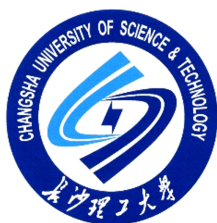


学校代号 10536

学 号 20208051427

分 类 号 TP391

密 级 公开



长沙理工大学

专业硕士学位论文

神经网络剪枝与稀疏模型泛化研究

学位申请人姓名 康夏涛

所 在 学 校 计算机与通信工程学院

专 业 学 位 类 别 工程硕士

专 业 学 位 领 域 电子信息

校内导师姓名及职称 李平 教授

校外导师姓名及职称 曾彬 高级工程师

论 文 提 交 日 期 2023年4月



学校代号: 10536

学 号: 20208051427

密 级: 公开

## 长沙理工大学专业硕士学位论文

# 神经网络剪枝与稀疏模型泛化研究

学位申请人姓名 康夏涛

所 在 学 院 计算机与通信工程学院

导师姓名及职称 李平 教授

专 业 学 位 领 域 电子信息

论 文 提 交 日 期 2023年4月

论 文 答 辩 日 期 2023年5月

答辩委员会主席 肖晓丽



# Research on Neural Network Pruning and Sparse Model Generalization

by

KANG Xiatao

B.E. (Hubei Polytechnic University) 2020

A thesis submitted in partial satisfaction of the

Requirements for the professional degree of

Master of Engineering

in

Changsha University of Science & Technology

Supervisor

Professor Li Ping

April, 2023



## 长沙理工大学

### 学位论文原创性声明

本人郑重声明：所呈交的论文是本人在导师的指导下独立进行研究所取得的研究成果。除了文中特别加以标注引用的内容外，本论文不包含任何其他个人或集体已经发表或撰写的成果作品。对本文的研究做出重要贡献的个人和集体，均已在文中以明确方式标明。本人完全意识到本声明的法律后果由本人承担。

作者签名：                    日期：        年        月        日

### 学位论文版权使用授权书

本学位论文作者完全了解学校有关保留、使用学位论文的规定，同意学校保留并向国家有关部门或机构送交论文的复印件和电子版，允许论文被查阅和借阅。本人授权长沙理工大学可以将本学位论文的全部或部分内容编入有关数据库进行检索，可以采用影印、缩印或扫描等复制手段保存和汇编本学位论文。同时授权中国科学技术信息研究所将本论文收录到《中国学位论文全文数据库》，并通过网络向社会公众提供信息服务。

本学位论文属于

1、保密☐，在\_\_\_\_年解密后适用于本授权书

2、不保密☐。

(请在以上相应方框内打“√”)

作者签名：                    日期：        年        月        日

导师签名：                    日期：        年        月        日





# 摘要

大规模神经网络模型涌现出了让人类叹为观止的能力，但随之而来的是不可解释性和千亿级参数量，这使得相关研究比以往任何时候都更具挑战性。最近的一些研究从神经网络剪枝的角度来探讨网络的运行机理，而不是仅仅为了模型压缩。主要的工作集中在训练前剪枝和稀疏模型深层结构研究，且训练前修剪模型后在训练阶段也能起到加速作用，有很强的应用价值。本文以提升稀疏模型泛化为目标，对训练前剪枝展开研究，探讨了在每轮训练中由一批样本训练引起待训练样本的损失隐式减少的新视角，提出了在稀疏网络过程中权重表现力转移的概念。

对于隐式损失下降，本文给出了其称为梯度耦合流的一阶近似，并探索了耦合流与稀疏模型泛化之间的联系，隐式损失理想地以细粒度的方式描述了精度波动的原因。由隐式损失下降的特性，本文提出敏感于梯度耦合流的权重度量准则，在初始化时捕获那些对性能提升最敏感的权重。

通过权重表现力转移的性质，本文对度量指标做动态分析，发现若要维持网络原有的性能，剩余权重将承担来自删减权重的表现力。为了实现最优的表现力调度，本文提出称为淘金的训练前修剪方案，通过多指标多流程的步骤引导表现力转移，并设计强化学习智能体实现淘金策略的自动化。

另外，本文的梯度耦合流敏感度量和强化学习淘金方案都在图像分类任务中进行了实证研究。梯度耦合流敏感在训练前的单次剪枝和迭代剪枝中都有优异的表现，而且耦合流的细分扩展更好的证明了耦合流的有效。强化学习淘金取得了非常好的稀疏效果，在任意压缩率下呈现了不错的性能，且可扩展并适用于大规模模型和数据集。实证表明，梯度耦合流和权重作用力为研究网络运行机理提供了有效的方法，并对提高过参数化网络可解释性和稳定性做出了贡献。

**关键词：**神经网络剪枝；稀疏模型泛化；训练前剪枝；强化学习剪枝；梯度耦合流；权重表现力



# ABSTRACT

The emergence of large-scale neural network models has produced astonishing capabilities, but it also brings with it uninterpretability and hundreds of billions of parameters, which makes related research more challenging than ever. Recent research has explored the operating mechanism of neural networks from the perspective of network pruning, rather than simply compressing models. The main focus is on pruning before training and structural research on deep sparse models, and pruning models before training can also accelerate the training process, with strong practical value. This dissertation aims to improve the generalization of sparse models, conducts research on pruning before training, explores a new perspective on loss implicit decrease of the data to be trained caused by one-batch training during each round, and proposes the concept of weight expressive force transfer in sparse network processes.

For the implicit loss reduction, this dissertation provides its first-order approximation called gradient coupled flow, and explores the relationship between coupled flow and the generalization of sparse models. The implicit loss ideally describes the cause of accuracy fluctuations in a fine-grained manner. Based on the characteristics of implicit loss reduction, this dissertation proposes a weight measure criterion sensitive to gradient coupled flow, which captures the weights that are most sensitive to performance improvement at initialization.

Based on the perspective of weight expressive force transfer, this dissertation analyzes the measurement indicators and finds that the remaining weights will bear the expressive force from the deleted weights in order to maintain the network original performance. In order to achieve optimal expressive force scheduling, this dissertation proposes a pruning before training scheme called panning, which guides the transfer of expressive force through a multi-indicator and multi-process step, and designs an intelligent agent based on reinforcement learning to automate this process.

In addition, the gradient coupled flow sensitivity measure and the reinforcement learning panning scheme proposed in this dissertation were empirically studied in image classification tasks. The gradient coupled flow sensitivity measure performed well in both single-shot and iterative pruning before training, and the finer subdivision of the coupled flow better demonstrated

its effectiveness. The reinforcement learning panning achieved very good sparse effects, showing excellent performance at any compression rate and being applicable to large-scale models and datasets. The empirical results show that the gradient coupled flow and weight expressive force transfer provide effective methods for studying the operation mechanism of neural networks, and contribute to improving the interpretability and stability of over-parameterized networks.

**Key Words:** neural network pruning; sparse model generalization; pruning before training; reinforcement learning pruning; gradient coupled flow; weight expressive force

# 目 录

摘 要	I
Abstract	III
目 录	V
插图索引	VII
附表索引	IX
第 1 章 模板介绍与注意事项	1
1.1 模板说明	1
1.2 下载安装	1
1.3 目录内容	1
1.4 参考文献生成方法	3
1.5 编译注意事项	3
1.6 系统要求	4
1.7 $\text{\TeX}$ 简介	4
1.7.1 什么是 $\text{\TeX}$ / $\text{\LaTeX}$ , 我是否应该选择它?	5
1.7.2 我该用什么编辑器?	5
1.7.3 我应该看什么 $\text{\LaTeX}$ 读物?	6
1.7.4 什么知识会过时? 什么不会?	6
1.8 免责声明	8
第 2 章 图片的插入方法	9
2.1 研究生毕业论文的插图规范	9
2.1.1 图题及图中说明	9
2.1.2 插图编排	9
2.2 $\text{\LaTeX}$ 中推荐使用的图片格式	10
2.3 单张图片的插入方法	10
2.4 具有子图的图片插入方法	13
第 3 章 表格的绘制方法	15
3.1 研究生毕业设计论文的绘表规范	15
3.2 普通表格的绘制方法	15
3.3 长表格的绘制方法	17
3.4 列宽可调表格的绘制方法	19
3.4.1 表格内某单元格内容过长的情况	19
3.4.2 对物理量符号进行注释的情况	20

第 4 章 数学公式的输入方法 .....	23
4.1 研究生毕业设计论文的公式规范 .....	23
4.2 生成 $\text{\LaTeX}$ 数学公式的两种方法 .....	23
4.2.1 基于 MathType 软件的数学公式生成方法 .....	23
4.2.2 基于 MATLAB 软件的数学公式生成方法 .....	24
4.3 数学字体 .....	25
4.4 行内公式 .....	25
4.5 行间公式 .....	26
4.6 可自动调整大小的定界符 .....	27
4.7 数学重音符号 .....	27
第 5 章 基于DSP微处理器应用的最优调度和集群间通信 .....	29
5.1 引言 .....	29
5.2 基本原理 .....	31
5.2.1 DSP处理器集群建模 .....	31
5.2.2 动机 .....	31
5.3 设计具有最小总线需求的集群间连接网络 .....	33
5.3.1 觉得集群间连接网络的最小总线需求数 .....	33
第 6 章 总结与展望 .....	35
参考文献 .....	37
致 谢 .....	39
附录A 攻读博士学位期间发表的学术论文 .....	41
附录B 攻读博士学位期间参与的科研项目 .....	42
附录C 攻读博士学位期间获得的奖励 .....	43

## 插图索引

图 2.1	树状结构 .....	11
图 2.2	数据维数的变化 .....	12
图 2.3	数据规模的变化 .....	12
图 2.4	Scalability of data .....	13
图 4.1	由 $\text{\LaTeX}$ 和 Word 生成的 3 种行内公式屏显效果 .....	26





## 附表索引

表 3.1	符合本科生毕业论文绘图规范的表格 .....	15
表 3.2	湖南大学各学院名称一览 .....	17
表 3.3	最小的三个正整数的英文表示法 .....	19
表 4.1	常用数学字体命令一览 .....	25
表 4.2	各种类型行间公式的标记 .....	26



## 第1章 模板介绍与注意事项

### 1.1 模板说明

CSUSTthesis 是为长沙理工大学毕业生撰写毕业论文而编写的  $\text{\LaTeX}$  论文模板。因为本校论文格式要求和湖大毕业论文格式相近，本模板基于湖大的 HNUthesis: [https://github.com/ljmdzyx1985/HNUthesis\\_master](https://github.com/ljmdzyx1985/HNUthesis_master)

如果你从来没有接触过  $\text{\LaTeX}$ ，建议先学习相关基础知识，磨刀不误砍柴工，能帮助你更好使用模板。<sup>[1][2]</sup>

由于个人水平有限，虽然现在的这个版本基本上满足了学校的要求，但难免存在不足之处，欢迎大家积极反馈，更希望有大佬能一同完善此模板，让更多同学受益。

如有模板的疑问或有意向加入模板的维护和编写队伍中来，请联系作者：kangxiatao@gmail.com

### 1.2 下载安装

CSUSTthesis 主页：[https://github.com/kangxiatao/CSUST\\_master](https://github.com/kangxiatao/CSUST_master)  
gitee 上也有同步镜像。

### 1.3 目录内容

本  $\text{\LaTeX}$  模板的源文件即为研究生毕业设计论文中使用的模板，用户可以通过修改这些文件来编辑自己的毕业论文。

- main.tex: 主文件，包含封面部分和其他章节的引用信息。
- preface: 包含本科毕业设计论文的封面和中英文摘要。
- body: 包含本文正文中的所有章节。
  - intros.tex: 包括本  $\text{\LaTeX}$  模板的介绍，编译方法和使用方法。
  - figures.tex: 包含论文中图片的插入和引用方法。
  - tables.tex: 包含论文中表格的插入和引用方法。
  - equations.tex: 包含论文中数学符号、公式的书写和排版方法。
  - others.tex: 包含论文中使用的罗列环境，定理环境等其他环境的排版方法。

- conclusion.tex: 包含本文的总结。
- setup: 存放论文所使用的宏包和全文格式的定义。
- appendix: 存放作者的发表论文和参加科研情况说明以及致谢文件。
- references/reference.bib: 存放论文所引用的全部参考文献信息。
- clean.bat: 双击此文件, 可以用来清理 main.tex 在编译之后生成的所有附属文件, 如后缀名为 .aux , .log , .bak 的文件。

需要说明的是, 以上文件名并不是固定的, 各位同学可以新建一个 tex 文件, 例如 algorithm.tex, 放在 body 目录下, 并且在 main.tex 中调用:

```
\include{body/algorithm.tex}
```

来引用之。当然你也可以重命名这些文件, 只要 include 中的文件名是存在且合法, L<sup>A</sup>T<sub>E</sub>X 总能找到这些文件的。

在你写作某一章节的时候, 你可能需要随时预览排版效果并 Debug, 这时你可以在其他章节的\include命令前加上一个%, 这代表注释掉本行, 例如:

```
%%%%%%%%%
```

正文部分

```
%%%%%%%%%
```

```
\mainmatter
```

```
\include{body/intros}
```

```
%%\include{body/figures}
```

```
%%\include{body/tables}
```

```
%%\include{body/equations}
```

```
%%\include{body/others}
```

```
%%\include{body/conclusion}
```

那么, 编译的时候就只编译未加 % 的一章, 在这个例子中, 即本章 intros。

理论上, 并不一定要把每章放在不同的文件中。但是这种自顶向下, 分章节写作、编译的方法有利于提高效率, 大大减少 Debug 过程中的编译时间, 同时减小风险。

## 1.4 参考文献生成方法

L<sup>A</sup>T<sub>E</sub>X 具有插入参考文献的能力。Google Scholar 网站上存在兼容 BibTeX 的参考文献信息，通过以下几个步骤，可以轻松完成参考文献的生成。

- 在谷歌学术搜索中，点击学术搜索设置。
- 页面打开之后，在文献管理软件选项中选择显示导入 **BibTeX** 的链接，单击保存设置，退出。
- 在谷歌学术搜索中检索到文献后，在文献条目区域单击导入 BibTeX 选项，页面中出现文献的引用信息。
- 将文献引用信息的内容复制之后，添加到 references 文件夹下的 reference.bib 中。

## 1.5 编译注意事项

1. 由于模板使用 UTF-8 编码，所以源文件应该保存成 UTF-8 格式，否则可能出现中文字符无法识别的错误。本模板中每一个 .tex 文件的文件的开头已经加上一行：

```
% !Mode:: "TeX:UTF-8"
```

这样可以确保 .tex 文件默认使用 UTF-8 的格式打开。读者如果删去此行，很有可能会导致中文字符显示乱码。在 WinEdt 编辑器中可以使用以下两种方式保存成 UTF-8 格式：

(a) 先建立 .tex 文件，另存为 .tex 文件时，选择用 UTF-8 格式保存。

(b) 在 WinEdt 编辑器中，选择

Document→Document Settings→Document Mode →TeX:UTF-8 同 时 在 WinEdt 最 下 面 的 状 态 栏 中， 可 以 看 到 该 文 档 是 TeX 格 式 还 是 TeX:UTF-8 格 式。 当 文 档 为 TeX:UTF-8 格 式 时， 状 态 栏 一 般 显 示： Wrap — Indent — INS — LINE — Spell — TeX:UTF-8 — -src 等。

2. 如果在pdf书签中，中文显示乱码的话，则注意以下说明：

```
\usepackage{CJKutf8}
```

```
% 1. 如果使用CJKutf8
```

```
% Hyperref中应使用unicode参数
```

```
% 2. 如果使用CJK
```

```
% Hyperref则使用CJKbookmarks参数
```

```
% 可惜得到的PDF书签是乱码，建议弃用
```

% 3. Unicode选项和CJKbookmarks不能同时使用

```
\usepackage[  
%CJKbookmarks=true,  
unicode=true  
{hyperref}
```

3. 建议采用以下两种编译方式:

(a) latex + bibtex + latex + latex + dvi2pdf. 在这种编译情况下, 对应的 main.tex 文件的第一行是`\def\usewhat{dvipdfmx}` (缺省设置)。此时, 所有图片文件应该保存为 .eps 格式, 如 figures 文件夹里 .eps 图片。如果您选择在命令行中操作, 可以在编译的时候依次输入 latex main, bibtex main, latex main, latex main 和 dvipdfmx main, 编译完成之后, 需要手动打开 pdf 文件。

(b) pdflatex + pdflatex. 在这种编译情况下, 对应的 main.tex 文件的第一行应该改为`\def\usewhat{pdflatex}`。此时, 编译不支持 .eps 图片格式, 此时需要在命令行下使用 epstopdf 指令将 figures 文件夹下的 .eps 文件转化成 .pdf 文件格式, 命令行中操作格式为 epstopdf a.eps。在命令行编译的时候, 依次输入 pdflatex main 和 pdflatex main, 编译完成之后, 需要手动打开 pdf 文件。

## 1.6 系统要求

CTEX 2.8, MiKTeX 2.8, TeX Live 2009 或以上版本。使用推荐的 WinEdt 6.0 编辑器, 可以完成文件的编辑和编译工作。

## 1.7 T<sub>E</sub>X 简介

以下内容是 milksea@bbs.ctex.org 撰写的关于 T<sub>E</sub>X 的简单介绍, 略有改动。注意这不是一个入门教程, 不讲 T<sub>E</sub>X 系统的配置安装, 也不讲具体的 L<sup>A</sup>T<sub>E</sub>X 代码。这里仅仅试图以一些只言片语来解释: 进入这个门槛之前新手应该知道的注意事项, 以及遇到问题以后该去如何解决问题。

### 1.7.1 什么是 $\text{T}_{\text{E}}\text{X}$ / $\text{L}^{\text{A}}\text{T}_{\text{E}}\text{X}$ ，我是否应该选择它？

$\text{T}_{\text{E}}\text{X}$  是最早由高德纳 (Donald Knuth) 教授创建的一门标记式宏语言，用来排版科技文章，尤其擅长处理复杂的数学公式。 $\text{T}_{\text{E}}\text{X}$  同时也是处理这一语言的排版软件。 $\text{L}^{\text{A}}\text{T}_{\text{E}}\text{X}$  是 Leslie Lamport 在  $\text{T}_{\text{E}}\text{X}$  基础上按内容/格式分离和模块化等思想建立的一集  $\text{T}_{\text{E}}\text{X}$  上的格式。

$\text{T}_{\text{E}}\text{X}$  本身的领域是专业排版领域但现在  $\text{TeX/LaTeX}$  也被广泛用于生成电子文档甚至幻灯片等， $\text{T}_{\text{E}}\text{X}$  语言的数学部分偶尔也在其他一些地方使用。但注意  $\text{T}_{\text{E}}\text{X}$  并不适用于文书处理 (Microsoft Office 的领域，以前和现在都不是)。

选择使用  $\text{T}_{\text{E}}\text{X}$ / $\text{L}^{\text{A}}\text{T}_{\text{E}}\text{X}$  的理由包括：

- 免费软件；
- 专业的排版效果；
- 是事实上的专业数学排版标准；
- 广泛的西文期刊接收甚或只接收  $\text{LaTeX}$  格式的投稿；

.....

不选择使用  $\text{T}_{\text{E}}\text{X}$ / $\text{L}^{\text{A}}\text{T}_{\text{E}}\text{X}$  的理由包括：

- 需要相当精力学习；
- 图文混合排版能力不够强；
- 仅在数学、物理、计算机等领域流行；
- 中文期刊的支持较差；

.....

请尽量清醒看待网上经常见到的关于  $\text{T}_{\text{E}}\text{X}$  与其他软件的优劣比较和口水战。在选择使用或离开之前，请先考虑  $\text{T}_{\text{E}}\text{X}$  的应用领域，想想它是否适合你的需要。

### 1.7.2 我该用什么编辑器？

编辑器功能有简有繁，特色不一，从简单的纯文本编辑器到繁复的 Emacs，因人而异。基本功能有语法高亮、方便编译预览就很好了，扩充功能和定制有无限的可能。初学者可以使用功能简单、使用方便的专用编辑器，如  $\text{TeXWorks}$ 、Kile、WinEdt 等，或者类似所见即所得功能的 LyX；熟悉的人可以使用定制性更强的 Notepad++、SciTE、Vim、Emacs 等。这方面的介绍很多，一开始不妨多试几种，找到最适合自己的才是最好的。

另外提醒一句，编辑器只是工作的助手，不必把它看得太重。

### 1.7.3 我应该看什么 L<sup>A</sup>T<sub>E</sub>X 读物？

这不是一个容易回答的问题，因为有许多选择，也同样有许多不合适的选择。这里只是选出一个比较好的答案。更多更详细的介绍可以在版面和网上寻找（注意时效）。

近两年 T<sub>E</sub>X 的中文处理发展很快，目前没有哪本书在中文处理方面给出一个最新进展的合适综述，因而下面的介绍也不主要考虑中文处理。

1. 我能阅读英文。

(a) 迅速入门：ltxprimer.pdf (LaTeX Tutorials: A Primer, India TUG)

(b) 系统学习：A Guide to LaTeX, 4th Edition, Addison-Wesley 有机械工业出版社的影印版（《L<sup>A</sup>T<sub>E</sub>X 实用教程》）

(c) 深入学习：要读许多书和文档，TeXbook 是必读的

(d) 细节学习：去读你使用的每一个宏包的说明文档

(e) 专题学习：阅读讲数学公式、图形、表格、字体等的专题文档

2. 我更愿意阅读中文。

(a) 迅速入门：lnotes.pdf (LaTeX Notes, 1.20, Alpha Huang)

(b) 系统学习：《L<sup>A</sup>T<sub>E</sub>X 2<sub>ε</sub> 科技排版指南》，邓建松（电子版）如果不好找，可以阅读《L<sup>A</sup>T<sub>E</sub>X 2<sub>ε</sub> 入门与提高》第二版，陈志杰等，或者《L<sup>A</sup>T<sub>E</sub>X 2<sub>ε</sub> 完全学习手册》，胡伟

(c) 深入学习：TeXbook0.pdf (特可爱原本，TeXbook 的中译，xianxian)

(d) 具体问题释疑：CTeX-FAQ.pdf，

吴凌云，<http://www.ctex.org/CTeXFAQ>

遇见问题和解决问题的过程可以快速提高自己的技能，建议此时：

- 利用 Google 搜索。
- 清楚，扼要地提出你的问题。

### 1.7.4 什么知识会过时？什么不会？

T<sub>E</sub>X 是排版语言，也是广泛使用的软件，并且不断在发展中；因此，总有一些东西会很快过时。作为学习 T<sub>E</sub>X 的人，免不了要看各种各样的书籍、电子文档和网络论坛上的只言片语，因此了解什么知识会迅速过时，什么知识不会是十分重要的。

最稳定的是关于 Primitive T<sub>E</sub>X 和 Plain T<sub>E</sub>X 的知识，也就是 Knuth 在他的《The TeXbook》中介绍的内容。因为 T<sub>E</sub>X 系统开发的初衷就是稳定性，要求今天的文档到



很久以后仍可以得到完全相同的结果，因此 Knuth 限定了他的  $\text{T}_{\text{E}}\text{X}$  语言和相关实现的命令、语法。这些内容许多年来就没有多少变化，在未来的一些年里也不会有什么变化。 $\text{Primitive T}_{\text{E}}\text{X}$  和  $\text{Plain T}_{\text{E}}\text{X}$  的知识主要包括  $\text{T}_{\text{E}}\text{X}$  排版的基本算法和原理，盒子的原理，底层的  $\text{T}_{\text{E}}\text{X}$  命令等。其中技巧性的东西大多在宏包设计中，初学者一般不会接触到很多；而基本原理则是常常被提到的，譬如， $\text{T}_{\text{E}}\text{X}$  把一切排版内容作为盒子（box）处理。

相对稳定的是关于基本  $\text{L}_{\text{A}}\text{T}_{\text{E}}\text{X } 2_{\epsilon}$  的知识，也包括围绕  $\text{L}_{\text{A}}\text{T}_{\text{E}}\text{X } 2_{\epsilon}$  的一些核心宏包的知识。 $\text{L}_{\text{A}}\text{T}_{\text{E}}\text{X } 2_{\epsilon}$  是自 1993 年以来的一个稳定的  $\text{L}_{\text{A}}\text{T}_{\text{E}}\text{X}$  版本，直到最近的一次修订（2005 年）都没有大的变动。 $\text{L}_{\text{A}}\text{T}_{\text{E}}\text{X}$  的下一个计划中的版本  $\text{L}_{\text{A}}\text{T}_{\text{E}}\text{X } 3$  遥遥无期，在可预见的将来， $\text{L}_{\text{A}}\text{T}_{\text{E}}\text{X } 2_{\epsilon}$  不会过时。 $\text{L}_{\text{A}}\text{T}_{\text{E}}\text{X } 2_{\epsilon}$  的知识是目前大部分  $\text{L}_{\text{A}}\text{T}_{\text{E}}\text{X}$  书籍的主体内容。关于  $\text{L}_{\text{A}}\text{T}_{\text{E}}\text{X}$  的标准文档类（article、report、book、letter、slide 等），关于基本数学公式的输入，文档的章节层次，表格和矩阵，图表浮动体，LR 盒子与段落盒子……这些  $\text{L}_{\text{A}}\text{T}_{\text{E}}\text{X}$  的核心内容都是最常用的，相对稳定的。与  $\text{L}_{\text{A}}\text{T}_{\text{E}}\text{X } 2_{\epsilon}$  相匹配的核心宏包，如 graphics(x)、ifthen、fontenc、doc 等，也同样是相对稳定的。还有一些被非常广泛应用的宏包，如 amsmath 系列，也可以看作是相对稳定的。

简单地说，关于基本  $\text{T}_{\text{E}}\text{X}/\text{L}_{\text{A}}\text{T}_{\text{E}}\text{X}$  的语言，都是比较稳定的。与之对应，实现或者支持  $\text{T}_{\text{E}}\text{X}/\text{L}_{\text{A}}\text{T}_{\text{E}}\text{X}$  语言的软件，包括在  $\text{T}_{\text{E}}\text{X}/\text{L}_{\text{A}}\text{T}_{\text{E}}\text{X}$  基础上建立的新的宏，都不大稳定。

容易过时的是关于第三方  $\text{L}_{\text{A}}\text{T}_{\text{E}}\text{X}$  宏包的知识、第三方  $\text{T}_{\text{E}}\text{X}$  工具的知识，以及新兴  $\text{T}_{\text{E}}\text{X}$  相关软件的知识等。 $\text{T}_{\text{E}}\text{X}$  和  $\text{L}_{\text{A}}\text{T}_{\text{E}}\text{X}$  语言是追求稳定的；但无论是宏包还是工具，作为不断更新软件，它们是不稳定的。容易过时的技术很多，而且现在广泛地出现在几乎所有  $\text{L}_{\text{A}}\text{T}_{\text{E}}\text{X}$  文档之中，因此需要特别引起注意：宏包的过时的原因可能是宏包本身的升级换代带来了新功能或不兼容，也可能是同一功能的更新更好的宏包代替了旧的宏包。前者的典型例子比如绘图宏包 PGF/TikZ，现在的 2.00 版功能十分强大，和旧的 1.1x 版相差很大，和更旧的 0.x 版本则几乎完全不同；后者的典型例子比如 caption 宏包先是被更新的 caption2 宏包代替，后来 caption 宏包更新又使得 caption2 宏包完全过时。——安装更新的发行版可以避免使用过旧的宏包；认真阅读宏包自带的文档而不是搜索得到的陈旧片断可以避免采用过时的代码。

工具过时的主要原因也是升级换代和被其他工具替换。前者的典型例子是编辑器 WinEdt 在 5.5 以后的版本支持 UTF-8 编码，而旧版本不支持；后者的典型例子是中文字体安装工具从 GBKFonts 到 xGBKFonts 到 FontsGen 不断被取代。图形插入是一个

在  $\text{T}_{\text{E}}\text{X}$  实现、宏包与外围工具方面都更新很快的东西。在过去，最常用的输出格式是 PS(PostScript) 格式，因此插入的图像以 EPS 为主流。使用 Dvips 为主要输出工具，外围工具有 GhostScript、bmeps 等等，相关宏包有 graphics 等，相关文档如《 $\text{L}_{\text{A}}\text{T}_{\text{E}}\text{X} 2_{\epsilon}$  插图指南》。

但凡提及“ $\text{L}_{\text{A}}\text{T}_{\text{E}}\text{X}$  只支持 EPS 图形”的，就是这个过时的时代的产物。事实上  $\text{T}_{\text{E}}\text{X}/\text{L}_{\text{A}}\text{T}_{\text{E}}\text{X}$  并不限定任何图形格式，只不过是当时的输出格式 (PS) 和工具 (Dvips) 对 EPS 情有独钟而已。后来 PDF 格式成为主流。pdf $\text{T}_{\text{E}}\text{X}$ 、DVIPDFM、DVIPDFMx、XeTeX 工具则主要支持 PDF、PNG、JPG 格式的图形，涉及一系列工具如 ImageMagick、ebb 等。

值得特别提出注意的就是，中文处理也一起是更新迅速、容易过时的部分。而且因为中文处理一直没有一个“官方”的“标准”做法，软件、工具、文档以及网上纷繁的笔记也就显得相当混乱。从八十年代开始的 CCT 系统、天元系统，到后来的 CJK 方式，到近来的 XeTeX 和 LuaTeX 方式，中文处理的原理、软件、宏包、配置方式等都在不断变化中。

## 1.8 免责声明

本模板依据《长沙理工大学研究生学位论文撰写规范(2020年版)》编写，适用于所有的学位论文编写。然而，作者不保证本模板完全符合学校要求，也不对由此带来的风险和损失承担任何责任。

## 第2章 图片的插入方法

### 2.1 研究生毕业论文的插图规范

图应有自明性。插图应与文字紧密配合，文图相符，内容正确。选图要力求精练，插图、照片应完整清晰。图中文字和数字等字号用宋体五号字。

机械工程图：采用第一角投影法，严格按照 GB4457—GB131-83 《机械制图》标准规定。

数据流程图、程序流程图、系统流程图等按 GB1526-89 标准规定。

电气图：图形符号、文字符号等应符合有关标准的规定。

流程图：必须采用结构化程序并正确运用流程框图。

对无规定符号的图形应采用该行业的常用画法。

坐标图的坐标线均用细实线，粗细不得超过图中曲线，有数字标注的坐标图，必须注明坐标单位。

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

引用文献图表必须标注出处。

#### 2.1.1 图题及图中说明

每个图均应有图题（由图序和图名组成），图名在图序之后空两格排写。图序按章编排，如第 1 章第一个插图的图号为“图 1-1”等。图题置于图下，要求中文用宋体五号字，位置居中。有图注或其它说明时应置于图题之上。引用图应注明出处，在图题右上角加引用文献号。图中若有分图时，分图题置于分图之下或图题之下，分图号用 a)、b)等表示。

图中各部分说明应采用中文（引用的外文图除外）或数字项号，各项文字说明置于图题之上（有分图题者，置于分图题之上）。

#### 2.1.2 插图编排

插图之前，文中必须有本插图的提示，如“见图 1-1”、“如图 1-1 所示”等。插图与其图题为一个整体，不得拆开排写于两页。插图处的该页空白不够排写该图整体

时，则可将其后文字部分提前排写，将图移到次页。

## 2.2 L<sup>A</sup>T<sub>E</sub>X 中推荐使用的图片格式

在 L<sup>A</sup>T<sub>E</sub>X 中应用最多的图片格式是 EPS (Encapsulated PostScript) 格式，它是一种专用的打印机描述语言，常用于印刷或打印输出。EPS 格式图片可通过多种方式生成，这里介绍一款功能强大的免费图片处理软件——ImageMagick，此软件可将其它格式图片转换为 EPS 格式图片，同时还可以锐化图片，使图片的局部清晰一些。

此软件对图片的格式转换操作都是在命令提示符 (cmd.exe) 中实现的，可以通过“开始→运行→输入 cmd→回车”或“开始→程序→附件→命令提示符”找到它。在命令提示符下，首先采用“盘符命令”或“cd 命令”将当前目录改为待处理图片所在的目录，在此目录下就可通过 convert 命令将图片转换为 EPS 格式，其命令的语法格式为

`convert [可选参数] 原文件名.原扩展名 新文件名.eps.`

若 convert 命令中无可选参数，则将原来的图片格式直接转换为 EPS 格式，对图片不进行任何处理，这也是最常用的方法。也可以选用可选参数，可选参数有很多选择，但最常用的有如下两个：

`-sharpen radius{xsigma}`——此参数用来锐化图片，一般用在图片像素不高，需要提高图片清晰度的情况下。其中 radius 只能为整数，它用来确定转换命令采取哪一种锐化算法，我们可以只取 radius 为 0；sigma 为所采取算法的锐化度，它的取值为 0.1 – 3 之间的任意一个浮点数，数值越大，锐化程度也越大，通常取为 0.1 – 3 之间；x 在参数中为分隔符。

`-resize geometry`——此参数用来改变图片的大小，若图片的存储空间过大，可通过此命令缩小图片尺寸，但同时也将导致图片像素降低，其具体用法请参见 `-resize geometry` 的官方说明。

除此之外，一些文字处理软件和科学计算软件也支持生成 EPS 格式的文件，请使用“另存为”功能查看某款软件是否能够将图片以 EPS 格式的形式保存。

## 2.3 单张图片的插入方法

单张图片独自占一行的插入形式如图 2.1 所示。

其插入图片的代码及其说明如下。

---

```
\begin{figure}[htbp]
```

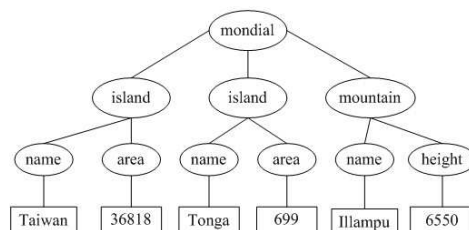


图 2.1 树状结构

`\centering`

`\includegraphics[width=0.4\textwidth]{文件名(.eps)}`

`\caption{标题}\label{标签名(通常为 fig:labelname)}`

`\vspace{\baselineskip}` %表示图与正文空一行

`\end{figure}`

`figure`环境的可选参数`[htbp]`表示浮动图形所放置的位置，**h** (**here**)表示当前位置，**t** (**top**)表示页芯顶部，**b** (**bottom**)表示页芯底部，**p** (**page**)表示单独一页。在Word等软件中，图片通常插入到当前位置，如果当前页的剩余空间不够，图片将被移动到下一页，当前页就会出现很大的空白，其人工调整工作非常不便。由LaTeX提供的浮动图片功能，总是会按**h**->**t**->**b**->**p**的次序处理选项中的字母，自动调整图片的位置，大大减轻了工作量。

`\centering`命令将后续内容转换成每行皆居中的格式。

`"\includegraphics"`的可选参数用来设置图片插入文中的水平宽度，一般表示为正文宽度(`\textwidth`)的倍数。

`\caption`命令可选参数“标签名”为英文形式，一般不以图片或表格的数字顺序作为标签，而应包含一定的图片或表格信息，以便于文中引用（若图片、表格、公式、章节和参考文献等在文中出现的先后顺序发生了变化，其标注序号及其文中引用序号也会跟着发生变化，这一点是Word等软件所不能做到的）。另外，图题或表题并不会因为分页而与图片或表格体分置于两页，章节等各级标题也不会置于某页的最底部，LaTeX系统会自动调整它们在正文中的位置，这也是Word等软件所无法匹敌的。

`\vspace`将产生一定高度的竖直空白，必选参数为负值表示将后续文字位置向上提升，参数值可自行调整。**em**为长度单位，相当于大写字母**M**的宽度。

`\vspace{\baselineskip}` 表示图与正文空一行。

引用方法：“见图~`\ref{fig:figname}`”、“如图~`\ref{fig:figname}`~所示”等。

若需要将 2 张及以上的图片并排插入到一行中，则需要采用`minipage`环境，如图 2.2 和图 2.3 所示。

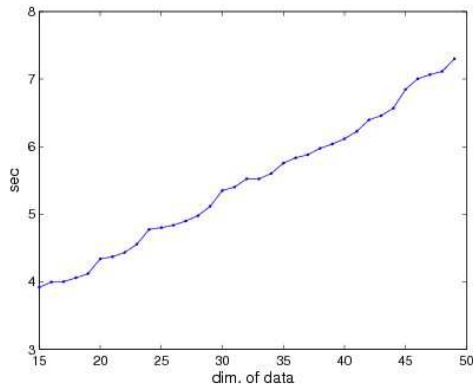


图 2.2 数据维数的变化

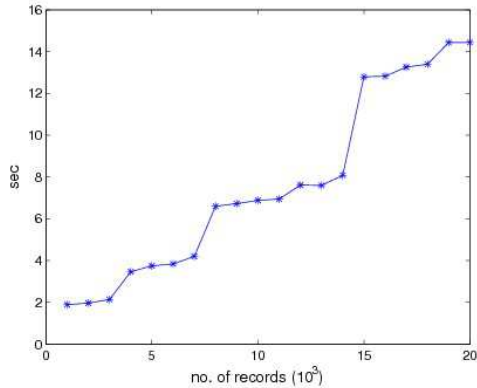


图 2.3 数据规模的变化

其代码如下所示。

```
\begin{figure}[htbp]
\centering
\begin{minipage}{0.4\textwidth}
\centering
\includegraphics[width=\textwidth]{文件名}
\caption{标题}\label{fig:f1}
\end{minipage}
\begin{minipage}{0.4\textwidth}
\centering
\includegraphics[width=\textwidth]{文件名}
\caption{标题}\label{fig:f2}
\end{minipage}\vspace{\baselineskip}
\end{figure}
```

`minipage`环境的必选参数用来设置小页的宽度，若需要在一行中插入 $n$ 个等宽图片，则每个小页的宽度应略小于 $(1/n)\text{\textwidth}$ 。

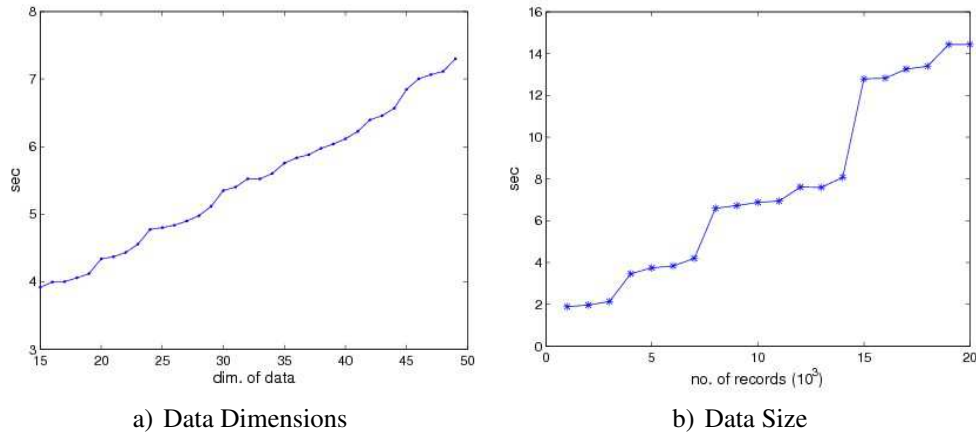


图 2.4 Scalability of data

## 2.4 具有子图的图片插入方法

图中若含有子图时，需要调用 `subfigure` 宏包, 如图 2.4 所示。

其代码及其说明如下。

---

```

\begin{figure}[htbp]
  \centering
  \subfigure[第1个子图标题]{
    \label{第1个子图标签(通常为 fig:subfig1:subsubfig1)}
    \includegraphics[width=0.4\textwidth]{文件名}}
  \subfigure[第2个子图标题]{
    \label{第2个子图标签(通常为 fig:subfig1:subsubfig2)}
    \includegraphics[width=0.4\textwidth]{文件名}}
  \caption{总标题}\label{总标签(通常为 fig:subfig1)}
\vspace{\baselineskip}
\end{figure}

```

---

子图的标签实际上可以随意设定，只要不重复就行。但为了更好的可读性，我们建议 `fig:subfig:subsubfig` 格式命名，这样我们从标签名就可以知道这是一个子图引用。

引用方法：总图的引用方法同本章第1节，子图的引用方法用 `\ref{fig:subfig:subsubfig}` 来代替。

---

子图的引用示例：如图 2.4 a) 和图 2.4 b) 所示。

若想获得插图方法的更多信息，参见网络上的 `Using Imported Graphics in LATEX and pdfLATEX` 文档。



### 第3章 表格的绘制方法

#### 3.1 研究生毕业设计论文的绘表规范

表应有自明性。表格不加左、右边线。表的编排建议采用国际通行的三线表。表内中文书写使用宋体五号字。

每个表格之上均应有表题（由表序和表名组成）。表序一般按章编排，如第 1 章第一个插表的序号为“表 1-1”等。表序与表名之间空两格，表名使用中文五号字，居中。表名中不允许使用标点符号，表名后不加标点。表头设计应简单明了，尽量不用斜线。表头中可采用化学，物理量等专业符号。

全表如用同一单位，则将单位符号移至表头右上角，加圆括号<sup>[2]</sup>。表中数据应准确无误，书写清楚。数字空缺的格内加横线“—”（占 2 个数字宽度）。表内文字或数字上、下或左、右相同时，采用通栏处理方式，不允许用“//”、“同上”之类的写法。

表内文字使用宋体五号字，垂直居中书写，起行空一格、转行顶格、句末不加标点。如某个表需要转页接排，在随后的各页上应重复表的编号。编号后加“（续表）”，表题可省略。续表应重复表头。表格绘制完成之后，与正文空一行。

#### 3.2 普通表格的绘制方法

表格应具有三线表格式，因此需要调用 `booktabs` 宏包，其标准格式如表 3.1 所示。

表 3.1 符合本科生毕业论文绘图规范的表格

$D(\text{in})$	$P_u(\text{lbs})$	$u_u(\text{in})$	$\beta$	$G_f(\text{psi.in})$
5	269.8	0.000674	1.79	0.04089
10	421.0	0.001035	3.59	0.04089
20	640.2	0.001565	7.18	0.04089
5	269.8	0.000674	1.79	0.04089
10	421.0	0.001035	3.59	0.04089
20	640.2	0.001565	7.18	0.04089
5	269.8	0.000674	1.79	0.04089
10	421.0	0.001035	3.59	0.04089
20	640.2	0.001565	7.18	0.04089
5	269.8	0.000674	1.79	0.04089
10	421.0	0.001035	3.59	0.04089
20	640.2	0.001565	7.18	0.04089

其绘制表格的代码及其说明如下。

---

```

\begin{table}[htbp]
\caption{表标题}\label{标签名(通常为 tab:tablename)}
\vspace{0.5em}\centering\wuhao
\begin{tabular}{cc...c}
\toprule[1.5pt]
表头第1个格    & 表头第2个格    & ... & 表头第n个格    \\
\midrule[1pt]
表中数据(1,1) & 表中数据(1,2) & ... & 表中数据(1,n)\\
表中数据(2,1) & 表中数据(2,2) & ... & 表中数据(2,n)\\
表中数据(3,1) & 表中数据(3,2) & ... & 表中数据(3,n)\\
表中数据(4,1) & 表中数据(4,2) & ... & 表中数据(4,n)\\
.....\\
表中数据(m,1) & 表中数据(m,2) & ... & 表中数据(m,n)\\
\bottomrule[1.5pt]
\end{tabular}
\vspace{\baselineskip}
\end{table}

```

---

`table`环境是一个将表格嵌入文本的浮动环境。

`\wuhao`命令将表格的字号设置为五号字（10.5pt），在绘制表格结束退出时，不需要将字号再改回为`\xiaosi`，正文字号默认为小四号字（12pt）。

`tabular`环境的必选参数由每列对应一个格式字符所组成：`c`表示居中，`l`表示左对齐，`r`表示右对齐，其总个数应与表的列数相同。此外，`@{文本}`可以出现在任意两个上述的列格式之间，其中的文本将被插入每一行的同一位置。表格的各行以`\\`分隔，同一行的各列则以`&`分隔。

`\toprule`、`\midrule`和`\bottomrule`三个命令是由`booktabs`宏包提供的，其中`\toprule`和`\bottomrule`分别用来绘制表格的第一条（表格最顶部）和第三条（表格最底部）水平线，`\midrule`用来绘制第二条（表头之下）水平线，且第一条和第三条水平线的线宽为1.5pt，第二条水平线的线宽为1pt。

引用方法：“如表~`\ref{tab:tablename}`~所示”。

---

### 3.3 长表格的绘制方法

长表格是当表格在当前页排不下而需要转页接排的情况下所采用的一种表格环境。若长表格仍按照普通表格的绘制方法来获得，其所使用的`table`浮动环境无法实现表格的换页接排功能，表格下方过长部分会排在表格第1页的页脚以下。为了能够实现长表格的转页接排功能，需要调用 `longtable` 宏包，由于长表格是跨页的文本内容，因此只需要单独的`longtable`环境，所绘制的长表格的格式如表 3.2 所示。

此长表格 3.2 第 2 页的标题“编号（续表）”和表头是通过代码自动添加上去的，无需人工添加，若表格在页面中的竖直位置发生了变化，长表格在第 2 页及之后各页的标题和表头位置能够始终处于各页的最顶部，也无需人工调整， $\text{\LaTeX}$  系统的这一优点是 Word 等软件所无法企及的。

下段内容是为了让下面的长表格分居两页，看到表标题“编号(续表)”的效果。摘录于《你若安好，便是晴天－林徽因传》片段：

她叫林徽因，出生于杭州，是许多人梦中期待的白莲。她在雨雾之都伦敦，发生过一场空前绝后的康桥之恋。她爱过三个男子，爱得清醒，也爱得平静。徐志摩为她徜徉在康桥，深情地等待一场旧梦可以归来。梁思成与她携手走过千山万水，为完成使命而相约白头。金岳霖为她终身不娶，痴心不改地守候一世。可她懂得人生飘忽不定，要学会随遇而安。真正的平静，不是避开车马喧嚣，而是在心中修篱种菊。尽管如流往事，每一天都涛声依旧，只要我们消除执念，便可寂静安然。愿每个人在纷呈世相中不会迷失荒径，可以端坐磐石上，醉倒落花前。如果可以，请让我预支一段如莲的时光，哪怕将来某一天加倍偿还。这个雨季会在何时停歇，无从知晓。但我知道，你若安好，便是晴天。

表 3.2 湖南大学各学院名称一览

学院名称	网址	联系电话
机械与运载工程学院	<a href="http://mve.hnu.cn/">http://mve.hnu.cn/</a>	88822826
电气与信息工程学院	<a href="http://eeit.hnu.cn/">http://eeit.hnu.cn/</a>	27404775
电子信息工程学院	<a href="http://www.tju.edu.cn/seie">http://www.tju.edu.cn/seie</a>	27406956
电气与自动化工程学院	<a href="http://www2.tju.edu.cn/colleges/automate/">http://www2.tju.edu.cn/colleges/automate/</a>	27405477
建筑工程学院	<a href="http://www2.tju.edu.cn/colleges/civil/">http://www2.tju.edu.cn/colleges/civil/</a>	27404072
化工学院	<a href="http://chemeng.tju.edu.cn/">http://chemeng.tju.edu.cn/</a>	27403389
材料科学与工程学院	<a href="http://mse.tju.edu.cn">http://mse.tju.edu.cn</a>	27406693
建筑学院	<a href="http://hgw022072.chinaw3.com/">http://hgw022072.chinaw3.com/</a>	27402724-2111

表 3.2 (续表)

学院名称	网址	联系电话
求是学部		
管理与经济学部	<a href="http://sm.tju.edu.cn">http://sm.tju.edu.cn</a>	27403423
理学院	<a href="http://www.tju.edu.cn/science/">http://www.tju.edu.cn/science/</a>	27404118
文法学院	<a href="http://www2.tju.edu.cn/colleges/sociology/new/">http://www2.tju.edu.cn/colleges/sociology/new/</a>	27403691
信息科学与工程学院	<a href="http://ccc.hnu.cn/">http://ccc.hnu.cn/</a>	88821907
马克思主义学院	<a href="http://www2.tju.edu.cn/colleges/marxism/">http://www2.tju.edu.cn/colleges/marxism/</a>	27405348
环境科学与工程学院	<a href="http://www.tju.edu.cn/see">http://www.tju.edu.cn/see</a>	87402072
药物科学与技术学院	<a href="http://www2.tju.edu.cn/colleges/pharmtier/">http://www2.tju.edu.cn/colleges/pharmtier/</a>	87401830
教育学院	<a href="http://soe.tju.edu.cn/">http://soe.tju.edu.cn/</a>	27401028
职业技术教育学院	<a href="http://202.113.0.248:8888">http://202.113.0.248:8888</a>	
继续教育学院	<a href="http://aectu.tju.edu.cn/">http://aectu.tju.edu.cn/</a>	27406298
仁爱学院	<a href="http://www.tjrac.edu.cn/">http://www.tjrac.edu.cn/</a>	68579990
农业与生物工程学院	<a href="http://202.113.13.169/site/nongxueyuan/">http://202.113.13.169/site/nongxueyuan/</a>	87402171
国际教育学院	<a href="http://www.ietju.com/">http://www.ietju.com/</a>	27406147
网络教育学院	<a href="http://www.etju.com/">http://www.etju.com/</a>	27426952

绘制长表格的代码及其说明如下。

```

\wuhao\begin{longtable}{cc...c}
\caption{表标题}\label{标签名(通常为 tab:tablename)}\\
\toprule[1.5pt] 表 头 第1个 格 & 表 头 第2个 格 & ... & 表 头 第n个
格\\ \midrule[1pt]
\endfirsthead
\multicolumn{n}{c}{表~\thetable (续表)}\vspace{0.5em}\\
\toprule[1.5pt] 表 头 第1个 格 & 表 头 第2个 格 & ... & 表 头 第n个
格\\ \midrule[1pt]
\endhead
\bottomrule[1.5pt]
\endfoot

```

---

```

表中数据(1,1) & 表中数据(1,2) & ... & 表中数据(1,n)\\
表中数据(2,1) & 表中数据(2,2) & ... & 表中数据(2,n)\\
.....\\
表中数据(m,1) & 表中数据(m,2) & ... & 表中数据(m,n)\\
\end{longtable}\xiaosi

```

---

在绘制长表格的前面留出一个空白行，并在第2行的一开始全局定义长表格的字号为五号字，这样能够保证长表格之前段落的行距保持不变。

在绘制长表格结束后，需要\xiaosi命令重新将字号改为小四号字。

\endhead之前的文字描述的是第2页及其之后各页的标题或表头；

\endfirsthead之前的文字描述的是第1页的标题和表头，若无此命令，则第1页的表头和标题由\endhead命令确定；

同理，\endfoot之前的文字描述的是除最后一页之外每页的表格底部内容；

\endlastfoot之前的文字描述的是最后一页的表格底部内容，若无此命令，

则最后一页的表格底部内容由\endfoot命令确定；由于规范中长表格每页底部内容均相同（水平粗线），因此模板中没有用到\endlastfoot命令。

---

### 3.4 列宽可调表格的绘制方法

论文中能用到列宽可调表格的情况共有两种：一种是当插入的表格某一单元格内容过长以至于一行放不下的情况，另一种是当对公式中首次出现的物理量符号进行注释的情况。这两种情况都需要调用 tabularx 宏包。下面将分别对这两种情况下可调表格的绘制方法进行阐述。

#### 3.4.1 表格内某单元格内容过长的情况

首先给出这种情况下的一个例子如表 3.3 所示。 绘制这种表格的代码及其说明如

表 3.3 最小的三个正整数的英文表示法

Value	Name	Alternate names, and names for sets of the given size
1	One	ace, single, singleton, unary, unit, unity
2	Two	binary, brace, couple, couplet, distich, deuce, double, doubleton, duad, duality, duet, duo, dyad, pair, snake eyes, span, twain, twosome, yoke
3	Three	deuce-ace, leash, set, tercet, ternary, ternion, terzetto, threesome, tierce, trey, triad, trine, trinity, trio, triplet, troika, hat-trick

下。

---

---

```

\begin{table}[htbp]
\caption{表标题}\label{标签名(通常为 tab:tablename)}
\vspace{0.5em}\wuhao
\begin{tabularx}{\textwidth}{1...X...1}
\toprule[1.5pt]
表头第1个格 & ... & 表头第X个格 & ... & 表头第n个格 \\
\midrule[1pt]
表中数据(1,1) & ... & 表中数据(1,X) & ... & 表中数据(1,n)\\
表中数据(2,1) & ... & 表中数据(2,X) & ... & 表中数据(2,n)\\
.....\\
表中数据(m,1) & ... & 表中数据(m,X) & ... & 表中数据(m,n)\\
\bottomrule[1.5pt]
\end{tabularx}
\vspace{\baselineskip}
\end{table}

```

---

**tabularx**环境共有两个必选参数：第1个参数用来确定表格的总宽度，这里取为排版表格能达到的最大宽度——正文宽度`\textwidth`；第2个参数用来确定每列格式，其中标为**X**的项表示该列的宽度可调，其宽度值由表格总宽度确定。

标为**X**的列一般选为单元格内容过长而无法置于一行的列，这样使得该列内容能够根据表格总宽度自动分行。若列格式中存在不止一个**X**项，则这些标为**X**的列的列宽相同，因此，一般不将内容较短的列设为**X**。

标为**X**的列均为左对齐，因此其余列一般选为**l**（左对齐），这样可使得表格美观，但也可以选为**c**或**r**。

---

### 3.4.2 对物理量符号进行注释的情况

为使得对公式中物理量符号注释的转行与破折号“——”后第一个字对齐，此处最好采用表格环境。此表格无任何线条，左对齐，且在破折号处对齐，一共有“式中”二字、物理量符号和注释三列，表格的总宽度可选为文本宽度，因此应该采用**tabularx**环境。由**tabularx**环境生成的对公式中物理量符号进行注释的公式如式(3.1)所示。

$$\ddot{\boldsymbol{\rho}} - \frac{\mu}{R_t^3} \left( 3\mathbf{R}_t \frac{\mathbf{R}_t \boldsymbol{\rho}}{R_t^2} - \boldsymbol{\rho} \right) = \mathbf{a} \quad (3.1)$$

式中  $\boldsymbol{\rho}$ ——追踪飞行器与目标飞行器之间的相对位置矢量；  
 $\ddot{\boldsymbol{\rho}}$ ——追踪飞行器与目标飞行器之间的相对加速度；  
 $\mathbf{a}$ ——推力所产生的加速度；  
 $\mathbf{R}_t$ ——目标飞行器在惯性坐标系中的位置矢量；  
 $\omega_t$ ——目标飞行器的轨道角速度；  
 $\mathbf{g}$ ——重力加速度， $= \frac{\mu}{R_t^3} \left( 3\mathbf{R}_t \frac{\mathbf{R}_t \boldsymbol{\rho}}{R_t^2} - \boldsymbol{\rho} \right) = \omega_t^2 \frac{R_t}{p} \left( 3\mathbf{R}_t \frac{\mathbf{R}_t \boldsymbol{\rho}}{R_t^2} - \boldsymbol{\rho} \right)$ ，这里  $p$  是目标飞行器的轨道半通径。

其中生成注释部分的代码及其说明如下。

---

```
\begin{tabularx}{\textwidth}{@{}l@{\quad}r@{———}X@{}}
```

式中 & symbol-1 & symbol-1的注释内容；\\

& symbol-2 & symbol-2的注释内容；\\

.....；\\

& symbol-m & symbol-m的注释内容。

```
\end{tabularx}\vspace{\wordsep}
```

---

`tabularx`环境的第1个参数选为正文宽度，第2个参数里面各个符号的意义为：

第1个`@{}`表示在“式中”二字左侧不插入任何文本，“式中”二字能够在正文中左对齐，若无此项，则“式中”二字左侧会留出一定的空白；

`@{\quad}`表示在“式中”和物理量符号间插入一个空铅宽度的空白；

`@{———}`实现插入破折号的功能，它由三个 $\frac{1}{2}$ 的中文破折号构成；

第2个`@{}`表示在注释内容靠近正文右边界的地方能够实现右对齐。

---

由此方法生成的注释内容应紧邻待注释公式并置于其下方，因此不能将代码放入`table`浮动环境中。但此方法不能实现自动转页接排，可能会在当前页剩余空间不够时，全部移动到下一页而导致当前页出现很大空白。因此在需要转页处理时，还请您手动将需要转页的代码放入一个新的`tabularx`环境中，将原来的一个`tabularx`环境拆分为两个`tabularx`环境。

若想获得绘制表格的更多信息，参见网络上的 `Tables in LATEX 2ε: Packages and Methods` 文档。



## 第4章 数学公式的输入方法

### 4.1 研究生毕业设计论文的公式规范

论文中的公式应另起行，原则上应居中书写，与周围文字留有足够的空间区分开。若公式前有文字（如“解”、“假定”等），文字空两格写，公式仍居中写。公式末不加标点。

公式应标注序号，并将序号置于括号内。公式序号按章编排，如第1章第一个公式序号为“(1-1)”。公式的序号右端对齐。

公式较长时最好在等号“=”处转行，如难实现，则可在 $+$ 、 $-$ 、 $\times$ 、 $\div$ 运算符号处转行，转行时运算符号仅书写于转行式前，不重复书写。

文中引用公式时，一般用“见式(1-1)”或“由公式(1-1)”。

公式中用斜线表示“除”的关系时应采用括号，以免含糊不清，如 $a/(b \cos x)$ 。通常“乘”的关系在前，如 $a \cos x/b$ 而不写成 $(a/b) \cos x$ 。

不能用文字形式表示等式，如：刚度 =  $\frac{\text{受力}}{\text{受力方向的位移}}$ 。

对于数学公式的输入方法，网络上有一个比较全面权威的文档 **Math mode** 请大家事先大概浏览一下。下面将对学位论文中主要用到的数学公式排版形式进行阐述。

### 4.2 生成 L<sup>A</sup>T<sub>E</sub>X 数学公式的两种方法

对于先前没有接触过 L<sup>A</sup>T<sub>E</sub>X 的人来说，编写 L<sup>A</sup>T<sub>E</sub>X 数学公式是一件很繁琐的事，尤其是对复杂的数学公式来说，更可以说是一件难以完成的任务。实际上，生成 L<sup>A</sup>T<sub>E</sub>X 数学公式有两种较为简便的方法，一种是基于 MathType 数学公式编辑器的方法，另一种是基于 MATLAB 商业数学软件的方法，下面将分别对这两种数学公式的生成方法作一下简单介绍。

#### 4.2.1 基于 MathType 软件的数学公式生成方法

MathType 是一款功能强大的数学公式编辑器软件，能够用来在文本环境中插入 Windows OLE 图形格式的复杂数学公式，所以应用比较普遍。但此软件只有 30 天的试用期，之后若再继续使用则需要付费购买才行。网络上有很多破解版的 MathType 软件可供下载免费使用，笔者推荐下载安装版本号在 6.5 之上的中文破解版。

在安装好 MathType 之后，若在输入窗口中编写数学公式，复制到剪贴板上的仍然是图形格式的对象。若希望得到可插入到  $\text{\LaTeX}$  编辑器中的文本格式对象，则需要对 MathType 软件做一下简单的设置：在 MathType 最上排的按钮中依次选择“参数选项 → 转换”，在弹出的对话框中选中“转换到其它语言（文字）：”，在转换下拉框中选择“Tex – LaTeX 2.09 and later”，并将对话框最下方的两个复选框全部勾掉，点击确定，这样，再从输入窗口中复制出来的对象就是文本格式的了，就可以直接将其粘贴到  $\text{\LaTeX}$  编辑器中了。按照这种方法生成的数学公式两端分别有标记 $\backslash$ 和标记 $\backslash$ ，在这两个标记之间才是真正的数学公式代码。

若希望从 MathType 输入窗口中复制出来的对象为图形格式，则只需再选中“公示对象（Windows OLE 图形）”即可。

#### 4.2.2 基于 MATLAB 软件的数学公式生成方法

MATLAB 是矩阵实验室（Matrix Laboratory）的简称，是美国 MathWorks 公司出品的商业数学软件。它是当今科研领域最常用的应用软件之一，具有强大的矩阵计算、符号运算和数据可视化功能，是一种简单易用、可扩展的系统开发环境和平台。

MATLAB 中提供了一个 latex 函数，它可将符号表达式转化为  $\text{\LaTeX}$  数学公式的形式。其语法形式为 latex(s)，其中，s 为符号表达式，之后再将 latex 函数的运算结果直接粘贴到  $\text{\LaTeX}$  编辑器中。从  $\text{\LaTeX}$  数学公式中可以发现，其中可能包含如下符号组合：

$\backslash\text{quad}$ =两个空铅(quad)宽度

$\backslash\text{quad}$ =一个空铅宽度

$\backslash;$ =5/18空铅宽度

$\backslash:$ =4/18空铅宽度

$\backslash,$ =3/18空铅宽度

$\backslash!$ =-3/18空铅宽度

$\backslash_$ =一个空格

所以最好将上述符号组合从数学公式中删除，从而使数学公式显得匀称美观。

对于 Word 等软件的使用者来说，在我们通过 MATLAB 运算得到符号表达式形式的运算结果时，在 Word 中插入运算结果需要借助于 MathType 软件，通过在 MathType 中输入和 MATLAB 运算结果相对应的数学表达形式，之后再 MathType 数学表达式

转换为图形格式粘贴到 Word 中。实际上，也可以将 MATLAB 中采用 latex 函数运行的结果直接粘贴到 MathType 中，再继续上述步骤，这样可以大大节省输入公式所需要的时间。此方法在 MathType 6.5c 上验证通过，若您粘入到 MathType 中的仍然为从 MATLAB 中导入的代码，请您更新 MathType 软件。

### 4.3 数学字体

在数学模式下，常用的数学字体命令有如下几种：

<code>\mathnormal</code> 或无命令	用数学字体打印文本；
<code>\mathit</code>	用斜体 ( <code>\itshape</code> ) 打印文本；
<code>\mathbf</code>	用粗体 ( <code>\bfseries</code> ) 打印文本；
<code>\mathrm</code>	用罗马体 ( <code>\rmfamily</code> ) 打印文本；
<code>\mathsf</code>	用无衬线字体 ( <code>\sffamily</code> ) 打印文本；
<code>\mathtt</code>	用打印机字体 ( <code>\ttfamily</code> ) 打印文本；
<code>\mathcal</code>	用书写体打印文本；

在学位论文撰写中，只需要用到上面提到的 `\mathit`、`\mathbf` 和 `\mathrm` 命令。若要得到 Times New Roman 的数学字体，则需要调用 txfonts 宏包（此宏包实际上采用的是 Nimbus Roman No9 L 字体，它是开源系统中使用的免费字体，其字符字体与 Times New Roman 字体几乎完全相同）；若要得到粗体数学字体，则需要调用 bm 宏包。表 4.1 中分别列出了得到阿拉伯数字、拉丁字母和希腊字母各种数学字体的命令。

表 4.1 常用数学字体命令一览

	阿拉伯数字&大写希腊字母	大小写拉丁字母	小写希腊字母
斜体	<code>\mathit{}</code>	无命令	无命令
粗斜体	<code>\bm{\mathit{}}</code>	<code>\bm{}</code>	<code>\bm{}</code>
直立体	无命令	<code>\mathrm{}</code>	字母后加up
粗体	<code>\mathbf{}</code> 或 <code>\bm{}</code>	<code>\mathbf{}</code>	<code>\bm{}</code> 字母后加up

下面列出了一些应采用直立数学字体的数学常数和数学符号。

d、D、p	——微分算子	e	——自然对数之底数
i、j	——虚数单位	$\pi$	——圆周率

### 4.4 行内公式

出现在正文一行之内的公式称为行内公式，例如  $f(x) = \int_a^b \frac{\sin x}{x} dx$ 。对于非矩阵和非

多行形式的行内公式，一般不会使得行距发生变化，而 Word 等软件却会根据行内公式的竖直距离而自动调节行距，如图 4.1 所示。

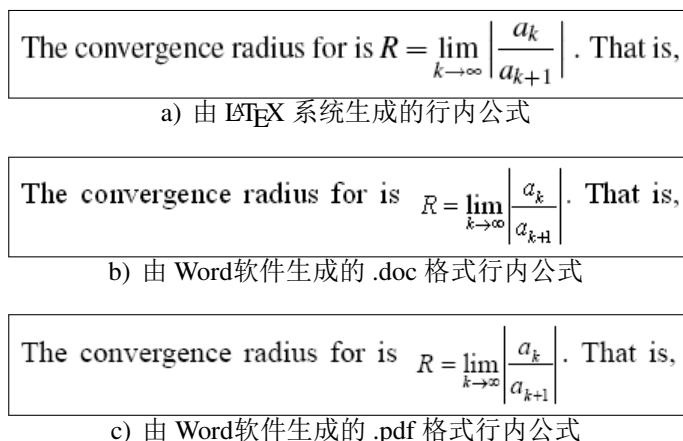


图 4.1 由 L<sup>A</sup>T<sub>E</sub>X 和 Word 生成的 3 种行内公式屏显效果

这三幅图分别为 L<sup>A</sup>T<sub>E</sub>X 和 Word 生成的行内公式屏显效果，从图中可看出，在 L<sup>A</sup>T<sub>E</sub>X 文本含有公式的行内，在正文与公式之间对接工整，行距不变；而在 Word 文本含有公式的行内，在正文与公式之间对接不齐，行距变大。因此从这一点来说，L<sup>A</sup>T<sub>E</sub>X 系统在数学公式的排版上具有很大优势。

L<sup>A</sup>T<sub>E</sub>X 提供的行内公式最简单、最有效的方法是采用 T<sub>E</sub>X 本来的标记——开始和结束标记都写作 \$，例如本段开始的例子可由下面的输入得到。

`$f(x)=\int_a^b \frac{\sin\{x\}}{x} \mathrm{d}x$`

## 4.5 行间公式

位于两行之间的公式称为行间公式，每个公式都是一个单独的段落，例如

$$\int_a^b f(x) dx = \lim_{\|\Delta x_i\| \rightarrow 0} \sum_i f(\xi_i) \Delta x_i$$

除人工编号外，L<sup>A</sup>T<sub>E</sub>X 各种类型行间公式的标记见表 4.2。

表 4.2 各种类型行间公式的标记

	无编号	自动编号
单行公式	<code>\begin {displaymath}... \end {displaymath}</code> 或 <code>\[...\]</code>	<code>\begin {equation}... \end {equation}</code>
多行公式	<code>\begin {eqnarray*}... \end {eqnarray*}</code>	<code>\begin {eqnarray}... \end {eqnarray}</code>

另外，在自动编号的某行公式行尾添加标签 `\nonumber`，可将该行转换为无编号形式。

行间多行公式需采用 `eqnarray` 或 `eqnarray*` 环境，它默认是一个列格式为 `rc1` 的

3 列矩阵，并且中间列的字号要小一些，因此通常只将需要对齐的运算符号（通常为等号“=”）置于中间列。

#### 4.6 可自动调整大小的定界符

若在左右两个定界符之前分别添加命令 `\left` 和 `\right`，则定界符可根据所包围公式大小自动调整其尺寸，这可从式(4.1)和式(4.2)中看出。

$$\left(\sum_{k=\frac{1}{2}}^{N^2}\right) \quad (4.1)$$

$$\left(\sum_{k=\frac{1}{2}}^{N^2}\right) \quad (4.2)$$

式(4.1)和式(4.2)是在  $\text{\LaTeX}$  中分别输入如下代码得到的。

```
(\sum_{k=\frac{1}{2}}^{N^2})
```

```
\left(\sum_{k=\frac{1}{2}}^{N^2}\right)
```

`\left` 和 `\right` 总是成对出现的，若只需在公式一侧有可自动调整大小的定界符，则只要用 “.” 代替另一侧那个无需打印出来的定界符即可。

若想获得关于此部分内容的更多信息，可参见 **Math mode** 文档的第 8 章 “Brackets, braces and parentheses”。

#### 4.7 数学重音符号

数学重音符号通常用来区分同一字母表示的不同变量，输入方法如下（需要调用 `amsmath` 宏包）：

<code>\acute</code>	$\acute{a}$	<code>\mathring</code>	$\mathring{a}$	<code>\underbrace</code>	$\underbrace{a}$
<code>\bar</code>	$\bar{a}$	<code>\overbrace</code>	$\overbrace{a}$	<code>\underleftarrow</code>	$\underleftarrow{a}$
<code>\breve</code>	$\breve{a}$	<code>\overleftarrow</code>	$\overleftarrow{a}$	<code>\underleftrightarrow</code>	$\underleftrightarrow{a}$
<code>\check</code>	$\check{a}$	<code>\overleftrightharpoonup</code>	$\overleftrightharpoonup{a}$	<code>\underline</code>	$\underline{a}$
<code>\ddot</code>	$\ddot{a}$	<code>\overline</code>	$\overline{a}$	<code>\underrightarrow</code>	$\underrightarrow{a}$
<code>\dot</code>	$\dot{a}$	<code>\overrightarrow</code>	$\overrightarrow{a}$	<code>\vec</code>	$\vec{a}$
<code>\grave</code>	$\grave{a}$	<code>\tilde</code>	$\tilde{a}$	<code>\widehat</code>	$\widehat{a}$
<code>\hat</code>	$\hat{a}$	<code>\underbar</code>	$\underbar{a}$	<code>\widetilde</code>	$\widetilde{a}$

当需要在字母  $i$  和  $j$  的上方添加重音符号时，为了去掉这两个字母顶上的小点，这两个字母应该分别改用 `\imath` 和 `\jmath`。

如果遇到某些符号不知道该采用什么命令能输出它时，则可通过 [Detexify<sup>2</sup>](#) 网站来获取符号命令。若用鼠标左键在此网页的方框区域内画出你所要找的符号形状，则会在网页右方列出和你所画符号形状相近的 5 个符号及其相对应的  $\text{\LaTeX}$  输入命令。若所列出的符号中不包括你所要找的符号，还可通过点击“Select from the complete list!”的链接以得分从低到高的顺序列出所有符号及其相对应的  $\text{\LaTeX}$  输入命令。

最后，建议大家还以 **Math mode** 这篇 pdf 文档作为主要参考。若要获得最为标准、美观的数学公式排版形式，可以查查文档中是否有和你所要的排版形式相同或相近的代码段，通过修改代码段以获得你所要的数学公式排版形式。

## 第5章 基于DSP微处理器应用的最优调度和集群间通信

### 5.1 引言

数字信号处理和多媒体应用程序需要大量计算，同时具有实时性需求。在这样应用程序中的计算引擎不同于通用的，它更趋向于嵌入式系统。因为这些程序在一般系统中有大量指令级并行，平均数字信号处理指令集并行为21，多媒体指令集并行大约为18，为了满足严格的性能要求，高端DSP处理器实验功能单元幅值来最大化指令集并行。然而，集中的注册文件呈现出高的区域复杂性，访问延迟和能耗。区域复杂度是由N个功能单元直接读写造成的，复杂度为 $N^3$ ；访问延迟为 $N^3/2$ ；能耗为 $N^3$ ，其中N是共享的集群数。因此，系统级文件被分层多个子块来减少大面积开销和访问竞争。每个寄存器文件子块联合相关的功能单元组成一个集群。对于多集群架构，集群数目可以由硬件实现来决定。每个集群可以以较小的开销从其相关寄存器文件子块中读写，集群之间访问开销比较大。

在多集群架构中集群间连接网络是一个瓶颈，影响整个性能。一些类似于展开和重定时技术可以开发和增加程序并行。但是，这会造成集群间数据传输增多，为了达到性能要求，这就给集群间通信网络施加了更大压力。集群间通信网络可以是一个基于总显得网络或者是一个点到点的网络。隐含的假设是任意两个集群之间存在一条通路，以至于集群间可以进行数据传输。点到点的网络是充分连接的，相连的集群中有一对单项的连接存在于每个功能单元和寄存器文件之间。尽管拓扑图提供了最大的传输可行性，其高硬件开销以及潜在的第连接实用性和低可扩展性为实际使用带来了障碍。因此，部分连接的点到点网络，如：仅在两个相邻集群之间有物理连接是比较实际和流行的。然而对于不是物理连接集群之间数据传输，他们必须通过具有物理连接的中间集群桥接，造成至少一个计算停止。另一方面，相比点到点连接，基于总线连接更具适应性，如一个全局总线连接所有集群，这样可以在所有相连的集群间传递数据。但是，在多个集群间同时进行数据交换时，单一全局总线可能会成为性能的瓶颈。另外，带有多个总线段的冗长的总线具有高能耗，区域开销，时钟歪斜和传播延迟。因此需要有更少和更短的总线。论文研究如何获取高性能和连接弹性与点到点全连接相似的情况下能维持使用总线的效益。为了获取这个目标，论文将研究如何以智能方式调度集群之间数据传输。为

了减少集群的DSP处理器上的调度开销，DSP应用程序通常将显式的调度信息嵌入到代码中来实现静态编译。例如：使用 VLIW代码，每个指令包含4,8，或更多操作，可以显示的指定功能单元和关联的寄存器。高级合成上的调度室一个很重要的任务，能决定哪个操作在哪个硬件资源上的那个时间段执行。传统调度技术一般将目标放在操作和通过流水线开发并行来最小化调度时长或最小化资源。这些调度算法在对单个处理机构时效果很好，因为他们不需要考虑集群间通信开销。对于多集群或多喝架构，集群间通信开销是不能被忽视的。因此，各种各样的调度算法已经将集群间通信开销列入考虑，如论文<sup>[2]</sup> [2]、[8]、[24]和[30]提出的方法。主要有两类集群间通信有意识调度算法。一类是论文<sup>[2]</sup> 中基于列表调度被称为根据时间估计最高级优先。对于这类中的调度算法，根据节点基本顺序调度。节点基本是沿着通路从一个节点到一个出口节点计算最大开销和。最高级节点总是比其他节点优先调度。另外一类是聚类。图形输入节点被分组成簇。聚类算法中有两类基本的。一类是基于关键路径。如果主序列中任务属于部分集群图中最长路径将被分组。另外一种是基于结构属性和优先级任务图分解的。近来，研究扩展到了异构多核架构。不管集群间通信有意识调度算法属于哪一类，它的研究目标是最小化集群间通信和整体指向时间。图中每个任务集群间通信网络和通信开销作为输入已经给定。集群间通信网络对总线需求数量总是由并发数据传输的峰值决定。对于数据传输，两个常用的传输策略是尽快和尽可能晚。对于ASAP，一旦可用，数据传输马上给接收集群。相反，对于ALAP，数据先存储在发送集群的寄存器文件中知道接收集群需要的时候。论文将研究新的高指令集并行调度技术来减少集群间数据传输需求和研究新的集群数据传输策略来最小化集群间网络总线需求，同时保证程序嵌入式指令级并行而不影响调度时长(完成时间)。工作中采用了一个应用程序的带部分连接总线的特定方法来设计无死锁集群间连接网络。论文第一部分，调度程序作为输入，集群间连接网络以最小硬件开销来设计去满足性能需求。通过获取DSP应用程序的调度信息，我们能决定集群间连接网络的最小总线需求。这个最小总线巨大算法将任意给定的调度作为输入，以多项式时间计算最小总线数。其还可以为相关集群间数据传输产生最有无死锁调度。随后，论文就总线段而言，提出了一个算法，在集群间连接网络拓扑图下通过部分连接总线来最小化整体总线长度。总线段是两个相邻集群之间的物理连接。不同的调度对于同一个DSP应用程序可能在有不同数目的最小总线需求，论文进一步提出一个调度算法来最小化集群间数据传输，来减少集群间连接总线需求数目。

总之，本文贡献如下：



- 提出了最小总线算法；该算法在给定多项式时间内决定集群间数据传输所需的最少总线数。
- 在上一步提到的最少总线数前提下，确定潜在的集群间连接网络拓扑。连接网络使用部分连接总线取代全局总线来减少整体总线段，保证同级数据传输可行性和全局总线给特定应用程序。
- 提出了一个计算和通信协调调度算法，产生最少总线算法的调度输入来减少所需总线的最少数量。

文章剩下部分组织如下：第二节介绍目标处理架构和DSP应用程序模型。第三节简要介绍提出的算法。第四节详细介绍算法。第四节A部分介绍最少总线算法以及证明了它是多项式时间可解。第四节B部分算法获取集群间连接网络拓扑。第五节介绍调度算法，该算法产生MinBus算法的输入，可以减少最少需求总线数目。第六节给出了实验结果。第七节总结与讨论，讨论如何扩展论文中特定程序到多个应用程序和如何工作在多核异构处理架构上。

## 5.2 基本原理

### 5.2.1 DSP处理器集群建模

图1表示一个一般的集群DSP处理器模型，它包含了N个集群。每个集群包含多个功能单元和一个寄存器文件。集群中的功能单元可以在控制的任何步骤以低开销直接访问其寄存器文件。然而，当一个功能单元需要访问一个远程寄存器文件时，内容通过通信功能单元传输到集群间连接网络。论文中，我们考虑集群间连接网络由一系列部分连接总线组成。部分连接总线仅仅连接到那些有需要依赖于它进行集群间数据传输需求和功能类似于点到点连接来在集群对之间传输数据的集群。在集群连接间支持多播。

当数据在计算或者临时存储在原始集群的寄存器文件时，集群间数据可以在同一控制步骤使用直到调度转移时间。目的寄存器文件中额外的时间可能在目的功能单元访问的之前用到。实验在第二节DSP基准上完成，将证明用于存储临时集群间通信数据的寄存器数量不超过10。论文中，假设在源集群和目标集群中用来存储临时数据的寄存器文件足够。

### 5.2.2 动机

这节我们使用图2中给的DAG例子来简单讨论提出方法来导出集群间连接网络最少

部分连接总线。下层架构和图1所示相同。布置了三个集群，每个集群包含了一个加法器，一个乘法器和一个寄存器文件。使用HLFET算法对图2中案例调度结果显示在图3(a)。根据节点优先级对其进行调度，优先级由相关节点数决定的。被调度节点被分配到第一个可用的集群，如图3(a)所示。一次循环包含了五个控制步骤。图3(a)中显示了集群间数据传输需求，用带箭头的线从发生方指向接收方。为了清除确定各控制步骤集群间数据传输，图3(b)给出了数据传输图。每个控制步骤下的线段表示可能的数据传输。在段左边标记的操作节点为发送方，在段右边标记的节点为接收方。变量 $x_{ij}$ 表示控制步骤 $j$ 可能有第 $i$ 个数据传输。例如，变量 $x_{31}$ 和 $x_{32}$ 分别表示集群2上节点D到集群1上节点F在控制步骤1和2数据传输。数据传输需要一个控制步骤， $x_{31}$ 和 $x_{32}$ 都可以发生。

图4(a)展示的为数据传输情景。在该情景中，“not going to happen”数据传输被用虚线段标记，如：有的标记为 $x_{32}$ 。一次迭代中最大并发数据传输定义为集群间连接网络在没有扩展调度时长下最小PC总线需求，图4(a)中最少需要3个PC总线。可能的集群间连接策略如图4(b)所示。一个总线连接集群1和集群2，分布在控制步骤1,2,3来传输数据 $x_{11}$ ， $x_{42}$ 和 $x_{63}$ 。另外一个总线连接所有的三个集群，用来分布在控制步骤1,2传输数据 $x_{31}$ 和 $x_{52}$ 。第三个总线连接集群2和集群3来在控制步骤1传输数据 $x_{21}$ 。更少的PC总线会延长调度时长。

如果数据传输如图5(a)那样被调度，那么一次迭代中任意控制步骤最大的并发数据传输数据为2。在该数据传输场景，数据由节点D传到节点F将发生在控制步骤2中而不是之前的场景中的控制步骤1。节点E到H和节点G到I中数据传输也是一样的。因此两个PC总线对于集群间连接网络在没延长调度时长条件下是足够的。相应的集群间连接策略如图5(b)所示。

图6(a)针对图2中的DAG给出了一个新的计算策略。相比图4(a)的调度，传输的数据从原来的6减少到了3，如图6(b)所示。结果，一条总线将足够满足所有的数据传输要求，而不影响调度时长。相应的集群间连接策略如图6(c)所示。

从例子中可以看出，集群间数据传输策略和计算策略很大程度影响最小PC总线需求数量。本节中案例足够就简单以至于很容易分析。对于复杂情况，在第四节中，我们将引入系统方法，在最有集群间数据传输调度下决定最小总线需求数和导出连接网络拓扑图来最小化整体总线段。第五节将介绍调度算法，它可以产生调度来减少最小PC总线需求数。

### 5.3 设计具有最小总线需求的集群间连接网络

本节介绍我们的方法设计集群间连接网络。方法被分为两个步骤：第一，在保证性能不降低的条件下决定最少需求总线。我们证明了可以在多项式时间内解决该问题。第二，用第一步中的基于数据传输调度的部分连接总线导出集群间连接网络拓扑图。导出的拓扑图将展示集群如何被连接到部分连接的总线上来减少整体总线段。

#### 5.3.1 觉得集群间连接网络的最小总线需求数

我们方法使用第二节给出的架构和应用程序模型。遵循上一节中的限制条件。

- 1) 时间限制。给定一个静态调度DSP应用程序，只要操作是在产生之后消耗之前，集群间数据传输就是灵活的。
- 2) 总线数限制。在任意给定时间，同时传输的数据不能超过可用的总线数。

构造数据传输变量算法(CDTV)从预先排好的DSP应用程序中获取时间限制，创建数据传输图。CDTV算法详细过程在算法1中给出。输入是如图3所示的时间表。CDTV产生一系列传输变量，标注为 $x_{ij}$ ，表示第 $i$ 个数据传输可以发生在第 $j$ 个控制步骤。 $x_{ij}$ 可以由以下值：

运行CDTV算法，一系列 $x_{ij}$ 如图3(b)所示，相应的时间表在图3(a)中产生。如算法2所示，对于给定的时间表，为了保证其嵌入式指令级并行而不增加调度时长(一次迭代完成时间)，MinBus算法能决定集群间连接总线数量需求的最小值。最小集群间连接总线需求数上届为 $M$ ， $M$ 是一次迭代中集群间数据传输数目总和。下限为0，当没有集群间数据传输时，总线需求为0。通过二分搜索，MinBus通过调用算法3中展示的数据传输策略功能寻找是否存在一个有效的集群间数据传输调度小于 $b$ 个总线限制，最终找到最小总线数 $b$ 。因此，一个有效的集群间数据传输调度产生了，它可以指定什么样的数据可以在哪个控制步骤中传输来获取最小的总线需求数。算法数据传输策略首先调用算法CDTV为给定的调度产生数据传输变量集合。约束等式(1)主要重申一个集群间数据传输需要一个控制步骤。约束等式(2)陈述了在任意迭代的单个控制步骤中最大并发集群间数据传输应该小于总线约束 $b$ 。 $b$ 代表最小的集群间连接网络所需的总线数。目标是在 $b$ 个总线约束下决定 $XT$ 中每个 $x_{ij}$ 的值。对于图2中的DAG例子，在创建一系列数据传输变量 $x_{ij}$ 后，添加总线约束，形成如下等式。等式EQ1-EQ6表示每个数据传输需要一个控制步骤。等式EQ7-EQ10表示最多 $b$ 个同时传输数据。等式(1)-

(10) 可以重新写成如下矩阵格式：其中 $s_1, s_2, s_3, s_4$ 选的是大于0的整数。定义如下：因此(1)可以简化为 $CY=V$ 。满足(1),我们获取到最小的 $b$ 是2,  $X^T=(1,1,0,1,1,0,1,1)$ ,  $X^T$ 定义为 $(x_{11}, x_{21}, x_{31}, x_{42}, x_{52}, x_{53}, x_{63}, x_{64})$ 。

## 第6章 总结与展望

结论应是作者在学位论文研究过程中所取得的创新性成果的概要总结，不能与摘要混为一谈。学位论文结论应包括论文的主要结果、创新点、展望三部分，在结论中应概括论文的核心观点，明确、客观地指出本研究内容的创新性成果（含新见解、新观点、方法创新、技术创新、理论创新），并指出今后进一步在本研究方向进行研究工作的展望与设想。对所取得的创新性成果应注意从定性和定量两方面给出科学、准确的评价，分（1）、（2）、（3）…条列出，宜用“提出了”、“建立了”等词叙述。



## 参考文献

- [1] 胡伟.  $\text{\LaTeX} 2_{\epsilon}$  完全学习手册[M]. 北京: 清华大学出版社, 书号: 978-7-302-24159-1, 2011.
- [2] 邓建松, 彭冉冉, 陈长松.  $\text{\LaTeX} 2_{\epsilon}$  科技排版指南[M]. 北京: 科学出版社, 书号: 7-03-009239-2/TP.1516, 2001.





## 致 谢

所谓的成长，不过是燃烧自己的无知，然后逐渐麻木。

恍惚间已是三年，伴随着疫情和动荡，在毕业之际，真心的感谢祖国，感谢父母，感谢抗疫前线的英雄们，感谢所有人的牺牲和付出换来形式的向好，让我们生活步入正轨，安稳的完成学业。

古之学者必有师，感谢我亦师亦友的导师李平教授。在路灯下讨论方案、在食堂外分析实验、在教室里推导公式、在民宿中撰写论文，这些画面一帧一帧的浮现出来，成了我研究生期间最重要的记忆。在李老师将下，我跟进了最前沿的技术、丰富了理论知识和思维、参加了学术会议，为我的人生写了一段关于科研魅力的故事。

风华正茂，感谢这些年挚友的关怀和帮助。特别感谢 OYX 为我提供丰富的高校资源，感谢 XZH 为我讲解算法和部署实践，感谢 KZC 在实验上提供的灵感和他仅有的显卡，感谢 AF 分享的文献和调参经验。

修辞立其诚，实验立其真。作为人工智能领域的学者，非常感谢 Kaggle、Google Colab、阿里云天池、华为云AI提供的云计算资源。感谢 DeepMind、OpenAI 和 FAIR 提供的开源代码和技术文档。更感谢这几年所有前辈的努力，我们拥有一个很友好的深度学习开发环境。

为学生二十余载，感谢我终迎来了最后一次毕业。我很好学，但终究是做不来学者，这条路也算是走到头了。在研究生期间，在这个历史的冬天，在这个卷不赢躺不平的时代，我的哲思过于极端，以至于都懒得去建设短暂的同学情谊。很长一段时间我都在找一个答案，一个现代主义没有给出的答案。逐渐我也有了答案，本以为的麻木，殊不知为无用之用。

一树百获的三年，虽行久矣，而方始发，任重道远。或某日同风起，直上九万里。

康夏涛

二零二三年四月

于长沙理工



## 附录A 攻读博士学位期间发表的学术论文

- [1] **Jianmin Li**, Zhaosheng Teng, Qiu Tang, Junhao Song and Xiaoju Li. Dielectric Loss Factor Measurement in Power Systems Based on Sampling Sequence Reconstruction Approach, IEEE Transactions on Power Electronics, 2017, 32(6): 4766-4775. (SCI 收录, 1 区)
- [2] **Jianmin Li**, Zhaosheng Teng, Qiu Tang and Junhao Song. Detection and Classification of Power Quality Disturbances Using Double Resolution S-Transform and DAG-SVMs, IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, 2016, 65(10):2302-2312. (SCI 收录, 3 区)
- [3] **Jianmin Li**, Zhaosheng Teng, Yong Wang, Fu Zhang and Xiaoju Li. A Digital Calibration Approach for Reducing Phase-shift of Electronic Power Meter Measurement, IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement. 2018, 67(7):1638-1645. (SCI 收录, 3 区)
- [4] 李建闽, 滕召胜, 吴言, 王永. 基于移频滤波的频率测量方法. 中国电机工程学报, 2018. 38 (3): 762-769. (EI 收录, 校定重点)
- [5] Fu Zhang, Zhaosheng Teng, Yuxiang Yang, **Jianmin Li**, Haowen Zhong and Jiangyan Sang. Near-binary multisine design with arbitrary sparse spectrum for fast bioimpedance spectroscopy measurement. IET Science, Measurement & Technology. (已录用, SCI 收录, 4 区)
- [6] Yong Wang, Zhaosheng Teng, He Wen, **Jianmin Li** and R Martinek. A State Evaluation Adaptive Differential Evolution Algorithm for FIR Filter Design. Advances in Electrical and Electronic Engineering, 2018, 15(5): 770-779.
- [7] Fu Zhang, Zhaosheng Teng, Haowen Zhong, Yuxiang Yang, **Jianmin Li** and Jiangyan Sang. Wideband mirrored current source design based on differential difference amplifier for electrical bioimpedance spectroscopy. Biomedical Physics & Engineering Express, 2018, 4(2):25-32.
- [8] 邱伟, 唐求, 唐璐, 李建闽, 何俊杰. 基于准同步序列重构的非稳态电力谐波分析. 中国电机工程学报, 2018, 38(2): 456-464+676. (EI 收录, 校定重点)

- [9] 凌菁, 滕召胜, 林海军, 李建闽. 烘干失重法水分快速检测的预估融合方法. 仪器仪表学报, 2018(2): 47-55. (EI 收录, 校定重点)
- [10] 王永, 滕召胜, 李建闽, 唐求, 成达. 基于采样序列重构的高精度介损角测量方法. 电工技术学报. (已录用, EI 收录, 校定重点)
- [11] 滕召胜, 王永, 李建闽, 姚文轩, 唐求. 一种新的谐波时频分解方法——K-S分解. 中国科学(技术科学). (已录用, EI 收录)
- [12] 李宁, 李建闽, 张建文, 宋俊皓, 段辉江, 荣宏. 单相双向计量多功能智能电能表设计. 自动化仪表, 2017, 38(3): 70-74. (北大核心)
- [13] 吴言, 李建闽. 基于改进 S 变换的电压骤降的自适应检测方法. 电测与仪表. (已录用, 北大核心)
- [14] 唐夕晴, 李建闽, 余晓烁. RS-485 总线接口性能测试仪设计与开发. 电测与仪表. (已录用, 北大核心)

## 附录B 攻读博士学位期间参与的科研项目

- [1] 复杂电网环境下的闪变包络提取与参数在线检测方法研究. 国家自然科学基金面上项目 (51777061)
- [2] 快速 K-S 变换理论与谐波时频参数自适应分析关键技术研究. 国家自然科学基金面上项目 (51377049)
- [3] 改进 S 变换自适应算法与电能质量检测及扰动信号特征提取方法研究. 国家自然科学基金面上项目 (51277058)
- [4] 智能家居电能互动计量与家电远程控制系统. 国网新疆电力公司委托项目

## 附录C 攻读博士学位期间获得的奖励

- [1] 研究生国家奖学金. 国家级 (2016.12)
- [2] 湖南省普通高校优秀毕业生. 省级 (2018.05)
- [3] 湖南大学优秀研究生. 校级 (2016.12)
- [4] 优秀博士研究生学校奖学金. 校级 (2017.12)
- [5] 湖南大学优秀毕业生. 校级 (2018.05)