

# 基于数字信号处理器的数字式控制插卡

侯世刚, 殷治国, 夏乐

(中国原子能科学研究院 串列升级工程技术部, 北京 102413)

**摘要:**研制了用于加速器射频低电平系统的数字信号处理器(DSP)控制卡。该插卡使用两个数字信号处理器,实现了3路PID(比例-积分-微分)调整、在线参数整定等功能。与传统模拟控制相比,数字控制方式具有较高的灵活性,降低了100 MeV加速器射频系统,特别是射频低电平系统开发的复杂程度。控制器输入级使用采样率为500 kHz的18位高精度高速AD转换器,经测量,控制带宽高于20 kHz。此数字控制器已用于100 MeV加速器低电平控制系统试验原型。经测试,控制器增益及零点在控制器带宽内全程可调。

**关键词:**数字比例积分控制器;数字信号处理器;射频低电平控制

中图分类号:TL273.5

文献标志码:A

文章编号:1000-6931(2008)02-0155-04

## Digital Control Card Based on Digital Signal Processor

HOU Shi-gang, YIN Zhi-guo, XIA Le

(China Institute of Atomic Energy, Beijing 102413, China)

**Abstract:** A digital control card based on digital signal processor was developed. Two Freescale DSP-56303 processors were utilized to achieve 3 channels proportional-integral-differential regulations. The card offers high flexibility for 100 MeV cyclotron RF system development. It was used as feedback controller in low level radio frequency control prototype, with the feedback gain parameters continuously adjustable. By using high precision analog to digital converter with 500 kHz sampling rate, a regulation bandwidth of 20 kHz was achieved.

**Key words:** digital proportional-integral-differential controller; digital signal processor; low level radio frequency control

随着数字信号处理技术的发展,数字式控制系统已在各领域内逐步替代模拟控制系统。数字信号处理器(DSP)因其具有强大的实时运算处理能力和灵活性,多被选作数字式控制系统的核心器件。本工作拟研制数字

控制插卡,该卡以数字信号处理器 DSP56303 为核心,主要用于回旋加速器高频系统的低电平控制,进而与高频信号调制/解调模块一同完成对高频功率源-腔体系统幅度、相位的稳定性控制<sup>[1-2]</sup>。

## 1 数字 PID 算法

在射频低电平控制中,模拟 PID(比例-积分-微分)控制器已得到广泛应用,但由于其参数难于在线调整,低电平控制系统的设计必须在系统稳定性与系统最优化之间折中。数字控制算法可避免这一缺点,其原理是在分析模拟控制器的基础上,量化控制器参数,从而实现控制器控制参数的调整<sup>[3]</sup>。

模拟 PID 控制可表示为:

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int e(t) dt + K_d \frac{de(t)}{dt} \quad (1)$$

其中: $K_p$ 、 $K_i$ 、 $K_d$  分别表示比例、积分和微分增益; $u(t)$ 为输出; $e(t)$ 为误差输入; $t$ 为时间。

如果对式(1)进行拉普拉斯变换,则可得:

$$U(s) = K_p E(s) + K_i E(s)/s + K_d s E(s) \quad (2)$$

也可表示为:

$$U(s) = (K_p + K_d s + K_i/s) E(s) \quad (3)$$

出于变换稳定性考虑,使用双线性梯形近似变化将上式从  $s$  域变换到  $z$  域,使用  $s = \frac{2}{T} \cdot$

$\frac{1-z^{-1}}{1+z^{-1}}$  替换,可得:

$$\frac{U(z)}{E(z)} = [(2K_p + 4K_d + T^2 K_i) + (2T^2 K_i - 8K_d)z^{-1} + (4K_d - 2TK_p + T^2 K_i)z^{-2}] / [2T(1 - z^{-2})] \quad (4)$$

其中, $T$  为采样间隔时间。

用差分方程表示,即可得:

$$u(n) = u(n-2) + k_0 e(n) + k_1 e(n-1) + k_2 e(n-2) \quad (5)$$

其中: $k_0 = K_p + K_i/2 + 2K_d$ ;  $k_1 = K_i - 4K_d$ ;

$k_2 = -K_p + K_i/2 + 2K_d$ ;  $e(n)$  为误差信号;  $u(n)$  为经计算得到的输出信号。

## 2 系统硬件构成

DSP 控制卡作为回旋加速器射频低电平控制系统的一部分,主要提供以下功能:

1) 3 路 PID 整定; 2) DSP 与主机进行通讯,在线调整控制器增益及零点频率; 3) 完整的自检功能及调试支持。为实现上述功能,该卡的硬件包括前/后端信号调理电路、ADC 和 DAC、DSP、VXI 总线接口等。系统的原理框图如图 1 所示。

数字信号处理芯片采用 Freescale 的 DSP56303,该芯片数据总线宽度为 24 位,处理器的执行单元、存储器 and 外围器件的操作相互独立。该处理器的数据算术逻辑单元、地址发生单元和程序控制单元工作在并行模式下,多数操作只需 1 条指令即可完成,有利于减少数字控制器的内部延迟<sup>[4]</sup>。数字信号处理器支持并行处理,可同时优化射频腔体谐振频率控制环和腔体相位控制环。数字控制插卡的通讯使用处理器的主机接口(HI08)连接 FPGA 与 VXI 总线,实现控制器参数的在线调整。DSP56303 还提供 JTAG 接口和片内仿真。数字控制插卡的诊断线路利用 ONCE 接口迅速确定寄存器、存储器单元的状态并跟踪指令每一步的执行。DSP 运行程序的存储采用 AT29LV256 非易失性片外存储器。

从信号调整的角度看,比例积分控制器尽

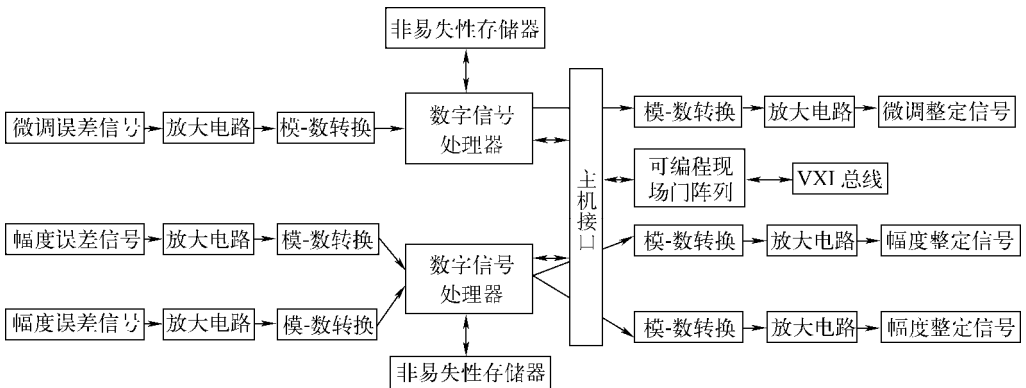


图 1 DSP 控制插卡结构示意图

Fig. 1 Scheme of DSP control card

可能调节输出量,使得控制器的输入为 0。因此,控制器工作一段时间后,输入信号便变得很小。为增加控制器的动态范围,ADC 选用 18 位高分辨率的 AD7674。设计中,为简化线路访问时序和减少周边期间,采用并行直接二进制的输出形式,数据接口电压设置为 LVCOMS 标准。

在控制器的设计中,输出级设计重点考虑 DAC 的单调性。因此,数字控制插卡采用 Analog 的 14 位电压输出数模转换芯片 AD7840。该芯片的最大微分非线性为 0.9LSB,从而确保控制器输出对设置点的跟踪能力。

数字控制插卡的 VXI 总线通讯功能使用 XC3000 系列的 FPGA,其主要功能为实现 VXI 总线地址译码、总线设备自检及 DSP 的 HI-08 接口寻址等<sup>[5]</sup>。

数字控制卡通过 VXI 的 P2 接口自定义局部总线,从高频卡获得频率微调、幅度和相位信号,在与主机设置控制点比较后,产生误差信号进入 AD7674 进行模数转换。转换后的数字信号传送给数字处理器,当主机设置的工作状态为闭环调节时,DSP 对误差信号进行 PID 运算,将结果输出给 AD7840 进行数模转换,转换后的调节信号经缓冲放大后,经局部总线回到高频卡,构成闭环。

### 3 系统固件开发

出于最大灵活性的考虑,数字控制插卡中 DSP 的固件开发采用汇编语言,主要功能模块如图 2 所示。

固件程序可工作在开环脉冲模式、开环

初始化模块	主机接口模块
误差读取模块	
数字PID运算	
整定值写入模块	
PID增益计算模块	
代码下载模块	
输出斜坡上升模块	
输出斜坡下降模块	
开环控制模块	

图 2 DSP-56303 程序模块图

Fig. 2 Module of DSP-56303 software

ramping 模式和闭环调节模式 3 种不同模式下,以满足射频控制的需求。其中,开环脉冲模式可用来克服射频腔体启动时的多电子效应。在此模式中,控制器的脉冲幅度可通过主机设置,脉冲宽度由反馈信号平均幅值决定,控制器工作在正反馈状态。当脉冲占空比大于 50% 后,固件程序自动转换为开环 ramping 模式,通过逐步提升输出电平,在射频腔体上建立足够的 D 电压。一旦反馈功率达到预先设定的阈值后,可通过主机命令将控制器转入闭环调节模式,即控制器最常用的工作模式,此时,控制器工作在负反馈状态。经优化,控制器在此模式下输入输出延迟为  $\mu\text{s}$  量级。当腔体或放大机发生异常时,射频控制卡会产生保护信号,通过 VXI 局部总线传给 DSP 固件,固件程序使用中断响应程序解除闭环,转换到开环脉冲模式。之后,输出反馈信号,对射频控制卡的保护线路进行解锁。数字控制插卡也为真空和射频发射机预留了类似的中断程序。

为提高 DSP 运算精度,固件采用左对齐方法处理输入和输出数据。为确保运算不溢出,固件程序使用特殊程序段对比例积分常数进行计算。当主机写入新的 PID 值并发出更新命令时,DSP 重新计算  $k_0$ 、 $k_1$ 、 $k_2$ ,然后继续进行数字 PID 算法。

load code 模块实现从主机接口下载并执行新程序的功能,以实现在线 DSP 程序更新。

### 4 调试及验证

在 DSP 卡单独工作模式下,通过信号源产生幅度为 1 V、频率为 1 kHz 的正弦波和方波作为 DSP 卡的输入,在示波器上同时观察误差信号和调整信号。保持输入信号不变,当改变 PID 增益时,可明显观察到输出信号的幅度和波形的相应变化。保持 PID 参数不变,改变误差信号的频率,通过测量输入和输出信号,可得到控制器的带宽和延迟参数。经测量,控制器带宽为 20 kHz,延迟约为  $2 \mu\text{s}$ ,能够满足闭环条件下系统的要求。

在与射频控制板的联调中,测试环境包括移相器、衰减器和放大器等,此时,输入信号由高频卡产生,控制信号再送回给高频卡。系统稳定性测试结果示于图 3。

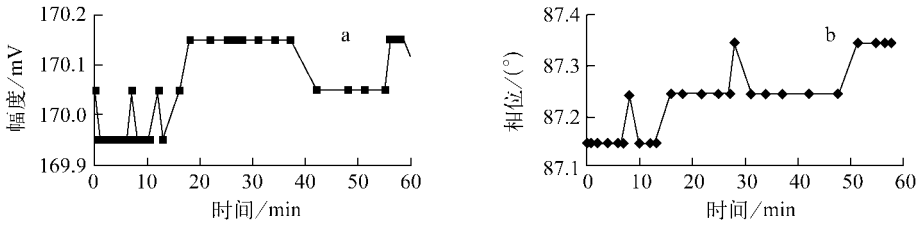


图3 幅度(a)和相位(b)稳定度测量结果

Fig. 3 Stability of amplitude (a) and phase (b)

测试结果表明,在 DSP 控制卡和高频卡同时工作情况下,桌面实验系统的幅度稳定度好于 0.2%,相位稳定度好于 $\pm 0.3^\circ$ ,基本满足实际工程的需要。

## 5 结语

本工作设计和实现了以数字信号处理器和可编程现场门阵列为核心、以 VXI 总线为基础的数字 PID 控制卡。通过对桌面被控对象的实验验证,表明该控制卡的设计是可行的,可满足实际工程的需要,能稳定工作,并具有良好的可扩展性。

## 参考文献:

[1] WANG Xiulong, ZHAO Zhenlu, JI Bin, et al. Preliminary design of a RF system for the 100 MeV cyclotron[C]//The 17th International Conference on Cyclotrons and Their Applications. Tokyo: Particle Accelerator Society of Japan, 2004:215-219.

[2] 殷治国,侯世刚,夏乐,等. 100 MeV 强流回旋加

速器射频低电平控制系统的桌面验证[J]. 高能物理与核物理, 2007, 31(10): 962-966.

YIN Zhiguo, HOU Shigang, XIA Le, et al. Desktop experiment for 100 MeV cyclotron LLRF control system[J]. High Energy Physics and Nuclear Physics, 2007, 31(10): 962-966 (in Chinese).

- [3] FANG Shuyao. DSP 56001 based digital PID controller, TRI-DN-93-16[R]. Vancouver: TRIUMF, 1993.
- [4] 牛晔,周浩敏. Motorola DSP 及其开发[J]. 世界电子元器件, 2004, 4:51-53.
- NIU Ye, ZHOU Haomin. Motorola DSP and it's development[J]. Global Electronics China, 2004, 4:51-53 (in Chinese).
- [5] 刘莉,余锋,汪乐宇,等. 基于 DSP 的 VXI 高精度数据采集系统[J]. 仪器仪表学报, 2001, 22(增刊):317-318.
- LIU Li, YU Feng, WANG Leyu, et al. A DSP based VXI high precision data acquisition system [J]. Chinese Journal of Scientific Instrument, 2001, 22(Suppl.): 317-318 (in Chinese).