

智能控制在桥式吊车系统中的应用研究

Study on the Application of Intelligent Control in Bridge Crane System

张晓亮

Xiaoliang Zhang

中铁国际集团有限公司 北京 100039

China Railway International Group Co Ltd Beijing 100039

摘要:桥式吊车经常在港口,工厂和建筑工地等场合被用来移动重物。为了提高吊车的运输效率,应该尽可能快速准确地将载物运到目的地。为了防止载物被损坏,运行过程中吊索的摆角应该被限制的尽可能小。然而,吊车的加速常常带来吊索的晃动,这就可能会损坏载物甚至带来事故。

论文致力于桥式吊车模糊控制器的优化。由于桥式吊车的模糊控制器有四个输入量和一个输出量,总的模糊规则数目很大。在论文中,模糊规则的数目通过双模糊控制器来削减,并且隶属度函数通过遗传算法得到优化,改善后的模糊控制器达到了更好的效果。

Abstract: The Bridge Cranes are often used in harbors, factories and construction sites for moving heavy loads. In order to improve the efficiency of loads transportation, the trolley should move the loads to desired position as fast and as accurately as possible. Besides, the swing should be kept as small as possible to avoid the load damage. However, the acceleration of trolley always leads to undesired load swing, which might cause damage and even accidents.

This paper deals with the optimization of a fuzzy controller for Bridge Crane. Since this fuzzy controller has four inputs and one output, total number of the fuzzy rules is very large. Those rules reduced by using cooperative Fuzzy control, and the membership function was adjusted by a method of GA. We obtained an optimized fuzzy controller and it is proved that this controller has a better effect.

关键词: 桥式吊车;模糊控制;遗传算法;晃动

Keywords: bridge crane;fuzzy control;genetic algorithm;swing

DOI: 10.12346/etr.v3i1.3122

1. 引言

桥式吊车广泛地应用于工厂,建筑工地和码头等场合来运输重物,极大地节省了人力,在人类社会的发展中发挥了巨大作用。本文针对桥式吊车的控制问题,设计并具体实现了模糊控制器,并且把遗传算法应用于模糊控制器的优化,改善了控制效果。

2. 桥式吊车的数学模型

在忽略了空气流动,各种摩擦之后,可将桥式吊车抽象成小车、匀质杆和质量块组成的系统,如下图所示:

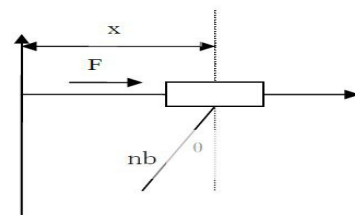


图1 桥式吊车模型示意图

M:小车质量 m1:吊索的质量 l: 吊索旋转点到吊索质心的距离 x:小车的位置(水平向右为正) θ_1 :吊索与垂直向下方向的夹角(顺时针为正)

【作者简介】张晓亮(1981~),男,汉族,河北石家庄人,硕士,工程师,研究方向:智能控制在工程领域的应用。

系统的拉格朗日方程为:

$$L(q, \dot{q}) = T(q, \dot{q}) - V(q, \dot{q})$$

其中, L 为拉格朗日算子, q 为系统的广义坐标, T 为系统的动能, V 为系统的势能。拉格朗日方程由广义坐标 q_i 和 L 表示为:

$$\frac{d}{dt} \frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i} - \frac{\partial L}{\partial q_i} = f_i$$

其中, $i = 1, 2, 3, n$, f_i 为系统沿该广义坐标方向上的外力, 在本系统中, 设系统的两个广义坐标分别是 x, θ 。

首先计算系统的动能:

$$T = T_{m1} + T_{m2}$$

$$T_M = \frac{1}{2} M \dot{x}^2$$

$$T_{m1} = \frac{1}{2} m_1 \left(\left(\frac{d(x - l_1 \sin \theta)}{dt} \right)^2 + \left(\frac{d(l_1 \cos \theta)}{dt} \right)^2 \right) = \frac{1}{2} m_1 \dot{x}^2 - m_1 l_1 \dot{x} \dot{\theta} \cos \theta + \frac{1}{2} m_1 l_1^2 \dot{\theta}^2$$

$$T_{m2} = \frac{1}{2} (m_2 l_2^2) \dot{\theta}^2 = \frac{1}{2} m_2 l_2^2 \dot{\theta}^2$$

T_M 为小车动能, T_{m1} 为吊索动能。

$$T_{m1} = T_{m1}' + T_{m1}'' = \frac{1}{2} m_1 \dot{x}^2 - m_1 l_1 \dot{x} \dot{\theta} \cos \theta + \frac{2}{3} m_1 l_1^2 \dot{\theta}^2$$

可以得到系统动能:

$$T = \frac{1}{2} M \dot{x}^2 + \frac{1}{2} m_1 \dot{x}^2 - m_1 l_1 \dot{x} \dot{\theta} \cos \theta + \frac{2}{3} m_1 l_1^2 \dot{\theta}^2$$

系统的势能为:(以吊索所在的位置为零势能位置)

$$V = m_1 g l_1 (1 - \cos \theta)$$

从而拉格朗日算子为:

$$L = M \dot{x}^2 \frac{3g}{4l_1} - \frac{3}{4l_1} u + \frac{1}{2} m_1 \dot{x}^2 - m_1 l_1 \dot{x} \dot{\theta} \cos \theta + \frac{2}{3} m_1 l_1^2 \dot{\theta}^2 +$$

$$m_2 g l_2 (1 - \cos \theta)$$

由于在广义坐标 θ 上无外力作用, 有以下等式成立:

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L}{\partial \dot{\theta}} \right) - \frac{\partial L}{\partial \theta} = 0$$

得到下式:

$$m_1 l_1 \cos \theta \ddot{x} + \frac{4}{3} m_1 l_1^2 \ddot{\theta} + m_1 g l_1 \sin \theta = 0$$

$$\text{令 } u = \ddot{x}$$

取平衡位置时各变量的初值为零,

$$X = (x, \dot{x}, \theta, \dot{\theta}) = (0, 0, 0, 0)$$

得到

$$\ddot{x} = u$$

$$\ddot{\theta} = -\frac{3g}{4l_1} - \frac{3}{4l_1} u = -u$$

系统的状态空间模型

取状态变量如下:

$$x_1 = x$$

$$x_2 = \dot{x}$$

$$x_3 = \theta$$

$$x_4 = \dot{\theta}$$

由(5), (6)式得到状态空间方程如下:

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{x}_3 \\ \dot{x}_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \\ 0 \\ -\frac{3}{4l_1} \end{bmatrix} u$$

$$y = \begin{bmatrix} x \\ \theta \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \end{bmatrix} u$$

3. 智能控制在桥式吊车控制中的应用

3.1 模糊控制应用

桥式吊车是多变量系统, 控制目标(吊车位移和速度, 吊索角度)和状态变量(小车位移, 速度, 吊索角度, 吊索角速度)都较多, 如果用一个模糊控制器来同时实现多个目标, 那么模糊规则的数目将会非常巨大, 并且在实时性方面也不会很理想, 所以本论文采用位置和角度两个模糊控制器。

桥式吊车模糊控制系统的框图如下所示:

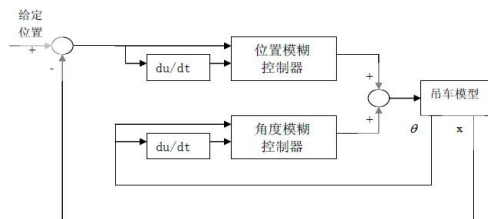


图 2 桥式吊车模糊控制系统框图

3.1.1 MATLAB/Simulink 平台上的建模

在 MATLAB/Simulink 平台上, 利用 GT-400-SV Block Library 中提供的功能模块和 Simulink 中已有的模块, 搭建了双模糊控制器(位置模糊控制器和角度模糊控制器)吊车

模型实验平台,如下图所示。

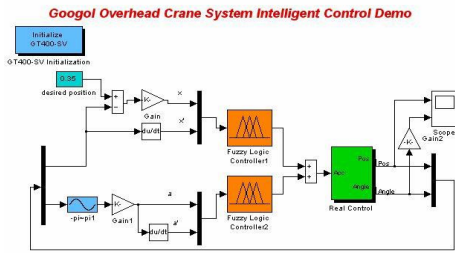


图3 桥式吊车模糊控制模型

3.1.2 模糊控制器的具体实现

模糊控制器输入量和输出量的论域以及模糊规则,都是依据操作者的经验来制定的,经过多次反复实践,结合试验设备的性能,最终确定的模糊控制器,实现了小车的快速定位,抑制吊索摆角的指标要求。

3.1.2.1 模糊控制器的输入输出量

3.1.2.1.1 位置模糊控制器输入量

位置模糊控制器(Fuzzy Logic Control1)有两个输入量, x (小车当前位置到目标位置的距离占总路程的百分比), x' (小车速度)。其中 x 的论域为 $[-0.5, 1]$,分为7个模糊集合,分别为NS(负小),NSS(负较小),ZO(零),PSS(正较小),PS(正小),PM(正中),PB(正大)。 x' 论域为 $[-0.6, 0.6]$ m/s,分成为7个模糊集合,分别为NB(负大),NM(负中),NS(负小),ZO(零),PS(正小),PM(正中),PB(正大),

各隶属度函数如下图所示:

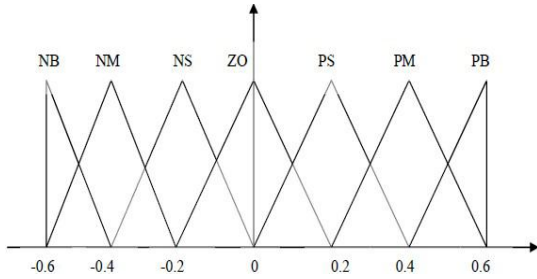


图4 x' 的论域及模糊划分

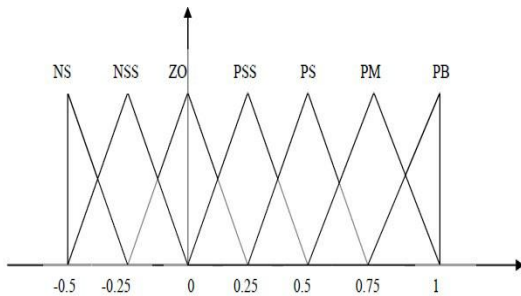


图5 x 的论域及模糊划分

3.1.2.1.2 角度模糊控制器输入量的确定

角度模糊控制器(Fuzzy Logic Controller2)的输入信号为 a (吊索偏离垂直方向的角度), a' (吊索的角速度)。 a 的论域为 $[-20, 20]$ 度,分为7个模糊集合,NB(负大),NM(负中),NS(负小),ZO(零),PS(正小),PM(正中),PB(正大)。 a' 的论域为 $[-180, 180]$ 度/秒,分为7个模糊集合:NB(负大),NM(负中),NS(负小),ZO(零),PS(正小),PM(正中),PB(正大)。各模糊集合的隶属度函数如下图所示:

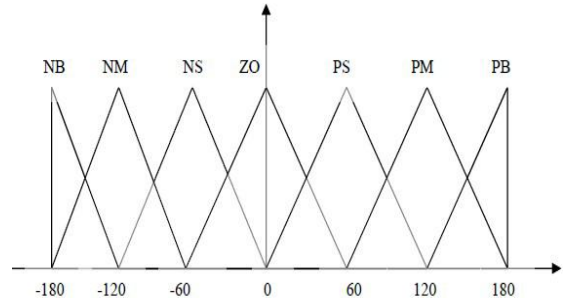


图6 角度模糊控制器中 a' 隶属度函数

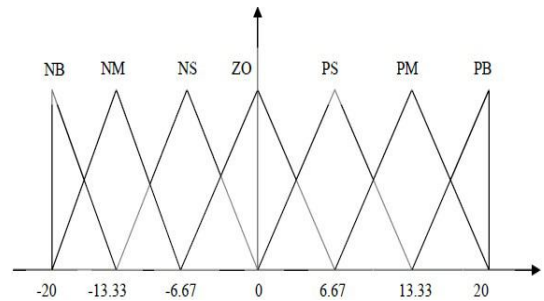


图7 角度模糊控制器中 a 隶属度函数

3.1.2.1.3 模糊控制器输出量的确定

两个模糊控制器的输出都是施加给小车的加速度,而最终加在小车上的加速度是两个控制器的输出之和,所以,两个模糊控制器的输出量(加速度 Acc)论域以及模糊集合隶属度函数的设置都是一样的,Acc的论域为 $[-2, +2]$ 米/秒²,划分为五个模糊集合:NB(负大),NS(负小),ZO(零),PS(正小),PB(正大),如下图所示:

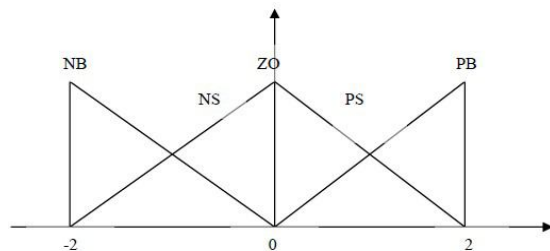


图8 Acc的论域及模糊划分

3.1.2.1.4 模糊控制器输出量的确定

经过多次实践,摸索出了一套适用于两个模糊控制器的较为理想的模糊规则,分别如下表所示:

表 1 位置模糊控制器的模糊规则表

Acc \ $\frac{dx}{dt}$	NS	NSS	ZO	PSS	PS	PM	PB
NB	ZO	PS	PB	PB	PB	PB	PB
NM	NS	PS	PB	PB	PB	PB	PB
NS	NB	ZO	PB	PB	PB	PB	PB
ZO	NB	NS	ZO	PS	PS	PB	PB
PS	NB	NB	NS	ZO	ZO	PB	PB
PM	NB	NB	NB	NS	ZO	PS	PS
PB	NB	NB	NB	NB	ZO	PS	PS

3.1.2.1.5 控制效果

首先设定,当实验系统小车距目标位置的距离小于 0.005m,并且摆杆的摆角小于 0.8 度时,即视为系统完成定位。

模糊控制 Simulink 平台上的控制图已在前面给出。首先对这个程序外部方式下的 Real-Time-Target 建模,然后连接外部模型,就可以开始实验,得到实验曲线和数据。

表 2 角度模糊控制器的模糊规则表

Acc \ $\frac{d\theta}{dt}$	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
NB	ZO	NS	ZO	PS	PS	PB	PB
NM	ZO	NS	ZO	PS	PS	PB	PB
NS	NS	NS	ZO	PS	PS	PB	PB
ZO	NB	NS	NS	ZO	PS	PS	PB
PS	NB	NS	NS	NS	ZO	PS	PB
PM	NB	NB	NS	NS	ZO	PS	PS
PB	NB	NB	NS	NS	ZO	PS	PS

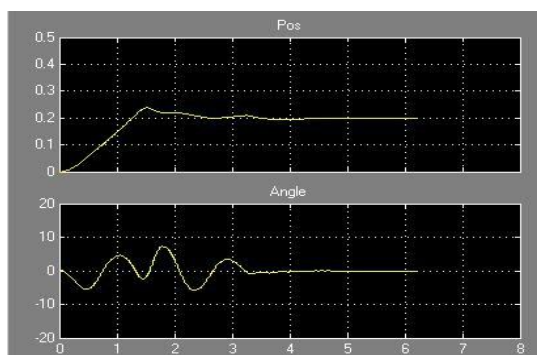


图 9 目标位置为 0.2 米时的控制效果图

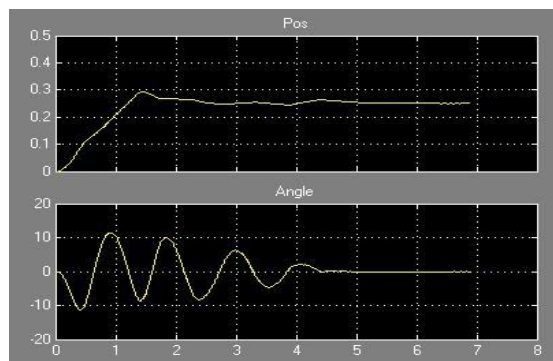


图 10 目标位置为 0.25 米时的控制效果图

从图中看出,控制的效果很好,但位置响应曲线存在静差。这是因为,在目标位置附近控制器的输出接近于零,而实验设备是一个机械系统,必然存在摩擦,当控制器输出力不足以克服摩擦力时,静差就不可避免地产生了。静差可以通过调整模糊控制器输出的 zo 模糊子集隶属度函数的形状来改善,但无论如何都不能根本消除。如想彻底消除,可引入一个补偿机制,当接近目标位置时额外地施加给小车一个力的作用,但前提是这个力必须合适。

3.2 用遗传算法优化模糊控制器

操作者根据自己的经验制定的模糊隶属度函数并不一定是最优的,特别是系统复杂性提高时,隶属度函数的变化会明显影响模糊逻辑控制器的性能,因此,应该设计具备自调整功能的模糊控制器。

我们用改进的遗传算法来寻优模糊控制器输出 Acc 模糊子集的隶属度函数。由图 8 可以看到,Acc 共有 5 个模糊子集:NB,NS,ZO,PS,PB。其中 ZO 为单点模糊集,只有在横坐标 0 时,ZO 的隶属度函数的值为 1。除 ZO 外,其他四个模糊子集都是直角三角形且都与横坐标两点交叉。我们在这里要优化的参数就是四个直角三角形的直角边与横坐标的交点坐标。位置模糊控制器的输出 Acc 与角度模糊控制器的输出 Acc 加起来需要优化的参数有八个。设这八个变量分别为 nnb1, nns1, nps1, npb1 (位置模糊控制器的输出 Acc 需要优化的四个参数), nnb2, nns2, nps2, npb2 (角度模糊控制器的输出 Acc 需要优化的四个参数)。

$$-2 \leq n_{nb1}, n_{nb2}, n_{ns1}, n_{ns2} \leq 0$$

$$0 \leq n_{pb1}, n_{pb2}, n_{pb1}, n_{pb2} \leq 2$$

它们的约束条件分别为

3.2.1 遗传算法设计

遗传算法的设计包括以下内容:

3.2.1.1 控制参数的设定

遗传算法的控制参数主要包括:初始种群的数目、交叉和变异概率、待寻优的参数的初始值等。这里选择初始种群的数目 n 为 40,交叉概率和变异概率的选择按照自适应交叉概率和自适应变异概率的方法进行选择,初始的交叉概率为 0.8,初始的变异概率为 0.1。待寻优参数的初始值按照选择初始种群的方法进行。

3.2.1.2 编码方式的选择

为减少二进制数到实数之间的转换误差,增强种群的稳定性,选择基于浮点的编码方式,将所有待寻优参数组成一个染色体特体,然后对之进行编码。

3.2.1.3 评价函数的选取

桥式吊车是一个多目标系统,须兼顾到晃动角度和定位时间两个指标,根据实验设备的特性,我们选用并列选择法。这样,须为两个指标各设定一个评价函数,分别取定位时间和最大晃动角度的倒数作为评价函数。

用基于排序选择的改进遗传算法,对模糊控制器的输出 Acc 的隶属度函数进行优化,改善模糊控制器的性能。

3.2.2 优化结果

随着遗传算法代数地不断进化,群体中个体的整体适应度水平不断提高,从 40 代以后逐渐收敛,50 代达到最优解。

现在,我们把模糊控制器的控制效果和用遗传算法优化后的模糊控制器的控制效果图做个简单对比。

表 3 模糊控制器优化前后所用时间对比

目标位置 \ 控制器	0.2 米	0.25 米	0.3 米	0.35 米
模糊控制器	1054	1522	1698	1523
优化后的控制器	842	752	1369	1063

通过实验结果可以看出,基于改进遗传算法的模糊控制能够更好的控制桥式吊车模型,系统的超调量以及调节时间

都大大小于单纯的模糊控制器,这说明基于排序选择的改进遗传算法在模糊控制器参数寻优中充分发挥了全局寻优的性能,较好地克服了常规模糊控制器的隶属度函数难以制定的不足,极大地提高了模糊控制器的控制性能。

表 4 模糊控制器被优化前后运行过程中最大晃动角度对比(度)

目标位置 \ 控制器	0.2 米	0.25 米	0.3 米	0.35 米
模糊控制器	7.6506	11.5509	15.1511	15.1511
优化后的控制器	4.3503	5.8504	13.9510	11.7009

4. 结束语

本文以 MATLAB/Simulink 为软件工具平台,利用固高公司提供的 MATLAB 实时控制软件,连接了 GT-400-SV 运动控制器和外部实验模型的控制通道,成功的完成了控制器与实验设备的连接。

实验结果表明,基于排序选择的改进遗传算法在模糊控制器的参数寻优方面具有较好的特性,使桥式吊车的定位和防摆性能得到了不同程度的改善,而且该算法易于程序实现,具有一定的工程实践指导意义。

参考文献

- [1] J.W.Auernig and H.Troger, "Time optimal control of overhead cranes with hoisting of the load", *Automatica*, vol.23, pp.437-447, 1987.
- [2] A.piazza and A.Visioli, "Optimal dynamic-investigation-based control of an overhead crane" *IEEE Proceedings-Control Theory and Applications*, vol. 149, no.5, Sep.2002.
- [3] Y.Sakawa and Y.Shindo, "Optimal control of container cranes," *Automatica*, Vol.18, pp.257-266, 1982.
- [4] Y.C.Liang and K.K.Kon, "concise anti-swing approach for fuzzy crane control," *IEE Electronics Letters*, vol.3, no.2, pp.167-168, Jan.1997.
- [5] S.T.Lin and A.K.Huang, "Hierarchical fuzzy force control for industrial robot," *IEEE Trans.Ind. Electron.*, vol.45, no.4, pp.646-653, Aug.1998.