

基于信息瓶颈的表征学习方法

(申请清华大学工学硕士学位论文)

培 养 单 位 ： 清华伯克利深圳学院

学 科 ： 数据科学与信息技术

研 究 生 ： 王 子 丰

指 导 教 师 ： 黄 绍 伦 副 教 授

副 指 导 教 师 ： Khalid M. Mosalam 教 授

二〇二一年三月

Information Bottleneck for Representation Learning: New Vision

Thesis Submitted to

Tsinghua University

in partial fulfillment of the requirement

for the degree of

Master of Science

in

Data Science and Information Technology

by

Wang Zifeng

Thesis Supervisor: Professor Huang Shao-Lun

Associate Supervisor: Professor Khalid M. Mosalam

March, 2021

学位论文指导小组、公开评阅人和答辩委员会名单

指导小组名单

李 XX	教授	清华大学
王 XX	副教授	清华大学
张 XX	助理教授	清华大学

公开评阅人名单

刘 XX	教授	清华大学
陈 XX	副教授	XXXX 大学
杨 XX	研究员	中国 XXXX 科学院 XXXXXXXX 研究所

答辩委员会名单

主席	赵 XX	教授	清华大学
委员	刘 XX	教授	清华大学
	杨 XX	研究员	中国 XXXX 科学院 XXXXXXXX 研究所
	黄 XX	教授	XXXX 大学
	周 XX	副教授	XXXX 大学
秘书	吴 XX	助理研究员	清华大学

关于学位论文使用授权的说明

本人完全了解清华大学有关保留、使用学位论文的规定，即：

清华大学拥有在著作权法规定范围内学位论文的使用权，其中包括：（1）已获学位的研究生必须按学校规定提交学位论文，学校可以采用影印、缩印或其他复制手段保存研究生上交的学位论文；（2）为教学和科研目的，学校可以将公开的学位论文作为资料在图书馆、资料室等场所供校内师生阅读，或在校园网上供校内师生浏览部分内容。

本人保证遵守上述规定。

（保密的论文在解密后遵守此规定）

Statement on Thesis Usage Authorization

I entirely understand Tsinghua University policies concerning reserving and using copies of graduate dissertations. Tsinghua University has the right to use dissertations within the scope of the Copyright Law, which includes: (1) Graduate students who have obtained a degree must submit dissertations which can be reserved by photocopying, reduction or other means of reproduction; (2) For teaching and research purposes, public dissertations can be provided in libraries, reference rooms and other places or part of dissertation put on the campus network for teachers and students within the school to read.

I guarantee to comply with the above regulations.

(Any confidential thesis must also fully comply with this policy after declassification.)

Signature by Author: _____

Date: _____

Signature by Advisor: _____

Date: _____

摘 要

论文的摘要是对论文研究内容和成果的高度概括。摘要应对论文所研究的问题及其研究目的进行描述，对研究方法和过程进行简单介绍，对研究成果和所得结论进行概括。摘要应具有独立性和自明性，其内容应包含与论文全文同等量的主要信息。使读者即使不阅读全文，通过摘要就能了解论文的总体内容和主要成果。

论文摘要的书写应力求精确、简明。切忌写成对论文书写内容进行提要的形式，尤其要避免“第 1 章……；第 2 章……；……”这种或类似的陈述方式。

关键词是为了文献标引工作、用以表示全文主要内容信息的单词或术语。关键词不超过 5 个，每个关键词中间用分号分隔。

关键词：关键词 1；关键词 2；关键词 3；关键词 4；关键词 5

Abstract

An abstract of a dissertation is a summary and extraction of research work and contributions. Included in an abstract should be description of research topic and research objective, brief introduction to methodology and research process, and summarization of conclusion and contributions of the research. An abstract should be characterized by independence and clarity and carry identical information with the dissertation. It should be such that the general idea and major contributions of the dissertation are conveyed without reading the dissertation.

An abstract should be concise and to the point. It is a misunderstanding to make an abstract an outline of the dissertation and words “the first chapter”, “the second chapter” and the like should be avoided in the abstract.

Keywords are terms used in a dissertation for indexing, reflecting core information of the dissertation. An abstract may contain a maximum of 5 keywords, with semi-colons used in between to separate one another.

Keywords: keyword 1; keyword 2; keyword 3; keyword 4; keyword 5

Table of Contents

摘 要.....	I
Abstract.....	II
Table of Contents	III
Nomenclature.....	IV
1 Introduction	1
1.1 Background.....	1
1.2 Literature review.....	1
1.3 Thesis structure	1
2 Literature Review	3
2.1 插图.....	3
2.2 表格.....	4
3 When Information Bottleneck Meets Counterfactuals	5
3.1 数学符号.....	5
3.2 数学公式.....	5
3.3 数学定理.....	6
4 PAC-Bayes Information Bottleneck	7
4.1 顺序编码制.....	7
4.2 著者-出版年制.....	7
5 Conclusion and Future Work	8
5.1 Summary	8
References.....	9
Acknowledgement	12
Personal Statement.....	13
Resume and Research Achievements during Study	14
指导小组学术评语.....	15
答辩委员会决议书.....	16

Nomenclature

A	Matrix
a	Vector
<i>a</i>	Scalar
W	Weight matrix
ω	A set of random variables $\{\mathbf{W}_1, \dots, \mathbf{W}_L\}$
f^ω	Function parametrized by the variables ω
<i>S</i>	Dataset
X	Dataset inputs (matrix with N rows, one for each sample)
Y	Dataset outputs (matrix with N rows, one for each sample)
\mathbf{x}_i	Input sample for model
\mathbf{y}_i	Output label for model
\mathbf{z}_i	Data point combining both input and output $(\mathbf{x}_i, \mathbf{y}_i)$
$\hat{\mathbf{y}}_i$	Model prediction on input sample \mathbf{x}_i
ℓ	Loss function
\mathcal{N}	The Gaussian distribution
\mathbb{R}	The real numbers
IB	Information bottleneck
BNN	Bayesian neural network
VI	Variational inference
ELBO	Evidence lower bound
KL	Kullback–Leibler
DNN	Deep neural network
MC	Monte Carlo
MCMC	Markov chain Monte Carlo
MDL	Minimum description length
PAC	Probably approximately correct
e.g.	Exempli gratia (“for the sake of an example”)
i.e.	Id est (“it is”)
i.i.d.	Independent and identically distributed
s.t.	Subject to
w.r.t.	With respect to

Chapter 1: Introduction

1.1 Background

Representation learning^[1], especially deep representation learning (or deep learning, DL), has become one of the most popular techniques since Krizhevsky et al.^[2] developed a powerful deep neural network (DNN) that can significantly outperform shallow methods on ImageNet^[3]. After that, DNN based methods have thrived in various machine learning domains, including computer vision^[4], natural language processing^[5], recommendation^[6], reinforcement learning^[7], and so on. These works make a substantial progress in building better artificial intelligence (AI) applications by DNN. However, it remains elusive why DNN gains so much improvement with adding more layers of representations. This question encourages us to think of opening the black box of DNN.

1.2 Literature review

Lorem ipsum dolor sit amet, consectetur adipiscing elit. Ut purus elit, vestibulum ut, placerat ac, adipiscing vitae, felis. Curabitur dictum gravida mauris. Nam arcu libero, nonummy eget, consectetur id, vulputate a, magna. Donec vehicula augue eu neque. Pellentesque habitant morbi tristique senectus et netus et malesuada fames ac turpis egestas. Mauris ut leo. Cras viverra metus rhoncus sem. Nulla et lectus vestibulum urna fringilla ultrices. Phasellus eu tellus sit amet tortor gravida placerat. Integer sapien est, iaculis in, pretium quis, viverra ac, nunc. Praesent eget sem vel leo ultrices bibendum. Aenean faucibus. Morbi dolor nulla, malesuada eu, pulvinar at, mollis ac, nulla. Curabitur auctor semper nulla. Donec varius orci eget risus. Duis nibh mi, congue eu, accumsan eleifend, sagittis quis, diam. Duis eget orci sit amet orci dignissim rutrum.

1.3 Thesis structure

Lorem ipsum dolor sit amet, consectetur adipiscing elit. Ut purus elit, vestibulum ut, placerat ac, adipiscing vitae, felis. Curabitur dictum gravida mauris. Nam arcu libero, nonummy eget, consectetur id, vulputate a, magna. Donec vehicula augue eu neque. Pellentesque habitant morbi tristique senectus et netus et malesuada fames ac turpis egestas. Mauris ut leo. Cras viverra metus rhoncus sem. Nulla et lectus vestibulum urna fringilla

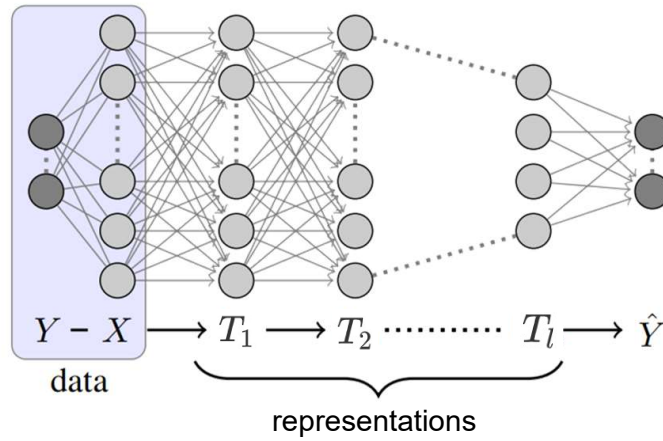


Figure 1-1. A hierarchy of representations in DNN is formulated as a Markov chain, reproduced from [8].

ultrices. Phasellus eu tellus sit amet tortor gravida placerat. Integer sapien est, iaculis in, pretium quis, viverra ac, nunc. Praesent eget sem vel leo ultrices bibendum. Aenean faucibus. Morbi dolor nulla, malesuada eu, pulvinar at, mollis ac, nulla. Curabitur auctor semper nulla. Donec varius orci eget risus. Duis nibh mi, congue eu, accumsan eleifend, sagittis quis, diam. Duis eget orci sit amet orci dignissim rutrum.

Chapter 2: Literature Review

2.1 插图

图片通常在 **figure** 环境中使用 `\includegraphics` 插入，如图 2-1 的源代码。建议矢量图片使用 PDF 格式，比如数据可视化的绘图；照片应使用 JPG 格式；其他的栅格图应使用无损的 PNG 格式。注意，LaTeX 不支持 TIFF 格式；EPS 格式已经过时。

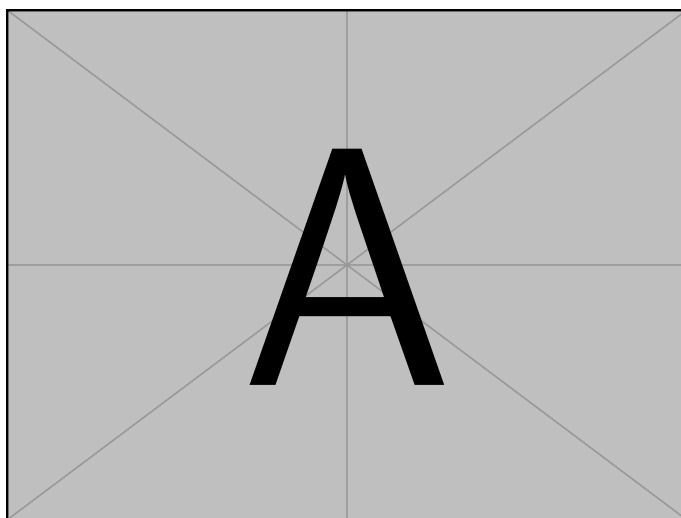


Figure 2-1. 示例图片

若图或表中有附注，采用英文小写字母顺序编号，附注写在图或表的下方。

如果一个图由两个或两个以上分图组成时，各分图分别以 (a)、(b)、(c)..... 作为图序，并须有分图题。推荐使用 `subcaption` 宏包来处理，比如图 2-2(a) 和图 2-2(b)。

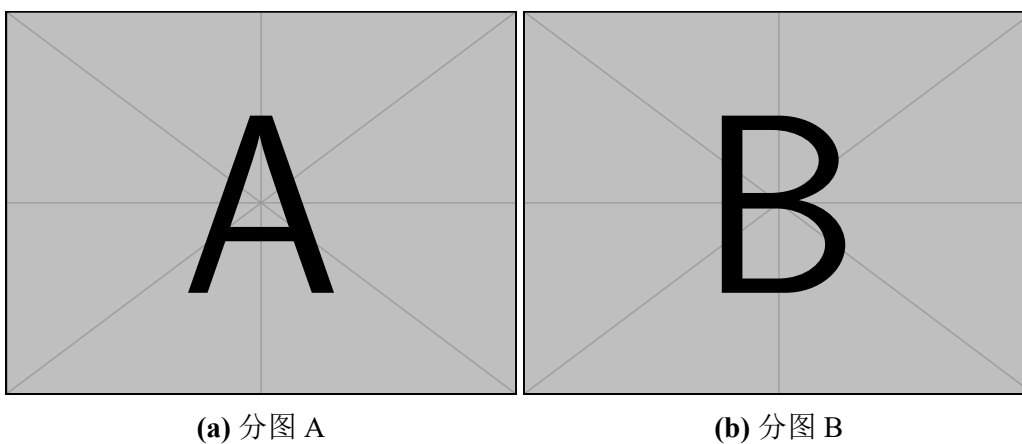


Figure 2-2. 多个分图的示例

2.2 表格

表应具有自明性。为使表格简洁易读，尽可能采用三线表，如表 2-1。三条线可以使用 `booktabs` 宏包提供的命令生成。

Table 2-1. 三线表示例

文件名	描述
thuthesis.dtx	模板的源文件，包括文档和注释
thuthesis.cls	模板文件
thuthesis-*.bst	BibTeX 参考文献表样式文件
thuthesis-*.bbx	BibLaTeX 参考文献表样式文件
thuthesis-*.cbx	BibLaTeX 引用样式文件

表格如果有附注，尤其是需要在表格中进行标注时，可以使用 `threeparttable` 宏包。研究生要求使用英文小写字母 a、b、c…… 顺序编号，本科生使用圈码①、②、③…… 编号。

Table 2-2. 带附注的表格示例

文件名	描述
thuthesis.dtx ^a	模板的源文件，包括文档和注释
thuthesis.cls ^b	模板文件
thuthesis-*.bst	BibTeX 参考文献表样式文件
thuthesis-*.bbx	BibLaTeX 参考文献表样式文件
thuthesis-*.cbx	BibLaTeX 引用样式文件

^a 可以通过 `xelatex` 编译生成模板的使用说明文档；使用 `xetex` 编译 `thuthesis.ins` 时则会从 `.dtx` 中去除掉文档和注释，得到精简的 `.cls` 文件。

^b 更新模板时，一定要记得编译生成 `.cls` 文件，否则编译论文时载入的依然是旧版的模板。

Chapter 3: When Information Bottleneck Meets Counterfactuals

3.1 数学符号

研究生《写作指南》要求量及其单位所使用的符号应符合国家标准《国际单位制及其应用》(GB 3100—1993)、《有关量、单位和符号的一般原则》(GB/T 3101—1993) 的规定。模板中使用 `unicode-math` 宏包来配置数学符号，与 \LaTeX 默认的英美国家的符号习惯有所差异：

1. 大写希腊字母默认为斜体，如 `\Delta`： Δ 。
2. 有限增量符号 Δ (U+2206) 应使用 `unicode-math` 宏包提供的 `\increment` 命令。
3. 向量、矩阵和张量要求粗斜体，应该使用 `unicode-math` 的 `\symbf` 命令，如 `\symbf{A}`、`\symbf{\alpha}`。
4. 数学常数和特殊函数要求用正体，应使用 `\symup` 命令，如 $\pi = 3.14\dots$ ； $e = 2.718\dots$ ，
5. 微分号和积分号使用使用正体，比如 $\int f(x) dx$ 。

关于数学符号更多的用法，参考 `unicode-math` 宏包的使用说明，全部数学符号命的令参考 `unimath-symbols`。

关于量和单位推荐使用 `siunitx` 宏包，可以方便地处理希腊字母以及数字与单位之间的空白，比如： $6.4 \times 10^6 \text{ m}$ ， $9 \mu\text{m}$ ， $\text{kg} \cdot \text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ ， 10°C to 20°C 。

3.2 数学公式

数学公式可以使用 `equation` 和 `equation*` 环境。注意数学公式的引用应前后带括号，建议使用 `\eqref` 命令，比如式 (3-1)。

$$\frac{1}{2\pi i} \int_{\gamma} f = \sum_{k=1}^m n(\gamma; a_k) \mathcal{R}(f; a_k) \quad (3-1)$$

注意公式编号的引用应含有圆括号，可以使用 `\eqref` 命令。

多行公式尽可能在“=”处对齐，推荐使用 `align` 环境。

$$a = b + c + d + e \quad (3-2)$$

$$= f + g \quad (3-3)$$

3.3 数学定理

定理环境的格式可以使用 `amsthm` 或者 `ntheorem` 宏包配置。用户在导言区载入这两者之一后，模板会自动配置 `theorem`、`proof` 等环境。

Theorem 3.1 (Lindeberg–Lévy 中心极限定理): 设随机变量 X_1, X_2, \dots, X_n 独立同分布，且具有期望 μ 和有限的方差 $\sigma^2 \neq 0$ ，记 $\bar{X}_n = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i$ ，则

$$\lim_{n \rightarrow \infty} P\left(\frac{\sqrt{n}(\bar{X}_n - \mu)}{\sigma} \leq z\right) = \Phi(z), \quad (3-4)$$

其中 $\Phi(z)$ 是标准正态分布的分布函数。

Proof: Trivial. ■

同时模板还提供了 `assumption`、`definition`、`proposition`、`lemma`、`theorem`、`axiom`、`corollary`、`exercise`、`example`、`remark`、`problem`、`conjecture` 这些相关的环境。

Chapter 4: PAC-Bayes Information Bottleneck

模板支持 BibTeX 和 BibLaTeX 两种方式处理参考文献。下文主要介绍 BibTeX 配合 natbib 宏包的主要使用方法。

4.1 顺序编码制

在顺序编码制下，默认的 \cite 命令同 \citep 一样，序号置于方括号中，引文页码会放在括号外。统一处引用的连续序号会自动用短横线连接。

<code>\cite{zhangkun1994}</code>	⇒	[9]
<code>\citet{zhangkun1994}</code>	⇒	张昆 等 ^[9]
<code>\citep{zhangkun1994}</code>	⇒	[9]
<code>\cite[42]{zhangkun1994}</code>	⇒	[9] ⁴²
<code>\cite{zhangkun1994,zhugezhen1973}</code>	⇒	[9-10]

也可以取消上标格式，将数字序号作为文字的一部分。建议全文统一使用相同的格式。

<code>\cite{zhangkun1994}</code>	⇒	[9]
<code>\citet{zhangkun1994}</code>	⇒	张昆 等 [9]
<code>\citep{zhangkun1994}</code>	⇒	[9]
<code>\cite[42]{zhangkun1994}</code>	⇒	[9] ⁴²
<code>\cite{zhangkun1994,zhugezhen1973}</code>	⇒	[9-10]

4.2 著者-出版年制

著者-出版年制下的 \cite 跟 \citet 一样。

<code>\cite{zhangkun1994}</code>	⇒	张昆 等 (1994)
<code>\citet{zhangkun1994}</code>	⇒	张昆 等 (1994)
<code>\citep{zhangkun1994}</code>	⇒	(张昆 等, 1994)
<code>\cite[42]{zhangkun1994}</code>	⇒	(张昆 等, 1994) ⁴²
<code>\citep{zhangkun1994,zhugezhen1973}</code>	⇒	(张昆 等, 1994; 竺可桢, 1973)

注意，引文参考文献的每条都要在正文中标注^[9-42]。

Chapter 5: Conclusion and Future Work

5.1 Summary

Nam dui ligula, fringilla a, euismod sodales, sollicitudin vel, wisi. Morbi auctor lorem non justo. Nam lacus libero, pretium at, lobortis vitae, ultricies et, tellus. Donec aliquet, tortor sed accumsan bibendum, erat ligula aliquet magna, vitae ornare odio metus a mi. Morbi ac orci et nisl hendrerit mollis. Suspendisse ut massa. Cras nec ante. Pellentesque a nulla. Cum sociis natoque penatibus et magnis dis parturient montes, nascetur ridiculus mus. Aliquam tincidunt urna. Nulla ullamcorper vestibulum turpis. Pellentesque cursus luctus mauris.

References

- [1] Bengio Y, Courville A, Vincent P. Representation learning: A review and new perspectives[J]. IEEE Transactions on Pattern Analysis and Machine Intelligence, 2013, 35(8): 1798-1828.
- [2] Krizhevsky A, Sutskever I, Hinton G E. Imagenet classification with deep convolutional neural networks[J]. Advances in neural information processing systems, 2012, 25: 1097-1105.
- [3] Deng J, Dong W, Socher R, et al. ImageNet: A large-scale hierarchical image database[C]// IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition. IEEE, 2009: 248-255.
- [4] Simonyan K, Zisserman A. Very deep convolutional networks for large-scale image recognition[J]. arXiv preprint arXiv:1409.1556, 2014.
- [5] Kim Y. Convolutional neural networks for sentence classification[C]// Proceedings of the 2014 Conference on Empirical Methods in Natural Language Processing (EMNLP). 2014: 1746-1751.
- [6] Cheng H T, Koc L, Harmsen J, et al. Wide & deep learning for recommender systems[C]// Proceedings of the 1st Workshop on Deep Learning for Recommender Systems. 2016: 7-10.
- [7] Silver D, Huang A, Maddison C J, et al. Mastering the game of go with deep neural networks and tree search[J]. Nature, 2016, 529(7587): 484-489.
- [8] Tishby N, Zaslavsky N. Deep learning and the information bottleneck principle[C]// IEEE Information Theory Workshop (ITW). IEEE, 2015: 1-5.
- [9] 张昆, 冯立群, 余昌钰, 等. 机器人柔性手腕的球面齿轮设计研究 [J]. 清华大学学报: 自然科学版, 1994, 34(2): 1-7.
- [10] 竺可桢. 物理学论 [M]. 北京: 科学出版社, 1973: 56-60.
- [11] Dupont B. Bone marrow transplantation in severe combined immunodeficiency with an unrelated mhc compatible donor[C]// White H J, Smith R. Proceedings of the third annual meeting of the International Society for Experimental Hematology. Houston: International Society for Experimental Hematology, 1974: 44-46.
- [12] 郑开青. 通讯系统模拟及软件 [D]. 北京: 清华大学无线电系, 1987.
- [13] 姜锡洲. 一种温热外敷药制备方案: 中国, 88105607.3[P]. 1980-07-26.
- [14] 中华人民共和国国家技术监督局. GB3100-3102. 中华人民共和国国家标准-量与单位 [S]. 北京: 中国标准出版社, 1994.
- [15] Merkt F, Mackenzie S R, Softley T P. Rotational autoionization dynamics in high rydberg states of nitrogen[J]. J Chem Phys, 1995, 103: 4509-4518.
- [16] Mellinger A, Vidal C R, Jungen C. Laser reduced fluorescence study of the carbon monoxide nd triplet rydberg series - experimental results and multichannel quantum defect analysis[J]. J Chem Phys, 1996, 104: 8913-8921.
- [17] Bixon M, Jortner J. The dynamics of predissociating high Rydberg states of NO[J]. J Chem Phys, 1996, 105: 1363-1382.

References

- [18] 马辉, 李俭, 刘耀明, 等. 利用 REMPI 方法测量 BaF 高里德堡系列光谱 [J]. 化学物理学报, 1995, 8: 308-311.
- [19] Carlson N W, Taylor A J, Jones K M, et al. Two-step polarization-labeling spectroscopy of excited states of Na₂[J]. Phys Rev A, 1981, 24: 822-834.
- [20] Taylor A J, Jones K M, Schawlow A L. Scanning pulsed-polarization spectrometer applied to Na₂[J]. J Opt Soc Am, 1983, 73: 994-998.
- [21] Taylor A J, Jones K M, Schawlow A L. A study of the excited $1\Sigma_g^+$ states in Na₂[J]. Opt Commun, 1981, 39: 47-50.
- [22] Shimizu K, Shimizu F. Laser induced fluorescence spectra of the $a\ 3\Pi_u-X\ 1\Sigma_g^+$ band of Na₂ by molecular beam[J]. J Chem Phys, 1983, 78: 1126-1131.
- [23] Atkinson J B, Becker J, Demtröder W. Experimental observation of the $a\ 3\Pi_u$ state of Na₂[J]. Chem Phys Lett, 1982, 87: 92-97.
- [24] Kusch P, Hessel M M. Perturbations in the $a\ 1\Sigma_u^+$ state of Na₂[J]. J Chem Phys, 1975, 63: 4087-4088.
- [25] 广西壮族自治区林业厅. 广西自然保护区 [M]. 北京: 中国林业出版社, 1993.
- [26] 霍斯尼. 谷物科学与工艺学原理 [M]. 李庆龙, 译. 2 版. 北京: 中国食品出版社, 1989: 15-20.
- [27] 王夫之. 宋论 [M]. 刻本. 金陵: 曾氏, 1865 (清同治四年).
- [28] 赵耀东. 新时代的工业工程师 [M/OL]. 台北: 天下文化出版社, 1998[1998-09-26]. <http://www.ie.nthu.edu.tw/info/ie.newie.htm>.
- [29] 全国信息与文献工作标准化技术委员会出版物格式分委员会. GB/T 12450-2001 图书书名页 [S]. 北京: 中国标准出版社, 2002: 1.
- [30] 全国出版专业职业资格考试办公室. 全国出版专业职业资格考试辅导教材: 出版专业理论与实务·中级 [M]. 2014 版. 上海: 上海辞书出版社, 2004: 299-307.
- [31] World Health Organization. Factors regulating the immune response: Report of WHO Scientific Group[R]. Geneva: WHO, 1970.
- [32] Peebles P Z, Jr. Probability, random variables, and random signal principles[M]. 4th ed. New York: McGraw Hill, 2001.
- [33] 白书农. 植物开花研究 [M]// 李承森. 植物科学进展. 北京: 高等教育出版社, 1998: 146-163.
- [34] Weinstein L, Swertz M N. Pathogenic properties of invading microorganism[M]// Sodeman W A, Jr, Sodeman W A. Pathologic physiology: mechanisms of disease. Philadelphia: Saunders, 1974: 745-772.
- [35] 韩吉人. 论职工教育的特点 [C]// 中国职工教育研究会. 职工教育研究论文集. 北京: 人民教育出版社, 1985: 90-99.
- [36] 中国地质学会. 地质评论 [J]. 1936, 1(1)-. 北京: 地质出版社, 1936-.
- [37] 中国图书馆学会. 图书馆学通讯 [J]. 1957(1)-1990(4). 北京: 北京图书馆, 1957-1990.
- [38] American Association for the Advancement of Science. Science[J]. 1883, 1(1)-. Washington, D.C.: American Association for the Advancement of Science, 1883-.

References

- [39] 傅刚, 赵承, 李佳路. 大风沙过后的思考 [N/OL]. 北京青年报, 2000-04-12(14)[2002-03-06]. <http://www.bjyouth.com.cn/Bqb/20000412/B/4216%5ED0412B1401.htm>.
- [40] 萧钰. 出版业信息化迈入快车道 [EB/OL]. (2001-12-19)[2002-04-15]. <http://www.creader.com/news/20011219/200112190019.htm>.
- [41] Online Computer Library Center, Inc. About OCLC: History of cooperation[EB/OL]. 2000 [2000-01-08]. <http://www.oclc.org/about/cooperation.en.htm>.
- [42] Scitor Corporation. Project scheduler[CP/DK]. Sunnyvale, Calif.: Scitor Corporation, 1983.

Acknowledgement

衷心感谢导师 ××× 教授和物理系 ×× 副教授对本人的精心指导。他们的言传身教将使我终生受益。

在美国麻省理工学院化学系进行九个月的合作研究期间，承蒙 Robert Field 教授热心指导与帮助，不胜感激。

感谢 ××××× 实验室主任 ××× 教授，以及实验室全体老师和同窗们学的热情帮助和支持！

本课题承蒙国家自然科学基金资助，特此致谢。

声 明

本人郑重声明：所呈交的学位论文，是本人在导师指导下，独立进行研究工作所取得的成果。尽我所知，除文中已经注明引用的内容外，本学位论文的研究成果不包含任何他人享有著作权的内容。对本论文所涉及的研究工作做出贡献的其他个人和集体，均已在文中以明确方式标明。

Personal Statement

I solemnly declare that this dissertation was prepared solely by myself under instruction of my advisors. To my knowledge, except for documents cited in the dissertation, the research results do not contain any achievements of any others who have claimed copyrights. To contributions made by relevant individuals and organizations in the completion of the dissertation, I have clearly acknowledged all their efforts.

Signature by Author: _____

Date:_____

Resume and Research Achievements during Study

个人简历 Resume

197× 年 ×× 月 ×× 日出生于四川 ×× 县。

1992 年 9 月考入 ×× 大学化学系 ×× 化学专业, 1996 年 7 月本科毕业并获得理学学士学位。

1996 年 9 月免试进入清华大学化学系攻读 ×× 化学博士至今。

×× was born 197× in ×× city, Sichuan province. ××××××××××

学术论文 Published Papers

- [1] **Yang Y**, Ren T L, Zhang L T, et al. Miniature microphone with silicon- based ferroelectric thin films. Integrated Ferroelectrics, 2003, 52:229-235. (SCI 收录, 检索号:758FZ.)
- [2] **杨轶**, 张宁欣, 任天令, 等. 硅基铁电微声学器件中薄膜残余应力的研究. 中国机械工程, 2005, 16(14):1289-1291. (EI 收录, 检索号:0534931 2907.)
- [3] **杨轶**, 张宁欣, 任天令, 等. 集成铁电器件中的关键工艺研究. 仪器仪表学报, 2003, 24(S4):192-193. (EI 源刊.)
- [4] **Yang Y**, Ren T L, Zhu Y P, et al. PMUTs for handwriting recognition. In press. (已被 Integrated Ferroelectrics 录用. SCI 源刊.)
- [5] Wu X M, **Yang Y**, Cai J, et al. Measurements of ferroelectric MEMS microphones. Integrated Ferroelectrics, 2005, 69:417-429. (SCI 收录, 检索号:896KM.)
- [6] 贾泽, **杨轶**, 陈兢, 等. 用于压电和电容微麦克风的体硅腐蚀相关研究. 压电与声光, 2006, 28(1):117-119. (EI 收录, 检索号:06129773469.)
- [7] 伍晓明, **杨轶**, 张宁欣, 等. 基于 MEMS 技术的集成铁电硅微麦克风. 中国集成电路, 2003, 53:59-61.

研究成果 Research Achievements

- [8] 任天令, **杨轶**, 朱一平, 等. 硅基铁电微声学传感器畴极化区域控制和电极连接的方法: 中国, CN1602118A[P]. 2005-03-30.
- [9] Ren T L, **Yang Y**, Zhu Y P, et al. Piezoelectric micro acoustic sensor based on ferroelectric materials: USA, No.11/215, 102[P]. (美国发明专利申请号.)

指导小组学术评语

论文提出了.....

答辩委员会决议书

论文提出了.....

论文取得的主要创新性成果包括：

1.

2.

3.

论文工作表明作者在 ××××× 具有 ××××× 知识，具有 ×××× 能力，论文 ××××，
答辩 ××××。

答辩委员会表决，（× 票/一致）同意通过论文答辩，并建议授予 ×××（姓名）
×××（门类）学博士/硕士学位。