

量子退火计算机为何采用磁通量子比特

1. 引言: 量子退火与超导量子比特

量子计算领域正蓬勃发展,旨在解决传统计算机难以处理的复杂问题。其中,优化问题在诸多领域,如物流、金融、材料科学等,都具有重要的现实意义¹。量子退火作为一种专门的量子计算范式,正是专注于解决这类优化难题¹。它通过利用量子力学原理,在众多候选解中寻找目标函数的全局最小值⁴。

在众多的量子计算硬件平台中,超导量子比特凭借其成熟的技术和潜在的可扩展性,成为了实现量子计算机的有希望的途径之一⁶。超导量子比特具有操作速度快、可利用半导体工业的制造技术进行大规模集成等优点⁷。在基于超导技术的量子退火计算机中,磁通量子比特是目前商业化量子退火器所采用的主要量子比特类型¹³。理解为何量子退火计算机偏爱使用磁通量子比特,需要深入探讨磁通量子比特的特性以及量子退火的原理。

2. 理解磁通量子比特

磁通量子比特是一种微米尺寸的超导金属环,该环被一个或多个约瑟夫逊结中断¹⁹。这些超导环路作为量子比特发挥作用,其量子态由磁通量控制²⁰。磁通量子比特的典型制造过程采用电子束光刻和薄膜蒸镀技术²⁰。这种微小的尺寸和特定的制造工艺使得在这些超导环路中能够观察到量子效应。

约瑟夫逊结是磁通量子比特的核心组成部分。它是由两层超导体之间极薄的绝缘层构成的结构,允许库珀对(电子对)通过量子隧穿效应穿过绝缘层⁶。约瑟夫逊结的引入为超导环路带来了非线性,这对于形成量子比特中可区分的能级至关重要⁸。正是这种非线性使得超导环路能够表现出量子比特的行为,通过量化其能量水平来实现。

当施加外部磁通量时,超导环路中会产生持续电流²⁰。该持续电流的方向(顺时针或逆时针)对应于量子比特的两个基态,通常标记为 $|0\rangle$ 和 $|1\rangle$ ¹¹。当通过环路的磁通量接近半整数个磁通量子时,量子比特会处于这两个电流态的量子叠加态¹⁹。这意味着量子比特可以同时处于顺时针和逆时针电流流动的状态,直到被测量时才确定下来。量子比特的状态通过施加外部磁场进行控制和操纵⁶。特定频率的微波脉冲可以用于执行量子操作,通过激发能级之间的跃迁来实现²⁰。

在磁通量子比特中,约瑟夫逊结的耦合能通常远大于其充电能²⁰。这种能量状态使得库珀对能够在环路中持续流动,这与电荷量子比特中库珀对离散地隧穿结不同²⁰。这种基本的能量状态区分了磁通量子比特与其他类型的超导量子比特,并影响了它们在不同量子计算范式中的行为和适用性。

3. 量子退火的原理

量子退火是一种利用量子涨落来寻找给定目标函数在一组候选解中的全局最小值的优化过程¹。它特别适用于具有离散搜索空间和多个局部最小值的优化问题,例如寻找自旋玻璃的基态或解决旅行商问题⁴。量子退火与旨在实现通用计算的基于量子门的模型不同,它专注于优化任务。

量子退火的核心是绝热量子计算的原理。该过程从一个易于制备的初始哈密顿量的基态开始,然后缓慢地演化到最终哈密顿量的基态,该最终哈密顿量编码了待解决的问题²。绝热定理指出,如果演化足够缓慢,并且基态与激发态之间存在能隙,则系统将保持在其瞬时哈密顿量的基态²³。

能隙的大小对所需的退火时间和成功概率至关重要。

在量子退火中，优化问题通常被映射到横向场伊辛模型上²。该哈密顿量包括描述单个量子比特偏置和量子比特之间成对相互作用的项。退火过程包括逐渐减小横向场的强度，同时增加问题哈密顿量的强度。由横向场驱动的量子涨落使得系统能够隧穿能量壁垒，并同时探索多个候选解²。这种量子隧穿效应是量子退火可能优于经典模拟退火的关键机制，因为它能够更有效地逃离局部最小值。

为了利用量子退火解决实际问题，需要将现实世界的优化问题转化为伊辛模型。这通过为量子比特分配适当的偏置并设置它们之间的耦合强度来实现²。有效的问题映射对于量子退火的实际应用至关重要。

4. 磁通量子比特在量子退火中的优势

磁通量子比特之所以成为量子退火计算机的首选，是由于其固有的特性与量子退火过程的需求高度契合。

首先，磁通量子比特的能量水平和耦合可以通过调节外部磁通量来容易地控制⁶。这种直接的磁通控制与绝热量子计算的要求非常吻合，在绝热量子计算中，哈密顿量需要在一段时间内平滑地变化⁶。通过精确地调整磁通量，可以实现对量子比特参数（横向场伊辛模型中的 ϕ_i 和 Δ_i ）以及编码问题哈密顿量和驱动退火过程所需的耦合强度（ J_{ij} ）的精确调控¹⁴。这种参数的可调性对于编码特定的优化问题和实施退火计划至关重要。研究表明，使用超导量子比特（包括磁通量子比特）相对容易实现绝热哈密顿量控制²⁸。

其次，尽管早期的磁通量子比特相干时间相对较短³²，但磁通量子比特的设计已经取得了显著的进步。例如，电容分流磁通量子比特（CSFQ）的出现，使得相干时间得到了显著的提高，达到了微秒甚至在某些设计中达到了毫秒级别²⁸。更长的相干时间使得量子退火器能够在更长的时间内保持叠加态，这可能有助于更好地探索能量景观并找到更低能量的解⁶。此外，快速退火协议旨在在发生显著退相干之前完成计算¹⁴。

第三，磁通量子比特通过外部磁通偏置提供了高度的可控性，能够精确地操纵单个量子比特的状态及其相互作用⁶。这种精细的控制对于将优化问题的特定参数编程到量子退火器上至关重要。此外，通常基于超导量子干涉器件（SQUID，与磁通量子比特相关）的可调耦合器，允许在退火过程中调整量子比特之间的耦合强度¹⁴。可调耦合为设计不同优化问题所需的连接性和相互作用强度提供了灵活性。

第四，磁通量子比特架构已成功扩展到数千个量子比特，这在商业化的量子退火器中得到了证明（例如，D-Wave 系统的量子比特数超过 5000 个）⁴。这种可扩展性对于解决大规模和复杂的优化问题至关重要。超导电路（包括磁通量子比特）的制造技术与半导体工业标准兼容，这进一步促进了可扩展性⁶。

第五，磁通量子比特能够在纳秒级的时间尺度上执行操作，这对于实施退火计划（特别是快速退火协议）至关重要⁷。这种速度使得在退火过程中能够快速地操纵量子比特的状态。快速退火可以通过快速完成计算来潜在地减轻退相干的影响¹⁴。D-Wave 系统中的典型退火时间范围从纳秒到微秒不等¹⁴。

最后，虽然超导量子比特对噪声敏感，但使用磁通量子比特的量子退火由于其集体寻基态的特性，对某些类型的错误表现出一定的鲁棒性¹³。量子退火固有的方法与基于量子门的计算相比，对环境噪声具有一定的抵抗力。通过特定的设计选择，例如减小磁通量子比特中的持续电流，可以

提高其相干性并降低对磁通噪声(退相干的主要来源)的敏感性³²。

5. D-Wave 系统中的磁通量子比特架构

D-Wave Systems 是首家商业化提供量子计算机的公司,其主要技术是基于超导磁通量子比特的量子退火⁴。D-Wave 的架构采用一种特定的磁通量子比特,即复合约瑟夫逊结(CCJJ)射频 SQUID 磁通量子比特¹⁸。选择这种特定的设计是因为其在量子退火背景下的稳定性和易于控制性。

在 D-Wave 的处理器中,磁通量子比特以网络形式互连,形成了特定的拓扑结构,如 Chimera 和 Pegasus¹³。这些拓扑结构定义了量子比特之间允许的相互作用,这会影晌某些优化问题能否被有效地嵌入到硬件上¹³。电压和磁场被用于控制磁通量子比特,并将伊辛模型的参数(偏置和耦合)编程到芯片上¹⁴。控制机制旨在操纵通过量子比特环路的磁通量,从而直接影响它们的量子态和相互作用。

D-Wave 系统中使用的典型退火计划包括逐渐改变横向场和问题哈密顿量¹⁴。此外,还提供了快速退火协议,用于探索相干量子退火区域¹⁴。D-Wave 对量子退火的实现为如何在实践中利用磁通量子比特提供了一个具体的例子。

6. 与其他用于量子退火的超导量子比特类型的比较

除了磁通量子比特,还有其他类型的超导量子比特,包括电荷量子比特(库珀对盒、透射子)、相位量子比特和通量子量子比特⁶。每种设计都有其自身的优点和缺点。

电荷量子比特对电荷噪声高度敏感,这可能导致快速退相干,使其不太适合某些量子退火方法中相对较长的退火时间⁶。虽然透射子通过降低电荷敏感性提高了相干性,但其设计可能不如磁通量子比特那样自然地适用于某些量子退火实现所需的直接磁通控制和强耦合⁶。相位量子比特基于约瑟夫逊结两端的相位差,与磁通量子比特相比,在量子退火中的应用较少⁶。

通量子量子比特是一种较新的磁通量子比特类型,由于其约瑟夫逊结被一个大电感分流,因此具有更长的相干时间⁷。D-Wave 最近探索了通量子量子比特,这表明它们可能在未来的量子退火技术中发挥作用¹⁶。

以下表格总结了不同超导量子比特类型(电荷、透射子、相位、磁通、通量子)在量子退火方面的关键特性:

特性	电荷量子比特 (含透射子)	相位量子比特	磁通量子比特	通量子量子比特
相干时间	早期较短,透射子有所改善	相对较短	早期较短,新型设计显著提高	较长

控制机制	栅极电压	电流偏置	磁通量	磁通量
耦合方式	电容耦合	电感耦合	电感耦合	电感耦合
可扩展性	良好	良好	已在商业化量子退火器中实现大规模扩展	有潜力
对噪声的敏感性	对电荷噪声高度敏感, 透射子有所改善	对临界电流噪声敏感	对磁通噪声敏感	对磁通噪声敏感性降低
在量子退火中的应用	早期研究, 透射子在其他领域应用广泛	应用较少	商业化量子退火器的主要选择	潜在的未来选择

7. 历史回顾: 磁通量子比特在量子退火中的发展

磁通量子比特最初由 Orlando 等人在 1999 年于麻省理工学院提出²⁰, 并很快被制造出来²⁰。早期的实验验证了其作为量子比特的潜力²⁰。量子退火的概念最早出现在 20 世纪 80 年代末, 并在 90 年代末形成了现在的形式⁴。

D-Wave Systems 在 2007 年展示了其首个量子退火处理器, 并在 2011 年发布了 D-Wave One, 该计算机使用了 128 个超导磁通量子比特⁴。D-Wave 的工作标志着磁通量子比特量子退火技术走向商业化的重要里程碑。用于量子退火器的磁通量子比特的设计随着时间的推移不断发展, 包括采用 CCJJ 结构和提高相干性¹⁸。目前, 研究工作仍在继续, 重点是提高磁通量子比特在量子退火应用中的相干性、可控性和可扩展性²⁸。

8. 挑战与未来方向

尽管磁通量子比特在量子退火中取得了显著的进展, 但仍存在一些挑战。提高相干时间仍然是关键, 更长的相干时间对于实现更复杂和更长的退火过程至关重要⁷。当前量子退火器中量子比特之间的连接性可能限制某些类型问题的有效嵌入¹³。识别和减轻各种影响磁通量子比特在量子退火器中性能的噪声源, 是持续努力的方向²⁸。对替代磁通量子比特设计(如通量子)的研究也在进行中, 这些设计可能为量子退火提供更好的相干性⁷。此外, 将量子退火与经典算法相结合以更有效地解决复杂的优化问题, 也引起了越来越多的关注³。

9. 结论

磁通量子比特之所以成为量子退火计算机的首选, 主要是因为其易于通过磁通量实现绝热哈密顿量控制、已证明可扩展至大量量子比特、操作速度适合退火计划, 以及相干性和鲁棒性方面的持续改进。D-Wave Systems 在基于磁通量子比特的量子退火技术的开创和商业化方面发挥了重要作用。虽然仍面临挑战, 但磁通量子比特设计和控制方面的持续研究和开发, 以及混合方法的探索, 预示着基于磁通量子比特的量子退火在解决复杂优化问题方面拥有光明的未来。

引用的著作

1. What Is Quantum Annealing? Revolutionize Problem-Solving - BlueQubit, 访问时间为 三月 14, 2025, <https://www.bluequbit.io/quantum-annealing>
2. Quantum Annealing: Paving the Path to Optimization in a Quantum ..., 访问时间为 三月 14, 2025, <https://medium.com/@learningmaterialcomputations/quantum-annealing-paving-the-path-to-optimization-in-a-quantum-world-bfb98c997054>
3. Quantum Annealing: Principles and Performance Analysis - AZoQuantum, 访问时间为 三月 14, 2025, <https://www.azoquantum.com/Article.aspx?ArticleID=421>
4. Quantum annealing - Wikipedia, 访问时间为 三月 14, 2025, https://en.wikipedia.org/wiki/Quantum_annealing
5. A Comprehensive Survey on Quantum Annealing: Applications, Challenges, and Future Research Directions - TechRxiv, 访问时间为 三月 14, 2025, <https://www.techrxiv.org/users/870156/articles/1256360-a-comprehensive-survey-on-quantum-annealing-applications-challenges-and-future-research-directions>
6. Superconducting quantum bits - Physics World, 访问时间为 三月 14, 2025, <https://physicsworld.com/a/superconducting-quantum-bits/>
7. Superconducting Quantum Computing: Breakthroughs & Insights - SpinQ, 访问时间为 三月 14, 2025, <https://www.spinquanta.com/news-detail/superconducting-quantum-computing-breakthroughs-in-sights20250211082724>
8. Superconducting quantum computing - Wikipedia, 访问时间为 三月 14, 2025, https://en.wikipedia.org/wiki/Superconducting_quantum_computing
9. quantum.microsoft.com, 访问时间为 三月 14, 2025, <https://quantum.microsoft.com/en-us/insights/education/concepts/types-of-qubits#:~:text=Superconducting%20qubits%20are%20the%20most.flux%20qubits%2C%20and%20phase%20qubits>
10. Microsoft Quantum | Types of qubits, 访问时间为 三月 14, 2025, <https://quantum.microsoft.com/en-us/insights/education/concepts/types-of-qubits>
11. Quantum Computing Paradigms and Architectures: Superconducting Qubits 101, 访问时间为 三月 14, 2025, <https://postquantum.com/quantum-computing-architectures/superconducting-qubits-101/>
12. What Are Superconducting Qubits? Quantum Engineer Explained - SpinQ, 访问时间为 三月 14, 2025, <https://www.spinquanta.com/newsDetail/0d021ca6-b3f2-4e8a-bd00-e8b9e434b010>
13. Quantum Computing Paradigms and Architectures: Quantum Annealing (QA) 101, 访问时间为 三月 14, 2025, <https://postquantum.com/quantum-computing-architectures/quantum-annealing-101/>
14. Annealing Implementation and Controls - D-Wave System Documentation, 访问时间为 三月 14, 2025, https://docs.dwavesys.com/docs/latest/c_qpu_annealing.html
15. What is Quantum Annealing? - D-Wave System Documentation, 访问时间为 三月 14, 2025, https://docs.dwavesys.com/docs/latest/c_gs_2.html
16. Fabricating qubits for D-Wave Quantum, 访问时间为 三月 14, 2025, <https://qmi.ubc.ca/fabricating-qubits-for-d-wave-quantum/>
17. D-Wave Systems - Wikipedia, 访问时间为 三月 14, 2025, https://en.wikipedia.org/wiki/D-Wave_Systems
18. Introduction To The Physics Of D-Wave and Comparison To Gate Model, 访问时间为 三月 14, 2025, <https://arcb.csc.ncsu.edu/~mueller/qc/qc18/readings/gottlieb2.pdf>
19. Flux-Qubits: Principles, Applications, and Future Prospects - YouTube, 访问时间为 三月 14,

- 2025, <https://www.youtube.com/watch?v=xibKZVuyWSU>
20. Flux qubit - Wikipedia, 访问时间为 三月 14, 2025, https://en.wikipedia.org/wiki/Flux_qubit
21. A Brief History of Superconducting Quantum Computing | Steven Girvin - YouTube, 访问时间为 三月 14, 2025, <https://www.youtube.com/watch?v=xjGL4Mvg7A>
22. Fast, Lifetime-Preserving Readout for High-Coherence Quantum Annealers, 访问时间为 三月 14, 2025, <https://link.aps.org/doi/10.1103/PRXQuantum.1.020314>
23. Adiabatic Quantum Computing and Quantum Annealing | Oxford Research Encyclopedia of Physics, 访问时间为 三月 14, 2025, <https://oxfordre.com/physics/display/10.1093/acrefore/9780190871994.001.0001/acrefore-9780190871994-e-32?p=emailAWJ3Fb1Lrs1kQ&d=/10.1093/acrefore/9780190871994.001.0001/acrefore-9780190871994-e-32>
24. Adiabatic quantum computation with flux qubits, first experimental results. - arXiv, 访问时间为 三月 14, 2025, <https://arxiv.org/pdf/cond-mat/0702580>
25. (PDF) Adiabatic Quantum Computation With Flux Qubits, First Experimental Results, 访问时间为 三月 14, 2025, https://www.researchgate.net/publication/3313415_Adiabatic_Quantum_Computation_With_Flux_Qubits_First_Experimental_Results
26. Universal quantum computation using quantum annealing with the transverse-field Ising Hamiltonian - arXiv, 访问时间为 三月 14, 2025, <https://arxiv.org/html/2402.19114v1>
27. Scalable interconnection using a superconducting flux qubit - PMC, 访问时间为 三月 14, 2025, <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC11252359/>
28. Superconducting qubits for quantum annealing applications - UCL Discovery, 访问时间为 三月 14, 2025, https://discovery.ucl.ac.uk/10158645/2/Gioele_PhD_Thesis.pdf
29. Quantum adiabatic theorem for unbounded Hamiltonians with a cutoff and its application to superconducting circuits, 访问时间为 三月 14, 2025, <https://par.nsf.gov/servlets/purl/10473403>
30. Adiabatic Quantum Simulation of Quantum Chemistry - PMC, 访问时间为 三月 14, 2025, <https://pmc.ncbi.nlm.nih.gov/articles/PMC4194464/>
31. Quantum Annealing Explained - NOREA, 访问时间为 三月 14, 2025, <https://www.norea.nl/uploads/bfile/b2f8c1cd-f550-427e-90ac-535ee9e79af8>
32. link.aps.org, 访问时间为 三月 14, 2025, <https://link.aps.org/accepted/10.1103/PhysRevApplied.8.014004>
33. Experimenting with D-Wave quantum annealers on prime factorization problems - Frontiers, 访问时间为 三月 14, 2025, <https://www.frontiersin.org/journals/computer-science/articles/10.3389/fcomp.2024.1335369/full>
34. [2001.09844] Quantum annealing with capacitive-shunted flux qubits - arXiv, 访问时间为 三月 14, 2025, <https://arxiv.org/abs/2001.09844>
35. [1701.06544] Coherent coupled qubits for quantum annealing - arXiv, 访问时间为 三月 14, 2025, <https://arxiv.org/abs/1701.06544>
36. arXiv:2307.13961v1 [quant-ph] 26 Jul 2023, 访问时间为 三月 14, 2025, <https://arxiv.org/pdf/2307.13961>
37. Decoherence Time vs Annealing Time - D-Wave Quantum Inc, 访问时间为 三月 14, 2025, <https://support.dwavesys.com/hc/en-us/community/posts/360028945913-Decoherence-Time-vs-Annealing-Time>
38. The Flux Qubit Revisited to Enhance Coherence and Reproducibility - arXiv, 访问时间为 三月 14, 2025, <https://arxiv.org/pdf/1508.06299>
39. Superconducting flux qubits for high-connectivity quantum annealing without lossy dielectrics - eScholarship, 访问时间为 三月 14, 2025, <https://escholarship.org/uc/item/9844c3h3>

40. Coherent flux qubits for quantum annealing (Theory) - NASA ADS, 访问时间为 三月 14, 2025, <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2023APS..MARS70011L/abstract>
41. Coherent flux qubits for quantum annealing (12 April 2024), 访问时间为 三月 14, 2025, <https://indico.ifae.es/event/1938/>
42. Fast Anneals and Coherent Quantum Annealing - D-Wave Systems, 访问时间为 三月 14, 2025, https://www.dwavesys.com/media/x3blg5bk/14-1074a-a_fast_anneals_and_coherent_quantum_annealing.pdf
43. [1906.07024] Real-time simulation of flux qubits used for quantum annealing - arXiv, 访问时间为 三月 14, 2025, <https://arxiv.org/abs/1906.07024>
44. Scientific Publications | D-Wave, 访问时间为 三月 14, 2025, <https://www.dwavesys.com/learn/publications/?items=all&thirdParty=0>
45. Comparison Between Different Qubit Designs for Quantum Computing - AWS, 访问时间为 三月 14, 2025, https://terra-docs.s3.us-east-2.amazonaws.com/IJHSR/Articles/volume6-issue8/IJHSR_2024_6_8_52.pdf
46. Fast control methods enable record-setting fidelity in superconducting qubit | MIT News, 访问时间为 三月 14, 2025, <https://news.mit.edu/2025/fast-control-methods-enable-record-setting-fidelity-superconducting-qubit-0114>
47. D-Wave Demonstrates State-of-the-Art Coherence Results with Fluxonium Qubits, 访问时间为 三月 14, 2025, <https://www.dwavesys.com/company/newsroom/press-release/d-wave-demonstrates-state-of-the-art-coherence-results-with-fluxonium-qubits/>
48. D-Wave Demonstrates Coherence Results with Fluxonium Qubits - HPCwire, 访问时间为 三月 14, 2025, <https://www.hpcwire.com/off-the-wire/d-wave-demonstrates-state-of-the-art-coherence-results-with-fluxonium-qubits/>
49. en.wikipedia.org, 访问时间为 三月 14, 2025, https://en.wikipedia.org/wiki/Flux_qubit#:~:text=The%20flux%20qubit%20was%20first,external%20magnetic%20flux%20is%20applied.
50. Materials Origins of Decoherence in Superconducting Qubits - University of Wisconsin–Madison, 访问时间为 三月 14, 2025, <https://mcdermottgroup.physics.wisc.edu/pdfs/21.pdf>
51. Low-decoherence flux qubit | Phys. Rev. B - Physical Review Link Manager, 访问时间为 三月 14, 2025, <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevB.75.140515>
52. Decoherence of a tunable capacitively shunted flux qubit - Inspire HEP, 访问时间为 三月 14, 2025, <https://inspirehep.net/literature/2681757>
53. Conditions for superdecoherence - Quantum Journal, 访问时间为 三月 14, 2025, <https://quantum-journal.org/papers/q-2020-05-14-265/>
54. Flux qubits in a planar circuit quantum electrodynamics architecture: Quantum control and decoherence | Phys. Rev. B - Physical Review Link Manager, 访问时间为 三月 14, 2025, <https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevB.93.104518>
55. [PDF] Decoherence of flux qubits due to $1/f$ flux noise. - Semantic Scholar, 访问时间为 三月 14, 2025, <https://www.semanticscholar.org/paper/Decoherence-of-flux-qubits-due-to-1%2Ff-flux-noise.-Yoshihara-Harrabi/c77b5ba2a273d41b7d89b1ed5102b41fe9139da9>