

# 介质阻挡放电等离子体激发器在 湍流减阻中的应用研究

(申请清华大学工学博士学位论文)

培 养 单 位 : 航 天 航 空 学 院

学        科 : 力 学

研 究 生 : 王 哲 夫

指 导 教 师 : 符 松 教 授

二〇一八年一月



**Study of the application of  
Dielectric-Barrier-Discharge plasma  
actuators in turbulent drag reduction**

Thesis Submitted to  
**Tsinghua University**  
in partial fulfillment of the requirement  
for the professional degree of  
**Doctor of Philosophy**

by  
**Wang Zhefu**  
( **School of Aerospace Engineering** )

Thesis Supervisor : Professor Fu Song

**January, 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

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。

本文介绍清华大学论文模板 THUTHESIS 的使用方法。本模板符合学校的本科、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：T<sub>E</sub>X；L<sup>A</sup>T<sub>E</sub>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 引言 .....	1
1.1 介质阻挡放电等离子体激发器 .....	1
1.1.1 介质阻挡放电等离子体激发器数值模拟模型 .....	1
1.1.2 介质阻挡放电等离子体激发器在流动控制方面的应用 .....	1
1.2 通过推迟层流/湍流转捩减阻 .....	2
1.2.1 二维边界层失稳与转捩 .....	2
1.2.2 三维边界层失稳与转捩 .....	2
1.2.3 转捩推迟方案研究进展 .....	2
1.3 通过控制壁湍流相干结构减阻 .....	2
1.3.1 湍流相干结构研究进展 .....	2
1.3.2 湍流减阻技术研究进展 .....	2
1.3.3 基本表格 .....	2
1.3.4 复杂表格 .....	3
1.3.5 其它 .....	7
1.4 本文研究工作与主要安排 .....	7
1.5 参考文献 .....	11
1.6 公式 .....	11
第2章 理论公式与数值求解方法 .....	13
2.1 流动稳定性求解框架 .....	13
2.1.1 边界层方程 .....	13
2.1.2 扰动方程 .....	13
2.2 扰动发展的敏感性分析 .....	13
2.2.1 基于线性稳定性理论的敏感性分析 .....	13
2.2.2 基于抛物化扰动方程的的敏感性分析 .....	13
2.3 充分发展槽道的直接数值模拟 .....	13
2.3.1 绘图 .....	13
2.3.2 插图 .....	13
第3章 后掠Hiemenz流动的失稳分析与控制 .....	16
3.1 后掠Hiemenz流动的稳定性分析 .....	16
3.2 后掠Hiemenz流动的敏感性分析 .....	16

3.3 采用等离子体激发器推迟后掠Hiemenz流动转捩 .....	16
第4章 后掠翼上流动失稳分析与控制 .....	17
4.1 后掠翼上流动的稳定性分析 .....	17
4.2 采用等离子体激发器推迟后掠翼上流动转捩 .....	17
第5章 等离子体激发器控制充分发展槽道湍流 .....	18
5.1 定常等离子体激发器控制充分发展槽道湍流 .....	18
5.2 非定常等离子体激发器控制充分发展槽道湍流 .....	18
第6章 结论 .....	19
参考文献 .....	20
致 谢 .....	22
声 明 .....	23
附录 A 扰动方程推导 .....	24
个人简历、在学期间发表的学术论文与研究成果 .....	25

## 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
$\Delta G$	活化自由能 (Activation Free Energy)
$\chi$	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	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。——荀况

## 第1章 引言

等离子体激发器由于具有响应时间短，安装方便，耗能低，器件小等众多优点，近些年得到了流动控制领域研究者的青睐。本文主要研究了介质阻挡放电（dielectric barrier discharge, DBD）等离子体激发器在湍流减阻方面的应用。研究主要分为两个部分，分别是通过推迟转捩降低湍流阻力和通过改变充分发展湍流的相干结构降低湍流阻力。引言部分将会先介绍我们所采用的等离子体激发器，然后再分别综述这两种控制方法的研究现状。

### 1.1 介质阻挡放电等离子体激发器

最早在文献中记载介质阻挡放电等离子体激发器的Masuda和Washizu<sup>[1]</sup>。之后再1998年，Roth首次将这个激发器用于流动控制<sup>[2]</sup>。介质阻挡放电等离子体激发器由两片电极和一层绝缘层构成（如图 1.1所示）。当在两片电极上加上高电压时，两片电极之间的空气就会被电离。在电场的作用下，带电的离子会做定向运动，并通过与不带电的空气分子的碰撞作用，将动量转移到空气分子上。从宏观的角度看，等离子体激发器在开启时会产生图示方向的射流。

#### 1.1.1 介质阻挡放电等离子体激发器数值模拟模型

介质阻挡放电等离子体激发器数值模拟方法

#### 1.1.2 介质阻挡放电等离子体激发器在流动控制方面的应用

介质阻挡放电等离子体激发器在流动控制方面的应用

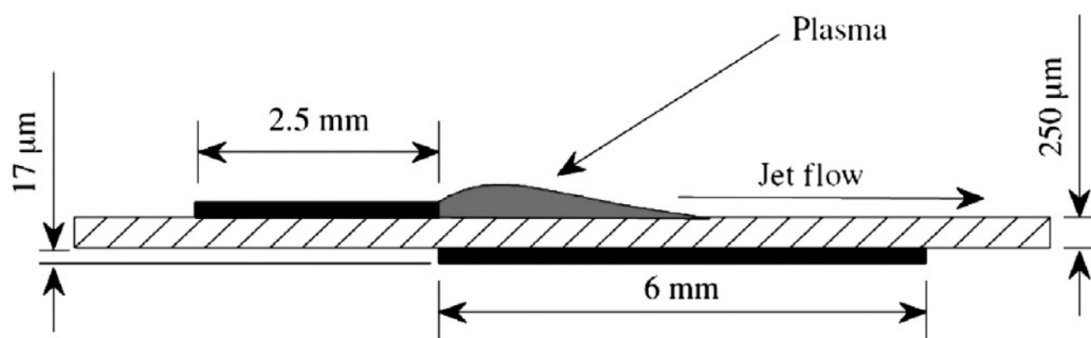


图 1.1 等离子体激发器示意图<sup>[3]</sup>

## 1.2 通过推迟层流/湍流转捩减阻

### 1.2.1 二维边界层失稳与转捩

二维边界层失稳与转捩

### 1.2.2 三维边界层失稳与转捩

三维边界层失稳与转捩

### 1.2.3 转捩推迟方案研究进展

转捩推迟方案研究进展

坡仙擅长行书、楷书，取法李邕、徐浩、颜真卿、杨凝式，而能自创新意。用笔丰腴

易与天地准，故能弥纶天地之道。仰以观於天文，俯以察於地理，是故知幽明之故

有天地，然后万物生焉。盈天地之间者，唯万物，故受之以屯；屯者盈也，屯者物之始生也。

履而泰，然后安，故受之以泰；泰者通也。物不可以终通，故受之以否。

有事而后可大，故受之以临；临者大也。物大然后可观，故受之以观。可观而后有所合，故受之以噬嗑；嗑者合也。

有无妄然后可畜，故受之以大畜。物畜然后可养，故受之以颐；颐者养也。不养则不可动，故受之以大过。物不可以终过，故受之以坎；坎者陷也。陷必有所丽，故受之以离；离者丽也。

## 1.3 通过控制壁湍流相干结构减阻

### 1.3.1 湍流相干结构研究进展

壁湍流相干结构研究进展

### 1.3.2 湍流减阻技术研究进展

湍流减阻技术研究进展

### 1.3.3 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{\width}` 控制。

表 1.1 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>thuthesis.ins</code>	$\text{\LaTeX}$ 安装文件， <code>DocStrip</code> <sup>①</sup>
<code>thuthesis.dtx</code>	所有的一切都在这里面 <sup>②</sup> 。
<code>thuthesis.cls</code>	模板类文件。
<code>thuthesis.cfg</code>	模板配置文。 <code>cls</code> 和 <code>cfg</code> 由前两个文件生成。
<code>thuthesis-numeric.bst</code>	参考文献 $\text{BIB}\text{\TeX}$ 样式文件。
<code>thuthesis-author-year.bst</code>	参考文献 $\text{BIB}\text{\TeX}$ 样式文件。
<code>thuthesis.sty</code>	常用的包和命令写在这里，减轻主文件的负担。

① 表格中的脚注

② 再来一个

首先来看一个最简单的表格。表 1.1 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。

### 1.3.4 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，如果不喜欢脚注，可以在表格后面写注释，比如表 1.2。

表 1.2 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《`ThUThesis` 使用手册》。

\*：东部

\*\*：西部

此外，表 1.2 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 `\diagbox` 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。凉武昭王暠九世孙。或曰山东人，或曰蜀人。白少有逸才，志气宏放，飘然有超世之心。初隐岷山，益州长史苏颋见而异之，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。左右以水颰面，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。永王璘都督江陵，辟为僚佐。璘谋乱，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、裴旻剑舞、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 1.3、图 1.4 使用小页环境，也可以如图 1.5 使用子表格来做。图的例子参见第 2.3.2.2 节。

表 1.3 第一个并排子表格

111	222
222	333

表 1.4 第二个并排子表格

111	222
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。以论救房琯，出为华州司功参军。关辅饥乱，寓居同州同谷县，身自负薪采椽，餬糲不给。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，乃之东蜀就高适。既至而适卒。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。

表 1.5 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

不可否认  $\text{\LaTeX}$  的表格功能没有想象中的那么强大，不过只要足够认真，足够细致，同样可以排出来非常复杂非常漂亮的表格。请参看表 1.6。

表 1.6 复杂表格示例 2

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					

最后就是清新飘逸、文约意赅、空谷绝响的王大俠了。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，服药阳喑，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，宁薛诸王驸马豪贵之门，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。殷璠谓维诗词秀调雅，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 1.7 就是 `longtable` 的简单示例。

表 1.7 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

### 1.3.5 其它

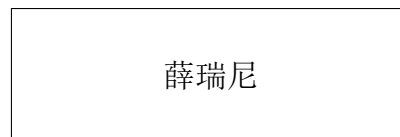
如果不想让某个表格或者图片出现在索引里面，请使用命令 `\caption*`。这个命令不会给表格编号，也就是出来的只有标题文字而没有“表 XX”，“图 XX”，否则索引里面序号不连续就显得不伦不类，这也是  $\text{\LaTeX}$  里星号命令默认的规则。

有这种需求的多是本科同学的英文资料翻译部分，如果觉得附录中英文原文中的表格和图片显示成“表”和“图”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。

THUThesis
-----------

Figure 1.111 这是一个手动编号，不出现在索引中的图。



如果的确想让它编号，但又不想让它出现在索引中的话，目前模板上不支持。

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。

## 1.4 本文研究工作与主要安排

给大家演示一下各种和证明有关的环境：

假设 1.1: 待月西厢下，迎风户半开；隔墙花影动，疑是玉人来。

$$c = a^2 - b^2 \quad (1-1)$$

$$= (a + b)(a - b) \quad (1-2)$$

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 1.1: 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，山鬼暗谿风雨。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 1.1: 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 1.1: 天不言自高，水不言自流。

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

$$\zeta^0 = (\xi^0)^2, \quad (1-3)$$

$$\zeta^1 = \xi^0 \xi^1, \quad (1-4)$$

$$\zeta^2 = (\xi^1)^2, \quad (1-5)$$

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 1.1:** 两点间直线段距离最短。

$$x \equiv y + 1 \pmod{m^2} \quad (1-6)$$

$$x \equiv y + 1 \pmod{m^2} \quad (1-7)$$

$$x \equiv y + 1 \pmod{m^2} \quad (1-8)$$

《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 1.1:** 《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 1.1:** 犯我强汉者，虽远必诛 —— 陈汤（汉）

$$y = 1 \quad (1-9a)$$

$$y = 0 \quad (1-9b)$$

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 1.1:** 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。

$$V_i = v_i - q_i v_j, \quad X_i = x_i - q_i x_j, \quad U_i = u_i, \quad \text{for } i \neq j; \quad (1-10)$$

$$V_j = v_j, \quad X_j = x_j, \quad U_j u_j + \sum_{i \neq j} q_i u_i. \quad (1-11)$$

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 1.1:** 大家来看这个例子。

$$\begin{cases} \nabla f(\mathbf{x}^*) - \sum_{j=1}^p \lambda_j \nabla g_j(\mathbf{x}^*) = 0 \\ \lambda_j g_j(\mathbf{x}^*) = 0, \quad j = 1, 2, \dots, p \\ \lambda_j \geq 0, \quad j = 1, 2, \dots, p. \end{cases} \quad (1-12)$$

**练习 1.1:** 请列出 Andrew S. Tanenbaum 和 W. Richard Stevens 的所有著作。

**猜想 1.1:** *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 1.1:** 回答还是不回答，是个问题。

如何引用定理 1.1 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，瞿塘滟滪堆。五月不可触，猿声天上哀。门前迟行迹，一一生绿苔。苔深不能扫，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。

## 1.5 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`，分别提供数字引用 (`thuthesis-numeric.bst`) 和作者年份引用 (`thuthesis-author-year.bst`) 样式，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>[4-6]</sup>，还有这些<sup>[7-9]</sup>，关于杂志的<sup>[10-12]</sup>，硕士论文<sup>[13,14]</sup>，博士论文<sup>[15,16]</sup>，标准文件<sup>[17]</sup>，会议论文<sup>[18,19]</sup>，技术报告<sup>[20]</sup>，电子文献<sup>[21,22]</sup>。中文参考文献<sup>[23]</sup>应增加 `lang="zh"` 字段，以便进行相应处理。另外，本模板对中文文献<sup>[24]</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 `bb1` 文件。

有时候不想要上标，那么可以这样 [15]，这个非常重要。

有时候一些参考文献没有纸质出处，需要标注 URL。缺省情况下，URL 不会在连字符处断行，这可能使得用连字符代替空格的网址分行很难看。如果需要，可以将模板类文件中

```
\RequirePackage{hyperref}
```

一行改为：

```
\PassOptionsToPackage{hyphens}{url}
\RequirePackage{hyperref}
```

使得连字符处可以断行。更多设置可以参考 `url` 宏包文档。

## 1.6 公式

贝叶斯公式如式 (1-13)，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。

$$p(y|\mathbf{x}) = \frac{p(\mathbf{x}, y)}{p(\mathbf{x})} = \frac{p(\mathbf{x}|y)p(y)}{p(\mathbf{x})} \quad (1-13)$$

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

$$\det \mathbf{K}(t = 1, t_1, \dots, t_n) = \sum_{I \in \mathbf{n}} (-1)^{|I|} \prod_{i \in I} t_i \prod_{j \in I} (D_j + \lambda_j t_j) \det \mathbf{A}^{(\lambda)}(\bar{I}|\bar{I}) = 0. \quad (1-14)$$

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：

$$\left\{ \begin{array}{l} \max_x F(x, y_1^*, y_2^*, \dots, y_m^*) \\ \text{subject to:} \\ G(x) \leq 0 \\ (y_1^*, y_2^*, \dots, y_m^*) \text{ solves problems } (i = 1, 2, \dots, m) \\ \left\{ \begin{array}{l} \max_{y_i} f_i(x, y_1, y_2, \dots, y_m) \\ \text{subject to:} \\ g_i(x, y_1, y_2, \dots, y_m) \leq 0. \end{array} \right. \end{array} \right. \quad (1-15)$$

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。

## 第2章 理论公式与数值求解方法

### 2.1 流动稳定性求解框架

#### 2.1.1 边界层方程

#### 2.1.2 扰动方程

##### 2.1.2.1 线性稳定性理论

##### 2.1.2.2 抛物化扰动方程

##### 2.1.2.3 Floquet理论与二次失稳

### 2.2 扰动发展的敏感性分析

#### 2.2.1 基于线性稳定性理论的敏感性分析

#### 2.2.2 基于抛物化扰动方程的的敏感性分析

### 2.3 充分发展槽道的直接数值模拟

在第 1 章中我们学习了贝叶斯公式 (1-13)，这里我们复习一下：

$$p(y|\mathbf{x}) = \frac{p(\mathbf{x}, y)}{p(\mathbf{x})} = \frac{p(\mathbf{x}|y)p(y)}{p(\mathbf{x})} \quad (2-1)$$

#### 2.3.1 绘图

本模板不再预先装载任何绘图包（如 `pstricks`，`pgf` 等），完全由用户来决定。个人觉得 `pgf` 不错，不依赖于 `Postscript`。此外还有很多针对 `LATEX` 的 GUI 作图工具，如 `XFig(jFig)`，`WinFig`，`Tpx`，`Ipe`，`Dia`，`Inkscape`，`LaTeXPiX`，`jPicEdt`，`jaxdraw` 等等。

#### 2.3.2 插图

强烈推荐《`LATEX 2ε` 插图指南》！关于子图形的使用细节请参看 `subcaption` 宏包的说明文档。

##### 2.3.2.1 一个图形

一般图形都是处在浮动环境中。之所以称为浮动是指最终排版效果图形的位



置不一定与源文件中的位置对应<sup>①</sup>，这也是刚使用  $\text{\LaTeX}$  同学可能遇到的问题。如果要强制固定浮动图形的位置，请使用 `float` 宏包，它提供了 `[H]` 参数，比如图 2.1。



图 2.1 利用 Xfig 制图

大学之道，在明明德，在亲民，在止于至善。知止而后有定；定而后能静；静而后能安；安而后能虑；虑而后能得。物有本末，事有终始。知所先后，则近道矣。古之欲明明德于天下者，先治其国；欲治其国者，先齐其家；欲齐其家者，先修其身；欲修其身者，先正其心；欲正其心者，先诚其意；欲诚其意者，先致其知；致知在格物。物格而后知至；知至而后意诚；意诚而后心正；心正而后身修；身修而后家齐；家齐而后国治；国治而后天下平。自天子以至于庶人，壹是皆以修身为本。其本乱而未治者否矣。其所厚者薄，而其所薄者厚，未之有也！

——《大学》

### 2.3.2.2 多个图形

如果多个图形相互独立，并不共用一个图形计数器，那么用 `minipage` 或者 `parbox` 就可以。否则，请参看图 2.2，它包含两个小图，分别是图 2.2(a)和图 2.2(b)。推荐使用 `\subcaptionbox`，因为可以像图 2.2 那样对齐子图的标题，也可以使用 `subcaption` 宏包的 `\subcaption`（放在 `minipage` 中，用法同 `\caption`）或是 `subfigure`、`subtable` 环境，像图 2.3，不要再用 `\subfloat`、`\subfigure` 和 `\subtable`。

古之学者必有师。师者，所以传道受业解惑也。人非生而知之者，孰能无惑？惑而不从师，其为惑也，终不解矣。生乎吾前，其闻道也固先乎吾，吾从而师之；生乎吾後，其闻道也亦先乎吾，吾从而师之。吾师道也，夫庸知其年之先後生於吾乎！是故无贵无贱无长无少，道之所存，师之所存也。

嗟乎！师道之不传也久矣，欲人之无惑也难矣。古之圣人，其出人也远矣，犹且从师而问焉；今之众人，其下圣人也亦远矣，而耻学於师。是故圣益圣，愚益愚。圣人之所以为圣，愚人之所以为愚，其皆出於此乎？爱其子，择师而教之，

<sup>①</sup> This is not a bug, but a feature of  $\text{\LaTeX}$ !



(a) 第一个小图形



(b) 第二个小图形，注意这个图略矮些。如果标题很长的话，它会自动换行

图 2.2 包含子图形的大图形(subcaptionbox示例)



(a) 第一个小图形



(b) 第二个小图形，注意这个图略矮些。  
subfigure中同一行的子图在顶端对齐。

图 2.3 包含子图形的大图形(subfigure示例)

於其身也，则耻师焉，惑焉。彼童子之师，授之书而习其句读者，非吾所谓传其道、解其惑者也。句读之不知，惑之不解，或师焉，或不焉，小学而大遗，吾未见其明也。巫医、乐师、百工之人不耻相师，士大夫之族曰“师”曰“弟子”之云者，则群聚而笑之。问之，则曰：彼与彼年相若也，道相似也，位卑则足羞，官盛则近谄。呜呼！师道之不复，可知矣。巫医、乐师、百工之人。吾子不齿，今其智乃反不能及，其可怪也欤！圣人无常师。孔子师郯子、苌子、师襄、老聃。郯子之徒，其贤不及孔子。孔子曰：“三人行，必有我师。”是故弟子不必不如师，师不必贤於弟子。闻道有先後，术业有专攻，如是而已。

如果要把编号的两个图形并排，那么小页就非常有用：

李氏子蟠，年十七，好古文、六艺，经传皆通习之，不拘於时，学於余。余嘉其能行古道，作师说以贻之。

—— 韩愈（唐）



图 2.4 并排第一个图



图 2.5 并排第二个图

## 第3章 后掠Hiemenz流动的失稳分析与控制

- 3.1 后掠Hiemenz流动的稳定性分析
- 3.2 后掠Hiemenz流动的敏感性分析
- 3.3 采用等离子体激发器推迟后掠Hiemenz流动转捩

## 第4章 后掠翼上流动失稳分析与控制

### 4.1 后掠翼上流动的稳定性分析

### 4.2 采用等离子体激发器推迟后掠翼上流动转捩

## 第5章 等离子体激发器控制充分发展槽道湍流

### 5.1 定常等离子体激发器控制充分发展槽道湍流

### 5.2 非定常等离子体激发器控制充分发展槽道湍流

## 第6章 结论

## 参考文献

- [1] Masuda S, Washizu M. Ionic charging of a very high resistivity spherical particle[J/OL]. Journal of Electrostatics, 1979, 6(1): 57–67. <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/030438867990024X>.
- [2] Roth J, Sherman D, Wilkinson S. Aerospace sciences meetings: Boundary layer flow control with a one atmosphere uniform glow discharge surface plasma[M/OL]. American Institute of Aeronautics and Astronautics, 1998. <https://doi.org/10.2514/6.1998-328>
- [3] Whalley R D, Choi K S. The starting vortex in quiescent air induced by dielectric-barrier-discharge plasma[J]. Journal of Fluid Mechanics, 2012, 703: 192–203.
- [4] Knuth D E. The  $\text{\TeX}$  book[M]. 15th ed. Reading, MA: Addison-Wesley Publishing Company, 1989
- [5] Goossens M, Mittelbach F, Samarin A. The  $\text{\LaTeX}$  companion[M]. Reading, MA: Addison-Wesley Publishing Company, 1994: 112–125
- [6] Gröning P, Nilsson L, Ruffieux P, et al. Encyclopedia of nanoscience and nanotechnology: volume 1[M]. [S.l.]: American Scientific Publishers, 2004: 547–579
- [7] Krasnogor N. Towards robust memetic algorithms[M]//Hart W, Krasnogor N, Smith J. Studies in Fuzziness and Soft Computing: volume 166 Recent Advances in Memetic Algorithms. New York: Springer Berlin Heidelberg, 2004: 185–207
- [8] 阎真. 沧浪之水[M]. [出版地不详]: 人民文学出版社, 2001: 185–207
- [9] 班固. 苏武传[M]//郑在瀛, 汪超宏, 周文复. 新古文观止丛书: 第2卷 传记散文英华. 武汉: 湖北人民出版社, 1998: 65–69
- [10] Chafik El Idrissi M, Roney A, Frigon C, et al. Measurements of total kinetic-energy released to the  $N = 2$  dissociation limit of  $\text{H}_2$  — evidence of the dissociation of very high vibrational Rydberg states of  $\text{H}_2$  by doubly-excited states[J]. Chemical Physics Letters, 1994, 224(10): 260–266.
- [11] Mellinger A, Vidal C R, Jungen C. Laser reduced fluorescence study of the carbon-monoxide and triplet Rydberg series-experimental results and multichannel quantum-defect analysis[J]. J. Chem. Phys., 1996, 104(5): 8913–8921.
- [12] Shell M. How to use the IEEEtran  $\text{\LaTeX}$  class[J]. Journal of  $\text{\LaTeX}$  Class Files, 2002, 12(4): 100–120.
- [13] 猪八戒. 论流体食物的持久保存[硕士学位论文]. 北京: 广寒宫大学, 2005.
- [14] Jeyakumar A R. Metamori: A library for incremental file checkpointing[D]. Blacksburg: Virginia Tech, 2004.
- [15] 沙和尚. 论流沙河的综合治理[博士学位论文]. 北京: 清华大学, 2005.
- [16] Zadok E. FiST: A System for Stackable File System Code Generation[D]. USA: Computer Science Department, Columbia University, 2001.
- [17] IEEE Std 1363-2000. IEEE standard specifications for public-key cryptography[M]. New York: IEEE, 2000

- [18] Kim S, Woo N, Yeom H Y, et al. Design and Implementation of Dynamic Process Management for Grid-enabled MPICH[C]//the 10th European PVM/MPI Users' Group Conference. Venice, Italy: [s.n.], 2003.
- [19] Kocher C, Jaffe J, Jun B. Differential power analysis[C]//Wiener M. Lecture Notes in Computer Science: volume 1666 Advances in Cryptology (CRYPTO '99). [S.l.]: Springer-Verlag, 1999: 388–397.
- [20] Woo A, Bailey D, Yarrow M, et al. The NAS parallel benchmarks 2.0[R/OL]. The Pennsylvania State University CiteSeer Archives, 1995. <http://www.nasa.org/>.
- [21] 萧钰. 出版业信息化迈入快车道[EB/OL]. <http://www.creader.com/news/200112190019.htm>.
- [22] Online Computer Library Center, Inc. History of OCLC[EB/OL]. <http://www.oclc.org/about/history/default.htm>.
- [23] 贾宝玉, 林黛玉, 薛宝钗, 等. 论刘姥姥食量大如牛之现实意义[J]. 红楼梦杂谈, 1800, 224: 260–266.
- [24] 王重阳, 黄药师, 欧阳峰, 等. 武林高手从入门到精通[C]//第  $N$  次华山论剑. 西安, 中国: [出版地不详], 2006.
- [25] 薛瑞尼. THUThesis: 清华大学学位论文模板[EB/OL]. 2017. <https://github.com/xueruini/thuthesis>.



## 致 谢

衷心感谢导师符松教授和课题组内王亮助理研究员对本人的精心指导。他们的言传身教将使我终生受益。

同时衷心感谢徐国亮师兄，任杰师兄在流动稳定性方面的悉心指导，帮助我解决了不少问题。

感谢 L<sup>A</sup>T<sub>E</sub>X 和 THUTHESIS<sup>[25]</sup>，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 扰动方程推导

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

1991 年 10 月 5 日出生于陕西省西安市长安县（现长安区）。

2009 年 9 月考入清华大学航天航空学院工程力学系钱学森力学班，2013 年 7 月本科毕业并获得工学学士学位。

2013 年 9 月免试进入清华大学大学航天航空学院攻读力学博士学位至今。

### 发表的学术论文

- [1] Zhefu Wang, Liang Wang, and Song Fu. "Control of stationary crossflow modes in swept Hiemenz flows with dielectric barrier discharge plasma actuators", *Physics of Fluids*, 2017, 29(9): 094105. （SCI 收录，WOS:000412105100038）
- [2] Zhefu Wang, Liang Wang, and Song Fu. "Sensitivity analysis of crossflow boundary layer and transition delay using plasma actuator", 8th AIAA Flow Control Conference, AIAA AVIATION Forum, (AIAA 2016-3933). （EI 收录，ISBN-13: 9781624104329）
- [3] Zhefu Wang, Liang Wang, and Song Fu. "Control of crossflow instability using plasma actuators", 7th Asia-Pacific International Symposium on Aerospace Technology, 25-27 November 2015, Cairns, Australia. （会议论文）
- [4] Zhefu Wang and Song Fu. "Control of crossflow instability using plasma actuators", XXIV ICTAM, 21-26 August 2016, Montreal, Canada. （会议论文）
- [5] Zhefu Wang and Song Fu. "Transition delay using DBD plasma actuators", European Drag Reduction and Flow Control Meeting, 3-6 April 2017, Rome, Italy. （会议论文）

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