控制器;然后用遗传算法优化 PID 参数;再用优化的参数设计双回路模糊 PID 控制器;并用 MATLAB 对系统进行了仿真。纵向和横向控制方法的对比分析表明:该方案控制效果最好,能同时控制角度和位移;其参数可在最优 PID 初值的基础上在线修改,实现最佳调整,使对象具有良好的静态和动态性能。
关键词 倒立摆 PID 双回路 模糊控制 遗传算法
中图法分类号 TP273.4; **文献标志码** A

倒立摆的研究^[1-3]具有重要的工程背景:现在流行的智能平衡车、能够站立行走的机器人、飞行器若干对象的控制无不蕴含了倒立摆平衡控制问题。这些相关热门课题的学者,熟悉和精通倒立摆的控制很有必要。倒立摆作为一个经典的绝对不稳定系统是学校优秀的教学实验平台,通过它既可以验证许多经典控制理论和算法,也可以试验新的控制方法的正确性与可行性。

近年来,研究倒立摆的文献层出不穷,但方法都属于经典控制理论、现代控制理论、智能控制理论的研究范畴。典型的有文献[4—6]将小车的位置作为外环,摆杆角度作为内环设计了双闭环系统,小车根据摆杆角度的变化调整自己移动的方向和速度,控制效果能满足要求;但实际操作时计算稍显复杂,需要按照串级控制方法先整定内回路,然后再整定外回路;文献[7,8]运用二次型最优控制 LQR 算法,求取反馈矩阵 K 的值,寻找到最优控制律 u ,使系统性能指标为最小值;但控制的关键是根据期望性能选取适当的 Q 和 R ;文献[9]建立了三层 BP 神经网络,用 LQR 产生数据训练神经网络,前向传播计算神经网络输出,反向传播使用梯度下降法调整各层权值减小期望输出与实际输出之间的误差,往往训练时间较长。目前许多智能算法,很多都还是以 PID 作

为核心实现对参数最佳整定、改善控制效果^[10]。
倒立摆控制的关键是使得摆杆不倒,小车在一定范围内移动。考虑在工业过程控制和运动控制中,使用最为成熟、算法简单可靠的还是 PID 算法,笔者特别设计了 PID、遗传算法和模糊控制有机结合的系统。首先用牛顿学的方法对固高一阶直线倒立摆进行建模,求解倒立摆的运动方程;进而得到系统的传递函数和状态空间表达式;随后分析了系统的稳定性和可控性。在此基础上,先设计出 PID 单回路和双回路控制器,然后以 ITAE 性能指标作为目标函数用遗传算法对前面设计的双回路 PID 参数寻优,最后在最优参数基础上设计了双回路模糊 PID 控制器,并用 MATLAB/Simulink 工具对系统进行了仿真,对实验结果进行纵向和横向充分性对比分析。

1 建模

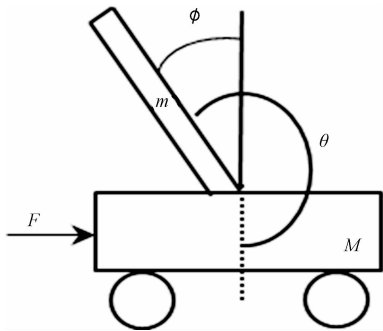
倒立摆系统^[11]的研究,必须把空气阻力等次要因素忽略后,作为一个典型的运动刚体系统(如图 1 来)分析,可以建立惯性坐标系。根据倒立摆已知条件列出动力学方程,得出对象的数学模型。

由图 2 倒立摆小车受力分析图,得到式(1)。
$$M\ddot{x} = F - b\dot{x} - N \tag{1}$$

以小车水平向右运动方向为正,对摆杆进行水平方向的受力分析可以得到式(2)

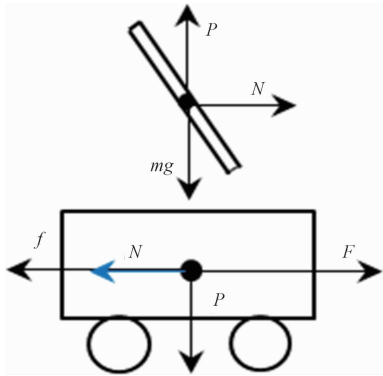
$$N = m \frac{d^2(x + l\sin\theta)}{dt^2} \tag{2}$$

2017 年 11 月 8 日收到 “十三五”全军共用信息系统装备预先
研究项目(31512080305)资助
第一作者简介:王美刚(1977—),男,讲师。研究方向:智能控制。
E-mail:wmeigang@sina.com。



该倒立摆参数为:小车质量 M 为 1.096 kg,摆杆质量 m 为 0.109 kg,小车的摩擦系数 b 是 $0.1\text{ N}\cdot(\text{m}\cdot\text{s})^{-1}$,摆杆质心距固定端的距离 l 是 0.25 m,摆杆的转动惯量 I 是 $0.002\,23\text{ kg}\cdot\text{m}^2$,小车驱动力为 F ,小车的位移 x ,摆杆与垂直负方向(向下)的夹角为 θ ,摆杆与垂直正方向(向上)的夹角为 ϕ

图 1 倒立摆物理模型
Fig. 1 Physical model of the inverted pendulum



N 是小车和摆杆水平相互作用力, P 是垂直相互作用力
图 2 受力分析图

Fig. 2 Force analysis diagram

对摆杆进行垂直向的受力分析,可以得到式(3)。

$$P - mg = m \frac{d^2(l\cos\theta)}{dt^2} \tag{3}$$

由力矩平衡原理得到式 4。

$$-Pl\sin\theta - Nl\cos\theta = I\ddot{\theta} \tag{4}$$

由式(1)~式(4)得到两个运动方程式(5)、式(6)。

$$(M+m)\ddot{x} + b\dot{x} + m\ddot{\theta}\cos\theta - ml\ddot{\theta}\sin\theta = F \tag{5}$$

$$(I+ml^2)\ddot{\theta} + mgl\sin\theta = -ml\ddot{x}\cos\theta \tag{6}$$

设 $\theta = \pi + \phi$, 在 ϕ 与 1 比较很小,即 $\phi \ll 1$ 的条件下,可以进行如式(7)所示近似。

$$\cos\theta = -1, \sin\theta = -\phi, \dot{\theta}^2 = 0 \tag{7}$$

用 u 来表示对象的输入力 F ,将系统运动方程化简后得到如式(8)所示结果。

$$\begin{cases} (I+ml^2)\ddot{\phi} - mgl\phi = m\ddot{x} \\ (M+m)\ddot{x} + b\dot{x} - ml\ddot{\phi} = u \end{cases} \tag{8}$$

拉氏变换后求出 ϕ 和 x 的传递函数:

$$G_1(S) = \frac{\Phi(s)}{U(s)} = \frac{\frac{mls^2}{q}}{s^4 + \frac{b(I+ml^2)}{q}s^3 - \frac{(M+m)mgl}{q}s^2 - \frac{bmgl}{q}s} \tag{9}$$
$$G_2(S) = \frac{X(s)}{U(s)} = \frac{\frac{(I+ml^2)s^2 - gml}{q}}{s^4 + \frac{b(I+ml^2)}{q}s^3 - \frac{(M+m)mgl}{q}s^2 - \frac{bmgl}{q}s} \tag{10}$$

式中, $q = [(M+m)(I+ml^2) - (ml)^2]$,整理得到以下方程:

$$\begin{bmatrix} \dot{x} \\ \ddot{x} \\ \dot{\phi} \\ \ddot{\phi} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{-(I+ml^2)b}{I(M+m)+Mml^2} & \frac{m^2gl^2}{I(M+m)+Mml^2} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & \frac{-mlb}{I(M+m)+Mml^2} & \frac{mgl(M+m)}{I(M+m)+Mml^2} & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ \dot{x} \\ \phi \\ \dot{\phi} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{I+ml^2}{I(M+m)+Mml^2} \\ 0 \\ \frac{ml}{I(M+m)+Mml^2} \end{bmatrix} u \tag{11}$$

$$y = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x \\ \dot{x} \\ \phi \\ \dot{\phi} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} u \tag{12}$$

2 系统分析

分析系统开环脉冲响应,发现小车和摆杆的响应都是发散的,表明系统自身是不稳定的。

根据相关控制理论,对于连续的时间系统,系统状态完全可控的条件为:当且仅当向量组 $B, AB, \dots, A^{n-1}B$ 是线性无关的或 $n \times n$ 维矩阵 $Uc = [B \ AB \ \dots \ A^{n-1}B]$ 的秩为状态变量的维数 n 。系统的输出可控性的条件为:当且仅当矩阵 $Uo = [CB \ CAB \ CA^2B \ \dots \ CA^{n-1}B \ D]$ 的秩等于 y 的维数^[12]。经计算 $Uc = \text{ctrb}(A, B)$, $\text{rank}(Uc) = 4$; $\text{rank}(Uo) = 2$,即输出完全可控性矩阵的秩等于输出向量维数,因此系统必然可控,能设计控制器维持系统稳定。

3 系统设计

先设计了 PID 单回路和双回路控制器,然后用遗传算法优化 PID 参数,再用优化的参数设计双回

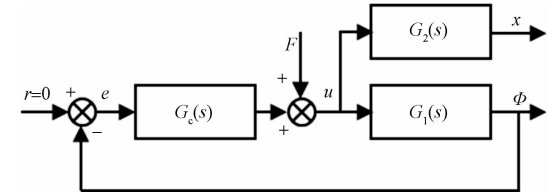
路模糊 PID 控制器,并用 MATLAB 对系统进行了仿真,对控制结果进行对比分析。

3.1 单回路和双回路控制

倒立摆系统有一个输入量为小车的作用力 F , 两个输出量是摆杆的角度 ϕ 和小车的位移 x , 其中摆杆的角度 ϕ 是主要被控量。单回路控制框图如图 3 所示。设参考输入 $r=0$,图 3 框图可以整理为框图 4,由图 4 求出摆杆角度闭环传递函数为 $G_3(s)$

$$= \frac{G_1(s)}{1 + G_c(s)}$$

由于 PID 控制器单输入单输出的特点,只能实现摆杆角度闭环控制,小车位移不能实现闭环,未能得到有效控制,因此会沿着一个方向移动,碰到限位模块才会停止。



r 为参考输入, $G_c(s)$ 为控制器, $G_1(s)$ 为摆杆角度开环传递函数, $G_2(s)$ 为小车位移传递函数, 摆杆在受到扰动时能够回到原先的位置, 角度 ϕ 的控制构成闭环控制

图 3 单回路控制框图

Fig. 3 Single loop control block diagram

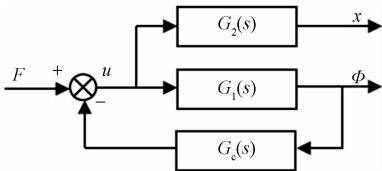


图 4 整理后的单回路控制框图

Fig. 4 Modified single loop control block diagram

上述单回路控制无法实现对小车位移的控制,所以在摆杆角度单回路基础上增加一个小车位移控制回路,从而构成摆杆角度和小车位移双回路控制,双回路控制^[13]结构简单、回路独立,参数调整方便。设计双回路系统如图 5,两个回路 PID 参数一起调整,其中一个回路的参数变化会对另一回路造成影响。所以要进行多次调整,但没有烦冗的计算过程。pid 控制器控制小车位移, pid1 控制器控制摆杆角度,仿真结果如图 9 所示, pid 控制器中, $k_p = -120$, $k_i = 0$, $k_d = -80$; pid1 中, $k_p = 450$, $k_i = 0$; $k_d = 70$ 。小车位移和摆杆角度在 5 s 后均达到稳定,小车位移超调不到 0.07,摆杆角度超调不到 0.03。

3.2 遗传算法对 PID 参数寻优

双回路 PID 控制器参数需要多次调整才能达到满意的控制效果,但不确定是对象的最理想参数,参照文献[14,15]用神经网络优化 PID 参数,文献

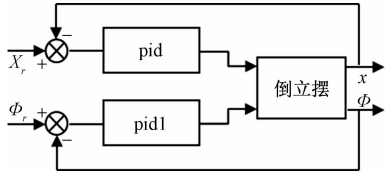


图 5 双回路控制框图

Fig. 5 Dual-loop control block diagram

[16—18]用遗传算法对 PID 参数寻优,设想可以在该参数基础上利用智能控制理论对原参数优化,考虑到遗传算法能同时从若干初始点开始,搜索最优解,最后采用文献[19]提到的遗传算法: gaopt() 函数解决参数最优化的问题;该函数不受模型限制,调用方便,不需要了解染色体如何选择,无需了解如何进行交叉、变异、选择等问题,目标函数采用偏差绝对值与时间乘积的积分 (ITAE) 见式 (13) 作为参数选择的目标函数,其中 $e_1(t)$ 是小车位移偏差, $e_2(t)$ 为摆杆角度偏差,用 MTALAB 语言描述出目标函数,程序如下:

```
function[sol,y]=youhua(x,options)
sol=x; assignin('base','Kp',x(1));
assignin('base','Kd',x(2)); assignin('base','Ki',x(3));
assignin('base','Kp1',x(4)); assignin('base','Kd1',x(5));
assignin('base','Ki1',x(6));
[t_time,a,y_out]=sim('youhua.mdl',[0,10]); y=-y_out(end,1);
```

运用遗传算法查找使得 ITAE 指标最佳,部分程序如图 6 可得出最优 PID 控制器参数: $k_p = -149$, $k_i = 0$, $k_d = -115$; pid1 中, $k_p = 500$, $k_i = 0$, $k_d = 57$,在这组参数作用下,得到小车位移 x 和摆杆角度 ϕ 的响应曲线如图 9,和原参数响应比较超调量减小,调节时间缩短。

$$J = \int_0^{\infty} t (|e_1(t)| + |e_2(t)|) dt \tag{13}$$

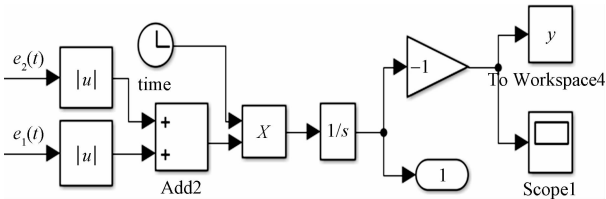


图 6 优化程序

Fig. 6 Optimization program

3.3 寻优基础上的双回路模糊 PID 控制

上述双回路 PID 控制虽然实现了摆杆角度和小车位移的控制,但初始 PID 参数很难调整,往往需要积累丰富的经验后才能调整到位,并且 PID 控制效果主要依赖于对象数学模型的准确性,如果模型特别复杂或者难以确定模型的系统,如非线性、参数时变和推理复杂的过程往往难以控制,

控制效果达不到工艺要求,参数在线调整困难;传统 PID 作用时参数固定,不能兼顾系统静态性能和动态性能。而模糊控制对模型的依赖性不强,主要依靠人的操作经验来设计控制器,不必知道对象的内部结构。单纯的模糊控制器很难消除静态误差,因此设计两者相结合的二维模糊 PID 控制器,典型结构如图 7,当误差和误差变化率变化时,通过在线修改 PID 控制器初值,自动实现对参数的最佳调整,达到改善控制效果,优化静态和动态性能指标的目的^[20]。

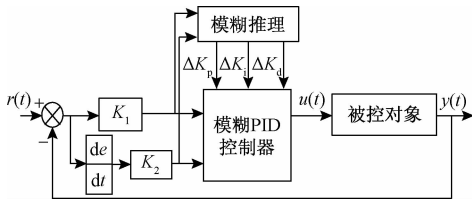


图 7 模糊 PID 控制器结构图
Fig. 7 Fuzzy PID control structure diagram

模糊整定 PID 控制器的表达式为式(14)。

$$\begin{cases} K_p(k) = K_{p0} + \Delta K_p(k) \\ K_i(k) = K_{i0} + \Delta K_i(k) \\ K_d(k) = K_{d0} + \Delta K_d(k) \end{cases} \quad (14)$$

式(14)中, K_{p0} 、 K_{i0} 、 K_{d0} 为双回路控制器经遗传算法优化后的参数。为实现小车位移和摆杆角度的双重控制,对两者分别设计模糊 PID 控制器,构成双回路模糊 PID 控制如图 8,其中 fpid 为小车位移模糊 PID 控制器,fpid1 为摆杆角度模糊 PID 控制器,两个模糊 PID 控制器输入都是对应的偏差 E 和偏差变化率 EC ,模糊推理输出量是对应的 ΔK_p 、 ΔK_i 、 ΔK_d ,输入量和输出量的论域都取 $[-3, +3]$,模糊子集为 $\{NB, NS, ZE, PS, PB\}$ 。根据经验建立模糊控制规则表 1,进行模糊推理,该系统每个控制回路有两个输入,三路输出,分别对应于 ΔK_p 、 ΔK_i 、 ΔK_d ,解模糊采用重心法。模糊控制器量化因子 Ke 、 Kec 和比例因子 Ku 的选择对于系统性能非常关键,量化因子 Ke 越大,超调越大,过渡过程时间延长;量化因子 Kec 越大,超调越小,响应变慢;比例因子 Ku 越小,响应变慢,过大系统震荡。

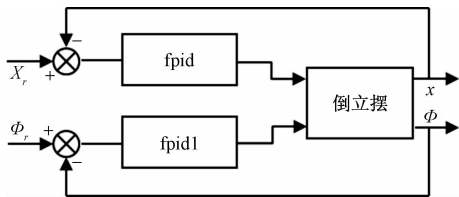


图 8 模糊 PID 双回路控制
Fig. 8 Fuzzy PID dual-loop control

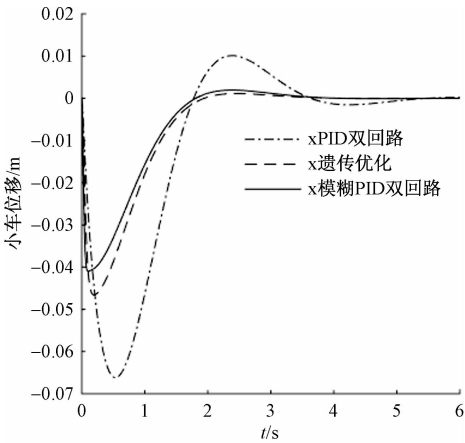
表 1 模糊控制规则表

Table 1 Fuzzy control rule table

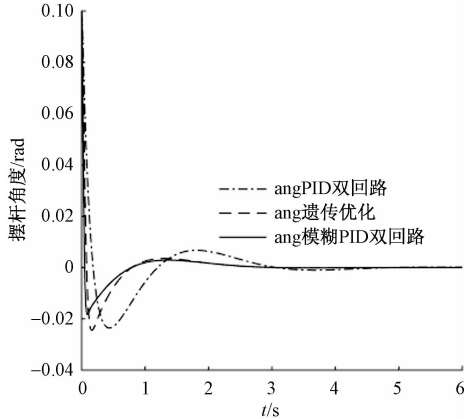
EC	E				
	NB	NS	ZE	PS	PB
NB	PB/NB/PS	PM/NM/NB	PM/NM/NB	PS/NS/NB	ZE/ZE/PS
NS	PM/NM/ZE	PM/NS/NM	PS/NS/NM	ZE/ZE/NS	NS/PS/ZE
ZE	PM/NM/ZE	PS/NS/NS	ZE/ZE/NS	NS/PS/NS	NM/PM/ZE
PS	PS/NM/ZE	ZE/ZE/ZE	NS/PS/ZE	NS/PS/ZE	NM/PB/ZE
PB	ZE/ZE/PB	NM/PS/PM	NM/PM/PM	NM/PM/PS	NB/PB/PB

4 仿真结果对比分析

仿真结果如图 9、图 10 所示,图 9 为本文方案优化过程,从中可以看出,三种控制作用下系统在 5 s 左右达到稳定;遗传算法优化后小车和摆杆角度控制效果很明显,特别是小车位移超调和调节时间都减小很多;优化参数基础上再用模糊 PID 控制超调进一步减小。本方案和其他文献控制效果对比如图 10,从中可以看出,三种策略都实现了小车位移和摆杆角度的控制,且控制效果都能满足要求,笔者设计的方案下小车位移和摆杆角度的超调量比文献[7]和文献[9]都要小,调节速度也比后两种方法



(a) 小车位移响应



(b) 摆杆角度响应

图 9 PID 仿真结果对比

Fig. 9 Comparison of PID simulation results

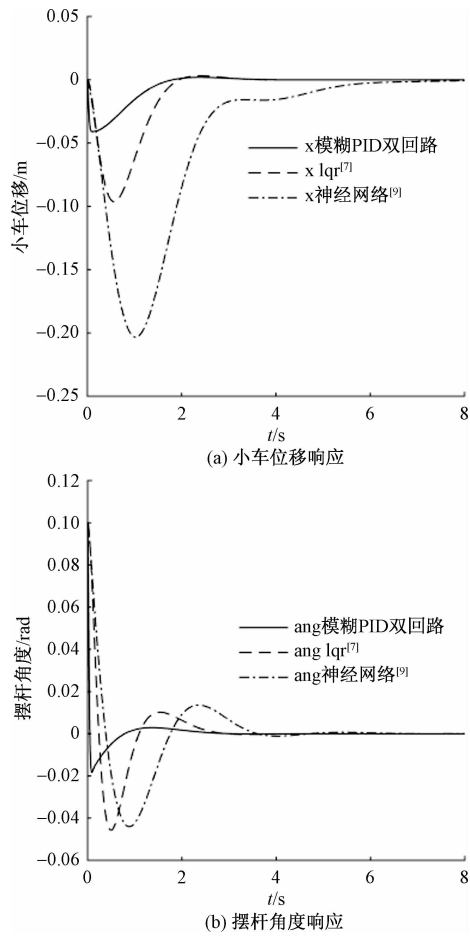


图 10 和其他文献仿真结果对比

Fig. 10 Compared with other literature simulation results

快,抗干扰能力和鲁棒性效果更好;而 LQR 稳定性较好,神经网络受限于训练样本导致调节时间最长。

5 结论

对于绝对不稳定的一阶直线倒立摆系统,不仅要控制摆杆角度,也要控制小车位移,其中摆杆角度是首要被控量。因此 PID 单回路只能用于摆杆角度的控制,而双回路 PID 和双回路模糊 PID 策略有两个控制回路,所以能同时实现对两个被控量的控制,且控制效果都能满足要求,经过遗传算法优化后快速性和稳定性更佳。PID 作为一种经典的控制方法,算法成熟、资源丰富、应用成熟,实践证明把先进控制理论和和 PID 相结合,能得到更理想的控制效果。

参 考 文 献

1 傅忠云,朱海霞,孙金秋,等. 两轮载人自平衡车姿态测量单元设计. 科学技术与工程, 2015; 15(15): 66—71
Fu Zhongyun, Zhu Haixia, Sun Jinqiu, *et al.* Design of attitude measurement unit for two-wheel self-balanced vehicle. Science Technology and Engineering, 2015; 15(15): 66—71

2 阮晓钢,孙荣毅,马圣策,等. 两轮自平衡机器人运动平衡控制研究. 科学技术与工程, 2014; 14(24): 84—88
Ruan Xiaogang, Sun Rongyi, Ma Shengce, *et al.* The research on balancing control of two wheel self-balance robot. Science Technology and Engineering, 2014; 14(24): 84—88
3 蔡敏,王思明. 抗时滞 LADRC 的六旋翼飞行器姿态控制. 科学技术与工程, 2017; 17(6): 77—82
Chai Min, Wang Siming. Attitude control of six-rotor helicopter based on anti-delay linear active disturbance rejection control. Science Technology and Engineering, 2017; 17(6): 77—82
4 郑舒人. 一阶直线倒立摆平衡控制研究. 大连:大连理工大学, 2014
Zheng Shuren. The balance control of single liner inverted pendulum. Dalian: Dalian University of Technology, 2014
5 于丁文,金伟,胡晗,等. 一种倒立摆的控制方案. 仪器仪表学报, 2005; 26(增刊2): 648—650
Yu Dingwen, Jin Wei, Hu Han, *et al.* A control method for inverted pendulum. Chinese journal of Scientific Instrument, 2005; 26(S2): 648—650
6 Li M. Digital double-loop PID controller for inverted pendulum. Sensors & Transducers, 2013; 156(9): 324—329
7 Jose A, Augustine C, Malola S M, *et al.* Performance study of PID controller and LQR technique for inverted pendulum. World Journal of Engineering & Technology, 2015; 3(2): 76—81
8 Sonone S S, Patel N V. LQR controller design for stabilization of cart model inverted pendulum. International Journal of Science and Research, 2015; 7(4): 1172—1176
9 刘华章,宋玉珍. 基于神经网络的倒立摆控制系统研究. 中国电路与系统学术年会. 北京:中国电子学会, 2007: 746—748
Liu Huazhang, Song Yuzhen. Research on inverted pendulum control system based on neural network. China Circuit and System Academic Year. Beijing: Chinese Institute of Electronics, 2007: 746—748
10 刘金琨. 先进 PID 控制 MATLAB 仿真. 北京:电子工业出版社, 2012: 74—75
Liu Jinkun. Advanced pid control matlab simulation. Beijing: Electronic Industry Press, 2012; 74—75
11 固高科技(深圳)有限公司. 倒立摆与自动控制原理实验. 深圳:固高科技(深圳)有限公司, 2005: 25—28
Googol Technology (Shenzhen) Ltd. Experiment of inverted pendulum and automatic control principle. Shenzhen: Googol technology (shenzhen) Ltd, 2005: 25—28
12 刘永信. 现代控制理论. 北京:北京大学出版社, 2006: 87—88
Liu Yongxin. Modern control theory. Beijing: Peking University Press, 2006: 87—88
13 刘涛,张卫东,顾延英. 双回路控制系统 PI_PID 控制器的解析设计. 上海交通大学学报, 2006; 40(7): 1152—1156
Liu Tao, Zhang Weidong, Gu Danying. Analytical design of PI_PID controllers for double-loop control systems. Journal of Shanghai Jiao-tong University, 2006; 40(7): 1152—1156
14 Jacob R, Murugan S. Implementation of neural network based pid controller. International Conference on Electrical, Electronics, and Optimization Techniques. New York: IEEE, 2016: 2769—2771
15 张伟,乔俊飞,韩红桂. 基于性能协调的溶解氧复合控制方法. 北京工业大学学报, 2014; 40(9): 1302—1307
Zhang Wei, Qiao Junfei, Han Honggui. Composite control of dis-

solved oxygen concentration based on performance coordination. Journal of Beijing University of Technology, 2014; 40(9): 1302—1307

16 Yin J. Research on the optimization PID parameters based on genetic algorithm. Journal of Convergence Information Technology, 2012; 7(11): 81—88

17 Bi J, Liu D, Zhan K. PID parameters optimization for liquid level control system based on genetic algorithm. International Journal of Digital Content Technology & Its Applications, 2012; 6(1): 361—368

18 Mahdi S. Optimization of PID controller parameters based on genetic algorithm for non-linear electromechanical actuator. International

Journal of Computer Applications, 2014; 94(3): 11—20

19 陈 星,李东海. 一类热工过程分布参数模型的 PID 控制仿真研究. 系统仿真学报, 2008; 20(9):2382—2386

Chen Xing, Li Donghai. Simulation analysis on PID control of distributed parameter model in thermal process. Journal of System Simulation, 2008; 20(9): 2382—2386

20 蔡建美,阮晓刚,甘家飞. 两轮自平衡机器人系统建模与模糊自整定 PID 控制. 北京工业大学学报, 2009; 35(12):25—29

Chai Jianxian, Ruan Xiaogang, Gan Jiafei. Modeling of two-wheeled self-balancing robot and fuzzy self-adjusting PID control. Journal of Beijing University of Technology, 2009; 35(12):25—29

Dual Loop Fuzzy Control Inverted Pendulum System Based on Genetic Algorithm Optimization

WANG Mei-gang, BAI Jian-yun

(Department of Automation, Shanxi University, Taiyuan 030013, China)

[**Abstract**] Through the combination of genetic algorithm, fuzzy control and PID, the balance control problem of the linear inverted pendulum is optimized. Firstly, the dynamic model of the inverted pendulum is established by Newton-Euler method, and the transfer function and state space representation of the system are obtained. The stability and controllability of the system are analyzed. On this basis, the PID single loop and dual loop controller is designed firstly, then the PID parameters are optimized by genetic algorithm, and then the fuzzy dual loop PID controller is designed with the optimized parameters, and the system is simulated by MATLAB. Comparative analysis of longitudinal and lateral control method show that the control effect is best, can also control the angle and the displacement parameters based on optimal PID initial online modification to achieve the best adjustment, the object has good static and dynamic performance.

[**Key words**] inverted pendulum PID dual-loop fuzzy control genetic algorithm