



250014

山东省济南市历下区经十路 17703 号华特广场 B510 室 济南圣达知  
识产权代理有限公司  
王雪(0531-68605722)

发文日:

2025 年 10 月 24 日



申请号: 202511532757.X

发文序号: 2025102401742030

## 专 利 申 请 受 理 通 知 书

根据专利法第 28 条及其实施细则第 43 条、第 44 条的规定,申请人提出的专利申请已由国家知识产权局受理。现将确定的申请号、申请日等信息通知如下:

申请号: 202511532757X

申请日: 2025 年 10 月 24 日

申请人: 山东省计算中心(国家超级计算济南中心),齐鲁工业大学(山东省科学院)

发明人: 谭立状,褚夫明,吴胜,董鑫,史慧玲,张玮

发明创造名称: 面向 FPGA 网卡的虚拟网络资源共享方法及系统

经核实,国家知识产权局确认收到文件如下:

权利要求书 1 份 3 页,权利要求项数: 10 项

说明书 1 份 14 页

说明书附图 1 份 3 页

说明书摘要 1 份 1 页

发明专利请求书 1 份 5 页

实质审查请求书 文件份数: 1 份

申请方案卷号: 2025701268

提示:

1. 申请人收到专利申请受理通知书之后,认为其记载的内容与申请人所提交的相应内容不一致时,可以向国家知识产权局请求更正。

2. 申请人收到专利申请受理通知书之后,再向国家知识产权局办理各种手续时,均应当准确、清晰地写明申请号。

审 查 员: 自动受理

联系电话: 010-62356655

审查部门: 初审及流程管理部



1. 面向 FPGA 网卡的虚拟网络资源共享方法，其特征在于，包括：

将 FPGA 网卡资源虚拟化得到私有租户资源区和共享资源区，根据不同的多个租户预先将私有租户资源区划分为多个 vFPGA；

接收租户的数据包进行解析，确定租户请求的网络功能以及对应的 vFPGA，并将数据包转发至对应的 vFPGA；

基于租户请求的网络功能，判断所述 vFPGA 是否支持处理当前网络功能；如果不支持，则判断共享资源区是否支持处理当前网络功能，若不支持，则根据共享资源区的空闲情况重新配置对应的网络功能模块；

当租户的数据包请求的网络功能处理完成后，回收对应的 vFPGA 资源，并更新功能映射表；对共享资源区的资源进行动态调整分配，并根据已加载的网络功能的使用情况确定未加载的候选网络功能中最优可替换网络功能，将最优可替换网络功能代替已加载的网络功能以实现最优预加载。

2. 如权利要求 1 所述的面向 FPGA 网卡的虚拟网络资源共享方法，其特征在于，所述接收租户的数据包进行解析，确定租户请求的网络功能以及对应的 vFPGA，并将数据包转发至对应的 vFPGA，包括：

接收租户的数据包进行解析，得到租户标识符和功能标识符；

通过租户标识符确定租户对应的 vFPGA，通过功能标识符确定租户请求的网络功能；

将数据包转发至租户对应的 vFPGA。

3. 如权利要求 1 所述的面向 FPGA 网卡的虚拟网络资源共享方法，其特征在于，所述基于租户请求的网络功能，判断所述 vFPGA 是否支持处理当前网络功能；如果不支持，则判断共享资源区是否支持处理当前网络功能，若不支持，则根据共享资源区的空闲情况重新配置对应的网络功能模块，包括：

基于租户请求的网络功能，判断所述 vFPGA 是否支持处理当前网络功能，如果支持，则直接处理当前租户请求的网络功能并转发数据包；

如果不支持，则基于功能映射表确定共享资源区是否支持处理当前网络功能，若功能映射表中存在所述网络功能映射条目且已加载，则由 vFPGA 调用共享资源区中对应的网络功能模块处理当前租户请求的网络功能，并转发数据包；

若功能映射表中不存在所述网络功能映射条目，则如果共享资源区当前存在空闲虚拟资源块，重新配置对应的网络功能模块到共享资源区，并更新功能表；

如果共享资源区当前不存在空闲虚拟资源块，则等待共享资源区空闲后再进行重新配置。

4. 如权利要求 3 所述的面向 FPGA 网卡的虚拟网络资源共享方法，其特征在于，如果共享资源区当前存在空闲虚拟资源块，重新配置对应的网络功能模块到共享资源区，并更新功能表，包括：

周期性获取每个租户的活跃度、网络负载和资源使用饱和度；

依据网络负载，计算对应的负载调节项；

基于租户活跃度、资源使用饱和度以及负载调节项，计算得到每个租户的综合调度评分；

计算所有租户综合调度评分的绝对值之和得到总评分，根据各租户的综合调度评分和总评分确定每个租户的分配资源面积；

在每个租户的分配资源面积中重新配置对应的网络功能模块以处理当前租户请求的网络功能，并更新功能表。

5. 如权利要求 1 所述的面向 FPGA 网卡的虚拟网络资源共享方法，其特征在于，对共享资源区的资源进行动态调整分配，包括：

若 vFPGA 的当前资源使用信息超过资源使用阈值时，则自动申请共享资源区的空闲资源或对低利用率租户进行回收；

如果共享资源区无空闲资源且低利用率租户无法回收，则向租户返回资源不足的提示或排队等待；

当多个 vFPGA 请求共享资源区的相同网络功能时，则并行调用共享资源区中的网络功能模块。

6. 如权利要求 1 所述的面向 FPGA 网卡的虚拟网络资源共享方法，其特征在于，所述根据已加载的网络功能的使用情况确定未加载的候选网络功能中最优可替换网络功能，将最优可替换网络功能代替已加载的网络功能以实现最优预加载，包括：

周期性收集每个网络功能的调用频率、访问趋势和模块权重，计算每个网络功能的综合价值评分；

分别计算候选集合中每个网络功能的综合价值评分，提取候选集合中综合价值评分最高的最优可替换网络功能；

基于部署代价以及驻留时间，确定当前部署集合中大于驻留时间阈值且替换代价最小的最优替换目标网络功能；

如果最优可替换网络功能的综合价值评分与最优替换目标网络功能的综合价值评分的差值满足替换设定条件，则将最优替换目标网络功能替换为最优可替换网络功能；

反之，则保留当前的部署状态。

7. 面向 FPGA 网卡的虚拟网络资源共享系统，其特征在于，包括私有资源子系统、共享资源子系统、数据收发子系统以及调度管控子系统，其数据交互过程，包括：

将 FPGA 网卡资源虚拟化得到私有租户资源区和共享资源区，所述私有资源子系统根据不同的多个租户预先将私有租户资源区划分为多个 vFPGA；所述共享资源子系统在共享资源区配置通用网络功能模块，用于处理不同租户的通用网络请求，并且为所有租户共享使用；

所述数据收发子系统接收租户的数据包进行解析，确定租户请求的网络功能以及对应的 vFPGA，并将数据包转发至对应的 vFPGA；

所述调度管控子系统，用于基于租户请求的网络功能，判断所述 vFPGA 是否支持处理当前网络功能；如果不支持，则判断共享资源区是否支持处理当前网络功能，若不支持，则根据共享资源区的空闲情况重新配置对应的网络功能模块；

当租户的数据包请求的网络功能处理完成后，所述数据收发子系统回收对应的 vFPGA 资源，并更新功能映射表；

所述调度管控子系统对共享资源区的资源进行动态调整分配，并根据已加载的网络功能的使用情况确定未加载的候选网络功能中最优可替换网络功能，将最优可替换网络功能代替已加载的网络功能以实现最优预加载。

8. 一种计算机可读存储介质，其上存储有计算机程序，其特征在于，该程序被处理器执行时实现如权利要求 1-6 中任一项所述的面向 FPGA 网卡的虚拟网络资源共享方法中的步骤。

9. 一种计算机设备，包括存储器、处理器及存储在存储器上并可在处理器上运行的计算机程序，其特征在于，所述处理器执行所述程序时实现如权利要求 1-6 中任一项所述的面向 FPGA 网卡的虚拟网络资源共享方法中的步骤。

10. 一种计算机程序产品，其特征在于，所述计算机程序产品包括计算机程序，所述计算机程序被处理器执行时，实现如权利要求 1-6 中任一项所述的面向 FPGA 网卡的虚拟网络资源共享方法中的步骤。

# 面向 FPGA 网卡的虚拟网络资源共享方法及系统

## 技术领域

[0001] 本发明属于 FPGA 虚拟化技术领域，具体涉及一种面向 FPGA 网卡的虚拟网络资源共享方法及系统。

## 背景技术

[0002] 本部分的陈述仅仅是提供了与本发明相关的背景技术信息，不必然构成在先技术。

[0003] 随着机载信息处理系统数据量的爆发式增长，传统的同构多核通用处理器已难以满足大规模信息编解码、卷积运算、快速傅里叶变换以及人工智能识别等高计算密集型任务的需求。FPGA（现场可编程门阵列）因其具备硬件灵活、高吞吐、低功耗等优势，被广泛用作协处理器，与 CPU 共同构建异构计算系统，显著提升了机载分布式体系结构的计算能力。为了更好地利用 FPGA 资源，虚拟化技术应运而生，旨在通过将物理 FPGA 资源划分为多个虚拟 FPGA（vFPGA），使得多个租户可以共享同一物理 FPGA 资源。然而，现有的 FPGA 虚拟化技术仍存在以下局限性：

性能瓶颈问题：传统 FPGA 虚拟化方案通常采用静态资源分配策略，即将物理资源固定分配给每个租户。这种分配方式缺乏弹性，每个租户只能在固定的资源大小上执行任务，当某个租户的计算需求超出其分配资源时，无法动态扩展，从而导致性能瓶颈。此外，固定资源分配也限制了多任务并发执行的效率。

[0004] 资源利用率低与浪费问题：由于缺乏动态调度与资源共享机制，部分租户的资源可能长期处于闲置状态，而其他租户却因资源不足而无法及时完成任务，造成 FPGA 整体资源利用率低下。

[0005] 功能冗余与缺乏共享机制：多个租户可能同时需要使用相同的网络功能（如加密、协议处理等），但由于缺乏统一的硬件功能共享机制，导致相同功能在不同 vFPGA 中重复部署，既浪费逻辑资源，又增加了配置开销，降低了系统整体性能。

[0006] 综上所述，由于现有 FPGA 虚拟化技术在资源调度、功能共享、资源利用率方面存在明显不足，使得 FPGA 无法适用租户复杂多变的任务需求，从而导致 FPGA 的资源与租户需求出现不对等而降低了资源利用率。

## 发明内容

[0007] 为了解决上述问题，本发明提出了一种面向 FPGA 网卡的虚拟网络资源共享方法及系

统，本发明在数据中心和云计算等场景下提供了一种高效、灵活的网络服务处理方案，大幅度提升了 FPGA 资源利用率和网络处理性能，并且该方案能够动态响应租户需求，实现资源的优化利用和功能共享，更好地发挥 FPGA 在数据中心中的潜力，实现高效、可靠的网络功能加速服务。

[0008] 根据一些实施例，本发明的第一方案提供了一种面向 FPGA 网卡的虚拟网络资源共享方法，采用如下技术方案：

面向 FPGA 网卡的虚拟网络资源共享方法，包括：

将 FPGA 网卡资源虚拟化得到私有租户资源区和共享资源区，根据不同的多个租户预先将私有租户资源区划分为多个 vFPGA；

接收租户的数据包进行解析，确定租户请求的网络功能以及对应的 vFPGA，并将数据包转发至对应的 vFPGA；

基于租户请求的网络功能，判断所述 vFPGA 是否支持处理当前网络功能；如果不支持，则判断共享资源区是否支持处理当前网络功能，若不支持，则根据共享资源区的空闲情况重新配置对应的网络功能模块；

当租户的数据包请求的网络功能处理完成后，回收对应的 vFPGA 资源，并更新功能映射表；对共享资源区的资源进行动态调整分配，并根据已加载的网络功能的使用情况确定未加载的候选网络功能中最优可替换网络功能，将最优可替换网络功能代替已加载的网络功能以实现最优预加载。

[0009] 进一步地，所述接收租户的数据包进行解析，确定租户请求的网络功能以及对应的 vFPGA，并将数据包转发至对应的 vFPGA，包括：

接收租户的数据包进行解析，得到租户标识符和功能标识符；

通过租户标识符确定租户对应的 vFPGA，通过功能标识符确定租户请求的网络功能；

将数据包转发至租户对应的 vFPGA。

[0010] 进一步地，所述基于租户请求的网络功能，判断所述 vFPGA 是否支持处理当前网络功能；如果不支持，则判断共享资源区是否支持处理当前网络功能，若不支持，则根据共享资源区的空闲情况重新配置对应的网络功能模块，包括：

基于租户请求的网络功能，判断所述 vFPGA 是否支持处理当前网络功能，如果支持，则直接处理当前租户请求的网络功能并转发数据包；

如果不支持，则基于功能映射表确定共享资源区是否支持处理当前网络功能，若功能映射表

中存在所述网络功能映射条目且已加载,则由 vFPGA 调用共享资源区中对应的网络功能模块处理当前租户请求的网络功能,并转发数据包;

若功能映射表中不存在所述网络功能映射条目,则如果共享资源区当前存在空闲虚拟资源块,重新配置对应的网络功能模块到共享资源区,并更新功能表;

如果共享资源区当前不存在空闲虚拟资源块,则等待共享资源区空闲后再进行重新配置。

**[0011]** 进一步地,如果共享资源区当前存在空闲虚拟资源块,重新配置对应的网络功能模块到共享资源区,并更新功能表,包括:

周期性获取每个租户的活跃度、网络负载和资源使用饱和度;

依据网络负载,计算对应的负载调节项;

基于租户活跃度、资源使用饱和度以及负载调节项,计算得到每个租户的综合调度评分;

计算所有租户综合调度评分的绝对值之和得到总评分,根据各租户的综合调度评分和总评分确定每个租户的分配资源面积;

在每个租户的分配资源面积中重新配置对应的网络功能模块以处理当前租户请求的网络功能,并更新功能表。

**[0012]** 进一步地,对共享资源区的资源进行动态调整分配,包括:

若 vFPGA 的当前资源使用信息超过资源使用阈值时,则自动申请共享资源区的空闲资源或对低利用率租户进行回收;

如果共享资源区无空闲资源且低利用率租户无法回收,则向租户返回资源不足的提示或排队等待;

当多个 vFPGA 请求共享资源区的相同网络功能时,则并行调用共享资源区中的网络功能模块。

**[0013]** 进一步地,所述根据已加载的网络功能的使用情况确定未加载的候选网络功能中最优可替换网络功能,将最优可替换网络功能代替已加载的网络功能以实现最优预加载,包括:

周期性收集每个网络功能的调用频率、访问趋势和模块权重,计算每个网络功能的综合价值评分;

分别计算候选集合中每个网络功能的综合价值评分,提取候选集合中综合价值评分最高的最优可替换网络功能;

基于部署代价以及驻留时间,确定当前部署集合中大于驻留时间阈值且替换代价最小的最优替换目标网络功能;

如果最优可替换网络功能的综合价值评分与最优替换目标网络功能的综合价值评分的差值满

足替换设定条件，则将最优替换目标网络功能替换为最优可替换网络功能；

反之，则保留当前的部署状态。

**[0014]** 根据一些实施例，本发明的第二方案提供了一种面向 FPGA 网卡的虚拟网络资源共享系统，采用如下技术方案：

面向 FPGA 网卡的虚拟网络资源共享系统，包括私有资源子系统、共享资源子系统、数据收发子系统以及调度管控子系统，其数据交互过程，包括：

将 FPGA 网卡资源虚拟化得到私有租户资源区和共享资源区，所述私有资源子系统根据不同的多个租户预先将私有租户资源区划分为多个 vFPGA；所述共享资源子系统在共享资源区配置通用网络功能模块，用于处理不同租户的通用网络请求，并且为所有租户共享使用；

所述数据收发子系统接收租户的数据包进行解析，确定租户请求的网络功能以及对应的 vFPGA，并将数据包转发至对应的 vFPGA；

所述调度管控子系统，用于基于租户请求的网络功能，判断所述 vFPGA 是否支持处理当前网络功能；如果不支持，则判断共享资源区是否支持处理当前网络功能，若不支持，则根据共享资源区的空闲情况重新配置对应的网络功能模块；

当租户的数据包请求的网络功能处理完成后，所述数据收发子系统回收对应的 vFPGA 资源，并更新功能映射表；

所述调度管控子系统对共享资源区的资源进行动态调整分配，并根据已加载的网络功能的使用情况确定未加载的候选网络功能中最优可替换网络功能，将最优可替换网络功能代替已加载的网络功能以实现最优预加载。

**[0015]** 根据一些实施例，本发明的第三方案提供了一种计算机可读存储介质。

**[0016]** 一种计算机可读存储介质，其上存储有计算机程序，该程序被处理器执行时实现如上述第一方案所述的面向 FPGA 网卡的虚拟网络资源共享方法中的步骤。

**[0017]** 根据一些实施例，本发明的第四方案提供了一种计算机设备。

**[0018]** 一种计算机设备，包括存储器、处理器及存储在存储器上并可在处理器上运行的计算机程序，所述处理器执行所述程序时实现如上述第一方案所述的面向 FPGA 网卡的虚拟网络资源共享方法中的步骤。

**[0019]** 根据一些实施例，本发明的第五方案提供一种计算机程序产品或计算机程序。

**[0020]** 一种计算机程序产品或计算机程序，包括计算机指令，该计算机指令存储在计算机可读存储介质中，计算机设备的处理器从计算机可读存储介质读取该计算机指令，处理器执行



该计算机指令，使得该计算机设备执行如上述第一方案所述的面向 FPGA 网卡的虚拟网络资源共享方法中的步骤。

**[0021]** 与现有技术相比，本发明的有益效果为：

本发明通过将 FPGA 划分为物理功能和虚拟功能两部分，该物理功能代表整个 FPGA 的硬件资源，负责管理和控制虚拟功能，数据包的接收以及转发，功能映射表的检索和维护。其中数据包通过 PCIe 或以太网接口进行接收或转发，而功能映射表则通过调度管控子系统来进行检索和维护。虚拟功能是独立的资源实体，具有独立的 I/O 通道、计算资源和存储资源，包括私有租户资源子系统和共享资源子系统。其中，私有租户资源子系统通过 DMA 调度器实现 FPGA 和租户主机之间的数据通信，并通过包转发将数据包传输到不同的 vFPGA 硬件加速器，同时共享资源子系统通过部分重配置技术动态加载数据包所需的网络功能模块，满足不同数据包请求对不同网络功能的需求。

## 附图说明

**[0022]** 构成本发明的一部分的说明书附图用来提供对本发明的进一步理解，本发明的示意性实施例及其说明用于解释本发明，并不构成对本发明的不当限定。

**[0023]** 图 1 是本发明实施例中一种面向 FPGA 网卡的虚拟网络资源共享方法的流程图；

图 2 是本发明实施例中功能映射表示例图；

图 3 是本发明实施例中功能表示例图；

图 4 是本发明实施例中的面向 FPGA 网卡的虚拟网络资源共享系统架构图；

图 5 是本发明实施例中共享系统的数据包处理流程图。

## 具体实施方式

**[0024]** 下面结合附图与实施例对本发明作进一步说明。

**[0025]** 应该指出，以下详细说明都是例示性的，旨在对本发明提供进一步的说明。除非另有指明，本文使用的所有技术和科学术语具有与本发明所属技术领域的普通技术人员通常理解的含义。

**[0026]** 需要注意的是，这里所使用的术语仅是为了描述具体实施方式，而非意图限制根据本发明的示例性实施方式。如在这里所使用的，除非上下文另外明确指出，否则单数形式也意图包括复数形式，此外，还应当理解的是，当在本说明书中使用术语“包含”和/或“包括”时，其指明存在特征、步骤、操作、器件、组件和/或它们的组合。

**[0027]** 在不冲突的情况下，本发明中的实施例及实施例中的特征可以相互组合。

## [0028] 实施例一

如图 1 所示，本实施例提供了一种面向 FPGA 网卡的虚拟网络资源共享方法，本实施例以该方法应用于服务器进行举例说明，可以理解的是，该方法也可以应用于终端，还可以应用于包括终端和服务器和系统，并通过终端和服务器的交互实现。服务器可以是独立的物理服务器，也可以是多个物理服务器构成的服务器集群或者分布式系统，还可以是提供云服务、云数据库、云计算、云函数、云存储、网络服务器、云通信、中间件服务、域名服务、安全服务 CDN、以及大数据和人工智能平台等基础云计算服务的云服务器。终端可以是智能手机、平板电脑、笔记本电脑、台式计算机、智能音箱、智能手表等，但并不局限于此。终端以及服务器可以通过有线或无线通信方式进行直接或间接地连接，本申请在此不做限制。本实施例中，该方法包括以下步骤：

将 FPGA 网卡资源虚拟化得到私有租户资源区和共享资源区，根据不同的多个租户预先将私有租户资源区划分为多个 vFPGA；

接收租户的数据包进行解析，确定租户请求的网络功能以及对应的 vFPGA，并将数据包转发至对应的 vFPGA；

基于租户请求的网络功能，判断所述 vFPGA 是否支持处理当前网络功能；如果不支持，则判断共享资源区是否支持处理当前网络功能，若不支持，则根据共享资源区的空闲情况重新配置对应的网络功能模块；

当租户的数据包请求的网络功能处理完成后，回收对应的 vFPGA 资源，并更新功能映射表；对共享资源区的资源进行动态调整分配，并根据已加载的网络功能的使用情况确定未加载的候选网络功能中最优可替换网络功能，将最优可替换网络功能代替已加载的网络功能以实现最优预加载。

[0029] 本实施例所述方法，过程如下：

可以理解的是，在接收租户的数据包之前，预先将 FPGA 网卡资源虚拟化为私有租户资源区和共享资源区；

所述私有租户资源区包含多个 vFPGA，用于调用租户对应的 vFPGA 硬件加速器处理不同租户请求的网络功能；此处每个租户在 FPGA 网卡上有对应的单独的 vFPGA 硬件加速器，且每个租户与对应的 vFPGA 之间通过租户标识符建立唯一关联；

所述共享资源区包含多个通用的网络功能模块，用于处理不同租户请求的通用网络功能，多个通用的网络功能模块的使用情况用功能表进行存储，如图 3 所示。

[0030] 步骤 S100：接收租户的数据包进行解析，确定租户请求的网络功能以及对应的 vFPGA，并将数据包转发至对应的 vFPGA，包括；

接收租户的数据包进行解析，得到租户标识符和功能标识符；

通过租户标识符确定租户对应的 vFPGA，通过功能标识符确定租户请求的网络功能；

将数据包转发至租户对应的 vFPGA。

[0031] 首先，通过 FPGA 网卡的 PCIe 接口或以太网接口接收不同租户发送的数据包，通过数据包中的 TLP 描述符字段解析出租户标识符和功能标识符，确定租户请求的网络功能以及对应的 vFPGA，具体为：

通过解析 TLP 描述符字段中的租户标识符，确定租户对应的 vFPGA。

[0032] 通过解析 TLP 描述符字段中的功能标识符，确定租户请求的网络功能；

也就是说，通过识别 Fmt 和 Type 字段的组合，以用来标识租户请求的某种网络功能，例如：Fmt 为 000，Type 为 00001，功能为 AES 加密。

[0033] 其次，将数据包转发到租户对应的 vFPGA，并更新功能映射表；其中，功能映射表的示例表如图 2 所示。

[0034] 步骤 S200：基于租户请求的网络功能，判断所述 vFPGA 是否支持处理当前网络功能；如果不支持，则判断共享资源区是否支持处理当前网络功能，若不支持，则根据共享资源区的空闲情况重新配置对应的网络功能模块。

[0035] 步骤 S201：基于租户请求的网络功能，判断所述 vFPGA 是否支持处理当前网络功能，如果支持，则直接处理当前租户请求的网络功能并转发数据包；

步骤 S202：如果不支持，则基于功能映射表确定共享资源区是否支持处理当前网络功能，若功能映射表中存在所述网络功能映射条目且已加载，则由 vFPGA 调用共享资源区中对应的网络功能模块处理当前租户请求的网络功能，并转发数据包；

步骤 S203：若功能映射表中不存在所述网络功能映射条目，则如果共享资源区当前存在空闲虚拟资源块，重新配置对应的网络功能模块到共享资源区，并更新功能表。

[0036] 当功能映射表中不存在所述网络功能映射条目且尚未预加载时，并且在共享资源区的资源允许的情况下（如剩余 LUT>目标模块需求的 x%），利用部分重配置技术加载对应的网络功能模块以处理当前租户请求的网络功能。

[0037] 例如，接收到租户需要专用的防火墙功能时，首先执行功能检查，确认防火墙功能是否在 FPGA 网卡系统支持的功能范围内。若在支持的功能范围内，检查共享资源区的资源情

况，若共享资源区剩余的逻辑单元数量满足防火墙功能模块的需求时，则热烧录防火墙功能模块至共享资源区，并且更新功能表。

[0038] 基于此，利用最优共享资源分配算法重新配置对应的网络功能模块到共享资源区，过程如下：

步骤 S2031：周期性获取每个租户*i*的活跃度 $A_i$ 、网络负载 $L_i$ 和资源使用饱和度 $U_i$ 。该步骤是整个算法的基础，确保能够及时获取租户的最新状态信息，为后续的资源分配决策提供准确的数据支持。

[0039] 步骤 S2032：依据获取到的网络负载 $L_i$ ，按照下述三段式负载影响函数计算对应的负载调节项 $LoadScore(L_i)$ ，对每个租户的网络负载 $L_i$ 值进行判断，具体操作为：

$$LoadScore(L_i) = \begin{cases} +1, & L_i < T_{low} \\ 0, & T_{low} \leq L_i \leq T_{high} \\ -1, & L_i > T_{high} \end{cases}$$

[0040] 其中， $T_{low}$ 是最低负载阈值，代表低于该值时，给予激励分配，即负载调节项 $LoadScore(L_i)+1$ ，而 $T_{high}$ 是最高负载阈值，表示高于该值时，进行抑制分配，即负载调节项 $LoadScore(L_i)-1$ 。

[0041] 该步骤通过对网络负载的分段处理，为后续的调度评分计算引入网络负载的调节作用，确保资源分配能够根据网络负载的不同状态进行合理的调整。

[0042] 步骤 S2033：将租户活跃度 $A_i$ 、资源使用饱和度 $U_i$ 以及计算得到的负载调节项 $LoadScore(L_i)$ 代入调度评分函数，分别对每个租户的三个因素进行加权求和，计算得到每个租户的综合调度评分 $S_i$ ，如下：

$$S_i = \alpha \cdot A_i + \beta \cdot U_i + \gamma \cdot LoadScore(L_i)$$

[0043] 其中， $\alpha$ ， $\beta$ ， $\gamma$ 是权重系数。

[0044] 步骤 S2034：计算所有租户综合调度评分的绝对值之和得到总评分，根据各租户的综合调度评分和总评分确定每个租户的分配资源面积。

[0045] 通过对所有租户的调度评分取绝对值并求和，得到一个反映系统总体资源需求的量化指标，即总评分；根据各租户的综合调度评分 $S_i$ 及总评分，按资源分配比例计算公式求得每个租户的分配资源面积 $R_i$ ，如下：

$$R_i = R_{total} \cdot \frac{|S_i|}{\sum_{j=1}^N |S_j|}$$

[0046] 其中， $R_{total}$ 是共享资源区的总面积， $i$ 是第 $i$ 个租户， $N$ 是租户的总数， $\sum_{j=1}^N |S_j|$ 是总评分。

[0047] 步骤 S2034：在每个租户的分配资源面积中重新配置对应的网络功能模块以处理当前租户请求的网络功能，并更新功能映射表。

[0048] 步骤 S204：如果共享资源区当前不存在空闲虚拟资源块，则等待共享资源区空闲后再进行重新配置。

[0049] 数据包在 vFPGA 接收队列中按照 FIFO 策略来占有 vFPGA 硬件加速器。当数据包占有 vFPGA 硬件加速器时，调度管控子系统查询功能表来为每一个 vFPGA 硬件加速器调用共享资源区中相应的网络功能，并更新功能映射表；若共享资源子系统中缺少相应的网络功能模块，则根据可重配置区域剩余逻辑单元数是否满足需求模块的 LUT 占用量，若逻辑单元不足则返回错误码，若逻辑单元充足则烧录数据包所需求的网络功能模块。

[0050] 步骤 S300：当租户的数据包请求的网络功能处理完成后，回收对应的 vFPGA 资源，并更新功能映射表。

[0051] 当 vFPGA 硬件加速器中租户数据包请求完成后，将数据包放入 vFPGA 转发队列中，并且回收占用的 vFPGA 硬件资源，更新功能映射表中的映射关系。

[0052] 具体地实施例中，结果回传与资源回收，数据包在 vFPGA 硬件加速器中完成功能服务处理后，FPGA 网卡通过 DMA 资源调度器将 vFPGA 转发队列中的结果转发至以太网接口或租户主机，并且对普通转发包直接进行快速回传。

[0053] 与此同时，调度管控子系统在接收到 vFPGA 硬件加速器的“任务完成”信号后，回收释放 vFPGA 占用的 FPGA 硬件资源并将其归还至空闲资源池，同时调度管控子系统更新功能映射表。

[0054] 步骤 S400：预先对共享资源区的资源进行动态调整分配，并根据已加载的网络功能的使用情况确定未加载的候选网络功能中最优可替换网络功能，将最优可替换网络功能代替已加载的网络功能以实现最优预加载。

[0055] 步骤 S401：若 vFPGA 的当前资源使用信息超过资源使用阈值时，则自动申请共享资

源区的空闲资源或对低利用率租户进行回收，如果共享资源区无空闲资源且低利用率租户无法回收，则向租户返回资源不足的提示或排队等待。

[0056] 其中，当前资源使用信息包括每个 vFPGA 的资源利用率、队列状态以及模块负载。

[0057] 步骤 S402：当多个 vFPGA 请求共享资源区的相同网络功能时，则并行调用共享资源区中的网络功能模块，包括：

采用时间片机制，每时钟周期选取任务进入第一级流水线并加载对应网络功能；

后续周期中各任务依次推进流水线阶段，实现多租户数据时序交错处理，实时监测阶段冲突，任务完成后验证流水线排空，数据包进入 vFPGA 的转发队列中等待转发，并更新功能映射表。

[0058] 当多个租户的 vFPGA 并发请求共享资源区的同一网络功能时，共享资源区的功能模块按照多级流水线阶段使不同租户任务能在不同阶段并发执行。

[0059] 步骤 S403：根据已加载的网络功能的使用情况确定未加载的候选网络功能中最优可替换网络功能，将最优可替换网络功能代替已加载的网络功能以实现最优预加载，包括：

步骤 S4031：周期性收集每个网络功能的调用频率  $R_t(f_m)$ 、访问趋势  $T_t(f_m)$  和模块权重  $W(f_m)$ 。

[0060] 调用频率  $R_t(f_m)$  反映了第  $m$  个网络功能  $f_m$  在当前周期内的使用热度，其计算方法为统计该网络功能在周期内的调用次数与总调用次数的比值。访问趋势  $T_t(f_m)$  则通过分析网络功能  $f_m$  在最近几个周期的调用频率变化情况得出，可采用线性回归或其他趋势分析方法，以预测其未来调用频率的变化趋势。模块权重  $W(f_m)$  是根据网络功能  $f_m$  的重要性、资源消耗等因素预先设定的权重值，用于在综合评估中体现各个功能的相对重要程度。

[0061] 步骤 S4032：基于每个网络功能的调用频率  $R_t(f_m)$ 、访问趋势  $T_t(f_m)$  和模块权重  $W(f_m)$ ，计算每个网络功能的综合价值评分  $S(f_m)$ ，评分函数如下：

$$S(f_m) = \delta \cdot R_t(f_m) + \varepsilon \cdot T_t(f_m) + \sigma \cdot W(f_m)$$

[0062] 其中， $\delta$ 、 $\varepsilon$ 、 $\sigma$  是权重系数，且  $\delta + \varepsilon + \sigma = 1$ 。该评分函数综合考虑了网络功能的调用频率、访问趋势和模块权重三个因素，通过权重系数  $\delta$ 、 $\varepsilon$ 、 $\sigma$  分别赋予这三个因素不同的权重，从而得到一个能够反映网络功能综合价值的评分。权重系数的取值可根据实际应用场景和需求进行调整，例如，若调用频率在决策中更为重要，则可适当增大  $\delta$  的值。

[0063] 步骤 S4033：分别计算候选集合  $F \setminus D$  中每个网络功能的综合价值评分，提取候选集合中综合价值评分最高的网络功能，即最优可替换网络功能  $f_{new}$ 。

[0064] 分别计算候选集合 $F \setminus D$ 中各个网络功能的综合价值评分，找出候选集合中综合价值评分最高的网络功能 $f_{new}$ ，该网络功能即为当前未部署的候选网络功能中最有可能被调用且具有较高价值的功能，即最优可替换网络功能。

[0065] 步骤 S4034：基于部署代价以及驻留时间，确定当前部署集合 $D$ 中大于驻留时间阈值且替换代价最小的最优替换目标网络功能，替换惩罚函数计算如下：

$$f_{evict} = \operatorname{argmin}(\lambda_1 \cdot C(f_m) + \lambda_2 \cdot 1/\tau(f_m))$$

[0066] 其中，驻留时间 $\tau(f_m)$ 是指网络功能 $f_m$ 在当前部署集合 $D$ 中持续部署的时间长度， $\theta$ 为设定的驻留时间阈值，用于筛选出在当前部署集合中驻留时间较长的网络功能， $\lambda_1$ 和 $\lambda_2$ 是权重系数，用于平衡部署代价和驻留时间在替换决策中的影响， $\operatorname{argmin}(D)$ 表示在当前部署集合 $D$ 中找到使括号内表达式取最小值的元素，约束条件为 $\lambda_1 + \lambda_2 = 1$ 。

[0067] 替换惩罚函数综合考虑了网络功能的部署代价 $C(f_m)$ 和驻留时间 $\tau(f_m)$ ，通过该惩罚函数找出在当前部署集合中替换代价最小的网络功能 $f_{evict}$ ，即为最优替换目标网络功能。

[0068] 步骤 S4035：如果最优可替换网络功能的综合价值评分与最优替换目标网络功能的综合价值评分的差值满足替换设定条件，则将最优替换目标网络功能替换为最优可替换网络功能。

[0069] 其中，替换设定条件，计算如下：

$$S(f_{new}) - S(f_{evict}) > \eta + \operatorname{Penalty}(f_{evict})$$

[0070] 其中， $\eta$ 为替换阈值，用于控制替换的敏感度， $\operatorname{Penalty}(f_{evict})$ 为替换功能 $f_{evict}$ 所带来的惩罚成本，可包括重新部署的开销等。

[0071] 若上述不等式成立，则执行替换操作，将 $f_{evict}$ 从当前部署集合 $D$ 中移除，并将 $f_{new}$ 部署到 FPGA 平台；否则，保留当前的部署状态。

[0072] 该替换条件综合考虑了新功能与替换功能的评分差异以及替换惩罚成本，确保只有当新功能带来的价值增益足够大时才进行替换，避免频繁的替换操作。

[0073] 在完成替换操作或决定保留当前部署状态后，需要更新调度表，记录新的部署计划；更新状态表，反映当前功能的部署状态和相关信息；更新评分缓存，保存最新的评分结果。然后等待下一个周期的到来，重复步骤 S403 的整个过程，持续优化功能部署，以适应动态变化的需求和环境。

## [0074] 实施例二

如图 4 所示，本实施例提供了一种面向 FPGA 网卡的虚拟网络资源共享系统，包括私有资源

子系统、共享资源子系统、数据收发子系统以及调度管控子系统，其数据交互过程，包括：将 FPGA 网卡资源虚拟化得到私有租户资源区和共享资源区，所述私有资源子系统根据不同的多个租户预先将私有租户资源区划分为多个 vFPGA；所述 vFPGA 负责对租户的数据包进行处理解析，并执行该租户的网络功能处理，从而对共享资源子系统的网络功能模块进行调用。

[0075] 所述共享资源子系统在共享资源区配置通用网络功能模块，用于处理不同租户的通用网络请求，并且为所有租户共享使用；利用 FPGA 的部分重配置技术，预先配置通用网络功能模块，例如加解密功能、数据包分类功能和流量调度等多种网络加速功能，用于处理不同租户的网络请求，并且为所有租户共享使用。当 FPGA 上逻辑资源充足时，可热烧录租户所需的网络功能模块到共享资源子系统的共享资源区。

[0076] 所述数据收发子系统接收租户的数据包进行解析，确定租户请求的网络功能以及对应的 vFPGA，并将数据包转发至对应的 vFPGA；

所述调度管控子系统，用于基于租户请求的网络功能，判断所述 vFPGA 是否支持处理当前网络功能；如果不支持，则判断共享资源区是否支持处理当前网络功能，若不支持，则根据共享资源区的空闲情况重新配置对应的网络功能模块；

当租户的数据包请求的网络功能处理完成后，所述数据收发子系统回收对应的 vFPGA 资源，并更新功能映射表；

所述调度管控子系统对共享资源区的资源进行动态调整分配，并根据已加载的网络功能的使用情况确定未加载的候选网络功能中最优可替换网络功能，将最优可替换网络功能代替已加载的网络功能以实现最优预加载。

[0077] 所述调度管控子系统基于物理功能与 DMA 资源调度器相互配合，负责租户管理、资源管理和功能管理，维护私有资源子系统中的功能映射表以及共享资源子系统中的功能表。基于功能映射表将租户请求的网络功能映射到当前已加载的对应功能模块；同时，基于功能表触发动态预加载，并且能够进行资源调度和优先级管理等控制操作。

[0078] 根据功能映射表中的信息以及数据包中的信息，将数据包调度至相应的 vFPGA，为不同租户提供独立的功能服务区域。对于不同的数据包具有独立的数据处理路径（RXQP 接收队列和 TXQP 转发队列），确保不同租户的数据流不互相干扰。此外，调度与管控子系统动态监控资源使用率，并根据需求实施分配资源。

[0079] 本实施例所述系统具体实现，如图 5 所示，租户通过 PCIe 接口将数据包发送至 FPGA



网卡的数据收发子系统，数据收发子系统对收到的数据包进行解析，根据网络加速功能请求数据包中 TLP 描述符字段对不同的网络服务进行功能调用。

[0080] 若数据包不需要任何特殊网络加速功能处理，则 FPGA 网卡可直接将数据包通过 PCIe 返回租户主机或转发至网络接口。

[0081] 本实施例解决了传统 FPGA 网卡虚拟化中资源利用率低、性能瓶颈和功能冗余等问题，增强了多租户环境下的公平性和可靠性，适用于数据中心云网络加速场景。

[0082] 上述实施例中对各个实施例的描述各有侧重，某个实施例中未详述的部分可以参见其他实施例的相关描述。

### [0083] 实施例三

本实施例提供了一种计算机可读存储介质，其上存储有计算机程序，该程序被处理器执行时实现如上述实施例一所述的面向 FPGA 网卡的虚拟网络资源共享方法中的步骤。

### [0084] 实施例四

本实施例提供了一种计算机设备，包括存储器、处理器及存储在存储器上并可在处理器上运行的计算机程序，所述处理器执行所述程序时实现如上述实施例一所述的面向 FPGA 网卡的虚拟网络资源共享方法中的步骤。

### [0085] 实施例五

本实施例提供了一种计算机程序产品或计算机程序，包括计算机指令，该计算机指令存储在计算机可读存储介质中，计算机设备的处理器从计算机可读存储介质读取该计算机指令，处理器执行该计算机指令，使得该计算机设备执行上述实施例一所述的面向 FPGA 网卡的虚拟网络资源共享方法中的步骤。

[0086] 本领域内的技术人员应明白，本发明的实施例可提供方法、系统或计算机程序产品。因此，本发明可采用硬件实施例、软件实施例或结合软件和硬件方面的实施例的形式。而且，本发明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和光学存储器等)上实施的计算机程序产品的形式。

[0087] 本发明是参照根据本发明实施例的方法、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。

[0088] 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造品，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。

[0089] 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。

[0090] 本领域普通技术人员可以理解实现上述实施例方法中的全部或部分流程，是可以通过计算机程序来指令相关的硬件来完成，所述的程序可存储于一计算机可读取存储介质中，该程序在执行时，可包括如上述各方法的实施例的流程。其中，所述的存储介质可为磁碟、光盘、只读存储记忆体(Read-Only Memory, ROM)或随机存储记忆体(Random Access Memory, RAM)等。

[0091] 上述虽然结合附图对本发明的具体实施方式进行了描述，但并非对本发明保护范围的限制，所属领域技术人员应该明白，在本发明的技术方案的基础上，本领域技术人员不需要付出创造性劳动即可做出的各种修改或变形仍在本发明的保护范围以内。

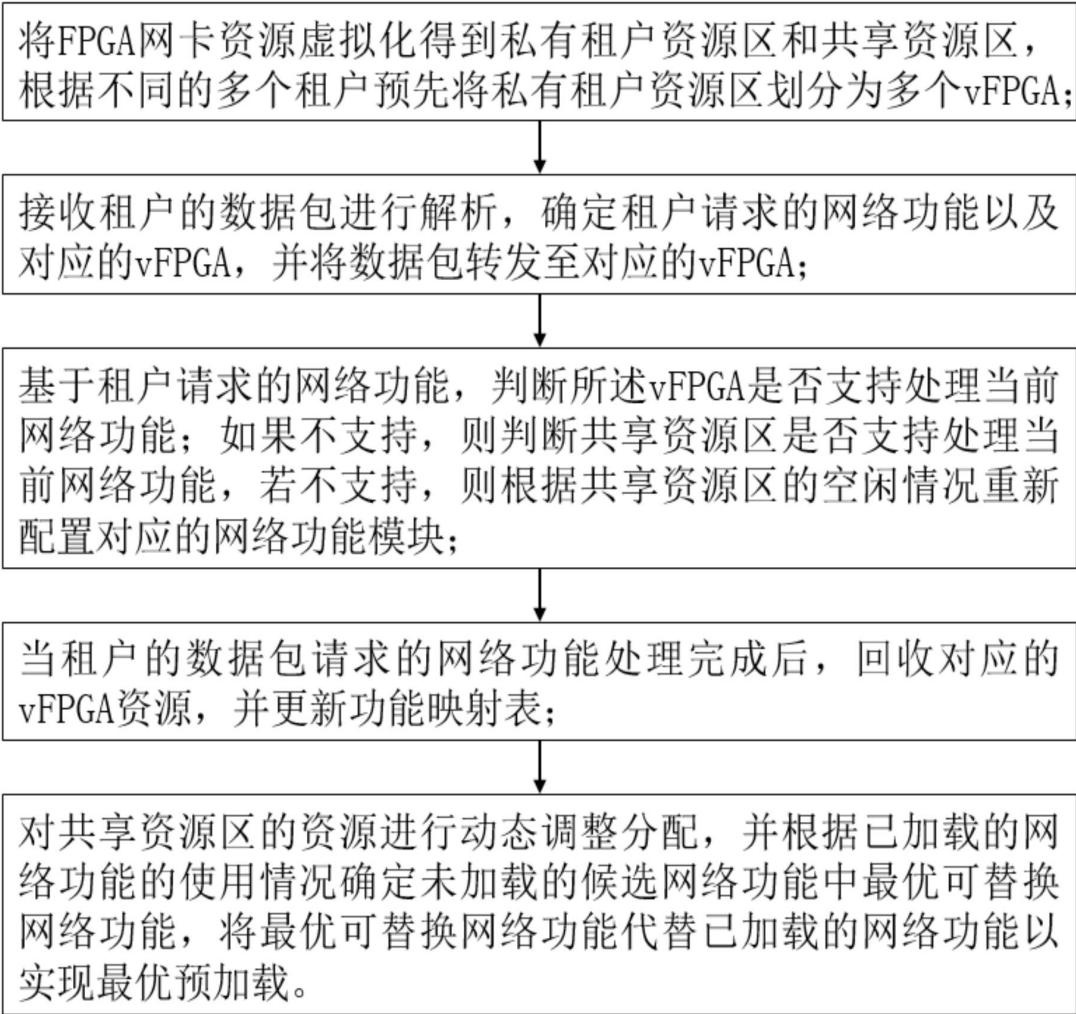


图 1

用户标识符 (Tenant ID)	功能标识符 (Function ID)	优先级 (Priority)	功能模块 (Function Module)	资源分配 (VF)	是否就绪 (Loaded)
001	AES-256	高	加解密模块	VF1	1
002	GZIP	中	数据压缩模块	VF2	1
003	Firewall	低	防火墙模块	VF3	0

图 2

功能模块 (Function Module)	调用频率 (Call frequency)	访问趋势 (Visit Trends)	部署代价 (Deployment cost)	驻留时间 (Dwell time)
加解密模块	N/A	N/A	N/A	N/A
数据压缩模块	N/A	N/A	N/A	N/A
防火墙模块	N/A	N/A	N/A	N/A
.....	.....	.....	.....	.....

图 3

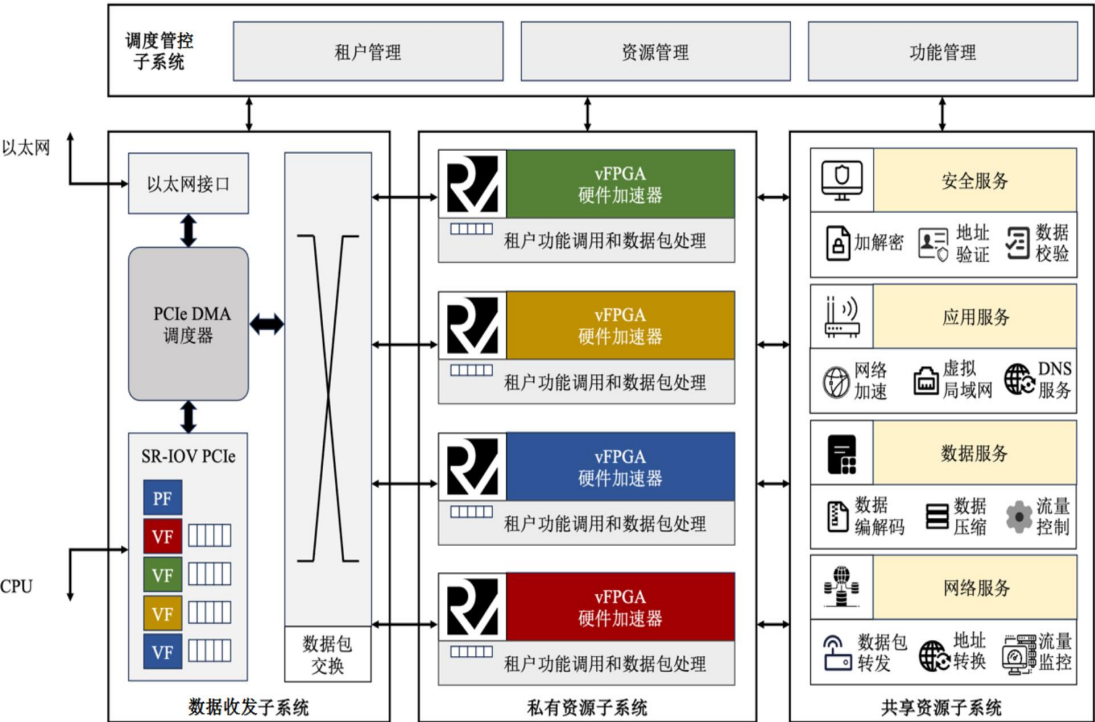


图 4

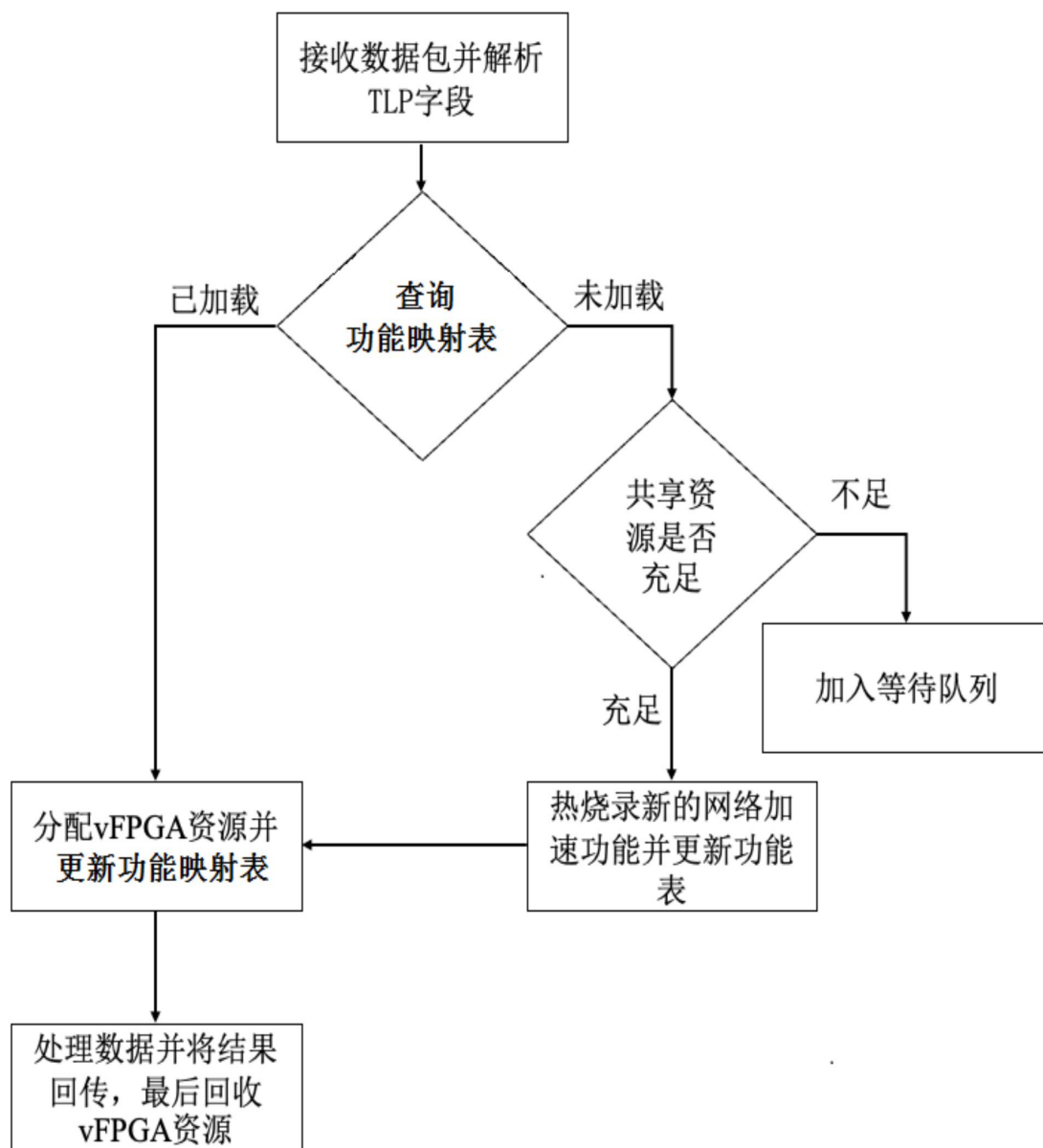


图 5

## 说明书摘要

---

本发明属于 FPGA 虚拟化领域，提供了一种面向 FPGA 网卡的虚拟网络资源共享方法及系统，资源共享系统由私有租户资源子系统、共享资源子系统和调度与管理子系统三部分组成；资源共享方法流程如下，通过 FPGA 虚拟化在硬件层面对多个租户的请求进行隔离，每个请求拥有独立的数据处理队列和带宽，避免相互干扰并保障性能；基于共享资源子系统在单一功能上实现多个租户队列分时复用和流水线调度机制以及在多个功能上实现并行处理机制，避免重复功能实例化并提升资源利用率；调度与管理子系统实时监控数据行为并对请求进行实时监控，并实施动态管控策略。本发明解决了传统 FPGA 网卡虚拟化中资源利用率低、性能瓶颈和功能冗余等问题。