

导管架调平器模型样机提升运动控制的电液比例液压系统研究

张波¹, 王立权¹, 李怀亮²

(1. 哈尔滨工程大学机电学院, 黑龙江哈尔滨 150001; 2. 海洋石油工程股份有限公司, 天津 300451)

摘要: 分析了提升油缸电液比例闭环位置控制系统, 阐述了其工作原理; 建立了该控制系统的数学模型; 利用 MATLAB 软件对提升油缸的电液比例闭环控制系统进行了仿真, 在电液比例控制系统中引入了 PD 控制器, 改善了控制系统, 得到了比较满意的控制效果, 能够满足水下工程作业的要求。

关键词: 导管架调平器; 模型样机; 电液比例控制; PD 校正

中图分类号: TP273.4 **文献标识码:** B **文章编号:** 1001-3881(2009)1-062-4

Research of Electric and Hydraulic Scale System on Movement Control for Adjusting Plane Equipment Model on Pipe Fram

ZHANG Bo¹, WANG Liquan¹, LI Huailiang²

(1. College of Mechanical and Electrical Engineering, Harbin Engineering University,

Harbin Heilongjiang 150001, China; 2. Offshore Oil Engineer Co Ltd, Tianjin 300451, China)

Abstract: The position control system and its principle of electric and hydraulic scale close-loop system were analyzed, the math model was put forward. The raising movement of oil cylinder and its scale close-loop system were simulated using MATLAB. In order to improve the performance of system, the PD controller was imported, satisfied effect was got, which meets the demand of underwater engineering.

Keywords: Adjusting plane equipment; Model prototype; Electric and hydraulic scale control; PD compensation

0 引言

导管架调平器是在海洋石油工程中安装导管架时所使用的特殊机具, 主要完成导管架的调平作业。由于该装备目前均由国外进口, 价格近 2 000 万元, 为了实现国产化, 进行了模型样机的研究, 即按装置尺寸 1/3 缩小, 工作水深: 模拟 60m 以浅的海域。该装置主要由上下圈、若干个中间提升油缸、连接夹爪等部件组成, 其中中间提升油缸的上升与下降运动调节导管架的水平, 是调平器的关键动作, 本文作者将围绕提升油缸位置控制的电液比例液压系统进行研究与设计。

1 电液比例位置控制系统的组成

电液比例控制是指用输入电信号来调制液压参数。这是一种理想的液压系统与电子系统的结合。常用的回路有两种, 一种是能实现正反向无级调速的开环比例位置控制系统, 另一种是闭环系统。该系统采用闭环位置控制系统, 系统由位置传感器、双通道比例放大器、比例阀、溢流阀以及限压阀组成, 在开环控制系统上增加了位置反馈元件。这种系统通过负反馈控制, 具有自动纠正偏差的能力, 可获得相当高的位置控制精度。控制方块图如图 1 所示。

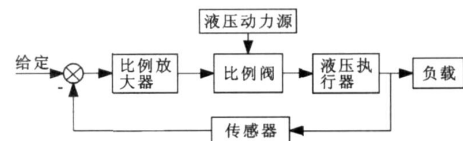


图 1 闭环比例位置系统方框图

它的工作原理是比例电磁铁在控制输入信号的激励下, 产生一个吸引力直接驱动阀芯位移, 并与作用在阀芯上的弹簧力相平衡, 利用阀芯位移与弹簧力和电磁铁的吸引力与控制信号的线性关系, 实现输出流量与输入信号成线性关系。

2 电液比例控制系统数学模型的建立

2.1 比例放大器的设计

经过数字控制器处理的电压数字信号, 通过 D/A 转换器转换成模拟电压信号后, 由比例放大器将其放大转变成电流信号并输入到比例电磁铁上, 其公式为:

$$K_p = \frac{I(s)}{U(s)} \quad (1)$$

式中: $I(s)$ 为比例放大器输出电流, A; $U(s)$ 为误差电压, V; K_p 为比例放大器放大系数, A/V。

2.2 比例方向阀动态数学模型的建立

根据测试结果, 工程上将比例方向阀视为一个二

收稿日期: 2008-01-28

基金项目: 国家 863 计划重大专项 (2002AA602012-1); 哈尔滨工程大学基金项目 (HEUFT05072)

作者简介: 张波 (1967—), 女, 副教授, 在读博士, 研究领域: 水下智能机械技术与工程图学。电话: 13224501869, E-mail: jlwzh@163.com。

阶环节, 传递函数为

$$G_{vs} = \frac{Q(s)}{I(s)} = \frac{K_q}{\frac{s^2}{\omega_n^2} + \frac{2\zeta s}{\omega_n} + 1} \quad (2)$$

式中: $Q(s)$ 为电液比例阀在稳态工作点附近流量, m^3/s ; K_q 为电液比例阀在稳态工作点附近流量增益 (控制阀输出流量与输入电流之比), $\text{m}^3/(\text{s} \cdot \text{A})$; ω_n 为电液比例阀的等效无阻尼自振频率, rad/s ; ζ 为电液比例阀的等效阻尼系数, 无量纲, 取值范围为 $0.5 \sim 0.7$; s 为拉普拉斯算子。

采用类似于四通阀控液压缸的线性化分析方法, 建立和分析其动态特性。在简化讨论, 分析中做如下假设:

- (1) 不考虑管道动态及管道的动态特性。
- (2) 恒压油源供油, 即只恒定, 并且回油压力 $p_0 = 0$ 。
- (3) 对称三位四通阀, 矩形窗口工作时阀口处于紊流状态。
- (4) 油的温度和密度为常数。
- (5) 不考虑阀的非线性的影响。

2.3 阀的流量方程

当阀作正向移动时, 比例阀的流量方程为:

$$Q_1 = C_d x_v \sqrt{\frac{2}{\rho} (p_s - p_1)} \quad (3)$$

$$Q_2 = C_d x_v \sqrt{\frac{2}{\rho} p_2} \quad (4)$$

式中: Q_1 为比例阀进口流量, m^3 ;

Q_2 为比例阀出口流量, m^3 ;

x_v 为四通阀阀芯的位移, m ;

为窗口面积梯度, 指单位控制位移量所对应的阀口面积, 即阀口面积对阀芯位移量的偏导数, 当节流口为圆柱面时, $\frac{\partial A}{\partial x} = d$, m ;

C_d 为流量系数;

为液压油密度, kg/m^3 ;

p_s 为供油压力, MPa ;

p_1 为非对称液压缸无杆腔工作压力, MPa ;

p_2 为非对称液压缸有杆腔工作压力, MPa 。

2.4 液压缸的流量方程

$$\frac{Q_1}{2} = C_{ic} (p_1 - p_2) + C_{ec} p_1 + \frac{V_1}{E} \dot{p}_1 + A_1 \dot{y} \quad (5)$$

$$\frac{Q_2}{2} = C_{ic} (p_1 - p_2) - C_{ec} p_2 + \frac{V_2}{E} \dot{p}_2 + A_2 \dot{y} \quad (6)$$

式中: C_{ic} 为内泄漏系数; C_{ec} 为外泄漏系数; V_1 为有杆腔容积, m^3 ; V_2 为无杆腔容积, m^3 ; E 为流体体积弹性模数。

力平衡方程为:

$$2A_1 p_1 - 2A_2 p_2 = M \ddot{y} + B \dot{y} + k_s y + f = F \quad (7)$$

式中: M 为液压执行元件运动部分的总质量, kg ; f 为负载, N ; B 为运动粘性摩擦系数, $\text{N} \cdot \text{s/m}$; k_s 为弹性负载的刚度, N/m ; E 为流体体积弹性模数。

2.5 模型的简化

两腔的流量比 为:

$$\frac{Q_2}{Q_1} = \frac{\dot{V}_2}{\dot{V}_1} = \frac{A_2 \dot{y}}{A_1 \dot{y}} = \frac{A_2}{A_1} \quad (8)$$

式中: A_1 为有杆腔活塞的面积, m^2 ; A_2 为无杆腔活塞的面积, m^2 。

由式 (2)、(3) 可得

$$= \frac{\sqrt{p_2}}{\sqrt{p_s - p_1}} \quad (9)$$

定义 $p_L = p_1 - p_2$, $Q_L = \frac{Q_1 + Q_2}{2}$, 得

$$Q_L = C_d y(x - x_0) \sqrt{\frac{1}{\rho} (p_s + p_L)} \quad (10)$$

式中: x 为阀芯位移, m ;

$$= \frac{1 + \frac{p_L}{p_s}}{\sqrt{2(1 + \frac{p_L}{p_s})}}。$$

在工作点附近对上式线性化得:

$$Q_L = K_{qv} x - K_p p_L \quad (11)$$

$$\text{式中: } K_{qv} = C_d \sqrt{\frac{p_s - p_L}{\rho}} = \frac{\partial Q_L}{\partial x} \quad (12)$$

$$K_p = C_d (x + x_0) / \sqrt{4(p_s + p_L)} = \frac{\partial Q_L}{\partial p_L} \quad (13)$$

定义: $C_i = 2C_{ie} + C_{ce}$, $V_e = \frac{V_1 + V_2}{1 + \frac{A_2}{A_1}}$, $A_e = A_1 +$

A_2 , 得:

$$p_L = \frac{M \ddot{y} + B \dot{y} + k_s y}{2A_e} \quad (14)$$

进行拉普拉斯变换得:

$$Y(s) = \frac{K_{qv} x}{\frac{V_e M}{4EA_e} s^3 + (\frac{V_e B}{4EA_e} + \frac{K_{ce} M}{A_e}) s^2 + (\frac{K_s V_e}{4EA_e^2} + \frac{B K_{ce}}{A_e^2}) s + \frac{K_{ce} K_v}{A_e^2}} \quad (15)$$

式中: $K_{ce} = K_p + C_{io}$ 。

工程上一般弹性负载很小, 可以忽略, 所以 $k_s = 0$ 。另外粘性摩擦力远小于系统的泄漏量, 更远小于系统的总流量, 所以 $\frac{B K_{ce}}{A_e^2} = 0$ 。

式 (15) 可以简化为:

$$Y(s) = \frac{\frac{K_{qv}}{A_e} X}{s(\frac{s^2}{\omega_n^2} + \frac{2\zeta}{\omega_n} s + 1)} \quad (16)$$

式中: ω_n 为液压系统的固有频率;

η 为液压系统阻尼比。

以指令信号作为输入，从阀芯的位移 x 到油缸活塞的位移 y ，其传递函数为：

$$\frac{Y(s)}{X(s)} = \frac{K_{qv}}{A_e} \cdot \frac{1}{s(\frac{s^2}{\omega_n^2} + \frac{2\eta}{\omega_n}s + 1)} \quad (17)$$

由以上可直接列出忽略弹性负载位置控制系统的传递函数方框图，如图 2 所示。

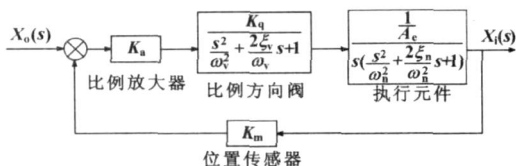


图 2 只有惯性负载的控制系统传递函数方框图

由图 2 可以得到系统的开环传递函数为：

$$G(s) = \frac{K_c K_q K_m}{A_e} \cdot \frac{1}{s(\frac{s^2}{\omega_v^2} + \frac{2\eta_v}{\omega_v}s + 1) (\frac{s^2}{\omega_n^2} + \frac{2\eta_n}{\omega_n}s + 1)} \quad (18)$$

定义 $K_c = K_c K_q K_m$ ，系统的开环传递函数为：

$$G(s) = \frac{K_c}{s(\frac{s^2}{\omega_v^2} + \frac{2\eta_v}{\omega_v}s + 1) (\frac{s^2}{\omega_n^2} + \frac{2\eta_n}{\omega_n}s + 1)} \quad (19)$$

3 控制系统仿真及分析

3.1 控制系统仿真

传递函数中各参数见表 1。经 MATLAB 仿真分析得到开环特性曲线，如图 3 所示。从图 3 可以看出系统是稳定的，对系统进行闭环阶跃仿真，如图 4 所示。闭环响应曲线响应速度慢，跟踪性能差，需要用适当的校正方法和控制策略，可以改善系统的性能。

表 1 传递函数参数表

K_c	ω_v	η_v	ω_n	η_n
1.79	182.58	10.853	0.6	0.1

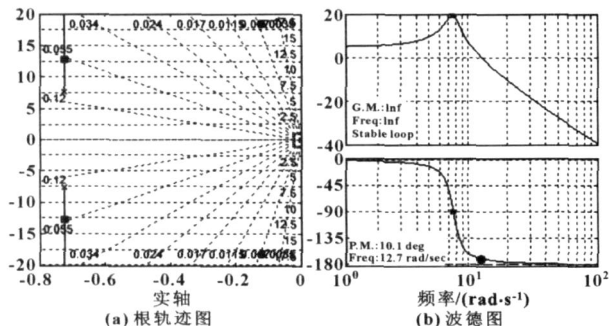


图 3 开环特性曲线

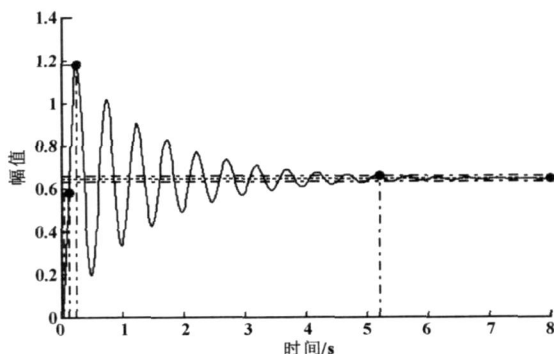


图 4 闭环阶跃响应特性曲线

3.2 控制系统的 PD 校正

PD 控制是控制工程技术成熟、应用广泛的一种控制策略。PD 控制参数整定方便，结构改变灵活，在众多工业过程控制中取得了满意的应用效果。在现代工业控制中，需要将连续的 PD 控制算法离散化，实现计算机数字 PD 的调节。

模拟系统中 PD 控制函数为：

$$u(t) = K_p \left[e(t) + \frac{1}{T_i} \int_0^t e(t) dt + T_d \frac{de(t)}{dt} \right] \quad (20)$$

式中： $u(t)$ 为控制器的输出； $e(t)$ 为控制器的输入； K_p 为比例系数； T_i 为积分时间常数； T_d 为微分时间常数。

对各环节离散化处理，得

$$\begin{cases} t & kT \quad (k=0, 1, 2, \dots) \\ e(t) dt & T \sum_{j=0}^k e(jT) \\ \frac{de(t)}{dt} & \frac{e(kT) - e((k-1)T)}{T} \end{cases} \quad (21)$$

式中： T 为采样周期。

$$u(kT) = K_p e(k) + K_i \sum_{j=0}^k e(jT) + K_D [e(kT) - e((k-1)T)] \quad (22)$$

式中： k 为采样序号， $k=0, 1, 2, \dots$ ；

$u(k)$ 为第 k 次采样时刻的计算机输出值；

$e(k)$ 为第 k 次采样时刻输入的偏差值；

$e(k-1)$ 为第 $(k-1)$ 次采样时刻输入的偏差值；

K_i 为积分系数， $K_i = K_p T / T_i$ ；

K_D 为微分系数， $K_D = K_p T_d / T$ 。

PD 控制器各校正环节的作用如下：

(1) 比例环节。可以及时成比例的反映控制系统的偏差信号，偏差一旦产生，控制器立即产生控制作用，减少偏差。

(2) 积分环节。主要用于消除静差，提高系统的无差度。积分作用的强弱取决积分时间常数 T_i ， T_i

越大, 积分作用越弱, 反之则越强。

(3) 微分环节。能反映偏差信号的变化趋势(变化速率), 并能在偏差信号值变得太大之前, 在系统中引入一个有效的早期修正信号, 从而加快系统的动作速度, 减小调节时间。

在电液比例位置控制系统中引入 PD 控制器, 控制系统的基本组成框图如图 5 所示。

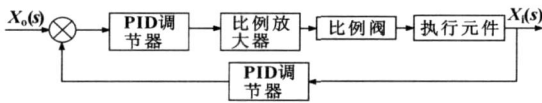


图 5 PD 控制框图

常规 PD 从本质上讲是一种纯线性控制方式, 它以不变的模式来处理变化的系统响应过程。根据被控对象——电液比例控制系统适当的整定 PD 的 3 个参数。经过一系列参数调整后得到系统单位阶跃响应曲线如图 6 所示, 其中 $K_p = 250$; $K_i = 1\ 200$; $K_D = 2.5$ 。

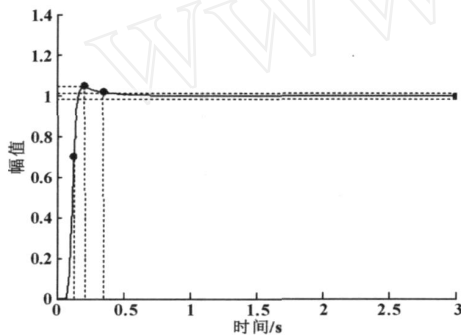


图 6 PD 调节后系统闭环阶跃响应曲线

加入 PD 控制器后, 系统稳定, 且闭环阶跃响应速度和响应稳态误差均满足要求。

4 结论

本文作者设计了导管架调平器模型样机提升油缸位置控制的电液比例控制系统, 主要解决了以下问题:

(1) 分析了位置控制系统, 阐述了其工作原理。
(2) 建立了提升油缸位置控制系统的数学模型, 并确定了模型的参数。

(3) 利用 MATLAB 软件对控制系统进行了仿真, 并在电液比例控制系统中引入了 PD 控制器, 改善了控制系统, 得到了比较满意的控制效果。仿真结果表明设计的电液比例控制系统稳定, 控制简单, 能够满足水下工程作业的要求。

参考文献

- 【1】王守城, 段俊勇. 液压元件及选用 [M]. 北京: 化学工业出版社, 2007 (4): 427.
- 【2】张明珠. 基于 PLC 实现的电液比例控制系统线性化调节的方法 [J]. 北京工业职业技术学院学报, 2007 (6): 38 - 39.

- 【3】张送. 电液比例压力及速度控制系统分析研究 [D]. 昆明理工大学, 2004: 34 - 42.
- 【4】贺鹏. 电液比例速度控制系统的设计及特性研究 [D]. 昆明理工大学, 2002: 41 - 45.
- 【5】许益民. 电液比例控制系统分析与设计 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2005: 227 - 228.
- 【6】http://www.mpapower.com/cp.htm [oL].
- 【7】贾铭新, 曹诚明. 液压传动与控制 [M]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学出版社, 1995: 51 - 154.
- 【8】Takatoshi Nishimaki, Naohiro Yuhara, Yasuji Shibahata, et al. Two-degree-of-freedom hydraulic pressure controller design for direct yaw moment control system [M]. JSAE Review, 1999, 20 (4): 517 - 522.
- 【9】王岚, 赵丹, 隋立明. 机电系统计算机控制 [M]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学出版社, 2006: 73 - 80.

(上接第 51 页)

参考文献

- 【1】李文超, 等. 应用数字调控压模法技术构建颅骨修复体 [J]. 中国临床康复, 2005, 9 (30): 257 - 259.
- 【2】龚振宇, 刘彦普, 周树夏, 等. 快速成型技术辅助颌面萎缩衬垫物设计 [J]. 第四军医大学学报, 2003, 24 (3): 1189 - 1191.
- 【3】金国良, 张永良, 俞学斌. 钛金属板在颅骨缺损中的应用 [J]. 中华创伤杂志, 1999, 15 (6): 472 - 473.
- 【4】李燕, 谭鸥, 段会龙. 三维医学图像可视化技术综述 [J]. 中国图像图形学报, 2001, 6 (2): 103 - 105.
- 【5】李明哲, 裴永生, 徐建丽. 薄板类件多点成形过程的数值模拟 [J]. 材料科学与工艺, 2004, 12 (4): 379 - 382.
- 【6】张建, 杨宝贺, 秦怀海, 等. 医用胶自体颅骨碎片原位粘合成形术 [J]. 中华神经外科杂志, 1998, 14 (3): 178.
- 【7】唐果, 赵晓东, 等. 三维医学图像分割与可视化研究 [J]. 计算机学报, 1998, 21 (3): 204 - 209.
- 【8】鲍虎军, 马利庄, 王强. 基于骨架的断层间复杂轮廓线的三角片曲面重构 [J]. 计算机学报, 2000, 23 (8): 842 - 846.
- 【9】李铃, 张睿, 于力牛, 等. 基于 CT 断层影像的下颌骨及下牙列三维几何学仿真 [J]. 上海口腔医学, 2000, 9 (4): 235 - 236.
- 【10】李明哲. 特种成形与连接技术 [M]. 高等教育出版社, 2005.
- 【11】吕培军, 李彦生, 王勇, 等. 国产口腔修复 CAD-CAM 系统的研究与开发 [J]. 中华口腔医学杂志, 2002, 37 (5): 367 - 370.
- 【12】周朝晖, 蔡中义, 李明哲. 多点模具的拉形工艺及其数值模拟 [J]. 吉林大学学报: 工学版, 2005, 35 (3): 287 - 291.