
caption



中国科学院大学
University of Chinese Academy of Sciences

硕士学位论文

基于TDD的量子模型检测中的可达性分析

作者姓名：高丁超

指导教师：应圣钢 副研究员 中国科学院软件研究所

学位类别：理学硕士

学科专业：计算机科学与技术

培养单位：中国科学院软件研究所

2024 年 6 月

LaTeX Thesis Template of UCAS

**A thesis submitted to
University of Chinese Academy of Sciences
in partial fulfillment of the requirement
for the degree of
Master of Philosophy
in Computer Applied Technology**

By

Author Name

Supervisor: Professor LI Si

Institute of xxx, Chinese Academy of Sciences

June, 2024

中国科学院大学 学位论文原创性声明

本人郑重声明：所呈交的学位论文是本人在导师的指导下独立进行研究工作所取得的成果。承诺除文中已经注明引用的内容外，本论文不包含任何其他个人或集体享有著作权的研究成果，未在以往任何学位申请中全部或部分提交。对本论文所涉及的研究工作做出贡献的其他个人或集体，均已在文中以明确方式标明或致谢。本人完全意识到本声明的法律结果由本人承担。

作者签名：

日 期：

中国科学院大学 学位论文授权使用声明

本人完全了解并同意遵守中国科学院大学有关收集、保存和使用学位论文的规定，即中国科学院大学有权按照学术研究公开原则和保护知识产权的原则，保留并向国家指定或中国科学院指定机构送交学位论文的电子版和印刷版文件，且电子版与印刷版内容应完全相同，允许该论文被检索、查阅和借阅，公布本学位论文的全部或部分内容，可以采用扫描、影印、缩印等复制手段以及其他法律许可的方式保存、汇编本学位论文。

涉密及延迟公开的学位论文在解密或延迟期后适用本声明。

作者签名：

日 期：

导师签名：

日 期：

摘 要

中文摘要、英文摘要、目录、论文正文、参考文献、附录、致谢、攻读学位期间发表的学术论文与其他相关学术成果等均须由另页右页（奇数页）开始。

关键词： 中国科学院大学，学位论文，模板

Abstract

Chinese abstracts, English abstracts, table of contents, the main contents, references, appendix, acknowledgments, author's resume and academic papers published during the degree study and other relevant academic achievements must start with another right page (odd-numbered page).

Key Words: University of Chinese Academy of Sciences, Thesis, LaTeX Template

目 录

图目录

表目录

符号列表

字符

Symbol	Description	Unit
R	the gas constant	$\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$
C_v	specific heat capacity at constant volume	$\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$
C_p	specific heat capacity at constant pressure	$\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2} \cdot \text{K}^{-1}$
E	specific total energy	$\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$
e	specific internal energy	$\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$
h_T	specific total enthalpy	$\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$
h	specific enthalpy	$\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-2}$
k	thermal conductivity	$\text{kg} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-3} \cdot \text{K}^{-1}$
S_{ij}	deviatoric stress tensor	$\text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-2}$
τ_{ij}	viscous stress tensor	$\text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-2}$
δ_{ij}	Kronecker tensor	1
I_{ij}	identity tensor	1

算子

Symbol	Description
Δ	difference
∇	gradient operator
δ^\pm	upwind-biased interpolation scheme

缩写

CFD	Computational Fluid Dynamics
CFL	Courant-Friedrichs-Lewy
EOS	Equation of State
JWL	Jones-Wilkins-Lee
WENO	Weighted Essentially Non-oscillatory
ZND	Zel'dovich-von Neumann-Doering

第1章 绪论

1.1 背景

2022年修订的《中国科学院大学研究生学位论文撰写规范和指导意见》（以下简称《指导意见》）从2023年冬季批次开始实施。为方便各位同学使用，特提供此模板。

您在使用此模板进行学位论文撰写时，只需根据《指导意见》在相应章节填写具体内容即可。

本模板在第2章提供了本模板的使用说明，在第3章中提供了《指导意见》中关于内容和格式的部分要求，请仔细阅读。

1.2 系统要求

`ucasthesis` 宏包可以在目前主流的 [LaTeX](#) 编译系统中使用，如 [TeXLive](#) 和 [MiKTeX](#)。因CTex套装已停止维护，**不再建议使用**（请勿混淆CTex套装与`ctex`宏包。CTex套装是集成了许多LaTeX组件的LaTeX编译系统。`ctex`宏包如同`ucasthesis`，是LaTeX命令集，其维护状态活跃，并被主流的LaTeX编译系统默认集成，是几乎所有LaTeX中文文档的核心架构）。推荐的 [LaTeX编译系统](#) 和 [LaTeX文本编辑器](#) 为LaTeX编译系统见表~??。请从各软件官网下载安装程序，勿使用不明程序源。LaTeX编译系统和LaTeX编辑器分别安装成功后，即完成了LaTeX的系统配置，无需其他手动干预和配置。若系统原带有旧版的LaTeX编译系统并想安装新版，请先卸载干净旧版再安装新版。

使用overleaf在线编辑是一种简单有效的方法，对于绝大多数初学者来说，我们推荐使用这种无需进行系统配置的方式。在操作时，只需将压缩包上传至网站即可，无需在本地配置环境，同时支持多人，多地撰写论文。

本模板兼容操作系统：Windows、Linux、MacOS、Overleaf在线编辑器，支持多种LaTeX编译引擎（pdfLaTeX、xeLaTeX、luaLaTeX）。

表 1-1 支持的LaTeX编译系统和编辑器

Table 1-1 Supported LaTeX compiler and editor

操作系统	LaTeX编译系统	LaTeX文本编辑器
Windows	TeXLive Full 或 MiKTeX	Texmaker
Linux	TeXLive Full	Texmaker 或 Vim
MacOS	MacTex Full	Texmaker 或 Texshop
Overleaf	XeLaTeX+TeXLive2021	Overleaf

第2章 LaTeX使用说明

为方便使用及更好地展示LaTeX排版的优秀特性，ucasthesis的框架和文件体系进行了细致地处理，尽可能地对各个功能和板块进行了模块化和封装。

2.1 初步设置

- (1) 使用overleaf: 打开并注册[overleaf](#)。
- (2) 将整个文件夹上传至overleaf项目。
- (3) 右键菜单，设置编译器为XeLaTeX，选择TexLive 2021
- (4) 点击编译，即可预览PDF文件

编译完成即可获得本PDF说明文档。

2.2 文档目录简介

2.2.1 Thesis.tex

Thesis.tex为主文档，其设计和规划了论文的整体框架，通过对其的阅读可以了解整个论文框架的搭建。

2.2.2 编译脚本

为方便本地编译，提供bat脚本和.sh脚本分别用于windows环境和unix环境。

- Windows: 双击Dos脚本artratex.bat可得全编译后的PDF文档，其存在是为了帮助不了解LaTeX编译过程的初学者跨过编译这第一道坎，请勿通过邮件传播和接收此脚本，以防范Dos脚本的潜在风险。

- Linux或MacOS: 在terminal中运行

- ./artratex.sh xa: 获得全编译后的PDF文档
- ./artratex.sh x: 快速编译，不会生成文献引用

全编译指运行 **xeLaTeX+bibtex+xeLaTeX+xeLaTeX** 以正确生成所有的引用链接，如目录、参考文献及引用等。在写作过程中若无添加新的引用，则可用快速编译，即只运行一遍LaTeX编译引擎以减少编译时间。

2.2.3 Tmp文件夹

运行编译脚本后，编译所生成的文档皆存于Tmp文件夹内，包括编译得到的PDF文档，其存在是为了保持工作空间的整洁。

2.2.4 Style文件夹

包含ucasthesis文档类的定义文件和配置文件，通过对它们的修改可以实现特定的模版设定。

- (1) ucasthesis.cls: 文档类定义文件, 论文的最核心的格式即通过它来定义的。
- (2) ucasthesis.cfg: 文档类配置文件, 设定如目录显示为“目录”而非“目录”。
- (3) artratex.sty: 常用宏包及文档设定, 如参考文献样式、文献引用样式、页眉页脚设定等。这些功能具有开关选项, 常只需在Thesis.tex中进行启用即可, 一般无需修改artratex.sty本身。
- (4) artracom.sty: 自定义命令以及添加宏包的推荐放置位置。

2.2.5 Tex文件夹

文件夹内为论文的所有实体内容, 正常情况下, 这也是使用ucasthesis撰写学位论文时, 主要关注和修改的一个位置, 注: 所有文件都必须采用UTF-8编码, 否则编译后将出现乱码文本, 详细分类介绍如下:

- Frontinfo.tex: 为论文中英文封面信息。论文封面会根据英文学位名称如Master, Doctor自动切换为相应的格式。
- Frontmatter.tex: 为论文前言内容如中英文摘要等。
- Mainmatter.tex: 索引需要出现的Chapter。开始写论文时, 可以只索引当前章节, 以快速编译查看, 当论文完成后, 再对所有章节进行索引即可。
- Chap_xxx.tex: 为论文主体的各章, 可根据需要添加和撰写。添加新章时, 可拷贝一个已有的章文件再重命名, 以继承文档的 UTF8 编码。
- Appendix.tex: 为附录内容。
- Backmatter.tex: 为发表文章信息和致谢部分等。

2.2.6 Img文件夹

用于放置论文中所需要的图类文件, 支持格式有: .jpg, .png, .pdf。其中, ucas_logo.pdf为国科大校徽。

2.2.7 Biblio文件夹

ref.bib用于放置论文中所需要参考文献信息。

2.3 功能介绍

2.3.1 数学公式

比如Navier-Stokes方程 (方程 (??)):

$$\begin{cases} \frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{V}) = 0 & \text{times math test : 1, 2, 3, 4, 5, 1, 2, 3, 4, 5} \\ \frac{\partial (\rho \mathbf{V})}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{V} \mathbf{V}) = \nabla \cdot \boldsymbol{\sigma} & \text{times text test: 1,2,3,4,5} \\ \frac{\partial (\rho E)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho E \mathbf{V}) = \nabla \cdot (k \nabla T) + \nabla \cdot (\boldsymbol{\sigma} \cdot \mathbf{V}) \end{cases} \quad (2-1)$$

$$\frac{\partial}{\partial t} \int_{\Omega} u \, d\Omega + \int_S \mathbf{n} \cdot (u\mathbf{V}) \, dS = \dot{\phi} \quad (2-2)$$

$$\mathcal{L}\{f\}(s) = \int_{0^-}^{\infty} f(t)e^{-st} \, dt, \quad \mathcal{L}\{f\}(s) = \int_{0^-}^{\infty} f(t)e^{-st} \, dt$$

$$\mathcal{F}(f(x+x_0)) = \mathcal{F}(f(x))e^{2\pi i \xi x_0}, \quad \mathcal{F}(f(x+x_0)) = \mathcal{F}(f(x))e^{2\pi i \xi x_0}$$

数学公式常用命令请见 [WiKibook Mathematics](#)。artracom.sty中对一些常用数据类型如矢量矩阵等进行了封装，这样的好处是如有一天需要修改矢量的显示形式，只需单独修改artracom.sty中的矢量定义即可实现全文档的修改。

2.3.2 数学环境

公理 2.1. 这是一个公理。

定理 2.2. 这是一个定理。

引理 2.3. 这是一个引理。

推论 2.4. 这是一个推论。

断言 2.5. 这是一个断言。

命题 2.6. 这是一个命题。

定义 2.1. 这是一个定义。

例 2.1. 这是一个例子。

注. 这是一个注。

2.3.3 图

论文中图片的插入通常分为单图和多图，下面分别加以介绍：

单图插入：假设插入名为c06h06（后缀可以为.jpg、.png和.pdf，下同）的图片，其效果如图 ??。

图 2-1 样图

Figure 2-1 Sample Figure

注：对图片的注释

如果插图的空白区域过大，以图片c06h06为例，自动裁剪如图 ??。

多图的插入如图 ??，多图不应在子图中给文本子标题，只要给序号，并在主标题中进行引用说明。

图 2-2 自动裁切测试
Figure 2-2 Auto-Crop Test

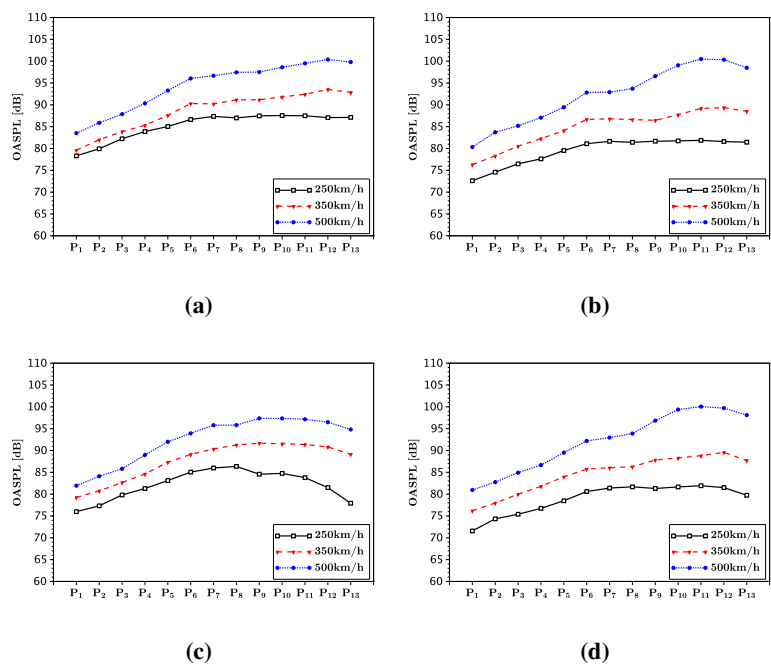


图 2-3 多子图测试
Figure 2-3 A test for multi-subfig

表 2-1 这是一个样表
Table 2-1 This is a sample table

行号	跨多列的标题							
Row 1	1	2	3	4	5	6	7	8
Row 2	1	2	3	4	5	6	7	8
Row 3	1	2	3	4	5	6	7	8
Row 4	1	2	3	4	5	6	7	8

2.3.4 表

请见表 ??。

制图制表的更多范例, 请见 [ucasthesis 知识小站](#) 和 [WiKibook Tables](#)。

2.3.5 参考文献引用

参考文献引用过程以实例进行介绍, 假设需要引用名为"Document Preparation System"的文献, 步骤如下:

1) 将Bib格式的参考文献信息添加到ref.bib文件中 (此文件位于Biblio文件夹下), 如直接粘贴自网站, 请注意修改其格式。

2) 索引第一行 `@article{lampport1986document}`, 中 `lampport1986document` 即为此文献的label (中文文献也必须使用英文label, 一般遵照: 姓氏拼音+年份+标题第一字拼音的格式), 想要在论文中索引此文献, `\citep{lampport1986document}`。如此处所示^[? ?]。

多文献索引用英文逗号隔开, 如此处所示^[? ? ?]。

更多例子如:

Walls等^[? ?]根据Betts^[? ?]的研究, 首次提出.....理论。其中关于.....的研究^[? ?], 是当前中国得到迅速发展的研究领域^[? ?]。

不同文献样式和引用样式, 如著者-出版年制 (authoryear)、顺序编码制 (numbers)、上标顺序编码制 (super) 可在Thesis.tex中对artratex.sty调用实现, 详见 [ucasthesis 知识小站之文献样式](#)。

参考文献索引的更多知识, 请见 [WiKibook Bibliography](#)。

2.4 常见使用问题

设置文档样式: 在artratex.sty中搜索关键字定位相应命令, 然后修改

- (1) 正文行距: 启用和设置 `\linespread{1.25}`, 默认1.25倍行距。
- (2) 参考文献行距: 修改 `\setlength{\bibsep}{0.0ex}`
- (3) 目录显示级数: 修改 `\setcounter{tocdepth}{2}`
- (4) 文档超链接的颜色及其显示: 修改 `\hypersetup`

文档内字体切换方法:

- 宋体: 国科大论文模板ucasthesis 或 国科大论文模板ucasthesis
- 粗宋体: 国科大论文模板ucasthesis 或 国科大论文模板ucasthesis
- 黑体: 国科大论文模板ucasthesis 或 国科大论文模板ucasthesis
- 粗黑体: 国科大论文模板ucasthesis 或 国科大论文模板ucasthesis
- 仿宋: 国科大论文模板ucasthesis 或 国科大论文模板ucasthesis
- 粗仿宋: 国科大论文模板ucasthesis 或 国科大论文模板ucasthesis
- 楷体: 国科大论文模板ucasthesis 或 国科大论文模板ucasthesis

- 粗楷体：国科大论文模板*ucasthesis* 或 国科大论文模板*ucasthesis*

对附录的引用，如对附录??的引用。对附录中图表的引用，如，对附表??的引用。

第3章 中国科学院大学研究生学位论文撰写规范指导意见（节选）

学位论文是研究生在掌握已有的科学知识的基础上，运用科学思维和一定的科学方法、技术与工具，面向特定的科学领域所存在的科学问题，开展创新性研究而产生的科学研究成果。

学位论文是研究生科研工作成果的集中体现，是评判学位申请者学术水平、授予其学位的主要依据，是科研领域重要的文献资料。撰写学位论文是对研究生科学研究能力的基本训练，是研究生学业与研究成效的基本检验，也是科研与创新能力的体现。

为提高研究生学位论文的撰写质量，促进学位论文在内容和格式上的规范化，参照《学位论文编写规则》（GB/T 7713.1—2006）、《信息与文献参考文献著录规则》（GB/T 7714—2015）和《学术出版规范期刊学术不端行为界定》（CY/T 174—2019）等国家有关标准，特制定本指导意见（2021年修订）。各学科群学位评定分委员会（以下简称各学科群分会）可结合本学科领域的特点，参考本指导意见，制订符合本学科领域特点与要求的学位论文撰写具体要求。

本指导意见从2023年冬季批次开始实施。

3.1 组成及要求

学位论文一般由以下几个部分组成：封面、原创性声明及授权使用声明、摘要、目录、符号说明（若有）、正文、参考文献、附录（若有）、致谢、作者简历及攻读学位期间发表的学术论文与其他相关学术成果等。

3.1.1 封面

一律采用中国科学院大学规定的统一中英文封面，封面包含内容如下：

(1) 密级,涉密或延迟公开论文必须在论文封面标注密级，同时注明保密年限。公开论文不标注密级，可删除此行。

(2) 论文题目，应简明扼要地概括和反映整个论文的核心内容，一般不宜超过25个汉字（符），英文题目一般不应超过150个字母，必要时可加副标题。题目中应尽量避免使用缩略词、首字母缩写词、字符、代号和公式等。

(3) 作者姓名,根据《中国人名汉语拼音字母拼写规则》（GB/T 28039—2011），英文封面中的姓和名分写，姓在前，名在后，姓名之间用空格分开。姓和名需写全拼，姓全大写，名首字母大写。外国留学生姓名书写顺序以护照格式为准，字母全部大写。

(4) 指导教师，需同时填写导师姓名、专业技术职务和工作单位。如果有多位导师（均需经培养单位批准，并在学籍系统备案），第一导师在前，第二导

师等依次在后。学位论文在指导小组的指导下完成的，应注明指导小组成员相应信息。

(5) 学位类别，包括学科门类（学术型）或专业学位类别以及学位级别。学科门类如理学、医学等，专业学位类别如应用统计、工商管理。学位级别包括硕士、博士。

(6) 学科专业，填写攻读学位的一级学科/二级学科或专业学位类别/领域全称，须与学籍信息一致，不可用简写。

(7) 培养单位，填写就读研究所或学院、系全称，如中国科学院××研究所、中国科学院大学××学院。

(8) 时间，填写论文提交学位授予单位的年月，使用阿拉伯数字标注。一般夏季申请学位的论文标注6月，冬季申请学位的论文标注12月。例如：2023年6月，2023年12月。

3.1.2 原创性声明及授权使用声明

本部分内容提供统一的模版，提交时作者和导师须亲笔签名。如遇导师无法签字时，培养单位应做出适当处理。

3.1.3 摘要和关键词

论文摘要包括中文摘要和英文摘要（Abstract）两部分。论文摘要应概括地反映出本论文的主要内容，说明本论文的主要研究目的、内容、方法、结论。要突出本论文的创造性成果或新见解，不宜使用公式、图表、表格或其他插图材料，不标注引用文献。中文摘要的字数由各学科群分会根据本分会涉及学科专业的特点提出具体要求。英文摘要与中文摘要内容应保持一致。留学生用其他语种撰写学位论文时，应有详细的中文摘要，字数由各学科群分会具体制定，建议一般不少于5000字。

摘要最后注明本文的关键词（3~5个）。关键词是为了文献标引和检索工作，从论文中选取出来，用以表示全文主题内容信息的单词或术语。关键词以显著的字符另起一行并隔行排列于摘要下方，左顶格，中文关键词间用中文逗号隔开。英文关键词应与中文关键词对应，首字母应大写，用英文逗号隔开。

摘要应另起一页，与正文前的内容连续编页（用罗马字符）。

3.1.4 目录

目录应包括论文正文中的全部内容的标题，以及参考文献、附录（若有）和致谢等，不包括中英文摘要。目录页由论文的章、条、附录等序号、名称和页码组成。正文章节题名要求最多编到第三级标题，即x.x.x（如1.1.1）。一级标题顶格书写，二级标题缩进一个汉字符位置，三级标题缩进两个汉字符位置。论文中若有图表，应有图表目录，置于目录页之后，另页编排。图表目录应有序号、图题或表题和页码。

目录应另起一页，与正文前的内容连续编页（用罗马字符）。

3.1.5 符号说明（若有）

如果论文中使用了大量的物理量符号、标志、缩略词、专门计量单位、自定义名词和术语等，应编写成注释说明汇集表。若上述符号等使用数量不多，可以不设此部分，但必须在论文中首次出现时加以说明。论文中若有符号说明，应置于目录之后、正文之前，另起一页，与正文前的内容连续编页（用罗马字符）。

3.1.6 正文

正文一般包括绪论、论文主体、研究结论与展望等部分。

(1) 绪论应包括选题的背景和意义，国内外相关研究成果与进展述评，本论文所要解决的科学与技术问题、所运用的主要理论和方法、基本思路和论文结构等。绪论应独立成章，用足够的文字叙述，不与摘要雷同。要实事求是，不夸大也不弱化前人的工作和自己的工作。

(2) 论文主体是正文的核心部分，占主要篇幅，它是将学习和研究过程中调查、观察和测试所获得的材料和数据，经过思考判断、加工整理和分析研究，进而形成论点。依据学科专业及具体选题，论文主体可以有不同的表现形式，可以按照章与节的结构表述，也可以按照“研究背景与意义—研究方法与过程—研究结果与讨论”的表述形式组织论文。但主体内容必须实事求是，客观诚实，准确完备，合乎逻辑，层次分明，简明可读。

(3) 研究结论是对整个论文主要成果的总结，不是正文中各章小结的简单重复，应准确、完整、明确、精炼。应明确凝练出本研究的主要创新点，对论文的学术价值和应用价值等加以分析和评价，说明本项研究的局限性或研究中尚难解决的问题，并提出今后进一步在本研究方向进行研究工作的设想或建议。结论部分应严格区分本人研究成果与他人科研成果的界限。

3.1.7 参考文献

本着严谨求实的科学态度撰写论文，凡学位论文中有引用或参考、借鉴他人思想或成果之处，均应按一定的引用规范，列于文末（通篇正文之后），参考文献部分应与正文的文献引用一一对应，注重合理引用，严禁抄袭剽窃等学术不端行为。

3.1.8 附录（若有）

主要列入正文内过分冗长的公式推导、供查读方便所需的辅助性数学工具或表格、数据图表、程序全文及说明、调查问卷、实验说明等。

3.1.9 致谢

对给予各类资助、指导和协助完成研究工作，以及提供各种对论文工作有利条件的单位及个人表示感谢。致谢应实事求是，切忌浮夸与庸俗之词。致谢

末尾应具日期，日期与论文封面一致。

3.1.10 作者简历及攻读学位期间发表的学术论文与其他相关学术成果

作者简历应包括从大学起到申请学位时的个人学习工作经历。按学术论文发表的时间顺序，列出作者本人在攻读学位期间发表或已录用的学术论文清单（著录格式同参考文献）。其他相关学术成果可以是申请的专利、获得的奖项及完成的项目等代表本人学术成就的各类成果。

3.2 撰写要求

3.2.1 学位论文基本要求

学位论文必须是一篇系统的、完整的学术论文，遵循既定的学术规范与要求，不仅要符合学位论文的形式规范，更要符合学位论文的质量规范。做到：学术观点明确，立论正确，方法科学，材料翔实，数据可靠，推理严谨，论证充分，引用规范，结构合理，层次分明，文字通顺，表达准确，学风严谨。研究成果体现作者独到的学术见解、科学论证与创新性结论，表明作者掌握了坚实的基础理论和系统的专门知识，具有独立地从事科学研究的能力。

硕士学位论文选题应为本学科重要领域，有一定的理论意义或应用价值；在理论或方法上有一定的创新，解决了科学或生产实践中某一项重要的问题，取得重要的研究成果，具有较好的社会效益或应用前景。

博士学位论文选题应为本学科前沿领域，有重要的理论意义或应用价值；在理论或方法上有较大的创新，解决了科学或生产实践中某一项重大的问题，取得突破性的研究成果，具有重要的社会效益或应用前景。

3.2.2 论文原创性要求

学位论文应为学位申请者在导师的指导下独立完成的科学研究成果，为作者本人的原创性成果，系研究生经过多年的专业学习和科学研究，运用科学思维、科学方法或工具，探索科学领域中的某一科学问题，提出问题，分析问题，解决问题。学位论文中要有清晰完整的文献综述，但不能以文献综述来代替学位论文。论文引用规范合理，没有伪造、篡改、剽窃、他人代写、论文买卖及其它学术不端行为。

3.2.3 论文创新性要求

学位论文的研究既包括创造知识，即创新、发现和发明，是对未知世界及其规律的探索，也包括整理知识，即对已有知识分析整理，使其规范化、系统化，是对已有知识的传承。创新活动，贯穿了学位论文研究与写作的全过程，如提出新的学术思想、科学概念、假说、学说、定理、定律，设计新的观察方法和实验手段，建立新的科学模型，研制出新的产品，设计出新的工艺流程，发现新的物种等。学位论文的价值在于探索未知，发现科学发展中的规律与特

征。学位论文要体现其应有的严谨性与探索性，在原创性的基础上实现对已有知识的超越、突破或颠覆，发现前所未有的科学问题，提出前所未有的分析论证，得出前所未有的科学结论。

3.2.4 学位论文的字数要求

学位论文最重要的意义在于其学术研究的创新性，应将学位论文的质量水平作为主要考量，不以字数多少作为特别要求，但各学科群分会可根据本领域涉及的学科专业特点做相应规定。

3.2.5 文字、标点符号和数字

除外国来华留学生、外语专业研究生以及特殊需要外，学位论文一律用国家正式公布实施的简化汉字书写。标点符号的用法以《标点符号用法》（GB/T 15834—2011）为准。数字用法以《出版物上数字用法》（GB/T 15835—2011）为准。

外国来华留学生可用中文或英文撰写学位论文，但应有详细的中英文摘要。外语专业的学位论文应用所学专业相应的语言撰写，摘要应使用中文和所学专业相应的语言对照撰写。

为了便于国际合作与交流，中文学位论文亦可有英文或其他文字的副本。

3.2.6 论文正文

3.2.6.1 章节和各章标题

论文正文须由另页右页（奇数页）开始，用阿拉伯数字连续编码，一直到全文最后。正文内部新章节无须另页右页（奇数页）开始。论文可参考“绪论-研究背景与意义-研究方法过程-研究结果与讨论-研究结论与展望”的结构形式撰写，各主体研究内容可分别单独成为章节并作为章节标题使用。

各章标题中尽量不采用英文缩写词，对必须采用者，应使用本行业的通用缩写词。标题中尽量不使用标点符号。

3.2.6.2 序号

标题序号

论文标题分层设序。层次以少为宜，根据实际需要选择。各层次标题一律用阿拉伯数字连续编号。以三级标题为宜，最多四级。若确需要再增加一级，以小括号形式表示；不同层次的数字之间用小圆点“.”相隔，末位数字后面不加句号，如“1.1”，“1.1.1”等；章的标题居中排版，各层次的序号均左起顶格排，序号与题名间空一个汉字符。

图表等编号

论文中的图、表、附注、公式、算式等，一律用阿拉伯数字分章依序连续编码。其标注形式应便于互相区别，如：图1-1（第1章第一个图）、图2-2（第2章

第二个图)；表3-2（第3章第二个表）等。附录的图表参考正文的编号方式，如附图1-1或附表1-1。

页码

正文页码从绪论开始按阿拉伯数字（1，2，3……）连续编排，页码应位居左页左下角、右页右下角；正文前的部分（中英文摘要、目录等）用大写罗马数字（I，II，III…）单独编排，页码位于页面下方居中。

3.2.6.3 页眉

页眉从摘要开始，奇数页上标明“摘要”、“Abstract”、“目录”、“图表目录”等，偶数页上标明论文题目（英文摘要标明英文题目）。正文（即第1章开始到最后一章）的页眉，奇数页上标明每一章名称，偶数页上标明论文题目。参考文献、附录、致谢等的页眉，奇数页标明“参考文献”、“附录”、“致谢”等，偶数页标明论文题目。页眉居中设置。

3.2.6.4 名词和术语

科技名词术语及设备、元件的名称，应采用全国科学技术名词审定委员会公布的权威标准或其他相关权威信息源规定的术语或名称。标准中未规定的术语要采用行业通用术语或名称。全文名词术语必须统一。一些特殊名词或新名词应在适当位置加以说明或注解。双名法的生物学名部分均为拉丁文，并为斜体字。

采用英语缩写词时，除本行业广泛应用的通用缩写词外，文中第一次出现的缩写词应该用括号注明英文原词。新的外来名词应用括号注明英语全称和缩写语。

3.2.6.5 量和单位

量和单位要严格执行《国际单位制及其应用》（GB 3100-93）、《有关量、单位和符号的一般原则》（GB3101—93）有关量和单位的规定。量的符号一般为单个拉丁字母或希腊字母，并一律采用斜体（pH例外）。

3.2.6.6 图和表

论文中若有图和表，应设置图表目录，先列图后列表，置于目录页后，另页编排。

(1) 图

图片大小适当，图边界在页面范围内（图边界离页面边界距离大于页边距）。若图片中包含文字，文字大小不超过正文文字大小。图包括曲线图、构造图、示意图、框图、流程图、记录图、地图、照片等，宜插入正文适当位置。引用的图必须注明来源。具体要求如下

• 图应具有“自明性”，即只看图、图题和图注，不阅读正文，就可理解图意。每一图应有简短确切的图题，连同图序置于图下居中。

• 图中的符号标记、代码及实验条件等，可用最简练的文字横排于图框内或图框外的某一部位作为图注说明，全文统一。图题建议用中文及英文两种文字表达。

• 照片图要求主要显示部分的轮廓鲜明，便于制版，如用放大、缩小的复制品，必须清晰，反差适中，照片上应有表示目的物尺寸的标尺。

• 图片一般设为高6cm×宽8cm，但高、宽也可根据图片量及排版需要按比例缩放。中文（宋体）英文（Times New Roman）图注为五号字，1.25倍行距。

• 文中尽量不用世界地图、全国地图！如果一定要用，凡涉国界图件（国内部分地区、全国、世界部分地区、全球）必须使用自然资源部标准地图底图（下载网址：<http://bzdt.ch.mnr.gov.cn>），所用底图边界要完全无修改（包括南海诸岛位置），为适应排版时图的缩放，比例尺一律用线段比例尺，而不用数字比例尺。并在图题下注明“注：该图基于自然资源部标准地图服务网站下载的审图号为GS(2021)××××号的标准地图制作，底图边界无修改。”

(2) 表

表的编排一般是内容和测试项目由左至右横读，数据依序竖排，应有自明性，引用的表必须注明来源。具体要求如下：

• 每一表应有简短确切的题名，连同表序置于表上居中。必要时，应将表中的符号、标记、代码及需说明的事项，以最简练的文字横排于表下作为表注。表题建议用中文及英文两种文字表达。

• 表内同一栏数字必须上下对齐。表内不应用“同上”、“同左”等类似词及“”符号，一律填入具体数字或文字，表内“空白”代表无此项，“—”或“...”（因“—”可能与代表阴性反应相混）代表未发现，“0”该表实测结果为零。表内未测出值可以用“N.D.”表示。

• 表格尽量用“三线表”，避免出现竖线，避免使用过大的表格，确有必要时可采用卧排表，正确方位应为“顶左底右”，即表顶朝左，表底朝右。表格太大需要转页时，需要在续表表头上方注明“续表”，表头也应重复排出。

• 中文（宋体）英文（Times New Roman）表注为五号字，1.25倍行距。

3.2.6.7 表达式

论文中的表达式需另行起，原则上应居中。若有两个以上的表达式，应从“1”开始的阿拉伯数字进行编号，并将编号置于括号内。编号采用右端对齐。表达式较多时可分章编号。

较长的表达式如必须转行，只能在+，-，×，÷，<，>等运算符之后转行，序号编于最后一行右顶格。

3.2.7 参考文献

参考文献格式规范参照《信息与文献参考文献著录规则》(GB/T 7714—2015), 或可参照国际刊物通行的参考文献格式。各学科群分会可根据本学科的一般规范制定相应的参考文献格式。文后参考文献和参考文献在正文中的标注方式可采用“顺序编码制”或“著者—出版年制”。确定采用某种方法后, 文后参考文献和参考文献在正文中的标注方式要对应。

文后参考文献按“顺序编码制”组织时, 各篇文献应按正文部分首次引用时标注的序号依次列出; 文后参考文献按“著者—出版年制”组织时, 条目不排序号, 先按语种分类排列, 语种顺序是: 中文、日文、西文、俄文、其他文种; 然后按著者字序和出版年排列。中文和日文按第一著者的姓氏笔画排序, 中文也可按汉语拼音字母顺序排列, 西文和俄文按第一著者姓氏字母顺序排列。当一个著者有多篇文献并为第一著者时, 该著者单独署名的文献排在前面(并按出版年份的先后排列), 接着排该著者与其他人合写的文献。文后参考文献加标题“参考文献”, 并列入全文目录。凡正文里标注了参考文献的, 其文献都必须列入文后参考文献。文后参考文献应集中著录于正文之后, 不分章节著录。正文中未被引用但被阅读或具有补充信息的文献可集中列入附录中, 其标题为“荐读书目”。

详细内容请参考《中国科学院大学研究生学位论文撰写规范指导意见》。

3.3 排版与印刷要求

3.3.1 纸张与页面要求

表 3-1 排版和印刷要求

Table 3-1 Typography and Printing Requirements

项目名称	要求
纸张	A4 (210mm×297mm), 幅面白色
页面设置	上、下2.54cm, 左、右3.17cm, 页眉、页脚距页边界1.5cm
封面	采用国科大统一格式
页眉	宋体小五号居中, 英文和阿拉伯数字用Times New Roman体
页码	Times New Roman体小五号

3.3.2 印刷及装订要求

论文封面使用中国科学院大学统一的封面格式。学位论文用A4标准纸(210 mm×297 mm)打印、印刷或复印, 按顺序装订成册。自中文摘要起双面印刷, 之前部分单面印刷。中文摘要、英文摘要、目录、论文正文、参考文献、附录、致谢、作者简历及攻读学位期间发表的学术论文与其他相关学术成果等, 均须由另页右页(奇数页)开始。论文必须用线装或热胶装订, 不使用钉子装订。

封面用纸一般为150克花纹纸（需保证论文封面印刷质量，字迹清晰、不脱落），博士学位论文封面颜色为红色，硕士学位论文封面颜色为蓝色。

3.3.3 书脊

学位论文的书脊用黑体，英文和阿拉伯数字用Times New Roman体，字号一般为小四号，可根据论文厚度适当调整。上方写论文题目，中间写作者姓名，下方写“中国科学院大学”，距上下边界均为3cm左右。

第4章 研究背景

模型检测 (Model Checking) 是一种自动化形式方法, 用于验证有限状态系统的性质。模型检测最初由 E. M. Clarke 和 E. A. Emerson 提出^[2, 3], 如今已广泛应用于软件和硬件设计。例如, 在嵌入式系统中, 可以使用 UML 活动图来验证硬件是否符合规范^[2]。

模型检测将待检测的系统建模为一个跃迁系统(transition system), 在时序逻辑(temporal logic)中指定待验证的属性。给定模型 M 和属性 φ , 模型检测将验证是否 M 满足 φ 。在不同的模型检测方法中, 高级符号模型检查 (Advanced Symbolic Model Checking) ^[2] 使用简化的有序二叉决策图 (Reduced Ordered Binary Decision Diagrams, ROBDDs 或 BDDs) ^[2] 来表示状态集合和转移关系。通过迭代调用图像计算算法来计算所有可达状态, 判断一个模型是否满足时间属性, 直到达到不动点为止。

最近, 随着量子计算的发展, 关于量子线路的验证技术也在不断发展^[2, 3]。其中, 利用模型检测方法对线路进行自动化验证也有了一些应用。由于量子线路运算空间随着量子比特的线性增加而指数级膨胀, 传统的计算方法并不能很好应对。因此本次研究希望应用基于张量网络(tensor network)的张量决策图(tensor decision diagrams)进行量子模型检测。

4.1 量子计算简介

量子计算机(quantum computer)是一种利用量子比特特性进行计算的一种设备。在量子计算中, 量子比特的特殊性质允许其同时处于多种状态, 这与经典比特的二进制状态不同。量子计算机的状态空间可以用希尔伯特空间(Hilbert space) \mathcal{H} 表示^[2], 即可以进行内积运算(inner product)的复向量空间。比特状态可以用 \mathcal{H} 的向量表示, 量子门由 \mathcal{H} 上的酉算子(unitary operator)表示。

量子线路(quantum circuit)是一种描述量子计算的模型。在量子线路中, 通过量子比特的初始化、应用量子门、测量以及其他可能的操作的序列来构建和执行量子计算任务。量子线路通常从左向右阅读, 每个量子门的作用是将输入的量子比特状态转变为输出状态, 该过程可以认为是量子门的酉矩阵与输入的量子状态的乘积。

图?? 所示的量子线路展示了一个具体的量子线路示例。其中有单比特门 $H = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ 1 & -1 \end{bmatrix}$, $T = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & e^{-i\pi/4} \end{bmatrix}$, 以及双比特门 $CX = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}$ 。假设该量子线路的初始状态为 $|\psi\rangle = |\psi_1\rangle |\psi_2\rangle$, 则输出状态为 $T \otimes H \cdot CX \cdot T \otimes H \cdot |\psi\rangle$ 。

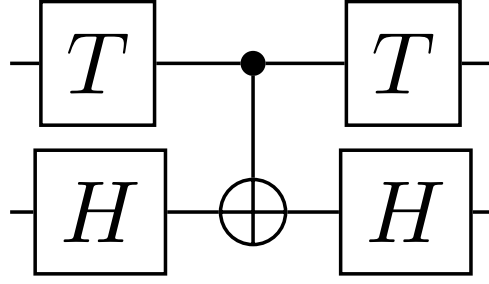


图 4-1 一个量子线路的例子

在量子计算机上可以执行各种算法和计算任务，如量子搜索^[2]、量子因子分解^[2]和量子模拟^[2]等。量子计算的潜力在于其能够在某些特定问题上比经典计算机更高效地进行计算，尤其在处理大规模数据和解决复杂问题方面具有潜在优势。需要对这部分深入了解的读者，可以自行阅读^[2]。

4.2 跃迁系统

跃迁系统广泛应用于模型检测中待检测系统的建模，其定义为^[2]：

$$\mathcal{M} = \{S, Act, \rightarrow, I\} \quad (4-1)$$

其中 S 为系统状态集合， I 为系统初态集合，因此满足 $I \subseteq S$ 。 Act 为系统行为集合。 \rightarrow 为系统状态转移关系，即 $\rightarrow \subseteq S \times Act \times S$ 。此外还有 AP 为描述系统原子命题。 L 是标记函数，将状态映射为状态满足的原子命题集合。需要验证的属性 φ 将表述为命题。

系统的有限路径片段 π 是一个有限状态序列 $s_0, s_1 \dots s_n$ 。 s_i 满足 $s_{i-1} \xrightarrow{a} s_i, a \in Act$, 对于所有 $0 < i \leq n$ ，其中 $n \geq 0$ 。无限路径片段 π 是一个无限状态序列 $s_0, s_1 \dots$ ，使得对于所有 $i > 0, s_{i-1} \xrightarrow{a} s_i, a \in Act$ 。在路径中 $\pi[i] = s_i, \pi[i] = s_i \dots$ 。所有以 s_0 为开始的路径，构成了路径集合 $Path(s_0)$ 。

图?? 所示的跃迁系统展示了一个简化版的售货机模型。在该模型中，用户投入硬币，进行选择后就可以得到苏打水或者啤酒。在该例子中，系统状态 $S = \{pay, select, soda, beer\}$ ，系统初态 $I = pay$ 。系统行为 $Act = \{insert_coin, \tau, get_soda, get_beer\}$ ，其中 τ 表示立即行动符号。转移关系图中已经展示。原子命题可取 $AP = \{paid, drink\}$ 。因此 $L(pay) = \{\emptyset\}$ ， $L(soda) = L(beer) = \{paid, drink\}$ ， $L(select) = \{paid\}$ 。系统的一个路径是 $\pi = pay \ select \ soda \ pay \ select \dots$ 。此时 $\pi[1] = select, \pi[1] = select \ soda \ pay \ select \dots$ 。同时该路径满足 $\pi \in Path(pay)$ 。量子模型检测的跃迁系统类似。区别在于状态空间用 \mathcal{H} ，转移关系用酉矩阵。一个量子自

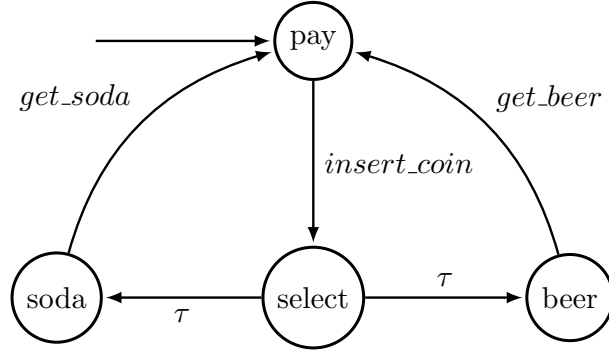


图 4-2 一种简化版的售货机跃迁系统

动机定义如下：

$$\mathcal{M} = \{\mathcal{H}, Act, \{U_\alpha, \alpha \in Act\}, \mathcal{H}_0\} \quad (4-2)$$

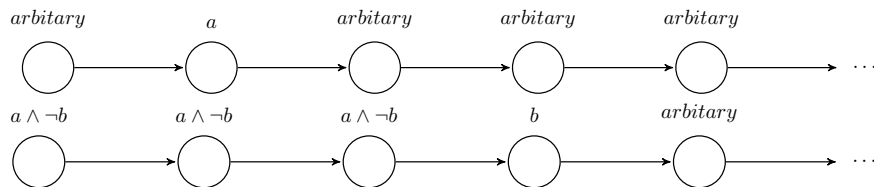
下面介绍模型检测中使用的时序逻辑。

4.3 时序逻辑的验证

在量子模型检测中，与经典模型检测一样使用时序逻辑指定待验证的属性 φ 。时序逻辑命题的运算符有两类^[2]。状态命题公式(State formulas): $\varphi ::= a \mid \exists\varphi \mid \forall\varphi \mid \neg\varphi \mid \varphi \wedge \psi$ ，其中 $a \in AP$ 。以及路径命题公式(Path formulas): $\varphi = O\varphi \mid \varphi U\psi$ 。给定模型的一个状态为 s ，路径为 π ，则具体满足条件分别如下：

- $s \models a, \text{ iff } (s) \models a$
- $s \models \exists\varphi, \text{ iff } \pi \models \varphi \text{ 对一些 } \pi \in Path(s)$
- $s \models \forall\varphi, \text{ iff } \pi \models \varphi \text{ 对所有 } \pi \in Paths$
- $s \models \neg\varphi, \text{ iff } s \not\models \varphi$
- $s \models \varphi \wedge \psi, \text{ iff } s \models \varphi \text{ and } s \models \psi$
- $\pi \models O\varphi, \text{ iff } \pi[1] \models \varphi$
- $\pi \models \varphi U\psi, \text{ iff } \exists j \geq 0. \pi[j] \models \psi \text{ 同时对所有 } 0 \leq i < j \text{ 有 } \pi[i] \models \varphi$

图?? 展示了两种路径命题公式的直观示意图。


 图 4-3 $\pi \models Oa$ 与 $\pi \models aUb$ 的图示

在模型检测中，有三类比较重要的可达性问题，分别是可达性、持续可达性以及重复可达性。过程中主要涉及以下路径命题公式： \diamond 表示最终(eventually)，

\Box 表示总是(always), \Diamond 表示总是最终(always eventually), $\Box\Diamond$ 表示最终总是(eventually always)。其中 \Diamond 和 \Box 具体定义为:

- $\Diamond\varphi \stackrel{\text{def}}{=} \text{True}U\varphi$
- $\Box\varphi \stackrel{\text{def}}{=} \neg\Diamond\neg\varphi$

图??展示了这两种基本路径命题公式的直观示意图。

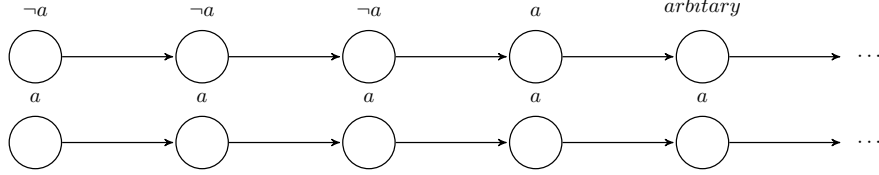


图 4-4 $\pi \models \Diamond a$ 与 $\pi \models \Box a$ 的图示

具体的可满足条件为:

- $\pi \models \Diamond\varphi, \text{ iff } \exists j \geq 0. \pi[j] \models \varphi$
- $\pi \models \Box\varphi, \text{ iff } \forall j \geq 0. \pi[j] \models \varphi$
- $\pi \models \Diamond\Box\varphi, \text{ iff } \exists i \geq 0. \forall j \geq i, \pi[j] \models \varphi$
- $\pi \models \Box\Diamond\varphi, \text{ iff } \forall i \geq 0. \exists j \geq i, \pi[j] \models \varphi$

基于此三种可达性问题定义分别如下:

- 可达性: $Pr^M(s \models \Diamond G) = Pr^M(\pi \models \Diamond G : \pi \in \text{Paths}(s))$
- 持续可达性: $Pr^M(s \models \Diamond\Box G) = Pr^M(\pi \models \Diamond\Box G : \pi \in \text{Paths}(s))$
- 重复可达性: $Pr^M(s \models \Box\Diamond G) = Pr^M(\pi \models \Box\Diamond G : \pi \in \text{Paths}(s))$

4.4 量子模型检测

目前量子的模型检测, 主要使用Birkhoff-von Neumann Quantum Logic来描述量子系统的性质^[21]。Birkhoff-von Neumann量子逻辑是一种非经典逻辑, 用于描述量子力学中事件的逻辑结构。它由 Birkhoff 和 von Neumann 在 1936 年首次提出。在量子逻辑中, 命题的集合不再形成布尔代数, 而是形成一个投影算子的正交完备格, 这与传统的逻辑系统不同。

在 Birkhoff-von Neumann 量子逻辑中, 量子系统的状态可以由希尔伯特空间(Hilbert space)来描述, 每个量子命题对应希尔伯特空间的一个闭子空间。对于系统的状态 $|\psi\rangle$, 如果它属于某个特定的闭子空间 \mathcal{X} , 我们可以说这个命题是真的。

例如, 考虑以下量子逻辑命题:

- 命题 \mathcal{X} : 在时间 t 时, 量子粒子的位置 x 坐标在区间 $[a, b]$ 内。
- 命题 \mathcal{Y} : 在时间 t 时, 量子粒子的动量 y 坐标在区间 $[a, b]$ 内。

这些命题 \mathcal{X} 和 \mathcal{Y} 可以通过粒子的状态希尔伯特空间的特定子空间来表示。

在数学上, 这种逻辑结构可以使用格理论(lattice theory)来描述, 其中格中的元素对应于量子事件, 格的操作则对应于逻辑运算。在确定了原子命题后,

需要引入连接词，这些连接词可以用来构建更复杂的命题，以描述量子系统的复杂属性。在语义上，这些可以被视为在希尔伯特空间 \mathcal{H} 的一个子空间 $S(\mathcal{H})$ 中的代数操作。具体如下：

- 子空间之间的包含关系 \subseteq 在 $S(\mathcal{H})$ 中是一个偏序关系，它可以理解为量子逻辑的蕴含（元逻辑）。
- 一个子空间 \mathcal{X} 的正交补 \mathcal{X}^\perp 在量子逻辑中用作否定的解释。
- $S(\mathcal{H})$ 对交集是封闭的，即对于 $S(\mathcal{H})$ 中的任何元素族 $\{\mathcal{X}_i\}$ ，都有 $\bigcap_i \mathcal{X}_i \in S(\mathcal{H})$ 。在量子逻辑中用于表示合取。
- 对于一组子空间 $\{\mathcal{X}_i\}$ ，它们的并集定义为 $\bigvee_i \mathcal{X}_i = \text{span}(\bigcup_i \mathcal{X}_i)$ 。在量子逻辑中，析取被解释为并集。

$(S(\mathcal{H}), \cap, \vee, \perp)$ 构成一个正交模糊格， \subseteq 是其排序，这是 Birkhoff–von Neumann 量子逻辑的代数模型。

在实际应用中，通常只选择 $S(\mathcal{H})$ 的一个子集 \mathbf{AP} 作为原子命题的集合。 \mathbf{AP} 中的元素可以被认为是真正关心的那些命题，而其他的可能是不相关的。出于算法目的，通常假设 \mathbf{AP} 是可数的甚至是有限的 $S(\mathcal{H})$ 的子集，而不是 $S(\mathcal{H})$ 本身，因为 $S(\mathcal{H})$ 是不可数无限的。

因此给定一组原子命题集 \mathbf{AP} ，对于 $\mathcal{X} \in S(\mathcal{H})$ ，如果状态 $|\psi\rangle$ 满足集合中所有命题的交集，我们说 $|\psi\rangle$ 满足 \mathcal{X} 。所以在量子模型检测中，计算系统状态是一件非常重要的事情。而量子计算中状态空间 \mathcal{H} 维度 $\dim(\mathcal{H}) = 2^n$ ，其中 n 为比特数量。即状态空间维数随比特个数指数级增长。这为计算量子系统状态带来了困难。

借助更好的数据结构，可以用更少的资源表示量子状态以及量子线路，并计算最终的结果。比如TDD给出了量子电路的紧凑表示，提供了一种方便的实现张量网络各种操作的方式，这些操作对于模拟量子物理系统非常重要。图??展示了一个矩阵和TDD形式，其中TDD中的实线表示高边，虚线表示低边。可以明显看到TDD的结构更紧凑。

TDD特别适用于实现可达性分析和模型检查算法。这是因为基于BDD的模型检查算法中使用的许多优化技术可以推广到收缩量子电路张量网络上^[21]。这些为应用TDD解决量子模型检测问题提供了可能的方案。

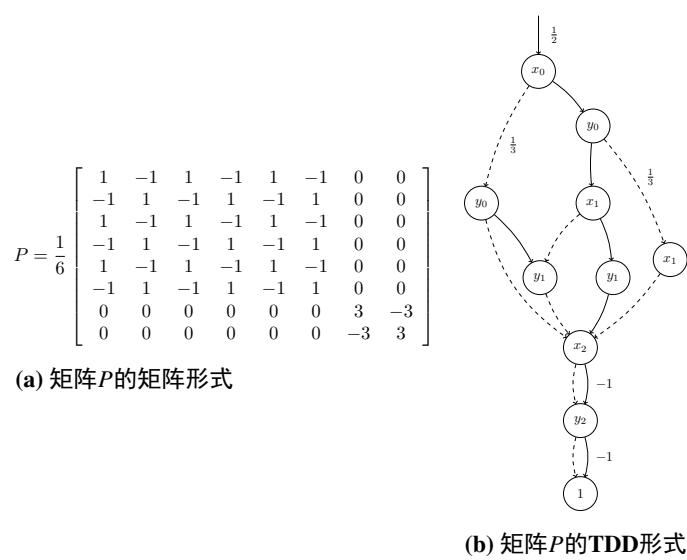


图 4-5 应用TDD可以减少存储特殊矩阵的资源

第5章 研究现状

随着量子计算硬件规模的快速增长，量子电路的验证成为一个重要问题。开始的研究主要集中在BDD在量子计算下的推广算法，如量子信息决策图(Quantum Information Decision Diagram, 或QuIDD)^[21]，量子多值决策图(Quantum multiple-valued Decision Diagram, 或QMDD)^[21]等，从而对组合式量子电路进行等效性检查。显然，随着越来越复杂的物理可实现化的硬件出现，将会出现更加复杂的，更加针对的，新的验证问题。比如量子存储^[21]，量子反馈网络^[21]，RUS量子电路^[21]。量子模型检测可以为量子电路的验证提供了更多思路。

量子系统模型检测的早期工作旨在验证量子通信协议^[22]。后来还有针对分析和验证量子程序的应用^[21]，比如量子自动机^[21]、量子马尔可夫链^[21]和超算符值马尔可夫链^[21]的模型检测技术。然而，在这些量子模型检测技术与它们在验证量子电路方面实际应用之间存在巨大差距仍需填补。TDD作为新的数据结构，极大加快了计算过程，有可能深化二者的联系，加快实际应用的出现。

5.1 类似技术

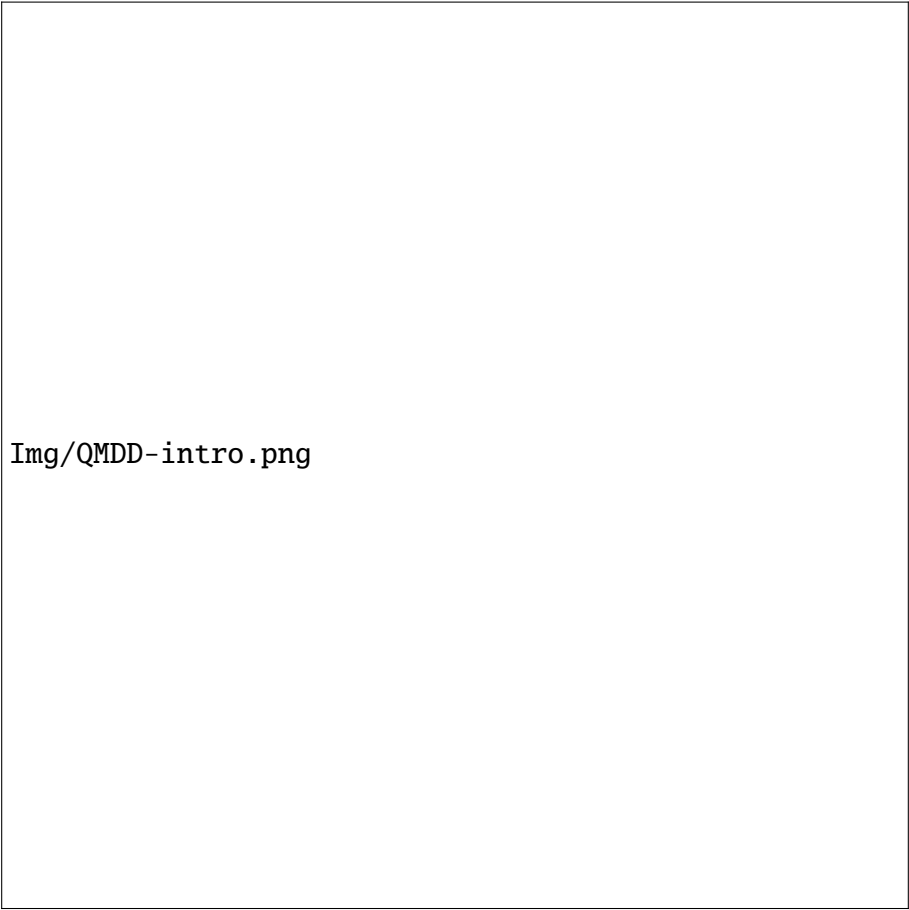
TDD是一种相对较新的数据结构，用于表示和操作张量网络。张量网络提供了量子线路更紧凑的表现形式。在张量网络领域，目前除了TDD外目前还有直接使用张量网络，QMDD^[21]，以及ZX-calculus^[21]。

QMDD (Quantum Multiple-Valued Decision Diagrams)，即量子多值决策图提供了一种紧凑而系统的方法来描述量子过程。图??展示了一个矩阵到最终QMDD的一个过程。目前QMDD已有效地用于量子电路的合成^[21]和验证任务^[22]。

图??展示了ZX-calculus中量子计算基本门的形式。图??展示了ZX-calculus的基本化简规则。将一个量子线路中的比特门表示为Z-calculus后化简，从而进行验证。

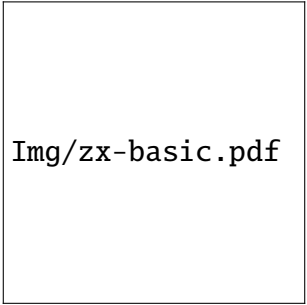
目前ZX-calculus发展还比较早期。图??展示了目前各种比较成熟的表示方法下模拟量子电路的时间对比。其中TDD No Part指的是不对电路进行拆分优化的方法；TDD part I 和 TDD part II 指的是两种不同的电路拆分优化方法；QMDD指的是Quantum Multiple-valued Decision Diagrams；TN是指google的tensor network。可以看到TDD相比其他有一定优势。因此本次研究选择TDD作为主要技术。

目前，TDD研究集中在开发更有效的算法来使用TDD操作和收缩张量网络。这包括开发新技术来分割张量网络，优化TDD结构，从而进一步提高基于TDD的可达性分析和模型检测算法的效率。这也是实现基于TDD的量子模型检测的主要方法。



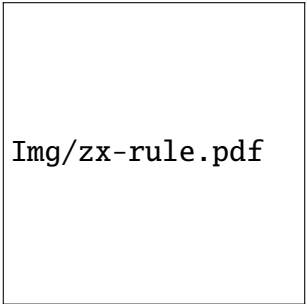
Img/QMDD-intro.png

图 5-1 一个QMDD的示例



Img/zx-basic.pdf

图 5-2 量子计算基本门在ZX-calculus的表示



Img/zx-rule.pdf

图 5-3 ZX-calculus的基本化简规则

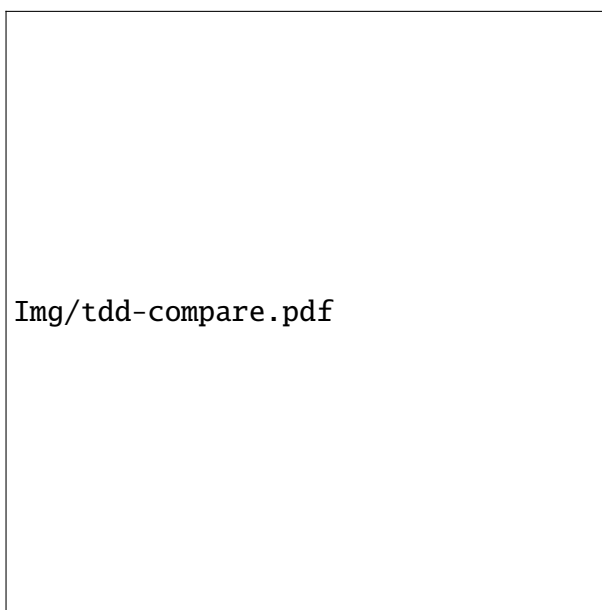


图 5-4 TDD与其他实验方法的比较^[2]

5.2 研究趋势

量子系统的模型检测尚处于起步阶段，尤其是在量子硬件验证方面。未来量子模型检测的最重要目标是寻找一类更简单易于检测的属性。过去的研究追求的是普遍性，即只针对检查量子系统的一般可达性和时间逻辑属性。然而，为了实现这一目标，模型检测的效率非常低，且仅适用于非常小规模和深度较小的量子电路。因此，需要确定一类更简单易于检测的属性，以便当前的量子模型检测工具可以高效地进行检测^[2]。这需要更多在时序逻辑上的研究工作。但同时更实用的模型检测工具也能在研究相关属性起到一定帮助。

第6章 系统设计与实现

6.1 预期目标

image computation指的是通过当前系统状态与转移关系，计算下一步系统状态。在模型检测中，image computation是关键的一步。过去传统模型检测已发展出多种高效的计算算法，特别是利用二叉决策图（BDDs）符号性表示初始状态和转移关系，以及利用状态空间划分和电路划分加速图像计算过程。然而，量子系统的模型检测尚处于起步阶段。本次研究的重要目标就是利用TDD，构建量子系统的image computation，从而为未来的工作奠定基础。

考虑到量子计算的特殊性，可以利用一系列的优化策略，主要包括基于张量网络的结构特性和TDD的有效性能。通过这些优化，可以提升量子图像计算的效率，尤其是在处理复杂量子系统时的性能表现。

6.2 研究方法

本次研究的主要目的是借助TDD数据结构，构建能快速计算量子模型检测中可达问题的方案。本次研究的主要挑战在于尽可能减少程序的运行时间以及空间资源。为此，需要采用一系列方法来开发更有效的算法，以优化TDD操作和收缩张量网络。其中包括开发新技术来分割张量网络和优化TDD结构。下面简单介绍以下具体研究方法。

关于常用的量子线路划分方法，第一种被称为addition^[7]。将量子电路视为张量网络，首先将一个量子电路C转换成无向图G。G中的每个节点表示量子电路的一个索引，并且如果它们是相同门的输入或输出索引，则在G中连接两个节点。并且当满足以下两个条件之一时输入和输出索引不变：

- 是对角线量子门的输入和输出索引；
- 是受控门的控制比特位的输入和输出索引。

图??展示了Grover_3电路图的索引链接图。该图描述了量子电路的连通性，通过选择图中连通度最大的索引可以对电路进行分割。因此选择图中连通度较大的 x_1^1, x_1^3, x_2^1 可以对电路进行较好的划分。

另一种常用的电路划分方法成为contraction。在这一方法中，将量子电路划分为若干个较小的部分，其收缩等于原始电路。对于两个预设整数参数k1和k2，将电路划分为若干小电路。其中每个小电路涉及最多k1个量子比特，并且与至多跨越不同部件的k2个多比特门相连。图??展示了对Bit flip电路进行k1=3,k2=2的拆分结果。

在BDD中，索引的顺序很重要。因为索引顺序会直接影响BDD的大小。一个好的变量顺序可以使得BDD比一个糟糕的变量顺序小得多。图??的了两张图都

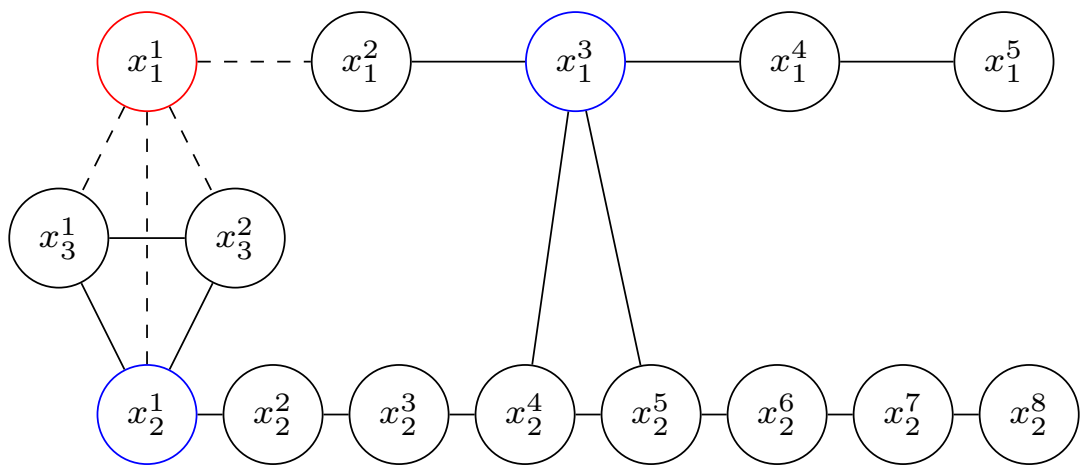


图 6-1 Grover_3的索引连接图

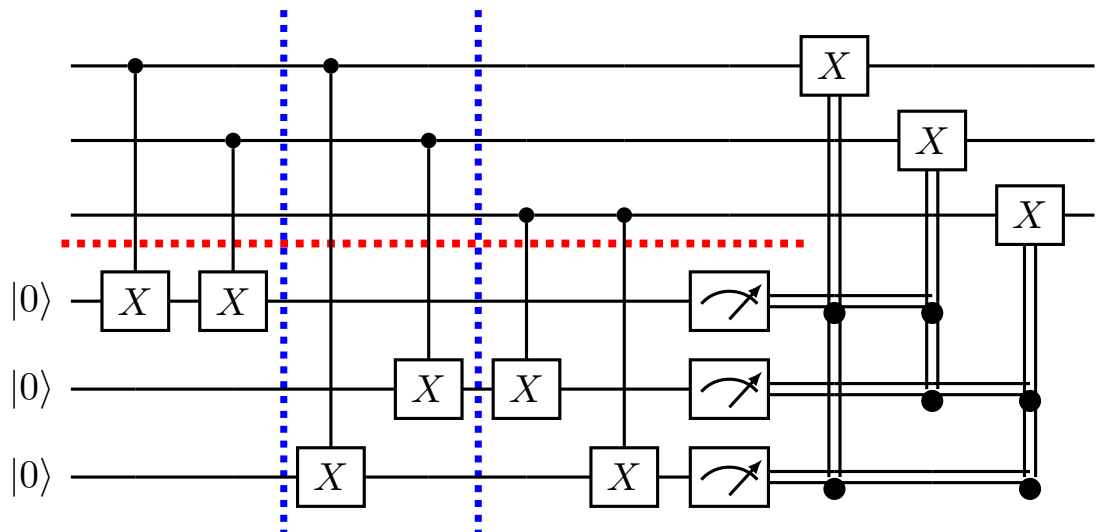


图 6-2 对Bit flip电路进行contraction的拆分

表示了布尔函数 $f(x_1, \dots, x_8) = x_1x_2 + x_3x_4 + x_5x_6 + x_7x_8$ ，但图??的结构更简单。其中图??的索引顺序为 $\{x_1, x_3, x_5, x_7, x_2, x_4, x_6, x_8\}$ ，图??的索引顺序为 $\{x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6, x_7, x_8\}$ 。找到一个好的索引顺序是一个NP问题。在工程实现中，目前只能通过小规模电路上寻求规律，然后在更大规模电路中应用较优顺序。

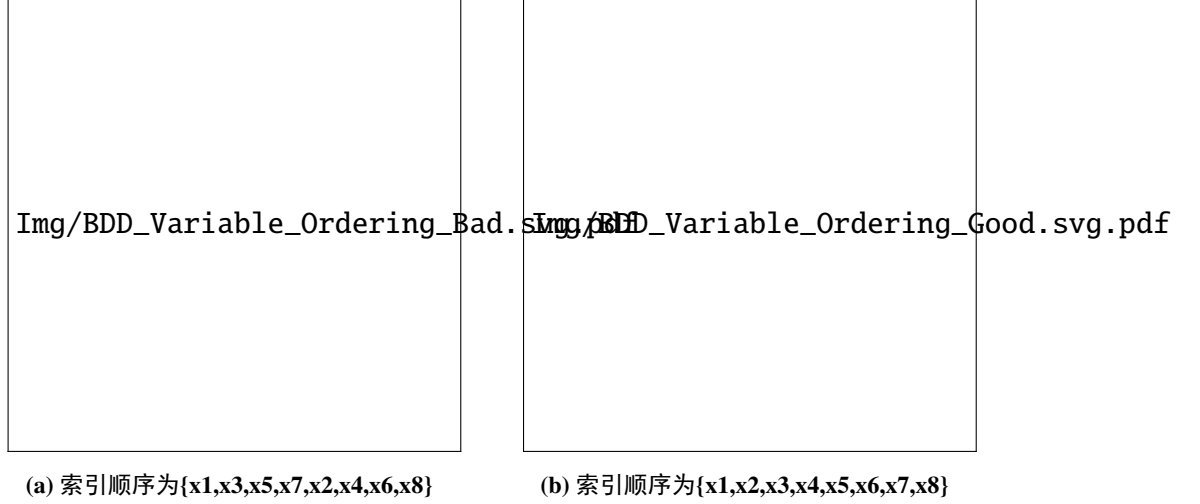
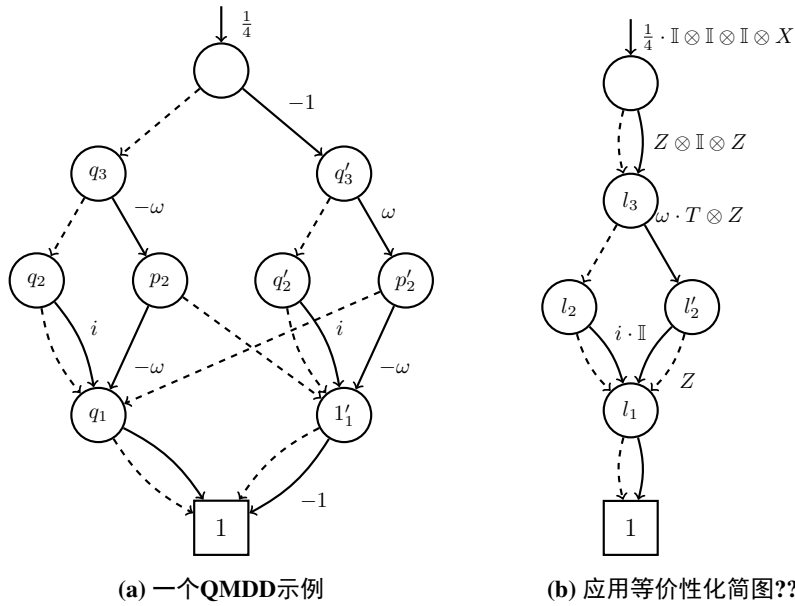


图 6-3 同一布尔函数在不同索引顺序下的结构图^[2]

由于量子状态都在同一希尔伯特空间中。因此作用某些算子后，不同的量子状态可能等价。当存储算子的资源少于存储状态的资源时，就有可能存储算子表示不同的状态^[2]。图??表示了一个QMDD的例子，应用等价性，可以化简为图??。TDD也可以应用类似技术，进行进一步化简，从而降低资源要求。



6.3 软件系统实现

为了实现软件的高效运行，模块化设计至关重要。每个模块在软件系统中扮演着关键角色，并且具有特定的功能和目的。以下是本次毕业设计中软件必须包含的模块及其重要性的说明：

- **输入处理模块：**该模块的主要职责是处理输入数据，例如接收用OpenQASM格式编写的量子算法代码。其核心功能是将这些代码转换为TDD表示形式。鉴于当前存在多种量子编程语言，此模块的模块化处理能够显著提升系统的灵活性和兼容性。

- **内存管理模块：**本模块负责管理TDD节点的存储和维护。当创建新的TDD节点时，它会运用哈希算法与现有节点进行对比，以避免重复创建相同节点。这种方法不仅减少了内存占用，还提高了处理效率。

- **TDD基础模块：**该模块主要执行TDD节点的压缩操作，或者导出TDD的树状结构图。节点收缩是TDD核心的运算过程，而树状结构图的导出功能则有助于用户更好地理解和分析TDD的结构。

- **TDD算法模块：**此模块为TDD提供更复杂的算法支持。例如，它能够调整节点收缩的顺序，以优化系统运行效率。此外，它还能执行其他高级功能，如检验TDD是否存在于特定子空间中。

第7章 研究进展以及存在的问题

7.1 学术成果

以下是目前的研究成果：

- 论文题目：Image Computation for Quantum Transition Systems
- ICCAD 2023 投稿情况：
 - * 论文编号：568
 - * 审稿结果：投稿被拒
 - * 审稿人评分：2，4，4
- DAC2024 投稿情况：
 - * 当前状态：在投
 - * 预期反馈日期：2024年2月26日前

7.2 研究内容进展

在模型检测中，image computation指的是在给定当前状态 $s_i \in S$ 和行为 $\alpha \in Act$ 的情况下计算接下来的状态。目前，在Intel Xeon-Gold-5215 CPU，512GB RAM的硬件平台上，关于使用TDD对量子的image computation的计算已经完成。图??表示了对Grover搜索算法运行不同image computation算法的资源对比。图??表示了对quantum Fourier transform (QFT) 算法运行不同image computation算法的资源对比。图??表示了对Bernstein–Vazirani (BV) 算法运行不同image computation算法的资源对比。图??表示了对Greenberger–Horne–Zeilinger (GHZ) 状态制备电路运行不同image computation算法的资源对比。图??表示了对在 2^n 环上的quantum random walk (QRW) 算法运行不同image computation算法的资源对比。



图 7-1 对Grover算法运行image computation时不同电路拆分技术的资源对比

表??给出了在不同电路拆分技术下具体的各类算法的计算时间，单位为秒，max node表示计算过程中TDD的节点最大个数。其中basic表示没有使用优化技

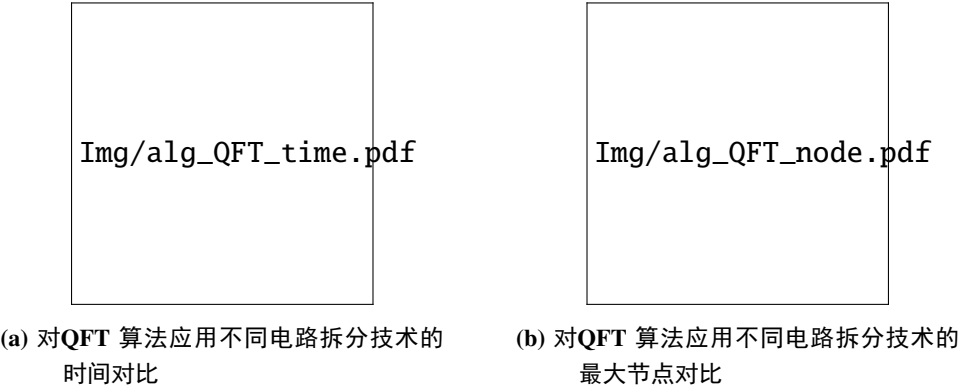


图 7-2 对QFT算法运行image computation时不同电路拆分技术的资源对比

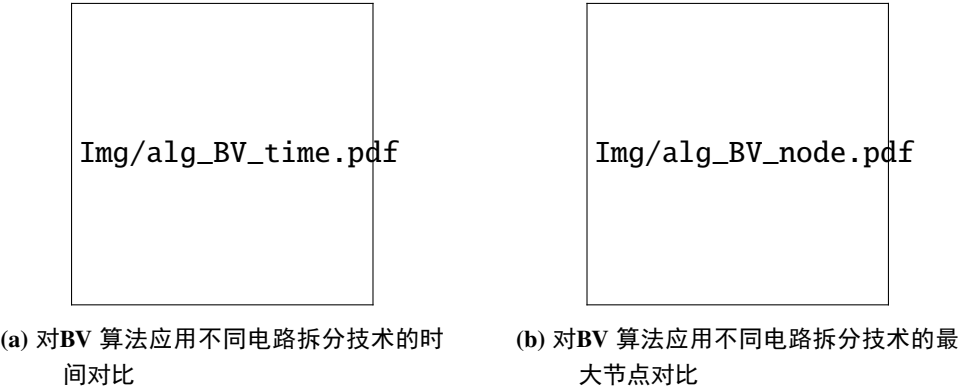


图 7-3 对BV算法运行image computation时不同电路拆分技术的资源对比

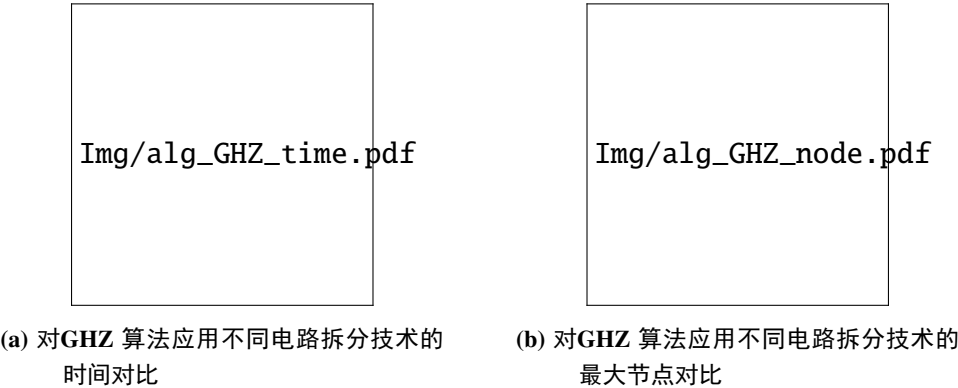


图 7-4 对GHZ算法运行image computation时不同电路拆分技术的资源对比

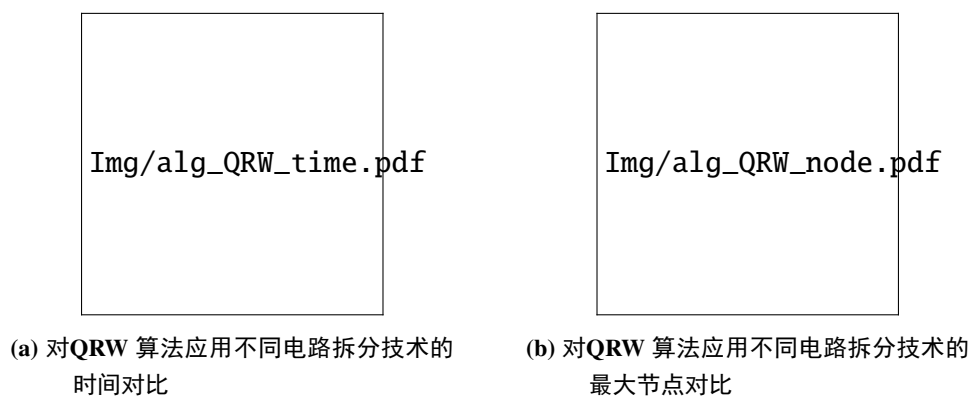


图 7-5 对QRW算法运行image computation时不同电路拆分技术的资源对比

术，addition表示使用研究方法??的addition优化技术，contraction表示使用研究方法??中的contraction优化技术。“-”表示超过一小时的运行上限。

通过对比不同优化技术下的计算时间，可以看到使用优化技术能够显著降低计算时间。例如，在Grover-20的例子中，使用"contraction"优化技术的情况下，计算时间从294秒降低到了4秒。这表明优化技术在提高计算效率方面起到了积极的作用。

同时，表??展示了对同一线路，即Grover_15应用不同的addition参数的时间，可以看到合适的参数选择也是非常重要的。

在技术实现上，构建了两个版本的量子线路转化为TDD的工具，分别基于C语言和Python语言。这些工具的开发对于实现我们的研究方法至关重要，提高了实验的灵活性和效率。其中的C语言的TDD支持任意维度张量，例如对双比特CNOT门，既可以按图??中的张量维度为4，即按照索引为 q_1, q_0 进行表示。也可以按图??中的张量维度为4，即按照索引为 q_3, q_2, q_1, q_0 进行表示。这样的设计大大提高了TDD的表示能力，为更复杂系统的验证提供了基础。

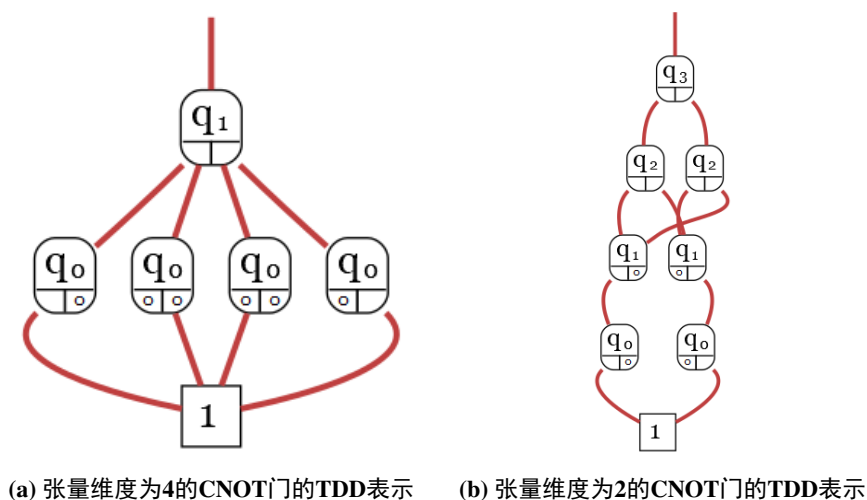


图 7-6 C语言版的TDD支持任意维度的例子

Benchmark	basic		addition		contraction	
	time	max #node	time	max #node	time	max #node
Grover_15	19.33	15785	17.35	15099	1.61	597
Grover_18	76.47	61694	66.02	60332	2.41	516
Grover_20	294.65	243946	259.87	241240	4.39	1036
Grover_40	-		-		2953.57	851973
QFT_15	34.64	65536	18.88	32770	0.08	63
QFT_18	282.12	524288	148.13	262146	0.10	31
QFT_20	1199.21	2097152	655.19	1048578	0.12	63
QFT_30	-		-		0.29	31
QFT_50	-		-		1.02	51
QFT_100	-		-		7.14	101
BV_100	7.36	596	7.43	596	0.41	102
BV_200	31.57	1196	30.03	1196	1.70	202
BV_300	75.66	1796	75.56	1796	4.28	302
BV_400	146.47	2396	145.40	2396	9.18	402
BV_500	244.15	2996	223.90	2996	16.31	502
GHZ_100	0.38	595	0.13	301	0.18	200
GHZ_200	0.72	1195	0.37	601	0.48	400
GHZ_300	1.29	1795	0.62	901	0.80	600
GHZ_400	2.03	2395	1.00	1201	1.26	800
GHZ_500	2.96	2995	1.45	1501	1.72	1000
QRW_15	36.86	13122	24.59	10882	7.16	222
QRW_18	139.76	90538	84.69	37064	11.23	226
QRW_20	341.05	265614	218.29	107714	14.31	404
QRW_30	-		-		36.82	404
QRW_50	-		-		118.08	404
QRW_100	-		-		692.08	436

表 7-1 对不同测试实验应用image computation

k1k2	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15
1	2.8	2.2	2.1	2.0	1.9	2.0	2.1	2.0	2.1	2.0	2.0	2.1	2.2	2.1	2.1
3	2.2	1.9	1.8	1.6	2.0	1.9	2.1	2.1	2.5	2.3	2.7	2.3	3.1	2.8	3.3
4	2.3	1.8	2.0	1.7	2.0	2.1	2.2	2.1	2.6	2.3	2.8	2.7	3.3	3.0	3.3
5	2.2	1.7	1.9	1.6	1.9	2.0	2.3	1.9	2.5	2.3	2.8	2.7	3.4	3.0	3.6
6	2.1	1.5	1.8	1.7	2.2	1.9	2.5	2.2	2.9	2.8	3.1	2.9	3.7	3.7	4.2
7	2.1	1.5	1.9	1.6	2.2	1.9	2.5	2.2	2.8	3.0	3.6	3.3	4.2	5.7	5.0
8	2.0	1.7	1.8	1.7	2.1	2.0	2.4	2.2	2.8	2.8	3.7	3.4	4.3	4.8	5.2
9	2.1	1.5	2.0	1.4	2.2	2.0	2.5	2.0	3.3	2.9	3.7	3.5	4.9	4.7	5.8
10	2.3	1.9	2.3	1.6	2.6	2.7	3.1	2.2	4.0	3.6	4.6	3.9	5.6	5.2	7.5
11	3.2	3.2	3.5	3.1	4.7	4.2	5.6	4.2	6.8	7.2	7.6	6.3	9.0	8.1	11
12	5.6	6.0	7.2	6.0	8.3	9.0	8.9	7.8	11	11	12	11	12	15	16
13	11	12	14	12	15	18	18	15	18	20	18	32	32	30	25
14	20	21	24	32	31	44	77	50	86	109	68	133	70	119	142
15	28	30	31	53	69	111	85	81	102	153	114	130	166	162	235

表 7-2 对grover_15应用不同的addition 参数

7.3 学术论文进展

在学术论文撰写方面的进展包括：

- 完成了学术论文中关于研究背景的详细调查和综述，这部分内容主要包括了量子模型检测的背景知识与重要性。
- 撰写了研究内容的方法论部分，详细描述了主要的研究方法和实验设计。阐述了我们的研究方法，并详细介绍了方法的实施步骤和预期目标。

7.4 目前存在的问题

在本研究过程中，主要遇到了两个问题，这些问题对研究的深入发展和实际应用产生了重要影响。

首先，面临的一个关键挑战是如何将所提出的方法扩展应用到更大规模的实例。这不仅涉及到算法的效率问题，还包括数据处理能力的提升。对于实现验证量子计算算法在更广泛领域的应用至关重要。为了解决这一挑战，目前采用电路拆分方法来降低 TDD 的资源消耗，并挖掘可能的并行计算机会。此外，还计划应用更灵活的索引策略和 limdd 的思路，以期达到更高效的处理效果。

其次，另一个重要的问题是如何将研究方法应用于更加实用的示例。这是将理论研究转化为实际应用的关键一步。目前考虑的主要方向是将此方法应用到量子线路设计，即 QDA（Quantum Design Automation）领域。计划未来能够将本研究成果应用于不同的 synthesis 算法的验证等价性中，从而在量子计算的的实际应用中发挥更大的作用。

第8章 下一步的工作计划和答辩时间

8.1 未来的进度安排

中期报告之后，目前的进度安排如下：

- 2024.01至2024.02：进行工具性能测试、优化和评价。在这个阶段，我将对已实现的基于TDD的量子模型检测工具进行性能提升。特别的，考虑在实际场景中应用已完成的工具。根据测试结果，对工具进行必要的优化和改进，以提高其计算效率和准确性。同时，结合实验结果和评估数据，对工具的性能进行客观评价，并提出可能的改进方案。

- 2024.03至2024.04：总结研究工作并撰写硕士论文。在这个阶段，我将对整个研究过程进行总结和归纳，梳理研究中的重要发现和创新点。然后，撰写硕士论文，包括引言、相关工作、方法设计、实验结果、分析和讨论等部分，以完整而准确地呈现研究成果。此外，还将对未来可能的研究方向和改进方案进行探讨和展望。

- 2024.04至2024.05：总结工作，准备答辩。在这个阶段，我将深入分析整个硕士研究过程中的关键成就和挑战。我将准备详细的答辩演示，包括对主要研究成果的展示、研究方法的阐述、以及对研究局限性的诚实评估。同时，我也将为可能的答辩问题进行充分的准备，确保能够对评审委员会的任何疑问提供清晰、准确的回答。此外，我将与导师密切合作，确保论文和答辩的质量达到最高标准。

8.2 预计答辩时间

一切顺利的话，预计我的硕士论文答辩将于2024年5月进行。答辩前，我将进行广泛而深入的准备工作，确保能够充分展示我的研究成果和对学术领域的理解。这将包括对论文的每一部分进行细致的复习，以及对答辩过程中可能提出的问题进行预演和准备。

附录一 附录中的公式

对公式的引用如，公式(??)

$$\begin{cases} \frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{V}) = 0 \\ \frac{\partial(\rho \mathbf{V})}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{V} \mathbf{V}) = \nabla \cdot \boldsymbol{\sigma} \\ \frac{\partial(\rho E)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho E \mathbf{V}) = \nabla \cdot (k \nabla T) + \nabla \cdot (\boldsymbol{\sigma} \cdot \mathbf{V}) \end{cases} \quad (\text{附1-1})$$

$$\begin{cases} \frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{V}) = 0 \\ \frac{\partial(\rho \mathbf{V})}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho \mathbf{V} \mathbf{V}) = \nabla \cdot \boldsymbol{\sigma} \\ \frac{\partial(\rho E)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho E \mathbf{V}) = \nabla \cdot (k \nabla T) + \nabla \cdot (\boldsymbol{\sigma} \cdot \mathbf{V}) \end{cases} \quad (\text{附1-2})$$

mathtext: $A, F, L, 2, 3, 5, \sigma$, mathnormal: $A, F, L, 2, 3, 5, \sigma$, mathrm: $A, F, L, 2, 3, 5, \sigma$.
 mathbf: **$A, F, L, 2, 3, 5, \sigma$** , mathit: $A, F, L, 2, 3, 5, \sigma$, mathsf: $A, F, L, 2, 3, 5, \sigma$.
 mathhtt: **$A, F, L, 2, 3, 5, \sigma$** , mathfrak: $\mathfrak{A}, \mathfrak{F}, \mathfrak{L}, \mathfrak{2}, \mathfrak{3}, \mathfrak{5}, \mathfrak{\sigma}$, mathbb: $\mathbb{A}, \mathbb{F}, \mathbb{L}, \mathbb{2}, \mathbb{3}, \mathbb{5}, \mathbb{\sigma}$.
 mathcal: $\mathcal{A}, \mathcal{F}, \mathcal{L}, \in, \exists, \nabla, \sigma$, mathscr: $\mathscr{A}, \mathscr{F}, \mathscr{L}, , , , \sigma$, boldsymbol: **$A, F, L, 2, 3, 5, \sigma$** .
 vector: $\boldsymbol{\sigma}, \mathbf{T}, \mathbf{a}, \mathbf{F}, \mathbf{n}$, unitvector: $\boldsymbol{\sigma}, \mathbf{T}, \mathbf{a}, \mathbf{F}, \mathbf{n}$
 matrix: $\boldsymbol{\sigma}, \mathbf{T}, \mathbf{a}, \mathbf{F}, \mathbf{n}$, unitmatrix: $\boldsymbol{\sigma}, \mathbf{T}, \mathbf{a}, \mathbf{F}, \mathbf{n}$
 tensor: $\boldsymbol{\sigma}, \mathbf{T}, \mathbf{a}, \mathbf{F}, \mathbf{n}$, unittensor: $\boldsymbol{\sigma}, \mathbf{T}, \mathbf{a}, \mathbf{F}, \mathbf{n}$

附录二 附录中的图表

附表测试

附表 2-1 这是一个样表

App Table 2-1 This is a sample table

行号	跨多列的标题							
Row 1	1	2	3	4	5	6	7	8

附表 2-2 这是一个样表

App Table 2-2 This is a sample table

行号	跨多列的标题							
Row 1	1	2	3	4	5	6	7	8

附图测试

附图 2-1 这是一个样图

App Figure 2-1 This is a sample figure

注: 对图片的注释

致 谢

此处填写致谢。

2023年6月

作者简历及攻读学位期间发表的学术论文与其他相关学术成果

作者简历：

xxxx年xx月——xxxx年xx月，在xx大学xx院（系）获得学士学位。

xxxx年xx月——xxxx年xx月，在xx大学xx院（系）获得硕士学位。

xxxx年xx月——xxxx年xx月，在中国科学院xx研究所（或中国科学院大学xx院系）攻读博士/硕士学位。

工作经历：

已发表（或正式接受）的学术论文：

- (1) 已发表的工作1
- (2) 已发表的工作2

申请或已获得的专利：

（无专利时此项不必列出）

参加的研究项目及获奖情况：

