

FPGA 技术在核电厂 多样性驱动系统中的应用

陈冬雷, 张瑜, 陈杰, 雷晴

(深圳中广核工程设计有限公司 上海分公司, 上海 200241)

摘要: AP1000 核电厂多样性驱动系统(DAS)为保护系统的后备。本文研究了 DAS 的功能和结构、可编程门阵列(FPGA)技术的基本结构以及 FPGA 在 DAS 自动驱动平台中的应用。结果表明, FPGA 技术根据其结构和电路的自身特点, 具备多样性能力强、复杂程度低、稳定性高、响应时间短和安全性高等优点, 能满足核电厂保护功能的多样性驱动, 并满足相关法规标准对 DAS 的基本功能要求。

关键词: FPGA; 核电厂; 多样性驱动系统

中图分类号: TM623 **文献标志码:** A **文章编号:** 1000-6931(2014)S1-0976-04

doi: 10. 7538/yzk. 2014. 48. S1. 0976

FPGA Technology Application in Diversity Actuation System of Nuclear Power Plant

CHEN Dong-lei, ZHANG Yu, CHEN Jie, LEI Qing

(Shanghai Branch of Shenzhen China Nuclear Power Design Co., Ltd., Shanghai 200241, China)

Abstract: In AP1000 nuclear power plant (NPP), the diversity actuation system (DAS) provides a backup to the protection system. This paper focused on the function and structure of DAS, the filed programmable gate arrays (FPGA) technology and application of FPGA in DAS. The results show that the FPGA performs the characteristics of diversity, simple, high reliability, short response time and good security. And the FPGA can meet the requirement of diversity actuation function and relate rule.

Key words: FPGA; nuclear power plant; diversity actuation system

随着计算机技术的不断发展,数字化仪控技术在核电厂的应用也不断推广和扩展。核电厂数字化仪控技术的优点是集成能力强、组态灵活、自动化程度高。此外,在自诊断、可靠性、可用性和易于安装维护等方面也有一定优势。但核电厂数字化仪控技术的应用存在一定的不足,系统软件的应用和多个冗余列间软件的互

用导致其抵御共因故障(CCF)的能力较弱。多样化手段被认为是应对软件 CCF 最有效的方法之一,各国的核监管当局在进行核电厂数字化仪控系统设计和审评中都特别重视依靠多样性驱动系统(DAS)实现应对反应堆保护系统(PMS)软件的共因故障。

AP1000 核电厂的 DAS 作为保护系统的

后备^[1],能缓解未能紧急停堆的预期瞬态(ATWS)的后果,降低概率安全评价中的堆芯熔化概率,并防止堆芯熔化后安全壳超压失效。

本文重点研究 DAS 的基本功能和结构、FPGA 技术的结构以及 FPGA 在 DAS 中应用情况,并以此为基础分析 FPGA 技术在 DAS 应用中的优势。

1 DAS 的基本功能和结构

为减少保护系统共因故障带来的风险,多样性驱动系统采用与 PMS 不同的信号处理、通讯和逻辑处理软硬件,且提供了如下必要的功能:1) 提供自动驱动信号,当规定的电厂参数超过整定值时,停闭反应堆和驱动选定的专设安全设施;2) 提供独立的手动驱动信号,触发反应堆停堆和驱动选定的专设安全设施;3) 对选定的电厂参数提供专用的独立指示。

DAS 结构如图 1 所示。其中,DAS 的自动驱动处理平台采用 FPGA 技术实现其功能。DAS 的手动驱动通过硬接线的方式将手动驱动开关直接连接到驱动最终负载的继电器或爆破阀控制器上,这种方式从路径上完全独立于 PMS 和 DAS 自动逻辑。

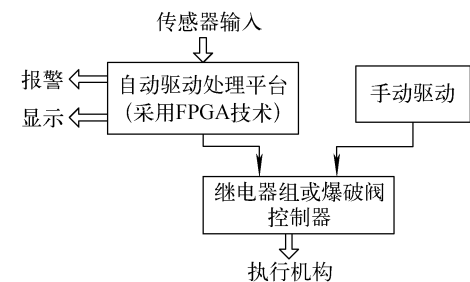


图 1 DAS 结构
Fig. 1 DAS configuration

2 FPGA 技术的结构

FPGA 在结构上采用逻辑单元阵列的概念。内部包括可配置逻辑模块(CLB)、输入输出模块(IOB)、内部连线 3 个部分。其内部是一相交的二维可编程逻辑块阵列和固定互连线,CLB 如方块一样分布在芯片中央,外围是与管脚相连的 IOB。

FPGA 的编程通过编译后转化为 FPGA 内在的连接表,相当于 FPGA 内提供了大量的

与非门、或非门、触发器等基本数字器件,编程决定被使用器件的数量以及它们之间的连接。

1) 可配置逻辑模块

CLB 是 FPGA 内基本逻辑单元,是组成 FPGA 的核心部件,通常规则地排列成 1 个阵列,散布于整个芯片,完成用户指定的逻辑功能。CLB 主要由组合逻辑、寄存器、选择器和控制单元组成。

2) 输入输出模块

IOB 主要完成芯片上的逻辑与外部封装脚的接口,通常排列在芯片的四周,完成不同电气特性下对输入、输出信号的驱动和匹配要求。

3) 内部连线

内部连线分布于 CLB 和 IOB 之间,连通 FPGA 内部所有单元。内部连线使用多种不同长度的金属线通过可编程开关点或可编程开关矩阵 PSM 相互连接,从而构成所需的信号通路。

4) 配置数据

FPGA 的功能由逻辑结构的配置数据决定。工作时,这些配置数据存放在片内的静态随机存储器(SRAM)或熔丝图上。基于 SRAM 的 FPGA 器件,在工作前需从芯片外部加载配置数据,配置数据可存储在片外的 EPROM 或其他存储体上。用户可控制加载过程,在现场修改器件的逻辑功能,即现场编程。

3 基于 FPGA 的 DAS 平台

FPGA 技术属于可编程逻辑器件(PLD)的一种,广泛应用于通信、消费电子、汽车电子、工业控制、测试测量等领域。FPGA 凭借其优良特性,在核电领域占有一席之地,核电领域仪控系统电子硬件技术^[2]如图 2 所示。

DAS 自动驱动平台的主要功能为接收传感器信号、进行整定值比较、以通讯方式传输信息、提供与外系统的接口。平台基于通用的板件组合使用外部软件,将配置程序“烧入”带有 FPGA 芯片的板件,实现 DAS 的基本功能。DAS 使用的板件有核心逻辑板件、输入板件、输出板件和通讯板件。

核心逻辑板件获取输入板件传输的信息,执行 DAS 的整定值比较功能。比较结果用于驱动现场设备。此外,板件还对试验和诊断的

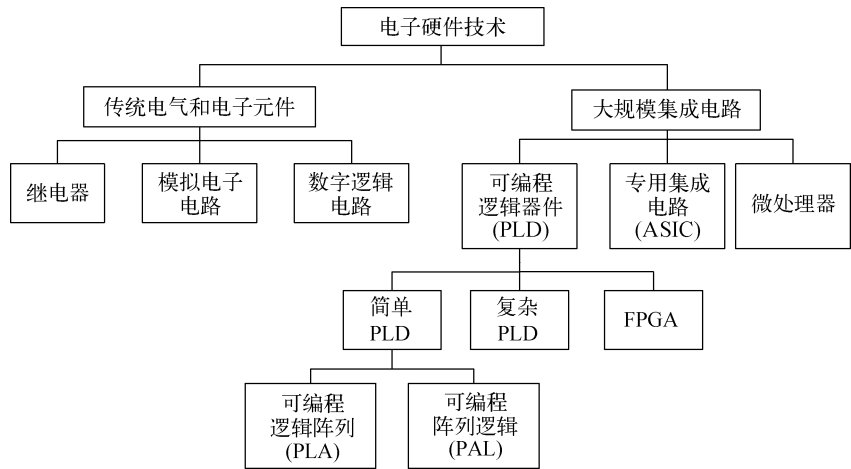


图 2 核电领域电子硬件技术

Fig. 2 Electronic hardware technology used in nuclear power plant

输入进行处理,并提供系统诊断和试验报警的输出。

输入板件执行信号采集、信号调理、滤波和模数转换的功能。板件根据输入类型的不同分为 3 种。一种板件处理热电阻和热电偶信号的模拟量信号,主要有来自现场、参考端的温度和机柜温度输入的温度信号;另一种板件处理现场传感器的 4~20 mA 模拟量信号;最后一种板件处理数字量输入,主要有旁通信号、电源状态和继电器反馈信号。

输出板件提供固态数字量输出,用于自动驱动信号发出、传输 SOE(事件序列)信号、试验状态输出、旁通报警输出。输出板件在输入通道和现场电路间提供电气隔离。

DAS 的通讯板件通过 RS485 的数据链路物理接口将信息传输至 DAS 数字显示器中。

4 DAS 中采用 FPGA 技术应用的优点

1) 作为保护系统的多样性后备

采用 FPGA 技术的 DAS 与基于微处理器技术的 DCS 相比,完全脱离了操作系统的束缚,“纯硬件”的系统模式完全克服了数字化仪控系统的共因故障。FPGA 技术可继承监视、自诊断等辅助功能,自身具有独立性,可很好地满足美国联邦法规 10 CFR 50.62^[3] 对核电厂仪控系统的要求。

2) 复杂程度低且稳定性高

采用 DCS 和 PLC 的仪控系统依靠计算机

操作系统的运行,其操作软件和专用的应用软件使得系统的软硬件过于庞大。基于微处理器的系统通常包含了多个抽象层,可在多个进程之间计划任务、共享资源。驱动层控制着硬件资源,而操作系统管理内存和处理器的带宽。对于任何给定的处理器内核,每次只能执行 1 个指令,且基于微处理器的系统时刻面临着严格限时的任务相互取占的风险。而 FPGA 不使用操作系统,由外部软件工具提供编程环境。FPGA 电路是真正的编程“硬”执行过程,拥有真正的并行执行和专注于每项任务的确定性硬件,可减少稳定性方面出现问题的可能。

3) 响应时间更短

FPGA 的硬件结构与传统模拟电路、数字逻辑电路非常相似,电路层级极少,因此,处理速度快、响应时间短。与微处理器相比,FPGA 可在 1 个时间周期内同时处理所有控制算法,以保证 DAS 所需的系统响应时间。

4) 安全性更好

基于 FPGA 的系统采用数据查询表的方式执行其控制功能,不包含以通用目的设置的上层部件。任何恶意篡改、破坏系统运行的行为均需通过全新设计,使用专用技术的工程工具,提升了恶意修改行为的难度。

5 小结

本文介绍了 DAS 的功能和结构、FPGA 技

术的基本结构以及 FPGA 在 DAS 自动驱动平台中的应用,在此基础上,概括出该平台采用 FPGA 技术的优点。FPGA 技术在 DAS 的应用有效地解决了核电厂保护功能多样性的驱动。通过相关技术的研究,可更好地指导 DAS 的工程设计,并为 DAS 设备国产化奠定一定基础。

参考文献:

[1] 林诚格,郁祖盛,欧阳予,等. 非能动安全先进核

电厂 AP1000[M]. 北京:原子能出版社,2008: 438-440.

[2] NASER J. Guidelines on the use of field programmable gate arrays (FPGAs) in nuclear power plant I&C systems, TR-1019181 EPRI[R]. California: EPRI, 2009.

[3] 10 CFR 50. 62 Requirements for reduction of risk from anticipated transients without scram (ATWS) events for light-water-cooled nuclear power plants[S]. US: NRC, 2012.