

结 构 模 型 分 析

[联邦德国] H·霍斯多尔夫 著

徐正忠 陈安息 曾盛奎 译

中国建筑工程出版社

结 构 模 型 分 析

[联邦德国] H·霍斯多尔夫 著

徐正忠 陈安息 曾盛奎 译

中国建筑工程出版社

本书共分五章，主要介绍：模型试验分析的目的和意义；相似力学原理及在建筑结构试验中的应用；模型试验的方法、材料和设备；以及电子计算机在模型分析中的应用。书末附有一些实际工程和模型的照片。

本书可供土建科研、设计人员以及大专院校师生参考。

MODEL ANALYSIS OF STRUCTURES

Heinz Hossdorf

Van Nostrand Reinhold Company Ltd.

1974

结 构 模 型 分 析

徐正忠 陈安息 曾盛奎 译

中国建筑工业出版社出版(北京西郊百万庄)

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

中国建筑工业出版社印刷厂印刷(北京阜外南礼士路)

开本：850×1168毫米 1/32 印张：6³/₄ 字数：178千字

1985年1月第一版 1986年1月第一次印刷

印数：1—6,900册 定价：1.35元

统一书号：15040·4869

目 录

序

第 1 章 概论	1
1.1 为什么采用模型分析	1
1.2 模型试验及其应用	6
1.2.1 试验方法的分类	6
1.2.2 模型试验的方法和目的	11
1.3 历史片断	13
第 2 章 理论	22
2.1 相似力学	22
2.1.1 引言	22
2.1.2 量纲的同一性和量纲系统	27
2.1.3 量纲分析	29
2.1.4 静力模型律	32
2.1.5 示例	39
2.1.6 自然界、工业技术和建筑学中的相似性	49
2.2 应力和应变	57
2.2.1 模型变形测量的意义	57
2.2.2 E 和 μ 的定义	58
2.2.3 平面应力场	60
2.2.4 由应变测量计算主应力	68
2.3 确定弹性结构中的内力	73
2.3.1 问题的提出	73
2.3.2 杆系结构(框架)	77
2.3.3 板	81
2.3.4 一般结构	96
2.3.5 泊松比	97
第 3 章 试验技术	100

3.1 模型制作	100
3.1.1 弹性材料	100
3.1.2 用实际施工材料制作的模型	112
3.2 试验方法和设备	113
3.2.1 一般原理	113
3.2.2 模型的支承系统	115
3.2.3 外荷载的施加	118
3.2.4 预应力	131
3.2.5 支座位移	135
3.2.6 恒载	136
3.3 应力分析的电子技术	137
3.3.1 引言	137
3.3.2 模拟测量换能器	140
3.3.3 比较法	157
第4章 计算机与模型分析	161
4.1 结构分析中的数据处理	161
4.2 混合计算机分析	167
4.2.1 技术特性	167
4.2.2 影响函数与混合计算机分析法	174
第5章 工程与模型图片实录	195
5.1 意大利米兰 Pirelli 摩天大楼	195
5.2 委内瑞拉马拉开波湖大桥	196
5.3 澳大利亚悉尼歌剧院	197
5.4 瑞士巴塞尔大学图书馆屋盖	198
5.5 西班牙马德里教堂	199
5.6 欧洲煤气服务站的结构体系	200
5.7 Wanger 瑞士消费者联合会中心仓库建筑	201
5.8 日本东京奥林匹克运动会游泳馆	202
参考文献	203

第1章 概 论

1.1 为什么采用模型分析

结构模型的意义及其在应力分析中应用的理由，可简单地解释为：其目的是为了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的束缚中解放出来，能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。

因此，可以想象，这种对设计人员有益的帮助应受到尽可能的鼓励。可是，有些工程师对模型分析的发展产生了疑虑，深入研究不赞成的根本原因也许是有益的。

首先，无疑地是哲学上的原因——这一原因可能与认识方法的心理态度有关。哲学家中经常有理性主义者，这些人认为关于自然界基本定律的真理，早已存在于人们的头脑中。他们是先验论者，认为要求得真理，只需去探索头脑本身，而无需观察我们周围的世界。德国伟大哲学家艾曼纽·康德(Immanuel Kant)可能是这类思想学派的最有名望的代表，他曾假定空间由三维组成，两点只能连成一条直线；在物质世界中，不论现象发生任何变化，物质的数量既不能增加，也不能减少。可是，根据现代的科学宇宙观，康德所想象存在于头脑中的先验论的“纯真理”，今天没有一个是能被接受的。

现代物理学对先验认识实现的不可能性已经作了结论；它把每一个自然过程——当然是明显的和可信的过程的模型概念，只当作一种工作的假设，每当有新发现出现时，随时准备修正这种假设。可是，这不能作为采用经验方法的借口，这就是说按照无可置疑的经验，人们必须尽速承认自己不具备绝对认识的能力，

而自己的头脑只有能力去履行一个职责，即去整理获得的资料，也就是系统地把资料进行整理并使之协调。

感到遗憾的是，以理论概念和分析为依据的规律，一经用到一个具体问题，经常证明是不完善的。唯有在那些还可能回避现实问题的地方——即在较老的和较保守的工程学校中，在那里还残留着十九世纪的心理状态——仍培植着这些空想的概念。从这种学校毕业出来的工程师，带着错误的概念开始从事他们的事业，而认为自己对所遇到的一切问题都具有分析解决的能力。这些毕业生没有受到关于理论局限性的教育是羞愧的，他们中的许多人在整个职业生活中墨守着这种思想，尤其那些人，他们在一生中做着没有创造性的设计，而这些设计只不过是些传统结构的翻版。

对工程研究分析方法的这种过高估价——幸亏目前已产生一种不同的观点——还有另一个后果：即无数的迷信。这类工程师对模型试验是外行，所提供的结果是类比形式的而不是定量的。用这种方法所取得的数据具有一定的离散性，这是由误差影响所致。单纯的分析计算，可以设法给出任意所需小数点位数的结果，似乎具有高度的精确性。工程师不断地重复应用熟悉的理论，容易使他忘掉他据以进行计算的假定所代表的结构真实性状是多么的不完善。这些工程师对不合逻辑的精度的强烈爱好，要用电子计算机大大地予以满足！

除了这些已证明是十分不妥的“理由”外，应该予以严重注意的，还有对目前普遍采用的模型试验的用处提出的异议，以及涉及试验方法本身的可靠性问题。这方面的担心是直率的，特别是以下各点：

(a) 在模型上进行的测量精度，常常与所要求的有距离。

(b) 制作模型、布置试验以及测量操作都很费时间，因此在实践中经常由于时间不充裕而放弃进行试验。

(c) 除特大的结构外，为了查明精确的结构性能，已证明模型试验是不经济的。

迄今为止，所进行的模型试验往往是不适当的，而不是有指导性的，这些也许是事实。但这些并非由于模型试验固有的性质所造成，唯一的原因是由于模型试验方法目前仅仅才迈向解放的重要的第一步。近年来，电测法业已趋完善，使用计算机控制量测过程和数据处理，改变了需繁重手工操作的整个模型试验面貌。本书主要目的之一，是展示出现代计算机和测量技术对促进未来模型试验的新发展的可能性。以后将会看到，从原则上讲，工程模型只不过是数字计算机的模拟信息媒体（第4.2节）。

今后，工程师可以选择三种不同工具来解决结构问题：

- （1）采用计算尺和台式计算机作一般的分析；
- （2）采用程序控制计算机；
- （3）采用现代模型分析和试验。

在什么场合下可以应用这三种方法中的哪一种方法呢？附图

（图1-1）试图对各应用场合给出定性的界限。

在解答一个结构问题时，将其所含有的相对能力作为标准，并作为问题难易程度的函数绘出。例如，后者可按人工-小时的费用来估计。

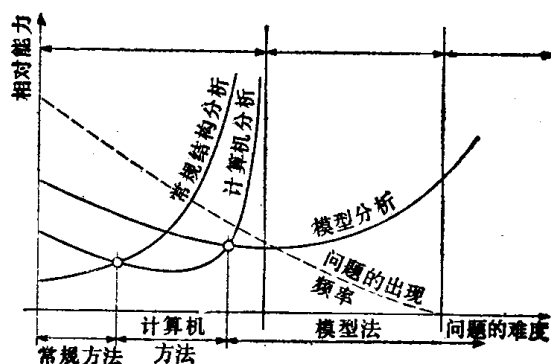


图 1-1

在水平轴上可以定出两条定性的分界线，第一条“困难分界线”，是由我们对结构和材料承载性能的理论知识确定的；第二条是实际可能的绝对极限，超过这个界线，工程师就只能设想，而实际上不能建造。

使用计算尺和台式计算机的常规结构分析方法，可以对付简单的问题。所作的努力随着问题困难程度的逐渐增加而增加，而结构理论中所遇到的更复杂的问题，将迅速超过可以适当地试一

试的限度。

考虑到繁琐、时间和费用，将简单的一个问题归到计算中心去是没有意义的。考虑到咨询商行购买私用计算机，以及与计算中心站建立远距离联系等因素，必然会加速实现使用计算机的局面。对经常反复遇到的中等难度的问题，程序电子计算机获得所需的结果往往要比常规方法更快、更方便和更合理。大型计算机在一定范围内也适合于解决相当复杂的弹性理论问题。至今，正在全世界普遍而飞跃发展着的计算机程序，在工程设计实践中应用到什么程度仍有待观察。采用一台高效率的计算机已能经济地处理一系列难于分析的问题。但是，只要问题一接近第一条分界线，解答的能力沿渐近线急剧上升，和常规方法的曲线相同。这样，甚至计算机及其程序也遇到了它们不能越过的界限（第4.1节）。

这里，基本上展现出了模型试验的各种特征和独特的价值。在图表内，模型试验的曲线切断了计算机曲线的上面部分，也就是说在这部分采用计算机成为不经济的，模型试验的曲线延续下去，超过渐近线的分界线，揭示出工程师不能定量探索的区域。模型试验的曲线只在第二分界线中止，这是以自然界所强加的绝对界限来定的。

换句话说，模型分析和试验技术将使我们从对自然界的不可避免地不完美的概念的束缚中解放出来，并给出任何类型的结构性能的一幅真实图象。

我们要问，这样努力去达到解放是否反应真实需要——尤其是这种解放，有可能建造复杂的结构时，具有奇异形状而又不容许一般分析处理的建筑结构，意义何在？

我们生活在一个大多数人类民族寻求幸福的世界，总是以最小的代价去获得物质资源的最大利用。我们的社会生活和经济生活，在很大程度上是按这个原则得到和支配的。因此，合理性和降低造价成了建造房屋的最终目的。重视预制结构就明显地反映了这个状况。在这个领域里，至今对模型分析还很少需求。

然而，伴随施工技术的发展，还有一种不大明显和不引人注目的，但却是重要的趋向，即人们不能只按合理来生活，如果这样，我们就根本不该去建造戏院、博物馆或教堂。我们需要的艺术以及与艺术有关的生活条件，就会成为一个刻板的社会体系的牺牲品。但建筑学终归是一种艺术，十分幸运，我们至今还没有追求这种刻板局面。

在力求合理建造经济实用房屋的同时，还希望根据各自情况发挥技术效能。良好的建筑设计，正是人本身确定了一座房屋应满足的功能。建筑师的创作在于提供围护结构的形式和材料，建筑学往往还需要去满足其它许多复杂的要求，如音响、照明、采暖和通风。结构工程师创造性的和无偏见的合作，对建造一个完全满足功能要求的结构，是必不可少的。即使在纯粹建筑工程领域内，应承认静力学中最简单或最经济的结构未必能最好满足功能上的要求。一座现代化公路桥的形式，仅只有部分因素是由结构分析的方便来决定的，而大部分则是按公路轴线布置和美观设计来考虑的，为了真正地满足这些要求，经常要求设计人员付出更大的智慧。如果没有模型分析的帮助，要真正摆脱定型的结构形式是不可想象的。

本书显示了另一个更为普遍的模型分析领域，即结构模型的研究，它是工程师和建筑师之间的媒介。

工程师和建筑师亲密无间的关系，按理应是协调工作的，所以，对他们之间的争吵是难于理解的。遗憾的是，他们总是不能创造性地合作、相互了解和信任，这是常见的情况。

图 1-1 示出这种缺乏融洽的原因。其渊源从这里又要追溯到大学。工科学生学习的是图中第一分界线左边区域内的内容。他尽力用分析方法缓慢地向这条分界线（“分析计算”的极限）前进，他确信他永远达不到这条分界线，更不用说能越过它。当他还在工科学校时（很少讲授设计），他学到用他的分析技术去工作，而超越分界线的区域，仍然严格禁止入内。从这个角度，他采取一种和建筑师不同的见解。建筑师看来象是兴致勃勃，不去

思考妨碍他们不凡想法的技术上的困难，而去使用他的分界线的另一边。建筑师酷爱他的自由，这是有益的和必要的，他一定不能让自己被结构分析的限制禁闭住；他一定不能过高估计它的重要性，而应训练自己理解和认识第二分界线确实是绝对存在的。如果工程师的想法已停留在第一分界线，我们又怎能真正地希望建筑师作出调整呢？工科学生应该学习更多有关结构的设计，并给予更精通洞察科学的方法，以帮助他们检验自己想法的可行性如何。工程师的责任是对建筑学作出贡献，并在建筑师寻求满足他的建筑目的中给予引导。在建筑师和工程师一起工作的场合，共同发挥他们的思想时，模型分析和试验就会受到严峻的考验。在合作过程中，工程师可以由模型提供的结果进行科学地评价，而建筑师则能从模型提供的方法去想象他要创造的结构。

1.2 模型试验及其应用

由于模型分析是一个完整过程，包括各种形式的实验活动，从结构模型导出设计数据，因而受到重视。“模型试验”这个名词反映了“模型分析”的实际面貌，这里并不打算给它一个广泛的一般定义；相反，我们将系统叙述各类模型试验。为此，从两个方面考虑试验，即：（1）所采用的试验技术；（2）试验目的。

1.2.1 试验方法的分类

模型是一种复制品。我们了解一个物体的真实性能，除了直接观察外，还有两个方法：试验和理论。理论只不过是建造在头脑中的一个模型，用一个假想的原理去体现一类已知的现象；由于这是一个因果关系和逻辑推理过程，含有明确的量，能使我们了解自然现象的具体关系。所以，要体现任何一个思维模型的全部要素必定是不完整的，并且只能在有限范围内给出自然过程的精确图象。结构分析理论是应用物理学的一个分支，也受此限制。

一个实际结构与应力分析（材料力学）可能性之间的关系在图1-2中表示出。图中给出了各类可能的模型试验类型。

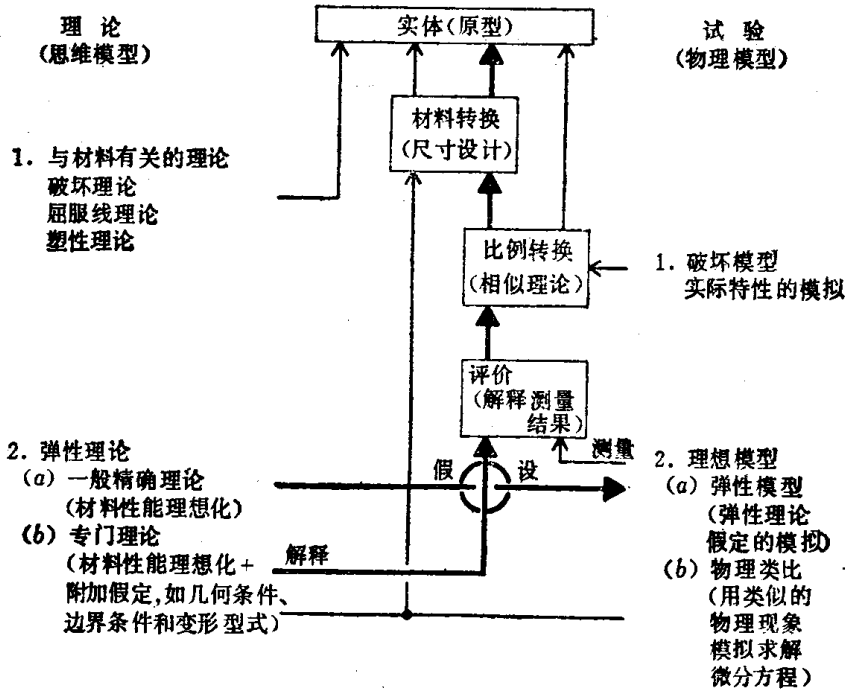


图 1-2 应力分析问题中，各种理论和可能的试验办法图释

实体（原型）不是以纯理论（思维模型）就是以复制原型的试验（实际模型）来模拟。按理讲，就所研究的问题得出的普遍推论，模型应该是理想的。但遗憾的是，我们由经验知道，精确性和普遍性从来是不能同时都得到满足的。模拟物理性能愈接近、愈逼真，就愈加不容易把我们所得到的知识应用到其它情况。另一方面，用理想的假定是可能找到普遍的（但不完整）规律和关系的。这个原理很普遍地应用于理论以及物理实验。这样，我们就能真实控制近似程度，从而建立理论或进行实验以提供精确的或更为普遍的资料。

在理论应力分析中，基本的假定包括材料特性。使用的材料，诸如金属、混凝土或塑料，它们的物理特性是不同的，所以，由单一材料或多种材料所制作的结构的性能，必然有其各自

的规律，这也是合乎道理的。这是在钢筋混凝土或预应力混凝土截面的破损理论（即屈服线理论）、钢结构的塑性理论中要反映的，或者无论是试图通过加载到破坏的整个过程来模拟结构的性能都是要考虑的。个别情况下，实际破坏的观察能对结构的性能作出可靠的描绘，并为所进行的试验研究进行假定提供依据。不管怎样，对于判断个别情况，这些结论虽有价值，但不应推广，因为对这一复杂的破坏机理几乎是不清楚的，并且试验结果是任意选择的荷载分布所得到的破坏有关的。同样，因为假定的任意性有损于屈服线理论的普遍有效性，结局是这些假定经不住客观评价。仅当知道了荷载的分布，破坏试验和破坏理论才适合于对个别问题的研究。

弹性理论对结构性能采用了一个根本不同的方法。把术语“材料强度”应用到弹性理论问题是容易使人误解的，因为，事实上弹性理论和所讨论的材料强度根本无关。相反地，在普遍的分析里，它尽力去表明外荷和变形的关系、应力和应变的关系。如果要从数学方面解决这个问题，那么，根据材料特性建立的理论就要求大大简化材料的特性，于是，破坏（或极限强度）在理论上无特定含义。在较小荷载下，大多数建筑材料都可以按弹性理论加以正确的描述。这个理论的最大优点在于它的普遍真实性。它仍然是得出系统了解结构承载性能的一个方法。但是，从理论推论出的数据，为了确定断面尺寸等，无论如何还必需补充实际的材料性质。

弹性理论是建立在材料性能的熟悉概念上的（第 2.2 节）。为了对所涉及的数学上的复杂性加以限制，要求增加简化假设，例如，描述特种结构形式的运动学假设（第 2.3 节）。因此，弹性问题的多数解答与一般假定是不同的。实用上，在着手分析特殊问题以前，我们必需批判地对所采用的假定进行评价，然后再决定某个分析方法。

在实验领域内，在描述结构破坏现象时，弹性模型试验的程序，就其假定，普遍适用性及其应用范围都是与弹性理论相对应

的。

弹性模型试验的技术和原理，目的在于制作和试验结构模型，使其在所测范围内的性能尽可能理想地模拟一般弹性理论的假设和条件。如果能做到的话，就可得到优于理论方法的两个显著的优点：模型的特点是能够模拟理论问题的解答而无需复杂的微分方程式。即使在数学解答不能实现的情况下，模型也能综合地解出这些方程。

处理弹性理论中的特殊问题而作的一些近似假设（例如 Navier 假设），弹性模型是不可能模拟的。测量的解答本来是精确的。这是模型试验本身的一个极好的特色，但是也能导致解释测量数据的困难，实验人员应经常认真地考虑产生这种困难的原因。

单个测量对工程师是没什么兴趣的。当设计一个结构时，他必需知道应力合力，为了从整套测量数据计算出这些应力合力，他必需求助于理论。解释测量数据时，研究人员常常采用按假设得出的弹性理论的简化关系，而这些假设，模型又不严格符合。图中（图 1-2）理论上的矛盾是用注有圆圈的交点表示。如果要使测量和解释没有矛盾，那么，解释理论的选择和测点的定位，必须仔细地考虑和调整。所以，对于了解结构问题及其按弹性理论得出的解答，对结果的处理和解释（第 2.3 节）是具有高度意义的。

于是，下一步是用量纲分析把所得到的结果转换到原型（第 2.1 节），和弹性理论所得的其它结果一样，还必须按照实际结构所用材料重新解释，以便得出一个设计处理办法（第 4.2 节）。弹性模型试验需要在若干方面作更深入地了解：

- （1）发展适宜的模型材料，模拟弹性理论的条件。
- （2）进一步发展和改进模型试验和仪器，取得模型性能的精确资料。
- （3）用弹性理论对数据作出解释，发展解释条例。
- （4）模型力学的知识。

(5) 进一步发展以弹性模型试验结果为基础的设计方法, 现有的方法离要求甚远。

最后, 应指出模型试验中其它技术因素。虽然模型模拟了理想化的材料性能, 即模型是一与原型相同的或模仿原型的结构, 而且还是以同样的方式承受荷载的, 但却忽视了原型材料的性能。

模型的抽象化可使问题前进一大步。在物理学中, 我们经常遇到类似地建立描述完全不同科学分支现象的微分方程式。描述流体动力学和空气动力学的流量状态的势能方程式, 以及电场或重力场。所有这些方面, 在理论上讲, 对不同学科类似现象进行试验, 是能够研究任何特殊现象的特性的。这样, 研究人员就可以选择最适合试验技术需要的方法。如果确实是这样的话, 则电模拟从技术上讲是操作最方便的。

应力分析中熟悉的模拟, 是对Saint Venant扭转的Prandtl薄膜模拟和用流体动力学模拟表示的Bredt公式。

模拟计算机一直应用电模拟解微分方程的技术和用电路实现数字运算。这些装置能执行诸如加、减、积分和微分的线性运算, 以及诸如乘和除的非线性运算。无论是哪一种作用都可以模拟。模拟计算机非常适合于快速求解线性和非线性微分方程, 但是处理代数方程组是无效的。在这个意义上讲, 数字计算机就非常优越了。模拟计算机和数字计算机现在经常合并成相容系统, 即所谓混合计算机。在混合计算机中, 数字计算机执行算术运算, 并按程序去监测整个计算过程和控制模拟计算机的操作。

模拟计算机在求解应力分析问题只是在有限范围内应用, 原因是结构工程师还不了解它的效益, 这是确实存在的情况。例外的是, 加利福尼亚工学院已用模拟计算机分析机翼, 布拉提什拉法(Bratislava)建筑研究所打算用模拟计算机求解双调和问题。

模拟计算机和专用混合计算机, 无疑是能够解决大量结构分析问题的。因之, “塑性设计”法的模拟和更高阶问题的处理尤

其引人注目。

虽然，依照上述的相似模拟不能当作真实的模型试验，可是就模型试验方法而言，混合计算机的功能特性是重要的，因为在混合计算机系统，程序数字计算机将控制未来的模型试验顺序、实现数据处理、提供最后结果（第4.2节）。唯一的根本区别是，在自动化模型试验中，所测得的数据直接代表实际模型结构所产生的应变。用作控制混合计算机的数字计算机具有对模型试验精确控制所必需的全部逻辑单元和电路。这些都可以从混合计算机中学到。

1.2.2 模型试验的方法和目的

前已述及，应根据试验的最初目的有选择地考虑模型试验。对问题进行分类，给出应用的情况和范围。

1.2.2.1 定性试验

为了初步评价一个新型结构的特性，通常采用由简单材料如纸、纸板、金属丝等做成模型。用简单的手工操作对模型施加荷载，从而判断其结构性能。这类试验的优越性在于有高度的适应性，因为，根据模型所暴露出来的新情况可以迅速而又方便地对模型进行修改。通过这种方法，就可能对有关结构的承载能力进行有效的和可靠的比较。在同一模型中，改变支承情况，可以有效地查明各种结构体系的基本性能。

这种临时凑成试验的危险性估计，需要有结构分析原理的知识，特别是模型力学的知识，因为小模型太容易导致对结构性能的错误结论（第2.1节）。定性试验对设计人员是有益的，但决不能作为结构适用的结论性证据。

1.2.2.2 半分析法

为了全面地研究结构的性能，经常需要去研究各种结构构件的相互作用。结构可以是易于分析的装配部件如格子梁、门式框架等，也可以是不易于分析的复杂平板或壳。对所有这些问题进行弹性研究时，总是可以从整个体系中把“难点”分别隔离出来，用模型试验确定其结构性能，这样，当加上单位荷载后，就