

基于 Simulink 的等静压机升压系统建模与仿真

梁晓辉, 范玉德

(中国工程物理研究院 化工材料研究所, 四川 绵阳 621900)

摘要: 研究等静压机升压系统的组成, 通过理论辨识法确定控制系统模型结构, 采用阶跃响应法确定模型参数, 得到系统数学模型; 研究各种非线性因素对升压曲线控制精度的影响, 进而确定控制算法; 设计比例-积分控制器, 对控制器参数进行理论仿真整定, 在 Simulink 上组建仿真平台, 对等静压机升压过程按照一次曲线、抛物线、圆、椭圆及组合曲线进行系统级仿真实验, 跟随误差低于 1 MPa; 结果表明: 所设计比例-积分控制策略可以满足等静压机在 0~200 MPa 下的升压曲线控制精度要求。

关键词: 增压器; 控制算法; 系统仿真; Simulink

Modeling and Simulating for Rising—Pressure System of Isostatic—Pressure Machine based on Simulink

Liang Xiaohui, Fan Yude

(Institute of Chemical Materials, CAEP, Mianyang 621900, China)

Abstract: Study constitute of the rising—pressure system of Isostatic—Pressure, obtain the mathematic modeling of control system by theory identification, obtain the characters of mathematic model by step response method, then obtain the mathematic model. Study the infection of rising—curve controlling precision by all kinds of non—linear factor, then obtain the controlling arithmetic. Design proportion—integral controller, adjust the controller parameters by theory simulation, carry out the system—levels simulation experiment aiming at linear curve, parabola, ellipse, round and compound curve on the SIMULINK platform. As result, the compound curve is lower than 1 MPa. The result demonstrates that the proportional—integral controlling strategy can meet the wide—pressure extent and high—precision curve controlling of the rising—pressure system of WIP.

Keywords: supercharger; control arithmetic; system simulation; Simulink

0 引言

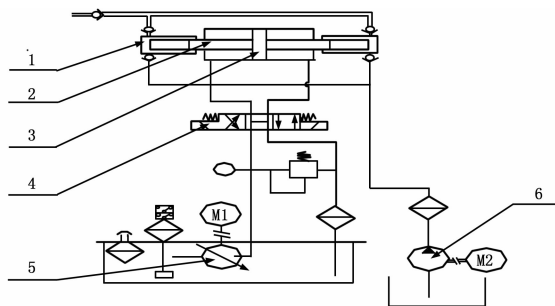
等静压机是利用液体介质中各个方向等压强的原理^[1], 对采用橡胶软模包覆的粉体材料进行等压力压制。等静压机工艺过程包括升压、保压以及卸压。

等静压机广泛应用于军工、国防、高能材料、特种材料等粉体材料成形领域, 材料成形工艺对压力曲线控制精度要求较高^[2]。研究适用于等静压机、控制曲线精度达到 1 MPa 的控制算法, 满足等静压机的高精度曲线控制要求。

研究等静压机的升压系统特性并进行系统辨识, 得到数学模型; 设计控制器并确定控制器参数, 采用仿真平台对控制器参数进行优化, 实现高精度升压曲线控制要求。

1 等静压机升压系统介绍

常用液压系统只能提供最高压力为 25 MPa 的油压^[3]。利用增压器的不同横截面积活塞的力学平衡原理, 实现把常压液压油压力以活塞的横截面积比例进行放大, 实现超高压油压。超高压油进入工作缸后, 根据液体压缩原理, 实现工作缸升压。等静压机可实现高达 200 MPa 的油压力, 其升压装置如图 1 所示。



1. 超高压柱塞缸; 2. 柱塞; 3. 活塞; 4. 三位四通换向阀; 5. 变量泵; 6. 供油泵

图 1 升压控制装置

1.1 等静压机升压过程

变量柱塞泵 M1 运行后, 向液压油路提供流量可控的高压油液; 三位四通换向阀改变高压油液的方向, 实现活塞运动方向变换; 当换向阀位于中位时, 高压油液返回到液压缸; 当位于左位时, 高压油液进入活塞右腔, 此时在活塞左腔形成超高压环境; 当位于右位时, 高压油液进入活塞左腔, 在活塞右腔形成超高压环境; 在活塞运动过程中, 超高压油液进入超高压工作缸, 实现升压。

1.2 等静压机升压原理

超高压工作缸缸内压力是通过增压器向工作缸内注入超高压介质油, 致使缸内介质油压缩而实现升压。压缩过程满足液体压缩公式^[4], 如下:

收稿日期: 2013-11-21; 修回日期: 2014-01-26。

基金项目: 国家科技重大专项课题资助课题(2011ZX04001-081)。

作者简介: 梁晓辉(1984-), 男, 陕西渭南人, 研究生, 主要从事自动化理论研究、自动化系统设计与应用以及机床自动化等方向的研究。

$$P = K \frac{V_0}{V + V_0} \quad (1)$$

式中, V 为工作缸的有效容积, V_0 为工作缸内压力达到 P 时需往缸内注入的介质油体积。

1.3 等静压机升压控制方法

等静压机升压控制可采用比例流量阀控制法与比例溢流阀控制法, 常采用比例流量阀控制法。

比例溢流阀控制法通过在超高压工作缸并联比例溢流阀, 通过控制器控制比例溢流阀的开度, 实现对超高压缸内压力的控制。这种方式只能实现 60 MPa 以下压力控制, 在 60 MPa 以上的控制精度比较差。

比例流量阀控制法是通过控制电液比例流量阀的开度或者变量泵的出口流量, 对液压回路上的流量控制, 进而对增压器活塞往复运行频率的控制, 实现对注入超高压工作缸的介质油体积量的控制, 最终实现缸内压力的控制。比例流量阀控制阀可以应用于超高压压力段的升压控制, 适用于各种压力域的等静压机。

2 升压系统数学模型辨识

等静压机升压系统的特征为: 系统为单输入单输出的连续控制系统; 存在多种非线性因素, 影响曲线控制精度的主要因素包括: 增压器往复运动过程的压力突变、油液温度变化、坯件体积与压缩比例、粘度以及工作介质油自身的非线性因素等。建立较为合适的数学模型, 是设计控制算法的基础。经典控制理论可以解决线性控制系统的控制问题; 对于非线性系统, 通过在系统工作点附近进行线性化来解决^[5]。

2.1 升压过程模型简化

通过对升压系统的工作机理以及特性进行定性定量分析, 结合理论分析法与实验法进行模型辨识, 得到控制系统模型^[6]。由于影响升压系统的因素较多, 且多为非线性因素, 考虑所有因素得到的数学模型关系式比较复杂且不实用。忽略增压器往复运动过程、油液温度变化、坯件体积与压缩比例、粘度、以及工作介质油自身的非线性因素等次要因素, 建立比例流量阀流量、增压器活塞面积比、超高压工作缸体积、以及注入缸内的介质油流量的数学关系模型。忽略非线性因素, 简化后升压系统数学模型可由比例阀、换向阀、增压器以及工作缸的模型推导得出。

2.2 比例流量阀输入输出数学关系

给定值由 PLC 控制器计算给定。理想比例流量阀可看作一个线性过程。设控制信号 $i(t)$, 比例阀比例系数 k_0 , 比例阀输出流量 $Q_0(t)$, 则控制信号 $i(t)$ 与比例阀输出流量 $Q_0(t)$ 的数学关系如式 (1) 所示。

$$Q_0(t) = k_0 i(t) \quad (1)$$

2.3 换向阀输入输出数学关系

换向阀的一个工作周期由两个工作时间 t_w 和两个换向时间 t_e 组成。换向过程存在换向时长不确定、液压油流量变化、液体压缩以及温度变化等非线性因素。换向阀是非线性元件, 对于性能较好的换向阀, $t_w \gg t_e$, 故可以忽略非线性因素, 把换向阀看做是一个比例系统为 1 的线性元件。设换向阀的输出流量 $Q_h(t)$, 则得到关系式如 (2) 所示。

$$Q_h(t) = Q_0(t) \quad (2)$$

2.4 增压器输入输出数学关系

增压器是依靠电控液压阀控制高压油液流动方向, 实现活

塞运动, 通过不同横截面积的活塞实现高压油液压力放大, 形成超高压环境。增压器非线性因素包括: 压缩过程为变加速度运动, 换向过程存在对油液的非线性压缩且时间不定等等。增压器运动是连续过程, 理想情况下, 低压腔的液体全部用于驱动活塞, 而高压腔的液体全部打入超高压工作缸, 而两者依靠活塞建立关系。

进入增压器低压腔的流量 $Q_1(t)$ 与换向阀的输出流量 $Q_h(t)$ 相等, 如式 (3) 所示:

$$Q_1(t) = Q_h(t) \quad (3)$$

设活塞运动速度 $v(t)$, 进入低压腔的液体流量 $Q_1(t)$, 从高压腔流出的液体流量 $Q_2(t)$, 低压腔的活塞面积 s_1 , 高压腔的活塞面积 s_2 , 在低压腔一侧, 活塞速度 $v(t)$ 与低压腔液体流速 $Q_1(t)$ 的关系如式 (4) 所示:

$$v(t) = \frac{Q_1(t)}{s_1} \quad (4)$$

在高压腔一侧, 活塞速度 $v(t)$ 与高压腔液体流速 $Q_2(t)$ 的关系如式 (5) 所示:

$$v(t) = \frac{Q_2(t)}{s_2} \quad (5)$$

这样, 进入高压缸的液体流量 $Q_2(t)$ 与换向阀出口液体流量 $Q_h(t)$ 的关系, 即为增压器的传递函数, 如式 (6) 所示:

$$Q_2(t) = \frac{s_2}{s_1} Q_h(t) \quad (6)$$

2.5 超高压工作缸输入输出数学关系

增压器高压腔打出的超高压油液全部进入超高压工作缸。由于工作缸是定体积容器, 当超高压油液打入后, 会压缩升压。设工作缸体积 V_0 , 初始压强 P_0 , 当增压器高压腔打入工作缸介质油 ΔV 后, 工作缸的压强增量为 ΔP , 液压油的压缩系数为 k , 则得到关系如式 (7) 所示:

$$\Delta p = k \frac{\Delta V}{V}, V = V_0 + \Delta V \quad (7)$$

压缩系数 $k = 1.5 \times 10^3$ MPa, 而等静压机在最高压力 200 MPa 时的液体压缩量 ΔV 远远小于工作缸体积 V_0 , 即 $\Delta V \ll V_0$ 。

故忽略 ΔV , 液体压缩公式变化为式 (8):

$$\Delta P = k \frac{\Delta V}{V_0} \quad (8)$$

进一步变化得到式 (9):

$$\frac{\Delta P}{\Delta t} = \frac{k}{V_0} \frac{\Delta V}{\Delta t} \quad (9)$$

由于升压过程中液体压力、体积均为连续变量, 故可微可导。变换后得到式 (10):

$$\frac{dP}{dt} = \frac{k}{V_0} \frac{dV}{dt} \quad (10)$$

2.6 比例流量阀控制量与缸内压力数学关系

由于注入超高压工作缸的介质油体积 V 、流量均为连续性变量, 流入高压缸的液体流量 $Q_2(t)$ 在数值上可以如式 (11) 所示:

$$Q_2(t) = \frac{dV}{dt} \quad (11)$$

工作缸的传递函数式 (10) 变换为式 (12):

$$\frac{dP(t)}{dt} = \frac{k}{V_0} Q_2(t) \quad (12)$$

综合式 (3) ~ (12), 升压系统的数学模型可以推导为式

(13) 所示。

$$\frac{dP(t)}{dt} = \frac{k}{V_0} \cdot \frac{s_2}{s_1} \cdot k_0 \cdot i(t) \quad (13)$$

设 $K = \frac{k}{V_0} \cdot \frac{s_2}{s_1} \cdot k_0$ ，得到式 (14)：

$$\frac{dP(t)}{dt} = K \cdot i(t) \quad (14)$$

可见，工作缸压强 P 与控制信号 $i(t)$ 在时域上满足一阶线性微分方程，在频域上的传递函数如式 (15) 所示：

$$P(s) = \frac{K}{s} \quad (15)$$

2.7 数学模型参数计算

物理过程均存在惯性，式 (15) 所描述的传递函数忽略了系统的惯性因素，需进行惯性时间常数测定。由于压力控制系统属于低滞后性系统，往往忽略滞后时间常数，所辨识模型无滞后环节是允许的。

设惯性时间常数为 T ，传递函数式 (15) 变换为式 (16)：

$$P(s) = \frac{K}{s + \frac{1}{T}} \quad (16)$$

惯性时间常数往往通过实验法确定。根据一阶控制系统的特性，其惯性时间常数为系统在单元阶跃信号激励下，达到输出量的 0.632 时对应的的时间值。对实验获得的曲线进行计算，时间常数 T 为 6 s。

开环增益 K 主要由液压油压缩系数、高压缸体积、增压器高压腔与低压腔横截面积比以及理想比例阀比例系数确定。某等静压机系统，液压油压缩系数为： 1.5×10^3 MPa；工作缸体积为： 0.2355 m^3 ；增压器高压腔与低压腔横截面积比为： 12.5 ；理想比例阀比例系数为： $3.14 \times 10^{-4} \text{ m}^3$ 。计算得到开环增益 K 为： 25 。得到系统模型的传递函数如式 (17) 所示。

$$P(s) = \frac{25}{s + \frac{1}{6}} \quad (17)$$

3 控制器设计与仿真平台组建

等静压机升压过程为一阶连续小惯性近似线性时不变系统。通过研究，升压系统的非线性因素对系统的控制精度影响较小，PID 控制器采用了负反馈，可对模型近似后的引起的误差进行补偿，可用于升压过程的控制。

3.1 PID 控制器设计

等静压机升压系统是一种跟随控制系统，通过设计控制算法、优化控制器参数，实现超高压工作缸缸内压力按照设定升压曲线升压，实际压力曲线能够对设定曲线快速跟随、无超调且误差满足要求。通过研究，PID 控制器可应用于升压曲线控制过程。

升压控制策略如图 2 所示。具体为：

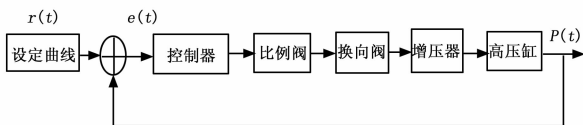


图 2 压力曲线控制策略

- 1) 设定曲线 $r(t)$ 由 PLC 程序计算；
- 2) 在 PLC 程序里编写软件 PID 控制器，根据误差 $e(t)$ ，

按照 0.1 s 的间隔计算比例流量阀的开度控制信号；

3) 比例流量阀开度控制了进入液压系统的液压油量，进而控制超高压工作缸的缸内压力的升压过程；

4) 压力传感器实时检测缸内压力 $P(t)$ ，形成反馈。

3.2 PID 控制器参数整定

压力控制系统属于低滞后系统，辨识得到的传递函数无滞后环节，故可省略微分环节，采用比例-积分进行控制。

比例参数对动态过程的影响是：比例参数越大，动态过程就越短；但是比例参数过大，系统会出现超调。积分常数对动态过程的影响是：比例参数一定调节下，积分时间越长，系统越稳定，但是此时系统进入稳态也越慢；缩短积分时间，系统可能会引起超调。

通过仿真实验，比例参数为 0.01，积分时间分别为：1, 10, 100 的条件下，得到的仿真曲线。积分时间太短，系统出现超调；积分时间过长，系统进入稳态的时间长。当积分时间为 10 s 时，系统同时满足无超调且响应速度快的要求。故得到的比例参数为 0.01，积分时间常数为：10。

3.3 仿真平台组建

升压系统采用基于 PID 控制器的负反馈控制策略。SIMULINK 平台上实现升压系统数学模型，以及 PID 控制器，实现系统级仿真^[7-8]，如图 3 所示。

比例增益 K 为：0.01；微分环节增益为： $K_i = \frac{K_p}{T_i} = 0.001$ 。

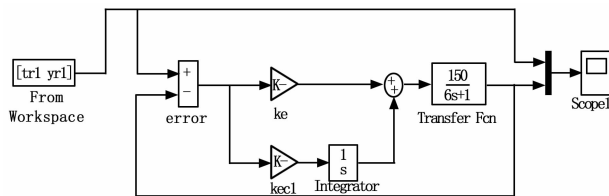


图 3 升压系统 SIMULINK 仿真平台

4 仿真实验

等静压机升压系统需实现一次曲线、抛物线、圆以及几种函数组合曲线的高精度跟随控制。通过仿真实验，给定几种信号源，观察模型对于给定工艺曲线的跟随能力。

4.1 一次函数跟随控制仿真

一次曲线函数为：

- (a) $y = 0.1x (1 \leq x < 150)$ ；
- (b) $y = 15 (151 \leq x < 450)$ ；
- (c) $y = 0.15x - 52.5 (451 \leq x < 1683)$ ；
- (c) $y = 200 (1684 \leq x < 1700)$ 。

仿真曲线如图 4 所示。

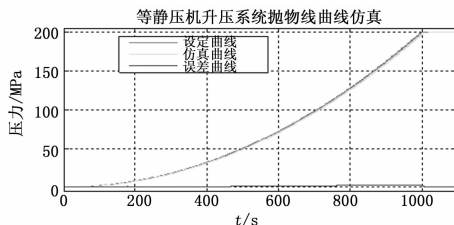


图 4 一次组合函数曲线

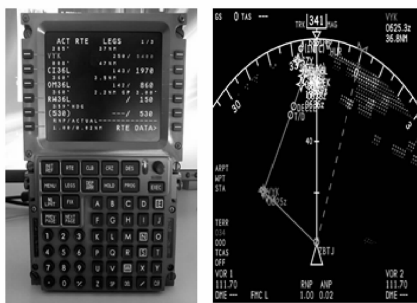


图 4 仿真验证结果

(ZBTJ) 通过导航台 (VYK)



(a) 位置起始页面 (b) 性能起始页面 (c) DFCS 测试 (d) ADIRS 测试

图 5 航线设置页面和测试页面

故障注入等功能, 系统稳定可靠, 可以满足飞行操作模拟等场合的需要。

(上接第 2576 页)

4.2 抛物线曲线控制仿真

曲线函数为:

$$(a) y = 0.0002x^2 (1 \leq x < 1000);$$

$$(b) y = 200(1001 \leq x < 1100);$$

仿真曲线如图 5 所示。

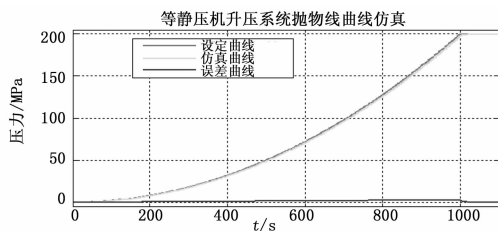


图 5 抛物线曲线

4.3 圆曲线控制仿真

曲线方程为:

$$y = 200 - \sqrt{40000 - (x-1)^2} (1 \leq x < 121);$$

$$y = 0.4x - 8.4 (121 \leq x < 521);$$

$$y = 200(522 \leq x < 600).$$

仿真曲线如图 6 所示。

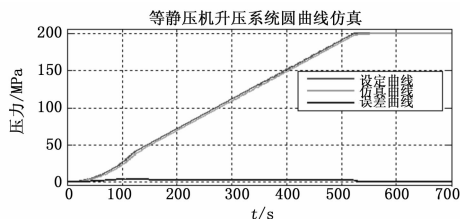


图 6 圆曲线

5 结论

通过对 ARINC739 规范的深入研究, 利用接口仿真技术设计的具有真实航电组件接口特性和外形的多功能控制显示组件仿真系统。使用实物化面板代替图形化的虚拟界面和面板, 具有很高的仿真度和逼真的操作手感。提出了基于数据库的页面生成和管理方法, 降低了开发难度和硬件要求。系统中协议仿真和故障注入功能可应用于航电系统仿真和通信验证方面。

参考文献:

[1] 向明, 马存宝. 基于 VAPS 的 FMS CDU 实时仿真系统开发 [J]. 计算机仿真, 2006, 23 (8): 244-247.

[2] 罗春波, 沈为群, 宋子善. 飞行多功能显示器仿真系统的研究与实现 [J]. 计算机仿真, 2004, 21 (12): 249-251.

[3] 云超, 李小民, 郑宗贵, 刘品面向对象与应用框架的飞行仿真软件开发方法 [J]. 探测与控制学报, 2013, 35 (4): 58-67.

[4] Madden M M, Sugden P C. Extending a flight management computer for simulation and flight experiments [A]. Proceedings of AIAA Modeling and Simulation Technologies Conference [C]. San Francisco: USA; [s. n.], 2005.

[5] 穆凌霄, 王新民, 刘进义, 等. 基于飞控半物理仿真平台的模拟座舱及虚拟仪表系统的研究 [J]. 计算机测量与控制, 2012, 20 (11): 3113-3128.

通过误差曲线计算最大误差值, 4 种曲线的最大误差值小于 1 MPa, 控制器能够实现对升压过程的高精度跟随控制。

5 结论

研究了等静压机升压系统的组成、系统特性、控制系统的建模、控制算法研究与系统仿真。采用理论系统辨识法得到了升压系统数学模型, 采用实验阶跃相应法, 确定模型参数, 得到升压系统传递函数。采用 SIMULINK 仿真平台对给定几种常见的工艺曲线进行仿真实验, 结果表明: 所设计的控制器与控制算法可以满足等静压机的宽压力范围的高精度控制要求。

参考文献:

[1] 孙建. 等静压炸药装药技术发展与应用 [J]. 含能材料, 2012, 20 (5): 638-642.

[2] 范玉德, 曹志伟, 张程滔. 温等静压机安全保护系统设计 [J]. 控制工程, 2011, 18 (s): 134-140.

[3] 章宏甲. 液压与气动传动 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2004.

[4] 闫邦椿. 机械设计手册第 22 篇液压与传动 [M]. 北京: 机械工业出版社, 2010: 22-35.

[5] 胡寿松. 自动控制原理 [M]. 北京: 科学出版社, 2007.

[6] 王正林, 郭阳宽. 过程控制与 SIMULINK 应用 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2006.

[7] 云超, 李小民, 郑宗贵. 基于 Matlab/Simulink 的硬件在回路无人机仿真系统设计 [J]. 计算机测量与控制, 2012, 20 (12): 3306-3308.

[8] 李颖. SIMULINK 动态建模与仿真 [M]. 西安: 西安电子科技大学出版社, 2009.