

文章编号:1674-2869(2011)06-0107-04

液压挖掘机工作臂的自适应控制

郑明辉<sup>1</sup>, 江吉彬<sup>1</sup>, 郭 熾<sup>2</sup>

(1. 福建工程学院机电及自动化工程系, 福建 福州 350108;  
2. 泊姆克(天津)液压有限公司, 天津 300461)

**摘 要:**讨论了应用自适应控制对液压挖掘机工作臂位置进行控制,采用自适应控制设计挖掘机工作臂的位置控制器,克服了在工程机械车辆中存在的只通过简化计算而得到的数学模型与实际控制对象不符的问题,并在 Simulink 环境下对液压挖掘机工作臂的迹线控制进行了仿真试验研究. 仿真运算,证实了方法的有效性,建立了与工作臂实际位置相符的数学模型,保证系统平稳地沿希望迹线运行.

**关键词:**液压挖掘机;工作臂;运动迹线;自适应控制

**中图分类号:** TV137.7      **文献标识码:** A      **doi:** 10. 3969/j. issn. 1674-2869. 2011. 06. 025

0 引言

工程机械车辆如液压挖掘机具有经济性的优点,被广泛地应用于建筑、筑路、水利、采矿及军事工程中,完成各种工程施工大部分的土石方量。由于液压挖掘机的执行机构如动臂、斗杆、铲斗等在实际工作中存在的复杂工况,要在正常的工作速度中一致地保持动作的精度,即非线性、动态性能不对称性等,则要求工作者能够做到步调一致地控制动臂、斗杆及铲斗的执行机构。目前,液压挖掘机工作臂控制系统中存在着数学模型因通过简化的计算而出现了与实际对象不完全相符的问题。对这样的复杂系统的控制性能要求较高,需要在系统中进行智能控制,如自适应控制、模糊控制、滑模控制等,进行智能管理,这样就可以做到不依靠高精度的数学模型。在液压挖掘机中,因参数和负载变化严重干扰其控制系统,在执行机构中应用自适应控制,可以实现仅根据负载和工况的不断变化,自动调整系统的控制参数。

1 铰接式反铲液压挖掘机

铰接式反铲是液压挖掘机中常用的结构型式,即动臂、斗杆及铲斗彼此铰接,在执行机构液压缸的作用下,各部件绕铰点摆动,完成动臂挖掘、斗杆提升、铲斗卸土等主要功能运动。如图 1,反铲式挖掘机工作装置模型。在挖掘机执行机构动作过程中,要考虑以下几点,首先是动臂向下运

动时,要使斗杆和铲斗调整至准确位置,并进行下一步的挖掘动作;动臂向上运动时,通过挖掘机的回转装置,使工作臂运动至卸土位置,控制斗杆和铲斗配合动作,进行卸土。液压挖掘机的工况变化很大,如工作对象和环境条件的不断改变,使工作负载与工作速度频繁随之改变,这就要求主机在进行各种主要工作过程时,作为执行机构的液压缸和液压马达具有稳定的压力和流量特性;其次,要求工作臂在动作过程中要同时有两个主要动作进行组合动作,使得发动机功率充分利用,并缩短了作业的循环时间,如图 1,  $F$  是动臂与斗杆的铰点,  $|FV|$  是指斗齿尖  $V$  至  $F$  的距离,铲斗的动作是以  $F$  点为中心,控制斗杆动作的液压缸在工作时,以  $|FV|$  为半径形成的包络弧线,包络弧线的长度与包络角决定了斗杆液压缸的行程。当挖掘机的动臂位于下端极限位置时,挖掘深度和挖掘行程达到最大<sup>[1]</sup>。

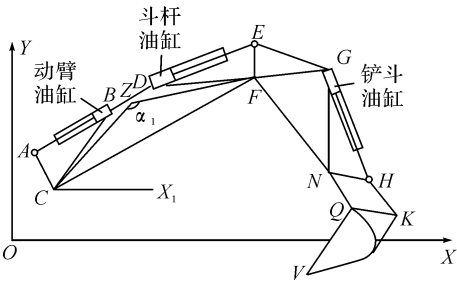


图 1 反铲式挖掘机工作装置模型  
Fig. 1 Backhoe excavator model

2 自适应控制理论

如图 2 所示,自适应控制系统是在反馈控制的基础之上增加一个理想模型和参数自适应调制功能.其中  $y_m(t)$  表示系统理想的动态特性,即用理想模型的输出表示对系统的性能要求.当原始输入  $N(t)$  同时加到控制对象和理想模型输入端时,由于控制对象的初始参数不确定,或未知状态,控制器的初始参数不能理想调节,使控制对象输出  $y(t)$  与理想模型的输出  $y_m(t)$  进行比较,产生自适应控制误差  $e(t)$ , $e(t)$  通过自适应机构,根据自适应规律运算,产生反馈作用去修正自适应控制调制器参数,产生新的输入信号  $R(t)$  控制控制对象.从而使控制系统的输出  $y(t)$  渐近一致地跟随理想模型的输出  $y_m(t)$ ,直到  $y(t)=y_m(t)$ ,即自适应控制误差  $e(t)=0$  为止.液压挖掘机工作臂控制系统的设计,需综合自适应控制调节规律,着重于系统的误差方程,确定系统参数调节规律,给出使自适应控制系统输出误差为零的控制系统的控制输入<sup>[2-4]</sup>,如图 2 所示.

图 2 中,自适应控制器的任务是动态的确定控制输入  $R(t)$ ,使控制对象的输出  $y(t)$  渐近一致的跟随理想模型的理想输出  $y_m(t)$ .为了导出参数调节规律及自适应控制规律,设定存在小于  $n-1$  阶的多项式  $S(p)$ ,且满足式(1).

$$A_m(p)=A(p)+S(p)$$

(1)

式(1)中  $A(p)$  和  $S(p)$  皆为未知量.由自适应误差计算式  $e(t)=y(t)-y_m(t)$ ,可得式(2).

$$A_m(p)e(t)=A_m(p)[y(t)-y_m(t)]=$$

$$bB(p)u(t)+S(p)y(t)-B_m(p)u_m(t)$$

(2)

式(2)中,被控对象  $A(p)y(t)=bB(p)u(t)$ ,理想模型  $A_m(p)y_m(t)=B_m(p)u_m(t)$ . $b$  为常量.

引入  $m$  阶稳定多项式  $H(p)$  可得式(3).

$$e(t)=$$

$$\frac{H(p)}{A_m(p)}b\left\{u(t)+\frac{B(p)-H(p)}{H(p)}u(t)+\right.$$

$$\left.\frac{1}{b}\frac{S(p)}{H(p)}y(t)-\frac{1}{b}\frac{B_m(p)}{H(p)}u_m(t)\right\}$$

(3)

选择  $n-m-1$  阶多项式  $D(p)$  使  $H(p)D(p)/A_m(p)$  为严格正实函数,由于式(4)成立,则式(3)可另写成式(5). $p$  为微分算子.

$$\begin{cases} G(p)=H(p)D(p) \\ e_m(t)=D(p)e(t) \end{cases}$$

(4)

$$e_m(t)=\frac{G(p)}{A_m(p)}b\left\{u(t)+\frac{B(p)-H(p)}{H(p)}u(t)+\right.$$

$$\left.\frac{1}{b}\frac{S(p)}{H(p)}y(t)-\frac{1}{b}\frac{B_m(p)}{H(p)}u_m(t)\right\}$$

(5)

式(5)为理想模型的自适应控制基本误差方程, $\frac{G(p)}{A_m(p)}$  为严格正实.引进状态变量滤波器,根据平衡点稳定定理,可以证明式(6)成立.

$$\lim_{t \rightarrow \infty} e(t)=0$$

(6)

由于  $D(p)e(t)=e_m(t)$ ,其中  $D(p)$  为稳定多项式,因此可证式(7)成立,则构成自适应控制系统.

$$\lim_{t \rightarrow \infty} e_m(t)=\lim_{t \rightarrow \infty} D(p)e(t)=0$$

(7)

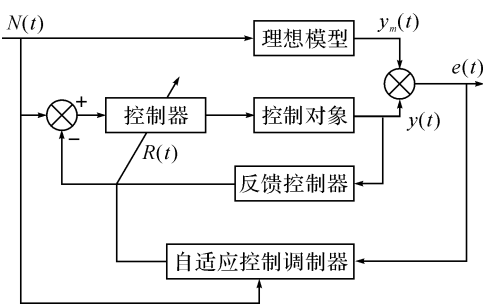


图 2 自适应控制系统

Fig. 2 Adaptive control system

3 自适应控制器设计

在 MATLAB/Simulink 中建立了液压挖掘机的位置控制系统的闭环响应仿真模型<sup>[8]</sup>,其模型如图 3 所示.

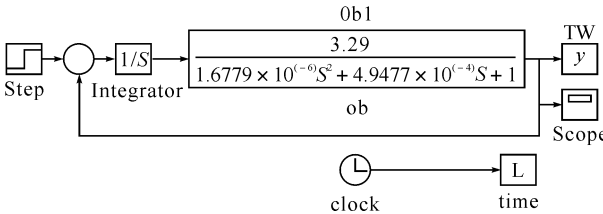


图 3 位置控制系统模型

Fig. 3 The model of Position control system

本文采用文献[5-7]的理想模型  $G_m(s)$  作为理想模型,如式(8)所示.仿真结果表明:时域特性曲线较为理想,第一次到达稳态值时间小于 0.1 s,过渡过程光滑平稳且没有出现超调.

$$G_m(s)=\frac{B_m(p)}{A_m(p)}=\frac{K_m\omega_r\omega_m^2}{(s+\omega_r)(s+2z_m\omega_ms+\omega_m^2)}=$$

$$\frac{600000}{s^3+200s^2+18400s+600000}$$

(8)

由液压控制系统即控制对象的闭环传递函数可知,为了能够使该系统在李亚普洛夫函数意义上达到稳定,令  $m$  阶稳定多项式  $H(p)=1$ ,取  $n-m-1$  阶多项式  $D(p)=p^2+140p+10\ 000$ , $p$  为微分算子,可得式(9),式(9)为严格正实函数.

$$\frac{D(p)H(p)}{A_m(p)}=\frac{G(p)}{A_m(p)}=\frac{1}{p+\omega}=\frac{1}{p+60}$$

(9)

现令系统控制误差为  $e_m(t)=y_p(t)-y_m(t)$ ,为了使算法容易实现,取广义输出误差如式(10)所

示,式(11)为理想模型的自适应控制基本误差方程.

$$e_m(t)=D(p)e(t)=\ddot{y}_p(t)-\ddot{y}_m(t)+140[\ddot{y}_p(t)-\ddot{y}_m(t)]+10\,000[y_p(t)-y_m(t)]\tag{10}$$

自适应控制器输入信号如式(11)所示,变换后,控制对象新的输入信号如式(12)所示.

$$k_i(t)=-\int_0^\infty \tau_i x_i(t) e_d(t) dt$$

$(\tau_i=100>0,i=1,2,\cdots,4)\tag{11}$

$$R(t)=\sum_{i=1}^4 k_i(t) x_i(t)\tag{12}$$

为了方便分析和建立仿真模型,对传递函数进行拉氏反变换,便可以得到伺服系统和理想模型微分方程分别如式(13)、式(14)和式(15)所示,从而可得控制系统及理想模型的加速度、速度、及位移方程式.

$$\ddot{y}_p(t)+295\dot{\ddot{y}}_p(t)+595980\dot{y}_p(t)+1960800y_p(t)=1\,960\,800u\tag{13}$$

$$\ddot{y}_p(t)+2042\dot{\ddot{y}}_p(t)+1571000\dot{y}_p(t)=1\,571\,000u\tag{14}$$

$$\ddot{y}_p(t)+200\dot{\ddot{y}}_p(t)+18400\dot{y}_p(t)+600\,000y_p(t)=600\,000u\tag{15}$$

根据液压挖掘机工作臂实际工作过程的相关参数,在 MATLAB/Simulink 中建立自适应控制系统的仿真模型对液压系统的动态性能进行仿真分析<sup>[8-9]</sup>,仿真结果表明:如果干扰信号发生变化,如负载则控制系统的响应也会发生相应的变化,如工作臂的工作位置改变,并可能导致反馈系统变化而带来适应干扰信号的变化,因而所设计的系统具有较好的动态性能.

4 仿真算例

以阶跃和正弦等信号作为输入,挖掘机工作臂的液压缸正向和反向运动结果如图 4 所示,理解迹线和实际运动迹线是极其接近的,由仿真结果可知正反运动响应曲线几乎完全重合. 比较自适应控制和普通的 PD 控制,如图 5 所示,(a)为改变放大系数,(b)为改变阻尼比,自适应控制在对系统参数变化的适应能力上大大优于普通的 PD 控制,具有很高的参数适应性和良好的跟随精度,液压控制系统的输出渐进一致地收敛于理解模型的输出,系统的动态性能满足预期要求,并寻求最优参数有效改善系统性能,提高动态特性,减小随机干扰的影响,保证系统无超调、平稳地沿希望迹线运行,数学模型与被控对象相符,能够减小由于建模不精确对控制精度的影响,同时解决液压挖掘机工作装置液压缸正反向运动的不对称性问

题,如图 5 所示.

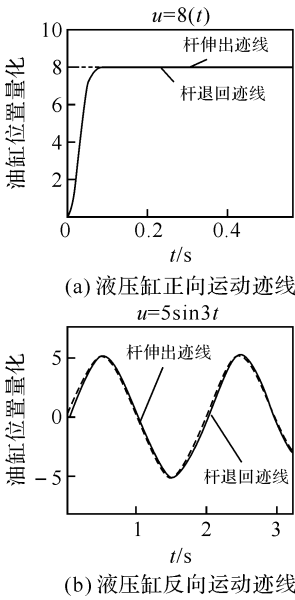


图 4 挖掘机工作臂液压缸正反向运动理想迹线与实际运动迹线

Fig. 4 Excavator arm cylinder forward movement and actual movement expected trace trace  
注:理想迹线·····;杆伸出迹线——;杆退回迹线——

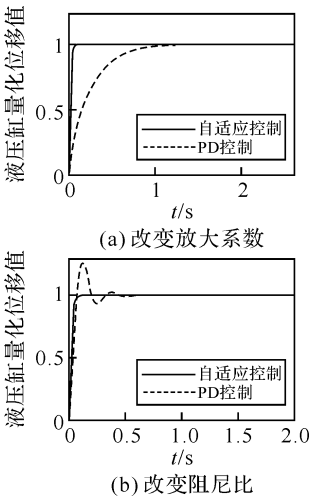


图 5 自适应控制与 PD 控制参数适应性能的比较  
Fig. 5 Adaptive control and PD control parameters to adapt to compare the performance

5 结 语

上述设计的自适应控制消除了液压挖掘机工作装置位置输出的不对称性,能够达到很好的控制效果,与 PD 控制系统相比,对控制对象的变化不敏感,参数适应能力很强,而且在随机信号干扰下能保持稳定的输出,有着一定的抗扰能力. 这种基于控制理论的动态设计方法具有较大的实际应用价值,能够在挖掘机、装载机等工程机械车辆发挥作用.

参考文献:

[1] 许福玲,陈尧明. 液压与气压传动(第 2 版)[M]. 北京:机械工业出版社,2004.

[2] 李永堂. 液压系统建模与仿真[M]. 北京:冶金工业出版社,2003.

[3] 刘忠. 液压传动与控制实用技术[M]. 北京:北京大学工业出版社,2009.

[4] 杨叔子. 机械工程控制基础(第五版)[M]. 武汉:华中科技大学出版社,2005.

[5] 高钦和. 基于 Simulink 的重物举升液压控制系统建

模与仿真[J]. 机床与液压,2001(1):61-62.

[6] 吴振顺. 基于 Simulink 图型模态液压自适应控制的实现[J]. 计算机仿真,2007(5):134-137.

[7] 吴振顺. 基于误差多项式的模型参考自适应控制在阀控非对称缸系统中的应用[J]. 机械工程学报,2006(8):56-59.

[8] 韩虎. 基于 MATLAB 液压系统的仿真技术研究与应用[J]. 液压气动与密封,2007(3):4-6.

[9] 熊大为. BP 网络在感应电机逆系统中的模拟与仿真[J]. 武汉工程大学学报,2010,31(5):91-93.

Adeptive control of hydraulic pressure excavator work arm's position

ZHENG Ming-hui<sup>1</sup>,JIANG Ji-bin<sup>1</sup>,GUO Biao<sup>2</sup>

(1. Electromechanical and Automation Engineering Department,Fujian University of Technology,Fuzhou 350108, China;  
2. Permco(Tian Jin) Hydraulic INC, LTD, Tianjin 300461, China)

**Abstract:** This article discusses the application of adaptive control of hydraulic excavator arm position control,adaptive control design of the excavator arm position controller,vehicles in the construction machinery to overcome the existing calculation is only obtained by simplifying the mathematical model does not match with the actual problem of the control object. In the Simulink environment on the hydraulic excavator arm control system simulation,simulation operation,which confirmed the validity of the method,and Established in line with the working arm of the mathematical model of the actual location,ensure the system stabling and running along the trace of hope.

**Key words:** hydraulic pressure excavator;work arm;movement pathline;adaptive control

本文编辑:陈小平

☆

(上接第 29 页)

Reactions of tandem substituent and rearrangement in organophosphor chemistry

LI Jian<sup>1</sup>, BI Ya-fan<sup>2</sup>, LIU Zhang-wei<sup>1</sup>

(1. School of Chemical Engineering and Pharmacy, Wuhan Institute of Technology, Wuhan 430074, China;  
2. School of Enhvironmental and Civil Engineering, Wuhan Institute of Technology, Wuhan 430074, China)

**Abstract:** Reactions of tandem substituent and rearrangement is a concurrent reaction which is not only substitution reaction but also isomerization reaction in intramolecular of phosphorus compounds. It is a new method constructing carbon—phosphorous bond and developing new organic compounds and promoting synthetic methods. What is more, the reactions could improve the selectivity of traditional organic reactions and atom utilization, etc. This article summarizes research on explaining the definition and mechanism of tandem and rearrangement reaction. At last, we reviewed tandem and rearrangement reaction in the carbon-phosphorous bond formation and its extension in the Suzuki reaction and the Mitsunobu reaction.

**Key words:** substituent and rearrangement; carbon-phosphorous bond; Suzuki reaction; mitsunobu reaction; application

本文编辑:张瑞