

DOI:10.3969/j.issn.1001-4551.2023.03.018

起重机悬挂负载系统位置控制实验研究^{*}

陈 可¹, 周惠兴^{1,2*}, 单晓微¹, 张中岳¹, 王 曦¹

(1. 北京建筑大学 机电与车辆工程学院, 北京 100044; 2. 北京建筑大学
北京市建筑安全监测工程技术研究中心, 北京 100044)

摘要:在起重机工作时,负载围绕吊装线旋转,存在定位困难的问题,为此,以动量轮为执行机构,提出了一种基于角动量守恒定律的悬挂负载系统姿态控制方法。首先,对悬挂负载系统的机理与结构进行了研究,用欧拉角描述法推导出了系统的运动学方程,并基于角动量守恒定律对系统进行了动力学建模;然后,对系统的稳定性进行了研究,采用比例积分与比例微分(PI+PD)混合控制律,实现了对俯仰方向旋转位置的控制目的;并设计了比例微分(PD)控制律,抑制了外部干扰对俯仰方向旋转产生的摇晃;基于 MATLAB 的 Simulink 环境对系统进行了风力扰动下的仿真实验;最后,搭建了样机实验平台,进行了实际过程测试,结合测试结果对仿真结果进行了验证。研究表明:所设计控制律有效,位置控制角度误差达到 10^{-2} 量级;解决了负载旋转定位困难的问题,抑制了外部干扰对俯仰方向旋转所产生的摇晃。

关键词: 自行式起重机;动量轮;角动量守恒;比例积分与比例微分混合控制律;姿态控制方法

中图分类号:TH213;TP23

文献标识码:A

文章编号:1001-4551(2023)03-0452-09

Experimental study on position control of crane suspension load system

CHEN Ke¹, ZHOU Hui-xing^{1,2}, SHAN Xiao-wei¹, ZHANG Zhong-yue¹, WANG Xi¹

(1. School of Mechanical-Electronic and Vehicle Engineering, Beijing University of Civil Engineering and Architecture, Beijing 100044, China; 2. Beijing Engineering Research Center of Monitoring for Construction Safety, Beijing University of Civil Engineering and Architecture, Beijing 100044, China)

Abstract: Aiming at the difficulty of rotating and positioning the load around the hoisting line when the crane was working, an attitude control method of the suspended load system was proposed based on the law of conservation of angular momentum with the momentum wheel as the actuator. Firstly, the mechanism and structure of the suspended load system were studied, the kinematic equations of the system were deduced by the Euler angle description method, and the dynamic modeling of the system was carried out based on the law of conservation of angular momentum. Then, the stability of the system was studied, and the proportional-integral and proportional-derivative (PI + PD) mixed control law was used to complete the pitch direction rotation position control, and the proportional-derivation (PD) control law was designed to suppress the shaking caused by external disturbances to the pitch direction rotation. The simulation experiment of the system under wind disturbance was carried out based on the Simulink environment of MATLAB. Finally, a prototype experimental platform was built, the actual process test was carried out, and the simulation results were verified by combining the test results. The research results indicate that the designed control law is effective, the position control angle error reaches the order of 10^{-2} . The problem of difficult load rotation positioning is solved, and the sway of pitch direction rotation caused by external interference is restrained.

Key words: self-propelled crane; momentum wheel; conservation of angular momentum; proportional-integral and proportional-derivative (PI + PD) mixed control; attitude control method

收稿日期:2022-06-21

基金项目:国家住房和城乡建设部研究开发项目(2020-K-150);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(H21175);北京建筑大学硕士研究生创新资助项目(PG2022128)

作者简介:陈可(1997-),男,甘肃张掖人,硕士研究生,主要从事智能装备与自动化控制方面的研究。E-mail:1561140680@qq.com

通信联系人:周惠兴,男,博士,教授,博士生导师。E-mail:zhouhuixing@bucea.edu.cn

0 引言

通常,负载的远程运输需要操作员控制自行式起重机的移动来实现。但在高处较为狭窄的地方,负载必须旋转才能避免其与周围的建筑物发生碰撞。

吊钩是一种自由旋转机构,由于其缺乏旋转动力功能,这意味着悬挂在吊钩下的负载遇到强风时,其旋转位置难以得到控制。对此,较为传统的方法^[1]是由经验丰富、技术熟练的工人拉动挂在负载上的辅助绳索,对其进行旋转控制。由于这一过程需要工人与负载近距离接触,存在严重安全隐患^[2]。同时,由于负载旋转时产生的惯性很大,当负载被手动旋转到停止位置时,工人往往需要施加巨大的力。此外,由于风力等外部干扰的存在,当负载向着非预期方向旋转时,仅仅依靠人力是难以应对的。

因此,研究一种悬挂负载系统,利用远程无线遥控来解决负载围绕吊装线旋转定位困难的问题,控制负载的旋转位置,同时抑制外部干扰对俯仰方向旋转产生的摇晃,具有重要的现实意义。

但是,以往与旋转定位技术相关的研究文献很少。目前,用于控制负载旋转的方式通常有两种,即间接式和直接式。其优缺点分别为:(1)间接式是采用四绳配置与吊具相结合,利用4个执行器独立控制每根绳索的长度,以实现负载旋转功能^[3,4];但其可调节的最大旋转角度只有 10° ,角度调节的灵活性有限;(2)直接式是采用双绳/滑轮组与自动旋转吊钩装置相结合,利用安装在装置内部的伺服电机,直接控制负载的旋转。

LEE C 等人^[5]提出了一种改进的起重机滑轮组,通过驱动电机产生旋转轴向扭矩,可以实现对角度自由调节的目的;但其滑轮的结构较为复杂。LAHRES S 等人^[6]提出了一种利用滑轮组来控制负载旋转到目标角度的方法;但其滑轮的结构依旧较为复杂。LEE C 等人^[7]提出了一种可大范围调节负载角度的吊钩装置,有效避免了工人与负载的接触,减少了起重机的安全隐患;然而,其装置的旋转过程存在残余振动。THO H D 等人^[8]提出了一种吊钩装置,使用锁具通过扭锁机构夹住负载,并与其装置内部的电机轴连接,其能够实现将负载旋转到任意角度的目标;然而,吊钩装置是通过起重机绳索悬挂,在旋转负载到达目标位置后,绳索将产生反作用力矩,使负载静止时的定向精度不高,并且旋转过程也存在残余振动。

虽然,目前为了消除振动,研究人员提出了各种控制器^[9,10];但由于控制器存在对参数不确定性的鲁棒

性问题,其消除振动的效果并不理想。LIANG C J 等人^[11]提出了一种飞轮旋转系统,利用内部的齿轮驱动飞轮来控制惯性的,提高了系统的定位精度,且有效消除了残余振动;但其无法抑制外部干扰对俯仰方向旋转产生的摇晃。LNOUE F 等人^[12]提出了一种带有飞轮的吊杆装置,利用飞轮提供的扭矩控制惯性大小,使负载可以围绕吊装线旋转定位,并可有效抑制负载在空间的摇晃;然而,其吊杆装置需要同时提供3个方向的动量,当存在较大干扰时,会出现动量不足问题,且其结构也较为复杂。

基于上述研究的不足,笔者提出一种起重机悬挂负载系统姿态控制方法,通过控制动量轮加减速产生的旋转扭矩,以解决负载旋转定位困难问题,抑制外部干扰对俯仰方向旋转产生的摇晃。

1 机理与结构

1.1 工作机理

系统的工作机理基于角动量守恒^[13]定律,其工作机理图如图1所示。

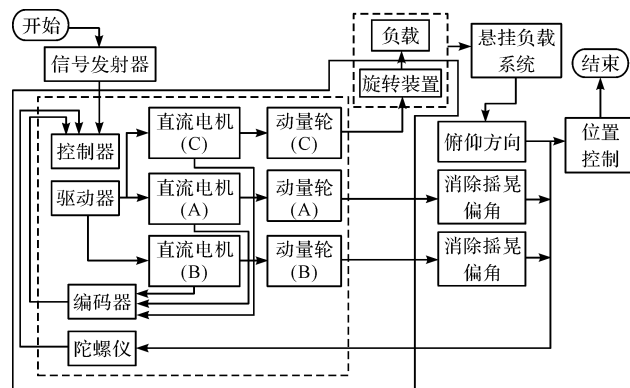


图1 系统机理图

由图1可知:俯仰方向的动量轮C用于控制负载在空间绕吊装线的旋转位置;而滚动与偏航方向的动量轮A与B分别用于抑制外部干扰对俯仰方向旋转产生的摇晃。3个方向独立控制,互不影响;

工作时,当控制器接收到信号发射器发送的启动信号后,驱动器会驱动电机改变动量轮A,B,C的速度与加速度,产生旋转扭矩,经过动量轮与系统之间的动量交换,负载会被旋转到目标位置;

旋转过程中,通过编码器和陀螺仪采集电机与系统的数据信息(角度和角速度)。因负载四角悬挂,刚度较大,对结果影响较小,因此,笔者将装置与负载视为整体。

研究过程中,考虑到图1中部件在装置内部的占据空间与拆装便捷等问题,在以下环节,笔者对系统装

置结构进行设计。

1.2 结构设计

系统主要是由信号发射器、旋转装置、钢丝绳和负载四部分构成。其中,旋转装置是由动量轮、直流电机、控制器等构成,装置底部安装有吊环,钢丝绳通过吊环将装置与负载连接。

系统结构图如图 2 所示。

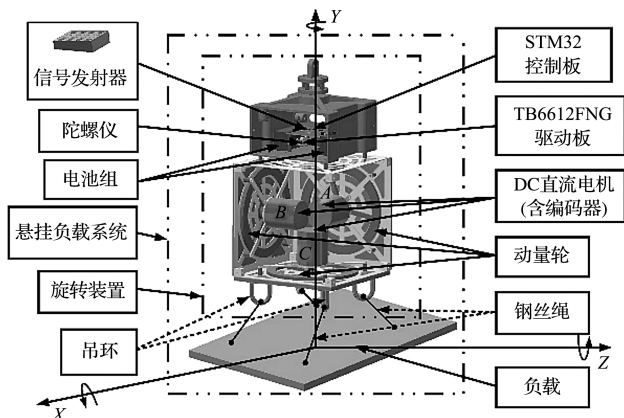


图 2 系统结构图

由图 2 可知:旋转装置的安装过程只需要将动量轮与对应直流电机连接,然后固定好装置外壳即可,拆装简单快捷。显然,图 2 所示的动量轮分布采用三正交架构,不会出现动量不足的问题。

为了探究系统旋转负载并抑制摇晃的效果,在下面研究中,笔者对图 2 中系统的运动进行数学建模与控制律设计。

2 运动学分析与动力学建模

2.1 运动学分析

笔者借鉴了航天领域中卫星的姿态运动原理^[14],采用欧拉角描述法对系统进行了滚动、俯仰、偏航 3 个方向的运动学分析。

其运动学坐标系如图 3 所示。

由图 3 可知:空间角速度 ω 、相对角速度 ω_r 和牵引角速度 ω_e 三者之间的关系满足叠加原理^[15]。其关系式如下:

$$\omega = \omega_r + C\omega_e \quad (1)$$

式中: C —坐标旋转矩阵^[16]。

当姿态偏角较小时,得到式(1)的展开式如下:

$$\omega = \begin{pmatrix} \omega_x \\ \omega_y \\ \omega_z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \dot{\lambda} \\ \dot{\theta} \\ \dot{\psi} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 1 & \psi & -\theta \\ -\psi & 1 & \lambda \\ \theta & -\lambda & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 0 \\ -\omega_0 \\ 0 \end{pmatrix} \quad (2)$$

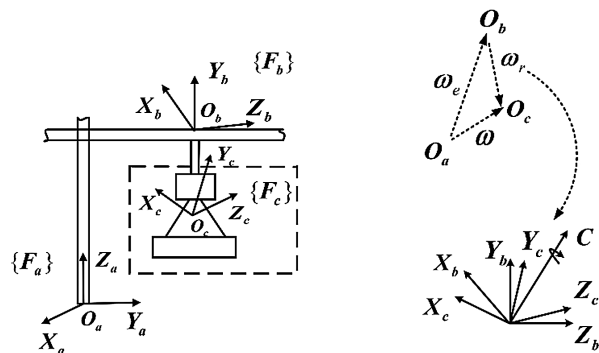


图 3 系统运动学坐标系

$\{F_a\}$ —空间固定坐标系,固连在起重机底座上,原点为 O_a ; $\{F_b\}$ —参考轨道坐标系,固连在起重机横梁上,原点为 O_b ; $\{F_c\}$ —本体坐标系,原点为 O_c ,固连在系统上;当 $\{F_c\}$ 的坐标轴转动到与 $\{F_b\}$ 对应坐标轴相互平行时,则 X_c, Y_c, Z_c 分别为 $\{F_c\}$ 的滚动轴、俯仰轴和偏航轴; ω — $\{F_c\}$ 相对于 $\{F_a\}$ 的旋转角速度; ω_r — $\{F_c\}$ 相对于 $\{F_b\}$ 相对角速度, $\omega_r = [\dot{\varphi} \quad \dot{\theta} \quad \dot{\psi}]^T$; ω_e — $\{F_b\}$ 相对于 $\{F_a\}$ 的牵引角速度, $\omega_e = [0 \quad -\omega_0 \quad 0]^T$; ω_0 —轨道角速度大小

式中: $\omega_x, \omega_y, \omega_z$ — $\{F_c\}$ 相对于 $\{F_a\}$ 在 $\{F_c\}$ 中的角速度投影分量; 滚动角 λ —俯仰轴 Y_c 在其当地水平面上投影的夹角; 俯仰角 θ —滚动轴 X_c 在其当地水平面上投影的夹角; 偏航角 ψ —滚动轴 X_c 在当地水平面上的投影与 X_b 之间的夹角。

将式(2)展开后,可得到系统的运动学方程如下:

$$\begin{pmatrix} \omega_x \\ \omega_y \\ \omega_z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \dot{\lambda} - \omega_0 \psi \\ \dot{\theta} - \omega_0 \\ \dot{\psi} + \omega_0 \lambda \end{pmatrix} \quad (3)$$

2.2 动力学建模

为了剖析系统旋转负载时的动量转换过程,笔者采用了角动量守恒定律对系统进行动力学建模。

首先,笔者定义系统的总转动惯量为 I_s ,动量轮的转动惯量为 I_{fw} ;定义动量轮相对于系统的角速度为 ω_{fw} ,动量轮的动量矩为 H_{fw} ,系统(不含动量轮)的动量矩为 H_b 。其中: $H_{fw} = I_{fw}(\omega + \omega_{fw})$, $H_b = (I_s - I_{fw})\omega$ 。

由此,得到系统的总动量矩 H 如下式所示:

$$H = DH_{fw} + H_b \quad (4)$$

式中: D —动量轮的安装矩阵。

由于 3 个动量轮呈现正交分布安装,因此,安装矩阵 $D = I_{3 \times 3}$ 为单位阵。笔者将式(4)简化并依据动量矩定理^[17],得到系统的导数表达式如下式所示:

$$\frac{d}{dt}(H_{fw} + H_b) = M_d \quad (5)$$

展开式(5),得到系统的完整导数表达式如下式所示:

$$\dot{\mathbf{H}}_b + \boldsymbol{\omega} \times \mathbf{H}_b + \boldsymbol{\omega} \times \mathbf{H}_{fw} = \mathbf{M}_c + \mathbf{M}_d \quad (6)$$

式中: $\mathbf{M}_c$ —直流电机提供的控制力矩^[18]; $\mathbf{M}_d$ —干扰力矩。

其中: $\mathbf{M}_c = (M_{cx} \ M_{cy} \ M_{cz})^T$, $\mathbf{M}_d = (M_{dx} \ M_{dy} \ M_{dz})^T$ 。

参考文献[19],针对 $\mathbf{I}_s, \mathbf{I}_{fw}$ 与角速度 $\boldsymbol{\omega}$ 的矩阵的表达式,笔者将式(3)代入其中,并略去二阶以上小量,经简化,得到系统的动力学模型:

$$\begin{cases} I_x \ddot{\lambda} - (I_x - I_y + I_z) \omega_0 \dot{\psi} + (I_y - I_z) \omega_0^2 \lambda = M_{dx} + M_{cx} \\ I_y \ddot{\theta} = M_{dy} + M_{cy} \\ I_z \ddot{\psi} + (I_x - I_y + I_z) \omega_0 \dot{\lambda} + (I_y - I_x) \omega_0^2 \psi = M_{dz} + M_{cz} \end{cases} \quad (7)$$

式中: I_i —系统的惯性积, $i = x, y, z$; I_{ij} —系统的惯量积, $i = x, y, z; j = x, y, z$ 。

为方便计算,笔者取系统的主轴作为惯量轴,则 $I_{xy} = I_{xz} = I_{yz} = 0$ 。

此处要解决起重机停止在某一位置时,负载围绕吊装线的旋转定位与外部干扰,对俯仰方向旋转产生的摇晃问题,因此,此处的 $\omega_0 = 0$ (起重机的角速度)。

式(7)经简化,得到线性化后系统的动力学模型如下式所示:

$$\begin{cases} I_x \ddot{\lambda} = M_{dx} + M_{cx} \\ I_y \ddot{\theta} = M_{dy} + M_{cy} \\ I_z \ddot{\psi} = M_{dz} + M_{cz} \end{cases} \quad (8)$$

3 控制算法设计

在建立动力学模型的基础上,设计必要的控制算法是验证数学模型是否正确的关键环节。

具体步骤如下:(1)首先对系统进行无执行机构下稳定性的分析研究;(2)为避免动量轮转速过零时引起系统振荡,提出含执行机构(动量轮)下的 PI + PD 混合控制律设计,用于俯仰方向旋转位置控制;(3)为了有效抑制外部干扰对旋转过程产生的摇晃,对滚动和偏航方向进行 PD 控制律设计。

3.1 稳定性分析

稳定性是控制律设计的前提条件。由于动力学模型均可视为3个双积分环节进行处理,此处,笔者以俯

仰方向为例,对系统进行了稳定性的分析研究,而滚动和偏航方向的稳定性分析过程与俯仰方向一致。

由式(8)知,俯仰方向的方程如下式所示:

$$I_y \ddot{\theta} = M_{dy} + M_{cy} \quad (9)$$

显然,当 $M_{cy} = 0$ 时,如果系统受到外部干扰,则会偏离平衡状态,若不加以控制,系统将无法恢复到原来的平衡位置。

为了使姿态保持在给定方向,须对其加以反馈控制。因此,笔者采用姿态角反馈加姿态角速度反馈(增加阻尼)的方法进行控制律设计,其过程如下:

控制力矩 M_{cy} 如下式所示:

$$M_{cy} = -I_{fw} \omega_{fwy} = -(K_p \theta + K_d \dot{\theta}) \quad (10)$$

将式(10)代入式(9)中,得到系统的二阶微分方程如下式所示:

$$\ddot{\theta} + \frac{K_d}{I_y} \dot{\theta} + \frac{K_p}{I_y} \theta = \frac{M_{dy}}{I_y} \quad (11)$$

显然,式(11)为一个典型的二阶系统。由二阶系统稳定性知,在阻尼 $\xi < 1$ 或 $\xi > 1$ 时,系统特征根总是小于零,因此,该系统是稳定的。

3.2 俯仰方向控制律设计

笔者在俯仰方向设计了 PI + PD 控制律,其过程如下:

动量轮的传递函数模型如下式所示^[20,21]:

$$G_m(s) = \frac{K_t}{Ls + R} \quad (12)$$

动量轮原理图如图4所示。

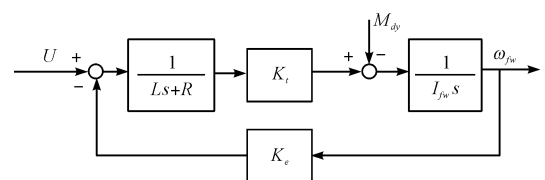


图4 动量轮原理图

L —电机的增益系数; R —电机的时间系数; U —直流电机电压; K_t —力矩系数; K_e —反电动势常数

PI + PD 控制律的描述如下式所示^[22,23]:

$$\omega_y^* = K_{py} e_\theta(t) + K_{dy} \frac{de_\theta(t)}{dt} \quad (13)$$

$$\omega_\theta = K_{py}^* e_\theta(t)^* + K_{iy}^* \int e_\theta(t)^* dt \quad (14)$$

式中: ω_y^* —角度 PD 环的输出角速度; θ_d —期望角度; θ —实际角度; K_{py}, K_{dy} —角度 PD 环比例,微分系数; ω_θ —角速度 PI 环的输出角速度; $e_\theta(t)$ —角度误差; $e_\theta(t)^*$ —角速度误差; K_{py}^*, K_{iy}^* —角速度 PI 环的比例,积分系数。

其中: $e_{\theta}(t) = \theta_d - \theta, e_{\theta}(t)^* = \omega_y^* - \omega_y$;
俯仰方向的控制律框图如图 5 所示。

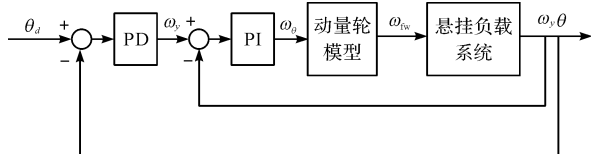


图 5 俯仰方向控制律框图

3.3 滚动和偏航方向控制律设计

为了有效抑制外部干扰对俯仰方向旋转产生的摇晃,笔者以滚动方向为例,对 PD 控制律的设计过程进行了描述,而偏航方向的设计过程与滚动方向一致。

PD 控制律的描述如下式所示^[24,25]:

$$\omega_{\lambda} = K_{px} e_{\lambda}(t) + K_{dx} \frac{de_{\lambda}(t)}{dt} \quad (15)$$

式中: ω_{λ} —角度 PD 环的输出角速度; $e_{\lambda}(t)$ —角度误差; λ_d —期望角度; λ —实际角度; K_{px}, K_{dx} —角度 PD 环的比例、微分系数。

其中: $e_{\lambda}(t) = \lambda_d - \lambda$ 。

滚动方向的控制律框图如图 6 所示。

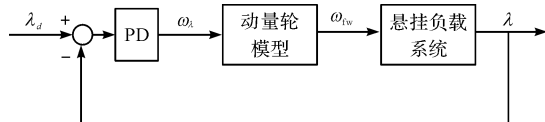


图 6 滚动方向控制律框图

4 仿真实验

仿真实验中,系统及动量轮参数数值如表 1 所示。

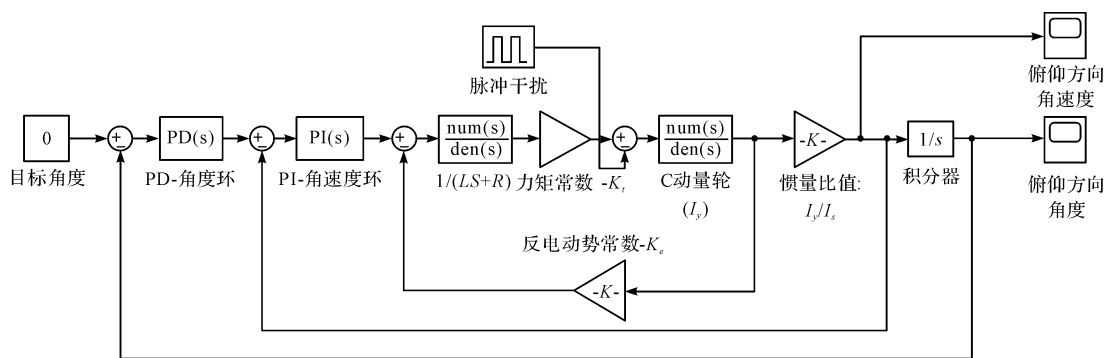
表 1 悬挂系统及动量轮电机参数

名称/单位	数值
电阻 R/Ω	0.565
电感 $L/\mu\text{H}$	10
A 轮转动惯量 $I_{fix}/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-2})$	0.000 137
C 轮转动惯量 $I_{fix}/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-2})$	0.000 137
B 轮转动惯量 $I_{fix}/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-2})$	0.000 137
系统总转动惯量 $I_s/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-2})$	0.003 0
力矩常数 $K_t/(\text{N} \cdot \text{m} \cdot \text{A})$	0.021 0
反电动势常数 $K_e/[\text{V} \cdot (\text{r} \cdot \text{min}^{-1})^{-1}]$	0.001 25
电压 U/V	24

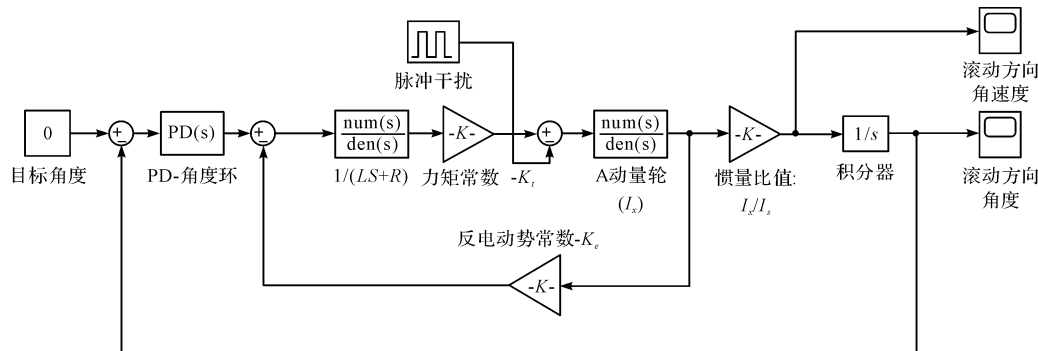
为了验证上述控制算法的有效性,基于 MATLAB 的 Simulink 环境,笔者对系统进行了数值仿真实验,得到了俯仰、滚动与偏航 3 个方向的 Simulink 仿真建模图,如图 7 所示。

首先,笔者设定俯仰初始角 $\theta_0 = 12^\circ$,目标角度 $\theta_d = 0^\circ$;设定滚动初始值 $\lambda_0 = 1.8^\circ$,目标角度 $\lambda_d = 0^\circ$;设定偏航初始值 $\psi_0 = -2.5^\circ$,目标角度 $\psi_d = 0^\circ$ 。

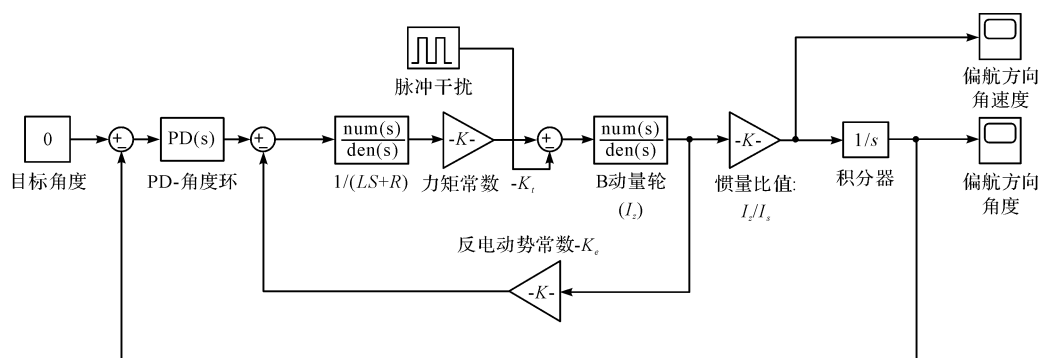
已知 PI + PD 控制律下参数值为: $K_{py} = 2.82, K_{dy} = 0.246, K_{py}^* = 0.45, K_{iy}^* = 0.16$;PD 控制律下参数值为: $K_{px} = 0.35, K_{dx} = 0.22; K_{pz} = 0.372, K_{dz} = 0.241$;



(a) 俯仰方向仿真图



(b) 滚动方向仿真图



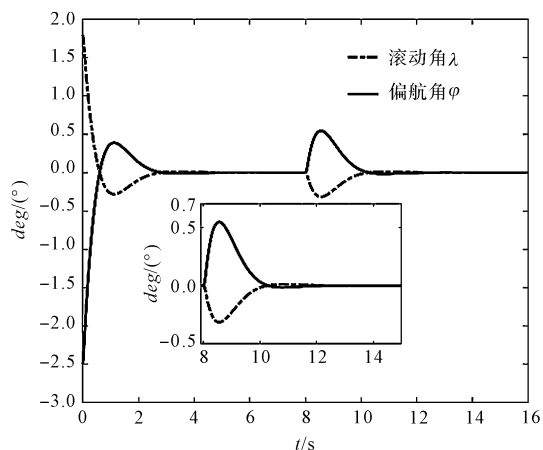
(c) 偏航方向仿真图

图7 Simulink 仿真图

设置仿真时间 $t = 16 \text{ s}$, 限制倾斜角度 $\varepsilon < 5^\circ$ 。

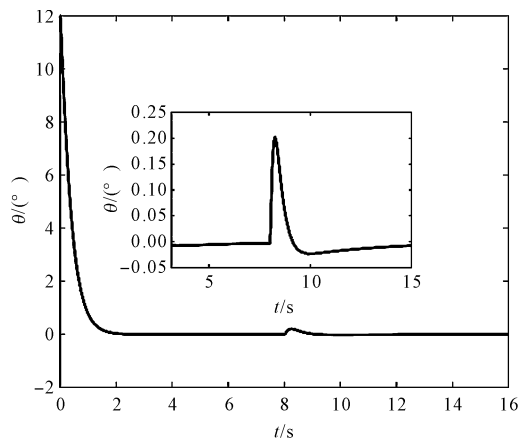
实验中的干扰主要为空气气流和轴承摩擦阻力。笔者通过对系统结构调整,减小了轴承摩擦的影响,同时利用滚动、俯仰、偏航方向的姿态角反馈消除了空气干扰的影响,得到了系统在受到脉冲干扰时的仿真曲线,如图8所示。

上述实验中,在 $t = 8 \text{ s}$ 时,笔者分别对俯仰方向施加了周期为 8 s ,强度为 0.098 的脉冲干扰;对滚动方向施加了周期为 8 s ,强度为 0.055 的脉冲干扰;对偏航方向施加了周期为 8 s ,强度为 0.078 的脉冲干扰,实验结果如下。

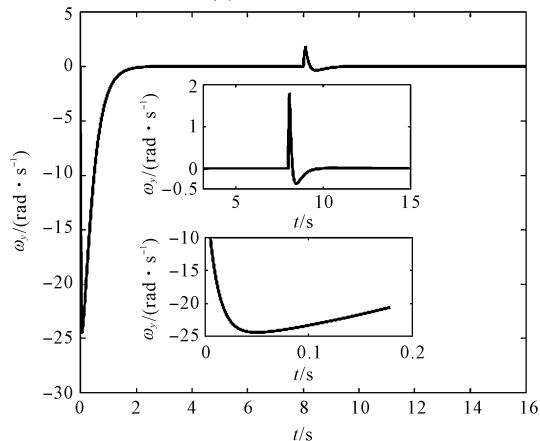


(c) 滚动和偏航方向角度曲线

图8 干扰时系统曲线



(a) 仰方向角度曲线



(b) 俯仰方向角速度曲线

由图8(a,b)可得:系统达到稳态的时间为 $t = 3.73 \text{ s}$ 。当 $t = 0.05 \text{ s}$ 时,具有最大俯仰角速度 $\omega_y = -24.442 \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1}$; $t = 8.26 \text{ s}$ 时,俯仰角最大变化值为 $\theta = 0.202^\circ$,俯仰角速度最大变化值为 $\omega_y = 1.782 \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1}$,角度误差达到 10^{-2} 量级;

由图8(c)可得:滚动方向消除角度偏差为零的时间为 $t = 2.38 \text{ s}$ 。当 $t = 8.55 \text{ s}$ 时,滚动角最大变化值为 $\lambda = -0.315^\circ$;偏航方向消除角度偏差为零的时间为 $t = 2.84 \text{ s}$,偏航角最大变化值为 $\psi = 0.545^\circ$ 。

仿真结果表明:在施加脉冲的条件下,笔者对俯仰方向旋转位置控制与抑制扰动摇晃所提出的控制律是有效的,系统收敛效果较好,具有较好的抗干扰性。

5 样机实验

为了进一步验证实际运行的效果,笔者通过实验室已有的设备条件搭建了样机实验平台,如图9所示。

实验过程由3名人员配合完成。首先由站在距离实验平台 5 m 远的第一位人员,使用远程信号发射器控制系统旋转负载;然后第二位人员通过示波器实时采集姿态信息;同时,由第三位人员观察旋转过程中设

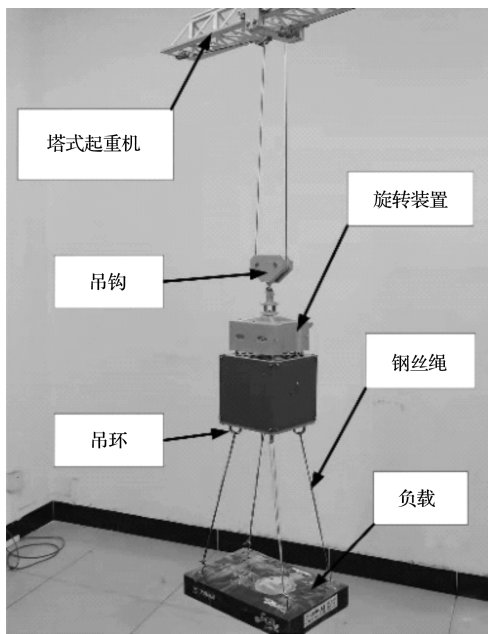
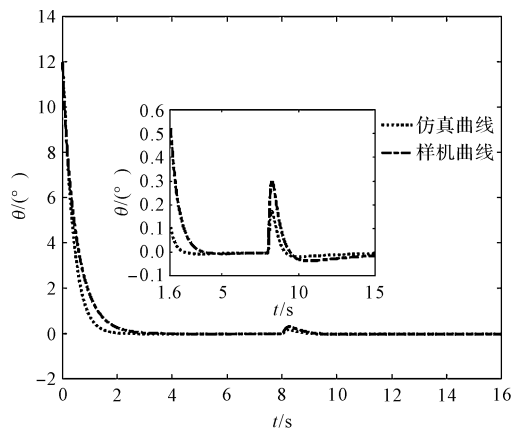


图 9 样机实验平台

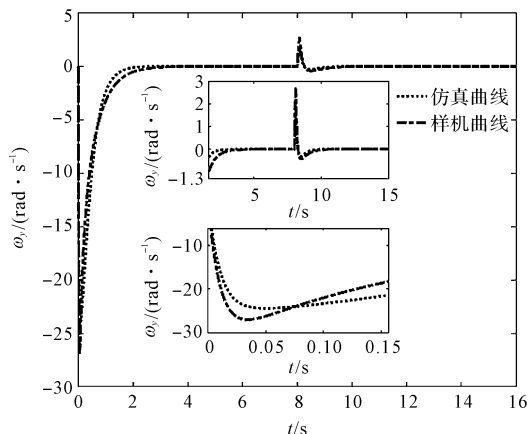
备运行情况。

经过采集数据,得到了 3 个方向的样机结果与仿真结果对比曲线,如图 10 所示。

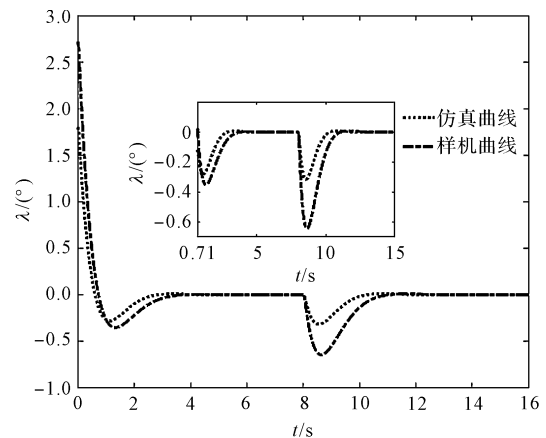
由图 10 可得:系统旋转负载趋于稳态的时间为 $t = 4.91 \text{ s}$;



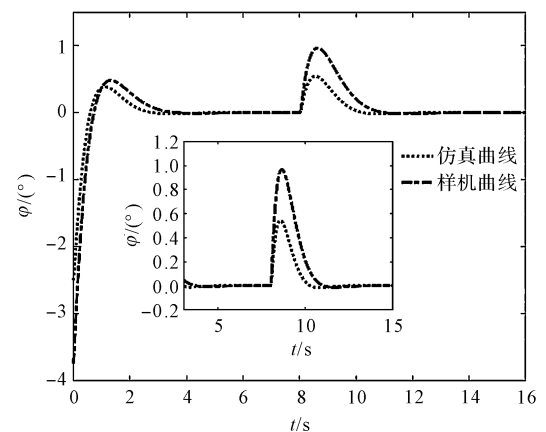
(a) 俯仰方向角度曲线



(b) 俯仰方向角速度曲线



(c) 滚动方向角度曲线



(d) 偏航方向角度曲线

图 10 样机与仿真对比曲线

由图 10(a,b)可得:当 $t = 8.26 \text{ s}$ 时,样机曲线俯仰角最大变化值为 $\theta = 0.303^\circ$,俯仰角速度最大变化值为 $\omega_y = 2.670 \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1}$; $t = 0.03 \text{ s}$ 时,具有最大俯仰角速度 $\omega_y = -27.023 \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1}$;

由图 10(c)可得:实际测试得到的滚动起始角为 $\lambda_0 = 2.72^\circ$, $t = 8.63 \text{ s}$ 时,样机曲线滚动角最大变化值为 $\lambda = -0.645^\circ$;

由图 10(d)可得:实际测试得到的偏航起始角为 $\psi_0 = -3.74^\circ$, $t = 8.65 \text{ s}$ 时,样机曲线偏航角最大变化值为 $\psi = 0.968^\circ$ 。

图 10 结果显示:在趋于稳态的时间上,样机曲线相比较仿真曲线存在一定的延时,这主要是因为信号发射器从发送信号到控制器接收信号,并启动电机旋转存在一定的延时;但这并不影响实验结果。

笔者分别进行了干扰、样机平台两种情况下的实验测试,并对相应的实验结果进行了分析,从实验结果可以得出以下结论:

(1)从图 8(a,b)和图 10(a,b)中可以看出:利用俯仰方向的动量轮 C 加减速能够精确控制负载围绕吊装线的旋转位置,具有较好的收敛性;

(2)从图8(c)和图10(c,d)中可以看出:利用滚动以及偏航方向的动量轮A、B加减速,能够有效抑制外部干扰对俯仰方向旋转产生的摇晃。

6 结束语

笔者提出了一种悬挂负载系统姿态控制方法,用于控制起重机负载围绕吊装线的旋转位置,采用欧拉描述法和角动量守恒定律分析与推导了系统的运动学方程,并简化了动力学模型,利用样机实验对控制算法和仿真实验结果进行了验证。

研究结果表明:

(1)仿真结果表明,笔者所提出的控制律是有效的,它减小了角度偏差,使系统的旋转过程稳定可靠;

(2)样机结果表明,笔者所提出的PI+PD控制律,能够精确实现负载围绕吊装线的稳定旋转;针对滚动与偏航方向设计的PD控制律,能够有效抑制外部干扰对系统俯仰方向旋转产生的摇晃;

(3)通过无线遥控控制悬挂负载系统能够将负载旋转到任意指定角度,避免了工人与负载的接触,减少了损坏事故,节省了时间,从而提高了起重工作效率。

在今后的工作中,笔者将继续对起重机悬挂负载系统进行深入研究,采用优化算法提高悬挂负载系统旋转定位精度。

参考文献(References):

- [1] LRIZARRY J. Application of methods analysis to steel erection tasks: identification of factors affecting labor performance[J]. **International Journal of Construction Management**,2011,11(4):31-47.
- [2] BEAVERS J E, MOORE J R, SCHRIEVER W R, et al. Steel erection fatalities in the construction industry[J]. **Journal of Construction Engineering and Management**, 2009,135(3):227-234.
- [3] ARENA A, CASALOTTI A, LACARBONARA W, et al. Dynamics of container cranes: three-dimensional modeling, full-scale experiments, and identification[J]. **International Journal of Mechanical Sciences**,2015,93(4):8-21.
- [4] NGO Q H, HONG K S. Skew control of a quay container crane [J]. **Journal of Mechanical Science and Technology**,2009,23(12):3332-3339.
- [5] LEE C, LEE G, PARK S, et al. Analysis of field applicability of the rotation-controllable tower-crane hook block[J]. **Automation in Construction**, 2011, 21(1): 81-88.
- [6] LAHRES S, ASCHEMANN H, SAWODNY O, et al. Observer and control design for the rotation of crane loads [J]. **IFAC. Proceedings Volumes**, 2000, 33(13): 619-624.
- [7] LEE C, LEE G. Feasibility of beam erection with a motorized hook-block[J]. **Automation in Construction**, 2014,41(5):25-32.
- [8] THO H D, TERASHIMA K. Robust control designs of payload's skew rotation in a boom crane system[J]. **IEEE. Transactions on Control Systems Technology**, 2019, 27(4):1608-1621.
- [9] SCHAPER U, DITTRICH C, ARNOLD E, et al. 2-DOF skew control of boom cranes including state estimation and reference trajectory generation[J]. **Control Engineering Practice**,2014,33(12):63-75.
- [10] THO H D, TAKEMORI K, TASAKI R, et al. Adaptive Input Shaping Control of a Rotary Hook[C]//2016 55th Annual Conference of the Society of Instrument and Control Engineers of Japan (SICE.). Japan: Institute of Electrical and Electronics Engineers,2016:596-602.
- [11] LIANG C J, KANG S C, LEE M H. RAS: a robotic assembly system for steel structure erection and assembly [J]. **International Journal of Intelligent Robotics and Applications**,2017,1(12):459-476.
- [12] LNOUE F, WATANABE K, LKEDA Y, et al. A Practical Development of the Suspender Device that Controls Load Rotation by Gyroscopic Moments[C]//Proceedings of the 15th ISARC, Munchen, Germany. Japan: Technical Research Institute of Obayashi Corporation,1998:486-495.
- [13] 杨帆. 使用动量交换装置的滚转角稳定控制[J]. 舰船电子工程,2020,40(1):207-211.
- [14] ISMAIL Z, VARATHARAJOO R. A study of reaction wheel configurations for a 3-Axis satellite attitude control [J]. **Advances in Space Research**, 2010, 45(6): 750-759.
- [15] CHEN X J, STEYN W H, HODGART S, et al. Optimal combined reaction-wheel momentum management for earth-pointing satellites[J]. **Journal of Guidance, Control, and Dynamic**,1999,22(4):543-550.
- [16] SUN Z W, GENG Y H, XU G D, et al. The combined control algorithm for large-angle maneuver of HITSAT-1 small satellite [J]. **Acta Astronautica**, 2004, 54(7): 463-469.
- [17] CHEN Y H, HONG Z C, LIN C H, et al. Aerodynamic and gravity gradient stabilization for microsatellites [J]. **Acta Astronautica**,2000,46(7):491-499.
- [18] 李华山,闫野,任利,等. 飞轮姿控微小卫星控制方法研究[J]. 舰船电子工程,2013,33(1):61-63.
- [19] BANG H, TAHK M J, CHOI H D. Large angle attitude

- control of spacecraft with actuator saturation[J]. **Control Engineering Practice**, 2003, 11(9): 989-997.
- [20] 刘宗源, 高 敏, 王 毅, 等. 可控滚转弹道修正引信电动舵机系统仿真[J]. 舰船电子工程, 2019, 39(3): 93-97.
- [21] 陈茂胜, 金 光, 安 源, 等. 采用自适应 PI 控制的单框架控制力矩陀螺角动量飞轮系统的设计[J]. 光学精密工程, 2011, 19(5): 1075-1081.
- [22] 张 聪, 刘 刚, 李光军. 基于干扰观测器的惯性动量轮高精度控制[J]. 北京航空航天大学学报, 2013, 39(1): 52-56.
- [23] 蔡红萍, 吴乐彬, 胥 芳. 基于自整定模糊 PID 控制的直流无刷电机调速系统研究[J]. 机电工程, 2016, 33(8): 991-996.
- [24] 丁惠忠, 陈凯峰. 基于 PLC 的啤酒发酵温度模糊 PID 控制系统[J]. 包装与食品机械, 2022, 40(6): 71-76, 82.
- [25] 黄 平, 王 英, 江先志. 基于 STM32 的直流电机模糊 PID 调速系统研究[J]. 机电工程, 2017, 34(4): 380-385.
- [编辑: 李 辉]

本文引用格式:

陈 可, 周惠兴, 单晓微, 等. 起重机悬挂负载系统位置控制实验研究[J]. 机电工程, 2023, 40(3): 452-460.

CHEN Ke, ZHOU Hui-xing, SHAN Xiao-wei, et al. Experimental study on position control of crane suspension load system[J]. *Journal of Mechanical & Electrical Engineering*, 2023, 40(3): 452-460.

《机电工程》杂志: <http://www.meem.com.cn>

(上接第 434 页)

- [5] 欧阳红兵, 曾 胜. 转子系统在线动平衡综述与展望[J]. 机械强度, 1997, 19(4): 20-25, 69.
- [6] VEGTE J V. Continuous automatic balancing of rotating systems[J]. **Journal of Mechanical Engineering Science**, 1964, 6(3): 264-269.
- [7] 顾超华, 曾 胜, 罗迪威, 等. 一种机械式在线平衡头的设计与实验研究[J]. 振动与冲击, 2014, 33(12): 151-155.
- [8] 母德强, 赵心文, 毛志阳. 径注式砂轮在线液体平衡装的设计[J]. 中国机械工程, 1996, 7(3): 58-59.
- [9] 贺世正. 释放液体式自动平衡头研究[J]. 浙江大学学报: 工学版, 2001, 35(4): 70-74.
- [10] 章 云, 梅雪松, 胡振邦, 等. 注液式高速切削主轴动平衡设计及其性能研究[J]. 西安交通大学学报, 2013, 47(3): 13-17, 23.
- [11] 葛哲学, 陶利民. 新型电磁式自动平衡装置的研究[J]. 机械, 2001, 28(6): 62-64.
- [12] 蒋红琰, 王俊元. 一种新型高速转子在线动平衡头[J]. 新技术新工艺, 2007, 240(12): 40-42.
- [13] 欧阳红兵, 汪希萱. 两种新型电磁式在线自动平衡头[J]. 机械制造, 2002, 40(7): 47-48.
- [14] DYER S W. Adaptive optimal control of active balancing systems for high-speed rotating machinery[D]. Ann Arbor, USA: University of Michigan, 1999.
- [15] 沈 伟. 旋转机械主动平衡技术及工程应用[D]. 北京: 北京化工大学机电工程学院, 2006.
- [16] MOON J D, KIM B S. Development of the active balancing device for high-speed spindle system using influence coefficients[J]. **International Journal of Machine Tools & Manufacture**, 2006, 46(9): 978-987.
- [17] FAN H W, JING M Q, WANG R C, et al. New electromagnetic ring balance for active imbalance compensation of rotating machinery[J]. **Journal of Sound and Vibration**, 2014, 333(17): 3837-3858.
- [18] 潘 鑫, 彭瑞轩, 何啸天, 等. 基于径向励磁和永磁-电磁联合驱动的主动平衡执行器[J]. 振动与冲击, 2021, 40(2): 23-28.
- [19] 樊红卫, 景敏卿, 张旭辉, 等. 电主轴用电磁式主动平衡装置启动磁场仿真分析[J]. 磁性材料及器件, 2017, 48(2): 18-24.
- [20] 梁警威, 刘保国, 申会鹏, 等. 电磁平衡头自锁力矩有限元分析及试验研究[J]. 机电工程, 2021, 38(4): 504-506.
- [21] 梁警威, 丁 浩, 刘保国, 等. 电磁平衡头自锁力矩随永磁体参数变化规律研究[J]. 机床与液压, 2021, 49(13): 161-165.
- [22] 樊红卫, 景敏卿, 王仁超, 等. 结构参数对磁力平衡头自锁和启动力矩的影响研究[J]. 振动与冲击, 2014, 33(3): 135-139, 156.
- [23] 梁警威, 刘保国, 申会鹏, 等. 电磁平衡头齿盘齿形参数对自锁力矩的影响研究[J]. 机电工程, 2021, 38(2): 245-249.
- [编辑: 李 辉]