



(12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 110407094 B

(45) 授权公告日 2020.11.27

(21) 申请号 201910555584.1

G06F 30/17 (2020.01)

(22) 申请日 2019.06.25

G06F 30/15 (2020.01)

(65) 同一申请的已公布的文献号

G06F 119/14 (2020.01)

申请公布号 CN 110407094 A

审查员 梅钦

(43) 申请公布日 2019.11.05

(73) 专利权人 河南科技大学

地址 471000 河南省洛阳市涧西区西苑路  
48号

(72) 发明人 范波 张炜炜 付主木 许惠

(74) 专利代理机构 洛阳公信知识产权事务所

(普通合伙) 41120

代理人 李真真

(51) Int.Cl.

B66C 13/06 (2006.01)

B66C 13/18 (2006.01)

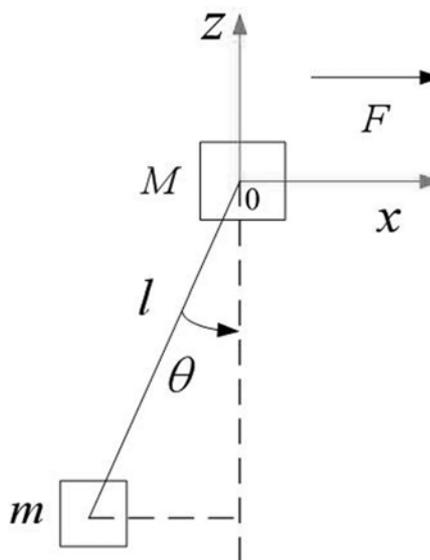
权利要求书2页 说明书9页 附图5页

(54) 发明名称

一种基于动态平滑轨迹的桥式起重机定位防摆控制方法

(57) 摘要

本发明公开了一种基于动态平滑轨迹的桥式起重机定位防摆控制方法,基于二维桥式起重机动力学模型,针对三段式加速度的缺点,采用相平面分析法,以三段式加速度为基础并引入加速度平滑过度环节,获得便于应用的解析表达式并设计控制系统,减少加速度变化对台车的直接冲击,兼顾台车精准定位与负载防摆的要求,同时提高了系统的响应速度;与现有轨迹控制方法比较,该方法能够使台车准确到达指定位置并防止负载摆动,同时有效减小加速度变化对台车的冲击,达到更加的控制效果,解决了桥式起重机运输过程中台车牵引吊绳引起负载惯性摆动与定位时负载残余摆动、负载定位精度低及负载摆动剧烈的问题,实现桥式起重机负载吊运时高效的定位防摆控制。



1. 一种基于动态平滑轨迹的桥式起重机定位防摆控制方法,其特征在于:包括以下步骤:

S1: 求取负载的位移、摆角信息与绳长量耦合到台车位移的控制量;

S2: 基于二维桥式起重机动力学模型,分析二维坐标系中台车位移摆角与加速度的关系,结合相平面分析法,建立基于位移摆角的加速度控制信号;

S21: 建立二维桥式起重机动力学模型:依据二维桥式起重机简化模型,在广义坐标下,利用拉格朗日动力学方程,建立定绳长二维桥式起重机动力学模型:

$$\begin{aligned} F(t) &= (M+m) \ddot{x}(t) + ml\ddot{\theta}(t)\cos\theta(t) - ml\dot{\theta}^2(t)\sin\theta(t) \quad ; \\ 0 &= l^2\ddot{\theta}(t) + l\ddot{x}(t)\cos\theta(t) + lg\sin\theta(t) \quad ; \end{aligned}$$

其中, $F(t)$ 表示作用到台车上的合力, $M$ 和 $m$ 分别代表台车和负载的质量, $x(t)$ 表示台车水平方向位移, $\theta(t)$ 表示负载在垂直方向的夹角即摆角, $\dot{\theta}(t)$ 与 $\ddot{\theta}(t)$ 分别表示负载摆动的角速度与角加速度, $l$ 是吊绳的长度, $g$ 是重力加速度;

S22: 结合相平面分析法,得到台车以恒定加速度 $a$ 运行时的相平面曲线方程:

$$\left[ \theta(t) + \frac{a}{g} \right]^2 + \left[ \frac{\dot{\theta}(t)}{\omega_n} \right]^2 = \left[ \theta(0) + \frac{a}{g} \right]^2 + \left[ \frac{\dot{\theta}(0)}{\omega_n} \right]^2 ;$$

其中, $\theta(0) = 0$ 和 $\dot{\theta}(0) = 0$ 表示初始状态的摆角与初始角速度, $\omega_n = \sqrt{g/l}$ 表示自然振荡频率;

S23: 建立相平面曲线:基于步骤S22,在以 $\theta(t)$ 为横坐标, $\dot{\theta}(t)/\omega_n$ 为纵坐标的坐标系中,表示为以 $[-a/g, 0]$ 为圆心, $R = \sqrt{\left[ \theta(0) + \frac{a}{g} \right]^2 + \left[ \frac{\dot{\theta}(0)}{\omega_n} \right]^2}$ 为半径的圆,即相平面曲线;

S24: 依据相平面曲线,分析桥式起重机运动情况可知,当 $a \neq 0$ 时,负载以固定角速度 $\omega_n$ 做单摆运动;当 $a = 0$ 时,负载与台车保持相对静止;

S3: 建立运动控制系统,利用负载在运行过程中的摆动规律,建立对称式的加速度运动轨迹,即三段式加速度轨迹,设定各项性能指标,使得台车准确到达指定位置并消除负载摆动;

S31: 三段式加速度轨迹表达式为:

$$\ddot{x}_1(t) = \begin{cases} a_{\max} & 0 < t < t_a \\ -a_{\max} & t_a + t_c < t < 2t_a + t_c \\ 0 & \text{其他} \end{cases} ;$$

其中, $a_{\max}$ 表示最大加速度, $t_a$ 表示加速或减速持续时间, $t_c$ 表示匀速持续的时间;

在给定的运送距离内,限定各项性能指标:限定最大加速度、最大速度、绳长、最大摆角,根据相平面曲线计算出满足要求的 $a_{\max}$ 、 $t_a$ 与 $t_c$ 值,得到三段式加速度轨迹准确表达式,使得桥式起重机在安全运行范围内能够最快达到指定运送位置消除摆动;

三段式加速度轨迹准确表达式为:

$$\ddot{x}(t) = \begin{cases} \frac{\sin(\omega t - \frac{\pi}{2}) + 1}{2} a_{\max} & 0 \leq t \leq t_1 \\ a_{\max} & t_1 < t \leq t_1 + t_2 \\ \frac{\sin[\omega(t - t_2) - \frac{\pi}{2}] + 1}{2} a_{\max} & t_1 + t_2 < t \leq 2t_1 + t_2 \\ \frac{\cos[\omega(t - 2t_1 - t_2 - t_3)] - 1}{2} a_{\max} & 2t_1 + t_2 + t_3 < t \leq 3t_1 + 2t_2 + t_3 \\ -a_{\max} & 3t_1 + t_2 + t_3 < t \leq 3t_1 + 2t_2 + t_3 \\ \frac{\cos[\omega(t - 2t_1 - 2t_2 - t_3)] - 1}{2} a_{\max} & 3t_1 + 2t_2 + t_3 < t \leq 4t_1 + 2t_2 + t_3 \\ 0 & \text{其他} \end{cases} ;$$

其中,  $\omega = \pi/t_1$ , 为避免负载往复摆动, 则  $t_1 \in (0, \pi/2 \omega_n)$ ,  $t_1$  表示加速度变化的加速或减速阶段时间,  $t_2$  表示加速度恒定的加速或减速阶段时间,  $t_3$  表示匀速阶段时间;

S32: 引入加速度平滑过度曲线: 基于步骤S31, 在运输距离确定的情况下, 即指定位置位移  $u_x = x(t)$  时, 加速与减速阶段的运送位移相同, 则加速度轨迹曲线中心对称, 整个运送过程中满足以下性能指标:

- (1) 安全摆角指标: 运行过程中的最大摆角  $u_\theta \geq |\theta(t)|$ ;
- (2) 最大加速度指标: 运行过程中最大加速度  $u_a \geq |\ddot{x}(t)|$ ;
- (3) 最大速度指标: 运行最大速度  $u_v \geq |\dot{x}(t)|$ ;
- (4) 稳态指标: 匀速运动及停止运动时的摆角  $\theta(t) = 0$ ;

S4: 通过调节负载在加速阶段、匀速运动阶段、减速阶段的位移时间函数, 在不影响定位的前提下构建负载动态平滑定位防摆轨迹; 依据三段式加速度轨迹准确表达式, 得到限定各项性能指标下的轨迹方程; 若平滑轨迹下台车受到的冲击与三段式加速度轨迹相比, 有较大幅度的缓解, 至此轨迹规划完成。

## 一种基于动态平滑轨迹的桥式起重机定位防摆控制方法

### 技术领域

[0001] 本发明涉及桥式起重机控制技术领域,特别涉及一种基于动态平滑轨迹的桥式起重机定位防摆控制方法。

### 背景技术

[0002] 目前,桥式起重机作为运输机械,广泛的应用于国民经济建设的各个领域,并发挥着极其重要的作用。为创造更大价值,桥式起重机的工作效率必须不断提高,而安全运行指标、台车定位及负载防摆的性能在很大程度上决定了桥式起重机的运送效率。

[0003] 针对桥式起重机的定位防摆,国内外学者进行了广泛的研究,其中较为经典的是以二维桥式起重机动力学模型为基础,设计开环与闭环的控制方法。闭环控制需要借助于各种距离、速度、角度、重力传感器来实时监测桥式起重机运行状态,但该方法导致桥式起重机控制系统设计复杂、稳定性变差且成本倍增;开环控制方式则简便易行,并在实际工程中控制效果良好,具有可靠、普遍性。

[0004] 其一,开环控制方法以输入整形、轨迹规划最具代表性。现有技术中,通过分析自然振荡频率与阻尼比,设计时滞滤波器,对摆动进行有效的控制。随后经过不断研究,设计了一种PD结合输入整形控制的消摆方法,对摆动具有显著的抑制作用。但此种方法将桥式起重机模型在平衡点附近的摆角线性化,若摆动超出线性化值,则摆角变化将很难判断;

[0005] 其二,另外,现有技术中还通过构造一条S形轨迹,并设计自适应跟踪控制器对其进行跟踪控制,实现定位防摆;但该S形轨迹仅有定位性能,不能够消除负载摆动,负载摆动的抑制性能完全由跟踪控制器实现;

[0006] 其三,现有技术中,采用迭代学习来规划桥式起重机运行的轨迹,并且在伺服电机控制的桥式起重机实验平台上获得较好的控制效果;但该方法应用时须进行迭代优化,且无法保证台车最大速度、最大加速度、负载摆角等指标;

[0007] 其四,现有技术中,提出了基于相平面的轨迹规划方法;但是该方法致加加速度在切换点处不平滑,易给执行器带来较大冲击,发生打滑现象。

### 发明内容

[0008] 有鉴于此,为解决上述现有技术的不足,本发明的目的在于提供了一种基于动态平滑轨迹的桥式起重机定位防摆控制方法,将运用机器人技术的灵活性与自动化技术的高效性相融合,并应用到桥式起重机系统上,用于解决桥式起重机运输过程中台车牵引吊绳引起负载惯性摆动与定位时负载残余摆动的问题,用于解决负载定位精度低及负载摆动剧烈的问题,实现桥式起重机负载吊运时高效的定位防摆控制。

[0009] 为实现上述目的,本发明所采用的技术方案是:

[0010] 一种基于动态平滑轨迹的桥式起重机定位防摆控制方法,包括以下步骤:

[0011] S1:求取负载的位移、摆角信息与绳长量耦合到台车位移的控制量;

[0012] S2:基于二维桥式起重机动力学模型,分析二维坐标系中台车位移摆角与加速度

的关系,结合相平面分析法,建立基于位移摆角的加速度控制信号;

[0013] S21:建立二维桥式起重机动力学模型:依据二维桥式起重机简化模型,在广义坐标下,利用拉格朗日动力学方程,建立定绳长二维桥式起重机动力学模型:

$$[0014] \quad F(t) = (M+m) \ddot{x}(t) + ml\ddot{\theta}(t)\cos\theta(t) - ml\dot{\theta}^2(t)\sin\theta(t) \quad ;$$

$$[0015] \quad 0 = l^2 \ddot{\theta}(t) + l\ddot{x}(t)\cos\theta(t) + lg\sin\theta(t) \quad ;$$

[0016] S22:结合相平面分析法,得到台车以恒定加速度a运行时的相平面曲线方程:

$$\left[ \theta(t) + \frac{a}{g} \right]^2 + \left[ \frac{\dot{\theta}(t)}{\omega_n} \right]^2 = \left[ \theta(0) + \frac{a}{g} \right]^2 + \left[ \frac{\dot{\theta}(0)}{\omega_n} \right]^2 ;$$

[0017] 其中,  $\theta(0) = 0$  和  $\dot{\theta}(0) = 0$  表示初始状态的摆角与初始角速度,  $\omega_n = \sqrt{g/l}$  表示自然振荡频率;

[0018] S23:建立相平面曲线:基于步骤S22,在以  $\theta(t)$  为横坐标,  $\dot{\theta}(t)/\omega_n$  为纵坐标的坐标系中,表示为以  $[-a/g, 0]$  为圆心,  $R = \sqrt{\left[ \theta(0) + \frac{a}{g} \right]^2 + \left[ \frac{\dot{\theta}(0)}{\omega_n} \right]^2}$  为半径的圆,即相平面曲线;

[0019] S24:依据相平面曲线,分析桥式起重机运动情况可知,当  $a \neq 0$  时,负载以固定角速度  $\omega_n$  做单摆运动;当  $a = 0$  时,负载与台车保持相对静止;

[0020] S3:建立运动控制系统,利用负载在运行过程中的摆动规律,建立对称式的加速度运动轨迹,即三段式加速度轨迹,设定各项性能指标,使得台车准确到达指定位置并消除负载摆动;

[0021] S31:三段式加速度轨迹表达式为:

$$[0022] \quad \ddot{x}_1(t) = \begin{cases} a_{\max} & 0 < t < t_a \\ -a_{\max} & t_a + t_c < t < 2t_a + t_c \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad ;$$

[0023] S32:引入加速度平滑过度曲线:基于步骤S31,在运输距离确定的情况下,即指定位置位移  $u_x = x(t)$  时,加速与减速阶段的运送位移相同,则加速度轨迹曲线中心对称,整个运送过程中满足以下性能指标:

[0024] (1) 安全摆角指标:运行过程中的最大摆角  $u_\theta \geq |\theta(t)|$  ;

[0025] (2) 最大加速度指标:运行过程中最大加速度  $u_a \geq |\ddot{x}(t)|$  ;

[0026] (3) 最大速度指标:运行最大速度  $u_v \geq |\dot{x}(t)|$  ;

[0027] (4) 稳态指标:匀速运动及停止运动时的摆角  $\theta(t) = 0$  ;

[0028] S4:通过调节负载在加速阶段、匀速运动阶段、减速阶段的位移时间函数,在不影响定位的前提下构建负载动态平滑定位防摆轨迹;依据三段式加速度轨迹表达式,得到限定各项性能指标下的轨迹方程;若平滑轨迹下台车受到的冲击与三段式加速度轨迹相比,有较大程度的缓解,至此轨迹规划完成。

[0029] 进一步的,所述步骤S21中,  $F(t)$  表示作用到台车上的合力,  $M$  和  $m$  分别代表台车和负载的质量,  $x(t)$  表示台车水平方向位移,  $\theta(t)$  表示负载在垂直方向的夹角即摆角,  $\dot{\theta}(t)$  与  $\ddot{\theta}(t)$  分别表示负载摆动的角速度与角加速度,  $l$  是吊绳的长度,  $g$  是重力加速度。

[0030] 进一步的,所述步骤S31中,在给定的运送距离内,限定各项性能指标,根据相平面计算出满足要求的 $a_{\max}$ 、 $t_a$ 与 $t_c$ 值,得到三段式加速度轨迹准确表达式,使得桥式起重机在安全运行范围内能够最快达到指定运送位置消除摆动。

[0031] 进一步的,所述各项性能指标为:限定最大加速度、最大速度、绳长、最大摆角。

[0032] 进一步的,所述三段式加速度轨迹准确表达式为:

$$[0033] \quad \ddot{x}(t) = \begin{cases} \frac{\sin(\omega t - \frac{\pi}{2}) + 1}{2} a_{\max} & 0 \leq t \leq t_1 \\ a_{\max} & t_1 < t \leq t_1 + t_2 \\ \frac{\sin[\omega(t - t_2) - \frac{\pi}{2}] + 1}{2} a_{\max} & t_1 + t_2 < t \leq 2t_1 + t_2 \\ \frac{\cos[\omega(t - 2t_1 - t_2 - t_3)] - 1}{2} a_{\max} & 2t_1 + t_2 + t_3 < t \leq 3t_1 + t_2 + t_3 \\ -a_{\max} & 3t_1 + t_2 + t_3 < t \leq 3t_1 + 2t_2 + t_3 \\ \frac{\cos[\omega(t - 2t_1 - 2t_2 - t_3)] - 1}{2} a_{\max} & 3t_1 + 2t_2 + t_3 < t \leq 4t_1 + 2t_2 + t_3 \\ 0 & \text{其他} \end{cases};$$

[0034] 其中,  $\omega = \pi/t_1$ , 为避免负载往复摆动, 则  $t_1 \in (0, \pi/2 \omega_n)$ 。

[0035] 本发明的有益效果是:

[0036] 本发明在二维桥式起重机动力学模型的基础上, 针对三段式加速度的缺点, 采用相平面分析法, 以三段式加速度为基础并引入加速度平滑过度环节, 获得便于应用的解析表达式, 由此方程设计控制系统, 减少加速度变化对台车的直接冲击, 兼顾台车精准定位与负载防摆的要求, 同时提高了系统的响应速度; 与现有轨迹控制方法比较, 该方法能够使台车准确到达指定位置并防止负载摆动, 同时有效减小加速度变化对台车的冲击, 达到更加的控制效果, 解决了桥式起重机运输过程中台车牵引吊绳引起负载惯性摆动与定位时负载残余摆动的问题, 解决了负载定位精度低及负载摆动剧烈的问题, 实现桥式起重机负载吊运时高效的定位防摆控制。

## 附图说明

[0037] 为了更清楚地说明本发明实施例或现有技术中的技术方案, 下面将对实施例或现有技术描述中所需要使用的附图作简单地介绍, 显而易见地, 下面描述中的附图仅仅是本发明的一些实施例, 对于本领域普通技术人员来讲, 在不付出创造性劳动的前提下, 还可以根据这些附图获得其他的附图。

[0038] 图1为本发明的桥式起重机动力学模型原理图;

[0039] 图2为相平面曲线的原理图;

[0040] 图3为三段式加速度轨迹的原理图;

[0041] 图4为平滑变加速轨迹的原理图;

[0042] 图5为平滑加速度轨迹的相平面曲线原理图;

[0043] 图6为位移实验结果示意图;

[0044] 图7为位移实验变化趋势示意图;

[0045] 图8为两种轨迹位移实验结果示意图;

[0046] 图9为两种轨迹摆角实验结果示意图。

## 具体实施方式

[0047] 下面给出具体实施例,对本发明的技术方案作进一步清楚、完整、详细地说明。本实施例是以本发明技术方案为前提的最佳实施例,但本发明的保护范围不限于下述的实施例。

[0048] 一种基于动态平滑轨迹的桥式起重机定位防摆控制方法,包括以下步骤:

[0049] S1:求取负载的位移、摆角信息与绳长量耦合到台车位移的控制量;

[0050] S2:基于二维桥式起重机动力学模型,分析二维坐标系中台车位移摆角与加速度的关系,结合相平面分析法,建立基于位移摆角的加速度控制信号;

[0051] S21:建立二维桥式起重机动力学模型:依据二维桥式起重机简化模型,在广义坐标下,利用拉格朗日动力学方程,建立定绳长二维桥式起重机动力学模型:

$$[0052] \quad F(t) = (M+m) \ddot{x}(t) + ml\ddot{\theta}(t)\cos\theta(t) - ml\dot{\theta}^2(t)\sin\theta(t) \quad ;$$

$$[0053] \quad 0 = l^2 \ddot{\theta}(t) + l\dot{x}(t)\cos\theta(t) + lg\sin\theta(t) \quad ;$$

[0054] S22:结合相平面分析法,得到台车以恒定加速度a运行时的相平面曲线方程:

$$\left[\theta(t) + \frac{a}{g}\right]^2 + \left[\frac{\dot{\theta}(t)}{\omega_n}\right]^2 = \left[\theta(0) + \frac{a}{g}\right]^2 + \left[\frac{\dot{\theta}(0)}{\omega_n}\right]^2 ;$$

[0055] 其中, $\theta(0) = 0$ 和 $\dot{\theta}(0) = 0$ 表示初始状态的摆角与初始角速度, $\omega_n = \sqrt{g/l}$ 表示自然振荡频率;

[0056] S23:建立相平面曲线:基于步骤S22,在以 $\theta(t)$ 为横坐标, $\dot{\theta}(t)/\omega_n$ 为纵坐标的坐标系

中,表示为以 $[-a/g, 0]$ 为圆心, $R = \sqrt{\left[\theta(0) + \frac{a}{g}\right]^2 + \left[\frac{\dot{\theta}(0)}{\omega_n}\right]^2}$ 为半径的圆,即相平面曲线;

[0057] S24:依据相平面曲线,分析桥式起重机运动情况可知,当 $a \neq 0$ 时,负载以固定角速度 $\omega_n$ 做单摆运动;当 $a = 0$ 时,负载与台车保持相对静止;

[0058] S3:建立运动控制系统,利用负载在运行过程中的摆动规律,建立对称式的加速度运动轨迹,即三段式加速度轨迹,设定各项性能指标,使得台车准确到达指定位置并消除负载摆动;

[0059] S31:三段式加速度轨迹表达式为:

$$[0060] \quad \ddot{x}_1(t) = \begin{cases} a_{\max} & 0 < t < t_a \\ -a_{\max} & t_a + t_c < t < 2t_a + t_c \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad ;$$

[0061] S32:引入加速度平滑过度曲线:基于步骤S31,在运输距离确定的情况下,即指定位置位移 $u_x = x(t)$ 时,加速与减速阶段的运送位移相同,则加速度轨迹曲线中心对称,整个运送过程中满足以下性能指标:

[0062] (1) 安全摆角指标:运行过程中的最大摆角 $u_\theta \geq |\theta(t)|$ ;

[0063] (2) 最大加速度指标:运行过程中最大加速度 $u_a \geq |\ddot{x}(t)|$ ;

[0064] (3) 最大速度指标:运行最大速度 $u_v \geq |\dot{x}(t)|$ ;

[0065] (4) 稳态指标:匀速运动及停止运动时的摆角 $\theta(t) = 0$ ;

[0066] S4:通过调节负载在加速阶段、匀速运动阶段、减速阶段的位移时间函数,在不影响定位的前提下构建负载动态平滑定位防摆轨迹;依据三段式加速度轨迹表达式,得到限定各项性能指标下的轨迹方程;若平滑轨迹下台车受到的冲击与三段式加速度轨迹相比,有较大幅度的缓解,至此轨迹规划完成。

[0067] 进一步的,所述步骤S21中, $F(t)$ 表示作用到台车上的合力, $M$ 和 $m$ 分别代表台车和负载的质量, $x(t)$ 表示台车水平方向位移, $\theta(t)$ 表示负载在垂直方向的夹角即摆角, $\dot{\theta}(t)$ 与 $\ddot{\theta}(t)$ 分别表示负载摆动的角速度与角加速度, $l$ 是吊绳的长度, $g$ 是重力加速度。

[0068] 进一步的,所述步骤S31中,在给定的运送距离内,限定各项性能指标,根据相平面计算出满足要求的 $a_{\max}$ 、 $t_a$ 与 $t_c$ 值,得到三段式加速度轨迹准确表达式,使得桥式起重机在安全运行范围内能够最快达到指定运送位置消除摆动。

[0069] 进一步的,所述各项性能指标为:限定最大加速度、最大速度、绳长、最大摆角。

[0070] 进一步的,所述三段式加速度轨迹准确表达式为:

$$[0071] \quad \ddot{x}(t) = \begin{cases} \frac{\sin(\omega t - \frac{\pi}{2}) + 1}{2} a_{\max} & 0 \leq t \leq t_1 \\ a_{\max} & t_1 < t \leq t_1 + t_2 \\ \frac{\sin[\omega(t - t_2) - \frac{\pi}{2}] + 1}{2} a_{\max} & t_1 + t_2 < t \leq 2t_1 + t_2 \\ \frac{\cos[\omega(t - 2t_1 - t_2 - t_3)] - 1}{2} a_{\max} & 2t_1 + t_2 + t_3 < t \leq 3t_1 + t_2 + t_3 \\ -a_{\max} & 3t_1 + t_2 + t_3 < t \leq 3t_1 + 2t_2 + t_3 \\ \frac{\cos[\omega(t - 2t_1 - 2t_2 - t_3)] - 1}{2} a_{\max} & 3t_1 + 2t_2 + t_3 < t \leq 4t_1 + 2t_2 + t_3 \\ 0 & \text{其他} \end{cases};$$

[0072] 其中,  $\omega = \pi/t_1$ , 为避免负载往复摆动,则  $t_1 \in (0, \pi/2 \omega_n)$ 。

[0073] 实施例

[0074] 下面通过具体实施方式结合附图对本发明进一步详细说明;

[0075] 步骤1:桥式起重机动力学模型分析,桥式起重机运输负载主要依靠大车、台车和吊绳的动作,由此建立桥式起重机的五自由度三维数学模型。模型中的二自由度摆角是由大车、台车的加(减)速度以及绳长决定,并且大车、台车的运动处于解耦状态,因此只需研究一个方向上的运动即可,另一方向控制规律相同。在二维坐标系中,建立简化的二维桥式起重机动力学模型,如图1所示,图中: $M$ 和 $m$ 分别代表台车和负载的质量, $F$ 表示动力, $l$ 是吊绳的长度, $\theta$ 为负载摆角;

[0076] 桥式起重机运输负载的过程中,为保证运输安全性,吊绳长度一般不变。由图1简化模型,在广义坐标下,利用拉格朗日动力学方程<sup>[11]</sup>,建立如下定绳长二维桥式起重机数学模型:

$$[0077] \quad F(t) = (M + m) \ddot{x}(t) + ml\ddot{\theta}(t)\cos\theta(t) - ml\dot{\theta}^2(t)\sin\theta(t) \quad (1)$$

$$[0078] \quad 0 = l^2 \ddot{\theta}(t) + l\ddot{x}(t)\cos\theta(t) + lg\sin\theta(t) \quad (2)$$

[0079] 式中: $F(t)$ 表示作用到台车上的合力, $M$ 和 $m$ 分别代表台车和负载的质量, $x(t)$ 表示台车水平方向位移, $\theta(t)$ 表示负载在垂直方向的夹角即摆角, $\dot{\theta}(t)$ 与 $\ddot{\theta}(t)$ 分别表示负载摆动的角速度与角加速度, $l$ 是吊绳的长度, $g$ 是重力加速度;

[0080] 步骤2:运用相平面分析法对模型进行分析,由于桥式起重机工作的安全摆角小于 $5^\circ$ ,则 $\sin(\theta(t)) \approx \theta(t)$ ,  $\cos(\theta(t)) \approx 1$ ;

[0081] (2)式即可简化为

$$[0082] \quad \ddot{\theta}(t) + \frac{g}{l}\theta(t) = \frac{1}{l}\ddot{x}(t) \quad (3)$$

[0083] 求解微分方程(3),结合相平面分析法,可以得到台车以恒定加速度 $a$ 运行时的相平面曲线方程:

$$[0084] \quad \left[ \theta(t) + \frac{a}{g} \right]^2 + \left[ \frac{\dot{\theta}(t)}{\omega_n} \right]^2 = \left[ \theta(0) + \frac{a}{g} \right]^2 + \left[ \frac{\dot{\theta}(0)}{\omega_n} \right]^2 \quad (4)$$

[0085] 式中: $\theta(0) = 0$ 和 $\dot{\theta}(0) = 0$ 表示初始状态的摆角与初始角速度, $\omega_n = \sqrt{g/l}$ 表示自然振荡频率;

[0086] 式(4)在以 $\theta(t)$ 为横坐标, $\dot{\theta}(t)/\omega_n$ 为纵坐标的坐标系中,可以表示为以 $[-a/g, 0]$ 为

圆心, $R = \sqrt{\left[ \theta(0) + \frac{a}{g} \right]^2 + \left[ \frac{\dot{\theta}(0)}{\omega_n} \right]^2}$ 为半径的圆;曲线如图2所示,分析桥式起重机运动情况可知,

当 $a \neq 0$ 时,负载以固定角速度 $\omega_n$ 做单摆运动;当 $a = 0$ 时,负载与台车保持相对静止;

[0087] 步骤3:三段式加速度轨迹控制分析,根据上述相平面分析,利用负载在运行过程中的摆动规律,建立对称式的加速度运动轨迹,即三段式加速度轨迹,保证台车能够准确到达指定位置并消除负载摆动;其规划轨迹如图3所示,图中: $a_{\max}$ 表示最大加速度, $t_a$ 与 $t_b$ 分别表示加(减)速持续时间与匀速持续的时间;

[0088] 三段式加速度轨迹表达式为:

$$[0089] \quad \ddot{x}_1(t) = \begin{cases} a_{\max} & 0 < t < t_a \\ -a_{\max} & t_a + t_c < t < 2t_a + t_c \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (5)$$

[0090] 在给定的运送距离内,限定各项性能指标,即限定最大加速度、最大速度、绳长、最大摆角等;根据相平面计算出满足要求的 $a_{\max}$ 、 $t_a$ 与 $t_c$ 值,即可得到出三段式加速度轨迹准确表达式,保证桥式起重机在安全运行范围内能够最快达到指定运送位置消除摆动;

[0091] 步骤4:平滑轨迹控制设计,三段式加速度轨迹在加速切换过程中,直接给予执行机构最大加速度值,缺少平滑过度环节,造成动作响应延迟,对台车冲击较大,容易发生打滑抖动现象;为避免上述现象的发生,使运输更加平稳准确,三段式加速度轨迹须引入加速度平滑过度曲线;为此规划了新的轨迹如图4所示,图中: $t_1$ 、 $t_2$ 、 $t_3$ 分别表示加速变化的加(减)速阶段时间、加速度恒定的加(减)速阶段时间、匀速阶段时间;

[0092] 在运输距离确定的情况下,即指定位置位移 $u_x = x(t)$ 时,加速与减速阶段的运送位移相同,则加速度轨迹曲线中心对称,整个运送过程中满足以下性能指标:

[0093] 1) 安全摆角指标:运行过程中的最大摆角 $u_\theta \geq |\theta(t)|$ ;

[0094] 2) 最大加速度指标:运行过程中最大加速度 $u_a \geq |\ddot{x}(t)|$ ;

[0095] 3) 最大速度指标:运行最大速度 $u_v \geq |\dot{x}(t)|$ ;

[0096] 4) 稳态指标:匀速运动及停止运动时的摆角 $\theta(t) = 0$ ;

[0097] 利用图3的轨迹,在加速阶段中引入加速度平滑变化的三角函数曲线,确保加速度变化率在 $t_1$ 时间段内由小变大再由大变小,随后达到最大加速度,并以此加速度运行 $t_2$ ;在进入匀速运动前,采取同样方法控制加速度变化率,使加速度减为零,提升运输速度,缩短运送时间,避免了加速度变化过大造成的打滑抖动;同理,减速阶段采用类似控制规律,最终实现台车准确到达指定位置,负载停止摆动;其表达式为:

$$[0098] \quad \ddot{x}(t) = \begin{cases} \frac{\sin(\omega t - \frac{\pi}{2}) + 1}{2} a_{\max} & 0 \leq t \leq t_1 \\ a_{\max} & t_1 < t \leq t_1 + t_2 \\ \frac{\sin[\omega(t - t_2) - \frac{\pi}{2}] + 1}{2} a_{\max} & t_1 + t_2 < t \leq 2t_1 + t_2 \\ \frac{\cos[\omega(t - 2t_1 - t_2 - t_3)] - 1}{2} a_{\max} & 2t_1 + t_2 + t_3 < t \leq 3t_1 + t_2 + t_3 \\ -a_{\max} & 3t_1 + t_2 + t_3 < t \leq 3t_1 + 2t_2 + t_3 \\ \frac{\cos[\omega(t - 2t_1 - 2t_2 - t_3)] - 1}{2} a_{\max} & 3t_1 + 2t_2 + t_3 < t \leq 4t_1 + 2t_2 + t_3 \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (6)$$

[0099] 式中:  $\omega = \pi/t_1$ , 为避免负载往复摆动, 则  $t_1 \in (0, \pi/2 \omega_n)$ ;

[0100] 那么,

$$[0101] \quad 0 < \omega_n t_1 < \omega t_1 = \frac{\pi}{2} \quad (7)$$

[0102] 将时刻的表达式代入(3)可得

$$[0103] \quad \ddot{\theta}(t) + \omega_n^2 \theta(t) = -\frac{\omega_n^2}{g} \left[ \frac{\sin(\omega t - \frac{\pi}{2}) + 1}{2} a_{\max} \right] \quad (8)$$

[0104] 求解该二阶非齐次微分方程可得

$$[0105] \quad \theta(t) = \frac{\omega_n^2}{g(\omega - \omega_n)} a_{\max} \left[ \frac{\sin(\omega t - \frac{\pi}{2}) + 1}{2} - \frac{\omega}{\omega_n} \frac{\sin(\omega_n t - \frac{\pi}{2}) + 1}{2} \right] \quad (9)$$

[0106] 则

$$[0107] \quad \dot{\theta}(t) = \frac{\omega_n \cdot \omega}{g(\omega - \omega_n)} a_{\max} \left[ \frac{\cos(\omega t - \frac{\pi}{2}) + 1}{2} - \frac{\cos(\omega_n t - \frac{\pi}{2}) + 1}{2} \right] \quad (10)$$

[0108] 根据(7)、(10), 可得

$$[0109] \quad \dot{\theta}(t) < 0 \quad \text{且} \quad \theta(0) = 0 \quad (11)$$

[0110] 由式(11)可得, 当 $t = t_1$ 时, 变加速运动的结束点位于第三象限。根据运动的对称性, 可得平滑加速度轨迹的相平面曲线如图5所示, 图中: $O_1$ 、 $O_2$ 分别是台车加速度恒定时加速阶段、减速阶段的圆心, 则 $|OO_1| = a_{\max}/g$ ; A、B分别是台车加速度恒定时加速阶段、减速阶段的负载最大摆角; C是第一段平滑过度加速度的结束点; D是C在横轴上的投影; OC代表第一段平滑过度加速度的复杂变化相平面曲线, 0即为匀速运动及停止运动时的摆角;

[0111] 由公式(9)、(10)可得, C的坐标为 $[\theta(t_1), \dot{\theta}(t_1)/\omega_n]$ ;

[0112] 由C的坐标, 可得 $\alpha$ 为锐角, 则

$$[0113] \quad \alpha = \arctan \left[ \frac{\frac{\cos(\omega_n t_1 - \frac{\pi}{2}) + 1}{\omega_n} \cdot \frac{2}{2}}{\frac{\sin(\omega_n t_1 - \frac{\pi}{2}) + 1}{\omega - \omega_n} \cdot \frac{2}{2}} \right] \quad (12)$$

[0114] 由式(12),根据图3结论,分析图4、图5,则

$$[0115] \quad t_2 = T \cdot \frac{2\pi - 2\alpha}{2\pi} = \frac{2\pi - 2\alpha}{\omega_n} \quad (13)$$

[0116] 式中: $T=2t_1+t_2$ ,代表整个加速阶段的周期,此时负载摆动周期是单摆运动周期的一半;

[0117] 对(6)进行两次积分可得

$$[0118] \quad u_x = v_{\max} (2t_1 + t_2 + t_3) \quad (14)$$

$$[0119] \quad v_{\max} = a_{\max} \left( \frac{4}{\omega} + t_2 \right) \leq u_v \quad (15)$$

[0120] 由图5可得

$$[0121] \quad \theta_{\max} = |AO_1| + \frac{a_{\max}}{g} \leq u_{\theta} \quad (16)$$

[0122] 式中: $|AO_1| = \sqrt{|CD|^2 + |Q_1D|^2}$ ,可有C坐标求得。

[0123] 根据(14)可得

$$[0124] \quad t_3 = \frac{u_x}{v_{\max}} - 2t_1 - t_2 \quad (17)$$

[0125] 在限定的性能指标下,由式(14)、(15)、(16)可得如下性能指标:

[0126] 1) 速度的最大取值:

$$[0127] \quad v_{\max} = \min \left\{ u_v, \frac{u_x}{(2t_1 + t_2 + t_3)}, a_{\max} \left( \frac{4}{\omega} + t_2 \right) \right\}$$

[0128] 2) 加速度的最大取值:

$$[0129] \quad a_{\max} = \min \left\{ u_a, u_{\theta} g - g \cdot |AO_1|, \frac{v_{\max}}{\left( \frac{4}{\omega} + t_2 \right)} \right\}$$

[0130] 在运送总时间 $T_{\text{total}}$ 与运送距离 $u_x$ 已知的情况下,由式(7)、(13)、(17)结合性能指标1)、2)即可得出平滑加速度轨迹的具体表达式;

[0131] 对表达式(6)求导,可得

$$[0132] \quad \ddot{x}(t) = \begin{cases} \frac{\omega \cos(\omega t - \frac{\pi}{2})}{2} a_{\max} & 0 \leq t \leq t_1 \\ \frac{\omega \cos[\omega(t-t_2) - \frac{\pi}{2}]}{2} a_{\max} & t_1 + t_2 < t \leq 2t_1 + t_2 \\ \frac{\omega \sin[\omega(t-2t_1-t_2-t_3)]}{2} a_{\max} & 2t_1 + t_2 + t_3 < t \leq 3t_1 + 2t_2 + t_3 \\ \frac{\omega \sin[\omega(t-2t_1-2t_2-t_3)]}{2} a_{\max} & 3t_1 + 2t_2 + t_3 < t \leq 4t_1 + 2t_2 + t_3 \\ 0 & \text{其他} \end{cases} \quad (18)$$

[0133] 由式(18)可知,平滑轨迹下台车受到的冲击与三段式加速度轨迹相比,有较大幅度的缓解,至此轨迹规划完成。

[0134] 本实施例中,本发明利用三维吊车实验平台验证上述规划的平滑加速度轨迹的定位防摆性能。根据上述轨迹规划方法,得出三段式加速度轨迹、平滑过度轨迹以及三角函数轨迹的各参数,如表1所示,实验平台参数如表2所示:

[0135] 表1轨迹参数表

控制方法	$a_{\max}$	$t_1$	$t_2$	$t_3$	$\omega$
[0136] 三角函数轨迹	0.1725	0.2173	1.4613	0.1015	7.2296
平滑过渡轨迹	0.1548	0.2173	1.5167	0.0023	14.4574

[0137] 表2平台参数

平台参数	M	m	l	g	$u_x$	$u_v$	$u_a$	$u_0$	t
[0138] 数值	6.157	1	0.75	9.8	0.6	0.4	0.2	2	3.94

[0139] 表3实验结果数据

控制方法	$\theta_{\max}$ (实际/规划值)	$\theta_{\text{res}}$ (实际/规划值)	t(实际/规划值)
[0140] 三角函数轨迹	1.96/2	<0.1/0	3.94/3.90
平滑过渡轨迹	1.92/2	<0.1/0	3.92/3.90

[0141] 其中,实验结果如图7-10和上表3所示,表3中: $\theta_{\text{res}}$ 表示残余摆角。实验结果表明实际位移相比规划位移来讲存在较小位移差,且实际位移跟随规划位移变化,有助于提高定位精度。另一方面,运输的整体过程中,摆角的实际变化在安全范围内,稳态摆角幅度较小,有效实现了抑制摆角的目的。总之,平滑过度轨迹在抑制摆角、快速定位方面都优于三角函数轨迹,定位精度与摆角均较小,具有很好的运用前景。

[0142] 本发明中,运用平滑的过度函数,依据优化相平面曲线,计算出限定性能指标下的轨迹方程即公式(18);在保证桥式起重机整体运输过程中负载摆角在安全范围内,且台车能够准确到达指定位置并消除负载摆动,提升运输过程平顺性。通过实验验证了该轨迹能够降低冲击的影响,有效的减小台车抖动,避免打滑现象发生,且具有更小的残余摆动,提升了桥式起重机工作的平稳性与运输效率。该轨迹的平滑性对采用跟踪控制非常有利,为自动化起重设备的安全、快速、准确、稳定运输货物提供了理论依据。

[0143] 以上显示和描述了本发明的主要特征、基本原理以及本发明的优点。本行业技术人员应该了解,本发明不受上述实施例的限制,上述实施例和说明书中描述的只是说明本发明的原理,在不脱离本发明精神和范围的前提下,本发明还会根据实际情况有各种变化和进步,这些变化和进步都落入要求保护的本发明范围内。本发明要求保护范围由所附的权利要求书及其等效物界定。

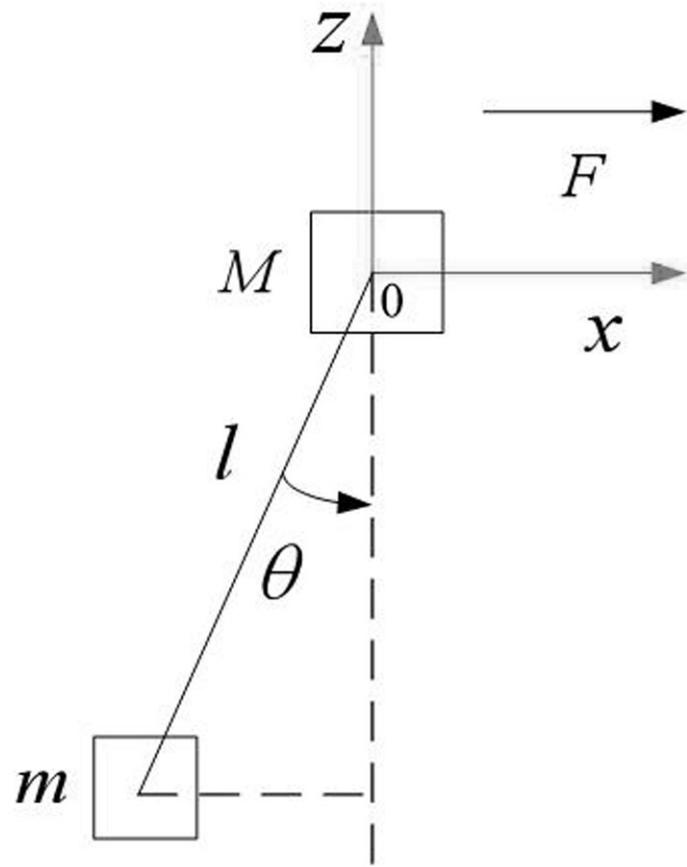


图1

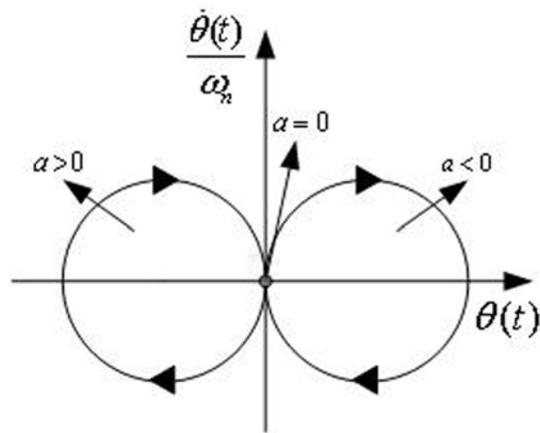


图2

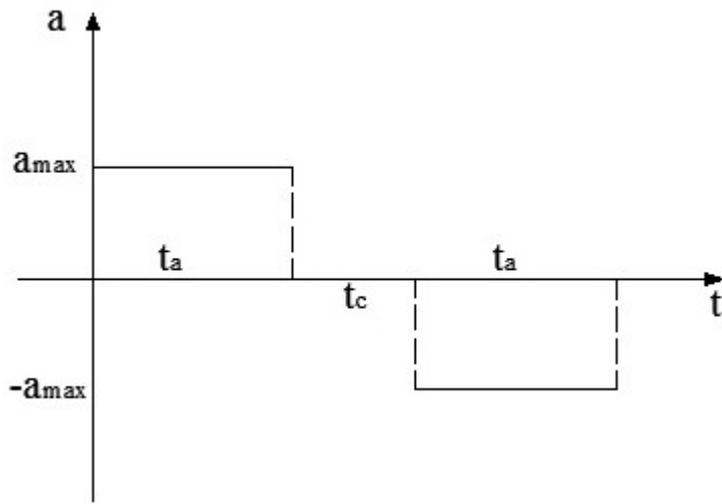


图3

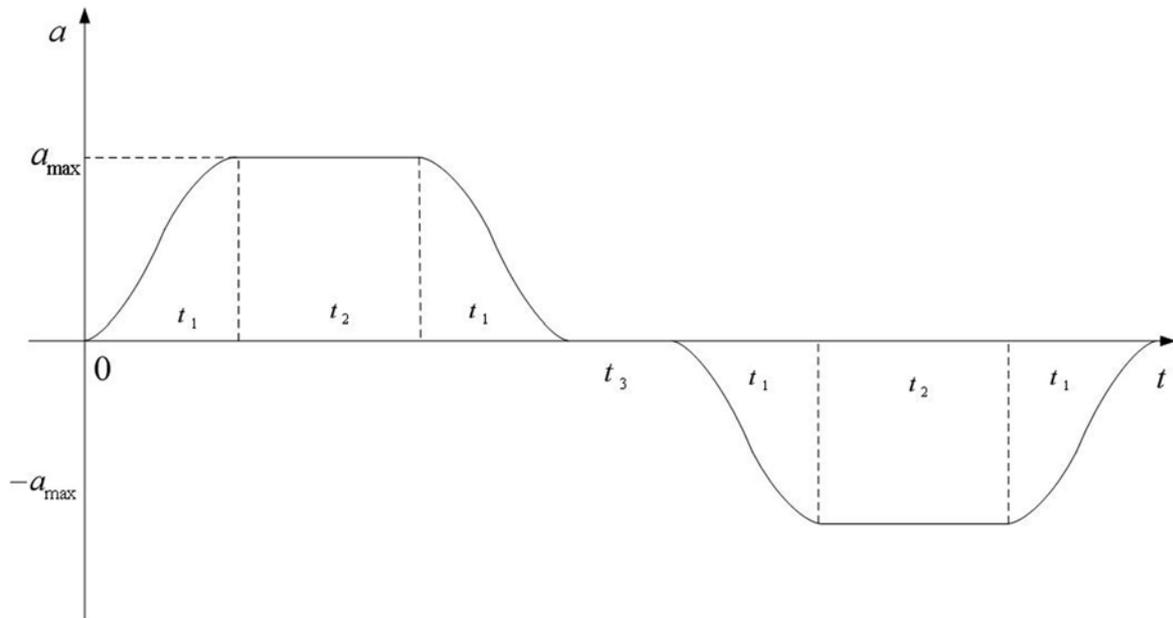


图4

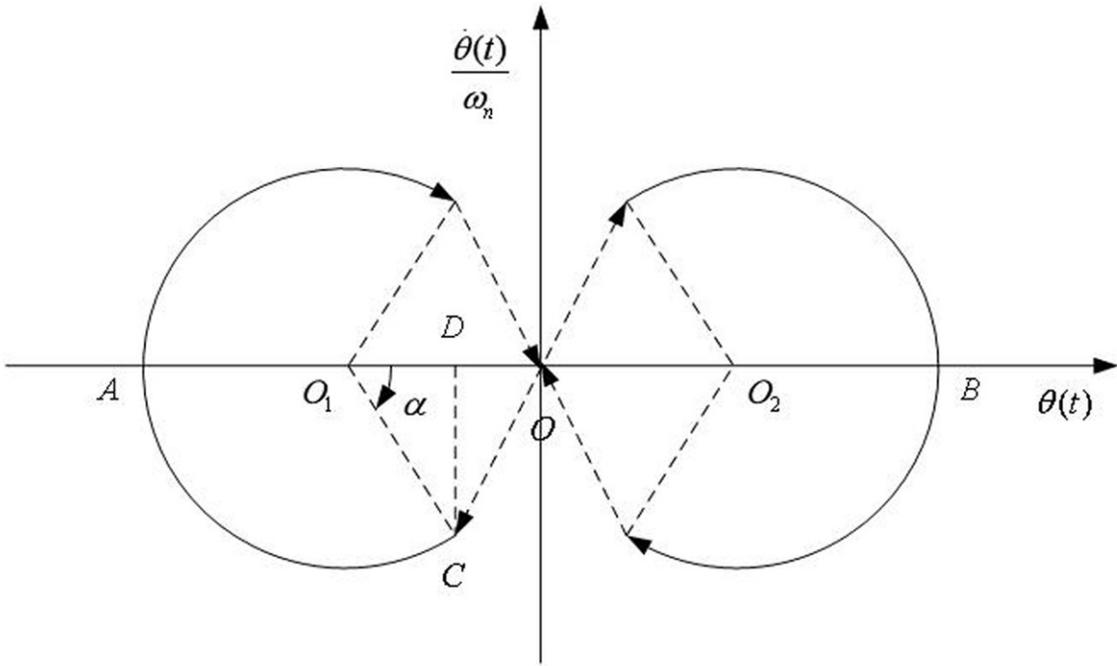


图5

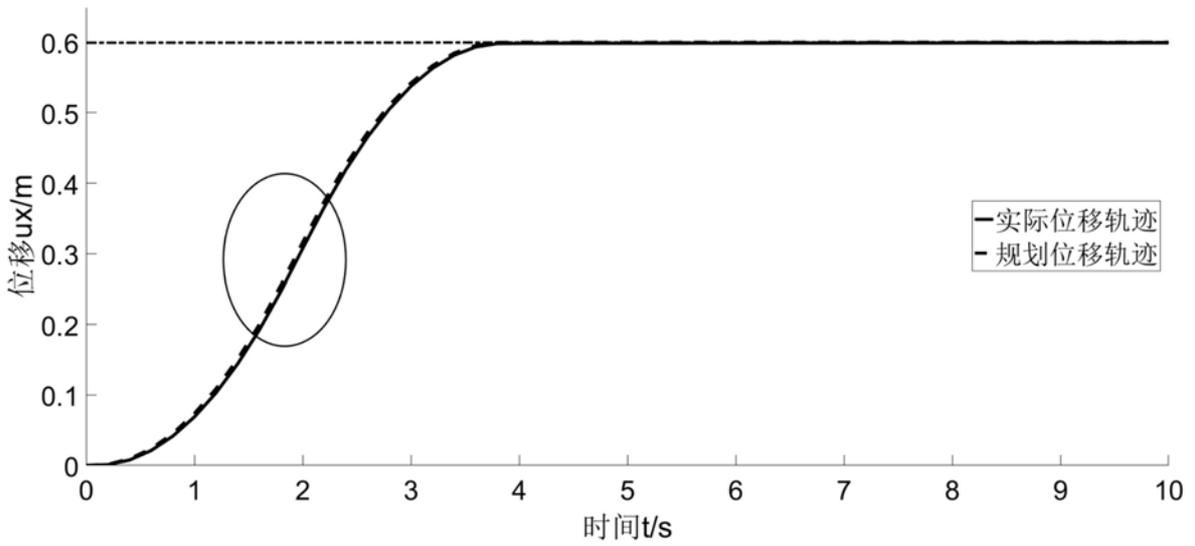


图6

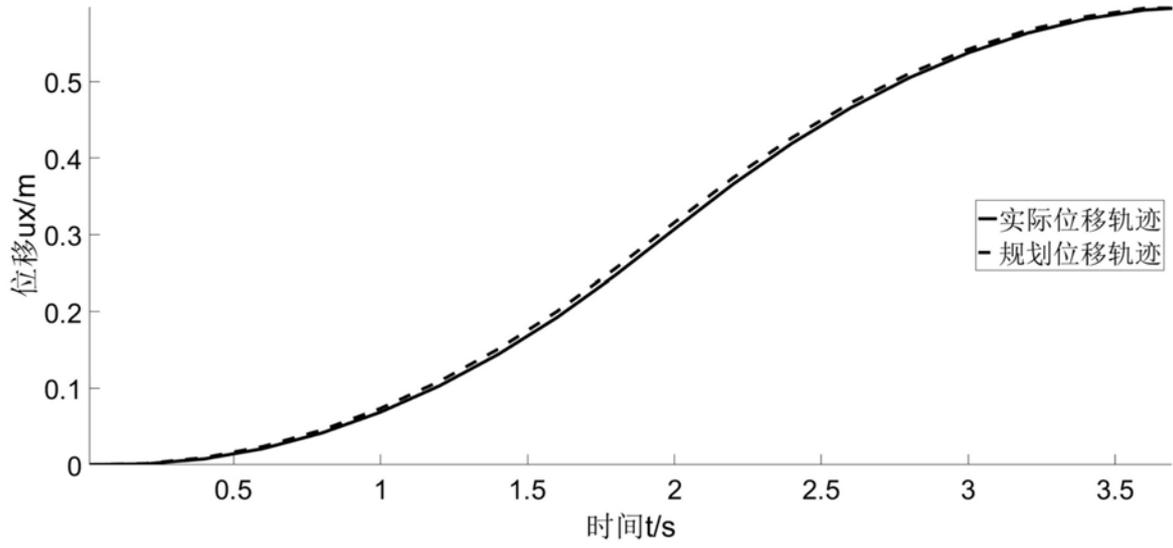


图7

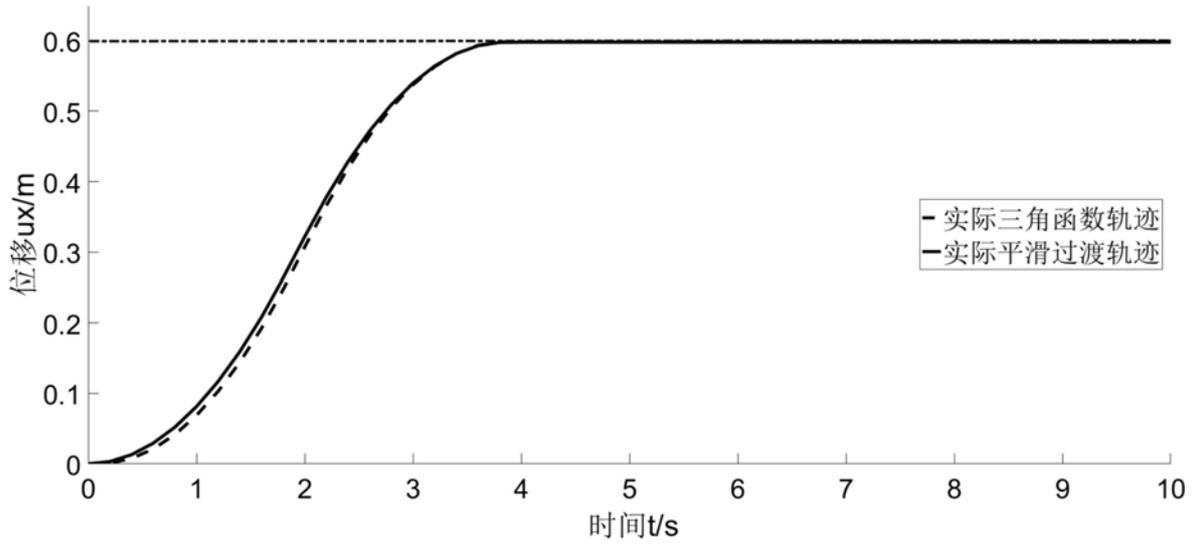


图8

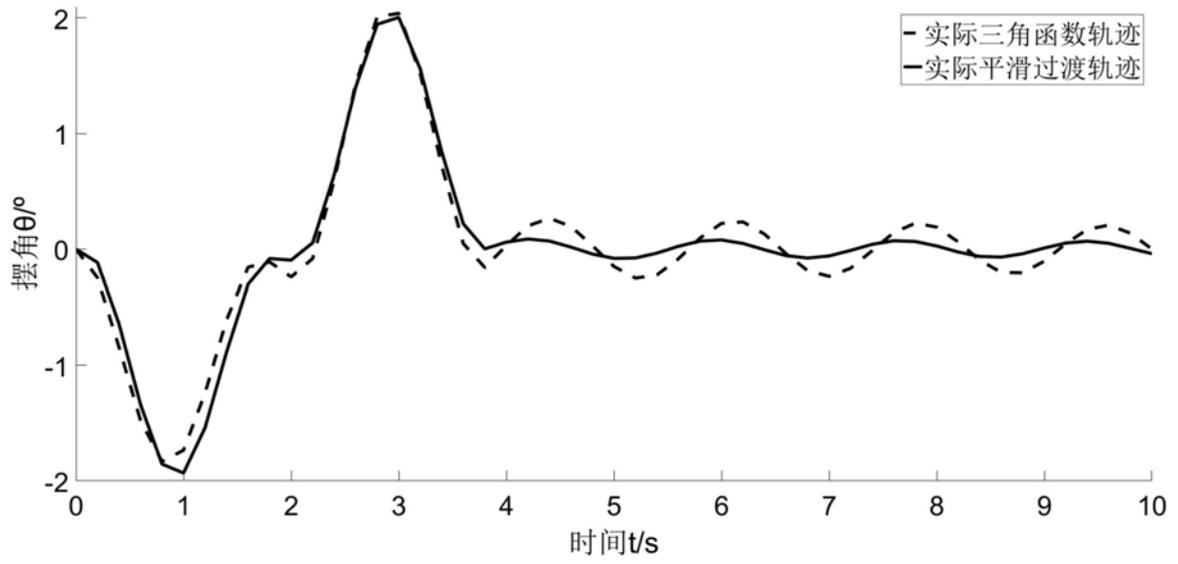


图9