

上海光源储存环直流流强监测系统设计

冷用斌 周伟民 陈永忠 赵国璧 余俊 刘德康

(中国科学院上海应用物理研究所 上海 201800)

摘要 上海光源储存环调试运行需要一个分辨率达到微安量级的直流流强监测系统。为此设计完成的硬件系统包含一个 Bergoz 公司 NPCT 型探头、一个 NI 公司 PXI 总线数字电压表模块以及一个 PXI 总线的输入输出控制器。数据采集处理软件在 LabVIEW 平台上开发,与控制系统的接口通过 EPICS Shared Memory IOCcore 技术实现。实验室测试及仿真结果表明该系统直流流强测量分辨率可达 2 微安,束流寿命相对测量精度可望达到 0.5%。

关键词 上海光源, 直流流强变压器, EPICS, 束流寿命

中图分类号 O572.21+3

作为第三代中能专用同步辐射装置,上海光源储存环需要一个高精度的电子束流直流流强监测系统,用以提供储存束流的流强数据并据此计算当前的束流寿命或是评估储存环注入速率。依据上海光源初步设计的要求,此直流流强监测系统的量程须大于 400mA,分辨率须达到微安量级。同时,为便于机器的调试运行,流强以及束流寿命数据的刷新率不应低于 1Hz,数据采集处理部分应与上海光源控制系统实现无缝连接^[1]。

1 硬件设计

为缩短研发周期,确保系统性能,上海光源选择了采购成熟的商品化模块进行系统集成创新的技术路线。

1.1 系统结构

系统硬件结构如图 1 所示,在储存环隧道内的流强监测点处安装一个带直流隔离陶瓷环的探头组件,电子束穿过此探头组件时,其低频分量会被组件内的直流流强变压器探头(DC Current Transformer Sensor)检测到,检测到的束流信号由直流流强变压器前端电子学(DCCT Front-end Electronics)模块进行信号调理,送入数据采集设备(通常为数字电压表模块, Digital Voltage Meter)进行模数转换,量化后的数据在输入输出控制器(Input Output Controller)内完成后续处理和分析,计算得到当前流强值以及束流寿命,最终通过 IOC 的数据服务器实现与控制系统的无缝连接。

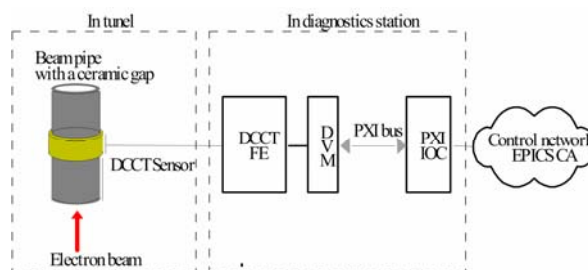


图 1 系统硬件结构

Fig.1 Hardware configuration of DCCT system

1.2 电子学探头选型

直流流强变压器是在交流流强变压器(AC Current Transformer)的基础上,应用磁调制器技术和零磁通反馈控制技术将低端频响扩展到直流的^[2],目前在加速器束流诊断领域已经有较为成熟的商业化产品并获得了成功的应用^[3]。根据上海光源对流强测量精度的要求以及储存环束流真空室的截面尺寸,直流流强监测系统选用了法国 Bergoz Instrumentation 公司第三代的 NPCT175 型探头,与上一代产品相比 NPCT 具有如下优点^[4]:

- (1)耐辐照的探头与前端电子学彻底分离为两个独立模块,电子学设备可放置于隧道外;
- (2)更强的电磁兼容能力,对于加速器典型的电磁干扰频谱不敏感;
- (3)输出信号中不再包含调制信号频率分量;
- (4)内置 100mA 标定信号源;
- (5)标准化的 19 英寸机箱、3U 板卡设计。

国家大科学工程上海光源工程基金资助

第一作者:冷用斌,男,1972 年出生,1999 年毕业于中国科技大学获博士学位,研究员,研究方向为粒子加速器束流测控技术

收稿日期:2007-01-16,修回日期:2007-03-14

其基本技术指标如表 1 所示:

表 1 NPCT175 基本技术指标
Table 1 NPCT175 specification

量程 Full scale ranges	$\pm 20\text{mA} \sim \pm 2\text{A}$
噪声(RMS) Noise	$5\mu\text{A}/\sqrt{\text{Hz}}$
绝对精度 Absolute accuracy	$\pm 0.1\%$
电子学温漂系数 Electronics temperature coefficient	$< 0.1\mu\text{A}/^\circ\text{C}$
探头温漂系数 Sensor temperature coefficient	$5\mu\text{A}/^\circ\text{C}$
-3dB 带宽 -3dB bandwidth	DC ~ 10kHz

探头工作在 2A 量程时采用 Agilent 89610A 矢量信号分析仪实测的 NPCT175 带宽如图 2 所示。

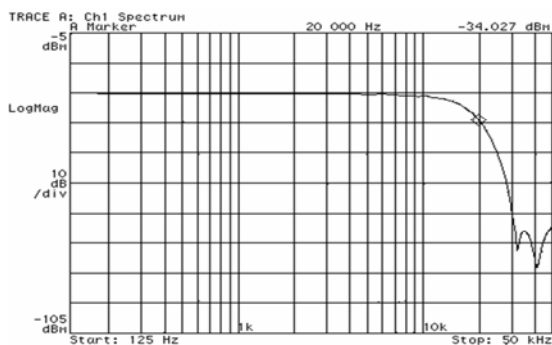


图 2 NPCT 带宽 (2A 量程)
Fig.2 Bandwidth of NPCT at 2A range

1.3 探头真空组件结构设计

NPCT 型探头的流强分辨率可达 μA 量级, 其核心器件为磁调制器, 外界电磁场对探头的干扰以及探头向外辐射的电磁干扰信号都较大, 须采取完善的电磁屏蔽措施以确保本系统以及其它系统的正常工作。SPEAR3 的 DCCT 探头电磁屏蔽组件设计合理, 经机器运行验证屏蔽性能良好, 因此上海光源借鉴了该真空屏蔽组件设计并已在国内投入加工。其剖面侧视图如下所示。

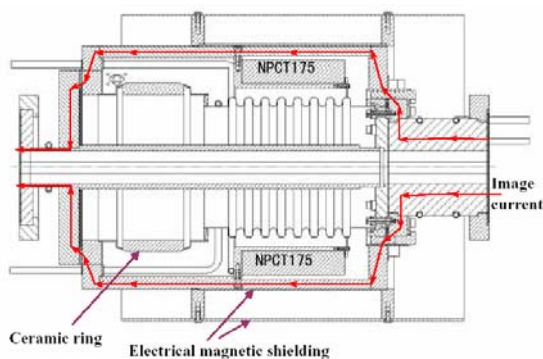


图 3 探头真空组件剖面侧视图
Fig.3 Side view of DCCT vacuum assembly

1.4 数据采集设备选型

因具有较好的电磁兼容性、长期运行稳定性、较全的 IO 板卡系列以及高速的 CPU 运算能力, 上海光源束测系统选择 PXI 总线工控机作为前端输入输出控制器的硬件平台。样机评估测试后, 选定美国国家仪器公司(National Instrument)的 PXI-1042 八槽 PXI 机箱、PXI-1044 十四槽 PXI 机箱以及 PXI-8196 2.0GHz CPU 控制器为标准配置。

对 DCCT 信号的量化, 较为传统的做法是用一台高精度(通常为 6.5 位)的数字电压表以较低采样率(数 Hz)进行测量。对于 NPCT 输出满量程 $\pm 10\text{V}$ 的信号, 其电压分辨率可达 $10\mu\text{V}$, 在 NPCT 的 2A 量程配置下等效电流分辨率约为 $2\mu\text{A}$, 优于探头组件的分辨率。但此方案的不足之处在于数据采样率较低, 束流寿命计算时往往须累积上百秒的数据才能够给出一个精度较高的计算结果, 对于秒级的束流寿命变化则完全无法分辨。

要缩短束流寿命计算的响应时间, 必须采用采样率更高的解决方案。上海光源选择了 NI 公司 PXI 总线 4070 系列数字万用表模块产品搭建数据采集平台。该系列产品采样率从 1Hz 至 1.8MHz 可动态配置, 4070 最高分辨率为 6.5 位, 4071 最高分辨率为 7.5 位。这两款产品在不同采样率下的噪声水平, 以及 4070 与 NPCT175 联机噪声水平的实验室评估测试结果如图 4 所示:

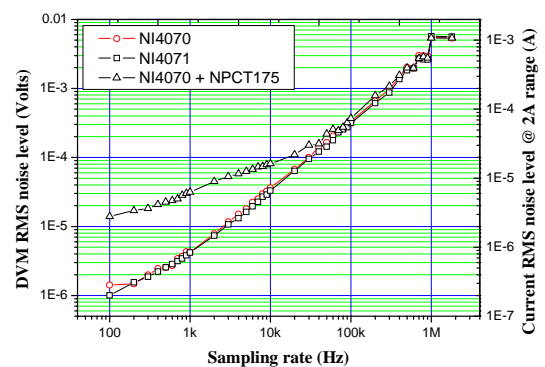


图 4 数字电压表及 NPCT 探头电子学噪声测试
Fig.4 Noise test result of DVM and NPCT

从以上测试结果可以得到如下结论: (1) 采样率低于 200Hz 时 4071 电子学噪声明显低于 4070, 而当采样率高于 200Hz 时两者电子学噪声水平相差无几; (2) 采样率在 40kHz 以下时数字电压表电子学噪声明显低于联机噪声, 测量误差将主要来源于 NPCT 探头噪声; (3) 采样率在 40kHz 以上时因探头带宽的限制数字电压表电子学噪声接近联机噪声, 测量误差将主要来源于数字电压表。

上海光源的应用需要数据采集模块工作在较高频率，因此选定 NI4070 作为储存环直流流强监测系统的数据采集模块。

2 软件设计

直流流强监测系统软件将在 LabVIEW 平台下开发运行，需要实现数字电压表原始数据回读、束流流强计算、流强变化率计算以及束流寿命计算等功能，并在 EPICS^[5]框架内实现与控制系统的接口

2.1 数据采集处理方案

从图 4 所示的噪声测试结果来看，流强计算以及流强变化率计算对数据量和采样率要求可以较低，以 100Hz 或是更低采样率获取数据均可在 1 秒累积时间处理得到 μA 量级的流强分辨率。因此数据采集率的选择将主要由束流寿命计算的需求来确定。

束流寿命是电子储存环的重要参数之一，是受量子效应、气体散射和托歇克等因素限制的^[6]，其综合效应是流强随时间的变化可以用一个指数函数来描述：

$$I(t) = I_0 \exp(-t/\tau)$$

其中，参数 τ 被定义为测量意义上的束流寿命。因此束流寿命估算可通过对 N 个时刻流强测量值 $I(t_n)$ ($n=1, \dots, N$) 进行指数函数拟合完成。拟合系数的准确度与流强测量值 $I(t_n)$ 的精度有关，也与采集数据点的样本数 N 有关。

针对上海光源的应用，采用数值模拟方法对束流寿命计算分辨率与流强数据采样率和累积采样时间的关系进行了仿真，方法如下：(1) 采用公式 $I_S(i) = I_0 \exp\{-i/(f_s \tau_0)\}$ ， $i=0, 1, \dots, T \cdot f_s$ ，计算得到一组无测量误差的流强采样数据，其中 τ_0 为束流真实寿命（设定为 10 小时）， I_0 为初始流强（设定为 300mA）， I_S 为流强采样值， f_s 为采样频率， T 为累积采样时间；(2) 在上述每个采样数据上叠加一个随机测量误差（幅度由图 4 所示实测电子学噪声数据确定），即可得到一组仿真流强采样数据；(3) 对上述仿真数据进行指数函数拟合得到一个束流寿命测量值；(4) 重复以上步骤 10000 次获得一组束流寿命测量值，计算其方差即可得到束流寿命的测量精度。

对于不同的数据采样率和累积采样时间，仿真结果如图 5 所示。

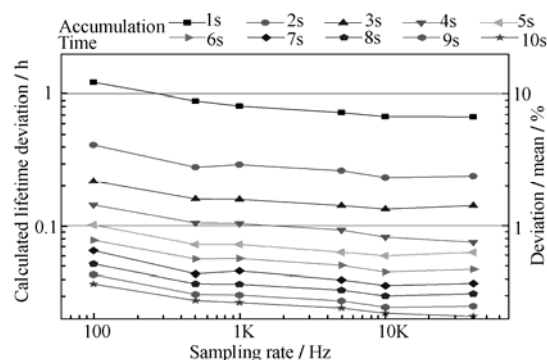


图 5 束流寿命测量精度仿真结果
Fig.5 Simulation of beam lifetime measurement

从图 5 中可看出：当数据采样率低于 10kHz 时，采样率越高则束流寿命计算精度越高；采样率高于 10kHz 时束流寿命计算精度与采样率无单增关系。

根据此结果，上海光源储存环直流流强测量系统数据采样率将取为 10kHz。从图 5 仿真结果可知，在此采样率条件下，如果累积 10s 的流强数据进行束流寿命计算，其均方根误差小于 0.03h，相对测量精度可达 0.3% (0.03 小时/10 小时)。为了同时满足 1Hz 数据刷新率及 10 秒钟流强累积数据的要求，数据采集处理的触发频率选定为 1Hz，在软件中设定一个长度为 100000 点的 FIFO，每次采样完成后刷新 FIFO 并根据刷新后 FIFO 中的数据计算当前束流寿命。考虑到现场环境噪声的影响，0.05Hz 带宽条件下的束流寿命测量相对精度可望好于 0.5%。

为评估流强测量分辨率，对 10kHz 采样率条件下的系统噪声电压频谱及积分噪声电压 VS 频率曲线进行了测量，其结果如图 6 所示。

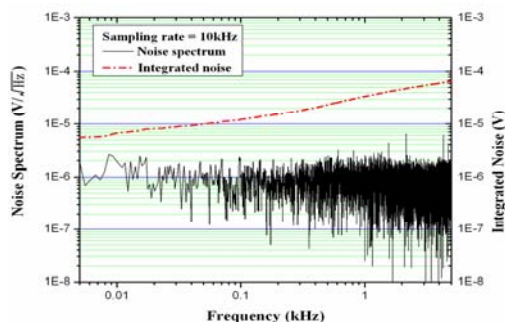


图 6 系统噪声频谱测试结果
Fig.6 Noise spectra of DCCT system

从图 6 可见，在 5kHz 带宽之内电子学噪声近似为白噪声，噪声电压频谱密度基本在 $2\mu\text{V}/\sqrt{\text{Hz}}$ 以下。带宽小于 50Hz 时积分噪声电压小于 $10\mu\text{V}$ ，2A 量程下等效电流噪声为 $2\mu\text{A}$ 。

上海光源直流流强测量的数据刷新率要求为 1Hz，可采用数字低通滤波后抽取，或是直接对 10kHz 采样数据取平均的办法来降低系统带宽，提高测量精度。考虑到现场环境噪声的影响，0.5Hz

带宽条件下的直流流强测量分辨率可望好于 $2\mu\text{A}$ 。

2.2 软件实现

上海光源控制系统是基于 Experimental Physics and Industrial Control System 平台进行开发的,因此直流流强测量系统必须提供一个 EPICS 数据接口,以便和控制系统实现无缝连接,向加速器物理学家和中控室的操作人员提供流强及束流寿命数据。

根据这一要求,直流流强测量系统软件在 Windows 平台上采用 LabVIEW 图形化编程语言进行开发,通过 Shared Memory IOCcore^[7]技术来实现 EPICS 的数据接口,完成 LabVIEW 应用程序和控制系统之间的数据交换。其结构如图 7 所示:

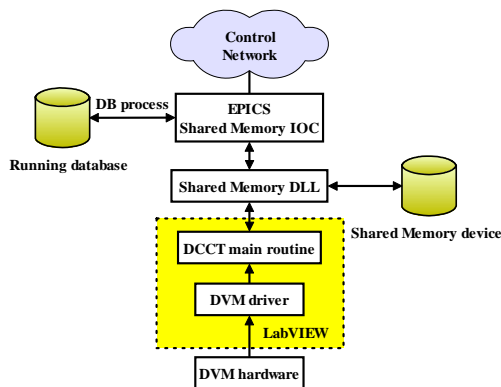


图 7 直流流强测量系统软件结构
Fig.7 Software architecture of DCCT system

其中在 LabVIEW 平台上运行的数字电压表驱动程序 (DVM driver) 完成硬件的初始化及原始数据的采集,DCCT 主控程序完成直流流强和束流寿命数据的计算。作为 Windows 应用程序运行的 EPICS Shared Memory IOC 生成一个运行数据库同控制系统的接口。DCCT 主控程序和运行数据库之间则通过调用共享内存动态连接库 (Shared Memory DLL) 访问同一个共享内存区域来实现数据交换。

3 结论

为满足储存环调试运行的物理需求,设计了一个基于 Bergoz NPCT 型探头和 PXI 数据采集处理平台的直流流强测量系统,目前电子学搭建及软件开发工作均已完成,采用多层磁屏蔽的探头真空组件正在加工并将于 2007 年中到货。前期仿真测试结果表明:在实验室环境中,50Hz 带宽条件下该系统直流流强测量分辨率好 $2\mu\text{A}$,0.05Hz 带宽条件下该系统束流寿命相对测量精度可望达到 0.5%。

参考文献

- 1 上海光源 (SSRF) 国家重大科学工程初步设计. 上海建筑设计研究院有限公司, 2004
Preliminary design of SSRF. 2004
- 2 Odier P. Proceedings of Workshop on "DC Current Transformer and beam lifetime evaluation". Lyon, France, 1-2 Dec., 2004. 3-5
- 3 Dehler M, Jaggi A, Schlott V, et al. Proceedings of EPAC'98. Stockholm, Sweden, 22-26 June, 1998. 1592-1594
- 4 New Parametric Current Transformer User's Manual, BERGOZ Instrumentation, 2006, available at www.bergoz.com,
- 5 冷用斌. EPICS 在 SSRF 中的应用. 博士后出站报告. 上海原子核研究所, 2001
LENG Yongbin. Application of EPICS in SSRF. Postdoctoral working report. SINR, 2001
- 6 金玉明. 电子储存环物理. 中国科技大学出版社, 1994, 62-64
JIN Yumin. Electron storage ring physics. USTC press, 1994. 62-64
- 7 Thompson D, Blockland W. Proceedings of ICLEPCS 2003. Gyeongju, Korea, 13-17 Oct., 2003.

DCCT system design for SSRF storage ring

LENG Yongbin ZHOU Weimin CHEN Yongzhong ZHAO Guobi YU Jun LIU Dekang

(Shanghai Institute of Applied Physics, Shanghai 201800)

Abstract A precise DC current transformer (DCCT) system is a must for commissioning and operation of the storage ring of Shanghai Synchrotron Radiation Facility (SSRF). Hardware of the system to be completed consists of a Bergoz NPCT sensor, a NI PXI digital voltage meter and a PXI controller. The software was developed on LabVIEW platform to communicate with accelerator control system via EPICS Shared Memory IOCcore interface. Bench test and simulation results of the DCCT showed that $2\mu\text{A}$ resolution for DC current measurement and 0.5% relative accuracy for beam lifetime measurement could be achieved.

Key words SSRF, DCCT, EPICS, beam lifetime

CLC O572.21+3