·量子信息技术专题· 文章编号:1000-3428(2018)12-0033-06 文献标志码:A 中图分类号:TP391

基于约瑟夫森结的超导量子芯片进展概述

余 玄,陆 新,奚 军,邵培南

(中国电子科技集团公司第三十二研究所,上海 201808)

摘 要: 超导量子计算机具有芯片加工技术成熟、系统集成度高、可扩展性能好等优势,但超导量子计算需要加大芯片的量子位集成度,同时需保证量子芯片的退相干时间来实现容错量子计算。对超导量子芯片的前沿进展进行分析,阐述超导量子比特的物理机理与优缺点,并研究几种最基本的量子比特特点。讨论超导量子比特之间的耦合方案,包含局域耦合和非局域耦合。通过对近年来主流扩展和布局方案进行分析,结果表明,实现量子算法编程适用一维或者二维阵列,而最大纠缠和全耦合则选用环绕式的扩展方案,可为大规模、高效率的量子计算的芯片设计提供一种思路。

关键词: 超导量子比特;退相干时间;耦合;表面码;量子算法

中文引用格式: 余 玄,陆 新,奚 军,等. 基于约瑟夫森结的超导量子芯片进展概述[J]. 计算机工程,2018,44(12):33-38,45.

英文引用格式: YU Xuan,LU Xin,XI Jun,et al. Progress overview of superconducting quantum chip based on Josephson Junction[J]. Computer Engineering,2018,44(12):33-38,45.

Progress Overview of Superconducting Quantum Chip Based on Josephson Junction

YU Xuan,LU Xin,XI Jun,SHAO Peinan

(The 32nd Research Institute of China Electronics Technology Group Corporation,Shanghai 201808,China)

【Abstract】 Superconducting quantum computers have the advantages of mature chip processing technology,high system integration,and good scalability. However,superconducting quantum computing needs to increase the quantum integration of chips and ensure decoherence time of quantum chips to achieve fault-tolerant quantum computing. The advancement of superconducting quantum chips is analyzed, and the physical mechanism, advantages and disadvantages of superconducting quantum bus are presented,and several basic quantum bits characteristics are studied. The coupling scheme is discussed between superconducting qubits, including local and non-local coupling. Analysis results on mainstream expansion and layout schemes in recent years show that quantum algorithm programming is suitable for one-dimensional or two-dimensional arrays, while maximum entanglement and full coupling use wraparound expansion schemes to achieve large-scale,high-efficiency quantum to provied an idea for the design of the computational chip.

【Key words】 superconducting quantum bit;decoherence time;coupling;surface code;quantum algorithm

DOI: 10.19678/j.issn.1000-3428.0051917

0 概述

随着经典计算机的计算能力渐趋极限,拥有潜在巨大计算能力的量子计算机逐渐受到关注。自20世纪80年代美国物理学家费曼提出量子计算机的概念之后,不断有新的算法设计和物理偿试产生[1-3]。经典比特在同一时刻只能表示0或1这2个数中的1个。量子比特的载体遵循量子力学的规律,可以处于0和1的相干叠加态,这种特性称为量子叠加,系统处于量子叠加的能力称为相干性。量子计算是对量子比特进行一系列量子门操作的过程,计算结果在最终测量得到的概率幅中。据研究表明,一个实用的量子算法需用大量的量子逻辑门[3],需要较长的退相干时间完成这些操作,而且要求量子门操作具有极高精度。因此,量子计算的实现对量子比特的退相干时间以及操控精度提出新的要求。

类比经典计算机的发展史,量子计算机目前仍处在电子管时代。量子计算机的物理实现方案有多

基金项目: 中国电子科技集团公司创新基金(CQ170386-00);中国电子科技集团公司第三十二研究所创新基金(EX170410-00)。

作者简介: 余 玄(1993—),女,硕士,主研方向为量子芯片设计;陆 新、奚 军,高级工程师;邵培南,研究员。

收稿日期: 2018-06-25 **修回日期:** 2018-09-12 **E-mail:** tsinghuayux10@163.com

种,包括但不限于离子阱[4]、核磁共振[5]、光子[6]、超导电路[7]。

离子阱体系技术是通过离子间的库仑斥力和轴向的谐振子势,使得 N 个离子在轴向形成 N 个振动(声子)模式,这些振动模式通过声子-激光-离子三者的共同作用实现量子信息的初态制备操控和读取。核磁共振技术是利用分子自旋为 1/2 的原子核在外加磁场的作用下发生 Zeeman 劈裂形成量子比特的双能级结构。垂直磁场方向的射频脉冲可以改变核自旋拉莫尔旋进频率进而实现量子比特的初态制备和门操作。光子的偏振和光子的路径信息都可以用来编码量子比特,用各种半波片和半透镜等光学器件完成对量子比特的单比特操作。

目前,离子阱体系技术最大退相干时间达到 10 min[4],3D 超导量子比特能达到最大退相干时间为 0.1 ms[7],核磁共振技术已经利用多比特量子位实现量子算法的稳定操作[5]。在量子计算实现的几种技术方案中,超导量子计算具备系统集成度高、芯片设计和加工技术成熟等特点,从而成为各大企业和研究单位主要研究方向。例如 IBM 公司推出的在线量子计算云平台,DWave 公司的量子退火机,Google 公司的 72 比特量子处理器均选用超导量子比特作为运算单元。本文对超导量子芯片的前沿进展进行分析,阐述超导量子比特的物理机理与优缺点,并讨论超导量子比特之间的耦合方案。

1 超导量子比特的物理原理

超导量子电路是肉眼可见的宏观电路。在极低温(~20 mK)环境下,超导体中自旋相反的电子结成库伯对并凝聚成一个特殊的基态。要打破一个库伯对并产生激发态需要的能量是 2Δ。超导量子比特具有量子化的能级,尽管它由 $10^9 \sim 10^{12}$ 个铝原子组成,却可以被当作一个人工原子来处理[8]。将超导电路运用到量子信息处理过程的想法来源于超导隧道结中观测到的宏观量子遂穿效应[9],以及随后对库珀盒晶体管的研究[10]。

所有的超导量子比特都是基于约瑟夫森结[11]实现。常见的制备材料有铝和铌,绝缘层通常是氧化铝,衬底材料常用蓝宝石和硅。当温度降至 mK 左右时,一个线性 LC 振荡器表现出谐振子的物理特性,具有等间距的能级,能级间的跃迁是无差别的,不能用来做量子比特。而约瑟夫森结展示出非线性电路特性,能级不等间距,通常被用到的是最低 2 个能级。约瑟夫森结在超导体系中具有广泛的应用。除了构成一个非谐振子外,还可以用它制备超导量子干涉仪(Superconducting Quantum Interference Device, SQUID)。SQUID 能够被外加磁场偏置所调节。利用约瑟夫森结的非线性特点,可快速改变量子比特的频率,或者改变量子比特之间的耦合电感,此外还能用它来放大微弱信号[12-15]。

最基本的 3 种超导量子比特分别是电荷量子比特、磁通量子比特以及相位量子比特[16-19]。其他类型的超导量子比特,无一例外都用到了约瑟夫森结。除了具有非线性的特质,约瑟夫森结的能量耗散也几乎可以忽略,是一种较为理想的基本构成单元。

如图 1(a)所示,电荷量子比特可简单分为2 种:一种是单结的电荷量子比特,左图的交叉形状代表约瑟夫森结,电压源 V_g 通过电容对其进行偏置;另一种基于 SQUID,右图 2 个约瑟夫森结并联形成一个 SQUID,它同时受外加磁场和偏置电压调制[20-21]。磁通量子比特的构造也可以分为 2 类:一类是在一个大的超导环中插入一个约瑟夫森结和一个大电感;另一类是在超导环中插入 3 个及以上的约瑟夫森结[22-23],如图 1(b)所示。相位量子比特的结构如图 1(c)所示,由一个被电流偏置的约瑟夫森结构成[19,24-25]。这 3 种基本超导量子比特将能级的基态和第一激发态分别作为量子比特的 0 和 1 状态,电荷、磁通以及相位则是控制能级结构的参数。将超导量子比特的基态至第一激发态的跃迁频率记为 ω_{01},第一激发态至第二激发态的跃迁频率记为 ω_{12}。为了得到一个非线性的能级结构,比如 $|\omega_{01}-\omega_{12}| >> \omega_{01}$,不同的超导量子比特会面临不一样的噪声源,噪声则会影响量子比特的退相干时间和调控精度。电荷量子比特对偏置电荷噪声更加敏感,磁通量子比特对临界电流噪声和磁通噪声较为敏感,相位量子比特对临界电流噪声更敏感。

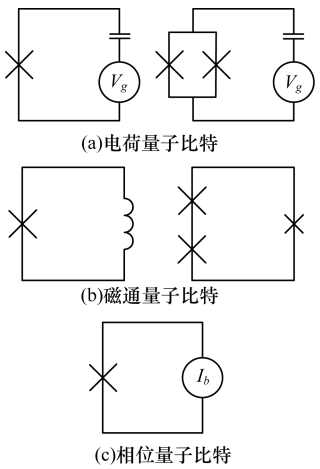


图 1 超导量子比特电路示意图

表征超导量子比特的物理特性有 2 个重要的参数,即电容充电能 E_c 和约瑟夫森能 E_J。E_c 的大小取决于约瑟夫森结的电容或者与之相连的超导岛的电容,E_J 的取值则与结的遂穿电流有关。当 $E_J < E_c$ 时,

结的电荷属性占主导地位;反之,当$E_J > E_c$时,结的遂穿效应占主要地位。因此,有一种对超导量子比特的分类方法是按照E_J/E_c的大小来划分,比如从小到大依次是电荷量子比特($E_c/E_J \sim 10$)、磁通量子比特($E_J/E_c \sim 50$)、相位量子比特($E_J/E_c \sim 10^6$)。

在 3 种基本超导量子比特的基础上衍生出许多其他种类的超导量子比特,比如 Quantronium、Fluxonium、C-shunt flux qubit[26-28]、2D Transmon、3D Transmon、Xmon[29-31]、Gatemon、Andreev level qubit、Majorana[32-34]等。围绕不同种类的超导量子比特的一个共同的话题是延长退相干时间,一种思路是改进量子比特的电路设计,使其对噪声的敏感度降低[35],另一种延长退相干时间的途径是优化材料和工艺[36]。

超导量子比特的优点是可以在标准的微加工环境下制备。它的工作频段在标准射频范围内,与现有的微波电子技术结合紧密[37]。诸如电容、电感和传输线之类的电子元器件可以用来读出超导量子比特的状态,或者用来控制它们。与普通的电子线路不同的是,为了防止量子比特退相干,超导量子比特的上述外围电路也必须用无耗散的超导材料制成。尽管理论上电路是无耗散的,但是由于电路尺寸太大,材料特性也不可能完美,导致现有工艺制备的超导量子比特与环境的耦合还是很强烈,退相干时间受到限制。超导量子比特的门操作时间在几十纳秒量级,退相干时间则在几十微秒量级,超导量子比特可在现有退相干时间内进行数千次的门操作。

2　超导量子比特的耦合方式

经典电路与量子线路的扩展分别体现在空间和时间 2 个不同的层面上。经典电路的基础门电路是单比特非门和两比特与门,是物理实现的晶体管单元。同时经典电路的一个输出端可提供多个驱动信号,意味着信息可以被复制。因此,扩展经典电路的方式是在空间上增加晶体管的数目。而量子线路的基础构成是单比特旋转门操作加上两比特受控门操作,是运算过程中实施的控制操作。量子比特不可复制,扩展量子线路的方式是在时间上延长门操作序列。

量子比特与量子线路的上述特点使得构建一个具有逻辑功能的量子线路并不简单。提高退相干时间和门保真度是其一个特点,此外还需要解决多量子比特的耦合以及布局问题。量子比特的耦合方式可以分为局域耦合与非局域耦合,按照芯片布局的方式大致可以分为阵列式与环绕式。量子比特的耦合方式如图 2 所示。

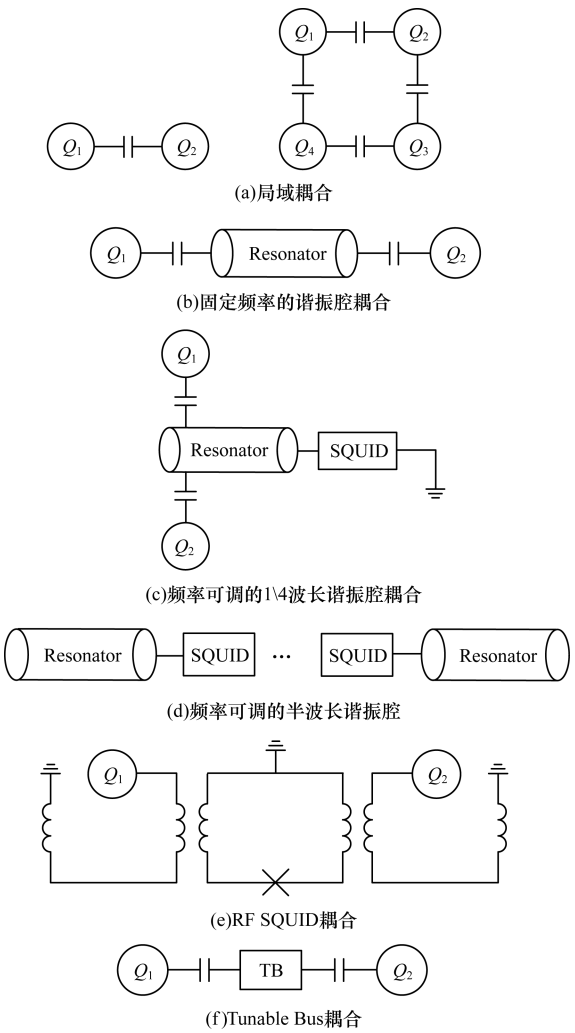


图 2　超导量子比特的多种耦合方式

局域耦合指近邻的量子比特通过简单的电容电感互相耦合。以 Xmon 为例,它有一个十字形电容,通过这个电容能够与相邻的量子比特耦合,既可以组成一维阵列又可以扩展成二维阵列。如图 2(a)所示,其中,Q 代表量子比特,数字是量子比特编号。其优点是该设计不需要额外控制电路,例如谐振腔、SQUID、信号输入线等电路,因此空间布局紧凑,在单位面积上能够集成更多的量子比特,适用于表面码设计。局域耦合的缺点是:相邻 2 个量子比特的频率需要一定设计间隔,导致量子比特频率可调范围受限。

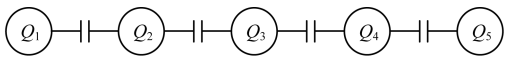
非局域耦合的方式包含多种,其中一种是半波长共面波导谐振腔耦合[38-39]。如图 2(b)所示,量子比特通过电容与谐振腔互连,进行耦合操作时,调节量子比特的频率使之与谐振腔的频率相同。这种耦合的优点是可控耦合与解耦,且不需要额外的偏置线,缺点是蜿蜒的谐振腔占用较多芯片空间。在这种设计方案中量子比特的频率可调,而谐振腔的频率固定。如图 2(c)是频率可调的谐振腔耦合设计,该设计可通过调节谐振腔的频率来改变耦合强度。在 1/4 波长谐振腔的接地端插入 SQUID,外加一个磁场去调控 SQUID 环路的磁通量,改变其电感,进而改变谐振

腔的频率[40]。将 transmon 量子比特放在波腹处,它的频率也可以通过外加磁场来调控。如图 2(d)是另一种改变谐振腔频率设计,在半波长谐振腔的正中间插入 DC SQUID 阵列[41],谐振腔的两端可通过电容连接量子比特。

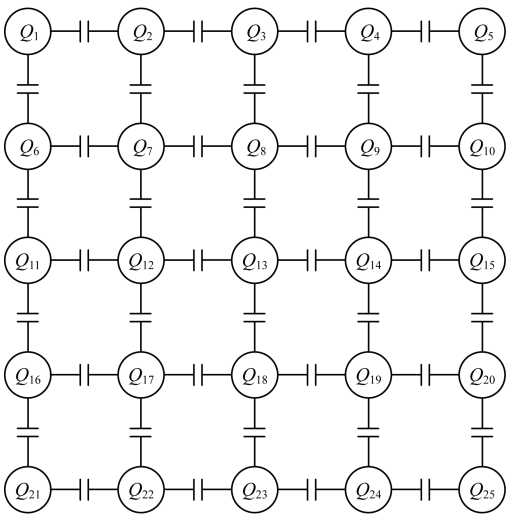
除了用谐振腔作为耦合媒介,还可采用包含约瑟夫森结的各种电路来耦合量子比特。例如采用直流偏置的约瑟夫森结来耦合相位量子比特[13],或者使用磁场偏置的 RF SQUID[42-43],如图 2(e)所示。以及用可调的总线(Tunable Bus,TB)来耦合 2 个频率固定的 transmon 量子比特[44],如图 2(f)所示。目前 Google 公司多用局域耦合与 RF SQUID 耦合,IBM 公司则使用谐振腔耦合与 TB 耦合。

3 超导量子比特的扩展

超导量子比特的扩展主要包括 2 种方式:一种是阵列式布局;另一种是围绕中心谐振腔的环绕式布局。其中,阵列式布局包括一维和二维阵列,代表性的芯片有 Martinis 小组的 9-qubit[45]、IBM 云平台 16-qubit[46]、Google 公司的 72-qubit 以及 D-Wave 公司的 2 000-qubit 退火机。多量子比特的阵列式扩展方案如图 3 所示。



(a)局域耦合一维阵列



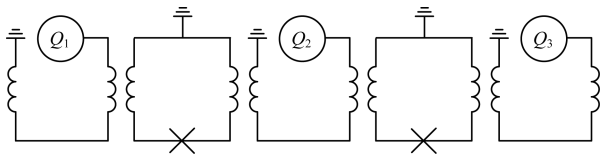
(b)局域耦合二维阵列

图 3 多量子比特的阵列式扩展方案

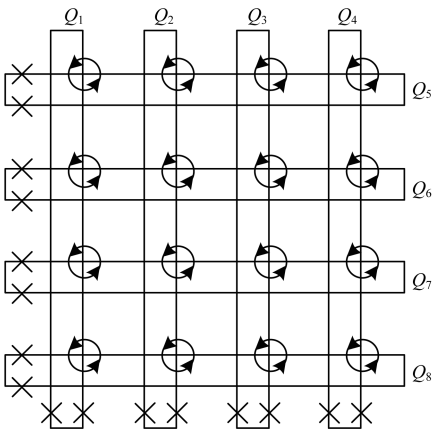
图 3(a)是一个典型的阵列式扩展方案。以 Xmon 量子比特为例,它的频率可调,同时与近邻的量子比特之间通过十字电容直接耦合。每个量子比特有单独的 XY 微波控制线以及 Z 直流偏置线,所有的量子比特复用一根读出线。有研究表明[47],对于 5-qubit 一维阵列芯片,表面码的门保真度阈值是 99%,实测单比特门保真度达到了 99.92%,双比特门保真度可达 99.4%,满足量子计算最低阈值要求。

在此之后 9-qubit 一维阵列芯片问世,并实现了重复码[45]。重复码可以用于纠正数据比特和测量比特的比特翻转错误,是一种较为简单的表面码。在单个量子比特的可靠度有保障的前提下,量子位计算误差可通过量子纠错来识别和校正。用越多的物理比特去表示一个逻辑比特,可让逻辑比特的状态保持得更持久。对一维阵列的尝试是在为实现二维表面码做准备,例如 Google 公司在 2018 年的美国物理学会会议上介绍了 72 位量子芯片,该芯片采用的是二维阵列布局,类似图 3(b)的二维阵列结构。

图 4(a)是基于耦合强度可调的阵列式布局方案。在 9-qubit 一维阵列芯片实验中提到,可调控的参数越多,量子芯片的应用范围会更广阔[48]。该文献采用的量子比特由电容、DC SQUID 和并联的电感组成,与典型的平面 transmon 量子比特相似。其中并联的电感与 RF SQUID 耦合,可调节相邻量子比特之间的耦合强度。D-Wave 公司推出的 2 000-qubit退火机采用的是二维阵列,类似图 4(b)的结构。量子退火机的运行对算法限制更多,能用它解伊辛模型但是不能分解大数。它的基本单元是磁通量子比特[49],量子比特之间的耦合强度可调节。



(a)RF SQUID耦合一维阵列

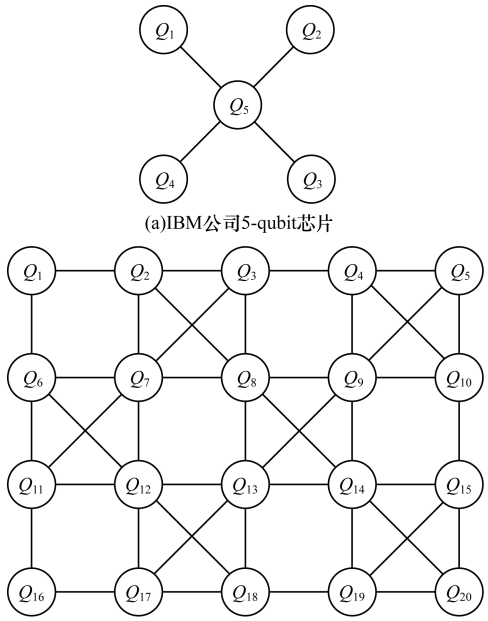


(b)D-Wave公司芯片布局

图 4 耦合强度可调的阵列式布局方案

IBM 公司前后推出的几款芯片多采用共面波导谐振腔来耦合近距离的量子比特。图 5(a)所示是一款 5-qubit 芯片,也是一种适用于表面码的结构。其中用于耦合的电容与谐振腔均未在图上标出,具体可参考文献[50]。图 5(b)是 IBM 公司最新的 20-qubit芯片结构,与 Google 公司的最近邻耦合对

比,IBM 公司的芯片在此基础上增加了耦合的灵活性,但又没有达到全耦合。

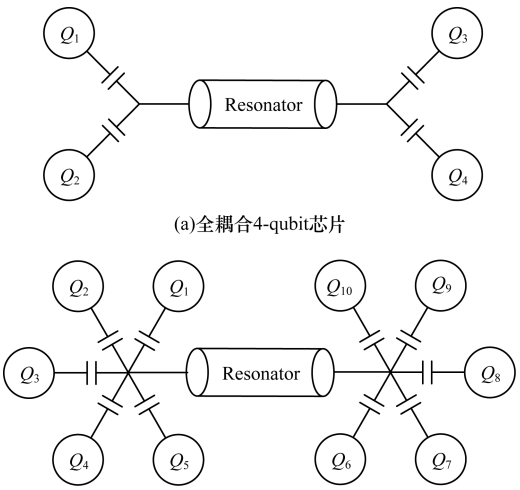


(a)IBM公司5-qubit芯片

(b)IBM公司20-qubit芯片

图 5　IBM 公司芯片布局方案

多量子比特芯片的另一种布局方案是全耦合的环绕式,如图 6 所示。



(a)全耦合4-qubit芯片

(b)全耦合10-qubit芯片

图 6　全耦合环绕式布局方案

多量子比特芯片是由 Martinis 小组提出并测试的4 个相位量子比特[51]。如图 6(a)所示,芯片上的每个相位量子比特都通过电容与中心的半波长谐振腔耦合。此外,每个量子比特都有一个 1/4 波长的存储谐振腔未在图中标出。通过调节量子比特的频率,可使它与半波长谐振腔耦合或者解耦。利用这款芯片演示了经过编译的分解 15 的 Shor 算法,其中采用 3 个量子比特[52]。

同样采用环绕式的还有一款 10-qubit 芯片。如图 6(b)所示,芯片由10 个Xmon 量子比特围绕中心半波长谐振腔构成。在这款芯片上首次产生了10 量子比特的 GHz 态,是彼时固态量子体系中能达到的最大纠缠[53]。

目前被构造出的具有指数级加速的量子算法较少,Shor 算法是其中的一种,而要实现 Shor 算法所需的量子比特数远超出了现阶段技术水平。因此,在扩展量子比特数量时,应该考虑算法的应用场景。一种思路是可应用表面码的阵列式布局,用多个物理比特去表示一个逻辑比特,降低算法对保真度的要求,而基于表面码的设计需要利用 3D 布线的方案。另一种思路是围绕中心谐振腔的全耦合式布局,目标是提高单个量子比特的质量和保真度。对上述 2 种方案折衷考虑,从算法的实施难易程度来看,环绕式布局有一定优势,而从可靠性来看,阵列式布局较优。目前各研究组多采用的是阵列式布局。

4　结束语

超导量子计算机具备芯片加工技术成熟、系统集成度高、可扩展性能好的优势,成为各大企业主要研究方向。超导量子比特利用约瑟夫森结在低温下的非线性效应,构造出电荷量子比特、磁通量子比特、相位量子比特等。本文根据芯片设计思路和所选用耦合、布局扩展方式,选用合适的量子比特类型,并对近年来研究机构推出的主流扩展和布局方案进行分析,结果表明,阵列式的扩展方案实现的一维或者二维阵列,有利于实现量子算法编程,环绕式的扩展方案有利于实现最大纠缠和全耦合。实用化的量子计算面临着2 个挑战,一个是扩展量子比特数目,需要同时提高退相干时间,另一个则是提高量子门调控保真度,需要在量子位的数量和量子比特的质量 2 个维度上不断推进。现有量子比特的芯片虽然在分解大数或者搜索算法上尚未应用,但可以用来进行量子物理模拟,在材料和生物领域发挥作用。不论采用何种耦合和布局方式,芯片的设计和加工都会变得越来越精细和具有技巧性,例如双面布线设计或者 3D 布线设计是未来选择方案之一。

参考文献

[1] FEYNMAN R P. Simulating physics with computers[J]. International Journal of Theoretical Physics,1982,21(6):467-488.

[2] SHOR P W. Algorithms for quantum computation: discrete logarithms and factoring[C]//Proceedings of the 35th Annual Symposium on Foundations of Computer Science. Santa Fe, USA:[s. n.], 1994:124-134.

[3] KELLY J S. Fault-tolerant superconducting qubits[D]. Santa Barbara,USA:University of California,2015.

[4] WANG Y, UM M, ZHANG J, et al. Single-qubit quantum memory exceeding ten-minute coherence time[J]. Nature Photonics,2017,11(10):646-650.
[5] 潘 健,余 琦,彭新华.多量子比特核磁共振体系的实验操控技术[J].物理学报,2017,66(15):57-67.
[6] KNILL E,LAFLAMME R,MILBURN G J. A scheme for efficient quantum computation with linear optics[J]. Nature,2001,409(6816):46-52.
[7] RIGETTI C, POLETTO S, GAMBETTA J M, et al. Superconducting qubit in waveguide cavity with coherence time approaching 0.1 ms [J]. Physical Review B,2012,86(10):2904-2912.
[8] GIRVIN S M. Circuit QED: superconducting qubits coupled to microwave photons [EB/OL]. [2017-12-01]. http://oxfordindex.oup.com/.
[9] MARTINIS J M. Macroscopicquantum tunneling and energy-level quantization in the zero voltage state of the current-biased Josephson Junction[D]. Berkeley, USA: University of California,1985.
[10] BOUCHIAT V, VION D, JOYEZ P, et al. Quantum coherence with a single cooper pair[J]. Physica Scripta, 2006(76):165.
[11] MAKHLI N, YURI Y, SCHO N, et al. Quantum-state engineering with Josephson Junction devices [J]. Physics,2000,73(2):357-400.
[12] NISKANEN A O,HARRABI K,YOSHIHARA F,et al. Quantum coherent tunable coupling of superconducting qubits[J]. Science,2007,316(5825):723-726.
[13] BIALCZAK R C,ANSMANN M,HOFHEINZ M,et al. Fast tunable coupler for superconducting qubits [J]. Physical Review Letters,2011,106(6).
[14] CHEN Y, NEILL C, ROUSHAN P, et al. Qubit architecture with high coherence and fast tunable coupling[J]. Physical Review Letters,2014,113(22).
[15] HATRIDGE M, VIJAY R, SLICHTER D H, et al. Dispersive magnetometry with a quantum limited SQUID parametric amplifier [J]. Physical Review B, 2010, 83(13):970-978.
[16] NAKAMURA Y,PASHKIN Y A,TSAI J S. Coherent control of macroscopic quantum states in a single-cooper-pair box[J]. Nature,1999,398(6730):786-788.
[17] CHIORESCU I,NAKAMURA Y, HARMANS C J, et al. Coherent quantum dynamics of a superconducting flux qubit[J]. Science,2003,299(5614):1869-1871.
[18] MARTINIS J M. Superconducting phase qubits [J]. Quantum Information Processing,2009,8(2/3):81-103.
[19] GU X,KOCKUM A F, MIRANOWICZ A, et al. Microwave photonics with superconducting quantum circuits[J]. Physics Reports,2017,718:1-102.
[20] PASHKIN Y A,ASTAFIEV O,YAMAMOTO T,et al. Josephson charge qubits: a brief review [J]. Quantum Information Processing,2009,8(2/3):55-80.
[21] SCHUSTER D I. Circuit quantum electrodynamics[D]. New Haven,USA:Yale University,2007.
[22] FRIEDMAN J R,PATEL V,CHEN W,et al. Quantum superposition of distinct macroscopic states[J]. Nature, 2000,406(6791):43-46.
[23] MOOIJ J E, LLOYD S. Josephson persistent-current qubit[J]. Science,1999,285(5430):1036.
[24] OLIVER W D, WELANDER P B. Materials in superconducting quantum bits[J]. MRS Bulletin,2013, 38(10):816-825.
[25] DEVORET M H,MARTINIS J M. Implementing qubits with superconducting integrated circuits [J]. Quantum Information Processing,2004,3(1-5):163-203.
[26] VION D,AASSIME A,COTTET A,et al. Manipulating the quantum state of an electrical circuit[J]. Science, 2002,296(5569):886-889.
[27] MANUCHARYAN V E, KOCH J, GLAZMAN L I, et al. Fluxonium:single cooper-pair circuit free of charge offsets[J]. Science,2009,326(5949):113-116.
[28] YAN F,GUSTAVSSON S,KAMAL A,et al. The flux qubit revisited to enhance coherence and reproducibility[J]. Nature Communications,2016,7:12964.
[29] KOCH J, YU T M, GAMBETTA J, et al. Charge-insensitive qubit design derived from the Cooper pair box[J]. Physics,2007,76(4):538-538.
[30] PAIK H,SCHUSTER D I,BISHOP L S,et al. Observation of high coherence in Josephson junction qubits measured in a three-dimensional circuit QED architecture[J]. Physical Review Letters,2011,107(24).
[31] BARENDS R, KELLY J, MEGRANT A, et al. Superconducting quantum circuits at the surface code threshold for fault tolerance[J]. Nature,2014,508(7497):500.
[32] LARSEN T W,PETERSSON K D,KUEMMETH F,et al. Semiconductor-nanowire-based superconducting qubit[J]. Physical Review Letters,2015,115(12).
[33] ZAZUNOV A,SHUMEIKO V S,BRATUS E N,et al. Andreev level qubit[J]. Physical Review Letters,2003,90(8).
[34] WENDIN G. Quantum information processing with superconducting circuits: a review [J]. Reports on Progress in Physics,2017,80(10).
[35] 金贻荣,郑东宁.超导量子计算:长退相干量子比特发展之路[J].科学通报,2017(34):3935-3946.
[36] MARTINIS J M,MEGRANT A. UCSB final report for the CSQ program:review of decoherence and materials physics for superconducting qubits [EB/OL]. [2017-12-01]. http://101.96.10.63/www.physics.ucsb.edu.
[37] BIALCZAK R R C. Development of the fundamental components of a superconducting qubit Quantum computer [D]. Santa Barbara, USA: University of California,2011.
[38] JEFFREY E,SANK D,MUTUS J Y,et al. Fast accurate state measurement with superconducting qubits [J]. Physical Review Letters,2014,112(19).
[39] MAJER J, CHOW J M, GAMBETTA J M, et al. Coupling superconducting qubits via a cavity bus[J]. Nature,2007,449(7161):443-4477.
[40] SANDBERG M,PERSSON F,HOI I C,et al. Exploring circuit quantum electrodynamics using a widely tunable superconducting resonator [J]. Physica Scripta, 2009, 2009(137).
[41] PALACIOS L A, NGUYEN F, MALLET F, et al. Tunable resonators for quantum Circuits[J]. Journal of Low Temperature Physics,2008,151(3/4):1034-1042.

(下转第 45 页)

4　结束语

通过对信息系统安全保障体系的分析,本文提出基于信息资产的信息系统安全风险评估指标体系。将量子门线路神经网络应用于信息系统安全风险评估领域,利用量子旋转门完成相位旋转并作为控制位,控制量子位的翻转。实验结果表明,量子门线路神经网络在收敛速度以及鲁棒性方面均优于 BP 神经网络。通过对风险因素敏感性的进行分析,可以得到各项信息资产的敏感度,为信息系统更有效的风险管理提供了理论依据。

参考文献

[1] 刘国城,王会金.基于 AHP 和熵权的信息系统审计风险评估研究与实证分析[J].审计研究,2016(1):53-59.

[2] 刘　健,赵　刚,郑运鹏.基于 AHP-贝叶斯网络的信息安全风险态势分析模型[J].北京信息科技大学学报,2015,30(3):68-74.

[3] 赵　刚,刘　换.基于多层次模糊综合评判及熵权理论的实用风险评估[J].清华大学学报(自然科学版),2012,52(10):1382-1387.

[4] 宋杰鲲,张丽波.基于三角模糊熵的信息安全风险评估研究[J].情报理论与实践,2013,36(8):99-104.

[5] 付　沙.一种基于信息熵的信息系统安全风险分析方法[J].情报科学,2013,31(6):38-42.

[6] 伍浏阳.因子分析和支持向量机的信息系统风险评价[J].微电子学与计算机,2016,33(2):144-148.

[7] 陈　宇,王亚弟,王晋东,等.模糊认知图在信息安全风险评估中的应用研究[J].计算机工程,2016,42(7):109-116.

[8] 申时凯,佘玉梅.模糊神经网络在信息安全风险评估中的应用[J].计算机仿真,2011,28(10):91-94.

[9] 李士勇,李盼池.量子计算与量子优化算法[M].哈尔滨:哈尔滨工业大学出版社,2009.

[10] 李盼池,宋考平,杨二龙.基于受控旋转门的量子神经网络模型算法及应用[J].控制与决策,2011,26(6):898-901,906.

[11] 郭光灿.量子信息技术[J].重庆邮电大学学报(自然科学版),2010,22(5):521-525.

[12] KAK S. Quantum neural computing[J]. Advances in Imaging and Electron Physics,1995,94:259-313.

[13] NIELSEN M A, CHUANG I L. Quantum computation and quantum information[M]. Cambridge, UK: Cambridge University Press,2003.

[14] 李盼池,宋考平,杨二龙.基于量子门线路的量子神经网络模型及算法[J].控制与决策,2012,27(1):143-146.

[15] 施　恩,李　骞,顾大权,等.基于局部特征的卷积神经网络模型[J].计算机工程,2018,44(2):282-286.

[16] 李增鹏,马春光,李迎涛.基于层次分析涉密信息系统风险评估[J].信息网络安全,2014,50(6):213-218.

[17] 张笑铭,王志君,梁利平.一种适用于卷积神经网络的 Stacking 算法[J].计算机工程,2018,44(4):243-247.

[18] 李井春,张文朗,夏立福.基于神经网络的变形预报方法研究[J].测绘与空间地理信息,2011,34(1):151-154.

[19] 曾谨言.量子力学[M].北京:科学出版社,2013.

编辑　赵　辉

(上接第 38 页)

[42] HARRIS R, BERKLEY A J, JOHNSON M W, et al. Sign and magnitude-tunable coupler for superconducting flux qubits[J]. Physical Review Letters,2007,98(17).

[43] ALLMAN M S, ALTOMARE F, WHITTAKER J D, et al. rf-SQUID-mediated coherent tunable coupling between a superconducting phase qubit and a lumped-element resonator[J]. Physical Review Letters, 2010, 104(17).

[44] MCKAY D C, FILIPP S, MEZZACAPO A, et al. A universal gate for fixed-frequency qubits via a tunable bus[J]. Physical Review Applied,2016,6(6).

[45] KELLY J, BARENDS R, FOWLER A G, et al. State preservation by repetitive error detection in a superconducting quantum circuit[J]. Nature,2015,519(7541):66-69.

[46] WANG Y, LI Y, YIN Z, et al. 16-qubit IBM universal quantum computer can be fully entangled[EB/OL]. [2017-12-01]. http://cn.arxiv.org/abs/1801.03782.

[47] BARENDS R, KELLY J, MEGRANT A, et al. Superconducting quantum circuits at the surface code threshold for fault tolerance[J]. Nature,2014,508(7497):500.

[48] NEILL C, ROUSHAN P, KECHEDZHI K, et al. A blueprint for demonstrating quantum supremacy with superconducting qubits[J]. Science,2017,360(6385).

[49] VENEGAS A S E, CRUZSANTOS W, MCGEOCH C, et al. A cross-disciplinary introduction to quantum annealing-based algorithms[J]. Contemporary Physics, 2018,59(2):174-196.

[50] TAKITA M, CORCOLES A D, MAGESAN E, et al. Demonstration of weight-four parity measurements in the surface code architecture[J]. Physical Review Letters, 2016,117(21).

[51] CHEN Y, SANK D, O'MALLEY P, et al. Multiplexed dispersive readout of superconducting phase qubits[J]. Applied Physics Letters,2012,101(18).

[52] LUCERO E, BARENDS R, CHEN Y, et al. Computing prime factors with a Josephson phase qubit quantum processor[J]. Nature Physics,2012,8(10):719-723.

[53] SONG C, XU K, LIU W, et al. 10-qubit entanglement and parallel logic operations with a superconducting circuit[J]. Physical Review Letters,2017,119(18).

编辑　索书志