

DOI:10.12405/j.issn.2097-1486.2025.04.006

量子芯片设计的逻辑与方法论研究

沈健^{1,2}

1. 嘉应学院, 广东 梅州 514015

2. 湖南师范大学 科技与社会发展研究中心, 湖南 长沙 410081

摘要:众所周知,量子芯片存在多种设计路线:超导路线、半导体路线、离子阱路线等等,在这些众多路线当中,整体上还未能实现大规模集成量子比特的成熟的量子计算。从逻辑与方法论层面去澄清量子芯片的现有设计机理,一方面能够深化技术哲学核心概念研究,另一方面亦能启发量子芯片的技术设计。其中,确定性与非确定性、逻辑至简与功效提升、理论发现与技术发明、技术目的与技术手段、功能模拟与物理实现等传统哲学概念范畴,量子芯片设计赋予其新的关系内涵;而系统哲学层级理论、整体论与还原论互补思维、容错—可扩展性—并行化逻辑、诠释学“前见”理论、多元主义哲学观以及实践哲学观则能为解决当前量子芯片设计中所遇到的难题带来重要的方法论启示。

关键词:量子芯片技术;内在逻辑;方法论;技术设计启示

中图分类号:N02; O413

文献标志码:A

文章编号:2097-1486(2025)04-0373-08

Design logic and methodology for quantum chips

SHEN Jian^{1,2}

1. Jiaying University, Meizhou 514015, China

2. Research Center for Science, Technology and Social Development, Hunan Normal University, Changsha 410081, China

Abstract: It is well known that quantum chips encompass multiple design approaches: superconducting, semiconductor, ion trap, etc. On the whole, all these approaches failed to achieve mature quantum computing with large-scale qubits. Clarifying the design mechanisms of quantum chips from logical and methodological perspectives can not only deepen core concepts research in the philosophy of technology, but enlighten technology innovations in chip design. Traditional philosophical categories, such as determinism vs. indeterminism, logical simplicity vs. performance enhancement, theoretical discovery vs. technological invention, technology intentions vs. technology means, and functional simulation vs. physical realization, can acquire new relational implication through quantum chip design. Furthermore, methodological insights from system hierarchy theory, complementarity of holism or reductionism, fault tolerance -- scalability -- parallelism logic, hermeneutic "pre-conception" theory, pluralistic philosophical views, and pragmatism can provide critical pathways to address current challenges in quantum chip design.

Keywords: quantum chip technology; inherent logic; methodology; enlightenment of technological design

0 引言

目前,经典半导体芯片已达到 3 nm 技术瓶颈点,量子隧穿效应导致传统晶体管无法正常工作。虽然依靠先进的封装技术可以继续增加晶体管数量

和线路密度,但存在芯片的散热难题。量子芯片技术的出现,将扭转这一技术困境。量子芯片是将量子线路集成于基片之上,在功能上实现远超经典芯片处理能力的量子信息处理,它重塑了信息技术的底层架构,优势是“计算可逆、热耗散小、计算能力

基金项目:国家社会科学基金重大项目(19ZDA038)

收稿日期:2025-09-16;修回日期:2025-10-21

强”^[1]。然而,要实现量子芯片的商业化应用需要突破 1 000 量级的量子比特数,要实现通用量子计算更是需要百万量级量子比特数,现有的量子芯片技术,不管是超导体系,还是离子阱体系、半导体体系,总体上都还没能实现大规模集成量子比特的成熟的量子计算。为此,在笔者看来,澄清量子芯片技术创新设计中的逻辑与方法论或许能为解决具体设计难题提供一些宏观的指引。关于创新方法论,金吾伦先生早在 2007 年就有过这样的界定,“研究创新过程中有没有逻辑程序、规则、方法以及有什么样的程序、规则与方法为宗旨的哲学研究”^{[2]221}。经典半导体芯片设计的创新方法论是:在确定性的物理规则框架内,通过系统分解与工具自动化实现复杂功能的可靠集成,经典布尔逻辑的因果确定性是其设计的基石。然而,量子芯片设计的创新方法论又是什么呢?它有哪些新的特质?本文将系统探究这一问题,并力求为量子芯片的设计提供某种方法论启示。

1 量子芯片概念及进展史

1.1 概念内涵

量子芯片是以量子力学原理为基础构建的计算

硬件载体,其核心功能单元为量子比特(Qubit)。与经典二进制硅基芯片相比,它具有三个本质特征:第一是新的信息载体。采用量子比特(Qubit)替代经典比特,借助量子叠加态实现指数级并行计算。单个量子比特可同时表征 $|0\rangle$ 与 $|1\rangle$ 的相干叠加态, n 个量子比特系统具备同时处理 2^n 种状态的能力。第二是新的运算机制。通过量子门操作实现量子态的受控演化,典型如 Hadamard 门产生叠加态、CNOT 门(Controlled NOT gate)建立纠缠态。这种运算模式在密码破解(Shor 算法)、分子模拟(VQE 算法)等领域展现出革命性优势。第三是对环境的高度敏感。量子相干时间成为关键性能指标,超导量子芯片需在极低温环境运行,离子阱系统要求超高真空,光子芯片依赖精密光学谐振腔,这些条件显著区别于传统 CMOS 芯片的常温工作模式。

1.2 主流技术路线

从设计的技术路线来看,目前有超导量子芯片、光量子芯片、半导体量子芯片、离子阱量子芯片、拓扑量子芯片等多种方案(见表 1)。其中,超导和离子阱“最有希望在短期内实现量子容错计算和规模可扩展的体系”^[3]。

表 1 量子芯片主流技术路线对比分析^[1,4-6]

Table 1 Comparative Analysis of Main Technical Approaches for Quantum Chips^[1,4-6]

	超导量子芯片	光量子芯片	半导体量子芯片	离子阱量子芯片	拓扑量子芯片
物理基础	约瑟夫森结宏观量子效应;极低温具有非线性电路特征	利用光子偏振/路径/轨道角动量等自由度编码量子信息	依赖于半导体材料(如硅基或砷化镓)的量子特性,例如自旋态或拓扑导体结构	用静电场和射频场稳定囚禁单个离子,在离子内态能级上编码量子比特,用激光束实现量子态操控	基于马约拉纳 Majorana 费米子的非阿贝尔统计特性
典型架构	约瑟夫森结+控制线+谐振器+电容电感+读出线	基于耦合光波导体系,通过光子在波导系统的传输和波导之间的耦合	使用成熟的半导体微电子制造技术,兼容电容量子比特的规模化集成	线性保罗 Paul 阱(单轴囚禁),微加工表面电极阱	微软在 InAs-Al 异质结中发现零偏压电导峰 ^[7]
技术优势	与传统技术兼容性强,有较强的可扩展模块化集成能力。	室温工作且抗电磁干扰,长距离量子通信,精度高、工艺简单,成本低。	可容错性、可拓展性、兼容现有半导体芯片工艺	量子比特相干时间领先,量子门保真度突破 99.9%,计算性能优越	拓扑保护可显著降低量子纠错成本
技术缺陷	需要极低温、相干时间短,需要先进的封装集成技术。	确定性量子光源制备效率($<50\%$),光子损耗导致逻辑门保真度下降	保真度低,纠错复杂度高	真空系统微型化难,多离子协同操控的激光系统复杂,体积庞大,制作工艺复杂,不易单片集成	需极低温与强磁场,材料界面缺陷易使拓扑序破坏

1.3 进展史

量子芯片研发史可划分为三个阶段:理论探索期,时间大概从 1980 年到 2000 年;技术突破期,时间大概从 2001 年到 2015 年;工程竞速期,时间大概

从 2016 年到现在。

理论探索期:1982 年,美国的费曼(Richard Feynman)提出了构建量子计算机来高效模拟量子系统的革命性构想,确立了量子计算理论框架^[8]。1994 年

Shor算法证明量子计算在质因数分解的指数加速^[9],1995年Shor给出最早的量子纠错码,他将“多个物理量子比特编码成逻辑量子比特,基于两者的映射关系来检测并纠正错误”^[10]。1995年Ignacio Cirac和Peter Zoller首次提出离子阱量子计算理论方案^[11],1999年日本物理学家Nakamura实现首个超导量子比特(电荷量子比特)^[12]。这一阶段奠定了量子芯片设计的理论基础。

技术突破期:2007年耶鲁大学科研团队发明Transmon量子比特(退相干时间提升10倍)^[13],2010年NIST实现离子阱量子逻辑门保真度99.9%,2011年D-Wave推出首款商用量子退火机,配备128个量子比特,2012年加州理工学院John Preskill首次提出量子优越性概念。这一阶段量子芯片技术在设计上不断取得新突破。

工程竞速期:2016年IBM推出5量子比特云量子计算平台,2018年IonQ公司在离子阱量子计算技术方面取得重大进展,2019年谷歌实现量子优越性^[14](Sycamore处理器53量子比特),2020年中国“九章”光量子计算机实现高斯玻色采样,2022年中国推出专用于量子芯片生产的NDPT-100无损探针电学测量平台,提高了量子芯片良品率,2023年IBM推出1121量子比特的Condor处理器。2024年12月,美国谷歌和中国科学技术大学先后发布105比特超导量子芯片,在电路规模、纠错效率、保真度等方面,取得进一步进展,意味着量子计算机向实用化迈出了重要一步。2025年5月,本源科仪公司自主研发的量子芯片设计软件“本源坤元”完成第五次迭代。这一阶段工程应用获得快速发展。

1.4 高性能量子芯片研制的核心难题和技术趋向

目前,量子芯片技术的核心难题是:量子比特的数量和质量提升难;量子纠错难,2024年谷歌“深度思维”团队开发“阿尔法量子比特”的AI解码器,能以更高的精确度检测量子计算过程中出现的错误,但是整体上这方面的工作还有很长的路要探索;可拓展性难,例如超导量子芯片体系布线的复杂性随比特数量的增加呈指数增长;异构集成难,要实现传统半导体芯片与量子芯片的协同封装困难。未来量子芯片的技术趋势有这么几个方向:走向混合量子架构,例如超导-光子量子互联;走向多层堆积集成,例如硅通孔(TSV)实现多层量子芯片堆叠;开发量子EDA工具,例如Qiskit Metal等自动化设计平台降低研发门槛;寻找新型材料体系,例如钽基超导材料相干时间突破200 μs 。

总体上,量子芯片的发展目前已从实验室探索阶段转向工程化攻坚阶段。不同技术路径的竞争本质是基础物理特性与工程可行性的博弈,而真正实用化量子计算机的出现将取决于量子纠错、规模扩展与异构集成等关键技术的突破。作为一种颠覆性的技术,量子芯片技术将带来一场新的科技革命,它不仅重塑计算范式,更将重构全球芯片产业竞争格局。

2 量子芯片技术的逻辑与方法论

2.1 量子芯片技术中的确定性与非确定性

量子芯片技术中的确定性体现在三个方面:第一,理论确定:在量子比特与环境耦合的时间尺度内,即退相干时间内,系统演化遵循薛定谔方程的确定性规律;量子逻辑门由酉矩阵描述,其操作在理论上完全可逆且确定;量子纠错码理论上可检测并纠正特定类型的错误。第二,优势确定:可操控量子比特以实现量子计算优势,量子算法(Shor算法、Grover算法)在理想条件下具有确定性的加速效果。第三,方案确定:量子芯片设计中,整个芯片的器件设计是确定的;通过量子线路优化,可将非确定性过程转化为可预期的概率分布。例如,超导量子芯片中通过微波脉冲序列调控量子态演化路径,使得最终测量结果的概率分布满足计算目标。量子芯片技术中的非确定性也体现在如下方面:第一,超过退相干时间则呈现经典随机性,量子叠加态在测量时坍缩为经典态的过程具有本质概率性,量子态初始化可能偏离理想基态,导致后续操作的非确定性偏差,量子芯片的制造误差(如量子比特频率偏差、耦合强度不均)导致门操作误差累积。第二,量子比特的测量结果为0或1的概率由波函数模平方决定,无法提前确定。第三,量子纠缠态的计算结果是不确定的,量子纠缠态的离物传导是非确定性的,真正有效用的量子芯片属于复杂系统。正如张华夏先生所言:“我们不能要求所有的知识具有精确的可预测性”^[15]¹⁸。为解决好量子芯片技术中的确定性与非确定性问题,芯片设计专家的技术设计逻辑体现在三个方面:第一,通过超导电路、离子阱或光子芯片的优化设计提升量子比特的相干时间与门保真度,延长退相干时间,开发噪声适应性算法,在非理想条件下促使计算成功率最大化,拓展技术设计可用的量子确定性。技术改变确定性与非确定性界限,确定性与非确定性的相对性。第二,悬置量子比特的内涵本体论争议,而去关注如何在技术上操控量子比特。技术设

计的可行性和实效性比分析量子比特的物理属性更重要,量子芯片的实际性能评估必须超越形式化模型。第三,量子纠错技术,部署量子纠错码,将物理量子比特编码为逻辑量子比特以容忍错误。通过冗余编码和协同操作检测并纠正量子系统中的比特翻转、相位翻转及退相干错误,以保护量子信息免受噪声干扰并实现可靠量子计算。通过不断补加新技术设计来减少非确定性,这类似语境补偿机制。

2.2 量子芯片技术中的逻辑至简与功效提升

对于芯片设计,逻辑至简就是通过算法与结构的优化,减少量子操作的复杂性与资源依赖。例如,量子电路压缩的方案 QLOQ:通过将多个量子比特映射到单个高维量子系统上,利用高维量子系统的多能级特性压缩硬件资源;在可逆逻辑设计中引入编码机制,将非可逆函数嵌入可逆逻辑中;通过预定义的逻辑规则实现量子电路行为的快速验证。功效提升是指通过优化物理实现与算法效率,提高计算速度与资源利用率。例如,QLOQ通过减少物理门的数量,直接缩短计算时间;通过编码减少辅助量子比特需求,降低硬件资源消耗;在变分子量算法中,通过参数化量子电路的紧凑设计(减少层数与参数数量),降低训练复杂度,同时保持精度;确保逻辑正确性,避免后期调试中的冗余修正。关于量子芯片设计里的逻辑至简与功效提升,在实际操作过程中,我们的技术理想是:兼得结构上的逻辑至简与功用上的功效提升,此为所有技术设计的理想化目标。逻辑至简与功效提升本质上都属于技术的价值取向,但在技术实践上往往二者不可兼得。技术现实是:在逻辑至简与功效提升之间进行权衡取舍,在实用主义与理想主义发生冲突时进行综合权衡,技术研发中往往存在“可行性优先于完备性”的实用价值导向。

2.3 量子芯片技术中的理论发现与技术发明

理论发现驱动技术发明:量子叠加态的数学表述、量子纠缠态(如贝尔态)的理论描述,直接为量子信息传递奠定了数学基础,并进而促使量子比特概念的提出。在此基础上,量子并行性可实现指数级加速计算的论证和多量子比特纠缠态成功制备,标志着量子计算从理论发现走向技术发明阶段。约瑟夫森结非线性效应的理论发现直接驱动了超导量子芯片的技术发展。**技术发明深化理论发现:**在量子芯片设计过程中,实验观测发现超导量子比特的退相干主要源于 $1/f$ 噪声,这与材料界面缺陷相关,而非传统理论认为的准粒子激发,这一实验观察结果促使材料科学转向高纯度硅基衬底与分子束外延生长技

术,并重构了量子退相干理论机制。“**理论发现—技术发明**”**共同体创新范式:**量子芯片的发展,同时并行涵盖了基础科学探索性(深层次的原理认知需求)和明确的应用目标导向性(解决实际问题的需求)。“这个领域是基础与应用同时进行发展的,而不是简单地从基础到应用”^[16]。它有着明确的技术使命和产业化需求,同时又必须完成深刻的基础科学探索,如何将量子力学原理工程化?这势必需要打造“理论发现—技术发明”共同体创新范式,并且产学研深度合作(政府引导—市场资本介入—跨学科共同体团队),以适应当下量子技术革命的这一新特点。华为公司是一个典型案例,组建“哲学家+科学家+技术专家+普通技术人员”跨领域合作团队以适应技术革命的新趋势。

2.4 量子芯片技术中的技术目的与技术手段

量子芯片技术的技术目的有这么几个特征:第一,明确的应用性。量子芯片的技术目的具有明确的应用性,就是要超越受限于摩尔定律的经典芯片,用新的物理器件来实现有效的量子算法。避开经典芯片晶体管尺寸由于接近物理极限而带来量子隧穿效应,从而导致芯片计算结果出现误差。此外,高密度的晶体管也会带来发热问题,从而影响经典芯片的稳定性。量子芯片的技术目的就是要克服上述经典芯片的弊端。并且,要大幅提升计算速度。第二,发展性。量子芯片的核心技术目的已从单纯追求“量子优越性”转向构建实用化量子生态系统。第三,层级性。基础目的服务高阶目的,每个子目的(如拓扑优化)都是更高目的(如容错计算)的手段。量子芯片技术的技术手段具有多样性、复杂性,实现量子芯片技术目的的技术手段往往是多样的,有离子阱、超导、半导体及光学。在权衡选择何种技术手段进行主攻时,需要综合考虑技术方案实现的难易程度、技术方案的可靠性和稳定性、技术方案是否便于未来技术的拓展。技术手段具有阶段性、进化性,在量子芯片研发和制造过程中需按照技术成熟度和目标划分不同阶段,每个阶段聚焦特定技术挑战并采用差异化的方法体系。技术手段具有价值性,手段并非中性,它内嵌设计者的认知框架。量子芯片技术的目的和手段二者的关系是这样的:目的提出挑战(如降低错误率),手段响应创新(如新布线算法);手段的局限(如算法复杂度)又倒逼目的调整(如接受近似解)。手段通过实证检验,推动目的从理想化向现实化转变。

2.5 量子芯片技术中的功能模拟与物理实现

量子芯片技术中的功能模拟其实就是量子技术认识论的呈现过程,其内涵就是:利用经典计算机模拟量子态演化。在量子芯片设计过程中,为达到某种量子功能,采用经典器件的经典功能进行量子功能模拟,或者采用经典器件所得到的量子效应去模拟某种整体量子功能。量子芯片技术的物理实现其实就是量子技术本体论的呈现过程,在物理层进行设计,直接涉及量子芯片的制造工艺和人工物呈现,如超导电路、硅基光量子结构。在硅基光量子芯片研制当中,功能模拟用以验证多光子纠缠态或量子密钥分发协议的理论可行性,而物理实现就是指设计波导结构和调制器精度以保证光子干涉稳定性,

抵抗光子损耗与串扰。功能模拟与物理实现之间的关系是这样的:功能模拟是量子芯片设计的“理论沙盒”,作为物理实现的全量子设计是“物理实验室”。二者通过迭代优化,共同驱动量子芯片从抽象算法走向物理实现,缺一不可。忽视功能模拟将导致算法缺陷未被发现;跳过物理实现层面的全量子设计则无法应对真实量子硬件的噪声与约束,最终使芯片性能偏离预期。功能模拟为技术发展的过渡性步骤,适合“经典+量子”的量子技术发展的初级阶段。全量子技术为技术发展的终极追求与理想,需要量子互连技术、量子编译器技术、量子指令集架构技术的突破。功能模拟与物理实现二者的关系见图1。

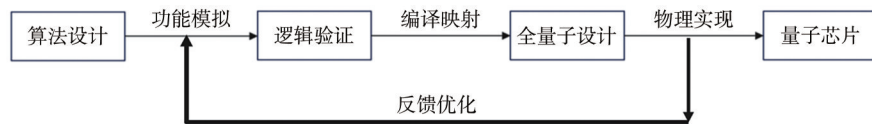


图1 功能模拟与物理实现关系

Figure 1 Relationship between Functional Simulation and Physical Implementation

3 从哲学反思看量子芯片设计的出路

3.1 系统哲学的层级理论对量子芯片设计的方法论启示

系统哲学的层级理论认为,复杂世界本质上是层级化的,系统内部存在有序的层级结构。“层级分类不只是一个线性的序列,而且是一个‘网络系统’”^{[17]215}。量子芯片作为一种复杂性的量子系统,始终存在内存可扩展性与可控性的矛盾。量子力学叠加与纠缠特性赋予其并行计算潜力,但量子态的脆弱性(退相干、噪声干扰)导致大规模集成时系统稳定性呈指数级下降。这一矛盾的本质是微观量子系统(量子世界)与宏观工程系统(经典世界)之间的哲学对立。从方法论看,可借鉴复杂性系统层级理论,将量子芯片设计分解为物理层(量子比特实现)、逻辑层(量子门操作)与架构层(系统集成),三个层级协同优化,而非单一维度的技术突破。同时,可建构从微观量子层向宏观经典层逐层过渡或动态交互的层级架构。微观量子态与宏观量子芯片装备可通过技术分层的精细化设计来实现统一。例如,在量子线路模型及算法设计结构当中,经典层与量子层要交互交融,“量子算法的设计需要经典的‘母’算法”^[16]。一般算法设计结构如图2,这种结构包含了经典算法和它设计的量子线路以及测量方式,并可构成经典-量子混合的迭代层级结构。

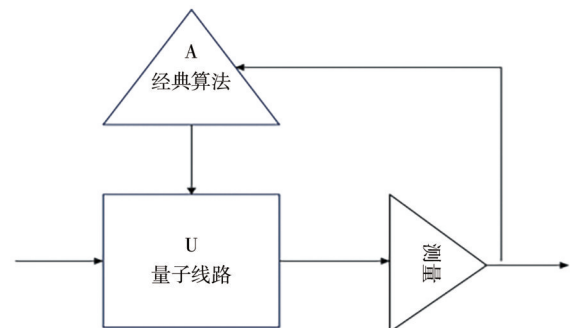


图2 量子算法设计结构

Figure 2 Design Framework of Quantum Algorithms

3.2 坚持整体论与还原论的互补思维对量子芯片设计的方法论启示

在量子芯片的设计中,还原论进路是必要的,因为我们需要深入分析和研究单个量子比特的物理实现问题,如超导约瑟夫森结的能级调控、离子阱的激光操控精度等。基于还原论思维,技术专家可通过材料科学和微纳加工技术来不断提升量子芯片基本单元的性能。另一方面,在量子芯片的设计中,整体论进路也是必要的,必须超越传统芯片的“线性叠加”思维,将量子芯片视为非定域化拓扑网络,重视其整体属性,采用表面码(Surface Code)等量子纠错编码,将物理量子比特与逻辑量子比特的映射关系纳入到芯片整体设计,通过几何拓扑结构实现纠错能力的自发突现,从整体上考虑芯片架构的有效性、

保真度、稳定性等问题。鉴于此,与经典计算机设计更加侧重还原主义设计思路不同,量子芯片设计要坚持还原论与整体论的互补思维。从语言哲学视角看,弗雷格语境原则和蒯因整体论对量子系统设计亦具启发作用,量子纠缠态的语义无法通过单个量子比特独立定义,必须从多比特系统的整体语境去解读。芯片设计需优先保证多量子比特之间的可控关联性,而非孤立优化单个比特性能。量子算法的语义实现依赖芯片架构从基底上对多量子比特并行操控的支持,芯片的物理结构可视为算法语义的“语法载体”,从而避免硬件碎片化带来语义上的断裂。

3.3 容错、容灾与技术目的论对量子芯片设计的方法论启示

与经典芯片设计追求“零误差”不同,量子芯片的设计需接受“概率性容错”。技术上,可通过动态阈值定理(Dynamic Threshold Theorem)来指导具体设计。动态阈值定理是指当物理错误率低于特定阈值时,逻辑错误率随编码规模增加而降低,这便要求芯片架构预留冗余量子比特与实时反馈调节模块。可以引入非二元容灾机制,从静态冗余转向动态自适应。例如,利用量子退火原理设计可重构耦合器,在部分量子比特失效时动态切换连接路径来保证量子芯片功能的实现,而非追求全系统、各要素的绝对稳定性。容错就是对错误的容忍,采用纠错码可有效克服退相干、噪声或错误的影响。在量子芯片设计过程中,我们要坚持容错逻辑观。容错就是基于技术现实认知,要勇敢承认世界的不完美性和故障必然性,通过结构化冗余设计将脆弱性转化为韧性,最终在技术缺陷存在的前提下实现功能存续、目标实现,即局部失效不影响全局功能。容错逻辑与桂起权先生“次协调逻辑与辩证逻辑”是一致的,我们认为次协调逻辑^[18]可用于量子芯片系统容错机制的构建,增强量子芯片系统对不完全、不一致信息的处理能力。技术功能的最终实现,技术预设目的的最终实现,这才是量子芯片设计的本质和意义所在。设计中出现技术错误(或因理论、或因人为、或因不可抗力)没必要沮丧,可通过附加新设计来弥补设计错误。实质上,量子芯片设计中的技术选择并非仅由量子力学理论必然性来决定,而是设计者基于社会需求、资源约束和价值判断的“目的导向”决策的结果。

3.4 可扩展性逻辑和并行化逻辑对量子芯片设计的方法论启示

可扩展性逻辑是指:一种以动态生成为本体、模

型化预期为认知工具、未来可持续适应为价值导向的技术设计逻辑。它使技术系统在现有资源、现有认知的约束下,面对未来可能出现的新问题、新需求,通过技术边界重构与关系微调整,以实现自身技术潜能的持续释放,以最小代价应对技术环境的不确定性并实现技术功能的持续提升。例如,在量子芯片设计中采用模块化嵌套可拓展性结构,借鉴离子阱芯片的“分区域囚禁”思路,将芯片划分为若干功能单元(如计算区、存储区、通信区),通过光子互连或可调耦合器实现模块间量子态传输。以递归逻辑采用可自相似性设计,将复杂问题分解为结构相似但规模更小的子问题,例如在超导量子芯片设计中,用重复性单元“Transmon量子比特阵列”构成分形结构,使局部操控协议可递归应用于全局量子芯片系统。

并行化逻辑是指:将逻辑计算任务分解为多个可同时执行的子任务,通过空间或时间上的并行处理,从而提升系统效率的计算范式。在量子芯片设计中,除了利用量子叠加态、纠缠态和相干性来实现量子比特的并行计算能力之外,还可通过量子比特排布优化(空间并行)、门操作时序交错(时间并行)和经典—量子系统混合控制(系统并行),来实现量子芯片的超强计算能力。例如在半导体量子点芯片设计时,可采用交叉型微波波导,允许同时操作多组量子比特而不发生串扰;可预先在芯片中固化特定纠缠态,通过测量基自适应选择,实现计算任务的并行分解。

3.5 诠释学“前见”理论对量子芯片设计的方法论启示

伽达默尔(Hans-Georg Gadamer)认为,“前见”就是“前见解”,“前见解”带来文本解读上的前理解,理解活动始终以历史传统赋予的认知框架为基础,“一切理解都必然包含某种前见”^{[19]383}。我们需要认识到,前见内蕴着技术实践对技术历史路径的依赖性。量子芯片设计依赖于旧有技术工具的认知惯性,例如,超导量子芯片的物理实现依赖于超导电路技术,超导量子芯片技术里的“平面工艺、倒装焊、TSV多层堆叠、模块化集成”^[1],都是源于传统半导体技术的成熟经验。但这样的一种基于前见的技术选择也会阻挡我们对拓扑量子芯片等新兴设计路径的探索,从而“前见”变成“成见”。技术历史路径的依赖性既是技术创新的前提条件,也是技术创新的隐性约束。量子芯片技术的每一次突破都必须依赖突破之前的前见,然而这种前见并不总是正面性的。

在我们看来,技术创新既不在于彻底地抛弃前见,也不在于被动地接受传统,而在于通过“视域融合”实现“前见+预见”认知框架的创造性转化。正如伽达默尔所言,前见既是认知的边界,也是突破边界的桥梁^{[19]377-434}。

3.6 多元主义哲学观对量子芯片设计的方法论启示

技术的多元主义是指一种强调技术具有多样性、多角度性和综合性的哲学观点。例如,并行研制专用与通用量子芯片。专用量子芯片聚焦专用领域架构,专用性问题单一,相对而言技术问题容易被攻克,并能为通用技术研发提供基础;只要在专用芯片上预留通用接口,未来就可以从专用转为通用。在量子芯片设计中,有超导量子芯片、光子量子芯片、离子阱量子芯片等多元路径,这些多元路径有利于量子芯片技术生态的互补共生。可以建构某种超导—半导体—离子阱体系的异构集成平台,这种异构集成平台能发挥不同设计路径的优势,并规避各自的劣势。例如,利用超导量子芯片的高操作速度完成核心计算,通过半导体量子点量子芯片实现长寿命量子存储,采用离子阱量子芯片的高保真度测量进行结果验证,通过量子态隐形传态协议实现跨物理平台的信息传递。面对量子芯片此类未知技术领域,应注重技术的多元性,避免单一技术的主导地位。技术突破阶段,单一技术路线容易走入死胡同,而多元技术路线具有高度的适应性和灵活性,更易带来技术革命;技术成熟阶段,多元技术路线有利于不同技术路线的竞争与发展,有利于满足多样化的技术需求,有利于技术共同体获得更为宽广的技术发展视野。当然,在坚持多元性的同时,也要寻求某种统一性(例如,构建技术规范和标准),确保技术发展的整体性和协调性。

3.7 实践哲学观对量子芯片设计的方法论启示

第一,要强调实践优位观。量子芯片设计往往面临理论模型与工程实现的鸿沟,要从理论优位转向实践情境的动态建构。设计专家要大胆拒绝先验理论预设,要从实践约束(如材料缺陷、环境影响)出发动态调整模型,而非强行套用理论。设计知识很多时候来自具体实验,如通过低温测量优化量子门保真度,而非理论推导的简单应用。量子芯片设计论证了吴彤教授关于科学实践哲学的核心思想,即“通过对人类科学实践活动和过程的深刻理解而把一种理论优位的科学哲学转变为实践优位和活动优位的科学哲学”^[20]。**第二,要重视实验者的具身经**

验。操控量子系统高度依赖实验者的具身经验,设计工具需要保留人机交互的实践智慧,避免完全自动化和智能化。**第三,要坚持工具理性与价值理性的统一。**在量子芯片设计时,一方面要促使工具效能最大化,另一方面需要内嵌伦理反思。**第四,要从技术实践去为量子芯片设计合理性提供辩护。**依照张志林先生对科学合理性的分类(认知合理性和实践合理性)^{[21]95}。同理,量子芯片技术合理性,也应包含技术认知合理性与技术实践合理性。其中,关于技术实践合理性辩护尤为重要,量子芯片设计的合不合理,除了看里面内蕴的量子技术知识是否得到确证外,更应看量子芯片在技术实践层面所获得的具体实验数据。

3.8 方法论上的范式革新是量子芯片技术突破的关键

在量子芯片设计当中,方法论上要从技术的“完美控制”转变为技术的“容错共生”,从技术的“线性拓展”转变为技术的“拓扑涌现”,从技术的“单一最优”转变为技术的“多元协同”。超越现有设计方案局限性的根本出路是:经典方案与量子方案高度协同,宏观世界与微观世界灵活转换,“AI+设计”助力设计效率大幅提升。

4 从量子芯片技术看技术进步的本质

基于量子芯片技术的发展历程,可以看出技术进步具有如下本质特征:第一,技术进步就是一场认知革命,它是人类不断打破认知边界的过程。第二,技术进步不仅限于先前技术效能的进一步优化、创造新功能,而在于对先前技术所涉及的核心概念内涵的颠覆性改变,即量子芯片技术颠覆性地重新界定了传统芯片关于“计算”的概念内涵,它不是力图设计出运行更快的计算机器,它是创造能重新定义“计算”本身的新机器。第三,技术进步既包含技术继承,又包含技术跳跃,技术继承与技术跳跃同时孕育出技术的新范式。第四,技术创新需要“宽视野+长周期+大资金+跨领域大团队+持续市场需求”,技术创新不只是“技术”本身的事。第五,技术之技术实在具有多元性和发散性,而技术之技术功用具有一元性和收敛性。作为人工物的技术实在源自技术主体的创造,而技术主体的创造力又基于技术主体的构造模式(多领域研发共同体、单领域研发共同体、单个研发专家)和技术主体基于“前见+创见”识界融合所激发的技术智慧。

参考文献:

- [1] 郑伟文,李晓伟,熊康林,等.超导量子芯片集成技术概述[J].电子元件与材料,2022,41(11):1143-1148. DOI: 10.14106/j.cnki.1001-2028.2022.0249.
- [2] 金吾伦.感悟科学:科学哲学探询[M].长沙:湖南人民出版社,2007:12.
- [3] 饶欣欣,李卓瑛,宋潇,等.离子阱量子计算机的发展现状与趋势[J].世界科技研究与发展,2022,44(2):157-171. DOI:10.16507/j.issn.1006-6055.2022.02.003.
- [4] 李础,王睿琦,李焱.飞秒激光直写的三维光量子芯片研究进展[J].世界科技研究与发展,2024,46(6):772-789. DOI:10.16507/j.issn.1006-6055.2024.10.006.
- [5] 张建军,李海欧,郭国平.半导体量子芯片[J].中国科学(信息科学),2024,54(1):102-109.
- [6] 刘瀛旻,刘芬,尤瑞松,等.量子芯片的研究现状与应用[J].科技智囊,2020,12: 55-60.
- [7] AGHAEI M, RAMIREZ A, ALAM Z, et al. Interferometric Single-shot Parity Measurement in InAs-Al hybrid Devices[J]. *Nature*, 2025, 638(8051): 651-655. DOI:10.1038/s41586-024-08445-2.
- [8] FEYNMAN R. Simulating Physics with Computers [J]. *Int J Theoret Physics*, 1982, 21(6-7): 467-488. DOI: 10.1007/BF02650179.
- [9] SHOR P W. Algorithms for Quantum Computation: Discrete logarithms and Factoring [C]//Proceedings of the 35th Annual Symposium on Foundations of Computer Science, 1994:124-134.
- [10] 张心怡.2025年量子芯片将行至何处?[N].中国电子报,2025-01-17(08).
- [11] CIRAC J I, ZOLLER P. Quantum Computations with Cold Trapped Ions[J]. *Physical Review Letters*, 1995, 74(20):4091.
- [12] 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. DOI: 10.1038/19718.
- [13] KOCH J, YU T M, GAMBETTA J. et al. Charge-insensitive Qubit Design Derived from the Cooper Pair Box[J]. *Phys Rev A*, 2007, 76(4): 042319. DOI:10.1103/PhysRevA.76.042319.
- [14] ARUTE F, ARYA K, BABBUSCH R. et al. Quantum Supremacy Using a Programmable Superconducting Processor [J]. *Nature*, 2019, 574(7779): 505-511. DOI:10.1038/s41586-019-1666-5.
- [15] 张华夏.科学的结构:后逻辑经验主义的科学哲学探索[M].北京:社会科学文献出版社,2016.
- [16] 王东升.通用量子计算模型:一个资源理论的视角[J].物理学报,2024,73(22):16-37. DOI:10.7498/aps.73.20240893.
- [17] 张华夏.系统哲学三大定律:乌杰《系统哲学》解析[M].北京:人民出版社,2015.
- [18] 桂起权.次协调逻辑:辩证逻辑形式化的阶梯[J].武汉大学学报(社会科学版),1989,43(6):24-30.
- [19] 汉斯-格奥尔格·伽达默尔:诠释学 I 真理与方法:哲学诠释学的基本特征[M].洪汉鼎,译.上海:商务印书馆,2009.
- [20] 吴彤.科学实践哲学发展述评[J].哲学动态,2005(5): 40-43. DOI:10.3969/j.issn.1002-8862.2005.05.008.
- [21] 张志林.科学合理性[M].上海:复旦大学出版社,2015.



沈健,男,博士,嘉应学院教授,现为嘉应学院学报编辑部主任、湖南师范大学科技与社会发展研究中心特邀研究员、中国自然辩证法研究会物理学哲学专业委员会副主任委员、广东省自然辩证法研究会理事、广东省高等教育学会第七届理事会常务理事、广东省高校科研管理研究会常务理事。曾在南开大学哲学院、西南石油大学马克思主义学院担任兼职博士生导师和硕士生导师。主持2011年国家社科基金一般项目“弦论的哲学研究”1项,参与国家自然科学基金重大项目1项并担任子课题负责人,参与教育部重大攻关项目1项,参与省、部、国家级科研项目5项,主办全国性学术会议2次,参加国际、全国学术会议30多次。在《哲学研究》《自然辩证法通讯》《自然辩证法研究》《科学技术哲学研究》等学术刊物发表论文20多篇,论文先后被《人大复印资料》《高校文摘》转摘3次,在科学出版社等权威出版社出版学术专著《量子革命与问题还原》《物理学哲学研究》等。Email:shenjian88696@163.com

(责任编辑:彭 鹏)