

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2022.01.018

基于自适应 S 速度轨迹的塔式起重机 变幅定位与防摆控制研究*

卢 宁^{1,2}, 宋鹏程^{1,2}

(1. 北京建筑大学 机电与车辆工程学院, 北京 100032;

2. 北京市建筑安全监测工程技术研究中心, 北京 100032)

摘要: 在塔式起重机的变幅作业过程中, 由于吊物的摆动极易造成危险, 为此, 提出了一种基于自适应七段式 S 速度轨迹的控制策略, 并将其用于小车定位与吊物防摆中。首先, 根据 Lagrange 方程, 分析出影响吊物摆角的因素, 确定了控制目标; 然后, 推导了七段式轨迹下的小车速度数学模型; 考虑到小车传动系统中的非线性因素, 在 MATLAB/Simulink 中建立了基于 PI 变频调速的异步电机模型, 在 ADAMS 中建立了小车—吊物的虚拟样机, 并通过 ADAMS 的 Controls 接口模块与 MATLAB, 实现了机电联合仿真; 最后, 通过设计多种工况对该控制策略的可行性进行了验证。研究表明: 上述控制策略能有效实现对小车的精确定位, 并将吊物摆角限制在 5° 左右; 与传统梯形速度轨迹相比, 该控制策略的防摆效果提升 23%, 可提高塔式起重机作业的安全性。

关键词: 塔式起重机; S-速度轨迹; 联合仿真; 定位; 防摆控制

中图分类号: TH215; TP273 文献标识码: A

文章编号: 1001-4551(2022)01-0120-08

Variable amplitude positioning and anti-swing control of tower crane based on adaptive S speed locus

LU Ning^{1,2}, SONG Peng-cheng^{1,2}

(1. School of Machine-electricity and Automobile Engineering, Beijing University of Civil Engineering and Architecture, Beijing 100032, China; 2. Beijing Engineering Research Center of Monitoring for Construction Safety, Beijing 100032, China)

Abstract: Aiming at the dangerous problem caused by the swing of the lifting object in the luffing operation of tower crane, a control strategy based on adaptive seven segment S-speed trajectory was proposed for trolley positioning and lifting object anti-swing. Firstly, the factors affecting the swing angle of the hanging object were analyzed according to the Lagrange equation, and the control target was determined. Secondly, the mathematical model of trolley speed under seven section trajectory was deduced; considering the nonlinear factors in the trolley transmission system, the asynchronous motor model based on PI variable frequency speed regulation was established in MATLAB/Simulink, the virtual prototype of trolley and hanging object was established in ADAMS, and the electromechanical joint simulation was realized through the controls interface module of ADAMS and MATLAB. Finally, a variety of working conditions were designed to verify the control strategy. The results show that the above control strategy can effectively realize the accurate positioning of the trolley and limit the swing angle of the hanging object to about 5°; comparing with the traditional trapezoidal speed trajectory, the anti-swing effect of this control strategy is improved by 23%, and the safety of tower crane operation can be improved.

Key words: tower crane; S-speed locus; co-simulation; positioning; anti-swing control

收稿日期: 2021-07-14

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(51775031); 北京市属高校基本科研业务费专项资金资助项目(X20071); 北京市建筑安全监测工程技术研究中心研究基金资助项目(BJC2020K010)

作者简介: 卢宁(1976-), 男, 河北定州人, 博士, 副教授, 主要从事特种设备控制等方面的研究。E-mail: luning@bucea.edu.cn

0 引言

塔式起重机(简称塔机)使用方便,具有高效的装卸能力,被广泛应用于生产建筑中^[1]。

在塔机的作业过程中,吊物由于惯性作用易发生摆动,影响工作效率,同时易导致危险发生^[2]。为防止吊物摆动,保证塔机上的小车定位精度,设计一种合理的控制策略十分必要^[3]。

目前,针对起重机的定位防摆问题,学者们进行了大量研究,其中包括:(1)以角度、位移作为反馈量的闭环控制策略,例如模糊控制^[4]、迭代学习控制^[5]、神经元控制^[6]、滑模控制^[7]等;(2)以及无反馈量的开环控制策略,包括轨迹规划^[8]、输入整形^[9]等。

闭环控制中需增加传感器,对位移、摆角等反馈量进行获取,传感器性能对控制效果影响较大;开环控制方式对控制元器件性能要求低,常用于工程机械的控制中。因此,笔者选用开环控制方式对变幅运动进行研究。

随着计算机仿真技术发展,人们对工程要求不断提高。火箭军工程大学的刘春桐^[10]利用 MATLAB/Simulink、ADAMS 建立了基于模糊 PID 控制的桥式起重机联合仿真模型,经仿真得到了结论,即模糊控制对吊物摆角的抑制效果较传统 PID 控制有明显提升。上海海事大学的吕锦超^[11]通过 MATLAB/Simulink 与 ADAMS 联合仿真的方式,验证了双 PID 控制对于小车定位防摇具有良好控制效果。

上述研究以起重机的数学模型为依据,通过控制小车的驱动力,完成对小车定位及吊物防摆的控制,忽略了电机回路状态、控制系统参数等因素对驱动力输出的影响^[12]。

因此,考虑到轨道摩擦力^[13]等非线性因素,笔者将变频器、异步电机以及变幅传动系统加入考虑范围,提出一种基于自适应七段式 S 速度轨迹的控制策略,将小车的运动过程分为加加速、匀加速、减加速、匀速、加减速、匀减速、减减速七段速度轨迹,并对不同工况下的小车变幅过程进行机电联合仿真。

1 定位及防摆数学模型

为了寻找影响塔机吊物摆角的因素,笔者做了以下假设:(1)把吊物视作质点;(2)忽略钢丝绳的质量和形变;(3)忽略空气阻力影响。

小车在水平方向驱动力 F 的影响下沿 X 轴正方向移动,其运动关系如图 1 所示。

根据 Lagrange 动力学方程^[14,15],笔者以小车运动的初始状态建立其数学模型:

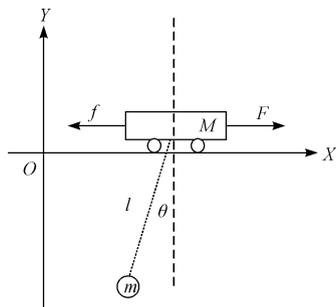


图1 变幅运动示意图

M —小车质量; m —吊物质量; l —钢丝绳长度; X —小车定位距离; f —小车与轨道的摩擦力; θ —吊物与 Y 轴的夹角

$$\begin{cases} (M+m)\ddot{x} - ml\ddot{\theta}\cos(\theta) + ml\dot{\theta}^2\sin(\theta) + f = F \\ l\ddot{\theta} - \ddot{x}\cos(\theta) + g\sin(\theta) = 0 \end{cases} \quad (1)$$

在防摆过程中,由于吊钩角度变化逐渐趋于 0° ,笔者在平衡点附近对其进行线性化,令 $\sin\theta = 0, \cos\theta = 1$, 又因:

$$\dot{\theta}\cos\theta - \theta^2\sin\theta = \frac{d}{dt}(\dot{\theta}\cos\theta) = \frac{d}{dt}(\dot{\theta}) = \ddot{\theta} \quad (2)$$

所以,式(1)可化简为:

$$\begin{cases} (M+m)\ddot{x} - ml\ddot{\theta} + f = F \\ l\ddot{\theta} + g\theta = \ddot{x} \end{cases} \quad (3)$$

对式(3)进行变形可得:

$$\begin{cases} (M+m)\ddot{x} - ml\ddot{\theta} + f = Ma \\ l\ddot{\theta} + g\theta = a \end{cases} \quad (4)$$

同时:

$$a = d^2x/dt^2 \quad (5)$$

式中: a —小车的加速度。

由式(4,5)可知:当确定了吊物的质量以及钢丝绳长度后,小车的加速度成为影响小车位移以及吊物摆角的关键因素。因此,需要合适的控制方法对小车的加速度进行控制,来实现定位与防摆的控制目标。

考虑到异步电动机的复杂特性,通过控制电动机的输出力矩,来控制小车加速度的方式较难实现^[16]。因此,笔者选用速度控制方式,以电机转速作为输入量,对小车加速度进行控制。

2 自适应 S 轨迹算法

2.1 传统七段式 S 轨迹理论

目前常用的速度规划算法包括直线加减速、指数加减速、梯形(匀加速,匀速,匀减速)、S 形以及多项式加减速^[17]等。

考虑到塔机变幅驱动电机的机械特性与吊物的防摆效果,只有梯形、S 形、多项式加减速算法适用于塔机的速度规划。其中:(1)梯形加减速算法,加速度曲

线不连续,加速度突变对吊物摆角影响较大;(2)多项式加减速算法复杂,对工作元件的性能要求极高,难以应用在塔机变幅运动中;(3)S形轨迹平稳性高,且加速度曲线无突变,对吊重摆角影响较小。因此,笔者选取S形速度轨迹算法进行控制。

基于S形轨迹理论,将小车整个变幅过程分为7段,包括加加速、匀加速、减加速、匀速、加减速、匀减速、减减速。考虑到塔机变幅机构对速度和加速度的限制性要求,此处规定小车运动速度不超过变幅运动的最大速度 V_{max} ,加速度不超过变幅运动的最大加速度 a_{max} ;同时设加加速度为常量 J 。

对加加速度 J 规划如图2所示。

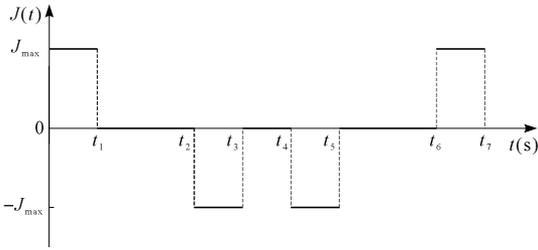


图2 加加速度规划图

t —小车加加速度变化的时间节点; J_{max} —加加速度的最大值

J 与时间 $t(s)$ 的关系如下:

$$J(t) = \begin{cases} J & 0 < t \leq t_1 \\ 0 & t_1 < t \leq t_2 \\ -J & t_2 < t \leq t_3 \\ 0 & t_3 < t \leq t_4 \\ -J & t_4 < t \leq t_5 \\ 0 & t_5 < t \leq t_6 \\ J & t_6 < t \leq t_7 \end{cases} \quad (6)$$

塔机变幅运动中,小车的起始速度与终止速度都为0。根据变幅过程中吊物的摆动规律,必须保证加加速、减加速、加减速、减减速这4个时间段相等^[18],则有:

$$t_1 - 0 = t_3 - t_2 = t_5 - t_4 = t_7 - t_6 \quad (7)$$

根据加加速度 J 值,规划加速度 a 如图3所示。

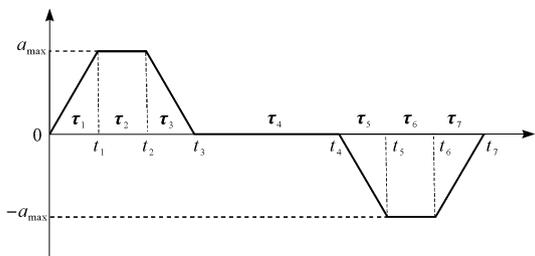


图3 加速度规划图

τ —以当前时间节点出发的时间矢量; a_{max} —加速度的最大值

加速度 a 与加加速度 J 、时间 $t(s)$ 的关系如下:

$$a(t) = \begin{cases} J\tau_1 & 0 < t \leq t_1 \\ a_{max} & t_1 < t \leq t_2 \\ a_{max} - J\tau_3 & t_2 < t \leq t_3 \\ 0 & t_3 < t \leq t_4 \\ -J\tau_5 & t_4 < t \leq t_5 \\ -a_{max} & t_5 < t \leq t_6 \\ -a_{max} + J\tau_7 & t_6 < t \leq t_7 \end{cases} \quad (8)$$

其中:

$$a_{max} = Jt_1 \quad (9)$$

由加速度曲线得到速度曲线如图4所示。

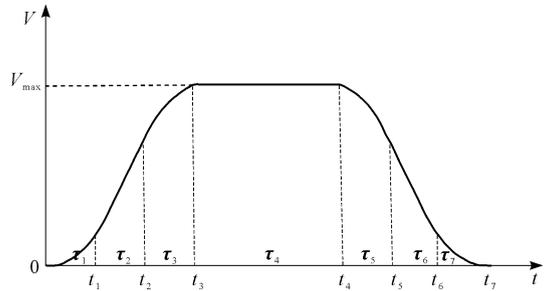


图4 速度曲线规划图

V_{max} —速度最大值

速度 V 与加速度 a 、时间 $t(s)$ 的关系如下:

$$V(t) = \begin{cases} \frac{1}{2}J\tau_1^2 & 0 < t \leq t_1 & v_1 = \frac{1}{2}j_{max}t_1^2 \\ v_1 + a_{max}\tau_2 & t_1 < t \leq t_2 & v_2 = v_1 + a_{max}(t_2 - t_1) \\ v_2 + a_{max}\tau_3 - \frac{1}{2}J\tau_3^2 & t_2 < t \leq t_3 & v_3 = v_2 + \frac{1}{2}Jt_1^2 \\ v_{max} & t_3 < t \leq t_4 & v_4 = v_3 = v_{max} \\ v_4 - \frac{1}{2}J\tau_5^2 & t_4 < t \leq t_5 & v_5 = v_4 - \frac{1}{2}J(t_5 - t_4)^2 \\ v_5 - a_{max}\tau_6 & t_5 < t \leq t_6 & v_6 = v_5 - a_{max}(t_6 - t_5) \\ v_6 - a_{max}\tau_7 + \frac{1}{2}J\tau_7^2 & t_6 < t \leq t_7 & v_7 = v_6 - \frac{1}{2}J(t_5 - t_4)^2 \end{cases} \quad (10)$$

2.2 自适应S形轨迹算法

传统S形轨迹算法需要确定小车最大速度 V_{max} 、最大加速度 a_{max} 以及加加速度 J 。当加加速度选择不合适时,会造成加速度的突变,不利于吊物防摆;同时,在塔机定位防摆控制中,需对变幅小车进行点到点的轨迹规划。

因此,笔者在传统S形轨迹算法的基础上,提出自适应S形轨迹算法,即通过规定小车的目标位移距离值、限制速度和加速度的最大值,以及确定整体作业时

间 T_f , 对小车变幅的速度轨迹进行规划。

基于自适应 S 形轨迹算法, 可计算出小车的加加速度, 即:

$$J = \frac{a_{\max}^2 \cdot V_{\max}}{T_f \cdot V_{\max} \cdot a_{\max} - V^2 - a_{\max}} \quad (11)$$

为减少加速度突变对摆角的影响, 此处规定小车变幅运动必须具有匀加速段、匀速段以及匀减速段, 由此得:

$$t_2 - t_1 = t_6 - t_5 = T_f - 2 \frac{V_{\max}}{a_{\max}} - 2 \frac{a_{\max}}{J} > 0 \quad (12)$$

$$t_4 - t_3 = \frac{2}{V_{\max}} - T > 0 \quad (13)$$

由于自适应 S 形轨迹算法计算量较大, 在规定了前提条件以后, 笔者采用 MATLAB 编写函数实现算法。

自适应算法流程如图 5 所示。

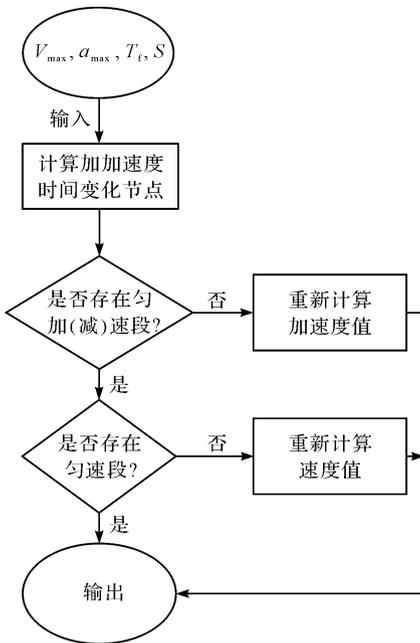


图 5 自适应算法流程图

3 机电联合仿真平台

根据小车变幅系统的控制要求, 笔者采用 PLC、变频器以及三相异步电动机作为电气控制系统, 通过减速器、卷筒以及钢丝绳等构成的传动系统对小车速度进行控制。

小车控制结构图如图 6 所示。

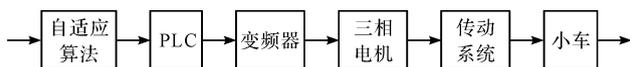


图 6 小车控制结构图

3.1 矢量控制系统建模

由于异步电机的矢量控制理论发展成熟, 且易于实现, 笔者选取矢量控制方式, 在 Simulink 中建立电机变频调速模型。由于异步电机系统复杂且耦合性强, 建立其数学模型时需忽略空间谐波、磁路饱和、绕组电阻以及铁芯损耗的影响^[19]。

笔者以转子磁链定向的方式建立电机矢量控制数学模型:

(1) 电压方程:

$$\begin{bmatrix} u_{sd} \\ u_{sq} \\ u_{rd} \\ u_{rq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s + L_s p & -w_{dqs} L_s & L_m p & -w_{dqs} L_m \\ w_{dqs} L_s & R_s + L_s p & w_{dqs} L_m & L_m p \\ L_m p & -w_{dqr} L_m & R_r + L_r p & -w_{dqr} L_r \\ w_{dqr} L_m & L_m p & w_{dqr} L_r & R_r + L_r p \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{sd} \\ i_{sq} \\ i_{rd} \\ i_{rq} \end{bmatrix} \quad (14)$$

(2) 磁链方程:

$$\begin{bmatrix} \varphi_{sd} \\ \varphi_{sq} \\ \varphi_{rd} \\ \varphi_{rq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_s & 0 & L_m & 0 \\ 0 & L_s & 0 & L_m \\ L_m & 0 & L_r & 0 \\ 0 & L_m & 0 & L_r \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{sd} \\ i_{sq} \\ i_{rd} \\ i_{rq} \end{bmatrix} \quad (15)$$

(3) 转矩方程和运动方程:

$$T_e = n_p L_m (i_{sq} i_{rd} - i_{sd} i_{rq}) \quad (16)$$

$$T_e = T_L + \frac{J d\omega}{n_p dt} \quad (17)$$

当两相旋转坐标系按转子磁链定向时, 有 $\Phi_r = \Phi_r, \Phi_{rq} = 0$, 可得:

$$T_e = \frac{n_p L_m i_{sq} \varphi_r}{L_r} \quad (18)$$

式中: U_{sd}, U_{sq} —定子等效绕组电压; U_{rd}, U_{rq} —转子等效绕组电压; w_{dqs}, w_{dqr} —定子、转子相对角速度; R_s, R_r —定子、转子绕组电阻; Φ_{sd}, Φ_{sq} —定子磁链; Φ_{rd}, Φ_{rq} —转子磁链; L_m —转子等效绕组互感; L_s, L_r —定子、转子等效绕组自感; i_{sd}, i_{sq} —定子等效绕组电流; i_{rd}, i_{rq} —转子等效绕组电流; P —微分算子; T_e —电磁转矩; n_p —电机极对数; T_L —负载转矩; J —电机等效转动惯量; ω —电机转子的转速。

由式(18)可知, 只需控制 i_{sq} , 便可对电磁转矩进行控制。

基于上述数学模型, 为保证电机转速的跟踪性能, 笔者选取通过电流滞环控制 PWM 逆变器的异步电机矢量控制方法(其转速环、电流环采取 PI 控制器)。

为验证控制策略的有效性, 此处选用合适的电机参数, 如表 1 所示。

表 1 电机参数表

额定电压 U/V	额定转速 $n/(r \cdot \text{min}^{-1})$	额定频率 f/Hz	极对数 n	转动惯量 $J/(\text{kg} \cdot \text{m}^2)$
380	1 440	50	2	0.19
定子电阻 R_s/Ω	定子电感 L_s/H	转子电阻 R_r/Ω	转子电感 L_r/H	互感 L_m/H
0.435	0.002	0.816	0.002	0.069

3.2 系统动力学建模

塔机传动系统包括小车、滑轮、减速器与钢丝绳等。笔者在 SolidWorks 软件中建立塔机变幅机构的实体模型,并将其导入 ADAMS 中。

在变幅运动中,由于钢丝绳柔性的特点,难以建立较精确的非线性动力学模型。因此,笔者使用 ADAMS/Cable 模块建立钢丝绳系统^[20],并依据工程经验,在 Cable 模块中设置钢丝绳参数,并确定滑轮和锚点的具体位置^[21](其中,吊钩处连接滑轮为动滑轮,小车处连接滑轮为定滑轮)。

笔者在 ADAMS 中为模型添加部件约束以及运动副,如表 2 所示。

表 2 约束/运动副设置表

部件	约束/运动副
基座与大地	固定副
回转机构与塔身	固定副
小车与起重臂	移动副
吊钩与吊物	固定副
定滑轮与小车	转动副
车轮与轨道	接触力

在 ADAMS 中,变幅机构动力学模型如图 7 所示。

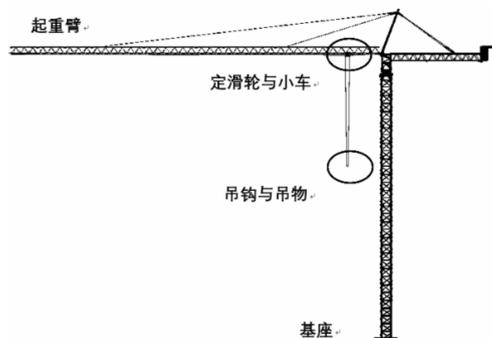


图 7 变幅机构动力学模型

在 ADAMS 中,钢丝绳和滑轮的缠绕方式局部放大图如图 8 所示。

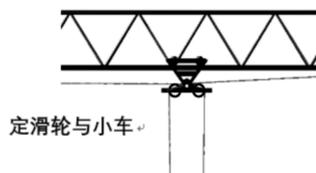


图 8 小车局部放大图

3.3 联合仿真平台搭建

笔者利用自适应 S 形轨迹算法,对变幅小车的速度进行控制,取减速比为 24,对小车的最大加速度与最大速度进行限制;确定 ADAMS 模型的输入状态变量为小车速度 V ,输出状态变量为小车位移 S ,吊钩角度为 θ ;利用 ADAMS/Controls 接口将模型导入 Simulink 中进行联合仿真。

机电联合仿真过程如图 9 所示。

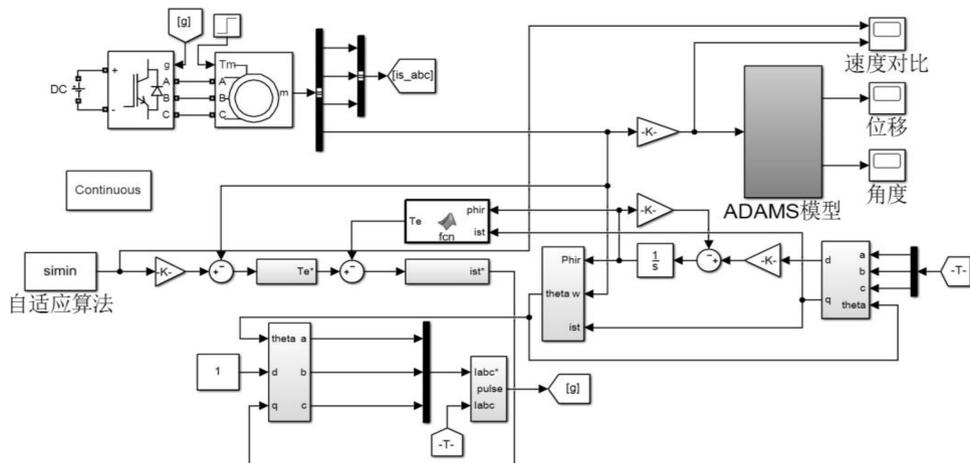


图 9 机电联合仿真图

4 仿真分析

4.1 不同速度轨迹对比研究

考虑到算法的适用性,此处选取梯形轨迹与 S 形

轨迹进行对比研究。笔者分别选取工况一:绳长 20 m,变幅距离 20 m,起重重量 0.5 t;工况二:绳长 30 m,变幅距离 30 m,起重重量 1 t 进行仿真。

此处设定小车最大速度不超过 1.2 m/s,最大加速

度不超过 2 m/s^2 , 仿真时间为 40 s 。

仿真结果如图(10~13)所示。

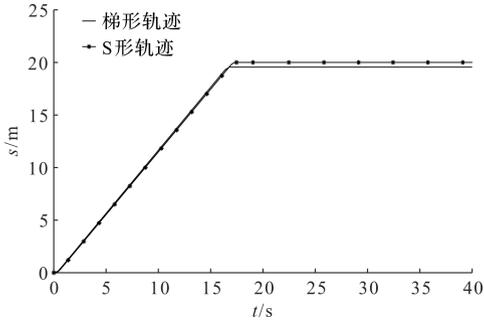


图10 工况一小车位移图

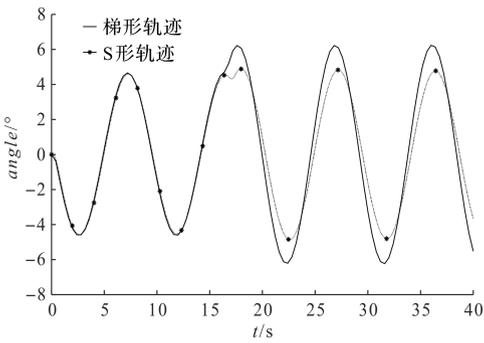


图11 工况一小车摆角图

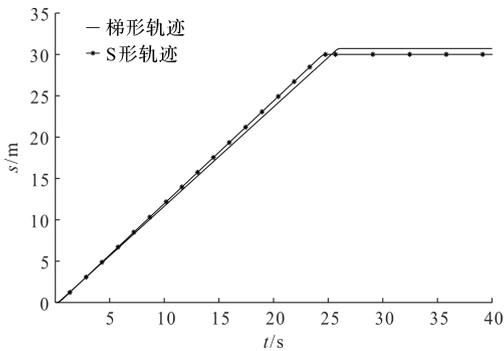


图12 工况二小车位移图

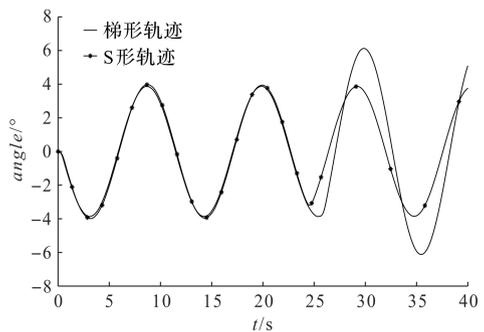


图13 工况二小车摆角图

由图(10,12)可知:两种轨迹下,小车均能达到指定位置附近,且S形轨迹算法定位更精确;

由图(11,13)可知:小车停止后,吊物由于自身惯性以及重力的影响,仍将处于摇摆状态;梯形轨迹下,

吊物摆角的最大幅值为 6.5° , S形轨迹将摆角幅值限制在了 5° 以内,较梯形轨迹减小了 23%,可以更好地符合作业安全性要求。该结果证明,S形轨迹较梯形轨迹有更好的防摇性能。

4.2 不同工况对比研究

笔者采取控制变量法,取不同绳长(l)、吊物重量(g)以及变幅距离(s)的工况进行仿真。同样,此处限制小车的最大速度、最大加速度,取仿真时间为 40 s 。

仿真工况如表3所示。

表3 仿真工况表

定量		变量		
20 m(l)	0.5 t(g)	10(s)	20 m(s)	30 m(s)
20 m(l)	20 m(s)	0.5 t(t)	1.0 t(t)	1.5 t(t)
20 m(s)	0.5 t(g)	10 m(l)	20 m(l)	30 m(l)

仿真结果如图(14~19)所示。

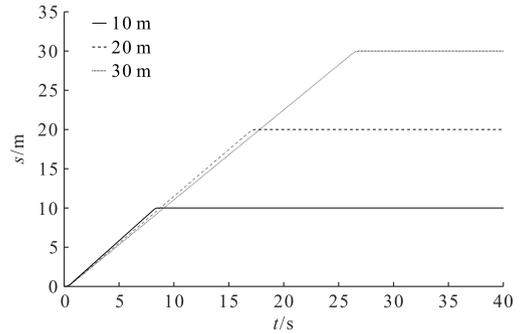


图14 不同变幅距离小车位移图

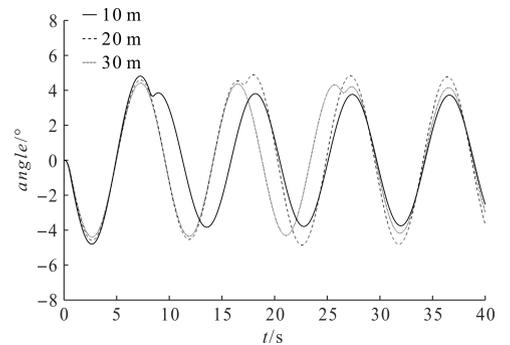


图15 不同变幅距离小车摆角图

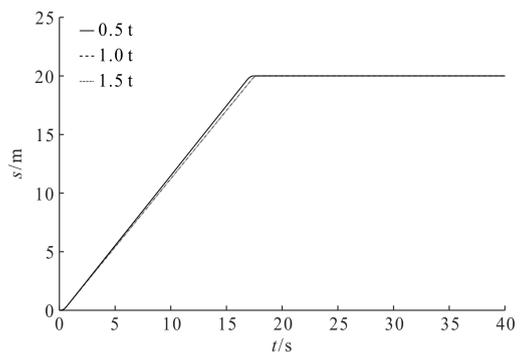


图16 不同吊物重小车位移图

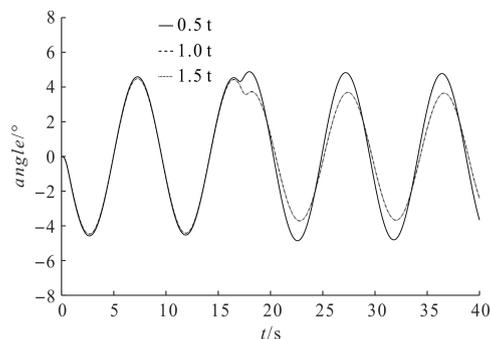


图 17 不同吊物重小车摆角图

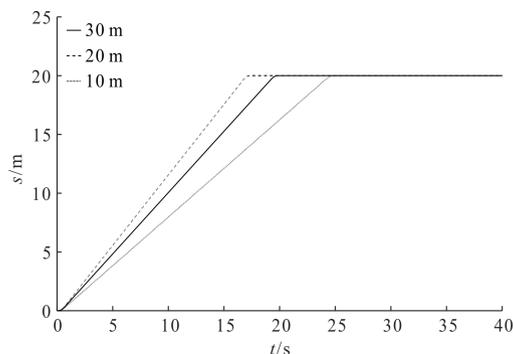


图 18 不同绳长小车位移图

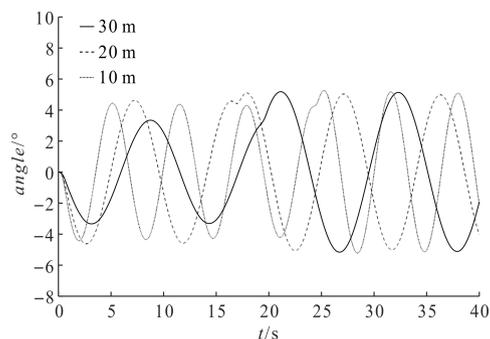


图 19 不同绳长小车摆角图

综合分析图(14~17)可知:在变幅距离不同和吊物重量不同的工况下,小车均能到达指定位置附近;且在 S 形轨迹的规划下,吊物摆角都能被限制在 5° 左右,符合塔机作业的安全性要求。

分析图(18,19)可知:在不同绳长工况下,采用 S 形轨迹虽能达到小车定位与吊物防摆的要求,但由于 S 形轨迹算法中对吊物防摆要求的限制,小车到达指定位置的时间不同,影响了作业效率。

因此,在实际作业中,为兼顾作业效率与安全性,应选择合适的起升距离。同时,观察图 19 仿真结果可知,吊物的摆动周期随着绳长的增加而增大,这与文献[22]的结论相吻合。

5 结束语

为防止塔式起重机变幅作业过程中,由于吊物的

摆动造成危险,笔者利用 Lagrange 方程找出影响塔机吊物摆动的因素,提出了一种自适应 S 形速度轨迹算法,来解决小车的定位和吊物的防摆问题,并建立了基于 PI 控制的塔机变幅机构机-电联合仿真模型,对该控制策略进行了验证。

研究表明:

- (1) S 形速度轨迹的定位防摆效果优于梯形轨迹;
- (2) S 形速度轨迹对于变幅运动的多种工况都具有良好的定位效果,且都能将吊物摆角限制在 5° 左右;
- (3) 钢丝绳长度影响吊物的摆动周期,且两者呈正相关性。

此外,为了更好地研究钢丝绳长度变化对吊物摆动的影响,在后续的研究工作中,笔者将起升运动与变幅运动进行耦合考虑,并综合分析该控制策略的防摆性能。

参考文献 (References):

- [1] 王海舰,袁嘉惠,卢士林,等.塔式起重机自动化配重控制及平衡动态特性分析研究[J].机电工程,2021,38(1):108-112.
- [2] RAMLI L, MOHAMED Z, ABDULLAHI A M, et al. Control strategies for crane s-systems; a comprehensive review [J]. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 2017, 95 (10):1-23.
- [3] 丁承君,李庆,高少彬,等.基于改进差分进化算法优化的塔机防摆控制研究[J].机电工程,2021,38(3):350-355.
- [4] MOHAMMADZADEH A, TAGHAVIFAR H. A robust fuzzy control approach for path-following control of autonomous vehicles[J]. *Soft Computing*, 2020, 24(5):3223-3235.
- [5] 付子义,袁海国,王艺龙.基于迭代学习控制的桥式起重机定位及防摆[J].实验室研究与探索,2017,36(2):34-38.
- [6] 赵华洋,李理,张春友,等.基于神经元控制的桥式起重机吊重防摆系统[J].实验室研究与探索,2017,36(11):64-67.
- [7] 段向军,朱方园,刘晓强.基于 PSO 的塔式起重机模糊神经网络滑模防摆控制[J].机床与液压,2016,44(22):155-159.
- [8] 张炜炜,范波,廖志明.基于平滑过渡轨迹的桥式起重机定位防摆[J].计算机仿真,2019,36(7):405-410.
- [9] 王晓军.桥式起重机的鲁棒输入整形控制方法研究[J].现代制造技术与装备,2018,4(8):182-183.
- [10] 刘春桐,李卫华,何祯鑫,等.基于联合仿真的桥式起重机吊重动态特性分析与消摆控制研究[J].机电工程,2021,38(3):356-362.

- [11] 吕锦超,孙友刚,董达善. 基于虚拟样机的岸桥自动定位防摇控制[J]. 科学技术与工程,2020,20(3):1092-1098.
- [12] 牛聪民,欧阳华江,张洪武,等. 电动桥式起重机负载升降过程的系统动力学模拟[J]. 计算力学学报,2014,31(5):558-564.
- [13] SUH J H, LEE J W, LEE Y J, et al. An automatic travel control of a container crane using neural network predictive PID control technique[J]. **International Journal of Precision Engineering & Manufacturing**,2006,7(1):35-41.
- [14] 白文文. 塔式起重机的定位防摆控制[D]. 西安理工大学,2019.
- [15] ANTHONY G, WILLIAM S, ALDO F. Three-dimensional dynamic modeling and control of off-centered bridge crane lifts[J]. **Journal of Dynamic Systems Measurement & Control**,2017,139(4):041005.
- [16] 王卫辉,刘陈,赵典,等. 一种改进的基于驱动模型的门式起重机消摆设计[J]. 计算机测量与控制,2012,20(12):3341-3344.
- [17] 叶荫民. 数控系统的加减速控制算法及其实现[D]. 兰州交通大学,2019.
- [18] 刘志峰,张森,蔡力钢,等. 基于粒子群优化五阶段S曲线加减速控制算法[J]. 北京工业大学学报,2015,41(5):641-648.
- [19] 周建萍,薛亚林,崔屹,等. 异步电机PI模糊自适应矢量控制策略及其仿真研究[J]. 微电机,2016,49(6):65-69.
- [20] 孟超,周勇,曹小华. 基于ADAMS/Cable的抓斗卸船机摆动动力学与控制研究[J]. 起重运输机械,2017,4(10):102-106.
- [21] GUTIÉRREZ M, RICARDO, ARANGO C, et al. Design verification through virtual prototyping techniques based on systems engineering[J]. **Research in Engineering Design**,2017,28(4):477-494.
- [22] 董明晓,张恩,韩松君,等. 塔式起重机在变幅运动过程中货物的摆动规律[J]. 中国工程机械学报,2020,18(1):74-77.

[编辑:雷敏]

本文引用格式:

卢宁,宋鹏程. 基于自适应S速度轨迹的塔式起重机变幅定位与防摆控制研究[J]. 机电工程,2022,39(1):120-127.

LU Ning, SONG Peng-cheng. Variable amplitude positioning and anti-swing control of tower crane based on adaptive S speed locus[J]. **Journal of Mechanical & Electrical Engineering**, 2022,39(1):120-127.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>