

# 基于 Simulink 的液压起重机吊重摆动控制的仿真

陈明亮<sup>1,2</sup>, 朱 钰<sup>1,2</sup>, 尹自斌<sup>1,2</sup>

(1. 集美大学轮机工程学院, 福建 厦门 361021; 2. 福建省船舶与海洋工程重点实验室, 福建 厦门 361021)

**[摘要]** 为了解决起重机在工作时出现的吊重摆动的问题, 以实验室液压起重机为研究对象, 建立其液压操作系统和吊重摆动系统的数学模型, 并利用 MATLAB/Simulink 仿真平台建立仿真模型, 根据实际情况增加阻尼系数; 在模型中设计基于吊重绳长为控制变量的零振动零导数 (zero vibration and zero derivative, ZVD), 并将其输入整形控制器, 仿真研究起重机在 3 个执行机构联合操作下吊重的摆动情况。仿真结果表明: 在 ZVD 输入整形控制器的操作模式下, 对比常规操作, 起重机吊重的强制摆动幅度和惯性摆动幅度平均下降 56.43%、96.78%, 说明采用吊重绳长作为唯一控制参数的 ZVD 输入整形控制器可以简便有效地控制起重机吊重的摆动。

**[关键词]** 液压起重机; 吊重摆动; 零振动零导数 (ZVD); 数值仿真

**[中图分类号]** U 664.4

## Simulation of Payload Swing Control of Hydraulic Crane Based on Simulink

CHEN Mingliang<sup>1,2</sup>, ZHU Yu<sup>1,2</sup>, YIN Zibin<sup>1,2</sup>

(1. School of Marine Engineering, Jimei University, Xiamen 361021, China;

2. Fujian Provincial Key Laboratory of Naval Architecture and Ocean Engineering, Xiamen 361021, China)

**Abstract:** In order to solve the problem of payload swing during the operation of the crane, taking the hydraulic crane in the laboratory as the object, the mathematical models of its hydraulic operation system and the swinging system of payload were established, and the simulation models were established by using the Matlab/Simulink simulation platform. During the simulations, the swing damping was increased, and a zero vibration and zero derivative (ZVD) input shaping controller was then designed as per the length of lifting rope, the swing of the payload was further studied under the joint operation of the three actuators of the crane. The results showed that the forced swing amplitude and inertial swing amplitude of crane were reduced by 56.43% and 96.78% on average, compared with those of the conventional operation under various operation modes with the crane shaping controller. This proved that using the length of the lifting rope as the only control parameter for the ZVD input shaping controller could effectively control the payload swing.

**Keywords:** hydraulic crane; payload swing; zero vibration and zero derivative (ZVD); numerical simulation

## 0 引言

回转式液压起重机的吊重消摆长期以来都是国内外学者的重点研究领域, 它先后经历了用辅助机

**[收稿日期]** 2024-01-25

**[基金项目]** 福建省教育厅科研基金项目 (JAT210246); 福建省自然科学基金项目 (2022J01812)

**[通信作者]** 陈明亮 (1982—), 讲师, 轮机长, 从事现代轮机工程管理方向研究。E-mail:45173877@qq.com

械对起重机吊重进行机械式消摆阶段、基于模型及控制器的电子式消摆阶段。机械式消摆虽然可以起到一定的消摆作用, 但是其结构较为复杂, 可靠性不高, 对提高起重机工作效率和安全性作用有限<sup>[1]</sup>。电子式消摆主要有反馈控制和前馈-反馈复合控制 2 类方法, 它着重于起重机动力学模型的建立、起重机操作控制器及其算法的研究, 但其控制规律表达式较复杂, 且控制存在滞后性和计算复杂性<sup>[2]</sup>。

有研究者设计了基于起重机系统的输入和输出数据驱动的非模型自适应控制方法<sup>[3]</sup>, 通过对系统能量函数进行分析, 设计自适应消摆控制器<sup>[4]</sup>, 在一定程度上减轻了对模型和算法的依赖, 并取得了优于一般比例积分微分 (proportional-integral derivative, PID) 控制和滑模控制的效果; 也有研究者利用起重机吊重线速度反馈原理设计吊重恒张力消摆控制方法, 并实验验证其对负载不对称摆动具有较好的抑制效果<sup>[5]</sup>, 但其对数学模型的准确性、控制参数测量精度及执行机构动作速度等要求较高。基于此, 采用结构简单的前馈控制的输入整形控制方法也常被用来抑制起重机吊重运动过程中产生的振荡, 有研究者在港口起重机的控制命令上加入一系列的阶跃加速度输入整形信号, 也得到较好消摆效果<sup>[6]</sup>。随着对起重机吊重摆动规律的不断深入研究, 基于经验的多种输入整形方法都能取得一定效果, 但消摆控制的鲁棒性与运动速度存在矛盾<sup>[7]</sup>。综上所述, 开发一种控制规律简洁、参数整定简单并能兼具消摆控制的鲁棒性与运动速度的控制方法, 对提高液压起重机作业效率和安全性十分有必要。因此, 本文以实验室的液压起重机为研究对象, 探索通过绳长参数设计的输入整形控制方法来有效消除吊重摆动, 为简便有效控制液压起重机吊重摆动提供可行方案。

### 1 实验室液压起重机模型

本文以实验中心 2 t/3 m 回转式液压起重机为原型来建立仿真模型, 该实验平台具有回转、起升和变幅等 3 个操作机构, 均采用液压系统驱动。图 1 为液压起重机实验平台组成示意图, 表 1 为液压起重机实验平台主要技术参数表。

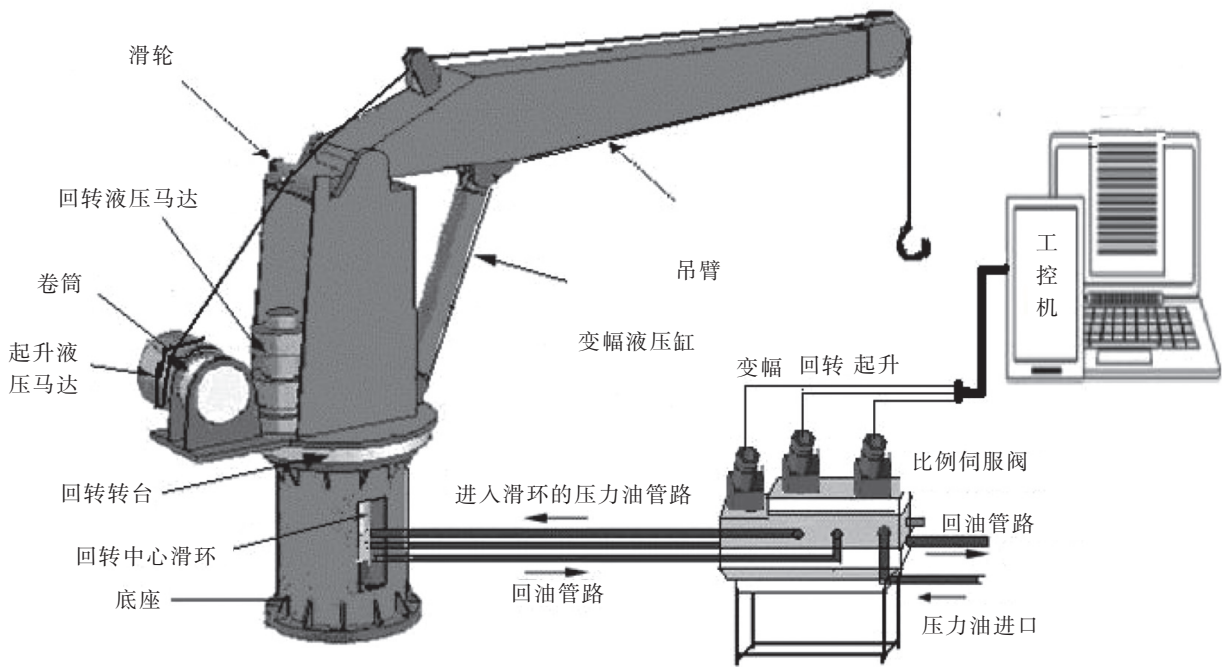


图 1 液压起重机实验平台组成示意图

Fig.1 Composition of the experimental platform for hydraulic crane

表 1 液压起重机实验平台主要技术参数  
Tab.1 Main technical parameters of the experimental platform for hydraulic crane

参数(性能)	数值	参数(液压)	数值
额定起升负载/kN	20.00	额定回转油压/MPa	8.00
最小工作半径/m	0.76	额定变幅油压/MPa	19.00
最大工作半径/m	3.00	额定起升油压/MPa	18.00
变幅角度/(°)	0~50	额定起升速度(液压油流量)/(m³·h <sup>-1</sup> )	3.54
回转速度/(r·min <sup>-1</sup> )	0~4.5	额定回转速度(液压油流量)/(m³·h <sup>-1</sup> )	5.04
起升速度/(m·s <sup>-1</sup> )	0~0.6	额定变幅速度(液压油流量)/(m³·h <sup>-1</sup> )	2.10

1.1 起重机吊重摆动系统的数学模型

起重机系统实际的运行过程是非常复杂的，它不仅存在刚性体和弹性体的耦合，而且各项操作等外部激励引起的模型状态量变动也是耦合的，这会导致整个系统具有很强的非线性。为了使系统容易实现，需要将问题进行简化，将吊重视为质点，吊绳质量与吊重相比可以忽略不计。在图 2 的起重机吊重摆动系统中： $O$  为惯性参考系的原点（实际中，起重机的旋转中心线与吊臂铰接点水平面的交点同  $O$  点存在一定的距离）； $P$  是吊臂顶点，也是吊重绳子与吊臂连接点； $M$  是理想化的吊重质点。

图 2 中，根据  $P$  点的坐标可推导出吊重质点  $M$  的惯性坐标，对其求导得出吊重在  $X$ 、 $Y$ 、 $Z$  等 3 个方向的速度，可得出重物摆动时的动能和势能，进而可得系统吊重的拉格朗日算子为

$$L = M(\dot{x}_M^2 + \dot{y}_M^2 + \dot{z}_M^2 - 2gz_M)/2。$$
 (1)

起重机吊重摆动的控制是通过起重机回转、变幅和起升操作来控制吊重摆动面内角  $\theta_1$  和面外角  $\theta_2$  的大小。在优化外界干扰力的情况下，吊重系统的拉格朗日方程式为

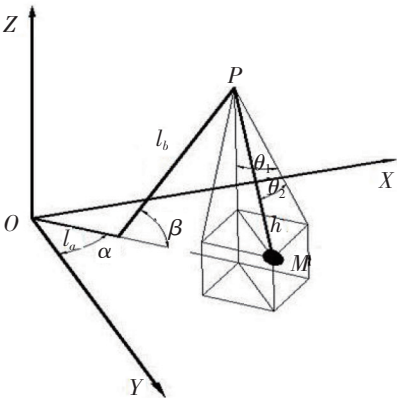
$$\begin{cases} d[\partial L/\partial \dot{\theta}_1(t)]/dt - \partial L/\partial \theta_1(t) = 0, \\ d[\partial L/\partial \dot{\theta}_2(t)]/dt - \partial L/\partial \theta_2(t) = 0. \end{cases}$$
 (2)

利用 MATLAB 对式 (2) 进行求解，并对角度值与其三角函数值进行优化整理，可得面内角  $\theta_1$  和面外角  $\theta_2$  的方程式分别为

$$\ddot{\theta}_1(t) + 2\dot{\theta}_1(t)\dot{h}/h + [g/h - l_b(\dot{\beta}^2 \sin \beta - \ddot{\beta} \cos \beta)/h - \dot{\alpha}^2]\theta_1(t) + (2\dot{\alpha}\dot{h}/h + \ddot{\alpha})\theta_2(t) + 2\dot{\alpha}\dot{\theta}_2(t) = l_b[\dot{\beta} \sin \beta + (\dot{\alpha}^2 + \dot{\beta}^2) \cos \beta]/h + l_a\dot{\alpha}^2/h,$$
 (3)

$$\ddot{\theta}_2(t) + 2\dot{\theta}_2(t)\dot{h}/h + [g/h - l_b/h(\dot{\beta}^2 \sin \beta - \ddot{\beta} \cos \beta) - \dot{\alpha}^2]\theta_2(t) - (2\dot{\alpha}\dot{h}/h + \ddot{\alpha})\theta_1(t) - 2\dot{\alpha}\dot{\theta}_1(t) = l_b(\ddot{\alpha} \cos \beta - 2\dot{\alpha}\dot{\beta} \sin \beta)/h + l_a\ddot{\alpha}/h。$$
 (4)

由式 (3) 和式 (4) 可以得出，在起重机本身不进行回转、变幅和起升操作运动时，吊重系统模型可认为是简单的球摆模型；但当有操作运动时，面内角  $\theta_1$  和面外角  $\theta_2$  之间则存在耦合作用，且吊重绳长变化速率  $\dot{h}$ ，回转操作速度  $\dot{\alpha}$  和加速度  $\ddot{\theta}$ ，变幅操作速度  $\dot{\beta}$  和加速度  $\ddot{\beta}$  等对吊重的摆动均有影响。吊重的摆动可以理解为有阻尼强制振动型，式 (3) 和式 (4) 的右侧为强



说明： $h$ —钢丝绳长度； $l_a$ —吊臂铰接点与回转中心线的垂直距离； $l_b$ —起重机吊臂的长度； $\theta_1$ —吊重摆动的面内角； $\theta_2$ —吊重摆动的面外角； $\alpha$ —吊臂的回转角度； $\beta$ —吊臂变幅角度

图 2 起重机吊重摆动系统三维坐标系

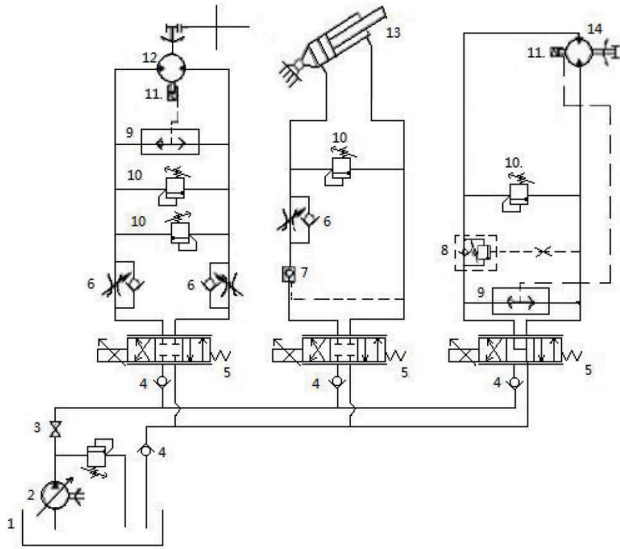
Fig.2 The three dimensional coordinate system of the crane payload system

制振动激励,其中回转操作速度和加速度是吊重强制振动的主要因素;起升绳长的变化对吊重摆动的影响为阻尼项;起重机多种操作同时进行对吊重的摆动存在相互抑制的情形,当操作停止后即转换成无阻尼自由振动型<sup>[8]</sup>。

1.2 起重机液压操纵系统的数学模型

图3为起重机液压系统原理图,其主要工作控制过程是通过动力元件(泵站)为液压油加压,再利用控制元件(液压阀)将有一定压力和流量的液压油送至执行元件(液压马达、液压缸),以达到让起重机吊重起升、回转和变幅运动的目的。

根据图3列出变幅液压油缸、起升和回转液压马达工作腔的流量连续性方程,液压油缸、液压马达输出的力和力矩的平衡方程,可以得到阀控液压马达系统和阀控液压缸系统的数学模型。分析中不考虑弹性负载和管道内摩擦损失,但考虑液压油的可压缩性,可将液压马达和液压缸系统的数学模型简化为



说明: 1—液压油箱; 2—柱塞泵; 3—出口截止阀; 4—单向阀; 5—电液比例伺服阀; 6—单向节流阀; 7—液控单向阀; 8—平衡阀; 9—梭阀; 10—溢流阀; 11—机械制动器; 12—回转马达; 13—变幅液压缸; 14—起升马达

图3 起重机液压系统原理图

Fig.3 Schematic diagram of the crane hydraulic system

$$\begin{cases} \theta_m(s) = [D_m k_q x_v(s)/(2\pi) - (k_{ce} + V_m s/(4\beta_e))T_L(s)] / \{s[(s^2/\omega_h^2) + (2\xi_h/\omega_h)s + 1]\}, \\ \xi_h = \pi[k_{ce}\sqrt{4J\beta_e/V_m} + B_m\sqrt{V_m/(4J\beta_e)}] / D_m, \\ \omega_h = \sqrt{\beta_e D_m^2/(\pi^2 J V_m)}. \end{cases} \quad (5)$$

$$\begin{cases} x_p(s) = \{k_q x_v(s)/A_p - k_{ce}[1 + V_t s/(4\beta_e k_{ce})]F_L(s)/A_p^2\} / \{s[(s^2/\omega_p^2) + (2\xi_p/\omega_p)s + 1]\}, \\ \xi_p = (k_{ce}/A_p)\sqrt{\beta_e M_t/V_t} + [B_p/(4A_p)]\sqrt{V_t/(\beta_e M_t)}, \\ \omega_p = \sqrt{\beta_e A_p^2/(V_t M_t)}. \end{cases} \quad (6)$$

其中:  $\theta_m$ 为液压马达轴的转角(rad);  $\xi_h$ 为液压马达阻尼比;  $\omega_h$ 为液压马达固有频率;  $D_m$ 为液压马达的理论排量( $\text{m}^3/\text{r}$ );  $V_m$ 为马达腔和阀间连接管道的阀腔总容积( $\text{m}^3$ );  $T_L$ 为作用于马达轴的外负载扭矩( $\text{N} \cdot \text{m}$ );  $k_{ce}$ 为总的流量-压力系数( $\text{m}^5/(\text{N} \cdot \text{m}^{-1})$ );  $B_m$ 为液压马达和负载折算到马达轴上的总黏性阻尼系数( $\text{N} \cdot \text{m}/(\text{rad} \cdot \text{s}^{-1})$ );  $\beta_e$ 为系统综合弹性模量( $\text{N}/\text{m}^3$ );  $J$ 为液压马达轴的转动惯量( $\text{kg} \cdot \text{m}^2$ );  $x_p$ 为液压油缸杆位移( $\text{m}$ );  $\xi_p$ 为液压缸阻尼比;  $\omega_p$ 为液压缸固有频率;  $M_t$ 为活塞及负载的总质量( $\text{kg}$ );  $F_L$ 为液压缸的负载力( $\text{N}$ );  $A_p$ 为液压油缸活塞面积( $\text{m}^2$ );  $V_t$ 为液压油缸控制前初始容积( $\text{m}^3$ );  $B_p$ 为活塞及负载的黏性阻尼系数( $\text{N} \cdot \text{s}/\text{m}$ );  $s$ 为拉普拉斯算子。

1.3 ZVD 输入整形器的设计

作为前馈控制方法,输入整形器的关键在于每个脉冲信号的个数、幅值和时滞。在本系统中,设置脉冲信号个数为3,令残留振荡比例 $V(\omega_n, \xi) = 0$ ,得到ZVD整形器(以下称ZVD输入整形器)。ZVD输入整形器虽然调节时间相对较长,但鲁棒性较好,对建模误差有更强的适应性,能让系统停止阶段的残留振荡得到明显改善,并减少系统响应的等待时间<sup>[9]</sup>。在此设计参数条件下,根据前述起重机吊重摆动系统的固有频率 $\omega_n$ 和阻尼比 $\xi$ ,可以设计出依靠吊重绳长 $l$ 值的ZVD输入整形器为

$$F(s) = 0.25 + 0.5e^{-(\pi\sqrt{l/g})s} + 0.25e^{-(2\pi\sqrt{l/g})s} \quad (7)$$



结合起重机吊重的摆动数学模型和液压操纵数学模型，设计基于绳长的 ZVD 输入整形器，在 Simulink 仿真软件平台上可以建立液压起重机从操纵到吊重摆动的完整仿真模型。

2 基于 Simulink 的吊重摆动系统的仿真模型

基于 MATLAB/Simulink 软件，本文建立的起重机操作控制仿真模型主要包括起升系统模块、回转系统模块、变幅系统模块和吊重摆动方程模块，通过操作指令输入到相应模块中，将各对应的模块输出结果输入吊重摆动方程中，通过 PID 控制器调节，进行滤波和增益等处理，输出吊重的面内角、面外角、吊臂状态、吊绳长度，而吊重消摆控制是通过起重机的液压系统来控制起重机的机构运动状态来实现<sup>[10]</sup>。吊重系统动力学方程（3）和（4）是复杂的时变非线性微分方程，无法求得系统的解，需要采用数值方法进行分析，利用 Simulink 软件中四阶-五阶龙格库塔法（ODE45）进行求解。起重机吊重摆动控制原理如图 4 所示。

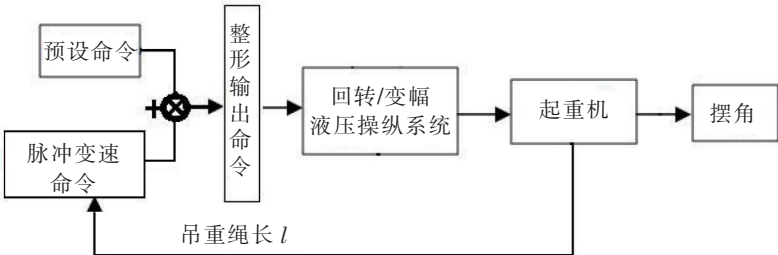


图 4 起重机吊重摆动控制原理图  
Fig.4 The schematic diagram of a crane swing control of payload

在液压起重机从操纵到吊重摆动的完整仿真模型基础上，根据绳长参数设计 ZVD 输入整形器控制，在 Simulink 软件平台建立的仿真模型如图 5 所示。

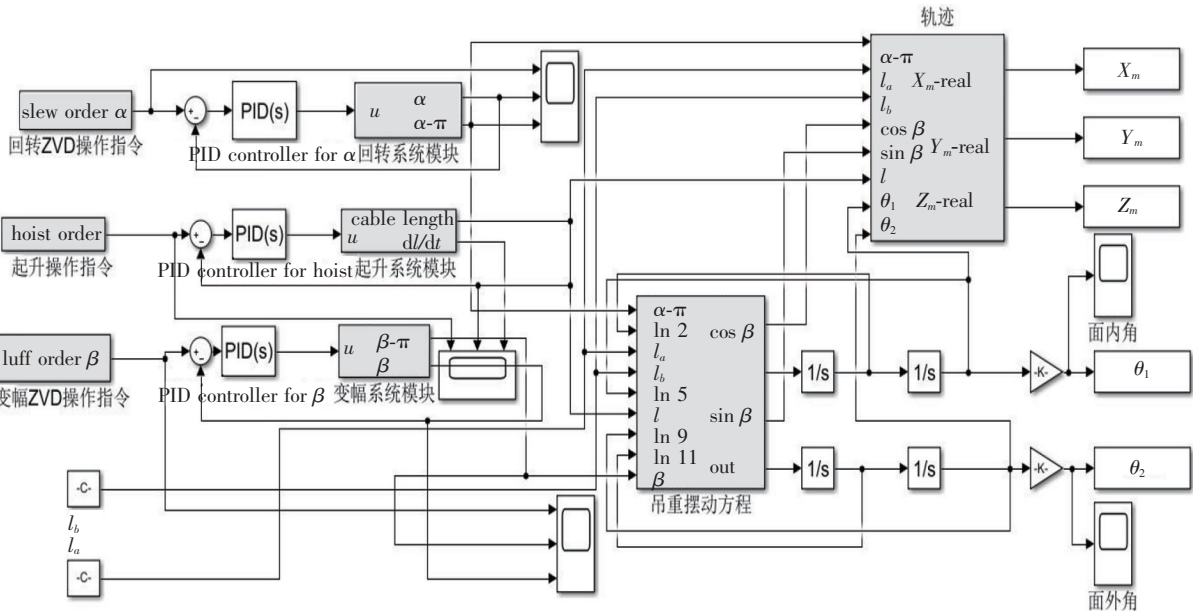


图 5 起重机吊重摆动系统 Simulink 仿真模型  
Fig.5 The Simulink simulation model of the crane payload system

在起止阶段，当液压起重机的操作方式为匀加速、减速形式时，起重机吊重摆动相对较小<sup>[11]</sup>，ZVD 输入整形器在 Simulink 模型中就是通过改变起重机操作时加速（减速）段的加速度值来实现对起重机操作命令控制，进而控制吊重摆动幅度。同时在实际摆动时，起重机吊重有空气等各种摩擦引

起的阻尼存在, 在“吊重摆动方程”模块中需要添加阻尼项  $\mu_1 \dot{\theta}_1$  和  $\mu_2 \dot{\theta}_2$  ( $\mu_1$  和  $\mu_2$  为综合阻尼系数), 以便使该模型与实际更为贴近。因面外角的摆动会受到滑轮侧边缘的影响, 故面外角的综合阻尼系数较大, 经过多次仿真模拟, 最终本实验的  $\mu_1$  取 0.05,  $\mu_2$  取 0.10。

3 仿真结果及分析

在回转、变幅和起升联合操作模式下, 将回转角度设置为  $0^\circ \sim 72^\circ$ , 变幅角度设置为  $0^\circ \sim 48^\circ$ , 起升有下降段 1.0 ~ 1.5、1.5 ~ 2.0、2.0 ~ 2.5、2.5 ~ 3.0 m 和上升段 3.0 ~ 2.5、2.5 ~ 2.0、2.0 ~ 1.5、1.5 ~ 1.0 m, 在变绳长下回转、变幅操作模式下, 仿真探究操作命令未加整形及加入 ZVD 整形起重机吊重摆动的情况。变幅操作命令和回转操作命令速度曲线如图 6 ~ 图 7 所示。

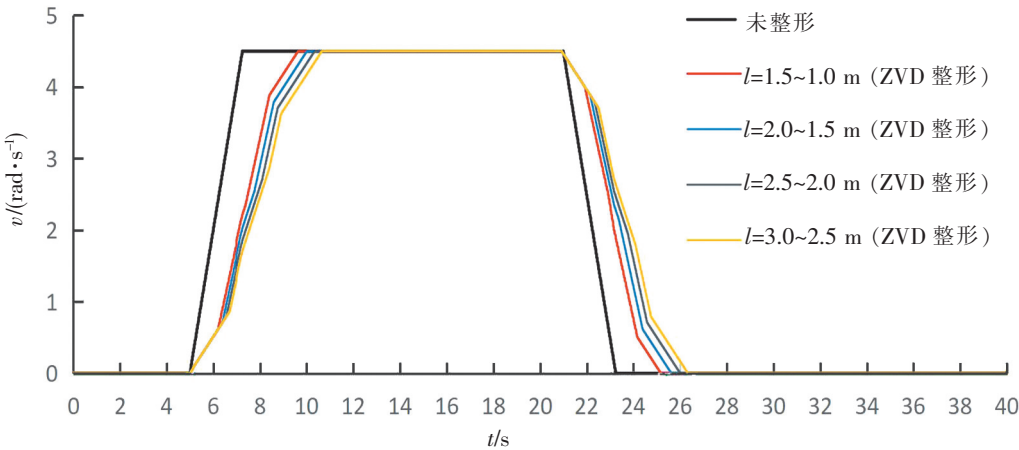


图 6 未整形与 ZVD 整形在变绳长下的变幅操作命令速度曲线  
Fig.6 Speed curves of luffing operation command for unshaped and ZVD shaped under variable rope lengths

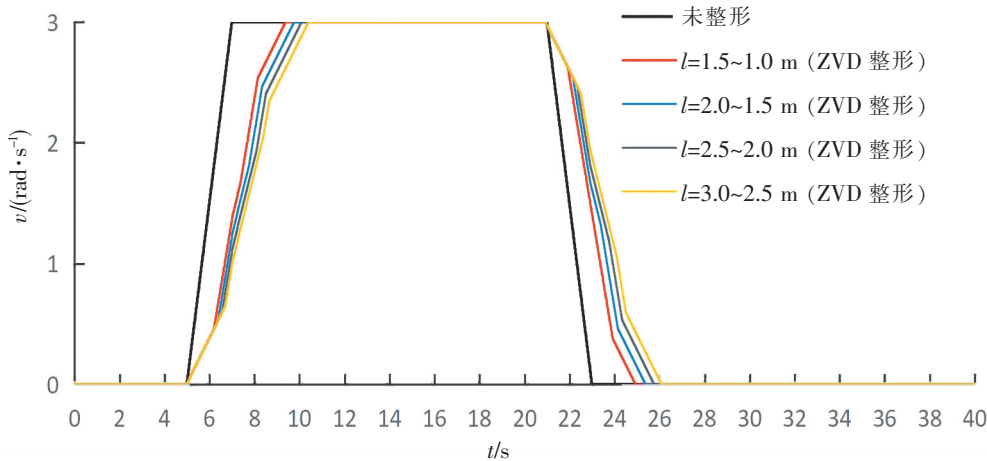


图 7 未整形与 ZVD 整形在变绳长下的回转操作命令速度曲线  
Fig.7 Speed curves of slewing operation command for unshaped and ZVD shaped under variable rope lengths

3.1 未整形下起重机联合操作

在起重机回转、变幅和起升联合操作模式下, 使用图 6 和图 7 的命令速度曲线在模型中进行仿真实验, 图 8 和图 9 分别为未整形下起重机在联合操作上升和下降各阶段变绳长时的吊重摆动情况。

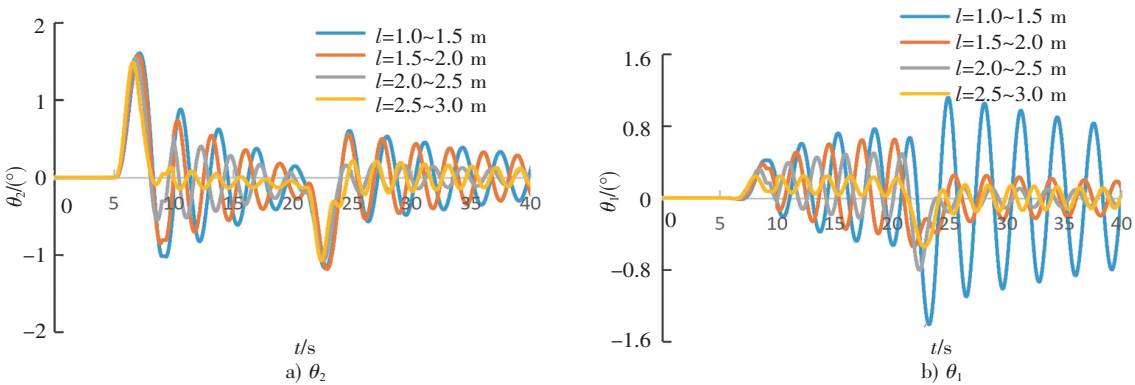


图 8 未整形变绳长(上升)下起重机吊重摆动情况

Fig.8 The swinging curve of the crane's payload under unshaped and variable rope lengths (up)

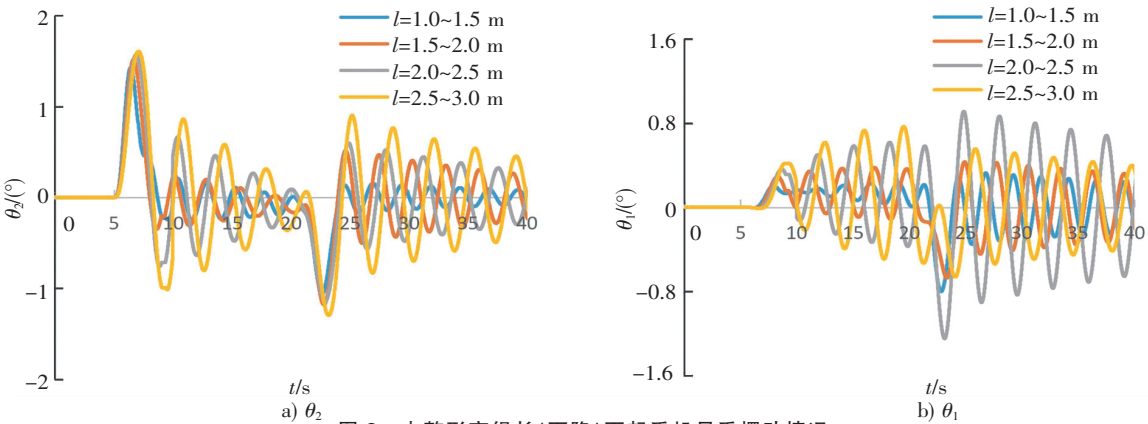


图 9 未整形变绳长(下降)下起重机吊重摆动情况

Fig.9 The swinging curve of the crane's payload under unshaped and variable rope lengths (down)

通过仿真结果发现，在未整形的操作命令下，起重机吊重的摆动幅度及停止后的残余摆动均较大，在执行操作命令期间，随着绳长的增加，摆动幅度线性变化，但是在起重机吊重绳长由 3.0 m 上升至 2.5 m、2.0 m 下降至 2.5 m 时，其面内角的残余摆动值异常增大。

3.2 加入整形控制变绳长下起重机变幅和回转操作

在起重机回转、变幅和起升（下降）联合操作模式下，使用图 6 和图 7 的命令速度曲线在模型中进行仿真实验。图 10 和图 11 分别为加入 ZVD 整形速度命令曲线下起重机在联合操作上升和下降各阶段变绳长时的吊重摆动情况。

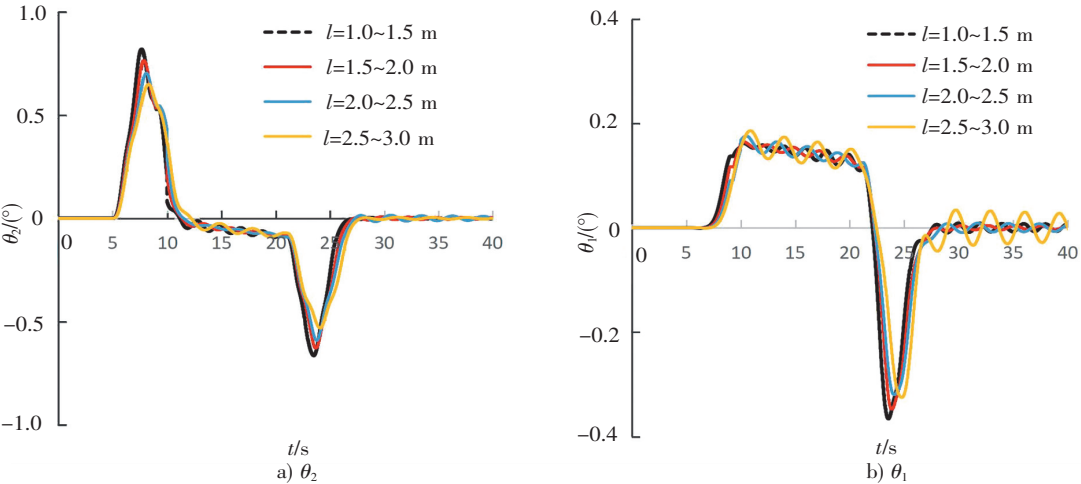


图 10 加入 ZVD 整形变绳长(上升)起重机吊重摆动情况

Fig.10 The swinging curve of the crane's payload under ZVD shaped and variable rope lengths (up)

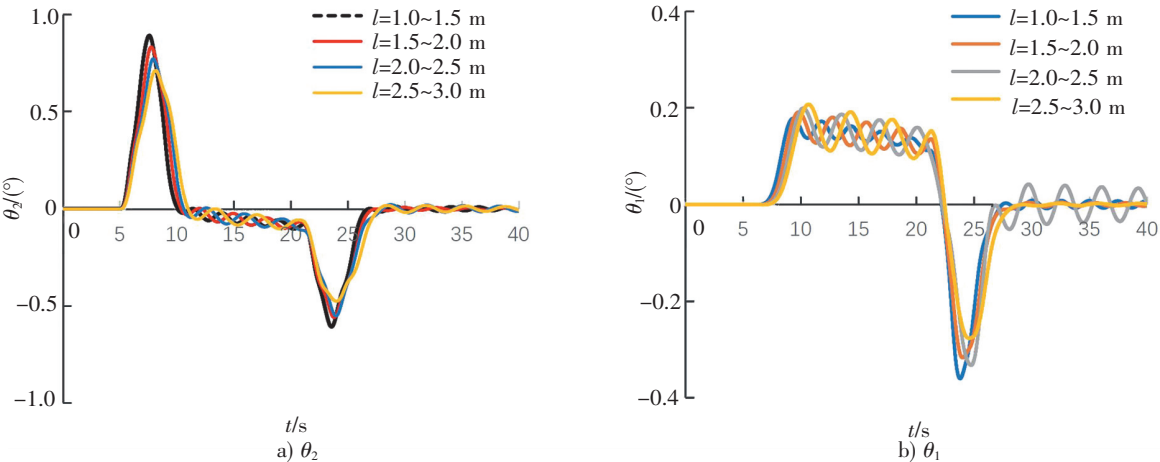


图 11 加入 ZVD 整形变绳长(下降)起重机吊重摆动情况

Fig.11 The swinging curve of the crane's payload under ZVD shaped and variable rope lengths (down)

加入 ZVD 整形命令相同操作时, 起重机整个过程的吊重摆动得到了很大抑制, 尤其是对面内角的效果非常明显, 同时对比在未整形时出现异常的 3.0 m 上升至 2.5 m、2.0 m 下降至 2.5m 的情况发现, 面内角的残余角度也有相应的改善。

3.3 未加整形与加入 ZVD 整形控制对比分析

由于实验室起重机受实验室空间限制, 吊重的起降只能在 1 ~ 3 m 范围内。虽然从上面的仿真结果中可以明显看出, 加入整形命令操作后起重机的运行非常平稳, 吊重在有操作命令时的强制摆动角度和停止后的惯性摆动角度都得到非常大的抑制, 但是通过表 2 和表 3 把最大强制摆动角度、惯性摆动角度及其消摆效率对比未整形时的具体数据进行定量分析, 结果将更加直观。

表 2 变绳长(上升)吊重最大摆动角度与消摆效率

Tab.2 Maximum swing angle and anti-swing efficiency of variable rope lengths(up)

指标	摆动方式	$l=3.0\sim2.5\text{ m}$		$l=2.5\sim2.0\text{ m}$		$l=2.0\sim1.5\text{ m}$		$l=1.5\sim1.0\text{ m}$	
		面内角	面外角	面内角	面外角	面内角	面外角	面内角	面外角
未整形/ $(^{\circ})$	强制	-1.410 4	1.606 9	0.648 5	1.579 7	-0.802 3	1.541 8	-0.539 6	1.486 1
	惯性	1.052 5	0.526 5	0.250 2	0.496 4	0.113 4	0.171 4	0.145 0	0.204 3
ZVD 整形/ $(^{\circ})$	强制	-0.366 5	0.818 4	0.165 1	0.764 6	-0.302 3	0.703 6	-0.325 6	0.649 0
	惯性	0.034 0	0.005 7	0.008 8	0.015 2	0.004 2	0.007 0	0.008 6	0.003 6
消摆效率/%	强制	74.020 0	49.070 0	74.550 0	51.600 0	60.080 0	54.370 0	39.660 0	56.330 0
	惯性	96.770 0	98.920 0	96.500 0	96.930 0	96.260 0	95.900 0	94.100 0	98.220 0

表 3 变绳长(下降)吊重最大摆动角度与消摆效率

Tab.3 Maximum swing angle and anti-swing efficiency of variable rope lengths(down)

指标	摆动方式	$l=1.0\sim1.5\text{ m}$		$l=1.5\sim2.0\text{ m}$		$l=2.0\sim2.5\text{ m}$		$l=2.5\sim3.0\text{ m}$	
		面内角	面外角	面内角	面外角	面内角	面外角	面内角	面外角
未整形/ $(^{\circ})$	强制	-0.799 5	1.431 1	-0.670 9	1.517 2	-1.246 6	1.569 8	0.766 2	1.605 5
	惯性	0.325 6	0.153 3	0.424 3	0.467 9	0.865 2	0.522 8	0.514 8	0.764 5
ZVD 整形/ $(^{\circ})$	强制	-0.361 1	0.891 0	-0.317 9	0.831 9	-0.333 6	0.771 1	0.206 4	0.710 7
	惯性	0.008 6	0.012 5	0.004 1	0.007 5	0.042 0	0.021 5	0.002 4	0.017 5
消摆效率/%	强制	54.830 0	37.740 0	52.620 0	45.170 0	73.240 0	50.880 0	73.060 0	55.730 0
	惯性	97.370 0	91.830 0	99.030 0	98.400 0	95.150 0	95.880 0	99.540 0	97.710 0



由表 2 和表 3 可以看出,起重机在联合操作时,操作命令未整形的最大摆动幅度为  $1.606\ 9^{\circ}/0.764\ 6^{\circ}$  (面外角) 和  $1.410\ 4^{\circ}/1.052\ 5^{\circ}$  (面内角),经过 ZVD 整形命令后,其吊重的摆动角度最高仅为  $0.891\ 0^{\circ}/0.021\ 5^{\circ}$  (面外角) 和  $0.366\ 5^{\circ}/0.034^{\circ}$  (面内角),平均消摆效率为  $50.11\%/96.7\%$  (面外角) 和  $62.76\%/96.9\%$  (面内角)。可见,使用 ZVD 整形方法能让起重机在回转变幅起升复杂操作运行中和操作停止后都具有非常好的抑制吊重摆动效果。

## 4 结论

以实验室 2 t/3 m 液压起重机为原型,建立了该起重机吊重系统、液压操纵系统的数学模型;利用 MATLAB/Simulink 软件平台,建立了起重机吊重系统仿真模型,并根据实际情况增加摆动阻尼;设计了依据起重机吊重绳长为变量参数的 ZVD 输入整形控制器,并通过命令曲线加入到仿真模型中;设计了起重机在联合操作下未整形与 ZVD 整形的仿真实验,并对摆动角度曲线和数值进行分析。结果表明:基于起重机吊重绳长为变量设计的 ZVD 输入整形控制器能抑制吊重摆动幅度,在强制驱动阶段的消摆效率为  $56.43\%$ ,而惯性摆动的平均消摆效率高达  $96.78\%$ ,能让起重机吊重在操作期间消除大幅摆动,并在停止操作后快速稳定下来。在起重机作业中,根据吊重绳长为参数的 ZVD 输入整形控制器设计的操纵命令,能让起重机吊重的摆动得到极大抑制,并且吊绳长度极易测量,ZVD 输入整形控制器的运算规律相当简洁,为起重机安全、快捷工作提供了一个简便有效的控制方案。

## [ 参考文献 ]

- [1] 洪斯琦. 船舶液压起重机的消摆控制仿真研究[D]. 厦门:集美大学,2014.
- [2] 王生海,孙茂凯,曹建彬,等. 船用起重机吊重防摆控制研究进展[J]. 大连海事大学学报,2021,47(4):1-9.
- [3] SHAO X J,ZOU X J,ZHANG J G,et al. Data-driven model-free adaptive positioning and anti-swing control for bridge cranes[J]. IEEE Access,2023,11:44842-44853.
- [4] LI G,MA X,LI Y B. Adaptive anti-swing control for 7-DOF overhead crane with double spherical pendulum and varying cable length[J]. IEEE Transactions on Automation Science and Engineering,2023,21(4):5240-5251.
- [5] JIN G L,SUN Y Q,CHENG H Y,et al. Dynamic modeling and control of hydraulic driven payload anti-swing system for shipborne cranes[J]. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers,Part M:Journal of Engineering for the Maritime Environment,2024,238(1):137-152.
- [6] 牛王强,高迪驹,杨育青,等. 定绳长下港口起重机的一系列阶跃输入整形防摇方法[J]. 港口科技,2021(5):25-29,34.
- [7] 任会礼,付玲,梅志千,等. 基于输入整形的起重机消摆控制研究进展[J]. 机械制造与自动化,2013,42(5):163-167.
- [8] 朱钰. 船舶液压起重机基于延迟反馈控制的吊重消摆[J]. 船舶工程,2017,39(1):68-72.
- [9] 陈艳,黄国辉,葛鹏遥. 输入整形技术在柔性系统中的设计与实现[J]. 企业科技与发展,2023(9):32-34,44.
- [10] 王云飞. 基于输入整形技术的门座起重机吊重摆动控制研究[D]. 武汉:武汉理工大学,2018.
- [11] 陈明亮,卓甘澍,朱钰. 船舶液压起重机操纵与吊重摆动关系试验研究[J]. 交通科技,2021(1):144-148.

(责任编辑 马建华 英文审校 郑青榕)