

国外力学研究中测量技术的一些动态

中国科学院力学研究所九室测量小组

测量技术在基础理论研究和工程应用中是十分重要的一环。经验证明,要把理论分析同实验技术以及测量技术结合起来,才能更好推动各学科研究的发展。60年代以来,随着电子学、光学(特别是激光技术)的发展,在力学的实验研究中,测量技术有了不少提高。现在对国外一些测量技术的动态作一个简要的粗浅介绍,希望能作为有关方面进行深入调查研究的参考。

文中介绍了一些电测法,但更偏重于光学技术方面。有关电子和无线电技术、显示记录设备、讯号和数据处理等,虽然也是力学测量技术中不可缺少的重要组成部分,但因时间关系没有来得及整理出来。

高温应变的测量

在电阻丝式应变计方面,中温(300—400°C以下)的已经成熟。更高温度下使用的应变计,国外曾进行过长期的研制,如美国于1961年进行了研究高温应变计性能的方法和技术的试验,可达到850°C,并在1964年定出了检验高温应变计的试验方法和性能评定的规范。关于改进应变计的结构,以获得良好的温度补偿或动态特性的工作,近几年来仍有报道^[1]。在1965—1966年时期,英国和日本均已生产了用于较高温度(400—500°C)的应变片和粘接剂,用于800°C的焊接式应变片也有商品供应。电容式高温应变计近年来也在研究,有文章报道,静态温度可达800°C,瞬态温度可达1300°C。这种应变计的问题是测量电容比测量电阻困难得多,目前的技术水平测电容的变化量可低至0.02微微法,相当于50微应变,对2000微应变量程来说,误差为2.5%。

此外,美国国家标准局(NBS)发展了一种电容式的引伸计^[2],温度可达1500°C,升温率可达55°C/秒,应变分辨达0.25微米,用作实验室标准。在激光技术没有发展以前,本来就使用光学引伸计作为温度较高时的测量标准。到1967年有使用激光引伸计来测量白炽温度下的试件应变的文章发表。

高应变率的动态大变形的测量

测量大的动态载荷产生的应变,仍然是应变测量中的困难问题之一。由于塑性波的传播,测量必须在很小的间距内进行。若用固定在试件上的元件测量,则其响应可能与试样本

身的响应不同。因此,这是一般应变计所不能解决的,必须加以研究。借助于光学办法可以避开一些困难。已经使用的有衍射光栅法和激光干涉应变计^[3](在试件上刻两条间距很小的浅槽,激光自其上反射以后形成干涉条纹,可以从中计算变形)。

全息照相干涉学用于应变分析^[4,5]

进行应变分析是全息照相的重要用途之一,它能以干涉条纹的形式记录来自物体的光的相位和振幅,从而把物体各点形状的细节都反映到干涉条纹图中。物体表面的微小变形或位移足以使干涉条纹图引起显著的改变,因此可以从分析干涉条纹图来进行应变分析。这种方法可以给出应变物体表面所有点的位移场的完整的量度,给出形象化的图型。它是非接触法的测量,不会由于机械接触而影响试件。它同一般光的干涉法相比,优点在于不需要特别制备的供反射用的光学表面。现阶段存在的问题是:虽则产生的干涉条纹图反映试件的变形或位移,但是计算这些图型的含义却并不总是容易的,由图型定量地分析应变是复杂的,这是因为以图象形式记录下来的大量数据必须与试件的形状和位置联系起来分析。在原理上,若在全息照相定位时十分准确,对条纹分布的测量也足够地精确,则对物体表面的变形能进行三维的定量确定。但目前还有一些困难,有些文章提出了一些分析方法。

正如激光用于光弹性学中一样,由于曝光时间是毫微秒量级的,因此可使固体中的应力波事实上象是固定不动的一样。这样便可以使用脉冲激光器进行瞬态全息照相。所以全息照相也是进行动态研究的有力工具。

就近几年来发表的文章来看,把全息照相用于固体力学基本研究的有:

1. 圆筒在内压力的作用下的应变测量。
2. 梁中的横向应力波的传播的测量。
3. 板中的横向应力波的传播的测量。
4. 轴向应力波引起的径向变形的测量。
5. 复合材料板在静态或动态下的应力分析。

6. 在断裂力学中用来研究裂纹前缘附近的应变场,研究这一区域的塑性变形已使用了全息照相^[6]。

用于工程性研究的如分析透平叶片的应变,检查用X光很难探查的隐藏在内部的微细伤痕,测试轮盘、叶片的振型等等。在振型的观测中,全息照相法比沙型分析法或压电探头探测法要快速得多。英国罗尔斯-罗斯公司生产一套用于振型检测和静挠度应变分析的“时间平均”全息摄影装置,它作一次振动分析包括完成定量的数据摄影只需15分钟。

激光技术在光弹性学中的应用

60年代中期以来,激光器和激光应用的发展,使传统的光弹性学的发展获得了新的支持。激光技术应用到光弹性学中的文章大量发表。这些文章主要涉及两个方面:一是用激光器来代替原来作光弹性实验的光源^[7]。二是把全息照相技术应用到光弹性实验中,把全息照相干涉学和光弹性学结合起来,这就为实验力学提供了十分有力的武器^[8]。由于激光器的光很强而且集中,又容易获得平面偏振光,所以用它来代替原用的光源(如汞弧灯和脉冲氙灯)是很合适的。特别是用于光弹性的散射光法和高速动态工作时,它比通常的光源要优越

得多。激光器用于散射光法时可以高效率地转换成光的薄层。红宝石固体激光器的光强比脉冲氙灯的高好几个量级，而脉冲持续时间则又可比氙灯短得多，可达几十毫微秒到 1 毫微秒。这种性质使红宝石激光器很适于用作分析高模数光弹性材料应力条纹传播的光源，亦即适于用作高速动态应力分析中的光源。有人已获得了 0.2 微秒曝光时间的图型，这一曝光时间对“固定”塑料中的应力波是足够快的。把激光器用于光弹性的散射光法，也为进行动态光弹性、光热弹性、光塑性和多种材料的复合模型等类型的三维光弹性试验提供了可能。在此以前，这些类型的三维光弹性试验使用应力冻结法或弱光源时的散射光法并不能很好胜任。

在动态光弹性中用脉冲激光器作光源，还需相应地解决对单次过程进行多次拍摄的高速记录照相问题。因此，在高速照相和胶片方面，要求有相应的发展。

在最近几年，有人在应用全息照相术于光弹性测量方面做了一些工作。用全息照相可以得到光弹性应力条纹、等倾条纹等，所得照片储存了三维信息，而在设备上则可免除光弹性偏振光仪上的很多部件，并简化照相的实验安排。

用激光干涉法研究冲击波对固体的作用^[9]

用爆炸产生平面波，或用平板的冲击在固体中产生平面应力波。通常用两种方法来研究这种应力波的传播的形状。一是测量试件自由表面的速度历史，另一是使用应力传感器以测量传感器和试件表面之间的应力历史。激光技术的发展，使光学干涉法用于自由表面运动的测量技术具有现实性。现在已经有了实用的速度干涉计和位移干涉计。在美国，现在这种仪器和技术的典型指标是能提供 3% 的速度分辨和 1—5 毫微秒的时间分辨，最近已被发展用于地下核爆炸计划的冲击测量。

爆炸冲击波的传播速度和压力测量

在与爆炸有关的力学课题的研究中，冲击波的传播速度和压力随时间变化的动态过程是十分重要的数据。由这些数据可得知压力在距离和方向上的分布情况，以确定爆炸的威力和有关结构所需的抗爆能力。

在水下爆炸测压方面，由于有关课题和军事技术紧密有关，所以国外的重要的近期的资料保密较严，很少看到。公开发表的只是点滴的结果报道和很早期的工作的报告。较早就使用的是利用钛酸钡或电气石的压电效应的元件，在性能上还存在着温度影响、峰值振荡、弛张效应等需要改进。元件强度也需要提高以延长使用寿命。

在大气中测量爆炸冲击波的问题，只要测量点与爆炸源相距不是太近，因而不处于高温、高辐照等恶劣条件下，同样可用压电传感器测量，主要的工作是在元件结构和安装上进行试验，以取得抗机械和电气的干扰的能力。在环境条件很严酷的情况下，例如在接近爆炸源的大气中测压，元件的坚固性和抗干扰能力，以及进行远距离测量的需要就成为突出的问题。1967 年美国有人完成了一套可用于测量地下核爆炸所产生的大气冲击波的测量系统^[10]，它以可变阻抗为元件，配以长电缆联结的载波调制设备。这一系统的主要优点是可以在严酷的温度、辐射、冲击和电—磁脉冲的环境中使用，因此，它可以在尽量接近爆炸中心的地点进行测量。其上升时间响应约为 2 微秒。元件结构坚固，可以经受要测量的超高压，现在实

际达到约7000大气压。这种测量系统由于可变阻抗与高频（1兆赫）载波相结合而具有低阻抗频带特性，因此可以与直至几千呎的任何长度的同轴电缆相匹配进行远距离的测试。

与上述方法类似的一种是用以测量地下冲击波的传播速度的“电振荡”法。1964年有资料发表，美国地下核试验中使用埋入地下的同轴电缆作传感器，它的电感是与之相联的振荡器的电感的组成部分。当压力波沿电缆传播时，渐次使电缆破坏，因此改变了电感量，振荡器的频率也随之改变。测出频率随时间的变化，再测出未被破坏时电缆长度与频率的关系，就可以确定冲击波的瞬时位置和传播速度。

岩石和土中的冲击波的测量则仍是一个困难的问题。已经使用的主要的传感器的信号都是和元件本身的刚度关联着的。它所测得的是它对岩土中压力的反作用。这种反作用既可表现于元件敏感部分的变形（如膜片的挠曲或晶体片的厚度变化），又可表现于抵抗变形的反作用力。因此第一个困难是如何解释元件的信号，测得的是应力还是应变，这是在测试所依据的原理上存在的问题。直到最近，国外的有关研究者还在对这一疑难进行争论。其次，由于岩土的应力—应变关系既非线性的，又非单值的，元件的刚度和被测物的刚度的比率很难保持常数，因此，元件的输出信号与岩土中应力的关系就不是定常的函数。这也是岩土中应力测量的一个固有的困难。在土壤中元件的刚度虽然和土的刚度不匹配，但土对应力波的时间滞后较大，所以对土中测压的元件的动态要求一般说来是能够满足的。1967年美国IITRI为测量沙、土或沙土混合试样中的应力波的传播而研制了两种测应力的元件和一种测应变的元件^[11]。测应力的元件是压电式的（锆钛酸铅）和半导体压阻式的（频率响应达60千周）。测应变的元件是利用差动变压器的原理。这些元件都用在由激波管产生的几百磅/吋²至1000磅/吋²的冲击载荷试验中。在岩石中测应力波的工作更为困难和显得薄弱，这方面的工作从测试原理到技术都需要继续开展研究。

用激光多普勒—散射原理 测量流体速度和研究湍流^[12,13]

用热线风速计测流体速度是传统的成熟的方法。在气流速度较高的场合（如500米/秒，1大气压下）或在液体中测速时，则使用热膜式的探头，它比热线探头坚实而又可用于导电介质。近几年来，国外对各种场合使用的薄膜探头有较多的研制。现阶段，研制热线（热膜）风速计的工作主要是在尽可能小型化，以及在温度补偿、随机信号的分析 and 处理等电子线路方面。

随着激光技术的发展，60年代中期以来，逐渐发展了激光多普勒—散射测速技术，为研究流动特别是湍流现象，提供了有价值的光学工具。它的基本原理是：当激光被流体中的微粒散射时，散射光的频率相对于入射光的频率会发生正比于微粒速度的偏移，若微粒小到能追随流体的速度脉动，则测出这种频率偏移，就能测出流体速度。它具有热线风速计所没有的某些优点，如校正简单，特性很少变动；对介质没有扰动；不受高温和介质侵蚀的影响等。它的空间分辨可做到比热线风速计为佳（十几微米到几十微米），测速范围也很宽（ 10^{-3} 厘米/秒到 10^4 米/秒）。由于它的这些优点，近几年来，这种仪器和技术已成为很多力学、光学和电子学领域内的工作者所热心研究的课题。但是作为光学方法，要求流体介质能透光，并需包含适宜的散射微粒。微粒太小，会因布朗运动引起误差，微粒太大，又会有速度滞后，而且无法测出散射微粒和气流的对速度，这些是它的缺点。所以它可以与热线

风速计相辅使用,各自发挥其优点。目前,激光多普勒风速计很多是属于实验室装置阶段的,但有几家厂商(如丹麦 DISA 公司)已生产了包括信号处理电路在内的商品仪器(速度100米/秒)。这种测试技术已用于管道和漕路中层流和湍流的研究,用于高速风洞的速度测量(马赫数达到6),用于高温喷气的湍流的测量等。1971年在美国曾有一次学术会议^[14],专门讨论它的理论、技术和在研究流动和湍流中的应用。

除了流体力学中的应用之外,基于多普勒效应,还可用激光测位移、加速度、振动等,据报道,在某些实验系统中,位移灵敏度可达0.1微米。

观察高速流动的形象化方法

在高速流动中,气流所产生的激波、气流分离、密度变化等引起折射率的不均匀。在气动试验中常用的纹影照相法和阴影照相法就把这种不均匀以光的强弱或条纹的形式反映出来而显示整个流动的特征。现在用激光器作为光源,能使这些技术提高一步,特别是使用大功率的脉冲激光器,更能进行瞬态的研究。在过去,纹影技术大都用于定性观察。现在已有进行定量校准和使用的文章发表^[15,16]。用全息照相研究流动则是新的方法,但是正如在纹影法和阴影法中一样,它所依据的也是折射率的不均匀。从已发表的资料得知,此法已用于高速流场^[17]和弹体绕流问题^[18]等研究中。

气动试验的压力测量元件

在气体动力学的试验中,压力也是一个重要的参数,而且往往需要测量瞬态的压力。在有些设备中则还需在高温环境下测量压力。由于常温瞬态压力的测量用压电法早就可以解决,所以近年来有些研究工作的趋向,是在扩大温度测量范围和微型化方面探求新的元件。有人比较了几种类型的压力传感器的高温限度^[19],认为电感式的大约为1000°F,电容式的可更高,但加工困难,电阻丝式的高温蠕变问题很难解决。1972年8月,有关方面曾与美籍中国学者李诗颖座谈电容式传感器问题^[20],他认为由于工艺、材料和电子组件的进展,电容式压力传感器在低压和较小的加速度测量方面,呈现出更多的优越性。在元件的微型化方面,有人使用半导体应变计于很细的应变管中,制成了注射针大小的元件^[21]。

等离子体和电离气体的诊断和测量^[22,23]

光学干涉的诊断方法早已完善地建立起来。微波技术也已广泛地用于观察等离子体,其优点是时间响应快。

随着激光技术的发展,用光学方法诊断等离子体的工作有了很大的进展和提高。除了光学干涉法以外,现在又有散射光法、法拉第旋转法和全息照相等方法可供使用。

首先是在常用的干涉仪方法(如马赫-策恩德尔干涉仪)中使用激光器。这对于稠密磁等离子体的电子密度的定量确定很有价值。已用于测量由激波管产生的或强激光诱发的等离子体的冲击压力前沿和电子密度。在电子密度低于 $\sim 10^{14}$ /厘米³时,广泛采用微波干涉仪测量电子密度,但是高于这个量值时,就需采用红外的或可见光的干涉法。

在激光器发明以前,还没有可以有效地利用的被电子散射的光源。现在,利用电子对激

光产生的汤姆孙散射,已成为等离子体的诊断的手段之一。这种方法对等离子体的扰乱小,时间分辨率高(可达 ~ 10 毫微秒),空间分辨率高(可达 ~ 0.1 毫米³)。在一定条件下,在测定散射光的谱线分布以后,可以得知电子密度、电子温度和离子温度以及其他信息。

高密度、高温和高瞬态的等离子体会产生强的连续分布的辐射,且等离子体很不均匀和很紊乱。通常的诊断方法如使用一般光源的光学法和微波法就不再适应。但是,光波通过处于磁场中的电离气体传播时,和微波一样地遵从麦克斯韦方程,因此可以把微波诊断中的两个概念扩展到光波波长范围。这就出现了充等离子体的耦合光学谐振腔的概念,以及激光束通过磁等离子体传播时其偏振平面发生法拉第旋转的概念。前者是充等离子体的微波腔的扩展,由于等离子体中的电子对辐射的分散而使腔的谐振频率产生偏移,这种偏移与电子密度有关,因此可用于诊断电子密度。后者所产生的旋转角正比于磁场和电子密度,因此和其他方法相配合,可用于诊断磁场或电子密度。

纹影照相、阴影照相和全息照相的技术,也可用以形象化地观察等离子体。全息照相干涉法提供了对折射性质进行二维测量的新方法,并有希望解释三线的变化。

运动物体某些参量的测试

轴的应变、活塞温度、下落物体的加速度等运动物体的力学测量,比在静止物体上进行要困难得多。主要问题是需研制新型的测量元件和特殊的讯号传输装置。此外,和许多其他测量一样,需要多点快速数字记录仪器。

1. 利用新材料研制体积小、重量轻、机械强度高、讯号大的测量元件:近代物理学关于铁电体、半导体的广泛研究和新型材料种类的日益增多,有可能研制满足上述要求的测量元件,例如压电陶瓷具有制造简单、耐热防潮、改变材料成分比较容易获得要求特性等特点,因此制成的压力计体积小、频率响应高。铁电体的介电系数高达几千,电容温度系数最高可达 $30\%/C^{\circ}$ ^[24],用它作介质可以获得热惯性小、讯号大的温度敏感元件。半导体材料制成的应变片、热敏电阻,也均具有体积小、讯号大等优点。尤其是热敏电阻可以做成各种形式,最小的热敏电阻连同外壳,直径小于 0.5 毫米,使用方便,在 $300^{\circ}C$ 以下范围内越来越多的代替热电偶。关于元件的互换性、稳定性以及测量温度的提高等问题,也在逐步取得解决。

为配合数字化的记录仪器,需要线性的测量元件。但铁电体、半导体等制成的测量元件往往具有很强的非线性。因此设计线性敏感元件和合适的补偿网络,也是研制元件的一个方面^[25]。

2. 讯号传输装置:接触式引流器具有结构复杂、寿命短、使用范围有限制等缺点。随着电子技术的发展和微型器件的生产,采用无线电收发报机形式来传送讯号是可取的^[26]。这种短距离的“遥”测工作状况恶劣,经常伴随着电火花、高温等外界干扰,需要在线路中特殊解决。

3. 数字化的多点快速记录仪器:数字计算机技术的发展,使得越来越多的仪器趋向于数字化^[27],这将大大提高仪器精度和有可能同时记录几个快速过程。大量使用数字固体电路,从而可减小仪器体积,增加仪器的可靠性。运动物体的讯号发送装置由于电源和容积的限制,讯号不能很大,因此又对仪器提出特殊要求。

某些运动物体的测量可以利用光学方法,其优点是运动物上可以不装附加物,但受密闭

容器(影响光的传导)和机械冲击等的限制。近几年高温光导体和电子元件微型化的发展有可能可靠地用于测量航空发动机叶片温度^[28],可测叶片的平均温度,也可测最高温度,最高可达1100℃。

参 考 文 献

- [1] J. M. Hudson, High temperature dynamic strain gage evaluation system, *Advances in Instrumentation*, V.25, Part II.
- [2] R. L. Bloss, An extensometer for use as laboratory standard at temperatures to 1500°C, *Advances in Instrumentation*, V.25, Part II.
- [3] W. N. Sharpe, The interferometric strain gage, *Proc. SESA*, 25, №1 (1968).
- [4] Matt Lehmann, *Holography—Technique and Practice*, Focal Press Limited(1970).
- [5] W. G. Gottenberg, Some application of holographic interferometry, *Proc. SESA*, 25, №2 (1968).
- [6] T. D. Dudderar, Application of holography to fracture mechanics, *Proc. SESA*, 26, №1 (1969).
- [7] C. E. Taylor, et al., Application of lasers to photoelasticity, *Proc. SESA*, 23, №1 (1966).
- [8] R. O'Regan and T. D. Dudderar, A new holographic intarferometer for stress analysis, *Proc. SESA*, 28, №2 (1971).
- [9] L. M. Barker, Laser interferometry in shock-wave research, *Proc. SESA*, 29, №1 (1972).
- [10] W.A. Holmgren and P.K.Churck, Shock-pressure instrumentation for severe-environment applications, *ISA Transactions*, 7, №3 (1968) .
- [11] D. Hampton and W.B. Truesdale, Stress and strain gauges for use in soil dynamics research, *ISA Transactions*, 7, №3 (1968) .
- [12] J.W.Foreman, et al., Fluid flow measurements with a laser Doppler velocimeter, *IEEE J., Quantum Electronics*, QE2, №8 (1966).
- [13] E. R. Pike, D. A. Jackson and P. J. Bourke, Measurement of turbulent velocities from the Doppler shift in scattered laser light, *J. Scientific Instruments, Series 2*, 1, №7 (1968) .
- [14] *Optics and Laser Technology*, 3, №3 (1971).
- [15] J. Kiefer, R. Lutz, Simple quantitative schlieren technique of high sensitivity for shock tube densitometry, *Phys. Fluids*, 8, №7 (1965).
- [16] J.B. Brackenridge, J. Peterka, Criteria for quantitative schlieren interferometry, *Appl. Optics*, 6 (1967).
- [17] Laser Holographic Inteferometry Study of High-Speed Flow Fields, AIAA 4th Aerodynamic Testing Conf. Cincinnati (April 28—30, 1969).
- [18] *J. Appl. Phys.*, 37, 642—649 (Feb. 1966).
- [19] Pressure Measuring Techniques Feasibility Evaluation, AD-295483 (Dec. 1962).
- [20] 美麻省理工学院教授李诗颖在京学术活动材料(内部资料)(1972).
- [21] Takewo Chiku and Isemi Igarashi, Subminiature pressure transducer—An application of semiconductor strain gages, *ISA Trans.*, 10, №1, 35(1972) .
- [22] A. A. Dougal and O. M. Friedrich, Interaction of optical-maser beams with ionized gases, *ISA Trans.*, 7, №4 (1968).
- [23] G. M. Malysnev, Plasma diagnostics by light scattering on electrons, *Soviet Physics—Tech. Physics*, 10 (1966).
- [24] Измерительная Техника, №9 (1971).
- [25] *J. S. I.*, 42, p.611 (1965).
- [26] *Instrumentation Technology*, 17, 2, 55—60 (1970).
- [27] Digital Thermometer N70—28157.
- [28] S. A. E. Prepr. s. a. №720159.