

电液伺服系统新型控制算法^①

王延年, 马丽娜, 刘成涛

(西安工程大学 电子信息学院, 西安 710048)

摘要: 研究了一种优化偏差—偏差变化率算法在电液伺服控制系统中的控制效果。电液位置伺服控制系统影响因素复杂, 加之系统本身存在多种非线性环节, 难于用精确数学模型描述其所有特性, 为系统控制方法设计增添困难。针对上述问题, 在分析电液伺服控制系统的结构和特点的基础上, 提出一种优化偏差—偏差变化率算法, 并进行多方面的仿真实验, 获得了良好的控制效果。

关键词: 电液伺服控制; 智能控制; 相平面; 基本型逻辑控制器

Control Algorithm in the Electro-Hydraulic Servo System

WANG Yan-Nian, MA Li-Na, LIU Cheng-Tao

(School of Electronic Information, Xi'an Polytechnic University, Xi'an 710048, China)

Abstract: The optimized deviation-deviation rate algorithm is applied in the electro-hydraulic servo control system. It brings difficulties to the design of the control method, because of the complexity of the influence factor in electro-hydraulic position servo control system, and the system itself has many nonlinear elements which makes it difficult to describe all of the features with precise mathematical model. Aiming at these problems, an optimized deviation-deviation rate algorithm is putted forward on the basis of the analysis of the structure and characteristics of electro-hydraulic servo control system, and achieved good control effect in various simulation experiment.

Key words: electro-hydraulic servo control; intelligent control; phase plane; basic logic controller

近年来, 随着电液伺服控制系统越来越多地应用在大功率、高精度及快速响应的场合, 从起初的舰艇操舵控制到更广泛的国防、航空航天、冶金工业等自动控制领域。其控制的机械对象也越来越复杂, 并且系统存在多种非线性及干扰因素, 使得对控制系统精度、响应能力、稳定性及鲁棒性等多方面的要求越来越高。目前国外对伺服控制器的研究较为先进, 结合智能控制方法设计性能良好的控制器, 而国内对这方面的研究相对落后, 但也在不断地改进, 向着数字化、智能化的方向发展。传统的 PID 控制算法属于线性控制, 虽然其控制效果的稳态精度较好, 但是动态特性不能兼顾。对于电液伺服控制系统这种典型非线性控制系统, 在参数变化和外界干扰的情况下, PID 控制还存在控制参数难以确定、鲁棒性不佳的缺点, 难以满

足较高的控制要求。而过于复杂的智能控制算法运算量大, 参数繁多, 不适合工业现场调试。

本文在对电液位置伺服控制系统分析的基础上, 总结其影响因素复杂并包含多种非线性环节的特点, 提出一种优化偏差—偏差变化率算法, 依据系统偏差及偏差的变化率的组合关系将系统运行状态划分阶段, 并在不同的时间段选择不同大小的控制量而产生相应的控制作用。本方法兼顾了稳态精度和动态特性, 并有较好的鲁棒性, 满足了系统较高的控制要求。

1 系统总体分析

1.1 电液控制系统的工作原理

电液伺服控制系统是大型控制系统的执行机构^[1], 一般组成包括: 输入元件、比较元件、放大转换元件

^① 收稿时间:2014-03-24;收到修改稿时间:2014-04-25

(伺服放大器和电液伺服阀)、检测反馈元件(位移传感器)、液压执行元件(液压伺服缸)及被控对象(工作台或其他负载)。它的工作原理是由指令元件发出指令信号,通过电液伺服控制器来控制电液伺服阀的开度,进而控制油缸活塞的位置来驱动执行机构^[2]。其结构框图如图 1 所示。

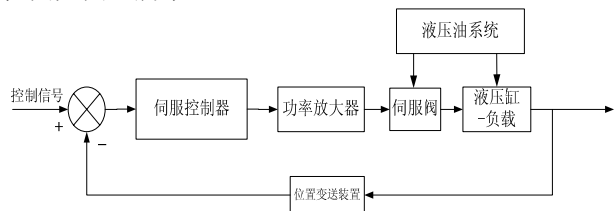


图 1 电液伺服控制系统结构框图

在控制系统中,指令信号和反馈元件传来的信号输入到伺服控制器中,控制器依据两者的偏差值选择合理的控制算法,经放大后产生控制电流,操纵电液伺服阀产生较大功率的液压信号,从而驱动液压伺服缸,并带动负载机构按指令要求运动,最终达到预期的位置上^[3]。

1.2 电液伺服系统模型分析

电液伺服控制系统影响因素复杂,系统本身包含有许多非线性因素:阀的流量—压力非线性,伺服放大器的饱和特性,阀的死区特性,铁磁元件的滞环特性以及摩擦因素。并且在实际中,由于温度、压力等的变化以及空气混入和外界干扰的情况下,系统的许多参数也很难固定在一个确定的值^[4]。

为了分析和研究系统的稳态性能及动态性能,仍需对系统进行适当简化,提取出决定系统性能的主要部分,提炼合理的数学模型。

1) 功率放大器

在实际系统中,功率放大器由集成电子元件组成,响应速度很快,可将其视为一个比例环节^[5],其数学模型为:

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

其中 I ——放大器输出电流, A ; K_a ——放大器增益, A/V ; U ——输入电压信号, V 。

2) 位移传感器

传感器是伺服控制系统中的重要元件,通常要比系统精度高一个数量级,也可视为一个比例环节^[6]。

$$G_f(s) = \frac{U(s)}{Y(s)} = K_f \quad (2)$$

其中 U_f ——位移反馈信号, V ; K_f ——传感器位移/电压转换系数, V/m ; Y ——液压缸输出位移。

3) 伺服阀

电液伺服阀是一种自动控制阀,它既是电液转换组件,又是功率放大组件。由于其输出位移是其内部的一个参数,不容易测量得到,因此通常将伺服阀的空载流量作为输出来确定其特性。可将其看作二阶振荡环节^[7]:

$$G_{sv}(s) = \frac{Q_L(s)}{\Delta I(s)} = \frac{K_{sv}}{s^2 + \frac{2\xi_{sv}}{\omega_{sv}}s + 1} \quad (3)$$

其中 $Q_L(s)$ ——伺服阀的流量表示; $\Delta I(s)$ ——控制电流增量; K_{sv} ——伺服阀流量增益; ω_{sv} ——伺服阀固有频率; ξ_{sv} ——伺服阀阻尼比。

当选用的伺服阀频宽远大于液压固有频率时,伺服阀还可以看作比例环节。

4) 液压缸—负载

位置系统动态分析一般是在零位工作条件下,本系统考虑负载为惯性负载的情况下,忽略管道摩擦损失、流体质量影响和管道动态可推导出液压缸的传递函数^[7]:

$$G_n(s) = \frac{X_p}{Q} = \frac{1}{s \left(\frac{s^2}{\omega_n^2} + \frac{2\xi_n}{\omega_n}s + 1 \right)} \quad (4)$$

其中 X_p ——阀芯位移; Q ——液压缸输入流量; A_p ——液压缸有效工作面积; ω_n ——液压缸固有频率; ξ_n ——液压缸阻尼比。

综上所述可以得到系统的方框图:

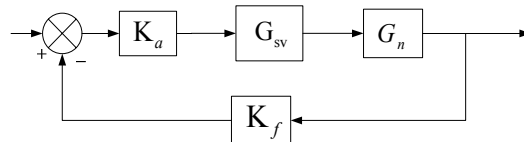


图 2 电液位置系统方框图

2 控制方法的研究

在对液压伺服系统的控制中应用的最为广泛的算法是PID控制算法以及由其衍生而来的智能控制算法。对于PID控制,它是一种线性控制器,将给定值与输出值进行比较获得偏差,将偏差的比例、积分和微分

量线性组合构成控制量, 对被控对象进行控制^[8]. 虽然其控制效果的稳态精度较好, 但是动态特性不能兼顾. 在参数的选取上常常要依赖于对象的数学模型, 且当被控对象机理复杂、具有高度非线性时, 很难找到一组适合的参数用于系统调控. 而对于由 PID 算法演进而来的智能控制算法来说, 算法的运算量很大, 控制方式复杂, 涉及的参数很多, 过于复杂的控制策略不适合工业现场快速地调试.

考虑以上问题, 本文提出一种优化偏差—偏差变化率算法, 控制方法具有非线性控制的特点, 控制策略简单, 且对不同类型信号适应性强, 兼顾了动态性能和稳态精度, 有很好的鲁棒性.

2.1 控制算法介绍

该控制算法不再像以往的控制方法单纯地将系统偏差作为控制器的输入, 而让偏差的变化率同时参与控制, 对系统的运行状况判断将更加细化. 控制器的输出也不再是某些变量的线性组合或者固定不变的方式, 而是可以依据系统运行的状态和工作需要自发地切换控制器的输出大小以达到调整控制量的目的.

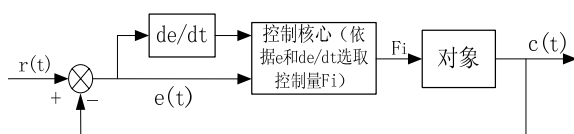


图 3 控制方式示意图

首先要作一些系统描述所需的定义: 设系统给定值为 $r(t)$, 输出响应为 $c(t)$, 则偏差为 $e = r(t) - c(t)$, 偏差变化率为 $\dot{e} = (e_i - e_{i-1})/T$, 其中 T 为采样周期, i 和 $i-1$ 分别为本次采样时刻和上次采样时刻. 在相平面中, 以偏差 e 作为横轴, 偏差变化率 \dot{e} 作为纵轴, 引入系统允许的偏差限 $\pm e_0$, 以及系统允许偏差变化率 $\pm \dot{e}_0$ ^[9], 在不同的组合状态下令控制器输出不同大小的控制量, 控制思路如下:

$e > e_0, \dot{e} > \dot{e}_0$, 代表系统当前输出值小于给定值, 并有向更小的方向偏离的趋势, 控制器应输出一个正向最强的控制量 (F_{4+}); $e > e_0, |\dot{e}| \leq \dot{e}_0$, 代表系统当前输出值小于给定值, 但没有继续变化的趋势, 控制器应输出一个正向次强的控制量 (F_{3+}); $e > e_0, \dot{e} < -\dot{e}_0$, 代表系统当前输出值小于给定值, 但有向给定值方向靠拢的趋势, 控制器应输出一个正向较弱的控制量 (F_{2+}); $|\dot{e}| \leq \dot{e}_0, \dot{e} > \dot{e}_0$, 代表系统当前输出值等于给定值, 但有背离给定值方向的趋势, 控制器应输出一个正向最弱的控制量 (F_{1+}); $e < -e_0, \dot{e} < -\dot{e}_0$, 代表系统当

前输出值大于给定值, 并有向更大的方向偏离的趋势, 控制器应输出一个反向最强的控制量 (F_{4-}); $e < -e_0, |\dot{e}| \leq \dot{e}_0$, 代表系统当前输出值大于给定值, 但没有继续变化的趋势, 控制器应输出一个反向次强的控制量 (F_{3-}); $e < -e_0, \dot{e} > \dot{e}_0$, 代表系统当前输出值大于给定值, 但有向给定值方向靠拢的趋势, 控制器应输出一个反向较弱的控制量 (F_{2-}); $|\dot{e}| \leq \dot{e}_0, \dot{e} < -\dot{e}_0$, 代表系统当前输出值等于给定值, 但有向正向偏离给定值的趋势, 控制器应输出一个负向最弱的控制量 (F_{1-}); $|\dot{e}| \leq \dot{e}_0, |\dot{e}| \leq \dot{e}_0$, 代表系统当前输出值等于给定值, 且没有变化的趋势, 控制器应输出一个很小的保持控制量 (F_0).

以往的演进型智能算法通常只将系统偏差笼统地分为大偏差区和小偏差区, 在大偏差区采用智能控制方法, 而小偏差区仍然沿用传统 PID 控制方式, 不仅大小偏差区的分界难以确定, 而且保证切换平滑上也存在许多难点. 而该优化算法则充分沿用了将偏差分段处理的思想, 并合理的加入了偏差变化率配合控制, 分区更为细化, 控制方式更加贴近人类控制经验. 控制量大小则可以自发切换, 依据细致的分区原则选择对应的控制量, 使系统快速平稳地达到控制要求.

2.2 控制参数选取

根据控制器控制策略要求, $F_i (i = 0, \pm 1, \pm 2, \pm 3, \pm 4)$ 应在满足: $F_{4+} \geq F_{3+} \geq F_{2+} \geq F_{1+}, F_{4-} \geq F_{3-} \geq F_{2-} \geq F_{1-}$ 的一般前提下取值. 总结控制参数的选取具有以下几方面特点: F_{4+} 和 F_{4-} 分别用于抑制负超调和正超调, 为避免抑制作用过大而导致震荡, 延长调节时间, 宜将大小控制在输入信号幅值 10 倍上下; F_{3+} 和 F_{3-} 辅助 F_{4+} 和 F_{4-} 打压系统超调, 作用力略小于 F_{4+} 和 F_{4-} ; F_{2+} 负责上升时间控制, 对于电液位置伺服控制系统来说, 考虑其超调量不宜过大, F_{2+} 也不宜过大; F_{1+} 和 F_{1-} 作用于稳态附近, 有抑制 F_{2+} 和 F_{2-} 过大而给系统带来的剧烈震荡的作用, 可取接近 F_{2+} 和 F_{2-} 的值; F_0 负责稳态平衡时的控制, 一般取较小值使系统稳态时振荡频率较小. 综上可初定: $F_{4+} = 9, F_{3+} = 5, F_{2+} = 2, F_{1+} = 1, F_0 = 0.01, F_{1-} = -2, F_{2-} = -5, F_{3-} = -9, F_{4-} = -12$, 依据控制效果进行细微调整.

3 控制效果与分析

在伺服控制系统中, 与其他组件相比起来, 动力机构的液压固有频率往往是最底的, 其参数变化对系统动态性能有着决定性的影响^[7]. 实验中, 分别研究在动力机构的阻尼比 ξ_n 以及固有频率 ω_n 发生变化时, 使用同一套控制参数(2.2 节中参数)的控制器对系统的调节情况.

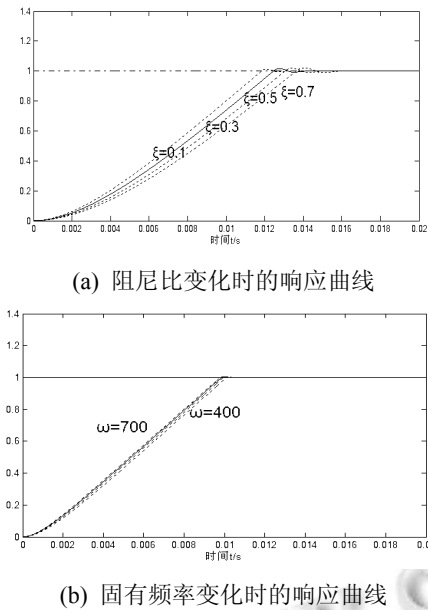


图 5 ξ_n 以及 ω_n 发生变化时的响应曲线

图 5(a)为阻尼比 ξ_n 分别等于 0.1,0.3,0.5,0.7 时的响应曲线, 图 5(b)为固有频率 ω_n 从 700 变化到 400 的响应曲线. 从实验结果可以看出, 对于同一套控制参数, 在系统参数发生了变化, 系统的响应情况变化较小, 控制效果无明显波动, 性能较为稳定.

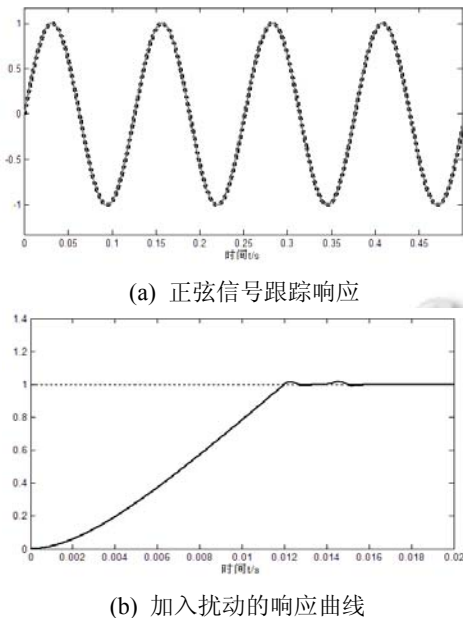


图 6 跟踪响应及抗干扰能力

图 6(a)显示当系统给定变为正弦信号时的输出响应跟踪情况, 图中点状曲线为输出响应曲线, 颜色较浅的灰色曲线为输入的正弦信号, 两条曲线基本重合. 由图可以看出, 其跟踪效果良好, 对信号变化的适应性强.

为探究系统的抗干扰能力, 在 0.014s 时刻加入 15% 的瞬时扰动信号. 由图 6(b)中曲线可看出, 系统迅速做出调节, 在出现微小波动后立刻恢复到稳态. 有很好的抗扰能力.

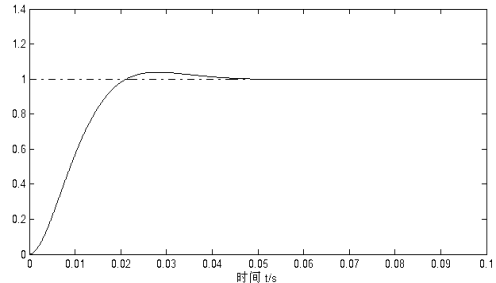


图 7 PID 控制响应曲线

图 7 为传统 PID 控制方式下系统响应曲线. 由图上数据可知, 系统调节时间大于 0.04s, 超调量 4%. 采用优化偏差—偏差变化率算法系统调节时间不超过 0.015s, 超调量也小于 2%.

4 总结

本文中, 将优化偏差—偏差变化率算法用于电液伺服控制系统, 克服了传统算法单一线性控制的缺点, 兼顾了动态和稳态性能, 并且控制策略简单, 对不同信号适应性强, 具有很强的鲁棒性. 实验数据显示系统拥有较快的响应速度, 超调量小, 并有较高的精度, 抗扰动性能好, 满足较高的控制要求.

参考文献

- 1 王栋. 基于嵌入式系统的电液伺服控制器设计与研究[学位论文]. 洛阳: 河南科技大学, 2007.
- 2 易孟林, 曹树平, 刘银水. 电液控制技术. 武汉: 华中科技大学出版社, 2010.
- 3 王延年, 郭卫松, 陈苗苗. 基于 DSP 的高精度智能电液伺服控制器的设计. 西安工程大学学报, 2013, 2: 198-202.
- 4 靳宝全. 电液位置伺服控制系统的模糊滑模控制方法研究[学位论文]. 太原: 太原理工大学, 2010.
- 5 黎启柏. 液压元件手册. 北京: 冶金工业出版社, 1999.
- 6 许建. 液压传动伺服系统控制算法的研究与应用[学位论文]. 济南: 山东大学, 2008.
- 7 高霞. 基于 DSP 的 TRT 液压伺服调节器研究与设计[学位论文]. 西安: 西安工程大学, 2010.
- 8 Ito K, Ikeo S. PID control performance of a water hydraulic servomotor system. Proc. of the 41st SICE Annual Conference. 2002, 3. 1732-1735.
- 9 谭思云, 徐武雄. 九点控制器的相平面分析. 武汉理工大学学报(信息与管理工程版), 2002, 5: 114-116.