

用于加速器数字反馈控制研究的实验平台

郑丽芳 李纪堂 刘松强

(中国科学院上海应用物理研究所 上海 201800)

摘要 本文介绍了用于加速器数字反馈控制研究的实验平台。该平台由四极磁铁、磁铁电源、Hall 电路、DSP 系统和用于系统开发的计算机组成。它不仅可用于加速器轨道反馈控制等系统级的研究,而且还可以用于研究高精度电源和高频系统低电平等设备级的数字反馈控制。

关键词 数字化控制, 轨道反馈, PID 控制

中图分类号 TP273, TP271⁺.9

同步辐射装置为了向光束线实验站提供高亮度的光束,需要将束流在发光点的轨道稳定在极小的束斑大小范围内。但有许多影响束流轨道稳定的因素,例如磁铁安装准直误差等的静态因素;地基振动、磁铁电源纹波、涡流效应和环境温度的变化等动态因素。除了进行有效的静态校正和消除主要的噪声源之外,还可以用适当的反馈来提高束流轨道的稳定性。

由于技术条件的限制,用模拟电子学实现的反馈系统,只能处理少量的数据、实现简单的放大和偏转等控制功能,有限地改善加速器性能。90 年代初,美国的 SPEAR 实验室和阿贡实验室 APS 先后开展了将数字技术用于轨道反馈控制的研究^[1,2]。目前,数字化反馈控制已成为国际上各加速器实验室的研究重点。

数字控制技术用传感器获取真实物理世界的模拟信号,通过采样得到离散的数字信号,对这种数字信号进行处理,再将最后结果转换为模拟信号,用来控制受控对象。与传统的模拟技术相比,数字技术只在输入和输出两端与真实物理世界接口,整个中间处理过程都是数字化的,这就不仅避免了模拟信号传输和处理过程中的噪声和失真,以及由于漂移、非线性、控制环境温度变化及 DAC 分辨率带来的系统误差,而且能够实现复杂和精确的处理和控制算法,如数字滤波(FIR、IIR)、FFT 变换、控制 PID 算法、轨道反馈 SVD 算法等等^[3]。

图 1 是一加速器束流反馈控制系统的结构示意图,用加速器束流位置探测器(BPM)测得束流的实际位置,与参考值相比较得出偏差,用数字低通滤波器滤除回路噪声,经 DSP 系统作数字信号处理

之后,将结果反馈到校正磁铁电源,达到校正束流轨道的目的。

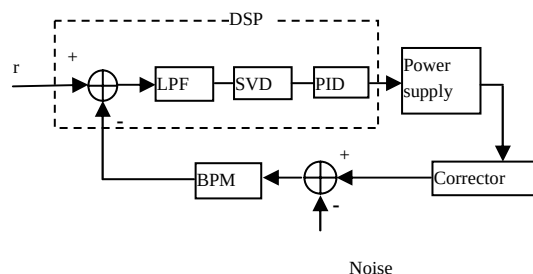


图 1 束流轨道反馈控制系统的结构

Fig.1 The beam orbit feedback system

为了在目前未具备加速器装置的条件开展研究,我们建立了一个数字化反馈控制实验平台。它由实验装置平台和 DSP 反馈控制系统二部分组成,如图 2 所示。实验装置平台包括作为被控制对象的四极磁铁,磁铁电源以及 Hall 电路等。DSP 反馈控制系统包括主控制器、数字信号处理器、ADC、DAC 等。

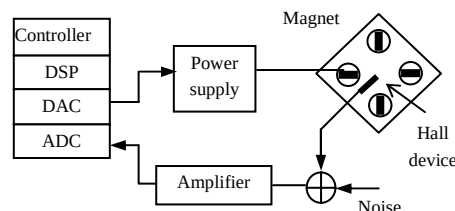


图 2 数字化反馈控制实验平台

Fig.2 An experimental setup for digital feedback control

中国科学院知识创新工程所前沿领域项目(55100216)资助

第一作者:郑丽芳,女,1966 年出生,1991 年于中国科学院上海应用物理研究所获硕士学位,现为中科院上海应用物理研究所在职博士生

收稿日期:2004-02-16,修回日期:2004-08-30

1 实验装置平台

1.1 实验装置平台的设计

DSP 系统的 DAC 输出的电压参考值用来设定磁铁电流, 它与磁铁电源和四极磁铁组成系统的主控回路; 由 Hall 电路测得的电压用作误差信号, 经由 ADC 采样输入到 DSP 系统, 构成反馈回路。这个误差信号与电压参考值相比较得出偏差, 经 DSP 系统的信号处理和控制算法计算后, 再由 DAC 输出到磁铁电源, 改变磁铁的磁场强度, 使 Hall 电路的测量值不断接近电压参考值, 实现系统的反馈控制。

这个实验平台的核心设计思想是将用作反馈的 Hall 元件同时用来引入扰动噪声源。可以通过 Hall 元件的电流输入端引入电源纹波、环境温度变化和地面振动等各种扰动的仿真信号, 研究如何抵消它们所产生的对束流轨道的影响的算法。

1.2 实验平台的数学模型

数字化控制的数学研究方法与模拟控制相类似。在分析和设计系统的反馈控制之前, 需要确定系统的数学模型。最常用的是传递函数模型, 它用于描述线性时不变系统的外部行为, 即输入和输出的关系。其一般格式为: $H(z) = \sum a_k z^{-k} / (1 + \sum b_k z^{-k})$ 。

1.3 传递函数测试方法

确定系统的传递函数有两种方法: 基于已知的原理和公式写出系统的数学模型, 称为物理建模方法; 测量系统对输入信号的响应来近似地估计出系统的模型, 称为系统辨识建模方法。

可以用专用的系统分析仪来测量系统的传递函数。通过给系统加一组电压信号, 分别测量相应的输出信号, 再用多项式进行拟合。因曲线拟合方法较多, 在选择极点、零点的数目时需在曲线拟合质

量、计算复杂程度及滤波器的延迟等要素之间作权衡。

除了用昂贵的专门仪器外, 测量传递函数的另一方法是给系统输入不同频率的正弦波, 测量相应的输出。根据输入输出信号的幅度和相位差, 计算系统的电阻和电容。通过它的等效电路来求解系统的传递函数。

无论用哪种方法得到的传递函数, 在实际系统运用中都必须根据系统的实际情况不断调整有关的参数, 找到最适合本系统的传递函数。

2 DSP 反馈控制系统

2.1 系统配置

DSP 系统的组成如图 3 所示, 系统的核心是基于 TI 公司 TMS320C40 浮点处理器和协处理器的 Pentek 模块 4284 和 4257。系统还包括运行客户端软件和开发 DSP 应用的 PC 主机, 在 PC 主机和 DSP 目标机之间传递信息的 VME 控制器 MVME2302 以及高精度 ADC/DAC 模块 Pentek4243。

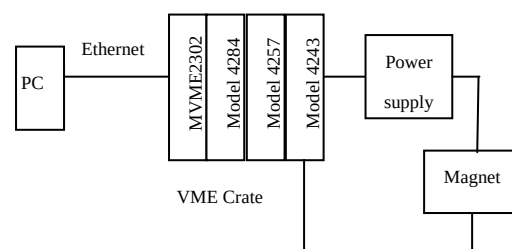


图 3 DSP 系统

Fig.3 DSP system

2.2 Swiftnet 软件及开发环境

Swiftnet 是 Pentek 公司为分布式 DSP 应用程序提供的一种基于中断驱动的设备之间的简单通讯协议, 它提供了多种中间连接机制, 如 VME 总线和

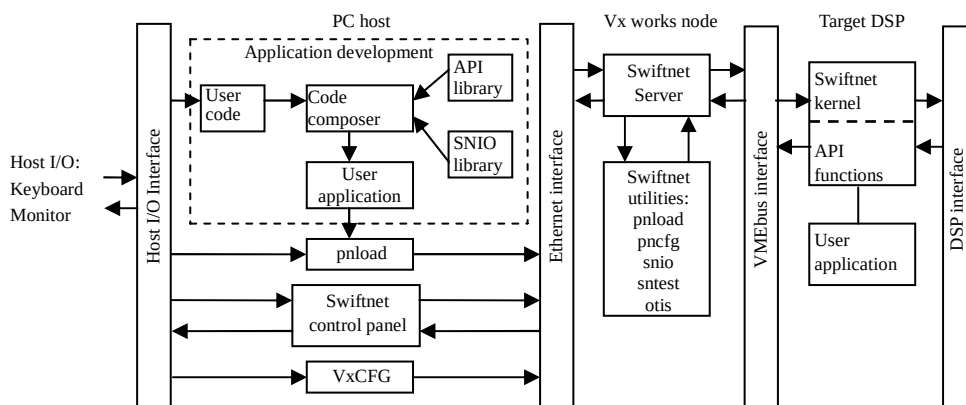


图 4 DSP 开发环境

Fig.4 DSP development environment

MIX 总线的共享内存、总线适配器、嵌入式主机和以太网的连接等等。Swiftnet 的文件输入/输出服务器提供了两个类似于标准 C 的 I/O 接口库, 为 DSP 应用程序的开发带来便捷。图 4 为整个系统的软件环境, 包括将 MVME2302 配置为 Swiftnet 服务器的软件工具 VxCFG、DSP 系统配置工具、文件输入/输出服务器、下载工具、DSP 应用开发工具和实时操作系统 Tornado/VxWorks 等。

2.3 算法研究

可以用 MATLAB 仿真设计数字滤波器和 PID 控制器, 然后在实验平台的 DSP 系统上通过实验来研究反馈控制过程。在 DSP 系统上可以开展各种控制算法的研究, 经典控制理论中最常见的是 PID 控制算法 (比例—积分—微分)。比例项决定系统的开环增益; 积分项相当于滞后补偿, 消除系统响应的稳态误差; 微分项相当于超前补偿, 防止响应过冲。

其输入的偏差信号 $e(t)$ 与输出信号 $u(t)$ 之间的关系为:

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

DSP 系统以数字化形式 (2) 实现 PID:

$$u(n) = u(n-1) + K_p e(n) + K_i e(n) \Delta t + K_D \frac{e(n) - e(n-1)}{\Delta t} \quad (2)$$

除了 PID 控制算法外, 这个实验平台还可以用于现代控制理论的状态空间算法、模糊逻辑等控制算法的研究。

3 结束语

为了配合大型加速器工程的建设, 需要开展加速器轨道反馈控制的前期研究, 为此我们建立了一个数字化反馈控制实验平台, 采用磁铁和 Hall 元件分别用作系统的控制对象和反馈元件, 并在用作反馈元件的 Hall 片的电流输入端引入各种类型的仿真噪声。这个实验平台不仅可以方便地用于研究各种控制算法, 获得数字反馈控制的实际知识和经验, 还可以用来选择和测试最终将用于工程的 DSP 系统。同样, 该装置不仅可用于加速器轨道反馈控制等系统级数字反馈控制的研究, 也可以用于高精度电源等设备级的数字反馈控制研究。

参考文献

- 1 Hettel R, Corbett J, Keeley D, *et al.* Status of Digital Orbit Feedback for SPEAR, EPAC'96
- 2 Chung Y, Barr D, Decker G, *et al.* Implementation Status of the Global and Local Beam Position Feedback Systems for the Advanced Photon Source Storage Ring, PAC'95
- 3 刘松强. 数字信号处理系统及其应用. 北京: 清华大学出版社, 1996
LIU Songqiang. Digital Signal Processing and its Application. Beijing: Tsinghua University Press, 1996

Experimental platform for digital feedback control in accelerators

ZHENG Lifang LI Jitang LIU Songqiang

(Shanghai Institute of Applied Physics, the Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800)

Abstract This paper describes the experimental platform used for the digital feedback control in accelerators. It can be applied not only for studying the orbit feedback control, but also for studying the digital feedback control of high-precision power supplies and the low level control of RF system.

Key words Digital control, Orbit feedback, PID control

CLC TP273, TP271^{+.9}