

电子回旋共振加热系统中央控制器 异常诊断设计与仿真

杨 永

(中国科学院 等离子体物理研究所, 合肥 230031)

摘要: 异常诊断是电子回旋共振加热控制系统中存在的一大问题; 由于控制回旋管的信号繁多, 且控制实时性要求高, 一般延迟要求在微秒量级; 一旦发生故障, 控制系统会立即关闭各高压电源以保护回旋管; 想要查找异常发生的原因, 只能将各信号均接入示波器, 并且等待该故障再次发生时被示波器捕获, 这样不仅难以定位异常, 而且耗时耗力; 针对以上问题, 设计了 ECRH 系统中央控制器的异常诊断逻辑, 该诊断逻辑主要基于正常的回旋管控制流程, 通过判断回旋管控制流程的走向以及各种检测输入信号来诊断异常发生的原因; 将诊断逻辑与正常的回旋管控制逻辑嵌入到同一片 FPGA 芯片中, 并发运行; 时序仿真结果表明, 在故障发生时能够立即输出异常信号给计算机, 实现了实时在线故障检测和诊断, 使整个电子回旋共振加热控制系统更加智能化。

关键词: 电子回旋共振加热; 回旋管; 异常诊断; FPGA

Design and Simulation of Abnormal Diagnosis of Central Controller of ECRH System

Yang Yong

(Institute of Plasma Physics, Chinese Academy of Sciences, Hefei 230031, China)

Abstract: Abnormal diagnosis is a big problem in the electronic cyclotron resonance heating control system. Since the signals for controlling the gyrotron are numerous and the real-time control requirements are high, the general delay requirement is on the order of microseconds. In the event of a fault, the control system immediately shuts down the high voltage power supplies to protect the gyrotron. If you want to find out the cause of the abnormality, you can only connect each signal to the oscilloscope and wait for the fault to occur again when it is captured by the oscilloscope. This is not only difficult to locate the abnormality, but also time-consuming and labor-intensive. Aiming at the above problems, the abnormal diagnosis logic of the central controller of the electron cyclotron resonance heating system is designed. The diagnostic logic is mainly based on the normal gyrotron control flow, and the abnormality occurs by judging the direction of the gyrotron control flow and various detection input signals. The diagnostic logic and the normal gyro control logic are embedded in the same field programmable gate array chip and run concurrently. The simulation results show that the abnormal signal can be output to the computer immediately when a fault occurs, real-time online fault detection and diagnosis is realized, and the whole electron cyclotron resonance heating control system is more intelligent.

Keywords: ECRH; gyrotron; abnormal diagnosis; FPGA

0 引言

电子回旋共振加热 (electron cyclotron resonance heating, ECRH) 是可控核聚变反应的重要的加热方法之一, 具有耦合效率高、功率沉积局域性好、微波发射天线结构简单、发射功率密度较高、易于控制回旋共振层等许多优点, 能够弥补传统加热方式加热温度有限的缺点, 如中国环流器新一号 (HL-1M) 装置上研制的 500 kW/50 ms 的电子回旋共振加热系统^[1]。中国环流器二号 A (HL-2A)

装置在一代的基础上先后从 2005 年的 2 只 500 kW 回旋管共 1 MW 输出功率逐步发展到 2009 年 6 只共 3 MW 输出功率^[2-3]。作为中国第一个超导托卡马克 HT-7^[4] 的升级版, EAST (experimental advanced superconducting tokamak) 托卡马克装置上配备了 4 MW 长脉冲电子回旋加热系统^[5-7]。

回旋管作为整个 ECRH 系统的核心器件, 它的控制需要遵循严格的要求, 其中一个重要的原则是: 加电时, 应先加阴极高压, 再加阳极高压; 关断时, 先关阳极高压, 再关阴极高压, 即阳极高压要在阴极高压已经加载的情况下才能加载, 不能单独加载^[8]。中央控制器作为直接控制回旋管的部件, 为了保证回旋管可靠运行, 以及不被各种意外情况损坏, 其控制逻辑复杂, 输入输出信号繁多, 如果安装调试中遇到异常状况, 难以定位异常发生的位置。

收稿日期: 2019-12-03; 修回日期: 2019-12-30。

基金项目: 国家重点研发计划 (2017YFE0300200, 2017YFE0300503, 2017YFE0300401, 2017YFE0400600)。

作者简介: 杨 永 (1985-), 男, 安徽长丰人, 博士, 主要从事复杂系统智能运行管理方向的研究。

如果没有异常诊断功能, 遇到异常时, 需要使用示波器去再次捕获异常, 由于信号繁多、连线困难, 而且有些异常出现的频率较低, 使得调试工作非常繁琐, 效率低下, 严重拖延工作进展。因此设计一种实时在线的异常诊断逻辑势在必行。

另外, 配合计算机进行长期的异常数据记录, 通过分析异常的类型和出现频率的变化, 还可以评估 ECRH 系统中重要部件的运行状态。ECRH 系统正常运行时, 也会出现一些异常, 但是出现的频率很低, 随着系统运行时间的增长, 各部件会逐渐老化, 这些异常出现频率可能会增加或者减少, 通过分析这些异常发生的频率, 可以间接地监控各部件运行的状态。

传统的 ECRH 系统主要采用可编程逻辑控制器 (programmable logic controller, PLC) 来控制回旋管高压电源的开关。但是 PLC 的控制响应速度不高, 一般为毫秒量级, 且无法编程实现较为复杂的逻辑, 大大限制了 ECRH 系统回旋管控制的性能提升。FPGA (field programmable gate array) 作为 PAL、GAL 等可编程器件的进一步发展的产物, 具有速度快、逻辑资源丰富, 几乎能够编程实现任意复杂逻辑。为了提高控制响应速度、控制时间精度、以及复杂度, EAST 托卡马克装置的 ECRH 系统采用 FPGA 芯片作为回旋管的主控芯片。

本文主要介绍了 ECRH 系统中央控制器的控制原理以及异常诊断的逻辑设计, 并且进行了仿真验证。第二小节介绍了中央控制器正常的回旋管控制流程。第三小节详述了可能出现的异常种类及其原因, 然后设计了对应的诊断逻辑。第四小节对这些诊断逻辑进行了时序仿真。第五小节对全文进行了总结。

1 中央控制器控制原理

中央控制器的主要作用是根据 EAST 装置的总控发来的触发信号和等离子体电流信号来控制回旋管阴极高压电源和阳极高压电源的开关。由于要严格保证阳极高压不被单独加载在回旋管上, 因此需要实时检测阴极高压源的输出状况, 一旦检测到异常就先迅速关闭阳极电源。中央控制器的输入输出信号如图 1 所示。图中只画出了中央控制器与其他部件或系统之间的信号连接关系, 各部件或系统之间的信号连线没有在该图中表示, 比如 PLC 也会监视阴极高压电源的输出情况等。与中央控制器相连的有 EAST 总控、阴极高压单元、阳极高压电源、PLC 监视器、ECRH 总控见算计、自检计算机以及各种保护单元。

信号 TriggerIn₋₆₀、TriggerIn₀ 以及 Ip 是 EAST 总控发来的信号, TriggerIn₋₆₀ 为负 60 秒触发脉冲信号, 用于通知 ECRH 系统作好一次放电实验的准备, 因为 ECRH 系统中有些部件 (比如阴极高压电源) 从启动到就绪需要比较长的时间。TriggerIn₀ 为 0 秒触发脉冲信号用于通知中央控制器可以立即打开回旋管给 EAST 装置输送

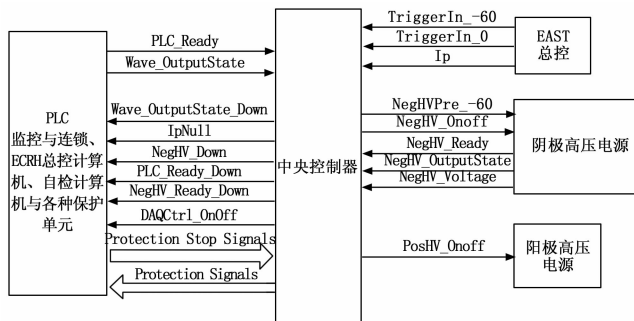


图 1 中央控制器输入输出信号

高功率微波。Ip 为 EAST 总控发送来的等离子体电流信号, 当回旋管输出微波后就会接收到 Ip 信号有效, 等 Ip 信号再次变为无效时, 表示一次放电过程结束, 应立即关闭回旋管。

NegHVPre₋₆₀ 为阴极高压电源负 60 秒准备信号, DAQCtrl_{OnOff} 为数据采集控制信号, 与 NegHVPre₋₆₀ 时刻保持同步。NegHV_{OnOff} 为阴极高压电源的输出开关信号, NegHV_{Ready} 为其准备就绪信号, NegHV_{OutputState} 为其输出状态信号, NegHV_{Voltage} 为其输出电压信号, 该信号用电平高低来表示输出电压是否达到要求。PosHV_{OnOff} 为阳极高压电源的输出开关信号。PLC_{Ready} 为 PLC 准备就绪信号, Wave_{OutputState} 为实时波输出状态信号, 其电平的高低表示回旋管有无波输出, 由于微波功率检测器输出的模拟信号噪声较大, 可能会造成 Wave_{OutputState} 信号有脉冲干扰, 因此需要对该信号进行两次或多次确认才能比较可靠地判断波输出的真实状态。

Wave_{OutputState}_{Down} 为发生波输出状态异常时的诊断输出信号, IpNull 为发生无等离子体电流异常时的诊断输出信号, NegHV_{Down} 为发生阴极高压输出状态异常时的诊断输出信号, PLC_{Ready}_{Down} 为发生 PLC 就绪状态异常时的诊断输出信号, NegHV_{Ready}_{Down} 为发生阴极高压就绪状态异常时的诊断输出信号。

除了上述信号之外, 还有各种保护和急停信号, 统称为 Protection Stop Signals, 当这些信号中的任意一个有效时, 中央控制器会立即关闭回旋管, 并且输出对应信号的诊断输出信号, 这里统称为 Protection Signals。

回旋管除了需要阴极高压电源和阳极高压电源外, 还需要配套超导磁体及其电源、灯丝电源、钛泵电源等附属部件, 因为这些部件的监控要求速度相对不高, 由其他 PLC 等控制器来监控, 当出现异常时, 会发送保护停止信号 (protection stop signals) 给中央控制器, 来使其关闭阴极高压电源和阳极高压电源。

中央控制器的控制流程可以用图 2 所示的状态图来表示:

1) 上电初始化: 系统上电之后 100 ms 内, 复位信号

有效, 此时处于“空闲状态”, 系统进行初始化, FPGA 将所有输出信号置为无效状态 (NegHVPre₋₆₀、NegHV_{-Onoff}、PosHV_{-Onoff}、DAQCtrl_{-OnOff}、IpNull 为低电平, Wave_{-OutputState}、Down、NegHV_{-Down}、PLC_{-Ready}、Down、NegHV_{-Ready}、Down、Protection Signals 为高电平);

2) 当 PLC 就绪信号 PLC_{-Ready} 为高电平时, 进入“准备状态”; 此时如果 -60 s 触发脉冲信号 TriggerIn₋₆₀ 有效, 进入“负 60 s 触发状态”, FPGA 将负 60 s 阴极高压准备信号 NegHVPre₋₆₀ 和 DAQCtrl_{-OnOff} 置为高电平, 以使阴极高压电源开始准备, 各信号数据开始被采集; 当阴极高压电源准备好后, 阴极高压准备好状态信号 NegHV_{-Ready} 变为高电平;

3) 处于“负 60 s 触发状态”时, 当 NegHV_{-Ready} 信号变为高电平后, 如果 0 s 触发脉冲信号 TriggerIn₀ 有效, FPGA 将阴极高压启停信号 NegHV_{-OnOff} 置为高电平, 给回旋管加载阴极高压电源, 程序进入“等待阴极高压输出状态”;

4) 等待 1 ms 后, 程序自动进入“检测阴极高压输出状态”, 检测信号 NegHV_{-OutputState} 是否正常; 如果 NegHV_{-OutputState} 异常 (表示阴极高压电源没有正常加载), 进入“关闭状态”; 如果 NegHV_{-OutputState} 正常 (表示阴极高压电源已正常加载), 程序进入“等待阳极高压输出状态”, 50 ms 后自动进入“等待波输出状态”, 并将阳极高压启停信号 PosHV_{-OnOff} 置为高电平, 给回旋管加载阳极高压电源;

5) 当阳极高压启停信号 PosHV_{-OnOff} 发出后, 程序等待 1 ms, 然后进入“检测波输出状态”, 检测信号 Wave_{-OutputState} 是否正常; 如果 Wave_{-OutputState} 检测为异常, 程序进入“再次等待波输出状态”, 等待 1 ms, 然后进入“再次检测波输出状态”, 再次检测信号 Wave_{-OutputState} 是否正常, 如果波输出状态信号再次检测不正常, 进入“关闭状态”; 如果 Wave_{-OutputState} 检测 (或再次检测) 为正常, 则进入“等待等离子电流状态”, 等待 1 ms 后, 进入“检查等离子电流状态”, 检测信号 Ip 是否正常;

6) 如果信号 Ip 正常, 程序进入“等待关闭状态”; 如果异常, 则直接进入“关闭状态”;

7) 在“等待关闭状态”中, 程序等待信号 Ip 变为无效 (表示一个放电过程结束), 然后正常进入“关闭状态”; 如果此时检测到波输出异常, 程序会进入“再次等待波输出状态”, 等待 1 ms 后, 进入“再次检测波输出状态”, 如果检测正常, 会直接返回“等待关闭状态”; 否则会进入“关闭状态”。程序从“等待关闭状态”进入到“再次等待波输出状态”以及“再次检测波输出状态”时, 当 Ip 信号变为无效时, 也判定为放电过程正常结束, 立即进入“关闭状态”;

8) 当程序进入“关闭状态”后, 会将 PosHV_{-Onoff} 置为低电平, 以关闭阳极高压电源, 等待 2 ms 后进入“关闭状态 2”; 在“关闭状态 2”中, 将 NegHV_{-Onoff} 置为低电平, 以关闭阴极高压电源, 等待 200 ms 后进入“关闭状态 3”; 在“关闭状态 3”中, 将 NegHVPre₋₆₀ 和 DAQCtrl_{-OnOff} 置为低电平; 最后返回“空闲状态”。

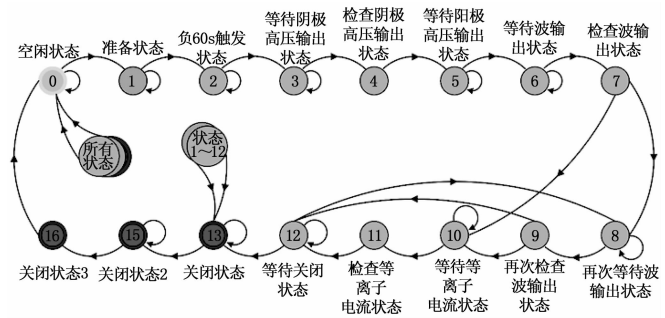


图 2 FPGA 控制部分状态机

2 异常诊断逻辑设计

除了上一节所述的正常的控制逻辑外, 在控制回旋管运行时, 还会出现各种异常的情况, 中央控制器必须及时地诊断和处理这些异常状况, 才能起到保护回旋管的作用。异常诊断逻辑是根据程序跳转到关闭状态前的状态以及各输入信号的电平高低来判断是否发生了异常以及诊断异常发生的原因。当主控制逻辑处于空闲、就绪或者关闭状态时, 输入状态信号异常或者保护急停信号有效不会被判定为一个异常情况。只有在一次放电过程中, 输入状态信号异常才有可能产生一个异常情况。异常主要可以分为以下六种情况:

1) PLC 就绪状态异常: 指当程序处于状态 2~12 时 (即处于一个放电过程中), PLC_{-Ready} 信号突然变为低电平, 表示 PLC 出现了异常状况, 此时回旋管控制逻辑从状态 2~12 中的某一个状态跳转到“关闭状态”, 异常诊断逻辑监测这一状况后, 将信号 PLC_{-Ready}、Down 置为低电平, 并保持 20 s 后再拉高;

2) 阴极高压就绪状态异常: 指当 0 s 触发脉冲信号 TriggerIn₀ 有效后至放电过程结束进入“关闭状态”前, NegHV_{-Ready} 信号突然变为低电平, 表示阴极高压电源没有就绪。此时回旋管控制逻辑从状态 2~12 中的某一个状态跳转到“关闭状态”, 异常诊断逻辑监测这一状况后, 检查跳转前的状态是否是“负 60 s 触发状态”, 如果是, 则还需检查 TriggerIn₀ 信号, 只有当 TriggerIn₀ 信号同时为高时, 才表示发生了阴极高压就绪状态异常; 如果跳转前的状态不是“负 60 s 触发状态”, NegHV_{-Ready} 信号为低就直接表示发生了阴极高压就绪状态异常, 然后异常诊断逻辑将信号 NegHV_{-Ready}、Down 置为低电平, 并保持 20 s 后再拉高;

3) 阴极高压输出状态异常: 指当程序处于状态 4~12 时, NegHV_ OutputState 信号或 NegHV_ Voltage 信号为低电平, 表示阴极高压输出不正常, 此时程序从状态 4~12 中的某一个状态跳转到“关闭状态”, 异常诊断逻辑监测这一状况后, 将信号 NegHV_ Down 置为低电平, 并保持 20 s 后再拉高;

4) 波输出状态异常: 由于回旋管波输出信号噪声比较大, 为了避免误判, 程序中只有连续两次检测到波输出信号 Wave_ OutputState 为低时才判定为异常状况, 即当程序从“再次检查波输出状态”跳转到“关闭状态”, 且波输出信号 Wave_ OutputState 为低时, 才表示发生了波输出状态异常。异常诊断逻辑监测这一状况后, 将信号 Wave_ OutputState_ Down 置为低电平, 并保持 20 s 后再拉高;

5) 无等离子电流异常: 当程序从“检查等离子电流状态”跳转到“关闭状态”, 且 Ip 信号为低时, 表示发生了无等离子电流异常。异常诊断逻辑监测这一状况后, 将信号 IpNull 置为高电平, 并保持 5 s 后再拉低;

6) 保护急停信号有效: 指当程序处于状态 2~12 时 (即处于一个放电过程中), 保护停止类信号中的任意一个突然变为高电平, 表示 ECRH 控制系统给中央控制器发送了停止命令, 此时回旋管控制逻辑从状态 2~12 中的某一个状态跳转到“关闭状态”, 异常诊断逻辑监测这一状况后, 将对应停止类信号的异常输出信号置为低电平, 并保持 20 s 后再拉高。

3 FPGA 编程与仿真测试

本设计的开发采用 Quartus II 软件, FPGA 芯片选用 Cyclone II 系列^[9]的工业级芯片, 上述 2、3 两小节的逻辑采用 VerilogHDL 进行编写。FPGA 系统时钟采用外部的高精度有源晶振产生的频率为 29.2412 MHz 的时钟信号, 不适用内部 PLL。由于系统中各输入信号与系统时钟是异步的, 如果直接使用会产生亚稳态。因此为了避免时序混乱, 对所有输入信号用系统时钟进行了两步采样寄存, 虽然理论上仍然可能进入亚稳态, 但是其概率已经非常小^[10-11]。

为了验证设计的正确性, 将程序在各种可能的输入情况下进行了仿真。仿真时, 为了减少仿真时间以及便以观察波形, 对涉及的各个时间间隔进行了适当的缩短。

图 3 为正常运行的仿真时序图, 仿真开始时, PLC_ Ready 信号有效, 程序应处于准备状态; 随着 TriggerIn_ neg_ 60 信号脉冲的到来, 一次放电过程开始, 首先将阴极高压电源负 60 秒准备信号 (NegHVPre_ neg_ 60) 和数据采集控制信号 (DAQCtrl_ OnOff) 置高, 启动阴极高压电源, 并且开始数据采集; 一段时间后, 阴极高压电源准备好信号 (NegHV_ Ready) 变高, 表示阴极高压电源就绪; 然后 0 秒触发脉冲信号 (TriggerIn_ 0) 来了一个脉冲, 程序立即将阴极高压电源的输出开关信号 (NegHV_ OnOff) 置高, 以给回旋管阴极加载高压, 然后阴极高压输出状态

信号 (NegHV_ OutputState) 和阴极高压输出电压信号 (NegHV_ Voltage) 均变高, 表示阴极高压输出正常; 检测到阴极高压输出正常后将阳极高压电源的输出开关信号 (PosHV_ OnOff) 置高, 给回旋管阳极加载高压; 延迟一小段时间后检测波输出是否正常, 图 3 中 Wave_ OutputState 为高表示波输出正常; 然后进入等离子电流信号 (Ip_ D) 检测, 检测到 Ip_ D 正常后一直等待 Ip_ D 信号变低; 先将阳极高压电源的输出开关信号 (PosHV_ OnOff) 置低, 再将阴极高压电源的输出开关信号 (NegHV_ OnOff) 置低, 最后将阴极高压电源负 60 秒准备信号 (NegHVPre_ neg_ 60) 和数据采集控制信号 (DAQCtrl_ OnOff) 置低; 一次正常的放电过程结束。

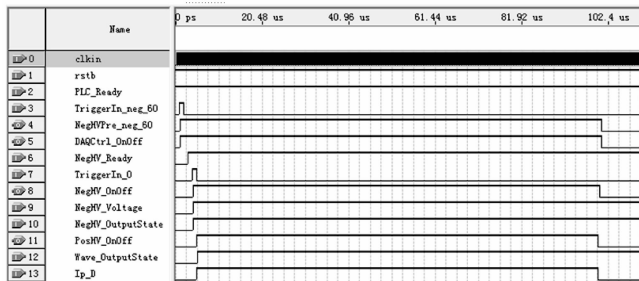


图 3 正常运行仿真时序图

图 4 为发生无等离子电流异常时的仿真时序图。直到波输出状态信号 Wave_ OutputState 变高前, 与正常运行时相同; 但是由于在 Wave_ OutputState 变高后的很长一段时间内等离子电流信号 Ip_ D 均保持为低, 此时程序应已进入“检查等离子电流状态”, 然后主控制逻辑检测到 Ip_ D 为低, 进入“关闭状态”, 依次将阳极高压电源的输出开关信号 (PosHV_ OnOff)、阴极高压电源的输出开关信号 (NegHV_ OnOff)、以及阴极高压电源负 60 秒准备信号 (NegHVPre_ neg_ 60) 和数据采集控制信号 (DAQCtrl_ OnOff) 置低。异常诊断逻辑检测到主控制逻辑从“检查等离子电流状态”跳转到“关闭状态”, 且此时 Ip_ D 为低, 因此诊断为发生了无等离子电流异常, 将 IpNull 信号拉高一段时间。

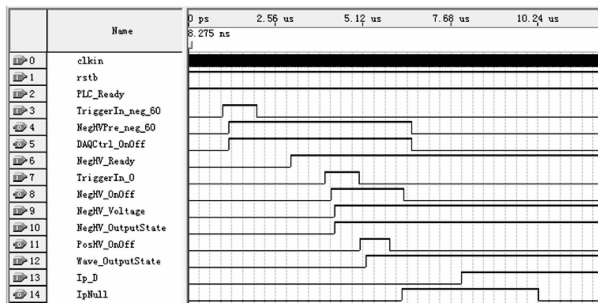


图 4 无等离子电流异常仿真时序图

图 5 为发生波输出状态异常时的仿真时序图。当阳极高压电源的输出开关信号 (PosHV_OnOff) 置高后, 很长一段时间内波输出状态信号 Wave_OutputState 保持为低, 因此导致主控制逻辑连续两次检测波输出信号为低, 因此直接进入了“关闭状态”, 依次将 PosHV_OnOff、NegHV_OnOff 以及 NegHVPre_neg_60 和 DAQCtrl_OnOff 置低。异常诊断逻辑检测到主控制逻辑从“再次检测波输出状态”跳转到“关闭状态”, 且此时波输出状态信号 Wave_OutputState 为低, 因此诊断为发生了波输出状态异常, 将信号 Wave_OutputState_Down 拉低一段时间。

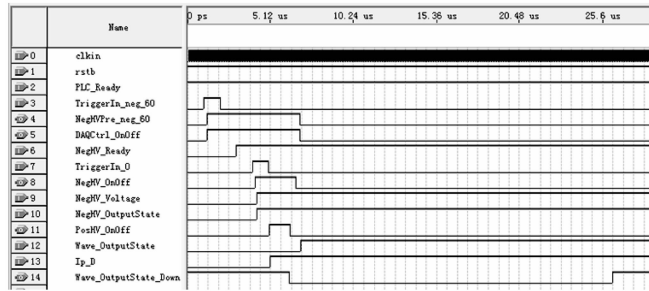


图 5 波输出状态异常仿真时序图

图 6 为发生阴极高压就绪状态异常时的仿真时序图。当 0 s 触发脉冲信号 TriggerIn_0 有效时, 检测到阴极高压电源准备信号 (NegHV_Ready) 为低, 主控制逻辑进入进入“关闭状态”。异常诊断逻辑检测到这一情况后, 将信号 NegHV_Ready_Down 拉低一段时间。

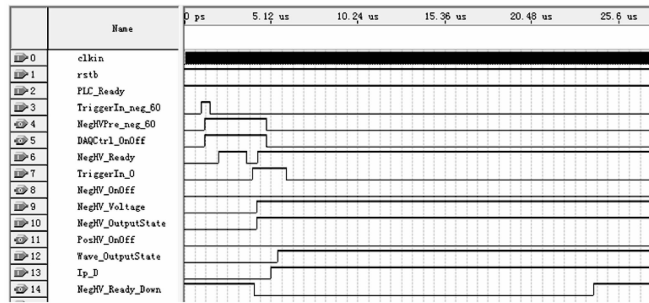


图 6 阴极高压就绪状态异常仿真时序图

4 结束语

本文主要阐述了 ECRH 系统中央控制器异常诊断的逻辑设计。针对回旋管中央控制器发生故障时调试工作繁琐、难以查找异常发生的原因等问题, 设计了一套实时在线的异常检测和诊断逻辑, 并且在 Altera Cyclone II 系列 FPGA 中编程实现了该异常诊断逻辑与回旋管控制逻辑, 最后对 FPGA 程序进行了时序仿真, 验证了设计的正确性。

参考文献:

- [1] 饶 军, 刘 永, 夏 华, 等. HL-1M 装置 ECRH 系统的研制与实验 [J]. 核聚变与等离子体物理, 2003 (2): 70-6.
- [2] Wang H, Lu Z H, Kubo S, et al. Power measurement system of ECRH on HL-2A [J]. Ecl8-18th Joint Workshop on Electron Cyclotron Emission and Electron Cyclotron Resonance Heating, 2015, 87.
- [3] 赵 磊, 李 立, 卜英南, 等. 基于 PLC 的 HL-2A 装置电子回旋共振加热系统控制与保护 [J]. 核聚变与等离子体物理, 2010, 30 (3): 230-235.
- [4] 胡国富, 丁同海, 刘保华. 电子回旋共振加热控制系统的设计与应用 [J]. 计算机测量与控制, 2003 (9): 49-51.
- [5] 徐伟业. 回旋管运行实验研究 [D]. 北京: 中国科学院大学, 2016.
- [6] Wang X, Liu F, Shan J, et al. Status of ECRH project on EAST Tokamak [A]. AIP Conference Proceedings. American Institute of Physics [C]. 2015.
- [7] Xu H, Wang X, Liu F, et al. Development and Preliminary Commissioning Results of a Long Pulse 140 GHz ECRH System on EAST Tokamak (Invited) [J]. Plasma Science and Technology, 2016, 18 (4): 442-448.
- [8] 王善林. ECRH 系统回旋管阳极控制系统研究 [D]. 北京: 中国科学院大学, 2015.
- [9] Cyclone II Device Handbook [EB/OL]. <http://www.intel.com>.
- [10] Understanding Metastability in FPGAs [EB/OL]. <http://www.intel.com>.
- [11] metastability in Altera Devices [EB/OL]. <http://www.altera.com/literature/an/an042.pdf>.

(上接第 45 页)

- [2] 高 森. 电路板故障诊断系统 TPS 运行及数据管理模块设计与实现 [D]. 成都: 电子科技大学, 2011.
- [3] 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, 2003.
- [4] 保 坤. 电路板故障诊断系统可视化开发与运行环境的设计与实现 [D]. 成都: 电子科技大学, 2010.
- [5] 王 红, 王湘念. 自动测试系统软件平台发展现状及建议 [J]. 航空制造技术, 2008 (22): 40-43.
- [6] 王建新. LabWindows/CVI 虚拟仪器测试技术及工程应用

- [M]. 北京: 北京化学工业出版社, 2011.
- [7] 陈雄姿, 龙 辛, 戴建利, 等. 自动测试系统中矩阵开关的设计与实现 [J]. 机械工程与自动化, 2015 (2): 165-167.
- [8] 许屹晖, 李执力, 王震宇. 新一代军用 ATS 技术体制和关键技术研究 [J]. 现代防御技术, 2010 (2): 35-40.
- [9] 郭荣斌, 赵秀才. 自动测试系统的发展趋势 [J]. 国外电子测量技术, 2014 (6): 1-4.
- [10] 安治永, 李应红, 苏长兵. 航空电子设备故障诊断技术研究综述 [J]. 电光与控制, 2006, 13 (3): 5-10.