内嵌式溢油回收机电液阀控 马达速度变结构控制

杨前明¹,王 伟¹,胡开文¹,董一鸿²

(1. 山东科技大学 机械电子工程学院,山东 青岛 266590;2. 兰州理工大学 计算机与通信学院,甘肃 兰州 730050)

摘 要:针对内嵌式溢油回收机扫油臂端部线速度控制参数不确定性问题,基于变结构控制理论,提出采用饱和函数准滑模变结构控制方法(CSS)来消除参数不确定性对控制系统性能的影响,并采用饱和函数平滑不连续控制法 有效减弱系统中抖动现象。仿真结果表明,采用滑模变结构控制的扫油臂电液阀控马达系统输出速度与位置具有 良好的鲁棒性与跟踪性。

关键词:溢油;回收;机电液阀控马达;切换饱和函数;滑模变结构控制;位置与速度控制

中图分类号:TH122 文献标志码:A 文章编号:1672-3767(2017)02-0115-06

Variable Structure Control of Electro-hydraulic Valve-controlled Motor Speed for Embedded Oil Spill Recovery Equipment

YANG Qianming¹, WANG Wei¹, HU Kaiwen¹, DONG Yihong²

(1. College of Mechanical and Electronic Engineering, Shandong University

of Science and Technology, Qingdao, Shangdong 266590, China;

2. College of Computer and Communication, Lanzhou University of Technology, Lanzhou, Gansu 730050, China)

Abstract: In view of the end linear velocity control parameter uncertainty of the sweep arm of the embedded oil spill recovery machine, a control method of saturation function and quasi-sliding mode variable structure (CSS) was proposed to eliminate the influence of parameter uncertainty on the performance of the control system based on the theory of variable structure control. At the same time, a saturation function smooth discrete control method was adopted to reduce the jitter phenomenon in the system. The simulation results show that the output velocity and position of the electro-hydraulic valve-controlled motor system of the sweep arm adopting the control method of sliding mode variable structure have good robustness and tracking performance.

Key words: spilled oil; recovery; electro-hydraulic valve-controlled motor; switch saturation function quasi-sliding mode; variable structure control; position and velocity control

文献[1-2]以内嵌式溢油回收系统中浮筒与围油栏卷筒线速度同步控制系统为研究对象,提出了以 PLC 为控制核心,分别采用"同等方式"与"主从方式"对扫油臂端部与围油栏卷筒端布放速度进行同步控制,在建 立其速度控制数学模型的基础上,对系统进行仿真分析与实验测试,取得良好的控制效果。内嵌式溢油回收 机本体带动扫油臂摆动布放围油栏时,在海面风力载荷、海浪冲击等复杂气候条件下,扫油臂受载多变,控制 过程中表现出控制参数不确定问题,扫油臂摆动过程中有轻度抖动现象。基于滑模变结构控制理论,对扫油

收稿日期:2016-04-14

基金项目:国家科技支撑计划项目(2012BAC14B05)

作者简介:杨前明(1960—),男,江苏如皋人,教授,博士,主要从事机械电子工程、电液控制技术方面的研究.

王 伟(1985—),男,山东济宁人,硕士研究生,主要从事机械电子工程方面的研究,本文通信作者.

E-mail:116632703@qq. com

山东科技大学 学报 自然科学版

臂电液阀控马达速度采取具有切换饱和函数准滑模变结构控制(CSS)策略,探讨了电液控制系统的稳态性能与鲁棒性。

116

1 围油拦速度同步控制系统

1.1 系统组成及原理

1.1.1 系统工作原理

图 1 所示为围油栏位置-速度同步控制示意图。 围油栏实际布放过程中,为保证具有一定的张紧度, 其展开依靠机身本体马达驱动扫油臂与围油栏卷筒 马达驱动卷筒旋转共同完成。两部分均采用电液阀 控马达-减速机驱动方案,马达经行星减速机减速后 同步转动,通过控制系统对马达速度的控制实现围 油栏牵引端良好的同步性、协调性与可控性。因此 需对扫油臂牵引端浮筒 6 位置处及围油栏卷筒 1 缠 绕端的线速度误差进行设计,考虑到海浪冲击及围 油栏自身的柔性,实际设计过程中需将两端线速度 误差限制在 15~20 mm/s 范围内。

图 2 所示为扫油臂电液比例阀控马达驱动系统 原理图,主要由可编程逻辑控制器(programmable logic controller, PLC)、DA 模块、比例放大器、比例 换向阀、液压马达、速度传感器等组成。

1.1.2 控制原理

给 PLC 设定初始信号值,经由 DA 模块、比例 放大器转化成电流信号驱动比例阀阀芯,阀芯的位 移大小根据驱动电流的大小而变化,从而控制进入 液压马达等器件的流量大小,决定马达的转速。

经速度传感器测得的马达转速反馈到前段与 PLC输出值进行比较,所得的差值用来作为二次控 制信号调节马达的转速。

1.2 数学模型

图 3 所示为控制系统原理框图, $H_1(S)$ 、 $H_2(S)$ 、 $G_1(S)$ 、 $G_2(S)$ 、 $G_3(S)$ 、 $G_4(S)$ 分别代表速度调整因 子、速度传感器、DA 模块、比例放大器、比例换向 阀、马达的传递函数。

在图 3 控制系统方框图中将各传递函数公式代入,得控制系统传递函数框图如图 4 所示。

由图 4 可获得电液比例阀控马达闭环传递函数^[1]:



1---围油栏卷筒;2--导向辊;3--橡胶围油栏;4--扫油臂; 5--机身;6--浮筒;7,10--液压马达;8,11--减速机;9--齿轮副

图1 位置-速度同步控制示意

Fig. 1 Schematic diagram of position-speed synchronization control



图 2 控制系统组成结构原理图

Fig. 2 Structure diagram of control system



图 3 控制系统框图

Fig. 3 The block diagram of transfer function of the system

$$G_{M}(S) = \frac{N(S)}{SV(S) + P(S) \cdot K_{v}} = \frac{K_{d}K_{a}K_{sv}2\pi D_{m}}{(\frac{s^{2}}{w_{sv}^{2}} + \frac{2\zeta_{sv}}{w_{sv}}s + 1)(\frac{s^{2}}{w_{h}^{2}} + \frac{2\zeta_{h}}{w_{h}}s + 1) + K_{z}}$$
(1)

式中 $K_z = \frac{K_d K_a K_{sv} K_f K_v}{2\pi D_m}$ 。

由上式分析知,决定液压马达速度的参数为初始值 SV 以及速度调整因子 K_v。

117

2 饱和函数的准滑模变结构控制(CSS)策略

2.1 CSS 切换滑模层

理想情况下,滑模切换结构无摩擦,系统切换响 应非常快,有足够大的切换频率,近似于无穷大。实 际应用中切换频率有一个上限,且切换有一定响应时 间,滑动运动是逐渐接近稳态。将实际应用中的滑模 结构看作一个滑模层,并将其理解为存在一个极小的 范围,滑模运动在这个范围内来回跳动,并始终有向 平衡点逼近的趋势^[5]。图 5 所示为滑模切换示意图。 理论上,系统控制精度越高,滑模层范围就越小。因 此滑模变结构控制系统的关键是设计满足s≪ε为依 据,且跳变范围 ε 尽可能小的有效控制结构。

图 6 所示为滑模层结构示意图,是根据变结构 理论设计的具有切换饱和函数的准滑模变结构控制。其中 ε₂ 称为"边界层"。饱和函数的本质为:在 边界层外,采用切换控制;在边界层之内,采用线性 化反馈控制。实际设计中采用试误法寻找最大切换 频率加以应用^[6]。

由图 6 分析可知,误差 e 随滑模层厚度增加而 增大。当进入第一滑模层 ϵ_1 时则由误差决定滑模 层 ϵ_1 过渡到 ϵ_2 的时间,从而改善阀控马达系统的稳 态误差。

2.2 具有 CSS 的电液控制系统

图 7 所示为具有切换饱和函数的马达速度准滑 模变结构控制系统框图,图中 $e(k) = \gamma - \theta, \gamma$ 为初始 值, θ 为马达负载角速度值;

系统采用主比例切换滑模变结构控制,该系统为2阶系统。假定液压系统工作压力为P = 6 MPa,控制时间t = 3 s,滑模切换函数表述如下^[5]:

$$S_{c}(e) = \left\{\frac{d}{d_{t}} + \lambda\right\}e + \beta \int_{0}^{t} e dt \quad (2)$$

设计控制输入函数如下:

$$u = k_a \tanh \frac{S_c}{\varepsilon_1}, e > e_c, \qquad (3)$$

$$u = k_a \tanh \frac{S_c}{\varepsilon_1}, e \leqslant e_c \, , \qquad (4)$$

式中: $\frac{d}{d_t}$ 为未知变量函数, β 为积分增益(β >0), λ 为 权衡系数(λ >0), K_a 为伺服放大增益,h为液压马 达等效容积弹性系数。





Fig. 4 The block diagram of transfer function of the system



图 有候机应切换小息图

Fig. 5 Structure diagram of control system



图 6 滑模层结构





图 7 滑模变结构控制系统框图



当系统处于误差范围 e≤e_c 内时,函数从 ε₁ 变化到 ε₂,滑模变结构函数曲线如图 8 所示。



118

3 系统仿真

将滑模变结构控制系统框图导入 Matlab 仿真软件中的 Simulink 软件包,转化成液压系统仿真模型,得到如图 9 所示 控制系统的传递函数框图。将系统的各参数分别代入,表 1 所示为系统仿真初始参量表。

3.1 系统 PID 及滑模变结构整定

3.1.1 阶跃响应

图 10 所示为原型及采用变结构控制与 PID 调节两种策略时获得的系统阶跃响应曲线。图中曲线①为未采用调节环节时原型系统的响应曲线,曲线②为采用 PID 环节校正后的响应曲线,曲线③为采用 CSS 控制时的响应曲线。表 1 给出了图 10 中 PID 与 CSS 调节响应参数表。



图 8 滑模变结构函数曲线

Fig. 8 Sliding mode variable structure function



图 9 系统传递函数框图

Fig. 9 System transfer function block diagram

表1 初始参量表^[1]

Tab. 1 Initial parameter

参量	意 义	取 值	参量	意 义	取 值
K_d	DA 模块增益	1/3 200	$K_c/(\mathrm{A/V})$	比例放大器增益	0.1
$\epsilon_{_{SU}}$	比例阀阻尼比	0.6	$w_{sv}/(\mathrm{rad/s})$	比例阀固有频率	60
$K_q / [m^3 / (S \cdot A)]$	比例阀流量增益	8.67 $\times 10^{-4}$	K_1	动态柔度系数[7]	0.013 6
ε_h	液压阻尼比	7.57	$k_{ce}/[\mathrm{m}^2/(\mathrm{S}\cdot\mathrm{Pa})^2]$	流量压力系数[7]	3. 3×10^{-12}
w_h	液压固有频率	10.55	$J_T/(\mathrm{kg} \cdot \mathrm{m}^2)$	马达转动惯量	20
K_f	传感器增益	39	$D_m/(m^3/rad)$	马达排量	10×10^{-6}
K_v	速度调整因子	60			

综合图 10 响应曲线与表 1 中参数分析可知:

1) 未采用任何调节方法时,原始系统的整个响应过程表现连续震荡特征,采用 PID 调节时,系统经大约 3.5 s 后到达稳定状态,但起初有较大峰值、超调量;

2)采用变结构滑模控制策略调节时系统经大约 2.5 s 达到稳态值,但系统上升与峰值均长于 PID 调节 响应对应时间;系统经过大约 1 s 上升时间后,响应稳定、无震荡,无超调;

3.1.2 伯德特性

图 11 是为系统伯德图,图中曲线①为未采用调节环节时原型系统的伯德图,曲线②为采用 PID 环节校 正后的伯德图,曲线③为采用变结构控制时的伯德图。表 2 给出了 PID 与 CSS 调节时伯德图上的相位裕度 和幅值裕度参数。



Fig. 10 The step response of system

1) 分析图 11 可以看出,原型系统的相位 裕量 K_s = 46.8 dB,幅值裕量 γ = 152°,一般规 定,相位裕量在 30°~60°范围之内,幅值裕量大 于 6 dB 为稳定控制系统,因此原型系统不符合 稳定性要求^[30]。

2)分析表 3 可知,系统经 PID 和 CSS 整定后,幅值裕度与相位裕度均有显著提升,且后者优于前者,K_g与γ均具有较宽裕量,说明系统具有良好的稳定性。

3.1.3 CSS 控制与鲁棒性

在系统参数不变的情况下,对比例阀控马 达系统加入 50 N·m的力矩干扰^[4]。图 12 与 图 13 分别为加入力矩干扰后,控制系统 PID 与 CSS 整定后响应曲线。图中曲线①和②分 别为初始状态以及加入外干扰后的系统仿真 曲线。

比较分析图 12 与图 13 可以看出,在有外 力矩干扰的情况下,PID 控制下的系统虽然最 终也到达稳态,但所用时间明显变长,震荡幅值 也加大。采用 CSS 控制策略时,系统到达稳态 的时间与未加干扰时相比变化不大,且具有较 理想的过渡过程,表现出良好的鲁棒性。机身 本体以及围油栏卷筒均采用电液阀控马达-减

表 2 PID	与 CSS	调节	向应	参数表	表
---------	-------	----	----	-----	---

Tab. 2 PID and CSS adjustment response parameter

响应参数	PID	CSS
上升时间 Tr/s	0.4	1.6
峰值时间 Tp/s	0.9	2.2
调整时间 Ts/s	2.5	1.5
超调量 $M_{\nu}/\%$	0.9	0



图 11 系统 Bode 图对比



表 3 PID 与 CSS 调节伯德参数表

Tab. 3 PID and CSS adjustment Bode parameter

Bode 参数	PID	CSS
K_g/dB	32.6	39.2
$\gamma/(^{\circ})$	32	53

速机驱动方案,CSS 控制策略下表现出良好的鲁棒性,围油栏两端线速度误差维持在设计值的 15~20 mm/s 范围内,布放时具有合理的张紧度。

119



4 结论

建立了溢油回收机电液马达速度控制系统数学模型,针对其控制系统参数的不确定性,提出运用具有饱和函数的准滑模变结构控制技术(CSS)对系统进行调节控制;实验仿真结果表明,采用 CSS 控制策略,电液 阀控马达系统表具有响应快、稳定性好与良好的鲁棒性等特点。

参考文献:

- [1]杨前明,孔令奇,李健,等. 电液比例马达速度同步控制系统建模与仿真[J]. 工程设计学报,2015,22(4):330-336. YANG Qianming,KONG Lingqi,LI Jian, et al. Modeling and simulation of synchronous speed control system about electrichydraulic proportional motor[J]. Chinese Journal of Engineering Design,2015,22(4):330-336.
- [2]杨前明,李健,孔令奇. 海面溢油回收机双马达速度闭环同步控制实现方法研究[J]. 机床与液压,2015,43(19):105-108. YANG Qianming,LI Jian,KONG Lingqi. Research of realization method of double motor speed closed-loop synchronization control of oil spill recovery machine[J]. Machine Tool & Hydraulics,2015,43(19):105-108.
- [3]姚琼荟,黄继起,吴汉松.变结构控制系统[M].重庆:重庆大学出版社,1997:25-40.
- [4]王秀君,裘丽华. 电液伺服系统的变结构控制研究[J]. 机床与液压,2003(5):125-126.
 WANG Xiujun,QIU Lihua. Research on variable structure control of electro hydraulic servo system[J]. Machine Tool & Hydraulics,2003(5):125-126.
- [5]胡盘峰,刘光新. 电液伺服系统的切换饱和函数滑模变结构控制[J]. 上海第二工业大学学报,2010,27(1):48-53. HU Panfeng,LIU Guangxin. Change saturation function for sliding mode variable structure control in the electro-hydraulic servo system[J]. Journal of Shanghai Second Polytechnic University,2010,27(1):48-53.
- [6]高为炳. 变结构控制理论基础[M]. 北京:中国科学技术出版社,1990:114-120.
- [7]刘金坤. 滑模变结构控制 Matlab 仿真[M]. 北京:清华大学出版社,2005:18-31.
- [8] ABDELFATAH N, GASBAOUIB, FAYSSALB. Sliding mode control for four wheels electric vehicle drive[J]. Procedia Technology, 2016, 22:518-526.
- [9]ZHENG B C, JU H P. Adaptive integral sliding mode control with bounded L₂ gain performance of uncertain quantised control systems[J]. IET Control Theory & Applications, 2015, 9(15):2273-2282.
- [10]董彩云,王海军,吴玉娟. 滑模变结构控制在电液伺服控制系统中的应用综述[J]. 流体传动与控制,2015(4):1-3. DONG Caiyun,WANG Haijun,WU Yujuan. Application of sliding mode variable structure control in electro-hydraulic servo system[J]. Fluid Power Transmission and Control,2015(4):1-3.