

# EAST 积分器系统的设计

吴一纯<sup>1,2</sup>, 王 勇<sup>2</sup>, 刘冬梅<sup>2</sup>, 季振山<sup>2</sup>, 罗家融<sup>2</sup>

(1. 漳州师范学院 物理与电子信息工程系, 福建 漳州 363000;  
2. 中国科学院 等离子体物理研究所, 安徽 合肥 230031)

**摘要:**在核聚变实验中,积分器是还原微分信号的基本手段。长时间低漂移积分器系统的研制是托卡马克实验中的重要环节。以差分式积分器为核心,结合线性隔离技术、程控放大器技术和嵌入式以太网通信技术,设计实现了 EAST(Experiment Advance Superconductor Tokamak)积分器系统。提出的系统整体标定方法进一步提高了该积分器系统的精度。性能测试表明,在增益为 1 时,该积分器在 100 s 内的积分漂移小于 10 mV,满足了当前 EAST 实验的需求。该积分器系统已投入 EAST 的实验中,并取得了良好的运行效果。

**关键词:**托卡马克;积分器;隔离;程控;标定

**中图分类号:**TP321.2      **文献标志码:**A      **文章编号:**1000-6931(2009)12-1133-05

## Design of Integrator System on Experiment Advance Superconductor Tokamak

WU Yi-chun<sup>1,2</sup>, WANG Yong<sup>2</sup>, LIU Dong-mei<sup>2</sup>, JI Zhen-shan<sup>2</sup>, LUO Jia-rong<sup>2</sup>

(1. College of Physics and Information Engineering, Zhangzhou Normal University, Zhangzhou 363000, China; 2. Institute of Plasma Physics, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China)

**Abstract:** In fusion experiments, the integrator is a fundamental method to recover differential signals. Developing a longtime low-drift integrator system is very important for the Tokamak experiments. Based on the differential integrator, combining linear isolation technology, remote control programmable amplifier technology and embedded Ethernet communication technology, the integrator system on the Experiment Advance Superconductor Tokamak (EAST) was designed. A kind of global calibration method was presented, and it improved the accuracy of the integrator system. The test results show that, when the gain is 1, the integration drift is less than 10 mV within 100 s, which meets current demand of the EAST experiments. The integrator system has been used in the experiment on the EAST, and achieved good operating results.

**Key words:** Tokamak; integrator; isolation; remote control; calibration

在托卡马克核聚变实验装置的放电实验过程中,许多电磁测量信号的输出为该信号的微分形式,若要还原该信号,需使用积分器。以中国科学院等离子体物理研究所的托卡马克装置为例,HT-7 超导托卡马克的放电时间已长达数百秒,2006 年建成的 EAST 全超导托卡马克的放电时间目标达到 1 000 s,所以,需要能够长时间工作的积分器。而传统模拟基本积分电路<sup>[1]</sup>,由于实际集成运放并非理想器件,积分电容存在泄漏电阻,使得实际积分电路与理想状况存在误差,长时间积分漂移很大,势必对托卡马克实验的实时控制和数据采集造成较大影响。因此,长时间低漂移的积分器的研制是 EAST 实验中的重要环节。

## 1 EAST 积分器系统设计目标

EAST 积分器系统主要包括 4 个部分:

1) 积分器电路,用于实现对输入信号的积分,这是本系统的核心;2) 线性隔离部分,用于将前端的信号源与后端的系统隔离,保证各系统的安全;3) 程控放大器部分,用于将信号调整到适合采集的幅度范围,以提高数据采集系统的分辨率;4) 控制器部分,用于实现积分器和放大器的以太网控制,包括程控放大器的增益设置、积分器的启停控制和 1 个用于判断积分器是否正常工作标准信号的产生。系统框图如图 1 所示,微分信号经积分后通过隔离到程控放大器,一路到等离子体控制系统(PCS),用于等离子体的位形控制,另一路到数据采集系统(DAQ),用于数据的采集与存储分析。

综合以上要求,1 个程控积分器机箱上将

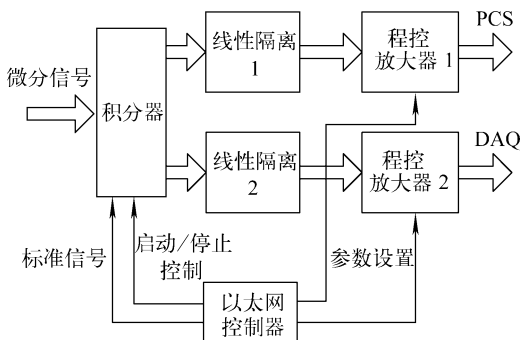


图 1 EAST 积分器系统框图

包含 12 块积分器板、1 个控制器板和 3 个彼此隔离的电源模块。其中,每块积分器板上包括 1 路积分器、2 路线性隔离器和 2 路程控放大器,12 块积分器板卡均通过控制器板统一控制。

EAST 积分器系统的主要技术参数为:

1) 积分漂移,100 s 内漂移小于 10 mV;2) 4 档程控增益,0.5、1、2、5;3) 输出电压,−10~+10 V。

## 2 EAST 积分器系统电路设计

### 2.1 积分器电路

由基本积分电路误差分析<sup>[1]</sup>得出,模拟积分器的误差主要来自于两个方面:一是运放引入的误差,主要由失调电压和失调电流引起;二是积分电容引入的误差。因此,一方面选用高性能电子元器件改善模拟积分电路的工作状态,从引起误差的主要因素入手控制积分器的积分误差;另一方面采用实时积分漂移补偿的方案,动态消除积分器本身的等效输入偏移量、温度漂移及地噪声等带来的误差,以达到提高积分器精度的目的。

双运放集成电路中的两个运放处在相同的工作环境中,它们的输入失调电压、输入失调电流和输入偏置电流等性能指标很相近,利用这些相似性将双运放搭成两路积分器,一路对输入信号积分,另一路对参考地积分,然后使用减法器对两路积分信号进行减法运算,可实时消除积分过程中积分器本身的等效输入偏移量、温度漂移及地噪声等带来的误差。系统原理如图 2 所示。

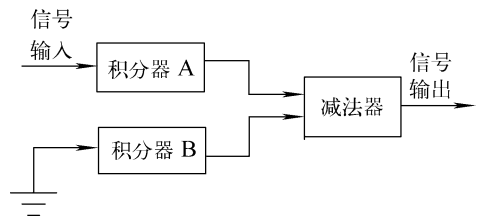


图 2 差分式积分器原理图

Fig. 2 Scheme of differential integrator

在元器件的选择上,应选择零漂移高精度双运算放大器,该类运放采用斩波调零技术,使

得输入失调电压和输入失调电流极小,性能上比 OP07 高出 1~2 个量级。同时无源器件采用具有低泄漏电流的聚苯乙烯电容和高精度低温度系数的电阻,以尽可能减少器件带来的误差。

### 2.2 线性隔离电路

在积分器和程控放大器间设置线性隔离电路,可有效确保系统安全并消除地环路噪声。此处采用美国 BB 公司的 ISO124P 线性隔离放大器,它的主外围电路简单,采用两套独立的供电电源,电压为  $\pm 4.5 \sim \pm 18 \text{ V}$ ,非线性失真小,增益误差为满量程的  $\pm 0.05\%$ ,频带宽度可达 50 kHz,耐击穿电压均方根值高达 1 500 V,增益固定为 1,温度稳定性为  $10^{-5} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ 。

由于 ISO124 内部使用的调制解调频率为 500 kHz,所以,它的输出有 500 kHz 的纹波<sup>[2]</sup>,通过 1 个截止频率为 10 kHz 的二阶低通滤波器,可将噪声控制在 10 mV 左右(图 3)。

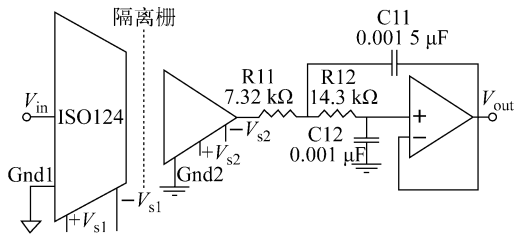


图 3 隔离电路

Fig. 3 Isolation circuit

### 2.3 反相型可变增益放大器电路

利用多路开关改变运算放大器的反馈电阻或输入电阻,可达到改变增益大小的目的。模拟开关具有体积小、功耗低、切换速度快等特点。如果运放采用反向输入,切换反馈电阻的大小,可对信号放大或缩小,这种放大器可根据不同需要设定不同的档位和放大倍数,灵活性高。对于精度要求高的系统,可选用高精度的运放和电阻,并配合相应的增益标定来达到要求。为固定输入阻抗,采用如图 4 所示的反相型可变增益放大器方案。

图 4 中,运放选择低噪声、精密运算放大器 OP27,其失调电压为  $25 \mu\text{V}$ ,且最大漂移为  $0.6 \mu\text{V}/^\circ\text{C}$ ,8 MHz 的增益带宽和  $2.8 \text{ V}/\mu\text{s}$  的转换速率,使该放大器在高速数据采集系统中

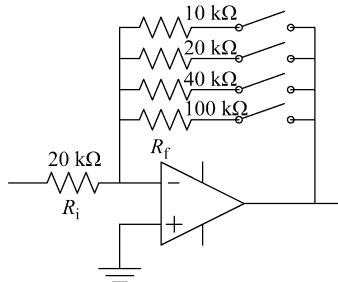


图 4 反相型可变增益放大器

Fig. 4 Gain-variable inverting amplifier

保持极好的动态精度。模拟开关选择 MAX308,其导通电阻小于 100  $\Omega$ ,导通电阻一致性小于 5  $\Omega$ ,双极性供电可达  $\pm 20 \text{ V}$ 。电阻选择 RJJ 型精密小型金属膜电阻,其精度为  $\pm 0.5\%$ ,温漂系数为  $\pm 5 \times 10^{-5} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ 。在图 4 的电路中,通过软件控制开关的闭合或断开选择不同的反馈电阻,以改变电路的增益。但该方法由于切换开关与反馈电阻串联,开关的导通电阻将影响放大器的增益。考虑到速度和精度的要求,取  $R_i = 20 \text{ k}\Omega$ ,对应于 4 个档位 0.5、1、2、5 的反馈电阻  $R_f$  分别为 10、20、40 和 100 k $\Omega$ 。

### 2.4 控制器设计

控制器主要实现以太网 TCP Socket 通信、积分器控制、程控放大器放大倍数设置和标准信号发生等功能。图 5 为控制器的结构图,AVR 微处理器 ATmega128 是控制器的核心,外部扩展的 32 kB SRAM KM62256 使得 ATmega128 足以运行实时操作系统 Nut/OS,ATmega128 通过 10M 以太网控制器 RTL8019AS 实现以太网通信。在 CPLD EPM570T144 中设计了积分器控制电路、放大器参数设置电路和标准信号发生电路等电路。ATmega128 通过其 I/O 口来控制 CPLD

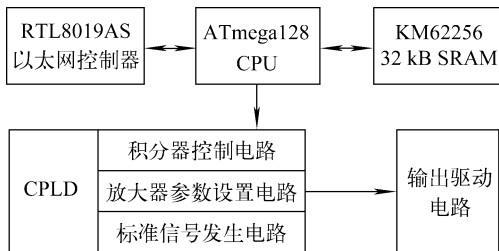


图 5 控制器结构图

Fig. 5 Structure diagram of controller

上的各功能电路,最终实现对积分器系统的控制。

积分器控制电路实现对积分器的3种控制方式:外接硬件电平信号的远程控制、本地手动开关控制和基于TCP/IP的Socket网络命令控制。前者主要用于正常实验阶段,EAST中央时序系统发出的硬件电平信号能够精确控制积分器启动和停止的时刻。为便于积分器的调试,设计了后两种控制方式。

放大器参数设置电路主要由地址译码和输出锁存器电路构成。锁存器输出经光电隔离后与积分器板上的模拟开关MAX308上的地址输入端A2~A0相连,以控制MAX308上导通的模拟开关通道,进而控制程控放大器的放大倍数。

标准信号发生电路结合后续的运放OP07可提供两类标准信号:一类是幅度为+3.3 V、脉宽10 ms正脉冲紧接幅度为-3.3 V、脉宽10 ms负脉冲的信号;一类是幅度为+3.3 V、脉宽分别为1,2,⋯,9,10和100 ms的正脉冲信号。标准信号用于检测积分器的工作状态和标定积分器的积分常数。

### 3 软件设计

控制器的应用程序基于实时操作系统Nut/OS开发。Nut/OS是开源且完全免费的实时操作系统,该操作系统中提供一精简的TCP/IP协议栈Nut/Net,通过调用Nut/Net中的Socket API函数可实现TCP/IP Socket通信<sup>[3]</sup>。

应用程序的核心任务是实现以太网通信,在解析接收到的网络指令后控制CPLD上的功能电路,以实现对接积分器系统的控制。应用程序包含两个线程:主线程作为TCP服务器端,接收并解析EAST数据采集控制系统发出的TCP Socket指令;放大器参数设置线程,最终完成放大器参数的设置。

主线程在完成IP、MAC、Mask和Gateway配置,恢复CPU掉电前设置的24路程控放大器的放大倍数,在创建放大器参数设置线程后进入TCP Socket服务器端程序,并开始侦听TCP Socket客户端引入的连接。TCP服务器端线程在接收到的客户端发出的指令后将执行

相应的动作。从“WriteAmp”指令及其后续字符串中获取24个放大器的放大倍数并保存在全局变量数组中,然后向放大器参数群设置线程发送设置参数事件;“ReadAmp”指令用于从EEPROM中获取24路放大器的放大倍数并发送客户端;通过“CreateStandard”指令产生带正负对称脉冲的标准信号;“PulseSignal”及其后续字符则用于输出1~10 ms或100 ms的正脉冲信号。由“DelayCharge”和“DelayDischarge”指令实现网络指令方式的积分器的启动和停止控制。

## 4 积分器系统性能测试

### 4.1 功能测试

在前端电磁探针无信号的情况下,让积分器工作100 s,积分漂移如图6所示。两路信号在100 s内积分漂移均在20 mV以内,而此时的程控放大器增益为2,所以,该20 ms的积分器在100 s的积分漂移效益为10 mV,能够满足当前EAST实验的需要。对于一些精度要求更高的信号,则需精细调节积分器,使积分漂移更小。

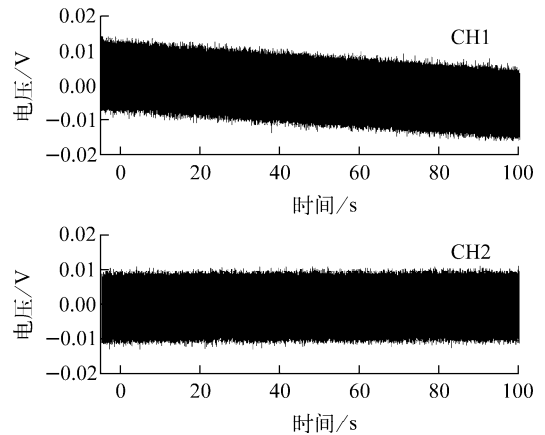


图6 积分漂移  
Fig. 6 Integral drift

利用标准信号积分检查积分器工作是否正常。标准信号是由控制器产生的正负对称的脉冲信号,它的正向电压为3.3 V,负向电压为-3.3 V,正负脉宽均为10 ms,如图7a所示,所以,对此信号积分后得到轴对称的三角波,如图7b所示。所使用积分器的积分时间常数为

20 ms, 则 3.3 V 的电平积分 10 ms 后,  $V_o = \frac{V_{in}}{RC} \cdot$

$T = \frac{3.3 \text{ V}}{20 \text{ ms}} \times 10 \text{ ms} = 1.65 \text{ V}$ 。图中程控放大器的

增益设置为 2, 所以,  $1.65 \text{ V} \times 2 = 3.3 \text{ V}$ , 与图中的 3.24 V 或 3.26 V 接近, 说明积分器正常工作。误差则来自多方面, 一是标准信号不是准确的 3.3 V, 另外, 积分时间常数 RC、隔离器的增益和放大器的增益均有误差。因此, 需对积分时间常数进行标定。

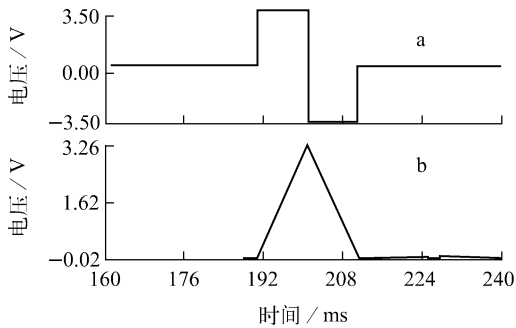


图 7 标准信号(a)和对标准信号的积分(b)

Fig. 7 Standard signal (a) and integral to standard signal (b)

#### 4.2 积分时间常数标定

积分器的时间常数(RC)是积分器的一项重要参数, 其精度将影响到系统的精度, 因此, 每次实验前都要对积分器的时间常数进行标定。积分器后端的线性隔离器和程控放大器的增益也需标定。所以, 本系统采用整体标定的方法, 将隔离器和程控放大器的增益折算到积分时间常数中。

标定的方法为: 输入 1 个正脉冲幅度为  $U$  (单位: V) 的脉冲信号(此处使用如图 7a 所示的标准信号), 积分得到输出曲线, 如图 7b 所示, 取其上升部分的中间一段, 计算得到上升斜率  $K$  (单位: V/ms), 于是, 积分时间常数为  $U/K$  (单位: ms)。

对 1 块  $RC = 20 \text{ ms}$  积分器板的 4 个档位的标定结果列于表 1。

从表 1 可看出, 折算后实际积分常数的相对偏差基本随程控放大器增益的增大而减小, 这是因随着增益的增大, 所使用的反馈电阻也增大, 从而减少了模拟开关的导通电阻对反馈

电阻的影响。在增益为 1 时, 与理想值的相对偏差为 1.8%, 考虑线性隔离器和程控放大器的影响, 这个误差是可能的。为控制温度漂移, EAST 积分器系统被放置在温度基本恒定在  $18 \text{ }^\circ\text{C}$  的室内。在每轮托卡马克装置实验前, 待积分器开机运行一段较长的时间且稳定后, 对其统一标定, 整个系统将达到很高的精度。标定后的积分时间常数用于实验数据的修正, 误差小于 0.5%。

表 1 积分时间常数标定

Table 1 Integral time constant calibration

程控放大器增益	折算后理想积分时间常数/ms	折算后实际积分时间常数/ms	偏差/ms	相对偏差/%
0.5	10	10.25	0.25	2.5
1	20	20.36	0.36	1.8
2	40	40.66	0.66	1.65
5	100	101.4	1.4	1.4

#### 5 结论

该 EAST 积分器系统通过以太网远程控制放大器的增益设置和积分器的工作, 操作安全可靠, 设置简单快捷, 采用线性隔离技术, 将积分器电路与后续系统隔离, 确保了各系统的安全。经标定后, 折合后的积分时间常数精度很高, 在增益为 1 时, 积分器在 100 s 内积分漂移小于 10 mV, 达到当前实验的要求。400 路 EAST 积分器已投入 EAST 实验中, 运行效果良好。

#### 参考文献:

- [1] JUNG W G. 集成运算放大器应用手册[M]. 北京: 世界图书出版公司, 1990: 383-393.
- [2] Texas Instruments Incorporated. ISO124 precision lowest-cost isolation amplifier (Rev. C) [M/OL]. Dallas: Texas Instruments Incorporated, 2005. [2008-08-08]. <http://focus.ti.com/lit/ds/symlink/iso124.pdf>.
- [3] KIPP H. EtherNUT software manual (Rev. 2.4) [M/OL]. Castrop-Rauxel: Egnite Software GmbH, 2005. [2008-08-08]. <http://www.ethernut.de/pdf/enswm24e.pdf>.