

基于拉格朗日模型的防摇控制系统设计

李珂¹, 魏兴国², 王海洋¹

(1. 山东大学 控制科学与工程学院, 山东 济南 250014;

2. 兰山区大数据局, 山东 临沂 276000)

摘要:防摇技术是桥吊系统中的一项关键技术。针对传统机械防摇效果不佳、电子防摇控制算法复杂等问题,采用拉格朗日法建立了系统负载的动态模型,分析负载摇摆运动的规律。基于此提出了适用于近距离的单周期防摇控制策略和基于“稳定单元”的通用防摇控制策略,实现根据摆角要求和目标位置进行小车运动控制的规划。利用 PLC 搭建桥吊防摇模型对所提控制策略进行实验验证,结果表明所提方案有很好的适用性,具有摆角小、定位准确等优点。

关键词:防摇系统;拉格朗日建模;周期消摆;直流传动

中图分类号:TH213 **文献标识码:**A **DOI:**10.19457/j.1001-2095.dqcd20878

The Design of Anti-swing Control System Based on the Lagrangian Model

LI Ke¹, WEI Xingguo², WANG Haiyang¹

(1. School of Control Science and Engineering, Shandong University, Jinan 250014, Shandong, China;

2. Lanshan Distict Big Data Bureau, Linyi 276000, Shandong, China)

Abstract: Anti-swing technology is a key technology in the bridge crane system. The effect of traditional mechanical anti-shake device is poor, and the algorithm of electronic anti-shake controller is complex. Therefore, the dynamic model of the anti-swing system was established by Lagrangian method to analyze the law of load swing motion. Based on this, a single-cycle stabilizer control strategy applied to a short distance and the “stable unit” control strategy for general anti-swing system were presented. According to the requirements of swing angle and target position, the control plan of vehicle motion was carried out. The proposed control strategy was verified by using PLC to build the anti-rolling model of bridge crane, the results show that the proposed scheme is successfully applied and has the advantages of small angular as well as accurate positioning.

Key words: anti-swing system; Lagrangian modeling; periodic anti-pendulum; DC drive

在现代工业生产中,起吊设备扮演着重要的角色,桥吊是码头的核心,其作业能力决定着一个码头的货物吞吐能力^[1]。桥吊设备在启停以及移动过程中必然会发生摇晃现象。摇晃现象不仅影响生产运输效率,还有可能会损坏货物,还存在着一定的安全隐患。为了提高装、卸货效率和出于安全考虑,一般要为整个系统增加防摇控制器。防摇控制和位置控制成为实现自动运转的一项关键技术^[2]。

目前的防摇设备分为机械防摇设备和电子防摇设备^[3]。其中机械防摇设备是指小车下方安装:减摇钢丝绳、力矩限制器传动链等机械设

备,通过机械手段消耗摆动的能量以实现最终消除摇摆的目的,从而提高起重机的效率。然而存在装置结构复杂、可靠性低、维修保养工作量较大等缺点。而电子防摇技术利用各种传感器对一些信息进行信息搜集和检测,再将检测到的信息传送至控制系统的微机,通过处理后将最佳的控制参数提供给小车调速系统来控制小车的运行,以达到对吊具及载荷的摆动幅度的精确控制^[4]。防摇控制系统是一个多变量、非线性、时变的欠驱动系统,传统 PID 方法控制效果不佳,神经网络、滑模控制等现代控制算法也只是停留在理论仿真阶段,实际应用较少。

基金项目:国家自然科学基金创新研究群体(61821004);国家自然科学基金(61573223,61733010)

作者简介:李珂(1979—),男,博士,副教授,Email:like@sdu.edu.cn

因此本文提出一种基于周期消摆的路径规划开环控制,采用拉格朗日法建立了系统负载的动态模型,分析负载摇摆运动的规律,提出了适用于近距离的单周期防摇控制策略和基于“稳定单元”的通用防摇控制策略。实验结果表明该防摇控制系统具有定位准、摆角小以及适用性广等优点。

1 模型分析

1.1 问题描述

防摇系统模型由同步带直线导轨、负载小车和摆臂组成,如图 1 所示。其中同步带直线导轨由伺服电机驱动,使得固定在其滑台上的负载小车能够进行水平移动;在负载小车上安装有编码器并与摆臂连接,摆臂能以编码器轴为旋转轴线,在与编码器轴正交的平面上绕该轴做圆周运动。编码器可以准确测量摆臂的摆动角度。控制要求如下:负载初始速度为 0,控制负载从起点运动到终点,通过添加控制器,使摆臂在整个运动过程中尽量稳定不摇晃。

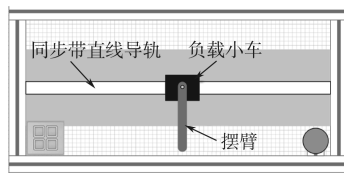


图 1 系统抽象模型

Fig. 1 System abstract model

1.2 数学建模

将防摇系统模型的小车和摆臂以及负载简化成一个移动单摆系统,如图 2 所示,并用拉格朗日分析法建立系统模型^[5-6]。

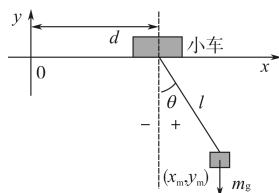


图 2 小车负载运动坐标

Fig. 2 Coordinates of vehicle load motion

定义坐标原点 0 在小车起始位置, x 正方向为小车前进方向, y 正方向为垂直向上。设小车运行到 $(d, 0)$ 位置的瞬时, 负载的位置为 (x_m, y_m) ; 摇摆角度(负载和垂线的夹角)为 θ , θ 符号定义为: 向 x 正方向摆动时 θ 为正, 反之

为负; 杆长为 l , m ; 小车质量 M , kg ; 负载质量 m , kg ; 重力加速度 g , 忽略风力和钢丝绳弹性变化、摩擦等因素。

负载位置坐标:

$$\begin{cases} x_m = d + l \sin \theta \\ y_m = -l \cos \theta \end{cases} \quad (1)$$

对式(1)求导可得到负载在 x, y 方向上的速度分量:

$$\begin{cases} \dot{x}_m = v_t + l \dot{\theta} \cos \theta \\ \dot{y}_m = -l \dot{\theta} \sin \theta \end{cases} \quad (2)$$

其中 $v_t = \dot{d}$

式中: v_t 为小车的速度。

由动能公式 $T = mv^2/2$ 得负载动能为

$$T_m = \frac{1}{2} m (v_t^2 + \dot{d}^2 + l^2 \dot{\theta}^2 + 2v_t \dot{\theta} \sin \theta + 2v_t \dot{\theta} \cos \theta) \quad (3)$$

以小车所在平面为势能零点, 则负载势能为

$$U_m = -mgl \cos \theta \quad (4)$$

由 $L_m = T_m - U_m$ 得负载的拉格朗日函数为

$$L_m = \frac{1}{2} m (v_t^2 + \dot{d}^2 + l^2 \dot{\theta}^2 + 2v_t \dot{\theta} \sin \theta + 2v_t \dot{\theta} \cos \theta) + mgl \cos \theta \quad (5)$$

经整理得系统摆角的拉格朗日方程为

$$m(2l\ddot{\theta} + l^2\ddot{\theta} + \dot{v}_t \cos \theta + g \sin \theta) = 0 \quad (6)$$

式中: $\dot{v}_t$ 为小车的加速度。

文中防摇系统的杆长不变, 即 $\dot{l} = 0$ 。经整理可得负载的动态模型:

$$\ddot{\theta} = -(a_t \cos \theta + g \sin \theta) / l \quad (7)$$

当负载摇摆角度 θ 在 $\pm 10^\circ$ (0.1745 弧度) 以内时, 可近似认为 $\cos \theta \approx 1$, $\sin \theta \approx \theta$, 小车负载动态模型可进一步简化为

$$\ddot{\theta} + g\theta/l + a_t/l = 0 \quad (8)$$

从式(8)可以看到, 理想情况下, 负载摆角与小车加速度及杆长有关, 而与负载质量无关。当 a_t 为 0 时, $\ddot{\theta} = -g \sin \theta$ 为理想单摆动态模型。可见小车只有在进行加减速时才对负载摆角产生影响; 而在静止或匀速运行时, 负载自身将呈现单摆运动特性。

假设小车的最大加速度为 a_m , 设 $u = \ddot{x}/a_m$, 则有 $|u| \leq 1$, 负载摆动方程可写成:

$$\ddot{\theta} + g\theta/l = a_m u / l \quad (9)$$

设 $\omega^2 = g/l$, $K = a_m/l$, 取状态变量: $x_1 = \omega\theta/K$, $x_2 = \dot{\theta}/K$, 则状态方程:

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & \omega \\ \omega & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} u \quad (10)$$

负载摆锤摆动的相平面图如图 3 所示。通过相平面分析,可知在负载的摆动周期 $T=2\pi\sqrt{l/g}$ 内,对小车施加恒定的加(减)速度后,负载将回到起始状态。若起始状态时负载无摇摆,则进行整数个周期加(减)速结束后负载将保持无摇摆状态。

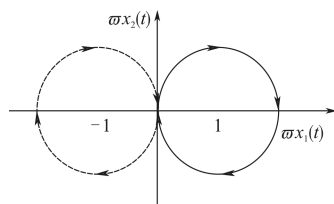


图 3 负载摆动相平面图

Fig. 3 Plan of load swing phase

2 防摇控制策略研究

根据防摇系统模型,结合控制要求,本系统的输入变量为小车速度 v ,输出变量为摆锤摆角 θ 和小车位置 x ,因此本系统为一类欠驱动系统,即输入变量数少于输出变量数。根据对摆锤摆角以及小车位置的控制要求,本文提出了周期消摆的路径规划开环控制策略,控制框图如图 4 所示。

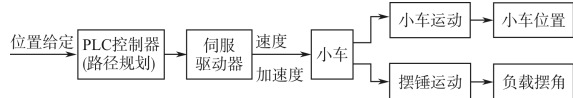


图 4 周期消摆的路径规划控制框图

Fig. 4 Control block diagram of the path planning for the periodic anti-pendulum

2.1 单周期消摆的路径规划控制策略

众所周知,负载摆臂的摆角与小车加速度和摆臂的长度有关,而与负载质量无关。只有当小车受到外力作用时,负载摆臂的摆角才会受到影响;否则摆臂自身将静止或呈现单摆运动的特性。

单周期消摆控制是指在 1 个摆动周期内,保证小车具有相同的加速度和加、减速时间,利用单摆运动的周期性和对称性来消除负载的摆动,实现消摆控制。

考虑到小车在整个运动过程中是一个加速启动、匀速运动和减速停止的过程,则在摆臂在大约 1 个周期 $T=2\pi\sqrt{l/g}$ 内,将小车运动路径划分为 3 个阶段,如图 5 所示。图 5 中 OA 为匀加速阶段,AB 为匀速运动阶段,BC 为匀减速运动阶段。

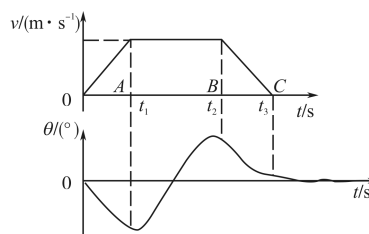


图 5 单周期消摆的小车路径规划图

Fig. 5 Path planning diagram of the vehicle with one periodic anti-pendulum

2.2 基于“稳定单元”的周期消摆路径规划

单周期消摆的控制策略可以有效地保证短距离系统的调节时间以及位置控制。但随运行距离的增加负载的摆角增大。因此,对长距离的运行做出了改善,提出基于“稳定单元”周期消摆的控制策略。“稳定单元”指在随机给定位置情况下,能保证系统正常稳定运行的运动单元。该策略的基本思想即是,小车运行的加速时间和减速时间为摆动周期的整数倍,同时保证两阶段加速度大小一致,中间匀速运动的时间可根据实际运行的距离设定。对小车运动路径做了进一步规划,如图 6 所示,系统的运动过程分为正向匀加速启动阶段、匀速运动阶段、匀减速运动阶段以及相应的反向急停运动阶段。

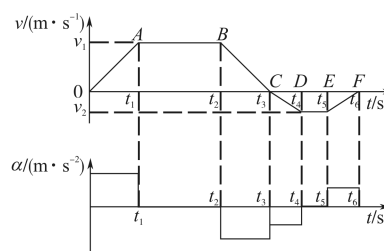


图 6 基于“稳定单元”的小车路径规划图

Fig. 6 The path planning diagram of vehicle based on stability unit

3 实验结果与分析

3.1 实验平台

本文采用的实验系统,通过伺服驱动器及输入输出模块控制电机带动小车在导轨上移动,实现对摆臂的运动控制。防摇模型的控制程序使用 Automation Studio 程序进行开发。

3.2 实验结果与讨论

基于以上硬件平台,采用周期消摆的方法,因本实验平台导轨长度有限,只进行了具有代表性的单周期和双周期的实验。首先针对不同终

点进行了单周期实验,以 300 mm 作为终点为例进行说明分析。

在 Automation studio 中利用 trace 功能记录运动的位移、速度以及摆角等关键参数,300 mm 为终点单周期 trace 图如图 7 所示。

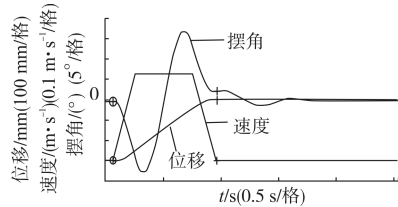


图 7 300 mm 为终点单周期 trace 图像
Fig. 7 Single-cycle trace image at 300 mm as the end point

图 7 运动过程中,匀加速与匀减速时间都为 0.2 s,加速度值为 2.14 m/s^2 ,速度最大值为 0.428 m/s ,到达速度最大值后匀速运动 0.5 s,之后匀减速运动到停止,整个运动过程时间仅为 0.9 s,因摆角较大,与理想单摆周期有一定误差。因加速与减速过程中加速度值较大,整个过程最大摆角为 17.6° ,摆动较大,在停止时负载摆角仅为 2° ,系统很快将会稳定。停止位置为 300.3 mm ,无超调或震荡发生,与目标位置 300 mm 仅相差 0.3 mm,误差仅为 0.1%。充分利用了匀速运动过程中负载做单摆运动这一特性,在加速与减速阶段保持对称,在大约 1 个周期内即可完成全部运动。

对不同目标位置进行了多组实验,得到表 1。如果在 1 个周期左右时间内运动到目标位置,此时速度较快、位置准确,但同时存在负载在运动过程中摆角偏大的问题,为了减小负载摆角,需要减小加速和减速阶段的加速度,增加运动的时间,根据平台的实际情况设计了双周期的实验,并基于此验证了“稳定单元”的设计思路。同样以 300 mm 作为终点的图 8 进行说明分析。

表 1 单周期不同目标位置下系统性能表
Tab. 1 System performance table with different positions in a single cycle

目标位置/mm	最大摆角/ $^\circ$	停止摆角/ $^\circ$	运动时间/s	实际位置/mm	位置误差/%
50	2.19	1.31	0.9	50.3	0.600
100	5.62	1.93	0.9	100.7	0.700
150	8.70	1.75	0.9	150.1	0.060
200	11.77	1.58	0.9	200.9	0.450
250	14.85	1.93	0.9	249.8	0.080
300	17.66	1.93	0.9	300.3	0.100
350	20.91	2.19	0.9	349.8	0.057
400	23.81	2.37	0.9	399.7	0.075

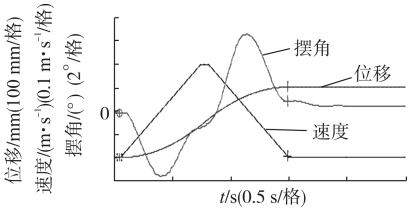


图 8 300 mm 为终点双周期 trace 图像
Fig. 8 Dual-cycle trace image of 300 mm as the end point

在运动过程中匀加速和匀减速的时间大约为 0.69 s,加速度值为 1.93 m/s^2 ,速度最大值为 0.4 m/s ,整个运动过程时间约为 1.45 s。运动过程中最大摆角为 6.59° ,与单周期相比减小了 62.6%,最后停止时刻摆角仅为 0.79° 。最终停止位置为 302.8 mm ,与目标位置相差 2.8 mm,误差仅有 0.93%。针对双周期运动,进行多组实验,双周期不同目标位置下系统性能如表 2 所示。

表 2 双周期不同目标位置下系统性能表
Tab. 2 System performance table with different target positions in two cycles

目标位置/mm	最大摆角/ $^\circ$	停止摆角/ $^\circ$	运动时间/s	实际位置/mm	位置误差/%
50	0.43	0.35	1.45	50.0	0.00
100	2.11	1.14	1.45	100.3	0.30
150	3.42	0.88	1.45	150.9	0.60
200	4.92	0.44	1.45	201.5	0.74
250	5.70	0.61	1.45	249.9	0.04
300	6.59	0.79	1.45	302.8	0.93
350	7.80	0.79	1.45	352.7	0.76
400	8.35	0.87	1.45	401.9	0.47

对比单周期和双周期 2 种运动方案,以 300 mm 为终点对比分析如图 9 所示。

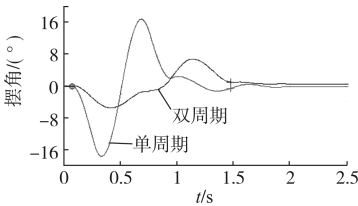


图 9 单周期和双周期摆角对比图
Fig. 9 Comparison of single-cycle and double-cycle pendulum angles

单周期运动时速度较快,可在 0.9 s 完成运动过程,但同时存在运动过程中摆角过大的问题,尤其是在较长距离时,摆角最大值可达 17.6° ,对系统的安全平稳运行有较大影响。双周期运动时,运动时间为 1.45 s,较单周期相比,运动时

间有所增加,但负载摆角有了很大程度的减小,与单周期相比可减小约 60% 的摆角,在可测试范围内系统摆角不会超过 10° ,如果想要实现较长距离的运动,可以通过增加中间匀速运动的时间来完成。验证了之前“稳定单元”控制方案的可行性。可以通过控制加速度的大小来控制负载的摆角大小,此方案可以很好的兼顾时间和摆角 2 个变量。由此可见在实验中所采用的双周期方案实际为一个最小“稳定单元”,使系统有一个良好的整体性能。

综合考虑 2 种运动方式的特点以及本实验平台的特性,可采用“近单远双”的运动控制方式,即通过设置适当的距离阈值,在近距离运动时采用单周期方式,可以在较快时间内到达目标位置,同时负载摆角不会太大;在远距离运动时采用双周期方式。设置 100 mm 为分段的阈值,在 100 mm 以内采用单周期运动方式,运动时间为 0.9 s,同时最大摆角不会超过 5.62° ;在 100 mm 以上采用双周期运动方式,系统运动时间为 1.45 s,同时最大摆角小于 8.35° 。采用“近单远双”的方式,解决了时间和摆角矛盾的问题,通过设置适当的阈值实现分段可优化系统的控制性能。

4 结论

本文采用拉格朗日方程对小车负载建立了动态模型,得到消摆的运动规律并在此基础上设计了周期消摆的路径规划方法,利用实验平台进

行了单周期和双周期的实验验证。

1)完成到指定位置的控制要求,采用“近单远双”的方式,近距离采用运行 1 个周期的方式,时间短而且摆角较小;远距离采用运行 2 个周期的方式,时间虽然有所增加,但是摆角得到了很大的减小,极大增加了系统运行的平稳性。

2)引入“稳定单元”的概念,由于惯性,加速与减速阶段负载会产生摆动,但是利用摆动的周期与加减速时间相互配合可以实现很大程度的消摆。该方法同样适用于长距离系统,对实际桥吊系统的运行控制有重要参考意义。

参考文献

- [1] 蒋工圣. 基于作业均衡的集装箱码头桥吊调度优化[J]. 集装箱化, 2013, 24(3):13—16.
- [2] Kim YS, Hong KS, Sul SK. Anti-sway Control of Container Cranes: Inclinator, Observer, and State Feedback[J]. International Journal of Control Automation & Systems, 2004, 2(4): 435—449.
- [3] 陈欣, 张衍均, 张翼成. 桥式起重机防摇技术的对比[J]. 起重运输机械, 2016(1):6—8.
- [4] 蒋晓辉. 对起重机防摇技术的探讨[J]. 现代企业文化, 2008(26):178—179.
- [5] 安延涛, 马汝建. 机械系统的拉格朗日法建模与仿真[J]. 系统仿真技术, 2007, 3(4):206—210.
- [6] 单磊, 费国. 防摇控制系统在集装箱起重设备中的研究与应用[J]. 起重运输机械, 2011(10):51—55.

收稿日期:2019—09—18

修改稿日期:2019—11—16