

Practical Methods for Efficient Analytical Control in Superconducting Qubits

Inaugural-Dissertation

zur

Erlangung des Doktorgrades

der Mathematisch-Naturwissenschaftlichen Fakultät

der Universität zu Köln

vorgelegt von

Boxi Li

geboren in Jiangsu, China

October 2024

Supervisors:

Prof. Dr. Tommaso Calarco

Prof. Dr. Felix Motzoi

Examination committee:

Prof. Dr. Tommaso Calarco

Prof. Dr. Rami Barends

Prof. Dr. Felix Motzoi

Prof. Dr. Erwann Bocquillon



UNIVERSITÄT
ZU KÖLN

Abstract

Quantum technology is at the forefront of revolutionizing information processing by exploiting the principles of quantum mechanics to perform operations infeasible for its classical counterparts. As this field shifts from pure scientific exploration to practical application, developing advanced quantum control techniques becomes critical for precise and reliable quantum system manipulation. This thesis focuses on analytical quantum control techniques to enhance the performance of superconducting qubits, a leading architecture in quantum information processing. Due to their simplicity and efficiency, the model-based analytical methods discussed are particularly advantageous for experimental integration.

The thesis covers three aspects of quantum control: system modelling, control scheme design, and performance benchmarking. It starts by discussing the efficient modelling of quantum systems, aiming to reduce the dimension of the model while keeping the essential features of the dynamics. Here, to build more accurate and efficient models, the traditional perturbative approach is generalized by adopting the recursive structure and the exact diagonalization of a two-by-two matrix via Givens rotation. Building upon these modelling methods, the thesis addresses the dynamic control errors in quantum operations, including leakage, crosstalk, and other control errors in superconducting qubits. Based on the Derivative Removal by Adiabatic Gate (DRAG) framework, several applications are studied for two-qubit gates, multi-level qudit, and inter-qubit crosstalk. The key insight is to use the recursive formulation, which allows the integration of multiple DRAG corrections to address different errors simultaneously while maintaining simplicity and practicality for experimental calibration. Lastly, to validate the performance of control methods, the thesis introduces a new simulation tool for quantum circuits at the pulse level, based on the widely used software package Quantum Toolbox in Python (QuTiP). This tool incorporates realistic control errors and dissipation, aiding in the design, testing, and practical implementation of quantum control strategies in real-world settings.

Zusammenfassung

Die Quantentechnologie steht an vorderster Front der Revolutionierung der Informationsverarbeitung, indem sie die Prinzipien der Quantenmechanik nutzt, um Operationen auszuführen, die für klassische Systeme nicht realisierbar sind. Da sich dieses Forschungsgebiet zunehmend von der reinen wissenschaftlichen Untersuchung hin zu praktischen Anwendungen entwickelt, wird die Entwicklung fortschrittlicher Quantenkontrolltechniken entscheidend für die präzise und zuverlässige Manipulation von Quantensystemen. Diese Dissertation konzentriert sich auf analytische Quantenkontrollmethoden zur Leistungssteigerung supraleitender Qubits, einer führenden Architektur in der Quanteninformationsverarbeitung. Aufgrund ihrer Einfachheit und Effizienz sind die hier diskutierten modellbasierten analytischen Methoden besonders vorteilhaft für die experimentelle Implementierung.

Die Arbeit behandelt drei zentrale Aspekte der Quantenkontrolle: Systemmodellierung, Entwurf von Kontrollschemas und Leistungsbewertung. Zunächst wird die effiziente Modellierung von Quantensystemen untersucht, mit dem Ziel, die Modellkomplexität zu reduzieren, ohne wesentliche Merkmale der Dynamik zu vernachlässigen. Hierbei wird der traditionelle Störungsansatz durch eine rekursive Struktur und die exakte Diagonalisierung einer 2×2 -Matrix mittels Givens-Rotation verallgemeinert, um genauere und effizientere Modelle zu entwickeln. Aufbauend auf diesen Modellierungsmethoden werden dynamische Kontrollfehler bei Quantenoperationen betrachtet, darunter Leakage, Crosstalk und weitere Steuerungsfehler in supraleitenden Qubits. Basierend auf dem Derivative Removal by Adiabatic Gate (DRAG)-Ansatz werden verschiedene Anwendungen für Zwei-Qubit-Gatter, mehrstufige Qudits und Inter-Qubit-Crosstalk untersucht. Ein zentraler Aspekt ist die Nutzung der rekursiven Formulierung, die es ermöglicht, mehrere DRAG-Korrekturen zu kombinieren, um unterschiedliche Fehler gleichzeitig zu adressieren, während die Einfachheit und praktische Umsetzbarkeit für die experimentelle Kalibrierung erhalten bleiben. Schließlich wird zur Validierung der Kontrollmethoden ein neues Simulationstool für Quantenschaltkreise auf Pulsniveau vorgestellt, das auf dem weit verbreiteten Softwarepaket Quantum Toolbox

in Python (QuTiP) basiert. Dieses Tool integriert realistische Steuerungsfehler und Dissipation und unterstützt damit das Design, die Evaluierung und die praktische Implementierung von Quantenkontrollstrategien in realen Anwendungen.