

适于长距离运输的分段吊车模糊控制

刘殿通, 易建强, 谭 民

(中国科学院 自动化研究所, 北京 100080)

摘要: 针对长距离吊车运输系统的特征, 提出了分段切换因子模糊控制方法. 该方法使用两个子模糊控制器分别用于抗摆和定位控制, 并运用实值遗传算法选取模糊控制器的分段切换因子. 仿真结果表明: 该方法保证了定位精度并能有效地抑制超调, 在加速阶段、运输阶段和减速阶段能够使载荷摆角最小, 并且能够在目标位置进行消摆控制, 其性能优于传统二次型最优控制.

关键词: 吊车; 模糊控制; 遗传算法; 分段控制

中图分类号: TP273 **文献标识码:** A

Two-stage fuzzy control for long-distance transportation of overhead crane

LIU Dian-tong, YI Jian-qiang, TAN Min

(Institute of Automation, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China)

Abstract: A GA-based two-stage parameter-switching fuzzy controller was presented for the long-distance transporting performance of overhead crane. In this controller, two fuzzy sub-controllers were respectively built for swing damping and position control. The real-valued GA was used to tune the parameters of the fuzzy sub-controllers in accelerating stage and decelerating stage in order to ensure the positioning precision, the minimum transporting swing angle and the damping of swing angle at the target position. Simulation results demonstrated the effectiveness of this method and its advantage over quadratic optimal control.

Key words: overhead crane; fuzzy control; genetic algorithm; two-stage control

1 引言(Introduction)

吊车作为一种重物运输工具, 已广泛应用于车间、码头、仓库等场所. 其主要特征是: 把吊绳作为悬挂重物的工具, 有利于重物的提升和放下、提高了运输速度. 然而吊绳却带来了一些问题: 加速、减速以及外部干扰都会引起重物摆动. 摆动使得定位精度差, 且重物难以放下, 摆动还会引起运输过程中重物与其他设备的碰撞, 造成不必要的损失, 因此在运输过程中需要对重物的摆动和最后的定位进行控制, 以减小损失和提高效率.

许多学者在吊车控制方面做了大量的工作. Park 等人提出了考虑绳长变化的输入轮廓控制方法^[1]; Yoshimi 等人把整个运输过程分为 5 个速度轮廓进行控制^[2]; William 等人研究了提升载荷对跟踪输入轮廓控制的影响^[3]. 上述三种控制都采用跟踪输入轮廓的方法, 这些输入轮廓主要依靠系统数学模型或系统固有频率获得, 然而在实际控制中这些

都难以精确得到; 并且上述方法都是开环控制, 难以抑制干扰. Ridout 使用变阻尼的方法进行抗摆控制^[4]; Lee 建立了伺服系统数学模型, 采用双环控制^[5] (位置控制作为内环, 抗摆控制作为外环); Giua 等人设计了吊车控制的观测器和控制器^[6]. 这 3 种方法都属于闭环控制, 虽然有利于抑制干扰, 但需要精确的数学模型和必要的线性化, 且计算量大. 为了克服数学模型的限制, 部分学者进行了模糊控制的研究: Suzuki 等人使用模糊推理来得到加速时间和减速时间^[7]; Lee 等人^[8] 和华克强将模糊推理应用到了抗摆控制上^[9]; Michael 等人不仅将模糊技术用于抗摆控制^[10], 还用于位置控制. 这些方法都使用较多的规则来提高控制精度, 不利于控制规则的设定和实时推理, 并且参数的设定完全依靠经验, 效果不能保证. 另外所有以上方法都没有考虑实际系统约束, 难以应用于长距离运输中.

本文在简化模糊控制器设计的基础上, 提出了

一种考虑了实际系统约束并适合长距离运输的吊车控制方法:双模糊控制与分段控制相结合,并利用遗传算法获取模糊控制器量化和比例因子。

2 吊车系统模型(Overhead crane model)

图 1 为一维吊车系统的力学模型, m_1 为小车质量, m_2 为载荷质量, x 为小车移动距离, θ 为载荷摆动角度, L 为吊绳的理论长度, F 为小车电机驱动力及摩擦力的合力。根据拉格朗日方程:

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial T}{\partial \dot{q}_i} \right) - \frac{\partial T}{\partial q_i} + \frac{\partial U}{\partial q_i} = Q_i \quad (1)$$

式中: T 为系统总动能; U 为系统总势能; q_i 为系统广义坐标; Q_i 为除转换为势能的所有外力。可以得到系统的运动方程:

$$\begin{cases} (m_1 + m_2)\ddot{x} + m_2 L \ddot{\theta} \cos\theta - m_2 L \dot{\theta}^2 \sin\theta = F, \\ m_2 L \ddot{\theta} + m_2 L \dot{x} \cos\theta + m_2 g L \sin\theta = 0. \end{cases} \quad (2)$$

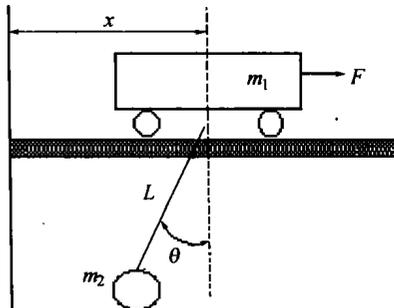


图 1 吊车系统模型

Fig. 1 Overhead crane model

3 控制结构设计(Design of control structure)

吊车系统是典型的非线性系统,实际应用中重物质量往往是未知的,绳子长度时常变化,存在实际状态约束。这些都会给精确控制带来很大的困难,同时使得经典和现代控制方法难以奏效。

一维吊车系统有 4 个状态变量 $(x, \dot{x}, \theta, \dot{\theta})$, 分别为位置、速度、角度和角速度。如果模糊控制器的输入采用 4 个状态变量,模糊控制规则数目巨大且难以设定,从而推理速度慢,不利于实时控制;另外运输过程中只有加速和减速时才存在较大的载荷摆角,可以把位置和角度分开控制。为此采用双模糊控制方案:位置模糊控制器实现快速定位和抑制超调,角度模糊控制器抑制摆角。

在运输距离较长且存在速度、加速度约束时,如果模糊控制器把量化因子设为定值,则在目标位置附近位置误差较小;而此时正好处于减速阶段,载荷摆角却很大,位置控制作用就远远小于角度控制作用,不利于快速定位,可能出现两种情况:出现位置

超调或者减速时间过长。故针对长距离运输情况,提出分段模糊控制的方法:在加速阶段和减速阶段分别设置一组因子。

吊车系统是典型的多目标控制系统:定位精度要高、重物摆角要小、运输时间要短。并且三者之间存在着矛盾:起始阶段,摆角控制与时间最优控制矛盾;减速阶段,定位控制和摆角控制矛盾。如何平衡三者之间的关系对于控制器的性能十分重要。另外吊车工作环境较差,外部干扰如风、摩擦力等非常严重,这些都提高了控制难度;同时为了增强实时性,尽可能采用模糊规则比较少的控制器。这样,控制性能就主要由量化因子和比例因子决定,而且这些因子之间具有较强的耦合性,设定非常困难,仅凭经验或试探法根本无法保证控制效果,因此采用遗传算法选择模糊控制器因子的方法。

基于上述分析,提出如图 2 所示的控制结构。其中, x_0 与 θ_0 分别为目标位置和角度, E_x, EC_x 与 E_θ, EC_θ 为两个模糊控制器输入, Y_x, Y_θ 为输出, $W_1 \sim W_4$ 为量化因子, W_5, W_6 为比例因子, U 为控制量。

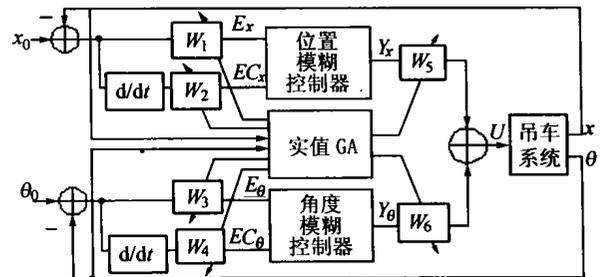


图 2 控制结构示意图

Fig. 2 Schematic diagram of control system

4 模糊控制器与遗传算法设计(Designs of fuzzy controller and GA)

4.1 模糊控制器(Fuzzy controller)

本文采用模糊化、模糊推理及解模糊的方法,位置和角度模糊控制器采用相同的设计方法。

1) 隶属度函数定义。

输入变量采用简单的三角形隶属度函数,输出变量采用单点隶属度函数,如图 3 所示。

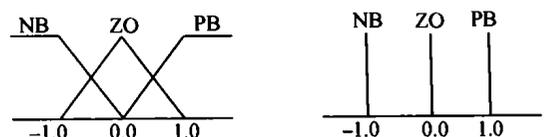


图 3 输入输出隶属函数

Fig. 3 Input and output membership functions

2) 模糊控制规则的设定.

根据实际操作经验,容易得到控制规则,见表1.

表1 模糊控制规则表

Table 1 Rules for fuzzy sub-controllers

$EC \setminus E$	NB	ZO	PB
NB	PB	PB	ZO
ZO	PB	ZO	NB
PB	ZO	NB	NB

3) 解模糊.

采用加权平均法,子模糊控制器的输出为

$$Y = \sum_{i=1}^9 w_i y_i / \sum_{i=1}^9 w_i. \quad (3)$$

其中, w_i 为各规则的激活强度, y_i 为输出隶属函数各单点值.这样吊车系统的控制量为

$$U = W_5 Y_x + W_6 Y_\theta. \quad (4)$$

4.2 遗传算法(Genetic algorithm)

给定吊车控制的初始条件和终止条件,根据设定的评价函数,就可以得到控制器的分段最优因子.

1) 编码.

在吊车模糊控制中,为了消除二进制编码的编码和解码的繁琐计算以及提高精度,本文使用实值编码.这样,一个染色体有6个参数组成:

$$W = [W_1 \ W_2 \ W_3 \ W_4 \ W_5 \ W_6]$$

2) 评价函数.

本文在因子寻优过程中设定:把载荷从原点向正方向的目标位置运输.首先考虑加速阶段,在最大加速度约束下,速度快速接近最大速度;在这个过程中,摆角从零逐渐负向增大(不能超过摆角限定值 $-\theta_{max}$) 然后减小,当速度到达稳定运输速度时,摆角减小到零,同时满足以上要求前提下,位置误差越小越好,对摆动角速度没有要求.优化参数,使评价指标 J_{begin} 最大化:

$$J_{begin} = \int (\mu_1 x + \mu_2 \dot{x} + \mu_3 f_1(\theta)) dt / (1 + \text{penalty}_1) \quad (5)$$

其中 μ_1, μ_2, μ_3 分别为位置、速度和角度在控制性能评价中的权重,可以根据实际要求而定.前两项保证了加速最快,后一项保证加速时角度最小并防止出现正摆角, penalty_1 是每次角度超过最大值时的惩罚系数, $f_1(\theta)$ 为与摆角有关的函数:

$$f_1(\theta) = \begin{cases} \theta_{max} + \theta, & \theta \leq 0, \\ -\theta, & \theta > 0. \end{cases} \quad (6)$$

考虑减速阶段,在最大加速度约束下,要求速度快速减为零,同时摆角从零逐渐增大(不能超过摆角

限定值)然后减小,当速度减为零时,摆角减小到零,并且正好到达目标位置,同样对摆动角速度没有要求:

$$J_{end} = \int (\mu_4 f_2(x) + \mu_5 f_3(\dot{x}) + \mu_6 f_4(\theta)) dt / (1 + \text{penalty}_2). \quad (7)$$

其中 μ_4, μ_5, μ_6 分别为位置、速度和角度在控制性能评价中的权重.式中第一项保证定位精度并防止出现位置超调,第二项保证减速时间短并防止出现负的速度,第三项保证减速时角度最小并防止角度为负, penalty_2 是角度超过最大值、位置出现超调、速度出现负值时的累加惩罚系数, $f_2(x), f_3(\dot{x}), f_4(\theta)$ 为分别与位置、速度、摆角有关的函数:

$$f_2(x) = \begin{cases} x, & x \leq x_0 \text{ 时}, \\ x_0 - x, & x > x_0 \text{ 时}; \end{cases} \quad (8)$$

$$f_3(\dot{x}) = \begin{cases} \dot{x}_{max} - \dot{x}, & \dot{x} \geq 0 \text{ 时}, \\ \dot{x}, & \dot{x} < 0 \text{ 时}; \end{cases} \quad (9)$$

$$f_4(\theta) = \begin{cases} \theta_{max} - \theta, & \theta \geq 0 \text{ 时}, \\ \theta, & \theta < 0 \text{ 时}. \end{cases} \quad (10)$$

3) 遗传操作.

a) 选择.

采用旋转赌轮的方式,第 i 个染色体被选择的概率为

$$p_i = J_i / \sum_{j=1}^N J_j. \quad (11)$$

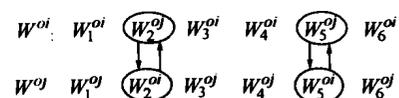
其中 N 为种群中染色体的个数,这样在下一代中这个染色体的可能数目为 $N \times p_i$.

b) 交叉算子.

采用以下线性方式进行交叉:

$$\begin{cases} W_k^{oi} = rW_k^{pi} + (1-r)W_k^{pj}, \\ W_k^{oj} = (1-r)W_k^{pi} + rW_k^{pj}. \end{cases} \quad (12)$$

并同时随机地对换两对参数:



其中 r 为 0 到 1 之间的随机数, W_k^{oi}, W_k^{oj} 为子代, W_k^{pi}, W_k^{pj} 为父代.

c) 变异算子.

本文采用时变变异概率的方法,同时保留最优个体.变异概率取为

$$p = \exp(-1/T). \quad (13)$$

其中 T 为时变参数,初始值可以取大一些,然后以一定的系数(根据遗传代数而定)递减.变异方式

$$W^{oi} = W^{pi} + Mw. \quad (14)$$

w 为六维高斯向量,每维数值在 -1 与 1 之间,表示

随机变异方向, M 为小于搜索范围的随机数, 若产生的子代 W^{oi} 超出允许范围, 则用 0 到 M 之间的随机数替换 M , 一直循环直到产生可行的 W^{oi} 为止.

在保留最优个体的前提下, 采用先变异后交叉的方式更有利于寻优, 故遗传操作顺序定位: 选择 - 变异 - 交叉, 一直循环到设定代数.

5 控制仿真(Control simulations)

系统参数为: 小车最大运行速度为 0.5 m/s, 最大加速度为 2 m/s², 小车质量为 1 kg, 载荷质量为 1 kg, 绳长为 1 m. 首先利用遗传算法进行因子选择: 加速时, 采用系统初始状态和中间状态(位置); 减速时, 使用中间状态和目标状态, 这样参数变换时不会对系统造成冲击. 图 4 给出了仿真结果((a), (b)和(d)中速度纵坐标每格 0.1 m/s). 使用所提出方法的仿真:(a)为运输过程控制, 从初始状态(0,0,0,0)到目标状态(10,0,0,0), 8 s 时人为增加 -0.4° 的干扰;

(b)为从状态(10,0,30,0)到状态(10,0,0,0)消摆的控制仿真结果;(c)为从不同初始位置和角度把载荷向原点运输的相平面图. 由于二次型最优控制没有考虑系统状态约束, 不会出现恒速运行区(参见文献[6]), 从而出现启动摆角大、减速时间长等问题. 针对以上问题, 在二次型最优控制仿真中采用对位置误差取饱和和运算的方法达到满足系统约束的目的, 但仍出现了减速时间较长的问题, (d)给出了这种方法的仿真结果 ($K = [26.27\ 29.51\ -86.38\ -3.67]$). 仿真结果表明: 无论初始条件如何, 所提出的方法在加速过程、减速过程和运输过程中, 都可以有效地抑制摆角, 并在目标位置精确定位, 得到较高的运输效率; 与二次型最优控制相比, 在满足摆角要求的前提下, 所提出的方法加速和减速过程时间短(减速阶段尤为明显), 大大提高了运输效率, 并且抗干扰能力也有所增强.

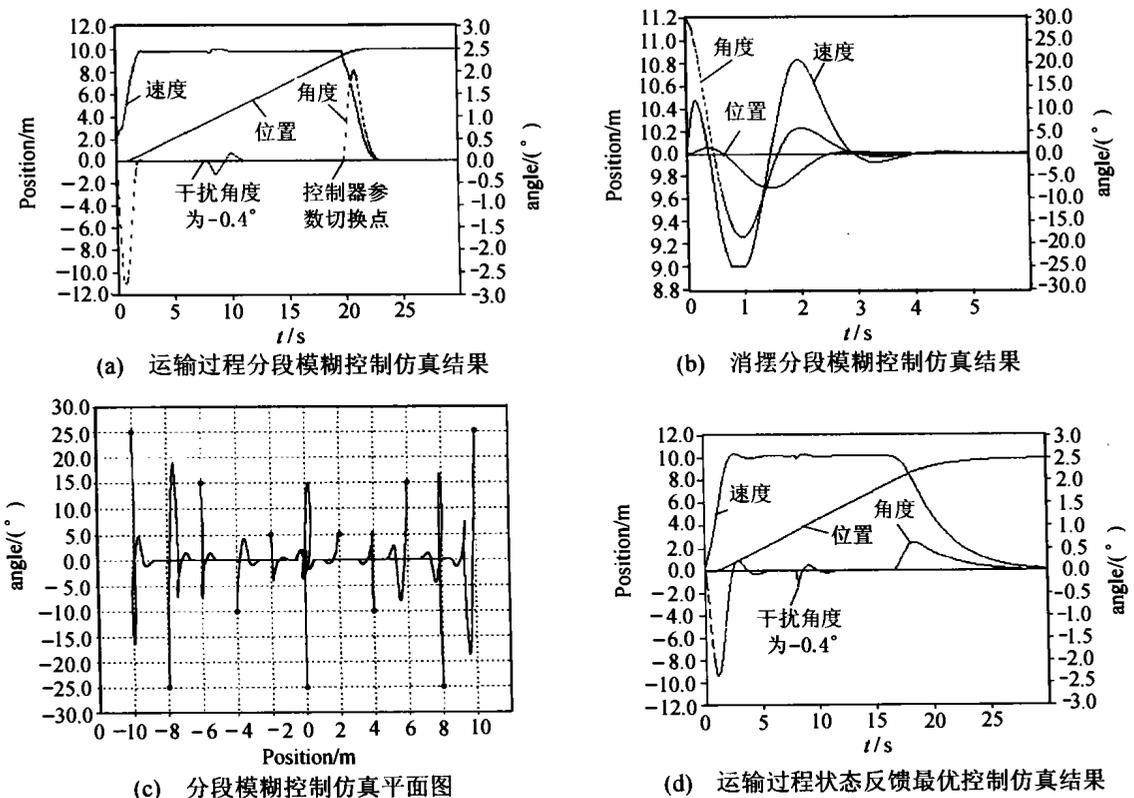


图 4 仿真结果

Fig. 4 Simulation results

6 结论(Conclusion)

针对吊车长距离运输系统, 提出了一种有效的方法: 在运输过程中采用最简单的模糊控制方法, 提高了控制系统的实时性; 采用实值遗传算法调整模糊控制器因子获得了较好的控制效果; 并根据加速

和减速阶段的要求不同, 采用了分段变因子方法. 仿真结果验证了该控制方法的有效性: 加速、减速和运输过程都能够有效地抑制摆角, 并且能够快速到达目标位置且定位精度较高, 其性能优于二次型最优控制.

参考文献(References)

- [1] PARK B, HONG K, HUH C. Time-efficient input shaping control of container crane systems [A]. *Proc of the 2000 IEEE Int Conf on Control Application* [C]. Anchorage, Alaska: IEEE Service Center, IEEE Control System Society, 2000:80 - 85.
- [2] YOSHIMI H, MASAKATSU N. Anti-sway and position control of crane system [A]. *Proc of 4th Int Workshop on Advanced Motion Control* [C]. Marzo: IEEE Service Center, IEEE Industrial Electronics Society, 1996, 2:657 - 662.
- [3] WILLIAM S, LISA P, MICHAEL K, et al. Effects of hoisting on the input shaping control of gantry cranes [J]. *Control Engineering Practice*, 2000, 8(10):1159 - 1165.
- [4] RIDOUT A J. Variably damped control of the overhead crane [A]. *Proc of 15th Annual Conf of the IEEE Industrial Electronics Society* [C]. Philadelphia, PA: IEEE Service Center, IEEE Industrial Electronics Society, 1989:263 - 269.
- [5] LEE H H. Modeling and control of a three-dimensional overhead crane [J]. *J of Dynamic System, Measurement, and Control*, 1998, 120(4):471 - 476.
- [6] GIUA A, SEATZU C, USAI G. Observer-controller design for cranes via Lyapunov equivalence [J]. *Automatica*, 1999, 35(4): 669 - 678.
- [7] SUZUKI Y, YAMADA S, FUJIKAWA H. Anti-swing control of the container crane by fuzzy control [A]. *Proc of 19th Annual Conf of the IEEE Industrial Electronics Society* [C]. Maui, Hawaii: IEEE Service Center, IEEE Industrial Electronics Society, 1993:230 - 235.
- [8] LEE H H, CHO S K. A new fuzzy-logic anti-swing control for industrial three-dimensional overhead cranes [A]. *Proc of 2001 IEEE Int Conf on Robotics & Automation* [C]. Seoul Korea: IEEE Service Center, IEEE Robotics & Automation Society, 2001:2956 - 2961.
- [9] 华克强. 桥式吊车模糊防摆技术[J]. 中国民航学院学报, 2000, 18(3):12 - 15.
(HUA Keqiang. Fuzzy anti-swing technology for overhead crane [J]. *J of Civil Aviation University of China*, 2000, 18(3):12 - 15.)
- [10] MICHAEL J N, MOHAMED B T. Control of overhead cranes using a fuzzy logic controller [J]. *J of Intelligent and Fuzzy System*, 2000, 8(1):1 - 18.

作者简介

刘殿通 (1971 —), 男, 中国科学院自动化研究所博士生. 研究方向为智能控制, 欠驱动系统控制. E-mail: diantong.liu@mail.ia.ac.cn;

易建强 (1963 —), 男, 中国科学院自动化研究所研究员, 博士生导师. 研究领域为智能控制, 机器人技术, 机电一体化等. E-mail: jianqiang.yi@mail.ia.ac.cn;

谭民 (1962 —), 男, 中国科学院自动化研究所研究员, 博士生导师. 研究领域为机器人可靠性设计, 机器人团体协作与控制, 移动机器人等. E-mail: min.tan@mail.ia.ac.cn.