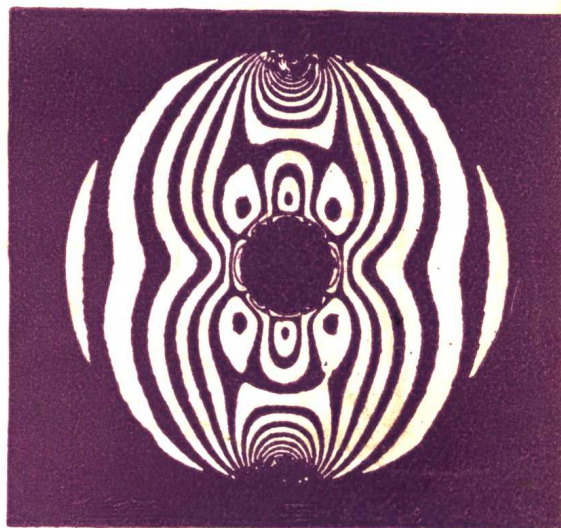




赵澄清 主编  
石 沉

# 实验应力分析



科学出版社

# 实验应力分析

赵清澄 主编  
石沅

科学出版社

1987

## 内 容 简 介

力学理论源于实验，理论正确与否也靠实验来验证。书中主要介绍电测法和光测法等基本的力学实验方法，并对这些方法的最新发展和状况作了介绍，对一些新方法如全息干涉、散斑、云纹、焦散线以及动态光弹性等也作了简介。书中对实验方案应如何选择及实验前后应注意事项、有关随机数据分析的概念及手段、应力应变测试数据的分析处理、由实验数据如何绘制成图表和建立经验公式等均作了详细阐述。

本书尽量避免深奥的数学推演，着重介绍应用方面和目前使用情况。该书通俗易懂，深入浅出。可供力学工作者、有关院校师生及对实验应力分析有兴趣的隔行科技人员参考阅读。

## 实 验 应 力 分 析

赵 澄 沉 主编  
石

责任编辑 徐一帆

科 学 出 版 社 出 版

北京朝阳门内大街137号

中国科学院印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

1987年9月第一版 开本：850×1168 1/32

1987年9月第一次印刷 印张：11 3/8 插页：1

印数：0001—3,850 字数：295,000

统一书号：13031·3654

本社书号：4981·13—2

定价：3.30元

## 前 言

设计一个构件或结构物时，必须考虑它的强度、刚度和稳定性等问题，以求得在安全条件下的最大经济效果。对构件及结构物的计算，已经建立了材料力学、结构力学、板壳力学及弹塑性力学等理论，在解决工程实际问题中起着重要的作用。但是，这些学科的某些基本理论，不少是建立在若干简化的假设上的，而这些假设往往以大量实验（也包括实践）资料归纳总结的结果为依据。判断理论计算结果是否正确，同时又需用实验和实践来检验。尤其对于几何形状较为复杂的结构以及应力集中等情况，由于数学上的困难有时几乎无法进行理论分析，但用实验手段来解决往往显得很方便和有效。特别对于当前许多新的技术领域，例如在非线性、非匀质材料、复合材料等的分析研究中，建立其基本理论，以反映其内在规律的本质，更需要通过大量实验资料的积累来完成这一重大任务。加之近代工业的发展，在很多尖端技术部门，如航空工业、宇航技术、原子能工业等部门，在方案比较、设计和改型中，碰到的零部件或结构物（如飞机的起落架、导弹压力容器、反应堆承力结构等），除几何形状越来越复杂外，载荷情况和工作条件（高空、宇宙、地下、水下、高温、高压、强磁场、强辐射等）也越来越多样，致使理论计算无能为力，因而用实验分析就显得更重要，甚至是唯一的有效方法和手段了。通过实验，发展和建立了理论，反过来，工程实际又推动了实验发展，从而又创建出新的理论。

实验应力分析是利用实验的手段对构件或结构物进行应力、应变分析，它是基础理论和工程技术相结合的一门学科。实验应力分析的手段很多，有光测法、电阻丝应变片测量法、脆性漆层法、模拟法以及声发射等等。目前，发展得较快又较普遍的实验法

是电测法和光测法两大类。本书将分别介绍这两方面的内容。

电测法是借助于电子仪器，将应变这一非电量，转为电量的一种测试方法。它可以用于现场测定和模拟测定。现场测定是完全在生产实际的真实客观情况下进行的，因此，测得的数据反映了构件内应力分布的实际情况和规律，这种测试法比其他方法更直接，这是电测法的最大优点。其次，电测法可用于各种复杂环境下的测量，如高温、高压、液中、混凝土中、旋转物体等等情况下的静、动态应变测量，还可用于远距离遥测，并能自动记录和自动分析处理数据。根据需要可制成各种传感器，测定多种力学参量，如力、压力、位移、速度和加速度等等。可是，用电测法仅能获得应变片所在位置处的应变平均值，对了解应力全貌及应力集中情况尚有不足之处。电测法也常用于结构的模型实验，利用相似理论可解决不少力学上的问题。由于模型可以比实物小很多倍，且可用不同的材料，因而造价低廉，所以在结构选型和设计阶段，常以模型实验作为补助手段，帮助分析。这些就构成为本书第一篇的内容。

光测法是一门进行应力、应变和位移分析的实验技术学科，其实质是应用光学的基本原理，以实验方法去研究物体中的应力、应变和位移等力学问题。这个方法是本世纪三十年代初期兴起的，当时只限于在材料的弹性范围内分析物体内的应力和应变状态，故称光弹性法。鉴于这个方法首先得到的力学未知数是应力分量，考虑到与弹性力学相呼应，故本书称这部分内容为光测力学应力法。这是光测法中最原始的部分，即本书中的第二篇的内容。这个方法的最大优点是能了解弹性体(结构物)内应力分布的全貌，特别能方便地获得边界上的应力，而工程上构件内的最大应力，往往就发生在构件的边界上，所以用光弹性法来解决这些问题是非常有利的。并且，光弹性法能清晰地反映出应力集中的情况。当对结构设计进行方案比较时，采用光弹性法也比较合适。

六十年代初，激光器的出现极大地推动了光弹性法。目前，这个方法早已超出了弹性的范围而应用于非弹性体中，并且使研

究的范围迅速扩大，增添了许多新的内容。不仅在以测应力为主的光弹性法的范围内，迅速兴起了全息光弹性法和散光光弹性法；而且，还超越光弹性法的范畴，出现了以测位移为主的全息干涉法，散斑法以及云纹法和焦散线法等。我们把后面这些以测位移为主的方法称为光测力学位移法，也称现代光测力学法，这就是本书中的第三篇内容。

本书还介绍了动态光弹性法，热光弹性法和光塑性法等，最后介绍了光测力学法在断裂力学中和生物固体力学中的应用专题。这就是本书中最后一篇特殊光测力学法和专题应用的内容。

编写时作了具体的明确分工：第一、二、三、四章由石沅、王德林编写，并由石沅统编电测；第五、六、八、十、十九章（部分）由赵清澄编写；第七、十五章由方如华编写；第九、十七章由张祖巡编写；第十一、十九章（部分）由丁祖泉编写；第十二章由曹正元、李伊凡编写；第十三章由邵一心、郭孔屏编写；第十四、十八章由顾绍德编写；第十六章由张熹编写；并由赵清澄统编光测。在编写过程中，浙江大学曹鸿生、杨槐堂老师分别对动态光弹性法、焦散线法提供了资料，对此，特致以谢意。全书插图由张林春、邵一心绘制。部分照片由周培英摄制。

总之，实验方法的直观性和可靠性，使它在产品设计、定型、方案比较、规范的制定、事故的分析等等工作中有着显著的现实意义，为很多工程技术人员所欢迎。目前也有很多产业部门进行着这方面的研究工作。

近年来，虽然电子计算技术及计算力学理论的迅速发展解决了不少问题（这本来是件好事），可是，却因此而引起某些人对实验应力分析的排斥，曾提出是否可用电子计算机全部取而代之。当然，事实的发展完全否定了这种片面性的看法。任何一种方法或理论不可能是十全十美的，既有自己的长处，又有自己的局限性。它们在发展中都应相互促进，彼此取长补短，共同为解决工程问题服务。相反，应该尽快把电子计算技术直接引用到实验测试中去，使设备自动化，数据采集和处理自动化，把电子计

算技术、计算力学、弹塑性力学和实验力学有机地结合起来，这是当前实验力学工作者的一项重大任务。相信在今后的工程实践中，必将进一步促进这些方法的合作和发展，在我国实现四个现代化的进程中，发挥更大的作用。

# 目 录

前言

## 第一篇 电阻应变测量

<b>第一章 试验组织与方案考虑</b> .....	( 1 )
§ 1-1 实物试验和模型试验 .....	( 1 )
§ 1-2 载荷系统的考虑 .....	( 4 )
§ 1-3 试验组织和安排 .....	( 8 )
§ 1-4 试验资料的分析与总结 .....	( 11 )
<b>第二章 电测的基本原理和应用</b> .....	( 12 )
§ 2-1 电阻应变计及其工作原理 .....	( 13 )
§ 2-2 静态应变测量 .....	( 22 )
§ 2-3 动态应变测量 .....	( 29 )
§ 2-4 特殊条件下的应变测量 .....	( 36 )
§ 2-5 几种应变式传感器 .....	( 44 )
<b>第三章 测点布置</b> .....	( 50 )
§ 3-1 概述 .....	( 50 )
§ 3-2 应变分析及应变计方位 .....	( 51 )
§ 3-3 布点原则和实例 .....	( 58 )
<b>第四章 实验数据的处理</b> .....	( 72 )
§ 4-1 量测值的误差 .....	( 72 )
§ 4-2 量测数据的处理 .....	( 83 )
§ 4-3 量测数据的作图法 .....	( 93 )
§ 4-4 经验曲线与经验公式的选择 .....	( 97 )

## 第二篇 光测力学应力法 (光弹性法)

<b>第五章 平面光弹性</b> .....	(107)
------------------------	-------



§ 5-1	基本概念	(107)
§ 5-2	光弹性仪	(110)
§ 5-3	平面光弹性的应力-光学定律	(113)
§ 5-4	平面受力模型在平面偏振光中的光弹效应	(116)
§ 5-5	等差线	(120)
§ 5-6	等倾线	(124)
§ 5-7	剪应力差法	(126)
§ 5-8	求主应力和法	(133)
§ 5-9	计算对称截面上的应力——柯克、菲隆算法	(135)
<b>第六章</b>	<b>模型材料和三维冻结切片法</b>	<b>(138)</b>
§ 6-1	环氧树脂平板材料	(138)
§ 6-2	聚碳酸酯平板材料	(139)
§ 6-3	三维光弹性模型	(140)
§ 6-4	材料的冻结性能及热光曲线	(142)
§ 6-5	三维光弹性的应力-光学定律	(144)
§ 6-6	自由表面应力测定	(147)
§ 6-7	三维剪应力差法	(151)
§ 6-8	三维光弹性的又一种分析法——连续切片法	(154)
<b>第七章</b>	<b>光弹性贴片法</b>	<b>(159)</b>
§ 7-1	概述	(159)
§ 7-2	反射式光弹性仪及其光路布置	(160)
§ 7-3	光弹性贴片法的基本原理	(162)
§ 7-4	贴片的主应变(主应力)分离	(166)
§ 7-5	光弹性贴片材料	(169)
§ 7-6	光弹性贴片法中的几个修正系数	(170)
§ 7-7	光弹性贴片法在工业中的应用	(172)
<b>第八章</b>	<b>散光光弹性法</b>	<b>(174)</b>
§ 8-1	一般概念	(174)
§ 8-2	光的散射	(176)
§ 8-3	光在双折射介质中的散射	(177)
§ 8-4	散光法中的应力-光学定律	(180)
§ 8-5	散射条纹级次判别	(182)
<b>第九章</b>	<b>全息光弹性法</b>	<b>(187)</b>

§ 9-1	概述	(187)
§ 9-2	全息照相的基本概念	(188)
§ 9-3	全息光弹性实验设备和技术	(190)
§ 9-4	全息光弹性的基本原理	(193)
§ 9-5	等和线与等差线的分离	(195)
<b>第十章</b>	<b>相似原理和量纲分析简介</b>	<b>(198)</b>
§ 10-1	概念	(198)
§ 10-2	相似原理简介	(199)
§ 10-3	由关系方程建立相似条件	(201)
§ 10-4	量纲分析	(203)
§ 10-5	$\pi$ 定理简介	(208)

### 第三篇 光测力学位移法

<b>第十一章</b>	<b>全息干涉法</b>	<b>(212)</b>
§ 11-1	概述	(212)
§ 11-2	基本的全息干涉法	(214)
§ 11-3	全息干涉法位移测量的实验装置和技术	(215)
§ 11-4	全息干涉条纹解释技术	(217)
§ 11-5	用ZF法和FC法作位移定量分析的基本方程	(220)
§ 11-6	全息干涉法作位移定量分析的实例	(225)
§ 11-7	全息干涉法中的几个问题	(232)
<b>第十二章</b>	<b>散斑法</b>	<b>(235)</b>
§ 12-1	概述	(235)
§ 12-2	单光束散斑干涉法(散斑照相)	(235)
§ 12-3	双光束散斑干涉法(散斑干涉)	(242)
§ 12-4	散斑剪切干涉法	(245)
§ 12-5	其它有关技术	(248)
<b>第十三章</b>	<b>云纹法</b>	<b>(251)</b>
§ 13-1	概述	(251)
§ 13-2	云纹条纹的形成	(251)
§ 13-3	云纹条纹的级次	(254)
§ 13-4	云纹条纹与应变的关系	(257)
§ 13-5	栅线的构造及其使用	(259)

§ 13-6	栅线的衍射特性	(260)
§ 13-7	云纹照相法	(263)
§ 13-8	影象云纹法	(265)
<b>第十四章</b>	<b>焦散线法</b>	<b>(269)</b>
§ 14-1	概述	(269)
§ 14-2	焦散线法的物理基础	(270)
§ 14-3	焦散线的构成原理及其初始曲线	(272)
§ 14-4	焦散线法在平面问题中的应用	(274)
§ 14-5	焦散线法在断裂力学中的初步应用 (求 $K_I$ )	(275)
§ 14-6	实验光学系统	(277)
§ 14-7	补充两个公式的证明	(277)

#### 第四篇 特殊光测力学法和专题应用

<b>第十五章</b>	<b>动态光弹性法</b>	<b>(283)</b>
§ 15-1	概述	(283)
§ 15-2	弹性应力波及材料的动态特性	(285)
§ 15-3	动态记录方法	(290)
§ 15-4	动态资料的分析	(292)
§ 15-5	动光弹性的应用	(293)
<b>第十六章</b>	<b>热光弹性法</b>	<b>(295)</b>
§ 16-1	概述	(295)
§ 16-2	相似关系	(296)
§ 16-3	三维热光弹性夹片法	(298)
§ 16-4	热光弹性表面贴片法	(300)
§ 16-5	全息热光弹性	(301)
<b>第十七章</b>	<b>光塑性法</b>	<b>(305)</b>
§ 17-1	概述	(305)
§ 17-2	实物光塑性法	(307)
§ 17-3	光塑性的相似模拟条件	(308)
§ 17-4	模型光塑性法	(310)
<b>第十八章</b>	<b>光测力学法在断裂力学中的应用</b>	<b>(317)</b>
§ 18-1	概述	(317)
§ 18-2	光弹性法测定应力强度因子 $K_I$	(318)

§ 18-3	光弹塑性法分析裂纹尖端塑性应力场 .....	( 322 )
§ 18-4	散光法测定混合型应力强度因子 .....	( 326 )
§ 18-5	云纹法在断裂力学中的应用 .....	( 327 )
§ 18-6	反射全息和散斑法结合研究板条中心裂纹的 三维位移场 .....	( 330 )
<b>第十九章</b>	<b>光测力学法在生物固体力学中的应用</b> .....	<b>( 332 )</b>
§ 19-1	概述 .....	( 332 )
§ 19-2	人体颅骨受集中载荷时的变形分析 .....	( 333 )
§ 19-3	快速上颌扩大术引起的牙颌变化 .....	( 335 )
§ 19-4	颈段脊柱的应力状态 .....	( 336 )
§ 19-5	人体股骨在身体重力下的位移场和应变场 .....	( 340 )
§ 19-6	人体股骨颈骨折内固定器功效的探讨 .....	( 344 )
<b>参考资料</b>	.....	<b>( 349 )</b>

# 第一篇 电阻应变测量

## 第一章 试验组织与方案考虑

### § 1-1 实物试验和模型试验

承担一项实验应力分析任务时，首先要考虑采用实物试验还是模型试验。

实物试验是在实际结构物上，在实际的工作环境中进行试验。它能准确地反映被测对象的特点，能得到结构物在正常工作条件下应力分析所需的资料，这是实物试验最有利的一面。有些重要的结构物必须进行实物试验，因为实物试验可以校核整体强度、刚度和检验工艺质量等。例如新设计的飞机除需要进行大量的零部件试验外，还要进行整机的静力试验、飞行试验。高压容器常需进行实物的爆破试验等等。

实物试验可以是破坏性试验，也可以是非破坏性试验。对某些可能投入大量生产的结构物，当进行了比较细致的研究以后，可以进行破坏性试验，以测定结构物的承载能力，建议合理的安全系数。由于对较大的实物结构（如高层建筑、大跨度空间结构、大型机械设备等）进行破坏性试验时，加荷困难，要耗费很多人力、物力，所以一般很少进行大型结构的破坏性试验。

总之，通过实物试验，可以检验载荷假定是否合理，建议以后的设计时应采用的载荷；检查计算简图和计算公式是否可靠，提出修正意见；研究结构和工艺的改进方案；测定结构的承载能力，以便在提高生产率时增加负荷，或者提供加固方案等等。以使新设计加工的同类结构更趋合理完善。

但是实物试验也有它不足的一面。例如在现场作实物试验时往往要受复杂环境的影响。此时试验只能反映出在各种条件综合

作用下的结果，测得的结果将很难分析。此外，如果设计工作还处于选型阶段，就要建造几个实物进行试验比较，显然是不合算的。因此，对大型结构物来说，实物试验规模大，必然耗资多，周期长，是应慎重考虑的。

然而，模型试验大多在试验室内进行，可减少或消除周围环境对试验结果的影响。并可人为地控制试验条件，突出研究主要方面而消除一些对结构实际工作有影响的次要因素。还可以把复杂的因素一个个分离开来，进行各种独立条件下的试验，因而可以满足理论研究及探讨计算方法的需要。例如，可要求某一模型反映一个参变量与其它参数的关系，那么一组模型即可反映一组参变量与其它参数的关系。这样易于总结规律，检验现有理论及发展新的理论。

大型结构试验的模型，其几何尺寸通常都比实际结构小得多，所以造价较小，加工周期短。在结构设计还处于方案选择阶段时，可借助于模型做各种条件下的试验，进行方案比较。此外，一般说来，模型试验主要用在既无实际经验又较难进行数学运算的新结构上，通过模型试验，摸索规律，建立数学模型，提供设计依据。所以，在比较重要及复杂的结构设计施工前，往往都先进行模型试验。例如，大型水坝，高层和超高层建筑以及原子能反应堆等特种结构。

但是模型与实物总是有差别的，且有些问题靠模型实验是解决不了的。因为模型在很多方面难以模拟真实的情况。如尺寸与加工工艺不同，很多性能参数都会完全不同。例如在混凝土大块状结构物中，混凝土固结时散热问题是个主要问题，但是在小模型中它就无关大局；再例如在薄板与厚板中焊接应力就难以模拟；某些结构上的制造工艺，也难以在模型中再现。在必要时需按结构的实际尺寸加工模型，进行试验，称为足尺试验。模型试验最终还是要靠实物试验作为鉴定。特别是在一些重要的、复杂的新型结构上，常通过模型试验进行方案比较，找出载荷与应力、变形的规律，最后还需要进行现场实物试验与观察，总结经验，

检验原有理论，发现新现象，总结新规律，以建立新理论。在选用试验方法解决问题的过程中，还要讲究经济效果：能用小模型就不用大模型，能用大模型就不做实物试验，能进行非破坏性试验，就不进行破坏性试验。

在决定进行模型试验后，应考虑怎样使模型能真实的反映问题的主要方面，例如模型的尺寸和材料怎样选择、载荷如何模拟、试验参数怎样考虑、以及模型试验的结果怎样换算到真实结构上去等等。

用来制作模型的材料通常应满足以下要求：模型材料与实物材料具有相似的应力应变关系；为保证量测要求，应能产生足够的应变，使量测仪表有足够的读数，因此，模型材料的弹性模量要适当低一些；此外，还要求便于加工。常用的有金属、塑料、石膏、细石混凝土等材料。无论采用哪一种材料制作模型，试验前必须对材料的物理、力学性能进行测定，并研究掌握它的制造工艺。

就建筑结构试验来说，常用塑料来制作小比例模型，又叫弹性模型，主要用来研究结构在弹性阶段的应力状态。也有用塑料配以玻璃丝、石膏配以铝丝来制作模型的。在采用塑料作模型时，要注意到塑料的蠕变大、线胀系数大和导热性差等特点会影响试验精度，要摸索克服的方法以提高测量精度。在大比例的土建模型试验方面，常采用与结构材料相类似的材料，例如常用细石混凝土和砂浆代替混凝土，钢筋则用细钢丝代替。

此外，模型比例也取决于结构截面的最小尺寸（通常采用 $1/2$ — $1/25$ 的比例模型）。

近年来，小型结构模型试验越来越受到重视，模型试验的相似理论及模型设计理论有了新的发展。国外并进行大量模型材料的研究工作，研制、生产符合模型试验要求的仪表及设备。模型试验室的设施日趋自动化、程序化，并对加工模型的设备及加工工艺提出了更严格的要求。

## § 1-2 载荷系统的考虑

在真实的结构物上，并只在正常工作条件下进行应力测量时，加载问题一般说来不是主要的问题。例如欲测定飞机在空中飞行时结构某部位的应力或冲床在正常工作时机架应力等等，就不必考虑加载问题。但是在模型试验中就要考虑如何模拟真实的载荷情况，即采用何种加载装置。

一般需要考虑的载荷有：集中载荷、分布载荷及体积力。它们可以是垂直方向、水平方向或任意方向。

试验用的载荷及加荷设备应使施加的载荷数值稳定、作用点明确；载荷的分度值应满足试验量测精度的要求，加荷设备能加的最大载荷应大于试验要求的最大载荷，即要有一定的储备；要求加载设备置于结构上时，在加载过程中不影响结构受力性能，也不妨碍仪表的安装及测读；最好能采用加载自动化，以减轻体力劳动。

常用的方法有重力加载和液压加载两种。

重力加载就是利用材料本身重量（一般采用已校准过的铸铁砝码、混凝土立方试块、铅珠袋、砂袋或水等）加于结构上作为载荷。重物可以直接加于试验的结构上或通过杠杆间接加在结构上。根据需要可以布置成集中载荷、均布载荷或按一定要求的分布载荷。图 1-1 是用重物作垂直集中载荷作用在屋架上的示意

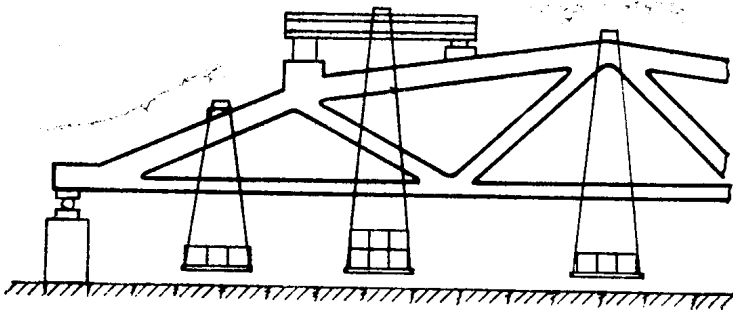
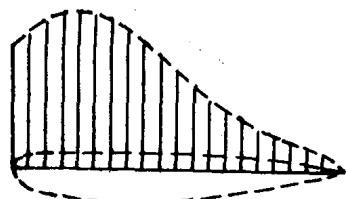


图 1-1 集中载荷示意图



图。早期的机翼模型静载试验也曾用铅袋模拟空气动力载荷(见图1-2)。这种加载方法的主要优点是简单、载荷准确并易于实现各种分布规律。缺点是加荷时费时、费体力并且不安全。利用水的重量来实现均布载荷是一种简便而经济的方案。采用特殊的盛水装置内灌以水作为均布载荷直接加于结构表面。这种方法对大面积的平板试验,例如楼面、平屋面等钢筋混凝土结构是甚为合适的。在加载时利用进水管,卸载时利用虹吸原理,可以减少劳力,且载荷能均匀、稳定。例如上海体育馆屋盖网架结构1/20比例的模型试验中,就利用盛放于塑料薄膜内的水重为均布载荷,当最大试验载荷为350公斤/米<sup>2</sup>时,放水高度为35厘米。



空气动力载荷沿翼缘之分布

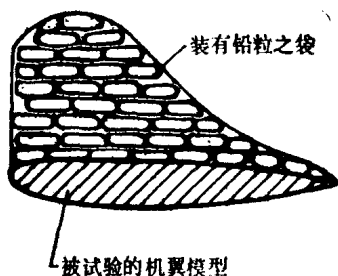


图1-2 空气动力载荷示意图

如利用杠杆装置,则由于杠杆比例关系可将载荷放大,这样不仅能节省大量的加载设备,且可减轻加载时的劳动强度。此外利用杠杆、滑轮等加载设施还可以根据需要改变力的方向。图1-3是一模拟侧向风荷的加载装置,用于高层建筑模型试验中,这样近似地模拟了被测结构物受到侧向水平风力的作用。

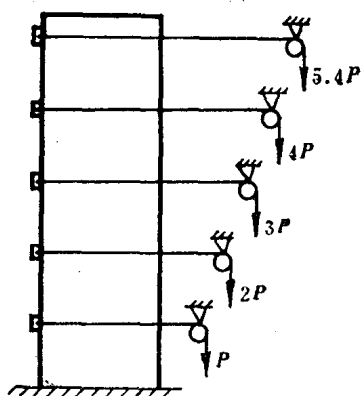


图1-3 模拟侧向风荷的加载装置

液压加载是利用油压使液