



# (12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 112368677 B

(45) 授权公告日 2022.07.15

(21) 申请号 201980044597.0

(22) 申请日 2019.06.13

(65) 同一申请的已公布的文献号  
申请公布号 CN 112368677 A

(43) 申请公布日 2021.02.12

(30) 优先权数据  
16/011,010 2018.06.18 US

(85) PCT国际申请进入国家阶段日  
2020.12.30

(86) PCT国际申请的申请数据  
PCT/US2019/036967 2019.06.13

(87) PCT国际申请的公布数据  
W02019/245846 EN 2019.12.26

(73) 专利权人 超威半导体公司  
地址 美国加利福尼亚州

(72) 发明人 马吕斯·埃弗斯

阿帕那·斯亚加拉简

阿肖克·T·文卡塔查尔

(74) 专利代理机构 上海胜康律师事务所 31263  
专利代理师 李献忠 张静

(51) Int.Cl.  
G06F 9/38 (2006.01)

(56) 对比文件  
WO 2016195848 A1, 2016.12.08  
CN 205176828 U, 2016.04.20  
CN 106681695 A, 2017.05.17  
CN 107102845 A, 2017.08.29

审查员 林芳

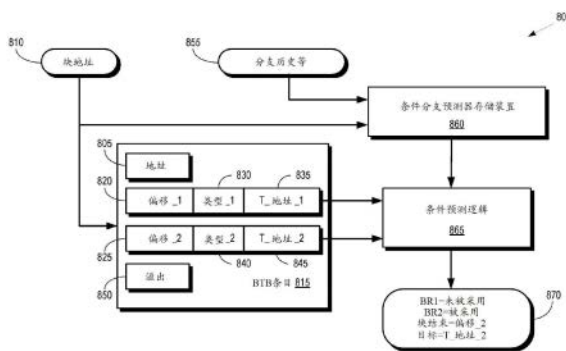
权利要求书3页 说明书12页 附图9页

## (54) 发明名称

基于分支指令的类型选择性地执行提前分支预测

## (57) 摘要

基于第一块[305]的第一地址来访问分支预测结构[500]中的针对一组第二块[310,315]的条目集合。所述组第二块对应于所述第一块中的一个或多个第一分支指令的结果。基于所述分支预测结构中的所述条目来发起对所述第二块中的第二分支指令的结果的推测预测。基于所述分支指令的类型来选择性地刷新与所述推测预测相关联的状态。



1. 一种基于分支指令的类型选择性地执行分支预测的方法,其包括:

基于第一块[305]的第一地址,访问分支预测结构[500]中的针对与所述第一块中的至少一个第一分支指令[320]的结果相对应的一组第二块[310,315]的条目集合;

基于所述分支预测结构中的所述条目集合,发起对所述组第二块中的第二分支指令[325,335]的结果的推测预测;以及

基于所述至少一个第一分支指令的至少一种类型,选择性地刷新与所述推测预测相关联的状态。

2. 如权利要求1所述的方法,其中访问所述分支预测结构中的所述条目集合包括访问所述分支预测结构中的针对一组第二块的条目集合,所述组第二块为所述至少一个第一分支指令的潜在目标或者在所述至少一个第一分支指令未被采用的情况下为所述第一块之后的块。

3. 如权利要求1所述的方法,其还包括:

确定所述至少一个第一分支指令的所述至少一种类型[710],同时对所述组第二块中的所述第二分支指令的所述结果进行推测预测。

4. 如权利要求3所述的方法,其中确定所述至少一个第一分支指令的所述至少一种类型包括基于所述至少一个第一分支指令的结果是由分支目标缓冲器、间接分支预测器还是返回地址栈确定的,确定所述至少一个第一分支指令的所述至少一种类型。

5. 如权利要求1所述的方法,其中选择性地刷新所述状态包括响应于所述至少一个第一分支指令的所述至少一种类型属于分支指令的类型集合的第一子集,刷新与所述第二分支指令的所述结果的所述推测预测相关联的所述状态。

6. 如权利要求5所述的方法,其中所述第一子集包括调用指令、返回指令和间接分支指令。

7. 如权利要求5所述的方法,其还包括:

基于所述分支预测结构中的通过所述第二块中的预测的第二块的第二地址编入索引的条目,重新发起对所述预测的第二块中的所述第二分支指令中的至少一个第二分支指令的推测预测。

8. 如权利要求7所述的方法,其中所述预测的第二块对应于所述第一块中的所述至少一个第一分支指令的预测结果。

9. 如权利要求5所述的方法,其中选择性地刷新所述状态包括响应于所述至少一个第一分支指令的所述至少一种类型属于所述分支指令的所述类型集合的第二子集,绕过刷新所述状态并且继续进行所述推测预测。

10. 如权利要求1所述的方法,其还包括:

通过从所述第一块的所述第一地址丢弃预定数量的最低有效位来生成所述分支预测结构中的索引。

11. 一种基于分支指令的类型选择性地执行分支预测的设备,其包括:

分支预测器[220],所述分支预测器配置为预测第一块[305]中的至少一个第一分支指令[320]的结果,并且基于所述第一块的第一地址访问分支预测结构[500]中的针对与所述第一块中的所述至少一个第一分支指令的所述结果相对应的一组第二块[310,315]的条目集合;以及

提取逻辑[225],所述提取逻辑用于基于所述分支预测结构中的所述条目集合来提取用于对所述组第二块中的第二分支指令的结果进行推测预测的指令,

其中基于所述至少一个第一分支指令的至少一种类型,从所述分支预测器选择性地刷新与所述推测预测相关联的状态。

12.如权利要求11所述的设备,其中所述分支预测器被配置为访问所述分支预测结构中的针对一组第二块的所述条目集合,所述组第二块为所述至少一个第一分支指令的潜在目标或者在所述至少一个第一分支指令未被采用的情况下为所述第一块之后的块。

13.如权利要求11所述的设备,其中所述分支预测器被配置为确定所述至少一个第一分支指令的所述至少一种类型,同时对所述组第二块中的所述第二分支指令的所述结果进行所述推测预测。

14.如权利要求13所述的设备,其中所述分支预测器被配置为基于所述至少一个第一分支指令的结果是由分支目标缓冲器、间接分支预测器还是返回地址栈确定的,确定所述至少一个第一分支指令的所述至少一种类型。

15.如权利要求11所述的设备,其中响应于所述至少一个第一分支指令的所述至少一种类型属于分支指令的类型集合的第一子集,刷新与所述第二分支指令的所述结果的所述推测预测相关联的所述状态。

16.如权利要求15所述的设备,其中所述第一子集包括调用指令、返回指令和间接分支指令。

17.如权利要求15所述的设备,其中所述分支预测器被配置为基于所述分支预测结构中的通过所述第二块中的预测的第二块的第二地址编入索引的条目,重新发起对所述预测的第二块中的所述第二分支指令中的至少一个第二分支指令的推测预测。

18.如权利要求17所述的设备,其中所述预测的第二块对应于所述第一块中的所述至少一个第一分支指令的预测结果。

19.如权利要求15所述的设备,其中所述分支预测器被配置为响应于所述至少一个第一分支指令的所述至少一种类型属于所述分支指令的所述类型集合的第二子集,绕过刷新所述状态并且继续进行所述推测预测。

20.如权利要求11所述的设备,其中所述分支预测器被配置为通过从所述第一块的所述第一地址丢弃预定数量的最低有效位来生成所述分支预测结构中的索引。

21.一种基于分支指令的类型选择性地执行分支预测的设备,其包括:

分支目标缓冲器[600],所述分支目标缓冲器被配置为存储包括针对对应块中的分支指令的分支预测信息的条目[605];

第一分支预测器[500],所述第一分支预测器被配置为基于所述分支目标缓冲器中的使用所述第一块的第一地址访问的条目来预测所述第一块中的至多预定数量的分支指令的结果;以及

第二分支预测器,所述第二分支预测器被配置为基于所述分支目标缓冲器中的使用所述第一块的所述第一地址访问的条目,执行多个第二块中的至多所述预定数量的分支指令的结果的推测预测,所述第二块对应于所述第一块中的所述分支指令的结果,

其中从所述第二分支预测器中选择性地刷新与所述推测预测相关联的状态,并且基于所述第一块中的所述分支指令中的至少一个分支指令的至少一种类型,在所述第一分支预

测器中选择性地发起对所述第二块中的一者中的分支指令的结果的预测。

22. 如权利要求21所述的设备,其中响应于所述至少一种类型属于所述分支指令的类型集合的第一子集,刷新与所述推测预测相关联的所述状态,并且其中响应于所述至少一种类型属于所述分支指令的所述类型集合的第二子集,不刷新与所述推测预测相关联的所述状态。

23. 如权利要求22所述的设备,其中所述第一子集包括调用指令、返回指令和间接分支指令。

24. 如权利要求23所述的设备,其中响应于基于所述分支目标缓冲器中的条目预测所述返回指令或所述间接分支指令的结果,从所述第一子集中移除所述返回指令或所述间接分支指令。

25. 如权利要求21所述的设备,其中所述第一分支预测器被配置为基于所述分支目标缓冲器中的通过所述第二块中的预测的第二块的第二地址编入索引的条目,重新发起对所述预测的第二块中的所述分支指令中的至少一个分支指令的推测预测。

26. 如权利要求25所述的设备,其中所述预测的第二块对应于所述第一块中的所述分支指令中的至少一个分支指令的预测结果。

## 基于分支指令的类型选择性地执行提前分支预测

### 背景技术

[0001] 处理单元执行不同类型的分支指令,以将程序流重定向(或“分支”)到分支指令所指示的地址处的指令。分支指令的类型包括:将程序流重定向到预定目标地址的无条件分支;如果满足条件则“被采用”以将程序流重定向到目标地址以及如果不满足条件则“不被采用”以继续顺序地执行指令的条件分支;将程序流重定向到子例程的地址的调用指令;将程序流从子例程重定向到发起该子例程的调用指令之后的地址的返回指令;以及根据处理单元的状态将程序流重定向到不同地址的间接分支指令。

[0002] 分支预测技术用于猜测分支指令的结果,使得处理单元可在处理单元评估分支指令之前,沿预测的分支开始推测性地执行后续指令。处理单元使用分支预测结构的与包括分支指令的指令块相关联的条目中的信息来预测结果。如果在评估分支指令时发现预测的分支不正确,则将沿错误预测分支的推测执行挂起,并且将处理单元的状态回滚到分支指令处的状态以开始沿正确分支执行。更具体地,分支预测单元和提取单元两者被回滚以从分支的正确目标进行处理,或者如果不采用分支则从分支之后的地址进行处理。

### 附图说明

[0003] 通过参考附图,本领域技术人员可更好地理解本公开并且明白其众多特征和优势。在不同附图中使用相同的附图标记来指示类似或相同的项目。

[0004] 图1是根据一些实施方案的处理系统的框图。

[0005] 图2是根据一些实施方案的包括处理器核心的处理系统的一部分的框图。

[0006] 图3是根据一些实施方案的预测块和与预测块中的分支指令的不同可能结果相对应的一组块的框图。

[0007] 图4是根据一些实施方案的包括程序流和子例程的指令集。

[0008] 图5是根据一些实施方案的分支预测结构的框图。

[0009] 图6是根据一些实施方案的分支目标缓冲器的框图。

[0010] 图7是根据一些实施方案的基于分支指令的类型来选择性地执行非提前分支预测或提前分支预测的方法的流程图。

[0011] 图8是根据一些实施方案的包括分支目标缓冲器和条件分支预测器的分支预测单元的一部分的框图。

[0012] 图9是根据一些实施方案的选择性地允许返回指令和间接分支指令的子集使用“提前预测”分支预测的处理系统的一部分的框图。

### 具体实施方式

[0013] 在用于分支预测的“提前预测”技术中,第一块的地址被用作用于访问分支预测结构和分支预测器存储装置中的信息的索引。所述信息包括与一组可能的后续块相对应的条目集合,该组可能的后续块为第一块中的分支指令的目标或者如果预测第一块中的所有分支均不被采用则为第一块之后的块。响应于分支预测器预测第一块中的分支指令的结果,

从该集合中选择条目的一个子集。预测结果指示第二块包括与所述条日子集相对应的分支指令,所述条日子集包括用于第二块中的分支指令的分支预测信息。在确定第一块的结果是否被正确预测之前,分支预测器使用所述条日子集中的信息来预测第二块中的分支指令的结果。第二块的地址用作信息的索引,该信息用于预测第三块中的在预测为第二块中的分支指令中的一个分支指令的结果的地址处的分支指令的结果。如果第一块的分支结果或目标被误预测,则处理单元将回滚到第一块中的误预测分支指令结束时的状态,并开始沿正确路径执行。如果错误的预测是分支指令“未被采用”,而实际的分支结果是“被采用”,则正确路径从作为第一块中的分支指令的目标的该组可能的后续块中的另一个可能的后续块处开始。如果错误的预测是分支指令“被采用”,而实际的分支结果是“未被采用”,则在继续移动至第二块之前,预测并且提取第一块的其余部分。因此,如果初始分支预测不正确,则要求处理单元基于正确路径重启分支预测器,这增加了分支预测器的等待时间。

[0014] 提前预测技术的有效性取决于分支指令的类型。提前预测技术通常在不牺牲条件分支指令和无条件分支指令的准确度的情况下减少总体等待时间。然而,相对于使用块的地址作为用于预测块内的分支指令的结果的信息的索引的常规分支预测,使用提前预测技术用于其他类型的分支指令可潜在地牺牲准确度。例如,通常从程序内的多个位置访问子例程。如果正在使用提前预测,则针对子例程内的块生成分支预测结构中的多个条目,因为每个条目通过程序内的不同源地址编入索引。为相同的块存储多个条目会消耗分支目标缓冲器中的空间,这会导致容量缺失(capacity miss)。当分支预测器由于此类分支目标缓冲器缺失而无法标识分支时,如果采用未标识的分支,则会导致误预测。关于另一示例,来自子程序的返回指令返回到程序中的多个目标地址。因此,分支目标缓冲器包括从多个目标地址处开始的块的条目。如果正在使用提前预测,则条目通过相同的源地址(即,包含返回指令的块的地址)编入索引。因此,组相联分支目标缓冲器将条目存储在相同的组中,这会在分支目标缓冲器中产生热点,并且如果路的数量少于通过相同的源地址编入索引的条目的数量,则导致冲突缺失(conflict miss)。关于又一示例,间接分支指令生成冲突缺失,因为间接分支可根据处理单元的状态跳转到不同的目标地址,这导致多个条目以与针对返回指令所进行的方式类似的方式通过相同的源地址编入索引。

[0015] 图1至图9公开了分支预测技术,所述分支预测技术通过基于第一块中的分支指令的类型来选择性地执行提前预测分支预测来实现提前预测器的大部分等待时间益处,同时保持常规非提前预测器的准确度。分支预测器使用第一块的地址作为用于访问分支预测结构中的信息的索引。该信息包括与一组第二块相对应的条目集合,该组第二块可能是第一块中的分支指令的目标或者如果预测第一块中的所有分支均不被采用则为第一块之后的块。用于分支预测结构的组合逻辑的多个实例使用来自与该组第二块相对应的条目集合的分支预测信息,来在确定第一块中的分支指令的结果之前,预测(预测的和替代的)第二块中的分支指令的结果。分支预测器确定第一块中的分支指令的类型,同时,组合逻辑预测第二块中的分支指令的结果。响应于分支预测器确定该类型在分支指令的类型集合中的预定子集中,分支预测器刷新与第二块中的分支指令的结果的推测预测相关联的状态,并且使用第二块的地址来访问分支预测结构中针对第二块的条目。例如,如果预测第一块以调用指令、返回指令或间接分支指令结束,则分支预测器刷新与第二块的推测预测相关联的状态。然后,分支预测器基于通过第二块的地址编入索引的条目,重新发起对第二块中的分支

指令的结果的预测。

[0016] 实现提前预测技术的分支预测器的一些实施方案的性能使用减少数量的索引位得到了改善。例如,从用于在分支目标缓冲器中生成条目的索引的地址丢弃预定数量的最低有效位。一些软件构造包括多个分支指令,所述多个分支指令在地址空间中彼此相邻并且具有相同的目标地址。在提前预测分支预测中,即使这些分支指令具有相同的目标地址并且因此指向相同的块,这些分支指令的每一个分支指令也将在分支目标缓冲器中生成不同的条目。通过从索引中丢弃预定数量的最低有效位来减少这种类型的复制,使得相邻的分支指令对分支目标缓冲器中的单个条目具有相同的索引。

[0017] 图1是根据一些实施方案的处理系统100的框图。处理系统100包括或有权访问存储器105或使用非暂时性计算机可读介质(诸如动态随机存取存储器(DRAM))实现的其他存储部件。然而,在一些情况下,使用包括静态随机存取存储器(SRAM)、非易失性RAM等的其他类型的存储器来实现存储器105。存储器105被称为外部存储器,因为它是在处理系统100中实现的处理单元外部实现的。处理系统100还包括总线110以支持在处理系统100中实现的实体(诸如存储器105)之间的通信。处理系统100的一些实施方案包括为了清楚起见未在图1中示出的其他总线、桥、开关、路由器等。

[0018] 处理系统100包含被配置为渲染图像以用于在显示器120上呈现的图形处理单元(GPU) 115。例如,GPU 115渲染对象以产生提供给显示器120的像素值,所述显示器使用像素值来显示表示渲染的对象的图像。GPU 115实现多个处理器核心121、122、123(在本文中统称为“处理器核心121-123”),所述多个处理器核心被配置为同时或并行地执行指令。在GPU 115中实现的处理器核心121-123的数量是设计选择的问题。GPU 115的一些实施方案用于通用计算。GPU 115执行存储在存储器105中的指令,诸如程序代码125,并且GPU 115将信息(诸如所执行的指令的结果)存储在存储器105中。

[0019] 处理系统100还包括连接到总线110并且因此经由总线110与GPU 115和存储器105通信的中央处理单元(CPU) 130。CPU 130实现多个处理器核心131、132、133(在本文中统称为“处理器核心131-133”),所述多个处理器核心被配置为同时或并行地执行指令。处理器核心131-133执行存储在存储器105中的指令,诸如程序代码135,并且CPU 130将信息(诸如所执行的指令的结果)存储在存储器105中。CPU 130还能够通过向GPU 115发出绘图调用来发起图形处理。CPU 130的一些实施方案实现多个处理器核心(为了清楚起见未在图1中示出),所述多个处理器核心被配置为同时或并行地执行指令。

[0020] 输入/输出(I/O)引擎145处理与显示器120以及处理系统100的其他元件(诸如键盘、鼠标、打印机、外部磁盘等)相关联的输入或输出操作。I/O引擎145耦接到总线110,使得I/O引擎145能够与存储器105、GPU 115或CPU 130通信。在所示的实施方案中,I/O引擎145读取存储在外部存储部件150上的信息,该外部存储部件使用非暂时性计算机可读介质(诸如光盘(CD)、数字视盘(DVD)等)来实现。I/O引擎145还能够将信息(诸如GPU 115或CPU 130的处理结果)写入外部存储部件150。

[0021] 图2是根据一些实施方案的包括处理器核心205的处理系统的部分200的框图。处理器核心205用于实现图1所示的处理器核心121-123、131-133的一些实施方案。处理系统的部分200还包括用于实现图1中所示的存储器105的一些实施方案的存储器210。存储在存储器210中的一些信息的副本也被存储在高速缓存215中。例如,经常被访问的指令被存储

在高速缓存215的高速缓存行或高速缓存块中。

[0022] 处理器核心205包括分支预测单元220,该分支预测单元包括条件分支预测器存储装置和条件分支预测逻辑。条件分支预测器存储装置将位置的地址存储在存储器210中,并且条件分支预测逻辑被配置为预测分支指令的结果,如下面详细讨论的。分支指令包括条件分支指令,所述条件分支指令根据条件是真还是假将程序流重定向到一地址。例如,条件分支指令用于实现诸如if-then-else和case语句的软件构造。分支指令还包括无条件分支指令,所述无条件分支指令总是将程序流重定向到指令所指示的地址。例如,JMP指令总是跳转到指令所指示的地址。分支指令还包括将程序流重定向到子例程的位置的调用指令,以及将程序流从子例程重定向到程序流中在调用指令之后的指令的返回指令。在一些情况下,目标地址被提供在寄存器或存储器位置,因此每次执行分支时目标可以不同。此类分支被称为间接分支。

[0023] 分支预测单元220的一些实施方案包括与先前已经由当前过程或先前在处理器核心205上执行的过程执行的分支指令相关联的条目。存储在分支预测单元220的每个条目中的分支预测信息指示分支指令将程序流引导至指令的地址的可能性。基于与对应的分支指令相关联的地址来访问分支预测单元220中的条目。例如,表示分支指令的物理地址、虚拟地址或高速缓存行地址的位(或其子集)的值用作分支预测单元220中的索引。关于另一示例,将位(或其子集)的散列值用作分支预测单元220中的索引。分支预测结构的示例包括间接分支预测器、返回地址栈、分支目标缓冲器、条件分支预测器、分支历史或用于存储分支预测信息的任何其他预测器结构。

[0024] 分支预测单元220的一些实施方案包括非提前分支预测逻辑和提前分支预测逻辑。如本文所用,短语“非提前分支预测”是指针对块中的一个或多个分支指令由分支预测单元220基于分支预测结构(例如,分支目标缓冲器)中的根据标识所述块的地址而访问的条目来执行的分支预测。如本文所用,短语“提前分支预测”是指针对块中的一个或多个分支指令由分支预测单元220基于分支预测结构中的根据标识在分支预测单元220中先前或正在同时处理的块的地址而访问的条目来执行的分支预测。例如,分支预测单元220可预测第一块中的分支指令的结果。该结果指示第二块并且提前分支预测逻辑可基于第一块的地址访问第二块中的分支指令的条目,如在本文中详细讨论的。

[0025] 分支预测单元220基于分支指令的类型来选择性地利用提前分支预测或非提前分支预测。例如,分支预测单元220中的提前分支预测逻辑用于对条件分支指令和无条件分支指令执行分支预测。分支预测单元220中的非提前分支预测逻辑用于对分支到子例程的地址的调用指令、从子例程返回到调用指令之后的后续地址的返回指令以及间接分支指令执行分支预测。分支预测单元220确定当前块中的分支指令的类型,同时推测性地预测与当前块中的分支指令的可能结果相对应的一个或多个后续块中的分支指令的结果。如果分支预测单元220确定当前块中的分支指令的类型在预定类型子集中(例如,分支指令为调用指令、返回指令或间接分支指令),则刷新分支预测单元220的状态,并且基于后续块的地址使用非提前分支预测逻辑来重新发起对后续块中的一个块的分支预测。

[0026] 在一些实施方案中,基于分支指令的结果是基于BTB条目、间接分支预测器还是返回地址栈进行预测的,从预定类型子集中移除特定类型的分支指令,使得可以针对所述分支指令使用提前预测。例如,响应于BTB条目预测间接分支指令的结果,而不是间接分支预

测器预测结果,可以从预定类型子集中移除间接分支指令,使得针对间接分支指令使用提前预测,如下所述。关于另一示例,响应于BTB条目预测返回指令的结果,而不是返回地址栈预测结果,可以从预定类型子集中移除返回指令,如下所述。

[0027] 提取单元225基于从分支预测单元220接收的地址,从存储器210或高速缓存215中提取信息,诸如指令。提取单元225从高速缓存215或存储器210读取表示指令的字节,并且将该指令发送到解码单元230。解码单元230检查指令字节并且确定指令的功能。解码单元230转换(即,解码)指令以生成将由处理器核心205执行的一系列操作。这些操作被写入调度器235。调度器235确定用于操作的源值何时准备就绪,并且将源值发送到一个或多个执行单元231、232、233,在本文中统称为“执行单元231-233”,用于执行操作。结果被写回到寄存器文件240。

[0028] 调度器235调度处理器核心205对指令的执行。调度器235的一些实施方案执行分支指令之后的指令的推测执行,该分支指令将程序流重定向到存储器210(或相关高速缓存215)中由分支指令所指示的地址处的指令。然后,处理器核心205能够推测性地执行目的地地址处的指令以及沿程序流的预测分支的后续指令。如果在评估分支指令时发现预测的分支不正确,则将沿错误预测的分支的推测执行挂起,并且将处理器核心205的状态回滚到分支指令处的状态,以开始沿正确分支执行。

[0029] 图3是根据一些实施方案的预测块300和与预测块300中的分支指令的不同可能结果相对应的一组块305、310、315的框图。预测块300包括分支指令320、325和指令330、335。预测块300的一些实施方案包括更少的分支指令或附加的分支指令(为了清楚起见在图3中未示出)。块305、310、315分别包括指令340、345、350、355、360、365。块305由作为分支指令320的目标的第一地址标识,块310由作为分支指令325的目标的第二地址标识,并且块315由分支指令325之后的第三地址标识。在所示的实施方案中,第三地址是针对在边界(诸如块300、块315之间的高速缓存行边界)处的后续指令(诸如指令360)的。在其他实施方案中,第三地址是针对块300中的后续指令(诸如指令335)的。

[0030] 分支预测器(诸如图2中所示的分支预测单元220)同时预测预测块内的多个分支指令的结果。在所示的实施方案中,分支预测器同时预测分支指令320和分支指令325的结果。分支指令320的可能结果是“被采用”,在这种情况下,程序流分支到块305中的指令340的目标地址,或者是“未被采用”,在这种情况下,程序流顺序地继续进行到预测块300中的指令330。分支指令325的可能结果是“被采用”,在这种情况下,程序流分支到块310中的指令350的目标地址,或者是“未被采用”,在这种情况下,程序流顺序地继续进行到预测块300中的指令335。

[0031] 块305、310、315中的指令340、345、350、355、360、365可包括一个或多个分支指令。在实现提前分支预测的一些实施方案中,使用条件预测逻辑的多个实例来同时预测块305、310、315中的分支指令的结果。例如,块300的地址可用于访问条件分支预测器存储装置中的信息,诸如针对块305、310、315的预测信息。条件预测逻辑的多个实例使用所访问的信息来预测块305、310、315中的分支指令的结果。如下面详细讨论的,推测执行沿包括块305、310、315中的所预测的一个块的路径前进。

[0032] 分支预测器确定分支指令320、325的类型,同时预测块305、310、315中的分支指令的结果。在一些实施方案中,在分支预测器中实现提前分支预测器,以使用分支预测结构中

的基于块305、310、315的地址而访问的对应条目来同时预测块305、310、315中的分支指令的结果。提前分支预测对于第一类型子集(诸如条件分支指令和无条件分支指令)是优选的,并且非提前分支预测对于第二类型子集(诸如调用指令、返回指令和间接分支指令)是优选的。因此,分支预测器基于分支指令320、325的类型选择性地执行提前分支预测或非提前分支预测。响应于确定分支指令320、325中的一个或多个分支指令的类型在第一子集中,分支预测器以提前分支预测继续。响应于确定分支指令320、325中的一个或多个分支指令的类型在第二子集中,刷新分支预测器的状态,并且例如使用非提前索引用于分支预测器来重新发起分支预测以进行非提前分支预测。

[0033] 图4是根据一些实施方案的包括程序流405和子例程410的指令集400。程序流405包括调用指令415、420、425,这些调用指令从程序流405中的不同位置调用子例程410。调用指令415、420、425的一些实施方案通过基于指令430的地址将程序流405重定向到指令430来调用子例程410。正在利用提前指令的分支预测器基于先前块中的地址在分支预测结构中为块中的分支指令生成条目。因此,分支预测器针对调用指令415、420、425中的每个调用指令在分支预测结构中为子例程410生成条目。例如,分支预测器在分支预测结构中生成使用调用指令415的地址而访问的第一条目,在分支预测结构中生成使用调用指令420的地址而访问的第二条目,以及在分支预测结构中生成使用调用指令425的地址而访问的第三条目。第一条目、第二条目和第三条目中的分支预测信息相同,因为它们指向相同的子例程410。

[0034] 子例程410包括一个或多个附加指令435(在一些情况下,其包括分支指令)和返回指令440,该返回指令将流程重定向回到将程序流405重定向到子例程410的调用指令之后的指令。例如,如果子例程410被调用指令415调用,则返回指令440将流程重定向到指令445;如果子例程410被调用指令420调用,则返回指令将流程重定向到指令450;并且如果子例程410被调用指令425调用,则返回指令将流程重定向到指令455。分支预测器在分支预测结构中为由指令445、450、455的目标地址标识的块生成条目。如果正在使用提前预测,则条目通过相同的源地址(即,包含返回指令440的块的地址)编入索引。因此,组相联分支预测结构将针对指令445、450、455的条目存储在相同的组中,这在分支预测结构中产生热点,并且如果路的数量少于通过相同的源地址编入索引的条目的数量,则导致冲突缺失。

[0035] 图5是根据一些实施方案的分支预测结构500的框图。在图2所示的分支预测单元220的一些实施方案中实现分支预测结构500。分支预测结构500包括条目505、510、515,这些条目在调用指令(诸如图4所示的调用指令415、420、425)的提前分支预测期间生成。调用指令将程序流重定向到相同的子例程,例如,图4中所示的子例程410。

[0036] 条目505包括针对两个分支指令的分支预测信息。例如,条目505包括指示第一分支指令相对于地址520的位置的偏移535和指示第二分支指令相对于地址520的位置的偏移540。条目505还包括标识第一分支指令和第二分支指令的类型545、550以及第一分支指令和第二分支指令的目标地址555、560的信息。如果第一分支指令被采用,则程序流从第一分支指令分支到目标地址555。否则,程序流以该块中的指令顺序地继续,直到到达第二分支指令为止。如果第二分支指令被采用,则程序流从第二分支指令分支到目标地址560,否则,程序流以该块中的指令顺序地继续。溢出指示符565指示在下一个顺序边界之前是否存在另外的分支指令。在一些实施方案中,顺序边界匹配指令高速缓存行边界。在其他实施方案

中,顺序边界被设置在其他对准的地址处。图5所示的条目505是分支预测结构(诸如分支目标缓冲器)中的条目的一个示例。条目505的一些实施方案包括以不同方式组织或结构化的不同的分支预测信息。

[0037] 条目510、515位于BTB阵列的不同索引处,因为它们通过先前地址(例如,包括图4所示的调用指令415、420、425的块的地址)编入索引。然而,条目510、515的内容(诸如,偏移、分支指令类型、目标地址和溢出值)与条目505的内容相同,因为条目505、510、515都是针对相同的指令块(例如,图4中所示的与由调用指令415、420、425所调用的子例程相对应的指令块410)生成的。因此,条目505、510、515是彼此的重复,这不必要地消耗了分支预测结构中的空间。

[0038] 图6是根据一些实施方案的分支目标缓冲器600的框图。分支目标缓冲器600用于实现图2中所示的分支预测单元220的一些实施方案。分支目标缓冲器600中的条目是使用基于包括分支指令的块的地址形成的索引来编入索引的。例如,当正在使用非提前预测时,包括分支指令的块的地址用于生成分支目标缓冲器600的条目中的索引。关于另一示例,当正在使用提前预测时,先前块的地址用于生成分支目标缓冲器的与当前块相对应的条目中的索引。

[0039] 在所示的实施方案中,分支目标缓冲器600是存储条目的4路组相联缓冲器,所述条目包括在对应的处理器核心上执行的程序流中的分支指令的分支预测信息。因此,将每个索引映射到包括多个条目的四个不同的路中的一路中的条目。例如,分支目标缓冲器600包括与第一路相对应的条目605、610、615,如实线框所示。其他条目620(为了清楚起见,仅由参考数字指示一个条目)与4路组相联缓冲器的其他路相对应,如虚线框所指示的。

[0040] 分支预测器在分支目标缓冲器600中为由基于与对应的分支指令相关联的地址而生成的索引625、630、635标识的块生成条目。在所示的实施方案中,分支预测器实现提前预测,并且与索引625、630、635相关联的分支指令是子例程中的返回指令。因此,索引625、630、635具有相同的值,因为它们是基于相同的源地址(即,包含子例程的返回指令的块的地址)生成的。因此,由索引625、630、635标识的条目创建在分支目标缓冲器600中的相同的(第一)路中的条目605、610、615中。这在第一路中产生热点,特别是在分支目标缓冲器600的其他路620中没有创建使用其他索引访问的条目(或创建的更少条目)的情况下。如果第一路中的条目数量少于通过相同的源地址编入索引的条目的数量,例如,如果经由相同的返回指令访问的块的块预测信息所消耗的条目数量超出第一路中的条目数量,则热点会导致冲突缺失。

[0041] 图7是根据一些实施方案的基于分支指令的类型来选择性地执行非提前分支预测或提前分支预测的方法的流程图700。方法700的第一部分在图1所示的处理系统100和图2所示的处理系统的部分200的一些实施方案中实现。在所示的实施方案中,分支预测器同时预测至多预定数量的分支指令(诸如两个分支指令)的结果。然而,不需要块精确地包括预定数量的分支指令,并且一些块包括超过或少于预定数量的分支指令。

[0042] 在框705处,分支预测器同时预测第一块中的第一分支和第二分支的结果。如本文所讨论的,第一块中的第一分支和第二分支的结果的不同组合对应于不同的目的地第二块。分支预测器基于第一分支和第二分支的预测结果将第二块中的一个块标识为“预测的”第二块。对应于其他结果的第二块被标识为“替代的”第二块。然后,方法700的一部分进行

到框710、框715。

[0043] 在框710处,分支预测器确定第一块中的一个或多个分支指令的类型。如本文所讨论的,类型包括第一子集和第二子集,第一子集包括条件分支指令和无条件直接分支指令,第二子集包括调用指令、返回指令和间接分支指令。在一些实施方案中,第一子集或第二子集中包括其他类型的指令。例如,响应于间接分支预测器生成预测的第二块的地址,在第一子集中包括间接分支指令,如下所述。关于另一示例,如下所述,响应于返回地址栈生成所预测的第二块的地址,在第一子集中包括返回指令。分支预测器基于从分支预测结构(诸如图5中所示的分支预测结构500和图6中所示的分支目标缓冲器600)检索的分支预测信息来确定分支指令的类型。

[0044] 在框715处,分支预测器在预测的和替代的第二块中发起对分支指令的结果的提前预测。如本文所讨论的,由分支预测器进行的提前预测是基于分支预测结构的根据从第一块的地址导出的索引而访问的条目中的分支预测信息来执行的。在一些实施方案中,使用条件预测逻辑的多个实例来预测预测的第二块和替代的第二块中的每一者的第一分支指令和第二分支指令的结果。在一些实施方案中,条件预测逻辑的第一实例预测在预测的第二块中的第一分支指令和第二分支指令的结果,第二实例预测在替代的第二块中的一者中的第一分支指令和第二分支指令的结果,并且第三实例预测在替代的第二块中的另一者中的第一分支指令和第二分支指令的结果。然而,在其他实施方案中,第二块中的一些块或全部块包括更多或更少的分支指令。

[0045] 在所示的实施方案中,框710、框715同时执行。然而,分支预测器的一些实施方案以其他顺序(包括顺序地或以交错的方式)执行块710、715中的一些或全部操作。响应于分支描述确定第一块中的一个或多个分支指令的类型,方法700进行到决策块720。

[0046] 在决策框720处,分支预测器确定第一块中的第一预测采取的分支指令的类型是在类型集合的第一子集还是第二子集中。如果分支预测器确定分支指令在第一类型子集中,例如,分支指令是条件分支指令或无条件分支指令,则方法700进行到框725,并且分支预测器使用提前分支预测技术继续。如果分支预测器确定分支指令在第二类型子集中,例如,分支指令为调用指令、返回指令或间接分支指令,则方法700进行到框730。

[0047] 如本文所讨论的,相对于使用块的地址作为用于预测块内的分支指令的结果的信息的索引的常规分支预测,使用提前分支预测来预测第二子集中的类型的分支指令的结果可能会牺牲准确度。为了保持具有第二子集中的类型的分支指令的准确度,在框730处刷新分支预测流水线以移除与预测的第二块和替代的第二块中的分支指令中的结果的提前预测相关联的状态。然后使用基于预测的第二块的地址从分支预测结构中的条目访问的分支预测信息,针对预测的第二块重新开始非提前分支预测。

[0048] 图8是根据一些实施方案的包括分支目标缓冲器和条件分支预测器的分支预测单元800的一部分的框图。分支预测单元800用于实现图2中所示的分支预测单元220的一些实施方案。地址805指示指令块的起始地址。分支目标缓冲器中的条目通过与条目相关联的块的起始地址编入索引。在所示的实施方案中,分支目标缓冲器的包括针对块中的分支指令的分支预测信息的条目815的索引810包括等于地址805的值。因此,索引810用于访问分支目标缓冲器的条目815。例如,图3所示的块300的地址被用作分支目标缓冲器的与块300中的分支320、325相对应的条目中的索引。

[0049] 条目815包括针对两个分支指令的分支预测信息。例如,条目815包括指示第一分支指令相对于地址805的位置的偏移820和指示第二分支指令相对于地址805的位置的偏移825。条目还包括标识第一分支指令和第二分支指令的类型830、835以及第一分支指令和第二分支指令的目标地址840、845的信息。如果第一分支指令被采用,则程序流从第一分支指令分支到目标地址840。否则,程序流以该块中的指令顺序地继续,直到到达第二分支指令为止。如果第二分支指令被采用,则程序流从第二分支指令分支到目标地址845,否则,程序流以该块中的指令顺序地继续。溢出指示符850指示在下一个顺序边界之前是否存在另外的分支指令。在一些实施方案中,顺序边界匹配指令高速缓存行边界。在其他实施方案中,顺序边界被设置在其他对准的地址处。图8所示的条目815是分支目标缓冲器中的条目的一个示例。条目815的一些实施方案包括以不同方式组织或结构化的不同的分支预测信息。

[0050] 分支预测结构包括条件分支预测器存储装置860和条件预测逻辑865。条件分支预测器存储装置860存储用于预测分支指令的结果的信息。索引810被提供给条件分支预测器存储装置860以访问与由地址805指示的块相关联的所存储的信息。在一些实施方案中,附加信息(诸如分支历史信息855)被提供给条件分支预测器存储装置860。与从地址805开始的块相关联的所访问信息被提供给条件预测逻辑865,该条件预测逻辑还从条目815接收块中的分支指令的分支预测信息。条件预测逻辑865使用从条目815和条件分支预测器存储装置860访问的信息来预测块中的分支指令的结果。在所示的实施方案中,条件预测逻辑865预测第一分支指令未被采用,并且第二分支指令被采用。因此,条件预测逻辑865预测第一块的结束是在第二分支指令的位置(OFFSET\_2)处,并且第二分支指令的目标地址为T\_ADDR\_2。

[0051] 图9是根据一些实施方案的选择性地允许返回指令和间接分支指令的子集使用“提前预测”分支预测的处理系统的部分900的框图。处理系统的部分900用于实现图1中所示的处理系统100和图2中所示的处理系统的部分200的一些实施方案。部分900的所示实施方案包括存储间接分支指令或返回指令的目标的BTB条目905。间接预测器910预测间接分支指令的目标,并且返回地址栈915预测返回指令的返回地址。每当预测对应分支的结果时,间接预测器910和返回地址栈915返回不同的地址。间接分支指令或返回的第一目标在首次安装分支时被写入BTB,例如,写入BTB条目905中。存储在BTB条目905中的针对间接分支指令或返回指令的目标信息在后面不被改变。

[0052] 来自间接分支预测器910或返回地址栈915的预测的优先级高于BTB条目905中的预测。例如,如果间接预测器910预测了间接分支指令的目标地址,则选择器920选择该目标地址而不是由BTB条目905预测的目标地址用于后续的分支预测。关于另一示例,如果返回地址栈915预测了返回指令的返回地址,则选择器920选择该返回地址而不是由BTB条目905预测的返回地址用于后续的分支预测。间接分支预测器910和返回地址栈915并不总是返回预测。因此,在没有间接分支预测器910或返回地址栈915的预测的情况下,选择器920选择由BTB条目905预测的地址。

[0053] 在一些实施方案中,提前预测或非提前预测被选择性地用于间接分支指令和返回指令,这取决于哪个实体生成由选择器920选择的地址。响应于选择器920选择由BTB条目905预测的地址,使用提前预测,因为每当将BTB条目905用于分支预测时,便针对相同的地址执行分支预测。因此,在这些情况下,不通过使用提前预测在BTB阵列中生成热点。响应于

选择器920选择由间接分支预测器910或返回地址栈915预测的地址,使用非提前预测,因为这些实体每次都生成不同的目标地址,因此可在BTB阵列中生成热点,如本文所述。

[0054] 如本文所公开的,一种方法包括:基于第一块的第一地址,访问分支预测结构中的针对与第一块中的至少一个第一分支指令的结果相对应的一组第二块的条目集合;基于分支预测结构中的所述条目集合发起对该组第二块中的第二分支指令的结果的推测预测;并且基于至少一个第一分支指令的至少一种类型来选择性地刷新与推测预测相关联的状态。在一个方面,访问分支预测结构中的所述条目集合包括访问分支预测结构中的针对一组第二块的条目集合,该组第二块为至少一个第一分支指令的潜在目标或者在至少一个第一分支指令未被采用的情况下为第一块之后的块。在另一方面,确定至少一个第一分支指令的至少一种类型,同时对该组第二块中的第二分支指令的结果进行推测预测。

[0055] 在另一方面,确定至少一个第一分支指令的至少一种类型包括基于至少一个第一分支指令的结果是由分支目标缓冲器、间接分支预测器还是返回地址栈确定的,确定至少一个第一分支指令的至少一种类型。在又一方面,选择性地刷新状态包括响应于至少一个第一分支指令的至少一种类型属于分支指令的类型集合的第一子集,刷新与第二分支指令的结果的推测预测相关联的状态。在又一方面,第一子集包括调用指令、返回指令和间接分支指令。在又一方面,该方法包括:基于分支预测结构中的通过第二块中的预测的第二块的第二地址编入索引的条目,重新发起对预测的第二块中的第二分支指令中的至少一个第二分支指令的推测预测。在一个方面,预测的第二块对应于第一块中的至少一个第一分支指令的预测结果。在另一方面,选择性地刷新状态包括响应于至少一个第一分支指令的至少一种类型属于分支指令的类型集合的第二子集,绕过刷新状态并且继续进行推测预测。在又一方面,该方法包括通过从第一块的第一地址丢弃预定数量的最低有效位来生成分支预测结构中的索引。

[0056] 如本文所公开的,一种设备包括:分支预测器,该分支预测器被配置为预测第一块中的至少一个第一分支指令的结果,并且基于第一块的第一地址来访问分支预测结构中的针对与第一块中的至少一个第一分支指令的结果相对应的一组第二块的条目集合;以及提取逻辑,该提取逻辑用于基于分支预测结构中的所述条目集合来提取用于对该组第二块中的第二分支指令的结果进行推测预测的指令,其中基于至少一个第一分支指令的至少一种类型,从分支预测器选择性地刷新与推测预测相关联的状态。在一个方面,分支预测器被配置为访问分支预测结构中的针对一组第二块的条目集合,该组第二块为至少一个第一分支指令的潜在目标或者在至少一个第一分支指令未被采用的情况下为第一块之后的块。在另一方面,分支预测器被配置为确定至少一个第一分支指令的至少一种类型,同时对该组第二块中的第二分支指令的结果进行推测预测。在又一方面,分支预测器被配置为基于至少一个第一分支指令的结果是由分支目标缓冲器、间接分支预测器还是返回地址栈确定的,确定至少一个第一分支指令的至少一种类型。

[0057] 在另一方面,响应于至少一个第一分支指令的至少一种类型属于分支指令的类型集合的第一子集,刷新与第二分支指令的结果的推测预测相关联的状态。在另一方面,第一子集包括调用指令、返回指令和间接分支指令。在又一方面,分支预测器被配置为基于分支预测结构中的通过第二块中的预测的第二块的第二地址编入索引的条目,重新发起对预测的第二块中的第二分支指令中的至少一个第二分支指令的推测预测。在又一方面,预测的

第二块对应于第一块中的至少一个第一分支指令的预测结果。在另一方面,分支预测器被配置为响应于至少一个第一分支指令的至少一种类型属于分支指令的类型集合的第二子集,绕过刷新状态并且继续进行推测预测。在又一方面,分支预测器被配置为通过从第一块的第一地址丢弃预定数量的最低有效位来生成分支预测结构中的索引。

[0058] 如本文所公开的,一种设备包括:分支目标缓冲器(BTB) [600],该分支目标缓冲器被配置为存储包括针对对应块中的分支指令的分支预测信息的条目[605];以及第一分支预测器[500],该第一分支预测器被配置为基于BTB中的使用第一块的第一地址访问的条目来预测第一块中的至多预定数量的分支指令的结果;以及第二分支预测器,该第二分支预测器被配置为基于BTB中的使用第一块的第一地址访问的条目来推测性地预测多个第二块中的至多预定数量的分支指令的结果,所述第二块对应于第一块中的分支指令的结果,其中与推测预测相关联的状态从第二分支预测器选择地刷新,并且基于第一块中至少一个分支指令中的至少一种类型,在第一分支预测器中选择性地发起对第二块中的一个块中的分支指令的结果的预测。在另一方面,响应于至少一种类型属于分支指令的类型集合的第一子集,刷新与推测预测相关联的状态,并且其中响应于至少一种类型属于分支指令的类型集合的第二子集,不刷新与推测预测相关联的状态。在又一方面,第一子集包括调用指令、返回指令和间接分支指令。在又一方面,响应于基于BTB中的条目预测返回指令或间接分支指令的结果,从第一子集中移除返回指令或间接分支指令。在又一方面,第一分支预测器被配置为基于BTB中的通过第二块中的预测的第二块的第二地址编入索引的条目,重新发起对预测的第二块中的分支指令中的至少一个分支指令的推测预测。在又一方面,预测的第二块对应于第一块中的分支指令中的至少一个分支指令的预测结果。

[0059] 在一些实施方案中,上述设备和技术在包括一个或多个集成电路(IC)装置(也被称为集成电路封装或微芯片)的系统中实现,诸如以上参考图1至图9所述的分支预测。电子设计自动化(EDA)和计算机辅助设计(CAD)软件工具可用于设计和制作这些IC装置。这些设计工具通常被表示为一个或多个软件程序。所述一个或多个软件程序包括代码,所述代码可由计算机系统执行以操纵计算机系统来对表示一个或多个IC装置的电路的代码进行操作,以便执行用以设计或调适制造系统从而制造电路的过程的至少一部分。这个代码可以包括指令、数据或指令和数据的组合。表示设计工具或制造工具的软件指令通常存储在可由计算系统访问的计算机可读存储介质中。同样,代表IC装置的设计或制作的一个或多个阶段的代码可以存储在相同的计算机可读存储介质或不同的计算机可读存储介质中并且从其进行访问。

[0060] 计算机可读存储介质可包括在使用期间可由计算机系统存取以将指令和/或数据提供给计算机系统的任何非暂时性存储介质或非暂时性存储介质的组合。此类存储介质可包括但不限于光学介质(例如,压缩光盘(CD)、数字通用光盘(DVD)、蓝光光盘)、磁性介质(例如,软盘、磁带或磁性硬盘驱动器)、易失性存储器(例如,随机存取存储器(RAM)或高速缓存)、非易失性存储器(例如,只读存储器(ROM)或快闪存储器)或基于微机电系统(MEMS)的存储介质。计算机可读存储介质可嵌入在计算系统中(例如,系统RAM或ROM)、固定地附接至计算系统(例如,磁性硬盘驱动器)、可移除地附接至计算系统(例如,光盘或基于通用串行总线(USB)的快闪存储器)或经由有线或无线网络而耦合至计算机系统(例如,网络可存取存储(NAS))。

[0061] 在一些实施方案中,上文所描述的技术的某些方面可由执行软件的处理系统的一个或多个处理器实现。软件包括存储或以其他方式有形地体现在非暂时性计算机可读存储介质上的一组或多组可执行指令。所述软件可以包括当由一个或多个处理器执行时操纵一个或多个处理器以执行上述技术的一个或多个方面的指令和某些数据。非暂时性计算机可读存储介质可以包括(例如)磁盘或光盘存储装置、固态存储装置(诸如快闪存储器)、高速缓存、随机存取存储器(RAM)或一个或多个其他非易失性存储器装置等。存储在非暂时性计算机可读存储介质上的可执行指令可以呈源代码、汇编语言代码、目标代码或者被一个或多个处理器解译或可以其他方式执行的其他指令格式。

[0062] 应当注意,并不需要上文在一般描述中所描述的所有活动或元件,特定活动或装置的一部分可能是不需要的,并且可执行一个或多个其他活动,或者可包括除所描述的那些元件之外的元件。此外,列出活动的顺序不一定是执行所述活动的顺序。另外,已经参考具体实施方案描述了相应概念。然而,本领域普通技术人员应了解,在不脱离如所附权利要求中所阐述的本公开范围的情况下,可作出各种修改和改变。因此,本说明书和附图将被视为说明性的而非限制性的,并且所有此类修改都意图被包括在本公开的范围内。

[0063] 上文已经参照具体实施方案描述了相应益处、其它优点以及问题的解决方案。然而,所述益处、优点、问题解决方案以及可使任何益处、优点或问题解决方案出现或变得更突出的任何特征都不应被解释为是任何或所有权利要求的关键、必需或必要特征。此外,上文所公开的特定实施方案只是说明性的,因为所公开的主题可以按受益于本文教导的本领域技术人员显而易见的不同但等效的方式来修改和实践。除了如所附权利要求中所描述的之外,并不意图限制本文所示出的构造或设计的细节。因此,明显以上所公开的特定实施方案可更改或修改,并且所有此类变化形式被认为在所公开的主题的范围内。因此,本文所寻求的保护正如所附权利要求中所陈述。

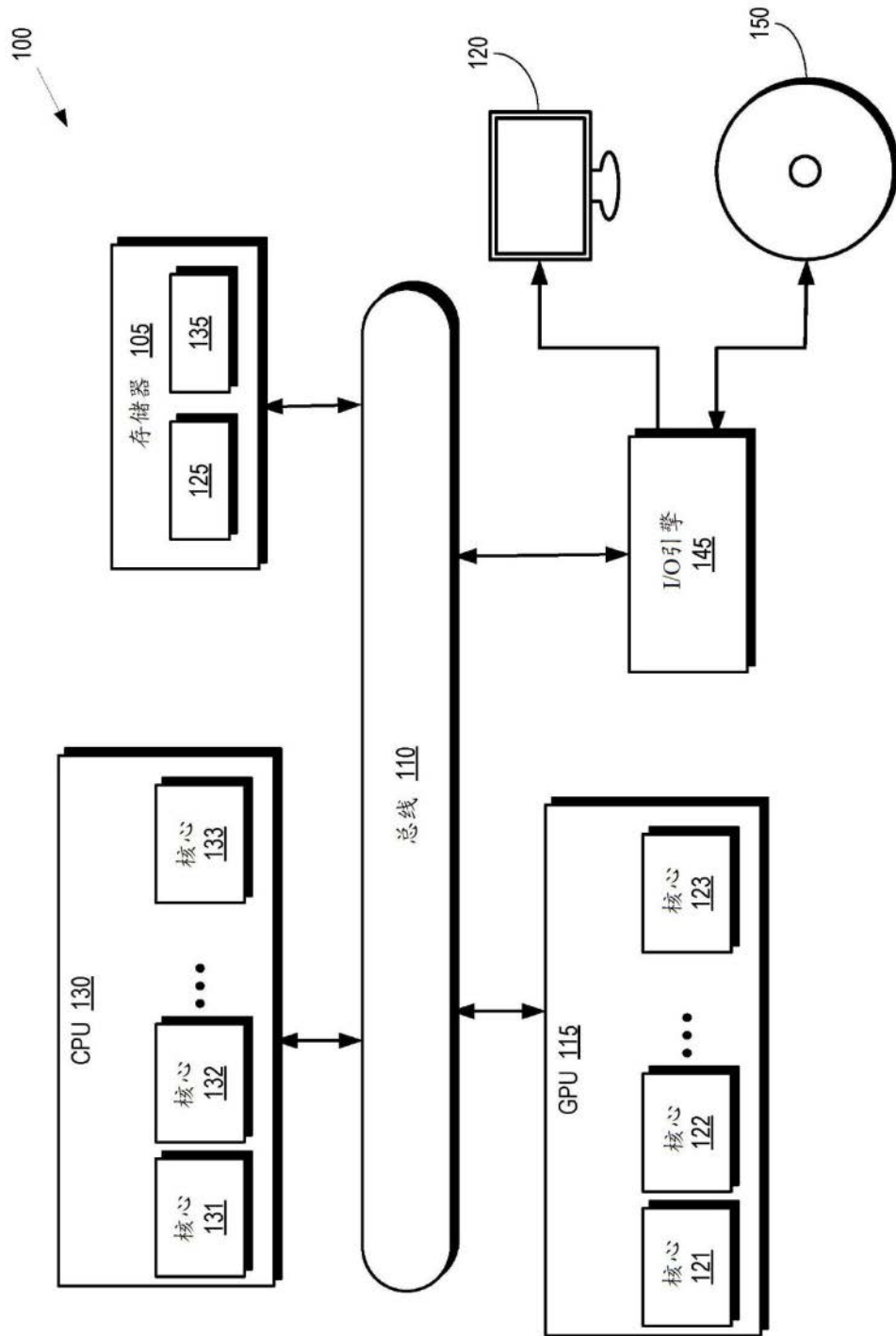


图1

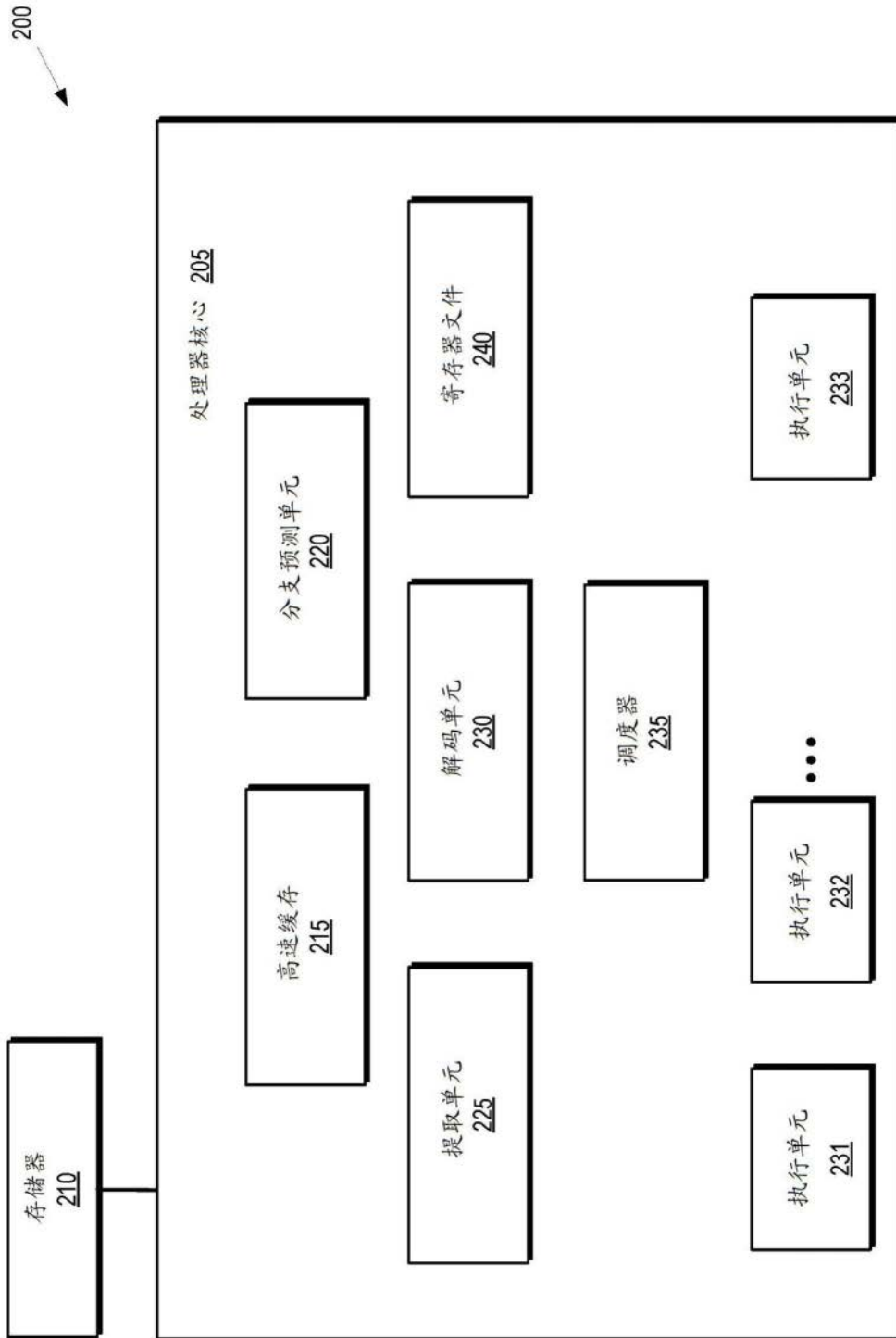


图2

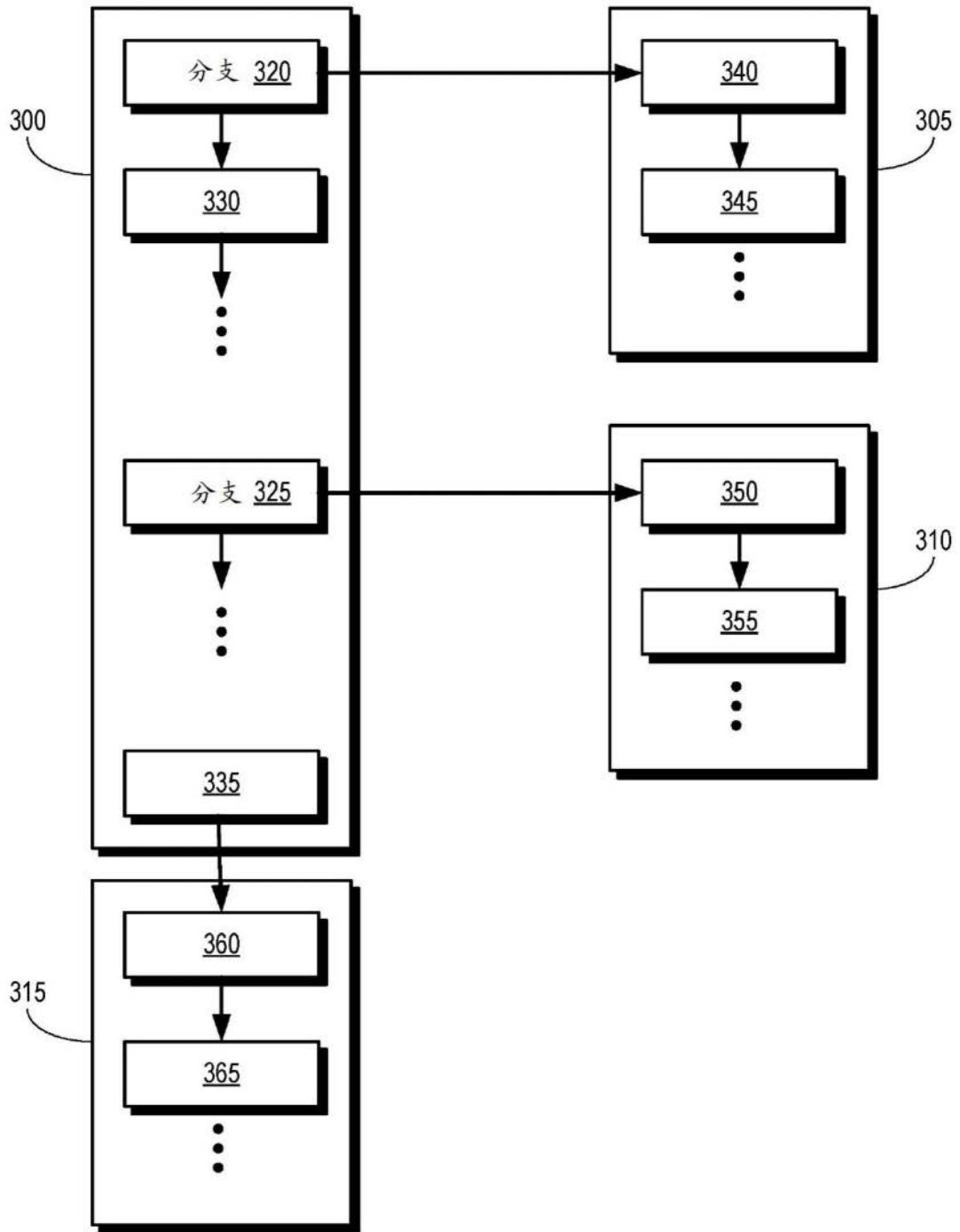


图3

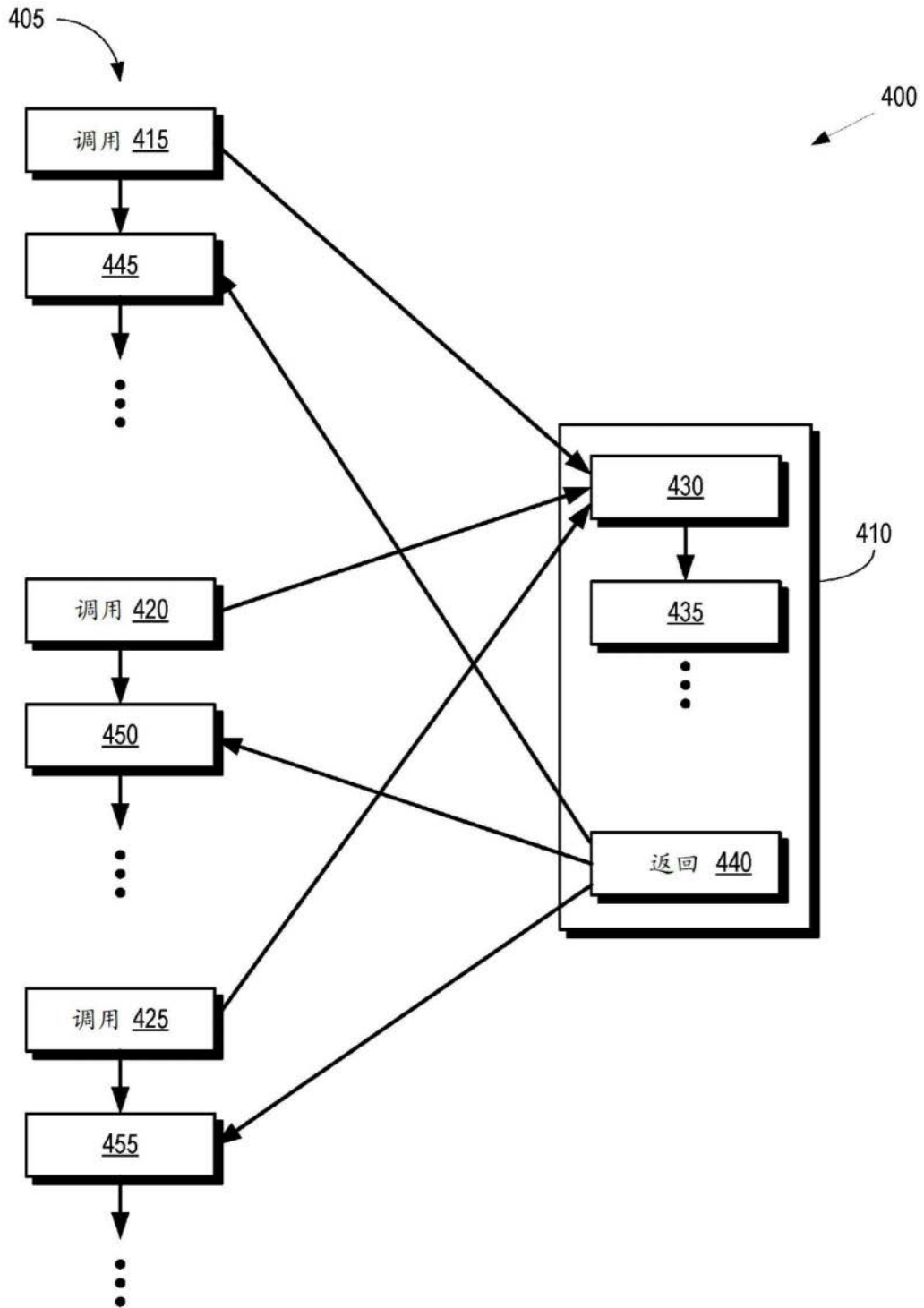


图4

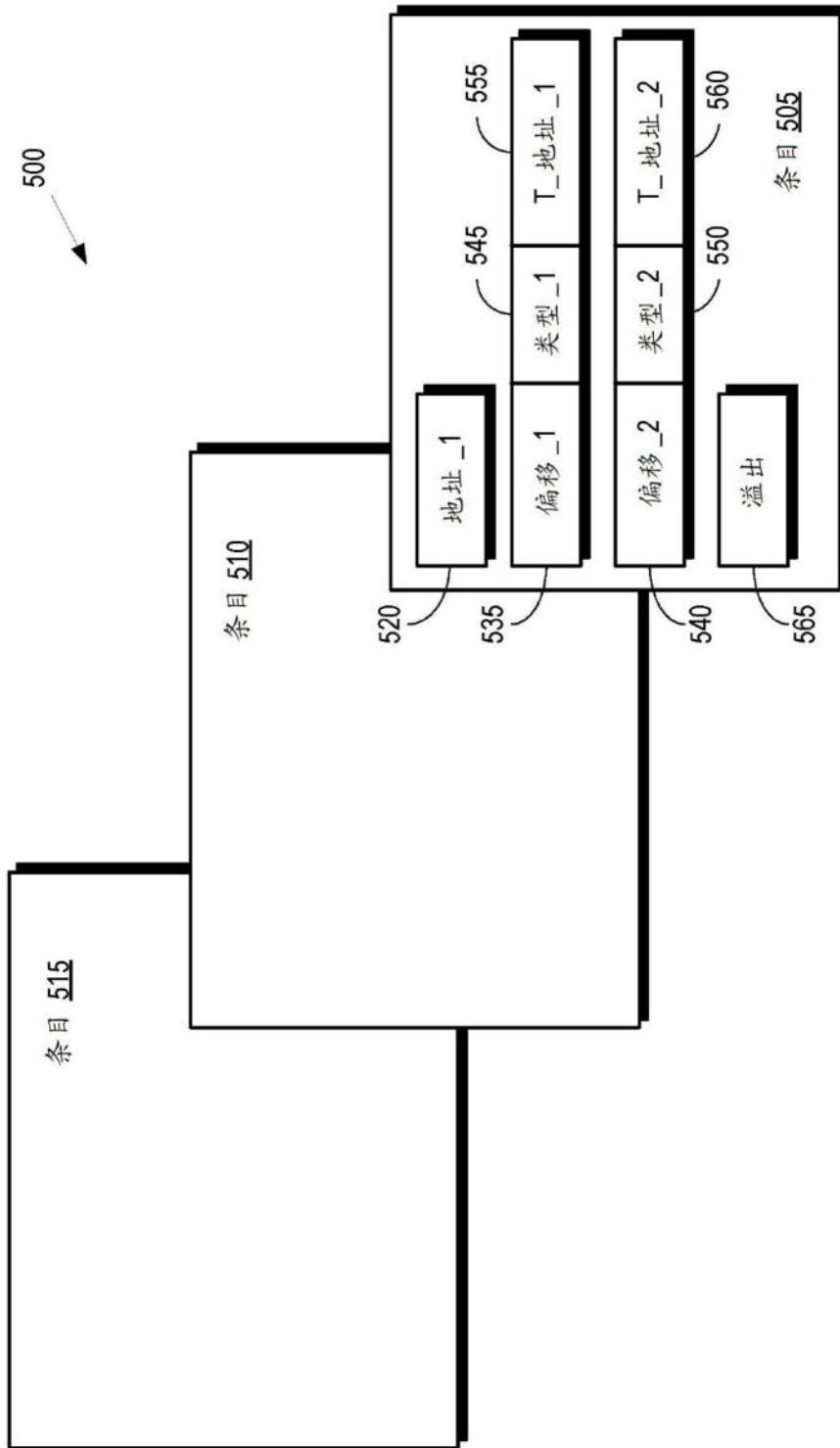


图5

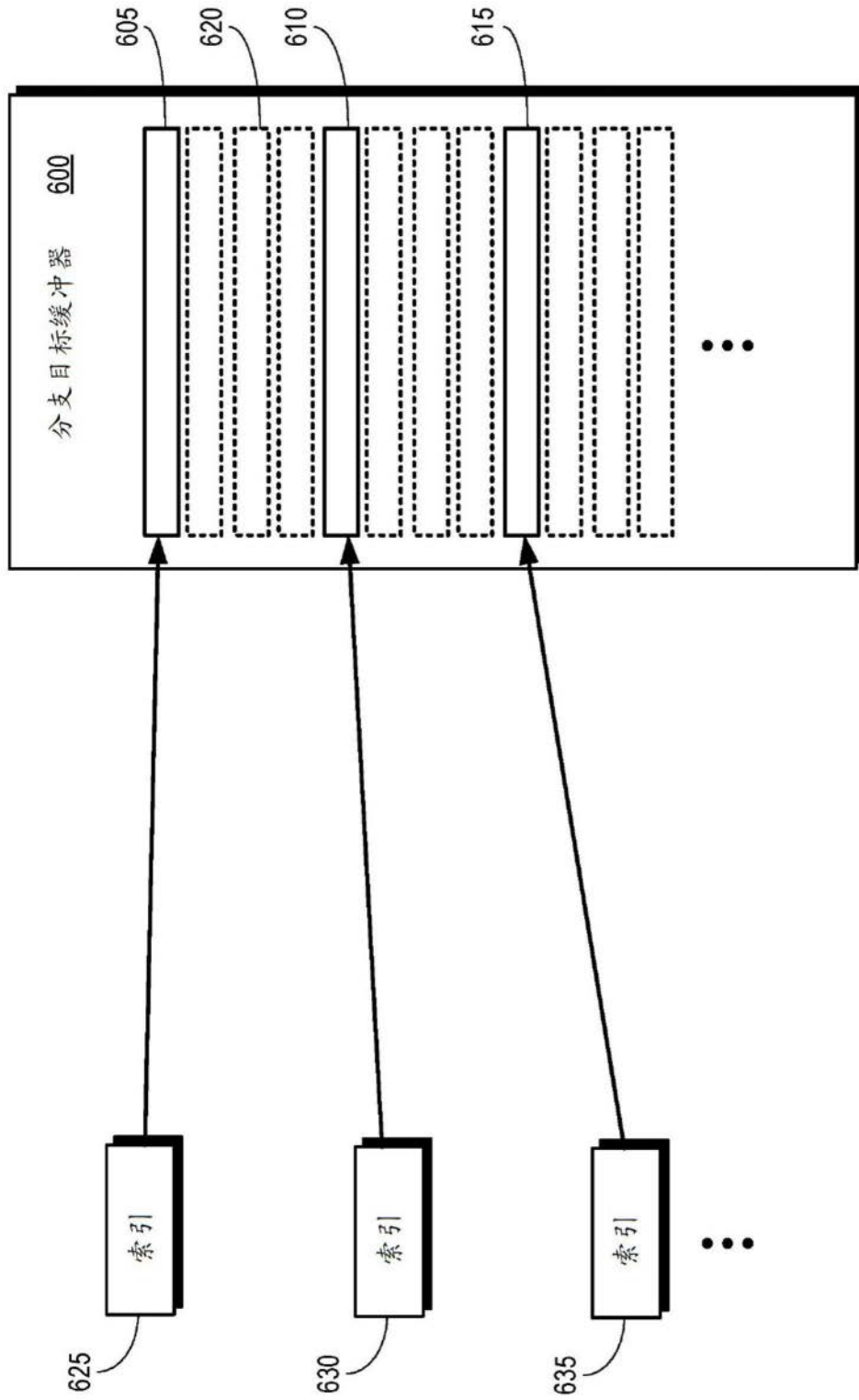


图6

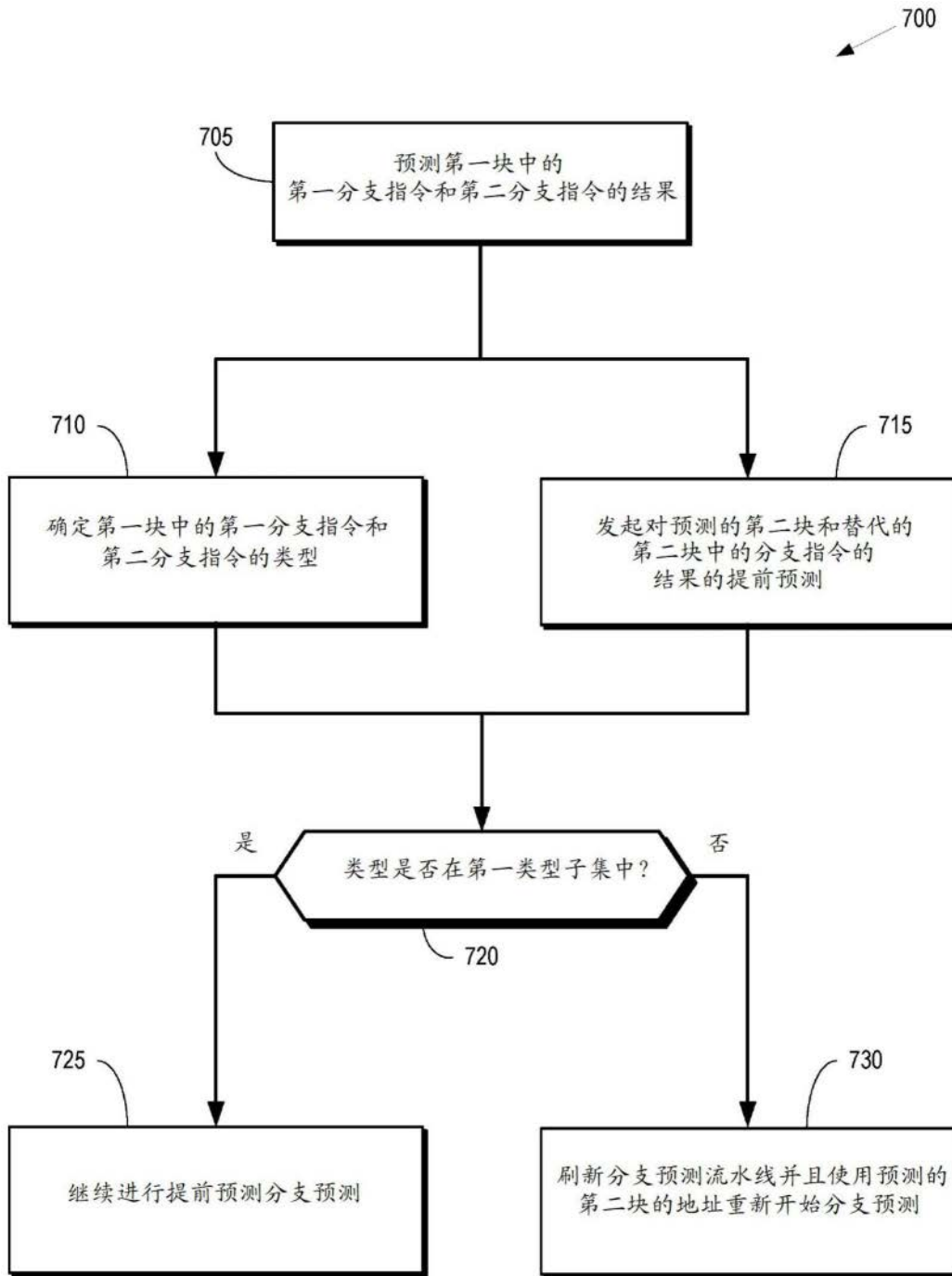


图7

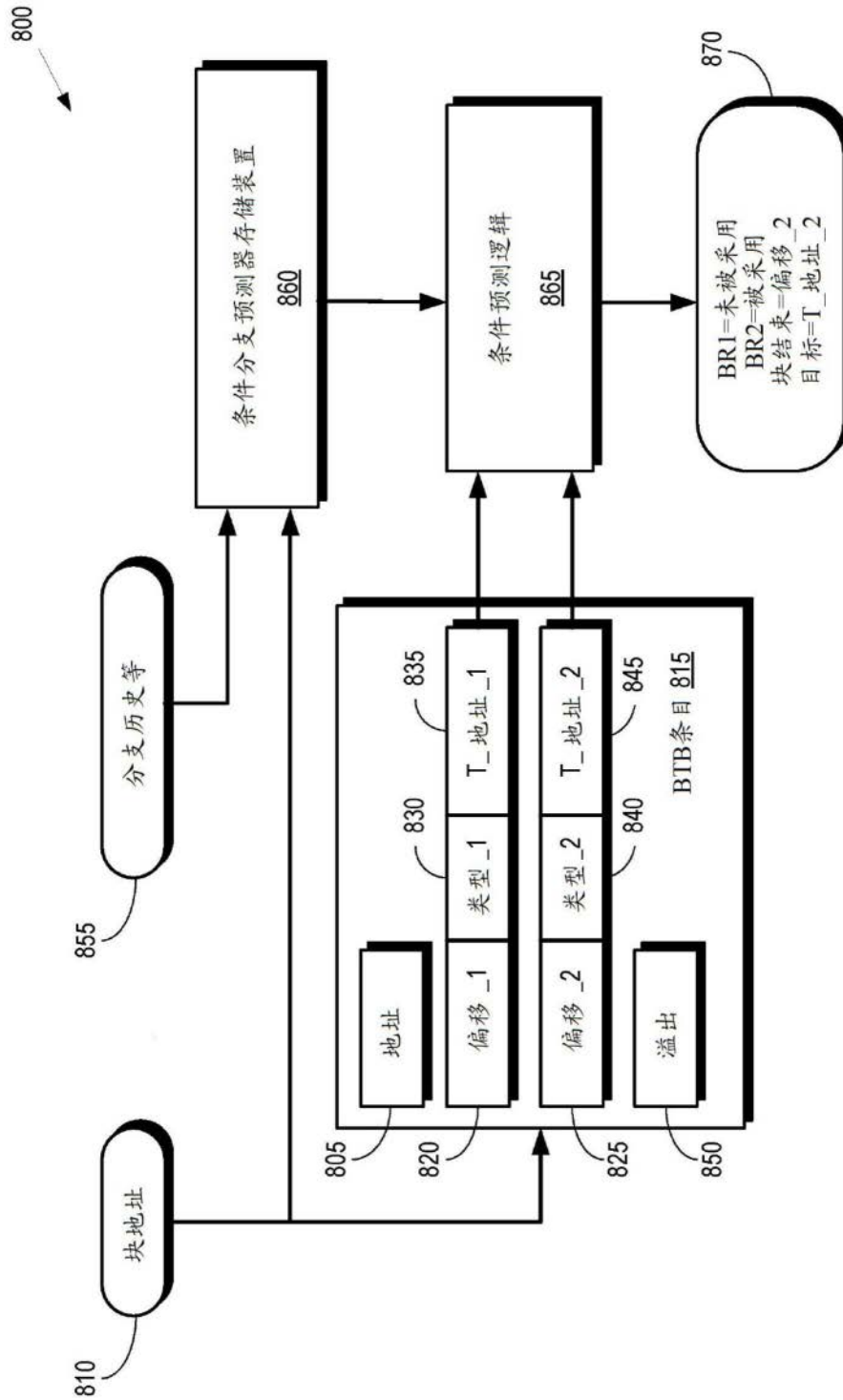


图8

900

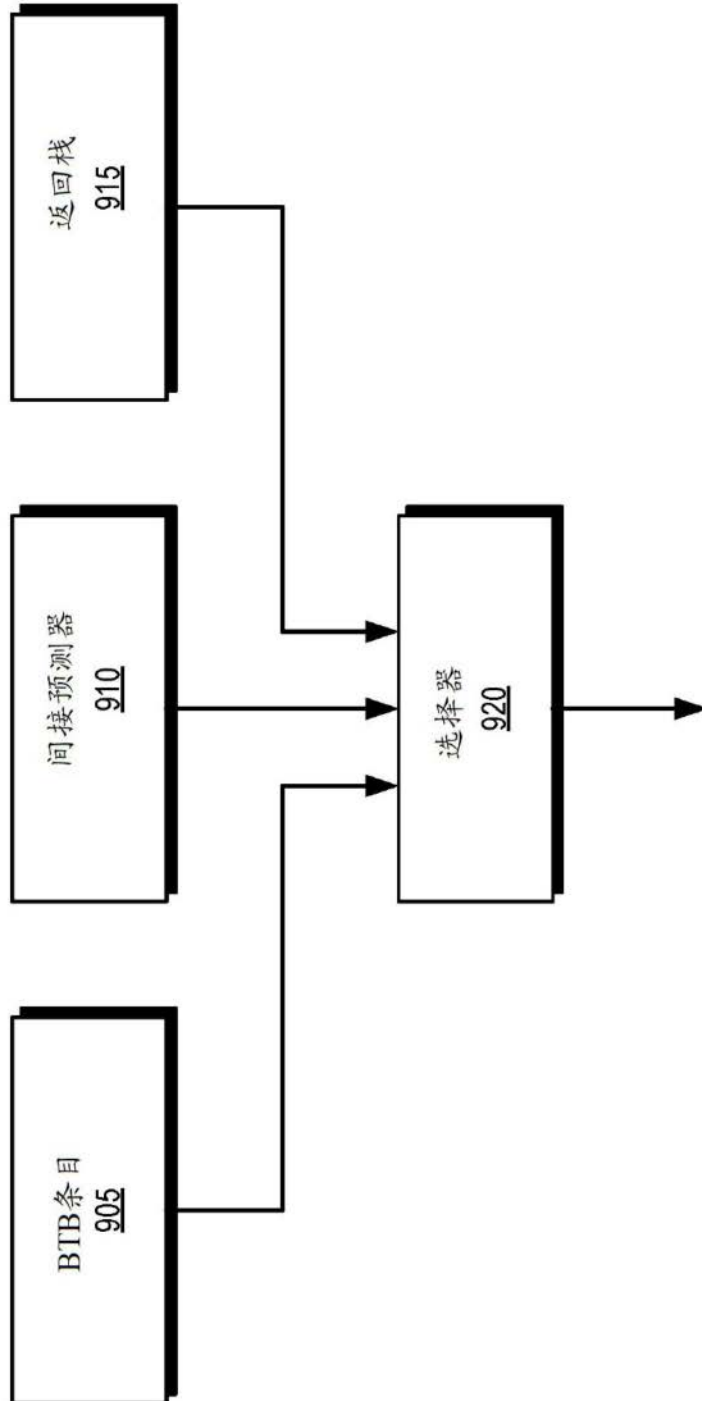


图9