

面向超导量子芯片的自动化测控系统设计 与实现

范智强, 王卫龙, 岳峰, 王立新, 杨梦迪
信息工程大学, 河南 郑州 450001

摘要:随着量子比特规模的扩大,人工标定量子比特成本巨大且效率低下,因此量子测控的自动化工作势在必行。针对此问题,构建一个自动化量子测控的系统框架,包括测控实验、数据处理和决策判断等3个模块,以及测控实验库、数据处理函数库、测控经验库和测控数据库等4个数据库,并基于此完成单比特性质的自动化标定。对24个量子比特进行读取门和单比特门的标定,总共耗时2.7h,平均每比特耗时6.75min,效果上达到了平均单比特门保真度99.28%、读取保真度78.6%的水平。

关键词:量子计算;量子测控;量子门表征;自动化;量子测控系统

Design and Implementation of an Automated Measurement and Control System for Superconducting Quantum Chips

Fan Zhiqiang, Wang Weilong, Yue Feng, Wang Lixin, Yang Mengdi
Information Engineering University, Zhengzhou 450001, Henan Province China

Abstract As the scale of quantum bits expands, manual calibration of quantum bits becomes costly and inefficient. Therefore, the automation of quantum measurement and control is imperative. A framework for automated quantum measurement and control is constructed in this work, including 3 modules such as measurement and control experiment, data processing and decision judgment, and 4 databases such as measurement and control experiment library, data processing function library, measurement and control experience library and measurement and control database. The automated calibration of single-qubit properties is completed based on this framework. The calibration of readout gates and single-qubit gates for 24 quantum bits is accomplished in a total of 2.7 h, averaging 6.75 min per qubit. An average single-qubit gate fidelity of 99.28% and a readout fidelity of 78.6% is achieved.

keyword quantum computing; quantum measurement and control; quantum gate characterization; automation; quantum measurement and control system

1 引言

超导量子计算是当前实现量子计算最主流的技术路线之一,其中量子比特数目及性质是评价超导量子计算性能的重要指标。2023年12月4日,美国IBM公司发布的Condor^[1]超导量子处理器是当前规模最大的超导量子处理器,包含1121个量子比特;另一款Heron^[2]处理器采用固定频率加可调耦合

器的架构,拥有133个量子比特,是当前

性能最好的超导量子处理器。即使如此,当前超导量子芯片的比特规模仍然相对较小,远未达到实际应用所需的规模。随着未来比特数目的不断扩展,依赖人工的调试变得越来越不可取。因此,自动化标定技术的发展将是推动超导量子计算发展的必要条件,这项技术可以有效推动超导量子计算在实际应

用中发挥作用。

自动化量子测控将自动化技术和量子技术相结合,实现对超导量子芯片的精确测量和控制,核心技术包括智能化控制算法、量子误差校正技术^[3-4]、量子机器学习^[5]和优化算法^[6-7]的应用、自动化测量技术的研发等。这些技术的发展将推动超导量子计算系统实现更智能化、高效化的量子门操作、测量和控制,从而提高量子计算系统的稳定性和准确性。目前,自动化量子测控发展仍受许多因素的制约,如量子芯片和量子测控硬件的不完美性,并且还受到热噪声^[8]、振动噪声、光子噪声^[9]等系统误差和不稳定因素的影响。此外,量子系统的高维度、量子纠缠和量子噪声增加了量子控制和测量的复杂性,从而对自动化测控的算法和软件提出了更高的要求。由于量子系统的复杂性和不确定性,结果的验证和解释需要面对诸如误差分析、模型验证、实验重复性等方面的困难。

自动化测控的发展可以划分为不同阶段:流程贯通阶段、效果优化阶段、彻底代替人工测控阶段、超越人工阶段。当前自动化量子测控的发展总体正处于第1与第2阶段。文献^[10]利用最优脉冲工程算法对金刚石中电子自旋量子操作进行闭环迭代校正,在min的时间尺度上实现了高达98%的自旋布居数反转的自主校准保真度,在h的时间尺度上实现了高达 $0.98(\pm 2\%)$ 的单量子比特 $\pi/2$ 旋转的自主校准保真度。文献^[11]提出一种基于深度强化学习的超导电路自动校准方法,使用深度确定性策略梯度技术,实现了最高92%的平均保真度。在设备厂商和开源测控系统方面,本源量子^[12]宣称支持超导量子芯片的自动化测试功能和校准功能。QubiC^[13-14]称实现了自动化量子比特性质表征,构建门优化协议,在劳伦斯伯克利国家实验室的transmon类型的量子比特上取得较高的保真度,单比特和两比特Clifford门失真度分别为 $4.9(1.1) \times 10^{-4}$ 和 $1.4(3) \times 10^{-2}$ 。

根据量子测控的物理逻辑,构建一个自动化测控的框架,包括测控实验、数据处理和判断决策等3个模块,以及根据实际需要构建的测控实验库、数据处理函数库、测控经验库和测控数据库等4个库。基于此自动化测控框架,构建面向固定频率—可调耦合超导量子芯片的自动化校准程序。在同时对24个

量子比特的校准中,耗时总计2.7h,提升10.5个百分点的平均读取保真度和5.58个百分点的单比特平均保真度,分别达到78.6%和99.28%的水平。

2 量子测控自动化系统设计

自动化测控系统分为测控实验、数据处理、决策判断等3个部分,如图1所示。整个自动化测控系统通过这3个部分的协同配合,实现对量子芯片的全方位表征、监测、控制和管理。自动化量子测控系统实现的关键在于构建4个库:测控实验库、数据处理函数库、测控经验库和测控结果数据库。

2.1 测控实验库

测控实验库是自动化量子测控系统中的一个重要组成部分,用于存储各种实验方案和参数设置。这些实验方案包括不同的量子态制备方法、量子比特之间的相互作用方式、测量方案等。实验库中存储的信息可以帮助系统在进行实验时快速选择合适的实验方案,从而提高实验的效率和准确性。测控实验库的结构和示例如表1所示。

2.2 数据处理函数库

数据处理函数库包含了各种用于处理实验数据的算法和工具。这些函数可以包括数据滤波、噪声校正、数据拟合、特征提取等。通过使用数据处理函数库中的算法,系统可以对实验采集到的数据进行有效处理,从而提取出有用的信息并准确地进行数据分析。

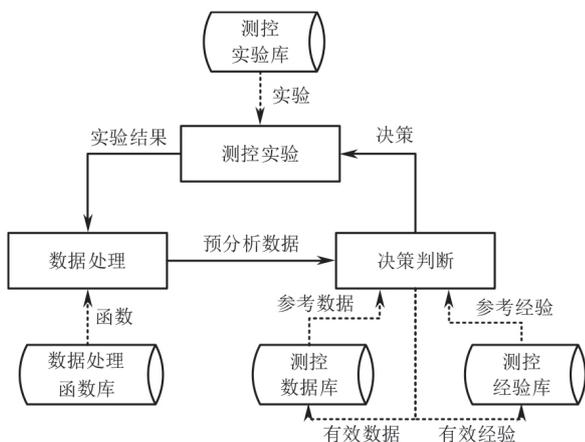
波形寻峰是一种常用的信号分析方法,用于识别信号中的峰值或极值点。该方法通常通过计算信号的一阶导数或二阶导数来寻找信号的极值点,然后根据设定的阈值或其他条件来确定峰值点。在量子测控中,寻找谐振腔频率、量子比特驱动频率等参数采用的就是波形寻峰的方法。

波形拟合是一种利用数学模型来描述信号波形的方法。通过选择合适的数学函数模型,可以对信号波形进行拟合,并得到模型参数。常用的波形拟合方法包括最小二乘拟合、非线性拟合和号重构和信号特征提取等应用,在量子测控中主多项式拟合等。波形拟合可以用于信号去噪、信要用于Rabi振荡、能量弛豫、相位弛豫等实验。

聚类分析是一种将数据集分为不同类别的方法,用于发现数据集中的内在结构和模式。在信号分析中,聚类分析可以用于将信号波形划分为不同的类别或群组,从而识别信号中的不同特征和模式。常用的聚类分析方法包括K均值聚类^[15]、层次聚类^[16]和密度聚类^[17]等。聚类分析可以帮助识别信号中的异常点、趋势和周期性等特征,在量子测控中主要用于分析SingleShot实验。

2.3 测控经验库

测控经验库中存储了量子测控领域测控的经验知识和规则,它们不仅可以来源于已有的文献和研究成果,还可以来自于实际工程师在量子测控系统设计、操作和维护过程中积累的宝贵经验。工程师在实际工作中所获得的经验



知识和解决问题的技巧，经过整理和归纳后可以成为测控经验库中的重要内容，为自动化量子测控系统提供实用的指导和建设。测控经验库不仅可以融合学术界的最新研究成果，还可以结合实际应用场景中的经验，为系统的智能化和实用性提供更全面的支持。测控经验库结构和示例如表2所示。

2.4 测控数据库 测控结果数据库用于存储实验过程中获得的

各种数据和结果。数据中包括量子比特数据、量子门数据和历史数据等，它们记录了量子计算实验中的关键信息和结果。测控结果数据库的建立可以帮助系统对实验过程进行追溯和分析，从而为后续的实验设计和优化提供参考。

量子比特数据指的是对量子比特的状态进行描述和记录的数据。在自动化量子测控系统中，量子比特数据可以包括量子比特的初始状态、演化过程中的状态变化、以及最终的测量结果等。这些数据对于量子计算实验的设计、执行和分析

非常重要，可以帮助研究人员了解量子比特的状态演化情况，评估量子门操作的效果，以及进行量子算法的验证。

量子门数据记录量子门操作相关信息，包括单比特门、双比特门和测量门等。单比特门用于对单个量子比特进行操作，例如X门、Y门、Z门等；双比特门用于实现两个量子比特之间的相互作用，例如受控非门(Controlled-NOT Gate, CNOT门)、交换门(SWAP Gate, SWAP门)等；测量门用于对量子比特进行测量，获取量子比特的状态信息。量子门数据记录的信息为量子计算实验提供关键的操作指导和结果分析。测控数据库表3所示。

3 自动化校准程序实现

3.1 测控实验模块 测控实验模块是本程序设计的核心部分，主要包括内容如下。

1) 腔频谱扫描是用于研究量子比特与谐振腔

相互作用的实验方法。通过扫描微波信号的频率，观察谐振腔中的光子共振吸收，从而得到腔的频谱特性，包括腔的谐振频率、带宽和色散等。

2) 量子比特频谱扫描是用于研究量子比特的能级结构和频率特性的实验方法。通过调节微波信号的频率，观察量子比特的能级跃迁和共振吸收，从而得到量子比特的频谱特性。

3) Rabi 振荡^[18]是用于研究量子比特与外加微波场相互作用的实验方法。通过施加微波脉冲，观察量子比特的能级跃迁和 Rabi 振荡现象，从而得到量子比特与微波场相互作用的强度和频率特性。

4) 能量弛豫是用于研究量子比特的能量弛豫时间(寿命)的实验方法。通过对量子比特施加激发脉冲，观察其能级的自发衰减过程，可以得到量子比特的能级寿命和弛豫时间。

5) 相位弛豫是用于研究量子比特的相位稳定性和相位弛豫

时间的实验方法。通过对量子比特施加相位激发脉冲，观察其相位的演化过程，可以得到量子比特的相位弛豫时间和相位稳定性。

6) SingleShot^[19]是用于测量单个量子比特的态区分依据的实验方法。通过测量得到量子比特处于不同状态时的信息，利用聚类的方法分析不同状态的特征信息，从而得到单个量子比特态区分的依据。

7) 单比特门 RB^[20]是用于研究单比特量子门操作的性能和稳定性的实验方法。通过施加一系列单比特门操作，观察量子比特的状态演化，从而得到单比特门操作的保真度和误差率等性能指标。

8) DRAG^[21]是一种用于减少超导量子比特中泄漏误差的技术。它通过在量子比特的驱动脉冲中添加额外的调制信号来实现。这种额外的调制信号被设计为与主要的驱动信号有一定的相位差，以抵消驱动信号导致的非共振跃迁，从而减少泄漏误差。DRAG技术的应用可以提高量子门操作的准确性和保真度，是量子计算中重要的误差校正技术之一。

3.2 数据处理模块 本系统主要用到的信号分析手段包括波形寻峰、波形拟合和聚类分析。

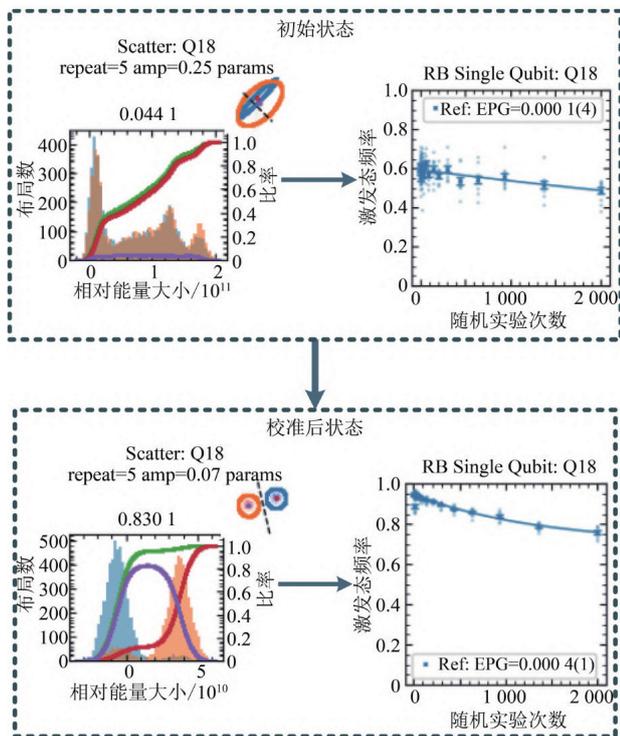
判断决策模块在自动化测控中，判断决策模块的任务是基于数据处理模块产生的特征信息，对当前的量子系统状态进行判断，并根据判断结果制定下一步的操作策略。该模块的功能在量子比特性质表征中尤为重要。例如，在量子比特频谱扫描实验中，判断决策模块可以根据量子比特的能级跃迁特征，判断当前量子比特的能级结构和频率特性，从而决定下一步的实验步骤和实验参数设置。在 Rabi 振荡实验中，判断决策模块可以根据 Rabi 振荡的频率和幅度特征，判断量子比特与外加微波场的相互作用强度，进而决定下一步的 Pi 脉冲参数设置。

判断决策模块通常会结合预先设定的决策规则或者算法，对数据处理模块提供的特征信息进行分析和判断。这些决策规则或算法可以基于测控经验、统计学方法、机器学习等技术，以实现系统状态的准确判断和合理决策。在量子比特性质表征中，由于量子系统的复杂性和噪声干扰的存在，判断决策模块的设计和优化对于实验结果的准确性和稳定性至关重要。

4 实验效果

自动化量子测控系统采用定频—可调耦合的芯片结构，对24个量子比特进行一系列实验。单比特校准过程示例如图3所示。这些实验包括腔频谱、量子比特频谱、TimeRabi、PowerRabi、DRAG、SingleShot以及单比特RB实验。通过这些实验，系统对单比特和测量门进行了表征，并采用波形寻峰、波形拟合和聚类分析等数据处理函数进行实验数据的处理。

在判断决策方面，系统基于测控经验构建了判断决策流程，通过分析和处理实验数据，以及结合测控经验，对实验参数进



行调整和优化，以提高实验结果的准确性和稳定性。最终，该系统实现较好的自动校准性能。采用 33 个实验序列，耗时 2.7 h 完成对 24 个量子比特的自动校准，平均单比特自动校准花费 6.75 min。读取区分度分析、读取保真度分析、单比特门保真度分析如图 4~ 图 6 所示。校准前读取区分度平均 36.1%、最大 76.4%，校准后区分度平均 57.1%、最大 88.1%，平均提升 21 个百分点、最大提升 78.8 个百分点；校准前读取保真度平均 68.1%、最大 88.2%，校准后读取保真度平均 78.6%、最大 94.1%，平均提升 10.5 个百分点、最大提升 89.4 个百分点，自动校准成功率达到 66.67%。校准前平均单比特门保真度 93.7%，校准后平均单比特门保真度 99.28%，平均提升 5.58 个百分点、最大提升 39.93 百分点，自动校准成功率达到 66.67%。

5 结束语

本系统实现了一定规模量子比特的自动化高效操作和测量，保真度和效率较人工标定有可观的提升，为量子信息处理和量子计算的实验研究提供了重要的支持。接下来，可以通过以下几种方式来优化和改进自动化测控系统。首先，引入更先进的数据分析技术，例如增强学习算法和深度学习模型等，以提高系统对复杂数据的处理能力和分析精度。其次，扩展系统功能，使其能够自动进行单双比特门的标定。最后，提升判断决策的智能化水平，以提高系统状态的识别能力和决策准确性，例如可以探索引入强化学习算法来实现系统的自主决策和优化，以提高系统的智能化水平和自适应能力。未来的自动化

量子测控技术将更加智能化、高效化，这需要量子物理、自动化控制、计算机科学等多个学科领域的合作，共同推动自动化量子测控技术的发展。

参考文献：

- [1] GAMBETTA J. The hardware and software for the era of quantum utility is here[EB/OL].[2024-01-16]. <https://research.ibm.com/blog/quantum-roadmap-2033>.
- [2] CHOI C Q. IBM's quantum leap:the company will take quantum tech past the 1000-qubit mark in 2023[J]. IEEE Spectrum, 2023, 60(1):46-47.
- [3] CHIAVERINI J, LEIBFRIED D, SCHAETZ T, et al. Realization of quantum error correction[J]. Nature, 2004, 432(7017):602-605.
- [4] GEORGESCU I. 25 years of quantum error correction[J]. Nature Reviews Physics, 2020, 2(10):519-519.
- [5] ALLCOCK J, ZHANG S Y. Quantum machine learning [J]. National Science Review, 2019, 6(1):26-28.
- [6] GIANNELLI L, SGROI P, BROWN J, et al. A tutorial on optimal control and reinforcement learning methods for quantum technologies[J]. Physics Letters A, 2022, 434: 128054.
- [7] VINTER R. Optimal Control[M]. Boston, USA: Birkhäuser, 2010.
- [8] SAULSON P R. Thermal noise in mechanical experiments[J]. Physical Review D, 1990, 42(8):2437-2445.
- [9] BERTET P, CHIORESCU I, BURKARD G, et al. Dephasing of a superconducting qubit induced by photon noise[J]. Physical Review Letters, 2005, 95(25):257002. [10] FRANK F, UNDEN T, ZOLLER J, et al. Autonomous calibration of single spin qubit operations[J]. npj Quantum Information, 2017, 3(1):48.
- [11] BAUTISTA M G, YAO Z J, BUTKO A, et al. Towards automated superconducting circuit calibration using deep reinforcement learning[C] // Proceedings of 2021 IEEE Computer Society Annual Symposium on VLSI. Tampa, USA: IEEE, 2021:462-467.
- [12] 本源量子. 超导量子芯片测试表征系统解决方案[EB/OL].[2024-01-11]. <https://originqc.com.cn/product/zh/solution/system/0>.
- [13] XU Y L, HUANG G, BALEWSKI J, et al. Automatic qubit characterization and gate optimization with qucib[J]. ACM Transactions on Quantum Computing, 2022, 4(1):3.
- [14] XU Y L, HUANG G, FRUITWALAN, et al. QubiC2.0: an extensible open-source qubit control system capable of mid-circuit measurement and feed-forward[DB/OL].[2023-09-19][2024-01-16]. <https://arxiv.org/abs/2309.10333>.
- [15] SINAGA K P, YANG M S. Unsupervised K-means clustering algorithm[J]. IEEE Access, 2020, 8:80716-80727. [16] MURTAGH F, CONTRERAS P. Algorithms for hierarchical clustering: an overview[J]. WIREs Data Mining and Knowledge Discovery, 2012, 2(1):86-97. [17] BHATTACHARJEE P, MITRA P. A survey of density based clustering algorithms[J]. Frontiers of Computer Science, 2020, 15(1):151308.
- [18] MARTINIS J M, NAM S, AUMENTADO J, et al. Rabi oscillations in a large Josephson-junction qubit[J]. Physical Review Letters, 2002, 89(11):117901. [19] WALTER T, KURPIERS P, GASPARINETTI S, et al. Rapid high-fidelity single-shot dispersive readout of superconducting Qubits[J]. Physical review applied, 2017, 7:054020.
- [20] KNILL E, LEIBFRIED D, REICHLER R, et al. Randomized benchmarking of quantum gates[J]. Physical Review A, 2008, 77(1):012307.
- [21] 王腾辉. 超导量子比特与绝热快速捷径在量子模拟和量子门中的应用[D]. 杭州: 浙江大学, 2018.