

8-17-2020

## Research and Simulation on Trajectory Control of Telescopic Boom Aerial Work Platform for Hull Spray Painting

Wang Xin

1. *School of Mechanical Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116023, China;;*

Lingchong Gao

1. *School of Mechanical Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116023, China;;*

Zhaoqiu Huang

2. *Dalian Shipbuilding Industry Offshore Co., LTD, Dalian 116001, China;*

Yuchen Xiao

1. *School of Mechanical Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116023, China;;*

Follow this and additional works at: <https://dc-china-simulation.researchcommons.org/journal>



Part of the Artificial Intelligence and Robotics Commons, Computer Engineering Commons, Numerical Analysis and Scientific Computing Commons, Operations Research, Systems Engineering and Industrial Engineering Commons, and the Systems Science Commons

---

This Paper is brought to you for free and open access by Journal of System Simulation. It has been accepted for inclusion in Journal of System Simulation by an authorized editor of Journal of System Simulation.

---

# Research and Simulation on Trajectory Control of Telescopic Boom Aerial Work Platform for Hull Spray Painting

## Abstract

**Abstract:** Telescopic boom aerial work platform, which has been widely applied in ship building field, is taken as research object. An intelligent method of spray painting, *continuous spray painting along hull's contour* was proposed. *Correspondence between position vector of boom's top and drive-space vector was established*. A path planning strategy of continuous spray painting was designed, and *the variation of driving-space vector was acquired when the path was known*. *The trajectory control system of intelligent spray painting was modeled in Simulink environment* based on the transfer function of electro-hydraulic proportional position control system. The correction link made of PID controller and feed-forward compensation was designed. The simulation and analysis of the spray painting method were completed. The good following behavior of control system according to the trajectory control signal was revealed in the simulation result.

## Keywords

telescopic boom aerial work platform, trajectory control, PID, feed-forward compensation

## Recommended Citation

Wang Xin, Gao Lingchong, Huang Zhaoqiu, Xiao Yuchen. Research and Simulation on Trajectory Control of Telescopic Boom Aerial Work Platform for Hull Spray Painting[J]. Journal of System Simulation, 2016, 28(2): 404-409.

## 直臂高空作业车船体喷涂轨迹控制研究与仿真

王欣<sup>1</sup>, 高凌翀<sup>1</sup>, 黄兆秋<sup>2</sup>, 肖宇晨<sup>1</sup>

(1.大连理工大学机械工程学院, 大连 116023; 2.大连船舶重工集团海洋工程有限公司, 大连 116001)

**摘要:**以直臂高空作业车为研究对象,以其在船舶喷涂作业方面的应用为研究背景。提出了一种“船体轮廓连续喷涂”智能喷涂方式,建立了臂架末端位置向量与驱动空间向量之间的映射关系。针对船体轮廓连续喷涂模式,设计一种路径规划策略,实现在已知路径条件下得到驱动空间各变量的变化规律。根据电液比例位置控制系统的传递函数,在 Simulink 环境下建立船体轮廓连续喷涂轨迹控制系统模型,设计了由 PID 控制器及前馈补偿器共同构成的校正环节,并针对轨迹规划方案进行了仿真分析,得到的仿真结果反映了控制系统针对轨迹控制信号良好的跟随性。

**关键词:**直臂高空作业车; 轨迹控制; PID; 前馈补偿

中图分类号: TH213.6

文献标识码: A

文章编号: 1004-731X (2016) 02-0404-06

### Research and Simulation on Trajectory Control of Telescopic Boom Aerial Work Platform for Hull Spray Painting

Wang Xin<sup>1</sup>, Gao Lingchong<sup>1</sup>, Huang Zhaoqiu<sup>2</sup>, Xiao Yuchen<sup>1</sup>

(1. School of Mechanical Engineering, Dalian University of Technology, Dalian 116023, China;

2. Dalian Shipbuilding Industry Offshore Co., LTD, Dalian 116001, China)

**Abstract:** Telescopic boom aerial work platform, which has been widely applied in ship building field, is taken as research object. An intelligent method of spray painting, *continuous spray painting along hull's contour* was proposed. *Correspondence between position vector of boom's top and drive-space vector was established.* A path planning strategy of continuous spray painting was designed, and *the variation of driving-space vector was acquired when the path was known.* *The trajectory control system of intelligent spray painting was modeled in Simulink environment* based on the transfer function of electro-hydraulic proportional position control system. The correction link made of PID controller and feed-forward compensation was designed. The simulation and analysis of the spray painting method were completed. The good following behavior of control system according to the trajectory control signal was revealed in the simulation result.

**Keywords:** telescopic boom aerial work platform; trajectory control; PID; feed-forward compensation

## 引言

在我国船舶涂装领域内,除了钢材的预处理实

现了自动化流水线生产以外,分段、船台、码头等阶段的除锈喷涂作业,依然以人工作业为主,劳动强度大,作业时间长<sup>[1]</sup>。而随着高空作业车在船舶领域的广泛应用,船厂逐渐实现了从纯人工作业向半机械化作业的转变,特别是针对船体修补、除锈、焊接、喷涂等人工作业将逐渐被基于高空作业车改装的喷涂机器人所取代。高空作业车的智能化将使操作人员能够从恶劣的环境中解放出来,也可以极



收稿日期: 2014-09-19 修回日期: 2014-10-28;  
基金项目: 辽宁省高等创新团队支持计划 (LT2014001); 中央高校基本科研业务专项 (DUT14ZD221);  
作者简介: 王欣(1972-),女,天津,博士,副教授,研究方向为重型装备现代设计理论与方法,复杂结构 CAD 与智能计算,结构损伤与剩余寿命评估。

<http://www.china-simulation.com>

大地提高作业效率及作业质量<sup>[2]</sup>。而自动控制技术及轨迹规划技术水平的高低是决定高空作业车智能化程度的关键因素<sup>[3]</sup>。

由于船体外轮廓为曲面, 在喷涂过程中, 为保证涂料分布均匀, 喷头需沿曲线轨迹运动。目前针对高空作业车轨迹规划的相关研究以直线轨迹规划为主。如设计一种控制系统, 实现作业平台垂直及水平运动的轨迹控制<sup>[4]</sup>, 采用自整定模糊 PID 控制方法<sup>[5]</sup>, 通过研究轨迹跟踪控制方法实现工作台沿预定直线轨迹运动<sup>[6]</sup>。而在针对高空作业车避障轨迹规划的现作业平台垂直及水平运动的轨迹控制<sup>[4]</sup>, 采用自整定模糊研究中<sup>[7]</sup>, 考虑到臂架末端沿曲线连续运动问题, 但并没有设计液压控制系统。本文将在现有研究基础上, 针对船体喷涂需要, 设计一种控制系统, 以实现高空作业车臂头沿特定曲线连续运动。

本文选择实现直臂高空作业车臂头的连续运动轨迹规划为目标, 通过建立臂架系统的运动学方程, 以及臂架电液比例位置控制系统模型, 在 Simulink 环境下实现对连续喷涂轨迹控制系统建模与仿真分析。

## 1 直臂高空作业车运动学建模

在喷涂作业时, 臂架的运动与平台的回转运动一般不会同时进行, 仅需要臂架完成在变幅平面内的轨迹运动, 置于臂架端部的辅助喷涂机器人进行一定面积的喷刷。因此, 若不考虑平台的回转动作, 可将臂架系统看作两个关节, 分别为臂架绕根铰点的转动关节和臂架伸缩的移动关节, 如图 1 所示。

臂架顶端在全局坐标系下的正运动学方程为:

$$\begin{cases} X = cL_E - w \\ Y = 0 \\ Z = sL_E + h \end{cases} \quad (1)$$

式中:  $c$  为  $\cos\theta$ ;  $s$  为  $\sin\theta$ ;  $\theta$  为伸缩臂架仰角, °;  $w$  为臂架根铰点至回转中心距离, mm;  $h$  为臂架根铰点至地面距离, mm;  $L_E$  为伸缩臂长度, mm。

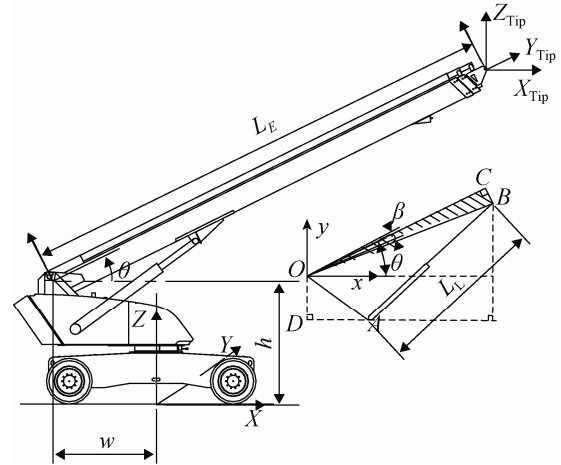


图 1 直臂高空车关节坐标系示意图

由正运动学方程, 可以完成逆运动学问题中位置向量 ( $\mathbf{P}=[X, Y, Z]^T$ ), 向关节空间向量 ( $\mathbf{q}=[L_E, \theta_2]^T$ ) 的变换, 将式(1)整理后, 可得:

$$\begin{cases} L_E = \sqrt{(X+w)^2 + (Z-h)^2} \\ \theta_2 = \cos^{-1} \frac{w-X}{L_E} \end{cases} \quad (2)$$

因不考虑平台的回转动作, 驱动空间的参量只包含变幅油缸的长度  $L_1$  和伸缩油缸的长度  $L_2$ , 驱动空间向量  $\bar{\mathbf{L}}=[L_1, L_2]^T$ 。

变幅油缸的长度  $\lambda_1$ , 可通过三铰点几何关系求得:

$$L_1 = L_L = \sqrt{(L_{BO} \cdot \sin(\theta - \beta) + L_{DO})^2 + (L_{BO} \cdot \cos(\theta - \beta) - L_{AD})^2} \quad (3)$$

伸缩油缸的长度  $\lambda_2$ , 由伸缩原理可知:

$$L_2 = (L_E - L_0) / 2 + L_{S0} \quad (4)$$

式中:  $L_0$  为臂架全缩时, 臂架长度, mm;  $L_{S0}$  为臂架全缩时, 伸缩油缸长度, mm;  $\beta$  为臂架根铰点 O 与油缸铰点 B 的连线与臂架轴线夹角, °。

由式(1)~(4), 可以实现由位置空间向驱动空间的转换。

## 2 直臂高空作业车船体喷涂轨迹规划

### 2.1 船体外轮廓连续喷涂

轨迹运动主要分为 2 类, 一是如机器人抓放作业的点到点(PTP—Point To Point)运动, 二是如弧

焊和曲面加工的连续路径(CP—Continuous-Path)运动或轮廓运动<sup>[8]</sup>。本文将在直线轨迹规划的基础上,研究曲线轨迹规划的实现方式。本文采用一种臂架末端沿船体轮廓连续运动的喷涂方式。在运动过程中,由喷涂属具保证喷头与船体表面垂直,由臂架系统控制喷头与船体表面距离,臂头运动轨迹 AB 可以看作船体外轮廓线的平行线。

由上述描述可知,若要实现此种方式的喷涂作业,臂架系统必须能够实现其运动平面内任意的曲线运动。这样,臂架的运动才能够跟随不同船体的外形。本文要求在船体外轮廓运动喷涂作业时,臂架顶端需沿路径方向匀速运动,以确保喷涂的均匀性。

## 2.2 连续喷涂轨迹规划

关节空间作为位姿空间与驱动空间之间的中间环节,与位姿向量与驱动向量之间都有清晰的函数表达式,因此可以作为轨迹规划的目标向量。在关节空间进行轨迹规划,是将关节变量表示成关于时间的函数,并且要确保其导数连续<sup>[9]</sup>。而对于任意曲线的轨迹规划问题,可以考虑将曲线分成若干小段,求出各节点位置下的关节向量,得到关节空间中的若干点。考虑到运动过程中的速度平稳,需采用插值拟合的方式得到关节向量的平滑函数,从而得到现实可行的驱动向量函数。

具体方法是,已知初始位置的关节向量  $q_0$  和结束位置的关节向量  $q_f$ 。轨迹描述可以用一个  $q_0$  和  $q_f$  的平滑差值函数  $q(t)$  表达,为保证关节位置和速度的连续性,需要一个三次多项式进行插值:

$$q(t) = a_0 + a_1 t + a_2 t^2 + a_3 t^3 \quad (5)$$

多项式系数需要满足:

$$\begin{bmatrix} q_0 \\ q_f \\ \dot{q}_0 \\ \dot{q}_f \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 1 & t_f & t_f^2 & t_f^3 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 2t_f & 3t_f^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} a_0 \\ a_1 \\ a_2 \\ a_3 \end{bmatrix} \quad (6)$$

PTP 问题边界条件:

$$\begin{cases} q(0) = q_0, q(t_f) = q_f \\ \dot{q}(0) = \dot{q}_0, \dot{q}(t_f) = \dot{q}_f \end{cases}$$

求解上述方程,即可得到三次多项式各系数:

$$\begin{cases} a_0 = q_0 \\ a_1 = \dot{q}_0 \\ a_2 = \frac{3}{t_f^2}(q_f - q_0) - \frac{2}{t_f}\dot{q}_0 - \frac{1}{t_f}\dot{q}_f \\ a_3 = -\frac{2}{t_f^3}(q_f - q_0) + \frac{1}{t_f}(\dot{q}_0 + \dot{q}_f) \end{cases} \quad (7)$$

## 3 船体喷涂轨迹控制系统建模与仿真分析

本文针对在直臂高空作业车变幅平面内,实现对船体喷涂轨迹规划,执行机构为臂架变幅油缸和伸缩油缸。为实现对臂架末端位置的跟踪控制,对 2 组油缸均采用电液比例位置控制系统,并获得控制系统的传递函数,在 MATLAB/Simulink 环境下建立船体喷涂轨迹控制系统模型,并针对连续喷涂运动方案进行仿真分析。

直臂高空作业车船体喷涂轨迹控制系统的工作流程如下:由喷涂作业轨迹规划器给出伸缩油缸和变幅油缸的期望位移值,通过位移/电流装换,将期望的位移值转化为电信号,通过控制电液比例阀的阀芯以实现实时控制伸缩油缸和变幅油缸,两组油缸分别设置有位移传感器,将实际位移转化为电信号反馈给控制环节,实现闭环反馈控制。

### 3.1 液压系统传递函数

将电液比例阀看作一个二阶震荡环节,由比例阀阀芯的受力方程经拉氏变换后得到阀输出流量  $Q$  对输入电流  $I$  的传递函数为<sup>[10]</sup>:

$$G_2(s) = \frac{Q(s)}{I(s)} = \frac{K_{sv}}{\frac{s^2}{\omega_{sv}^2} + \frac{2\zeta_{sv}}{\omega_{sv}}s + 1} \quad (8)$$

式中:  $K_{sv}$  为比例阀流量增益,  $\text{m}^3/\text{s}\cdot\text{A}$ ;  $\omega_{sv}$  为比例阀频宽,  $\text{rad/s}$ ;  $\zeta_{sv}$  为比例阀阻尼比,取 0.7。

比例阀流量增益  $K_{sv}$  的计算公式如下:

$$K_{sv} = \frac{Q_{0n} \sqrt{p_s / p_{sn}}}{I_n} \quad (9)$$

式中:  $Q_{0n}$  为比例阀额定流量, L/min;  $I_n$  为比例阀额定控制电流, A;  $p_s$  为液压系统压力, MPa;  $p_{sn}$  为比例阀额定压力, MPa。

针对四通阀控单出杆液压缸环节, 可得到阀的流量  $q_L$  为输入, 液压缸位移  $x_p$  为输出的传递函数, 经简化后为:

$$\frac{X_p(s)}{Q_L(s)} = \frac{1/A_p}{s(\frac{s^2}{\omega_h^2} + \frac{2\zeta_h}{\omega_h}s + 1)} \quad (10)$$

式中:  $\omega_h$  为液压缸固有频率, rad/s;  $\zeta_h$  为液压阻尼比;  $A_p$  为液压缸有效作用面积,  $m^2$ 。

根据图 2 所示的各环环节的传递关系, 并根据式(8)~(10), 将相关参数值代入各环节, 可分别得到忽略外负载力情况下, 变幅油缸伸出、缩回及伸缩油缸伸出、缩回动作时的系统开环传递函数如下

$$G(s)H(s) = K_a \cdot \frac{K_{sv}}{\frac{s^2}{\omega_{sv}^2} + \frac{2\delta_{sv}s}{\omega_{sv}} + 1} \cdot \frac{1/A_p}{s(\frac{s^2}{\omega_h^2} + \frac{2\delta_h s}{\omega_h} + 1)} \cdot K_s \quad (11)$$

式中:  $K_a$  为比例放大系数;  $K_s$  为位移传感器环节传递函数。

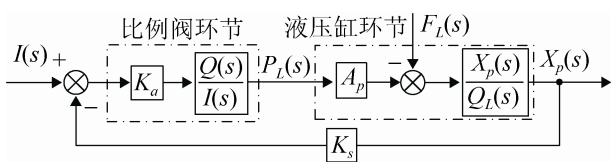


图 2 阀控液压缸电液比例控制系统传递函数方框图

### 3.2 前馈补偿与 PID 控制器复合校正

根据上节得到的传递函数, 忽略外负载对系统影响, 在 MATLAB/Simulink 环境下搭建阀控液压缸电液比例位置控制系统。分别在不设置校正环节与添加 PID 校正环节时, 给系统输入单位阶跃及斜坡信号, 得到相应结果。可采用试凑法、Ziegler—Nichols 整定法、临界比例度法、衰减曲线法等方法对比例、积分和微分的三项参数进行校正, 不断调节并观察系统响应曲线的变化, 获得更好的响应性能<sup>[11-13]</sup>。

经 PID 校正后, 虽然控制系统的阶跃响应达到要求, 但无法很好跟随斜坡信号。可以通过调整开环增益的大小来减少偏差, 但始终无法消除偏差。而前馈校正的特点是不依靠偏差而直接测量干扰, 在干扰引起误差之前就对它进行近似补偿, 及时消除干扰的影响<sup>[14]</sup>。

根据式(8)~(11), 绘制增加前馈 PID 校正环节的控制系统的整体传递函数方框图如图 3 所示。

虽然系统加入了前馈补偿校正环节, 但系统的特征方程没有改变, 因此前馈环节的引入不会影响系统阶跃响应性能<sup>[15]</sup>。所以, 在此只观察引入前馈补偿环节后, 系统对于斜坡信号的响应结果, 如图 4 所示。

引入前馈补偿后的系统能够很好地跟随斜坡信号, 并且在响应达到稳态时消除了稳态误差, 因此, 此时的电液比例位置控制系统可以很好地跟随臂架运动的轨迹控制信号。

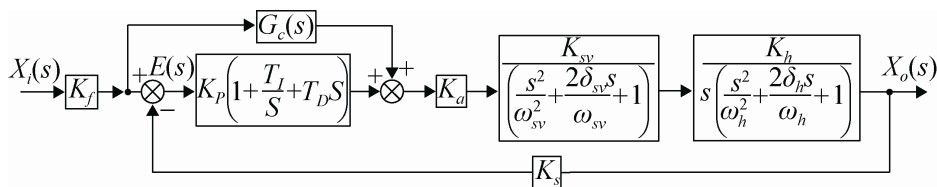


图 3 基于前馈及 PID 校正的控制系统传递函数方框图



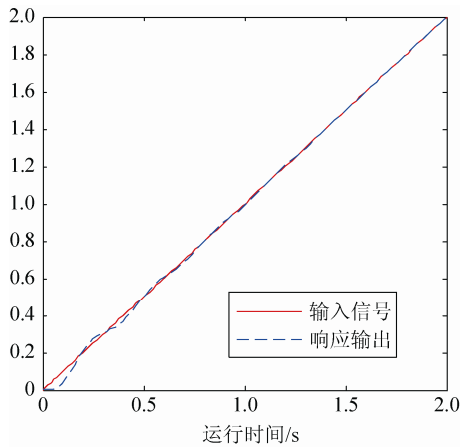


图 4 前馈及 PID 校正下伸缩油缸伸出运动斜坡响应

### 3.3 船体轮廓连续喷涂仿真与分析

本文应用自定义信号源的方法,对船体轮廓连续喷涂系统的控制信号进行了建模。

假设初始时刻,臂架的长度为 19 m,臂架的幅度为 60°,臂架顶端的运动轨迹为一半径为 5 000 mm 的 1/4 圆弧,沿轨迹方向的运动速度  $v=-0.2$  m/s。按照上述步骤进行轨迹规划,应用 MATLAB 进行运动学仿真,得到伸缩油缸和变幅油缸伸缩位移曲线。

首先运行船体轮廓连续喷涂的轨迹规划 M 文件,同时得到以列的形式存放的时间变量和伸缩油缸位移量构成的数组“LE”,以及以列的形式存放的时间变量和变幅油缸位移量构成的数组“LL”。分别对两个模块进行设置后可得信号源。将信号连接到对应的执行机构模型后,运行程序,工作空间中的“LE”和“LL”数组将被自动调用,作为控制信号输出。此方法极大的简化了控制信号的建模过程,同时避免了轨迹规划 M 文件的二次编辑,节省了工作时间。

按照信号源“LE”,“LL”和“LED”,其中“LED”是对伸缩缸的位移信号进行了微分,得到其速度信号,依据速度信号的正负来完成伸缩油缸伸出与缩回动作的切换。变幅油缸伸出与缩回动作的选择依然由沿运动路径速度的正负来决定。“伸缩油缸伸出”、“伸缩油缸缩回”、“变幅油缸伸出”、“变幅油缸缩回”4 个子系统为前馈补偿及 PID 复合校正下

的电液比例位置控制系统。根据前馈补偿及 PID 复合校正的电液比例位置控制系统,在 MATLAB/Simulink 环境下建立船体喷涂轨迹控制系统模型如图 5 所示。运行船体轮廓连续喷涂程序,得到如图 6 所示的仿真结果。

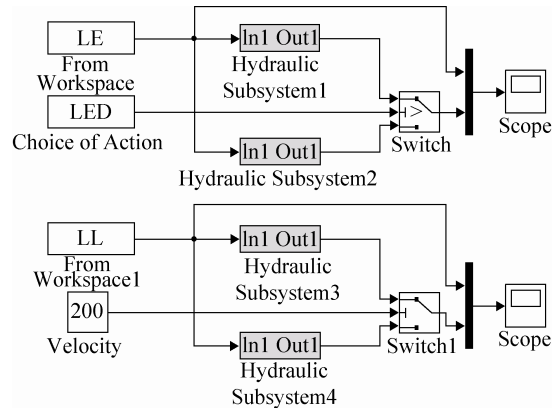
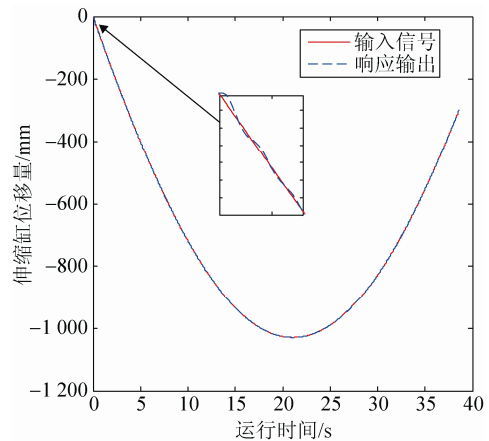
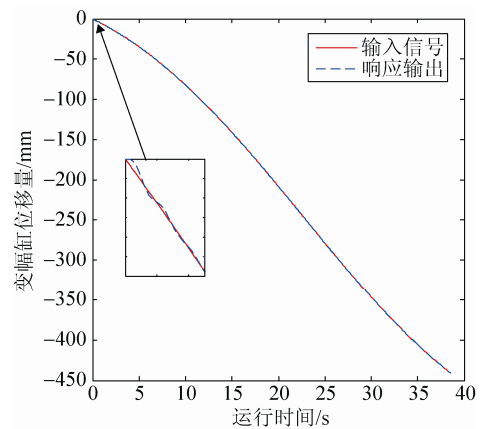


图 5 船体喷涂轨迹控制系统



(a) 伸缩油缸位移仿真曲线



(b) 变幅油缸位移仿真曲线

图 6 油缸位移仿真曲线

图 6(a)与图 6(b)中的红色曲线, 即分别为由已知轨迹通过运动学仿真的到伸缩油缸和变幅油缸伸缩位移曲线。由图 7 的仿真结果可知, 系统可以很好地跟随控制信号, 使油缸的动作达到期望的位移量, 仅在运动的前 1 s 内存在波动, 迅速达到稳态后, 伸缩油缸的稳态偏差 $<0.04$  mm, 变幅油缸的稳态偏差 $<0.002$  mm。因此, 臂架可以很好地实现期望的轨迹运动。

## 4 结论

本文针对目前用于船体喷涂的直臂高空作业车自动化程度不高的现状, 研究设计了一种直臂高空作业车臂架运动轨迹智能控制系统, 实现臂架末端在变幅平面内沿任意曲线连续运动功能, 可以更好地配合臂头的喷涂属具完成船体喷涂任务, 也为实现高空作业车智能化程度的提高奠定基础。

(1) 根据直臂高空作业车臂架运动特点, 建立臂架系统在变幅平面内的运动学方程, 得到关节空间向臂头位置空间变换的逆运动学方程, 并建立了关节变量与驱动油缸伸长量之间的数学关系, 为实现对臂头运动轨迹控制提供了数学基础。

(2) 根据船体喷涂需要, 提出“船体轮廓连续喷涂”方式, 利用三次多项式插值实现了在平面内臂头沿连续曲线运动的轨迹规划。以实现平面圆弧运动轨迹为例, 运用 MATLAB 进行运动仿真, 得到了驱动油缸位移量曲线。

(3) 运用液压系统传递函数建模方法, 对臂架的电液比例位置控制系统进行了数学建模, 得到了各环节的传递函数。在 MATLAB/Simulink 环境下建立连续喷涂轨迹控制系统模型, 设计了包含 PID 控制器及前馈补偿器的校正环节, 有效提高了系统响应速度并改善了系统对控制信号的跟随性。通过仿真分析, 验证了系统达到了喷涂作业要求。

## 参考文献:

- [1] 汪国平. 船舶涂料与涂装的发展方向 [J]. 船舶工业技术经济信息, 2001, 190(2): 8-17.
- [2] 贺继林, 赵鑫, 张大庆, 等. 新型智能挖掘机自动轨迹控制研究 [J]. 广西大学学报, 2012, 37(2): 259-265.
- [3] 姜鹏鹏. 液压挖掘机工装轨迹自动控制系统的研制 [D]. 哈尔滨: 哈尔滨工业大学, 2006.
- [4] 刘鹏飞. 伸缩臂高空作业车直线轨迹控制研究 [D]. 大连: 大连理工大学, 2012.
- [5] 袁合. 折臂式高空车轨迹规划与控制研究 [D]. 大连: 大连理工大学, 2013.
- [6] 王硕, 李恩, 赵晓光, 等. 伸缩臂高空作业车轨迹跟踪控制方法研究 [J]. 华中科技大学学报(自然科学版), 2011, 39(增 2): 216-219.
- [7] 贺浩. 基于空间避障的冗余度高空作业车轨迹规划 [D]. 大连: 大连理工大学, 2013.
- [8] 刘全政. 伸缩臂高空作业平台轻量化设计及控制系统研究 [D]. 济南: 山东大学, 2012.
- [9] 陈幼平, 马志艳, 袁楚. 六自由度机械手三维运动仿真研究 [J]. 计算机应用研究, 2006(6): 205-207.
- [10] 吴振顺. 液压控制系统 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2008.
- [11] Janusz Krasucki, Andrzej Rostkowski, Lukasz Gozdek. Control strategy of the hybrid drive for vehicle mounted aerial work platform [J]. Automation in Construction (S0926-5805), 2009, 18(2): 130-138.
- [12] Xia Changgao, Zhu Zhongming, Qiu Wenning. PID Control and Simulation of the Automatic Correcting System for Lorry-mounted Crane Telescopic Boom [C]// 2010 International Conference on Intelligent Computation Technology and Automation. United States: IEEE Computer Society, 2010: 905-908.
- [13] 王正, 林王琪. MATLAB/Simulink 与控制系统仿真 [M]. 2 版. 北京: 电子工业出版社, 2008.
- [14] 杨叔子, 杨克冲, 等. 机械工程控制基础 [M]. 武汉: 华中科技大学出版社, 2005.
- [15] Guang Li, Jing Na, Stoten, D.P, Xuemei Ren. Adaptive neural network feedforward control for dynamically substructured systems [J]. Transactions on Control Systems Technology (S1063-6536), 2014, 22(3): 944-954.