

doi: 10.3969/j.issn.1006-1576.2012.11.009

桥式起重机定位和防摆的粒子群算法优化 PID 控制

杜文正, 谢政, 童国林, 刘陈

(第二炮兵工程大学二系 203 教研室, 西安 710025)

摘要: 为使桥式起重机精确定位和快速消摆, 设计了利用 PSO 算法优化 PID 参数的定位防摆控制器。通过在 Matlab 中编写 PSO 算法程序和连接 Matlab 与 Simulink 的调用函数程序, 结合在 Simulink 中建立的起重机吊重系统模型, 完成了 PSO-PID 控制器控制的吊重系统的仿真。通过仿真, 起重机小车实现了无超调无静差的快速定位, 吊重摆动也得到快速有效的抑制。仿真结果证明了该控制器的可行性和有效性。

关键词: 桥式起重机; 定位和防摆; 粒子群优化; PID 控制

中图分类号: TJ81 **文献标志码:** A

Position Control and Anti-Swing for Overhead Cranes Based on Particle Swarm Algorithm Optimization PID Control

Du Wenzheng, Xie Zheng, Tong Guolin, Liu Chen

(No. 203 Staff Room, No. 2 Department, Second Artillery Engineering University, Xi'an 710025, China)

Abstract: To make the overhead crane positioning accurately and anti-swing quickly, this paper design a positioning and anti-swing controller based on PSO algorithm optimization PID parameter. Compile PSO algorithm procedures and the invoking procedures which link Matlab and Simulink in Matlab, combine with crane's hanging weight system model in Simulink, and realize the PSO-PID control system of the hanging weight simulation. The simulation results show that the crane dolly can positioning accurately and the swing of hanging weight system can be restrained quickly and effectively. The simulation results prove that the controller is feasible and effective.

Key words: overhead crane; positioning and anti-swing; particle swarm optimization; PID control

0 引言

随着自动控制技术的不断发展, 桥式起重机从单一的搬运工具逐步演变成自动化生产中的重要组成部分, 并广泛应用于厂房、车间、仓库、码头等工业场所, 在作业过程中能防止吊重晃动、精确定位是提高工作效率和安全性, 以及实现自动化装卸的关键环节^[1]。

目前, 应用最广泛的方法是通过建立吊重系统数学模型, 应用各种控制算法构建消摆控制器, 从而实现起重机精确定位及安全高效工作。起重机吊重摇动过程是一个复杂的非线性过程, 对吊摆进行定位防摆控制的理论研究, 既有依赖吊重数学模型的状态反馈控制、自适应控制、最优控制, 也有不依赖精确数学模型, 且能使用不确定因数的模糊控制。但在实际生产、工作过程中, 考虑到起重机的安全性和可靠性, 目前绝大多数起重机的消摆系统都采用 PID 控制^[1]。PID 控制具有结构简单、可靠性高, 且具有一定鲁棒性的特点。在 PID 控制中, PID 参数的整定是一个至关重要的问题, 对于

桥吊这种结构和参数不确定性的控制系统, PID 参数的整定至今仍然是个难点。目前, PID 参数优化算法主要包括梯度法、单纯形方法、神经网络法以及遗传算法等。上述方法各有优点, 但也存在明显缺陷。梯度法要求目标函数连续可导; 单纯形法受初值和计算步长的影响较大, 易于收敛于局部最优解; 神经网络法需要大样本训练, 且容易出现数值病态问题; 遗传算法需要进行复制、交叉与变异操作, 进化速度慢, 易产生早熟收敛, 并且其性能对参数有较大的依赖性。粒子群优化 (particle swarm optimization, PSO) 算法简单, 易于程序实现, 具有良好的收敛性, 能以较大概率找到问题的全局最优解, 且计算效率高, 因而得到广泛的研究与应用。笔者提出采用 PSO 算法进行 PID 最优化参数整定, 仿真结果证明, 该方法实现了桥吊的 PSO-PID 防摆控制, 效果良好。

1 桥式起重机吊重系统的数学模型

1.1 模型的建立

桥式起重机吊重系统是一个非常复杂非线性的

收稿日期: 2012-06-18; 修回日期: 2012-07-12

作者简介: 杜文正(1974—), 男, 陕西人, 博士, 副教授, 从事智能起重机研究。

系统。为了简化分析, 根据起重机工作的基本情况, 作以下假设^[1-3]:

1) 由于起重机在进行装卸作业过程中, 大车机构一般都是处于静止状态, 笔者在建立力学模型时, 不考虑大车机构的运动;

2) 吊重与起升钢丝绳在整个运行过程中所受的风力和空气阻尼均不计;

3) 吊重只作平面运动, 且始终处于水平状态;

4) 起升钢丝绳的质量相对于吊重的质量可忽略不计;

5) 假设小车与轨道之间的摩擦力和小车速度成线性关系, 记摩擦系数为 μ 。

考虑小车运行牵引力、吊重的偏摆及小车与轨道间的摩擦阻力, 得到桥式起重机吊重系统示意图如图 1 所示。对整个桥式起重机防摆系统, 设小车质量为 m_1 , 吊重质量为 m_2 , 绳长为 l , θ 为吊重摆角, F 为小车运行牵引力, f 表示小车运行阻力, f_1 为钢绳的张力。

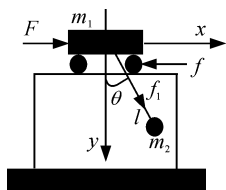


图 1 桥式起重机吊重系统示意图

设小车 m_1 的位置坐标为 (x, y) , 则负载 m_2 在图 1 所示坐标系中的位置坐标 (x_{m_2}, y_{m_2}) 满足如下关系:

$$\begin{cases} x_{m_2} = x + l \sin \theta \\ y_{m_2} = l \cos \theta \end{cases} \quad (1)$$

系统的动能为

$$T = \frac{1}{2} m_1 v_{m_1}^2 + \frac{1}{2} m_2 v_{m_2}^2 \quad (2)$$

其中 $v_{m_i}^2 = \dot{x}_{m_i}^2 + \dot{y}_{m_i}^2$ ($i=1, 2$)。

约定初始位置绳长为 h , 吊重未起吊时的位置, 为零势能点, 则系统的势能为

$$V = m_2 g (h - l \cos \theta) \quad (3)$$

式中 g 为重力加速度, $g=9.81 \text{ m/s}^2$ 。

取广义坐标 (x, l, θ) , 系统的拉格朗日方程为

$$\begin{cases} L = T - V \\ \frac{d}{dt} \frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i} - \frac{\partial L}{\partial q_i} = f_{q_i} \quad (i=1, 2, 3) \end{cases} \quad (4)$$

式中: q_i 为广义坐标, $q_1 \sim q_3$ 分别为 x , l 和 θ (rad); f_{q_i} 为广义力, $f_{q_1} \sim f_{q_3}$ (N) 分别为 $F - f$ 、 f_1 和 0 ,

其中 $f = \mu \dot{x}$ 。

联立式(1)~式(4), 得到起重机载荷系统关于 x 、 l 和 θ 的动力学方程

$$\begin{cases} (m_1 + m_2) \ddot{x} + m_2 \ddot{l} \sin \theta + m_2 l \ddot{\theta} \cos \theta + \\ 2m_2 \dot{l} \dot{\theta} \cos \theta - m_2 l \dot{\theta}^2 \sin \theta + \mu \dot{x} = F \\ m_2 \ddot{x} \sin \theta + m_2 \ddot{l} - m_2 l \dot{\theta}^2 - m_2 g \cos \theta = f_1 \\ 2\dot{l} \dot{\theta} + l \ddot{\theta} + \ddot{x} \cos \theta + g \sin \theta = 0 \end{cases} \quad (5)$$

1.2 模型的简化

实际操作中, 考虑到吊重运输的安全性, 要尽可能地抑制吊重的摇摆, 使摆角最大不超过 10° , 并且起重机小车运行过程时总是将提升电机制动, 使吊车系统在吊运过程中绳长不变^[3], 即假定 $\dot{l} \approx \ddot{l} \approx 0$ 、 $\sin \theta \approx \theta$ 、 $\cos \theta \approx 1$ 。

由方程组(5)得起重机防摆系统数学模型^[1]

$$\begin{cases} (m_1 + m_2) \ddot{x} + m_2 \ddot{\theta} + \mu \dot{x} = F \\ \ddot{x} + l \ddot{\theta} + g \theta = 0 \end{cases} \quad (6)$$

2 粒子群算法优化 PID 控制器的设计

2.1 粒子群算法的优化算法

PSO 是一种进化算法, 它源于对鸟群捕食的行为研究。PSO 算法首先在可行解空间中初始化一群粒子, 每个粒子都代表极值优化问题的一个潜在最优解, 用位置、速度和适应值 3 项指标表示该粒子特征, 适应值由适应度函数计算得到, 其值好坏表示粒子的优劣。粒子在解空间中运动, 通过跟踪个体极值 Pbest 和群体极值 Gbest 更新个体位置。个体极值 Pbest 是指个体经历位置中计算得到的适应值最优位置, 群体极值 Gbest 是指群体中所有粒子搜索到的适应度最优值。粒子每更新一次位置, 就计算一次适应度值, 并且通过比较新粒子的 3 项指标, 更新个体极值 Pbest 和群体最优值 Gbest 位置。

假设在一个 D 维的搜索空间中, 由 n 个粒子组成种群 $X=(X_1, X_2, \dots, X_n)$, 其中第 i 个粒子表示为一个 D 维向量 $X_i=(x_{i1}, x_{i2}, \dots, x_{iD})^T$, 代表第 i 个粒子在 D 维搜索空间中的位置, 也代表一个潜在解。根据目标函数即可计算出每个粒子位置 X_i 对应的适应度值。第 i 个粒子速度为 $V_i=(V_{i1}, V_{i2}, \dots, V_{iD})^T$, 其个体极值为 $P_i=(P_{i1}, P_{i2}, \dots, P_{iD})^T$, 种群的群体极值为 $P_g=(P_{g1}, P_{g2}, \dots, P_{gD})^T$ ^[4-5]。

在每次迭代中, 粒子通过个体极值和群体极值更新自身的速度和位置, 即

$$\begin{cases} V_{id}^{k+1} = \omega V_{id}^k + c_1 r_1 (P_{id}^k - X_{id}^k) + c_2 r_2 (P_{gd}^k - X_{id}^k) \\ X_{id}^{k+1} = X_{id}^k + V_{id}^{k+1} \end{cases} \quad (7)$$

其中： ω 为惯性权重； $d=1,2,\dots,D$ ； $i=1,2,\dots,n$ ； k 为当前迭代次数； X_{id} 表示粒子的位置； V_{id} 表示粒子的速度； c_1, c_2 是非负常数，表示加速度常数； r_1, r_2 为[0,1]区间的随机数；为了防止粒子的盲目搜索，将其位置和速度限制在一定的区间 $[-X_{max}, X_{max}]$ 、 $[-V_{max}, V_{max}]$ 。基于 PSO 算法的参数优化算法流程图如图 2^[6]所示。

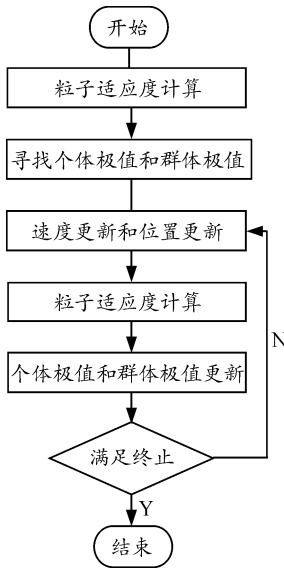


图 2 PSO 算法的参数优化算法流程

其中：粒子和速度初始化随机初始化粒子速度和粒子位置；根据待优化对象计算粒子适应度值；根据初始粒子适应度确定个体极值和群体极值；根据方程组 (7) 更新粒子速度和位置；根据新种群中粒子适应度值更新个体极值和群体极值。

2.2 PSO-PID 控制器的设计

PID 控制器应用广泛，其一般形式

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(\tau) d\tau + K_d \frac{de(t)}{dt} \quad (8)$$

其中： $e(t)$ 是系统误差； K_p 、 K_i 和 K_d 分别是对系统误差信号及其积分和微分量的加权值，通过选取适当的权值，可以使被控对象的输出达到较为理想的效果^[4]。PID 控制器的系统结构图如图 3^[7]所示。

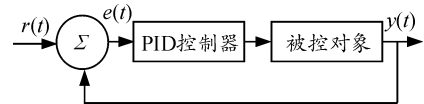


图 3 PID 控制器的系统结构

PID 控制器的优化问题就是确定一组合适的参数 K_p 、 K_i 、 K_d ，使得指标达到最优，常用的指标有 ISE、IAE、ITAE、ISTE 等，文中选用 ITAE 指标，其定义为

$$J = \int_0^{\infty} t |e(t)| dt \quad (9)$$

根据第 2 节中建立的模型，由方程 (6) 变换得

$$\begin{cases} m_1 \ddot{x} - mg\theta + \mu \dot{x} = F \\ -l\ddot{\theta} - g\theta = \ddot{x} \end{cases} \quad (10)$$

对方程组 (10) 进行拉氏变换得

$$\begin{cases} F(s) = (m_1 s^2 + \mu s) X(s) - m_2 g \theta \\ s^2 X(s) = -l s^2 \theta(s) - g \theta(s) \end{cases} \quad (11)$$

根据方程 (11)，在 Simulink 环境下中建立起起重机防摆系统的模型如图 4 所示。图 4 中，输出端口 1、端口 2 即为式 (9) 所示的 ITAE 指标，通过时间及误差绝对值的乘积进行积分后得到。

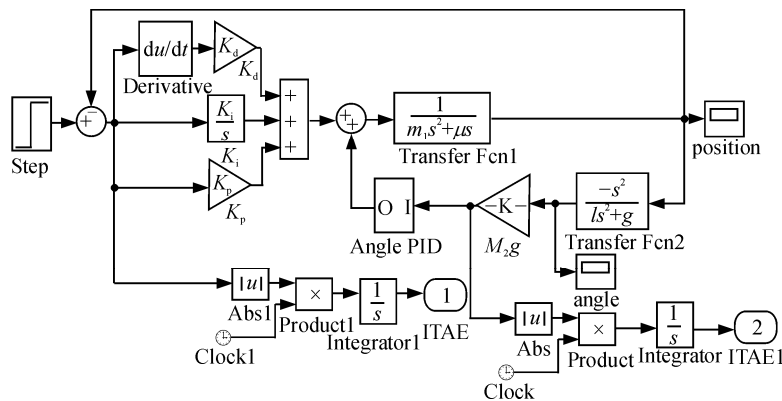


图 4 起重机防摆系统的模型

2.3 优化设计过程

利用粒子群算法对 PID 控制器的参数进行优化设计, 其过程如图 5 所示。

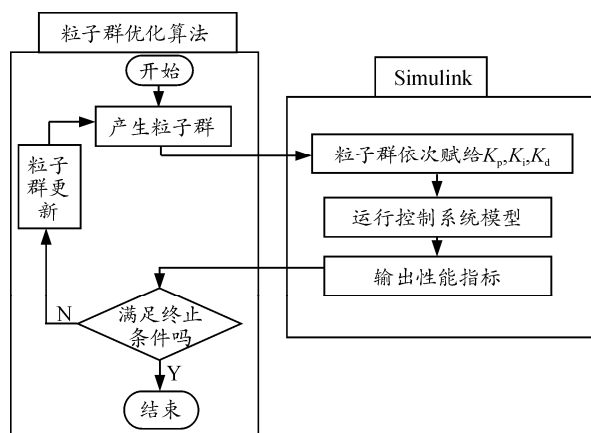


图 5 粒子群算法优化 PID 控制器的参数过程

图 5 中, 粒子群算法与 Simulink 模型之间连接的桥梁是粒子(即 PID 控制器参数)和该粒子对应的适应值(即控制器的性能指标)。优化过程如下: PSO 产生粒子群(可以是初始化粒子群, 也可以是更新后的粒子群); 利用 Matlab 编写粒子群算法优化 PID 参数程序, 通过调用函数 assignin 将 Matlab 程序优化的参数送到 Simulink 模型进行仿真, 得到该组参数对应的性能指标传递到 PSO 中作为粒子的适应值, 最后判断是否可以退出算法。

3 仿真研究

由 PID 的控制原理可知, PID 控制器的控制量是系统的误差, 误差量一般由系统的期望输出值(输入量)与实际输出比较得到^[4]。如图 4 所示的起重机吊重系统的 Simulink 模型中, 为检验该系统时域响应性能, 设定参考位置信号为阶跃信号, 幅值为 1, 参考角度信号为常值信号, 幅值为零。根据文献[8]得到吊重质量对防摆控制效果影响很小, 故在该仿真中取吊重质量为定值。 m_1, m_2, l 的值分别为 40 kg, 100 kg, 2 m。

3.1 常规 PID 控制的阶跃信号响应

如图 4 所示的 Simulink 模型中, 有 2 个 PID 控制器, 即有 6 个 PID 参数需要调试, 且各个参数之间是非独立的关系, 根据参考文献[1]中提供的经验整定方法, 得到位置控制 PID 的 3 个参数 K_p, K_i, K_d 分别为 25, 0.1, 20, 角度控制 PID 的 3 个参数分别为 1, 0.2, 0.01。仿真后的到系统的位置及摆角响应如图 6、图 7 所示。

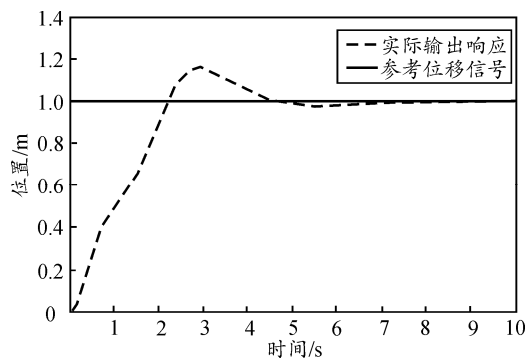


图 6 位置响应

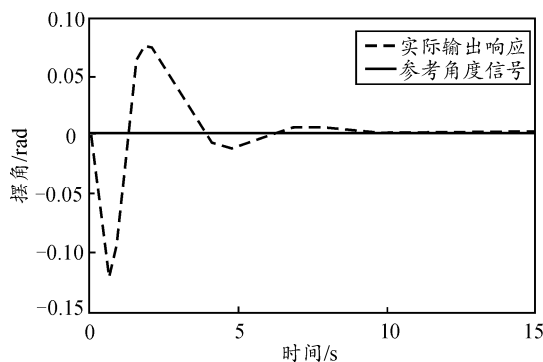


图 7 摆角响应

3.2 PSO 优化得到的 PID 参数

如图 5 所示的 PSO 优化 PID 过程示意图, 其右侧的 Simulink 部分的程序实现如下:

```

function z=PSO_PID(x)
%粒子依次赋值给 Kp assignin('base','Kp',x(1));
assignin('base','Kp1',x(2));
%粒子依次赋值给 Ki
assignin('base','Ki',x(3));
assignin('base','Ki1',x(4));
%粒子依次赋值给 Kd
assignin('base','Kd',x(5));
assignin('base','Kd1',x(6));
%使用命令运行控制系统模型 100 s
[t_time,x_state,y_out]=sim('PID_Model',[0,100]);
%还回性能指标
z=y_out(end,1:2);
  
```

其中, x 为 PSO 传递来的粒子, 首先调用函数 assignin 将 $x(1) \sim x(6)$ 的赋值给 Workplace 中的位置 PID 的参数 K_p, K_i, K_d , 角度 PID 的参数 K_{p1}, K_{i1}, K_{d1} ; 调用函数 sim 对图 4 的模型进行仿真, 其中 PID_Model 是 Simulink 模型的文件名, [0, 100] 为仿真时间, 还回的 y_out 即为输出端子 1 和 2 的值; 最后将性能指标 ITAE 赋值给 z , 以实现图 5 从 Simulink 部分到 PSO 部分的参数传递。

设置 POS 的参数为：惯性因子为 0.6，加速度常数都取 2，维数为 6(有 2 个 PID 控制器，故有 6 个待优化参数)，粒子群规模为 20，最大迭代次数为 100，最小适应值为 0.1，速度范围为[-1,1]，6 个待优化参数范围均为[0,100]。运行 Matlab 粒子群优化程序后得到位置控制 PID 的 3 个参数 K_p , K_i , K_d 分别为 15.611 2, 0, 19.470 2，角度控制 PID 的 3 个参数分别为 0.554 2, 0.180 1, 0。

3.3 优化后 PID 的控制系统的阶跃信号响应

运行 Matlab 主程序后得到系统的位置及摆角响应如图 8、图 9 所示。

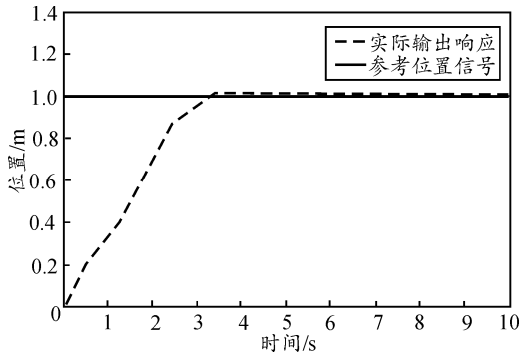


图 8 优化 PID 控制的位置响应

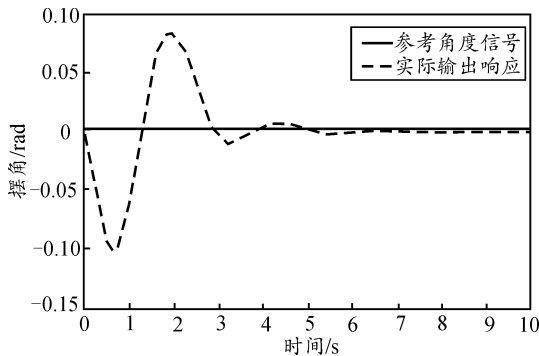


图 9 优化 PID 控制的摆角响应

从图 6、图 8 可以得到起重机吊重系统在常规 PID 和 PSO 优化 PID 控制下的阶跃信号位置响应指标，如表 1 所示。

表 1 系统的阶跃信号位置响应

算法	性能指标			
	上升时间/s	稳态时间/s	超调量/%	稳态误差/%
常规 PID	3.25	8.94	16.74	0.24
PSO 优化 PID	3.12	3.12	0	0.10

从图 7、图 9 可以得到，常规 PID 控制系统的最大摆角为 0.072 6 rad，最小摆角-0.125 7 rad，当时间达到 11.5 s 时，吊重的摆角衰减到低于 0.002 rad，接近于零；PSO 优化 PID 控制的系统最大摆角为 0.780 3 rad，最小摆角为-0.994 6 rad，当时间达到

6.68 s 时，吊重的摆角衰减到低于 0.000 3 rad，接近于零。由此可见，利用 PSO 算法优化 PID 参数后，起重机小车实现了无超调无静差的快速定位，同时吊重系统载荷摆动得到了快速有效的抑制。

3.4 动态性能的检验

为检验 PSO 算法优化 PID 控制系统的动态性能，检验在起重机小车运动时吊重系统的摆角变化情况。设定输入参考位置信号为单位斜坡信号，初始幅值为 0；参考角度信号为常值信号，幅值为零。仿真后得到的系统位置及摆角响应如图 10~图 12。

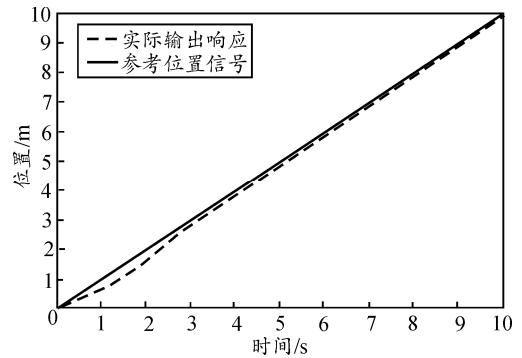


图 10 位置响应

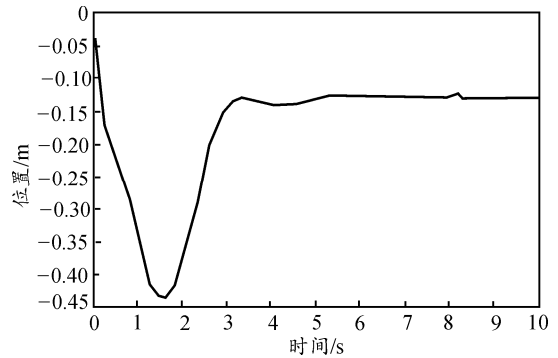


图 11 位置误差

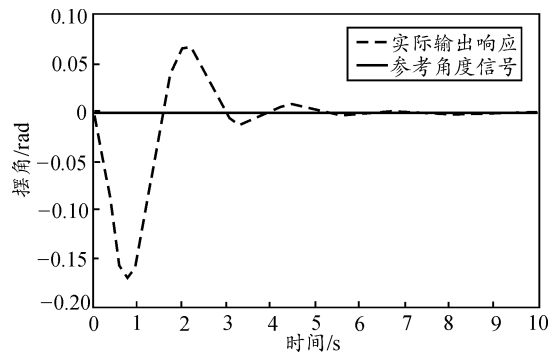


图 12 摆角响应

由图 10 可知，小车运动时能够很好地跟踪输入信号。在小车运动中，实际位移与输入的参考位移误差如图 11 所示，在小车稳定运行后，位置误差小于 0.15，且基本维持恒定，在实际设备中若存在这

样的恒定误差, 可以采用硬件措施消除该误差。

由图 12 可知, 吊重只是在小车启动时有一定幅度摆动, 最大摆角为 $0.062\ 2\ \text{rad}$, 最小摆角为 $-0.169\ 8\ \text{rad}$ 。在小车运行到 $6.4\ \text{s}$ 时, 摆角衰减到 $0.000\ 1\ \text{rad}$ 以下, 在小车稳定运行时, 摆角接近于 0。仿真结果表明, 经 PSO 算法优化 PID 参数后的 PID 控制系统, 具备较好的动态性能。

4 结束语

笔者利用粒子群算法优化 PID 控制器参数, 实现了有效的控制起重机吊重系统。仿真结果表明: 利用 PSO 算法优化 PID 参数后, 起重机小车实现了无超调无静差的快速定位, 同时吊重系统载荷摆动得到了快速有效的抑制, 且具有较好的动态性能。下一步, 笔者将尝试改进粒子群算法, 以提高优化算法的运行速率, 并将该控制方法应用到实物模型上。

(上接第 31 页)

3 结束语

笔者结合军事物联网发展的安全需求, 依据 QR 二维码的独特优势, 结合视觉密码像素随机分布的特性, 建立了一种随机加密型的 QR 码应用模式。实验结果表明: 加密后的 QR 码图像恢复效果好, 并且保密性较强, 在军事物联网的应用中有着广阔的前景。如何设计出高效识别、调高容错率的识别方案是下一步的研究方向。

参考文献:

- [1] 尚德华. 二维条码标准与我国物联网发展关系的几点探讨[J]. 吉林广播电视大学学报, 2011, 115(6): 121-123.
- [2] 冯俊伟, 唐云海, 李云飞, 等. 涉密网络中信息输入输

参考文献:

- [1] 黄凯. 起重机自适应智能防摆方法及其仿真研究[D]. 南京: 南京林业大学机械设计及理论学院, 2007: 8-102.
- [2] 王晓军, 邵惠鹤. 基于模糊的桥式起重机的定位和防摆控制研究[J]. 系统仿真学报, 2005, 17(4): 34-38.
- [3] 李伟. 起重机载荷摆振模型的简化条件及误差[J]. 山东建筑工程学院学报, 1998, 13(1): 59-64.
- [4] 刘金棍. 先进 PID 控制及其 Matlab 仿真[M]. 北京: 电子工业出版社, 2003: 309-316.
- [5] 杨朝霞, 方建文, 李佳蓉, 等. 粒子群优化算法在多参数拟合中的作用[J]. 浙江师范大学学报, 2008, 31(2): 173-177.
- [6] 史峰, 王辉, 等. Matlab 智能算法 30 个案例分析[M]. 北京: 北京航空航天大学出版社, 2011: 130-143.
- [7] 李小凡. 基于 RBF 神经网络整定的 PID 控制器设计[J]. 兵工自动化, 2009, 28(1): 45-47.
- [8] 钟斌. 基于吊重防摇控制的起重机快速对位关键技术研究[D]. 四川: 西南交通大学, 2007: 14-79.
- [9] 钟斌. 基于吊重防摇控制的起重机快速对位关键技术出控制和管理[J]. 四川兵工学报, 2010, 31(6): 132.
- [3] M Naor, A Shamir. Visual cryptography[C] // Advances in Cryptology. Berlin: Springer-Verlag 1995: 1-12.
- [4] C Blundo, A De Santis, D R Stinson. On the contrast in visual cryptography schemes[J]. Journal of Cryptology, 1999, 12: 261-289.
- [5] 郭文明. 基于二维码的物流防窜货终端管理系统设计与实现[D]. 北京: 北京邮电大学, 2011, 5.
- [6] 刘小丹, 栾若星, 黄翠翠. 可视二维条码的模式编码方法[J]. 计算机应用, 2010, 30(9): 2467-2469.
- [7] 付正欣, 郁滨. 基于 XOR 运算的多秘密视觉密码[J]. 计算机应用研究, 2011, 28(2): 708-710.
- [8] 王益伟, 郁滨, 付正欣, 等. 像素不扩展的防欺骗视觉密码方案研究[J]. 信息工程大学学报, 2011, 28(2): 708-710.
- [9] 董琳, 王道顺, 李顺东, 等. 基于布尔运算的(2,n)秘密共享方案[J]. 中国科学, 2011, 41(5): 513-525.