



(12)发明专利

(10)授权公告号 CN 104919476 B

(45)授权公告日 2018.03.02

(21)申请号 201480004941.0

(22)申请日 2014.01.06

(65)同一申请的已公布的文献号
申请公布号 CN 104919476 A

(43)申请公布日 2015.09.16

(30)优先权数据
61/752,646 2013.01.15 US
13/912,876 2013.06.07 US

(85)PCT国际申请进入国家阶段日
2015.07.15

(86)PCT国际申请的申请数据
PCT/US2014/010276 2014.01.06

(87)PCT国际申请的公布数据
W02014/113226 EN 2014.07.24

(73)专利权人 阿尔卡特朗讯
地址 法国布洛涅-比扬古

(72)发明人 阿列克谢·阿西赫明

(74)专利代理机构 北京律盟知识产权代理有限公司 11287
代理人 林斯凯

(51)Int.Cl.
G06N 99/00(2006.01)

(56)对比文件
CN 1825771 A, 2006.08.30,
US 6128764 A, 2000.10.03,
G. Gilbert 等. Logical Zeros for the
Seven-Qubit Quantum Error Correction
Code.《Quantum Information and Computation
IX》.2011,

审查员 安飞

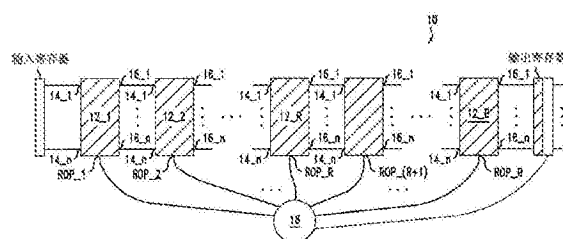
权利要求书1页 说明书13页 附图10页

(54)发明名称

降级的经量子冗余译码状态的校正子

(57)摘要

一种设备包含具有n个输入端口及n个输出端口的装置。所述n个输入端口经配置以接收物理处理过的经量子冗余译码状态的n个对应物理对象。所述n个输出端口经配置以输出所述物理处理过的经量子冗余译码状态中的所述n个物理对象。所述装置经配置以通过使所述n个物理对象通过所述装置而测量所述物理处理过的经量子冗余译码状态的校正子的位。所述装置经配置以通过所述使所述n个物理对象通过所述装置而测量所述校正子的所述所测量位的奇偶校验位。



1. 一种适于在测量校正子中使用的设备,其包括:

装置,其具有用以接收物理处理过的经量子冗余译码状态的对应 n 个物理对象的 n 个输入端口且具有用以输出所述物理处理过的经量子冗余译码状态中的所述 n 个物理对象的 n 个输出端口,所述装置经配置以通过使所述 n 个物理对象通过所述装置而测量所述物理处理过的经量子冗余译码状态的校正子的位;且

其中所述装置经配置以通过所述使所述 n 个物理对象通过所述装置而测量所述校正子的所测量位中的一些所测量位的奇偶校验位。

2. 根据权利要求1所述的设备,其中所述装置包含串联连接的测量装置的序列,所述测量装置中的每一者经配置以接收及传输所述 n 个物理对象且经配置以测量所述校正子的所述位中的一者或所述校正子的所述所测量位中的一些所测量位的所述奇偶校验位。

3. 根据权利要求2所述的设备,其中所述测量装置中的每一者包含量子门的量子电路。

4. 根据权利要求2所述的设备,其中所述测量装置的真子集经配置以测量所述校正子的所述位,使得所述校正子的每一位由所述真子集的所述测量装置中的不同一者测量。

5. 根据权利要求4所述的设备,其进一步包括电子控制器,所述电子控制器经连接以接收所述校正子的所述所测量位及所述所测量奇偶校验位且经配置以基于所述所测量奇偶校验位及所述校正子的所述所测量位而确定所述校正子的经错误校正值。

6. 根据权利要求5所述的设备,其进一步包括错误校正模块,所述错误校正模块经配置以基于所述校正子的由所述电子控制器产生的经错误校正值而对所述物理处理过的经量子冗余译码状态进行错误校正。

7. 一种适于在测量校正子中使用的设备,其包括:

输入寄存器,其经连接以接收并存储 n 个量子位的物理状态;

多个辅助寄存器,所述多个辅助寄存器中的每一辅助寄存器经配置以传输一或多个量子位的预设置状态;

量子电路,其经构造以基于从所述输入寄存器接收的所述物理状态而变换所述预设置状态且将所述物理状态输出到输出寄存器;及

多个检测器,所述多个检测器中的每一检测器经连接以从所述量子电路接收所述经变换预设置状态中的对应一者且经配置以通过测量所述经变换预设置状态中的所述对应所接收一者的一或多个量子位而产生一值;且

其中所述量子电路经配置以形成所述经变换预设置状态,使得所产生值测量所述物理状态的校正子的位,且使得所述所产生值中的至少一者测量所述校正子的所测量位的奇偶校验位。

8. 根据权利要求7所述的设备,其进一步包括控制器,所述控制器经配置以从所述检测器接收所述值且经配置以基于测量奇偶校验位的所述值而对所述所产生值中的测量所述校正子的位的一者进行错误校正。

9. 根据权利要求7所述的设备,其中所述量子电路经配置以串行产生所述经变换预设置状态。

10. 根据权利要求7所述的设备,其中所述量子电路经配置以并行变换所述预设置状态中的至少两者。

降级的经量子冗余译码状态的校正子

[0001] 相关申请案交叉参考

[0002] 本申请案主张2013年1月15日提出申请的第61/752,646号美国临时专利申请案的权益。

[0003] 依照情报高级研究计划署(IARPA)授予的第D11PC20165号合同的条款,美国政府在本发明中具有完全支付许可及在有限的情形下根据合理条款要求专利所有人许可他人的权利。

技术领域

[0004] 本发明涉及测量可能已经历物理降级的经量子冗余译码状态的校正子。

背景技术

[0005] 本章节介绍可有助于促进对本发明的更好理解的方面。因此,本章节的陈述应从这个角度来阅读而不应理解为关于什么在现有技术中或什么不在现有技术中的承认。

[0006] 由于载运纠缠的量子状态的信息易于在一些类型的物理处理期间发生错误,因此其中此类纠缠的量子状态载运信息的量子计算机将可能使用错误校正。在此类量子计算机中,错误校正可涉及基于量子稳定子群组对载运纠缠的量子状态的信息进行量子冗余译码。

[0007] 量子冗余译码涉及相干地混合个别初始量子状态(即,信息载运状态)与预设置量子状态,借此产生对应经量子冗余译码状态。相干混合通常使每一初始量子状态与具有多个量子位(qubit)的预设置量子状态纠缠。在量子冗余译码之后,物理处理可在经量子冗余译码状态中产生错误。物理处理可包含(例如)经由物理通信通道传输经量子冗余译码状态及/或存储经量子冗余译码状态。

[0008] 在物理处理之后,物理处理过的经量子冗余译码状态可经受错误校正处理。错误校正过程通常涉及测量物理处理过的经量子冗余译码状态的校正子的值。校正子的所测量值指示物理处理是否在对经量子冗余译码状态中产生错误。通常,使用所测量值来识别物理处理最可能产生的错误。如果校正子的所测量值指示存在错误,那么错误校正过程可涉及对物理处理过的经冗余译码量子状态应用量子操作以反转所述物理处理最可能产生的错误。所应用量子操作的形式是依据物理处理过的经量子冗余译码状态的校正子确定。通常,可通过此错误校正处理校正的错误的集合为物理处理可能产生的所有错误的集合的真子集。

发明内容

[0009] 一些实施例提供其对物理处理过的(例如,降级的)经量子冗余译码状态的校正子的确定对抗潜在错误更稳健的设备或方法。

[0010] 在一些实施例中,第一设备包含具有n个输入端口及n个输出端口的装置。所述n个输入端口经配置以接收物理处理过的经量子冗余译码状态的n个对应物理对象。所述n个输

出端口经配置以输出所述物理处理过的经量子冗余译码状态中的所述 n 个物理对象。所述装置经配置以通过使所述 n 个物理对象通过所述装置而测量所述物理处理过的经量子冗余译码状态的校正子的位。所述装置经配置以通过所述使所述 n 个物理对象通过所述装置而测量所述校正子的所述所测量位中的一些所测量位的奇偶校验位。

[0011] 在所述第一设备的一些实施例中,所述装置可包含串联连接的测量装置的序列。所述测量装置中的每一者经配置以接收及传输所述 n 个物理对象且经配置以测量所述校正子的所述位中的一者或所述校正子的所述所测量位中的一些所测量位的所述奇偶校验位。在一些此类实施例中,所述测量装置中的至少一者经配置以测量所述奇偶校验位。在此段落的任何实施例中,所述测量装置中的每一者可包含量子门的量子电路。在此段落的任何实施例中,所述测量装置的真子集可经配置以测量所述校正子的所述位,使得所述校正子的每一位由所述真子集的所述测量装置中的不同一者测量。

[0012] 所述第一设备的以上实施例中的任一者可进一步包含经连接以接收所述校正子的所述所测量位及所述所测量奇偶校验位的电子控制器。所述电子控制器经配置以基于所述所测量奇偶校验位及所述校正子的所述所测量位而确定所述校正子的经错误校正值。在一些此类实施例中,所述控制器可经配置以根据线性块码对由所述测量装置的所述真子集测量的所述校正子进行错误校正。在一些此类实施例中,所述第一设备可包含经配置以基于所述校正子的由所述电子控制器产生的经错误校正值而对所述物理处理过的经量子冗余译码状态进行错误校正的错误校正模块。

[0013] 在其它实施例中,第二设备包含经连接以接收并存储 n 个量子位的物理状态的输入寄存器、多个辅助寄存器、量子电路及多个检测器。所述多个辅助寄存器中的每一辅助寄存器经配置以传输一或多个量子位的预设置状态。所述量子电路经构造以基于从所述输入寄存器接收的所述物理状态而变换所述预设置状态且将所述物理状态输出到输出寄存器。所述多个检测器中的每一检测器经连接以从所述量子电路接收所述经变换预设置状态中的对应一者且经配置以通过测量所述经变换预设置状态中的对应所述所接收一者的一或多个量子位而产生一值。所述量子电路经配置以形成所述经变换状态,使得所述所产生值测量所述物理状态的所述校正子的位,且使得所述所产生值中的至少一者测量所述校正子的所述所测量位的奇偶校验位。

[0014] 所述第二设备的一些实施例可进一步包含经配置以从所述检测器接收所述值的控制器。所述控制器还可经配置以基于测量奇偶校验位的所述值而对所述所产生值中的测量所述校正子的位的一者进行错误校正。一些此类实施例可进一步包含错误校正模块,所述错误校正模块经配置以从所述输出寄存器接收所述物理状态且基于所述校正子的由所述电子控制器产生的经错误校正值而对所述所接收所述物理状态进行错误校正。

[0015] 在所述第二设备的一些实施例中,所述量子电路经配置以串行产生所述经变换量子状态。

[0016] 在所述第二设备的一些实施例中,所述量子电路经配置以并行变换所述预设置量子状态中的至少两者。

[0017] 在另一实施例中,一种方法包含传输经冗余编码多量子位状态通过第一硬件装置以测量所述经冗余编码多量子位状态的校正子。所述方法还包含传输所述经冗余编码多量子位状态通过第二硬件装置以测量所述校正子的测量的一或多个奇偶校验位。

[0018] 在所述方法的一些实施例中,所述传输经冗余编码多量子位状态通过所述第一硬件装置的动作可包含传输所述经冗余编码多量子位状态通过量子门电路的序列。在一些此类实施例中,所述传输经冗余编码多量子位状态通过所述第二硬件装置的动作可包含传输所述经冗余编码多量子位状态通过量子门电路的序列,其中所述第一与第二序列不连结。

[0019] 方法的以上实施例中的任一者可进一步包含通过基于所述一或多个奇偶校验位的所述所测量值校正所述校正子的多个所测量位中的至少一者而对所述所测量校正子进行错误校正。一些此类实施例可进一步包含基于所述经错误校正所测量校正子而对量子电路中的所述经冗余编码多量子位状态进行错误校正。

[0020] 其它实施例可涵盖操作发明内容、图式及/或具体实施方式中所描述的设备的其它设备或方法。

附图说明

[0021] 图1是经配置以测量已经历能够在其中产生错误的物理处理的经量子冗余译码状态的校正子的设备的框图;

[0022] 图2是(例如)可形成图1的硬件测量装置中的一者的量子电路的框图;

[0023] 图3、4、5及6是量子电路的针对稳定子群组G的基础元素的实例的框图,并且是图1的用于直接测量一种量子冗余译码方案的校正子的位的硬件测量装置的实施例;且

[0024] 图7及8是量子电路的针对相同稳定子群组G的非基础元素的实例的框图,并且是图1的用于直接测量相同量子冗余译码方案中的所测量校正子的校验位的硬件测量装置的实施例;

[0025] 图9是图解说明使用量子电路及预设置量子状态集合来提供所接收经量子冗余译码状态的所测量校正子的错误校正的设备的框图;且

[0026] 图10是图解说明(例如)在图1及9的设备中处置物理处理过的经冗余编码多量子位状态的方法的流程图。

[0027] 在各图及文本中,相似参考编号指代功能上及/或结构上类似的元件。

[0028] 在各图中,可能放大一些特征的相对尺寸以更清楚地图解说明其中的设备。

[0029] 在本文中,通过图式及具体实施方式更全面地描述各种实施例。不过,本发明可以各种形式来体现且并不限于各图及具体实施方式中所描述的特定实施例。

具体实施方式

[0030] 弗兰克盖坦(Frank Gaitan)(泰勒与弗兰西斯(Taylor&Francis),2008年)的书量子错误校正与容错量子计算及麦可A.尼尔森(Micahel A.Nielson)和艾萨克L.庄(Isaac L.Chuang)(剑桥200)的书量子计算与量子信息以全文引用方式并入本文中。

[0031] 2013年1月15日提出申请的第61/752,646号美国临时专利申请案以全文引用方式并入本文中。

[0032] 本文中,字词状态指的是物理实体而不是抽象条件,除非另有规定。举例来说,物理对象的n量子位状态指的是物理对象的已经以适合方式准备的物理实体(例如,n个离子的集合)。状态的物理实体可被生产、存储、运输或测量且可(例如)载运n个量子位的表示。

[0033] 如已陈述,一些错误校正方案基于物理处理过的经量子冗余译码状态的校正子。

校正子是被赋予二进制值的多分量向量,其值在此状态中从其中的可能错误集合识别可能特定错误(例如,最可能错误)。举例来说,校正子可足以在对此类物理处理过的经量子冗余译码状态的错误为单量子位错误时识别所述错误。即,校正子的值可足以在于经量子冗余编码状态的预选定量量子位中的单个量子位中存在错误的假设下识别错误。基于确定校正子的值,错误校正处理可通过使物理处理过的经量子冗余译码状态通过量子门的量子电路而反转经识别最可能错误。

[0034] 用于错误校正的此类方案经常在所述确定不正确地识别物理处理过的经量子冗余译码状态的校正子的值时失败。并且,用以测量校正子的值的许多硬件装置易于提供错误值,这是因为所述硬件装置基于易于出错的基本量子门的量子电路。因此,增加确定校正子的可靠性可改进基于校正子的所确定值的错误校正的性能。

[0035] 用以增加确定校正子的值的可靠性的一种方案涉及对物理处理过的经量子冗余译码状态进行一组校正子值测量,且接着将所述状态的校正子的值定义为所述集合的值中的最频繁测量出的值。举例来说,可通过多数规则确定所述值中的最频繁测量出的值。根据多数规则,所确定值将为物理处理过的经量子冗余译码状态在大多数时间的所测量值。发明人相信此方案减小在确定校正子时出错的概率,但发明人还相信此方案通常使用大量测量硬件来产生此类错误的发生率的中等减小。

[0036] 设备及方法的各种实施例改进确定物理处理过的经量子冗余译码状态的校正子的值的可靠性。所述经改进可靠性可高于上文所提及的通过涉及校正子的多个测量的方法产生的可靠性,及/或为了达到与涉及校正子的多个测量的方法相同的可靠性,可使用较少测量硬件来确定校正子的值。

[0037] 图1图解说明经配置以确定物理处理过的经量子冗余译码状态的校正子的设备10。经量子冗余译码状态具有 n 个物理对象;所述物理对象中的每一者载运信息的对应单个可测量量子位。经量子冗余译码状态通过相干地混合 $(n-k)$ 个物理对象的预选定量子状态与载运信息的 k 个量子位的初始量子状态而产生。对经量子冗余译码状态的各种物理处理可能已在其中产生错误。

[0038] 在各种量子状态中,载运信息的个别量子位的物理对象可采取各种形式,例如,光子、受约束离子、受约束原子及/或电荷载子的小分率的量子霍尔(Hall)效应小滴的边缘或其它刺激物。相关领域的技术人员将理解如何做出此类物理对象、如何将关于此类物理对象的信息进行量子译码、如何相干地混合此类量子状态及如何读取存储于此类量子状态中的信息。弗兰克盖坦的上文所并入的书及/或麦可A.尼尔森等人的上文所并入的书中可能描述经配置以执行此类功能的一些此类方法及设备。

[0039] 在图1中,设备10包含用于量子状态的输入寄存器IR及用于量子状态的输出寄存器OR。所述输入寄存器IR能够接收及存储 n 个量子位的物理处理过的经量子冗余译码状态的 n 个物理对象。所述输出寄存器经配置以在设备10中的处理之后存储及传输相同所接收状态的 n 个物理对象。

[0040] 设备10具有硬件测量装置12_1、...、12_B的序列。每一硬件测量装置12_1-12_B具有 n 个输入端口14_1-14_n的第一阵列及 n 个输出端口16_1-16_n的第二阵列。所述硬件测量装置中的第 R 硬件测量装置12_R的中间输出端口16_1至16_n以一对一方式连接到所述序列中的下一者(硬件测量装置12_($R+1$))的中间输入端口14_1至14_n。所述序列经由所述序列

的第一硬件测量装置12_1的输入端口14_1-14_n从输入寄存器IR接收物理处理过的经量子冗余译码状态的n个物理对象,且经由所述序列的最后一个硬件测量装置12_B的输出端口16_1-16_n将所述物理对象传输到输出寄存器OR。

[0041] 在所述序列中,每一硬件测量装置12_1-12_B经配置以测量指示以下各项中的任一者的二进制值:

[0042] a) 物理处理过的经量子冗余译码状态的校正子的对应位,其由设备10在输入端口14_1-14_n处接收;

[0043] 或

[0044] b) 相同校正子的奇偶校验位,硬件测量装置12_1-12_B中的其它硬件测量装置经配置以对其进行测量。

[0045] 硬件测量装置12_1-12_B中的一或多者测量校正子的奇偶校验位,且硬件测量装置12_1-12_B中的其它者测量校正子的位。在一些实施例中,奇偶校验位的此类测量可支持校正子的所测量值的多个奇偶校验。在一些实施例中,测量可包含所述序列的硬件测量装置12_1-12_B中的至少一者对校正子的每一位的测量。在不同实施例中,此类测量的对校正子的特定位及/或特定奇偶校验位的测量可由所述序列中的硬件测量装置12_1-12_B中的位于不同位置处的硬件测量装置执行。

[0046] 设备10还包含经配置以从硬件测量装置12_1-12_B接收校正子的所测量位及其所测量奇偶校验的电子控制器18。实际上,每一硬件测量装置12_1-12_b具有一结果输出端口ROP_1-ROP_B,校正子的此奇偶校验位或普通位的所测量值从所述结果输出端口传输到控制器18。电子控制器18基于从硬件测量装置12_1-12_B的结果输出端口ROP_1-ROP_B接收的所测量位值而确定所接收物理处理过的经量子冗余译码状态的校正子的值。

[0047] 电子控制器18基于用于校正子的位的所接收测量的所接收的所测量奇偶校验位而将错误校正应用于校正子的位的所述测量。举例来说,经错误校正值可基于硬件测量装置12_1-12_B中的一些硬件测量装置对校正子的每一位的直接测量及硬件测量装置12_1-12_B中的其余硬件测量装置对校正子的位的所测量值的一或多个奇偶校验位的直接测量。

[0048] 在此类实施例中,电子控制器18还可经由对线性冗余译码(例如,基于线性块码或系统线性块码)的错误校正而对校正子的位的所测量值进行错误校正。在此类方法中,电子控制器18可将校正子视为二进制信息向量。接着,控制器可应用常规技术以依据校正子的所测量值(即,基于所测量奇偶校验位)识别校正子。基于校正子的所测量值,控制器18可识别校正子的所测量值中的最可能错误(例如,单位错误)且对校正子的所测量值中的此类错误进行校正。

[0049] 在设备10的一些实施例中,每一硬件测量装置12_1-12_B包含基本量子门的量子电路。在硬件测量装置12_1-12_B中的不同硬件测量装置中,量子电路可不同。特定来说,每一硬件测量装置12_1-12_B具有经配置以测量校正子的对应位或所测量校正子的奇偶校验位的量子电路。

[0050] 在一些实施例中,每一硬件测量装置12_1-12_B包含量子门的对应量子电路。每一量子电路对应于用于量子冗余译码方案的稳定子群组的一元素,且稳定子群组的元素定义硬件测量装置12_1-12_B的结果输出端口ROP_1-ROP_B处的位输出的类型。

[0051] 硬件测量装置12_1-12_B的此类实施例的描述经由量子位作为具有2个状态(即,|

$0\rangle$ 及 $|1\rangle$ 的自旋的表示而为简单的。在此表示中,将初始量子状态及经量子冗余译码状态表示为多自旋状态的复叠加。每一初始量子状态为 k 个此类自旋的状态的复叠加。每一经量子冗余译码状态为 n 个此类自旋的状态的复叠加。此处, p 个自旋的状态为根本2状态自旋的直积空间中的状态。复叠加为此类直积状态的和,其中所述和的每一状态被一复因子加权。

[0052] 在此自旋表示中,经量子冗余译码状态的处理可由对对应 n 自旋状态应用矩阵表示。此类矩阵可书写为集合 V 的 2×2 矩阵的直积的和。集合 V 包含 2×2 单位矩阵(identity matrix)及 2×2 泡利(Pauli)矩阵,即, I 、 σ_x 、 σ_y 及 σ_z 。实际上,对量子冗余译码状态的物理处理可产生根本错误,所述根本错误由算子在 V 的 2×2 矩阵的 n 维直积空间中的作用表示。

[0053] 另外,在 V 的 2×2 矩阵与2分量二进制向量之间存在一对一对应。此对应将简化对图1的硬件测量装置12_1-12_B的所说明实施例的量子电路的描述。所述对应定义为如下。

[0054] $I \leftrightarrow 0, 0;$

[0055] $\sigma_x \leftrightarrow 1, 0;$

[0056] $\sigma_z \leftrightarrow 0, 1;$ 及

[0057] $\sigma_y \leftrightarrow 1, 1。$

[0058] 2×2 泡利矩阵众所周知定义为如下:

[0059] $\sigma_x = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}, \sigma_y = \begin{bmatrix} 0 & -i \\ i & 0 \end{bmatrix}$ 且 $\sigma_z = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{bmatrix}。$

[0060] 以上对应定义从2维二进制向量的空间到集合 V 的函数 U 。函数 U 定义为如下:

[0061] $U(0, 0) = I, U(1, 0) = \sigma_x, U(0, 1) = \sigma_z$ 且 $U(1, 1) = \sigma_y。$

[0062] 函数 U 提供根本错误算子与 $2n$ 维二进制向量(即,为形式 $(a_{11}, a_{12}, a_{21}, a_{22}, \dots, a_{n1}, a_{n2})$ 的向量,其中每一 a_{ij} 在 $\{0, 1\}$ 中)之间的对应的简单描述。每一根本错误算子 E 针对某种 $2n$ 维二进制向量 $(a_{11}, a_{12}, \dots, a_{n1}, a_{n2})$ 具有以下形式:

[0063] $U(a_{11}, a_{12}) \otimes \dots \otimes U(a_{n1}, a_{n2})。$

[0064] 因此,所述对应定义为如下:

[0065] $E = U(a_{11}, a_{12}) \otimes \dots \otimes U(a_{n1}, a_{n2}) \leftrightarrow (a_{11}, a_{12}, \dots, a_{n1}, a_{n2})。$

[0066] 为了进一步说明此对应,下文针对 $n=3$ 及4展示两个实例。

[0067] 错误 $\sigma_x \otimes I \otimes \sigma_z = U(1, 0) \otimes U(0, 0) \otimes U(0, 1) \leftrightarrow (1, 0, 0, 0, 0, 1)。$

[0068] 错误 $I \otimes \sigma_z \otimes \sigma_x \otimes \sigma_y = U(0, 0) \otimes U(0, 1) \otimes U(1, 0) \otimes U(1, 1) \leftrightarrow (0, 0, 0, 1, 1, 0, 1, 1)。$

[0069] 上文所描述的对应还给出稳定子群组的元素(其为根本错误算子)与2维二进制向量的子集之间的对应。特定来说,用于量子冗余译码方案的稳定子群组的每一元素 g_i 对应于 $2n$ 维二进制向量 $(a_{11}(i), a_{12}(i), \dots, a_{n1}(i), a_{n2}(i))$,针对所述 $2n$ 维二进制向量,元素 $g_i = U(a_{11}(i), a_{12}(i)) \otimes \dots \otimes U(a_{n1}(i), a_{n2}(i))。$

[0070] 对应于元素 g_i 的 $2n$ 维二进制向量 $(a_{11}(i), a_{12}(i), \dots, a_{n1}(i), a_{n2}(i))$ 还形成稳定子群组的表示。在此表示中,群组运算为对应 $2n$ 维二进制向量的二进制加法。特定来说,群组元素 $g_m = g_i \times g_j$ 由以下方程式表示:

[0071] $(a_{11}(m), a_{12}(m), \dots, a_{n1}(m), a_{n2}(m)) =$

[0072] $(a_{11}(i) + a_{11}(j), a_{12}(i) + a_{12}(j), \dots, a_{n1}(i) + a_{n1}(j), a_{n2}(i) + a_{n2}(j))$ 。

[0073] 此表示为阿贝耳(abelian)的,就如稳定子群组本身一样。

[0074] 相关领域的技术人员将容易地能够依据选定量子冗余译码方案确定稳定子群组。在弗兰克盖坦及麦可A.尼尔森等人的上文所并入的书中可找到量子冗余译码方案及其稳定子群组的实例的一些描述。

[0075] 稳定子群组的基础元素描述可用于直接测量物理处理过的经量子冗余译码状态的校正子的基本量子门的量子电路。稳定子群组的其它元素描述可用于直接测量此物理处理过的经量子冗余译码状态的校正子的所测量值的奇偶校验位的基本量子门的量子电路。在下文中,对此类量子电路的描述基于以上对应。

[0076] 特定来说,稳定子群组的每一基础元素 g_j 定义经配置以测量物理处理过的经量子冗余译码状态的校正子的对应位 s_j 的量子基本门的量子电路。为了测量校正子的位 s_j ,使物理处理过的经量子冗余译码状态通过用于稳定子群组的对应基础元素 g_j 的量子电路。因此,可通过使物理处理过的经量子冗余译码状态通过一系列此类量子电路而测量校正子的每一位,只要所述系列包含对应于稳定子群组的每一基础元素的至少一个此类量子电路即可。

[0077] 稳定子群组的其它元素 g_q 定义经配置以测量校正子的所测量值的对应奇偶校验位 p_q 的基本量子门的量子电路。为了测量奇偶校验位 p_q ,使物理处理过的经量子冗余译码状态通过稳定子群组的对应元素 g_q 的量子电路。举例来说,为了确定校正子的所测量位 s_f 及 s_h 的奇偶校验位,使物理处理过的经量子冗余译码状态通过对应于 $g_q = g_f \times g_h$ 的量子电路。此处, g_f 为对应于经配置以测量校正子的位 s_f 的量子电路的稳定子群组的基础元素,且 g_h 为对应于经配置以测量校正子的位 s_h 的量子电路的稳定子群组的基础元素。最后,“ $\times$ ”为稳定子群组的乘法运算。

[0078] 图2图解说明对应于稳定子群组的元素 g_i 的量子电路12(i)(例如,图1的硬件测量装置12_1-12_B中的一者)的实施例。元素 g_i 具有定义整数 $w(i)$ 的对应 $2n$ 维二进制向量 $(a_{11}(i), a_{12}(i), \dots, a_{n1}(i), a_{n2}(i))$ 。特定来说,整数 $w(i)$ 为针对索引 f 的所有值不等于 $(0, 0)$ 的对 $(a_{f1}(i), a_{f2}(i))$ 的数目。整数 $w(i)$ 定义如下文所描述的量子电路12(i)的数个性质。

[0079] 量子电路12(i)具有包括量子位连接线 $L_1, \dots, L_n$,测量区段24及 $w(i)$ 控制线 $CL_1, \dots, CL_{w(i)}$ 的主要物理通道22。每一连接线 L_1-L_n 将所接收量子状态的量子位从输入端口 $14_1, \dots, 14_d, \dots, 14_n$ 中的一者传递到输出端口 $14_1, \dots, 14_d, \dots, 14_n$ 中的一者(例如)以对所述量子位进行运算。主要物理通道22控制测量区段24的次要物理通道30,使得预选量子状态通过次要物理通道30的传输产生其性质测量在输入端口 14_1-14_n 处接收的量子状态的校正子的位或所述校正子的所述测量的奇偶校验位的状态。

[0080] 本文中,连接线(例如,线 L_1-L_n 及 L'_1 至 $L'_{w(i)}$ 中的任一者)为量子门的一部分或一系列量子门的一部分以在输入端口与输出端口之间传送状态的量子位。

[0081] 测量区段包含:输入寄存器26,其用以存储预选量子状态(即, $w(i)$ 量子位的附属状态);输出测量装置28;及次要物理通道30,其具有 $w(i)$ 量子位连接线 $L'_1, \dots, L'_{w(i)}$ 以在输入寄存器26与输出测量装置28之间传输预选量子状态的量子位。次要物理通道30的连接线 $L'_1-L'_{w(i)}$ 中的每一者由主要物理通道22的连接线 L_1-L_n 中的一者(即,经由控制线 $CL_1-CL_{w(i)}$ 中的一者)控制。为了清晰,控制结构由主要物理通道22的连接线 L_d

上的方格指示。所述方格经由控制线CL_h连接到次要物理通道30的连接线L'_h。主要物理通道22的其它连接线L₁-L_n在其上具有小的虚线方格以指示此类控制连接可能位于其处的位置。在n个连接线L₁-L_n当中，w(i)将在由小的虚线方格指示的位置处具有此类线间交互结构。主要通道的[n-w(i)]其它连接线L₁-L_n中的任一者不连接到双线基本量子门。

[0082] 控制线CL₁-CL_{w(i)}指示将主要物理通道22的连接线L₁-L_n的w(i)连接到次要物理通道30的连接线L'₁-L'_{w(i)}的双线量子门的存在。

[0083] 输出区域28经配置以测量从次要物理通道30接收的量子状态的w(i)量子位中的每一者的值且经配置以传输所述所接收量子状态的w(i)量子位的所测量值的和的所测量奇偶性的结果信号。所述结果信号被传输到结果输出端口(例如,图1的结果输出端口ROP₁-ROP_B中的一者)。所述结果信号为校正子的所测量位的值或所测量校正子的奇偶校验位。

[0084] 相关领域的技术人员基于本发明将容易地理解用于制作及使用线L₁-L_n、L'₁-L'_{w(i)}及CL₁-CL_{w(i)}的各种结构及方法;基本量子门;寄存器26及测量区域28。另外,(例如)在弗兰克盖坦及麦可A.尼尔森等人的上文所并入的书中的一者或两者中可能提供一些此类结构及方法的描述。

[0085] 在硬件测量装置中,耦合主要物理通道22及次要物理通道30的线L₁-L_n及L'₁-L'_{w(i)}的基本量子门的图案由对应于元素g_i的2n维二进制向量(a₁₁(i)、a₁₂(i)、...、a_{n1}(i)、a_{n2}(i))的形式固定。举例来说,来自主要物理通道22的顶部的第d线L_d经由基本量子门连接到次要物理通道30的第h线L'_h。所述基本量子门的形式由对(a_{d1}(i),a_{d2}(i))的值固定。针对此对的各种值,基本量子门定义为如下:

[0086] 0) 针对(a_{d1}(i),a_{d2}(i))=(0,0),量子门充当单位算子(即,无量子门)。

[0087] 1) 针对(a_{d1}(i),a_{d2}(i))=(0,1),量子门为其控制来自主要物理通道22中的线L_d的非控制(CNOT)门。

[0088] 2) 针对(a_{d1}(i),a_{d2}(i))=(1,0),量子门为哈达玛(Hadamard)门(H)、CNOT门及H门的序列,其中H门及CNOT门的控制是在主要物理通道22的线L_d上。

[0089] 3) 针对(a_{d1}(i),a_{d2}(i))=(1,1),量子门为- $\pi/4$ 门($\tilde{H}$)、CNOT门及 $\tilde{H}$ 门的离散x轴旋转的序列,其中 $\tilde{H}$ 门及CNOT门的控制是在主要物理通道22的线L_d上。

[0090] 各种上文所提及的基本量子门如下进行运算。H门根据以下方程式对单个自旋状态|j>(即,主要物理线L_d的线L_d上的量子位)进行运算:

[0091] $H|j\rangle = [|0\rangle + (-1)^j|1\rangle]$ 。

[0092] CNOT门根据以下方程式对双自旋状态|i,j>(即,线L_d及L'_h的量子位)进行运算:

[0093] $CNOT|i,j\rangle = |i,i+j\rangle$ 。

[0094] 此处,“+”指示加法模2。针对CNOT门,控制量子位I在主要物理通道22的线L_d上,且受控量子位j在次要物理通道30的线L'_h上。 $\tilde{H}$ 门对主要物理通道22的线L_d上的单个自旋状态|j>进行运算且由以下方程式定义:

[0095] $\tilde{H}|j\rangle = \exp(-i\pi\sigma_x/4)|j\rangle$ 。

[0096] 在量子电路中,次要物理通道30的形式及寄存器26中的预选定量子状态由对应于

稳定子群组的元素 g_i 的 $2n$ 维二进制向量 $(a_{11}(i), a_{12}(i), \dots, a_{n1}(i), a_{n2}(i))$ 固定。首先,如已提及,次要物理通道30具有量子位连接线 $L_1-L_w(i)$ 的 $w(i)$ (即,用于量子电路的每一双状态量子门的单独线)。最后,存储于寄存器26中且传输到次要物理通道30的预选量子状态为 $w(i)$ 量子位的Shor量子状态 $|A\rangle$ 。Shor量子状态 $|A\rangle$ 由以下方程式定义:

$$[0097] \quad |A\rangle = 2^{[-w(i)-1]/2} \sum_{A(e)} |A(e)\rangle$$

[0098] 此处,跨过量子状态 $A(e)$ 的包含 $w(i)$ 自旋状态(即, $w(i)$ 量子位状态)的所有直积的和具有偶数奇偶性。

[0099] 图3、4、5及6图解说用于其中 $n=5$ 的量子冗余译码方案的分别对应于稳定子群组G的基础元素 g_1 、 g_2 、 g_3 及 g_4 的量子电路12(1)、12(2)、12(3)、12(4)。基础元素 g_1 、 g_2 、 g_3 及 g_4 与10维(10D)二进制向量之间的对应由以下内容给出:

[0100] $g_1 \leftrightarrow (1, 0, 0, 1, 0, 1, 1, 0, 0, 0),$

[0101] $g_2 \leftrightarrow (0, 0, 1, 0, 0, 1, 0, 1, 1, 0),$

[0102] $g_3 \leftrightarrow (1, 0, 0, 0, 1, 0, 0, 1, 0, 1),$ 及

[0103] $g_4 \leftrightarrow (0, 1, 1, 0, 0, 0, 1, 0, 0, 1)。$

[0104] 元素 g_1 、 g_2 、 g_3 及 g_4 中的每一者具有等于4的权重“ $w(i)$ ”使得Shor状态将具有4量子位。

[0105] 图3图解说对应于稳定子群组的元素 g_1 的量子电路12(1)。量子电路12(1)的结构是从10D二进制向量 $(1, 0, 0, 1, 0, 1, 1, 0, 0, 0)$ 推导出,如下:

[0106] 1.在 g_1 的10D二进制向量中,最左侧位对为 $(1, 0)$ 。针对对 $(1, 0)$,H门、CNOT门及H门的序列将主要物理通道22的顶部线连接到次要物理通道30的顶部线。

[0107] 2.在 g_1 的10D二进制向量中,第二位对为 $(0, 1)$ 。针对对 $(0, 1)$,CNOT将主要物理通道22的下一顶部线连接到次要物理通道30的下一顶部线。

[0108] 3.在 g_1 的10D二进制向量中,第三位对还为 $(0, 1)$ 。针对对 $(0, 1)$,CNOT将主要物理通道22的第三线连接到次要物理通道30的第三线。

[0109] 4.在 g_1 的10D二进制向量中,第四位对为 $(1, 0)$ 。针对对 $(1, 0)$,H门、CNOT门及H门的序列将主要物理通道22的第四线连接到次要物理通道30的第四线。

[0110] 5.在 g_1 的10D二进制向量中,第五或最右侧位对为 $(0, 0)$ 。针对对 $(0, 0)$,在主要物理通道22与次要物理通道30的底部线之间不存在连接。第五量子位不参与此测量。

[0111] 图4、5及6图解说对应于相应基础元素 g_2 、 g_3 及 g_4 的量子电路12(2)、12(3)及12(4)。量子电路12(2)、12(3)、12(4)可以类似于上文的从对应于群组元素 g_1 的10D二进制向量推导量子电路12(1)的方式而从对应于群组元素 g_2 、 g_3 及 g_4 的10D二进制向量推导出。

[0112] 在一些实施例中,电子控制器18可经配置以(例如)经由线性块译码使用线性译码来对校正子的位的测量进行错误校正。举例来说,在以上实例中,对应于稳定子群组G的基础元素 g_1 、 g_2 、 g_3 及 g_4 的量子电路12(1)-12(4)测量物理处理过的经量子冗余译码状态的校正子的位 s_1 、 s_2 、 s_3 及 s_4 。电子控制器18可经配置以经由线性块译码技术对校正子的位 s_1 、 s_2 、 s_3 及 s_4 的所测量值的集合进行错误校正。在线性块译码中,将奇偶校验位定义为信息位的线性组合。此处,信息位为校正子位 s_1 、 s_2 、 s_3 及 s_4 。因此,在以上实例中,此线性块译码可使用

为校正子位 s_1 、 s_2 、 s_3 及 s_4 的以下线性组合的奇偶校验位 p_1 - p_8 :

$$[0113] \quad p_1 = s_1 + s_3,$$

$$[0114] \quad p_2 = s_2 + s_3,$$

$$[0115] \quad p_3 = s_1 + s_2,$$

$$[0116] \quad p_4 = s_1 + s_2 + s_4,$$

$$[0117] \quad p_5 = s_1 + s_3 + s_4,$$

$$[0118] \quad p_6 = s_3 + s_4,$$

$$[0119] \quad p_7 = s_1 + s_2 + s_3 + s_4,$$

$$[0120] \quad p_8 = s_2 + s_4.$$

[0121] 奇偶校验位的此选择对应于具有以下生成矩阵的线性码C:

$$[0122] \quad \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 1 & 1 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \quad (2)$$

[0123] 以上奇偶校验位可由对应于稳定子群组的元素(其为基础元素 g_1 、 g_2 、 g_3 及 g_4 的积)的量子电路测量。举例来说,由于奇偶校验位 p_3 等于 $s_1 + s_2$,因此用于测量 p_3 的量子电路对应于稳定子群组的元素 $g_1 \times g_2$ 。但是,对应于 $g_1 \times g_2$ 的10D二进制向量为对应于 g_1 及 g_2 的10D二进制向量的和。因此,用于测量 p_3 的量子电路对应于:

$$[0124] \quad (1, 0, 0, 1, 0, 1, 1, 0, 0, 0) + (0010010110) = (1, 0, 1, 1, 0, 0, 1, 1, 1, 0)。$$

[0125] 类似地,用于测量为 $s_2 + s_3$ 的 p_2 的量子电路为对应于 $g_2 \times g_3$ 的10D二进制向量。因此,用于测量 p_2 的量子电路对应于:

$$[0126] \quad (0, 0, 1, 0, 0, 1, 0, 1, 1, 0) + (1, 0, 0, 0, 1, 0, 0, 1, 0, 1) = (1, 0, 1, 0, 1, 1, 0, 0, 1, 1)。$$

[0127] 图7及8分别图解说明用于直接测量 p_3 及 p_2 的相应量子电路12(7)及12(8)。

[0128] 基于以上描述,相关领域的技术人员将能够构造用于直接测量上文所列示的奇偶校验位 p_1 - p_8 中的每一者的量子电路。

[0129] 在图1的包含此类量子电路的设备10的实施例中,电子控制器18可经配置(例如)以基于线性C码对校正子的所测量值进行错误校正。特定来说,如果校正子位 s_1 - s_4 及奇偶校验位 p_1 - p_8 的所测量值全部正确,那么向量 $(s_1, s_2, s_3, s_4, p_1, p_2, p_3, p_4, p_5, p_6, p_7, p_8)$ 为码C的码字。另一方面,如果这些所测量位值中的一或多者不正确,那么此向量不是码字。在此情况下,电子控制器18可经配置以找到C中的最可能码字 $(v_1, v_2, v_3, v_4, v_5, v_6, v_7, v_8, v_9, v_{10}, v_{11})$ 且可经配置以将校正子形成为 (v_1, v_2, v_3, v_4) 。例如,电子控制器18可经配置以找到C到向量 $(s_1, s_2, s_3, s_4, p_1, p_2, p_3, p_4, p_5, p_6, p_7, p_8)$ 的最接近码字,如下:

$$[0130] \quad v = (v_1, v_2, v_3, v_4, v_5, v_6, v_7, v_8, v_9, v_{10}, v_{11})$$

$$[0131] \quad = \operatorname{argmin}_{v \in C} \operatorname{dist}(v, (s_1, s_2, s_3, s_4, p_1, p_2, p_3, p_4, p_5, p_6, p_7, p_8))。$$

[0132] 此处,函数 $\operatorname{dist}(V, W)$ 为向量V与W之间的汉明(Hamming)距离。

[0133] 在其它实施例中,图1的电子控制器18可针对校正子的每一位 s_j 估计解码错误的概率 P_j 且针对每一位 p_i 估计错误概率(例如, Pr_i)并且使用这些概率来执行C的软决策解码。例如,电子控制器18可经配置以执行C的基于格式结构的软决策解码。概率 P_j 及 Pr_i 可取决于(例如)稳定子群组的对应元素的二进制向量的汉明权重。

[0134] 虽然图1的设备10串行地测量物理处理过的经量子冗余译码状态的校正子的位且测量校正子的所测量位的所述集合的一或多个奇偶校验位,但所述测量可以不同方式执行。实际上,其它实施例可以并行方式、以串行方式或以经混合并行与串行方式执行此类测量。

[0135] 图9图解说明经配置以将错误校正应用于在图9中的标记为INPUT的输入处接收的n量子位物理状态的校正子的所测量位的另一设备10'。所接收n量子位物理状态先前通过以下操作准备:对k个物理对象的初始量子状态进行量子冗余译码,及随后以能够在其中导致错误的方式对n个物理对象的经量子冗余译码状态进行物理处理。

[0136] 设备10'包含输入寄存器 R_{IN} 、输出寄存器 R_{OUT} 、用于物理对象的c个对应预设置量子状态的辅助寄存器 $RPQS_1$ - $RPQS_c$ 、量子电路QC、量子状态 D_1 - D_c 的c个检测器及电子控制器18。在一些实施例中,所述设备还可包含任选错误校正模块ECM。

[0137] 图9示意性地指示组件之间的各种连接。首先,寄存器 R_{IN} 、 R_{OUT} 、 $RPQS_1$ - $RPQS_c$ 的端口与量子电路QC的端口之间的连接及检测器 D_1 - D_c 的端口与量子电路QC的端口之间的连接由有箭头的线指示。其次,用于在电子控制器18与检测器 D_1 - D_c 之间传输信号的连接及用于在电子控制器18与任选错误校正模块ECM之间传输信号的连接由有箭头的线指示。

[0138] 输入寄存器 R_{IN} 经连接以存储在图9中的标记为INPUT的输入处接收的n量子位物理状态。输入寄存器 R_{IN} 经由输入寄存器 R_{IN} 的n个输出端口将所接收n量子位物理状态传输到量子电路QC的n个输入端口。

[0139] 输出寄存器 R_{OUT} 具有连接到量子电路QC的n个输出端口的n个输入端口,使得输出寄存器 R_{OUT} 可接收并存储量子电路QC先前从输入寄存器 R_{IN} 接收的n量子位物理状态。输出寄存器 R_{IN} 将n量子位物理状态传输到图9中的标记为OUPUT的输出,或在具有任选错误校正模块ECM的实施例中将所述状态输出到此模块。

[0140] 一或多个辅助寄存器 $RPQS_1$ - $RPQS_c$ 中的每一者存储预设置量子状态且经配置以经由输出端口将存储于其中的预设置量子状态传输到量子电路QC的输入端口的对应集合。

[0141] 量子电路QC经配置而以基于从输入寄存器 R_{IN} 接收的n量子位物理状态变换预设置量子状态的方式处理所接收量子状态。量子电路QC将一或多个经变换预设置量子状态中的每一者传输到检测器 D_1 - D_c 中的对应一者。量子电路QC向输出寄存器 R_{OUT} 输出从输入寄存器 R_{IN} 接收的相同n量子位量子状态。举例来说,在量子电路QC内部,所接收n量子位物理状态可操作量子门的控制节点及/或经历在量子电路QC内部反转的一或多个内部变换。

[0142] 每一检测器 D_1 - D_c 做出对在其处接收的经变换预设置量子状态的量子位的值的测量。基于量子位的所测量值,检测器向电子控制器18传输信号。所述信号对应于在输入(INPUT)处接收的n量子位量子状态的校正子的对应位的所测量值或所述校正子的所测量位的奇偶校验位的所测量值中的任一者。检测器 D_1 - D_c 中的一或多个者测量校正子的所测量位的奇偶校验位。通常,检测器 D_1 - D_c 中的其它者测量校正子的位。

[0143] 电子控制器18从检测器 D_1 - D_c 接收校正子的位的所测量值及/或奇偶校验位的所测量值的信号。依据所测量值,电子控制器18确定在标记为INPUT的输入处接收的n量子位物理状态的校正子的可能值。举例来说,电子控制器18可应用线性冗余译码的一或多个技术以基于奇偶校验位的所测量值对校正子的位的所测量值进行错误校正。电子控制器18还可将控制信号发送到任选错误校正模块ECM,其中所述控制信号指示由电子控制器18所

确定的校正子的可能值。

[0144] 任选错误校正模块ECM对n量子位物理状态进行操作以移除其中的错误且将经错误校正物理状态传输到在图9中标记为OUTPUT的输出。特定来说,所述错误校正模块使n量子位物理状态通过量子电路以反转其中的错误,其中错误反转的形式由从电子控制器18接收的控制信号指示。因此,错误校正基于由电子控制器18所确定的校正子的值。

[0145] 在图9中,设备10'可以并行方式、以串行方式或以部分并行且部分串行方式准备各种经变换预设置量子状态。

[0146] 最后,测量接收的且物理处理过的经量子冗余译码状态的校正子的位并且测量校正子的所测量位的所述集合的一或多个奇偶校验位的设备的其它实施例可使用其它量子电路。所述量子电路可具有不同量子门图案及/或可使用一些不同量子门。举例来说,一些此类量子电路可甚至耦合2个以上量子位。

[0147] 图10图解说明涉及(例如)在图1及9的设备10、10'中测量物理处理过的经冗余编码多量子位状态的校正子的方法40。

[0148] 方法40包含将物理处理过的经冗余编码多量子位状态传输通过第一硬件装置以测量物理处理过的经冗余编码多量子位状态的校正子(步骤42)。举例来说,步骤42可在图1的硬件测量装置12_1-12_B中的一些硬件测量装置或在图9的量子电路QC中执行。第一硬件测量装置可(例如)包含量子门电路的一或多个第一序列。

[0149] 方法40还包含将物理处理过的经冗余编码多量子位状态传输通过第二硬件装置以测量用于校正子的测量的一或多个奇偶校验位(步骤44)。举例来说,步骤42可在图1的其余硬件测量装置12_1、...、12_B中或在图9的量子电路QC的其它部分中执行。举例来说,第二硬件测量装置可包含量子门电路的一或多个第二序列。

[0150] 方法40可任选地包含通过基于一或多个奇偶校验位的所测量值校正校正子的多个所测量位中的至少一者而对所测量校正子进行错误校正(步骤46)。举例来说,所测量校正子的此校正可由图1及9的电子控制器18执行。

[0151] 方法40可任选地包含基于经错误校正所测量校正子而在量子电路中对物理处理过的经冗余编码多量子位状态进行错误校正。举例来说,此错误校正可在图9的错误校正模块ECM中执行。

[0152] 本文中所述的设备及方法的一些实施例可使用于2013年1月7日同时申请的美国专利申请案13/912,654中所描述的方法及/或设备。举例来说,一些实施例在构造时可为适合的,使得线性块码为低密度生成矩阵码。美国专利申请案13/912,654以全文引用方式并入本文中。

[0153] 本文中,不经由位的单独测量而测量奇偶校验位,针对所述位,和的奇偶性通过奇偶校验位校验。举例来说,经配置以测量此奇偶校验位的量子电路装置可从对纠缠的对象的单个量子状态的测量获得奇偶校验位的值。此量子电路装置不从多个量子状态的单独测量获得奇偶校验位的值,其中单独测量测量其和可通过奇偶校验位的值进行奇偶校验的位的值。

[0154] 其它实施例包含操作本文中所描述的设备中的任一者的各种方法。

[0155] 本文中所述的电子装置可完全以硬件或以经配置以操作特定软件的硬件(例如,经配置以执行用于执行本文中所描述的方法中的任一者的步骤的可执行命令的机器或

计算机可读程序的计算机装置) 实施。此机器或计算机可执行程序可以非暂时性方式存储于任一常规数字数据存储媒体(例如, 电子存储器、磁性硬盘或光学数据存储磁盘) 上。

[0156] 具体实施方式及图示仅图解说明本发明的实施例。将了解, 基于本发明, 相关领域的技术人员将能够容易地构想出虽然未明确描述或展示于本文中但包含于所主张发明内的其它设备及方法。此外, 本文中所叙述的所有实例主要打算仅用于教学目的且将在不限所主张发明的情况下构造。此外, 本文中叙述原理、方面及实施例的所有陈述打算涵盖其等效内容。

[0157] 本文中, 元件具有特征B或特征C的叙述在以下情形1、2及3中的任一者均为真的情况下满足。在情形1中, 元件具有特征B但不具有特征C。在情形2中, 元件具有特征C但不具有特征B。在情形3中, 元件具有特征B及C两者。

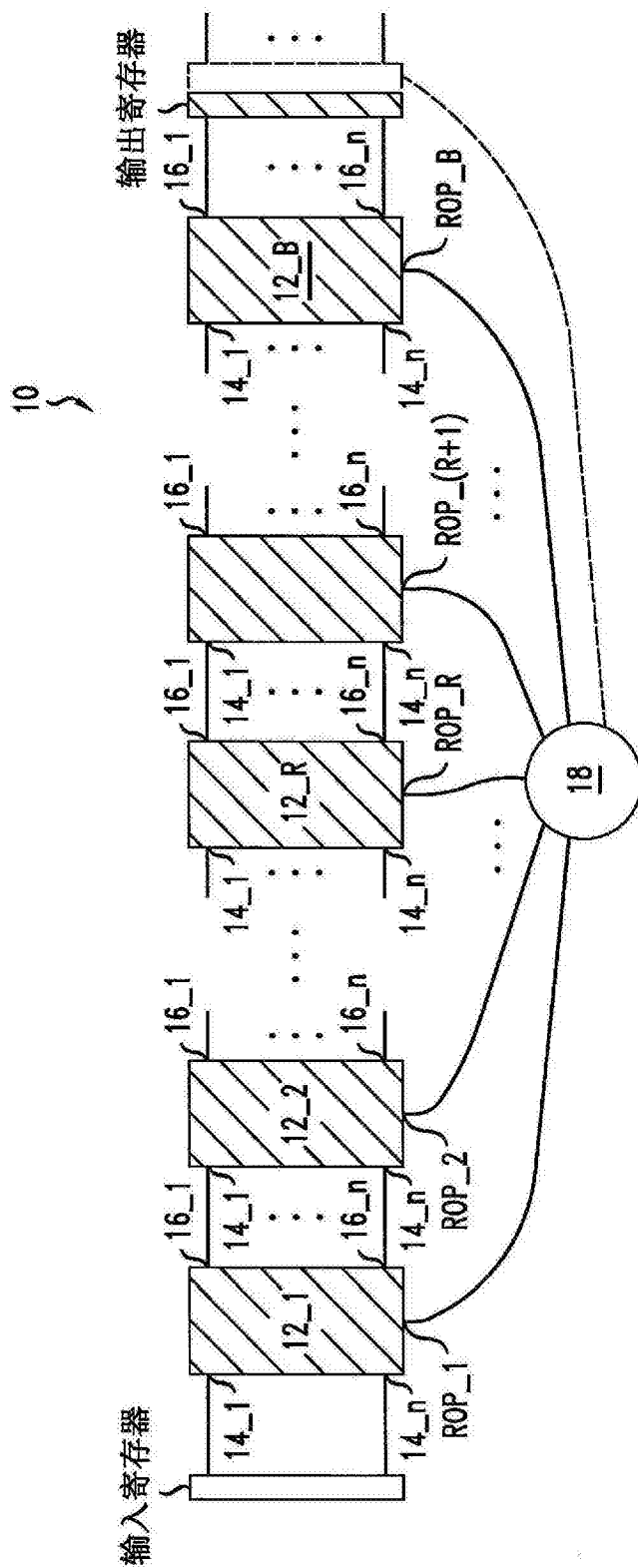


图1

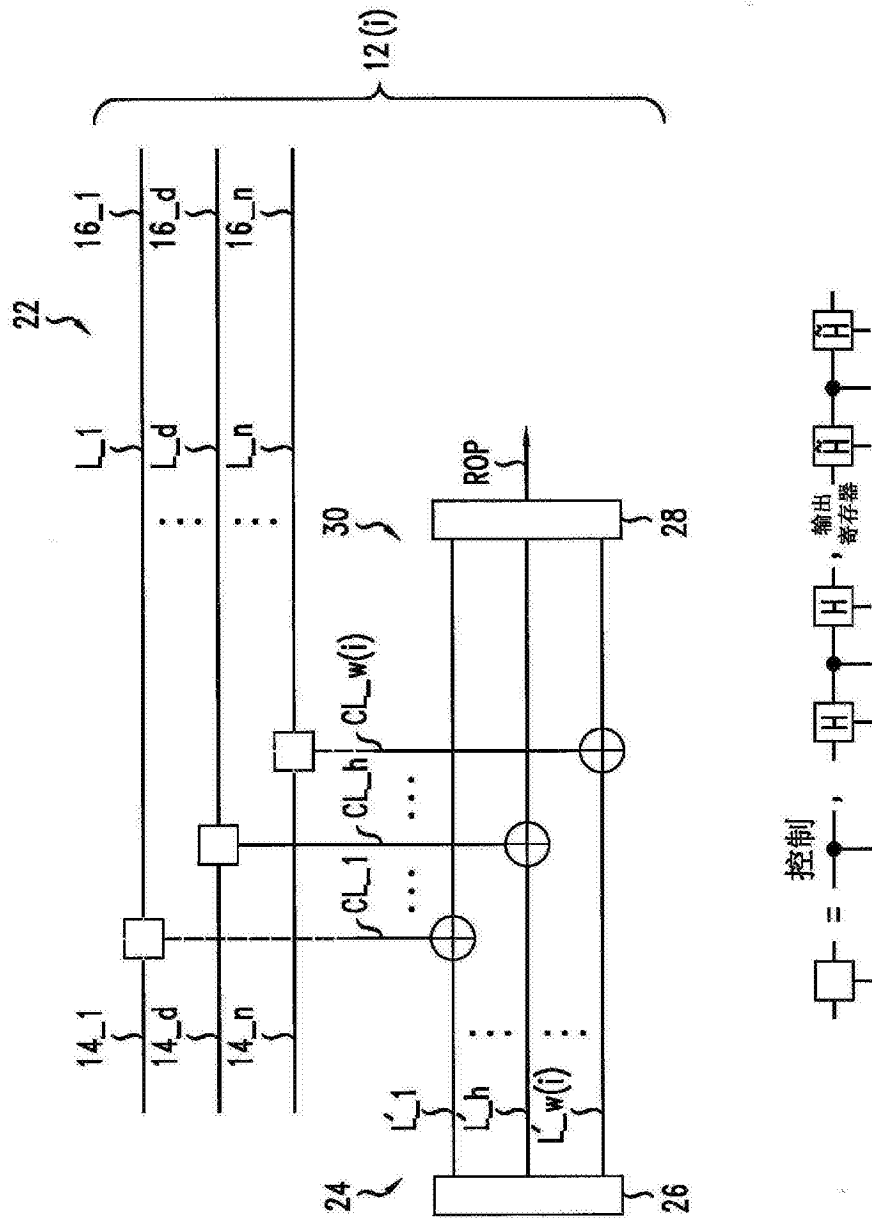


图2

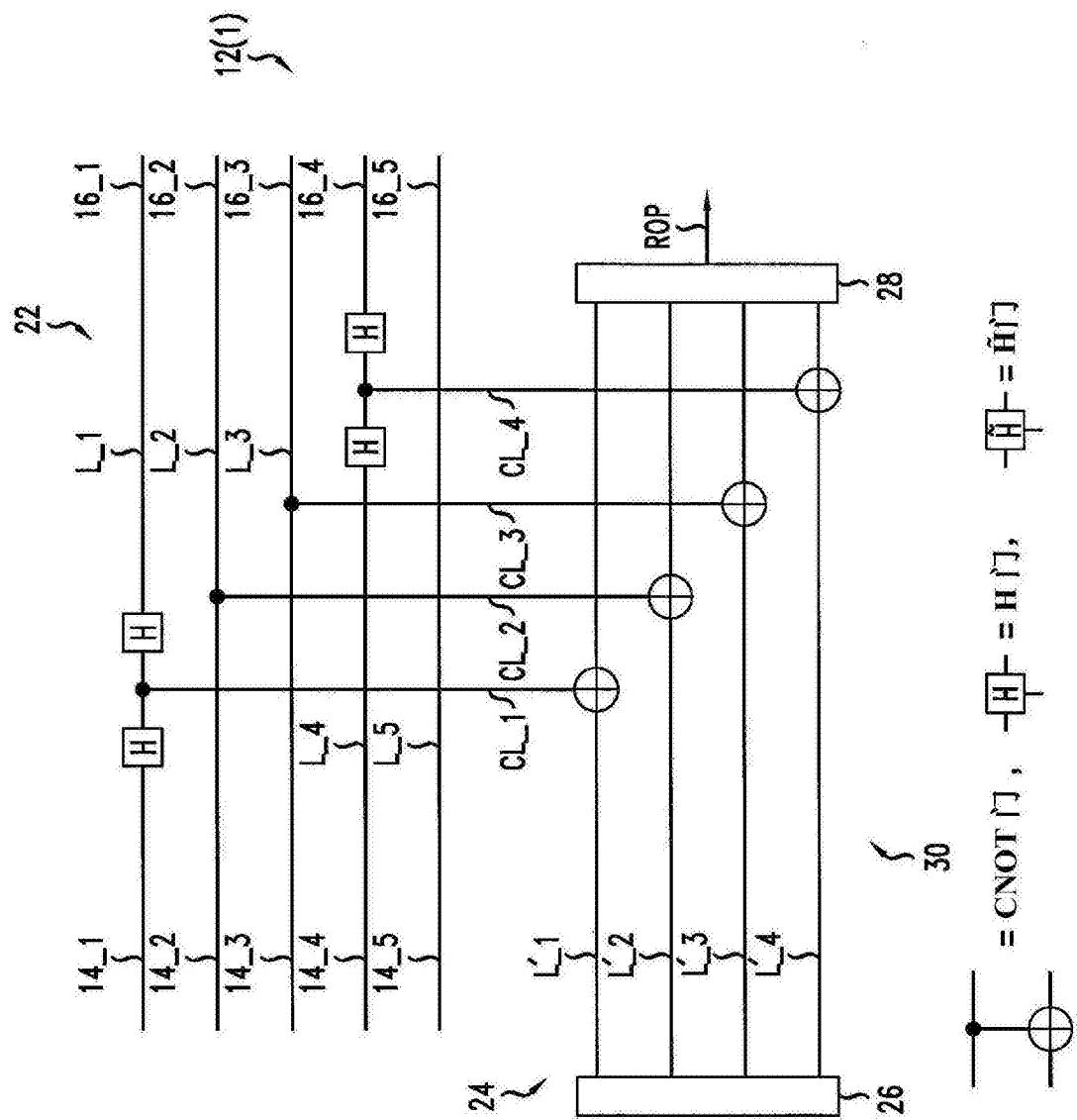


图3

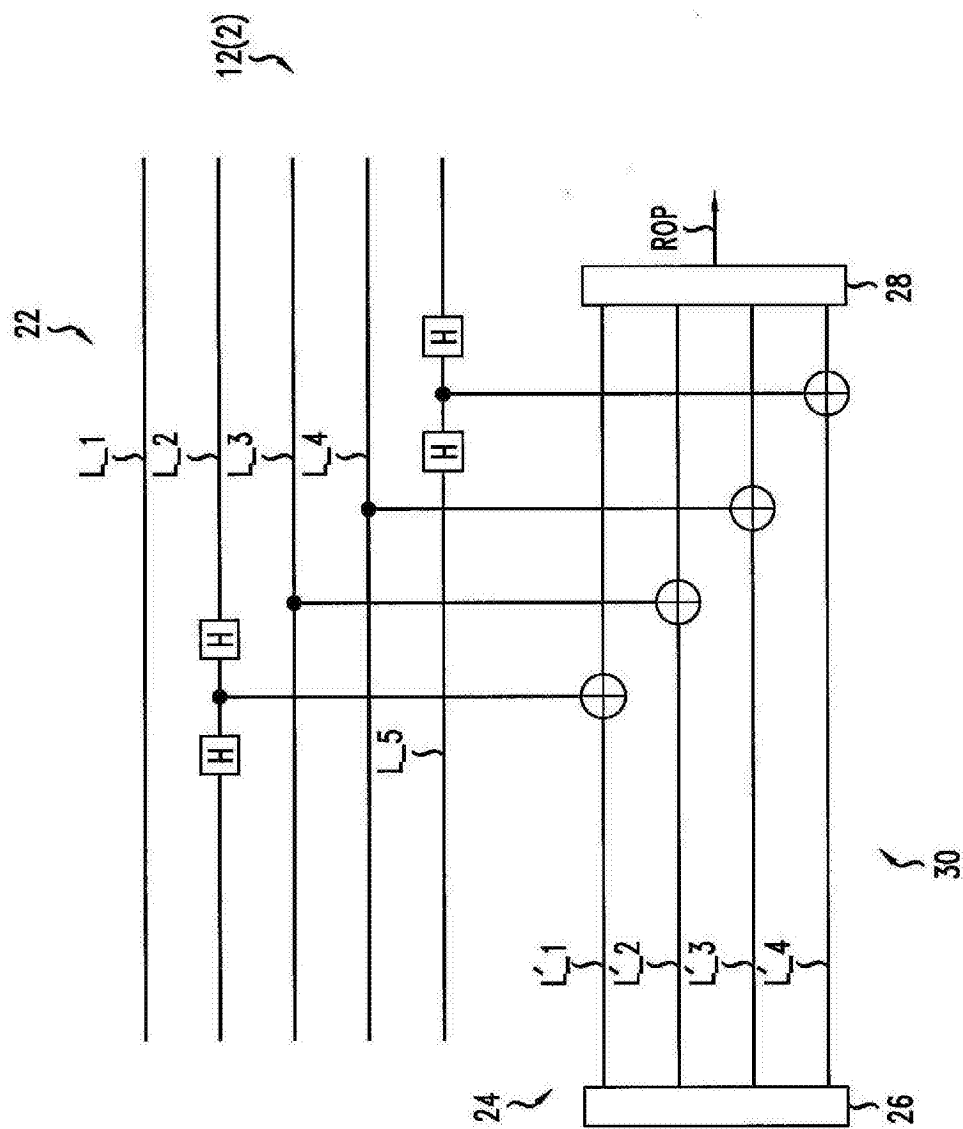


图4

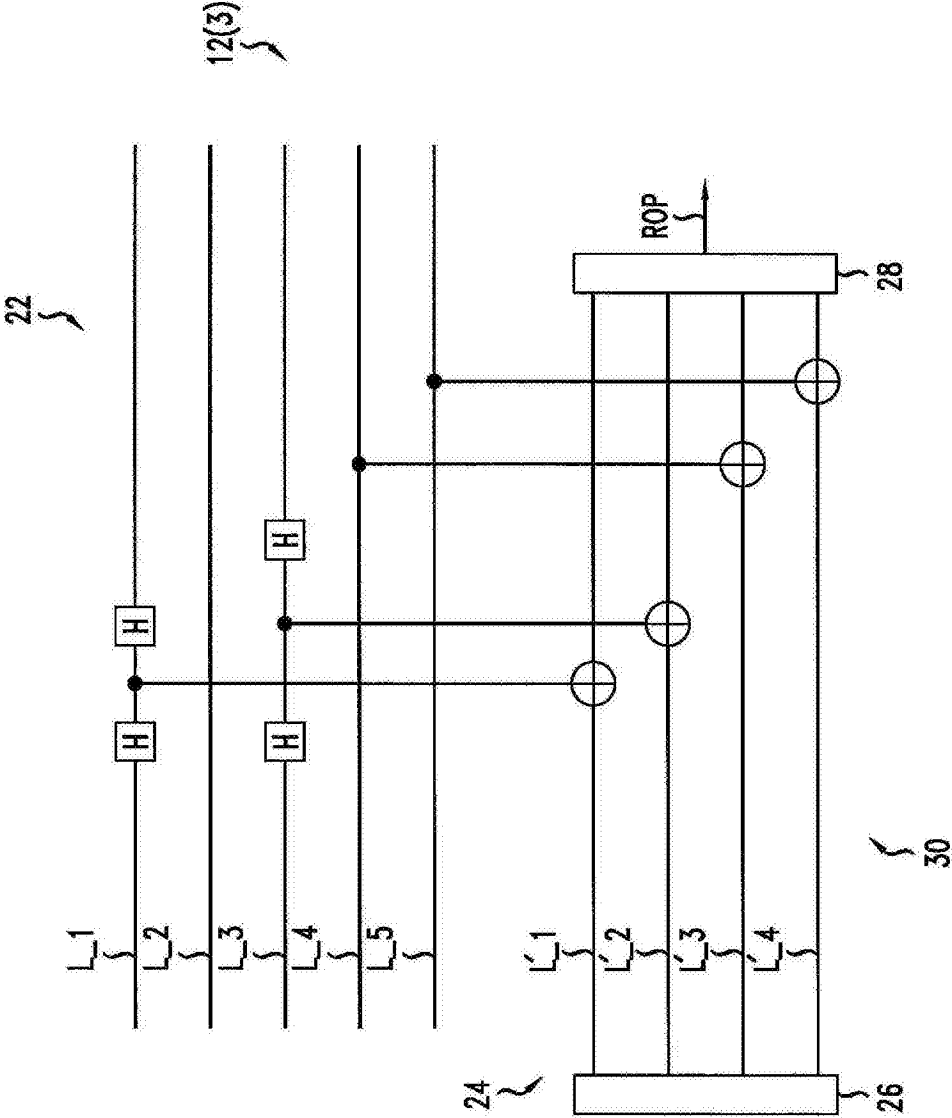


图5

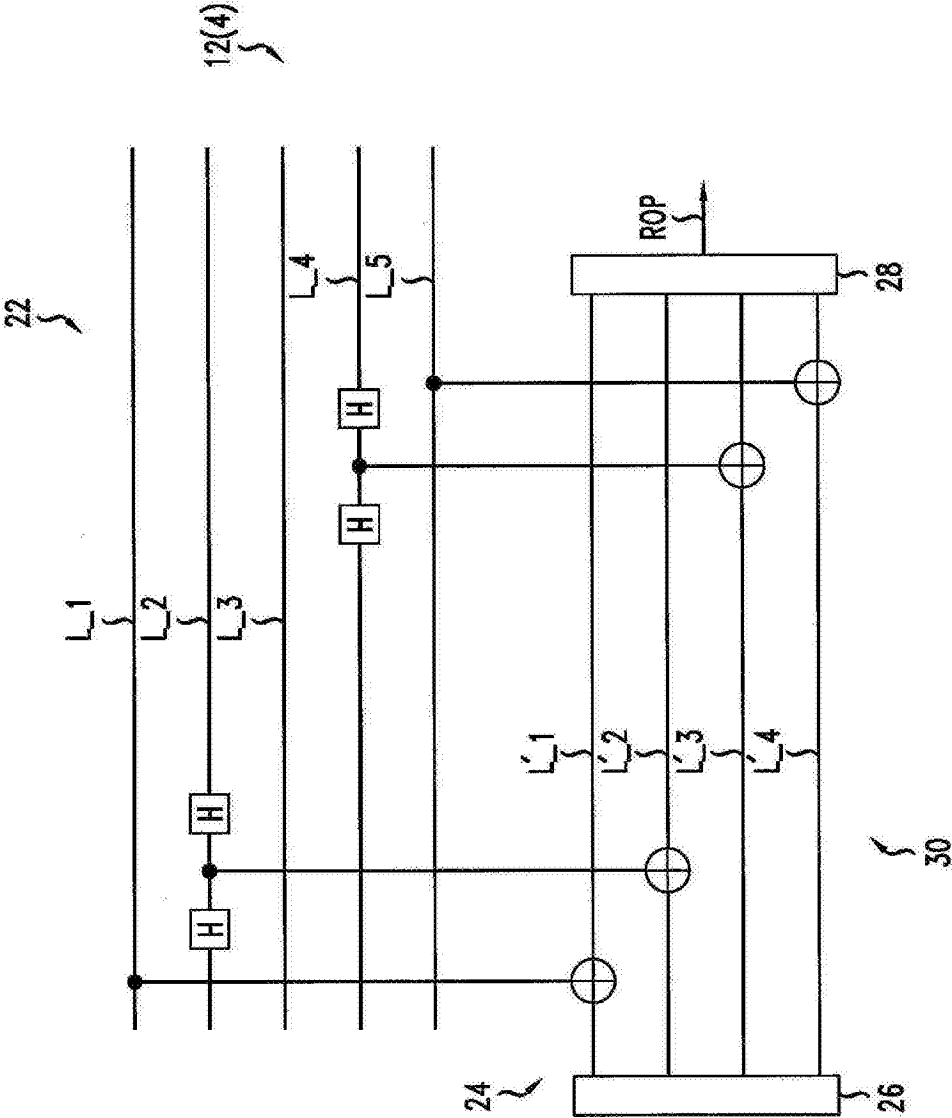


图6

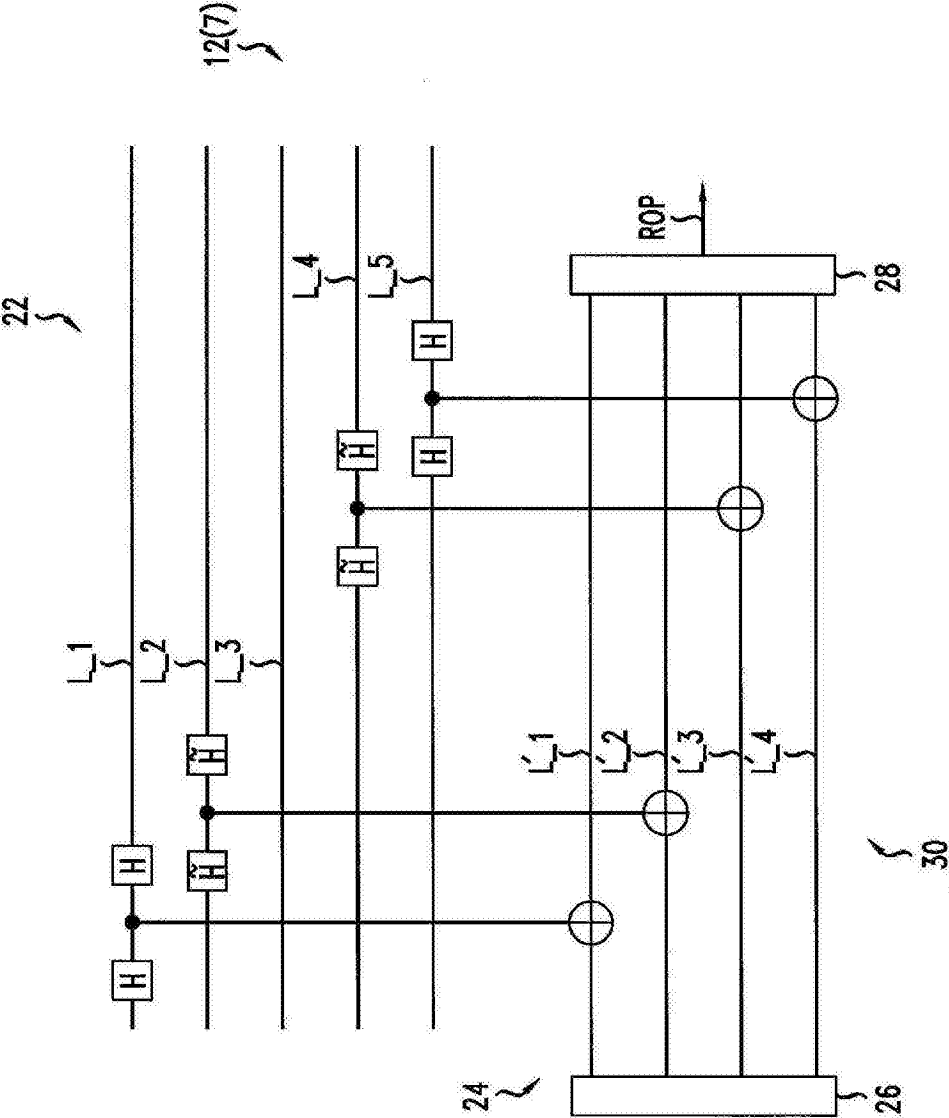


图7

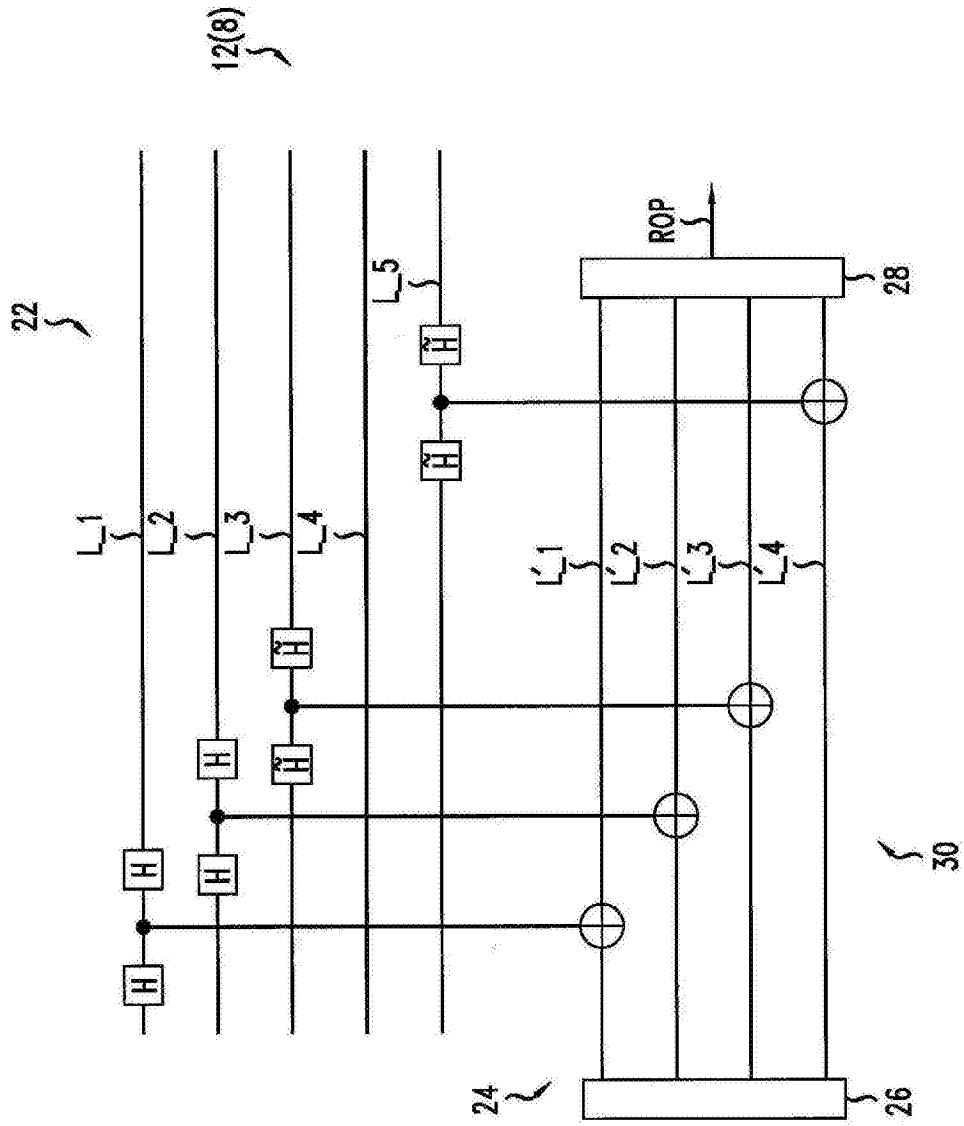


图8

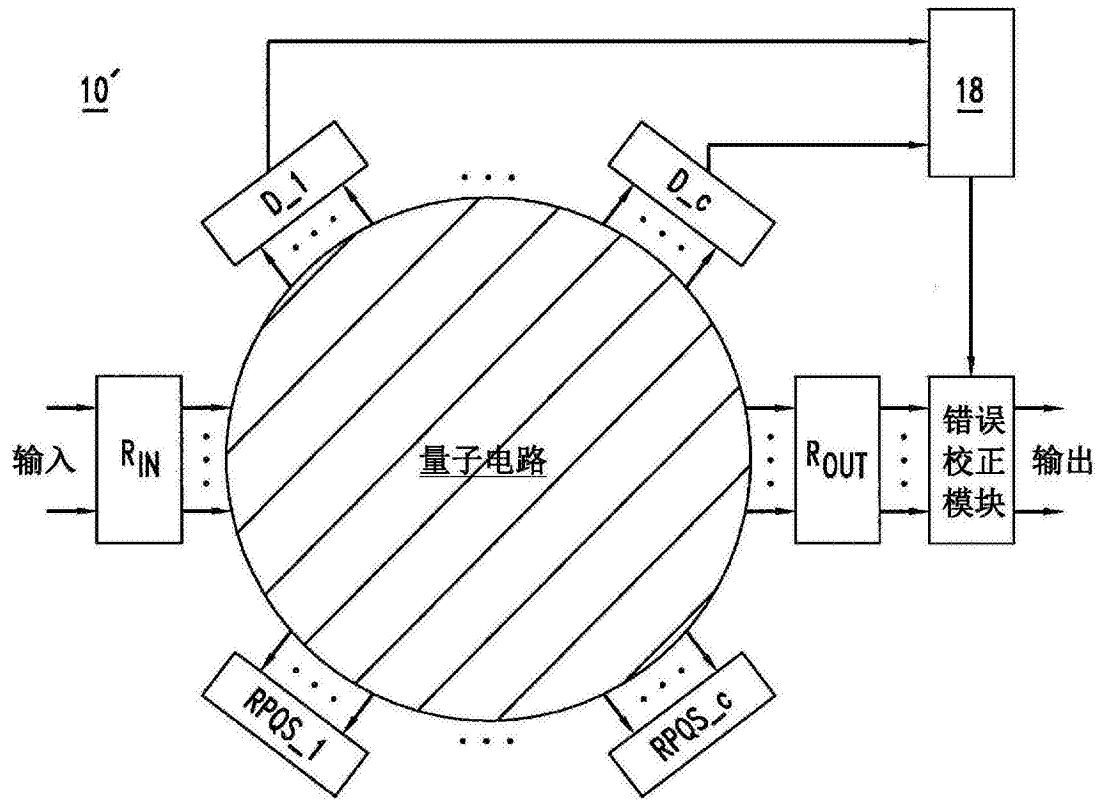


图9

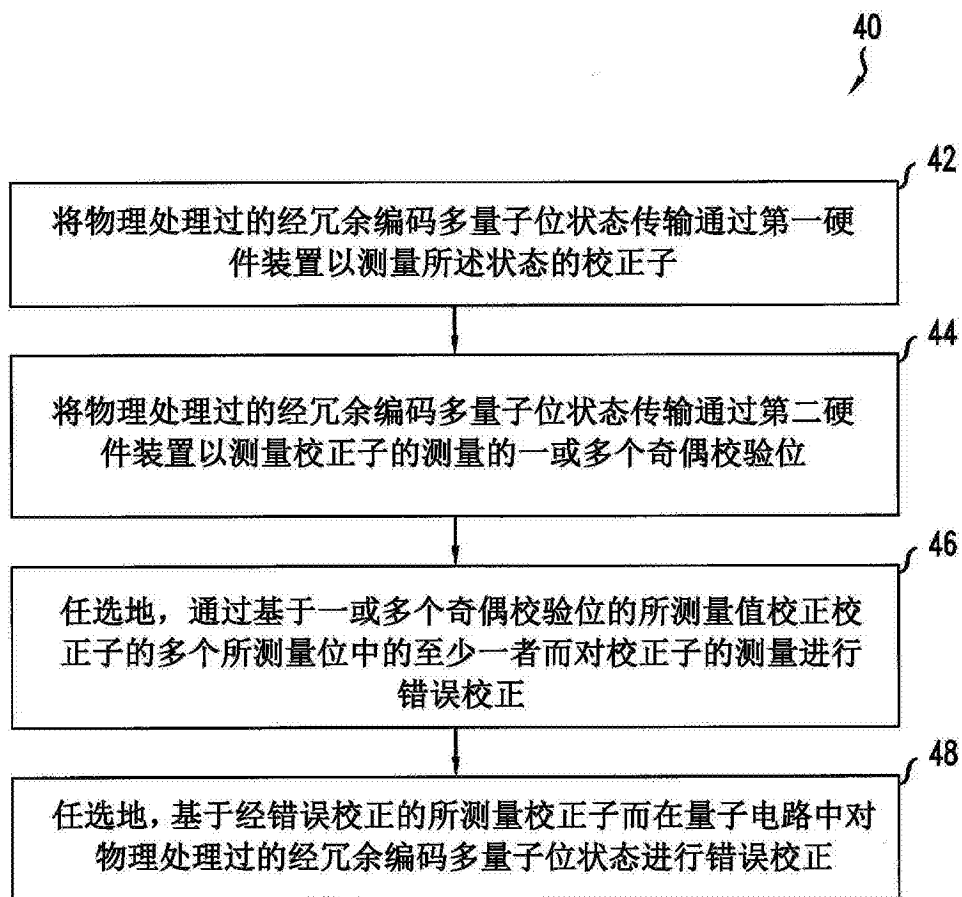


图10