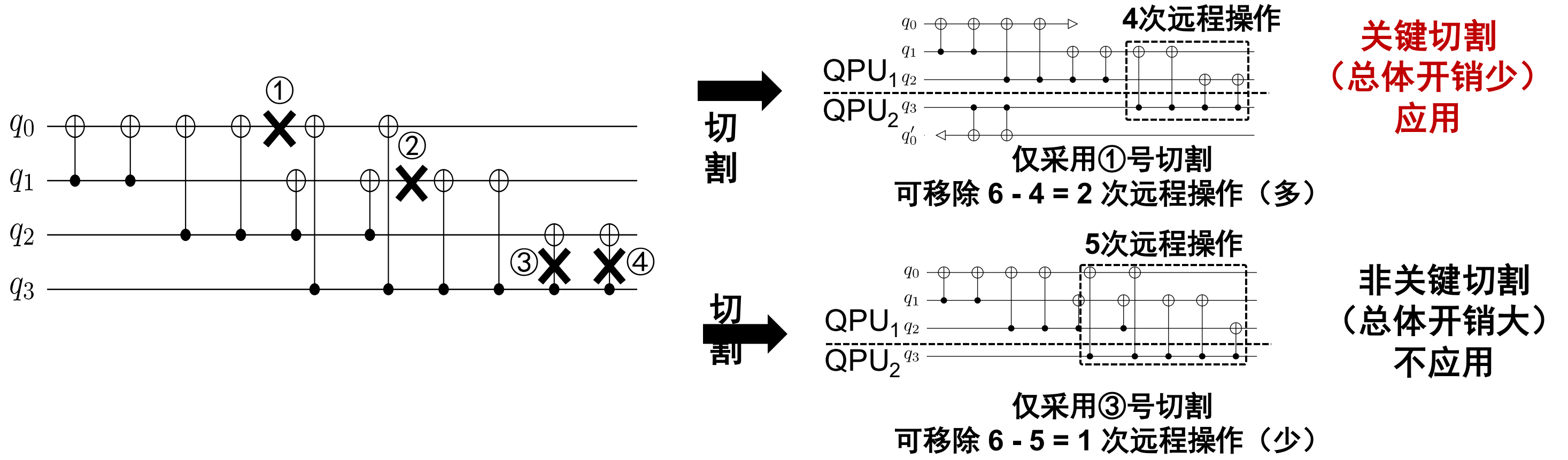


定义分布式量子计算环境中大型线路的**关键切割**

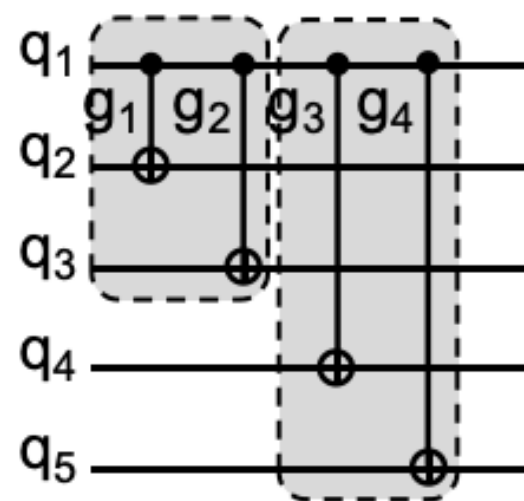
量子线路切割操作能够消除错误率较高的远程操作，**关键切割**相比其它切割操作能够消除更多的远程操作。



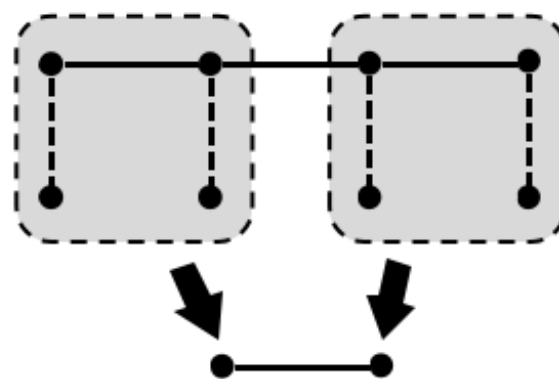
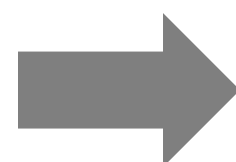
关键切割和非关键切割的定义标准为**独立应用该切割时所能消除的远程操作数**是否**大于**各个切割消除的远程操作**均值**。上图中各个切割消除的远程操作均值： $(2+2+1+1)/4=1.5$ 。因此1，2号切割被定义为关键切割，而3，4号切割被定义为非关键切割。

分布式量子计算环境下同构子线路复用机制

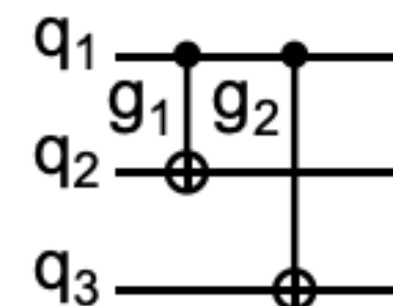
LQ-reuse机制复用同构子线路的线路执行结果，减少经典后处理的开销。具体步骤包括：（1）识别同构子线路（2）合并同构子线路节点（3）复用同构子线路执行结果。



识别同构子线路



在线路无向图中将同构子线路合并为同一节点，避免切割同构子线路

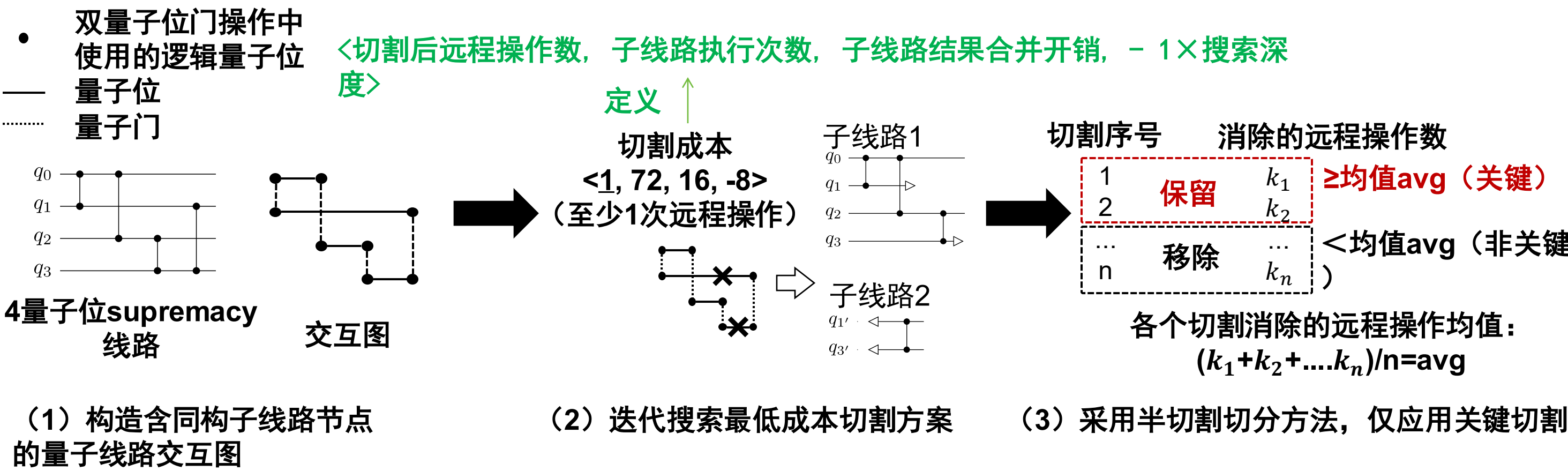


复用具有相同结构的子线路的执行结果

LQ-reuse通过复用同构子线路的执行结果，以减少经典后处理开销。该机制适用于存在同构子线路的量子算法(如BV、GHZ、LCS等)。

分布式量子计算环境中大型线路的切分策略

大型量子线路切分策略包括：构造含同构子线路节点的量子线路交互图，迭代搜索最低成本切割方案，使用半切割切分方法--仅应用关键切割，移除非关键切割。

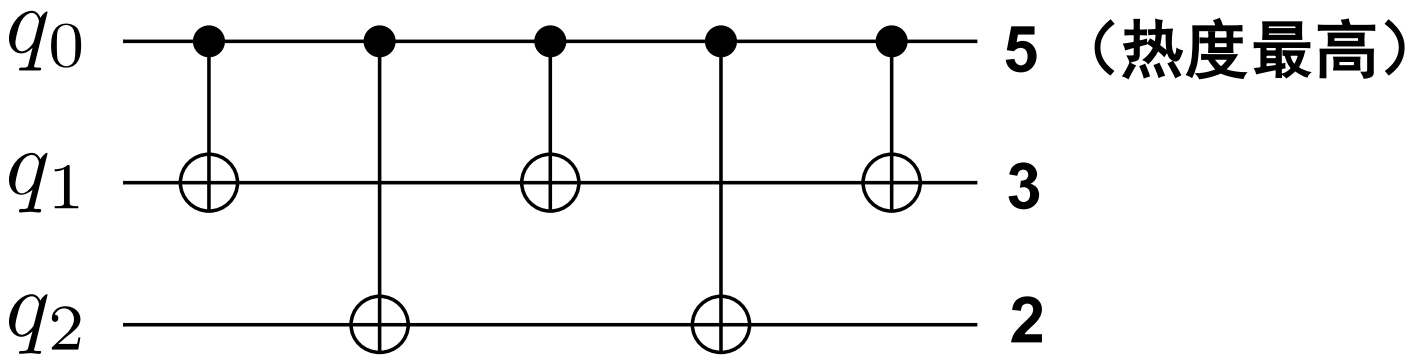


大型量子线路切分策略首先为量子线路构造交互图，该交互图中包含同构子线路节点。根据线路信息，迭代搜索最低成本切割方案。切割成本包括切割后远程操作数，子线路执行次数，子线路结果合并开销，搜索深度。随后采用半切割切分方法，移除非关键切割，仅应用关键切割。

分析分布式量子环境中子线路量子位的交互特征

定义“热度”，“弱连接度”的概念，分别表示量子位，量子位集合间的交互特征

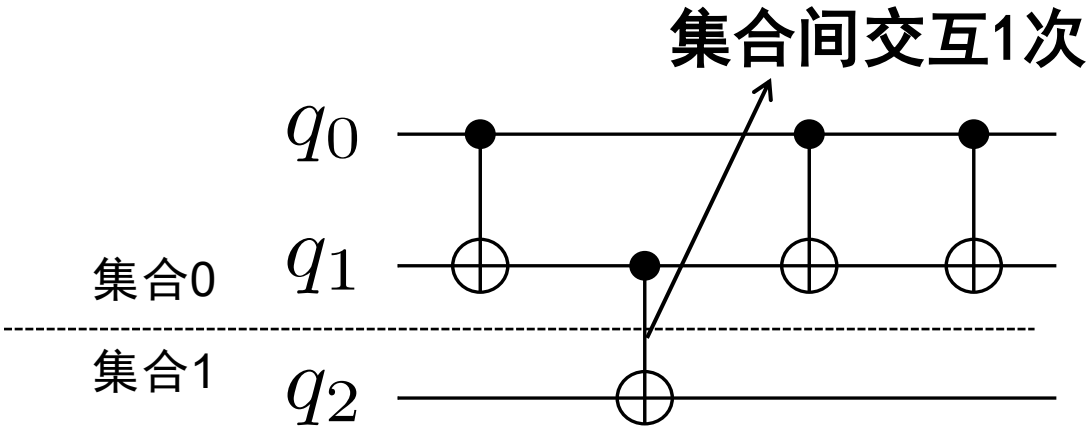
热度：
量子位在所有双量子位门操作中被使用的次数



量子线路的“热度”

“热度”最高的逻辑量子位与其他量子位的交互最频繁。该量子位应映射至度数（即与其直接相连的物理量子位数目）最高的物理量子位，使其与更多有交互的逻辑量子位直接相连，减少SWAP

弱连接度：
 $1 / (\text{量子位集合间交互次数})$

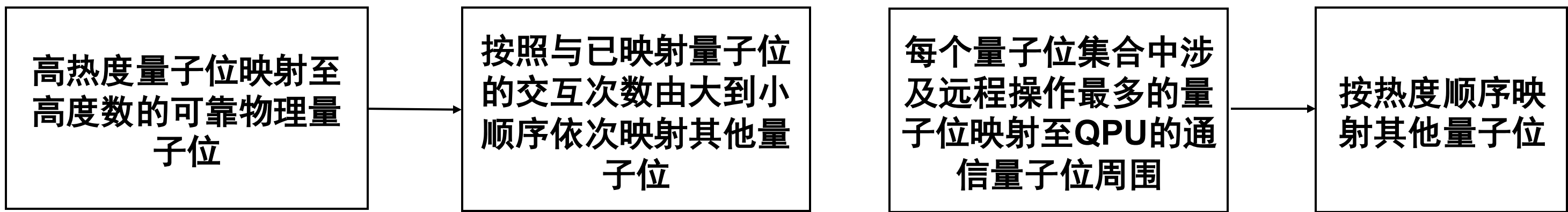


量子线路的“弱连接度”

“弱连接度”越高的量子位集合划分方案，集合间交互操作越少。将这些集合映射至不同QPU时，执行线路所需的远程操作数也越少

分布式量子计算环境中子线路的映射方案

基于“热度”和“弱连接度”，分别设计量子线路的初始映射方案，满足不同量子位交互模式的需求。



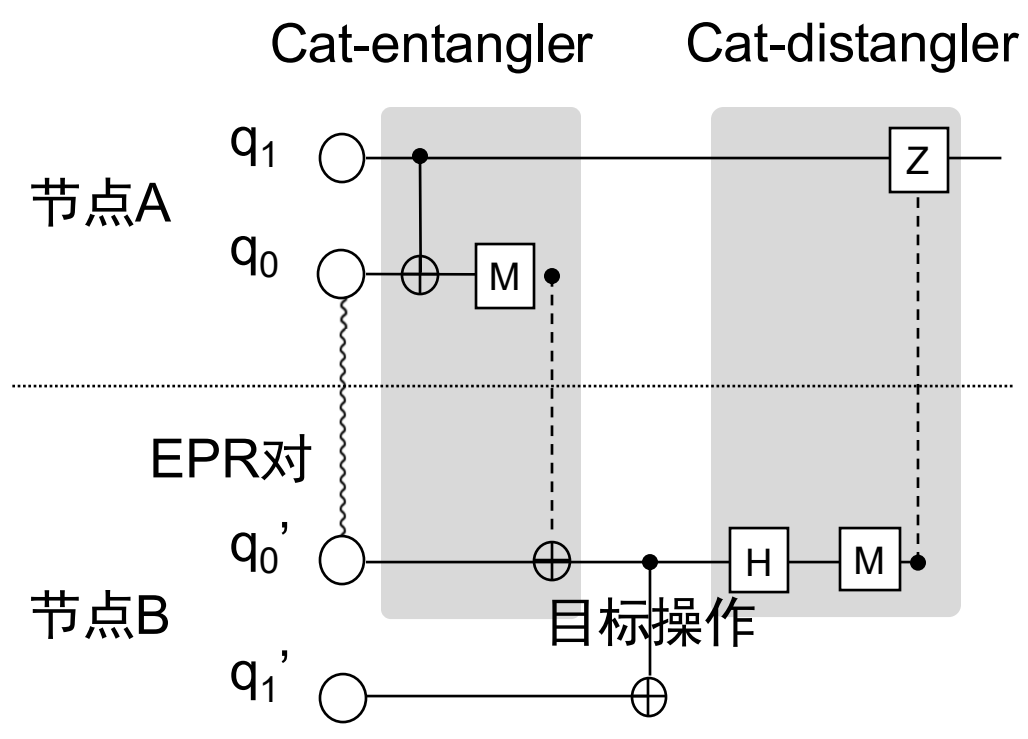
基于“热度”的初始映射

基于“弱连接度”的初始映射

基于“热度”的初始映射适用于含高热度量子位的线路。基于“弱连接度”的初始映射适用于量子位集合间交互较弱的线路。

分析分布式量子计算环境中映射转换时的远程操作开销

若多个量子位间存在交互操作且跨QPU映射，映射转换时常需执行延迟更高，错误率更高的远程操作（如跨程序SWAP/CNOT），影响量子程序的执行保真度



操作	延迟	Cat-Comm 所需执行次数
CX and CZ gates (本地操作)	1 CX	3
Measure	5 CX	2
EPR preparation	~ 12 CX	1

Cat-Comm
所需总时间
25 CX

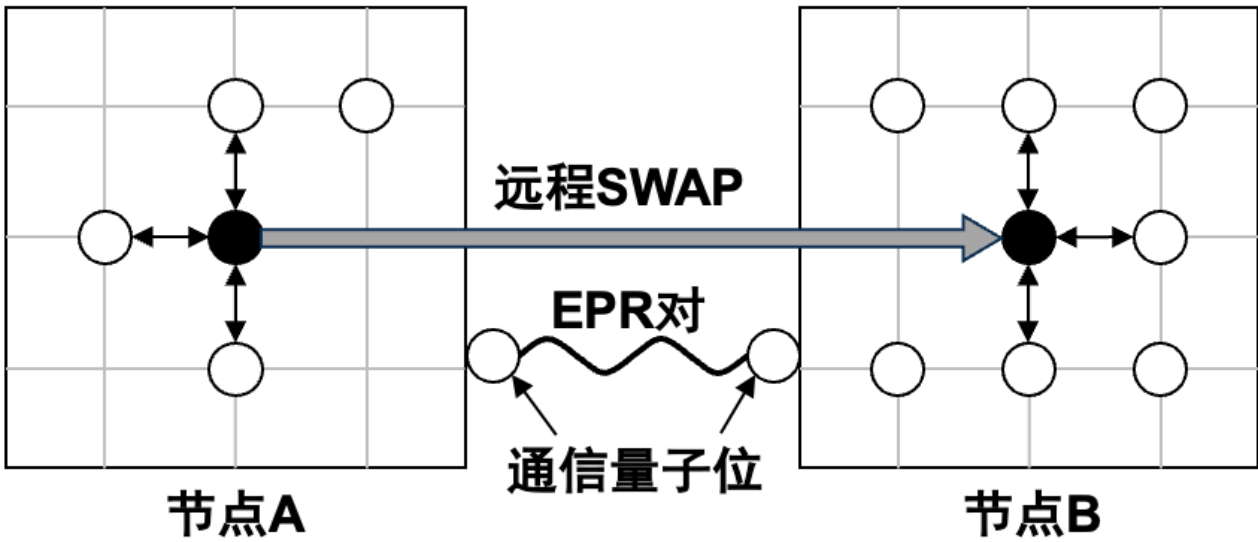
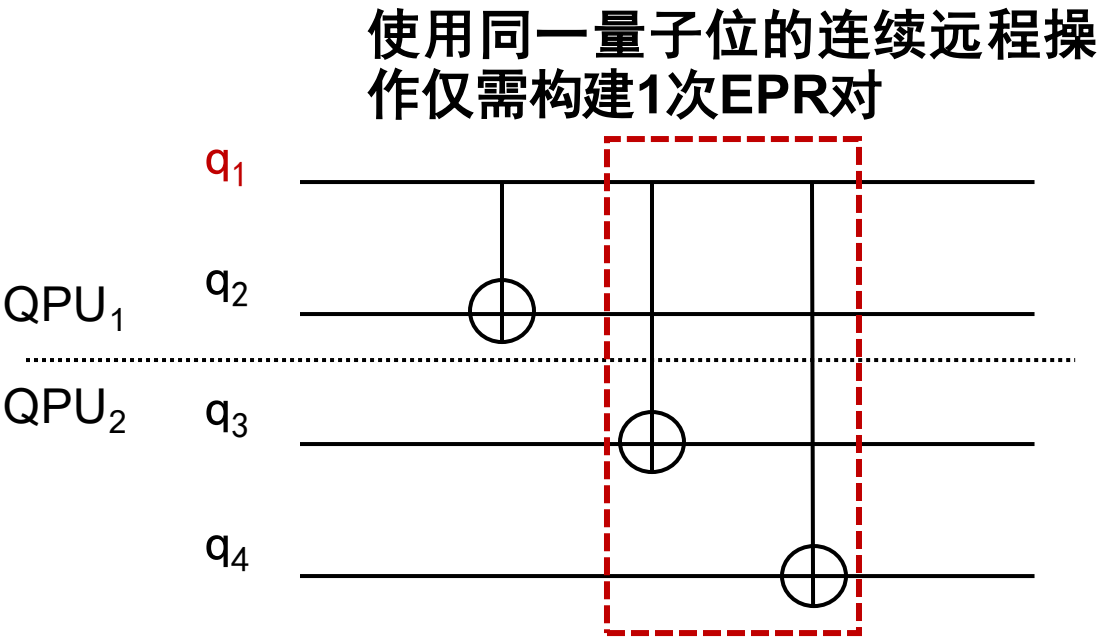
执行远程操作常用的Cat-Comm协议

Cat-Comm协议中的各类操作耗时及执行次数

采用Cat-Comm协议执行一次远程CNOT操作需额外执行EPR对构建、测量等操作，耗时约等同于25次本地CNOT操作

分布式量子计算环境中的映射转换机制

映射转换机制设计启发式函数，避免执行启发式代价较高的远程CNOT和SWAP操作，减少EPR对建立次数，降低远程通信开销



启发式函数设计：

- 远程操作开销=25×本地操作开销
- 连续使用同一量子位的远程操作仅产生一次远程操作开销

效果1：使用同一量子位的连续远程操作可**共享EPR对**执行，减少EPR对建立次数，降低远程通信开销。

效果2：若一个逻辑量子位与远程QPU节点上的量子位交互更多，可使用**跨QPU的远程SWAP操作**将该量子位移动至远程QPU，减少后续远程操作