

doi: 10.3969/j.issn.1007-855x.2009.04.006

连铸结晶器非正弦振动电液伺服系统 设计及改进型 PID 仿真

俞婕¹, 胡大超²

(1. 上海石化工业学校, 上海 201512; 2. 上海应用技术学院, 上海 200235)

摘要: 随着钢铁连铸的发展, 结晶器振动技术的发展成为提高生产效率, 改善铸坯产品质量的主要手段。基于先进的液压伺服技术, 建立由电液伺服阀、伺服油缸等组成电液伺服激振系统, 根据实际生产参数建立数学模型。同时还在研究加入了改进式 PD 控制方法, 并由 MATLAB 进行结晶器伺服系统仿真分析, 证明控制方法对系统的快速性、精确性、稳定性都有显著提高, 也说明了此系统具有很强的实用型。

关键词: 电液伺服; 结晶器; 非正弦振动; PD 控制

中图分类号: TG316.8 **文献标识码:** A **文章编号:** 1007-855X(2009)04-0022-05

Design of Continuous Casting Crystallizer Oscillation Electro - Hydraulic Servo System and Its Improved PID Simulation

YU Jie¹, HU Da-chao²

(1. Shanghai Petrochemical Academy, Shanghai 201512, China; 2. Shanghai Institute of Technology, Shanghai 200235, China)

Abstract: With the development of steel continuous casting, crystallizer oscillation technology becomes an important measure to increase productivity and improve product quality. In this paper, based on the advanced hydraulic servo technology, a servo oscillation system is set up by electro-hydraulic servo valve, servo cylinder and so on. Digital models are then built according to actual production parameters. The improved PD control method is also introduced. Finally, MATLAB is adopted to simulate and analyze this system. The system is proved to be quick, accurate, stable and highly feasible.

Key words: electro - hydraulic servo system; crystallizer; non-sine oscillation; PD control

0 引言

结晶器是连铸设备中的关键部件, 其振动形式和振动参数会直接影响到铸坯的表面质量。对于现在连铸技术中最热点的非正弦振动技术, 在国内一般还以直流电机或交流电机驱动偏心轮实现。采用最新的电液伺服驱动的连铸结晶器激振系统, 与前者相比, 电液伺服系统在实现非正弦振动的时候, 可在线调整控制, 并可以明显改善结晶器保护渣的润滑, 有效地减少坯壳与结晶器之间的摩擦力, 减少铸坯振痕, 提高铸坯质量和金属收得率等优点。系统采用先进的电液伺服控制技术是结晶器振动系统设计上的一个突破, 其控制精度更高、响应更快、系统稳定性更高。并且运用先进的数字仿真手段, 以模糊控制理论对系统控制性能进行了分析研究。

收稿日期: 2008-12-04 基金项目: 上海市教育委员会重点学科建设资助项目 (项目编号: J51501); 上海市教育委员会科研创新重点项目 (项目编号: 09ZZ197)。

第一作者简介: 俞婕 (1983-), 女, 硕士, 助教。主要研究方向: 连铸技术开发应用。E-mail: borryjie@yahoo.com.cn

1 系统描述

根据委托方技术要求和调整方案,参考实际生产的工况及振动需要的频率、振幅范围,经过研究分析,选取结晶器在常用工况下的要求进行系统设计:

结晶器负载范围为 0 ~ 4 500 kg;振动频率为 0 ~ 300 min⁻¹ (取常用数值 240 min⁻¹);

结晶器端振幅为 0 ~ 25 mm (取常用数值 6 mm);偏斜率为 0 ~ 0.5 (取常用数值 0.4).

同时考虑系统中负载存在设备重力,钢水重力,浇铸情况下的干摩擦和粘性摩擦等因素适当放大系统的可靠系数.要求保证系统运行后精度高、响应快、振动平稳.

在连铸结晶器振动过程中,结晶器端总负载组成为以下几部分:结晶器装置自身重量、负载惯性力以及振动过程中结晶器内壁与铸坯间的摩擦力,包括干摩擦和粘性摩擦,进行结晶器振动端到液压缸端的负载折算,并由计算机采集的在液压缸驱动端的振动位移、速度参数.

当液压伺服缸端非正弦振动参数设置为: A = 6 mm, ω = 240 Hz, β = 0.4 最大功率点功率 P_{max} = 15.1 kW,此时负载力 F_{Lmax} = 37 397.79 N,负载振动速度 v_{Lmax} = 0.4 046 m/s 以最大功率点为参照选择系统压力 P_s = 16 kW.

2 方案设计

2.1 系统主要构成

电液伺服连铸结晶器振动系统主要执行元件(高精度伺服油缸)、控制元件(电液伺服阀及其控制器)、液压泵站和其他一些辅助元件组成.连铸结晶器振动系统把正弦或非正弦信号作为输入信号,通过计算机发出相应的振幅,振频,偏斜率信号进入到 PD 控制器,输出控制指令到伺服阀控制器,从而控制伺服阀的开口量从而驱动液压缸运动.输出的位移由位移传感器测得与输入的位移指令信号作比较来纠正偏差,构成闭环控制来提高系统精度已满足设计要求.

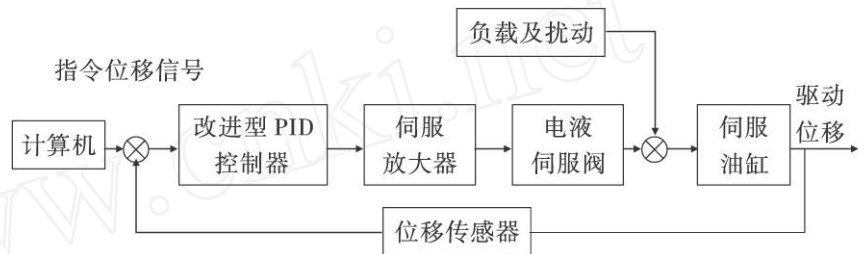


图 1 电液伺服系统原理图

Fig1 Electro - hydraulic servo system

2.2 振动曲线的确定

结晶器非正弦振动可以达到上升时间比下降时间长,即正滑动时间增长,负滑脱时间减少,从而加大得马克公司振动曲线

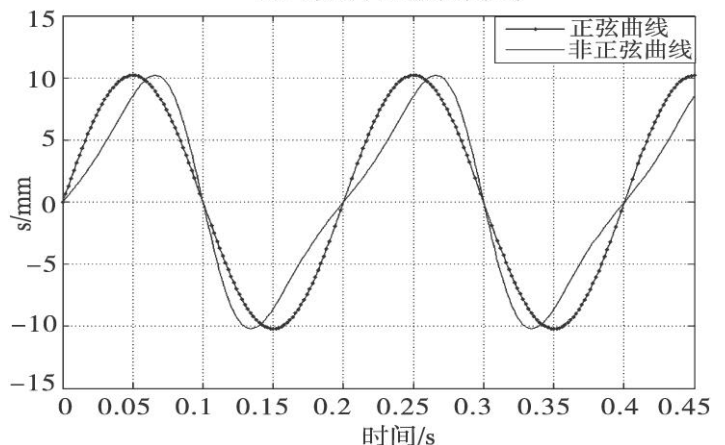


图 2 非正弦振动曲线图示

Fig.2 Non - sine oscillation curve

在设计中,采用德马克公司开发的的非正弦振动曲线,描述为:

$$x(t) = A \sin[\omega t - h \sin(\omega t)]$$

$$h = \frac{\beta}{2} / \cos(\frac{\beta}{2})$$

式中:A——结晶器振动振幅,mm;
β——非正弦振动曲线偏斜率;
ω——结晶器振动频率,(min⁻¹).

波形偏斜率 β 取 0 ~ 0.5 之间,当 β = 0

时振动曲线为正弦曲线,当 $0 < \zeta < 0.5$ 时振动曲线为非正弦曲线. 当分别取 $\zeta = 0$, $\zeta = 0.4$ 时, 曲线对比如图 2 所示.

2.3 电液伺服控制系统的数学模型

2.3.1 伺服液压缸的传递函数建立

根据液压系统动力元件最佳匹配参数条件, 初算液压缸的有效面积 A :

$$A = \frac{3}{2} \frac{F_{L\max}}{P_s} = \frac{3}{2} \cdot \frac{37\,397.79}{16 \times 10^6} = 3.506 \times 10^6 \text{ m}^2$$

选择液压缸活塞直径 $D = 80 \text{ mm}$, 活塞杆直径 $d = 45 \text{ mm}$, 其实际作用面积 $A_p = 3.436 \times 10^{-6} \text{ m}^2$, 活塞总行程 $S = 50 \text{ mm}$, 液压缸总有效压缩体积: $V_t = 1.72 \times 10^{-4} \text{ m}^3$, 经验证满足系统需要.

由于伺服系统负载主要是惯性负载, 忽略弹性负载的存在, 液压缸活塞位移 X_v 与负载流量 Q 的传递函数为:

$$\frac{X_v}{Q} = \frac{1}{A_p} \frac{1}{s^2 \frac{V_t^2}{h} + \frac{2}{h} s + 1}$$

式中: ω_h —— 液压缸固有频率, 经计算取 $\omega_h = 355 \text{ rad/s}$; ζ_h —— 液压阻尼比, 经计算 $\zeta_h = 0.2$. 液压缸活塞位移 X_v 对负载力 F 的传递函数为:

$$\frac{X_v}{F} = \frac{-\frac{K_{ce}}{A_p^2} \left(\frac{V_t}{4 e K_{ce}} s + 1 \right)}{s^2 \frac{V_t^2}{h} + \frac{2}{h} s + 1}$$

式中: K_{ce} —— 液压缸总流量压力系数, 计算取 $K_{ce} = 4.286 \times 10^{-12} \text{ m}^3 / (\text{s} \cdot \text{Pa})$; e —— 有效体积弹性模量, 一般取 690 MPa .

2.3.2 电液伺服阀的传递函数建立

伺服阀流量应满足液压缸活塞杆最大运动速度, 但根据最大功率点的速度, 计算此时的额定负载流量 Q , 同时为了保证系统的可靠性将数值放大 150% :

$$Q = v_{\max} A_p \times 150\% = 0.4046 \times 3.436 \times 10^{-6} \times 150\% = 125.1 \text{ L/min}$$

设计中的伺服阀采用美国 MOOG 公司的高精度带集成放大器的 D661 系列产品, 确定选用 D661G60 电液伺服射流管先导阀, 额定流量 $Q_N = 160 \text{ L/min}$, 电流增量 $I = 20 \text{ mA}$, 伺服阀频率 $\omega_{sv} = 448.6 \text{ rad/s}$.

在连铸设备中, 一般电液伺服阀的频率略高于动力元件液压固有频率, 故将阀函数视为一个二阶振荡环节, 其传递函数:

$$\frac{Q}{I} = \frac{K_{sv}}{s^2 \frac{V_t^2}{h} + \frac{2}{h} s + 1}$$

式中: ζ_{sv} —— 电液伺服阀等效阻尼比, 根据经验取 $\zeta_{sv} = 0.7$; K_{sv} —— 电液伺服阀增益, 根据产品样本计算得 $K_{sv} = 0.151 \text{ m}^3 / (\text{s} \cdot \text{A})$.

3 电液伺服系统性能分析

对任何系统做控制分析和研究都必须建立在一个稳定的系统上, 所以设计时首先建立不带 PD 调整环节的结晶器振动伺服系统, 在工程控制仿真软件 MATLAB Simulink 功能块中建立方框图, 输入具体数值, 并考虑干扰因素, 考察系统的静态特性, 如图 3 所示.

将系统做线性分析, 得到开环博德图见图 4, 从图中可知其幅值余量为 6.38 dB , 相位余量为 71° , 符合系统稳定性条件 (幅值余量应为 $6 \sim 12 \text{ dB}$, 相位余量应为 $70 \sim 80^\circ$).

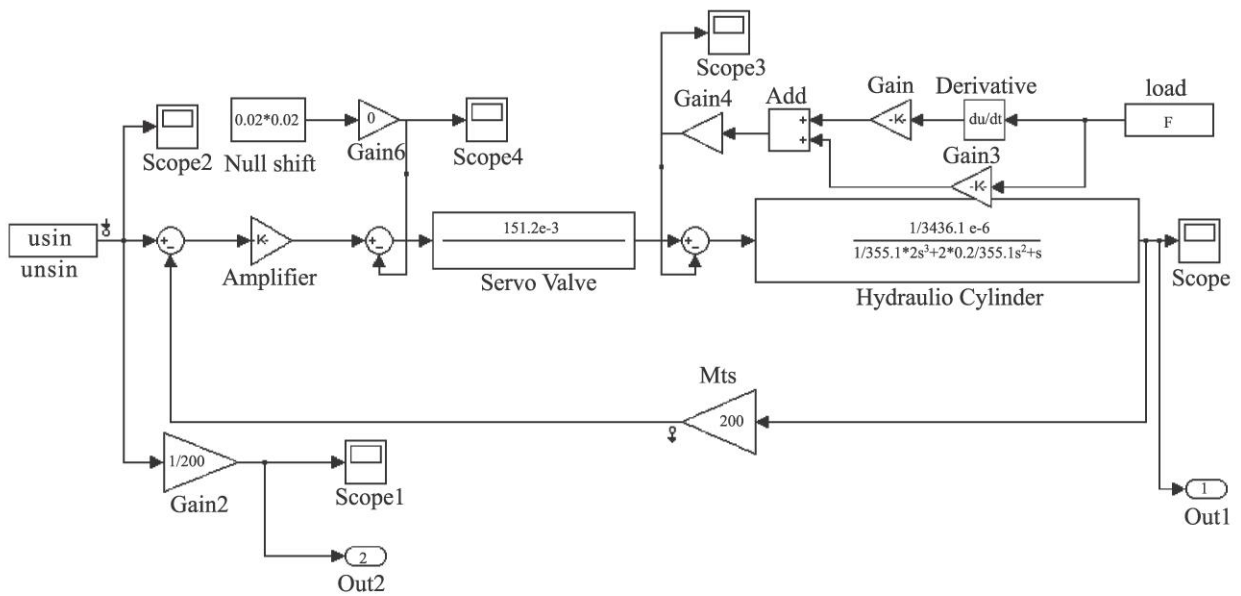


图 3 电液伺服连铸结晶器振动系统控制仿真界面

Fig 3 Simulation interface of continuous casting oscillation electro-hydraulic servo system

4 改进型 PD 控制仿真分析

在系统中加入 PD 控制环节如图 1 中所示,以提高结晶器伺服系统的抗干扰性和动态响应性.设计中引用了一种改进型的 PD 控制环节,其传递函数为

$$G_c(s) = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} + \frac{T_d s}{1 + T_d N} \right)$$

式中 K_p ——比例环节参数; T_i ——积分环节参数; T_d ——微分环节参数; N ——常数,取 $N = 10$

在传统 PD 控制中,微分环节通常用 $T_d s$ 表示,这里将它近似成一个惯性环节,对系统的调节作用与传统微分环节相同.此时考察 $N = 10$ 时微分环节的误差信号 $e(t) = 1 - y_d(t)$ 的阶跃响应,发现当 $t=0$ 时误差信号会有一个跳跃,这样会对系统的执行机构造成冲击.为了缓解这样的冲击,把微分动作放置在反馈路径中,此时输出信号是很平滑的.这样的 PD 控制策略及其等效结构如图 5 所示.

在 Simulink 中做出系统的单位阶跃响应曲线,对比基础系统,传统 PD 系统,改进型 PD 系统的动态响应特性,如图 6~8 所示,可以看出,改进型 PD 控制策略在结晶器电液伺服系统中有很好的控制效果.

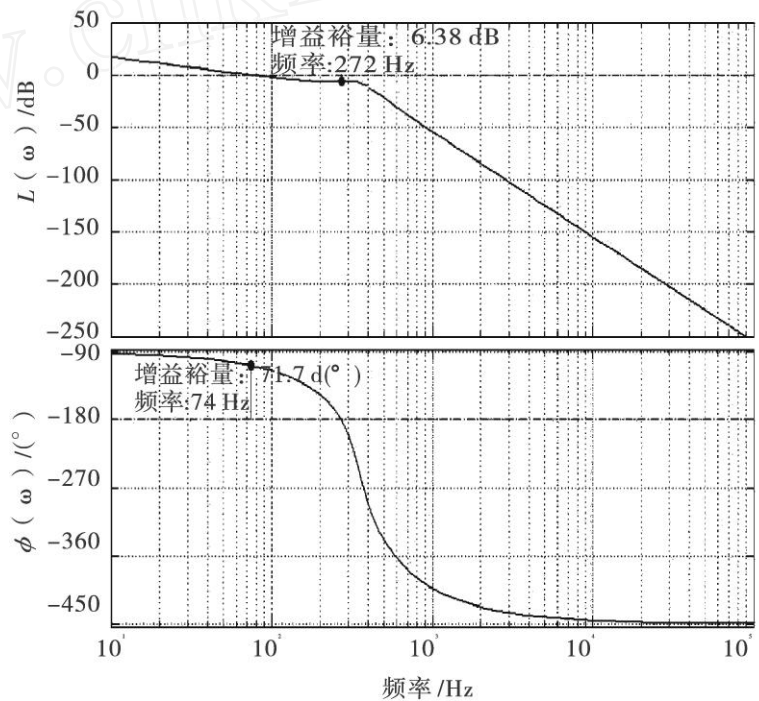


图 4 系统开环波德图

Fig 4 Bode analysis of open loop system

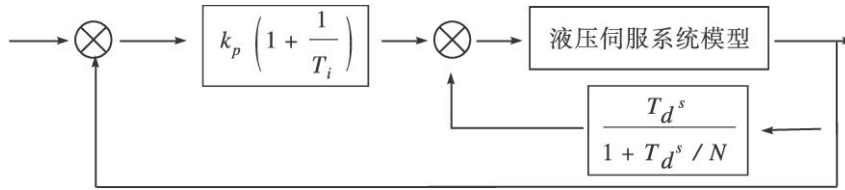


图 5 改进型 PD 控制策略等效结构图

Fig 5 Structure diagram of improved PD control system

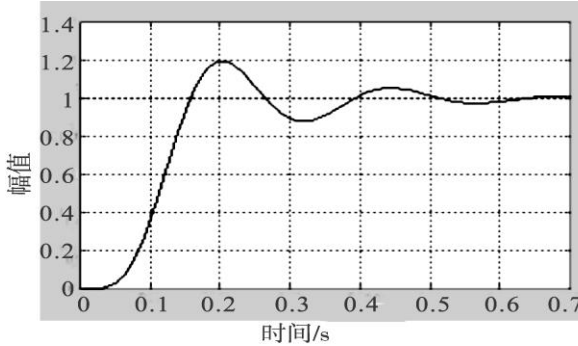


图 6 基础系统阶跃响应

Fig 6 Step response on basic system

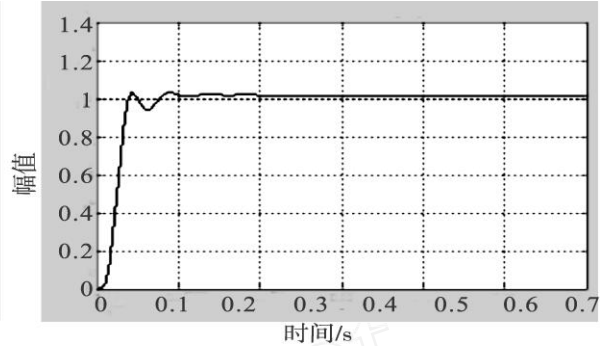


图 7 传统 PD 系统阶跃响应

Fig 7 Step response on PD control system

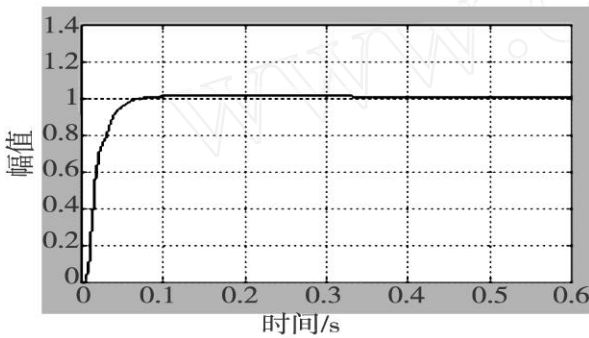


图 8 改进型 PD 阶跃响应

Fig 8 Step response on improved PD control system

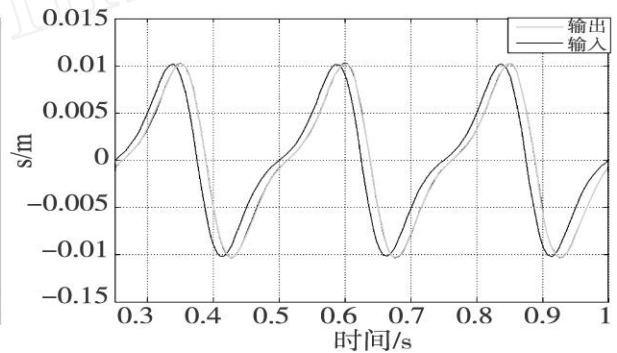


图 9 振动曲线对比

Fig 9 Input and output comparison of oscillation curve

5 结论

此系统经调试,得实时检测到的振动曲线对比,如下图 9 所示。(参数为常用工况下,振动频率为 4 Hz,振幅为 6 mm、偏斜率为 0.4)

从试验分析与仿真模拟结果中体现出,结晶器电液伺服系统已经达到:

- 1) 振动均匀、平稳,曲线跟随良好,没有出现失真、波动等不良显现;
- 2) 振动噪音低,从观察上看来摩擦力得到有效降低,增强了系统的使用寿命;
- 3) 改进型 PD 控制方法可以更好的提高系统的性能,有推广的价值。

参考文献:

- [1] 陈新元. 电液伺服激振系统设计与仿真 [J]. 机床与液压, 2006 (12): 108 - 109.
- [2] 梁利华. 液压传动与电液伺服系统 [M]. 哈尔滨: 哈尔滨工程大学出版社, 2005.
- [3] 张静. MATLAB 在控制系统中的应用 [M]. 北京: 电子工业出版社, 2007.