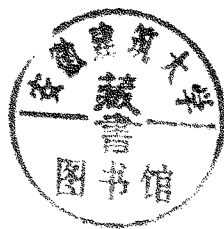


# 结构模型实验

李德寅 王邦楹 林亚超 编著



科学出版社

1996

# 结构模型实验

李德寅 王邦楹 林亚超 编著

科学出版社

1996

(京)新登字 092 号

## 内 容 简 介

本书从模型的基本原理出发,简要地阐述了国内各种形式的桥梁工程上、下部结构模型试验的方法、特点、资料 and 重要结论,并涉及国内重点建筑、水利等土建工程结构的模型试验,为我国从事结构计算和设计人员解决复杂工程结构问题提供了丰富的经验和技术资料。

### 结构模型实验

李德寅 王邦楣 林亚超 编著

责任编辑 徐宇星

科学出版社出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码:100717

化学工业出版社印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

1996 年 3 月第 一 版 开本:850×1168 1/32

1996 年 3 月第一次印刷 印张:15 7/8

印数:1—700 字数:419 000

ISBN 7-03-004280-8/O · 741

定价:32.00 元

## 序 言

现代桥梁、房屋及其它人工构筑物本身是一种复杂的空间体系,其受载时应力分布和变形状态非常复杂。要了解这些工程实际结构物受载时乃至破坏前应力和变形的解析关系和数值解并不总是容易的,有时甚至是不可能的。

由于电子计算机技术的发展,各类工程现象的计算方法有了飞跃的进步,但校核和确认在计算理论中作出的各种前提、假设和假定却是模型试验方法本身所追求的一种目标,同时,验证发展着的各类工程构筑物所必要的模型实验也更加复杂而多样化了。

由于各种原因,用实物进行试验显然存在诸多困难,单纯机械地在缩小了的模型上搬用实物试验的方法有时又不能达到目标,因而要采用相似模型。

象设计中的桥梁那样,在实物尚未存在的情况下进行实物实验是不可能的,此时得用相似模型进行实验,也就是说不用实物而用将长度、力、时间等因素缩小(或放大)了的相似模型来进行实验,再把实验结果推广到原来的实物现象中去。

相似模型,除了几何相似而外,力、质量、时间、速度、频率等都有一定的相似关系,也就是说,模型现象的各个变量与所对应的原型现象中的各个变量都必须保持有严格的、基于量纲分析和模拟理论的相似关系。

现代科技发展水平容许在某些情况时不进行模型试验只进行合理的计算解析;在另外的情况时不进行计算解析只进行完善的模型试验;但在更多的情况时要把两者结合起来,获取符合真实的最优效果。譬如在设计初始阶段,运用模型方法选出构筑物的优化结构。继之运用模型试验的成果正确地部署断面,减少不必要的强度、刚度储备,加强失稳和共振的薄弱部件,并因此而降低工程

造价。在国外还建立了科研和设计的联合机构,使模型试验研究工作和实物设计计算工作并列进行。在任何时候工程结构物的模型试验方法是,顺利地 and 精确地进行各类构筑物设计计算和营造构筑的众多有效方法中的一种。模型方法的运用展现出巨大的前景。

现时在此领域内国外已经积聚了相当多的经验。考虑到国内工程结构模型法方面的书籍甚少,编者力图加宽本书覆盖面,并列举了大量的深入到土建工程结构各个领域中的模型应用实例,而模型相似理论及试验载荷设备种类等在书中只提供了为理解本书内容的必须部分。

本书编者除扼要地介绍了本所从事的国内多座重点桥梁模型试验成果而外,还汇集了大量各种形式构筑物模型试验的实例,在这些实例中根据各自不同的试验目的,阐述了各自的模拟关系、材料选择、测试设备、试验数据整理及反馈运用等系列特点,并向后续工序的设计工程师们就模型试验成果的实用性作出评价、就设计过程中的应用方面提出了建议。本书有些材料直接取材于一些技术总结、交流文献和论文报告,所以本书也是我国广大从事模型试验工作者科学实验和生产实践成果的综合。

本书第一章概论阐述了模型试验的意义、分类和发展。第二章简要介绍了相似理论和量纲分析。第三章就模型设计和一般试验方法作了说明。第四、五、六、七章分别就钢结构、混凝土结构、地基基础结构和结构动力模型试验等专业范围内工程结构模型的试验成果的一般意义和特色作了详尽的阐明。分析这些实例有利于实际合理结构方案的选定,并使原先估计的设计计算复杂性简化。

本书取材新颖,内容丰富。力求通过系统介绍和典型实例使读者不仅了解工程模型试验的基本理论,而且掌握工程模型的设计、测试、成果分析的主要方法和技巧。本书的主要作用在于,给出工程结构物模型方法的概念,并和广大读者分享大量构筑物模型研究的工作成果。书后附有大量参考文献,供读者进一步阅读。

本书可供设计、科研和高等院校从事结构模型方法研究和结构测试工作的有关人员及广大从事土建工程结构设计计算的工程

# 目 录

## 序言

<b>第一章 概论</b> .....	( 1 )
第一节 模型试验的意义 .....	( 1 )
第二节 模型试验的分类 .....	( 3 )
第三节 模型试验的发展 .....	( 7 )
<b>第二章 相似理论和量纲分析</b> .....	( 13 )
第一节 相似理论 .....	( 13 )
第二节 量纲分析 .....	( 23 )
<b>第三章 模型设计和试验方法</b> .....	( 42 )
第一节 模型设计 .....	( 42 )
第二节 试验方法 .....	( 72 )
<b>第四章 钢结构模型试验</b> .....	( 102 )
第一节 钢结构模型试验中有关问题 .....	( 102 )
第二节 钢桁梁模型试验 .....	( 122 )
第三节 板桁组合钢梁模型试验 .....	( 151 )
第四节 空间钢网壳结构模型试验 .....	( 159 )
第五节 预应力钢吊车梁和钢屋架模型试验 .....	( 184 )
第六节 钢悬索桥模型试验 .....	( 195 )
<b>第五章 混凝土结构模型试验</b> .....	( 209 )
第一节 混凝土结构模型试验中有关问题 .....	( 209 )
第二节 混凝土结构的有机玻璃模型试验 .....	( 218 )
第三节 混凝土结构的三维光弹模型试验 .....	( 232 )
第四节 混凝土结构的砂浆模型试验 .....	( 250 )
第五节 混凝土结构的微混凝土模型试验 .....	( 269 )
<b>第六章 基础结构模型试验</b> .....	( 292 )

第一节	基础结构模型试验中有关问题 .....	( 292 )
第二节	衬砌结构模型试验 .....	( 298 )
第三节	桩的室内模型试验 .....	( 321 )
第四节	沉井侧摩阻力模型试验 .....	( 353 )
<b>第七章</b>	<b>结构动力模型试验 .....</b>	<b>( 372 )</b>
第一节	结构动力模型试验中有关问题 .....	( 372 )
第二节	结构激振动力模型试验 .....	( 388 )
第三节	结构冲击载荷模型试验 .....	( 411 )
第四节	结构抗震模型试验 .....	( 424 )
第五节	结构模型风洞试验 .....	( 466 )
<b>参考文献</b>	.....	<b>( 496 )</b>

# 第一章 概 论

## 第一节 模型试验的意义

关于模型试验的意义，可以援用我国著名学者华罗庚、宋健在《模型与实体》一文中提出的论述：

“我们把一切客观存在的事物及其运动形态统称之为实体。在自然科学中，定量研究实体特征的普遍而有成效的方法是模型法。在经典力学、量子力学、化学和近代物理学中历来如此，罕有例外。近年来，人们用模型法去研究社会领域中的一些现象，在政治、经济、军事、生态、人口等方面都有成功的范例。模型是对实体的特征和变化规律的一种定量的抽象，而且是对那些所要研究的特定的特征的定量抽象。模型能在所要研究的主题范围内更普遍、更集中、更深刻地描述实体的特征。通过建立模型而达到的抽象反映了人们对实体认识的深化，是认识论的一个飞跃。

然而，模型不是实体本身，不能等同于实体……任何实体都有数不清的特征，无穷尽的层次，模型不可能描述一切。能反映实体一切特征和运动规律的东西不是模型，而是实体本身。

电子计算机出现以后，模型方法又有了提高，叫做模拟技术，能更细致地描述实体的定量特征和变化过程。其中有数学模拟方法，它仍然是一个纯粹的模型。还有半实物模拟方法，能更深刻、更准确地反映客观过程的特征，虽然它有一部分是实体，但另一部分却依然是模型。

有人责备模型不能完全表达实体的一切特征，因而否定模型的价值。这些人不懂得模型的作用不在于也不可能表达实体的一切特征，而在于表达它的主要特征，特别是表达我们最需要知道的那些特征。从这个意义上讲，模型又优于实体，因为模型能更



深刻和更集中地反映客观事物的主要特征和规律。

正确的提法应该是‘模型有待于改进’。在科学实践的过程中，人们只能逐步地、愈来愈多地从真理的长河中获取知识。通过一、二次的实践不可能完成全部认识过程，我们只能在实践中逐步改善模型，而不能苛求每个模型都必须精确地表达实体，否则，将使科学工作者寸步难行。在定量研究客观事物时，科学工作者的责任首先是建立模型以抽象实体的主要特征，其次是逐步改进模型使其能愈来愈准确地描述实体……

不懂理论的人常常以为模型就等于实体，或者能完全描述实体；不懂得实践的人又往往以为模型可以一次建成，或者可以一劳永逸地照顾所有可以想象到的因素去无穷逼近实体。前者的错误已讲过，后者也仅仅是一种不切实际的幻想，因为如何运用这‘无穷个因素’也会成为问题。被‘一次认识论’或‘不可知论’所遮目，必将一事无成，因此它们妨碍科学的发展。而实体与模型不吻合处正是科学工作者的用武之地。”。

上述的精辟论断，对模型与实体各自的概念、特点，相互区别、关系，以及模型的意义和在模型试验工作中科学工作者的任务、责任都作了高度概括和总结。

德国学者 H. 霍斯多尔夫在他的论著中对结构模型试验的意义作如下解释：

“给结构设计人员以科学技术，使他们从结构性能的有限理论知识束缚中解放出来，并将他的设计活动扩大到实际结构的大量尚待探索的领域中去。”

而结构模型试验对整个结构工程的作用和意义更表现在如下几方面：

(1) 在新型结构的设计中，由于采用新的设计理论，或采用新型结构材料，或新的结构型式，没有现成的设计方法或计算方法，需要结构模型试验提供一定的数据，或者有时需要校核设计计算理论，比较几种设计方案等，都需要进行结构模型试验，以便了解所设计的结构的内部各种现象和规律。

(2) 模型试验所需的工作量及费用均比实体结构试验低得多, 这是因为缩尺模型小, 载荷也减小. 另外, 在模型上易作改变设计参数的多个模型对比试验.

(3) 由于电子计算机的发展, 结构分析的方法也有了飞跃的进步, 虽然用计算机对结构的数学模型分析在时间和经费上有时比作结构模型试验更节省, 但结构模型试验因不受简化假定的影响, 能更实际地反映结构的各种物理现象、规律和量值. 相反, 有时简化了的数学模型分析结果还需用模型试验来验证.

(4) 直到目前为止, 许多复杂结构如钢筋混凝土结构、预应力钢筋混凝土结构、考虑土体介质的基础结构, 以及复杂情况如三维非连续介质、非线性、各向异性、复杂边界条件等等的结构分析问题运用计算机计算仍有不少困难. 而模型试验却可清晰且直观地展示这种情况下整个结构从受载直至破坏的全过程.

## 第二节 模型试验的分类

结构模型试验按不同特点和情况来划分, 大致有如下类型.

### 1. 按模型试验目的分类

#### (1) 小结构试验

其目的是为了验证设计的计算理论, 或检验新的材料, 新的制造工艺, 或为取得某些设计所需要的参数等. 在此情况下, 不需要把模型试验的结果换算到实型, 只需要按照一般的设计规范设计和制造模型. 这种结构模型试验实际上就是建造一个较小型的结构物来进行试验, 因此常称这种方法为小结构试验. 小结构试验的优点是: 模型的设计和制造是遵照设计规范进行的, 因此其试验结果能较真实地反映设计计算的情况. 另外, 这种模型试验是模拟某一种类型的结构, 而不是某一个具体的结构, 因而这种模型只要求表现这种结构的共同特点, 即要求与该类结构的大体相似. 而对某种计算理论的检验, 可以直接用该模型进行验证.

#### (2) 相似模型试验

在设计某一比较复杂的或新型的结构时，有时不会计算，或计算误差太大，而须依靠模型试验来判断所设计结构的变形和内力。这时只有模型与原型结构严格相似，才能把试验结果正确地应用到该结构的设计中去。

## 2. 按模型试验研究范围分类

### (1) 弹性模型试验

此研究范围仅限于结构弹性阶段的模型试验。模型的制作材料不必和原型结构的材料完全相似，只需模型材料在试验过程中具有完全的弹性性质。其试验方法，除大多用应变仪测应变外，还有在模型上涂脆性材料、画照相网格以及光弹模型试验等。

### (2) 强度模型试验

研究原型结构在各级荷载直到破坏整个全过程的结构性能，预估原型结构的极限强度及极限变形的结构模型试验称为结构强度模型试验。目前，对钢筋混凝土结构多作钢筋混凝土强度模型试验，以研究钢筋混凝土结构的非弹性性能。但至今，钢筋混凝土的缩尺强度模型还仅能作到不完全相似，主要困难是模型混凝土和模型钢筋以及其相互作用机理作到与原型结构完全相似还无条件。

### (3) 间接模型试验

间接模型试验研究范围仅限于结构的支座反力及内力，如轴力、剪力、弯矩的资料（如影响线等）。因此，其模型不要求和原型结构直接相似。目前，间接模型试验多被计算机结构分析所代替，使用较少。

## 3. 按模型试验的方法分类

### (1) 定性试验

这类试验一般模型简单，主要是根据模型展现的各种现象和规律可迅速而方便地对模型进行修改，或者对同一模型，改变其支承情况，就可以有效地进行比较。因试验仅能对结构的承载能力和结构体系的基本性能进行研讨，所以定性试验对新型结构的设计是有益的，但决不能作为结构设计的依据和结论性证据。

## (2) 半分析法试验

半分析法是通过模型试验研究各种结构构件的相互作用，然后通过计算分析对结构的整体性能作全面研究。也就是先从整体结构中把各个不易计算分析的构件分别隔离出来，用模型试验分别确定这些隔离体的结构性能，如当加单位荷载时隔离体及其与所连其它构件界面处的变形。然后将这些由试验确定的数据、影响系数、多余力等用到整个结构计算分析中去。

## (3) 定量分析试验

定量分析也是结构模型试验的最终目的，因为作模型试验总是希望将它作为一种独立的研究工具，去研究和分析系统或结构的性能并作出量评断，特别对计算机不能真实模拟和准确计算的新型复杂结构尤为重要。这也是模型试验要不断提高试验技术的根据和今后发展的方向。

## 4. 按试验模拟的程度分类

### (1) 断面模型试验

也称平面或二维模型试验。主要用于可作平面问题分析的结构。对基础结构模型应使切取平面与土体构造面相垂直；对平面应变问题应采取约束侧向变形的措施，使模型不会产生侧向变形。

### (2) 半整体模型试验

也称局部结构模型试验。这是通过研究整体结构中某一复杂受力局部或某一特殊力素或某一边界约束所产生的作用，来了解整体结构的工作状态和在这些力素及边界下的工作机理。

### (3) 整体模型试验

也称空间或三维模型试验。它更能反映空间结构的整体性及结构本身的非连续、非匀质、非线性甚至具有初裂隙、初应变等重要结构特征。这些都是计算机难以模拟的。而模型试验则具有优势。

## 5. 按试验加载方法分类

### (1) 静力结构模型试验

静力结构模型试验是最基本的结构模型试验，主要是研究各

种结构在各种静力作用下的应力、变形、承载能力及裂缝、破坏机理的变化和发展规律。

### (2) 动力结构模型试验

动力结构模型试验有的是为了研究结构的动力特性，有的是为了研究结构在某种动力作用下的动力规律。所以有的是在室外场地上的结构模型上进行，有的是在室内动力台座上进行。如室外进行的释放力激振测结构模型的自振特性，模爆器激振测冲击波作用下的结构反应；室内进行的有在大型模拟地震振动台上进行的结构抗震模型试验和在风洞内进行的结构受风荷载的模型动力试验。

### (3) 伪静力结构模型试验

大尺寸模型结构动力试验，一般只能得到小振幅情况下的动力反应，而结构在强地震作用下，往往进入非弹性阶段，为推进结构非弹性地震反应的研究，目前结构试验中发展了一种伪静力试验，并也用于大尺寸模型结构试验中。它是用低周期反复循环的加荷法进行试验，以取得结构的非弹性荷载——变形特性，即恢复力特性。伪静力试验又称恢复力特性静力试验、低周疲劳试验等。

### (4) 拟动力结构模型试验

拟动力结构模型试验是把计算机分析与恢复力特性实测相结合，而恢复力不再是假定的，而是由结构模型中直接测量的。因其试验设备由加载系统和数据计算及数控系统两大部分组成，所以这种试验又称为：计算机——作动器联机系统的地震反应试验，简称联机试验。

## 6. 按试验量测方法分类

结构模型试验按试验量测方法可分如下几种：

### (1) 电测试验法

这是目前结构模型试验中最常采用的方法，它是直接在结构模型上贴电阻应变片或布置测点，通过实测应变换算成应力。

### (2) 光测试验法

此法是采用透明、匀质、边缘效应小的特制环氧树脂胶板或块体作模型材料，而制成的模型利用偏振光量测应力。试验能直接测得结构表面及内部应力场。光测试验的技术正在不断提高，如最近发展的有：激光全息干涉法、激光散斑干涉法等。

### (3) 脆性应力涂层法

在结构模型表面先涂底层涂料，再在其外涂上脆性面层涂料。加荷后，模型变形，在脆性涂料表面产生主应力方向的裂纹，因而可得到结构表面的主应力迹线，并具有一定的精度。

### (4) 比拟法

此法是利用自然界存在的一些现象所具有的相似性，当它们的数学表达式完全相同时，则只要将其边界条件进行比较，就可由一测得的物理状态的规律，求得另一物理状态的规律。早期结构模型试验中常用薄膜比拟、电比拟等。

### (5) 应变网格法

以软胶作模型，预先在模型表面印好网格，利用网格法测应变。因量测的准确度较低，试验数据仅供定性分析参考，此法现已很少采用。

## 7. 按试验结构的类型分类

按试验结构的类型不同，结构模型试验可分为：钢结构模型试验、混凝土结构模型试验、基础结构模型试验等。其详细内容将在以后有关各章详细介绍。

另外，还有按结构模型尺寸大小分为足尺模型试验和缩尺（或放大）模型试验；按结构模型试验中破坏与否分为破坏性模型试验和非破坏性模型试验；按试验时间的长短分为短期加荷模型试验和长期加荷模型试验；以及按试验的场地分为室外模型试验和室内模型试验等等，这里就不再一一作介绍。

## 第三节 模型试验的发展

理论的预言一定要通过实践的检验来证实，而试验是最有效

的实践。在结构发展史上，每个新假设和新理论的出现，都是由试验来检验、来证实的。而新的试验技术的出现和发展又反过来揭示出新的规律，提出新的问题，促进结构更新发展。结构模型试验就是伴随工程结构的发展史产生和发展的。

十七世纪初伽利略（1564—1642）就对结构材料强度问题进行研究，并在1638年提出了有关结构材料强度的学术理论著作。

1684年法国物理学家马里奥脱和德国数学家莱布尼兹通过试验对伽利略认为受弯梁断面应力分布是均匀受拉的错误观点进行了修正，认为其应力是按三角形分布的。

早在1686年，在牛顿的著作中就已有关于相似现象学说的阐述。但直到1848年，通过大量的模型试验研究，别尔特兰才首先确定相似现象的基本性质，并提出了量纲分析的初步理论，无疑这对结构模型试验的发展是一个极大的推动。

1713年法国人巴朗提出了中和轴理论，认为受弯梁断面上应力分布是以中和轴为界，一边受拉、一边受压。但当时受试验技术的限制，巴朗的理论只不过是一个假设，而受弯梁断面上存有压应力的理论，并不能被人接受。

1767年法国科学家容格密里在还没有量测仪器的时代，利用简支梁跨中区段上翼缘开小槽，槽中塞硬木垫块，进行受弯试验。试验结果证明，这根梁的承载能力与未开槽的整体木梁一样。显然，只有上部纤维承受压应力才可能有这样的结果。

1821年法国科学院院士拿维叶推导了材料力学中受弯构件断面应力分布计算公式。而此公式是在其二十多年后，由法国科学院另一名院士阿莫列恩用试验方法验证后才得以承认。

结构模型试验对工程结构和工程技术的推动作用更是比比皆是。

1755年德国格莱伯曼为了在莱茵河上建造木桥，首先用模型试验验证了设计的可靠性。

1829年法国科学家柯西用模型作梁和板的振动试验。1846年英国罗伯特·斯坦福森等人为作不列颠桥设计进行了缩尺1:6

的桥梁结构模型试验，之后他又对另一座管形结构铁路桥作了模型试验。1869年弗鲁德作了船的模型试验。1883年雷诺对管中流动体进行试验研究。不久著名的赖特兄弟建造了风洞，进行了机翼模型风洞试验。

进入本世纪后，随着模型相似理论的建立、科学技术和试验技术的发展，结构模型试验也进入正规发展时期。此时期大体可分为：初期、推广和深入三个阶段。

初期阶段指从本世纪初到40年代二次世界大战结束这一期间。

1910年西班牙建筑师阿托里·高丁在他的空间构思建筑结构的设计中，均采用模型试验作以研究。他还利用模型试验作了悬索结构的试验研究和设计应用。

此期间德国著名的工程师迪辛格尔、弗兰第和西班牙著名的建筑师托罗伽在设计新型工程结构时，尤其是所设计的新型复杂结构缺乏分析方法和计算手段时，均是用模型试验作为依靠工具。

另外，瑞士著名建筑学家罗伯特·马拉德根据缩尺混凝土模型试验完成了无梁楼板和蘑菇形楼板的设计。意大利工程师皮尔·鲁基莱菲用塑料模型试验完成了飞机库空间结构性能的研究和米兰市皮莱尔摩天大厦高层建筑的性能研究和设计。美国威尔逊用橡皮制作重力坝断面结构模型、用塑料制作拱坝模型。1930年美国垦务局用石膏硅藻土制作了当时世界最高的波尔德坝的结构模型，并进行了较完整的试验。

这期间，结构模型试验技术也有了很大发展。不仅采用机械式引伸仪进行应变测量，30年代初电阻应变片问世并很快用于结构模型试验中，为大、小尺寸结构模型试验的发展和推广创造了极为有利的条件。

二次世界大战结束到60年代末期是结构模型试验的推广发展阶段。

这一时期，随着高层建筑、大跨度桥梁、长隧道和高大坝的发展，以及原子反应堆压力容器、海洋平台等各种新型工程结构



的出现和需要，结构模型试验更得以推广和发展。

1947年葡萄牙建立了里斯本国家土木工程研究所，进行了许多小尺寸模型试验；1951年意大利建立了贝加莫结构模型试验所，多进行大尺寸模型试验；此外，美、英、法、西德和日本也都先后建立了大型结构试验室，为模型材料的研制、试验技术的发展、试验设备的更新作了很大贡献。50年代后期开始，原苏联、东欧一些国家及我国均相继开展结构模型试验。60年代中期出现了地基力学模型研究，基础结构模型试验也得以发展。

在这期间国际性的学会组织出现，并进行了几次与国际性结构模型试验有关的学术讨论会。如国际材料和结构试验协会下设的专业委员会，定期召开国际性学术会议；1959年6月在马德里召开结构模型国际讨论会；1963年10月在里斯本举行的混凝土坝模型讨论会。

正因这个时期的特点是开展结构模型试验工作的国家多，进行试验的数量多，用试验解决结构工程设计的问题多，而且对结构模型的相似理论、试验技术和设备都有全面推广和发展，所以称之为发展推广阶段。

70年代后，结构模型试验进入发展的深入阶段，更由于电子技术、激光技术的发展使试验技术飞快发展，电子计算机结构分析的发展使结构模型试验转向解决一些重大和复杂的研究课题，承担更为艰巨的任务。如核潜艇、直升飞机、超音速飞机、火箭、宇宙航行器的发展及地震对工程结构震害的研究和建筑结构抗震设计的需要，出现和发展各种结构的动力模型试验。在这深入发展阶段许多国家都注意结构模型试验室的建设和测试技术的更新。如为适应大尺寸结构模型试验，试验室趋向大型化，建立大型风洞室、大型三向震动台；为适应试验项目的多变，试验设备趋向自动化；为提高量测精度和准确度，量测仪器趋向智能化；为作到试验资料的处理迅速及时，数据采集和处理趋向实时化。

此时，国际交流和讨论的课题也在不断更新和深入。如1979年3月在意大利贝加莫举行的地质力学物理模型国际讨论会，讨