

内存远程调用方法、网卡、电子设备以及存储介质

本申请要求于 2023 年 08 月 29 日提交中国专利局、申请号为 202311101531.5、申
5 请名称为“内存远程调用方法、网卡、电子设备以及存储介质”的中国专利申请的优先
权，其全部内容通过引用结合在本申请中。

技术领域

本申请涉及云计算技术领域，尤其涉及内存远程调用方法、网卡、电子设备以及
10 存储介质。

背景技术

内存是计算设备的重要部件，用于暂时存放处理器中的运算数据以及与硬盘等外
部存储器交换的数据，计算设备中所有程序的运行都在内存中进行，内存性能的强弱
影响着计算设备的性能，内存占用过多的情况下，计算设备容易出现卡顿和崩溃的问
15 题，影响相关服务的运行。

在单个计算设备内存有限的情况下，可以通过复用设备的内存提高内存的利用率，
但受限于单个计算设备现有的内存量，其使用上限依旧无法突破，因此，需要提供一
种新的内存调用机制。

20 发明内容

本申请实施例提供内存远程调用方法、网卡、电子设备以及存储介质，以解决上
述一个或多个技术问题。

第一方面，本申请提供了一种内存远程调用方法，应用于与多个计算设备连接的
中间设备，所述方法包括：获取来自于第一计算设备的内存访问请求，查找为所述第
25 一计算设备分配的来自于第二计算设备的借用内存的内存地址；访问所述借用内存的
内存地址，通过与所述借用内存对应的目标传输链路将所述内存访问请求转发给所述
第二计算设备；获取所述第二计算设备的借用内存针对所述内存访问请求的处理结果，
并将所述处理结果转发至所述第一计算设备。

第二方面，本申请提供了一种内存远程调用方法，应用于第一计算设备，所述方
30 法包括：向与多个计算设备连接的中间设备发送内存访问请求；接收所述中间设备转
发的针对所述内存访问请求的处理结果；其中，所述处理结果由第二计算设备的借用
内存针对所述内存访问请求处理获得，所述内存访问请求由所述中间设备访问所述借
用内存的内存地址，通过与所述借用内存对应的目标传输链路将所述内存访问请求转
发给所述第二计算设备，所述中间设备在获取到所述第一计算设备的内存访问请求后

查找为所述第一计算设备分配的来自于第二计算设备的借用内存的内存地址。

第三方面，本申请提供了一种网卡，所述网卡与多个计算设备连接，所述网卡包括：

内存访问请求获取模块，用于获取来自于第一计算设备的内存访问请求，查找为
5 所述第一计算设备分配的来自于第二计算设备的借用内存的内存地址；

地址访问模块，用于访问所述借用内存的内存地址，通过与所述借用内存对应的
目标传输链路将所述内存访问请求转发给所述第二计算设备；

结果获取模块，用于获取所述第二计算设备的借用内存针对所述内存访问请求的
处理结果，并将所述处理结果转发至所述第一计算设备。

10 第四方面，本申请提供了一种电子设备，包括存储器、处理器及存储在存储器上的
的计算机程序，所述处理器在执行所述计算机程序时实现上述任一项所述的方法。

第五方面，本申请提供了一种计算机可读存储介质，所述计算机可读存储介质内
存储有计算机程序，所述计算机程序被处理器执行时实现上述任一项所述的方法。

与相关技术相比，本申请具有如下优点：

15 本申请实施例基于与多个计算设备连接的中间设备实现多个计算设备之间的内存
调用机制，中间设备可以为第一计算设备的需求分配来自于第二计算设备的借用内存，
后续在中间设备获取到来自于第一计算设备的内存访问请求后，查找第二计算设备的
借用内存的内存地址，访问借用内存的内存地址，通过与借用内存对应的目标传输链
20 路将内存访问请求转发给第二计算设备，相应的，在获取到第二计算设备的借用内存
针对内存访问请求的处理结果后，将处理结果转发至第一计算设备，由此可见，依据
上述方案，在第一计算设备在需要调用内存的情况下，特别是在第一计算设备内存不
充足的情况下，可以从第二计算设备中为第一计算设备分配借用内存，并通过访问第
25 二计算设备的借用内存实现对第一计算设备的数据处理，通过计算设备之间内存的灵
活调配，提高了第一计算设备的处理能力，相当于增加了有借用内存需求的第一计算
设备可使用内存的上限，可以降低计算设备的内存成本。并且对提供借用内存的第二
计算设备的空闲内存进行了充分利用，提高了资源利用率，实现了设备资源的优化调
度。

上述说明仅是本申请技术方案的概述，为了能够更清楚了解本申请的技术手段，
可依照说明书的内容予以实施，并且为了让本申请的上述和其他目的、特征和优点能
30 够更明显易懂，以下特举本申请的具体实施方式。

附图说明

在附图中，除非另外规定，否则贯穿多个附图相同的附图标记表示相同或相似的
部件或元素。这些附图不一定是按照比例绘制的。应该理解，这些附图仅描绘了根据
35 本申请的一些实施方式，而不应将其视为是对本申请范围的限制。

图 1 示出了本申请实施例中提供的一种内存远程调用方案的一个应用示例的示意图；

图 2 示出了本申请实施例中提供的一种内存远程调用方法的流程图；

图 3 示出了本申请实施例中提供的另一种内存远程调用方法的流程图；

5 图 4 示出了本申请实施例中提供的一种内存远程调用装置的结构框图；

图 5 示出了本申请实施例中提供的另一种内存远程调用装置的结构框图；

图 6 示出了本申请实施例中提供的一种网卡的结构框图；以及

图 7 示出了用来实现本申请实施例的电子设备的框图。

10 具体实施方式

在下文中，仅简单地描述了某些示例性实施例。正如本领域技术人员可认识到的那样，在不脱离本申请的构思或范围的情况下，可通过各种不同方式修改所描述的实施例。因此，附图和描述被认为本质上是示例性的，而非限制性的。

为便于理解本申请实施例的技术方案，以下对本申请实施例的相关技术进行说明。

15 以下相关技术作为可选方案与本申请实施例的技术方案可以进行任意结合，其均属于本申请实施例的保护范围。

本申请实施例提供了一种远程调用内存的方案，其核心构思之一在于，部署可与多个计算设备通信连接的设备（称之为中间设备），通过中间设备管理各个计算设备的内存资源，以使得计算设备通过远程访问的方式跨计算设备调用空闲的内存资源，用以补充一些计算设备的内存不足，同时对其他计算设备的空闲内存进行充分利用。
20 图 1 是用于实现本申请实施例的批量操作处理方案的一个应用示例的示意图，在该应用示例中，中间设备可以是网卡，计算设备分别记为 CN（服务器）-1、CN-2 和 CN-3，网卡分别与各个计算设备通信连接，通过网卡 MOC 实现 MEM-HUB 功能，所谓 MEM-HUB 也即是将网卡作为各计算设备之间借用的管理端，通过计算设备分别与网
25 卡之间的通信实现跨设备调用内存资源的过程。

以 CN-1 向外借用内存为例，在当前内存不足或是缺少某种特定类型的内存时，可以从其他计算设备上借用内存。可以向网卡发送内存借用请求，网卡的管理接口从 CN-2 和 CN-3 中确定与内存借用请求匹配的内存，并向提供借用内存的计算设备转发内存借用请求，提供借用内存的计算设备将借出的内存标记为借用状态。参见图 1 中，
30 网卡针对具有通信连接的各计算设备分别在计算设备上模拟一个 PCI 设备，相当于是 在计算设备上配置与网卡通信的驱动，以此实现计算设备与网卡的通信，本申请实现的过程可以划分为分配借用内存的阶段以及访问借用内存的阶段，对应图 1 中准备路
径（示出了与 CN-2 的部分）和数据路径。

在分配借用内存的阶段，CN-1 与网卡通过分别包括的管理接口进行通信，对应图
35 1 中的准备路径，网卡根据 CN-1 的内存借用请求指示的内存大小和内存类型，从 CN-2

和 CN-3 分配借用内存，CN-2 的借用内存为高速内存，通过 RDMA（Remote Direct Memory Access，远程直接数据存取）传输链路（传输通道）进行访问，CN-3 的借用内存为低速内存或是普通内存，通过 DMA（Direct Memory Access，直接数据存取）传输链路进行访问。一种情况下，可以是基于 CN-1 需要调用不同类型的内存，所以
5 分别从 CN-2 和 CN-3 分别分配不同类型的内存，另一种情况下，也可以是基于 CN-1 需要的内存仅仅调用一个计算设备无法满足，需要从 CN-2 和 CN-3 分别借用一部分内存。为使得网卡能够获取到可借用内存的计算设备，各计算设备可以定期或是在空闲内存发生变化时，将内存状态同步到网卡侧，便于网卡根据各计算设备的内存使用情况确定可借用内存的计算设备。

- 10 网卡记录从 CN-2 和 CN-3 借用的内存对应的内存地址，并将该内存地址与 PCI 总线寄存器的物理地址建立映射关系，进一步通过 CN1 和网卡分别对应的管理接口形成的准备路径，将 PCI 总线寄存器的物理地址通知给 CN-1。该物理地址是使用 MMIO（Memory-Mapped I/O，内存映射输入输出）技术将 PCI 总线寄存器映射到 CN-1 中物理内存的地址。CN-1 将该 PCI 总线寄存器的物理地址转换为对应在虚拟机中的虚拟地址，
15 便于后续基于该虚拟地址发起对借用内存的访问。

- 基于 CN-1 上运行的虚拟机（VM）的处理任务产生内存访问的需求后，向网卡发送针对借用内存的访问请求，具体是通过访问 PCI 总线寄存器的虚拟地址（VM/APP 地址空间）发起的，CN-1 的内存管理模块（Memory Management Unit，MMU）将虚拟地址映射为对应的物理地址，从而可以基于该物理地址发起对 PCI 总线寄存器的访问，PCI 总线寄存器相当于 CN-1 和网卡之间的通信通道，通过访问 PCI 总线寄存器可以进一步将针对借用内存的内存访问请求经过模拟 PCI 设备转发给网卡。
20

- 网卡的地址编码转换模块从地址映射关系中查找 PCI 总线寄存器的物理地址对应的借用内存的内存地址，从而可以通过访问借用内存的内存地址将内存访问请求转发给提供借用内存的 CN-2 和 CN-3，其中，由于 CN-2 和 CN-3 对应的借用内存的类型不同，具体是通过 RDMA 传输链路将内存借用请求转发给 CN-2，通过 DMA 传输链路将内存借用请求转发给 CN-3。具体而言，RDMA 传输链路发出的数据经过网卡和 CN-2 分别对应的 RDMA NIC（网卡控制器）发送至 CN-2。CN-2 和 CN-3 通过借用内存对内存访问请求进行处理后获得处理结果，进一步将处理结果发送给网卡，由网卡转发给 CN-1。
25

- 30 CN-1 完成内存借用后，可以向网卡发送内存停用的请求，由网卡确定向 CN-1 提供借用内存的 CN-2 和 CN-3，并通知 CN-2 和 CN-3 停止对借用内存的借用，CN-2 和 CN-3 可以取消借用内存的标记。

- 依据上述示例可见，不同计算设备之间可以借用内存资源，在 CN-1 在需要调用内存的情况下，特别是在 CN-1 内存不充足的情况下，可以从 CN-2 中为 CN-1 分配借用内存，并通过访问 CN-2 的借用内存实现对 CN-1 的数据处理，通过计算设备之间内
35

存的灵活调配，提高了 CN-1 的处理能力，相当于增加了有借用内存需求的 CN-1 可使用内存的上限，可以降低 CN-1 的内存成本。并且对提供借用内存的 CN-2 的空闲内存进行了充分利用，提高了资源利用率，实现了设备资源的优化调度。在一次内存借用中，CN-2 向 CN-1 提供借用内存，在另一次内存借用中，也可以是 CN-1 向 CN-2 提供借用内存，从网卡的角度来看实现了设备之间的对称式调用。本申请实施例特别适用于冷数据的处理中，在计算设备进行数据处理时，可以将原有的内存资源分配给使用频率更高的热数据的处理，针对使用频率较低的冷数据，可以在内存资源不足的情况下，调用远程的借用内存完成数据的处理。

上述是对内存的远程调用过程的一个示例，在具体实现中，可以部署一个网卡，实现网卡与计算设备之间一对多的管理，也可以部署多个网卡，实现网卡与计算设备之间多对多的管理，当部署有多个网卡时，将计算设备的借用请求按照一定的规则或是随机分配到其中一个网卡上，由该网卡来实现对借用过程的管理。具体实现中，可以从一个或多个计算设备借用内存，借用的内存类型可以对应一种或多种，在一种可能的实现方式中，借用内存还可以来自于网卡中的内存资源，如图 1 中通过 Memory 通道通过内存管理调用 MOC DDR(Double Data Rate, 双倍速率同步动态随机存储器)的内存资源，本申请对上述各种情况并不做限制。

其中，计算设备具有基于内存进行运算的功能，可以是物理服务器也可以是智能终端等设备。物理服务器可以作为宿主机，其上可以部署有一个或多个虚拟机。智能终端可以是智能家居设备、智能设施（例如智能摄像头）、车载设备、可穿戴设备、用户手机、平板电脑笔记本电脑、超级移动个人计算机(Ultra Mobile Personal Computer, UMPC)、个人数字助理(Personal Digital Assistant, PDA)等设备。

实现计算设备之间内存调用管理的中间设备可以是网卡，也可以是其他设备或硬件，例如 DPU(Data Processing Unit, 面向以数据为中心的计算的新一代处理器)，也可以是 CIPU(Cloud Infrastructure Processing Unit, 云基础设施处理器)，或者其他硬件设备（如服务器或终端设备）或硬件芯片（如 CPU、GPU、FPGA、NPU 或 AI 加速卡），具体实施在何种主体之上，本申请并不作限制。一种实现方式中，中间设备可以是基于 PCI(Peripheral Component Interconnect, 外设部件互连)通信协议与其他设备通信的 PCI 设备，中间设备与计算设备之间基于 PCI 通信协议进行通信。在计算设备并非 PCI 设备的情况下，可以通过在计算设备上创建虚拟 PCI 设备，也即是在计算设备上配置计算设备与中间设备之间通信的驱动，实现中间设备与计算设备之间基于 PCI 通信协议的通信。

需要说明的是，本申请所涉及的各种数据，例如用户信息（包括但不限于用户设备信息、用户个人信息等）和处理的数据（包括但不限于用于分析的数据、存储的数据、展示的数据等），均为经用户授权或者经过各方充分授权的数据，并且相关数据的收集、使用和处理需要遵守相关国家和地区的相关法律法规和标准，并提供有相应

的操作入口，供用户选择授权或者拒绝。

下面以具体的实施例对本申请的技术方案以及本申请的技术方案如何解决前述技术问题进行详细说明。所列举的若干具体的实施例可以相互结合，对于相同或相似的概念或过程可能在某些实施例中不再赘述。以下将结合附图，对本申请的实施例进行详细描述。

本申请实施例提供了一种内存远程调用方法，应用于与多个计算设备连接的中间设备，如图2所示为本申请一实施例的内存远程调用方法200的流程图，该方法200可以包括：

在步骤S201中，获取来自于第一计算设备的内存访问请求，查找为所述第一计算设备分配的来自于第二计算设备的借用内存的内存地址。

第一计算设备预先向中间设备请求分配借用内存，中间设备在分配完借用内存后保存有借用内存的内存地址，在第一计算设备需要访问借用内存时，根据针对借用内存的访问请求，查找预先保存的借用内存的内存地址，以基于该内存地址进一步发起对借用内存的访问。其中，第二计算设备可以有一个或多个，也即是说，向第一计算设备提供的借用内存可以是来自于一个第二计算设备的借用内存，也可以是来自于不同计算设备的多个借用内存，如图1的示例，第二计算设备为CN-2和CN-3。在第二计算设备包括多个的情况下，借用内存的内存地址为各第二计算设备分别提供的借用内存的内存地址。

在步骤S202中，访问所述借用内存的内存地址，通过与所述借用内存对应的目标传输链路将所述内存访问请求转发给所述第二计算设备。

中间设备通过访问借用内存的内存地址，可以进一步将第一计算设备的内存访问请求转发给第二计算设备。中间设备对借用内存的访问是通过与借用内存对应的目标传输链路进行的。传输链路是设备之间的传输通道，对应标识了中间设备访问第二计算设备的借用内存的访问方式，一种示例中，传输链路包括DMA传输链路或是RDMA传输链路。

传统的I/O数据传输过程中，由于CPU参与数据的搬运过程，需要占用一定的CPU资源，针对需要大批量数据传输的场景，对CPU性能造成了比较大的影响，DMA是一种数据直接传输技术，通过在传输数据的两端建立DMA传输链路，将数据从一个地址空间复制到另一个地址空间。具体而言，通过DMA传输链路传输数据时，对DMA控制器发出请求，DMA控制器获取传输的数据存储到DMA传输链路中，DMA控制器的总线与总线矩阵进行协调，使用系统总线将传输的数据经过DMA传输链路存放到目的位置，相比于传统数据传输方式，提供了高速的数据传输性能，并且数据搬运的工作全部由DMA相关的控制模块实现，CPU仅指挥和控制网卡相关处理、中断的处理、报文的封装和解析等等，节省了很大部分的CPU资源的占用。RDMA作为远程直接存取技术，可以将数据从一个设备传输到另一台设备，专门为了解决设备

之间数据传输中的处理延迟问题，两端设备的 CPU 只参与控制面，几乎不用参与数据传输过程，传输过程中由网卡直接从内存的用户空间 DMA 拷贝数据到内部存储空间，然后硬件进行各层报文的组装后，通过物理链路发送到对端网卡。接收端的 RDMA 网卡收到数据后，剥离各层报文头和校验码，通过 DMA 将数据直接拷贝到用户空间内存中，同时做到了更高带宽和更低时延，搭配高速内存进行数据传输，可以大大提高数据传输效能。

在分配借用内存的阶段，第二计算设备在分配完借用内存之后，可以通过协议通信的方式与中间设备进行握手，用以提供内存访问访问的具体方法。以 RDMA 通信链路为例，在握手阶段需要将第二计算设备的 IP 地址和物理端口地址等信息提供给中间设备，以供后续通过 RDMA 通信链路传输数据时，基于握手时提供的信息完成数据传输。IP 地址和物理端口地址可以存储在上述地址映射关系中，便于在执行数据传输过程中直接依据 IP 地址和物理端口地址执行数据传输。以 DMA 通信链路为例，在握手阶段则是将 PCI 端口信息等信息提供给中间设备，相应的，也可以将 PCI 端口信息等信息提供给中间设备存储在上述的地址映射关系中。

借用内存与目标传输链路的对应关系可以根据具体需求配置，本申请对此并不进行限制。例如，根据借用内存的内存类型配置对应的传输链路。

在步骤 S203 中，获取所述第二计算设备的借用内存针对所述内存访问请求的处理结果，并将所述处理结果转发至所述第一计算设备。

第二计算设备调用借用内存处理中间设备转发的内存访问请求，处理结果会发送给中间设备，中间设备进一步将处理结果发送至第一计算设备。

由此可见，依据上述方案，在第一计算设备在需要调用内存的情况下，特别是在第一计算设备内存不充足的情况下，可以从第二计算设备中为第一计算设备分配借用内存，并通过访问第二计算设备的借用内存实现对第一计算设备的数据处理，通过计算设备之间内存的灵活调配，提高了第一计算设备的处理能力，相当于增加了有借用内存需求的第一计算设备可使用内存的上限，可以降低计算设备的内存成本。并且对提供借用内存的第二计算设备的空闲内存进行了充分利用，提高了资源利用率，实现了设备资源的优化调度。

在确定内存访问请求来自于第一计算设备之前，需要先为第一计算设备分配借用内存，第一计算设备基于需求可以向中间设备发出内存借用请求，中间设备获取第一计算设备发送的内存借用请求，并从至少一个其他计算设备中确定与内存借用请求匹配的第二计算设备，并向第二计算设备转发该内存借用请求。其中，内存借用请求可以携带所需的内存类型以及借用内存的大小，中间设备进一步根据内存类型和借用内存的大小确定从哪些计算设备借用内存。例如，内存类型为高速内存和低速内存，则将具有高速内存和低速内存的计算设备确定为第二计算设备，或是将分别具有高速内存和低速内存的计算设备均确定为第二计算设备，如图 1 中的 CN-2 和 CN-3；根据内存大

小确定某个计算设备可以满足需求，则确定为提供借用内存的第二计算设备，若一个计算设备不足以满足所需的内存大小，则可以从多个计算设备获取借用内存，将多个计算设备确定为第二计算设备。第二计算设备为根据第一计算设备的内存借用请求分配完借用内存后，可以将借用内存的内存地址通知给中间设备，以在内存访问阶段根据该内存地址访问对应的借用内存。

针对中间设备和计算设备均为 PCI 设备的情况，两个 PCI 设备之间可以基于 PCI 协议进行通信。在中间设备为 PCI 设备而计算设备并非 PCI 设备的情况下，一种可能的实现方式中，中间设备在计算设备上为各个计算设备模拟一个 PCI 设备，也即是部署驱动以使得计算设备以 PCI 设备的模式与中间设备进行通信，则第一计算设备可以通过访问 PCI 总线寄存器的方式来访问中间设备，相当于两个 PCI 设备之间的交互。PCI 设备之间的数据交换是通过访问 PCI 总线寄存器的物理地址完成，当 PCI 设备配置空间被初始化后，PCI 设备在当前的 PCI 总线树上有一个独立的保存在总线寄存器上的 PCI 总线地址空间，一种示例中，在 PCI 设备的配置空间中有 6 个寄存器，其中每个寄存器都与 PCI 设备使用的一组 PCI 总线寄存器的物理地址相对应，在计算设备上部署有多个虚拟机的情况下，每个虚拟机可以通过不同的 PCI 总线寄存器的物理地址实现与其他 PCI 设备的通信。

一种实现方式中，PCI 总线寄存器的物理地址是通过 MMIO 技术将 PCI 总线寄存器映射到 CN-1 中物理内存的地址，从而通过访问物理内存的物理地址实现对 PCI 总线寄存器的访问，相比于传统的访问寄存器的方式，具有访问速度快、灵活性高等优点。

本申请实施例中，在获取来自于第一计算设备的内存访问请求的过程中，中间设备获取的是第一计算设备通过访问 PCI 总线寄存器发起的内存访问请求，该内存访问请求携带 PCI 总线寄存器的物理地址，相应的，在查找为第一计算设备分配的来自于第二计算设备的借用内存的内存地址时，可以从在借用内存对应的地址映射关系中查找与内存访问请求携带的 PCI 总线寄存器的物理地址对应的借用内存的内存地址，进而可以依据借用内存的内存地址访问借用内存。

地址映射关系中保存有 PCI 总线寄存器的物理地址和借用内存的内存地址之间的映射关系，该对应关系可以在为第一计算设备分配第二计算设备的借用内存之后创建。具体而言，在分配借用内存的阶段，第一计算设备向中间设备发送的内存借用请求携带有 PCI 总线寄存器的物理地址，中间设备在获取到第二计算设备针对所述第一计算设备的内存借用请求分配的借用内存的内存地址之后，建立借用内存的内存地址与内存借用请求携带的 PCI 总线寄存器的物理地址的地址映射关系，以在访问借用内存的阶段，中间设备在获取到第一计算设备的内存借用请求携带的 PCI 总线寄存器的物理地址后，根据地址映射关系确定借用内存的内存地址。

在分配借用内存的阶段，建立地址映射关系后，还可以进一步向第一计算设备发

送借用成功的通知消息，该通知消息可以携带 PCI 总线寄存器的物理地址，以使第一计算设备获知针对该 PCI 总线寄存器发起的内存借用请求已成功分配借用内存，并且后续可以通过访问 PCI 总线寄存器的物理地址来访问中间设备，以进一步实现对借用内存的访问。

5 如下给出地址映射关系的一个示例：

第一计算设备 ID	总线寄存器的物理地址	第二计算设备 ID	借用内存的内存地址	内存类型
1	0 X 300000 - 0 X 700000	2	0 X 100000 - 0 X 500000	DMA
1	0 X 0 - 0 X 100000	3	0 X 800000 - 0 X 900000	RDMA
1	0 X 500000 - 0 X 600000	N/A	0 X 600000 - 0 X 700000	MOC MEM

表 1

该示例中，地址映射关系存储在数据表中，PCI 总线寄存器的物理地址和借用内存的内存地址均表示为地址范围的形式。通过查表的方式可以确定与 PCI 寄存器总线的物理地址对应的内存地址，例如表 1 中，ID 为 2 的第二计算设备中，地址范围为 0 x100000 - 0x500000 的内存地址对应 ID 为 1 的第一计算设备中 0x300000 - 0x700000 的寄存器总线的物理地址，若内存访问请求携带的是地址范围为 0x300000 - 0x700000 的寄存器总线的物理地址，则可以确定对应的内存地址的地址范围为 0x100000 - 0x500000。

15 PCI 总线寄存器的物理地址和借用内存的内存地址还进一步关联对应的计算设备的设备标识（例如设备 ID），也即是说，访问借用内存时，根据第一计算设备的 ID 以及总线寄存器的物理地址，从地址映射关系中查找对应的第二计算设备 ID 以及借用内存的内存地址，根据查找到的第二计算设备 ID 以及借用内存的内存地址即可执行对借用内存的访问。上表 1 中给出了第一计算设备 ID、总线寄存器的物理地址、第二计算设备 ID 以及借用内存的内存地址的对应关系。

20 在具体实现中，第一计算设备上可以部署有一个或多个虚拟机，在部署有多个虚拟机的情况下，基于不同虚拟机运行任务产生的内存借用请求以及内存访问请求，可以通过不同的 PCI 总线寄存器与中间设备进行交互，中间设备并不感知交互过程的发起源于哪个虚拟机，区别仅仅在于接收到的是基于不同 PCI 总线寄存器的物理地址发送内存借用请求以及内存访问请求。相应的，在建立地址映射关系时，由于 PCI 总线寄存器的物理地址与借用内存的内存地址具有对应关系，不同虚拟机对应的借用内存对应了不同的 PCI 总线寄存器。参考上表的第一列中第一计算设备 ID 均为编号 1 的计算设备，在最后一列中对应的总线寄存器的物理地址有三个，表示编号 1 的计算设备分别对应的三个虚拟机对应了三个不同的 PCI 总线寄存器，也即是说三个虚拟机分别通过不同的 PCI 总线寄存器与中间设备进行交互。上表仅为示例，在具体实现中，表

中可以包括有多个第一计算设备或第二计算设备,计算设备 ID 的具体形式和地址范围的表示形式可以根据实际需要选取,本申请并不作限制。

虚拟机与 PCI 总线寄存器的对应关系在分配借用内存的阶段确定,中间设备建立地址映射关系后向第一计算设备发送的借用成功的通知消息中可以携带 PCI 总线寄存器的物理地址,第一计算设备可以根据该 PCI 总线寄存器的物理地址建立虚拟机与 PCI 总线寄存器的对应关系。具体而言,为避免虚拟机直接访问物理地址带来的安全隐患,第一计算设备的虚拟机可以通过标准内存映射方式来访问 PCI 总线寄存器,也即是说,中间设备反馈的 PCI 总线寄存器的物理地址可以映射为虚拟机中的虚拟地址 (GPA, 也即是客户机物理地址) 后,提供该虚拟地址给虚拟机用于后续访问。由于物理地址对虚拟机不可见,可以向虚拟机隐藏底层的远程调用,上层处理上对整个内存远程调用的过程无需介入管理,从而可以避免各种数据安全问题。

一种可能的实现方式中,在访问借用内存的内存地址,通过与借用内存对应的目标传输链路将内存访问请求转发给第二计算设备时,可以先确定本次借用内存过程中使用的目标传输链路,具体而言,目标传输链路的类型依据借用内存的内存类型确定。如前述内容,内存类型可以分为高速内存、低速内存等,相应的,根据借用内存的类型配置对应的传输链路时,一种示例中,可以为高速内存分配较快的传输链路,低速内存或是普通内存则可以通过其他传输链路进行访问,例如,若借用内存为高速内存,则可以通过 RDMA 传输链路进行内存访问,若借用内存为低速内存或是普通内存,则可以通过 DMA 传输链路进行内存访问;另一种示例中,为了提高低速内存的访问速度,若借用内存为低速内存或是普通内存,则优先通过 RDMA 传输链路进行内存访问,针对高速内存配置为 DMA 传输链路进行内存访问。在确定目标传输链路后,可以通过访问借用内存的内存地址,使用所确定的目标传输链路将内存访问请求转发给第二计算设备。此处的 RDMA 和 DMA 仅为示例,还可以采用其他适用的传输链路,本申请对此并不作限制。借用内存的内存类型可以在分配完借用内存后保存在地址映射关系中,从而可以直接从内存映射关系中读取内存类型,根据内存类型确定对应的目标传输链路。如上表 1,在内存映射关系中记录了内存类型,可以通过内存访问请求携带的 PCI 总线寄存器的物理地址(还可以进一步结合第一计算设备的 ID)来确定借用内存的内存类型。

相应的,中间设备在获取到第二计算设备的借用内存针对内存访问请求的处理结果后,将处理结果转发至第一计算设备时,可以获取第二计算设备通过前述确定的目标传输链路返回的针对内存访问请求的处理结果,例如通过 RDMA 或 DMA 的方式传输至中间设备。中间设备再通过 PCI 总线寄存器将所述处理结果转发至第一计算设备。具体而言,中间设备通过物理地址访问第一计算设备的 PCI 总线寄存器时,PCI 总线控制器将处理结果转换为 PCI 协议数据包,然后通过 PCI 总线将 PCI 协议数据包形式的处理结果发送给使用借用内存的虚拟机。

结束内存借用后，第一计算设备可以向中间设备发送内存停用请求，中间设备在获取到来自于第一计算设备的内存停用请求后，可以查找为第一计算设备借用内存的第二计算设备，并通知第二计算设备停止对借用内存的借用，至此完成对借用内存的借用过程。其中，在为第一计算设备分配完借用内存之后，可以记录为第一计算设备提供借用内存的第二计算设备。一种可能的实现方式中，可以将第一计算设备和第二计算设备的对应关系记录在上述保存 PCI 总线寄存器的物理地址与内存地址的地址映射关系中。在第一计算设备上部署有多个虚拟机的情况下，第一计算设备上各个虚拟机对应的借用内存可能对应来源于不同的第二计算设备，可以结合内存停用请求发起时携带的 PCI 总线寄存器的物理地址以及第一计算设备的设备标识，确定对应的第二计算设备的设备标识，以通知第二计算设备停止对借用内存的借用。还可以进一步将借用内存的内存地址提供给第二计算设备，供第二计算设备根据内存地址停止对借用内存的借用。

在停止对借用内存的借用后，还可以在中间设备上记录的地址映射关系中，删除针对该借用内存对应的记录的数据。

15

本申请实施例还提供了一种内存远程调用方法，应用于上述的第一计算设备，如图 3 所示为本申请一实施例的内存远程调用方法 300 的流程图，该方法 300 可以包括：

在步骤 S301 中，向与多个计算设备连接的中间设备发送内存访问请求。

在步骤 S302 中，接收所述中间设备转发的针对所述内存访问请求的处理结果；其中，所述处理结果由第二计算设备的借用内存针对所述内存访问请求处理获得，所述内存访问请求由所述中间设备访问所述借用内存的内存地址，通过与所述借用内存对应的目标传输链路将所述内存访问请求转发给所述第二计算设备，所述中间设备在获取到所述第一计算设备的内存访问请求后查找为所述第一计算设备分配的来自于第二计算设备的借用内存的内存地址。

25

本实施例从第一计算设备的角度描述方案实施的过程，第一计算设备在需要访问借用内存时，向中间设备发送内存访问请求，中间设备将内存访问请求转发给提供借用内存的一个或多个第二计算设备。第二计算设备调用借用内存对内存访问请求进行处理，获得处理结果，该处理结果由中间设备转发给第一计算设备。部分内容可以参照上个实施例的描述，此处不再赘述。

30

第一计算设备在向与多个计算设备连接的中间设备发送内存访问请求的过程中，通过访问 PCI 总线寄存器将内存访问请求发送给所述中间设备，内存访问请求携带 PCI 总线寄存器的物理地址，以供所述中间设备在借用内存对应的地址映射关系中查找与内存访问请求携带的 PCI 总线寄存器的物理地址对应的借用内存的内存地址。

其中，内存访问请求可以是虚拟机基于处理任务产生，基于上个实施例的表述，通过访问 PCI 总线寄存器的物理地址发起对 PCI 总线寄存器的访问，进而将内存访问

35

请求发送给中间设备，内存访问请求携带 PCI 总线寄存器的物理地址，中间设备可以进一步在借用内存对应的地址映射关系中查找与内存访问请求携带的 PCI 总线寄存器的物理地址对应的借用内存的内存地址。

在本申请实施例一种可能的实现方式中，虚拟机可以通过标准内存映射方式来访问 PCI 总线寄存器，也即是说，内存映射机制将物理地址映射到虚拟地址，从而通过虚拟地址访问 PCI 总线寄存器。具体而言，虚拟机基于 PCI 总线寄存器在虚拟机中的虚拟地址发起内存访问请求，第一计算设备的内存管理单元可以将 PCI 总线寄存器在虚拟机中对应的虚拟地址映射为对应物理机中的物理地址，通过物理地址访问 PCI 总线寄存器。第一计算设备的 PCI 总线控制器 (Root Complex) 是系统 CPU 和 PCI 总线之间的接口，代表系统 CPU 与其他组件进行通信，PCI 总线控制器根据对 PCI 总线寄存器的访问，将内存访问请求转换为 PCI 协议数据包，通过 PCI 总线发送给中间设备，中间设备接收到 PCI 协议数据包形式的内存访问请求，确定来自于模拟的 PCI 设备，则根据内存访问请求执行下一步的借用内存的访问。通过将 PCI 总线寄存器的物理地址映射为虚拟地址提供给虚拟机进行访问，可以向虚拟机隐藏底层的远程调用，上层处理上对整个内存远程调用的过程无需介入管理，从而可以避免各种数据安全问题。

其中，标准内存映射的具体实现中可以通过 EPT (Extended Page Table, 扩展页表) 实现虚拟机视角的地址映射，或是通过 IOPT (I/O MMU Page Table, I/O 内存管理单元页表) 实现 PCI 设备的地址映射，或是通过 PT (Page Table, 页表) 实现 host 模式下的地址映射，还可以使用其他方式，本申请对此不作限制。

一种可能的实现方式中，在向与多个计算设备连接的中间设备发送内存访问请求之前，还可以获取中间设备在分配完借用内存后发送的 PCI 总线寄存器的物理地址，将物理地址转换为虚拟地址，并将所述虚拟地址与发起内存借用请求的虚拟机进行绑定，以使虚拟机可以通过虚拟地址通过访问 PCI 总线寄存器来发起内存访问请求。具体实现时，将 PCI 总线寄存器的虚拟地址与发起内存借用请求的虚拟机的绑定，可以是将 PCI 总线寄存器的虚拟地址的范围通过页表的方式直接映射到虚拟机的内存空间。

在执行对借用内存的访问过程之前，还需要通过中间设备向其他计算设备请求分配借用内存，因此，在上述向与多个计算设备连接的中间设备发送内存访问请求之前，还可以向中间设备发送内存借用请求，以通过中间设备从第二计算设备中分配与内存借用请求匹配的借用内存。

在确定不需要继续向其他计算设备调用已分配的借用内存的情况下，还可以向中间设备发送针对借用内存的内存停用请求，以使得中间设备通知第二计算设备停止对借用内存的借用。

在具体实现中，计算设备可以向中间设备上报内存使用状态，可以是定期或是在空闲内存发生变化时进行上报，以使得中间设备可以监测到计算设备的内存状态，进

而在需要请求借用内存时，确定向哪些计算设备转发内存借用请求。

上述实施例中，第一计算设备作为借用内存的需求方，经过中间设备向第二计算设备请求借用内存，在具体实现中，第一计算设备也可以作为借用内存的提供方，向别的计算设备提供自己空闲的内存资源，例如，第三计算设备在需要借用内存时，向中间设备发出内存借用请求，中间设备根据各计算设备的内存状态，确定第一计算设备可以作为借用内存的提供方，则可以向第一计算设备转发内存借用请求，第一计算设备接收到中间设备发送的第三计算设备的内存借用请求后，分配空闲内存并添加借用内存的标识。

进一步可以向中间设备返回借用内存的内存类型以及内存相关的参数。内存类型可以用于进一步确定内存借用的方式，也即是通过何种传输链路来访问借用内存，比如，内存类型为高速内存，则可以用 RDMA 传输链路进行内存访问。内存相关的参数为内存地址，例如，低速内存通过 DMA 传输链路提供内存访问，内存地址为内存的物理地址，高速内存通过 RDMA 传输链路提供内存访问，内存地址为设备端口号以及内存的物理地址。

15

与本发明实施例提供的方法实施例相对应地，本发明实施例还提供一种内存远程调用装置，应用于与多个计算设备连接的中间设备。如图 4 所示为本发明一实施例的内存远程调用装置 400 的结构框图，该装置 400 可以包括：

访问请求获取模块 401，用于获取来自于第一计算设备的内存访问请求；
20 内存地址查找模块 402，用于查找为所述第一计算设备分配的来自于第二计算设备的借用内存的内存地址；

访问请求转发模块 403，用于访问所述借用内存的内存地址，通过与所述借用内存对应的目标传输链路将所述内存访问请求转发给所述第二计算设备；

结果转发模块 404，用于获取所述第二计算设备的借用内存针对所述内存访问请求的处理结果，将所述处理结果转发至所述第一计算设备。

25 在一种可能的实现方式中，所述装置还包括：

借用请求获取模块，用于在所述获取来自于第一计算设备的内存访问请求之前，获取第一计算设备发送的内存借用请求，所述内存借用请求指示借用内存的大小以及借用内存的内存类型；

30 借用请求转发模块，用于从至少一个其他计算设备中确定与所述内存借用请求匹配的第二计算设备，并向所述第二计算设备转发所述内存借用请求；

内存地址获取模块，用于获取所述第二计算设备分配的借用内存的内存地址。

在一种可能的实现方式中，所述访问请求获取模块，具体用于获取所述第一计算设备通过访问 PCI 总线寄存器发起的内存访问请求，所述内存访问请求携带 PCI 总线寄存器的物理地址。相应的，所述内存地址查找模块，具体用于在借用内存对应的地

35

址映射关系中查找与所述内存访问请求携带的 PCI 总线寄存器的物理地址对应的借用内存的内存地址，所述地址映射关系由中间设备在分配借用内存之后创建。

在一种可能的实现方式中，所述装置还包括：

映射关系建立模块，用于在所述确定内存访问请求来自于第一计算设备之前，在
5 获取到第二计算设备针对所述第一计算设备的内存借用请求分配的借用内存的内存地址之后，建立所述借用内存的内存地址与所述 PCI 总线寄存器的物理地址的地址映射关系；

物理地址通知模块，用于将所述 PCI 总线寄存器的物理地址通知至所述第一计算设备。

10 在一种可能的实现方式中，所述访问请求转发模块包括：

传输链路确定子模块，用于确定本次借用内存过程中使用的目标传输链路，所述目标传输链路的类型依据所述借用内存的内存类型和/或所述内存访问请求对应的服务等级信息确定；

内存地址访问子模块，用于访问所述借用内存的内存地址，使用所确定的目标传
15 输链路将所述内存访问请求转发给所述第二计算设备。

在一种可能的实现方式中，所述结果转发模块，具体用于获取所述第二计算设备通过所述目标传输链路返回的针对所述内存访问请求的处理结果，通过 PCI 总线寄存器将所述处理结果转发至所述第一计算设备。

在一种可能的实现方式中，所述装置还包括：

20 停用请求获取模块，用于获取来自于所述第一计算设备的内存停用请求；

借用停止模块，用于查找为所述第一计算设备借用内存的第二计算设备，并通知所述第二计算设备停止对所述借用内存的借用。

本申请实施例基于与多个计算设备连接的中间设备实现多个计算设备之间的内存调用机制，中间设备可以为第一计算设备的需求分配来自于第二计算设备的借用内存，
25 后续在中间设备获取到来自于第一计算设备的内存访问请求后，查找第二计算设备的借用内存的内存地址，访问借用内存的内存地址，通过与借用内存对应的目标传输链路将内存访问请求转发给第二计算设备，相应的，在获取到第二计算设备的借用内存针对内存访问请求的处理结果后，将处理结果转发至第一计算设备，由此可见，依据上述方案，在第一计算设备在需要调用内存的情况下，特别是在第一计算设备内存不
30 充足的情况下，可以从第二计算设备中为第一计算设备分配借用内存，并通过访问第二计算设备的借用内存实现对第一计算设备的数据处理，通过计算设备之间内存的灵活调配，提高了第一计算设备的处理能力，相当于增加了有借用内存需求的第一计算设备可使用内存的上限，可以降低计算设备的内存成本。并且对提供借用内存的第二计算设备的空闲内存进行了充分利用，提高了资源利用率，实现了设备资源的优化调
35 度。

与本发明实施例提供的方法实施例相对应地，本发明实施例还提供一种内存远程调用装置，应用于第一计算设备。如图5所示为本申请一实施例的内存远程调用装置500的结构框图，该装置500可以包括：

5 访问请求发送模块501，用于向与多个计算设备连接的中间设备发送内存访问请求；

 处理结果接收模块502，用于接收所述中间设备转发的针对所述内存访问请求的处理结果；其中，所述处理结果由第二计算设备的借用内存针对所述内存访问请求处理获得，所述内存访问请求由所述中间设备访问所述借用内存的内存地址，通过所述借用内存对应的目标传输链路将所述内存访问请求转发给所述第二计算设备，所述中间设备在获取到所述第一计算设备的内存访问请求后查找为所述第一计算设备分配的来自于第二计算设备的借用内存的内存地址。

10

 一种可能的实现方式中，所述访问请求发送模块，具体用于通过访问PCI总线寄存器将所述内存访问请求发送给所述中间设备，所述内存访问请求携带PCI总线寄存器的物理地址，以供所述中间设备在借用内存对应的地址映射关系中查找与所述内存访问请求携带的PCI总线寄存器的物理地址对应的借用内存的内存地址。

15

 一种可能的实现方式中，所述访问请求发送模块包括：

 访问请求发起子模块，用于基于所述PCI总线寄存器在虚拟机中的虚拟地址发起内存访问请求；

20

 地址转换子模块，用于将所述PCI总线寄存器的虚拟地址转换为在计算设备中的物理地址；

 请求发送子模块，用于通过所述物理地址访问所述PCI总线寄存器，将所述内存访问请求发送给所述中间设备。

 一种可能的实现方式中，所述装置还包括：

25 地址处理模块，用于在所述向与多个计算设备连接的中间设备发送内存访问请求之前，获取所述中间设备在分配完所述借用内存后发送的PCI总线寄存器的物理地址，将所述物理地址转换为虚拟地址，并将所述虚拟地址与发起内存借用请求的虚拟机进行绑定，以使所述虚拟机通过所述虚拟地址访问所述PCI总线寄存器来发起所述内存访问请求。

30 一种可能的实现方式中，所述装置还包括：

 借用请求发送模块，用于在所述向与多个计算设备连接的中间设备发送内存访问请求之前，向所述中间设备发送内存借用请求，以通过所述中间设备从所述第二计算设备中分配与所述内存借用请求匹配的借用内存。

 一种可能的实现方式中，所述装置还包括：

35 停用请求发送模块，用于向所述中间设备发送针对所述借用内存的内存停用请求，

以使得所述中间设备通知所述第二计算设备停止对所述借用内存的借用。

一种可能的实现方式中，所述装置还包括：

状态上报模块，用于向所述中间设备上报内存使用状态；

请求接收模块，用于接收所述中间设备发送的第三计算设备的内存借用请求；

5 内存标记模块，用于从所述第一计算设备中分配空闲内存并添加借用内存的标识。

本申请实施例基于与多个计算设备连接的中间设备实现多个计算设备之间的内存调用机制，中间设备可以为第一计算设备的需求分配来自于第二计算设备的借用内存，后续在中间设备获取到来自于第一计算设备的内存访问请求后，查找第二计算设备的借用内存的内存地址，访问借用内存的内存地址，通过与借用内存对应的目标传输链路将内存访问请求转发给第二计算设备，相应的，在获取到第二计算设备的借用内存针对内存访问请求的处理结果后，将处理结果转发至第一计算设备，由此可见，依据上述方案，在第一计算设备在需要调用内存的情况下，特别是在第一计算设备内存不充足的情况下，可以从第二计算设备中为第一计算设备分配借用内存，并通过访问第二计算设备的借用内存实现对第一计算设备的数据处理，通过计算设备之间内存的灵活调配，提高了第一计算设备的处理能力，相当于增加了有借用内存需求的第一计算设备可使用内存的上限，可以降低计算设备的内存成本。并且对提供借用内存的第二计算设备的空闲内存进行了充分利用，提高了资源利用率，实现了设备资源的优化调

10 度。

20 与本申请实施例提供的方法实施例和装置实施例相对应地，本申请实施例还提供一种网卡，该网卡与多个计算设备连接。如图6所示为本申请一实施例的网卡600的结构框图，该网卡600可以包括：

内存访问请求获取模块601，用于获取来自于第一计算设备的内存访问请求，查找为所述第一计算设备分配的来自于第二计算设备的借用内存的内存地址；

25 地址访问模块602，用于访问所述借用内存的内存地址，通过与所述借用内存对应的目标传输链路将所述内存访问请求转发给所述第二计算设备；

结果获取模块603，用于获取所述第二计算设备的借用内存针对所述内存访问请求的处理结果，并将所述处理结果转发至所述第一计算设备。

本申请实施例基于与多个计算设备连接的中间设备实现多个计算设备之间的内存调用机制，中间设备可以为第一计算设备的需求分配来自于第二计算设备的借用内存，后续在中间设备获取到来自于第一计算设备的内存访问请求后，查找第二计算设备的借用内存的内存地址，访问借用内存的内存地址，通过与借用内存对应的目标传输链路将内存访问请求转发给第二计算设备，相应的，在获取到第二计算设备的借用内存针对内存访问请求的处理结果后，将处理结果转发至第一计算设备，由此可见，依据上述方案，在第一计算设备在需要调用内存的情况下，特别是在第一计算设备内存不

30

35

充足的情况下，可以从第二计算设备中为第一计算设备分配借用内存，并通过访问第二计算设备的借用内存实现对第一计算设备的数据处理，通过计算设备之间内存的灵活调配，提高了第一计算设备的处理能力，相当于增加了有借用内存需求的第一计算设备可使用内存的上限，可以降低计算设备的内存成本。并且对提供借用内存的第二计算设备的空闲内存进行了充分利用，提高了资源利用率，实现了设备资源的优化调度。

本申请实施例各装置中的各模块的功能可以参见上述方法中的对应描述，并具备相应的有益效果，在此不再赘述。

10 图 7 为用来实现本申请实施例的电子设备的框图。如图 7 所示，该电子设备包括：存储器 701 和处理器 702，存储器 701 内存储有可在处理器 702 上运行的计算机程序。处理器 702 执行该计算机程序时实现上述实施例中的方法。存储器 701 和处理器 702 的数量可以为一个或多个。

该电子设备还包括：

15 通信接口 703，用于与外界设备进行通信，进行数据交互传输。

如果存储器 701、处理器 702 和通信接口 703 独立实现，则存储器 701、处理器 702 和通信接口 703 可以通过总线相互连接并完成相互间的通信。该总线可以是工业标准体系结构（Industry Standard Architecture，ISA）总线、外部设备互连（Peripheral Component Interconnect，PCI）总线或扩展工业标准体系结构（Extended Industry Standard Architecture，EISA）总线等。该总线可以分为地址总线、数据总线、控制总线等。为便于表示，图 7 中仅用一条粗线表示，但并不表示仅有一根总线或一种类型的总线。

25 可选的，在具体实现上，如果存储器 701、处理器 702 及通信接口 703 集成在一块芯片上，则存储器 701、处理器 702 及通信接口 703 可以通过内部接口完成相互间的通信。

本申请实施例提供了一种计算机可读存储介质，其存储有计算机程序，该程序被处理器执行时实现本申请实施例中提供的方法。

本申请实施例还提供一种计算机程序产品，其包括计算机程序，该计算机程序在被处理器执行时实现本申请任一实施例中提供的方法。

30 本申请实施例还提供了一种芯片，该芯片包括处理器，用于从存储器中调用并运行存储器中存储的指令，使得安装有芯片的通信设备执行本申请实施例提供的方法。

本申请实施例还提供了一种芯片，包括：输入接口、输出接口、处理器和存储器，输入接口、输出接口、处理器以及存储器之间通过内部连接通路相连，处理器用于执行存储器中的代码，当代码被执行时，处理器用于执行本申请实施例提供的方法。

35 应理解的是，上述处理器可以是中央处理器（Central Processing Unit，CPU），还

可以是其他通用处理器、数字信号处理器 (Digital Signal Processor, DSP)、专用集成电路 (Application Specific Integrated Circuit, ASIC)、现场可编程门阵列 (Field Programmable Gate Array, FPGA) 或者其他可编程逻辑器件、分立门或者晶体管逻辑器件、分立硬件组件等。通用处理器可以是微处理器或者是任何常规的处理器等。值得说明的是, 处理器可以是支持进阶精简指令集机器 (Advanced RISC Machines, ARM) 架构的处理器。

进一步地, 可选的, 上述存储器可以包括只读存储器和随机访问存储器。该存储器可以是易失性存储器或非易失性存储器, 或可包括易失性和非易失性存储器两者。其中, 非易失性存储器可以包括只读存储器 (Read-Only Memory, ROM)、可编程只读存储器 (Programmable ROM, PROM)、可擦除可编程只读存储器 (Erasable PROM, EPROM)、电可擦除可编程只读存储器 (Electrically EPROM, EEPROM) 或闪存。易失性存储器可以包括随机访问存储器 (Random Access Memory, RAM), 其用作外部高速缓存。通过示例性但不是限制性说明, 许多形式的 RAM 均可用。例如, 静态随机访问存储器 (Static RAM, SRAM)、动态随机访问存储器 (Dynamic Random Access Memory, DRAM)、同步动态随机访问存储器 (Synchronous DRAM, SDRAM)、双倍数据速率同步动态随机访问存储器 (Double Data Rate SDRAM, DDR SDRAM)、增强型同步动态随机访问存储器 (Enhanced SDRAM, ESDRAM)、同步链接动态随机访问存储器 (Sync link DRAM, SLDRAM) 和直接内存总线随机访问存储器 (Direct Rambus RAM, DR RAM)。

在上述实施例中, 可以全部或部分地通过软件、硬件、固件或者其任意组合来实现。当使用软件实现时, 可以全部或部分地以计算机程序产品的形式实现。计算机程序产品包括一个或多个计算机指令。在计算机上加载和执行计算机程序指令时, 全部或部分地产生依照本申请的流程或功能。计算机可以是通用计算机、专用计算机、计算机网络、或者其他可编程装置。计算机指令可以存储在计算机可读存储介质中, 或者从一个计算机可读存储介质向另一个计算机可读存储介质传输。

在本说明书的描述中, 参考术语“一个实施例”、“一些实施例”、“示例”、“具体示例”、或“一些示例”等的描述意指结合该实施例或示例描述的具体特征、结构、材料或者特点包括于本申请的至少一个实施例或示例中。而且, 描述的具体特征、结构、材料或者特点可以在任一个或多个实施例或示例中以合适的方式结合。此外, 在不相互矛盾的情况下, 本领域的技术人员可以将本说明书中描述的不同实施例或示例以及不同实施例或示例的特征进行结合和组合。

此外, 术语“第一”、“第二”仅用于描述目的, 而不能理解为指示或暗示相对重要性或者隐含指明所指示的技术特征的数量。由此, 限定有“第一”、“第二”的特征可以明示或隐含地包括至少一个该特征。在本申请的描述中, “多个”的含义是两个或两个以上, 除非另有明确具体的限定。

流程图中描述的或在此以其他方式描述的任何过程或方法可以被理解为，表示包括一个或更多个用于实现特定逻辑功能或过程的步骤的可执行指令的代码的模块、片段或部分。并且本申请的优选实施方式的范围包括另外的实现，其中可以不按所示出或讨论的顺序，包括根据所涉及的功能按基本同时的方式或按相反的顺序，来执行功能。

在流程图中描述的或在此以其他方式描述的逻辑和/或步骤，例如，可以被认为用于实现逻辑功能的可执行指令的定序列表，可以具体实现在任何计算机可读介质中，以供指令执行系统、装置或设备（如基于计算机的系统、包括处理器的系统或其他可以从指令执行系统、装置或设备取指令并执行指令的系统）使用，或结合这些指令执行系统、装置或设备而使用。

应理解的是，本申请各部分可以用硬件、软件、固件或它们的组合来实现。在上述实施方式中，多个步骤或方法可以用存储在存储器中且由合适的指令执行系统执行的软件或固件来实现。上述实施例方法的全部或部分步骤是可以通程序来指令相关的硬件完成，该程序可以存储于一种计算机可读存储介质中，该程序在执行时，包括方法实施例的步骤之一或其组合。

此外，在本申请各个实施例中的各功能单元可以集成在一个处理模块中，也可以是各个单元单独物理存在，也可以两个或两个以上单元集成在一个模块中。上述集成的模块既可以采用硬件的形式实现，也可以采用软件功能模块的形式实现。上述集成的模块如果以软件功能模块的形式实现并作为独立的产品销售或使用，也可以存储在一个计算机可读存储介质中。该存储介质可以是只读存储器，磁盘或光盘等。

以上所述，仅为本申请的示例性实施方式，但本申请的保护范围并不局限于此，任何熟悉本技术领域的技术人员在本申请记载的技术范围内，可轻易想到其各种变化或替换，这些都应涵盖在本申请的保护范围之内。因此，本申请的保护范围应以权利要求的保护范围为准。

权 利 要 求 书

1. 一种内存远程调用方法，应用于与多个计算设备连接的中间设备，所述方法包括：

5 获取来自于第一计算设备的内存访问请求，查找为所述第一计算设备分配的来自于第二计算设备的借用内存的内存地址；

访问所述借用内存的内存地址，通过与所述借用内存对应的目标传输链路将所述内存访问请求转发给所述第二计算设备；

获取所述第二计算设备的借用内存针对所述内存访问请求的处理结果，并将所述处理结果转发至所述第一计算设备。

10 2. 根据权利要求1所述的方法，其中，在所述获取来自于第一计算设备的内存访问请求之前，所述方法还包括：

获取第一计算设备发送的内存借用请求，所述内存借用请求指示借用内存的大小以及借用内存的内存类型；

15 从至少一个其他计算设备中确定与所述内存借用请求匹配的第二计算设备，并向所述第二计算设备转发所述内存借用请求；

获取所述第二计算设备分配的借用内存的内存地址。

3. 根据权利要求1所述的方法，其中，所述获取来自于第一计算设备的内存访问请求包括：

20 获取所述第一计算设备通过访问PCI总线寄存器发起的内存访问请求，所述内存访问请求携带PCI总线寄存器的物理地址；

所述查找为所述第一计算设备分配的来自于第二计算设备的借用内存的内存地址包括：

25 在借用内存对应的地址映射关系中查找与所述内存访问请求携带的PCI总线寄存器的物理地址对应的借用内存的内存地址，所述地址映射关系由中间设备在分配借用内存之后创建。

4. 根据权利要求3所述的方法，其中，在所述获取来自于第一计算设备的内存访问请求之前，所述方法还包括：

30 在获取到第二计算设备针对所述第一计算设备的内存借用请求分配的借用内存的内存地址之后，建立所述借用内存的内存地址与所述PCI总线寄存器的物理地址的地址映射关系；

将所述PCI总线寄存器的物理地址通知至所述第一计算设备。

5. 根据权利要求1所述的方法，其中，所述访问所述借用内存的内存地址，通过与所述借用内存对应的目标传输链路将所述内存访问请求转发给所述第二计算设备包括：

确定本次借用内存过程中使用的目标传输链路，所述目标传输链路的类型依据所述借用内存的内存类型确定；

访问所述借用内存的内存地址，使用所确定的目标传输链路将所述内存访问请求转发给所述第二计算设备。

- 5 6. 根据权利要求1所述的方法，其中，所述获取所述第二计算设备的借用内存针对所述内存访问请求的处理结果，并将所述处理结果转发至所述第一计算设备包括：

获取所述第二计算设备通过所述目标传输链路返回的针对所述内存访问请求的处理结果，通过PCI总线寄存器将所述处理结果转发至所述第一计算设备。

7. 根据权利要求1所述的方法，其中，所述方法还包括：

- 10 获取来自于所述第一计算设备的内存停用请求；

查找为所述第一计算设备借用内存的第二计算设备，并通知所述第二计算设备停止对所述借用内存的借用。

8. 一种内存远程调用方法，应用于第一计算设备，所述方法包括：

- 15 向与多个计算设备连接的中间设备发送内存访问请求；

接收所述中间设备转发的针对所述内存访问请求的处理结果；其中，所述处理结果由第二计算设备的借用内存针对所述内存访问请求处理获得，所述内存访问请求由所述中间设备访问所述借用内存的内存地址，通过与所述借用内存对应的目标传输链路将所述内存访问请求转发给所述第二计算设备，所述中间设备在获取到所述第一计算设备的内存访问请求后查找为所述第一计算设备分配的来自于第二计算设备的借用内存的内存地址。

20

9. 根据权利要求8所述的方法，其中，所述向与多个计算设备连接的中间设备发送内存访问请求包括：

- 25 通过访问PCI总线寄存器将所述内存访问请求发送给所述中间设备，所述内存访问请求携带PCI总线寄存器的物理地址，以供所述中间设备在借用内存对应的地址映射关系中查找与所述内存访问请求携带的PCI总线寄存器的物理地址对应的借用内存的内存地址。

10. 根据权利要求9所述的方法，其中，所述通过访问PCI总线寄存器将所述内存访问请求发送给所述中间设备包括：

- 30 基于所述PCI总线寄存器在虚拟机中的虚拟地址发起内存访问请求；

将所述PCI总线寄存器的虚拟地址转换为在计算设备中的物理地址，通过所述物理地址访问所述PCI总线寄存器，将所述内存访问请求发送给所述中间设备。

11. 根据权利要求10所述的方法，其中，在所述向与多个计算设备连接的中间设备发送内存访问请求之前，所述方法还包括：

- 35 在所述中间设备在分配完所述借用内存后，将所述物理地址转换为虚拟地址，并

将所述虚拟地址与发起内存借用请求的虚拟机进行绑定，以使所述虚拟机通过所述虚拟地址访问所述 PCI 总线寄存器来发起所述内存访问请求。

12. 一种网卡，所述网卡与多个计算设备连接，所述网卡包括：
- 5 内存访问请求获取模块，用于获取来自于第一计算设备的内存访问请求，查找为所述第一计算设备分配的来自于第二计算设备的借用内存的内存地址；
- 地址访问模块，用于访问所述借用内存的内存地址，通过与所述借用内存对应的目标传输链路将所述内存访问请求转发给所述第二计算设备；
- 结果获取模块，用于获取所述第二计算设备的借用内存针对所述内存访问请求的
- 10 处理结果，并将所述处理结果转发至所述第一计算设备。
13. 一种电子设备，包括存储器、处理器及存储在存储器上的计算机程序，所述处理器在执行所述计算机程序时实现权利要求 1-11 中任一项所述的方法。
14. 一种计算机可读存储介质，所述计算机可读存储介质内存储有计算机程序，所述计算机程序被处理器执行时实现权利要求 1-11 中任一项所述的方法。