

轴流风机防喘液压数字伺服控制系统的设计与研究

赵久梁

(首钢总公司)

摘 要 针对轴流鼓风机防喘调节的特殊要求,应用液压伺服控制理论、离散控制理论,研究设计了两套数字式液压伺服控制系统,经在首钢实际运行表明,其结构简单、性能可靠,具有一定的推广价值。

关键词 轴流鼓风机 防喘调节 液压伺服 数字控制 分析校正

STUDY AND DESIGN OF DIGITAL AERVO CONTROL SYSTEM FOR ANTI-SURGE REGULATION ON AXIAL BURBO-COMPRESSOR

ZHAO Jiuliang

(Shougang Iron and Steel Group)

ABSTRACT Aiming at the special request of the axial turbo-compressor for anti-surge regulation, the theory of hydraulic servo control and digital control technology were used to study and design hydraulic digital servo control system. Application at Shougang Co., has proved that the device is of simple structure, high reliability, quick response and high precision.

KEY WORDS axial turbo-compressor, anti-surge regulation, hydraulic servo, digital control, correcting link

1 前言

喘振是气体压缩机固有特性,尤其是大型轴流鼓风机,喘振的危害更为严重,所以必须设置防喘装置,防止喘振现象的发生。防喘控制的核心就是对防风阀的开度进行控制,常见的形式有机液控制系统、电液比例控制系统、FISHER 公司 320 系列电磁阀及电液伺服控制系统等。首钢 6 号高炉鼓风机 (AV80,风量 $5500 \text{ m}^3/\text{min}$) 放风阀采用电液比例控制,自 1994 年投产至今,故障频发,严重制约了风机的正常运行,给高炉生产造成了较大的影响,为改变

这一现状,在液压伺服系统的基础上,根据防喘控制对调节装置的性能要求,利用数字技术替代模拟电路,开发两套数字式防喘液压伺服调节装置,以满足高炉生产的要求。

2 组成及原理

液压数字伺服系统组成如图 1。图中 $x(t)$ 是连续指令信号 (来自于上机), $y(t)$ 是连续输出信号,在防喘控制中,即是放风阀的开度, $y(t)$ 通过传感器产生的负反馈信号 $b(t)$, $x(t)$ 、 $b(t)$ 分别进入 A/D 转换器,将模拟信号转化为数字信号 $x(kt)$ 、

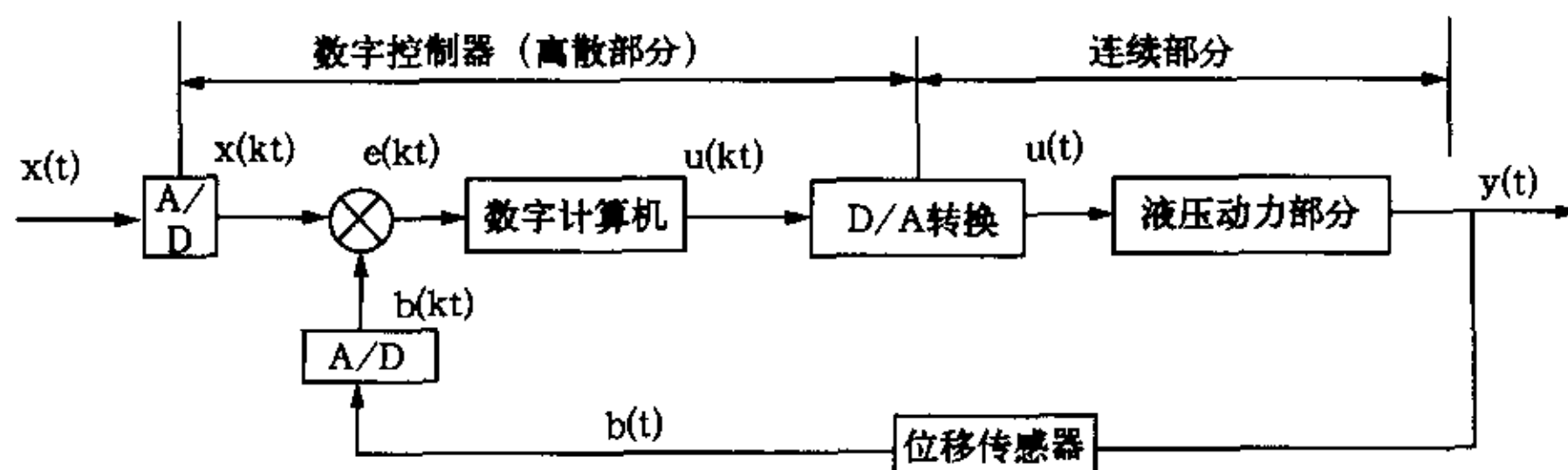


图 1 防喘液压数字伺服系统组成原理图

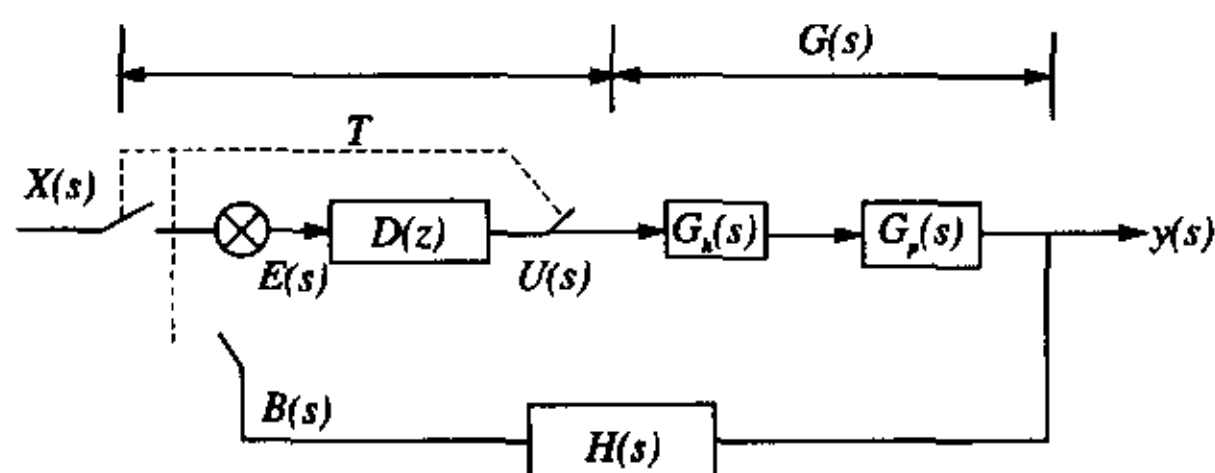


图 2 防喘液压数字伺服系统方框图

$b(kt)$, 由数字计算机进行比较计算产生误差数字信号 $e(kT)$, 通过放大及调节处理, 得到了数字序列 $u(kT)$, 再 D/A 转换器, 产生连续控制信号 $u(t)$, 对动力执行部分实现控制。系统的控制框图如图 2 所示, $D(s)$ 是控制器的传递函数, $G_h(s)$ 是保持器的传递函数, $G_p(s)$ 是动力部分的传递函数, $H(s)$ 是传感器的传递函数, 连续部分的传递函数 $G(s) = G_h(s) \cdot G_p(s) \cdot H(s)$ 。

3 连续部分的设计与传递函数

3.1 液压部分的原理

液压动力部分的原理如图 3。该回路主要由伺服阀 1、电磁换向阀 2、油缸及弹簧装置 3 和放风阀门 4 组成。伺服阀型号为 MOOG76-104, 额定流量 $Q_R = 57 \text{ L/min}$, 额定电流 $I_R = 0 \sim 100 \text{ mA}$, 响应频率 $f_{sv} = 90 \text{ Hz}$ 。油缸活塞面积 $A_c = 38.5 \text{ cm}^2$, 行程 $h = 127 \text{ mm}$ 。弹簧刚度 $K = 147 \text{ N/mm}$, 钢丝直径 $d = 28 \text{ mm}$, 预压缩量 $f_1 = 71 \text{ mm}$, 最大压缩量 $f_2 = 197 \text{ mm}$ 。电磁阀型号为 4WE5A60/G24Z4, 背压为 1 MPa 左右时, 流量保证在 60 L/min 。其工作原理如下: 正常工作状态下, 电磁阀 2 总是处于得电状态, 由伺服阀控制油缸伸出位置, 保证放风阀处于设定的开度。在系统断电, 亦即事故状态时, 电磁阀 2

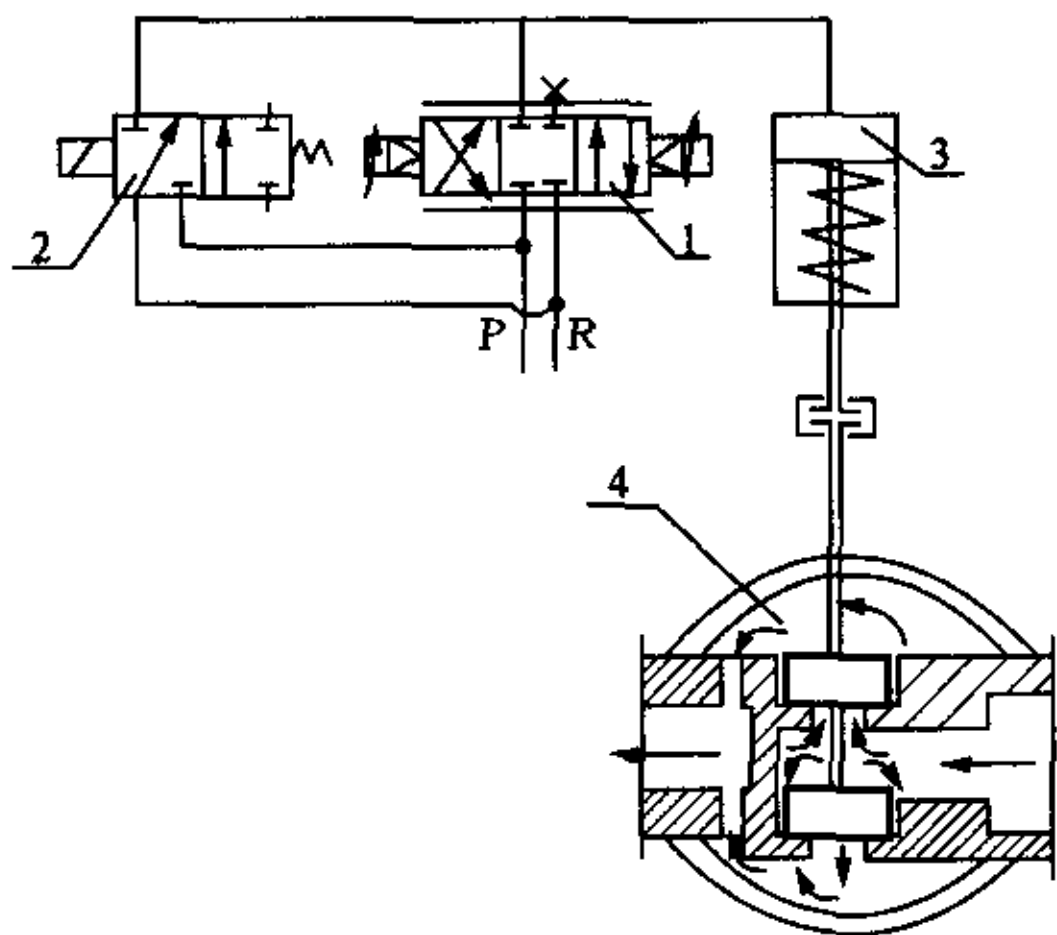


图 3 液压原理图

失电, 伺服阀回中位, 油缸在弹簧回程力的作用下缩回, 放风阀处于全开状态, 这样使鼓风机处于放风状态, 保证风机的安全运行。

3.2 连续部分的传递函数

(1) 液压部分传递函数

图 3 所示的系统属于三通阀控制不对称缸系统, 由于液压弹簧刚度 K_h 远大于机械弹簧刚度 K , 忽略负载的影响, 经计算其传递函数为:

$$G_0(s) = \frac{X_p(s)}{Q_0(s)} = \frac{11327}{(1 + \frac{s}{0.023})(\frac{s^2}{302^2} + \frac{0.2}{302}s + 1)}$$

(2) 伺服阀的传递函数

$$G_{sv}(s) = Q_R / I_R = 1.9 \times 10^{-2} \text{ m}^3 / \text{A}$$

(3) 保持器的传递函数

$$G_h(s) = \frac{1 - e^{-Ts}}{s}$$

4 系统传递函数的计算及校正

4.1 连续部分的传递函数及 Z 变换

图 2 所示, $G(s)$ 由三部分组成, 即保持器(D/A 转换器)传递函数 $G_h(s)$ 、动力部分传递函数 $G_p(s)$ 、传感器传递函数 $H(s)$ 。其中 $G_p(s)$ 由伺服阀的传递函数 $G_{sv}(s)$ 和 $G_0(s)$ 组成。 $G_p(s) = G_{sv}(s) \cdot G_0(s)$

位移传感器输出电流为 $4 \sim 16 \text{ mA}$, 检测位移范围为 126 mm , 则传感器的传递函数: $H(s) = 0.127 \text{ A/m}$ 。

根据 $G(s) = G_h(s) \cdot G_p(s) \cdot H(s)$ 得:

$$G(s) = \frac{5.75 \times 10^4 \times (1 - e^{-Ts})}{s(s + 0.023)(s^2 + 2 \times 30.2s + 91204)} \quad (3)$$

选用采样周期 $T = 200 \text{ ms}$, 将式(4)分解成部分分式, 查 z 变换表, 经通分整理并忽略分子及分母中极小系数, 得出连续部分传递函数 z 变换的表达式为:

$$G(z) = \frac{0.125z^{-1}}{(1 - 0.9954z^{-1})(1 + 0.0045z^{-1})} \quad (4)$$

4.2 连续部分稳态误差分析及校正环节的计算

由式(4)可知, $G(z)$ 中, 没有 $z = 0$ 的极点, 所以连续部分属于 0 型系统, 对于阶跃输入, 位置稳态误差 $e_{ss} \neq 0$ 。

位置误差系数 $K_p = \lim_{z \rightarrow 1} [1 + G(z)] = 1 +$

$$\frac{0.125}{(1 - 0.9954)(1 + 0.0045)} = 29.3$$

位置稳态误差 $e_{ss} = \frac{1}{K_p} = 0.0342$, 显然要获得稳态误差为零, 必须加校环节。

选用 PI 调节器可以消除连续部分的稳态误差, 通过校正, 欲消除 $G(z)$ 中 $1 - 0.9954z^{-1}$ 因子, 则其传递函数 $D(z)$ 为:

$$D(z) = \frac{b_1 + b_0 z^{-1}}{1 - z^{-1}} = \frac{b_1(1 - 0.9954z^{-1})}{1 - z^{-1}} \quad (5)$$

由式(5)得出数值控制器的差分方程为:

$$u(k) = b_0 e(k-1) + b_1 e(k) \quad (6)$$

其中 $b_0 = -K_p$, $b_1 = K_p + T/T_i$, $b_0/b_1 = -0.9954$, K_p 为放大器的放大系数, T_i 为积分时间, 可以由控制器来设定和调整。

5 数字控制器的设计

数字伺服控制器硬件由数据采集处理和键盘显示两部分电路组成, 数据采集处理由 80C51CPU 基核、ADC0809 八位模数转换器、DAC0832 数模转换器及 74H373 地址锁存器及相应的电路组成。键盘显示装置由串行输入并行输出移位寄存器 74LS164、8 路三态反向缓冲器 74HC240、4 路集电极反相门电路 7404、四位八段数码管、 1×8 按键等组成。

软件包括主程序和中断采样数据处理子程序、方波发生子程序、显示及修改子程序以及延时 100 ms 子程序等。采样及数据处理采用中断方式, 中断

采样的周期选为 200 ms, 由 0 号及定时器设置 100 ms, 延时 100 ms 只要时间一到, 在保护现场的情况下, CPU 优先进行数据采集及处理, 并按式(6)进行比较计算。方波发生子程序输出高频底幅的方波, 以保证伺服阀良好的动态性能, 显示及修改子程序可以对输入、输出、反馈等值的显示及放大系数、伺服阀零点等参数的修改。

6 系统的性能分析与校核

6.1 动态分析与校核

系统闭环传递函数为:

$$G_b(z) = \frac{y(z)}{x(z)} = \frac{0.125b_1 \cdot z^{-1}}{1 + z^{-1}(0.125b_1 - 0.9955)} \quad (7)$$

设 $x(z)$ 为阶跃函数, 则系统阶跃响应表达式为:

$$y(z) = \frac{1}{1 - z^{-1}} - \frac{1}{1 - mz^{-1}} = \sum_{n=0}^{\infty} z^{-k}(1 - m^k) = \sum_{n=0}^{\infty} a_k z^{-k} \quad (8)$$

式中:

$$m = -0.125b_1 + 0.9955, a_k = 1 - m^k \quad (9)$$

由 z 变换的定义可知:

$$y(kT) = a_k = 1 - m^k \quad (10)$$

由 $b_0/b_1 = -0.9954$ 和 $b_0 = -K_p$ 推导得:

$$b_1 = 1.005K_p \quad (11)$$

取不同的 K_p 值, 由式(11)、(10)、(9)计算结果见表 1。

表 1 系统单位阶跃响应

K_p	b_1	m	z^{-k} 的系数	$\Delta < 0.02$ 的 k 值	备注
2	2.01	0.7455	$1 - 0.7455^k$	14	收敛无超调
4	4.02	0.4955	$1 - 0.4955^k$	6	收敛无超调
5	5.025	0.3705	$1 - 0.3705^k$	5	收敛无超调
6	6.03	0.2455	$1 - 0.2455^k$	3	收敛无超调
7	7.035	0.1205	$1 - 0.1205^k$	2	收敛无超调
8	8.04	-0.0005	$1 - (-0.0005)^k$	1	收敛极小超调
9	9.045	-0.1295	$1 - (-0.1295)^k$	2	收敛有超调
10	10.05	-0.2545	$1 - (-0.2545)^k$	3	收敛有超调
12	12.06	-0.5045	$1 - (-0.5045)^k$	6	收敛超调大
14	14.07	-0.7545	$1 - (-0.7545)^k$	14	收敛超调大
15	15.075	-0.8795	$1 - (-0.8795)^k$	30	收敛超调大
16	16.08	-1.005	$1 - (-1.005)^k$		发散不稳定

注: 上表中 $\Delta = |1 - a_k|$

根据表 1 绘制出该数字液压伺服系统阶跃响应曲线如图 4。由表 1 及图 4 得出以下结论:

(1) $K_p > 15$, $a_k = 1 - m^k$ 数列发散, 系统不稳定, 系统在初始调整时要离开此区域。

(2) $8 \leq K_p \leq 15$, 系统响应速度快, 跟踪性能好, 但出现超调, 稳定性稍差。 $K_p < 8$, 系统响应速度稍慢, 稳定裕量大。

(3) $6 \leq K_p \leq 10$, 系统在 3 拍之内达到稳定值, 建议系统在初始调整, 选该用范围的 K_p 值。

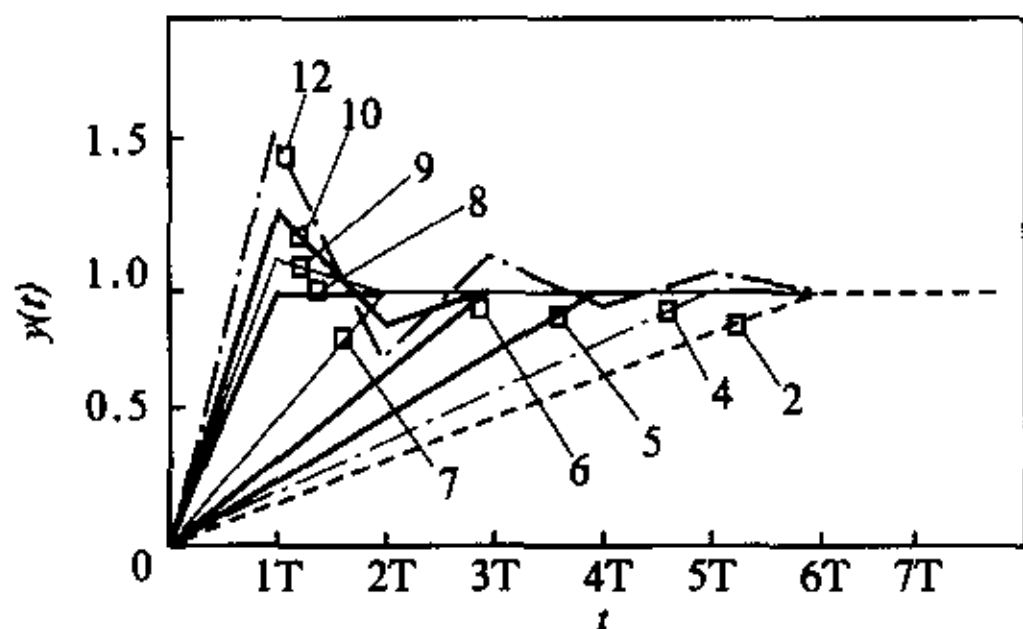


图 4 系统阶跃响应曲线

图中向曲线的数字为 K_p 的值 ($=2 \sim 12$)

6.2 系统控制精度分析

对于位置输入来说, 系统是 I 型系统, 从理论上位置误差应该为零。但是系统元件会引起误差, 主要误差有: 伺服阀的零漂和滞回 ($1\% \sim 2\% i_R$); 液压缸摩擦产生的不敏感区 ($0.5\% \sim 1\% i_R$) 等。括弧内的 i_R 为伺服阀的额定电流 (50 mA)。当这些干扰为常量时, 由此引起的位置误差为:

$$e_p = \frac{\pm 0.02 i_R}{K_p K_f} = \frac{\pm 0.02 \times 0.05}{K_p \times 0.127} = \frac{0.00787}{K_p}$$

在 $K_p = 6 \sim 10$, 则 $e_p = 1.31 \sim 0.79 \text{ mm}$

由于系统要求位置误差小于全行程的 1% , 则允许误差, $\Delta = 0.01 \times 126 = 1.26 \text{ mm}$, K_p 取值范围 $7 \sim 10$ 时, 即可满足系统提出的要求。此时 $e_p = 1.14 \sim 0.8 \text{ mm} < \Delta$ 。

7 应用及结论

该套防喘液压数字伺服系统装置于 2000 年 11 月完成, 原计划安装在首钢 6 号风机上, 但由于首钢 7 号风机 (型号 AV100, 风量 $7000 \text{ m}^3/\text{min}$, 电机功率 36140 kW) 在试车过程中, 由于管道振动使原有的防喘调节装置损坏, 在无法及时修复的情况下, 采用了该套系统。在一年多的运行过程中, 该系统控制的阀门开度定位误差小于 1% , 动作可靠, 性能稳定, 没有发生故障, 而且维护量小, 参数容易调节, 受到了现场作业人员的好评。

目前, 国内大型轴流鼓风机放风阀及控制装置都是成套进口, 本套液压数字伺服系统是在消化国外技术的基础, 首次采用了数字控制技术, 除伺服阀、传感器部件进口外, 主要元件都是国内设计制造, 其技术等级达到了国际先进水平, 提高了国内大型轴流鼓风机的配套能力, 有较好的经济效益和社会效益。