



(12) 发明专利

(10) 授权公告号 CN 107980145 B

(45) 授权公告日 2021.05.25

(21) 申请号 201680038222.X

(22) 申请日 2016.06.28

(65) 同一申请的已公布的文献号
申请公布号 CN 107980145 A

(43) 申请公布日 2018.05.01

(30) 优先权数据
15174362.2 2015.06.29 EP

(85) PCT国际申请进入国家阶段日
2017.12.28

(86) PCT国际申请的申请数据
PCT/EP2016/065014 2016.06.28

(87) PCT国际申请的公布数据
W02017/001404 EN 2017.01.05

(73) 专利权人 奇偶量子计算有限公司
地址 奥地利因斯布鲁克

(72) 发明人 沃尔夫冈·莱希纳 菲利普·奥克
彼得·佐勒

(74) 专利代理机构 北京东方亿思知识产权代理
有限责任公司 11258
代理人 宗晓斌

(51) Int.Cl.
G06N 10/00 (2019.01)

(56) 对比文件
US 2015111754 A1, 2015.04.23
US 2012254586 A1, 2012.10.04
US 2015332164 A1, 2015.11.19
US 2011060780 A1, 2011.03.10
CN 101375302 A, 2009.02.25
审查员 史江峰

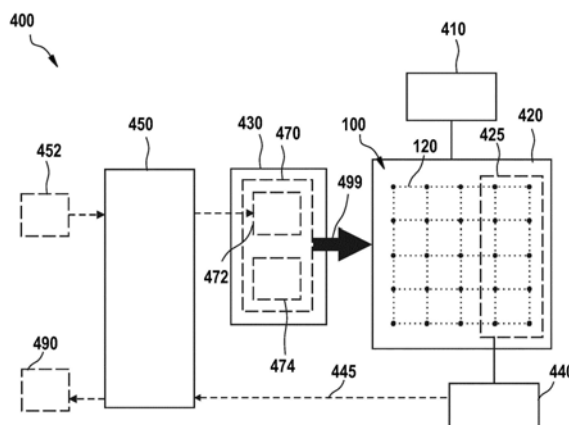
权利要求书2页 说明书25页 附图11页

(54) 发明名称

量子处理设备和方法

(57) 摘要

提供了一种使用包括多个量子位的量子系统来计算关于计算问题的解决方案的方法。该方法包括将计算问题编码为量子系统的问题哈密顿算子,其中,问题哈密顿算子是包括多个可调参数的单体哈密顿算子,并且其中,编码包括从计算问题确定针对多个可调参数的问题编码配置。该方法还包括将量子系统从初始量子态向量子系统的最终哈密顿算子的基态演化,其中,最终哈密顿算子是问题哈密顿算子和短程哈密顿算子的和,其中,问题哈密顿算子的多个可调参数在问题编码配置中,并且其中,短程哈密顿算子是d体哈密顿算子,其中,d与计算问题无关。该方法还包括测量多个量子位的至少一部分以获得量子系统的读出。该方法还包括从读出确定关于计算问题的解决方案。



1. 一种使用包括多个量子位的量子系统来计算关于计算问题的解决方案的方法,所述方法包括:

将所述计算问题编码为所述量子系统的问题哈密顿算子,其中,所述问题哈密顿算子是包括多个可调整参数的单体哈密顿算子,并且其中,所述编码包括从所述计算问题确定针对所述多个可调整参数的问题编码配置;

将所述量子系统从初始量子态向所述量子系统的最终哈密顿算子的基态演化,其中,所述最终哈密顿算子是所述问题哈密顿算子和短程哈密顿算子的和,其中,所述问题哈密顿算子的所述多个可调整参数在所述问题编码配置中,并且其中,所述短程哈密顿算子是d体哈密顿算子,并且d与所述计算问题无关;

测量所述多个量子位的至少一部分以获得所述量子系统的读出;以及

从所述读出确定所述计算问题的解决方案。

2. 根据权利要求1所述的方法,其中,将所述量子系统从所述初始量子态向所述最终哈密顿算子的所述基态的演化包括通过量子退火将所述量子系统的初始哈密顿算子转变到所述最终哈密顿算子。

3. 根据权利要求2所述的方法,还包括通过冷却所述量子系统来将处于所述初始量子态的所述量子系统初始化到所述初始哈密顿算子的基态。

4. 根据前述权利要求中任一项所述的方法,其中,所述多个可调整参数包括作用于所述多个量子位的单体场的多个场强和/或多个场方向。

5. 根据权利要求2或3所述的方法,其中,执行从所述初始哈密顿算子到所述最终哈密顿算子的量子退火包括将所述初始哈密顿算子绝热地演化为最终哈密顿算子。

6. 根据权利要求1-3中任一项所述的方法,其中,所述短程哈密顿算子是d体哈密顿算子,其中,d=4。

7. 根据权利要求1-3中任一项所述的方法,其中,所述短程哈密顿算子与所述计算问题无关。

8. 根据权利要求1-3中任一项所述的方法,其中,所述多个量子位是根据二维晶格或根据三维晶格进行排列的。

9. 根据权利要求1-3中任一项所述的方法,其中,所述多个量子位是根据二维晶格进行排列的,并且其中,所述短程哈密顿算子涉及与所述二维晶格的元格对应的四个量子位的组之间的相互作用。

10. 根据权利要求1-3中任一项所述的方法,其中,所述计算问题是NP难问题。

11. 根据权利要求1-3中任一项所述的方法,其中,所述问题哈密顿算子具有形式 $\sum_k J_k \sigma_z^{(k)}$,其中, $\sigma_z^{(k)}$ 是所述多个量子位中的第k个量子位的泡利算符,其中,每个 J_k 是系数,并且其中,所述系数 J_k 构成了所述问题哈密顿算子的所述多个可调整参数。

12. 根据权利要求1-3中任一项所述的方法,其中,确定所述问题编码配置包括:

将所述计算问题映射到辅助计算问题上,其中,所述辅助计算问题包括确定远程自旋模型的基态,特别是具有m体相互作用的远程自旋模型的基态,其中m是1,2或3;以及

从所述远程自旋模型确定所述问题编码配置。

13. 根据权利要求12所述的方法,还包括:

从所述远程自旋模型中的多个自旋闭环确定所述短程哈密顿算子。

14.一种用于计算关于计算问题的解决方案的装置,包括:

量子系统,该量子系统包括多个量子位;

冷却单元,该冷却单元适于将所述量子系统冷却到所述量子系统的基态;

可编程量子退火单元,该可编程量子退火单元适于通过量子退火将所述量子系统的初始哈密顿算子演化为所述量子系统的最终哈密顿算子,其中,所述最终哈密顿算子是问题哈密顿算子和短程哈密顿算子的和,其中,所述问题哈密顿算子是包含多个可调整参数的单体哈密顿算子;

测量设备,该测量设备适于测量所述多个量子位的至少一部分;以及

传统计算系统,该传统计算系统被连接到所述可编程量子退火单元和所述测量设备,其中,所述传统计算系统被配置为用于:

接收计算问题作为输入;

将所述计算问题编码为所述问题哈密顿算子,其中,所述编码包括从所述计算问题确定针对所述问题哈密顿算子的所述多个可调整参数的问题编码配置;以及

将所述问题编码配置通传至所述量子退火单元;

其中,所述可编程量子退火单元被配置为用于:

从所述传统计算系统接收所述问题编码配置;以及

通过量子退火将所述初始哈密顿算子演化为所述最终哈密顿算子,其中,所述问题哈密顿算子的所述多个可调整参数在所述问题编码配置中;以及

其中,所述传统计算系统还被配置为用于:

从所述测量设备接收所述量子系统的读出;以及

从所述读出确定所述计算问题的解决方案。

15.一种用于计算关于计算问题的解决方案的可编程量子退火设备,包括:

量子系统,该量子系统包括根据二维晶格排列的多个超导量子位;

磁通量偏置组件,该磁通量偏置组件包括多个磁通量偏置单元,所述多个磁通量偏置单元被配置为用于生成多个可调磁通量,其中,每个可调磁通量作用于所述多个超导量子位中的单个超导量子位;

耦合单元,该耦合单元包括至少一个超导量子干涉设备,所述超导量子干涉被配置为用于根据元格哈密顿算子来耦合所述多个超导量子位;以及

控制器,该控制器被连接到所述磁通量偏置单元和所述耦合单元,所述控制器被配置为用于:

接收针对所述量子系统的问题哈密顿算子的多个可调整参数的问题编码配置,其中,所述问题哈密顿算子是单体哈密顿算子,并且其中,所述问题编码配置对计算问题进行编码;以及

控制所述磁通量偏置组件和所述耦合单元来通过量子退火使所述量子系统的初始哈密顿算子演化为所述量子系统的最终哈密顿算子,其中,所述最终哈密顿算子是所述元格哈密顿算子和所述问题哈密顿算子之和,其中,所述问题哈密顿算子的所述多个可调整参数在所述问题编码配置中。

量子处理设备和方法

技术领域

[0001] 本文描述的实施例涉及用于使用量子系统来计算关于计算问题的解决方案的设备和方法,并且更具体地涉及包括多个量子位(qubit)的量子系统。

背景技术

[0002] 基于传统信息处理的计算设备(即,未利用量子力学效应的计算设备)一度只能作为执行特定操作的硬连线计算器出现。向完全可编程计算机的过渡彻底革新了这一领域,并开启了信息时代之门。当前的量子计算设备,即可能除了使用传统信息处理之外还利用量子力学效应来解决计算问题的计算设备,在某种意义上还停留在硬连线计算器的阶段,这是因为它们只能解决特别设计(即,“硬连线”)的计算问题。尤其是,所有平台和学科中的现有量子计算设备仍然没有完全实现可编程性和可扩展性。

[0003] 例如,在由D-WAVE SYSTEMS Inc.提供的基于超导量子位的量子计算设备中排列两组量子位,其中,可以在不同组中的量子位之间发生任意的相互作用,但是在同组中的量子位之间不发生相互作用。可以添加额外的量子位组,但是具有同样的限制。因此,这种量子计算设备受到硬连线约束的限制,这种约束不允许能实现完全可编程和可扩展架构的必要的相互作用。

[0004] 因此,需要用于使用量子系统解决计算问题的改进方法和设备。

发明内容

[0005] 根据一个实施例,提供了一种使用包括多个量子位的量子系统来计算关于计算问题的解决方案的方法。该方法包括将计算问题编码为量子系统的问题哈密顿算子,其中,问题哈密顿算子是包括多个可调参数的单体哈密顿算子,并且其中,编码包括从计算问题确定针对多个可调参数的问题编码配置。该方法还包括将量子系统从初始量子态演化为量子系统的最终哈密顿算子的基态,其中,最终哈密顿算子是问题哈密顿算子和短程哈密顿算子的和,其中,问题哈密顿算子的多个可调参数在问题编码配置中,并且其中,短程哈密顿算子是d体哈密顿算子,其中,d与计算问题无关。该方法还包括测量多个量子位的至少一部分以获得量子系统的读出。该方法还包括从读出确定计算问题的解决方案。

[0006] 根据另一实施例,提供了一种使用包括多个量子位的量子系统来计算关于计算问题的解决方案的方法。该方法包括将计算问题编码为量子系统的问题哈密顿算子,其中,问题哈密顿算子是包括多个可调参数的单体哈密顿算子,并且其中,编码包括从计算问题确定针对多个可调参数的问题编码配置。该方法还包括初始化处于初始量子态的量子系统。该方法还包括通过执行量子退火将量子系统从初始量子态演化为最终量子态,其中,执行量子退火包括将量子系统的初始哈密顿算子转变到量子系统的最终哈密顿算子。其中,最终哈密顿算子是问题哈密顿算子和短程哈密顿算子的和,其中,问题哈密顿算子的多个可调参数在编码问题配置中,并且其中,短程哈密顿算子是d体哈密顿算子,其中,d与计算问题无关。该方法还包括测量多个量子位的至少一部分以获得最终量子态的读出。该方法还

包括从读出确定计算问题的解决方案。

[0007] 根据另一实施例,提供了一种用于计算关于计算问题的解决方案的装置。该装置包括包含多个量子位的量子系统。该装置还包括冷却单元,该冷却单元适于朝量子系统的基态冷却量子系统。该装置还包括可编程量子退火单元,该可编程量子退火单元适于通过量子退火将量子系统的初始哈密顿算子演化为量子系统的最终哈密顿算子,其中,最终哈密顿算子是问题哈密顿算子和短程哈密顿算子的和,其中,问题哈密顿算子是包括多个可调参数的单体哈密顿算子。该装置还包括适于测量多个量子位的至少一部分的测量设备。该装置还包括连接到可编程量子退火单元和测量设备的传统计算系统。传统计算系统被配置为:接收计算问题作为输入;将计算问题编码为问题哈密顿算子,其中,编码包括从计算问题确定针对问题哈密顿算子的多个可调参数的问题编码配置;并将问题编码配置通传至量子退火单元。可编程量子退火单元被配置为用于:从传统计算系统接收问题编码配置;以及通过量子退火将初始哈密顿算子演化为最终哈密顿算子,其中,问题哈密顿算子的多个可调参数在问题编码配置中。传统计算系统还被配置为用于:从测量设备接收量子系统的读出;并从读出确定计算问题的解决方案。

[0008] 根据另一实施例,提供了一种用于计算关于计算问题的解决方案的可编程量子退火设备。可编程量子退火设备包括量子系统,该量子系统包括根据二维晶格排列的多个超导量子位。可编程量子退火设备还包括磁通量偏置组件,该磁通量偏置组件包括被配置为用于生成多个可调磁通量的多个磁通量偏置单元。其中,每个可调磁通量作用于多个超导量子位中的单个超导量子位。可编程量子退火设备还包括耦合单元,该耦合单元包括至少一个超导量子干涉设备,该超导量子干涉设备被配置为用于根据元格哈密顿算子来耦合多个超导量子位。可编程量子退火设备还包括连接到磁通量偏置单元和耦合单元的控制单元。控制单元被配置为接收针对量子系统的问题哈密顿算子的多个可调参数的问题编码配置,其中,问题哈密顿算子是单体哈密顿算子,并且其中,问题编码配置对计算问题进行编码。控制单元还被配置为用于控制磁通量偏置组件和耦合单元以通过量子退火将量子系统的初始哈密顿算子演化为量子系统的最终哈密顿算子。最终哈密顿算子是元格哈密顿算子和问题哈密顿算子的和,其中,问题哈密顿算子的多个可调参数在问题编码配置中。

[0009] 实施例还针对用于操作所公开的系统和设备的方法,以及对所公开的系统的使用以执行根据本文描述的实施例的方法。

[0010] 可以与本文描述的实施例结合的进一步的优点、特征、方面和细节从从属权利要求、说明书和附图中是显而易见的。

附图说明

[0011] 在本说明书的其余部分中,包括参考附图,更具体地阐述了对于本领域普通技术人员而言完整且能够实施的公开,其中:

[0012] 图1根据本文描述的实施例示出了用于使用量子系统计算关于计算问题的解决方案的装置;

[0013] 图2-图4根据本文描述的实施例示出了多个量子位的排列的示例;

[0014] 图5根据本文描述的实施例示出了单体哈密顿算子的概念;

[0015] 图6-图7根据本文描述的实施例示出了短程哈密顿算子的概念;

[0016] 图8示出了使用包括多个量子位的量子系统来计算关于计算问题的解决方案的方法。

[0017] 图9-图16根据本文描述的实施例示出了计算问题到问题哈密顿算子和相应的最终哈密顿算子的具体编码。

[0018] 图17示出了本文所描述实施例的涉及量子系统关于误差的鲁棒性的优点。

具体实施方式

[0019] 现在将详细参考各个示例性实施例，其中的一个或多个示例在每幅附图中示出。每个示例提供用以解释本发明，而不是作为对本发明的限制。例如，作为一个实施例的一部分所示出或描述的特征可以与另一实施例一起使用，以获得又一实施例。其意图是使本公开包括这些修改和变化。

[0020] 在以下对附图的描述中，相同的附图标记表示相同的组件。通常，仅描述关于各个实施例的差异。附图中示出的结构不一定是按比例绘制的，并且有可能包含以夸张方式绘制的细节以允许对实施例更好的理解。

[0021] 本文描述的实施例涉及包括多个量子位的量子系统。如本文所述，量子位可以指量子力学双态系统。量子位可以包括表示量子位的可能量子态的两个量子基态 $|0\rangle$ 和 $|1\rangle$ 。根据量子力学的叠加原理，每个形式为 $a|0\rangle + b|1\rangle$ 的叠加都是量子位可能的量子态。其中， a 和 b 是复数。在数学上，量子位可以用二维矢量空间表示。多个量子位可以具有与配置相对应的量子基态，其中多个量子位中的每个量子位处于量子态 $|0\rangle$ 或量子态 $|1\rangle$ 。考虑例如5个量子位，5个量子位的一个示例性量子基态可以是 $|00101\rangle$ 。其中，量子态 $|00101\rangle$ 表示第一量子位、第二量子位和第四量子位处于量子态 $|0\rangle$ 并且第三量子位和第五量子位处于量子态 $|1\rangle$ 的配置。对于 m 个量子位，有 2^m 个量子基态。考虑到叠加原理，针对多个量子位给定两个量子态，这两个量子基态的叠加也是该多个量子位的量子态。例如， $a|00101\rangle + b|11110\rangle + c|11111\rangle$ 的叠加形式，也是多个量子位的量子态，其中， a 、 b 和 c 为复数。在数学上，由 m 个量子位组成的量子系统可以由 2^m 维矢量空间表示。

[0022] 多个量子位可以包括多个超导量子位或由多个超导量子位组成，例如，transmon（传输线并联等离子振荡量子位）或磁通量量子位。超导量子位可以包括初级超导回路和次级超导回路。在初级超导回路中，顺时针和逆时针传播的超导电流可以分别形成超导量子位的量子基态 $|1\rangle$ 和 $|0\rangle$ 。另外，通过次级超导回路的磁通量偏置可以将量子基态 $|0\rangle$ 和 $|1\rangle$ 耦合。

[0023] 可选地，可以使用俘获离子的系统来实现量子系统。在这种情况下，量子位的量子基态 $|0\rangle$ 和 $|1\rangle$ 是由塞曼或超精细两级歧管或跨越碱土金属的禁戒光学跃迁能级或碱土金属族的正电荷离子（例如， Ca^{40+} ）而形成。

[0024] 作为又一备选方案，可以使用超冷原子来实现量子系统，例如，超冷中性碱金属原子，从激光场将这些原子俘获至光学晶格中或大间距晶格中。可以使用激光冷却来使原子向基态演化。量子位的量子基态是由原子的基态和高位里德伯态构成的。量子位可以通过激光来编址。

[0025] 作为又一备选方案，可以用量子点来实现量子系统。量子点量子位可以由GaAs/AlGaAs异质结构制造。量子位是以自旋状态进行编码的，这可以通过准备好将电势从单势

阱绝热地调节到双势阱来进行。

[0026] 作为又一备选方案,可以利用固态晶体中的杂质来实现量子系统,例如,氮空穴中心(NV中心),它是金刚石晶体中的点缺陷。其他杂质正在研究中,例如与铬杂质有关的色心、固态晶体中的稀土离子、或碳化硅中的瑕疵中心。NV中心有两个不成对的电子,这两个不成对的电子可与周围的核自旋一起来提供自旋-1基态,其中,该基态允许对两个生命期较长的显著缺陷级进行标识,所述显著缺陷级可以用来实现量子位。

[0027] 根据实施例,量子系统可以包括一个或更多、或者多个独立的q级量子系统,其中,q可以是常数。例如,q的范围可以从2到8,例如,3、4、5或6。单个q级量子系统可以包括由q个状态 $|0\rangle$ 、 $|1\rangle$ 、 $\dots$ 、 $|q-1\rangle$ 组成的基底。单个3级量子系统可被称为“三进制量子位(qutrit)”。

[0028] 量子系统的哈密顿算子可以表示量子系统的相互作用或多个相互作用。哈密顿算子是作用于量子系统的运算符。哈密顿算子的特征值对应于量子系统的能谱。哈密顿算子的基态是具有最低能量的量子系统的量子态。哈密顿算子的基态可以是在零温度下的量子态。

[0029] 如本文所描述,传统计算系统可以指利用传统位进行运算的计算系统。传统计算系统可以包括用于利用传统位处理信息的中央处理单元(CPU)和/或用于利用传统位存储信息的存储器。传统计算系统可以包括一个或多个常规计算机(例如,个人计算机(PC))和/或常规计算机网络。

[0030] 在提供实施例的详细描述之前,现在将参照图1来解释本公开的一些方面,图1根据本文描述的实施例示出了用于计算关于计算问题的解决方案的示例性设备400。

[0031] 图1中示出的设备400适于使用量子系统420来计算关于计算问题的解决方案。量子系统420包括多个量子位100,其中每个量子位在图1中均由黑点表示。根据图1所示的实施例,多个量子位100是根据二维晶格120,特别是二维正方晶格进行排列的。

[0032] 图1还示出了配置为用于冷却量子系统420的冷却单元410。冷却单元410可以将量子系统420冷却到工作温度。

[0033] 图1还示出了传统计算系统450。传统计算系统450被配置为接收待解决的计算问题452作为输入。计算问题452可例如是NP难问题(例如,旅行商问题或伊辛自旋模型问题)。其中,“NP”代表“非确定性多项式时间”。

[0034] 传统计算系统450还被配置为用于将计算问题452编码为量子系统420的问题哈密顿算子472。根据图1中所示的示例性实施例,问题哈密顿算子472具有 $H^{\text{问题}} = \sum_k J_k \sigma_z^{(k)}$ 形式,其中, $\sigma_z^{(k)}$ 是作用于多个量子位100的第k个量子位的泡利算符,并且其中,每个 J_k 是由一个或多个外部实体(例如,磁场)确定的可调参数,该可调参数可在每个量子位k上单独进行调整。例如, J_k 可能是影响第k个量子位的可调磁场的强度。多个可调外部实体(例如,磁场)可被提供,其中,每个可调外部实体均影响多个量子位的单个量子位。通过对外部实体进行调节,可以根据计算问题452来调整参数 J_k 。

[0035] 如传统计算系统450所执行的那样,对问题哈密顿算子472中的计算问题452进行编码包括从计算问题452确定针对多个可调整参数 J_k 的问题编码配置。对于每个可调参数 J_k ,可以根据计算问题452来确定参数值。因此,问题编码配置与计算问题有关。

[0036] 图1还示出了可编程量子退火单元430,其适于通过将量子系统420的初始哈密顿算子转变到量子系统420的最终哈密顿算子来执行量子退火。

[0037] 根据关于图1所描述的实施例,初始哈密顿算子具有 $H^{\text{初始}} = \sum_k a_k \sigma_x^{(k)}$ 的形式,其中, k 是系数,并且其中, $\sigma_x^{(k)}$ 是作用于多个量子位100中第 k 个量子位上的泡利算符。泡利算符 $\sigma_z^{(k)}$ 和 $\sigma_x^{(k)}$ 可以是非对易泡利算符,特别是反对易泡利算符。初始哈密顿算子 $H^{\text{初始}}$ 可以与计算问题452无关。

[0038] 最终哈密顿算子是问题哈密顿算子472和短程哈密顿算子474的和。根据示例性实施例,短程哈密顿算子474是表示与元格对应的量子位组之间的相互作用的元格哈密顿算子。元格可以例如是二维正方晶格的基本正方形,其中,量子位是根据二维正方晶格排列的。下面更详细描述了图7示出的根据本文描述的实施例的二维晶格的元格370的示例。短程哈密顿算子是 d 体哈密顿算子,例如4体元格哈密顿算子,其中, d 与计算问题452无关。根据实施例,短程哈密顿算子474可与计算问题452无关。

[0039] 如上所述,计算问题452被编码在问题哈密顿算子472中,特别是在可调参数 J_k 的问题编码配置中。根据实施例,编码使得作为问题哈密顿算子472和短程哈密顿算子474之和的最终哈密顿算子470具有包含关于计算问题452的解决方案的信息的基态。因此,如果量子系统420处于最终哈密顿算子470的基态,可以通过测量量子系统420来揭示关于计算问题的信息。

[0040] 根据本文描述的实施例,并且如图1中的箭头499所指示的,量子系统420朝向最终哈密顿算子470的基态演化,其中,问题哈密顿算子472的多个可调参数在问题编码配置中。根据图1所示的实施例,量子系统420通过执行量子退火的量子退火单元430向最终哈密顿算子470的基态演化。其中,执行量子退火包括将初始哈密顿算子转变到最终哈密顿算子470。

[0041] 根据示例性实施例,量子系统420在初始量子态下通过朝向初始哈密顿算子的基态冷却量子系统420而被初始化。此外,可编程量子退火单元430适于通过执行量子退火将量子系统420从初始时间的最初量子态演化到最终时间的最终量子态。量子退火可以包括将初始时间的最初哈密顿算子转变到最终时间的最终哈密顿算子470,以使量子系统420从初始量子态演化到最终量子态。可以在量子系统420由冷却单元410被基本维持在工作温度时执行量子退火。

[0042] 量子退火可以包括经由插值哈密顿算子 $H(t)$ 逐步地(例如,绝热地)将初始哈密顿算子 $H^{\text{初始}}$ 转变到最终哈密顿算子 $H^{\text{最终}} = H^{\text{问题}} + H^{\text{短程}}$,其中, $H^{\text{短程}}$ 是短程哈密顿算子。根据图1所示的示例性实施例,插值哈密顿算子具有形式 $H(t) = A(t)H^{\text{初始}} + B(t)H^{\text{问题}} + C(t)H^{\text{短程}}$ 。其中, $H^{\text{初始}}$ 可以表示初始哈密顿算子, $H^{\text{最终}}$ 可以表示最终哈密顿算子, t 可以是时间参数,并且 $A(t)$ 、 $B(t)$ 和 $C(t)$ 可以是与时间参数 t 有关的插值系数。当 t 是初始时间 t_0 时,插值系数 $A(t_0)$ 可以等于初始值1,并且插值系数 $B(t_0)$ 可以等于初始值0。或者,当 t 是初始时间 t_0 ,插值系数 $A(t_0)$ 可能远大于插值系数 $B(t_0)$ 。当 t 是最终时间 $t_{\text{最终}}$ 时,插值系数 $A(t_{\text{最终}})$ 可以等于最终值0,并且 $B(t_{\text{最终}})$ 和 $C(t_{\text{最终}})$ 可以分别等于最终值1,从而使插值哈密顿算子 $H(t_{\text{最终}})$ 等于 $H^{\text{最终}}$ 。或者,当 t 是最终时间 $t_{\text{最终}}$ 时,插值系数 $A(t_{\text{最终}})$ 可以远小于插值系数 $B(t_{\text{最终}})$ 和 $C(t_{\text{最终}})$ 。执行量子退火可以包括逐步地(例如,绝热地)将插值系数 $A(t)$ 、 $B(t)$ 和 $C(t)$ 从它们在初始时间的初始值改变到它们在最终时间的最终值。相应地,插值哈密顿算子从初始时间的初始哈密顿算子逐步变为最终时间的最终哈密顿算子。具体而言,可以执行如本文所述的量子退火过程,始终使 $C(t) = B(t)$ 。

[0043] 鉴于例如量子力学的绝热定理,但是并不希望受限于任何特定的理论,如果初始哈密顿算子到最终哈密顿算子470的转变足够缓慢地被执行,对于从初始时间到最终时间的时间参数 t 的所有值,量子系统420的插值哈密顿算子的量子态将会是基态或者至少与插值哈密顿算子 $H(t)$ 的基态高度近似。相应地,量子退火将初始时间的初始量子态演化为最终时间的最终量子态,其中,最终量子态是最终哈密顿算子的基态,或者至少与最终哈密顿算子470的基态高度近似。

[0044] 图1还示出了适于测量量子系统420的测量设备440。如图所示,测量设备440可以适于测量多个量子位100的量子位的部分425。使用测量设备440,部分425可以被测量以获得最终量子态的读出。与最终哈密顿算子的基态高度近似的最终量子态包含关于计算问题452的解决方案的信息。最终量子态的读出可以揭示关于解决方案的信息。根据图1所示的实施例,测量设备440可以向传统计算系统450提供读出,如图1中箭头445所示。传统计算系统450可以从读出来确定关于计算问题的解决方案490。传统计算系统450可以至少确定计算问题的试验解,并验证试验解是否实际上是计算问题的解决方案。对于NP问题,验证是可以在多项式时间内进行的计算,并且通常可以较为容易地计算。如果事实证明没有发现计算问题的解决方案,则重复该过程直到找到计算问题的解决方案。

[0045] 鉴于以上所述,根据一个实施例,提供了一种使用包括多个量子位的量子系统来计算关于计算问题的解决方案的方法。该方法包括将计算问题编码为量子系统的问题哈密顿算子,如图8中的框510所示。问题哈密顿算子是包括多个可调参数的单体哈密顿算子,并且编码包括从计算问题确定针对多个可调参数的问题编码配置。该方法还包括使量子系统从初始量子态向量子系统的最终哈密顿算子的基态演化,如图8中的框520所示。最终哈密顿算子是问题哈密顿算子和短程哈密顿算子之和,其中,问题哈密顿算子的多个可调参数在问题编码配置中。在一些实施例中,短程哈密顿算子是 d 体哈密顿算子, d 与计算问题无关。该方法还包括测量多个量子位的至少一部分以获得量子系统的读出,如图8中的方框530所示。该方法还包括从读出确定关于计算问题的解决方案,如图8中的框540所示。

[0046] 本文描述的实施例因此允许使用量子系统确定计算问题的解决方案,例如,NP难问题。与仅使用传统计算系统(即,不使用量子系统)确定计算问题的解决方案相比,本文描述的实施例可以使解决计算问题所需的计算时间缩短。换句话说,与传统的计算系统相比,本文描述的实施例可以允许更快地解决计算问题,或者甚至可以直接找到这样的解决方案,这是因为在传统的计算系统上对解决方案的计算可能会花很长时间。

[0047] 另一优点是关于问题哈密顿算子是单体哈密顿算子的方面。其他类型的问题哈密顿算子,特别是涉及大量的量子位之间的相互作用或彼此远距离的量子位之间相互作用(远程相互作用)的问题哈密顿算子可能是不可行的,或者至少需要设置非常复杂的量子系统以及驱动量子计算的组件,如本文所述的单体问题哈密顿算子可以使用更简单的设置(即,更简单的量子处理设备)来实现。另外,本文描述的实施例的具有可调参数的问题哈密顿算子提供了完全可编程系统,利用该系统可以对范围更广的计算问题进行编码。因此,根据本文所描述的实施例的设备和方法允许计算关于范围广泛的计算问题(例如,NP难问题)的解决方案。与仅可编码有限数目的问题的系统相比,其中,问题哈密顿算子所需的某些相互作用被硬连线到系统中,本发明提供了灵活度更高和更强大的设备和方法。

[0048] 又一优点是关于最终哈密顿算子是问题哈密顿算子和短程哈密顿算子的和的方

面。短程哈密顿算子可以是被加项哈密顿算子的和,其中,被加项哈密顿算子可以是如本文所述的约束哈密顿算子。短程哈密顿算子具有无需构造远距离量子位之间的相互作用的优点。这与需要远程相互作用的哈密顿算子形成对比,因为这种哈密顿算子在量子系统上可能是不可行的,或者至少需要非常复杂设置的量子处理设备。

[0049] 在短程d体哈密顿算子的参数d与计算问题无关的情况下,意味着可以用相同的量子处理设备来实现计算,而不管哪个计算问题被编码。如果短程哈密顿算子与计算问题无关,则提供了短程哈密顿算子另外的优点,即,由短程哈密顿算子确定的量子位间的相互作用无需针对不同的计算问题而改变。

[0050] 本文描述的实施例提供了用于计算关于计算问题的解决方案的可扩展构架。对于给定的量子系统,可以计算出具有某一最大大小的各种计算问题的解决方案,其中,最大大小由量子系统的量子位的数目决定。为了计算超出该最大大小的计算问题的解决方案,需提供更大的量子系统,即含有更多数目的量子位的量子系统,其中,根据本文描述的实施例,具有相应的问题哈密顿算子、短程哈密顿算子和最终哈密顿算子,以便处理大大小小的计算问题。通过选择具有适当的数目上多的量子位的量子系统,可以针对任何期望大小的计算问题来计算解决方案。根据本文描述的实施例,无论量子系统的量子位的数目如何,问题哈密顿算子是单体哈密顿算子,并且最终哈密顿算子是问题哈密顿算子和短程哈密顿算子的和。因此,提供了一种用于计算关于计算问题的解决方案的可扩展架构。

[0051] 根据一些实施例,计算问题可能是判定问题。判定问题可能是指被表述为是/否问题的计算问题。判定问题的解决方案可以是“是”或“否”。或者,判定问题的解决方案可以是单个传统位,即0或1。根据其他实施例,计算问题可以以不同于判定问题的方式来表达。

[0052] 计算问题可以是在例如计算机科学、物理学、化学或工程学领域中考虑的各种计算问题中的任何一个。为了解释的目的,但并不意在限制范围,下面讨论三个计算问题的示例。下面讨论的三个示例是判定问题的示例。

[0053] 根据本文描述的实施例的计算问题的第一示例是“旅行商问题”。旅行商问题涉及第一城市列表和第一列表中的每对城市之间距离的第二列表。旅行商问题如下:“给定第一列表、第二列表和常数K,是否存在路程长度至多为K的旅行,其中,旅行(i)只访问第一列表中的每个城市一次,并(ii)最终返回旅行开始的城市?”

[0054] 根据本文描述的实施例的计算问题的第二示例是与数学图着色有关的“三着色问题”。数学图可以包括一组顶点和表示顶点对之间的连接的一组边。数学图的三着色是向数学图的每个顶点分配的三种可能的颜色之一(例如,“红”、“绿”或“蓝”),其中,任一对由边连接的顶点被分配不同的颜色。由于并不是所有数学图都存在三着色问题。涉及三着色问题时可能会提出这样的问题:“给定数学图是否存在三着色问题?”

[0055] 根据本文描述的实施例的计算问题的第三示例涉及伊辛(Ising)自旋模型。伊辛自旋模型是表示多个自旋 $s_1, s_2, \dots, s_n$ 之间的相互作用的物理模型,其中,每个自旋 s_i 是可以具有值1或值-1的变量,其中,i的范围为1到n。对于多个自旋,可以考虑伊辛能量函数 $H(s_1, s_2, \dots, s_n)$,其中,伊辛能量函数具有如下形式:

$$[0056] \quad H(s_1, s_2, \dots, s_n) = \sum_{ij} c_{ij} s_i s_j + \sum_i c_i s_i$$

[0057] 其中,每个 c_{ij} 是耦合系数,并且每个 c_i 是场系数。伊辛能量函数涉及成对相互作用,其中,自旋 s_i 和 s_j 之间的成对相互作用由伊辛能量函数中的项 $c_{ij} s_i s_j$ 表示。耦合系数 c_{ij}

的绝对值反映了自旋 s_i 和 s_j 之间的成对相互作用的强度。耦合系数 c_{ij} 的符号反映了成对相互作用的性质,例如,铁磁或反铁磁相互作用。伊辛自旋模型可以是远程伊辛自旋模型。远程伊辛自旋模型可以包括根据距离量度彼此远离的自旋对之间的相互作用。远程伊辛自旋模型可以包括彼此相距至少为两个自旋之间的最大距离的对数的距离的自旋对之间的相互作用。一些远程伊辛自旋模型,例如全数伊辛自旋模型,可涉及所有自旋对之间的相互作用。例如,每个耦合系数 c_{ij} 都非零的伊辛自旋模型可以被认为是远程伊辛自旋模型。

[0058] 伊辛能量函数还包括表示自旋 s_i 与影响自旋 s_i 但不影响其他自旋的外部场之间的相互作用的项 $c_i s_i$ 。影响自旋 s_i 的场的强度和方向分别由场系数 c_i 的绝对值和正负号来表示。与伊辛自旋模型相关的计算问题(本文被称作伊辛自旋模型问题)可以如下表述为:“给定一组耦合系数 c_{ij} ,一组场系数 c_i 和常数 K ,是否存在使 $H(s_1, s_2, \dots, s_n)$ 小于 K 的自旋的配置 $(s_1, s_2, \dots, s_N)$ 。”

[0059] 根据本文描述的实施例,计算问题可以包括多个输入变量。多个输入变量可以表示关于要解决的计算问题的信息。例如,参考上述计算问题的三个示例,多个输入变量可以包括:第一城市列表和第二距离列表(针对旅行商问题);图的顶点和边的集合(针对三着色问题);耦合系数 c_{ij} 和场系数 c_i 的集合(针对伊辛自旋模型问题)。

[0060] 根据实施例,计算关于计算问题的解决方案可以包括计算关于计算问题的试验解。试验解可能是也可能不是关于计算问题的真正解决方案。对于计算问题属于复杂性类为NP的实施例,计算关于计算问题的解决方案可以包括计算一组见证变量,如下所述。

[0061] 根据本文描述的实施例,使用包括多个量子位的量子系统来计算关于计算问题的解决方案。多个量子位可以包括至少8个量子位,特别是至少3个量子位。另外地或替代地,多个量子位可以包括 N 个量子位,其中, N 在100和10000个量子位之间,优选地甚至更多个量子位。应该理解的是,为了说明和解释的目的在本文描述的附图中示出了多个量子位100,但是量子位的实际数目可以与其不同。

[0062] 量子系统的量子位可以排列在二维表面上或三维表面上,该二维表面或三维表面可以是平面的或可以具有曲率。图2-图4根据本文描述的实施例示出了多个量子位100的不同空间排列。这些空间排列可以是量子计算设备的布局,例如可以在其上体现量子位和/或其他单个量子系统(例如,诸如qutrit之类的 q 级系统)的量子芯片。如图2所示,多个量子位100可以根据二维平面表面110来排列,如图2中虚线所示。应当理解的是,图2中所示的二维表面110是出于能够可视地表示多个量子位的二维空间排列的目的而绘制的,但是二维表面110不必是在其上排列多个量子位100的物理上有形的表面。类似的考虑同样适用于如下所述的根据二维晶格或三维晶格来排列多个量子位的实施例。

[0063] 根据另外的实施例,并且如图3所示,可以根据如虚线所示的二维晶格120来排列多个量子位100。晶格(例如,二维晶格或三维晶格)可以包括根据规则的网格在空间上排列的多个节点。在图3中,由多个黑点表示的多个量子位100,这些量子位对应于二维晶格120的节点。如图所示,多个量子位100中的每个量子位可以排列在二维晶格120的节点上。在图3所示的示例性实施例中,二维晶格120是二维正方晶格。根据备选的实施例,二维晶格120可以例如是六方形晶格或三角形晶格,或者任何其他类型的二维晶格。

[0064] 根据实施例,多个量子位可以根据三维晶格来排列。类似于参考图3所提供的讨论,多个量子位可以对应于三维晶格的节点。多个量子位中的每个量子位可以被排列在三

维晶格的节点处。三维晶格可以是三维正方晶格。与二维晶格的情况一样,也可以考虑其他类型的三维晶格。

[0065] 二维晶格是平面结构,与例如三维晶格或一些不规则的空间排列相比,二维晶格可以提供更简单的量子位空间排列。

[0066] 根据实施例,多个量子位可以根据二维晶格的一部分或根据三维晶格的一部分来排列。图4示出了多个量子位100根据二维晶格的三角形部分121排列的示例性实施例。图4示出了三角形部分121的顶视图。三角形部分对应于根据一些被配置为用于执行本文所述的方法的实施例的量子计算设备的布局。也可考虑具有不同形状的晶格部分。

[0067] 问题哈密顿算子是包括多个可调参数的单体哈密顿算子。如本文所述,量子系统的单体哈密顿算子可以指在两个或更多个量子位的组之间不发生相互作用的哈密顿算子。单体哈密顿算子可以是多个被加项哈密顿算子的和。每个被加项哈密顿算子可以作用于多个量子位的单个量子位。单体哈密顿算子可以具有形式 $H = \sum_i H_i$,其中,每个 H_i 是被加项哈密顿算子,其仅作用于第 i 个量子位。单体哈密顿算子可以表示多个量子位和外部实体(例如,磁场或电场)之间的相互作用,其中,每个量子位与外部实体单独地相互作用。

[0068] 图5根据本文描述的实施例示出了单体哈密顿算子的示意图。为了具体而非意在限制范围的目的,图5中所示的多个量子位包括10个量子位,即量子位201至210,它们排列在二维方形晶格中构成三角形的部分中,类似于图4。参考图5描述的单体哈密顿算子是10个被加项哈密顿算子221到230的和。在图5中,每一个被加项哈密顿算子221到230被示意性地绘制成围绕单个量子位的正方形,表示每个被加项哈密顿算子作用于单个量子位。例如,被加项哈密顿算子221被表示为包围量子位201的单个正方形,其表示被加项哈密顿算子221作用于量子位201,但不作用于其余量子位202至210中的任何一者。

[0069] 问题哈密顿算子(其为单体哈密顿算子)可以是如上所述的被加项哈密顿算子的和。问题哈密顿算子的多个可调参数可以包括被加项哈密顿算子的多个可调参数。单体哈密顿算子的一个或多个被加项哈密顿算子,特别是被加项哈密顿算子中的每一者均可以包括一个或多个可调参数。

[0070] 如本文所述,问题哈密顿算子的可调参数可以指代表多个量子位的量子位与外部实体之间的相互作用的强度和/或方向的参数。外部实体可以例如包括以下各项中的至少一者:一个或多个磁场、一个或多个电场、和/或一个或多个激光场、微波或机械变形引起的相移。通过调整外部实体和/或通过调整量子位和外部实体之间的相互作用的强度和/或类型,可以实现对问题哈密顿算子的可调参数的调节。因此,可调参数可以表示可调节的相互作用,例如,在量子系统中非硬连线的相互作用。

[0071] 根据可与本文描述的其他实施例组合的实施例,问题哈密顿算子的多个可调参数可包括作用于多个量子位的单体场的多个场强和/或多个场方向。作用于多个量子位的场例如在涉及超导量子位的实施例中可以包括一个或多个磁场和/或一个或多个电场。

[0072] 单体场可以指影响多个量子位中的单个量子位的场。根据实施例,根据可能不同的场强和/或可能不同的场方向,多个单体场可以包括影响相应量子位的不同的单体场。例如,第一单体场和第二单体场可以分别影响多个量子位中的第一量子位和第二量子位。其中,第一单体场和第二单体场可以例如都是磁场,但可能具有不同的场强和/或场方向。

[0073] 根据可与本文描述的其他实施例组合的实施例,单体哈密顿算子具有形式 $\sum_k J_k$

$\sigma_z^{(k)}$, 其中, $\sigma_z^{(k)}$ 是多个量子位的第k个量子位的泡利算符, 其中, 每个 J_k 是系数, 并且其中, 系数 J_k 构成单体哈密顿算子的多个可调参数。根据一些实施例, 泡利算符 $\sigma_z^{(k)}$ 可以是与第一空间方向相关联的泡利算符。

[0074] 对于包括多个超导量子位的量子系统, 单体哈密顿算子(例如, 问题哈密顿算子)可以通过与多个超导量子位相互作用的多个磁通量来实现。磁通量或磁通量偏置可以通过超导量子位的初级超导回路和次级超导回路扩展。问题哈密顿算子的多个可调参数可通过调节多个磁通量或磁通量偏置来调节。

[0075] 对于利用俘获离子实现的量子系统, 单个离子可以通过空间分离或能量分离来编址。空间分离的情况涉及已经通过和/或已经从声光偏转器、声光调制器、微镜器件等反射的激光束的使用。能量分离的情况涉及改变内部跃迁频率的磁场梯度的使用, 允许通过能量差(即, 所施加场的失谐)来进行选择。单体哈密顿算子可以通过激光场或微波与内部跃迁的共振或非共振或者通过空间磁场差来实现。

[0076] 对于用量子点实现的量子系统, 可以用电场来实现单体哈密顿算子。

[0077] 对于利用NV中心实现的量子系统, 使用通过应用微波脉冲实现的磁共振, 可以在纳秒时间尺度上相干地对量子位的状态进行操纵。量子位状态的选择性操纵也可以有条件地基于附近的核自旋状态来实现。

[0078] 计算问题可被映射到问题编码配置。问题编码配置可以与计算问题的信息有关和/或包含关于计算问题的信息。确定问题编码配置的动作可以包括确定和/或计算多个可调参数中的每一者的值。每个值均可以从计算问题确定和/或计算。

[0079] 根据实施例, 通过确定相应的不同的问题编码配置, 可以将不同的计算问题编码到问题哈密顿算子中。例如, 第一计算问题和第二计算问题可以被编码到问题哈密顿算子中, 由此通往多个可调参数的第一问题编码配置以及第二问题编码配置。如果第二计算问题不同于第一计算问题, 则可调参数的第二问题编码配置可以不同于第一问题编码配置。

[0080] 根据实施例, 该方法可以包括将计算问题或者至少关于计算问题的信息提供给传统计算系统, 例如, 图1中所示的传统计算系统450。例如, 如本文所述, 计算问题的多个输入变量可被提供给传统计算系统。根据实施例, 可以由传统计算系统将计算问题编码在问题编码配置中。传统计算系统可以被配置为用于从计算问题(例如, 从计算问题的多个输入变量)计算问题编码配置。

[0081] 如本文所使用的短程哈密顿算子的术语可以指代表多个量子位的相互作用的哈密顿算子, 其中, 在彼此距离大于相互作用截断距离(cut-off distance)的量子位之间不发生相互作用。相互作用截断距离可以是恒定的距离。与多个量子位中的量子位之间的最大量子位距离相比, 相互作用截断距离可以小得多。例如, 相互作用截断距离可以是最大量子位距离的30%或以下, 特别是20%或更低, 更特别地是10%或更低。对于根据晶格排列的多个量子位, 短程哈密顿算子可以是r射程哈密顿算子, 其中, 在彼此距离大于晶格的基本距离(晶格常数)r倍的距离的量子位之间不发生相互作用。其中, r可以从1至5, 例如 $r=\sqrt{2}, 2, 3, 4$ 或5。根据本文描述的实施例的晶格的基本距离的概念将在下面参考例如图6和7进行说明。

[0082] 不管量子系统的量子位的数目如何, 如本文所述, 量子系统的元格哈密顿算子和成对最近邻哈密顿算子应当被视为短程哈密顿算子。

[0083] 如本文所述,短程哈密顿算子的示例是单体哈密顿算子。对于单体哈密顿算子,由于在两个或更多个量子位的组之间不存在相互作用,而仅仅存在各个量子位与外部实体(例如,磁场或电场)之间的相互作用,所以相互作用截断距离可以被认为是零。

[0084] 图6和图7还示出了针对一些实施例的短程哈密顿算子的示例,在这些实施例中多个量子位100根据二维正方晶格120排列并且位于形成二维正方晶格的三角形部分的二维正方晶格的节点的位置处。为了具体而非意在限制范围的目的,图6和图7所示的示例性二维正方晶格120包括55个排列成三角形的量子位,其中,三角形在 10×10 的正方晶格内,其包含10行和10列。当沿x方向310遍历二维晶格120的任何一行量子位(例如,虚线指示的行391)时,该行中的连续量子位彼此间隔基本距离D(也被称为x方向上的晶格常数)排列。基本距离D由附图标记350表示。类似地,当沿着y方向320遍历二维晶格120的任何一列量子位(例如,列392)时,列中的连续量子位间隔基本距离(也被称为y方向上的晶格常数)。在图6和图7中,晶格是正方晶格并且在x方向和y方向上的基本距离(晶格常数)是相同的。但是,x方向和y方向上的晶格常数也可以不同。如图所示,x方向310垂直于y方向320。图6和图7中示出的多个量子位100的最大量子位距离是量子位301和量子位302之间的距离。最大量子位距离等于 $(9\sqrt{2})D$ 。

[0085] 参照图6描述的短程哈密顿算子的示例是成对最近邻哈密顿算子。成对最近邻哈密顿算子可仅涉及二维晶格120上的相邻量子位对之间的相互作用,其中,一对相邻量子位可指彼此相距基本距离D的一对量子位。图6中所示的量子位362和364作为一对相邻量子位的示例。成对最近邻哈密顿算子可以是多个被加项哈密顿算子的和,其中,每个被加项哈密顿算子表示一对相邻量子位之间的相互作用。对于参考图6中描述的成对最近邻哈密顿算子,相互作用截断距离等于基本距离D。因此,相互作用截断距离比最大量子位距离小得多,即,相互作用截断距离D小于最大量子位距离的10%。

[0086] 参照图7描述的短程哈密顿算子的示例是元格哈密顿算子。在图7中,以黑色圆圈表示的55个量子位再次排列在二维方形晶格120中并在其中形成三角形。二维方形晶格120的元格是二维方形晶格120的基本正方形,如图7中用附图标记370所示。该元格370包括量子位371、372、373和374,其中,量子位371被设置为与量子位372和量子位374的距离为基本距离D,并且其中,量子位373也被设置为与量子位372和374的距离为基本距离D。另外,在另一行中添加用黑色矩形表示的辅助量子位以补全量子位的元格。例如,辅助量子位305将量子位302、303和304的元格补全。可以在特定量子态(例如 $|1\rangle$)中准备辅助量子位。对于这种晶格几何形状,元格哈密顿算子可只涉及对应于二维正方晶格120中的元格的四个量子位的组之间,或者三个量子位和一个附属量子位的组之间的相互作用。元格哈密顿算子可以是多个被加项哈密顿算子的和。每个被加项哈密顿算子可以表示与晶格上的量子位的元格对应的相互作用或者与量子位和辅助量子位的元格对应的相互作用。或者,可以不使用辅助量子位,并且元格哈密顿算子由此仅包括描述三个量子位之间的相互作用的被加项哈密顿算子。对于参考图7描述的元格哈密顿算子,由于元格中两个量子位之间的最大距离是 $\sqrt{2}D$,所以相互作用截断距离是 $\sqrt{2}D$ 。例如,量子位371和量子位373之间的距离是 $\sqrt{2}D$ 。因此,相互作用截断距离与最大量子位距离相比要小得多,即,相互作用截断距离 $\sqrt{2}D$ 低于最大量子位距离的12%。

[0087] 对于包括多个超导量子位的量子系统,可以使用多个附属量子位来实现元格哈密顿算子,其中,附属量子位可以排列在每个元格内,例如,在每个元格的中心。 $K_{km} \sigma_z^{(k)} \sigma_z^{(m)}$ 形式的量子位之间的相互作用可以通过耦合单元(例如,如本文所述的感应耦合单元)来实现。耦合单元包括超导量子干涉设备。对超导量子干涉设备施加可调整的磁通量偏置允许对系数 K_{km} 进行调整。然后,通过 $H_{\text{短程,元格}} = C(\sigma_z^{(1)} + \sigma_z^{(2)} + \sigma_z^{(3)} + \sigma_z^{(4)} - 2\sigma_z^{(\text{元格})} - 1)^2$ 来实现元格哈密顿算子的被加项哈密顿算子,该式仅包括对应于在 $|0\rangle$ 和 $|1\rangle$ 量子基态之间施加的能量差的形式 $\sigma_z^{(k)} \sigma_z^{(m)}$ 与单体 $\sigma_z^{(1)}$ 项之间的成对相互作用。在此, $\sigma_z^{(p)}$ 表示附属量子位。短程哈密顿算子是被加项哈密顿算子 $H_{\text{短程,元格}}$ 的总和。对于涉及附属量子位的实施例,将多个附属量子位的形式为 $\hbar \sum_p \sigma_x^{(p)}$ 的单体哈密顿算子添加到初始哈密顿算子。

[0088] 可选地,可以在没有附属量子位的情况下,例如使用三岛超导设备作为transmon量子位来实现元格哈密顿算子。通过将两个额外的超导量子干涉设备集成到耦合单元中并且通过将元格的四个量子位电容地耦合到共面谐振器,可以实现形式为 $-C\sigma_z^{(1)} \sigma_z^{(2)} \sigma_z^{(3)} \sigma_z^{(4)}$ 的被加项哈密顿算子。耦合系数C可以由通过两个额外的超导量子干涉设备的时间相关的磁通量偏置来调节。

[0089] 对于利用俘获离子实现的量子系统,两个离子之间的相互作用是通过声子总线传输的。为此,使用相对声子的蓝和/或红边带跃迁失谐的激光或微波。失谐和激光的强度可以使相互作用的强度被调节。也可以使用通过里德伯激发的直接相互作用。

[0090] 对于用冷原子实现的量子系统,量子位之间的相互作用可以通过激光激发d原子的激光失谐来控制。在这种情况下,哈密顿算子是d体哈密顿算子。元格哈密顿算子可以通过d体相互作用实现,也可以通过具有双体相互作用的辅助量子位实现。

[0091] 对于用量子点实现的量子系统,两个量子位之间的相互作用由电场梯度和磁场来调节。短程哈密顿可以用脉冲序列和磁场来实现。通过使用具有作用于元格的所有对的短程哈密顿算子的附加附属量子位,可以实现元格哈密顿算子。

[0092] 对于利用NV中心实现的量子系统,NV中心之间的相互作用可以通过将它们耦合到光场来传输。

[0093] 根据可以与本文描述的其他实施例组合的实施例,可以根据二维晶格来排列多个量子位。短程哈密顿算子可以涉及与二维晶格的元格对应的四个量子位的组之间的相互作用。根据实施例,如本文所述,短程哈密顿算子可以是元格哈密顿算子。

[0094] 根据可与本文所述的其他实施例组合的一些实施例,短程哈密顿算子是d体哈密顿算子,其中,d可以是2、3、4、5、6、7或8。如本文所述,d体哈密顿算子可以指代表多个量子位的相互作用的哈密顿算子,其中,在包括d+1个或更多量子位的组之间不发生联合相互作用。d体哈密顿算子可以涉及包含d个或更少量子位的组之间的相互作用。d体哈密顿算子可以是多个被加项哈密顿算子之和,其中,每个被加项哈密顿算子表示d个量子位或者更少的量子位的组之间的联合相互作用。

[0095] 例如,如本文所述,单体哈密顿算子可以被认为是d=1的d体哈密顿算子。作为另一示例,如本文所述,成对最近邻哈密顿算子可以被认为是d=2的d体哈密顿算子。作为又一示例,如本文所述的元格哈密顿算子可以被认为是d=4的d体哈密顿算子。根据可以与本文描述的其他实施例结合实施例,短程哈密顿算子可以是d体哈密顿算子,其中d=4。d的值可以取决于晶格的几何形状。例如,对于六角形晶格,元格会涉及六个量子位,且元格哈密

顿可以是6体哈密顿算子。

[0096] 短程哈密顿算子是具有较小 d (例如, $d=4$) 的 d 体哈密顿算子是有利的, 因为在这种情况下量子位之间的相应的相互作用可以比在较大 d 的 d 体哈密顿算子的情况下更容易地设计。

[0097] 如本文所述, 计算问题的大小可以指对指定计算问题所需的传统信息单元的数目的度量。计算问题的大小可与计算问题的输入变量的数目有关。计算问题的大小可能会随着输入变量数目的增加而增加。计算问题的大小可能等于输入变量的数目。例如, 对于旅行商问题, 如本文所述, 大小可以指第一列表和第二列表的长度的总和。对于作为另一示例的伊辛自旋模型问题而言, 大小可以指自旋 s_i 的数目 n 。

[0098] 对于具有第一大小的第一计算问题, 相应的最终哈密顿算子可以是第一问题哈密顿算子和第一短程哈密顿算子的和。对于具有第二大小的第二计算问题, 相应的最终哈密顿算子可以是第二问题哈密顿算子和第二短程哈密顿算子的和。如果第二大小与第一大小相同, 则第二个短程哈密顿算子可能与第一个短程哈密顿算子相同。如果第二大小与第一大小不同, 则第二短程哈密顿算子可能不同于第一短程哈密顿算子。例如, 参考上述伊辛自旋模型, 第一计算问题可以涉及针对 N 个自旋的具有第一组耦合系数和场系数的第一伊辛自旋模型问题, 并且第二计算问题可以涉及同样针对 N 个自旋的第二伊辛自旋模型问题, 其中, 第二组耦合系数和场系数不同于第一组耦合系数和场系数。其中, 第一伊辛自旋模型问题和第二伊辛自旋模型问题的大小都可以被认为等于数目 N 。根据实施例, 第一伊辛自旋模型问题的短程哈密顿算子与第二个伊辛自旋模型问题的短程哈密顿算子相同。

[0099] 根据可与本文描述的其他实施例组合的实施例, 短程哈密顿算子可以是 d 体哈密顿算子, 其中, d 可以与计算问题无关。此外, 相互作用截断距离可以与计算问题无关。根据可与本文所述的其他实施例组合的实施例, 短程哈密顿算子可与计算问题无关。

[0100] 根据本文描述的实施例, 该方法包括将量子系统从初始量子态向最终哈密顿算子的基态演化。最终哈密顿算子的基态是使最终哈密顿算子的能量最小化的量子系统的量子态。最终哈密顿算子的基态是最终哈密顿算子的本征态, 特别是具有最小特征值的本征态。由于计算问题被编码在问题哈密顿算子中, 并且由于最终哈密顿算子是问题哈密顿算子和短程哈密顿算子的和, 所以最终哈密顿算子的基态包含关于计算问题的信息和/或可以编码计算问题的解决方案。

[0101] 最终哈密顿算子的基态可以是量子系统在零温度下的状态。不希望被任何特定理论束缚, 根据量子物理学领域的考虑, 量子系统被认为不可能达到绝对零度的温度。尽管如此, 将量子系统从最初的量子态演化到最终哈密顿算子的基态, 包括例如将量子系统冷却到工作温度 $T_{\max}$, 允许接近最终哈密顿算子的基态。工作温度 $T_{\max}$ 可能很大程度上取决于量子系统中使用的量子位的类型。例如, 对于超导量子位, $T_{\max}$ 可以是50mK或更低, 优选为1mK或更低。量子系统可以从初始量子态演化到最终量子态, 以便接近最终哈密顿算子的基态。最终量子态可以是在工作温度 $T_{\max}$ 下或在较低温度下的量子系统的状态, 即它可以是在工作温度下或在较低温度下的最终哈密顿算子的热态。因此, 最终量子态可能近似于最终哈密顿算子的基态。最终量子态可能包含有关最终哈密顿算子的基态的信息。最终量子态可能包含有关解决计算问题的信息。

[0102] 量子系统可以通过如本文所述的冷却单元被冷却到例如工作温度 $T_{\max}$ 或更低的温

度。工作温度可以是非零温度。

[0103] 根据与本文描述的其他实施例结合的实施例,所述方法可以包括通过朝向初始哈密顿算子的基态冷却量子系统来初始化处于初始量子态的量子系统。初始哈密顿算子的基态是使初始哈密顿算子的能量最小化的量子系统的量子态。初始哈密顿算子的基态是初始哈密顿算子的本征态,特别是具有最小特征值的本征态。初始哈密顿算子的基态是量子系统在零温度下的状态。将量子系统冷却到初始哈密顿算子的基态可允许接近初始哈密顿算子的基态。初始量子态可近似于初始哈密顿算子的基态。

[0104] 初始哈密顿算子可以与计算问题无关。初始哈密顿算子可以是d体哈密顿算子,其中,d是1、2、3或4。如本文所述,初始哈密顿算子可以是单体哈密顿算子。例如,对于超导量子位的量子系统,具有是单体哈密顿算子的初始哈密顿算子允许通过简单的设置实现初始哈密顿算子。

[0105] 初始哈密顿算子可以是具有形式为 $H^{\text{初始}} = \sum_k a_k \sigma_x^{(k)}$ 的单体哈密顿算子。其中, a_k 可以是多个量子位中的第k个量子位的系数, $\sigma_x^{(k)}$ 可以是作用于第k个量子位的泡利算符。特别地, $\sigma_x^{(k)}$ 可以是对应于第二空间方向的泡利算符。如本文所述,第二空间方向可以与第一空间方向正交。泡利算子 $\sigma_x^{(k)}$ 和泡利算子 $\sigma_z^{(k)}$ 可以是非对易算子,特别是反对易算子。根据实施例,系数 a_k 中的每一个均等于单个共有系数h。初始哈密顿算子可以是具有形式为 $H^{\text{初始}} = h \sum_k \sigma_x^{(k)}$ 的单体哈密顿算子。

[0106] 对于超导量子位,可以设置磁通量偏置通过超导量子位的主超导环路来使得基态 $|0\rangle$ 和 $|1\rangle$ 具有相同的能量,即,这些基态的能量差是零。此外,使磁通量偏置通过次级超导环路可以耦合基态 $|0\rangle$ 和 $|1\rangle$ 。因此,可以为超导量子位实现形式为 $h\sigma_x^{(k)}$ 的被加项哈密顿算子。因此,对于多个超导量子位,可以实现形式 $H^{\text{初始}} = h \sum_k \sigma_x^{(k)}$ 的初始哈密顿算子。通过将系数h设置为比由量子系统的温度确定的能量大小大得多的值,几乎可以肯定实现了初始哈密顿算子的基态。

[0107] 对于利用俘获离子实现的量子系统,可以使用激光器来通过光泵浦进行离子的初始化,其中,激光器确定性地将离子转移到量子位的两个量子基态之一中。这样减少了熵,由此实现了对内部状态的冷却。

[0108] 对于用冷原子实现的量子系统,可以通过将处于基态的原子激励至具有较大的失谐的里德伯状态来准备初始量子态。

[0109] 对于利用NV中心实现的量子系统,NV中心可以通过使用标准光学共焦显微镜技术来单独编址。初始化和测量可以通过偏共振或共振光学激励来执行。

[0110] 根据实施例,量子系统从初始量子态向最终哈密顿算子的基态演化。根据实施例,演化量子系统可以包括执行量子退火。量子退火可以由可编程量子退火单元执行,如本文所述。

[0111] 执行量子退火可以包括将量子系统的初始哈密顿算子转变到最终哈密顿算子。执行量子退火可以包括经由插值哈密顿算子将初始哈密顿算子转变到最终哈密顿算子。插值哈密顿算子可以是时间相关的哈密顿算子。插值哈密顿算子可以具有用于在初始哈密顿算子和最终哈密顿算子之间插值的一个或多个插值参数。例如,插值哈密顿算子可以具有 $H(t) = A(t)H^{\text{初始}} + B(t)H^{\text{最终}}$ 的形式。其中, $H^{\text{初始}}$ 可以表示初始哈密顿算子, $H^{\text{最终}}$ 可以表示最终哈密顿算子,t可以是时间参数,A(t)和B(t)可以是与时间参数t有关的插值系数。

[0112] 执行量子退火可以包括将初始时间的初始哈密顿算子转变到最终时间的最终哈密顿算子。在初始时间,插值哈密顿算子的一个或多个插值参数可以被设置为一个或多个相应的初始值。在初始时间,插值哈密顿算子可等于初始哈密顿算子。例如,在插值哈密顿算子具有形式 $H(t) = A(t)H^{\text{初始}} + B(t)H^{\text{最终}}$ 的实施例中,插值参数 $A(t)$ 可以在初始时间被设置为初始值1,并且插值参数 $B(t)$ 可以在初始时间被设置为初始值0。因此,在初始时间,插值哈密顿算子等于的 $H^{\text{初始}}$ 。

[0113] 执行量子退火可以包括将初始哈密顿算子逐步转变到最终哈密顿算子。执行量子退火可以包括逐步改变插值哈密顿算子的一个或多个插值参数。在初始时间与最终时间之间的中间时间,插值哈密顿算子不同于初始哈密顿算子和/或不同于最终哈密顿算子。插值哈密顿算子的插值参数可以逐步地从例如在初始时间的初始值达到例如在最终时间的最终值。在最终时间,插值哈密顿算子等于最终哈密顿算子。例如,对于插值哈密顿算子具有 $H(t) = A(t)H^{\text{初始}} + B(t)H^{\text{最终}}$ 形式的实施例,插值参数 $A(t)$ 可以从在初始时间的初始值1逐步改变为在最终时间的最终值0。类似地,插值参数 $B(t)$ 可以从初始时间的初始值0逐步地改变到最终时间的最终值1。因此,插值哈密顿算子 $H(t)$ 等于最终时间的最终哈密顿算子。

[0114] 根据可与本文所述的其他实施例组合的实施例,量子系统在执行量子退火的同时维持在50mK或以下,特别是1mK或更低的工作温度。

[0115] 根据可与本文所述的其他实施例组合的实施例,执行从初始哈密顿算子到最终哈密顿算子的量子退火包括将初始哈密顿算子绝热地演化为最终哈密顿算子。

[0116] 对于包括具有 $\hbar \sum_k \sigma_x^{(k)}$ 形式的初始哈密顿算子的多个超导量子位、形式为 $\sum_k J_k \sigma_z^{(k)}$ 的问题哈密顿算子以及具有对应于元格的被加项哈密顿算子 C_i 的形式为 $C \sum_i C_i$ 的短程哈密顿算子的量子系统,可以按照如下方式进行量子退火:在初始化之后,其中 $C = J_k = 0$,缓慢地增加 C 和 J_k ,同时缓慢地减小系数 a 直到 $a = 0$ 。

[0117] 替代或除了涉及量子退火的实施例之外,将量子系统从初始量子态向最终哈密顿算子的基态演化可以包括将量子系统从初始量子态冷却到最终量子态。初始量子态可以是量子系统在初始温度下的状态。最终量子态可以是量子系统在最终温度下的状态。最终温度低于初始温度。将量子系统从初始温度下的初始量子态冷却到最终温度下的最终量子态可以包括将温度从初始温度降低(例如逐渐降低)到最终温度。根据可与本文所述的其他实施例组合的实施例,最终温度可以是50mK或更低,特别是1mK或更低。根据可以与本文所述的其他实施例组合的实施例,初始温度可以是室温或更低温度,特别是200开尔文(Kelvin)或更低。

[0118] 根据实施例,该方法包括测量多个量子位的至少一部分以获得最终量子态的读出。根据一些实施例,多个量子位的部分被测量,这样无需测量多个量子位中的所有量子位。多个量子位的部分可以包括多个量子位的70%或更少,特别是60%或更少,更特别是50%或更少。根据一些实施例,如果多个量子位中的量子位的总数由 N 表示,则所述部分中的量子位的数目根据 $\sqrt{N}$ 来选择。

[0119] 测量多个量子位的至少一部分可以包括单独地测量至少一个部分中的每个量子位。对于该至少一部分量子位中的每个量子位,测量至少一部分可以包括测量泡利算符(例如,泡利算符 σ_z)。测量至少一部分可以包括对多个量子位的至少一部分中的每个量子位执行双结果测量。双结果测量可以提供两种可能的结果之一,例如,0或1。如本文所述,量子位

的至少一部分可以由测量装置测量。

[0120] 测量至少一部分可以提供最终量子态的读出。读出可以具有由多个传统位表示的传统信息的形式。读出可以揭示关于最终量子态和/或关于最终哈密顿算子的基态的信息。读出可以提供关于计算问题的解决方案的信息,例如试验解、真正的解决方案或一组见证变量。读出可以是计算问题的解决方案。

[0121] 对于包括N个超导量子位的量子系统,可以使用包括多个超导量子干涉设备的测量设备高保真地测量多个量子位的量子位状态 $|0\rangle$ 和 $|1\rangle$,特别地,可以使用N个迟滞直流超导量子干涉设备和由偏置线控制的N个RF超导量子干涉设备锁存器,其中,偏置线的数目按照 $\sqrt{N}$ 来选择。

[0122] 对于利用俘获离子实现的量子系统,量子系统的测量可以通过荧光光谱来执行。其中,如果离子处于两种自旋状态之一,则离子被短暂地驱动以进行跃迁。其结果是,处于驱动状态的离子发射很多光子,而其他离子保持黑暗。发射的光子可以由商业CCD(电荷耦合器件)相机记录。在布洛赫球(Blochsphere)球上的任何方向上的测量是在荧光光谱之前便已通过适当的单量子位脉冲被实现。

[0123] 对于用冷原子实现的量子系统,可以通过执行基态原子的选择性扫描和具有单个位点分辨率的荧光成像来测量量子位。

[0124] 对于用量子点实现的量子系统,可以通过快速绝热通道从脉冲序列中读出量子位。

[0125] 根据实施例,该方法包括从读出确定关于计算问题的解决方案。该方法可以包括从读出计算解决方案。如本文所述,读出可以提供给传统计算系统。传统计算系统可以从读出确定或计算关于计算问题的解决方案。

[0126] 如本文所述,计算问题可涉及在计算机科学领域中考虑的NP复杂性类,其中“NP”代表“非确定性多项式时间”。根据可与本文描述的其他实施例组合的实施例,计算问题属于NP复杂性类。NP复杂性类包含判定问题。非正式地说,对于属于NP复杂性类的计算问题,存在一组见证变量,在该组见证变量的基础上可以验证计算问题的解决方案是“是”。其中,对于NP中的计算问题,验证解决方案是“是”的过程可以通过具有一定运行时间的验证算法来执行,其中,运行时间仅根据计算问题的大小多项式地进行缩放。换句话说,见证变量集包含关于解决方案的信息,其中,信息可以由验证算法在多项式运行时间内进行处理,以验证解决方案是“是”。关于NP复杂性类的标准定义,请参考相关的计算机科学文献。

[0127] 例如,如本文所述的旅行商问题、三着色问题和伊辛自旋模型问题是NP复杂性类中的判定问题的示例。例如,考虑伊辛自旋模型问题。如果针对给定的一组耦合系数和场系数以及针对给定的常数K的伊辛自旋模型问题的解决方案是“是”,则相关联的小于K的伊辛能量函数 $H(s_1, s_2, \dots, s_n)$ 的自旋 $(s_1, s_2, \dots, s_n)$ 的配置可以看作是一组见证变量。给定见证变量 $(s_1, s_2, \dots, s_n)$,通过计算 $H(s_1, s_2, \dots, s_n)$ 并将其与K进行比较,可以在多项式时间内验证能量 $H(s_1, s_2, \dots, s_n)$ 确实小于K。因此,伊辛自旋模型问题包含在NP复杂性类中。

[0128] 确定针对判定问题是“是”还是“否”的任务可能不具有针对NP中的一些计算问题的多项式时间算法,或者甚至可能具有指数运行时间,而验证算法可以具有多项式运行时间。在NP复杂性类中的一些计算问题被认为在传统计算系统中是计算上难以处理的。其中,术语“计算上难以处理”的计算问题可以指这样的计算问题,其中,不存在运行在具有多项

式运行时间的传统计算系统上的算法,以确定计算问题的解决方案是“是”或“不是”。尤其是旅行商问题、三着色问题和伊辛自旋模型问题对于传统计算系统来说被认为是难以处理的,或者至少没有已知的算法来在多项式运行时间中解决任何这些问题。

[0129] 根据可与本文描述的其他实施例组合的实施例,如本文所述,使用量子系统计算解决方案的计算问题是NP完全问题或NP难问题。NP完全问题属于NP复杂性类,对于传统的计算系统来说被认为是计算上难以处理的。虽然并不是每个NP难问题都属于NP复杂性类,但是对于传统计算系统,NP难问题也被认为是计算上难以处理的。

[0130] 对于计算属于NP复杂性类的实施例,例如,NP完全问题,测量的读出可包括计算问题的一组见证变量或这组见证变量的至少一部分。

[0131] 根据可以与本文描述的其他实施例组合的一些实施例,确定问题编码配置可以包括将计算问题映射到辅助计算问题上,其中,辅助计算问题包括确定远程自旋模型的基态。辅助计算问题与计算问题有关。将计算问题映射到辅助计算问题上可以包括将计算问题的输入参数映射到辅助计算问题的输入参数上。计算问题到辅助问题上的映射可使计算问题的解决方案可以从辅助计算问题的解决方案中被确定。

[0132] 根据实施例,如本文所述,辅助计算问题可以指伊辛自旋模型问题。根据又一实施例,计算问题可能是NP复杂性类中的问题,例如本文所述的旅行商问题。由于伊辛自旋模型问题是NP完全问题,每个NP复杂性类中的问题(例如,旅行商问题)都可以被映射到伊辛自旋模型问题上。例如,对于如本文所述的包括第一列表和第二列表的旅行商问题,可以将第一列表和第二列表映射到如本文所述的针对伊辛自旋模型问题的一组耦合系数和场系数。旅行商问题的解决方案可以从具有对应耦合系数和场系数的伊辛自旋模型问题的解决方案来计算。这样的映射是已知的。

[0133] 根据实施例,确定问题编码配置可以包括从远程自旋模型(例如,伊辛自旋模型)确定问题编码配置。执行该确定的具体方式参照图9-图16进行了更详细的描述。

[0134] 根据可与本文所述的其他实施例组合的实施例,远程自旋模型可以是具有 m 体相互作用的远程自旋模型,其中, m 是1、2或3。

[0135] 根据可与本文描述的其他实施例组合的实施例,所述方法还包括从远程自旋模型中的多个自旋闭环确定短程哈密顿算子。

[0136] 根据另一实施例,提供了一种使用包括多个量子位的量子系统来计算关于计算问题的解决方案的方法。

[0137] 该方法包括将计算问题编码为量子系统的问题哈密顿算子,如本文所述。问题哈密顿算子是包括多个可调参数的单体哈密顿算子,如本文所述。编码包括从计算问题确定针对多个可调参数的问题编码配置,如本文所述。

[0138] 该方法还包括初始化处于初始量子态的量子系统。该方法还包括通过执行量子退火将量子系统从初始量子态演化为最终量子态。执行量子退火包括将量子系统的初始哈密顿算子转变到量子系统的最终哈密顿算子,如本文所述。如本文所述,最终哈密顿算子是问题哈密顿算子和短程哈密顿算子的和,其中,问题哈密顿算子的多个可调参数在问题编码配置中,并且其中,短程哈密顿算子是 d 体哈密顿算子,其中, d 与计算问题无关。

[0139] 该方法还包括测量多个量子位的至少一部分以获得最终量子态的读出,如本文所述。

[0140] 该方法还包括从读出确定计算问题的解决方案,如本文所述。

[0141] 根据另一实施例,提供了一种用于计算关于计算问题的解决方案的装置,例如,图1中所示的设备400被提供。

[0142] 如本文所述,该装置包括含有多个量子位的量子系统。

[0143] 该装置还包括冷却单元,例如图1中所示的冷却单元410,该冷却单元适于将量子系统朝向量子系统的基态冷却,如本文所述。如本文所述,冷却单元可以被配置为用于将量子系统朝向初始哈密顿算子的基态冷却,以初始化处于初始量子态的量子系统,如本文所述。冷却单元可以被配置为用于将量子系统维持在工作温度,其中,工作温度与设备中使用的量子位类型密切相关。例如,对于超导量子位,工作温度为50mK或更低,特别是1mK或更低。

[0144] 该装置还包括可编程量子退火单元(例如,如图1所示的可编程量子退火单元430),该可编程量子退火单元适于通过量子退火将量子系统的初始哈密顿算子演化为量子系统的最终哈密顿算子,如本文所述。最终哈密顿算子是问题哈密顿算子和短程哈密顿算子的和。如本文所述。

[0145] 冷却单元可以被配置为用于在由可编程量子退火单元执行量子退火期间将量子系统维持在工作温度。

[0146] 该装置还包括测量设备(例如,图1中所示的测量设备440),该测量设备适于测量多个量子位的至少一部分。

[0147] 该装置还包括传统计算系统(例如,图1中所示的传统计算系统450),该传统计算系统连接到可编程量子退火单元和测量设备。传统计算系统可以被配置为用于接收计算问题作为输入。传统计算系统可以进一步被配置为用于将计算问题编码成问题哈密顿算子。其中,编码可以包括从计算问题确定针对问题哈密顿算子的多个可调参数的问题编码配置,如本文所述。传统计算系统还可被配置为用于将问题编码配置通传至量子退火单元。

[0148] 可编程量子退火单元可以被配置为用于从传统计算系统接收问题编码配置。可编程量子退火单元可以被配置为用于通过量子退火将初始哈密顿算子转变到最终哈密顿算子,其中,问题哈密顿算子的多个可调参数在问题编码配置中。

[0149] 传统计算系统还可被配置为用于从测量设备接收量子系统的读出。传统计算系统还可以被配置为用于从读出确定计算问题的解决方案。

[0150] 根据另一实施例,提供了一种用于计算关于计算问题的解决方案的可编程量子退火设备。可编程量子退火设备包括量子系统,该量子系统包括按照二维晶格排列的多个超导量子位。

[0151] 可编程量子退火设备还包括磁通量偏置组件,该磁通量偏置组件包括被配置为用于生成多个可调磁通量的多个磁通量偏置单元。每个可调整的磁通量作用于多个超导量子位中的单个超导量子位。

[0152] 可编程量子退火设备还包括耦合单元,该耦合单元包括至少一个超导量子干涉设备,该至少一个超导量子干涉设备被配置为用于根据元格哈密顿算子来耦合多个超导量子位。

[0153] 可编程量子退火设备还包括连接到磁通量偏置单元和耦合单元的控制单元。该控制单元被配置为用于接收针对量子系统的问题哈密顿算子的多个可调参数的问题编码配置,其

中,问题哈密顿算子是单体哈密顿算子,并且其中,问题编码配置对计算问题进行编码。控制器还被配置为用于控制磁通量偏置组件和耦合单元以通过量子退火将量子系统从量子系统初始哈密顿算子演化为量子系统的最终哈密顿算子。最终哈密顿算子是元格哈密顿算子和问题哈密顿算子的和,其中,问题哈密顿算子的多个可调参数在问题编码配置中。

[0154] 术语“可编程量子退火单元”与本文中的术语“可编程量子退火设备”同义互换使用。

[0155] 参考图9-图16描述本公开的其他方面。其中描述了计算问题到问题哈密顿算子的具体编码和相应的最终哈密顿算子,即将具有远程相互作用的伊辛自旋模型问题编码为最终量子哈密顿算子,其中,最终量子哈密顿算子是单体问题哈密顿算子和元格哈密顿算子的和。具有远程相互作用的(传统)伊辛自旋模型问题是NP完全问题,其量子化可忽略不计,因此在这里将不会对传统伊辛自旋模型和量子伊辛自旋模型进行区分。其他传统计算问题到伊辛自旋模型问题的映射是已知的。因此,最终量子哈密顿算子的基态或低工作温度下的热态可以包含关于伊辛自旋模型问题和许多(通过逆映射得到的)传统NP难计算问题的解决方案的信息。如果伊辛自旋模型问题仅包括 d 小于或等于2的 d 体相互作用,则到最终量子哈密顿算子的具体映射允许在二维表面,特别是二维晶格中实现量子处理设备(量子处理器),并且如果伊辛自旋模型问题仅包括 d 小于或等于3的 d 体相互作用,则允许在三维空间中,特别是在三维晶格中实现量子处理设备。该映射可以扩展到具有 d 体相互作用和任意 d 的伊辛自旋模型问题。量子处理设备可以通过单体问题哈密顿算子是完全可编程的架构,并且是可扩展构架。

[0156] 首先考虑伊辛自旋模型问题仅包括 d 小于或等于2的 d 体相互作用时的情况。具体编码是从针对 n 个自旋的自旋模型问题开始的,如本文所述,其中,具有最多两体相互作用和相应的耦合系数 c_{ij} 。指数 i 和 j 可以从1到 n , j 小于 i 。在第一种情况下,所有的场系数 c_i 都等于零。图9示出了自旋 $n=6$ 的伊辛自旋模型问题,其中,自旋被标记为1至6。自旋之间存在 $n(n-1)/2=15$ 对相互作用,如图9所示的以线连接的自旋对。例如,用12表示的线表示自旋1和2之间的成对的相互作用。15对成对的相互作用对应15个耦合系数 c_{ij} 。这些相互作用是远程相互作用。

[0157] 对于伊辛自旋模型中的每对自旋,提供了量子系统中的相应量子位。例如,对于图9中示出的具有15对成对的相互作用的6个自旋,相应的量子系统包括15个量子位。伊辛自旋模型中的自旋配置被映射到相应的量子位的配置。其中,量子位的配置与自旋的相对方向有关。指向相同方向(平行排列)的一对自旋被映射到处于量子基态“ $|1\rangle$ ”的量子位。此外,指向相反方向的一对自旋(反平行排列)被映射到处于量子基态“ $|0\rangle$ ”的量子位。该映射如图10所示。在图10中,标注0和1分别对应量子基态 $|0\rangle$ 和 $|1\rangle$ 。

[0158] 耦合系数 c_{ij} 被映射到编码计算问题(在这种情况下为伊辛自旋模型问题)的问题哈密顿算子的多个可调参数 J_k 。问题哈密顿算子具有形式 $\sum_k J_k \sigma_z^{(k)}$,其中, $k=n*i+j$,并且其中, k 的范围为1到 M ,其中, $M=n(n-1)/2$ 。伊辛自旋模型问题被映射到问题哈密顿算子,问题哈密顿算子的可调参数 J_k 表示伊辛自旋模型中自旋间的相互作用,对应于耦合系数 c_{ij} 。

[0159] 将伊辛自旋模型问题编码为问题哈密顿算子所需的量子位的数目关于针对 n 个自旋的伊辛自旋模型问题是二次方式地增加的,这是因为自旋之间的两体相互作用的数目等于 $M=n(n-1)/2$ 。根据一些实施例,可以考虑额外的自由度。量子系统中的量子位总数可以

是 $M+n-2$ 或更多,其中,可出于下面解释的原因而添加 $n-2$ 个额外的附属量子位和/或额外的辅助量子位。因此,量子位数目可能大于自旋数目 n 。具体而言,量子位的数目可以是自旋的数目 n 加 $M-2$ 个额外的自由度。哈密顿问题允许仅用局部相互作用,特别是与外部场的单体相互作用来编程量子处理设备。

[0160] 与伊辛自旋模型相比,量子系统的自由度增加的数目通过短程哈密顿算子来补偿,所述短程哈密顿算子是4体被加项哈密顿算子 C_l 的总和为 $M-n$ 的和,该短程哈密顿算子被称为约束哈密顿算子,表示对固定一部分量子位的约束。短程哈密顿算子具有形式 $\sum_l C_l$,其中,下角标 l 的范围为1到 $(n^2-3n)/2$,并且其中,每个被加项哈密顿算子 C_l 是具有如下形式的约束哈密顿算子:

$$C_l = -C \left(\sum_{m=n,e,s,w} \tilde{\sigma}_z^{(l,m)} + S_z^l \right)^2$$

$$= -C \tilde{\sigma}_z^{(l,n)} \tilde{\sigma}_z^{(l,e)} \tilde{\sigma}_z^{(l,s)} \tilde{\sigma}_z^{(l,w)}$$

[0162] 参考上面的等式,能够考虑到约束哈密顿算子的两种可能的实现。上面的等式中的和可以表示基于附属qutrit的实现。该和遍及二维晶格的元格的四个成员(北、东、南、西),其中,量子位是根据二维晶格排列的。此外,每个 S_z^l 是作用于包含在量子系统中的附属qutrit的运算符。附属qutrit具有由三个基本状态组成的基底,在本实施例中,这三个基本状态将被标记为 $|0\rangle$ 、 $|2\rangle$ 和 $|4\rangle$ 。短程哈密顿算子的第二个实现是基于无需附属qutrit的相互作用的实现。根据该基于相互作用的实现, C_l 是形成晶格的元格的量子位之间的4体相互作用。此外,在上面的等式中, C 表示约束强度,例如,恒定的约束强度。

[0163] 如上所述,伊辛自旋模型到问题哈密顿算子的编码涉及将伊辛自旋模型的自旋的配置映射到量子系统中的量子位的配置,其中,量子位的配置与相应自旋配置中的自旋对的相对方向有关。为了提供一致的映射,考虑与伊辛自旋模型中的闭环有关的方面,如下所述。在伊辛自旋模型中的每个自旋闭环中,反平行排列的自旋对的数目是偶数。例如,参考图9,考虑例如由虚线指示的由连接14、24、23和13形成的闭环。闭环包括自旋1、2、3和4。自旋1、2、3和4的任何配置包括零对、两对或四对反平行自旋。自旋1、2、3和4的配置没有一对或三对反平行自旋。因此,自旋1、2、3和4的每个配置均具有偶数个反平行自旋。

[0164] 由于反平行自旋对被映射到处于量子基态 $|0\rangle$ 的量子位,量子系统中与伊辛自旋模型中的自旋闭环相对应的每一组量子位都具有偶数个量子基态 $|0\rangle$ 。这针对量子系统的至少一部分量子位提供了一组约束。例如,对于上面参考图9讨论的闭环,相应的四个量子位的组在图11中被示出,鉴于伊辛模型中的自旋对与量子系统中的量子位之间的对应关系,用附图标记14、24、23和13来表示这四个量子位。如图11所示,量子位14、24、23和13对应于二维晶格120的元格。考虑如上所述对闭环的约束,针对量子位14、24、23和13的量子位基态的任何配置包括0、2或4个量子基态 $|0\rangle$,如图12所示。

[0165] 执行与闭环的合适子集相关联的约束就足够确保与所有闭环相对应的约束都能够满足。根据该实施例,包括至多4个自旋的组的闭合环路的特定构建块足以确保满足所有约束,从而提供了从伊辛自旋模型到量子系统的一致映射。构建块包括由4个连接相连的自旋组成的闭环,其中,一个连接具有标引距离 s ,两个连接具有标引距离 $s+1$,一个连接具有标引距离 $s+2$ 。其中, s 的范围为1到 $N-2$,并且自旋 s_i 和 s_j 之间的“标引距离”的概念指的是数字 $|i-j|$ 。 $s=1$ 的构建块闭环集提供了 $n-2$ 个约束。例如,如图9所示并且如上所述,包括自旋

1、2、3和4之间的连接14、24、23和13的闭环是 $s=1$ 的构件块闭环。

[0166] 另一方面涉及量子系统的边界。一些构建块闭环包括一组用三个连接来连接的三个自旋,而不是用四个连接来连接的四个自旋。例如,参考图9,关于这方面可以考虑包括自旋1、2和3之间的连接12、23和13的闭环。量子系统中相应的量子位组包括三个量子位12、23和13,其中,这些量子位按照二维晶格的三角形元格排列的。为了执行与这三个自旋的闭环相对应的约束,三体约束哈密顿 C_1 可以考虑为作用于三个量子位的对应组。或者,在量子系统中还可以包含固定在量子基态 $|1\rangle$ 上的具有 $n-2$ 个辅助量子位的附加行,如图11中虚线圆圈所示。为了执行对应于三个自旋的闭环的约束,例如对应于量子位12、23和13的闭环,可以认为约束哈密顿算子 C_1 作用于相应的三个量子位和辅助量子位中的一个(即,图11所示的辅助量子位1101)。因此,约束哈密顿算子 C_1 可以是作用于增大的二维晶格的元格上的具有与上述相同形式的4体哈密顿算子。后者的实现具有以下优点:所有约束哈密顿算子都可以在同一基脚(footing)上处理,因为所有约束哈密顿算子都是对应于二维晶格元格的4体哈密顿算子。

[0167] 约束哈密顿算子 C_1 确保对应于构件块闭环的约束能够被满足,并且由此确保对应于所有闭环的约束都能够被满足。因此,短程哈密顿算子提供了从伊辛自旋模型中的自旋约束到施加到量子系统上的约束的一致映射。

[0168] 为了提供读出,可以测量部分量子位,例如,如图11所示的部分425。如果量子系统处于最终哈密顿算子的基态中,则部分425中的量子位会在对应于在伊辛自旋模型基态的自旋的配置的量子基态的配置中。如果量子系统处于最终哈密顿算子的接近基态的热态,即在足够低的温度下,则这种情况的可能性很高。因此,对部分425的测量允许至少以高概率确定伊辛自旋模型问题的解决方案。如果量子系统处于最终状态,如本文所述,其中最终状态高度近似于最终哈密顿算子的基态,那么对部分425的测量将至少提供关于伊辛模型的基态的信息,从中可以计算出试验解。然后可以在多项式时间内通过传统计算来测试试验解是否是真正的解决方案,如果不是,可以重复计算直到找到真正的解决方案。

[0169] 作为本文描述的实施例的进一步的优点,由于关于伊辛自旋模型的信息在量子系统中以冗余的方式被编码,因此可以测量多个可能的量子位组以提供读出,从该读出可以确定关于计算问题的解决方案。

[0170] 根据以上所述,根据该实施例的短程哈密顿算子的构造使得:(i)约束覆盖了自旋之间的所有相互作用,(ii)约束的数目是 $(n^2-3n)/2$ 以及(iii)短程哈密顿算子可以在具有 d 体相互作用的简单二维几何结构上实现,其中, $d=4$,并且其中,相互作用对应于二维晶格的元格。此外,由于在伊辛自旋模型中增加一个自旋相当于向量子系统添加一行 n 个自旋,因此该实施例允许可扩展的实现。

[0171] 参考图9-图12描述的实施例涉及包括 n 个自旋之间的成对相互作用的伊辛自旋模型,其中,场系数为零。对于具有非零场系数的伊辛自旋模型,可以考虑与之类似的编码。在伊辛模型中可以包含额外的自旋 s_{n+1} ,其中, s_{n+1} 被固定为值+1。然后可以将非零场系数重新表示为 n 个自旋与额外的自旋 s_{n+1} 之间的耦合系数。由此,具有非零场系数的伊辛自旋模型被映射到场系数为零的伊辛自旋模型。因此可以应用与上述方式类似的方式来进行到量子系统的映射。添加额外的自旋 s_{n+1} 涉及包含额外一行 n 个量子位到量子系统。

[0172] 此外,对于涉及三个自旋组之间的相互作用的伊辛自旋模型也可以考虑编码。在

这种情况下,伊辛能量函数可以具有这种形式:

$$[0173] \quad H(s_1, s_2, \dots, s_n) = \sum_{ijk} c_{ijk} s_i s_j s_k$$

[0174] 其中,系数 c_{ijk} 表示自旋 s_i 、 s_j 和 s_k 之间的3体相互作用,并且其中, $i > j > k$ 。将这种3体伊辛模型映射到量子系统上,并将相应的伊辛自旋模型问题编码为量子系统的问题哈密顿算子,如图13-16所示。在该实施例中,量子系统中的量子位对应于3体伊辛模型中的自旋三元组。在3体伊辛模型中,存在 $R = n(n-1)(n-2)/6$ 个自旋三元组。相应地,量子位的数目是 R 或更多,其中,可以包括额外的量子位,例如,类似于针对上述2体伊辛自旋模型的映射的附属量子位和/或辅助量子位。在这个实施例中,多个量子位是根据图16所示的三维正方晶格1601进行排列的。问题哈密顿算子可以具有形式: $\sum_k J_k \sigma_z^{(k)}$,类似于涉及自旋之间最多2体相互作用的伊辛自旋模型的情况。短程哈密顿算子可以具有形式: $\sum_l C_l$,其中,约束哈密顿算子 C_l 对应于三维正方晶格的元格。约束哈密顿算子的数目可以是 $2(R-n)$ 。与涉及3体约束哈密顿算子和/或包含附属量子位和/或辅助量子位的量子系统的边界有关的类似考虑也适用于该实施例。

[0175] 本文描述的实施例的另一优点是预防和/或纠正量子系统中的错误。例如,对于具有4个量子位的小量子系统,当 C 大于 $1.5J$ (其中, $J = \max(|c_{ij}|)$)时,静态误差会减小甚至消失,特别是当 C 约等于 $1.5J$ 时。一般来说,如果 C 大于 $(n-2)\max(|c_{ij}|)$,静态误差会减小甚至消失,其中, n 表示伊辛自旋模型中的自旋数。此外,量子系统中的量子位数 N 大于伊辛自旋模型中的自旋数,例如, $N = n(n-1)/2$ 或更大。因此,关于伊辛自旋模型的信息以冗余方式在量子系统中被编码。这种冗余性允许实施对来自退相干的误差敏感度低的误差校正测量。测量量子位的多种可能的组合允许检测和纠正量子系统中的退相干,类似于拓扑量子存储器中的纠错方案。图17示出了本文描述的涉及量子系统中的错误预防和/或纠正的实施例的优点。在图17中,轴线1701对应自旋的数目 n 。轴1702对应错误比例。此外,曲线1710、1720和1730分别示出了错误的行为、信息丢失和自旋翻转的次数。在插图中,轴线1703对应自旋的数目,并且轴线1703对应读出的数目。

[0176] 根据又一实施例,提供了一种量子处理单元[QPU]。量子处理单元适于用作在用于计算关于计算问题的解决方案的装置中的中央处理单元。如本文所述,量子处理单元[QPU]包括量子系统。如本文所述,量子系统[QS]包括多个量子位。量子处理单元适于执行根据本文描述的实施例的方法。

[0177] 量子处理单元可适于在初始时间 $t = t_0$ 体现初始哈密顿算子 $H^{\text{初始}}$ 。量子处理单元还可以适用于在最终时间 $t = t_{\text{最终}}$ 体现最终哈密顿算子 $H^{\text{最终}}$ 。其中,“体现哈密顿算子”的表述意味着量子系统[QS]中与本发明中量子计算功能相关的量子态主要由各自根据量子物理的框架的哈密顿算子确定,即量子系统[QS]的量子计算性质由所述哈密顿算子充分确定,并且在量子系统[QS]的真实哈密顿算子中可想到的其他项关于本发明的功能原理可被忽略。

[0178] 最终哈密顿算子 $H^{\text{最终}}$ 可以是问题哈密顿算子 $H^{\text{问题}}$ 和短程哈密顿算子 $H^{\text{短程}}$ 的和,即 $H^{\text{最终}} = H^{\text{问题}} + H^{\text{短程}}$ 。其中,问题哈密顿算子 $H^{\text{问题}}$ 可以是包括多个可调参数 J_k 的单体哈密顿算子(即,作为多个可调参数 J_k 的函数的单体哈密顿算子)。可调节的参数 J_k 可以以适合于对计算问题进行编码的方式单独来调节。

[0179] 短程哈密顿算子 $H^{\text{短程}}$ 可以是 d 等于或大于2的 d 体哈密顿算子,并且其中, d 可以与计算问题无关。其中,术语“短程哈密顿算子”可以指表示多个量子位的相互作用的哈密顿算

子,其中,在彼此距离大于相互作用截断距离 $L_{\text{截断}}$ 的量子位之间不发生相互作用。术语“d体哈密顿算子”可以指表示多个量子位的相互作用的哈密顿算子,其中,在包含d+1或更多量子位的组之间不发生联合相互作用。

[0180] 量子处理单元[QPU]可适于测量时间 $t=t_{\text{最终}}$ 之后的量子系统[QS]的多个量子位的至少一部分的量子态。

[0181] 量子处理单元[QPU]可以适于实现形式为 $H(t)=A(t) \cdot H^0+B(t) \cdot H^{\text{问题}}+C(t) \cdot H^{\text{短程}}$ 的插值哈密顿算子,其中, $A(t)$ 、 $B(t)$ 和 $C(t)$ 是与时间参数 t 有关的插值系数,其中, H^0 是初始化哈密顿算子,其适于针对期望的计算过程初始化量子系统。其中, $A(t)$ 、 $B(t)$ 和 $C(t)$ 满足条件 $A(t_0)=1, A(t_{\text{最终}})=0, B(t_0)=0, B(t_{\text{最终}})=1, C(t_{\text{最终}})=1$,使得 $H(t_0)=H^{\text{初始}}=H^0+C(t_0) \cdot H^{\text{短程}}$ 并且 $H(t_{\text{最终}})=H^{\text{最终}}=H^{\text{问题}}+H^{\text{短程}}$,其中 $C(t_0)$ 是任意的并且也可以是0或1。

[0182] 多个量子位的量子位可以根据二维晶格或根据三维晶格进行排列。

[0183] 多个量子位的量子位可以位于相应晶格的元格的拐角处,其中,术语“plaquette (元格)”可以指相应晶格的网格。

[0184] 问题哈密顿算子可以具有 $H^{\text{问题}}=\sum_k [J_k \cdot \sigma_z^{(k)}]$ 的形式,其中, $\sigma_z^{(k)}$ 可以是与第一空间方向 $z(r_k)$ 相关联的泡利算符,所述泡利算符 $\sigma_z^{(k)}$ 作用于多个量子位中的第 k 个量子位,其中, z 可以指代所述第一空间方向的方向矢量,并且其中, r_k 表示第 k 个量子位的位置矢量。

[0185] 初始化哈密顿算子 H^0 可以具有适合于针对期望的计算过程来初始化量子系统并且优选易于实现的形式。例如,初始化哈密顿算子可以具有形式 $H^0=h \sum_k [\sigma_x^{(k)}]$,其中, h 是系数,其中, $\sigma_x^{(k)}$ 是与第二空间方向 $x(r_k)$ 相关联的泡利算符,所述泡利算符 $\sigma_x^{(k)}$ 作用于多个量子位中的第 k 个量子位,其中, x 表示所述第二空间方向的方向矢量,其中, r_k 表示第 k 个量子位的位置矢量,其中, $z(r_k)$ 和 $x(r_k)$ 优选相互正交,并且其中,泡利算符 $\sigma_z^{(k)}$ 和 $\sigma_x^{(k)}$ 优选地是非对易算子,特别是反对易算子。

[0186] 短程哈密顿算子 $H^{\text{短程}}$ 可以是可具有形式为 $H^{\text{短程}}=H^{\text{元格}}:=\sum_l [C_l(\sigma_z^{(1,1)}, \dots, \sigma_z^{(1,m)}, \dots, \sigma_z^{(1,M[1])})]$ 的元格哈密顿算子 $H^{\text{元格}}$,其中, l 表示第一元格的数目,(1,1)表示位于第1元格的第一拐角处的量子位,(1,m)表示位于第1元格的第 m 拐角处的量子位,(1,M[1])表示位于第1元格的最后一个拐角(即,第M[1])处的量子位,其中, $\sigma_z^{(1,m)}$ 表示相应量子位的泡利算符,并且其中,相应的M[1]-体-被加项 $C_l(\sigma_z^{(1,1)}, \dots, \sigma_z^{(1,m)}, \dots, \sigma_z^{(1,M)})$ 表示第1元格对元格哈密顿算子 $H^{\text{元格}}$ 的贡献。

[0187] 短程哈密顿算子 $H^{\text{短程}}$ 可以以如下方式来实现,即,仅构成相应量子位晶格的元格的量子位组来贡献被加项至 $H^{\text{短程}}=H^{\text{元格}}$,并且例如对于仅由三角形元格组成的量子位晶格, $H^{\text{短程}}=H^{\text{元格}}$ 是 $d=M=3$ 的d体哈密顿算子,对于由三角形和四边形元格组成的量子位晶格, $H^{\text{元格}}$ 是包含3体和4体被加项的哈密顿算子,因此是4体哈密顿算子。

[0188] 量子处理单元[QPU]可以包括适于实现量子系统的期望特征(特别是分别为期望的短程哈密顿算子 $H^{\text{短程}}$ 特征和元格哈密顿算子特征)的附加的量子位和/或qutrit和/或q级量子系统和/或另外的组件和设备。

[0189] 量子位所排列的晶格可以基本上是平面的二维晶格或由基本是平面的二维子晶格组成的三维晶格,所述基本平面的二维子晶格基本上相互平行并且相对于第三维度堆叠。

[0190] 量子位可以排列在二维晶格的大致为三角形的部分上,分别排列在每个二维子晶

格的基本为三角形的部分上。

[0191] 由相应的量子位排列形成的多个元格可以由一组四角形元格(占多数)和一组三角形元格(占少数)组成。可选地或另外地,由相应的量子位排列形成的多个元格可以仅由四边形元格组成,例如通过增加额外的量子位到量子系统以使所有元格为完整的四边形。

[0192] 元格哈密顿算子 $H^{\text{元格}} = \sum_l [C_l]$ 的被加项 C_l 可以是以下两种形式中的一种:

[0193] i) $C_l = c_l (\sum_{m=1}^{M(l)} (\sigma_z^{(l,m)})^2 + S_z^l)^2$, 或者

[0194] ii) $C_l = -c_l \sigma_z^{(l,1)} \sigma_z^{(l,2)} \sigma_z^{(l,3)} \sigma_z^{(l,4)}$ 针对四边形元格, 以及

[0195] $C_l = -c_l \sigma_z^{(l,1)} \sigma_z^{(l,2)} \sigma_z^{(l,3)}$ 针对三角形元格,

[0196] 其中 c_l 是系数, 以及 S_z^l 是附属qutrit的泡利算符。

[0197] 量子系统的量子位的空间排列, 和/或问题哈密顿算子 $H^{\text{问题}}$ 的系数 J_k 到量子系统的量子位的空间坐标的分配和/或短程哈密顿算子的实现和/或对被测量以提供读出的部分量子位的有利的确定, 这些可以根据将已知的2体量子相互作用模型或者已知的3体量子相互作用模型(例如, 2体或3体全数伊辛自旋模型)到量子系统[QS]的映射来执行, 尤其是根据从所述映射可推出的约束(例如, 闭环约束)来执行。

[0198] 量子处理单元可以适于将量子系统[QS]朝向 $H^{\text{初始}} := H(t_0)$ 的基态冷却。

[0199] 量子处理单元可以适于将量子系统[QS]朝向 $H^{\text{最终}} := H(t_{\text{最终}})$ 的基态冷却。

[0200] 量子处理单元可适于在 $t = t_0$ 和 $t = t_{\text{最终}}$ 之间的任何一个或所有时间将量子系统[QS]朝向 $H(t)$ 的基态冷却。

[0201] 量子处理单元可以适于逐步地将插值哈密顿 $H(t)$ 从 $H^{\text{初始}}$ 演化为 $H^{\text{最终}}$, 特别是根据绝热量子退火协议执行所述演化。

[0202] 量子处理单元可以包括根据二维晶格排列的多个超导量子位。

[0203] 量子处理单元可以包括磁通量偏置组件, 该磁通量偏置组件包括被配置为用于生成多个可调磁通量的多个磁通量偏置单元, 其中, 每个可调磁通量作用在多个超导量子位中的单个超导量子位上。

[0204] 量子处理单元可以包括耦合单元, 该耦合单元包括至少一个超导量子干涉设备, 该超导量子干涉设备被配置为用于根据元格哈密顿算子 $H^{\text{元格}}$ 耦合多个超导量子位。

[0205] 量子处理单元可以包括连接到磁通量偏置单元和耦合单元的控制单元。

[0206] 控制器可以被配置为接收针对量子系统的问题哈密顿算子 $H^{\text{问题}}$ 的多个可调参数的问题编码配置, 其中, 问题哈密顿算子是单体哈密顿算子, 并且其中, 问题编码配置对计算问题进行编码, 如本文所述。

[0207] 控制器可以被配置为用于控制磁通量偏置组件和耦合单元以通过量子退火来将量子系统的初始哈密顿算子 $H^{\text{初始}}$ 演化为量子系统的最终哈密顿算子 $H^{\text{最终}}$, 其中, 最终哈密顿算子 $H^{\text{最终}}$ 是元格哈密顿算子 $H^{\text{元格}}$ 和问题哈密顿算子的和, 其中, 问题哈密顿算子 $H^{\text{问题}}$ 的多个可调参数 J_k 在问题编码配置中。

[0208] 根据实施例, 本文描述的设备适用于执行根据本文描述的实施例的方法。

[0209] 根据另外的实施例, 提供了一种量子处理设备。量子处理设备可以被配置为计算关于计算问题的解决方案, 如本文所述。量子处理设备包括量子处理单元(QPU)。量子处理单元包括量子位元格。该元格可以是二维或三维晶格的基本单元。该元格可以包括至多四

个或至多三个量子位。量子处理单元可以包括包含量子位和一个或多个附属量子位(例如,一个配备的在特定量子态中的附属量子位)的元格。根据具体情况,量子位或量子位和附属量子位可以排列在元格的拐角处。量子处理设备可以包括排列在一部分或全部元格中的辅助q级系统(例如,辅助qutrit)。辅助q级系统可以调解元格的量子位之间或量子位和(一个或多个)附属量子位之间的相互作用。元格可以排列为构成正方晶格或其一部分。具体而言,元格可以排列为构成正方晶格的三角形部分。

[0210] 量子处理单元可以还包括第一设备和第二设备,该第一设备包括与单个量子位或附属量子位相互作用的单元,该第二设备包括与元格的量子位或与元格的量子位和附属量子位相互作用的单元。第一设备可以被配置为在元格的量子位上或在元格的量子位和附属量子位上实现单体哈密顿算子。第二设备可以被配置为在元格的量子位上或者在元格的量子位和附属量子位上实现元格哈密顿算子。

[0211] 根据一些实施例,量子位是超导量子位。附属量子位(若存在)也可以是超导量子位。元格被排列为构成二维晶格或其一部分,特别是二维晶格的三角形部分。该量子处理单元包括磁通量偏置组件,该磁通量偏置组件包括被配置为用于生成多个可调节磁通量的多个磁通量偏置单元,其中,每个可调磁通量作用在元格的单个超导量子位上。磁通量偏置组件可以被配置为用于在二维或三维晶格的元格的超导量子位或超导量子位和超导附属量子位上实现单体哈密顿算子。量子处理单元包括超导量子干涉设备,其中,每个量子干涉设备耦合元格的超导量子位或元格的超导量子位和(一个或多个)超导附属量子位。量子干涉设备可以提供元格的超导量子位或者元格的超导量子位和(一个或多个)超导附属量子位的受控相互作用。量子干涉设备可以是配置为用于在二维或三维晶格的元格上实现元格哈密顿算子的量子耦合单元的组件。

[0212] 量子处理单元(QPU)可以被配置为执行计算关于计算问题的解决方案的方法,如本文所述。量子处理设备可以还包括诸如本文所述的冷却单元、传统计算设备和控制器之类的组件。例如,控制器可以连接到磁通量偏置单元和耦合单元,并且可以被配置为用于:(i)接收针对量子系统的问题哈密顿算子的多个可调参数的问题编码配置,其中,问题哈密顿算子是单体哈密顿算子,并且其中,问题编码配置对计算问题进行编码;(ii)控制磁通量偏置组件和耦合单元以通过量子退火将量子系统的初始哈密顿算子演化为量子系统的最终哈密顿算子,其中,最终哈密顿算子是元格哈密顿算子和问题哈密顿算子的和,其中,问题哈密顿算子的多个可调参数在问题编码配置中。

[0213] 本文描述的实施例不仅可以用量子位(即,2级量子位)来实现,而且可以用qutrit量子系统或具有任意q的q级量子系统来实现。考虑多于两个状态,量子系统可被实现的不同方式(使用例如超导量子位、俘获离子、量子点和NV中心等)可被扩展到q级系统,特别是qutrit系统。对q级系统的操作和读出以及它们之间的相互作用可以通过对上述实施例的扩展来实现。

[0214] 虽然前述内容针对本发明的一些实施例,但是在不脱离由所附权利要求确定的范围的情况下可以设计出其他和进一步的实施例。

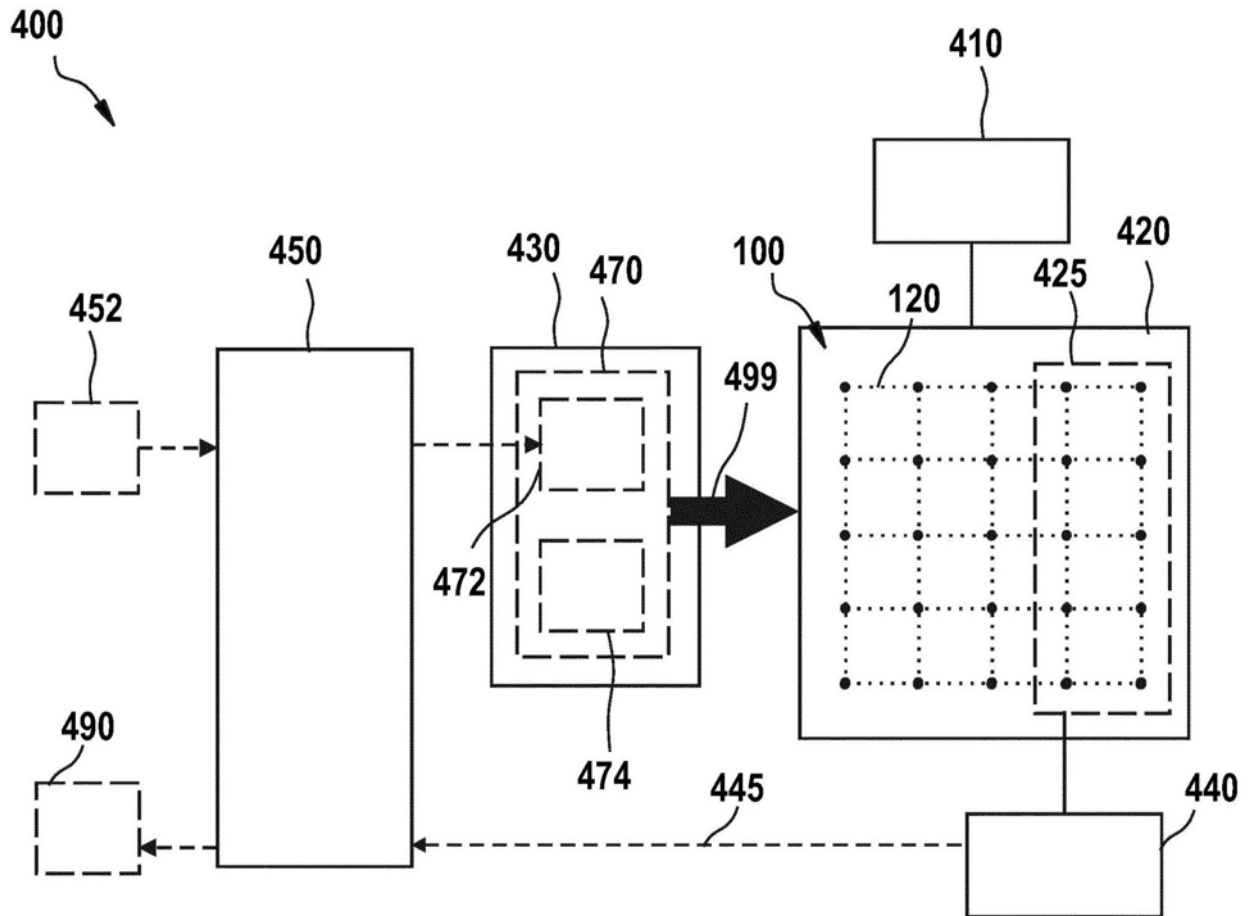


图1

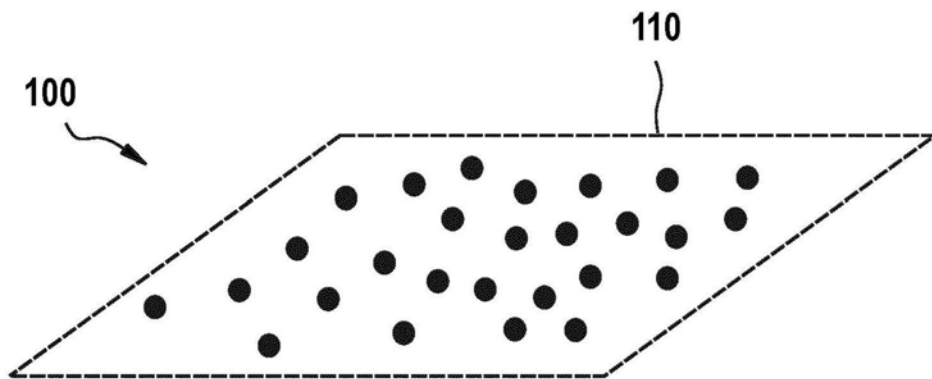


图2

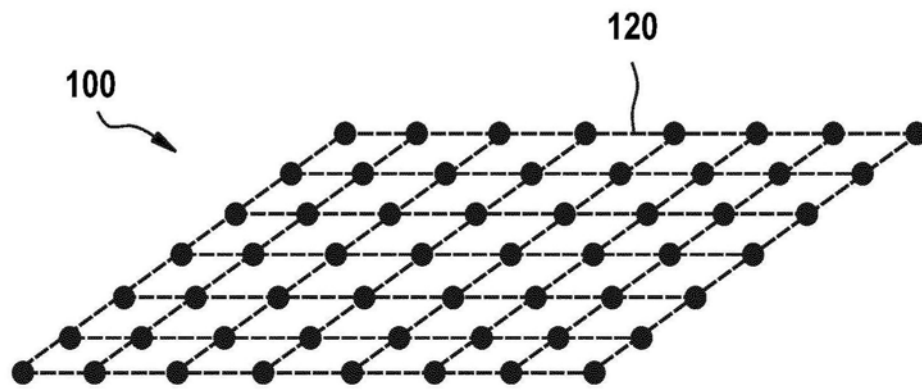


图3

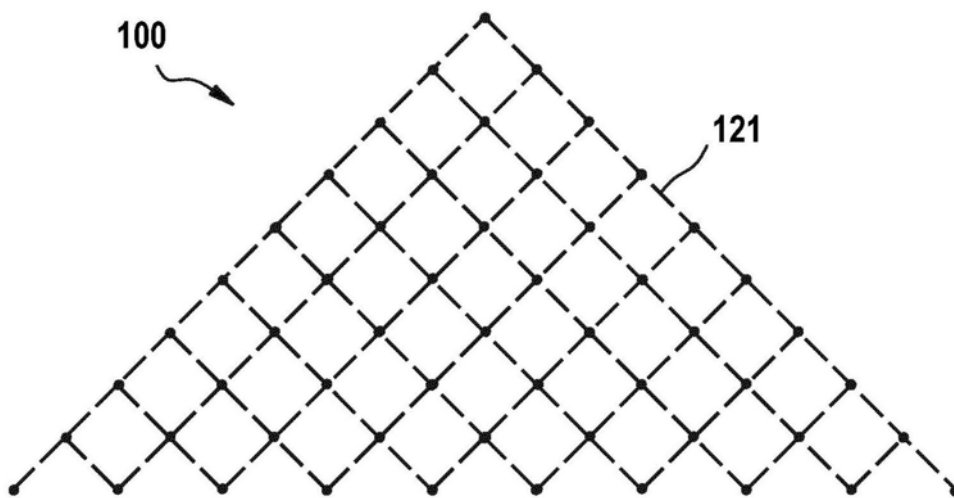


图4

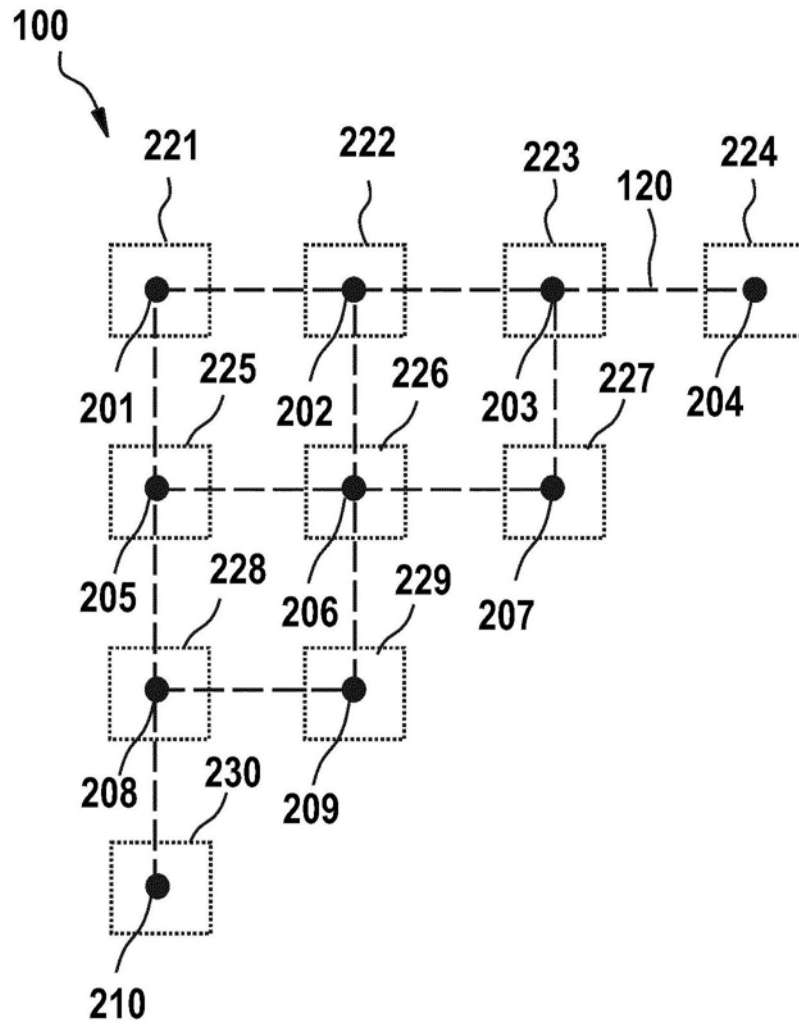


图5

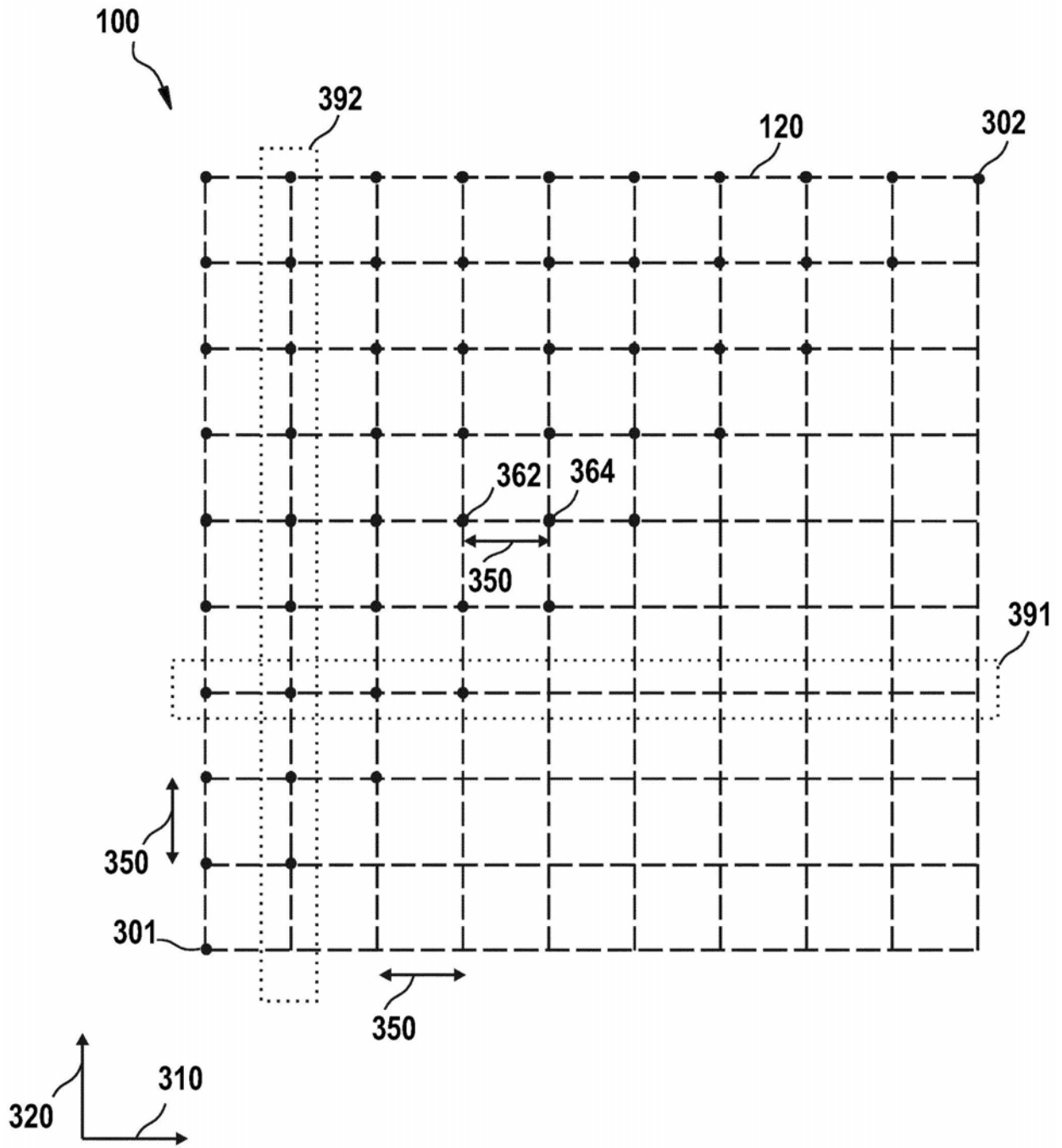


图6

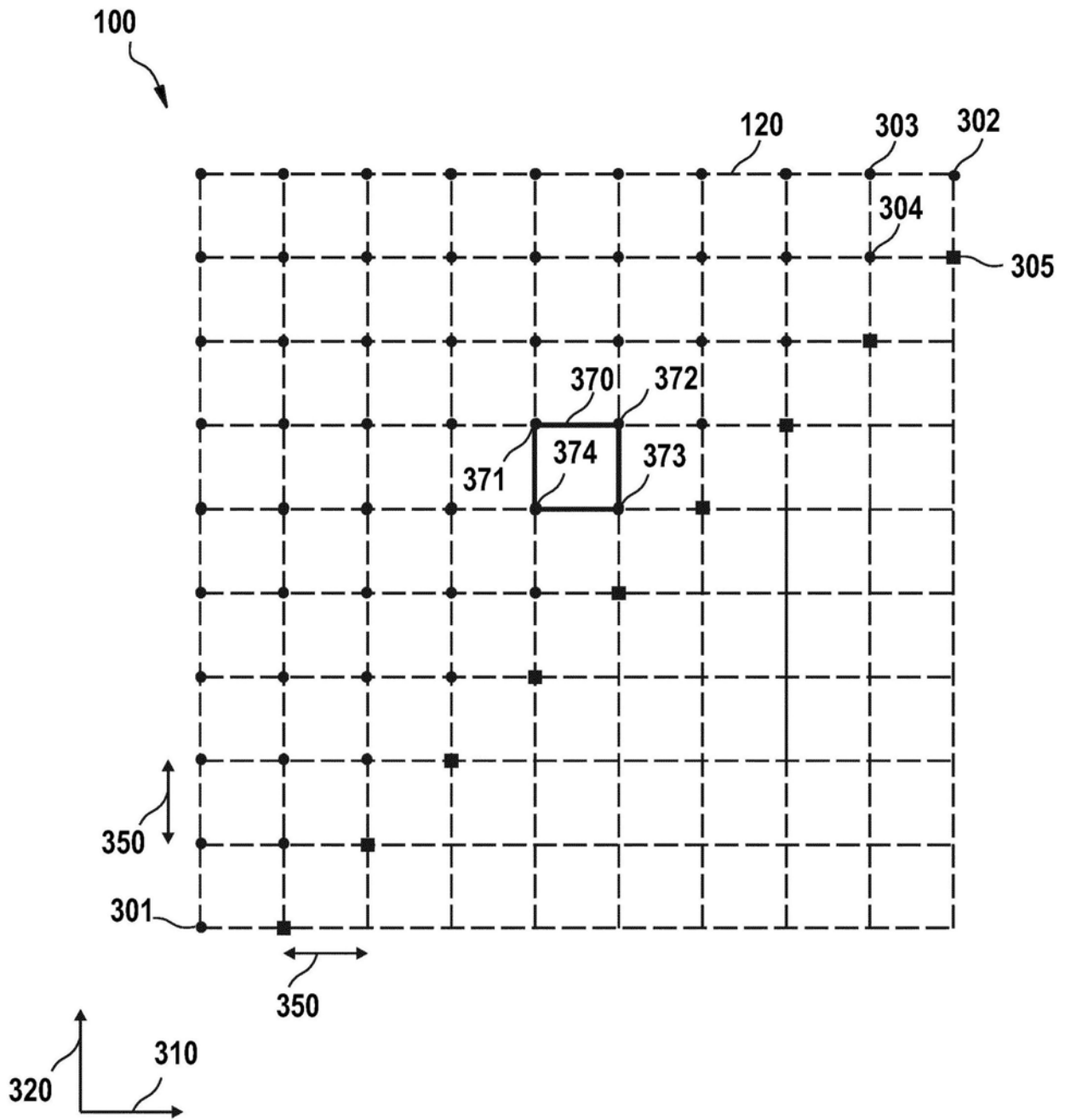


图7

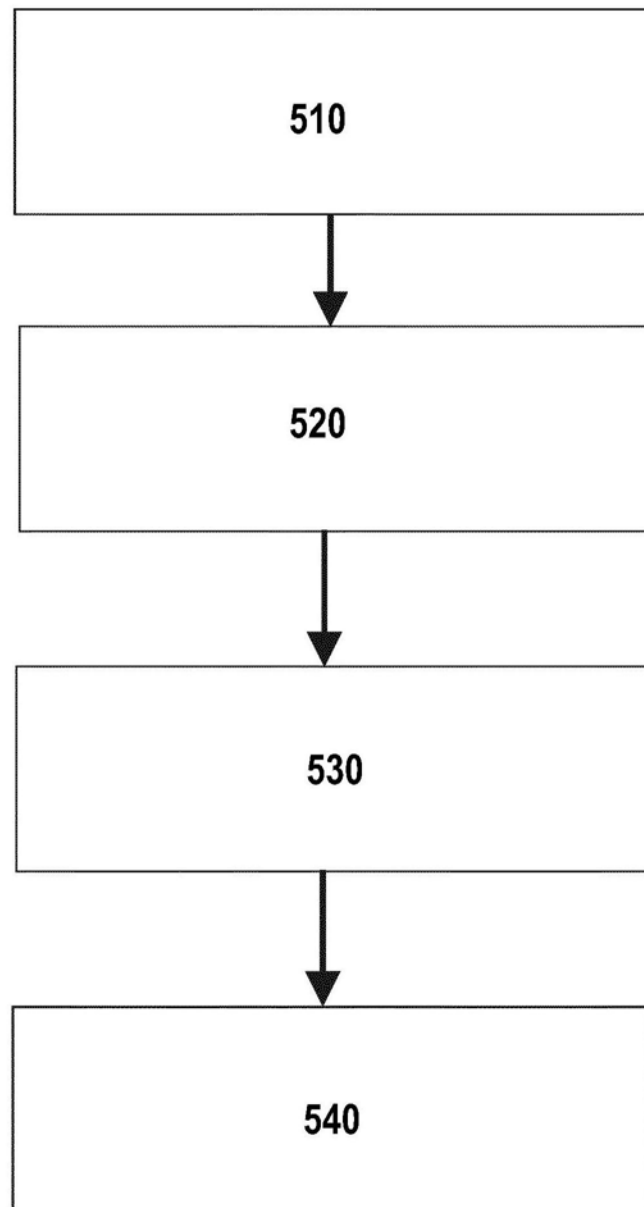


图8

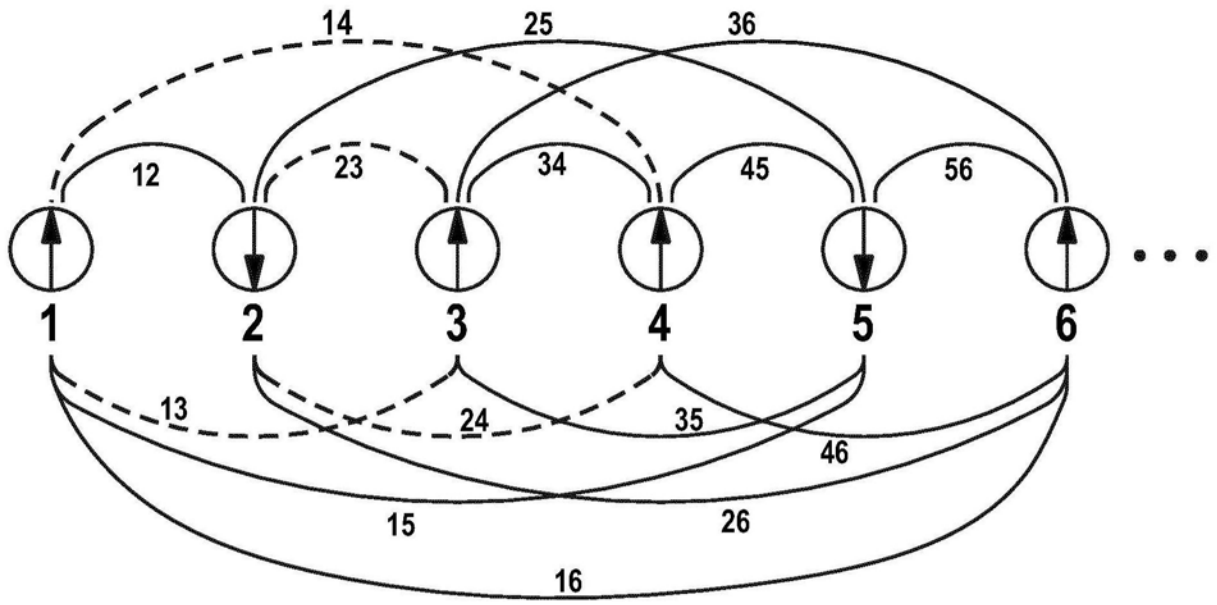


图9

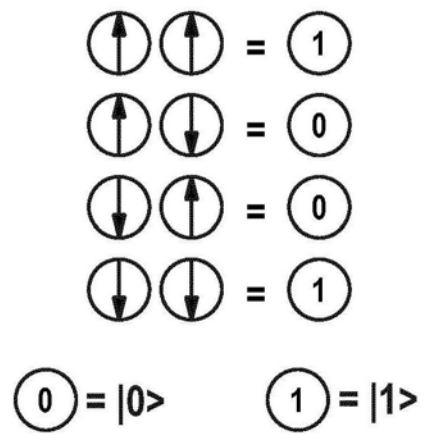


图10

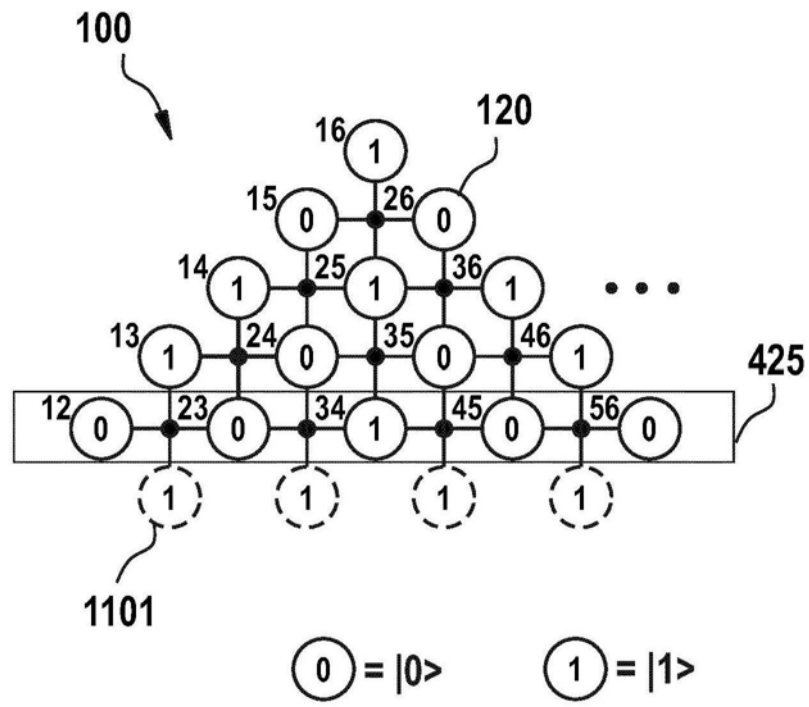


图11

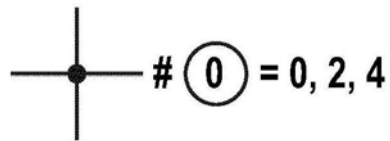


图12

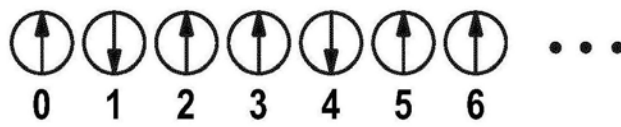


图13

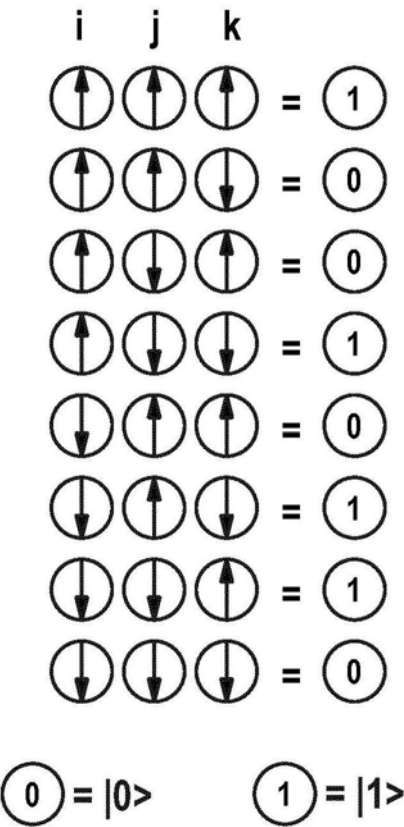


图14

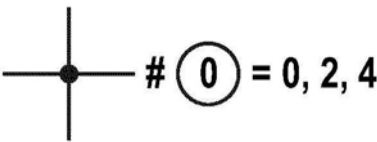


图15

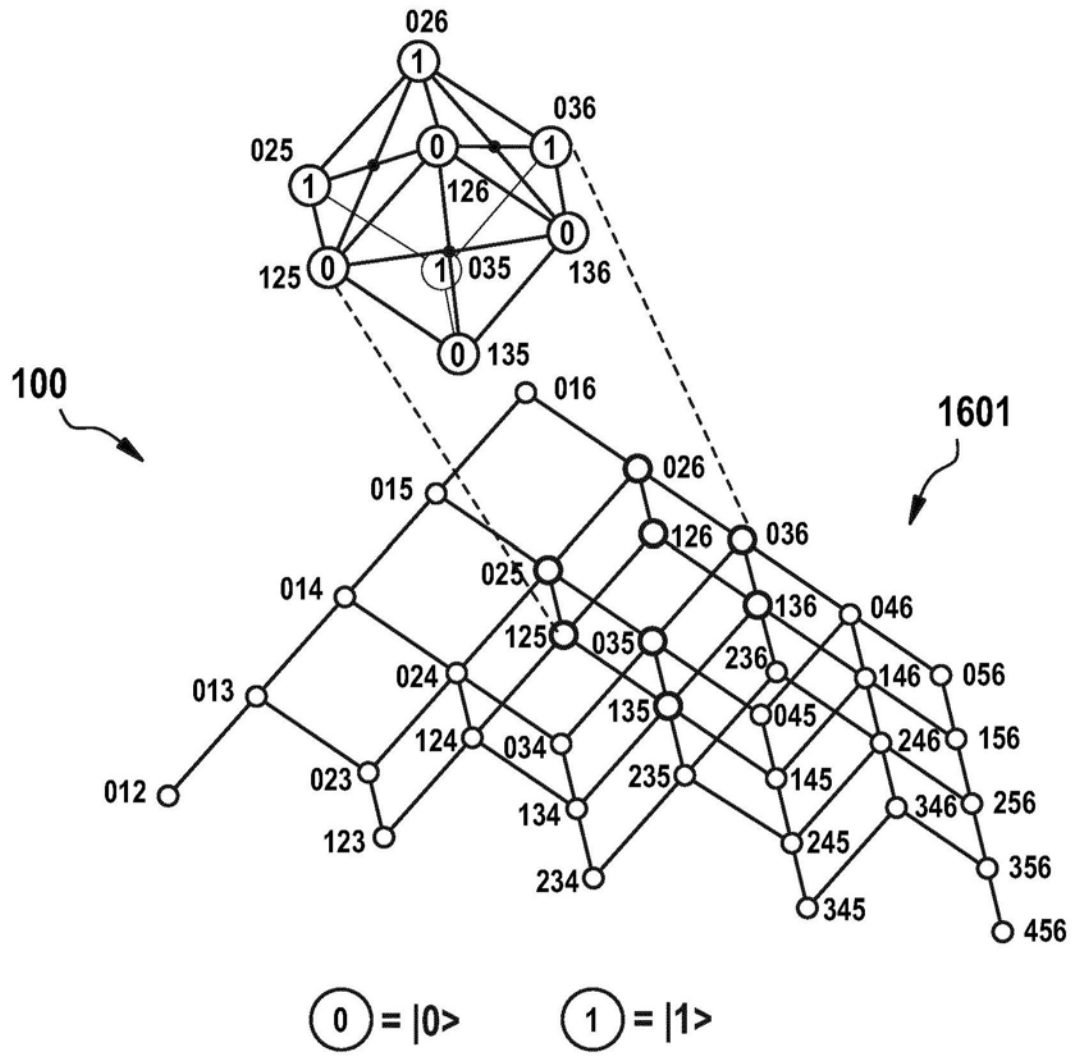


图16

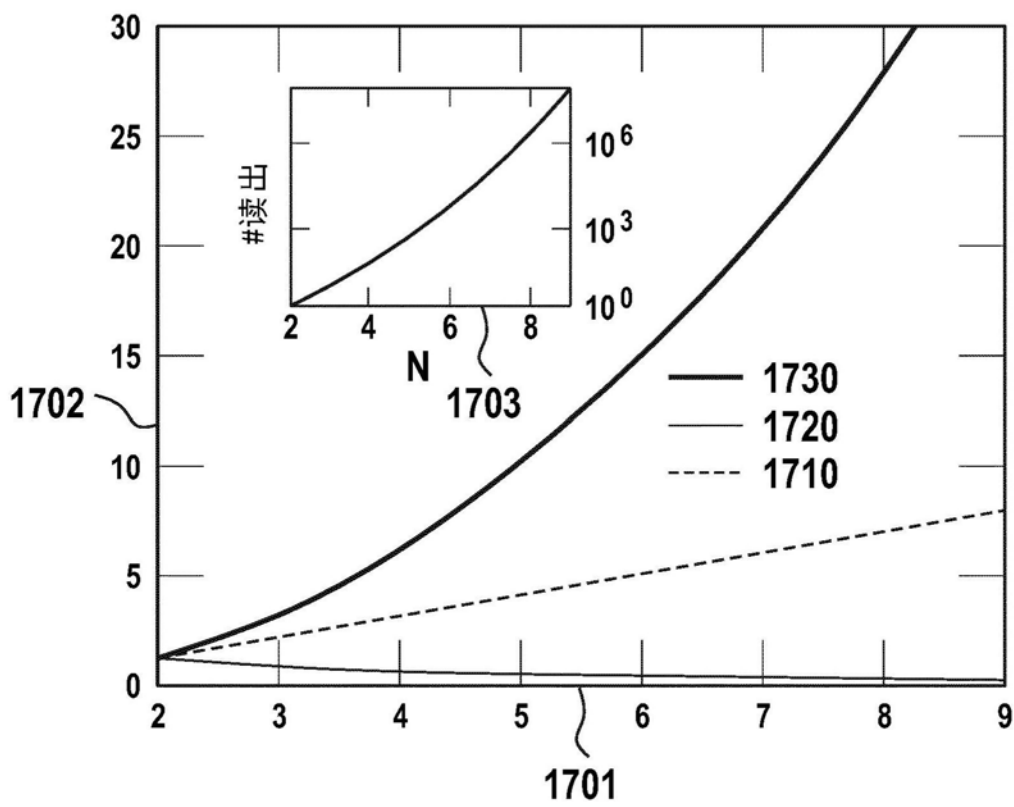


图17