



申请同济大学工学硕士学位论文

# 电容式离子电流检测电路 的离子电流适用工况拓展

培 养 单 位： 同济大学汽车学院

一 级 学 科： 热能与动力工程

二 级 学 科： 动力工程

研 究 生： 邱君诚

指 导 教 师： 吴志军教授

二〇一五年九月





**A dissertation submitted to  
Tongji University in conformity with the requirements for  
the degree of Master of Science**

## **A Simple Sample of Tongji Thesis Using TONGJITHESIS**

(Supported by the Natural Science Foundation of China for  
Distinguished Young Scholars, Grant No.123456789)

School/Department :	School of Automotive Study
Discipline :	Thermal and Power Engineering
Major :	Powertrain Engineering
Candidate :	Juncheng Qiu
Supervisor :	Prof. Wu Zhijun

**September, 2015**



# 学位论文版权使用授权书

本人完全了解同济大学关于收集、保存、使用学位论文的规定，同意如下各项内容：按照学校要求提交学位论文的印刷本和电子版；学校有权保存学位论文的印刷本和电子版，并采用影印、缩印、扫描、数字化或其它手段保存论文；学校有权提供目录检索以及提供本学位论文全文或者部分的阅览服务；学校有权按有关规定向国家有关部门或者机构送交论文的复印件和电子版；在不以盈利为目的的前提下，学校可以适当复制论文的部分或全部内容用于学术活动。

学位论文作者签名：

年 月 日



# 同济大学学位论文原创性声明

本人郑重声明：所呈交的学位论文，是本人在导师指导下，进行研究工作所取得的成果。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创作的、已公开发表或者没有公开发表的作品的内容。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。本学位论文原创性声明的法律责任由本人承担。

学位论文作者签名：

年 月 日





## 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。

本文介绍同济大学论文模板 TONGJITHESIS 的使用方法。本模板符合学校的硕士、博士论文格式要求。

本文的创新点主要有：

- 用例子来解释模板的使用方法；
- 用废话来填充无关紧要的部分；
- 一边学习摸索一边编写新代码。

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。（模板作者注：关键词分隔符不用考虑，模板会自动处理。英文关键词同理。）

关键词： $\text{T}_{\text{E}}\text{X}$ ， $\text{L}^{\text{A}}\text{T}_{\text{E}}\text{X}$ ，CJK，模板，论文

## 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<sub>E</sub>X, L<sup>A</sup>T<sub>E</sub>X, CJK, template, thesis

# 目录

第 1 章 绪论.....	1
1.1 前言.....	1
1.2 国内外研究现状.....	1
1.2.1 离子电流的形成机理研究.....	1
1.2.2 基于离子电流的检测应用研究.....	2
1.2.3 特征提取及参数估计算法.....	3
1.2.4 基于离子电流反馈的实时控制.....	3
1.2.5 国内研究现状.....	3
1.3 本课题的意义和主要研究内容.....	4
第 2 章 数值模型的建立和验证.....	6
2.1 离子电流模型.....	6
2.1.1 缸内燃烧化学反应式.....	6
2.1.2 离子电流产生的基本原理.....	8
2.1.3 带电粒子迁移速度的数学表达.....	8
2.1.3.1 离子的迁移率 $\mu_i$ .....	8
2.1.3.2 电子的迁移率 $\mu_e$ .....	9
2.1.4 火花塞离子电流的数学模型.....	9
2.1.4.1 火焰前期离子电流模型.....	9
2.1.4.2 火焰后期的离子电流模型.....	10
2.2 电容式离子电流电路结构的简化模型.....	11
2.2.1 火花塞动态电路模型.....	11
2.2.2 点火系统中的火花塞动态电路模型.....	11
2.3 方法介绍.....	11

第 3 章 引言 .....	12
3.1 UNIX 历史 .....	13
3.2 UNIX 家谱 .....	14
3.3 表格样本 .....	14
3.3.1 基本表格 .....	14
3.3.2 复杂表格 .....	15
3.3.3 其它 .....	19
3.4 定理环境 .....	20
3.5 参考文献 .....	23
3.6 公式 .....	24
3.7 破折号 .....	25
参考文献 .....	26
致  谢 .....	28
个人简历、在学期间发表的学术论文与研究成果 .....	29

## 主要符号对照表

GNU	GNU's Not Unix /'gnu:/
GFDL	GNU Free Documentation License
GPL	GNU General Public License
FSF	Free Software Foundation
SMP	对称多处理
API	应用程序编程接口
$E$	能量
$m$	质量
$c$	光速
$P$	概率
$T$	时间
$v$	速度

## 第1章 绪论

### 1.1 前言

早在十九世纪,人们就观察到碳氢化合物在燃烧时会产生自由离子,使得火焰和燃烧产物具有导电能力。这一现象被注意到,并逐渐运用到燃烧过程研究工作。在火花塞点火式发动机中,当燃烧发生时,火花塞电极之间就产生大量的离子。如果在火花塞两极之间加上适当的直流偏置电压就会形成离子电流,通过该电流可以对发动机进行检测实现对发动机的实时监测。但是,由于以往对发动机控制技术要求不高,同时受发动机控制软、硬件系统的整体技术水平限制,该方法并未引起人们的广泛注意。近年来,随着对发动机效率及排放性能要求的逐渐提高,该方法逐渐引起重视。离子电流检测技术的最初应用主要是面向于失火现象的检测,在美国国家环保局(EPA)第II代车载诊断装置(OBDII)法规颁布后,要求在所有负荷和转速下实现100%失火检测<sup>[1]</sup>。世界上许多厂家采用的是曲轴转速波动法,但这种方法在路况较差的情况下会产生干扰信号,影响检测结果,而采用离子电流法则可以避免上述问题,实现100%失火检测。由此,对离子电流检测技术的研究逐渐由对燃烧过程中的失火、爆震等现象的定性检测,逐渐向空燃比、燃烧相位及缸内燃烧压力状态等参数的定量检测上来。

### 1.2 国内外研究现状

目前,对离子电流检测技术的研究主要集中于离子电流的形成机理、应用途径、特征提取及参数估计方法以及实际控制应用等四个方面。

#### 1.2.1 离子电流的形成机理研究

早在1953年Winch和Mayes<sup>[2]</sup>就利用了偏置电压式的离子电流检测电路记录了离子电流信号,并以此分析了缸内燃烧状况。在20世纪50年代,出现了大量的研究火焰中化学离子平衡和火焰后燃区的研究成果。进入80年代,汽车领域的科技工作者致力于离子电流信号的研究,取得了很多重要的成果。1986至1997年Nick Collings<sup>[3-5]</sup>发表了利用火花塞作为传感器检测爆震的三篇论

文,介绍了离子电流法的基本原理和离子电流的发展历程,并完善了爆震检测的方法。1996年Andre Saitzkoff<sup>[6]</sup>发表了火花塞离子电流的平衡计算的论文,利用偏置电源式离子电流检测电路测量了离子电流信号,通过分析得到了火花塞离子电流的近似理论计算公式。2000年Wayne University的D. Schneider<sup>[7]</sup>发表了离子电流与内燃机工作参数之间关系的博士论文。

在离子电流的形成机理研究方面, Saitzkoff和Reinmann等人<sup>[6]</sup>率先对 $N_2$ ,  $H_2O$ ,  $CHO$ 和 $NO$ 四种基团在离子电流形成过程中所起的作用进行了对比分析。研究认为燃烧火焰电离后能够定向移动的自由离子只占极小部分,其原因在于移动能力上的差异。同时,研究表明占离子总浓度1%的 $NO$ 基团产生离子电流的能力最强。Kessler等人<sup>[8]</sup>在柴油机上采用光学方法对离子电流的研究表明,由于柴油和汽油在燃烧时产生自由离子的化学反应过程不同,二者产生的离子电流信号波形差异显著。在汽油机上形成的离子电流中,电子是负电荷的主要载体,而对于柴油机上的所形成的离子电流,带负电的离子也需考虑。A.Franke<sup>[9]</sup>在对汽油机离子电流产生的物质来源的分析基础上,首次将离子电流的产生划分为火焰前锋期和火焰后期两个阶段,认为在火焰前峰期的离子电流主要是由火焰前锋面与火花塞电极接触时所产生的,而在火焰后期热电离过程是形成离子电流的主要原因。

除了离子电流产生的化学动力学机理外,气缸结构及火花塞位置等物理因素也是影响离子电流波形的重要成因。L.Peron等人<sup>[10]</sup>对离子电流信号的局限性分析认为,离子电流生成机理并不是决定信号波形的唯一原因。

### 1.2.2 基于离子电流的检测应用研究

目前对离子电流的应用已经从初期对失火及爆震的定性研究转入对燃烧参数的定量研究。在空燃比检测方面, Reinmann<sup>[11]</sup>利用离子电流公式理论和实验论证拟合了空燃比-离子电流公式。Kenneth Ratton和Ming C. Lai等人<sup>[12]</sup>利用火花间隙电离检测研究了缸内空燃比的近似值,观察到了空燃比和离子电流特征之间的较强相互关系。其研究认为,从整体性能上看,离子电流检测无法取代缸压检测,二者信号质量和性质都完全不同。但通过具体工况下对离子电流波形的具体分析,该方法仍具备有对空燃比进行实时反馈的潜力。在对缸内燃烧压力状态的检测方面, Chao.F等人<sup>[13]</sup>提出,部分负荷工况下,对离子电流信号进行了多循环平均处理,通过处理后信号的第二峰位置及幅值,实现了对缸内

燃烧峰值压力及其位置的准确预测。

### 1.2.3 特征提取及参数估计算法

在基于离子电流的燃烧特征提取算法方面，J.Forster等人<sup>[14]</sup>率先基于离子电流的频域特征，实现了对爆震及其强度的准确估计。该研究展示了爆震强度与离子电流频域信号高频区域内幅值的相关性。此后，一系列针对产品发动机爆震检测的相关研究也相继出现。这些研究中普遍采用了离子电流的频域特征实现了较高质量的爆震检测。

此外，Gerard等人<sup>[15]</sup>针对不同燃烧边界条件下，离子电流信号变化规律复杂的情况，提出了基于信号时域特征，采用主成分分析方法对离子电流信号进行了特征提取，该方法可以有效的对离子电流信号观测窗内观测样本进行降维，从而减小后续的参数估计算法的计算量。

在基于离子电流的参数估计方法方面，由于离子电流信号的产生机理复杂，信号波形变化规律多样，在利用该信号进行燃烧特征检测时，大多采用了数学模型来建立电流信号特征与被估参数之间的映射关系。在这方面，Gazis等人<sup>[16]</sup>通过双高斯曲线拟合的方法，对电流信号的时域特征进行了提取，并针对离子电流信号的非线性变化特征，采用神经网络方法实现了对汽油机燃烧峰值压力位置的准确预测。

### 1.2.4 基于离子电流反馈的实时控制

Magnus等人<sup>[17]</sup>在研究柴油机EGR和颗粒污染对离子电流的影响时，尝试了在稳态工况下，通过多循环均值后的离子电流信号特征值对燃烧始点进行反馈和控制。先预定一个离子电流信号强度阈值，当检测到的离子电流信号首次越过该阈值时，该时刻被定义为燃烧始点。对燃烧始点检测成功后，可以通过调整燃油十六烷值和空气、燃油以及发动机温度等相应方法，对滞燃期加以调整。

### 1.2.5 国内研究现状

在国内许多科研院校和研究所针对离子电流也展开了大量的研究工作，其中典型的诸如，同济大学李理光课题组针对汽油机的点燃方式和均质压燃方式下离子电流的产生机理及信号特征变化规律进行了研究，分析了两种燃烧模式



下信号的产生机理及影响因素。在此基础上,研究了基于该信号的特征提取及燃烧信息反馈方法。进而,针对现有发动机传感及控制方法的不足,提出了以离子电流信号为反馈量,在发动机上实现基于循环的燃烧信息反馈及控制思想。西安交通大学的吴筱敏<sup>[18]</sup>和天津大学的谢辉等课题组也基于离子电流检测手段进行汽油机爆震、空燃比检测和燃烧相位判断等相关研究。

### 1.3 本课题的意义和主要研究内容

常见的离子电流检测电路分为电容式和偏置电源式。偏置电源式检测电路可以将点火干扰屏蔽,获得的离子电流曲线便于分析计算<sup>[19]</sup>,但是由于需要使用高压硅堆和外置电源成本太高。电容式检测电路结构简单,成本低廉,但是点火干扰阶段容易和火焰前锋期甚至包括焰后期重叠,导致离子电流的一些特征参数无法识别。如果能够提出一种较好的信号处理方法处理点火干扰阶段信号,将会使成本低廉、结构简单的电容式检测电路得到推广。

正常情况下,采用电容式离子电流检测电路得到的离子电流信号曲线可以分为三个时期:火花塞放电期,火焰前锋期,火焰后期。火花塞放电期间,由于次级线圈放电导致检测电路中产生了较大的电流。但如果火花塞附近发生早燃,则在点火信号之前或之后将产生一些峰值<sup>[20]</sup>。如果火花塞点火放电时间过长,将会和火焰前锋期甚至是火焰后期的离子电流信号重叠,从而影响了离子电流信号的分析。

在重叠情况下,仍然可以预估甚至提取离子电流。由于点火干扰的根本原因是点火能量在点火线圈中的震荡,其频率是有一定规律的。火焰前锋期的电流信号主要和火焰传播过程相关,火焰后期的电流信号和缸内的热力学过程相关,这两个时期的电流信号频率和点火线圈中的能量震荡频率区分明显。这是离子电流被淹没而仍然可以预估甚至提取的基本原理。所以为了能够准确地提取离子电流信号,首先需要通过电容式离子电流检测电路和纯点火干扰信号进行分析,以便了解点火干扰信号的频幅特性。而在失火情况下,由于燃烧没有发生,离子电流信号没有产生。所以失火是检测电路测定的信号就是纯点火干扰信号。除了信号提取的方法之外,Saitzkoff<sup>[6]</sup>做了很多研究,提出了近似的离子电流计算公式。通过将这些公式进行简化提出一些参数函数,也能够很好的预测离子电流的波形和特征参数,甚至可以达到预测空燃比的要求。

离子电流的火焰前锋期信号是由于燃烧的火焰前锋造成的，所以该时期的离子电流能够很好的用于分析缸内的燃烧状况，比如计算燃烧锋面的速度。而离子电流的火焰后期是由于火焰前锋面已经离开火花塞电极，但是缸内燃烧仍在继续，导致的缸内热力学变化引起的热电离而形成的，所以能够很好的反应内燃机的负荷，缸内压力变化等。所以正确地获得离子电流两个时期的信号曲线对于分析缸内的燃烧情况是非常重要的。但是这两个时期的信号极容易被点火干扰信号淹没，导致无法得到准确的离子电流信号。通过上述的一些方法去除干扰信号，就可以帮助更好的认识离子电流信号，为后续的研究扫清障碍。即使无法完整准确地消除点火放电干扰信号，仍然能够通过上述方法统一处理每个循环的离子电流信号，得到该处理方法下的某个稳定的特征变量，从而指导反馈控制发动机的运行参数。

在2015年3月至8月的联合汽车电子合作项目中，采集了一批不同工况下的离子电流曲线。发现离子电流随着转速的升高，离子电流被淹没的趋势越加的明显。如果能够把离子电流在淹没情况下进行提取，可以让这批实验数据更好的为其他分析服务。而这种分析方法也能为电容式离子电流检测电路的推广起到很重要的作用。

## 第2章 数值模型的建立和验证

数值模拟已经成为内燃机设计开发和优化过程中的一个重要研究手段。由于内燃机工作过程中缸内形成高温和高压的环境现有的测试方法很难直接将传感器安装在缸内进行测量，因此数值模拟在内燃机工作过程的研究上得到了广泛应用。

### 2.1 离子电流模型

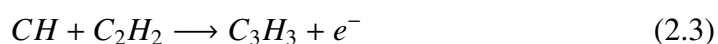
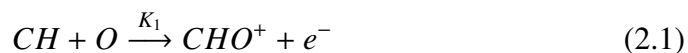
点燃式发动机缸内混合气在火花点火、火核形成、火焰传播等燃烧过程中会产生大量的自由电子、正负离子和自由基等带电粒子，使燃气具有一定的导电性。如果在火花塞两级施加一个稳定的直偏电压，由于有外加电场存在，带电粒子发生定向迁移，从而形成了火花塞离子电流。

以下的离子电流模型是基于以下的几个假设而成立的：

- 火花塞间隙中的燃气完全燃烧
- 燃烧过程满足绝热过程
- 燃气满足热力学平衡
- 火花塞间隙近似成圆柱模型

#### 2.1.1 缸内燃烧化学反应式

离子电流根据火焰的传播过程主要分为火焰前锋期和火焰后期。点火开始后，火焰前锋面从火花塞点火处开始燃烧，此时形成离子电流的火焰前锋期；当火焰前锋面离开火花塞两端时为离子电流的火焰后期。其中火焰前锋期的主要化学反应如下：



其中 $K_i(i = 1, 2, 3)$ 表示反应常数，大小分别为：

$$K_1 = 5 \times 10^{-14} \text{cm}^3/\text{s} \quad (2.5)$$

$$K_2 = 7 \times 10^{-9} \text{cm}^3/\text{s} \quad (2.6)$$

$$K_3 = 2.3 \times 10^{-9} \text{cm}^3/\text{s} \quad (2.7)$$

由式可以看出， $K_2$ 大于 $K_1$ ，也就是说火焰前锋中的离子大部分转化为 $H_3O^+$ ， $K_3$ 虽然也较大，但是由于反应不剧烈，因此在后火焰区 $H_3O^+$ 还会存在。

在后火焰期，导致 $H_3O^+$ 的快速放热反应基本完成， $H_3O^+$ 基本上消失。此时的燃气温度可能在 $1500^\circ\text{C}$ 以上，高温下的热电离决定了离子电流的变化。焰后区内产生电离过程的主要物质是一氧化氮，研究表明<sup>[11]</sup>，95%的有效的自由电子是由于 $NO$ 的热电离产生的。 $NO$ 起主导作用的原因见表<sup>[2]</sup>1， $NO$ 的电离能在燃气内主要物质中是最小的，这样， $NO$ 的电离率比其他物质的要大很多。

表 2.1 燃气中主要物质的电离参数

物质	电离能/ $eV$	浓度(在 $15^\circ\text{CAATDC}$ 时)	电离率
$NO$	9.26405	$1.48 \times 10^{-2}$	$2.44 \times 10^{-8}$
$H_2O_2$	10.54000	$1.60 \times 10^{-6}$	$1.73 \times 10^{-9}$
$CO$	14.01390	$4.85 \times 10^{-2}$	$1.30 \times 10^{-12}$
$CO_2$	13.77700	$7.17 \times 10^{-2}$	$2.10 \times 10^{-12}$
$H_2O$	12.61880	$1.16 \times 10^{-1}$	$2.33 \times 10^{-11}$
$N_2$	15.58080	$6.99 \times 10^{-1}$	$5.03 \times 10^{-14}$
$H_2$	15.42589	$9.72 \times 10^{-3}$	$6.87 \times 10^{-14}$

大部分 $NO$ 在 $1000^\circ\text{C}$ 以上的温度根据Thermal或Zeldovich<sup>[21]</sup>机理形成，其后火焰期的主要化学反应为：



由于在高温高压的环境下 $NO^+$ 浓度增加；当压力最大时， $NO^+$ 浓度达到最大，而对应的离子电流也达到峰值。所以火焰后期的离子电流和缸内压力有很明确的关系。

总的来说，火焰前锋期的离子电流主要是化学电离产生的 $H_3O^+$ 导致的；火焰后期的离子电流主要是 $NO$ 热电离产生的电子导致的。

### 2.1.2 离子电流产生的基本原理

当火花塞两级加上偏置电压 $U$ 时，火花塞间隙内会形成一个电场，如果此间燃气为等离子体状态，即存在带电粒子，那么这些带电粒子的运动为自身的无规则热运动和电场方向迁移运动的叠加。如果他们在 $dt$ 时间内分别移动了 $dx_i$ 和 $dy_i$ 距离，并使电极上产生的面电荷密度的变化量为 $q_i$ 和 $q_e$ ，既有

$$q = q_i + q_e = en_i dx_i + en_e dx_e \quad (2.11)$$

式中： $n_i$ 、 $n_e$ 是正负带电粒子的浓度； $e$ 为元电荷的电量即一个电子所带的电荷。那么，在离阴极 $x$ 距离处的电流密度为

$$j_e(x) = \frac{aq}{dt} = en_i v_{di} + en_e v_{de} \quad (2.12)$$

式中 $v_{di}$ 、 $v_{de}$ 为正负带电粒子的迁移速度。

对外电路而言，形成的火花塞离子电流为

$$I_{on} = \int_A j_e dA = j_e \pi r^2 = (en_i v_{di} + en_e v_{de}) \pi r^2 \quad (2.13)$$

式中 $r$ 为火花塞中心电极的半径。

### 2.1.3 带电粒子迁移速度的数学表达

#### 2.1.3.1 离子的迁移率 $\mu_i$

Langevin根据气体动力学，分析推导出离子的迁移率为

$$\mu_i = 0.815 \frac{e\bar{\lambda}}{M\bar{v}} \left( \frac{M + M_a}{M} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (2.14)$$

式中： $M$ 和 $M_a$ 分别为离子和气体原子的质量； $\bar{v}$ 为离子的均方根速度； $\bar{\lambda}$ 为离子在气体中的平均自由程。

从上式可以看， $\mu_i$ 与电场强度 $E$ 无关，这是由于上式推导是在 $E/p$ 比较低的情况下进行的。实际上当 $E/p$ 增大时， $\mu_i$ 将于电场强度 $E$ 有关。可以用一个经验公式表达，即

$$\mu_i = \mu_0 \left[ 1 + \alpha \left( \frac{E}{p} \right) \right]^{\frac{1}{2}} \quad (2.15)$$

式中： $\mu_0$ 为单位压强下离子的迁移率； $\alpha$ 为迁移常数，数值由实验测得； $E$ 为电场强度； $p$ 为气体压强。

### 2.1.3.2 电子的迁移率 $\mu_e$

电子和离子的迁移运动由于本身的特性差异很大，如下表2.2所示。所以在处理电子迁移运动时，不能完全按照离子迁移运动的方式来处理，经过公式推导，可以得到电子的迁移率为：

$$\mu_e = \frac{1}{3} e \bar{\lambda} \left( \frac{2}{\kappa T m} \right)^{1/2} \quad (2.16)$$

在燃气等离子体中，带电粒子在电场作用下会产生扩散和迁移运动；其根本原因是它们之间交换着能量和变更着位置。带电粒子的扩散和迁移反映出火花塞离子电流的基本特性。

表 2.2 离子和电子的比较

	电子	离子
质量	小	大
平均热运动	大	小
能量积累	可以	不可以
碰撞面积	小	大
刚体碰撞	否	是

### 2.1.4 火花塞离子电流的数学模型

#### 2.1.4.1 火焰前期离子电流模型

根据火焰前锋期的化学反应方程式可以得到各反应物和生成物的生成率。下式是 $H_3O^+$ 在反应过程中满足的公式

$$\frac{d[H_3O^+]}{dt} = k_2[CHO^+][H_2O] - k_3[H_3O^+][e] \quad (2.17)$$

当上式右边为零时，即为燃起的化学反应达到了平衡状态。同理，其他的反应物和生成物也满足类似的公式。于是可以得到：

$$[H_3O^+] = [e] = \left( \frac{k_1[CH][O]}{k_3} \right)^{1/2} \quad (2.18)$$

$[CH]$ 和 $[O]$ 的平衡浓度主要取决于被点燃燃油混合气的空燃比。Reinman等人<sup>[11]</sup>的研究表明，在空燃比 $\phi_{at}$ 大于0.8的稀混合气条件下， $[H_3O^+]$ 可表示为

$$[H_3O^+] = \frac{c}{\sqrt{\phi_{at}}} \quad (2.19)$$

式中 $c$ 为常数。

现在已经求得了离子浓度，火花塞离子电流可以得到为

$$I_{on} = en_e \pi r^2 E \mu \quad (2.20)$$

式中： $n_e$ 为相应于离子浓度的自由电子浓度； $v_d$ 为迁移速度； $E$ 为电场强度； $\mu$ 为迁移速率； $e$ 为单位电荷。这里将反应区看成一个简单的圆柱体，所以截面半径为 $r$ 。

#### 2.1.4.2 火焰后期的离子电流模型

火焰后期离子电流主要收到 $NO$ 的热电离的影响，而不是化学电离。首先计算出燃烧产物中的 $NO$ 的浓度，然后可利用沙哈(Saha)方程求解 $NO$ 在特定条件下发生热电离生成 $NO^+$ 和自由电子的电离率，并结合自由电子和离子的在外加电场作用下的迁移速率，就可以推导出火焰后期火花塞离子电流的数学模型。

沙哈方程的公式如下：

$$\frac{\chi^2}{1-\chi^2} p = \frac{(2\pi m_e)^{3/2}}{h^3} (\kappa T)^{5/2} \exp\left(-\frac{E_i}{\kappa T}\right) \quad (2.21)$$

其中： $m_e$ 为电子质量； $h$ 为普朗克质量； $\kappa$ 为波尔兹曼常数； $T$ 为气体的绝对温度； $E_i$ 为电离能； $p$ 为缸内压力； $\chi$ 为电离率。

如果将火花塞间隙局部看成一个圆柱形的等离子体，那么有

$$I_{on} = e N_a \chi \mu E \pi r^2 \quad (2.22)$$

其中 $N_a$ 为离子浓度。离子浓度满足公式

$$\frac{dN_a}{dt} = 6 \times 10^{16} T_{eq}^{-1/2} \exp\left[-\frac{69090}{T_{eq}}\right] (O_2)_{eq}^{1/2} (N_2)_{eq} \quad (2.23)$$

于是可以得到火花塞离子电流公式为

$$I_{on} = e^{3/2} N_a \pi r^2 \left(\frac{k}{2}\right)^{1/4} \sqrt{\frac{3.2 \times 10^{-2}}{p m_e \bar{\lambda}}} E T^{5/2} \exp\left(-\frac{E_i}{\kappa T}\right) \quad (2.24)$$

其中 $p$ 为缸内压力； $E$ 为外加电场强度； $r$ 为火花塞中心电极半径； $\bar{\lambda}$ 为电子平均自由程； $T$ 为气体的绝对温度； $E_i$ 为电离能； $m_e$ 为电子质量； $\kappa$ 为波尔兹曼常数。

## 2.2 电容式离子电流电路结构的简化模型

### 2.2.1 火花塞动态电路模型

### 2.2.2 点火系统中的火花塞动态电路模型

## 2.3 方法介绍



## 第3章 引言

UNIX 操作系统 (UNIX)，是美国AT&T公司1971年在PDP-11上运行的操作系统。具有多用户、多任务的特点，支持多种处理器架构，最早由肯·汤普逊 (Kenneth Lane Thompson)、丹尼斯·里奇 (Dennis MacAlistair Ritchie)，见图3.1和 Douglas McIlroy 于1969年在 AT&T 的贝尔实验室开发<sup>①</sup>。



图 3.1 肯·汤普逊 (左) 和丹尼斯·里奇 (右)

Linux 操作系统 (Linux)，是一类计算机操作系统的统称。Linux 操作系统的内核的名字也是 “Linux”。Linux 操作系统也是自由软件和开放源代码发展中最著名的例子。严格来讲，Linux 这个词本身只表示 Linux 内核，但在实际上人们已经习惯了用 Linux 来形容整个基于 Linux 内核，并且使用 GNU 工程各种工具和数据库的操作系统 (也被称为 GNU/Linux)。基于这些组件的 Linux 软件被称为 Linux 发行版。

Linux内核最初只是由芬兰人林纳斯·托瓦兹 (Linus Torvalds)，见图3.2，在赫尔辛基大学上学时出于个人爱好而编写的，当时他并不满意 Minix 这个教学用的操作系统，部分因为只能在有限硬件上运行。最初的设想中，Linux 是一种类似 Minix 这样的一种操作系统。Linux 的第一个版本在1991年9月被大学 FTP server 管理员 Ari Lemmke 发布在 Internet 上，最初 Torvalds 称这个内核的名称为 “Freax”，意思是自由 (“free”) 和奇异 (“freak”) 的结合字，并且附上了 “X” 这个常用的字母，以配合所谓的 Unix-like 的系统。但是 FTP server 管理员嫌原来的命名 “Freax” 的名称不好听，把内核的称呼改成 “Linux”，当

---

<sup>①</sup> 摘自中文维基百科

时仅有10000行代码，仍必须运行于 Minix 操作系统之上，并且必须使用硬盘开机；随后在10月份第二个版本（0.02版）就发布了，同时这位芬兰赫尔辛基的大学生在 comp.os.minix 上发布一则消息

Hello everybody out there using minix-  
I'm doing a (free) operation system (just a hobby,  
won't be big and professional like gnu) for 386(486) AT clones.



图 3.2 Linus Torvalds

### 3.1 UNIX 历史

UNIX 的历史始于1969年 ken Thompson, Dennis Ritchie（即著名的 K&G，C 语言的发明人）与一群人在一部 PDP-7 上进行的一些工作，后来这个系统变成了 UNIX。

主要大事件：

- V1(1971): 第一版的UNIX，以 PDP-11/20的汇编语言写成。包括文件系统，fork、roff、ed 等软件。

- V4(1973): 以 C 语言从头写过, 这使得 UNIX 修改容易, 可以在几个月内移植到新的硬件平台上。最初C语言是为 UNIX 设计的, 所以 C 与 UNIX 间有紧密的关系。
- V6(1975): 第一个在贝尔实验室外 (尤其是大学中) 广为流传的 UNIX 版本。这也是 UNIX 分支的起点与广受欢迎的开始。1.xBSD (PDP-II) 就是由这个版本衍生出来的。
- V7(1979): 在许多UNIX玩家的心目中, 这是“最后一个真正的 UNIX,” 这个版本包括一个完整的 K&RC 编译器, Bourne shell。V7 移植到 VAX 机器后称为 32V。

## 3.2 UNIX 家谱

目前开发 UNIX (System V) 的公司是 Unix System Laboratories (USL)。USL 本为 AT&T 所有, 1993年初被 Novell 收购。Novell 于1993年末将 UNIX 这个注册商标转让给 X/Open 组织。

详细的 UNIX 编年史<http://www.levenez.com/unix/>。

## 3.3 表格样本

### 3.3.1 基本表格

模板中关于表格的宏包有三个: `booktabs`、`array` 和 `longtabular`, 命令有一个 `\hlinewd`。三线表可以用 `booktabs` 提供的 `\toprule`、`\midrule` 和 `\bottomrule`。它们与 `longtable` 能很好的配合使用。如果表格比较简单的话可以直接用命令 `\hlinewd{xpt}` 控制。

首先来看一个最简单的表格。表 3.1 列举了本模板主要文件及其功能。请大家注意三线表中各条线对应的命令。这个例子还展示了如何在表格中正确使用脚注。由于  $\text{\LaTeX}$  本身不支持在表格中使用 `\footnote`, 所以我们不得不将表格放在小页中, 而且最好将表格的宽度设置为小页的宽度, 这样脚注看起来才更美观。

表 3.1 模板文件。如果表格的标题很长，那么在表格索引中就会很不美观，所以要像 `chapter` 那样在前面用中括号写一个简短的标题。这个标题会出现在索引中。

文件名	描述
<code>tongjithesis.cls</code>	模板类文件。 <sup>①</sup>
<code>tongjithesis.cfg</code>	模板配置文件 <sup>②</sup> 。
<code>tongjibib.bst</code>	参考文献 <code>Bibtex</code> 样式文件。
<code>tongjitils.sty</code>	常用的包和命令写在这里，减轻主文件的负担。
<code>shuji.tex</code>	书脊示例文档
<code>ref/</code>	示例文档参考文献目录
<code>data/</code>	示例文档章节具体内容
<code>figures/</code>	示例文档图片路径
<code>tongjitils.sty</code>	为示例文档加载其它宏包
<b><code>TongjiThesisReadme.pdf</code></b>	用户手册（本文档）

① 表格中的脚注

② 再来一个

### 3.3.2 复杂表格

我们经常会在表格下方标注数据来源，或者对表格里面的条目进行解释。前面的脚注是一种不错的方法，如果你不喜欢脚注。那么完全可以在表格后面自己写注释，比如表 3.2。

表 3.2 复杂表格示例 1

x \ y	First Half		Second Half	
	1st Qtr	2nd Qtr	3rd Qtr	4th Qtr
East*	20.4	27.4	90	20.4
West**	30.6	38.6	34.6	31.6

注：数据来源《TONGJITHESIS 使用手册》。

\*：东部

\*\*：西部

此外，表 3.2 同时还演示了另外两个功能：1）通过 `tabularx` 的 `|X|` 扩展实现表格自动放大；2）通过命令 `\backslashslashbox` 在表头部分插入反斜线。

为了使我们的例子更接近实际情况，我会在必要的时候插入一些“无关”文字，以免太多图表同时出现，导致排版效果不太理想。第一个出场的当然是我的最爱：风流潇洒、骏马绝尘、健笔凌云的李太白了。

李白，字太白，陇西成纪人。凉武昭王?本攀浪铎；蛟簧蕉耍蛟皇祥恕 0 咨傲幸荳牛? 气宏放，飘然有超世之心。初隐岷山，益州长史苏?见而异之，曰：“是子天才英特，可比相如。”天宝初，至长安，往见贺知章。知章见其文，叹曰：“子谪仙人也。”言于明皇，召见金銮殿，奏颂一篇。帝赐食，亲为调羹，有诏供奉翰林。白犹与酒徒饮于市，帝坐沉香亭子，意有所感，欲得白为乐章，召入，而白已醉。左右以水?面，稍解，援笔成文，婉丽精切。帝爱其才，数宴见。白常侍帝，醉，使高力士脱靴。力士素贵，耻之，摘其诗以激杨贵妃。帝欲官白，妃辄沮止。白自知不为亲近所容，恳求还山。帝赐金放还。乃浪迹江湖，终日沉饮。永王?都督江陵，辟为僚佐。?谋乱，兵败，白坐长流夜郎，会赦得还。族人阳冰为当涂令，白往依之。代宗立，以左拾遗召，而白已卒。文宗时，诏以白歌诗、裴?F剑舞、张旭草书为三绝云。集三十卷。今编诗二十五卷。

——《全唐诗》诗人小传

浮动体的并排放置一般有两种情况：1）二者没有关系，为两个独立的浮动体；2）二者隶属于同一个浮动体。对表格来说并排表格既可以像图 3.3、图 3.4 使用小页环境，也可以如图 3.5 使用子表格来做。图的例子参见第 ?? 节。

表 3.3 第一个并排子表格		表 3.4 第二个并排子表格	
111	222	111	222
222	333	222	333

然后就是忧国忧民，诗家楷模杜工部了。杜甫，字子美，其先襄阳人，曾祖依艺为巩令，因居巩。甫天宝初应进士，不第。后献《三大礼赋》，明皇奇之，召试文章，授京兆府兵曹参军。安禄山陷京师，肃宗即位灵武，甫自贼中遁赴行在，拜左拾遗。以论救房?，出为华州司功参军。关辅饥乱，寓居同州同谷县，身自负薪采?o，??不给。久之，召补京兆府功曹，道阻不赴。严武镇成都，奏为参谋、检校工部员外郎，赐绯。武与甫世旧，待遇甚厚。乃于成都浣花里种竹植树，枕江结庐，纵酒啸歌其中。武卒，甫无所依，乃之东蜀就高?。既至而?卒。是岁，蜀帅相攻杀，蜀大扰。甫携家避乱荆楚，扁舟下峡，未维舟而江陵亦乱。乃溯沿湘流，游衡山，寓居耒阳。卒年五十九。元和中，归葬偃师首阳山，元稹志其墓。天宝间，甫与李白齐名，时称李杜。然元稹之言曰：“李白壮浪纵恣，摆去拘束，诚亦差肩子美矣。至若铺陈终始，排比声韵，大或千言，次犹数百，词气豪迈，而风调清深，属对律切，而脱弃凡近，则李

表 3.5 并排子表格

(a) 第一个子表格		(b) 第二个子表格	
111	222	111	222
222	333	222	333

尚不能历其藩翰，况堂奥乎。”白居易亦云：“杜诗贯穿古今，尽工尽善，殆过于李。”元、白之论如此。盖其出处劳佚，喜乐悲愤，好贤恶恶，一见之于诗。而又以忠君忧国、伤时念乱为本旨。读其诗可以知其世，故当时谓之“诗史”。旧集诗文共六十卷，今编诗十九卷。

不可否认  $\text{\LaTeX}$  的表格功能没有想象中的那么强大，不过只要你足够认真，足够细致，那么同样可以排出来非常复杂非常漂亮的表格。请参看表 3.6。

表 3.6 复杂表格示例 2

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

最后就是清新飘逸、文约意赅、空谷绝响的王大侠了。王维，字摩诘，河东人。工书画，与弟缙俱有俊才。开元九年，进士擢第，调太乐丞。坐累为济州司仓参军，历右拾遗、监察御史、左补阙、库部郎中，拜吏部郎中。天宝末，为给事中。安禄山陷两都，维为贼所得，服药阳暗，拘于菩提寺。禄山宴凝碧池，维潜赋诗悲悼，闻于行在。贼平，陷贼官三等定罪，特原之，责授太子中允，迁中庶子、中书舍人。复拜给事中，转尚书右丞。维以诗名盛于开元、天宝间，宁薛诸王駉马豪贵之门，无不拂席迎之。得宋之问辋川别墅，山水绝胜，与道友裴迪，浮舟往来，弹琴赋诗，啸咏终日。笃于奉佛，晚年长斋禅诵。一日，忽索笔作书数纸，别弟缙及平生亲故，舍笔而卒。赠秘书监。宝应中，代宗问缙：“朕常于诸王坐闻维乐章，今存几何？”缙集诗六卷，文四卷，表上之。敕答云，卿伯氏位列先朝，名高希代。抗行周雅，长揖楚辞。诗家者流，时论归美。克成编录，叹息良深。殷?谓维诗词秀调雅，意新理惬。在泉成珠，著壁成绘。苏轼亦云：“维诗中有画，画中有诗也。”今编诗四卷。

要想用好论文模板还是得提前学习一些  $\text{T}_{\text{E}}\text{X}/\text{L}_{\text{A}}\text{T}_{\text{E}}\text{X}$  的相关知识，具备一些基本能力，掌握一些常见技巧，否则一旦遇到问题还真是比较麻烦。我们见过很多这样的同学，一直以来都是使用 Word 等字处理工具，以为  $\text{L}_{\text{A}}\text{T}_{\text{E}}\text{X}$  模板的用法也应该类似，所以就沿袭同样的思路来对待这种所见非所得的排版工具，结果被折腾的焦头烂额，疲惫不堪。

如果您要排版的表格长度超过一页，那么推荐使用 `longtable` 或者 `supertabular` 宏包，模板对 `longtable` 进行了相应的设置，所以用起来可能简单一些。表 3.7 就是 `longtable` 的简单示例。

表 3.7 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.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
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
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

续下页

续表 3.7 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.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
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
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

### 3.3.3 其它

有的同学不想让某个表格或者图片出现在索引里面，那么请使用命令 `\caption*{}`，这个命令不会给表格编号，也就是出来的只有标题文字而没有“表 XX”，“图 XX”，否则索引里面序号不连续就显得不伦不类，这也是  $\text{\LaTeX}$  里星号命令默认的规则。

有这种需求的多是本科同学的英文资料翻译部分，如果你觉得附录中英文原文中的表格和图片显示成“表”和“图”很不协调的话，一个很好的办法就



是用 `\caption*`，参数随便自己写，比如不守规矩的表 1.111 和图 1.111 能满足这种特殊需要（可以参看附录部分）。

表 1.111 这是一个手动编号，不出现在索引中的表格。

TONGJITHESIS
--------------



Figure 1.111 这是一个手动编号，不出现在索引中的图。

如果你的确想让它编号，但又不想让它出现在索引中的话，那就自己看看代码改一改吧，我目前不打算给模板增加这种另类命令。

最后，虽然大家不一定会独立使用小页，但是关于小页中的脚注还是有必要提一下。请看下面的例子。

柳宗元，字子厚（773-819），河东（今永济县）人<sup>①</sup>，是唐代杰出的文学家，哲学家，同时也是一位政治改革家。与韩愈共同倡导唐代古文运动，并称韩柳<sup>②</sup>。

① 山西永济水饺。

② 唐宋八大家之首二位。

唐朝安史之乱后，宦官专权，藩镇割据，土地兼并日渐严重，社会生产破坏严重，民不聊生。柳宗元对这种社会现实极为不满，他积极参加了王叔文领导的“永济革新”，并成为这一运动的中坚人物。他们革除弊政，打击权奸，触犯了宦官和官僚贵族利益，在他们的联合反扑下，改革失败了，柳宗元被贬为永州司马。

### 3.4 定理环境

给大家演示一下各种和证明有关的环境：

假设 3.1：待月西厢下，迎风户半开；隔墙花影动，疑是玉人来。

$$c = a^2 - b^2 \quad (3.1)$$

$$= (a + b)(a - b) \quad (3.2)$$

千辛万苦，历尽艰难，得有今日。然相从数千里，未曾哀戚。今将渡江，方图百年欢笑，如何反起悲伤？（引自《杜十娘怒沉百宝箱》）

**定义 3.1:** 子曰：「道千乘之国，敬事而信，节用而爱人，使民以时。」

千古第一定义！问世间、情为何物，只教生死相许？天南地北双飞客，老翅几回寒暑。欢乐趣，离别苦，就中更有痴儿女。君应有语，渺万里层云，千山暮雪，只影向谁去？

横汾路，寂寞当年箫鼓，荒烟依旧平楚。招魂楚些何嗟及，山鬼暗啼风雨。天也妒，未信与，莺儿燕子俱黄土。千秋万古，为留待骚人，狂歌痛饮，来访雁丘处。

**命题 3.1:** 曾子曰：「吾日三省吾身 —— 为人谋而不忠乎？与朋友交而不信乎？传不习乎？」

多么凄美的命题啊！其日牛马嘶，新妇入青庐，奄奄黄昏后，寂寂人定初，我命绝今日，魂去尸长留，揽裙脱丝履，举身赴清池，府吏闻此事，心知长别离，徘徊庭树下，自挂东南枝。

**注释 3.1:** 天不言自高，水不言自流。

$$\begin{aligned}\varphi(x, z) &= z - \gamma_{10}x - \gamma_{mn}x^m z^n \\ &= z - Mr^{-1}x - Mr^{-(m+n)}x^m z^n \\ \zeta^0 &= (\xi^0)^2, \tag{3.3}\end{aligned}$$

$$\zeta^1 = \xi^0 \xi^1, \tag{3.4}$$

$$\zeta^2 = (\xi^1)^2, \tag{3.5}$$

天尊地卑，乾坤定矣。卑高以陈，贵贱位矣。动静有常，刚柔断矣。方以类聚，物以群分，吉凶生矣。在天成象，在地成形，变化见矣。鼓之以雷霆，润之以风雨，日月运行，一寒一暑，乾道成男，坤道成女。乾知大始，坤作成物。乾以易知，坤以简能。易则易知，简则易从。易知则有亲，易从则有功。有亲则可久，有功则可大。可久则贤人之德，可大则贤人之业。易简，而天下矣之理矣；天下之理得，而成位乎其中矣。

**公理 3.1:** 两点间直线段距离最短。

$$x \equiv y + 1 \pmod{m^2} \tag{3.6}$$

$$x \equiv y + 1 \pmod{m^2} \tag{3.7}$$

$$x \equiv y + 1 \pmod{m^2} \tag{3.8}$$

《彖曰》：大哉乾元，万物资始，乃统天。云行雨施，品物流形。大明始终，六位时成，时乘六龙以御天。乾道变化，各正性命，保合大和，乃利贞。首出庶物，万国咸宁。

《象曰》：天行健，君子以自强不息。潜龙勿用，阳在下也。见龙再田，德施普也。终日乾乾，反复道也。或跃在渊，进无咎也。飞龙在天，大人造也。亢龙有悔，盈不可久也。用九，天德不可为首也。

引理 3.1: 《猫和老鼠》是我最爱看的动画片。

$$\begin{aligned} \int_a^b \left\{ \int_a^b [f(x)^2 g(y)^2 + f(y)^2 g(x)^2] - 2f(x)g(x)f(y)g(y) dx \right\} dy \\ = \int_a^b \left\{ g(y)^2 \int_a^b f^2 + f(y)^2 \int_a^b g^2 - 2f(y)g(y) \int_a^b fg \right\} dy \end{aligned}$$

行行重行行，与君生别离。相去万余里，各在天一涯。道路阻且长，会面安可知。胡马依北风，越鸟巢南枝。相去日已远，衣带日已缓。浮云蔽白日，游子不顾返。思君令人老，岁月忽已晚。弃捐勿复道，努力加餐饭。

定理 3.1: 犯我强汉者，虽远必诛 —— 陈汤（汉）

$$y = 1 \quad (3.9a)$$

$$y = 0 \quad (3.9b)$$

道可道，非常道。名可名，非常名。无名天地之始；有名万物之母。故常无，欲以观其妙；常有，欲以观其徼。此两者，同出而异名，同谓之玄。玄之又玄，众妙之门。上善若水。水善利万物而不争，处众人之所恶，故几于道。曲则全，枉则直，洼则盈，敝则新，少则多，多则惑。人法地，地法天，天法道，道法自然。知人者智，自知者明。胜人者有力，自胜者强。知足者富。强行者有志。不失其所者久。死而不亡者寿。

证明 燕赵古称多感慨悲歌之士。董生举进士，连不得志于有司，怀抱利器，郁郁适兹土，吾知其必有合也。董生勉乎哉？

夫以子之不遇时，苟慕义强仁者，皆爱惜焉，矧燕、赵之士出乎其性者哉！然吾尝闻风俗与化移易，吾恶知其今不异于古所云邪？聊以吾子之行卜之也。董生勉乎哉？

吾因子有所感矣。为我吊望诸君之墓，而观于其市，复有昔时屠狗者乎？为我谢曰：“明天子在上，可以出而仕矣！” —— 韩愈《送董邵南序》 □

推论 3.1: 四川话配音的《猫和老鼠》是世界上最好看最好听最有趣的动画片。

$$V_i = v_i - q_i v_j, \quad X_i = x_i - q_i x_j, \quad U_i = u_i, \quad \text{for } i \neq j; \quad (3.10)$$

$$V_j = v_j, \quad X_j = x_j, \quad U_j u_j + \sum_{i \neq j} q_i u_i. \quad (3.11)$$

迢迢牵牛星，皎皎河汉女。纤纤擢素手，札札弄机杼。终日不成章，泣涕零如雨。河汉清且浅，相去复几许。盈盈一水间，脉脉不得语。

例 3.1: 大家来看这个例子。

$$\begin{cases} \nabla f(\mathbf{x}^*) - \sum_{j=1}^p \lambda_j \nabla g_j(\mathbf{x}^*) = 0 \\ \lambda_j g_j(\mathbf{x}^*) = 0, \quad j = 1, 2, \dots, p \\ \lambda_j \geq 0, \quad j = 1, 2, \dots, p. \end{cases} \quad (3.12)$$

练习 3.1: 清列出 Andrew S. Tanenbaum 和 W. Richard Stevens 的所有著作。

猜想 3.1: *Poincare Conjecture* If in a closed three-dimensional space, any closed curves can shrink to a point continuously, this space can be deformed to a sphere.

问题 3.1: 回答还是不回答，是个问题。

如何引用定理 3.1 呢? 加上 label 使用 ref 即可。妾发初覆额，折花门前剧。郎骑竹马来，绕床弄青梅。同居长干里，两小无嫌猜。十四为君妇，羞颜未尝开。低头向暗壁，千唤不一回。十五始展眉，愿同尘与灰。常存抱柱信，岂上望夫台。十六君远行，瞿塘滟滪。选 N 透虏蒙纱，成焙习 A C 徘徊雉屑 # 灰簪烫 A L ？不能扫，落叶秋风早。八月蝴蝶来，双飞西园草。感此伤妾心，坐愁红颜老。

### 3.5 参考文献

当然参考文献可以直接写 bibitem，虽然费点功夫，但是好控制，各种格式可以自己随意改写。

本模板推荐使用 BIBTEX，样式文件为 tongjibib.bst，基本符合学校的参考文献格式（如专利等引用未加详细测试）。看看这个例子，关于书的<sup>[? ? ?]</sup>，还

有这些<sup>[1]</sup>，关于杂志的<sup>[2]</sup>，硕士论文<sup>[3]</sup>，博士论文<sup>[4]</sup>，标准文件<sup>[5]</sup>，会议论文<sup>[6]</sup>，技术报告<sup>[7]</sup>。中文参考文献<sup>[8]</sup>应增加 `lang='zh'` 字段，以便进行相应处理。另外，这个 `bst` 对中文文献<sup>[9]</sup>的支持并不是十全十美，如果有不如意的地方，请手动修改 `bbl` 文件。

有时候不想要上标，那么可以这样<sup>[10]</sup>，这个非常重要。

### 3.6 公式

贝叶斯公式如式 (3.13)，其中  $p(y|\mathbf{x})$  为后验； $p(\mathbf{x})$  为先验；分母  $p(\mathbf{x})$  为归一化因子。

$$p(y|\mathbf{x}) = \frac{p(\mathbf{x}, y)}{p(\mathbf{x})} = \frac{p(\mathbf{x}|y)p(y)}{p(\mathbf{x})} \quad (3.13)$$

论文里面公式越多， $\text{\TeX}$  就越 happy。再看一个 `amsmath` 的例子：

$$\det \mathbf{K}(t = 1, t_1, \dots, t_n) = \sum_{l \in \mathbf{n}} (-1)^{|l|} \prod_{i \in l} t_i \prod_{j \in l} (D_j + \lambda_j t_j) \det \mathbf{A}^{(l)}(\bar{l}|\bar{l}) = 0. \quad (3.14)$$

前面定理示例部分列举了很多公式环境，可以说把常见的情况都覆盖了，大家在写公式的时候一定要好好看 `amsmath` 的文档，并参考模板中的用法：

$$\begin{aligned} & \int_a^b \left\{ \int_a^b [f(x)^2 g(y)^2 + f(y)^2 g(x)^2] - 2f(x)g(x)f(y)g(y) dx \right\} dy \\ &= \int_a^b \left\{ g(y)^2 \int_a^b f^2 + f(y)^2 \int_a^b g^2 - 2f(y)g(y) \int_a^b fg \right\} dy \end{aligned}$$

其实还可以看看这个多级规划：

$$\left\{ \begin{array}{l} \max_x F(x, y_1^*, y_2^*, \dots, y_m^*) \\ \text{subject to:} \\ G(x) \leq 0 \\ (y_1^*, y_2^*, \dots, y_m^*) \text{ solves problems } (i = 1, 2, \dots, m) \\ \left\{ \begin{array}{l} \max_{y_i} f_i(x, y_1, y_2, \dots, y_m) \\ \text{subject to:} \\ g_i(x, y_1, y_2, \dots, y_m) \leq 0. \end{array} \right. \end{array} \right. \quad (3.15)$$

这些跟规划相关的公式都来自于刘宝碇老师《不确定规划》的课件。

### 3.7 破折号

中文破折号为一个两个字宽垂直居中的直线，输入法直接得到的破折号是两个断开的小短线（——），这看起来不舒服。所以我定义了一个破折号的命令 `\pozhehao`，请看几个例子：

- 这是一个 —— 破折号
  - (1) 同时也可以看看
  - (2) 不同列表环境的间距
- 看起来这个要好一些
- 破折号 —— 就说到这里。

默认的列表环境上下间距很大，模板将其重定义为 `paralist` 中的压缩环境，看起来要好一些。如果还是不满意，自己也可以调 `\itemsep` 的。`paralist` 还可以方便的指定标签的样式。

## 参考文献

- [1] 戈锐, 张煜盛. 光纤传感器在发动机燃烧研究中的应用与发展. 车用发动机, 2006, (1):1-5.
- [2] Winch R, Mayes F. A method for identifying preignition. Technical report, SAE Technical Paper, 1953.
- [3] Collings N, Dinsdale S, Eade D. Knock detection by means of the spark plug. Technical report, SAE Technical Paper, 1986.
- [4] Collings N, Dinsdale S, Hands T. Plug fouling investigations on a running engine-an application of a novel multi-purpose diagnostic system based on the spark plug. Technical report, SAE Technical Paper, 1991.
- [5] Collings N, Ma T. Knock detection alternatives for production vehicles. Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part D: Journal of Automobile Engineering, 1985, 199(4):301-307.
- [6] Saitzkoff A, Reinmann R, Berglind T, et al. An ionization equilibrium analysis of the spark plug as an ionization sensor. Technical report, SAE Technical Paper, 1996.
- [7] Schneider D. An experimental study of correlations between ionic current and operating parameters in SI engines. 2000.
- [8] Kessler M. Ionenstromsensorik im Dieselmotor. Fortschritt-Berichte VDI, 2002..
- [9] Franke A, Einewall P, Reinmann R, et al. Analysis of the ionization equilibrium in the post-flame zone. Technical report, SAE Technical Paper, 2003.
- [10] Peron L, Charlet A, Higelin P, et al. Limitations of ionization current sensors and comparison with cylinder pressure sensors. Technical report, SAE Technical Paper, 2000.
- [11] Reinmann R, Saitzkoff A, Mauss F. Local air-fuel ratio measurements using the spark plug as an ionization sensor. Technical report, SAE Technical Paper, 1997.
- [12] Balles E N, VanDyne E A, Wahl A M, et al. In-cylinder air/fuel ratio approximation using spark gap ionization sensing. Technical report, SAE Technical Paper, 1998.
- [13] Zhu G G, Daniels C F, Winkelmann J. MBT timing detection and its closed-loop control using in-cylinder pressure signal. Technical report, SAE Technical Paper, 2003.
- [14] Förster J, Günther A, Ketterer M, et al. Ion current sensing for spark ignition engines. Technical report, SAE Technical Paper, 1999.
- [15] Malaczynski G W, Baker M E. Real-time digital signal processing of ionization current for engine diagnostic and control. Technical report, SAE Technical Paper, 2003.
- [16] Panousakis D, Gazis A, Paterson J, et al. Ion current signal interpretation via artificial neural networks for gasoline HCCI control. Technical report, SAE Technical Paper, 2006.

- [17] Glavmo M, Spadafora P, Bosch R. Closed loop start of combustion control utilizing ionization sensing in a diesel engine. Technical report, SAE Technical Paper, 1999.
- [18] 高辉, 吴筱敏, 高忠权, 等. 盲源分离法在火花塞离子电流信号分离中的应用. 西安交通大学学报, 2010, (1):22–26.
- [19] 曹银波, 张志永, 沈康, 等. 离子电流检测系统的抗干扰设计. 同济大学学报: 自然科学版, 2012, 40(9):1369–1375.
- [20] Eriksson L, Nielsen L, Glavenius M. Closed loop ignition control by ionization current interpretation. Technical report, SAE Technical Paper, 1997.
- [21] Zeldovich Y B. The oxidation of nitrogen in combustion and explosions. Acta Physicochim. URSS, 1946, 21(4):577–628.



## 致 谢

衷心感谢导师吴志军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 TONGJITHESIS，它的存在让我的论文写作轻松自在了许多，让我的论文格式规整漂亮了许多。

## 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.)