

# 大型 ICF 实验物理诊断系统的集中控制设计\*

陆俊峰<sup>1,2</sup>, 杨存榜<sup>2</sup>, 丁永坤<sup>2</sup>, 陈 鸣<sup>1,2</sup>, 阴泽杰<sup>1</sup>

(1. 中国科学技术大学 近代物理系 信息处理实验室, 合肥 230026; 2. 中国工程物理研究院 激光聚变研究中心, 四川 绵阳 621900)

**摘 要:** 大型惯性约束聚变(ICF)实验中需要配备精密的物理诊断集中控制系统,以保证实验能够安全、高效地进行。针对国内正在建设的 ICF 大型激光装置,提出了一个完整的物理诊断集中控制系统构建框架。该 ICF 的物理诊断集中控制系统分两个层次。上层是管理控制层,由大型计算机组建的工作站和服务器构成,提供集中式操作控制、状态报告、数据采集、管理、处理和集中显示。下层是由大量嵌入式处理器构成的实时控制层,它直接面对装置各部分的控制点,由上层管理系统来协调下层每个处理器工作。采用现场可编程门阵列(FPGA)技术为该系统设计了两个子控制系统:在 FPGA 上为指令同步系统实现了一个高性能的嵌入式系统平台;利用 FPGA 将同步触发信号系统整合到 PXI 系统中实现集中控制。

**关键词:** 物理诊断; 集中控制系统; 现场可编程门阵列; 单片系统; PXI

**中图分类号:** TP368.1; TP302; TP39 **文献标识码:** A

目前国内大型的惯性约束聚变(ICF)实验物理诊断通常还是采用由探测设备与分立的台式仪器组成的一个独立子系统,完成单一诊断功能。实验时必须单独为每个子系统配备实验人员进行操作管理,极大地浪费了人力。此外,每个系统管理员在实验期间还要进行繁琐的数据采集、处理以及分析,严重影响了效率<sup>[1]</sup>。

未来大型 ICF 实验激光装置的建成,对整个实验区的环境要求更高,为了尽量减少人员流动的影响,对诊断设备的数据采集和控制系统的程控及遥控能力的要求也将明显提高。另一方面,物理实验将更复杂,涉及的测量项目更多,使用的诊断设备种类也更加多样化。这就需要—个高速度、高精度、高可靠性的集数据采集、处理和管理为一体的集中控制系统。该控制系统还应具有集中显示和数据分析平台,实验人员可以即时方便地处理和分析打靶的实验结果,提高实验数据关联处理和综合处理能力,即时给出实验的直观结果,指导下一步实验。

## 1 物理诊断集中控制系统

### 1.1 概述

ICF 的物理诊断集中控制系统分两个层次。上层是管理控制层,由大型计算机组建的工作站和服务器构成,提供集中式操作控制、状态报告、数据采集、管理、处理和集中显示。下层是由大量嵌入式处理器(EP)构成的实时控制层,它直接面对装置各部分的控制点,由上层管理系统来协调下层每个处理器工作。图 1 是集中控制系统结构图。

### 1.2 管理控制层

管理控制层主要是运行在通用 PC 设备上的一个大型综合软件系统,为 ICF 实验提供以下几个方面的功能。

(1)集中显示方式提供人机控制接口:由 PC 工作站中的集中显示软件和集中控制软件提供—个物理诊断显示与控制的人机接口,方便实验人员及时了解、分析和控制实验的进程。

(2)数据采集、管理与分析处理能力:实验数据服务器提供—个完整的实验数据库,便于对实验数据的管理和调用。应用程序服务器提供—个丰富的应用程序库,调用库中的应用程序可以快捷地对实验数据进行各种相关处理和分析运算,从而使实验人员能够及时获取实验结果,为进一步进行现场关联讨论和分析提供依据。

(3)协调控制功能:管理控制层的控制系统由若干个紧密相关的子系统构成,每一个子系统分别控制 ICF 实验中—个物理诊断子系统,如设备运行状态现场监视系统、高速示波器控制系统和 CCD 控制系统等。集中

\* 收稿日期:2006-05-09; 修订日期:2006-08-23

基金项目:国家 863 计划项目资助课题

作者简介:陆俊峰(1978—),男,博士研究生,主要从事物理电子学的研究及其应用; lujunfeng111@sina.com。

控制软件把这些子系统集中在一起协调实验现场的各种诊断设备的运行。该层的控制节点由通用 PC 机构成,用来实现对实时控制层中嵌入式处理器模块的具体管理以及数据交互。

管理控制层内部的信息交换和数据传输是利用局域网来实现的。局域网具有灵活的拓扑结构和巨大的数据传输带宽,适合构建复杂的分布式系统。每发打靶产生的数据量为 50~200 Mbit 之间,一次实验数据量为 5~10 Gbit,因此,采用 1 000 Mbit/s 带宽的局域网络连接 PC 和交换机,而在服务器和 workstation 与交换机的连接中则使用带宽更宽的光纤传输。

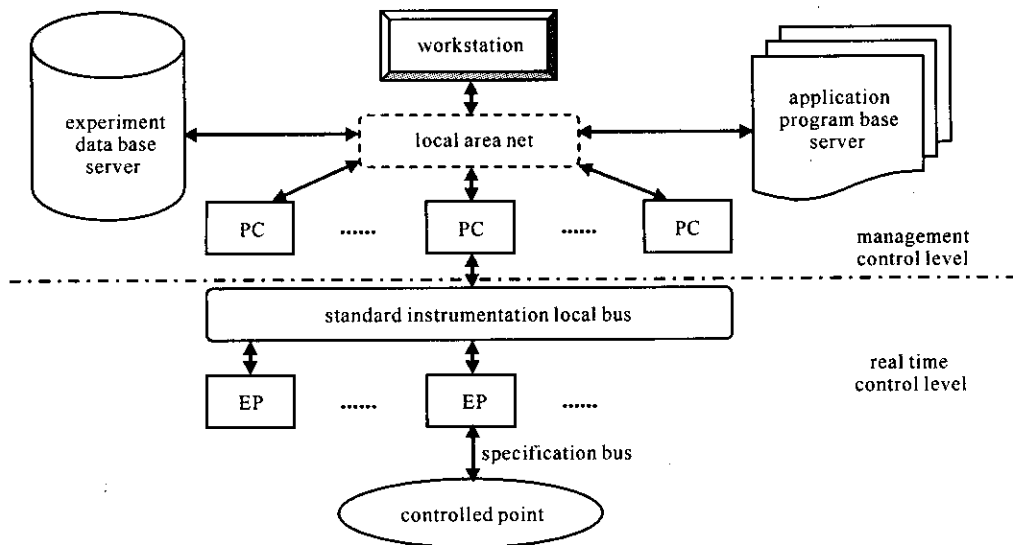


Fig. 1 Architecture of central control system for physical diagnosis system

图 1 物理诊断集中控制系统体系结构

### 1.3 实时控制层

实时控制层包括各种嵌入式处理器模块。整个系统有 50~100 个嵌入式处理器,每个处理器负责一个物理诊断子系统,能够监控 4~32 个前端分立设备。嵌入式处理器通过 ICF 实验诊断控制点的接口来执行具体的实时控制任务,为了提高设备集成度以及它们在实验现场复杂环境下工作的可靠性,这些处理器被做成模块化的电路系统,安装在 PXI(PCI eXtension for instrumentation)或者 LXI(LAN eXtension for instrumentation)标准工业局部总线系统中。PXI 系统是 PCI 总线在工业仪器和自动化控制中的应用,它除了能够提供 PCI 总线的所有功能外,还能满足特殊的工业仪用要求,如高精度同步、高性能和高可靠性等<sup>[2]</sup>。LXI 则是局域网在仪器领域的扩展,它不仅能满足工业仪用标准,还能提供局域网高带宽数据传输能力和便捷的接入扩展性能<sup>[3]</sup>。

通用 PC 机用来连接实时控制层和管理控制层,它采用虚拟仪器(VI)技术实现硬件和软件之间的无缝连接。虚拟仪器技术由美国国家仪器(NI)公司在 1986 年提出,通过该技术可以实现模块化硬件仪器的软件操控<sup>[4]</sup>,从而完成对各个嵌入式处理器模块设备的软件化集中控制。

为了使物理诊断集中控制系统能安全稳定地运行,还需要如下一些辅助子系统的支撑:电源系统、接地和屏蔽系统、监控与通讯系统、时间同步系统。其中,时间同步系统是物理诊断系统的关键部分,它属于实时控制层,负责为物理诊断系统提供三种同步信号:指令信号、时标信号和同步触发信号。

## 2 指令同步系统的设计

### 2.1 系统的性能要求

指令同步系统用于监控和报告目前激光器、测量系统、数据采集系统的准备状况并启动控制流程(可人为干预)来操作具有 ms 量级至 s 量级同步要求的各种设备。利用指令信号主要是规范实验进行状态报告和运行状态报告,便于集中控制和指挥。表 1 是物理诊断系统对指令信号的要求。以主激光到靶的时刻定义为零时刻,前面为负时刻,后面为正时刻。表中的每一步均在状态分析通过之后才发出相应的指令,否则会跳转到对应的异常处理子程序。

表 1 指令同步系统的工作流程

Table 1 Work flow of instruction synchronous system

time	action of issued instruction	condition analysis before instruction issue
-150 min	prepare for fusion experiment	check the situation of laser device and the condition of environment
-145 min	change target	determine whether to change target
-90 min	vacuum production	whether the target assemble and detectors adjust have been finished
-30 min	vacuum achievement	whether vacuum meets the requirement
-10 min	-10 min standby	whether the detectors have been ready
-5 min	-5 min standby	whether the laser device and target accurate adjust have been finished
-30	-30 standby	whether all the physical diagnostic devices have been ready

## 2.2 嵌入式控制系统的设计

指令同步系统由于对实时性要求比较高,采用基于 PXI 总线的嵌入式系统来实现,图 2 是系统的总体结构图。该系统是基于 NI 公司的 PXI 机箱(PXI-1042)设计的一片外围插卡,插卡上采用高性能的 FPGA 芯片自行设计片上系统(SoC)<sup>[5]</sup>来实现嵌入式指令同步系统,通用 PC 则采用 NI 公司的 PXI-8186 控制器来实现。它们之间通过 PXI 总线连接。片上系统的结构如图 3 所示。指令同步系统的控制程序固化在片内的 ROM 里,自行设计的基于 MIPS 体系结构<sup>[6]</sup>的 5 级流水线 32-bit 整数处理器负责控制代码的执行。为了提高处理器的性能,满足系统对实时控制的要求,设计中对处理器做了专门优化。考虑到控制程序不需要复杂的数据处理功能,从处理器的 ALU 单元中裁减掉浮点运算部件,大大节省了芯片资源,提高了处理器的工作频率。控制程序中涉及到大量的条件分支代码,为了提高处理器执行这些代码的效率,专门优化了分支控制点和分支条件判断点的位置<sup>[7]</sup>;首先,将分支控制点和分支条件判断点整合在同一级流水线中,这样能够消除因等待判断分支条件造成的流水线停顿;其次,将没有指令关联度的条件分支语句提前到指令解码级执行,降低了由于跳转所要清除的流水线级数,提高了流水线执行效率。

优化后整个处理器运行在 100 MHz 的频率(最高可达 148 MHz)下,按照每个控制动作平均需要 5~7 条指令计算,整个处理器平均响应时间达到了 70 ns,完全能够满足高实时性控制的要求,并为指令同步系统提供了向 ms 量级和  $\mu$ s 量级的同步精度扩展升级的空间,从而在打靶准备阶段覆盖更深的同步控制范围,减少特殊设备的使用。

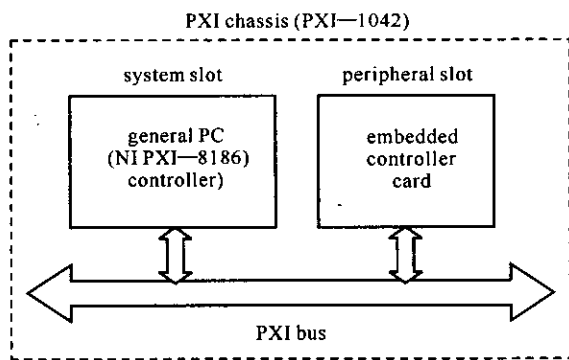


Fig. 2 Architecture of instruction synchronous system card

图 2 指令同步系统卡结构

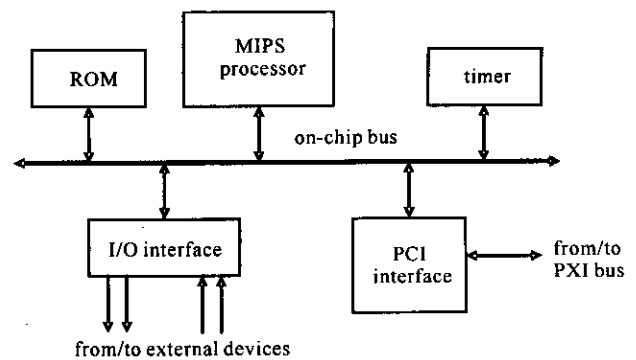


Fig. 3 SoC architecture based on FPGA chip

图 3 基于 FPGA 的片上系统结构

计时器提供精度高达 10 ns 的计时间隔。输入/输出(I/O)接口连接外设,用来获取设备的工作状态。PCI 接口负责与 PXI 总线通信。所有接口直接映射到处理器的数据缓存中,这样可以减少处理器和外围接口交换数据的等待时间,不会影响整个片上系统的实时性。

片上系统集成在一片 Altera 公司的 Stratix-II FPGA 芯片内,大大提高了系统的整体性能和可靠性。PXI 接口逻辑采用 Altera 公司提供的 PCI 软核<sup>[8]</sup>,其它部分的逻辑则根据应用需要灵活设计,这样可以最大限度地优化片上系统的性能。

## 3 同步触发信号系统的设计

### 3.1 系统的性能要求

同步触发信号主要用于示波器、条纹相机、分幅相机和数据采集系统等的同步触发。根据要求分为 ps 级

高精度同步触发信号、ns 级高精度同步触发信号和  $\mu\text{s}$  级同步触发信号。

### 3.2 同步触发信号系统的设计

通过对主触发信号进行延时输出，能够产生不同精度的同步触发信号。ps 级和 ns 级的高精度触发信号由专门的高精度可编程延迟线芯片阵列来实现，可编程延迟线芯片对输入信号的延时能根据应用需要现场程控调节，芯片的最小延时步长能达到 10 ps。高精度可编程延迟线芯片的控制逻辑以及  $\mu\text{s}$  量级低精度触发同步信号由 FPGA 芯片来实现。FPGA 芯片通过 PCI 软核将整个同步触发信号系统连接到 PXI 总线上，从而实现集中控制。图 4 是同步触发信号系统结构图。

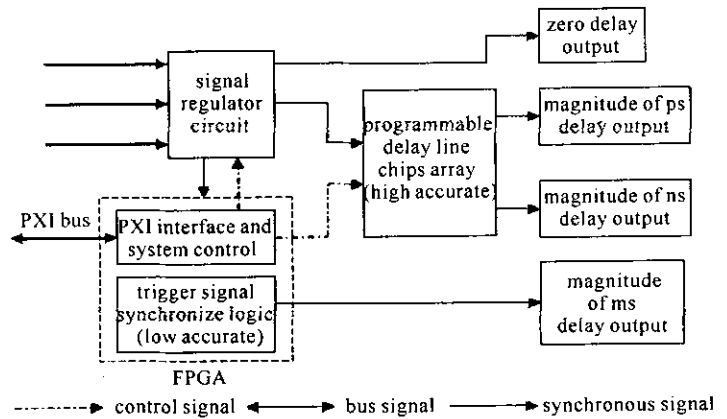


Fig. 4 Architecture of synchronous trigger signal system

图 4 同步触发信号系统结构

$\mu\text{s}$  量级低精度同步触发信号系统的部分控制信号时序在 Quartus II 软件<sup>[9]</sup>下的仿真如图 5 所示。clk\_20m 信号是外部输入的 20 MHz 时钟信号，在 FPGA 内部由 PLL 倍频到 250 MHz，提供给低精度的同步触发逻辑使用。clk\_33m 信号是 PXI 总线的系统时钟信号，频率为 33 MHz，提供给 FPGA 内部的 PCI 接口逻辑使用。rstn, idsel, ad 和 cben 是 PXI 总线信号。RegFile[3]和 RegFile[4]是 32-bit 内部寄存器，用来存储同步触发信号的延时和输出脉冲的宽度值，数值以 4 ns 为一个单位，按 16 进制形式表示。RegFile[5][8]是同步触发逻辑使能信号，RegFile[5][16]是同步触发逻辑延时数值加载信号，RegFile[5][24]是同步触发逻辑输出脉冲宽度值加载信号。trigg\_i 是输入的触发信号，wave 是输出的同步触发信号。

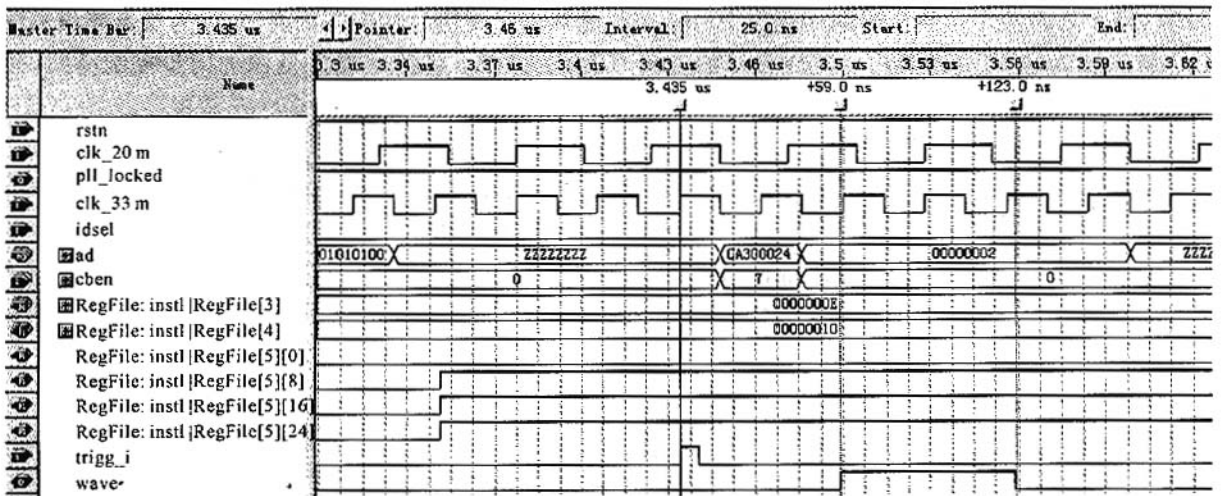


Fig. 5 Timing of synchronous trigger signal system

图 5 同步触发信号系统时序图

按照标准的 PXI 读写操作，将同步触发延时数值 E(十进制:14, 实际延时:  $14 \times 4 \text{ ns}$ )和同步触发输出脉冲宽度值 10(十进制:16, 实际脉冲宽度:  $16 \times 4 \text{ ns}$ )写入内部寄存器。同步触发逻辑开始工作前，对相应的控制寄存器写入控制字，使得 RegFile[5][8]、RegFile[5][16]和 RegFile[5][24]信号变高，整个同步触发逻辑进入工作状态，一旦有触发信号输入，就会产生一个满足要求的输出脉冲。从图 5 可以看出，输出的同步触发信号延时为 59 ns，输出脉冲宽度为 64 ns，精度很高。由于同步触发逻辑工作在 250 MHz，最小时间单位 4 ns，理论最大误差为 8 ns。

高精度的同步触发信号通过延迟线芯片阵列来实现，对这些芯片的控制则通过 PXI 读写操作改变 FPGA 内部对应的控制寄存器，并由控制逻辑来产生相应的控制信号。

## 4 结 论

物理诊断集中控制系统是一个复杂的系统工程,该系统服务于大型 ICF 实验,因此在硬件和软件设计上有很多特殊的要求。通过 FPGA 技术和标准工业总线技术,能够便捷地设计和集成各种复杂的前端实时控制系统,减少分立系统的使用,大大提高了系统的整体性能。基于 FPGA 芯片和 SoC 技术设计的前端嵌入式系统,具有很高的灵活性和强大的处理性能,完全能够适应物理诊断集中控制系统的实时控制层中不同实验设备和处理任务的需要。FPGA 芯片的可重复擦写功能使得对基于 FPGA 的设计进行系统升级和改造非常方便,周期短、成本低、对外围电路和器件影响小,具有极高的性价比。

### 参考文献:

- [1] 郑志坚,丁永坤,丁耀南,等. 激光-惯性约束聚变综合诊断系统[J]. 强激光与粒子束, 2003, **15**(11):1073-1078. (Zheng Z J, Ding Y K, Ding Y N, et al. Recent progress and application of diagnostic technique in laser fusion. *High Power Laser and Particle Beams*, 2003, **15**(11): 1073-1078)
- [2] PXI hardware specification (revision 2.2) [EB/OL]. PXI System Alliance, 2004. <http://www.pxisa.org/Spec/PXIHWSPEC22.pdf>.
- [3] LXI standard (revision 1.0) [EB/OL]. LXI Consortium, September, 2005. [http://www.lxistandard.org/home/LXI\\_Revision\\_1\\_0.pdf](http://www.lxistandard.org/home/LXI_Revision_1_0.pdf).
- [4] 赵会兵. 虚拟仪器技术规范与系统集成[M]. 北京:清华大学出版社,北方交通大学出版社,2003. (Zhao H B. Virtual instruments specification and system integration. Beijing: Tsinghua University Press, Northern Jiaotong University Press, 2003)
- [5] Rowen C. Engineering the complex SoC: fast, flexible design with configurable processors[M]. USA: Prentice Hall PTR, 2004.
- [6] Patterson D A, Hennessy J L. Computer organization and design: the hardware/software interface (3rd edition)[M]. San Francisco: Morgan Kaufmann Publishers, 2004.
- [7] Omondi A R. The microarchitecture of pipelined and superscalar computers[M]. Boston: Kluwer Academic Publishers, 1999.
- [8] PCI compiler user guide(vision 4.0) [EB/OL]. Altera Corporation, 2005. [http://www.altera.com.cn/literature/ug/ug\\_pci.pdf](http://www.altera.com.cn/literature/ug/ug_pci.pdf).
- [9] Quartus II version 6.0 handbook[EB/OL]. Altera Corporation, 2006. [http://www.altera.com.cn/literature/hb/qts/quartusii\\_handbook.pdf](http://www.altera.com.cn/literature/hb/qts/quartusii_handbook.pdf).

## Design of central control system for physical diagnosis in ICF experiment

LU Jun-feng<sup>1,2</sup>, YANG Cun-bang<sup>2</sup>, DING Yong-kun<sup>2</sup>, CHEN Ming<sup>1,2</sup>, YIN Ze-jie<sup>1</sup>

(1. *Information Processing Laboratory, Department of Modern Physics, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China;*

2. *Research Center of Laser Fusion, CAEP, P. O. Box 919-986, Mianyang 621900, China*)

**Abstract:** Large ICF experiments require their physical diagnosis systems to be equipped with a sophisticated central control system, which makes sure the whole experiment would be safe and efficient. An integrated central control system framework for physical diagnosis system serving for domestic ICF large laser device, which is being built, is brought forward. Two subsystems in the central control system are designed with field programmable gate array(FPGA) technology, implementing a high performance embedded system on chip(SoC) platform for instruction synchronous system in FPGA and integrating the synchronous trigger system into a PXI system for central control by FPGA.

**Key words:** Physical diagnosis; Central control system; Field programmable gate array; System on chip; PXI