

语音情感识别中特征空间选择的研究

（申请清华大学工程硕士学位论文）

培 养 单 位 ： 计 算 机 科 学 与 技 术 系

学 科 ： 计 算 机 技 术

研 究 生 ： 马 习

指 导 教 师 ： 吴 志 勇 副 研 究 员

二〇一八年三月

Feature Space Selection in Speech Emotion Recognition

Thesis Submitted to

Tsinghua University

in partial fulfillment of the requirement

for the professional degree of

Master of Engineering

by

Ma Xi

(Computer Technology)

Thesis Supervisor : Associate Professor Wu Zhiyong

March, 2018

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应遵守此规定）

作者签名：_____

导师签名：_____

日 期：_____

日 期：_____

摘要

在人机交互系统逐渐变得普遍的今天，只是理解语音中的语言学信息已经不足以满足所有需求，何提取语音中的情感信息在许多的应用场景中也变得越来越重要。传统的语音情感识别可以分为情感相关的声学特征的提取和情感分类模型的构建两部分，原始语音通常会先被映射到情感信息相关的声学特征，然后采用各种分类模型将特征向量映射到对应的情感类别。近年来，随着深度学习方法的发展与普及，深度神经网络开始越来越多被应用到这一领域，并且取得了不错的效果。此外，特征提取和情感分类两个部分也开始被整合到一起，通过深度神经网络将可以构建从原始语音直接到情感类别的端到端的识别系统。但是如何引入情感相关的心理学信息以及处理长度变化的语音，并没有被现有的研究广泛的关注。

针对这两个问题，本文将分别从传统的语音情感识别方法和端到端的深度学习入手，设计对应的方法来提升系统的识别率。主要的研究工作和贡献如下：

一、提出一种基于情感对的语音情感识别框架，并在最后的决策融合过程中引入心理学的情感空间模型，从而提升了系统的识别率。传统的语音情感识别系统通常为所有的情感选取相同的声学特征来完成最后的情感分类，但实验证明不同的情感和不同的声学特征的相关性并不同。针对这一问题，我们将分别为不同的情感对选取不同的特征集合，将原先的多分类问题转变为多个二分类问题，并在最后的决策融合过程中通过贝叶斯分类器引入情感空间的信息。在公开的情感语音数据集IEMOCAP上，我们方法取得了比传统的识别框架更好的准确率。

二、设计了一种能够处理变长语音段的神经网络结构，消除了语音分段带来的中性语音和情感语音的混淆，从而提升了系统的识别率。在使用深度神经网络实现端到端的语音情感识别系统时，由于卷积神经网络和循环神经网络很难处理变长的输入，通常会把变长的语音句子切分成多段等长的语音段，然后将所有语音段都标记为对应句子的情感标签，但这样会导致部分中性语音段被标记为有情感。针对于这一问题，我们采用补齐和掩码的方式来处理神经网络中变长的输入序列，避免了错误标注带来了的效果变差。相对于切分等长语音段的方法，我们直接输入整个变长语音的方法可以在相同的数据集上取得更好的准确率。

关键词：语音情感识别；情感对；情感空间模型；变长语音段；深度神经网络

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.

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

Key words: T_EX; L^AT_EX; CJK; template; thesis

目 录

第1章 绪论	1
1.1 研究背景和意义	1
1.1.1 传统的语音情感识别	1
1.1.2 端到端的语音情感识别	1
1.2 本文的主要研究内容和贡献	1
1.2.1 研究内容和各章介绍	1
1.2.2 本文主要贡献	1
第2章 语音情感识别的基础知识	2
2.1 本章引论	2
2.2 情感的定义	2
2.2.1 离散的情感类别标签	2
2.2.2 连续的情感维度空间	2
2.3 声学特征的抽取	2
2.3.1 人工选择情感相关的声学特征	2
2.3.2 选择算法筛选情感相关的声学特征	2
2.3.3 深度神经网络抽取情感相关的声学特征	2
2.4 情感分类模型的构建	2
2.4.1 基于传统机器学习的情感分类模型	2
2.4.2 基于深度学习的情感分类模型	2
第3章 基于情感对的语音情感识别框架	3
3.1 本章引论	3
3.2 情感对	3
3.2.1 情感对的定义	3
3.2.2 基于情感对的声学特征选择	3
3.2.3 基于情感对的二分类模型	3
3.3 决策融合	3
3.3.1 基于投票的决策融合	3
3.3.2 基于情感空间的贝叶斯决策融合	3
3.4 情感对与语音情感识别	3
3.4.1 基于情感对的语音情感识别系统	3

3.4.2 实验设置.....	3
3.4.3 实验结果.....	3
3.5 本章小结	3
第4章 基于变长语音段的端到端的情感识别	4
4.1 本章引论	4
4.2 基于语谱图的声学特征抽取.....	4
4.2.1 语谱图的定义	4
4.2.2 卷积神经网络	4
4.2.3 基于卷积神经网络的特征抽取.....	4
4.3 变长输入序列的神经网络结构	4
4.3.1 变长输入序列的卷积神经网络.....	4
4.3.2 变长输入序列的循环神经网络.....	4
4.4 深度神经网络与变长语音情感识别	4
4.4.1 基于深度神经网络的变长语音情感识别系统	4
4.4.2 实验设置.....	4
4.4.3 实验结果.....	4
4.5 本章小结	4
第5章 总结与展望	5
5.1 本文工作总结	5
5.2 未来工作展望	5
插图索引	6
表格索引	7
公式索引	8
参考文献	9
致 谢	10
声 明	11
附录 A 外文资料原文	12
A.1 Single-Objective Programming	12
A.1.1 Linear Programming	13
A.1.2 Nonlinear Programming.....	14
A.1.3 Integer Programming	15

附录 B 外文资料的调研阅读报告或书面翻译	16
B.1 单目标规划	16
B.1.1 线性规划.....	16
B.1.2 非线性规划	17
B.1.3 整数规划.....	17
附录 C 其它附录	18
个人简历、在学期间发表的学术论文与研究成果	19

主要符号对照表

HPC	高性能计算 (High Performance Computing)
cluster	集群
Itanium	安腾
SMP	对称多处理
API	应用程序编程接口
PI	聚酰亚胺
MPI	聚酰亚胺模型化合物, N-苯基邻苯酰亚胺
PBI	聚苯并咪唑
MPBI	聚苯并咪唑模型化合物, N-苯基苯并咪唑
PY	聚吡咯
PMDA-BDA	均苯四酸二酐与联苯四胺合成的聚吡咯薄膜
ΔG	活化自由能 (Activation Free Energy)
χ	传输系数 (Transmission Coefficient)
E	能量
m	质量
c	光速
P	概率
T	时间
v	速度
劝学	<p>君子曰：学不可以已。青，取之于蓝，而青于蓝；冰，水为之，而寒于水。木直中绳。輶以为轮，其曲中规。虽有槁暴，不复挺者，輶使之然也。故木受绳则直，金就砺则利，君子博学而日参省乎己，则知明而行无过矣。吾尝终日而思矣，不如须臾之所学也；吾尝跂而望矣，不如登高之博见也。登高而招，臂非加长也，而见者远；顺风而呼，声非加疾也，而闻者彰。假舆马者，非利足也，而致千里；假舟楫者，非能水也，而绝江河，君子生非异也，善假于物也。积土成山，风雨兴焉；积水成渊，蛟龙生焉；积善成德，而神明自得，圣心备焉。故不积跬步，无以至千里；不积小流，无以成江海。骐驎一跃，不能十步；驽马十驾，功在不舍。锲而舍之，朽木不折；锲而不舍，金石可镂。蚓无爪牙之利，筋骨之强，上食埃土，下饮黄</p>

泉，用心一也。蟹六跪而二螯，非蛇鳝之穴无可寄托者，用心躁也。——荀况

第1章 绪论

这是示例文档，基本上覆盖了模板中所有格式的设置。建议大家在使用模板之前，除了阅读《THUThesis用户手册》，这个示例文档也最好能看一看。

小老鼠偷吃热凉粉；短长虫环绕矮高粱^①。

1.1 研究背景和意义

封面的例子请参看 `cover.tex`。主要符号表参看 `denation.tex`，附录和个人简历分别参看 `appendix01.tex` 和 `resume.tex`。里面的命令都很直观，一看即会^②。

1.1.1 传统的语音情感识别

1.1.2 端到端的语音情感识别

1.2 本文的主要研究内容和贡献

1.2.1 研究内容和各章介绍

1.2.2 本文主要贡献

① 韩愈（768-824），字退之，河南河阳（今河南孟县）人，自称郡望昌黎，世称韩昌黎。幼孤贫刻苦好学，德宗贞元八年进士。曾任监察御史，因上疏请免关中赋役，贬为阳山县令。后随宰相裴度平定淮西迁刑部侍郎，又因上表谏迎佛骨，贬潮州刺史。做过吏部侍郎，死谥文公，故世称韩吏部、韩文公。是唐代古文运动领袖，与柳宗元合称韩柳。诗力求险怪新奇，雄浑重气势。

② 你说还是看不懂？怎么会呢？

第2章 语音情感识别的基础知识

2.1 本章引论

2.2 情感的定义

2.2.1 离散的情感类别标签

2.2.2 连续的情感维度空间

2.3 声学特征的抽取

2.3.1 人工选择情感相关的声学特征

2.3.2 选择算法筛选情感相关的声学特征

2.3.3 深度神经网络抽取情感相关的声学特征

2.4 情感分类模型的构建

2.4.1 基于传统机器学习的情感分类模型

2.4.2 基于深度学习的情感分类模型

第3章 基于情感对的语音情感识别框架

3.1 本章引论

3.2 情感对

3.2.1 情感对的定义

3.2.2 基于情感对的声学特征选择

3.2.3 基于情感对的二分类模型

3.3 决策融合

3.3.1 基于投票的决策融合

3.3.2 基于情感空间的贝叶斯决策融合

3.4 情感对与语音情感识别

3.4.1 基于情感对的语音情感识别系统

3.4.2 实验设置

3.4.3 实验结果

3.5 本章小结

第4章 基于变长语音段的端到端的情感识别

4.1 本章引论

4.2 基于语谱图的声学特征抽取

4.2.1 语谱图的定义

4.2.2 卷积神经网络

4.2.3 基于卷积神经网络的特征抽取

4.3 变长输入序列的神经网络结构

4.3.1 变长输入序列的卷积神经网络

4.3.2 变长输入序列的循环神经网络

4.4 深度神经网络与变长语音情感识别

4.4.1 基于深度神经网络的变长语音情感识别系统

4.4.2 实验设置

4.4.3 实验结果

4.5 本章小结

第5章 总结与展望

5.1 本文工作总结

5.2 未来工作展望

插图索引

表格索引

公式索引

公式 A-1	13
公式 A-2	13

参考文献

薛瑞尼. 2017. THUTHESIS: 清华大学学位论文模板[EB/OL]. <https://github.com/xueruini/thuthesis>.

致 谢

衷心感谢导师 xxx 教授和物理系 xxx 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 xxx 教授热心指导与帮助，不胜感激。感谢 xx 实验室主任 xx 教授，以及实验室全体老师和同学们的热情帮助和支持！本课题承蒙国家自然科学基金资助，特此致谢。

感谢 L^AT_EX 和 THU_{THE}SIS 薛瑞尼 (2017)，帮我节省了不少时间。

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。

签 名：_____ 日 期：_____

附录 A 外文资料原文

The title of the English paper

Abstract: As one of the most widely used techniques in operations research, *mathematical programming* is defined as a means of maximizing a quantity known as *objective function*, subject to a set of constraints represented by equations and inequalities. Some known subtopics of mathematical programming are linear programming, nonlinear programming, multiobjective programming, goal programming, dynamic programming, and multilevel programming^[1].

It is impossible to cover in a single chapter every concept of mathematical programming. This chapter introduces only the basic concepts and techniques of mathematical programming such that readers gain an understanding of them throughout the book^[2,3].

A.1 Single-Objective Programming

The general form of single-objective programming (SOP) is written as follows,

$$\begin{cases} \max f(x) \\ \text{subject to:} \\ g_j(x) \leq 0, \quad j = 1, 2, \dots, p \end{cases} \quad (123)$$

which maximizes a real-valued function f of $x = (x_1, x_2, \dots, x_n)$ subject to a set of constraints.

Definition A.1: In SOP, we call x a decision vector, and x_1, x_2, \dots, x_n decision variables. The function f is called the objective function. The set

$$S = \{x \in \mathbb{R}^n \mid g_j(x) \leq 0, j = 1, 2, \dots, p\} \quad (456)$$

is called the feasible set. An element x in S is called a feasible solution.

Definition A.2: A feasible solution x^* is called the optimal solution of SOP if and only if

$$f(x^*) \geq f(x) \quad (\text{A-1})$$

for any feasible solution x .

One of the outstanding contributions to mathematical programming was known as the Kuhn-Tucker conditions A-2. In order to introduce them, let us give some definitions. An inequality constraint $g_j(x) \leq 0$ is said to be active at a point x^* if $g_j(x^*) = 0$. A point x^* satisfying $g_j(x^*) \leq 0$ is said to be regular if the gradient vectors $\nabla g_j(x)$ of all active constraints are linearly independent.

Let x^* be a regular point of the constraints of SOP and assume that all the functions $f(x)$ and $g_j(x)$, $j = 1, 2, \dots, p$ are differentiable. If x^* is a local optimal solution, then there exist Lagrange multipliers λ_j , $j = 1, 2, \dots, p$ such that the following Kuhn-Tucker conditions hold,

$$\begin{cases} \nabla f(x^*) - \sum_{j=1}^p \lambda_j \nabla g_j(x^*) = 0 \\ \lambda_j g_j(x^*) = 0, \quad j = 1, 2, \dots, p \\ \lambda_j \geq 0, \quad j = 1, 2, \dots, p. \end{cases} \quad (\text{A-2})$$

If all the functions $f(x)$ and $g_j(x)$, $j = 1, 2, \dots, p$ are convex and differentiable, and the point x^* satisfies the Kuhn-Tucker conditions (A-2), then it has been proved that the point x^* is a global optimal solution of SOP.

A.1.1 Linear Programming

If the functions $f(x)$, $g_j(x)$, $j = 1, 2, \dots, p$ are all linear, then SOP is called a *linear programming*.

The feasible set of linear is always convex. A point x is called an extreme point of convex set S if $x \in S$ and x cannot be expressed as a convex combination of two points in S . It has been shown that the optimal solution to linear programming corresponds to an extreme point of its feasible set provided that the feasible set S is bounded. This fact is the basis of the *simplex algorithm* which was developed by Dantzig as a very efficient method for solving linear programming.

Table 1 This is an example for manually numbered table, which would not appear in the list of tables

Network Topology		# of nodes	# of clients			Server
GT-ITM	Waxman Transit-Stub	600	2%	10%	50%	Max. Connectivity
Inet-2.1		6000				
Xue	Rui	Ni	THUThESIS			
	ABCDEF					

Roughly speaking, the simplex algorithm examines only the extreme points of the feasible set, rather than all feasible points. At first, the simplex algorithm selects an extreme point as the initial point. The successive extreme point is selected so as to improve the objective function value. The procedure is repeated until no improvement in objective function value can be made. The last extreme point is the optimal solution.

A.1.2 Nonlinear Programming

If at least one of the functions $f(x), g_j(x), j = 1, 2, \dots, p$ is nonlinear, then SOP is called a *nonlinear programming*.

A large number of classical optimization methods have been developed to treat special-structural nonlinear programming based on the mathematical theory concerned with analyzing the structure of problems.



Figure 1 This is an example for manually numbered figure, which would not appear in the list of figures

Now we consider a nonlinear programming which is confronted solely with maximizing a real-valued function with domain \mathcal{R}^n . Whether derivatives are available or not, the usual strategy is first to select a point in \mathcal{R}^n which is thought to be the most likely place where the maximum exists. If there is no information available on which to base such a selection, a point is chosen at random. From this first point an attempt is made to construct a sequence of points, each of which yields an improved objective function value over its predecessor. The next point to be added to the sequence is chosen by analyzing the behavior of the function at the previous points. This construction continues

until some termination criterion is met. Methods based upon this strategy are called *ascent methods*, which can be classified as *direct methods*, *gradient methods*, and *Hessian methods* according to the information about the behavior of objective function f . Direct methods require only that the function can be evaluated at each point. Gradient methods require the evaluation of first derivatives of f . Hessian methods require the evaluation of second derivatives. In fact, there is no superior method for all problems. The efficiency of a method is very much dependent upon the objective function.

A.1.3 Integer Programming

Integer programming is a special mathematical programming in which all of the variables are assumed to be only integer values. When there are not only integer variables but also conventional continuous variables, we call it *mixed integer programming*. If all the variables are assumed either 0 or 1, then the problem is termed a *zero-one programming*. Although integer programming can be solved by an *exhaustive enumeration* theoretically, it is impractical to solve realistically sized integer programming problems. The most successful algorithm so far found to solve integer programming is called the *branch-and-bound enumeration* developed by Balas (1965) and Dakin (1965). The other technique to integer programming is the *cutting plane method* developed by Gomory (1959).

Uncertain Programming (BaoDing Liu, 2006.2)

References

NOTE: These references are only for demonstration. They are not real citations in the original text.

- [1] Donald E. Knuth. The \TeX book. Addison-Wesley, 1984. ISBN: 0-201-13448-9
- [2] Paul W. Abrahams, Karl Berry and Kathryn A. Hargreaves. \TeX for the Impatient. Addison-Wesley, 1990. ISBN: 0-201-51375-7
- [3] David Salomon. The advanced \TeX book. New York : Springer, 1995. ISBN:0-387-94556-3

附录 B 外文资料的调研阅读报告或书面翻译

英文资料的中文标题

摘要：本章为外文资料翻译内容。如果有摘要可以直接写上来，这部分好像没有明确的规定。

B.1 单目标规划

北冥有鱼，其名为鲲。鲲之大，不知其几千里也。化而为鸟，其名为鹏。鹏之背，不知其几千里也。怒而飞，其翼若垂天之云。是鸟也，海运则将徙于南冥。南冥者，天池也。

$$p(y|\mathbf{x}) = \frac{p(\mathbf{x}, y)}{p(\mathbf{x})} = \frac{p(\mathbf{x}|y)p(y)}{p(\mathbf{x})} \quad (123)$$

吾生也有涯，而知也无涯。以有涯随无涯，殆已！已而为知者，殆而已矣！为善无近名，为恶无近刑，缘督以为经，可以保身，可以全生，可以养亲，可以尽年。

B.1.1 线性规划

庖丁为文惠君解牛，手之所触，肩之所倚，足之所履，膝之所倚，砉然响然，奏刀騞然，莫不中音，合于桑林之舞，乃中经首之会。

表 1 这是手动编号但不出现在索引中的一个表格例子

Network Topology		# of nodes	# of clients			Server
GT-ITM	Waxman Transit-Stub	600	2%	10%	50%	Max. Connectivity
Inet-2.1		6000				
Xue	Rui	Ni	THUThESIS			
	ABCDEF					

文惠君曰：“嘻，善哉！技盖至此乎？”庖丁释刀对曰：“臣之所好者道也，进乎技矣。始臣之解牛之时，所见无非全牛者；三年之后，未尝见全牛也；方今之时，臣以神遇而不以目视，官知止而神欲行。依乎天理，批大郤，导大窾，因其固然。技经肯綮之未尝，而况大瓠乎！良庖岁更刀，割也；族庖月更刀，折也；

今臣之刀十九年矣，所解数千牛矣，而刀刃若新发于硎。彼节者有间而刀刃者无厚，以无厚入有间，恢恢乎其于游刃必有余地矣。是以十九年而刀刃若新发于硎。虽然，每至于族，吾见其难为，怵然为戒，视为止，行为迟，动刀甚微，謦然已解，如土委地。提刀而立，为之而四顾，为之踌躇满志，善刀而藏之。”

文惠君曰：“善哉！吾闻庖丁之言，得养生焉。”

B.1.2 非线性规划

孔子与柳下季为友，柳下季之弟名曰盗跖。盗跖从卒九千人，横行天下，侵暴诸侯。穴室枢户，驱人牛马，取人妇女。贪得忘亲，不顾父母兄弟，不祭先祖。所过之邑，大国守城，小国入保，万民苦之。孔子谓柳下季曰：“夫为人父者，必能诏其子；为人兄者，必能教其弟。若父不能诏其子，兄不能教其弟，则无贵父子兄弟之亲矣。今先生，世之才士也，弟为盗跖，为天下害，而弗能教也，丘窃为先生羞之。丘请为先生往说之。”



图1 这是手动编号但不出现索引中的图片的例子

柳下季曰：“先生言为人父者必能诏其子，为人兄者必能教其弟，若子不听父之诏，弟不受兄之教，虽今先生之辩，将奈之何哉？且跖之为人也，心如涌泉，意如飘风，强足以距敌，辩足以饰非。顺其心则喜，逆其心则怒，易辱人以言。先生必无往。”

孔子不听，颜回为驭，子贡为右，往见盗跖。

B.1.3 整数规划

盗跖乃方休卒徒大山之阳，脍人肝而铺之。孔子下车而前，见谒者曰：“鲁人孔丘，闻将军高义，敬再拜谒者。”谒者入通。盗跖闻之大怒，目如明星，发上指冠，曰：“此夫鲁国之巧伪人孔丘非邪？为我告之：尔作言造语，妄称文、武，冠枝木之冠，带死牛之胁，多辞缪说，不耕而食，不织而衣，摇唇鼓舌，擅生是非，以迷天下之主，使天下学士不反其本，妄作孝弟，而侥幸于封侯富贵者也。子之罪大极重，疾走归！不然，我将以子肝益昼铺之膳。”

附录 C 其它附录

前面两个附录主要是给本科生做例子。其它附录的内容可以放到这里，当然如果你愿意，可以把这部分也放到独立的文件中，然后将其 `\input` 到主文件中。

个人简历、在学期间发表的学术论文与研究成果

个人简历

xxxx 年 xx 月 xx 日出生于 xx 省 xx 县。

xxxx 年 9 月考入 xx 大学 xx 系 xx 专业, xxxx 年 7 月本科毕业并获得 xx 学士学位。

xxxx 年 9 月免试进入 xx 大学 xx 系攻读 xx 学位至今。

发表的学术论文

- [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

- [1] 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. (中国专利公开号)

- [2] Ren T L, Yang Y, Zhu Y P, et al. Piezoelectric micro acoustic sensor based on ferroelectric materials: USA, No.11/215, 102. (美国发明专利申请号)

综合论文训练记录表

学生姓名		学号		班级	
论文题目					
主要内容以及进度安排	<div>指导教师签字：_____</div> <div>考核组组长签字：_____</div> <div>年 月 日</div>				
中期考核意见	<div>考核组组长签字：_____</div> <div>年 月 日</div>				

指导教师评语	<div>指导教师签字：_____</div> <div>年 月 日</div>
评阅教师评语	<div>评阅教师签字：_____</div> <div>年 月 日</div>
答辩小组评语	<div>答辩小组组长签字：_____</div> <div>年 月 日</div>

总成绩：_____

教学负责人签字：_____

年 月 日