



## 声 明

本人郑重声明：此处所提交的硕士学位论文《矩形通道中单块柔性平板流固耦合实验研究》，是本人在华北电力大学攻读硕士学位期间，在导师指导下进行的研究工作和取得的研究成果。据本人所知，除了文中特别加以标注和致谢之处外，论文中不包含其他人已经发表或撰写过的研究成果，也不包含为获得华北电力大学或其他教育机构的学位或证书而使用过的材料。与我一同工作的同志对本研究所做的任何贡献均已在论文中作了明确的说明并表示了谢意。

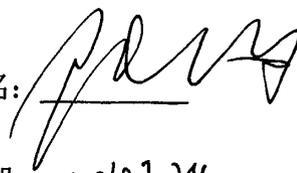
学位论文作者签名： 赵心静 日期： 2010.3.24

## 关于学位论文使用授权的说明

本人完全了解华北电力大学有关保留、使用学位论文的规定，即：①学校有权保留、并向有关部门送交学位论文的原件与复印件；②学校可以采用影印、缩印或其它复制手段复制并保存学位论文；③学校可允许学位论文被查阅或借阅；④学校可以学术交流为目的，复制赠送和交换学位论文；⑤同意学校可以用不同方式在不同媒体上发表、传播学位论文的全部或部分内容。

(涉密的学位论文在解密后遵守此规定)

作者签名： 赵心静

导师签名： 

日期： 2010.3.24

日期： 2010.3.24



## 摘 要

研究平行板燃料组件的流致振动特性对保证核反应堆的安全可靠运行具有重要意义。本次研究采用新思路、新方法：将平行板燃料组件简化成一个理想的单板结构，研究单块柔性平板在矩形通道内的流致振动情况。本文首先使用 PIV 仪器获得了矩形通道中的单板在不同工况下的流场分布信息；其次做了前期准备实验，测量板子在空气中的固有频率；最后对平板在不同流速下进行了流致振动实验。流致振动实验结果表明：平板在水中的振动现象只是一种湍流微振现象；振动位移随流速的增大而变大，变化幅度很小；随着流速的增大，平板振动加剧，振动表现为低频成分减少，高频成分增加。

关键词：平行板燃料组件，固有频率，湍流微振，流致振动，流固耦合

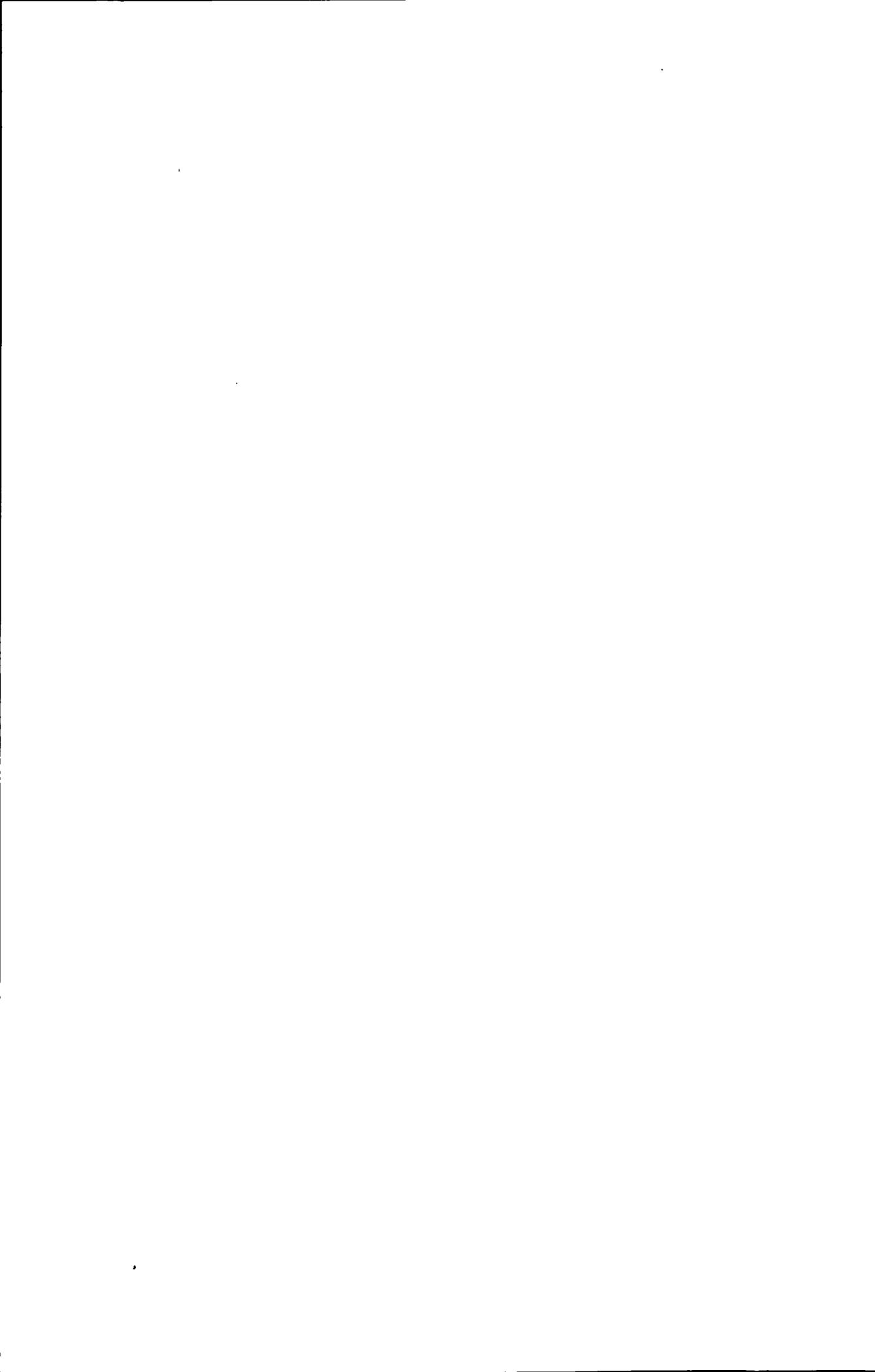
## ABSTRACT

It is very important for the reactor safety to research the flow-induced vibration (FIV) of the parallel-plate fuel assembly. This paper introduces a new method that the parallel-plate fuel assembly is simplified to a single-plate model in a rectangular channel, and the FIV of the single flexible plate in the rectangular channel is researched. In this paper, the flow information of single plate in the rectangular channel is first obtained by PIV. Then in the preparative experiment the natural frequency of the parallel-plate is measured in the air. The FIV of the parallel-plate is measured with the different velocity finally. The result indicates that the parallel-plate vibration in the water is just turbulent vibration phenomenon, the more the velocity is, the bigger the vibration displacement of the parallel-plate is, and the displacement changes little. With the increase of velocity, the parallel-plate vibrates acutely. The low frequency reduces, where the high frequency increases.

Zhao Yujing (Fluid Machinery and Engineering)

Directed by prof. Lu Daogang

**KEY WORDS:** parallel-plate fuel assembly, natural frequency, turbulent vibration, flow-induced vibration (FIV), fluid-structure interaction

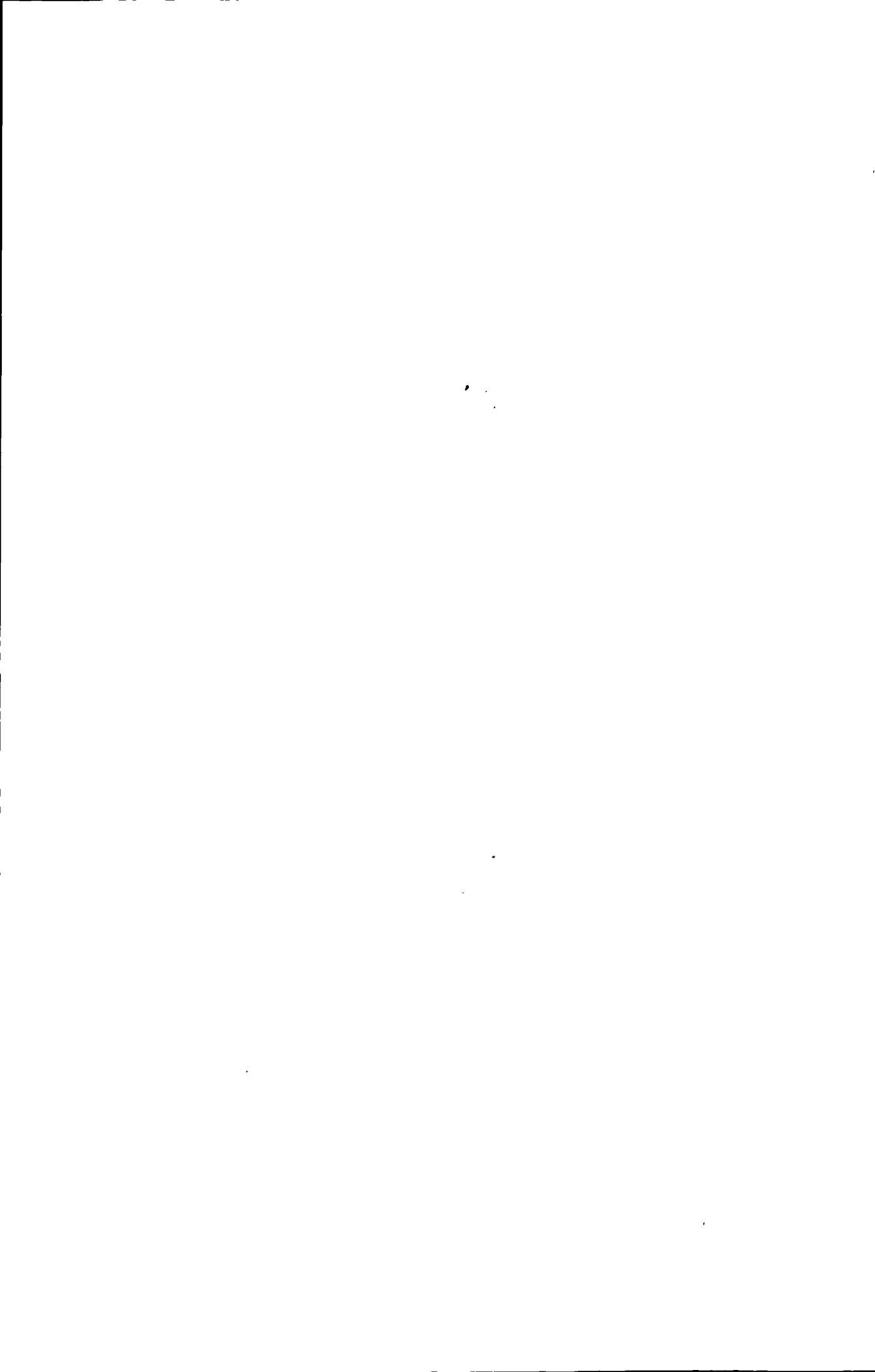


## 目 录

摘 要	
英文摘要	
第一章 引言	1
1.1 研究背景	1
1.1.1 核反应堆燃料组件的研究背景	1
1.1.2 流致振动可能导致的危害	1
1.2 国内外研究现状	3
1.2.1 国内研究现状	3
1.2.2 国外研究现状	3
1.3 本文的研究内容	5
1.3.1 本项目的创新点	5
1.3.2 本文的研究内容	5
第二章 实验方法	7
2.1 仪器选择方法	7
2.1.1 传感器的选择	7
2.2 测量方法	9
2.2.1 流速测量方法	9
2.2.1.1 PIV 技术理论	9
2.2.1.2 实验难点	10
2.2.1.3 实验操作步骤	11
2.2.2 振动测量方法	12
2.3 数字信号分析方法	12
2.3.1 信号采样	13
2.3.2 滤波	13
2.3.3 傅立叶变换	14
2.4 小结	14
第三章 实验装置和测量系统	15
3.1 实验回路	15
3.1.1 实验回路流量的计算	16

3.1.2 管道参数的选择.....	16
3.1.3 泵的选择.....	17
3.1.4 流量计的选择.....	17
3.1.5 水箱的选择.....	17
3.1.6 过渡段及紊流段的选择.....	17
3.1.7 实验段材料的选择.....	18
3.1.8 实验段结构的选择.....	19
3.1.9 阀门的选择.....	19
3.1.10 软连接管的选择.....	19
3.1.11 压力表的选择.....	19
3.1.12 其他辅助设备的选择.....	19
3.2 实验本体.....	19
3.3 控制系统.....	20
3.4 测量系统.....	20
3.4.1 硬件测量系统.....	21
3.4.1.1 振动测量仪器.....	21
3.4.1.2 流速测量仪器.....	22
3.4.1.3 辅助测量仪器.....	22
3.4.2 软件测量系统.....	22
3.5 小结.....	23
<b>第四章 实验过程和结果分析</b> .....	<b>24</b>
4.1 数值模拟计算分析.....	24
4.1.1 几何建模.....	24
4.1.2 设置边界条件.....	25
4.1.3 计算结果及分析.....	26
4.2 流场测量实验.....	31
4.2.1 实验方法和步骤.....	31
4.2.2 实验结果及分析.....	31
4.2.3 结论与分析.....	36
4.3 流致振动预实验.....	36

4.3.1 仪器验证实验.....	36
4.3.2 铝板弹性模量测量实验.....	38
4.3.3 两端固定方式固有频率测试实验.....	40
4.4 流致振动实验.....	42
4.4.1 实验过程.....	42
4.4.2 实验结果及分析.....	42
4.5 小结.....	46
第五章 结论与展望.....	47
5.1 结论.....	47
5.2 展望.....	47
参考文献.....	49
致 谢.....	52
在学期间发表的学术论文和参加的科研情况.....	53



## 第一章 引言

### 1.1 研究背景

#### 1.1.1 核反应堆燃料组件的研究背景

核燃料元件种类繁多,按组分特征来分,可分为金属型、陶瓷型和弥散性;按反应堆来分,可以分为实验堆元件、生产堆元件、动力堆元件(包括核电站用的核燃料组件);按几何形状来分,可分为柱状、棒状、环状、板状、条状、球状、棱柱状元件。燃料组件是反应堆的重要部分,它是能量的源泉,它的结构是否合理直接关系到反应堆的安全和效率。从反应堆热工设计方面来看,对燃料元件形状的要求是:在一定的水铀比的条件下,在相同的堆芯体积内应能布置更多的燃料元件传热面积。这样可以提高堆芯的功率密度;或在功率密度不变的条件下,降低燃料元件的表面热流量,从而降低元件的温度和提高堆芯的最小烧毁比<sup>[1]</sup>。

从增大单位堆芯体积内的传热面积来看,板状元件要优于棒状元件。具体而言,板状燃料元件有如下一些优点<sup>[2]</sup>:

- 1) 由于板状元件所用燃料的浓缩度高和弥散性燃料的稳定性好,因而它的燃耗可以很深,一般在 10 万兆瓦日/吨铀以上。
- 2) 因为铀—钨合金或金属陶瓷做芯体加上合金材料可以支撑很薄的燃料板,所以单位堆芯体积中能布置较大的放热面积,这就有效地提高了反应堆的平均容积比功率。
- 3) 即使采用导热性能较差的  $\text{UO}_2$  为燃料的板状元件,其中心温度一般也不超过  $900^\circ\text{C}$ 。

鉴于此,板状燃料组件在当今国际上的主要先进研究堆和军用堆中得到广泛应用,例如,中国工程物理研究院的 J01 研究堆及正在建造的中国先进研究堆都采用了平行板燃料组件。由中国原子能科学研究院承建的中国先进研究堆是关系到 21 世纪我国核科学与技术可持续发展的国家重点工程,该堆的燃料板窄长而极薄(厚度仅为 2mm 左右),板间距也很小(2mm 左右),而板间流道的冷却剂流速很高(约达 10m/sec)。由此可以看出,对板状燃料组件的研究有必要进行下去。

#### 1.1.2 流致振动可能导致的危害

流体流经非流线型物体时会产生较大的尾流和旋涡。在一定的条件下,这种旋涡可能会引起物体严重的振动。例如,风吹过电力输送线、高烟囱和悬索桥等结构时产生的振动,热交换器中管子的振动,潜望镜在一定的航速下所产生的振动等<sup>[3]</sup>。这就是所谓的流致振动问题。它可能造成天线、桥梁、热交换工程被摧毁的严重后果

果。如美国的 Tacoma Narrows 吊桥倒塌事故。该吊桥主跨长 853.4m, 宽 11.9m, 于 1940 年 7 月 1 日因风载荷作用产生自振, 历时一个小时, 振动 720 次, 使整个吊桥彻底毁坏。1965 年 11 月英国的渡桥发电站的八个大型冷却塔在经受一场大风袭击时倒塌了三个。这类严重的事故提醒了工程技术人员必须注意研究流体与固体相互作用的耦合振动, 即流致振动或者流动诱发振动<sup>[4]</sup>。

一般来说随着流体的扰动, 燃料组件总会产生一些微小的振动, 通常这并不导致破坏。在水冷堆中目前普遍认为有三种主要的激励来自于轴向流, 即紊流颤振、旋涡脱落和声弹性振动<sup>[5]</sup>。当旋涡脱落的频率接近于声频时, 流场与声场互相加强, 最坏的情况是当声频、旋涡脱落的频率以及燃料元件的微幅振动频率均相同时, 将产生强烈的燃料元件局部振动, 可能导致元件的损伤或破坏<sup>[6]</sup>。对于板状燃料组件而言, 主要的破坏情况有以下几种可能<sup>[7]</sup>:

#### 1) 撞击破坏

当组件的振幅达到足以使相邻板子互相撞击, 或边缘板不断击打壳体, 在板子的撞击部产生磨损, 板壳不断减薄而致最后开裂, 甚至折断。

#### 2) 应力疲劳

板子振动的振幅或频率较大时, 板子反复振动的弯曲应力较高, 长时间的连续振动造成疲劳损伤。这种损伤还会由于腐蚀作用而加剧。

#### 3) 材料缺陷扩展

振动所引起的应力脉动会使板材中的微观缺陷扩展, 以致产生大裂纹, 最终使板子受到破坏。

#### 4) 基座磨损

燃料组件由于自身重力以及组件与基座之间的斜面而支撑在基座上, 但是由于来流的不稳定性, 组件可能会发生整体晃动, 进而磨损了组件和基座。

#### 5) 结构失效

由于长时间的振动, 最终导致定位梳磨破了燃料板甚至脱落, 破坏了结构的一致性和完整性。

燃料组件是反应堆的核心部件, 燃料组件的包壳是限制放射性物质向外泄露的第一道安全屏障。燃料组件在堆芯中处在高温、高压、含硼水、强中子辐照、腐蚀、冲刷和水力振动等恶劣条件下长期工作, 因此燃料组件的强度、刚度、振动、稳定性和工作可靠性等性能是工程人员关心的问题。先进核反应堆中的板状燃料组件, 板与板之间的间距很小, 与板的厚度相当, 冷却剂按照规定流速由此流过, 并迅速将燃料组件释放的热量带走。燃料组件和冷却剂的此种结构构成典型的流固耦合模型。国外经验表明, 在先进核反应堆中, 平行板燃料组件中冷却剂的高速流动会诱发各燃料板的振动, 当各燃料板振动时又会引起冷却剂流道的变形, 从而改变流道中冷却剂的流速分布, 流速分布的改变又会加剧燃料板的振动, 如此往复, 燃料板

与冷却剂之间可能形成强烈的流固耦合现象，燃料板可能会发生所谓的流弹性失稳而导致损坏，流道的变形还会使堆芯局部换热效果恶化，影响核反应堆的安全运行。由此可见，对板状燃料组件在反应堆中可能发生的流致振动现象进行研究分析以确保其可靠和安全已经成为一个不容忽视的重要问题。

在核反应堆中出现的流致振动现象一直引起工程科技人员的高度重视，但由于人们的认识能力有限，世界上由流致振动引起的核电厂故障时有发生，因此西方国家在先进核反应堆（如先进压水堆和先进沸水堆）的设计中充分考虑了流致振动的影响；ASME 规范也在 1995 年的版本中新加入了关于圆管和管群的流致振动的设计准则。近年来国内已经发生了几起堆内构件流致振动相关事件，在秦山核电厂（I 期）吊篮下部防断支撑组件松动脱落事件后，流致振动分析引起了中国核工业部门的高度重视，中国核工业集团公司把流致振动分析列为中国核电国产化项目 CNP1000 的关键技术之一，国家核安全局也把流致振动列为重点核安全审查项目。因此本文的研究对于分析核反应堆中的流致振动现象具有重要意义。

## 1.2 国内外研究现状

### 1.2.1 国外研究现状

平行板燃料组件流致振动的研究已有较长的历史，国内外众多学者都对此进行过研究。Doan（1958 年）在美国工程试验堆（ETR）上发现了燃料板在流速 9m/sec 时的失稳现象<sup>[8]</sup>。Miller（1960 年）在实验基础上给出了燃料板失稳的临界流速公式<sup>[9]</sup>。Groninger 和 Kane（1963 年）发现燃料板失稳与相邻板间的流动通道的张开和闭合相关，由此判断相邻燃料板这种张开和闭合型振动导致流道形状交替变化，通道中的流动也交替变化，流场变化与燃料板振动强烈耦合<sup>[10]</sup>。此后又有多位学者相继进行了理论和实验研究，给出了各种各样的机理解释、振动起始预计公式和失稳的临界流速公式。Pavone（1982 年）用单板两维模型研究了在简支条件和层流条件下板的振动和失稳<sup>[11]</sup>，而 Davis（1985 年）用单板两维模型研究了在更为现实的固支和湍流条件下板的振动和失稳<sup>[12]</sup>。近年来，Kim 和 Davis（1995 年）进一步用多板两维模型研究了在复杂支撑和湍流条件下板的振动和失稳<sup>[13]</sup>，Guo 和 Paidoussis（2000 年）虽然仍旧用单板两维模型研究了在固支条件和理想不可压流体条件下板的振动和失稳，但在求解方法上，作了新的尝试<sup>[14]</sup>。

### 1.2.2 国内研究现状

在国内，西南交通大学的杨翊仁较早进行板状梁结构的流致振动的理论研究，在国家自然科学基金的资助下，陈贵清和杨翊仁（2003 年）研究了受非线性支承的板状梁结构流致振动问题。采用二维不可压缩粘性流体模型，建立了板状梁的运动

微分方程, 研究非线性支承情况下的流体流速对振幅的影响, 并对计算结果进行了分析, 结果表明在非线性支承下板状梁结构在流体动压力作用下存在着复杂的动力学行为, 如极限环颤振和屈曲等<sup>[15]</sup>。鲁丽和杨翊仁(2004年)又进一步研究了这一复杂运动现象的动力学特性<sup>[16]</sup>。且2006年又研究了刚性矩形框内板状结构的流固耦合影响。基于粘性流理论推导出多层板状结构和刚性矩形框内的流体动压近似理论解析表达式, 得到系统的附加质量系数、附加刚度系数和附加阻尼系数。结果表明流体的耦合系数与板间距相关: 附加质量系数与板间距的大小成正比; 附加刚度和附加阻尼系数与板间距的立方成反比<sup>[17]</sup>。南华大学的崔振东、唐益群和郭长青等人(2007年)对叠层板状结构的流致振动与稳定性进行研究, 在对叠层板状元件的固有振动特性的理论分析中, 提出了单梁与多梁对接的力学模型; 在研究叠层板状元件湿模态固有频率与振型的理论分析与计算中, 采用了以干模态振型函数序列作为试函数对复模态振型方程进行变分求解的方法, 在研究叠层板状元件的稳定性时, 采用直接法和变分法对其临界流速和失稳挠曲线进行分析和计算; 此外, 对结构在非线性支撑下的流致振动与稳定性作了初步研究<sup>[18]</sup>。

另一方面, 作为工程验证, 清华大学的闵刚、薄涵亮和姜胜耀等(2004年)对板型燃料组件额定流速流致振动进行了实验研究<sup>[19]</sup>。后来又针对贫铀叠层板型燃料组件, 采用了基于虚拟仪器的软测量方法, 在常温、常压下, 进行了其在经受冷却剂冲刷时的振动实验。得到了在0-18.8m/sec的流速范围内的振动动态响应时间域和频率域的结果。发现振幅随流速的增大而不断增大, 但在整个范围内未观测到流弹性失稳引起的大幅振动现象<sup>[20]</sup>。中国核动力研究设计院二所的喻丹萍等(2004年)对中国先进研究堆(CARR)全堆芯进行了流致振动试验, 确论了CARR的平行板燃料组件的流致振动的安全性, 实验采用水电阻传感器测量了相邻燃料板间总体位移, 但没有能测出燃料板振型<sup>[21]</sup>。

从上述国内外的研究现状来看, 平行板燃料组件流致振动现象涉及粘性流体流动与平行板群振动之间的强耦合, 在理论上属于非线性的流固耦合问题, 学术上具有独特的魅力, 因此吸引中外学者40多年来持续不断的研究; 同时由于平行板燃料组件在先进核反应堆中有独特的应用, 所以对平行板燃料组件的流致振动特性的研究具有重大的工程价值。由于其表现出的强非线性, 理论解很难求得, 有时不得不做较多的假设, 因此结果与实际情况有一定差距, 难于阐明其机理实质; 另一方面由于燃料板极薄, 板间距极小, 流速极高, 在流场和振动测量上, 传统测量技术在传感器尺寸, 传感器及引线的粘贴强度等方面难于全面达到要求, 新测量技术又有待进一步开发, 所以测点位置、信号种类、精确度和可靠度等等都会存在的问题, 现象本身很难精细把握。综上所述, 平行板燃料组件流致振动的研究有必要继续进行下去, 而且要改变思路, 采用新思想新方法。

## 1.3 本文的创新点研究内容

### 1.3.1 本文的创新点

以前的研究一般用理论与实验相结合的方法，但是实验因平行板之间的间距太小，传感器难以布置，所以难以获得详细而精确的流场和平板振动信息。本文是流致振动的机理研究，采用一种新方法：将燃料组件简化为一种理想的单板结构，即流道尺寸大于燃料组件实际的板间距，平板采用四角固定方式，研究这种理想结构的单板在不同工况下的流致振动现象。并且理想结构的实验板间距较大，无测量难题，这样本方法逾越了以前研究的一些技术障碍。

### 1.3.2 本文的研究内容

本文的课题来源于陆道纲教授申请的国家自然科学基金项目《先进核反应堆平行板燃料组件流固耦合研究》。本次实验是整个实验内容的第一步，主要研究内容是进行假想单板结构的实验研究，实验通过逐一改变通道中的流速，研究单块柔性平板在矩形通道内的流致振动情况。本次实验是对流致振动机理的研究，为以后的平行板燃料组件的流致振动实验打下基础，对于揭示平行板燃料组件流固耦合状况下的振动机理具有重要意义。本文共包括以下六个部分：

#### 1) 实验回路、实验段的设计

包括回路水箱、泵、管径、阀门的选择，流量及压力表的选择及布置，过渡段、紊流段的设计，实验段板子完全固定和两端固定方法的设计，其中两端固定时要考虑到板子需容易更换。

#### 2) 测量仪器的选购

流速测量所使用的粒子成像测速技术（Particle Image Velocimetry, PIV）仪器由国家重点实验室借得；需要购买的测量仪器分别有位移传感器、加速度传感器、探针式压力传感器、防水应变片和采集仪器包括软硬件在内的全套仪器设备。

#### 3) 数值模拟

应用 CFX 数值模拟软件按照实验条件进行数值模拟，得到通道中的流速和压力分布，并与实验结果进行对比。

#### 4) 流场测量实验

使用 PIV 仪器测得理想单板模型流道在不同工况下的流速分布情况，并对实验结果进行分析。

#### 5) 准备实验

在进行流致振动实验前，先做一些准备实验，包括：对加速度传感器、激

光位移传感器和防水应变片进行验证实验，保证仪器测量结果的准确性；实验过程中使用的平板的实际弹性模量测量实验；平板在空气中的固有频率测试实验。

#### 6) 流致振动实验

对矩形通道中的理想单板结构进行不同流速下的振动测量，测得位移、频率随流速的变化规律，把握流动与振动强耦合的基本特征和规律。

## 第二章 实验方法

本章主要讲述实验过程中所用到的一些理论方法，包括仪器的选择方法，实验过程中流速测量和振动测量的方法，以及实验数据的采集、分析、处理方法等。

### 2.1 仪器选择方法

本次实验主要需得到矩形通道中的流场信息和单板振动信息，因此需要购买振动测量的传感器和流场测量需要使用的仪器，以及配套的数据采集仪器和计算机等。

#### 2.1.1 传感器的选择

工程振动量值的物理参数常用位移、速度和加速度来表示。由于在通常的频率范围内振动位移幅值量很小，且位移、速度和加速度之间都可互相转换，因此只需选择一种参数进行测量即可。

描述振动信号的另一重要参数是信号的频率。绝大多数的工程振动信号均可分解成一系列特定频率和幅值的正弦信号，因此，对某一振动信号的测量，实际上是对组成该振动信号的正弦频率分量的测量。对传感器主要性能指标的考核也是根据传感器在其规定的频率范围内测量幅值精度的高低来评定。图 2-1 即为振动测量时测量参数的参考范围<sup>[22]</sup>。一般来说，在频率较低时，加速度数值不大，宜测量位移；而频率较高时，加速度数值很大，宜测量加速度；在中等频率时，则宜测量速度。所以在实际使用中振动量的大小一般用加速度的值来度量。常用单位为：米/秒<sup>2</sup> ( $m/s^2$ )，或重力加速度(g)。

最常用的振动测量传感器按各自的工作原理可分为压电式、压阻式、电容式、电感式以及光电式。压电式加速度传感器因为具有测量频率范围宽、量程大、体积小、重量轻、对被测件的影响小以及安装使用方便，所以成为最常用的振动测量传感器。

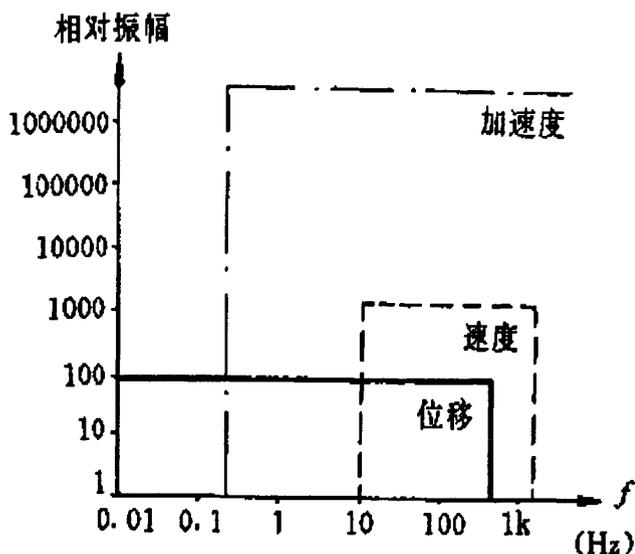


图 2-1 振动测量参数的参考范围

传感器的性能指标包括<sup>[23-24]</sup>：

1) 灵敏度

指沿着传感器测量轴方向对单位振动量输入  $x$  可获得的电压信号输出值  $u$ ，即  $s=u/x$ 。与灵敏度相关的一个指标是分辨率，这是指输出电压变化量  $\Delta u$  可加辨认的最小机械振动输入变化量  $\Delta x$  的大小。为了测量出微小的振动变化，传感器应有较高的灵敏度。

2) 使用频率范围

指灵敏度随频率而变化的量值不超出给定误差的频率区间。其两端分别为频率下限和上限。为了测量静态机械量，传感器应具有零频率响应特性。传感器的使用频率范围，除和传感器本身的频率响应特性有关外，还和传感器安装条件有关（主要影响频率上限）。

3) 动态范围

动态范围即可测量的量程，是指灵敏度随幅值的变化量不超出给定误差限的输入机械量的幅值范围。在此范围内，输出电压和机械输入量成正比，所以也称为线性范围。动态范围一般不用绝对量数值表示，而用分贝做单位，这是因为被测振值变化幅度过大的缘故，以分贝级表示，这样使用能更方便一些。

4) 相移

指输入简谐振动时，输出同频电压信号相对输入量的相位滞后量。相移的存在有可能使输出的合成波形产生畸变，为避免输出失真，要求相移值为零或  $\pi$ ，或者随频率成正比变化。

5) 环境条件

包括对环境温度、工作温度、电磁场屏蔽等的要求。

## 6) 采样及量化误差

模拟信号离散采样过程即模/数 (A/D) 转换的过程, 包括采样、量化、编码等内容。

流速测量使用 PIV 仪器, 这个仪器由国家重点实验室借得, 有关仪器的具体介绍可以参见 2.2.1 的流速测量方法和第三章的测量仪器介绍。

## 2.2 测量方法

### 2.2.1 流速测量方法

PIV 技术是一种基于流场图像相互分析的非接触式二维流场测量技术。该技术具有能够实现无扰动、精确有效测量二维流场的流速分布形式的特点, 因此, 目前在各领域应用都非常广泛。

#### 2.2.1.1 PIV 技术理论

PIV 技术从本质上而言是图像分析技术的一种, 它由脉冲激光源通过柱面镜和球面镜形成的片光源, 照亮流场中的一个很薄的 (约 2mm 厚) 流场层片; 在与片光源相垂直方向的 CCD 或照相机摄下了流场层片中的流动粒子的图像; 然后把图像数字化送入计算机, 利用自相关或互相关原理进行图像处理<sup>[25-26]</sup>。PIV 光路系统和原理图见图 2-2。

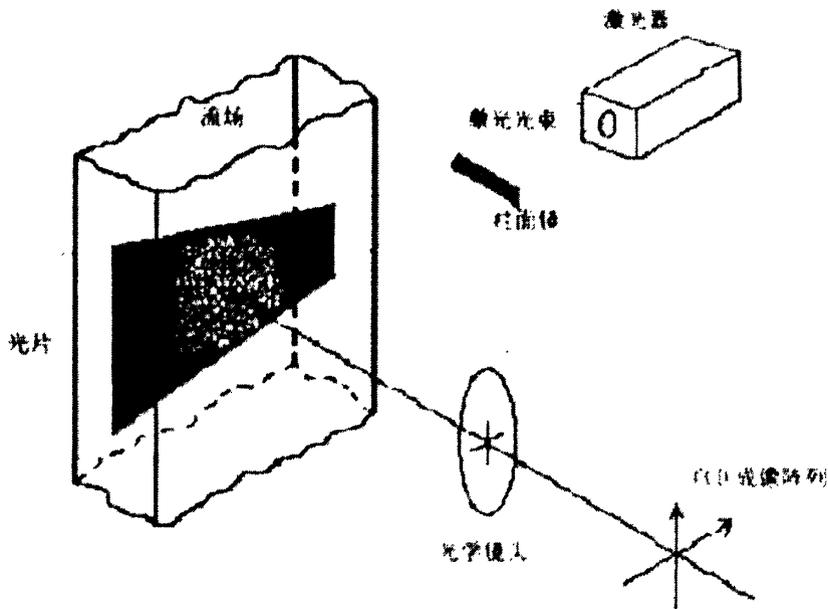


图 2-2 PIV 仪器原理示意图

利用 PIV 技术测量流场时, 需在流场中散播密度适当且跟随性好的示踪粒子, 由示踪粒子的运动来反映水质点的运动, 并用激光对所测平面进行照射, 形成光照平面, 再用 CCD 等摄像设备获得该示踪粒子的图像, 还要对得到得图像进行互相

关分析，以得到流场的二维速度矢量分布。

### 2.2.1.2 实验难点

实验过程中的难点在于：

#### 1) 模型的选择：

选择实验模型时要考虑透光性、避免和消除边界散射激光的影响。PIV 实验模型部分选取实验段板子尾部 150mm 处，采用把边缘两个边界面（与激光打入平面相垂直的平面）涂黑的方法，只露出  $10 \times 150 \text{mm}^2$  的面积供激光打入，在后处理软件过程中也可采用选定图形处理区域的方法来消除边界的影响。模型部分的处理如图 2-3 所示。图中绿色绳子吊着的钢尺为实验过程中标定所用。

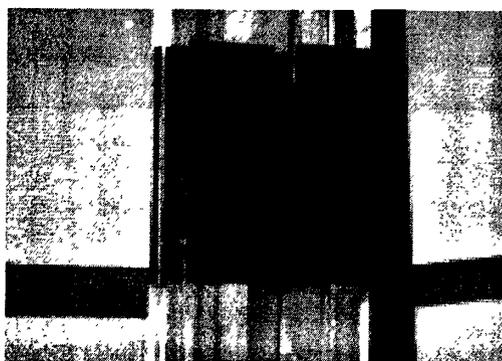


图 2-3 实验模型部分的处理

#### 2) 示踪粒子的添加：

选择示踪粒子时要考虑到粒子的粒径、浓度、分布均匀等问题。粒径越小，比重越小，跟随性越好。粒径越大，散射光强度越大<sup>[27-28]</sup>。

#### 3) 激光光路布置：

要适合实验模型和流场特点，本次实验激光打入平面为沿宽度方向与实验段铝板垂直的平面，CCD 相机摄像平面为与铝板平行的平面。如图 2-4 所示。



图 2-4 激光光路的布置

4) 相机布置:

相机的布置要满足测量要求,镜头的成像距离要求。一般要求相机距拍照平面的距离大约为 40~50mm 左右。且相机放置要水平。

5) 标定过程:

标定的作用是得到实际长度和 CCD 像素之间的关系(放大率),如果不经过标定过程,则得到的速度结果为像素/秒,标定得到像素-位移之间的关系,换算得到位移/秒的真实速度值。

6) 时序的选择:

最重要的是  $dt$  的选择:通常选取  $V_{\max} * dt < 1/4$  查询区间的长度。

### 2.2.1.3 实验操作步骤

1) 选好测量区域,布置好激光光路,添加示踪粒子。

本次实验所使用的粒子是空心玻璃微珠,购自北京立方天地科技发展有限公司,型号 MV-H0105,粒径 1~5 微米,主要参数:球形率 > 95%,主要化学成分  $\text{SiO}_2 > 65\%$ 。

2) 调整光路,安排并固定相机位置。

3) Insight 软件参数设定:包括实验目录的选择、双脉冲激光参数的选择、Free 模式的拍摄,CCD 对焦。

4) 标定:用钢尺标定激光打入平面,并且在软件上标定测量的实际长度。

5) 调节双曝光时间间隔( $\Delta T$ )和激光能量设置,使得 A、B 帧图像清晰度一样,获取实验所需的 PIV 图像。

6) 使用 Tecplot 软件对图像进行后处理,得到所需的速度场显示图。

### 2.2.2 振动测量方法

在反应堆一回路系统中，由于要快速地带走许多的热量，平行板燃料组件要经受冷却剂的高速冲刷，这对它的强度、刚度、稳定性等结构性能提出了很高的要求。为了保证平行板燃料组件在流场振动时保证稳定的结构性能，板子在流场中的固有振动特性的测量和分析成为一个很重要的问题。

固有频率是衡量结构振动特性的一个重要参数，研究表明组件在流场中的固有频率和振型（湿模态）与其在空气中的固有频率和振型（干模态）有一定关系<sup>[29-32]</sup>。因此，在研究平板元件流致振动固有频率特性时，有必要先分析一下其干模态的固有振动特性。另外，目前国内外对平行板燃料组件的流致振动和稳定性的理论分析及计算大都采用两端固定的单板力学模型，因此本次实验也要进行两端固定单板的固有频率测试。

铝板在空气中的固有频率测试的实验对象为流致振动实验中所使用的铝板。实验的支撑台架为刚性支撑台架。由于实验中使用的铝板质量分布不均匀，因此需要测量铝板实际的弹性模量。由此在固有频率测试时，铝板采用两种不同的方式固定，一种为单端固定（悬臂梁式），另一种为两端压紧的固定方式。首先测量出铝板单端固定时的固有频率，然后应用单端固定时的理论计算公式算出铝板实际的弹性模量，再应用此数据结合两端固定时的理论计算公式算出铝板两端固定时的固有频率，与两端固定时铝板的固有频率实验结果相比较。

在进行固有频率实验时，采取对同一个测点进行多次测量并且布置不同测点，这样做的目的不仅能够相互验证测量数据的准确性，还能消除随机噪声的干扰和由于支撑条件的不稳定带来的误差。

本实验采用常温常压水。在额定工况下，中国先进研究堆板状燃料组件的板间流体流速在 10m/sec 左右，因此本实验在 5m/sec 至 15m/sec 之间调整水的流速。在各个实验中，所使用的传感器不同，布置方式也不同，因此具体的测量方法在第四章实验过程中讲述。

## 2.3 数字信号分析方法

数字信号分析技术是振动测试中的一种重要方法，也是近年来测试技术的发展方向。数字信号的测试与模拟信号的测量一样，也是由传感器来完成的。然后将模拟信号转化成数字信号，再利用数字信号处理技术进行分析处理。特别是依据快速傅里叶变换理论的数字式信号分析仪，彻底解决了非平稳信号的频率分析问题。弥补了模拟式频率分析仪的不足。其特点是精度高、速度快、内容丰富，许多在模拟量分析中难于实现的实时分析，在数字分析中却十分容易实现<sup>[33-34]</sup>。

### 2.3.1 信号采样

采样也称抽样,是信号在时间上的离散化,即按照一定时间间隔 $\Delta t$ 在模拟信号 $x(t)$ 上逐点采取其瞬时值。它是通过采样脉冲和模拟信号相乘来实现的。数据采样中以采样频率的选择最为重要。采样频率越高,采样点数就越密,所得离散信号就越逼近于原信号。但过高的采样频率并不可取,对固定长度( $T$ )的信号,采集到过大的数据量( $N=T/\Delta t$ ),给计算机增加不必要的计算工作量和存储空间;若数据量( $N$ )限定,则采样时间过短,会导致一些数据信息被排斥在外。采样频率过低,采样点间隔过远,则离散信号不足以反映原有信号波形特征,无法使信号复原,造成信号混淆。把本该是高频的信号误认为低频信号。合理的采样间隔应该是即不会造成信号混淆又不过度增加计算机的工作量。采样定理证明,不产生频率混迭的最低采样频率 $f_s$ 应为信号中截止频率 $f_m$ 的两倍,即 $f_s \geq 2f_m$ ,考虑到计算机二进制表示方式的要求,一般取 $f_s=(2.56\sim 4)f_m$ <sup>[27]</sup>。

在数据采集过程中可能会出现频率混淆现象,减小频率混淆的方法有提高采样频率和采用抗混淆滤波器。抗混淆滤波器是一个低通滤波器,理想的抗混淆滤波器具有理想的低通滤波特性,即具有理想的截止特性。在信号处理过程中,常常将上述两种方法联合使用,即先采用抗混淆滤波器滤波,再提高采样频率对信号进行采样和处理,根据所采用的抗混淆滤波器的截止特性来确定采样频率的大小,一般将采样频率 $f_s$ 提高到截止频率 $f_m$ 的2.5~5倍。

### 2.3.2 滤波

在采得的信号中,总是混有干扰成分的,此即所谓噪声,噪声过大,有用信号不突出,便难以做出准确的故障诊断。在技术上用信噪比来衡量信号与噪声的比例关系,用符号 $N/S$ 表示。在做信号分析前,设法减少噪声干扰的影响,提高信噪比是信号预处理的一项主要内容。提高信噪比的途径主要有时域平均和滤波两种方法。

滤波的主要目的是设法使噪声与有用信号分离,并予以抑制和消除,滤波有模拟滤波和数字滤波两种方式,共有低通、高通、带通和带阻等四种基本类型。

采样定理只保证了信号不被歪曲为低频信号,但不能保证不受高频信号的干扰,如果传感器输出的信号中含有比所需信号频率还高的频率成分,A/D板同样会以所选采样频率加以采样,混入有用信号之中(虽然不是噪声的原来面目,而是被歪曲了的能量,也是对真正信息的干扰)。故此在采样前,应把比所需信号更高的频率成分滤掉,这就是滤波<sup>[35]</sup>。

### 2.3.3 傅立叶变换

傅立叶变换是数字信号处理领域一种很重要的算法。傅立叶原理表明：任何连续测量的时序或信号，都可以表示为不同频率的正弦波信号的无限叠加。而根据该原理创立的傅立叶变换算法利用直接测量到的原始信号，以累加方式来计算该信号中不同正弦波信号的频率、振幅和相位<sup>[36]</sup>。傅立叶变换将原来难以处理的时域信号转换成了易于分析的频域信号（信号的频谱），可以利用一些工具对这些频域信号进行处理、加工。最后还可以利用傅立叶反变换将这些频域信号转换成时域信号。傅立叶变换可以利用数字计算机快速的实现（其算法称为快速傅立叶变换算法（FFT））。正是由于傅立叶变换有上述的良好性质,所以它在物理学、数论、组合数学、信号处理、概率、统计、声学、光学等领域都有着广泛的应用。

## 2.4 小结

基于本实验目的，总结了进行实验测量时所需仪器的选购要求及注意事项、实验的测量方法和实验数据处理方法：

- 1) 测量仪器的选择：讲述了在选购振动测量传感器时需要注意的一些参数的选择。
- 2) 测量方法：讲述了流场测量和振动测量的方法，其中在流场测量方法中讲解了 PIV 仪器的原理、实验难点和操作步骤。
- 3) 数据处理：讲述了实验数据采集、分析及处理需要用到的几个知识点，包括信号采样、滤波和傅立叶变换。

### 第三章 实验装置和测量系统

板状燃料组件流致振动实验台架由实验回路、实验本体、控制系统和测量系统组成。其中实验回路提供实验的冲刷流场，控制系统只需控制实验过程中所需的流量，测量系统需获取实验所得到的流速分布情况和板子的振动信息。

#### 3.1 实验回路

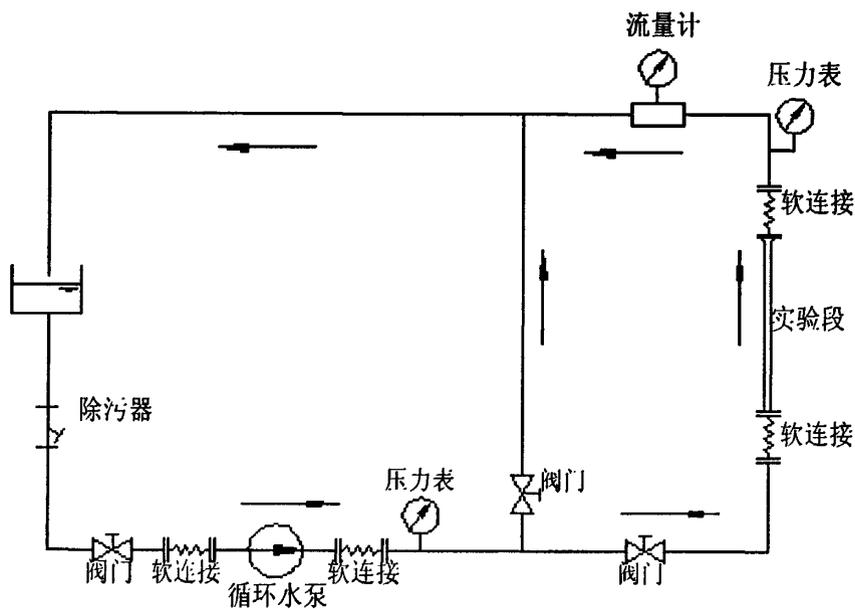


图 3-1 实验回路示意图

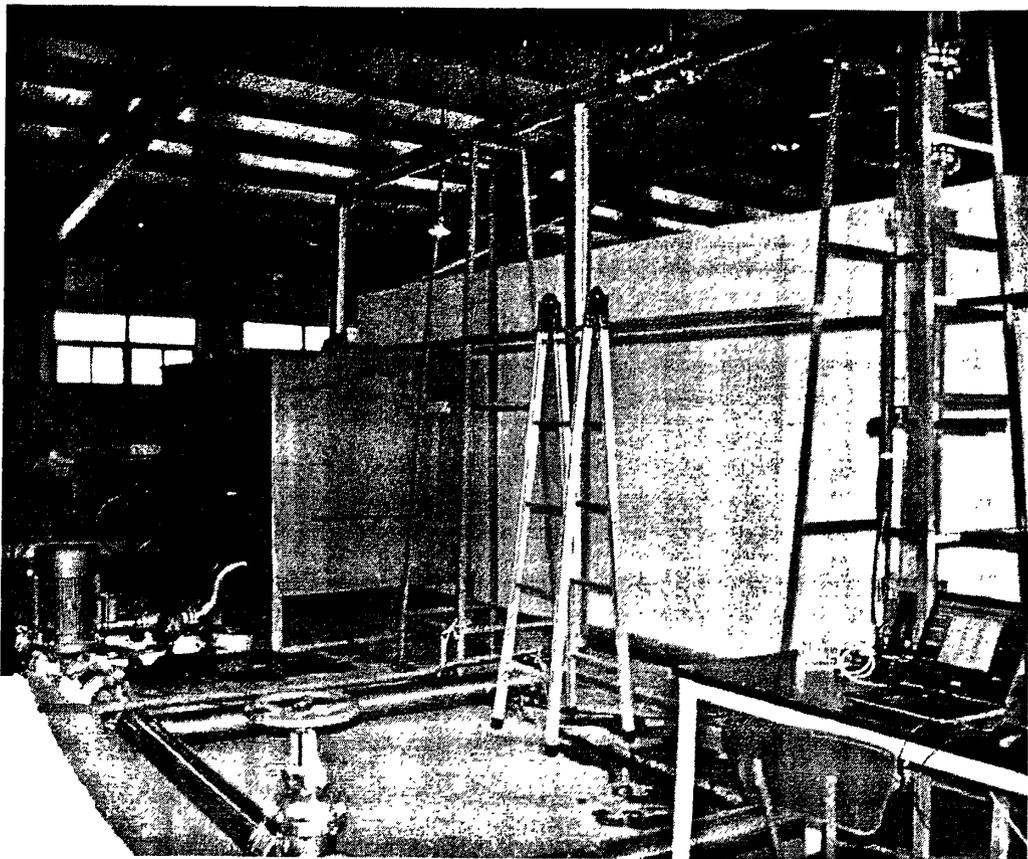


图 3-2 实验回路实体照片

实验回路提供实验的冲刷流场，示意图见图 3-1，实验台照片见图 3-2。包括的主要部件有水箱、水泵、软连接管、阀门、流量计、压力表等。其中各部分的设计过程如下：

### 3.1.1 实验回路流量的计算

按照实验段已知要求计算流量：

由已知条件：板厚  $D = 2.0 \times 10^{-3} m$ ，板宽  $S = 8.0 \times 10^{-2} m$ ，板长  $l = 0.85 m$ ，板间距  $d = 0.01 m$ ，板间流速  $v = 5 \sim 15 m/s$ ；

其中： $D$ 为， $S$ 为， $l$ 为， $d$ 为板间距， $v$ 为板间流速。

可得最大和最小体积流量：

$$Q_{\max} = 2 * d * S * v_{\max} = 2 \times 0.01 \times 0.08 \times 15 = 0.024 \frac{m^3}{s} = 86.4 m^3/h$$

$$Q_{\min} = 2 * d * S * v_{\min} = 2 \times 0.01 \times 0.08 \times 5 = 28.8 m^3/h$$

### 3.1.2 管道参数的选择

按照 3.1.1 计算出来的流量选取主管道参数：

管径： $d = 12.5 cm$  流量： $Q = 97.2 m^3/h$  流速： $v = 2.2 m/s$

参考管径/流速/流量对照表，计算得出实际管流速：

管径:  $d = 12.5\text{cm}$  流量:  $Q = 86.4\text{m}^3/\text{h}$  流速:  $v = 1.96\text{m/s}$ ,

$$\text{雷诺数: } \text{Re} = \frac{ud}{\nu} = \frac{1.96 \times 0.125}{10^{-6}} = 2.45 \times 10^5 > 2000, \text{ 为湍流。}$$

根据《化工管路手册》<sup>[37]</sup>选取管道标准为: 内径  $d_1 = 12.5\text{cm}$  外径  $d_2 = 13.3\text{cm}$  拟选择碳素钢管 YB231-70, 管道布置应尽可能布置成直管, 尽量减小管道中的附件, 尽量缩小管道长度, 必须转弯的时候, 弯头的弯曲半径应该是管道直径的 3~5 倍, 角度尽可能大于 90 度。

### 3.1.3 泵的选择

循环泵的作用是提供冲刷实验本体中流场的动力。

由已知参数:  $Q = 86.4\text{m}^3/\text{h}$ ,  $h = 5\text{m}$

可得:  $p_{\text{功}} = Q * h * \rho * g / 1000 = 86.4 \times 5 \times 1000 \times 9.8 / 3600 \times 1000 = 1.18\text{kw}$

选择单级离心泵, 具体参数为:

立式离心管道泵, 型号为 IRG100-125, 泵通径为 125mm, 最大流量为  $130\text{m}^3/\text{h}$ , 最大扬程为 36.1m, 功率为 11KW, 经测试流量稳定, 符合实验要求。

### 3.1.4 流量计的选择

流量计的作用是测量回路循环水的流量 (可折算出流速)。选用法兰连接式涡轮流量计, 型号为 LWGY-100, 通径为 100mm, 量程为  $20\text{m}^3/\text{h} \sim 200\text{m}^3/\text{h}$ 。精度为 0.5%, 流量计前直管段长度不小于 2.5m, 流量计后直管段长度不小于 0.625m。

### 3.1.5 水箱的选择

水箱的作用是提供冲刷试验本体的循环水。对于地面设备的水箱, 一般情况下, 其有效容积应为液压泵每分钟流量的三倍以上。

水箱容积选择<sup>[38]</sup>: 由水箱体积  $V = \frac{86.4}{60} \times 1 \times 3 = 4.32\text{m}^3$ , 拟选水箱尺寸为:

长 \* 宽 \* 高 =  $1.8 * 1.6 * 1.5\text{m}$

### 3.1.6 过渡段及紊流段的选择

由于实验回路是圆形管道, 实验段是矩形结构, 因此需在实验段前后设计一个圆变方形的过渡段。为了保证流道中流速分布均匀, 及尾部流场的测量, 还需在实验段前后设计一个紊流段。

首先采用 CFX 模拟了管道和实验段入口的结合, 并确定紊流段的尺寸。模拟尺寸及所得的流速分布结果如下图所示。

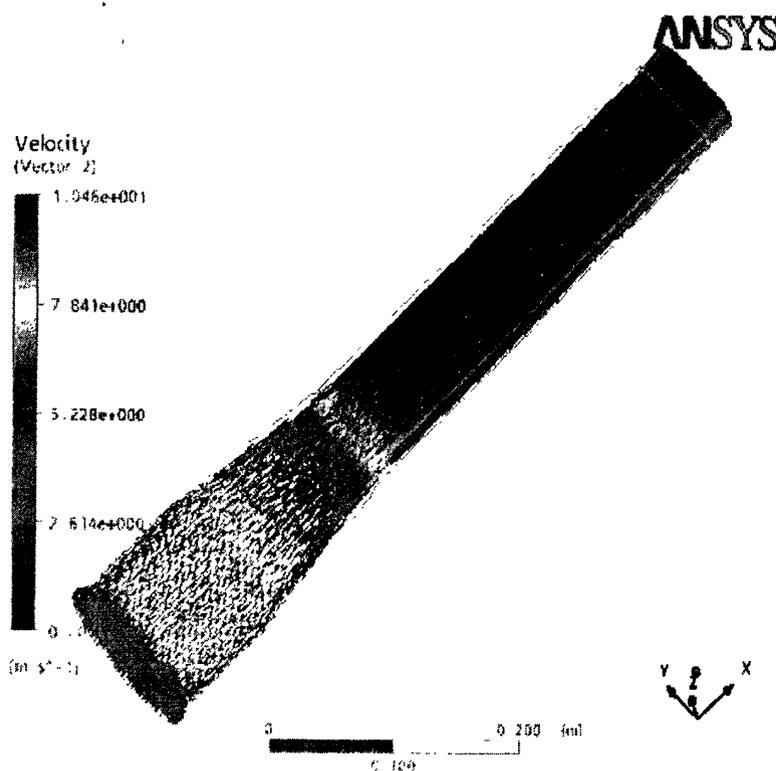


图 3-3 速度矢量分布图

由 CFX 模拟可得当紊流段长度为 150mm 时，板子入口处流速已经分布均匀。为了节省材料，板后紊流段尺寸设计为 100mm，此尺寸足够尾部流场的测量。由于渐缩管收缩角度不宜大于 30 度，本实验按照 20 度设计，过渡段长度设计为 150mm，设计后角度为 20.1 度。满足设计要求。

### 3.1.7 实验段材料的选择

中间薄板的等效刚度计算,受分布载荷的简支梁,最大挠度为:  $u_{\max} = \frac{-5pl^4}{384EI}$ , 假

设两种情况下板的受力相同,  $\frac{u_{\max 1}}{0.232} = \frac{u_{\max 2}}{1} \Rightarrow \frac{1}{0.232 * E_1 I_1} = \frac{1}{E_2 I_2}$  即:

$$E_1 = \frac{I_2}{0.232 * I_1} E_2 = \frac{D_1 S_1^3}{0.232 * D_2 S_2^3} E_2 = \frac{1.36 * 76^3}{0.232 * 2 * 80} * 7 \times 10^{10} = 9.47 \times 10^9 \text{ pa}。$$

选择和它相同的材料。经查询,有机玻璃足以满足要求。为了保证实验段的刚性,采用 30mm 厚的有机玻璃板。

### 3.1.8 实验段结构的选择

实验段设计两套:一种要求通道内板子沿长度方向的两端全部固死,不用更换板子,因此实验段的结构设计成一个整体即可;另一种要求板子容易更换,且板子

四角固定。因此为了方便实验段中板子的更换，将矩形通道设计成两部分，采用螺栓连接，接口处两周塞上橡皮圈，安装时涂上玻璃胶以防漏水。

### 3.1.9 阀门的选择

阀门的作用是调节实验本体的流量使其冲刷流速满足  $5\sim 15\text{m/sec}$ 。泵的排水侧必须装设阀门（球阀或截止阀等）和逆止阀。阀门用来调节泵的工况点，逆止阀在液体倒流时可防止泵反转，并确保泵免受水锤的打击。

### 3.1.10 软连接管的选择

为了减小循环泵及回路管道振动对实验本体造成的影响，在泵的前后和实验段前后都安装了软连接管。软连接管的直径为  $125\text{mm}$ ，采用法兰连接。

### 3.1.11 压力表的选择

为了测量回路中某处的压力值，在泵出口处和实验段出口处分别安装一个压力表，压力表量程为  $1\text{MP}$ 。

### 3.1.12 其他辅助设备的选择

其他一些辅助设备，如过滤器和实验支撑台架等，依据实验要求选取标准型号，实验回路的支撑台架依据具体环境安装固定。

## 3.2 实验本体

流致振动实验段本体采用厚  $30\text{mm}$  的透明有机玻璃板制成，矩形流道尺寸为  $1100\text{mm}\times 80\text{mm}\times 22\text{mm}$ ，流道中间布置一个柔性平板，将流道平均分为两个截面为  $80\text{mm}\times 10\text{mm}$  的子通道。柔性平板为  $99\%$  含量的铝板，尺寸为  $850\text{mm}\times 78\text{mm}\times 2\text{mm}$ 。实验本体设计两套，设计方法如前 3.1.8 所述。图 3-4 为第二套实验段的实体照片和示意图，照片为激光位移传感器的布置方式，示意图中间点表示应变片和激光位移传感器的测点位置。为了使冷却剂在板子入口处流速分布均匀，在实验本体前后各安装了一个圆变方形的过渡段，且板子固定在实验本体  $100\text{mm}$  后处。

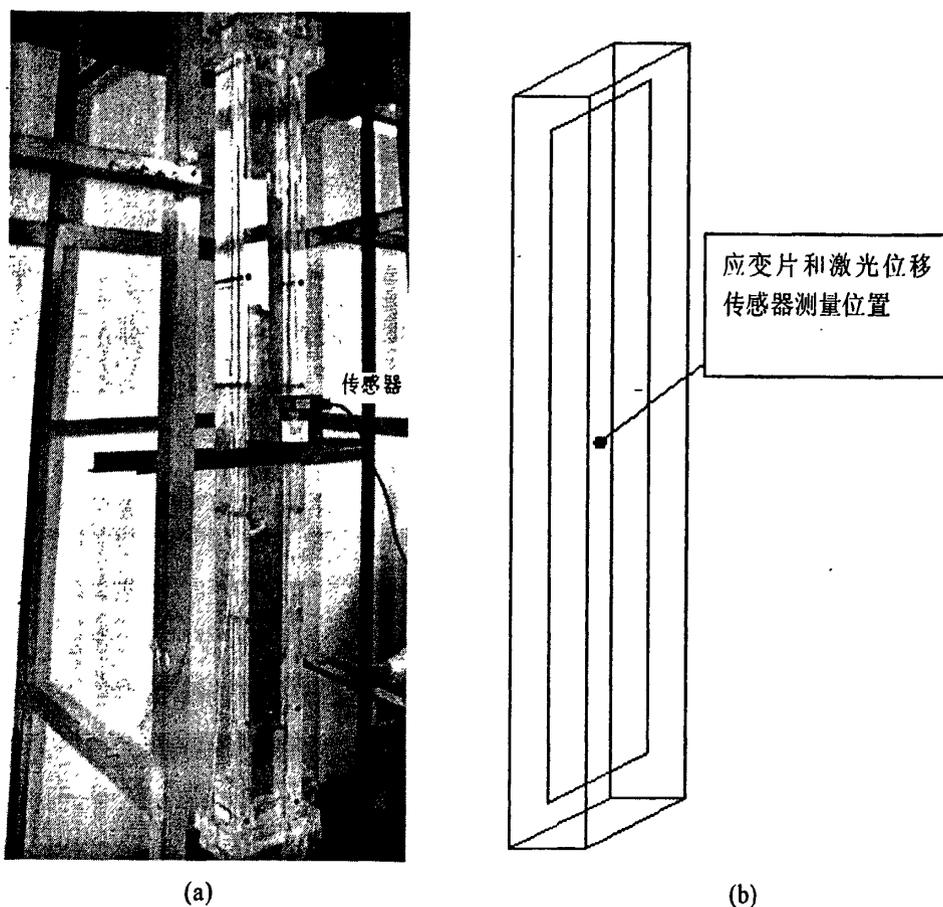


图 3-4 实验段照片及示意图

### 3.3 控制系统

控制系统的任务是对实验台架的启动、运行、停止和事故保护进行控制，使实验台架能够满足实验模拟工况，以便达到对实验对象进行研究的目的。板状燃料组件流致振动实验台架的控制对象主要有循环泵和调节阀等。其中调节阀包括总调节阀、主路调节阀、旁路调节阀和排水阀门，通过人工操作实现对实验所需流量的控制。

在实验过程中，总调节阀和主路调节阀处于全开状态，启动实验回路后，通过调节旁路阀来控制主路的流量，以此满足实验所需工况下的流速。

### 3.4 测量系统

流致振动实验要考察的一个重要内容就是流致振动动态响应与流速分布、流体压力之间的关系，因而确定振动参数和流速分布、流体压力情况是本实验的重点。因此本节主要介绍一下测量流体流速分布、振动频率及位移这些参数的硬件系统和实验过程中使用的软件系统。

### 3.4.1 硬件测量系统

#### 3.4.1.1 振动测量仪器

##### 1) 激光位移传感器

主要参数：型号为 LTC-050-20SA,线性中点为 50mm, 测量范围 $\pm 10\text{mm}$ , 分辨率 $\pm 2.5\mu\text{m}$ 。激光位移传感器的优点在于它不受实验条件的限制, 不受表面物体材质、颜色及发射光源的影响, 能穿透有机玻璃和水在实验本体外灵活布置, 安装方便, 测量精确度高, 能达到 $\pm 2.5\mu\text{m}$ 。

##### 2) 加速度传感器

选自 DYTRAN 公司的 DY 系列 IEPE 型 (电压输出) 传感器, 主要参数: 型号为 3006A, 灵敏度为  $100\text{mV/g}$ , 量程  $50\text{g}$ 。

##### 3) 力锤

压力石英力传感器, 自带小型电荷放大器, 型号 LC0501, 量程: 压缩  $5\text{Kn}$ , 拉伸  $1\text{kN}$ , 灵敏度  $3.75\text{pc/N}$ , 重量  $30\text{gm}$ 。

##### 4) 防水应变片

型号 TJ120-4AA(11), 电阻  $120\Omega$ , 精度等级: A, 购自北京斯创尔建筑测试技术开发有限公司。

##### 5) 5B38 应变调理模块

调理应变片输出, 将  $-10\text{mV} \sim +10\text{mV}$  电压信号转换成  $-5\text{V} \sim +5\text{V}$  电压信号输出。

##### 6) IOtech 采集仪器

型号 Personal Daq/3005, 采集速率能达到  $1\text{MHz}$ , 16 位多功能 USB2.0 接口数据采集模块, 可直接采集  $\text{mV}$  级电压信号和  $\text{V}$  级电压信号, 并且可以直接测量热电偶信号, 8 通道差分/16 通道单端输入, 可以扩展 32 通道差分/64 通道单端输入。

实验中以上仪器的连接关系如图 3-5 所示。

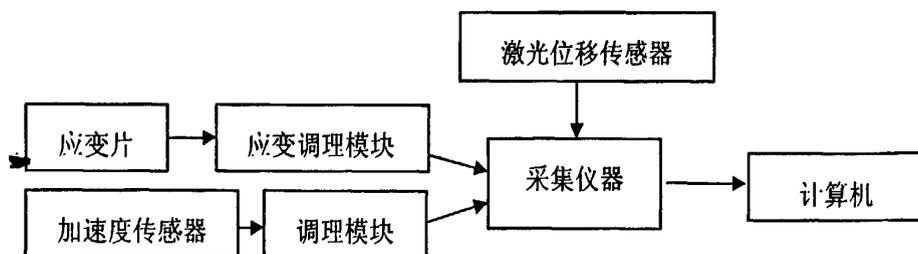


图 3-5 测量仪器连接框架图

### 3.4.1.2 流速测量仪器

本实验所使用的粒子图像测速系统（Particle Image Velocimetry —PIV）仪器由国家重点实验室借得。系统配置主要包括：

#### 1) 双脉冲激光器

Bigsky(NewWave), 主要参数: 200mJ/pulse, 532nm, 15Hz, 3-5ns 脉宽, 1ns Jitter 值, 工作温度 5~40 度, 10%~90%湿度。

#### 2) 光臂

高能激光束全封闭传递, YAG 激光器最高能量输出可达 500mJ/脉冲, 标准长度 -1.8 米。

#### 3) CCD 相机

Powerview 4Mp, 工作温度-5 度~40 度, 10%~80%湿度要求。

#### 4) 同步器

610034, 同步精度 1ns。控制激光器、CCD 相机的工作时序。

#### 5) 控制软件

Insight3G, 包括图像后处理软件 Tecplot。

此 PIV 仪器只能测量二维流场, 所以主要测量与薄板平行平面的流速变化情况与薄板垂直平面的板后旋涡脱落情况。

### 3.4.1.3 辅助测量仪器

除上述的测量系统之外, 为了保证实验在指定的工况下运行, 在实验回路上还布置了压力表和涡街流量计来获得实验回路的压力和流量。

### 3.4.1 软件测量系统

本实验的测量采用一体化在线软件测量系统, 能够实时得到所要的时程曲线和频谱分析图。实验测量所使用的软件系统为 DASyLab 9.0, 该软件具有专业图形化高速数据采集、显示、控制、分析软件包, 图形化界面, 操作简单, 可直接设置各种模块, 如滤波、归零、图形显示, 存储文件等, 方便的完成数据采集、显示、存储、分析、统计、运算、控制等各种功能。本实验测量时的模块设置如图 3-6 所示。

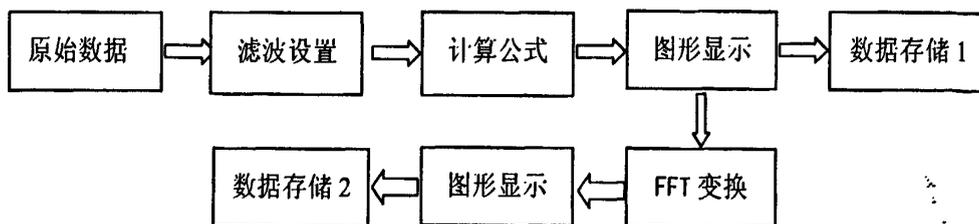
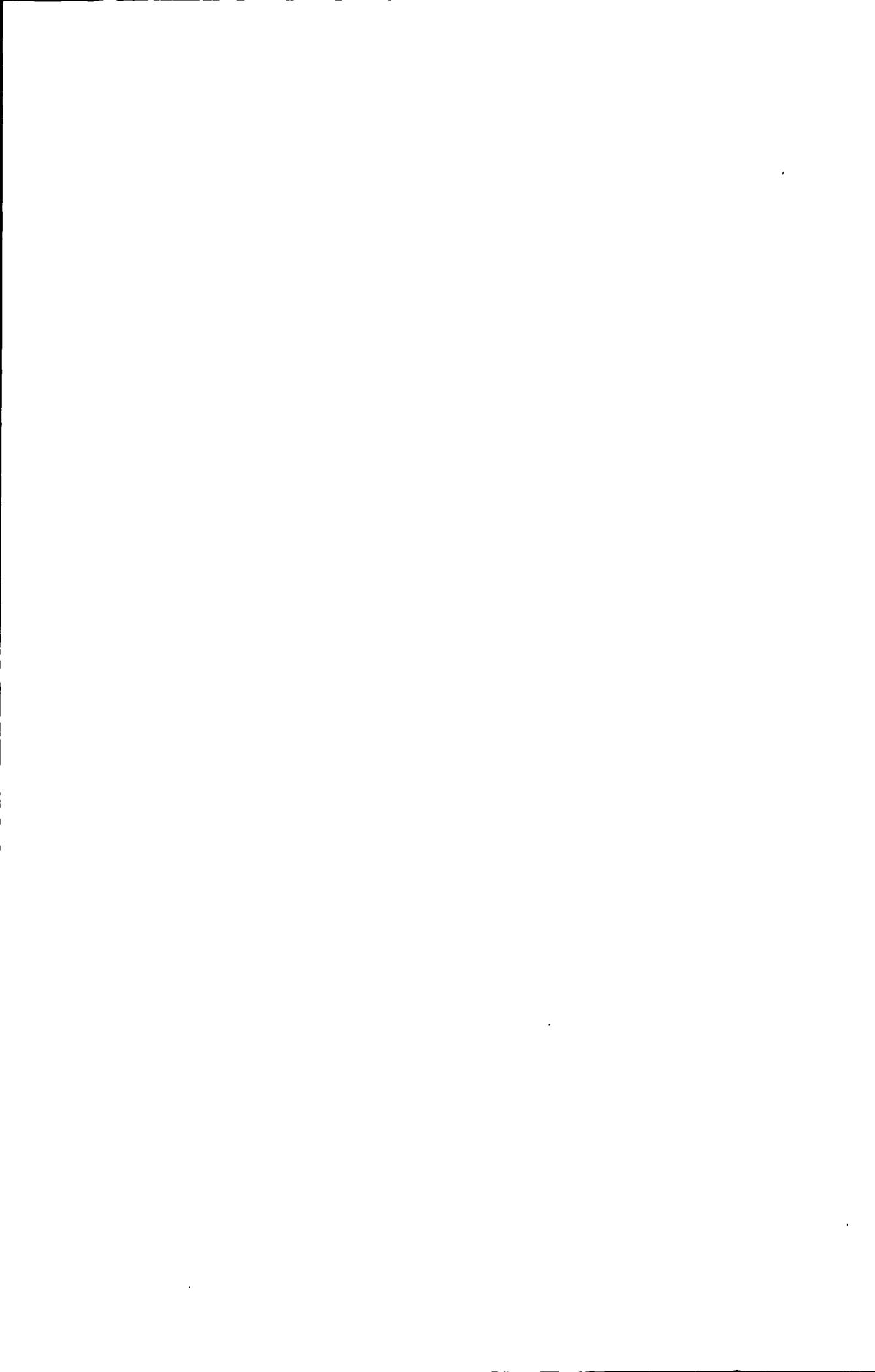


图 3-6 采集系统软件的模块设置示意图

### 3.5 小结

本章总结了实验台架各部分组成的选择和搭建工作，并且讲述了测量系统包括仪器和软件的作用和使用方法：

- 1) 实验台架：讲述了实验回路中管径、水箱、阀门、水泵、软连接管、过渡段和紊流段等的设计、选择和布置。
- 2) 实验本体：重点讲述了实验本体结构的设计方法和材料的选择方法。
- 3) 测量系统：分别讲述了振动测量仪器的一些重要参数及其作用和使用方法、流场测量使用的 PIV 仪器的组成和作用及实验测量时所使用的软件的模块设置方法。



## 第四章 实验过程和结果分析

首先进行的是对实验模型的数值模拟计算，利用分析出来的通道中的速度和压力分布为实验提供参考；其次进行的是矩形通道中的流场测量实验；再次进行的是准备实验，包括仪器的验证实验、铝板实际弹性模量的测试实验、两端固定的固有频率测试实验；最后进行的是不同流速下的流致振动实验。

### 4.1 数值模拟计算分析

本次数值模拟所使用的软件为 ANSYS CFX，它作为世界上唯一采用全隐式耦合算法的大型商业软件。算法上的先进性，丰富的物理模型和前后处理的完善性使 ANSYS CFX 在结果精确性，计算稳定性，计算速度和灵活性上都有优异的表现。

本次数值计算主要得到矩形通道中单块平板在 10m/sec 工况下的流场、压力分布情况，为实验过程中的流场测量和压力测量提供一些参考，方便实验的进行。

#### 4.1.1 几何建模

模型的几何尺寸基本同流致振动实验中的实验段流道尺寸一样，通道尺寸为 22 mm×80 mm×1300mm，板子布置在通道入口后 100mm 处，板子尺寸为 22mm×80 mm×850mm。与实验不同的是，板子采用延长度方向全固定的方式，而不是四角固定方式。几何图形建立时，设置 X 方向为通道宽度方向，即最大值 X=80mm；Y 方向为通道长度方向，即最大值 Y=1300mm；Z 方向为通道高度方向，即最大值 Z=22mm。几何模型建好后需要划分网格，本次采用标准的六面体网格，六面体网格具有精度高的优点，尤其适用于规则的几何图形。图 4-1 所示为本次模型板子尾部区域的网格图，在板子四周与壁面接口处，采用了网格加密的方法，模型一共划分了 93442 个网格。

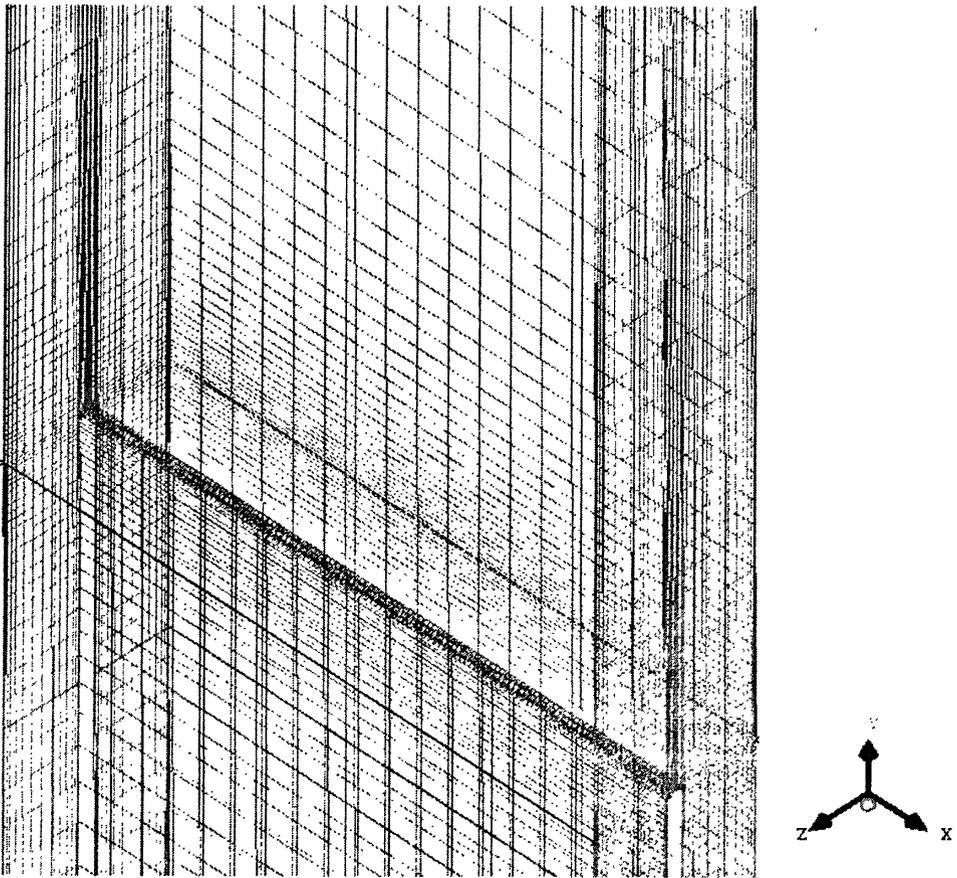


图 4-1 板子尾部网格划分图

#### 4.1.2 设置边界条件

在边界条件设置时采用入口定义速度条件： $v=10\text{m/sec}$ ，出口定义压力条件： $p=0\text{Pa}$ 。图 4-2 所示即为边界条件设置图，左下方的灰色箭头是入口边界，右上方的黄色箭头表示出口边界。

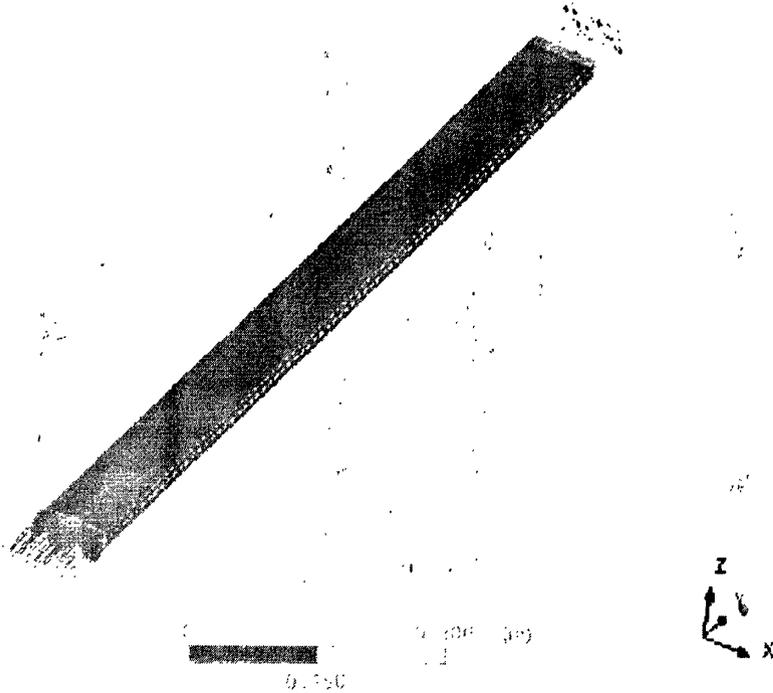


图 4-2 边界条件设置图

### 4.1.3 计算结果及分析

经过 28 步迭代计算后，结果收敛。所得计算结果如下图所示。图 4-3 所示为板子尾部中间 ( $X=40\text{mm}$ )  $YZ$  平面的速度分布云图。由速度标可以看出，在设置通道出口处速度为  $v=10\text{m/sec}$  时，板间最低流速为  $0\text{m/sec}$ ，最高流速达到了  $12.7\text{m/sec}$ ，这与理论计算结果板间流速  $v=11\text{m/sec}$  相比，较为符合。由图 (a) 可以看出板后流场的速度变化情况，结合图 (b) 板后流场放大图可以看出，板后速度变化明显。图 4-5 所示为板后正中点处沿  $Y$  轴方向速度变化曲线。可以看出在板后  $10\text{mm}$  范围内速度变化明显，在板后约  $3\text{mm}$  处速度达到最低值  $v=0.42\text{m/sec}$ 。

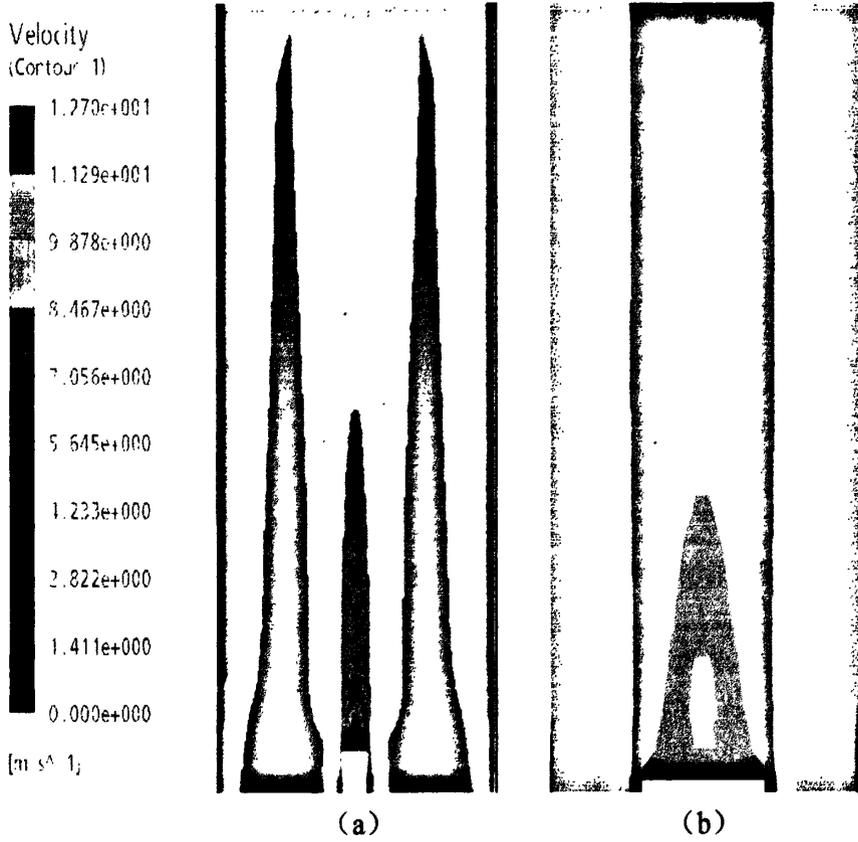


图 4-3 板子尾部中间 (X=40mm) YZ 平面的速度分布云图

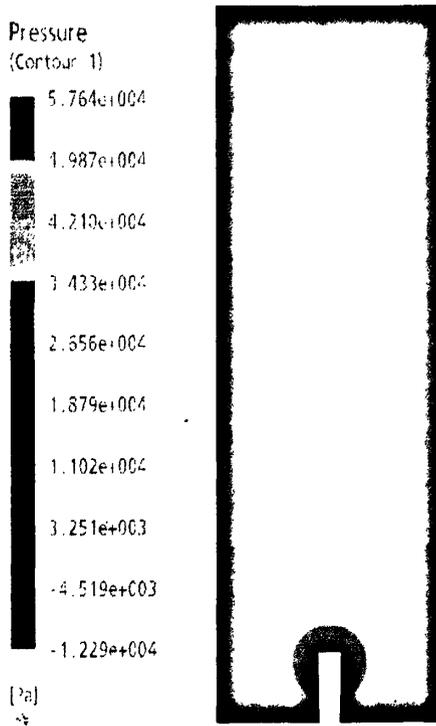


图 4-4 板子尾部中间 (X=40mm) YZ 平面的压力分布图

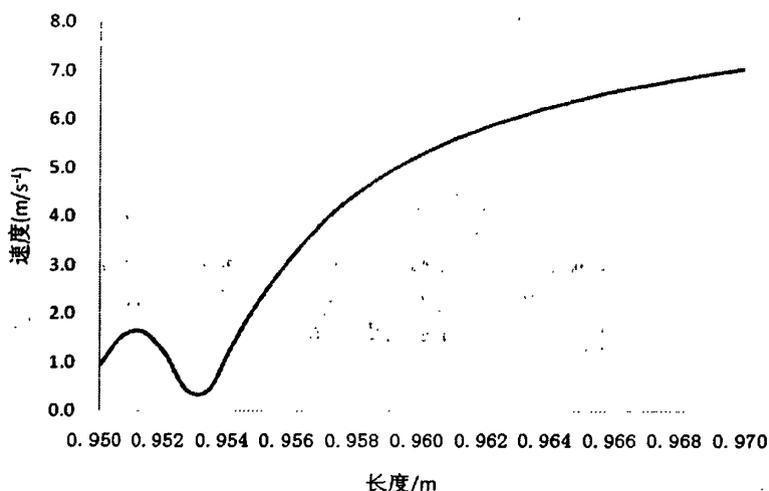


图 4-5 板后沿 Y 轴方向速度变化曲线

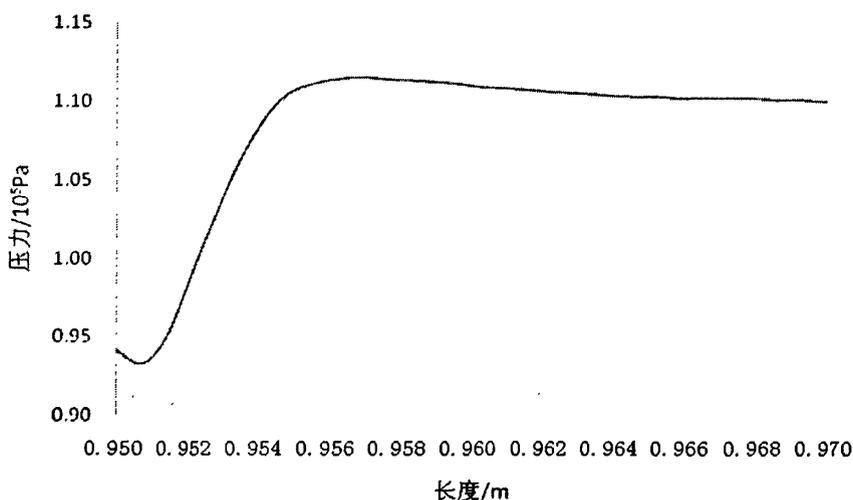


图 4-6 板后沿 Y 轴方向压力变化曲线

图 4-4 所示为板子尾部中间 ( $X=40\text{mm}$ ) YZ 平面的压力分布图。由压力标可以看出通道中最低压力为  $-1.229 \times 10^4 \text{Pa}$ ，最高压力为  $5.764 \times 10^4 \text{Pa}$ 。从计算结果可以看出，在通道入口处压力达到最大值，这与理论结果是一致的。由图 4-4 可以看出板后的压力分布，在板后的 2mm 处的一小部分圆形区域，压力达到了最小值，随后压力变大一些，在板后 10mm 后，压力无变化，均匀分布在  $3.25 \times 10^3 \text{Pa} \sim 1.1 \times 10^4 \text{Pa}$  范围内。图 4-6 所示为同图 4-5 位置处的压力变化曲线。可以看出，板后 1mm 处压力有小幅波动，最低值达到  $9.3 \times 10^4 \text{Pa}$  (绝对压力)，超过板后 10mm 处压力分布均匀，约为  $1.1 \times 10^5 \text{Pa}$ 。

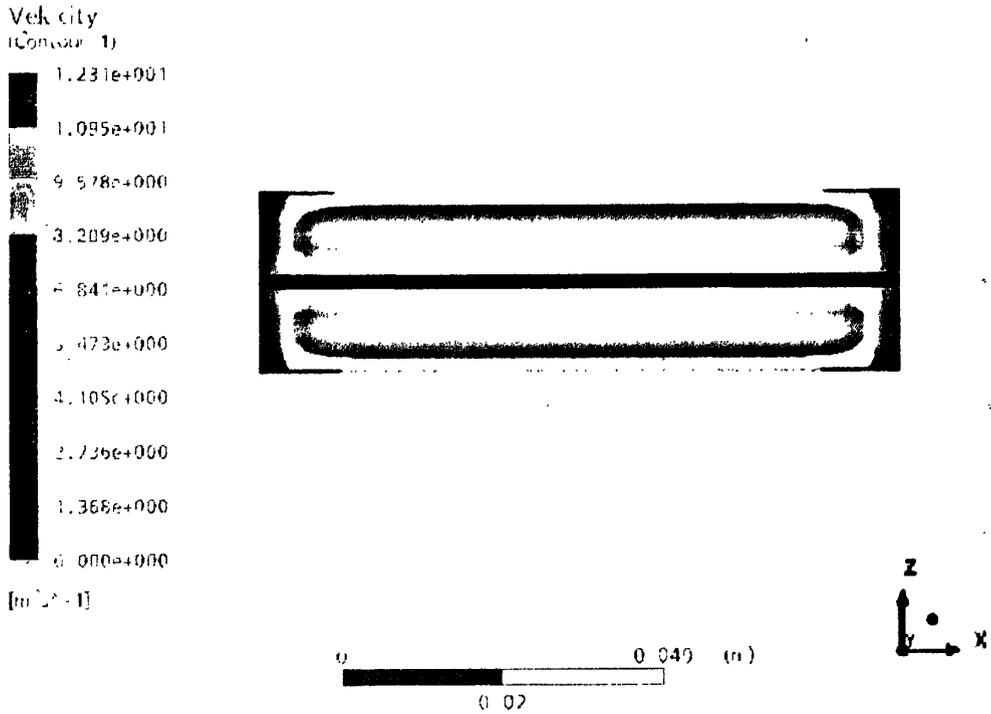


图 4-7 板后 XZ 平面(Y=950mm)的速度分布图

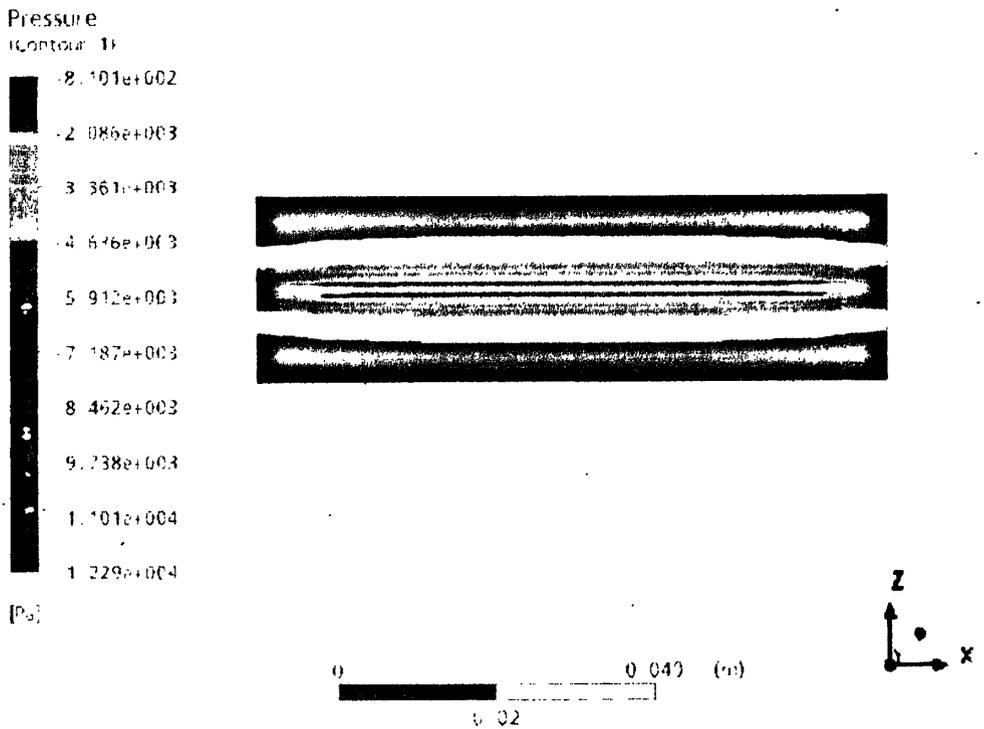


图 4-8 板后 XZ 平面(Y=950mm)的压力分布图

图 4-7 为板后出口处, XZ 平面(Y=950mm)的速度分布图。可以看出板后速度分布较为均匀, 最大值达到了 12.3m/sec, 边界速度为 0。图 4-9 所示板后正中点处沿

Z 轴方向速度变化曲线。由图中可以看出板后速度最低，超过板上方 1mm 后速度达到 11~12m/sec，分布均匀，在通道避免处速度降低到 6m/sec。

图 4-8 为板后出口处，XZ 平面(Y=950mm)的压力分布图。图 4-10 所示板后正中点处沿 Z 轴方向压力变化曲线。可以看出在板上方 1mm 处压力最小，为  $9.4 \times 10^4 \text{Pa}$  然后逐渐变大，在 Z=17mm 后即流道中间位置，压力趋于稳定，为  $1.03 \times 10^5 \text{Pa}$ 。

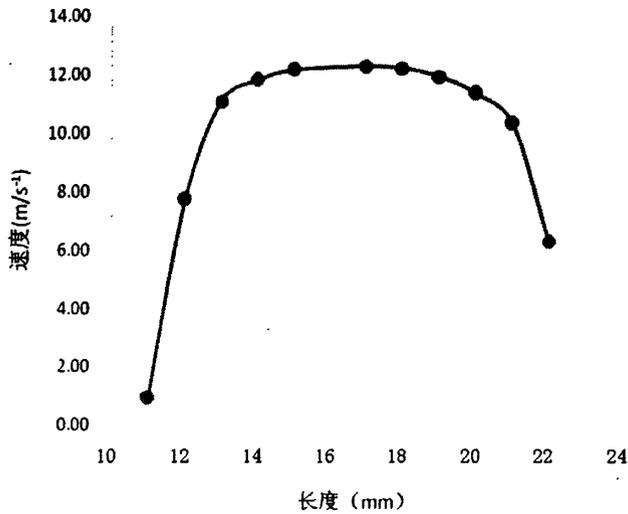


图 4-9 板后沿 Z 轴方向速度变化曲线

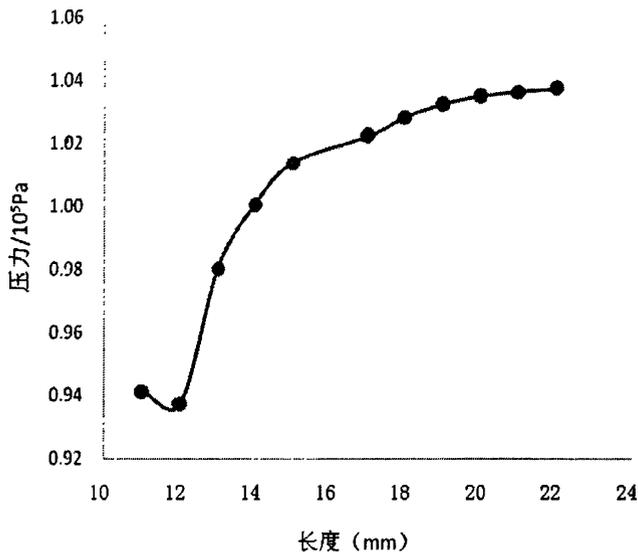


图 4-10 板后沿 Z 轴方向压力变化曲线

通过本次模拟计算，得到了在矩形通道入口处设置  $v=10\text{m/sec}$  时，通道内的速度分布情况和压力分布情况。但是本次计算模型仅为板子固定不动的情况，因此此次数据仅为流致振动实验提供一个参考，在以后的工作中，会继续对板子四角固定

模型进行分析。

## 4.2 流场测量实验

### 4.2.1 实验方法和步骤

本次实验的目的是应用 PIV 仪器测得在不同流速下流速分布情况及板后的旋涡脱落情况。

实验装置和操作步骤如前文（第二章）所述，本次实验使用 PIV 仪器测得在 5m/sec、10m/sec、15m/sec 三种工况下的流速分布情况及板后的旋涡脱落情况。实验台的布置情况如图 4-11 所示。

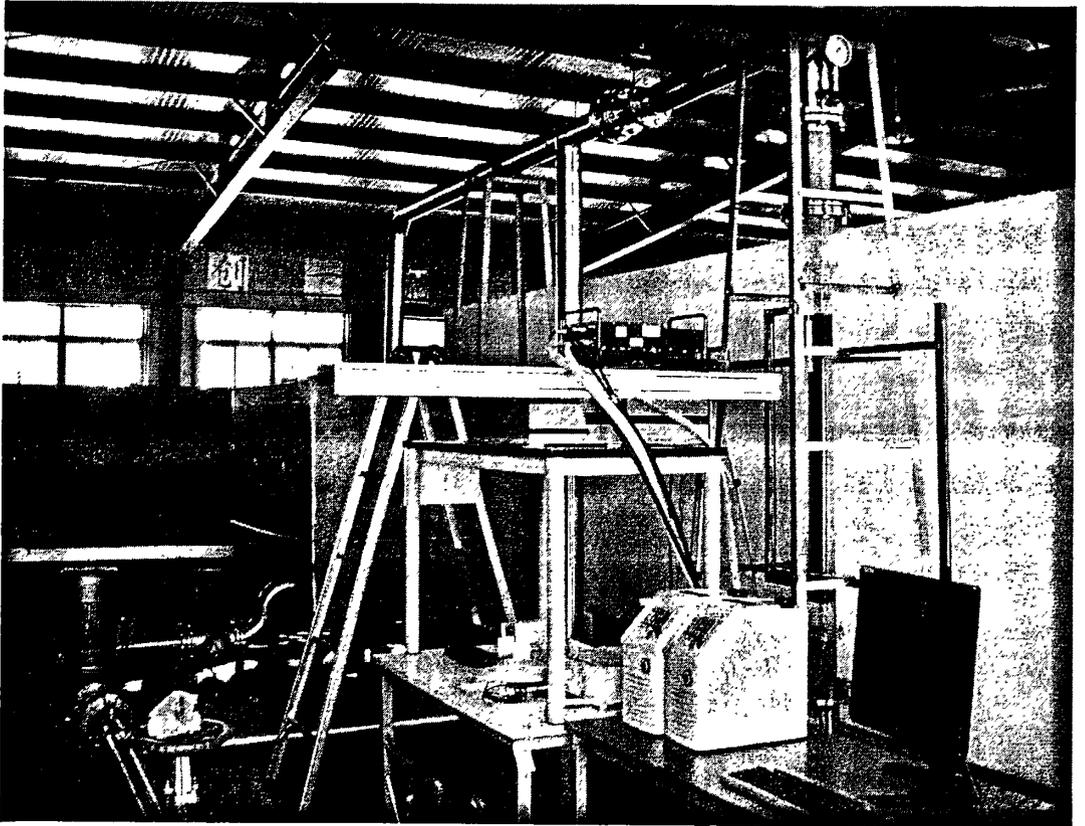


图 4-11 PIV 实验装置布置图

在流速为 5m/sec、10m/sec、15m/sec 三种情况下，分别对  $\Delta T$  在 120-30 之间进行调试，最后得到当流速为 5m/sec 时  $\Delta T$  取 100；10m/sec 时  $\Delta T$  取 80；15m/sec 时  $\Delta T$  取 50，这三种工况下测得的速度值最接近理论计算值。实验结果如下所述。

### 4.2.2 实验结果及分析

图 4-12 所示为 CDD 相机拍摄到的实验段尾部图片，由图中可以看出，拍摄区域面积约为  $22 \times 120 \text{mm}^2$ ，从  $X=40 \text{mm}$  至  $X=62 \text{mm}$  处为流场区域，从  $Y=-122 \text{mm}$  至

Y=-20mm 处即为板后流场区域。

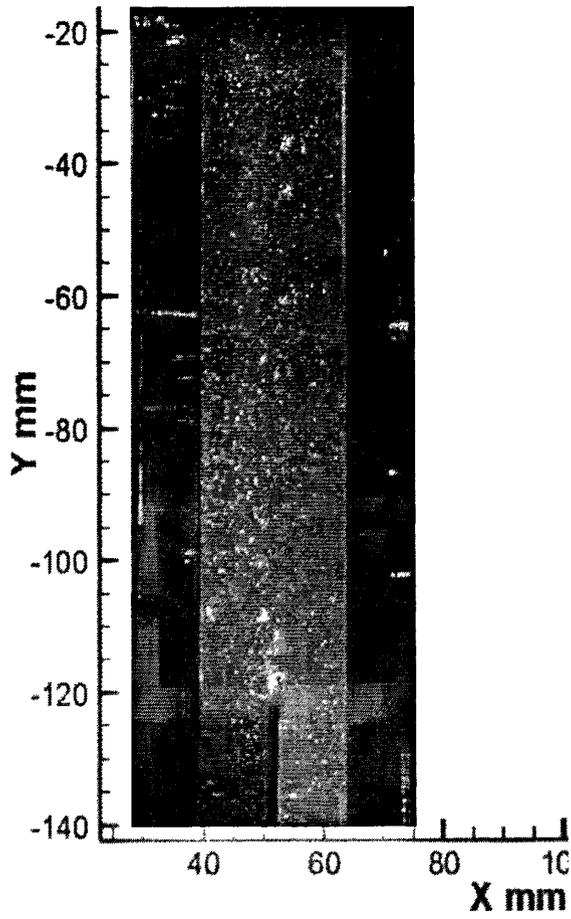


图 4-12 CCD 相机拍摄到的流场区域

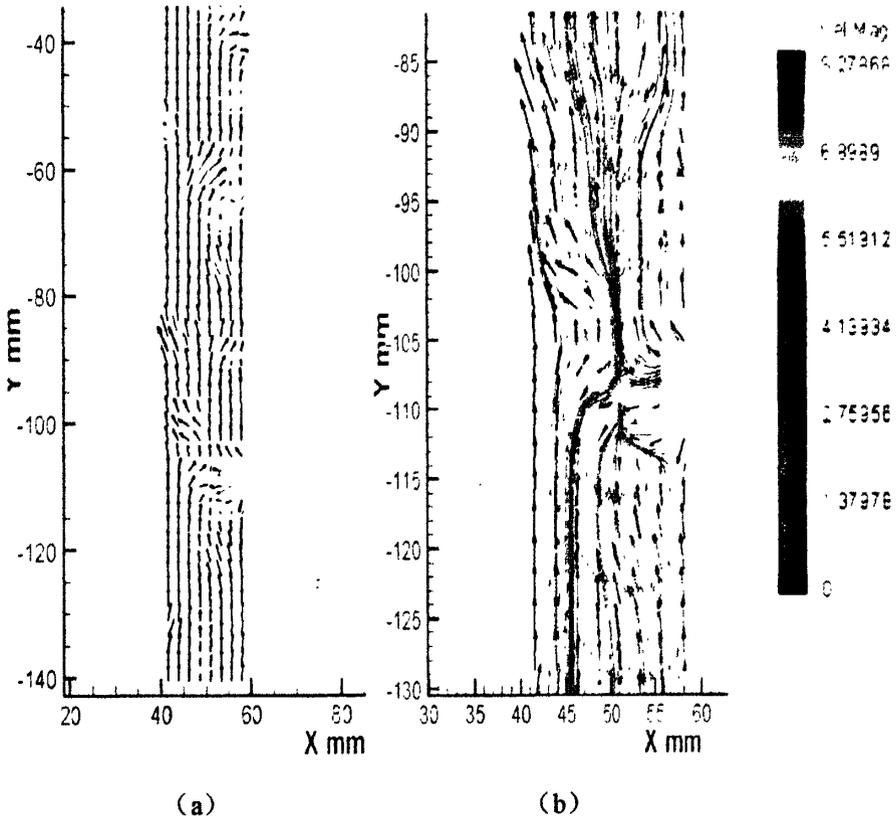


图 4-13 tecplot 处理得到的速度分布图和流线图 (理论计算流速  $v=5.87\text{m/s}$ )

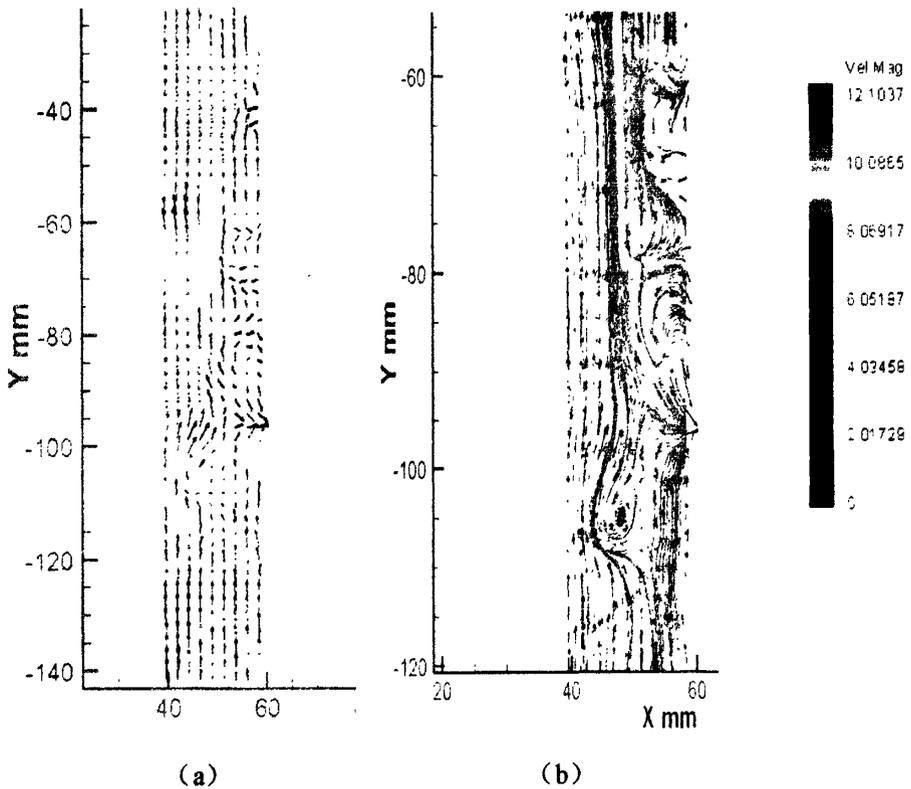


图 4-14 tecplot 处理得到的速度分布图和流线图 (理论计算流速  $v=10.8\text{m/s}$ )

图 4-13 到 4-16 为使用 tecplot 软件处理得到的速度场分布图和流线图。

图 4-13 所示为理论计算流速  $v=5.87\text{m/sec}$  时处理得到的速度分布图和流线图。由图中可以看出，最大流速为  $8.28\text{m/sec}$ ，平均流速分布在  $5\sim 6\text{m/sec}$  范围内，由此可以看出和理论计算结果  $v=5.87\text{m/sec}$  基本吻合。并且可以看出板后流场发生变化，流速变得不均匀，但是由流线图可以看出，没有拍摄到涡流现象。

图 4-14 为理论计算流速  $v=10.8\text{m/sec}$  时处理得到的速度分布图和流线图。由图中可以看出，最大流速为  $12.1\text{m/sec}$ ，平均流速分布  $10\text{m/sec}$  左右范围，由此可以看出和理论计算结果  $v=10.8\text{m/sec}$  基本吻合。并且可以看出板后流场发生变化，流速变得不均匀，由流线图可以明显看出板后流场有涡流现象。但是图中流场分布不对称，流场左边变化不如右边显著。分析原因可能有以下三方面：首先是结构本身不对称；其次是测量时正好处于右半部分旋涡脱落时期，所以左半部分旋涡不明显；最后一点有可能是壁面作用的影响。为了分析这种原因，采用将图片处理区域变小的方法。图 4-15 (b) 为处理区域变小后（宽度约为  $10\text{mm}$ ）处理得到的速度分布图，这样能减小后处理过程中边界对速度场分布的影响。可以看出，流场分布情况确实有些变化，但是总体上看，流场分布左右不对称现象还是存在的。

图 4-16 为理论计算流速  $v=15.3\text{m/sec}$  时处理得到的两张连续的速度分布图。由图中可以看出，最大流速达到了  $18.5\text{m/sec}$ ，平均流速分布  $15\sim 16\text{m/sec}$  左右范围，由此可以看出和理论计算结果  $v=15.3\text{m/sec}$  基本吻合。并且可以看出板后流场发生变化，流速变得不均匀。综合 4-16(a,b) 两图可以看出，板后流场在各个时间点上发生了变化，这说明有流动紊乱现象。总体上，流速范围和流场不均匀的特性是一样的。

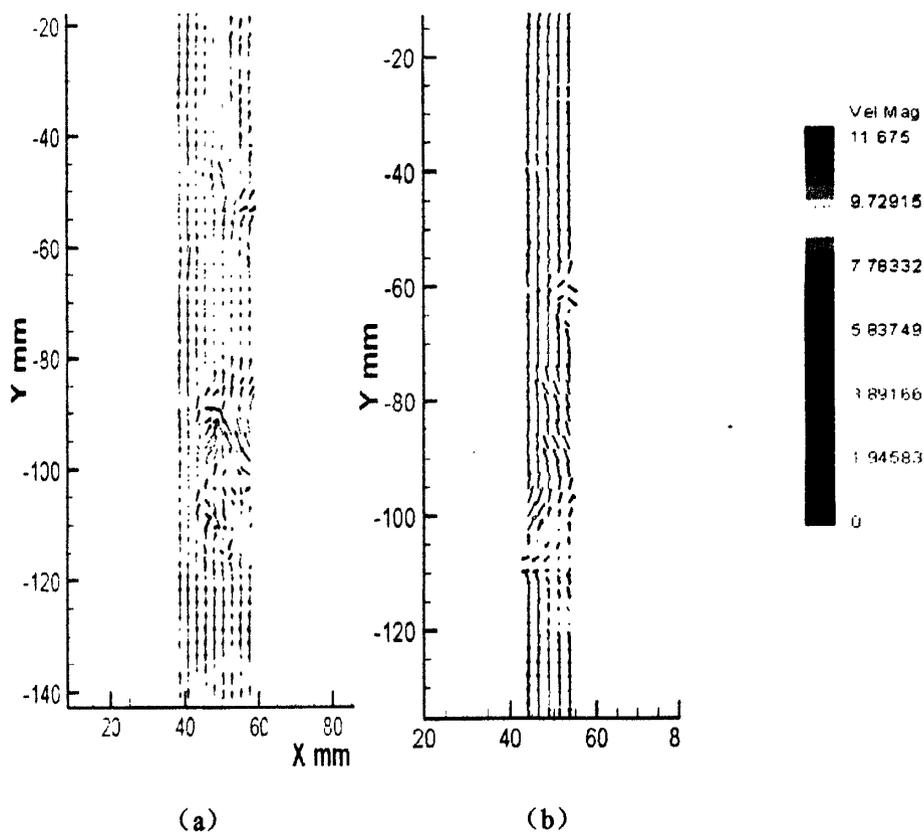


图 4-15 处理区域宽窄不同的速度分布图 (理论计算流速  $v=9.9\text{m/s}$ )

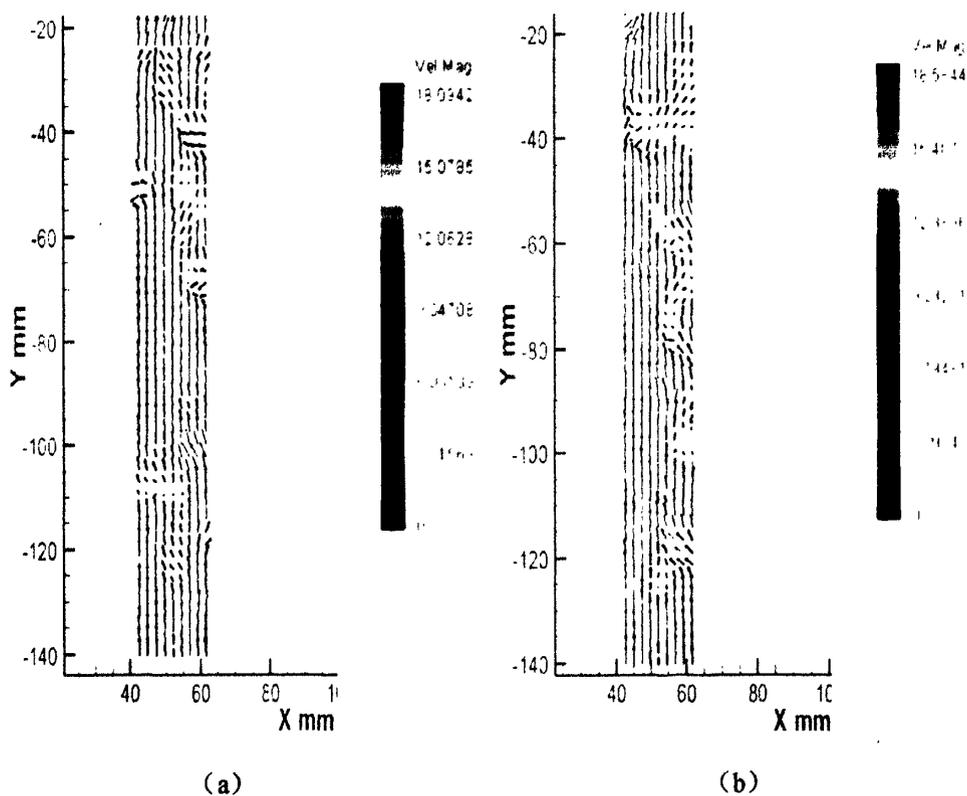


图 4-16 teplot 处理两张连续图片得到的速度分布图 (理论计算流速  $v=15.3\text{m/s}$ )

### 4.2.3 结论与分析

一、通过本次实验得到以下结论：

- 1) 由处理得到的速度场分布图可以看出，三种流速下的速度分布基本和理论计算结果相吻合，由此可得实验结果是正确的。
- 2) 在各个工况下，板子尾部流场有明显的变化，且随着流速的增大，涡流现象更加明显。但未能分析到旋涡脱落的频率。分析原因可能与仪器有关。（激光器的频率是 15HZ，数值模拟得到的旋涡脱落的频率是 10HZ 左右<sup>[39-40]</sup>。）
- 3) 流场左右两边分布不对称。分析原因可能和实验段本身不均匀光滑有关，致使壁面影响较大。其余原因有待进一步分析。

二、对此次实验结果的影响原因做了如下分析：

- 1) CCD 放大倍率不够，需要更大放大倍率的镜头（比如长焦镜头）；
- 2) 示踪粒子浓度不够，示踪粒子需要更密一点；
- 3) 判读窗口(IW)的选择，尺度有点大了。

三、通过此次分析，得到以下几点建议，若再次使用 PIV 仪器时，可以参考：

- 1) 采用荧光粒子；
- 2) 采用尺寸大的示踪粒子；
- 3) 使用更大能量的激光器。

本次实验预期目的是测得不同工况下流场的流速分布情况和板后旋涡脱落情况，但是由于仪器条件限制，未能测得板后旋涡脱落频率。

## 4.3 流致振动预实验

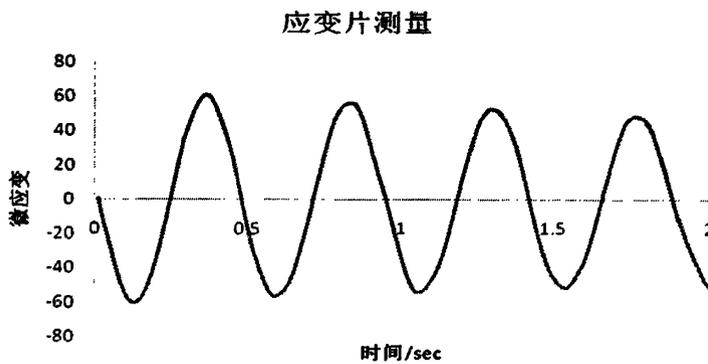
### 4.3.1 仪器验证实验

为了验证仪器的准确性，将加速度传感器、激光位移传感器和应变片布置在同一块铝板的同一点上进行测量，实验条件为铝板采用竖直放置，单端固定方式，相当于悬臂梁支撑。加速度传感器和应变片均粘贴在铝板中间位置，激光位移传感器也指向铝板中间位置，采用人工触碰端点的方式，实验重复做三次。铝板布置方式如图 4-17 所示。其中传感器均布置在铝板的中间位置。

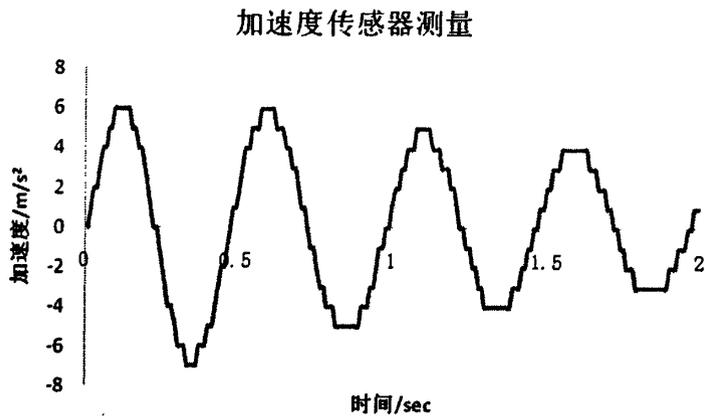


图 4-17 单端固定固有频率测试实验铝板布置照片

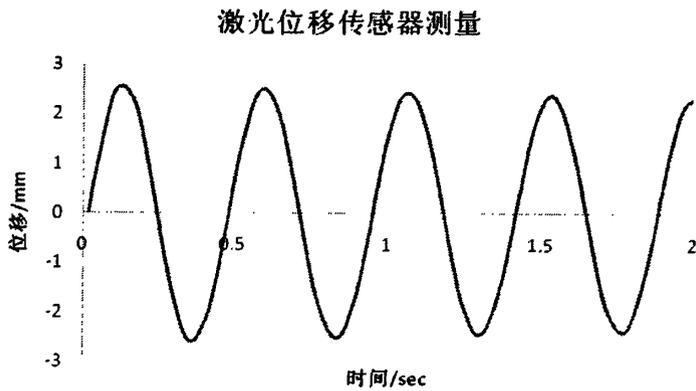
图 4-18 所示为应变片、加速度传感器和激光位移传感器测得的铝板在两秒钟内的振动时程曲线图，此图由 excel 办公软件处理得到。由图中可以看出三种仪器的测量结果基本一致，铝板的振动频率大约为 2HZ。实验过程中所得的实验数据汇总结果如表 4-1 所示。由表 4-1 的数据可以看出，三者测得的结果误差在 1%左右，由此可以确定加速度传感器、激光位移传感器和应变片测量的准确性。



(a)



(b)



(c)

图 4-18 三种仪器测得的时程曲线图

表 4-1 仪器验证实验结果

测量仪器	力作用点	实验结果 (HZ)			
		第一次	第二次	第三次	平均值
应变片	板子端点处	2.08	2.04	2.08	2.07
加速度传感器	板子端点处	2.04	1.96	2.13	2.04
激光位移传感器	板子端点处	2.00	2.08	2.08	2.05

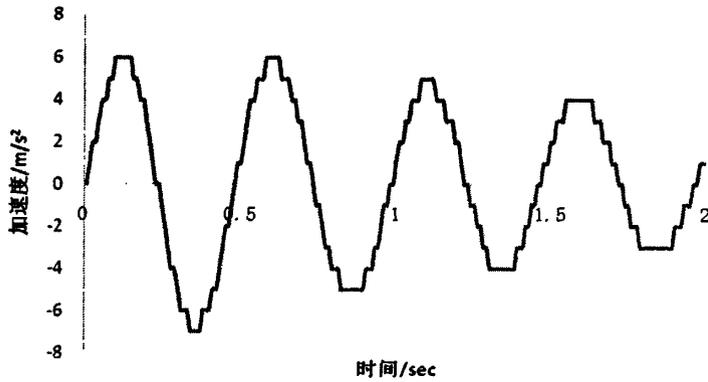
### 4.3.2 铝板弹性模量测量实验

由于实验室使用的铝板质量、厚度分布不均匀，因此需要测量铝板实际的弹性模量。本次测量采用的方法如下：首先测量出铝板单端固定时的固有频率，然后应用单端固定时的理论计算公式算出铝板实际的弹性模量，应用此数据结合两端固定时的理论计算公式算出铝板两端固定时的固有频率，将此数据与下一步的实验结果进行对比。

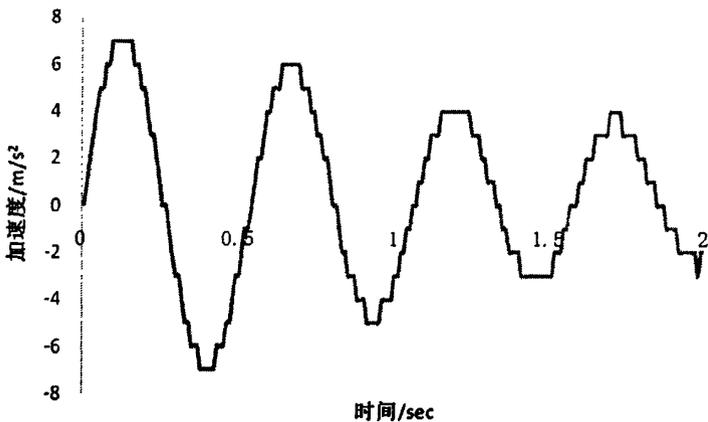
实验条件同上，板子竖直放置，单端固定，相当于悬臂梁支撑。将加速度传感

器分别布置在铝板的中间处和顶端处（见图 4-17），采用人工触碰端点的方式进行实验，每次实验进行三次。

图 4-19 所示为加速度传感器分别布置在铝板的中间和端点处测得的铝板在两秒内的振动时程曲线图。由图中可以看出传感器布置在铝板的中间（图 4-19a）测得的结果稍大于传感器布置在端点处。



(a)



(b)

图 4-19 传感器布置在中间和端点处 2 秒中的波形图

表 4-2 单端固定固有频率测试结果

测点布置	实验结果 (HZ)			
	第一次	第二次	第三次	平均值
板子中间处	2.04	1.96	2.13	2.04
板子顶端处	1.92	1.89	2.00	1.94

实验得到的具体数据结果如表 4-2 所示。由表 4-2 的数据可以看出加速度传感器布置在顶端处测得的结果略小于布置在中间处，但结果误差在 3%之内，可以认为板子的固有频率与传感器的固定方式无关，取两者的平均值即得到铝板在空气中

单端固定时的固有频率为  $f=2.00\text{HZ}$ 。

从文献中查得，固有频率计算公式为

$$f_n = \frac{A}{2\pi} \sqrt{\frac{EI}{ml^4}} \quad (4-1)$$

式中  $A$  为系数（当悬臂梁支撑时  $A=3.52$ ，两端固定时  $A=22.4$ ）， $E$  为弹性模量， $I$  为面积惯性矩， $m$  为单位长度的质量， $l$  为长度<sup>[41]</sup>。

应用此次实验结果  $f=2.00\text{HZ}$ ，依据固有频率计算公式计算出实验中所使用的铝板真正的弹性模量值  $E=52.8\text{GPa}$ 。再应用公式算出铝板两端固定时的固有频率为  $12.07\text{HZ}$ ，将此数据和下一步所得的实验结果作对比。

#### 4.3.3 两端固定方式固有频率测试实验

由于固有频率的测量可以忽略铝板自身重力的影响，竖直支撑时实验结果与固定松紧程度有很大影响，所以本次实验采用水平放置，两端用重物压紧的方式。进行加速度传感器分别布置在铝板的  $1/4$  处和  $1/2$  处，力分别作用在铝板的  $1/4$  处和  $1/2$  处共四组实验，每组实验取三个出现次数最多的值，再取平均值。图 4-20 为两端固定方式固有频率测试实验铝板布置照片。

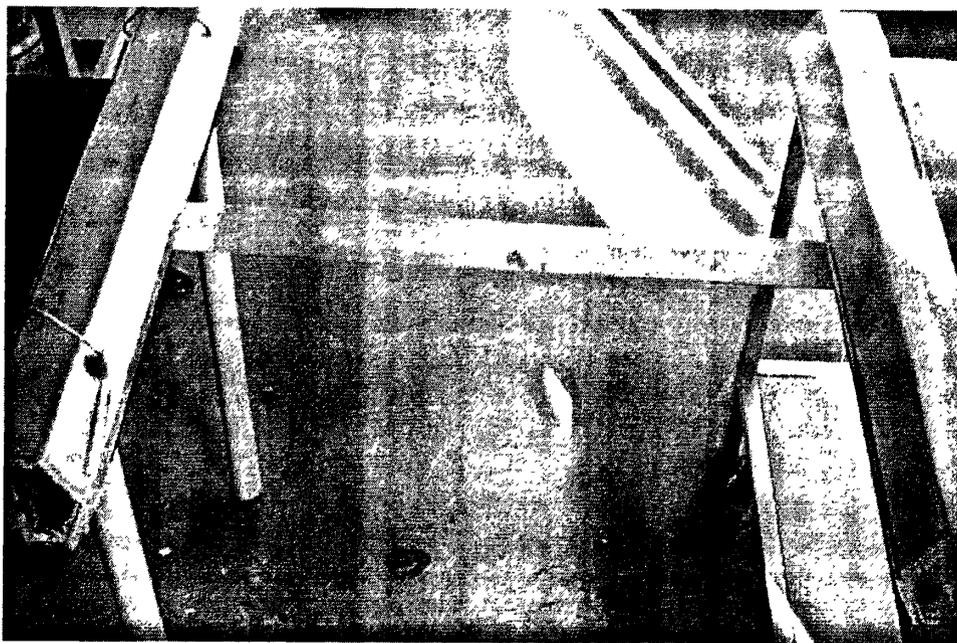


图 4-20 两端固定方式固有频率测试实验铝板布置照片

表 4-3 两端固定固有频率测试结果

测点布置	力作用点	实验结果 (HZ)			
		一	二	三	平均值
板子 1/2 处	板子 1/2 处	11.24	11.11	10.99	11.11
	板子 1/4 处	10.31	9.00	9.09	9.47
板子 1/4 处	板子 1/2 处	11.11	11.63	11.24	11.33
	板子 1/4 处	9.80	9.71	10.20	9.90

实验所得数据如表 4-3 所示。通过比较表 4-3 中的两组数据得到：当测点位置相同时，力作用在 1/2 处的结果大于作用在 1/4 处；当力作用点相同时，传感器测点在 1/2 处的结果小于测点在 1/4 处。当测点位置不同，力作用点同在 1/2 处时结果误差在 2% 内，力作用点同在 1/4 处时误差在 5% 内，由此可以认为固有频率和传感器的测点位置无关。当传感器测点位置不变，力的作用点不同时，由表中数据可以看出，测量结果误差最小为 12.6%，由此可得固有频率测试和力的作用点有关，作用在 1/2 处的结果比作用在 1/4 处数值偏大。但是和计算出来两端固定时的固有频率 12.07HZ 相比，显然力作用点在中间时更接近理论计算结果。因此只考虑力作用点在中间时的结果，两种情况取平均值得到两端固定时铝板的固有频率为 11.22HZ。

图 4-21 是当加速度传感器布置在铝板中间，力作用点也在铝板中间时的实验数据处理出来的一秒时间内的波形图，由图中可以大约估算出铝板的固有频率为 11.35HZ。

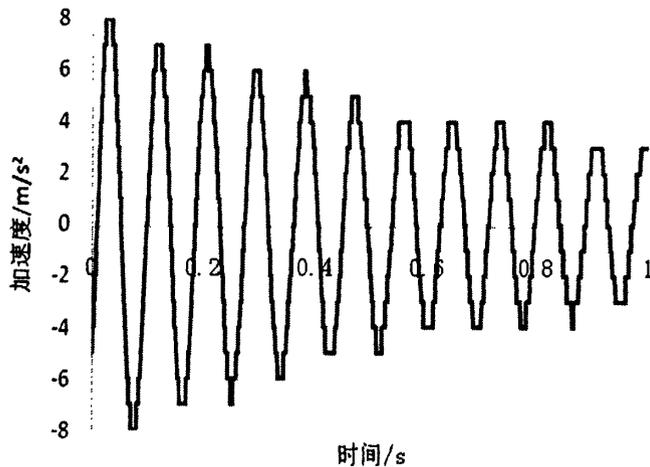


图 4-21 一秒时间内的波形图

## 4.4 流致振动实验

### 4.4.1 实验过程

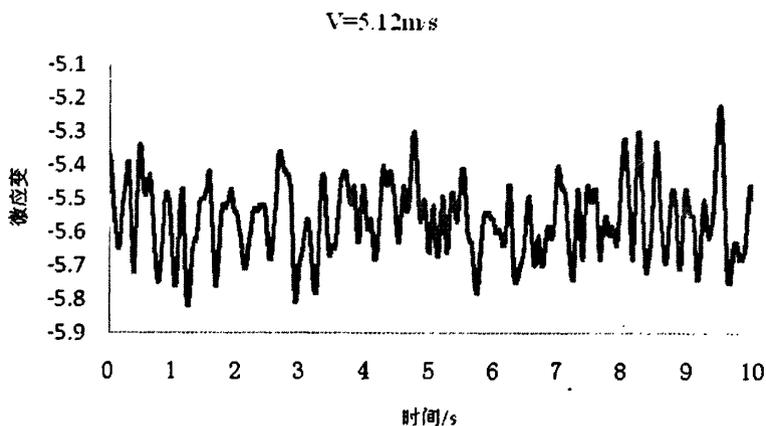
本次实验同时使用激光位移传感器和防水应变片进行测量。应变片采用半桥方式布置，贴在铝板的中间（如图 3-4 所示），测量铝板沿长度方向上在不同流速下的振动频率；位移传感器由于其能够穿透有机玻璃板和水介质故布置在实验本体外部与铝板的中间部位相对，并且与实验本体相接触。目的是消除实验本体由于外界干扰所带来的振动影响。主要应用激光位移传感器测量铝板的振动频率和位移。

实验通过改变流速测量铝板在不同工况下的振动频率和位移。本次实验测量了 3.47m/sec、5.12m/sec、8.49m/sec、10.97m/sec、12.53m/sec 这 5 种工况下的振动频率和位移。

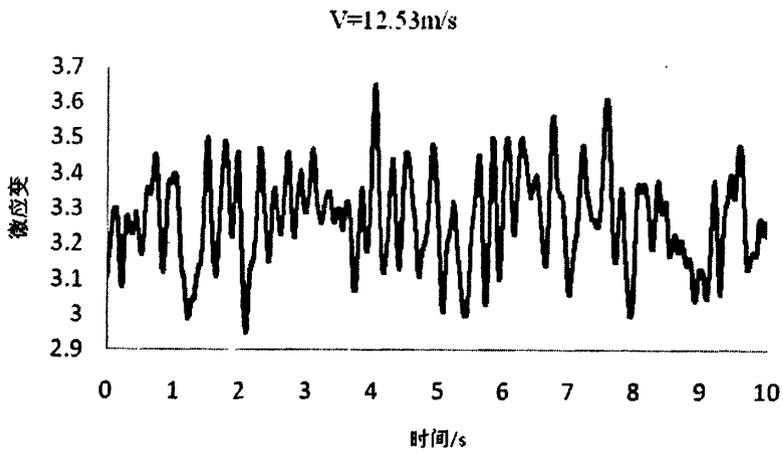
### 4.4.2 实验结果及分析

图 4-22 表示的是应变片测得的流速为 5.12m/sec 和 12.53m/sec 时的时程曲线。由图中可以看出，铝板的振动并不是弹性不稳定的大幅振动现象，而只是普通的随机振动现象。并且随着流速的增大，这种现象并未改变。

图 4-23 所示为在流速为 5.12m/sec 和 10.97m/sec 时的频谱图。由图中可以看出，每个频谱图上都有很多个尖峰，并且频率范围很大，这也说明铝板的振动只是由于湍流引起板子的一个复杂的随机振动。随着流速的增大，铝板的振动表现为低频成分减少，高频成分增加。

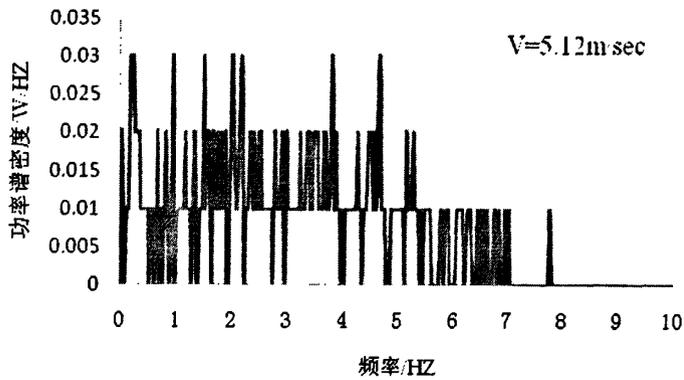


(a)

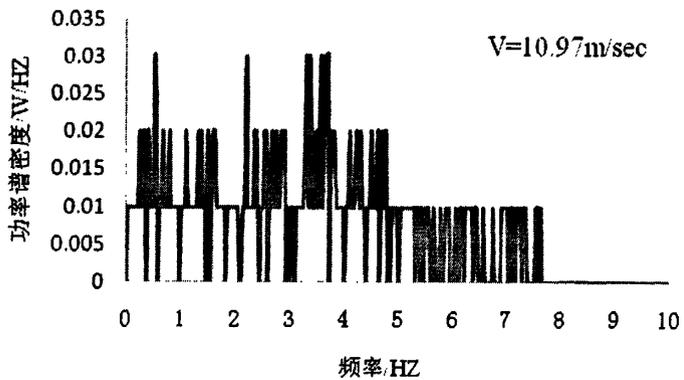


(b)

图 4-22 不同流速时的时程曲线



(a)



(b)

图 4-23 不同流速时的频谱图

表 4-4 中的数据是激光位移传感器测得的铝板中间部位在不同流速下的振动位

移，其中包括铝板偏移的最大正负位移和平均较大正负位移。由于传感器振动造成数据中有些坏点在数据处理过程中已被剔除，数据中所得出最大位移是出现 3 至 5 次以上的结果，平均较大位移是出现 10 次以上的结果。

表 4-4 不同流速下的振动位移结果

流速 (m/s)	实验结果 (mm)			
	最大正位移	平均较大正位移	最大负位移	平均较大负位移
3.47	0.16	0.13	-0.15	-0.13
5.12	0.18	0.14	-0.18	-0.16
8.49	0.20	0.16	-0.18	-0.15
10.97	0.24	0.18	-0.23	-0.18
12.53	0.24	0.20	-0.24	-0.20

由表中数据可以看出，铝板的正负最大位移和平均较大位移都随着流速的增大而逐渐增大。这表明随着流速的增大，铝板的振动加剧。图 4-16 是位移随流速变化的曲线图，可以看出，位移随流速成二项式规律变化。由图中公式可以算出当流量更大时的位移变化值。

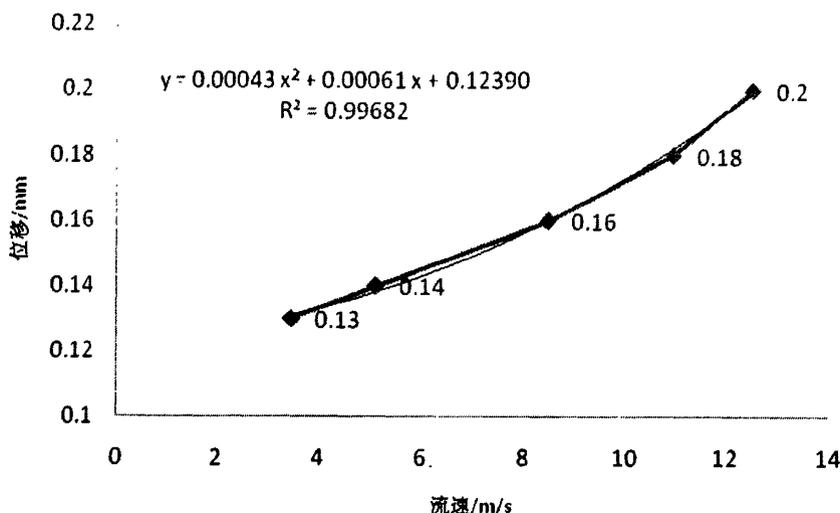


图 4-24 位移随流速变化曲线

实验中测到了铝板在水流冲击下的大幅振动现象，所得数据如表 4-5 所示。由表中可以看出大幅振动出现在低流速下，振动频率为 3.2HZ，最大振幅为 2.3mm。图 4-25 所示为截得的激光位移传感器和应变片测量铝板大幅振动时的图片。图 a 是激光传感器测量的时程曲线，图中横坐标表示一百个测点，纵坐标表示位移，单位是 mm；图 b 是应变片测量时的时程曲线，横坐标是测量时间，纵坐标代表微应

变。可以看出，大幅振动是一种简谐振动。但是这种现象并未重复出现，至今还未找到出现此现象的准确原因。初步分析可能和固定方式、板子的弹性模量等因素有关，在以后的实验中将深入分析原因。

表 4-5 大幅振动实验结果

流速(m/s)	实验结果	
	频率(HZ)	最大振幅(mm)
3.5	3.2	±2.3

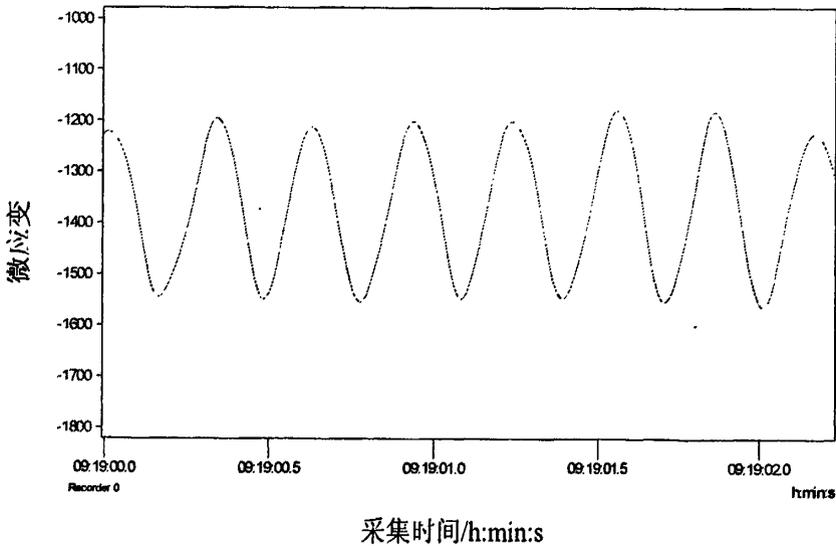
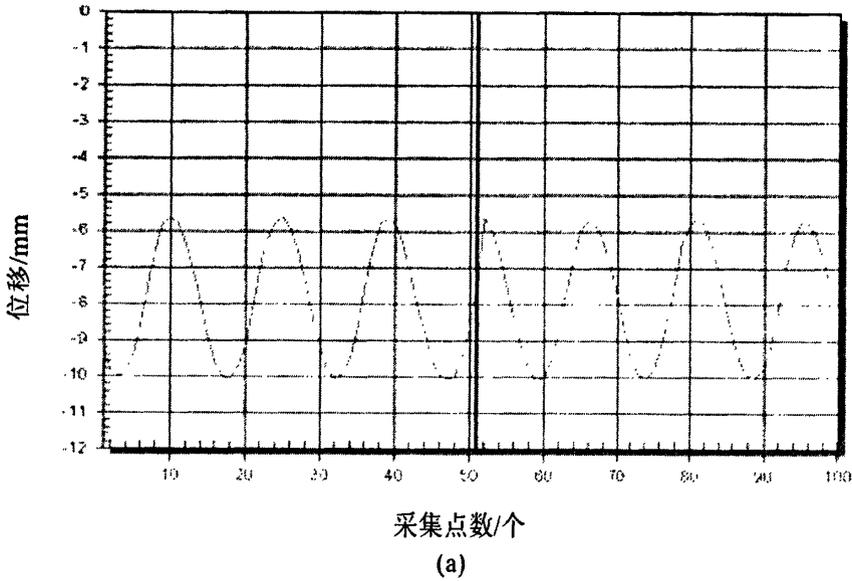


图 4-25 激光位移传感器和应变片测得的  $v = 3.5 \text{ m/s}$  时的时程曲线

## 4.5 小结

本章进行了各种工况下的实验及相应的数值模拟，总结如下：

- 1) 数值模拟分析：在对板子固定不动模型的数值模拟中，得到了在对矩形通道入口为  $v=10\text{m/sec}$  情况下通道中板间的流速和压力分布情况，为实验中的流场测量和压力测量提供了参考。
- 2) 流速测量：由速度场分布图得到三种流速下的速度分布基本和理论计算结果相吻合；在各个工况下，板子尾部流场有明显的变化，且随着流速的增大，涡流现象更加明显。但未能分析到旋涡脱落的频率。
- 3) 准备实验：测得了实验中所使用的铝板实际的弹性模量为  $E=52.8\text{GPa}$ ；得到了板子单端固定和两端固定时的固有频率，分别为  $f=2.00\text{HZ}$  和  $f=11.22\text{HZ}$ 。
- 4) 流致振动实验：在整个  $3.5\text{m/sec}$  到  $12.5\text{m/sec}$  流速范围内，铝板的振动只是一种由于湍流引起的复杂的随机振动；随着流速的增大，铝板的振动加剧，表现为低频成分减少，高频成分增加；铝板的振幅随流速的增大而变大，但变化幅度很小；只得到了一次大幅振动现象的数据，但是有关发生大幅振动现象的原因，有待继续研究。



## 第五章 结论与展望

### 5.1 结论

- 1) 在对板子固定不动模型的数值模拟分析中, 得到了在对矩形通道入口设置  $v=10\text{m/sec}$  情况下通道中的流速和压力分布情况, 为实验中的流场测量和压力测量提供了参考。
- 2) 使用 PIV 仪器进行了矩形通道中单板的流场测量实验, 初步得到了流道内的流速分布情况: 在不同工况下, 板后流速分布都有明显变化, 可以看出板后有旋涡生成, 且随流速的增大, 涡流现象更加明显, 但未能测得旋涡脱落频率。
- 3) 在准备实验中, 对单块铝板在空气中进行了弹性模量实验和固有频率测试, 得到铝板实际的弹性模量为  $E=52.8\text{GPa}$ 。铝板单端固定和两端固定时的固有频率, 分别为  $f=2.00\text{HZ}$  和  $f=11.22\text{HZ}$ 。旅伴
- 4) 通过进行不同工况下的流致振动实验可以得到以下几条结论:
  - a) 在整个  $3.5\text{m/sec}$  到  $12.5\text{m/sec}$  流速范围内, 铝板的振动频率峰值很多且分布范围大, 由此可得铝板的振动只是一种由于湍流引起的复杂的随机振动。
  - b) 随着流速的增大, 铝板的振动加剧, 表现为低频成分减少, 高频成分增加。
  - c) 铝板的振幅随流速的增大而变大, 但变化幅度很小。当流速从  $3.5\text{m/sec}$  到  $12.5\text{m/sec}$  变化时, 平均较大振动位移由  $\pm 0.13\text{mm}$  增大到  $\pm 0.20\text{mm}$ 。位移随流速成二项式规律变化。

### 5.2 展望

本次实验是流致振动机理研究, 是整个实验项目的第一步, 因此实验中有些不足的地方, 比如未得到发生流弹性失稳大幅振动情况的影响因素。因此流致振动实验必须继续进行下去, 并且要改变一些实验参数。具体可以从以下几方面着手:

- 1) 关于组件在流场中的固有频率和振型(湿模态)与其在空气中的固有频率和振型(干模态)有一定关系, 本文并未得到直接联系, 还有待深入研究: 可以进行板子在水中的两端固定和四角固定方式的实验;
- 2) 需要采用多种弹性模量的板子或者改变板子的厚度及固定方式继续进行实验。
- 3) 需要使用探针式压力传感器测量板子四周的压力变化情况, 得到压力分布与

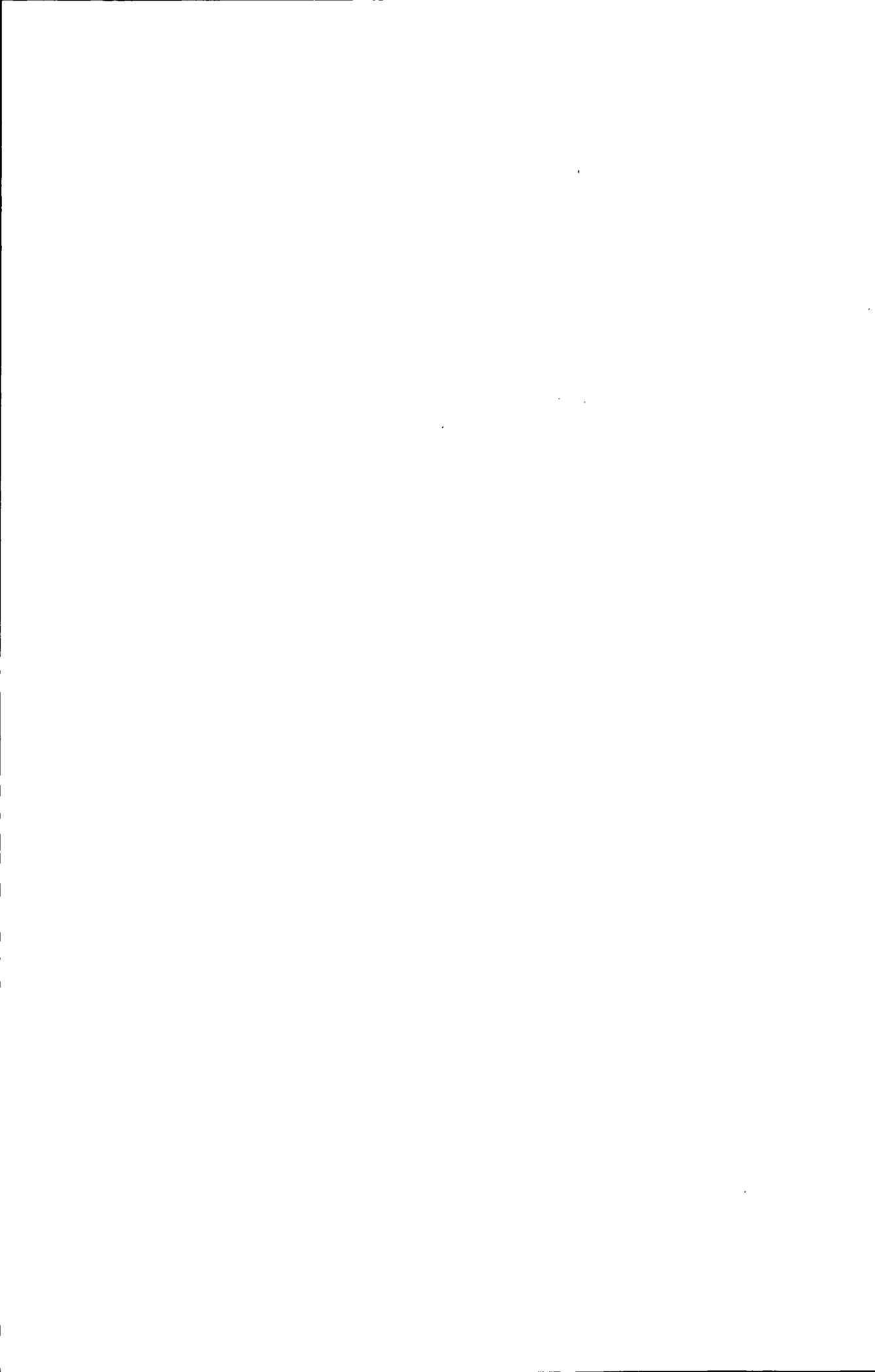
流速之间的关系。

## 参 考 文 献

- [1]于平安,朱瑞安等编著.核反应堆热工分析.上海:上海交通大学出版社,2002,43~44
- [2]凌备备,杨延洲.核反应堆工程原理.北京:原子能出版社,1982,76~77
- [3]Takasago Research, Yutaka Kawata, Hajime Izumi, Tomomichi Nakamura, and Katsuhisa Fujita. TWO-DIMENSIONAL FLOW ANALYSIS OF FLUID STRUCTURE INTERACTIO AROUND A CYLINDER AND A ROW OF CYLINDERS.PVP-VOL.273,Flow-Induced Vibration ASME 1994
- [4]R.D 白莱文斯.流动诱发振动(吴恕三译).北京:机械工业出版社,1983,1~8
- [5]Chen S.S. Flow induced vibration and instability of some nuclear reactor system components. SMIRT 7 Trans. 1983
- [6]王其政.结构耦合动力学.北京:宇航出版社,1999,23
- [7]闵刚.板状燃料组件流致振动实验研究.[硕士学位论文].北京:清华大学,2004
- [8]R.L. Doan. The engineering test reactor—a status report. Nucleonics, 1958, 16: 102~105
- [9]D.R. Miller. Critical flow velocities for collapse of reactor parallel-plate fuel assemblies. Trans. ASME, J. Eng. Power, 1960, 82: 83~99
- [10]R.D. Groninger and J.J. Kane. Flow-induced deflections of parallel flat plates. Nucl. Sci. Eng., 1963, 16: 218~226
- [11]Santino J.Pavone and Henry A.Scarton. Laminar flow-induced deflections of stacked plates. Nucl. Eng. Des., 1983, 74 (1) : 79~89
- [12]D.C. Davis and Henry A.Scarton. Flow-induced plastic collapse of stacked fuel plates. Nucl. Eng. Des., 1985, 85(2): 193~200
- [13]G. Kim and D.C. Davis. Hydrodynamic instabilities in flat-plate-type fuel assemblies. Nucl. Eng. Des., 1995, 158: 1~17
- [14]C.Q.Guo and M.P. Paidoussis. Analysis of hydroelastic instabilities of rectangular parallel-plate assemblies. Trans. ASME, J. Pres. Vessel Tech., 2000, 122: 502~508
- [15]陈贵清,杨翊仁.受非线性支承的板状梁结构流致振动研究.固体力学学报,2003,24:277~283
- [16]鲁丽,杨翊仁.弹性支承简支板梁在轴向流中的稳定性.核动力工程(第十三届全国反应堆结构力学会议论文专辑),2004:243~245

- [17]鲁丽,杨翊仁.板状结构上的流体附加质量、附加刚度和附加阻尼系数.科学与技术.2006,6(11):1479~1481
- [18]崔振东,唐益群,郭长青.叠层板状结构的流致振动与稳定性.地震工程与工程振动,2007,27:86-91
- [19]闵刚,薄涵亮,姜胜耀.板型燃料组件额定流速流致振动实验研究.核科学与工程,2004,24(2):121~124
- [20]闵刚,薄涵亮,姜胜耀.板状燃料组件流致振动实验研究.清华大学学报(自然科学版),2004,44:350~353
- [21]喻丹萍,蒋自龙,马建中,胡永陶.中国先进研究堆(CARR)全堆芯流致振动试验报告,中国核动力研究设计院二所,2004
- [22]张思.振动测试与分析技术.北京:清华大学出版社,1992,22~23
- [23]朱自勤.传感器与检测技术.北京:机械工业出版社,2008,10~18
- [24]叶湘滨,熊飞丽,张文娜等.传感器与测试技术.北京:国防工业出版社,2007,1~97
- [25]孙鹤泉,康海贵,李广伟.PIV的原理与应用.水道港口.2002,23(1):42~45
- [26]徐玉明,迟卫,莫立新.PIV测试技术及其应用.舰船科学技术.2007,29(3):101~105
- [27]A Melling. Tracer particles and seeding for particle image velocimetry. Meas.Sci.Technol.1997,8:1406~1416
- [28]阮驰,孙传东,白永林等.水流场 PIV 测试系统示踪粒子特性研究.实验流体力学.2006,20(2):72~77
- [29]Davis D C, Kim G. Design Against Hydrodynamic Instabilities in Flat-plate Type Fuel Element Assemblies [A]. SMIRT 11 Trans. 1991, J: 105~109
- [30]Guo C Q, Peng R H, Sun D L. A Dynamic Model for Flow-induced Vibration of Parallel-plate fuel Assemblies [A].SMIRT 12 rans.1993,J:1~4
- [31]郭长青,张兆湘,邹长川.叠层板型元件模型干模态固有频率与振型分析[J].中南工学院学报,1995,(1):17~23
- [32]崔振东.板状结构的流致振动与稳定性研究.[硕士学位论文].湖南,南华大学,2005
- [33]刘习军,贾启芬.工程振动理论与测试技术.北京:高等教育出版社,2004,421~461
- [34]殷祥超.振动理论与测试技术.江苏:中国矿业大学出版社,2007,225~233
- [35]宋爱国,刘文波,王爱民.测试信号分析与处理.北京:机械工业出版社,2006,116~118

- [36]杨西侠,柯晶.信号分析与处理.北京:机械工业出版社,2007,32~55
- [37]化学工业部化工工艺配管设计技术中心站.化工管路手册.北京:化学工业出版社,1988
- [38]李玉琳.液压元件与系统设计.北京:北京航空航天大学出版社,1991
- [39]张娟花.窄通道中掠过单板流动引起的旋涡脱落分析.[硕士学位论文].北京:华北电力大学,2008
- [40]李全星.窄通道中掠过平行板流动引起的旋涡脱落数值模拟.[硕士学位论文].北京:华北电力大学,2009
- [41]Shoei-Sheng Chen.圆柱结构的流致诱发振动(冯振宇 张希农译).北京:石油工业出版社,1993,330



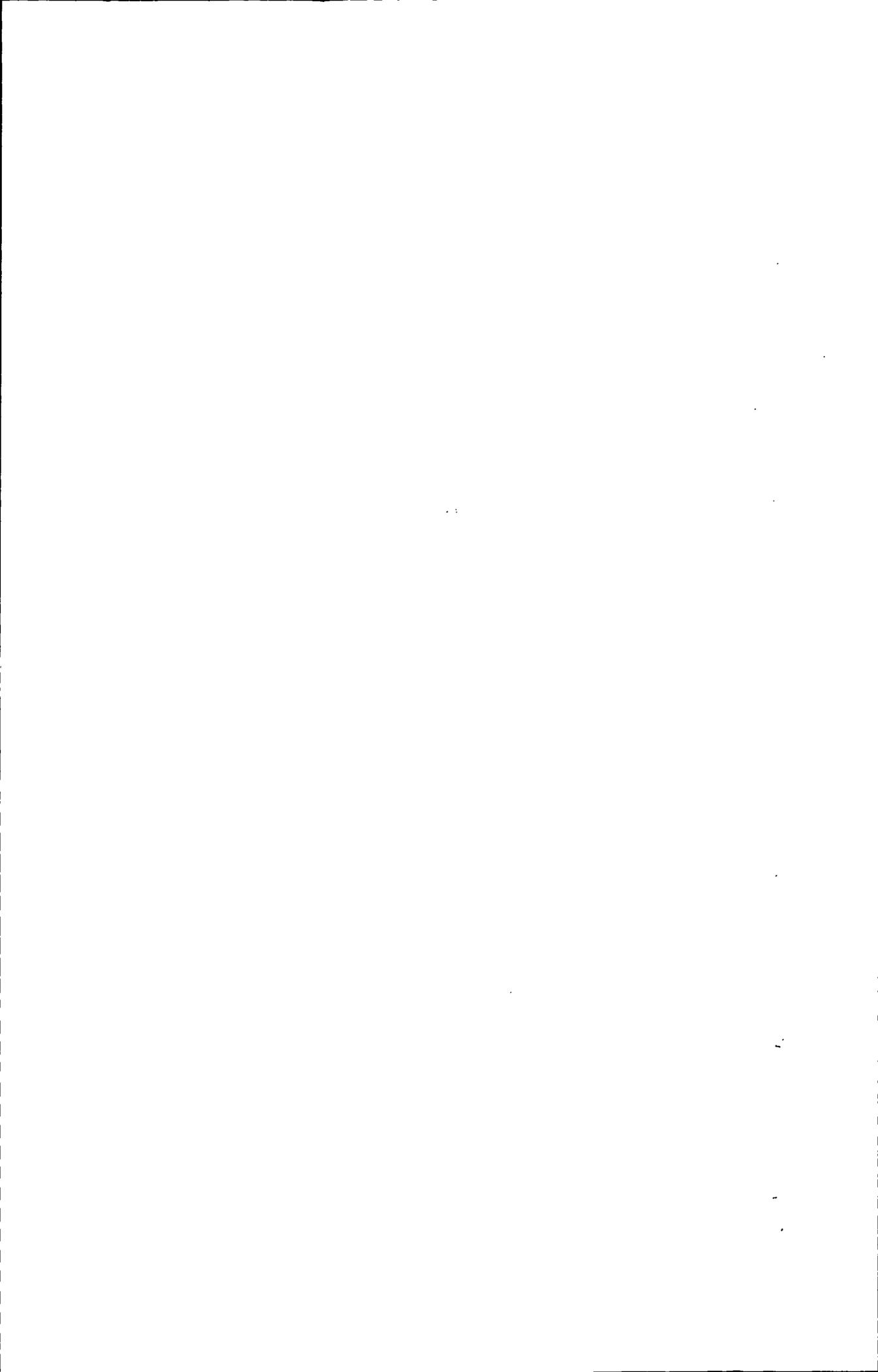
## 致 谢

本篇论文的完成，首先我要感谢我的主导师陆道纲教授。在整个研究生学习阶段，陆老师在我的论文工作方面给予了许多实质性的指导和启发性建议，在他的指导下，我对流致振动机理有了较多的理解，对振动方面的理论知识有了更深入的认识和理解，并且掌握了振动测量的有关知识。陆老师还为我论文的完成提供了良好的实验设备。在做人和工作态度方面，陆老师不仅经常教导我们做人要谦虚，做事要脚踏实地、勤奋动脑，还用实际行动影响着我们。陆老师严谨务实的工作态度将使我受益终生。再次向陆道纲老师表示由衷的感谢和深深的祝福。

其次，我还要感谢我的副导师李向宾老师。在实验仪器的购买和整个实验内容的完成过程中，李老师给予了很大的帮助，并且为了能对问题有更深入的了解，经常和我一起做实验。李老师还不辞辛劳地一遍遍给我看文章，帮助我修改论文。同时，在李老师的帮助下，我学会了使用 CFX 软件。在此，对李向宾老师表示深深的感谢！

本课题来源于陆道纲教授申请的国家自然科学基金项目《先进核反应堆平行板燃料组件流固耦合研究》。本文得以顺利完成，感谢国家自然科学基金委的大力支持与帮助。

此外，还要感谢师妹刘丽芳、师弟李阳、张勋、刘爱明等在我做实验过程中给予了很大的帮助，感谢张晓茹帮我解决 CFX 学习中遇到的一些问题，感谢朱众勇、贾蓉帮助我学习 PIV 仪器的使用，感谢隋丹婷、刘爱国、张立殷等同窗和范念青师妹给予我的支持和鼓励！感谢洪光宇在我失落时给予我的鼓励，以及平时默默的支持与关心。谢谢大家！



## 在学期间发表的学术论文和参加科研情况

- [1] 赵玉静, 陆道纲, 李向宾等. 矩形通道中单块柔性平板流致振动实验研究. 华北电力大学第七届研究生学术交流年会. 2009. 10
- [2] 赵玉静, 陆道纲, 李向宾. 矩形通道中两端固定柔性单板湍流微振. 中国科技论文在线. 2009. 11
- [3] 参加国家自然科学基金(编号: 50776031)“先进核反应堆平行板燃料组件流固耦合实验研究”。2007~2009

