



(12)发明专利申请

(10)申请公布号 CN 111240849 A
(43)申请公布日 2020.06.05

(21)申请号 202010020665.4

(22)申请日 2020.01.09

(71)申请人 中国人民解放军军事科学院国防科
技创新研究院

地址 100071 北京市丰台区东大街53号院

(72)发明人 张光达 宋威 戴华东

(74)专利代理机构 北京安博达知识产权代理有
限公司 11271

代理人 徐国文

(51)Int.Cl.

G06F 9/52(2006.01)

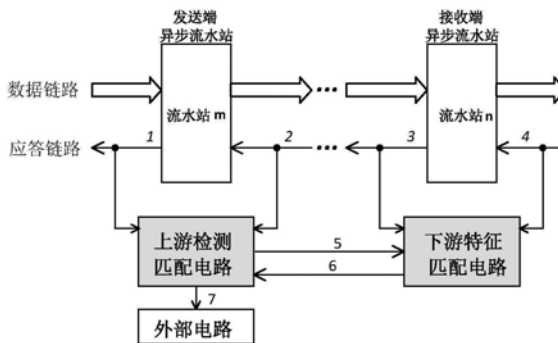
权利要求书2页 说明书11页 附图4页

(54)发明名称

一种异步流水线电路的死锁检测电路和检测方法

(57)摘要

一种异步流水线电路的死锁检测电路,安装在异步流水线上,包括上游检测匹配电路和下游特征匹配电路;所述上游检测匹配电路与受保护异步流水段的发送端流水线站并联,用于根据发送端流水线站输入端和输出端的完成检测信号判断所述发送端流水线站是否为错误上游流水线站;所述下游特征匹配电路与受保护异步流水段的接收端流水线站并联,用于根据接收端流水线站输入端和输出端的完成检测信号判断所述接收端流水线站是否为错误下游流水线站;所述上游检测匹配电路和下游特征匹配电路通讯连接,用于根据上游流水线站和下游流水线站的错误状态判断受保护异步流水段是否发生死锁。本发明提供的技术方案能够检测到错误导致的电路死锁,同时定位导致异步流水线电路死锁的错误的发生位置。



1. 一种异步流水线电路的死锁检测电路, 安装在异步流水线电路上, 其特征在于, 所述电路包括上游检测匹配电路和下游特征匹配电路;

所述上游检测匹配电路与受保护异步流水段的发送端流水站并联, 用于根据发送端流水站输入端和输出端的完成检测信号判断所述发送端流水站是否为错误上游流水站;

所述下游特征匹配电路与受保护异步流水段的接收端流水站并联, 用于根据接收端流水站输入端和输出端的完成检测信号判断所述接收端流水站是否为错误下游流水站;

所述上游检测匹配电路和下游特征匹配电路通讯连接, 用于根据上游流水站和下游流水站的错误状态判断受保护异步流水段是否发生死锁。

2. 如权利要求1所述的异步流水线电路的死锁检测电路, 其特征在于, 所述上游检测匹配电路包括翻转检测器、上游特征匹配器、同步器、控制状态机和时钟计数器;

所述翻转检测器包括两个输入端与一个输出端; 所述翻转检测器的第一输入端接入所述发送端流水站输出端的完成检测信号, 第二输入端与所述控制状态机连接; 所述上游特征匹配器包括三个输入端和一个输出端; 所述翻转检测器的输出端与所述上游特征匹配器的第一输入端连接; 所述上游特征匹配器的第二输入端接入所述发送端流水站输出端的完成检测信号, 第三输入端接入所述发送端流水站输入端的完成检测信号;

所述上游特征匹配器、同步器和控制状态机依次连接, 所述同步器用于对所述上游特征匹配器输出的信号按照所述控制状态机的时钟进行同步, 并将生成的信号发送给所述控制状态机;

所述时钟计数器与所述控制状态机连接, 用于向所述控制状态机的发送超时信号;

所述控制状态机与所述下游特征匹配电路进行通信连接, 用于向所述下游特征匹配电路发送询问信号并接收所述下游特征匹配电路的应答, 从而判断受保护的异步流水线段是否发生死锁;

所述控制状态机与外部电路连接, 用于通知外部电路受保护的异步流水段发生死锁。

3. 如权利要求2所述的异步流水线电路的死锁检测电路, 其特征在于, 所述上游特征匹配器包括异或门(11)和与门(12);

所述异或门(11)的两个输入端分别接入所述发送端流水站的输入端和输出端的完成检测信号; 所述异或门(11)的输出端与所述与门(12)的其中一个输入端连接; 所述翻转检测器的输出端与所述与门(12)的另一个输入端连接。

4. 如权利要求2所述的异步流水线电路的死锁检测电路, 其特征在于, 所述下游特征匹配电路包括: 同或门(9)和非对称C单元(8);

所述同或门(9)的两个输入端分别接入所述接收端流水站的输入端和输出端的完成检测信号, 所述同或门(9)的输出端与所述非对称C单元(8)的正输入端连接;

所述非对称C单元(8)的普通输入端与所述控制状态机连接, 所述非对称C单元(8)的输出端也与所述控制状态机连接, 用于实现与所述上游检测匹配电路的通信连接。

5. 一种异步流水线电路的死锁检测电路的死锁检测方法, 其特征在于, 所述方法包括:

当上游检测匹配电路检测受保护异步流水段的发送端流水站为错误上游流水站时与下游特征匹配电路通讯;

如果下游特征匹配电路检测受保护异步流水段的接收端流水站也为错误下游流水站时, 则判断所述受保护异步流水段发生死锁, 并通知上游检测匹配电路;

所述上游检测匹配电路通知外部电路受保护异步流水段发生死锁。

6. 如权利要求5所述的死锁检测方法,其特征在于,所述当上游检测匹配电路检测受保护异步流水段的发送端流水站为错误上游流水站时与下游特征匹配电路通讯包括:

上游检测匹配电路根据设定的时间周期启动发送端流水站信号翻转检测和错误上游流水站的特征匹配;

若检测到发送端流水站输出的完成检测信号在设定的时间周期内没有发生信号翻转,并且发送端流水站匹配发生死锁的流水线错误上游流水站的特征成功,则判断受保护异步流水段的发送端流水站为错误上游流水站,并通知下游特征匹配电路,启动死锁错误检测;否则上游检测匹配电路继续检测受保护异步流水段的发送端流水站是否发生错误。

7. 如权利要求6所述的死锁检测方法,其特征在于,如果下游特征匹配电路检测受保护异步流水段的接收端流水站也为错误下游流水站时则判断所述受保护异步流水段发生死锁,并通知上游检测匹配电路,包括:

下游特征匹配电路接收上游检测匹配电路的通知后,启动接收端流水站与错误下游流水站的特征匹配,同时继续检测上游发送端流水站的信号翻转,若在设定的时间周期内,接收端流水站匹配发生死锁的流水线错误下游流水站的特征成功,并且上游接收端流水站没有检测到信号翻转,则判断受保护异步流水段的接收端流水站为错误下游流水站,并通知上游检测匹配电路;

否则继续等待上游检测匹配电路的通知,再次启动检测受保护异步流水段的接收端流水站是否发生错误。

8. 如权利要求7所述的异步流水线电路的死锁检测方法,其特征在于,所述发生死锁的流水线错误上游流水站特征包括:

发送端流水站输出端的完成检测信号没有发生翻转,发送端流水站输入端和输出端的完成检测信号呈现出0和1交替的特征,且当前时间周期结束;

错误下游流水站特征包括:发送端流水站特征状态为错误状态,接收端流水站输入端和输出端的完成检测信号呈现出全0或全1的特征,且当前时间周期结束;

所述完成检测信号包括0和1,其中,0代表相应的异步流水站已经完成四段握手协议中的“复位”操作,处于正在“置位”的状态;1代表相应的异步流水站已经完成四段握手协议中的“置位”操作,处于正在“复位”的状态。

一种异步流水线电路的死锁检测电路和检测方法

技术领域

[0001] 本发明涉及异步电路设计领域,具体涉及一种异步流水线电路的死锁检测电路和检测方法。

背景技术

[0002] 异步流水线是异步电路设计的典型场景,由于采用异步握手信号进行控制,消除了全局时钟,具有数据驱动的特性,能够有效克服传统同步电路面临的一系列问题与挑战,特别是全局时钟分布导致的跨时钟域问题,具有低动态功耗、时序健壮、良好电磁兼容性、良好扩展性、支持模块化设计等优点,得到学术界和产业界的广泛重视。

[0003] 设计异步流水线的的一个重要指标是容错能力。伴随着半导体工艺尺寸的大幅度减小,芯片电源电压不断降低,时钟频率不断提高,芯片密度持续增大,电子器件对环境变化更为敏感,各类噪声源、高能粒子辐射等更容易引发信号传输延迟和瞬时翻转,信号传输延迟变化导致的时序错误,信号短时间错误翻转导致的瞬时逻辑错误,以及由于制造缺陷或者长期运转磨损导致的永久逻辑错误等,发生的概率大幅增加,这些都对异步流水线的可靠性带来较大负面影响。在异步流水线中,一个1比特位的逻辑错误不仅能够污染数据,还能够扰乱甚至破坏握手过程,使得握手请求得不到应答,或者应答完成时,流水线无法接收新的请求,导致异步流水线发生“电路死锁”。

[0004] 逻辑错误可以分为瞬时错误和永久错误。常见的瞬时错误为正向即高电平,或者负向即低电平的毛刺信号跳变,电路本身没有受到破坏,错误发生后会在较短时间内自动消除,不会影响接下来的信号变化;而永久错误是指电路发生了不可逆转的变化,导致其电路特性永久发生改变,为了简化永久错误的行为分析,通常使用“stuck-at”门级错误模型对永久错误进行建模,“stuck-at”模型包含stuck-at-0和stuck-at-1两类错误,分别表示某个信号的值永久为0或者为1。永久错误的发生概率小,但危害性高,一旦发生,对于没有容错机制的电路,基本意味着电路的废弃。在传统的同步电路中,不管是瞬时错误还是永久错误,引起的主要错误表现就是数据错误,电路仍然在运行,通过不断收集电路的错误状态即可实现瞬时错误或者永久错误的检测。比如通过使用容错编码的方式就能够很容易检测出瞬时错误,而当在同一处连续检测到多个瞬时错误时,基于错误发生在同一处概率极低的假设,可以判定此处发生了永久错误,该方法也已经应用于大多数的同步电路容错设计中,然而,该方法对于异步电路并不完全适用。

[0005] 异步电路设计的核心是异步协议。四段1-of-n异步握手协议是最常用的异步协议之一,是四段握手协议和1-of-n数据编码方式的总称,已经被广泛应用于准延迟不敏感异步流水线的设计中。异步流水线由多个异步流水站和连接流水站的链路构成,按照数据的流向,任意两级异步流水站可以分别抽象为发送端与接收端异步流水站。两级相邻的异步流水站之间通过正向的数据链路和反向的应答链路连接。

[0006] 使用四段1-of-n异步握手协议实现的准延迟不敏感类型的异步流水线能够有效克服时序错误,对于大规模长距片上通信非常有吸引力,但是依然受到逻辑错误导致的电

路死锁的威胁。

[0007] 面向异步电路的容错技术研究较少,一旦异步流水线发生电路死锁,首先需要做的就是死锁检测,并定位错误,然后才能进行错误的恢复。因此,死锁的检测至关重要。传统的面向同步电路的容错方法大都是通过不断收集电路的错误状态来实现瞬时错误或者永久错误的检测,而在电路死锁的状态下,异步流水线陷入停滞状态,检测电路只能获得当前的流水线状态,无法获取随时间不断累积的错误信息,难以有效实现死锁的检测。

[0008] 因此,为克服上述缺陷,本发明提供了一种低复杂度、高可扩展的死锁检测电路和检测方法,能够检测到错误导致的电路死锁,同时定位导致异步流水线电路死锁的错误发生的位置。

发明内容

[0009] 为了解决现有技术中所存在的上述不足,本发明提供一种异步流水线电路的死锁检测电路和检测方法。

[0010] 本发明提供的技术方案是:

[0011] 一种异步流水线电路的死锁检测电路,安装在异步流水线上,其改进之处在于,所述电路包括上游检测匹配电路和下游特征匹配电路;

[0012] 所述上游检测匹配电路与受保护异步流水段的发送端流水站并联,用于根据发送端流水站输入端和输出端的完成检测信号判断所述发送端流水站是否为错误上游流水站;

[0013] 所述下游特征匹配电路与受保护异步流水段的接收端流水站并联,用于根据接收端流水站输入端和输出端的完成检测信号判断所述接收端流水站是否为错误下游流水站;

[0014] 所述上游检测匹配电路和下游特征匹配电路通讯连接,用于根据上游流水站和下游流水站的错误状态判断受保护异步流水段是否发生死锁。

[0015] 优选地,所述上游检测匹配电路包括翻转检测器、上游特征匹配器、同步器、控制状态机和时钟计数器;

[0016] 所述翻转检测器包括两个输入端与一个输出端;所述翻转检测器的第一输入端接入所述发送端流水站输出端的完成检测信号,第二输入端与所述控制状态机连接;所述上游特征匹配器包括三个输入端和一个输出端;所述翻转检测器的输出端与所述上游特征匹配器的第一输入端连接;所述上游特征匹配器的第二输入端接入所述发送端流水站输出端的完成检测信号,第三输入端接入所述发送端流水站输入端的完成检测信号;

[0017] 所述上游特征匹配器、同步器和控制状态机依次连接,所述同步器用于对所述上游特征匹配器输出的信号按照所述控制状态机的时钟进行同步,并将生成的信号发送给所述控制状态机;

[0018] 所述时钟计数器与所述控制状态机连接,用于向所述控制状态机的发送超时信号;

[0019] 所述控制状态机与所述下游特征匹配电路进行通信连接,用于向所述下游特征匹配电路发送询问信号并接收所述下游特征匹配电路的应答,从而判断受保护的异步流水段是否发生死锁;

[0020] 所述控制状态机与外部电路连接,用于通知外部电路受保护的异步流水段发生死锁。

- [0021] 优选地,所述上游特征匹配器包括异或门(11)和与门(12);
- [0022] 所述异或门(11)的两个输入端分别接入所述发送端流水站的输入端和输出端的完成检测信号;所述异或门(11)的输出端与所述与门(12)的其中一个输入端连接;所述翻转检测器的输出端与所述与门(12)的另一个输入端连接。
- [0023] 优选地,所述下游特征匹配电路包括:同或门(9)和非对称C单元(8);
- [0024] 所述同或门(9)的两个输入端分别与接收端流水站接入输入和输出的完成检测信号,所述同或门(9)的输出端与所述非对称C单元(8)的正输入端连接;
- [0025] 所述非对称C单元(8)的普通输入端与所述控制状态机连接,所述非对称C单元(8)的输出端也与所述控制状态机连接,用于实现与所述上游检测匹配电路的通信连接。
- [0026] 一种异步流水线电路的死锁检测电路的死锁检测方法,所述方法包括:
- [0027] 当上游检测匹配电路检测受保护异步流水段的发送端流水站为错误上游流水站时与下游特征匹配电路通讯;
- [0028] 如果下游特征匹配电路检测受保护异步流水段的接收端流水站也为错误下游流水站时,则判断所述受保护异步流水段发生死锁,并通知上游检测匹配电路;
- [0029] 所述上游检测匹配电路通知外部电路受保护异步流水段发生死锁。
- [0030] 优选地,所述当上游检测匹配电路检测受保护异步流水段的发送端流水站为错误上游流水站时与下游特征匹配电路通讯包括:
- [0031] 上游检测匹配电路根据设定的时间周期启动发送端流水站信号翻转检测和错误上游流水站的特征匹配;
- [0032] 若检测到发送端流水站输出端的完成检测信号在设定的时间周期内没有发生信号翻转,并且发送端流水站匹配发生死锁的流水线错误上游流水站的特征成功,则判断受保护异步流水段的发送端流水站为错误上游流水站,并通知下游特征匹配电路,启动死锁错误检测;否则上游检测匹配电路继续检测受保护异步流水段的发送端流水站是否发生错误。
- [0033] 优选地,如果下游特征匹配电路检测受保护异步流水段的接收端流水站也为错误下游流水站时则判断所述受保护异步流水段发生死锁,并通知上游检测匹配电路,包括:
- [0034] 下游特征匹配电路接收上游检测匹配电路的通知后,启动接收端流水站与错误下游流水站的特征匹配,同时继续检测上游发送端流水站的信号翻转,若在设定的时间周期内,接收端流水站匹配发生死锁的流水线错误下游流水站的特征成功,并且上游接收端流水站没有检测到信号翻转,则判断受保护异步流水段的接收端流水站为错误下游流水站,并通知上游检测匹配电路;
- [0035] 否则继续等待上游检测匹配电路的通知,再次启动检测受保护异步流水段的接收端流水站是否发生错误。
- [0036] 优选地,所述发生死锁的流水线错误上游流水站特征包括:
- [0037] 发送端流水站输出的完成检测信号没有发生翻转,发送端流水站输入和输出的完成检测信号呈现出0和1交替的特征,且当前时间周期结束;
- [0038] 错误下游流水站特征包括:发送端流水站特征状态为错误状态,接收端流水站输入和输出的完成检测信号呈现出全0或全1的特征,且当前时间周期结束;
- [0039] 所述完成检测信号包括0和1,其中,0代表相应的异步流水站已经完成四段握手协

议中的“复位”操作,处于正在“置位”的状态;1代表相应的异步流水站已经完成四段握手协议中的“置位”操作,处于正在“复位”的状态。

[0040] 与现有技术相比,本发明的有益效果为:

[0041] 本发明提供的技术方案通过在异步流水段的发送端流水站安装上游检测匹配电路,在接收端流水站安装下游特征匹配电路,上游检测匹配电路和下游特征匹配电路之间通讯连接,能够在异步流水线因错误原因导致握手协议被破坏、发生电路死锁时,检测到错误导致的电路死锁,同时定位导致异步流水线电路死锁的错误的发生位置,为异步流水线死锁的消除和错误的恢复提供必要信息。

[0042] 本发明提供的技术方案具有低复杂度和高可扩展,易于理解和推广。

附图说明

[0043] 图1为本发明异步流水站的死锁检测电路结构图;

[0044] 图2为本发明异步流水站的死锁检测方法示意图;

[0045] 图3为本发明四段1-of-n异步流水线抽象模型示意图;

[0046] 图4为本发明四段1-of-n异步握手协议时序图;

[0047] 图5为本发明异步流水站内部结构与外部连接示意图;

[0048] 图6为本发明下游特征匹配电路;

[0049] 图7为本发明上游检测匹配电路;

[0050] 图8为本发明中翻转检测器结构图;

[0051] 图9为本发明控制状态机工作流程原理图;

[0052] 图10为本发明异步流水站电路的实现结构图;

[0053] 其中:1-发送端流水站输出端的完成检测信号acko_s;2-发送端流水站输入端的完成检测信号acki_s;3-接收端流水站输出端的完成检测信号acko_r;4-接收端流水站输入端的完成检测信号acki_r;5-上游检测匹配电路查询接收端流水站状态的信号enquiry;6-下游特征匹配电路输出的反映接收端流水站特征状态的信号deadlock_ack;7-上游检测匹配电路输出到外部电路反映最终死锁检测状态的信号deadlock_conf;8-非对称C单元;9-同或门;10-同或门9输出端的输出信号r1;11-异或门;12-与门;13-异或门11的输出信号diff_s;14-与门12的输出信号s1;15-与门12的输出信号s1经过同步后生成的信号s2;16-控制状态机的输出信号start;17-翻转检测器的输出信号act;18-时钟计数器输出的超时信号timeout;19-异步锁存器;20-C单元。

具体实施方式

[0054] 为了更好地理解本发明,下面结合说明书附图和实例对本发明的内容做进一步的说明。

[0055] 实施例1、

[0056] 一种异步流水线电路的死锁检测电路,安装在异步流水线上,如图1所示,所述电路包括上游检测匹配电路和下游特征匹配电路;

[0057] 所述上游检测匹配电路与受保护异步流水段的发送端流水站并联,用于根据发送端流水站输入端和输出端的完成检测信号判断所述发送端流水站是否为错误上游流水站;

[0058] 所述下游特征匹配电路与受保护异步流水段的接收端流水站并联,用于根据接收端流水站输入端和输出端的完成检测信号判断所述接收端流水站是否为错误下游流水站;

[0059] 所述上游检测匹配电路和下游特征匹配电路通讯连接,用于根据上游流水站和下游流水站的错误状态判断受保护异步流水段是否发生死锁。

[0060] 具体地,所述上游检测匹配电路包括翻转检测器、上游特征匹配器、同步器、控制状态机和时钟计数器;

[0061] 所述翻转检测器包括两个输入端与一个输出端;所述翻转检测器的第一输入端接入所述发送端流水站输出端的完成检测信号,第二输入端与所述控制状态机连接;所述上游特征匹配器包括三个输入端和一个输出端;所述翻转检测器的输出端与所述上游特征匹配器的第一输入端连接;所述上游特征匹配器的第二输入端接入所述发送端流水站输出端的完成检测信号,第三输入端接入所述发送端流水站输入端的完成检测信号;

[0062] 所述上游特征匹配器、同步器和控制状态机依次连接,所述同步器用于对所述上游特征匹配器输出的信号按照所述控制状态机的时钟进行同步,并将生成的信号发送给所述控制状态机;

[0063] 所述时钟计数器与所述控制状态机连接,用于向所述控制状态机的发送超时信号;

[0064] 所述控制状态机与所述下游特征匹配电路进行通信连接,用于向所述下游特征匹配电路发送询问信号并接收所述下游特征匹配电路的应答,从而判断受保护的异步流水段是否发生死锁;

[0065] 所述控制状态机与外部电路连接,用于通知外部电路受保护的异步流水段发生死锁。

[0066] 具体地,所述上游特征匹配器包括异或门11和与门12;

[0067] 所述异或门11的两个输入端分别接入所述发送端流水站的输入端和输出端的完成检测信号;所述异或门11的输出端与所述与门12的其中一个输入端连接;所述翻转检测器的输出端与所述与门12的另一个输入端连接。

[0068] 具体地,所述下游特征匹配电路包括:同或门9和非对称C单元8;

[0069] 所述同或门9的两个输入端分别与接收端流水站接入输入端和输出端的完成检测信号,所述同或门9的输出端与所述非对称C单元8的正输入端连接;

[0070] 所述非对称C单元8的普通输入端与所述控制状态机连接,所述非对称C单元8的输出端也与所述控制状态机连接,用于实现与所述上游检测匹配电路的通信连接。

[0071] 实施例2、

[0072] 一种使用上述异步流水线电路死锁检测电路的死锁检测方法,如图2所示,包括:

[0073] 步骤1:当上游检测匹配电路检测受保护异步流水段的发送端流水站为错误上游流水站时与下游特征匹配电路通讯;

[0074] 步骤2:如果下游特征匹配电路检测受保护异步流水段的接收端流水站也为错误下游流水站时,则判断所述受保护异步流水段发生死锁,并通知上游检测匹配电路;

[0075] 步骤3:所述上游检测匹配电路通知外部电路受保护异步流水段发生死锁。

[0076] 步骤1,所述当上游检测匹配电路检测受保护异步流水段的发送端流水站为错误上游流水站时与下游特征匹配电路通讯包括:

[0077] 上游检测匹配电路根据设定的时间周期启动发送端流水站信号翻转检测和错误上游流水站的特征匹配；

[0078] 若检测到发送端流水站输出端的完成检测信号在设定的时间周期内没有发生信号翻转，并且发送端流水站匹配发生死锁的流水线错误上游流水站的特征成功，则判断受保护异步流水段的发送端流水站为错误上游流水站，并通知下游特征匹配电路，启动死锁错误检测；否则上游检测匹配电路继续检测受保护异步流水段的发送端流水站是否发生错误。

[0079] 步骤2，如果下游特征匹配电路检测受保护异步流水段的接收端流水站也为错误下游流水站时则判断所述受保护异步流水段发生死锁，并通知上游检测匹配电路，包括：

[0080] 下游特征匹配电路接收上游检测匹配电路的通知后，启动接收端流水站与错误下游流水站的特征匹配，同时继续检测上游发送端流水站的信号翻转，若在设定的时间周期内，接收端流水站匹配发生死锁的流水线错误下游流水站的特征成功，并且上游接收端流水站没有检测到信号翻转，则判断受保护异步流水段的接收端流水站为错误下游流水站，并通知上游检测匹配电路；

[0081] 否则继续等待上游检测匹配电路的通知，再次启动检测受保护异步流水段的接收端流水站是否发生错误。

[0082] 具体地，所述发生死锁的流水线错误上游流水站特征包括：

[0083] 发送端流水站输出端的完成检测信号没有发生翻转，发送端流水站输入端和输出端的完成检测信号呈现出0和1交替的特征，且当前时间周期结束；

[0084] 错误下游流水站特征包括：发送端流水站特征状态为错误状态，接收端流水站输入端和输出端的完成检测信号呈现出全0或全1的特征，且当前时间周期结束；

[0085] 所述完成检测信号包括0和1，其中，0代表相应的异步流水站已经完成四段握手协议中的“复位”操作，处于正在“置位”的状态；1代表相应的异步流水站已经完成四段握手协议中的“置位”操作，处于正在“复位”的状态。

[0086] 步骤3：所述上游特征匹配电路通知外部电路受保护异步流水段发生死锁。

[0087] 实施例3、

[0088] 四段1-of-n异步握手协议是最常用的异步协议之一，是四段握手协议和1-of-n数据编码方式的总称，已经被广泛应用于准延迟不敏感异步流水线的设计中。异步流水线由多个异步流水站和连接流水站的链路构成，按照数据的流向，任意两级异步流水站可以分别抽象为发送端与接收端异步流水站，如图3所示，数据由左向右流动，因此流水站1和流水站4可以分别被称为发送端与接收端异步流水站，两级相邻的流水站之间通过正向的数据链路和反向的应答链路连接。在图3中，正向的数据链路传输的数据信号采用1-of-n的数据编码方式，反向应答链路传输宽度为1比特的应答信号。1-of-n数据编码又称为独热编码，即使用n个二进制比特位对0到n-1共n个十进制数据进行编码，每个合法的1-of-n码字里面只有一个有效比特位，即每个合法码字中只有一个比特位为1，其它比特位为0。四段握手协议下数据与应答信号变化的时序图见图4，每次握手过程包含“置位”和“复位”两个“相位”，因此，流水线中传输的数据会交替经历“置位”和“复位”的过程：“置位”时，流水线传输的数据信号由全0逐渐变为完整的1-of-n数据，该数据由一个或多个合法的1-of-n码字构成，“置位”完成表示接收端流水站接收到一个完整的1-of-n数据，此时，接收端流水站通过其

完成检测电路生成的应答信号的值变为1,反向传给上一级流水站;“复位”时,发送端流水站所有的输出数据信号逐渐变为0,“复位”完成即表示流水站所有的输出数据信号翻转为0,用来间隔开合法的1-of-n数据码字,接收端流水站生成的应答信号的值变为0,反向传给上一级流水站。

[0089] 使用四段1-of-n异步握手协议实现的准延迟不敏感类型的异步流水线能够有效克服时序错误,对于大规模长距片上通信非常有吸引力,但是依然受到逻辑错误导致的电路死锁的威胁。以永久错误发生在四段1-of-n异步流水线上为例说明电路死锁的形成过程:按照四段1-of-n异步握手协议,在正常情况下,如果要启动一次数据传输,流水线的发送端流水站首先准备好1-of-n编码的数据,等待接收端流水站接收,接收端流水站根据当前自身状态进行响应:如果当前接收端忙,接收端流水站无法接收新的数据,生成的应答信号继续保持低电平,表示没有应答发送端的请求;发送端保持输出1-of-n数据不变,等待接收端接收数据;在接收端空闲时候,接收端流水站开始接收数据,进行“置位”操作,接收端接收到完整的1-of-n数据后,生成的应答信号翻转为高电平,告知接收端流水站可以开始“复位”。因此,如果在“置位”的过程中,永久错误导致应答信号无法正确翻转,即应答信号的值一直为0,那么发送端无法知道接收端是否已经接收到数据,只能一直保持请求状态,握手协议遭到破坏,使得流水线陷入停滞产生“电路死锁”。类似的情形也可以发生在“复位”阶段或者数据链路上,严重威胁系统的可靠性。

[0090] 为了更加明确本发明的技术方案,下面结合四段准延迟不敏感异步流水线基础链路模型进行详细地说明。

[0091] 选取四段握手协议和延迟不敏感编码方式,设计异步流水线基础链路模型,整个流水线包括多个异步流水站,流水站之间由前向的数据链路和后向的应答链路连接而成,不考虑流水站之间的其他组合逻辑,如图5所示,其特征如下:

[0092] a、流水线中传输的数据采用延迟不敏感的编码方式进行编码,典型的延迟不敏感编码包括1-of-n编码,数据沿前向数据链路经由多级异步流水站通过流水线。因此,数据链路实际上是多条并行的互连金属线构成,其宽度由采用的编码方式以及单个数据包的宽度决定。

[0093] b、异步流水站的结构相同,由多个并联的异步锁存器19和完成检测电路构成,如图10所示。异步锁存器19用来锁存和传输数据,由多个C单元20搭建而成。完成检测电路存在于异步流水站的输出端,能够根据流水站异步锁存器19的输出数据,产生一个1比特位的完成检测信号或应答信号,该信号经应答链路,反向传输给上一级的流水站并作为其输入。因此,前向流动的数据和反向流动的完成检测信号或应答信号构成一个环路。完成检测信号能够反映当前流水站输出数据的状态,对于四段握手协议下的完成检测电路,其输出的完成检测信号会交替经历1和0转换的过程,分别表示该流水站接收到一个完整的数据和数据完成复位,典型的完成检测电路采用树状的“或门”和C单元构成。在四段准延迟不敏感异步流水线中,蕴含请求信息的数据信号和完成检测信号共同反映了异步握手的请求与应答过程。异步锁存器19也可由多个D触发器搭建。

[0094] 根据容错需求确定死锁检测的粒度:将整个流水线划分为多个流水段,每个流水段即为受容错保护的對象,因此,如果错误发生在受保护的流水段中,并导致产生了电路死锁,将能够定位到该错误所在的流水段,流水段的长短或者其包含流水站的数目反映了死

锁检测的粒度。

[0095] 根据容错需求和电路对于容错开销的要求,将流水线划分为多个流水段。假设一个异步流水线拥有n个流水站,那么在容错要求最高情况下,一共可以划分为n-1个流水段,每个流水段包含2个流水站;在容错要求最低情况下,则是将整个流水线作为1个流水段进行保护。

[0096] 流水线分割的粒度越细,容错的能力越高,但增加的冗余电路就会越多,导致电路面积开销的增加,也会影响系统整体的可靠性;分割的粒度越粗,容错能力越弱,但增加的冗余电路较小,带来的面积开销也较小,冗余电路本身对系统整体的可靠性影响较小。需要结合电路设计流程,在容错能力需求和容错设计开销之间进行反复迭代评估,确定流水线的划分粒度。

[0097] 为每个要保护的流水段增加死锁检测电路,检测和判断所保护的流水段是否发生电路死锁,并实现错误的定位。如图1所示,死锁检测电路主要包括位于该流水段发送端流水站处的上游检测匹配电路,以及位于该流水段接收端流水站处的下游特征匹配电路两部分。

[0098] 死锁检测电路的工作原理是:一个长数据报文流经异步流水线时,在流水线中形成了一条长的数据通路,该通路上包含多个异步流水站,如图3所示,每个异步流水站按照四段握手协议交替执行“置位”与“复位”过程,瞬时错误与永久错误都能够破坏四段握手协议导致该已经建立的数据通路电路死锁,进而导致整个异步流水线电路死锁,通过分析可以发现,死锁后的异步流水线表现出以下特征:流水线内锁存的数据报文停止流动,不再出现任何信号的翻转,包括数据信号与完成检测信号;错误上游流水站锁存的数据报文没有受到错误污染,相当于是没有出错的数据报文阻塞在出错的流水段之前而无法继续往下流动,表现出四段握手异步流水线受到阻塞后“一段空一段满”的现象,错误上游流水站生成的完成检测信号呈现出0和1交替的特征;错误下游流水站锁存的数据报文可能受到错误的污染,导致错误下游异步流水站锁存相同的数据,进而,错误下游异步流水站的完成检测信号值都相同,呈现出全0或者全1的特征。通过为要保护的流水段增加死锁检测电路,判断该流水段是否符合以上三个特征,可以判断该流水段是否发生了错误导致的电路死锁,从而实现电路死锁的准确检测与定位。

[0099] 死锁检测电路工作方式如下:

[0100] a、在受保护流水段的接收端流水站,即最后一个异步流水站处增加下游特征匹配电路,如图6所示,判断该接收端流水站是否符合发生死锁的流水线错误下游流水站的特征,即错误下游流水站的完成检测信号呈现出全0或者全1的特征,这可以通过匹配4接收端异步流水站输入端的完成检测信号acki_r和5输出端的完成检测信号acko_r是否相等进行判断,通过同或门9具体实现,如果两个完成检测信号相等,就意味着两者全0或者全1,满足错误下游流水站的特征,即10同或门9输出端的输出信号r1的值为1;如果不相等,则10输出端的输出信号r1的值为0,表示该流水站不是错误下游流水站。下游特征匹配电路接收5上游检测匹配电路输出的enquiry信号作为其输入,并根据10同或门9输出端的输出信号r1的值输出6下游特征匹配电路输出的反映接收端流水站特征状态的信号deadlock_ack到上游检测匹配电路,这里用到了非对称C单元8来生成6下游特征匹配电路输出的反映接收端流水站特征状态的信号deadlock_ack,其“正输入端”连接的是10同或门9输出端的输出信号

r1,普通输入端连接的是5上游检测匹配电路查询接收端流水站状态的信号enquiry。当上游检测匹配电路查询接收端流水站状态,即5上游检测匹配电路查询接收端流水站状态的信号enquiry的值为1时,如果接收端流水站符合发生死锁的流水线错误下游流水站的特征,即10同或门9输出端的输出信号r1的值为1时,非对称C单元8的输出6下游特征匹配电路输出的反映接收端流水站特征状态的信号deadlock_ack的值为1,即下游特征匹配电路告知上游检测匹配电路,接收端流水站符合发生死锁的流水线错误下游流水站的特征。当5上游检测匹配电路查询接收端流水站状态的信号enquiry的值为0时,无论10同或门9输出端的输出信号r1的值为多少,6下游特征匹配电路输出的反映接收端流水站特征状态的信号deadlock_ack的值始终为0,表示如果上游检测匹配电路如果没有查询接收端流水站状态。

[0101] b、在受保护流水段的发送端流水站处增加上游检测匹配电路,如图7所示,上游检测匹配电路主要包括翻转检测器、上游特征匹配器、同步器、控制状态机和时钟计数器组成,主要功能如下:

[0102] 1) 翻转检测器,如图8所示为低电平有效,即低电平表示检测到了翻转。翻转检测器包含两个输入信号,1发送端流水站输出的完成检测信号acko_s和16控制状态机的输出信号start,以及17翻转检测器的输出信号act。其具体工作原理如下:当16控制状态机的输出信号start为0时,翻转检测器处于未工作状态,无论发送端流水站输出的完成检测信号acko_s的值是高还是低,输出信号为1。当被检测信号为1时,翻转检测器处于工作状态,开始检测被检测信号翻转状态,当被检测的值没有翻转时,输出信号保持为1,一旦被检测信号发生翻转,输出信号变为0。17翻转检测器的输出信号act与上游特征匹配器相连。

[0103] 通过采样1发送端流水站输出端的完成检测信号acko_s检测是否有信号翻转,判断流水线是否为“空”或者“暂停”。如果在一段时间内没有检测到该完成检测信号发生信号翻转,那么这段时间内该流水段无数据流动,可以认为整个流水线已经为空或暂停。

[0104] 2) 上游特征匹配器用来匹配发送端流水站是否符合发生死锁的流水线错误上游流水站的特征,即错误上游流水站的完成检测信号呈现出0和1交替的特征,这可以通过匹配2发送端流水站输入端的完成检测信号acki_s和1发送端流水站输出端的完成检测信号acko_s,是否不相等进行判断,通过异或门11具体实现。如果两个完成检测信号不相等,该流水站满足错误上游流水站的特征,经过异或门11输出的13输出信号diff_s的值为1。13-异或门11的输出信号diff_s与17翻转检测器的输出信号act作为与门12的两个输入,因此,14与门12的输出信号s1;15-与门12的输出信号s1经过同步后生成的信号s2;16控制状态机的输出信s1能够同号时反映信号翻转和特征匹配的状态。

[0105] 3) 同步器位于上游特征匹配器与控制状态机中间,目的是对上游特征匹配器输出的与门12的输出信号s1信号,按照控制状态机的时钟进行同步,生成15并发送给控制状态机,降低亚稳态发生的概率,典型的同步器是采用2级D触发器串联实现。

[0106] 4) 时钟计数器能够按照预先定义好的时钟数clk_num,对时钟信号的边沿跳变进行计数,该时钟信号为同步电路中必需信号,未在示意图中显示,每当时钟信号的上边沿或者下边沿跳变clk_num次时,即经过clk_num个时钟周期后,18时钟计数器输出超时信号timeout为1,然后在下一个时钟周期到来时,18时钟计数器输出的超时信号timeout输出为0。换言之,每经过clk_num个时钟周期,18时钟计数器输出的超时信号timeout输出为1一次,该信号对控制状态机进行控制。clk_num值的设置应当根据电路的规模设得尽量大,确

保超时周期足够长,进而能够提高流水线状态判断的正确性。

[0107] 5) 控制状态机是实现死锁检测的核心电路,对整个检测过程进行控制。控制状态机的输入包括来自同步器的反映发送端流水站信号翻转和特征匹配状态的15与门12的输出信号s1经过同步后生成的信号s2信号,来自时钟计数器用于实现超时机制的18-时钟计数器输出的超时信号timeout,6下游特征匹配电路输出的反映接收端流水站特征状态的deadlock_ack信号,另外还有同步电路共有的时钟信号,时钟信号为同步电路中必需信号,在图7中未显示;其输出包括输出到翻转检测器用于启动信号翻转检测的16控制状态机的输出信号start,输出到下游特征匹配电路用于查询接收端流水站特征的enquiry信号,以及7上游检测匹配电路输出到外部电路反映最终死锁检测状态的信号deadlock_conf,若deadlock_conf==1,则表示在该段流水段上检测到了由错误产生的死锁,该流水段为出错的流水段,外部电路需要根据deadlock_conf信号对错误进行处理;如果deadlock_conf==0,则表示该段流水段正常,没有发生错误导致的死锁,不需要做任何的容错处理。控制状态机的核心是一个同步电路实现的状态机,反映了整个死锁检测过程,其工作流程原理图如图9所示:

[0108] 步骤1:当上游检测匹配电路检测受保护异步流水段的发送端流水站为错误上游流水站时与下游特征匹配电路通讯。

[0109] 起始状态下,控制状态机的16控制状态机的输出信号start、5上游检测匹配电路查询接收端流水站状态的信号enquiry和7上游检测匹配电路输出到外部电路反映最终死锁检测状态的信号deadlock_conf默认为0,18时钟计数器输出的超时信号timeout默认为0,等待第一个超时信号的到来。

[0110] 经过一个超时周期,18时钟计数器输出的超时信号timeout为1,则16控制状态机的输出信号start置为1,启动上游检测匹配电路,翻转检测器开始对来自发送端流水站的完成检测信号进行信号翻转检测,上游特征匹配器对来自发送端流水站输入输出端的连续两个完成检测信号进行比较,同时观测超时信号。如果在下一个超时信号到来之前,检测到任何的信号翻转,或者该流水站不匹配错误上游流水站特征即1发送端流水站输出的完成检测信号acko_s与2发送端流水站输入端的完成检测信号acki_s相等时,进而14与门12的输出信号s1为0;15与门12的输出信号s1经过同步后生成的信号s2为0,状态机电路立即返回起始状态,开始下一轮的检测。如果在一个超时周期内,没有检测到任何的信号翻转,且采样的完成检测信号始终不相等,则15与门12的输出信号s1经过同步后生成的信号s2为1,那么,在下一个超时信号到来,即18时钟计数器输出的超时信号timeout为1的时候,状态机跳转到下一状态,开始查询下游特征匹配电路的状态。

[0111] 步骤2:如果下游特征匹配电路检测受保护异步流水段的接收端流水站也为错误下游流水站时,则判断所述受保护异步流水段发生死锁,并通知上游检测匹配电路。

[0112] 控制状态机5上游检测匹配电路查询接收端流水站状态的信号enquiry为1,匹配接收端流水站是否符合发生死锁的流水线错误下游流水站特征,同时继续检测上游发送端流水站的信号翻转。如果在下一个超时信号到来之前,下游特征匹配电路采样的来自接收端流水站输入输出端的两个连续的完成检测信号出现不相等的情况,进而导致6下游特征匹配电路输出的反映接收端流水站特征状态的信号deadlock_ack为0,或者在发送端流水站检测到了信号翻转,即15与门12的输出信号s1经过同步后生成的信号s2为0,判定流水线

没有死锁,控制状态机立即回到起始状态。如果在下一个超时周期内,6下游特征匹配电路输出的反映接收端流水站特征状态的信号deadlock_ack一直为1表明接收端流水站匹配错误下游流水站的特征,并且没有检测到任何的信号翻转,15与门12的输出信号s1经过同步后生成的信号s2为1,那么,在下一个超时信号到来时,即18时钟计数器输出的超时信号timeout为1的时候,控制状态机置7上游检测匹配电路输出到外部电路反映最终死锁检测状态的信号deadlock_conf为1,判定在该段流水段上检测到了由错误产生的死锁,该流水段为出错的流水段,这样就实现了错误的准确定位与检测。

[0113] 步骤3:所述上游检测匹配电路通知外部电路受保护异步流水段发生死锁。将由外部电路对处于死锁状态的流水段进行容错处理。

[0114] 上述事实证明,本发明提供的技术方案通过在异步流水段的发送端流水站安装上游检测匹配电路,在接收端流水站安装下游特征匹配电路,上游检测匹配电路和下游特征匹配电路之间通讯连接,能够在异步流水线因错误原因导致握手协议被破坏、发生电路死锁时,检测到错误导致的电路死锁,同时定位导致异步流水线电路死锁的错误的发生位置,为异步流水线死锁的消除和错误的恢复提供必要信息。

[0115] 本领域内的技术人员应明白,本申请的实施例可提供为方法、系统、或计算机程序产品。因此,本申请可采用完全硬件实施例、完全软件实施例、或结合软件和硬件方面的实施例的形式。而且,本申请可采用在一个或多个其中包含有计算机可用程序代码的计算机可用存储介质(包括但不限于磁盘存储器、CD-ROM、光学存储器等)上实施的计算机程序产品的形式。

[0116] 本申请是参照根据本申请实施例的方法、设备(系统)、和计算机程序产品的流程图和/或方框图来描述的。应理解可由计算机程序指令实现流程图和/或方框图中的每一流程和/或方框、以及流程图和/或方框图中的流程和/或方框的结合。可提供这些计算机程序指令到通用计算机、专用计算机、嵌入式处理机或其他可编程数据处理设备的处理器以产生一个机器,使得通过计算机或其他可编程数据处理设备的处理器执行的指令产生用于实现在流程图一个流程或多个流程和/或方框图一个方框或多个方框中指定的功能的装置。

[0117] 这些计算机程序指令也可存储在能引导计算机或其他可编程数据处理设备以特定方式工作的计算机可读存储器中,使得存储在该计算机可读存储器中的指令产生包括指令装置的制品,该指令装置实现在流程图一个流程或多个流程和/或方框图一个方框或多个方框中指定的功能。

[0118] 这些计算机程序指令也可装载到计算机或其他可编程数据处理设备上,使得在计算机或其他可编程设备上执行一系列操作步骤以产生计算机实现的处理,从而在计算机或其他可编程设备上执行的指令提供用于实现在流程图一个流程或多个流程和/或方框图一个方框或多个方框中指定的功能的步骤。

[0119] 以上仅为本发明的实施例而已,并不用于限制本发明,凡在本发明的精神和原则之内,所做的任何修改、等同替换、改进等,均包含在申请待批的本发明的权利要求范围之内。

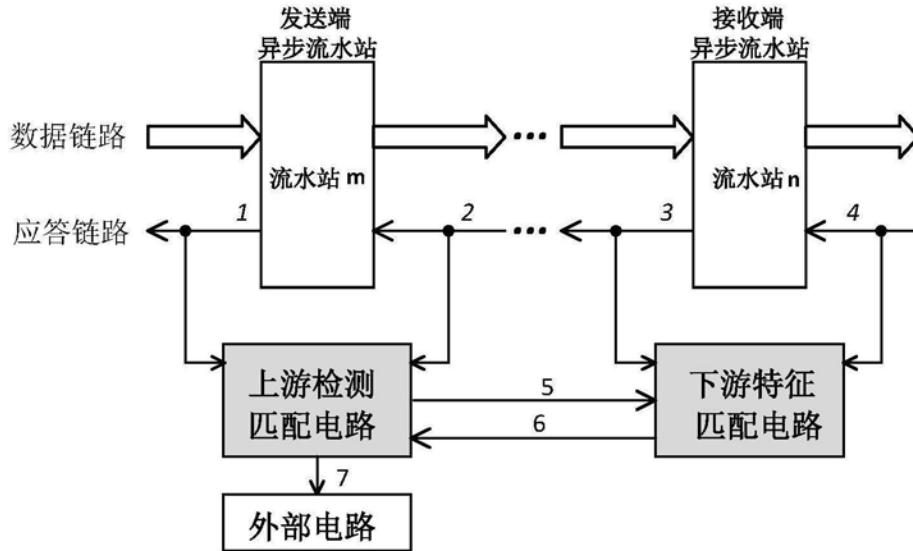


图1

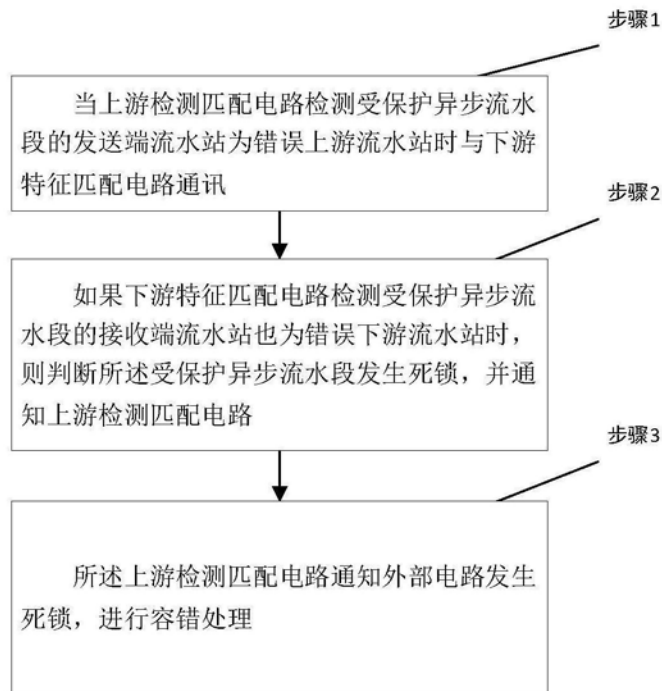


图2

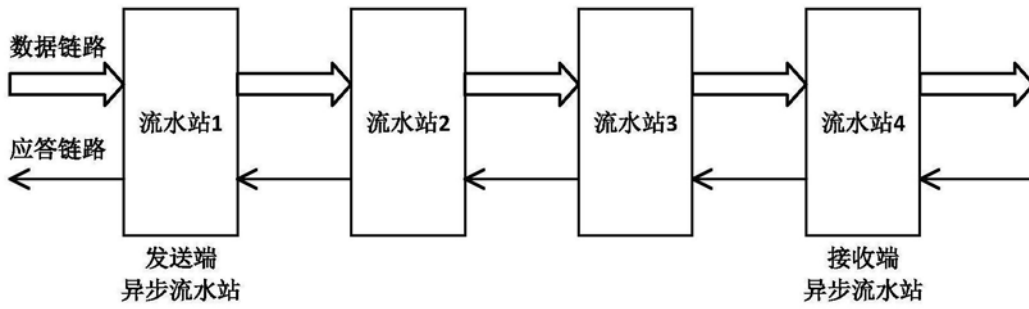


图3

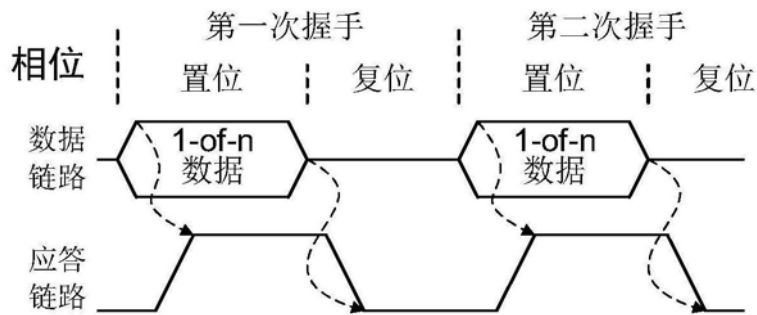


图4

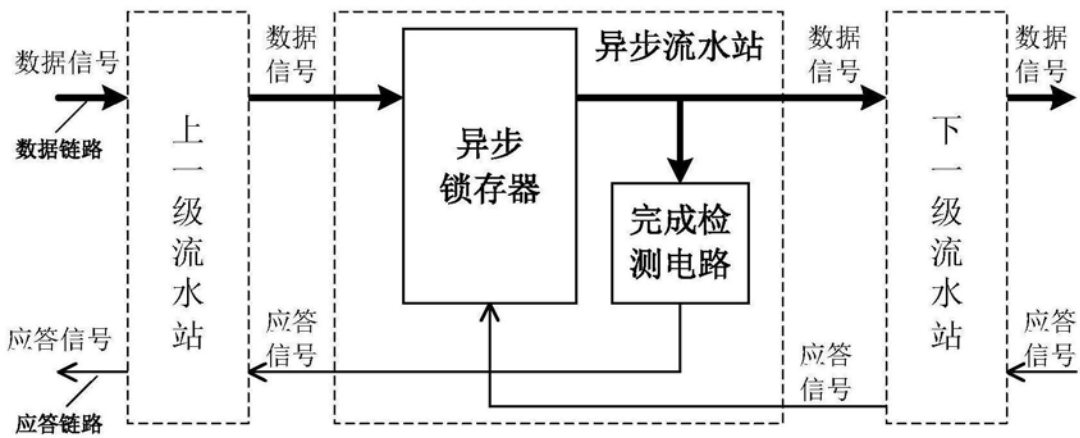


图5

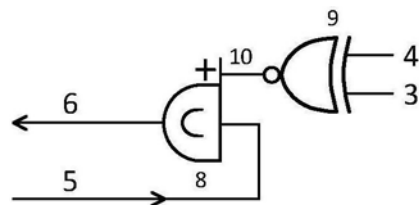


图6

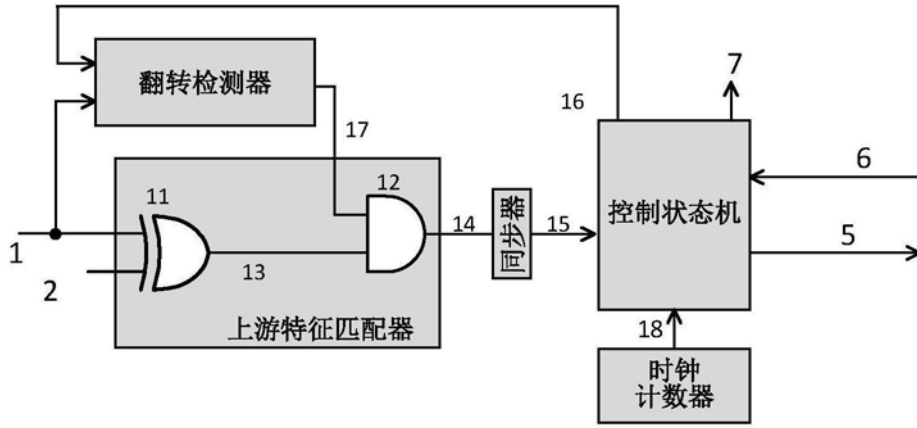


图7

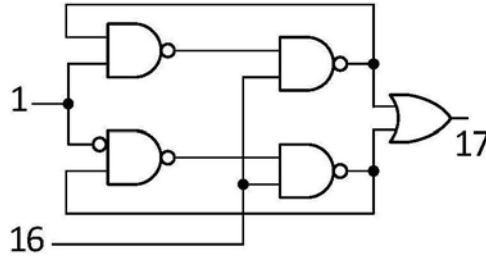


图8

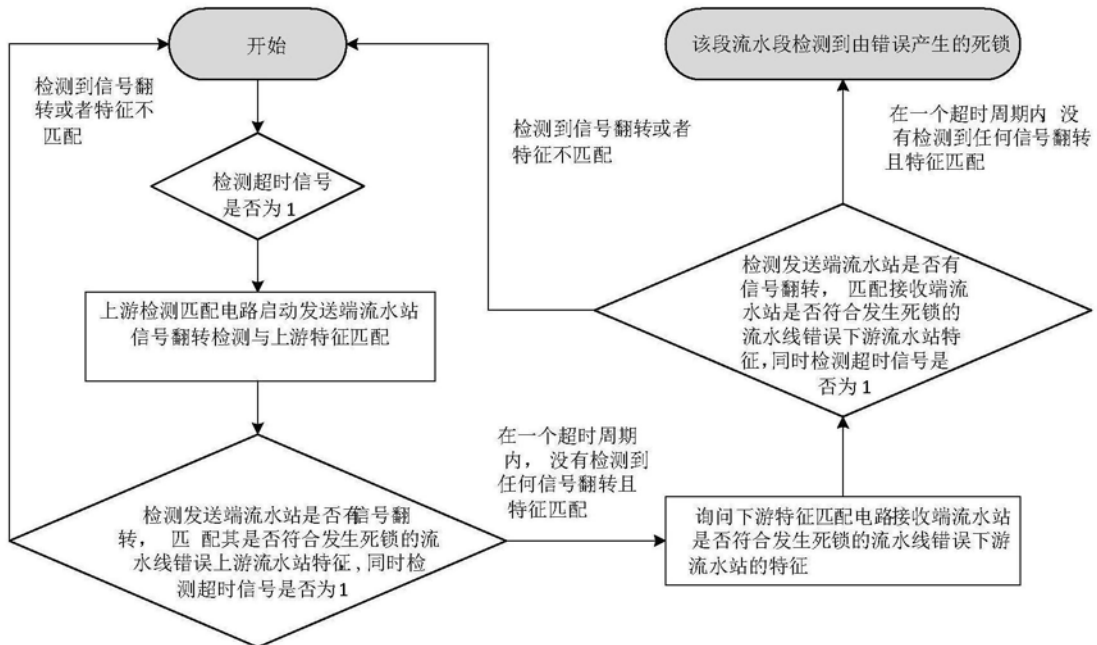


图9

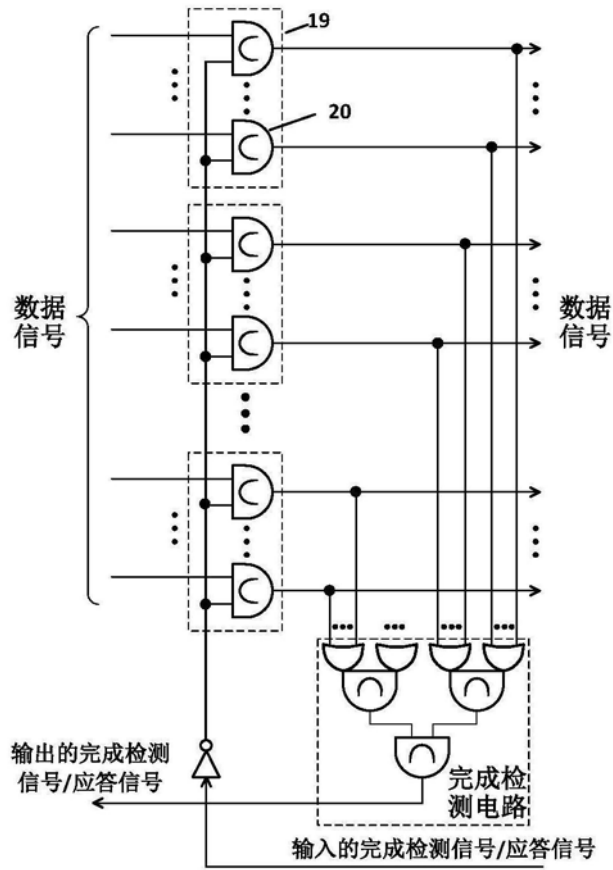


图10