

摘要

力学是科学与工程技术之间的一座桥梁，也是人们认识自然的一个极其重要的手段。在其漫长的发展过程中，实验研究一直扮演着十分重要的角色，而位移和变形的测量是在实验研究中最基本的任务之一，因为它们是力学行为最直接的反映。光学测试方法作为一种非接触、全场测量的方法，其各种优点显得尤为突出，已经被广泛应用于物体的面内变形、离面变形、三维形貌以及材料力学性能等领域的测量，并日渐成为微结构与材料静动态性能的一种最基本而有效的测试技术。离面变形是光测力学最基本的测量参数之一。通常，离面变形的光学测量方法需要对被测物体表面做适当处理，甚至需做成模型，然后通过光学干涉形成条纹，再从条纹中提取所需的位移信息。由于这类测量方法大多基于光波干涉原理，因此，测量过程对环境要求比较高。作为一种最活跃也最有生命力的光测力学方法，数字散斑相关方法(DSCM)以其简单、无损、全场、非接触、高精度、自动化程度高等优点已被成功应用于科学的研究和工程实际的许多领域。本文的研究旨在利用数字散斑相关方法，使用单相机实现物体离面位移的测量，使得离面位移的测量变得简单、快速。在此基础上建立了简单适用的鼓膜测试系统。本论文的主要工作和成果如下：

1. 根据测量离面位移的光学方法和数字散斑相关法的基本原理，采用单相机实现了离面位移的数字散斑相关测量，即将数字散斑相关与光学投影测量相结合的投影散斑法。该方法是从侧面倾斜一定角度将人工散斑投影到物体表面，一般情况下 CCD 相机也倾斜放置。当物体发生离面位移时，散斑受高度的调制而发生移动。用数字图像相关方法计算出像面上散斑的位移，根据几何关系就可以得到物体表面的高度变化。
2. 研制了测量离面位移的高精度数字散斑相关测量设备，相对精度达到 1: 10000。本文深入探讨了远心镜头在提高离面位移测量精度方面的重要作用，同时分析了镜头参数和相机参数与提高系统测量精度之间的关系，为进一步研制类似光测系统的硬件提供了一些参考。
3. 开发了用于测量离面位移的 DSCM 软件。利用 VC++6.0 开发工具，编制了该系统的配套软件。本软件使用了多线程技术，不仅可以实时显示图像，而且可以根据不同的测试对象添加相应的有针对性的功能，更加方便用户操作。
4. 利用所研制的离面位移测量系统，进一步研制了用于薄膜力学性能测试的实验装置，并用于鼓膜法测量薄膜力学性能的实验研究。
5. 为了方便操作，特别设计了弹簧活塞加油系统。鼓膜测试过程中，油缸中的油会有少部分的损耗。由于加油过程中极易混入空气，从而导致加载数值测量不准确或者活塞超出行程，特别设计了与油缸相联通的弹簧活塞部分，通过旋钮控制，从油缸底部加油，避免了空气进入油缸。

6. 利用电控平移台实现了亚微米、大量程的系统标定。不需要额外的标定装置，直接利用加载用的电控平移台通过软件界面控制对电控平移台的步进电机进行 80 细分，即可实现间隔为 $0.25 \mu m$ 高度标定。

关键词：数字散斑相关方法；离面位移测量；系统标定；鼓膜测试；薄膜力学性能

ABSTRACT

Mechanics is the bridge of science and engineering technology, which is also an important means of people understanding of nature. In its long course of development, experimental research has played an important role, and the measurement of displacement and deformation is one of the most basic tasks in the experimental study, because they are the most direct reflection of the mechanical behavior. The optics measurement method is a non-contact, whole field technique deformation measurement. And the optics measurement method has been applied to measure in-plane deformation, out-of-plane deformation, three-dimension surface and the mechanics characteristic of materials. The advantages of optics measurement method give prominence to the static and dynamic deformation measurement of micro structure and become one of the best of all basic and effective method. Out-of-plane displacement is one of basic parameters of optics measurement method. Usually, the optical method of out-of-plane displacement measurement needs make a sample treatment, even a model. Then use optical interference to produce fringe and extract displacement information from fringe. Most of these measurements based on the principle of light interference, therefore, the measurement process is relatively high demands on the environment. As one of the most active and lifelong photo-mechanics methods and so on, digital speckle correlation method (DSCM) have been applied successfully to many areas of science and engineering. This study aimed at using the DSCM to measure the out-of-plane displacement with single camera, so as to making the displacement measurement become simple and rapid. Furthermore, an integrated system based on the proposed method is developed to measure the thin film out-of-plane displacement. The main contents and achievements are as follows.

1. Based on the optical methods of the out-of-plane displacement measurements and basic principles of DSCM, the DSCM for out-of-plane displacement measurement with single camera is realized. This method is the combination of the DSCM and the optical projection measurement method. The basic principle is projecting the artificial speckle pattern onto the object's surface with an angle from the side and commonly inclining place the CCD camera. When the object surface out-of-plane displacement occurs, the speckle will move by modulation of the height. The digital image correlation method is used to calculate the speckle in-plane displacement on the image, then, out-of-plane displacement can be measured by the geometric relationship.

2. The equipment of the DSCM for out-of-plane displacement measurement is developed. The relative accuracy can reach to 1:10000. The important roles of telecentric lens on improving the accuracy of out-of-plane displacement measurement are further discussed. At the same time, the relationship between the lens parameter and camera parameter and the improving of system measurement accuracy is analyzed in order to provide some reference for further development of similar optical measurement system hardware.

3. The software of the DSCM for out-of-plane displacement measurement is developed. By

using of VC + +6.0 development tools, the system software is worked out. The multi-threading technology used in this software can not only display images in real time, but also can be added the corresponding functions according to different tested objects, making it more user-friendly operation.

4. By use of the out-of-plane displacement measurement system, the laboratory equipment for testing the mechanical properties of thin film is developed here and used for the experiment research of Bulge Test.

5. The spring-piston-infuse-oil system is specially designed for convenience operation. During the Bulge Test process, the oil stored in the pressure tank will be a small portion. Because it is easy to be mixed with air, resulting in inaccurate measurement of load values or piston over schedule, we specially designed the fuel tank with spring piston part. Through the knob control, the oil is infused from the bottom of the fuel tank to avoid air entering the oil tank.

6. By use of electric-controlled translation plat, the system calibration with sub-micron and large range is realized. No need for extra calibration device, directly use the electric-controlled translation plat for load, through the software interface to control the electric-controlled stepper motor shift for 80 subdivision, the $0.25\mu\text{m}$ height distance calibration can be achieved.

Keywords: digital speckle correlation method (DSCM); out-of-plane displacement measurement; system calibration; Bulge Test; thin film mechanical property

东南大学学位论文独创性声明

本人声明所呈交的学位论文是我个人在导师指导下进行的研究工作及取得的研究成果。尽我所知，除了文中特别加以标注和致谢的地方外，论文中不包含其他人已经发表或撰写过的研究成果，也不包含为获得东南大学或其它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。

研究生签名: 刘婧婧 日期: 2009.9.29

东南大学学位论文使用授权声明

东南大学、中国科学技术信息研究所、国家图书馆有权保留本人所送交学位论文的复印件和电子文档，可以采用影印、缩印或其他复制手段保存论文。本人电子文档的内容和纸质论文的内容相一致。除在保密期内的保密论文外，允许论文被查阅和借阅，可以公布（包括刊登）论文的全部或部分内容。论文的公布（包括刊登）授权东南大学研究生院办理。

研究生签名: 刘婧婧 导师签名: 何小之 日期: 2009.9.29

第一章 绪 论

1.1 研究背景和目的

力学是科学与工程技术之间的一座桥梁，也是人类认识自然的一个极其重要的手段。在其漫长的发展过程中，实验研究一直扮演着十分重要的角色。它不仅是验证和完善力学基本理论的重要手段，而且也为许多工程实际问题提供了设计依据，更重要的是人们借助于实验可以揭示各种新材料在新环境中的一些特殊力学行为的机理，从而推动了力学及材料科学的研究的进一步深入。

在实验研究中，位移和变形的测量是最基本的任务之一，因为它们是力学行为最直接的反映。而在位移和变形测量的各种技术中，光测力学以其非接触、全场测量、无附加质量、速度快和灵敏度高等优点，长期以来为人们所重视，并被广泛应用于航空、航天、造船、机械、建筑、医学、军事、农业、材料科学、生物科学及微电子机械系统(Micro electro mechanical Systems, MEMS)等领域。

微电子机械系统是集传感、信息处理和执行为一体的集成维系统^[1]。微电子机械系统技术的迅速崛起，推动了所用材料微尺度力学性能测试技术的发展^[2]。近十余年来，已经成为重要的高新技术领域和研究工作热点^[3]。

MEMS 所使用的材料多以单晶硅和在其上形成的微米级、亚微米级厚的薄膜为主，已经广泛地用于微电子元件和工程结构件的制造上^[4]。薄膜材料主要有单晶硅、多晶硅、氧化硅、氮化硅和一些金属，还有聚酰亚胺等高分子材料。这些材料通过化学气相沉积、溅射、电镀等方法形成薄膜，再经过光刻、蚀刻、牺牲层腐蚀、体硅腐蚀等形成各种形状，构成微机械结构。MEMS 器件要求薄膜不仅有良好的电磁光性质，还要求器件中的薄膜结构能够承受机械载荷、传递力和运动。微电子机械的研制和发展反过来又加速了薄膜力学性能的研究。基本构件主要有细丝、悬臂梁、微桥、薄膜、齿轮和微轴承等，由这些基本构件组合成的结构不是传统机械的简单几何缩小。当构件细微到微米/纳米尺度后，材料本身力学、物理性质及其受环境影响的程度有显著变化，会出现强烈的尺寸效应、表面效应等。常规条件下材料的力学性能参数已远不能满足 MEMS 系统结构的设计要求^[5]。目前，硅类薄膜材料的电学特性、化学特性均得到充分地了解，而材料力学性能检测的工作始终未能跟上，这已成为 MEMS 设计及其 CAD 发展中的一个制约因素^[6]。

薄膜材料在 MEMS 的设计和使用中，迫切需要了解下面几个重要的力学特性：弹性模量(决定器件的结构响应特性)、残余应力(影响器件的成品率和服役性能)、断裂强度(设计承载构件中最重要的材料特性)、疲劳强度(决定器件长期使用的可靠性)。近十年来，研究者们纷纷开始研制小型化的精密测量装置和与之相匹配的试样，用于研究材料的力学

性能,最大的挑战是自制仪器的校准和确定实验系统的可靠性^[7]。MEMS 试样的特征长度一般在 1mm 以下,这给实验带来一系列困难,如:如何制作、夹持、对中(保持试样与拉力之间的同轴性)微小试样,如何提高载荷和位移测量的分辨率,如何模拟 MEMS 器件的世纪结构和应力状态,如何完善理论模型等。

数字散斑相关方法是现代数字图像处理技术与光测力学相结合的产物。传统的光测力学方法,如光弹、云纹、全息、云纹干涉、散斑干涉,一般都需要对被测物体表面作预处理,如涂散射涂层、刻画网格与栅线,甚至需要做成模型,然后通过特定的光路形成条纹,再从条纹中提取所需的信息。由于这类测量方法大多基于光波干涉原理,因此,光测方法对测量环境要求比较高,一般只能在实验室条件下进行。至于在一般工程现场中的应用,则几乎是不太可能。上世纪八十年代发展起来的电子散斑干涉技术,尽管用光学电子元件代替了传统的照相干板,但其仍然以干涉条纹作为测量基础,对测量环境仍有相当高的要求,因而应用领域与其它光测方法基本相同——只能在实验室进行。其实,物体表面自然或人工形成的随机斑点,包括物理的表面微观结构和光学的表面散斑场,本身就是信息的载体。它们在物体变形过程中发生相应的变化,因而包含了变形过程的大量信息。传统的光测方法是通过光学干涉形成的条纹来提取变形信息,需要特定的测量环境,从而难以在工程现场应用,而且其应用领域也受到与干涉条纹有关的一系列限制。如能避开条纹而直接从这些信息载体中提取变形信息,变形测量同样得以实现。数字散斑相关方法正是这样一种从物体表面的随机分布的斑点或伪随机分布的人工散斑场中直接提取变形信息的全场、非接触的光测方法^[8]。

本文研究的目的在于利用现代光电测试技术、数控技术、电子技术以及计算机图像处理技术,研究开发一种操作简便、易于推广的离面变形测量实验方法,研制测量设备和测试分析软件,并应用该系统来研究薄膜结构的力学性能。

1.2 数字散斑相关方法进展

数字散斑相关方法(Digital Speckle Correlation Method, DSCM)是在上世纪八十年代初由日本的山口一郎^[9]和美国南卡罗来纳大学的 W.H.Peter 和 W.F.Ranson^[10]等人同时独立提出的。前者着重于研究一维变形场的测量,并进行相应的仪器化工作,而后者则限于对局部变形场的算法进行研究和改进,并应用于一些实际测量问题中。

山口一郎在研究物体小变形时,采用测量物体变形前后光强的互相关函数峰值来导出物体的位移。他采用双光束照明,并在照明点法线方向放置图像传感器,推导了物体变形与在衍射场中散斑位移的关系,利用这个关系导出了与表面应变有关的项,因而提出一种测量表面应变的激光应变计。山口一郎的激光应变计使用光二极管阵列分别接受对称入射的两个直径为 1mm 激光照射被测物体时的衍射光场,并存入计算机。对加载前后同一方向的衍射光场信号进行互相关运算,导出阵列方向的位移 $A_{x1}(\theta_s)$ 和 $A_{x2}(-\theta_s)$,由计算机自动

求出两者插值: $\Delta A_x = A_{x2}(-\theta_s) - A_{x1}(\theta_s)$, 再导出应变值 ϵ_{xx} 。这个应变的数值与电阻应变计的测量值进行比较, 结果是一致的。该方法可以获得的最小应变值约为 20 微应变, 标距 1mm, 测量时间 10s。

与此同时, 美国南卡罗来纳大学的 W.H.Peter 和 W.F.Ranson 则采用电视摄像机记录被测物体加载前后的激光散斑图, 经过模数转换得到数字灰度场, 并进行相关迭代运算, 即计算相关随扫描试块位移及其导数的变化过程, 得到相关系数的全场分布矩阵, 找出相关系数的极值而得到物体对应的位移和应变, 它是一个二维位移场的测量问题。

以往, 由于激光相干性好的特点, 散斑实验都采用激光作为照射光源。近年来, 非相干光散斑测量有了较快的发展, 如室外日光照射, 实验室白光照射等等, 直接以物体表面天然形成的斑点或人为制作的标志斑点作为散斑点进行拍摄测量。在非相干光照射下, 将物体表面的散斑记录下来, 通过分析散斑的位移, 得到物体上对应点的变形或位移, 这一方法称为白光散斑测量技术。白光散斑测量技术有以下特点:

1. 白光散斑测量不要求光源的相干性, 一般自然日光、白光光源均可采用, 这样可以使用大功率光源, 被测物体面积可以比较大, 适用于实物和现场测量。
2. 当物体受力产生变形时, 被白光照射的散斑仅随物体表面一起运动, 不像激光散斑空间运动那么复杂, 对于三维物体用白光散斑测量就比较方便, 位移分析也比较简单。
3. 传统的单光束激光散斑干涉可测量的物体最小位移等于散斑颗粒直径。白光散斑粒度的大小决定了测量的最小位移, 但白光散斑粒度的大小可以根据测量范围人为地选择, 白光散斑法能适应比较宽的位移测量范围。

当物体受载荷作用产生变形时, 白光散斑跟随着物体一起运动, 因此, 白光散斑运动的位移向量就是物体的变形向量。白光散斑在图像采集平面的成像与采集方向几何参数之间存在一定的关系, 即白光散斑运动的投影规律^[11]。

二十多年来, 国内外许多学者在数字散斑相关技术及应用方面开展了一些卓有成效的研究工作, 取得了丰硕的成果。

以美国南卡罗来纳大学Peters、Suton教授等为代表的许多学者对该方法的发展做出了突出贡献。在数字散斑相关方法的技术研究方面, 相继提出了粗—细搜索法^[12]、牛顿—拉裴逊偏微分修正法^[13]、优化搜索方法^[14]、亚象素的重建^[15]、数字散斑相关测量方法随机误差的分析^[16]等手段, 并且对此方法的精度进行了实验研究^[17]。在应用研究方面, 先后利用此方法进行了刚体位移测量方面的研究工作^[18], 二维流速测量的应用研究^[19], 玻璃纤维复合材料损伤的无损评价^[20], 用双摄像机系统测量离面位移的问题^[21], 裂纹尖端区域变形场以及J积分和SIF^[22]的测量, 弹塑性测量问题^[23]和高温测量问题^[24], 应力集中问题^[25], 陶瓷构件损伤状况的实验研究^[26], 扩展裂纹尖端的变形场^[27], 陶瓷电容器的无损探伤^[28], 圆柱试件的表面变形^[29]等。最近几年, 数字散斑相关方法的应用范围进一步扩大, 解决的问题也越加复杂。G.V endroux等又对该方法进行了改进, 使该方法在理论上进一步完善^[30],

Lu等将数字散斑相关方法进行了细化，使其能应用于较大的变形^[31]，Chao等利用该方法研究了扩展裂纹尖端的变形场^[32]，Yves Berthaud等将数字散斑相关的结果作为数值计算的边界条件，并研究了实验与计算的相互作用^[33]，Pascaldeng等将数字散斑相关方法与扫描电镜相结合，研究了表面具有微网格试件的细观变形^[34]。A. Asundi 和H. North^[35]利用散斑相关方法对日光的照射下的冰川运动进行了测量；S Bergonnier 等^[36]对褶皱羊绒复合制品的力学性能进行了研究；Chevalier, L. 等^[37]对类橡胶制品的力学性能进行了研究等等。

在国内，对数字散斑相关方法的研究起始于 1989 年，高建新博士等在我国开始进行了数字相关方法的研究^[38]。其他许多学者相继进行了一系列的研究工作。在实验方法方面的主要研究工作有：把数字散斑相关方法与变分原理相联系起来，多用途数字相关测量系统的提出，散斑场的亚象素恢复及相关检测技术^[39]，十字搜索法^[40]、非常应变的子区模式^[41]和数字散斑加权相关法^[42]的提出，牛顿迭代法缺点的改进，变形测量过程的描述和物理意义的讨论^[43]等。在应用领域方面的主要研究工作有：漩涡流场测量、扫描电镜的位移测量和刚体位移测量^[44]，微区变形场的定量测量^[45]，牙齿的修复^[46]，电视机外壳的检测^[47]，微电子组件封装工艺的研究^[48]，同扫描电镜的结合^[49]，航空材料粘接界面的无损检测，导电胶膜的力学性能测试和三维编织构件的孔边应力集中的研究^[50]，晶振片组件封装和改性高聚物的断裂行为的研究。近年来的工作有，亚象素位移搜索的曲面拟和法^[51]，频率域数字散斑相关法^[52]，多相材料破坏和断裂的研究^[53]等。清华大学的金关昌教授在数字散斑相关方法中的图像小波减噪分析^[54]等方面做了一定的研究工作。苏州大学的姜锦虎教授在远距离测量^[55]和系统抗噪声干扰能力^[56]方面的研究有了一定的进展。另外，哈工大单宝华等^[57]采用数字图像重心算法计算特征斑的重心，从而避免了数字散斑相关计算相关系数的繁琐过程，并运用在材料力学性能检测和工程建筑空间结构检测上。天津大学的亢一澜等人用散斑相关方法对单纤维细丝力学性能^[58]和薄膜断裂问题进行了实验研究^[59]。

数字散斑相关方法近年来快速发展的原因在于它与其它光测技术相比具有独特的优点。在实验条件上，该方法原始数据采集方式简单，不需对试件进行复杂的预处理，直接从试件表面摄取包含变形信息的人工斑点或自然斑点，便于实现自动化；在应用条件上，该方法对测量环境要求比较低，不需要严格的防震、暗室等特殊的要求，可以实现高温、高压等恶劣环境下的力学量的非接触式、无损、全场测量；在测量范围上，该方法可以根据需要在宏观、细观、微观范围内调节，与显微光学设备(如显微镜、电镜)相结合可以测量局部微区的变形。近几年来计算机的计算速度大幅度的提高，在很大程度上解决了此方法计算工作量大的瓶颈问题，推动了这一方法的深入研究，使其已经成为现代光测力学领域引人注目的测量方法之一。

目前，数字散斑相关方法在技术上正在不断进步，提高运算速度和相关识别的精度是它的两个重要的发展方向。在应用范围上逐步扩大，向着细微观、新型材料、恶劣环境

测量方向发展。

总之，通过对数字散斑相关方法国内外的发展及研究现状的分析，可以肯定的是，已有的研究方法和实验手段是我们进一步开展研究工作的基础。本文也正是在国内外已有的数字散斑相关方法的基础上，做出改进和发展，进行研究。

另外，本文作者所属教研组的师兄、师姐对数字图像相关法已经做了一些研究。例如，康新师姐做了微电子机械系统(MEMS)中的光学测试方法研究，陈凡秀师姐做了微结构动态变形的光学测试方法与应用研究，王伟师兄做了岩土微细结构变形跟踪测试方法研究及其应用，孙伟师姐做了数字图像相关及其混合法的理论和应用研究。本文也是在师兄、师姐的研究成果基础上进行研究的。

1.3 测量离面位移的光学方法

近年来，随着科学技术的快速发展，人们越来越重视对复杂物体表面轮廓以及某些小空间内物体的离面位移或振动等的检测。这些检测要求空间分辨率高、非接触、智能化等。测量这类离面位移的方法有很多，主要有：电子散斑干涉术 (Electronic Speckle Pattern Interferometry, ESPI) ^[60,61]、全息干涉术^[62-66]、电子错位散斑干涉术^[67]、散斑照相 (Speckle Photography) ^[68]、云纹干涉法^[69,70]等。

电子散斑干涉术作为一种主要用来测量光学粗糙表面变形的干涉计量术，它利用激光散斑作为待测表面位移信息的载体，通过电子学手段记录和处理散斑场信息，最后以散斑条纹的形式在监视器上显示出位移场分布。该方法具有波长量级的灵敏度，已经广泛应用于物体离面变形测量和无损检测。

全息干涉术在无刚体位移的情况下可以直接测得位移数据，但是全息干涉术光路比较复杂，测量结果易受外界振动的影响。

在国内，秦玉文等人^[71]从理论上分析了错位电子散斑实现电子干涉的可行性，并利用电子错位散斑干涉法 (Electronic Speckle-Shearing Pattern Interferometry, ESSPI) 获得了位移梯度等值条纹的电子散斑干涉图，实现了离面位移的测量。电子错位散斑干涉法光路简单，对刚体位移不敏感，但是不能直接测得位移数据，还需要对测量结果进行数值运算。

云纹干涉法是 1979 年 Post D 最早提出的，它采用高密度衍射光栅作为试件栅，测量灵敏度的理论上限为 $\lambda/2$ 的条纹位移，若采用相移技术甚至可达 $\lambda/100$ 。这种方法具有全场分析、实时观测、高反差条纹，以及直接获取面内位移场和应变场等优点，可用于面内位移的测量。但是该方法光路比较复杂，并且该方法需要通过光学干涉条纹来提取变形信息，处理过程中不可避免的会产生变形信息损失，影响了测量精度。

总之，这类基于干涉原理的光测方法常需要对被测物体表面做预处理，如涂散射涂层、刻画网格与栅线，甚至需做成模型，然后通过特定的光学干涉形成条纹，再从条纹中提取所需的信息。对测量环境要求比较高，一般只能在实验室条件下进行，至于在一般工程现

场中的应用，则几乎是不可能的。

而数字散斑相关法是一种测量面内位移和变形的计算机辅助光学测量方法，是现代数字图像处理技术与光学测量相结合的产物，克服了传统光测方法对测量环境要求较高的缺点。其实，物体表面自然或人工形成的随机斑点，包括物理的表面微观结构和光学的表面散斑场，本身就是信息载体，它们在物体变形过程中发生相应的变化，因而包含了变形过程的大量信息。数字散斑相关方法正是这样一种从物体表面的随机分布的斑点或伪随机分布的人工散斑场中直接提取变形信息的全场、非接触的光测方法。由于其信息载体——散斑场具有随机性，容易获取，因此对测量环境的要求也低。而且由于其不需要通过光学干涉条纹来提取变形信息，克服了以往光学测量中分析光测条纹时损失部分光学信息的缺点，因此提高了测量精度。同时，该方法是通过比较变形前后物体表面的两幅数字图像直接获取位移和应变信息，为全场非接触的实时测量方法，且其设备简单，易于实现测量过程的自动化或半自动化。

另一个方面，一直以来单相机数字散斑相关方法都是用来测面内位移，此次设计从物体侧面倾斜一定角度观测。这样，物体的离面位移就可以转变为标志点的面内位移，然后再用数字散斑相关方法来计算中心点的位移值。从而可以间接地用数字散斑相关方法来解决测试离面位移的问题。

1.4 本文的主要研究内容

第一章：绪论。这一章首先介绍了本课题的研究背景和目的，然后综述了数字散斑相关方法的进展，接着对常用的测量离面位移的光学方法进行了分析，包括：电子散斑干涉术、全息干涉术、电子错位散斑干涉术、散斑照相、云纹干涉法等。最后简要说明了论文的研究内容。

第二章：数字散斑相关法原理。本章首先介绍数字图像处理基础，详细描述了数字散斑相关方法的基本原理和亚象素搜索方法，包括双线性插值法、三次样条插值法和其它的一些插值方法，并且介绍了三维数字散斑相关方法，包括双目立体视觉基本原理、摄像机成像模型与标定、图像三维空间坐标的建立、基于小平面假设与摄像机成像模型的数字散斑相关法。

第三章：测量离面位移的数字散斑相关方法。本章介绍了测量离面位移的数字散斑相关方法，即将数字散斑与光学投影相结合的投影散斑法的基本原理，主要是从侧面倾斜一定角度将人工散斑投影到物体表面，一般情况下 CCD 相机也倾斜放置。当物体发生离面位移时，散斑受高度的调制而发生移动。用数字图像相关方法计算出像面上散斑的位移，根据几何关系就可以得到物体表面的高度变化。本文后面的验证实验正是基于这种原理来测量鼓膜实验中薄膜的三维变形。

第四章：测量离面位移的 DSCM 硬件实现。本章对测量离面位移的数字散斑相关方法

硬件实现进行了研究和开发。主要介绍光测系统硬件的组成部分——图像采集系统。以微观实验要求为根本出发点，同时保证系统运行的可靠性和稳定性，兼顾多功能性，在投影方和采图方都引入了远心镜头来提高测量离面位移的数字散斑相关方法精度。首先，探讨了远心镜头相比非远心镜头的优缺点和应用范围，并用 2 个实例证明了远心镜头的优点；其次，介绍了该硬件的核心——图像采集系统，并详细介绍了 2 个远心镜头的相关数据，从远心镜头的选择原则和机理上加以研究，确定了满足需要的零部件，并将它们有机地组成整体，从而实现系统的正常运行；最后，分析讨论了远心镜头的选型标准及其光路，为今后设计加工类似光测系统的硬件选择提供了一些参考。

第五章：测量离面位移的 DSCM 软件开发。软件开发是整个系统运行的关键，考虑到今后软件的维护和升级，本章利用 VC++6.0 开发工具，编制了该系统的配套软件。本章首先介绍该光测系统软件基本框架，然后详细说明了实现这一软件的关键技术——多线程技术，由于光测系统需要实时显示被测区域并能够采集不同时刻的图像，同时还要将采集的图像直接存入计算机，因此，计算机需要同步处理多项任务。多线程技术就是解决这一问题的关键技术，通过使用多线程技术，本软件不仅可以实时显示图像，而且可以根据不同的测试对象添加相应的有针对性的功能，例如，同步显示压力值并输出压力和时间关系曲线，可以发出信号驱动步进电机等等。经过程序的编写和调试，测量离面位移的 DSCM 光测系统软件可以满足微观结构变形实验的基本要求。最后对该光测系统软件进行了测试。

第六章：鼓膜光测实验研究。提出了一种光测薄膜微观结构离面变形的实验方法，同时研制了相应的实验设备。本章的主要工作就是利用这一实验方法和实验设备对液压作用下薄膜的微观结构变形进行光学测量，并对采集到的图像进行了参数提取和数据分析。本章首先介绍了薄膜力学性能检测进展和鼓膜实验的理论模型，然后重点研究了鼓膜光测实验，包括：鼓膜光测实验的硬件实现（操控系统、增压驱动器、压力传感器、），鼓膜光测实验的软件开发——在第五章测量离面位移的 DSCM 软件开发基础上，特别为鼓膜测试所编写的软件的几个主要功能（装载试样、压力加载 1、压力加载 2、快速卸载），系统标定（标定原理、标定步骤、标定结果），试件制备及加载，相关分析与曲线拟合，对记录下的试件在不同时刻的散斑图进行数字相关分析，可以得到各试件的三维变形图，将试件在各压力值下保存的散斑图分别与第一幅图作相关计算，并找到相应的时间点，得到每一时间点下的薄膜高度值并绘出试件的高度—时间曲线。用新设计的实验装置和方法对 0.2mm 厚的镍薄膜的力学性能进行测定。利用实验的理论模型计算镍薄膜的弹性模量和残余应力。

第七章：是全文总结，概述了本论文完成的主要工作并对今后工作中需要进一步深入研究的问题给予展望。

参考文献

- [1] Ho C W, Tai Y C. Micro-electo-mechanical systems (MEMS) and fluid flows [J]. Annual Review of Fluid Mechanics, 1998, 30: 579-612[中译文: 微电子机械系统和流体流动[J]. 力学进展, 1998, 28(2): 250-272]
- [2] 张泰华. MEMS 材料力学性能的测试技术[J]. 力学进展, 2002, 32(4): 546-562
- [3] 政哲敏. 《机械强度》微电子系统 (MEMS) 专辑绪言[J]. 机械强度, 2001, 23(4): 封2
- [4] 任凤章. 鼓泡法测量有机薄膜力学性能[J]. 自然科学进展, 2002, 12(6): 636-640
- [5] 梅涛, 孔德义, 张培强等. MEMS 力学特性与尺度效应[J]. 机械强度, 2001, 23(4): 373-379
- [6] 孙克豪, 钱劲, 张立宪等. MEMS 器件的计算机辅助设计与模拟[J]. 机械强度, 2001, 23(4): 488-494
- [7] Taechung Yi, Chang-Jin Kim. Measurement of mechanical properties for MEMS materials [J]. Meas Sci Technol, 1999, 10:706-716
- [8] 高建新. 数字散斑相关方法的原理与应用[J]. 力学学报, 1995, 27(6): 724-731
- [9] I Yamaguchi. Speckle displacement and decorrelation in the diffraction and image fields for small object deformation[J]. Opt Acta. 1981, 28(10): 1359-1376
- [10] Peters WH. Ranson WF. Digital image techniques in experimental stress analysis[J]. Opt Eng. 1982, 21(3):427-431
- [11] 郭勇. 远距离数字散斑相关测量系统的研制与在结构工程中的应用[D]. 浙江大学硕士论文, 2004, 5
- [12] M A Sutton, W J Wolters, W H Peters, et al. Determination of Displacements Using An Improved Digital Correlation Method [J]. Image and Vision Computing, 1983, 1(3), 133-139.
- [13] H A Bruck, S R McNeill, M A Sutton et al. Digital Image Correlation Using Newton-Raphson Method of Partial Differential Correction [J]. Exp.Mech., 1989, 29 :261- 267.
- [14] M A Sutton, MingQi Cheng. Application of An Optimized Digital Correlation Method to Planar Deformation Analysis. ImageAnd Vision Computing [J]. 1988, 4(3):145-150.
- [15] M A Sutton, S R McNeill, Jin Shengjiang. The Efects of Subpixel ImageRestoration On Digital Correlation Error Estimates [J]. 1988, Opt.Eng., 27(3):173-175.
- [16] Lu Hua. Statisticl Analysis of the Random Errorin Measuermnts Obtained Using Digital Correlation of Speckle Paterns [C]. Porc.Of the1993 SEMSpring Con.On Exp.Mech., Dearborn, Michigan, June1993, P. 930.
- [17] T C Chu, W F Rason, M A Suton, et al. Application of Digital-Image-Correlation Techniques to Experimental Mechanics [J]. Exp. Mech., 1985, 25(3):232-244.
- [18] W H Peters, W F Rason, M A Sutton, et al. Application of Digital Correlation Methods to rigid body Mechanics [J]. Opt.Eng., 1983, 22 (6):738-742.

- [19] Z H He, M A Sutton. Two-Dimensional Fluid Velocity Measuermant by Use of Digital Speckle Correlation Technique [J]. *Exp.Mech*, 1984, 24 (2):117-121.
- [20] S R Russel, M A Sutton. Image Correlation Quantitative NDE of Impact and Fabrication Damage In a Glass fiber Reinforced Composite System [J]. *J. Mater.E val.*, 1989, 47 (5) :550-558.
- [21] P F Luo, Y J Chao, M A Sutton, et al. Accurate Measurement of Three-Dimensional Deformations in Deformable and Rigid Bodies Using Computer Vision [J] .*Exp.Mech*,1993, 33(2):123-132.
- [22] G Han, M A Sutton. A Study of Stationary Crack-tip Deformation Fields in This Sheets By Computer Vision [J].*Exp.Mech*. 1994, 34 (2):125-139.
- [23] M A Sutton. Determination of Elastic-plastic Stresses and Strains From Measured Surface Strain Data [J].*Exp.Mech.*, 1996, 36 (2):99 -112.
- [24] J S Lyons, J Liu, M A Sutton. High-temperature Deformation Measurements Using Digital-image Correlation [J].*Exp.Mech.*, 1996, 36 (1):64 -70.
- [25] Lu Hua. Application of Method of Digital Correlation of Speckle Paterns to Strain Measurement on Botoms of Notches [C].*Pro.Of con.On Advanced Technoligy in Exp.Mech* ,Kanazawa, Ju ly1993, Japan, P. 239.
- [26] D Coburn. Digital Correlation System for Nondestructive Testing of Thermally Stressed Ceramics [J].*App.Opt*, 1995, 34(26):5977-5986.
- [27] Y J Chao, P F Luo, J F Kalthoff. An Experimental Study of the Deformation Fields Around a Propagating CrackTip [J].*Exp.Mech.*, 1998, 79 -85.
- [28] Y C Chan. Nondestructive Detection Using Digital Speckle Correlation on Miniatural Meltilayer Ceramic Capacitors Techniques [J], *IEEE Transaction Components.Packaging and Manufacturing Technology*, 1995,18 (3):677-682.
- [29] H Lu, G. Vendroux, W G. Knauss. Surface Measurements of a Cylind rical Specimen by Digital Image Corerlation [J].*Exp.Mech.*, 1997, 37 (4):433-439.
- [30] G. Vendroux, W G. Knauss. Submicron Deformation Field Measurement: Part 2.Improved Digital Image Correlation [J].*Exp.Mech*, 1998, 38(2): 86-91.
- [31] Hongbing Lu, Paul D Cary. Implementation of Second Order Displacement Gradient in Digital Image Correlation [C], *Porceedings of the 2000 SEM IX Intenrational Congress on Experimental Mechanics*, 2000,June5-8, Orlando,Florida
- [32]Y J Chao, P F Luo, J F Kalthoff. An Experimental Study of the Deformation Fields Arounda Porpagating Crack Tip [J].*Exp.Mech.*, 1998, 38 (2): 79-85.
- [33] YvesBerthaud.Ex periment/Computation Interactions byUsing Digital Image Correlation. Interfeormetry in Speckle Light Theory and Applications [C], *Proceedings of the Intenrational Conference*,25 -28 Sep.2000,Lausanne,Switzerland.
- [34] Pascal Doumalin. Micromechanical Application of Digital Speckle Correlation Techniques. Interferometry in Speckle Light Theory and Applications [C], *Proceedings of the Intenrational Conference*,25 -28 Sep.2000,Lausanne,Switzerland.
- [35] A. Asundi & H. North. White-light speckle Method-Current Trends. *Optics and Lasers in*

Engineering. 1998(29):159-169

[36] S Bergonnier. Digital image correlation used for mechanical test on crimped glass wool samples. *J. Strain Analysis*. 2005,40(2):185-197

[37] Chevalier, L. et. al. Digital image correlation used to analyse the multiaxial behavior of rubber-like material. *Eur. J. Mech. A, Solids*. 2001(20): 169-187

[38]高建新. 数字散斑相关方法及其在力学测量中的应用[D]. 清华大学博士学位论文, 1989.

[39]李德喜, 谭玉山. 散斑像的恢复与亚象素相关检测[C]. 第七届全国实验力学学术会议论文集, 1992, 631-634.

[40]丙嘉白, 金观昌, 徐秉业. 一种新的数字散斑相关方法及其应用[J]. 力学学报, 1994, 26(5),599- 607.

[41]计宏伟. 数字相关图象测量方法与应用研究[D]. 天津大学博士学位论文, 1997.

[42]陈金龙. 计算机辅助散斑计量技术及其在粘接界面质量检测研究中应用[D]. 天津大学博士学位论文, 1996.

[43]洪宝宁, 徐铸, 韩晓键. 数字散斑相关方法的数学模型及研究[C]. 第八届全国实验力学学术会议论文集, 1995, 554-557.

[44]高建新, 周辛庚. 数字散斑相关方法的原理与应用(一)(二) [C]. 第七届全国实验力学学术会议论文集, 1992, 614-622.

[45]高建新, 周辛庚. 定量测量微区变形场的数字散斑方法[J]. 实验力学, 1992, 7(2): 188-191.

[46]高建新, 丁祖泉, 方如华. 基于数字相关的多用途力学测量系统[C]. 第八届全国实验力学学术会议论文集, 1995, 546-549.

[47]李德喜, 谭玉山. 数字散斑强度相关计量在工程结构检测中的应用[C]. 第七届全国实验力学学术会议论文集, 635-638, 1992

[48]刘宝探, 史训清. 薄膜应力应变曲线和基本力学性能测试[J]. 实验力学, 1994, 9 (1), 1-7.

[49]徐铸. 电子显微图像位移分析法[C]. 第八届全国实验力学学术会议论文集, 1995, 550-553.

[50]高英剑. 数字散斑相关方法及其在新材料力学行为研究中的应用[D]. 天津大学硕士学位论文, 1997.

[51]李善样, 孙一翔. 数字散斑相关测量中亚象素位移搜索的曲面拟和研究[J]. 光子学报, 1999, 28 (7),638-640,.

[52]周灿林. 频率域数字散斑相关法及其应用[J]. 光电工程, 2000, 27 (3), 65-68.

[53] J Fang. Application of Digital Image Correlation Technique to the Damage and Fracture Study of Heterogeneous Material [C]. Interferometry in Speckle Light Theory and Applications, Proceedings of the International Conference, 25-28 Sep. 2000, Lausanne, Switzerland.

[54] 金观昌等. 数字散斑相关法中的小波减噪分析[J]. 清华大学学报(自然科学版), 2001, (41): 108-111

- [55] 姜锦虎等. 远距离数字散斑相关测量系统[J]. 上海力学, 1996,(17): 8-12
- [56] 姜锦虎等. 数字散斑相关测量系统抗噪声干扰能力的判据[J]. 1996,(17): 110-117
- [57] 单宝华等. 散斑图像相关数字技术原理及应用[J]. 实验力学, 2003,18(3): 409-418
- [58] 雷振坤, 亢一澜等. 单纤维细丝微力学性能实验研究[J]. 实验力学, 2005,25(1): 72-76
- [59] 王怀文, 亢一澜等. 应用数字散斑相关技术进行薄膜材料断裂问题研究[J]. 烟台大学学报(自然科学与工程版), 2001, 14(2): 100-104.
- [60] 张东升, 李鸿祺, 佟景伟等. 动态电子散斑干涉法研究[J]. 固体力学学报, 1996, 17(3): 251-256.
- [61] 贾书海, 乐开端, 谭玉山. 电子散斑测振技术进展[J]. 应用光学, 1999, 20(4): 41-45.
- [62] Tatam R P, Davies J C, Buckberry C H, et al. Holographic surface contouring using wavelength modulation of laser diodes[J]. Opt. Laser Technol., 1990,22:317-321.
- [63] Seebacher S, Osren W, Juptner W. Measuring shape and deformation of small objects using digital holography[C]. Proc. SPIE, 1998, 3479: 104-115.
- [64] 刘雯雯, 戴宜全, 康新等. 基于有限脉冲响应滤波器的数字全息零级像消除[J]. 光学学报, 2008, 28(5): 856-859.
- [65] Liu Wenwen, Kang Xin, Dai Yiquan, et. al. "Method for eliminating Zero-order image in digital holography" . [J] Journal of Southeast University (English Edition) 2009, 25(1):113-116.
- [66] Wenwen Liu, Xin Kang, Xiaoyuan He. "Filter method used to eliminate the zero-order image" [C].The International Conference on Experimental Mechanics 2008, SPIE
- [67] Hong Y Y, Ho. H. P. Shearography for Non-destructive Evaluation of Composite Structures[J]. Optics and Lasers in Engineering, 1996, 24(2-3): 161-182.
- [68] 黄献烈, 张武岑. 散斑照相法测量面内位移及其方向 [J]. 光学学报, 2008, 28(5): 856-859.
- [69] Dai Y Z, Chiang F P. Contouring by moiré interferometry[J]. Exp. Mech., 1991,3:76-81.
- [70] Harding K, Bieman L. High speed moiré contouring methods analysis[C]. Proc.SPIE, 1998,3520: 27-35.
- [71] 秦玉文, 王金起, 张福根. 电子错位散斑研究 [J]. 力学学报, 1990, 22(6): 725-731.

第二章 数字散斑相关法原理

2.1 引言

数字散斑相关测量 (Digital Speckle Correlation Measurement, DSCM)^[1-3] 又被称为数字图像相关方法^[4,5]。可以通过比较变形前后物体表面的两幅数字图像直接获取位移和应变信息。该方法具有的优点有: (1)非接触、全场测量; (2)实验设备简单, 对环境要求低。试件表面的散斑可以直接以试件表面的自然纹理作为标记或通过人工制斑技术获得, 避免了对环境的较高要求, 容易实现现场测量; (3)较易于实现测量过程的自动化。因不需要胶片记录, 回避了繁琐的显影和定影操作, 也不需要进行干涉条纹定级和相位处理, 能充分发挥计算机在数字图像处理中的优势和潜力; (4)与显微设备结合, 可在宏观、细观、微观范围内进行测量。因此该方法提出后收到了广泛的重视, 在对不同实验条件下材料力学性能的测试^[6,7]、微尺度变形场测量^[8-10]、电子封装^[11]、断裂力学^[12]、生物力学^[13]、岩石力学^[14]、纳米力学^[15]等众多场合的广泛应用充分展示了该方法的实用性和优越性。

本章首先介绍数字图像处理基础, 接着详细描述了数字散斑相关方法的基本原理和亚象素搜索方法, 包括双线性插值法、三次样条插值法和其它插值方法, 并且介绍了三维数字散斑相关方法。

2.2 数字图像处理基础

数字图形处理即用计算机对数字图像进行处理^[16,17]。与人类对视觉处理的研究历史相比, 这是一门年轻的学科。但在其短短的进程中, 该学科已被应用于几乎所有与成像有关的领域。有多个因素表明数字图像处理领域将继续成长。一个主要的因素是图像处理所需要的计算机设备的不断降价, 处理器和大容量的存储器越来越便宜; 第二个因素是图像数字化的图像显示设备越来越普及。下列技术发展新趋势将进一步刺激此领域的成长: 低价位处理器的并行处理技术; 用于图像数字化的低成本的电荷耦合器件 (CCD); 用于大容量、低成本存储阵列的新存储技术; 低成本、高分辨率的彩色显示系统。另一推动力来自稳定增长的应用新领域。在工业、农业、商业、医学、交通、军事等方面, 数字成像的使用将持续增长。

数字图像处理系统的三个基本部件是: 处理图像的计算机, 图像数字化设备和图像显示设备。在自然的形式下, 图像并不能直接由计算机进行分析处理。因为计算机只能处理数字而不是图片, 所以一幅图像在用计算机进行处理之前必须先转化为数字形式。

数字图像定义为: 对一个物体的数字表示施加一系列的操作, 以得到所期望的结果。更专业化的定义为: 数字图像是指一个被采样和量化的二维函数 (该二维函数由光学方法产生), 采用等距离矩形网格采样, 对幅度进行等间隔量化。至此, 一幅数字图像是一个

被量化的采样数值的二维矩阵。

图形处理本来是指将一幅图像变为另一幅经过修改的图像，因此是一个由图像到图像的过程。数字图像分析则是指将一幅图像转化为一种非图像的表示，如一个测量数据集或一个决策等。例如，一幅数字图像中包含几个物体，图像分析程序可通过对其进行分析后抽取这些物体的尺度。不太严格时，数字图像处理往往也用来兼指处理与分析。

扫描是指对一幅图像内给定位置的寻址，在扫描过程中被寻址的最小单元是图像元素，即象素；矩形扫描网格通常被称为光栅，图像扫描示意图如图 2.1 所示。

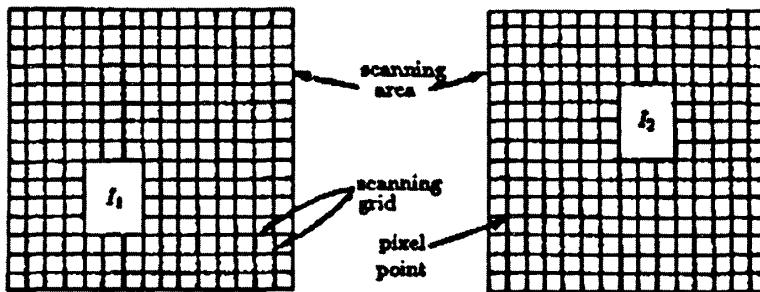


图 2.1 图像扫描示意图

采样是指在一幅数字图像的每个象素位置上测量其灰度值。采用通常是由图像传感元件完成的，它将每个象素处的亮度转换成与其成正比的电压值。

量化是将测量的灰度值用整数表示。由于数字计算机只能处理数字，因此必须将连续的测量值转化为离散的整数。在图像传感器的后面，常带有一个电子线路的模数转换器，将电压值转化成一个整数。一般都把采集到的图片转化为 8 位的灰度图，也就是说图像的象素有 0-255 的灰度级。

扫描、采样和量化这三个步骤组成了图像数字化的过程，经过数字化得到的数字表示，即数字图像。

图像识别，简单地说，就是要把一种研究对象根据其某些特性进行识别与分类。图像识别时除了要对图像进行数字化以外，还需要将各类图像的重要特性用数字刻画出来，这称特征提取。由于反映一类图像特征的数目往往是比较的，因此，实际上在特征提取前先要进行特征选择，即利用图像原来的特征，通过一些方法，找出某些（比原来数目要少）综合性指标。接下来就是设计识别方案，使得对任何一个未知类别的图像，根据方案就可以判定它属于哪一类。数字散斑相关方法的基本思想与图像识别及其相似。

2.3 数字散斑相关方法的基本原理

数字图像处理是由计算机处理图像的一种方法，具有精度高，通用性强等特点。数字图像处理将图像分割成等距离矩形网格进行量化和采样，将图像以二维矩阵的方式存储于

计算机中。通过模数转换将图像转化为一个二维灰度矩阵，也就是说图像有0~255的灰度级。

数字散斑相关是根据物体表面随机分布的粒子的反射光强分布在变形前后的概率统计相关性来确定位移、变形的。数字散斑相关测量法的基本测量过程为由CCD摄像机记录被测物体位移或变形前后的两幅散斑图，经模数转换得到两个数字灰度场，对两个数字灰度场做相关运算，找到相关系数极值得到相应的位移或变形。通常每幅图含512*512个像素，图像的灰度经8bit A / D转换为0~255灰度级^[18]。

由于散斑分布的随机性，散斑场上的每一点周围的一个小区域中的散斑分布与其它点是不一样的，这样的小区域通常称为子集。散斑场上以某一点为中心的子集可作为该点位移的信息载体，通过分析和搜索该子集的移动和变化，便可以获得该点的位移，从而实现了将变形测量问题转化为一个相关搜索和数字图像识别的计算过程。

如图2.2所示，物体变形前后两个散斑场为^[19]：

变形前： $\{F_1\} = \{F_1(x_i, y_i); i = 1 \dots n, j = 1 \dots n\}$

变形后： $\{F_2\} = \{F_2(x_i, y_i); i = 1 \dots n, j = 1 \dots n\}$

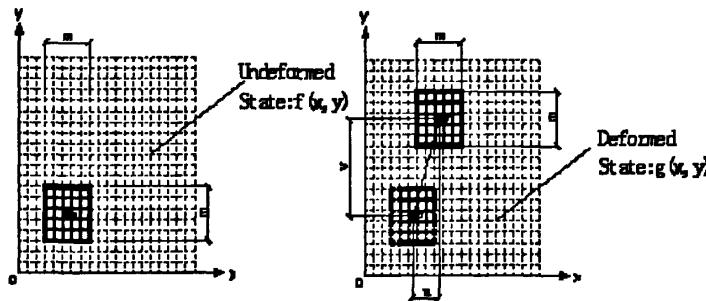


图 2.2 相关搜索示意图

假设散斑位移场为 $u(x, y)$ 与 $v(x, y)$ ，则变形前的散斑图上任一点 (x, y) 的灰度与变形后的散斑图上位于 $[x + u(x, y), y + v(x, y)]$ 的灰度相对应，即

$$I_1(x, y) = I_2[x + u(x, y), y + v(x, y)] \quad (2-1)$$

对变形后的数字散斑场所附的基坐标作仿射变换

$$\begin{cases} x' = x - u'(x, y) \\ y' = y - v'(x, y) \end{cases} \quad (2-2)$$

得到新的基坐标 (x', y') ，其中 $u'(x, y)$ ， $v'(x, y)$ 是试凑散斑位移函数。

通过上述仿射变换，得到新的数字散斑场

$$\{I_2'(x', y')\} = \{I_2[x + u'(x, y), y + v'(x, y)]\} \quad (2-3)$$

对照 (2-1) 式，可得

$$I_2'(x', y') = I_1[x + u'(x, y) - u(x, y), y + v'(x, y) - v(x, y)] \quad (2-4)$$

上式表明, 当试凑位移函数与真实的散斑位移函数相同时, 经仿射变换得到的数字散斑场完全恢复到物体变形前的数字散斑场。衡量试凑位移函数与真实的散斑位移函数的接近程度的指标, 就是 $\{I_1\}$ 与 $\{I'_2\}$ 之间的相关性

$$C_n = \frac{\langle I_1 * I'_2 \rangle - \langle I_1 \rangle * \langle I'_2 \rangle}{[\langle (I_1 - \langle I_1 \rangle)^2 \rangle * \langle (I'_2 - \langle I'_2 \rangle)^2 \rangle]^{1/2}} \quad (2-5)$$

其中, $\langle \rangle$ 是系综平均符, $|C_n| \leq 1$; 当且仅当 $I_1 = I'_2$ 时, $C_n = 1$.

具体计算步骤如下: 依次选取一组试凑位移函数, $u'(x, y)$, $v'(x, y)$, 对变形后的数字散斑场通过 (2-2) 式作仿射变换, 形成新的数字散斑场 $\{I'_2\}$, 然后计算 $\{I_1\}$ 与 $\{I'_2\}$ 之间的相关性。使相关性取得最大值的试凑位移函数就是真实的散斑位移。

2.4 亚像素搜索方法

数字标记点图像相关测量方法处理的图像是由图像技术获得的数字图像, 数字图像存储的灰度信息仅仅是在离散的整数像素位置的灰度值, 因此灰度函数也是离散的, 这样就无法获得整数像素之间位置小数的灰度值。但是, 在相关计算中, 变形前后的散斑图中点位置变化是任意的、连续的, 也就是说在变形以前原来位于整像素的点在变形以后常常会移到非整像素之间的位置, 因此必须获得这个非整数点的灰度值, 才能得到图像中标记点的精确位移及应变。所以, 有必要利用插值的方法对原图像进行重构, 以得到连续的图像, 获得整数像素点之间位置的灰度值, 这一过程称为亚像素的重建。亚像素重建有双线性插值法、双二次插值、二元三次样条插值等方法。

2.4.1 双线性插值法

双线性插值^[20]又称一阶插值, 是利用点 (x, y) 周围 4 个邻点 P_{00} , P_{10} , P_{01} , P_{11} 的灰度值 $g(x, y)$ 在 (x, y) 两个方向上作线性内插, 点之间的关系如图 2.3 所示。

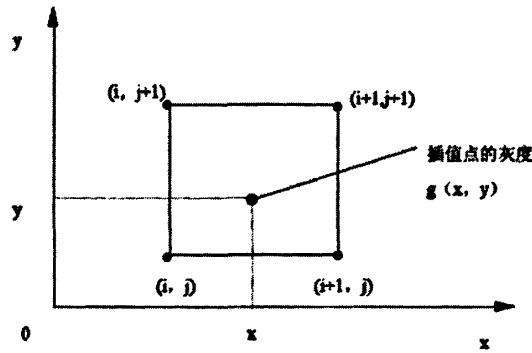


图 2.3 双线性插值点之间的关系

正方形内任意点的灰度值 $g(x, y)$ 由下面的双线性方程来定义:

$$g(x, y) = A + Bu + Cv + Duv \quad (2-6)$$

其中, u, v 是以点 (i, j) 为原点的局部坐标。

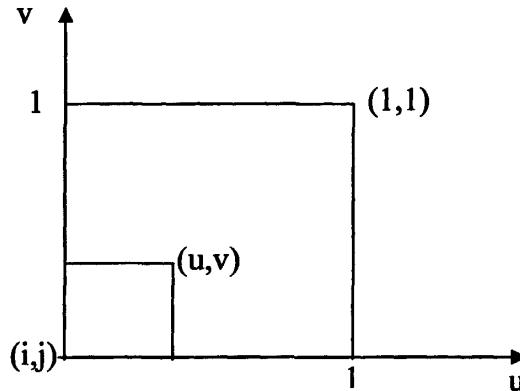


图 2.4 双线性插值点的局部坐标

将四个顶点的灰度值代入方程, 可求得系数:

$$A = g(i, j) \quad (2-7)$$

$$B = g(i+1, j) - g(i, j) \quad (2-8)$$

$$C = g(i, j+1) - g(i, j) \quad (2-9)$$

$$D = g(i+1, j+1) - g(i, j+1) - g(i+1, j) + g(i, j) \quad (2-10)$$

2.4.2 三次样条插值法

三次样条插值可以得到更高精度的插值图像, 它考虑了插值的一阶和二阶导数。三次样条插值的目的就是要得到一个内插公式, 不论在区间内还是边界上, 其一阶导数平滑, 二阶导数连续。用三次样条插值重建的数字图像会使相关计算得到更高精度的位移及其导数。

二元三次样条插值的定义如下:

在矩形区域 $\Omega = [a, b] \times [c, d]$ 上给定矩形分割 $\Delta = \Delta x \times \Delta y$

$$\begin{aligned} \Delta_x : a = x_0 < x_1 < \dots < x_m = b \\ \Delta_y : c = y_0 < y_1 < \dots < y_n = d \end{aligned} \quad (2-11)$$

在 Δ 上定义一个函数 $S3(x, y)$ 为二元三次样条函数, 它必须同时满足如下条件:

1. 在每一个子域上, $S3(x, y)$ 是关于 x, y 的 3 次多项式。
2. 在整个矩形区域 $S3(x, y)$ 的一阶和二阶导数及其偏导数是连续的。
3. 样条函数值在插值点的插值和已知点的值相等。

由分析可知, 要满足以上三个条件, 只依靠已知点的函数值是不能求得函数 $S3(x, y)$ 的, 通常的做法是附加边界条件。通常是附加自然边界条件, 即认为函数在边界处的二阶导数

为零，并且对 x, y 的四阶偏导 $\frac{\partial^4 S_3(x, y)}{\partial x^2 \partial y^2} = 0$

2.4.3 其它插值方法

除此之外还有双线性插值、小波双线性插值以及以分形几何为基础的分形内插方法等方法。这些插值方法同双线性插值算法相比，虽可以得到较高的信噪比，但插值原理难度大，计算非常复杂，计算量大大增加。而双线性插值算法原理简单，也可产生令人满意的效果，因此被广泛地应用在图像的灰度值插值中。本文即是采用双线性插值来求解亚像素的灰度值。

2.5 三维数字散斑相关方法

2.5.1 双目立体视觉基本原理

人类是通过两眼分别同时获取外部场景的二维图像，然后经过大脑的处理，从而得到外部场景的三维信息。双目立体视觉的基本原理与此类似，即利用两个摄像头记录下空间同一场景的图像，然后寻找这两幅二维图像中的对应点，根据已知的两个摄像头的内部参数，计算得到其相对于空间中某个坐标系的三维坐标。

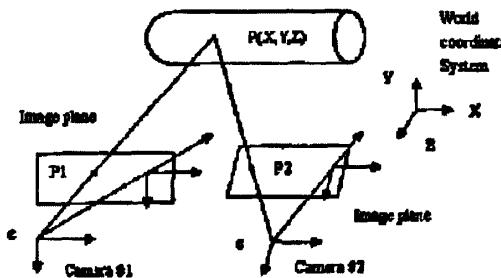


图 2.5 双目立体视觉示意图

图 2.5 是关于双目立体视觉原理的简单示意图，其中符号 c 表示两个摄像头的光心。从图中可以看出，空间中的点 P 分别成像于点 P_1 （位于摄像头 1 的像平面上）与点 P_2 （位于摄像头 2 的像平面上），双目立体视觉的目标，就是要从点 P_1 和点 P_2 确定点 P 在预先设定的世界坐标系中的坐标。从图 2.5 中可以很直观地看到，如果只有一个摄像头，那么只能得到空间中的一条直线，至少要两个摄像头，才可以唯一确定点 P 的坐标。

双目立体视觉测量中，有两个关键性的步骤：标定和匹配。标定是确定摄像头内外参数的过程，匹配是寻找测量系统中两个摄像头分别所记录图像中的对应点。如图 2.5 所示，如果已经得到了摄像头内外参数，利用每一对如 P_1 和点 P_2 这样的对应点的图像坐标，就可以确定空间中的一个点。

2.5.2 摄像机成像模型与标定

摄像机成像模型，是用数学语言描述空间中的点成像于摄像机靶面上，并经过AD转换，形成数字化图像上的像素点的简化过程。根据是否考虑摄像镜头畸变系数的影响，可将摄像机成像模型分为线性模型和非线性模型。

一般的摄像机成像模型涉及到如图2.6所示的五个坐标之间的转换关系：

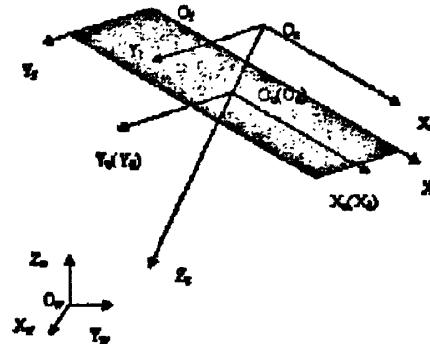


图 2.6 坐标变换示意图

1. 空间世界坐标 $0, x_w, y_w, z_w$ 到摄像机坐标 $0_c, x_c, y_c, z_c$ 的转换，表示如下：

$$\begin{bmatrix} x_c \\ y_c \\ z_c \end{bmatrix} = R \begin{bmatrix} x_w \\ y_w \\ z_w \end{bmatrix} + T \quad (2-12)$$

其中， R 是旋转矩阵，具有正交性，即 $RR^T=I$ ， T 是平移向量，

$$R = \begin{bmatrix} r_1 & r_2 & r_3 \\ r_4 & r_5 & r_6 \\ r_7 & r_8 & r_9 \end{bmatrix} \quad (2-13)$$

$$T = \begin{bmatrix} T_x \\ T_y \\ T_z \end{bmatrix} \quad (2-14)$$

2. 摑像机坐标系 $0_c, x_c, y_c, z_c$ 到理想摄像机像平面坐标系 $0_u, x_u, y_u$ 的转换：

$$z_c \begin{bmatrix} x_u \\ y_u \\ 1 \end{bmatrix} = F \begin{bmatrix} x_c \\ y_c \\ z_c \end{bmatrix} \quad (2-15)$$

其中，

$$F = \begin{bmatrix} f & & \\ & f & \\ & & 1 \end{bmatrix} \quad (2-16)$$

这里, f 是摄像机焦距。

注意, 摄像机坐标系 $0_c x_c y_c z_c$ 中坐标原点是摄像机光心, z_c 轴与光轴重合。理想摄像机像平面坐标系 $0_u x_u y_u$ 中的坐标平面与摄像机坐标系 $0_c x_c y_c z_c$ 中的 $x_c y_c$ 平面平行, 这两个平面间的距离即为摄像机焦距 f 。理想摄像机像平面坐标系 $0_u x_u y_u$ 坐标原点是 z_c 轴与 $x_u y_u$ 平面的交点, 且 x_u 轴与 y_u 轴分别与 x_c 轴和 y_c 轴平行。

3. 理想摄像机像平面坐标系 $0_u x_u y_u$ 到畸变摄像机像平面坐标系 $0_d x_d y_d$ 的转换:

$$x_u = x_d + \delta_{xd} \quad (2-17)$$

$$y_u = y_d + \delta_{yd} \quad (2-18)$$

其中 δ_{xd} 和 δ_{yd} 为镜头畸变引起的理想像点与真实像点在x和y两个方向上的偏差, 其表达式如下:

$$\delta_{xd} = k_1 x_d (x_d^2 + y_d^2) + [p_1 (3x_d^2 + y_d^2) + 2p_2 x_d y_d] + s_1 (x_d^2 + y_d^2) \quad (2-19)$$

$$\delta_{yd} = k_1 x_d (x_d^2 + y_d^2) + [2p_1 x_d y_d + p_2 (3x_d^2 + y_d^2)] + s_2 (x_d^2 + y_d^2) \quad (2-20)$$

式(2-19)和式(2-20)中第一项称为径向畸变, 其中 k_1 被称为径向畸变系数, 第二项称为离心畸变, 其中 p_1 和 p_2 称为离心畸变系数, 第三项称为薄棱镜畸变, 其中 s_1 和 s_2 被称为薄棱镜畸变系数。

4. 畸变摄像机像平面坐标系 $0_d x_d y_d$ 到计算机图像坐标系 $0_f x_f y_f$ 的转换:

$$x_f = x_d / \lambda d_x + c_x \quad (2-21)$$

$$y_f = y_d / d_y + c_y \quad (2-22)$$

其中各参数的意义如下:

d_x : 摄像机靶面感光单元x方向长度;

d_y : 摄像机靶面感光单元y方向长度;

λ : 非确定性标度因子, 它是由摄像机横向扫瞄与采样定时误差引起的;

x_c , y_c : 是畸变摄像机平面坐标系原点在计算机图像坐标系中的坐标。

在上述第三步坐标变换中, 如果式(2-19)和式(2-20)中各畸变系数皆为0, 则畸变摄像机平面坐标系 $0_d x_d y_d$ 与理想摄像机平面坐标系完全一致, 这时的摄像机模型就是线性模型, 或称小孔成像模型, 否则就是非线性模型。如果镜头的畸变系数比较大, 就应该选择非线性模型。而对于测量精度要求不高, 或镜头畸变很小, 则可以选择线性模型。

上述众多坐标变换所涉及的参数中, 旋转矩阵 R 由于其正交性, 只有三个独立参数, 它们与平移向量 T 中的三个独立参数, 完全由摄像机相对于世界坐标系的方位决定, 故称为摄像机外部参数; 其余的参数, 包括摄像机焦距 f , 畸变系数 k_1 、 p_1 、 p_2 、 s_1 , 和 s_2 , 非确定性标度因子 λ , 以及摄像机畸变坐标系的原点在计算机图像坐标系中的坐标 c_x 与 c_y , 只与摄像机内部结构有关, 故称为摄像机内部参数。

摄像机标定的目的, 是获得摄像机的内外部参数。具体的标定方法, 很多国内外文献

有详述讲解绍^[21-23]，本文不做具体介绍。

2.5.3 图像三维空间坐标的建立

对两个摄像机完成标定后，获得了它们的内外参数，同时也建立了一个基于模板的空间世界坐标系。这时，就可以从两个摄像机记录的图像上的对应像素点的二维图像坐标重建三维空间坐标。这里假设已经知道了两幅图像上的两个对应像素点的图像坐标为 (x_{f1}, y_{f1}) 、 (x_{f2}, y_{f2}) ，下面介绍如何从这两个图像坐标重建空间三维坐标，在下面的推导过程中，以下标“1”和“2”分别表示摄像机1和摄像机2的参数。

由式(2-21)和式(2-22)可得：

$$x_{d1} = (x_{f1} - c_{x1})d_{x1}\lambda_1 \quad (2-23)$$

$$y_{d1} = (y_{f1} - c_{y1})d_{y1}\lambda_1 \quad (2-24)$$

由式(2-17)和式(2-18)可得：

$$x_{u1} = x_{d1} + \delta_{xd1} \quad (2-25)$$

$$y_{u1} = y_{d1} + \delta_{yd1} \quad (2-26)$$

由式(2-15)可得：

$$\begin{bmatrix} x_{c1} \\ y_{c1} \\ z_{c1} \end{bmatrix} = z_{c1} F^{-1} \begin{bmatrix} x_{u1} \\ y_{u1} \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2-27)$$

由式(2-12)可得：

$$\begin{bmatrix} x_w \\ y_w \\ z_w \end{bmatrix} = R_1^{-1} \begin{bmatrix} x_{c1} \\ y_{c1} \\ z_{c1} \end{bmatrix} - R_1^{-1} T_1 \quad (2-28)$$

从(2-28)式可以看出，如果空间点在摄像机坐标系中的三维坐标已经知道，那么可以求得其在世界坐标系中的三维坐标。而式(2-27)所表示的方程组中，有三个未知数(即摄像机坐标系中的三维坐标)，而只有前两个方程是独立的，所以从一个摄像机记录的图像中不能确定摄像机坐标，从而也不能确定世界坐标，至少需要两个摄像机，才能唯一确定空间点的世界坐标。

由式(2-12)和式(2-27)可得：

$$R_1 \begin{bmatrix} x_w \\ y_w \\ z_w \end{bmatrix} + T_1 = z_{c1} F^{-1} \begin{bmatrix} x_{u1} \\ y_{u1} \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2-29)$$

令：

$$\begin{bmatrix} a_{11} \\ a_{12} \\ a_{13} \end{bmatrix} = F^{-1} \begin{bmatrix} x_{u1} \\ y_{u1} \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2-30)$$

$$\begin{bmatrix} R_{11} \\ R_{12} \\ R_{13} \end{bmatrix} = R_1 \quad (2-31)$$

其中, R_{11} 、 R_{12} 、和 R_{13} 是 R_1 的三个行向量。

可以证明, 式 (2-30) 中的 $a_{13}=1$, 利用式 (2-30) 和式 (2-31), 从式 (2-29) 中消去 z_{c1} , 可以得到如下方程组:

$$\left(\begin{bmatrix} R_{11} \\ R_{12} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} a_{11} \\ a_{12} \end{bmatrix} R_{13} \right) \begin{bmatrix} x_w \\ y_w \\ z_w \end{bmatrix} + \left(\begin{bmatrix} T_{1x} \\ T_{1y} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} a_{11} \\ a_{12} \end{bmatrix} T_{1z} \right) = 0 \quad (2-32)$$

对于摄像机2所拍摄图像上的像素点 (x_{r2}, y_{r2}) , 同理可得:

$$\left(\begin{bmatrix} R_{21} \\ R_{22} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} a_{21} \\ a_{22} \end{bmatrix} R_{23} \right) \begin{bmatrix} x_w \\ y_w \\ z_w \end{bmatrix} + \left(\begin{bmatrix} T_{2x} \\ T_{2y} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} a_{21} \\ a_{22} \end{bmatrix} T_{2z} \right) = 0 \quad (2-33)$$

式 (2-32) 和式 (2-33) 组成的方程组, 待求未知量是三个世界坐标, 但独立方程有四个, 对于这样的超静定方程, 可用最小二乘法求解。这样, 就实现了从图像二维坐标到空间三维坐标的重建。

2.5.4 基于小平面假设与摄像机成像模型的 DSCM

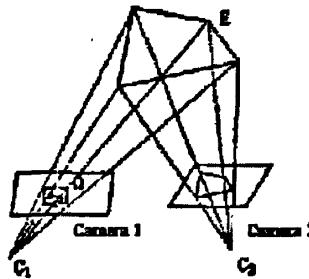


图 2.7 两个摄像机所记录图像点集的映射关系示意图

如图2.7所示, 在图像 I_1 上, 以点 $P(x_{r1}, y_{r1})$ 为中心选择一个相关区域 Ω , Ω 是有 n 个点的集合。相关区域是由空间中的曲面在摄像机靶面上的投影形成, 由于通常相关区域是一个非常小的区域, 故其所对应的曲面是一个微曲面, 因此可假设相关区域是由空间中的一个小平面 E 投影所形成。在摄像机1的三维坐标系 $O_{c1}x_{c1}y_{c1}z_{c1}$ 中, 假设平面 E 的方程为:

$$z = ax + by + c \quad (2-34)$$

需要指出的是, 如果平面E平行于摄像机1坐标系 $0_{cl}x_{cl}y_{cl}z_{cl}$ 的 z_{cl} 轴, 则式(2-15)是不合理的, 但在实际的测量中, 摄像机光轴总是指向被测物体表面, 即 z_{cl} 轴与平面E存在交点, 因此式(2-34)是合理的。

由式(2-21)和式(2-22)可得畸变摄像机像平面坐标为:

$$\begin{cases} x_{d1} = (x_{f1} - c_{x1})d_{x1}\lambda_1 \\ y_{d1} = (y_{f1} - c_{y1})d_{y1} \end{cases} \quad (2-35)$$

从式(2-17) 和式(2-18) 可得到理想摄像机像平面坐标为:

$$\begin{cases} x_{u1} = x_{d1} + \delta_{xd1} \\ y_{u1} = y_{d1} + \delta_{yd1} \end{cases} \quad (2-36)$$

通常在实验中使用的镜头畸变系数很小(大约在 $1-e5$ 的量级), 可以直接将畸变系数设置为0, 这对测量结果精度影响甚微。这样, 理想摄像机像平面坐标与畸变摄像机像平面坐标实际是一致的。由式(2-15) 可知:

$$\begin{cases} x_{cl} = \frac{x_{u1} \cdot z_{cl}}{f_1} \\ y_{cl} = \frac{y_{u1} \cdot z_{cl}}{f_1} \end{cases} \quad (2-37)$$

由小平面假设, 坐标 (x_{cl}, y_{cl}, z_{cl}) 应满足式(2-35), 即:

$$z_{cl} = ax_{cl} + by_{cl} + c \quad (2-38)$$

由式(2-37)、式(2-38)和式(2-12)可得:

$$\begin{bmatrix} x_w \\ y_w \\ z_w \end{bmatrix} = \frac{cf_1}{f_1 - ax_{u1} - by_{u1}} R_1^T \begin{bmatrix} x_{u1} \\ y_{u1} \\ f_1 \end{bmatrix} - R_1^T T_1 \quad (2-39)$$

经上述坐标变换, 得到了用平面参数a、b、c表示的图像1中的像素点 $P(x_{f1}, y_{f1})$ 对应的空间点在世界坐标系中的坐标 (x_w, y_w, z_w) 。根据摄像机成像模型, 继续坐标变换, 可求得该空间点在计算机图像坐标系2种的坐标, 具体过程下面介绍。

从式(2-12)可得摄像机坐标系2中的坐标:

$$\begin{bmatrix} x_{c2} \\ y_{c2} \\ z_{c2} \end{bmatrix} = R_2 \begin{bmatrix} x_w \\ y_w \\ z_w \end{bmatrix} + T_2 \quad (2-40)$$

将式(2-39)代入式(2-40)得:

$$\begin{bmatrix} x_{c2} \\ y_{c2} \\ z_{c2} \end{bmatrix} = \frac{cf_1}{f_1 - ax_{u1} - by_{u1}} R_2 \cdot R_1^T \cdot \begin{bmatrix} x_{u1} \\ y_{u1} \\ f_1 \end{bmatrix} + T_2 - R_2 R_1^T T_1 \quad (2-41)$$

设:

$$R = R_2 R_1^T = \begin{bmatrix} r_1 & r_2 & r_3 \\ r_4 & r_5 & r_6 \\ r_7 & r_8 & r_9 \end{bmatrix} \quad (2-42)$$

$$T = T_2 - R_2 R_1^T T_1 = \begin{bmatrix} T_x \\ T_y \\ T_z \end{bmatrix} \quad (2-43)$$

则式(2-41) 可简化为:

$$\begin{bmatrix} x_{c2} \\ y_{c2} \\ z_{c2} \end{bmatrix} = \frac{cf_1}{f_1 - ax_{u1} - by_{u1}} R \cdot \begin{bmatrix} x_{u1} \\ y_{u1} \\ f_1 \end{bmatrix} + T \quad (2-44)$$

从式(2-15) 可得摄像机2的理想摄像机像平面坐标:

$$\begin{cases} x_{u2} = f_2 \frac{cf_1(r_1x_{u1} + r_2y_{u1} + r_3f_1) + (f_1 - ax_{u1} - by_{u1})T_x}{cf_1(r_7x_{u1} + r_8y_{u1} + r_9f_1) + (f_1 - ax_{u1} - by_{u1})T_z} \\ y_{u2} = f_2 \frac{cf_1(r_4x_{u1} + r_5y_{u1} + r_6f_1) + (f_1 - ax_{u1} - by_{u1})T_y}{cf_1(r_7x_{u1} + r_8y_{u1} + r_9f_1) + (f_1 - ax_{u1} - by_{u1})T_z} \end{cases} \quad (2-45)$$

当畸变系数设置为0后, 摄像机2的畸变摄像机平面坐标等价于其理想摄像机像平面坐标。同上面推导一样, 可以得出图形2中的坐标为:

$$\begin{cases} x_{f2} = \frac{f_2}{\lambda_2 d_{x2}} \cdot \frac{cf_1(r_1x_{u1} + r_2y_{u1} + r_3f_1) + (f_1 - ax_{u1} - by_{u1})T_x}{cf_1(r_7x_{u1} + r_8y_{u1} + r_9f_1) + (f_1 - ax_{u1} - by_{u1})T_z} + c_{x2} \\ y_{f2} = \frac{f_2}{\lambda_2 d_{x2}} \cdot \frac{cf_1(r_4x_{u1} + r_5y_{u1} + r_6f_1) + (f_1 - ax_{u1} - by_{u1})T_y}{cf_1(r_7x_{u1} + r_8y_{u1} + r_9f_1) + (f_1 - ax_{u1} - by_{u1})T_z} + c_{y2} \end{cases} \quad (2-46)$$

式(2-46)描述了图像1中的点(x_{u1} , y_{u1})与图像2中的点(x_{f2} , y_{f2})的对应关系, 这种对应关系是由平面方程的三个参数a、b、c完全确定的。类似与二维DSCM中根据变形前后灰度不变的假设, 这里假设同一个空间点在两个摄像机所拍摄图像中的灰度是接近的或相等的。为了满足这个假设条件, 在测量过程中, 需要仔细调节两个摄像机, 使其灰度分布接近, 而在二维DSCM中, 只要光源稳定, 则可以满足灰度相等的条件。对于图像1中的相关区域Q, 在图像2中有n个点与其向对应, 可根据灰度关系, 建立相关算法。首先选择匹配公式, 这里选择式(2-26), 可得:

$$C(a, b, c) = \frac{\sum |f(x_{f1}, y_{f1}) \cdot g(x_{f2}, y_{f2})|}{[\sum f^2(x_{f1}, y_{f1}) \cdot \sum g^2(x_{f2}, y_{f2})]^{1/2}} \quad (2-47)$$

现在, 问题就转换为二维DSCM中求相关系数极值的问题。

2.6 本章小结

本章主要介绍了数字散斑相关法的基本理论, 并介绍了相关系数的计算与亚像素重构

的插值方法。

数字散斑相关测量法通过CCD摄像机和计算机摄取物体表面的图象并处理数据,与以往的干涉计量法相比具有光路简单、对测量环境要求低、精度高、自动进行数据处理等优点,可以进行全场、非接触测量。但同时,为了寻求相关最大点,需要进行大量繁琐重复的相关运算,使得计算量非常庞大,对硬件设备要求高。因此,在精度足够的情况下,本文采用方法简单,计算量小的双线性插值算法以加快计算速度。

参考文献

- [1] 高建新,周辛庚. 数字散斑相关方法的原理与应用[J]. 力学学报, 1995, 27 (6):724-731.
- [2] 高建新, 周辛庚. 变形测量中的数字散斑相关搜索方法[J]. 实验力学, 1991, 6 (4): 333-339.
- [3] 简龙晖, 林碧森, 刘宁. 基于小波变换的新型数字散斑相关方法[J]. 光学技术, 2003, 29(2): 216-218.
- [4] Chu T C, Ranson W. F, Sutton M A, et al. Application of digital image correlation techniques to experimental mechanics[J]. Exp. Mech, 1985,25:232-224.
- [5] Dongsheng Zhang. Application of digital image correlation to biological tissues[J]. Journal of Biomedical Optics, 2004,9(4):691-699.
- [6] Layons J S, Liu J, Sutton M A. High-temperature deformation measurements using digital image correlation[J]. Experimental Mechanics, 1996,35(1):64-70.
- [7] 董尊良, 康新, 陈凡秀等. 利用数字散斑相关法测定聚酰亚胺/SiO₂合成薄膜的力学性能[J]. 实验力学, 2005, 20(1): 109-114.
- [8] 张军, 金观昌, 马少鹏等. 基于微曲统计特性的数字散斑相关测量亚象素位移梯度算法[J]. 光学技术, 2003, 29(4): 467-472.
- [9] Wolfgang G. Knauss, Ioannis Chasiotis, Ying Huang. Mechanical measurements at the micron and nanometer scales[J]. Mechanics of Materials, 2003,35(3-6):217-231.
- [10] Jin G C, Wu Z, Bao N K, et al. Digital speckle correlation method with compensation technique for strain measurements[J]. Optics and Lasers in Engineering, 2003,39(4):457-464.
- [11] Wang Yu, Cuitiño, Alberto M. Full-field measurements of heterogeneous deformation patterns on polymeric foams using digital image correlation[J]. International Journal of Solids and Structures, 2002,39(13-14):3777-3796.
- [12] X. Q. Shi, Z. P. Wang, J. P. Pickering. A new methodology for the characterization of fracture toughness of filled epoxy films involved in microelectronics packages[J]. Microelectronics Reliability, 2003,43:1105-1115.
- [13] Zhang D S, Eggleton C D, Arola D D. Evaluating the mechanical behavior of arterial tissue using digital image correlation[J]. Experimental Mechanics, 2002,42(4):409-416.
- [14] 马少鹏, 金观昌, 潘一山. 白光DSCM方法用于岩石变形观测的研究[J]. 实验力学,

2002, 17(1): 10-16.

- [15] 谢惠民, 刘战伟, 朱宏伟等. 单壁碳纳米管力学行为的数字散斑相关方法实验研究[J]. 光学技术, 2004, 30(4): 449-454.
- [16] 阮秋琦, 阮宇智等译. 数字图像处理[M]. 电子工业出版社, 北京, 2003.
- [17] 金观昌. 计算机辅助光学测量[M]. 清华大学出版社, 1997.
- [18] 孙一翎, 李善祥, 李景镇. 数字散斑相关测量方法的研究与改进[J]. 光子学报, 2001, 30 (1), 54-57.
- [19] 高建新. 数字散斑相关方法的原理与应用[J]. 力学学报, 1995, 27 (6), 726-728.
- [20] 康新. 微电子机械系统(MEMS)中的光学测试方法研究[C]. 南京, 东南大学, 2003.
- [21] Faugeras O D, Toscani G. The Calibration problem for stereo [C]. Proc. of IEEE conference of computer vision and Pattern recognition, 1986, 15-20
- [22] Tsai R Y. An efficient and accurate camera calibration technique for 3D machine vision [C]. Proc. of IEEE conference of computer vision and pattern recognition, 1986, 364-374
- [23] Tsai R Y. A versatile camera Calibration technique for high-accuracy 3D machine vision metrology using off-the-shelf TV cameras and lenses[J]. IEEE Journal of Robotics and Automation, 1987, ra-3(4): 323-344

第三章 测量离面位移的数字散斑相关方法

3.1 引言

测量离面位移的方法有很多种，其中常用的方法有两类。一类是干涉法。全息干涉术^[1,2]在无刚体位移的情况下可以直接测得位移数据，但是全息干涉术光路复杂、对环境的要求较高，使得该方法的应用受到限制。电子散斑干涉法^[3,4]的发展摆脱了全息方法必须进行干涉记录的限制，实验过程相对简单，灵敏度较高，提高了光学测量方法的自动化程度，但是条纹处理步骤繁琐。另一类是投影法。投影栅线法^[5,6]是将光栅投影到物体表面，通过解调相位信息获得物体形貌。相位解调的方法主要有莫尔等高线法^[7]、傅立叶变换法^[8]和相移法^[9]。该方法虽然应用广泛，但是需要制作高精度光栅、具有精确相移等，而最主要的还是相位解调问题。虽然相移法可测量陡峭和有突变的物体形貌，而且精度很高，但是这种方法需要拍摄至少三幅变形条纹图，只能用于静态测量，这也使得该方法的应用受到了限制。

本文采用结构光投影^[10]与数字散斑相关法^[11]相结合的方法，利用数字散斑相关方法对采集到的结构光投影图进行分析，从而获得全场离面位移。传统的投影方法在测量物体三维形貌时，易受投影光分布不均匀和质量较差的结构光影响。而结构光投影相关法由单个结构光投影产生的物体表面投影场和一个标准参考表面两组变形投影场，通过对两组光场的位置和光强变化，获得物体的变形量。该方法比较以前的方法有如下优点：(1)测量结果不受投影光强分布的影响；(2)只要求投影系统光轴与CCD摄像机光轴保持在同一平面，具体投影系统的位置可以任意安排，方便了光路的布置；(3)主要用于测量物体的离面位移，它具有非接触式、全场测量、无破坏、高分辨率、理论精度高、操作简单、获取速度快等优点。

本章介绍了测量离面位移的数字散斑相关方法，即将数字散斑与光学投影相结合的投影散斑相关法的基本原理，主要是将人工散斑投影到物体表面，物体发生离面位移时，散斑受高度的调制而发生移动。用数字图像相关方法测出移动的位移就可以得到物体的高度变化。本文后面的验证实验正是基于这种原理来测量鼓膜实验中薄膜的三维变形。

3.2 投影散斑相关法的基本原理

投影散斑相关法是数字散斑相关法与投影云纹法的结合，其基本思想是采用光学投影装置将散斑投影到物体表面，在表面形成物体表面所调制的光强图像。该光场由CCD摄像机记录并保存到计算机上。不同的试件光场会有不同的变形程度，这主要取决于光学投影仪器与CCD摄像机之间的相对位置和物体表面的形貌。直观上看，光场在法线方向的位移（或偏移）与物体表面深度成比例，即光场的变形对应于表面高度的变化。光场不连续对

应于表面的物理突变或间隙。当光学投影装置与CCD摄像机之间的相对位置一定时，通过变形的光场图像可以重现被测物体的变形状态，即可以进行物体表面离面位移的测量。

受物体表面高度的调制，散斑图在平面内也产生位移，并且与高度有一定的关系。利用数字散斑相关法可以计算出各散斑点的面内位移，即可得到物体表面高度信息。投影散斑法对前后两幅数字化散斑场进行相关识别，通过相关运算和面内位移向高度场的转换计算，最终实现物体表面高度的测量。

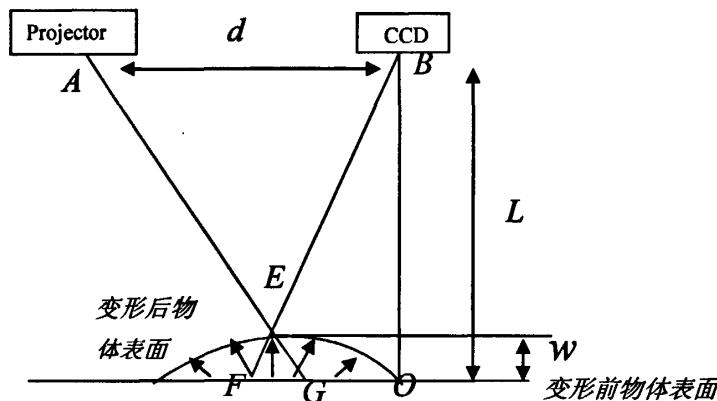


图 3.1 测量光路布置简图

图3.1为薄膜离面位移测量系统结构简图，将散斑图样经投影仪投到被测薄膜的表面，投在薄膜表面的散斑将随薄膜的运动而运动，并由高速CCD采集变形前后的散斑图样。薄膜的离面运动都转化成二维数字图像上散斑的面内位移。由图3.1中的几何关系，可以得到薄膜离面位移和散斑面内位移的关系，由三角形 EAB 与三角形 EGF 的相似关系，可得散斑面内位移：

$$u = FG = w \cdot d / (L - w) \quad (3-1)$$

由于 $w \ll L$ ，因此，上式可近似写为：

$$u = FG = w \cdot d / L \quad (3-2)$$

可得离面位移与散斑面内位移的关系：

$$w = \frac{Lu}{d} \quad (3-3)$$

考虑 CCD 成像的放大倍率 M ，将上式修正为：

$$w = \frac{LMu}{d} \quad (3-4)$$

将 LM/d 记为常数 K ，上式可记为：

$$w = Ku \quad (3-5)$$

系统一旦固定， K 值是常数，可通过实验标定得到，求得散斑面内位移后，即可得到

薄膜的离面位移。

3.3 本章小结

本章介绍了测量离面位移的数字散斑相关方法，即将数字散斑与光学投影相结合的投影散斑相关法的基本原理，它具有非接触式、全场测量、无破坏、高分辨率、理论精度高、操作简单、获取速度快等优点。

参考文献

- [1] 马友光, 汪晓红, 余国琮. 双波长激光全息干涉测试技术研究进展[J]. 光电子·激光, 1996, 7 (3), 135-143.
- [2] 杨桂娟, 梅妍, 白亚乡. 全息术及其应用[J]. 应用光学, 2006, 27 (2), 96-100.
- [3] Bruno L, Pagnotta L, Poggialini A, et al. Laser speckle decorrelation in NDT[C]. Optics and Lasers in Engineering, 2000, 34: 55-65.
- [4] 杨福俊, 何小元, 潘建武. ESPI技术对外贴纤维混凝土加固承载的实验研究[J]. 实验力学, 2004, 19 (2), 183-187.
- [5] Carsten Reich, Reinhold Ritter. 3-D shape measurement of complex objects by combining photogrammetry and fringe projection[J]. Opt. Eng, 2000,39(1): 224-231.
- [6] 康新, 董萼良, 何小元. 显微栅线投影法用于微镜转角测量[J]. 光子学报, 2004, 33 (12): 1500-1503.
- [7] Takasaki H. Moiré topography[J]. Appl. Opt, 1979,19: 1467-1472.
- [8] Jian Li, Xianyu Su, Lurong Guo. Improved Fourier transform profilometry for the automatic measurement of three-dimensional objects shapes[J]. Opt Eng, 1990,29(12): 1439-1444.
- [9] 潘伟, 赵毅, 阮雪榆. 相移法在光栅投影测量中的应用[J]. 应用光学, 2003, 24 (4): 46-49.
- [10] Mikael Södahl, Per Synnergren. Measurement of shape by using projected random patterns and temporal digital speckle photography[J]. Appl Opt, 1999,38(10): 1990-1997.
- [11] Jun Zhang, Guangchang Jin, Shaopeng Ma, et al. Application of an improved subpixel registration algorithm on digital speckle correlation measurement[J]. Optics&Laser technology, 2003, 35: 533-542.

第四章 测量离面位移的 DSCM 硬件实现

4.1 引言

为了实现测量离面位移的数字散斑相关方法系统的自动化和多功能化，尽量减少人为因素的干扰，提高精度，通过分析和研究，利用数控技术、电子技术、计算机技术等多方面知识进行设计和加工了该光测系统。该系统主要由硬件部分和软件部分组成。

本章主要介绍光测系统硬件的组成部分——图像采集系统。以微观实验要求为根本出发点，同时保证系统运行的可靠性和稳定性，兼顾多功能性，从远心镜头的选择原则和机理上加以研究，确定了满足需要的零部件，并将它们有机地组成整体，从而实现系统的正常运行。

4.2 远心镜头

在测量系统中，物距常发生变化，从而使像高发生变化，所以测得的物体尺寸也发生变化，即产生了测量误差；另一方面，即使物距是固定的，也会因为 CCD 敏感表面不易精确调整在像平面上，同样也会产生测量误差。为了解决上述问题，可以采用远心物镜。其中像方远心物镜可以消除物距变化带来的测量误差，而物方远心物镜则可以消除 CCD 位置不准带来的测量误差。

1) 物方远心物镜

物方远心物镜是将孔径光阑放置在光学系统的像方焦平面上，图 4.1 所示，当孔径光阑放在像方焦平面上时，即使物距发生改变，像距也发生改变，但像高并没有发生改变，即测得的物体尺寸不会变化；图 4.2 清楚地显示出物方远心光路的原理，其中孔径光阑位于像方焦面上，物方主光线平行于光轴。如果物体 B_1B_2 正确地位于与 CCD 表面 M 共轭的位置 A_1 上，那么它在 CCD 表面上的像为 M_1M_2 。如果由于物距改变，物体 B_1B_2 不在位置 A_1 而在位置 A_2 ，那么它的像 $B'_1B'_2$ 偏离 CCD 表面， B'_1 和 B'_2 点在 CCD 表面上投影为一个弥散斑，其中心仍为 M_1 和 M_2 点，按此投影像读出的长度仍为 M_2M_1 。这就是说，上述物距改变并不影响测量精度。

2) 像方远心光路

像方远心光路是将孔径光阑放置在光学系统的物方焦平面上，而像方的主光线平行于光轴，如图 4.3 所示。如果物体 B_1B_2 的像 $B'_1B'_2$ 不与 CCD 表面 M 重合，则在 CCD 表面 M 上得到的是 $B'_1B'_2$ 的投影像，其散斑中心距离 $M_1M_2=B'_1B'_2$ 。因此，不管 CCD 表面 M 是否和 $B'_1B'_2$ 相重合，它和标尺所对应的长度总是 B_1B_2 ，所以没有测量误差。

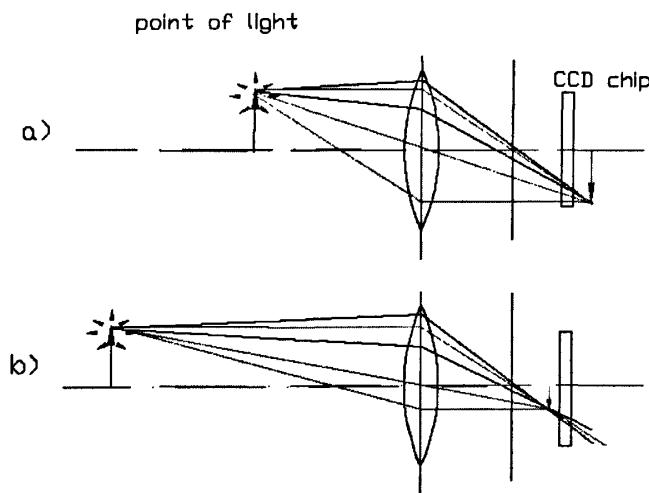


图 4.1 孔径光阑放在像方焦平面光路示意图

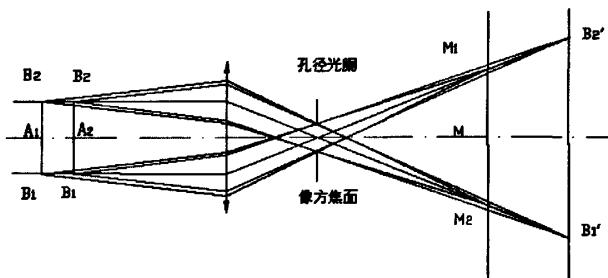


图 4.2 物方远心光路原理示意图

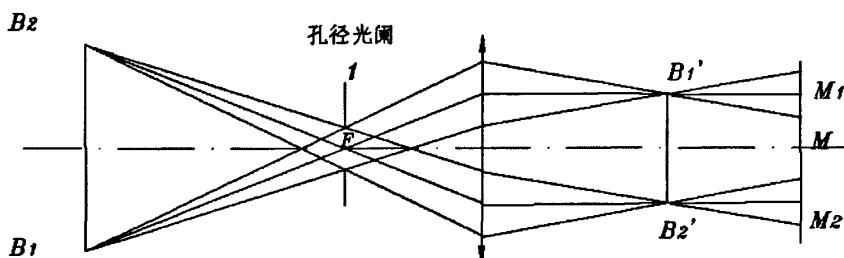


图 4.3 像方远心光路原理示意图

透视误差，也称为视差，是日常生活的一部分，人类的经验。事实上，视差让大脑解释三维世界。我们希望较近的物体看上去比较远的物体要大。这种现象也存在于传统的成像系统，物体的放大率随着其距离镜头远近而不同。远心镜头从光学上纠正了这一现象，

使物体保持不变的视觉大小, 和其距离镜头远近无关, 其原理如图 4.4 所示, 其优缺点对照结果如表 4.1 所示。

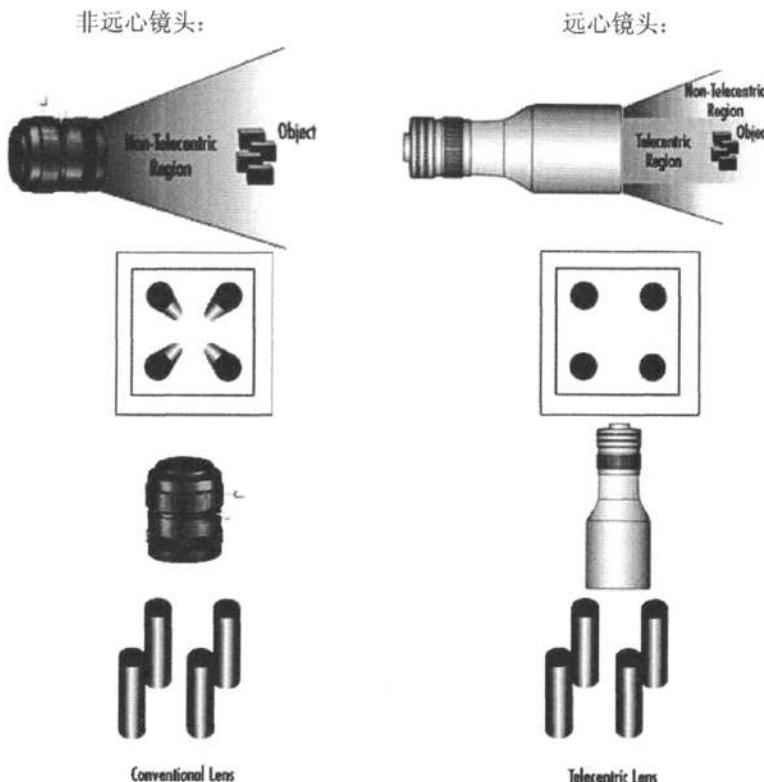


图 4.4 非远心镜头和远心镜头对比原理示意图

表 4.1 非远心镜头和远心镜头优缺点对照表

	非远心镜头	远心镜头
优点	成本较低	景深内放大率不变
	全面上市	没有透视错误
	适应性较高	
缺点	景深内放大率改变	成本较高
	有透视错误	较大的镜头直径
		比较重
应用	大物体成像	计量
		基于 CCD 的测量
		微光刻

例 1：对准跳线针

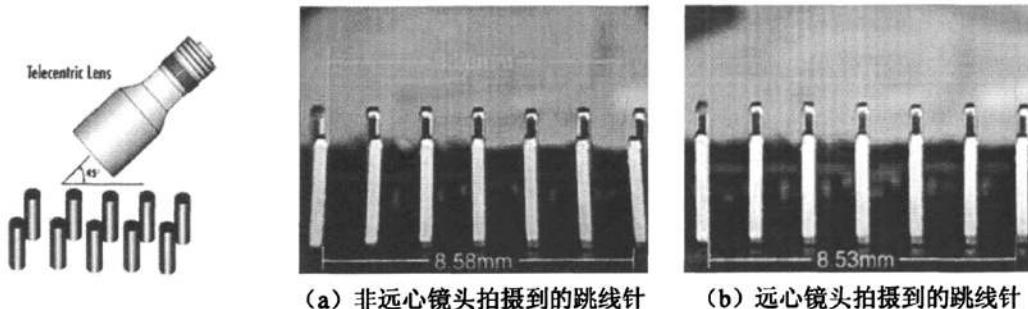


图 4.5 非远心镜头和远心镜头拍摄到的跳线针

随着计算机技术领域的指数性增长，非远心镜头的视差在处理这些细节时的错误变得更加明显。

图 4.5 (a) 显示传统的镜头以 45° 角查看一个典型的计算机电路板跳线针。从图上可以清楚地看到，镜头引入了视差，并且带有角度的针脚向中心视场倾斜。这些针脚之间的距离测量对整齐排列将产生不正确的计算。视差在这个例子中是 3%，但在其他应用领域要高得多。

图 4.5 (b) 显示通过一个远心镜头观看到相同的针脚。针脚的角度显示其距离的准确并且视差已被消除。使用远心镜头，可以确定正确一致的距离并达到较高的准确度。这是由于放大率不随距离镜头远近而变化。这种不变的放大率使用户能够在改变高度或改变斜率时得到精确的结果。

例 2：九根圆柱

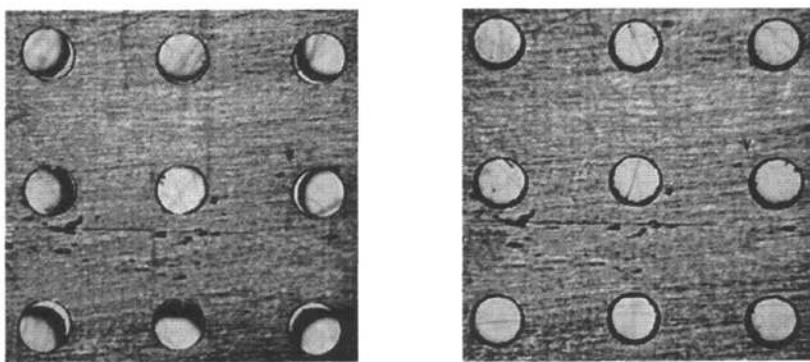


图 4.6 非远心镜头与远心镜头成像比较

选用高质量的显微镜头，比如远距离、远心、显微镜头可以使透过透镜看到的图像不发生失真。图 4.6 展示了非远心镜头与远心镜头在成像上的差异。从图 4.6(a) 上可以明显看出，应用非远心镜头拍摄的图像在周边发生了几何改变，也就是说，实际九根圆柱在图

像上也应该是圆柱，但在非远心镜头拍摄的图像上除中间一个没有发生变化外，其余都不同程度地发生了畸变，即图像发生了失真。而图 4.6(b)利用远心镜头拍摄的图像上九根圆柱的几何形状没有发生变化。可见，远心镜头拍摄的图像没有发生失真，仍然保持了物体本来的几何形状，从而提高了图像匹配的概率。但是购买此种镜头的费用较高，导致其应用受到经济条件的限制。

4.3 图像采集系统

4.3.1 图像采集系统简介

本文采用的图像采集系统同一般的采集系统基本一样，同样包括镜头、CCD、光源和图像采集卡，见示意图 4.7 所示。本实验中所用的 CCD 镜头为 BASLER 的镜头，其分辨率为 1628*1236，晶片尺寸为 7.2mm*5.4mm，采集频率为 14fps，所用的图像位数为 8 位。

这里选用的图像采集镜头是远心显微镜头。该镜头是 EDMUND 公司生产的 0.5 倍大口径远心镜头，与普通镜头不同的是该显微镜头在图像周边几乎不会发生几何畸变（根据远心镜头的参数，图像畸变量小于 0.1%），因而用这种镜头拍摄到的薄膜微观图像不会使图像中的散斑形状发生变形。因此，选用该镜头可以提高下一步在图像上进行参数提取的准确性，为薄膜力学性能分析奠定了可靠的数据基础。另外，散斑投影镜头也是采用远心镜头（55mm partially-telecentric video lens），这样也保证投影到试件表面的散斑颗粒不会发生畸变，从而进一步从硬件上面提高了整个实验器材的精确性，如图 4.8 所示。

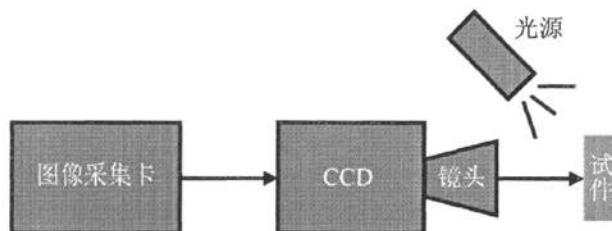


图 4.7 图像采集系统示意图

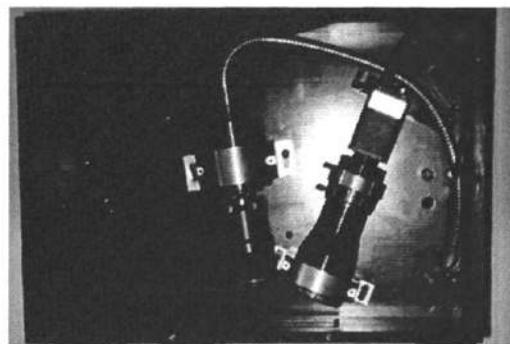


图 4.8 实验仪器所用远心镜头

4.3.2 采图远心镜头

本实验仪器采用的采图远心镜头为 0.5X 放大倍率的 TECHSPEC 黄金系列远心镜头，如图 4.9 所示。

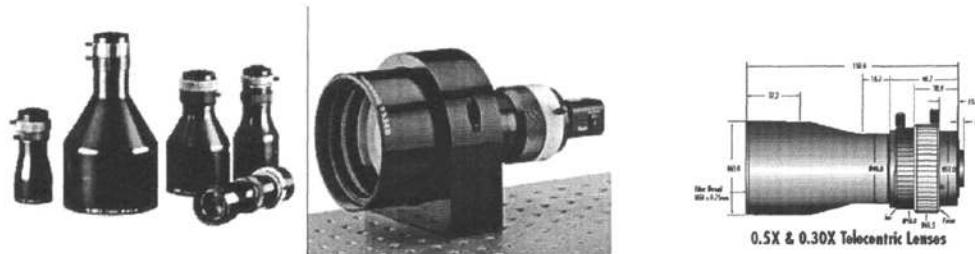


图 4.9 采图远心镜头

特点：

- 专为机器视觉应用
- $<0.1^\circ$ 远心率
- 高分辨率和低失真
- 最大传感器尺寸：2 / 3" 或 1 / 2" 格式系列

远心镜头是机器视觉系统与计量学应用的重要工具，产生的图像上可以得到精确测量。有两个系列的 TECHSPEC 黄金系列远镜头，可用于 2 / 3" 或 1 / 2" 格式传感器大小。在 2 / 3" 格式系列包括 5 个镜头，可用于 2 / 3" 或更小的尺寸传感器。在 1 / 2" 格式系列包括 4 个镜头，可用于 1 / 2" 或更小的尺寸传感器。新的 1 / 2" 系列通过匹配最大视场值的 2 / 3" 系列达到最大化覆盖面，从而实现了更大视野与尺寸较小的相机。这些镜头在界定的景深下放大率不变，并在指定的工作距离使用时优化提供 $<0.1^\circ$ 远心率。指定的工作距离内的任何地方，可简单地通过重新调整获得同样的放大倍率。由于最大视场远心系统中直接涉及到镜头光圈最接近对象，因此较大的视场必须用较大的前镜头。

所有 TECHSPEC 黄金系列远镜头的前端过滤器线程加上彩色滤光片，偏光板，或其它安装组件优化机器视觉应用。光圈和焦距调节装置的位置都可以由一套螺丝固定，以保证在高振动环境下仍可安全使用。

4.3.3 投影远心镜头

本实验仪器采用的投影远心镜头为 55 毫米 FL 部分远视频镜头如图 4.10 所示。

特点：

- 手动光圈
- 理想的测量应用
- ± 12.5 毫米景深在 0.5X

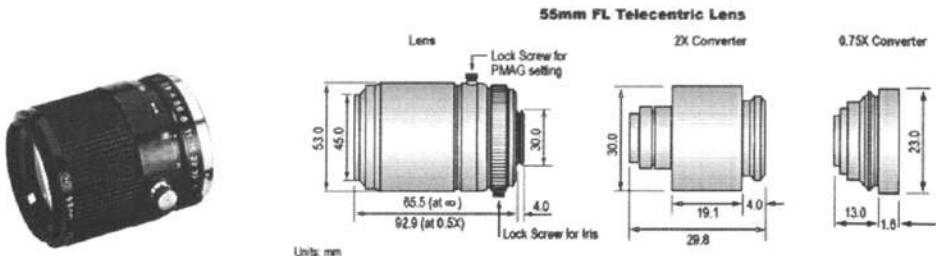


图 4.10 投影远心镜头

远心镜头带来不断放大的一系列工作距离，几乎消除视角错差。55 毫米焦距的远心镜头在 ± 12.5 毫米的物体移动（在 0.5X 放大率）时，图像尺度的误差小于 1%。而非远心镜头在同样的条件下通常只允许物体发生 ± 1.7 毫米的移动。在和适配器镜头配合使用时，镜头的保护窗口需要拆除。

这些镜头是理想的用于精确测量略有高度变化的三维物体视觉机器。通过消除非远心镜头所固有的失真角度和放大错误，很容易通过软件看到物体准确的三维图像。

4.3.4 镜头的选型

镜头是电视监控系统中必不可少的部件，镜头与 CCD 摄像机配合，可以将远距离目标成像在摄像机的 CCD 靶面上。

镜头的种类繁多，从焦距上分类，可分为短焦距、中焦距、长焦距和变焦距镜头；从视场的大小分类，可分为广角、标准、远摄镜头；从结构上分类，还可分为固定光圈定焦镜头、手动光圈定焦镜头、自动光圈定焦镜头、手动变焦镜头、自动光圈电动变焦镜头、电动三可变镜头（指光圈、焦距、聚焦这三者均可变）等类型。由于镜头选择得合适与否，直接关系到摄像质量的优劣，因此，在实际应用中必须合理选择镜头。

一、镜头主要参数

1. 焦距 (Focal Length)

焦距是从镜头的中心点到胶平面上所形成的清晰影像之间的距离。焦距的大小决定着视角的大小，焦距数值小，视角大，所观察的范围也大；焦距数值大，视角小，观察范围小。根据焦距能否调节，可分为定焦镜头和变焦镜头两大类。

2. 光圈 (Iris)

用 F 表示，以镜头焦距 f 和通光孔径 D 的比值来衡量。每个镜头上都标有最大 F 值，例如 8mm/F1.4 代表最大孔径为 5.7 毫米。F 值越小，光圈越大，F 值越大，光圈越小。

3. 对应最大 CCD 尺寸 (Sensor Size)

镜头成像直径可覆盖的最大 CCD 芯片尺寸。主要有：1/2"、2/3"、1" 和 1" 以上。

4. 接口 (Mount)

镜头与相机的连接方式。常用的包括 C、CS、F、V、T2、Leica、M42x1、M75x0.75 等。

5. 景深(Depth of Field,DOF)

景深是指在被摄物体聚焦清楚后，在物体前后一定距离内，其影像仍然清晰的范围。景深随镜头的光圈值、焦距、拍摄距离而变化。光圈越大，景深越小；光圈越小，景深越大。焦距越长，景深越小；焦距越短，景深越大。距离拍摄体越近时，景深越小；距离拍摄体越远时，景深越大。

6. 分辨率(Resolution)

分辨率代表镜头记录物体细节的能力，以每毫米里面能够分辨黑白对线的数量为计量单位：“线对/毫米” (lp/mm)。分辨率越高的镜头成像越清晰。

7、工作距离(Working distance,WD)

镜头第一个工作面到被测物体的距离。

8、视野范围(Field of View,FOV)

相机实际拍到区域的尺寸。

9、光学放大倍数(Magnification,β)

CCD/FOV，即芯片尺寸除以视野范围。

10、数值孔径(Numerical Aperture,NA)

数值孔径等于由物体与物镜间媒质的折射率 n 与物镜孔径角的一半 ($a/2$) 的正弦值乘积，计算公式为 $N.A=n*\sin a/2$ 。数值孔径与其它光学参数有着密切的关系，它与分辨率成正比，与放大率成正比。也就是说数值孔径直接决定了镜头分辨率，数值孔径越大，分辨率越高，否则反之。

11、后倍焦(Flange distance)

准确来说，后倍焦是相机的一个参数，指相机接口平面到芯片的距离。但在线扫描镜头或者大面阵相机的镜头选型时，后倍焦是一个非常重要的参数，因为它直接影响镜头的配置。不同厂家的相机，哪怕接口一样也可能有不同的后倍焦。

二、镜头选型

1. 选择镜头接口和最大像面尺寸

镜头接口只要可跟相机接口匹配安装或可通过外加转换口匹配安装就可以了；镜头可支持的最大 CCD 尺寸应大于等于选配相机 CCD 芯片尺寸。例如：1/3"摄像机可选 1/3"~1" 整个范围内的镜头，但水平视角的大小都是一样的。只是使用大于 1/3"的镜头能够更精确镜头中心光路，所以可提高图像质量和分辨率。

2. 选择合适的镜头焦距。

焦距越大，监看距离越远，水平视角越小，监视范围越窄；焦距越小，监看距离越近，水平视角越大，监视范围越宽。

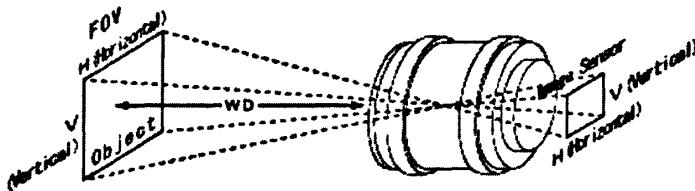


图 4.11 选择镜头焦距示意图

$$\frac{f}{WD} = \frac{\text{Sensor Size}(V) \text{ or } (H)}{\text{FOV}(V) \text{ or } (H)} \quad (4-1)$$

如图 4.11 和式(4-1)所示，在已知相机 CCD 尺寸、工作距离 (WD) 和视场 (FOV) 的情况下，可以计算出所需镜头的焦距 (f)。

3. 选择镜头光圈

镜头的光圈大小决定图像的亮度，在拍摄高速运动物体、曝光时间很短的应用中，应该选用大光圈镜头，以提高图像亮度。

光线对图像的采集效果起着十分重要的作用。一般来说，对于光线变化不明显的环境，我们常选用手动光圈镜头，将光圈手调到一个比较理想的数值后就可不动了；如果光线变化较大，如室外 24 小时监看，应选用自动光圈，能够根据光线的明暗变化自动调节光圈值的大小，保证图像质量。但需注意的是，如果光线照度不均匀，特别是监视目标与背景光反差较大时，采用自动光圈镜头效果不理想。

4. 选择远心镜头

其具体优点可参照上述 4.2 节的内容。

5. 镜头接口与摄像机接口要一致。

现在的摄像机和镜头通常都是 CS 型接口，CS 型摄像机可以和 CS 型、C 型镜头配接，但和 C 型镜头接配时，必须在镜头和摄像机之间加接配环，否则可能碰坏 CCD 成像面的保护玻璃，造成 CCD 摄像机的损坏。C 型摄像机不能和 CS 型镜头配接。

4.3.5 光路分析

1. 传统光路

图 4.12 是传统散斑投影光路示意图。CCD 摄像机和投影器在同一平面，平行于参考平面（未变形的物体表面）。Z 轴垂直于参考平面。点 P 是投影器中心一点，点 I 是 CCD 中心一点。点 O 是投影器和 CCD 光轴的交叉点。投影器用来投射人造随机散斑到参考平面。物体变形为 h 。采集变形前后的 2 幅图像，原来投射在参考面的 A 点的散斑移动到了

变形后的表面 C 点, 然后沿着 CI 反射进入 CCD 摄像机。参考面上的点 B 位于光束 CI 的延长部分。

$$\frac{\Delta x}{L} = \frac{h(x, y)}{H - h(x, y)} \quad (4-2)$$

当 $H \gg h(x, y)$, 图上象素相应的尺寸 Δx 为:

$$\Delta_i = M \Delta x = \frac{MLh}{H} \quad (4-3)$$

若参考平面上的放大倍率因子 M 不变 (单位: pixel / μm), 则标定系数为:

$$k = \frac{h}{\Delta_i} = \frac{H}{ML} \quad (4-4)$$

从公式 (4-4) 中, 我们知道, 系数 k 是一个常数, 仅和实验设备有关。标定后, 即可获得 k 值。

用数字图像相关方法比较这两幅图, 即可计算出图上的偏移 Δi , 而变形可通过公式 $h = k \Delta_i$ 来获得。

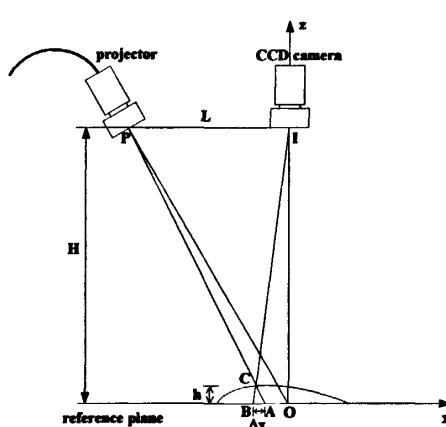


图 4.12 传统散斑投影光路示意图

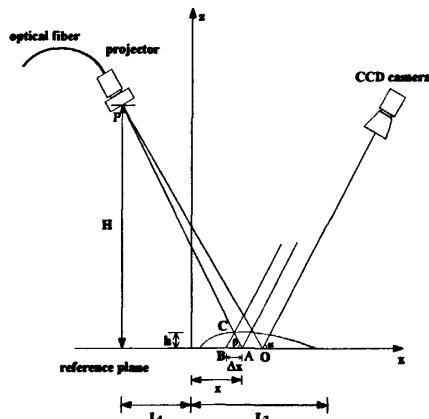


图 4.13 远心散斑投影光路示意图

2. 远心光路

在景深范围内, 物方远心镜头所成的像是大小不变的, 并且在整个视场内具有相同的视角。主要光线 (经过孔径光阑的斜光线) 平行于镜头前的光轴。当物体放置得离远心镜头过远或过近时, 成像可能已经模糊, 但是这个模糊的像与准确聚焦时的同样大小 (两者的中心一致)。此外, 物方远心镜头由于更小的镜头畸变和更高的图像分辨率而被采用。

图 4.13 是远心散斑投影光路示意图。CCD 采用 0.5 倍的远心镜头, 视场 12.8mm, 远心率小于 0.1° , 成像 CCD (Balser, scA 1600-14fm) 的分辨率是 1600 像素 \times 1200 像素。采用传统的镜头将散斑投影到物体表面。

在图 4.13 中, L_2 是视场。如前面所述, 光线 BC 平行于 CCD 摄像机光轴。

类似于传统光路分析，我们可获得

$$\Delta_i = M\Delta x = M\left(\frac{h}{\tan \alpha} + \frac{h}{\tan \beta}\right) \quad (4-5)$$

其中， $\tan \beta = \frac{H}{L_1 + x}$ ，M 是远心镜头参考平面常数放大倍率因子。

因此，

$$\Delta_i = Mh\left(\frac{1}{\tan \alpha} + \frac{L_1 + x}{H}\right) = (ax + b)h \quad (4-6)$$

其中， $a = \frac{M}{H}$ ， $b = M\left(\frac{1}{\tan \alpha} + \frac{L_1}{H}\right)$

$$k = \frac{h}{\Delta_i} = \frac{1}{ax + b} \quad (4-7)$$

可以看到，式(4-4) 和式(4-7)不同，式(4-4)中的 k 不变，而式式(4-7)表达的是一个变化的系数。

4.4 本章小结

本章对测量离面位移的数字散斑相关方法硬件实现进行了研究和开发。在投影方和采图方都引入了远心镜头来提高测量离面位移的数字散斑相关方法精度。首先，探讨了远心镜头相比非远心镜头的优缺点和应用范围，并用 2 个实例证明了远心镜头的优点；其次，介绍了该硬件的核心——图像采集系统，并详细介绍了 2 个远心镜头的相关数据；最后，分析讨论了远心镜头的选型标准及其光路，为今后设计加工类似光测系统的硬件选择提供了一些参考。

第五章 测量离面位移的 DSCM 软件开发

5.1 引言

在第四章中对测量离面位移的数字散斑相关方法的硬件进行研究时, 已经提到软件开发是整个系统运行的关键。考虑到今后软件的维护和升级, 本文利用 VC++6.0 开发工具, 编制了该系统的配套软件^[1-4]。由于光测系统需要实时显示被测区域并能够采集不同时刻的图像, 同时还要将采集的图像直接存入计算机, 因此, 计算机需要同步处理多项任务。多线程技术就是解决这一问题的关键技术^[5], 通过使用多线程技术, 本软件不仅可以实时显示图像, 而且可以根据不同的测试对象添加相应的有针对性的功能, 例如, 同步显示压力值并输出压力和时间关系曲线, 可以发出信号驱动步进电机等等。经过程序的编写和调试, 测量离面位移的 DSCM 光测系统软件可以满足微观结构变形实验的基本要求。

本章首先介绍该光测系统软件基本框架, 然后详细说明了实现这一软件的关键技术——多线程技术, 最后对该光测系统软件进行了测试。

5.2 软件的界面

数字散斑相关方法在测量物体表面变形时, 需要处理图像中保存的大量数据信息, 这就要求实验人员设计开发一套 DSCM 计算程序。本次实验以 VC++语言为工具, 应用标准 C++开发了数字散斑相关程序。为了软件的使用方便, 用 MFC 编写了直观友好的用户使用界面, 如图 5.1 所示。

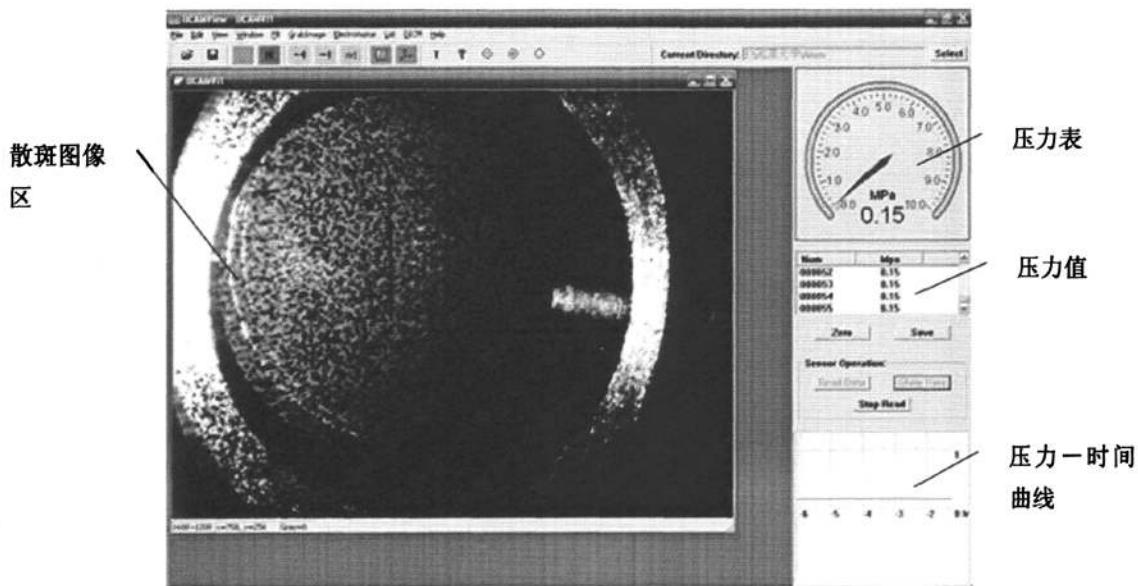


图 5.1 数字散斑相关计算软件图形界面

图 5.1 所示界面中, 左边大块区域为被测区域的实时显示区, 右边从上到下的压力表、压力值、压力——时间曲线区域则是根据具体的测试对象而添加的实时显示区。

根据采集到的散斑图像的不同可以设置需要计算的区域以及相关计算的模板大小等参数, 设置界面如图 5.2 所示。

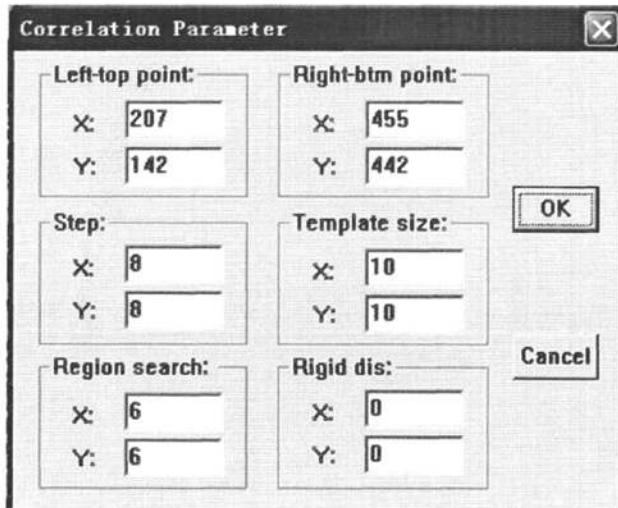


图 5.2 相关计算设置界面

5.3 软件实现的关键技术

5.3.1 Windows 环境下多线程基本原理

通常编制的软件主要是完成单个任务, 因此, 不需要考虑同步处理多个任务。但是针对本文编制的光测软件来说, 多个任务的同步进行是必不可少的, 比如, 图像实时显示、显示压力值、输出压力和时间关系曲线需要同步进行; 驱动步进电机带动控制台移动和采集不同移动位置下的图像也需要同步进行。因此, 通过分析, 利用 Windows 环境下的多线程技术能够解决这一问题。关于多线程技术的开发, 目前在测控系统^[7-11]、图像采集系统^[12-13]以及数据处理系统^[14-18]中都有应用。特别是基于 VC 编程平台的多线程技术更是有很大的发展前景^[19-23]。

在具体解释多线程之前, 首先说明几个相关概念。其中包括进程和线程, 单线程和多线程以及线程同步的概念。

1 进程和线程

进程和程序是两个不同的概念^[24], 简单地讲, 进程就是正在运行的应用程序, 而程序是静态的代码和数据。同一个程序可以由多个进程执行。严格来讲, 在操作系统内部, 进程是位于核心区的一块内存结构, 其中包含了虚拟地址空间、可执行代码、数据、对象句柄、环境变量、基本优先级、最小和最大工作集等有关信息。例如正在运行的 Web 浏览器就是一个进程, 在计算机中处于运行状态的任何一个程序都是一个进程。抽象一点讲, 进

程是一些所有权的集合，一个进程拥有内存、CPU、运行事件等一系列资源，为线程的运行提供一个环境。每个进程都有它自己的地址空间和动态分配的内存，以及文件、线程和其他一些模块。一个进程的状态有以下几种：

- ◆ 运行：正在使用CPU；
- ◆ 就绪：当前能够运行但由于系统正在运行其他进程而需要等待；
- ◆ 阻塞：由于不能得到所需资源或其他原因而使得该进程不能运行，需等待外部事件的发生。

运行、就绪和阻塞之间的关系如图 5.3 所示。

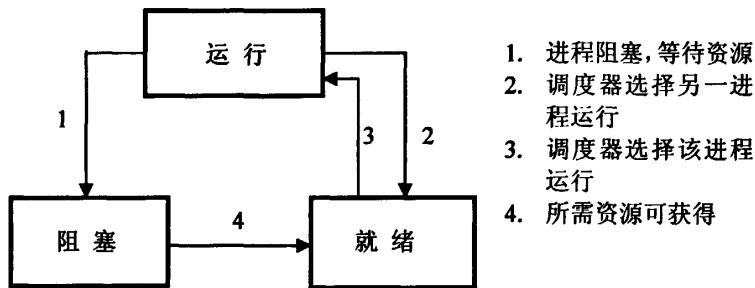


图 5.3 进程的状态转换

需要说明的是，进程和程序是不同的，程序是计算机指令的静态集合，而进程是指执行这个程序所需的各种资源的集合。

在传统的进程中，每个进程中只有一个控制线程，而现代的操作系统大多数支持多线程。简单的说，线程就是程序的一条执行路径，是操作系统分配CPU时间的基本实体。一个进程以一个主线程开始，如果需要还可以传递更多的线程。进程中的每个线程都独立运行，它们共享进程提供的各种资源，如代码、数据、虚拟地址空间等。通常所说的“执行一个进程”实际上是“执行进程中的一个线程”。一个进程中的多个线程共享进程内的公共资源，同一进程的所有线程共享同样的虚拟地址空间和全局变量。一个线程包括以下几个部分：

- ◆ 表示处理器状态的寄存器
- ◆ 两个堆栈，一个在线程处于核心模式时使用，另一个在线程处于用户模式时使用
- ◆ 一个由子系统，运行时间库和动态链接库使用的私有存储区域
- ◆ 一个线程 ID 号

2 单线程与多线程

了解了进程和线程的关系，下一步再看单线程和多线程的关系。在传统的单线程环境中，计算机只能执行完一个任务后再执行另一个任务，可以称为程序的串联运行，传统的 DOS 操作系统就属于此种类型。如果系统正在读入一个很大的文件，那么只能等待，而不

能中断该任务去做其他事情。如果用户想同时执行多个任务，只能自己设计完成所需的操作，这是很繁琐的。为了提高工作效率和有效利用资源，人们提出了多线程的思想。在多线程环境中，一个进程中的多个线程可同时运行，进程内的多个线程共享进程资源。

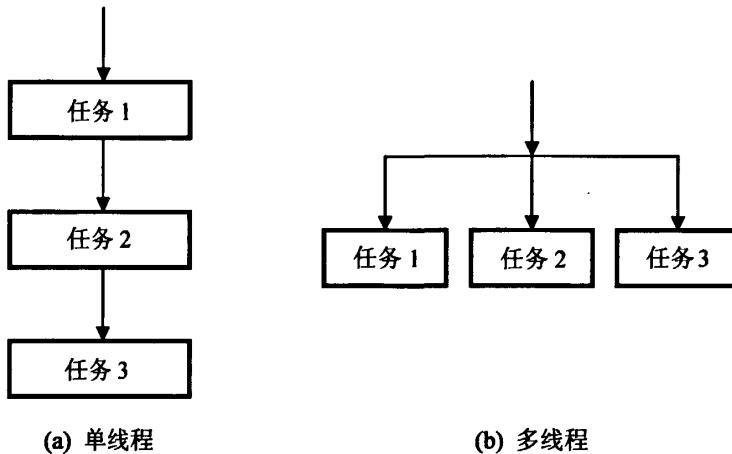


图 5.4 单线程与多线程

单线程与多线程的区别如图 5.4 所示。从图中明显可以看出，多线程并行执行的高效率能够节省大量的时间，还可以在同一时间内完成多个任务。

5.3.2 软件中的多线程实现

本软件是利用 Microsoft Visual C++6.0 工具进行编制的，因此，主要介绍在 MFC (Microsoft Foundation Class library) 中如何创建多线程^[25-27]。

VC++中每个线程都是从 CwinThread 类继承而来的，因此，MFC 用 CwinThread 对象来表示所有线程。利用 MFC 可以创建两种线程：一种称为工作者线程 (worker thread)，另一种称为用户界面线程 (user-interface thread)。工作者线程可以执行一个普通的全局 (或静态成员) 函数。工作者线程中没有 Windows 窗口界面，没有消息循环，常用来完成一些耗时的后台工作。用户界面线程类继承 CWinThread 类，具有消息循环。二者都是基于 CwinThread 类，并且都是通过调用函数 AfxBeginThread 来创建。本实验软件只用到了工作者线程。

创建工作线程分为两步：创建控制函数和启动线程。主要代码如下：

(1) 创建控制函数：

```
UINT CompThread(LPVOID pParam)
```

其中 CompThread 是函数名，pParam 为传递参数。

(2) 启动线程

```
AfxBeginThread(thredThread,(void*)this);
```

其中第一个参数为线程函数的起始地址，第二个参数为线程函数的参数。

接下来主要的工作就是将图像实时显示的具体实现代码写入工作线程的控制函数中。通过编译后，程序就可以在实时显示图像的同时，激活软件中其他菜单下的命令，同时执行其他任务。

5.4 软件测试

为了检验实验中所用的数字散斑相关的方法的准确性，先要用模拟实验来对其计算结果的精度进行验证。本文采用的验证方法是模拟散斑平移。把已有的散斑图沿 x 方向平移 0.7 个像素，得到另外一幅大小相同的散斑图，再用这两幅图进行计算。如图 5.5 所示。

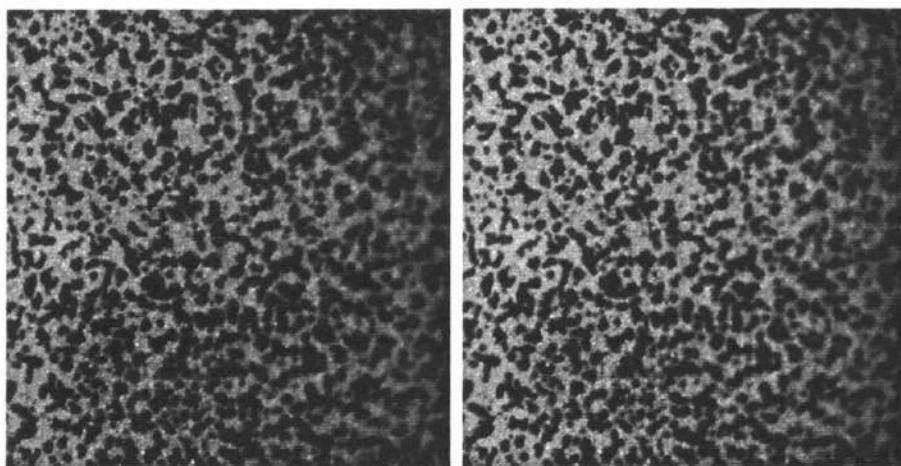


图 5.5 相关验证散斑图

用程序对这两幅散斑图进行相关运算，得到位移场如图 5.6 所示，

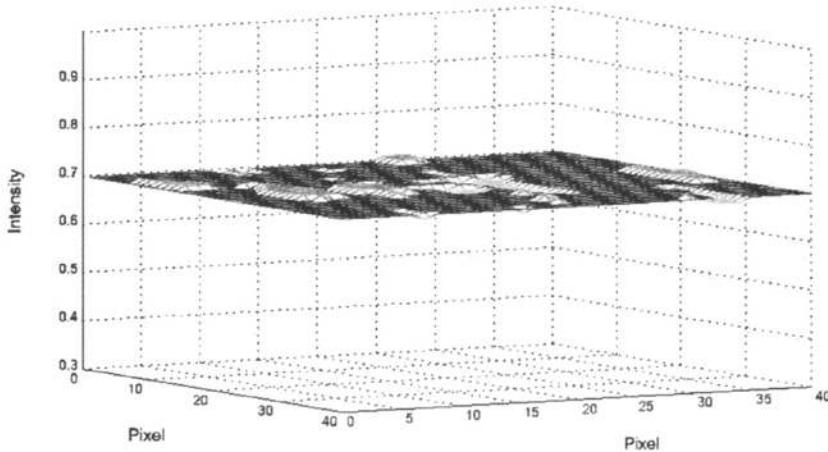


图 5.6 x 方向位移场

计算得到位移数值范围 (0.69, 0.71), 均值: 0.70, 与实际移动像素符合的很好。

再验证软件对线性变形的计算, 使用算法使得图像产生沿 x 方向应变为 0.01 的线性变形^[32], 如图 5.7 所示。

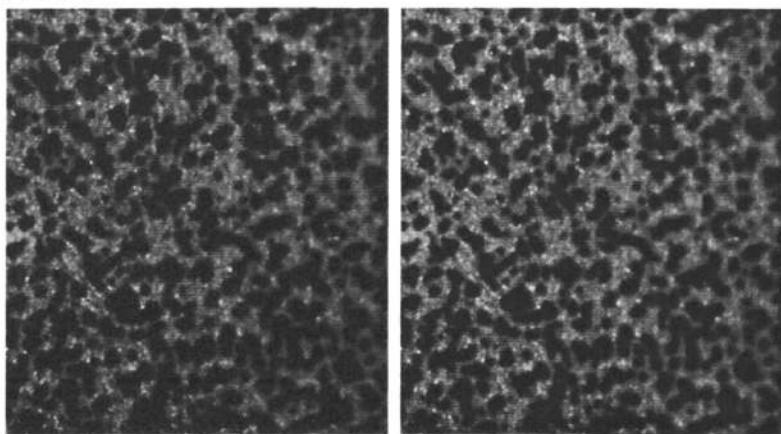


图 5.7 相关验证散斑图之线性变形

计算结果如图 5.8 所示。

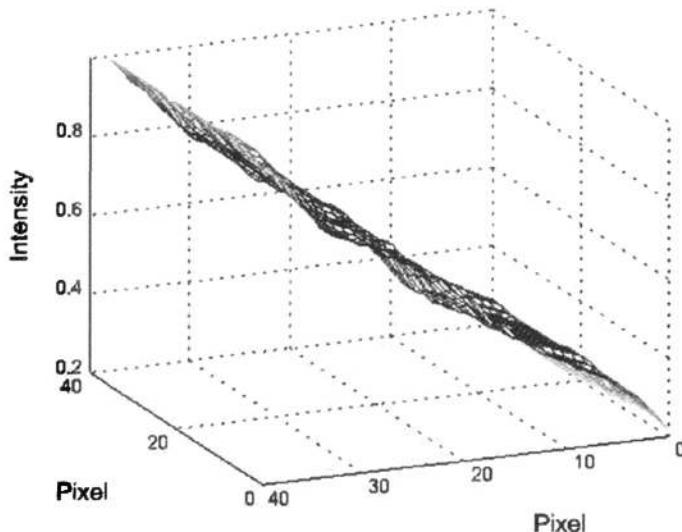


图 5.8 x 方向位移场

位移范围 (0.2, 1.04), 计算区域的 x 方向范围 (20, 100), 计算得应变为 0.01025, 误差为:

$$\Delta = \frac{0.01025 - 0.01}{0.01} = 0.025 = 2.5\% \quad (5-1)$$

符合实验要求。

由以上验证可知, 本文所用的数字散斑相关法计算程序计算出的结果与实际值相符, 满足实验所需的计算精度要求, 可以用于本实验的计算。

5.5 本章小结

本章在 Windows 环境下多线程技术的基础上, 利用 VC++6.0 开发了一套与测量离面位移的数字散斑相关方法光测系统配套的显微成像软件, 解决了测量离面位移的微观实验的核心问题。同时对该软件系统进行了测试。由于利用了可视化界面开发工具 VC++, 因此, 本软件可以在以后的工作中根据需要进行升级。

参考文献

- [1] 龙腾科技主编. Visual C++6.0 循序渐进教程[M]. 北京: 北京希望电子出版社, 2005
- [2] 王超龙, 陈志华编著. Visual C++6.0 入门与提高[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2002
- [3] 尹立民, 王兴东编著. Visual C++ 6.0 应用编程 150 例[M]. 北京: 电子工业出版社, 2004
- [4] 徐慧编著. Visual C++数字图像实用工程案例精选[M]. 北京: 人民邮电出版社, 2004
- [5] 王险峰, 刘宝宏编著. Windows 环境下的多线程边长原理与应用[M]. 北京: 清华大学出版社, 2002
- [6] 李水忠. 用Visual C++的多线程技术设计应用程序界面[J]. 微计算机应用, 2002, 23(3): 187-190
- [7] 刘九七. Windows NT 环境下多线程技术在测控软件中的应用[J]. 测控技术, 2001, 20(3): 45-47
- [8] 金昊. 仪器控制系统中多线程技术的应用[J]. 计算机自动控制与测量, 1999, 7(4): 44-46
- [9] 杜福鹏, 付永杰. 多线程技术在自动测量中的应用[J]. 国外电子测量技术, 2004, 增刊: 36-38
- [10] 舒红宇, 岑伊万. 基于多线程技术的虚拟测控平台设计[J]. 测控技术, 2005, 24(1): 69-72
- [11] 韩文鹤, 王时龙. 基于多线程的高分辨率煤气表检测系统[J]. 自动化仪表, 2005, 26(1): 53-55
- [12] 刘文, 苏秀琴, 王飞. 多线程在 CCD 测量系统中的应用[J]. 测控技术, 2002, 1(增 1): 117-119
- [13] 雷晓峰, 王耀南, 邓曙光. 在VC++中利用多线程实现图像采集与通信[J]. 微型机与应用, 2002, 6: 6-8
- [14] 刁修民, 刘亚斌, 于守谦等. 在Visual C++环境下实现高速数据采集的几个问题[J]. 计算机测量与控制, 2003, 11(2): 31-134
- [15] 刁修民, 刘亚斌, 于守谦. Windows环境下高速数据采集系统的设计与实现[J]. 计算

机工程, 2003, 29(10): 176-178

[16] 张琦, 朱善军, 吉吟东. Windows 下多线程的数据采集技术[J]. 中国仪器仪表, 2004, 4: 12-15

[17] 程昌品, 张渝荣. VC实现Windows操作系统下多线程的调度与应用[J]. 计算机应用与软件, 2004, 21(12): 18-120

[18] 施益峰, 王帮峰, 李迎. 面向结构健康监测的高速数据采集系统的研究[J]. 传感器技术, 2004, 23(12): 22-24

[19] 毋小省. 用 VC++实现多线程的调度和处理[J]. 焦作大学学报, 2001 (1): 57—59

[20] 刘思程, 余彬. MFC类库实现多线程的调度和处理[J]. 计算机时代, 2003, 8: 22-24

[21] 王日宏. 基于VC的Win32多线程同步问题[J]. 计算机系统应用, 2004, 7: 60-62

[22] 陈少强. VC ++中基于MFC的多线程应用程序设计[J]. 三明高等专科学校学报, 2002, 19(2): 49-55

[23] 范宝德, 刘惊雷. 基于 VC 的多线程编程技术及其实现[J]. 微型机与应用, 2002, 7: 10-12

[24] 刘小华等. 精通 MFC[M]. 北京: 电子工业出版社, 2005

[25] 胡秀建. 在Windows系统中实现的多线程程序编写[J]. 宿州教育学院学报, 2005, 8(2): 86-89

[26] 徐洪斌, 苏铁熊, 董小瑞. 多线程技术及其实现[J]. 山西电子技术, 2003, 3: 15-17

[27] 张乐平, 孔玉, 雷长海等. 基于多线程技术的实时检测[J]. 医疗卫生装备, 2005, 26(6): 58-5

第六章 鼓膜光测实验研究

6.1 引言

目前国内外已经有许多研究者致力于基于图像处理的鼓膜光测实验研究工作。虽然使用的仪器设备、采用的技术方法各不相同，但是大家关注的焦点却是一致的，主要是探讨和分析薄膜微观结构变形机理及其对整体宏观性质的影响。结合已有的研究成果，本文提出了一种光测薄膜微观结构变形的实验方法，同时研制了相应的实验设备。本章的主要工作就是利用这一实验方法和实验设备对液压作用下薄膜的微观结构变形进行光学测量，并对采集到的图像进行了参数提取和数据分析。

6.2 薄膜力学性能检测进展

薄膜材料与薄膜器件日益广泛的应用及其可靠性指标体系的日益健全，要求人们对其结构和性能的特殊性作出科学解释，并且用一些手段得到其基本力学性能。由于薄膜的厚度一般只有几百纳米到几千纳米，尺寸效应和结构尺寸的限制，使传统大体积材料力学性能的测试方法已不再适用于薄膜材料的力学性能测试。因此 30 多年来，许多学者对此领域进行了大量研究，并相继提出多种薄膜材料力学性能的测试方法，主要有纳米压痕法、单轴拉伸法、薄膜弯曲法、鼓膜实验法等^[1]。

6.2.1 纳米压痕法(Nanoindentation)

压痕法(Indentation)作为一种试验方法用来测量材料的弹性模量始于本世纪70年代^[2-4]。纳米压痕技术近年来更得到较广泛的使用^[5-13]，压头压入薄膜时薄膜变形示意图如图 6.1 所示。

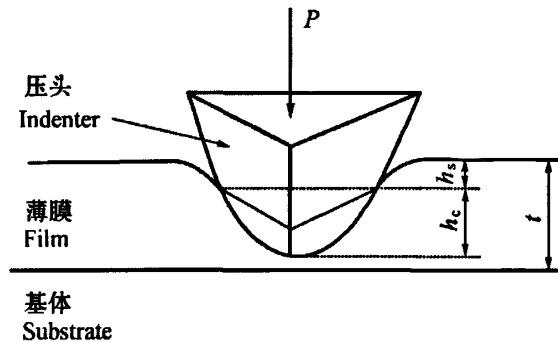


图 6.1 压头压入薄膜时薄膜变形示意图

纳米压入法评测薄膜等小体积材料力学性能的原理是通过压头对试样进行压入和卸

载获得连续记录的整个过程的载荷一位移 ($P - h$) 曲线, 如图 6.2 所示。 $P - h$ 曲线含有丰富的力学信息, 通过对该曲线的分析即可获得所需的各种力学参数^[14]。该技术的显著特点在于其极高的力分辨率和位移分辨率(位移分辨率可达 0.3 nm, 力分辨率可达 0.5 μ N)。能连续记录加载与卸载期间载荷与位移的变化, 从而使得该技术特别适合于薄膜材料力学性能的测量。

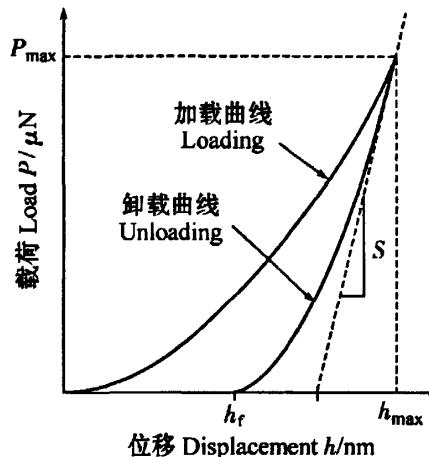


图 6.2 载荷一位移曲线

纳米压痕技术可用以测定薄膜的硬度 H 、弹性模量 E 以及薄膜的蠕变行为等, 其理论基础是 Sneddon^[15] 关于轴对称压头载荷与压入深度之间关系的弹性解析分析。弹性模量和硬度是压入法测试最多的两个参数, 该方法首先用幂函数对初始卸载部分数据进行拟合, 得到卸载曲线方程, 计算卸载曲线在最大载荷下的斜率即可得到接触刚度。影响该方法精度的主要因素有: 仪器的柔度, 试件材料特性, 试件表面特性等。这些因素在采用纳米压入法测量薄膜力学性能时必须综合考虑, 以获得准确的 $P-h$ 曲线。

6.2.2 单轴拉伸法

在材料的力学测试方法及技术中, 单轴拉伸(简称单拉) 试验是获得材料应力与应变关系最直接的实验方法。单拉时试样受均匀应力, 因而试验结果解释容易, 试验数据通用性强。在常规材料力学性能测试中, 单拉试验是最有价值的实验方法之一; 但由于薄膜在几何尺寸(尤其是厚度) 方面的特点, 使得单拉实验在技术上的困难程度大大增加。尽管如此, 单拉实验仍是薄膜材料力学性能研究领域内使用最早, 报道最多的实验方法之一。薄膜的单拉研究主要集中在60年代至80年代, 那时人们对各种金属薄膜在单拉条件下的力学性能及各种薄膜单向拉伸技术进行了广泛的研究^[16-19]。

但是由于薄膜的尺寸方面的特点, 将传统拉伸试验方法“缩微”用于薄膜拉伸试验时, 需要解决以下问题: (1) 薄膜试件的夹持和操作困难; (2) 试件很难固定于加载机构上;

(3) 微小位移需要高精度地检测出来。比较常用的解决方法是：将薄膜试件的一端固定在基板上不释放，通过操作基板来操作试件；另一端从基板释放后，利用粘接或静电力固定在加载机构上。位移是通过激光照射设置在试件表面的标志线后的反射光位移来测定的。

上海交通大学的李雪萍^[20]等，采用了一种集成于基板的试件两端固定式的拉伸试验方法进行薄膜的力学性能测量，简化了实验操作，提高实验精度。此集成式拉伸机构是把薄膜试件、加载机构、基板等集成于一体，形成一个平面框架结构，如图6.3(a)，薄膜拉伸试件位于机构的上层，其一端固定在此框架上，另一端固定在一个承载杠杆上试验时，将拉伸机构的框架部分固定在一个中空的框形试验台上，只在扭转杠下方轴线处支撑一个锋利的刃形支撑，则此时承载杠杆呈悬臂梁状态，如图6.3(b)所示。

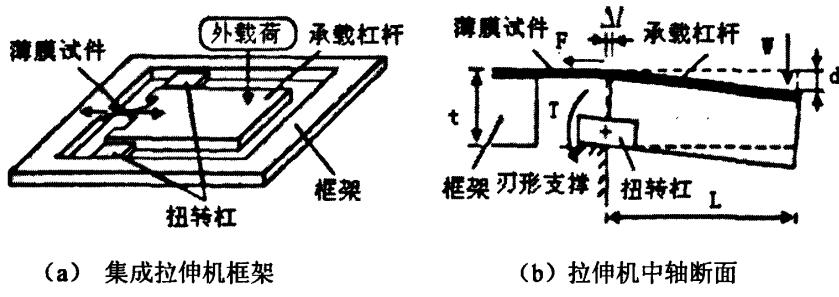


图 6.3 集成拉伸机示意图

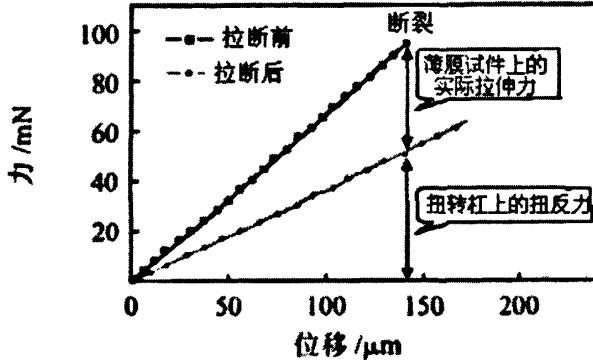


图6.4 单晶硅的载荷一位移曲线

当向承载杠杆上施加一个静态垂直载荷W时，承载杠杆发生顺时针转动，从而带动扭转杠发生扭转，同时，薄膜试件被拉长。记录杠杆远端的位移即可得到薄膜的伸长量。随着载荷不断增大，试件不断被拉长，加载点的位移也不断增大。记录下各个时刻的载荷和位移，直至试件被拉断，就可以得到一条加载点处的载荷一位移曲线。如图6.4所示。从该曲线中可以获得杨氏模量、破坏强度、破坏应变等力学特性参数。

6.2.3 薄膜弯曲法

薄膜的弯曲试验是另一类被广泛使用的薄膜力学性能测试技术，该方法最早由Weihs

等人提出^[21]，主要用于测定金属和非金属(如 SiO_2 、 SiN_x 、 Si 等)的弹性模量(E)、膜内残余应力(σ_r)、屈服强度(σ_s)(对于塑性膜)和弯曲断裂强度等。薄膜弯曲试样主要通过微机械工艺方法制备(例如薄膜的沉积和掺杂技术，光刻技术，牺牲层技术及各种干、湿腐蚀方法的应用等)。

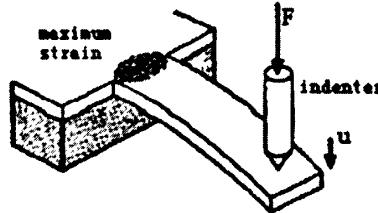


图6.5 薄膜弯曲法

如图6.5所示，用压头对悬臂梁加载，最大应变发生在梁的固定端，通过记录压头的载荷与位移可以得到微梁的弹性模量、屈服强度和断裂强度。就加载方式而言，薄膜弯曲试验主要分两类：一类是利用纳米压痕(Nanoindentation)技术，在部分脱基膜上施加载荷，借助于纳米压头(Nanoindenter)对空间位移和外加载荷的高分辨能力，连续记录位移随载荷的变化关系，即载荷一位移曲线；另一类是所谓共振法，对部分脱基金属膜进行电磁激励产生振荡，调谐振荡频率使试样发生共振，测出共振频率(ω)，进而算出弹性模量(E)和残余应力。

从结构上看，薄膜弯曲试验主要分为两大类，一类是薄膜试样一端固定于基底之上，另一端自由，自由端加载使膜弯曲，记录载荷与自由端力点位移之间的关系，该方法称之为悬臂梁(cantilever beam)法；另一类是矩形膜两端固定于基底之上，在矩形膜的中点加载，使膜弯曲或断裂，连续记录载荷与中点位移的关系，该方法称之为“微桥”(micro-bridge)法。图6.6 显示了悬臂梁法与“微桥”法的试样几何形状及测试状态。

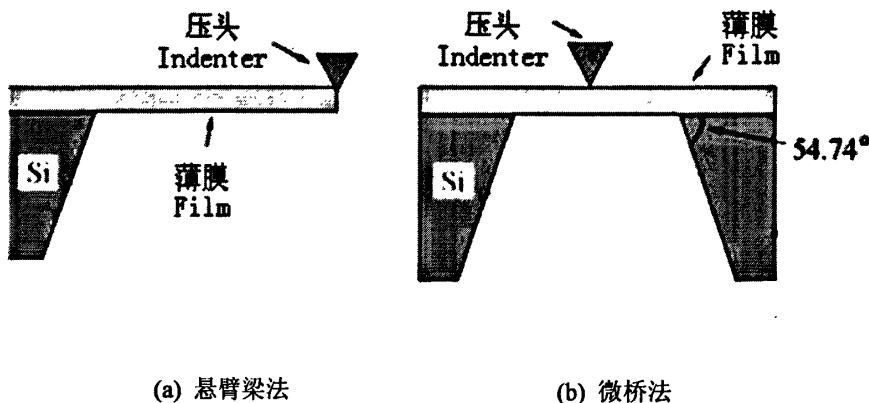


图6.6 薄膜弯曲实验示意图

6.2.4 鼓膜实验法 (Bulge Test)

薄膜的鼓膜(Bulge) 试验通常称之为两轴拉伸试验, 最早是由 Beams 于 1959 年提出的, 它也是最早用于研究薄膜力学性能的技术之一^[22, 23]。如图 6.7 所示, 初期的鼓膜试验是将脱基(free standing) 薄膜用机械压力附着在一个具有圆孔的基底上, 通过外加压力(气体或液体) 使其凸起, 测量压力与凸起高度之间的关系, 并将其转化为应力应变曲线, 以分析薄膜的力学性能。凸起高度的测量最初是使用指针仪等机械测量法^[24], 随后发展为精度更高的超声厚度测量仪(ultrasonic thickness gauge)^[25], 直至目前使用的激光干涉仪^[26]。薄膜受内压往外凸起后, 照射的激光与参考光干涉, 形成牛顿环的条纹图, 通过条纹级数就可计算薄膜中心的离面位移。

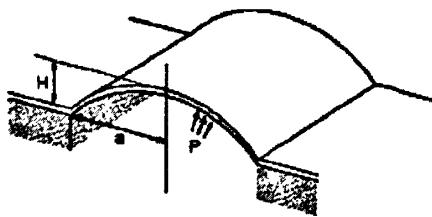


图 6.7 鼓膜实验法示意图

鼓膜试验的优点在于它可避免薄膜单拉试验中因试样边缘损伤与缺陷所引起的早期缩颈失稳现象。其试样的准备与夹持也相对容易(无需校对轴线)。鼓膜实验是唯一的一种既能确定薄膜弹性模量、屈服强度和断裂强度, 同时又能确定膜内残余应力的实验方法。

在国外, 鼓膜实验已引起人们的广泛重视, 并开展了深入研究。O.R.Shojaei等人^[27]用激光干涉仪方法进行鼓膜实验时, 先用一个直径较大的光束通过形貌检测观察薄膜平面是否平直, 再用干涉法专用细激光束照射, 观察离面位移情况。薄膜受内压产生凸起时, 照射的激光相互干涉形成牛顿环的条纹。而一般试样受均匀载荷的有效直径较小, 文献[28]中记载的鼓膜实验的孔径一般为 10mm, 或者更小。孔径大则很难保证初始时薄膜是平展的。所以薄膜试样有效承载直径都较小, 在如此小的试样上, 干涉条纹一多, 就无法辨认了。两条相邻条纹间的高度差为 $\lambda / 2$ (λ 为所用的He-Ne激光的波长, 为 $0.6328 \mu m$), 即 $0.3163 \mu m$ 。如O.R.Shojaei鼓膜实验薄膜试样有效直径4mm, 设计加载使薄膜中心凸起不超过 $80 \mu m$, 也就是说, 明暗条纹级数有 253 级, 实际实验中不可能做到这么大, 即使加载到这个程度也由于条纹过密而无法辨认, 因而实验测试范围受到限制。

在国内, 西安交通大学任凤章等人^[29-31]从 1998 年开始在鼓泡实验方面开展研究工作, 并已取得一定进展。任凤章等进行鼓膜实验测量圆形薄膜鼓气时中心的挠度采用了红外激光位移传感器测量, 其分辨率为 $2 \mu m$, 测量范围 $\pm 4mm$ 。此方法采用了激光红外位移传感器, 与目前最常用的牛顿环干涉法测量位移相比, 在位移测量的硬件方面大大简化了, 但是精度不够高, 最小只能分辨 $2 \mu m$, 由于受到激光波长的限制, 对于更微小级别的位

移测量方面失去了有效性。

中国科学技术大学辜萍等人^[32]利用鼓膜法测定纳米多孔氧化铝薄膜的弹性模量，他们采用电子散斑干涉（ESPI）技术和迈克尔逊光路测量周边固定的圆形薄膜鼓气时中心点的离面位移。其原理是，当一束平行的 He-Ne 激光照射到光学粗糙的物体表面时，会发生漫反射现象，若与方向和强度大小不变的参考光相互干涉，就会在物体的前面形成明暗相间的散斑场。此散斑场则携带了物体表面形貌特征的信息。若在物体变形前后各拍摄一幅散斑灰度图，两图进行相减（各个位置上像素的灰度值进行相减），就会形成类似于牛顿环明暗相间的干涉条纹图。两条相邻条纹间的高度差为 $\lambda/2$ （ λ 为所用的 He-Ne 激光的波长，为 $0.6328 \mu\text{m}$ ），即 $0.3163 \mu\text{m}$ 。此方法精度确定，为激光波长的二分之一，在数据处理方面与牛顿环干涉法相同，但对于厚度处于纳米级别（1-100nm）的薄膜来说，精度不够。而且由于散斑特征，条纹也不是非常清楚，稍微密集一点就无法辨别。所以该方法效果不好。

中国科学技术大学柳兆涛等人^[33]用时间序列散斑干涉法检测出薄膜的全场变形，从而搜索出圆形薄膜中心点的离面位移值。时间序列散斑干涉法的原理是^[34]：使光栅条纹的频率随时间而变化，这样就记录下一系列的相位图形形成测量空间的一个三维的相位分布，然后根据时间轴对每个像素进行相位展开，可以精确测量表面不连续物体的轮廓，从而可以测量全场的变形。虽然这个方法精确度很高，但是对实验条件要求也很高，特别是对激光照射光的控制，需要有专门的设备。

散斑干涉法的关键是要得到效果较好的散斑图，因为散斑携带了物体表明形貌特征的信息，如果此薄膜物体的表面比较平整，在激光照射下，不能形成质量较好的散斑图，也就很难提取出有效的变形和位移信息。虽然传统的散斑干涉法中有一些技术可以提高散斑成像质量，如用细砂纸打磨物体平面，或在物体平面上洒上颗粒较小的铝粉，人为地制造光学粗糙的平面。但是这些技术在薄膜测试中不能应用，这些薄膜本来尺度就很小，如果再打磨或洒上铝粉，这些附加载荷对薄膜的力学性能影响很大。

总结分析以上方法，薄膜鼓膜测试实验的关键在于均布载荷下同时测出薄膜中心的挠度和均布载荷的压力值。目前，国外已经有商业化成熟的压力传感器可以精确到 1.5Pa （甚至更低），现在鼓膜实验测试的关键就是求得薄膜中心单点的离面位移值。而数字散斑相关方法正是擅长于单点的面内位移。一个是要求测出单点的离面位移值，而另一个擅长测量单点的面内位移值。假如，我们用长距离显微镜倾斜一定角度拍摄薄膜变形前后标志点的面内位移（也就是用白光散斑方法），再根据简单的三角关系反算出离面位移，这样就把薄膜的离面位移转化到拍摄面方向的面内位移了。再用数字散斑相关方法的计算程序对标志点进行位移值计算，这样就可以计算出薄膜中心的离面位移了。并且结合不同放大倍数的光学显微镜，就可以达到不同的精度。本文使用的长距离显微镜放大倍数为 125X ，而目前较好的光学显微镜放大倍数能达到 1000X 左右，而最好的能高达 1500X 。因而，利用

光学显微镜对微结构变形观察和测量还有很多潜力可挖掘。如果本次实验成功，并改进一些技巧，此后将此方法运用在 MEMS 结构薄膜的力学性能测试上，将大大降低目前实验的条件，并且借用高倍数的显微镜可以达到更高的精度。

白光散斑的优点是：用非相干光源照射，相对于前面都使用激光作为光源，大大降低了实验条件。而激光干涉法，需要相干性好的激光照射，并且需要通过全场观测来获得变形信息。薄膜的鼓膜实验中，只需获得薄膜中心单点挠度数据就够了。所以白光散斑相关方法在这里应该有应用的价值。

另一个方面，一直以来数字散斑相关方法都是用来测面内位移，此次设计从物体侧面倾斜一定角度观测。这样，物体的离面位移转变为标志点的观测平面内的面内位移，然后再用数字散斑相关方法来计算中心点的位移值。从而可以间接地用数字散斑相关方法来解决测试离面位移的问题。

6.3 鼓膜实验的理论模型

鼓膜实验中，实验得到的是压力与挠度（高度）曲线，它与独立膜的几何形状及强度有关。在已知膜中心挠度随压力变化的理论关系（即理论模型）后，就可以根据实验结果拟合出薄膜的杨氏模量和残余应力。人们为提高实验结果解释的准确性，对鼓膜实验的力学理论模型进行了不断的探索和研究。已有的几种力学模型介绍如下^[35]，由于本实验所用的试件为圆形薄膜，故只写出圆形薄膜的几种理论模型。

6.3.1 球面薄膜方程

基于薄膜鼓起的形状为球冠状的假定，可以分不同的薄膜状态得到以下模型：

1. 薄膜平坦无应力状态

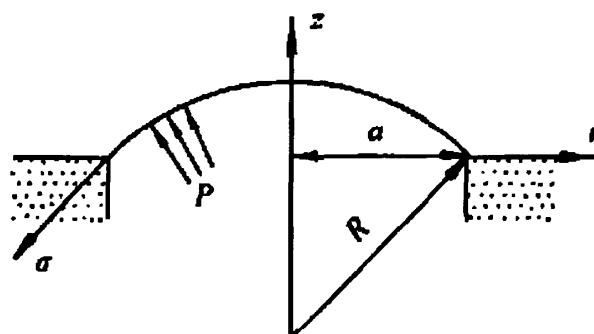


图 6.8 鼓膜实验的球冠模型示意图

球冠形状应力应变计算图如图6.8所示，薄膜内的应力为 σ ，加载压力为 p ，应变为 ε ，薄膜厚度为 t ， R 为球冠半径， a 为圆孔半径， h 为薄膜中心鼓起高度。由平衡关系，可得

膜内应力为：

$$\sigma = \frac{pa^2}{4ht} \quad (6-1)$$

独立膜内无残余应力且处于无皱折的平坦状态。对这种初始条件，依据球冠形状假设和 $a \gg h$ 假设，可求得膜内应变为：

$$\varepsilon = \frac{2h^2}{3a^2} \quad (6-2)$$

对于线弹性材料，可得如下关系：

$$p = \frac{8Eth^3}{3(1-\nu)a^4} \quad (6-3)$$

2. 张紧状态独立膜试样

独立膜处于无应力平坦状态的情况较少，多数情况是膜在基体上膜内有残余应力的存在，在制备成独立膜后，膜处于松弛（残余应力为压应力）或张紧状态（残余应力为拉应力）。

鼓膜实验时，独立膜总应变（ ε ）为残余拉应力（ σ_0 ）对应应变 ε_0 与外加载荷（ p ）对应应变（ ε_b ）之和，即

$$\varepsilon = \varepsilon_0 + \varepsilon_b \quad (6-4)$$

也即：

$$\varepsilon = \frac{2h^2}{3a^2} + \frac{\sigma_0(1-\nu)}{E} \quad (6-5)$$

同样得到压力与最大挠度的关系如下：

$$p = \frac{4t\sigma_0}{a^2}h + \frac{8Et}{3(1-\nu)a^4}h^3 \quad (6-6)$$

3. 球面薄膜方程所存在的问题

球面薄膜方程是在假设鼓起膜的形状为球冠状和膜内各处有相等的等向平面应力和应变条件下导出的。这种假设存在缺陷。首先，膜内应力方程在膜处于平面状态（即 $R = +\infty$ ）下是无意义的。因而，球面薄膜方程在小挠度条件下的解是不精确的。再者，膜内不存在所假设的应力应变状态。只有应力随应变指数规律变化，膜的形状才表现为球冠状。而对实际材料来说，不存在这种应力应变关系。虽然球面薄膜方程存在上述问题，但是，有限元法分析表明：用球面薄膜方程求解膜内残余应力和杨氏模量与有限元法结果符合较好。并且，其表达式简单，因而一直被广泛使用。

6.3.2 能量最小法

能量最小法是求解薄膜问题的常用方法，这种方法是首先选择适当的位移函数，然后依据最小能量原理求出位移函数中的常数项，最终建立起压力与挠度的关系。能量最小法

只能建立无应力平坦独立膜试样的方程，对有残余应力的试样，能量最小法不能直接求得解析解。

对圆形无应力平坦独立膜试样，因选择的位移函数不同，有两种能量法的解。

Timoshenko选择垂直膜方向的位移函数为^[36]：

$$w = h \left[1 - \left(\frac{r}{a} \right)^2 \right]^2 \quad (6-7)$$

这里 h 为 $r=0$ 处膜的垂直方向位移，即独立膜中心的挠度。

选择径向位移函数为：

$$u = r(a-r)(c_1 + c_2 r) \quad (6-8)$$

c_1 与 c_2 是常数。以上位移函数能满足 $(\partial w / \partial r)_{r=0} = 0, (u)_{r=0} = 0, (u)_{r=a} = 0$ 的边界条件。利用最小势能原理，求得压力与挠度的关系为：

$$p = \frac{16Et^3}{3(1-\nu^2)a^4} h \left(1 + 0.488 \frac{h}{t^2} \right) \quad (6-9)$$

该关系比球面薄膜方程更加准确地描述薄膜变形特征。

6.4 鼓膜光测实验

6.4.1 鼓膜光测实验的硬件实现

1. 操控系统

该操控系统是一种基于鼓泡法的数字散斑相关薄膜变形测量系统，其特征在于：该装置包括支撑和固定部分、位置调整机构、驱动系统、加压系统、加油系统、读压系统、散斑投影系统和散斑拍摄系统，如图 6.9 所示。所述的支撑和固定部分包括基底（1），设置在基底上进行 z 向位置调整的剪式升降台（2），油缸固定台（3），所述的油缸固定台（3）在剪式升降台（2）上沿 z 轴移动；所述位置调整机构包括设置在剪式升降台（2）上的 x 方向精密平移台（4），设置在 x 方向精密平移台上的 y 方向精密平移台（5）；所述的驱动部分含有直流可编程电源，由该电源所驱动的高精度电控平移台（6）的底面与 y 方向精密平移台（5）连接，一端与 L 型板（7）连接；所述加压系统包括活塞杆（8），增压筒（9），油缸（10），活塞杆一端与 L 型板相连接，通过高精度电控平移台推动 L 型板，并带动活塞杆的另一端在增压筒和油缸中滑动，实现加压，油缸上表面用来放置薄膜试件；所述加油系统包括储油筒（11），锁紧螺钉（12），通过旋开锁紧螺钉可控制储油筒中的油被弹簧推进油缸底部，避免空气进入油中；所述读压系统包括压力传感器（13），测量显示控制仪（14），压力传感器与油缸连通，将测量到的压力值通过测量显示控制仪显示出来；所述散斑投影系统包括光源（15），数字散斑投影器（16），远心镜头（17），光源发出的光进入数字散斑投影器，将散斑经过远心镜头投射到试件表面；所述散斑拍摄系统包括远心镜头（17），CCD 摄像头（18），试件表面的光反射进入远心镜头，被 CCD 摄像头拍摄到，

并传输进入电脑，显示在电脑屏幕上。

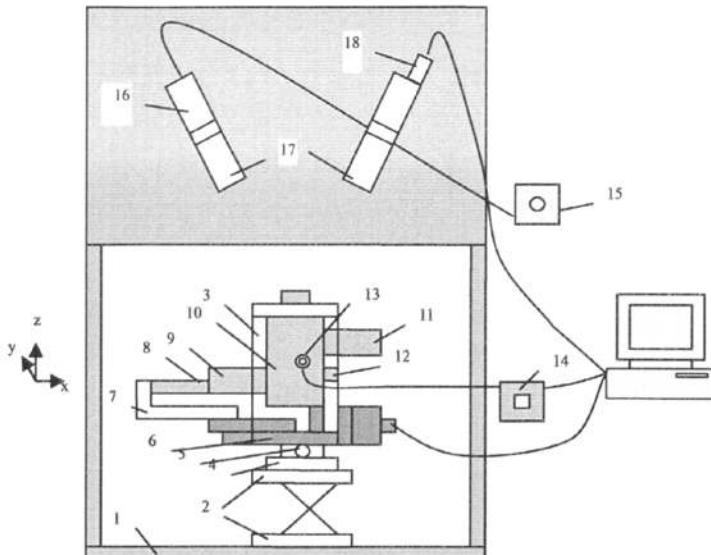


图 6.9 实验仪器示意图

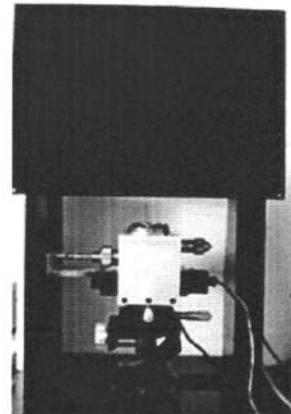


图 6.10 实验仪器照片图(整体)

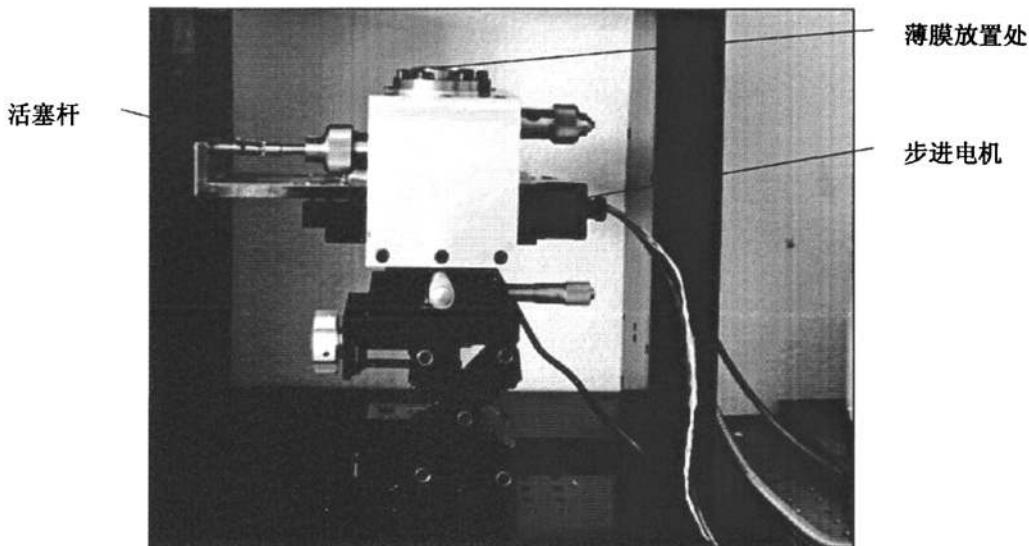


图 6.11 实验仪器照片图(部)

本实验仪器采用油压的方法进行加载，配以自动步进电机，通过电机控制伸缩杆调节仪器中油腔的大小，进而控制压力的大小。如图 6.10 和图 6.11 所示。为了实现这一功能，需要一系列配套的零件加以设计、组合和安装，才能实现自动功能的目的。配套零件的实现将在下面章节中一一介绍。

从上图中，可看出该仪器可在水平及竖直三维方向进行调节，以调整薄膜的位置适应投影仪的散斑投影与 CCD 的采集。该仪器采用 TSM25R-2(A) 高承载精密平移台 x 和 y 方向各用一个，用于手动调节两个方向的微小移动。X、Y 方向精密平移台行程：25mm；Z 方向

的剪式升降台的行程：30mm。

TSM 系列精密平移台采用线性滚珠走精磨钢棒，线性交叉滚柱走精磨 V 形块（型号中加 R）和精研燕尾副（型号中加 D）等多种导轨形式一，细牙螺杆。多种负载，多种安装台面选择，多安装孔位设计适应不同安装需求，并可方便地组合成多维移动台。

本实验采用的精密平移台采用 M6×0.5 螺杆中心驱动，分辨率为 0.002mm，自重 0.4kg，行程 25mm，交叉滚柱导轨，精度 0.005mm，台面尺寸 53×53mm，负载可达 10kg，可足以负载上面的油缸重量。

仪器与压力传感器相连，通过压力传感器采集油压值，可精确到 0.01MPa。如图 6.12 所示。



图 6.12 压力值显示面板

DSCM 处理的是数字图像，为此需要图像处理和数字化设备。本实验所用图像采集系统如图 6.13 所示，所用采集卡为 1394 卡，通过 PCI 总线实时将采集的图像传送到计算机内存。

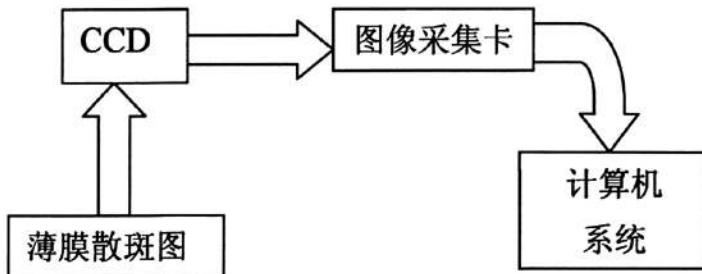


图 6.13 图像采集示意图

2. 增压驱动器的研制

本实验采用的步进电机为 TSA30-C 超薄型电控平移台，如图 6.14 所示，用于精密驱动活塞杆加液压。



图 6.14 超薄型电控平移台

该电控平移台通过步进电机驱动，实现位移调整自动化。传动采用精研丝杠副，导轨采用 V 型导轨副，弹性联轴器等均选用进口高品质产品，提供整机质量保证。左右极限开关和零位光电开关设置，保护产品，方便使用。标准接口方便信号传输。电机后面配有手轮，可进行手动调节。标准安装孔位适合组成多维电控平移台，并方便与其他系列产品配套。此型电移台面高度 30mm 最高处仅 44mm，特别适合空间高度要求小、行程小、分辨率要求高的仪器。这样也有利于我们组装的整体实验仪器紧凑，方便使用。

该电控平移台行程 30mm，螺杆导程 1mm，分辨率 0.625 μ ，最大速度 10mm/sec，重复定位精度 $<5 \mu$ ，步进电机 42BYGH101-1.8°，最大静转矩 40Ncm，额定工作电流 1.7A，中心负载 10Kg，自重 1.25Kg，1 转对应 8000 步，可达到高分辨率的加压，这样就比用泵来加压的分辨率高处很多。

3. 压力传感器的选择

最初的选择是：NS-I7 型压力变送器，如图 6.15 所示，用于精密测量油缸内的实时液压。该压力变送器采用进口原装陶瓷压阻传感器，电路零点和增益无需调整，传感器和放大电路高度集成，结构紧凑、防水、防尘，全体不锈钢封装成一体，价格低。



图 6.15 NS-I7 型压力变送器

然而，通过实验发现，NS-I7 型压力变送器的精度 (0.01Mpa) 和分辨率 (0.01Mpa) 不能够满足实验要求。因此，我们将原压力传感器换成了现在使用的 NS-B 型压力传感器，其精度 (0.001Mpa) 和分辨率 (0.005Mpa)。价格方面，原压力传感器是 380-460 元/台，而精度较高的 NS-B 型压力传感器价格为 1200 元/台，显示读数的仪表价格为 950/台，总价 2150 元/台。虽然价格较前者贵了很多，但是精度和分辨率都有了较大改进。因此，我们最终选择了 NS-B 型压力传感器。

后终的选择是：NS-B 型，如图 6.16 所示，用于更加精密地测量油缸内的实时液压。该压力传感器测量端带不锈钢隔离膜片，可以测量有腐蚀的气、液体，采用全密封机构，可靠性强、动静态特性好。



图 6.16 NS-B 型压力传感器

增压油缸的研制可谓是该仪器研制过程中要突破的一个重大难题。由于要测量的薄膜的界面结合力比较大, 所以要求油缸压力能达到 20Mpa。另外, 由于采用油压, 势必带来的一个问题就是密封问题。

增压油缸设计图如图 6.17 所示, 其主要设计有如下 6 点:

- (1) 采用活塞杆、机动增压缸和活塞工作油缸相结合的方法来增压;
- (2) 活塞杆通过左侧的万向节与步进电机相连接, 电动精密控制活塞杆的行程;
- (3) 在机动增压缸和活塞工作油缸内部多处采用“0”型圈来密封;
- (4) 活塞工作油缸右侧连接自动补充油压油缸和手动开关螺钉, 用来自下而上地完成加油工作, 从而避免直接加油产生的气泡影响油压的测量;
- (5) 活塞工作油缸后侧连接压力传感器来实时测量工作油缸内的压力值;
- (6) 活塞工作油缸上部是薄膜放置处, 其上有盖片压住周边保证密封。

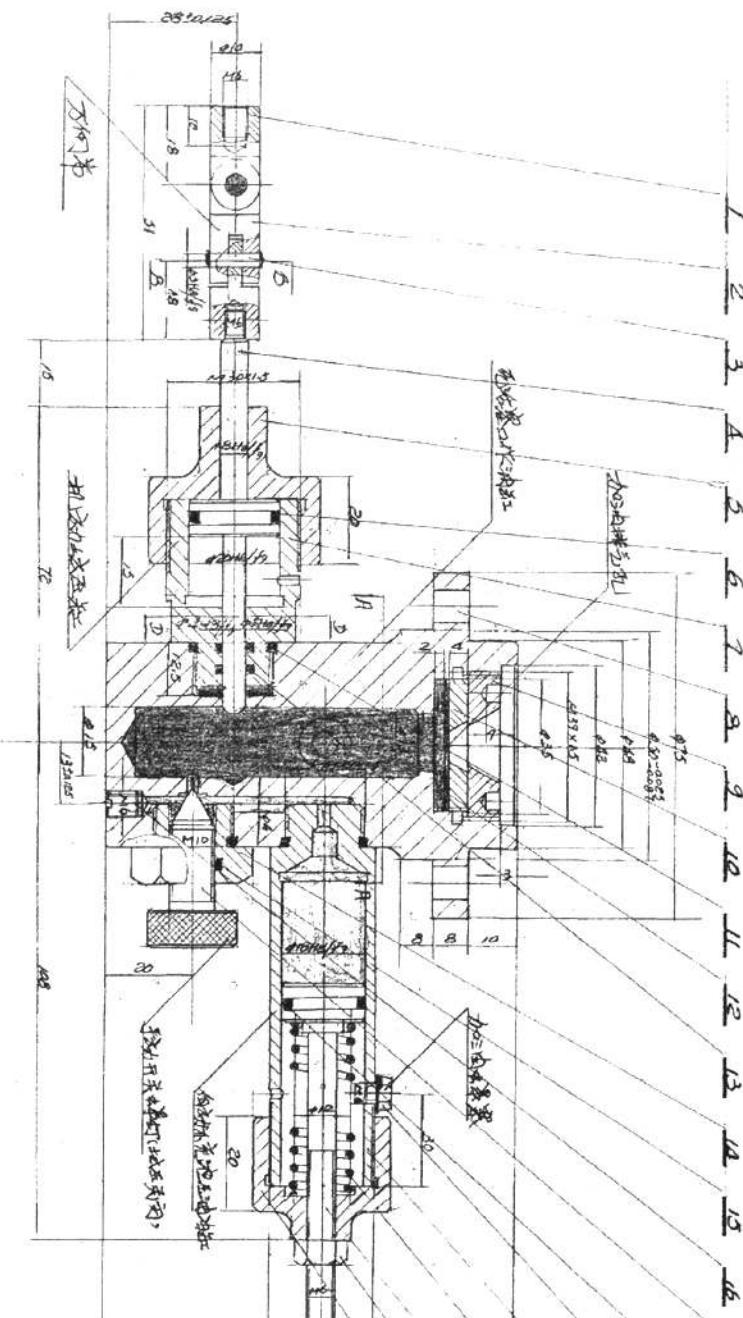


图 6.17 增压油缸设计图

6.4.2 鼓膜光测实验的软件开发

前文已经提到鼓膜光测系统硬件主要包括操控系统和图像采集系统，为了能够实现图像显微跟踪的目的，必须将二者有机地结合在一起。具体说明如下：通过计算机设置驱动步进电机的脉冲信号，从而通过控制卡和控制器驱动步进电机，使活塞杆随着步进电机的移动而移动，以达到增加油压的目的。图像采集系统获得增压过程中的一幅幅图像，存入硬盘，通过计算前后两帧图像的相关性，可得到两幅图像的差异，也就是得到所取模板在两帧图像中移动的相对位移。进而可通过标定数值，转化为薄膜受压后的竖向鼓起高度。

从以上分析可以看出，整个系统的中间枢纽就是计算机，也就是说计算机既是输入信号的产生者，也是输出信号的发出者。它连接图像采集系统是为了产生输入信号，连接控制系统是为了发出输出信号。因此，计算机起着至关重要的作用。在第五章测量离面位移的 DSCM 软件开发基础上，特别为鼓膜测试所编写的软件的几个主要功能如下所述，软件打开界面如图 6.18 所示。

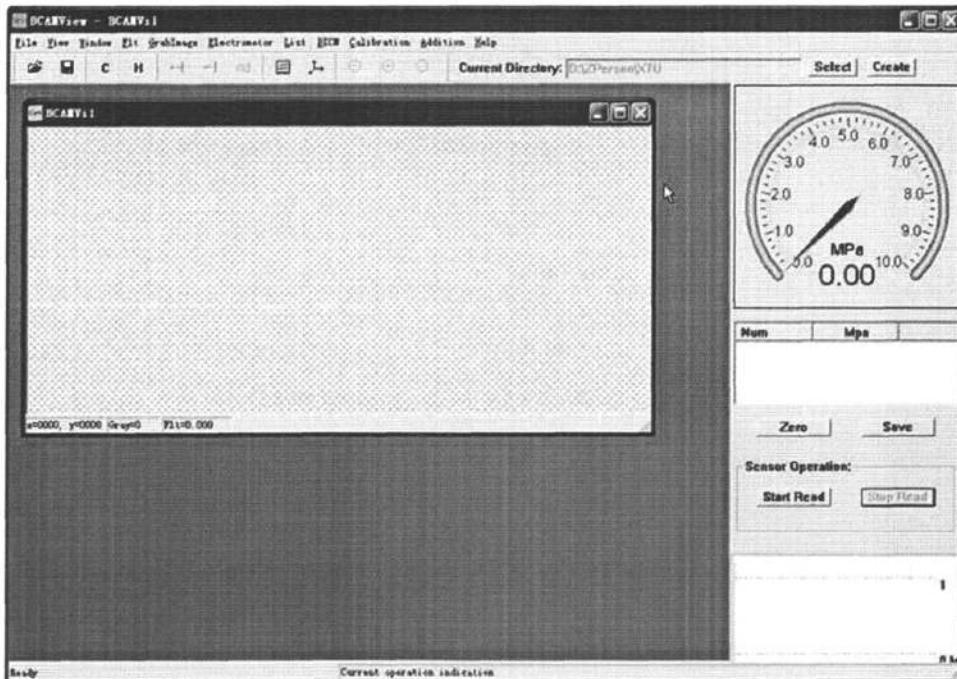


图 6.18 软件打开界面

1. 装载试样

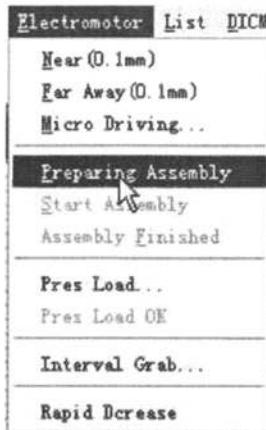


图 6.19 装载试样菜单

装载试样时，油缸的密封会使得压力传感器的读数会随着试样上面盖片的拧紧而慢慢增大，这样未测试前试样承受的荷载已经不为 0 了，这对于薄膜测试实验来说必定行不通。因此，有必要编写装载试样的功能，使得装载完时候传感器压力保持为 0。

首先点击软件右边的 Start Read 按钮，启动一个线程 1 读取传感器的压力，之后依次点击菜单栏 Electromotor 下的 Preparing Assembly，Start Assembly 启动另外一个线程 2 控制步进电机的走位使得油缸内的压力为 0。当油缸的压力变成 0 时，点击接下来一个按钮 Assembly Finished 终止线程 2。传感器的分辨率为 0.001MPa，因此当压力与未装载试样时的压力相差不超过 0.001MPa 就可以停止线程 2 了。

2. 压力加载 1

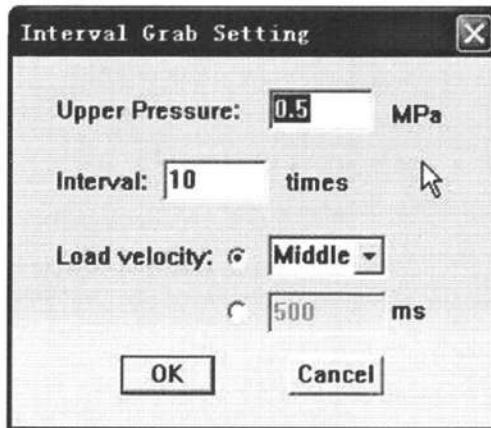


图 6.20 压力加载 1 菜单

点击菜单栏 Electromotor 下的 Interval Grab (即图 6.19 中的 Interval Grab), 弹出图 6.20 所示的对话框要求设置。下面详细说明一下对话框中的三个参数分别表示的意义。

◆UpperPressure: 目标压力值。可以比当前压力大或者小均可以, 大的情况表示加载, 小则表示卸载。

◆Interval: 保存一幅图像步进电机需要移动的次数 (如图 6.20 中的 10 表示步进电机移动 10 次, 软件保存一幅图像)。

◆Load Velocity: 压力加载的速度。实际上是指步进电机的两次移动之间的时间间隔, 经换算可以得到一个名义的加载速度。

点击按钮 OK 后, 系统开始步进电机加载、读传感器压力值、采集图像、保存图像这一系列线程同步的操作, 电机每移动一段距离, 软件保存一副当前时间下试样的图像。

为了实验的方便, 保存的图像文件名称由两部分组成: 当前时间和当前压力, 比如 20090110 19-10-21_0.173MPa.bmp。

3. 压力加载 2

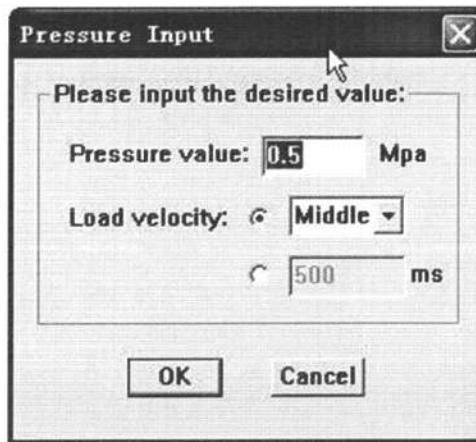


图 6.21 压力加载 2 菜单

点击菜单栏 Electromotor 下的 Pres Load (即图 6.19 中的 Pres Load), 弹出图 6.21 所示的对话框要求设置。这个功能是压力加载 1 功能的极限情况: 设定好目标压力值和加载速度后, 系统工作, 当压力到达目标值时, 保存一副图像。

这个功能由于不需要保存太多不必要的图像而使得加载快了不少。

4. 快速卸载



图 6.22 快速卸载菜单

利用图 6.22 中所示的 Rapid Decrease 菜单, 可快速将压力值卸载到 0Mpa。

6.4.3 系统标定

1. 标定原理:

数字散斑相关法的标定原理是以三角法中的几何关系变换为基础的。图6.23所示是散斑投影和摄像的光路示意图, 图中 ΔD 是像平面上散斑的水平位移, AC为入射光在物体表面和参考面投影点之间距离在图像上的投影长度。如果试样到成像系统的工作距离远远大于试样本身的几何尺寸, 即入射角和出射角的变化范围很小, 可近似认为平行投影, 则条纹在像平面上的位移和试样表面高度之间的关系如式(6-10)所示:

$$h = \frac{\Delta D}{M \cos \beta} \cos \alpha = k \cdot \Delta D \quad (6-10)$$

式中, h 是被测试样表面高度; M 是系统的放大倍数, $M = \Delta D/AC$; α 是结构光的入射角和出射角; β 是入射光线和AC之间的夹角; $k = \cos \alpha / (M \cos \beta)$ 是系统常数, 它和系统本身的结构组成有关, 测量试样时需要对其进行标定。

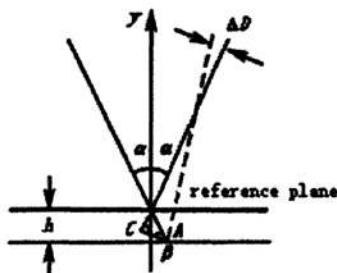


图 6.23 光路示意图

根据图6.23可知，散斑从数字散斑投影器投射到物体表面，经CCD成像。当CCD分别摄下散斑在参考面和物面上的投影后，对这两幅图像做相关运算就可以得到这些散斑的平移量，然后根据式(6-1)就可以得到被测物体表面的高度。这就是散斑投影相关法测量物体三维形貌和变形的原理。由于图像被物体调制前后的散斑在图像平面上只是发生了平移，相关搜索可只在单一方向进行，这就大大简化了相关运算的过程，并相应提高了提取位移信息的速度。本实验方法充分利用了散斑本身的特征作为相关运算时位移信息的载体。式(6-1)中的系数k是多个参数的函数，所以在实际测量之前需要对其进行标定。

2. 标定步骤：

- a. 如图6.24所示，将调整z向位置的剪式升降台(2)固定在基底(1)上，再将L型板(7)竖向固定在剪式升降台上，然后将高精度电控平移台(6)竖向固定在L型板上，高精度电控平移台上面的平台可用来放置标定试件——陶瓷片(19)。
- b. 转动数字散斑投影器(16)，调整投影在陶瓷片上的正方形光斑，使得正方形光斑有两条平行边垂直于投影光线和反射光线所组成的平面。
- c. 转动CCD摄像头(18)，使得计算机屏幕上的正方形投影光斑的四边平行于计算机屏幕上的采集区域的四边。
- d. 将光源(15)亮度调到最大，CCD摄像头光圈调小，投影散斑调离焦，CCD摄像机调聚焦，再将投影散斑调聚焦，投影散斑光圈调小。
- e. 调整好系统后，应保持系统的各个参数不变，取未移动电控平移台前的陶瓷片平面作为标定平面，采集一幅图像，然后通过程序控制，将高精度电控平移台沿z向升高，带动陶瓷片升高，按照z向分别升高 $2\mu\text{m}$ 、 $4\mu\text{m}$ 、 $8\mu\text{m}$ 、 $10\mu\text{m}$ 、 $50\mu\text{m}$ 、 $100\mu\text{m}$ 、 $200\mu\text{m}$ 、 $500\mu\text{m}$ ，并采集各个高度对应的序列散斑图像。
- f. 以未移动标定平面时采集的图像作为参考图像，以各位移值下的图像作为目标图像分别与其做相关运算，获得图像上各个像素点在z向升高不同高度时，水平方向对应的位移值 ΔD 。

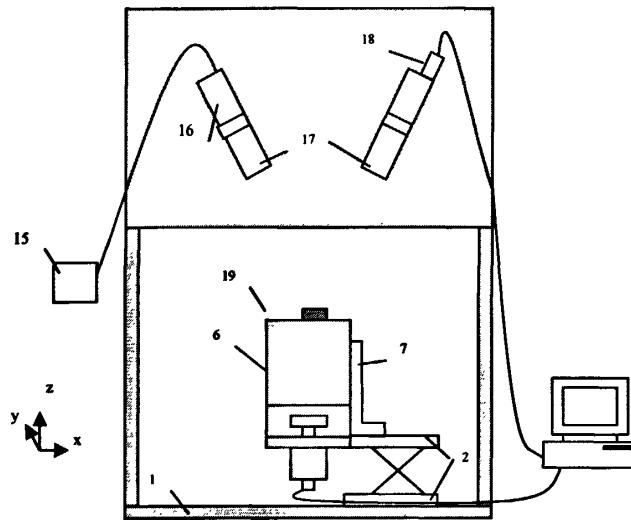


图 6.24 标定系统示意图

3. 标定结果:

- a. 在各位移值的图像内沿x方向分别选取10个区域(300~400pixel, 400~500pixel, 500~600pixel, 600~700pixel, 700~800pixel, 800~900pixel, 900~1000pixel, 1000~1100pixel, 1100~1200pixel, 1200~1300pixel,), 做出10个k值, 如表6. 1所示, 再做拟合, 得到k的4次函数, 如图6. 25所示。该4次函数即k的最终标定结果。

表6. 1 不同区域的标定k值

pixel	k
300~400	-21.07963
400~500	-20.73642
500~600	-20.36714
600~700	-19.86763
700~800	-19.43955
800~900	-19.00469
900~1000	-18.59871
1000~1100	-18.43179
1100~1200	-18.30811
1200~1300	-18.09265

$$Y = -19.18165 - 0.01575 X + 3.98827E-5 X^2 - 3.23227E-8 X^3 + 8.83609E-12 X^4$$

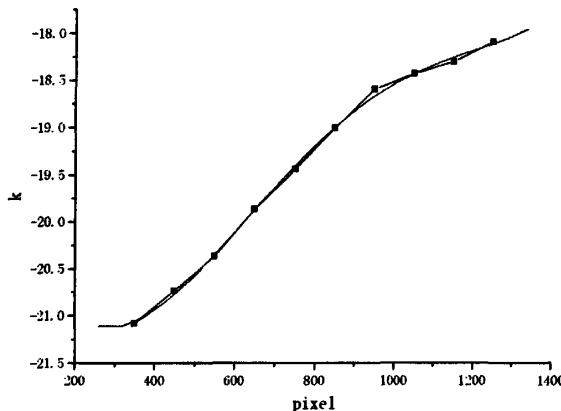


图6.25 标定结果k

- b. 控制高精度电控平移台，在z方向升高100μm，间隔10μm采集一幅图像，分别与没有升高前的图像做相关运算，得到x方向移动的像素值，再根据标定好的k值，得到z方向移动的高度。分别与实际升高的高度做比较，误差如图6.26所示，不超过1.1μm，证明从0到100μm，k值比较准确。

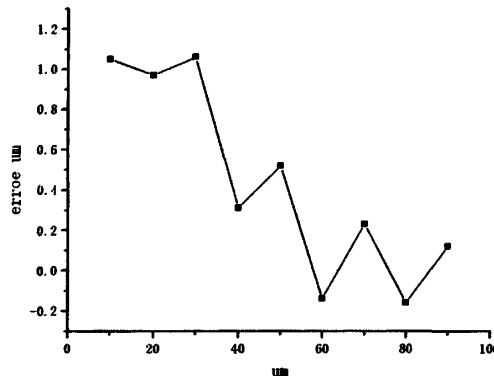
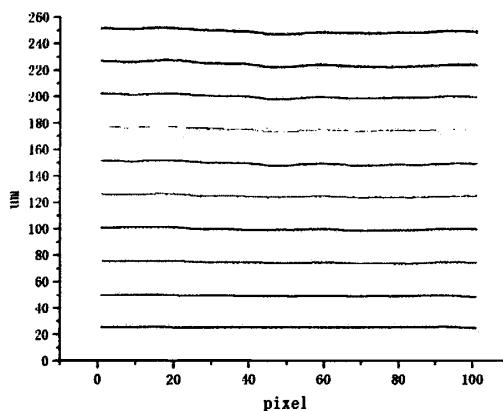
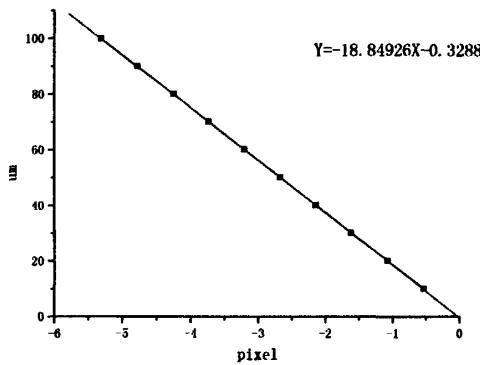


图6.26 100 μm之内误差

- c. 控制高精度电控平移台，在z方向升高250μm，间隔25μm采集一幅图像，分别与没有升高前的图像做相关运算，得到x方向移动的像素值，再根据标定好的k值，得到z方向移动的高度。如图6.27所示，一共10条直线，代表0-250μm，间隔25μm的10个高度，可以看到每个高度上平整度很好。

图6.27 250 μm 之内平整度

- d. 控制高精度电控平移台，在 z 方向升高 $100 \mu\text{m}$ ，间隔 $10 \mu\text{m}$ 采集一幅图像，分别与没有升高前的图像做相关运算，得到 x 方向移动的像素值，如图 6.28 所示，截距 0.3288 ，线性度很好，证明从 0 到 $100 \mu\text{m}$ 线性很好， k 值不随高度方向改变。

图6.28 100 μm 之内线性度

- e. 控制高精度电控平移台，在 z 方向按照 $10 \mu\text{m}$, $100 \mu\text{m}$, $200 \mu\text{m}$, $500 \mu\text{m}$ 升高，采集 4 幅图像，分别与没有升高前的图像做相关运算，得到 x 方向移动的像素值，如图 6.29 所示，截距 0.334 ，看线性度很好，证明从 0 到 $500 \mu\text{m}$ 线性很好， k 值不随高度方向改变。

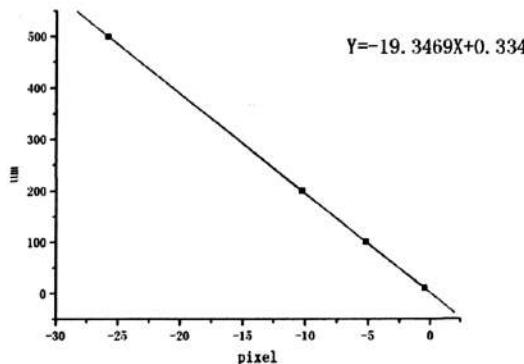


图6.29 500 μm之内线性度

- f. 控制高精度电控平移台，在 z 方向升高 $2.5\mu\text{m}$ ，间隔 $0.25\mu\text{m}$ 采集一幅图像，分别与没有升高前的图像做相关运算，得到 x 方向移动的像素值。图6.30表示的是10幅图像的结果，能看到台阶状，说明高度方向上改变 $0.25\mu\text{m}$ 的时候，该测量系统能够检测到，灵敏度很好。

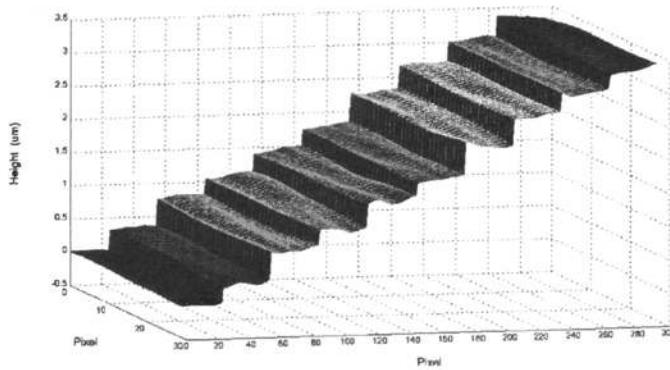
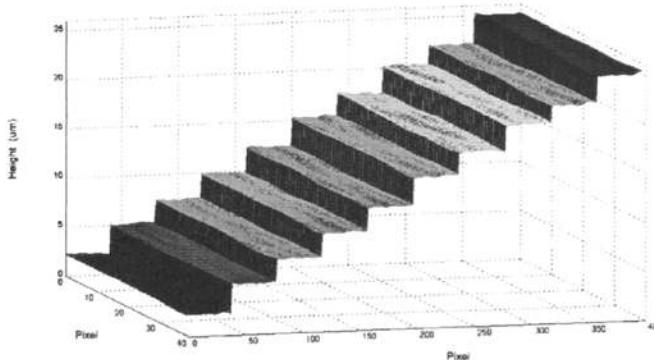
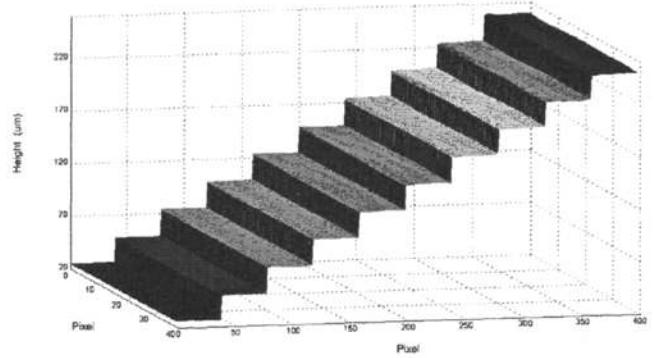


图6.30 2.5 μm之内灵敏度

- g. 控制高精度电控平移台，在 z 方向升高 $25\mu\text{m}$ ，间隔 $2.5\mu\text{m}$ 采集一幅图像，分别与没有升高前的图像做相关运算，得到 x 方向移动的像素值。图6.31表示的是10幅图像的结果，能看到比较明显的台阶状，说明高度方向上改变 $2.5\mu\text{m}$ 的时候，该测量系统能够较好地检测到，灵敏度很好。

图 6.31 $25 \mu\text{m}$ 之内灵敏度

- h. 控制高精度电控平移台，在 z 方向升高 $250 \mu\text{m}$ ，间隔 $25 \mu\text{m}$ 采集一幅图像，分别与没有升高前的图像做相关运算，得到 x 方向移动的像素值。图 6.32 表示的是 10 幅图像的结果，能看到非常明显的台阶状，说明高度方向上改变 $25 \mu\text{m}$ 的时候，该测量系统能够非常好地检测到，灵敏度很好。

图 6.32 $250 \mu\text{m}$ 之内灵敏度

由第二章论述可知，物体的高度变化与散斑的水平位移有一定的关系，这种关系可由计算得出，但计算时需对仪器之间的各个距离进行测量，不可避免会产生误差。由于本实验的测量精度在微米级，因此任何小的测量误差都会导致对最终结果产生很大的影响。在实验中采用标定的方法，直接得出高度变化与计算机中散斑像索值的变化，省去测量计算的步骤，提高实验结果的可靠性。

标定必须与实际测量时的仪器所在位置完全相同，因此需事先将仪器调整至合适位置，将构件放入仪器指定位置中，打开投影散斑测量系统，根据计算机显示图像，并调整投影仪与 CCD 至恰当位置，使散斑图清晰适合计算。

标定的思想是给定物体一个高度变化，由计算机采集到高度变化前后的两幅图，计算两幅图上散斑点的移动像素个数，进而得出高度与像素的对应关系。标定的高度控制采用百分表。

标定时,先测量出一个与试件同样尺寸,厚度相当的均匀圆片,测得其厚度为0.18mm。先将试件放入仪器中,采集一幅散斑图,再将圆片垫于同一片试件底部,放入仪器中,采集另一幅散斑图,如图6.33。将两幅图相减,得到各散斑移动的平均像素数为29.56pixels,计算得每移动一个像素,高度变化6.089微米,即 $6.089\mu\text{m}/\text{pixel}$ 的标定结果。

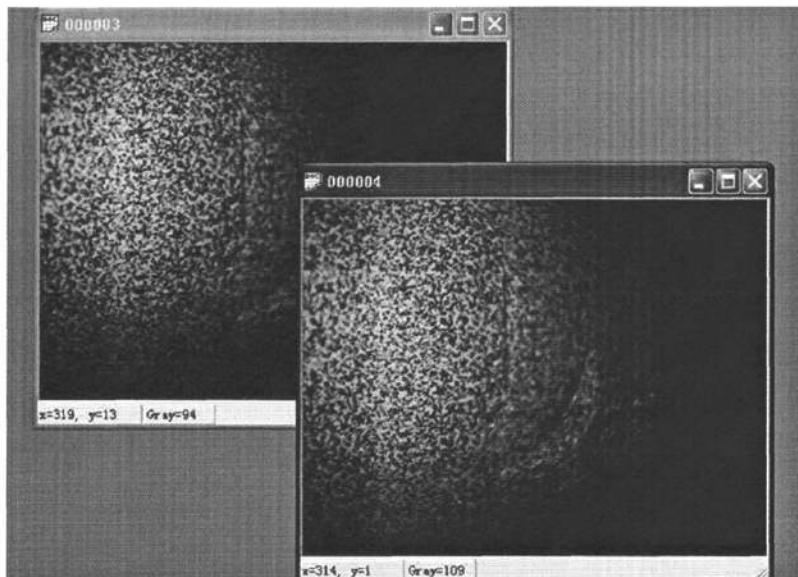


图 6.33 标定散斑图

6.4.4 试件制备及加载

实验试件是在圆形金属片中央开了一个小孔,并在其上镀了一层金属薄膜,基底材料为低碳钢,薄膜材料为金属镍。整个试件直径约为2.400cm,小孔直径为3.0mm左右,试件厚度在2.0mm左右(包括基底在内),薄膜厚度0.018mm。

试件按氧化时间分为无氧化、氧化10分钟、氧化30分钟、氧化1小时、氧化24小时五种类型,由于氧化的原因,试件会有锈迹出现,为保证试件放入仪器时平整,须对试件背面(未镀膜的那一面)进行打磨,打磨必须均匀,否则影响表面平整,同时不能影响到薄膜与基底的粘结。可以看到氧化时间越长的试件,其越容易在空气中生锈。

本实验需将人工散斑投影到物体表面,再由CCD进行采集,要求物体表面本身的自然散斑尽量少,不能对人工投影的散斑图造成影响。因此,物体表面要求为白色,能够使散斑有较好的明暗对比度,同时本身的颗粒要少而细。为了达到这一要求,必须对物体表面进行处理。在本实验中,我们尝试了多种方法,试用过油漆、水粉、油彩等多种材料涂于试件表面,并采用各种方法使其均匀分布于表面。经多次试验,我们最终确定使用喷漆的方法进行实验,喷漆法可以使试件表面均匀,颗粒细小,本身的自然散斑也少,且简单易行,便于控制。缺点是可能会在膜表面形成张力,对膜的变形造成一些影响。但相比而言,这是最适合的方法。

调整好仪器位置及数字散斑相关测量系统，并做好标定后，就可以开始正式做薄膜加载实验。将试件放入仪器中时，要注意应先往油腔中滴满油，使油的液面与仪器中放置试件的橡胶垫圈持平，防止空气进入，避免气泡对加压产生的影响。将试件放入，盖上盖片，务必使盖片的孔与试件的小孔对中拧紧。打开计算机软件与图像采集卡进行图像采集。经测量，薄膜小孔的直径为 3.0mm，盖片孔的尺寸有三种：5.84mm、9.00mm、12.84mm，如图 6.34 所示。

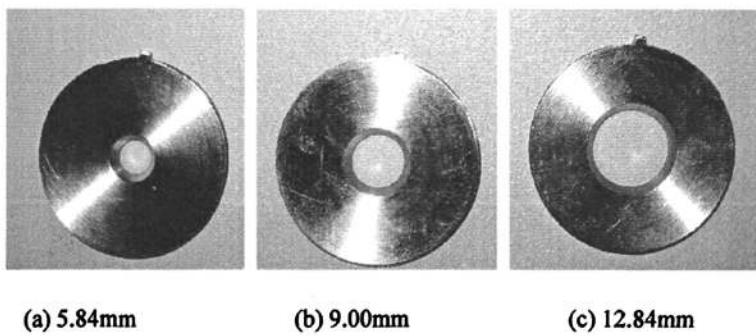


图 6.34 不同孔径的盖片

本次实验共使用九个试件，大体可分为无氧化试件与有氧化试件两大类。

1. 无氧化试件

表 6.2 无氧化试件实验记录

	041001	040901	041002	041302
盖片孔 (mm)	12.84	12.84	9.00	9.00
加压方式	自动，较快	手动	手动	手动
破裂压力值 (MPa)	1.54	2.83	4.39	缺

比较前两个试件，可以看出在盖片孔大小相同的情况下，加压方式对破裂压力值有很大影响。试件 041001 由于加压较快，使得作用在薄膜上的力不仅有静载，还有油的动载，使得其显示出的压力破坏值明显小于试件 040901。

试件 040901 与 041002 加压方式相同，而盖片孔的大小不同。实验结果表明，盖片孔小的试件破坏时的压力值高于盖片孔大的试件。

由于操作失误，加载试件 041302 时，程序异常中止，导致该试件的数据没有记录。

加压至一定值时均可看到薄膜有明显的变形，但均没有在接近破坏时看到压力下降现象。记录下各个时间下的压力值，可得压力一时间曲线表示如图 6.35：

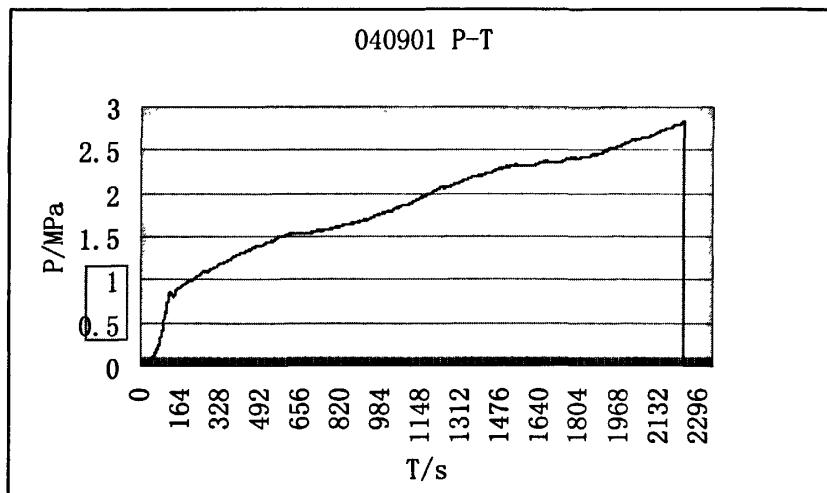


图 6.35 试件 040901 压力一时间曲线

图中标识处有压力下降的点，且压力与时间的斜率变缓，这是因为压力的加载速度在该时刻作了人为的调整，使其速度变慢。

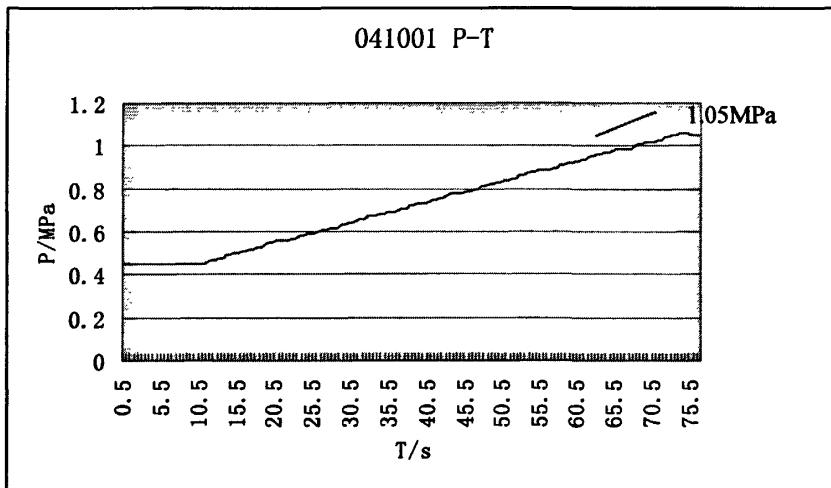


图 6.36 试件 041001 压力一时间曲线

试件 041001 的破坏压力值为 1.54MPa，图 6.36 所显示出的是压力值在 1.05MPa 前的一段时间内的压力一时间曲线，由该图可以看出，压力一时间曲线在加压的前段时间内基本呈线性。

上述两幅图中均没有明显的压力下降的时刻，试件破坏的也很突然。其余两个试件的压力一时间图与 041001 的压力图类似，无明显压力下降，不一一列出。

无氧化试件的这几次实验使我们对鼓膜实验的过程及要注意的事项有了一个大概的认识，也是对计算机软件的一个初步的检测。由这几次实验，我们得到的经验是加载的速度过快，试件来不及变形。而且为了得到更加准确的压力一时间曲线，加压方式必须采用

自动加压，且要缓慢而均匀的加压，使薄膜逐步变形。这样在每一时刻都可以近似的认为薄膜处于静平衡状态，才能更加真实的体现出薄膜在每一时刻的变形。因此，针对这一情况，我们对程序进行了完善，将加压的方式进行调整。如表 6.3 所示：

表 6.3 加压速度

	Fast	Middle	Slow
加压间隔(s)	0.2	0.4	0.6
电机运行时间(s)	0.02	0.02	0.02
伸缩杆前进路程(μm)	5	5	5
加压速度(μm/s)	22.73	11.90	8.65

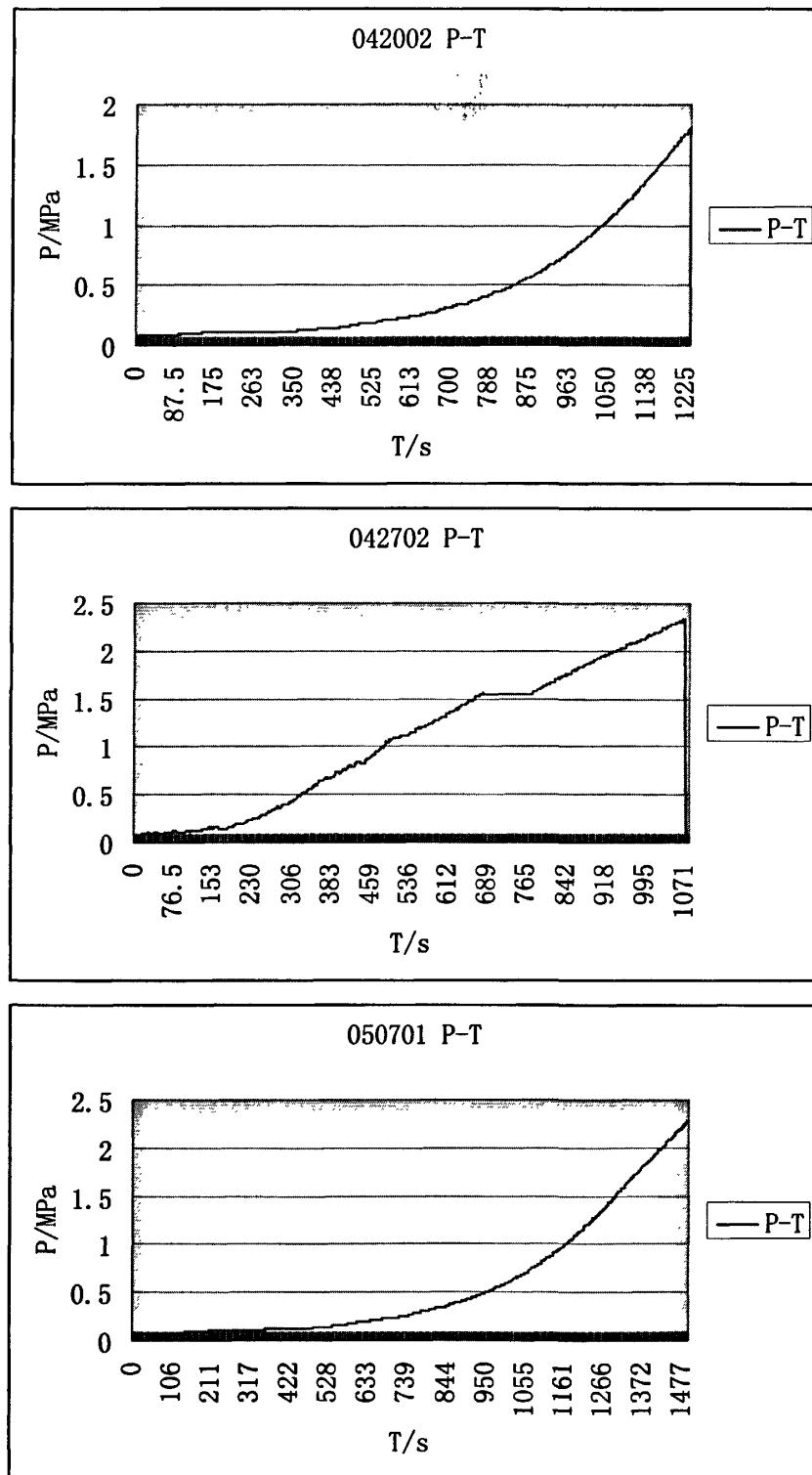
此处为了将每一时刻的压力值与高度对应，我们将采集到的每幅图用当时的压力值进行保存，为后面建立压力—高度曲线作准备。

2. 有氧化试件

表 6.4 有氧化试件实验记录

	042701	042002	042702	050701	042801
氧化时间	10 分钟	10 分钟	30 分钟	1 小时	24 小时
盖片孔 (mm)	5.84	9.00	9.00	9.00	9.00
加压方式	自动, Slow	自动, Slow	自动, Slow	自动, Slow	自动, Slow
破裂压力值 (MPa)	2.70	1.77	2.35	2.86	2.53

在这组实验中，首先对试件 042701 采用小孔盖片，目的在于确定鼓膜的变形是否受到小孔盖片的限制。这组实验的加压方式都进行了改进，控制伸缩杆对时间均匀缓慢的行进。得到各试件的压力图如图 6.37 所示，试件 042701 由于操作失误，导致信息未保存完整，不能得到其压力—时间曲线。



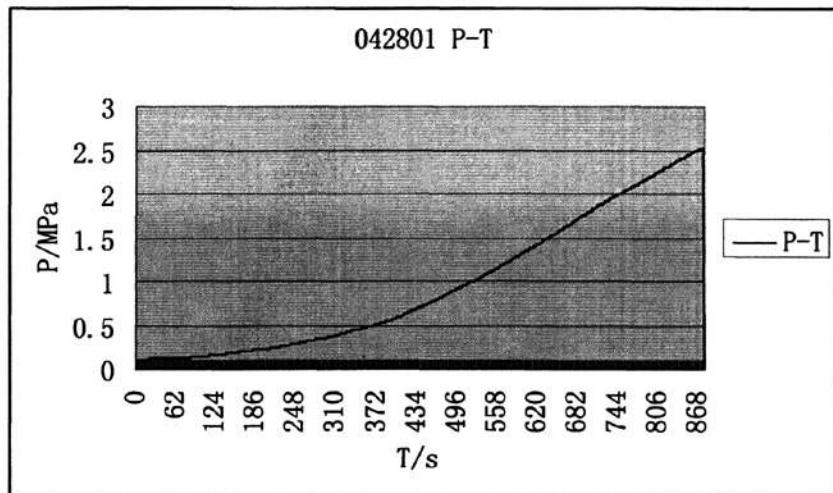


图 6.37 各试件压力一时间曲线

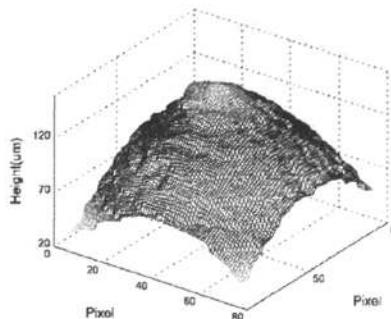
这五个试件加压方式相同，保存压力的间隔也相同，因此，这五个试件的压力一时间曲线可放在一起比较。由于加压时控制伸缩杆随时间匀步前进，而随着油腔空间的缩小，伸缩杆前进相同距离，压力会越来越大，因此，压力随着时间增长越来越快，当然这是在加压过程中薄膜变形较小的情况下结果。上图中 042002, 042801 与 050701 三个试件的 P-T 曲线都比较符合这种结果。042702 图中出现平缓段，是由于该试件加压过程中暂停了一段时间改变加压速度。可以基本确定试件在加压时压力一时间图应是斜率逐渐上升的。

6.4.5 相关分析与曲线拟合

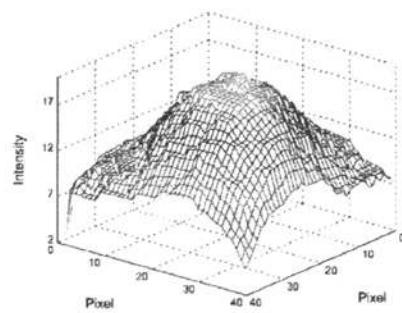
对记录下的试件在不同时刻的散斑图进行数字相关分析，可以得到各试件的三维变形图，各试件在计算时均采用 $20*20$ 的模板大小，两方向上的步长均为 10 个像素。由于无氧化的各试件加载方式为手动，加压间隔时间不能确定，压力值不能与变形相对应，因此，本节只给出无氧化试件的最终变形图，而在曲线拟合中只分析有氧化的试件，这并不影响对结果的总结。

1. 薄膜三维形态

a. 无氧化各试件的破坏前薄膜形态



041001 三维变形图



041002 三维变形图

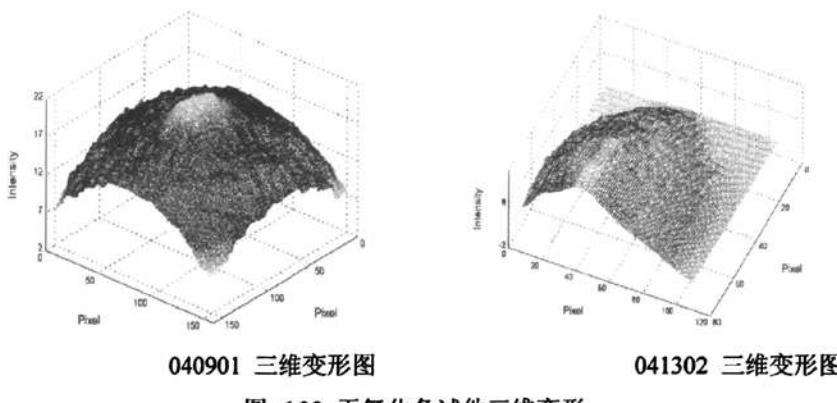


图 6.38 无氧化各试件三维变形

相关分析采用相同的搜索精度, 三维图的不同有可能是试件表面喷漆的均匀程度不同以及试件在制作过程中本身力学性能不一样造成的。在 041302 的变形图中, 只能看到薄膜一部分的变形, 这是由于薄膜的小孔未与盖片孔对齐的原因, 这种情况会导致薄膜的变形受到盖片的影响, 是必须注意的地方。

b. 有氧化各试件的破坏前薄膜形态

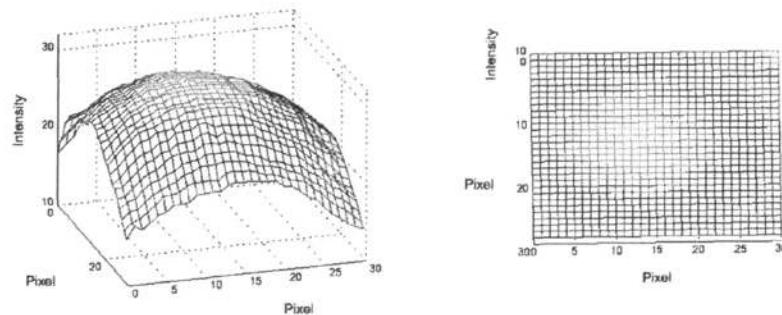


图 6.39 042701 的三维

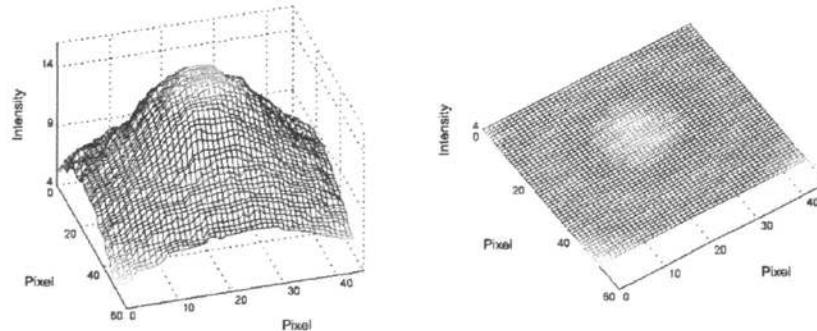


图 6.40 042002 的三维图 (1.77MPa)

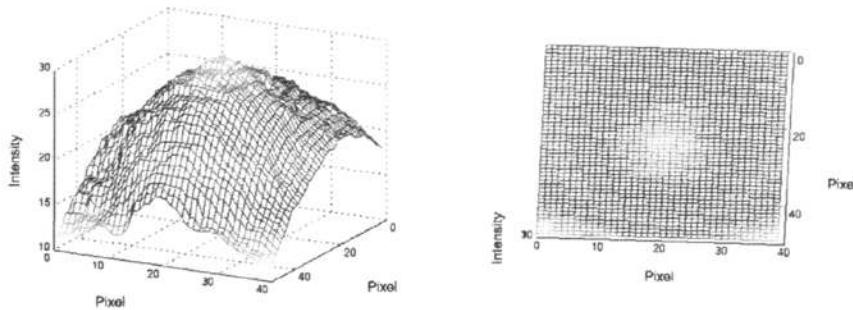


图 6.41 042702 的三维图 (2.35MPa)

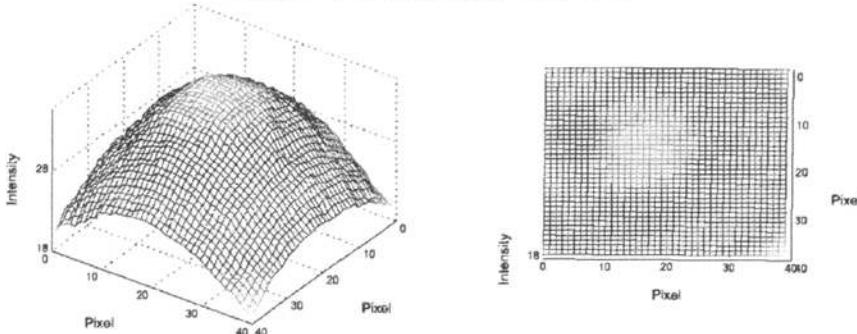


图 6.42 050701 的三维图 (2.53MPa)

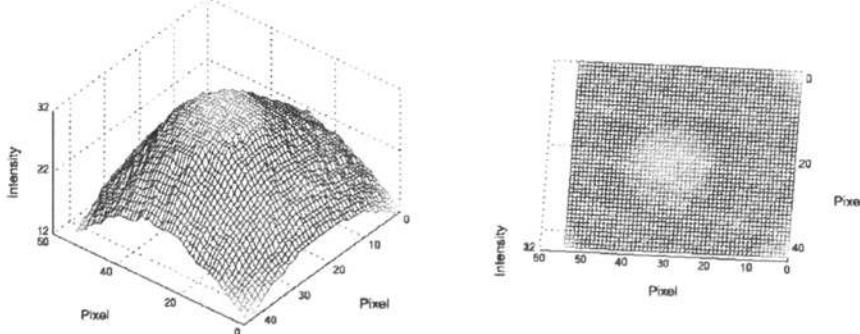


图 6.43 042801 的三维图 (2.86MPa)

上述图形中右边的图为三维变形的俯视图,可以看到,大部分薄膜鼓起时仍保持球形,但由于基底与薄膜的粘贴力不均匀,有些薄膜变形不是严格的圆形,而接近于椭圆。这也说明实验与第三章所提出的球冠模型并不是完全符合。

试件 042701 所用的盖片孔径为小孔 5.84mm, 薄膜破坏后, 膜呈椭圆形, 长短轴分别为 4.5mm、3.84mm, 与小孔的尺寸相近, 因此, 为了不让孔的尺寸影响到薄膜变形, 在该片后的试件进行实验时, 都采用了孔直径为 9.0mm 的盖片。

c. 相同压力下各试件变形像素对比

选取各试件相同压力下的散斑图分别进行相关计算, 得到各试件变形像素如表 6.5:

表 6.5 相同压力下各试件的变形像素

	氧化时间	盖片孔大小	加压方式	计算压力值	变形像素
042701	10 分钟	5.84	自动	0.42—1.43	6.84
042002	10 分钟	9.0	自动	0.43—1.42	8.43
042702	30 分钟	9.0	自动	0.44—1.44	11.49
050701	1 小时	9.0	自动	0.42—1.42	12.57
042801	24 小时	9.0	自动	0.42—1.41	9.53

由表中数据，在同样的压力下，氧化时间相同时，盖片孔大的试件变形也大，盖片孔小的试件变形也小，这应该是基底的变形所造成的，说明基底的变形对实验中所测的高度值是有影响的。氧化时间的长短对薄膜的变形也是有影响的，从表中数据来看，似乎可以总结出氧化时间在 1 小时内时，薄膜随着氧化时间的增加，变形会越来越大，推测其原因，可能与薄膜基底之间的粘贴力有关。

2. 曲线描绘与拟合

a. 高度—时间曲线

将试件在各压力值下保存的散斑图分别与第一幅图作相关计算，并找到相应的时间点，得到每一时间点下的薄膜高度值并绘出试件的高度—时间曲线，如图 6.44。

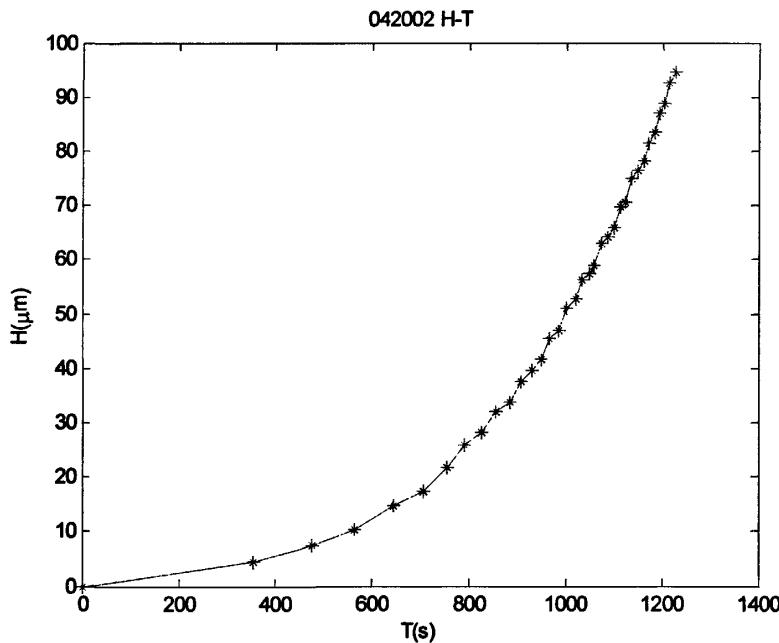


图 6.44 (a) 试件 042002 高度—时间曲线

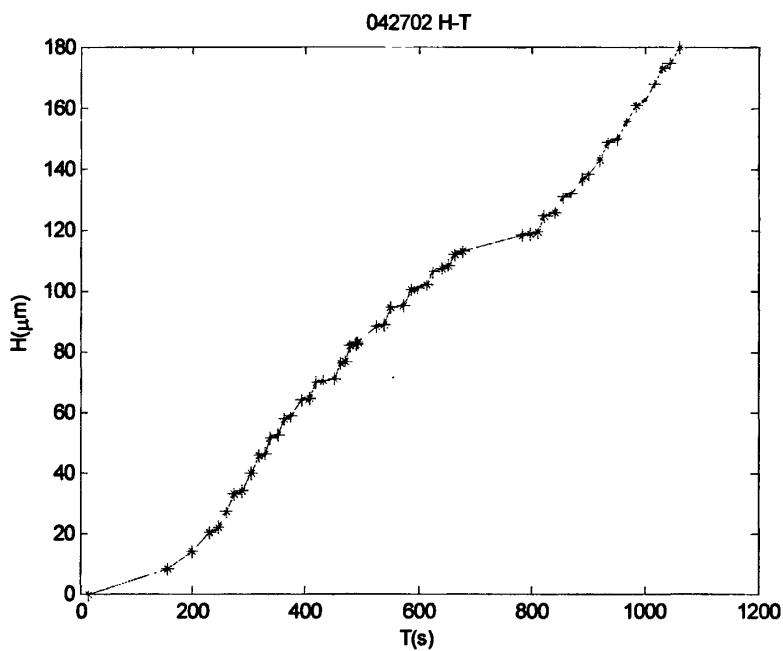


图 6.44 (b) 试件 042702 高度一时间曲线

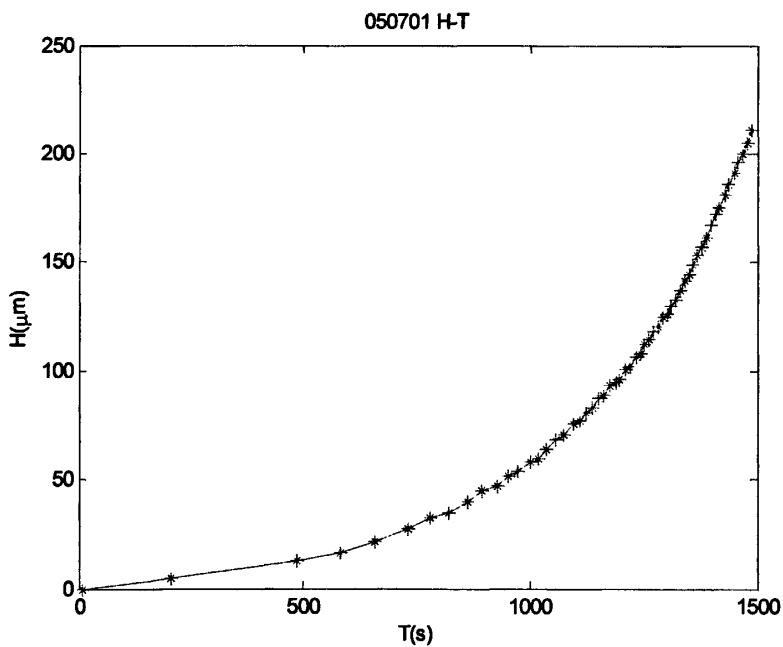


图 6.44 (c) 试件 050701 高度一时间曲线

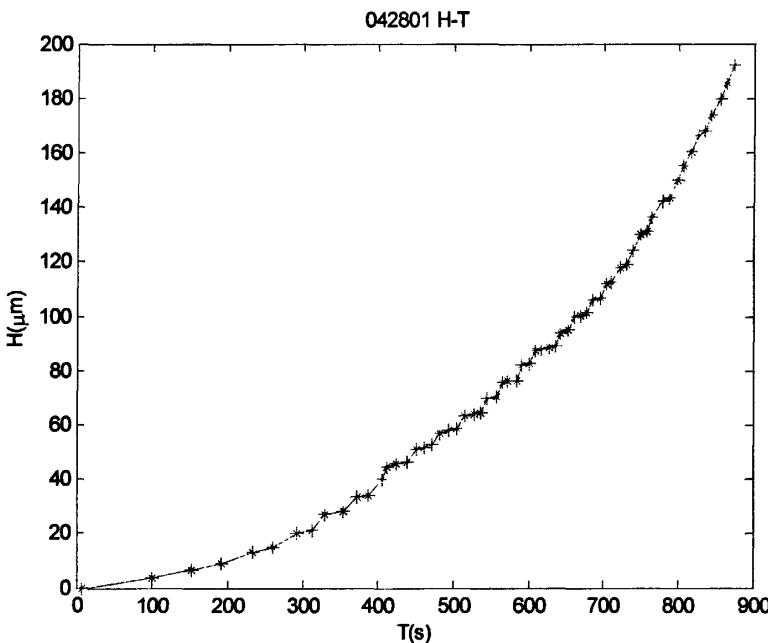


图 6.44 (d) 试件 042801 高度一时间曲线

由图中可以看出, 薄膜在加压时, 高度对时间的斜率越来越大, 这说明高度增加的速度越来越快。042702 试件有高度不变的一段, 原因与该试件的压力一时间曲线的解释一样, 即是因为在加载该试件的时候中途停了一段时间改变其加载速度。

b. 压力一高度曲线拟合

把每一时间的高度与压力对应起来, 每隔 0.04MPa 记录一幅散斑图像, 并用每幅散斑图与第一幅图进行数字散斑相关计算, 可以得到每个压力值下的变形值, 根据标定结果得到各压力对应的高度值。

下列各表列出了各试件的部分数据

表 6.6 试件 042701 压力一高度数据

序号	1	2	3	4	5	6	7	8	....	67
压 力 (MPa)	0.08	0.12	0.14	0.18	0.22	0.27	0.3	0.34		2.7
高 度 (mm)	0	0.0048	0.0074	0.0093	0.0141	0.0168	0.0206	0.0226		0.0184

表 6.7 试件 042002 压力一高度数据

序号	1	2	3	4	5	6	7	8	....	35
压 力 (MPa)	0.07	0.13	0.17	0.22	0.27	0.33	0.38	0.43	.....	1.77
高 度 (mm)	0	0.0044	0.0076	0.0103	0.0148	0.0174	0.0218	0.0258	.....	0.0947

表 6.8 试件 042702 压力—高度数据

序号	1	2	3	4	5	6	7	8	....	56
压 力 (MPa)	0.09	0.16	0.20	0.25	0.28	0.32	0.36	0.4	.....	2.32
高 度 (mm)	0	0.0083	0.0139	0.0203	0.0220	0.0270	0.0331	0.0340	.....	0.1799

表 6.9 试件 042801 压力—高度数据

序号	1	2	3	4	5	6	7	8	....	62
压 力 (MPa)	0.11	0.15	0.19	0.23	0.27	0.31	0.35	0.39	.....	2.53
高 度 (mm)	0	0.0037	0.0070	0.0092	0.0134	0.0150	0.0203	0.0214	.....	0.1919

表 6.10 试件 050701 压力—高度数据

序号	1	2	3	4	5	6	7	8	....	56
压 力 (MPa)	0.06	0.1	0.14	0.18	0.22	0.26	0.3	0.34	.....	2.26
高 度 (mm)	0	0.0051	0.0131	0.0167	0.0218	0.0275	0.0326	0.0349	.....	0.2107

由第三章中的薄膜理论计算方程, 结合本实验实际, 采用张紧状态独立膜的计算方程(6-6), 用 Matlab 把每个试件的这两组数据进行三次曲线拟合, 得到各试件的拟合多项式如下:

$$042701: p = 675.49h^3 - 218.01h^2 + 33.434h - 0.25942 \quad (6-11)$$

$$042002: p = -703.33h^3 + 146.77h^2 + 10.288h + 0.0856 \quad (6-12)$$

$$042702: p = -513.61h^3 + 144.75h^2 + 2.5946h + 0.13097 \quad (6-13)$$

$$042801: p = -417.12h^3 + 91.481h^2 + 10.009h + 0.10623 \quad (6-14)$$

$$050701: p = -264.28h^3 + 76.96h^2 + 5.7648h + 0.05214 \quad (6-15)$$

根据这些方程, 绘出各试件的拟合压力—高度曲线, 并在图中以“*”标出各数据点, 与拟合曲线进行比较。

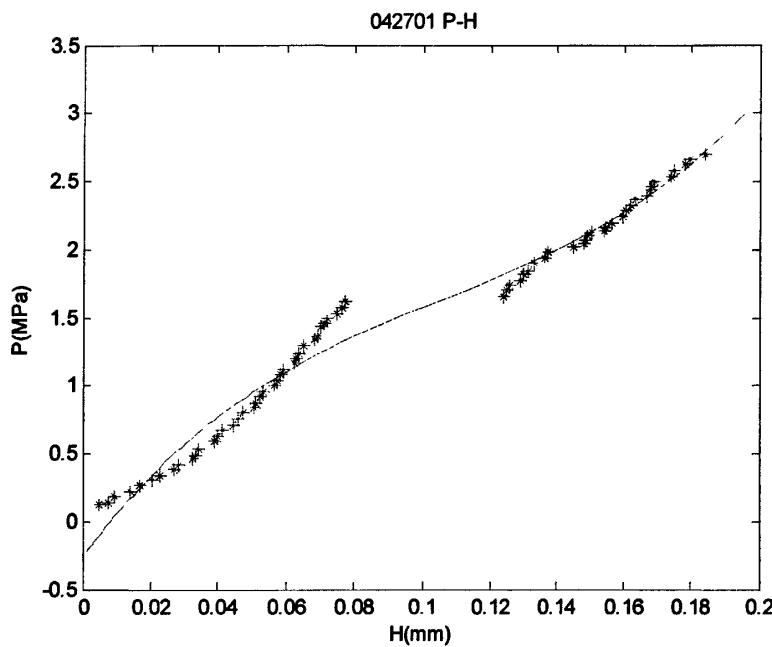


图 6.45 (a) 试件 042701 压力—高度曲线

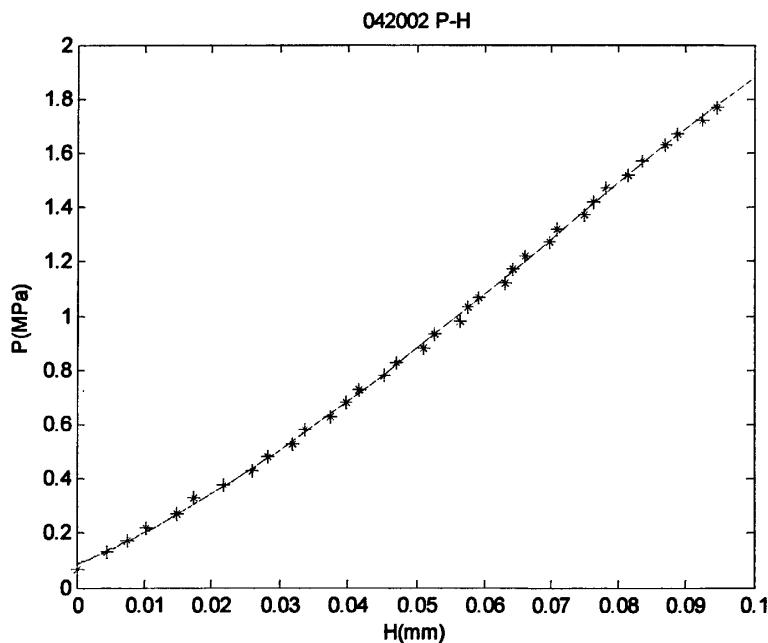


图 6.45 (b) 试件 042002 压力—高度曲线

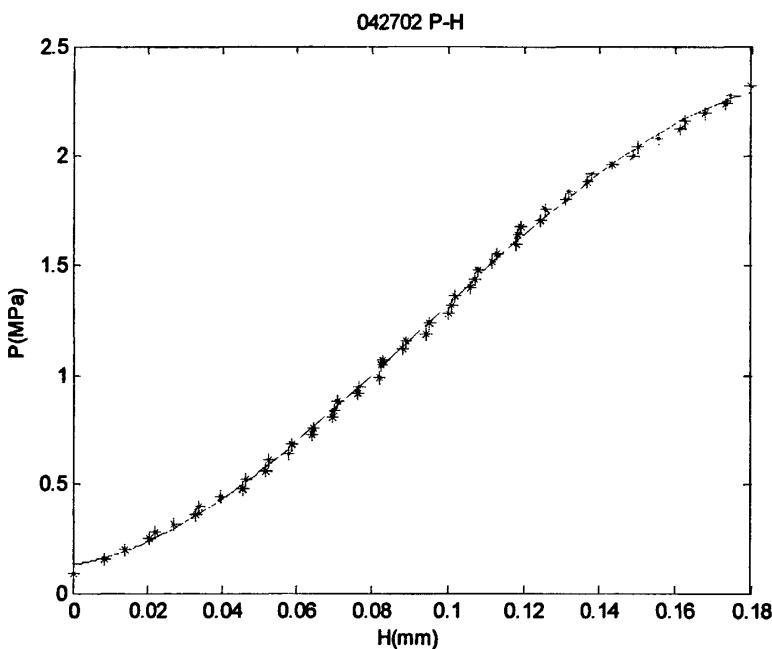


图 6.45 (c) 试件 042702 压力—高度曲线
042801 P-H

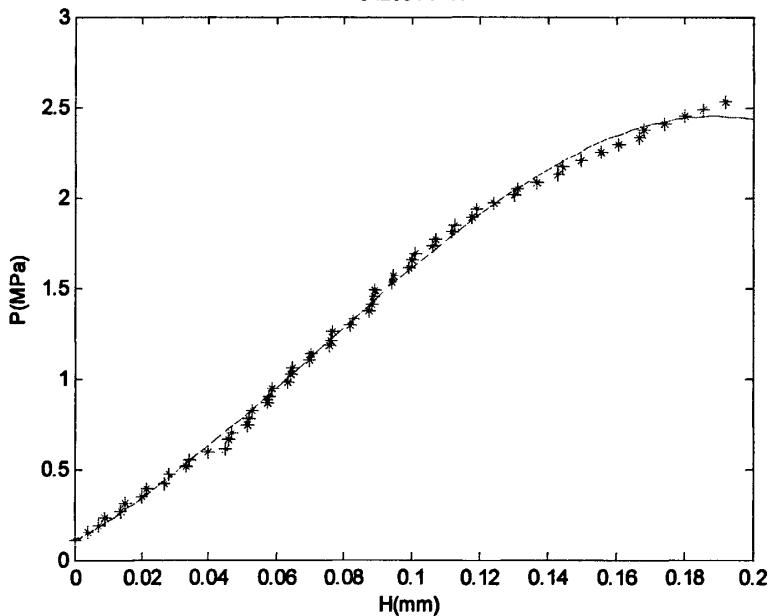


图 6.45 (d) 试件 042801 压力—高度曲线

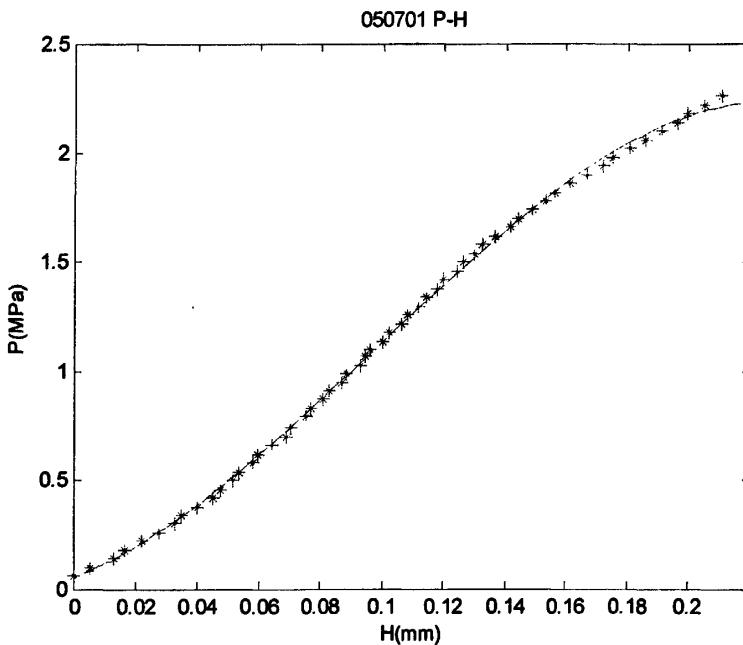


图 6.45 (e) 试件 050701 压力—高度曲线

这些曲线是做薄膜的材料性能分析及应力分析的重要数据依据。

由上述五幅图可以看出, 除第一幅以外, 其余四幅图中拟合曲线均与数据点符合较好。试件 042701 的曲线图中, 高度有一个明显的突变, 这反映出该试件在加压至 1.6MPa 附近时, 薄膜发生了一次剥离。而拟合曲线所依据的理论方程是在薄膜未剥离的情况下仅考虑薄膜自身的变形得到的, 因此试件 042701 的曲线图不能用该理论进行计算。

至此, 本文的实验目的基本完成。

3. 薄膜力学性能初步分析

本实验所用材料适合按张紧状态独立膜试样所得方程进行计算:

$$p = \frac{4t\sigma_0}{a^2}h + \frac{8Et}{3(1-\nu)a^4}h^3$$

由上述曲线拟合的结果,

042002:

$$p = -703.33h^3 + 146.77h^2 + 10.288h + 0.0856$$

$$\left. \begin{aligned} \frac{4t\sigma_0}{a^2} &= 10.288 \\ \frac{8Et}{3(1-\nu)a^4} &= 703.33 \end{aligned} \right\} \quad (6-16)$$

由测量可得, $t = 0.018\text{mm}$, $a = 3.0\text{mm}$, 可由上式得到:

$$\sigma_0 = 1286 \text{ MPa}$$

$$\frac{E}{1-\nu} = 647101.45 \text{ MPa} \quad (6-17)$$

查相关资料, 镍薄膜的弹性模量为 $E = 199 \text{ GPa}$, 泊松比为: $\nu = 0.31$

由上式得: $E = 818.6 \text{ GPa}$

同理可得其余三个试件的材料属性, 将四个试件的实验结果总结如下:

表 6.11 有氧化试件残余应力值与弹性模量

编号	042002	042702	050701	042801
盖片孔 (mm)	9.0	9.0	9.0	9.0
氧化时间	10 分钟	30 分钟	1 小时	24 小时
σ_0 (GPa)	1.286	0.3245	0.811	1.250
E (GPa)	818.6	597.6	346.1	485.5

由上表数据, 各试件的实验结果有较大的差异, 分析原因有以下几点:

- 现阶段鼓膜实验的力学模型都是在薄膜处于线弹性状态下推导出来的, 如果膜与基体界面的结合强度比较高, 压力增大到一定程度时, 薄膜会发生塑性变形, 而目前塑性变形阶段还没有较完善的力学模型可用。
- 模型是在假设基底完全刚性的条件下导出的, 而本实验中基底材料为低碳钢, 厚度为 0.24mm 左右, 容易发生变形。用做过实验的试件观察, 肉眼就能看出基底明显发生变形, 这与所采用的力学模型有很大的不符。
- 为了使图像采集范围尽可能大, 图像像素设为 1600*1200, 每幅图像大小有 1.9MB 左右, 在这种情况下, 每秒仅能采集两幅图像, 保存速度也受到影响, 因此所保存的散斑图有可能有滞后, 这对压力-高度曲线会有影响。

6.5 本章小结

本章介绍了实验的主要过程, 并根据所记录的各项数据得出各试件的压力-时间曲线, 高度-时间曲线以及压力-高度曲线。本章根据前文所介绍的薄膜的理论模型用 Matlab 对所得到的数据进行三次拟合, 拟合得到的曲线与数据点符合的较好, 说明该实验可以用三次曲线进行拟合。这些拟合曲线可以为以后的薄膜力学性能及膜基界面结合力的计算提供数据保证。

本章对实验所得到的各种数据进行分析, 分析因素主要包括加压速度、盖片大小、氧化时间等因素。分析各类曲线, 可以看出薄膜的压力与高度均随着时间加速增长, 对时间的斜率越来越大。

本章在最后用前文所得到的理论方程进行对薄膜的力学参数进行初步计算, 得到的结果与实际有很大的差异, 证明本实验不能用已知的球冠模型进行计算。这也说明了实验对

新的理论模型的迫切需求。

参考文献

- [1] 陈隆庆, 赵明皞, 张统一. 薄膜的力学测试技术 [J]. 机械强度, 2001, 23(4): 413-429
- [2] Ternovskii A P , Alekhin V P , ShorshorovM K, et al. Micromechanical testing of materials by depression [J]. Zavod. Lab. ,1973 , 39 :1242-1247.
- [3] Bulychev S I , Alekhin V P , Shorshorov M K, et al. Mechanical properties of materials studied from kinetic diagrams of load versus depth of impression during microimpression [J]. Prob. Prochn. , 1976 , 9: 79-83.
- [4] Bulychev S I , Alekhin V P , Shorshorov M K, et al. Determining Young' s modulus from the indentor penetration diagram [J].Zavod. Lab. , 1975 , 4 :1137-1140.
- [5] Frohlich F , Grau P , Grellmann W. Performance and analysis of recording microhardness tests [J]. Phys. Status. Solidi A , 1977 , 42 : 79-89.
- [6] Newey D , Wilkins M A , Pollock H M. An ultra2low2load penetration hardness tester [J]. J . Phys. E:Sci . Instrum. , 1982 , 15 :119-122.
- [7] Loubet J L , Georges J M, Marchesini O , et al. Vickers indentation curves of magnesium oxide (MgO) [J] . Transactions of the ASME. Journal of Tribology , 1984 , 106 : 43-48.
- [8] Doerner M F , Nix W D. A method for interpreting the data from depthsensing indentation instruments [J]. J . Mater. Res. , 1986 ,1 :601-609.
- [9] Oliver W C , Mchargue C J , Zinkle S J . Thin film characterization using a mechanical properties microprobe [J]. Thin Solid Films , 1987 ,153 :185-196.
- [10] Wu T W, Hwang C , Lo J , et al. Microhardness and microstructure of ion-beam-sputtered , nitrogen-doped NiFe films [J]. Thin Solid Films ,1988 ,166 :299-308.
- [11] Nishibori M, Kinoshita K. A vickers type ultra2microhardness tester for thin films [J]. Jpn. J . Appl . Phys. , 1972 , 11 :758.
- [12] Oliver W C , Pharr G M. An improved technique for determining hardness and elastic modulus using load and displacement sensing indentation experiments [J]. J . Mater. Res. , 1992 , 7 :1 564-1 583.
- [13] Kinoshita K. Recent developments in the study of mechanical properties of thin films [J]. Thin Solid Films , 1972 , 12 :17-28.
- [14] 周向阳等. 纳米压入法测试薄膜力学性能的若干关键影响因素分析 [J]. 机械强度, 2007, 29(5) :737-744
- [15] Sneddon I N. The relation between load and penetration in the axisymmetric boussinesq problem for a punch of arbitrary profile [J]. Int . J . Eng. Sci . , 1965 , 3 :47—57.
- [16] Neugebauer C A. Tensile properties of thin , evaporated gold film [J] . Appl .Phys. , 1960 , 31 : 1096-1101.
- [17] Blakely J M. Mechanical properties of vacuum-deposited gold films [J] . Apply. Phys. , 1964 , 35 : 1756-1759.

- [18] Henning C A O , Boswell F W, Corbett J M. Mechanical properties of vacuum-deposited metal films [J]. *Copper films. Acta Metall.* , 1975 , 23 : 177-185.
- [19] Badachhape R B , Margrave J L , Brotzen F R. Separation of thin aluminum films from silicon substrates [J]. *Thin Solid Films* , 1986 , 139 : L77-L78.
- [20] 李雪萍等. 一种 MEMS 薄膜材料的力学性能测试方法 [J]. *传感器与微系统* , 2007 , 26, 85-88
- [21] Weihs T P,Hong S,Bravman J C,et al.Mechanical deflection of cantilever microbeams:A new technique for testing the mechanical properties of thin films[J]. *Mater.Res.*,1988,3:931-942
- [22] Beams J W. In : Neugebauer C A , Newkirk J B , Vermilyea D A eds. ,*Structure and Properties of Thin Films* [J], New York : Wiley & Sons , 1959.183-192.
- [23] Gerard G, Papirno R. Dynamic biaxial stress-strain characteristics of Aluminum and mild steel [J]. *Trans. ASM*, 1957 , 49 :132-148.
- [24] Jaccodine R J, Schlegel WA. Measurement of strains at Si-SiO₂ interface [J]. *Apply. Phys.* , 1966 , 37 : 2 429-2 434.
- [25] Gossett J L. In : Sard R ed. , *Properties of Electrodeposits* , Princeton , NJ ,The Electrochemical Society [J], 1975, 221-228.
- [26] Tabata O , Kawahata K, Sugiyama S , et al. Mechanical property measurement of thin films using load-deflection of composite rectangular membranes [J]. *Sensors and Actuators* , 1989 , 20 : 135-141.
- [27] O R Shojaei. Comparison of mechanical properties of TiN thin films using nanoindentation and bulge test [J].*Thin solid Films*, 1998, 332: 202-208.
- [28] 任凤章. 鼓泡法测量有机薄膜力学性能[J]. *自然科学进展* , 2002, 12(6): 636-640.
- [29] 翁萍. 鼓膜法测定纳米多孔氧化铝薄膜的弹性模量[J]. *实验力学* , 2004, 19(1): 34-38.
- [30] 任凤章等. 鼓膜实验法测试薄膜基底界面结合强度的进展[J]. *材料研究学报* , 2006
- [31] 任凤章等. 鼓泡法薄膜力学性能测试的研究现状[J]. *稀有金属材料与工程* , 2001
- [32] 翁萍等. 鼓膜法测定纳米多孔氧化铝薄膜的弹性模量[J]. *实验力学* , 2004
- [33] 柳兆涛. 氧化铝多孔膜变形的时间序列散斑干涉法检测[J]. *实验力学* , 2005, 20(1): 51-56.
- [34] 岳慧敏等. 时间相位展开方法研究进展[J]. *激光杂志* , 2004, 25(3): 9-12
- [35] 任凤章, 鞠新华等 鼓泡法薄膜力学性能测试的研究现状 2001.10, 321—325。
- [36] Timoshenko S, Woinow sky Kriegerss. *Theory of Plates and Shells*[M]. New York: McGraw Hill, 1959: 400.

第七章 总结与展望

7.1 全文工作总结

论文根据现代测量技术的发展,对测量离面位移的数字散斑相关方法与应用进行了研究。综述了数字散斑相关方法的进展,分析了常用的测量离面位移的光学方法,详细描述了数字散斑相关方法的基本原理和亚象素搜索方法,并且介绍了三维数字散斑相关方法。单相机数字散斑相关方法一般用于面内位移的测量,而本文从理论上和实践上进行了深入细致的研究与探讨,将人工散斑投影到物体表面,再用数字散斑相关的方法计算出像面上散斑的位移,根据几何关系得到物体表面的高度变化,利用数字散斑相关方法使用单相机实现物体离面位移的测量,使得离面位移的测量变得简单、快速。在此基础上建立了简单适用的薄膜变形测试系统。

全文内容,总结如下:

1. 基于对常用的测量离面位移的光学方法的分析,例如电子散斑干涉术、全息干涉术、电子错位散斑干涉术、散斑照相、云纹干涉法等,和对数字散斑相关法基本原理的阐述,采用单相机实现了将数字散斑与光学投影相结合,用于测量离面位移。该方法主要是从侧面倾斜一定角度将人工散斑投影到物体表面,一般情况下 CCD 相机也倾斜放置。当被测物体表面发生离面位移时,散斑受高度的调制而发生移动。用数字图像相关方法计算出 CCD 摄像机拍摄到的散斑的位移,就可以根据几何关系和标定好的数值还原出物体表面的高度变化。

2. 对测量离面位移的数字散斑相关方法的高精度测量设备进行了研制,相对精度达到 1: 10000。主要是针对微观实验对精度方面的要求,以及可靠性、稳定性和多功能性的要求,在投影方和采图方都引入了远心镜头来提高测量离面位移的数字散斑相关方法精度。深入探讨了远心镜头在提高离面位移测量精度方面的重要作用及其相比非远心镜头的优缺点和应用范围,并用 2 个实例证明了远心镜头的优点;介绍了该硬件的核心——图像采集系统,并详细介绍了本文采用的 2 个远心镜头的相关数据,从远心镜头的选择原则和机理上加以研究,确定了满足需要的零部件,并将它们有机地组成整体,从而实现系统的正常运行;分析讨论了远心镜头的选型标准及其光路,为进一步研制类似光测系统的硬件提供了一些参考。

3. 利用 VC++6.0, 编制开发了用于测量离面位移的 DSCM 软件。介绍了该光测系统软件基本框架。由于光测系统需要实时显示被测区域并能够采集不同时刻的图像,同时还要将采集的图像直接存入计算机,因此,计算机需要同步处理多项任务。详细说明了解决这一问题的关键技术——多线程技术。通过使用多线程技术,本软件不仅可以实时显示图像,而且可以根据不同的测试对象添加相应的有针对性的功能,例如,同步显示压力值并

输出压力和时间关系曲线，可以发出信号驱动步进电机等等。经过程序的编写和调试，测量离面位移的 DSCM 光测系统软件可以满足微观结构变形实验的基本要求。最后对该光测系统软件进行了测试。软件开发是整个系统运行的关键，考虑到今后软件的维护和升级，还可以针对不同的测试对象、测试方法和需要得到的测试结果添加各种相应功能。

4. 为了检验该测量离面位移的数字散斑相关方法，对薄膜结构离面变形进行了测量。主要工作就是利用这一实验方法和研制的实验设备对液压作用下薄膜的微观结构离面变形进行光学测量，查找相关资料得到鼓膜实验中薄膜的力学模型，从已有的几个理论方程中选取适合本实验的 $p-h$ 方程作为依据进行实验的数据拟合与薄膜力学参数初步计算。内容包括：鼓膜光测实验的硬件实现（操控系统、增压驱动器、压力传感器、），鼓膜光测实验的软件开发——在测量离面位移的 DSCM 软件开发基础上，特别为鼓膜测试所编写的软件的几个主要功能（装载试样、压力加载 1、压力加载 2、快速卸载），系统标定（标定原理、标定步骤、标定结果），试件制备及加载，相关分析与曲线拟合，对记录下的试件在不同时刻的散斑图进行数字相关分析，可以得到各试件的三维变形图，将试件在各压力值下保存的散斑图分别与第一幅图作相关计算，并找到相应的时间点，得到每一时间点下的薄膜高度值并绘出试件的高度—时间曲线。用新设计的实验装置和方法对 0.2mm 厚的镍薄膜的力学性能进行测定。利用实验的理论模型计算镍薄膜的弹性模量和残余应力。实验证明，该方法计算薄膜的离面位移是适合的，效果也很好，可以作为一种新方法推广。

5. 针对鼓膜光测实验特别设计了弹簧活塞加油系统。鼓膜测试过程中，油缸中的油会有少部分的损耗。由于加油过程中极易混入空气，从而导致加载数值测量不准确或者活塞超出行程，特别设计了与油缸相联通的弹簧活塞部分，通过旋钮控制，从油缸底部加油，避免了空气进入油缸。通过实验，证明该设计简单实用，便于操作。

6. 利用电控平移台实现了亚微米、大量程的系统标定。不需要额外的标定装置，直接将加载时水平放置的电控平移台竖直固定在高承载精密平移台上，再将试件固定在电控平移台顶端，并确保位于视场中心。然后通过软件界面控制电控平移台的步进电机进行 80 细分，每升高 $0.25 \mu m$ 保存当前图像，一共记录 10 幅，通过计算得到测量结果并进行多次曲线修正，得到较满意的 10 个平整的台阶状标定结果。同样，将 $0.25 \mu m$ 改为 $2.5 \mu m$ 和 $25 \mu m$ 进行标定，也得到了满意的结果。

7.2 今后研究展望

本论文的研究在一定程度上实现了预定的研究目标，但是无论在测量离面位移的数字散斑相关方法的理论研究方面还是在其应用研究方面仍存在需要深入研究的内容。未来需要进一步研究的内容如下：

1. 文中所用的数字散斑相关方法克服了以往光学测量中分析光测条纹时易损失光学信息的缺点，提高了测量精度。同时，该方法是通过获取物体表面随机分布的斑点或伪随

机分布的人工散斑场，通过比较变形前后物体表面的两幅数字图像直接获取位移和应变信息，为全场非接触的实时测量方法，且其设备简单，易于实现测量过程的自动化或半自动化。但该方法基于所选定的计算子区在变形前后不发生扭曲和旋转等变形的假定，这一假定在一定程度上降低了测量精度。为此，需要在数字散斑相关方法中进一步考虑计算子区的变形情况，这一方面的工作有待于今后进一步完善。

2. 文中所用的数字散斑相关方法中相关函数极值的优化算法，无论在精度上还是在速度上都可以得到进一步的优化。算法在精度上的优化可显著提高微小物体的面内和离面位移测量精度，而算法在速度上的优化可提高实验过程中计算机程序的实时性，从而观测到微小物体更细微、更及时的变化。

3. 文中在测量离面位移的数字散斑相关方法的硬件研发中，在投影方和采图方都引入了远心镜头来提高测量精度。但由于成像系统的景深和分辨率有限，在连续加载的图像采集过程中，使得图像质量下降或测试区域超出视场范围，从而影响测试范围与精度。因此，采用高质量的成像系统或优化的摄像机成像模型来分析摄影测量原理及误差将具有更实用的价值。

4. 文中提出的测量离面位移的数字散斑相关方法是散斑投影法和数字散斑相关方法的有机结合，与传统的相位测试技术相比，该技术无需处理条纹相位，因此大大简化了测试过程。但本文尚未对其与相位测试技术（如傅立叶变换轮廓法、相移法、窗口傅立叶变换法等）进行全面而细致的比较与取舍判断，因此还需要进一步深入研究并建立系统的评价标准。

5. 相比于其它的光学测试方法，该测量离面位移的数字散斑相关方法具有较强的环境适应性，因此可应用于工程现场。但如何进一步提高该方法的通用性和工程实用性，以解决MEMS领域许多亟待解决的复杂力学测试问题，将是一项具有重大工程应用价值和市场价值的任务。

攻读博士学位期间公开发表的论文

1. 刘雯雯, 戴宜全, 康新, 杨福俊, 何小元. 基于有限脉冲响应滤波器的数字全息零级像消除. 光学学报, 2008, 28(5): 856-859 (EI 检索)
2. **Liu Wenwen, Kang Xin, Dai Yiquan, He Xiaoyuan.** "Method for eliminating Zero-order image in digital holography". Journal of Southeast University (English Edition) 2009, 25(1):113-116 (EI 检索)
3. **Wenwen Liu, Xin Kang, Xiaoyuan He.** "Filter method used to eliminate the zero-order image". The International Conference on Experimental Mechanics 2008, SPIE (已录用) (EI 源刊)
4. **Wenwen Liu, Wei Wang, Renjun Xie, Xiaoyuan He.** "Nondestructive Testing of Expansive Soil by Digital Image Method". The International Conference on Experimental Mechanics 2008, SPIE (已录用) (EI 源刊)
5. **Wenwen Liu, Xin Kang, Xiaoyuan He.** "Zero-Order Image Elimination in Digital Holography". International Conference on Advanced Technology in Experimental Mechanics 2007(ATEM'07)
6. 刘雯雯, 王伟, 孙伟, 谢仁军, 何小元. 一种新的数字图像方法测量膨胀土下滑位移. 2007 年校庆研究生学术报告
7. 刘雯雯, 朱飞鹏, 史红健, 王子菡, 何小元. 基于栅线投影相关法的薄膜变形测量研究. 江苏省力学学会 2008 学术大会暨第四届苏港力学及其应用论坛
8. 孙伟, 何小元, 黄跃平, 徐振斌, 刘雯雯. 拉索模型模态参数识别的实验研究. 工程力学, 2008, 25(6): 88-93 (EI 检索)
9. 孙伟, 刘雯雯, 康新, 何小元. 显微干涉法在 MEMS 结构三维形貌测试中的应用. 计量学报, 2009, 30(4): 302-306 (EI 源刊)
10. Feipeng Zhu, **Wenwen Liu, Xiaoyuan He.** "Calculation of three-dimensional film deformation according to image changes". The International Conference on Experimental Mechanics 2008, SPIE (已录用) (EI 源刊)
11. Yiquan Dai, **Wenwen Liu, Xiaoyuan He.** "Multi-focus Image Fusion Based on Batch Digital FIR Filters". The International Conference on Experimental Mechanics 2008, SPIE (已录用) (EI 源刊)

致 谢

本论文是在导师何小元教授的悉心指导下完成的。

衷心感谢我的导师对我的淳淳教诲和悉心关怀，在我博士三年多里，他给予了我生活上、学习上无微不至的关心。自己取得的点滴成绩无不凝聚着导师的心血。导师国际化的视野，前沿而精髓的学术造诣，严谨勤奋的治学风格，都让我永志不忘，深刻影响着我日后的工作和生活。值此论文完成之际，谨向我敬爱的导师表示衷心的感谢和诚挚的祝福！

感谢周益春教授对本论文部分实验提供的巨大帮助和支持。感谢湖南湘潭大学材料与光电物理学院王子菡老师为本文的部分实验付出了大量的劳动和汗水，他们对实验的设计、试件的制备和系统的研制都给予了积极的帮助和指导，为实验的顺利进行打下了坚实的基础。在此向他们表示衷心的感谢！

感谢已毕业的师姐陈凡秀博士、孙伟博士和师兄王伟博士在校期间对我学习生活的关心和实验技能提高的帮助！

感谢师弟朱飞鹏博士、史红建博士、戴宜全博士、白鹏翔博士为我的实验付出的劳动！

感谢杨福俊副教授、董萼良副教授、顾成军副教授、蒋明老师、郑翔老师、姜益军老师、蓼东斌老师、胥明老师给予的关心和帮助！

感谢我的舍友在生活上和学习上给予的关心和帮助！

感谢我的丈夫曹振华先生及其父母对我学业的支持和生活上的照顾！

感谢我的父母对我的养育之恩，这十几年的求学生涯给他们带来了太多的牵挂和期盼，但他们仍然不停地支持我，关心我和鼓励我，是他们的关怀和支持才使我遇到困难的时候不气馁，一直走到今天这一步。衷心祝愿我的父母身体健康！万事如意！

最后祝愿所有关心和帮助过我的人生活幸福！

东南大学土木工程学院

刘雯雯

2009年6月1日