



(12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 101826045 B

(45) 授权公告日 2011. 12. 28

(21) 申请号 201010185960. 1

(22) 申请日 2010. 05. 28

(73) 专利权人 哈尔滨工业大学

地址 150001 黑龙江省哈尔滨市南岗区西大直街 92 号

(72) 发明人 曹喜滨 刘源 孙兆伟 邢雷
兰盛昌 赵丹 徐国栋 张世杰
杨正贤 叶东 董晓光

(74) 专利代理机构 哈尔滨市松花江专利商标事务所 23109

代理人 张宏威

(51) Int. Cl.

G06F 11/16 (2006. 01)

(56) 对比文件

CN 101493809 A, 2009. 07. 29,

US 2009/0085603 A1, 2009. 04. 02,

JP 特开 2005-235074 A, 2005. 09. 02,
EP 1170666 A2, 2002. 01. 09,
CN 1983197 A, 2007. 06. 20,

审查员 梁艳

权利要求书 2 页 说明书 5 页 附图 1 页

(54) 发明名称

一种可重构星载计算机永久性故障电路的在线修复方法

(57) 摘要

一种可重构星载计算机永久性故障电路的在线修复方法, 它涉及航天航空技术领域, 它解决了现有的可重构星载计算机中的 FPGA 电路在空间辐射影响下产生的不可修复的损伤将直接导致永久性电路故障的问题。本发明所述的在线修复方法包括如下步骤: 首先由辐射加固处理器认定发生永久性电路故障的 FPGA 电路, 然后所述辐射加固处理器启用另一个 FPGA 电路工作, 最后由所述辐射加固处理器对所述发生永久性电路故障的 FPGA 电路进行在线修复。本发明适用于可重构星载计算机。

1. 一种可重构星载计算机永久性故障电路的在线修复方法,所述可重构星载计算机包括辐射加固处理器 (1)、第三 Flash 存储器 (2)、第三 SRAM 存储器 (3)、第一 FPGA 电路 (4)、第一 Flash 存储器 (5)、第一 SRAM 存储器 (6)、第二 FPGA 电路 (7)、第二 Flash 存储器 (8)、第二 SRAM 存储器 (9) 和选择电路 (10),

第一 FPGA 电路 (4) 和第二 FPGA 电路 (7) 是可重构星载计算机功能的主体部分,其中包含相同的处理器单元和硬件电路模块;两个 FPGA 电路之间互为冗余且交替工作,即当其中一个发生了永久性电路故障后,由辐射加固处理器 (1) 对其进行修复,并在修复期间启用另一个 FPGA 电路从而保障计算机整体功能的连续性;

第一 Flash 存储器 (5) 与第一 FPGA 电路 (4) 中的处理器电路相连,第二 Flash 存储器 (8) 与第二 FPGA 电路 (7) 中的处理器电路相连,所述两个 Flash 存储器中存储了软件程序代码;

第一 SRAM 存储器 (6) 与第一 FPGA 电路 (4) 中的处理器电路相连,第二 SRAM 存储器 (9) 与第二 FPGA 电路 (7) 中的处理器电路相连,所述两个 SRAM 存储器作为处理器程序执行的空间;

辐射加固处理器 (1) 同时与第一 FPGA 电路 (4) 的配置端口和第二 FPGA 电路 (7) 的配置端口相连,通过每个 FPGA 电路的配置端口,辐射加固处理器 (1) 可以对每个 FPGA 电路中的配置信息进行回读和配置操作,其中回读是指从每个 FPGA 电路中读出配置信息,辐射加固处理器 (1) 通过将回读得到的配置信息与标准配置信息相比较,可以确定辐射损伤的位置与类型;配置是指由辐射加固处理器 (1) 通过配置端口,往每个 FPGA 电路中写入配置信息,如果在对一个 FPGA 电路进行多次配置操作后,通过回读操作发现辐射损伤的位置与类型均相同,即可认定该 FPGA 电路发生了永久性的辐射损伤,从而其内部必然发生了永久性的电路故障,则辐射加固处理器 (1) 启用备份的 FPGA 电路,并完成配置,然后开始对发生了辐射损伤的 FPGA 电路的故障进行修复;

第三 Flash 存储器 (2) 与辐射加固处理器 (1) 相连,所述第三 Flash 存储器中存储了辐射加固处理器 (1) 所需的程序代码、第一 FPGA 电路 (4) 的配置文件和第二 FPGA 电路 (7) 的配置文件,其中在第三 Flash 存储器 (2) 中存储的第一 FPGA 电路 (4) 的配置文件为三份,在所述第三 Flash 存储器 (2) 中还存储有第二 FPGA 电路 (7) 的三份配置文件,辐射加固处理器 (1) 在读取配置文件时将读取三次并对其进行三选二处理,并将处理结果进行汉明码解码,然后才将其作为参照的标准,这样的处理使得第三 Flash 存储器 (2) 中的配置文件具有冗余编码和三模冗余两级容错保护,具有很高的长期可靠性,从而保证所读取的配置文件正确性,同时将该配置文件用于配置 FPGA 电路,所述配置文件还作为与回读得到配置文件进行对比的标准;

每个 FPGA 电路中的处理器的输出端通过选择电路 (10) 与外部的 CAN 总线相连,所述选择电路 (10) 由辐射加固处理器 (1) 输出的选择信号控制,所述辐射加固处理器 (1) 通过所述选择信号决定由第一 FPGA 电路 (4) 还是第二 FPGA 电路 (7) 输出信号,从而决定哪一个 FPGA 电路在当前处于工作状态;

其特征在于所述在线修复方法包括如下步骤:

步骤一:由辐射加固处理器 (1) 认定发生永久性电路故障的 FPGA 电路;

步骤二:所述辐射加固处理器 (1) 启用另一个 FPGA 电路工作;

步骤三:所述辐射加固处理器(1)定义发生永久性电路故障的FPGA电路发生永久性故障的电路在辐射损伤发生前的功能为 $f(b, i)$,且在辐射损伤发生后的功能为 $f'(b, i)$,且用整数 i 表示所述FPGA电路中发生永久性故障的电路的输入信号,其中, b 为存储在第三Flash存储器(2)中的用于配置所述FPGA电路中发生永久性故障的电路的原始配置文件,所述第三Flash存储器(2)中存储有配置所述FPGA电路中各功能电路的原始配置文件;

步骤四:所述辐射加固处理器(1)获取所述FPGA电路中发生永久性故障的电路的新配置文件 b' ,使得在所述FPGA电路中发生永久性故障的电路的任意输入信号下,所述FPGA电路中发生永久性故障的电路均存在 $f(b, i) = f'(b', i)$,将所述新配置文件 b' 替代原始配置文件 b ,与所述FPGA电路中的其他原始配置文件整合并上传至所述FPGA电路,完成可重构星载计算机永久性故障电路的在线修复;

步骤一中由所述辐射加固处理器(1)认定发生永久性电路故障的FPGA电路的方法为:

步骤一一:所述辐射加固处理器(1)对一个FPGA电路进行回读,并将对所述FPGA电路回读获得的配置信息与标准配置信息进行比较,以获取所述FPGA电路的辐射损伤的位置与类型,所述标准配置信息为存储在第三Flash存储器(2)中的用于配置两个FPGA电路的原始配置文件信息,然后执行步骤一二;

步骤一二:所述辐射加固处理器(1)对所述FPGA电路进行配置,以写入上述标准配置信息,然后执行步骤一三;

步骤一三:重复执行步骤一一和步骤一二多次,当多次获取的所述FPGA电路的辐射损伤的位置与类型均相同,则认定所述FPGA电路是发生了永久性电路故障的FPGA电路;

在步骤四中,所述辐射加固处理器(1)获取新配置文件 b' 的方法是:所述辐射加固处理器(1)按照可满足性问题求解新配置文件 b' ,使 $M = (f(b', 0) \odot f(b, 0)) \wedge (f(b', 1) \odot f(b, 1)) \wedge \dots \wedge (f(b', 2^n - 1) \odot f(b, 2^n - 1))$,其中 $M=1$, n 为所述FPGA电路的输入信号的位宽。

一种可重构星载计算机永久性故障电路的在线修复方法

技术领域

[0001] 本发明涉及航天航空技术领域,具体涉及一种可重构星载计算机永久性故障电路的在线修复方法。

背景技术

[0002] 现代小卫星的集成度越来越高,这要求其星载计算机能够在并行多任务的环境下,具有强大的计算和数据处理能力。普通星载计算机完全依赖处理器进行计算,因而效率低下无法满足小卫星技术发展的需求。而可重构计算机利用处理器和专用电路共同进行计算,具有很强的计算能力。然而由于可重构星载计算机的核心器件 FPGA 是一种半定制的硬件可编程器件,空间辐射导致的永久性损伤往往伴随着不可修复的电路故障,从而直接导致可重构星载计算机整体的失效。目前在实际工程中主要采用静态冗余的方法来应对这类损伤产生的影响,但是静态冗余技术数倍增加了电子系统的体积、重量、功耗与成本,与微小卫星集成化、低成本化的发展思路相悖;同时由于卫星的在轨工作周期长达数年,错误的积累依然会导致静态冗余系统因冗余资源耗尽而失效。

发明内容

[0003] 本发明为解决现有的可重构星载计算机中的 FPGA 电路在空间辐射影响下产生的不可修复的损伤将直接导致永久性电路故障的问题,提供了一种可重构星载计算机永久性故障电路的在线修复方法。

[0004] 本发明的一种可重构星载计算机永久性故障电路的在线修复方法,所述可重构星载计算机包括辐射加固处理器、第三 Flash 存储器、第三 SRAM 存储器、第一 FPGA 电路、第一 Flash 存储器、第一 SRAM 存储器、第二 FPGA 电路、第二 Flash 存储器、第二 SRAM 存储器和选择电路,所述修复方法包括如下步骤:

[0005] 步骤一:由辐射加固处理器认定发生永久性电路故障的 FPGA 电路;

[0006] 步骤二:所述辐射加固处理器启用另一个 FPGA 电路工作;

[0007] 步骤三:所述辐射加固处理器定义发生永久性电路故障的 FPGA 电路中发生永久性故障的电路在辐射损伤发生前的功能为 $f(b, i)$,且在辐射损伤发生后的功能为 $f'(b, i)$,且用整数 i 表示所述 FPGA 电路中发生永久性故障的电路的输入信号,其中, b 为存储在第三 Flash 存储器中的用于配置所述 FPGA 电路中发生永久性故障的电路的原始配置文件,所述第三 Flash 存储器中存储有配置所述 FPGA 电路中各功能电路的原始配置文件;

[0008] 步骤四:所述辐射加固处理器获取所述 FPGA 电路中发生永久性故障的电路的新配置文件 b' ,使得在所述 FPGA 电路中发生永久性故障的电路的任意输入信号下,所述 FPGA 电路中发生永久性故障的电路均存在 $f(b, i) = f'(b', i)$,将所述新配置文件 b' 替代原始配置文件 b ,与所述 FPGA 电路中的其他原始配置文件整合并上传至所述 FPGA 电路,完成可重构星载计算机永久性故障电路的在线修复。

[0009] 本发明的有益效果：本发明提供了一种能够对可重构星载计算机中发生的永久性故障电路进行在线修复的方法；本方法通过对原来不可修复的 FPGA 电路的永久性故障进行修复，弥补了半定制的 FPGA 器件抗辐射能力的不足，避免了原来的 FPGA 电路在出现永久性辐射损伤后将直接导致可重构星载计算机的整体失效，提高了可重构星载计算机在空间辐射环境下的生存能力，使其可以满足长期在轨的任务需求；本发放在认定可重构星载计算机永久性电路故障后，启用另一个正常的 FPGA 电路再针对永久性故障电路进行在线修复，使得发生了永久性电路故障的可重构星载计算机在进行在线修复过程中仍然能够继续工作。

附图说明

[0010] 图 1 是现有的可重构星载计算机的结构示意图。

具体实施方式

[0011] 具体实施方式一：根据说明书附图 1 具体说明本实施方式，本实施方式所述的一种可重构星载计算机永久性故障电路的在线修复方法，所述可重构星载计算机包括辐射加固处理器 1、第三 Flash 存储器 2、第三 SRAM 存储器 3、第一 FPGA 电路 4、第一 Flash 存储器 5、第一 SRAM 存储器 6、第二 FPGA 电路 7、第二 Flash 存储器 8、第二 SRAM 存储器 9 和选择电路 10，所述在线修复方法包括如下步骤：

[0012] 步骤一：由辐射加固处理器 1 认定发生永久性电路故障的 FPGA 电路；

[0013] 步骤二：所述辐射加固处理器 1 启用另一个 FPGA 电路工作；

[0014] 步骤三：所述辐射加固处理器 1 定义发生永久性电路故障的 FPGA 电路中发生永久性故障的电路在辐射损伤发生前的功能为 $f(b, i)$ ，且在辐射损伤发生后的功能为 $f'(b, i)$ ，且用整数 i 表示所述 FPGA 电路中发生永久性故障的电路的输入信号，其中， b 为存储在第三 Flash 存储器 2 中的用于配置所述 FPGA 电路中发生永久性故障的电路的原始配置文件，所述第三 Flash 存储器 2 中存储有配置所述 FPGA 电路中各功能电路的原始配置文件；

[0015] 步骤四：所述辐射加固处理器 1 获取所述 FPGA 电路中发生永久性故障的电路的新配置文件 b' ，使得在所述 FPGA 电路中发生永久性故障的电路的任意输入信号下，所述 FPGA 电路中发生永久性故障的电路均存在 $f(b, i) = f'(b', i)$ ，将所述新配置文件 b' 替代原始配置文件 b ，与所述 FPGA 电路中的其他原始配置文件整合并上传至所述 FPGA 电路，完成可重构星载计算机永久性故障电路的在线修复。

[0016] 具体实施方式二：本具体实施方式是对具体实施方式一的进一步说明，具体实施方式一中步骤一中由所述辐射加固处理器 1 认定发生永久性电路故障的 FPGA 电路的方法为：

[0017] 步骤一一：所述辐射加固处理器 1 对一个 FPGA 电路进行回读，并将对所述 FPGA 电路回读获得的配置信息与标准配置信息进行比较，以获取所述 FPGA 电路的辐射损伤的位置与类型，所述标准配置信息为存储在第三 Flash 存储器 2 中的用于配置两个 FPGA 电路的原始配置文件信息，然后执行步骤一二；

[0018] 步骤一二：所述辐射加固处理器 1 对所述 FPGA 电路进行配置，以写入上述标准配

置信息,然后执行步骤一三;

[0019] 步骤一三:重复执行步骤一一和步骤一二多次,当多次获取的所述 FPGA 电路的辐射损伤的位置与类型均相同,则认定所述 FPGA 电路是发生了永久性电路故障的 FPGA 电路。

[0020] 具体实施方式三:本具体实施方式是对具体实施方式一或二的进一步说明,具体实施方式一或二中在步骤四中,所述辐射加固处理器 1 获取新配置文件 b' 的方法是:所述辐射加固处理器 1 按照可满足性问题求解新配置文件 b',使 $M = (f'(b',0) \odot f(b,0)) \wedge (f'(b',1) \odot f(b,1)) \wedge \dots (f'(b',2^n-1) \odot f(b,2^n-1))$, 其中 $M=1, n$ 为所述 FPGA 电路的输入信号的位宽。

[0021] 本实施方式将 FPGA 电路永久性辐射损伤所导致的故障电路的修复问题等价为满足性问题来求解,实现了对所述故障电路的修复。

[0022] 本实施方式中所述的修复方法的理论基础:因为在 FPGA 电路中电路的功能由配置文件和电路输入信号共同决定,对于特修复的电路而言,在损伤发生前的电路功能 f 是已知的,当损伤发生后,根据损伤的类型与位置可以确定待修复的电路在损伤发生后的功能 f' ,由于辐射损伤的影响 f' 与 f 不完全相同,所以对于同样的配置文件 b 和电路输入 i 而言, f' 的输出与 f 的输出也不完全相同。因此如果存在一组新配置文件 b' ,使得对于任意输入而言满足 $f(b, i) = f'(b', i)$,则可认为 b' 在损伤后的 FPGA 电路中完全复现了损伤发生前的电路的功能,即永久性的电路故障得到了修复。根据上述思想建立如下等式, $M = (f'(b',0) \odot f(b,0)) \wedge (f'(b',1) \odot f(b,1)) \wedge \dots (f'(b',2^n-1) \odot f(b,2^n-1))$, 当且仅当 b' 在损伤后的 FPGA 电路中完全复现了损伤发生前的电路的功能时,有 $M=1$ 成立,否则 $M=0$ 。因此 FPGA 电路永久性电路故障的修复问题被转换成为可满足性问题,并等效为对满足 $M=1$ 的 b' 的求解。同时在上式中,仅有 b' 为未知量,因此求解是完全可行的。

[0023] 求解 b' 所用到的算法结构如下:

[0024] 1. 将 b 作为搜索起点(当前解)

[0025] 2. while (不满足子句数等于 0) do begin

[0026] 3. if (step> 阈值) begin

[0027] 4. 随机产生配置文件并作为当前解

[0028] 5. step 置 1

[0029] 6. end else begin

[0030] 7. 依次翻转配置文件所有变元(排除损伤点),将具有最小子句不满足

[0031] 足数的变元存入解序列

[0032] 8. if (解序列对应的子句满足数增加)

[0033] 9. 温度归 0

[0034] 10 else 升温

[0035] 11. if (解序列中解的子句满足数 $= 2^n$)

[0036] 12 求解成功并输出解

[0037] 13. else begin

[0038] 14 产生一个随机数

[0039] 15. if (随机数 < 当前温度)

```
[0040] 16    随机翻转一个配置文件变元作为新的当前解
[0041] 17.    else 在解序列中随机选择一个解作为当前解 end
[0042] 18.    end
[0043] 19    totalstep 加 1
[0044] 20    if (totalstep> 失败阈值)
[0045] 21.    求解失败
[0046] 22.    end
```

[0047] 在所述求解 b' 的过程汇总,为了提高求解成功率避免陷入局部最优解,在算法中引入了动态的升温和退火机制,即如果不满足子句数减少,则说明当前求得的 b' 在 f' 上对应的功能与损伤前电路的功能吻合度提高,同时也意味着算法可能正沿着正确的路径进行搜索,因此将算法中的“温度”降为 0 保证算法继续沿着该路径进行尝试;当不满足子句数不为 0 且不再减少时,说明算法可能陷入了局部最优陷阱,因此采用随机翻转当前解中变元的方法进行随机迈步,强制改变搜索路径,但随机迈步在绝大多数时候伴随着不满足子句数的急剧增加,所以频繁的随机迈步往往会导致算法无法收敛。因此在规定当陷入局部最优陷阱时,算法的“温度”逐步上升,然后算法根据当前的“温度”来进行搜索路径的决策,具体做法是首先产生一个随机数,如果随机数值高于当前温度值,求解器将继续沿着当前路径进行搜索;而当随机数值低于温度值时,进行随机迈步从而选择新的搜索路径。逐步升温的策略,避免了频繁的随机迈步;同时保证了算法不会长时间陷入局部最优的求解困境,从而加快收敛至最终的全局最优解的速度。

[0048] 本实施方式中,在成功求得 b' 后,将其与 FPGA 电路中整体的配置文件整合,并重新下载到 FPGA 电路中,从而实现对可重构星载计算机永久性电路故障的修复。

[0049] 本实施方式中,第一 FPGA 电路 4 和第二 FPGA 电路 7 是可重构星载计算机功能的主体部分,其中包含了相同的处理器单元和硬件电路模块(如定时器、浮点计算单元、超越函数计算单元等)。两个 FPGA 电路之间互为冗余且交替工作,即当其中一个发生了永久性电路故障后,由辐射加固处理器 1 对其进行修复,并在修复期间启用另一个 FPGA 电路从而保障计算机整体功能的连续性。

[0050] 第一 Flash 存储器 5 与第一 FPGA 电路 4 中的处理器电路相连,第二 Flash 存储器 8 与第二 FPGA 电路 7 中的处理器电路相连,所述两个 Flash 存储器中存储了软件程序代码。

[0051] 第一 SRAM 存储器 6 与第一 FPGA 电路 4 中的处理器电路相连,第二 SRAM 存储器 9 与第二 FPGA 电路 7 中的处理器电路相连,所述两个 SRAM 存储器作为处理器程序执行的空间。

[0052] 辐射加固处理器 1 同时与第一 FPGA 电路 4 的配置端口和第二 FPGA 电路 7 的配置端口相连,通过每个 FPGA 电路的配置端口,辐射加固处理器 1 可以对每个 FPGA 电路中的配置信息进行回读和配置操作,其中回读是指从每个 FPGA 电路中读出配置信息,辐射加固处理器 1 通过将回读得到的配置信息与标准配置信息相比较,可以确定辐射损伤的位置与类型;配置是指由辐射加固处理器 1 通过配置端口,往每个 FPGA 电路中写入配置信息。如果在一个 FPGA 电路进行多次配置操作后,通过回读操作发现辐射损伤的位置与类型均相同,即可认定该 FPGA 电路发生了永久性的辐射损伤,从而其内部必然发生了永久性的电路故障,则辐射加固处理器 1 启用备份的 FPGA 电路,并完成配置,然后开始对发生了辐射损伤

的 FPGA 电路的故障进行修复。

[0053] 第三 Flash 存储器 2 与辐射加固处理器 1 相连,所述第三 Flash 存储器中存储了辐射加固处理器 1 所需的程序代码、第一 FPGA 电路 4 的配置文件和第二 FPGA 电路 7 的配置文件,其中在第三 Flash 存储器 2 中存储的第一 FPGA 电路 4 的配置文件为三份,在所述第三 Flash 存储器 2 中还存储有第二 FPGA 电路 7 的三份配置文件,辐射加固处理器 1 在读取配置文件时将读取三次并对其进行三选二处理,并将处理结果进行汉明码解码,然后才将其作为参照的标准。这样的处理使得第三 Flash 存储器 2 中的配置文件具有冗余编码和三模冗余两级容错保护,具有很高的长期可靠性,从而保证所读取的配置文件正确性,同时将该配置文件用于配置 FPGA 电路,所述配置文件还作为与回读得到配置文件进行对比的标准。

[0054] 每个 FPGA 电路中的处理器的输出端通过选择电路 10 与外部的 CAN 总线相连,所述选择电路 10 由辐射加固处理器 1 输出的选择信号控制,所述辐射加固处理器 1 通过所述选择信号决定由第一 FPGA 电路 4 还是第二 FPGA 电路 7 输出信号,从而决定哪一个 FPGA 电路在当前处于工作状态。

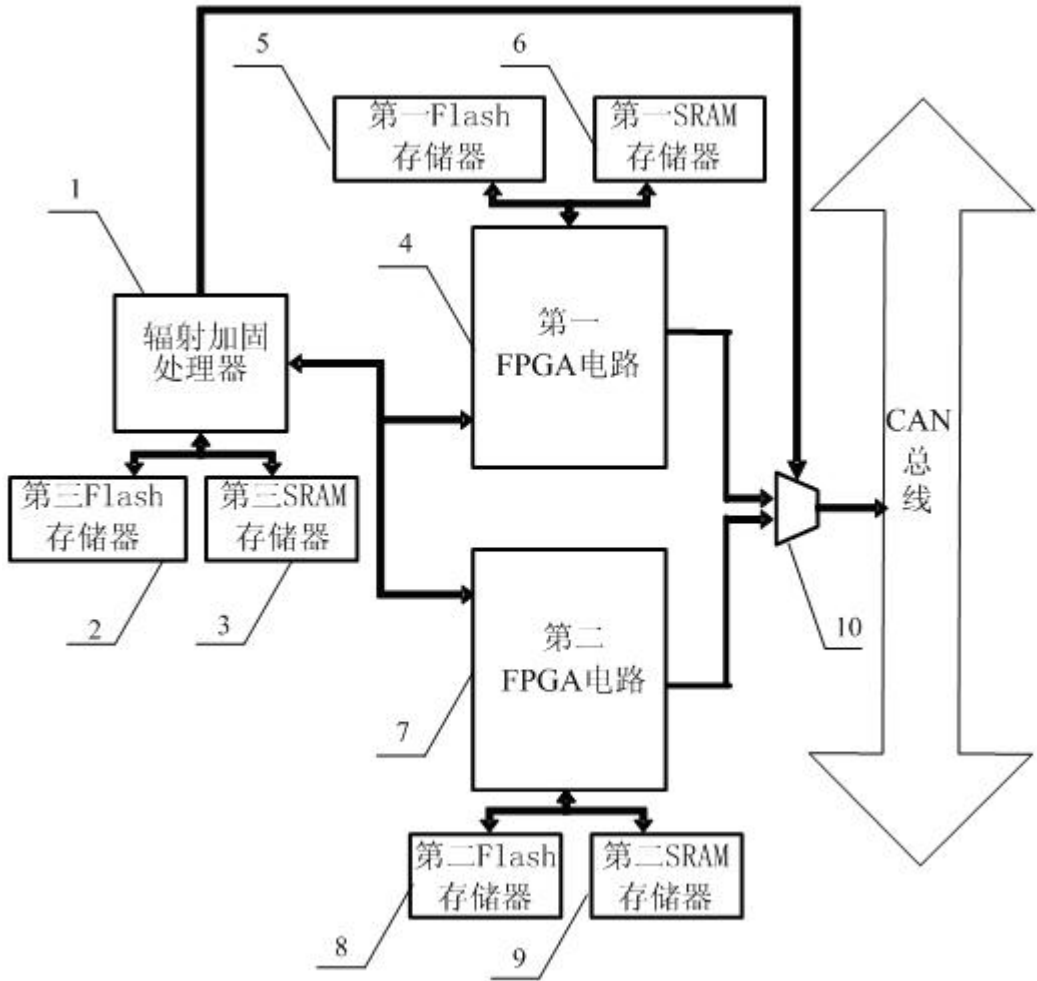


图 1