

文章编号: 2095-4980(2018)06-1105-04

一种基于 CompactRIO 的 HPM 源控制系统设计

金 晖, 罗光耀, 杨晓亮

(中国工程物理研究院 应用电子学研究所 高功率微波技术重点实验室, 四川 绵阳 621999)

摘 要: 基于 CompactRIO 嵌入式技术, 采用 LabVIEW 图形化编程开发平台设计了一种应用于高功率微波(HPM)源的控制系統, 详细阐述了系统的结构设计和实现方法。控制系统利用不同模块完成过程控制、数据处理、数据采集等多种任务; 采用串行通信和光纤传输等技术, 实现监控和数据通信, 提高系统的运行性能和可扩展性。实验过程中, 基于 CompactRIO 的控制系统工作稳定, 测控效果良好, 为进一步开展 HPM 源技术验证试验奠定一定的技术基础。

关键词: CompactRIO; 高功率微波源; 嵌入式控制; 串行通信; 光纤

中图分类号: TN876.3; TP274 **文献标志码:** A **doi:** 10.11805/TKYDA201806.1105

Design of HPM source control system based on CompactRIO

JIN Hui, LUO Guangyao, YANG Xiaoliang

(High Power Microwave Laboratory, Institute of Applied Electronics, China Academy of Engineering Physics, Mianyang Sichuan 621999, China)

Abstract: Based on LabVIEW and CompactRIO platform, a test system is developed for High Power Microwave(HPM) source. The structure design and the implementation method of control system are described. The system uses different modules to realize process control, data processing, data acquisition and so on. With serial communication and optical fiber transmission technology, the safe reliable remote monitoring and data communication are both implemented. The system is verified through the experiments. It is stable and efficient, which establishes the technical basis for the further development of HPM source technology verification.

Keywords: CompactRIO; HPM source; embedded control; serial communication; fiber

高功率微波(HPM)是指输出功率 0.1~100 GW、频率 1~300 GHz 的电磁波, 产生这种电磁波的源是一种运行在相对论电子束条件下的装置^[1], 其实质是将脉冲能量在时间尺度上进行压缩, 以获得极短时间(20~100 ns)内的高峰值功率输出^[2]。大多数情况下, HPM 系统必须装在平台上, 空间和能源有限, 因此, 要求 HPM 系统的源要设计得尽可能小、轻和安全^[1]。控制系统作为重要组成部分, 需要提供可靠的触发脉冲激励^[3], 对其体积、重量及环境适应性等提出了更严格的要求。为实现一种 HPM 源试验系统的高速闭环控制, 同时兼顾电磁兼容设计, 控制系统选用 LabVIEW 图形化编程开发平台, 采用 CompactRIO(cRIO)嵌入式技术, 完成过程控制、数据采集及处理等多种任务; 利用串行通信和光纤传输等技术, 实现监控和数据通信, 提高系统的运行性能和可扩展性。

1 控制系统硬件设计

1.1 工作原理及实现功能

典型 HPM 源系统工作时, 控制系统接收试验平台发布的指令, 控制初级能源系统给脉冲功率源系统快速充电, 脉冲功率源系统进行功率变换和脉冲整形, 形成高压电脉冲加载到微波产生系统, 转换为高频微波能量, 最终由微波辐射系统发射微波信号。

图 1 是典型 HPM 源控制系统的工作原理示意, 主要控制对象为: 初级充电电源、开关、触发源、磁场电源、天馈伺服等。监测内容包括: 初级充电电源及触发源运行状态、束压/束流、微波功率、真空度等, 划分为

收稿日期: 2017-08-30; 修回日期: 2017-10-20

基金项目: 国防基础科研计划资助项目(JCKY2016203A018)

三类信号：数字 I/O 信号、控制时序脉冲与串行通信信号。控制系统主要控制载荷运行、反馈载荷状态信息、实现 HPM 源系统的电源管理，具有较高的可靠性和电磁兼容性。针对系统体积紧凑、小型化、抗电磁干扰、宽工作温度范围及强环境适应性等要求，控制系统基于 CompactRIO 嵌入式测控平台进行设计。

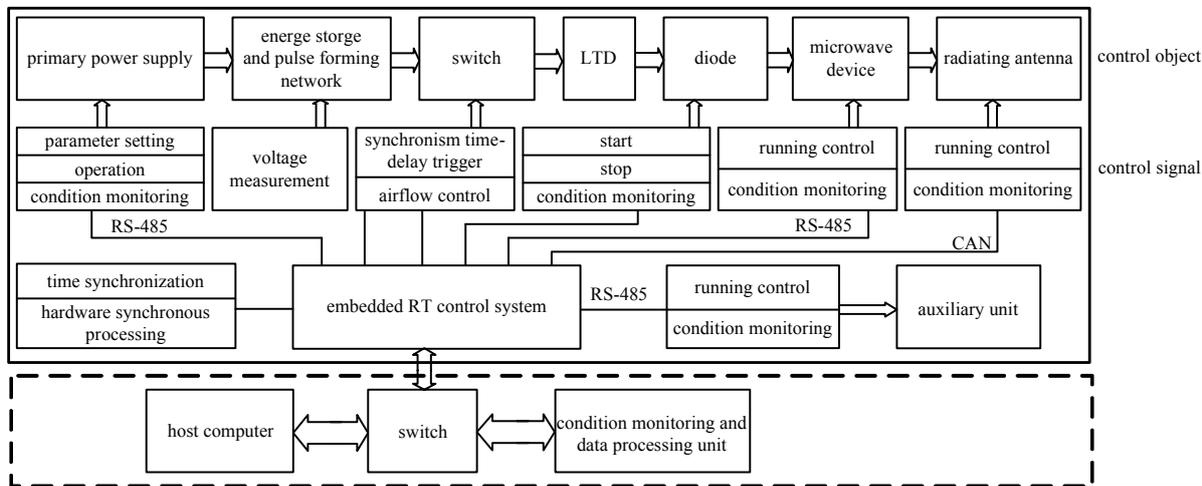


Fig.1 Schematic of typical HPM source control system
图 1 典型 HPM 源控制系统工作原理示意图

1.2 系统硬件架构

CompactRIO 是一款能适应较恶劣环境和有限空间的嵌入式系统，属于面向仪器的外围器件互联(Peripheral Component Interconnect, PCI)拓展的小型化系统，包含 I/O 模块、可编程逻辑门阵列(Field-Programmable Gate Array, FPGA)机箱、嵌入式控制器。内嵌 FPGA 的可重配置机箱是嵌入式体系结构的核心，FPGA 直接和 I/O 模块相连，可高速访问 I/O 电路，实现定时、触发和同步等功能，与其他工业控制器相比几乎没有控制系统的响应延迟。同时，CompactRIO 具有-40~70℃工作温度范围，结构坚固，50 g 冲击评级，以及各类安全、电磁兼容性(Electro Magnetic Compatibility, EMC)和环境指标的国际认证和评级^[4-6]。其硬件架构示意如图 2 所示。

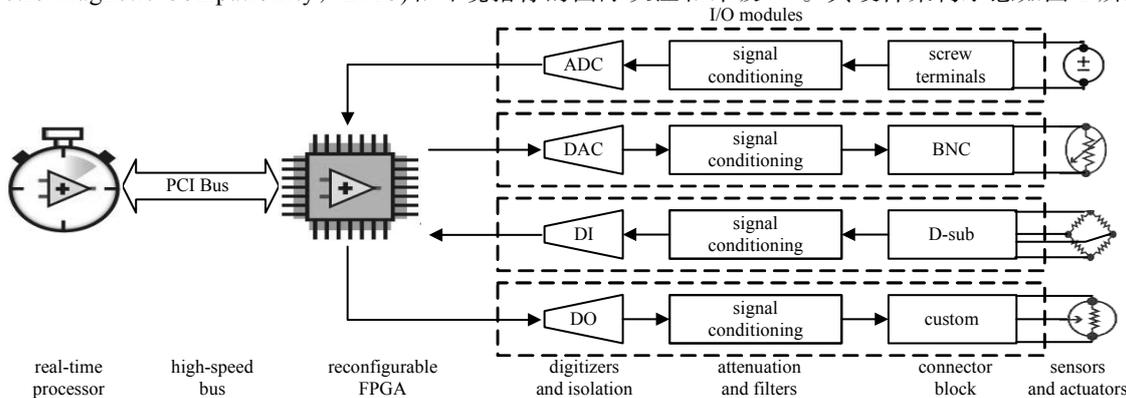


Fig.2 Hardware architecture of CompactRIO platform
图 2 CompactRIO 平台硬件架构

基于 CompactRIO 平台进行设计的 HPM 源测控系统结构组成如图 3 所示。总体硬件方案采用上/下位机模式，选用便携式计算机作为上位机，CompactRIO 系统及接口信号处理单元作为下位机，二者之间通过网络连接。上位机发布工作指令、显示运行状态等；下位机以 CompactRIO 为核心，配置相应的功能模块，由 FPGA 实现 HPM 源系统的时序控制及状态监测，预留通信接口(RS-485/CAN 等现场总线、以太网等)与 HPM 源辅助装备控制单元、调试平台、远程控制计算机(host computer)等进行通信以实现信息交换。

1.3 CompactRIO 平台模块配置

图 3 中 CompactRIO 测控平台选用紧固型实时控制器 cRIO-9024 作为嵌入式系统核心(主频 800 MHz/512 MB 的 DRAM 内存/双以太网端口，具有嵌入式 Web 和文件服务器，可实现远程用户连接)；与控制器相匹配的 cRIO-9113，作为一款四槽可重配置嵌入式机箱，支持所有 cRIO I/O 模块，Xilinx Virtex-5 可重配置 I/O(RIO)

FPGA 核心, 可实现逻辑控制、输入输出、定时、触发和同步设计; 选用定时/计数及 8 通道双向 100 ns 高速数字输入/输出模块——NI 9401, 产生系统工作时序脉冲、开关控制信号, 实时采集监测状态信息; 采用 cRIO 四端口 RS-422/RS-485 串行接口模块——NI 9871, 与其他系统进行通信以实现信息交换; 采用模拟输出模块——NI 9263, 产生 HPM 源初级电源和触发源等装备的工作电压等参数设置。

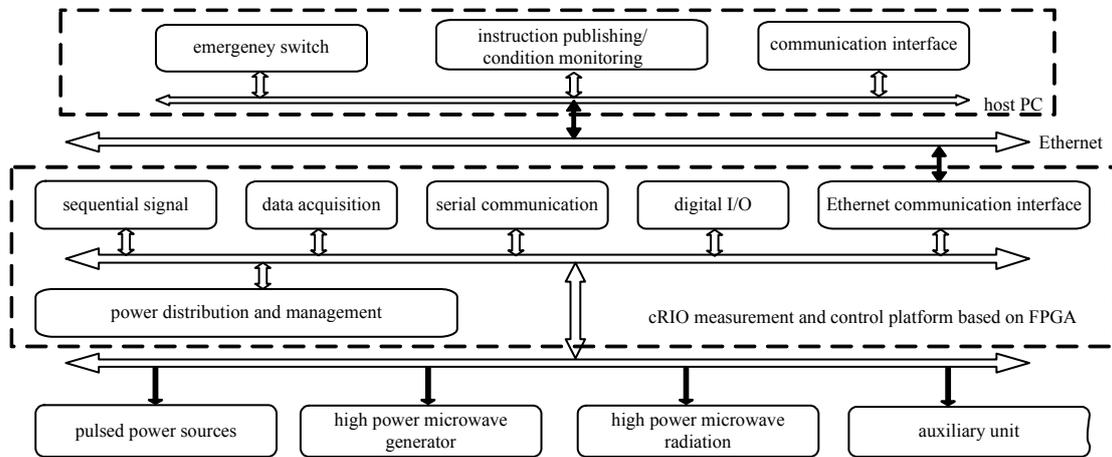


Fig.3 Structure of HPM source control system based on CompactRIO platform
图3 基于 CompactRIO 测控平台的 HPM 源控制系统结构框图

2 系统软件设计

HPM 源控制系统的软件开发包括上位机和下位机两部分。上位机软件是在 Windows 平台下, 利用 LabVIEW 开发系统进行编制, 主要实现人机交互功能, 如参数设置、指令发布、管理数据等。下位机软件按实现功能通过 CompactRIO 的 RT 和 FPGA 两层分别设计, 其中, 实时性要求较高的功能实现放在 FPGA 层, 如: HPM 源时序流程控制、I/O 数据采集与输出、安全连锁与紧急故障自动处理、CAN 通信等功能; 人机交互操作及实时性要求不高的功能放在 RT 层实现, 如上/下位机网络通信、HPM 源状态查询等。

CompactRIO 平台软件基于 LabVIEW 开发, 架构开放灵活, 可以便捷控制底层硬件设备。其中, FPGA 层程序由上位机 LabVIEW FPGA 模块开发, 采用 FPGA Compile Worker 编译生成比特位文件, 通过以太网部署到 FPGA 机箱中; RT 层程序由上位机 LabVIEW Real-Time 模块开发并部署到实时控制器中运行。

实时(Real Time, RT)层程序控制整个系统的核心——CompactRIO 控制器, 同时保证与上位机和 FPGA 层两部分的通讯。LabVIEW RT 支持传输控制协议(Transmission Control Protocol, TCP)/网际协议(Internet Protocol, IP)、用户数据报协议(User Datagram Protocol, UDP)等多种通讯协议, 与上位机进行数据通信; 提供 FPGA 接口函数, 可将 FPGA bit 文件下载至目标 FPGA, 并实现控制变量读写; 可通过直接内存访问(DMA)、握手、中断等模式与 FPGA 进行通信; 可以实现信号生成、分析等功能。

HPM 源控制系统在开发和调试阶段利用上位机完成对 CompactRIO 嵌入式测控平台的任务管理、工作参数设置、状态监测显示、数据处理等指令数据交互, 两者之间通过网络连接(接口方式: 以太网接口, 全双工, 100 Mbps/10 Mbps 自适应)。

3 电磁兼容设计

基于 CompactRIO 嵌入式测控平台的控制系统与 HPM 源试验系统(电子束源输出电压数百千伏, 电流数十千安, 功率 GW 量级, 脉冲宽度 150 ns 左右)集成在一起, 结构紧凑, 运行时现场产生的微波、高频电磁脉冲等将以传导和空间耦合形式, 经过供电、接地、互连以及空间辐射等方式形成电磁干扰^[7]。以高压开关触发导通时, 其附近观测的传导和空间干扰波形幅值最大, 对应辐射场强值约为数百 $V \cdot m^{-1}$, 频谱分量主要集中在 100 MHz 以下, 幅值最大处多出现在 40 MHz 以内。因此, 控制系统 EMC 设计主要考虑屏蔽、滤波和接地。

为防止 HPM 源强电磁环境中干扰源以空间耦合形式对控制系统形成干扰, 根据控制设备的功能实现、结构组成和线缆敷设等特点, 将控制设备安放在电磁屏蔽机箱内。其技术指标要求为: 在 20 MHz~10 GHz 频率范围内屏蔽效能不小于 60 dB。在信号传输与测控通信的连接介质选择上, 尽可能使用光纤^[8]——控制系统采用全光纤数据接口的数字化信息传输网络:

- 1) 时序触发信号及数字开关量等经过光电转换处理, 通过光纤连接;
- 2) 控制系统与 HPM 源系统的数据通信采用 RS-485 等标准串行总线通信方式, 约定通信协议, 统一数据接口标准, 采用光纤传输介质;
- 3) 与平台指控系统的连接网络采用光纤以太网, 完成控制系统内外数据指令交换。

切断经信号传输及通信连接线缆形成的干扰途径后, 控制系统滤波主要考虑防止从电源线引入电磁干扰。为此, HPM 源系统中初级能源的前级储能电源输入与脉冲功率源的高压输入相互独立; 控制系统采用“EMC 滤波器+DC/DC 隔离电源模块”的方式与平台供电部分连接, 控制模块单独接地, 与高压地确定可靠地分离。

屏蔽是抑制干扰的重要方法, 正确良好的接地可以保证控制系统稳定运行、消除干扰。由于控制系统中包含有多种电子线路和各种电器元部件, 分为信号地线和机壳地线等, 因此地线分组敷设。其中, 信号地线采用“悬浮地”, 屏蔽机箱采用铜排线接地(屏蔽地的电阻不超过 $1\ \Omega$), 形成电气通路, 为屏蔽箱体上的电荷提供一条低阻抗泄放通路。

4 结论

目前, 针对 HPM 源试验需要, 已完成基于 CompactRIO 的嵌入式测控单元研制, 结合平台 DC/DC 电压转换及低压高密度储能单元, 实现系统储能转换、充电管理等功能验证; 采用嵌入式测控平台控制, 与脉冲功率源联试, 实现系统功能, 满足实验要求。实验过程中, 基于 CompactRIO 嵌入式控制技术的测控系统工作稳定, 测控效果良好, 满足试验系统对控制的性能、体积、质量及可靠性的严格要求, 为 HPM 源系统的实验调试提供了基本条件, 也为进一步开展 HPM 源技术验证试验奠定一定的技术基础。

参考文献:

- [1] 周传明. 高功率微波源[M]. 北京:原子能出版社, 2007:2-44. (ZHOU Chuanming. High power microwave source[M]. Beijing:Atomic Energy Press, 2007:2-44.)
- [2] 刘锡三. 高功率脉冲技术[M]. 北京:国防工业出版社, 2005:9-24. (LIU Xisan. High pulsed power technology[M]. Beijing:National Defense Industry Press, 2005:9-24.)
- [3] 张秀栋. 脉冲功率源控制系统设计[D]. 南京:南京理工大学, 2012. (ZHANG Xiudong. Design of pulse power source control system[D]. Nanjing,China:Nanjing University of Science & Technology, 2012.)
- [4] National Instruments(NI). NI CompactRIO 开发者指南[EB/OL]. (2014-04-06) [2017-10-20]. <http://www.ni.com/compactriodevguide/zhs/>.
- [5] 应鹏,赵吉明,刘武通. 基于 CompactRIO 的载人航天器外场试验平台设计[J]. 计算机测量与控制, 2016,24(9):274-277. (YING Peng,ZHAO Jiming,LIU Wutong. Design of manned spacecraft field testing platform based on CompactRIO[J]. Computer Measurement & Control, 2016,24(9):274-277.)
- [6] 徐涛,戚长森. 基于 CompactRIO 的便携式航空发动机温度采集系统[J]. 测控技术, 2016,35(3):50-53. (XU Tao,QI Changsen. Portable temperature acquisition system for aero-engine based on CompactRIO[J]. Measurement & Control Technology, 2016,35(3):50-53.)
- [7] 樊旭亮,刘金亮,程新兵,等. 强流电子束加速器运行过程电磁辐射的实验研究[J]. 强激光与粒子束, 2011,23(11):2901-2905. (FAN Xuliang,LIU Jinliang,CHENG Xinbing,et al. Experimental research on electromagnetic radiation during operation of intense electron beam accelerator[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2011,23(11):2901-2905.)
- [8] 王远,江孝国,陈思富,等. 电磁干扰下时间分辨测量系统信号外触发技术[J]. 强激光与粒子束, 2014,26(4):1-5. (WANG Yuan,JIANG Xiaoguo,CHEN Sifu,et al. External trigger technique of high speed signal of beam parameters measurement system under strong electromagnetic interruption[J]. High Power Laser and Particle Beams, 2014,26(4):1-5.)

作者简介:



金 晖(1972-), 女, 四川省遂宁市人, 硕士, 高级工程师, 主要从事脉冲功率源及测控技术研究.email:qiqin1@163.com.

罗光耀(1976-), 男, 广西壮族自治区上林县人, 硕士, 副研究员, 主要从事脉冲功率源技术研究.

杨晓亮(1986-), 男, 河南省信阳市人, 硕士, 助理研究员, 主要从事脉冲功率及磁场设计的相关研究.