

前馈PID控制器在钻柱运动补偿系统中的应用

张文凡¹, 廖 辉²

- (1. 广州工程技术职业学院 机电工程系, 广东 广州 510075;
2. 广东石油化工学院 机电工程学院, 广东 茂名 525000)

摘要: 针对“深海钻柱运动补偿系统负载大时, 钻柱运动补偿系统响应的时间长, 使得补偿系统在控制过程中出现滞后、反馈补偿出现振荡”等问题, 设计了钻柱运动补偿系统中的前馈PID控制器。根据对负载变化趋势的预测结果, 采取前馈补偿的方法来减小补偿系统负载变化对钻压产生的影响, 提高了系统的响应速度; 同时, 引入PID反馈控制消除补偿系统在前馈控制过程中产生的误差, 提高了系统跟踪补偿的精度。研究表明, 该方法对于大惯性负载的运动补偿装置控制器的设计具有一定的借鉴意义和实用价值。

关键词: 阀控缸系统; 负载流量; 校正环节; 流量特性

中图分类号: TH137; TH39

文献标志码: A

文章编号: 1001-4551(2012)04-0417-04

Application of feedforward PID control in deep-sea drill string motion compensation system

ZHANG Wen-fan¹, LIAO Hui²

- (1. Department of Mechatronics Engineering, Guangzhou Institute of Technology, Guangzhou 510075, China;
2. Mechanical and Electrical Engineering Faculty, Guangdong University of Petrochemical Technology, Maoming 525000, China)

Abstract: Aiming at the problem that load of drill string motion compensation system is very heavy in deep-sea, which will take a long response time of system, and the process of compensation movement occurred delaying and oscillating, the feedward PID controller of drill string motion compensation system was put forward, on the basis of the forecast output of the trend of load, a feed forward compensation control method was used to reduce the effects of the chagement of the load, improve the respons time of system. Meanwhile, a PID feed back control method was used to reduce the errors which caused by others reason, improve the control accuration of the system. The research results show that this method has some guidance and practical value to the design of controller of high inertia loads of motion compensation device in deep-sea.

Key words: valve controlling cylinder system; load flow; calibration link; flow characteristics

0 引 言

利用浮式钻井平台在海上进行钻井作业时, 受海浪的影响, 作业平台会产生升沉等六自由度的运动, 使钻井作业系统也随平台一起运动^[1]。为保证钻井作业的正常进行, 必须在作业装置和作业平台间安装运动补偿器, 使钻井系统保持相对稳定的钻压, 这些运动补偿装置通常采用液压系统来实现。对这些补偿装置进行控制时, 有多种控制器可以选择^[2]。由于在海洋钻

井作业中, 负载的变化对钻井系统的性能影响最大, 如补偿器负载变化较大时, 会导致补偿系统供油不足, 使钻柱的运动补偿达不到要求的精度。

为了保持钻压稳定, 补偿装置要求能够对输入信号快速响应并运动到相应的位置。针对这种跟踪运动系统, 不少专家和学者用反馈控制的方法对系统的流量进行补偿, 实现对系统位移的跟踪控制。由于反馈控制是属于误差出现后才进行补偿的一种控制, 当误差较大时补偿系统会出现剧烈的振动。因此, 针对这

种情况,可以采取前馈PID控制,对负载的变化进行补偿控制,消除负载对系统的影响。

钻柱运动补偿系统是一个非线性控制系统^[3-4],不容易进行线性运动控制。如果利用PID控制器对系统进行反馈控制,当负载变化较大时,要对PID的参数进行调整才能达到补偿的要求,因此负载的变化会影响阀控缸系统的运动控制效果。要使系统的跟踪运动不受负载的影响,要对系统的流量输出进行前馈补偿,使系统输出流量与控制电流成线性关系,避免PID控制系统参数的调整,实现计算机对位移输出的精确控制。

本研究主要探讨前馈PID控制器在钻柱运动补偿系统中的应用研究。

1 钻柱运动补偿系统的原理

深海钻柱运动补偿系统是一个典型的电液比例阀控缸液压系统,由液压补偿缸、电液比例方向阀、位移传感器、工控机等构成,系统原理及实验平台如图1、图2所示。

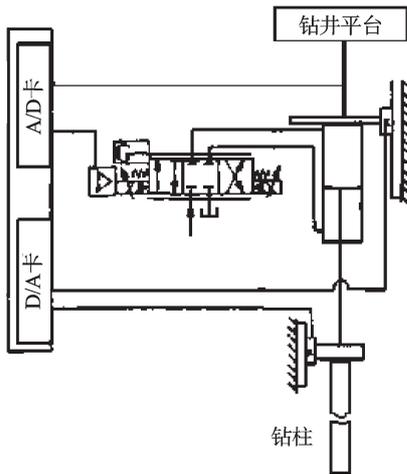


图1 钻柱运动补偿系统原理

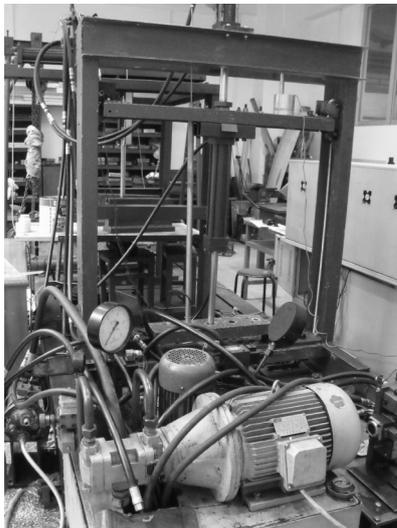


图2 钻柱运动补偿系统实验平台

位移传感器用来检测钻柱的运动位移,当钻柱与实际位移出现偏差时,位移传感器通过A/D卡传到工控机,工控机根据偏差按照一定控制方法输出相应控制信号,经过电液比例阀控制器将信号放大后控制阀开口的大小,使液压缸的活塞杆运动到相应的位移,从而实现钻柱的位移运动补偿。

2 控制系统的数学模型

运动补偿系统的动力机构由液压缸、阀以及油液等组成。在比例阀控制液压缸使活塞杆输出动力的过程中,作用在活塞杆的负载是影响流量输出最主要的原因。因此,本研究对补偿系统的阀控缸动力机构进行建模,得到阀控液压缸系统的整体流量方程,从而可以利用计算机对系统进行控制。

2.1 阀的流量方程

为了提高补偿精度,运动补偿系统所用的阀是比例方向阀,比例方向阀可以根据电压的大小按比例打开阀芯开口,输入液压油。当阀芯的有效位移为 x_v ,阀芯运动控制腔输出压力为 p_L ,则阀的流量方程为^[5]:

$$Q_L = K_q x_v - K_c p_L \quad (1)$$

式中: K_q 、 K_c —阀的流量增益和流量压力系数。

且:

$$K_q = C_d w \sqrt{\frac{1}{\rho} (p_s - p_L)} \quad (2)$$

$$K_c = \frac{C_d w x_v \sqrt{\frac{1}{\rho} (p_s - p_L)}}{2(p_s - p_L)} \quad (3)$$

式中: C_d —阀节流口的节流系数, w —阀节流口的面积梯度, ρ —油液密度, p_s —系统供油压力。

将式(2,3)代入式(1),得:

$$Q_L = K_q' x_v \sqrt{1 - \frac{p_L}{p_s}} \quad (4)$$

其中:

$$K_q' = C_d w \sqrt{\frac{p_s}{\rho}} \cdot \left[1 - \frac{p_L}{2(p_s - p_L)} \right]$$

2.2 液压缸的连续性方程

当考虑缸的泄漏以及由于泄漏引起的系统附加流量 Q_{ld} ,缸的流量连续性方程为:

$$Q_L = A \frac{dy}{dt} + C_l p_L + \frac{V_t}{4\beta_e} \frac{dp_L}{dt} + Q_{ld} \quad (5)$$

式中: A —缸的有效工作面积, y —缸活塞杆的位移, C_l —缸的泄漏系数, V_t 、 β_e —油腔的容积和弹性模量。

2.3 液压缸活塞的力平衡方程

本研究对液压缸活塞力的平衡进行建模时,考虑

到液压缸活塞是在负载、系统摩擦阻力等作用下保持力的平衡,可以用下式来表示:

$$Ap_L = m \frac{d^2 y}{dt^2} + B_c \frac{dy}{dt} + mg \quad (6)$$

式中: m — 活塞及负载的总质量, B_c — 液压缸的摩擦系数。

本研究对式(2,3)进行拉氏变换后,得:

$$Q_L = AsY - \left(C_{ic} + \frac{V_l}{4\beta_e} s \right) p_L \quad (7)$$

$$Y = \frac{p_L A - mg}{ms^2 + B_c s + K} \quad (8)$$

3 控制系统的设计

由于负载是阀控液压缸系统流量输出最重要的影响因素,当负载变化时,系统的流量输出也随着改变。如果将负载的变化输入系统中,就可以通过加入所设计校正环节来消除负载对输出流量的影响,因此,需要考虑系统电控器和阀芯位移运动的运动特性。

3.1 电流与阀芯位移的关系

不同比例方向阀的放大器及阀前置级有不同的响应特性,有的响应比较快,但在实际的应用中,换向时可能会产生较大的冲击,因而很多比例换向阀的电控中都有一个斜坡发生器,以延长比例换向阀的换向时间,从而得到较好的换向效果。因此,电控器的响应特性可简化为:

$$K_1 / (T_v s + 1) \quad (9)$$

式中: T_v — 响应的时间常数; K_1 — 放大系数。

本研究设其传递函数为 W_s , 则有:

$$W_s = \frac{x_v}{i} = \frac{K_1}{T_v s + 1} \quad (10)$$

将式(10)代入式(4),得到以电流为输入、流量为输出的传递函数为:

$$Q_L = K_q' \sqrt{1 - \frac{p_L}{p_s}} \cdot \frac{K_1}{T_v s + 1} i \quad (11)$$

由于放大器的响应时间常数 T_v 非常小,一般为 0.012 s, 因此在实际应用中可不考虑放大器对系统的影响。但从式(11)中可看出,系统输入电流一定时,当负载发生变化,系统的输出流量也产生变化,并且这种变化是非线性的,如果要求输出较精确的流量时,这种非线性控制系统的是比较难实现的。在实际的控制中,如果能够使系统输出流量与输入电流成正比,将会使系统容易控制得多。实际上,系统输出流量的大小可表明系统刚度特性,当负载较大时,如果输出的流量不发生变化,则表明系统的刚度提高了。假设系统得

到了补偿,输出流量与输入电流之间存在以下关系:

$$Q_L = K_i \cdot i \quad (12)$$

式中: K_i — 输入电流与输出流量的比例常数。

由式(4,12)可得:

$$\frac{x_v}{i} = \frac{K_i}{K_q' \sqrt{1 - \frac{p_L}{p_s}}} \quad (13)$$

式(13)表明了系统的输入电流与阀芯位移的关系情况,从上式可以看出,由于负载压力的变化会改变输入电流与阀芯位移的关系,并且这种变化关系不是线性的,需要设计一校正环节使得这种线性关系成立。

3.2 前馈控制的流量补偿

由阀的连续性方程式(4)可得阀芯位移到流量的传递函数:

$$W_V = \frac{Q_L}{x_v} = K_q' \sqrt{1 - \frac{p_L}{p_s}} \quad (14)$$

式(14)的阀芯位移到流量方程仍与负载大小有关,在设计校正环节的时候,可设校正环节为 W_c 和 W_c' [6], 且 $W_c \cdot W_c' \approx 1$ 时,因此所加入的校正环节并不影响阀控缸系统本身的平衡,此时 $W_c \cdot W_c'$ 的传递函数可写为一阶微分环节 $T_v s + 1$, 为使系统负载不对系统产生影响,使得:

$$W_c = \frac{x_v}{i} = \frac{K_i}{K_q' \sqrt{1 - \frac{p_L}{p_s}}} \quad (15)$$

由式(14,15)可得:

$$\frac{Q_L}{i} = K_i \quad (16)$$

由式(7,8,14,15)可得以流量为输入,活塞位移为输出的方程:

$$G(s) = \frac{y}{Q_L} = \frac{1}{As - \frac{1}{A} \left(C_{ic} + \frac{V}{4\beta_e} \right) (ms^2 + B_c s + mg)} \quad (17)$$

4 前馈PID控制的流量补偿

在系统中加入前馈控制器只对负载的变化产生作用,而其他环节的变化也可能引起活塞运动速度的误差。因此,加入校正环节对负载变化进行补偿后,本研究在系统中加入一个PID闭环控制,可以进一步减小由其他因素引起的误差。加入PID控制器的系统如图3所示。

从图3中可看出,当测量到补偿系统需要补偿的位移信号为 r 时,系统输入一个运动补偿的位移信号,经过补偿后系统的输出为液压补偿缸活塞运动位移。位移误差信号的输入经过PID控制器转化为电流后,以线性的方式进一步转化为流量输出,然后通过流量

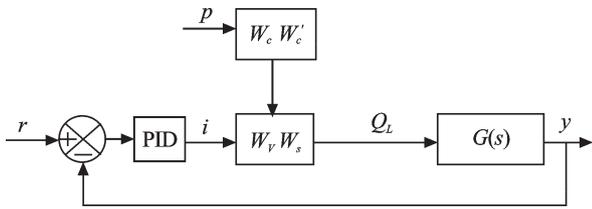


图3 系统前馈PID控制方框图

控制位移的输出。因此,经过前馈控制消除了负载对位移输出的影响,并简化了系统输出的控制,使阀控液压系统易于控制。

5 实验与仿真

为了验证上述阀控液压缸控制方法的有效性,本研究取负载为65 kg时对系统进行仿真和实验研究。仿真和实验中采用力士乐公司4WRAE6E1-15型电液比例阀,该阀的流量系数和面积梯度分别为0.7和0.057 83,液压缸的缸径和杆径为50 mm和35 mm,系统的供油压力 $P_s=5$ MPa,背压力 $P_b=0.5$ MPa,液压缸的动摩擦阻力为300 N,负载质量为50 kg,可得到以流量为输入、活塞位移为输出的方程:

$$G(s) = -\frac{714.29}{s^2 + 0.001s + 10} \quad (18)$$

利用Matlab/Simulink软件可对补偿系统进行仿真,为实现对负载流量的补偿,该系统引入了 W_c 和 W'_c ,使系统实现不受负载影响对流量进行控制,设控制系统的传递函数为 $G(s)$,则 W'_c 可设计为 $W'_c = -1/G(s)$;仿真时PID参数为: $K_p=250, K_i=20, K_d=0.12$ 。

系统的仿真和实验结果如图4、图5所示(曲线1和曲线2分别是系统位移输入信号和跟踪信号)。从图中可以看出,系统能够有效地跟踪输入的位移信号,仿真和实验结果证明了前馈PID对系统跟踪控制的有效性。由于在实验时存在较多的影响因素,如油液的泄漏、液压缸的摩擦等,实验比仿真结果的误差大。

实际上,在负载变化较小的条件下,前馈PID控制很难体现出其对系统控制的优越性,因为PID控制器

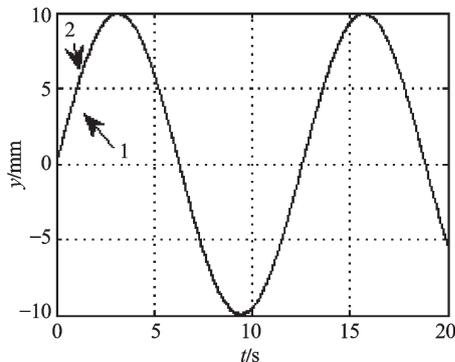


图4 仿真曲线

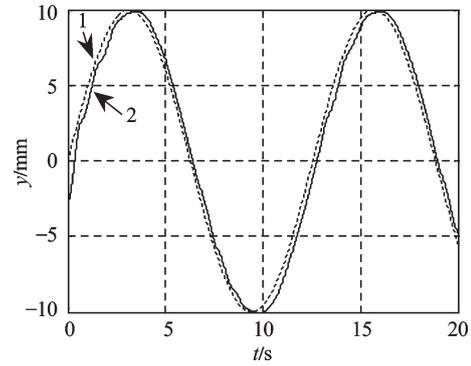


图5 实验曲线

能够适应一定范围的系统参数的调整,系统负载变化较大时才能体现出前馈PID控制器对系统负载变化控制的优越性。

6 结束语

在深海钻井作业的条件下,补偿系统负载容易发生变化,在补偿系统中加入前馈校正环节,预先对补偿系统负载的变化作出预测,并根据系统负载的变化实现对流量的线性补偿,减小了比例阀动态特性对系统性能的影响,使系统的流量输出与控制电流成比例关系。补偿系统的仿真和实验结果都表明,在前馈校正环节中加入PID控制器来消除其他因素对系统的影响,使运动补偿系统达到较高的控制精度,可满足深海钻柱运动补偿的需要。

实际上,本研究所设计的前馈PID控制器需要对钻井平台的运动进行预测,才能达到比较有效的控制结果,因此,对补偿系统进行前馈PID控制时,准确地预测平台的运动情况对补偿的结果有较大的影响。

参考文献(References):

- [1] 肖体兵,吴百海,龙建军,等. 深海作业装置轻载主动型多维运动补偿器的研究[J]. 机床与液压, 2008, 36(9): 198-200.
- [2] 廖辉,吴百海,肖体兵. 海洋钻柱运动补偿自适应模糊滑模控制的实现[J]. 华中科技大学学报:自然科学版, 2010, 38(7): 122-125.
- [3] 肖体兵,吴百海. 基于SIMULINK和功率键合图的液控系统非线性仿真模型的建立[J]. 流体传动与控制, 2003(1): 29-32.
- [4] 刘树祥,晏绍枝,李浪清. 浮式钻井装置钻柱运动补偿系统研究[J]. 船舶, 2010, 21(3): 1-5.
- [5] 黎啟柏. 电液比例控制与数学控制系统[M]. 北京:机械工业出版社, 2001.
- [6] 宋志安. 基于MATLAB的液压伺服控制系统分析与设计[M]. 北京:国防工业出版社, 2007.

[编辑:张翔]