

中图分类号: TP391
学科分类号: 081200

论文编号: 1028716 22-S057

硕士学位论文

一种求解多目标旅行商问题的邻域结构迁移局部搜索

研究生姓名	王康
学科、专业	计算机科学与技术
研究方向	计算智能理论与应用
指导教师	蔡昕烨 副教授

南京航空航天大学

研究生院 计算机科学与技术学院

二〇二一年十二月

Nanjing University of Aeronautics and Astronautics
The Graduate School
College of Computer Science and Technology

Research on Multi-Objective Combination Optimization Algorithm Based on Neighbor Structure Transfer

A Thesis in
Computer Science and Technology

by

Kang Wang

Advised by

Associate Prof. Xinye Cai

Submitted in Partial Fulfillment

of the Requirements

for the Degree of

Master of Engineering

December, 2021

承诺书

本人声明所呈交的硕士学位论文是本人在导师指导下进行的研究工作及取得的研究成果。除了文中特别加以标注和致谢的地方外，论文中不包含其他人已经发表或撰写过的研究成果，也不包含为获得南京航空航天大学或其他教育机构的学位或证书而使用过的材料。

本人授权南京航空航天大学可以将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、汇编学位论文。

（保密的学位论文在解密后适用本承诺书）

作者签名：_____

日 期：_____

摘 要

旅行商问题（TSP）是最经典的组合优化问题之一，其已广泛存在于大部分行业，包括但不限于交通运输、网络通信和钻孔电路板等领域。同时，多目标旅行商问题（MOTSP）是具有多个冲突的目标的多目标组合优化问题，设计相应的多目标组合优化算法来解决这类问题具有重要的实际意义。本文围绕 MOTSP 和基于分解的多目标组合优化算法进行研究，主要研究内容包括以下两个部分：

第一，TSP 拥有巨大的搜索空间会导致局部搜索算法的搜索时间过长、易陷入局部最优。针对这一问题，可以通过对具有显性结构化搜索空间进行剪枝预处理，从而达到提高算法的运行效率的目的。本文提出了基于最小生成树和欧拉回路的邻域结构生成算法，并通过局部搜索技术对这些邻域结构进行搜索，以此提升问题的优化效率。通过实验对比，可以证实基于最小生成树和欧拉回路的邻域结构生成算法生成邻域结构的高效率及其邻域结构的高质量。

第二，基于上述 TSP 的邻域结构，结合进化迁移中不同领域信息迁移这一特征，提出了基于邻域结构迁移的多目标组合优化算法。并在邻域结构迁移中构建了两目标相似度模型来引导算法进行邻域结构正迁移，同时构造了一个多臂老虎机模型来学习选择邻域结构的知识，以便进行更有效的局部搜索。最后，通过实验能够表明算法在各种测试用例上获得的非支配解集不仅分布性好，而且收敛性也优异，并且验证了邻域结构迁移中的两目标相似度模型和多臂老虎机模型的有效性。

关键词：旅行商问题，多目标优化，局部搜索，进化迁移优化，邻域结构，最小生成树，邻域结构迁移

ABSTRACT

The traveling salesman problem (TSP) is one of the most classic combinatorial optimization problems. It has been widely used in most industries, including but not limited to transportation, network communications, and drilling circuit boards. At the same time, the multi-objective traveling salesman problem (MOTSP) is a multi-objective combinatorial optimization problem with multiple conflicting objectives. It is of great practical significance to design a corresponding multi-objective combinatorial optimization algorithm to solve this type of problem. This thesis focuses on MOTSP and decomposition-based multi-objective combinatorial optimization algorithms. The main research content of this thesis includes the following two parts:

First, TSP has a huge search space, which will cause the search time of the local search algorithm to be too long, and it is easy to fall into the local optimum. To solve this problem, the pruning preprocessing can be performed on the explicit structured search space, so as to achieve the goal of improving the efficiency of the algorithm. This thesis proposes a neighbor structure generation algorithm based on minimum spanning tree and Euler circuit, and searches these neighborstructures through local search technology to improve the optimization efficiency of the problem. Through experimental comparison, it can be confirmed that the neighbor structure generation algorithm based on minimum spanning tree and Euler circuit has the high efficiency of generating neighbor structure and the high quality of neighbor structure.

Second, based on the above-mentioned neighbor structure of TSP, a multi-objective combinatorial optimization algorithm based on neighbor structure transfer is proposed. To guide positive knowledge transfer, a bi-objective similarity model is proposed to generate a neighbor structure candidate set for each subproblem. At the same time, a multi-armed bandit model is constructed to learn the knowledge of which neighbor structure to use for more efficient local search on the run. Finally, through experiments, it can be shown that the non-dominated solution set obtained by the algorithm on various test cases is not only well distributed, but also excellent in convergence. It also verifies the bi-objective similarity model and the multi-armed bandit model in the neighborhood structure migration. Effectiveness.

Keywords: Traveling Salesman Problem, Multi-objective Optimization, Local Search, Evolutionary Transfer Optimization, Neighbor Structure, Minimum Spanning Tree, Neighborhood Structure Transfer

目 录

第一章 快速上手	1
1.1 欢迎	1
1.2 L ^A T _E X 环境准备	1
1.3 编译模板和文档	1
1.4 使用模板	1
1.5 开始写作	1
1.5.1 使用 TeXstudio	2
1.5.2 使用 vscode	2
1.6 打印论文	2
第二章 特色功能	3
2.1 定理环境	3
2.2 参考文献	4
第三章 定理环境 · 下	5
3.1 演示一级标题	5
3.1.1 演示二级标题	5
第四章 使用示例	6
4.1 插图	6
4.2 表格	7
4.3 数字与国际单位	11
4.4 中英文之间空格	11
附录 A 后记	15
A.1 v0.9a 后记——Old Jack 的吐槽	15
A.2 v1.0 后记	16
A.3 v2.0 后记 by yzwduck	17
A.4 v2.1 后记 by yzwduck	17
A.5 v2.2 后记 by yzwduck	18
参考文献	19
参考文献	21
致谢	22

在学期间的研究成果及学术论文情况	23
------------------------	----

图表清单

图 4.1	tikz 例子	6
图 4.2	一个校徽	7
图 4.3	包含两张图片的插图	7
图 4.4	拙作中利用 <code>pgfplot^{PKG}</code> 绘制的图表	8
图 4.5	包含多张图片的插图	9
图 4.6	一幅占用完整页面的图片	13
图 4.7	又一幅占用完整页面的图片	14
表 4.1	城市人口	8
表 4.2	<code>tabu</code> 注意事项	8
表 4.4	实验数据	9
表 4.3	Tables where numbers have different units	12

注释表

A, A_0	状态方程矩阵	e	误差绝对值
a	重心到前轴的距离	e_i	误差变化率
a_0, a_1, a_2, a_3	多项式系数	$F(\omega)$	多项式
a_{c0}	加速度变量	F_i, θ_i	Fadeev 递归算法中间变量
a_{s1}, a_{s0}	连轴器及传动轴简化模型传递系数	F_X	汽车总制动力
		F_Y	汽车总侧向力
a_y	横向加速度	f_b	轮胎制动力
a_{yc}	横向加速度极限值	f_{bi}, f_{ci}	各轮制动力和侧偏力
$\tilde{a}_0, \tilde{a}_1, \tilde{a}_2, \tilde{a}_3$	多项式系数	G	状态方程矩阵
B, B_0, B_1	状态方程矩阵	g	重力加速度
B_{w1}, B_{w2}	状态方程矩阵	H	汽车重心高度
b	重心到后轴的距离	$H(j\omega)$	频响函数
b_0, b_1, b_2, b_3	多项式系数	h	汽车重心到侧倾中心的距离
b_m	电机阻尼比系数	h_r	汽车侧倾中心高度

缩略词

缩略词	英文全称
WSN	Wireless Sensor Networks
CAM	Center Angle Method
LEACH	Low-Energy Adaptive Clustering Hierarchy

第一章 快速上手

1.1 欢迎

欢迎使用 $\text{N}_\text{U}^2\text{ T}_\text{HESIS}$ ，本文档将介绍如何利用 $\text{N}_\text{U}^2\text{ T}_\text{HESIS}$ 模板进行学位论文写作，我们假设读者有 $\text{L}_\text{A}\text{T}_\text{E}_\text{X}$ 英文写作经验，并会使用搜索引擎解决常见问题。

本模板的源代码托管在 <https://github.com/nuaatug/nuaathesis>，欢迎来提 issue/PR。

1.2 $\text{L}_\text{A}\text{T}_\text{E}_\text{X}$ 环境准备

由于本模板使用了大量宏包，因此对 $\text{L}_\text{A}\text{T}_\text{E}_\text{X}$ 环境有不少要求。推荐使用以下打 ✓ 的 $\text{L}_\text{A}\text{T}_\text{E}_\text{X}$ 发行版：

✓ $\text{T}_\text{E}_\text{X}$ Live 请安装以下 collection: langchinese, latexextra, science, pictures, fontsextra;

如果觉得安装体积太大的话，可以看 `.ci/texlive.pkgs` 列出的所需宏包；

✓ $\text{M}_\text{i}\text{K}_\text{T}_\text{E}_\text{X}$ 请祈祷国内的镜像服务器不抽风；如果它抽风了，建议隔天再试；

因为 $\text{M}_\text{i}\text{K}_\text{T}_\text{E}_\text{X}$ 能自动下载安装宏包，非常推荐 Windows 用户使用。

✗ $\text{C}_\text{T}_\text{E}_\text{X}$ (<http://www.ctex.org/>) 不推荐，可能宏包缺失、版本过旧导致无法编译。

1.3 编译模板和文档

只有在找不到 `nuaathesis.cls` 文件的时候，才需要执行本步骤。

进入模板的根目录，运行 `build.bat` (Windows) 或 `build.sh` (其他系统)，它会生成模板 `nuaathesis.cls` 以及对应的文档 `nuaathesis.pdf`。

1.4 使用模板

论文写作时，请确认证件的目录下有以下文件：

- `nuaathesis.cls` 文档模板；
- `nuaathesis.bst` 参考文献格式（如果使用 `biber` 来生成参考文献的话）；
- `logo/` 文件夹，内含一些图标；

如果论文目录下没有这些文件的话，请从本模板根目录复制一份。

1.5 开始写作

最方便的开始方法，莫过于修改现有的文稿。因此推荐直接修改本文档：

- `bachelor.tex` 或 `master.tex` 主文件，定义了文档包含的内容。建议删除并只保留其中一个主文件；

- `global.tex` 里面定义文档的信息，导入一些宏包，并设置全局使用的宏；
- `content/` 文件夹，按章节拆分的文档内容，这里；
- `ref/` 文件夹，内含参考文献数据库；

修改完成后，使用 `latexmk -xelatex bachelor` 进行编译。如果需要使用图形界面的编辑器的话，请继续阅读本节内容。

1.5.1 使用 TeXstudio

1. 打开主文件 `bachelor.tex` 或 `master.tex`；
2. 菜单 Options > Configure TeXstudio 对话框；
3. 左侧选择 Build，右侧将 Default Compiler 修改为 Latexmk；
4. 确认即可。

1.5.2 使用 vscode

1. 打开论文目录；
2. 安装 LaTeX Workshop 插件；
3. 打开论文的主文件 `bachelor.tex` 或 `master.tex`，删除没有用到的主文件；
4. 使用 LaTeX Workshop 插件提供的编译命令编译文档。

1.6 打印论文

如果论文需要双面打印的话，请务必修改文档类选项，编译双面打印用的 PDF 文件。具体地说，在主文件的头部，将 `openany`，`oneside` 改成 `openany`，`twoside`。

第二章 特色功能

本章节介绍由 $\text{NJA}^2\text{THESIS}$ 提供的特有的宏。

2.1 定理环境

$\text{NJA}^2\text{THESIS}$ 没有定义任何定理环境，但提供了三个宏 $\backslash\text{nuaatheorem}(g|\text{chap}|\text{chapu})$ 来定义不同编号方法的定理环境。

1. $\backslash\text{nuaatheorem}g$ 的编号只有一个数字；
2. $\backslash\text{nuaatheorem}chap$ 的编号由“章节. 序号”构成，不同的定理环境的编号是独立的，它们的数字编号会重复，如“练习 3.1”后面可能出现“胡诌 3.1”；
3. $\backslash\text{nuaatheorem}chapu$ 的编号也是由“章节. 序号”构成，但它们的数字编号是统一的，同一个数字不会重复出现（仅限用 $\backslash\text{nuaatheorem}chapu$ 声明的定理环境之间）。如“定义 2.1”后面不会出现“假设 2.1”，但可能出现“定义 2.2”或“假设 2.2”；

由于学校没有规定计数的编号，所以所有的定理环境应该由作者来决定编号方式，这也意味着所有的定理环境都要由作者来定义（这不是 $\text{NJA}^2\text{THESIS}$ 在偷懒哦）。

顺便一提，在同一章里同时出现两种编号方式的定理环境，很可能造成混乱，所以请合理安排定理环境的编号方式。以下开始举栗子。

样例

定义 2.1 (欧几里得距离): 点 \mathbf{p} 与点 \mathbf{q} 的欧几里得距离，是连接该两点的线段 $(\overline{\mathbf{pq}})$ 的长度。

在笛卡尔坐标系下，如果 n 维欧几里得空间下的两个点 $\mathbf{p} = (p_1, p_2, \dots, p_n)$ 与点 $\mathbf{q} = (q_1, q_2, q_3, \dots, q_n)$ ，那么点 \mathbf{p} 与点 \mathbf{q} 的距离，或者点 \mathbf{q} 与点 \mathbf{p} 的距离，由以下公式定义：

$$d(\mathbf{p}, \mathbf{q}) = d(\mathbf{q}, \mathbf{p}) = \sqrt{(q_1 - p_1)^2 + (q_2 - p_2)^2 + \dots + (q_n - p_n)^2} \quad (2.1)$$

$$= \sqrt{\sum_{i=1}^n (q_i - p_i)^2} \quad (2.2)$$

证明: 由 $\backslash\text{nuaatheorem}(g|\text{chap}|\text{chapu})$ 定义的定理环境支持 $\backslash\text{autoref}$ ，比如在定义 2.1 中，式 2.2 是式 2.1 的简写。

但是 $\backslash\text{autoref}$ 只能在 $\backslash\text{ref}$ 加上前缀，无法加上后缀。所以上一句话的后半部分，更推荐手工来写标注“(2.2) 是 (2.1) 的简写”。

定理环境里面可以换行，不过证明与其他定理环境稍有不同，它是单独定义实现的，因此

末尾会有一个（帅气的）QED 符号。

□

假设 2.2: 假设本身就不成立

句子 1: 例句 1

2.2 参考文献

参考文献应该以上标的形式标注于论述之后，就像这样：

- 研究表明^[1]，早睡早起有益身体健康。
- 如果想同时引用多个文献^[2-5]，只需要在 `cite{}` 中用逗号分开 `citeKey` 就好。

本模板保留了 CQuThesis 里的 `inlinecite`，但请注意它不符合学校的要求，无论本科还是硕士、博士，请谨慎使用：文献 [5] 表明，文献 [6-8] 所述的情况是有理论依据的。

NJA² Thesis 格式测试，学校的参考文献格式并不是 GB7714-2015，所以追加一些测试样例。《要求》里列出的格式有：

1. 连续出版物^[9,10]：[序号] 作者. 文题. 刊名, 年, 卷号 (期号): 起~止页码.
2. 专译集^[11,12]：[序号] 作者. 书名 (译者). 出版地: 出版者, 出版年: 起~止页码.
3. 论文集^[13,14]：[序号] 作者. 文题. 编者, 文集名, 出版地: 出版者, 出版年: 起~止页码.
4. 学位论文^[15-17]：[序号] 姓名. 文题, [X X 学位论文]. 授予单位所在地: 授予单位, 授予年.
5. 专利^[18-20]：[序号] 申请者. 专利名, 国名, 专利文献种类, 专利号, 出版日期.
6. 技术标准^[21-23]：[序号] 发布单位, 技术标准代号, 技术标准名称, 出版地: 出版者, 出版日期.

注：目前实现的格式仍然与《要求》有点差异：

1. 《要求》里论文集的编者、文集名、出版地是逗号分隔，而目前是点号分隔；
2. 《要求》的学位论文用中文注明学位，目前没实现；
3. 在信息缺失的情况下，《要求》貌似直接把对应字段省略，目前仍显示“X X 不详”。

第三章 定理环境 · 下

本章演示使用 `\nuaatheoremchap` 定义的定理环境，注意它们的数字编号是可以重复的。

3.1 演示一级标题

3.1.1 演示二级标题

3.1.1.1 演示三级标题

胡诌 3.1：哆啦 A 梦写的论文被拒稿的可能性很高¹。

练习 3.1：证明 $1 + 1 = 2$ 。²

胡诌 3.2（右边的胡诌是真的）：“练习”与“胡诌”定理环境的编号是相互独立的，它们的数字编号允许重复，如“胡诌 3.1”和“练习 3.1”。

练习 3.2：按照本文所演示的方法，利用 `\nuaatheorem(g|chap|chapu)` 来定义您的论文中所需要的定理环境。

句子 2：例句 2

句 2 没有章节编号，它是全局编号的，它可以用在外国语学院论文中来枚举例句。

¹出处：<https://www.math.kyoto-u.ac.jp/~arai/latex/presen2.pdf> 的最后一页

²Testing footnote with English spaces

第四章 使用示例

本章介绍一些常用的宏包的常用方法，希望能为读者写作时提供参考。

4.1 插图

首先讨论一下插图的格式，在 \LaTeX 环境下，

1. 推荐使用宏包来绘制插图，如 `tikz`^{PKG}，它兼容所有 \LaTeX 环境，字体能与全文统一，质量最佳，但是需要的学习成本较大。请务必先阅读 `tikz`^{PKG} 文档的第 1 章教程，然后可以去 `texample`¹ 等网站上找类似的例子，也可以使用 `GeoGebra`² 之类的工具来生成 \TeX 代码，效果可以参见图 4.1；
2. 其次推荐使用其他绘图工具生成的 PDF、EPS 格式的矢量图，`svg` 格式可以通过 `inkscape` 软件转换成带 \TeX 文本代码的 PDF。效果可以参见图 4.2；
3. 当然，PNG、jpeg 之类的位图格式也能做插图；
4. 最后，不要忘记论文是单色印刷的，请确保插图在黑白打印的情况下的清晰度。

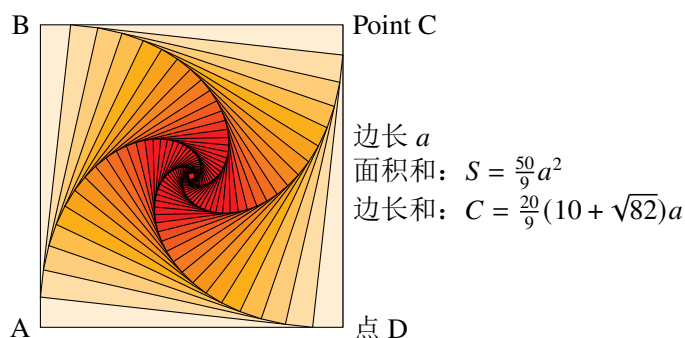


图 4.1 `tikz` 例子

如果需要多个插图共用一个题注的话，需要加载额外的宏包，一般选用 `subcaption`^{PKG} 或 `subfig`^{PKG}，这两个宏包是互斥的。需要注意的是 `subcaption`^{PKG} 貌似与 `geometry`^{PKG} 有些冲突，会导致多行的图表的最后一行无法居中，而 `geometry`^{PKG} 是设置页边距的必用宏包。所以个人推荐使用 `subfig`^{PKG}，效果可以参考图 4.3b。

如果需要插入图表的话，可以考虑使用 `pgfplots`^{PKG} 宏包，效果参见图 4.4；也可以用 `Matplotlib`、`MatLab`、`Mathematica` 之类的工具导出成兼容格式的图片。

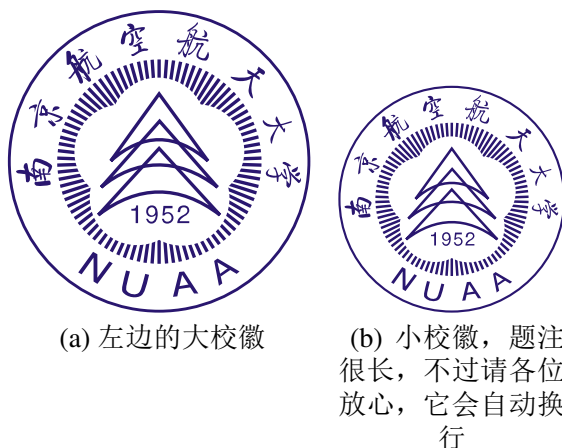
如果真的需要让十几张图片共用一个题注的话，需要手工拆分成多个 `float` 并用 `\ContinuedFloat`

¹<http://texample.net/tikz>

²<https://www.geogebra.org>



图 4.2 一个校徽



(a) 左边的大校徽

(b) 小校徽，题注很长，不过请各位放心，它会自动换行

图 4.3 包含两张图片的插图

来拼接，不过直接多次使用 `\caption` 会在图表清单里产生多个重复条目，需要一点点小技巧（设置图表目录标题为空）。建议将浮动位置指定为 `t`，以确保分散至多页的图能占用整个页面，手工分页才能靠谱。效果可以参见图 4.5 的图 4.5f。

如果需要插入一张很大的图片的话，可以使用 `rotating`^{PKG} 提供的 `sidewaysfigure`，它会将插图放置在单独的页面上，如果文档使用 `twoside` 选项的话，它会根据页面方向，设置 90° 或 270° 旋转，可能需要编译两遍才能设置正确的旋转方向。不过可能有一个问题，`sidewaysfigure` 中使用 `\subfloat` 可能无法准确标号，需要手工重置 `subfigure` 计数器。效果参见图 4.6 和图 4.7。

4.2 表格

由于封面页，本模板预先加载了 `array`^{PKG} 和 `tabu`^{PKG}，如果需要其他表格的宏包，请自行加载。

如果需要插入一个简易的表格，可以只使用 `tabular` 环境，如表 4.1。

也可以使用 `tabu` 环境，它可以更灵活地设置列宽，但它有一些 bug，如表 4.2。

如果需要对某列的小数点对齐，或者带有单位，或者需要做四舍五入的处理，可以尝试配合 `siunitx`^{PKG} 一起使用。非常推荐看一下 `siunitx`^{PKG} 文档的，至少看一下 “Hints for using

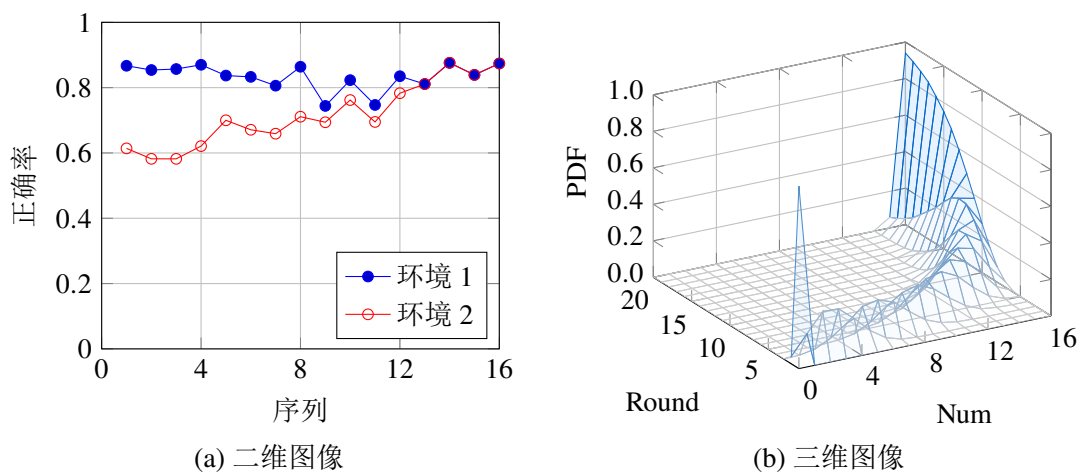
图 4.4 拙作中利用 `pgfplots`^{PKG} 绘制的图表

表 4.1 城市人口数量排名 (source: Wikipedia)

城市	人口
Mexico City	20,116,842
Shanghai	19,210,000
Peking	15,796,450
Istanbul	14,160,467

“`siunitx`”一节的输出结果，表 4.3 来自于该文档的 7.14 节。

如果表格内容很多，导致无法放在一页内的话，需要用 `longtable` 或 `longtabu` 进行分页。

表 4.4 是来自 `CQUThesis` 的一个长表格的例子。

表 4.2 `tabu` 注意事项

默认列	有修正的列
<code>tabu</code> 的 bug? This line is BAD	注意左侧最后一行后的垂直空格
注意对比最后一行	bug 会影响多行的 <code>tabu</code> 表格 bug 的修正方法是在段落后面加 <code>\strut</code> This line is Good
垂直居中没效果	改用 <code>tabular</code>
与新版 <code>array</code> ^{PKG} 不兼容	谨慎使用，切勿用 <code>tabu spread</code>

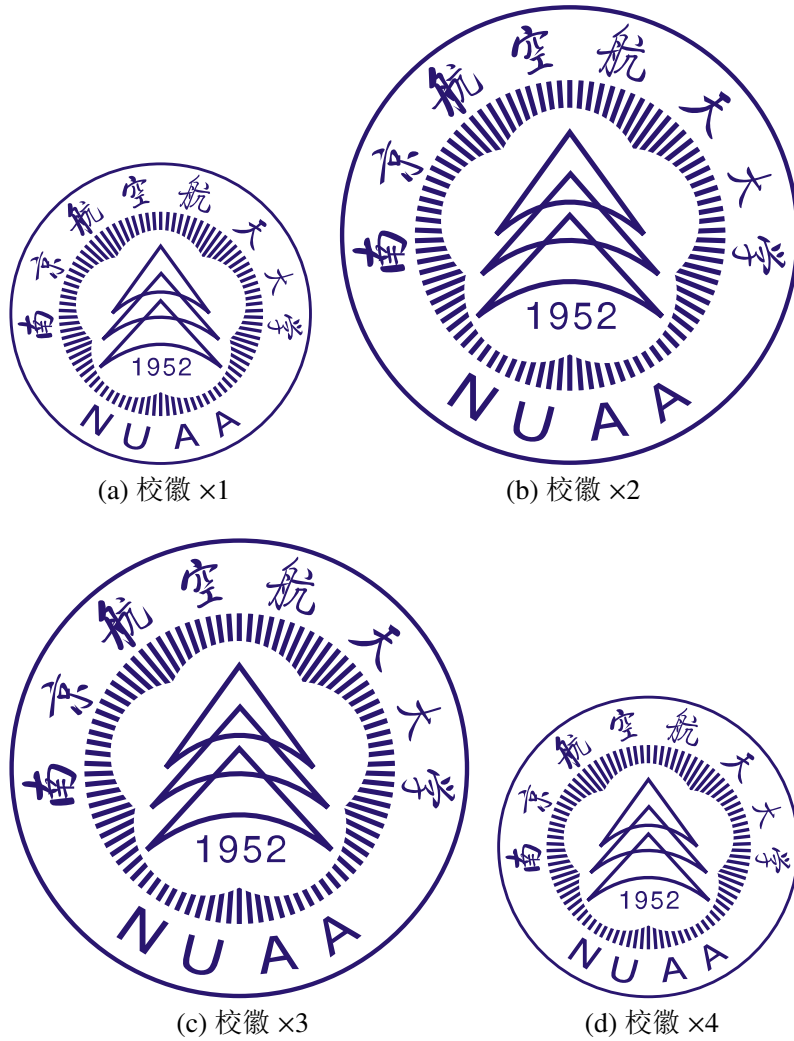


图 4.5 包含多张图片的插图

表 4.4 实验数据，这个题注十分的长，注意这在索引中的处理方式，还有 \caption 后面的双反斜杠

测试程序	正常运行 时间 (s)	同步 时间 (s)	检查点 时间 (s)	卷回恢复 时间 (s)	进程迁移 时间 (s)	检查点 文件 (KB)
CG.A.2	23.05	0.002	0.116	0.035	0.589	32491
CG.A.4	15.06	0.003	0.067	0.021	0.351	18211
CG.A.8	13.38	0.004	0.072	0.023	0.210	9890
CG.B.2	867.45	0.002	0.864	0.232	3.256	228562
CG.B.4	501.61	0.003	0.438	0.136	2.075	123862

续下页

续表 4.4 实验数据

测试程序	正常运行 时间 (s)	同步 时间 (s)	检查点 时间 (s)	卷回恢复 时间 (s)	进程迁移 时间 (s)	检查点 文件 (KB)
CG.B.8	384.65	0.004	0.457	0.108	1.235	63777
MG.A.2	112.27	0.002	0.846	0.237	3.930	236473
MG.A.4	59.84	0.003	0.442	0.128	2.070	123875
MG.A.8	31.38	0.003	0.476	0.114	1.041	60627
MG.B.2	526.28	0.002	0.821	0.238	4.176	236635
MG.B.4	280.11	0.003	0.432	0.130	1.706	123793
MG.B.8	148.29	0.003	0.442	0.116	0.893	60600
LU.A.2	2116.54	0.002	0.110	0.030	0.532	28754
LU.A.4	1102.50	0.002	0.069	0.017	0.255	14915
LU.A.8	574.47	0.003	0.067	0.016	0.192	8655
LU.B.2	9712.87	0.002	0.357	0.104	1.734	101975
LU.B.4	4757.80	0.003	0.190	0.056	0.808	53522
LU.B.8	2444.05	0.004	0.222	0.057	0.548	30134
CG.B.2	867.45	0.002	0.864	0.232	3.256	228562
CG.B.4	501.61	0.003	0.438	0.136	2.075	123862
CG.B.8	384.65	0.004	0.457	0.108	1.235	63777
MG.A.2	112.27	0.002	0.846	0.237	3.930	236473
MG.A.4	59.84	0.003	0.442	0.128	2.070	123875
MG.A.8	31.38	0.003	0.476	0.114	1.041	60627
MG.B.2	526.28	0.002	0.821	0.238	4.176	236635
MG.B.4	280.11	0.003	0.432	0.130	1.706	123793
MG.B.8	148.29	0.003	0.442	0.116	0.893	60600
LU.A.2	2116.54	0.002	0.110	0.030	0.532	28754
LU.A.4	1102.50	0.002	0.069	0.017	0.255	14915
LU.A.8	574.47	0.003	0.067	0.016	0.192	8655
LU.B.2	9712.87	0.002	0.357	0.104	1.734	101975
LU.B.4	4757.80	0.003	0.190	0.056	0.808	53522
LU.B.8	2444.05	0.004	0.222	0.057	0.548	30134

续下页

续表 4.4 实验数据

测试程序	正常运行 时间 (s)	同步 时间 (s)	检查点 时间 (s)	卷回恢复 时间 (s)	进程迁移 时间 (s)	检查点 文件 (KB)
EP.A.2	123.81	0.002	0.010	0.003	0.074	1834
EP.A.4	61.92	0.003	0.011	0.004	0.073	1743
EP.A.8	31.06	0.004	0.017	0.005	0.073	1661
EP.B.2	495.49	0.001	0.009	0.003	0.196	2011
EP.B.4	247.69	0.002	0.012	0.004	0.122	1663
EP.B.8	126.74	0.003	0.017	0.005	0.083	1656

4.3 数字与国际单位

本模板预加载 `siunitx`^{PKG} 来格式化文中的内联数字，该宏包有大量可定制的参数，请务必阅读其文档，并在文档导言部分设置格式。

- 旋转角度为 90° 、 270°
- 分辨率 1920×1080 的像素数量约为 2.07×10^6
- 电脑显示器的像素间距为 1.8 nm 、 $180 \mu\text{m}$ 还是 18 mm ?
- 重力加速度 $g = 9.8 \text{ kg s}^{-2}$ 、 $g = 9.8 \text{ kg} \cdot \text{s}^{-2}$ ，亦或 $g = 9.8 \text{ kg/s}^2$

4.4 中英文之间空格

很遗憾，目前 $\text{L}^{\text{A}}\text{T}_{\text{E}}\text{X}$ 和 $\text{C}^{\text{T}}\text{E}_{\text{X}}$ 虽然能处理普通汉字与英文之间的间隔，但是汉字与宏之间的空格仍然需要手工调整，请务必按以下的规则撰写原稿：

- ✓ 如图 4.3b 所示：如 `\autoref{fig:sub2}` 所示，这个宏返回的是“图 x.xx”，所以前面两个汉字之间不能加空格，后面数字与汉字之间必须加空格；
- ✓ 距离为 1.7 个天文单位：距离为 1.7~个天文单位，前面可以不加空格（ $\text{C}^{\text{T}}\text{E}_{\text{X}}$ 会修正），后面必须加 ~ 以防止在“1.7”与“个”之间换行。此时更推荐写成 1.7 au ：`\SI{1.7}{au}`。

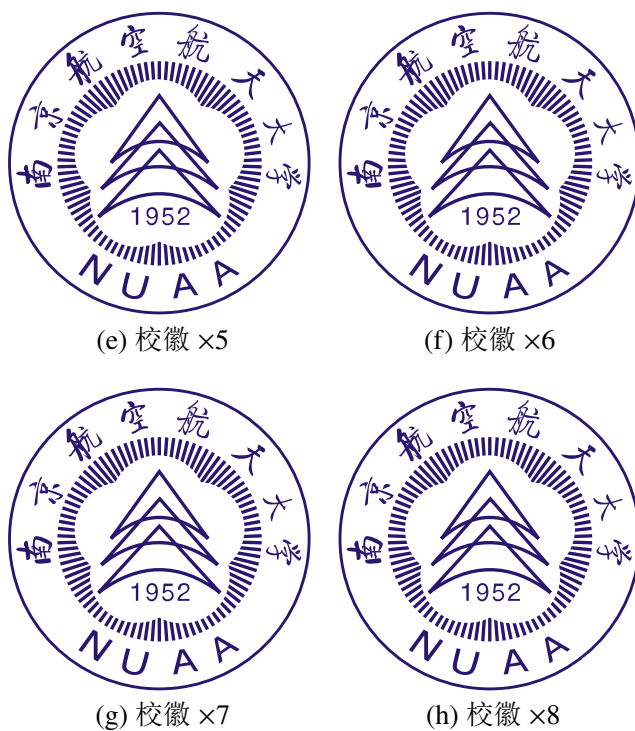


图 4.5 包含多张图片的插图（续）

表 4.3 Tables where numbers have different units

	One	Two	Heading
$a/\text{\AA}$	1.234(2)	5.678(4)	1.234 m
$\beta/^\circ$	90.34(4)	104.45(5)	0.835 cd
μ/mm^{-1}	0.532	0.894	4.23 J mol ⁻¹

南京航空航天大学

(a) First caption

南京航空航天大学

(b) Second caption

图 4.6 一幅占用完整页面的图片



图 4.7 又一幅占用完整页面的图片

附录 A 后记

A.1 v0.9a 后记——Old Jack 的吐槽

`\begin{轻松+愉快}`

Old Jack 他有点累.....

Old Jack 两年前就开始关注南航毕设的 L^AT_EX 模板了，但是两年了还没有任何有实际意义的新动作，所以 Old Jack 就亲自操刀制作了新的一版。虽然很多代码都是从其他模板中直接摘抄过来的，但是这也是 T_EX 最普遍、最快捷的学习 & 开发方法。一开始 Old Jack 也想造轮子，但是轮子真的不好造。

在制作过程中遇到了几个关键性的问题：

- 前文提到的三种粗体
- nuaa.png 源文件和页眉制作
- 英文字母、章节标题莫名其妙的加粗
- 脚注相对页脚线的位置

第一个问题 Old Jack 曾经用 T_EX 中伪粗体 (FakeBold) 的方法实现过，但是效果并不好，而且当时受到最后一个问题的强烈影响，不得不使用其他字体来解决这个问题。

第二个问题 Old Jack 开始是使用官方模板中的图片，但是分辨率太低，效果很差。于是 Old Jack Google 以图搜图找到了现在的这个文件的源文件，经过了一系列不可描述的操作后得到了现在的 nuaa.png。页眉的制作也让 Old Jack 很头疼，论文要求论文到顶端和底端的距离分别为 2.5cm 和 2.0cm，Old Jack 很 naive 的就给 geometry 设置了这个数值，但是效果和官方模板差了很多，于是 Old Jack 只好一点一点地调试，达到了近似官方模板的效果。页脚和官方模板有细微的区别，Old Jack 认为这无伤大雅，是要罗马数字和阿拉伯数字编号正确应该就可以了。

第三个问题是一个非常奇怪的问题。使用伪粗体时所有标题全都加粗了，非常难看，经过了代码重构和不停地调试解决了这个问题。在模板完成 99% 后发现最后致谢中的英文字体全都加粗了，Old Jack 几次审视代码和调试都没有解决。偶然间，Old Jack 将全部主要文件全部提取出来，放入另一个文件夹，然后重新编译就解决了这个问题！当然后来发现代码中确实有一个地方有小问题可能会影响，但是这不是上一次出错的原因。Old Jack 对于各位使用模板的南航学子以及其他可能会参考此模板的 T_EX 爱好者提了一个建议：任何语言，任何代码出现莫名其妙的问题时，换一个文件夹，改一下名字，重新跑一下，可能会得到意想不到的结果。当然这不是万能的解决方法。

第四个问题就如第一章中脚注和页脚线的情况，感觉两条线很别扭。Old Jack 犹豫了很久，

最后没有采用将脚注放在页脚线下的方案，因为 Old Jack 觉得还是两条线的方案好看。对于想要将脚注放在页脚线下方的同学，可以在主文件中取消注释那段代码，来实现所需要的效果。

Old Jack 他完成了模板的再制作，但是他没有心气再写出一篇能够指导大家使用 \LaTeX 的文档了(好吧，Old Jack 他承认懒是一部分因素)，望大家谅解 Old Jack。

$\backslash\text{end}\{\text{轻松+愉快}\}$

A.2 v1.0 后记

Old Jack 非常高兴，因为他不是一个人在战斗。再次感谢张一白、王成欣、曾宪文、Gavin Lee 等人的工作，没有他们， $\text{NJU}^2\text{THESIS}$ 不会像现在这么美丽。

经过 $\text{NJU}^2\text{THESIS}$ Group 的努力和测试， $\text{NJU}^2\text{THESIS}$ 迎来了 v1.0 版，也就是第一个正式发行版。一路走来也是有些坎坷，各种各样的小问题一直困扰着我们，其实 v1.0 也还有着一些细小的问题尚未解决。不过 Old Jack 请大家放心，这些小问题不影响模板的使用。很多已经被我们解决的小问题比如页眉的大小位置，中英文字体是否正确，摘要的章节标题不能是加粗的宋体等等，老师可能不去管这些，甚至注意不到有什么区别。相比之下，重要的地方是：公式、图表的编号，图表和文本的位置，参考文献的格式等等才是老师关注的点。很多地方只是我们几个人为了追求和 office 模板尽可能接近，才不断地进行修改调整，也是有点讽刺。

写毕设论文的时候，Old Jack 不止一次看到隔壁室友调公式内容， Mathtype 和 Office 装了卸，卸了装、调公式编号、调标题位置和大小、调首行缩进、调段间距等等等等，看着他们搞得焦头烂额的，Old Jack 都觉得心累。打印时也是这样，有太多的人在打印店不停地修改自己的论文，有因为 office 和 wps 不兼容修改的，有 office 版本不兼容修改的，有因为页眉页脚错误修改的等等。然而 Old Jack 他在写论文时从来没有担心过这些事情（当然，作为模板开发者 Old Jack 确实操心了很多，2333），他也第一次真正体会到了什么叫做专注于内容，真的挺轻松的（表格是例外）。

对于模板的推广，Old Jack 觉得使用人数仍然不会太多，毕竟 \LaTeX 的群众基础太小，除了 8 院，其他学院对公式的需求整体来讲并不迫切，Old Jack 猜测大部分知道、了解 \LaTeX 的同学是通过数学建模竞赛这个途径才学习了 \LaTeX ；同时因为涉及到学习新的程序语言，时间成本也较大，所以很多同学的学习意愿不高。不过 $\text{NJU}^2\text{THESIS}$ 的目标人群本来也不是全校所有学生，Old Jack 的思路，Old Jack 相信也是 $\text{NJU}^2\text{THESIS}$ Group 其他开发者的思路是：

1. 为自己服务，这是 $\text{NJU}^2\text{THESIS}$ Group 开发模板的第一动力；
2. 对已经掌握 \LaTeX 基本语法的同学， $\text{NJU}^2\text{THESIS}$ Group 为他们在毕业设计时能更轻松地撰写论文，提供平台和机会；
3. 对准备学习 \LaTeX 以及已经学习了一点 \LaTeX 的同学， $\text{NJU}^2\text{THESIS}$ Group 为他们提供学下去的动力和平台。

即将毕业了，回首大学四年，Old Jack 做过疯狂的事情，也找到了一份看起来还可以的工作，只觉得还没对学校做过什么有用的事情，尽管 Old Jack 对学校其实并不是很有感情。完成了这个模板后，至少 Old Jack 可以减少一个遗憾，然后离开学校了。虽然这不是什么惊天动地的工作，但是至少 Old Jack 做了件他认为还算有意义的事情。Old Jack 应该还会再维护 $\text{N}_\text{U}\text{A}^2\text{Thesis}$ 一段时间，期待有后继者能够接过火炬，继续完善并推广 $\text{N}_\text{U}\text{A}^2\text{Thesis}$ 。

想说的可能也就这么多了，Old Jack out !

0813 王志浩，2017.6.24

A.3 v2.0 后记 by yzwduck

也是两年前开始关注南航毕设的 $\text{L}_\text{A}\text{T}_\text{E}_\text{X}$ 模板了，但直到毕业前，都没能去静下心来学习 $\text{L}_\text{A}\text{T}_\text{E}_\text{X}$ 。

现在差不多本科毕业一年，或者说，一年后要开写硕士学位论文了，本打算照着 CQUThesis 来造轮子的时候，逛纸飞机¹ 看到 $\text{N}_\text{U}\text{A}^2\text{Thesis v1.0}$ 发布了。非常激动、也很自愧，同样是经历了大学四年的人，我没能把这模板做出来。

于是马上把两年前为了模板而画的校名（矢量图）传了上去²。

原本打算在 v1.0 版的基础上修改的，但因为行间距设置有问题，封面与 Word 模板也有点差异，还要再加入硕/博士的模板，于是干脆改成 Documented LaTeX Source (.dtx)，方便以后写模板的文档。

做模板过程中遇到的大问题，在于如何正确理解学校对论文格式的要求。虽然有《本科毕业设计（论文）撰写格式要求》、《研究生学位论文撰写要求》，但这些要求依然不够细致，因为那些要求都是假定你用 Word 来写论文的，要求里的内容是 Word 设置的操作方法，所以还要先学习 Word 的排版算法。虽然这不是热门的资料，而且还有 CJK 独有的坑，幸好有人把 Word 排版算法解释得非常详细，这个模板才能避免大量使用测量得到的魔数。但还有很多细节部分，因为能力有限，没能实现。

最后容我吐槽一下学校的 Word 模板，我觉得那个 Word 模板可能从最初做出来后，就基本没有变化。那个“最初”或许可以追溯到上个世纪。很多编号的事情都要由手工来完成，比如说目录页码、各级标题的编号、题注等。这些完全可以自动编号的工作，如果要手工做的话【掀桌颜文字】。

A.4 v2.1 后记 by yzwduck

转眼间一年过去，又到了写毕业论文的时候了。

¹论坛还活着吗？该不会已经沦落为老人的回忆了吧。——2018.10.10

²<https://github.com/nuaatug/nuaathesis/commit/24fa82e>

翻了一下代码的 commit 记录 (部分非公开), 这一年只有加起来两、三个星期在做这个论文模板, 已经无法用“懒”这字来描述鄙人的状态了。

不过也有几件值得小小炫耀一下的事, 终于把中/英/日多国语的坑填了不少, 至少能编译出对应语言的论文来; 为了减少重复代码, 使用一些宏包造了 $\text{CT}_{\text{E}}\text{X}$ 的几个轮子, 从而实现一个 class 文件能支持三国语言。

为了检验模板的效果, 鄙人从知网上找了两篇论文, 试着用 $\text{N}_{\text{U}}\text{A}^2\text{THESIS}$ 模板排版了一下 (节选), 又发现了不少问题。因此目前 $\text{N}_{\text{U}}\text{A}^2\text{THESIS}$ 应该还有相当多的问题的, 但没有用户的话, 由于鄙人能力有限, 难以发现, 还请各位使用 $\text{N}_{\text{U}}\text{A}^2\text{THESIS}$ 的先行者们 (Pioneers) 能反馈意见和建议。

愿所有使用 $\text{N}_{\text{U}}\text{A}^2\text{THESIS}$ 的人, 不会被评审老师指责格式问题。

A.5 v2.2 后记 by yzwduck

我完全没预料到学校会在论文提交截至的 10 天前, 更新论文的模板, 并且变化不小。

值得称赞的是, 学校官方的模板终于用上了“样式表”——从 Word 的第一个版本就有的功能¹。迟到总比不到好, 但是这份 Word 模板留有不少问题。其中比较容易的有:

- 英文摘要页使用了质量很低的机器翻译, 并且关键词前没有空行;
- 目录页结尾, 多了一个章节符;
- 样例章节 2.1.2 (以及 2.2.4) 的标题, 多了段落前后的空格;
- 样例章节 2.2.2 中的罗马数字页号, 没有使用 Times New Roman 字体;
- 四级标题没有顶格书写;
- 三线表标题行底部的划线, 粗细不是 0.75 磅;

不太容易解决的问题 (按从易到难排序):

1. 页眉高度过低, 侵入了正文空间 (大约 0.02 英寸);
2. 页眉里的章节标题, 在英文版的 Word 无法正常显示;
3. 插图、表格和公式没有自动标号, 也无法插入对应的引用;

当然, 这份模板也还有不少问题, 其中比较头疼的几个是:

- 与 Word 排版不一致的行间距;
- 一直没有得到修正的参考文件样式;
- 冗余且一知半解的代码;
- 大量魔数, 缺少文档。

如果 (虚拟语气) 有时间 devotion 的话, 我尽量在我停止维护之前, 把这些坑填上。

$\text{N}_{\text{U}}\text{A}^2\text{THESIS}$ と 良い 思い 出 に な り ま す よ う に 。

¹<http://www.columbia.edu/~em36/wordstyles.html>

参考文献

- [1] Li Z, Ding Y, Kang W, et al. Reduction Mechanism and Capacitive Properties of Highly Electrochemically Reduced TiO₂ Nanotube Arrays[J]. ELECTROCHIMICA ACTA, 2015, 161:40–47.
- [2] Zhang Y, Yu D, Gao M, et al. Growth of anodic TiO₂ nanotubes in mixed electrolytes and novel method to extend nanotube diameter[J]. ELECTROCHIMICA ACTA, 2015, 160:33–42.
- [3] Xue Y, Sun Y, Wang G, et al. Effect of NH₄F concentration and controlled-charge consumption on the photocatalytic hydrogen generation of TiO₂ nanotube arrays[J]. ELECTROCHIMICA ACTA, 2015, 155:312–320.
- [4] Mahshid S, Dolati A, Goodarzi M, et al. Self-organized Titanium Oxide Nanotubes Prepared in Phosphate Electrolytes: Effect of Voltage and Fluorine Concentration[C]. In: Bock C, Traversa E, (eds.). Proceedings of NANOTECHNOLOGY (GENERAL) - 217TH ECS MEETING, volume 28 of *ECS Transactions*, 65 S MAIN ST, PENNINGTON, NJ 08534-2839 USA: ELECTROCHEMICAL SOC INC, 2010. Electrochem Soc (ECS). 67–74. Symposium on Nanotechnology General Session Held During the 217th Meeting of the Electrochemical-Society (ECS), Vancouver, CANADA, APR 25-30, 2010.
- [5] Roy P, Berger S, Schmuki P. TiO₂ Nanotubes: Synthesis and Applications[J]. ANGEWANDTE CHEMIE-INTERNATIONAL EDITION, 2011, 50(13):2904–2939.
- [6] Sulka G D, Kapusta-Kolodziej J, Brzozka A, et al. Anodic growth of TiO₂ nanopore arrays at various temperatures[J]. ELECTROCHIMICA ACTA, 2013, 104:526–535. 3rd International Symposium on Surface Imaging/Spectroscopy at the Solid/Liquid Interface (ISSIS), Polish Acad Sci, J Haber Inst Catalysis & Surface Chem, Krakow, POLAND, MAY 27-JUN 01, 2012.
- [7] Garcia-Vergara S J, Skeldon P, Thompson G E, et al. A flow model of porous anodic film growth on aluminium[J]. ELECTROCHIMICA ACTA, 2006, 52(2):681–687.
- [8] LeClere D J, Velota A, Skeldon P, et al. Tracer investigation of pore formation in anodic titania[J]. JOURNAL OF THE ELECTROCHEMICAL SOCIETY, 2008, 155(9):487–494.
- [9] 袁训来, 陈哲, 肖书海, 等. 蓝田生物群: 一个认识多细胞生物起源和早期演化的新窗口 [J]. 科学通报, 2012, 57(34):3219.
- [10] Kanamori H. Shaking without quaking[J]. Science, 1998, 279(5359):2063.
- [11] 哈里森·沃尔德伦. 经济数学与金融数学 [M]. 北京: 中国人民大学出版社, 2012: 235–236.
- [12] 哈里森·沃尔德伦. 经济数学与金融数学 [M]. 中国人民大学出版社, 2012: 235–236.
- [13] 程根伟. 1998 年长江洪水的成因与减灾对策 [M]. . 见: 许厚泽, 赵其国, 编. 长江流域洪涝灾害与科技对策. 北京: 科学出版社, 1999: 32–36.
- [14] 程根伟. 1998 年长江洪水的成因与减灾对策 [M]. . 见: 许厚泽, 赵其国, 编. 长江流域洪涝灾害与科技对策. 北京: 科学出版社, 1999: 32–36.
- [15] 马欢. 人类活动影响下海河流域典型区水循环变化分析, [博士学位论文]. 北京: 清华大学, 2011.
- [16] 张旭. 基于大气高度辅助的机载 SINS/SAR 组合导航研究, [硕士学位论文]. 南京: 南京航空航天大学, 2013.

- [17] Calms R B. Infrared spectroscopic studies on solid oxygen[D]. Berkeley: Univ. of California, 1965.
- [18] 邓一刚. 全智能节电器, 2006-12-13.
- [19] 西安电子科技大学. 光折变自适应光外差探测方法, 2002-03-06.
- [20] Tachibana R, Shimizu S, Kobayshi S, et al. Electronic watermarking method and system: US6915001, 2005-07-05. <http://www.google.co.in/patents/US6915001>.
- [21] 全国广播电视标准化技术委员会. 广播电视音像资料编目规范: 第2部分 广播资料: GY/T 202.2—2007, 2007.
- [22] 国家环境保护局科技标准司. 土壤环境质量标准: GB 15616—1995, 1996.
- [23] Information and documentation—the Dublin core metadata element set: ISO 15836: 2009, 2009. http://www.iso.org/iso/home/store/catalogue_tc/catalogue_detail.htm?csnumber=52142.

参考文献

- [1] 本节演示如何手写参考文献目录
- [2] 如果论文能用 **biber** 来管理参考文献的话，请使用 **biber**，不要手写
- [3] 如果实在不方便用 **biber** 的话，可以使用这种方法来手写参考文献。格式完全手写会有点繁琐，而且不能在正文中引用。比如：
- [4] KANAMORI H. Shaking without quaking[J]. Science, 1998, 279(5359): 2063.
- [5] 吴云芳. 面向中文信息处理的现代汉语并列结构研究 [D]. 北京: 北京大学, 2003[2013-10-14].

示例：[1] 这种写法不符合学校的要求，推荐使用这种写法^[4]。

致 谢

在此感谢对本论文作成有所帮助的人。

在学期间的研究成果及学术论文情况

攻读硕士学位期间发表（录用）论文情况

1. 以后可能会在这里也用上 biber
2. 不过目前还需要手写论文全称

研究生期间参与的科研项目

1. 国家自然科学基金 (No.12345678)