

利用激光束阵列实时测量水波 3D 形貌的研究 Institute the te mistitute # institute the t

matilute # # 3

multitute mark "

而加加根本接後

matitute ## # # #

tinstitute # # # #

tinstitute # # # #

institute ## # # #

小小学家

matine m \*\* \*

面的抽版教教生

而這個的

matitute ## # # #

institute # # # #

institute # # B

matitute ## # B

小小学家

matitute # # 3

关键词: 3D 扫描, 折射, 点云, 水面测量。

institute # # # #

institute # # # #

institute # # # #

institute ## # # #

Lo How W. B. W.

matitute ## # # #

institute ## # # #

matitule ## # # #

institute ## # # #

to the We the Pho

Institute # # 3

而如此推新林塔梯

institute # # # #

面站抽根教教学

institute # # # B

Institute ## # # B

to the the the

Y.

X

摘要

×

Y.

K.

Y.

multitute m # "

matine to the B 幅振动透明液面 3D 形貌的方法,可以测量微米尺度振动的液面形貌。利用多束 平行激光束穿透透明滴体 并且或可以现于 面的 3D 形貌。在实验上,我们分别测量了平面和环形传播水波的波面参数,证明了测试方法的准确性。并且以水波衰减研究和少述必须 明了测试方法的准确性。并且以水波衰减研究和水滴激发波面形貌研究为例,展示了该测试方法在流体力学研究中的重要体型

而知道相论教育教学

institute # # # #

institute # # # B

institute # # # B

to the We B PR



<b>%</b> 5	St the start "S	摘要	》目录 " <sup>你并没</sup> "	W. K. B.	mit is the
	TUBLO.	符号和意义 1. 引言 2. 原理及装置			TT BUI
A.	the state of the s	<ol> <li>2.1 测试原理</li> <li>2.2 实验装置介绍</li> <li>2.2.1 测量光路系统</li> <li>2.2.2 振动系统</li> </ol>			the the 's the
<i>K</i>	×	<ol> <li>2.3 本章小结</li> <li>3. 利用线阵激光束测试给定</li> <li>3.1 测试原理</li> </ol>	点的波速和振幅		the the
	musitute ## ** ·s	<ul> <li>3.2利用塑料水波模型验</li> <li>3.3 平面水波测试</li> <li>3.3.1 测试系统介绍</li> <li>3.3.2 油速和振幅测</li> </ul>	☆证测试方法准确性 }		新林"。
<i>k</i>	如 教 教	3.3.2 波速和派幅演         4. 任意波形实时 3D 测试         4.1 测试原理         4.1.1 点阵			新茶客祭
	<b>Institute</b>	<ul> <li>4.1.2 三维波形重格</li> <li>4.2 周期性点振动源激发</li> <li>4.2.1 测试系统介绍</li> <li>4.2.2 处理方法</li> </ul>	]算法 的水波波形测试		instit
	mustitute ## **	<ul> <li>4.2.3 波形随时间的</li> <li>5. 波面 3D 扫描应用</li> <li>5.1 水波衰减的测量</li> </ul>	]变化 A Xiel 早.	23	the the 'S PR
<i>R</i> s	12	<ul> <li>5.2 水滴激反波面形貌的</li> <li>6. 总结与展望</li> <li>6.1 总结</li> <li>6.2 展望</li> </ul>			in the second
	mistitute #	参考文献 致 谢 学术诚信声明			tinstit
R.	S' Mar anno	3 % ···································	MB WHE WAR	with the the second	频·法·浅外
	tinst Mart	Tustilue Tust	Institute I	mstitue.	Tinsti



K.

Taritute # \*\*

matilitie m th 'S

mistime # \*\*

mustitute # # 'S

mistilute # \*\*

mistitute # \*\* \*



<sub>心频<sup>派</sup>後</sub>修 引言 加新林塔院 3D 扫描能够用以采集物体或环境的形状及外观信息,进而构建出数字化的

multille m # "

multine m # "

加斯林婆佛

multine m # 3

加斯林塔呢

matitute # # 3

multine m # 3

X

\*\*\*\*\*\*\*\*\*

multille m # "

山山的新林、资幣

institute ## # # 建到生产的过程,这也是将来制造业发展的趋势所在。3D 扫描可应用于复杂物体外形数据的测量,产品的复制、分析、修改 医具体 新生产 体外形数据的测量,产品的复制、分析、修改、质量检测等方面,有助于对产品的理解与分析,可以提高新立口的TTT · 工业 观域的产品开发具有重大意义。此外 文物的检查与文件化等方面,3D 扫描也有广泛的应用。 3D 扫描通过一定的测量 士 计 世 对机械、电子等工业领域的产品开发具有重大意义。此外,在电影及游戏的制作、

3D 扫描通过一定的测量方法获取物体表面的点云数据,将其统一在同一坐下,进而重构出物体的三维增型。 B 11 11 标系下,进而重构出物体的三维模型。具体的测量方法种类繁多,可简单分类如 Fig. 1.1 所示。



Fig. 1.1 3D 扫描技术分类

3D 扫描技术总体上可分为接触式与非接触式两类。接触式测量方法以探针 新生产的运转时, 等优点,但也有接触式测量常见的局限性:探针接触后磨损变形,精度下降;探 针头部的曲率半径限制了测量精度;不能测量易形态/m/+ 一 而非物化 \*\*\* 针头部的曲率半径限制了测量精度;不能测量易形变物体;不能测量精密器件等。 而非接触式的测量专注中工业 而非接触式的测量方法由于避免了与被测物的直接接触,因此可有效避免接触式 3D 扫描技术又可细分为光学测量技术、微波技术、超声技术、电场技术等,其中光学测量技术因其简单、方便、直观而最为党中 matilitte # # 'S #

to the B Ph

to the the B

to the the B

to the the the

mutute # # 'S # 否发出辐射。被动式的测量系统本身不发出任何形式的辐射,依靠探测反射的环境辐射(通常光可见地)、不可以 光学测量技术可再分为主动与被动两大类,其本质区别在于测量系统本身是 境辐射(通常为可见光)实现测量,与人眼的功能类似。而光学主动测量方法是 三角测量法和结构光法,下以列举的三种方法为例说明光学测量技术的基本原理。 astitute ## # 18

multille m # 3

Institute m # 3

multine m # 3

matitute # # 3

#### 飞行时间法

Institute m # "

multine m H 3

Y.

飞行时间进而计算得到物面一点到测量位置距离的一种测试方法<sup>[3]</sup>。从光源发出的脉冲激光信号经物体表面漫反射后沿几乎空**全**把回来。 的脉冲激光信号经物体表面漫反射后沿几乎完全相同的路径到达接收端,检测脉冲激光信号发出与接收间的时间并 明天 11 空间尺度的测量,而精度相对较差,在毫米量级,适用于建筑和地理特征测量。随着相关技术的发展,如单光子计数法 坐在 自社 1 随着相关技术的发展,如单光子计数法、光全息技术,此方法的测量精度已可达到微米量级<sup>[4]</sup>。



中位置的不同来反映物体表面的深度信息,如 Fig. 1.2 所示。激光器、光点、相 机构成三角,此三角形中激光器和相机距离已知, 激业 叫出 /// 机构成三角,此三角形中激光器和相机距离已知,激光器处的角度已知,相机处的角度可由激光感上在1999年 表面各点的位置信息,构建出表面形貌。在实际应用中,更多地是利用激光带来 对物体表面进行扫描<sup>[6]</sup>,以更快地获取物体的表面信户。 对物体表面进行扫描<sup>[6]</sup>,以更快地获取物体的表面信息。此测量方法精度可达数 十微米,而相对地、测量变用性, 十微米,而相对地,测量范围较小,在数米内,因其精度与测量范围合适为目前 较多的 3D 扫描仪所采用。

matitute \$\$ \$

matitute mat \*\* \*\*

加斯林塔塔

附额袜 资幣

institute # # # B

mstitt

multine m # 3

而的加坡教教学

Institute # \* \* \* \*

institute # # B

to the the of the

multine m \*\* \*\*

multille m # 3

multine m # 3

Y.

R.

K.

而以往相关教教学

Institute ## # # #

multilite # # # #

小学家院

X

而這個人都接著 uitute mark 's the 前加度新林塔梯 前期的新教学家 结构光法。 结构光法(Structured light)是在三角测量法原理的基础上发展而来,相当于同 统得到图案经三维物体调制后的变形情况,根据系统几何关系计算得到表面各点的三维坐标,其原理如Fig. 1.3 所示。世方注目在世生 的三维坐标,其原理如 Fig. 1.3 所示。此方法具有快速、精确、稳定性好、结构简单等优点,广泛应用于制造业 军事 医双轴 , 守结构光法分 等,分别介绍如下。 异,可将结构光法分为点结构光法、线结构光法、多线结构光法、网格结构光法 matitute # # # K 而的机机称林塔梯 相机、新加斯斯林·洛风 你头 linstitut

itute the the

近新祥塔佛

to the the the

光学投射器

3

institute #

institute # # 3

Institute # # '& PE

to the the B

Fig. 1.3 结构光法原理图

to the B Ph

multille m # "

multille m # \*

multine m \*\* \*

(1) 点结构光法 点结<sup>步,</sup> 点结构光法将一个光点投射在物体表面并以相机进行拍摄。这其实就是三角 法, 由激光界, 业上, 如此, 如此, 1000 测量法,由激光器、光点、相机的几何关系可以唯一确定光点的位置。通过对物 信息量少,不足以反映物体表面情况,对于较大区域待测面的测量,逐点扫描在数据获取及处理上都相对较慢,因此只适用于对整种"进行 stitute # \*\* \*\*

multille m H 3

multille m th 's

Institute mark "

(2) 线结构光法

而如果表面还存在间隙,则将导致光带的不连续。通过对畸变光带图像的采集、 分析、处理,可以得到被测物体表面的形貌。相较于点结构光,线结构光能够在 单次测量中获取更多的信息,其扫描速度大幅加快。

→ 単获取更多 (3) 多线结构光法 *条件*小 多线结构光法介于线结构光法与面结构光法之间,既可通过单次测量获得一 片区域的形貌信息,又可避免对区域数据的全部采集所导致的图像处理上的困难。 域,使单次测量包含更大的信息量,而且在采集到的一张图像中有多条光带,能 够同时进行分析,在数据获取和外理上却十十十世 情况下可以不必进行扫描操作就得到物体表面的三维形貌。这类方法中较为常见 的为光栅投影法。

(4) 网格结构光法

to the the By The

to the We B

面射油曲新林塔 网格结构光法采用方形网格作为结构光,与前几种测试方法不同的是,此方 法使用线性滤波分析法来对采集的图像进行分析。通过傅里叶变换实现在频域内 快速的计算和分割处理,从而确定物体的轮廓信息。

multine # # 3 以上方法各有特点,针对不同的测量对象各有优势。结构光法就其本质而言, 是对多点信息的同时测量。当结构光图案经过三维物体的调制而发生变形,其中 就包含了所测面的相位和振幅信息,对所得图案进行解调即可得到包含高度信息 的相位变化,进而推得所测面各处的高度。在不同角度下进行多次测量,再将测 量结果统一到同一个坐标系下,才能组合出一个物体完整的三维信息,得到其数 面如加坡森林塔

to the the B.

to the the B

to the the B

to the the B Ph

字化的三维模型。 相较于其他方法,结构光法架构简单,同时对多点的测量使总体的数据获取 与处理速度较快,有实现实时测量的可能。因此本文从结构光法出发,以激光点 阵作为结构光,设计出一套针对液体表面波测量的 3D 扫描系统。

multitute mark "

Institute # # B

Institute # # 'E PE

Institute # # B

institute # # #

institute # # #

institute # # # #

to the We B PR

matitute mark of

institute # # 'S PR

面的抽機教養後

institute ## # #

institute # # # B

institute # # # 18

institute # # # B

小小学家家

matitute # # 3

而的加快教教学

而這個的

而的加加非常非生活。

institute # # # #

institute # # # #

matilitte # # #

to the the the

matitute m X 3

Institute # # B

institute # # # 12

institute ## # # #

institute # # B

institute # # B

institute ## # # #

to the We B

matitute # # 3

matine # # B

matine # # B PR

面前加快新林塔梯

mating # # B

Institute # # B

institute # # # #

to the the the

Y.

Y.

Y.

×

×

×

×L

×

Y.

multitute m # "

Institute # # # 18

面动动机称带带等落

institute # # # B

institute # # # #

institute # # # #

institute # # # #

to the We the Pho

# 2. 原理及装置资格

multine m # 3

Institute m # "

institute # # # B

With the ## # 13 PS

面的机机都林塔像

to the We the

Institute mark "

而以此此教教学

面射曲服務株塔保

maximue ## # B

mastine # # # PS

institute # # # #

to the the B

multille m # \*

## 而时间的教教学 2.1 测试原理

multille m # "

加根鄉林道際

Institute # # '& PK

而知道那樣後来

matitute ## # #

to the We the

Institute # # 3

matitute # # # #

而出社社教教学

institute # # # B

institute # # B

to the We B PR

R.

X

Y.

Y.

Y.

在流体问题的研究中,往往需要得到液体表面的形貌,以辅助分析与研究。 但是,传统的 3D 扫描方法具有不能测量透明物体的 早四 出 于不能但不出 但是,传统的 3D 扫描方法具有不能测量透明物体的局限性,究其原因,主要在于不能得到较好的 E 的 # 1 \*\*\* 于不能得到较好的反射光情况。并且传统 3D 扫描方法空间高度分辨率有限,无 利用点阵式的结构光,以激光折射的原理来测量液面参数。 类似点结构光法,我们使用一声<sup>油、""</sup> 法很好的测量 0.1 mm 或者更小的水波形状。本实验由 3D 扫描的结构光法出发,

类似点结构光法,我们使用一束激光从透明液面下方入射穿过液体表面。 测试点波面的法线在 x-z 平面由 夹 中 一一 假设测试点波面的法线在 x-z 平面内,考虑 x-z 平面内的光路,如 Fig. 2.1 所 示。

a(t)

matitute ## # 3 P

matinue # # B Fig. 2.1 单光束分析示意图

k d k

收,由于水面的波动,光点将偏离正对位置。记光点偏离量为 a,水面发生折射 处的法线斜率为 k,入射角为 i,折射角为 ; 小河 处的法线斜率为 k,入射角为 i,折射角为 j,水深为 h(对于激光折射法,水深 其实并没有影响,因此也没有电理在中主有217  $\sin i = \frac{1}{\sqrt{k^2 + 1}} , \qquad \cos i = \frac{|k|}{\sqrt{k^2 + 1}}$  $\sin(j - i) = \frac{a}{\sqrt{a^2 + d^2}} , \qquad \cos(j - i) = \frac{d}{\sqrt{a^2 + d^2}}$ 

to the We B

to the the the

因此  
sin 
$$j = \frac{a|k| + d}{\sqrt{k^2 + 1} \cdot \sqrt{a^2 + d^2}}$$
  
根据折射定律  
故  
 $d - n\sqrt{a^2 + d^2}$ 

mistitute # 75

$$k = \frac{d - n\sqrt{a^2 + d^2}}{a}$$

mistitute mar 3

matitute mat 3

multille m # 3

multille # # 'S PR

tinstitute ## # #

(2.1) 新林·塔 化

myinne # # B

因此

mytitute # \*\* \*

mytille # # 13 PS

恨:

R.

×

Y.

Y.

K.

Y.

X

上 按 按 後 化

mistime # \*\*

Institute # # B  $\frac{\partial z}{\partial x} = \frac{a}{n\sqrt{a^2 + d^2 - d}}$ 即  $\frac{\partial z}{\partial x} = \frac{a}{n\sqrt{a^2 + d^2} - d}$ (2.1) 由于  $a \ll d$ ,  $\sqrt{a^2 + d^2} \approx d$ 。而 a 仅表示 x 方向的偏离量,且对于确定的位置 (2.2) # # \* \* \*

a 仅与时间有关,因此将其表示为 $a_x(t)$ ,式(2.1)可改写为 面和加加斯林塔

$$\frac{\partial z}{\partial x} = \frac{a_x(t)}{(n-1)d}$$

matitute # # # 如果考虑y方向,用 $a_y(t)$ 表示光点y方向的偏移量,同样有

$$\frac{\partial z}{\partial y} = \frac{a_y(t)}{(n-1)d} \tag{2.3}$$

institute # # # 18 由此便实现了光点偏移量到波面斜率的转化。光点偏移量是可以通过实验测量的, 而波面斜率能够反映水面的情况,由此便可实现实验测量到水面形貌的转化。

小小田形貌的转化。
小小田形貌的转化。
新率。利用高速相机连续拍照,我们就可以测量出光点偏离随时间的变化曲线,
进而推知水面斜率随时间的变化情况。

Institute # # 3 PS

## 2.2 实验装置介绍 2.2

W W B W

实验装置整体构架如 Fig. 2.2 所示,所用装置可分为测量光路系统及振动系

W W B W

to the the the

to the the the

统,下分别对其进行介绍。



Fig. 2.2 实验装置整体构架

2.2.1 测量光路系统



Fig. 2.3 (a) 测量光路系统仪器图 (b) 所用挡光片放大图

测量光路系统的构成如 Fig. 2.3 所示,由激光器、透镜、挡光片、光屏、高速相机组成,具体功能为

(1) 激光器:测量系统的光源,在本实验中,我们使用了波长 635nm、功率

100mW的激光器。

- (2) 透镜: 焦距为 200 mm 的凸透镜, 用以将激光准直为平行光。
- (3) 挡光片: 开有特定点阵的铝片, 扩束的激光通过带有点阵的铝片后会变为 多束平行激光, 如 Fig. 2.4 所示。



Fig. 2.4 平行光点阵示意图

- (4) 光屏:本实验中使用打印纸作为光屏。光束经过待测对象后通过光屏接收, 便于观察。
- (5) 高速相机:正对光屏背面观察接收到的光点的情况,需要较高的分辨率以 区分光点。本实验中根据测试需求使用了 640\*480 和 2048\*1536 像素的两 种相机。其中 640\*480 像素相机帧率高达 400 帧每秒,可以连续地观察液 面的运动。2048\*1536 像素的相机帧率为 30 帧每秒,由于分辨率较高, 可以用来同时采集超过 400 束激光的位置。

#### 2.2.2 振动系统

振动系统的构成如 Fig. 2.5 所示,由信号发生器、功率放大器、扬声器、振 子组成,用以激发水波,各部分功能如下。

(1) 信号发生器:输出可控的、特定波形、频率、幅值的电信号,激发振动。

- (2) 功率放大器: 放大电信号, 增强振动。
- (3) 扬声器:实现输入的电信号到输出的机械振动的转换。
- (4) 振子: 与扬声器相连,前端为圆柱形或横杆,分别用以激发环形波和平面波。



Fig. 2.5 振动系统仪器图

#### 2.3 本章小结

在第二章中,我们从 3D 扫描的原理出发,结合折射定律得到了光点偏移量 与波面斜率之间的关系,在理论上说明了测试方法的可行性。并且也介绍了本文 实验所使用的器材和装置。

在第三章中,我们通过水波模型模拟水波传播,验证了测试方法的可行性与 精准性,并利用一维激光点阵测量了周期性振动源激发的平面水波的振幅和波速。 在第四章中,我们研究了任意水波波形的测试方法,通过应用二维激光点阵并设 计相应的算法,可以实时得到测试区域的完整三维波形。在第五章中,我们测试 了平面水波的衰减规律和水滴滴在水面产生涟漪的三维波形,展示了我们的测试 方法在流体力学研究中的应用。

#### 3. 利用线阵激光束测试给定点的波速和振幅

#### 3.1 测试原理

对于水中周期性的振动源,在振幅足够小的情况下,产生的水波也是周期性 的。测试点与振动源的距离远大于波长的情况下,水波就可以近似成为平面波。 在本章中,我们研究了利用激光折射法测量周期性平面水波的波速和振幅的方法。

对于平面水波,在波长的尺度范围内,我们可以假设各处水波仅振幅发生变 化,波的其他性质没有改变。因此,如果我们同时测量待测点及其近邻点斜率随 时间的变化曲线,就能根据这些点所包含的信息的差异来推知水波的传播情况。



Fig. 3.1 (a) 两束激光测量水波振幅和波速的原理示意图;
(b) x<sub>1</sub>和x<sub>2</sub>位置液面斜率随时间的变化曲线。

这里为简单起见,我们假设平面水波沿 x 方向传播,如 Fig. 3.1(a)所示。为了 测量  $x_1$  位置水波振幅 z 随时间的变化,我们在相邻的  $x_1$  和  $x_2$  位置设置了两 束激光,并且须满足两个位置间的距离小于水波波长,同时考虑待测点  $x_1$  及其 下一个近邻点  $x_2 = x_1 + \Delta x$ 。

因为水面波前从  $x_1$  移动到  $x_2$  存在时间差,所以  $x_1$  和  $x_2$  位置斜率随时间变化曲线同样存在时间差  $\Delta t$ ,如 Fig. 3.1(b)所示。而两点的位置差  $\Delta x$  与时间差  $\Delta t$  有如下关系

$$\Delta x = c \cdot \Delta t \tag{3.1}$$

其中 c 为波速。

同时,我们可以求得 t 时刻  $x_0$  处的高度  $z(x_0,t)$ 。考虑  $x_0 + dx$  处的高度

11

 $z(x_0 + dx, t)$ ,由于 dx 足够小,因此 t 时刻  $x_0 + dx$  处的高度  $z(x_0 + dx, t)$  可以表示为 t - dx/c 时刻  $x_0$  处的高度,代入  $x_0$  位置斜率的表达式,可以得到  $\frac{dz}{dx}(t) = \frac{z(x_0 + dx, c) - z(x_0, t)}{dx} = \frac{z(x_0, t - dx/c) - z(x_0, t)}{dx} = -\frac{1}{c}\frac{dz}{dt}(x_0)$  (3.2) 将公式(2.2)代入到公式(3.2)中,并对时间 t 积分,即可得到

$$z(x_0) = -\int \frac{c \cdot a(t)}{(n-1)d} dt$$
(3.3)

在实验中,我们可以得到a(t),将其对时间t积分并乘以系数 $-\frac{c}{(n-1)d}$ ,即可得到 $x_0$ 位置水波高度z随时间的变化关系。

实际操作时,由于通过两个点计算波速误差比较大,我们使用了 10 束激光,测量其光斑位置变化曲线中峰值位置的时间差并作平均,从而可以更为准确地计算出波速 c,进而利用公式(3.3)得到测试点振幅随时间的变化曲线。实验中的光点效果如 Fig. 3.2 所示。



Fig. 3.2. 光点组示意图 (a) 静止图 (b) 0 ms 时刻 (c) 25 ms 时刻 (d) 50 ms 时刻 的偏离图

Fig. 3.2 中,相邻点之间的静止位置间距为 2 mm。四张图分别表示了波面静止时 光点组静止的情况以及波面运动时光点组发生偏离的情况,水波的传播方向为横 向。光点分布与水波的传播方向错开 45°是为了通过纵向的错开来保证光点在发 生偏离后不会重叠导致难以区分,在实际测量中可以根据测量对象的不同调整光 点组的参数,以取得合适的测量精度与测量范围。根据一个光点的运动周期就可 以推知水波振动的频率,而通过相邻光点的比对则能得出水波传播的速度,进而 得到测量位置的振幅随时间变化的曲线。下面就以这套方案针对平面波水波模型 进行测量,以验证其准确性。

#### 3.2 利用塑料水波模型验证测试方法准确性

由于实验中水波振幅仅为 10 微米量级,无法用其它方法进行测量验证。因此,为验证激光折射法测量方案的准确性,利用 CNC 机床加工了波长为 10 mm,振幅为 0.1 mm,形状为正弦平面波的塑料水波模型,其总厚度为 8 mm,折射率为 1.49,模型如 Fig. 3.3(a)、(b)所示。将它固定在电动位移台上,以电动位移台控制水波模型以 1 mm/s 匀速通过激光光束阵列测量系统,通过光屏上接收到的光点组可以计算出波速和测量位置高度随时间的变化曲线。整套系统如 Fig. 3.3(c)所示。



(d) 千分表测量水波模型示意图

另一方面,我们使用了千分表实际测试了样品表面的形貌。测试系统如 Fig.3.3(d)所示。通过电动位移台使水波模型以相同的1 mm/s 匀速经过千分表, 并且利用相机实时记录下千分表的读数,测量得到了相同测试点高度随时间的 变化曲线。

对于波速的测量情况,由激光折射法得到的波速为 1.008±0.004 mm/s,与 预设波速 1 mm/s 的相对误差为0.80%,结果较为准确。

对于振幅的测量情况, Fig. 3.4 显示了利用千分表与激光折射法测量的测试

13

点斜率和高度随时间的变化曲线。如 Fig. 3.4(a)所示,两种测试方法测得的斜率 随时间变化曲线趋势和幅度差别很小,但是受限于千分表的测试精度与响应速 度,求导后千分表的测试结果曲线中噪声很大。由于制作的水波模型波幅较小, 受机械加工精度所限,其斜率并不是理想的正弦波形。Fig. 3.4(b)显示了两种方 法测量的对应测试点高度随时间变化曲线的对比情况,结果表明两种方法的测 试结果完美吻合。从图中得到三组波峰、波谷的数据,求平均得到振幅。激光 折射法得到的振幅为86.8  $\mu$ m,而千分表的测量结果为88.2  $\mu$ m,相对误差为 $\mu_A = \frac{88.2-86.8}{88.2} \times 100\% = 1.59\%$ 。



Fig. 3.4 水波模型测试点 (a) 斜率 (b) 高度 随时间变化曲线对比图

通过对比,不但验证了测量方案的可行性,并且表明了这套测试系统的准确 度很高。相对于直接测量,激光折射法三维形貌测量系统具有明显的优势,其精 度及灵敏度都远高于直接接触式测量,此外,非接触式测量不会受到通过接触传 递的不必要的干扰,并且通过增大样品和光屏的距离,测试精度还可以再增加10 倍以上。因此激光折射法非常适合于测量表面高度变化在1-100 微米范围内的透 明样品的表面形貌。

#### 3.3 平面水波测试

平面水波是水波波动最简单、最基础的形式,其他的任何波动模式理论上都可以由平面波叠加而成,因此我们先从平面水波入手进行测试。

#### 3.3.1 测试系统介绍

本次测试采用间距 2 mm 共 10 个点的一维点阵,与水波传播方向成 45°角放 置。以 100 cm×20 cm×10 cm 尺寸的水槽,加入 40 mm 深的水作为待测对象。 以信号发生器、功率放大器、扬声器、振子构成的振动系统激发平面波,振动频 率固定为 10 Hz,其中振子为"T"形结构,纵端连接扬声器,横端稍短于水槽宽 度,从而可以无阻碍地在其中上下振动并且不会产生平面波以外的波。选取距离 波源 150 mm 处在距水面 250 mm 高度放置光屏,以高速相机记录下光点位置随 时间的变化情况,然后输入计算机进行处理。整套系统如 Fig. 3.5(a)所示,产生 的水波效果如 Fig. 3.5(b)所示。





Fig. 3.5 (a) 平面水波测试系统示意图 (b) 平面波效果图

#### 3.3.2 波速和振幅测试结果

根据预设的参数进行实验,可以得到光点组中各光点随时间的运动情况。提取出其中有价值的数据,即光点在水波传播方向的位置随时间的变化,作出图像如 Fig. 3.6 所示。





Fig. 3.6 各光点在水波传播方向上的位置随时间的变化情况

可以看到,在这样的小块区域内可以忽略水波的衰减,各光点的位置(等价 于斜率)随时间变化的曲线形状完全相同,均为围绕平衡位置的周期性振动,相 互之间只相差一个固定的时间差。对于任意一条曲线,一个周期都是 0.1 s ,即 测得水波振动频率为 10 Hz ,与振动源振动频率是完全一致的。再考虑曲线间 的对比,我们选取每条曲线对应的极大值位置作为研究点,这些点在 Fig. 3.6 中 以虚线相连,它们的分布是线性的,即固定的位置差  $\Delta x$  对应于固定的时间差  $\Delta t$ ,因此波速在传播中是不变的,其值为  $c = \frac{\Delta x}{\Delta t}$ ,在 Fig. 3.6 中就是虚线的斜 率。对于以上所说的各极大值位置的横坐标统计如 Table 3.1 所示,共取四组极 大值位置的横坐标。

	1	2	3	4
<i>t</i> <sub>1</sub> (s)	0.02097	0.12154	0.22135	0.32191
<i>t</i> <sub>2</sub> (s)	0.02799	0.12781	0.22837	0.32818
<i>t</i> <sub>3</sub> (s)	0.03426	0.13408	0.23389	0.33445
<i>t</i> <sub>4</sub> (s)	0.04053	0.14110	0.24091	0.34147
<i>t</i> <sub>5</sub> (s)	0.04680	0.14737	0.24718	0.34699
$t_6(s)$	0.05307	0.15364	0.25345	0.35401

Table 3.1 四组极大值位置的横坐标

<i>t</i> <sub>7</sub> (s)	0.05934	0.15991	0.25972	0.36028
<i>t</i> <sub>8</sub> (s)	0.06498	0.16618	0.26536	0.36655
<i>t</i> <sub>9</sub> (s)	0.07188	0.17245	0.27226	0.37219
<i>t</i> <sub>10</sub> (s)	0.07815	0.17871	0.27790	0.37846
$\Delta t(s)$	0.00628	0.00636	0.00628	0.00634

对于测得的每一组极大值点都以最小二乘法计算得到相邻点之间的时间差。光点 在水波传播方向上的间距为 1.41 mm ,故可算得给定点的平均波速为 0.224 ± 0.001 m/s。进而利用公式(3.3),得到了测试点(第5个点)水面高度随时间变化 曲线 Fig. 3.7。



Fig. 3.7 测试点水面高度随时间变化曲线

测试结果显示,水面高度振动幅度约为 0.0349±0.0002 mm。根据相关文献, 沿平面传播的深水波可以表示为若干阶余弦函数叠加的形式<sup>[7]</sup>,对测得的高度随 时间变化曲线以余弦函数进行拟合,如 Fig. 3.7 所示,两者的变化趋势基本一致。 由于振动源不是以标准的正弦波形式运动,激发的水波含有 10 Hz 倍频的分量, 所以高度随时间的变化曲线也不是理想的余弦函数。

而对于不同频率水波的测试情况,只要满足点阵中相邻光点在水波传播方向

上的间距小于水波波长,就仍然可以在一个周期内进行处理,从而唯一确定各点 的时间差,进而得到波速与振幅。

#### 4. 任意波形实时 3D 测试

#### 4.1 测试原理

根据公式(2.2)、(2.3),波幅 z 在 x、y 两个方向上的偏导数可以通过激光点在 x 和 y 方向的偏移量计算出来。在本章中,我们使用二维激光阵列,从而可以同时测量出不同位置光斑在 x、y 方向的偏移量,进而构建出水波的三维形貌。

4.1.1 点阵

相较于周期性平面波,任意波形的传播不再局限于一个方向,波形也更为复杂,因此需要以二维点阵来反映水面情况。其表现效果如 Fig. 4.1(a)所示,相邻 光点的静止位置间距为 2 mm,共20×20个点。



Fig. 4.1 (a) 二维点阵效果图 (b) 光点难以分辨的点阵图

考虑到水面 3D 形貌构建的精度,光点间距应取得较小,以保证获得水面准 连续的点云数据。但是如果激光点过密,在测试中激光点出现偏移时相邻光点会 出现难以分辨的情况,如 Fig. 4.1(b)所示,因此影响了测试的精度。实际实验中, 需根据测量对象应用合理的精度与测量范围,选取合适的激光光点间距,水面、 光屏距离。

#### 4.1.2 三维波形重构算法

从获取的二维点阵图,能够直接得到的是各光点的偏离情况,将其换算为水面各位置的  $\frac{\partial z}{\partial x}$ 、  $\frac{\partial z}{\partial y}$ ,然后就可通过积分得到测量区域内水面的 3D 形貌。由此设计了相应的算法来实现数据的处理。

5 mm



Fig. 4.2 二维点阵网格划分 (a) 水面静止 (b) 水面波动

(1) 网格划分:根据水面静止时的二维点阵图可以初步确定各点的静止位置,以点间距为边长划分方形网格并且静止时的光点均位于网格中心,如 Fig. 4.2(a) 所示。之后对于每一个点的搜索都局限于它对应的网格内, Fig. 4.2(b)表现了水面 波动时光点在网格内的分布情况。

(2)寻点:在各网格内,对每一个像素点的位置以亮度为权重进行加权平均, 获得每一个光点的实际位置。以此算法重新确定各点的静止位置,之后各时刻各 光点的位置与静止位置作差可得到光点偏移量的实时数据。

(3)波形重构: 假设第 *i* 列第 *j* 行的点坐标为(x<sub>i</sub>,y<sub>j</sub>), 偏移量 x 和 y 分量分别为
 a<sub>x</sub>(*i*, *j*, *t*) 和 a<sub>y</sub>(*i*, *j*, *t*), 则根据公式(2.2)、(2.3),

$$\frac{\partial z(x_i, y_j, t)}{\partial x} = \frac{a_x(i, j, t)}{(n-1)d}$$
(4.1)

$$\frac{\partial z(x_i, y_j, t)}{\partial y} = \frac{a_y(i, j, t)}{(n-1)d}$$
(4.2)

可将偏移量换算成各点实时的偏导数,再通过插值的方法得到测量区域各位置的偏导数。对于确定的时刻,不同的位置,

$$z(x, y, t) = \int_0^x \frac{\partial z}{\partial x}(x, 0, t)dx + \int_0^y \frac{\partial z}{\partial y}(x, y, t)dy$$
(4.3)

可由各位置的偏导数积分出某一时刻测量区域各位置的波高,得到水面波形。实际算法中采用了较为简单的积分形式,将某一角上的点设为零点并作为积分的起点,通过插值将积分步长减小,先对 *x* 后对 *y* 进行积分,得到了测量区域的水面 波形。实验中可以对二维点阵进行连续的拍摄,如果计算机处理速度足够快,便可以得到实时的水面 3D 形貌。

#### 4.2 周期性点振动源激发的水波波形测试

为实现对任意波形的实时 3D 测试,我们以环形波为例,展示了从数据采集 到水面 3D 形貌构建的整套流程,并测量了环形波的波形随时间的变化。

#### 4.2.1 测试系统介绍

类似于 Fig. 3.5(a)的平面波测量系统,我们将挡光板换为二维点阵,水槽尺 寸换为40cm×40cm×15cm,振子换为圆柱形,在水槽中心激发周期性振动,固 定振动频率为 20 Hz,产生的环形波效果如 Fig. 4.3(a)所示。实验选取在相对位置 如 Fig. 4.3(b) 所示处进行测量,光屏距离水面 150 mm,以高速相机连续拍摄光 屏上的二维点阵,导入计算机进行分析。





Fig. 4.3 (a) 环形波效果图 (b) 环形波测量位置示意图

整个测试流程包括了获取点阵、计算光点偏离、反推水波波形三个步骤,现 对其进行详细说明。



(1) 获取点阵

根据预设参数,测得某一时刻点阵如 Fig. 4.4(a)所示。光点的偏离相对较小,均分布在各点对应的网格内,删去缺少光点的上下各三行,以剩余的点阵进行后续的处理。

(2) 计算光点偏离

将采集的图片导入设计的算法程序中,得到各光点的偏移量数据,画出偏离 值(各点偏离静止位置的绝对值)随位置的变化图像如 Fig. 4.4(b)所示。由于偏 离值与波面斜率满足简单的线性换算关系,因此图像也可表示波面斜率随位置的 变化情况。可以看到,偏离值的等值线呈现明显的圆弧形,其大小随水波传播周 期性变化,在我们测量的时刻,环形波呈现出明显的衰减情况。由于偏离值取 *x*、 *y*方向偏离的均方根,因此只代表了偏离的大小,偏离值图所反映的频率为水波 实际频率的两倍。

(3) 反推水波波形

将偏离值换算为波面斜率,代入积分算法得到测量区域内各位置的波高,画 出波高随位置的变化图像如 Fig. 4.4(c)所示。图像表明,测量结果符合所选测量 区域的环形波的波形,测得的水波波长为 10 mm,振幅初始为12 μm,传播一个 波长以后衰减为7 μm,之后衰减逐渐减慢。这样的衰减情况与环形波的传播方式 密切相关,即使假设在传播过程中没有能量的损耗,由于波面在传播过程中不断 扩大,也将导致振幅随传播距离的增大而减小。根据相关文献,水波的能流密度 (波的强度)与振幅平方成正比<sup>[8]</sup>,而随传播过程中水波环面的扩大,其上各位 置的能流密度与到振动源的距离成反比,因此振幅与振动源到所测位置距离的 - <sup>1</sup>/<sub>2</sub> 次方成正比。

Fig. 4.4(d)为三维视角下的 Fig. 4.4(c),更为直观地展现了水波的波形。立体 图即为根据获取的水面点云数据进行重构的结果,反映了水面的三维形貌。

至此,实现了对某一时刻水面的一片区域的 3D 扫描,得到了水面的三维形貌。

4.2.3 波形随时间的变化

水波的传播过程是动态的,需要在测量中得到波形随时间变化的情况。在测量系统中,通过高速相机的连续拍摄,实现了对水面信息的连续采集。选取时间间隔为1/30s的4帧点阵图像,按照上一小节的流程进行处理,结果如 Fig. 4.5 所示。

结果表明,在测量区域,水面的斜率(通过偏离值图反映)和波形关于位置的分布都具有确定的规律性:(1)振幅的大小仅与所在位置到振动源的距离有关,沿水波传播方向可以发现明显的衰减;(2)波长始终为10mm,波形除幅值的差异外仅相差一个固定的相位差,故仍可以通过固定的相位差计算波速。不妨做一个粗略的估算:4组图像相邻之间的时间间隔为1/30*s*,因此测量到的波形变化在一个波长之内,如Fig.4.5(c)中虚线所示,这是一个波峰在测量区域内的传播情况。在所测量到的100ms中,此波峰传播了约21mm的距离,波速的估算值为0.21m/s,这与通过水波的波长和频率得到的计算值相一致。

23



Fig. 4.5 不同时刻的 (a) 点阵图 (b) 偏离值图 (c) 波形图 偏离值图、波形图颜色标尺单位为 mm

### 5. 波面 3D 扫描应用

激光折射法能够实现对透明液体表面形貌的实时 3D 测量,这给液体性质的研究带来很大的便利。下面以测量平面水波的衰减规律和水滴滴在水面时涟漪的 三维波形为例,说明这套测试系统在流体力学研究中的应用。

#### 5.1 水波衰减的测量

通过对波面的 3D 扫描可以实现水面各处振幅的测量,从而得到水波振幅随 位置的衰减情况,为理论研究提供实验依据。本节在多点测量了平面水波的幅值, 得到了其衰减情况。

实验仍采用如 Fig. 3.5(a)所示的平面水波测试系统。在距离振动源 75 mm、100 mm、125 mm、150 mm、175 mm、200 mm 处分别进行测量,得到各测量位置的波高随时间变化关系曲线,如 Fig. 5.1 所示。



Fig. 5.1 各测量位置的波高随时间变化关系曲线

各测量位置的曲线呈相同的变化规律,幅值自下而上逐渐减小。读出各曲线的波峰与波谷处的坐标,通过逐差法计算得到各测量位置的平均振幅。根据其他方法测量水波衰减的相关文献<sup>[9]</sup>,选择以  $y = a \cdot e^{bx}$ 形式的e指数函数拟合出振

25

幅随位置的衰减曲线,如 Fig. 5.2 所示,由此即可得到水波传播的衰减因子。当 然,实验仅仅提供了一种测量思路,选取的测量位置较少,拟合得到的曲线相对 误差较大,应选取更小的测量步长以得到更完美的拟合曲线。更为精确地,可以 考虑通过位移装置实现测量系统对平面波一段区域的扫描,得到准连续的振幅数 据,由大量数据点直接连出平面波的衰减曲线。



Fig. 5.2 振幅随位置衰减拟合曲线

#### 5.2 水滴激发波面形貌的测量



Fig. 5.3 水滴激发涟漪的测量位置示意图

在实验中,我们以水滴激发的波面传播过程研究为例,展示了本方法在研究 任意波形变化过程中的作用。在距水面 20 mm 的高度滴水以激发水面涟漪,在 距波源 30 mm 处进行测量,相对位置如 Fig. 5.3 所示,光屏距离水面 60 mm。测 得一次滴水产生的涟漪从进入到离开测量区域的全过程,不同时刻的点阵图、偏 离值图、波形图、立体图分别如 Fig. 5.4 、Fig. 5.5 、Fig. 5.6、Fig. 5.7 所示。



在0ms时刻,点阵右端有明显的弧形偏离,到33ms时刻,光点的偏离向前

传播,67ms、100ms时刻在区域内各处均有光点的偏离,但偏离程度很小,之后时刻的偏离很小,肉眼难以分辨。



Fig. 5.5 不同时刻偏离值图 其中颜色标尺单位为 mm

0 ms时刻的偏离值图右端有整个过程中的最大的偏离值,之后的偏离值在向前传播的同时幅值不断减小,这与点阵图的情况一致。这样的变化情况反映了涟漪的波列前端波形较陡,而后端波形较为平缓。



Fig. 5.6 不同时刻波形图 其中颜色标尺单位为 mm

波形图反映了水面各处的高度情况,图像表明,滴水激发的涟漪是一段不均 匀的波列。自 0 ms 起,波列前端进入测量区域,前端的振幅最大值约 0.02 mm, 波长约为 7 mm。在 100 ms 时刻,波列中间一段进入测量区域中心,其最大振 幅达 0.06 mm,此时波长约为 11 mm。到 133 ms 时刻,波列中最高的峰逐渐离 开测量区域中心,其后波的振幅减小,波长明显增大。到 200 ms 时,只剩一个 约 0.03 mm 高的波峰还在测量区域,其后水面略低于静止位置,水面的振动还未 完全平静。 立体图将之前各图的规律直观地反映出来,其波高分布与波形图一致,表现 了水滴激发的涟漪波列自前到后振幅先缓慢增大,在略靠后处达到极大值,然后 迅速减小的变化规律。而在波长上,波列前端波长较短,波峰分布较密,波形较 陡,之后波长逐渐增大,波峰分布变稀疏,波形变平缓,直到幅值迅速减小后无 法再观察到波峰,这与点阵图与偏离图所表现的规律相一致。



Fig. 5.7 不同时刻立体图 其中颜色标尺单位为 mm

#### 6. 总结与展望

#### 6.1 总结

本文从 3D 扫描的原理入手,根据结构光法加以改进,结合光的折射原理, 提出一套适合于测量液体表面微幅波动的三维形貌测量系统。对其测试表明,测 试方法行之有效,测量结果与实际的波面情况符合很好,适用的测量范围为1-100 µm。实验的光路设计运用了简单的光学放大原理,实现了较高精度的测量, 相对误差在 2%以内。

以此测量系统分别对平面波、环形波、水面涟漪等波形进行了测试,对各类 波形都实现了较好的表面形貌重构,同时可以获得水波的振幅、频率、波长、波 速等参数。

实验中首先以水波模型模拟实际水波的传播,测量结果与水波的实际波形完 全吻合,表明测量系统的精准度很高。

其次,应用一维点阵结构光对平面波进行了测量,通过点阵各点的相位差计 算得到了给定点的波速与振幅。相应地,可以以此研究平面水波的衰减规律。通 过一维点阵对平面波多个位置的测量,可以准确得到各位置的振幅情况,拟合得 到平面波随传播距离的衰减曲线。更为精确地,可以通过扫描的方法得到平面波 一段区域内准连续的振幅数据,由大量数据点直接连出一条衰减曲线。

最后,实验以二维点阵结构光实现了对任意波形的测量。通过对二维点阵光 点划分网格、寻点,得到各位置的偏离值,将其换算为波面斜率,最终插值并积 分得到测试区域的水面波形。对于周期性的环形波,我们测量了其不同时刻的波 形,由此得到了水面三维形貌的实时变化情况,并且从各时刻的图像中可以直接 得到波长、波速、振幅等信息。此测量方法对于流体问题的研究具有实际应用价 值,以水滴滴在水面激发的涟漪为例,激光束阵列可以实时地测得此具有随机性 的波列从进入测试区域到离开的全过程,得到其传播过程中的波形情况。结果表 明,水滴激发的涟漪波列的振幅自前到后先增大后减小,在波列稍靠后的位置有 一个振幅的极大值,而其波长则是自前到后逐渐增大,最终变为长波长,小振幅 的微幅波动,水面趋于平静。

#### 6.2 展望

基于激光阵列的激光折射法三维形貌测量系统能够实现对透明、微幅振动液体的波形及其振动的各参数的实时测量,并且有相当高的精度。通过这套测量系统,可以实现对微米尺度的水面三维形貌的实时测量。对于现实中的各类水体问题,如潮汐、船波、物体激发的水面涟漪、气流引起的表面波等,都可以在实验室通过缩小尺度以这套测量系统进行等效的研究。这对于流体规律的探索和流体问题的研究具有很大的应用价值。

此外,这也为水面的测量提供了一些新的思路,即类似 3D 扫描一样获取水 面的点云数据,进而重构表面形貌,这对测量系统和重构算法的设计都具有一定 的要求。具体而言,测量系统的接收端离得越远,光学放大效果越明显,测量精 度也就越高,但相对地,可实现的测量范围将会减小。实际的使用需兼顾测量精 度与测量范围两方面的要求,选择合适的放大参数。而在算法上,主要体现为对 数据的有效利用,采用更密的点阵固然能得到更精细的数据,但只有将这些数据 都进行了合理的处理,才能充分利用其中包含的信息,重构出更为精准的 3D 波 面。本实验中所采用的位置信息采集与积分算法都是比较简单的,可以在以后的 实验中加以改进。对于位置信息采集,其算法可以不必局限于划分的网格内,设 计合理的算法可以实现全区域的光点追踪,这样便可实现大振幅波的测量。对于 积分算法,二维曲面的积分是一个研究较多的问题,有较多的方法可以实现更精 确的积分计算,从而提高重构波形的精确度。

### 参考文献

- Richard J. Campbell, Patrick J. Flynn. Free-form 3D object recognition in range data using weak correspondence between local features [J]. International Journal of Pattern Recognition and Artificial Intelligence, 2008, 17(07):1245-1277.
- [2] Sung Joon Ahn, Wolfgang Rauh, Sung Il Kim. Circular coded target for automation of optical, 3D-measurement and camera calibration [J]. International Journal of Pattern Recognition and Artificial Intelligence, 2008, 15(06):905-919.
- [3] Massa J S, Buller G S, Walker A C, et al. Time-of-flight optical ranging system based on time-correlated single-photon counting [J]. Applied Optics, 1998, 37(31):7298.
- [4] Schwarte R. Simulation of the optical transmission in 3D imaging systems based on the principle of time-of-flight [J]. Proceedings of SPIE - The International Society for Optical Engineering, 2000, 4093(4):407-414.
- [5] https://en.wikipedia.org/wiki/3D\_scanner
- [6] Bernardini F, Rushmeier H. The 3D Model Acquisition Pipeline [C]// Computer Graphics Forum. Blackwell Publishers Ltd, 2002:149–172.
- [7] 侯一筠. 深水有限振幅重力波的一种解法 [J]. 海洋与湖沼, 1992, 23(6):619-625.
- [8] 庄甘霖, 陈秀宏. 基于真实能量衰减方程的水面特效模拟 [J]. 计算机工程与 设计, 2013, 34(06):2114-2118.
- [9] 苗润才, 时坚, 赵晓凤. 干涉法测量低频表面波的衰减系数 [J]. 光子学报, 2005, 34(3):382-385.

#### 致 谢

本论文的完成,离不开许多人的支持和指导。如果没有他们,我们会难以完 成实验探究和论文写作。在本论文即将完成之际,我们向所有帮助我们的人致上 衷心的感谢。

首先, 诚挚感谢潘志民老师给予我们团队极大的关心和指导。潘志民老师作 为学校的物理老师, 他渊博的专业知识、严密的逻辑思维、认真负责的工作态度, 严谨的治学风格, 让我们领略了物理学科的无限魅力, 是我们得以开始本研究的 关键。在我们为选题纠结之时, 他散发性思维的指导, 启发了我们选题的深度和 广度。在实验设计的过程中, 他循循善诱的教导, 让我们学到了课本之外的很多 知识。在我们遇到问题和困难时候, 他给予了细心解答和真诚帮助, 让我们受益 匪浅。感激之情, 不胜言表。

其次我们特别感谢我们自己的团队,在整个实验探究过程中,经过无数次失 败和淬炼,我们始终对科学的探究充满激情,相互之间给予了极大的支撑和心理 激励。从独立思考到创新选题,从实验设计到实验探究,从实验条件控制到实验 材料准备,从实验过程到实验测量研究,从实验数据获得到数据处理,从论文的 搭建到论文的完成,从白天到黑夜,从日常学习日到周末休息日,我们沉浸其中, 无怨无悔,我们既是科学探究之路上的孤独者,又是美妙物理世界的寻宝者。我 们感谢刘逸凡同学在此次实验论文中做出的贡献,他睿智风趣的学者风范,深厚 的物理造诣,为本次论文提供了正确的研究方向。我们感谢刘清源同学在此次实 验论文中做出的贡献,他理性的科学思维,独立思考的能力,为本次论文拓展了 研究深度。感谢我们共同完成了此次论文的撰写,感谢我们对物理世界的共同探 索。

同时,真诚感谢我们的家长,感谢所有帮助过我们的老师和同学们。他们的 关心和鼓励是我们研究期间的精神后盾。感谢他们对我们默默的支持。

最后,感谢为评阅本论文而付出宝贵时间的专家和教授们!

33

#### 学术诚信声明

本参赛团队声明所提交的论文是在指导老师指导下进行的研究 工作和取得的研究成果。尽本团队所知,除了文中特别加以标注和致 谢中所罗列的内容以外,论文中不包含其他人已经发表或撰写过的研 究成果。若有不实之处,本人愿意承担一切相关责任。

参赛队员: 刘逸凡 刘清源 指导老师: 潘志民

2017年9月15日