

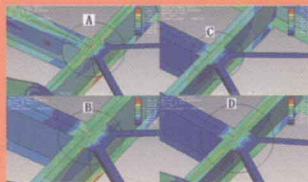
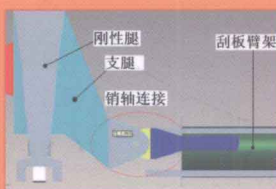
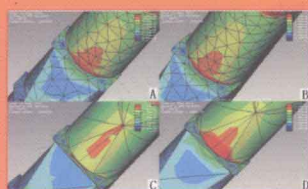
Pro/Engineer



野火版4.0 / 5.0

机械结构分析实战

张洪涛 编著



机械工业出版社
CHINA MACHINE PRESS



Pro/Engineer 野火版 4.0/5.0 机械结构分析实战

张洪涛 编著



机械工业出版社

本书以工程实际问题为基本素材,同时结合通用分析软件间的对比研究、测试数据与分析数据间的对比研究,充分说明了 Pro/Engineer 野火版结构分析模块 Mechanica 的有效性,坚定了广大结构设计及分析人员应用该分析环境的信心。本书没有进行典型的教程式叙述,更多的是对利用 Mechanica 的基本功能分析实际问题的要点的阐述。涉及的分析功能集中在带有接触非线性问题的常规静力分析,同时对实际项目中的整机分析、超量工况分析、模型参数化等经常遇到的工程实际问题,提出了作者单位自主研发的处理方式供需要的读者研究。有过分析经验的读者在充分阅读本书主体内容之后,可以清楚认识到该分析模块在实际应用过程中体现出的高效性、易用性、简洁性,再经过一段时间的实践,相信可以将该分析模块真正变成解决问题的利器。

本书适合有一定结构分析经验的技术人员阅读,也适合从事实际问题研究的大专院校的实验室人员使用。

图书在版编目 (CIP) 数据

Pro/Engineer 野火版 4.0/5.0 机械结构分析实战/张洪涛编著. —北京:机械工业出版社,2011.1

ISBN 978-7-111-32948-0

I. ①P… II. ①张… III. ①机械设计:计算机辅助设计-应用软件, Pro/Engineer Wildfire 4.0/5.0 IV. ①TH122

中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2010) 第 263627 号

机械工业出版社 (北京市百万庄大街 22 号 邮政编码 100037)

策划编辑:黄丽梅 责任编辑:王春雨 版式设计:张世琴

责任校对:张薇 封面设计:路恩中 责任印制:杨曦

北京双青印刷厂印刷

2011 年 3 月第 1 版第 1 次印刷

169mm×239mm·14.25 印张·274 千字

0 001—4 000 册

标准书号:ISBN 978-7-111-32948-0

ISBN 978-7-89451-816-3 (光盘)

定价:29.00 元(含 1CD)

凡购本书,如有缺页、倒页、脱页,由本社发行部调换

电话服务

策划编辑:(010) 88379770

社服务中心:(010) 88361066 网络服务

销售一部:(010) 68326294 门户网:<http://www.cmpbook.com>

销售二部:(010) 88379649 教材网:<http://www.cmpedu.com>

读者服务部:(010) 68993821 封面无防伪标均为盗版

序

有限元分析工具目前已经非常成熟了，其求解能力和易用性也有了很大提高，在生产中的作用越来越大。目前已经出版了大量针对各种软件的书籍，这些书籍在介绍有限元分析概念、普及软件知识及推广方面起到了很好的作用。

我们实验室（吉林大学机械学院工程力学结构分析室）从 2000 年就开始从事工程结构的力学分析及试验，这些年大大小小的分析项目也做了很多，比如码头、电厂用的堆取料机，塔吊、履带吊、汽车吊，还有泵车、消防车、鼓风机等。软件从 SAP93 到 AlgorV19，从 Ansys 5.7 到 Ansys 12.0 WorkBench 环境。近两年来我们根据合作企业的软件环境，从实际项目需要出发，尝试使用 Pro/Engineer 的 Mechanica 模块（以后用 Pro/Mechanica 来表达这个分析环境），逐渐认识到 Pro/Mechanica 环境给我们带来的高效率。

我们使用 Pro/Mechanica 环境主要进行结构的局部详细分析和参数化分析系统建立。常用的分析功能主要是带有接触的静力分析，在这一点上 Pro/Mechanica 环境确实有其独到之处。整个分析过程包括参数定义与引用、几何模型建立与处理、属性与边界定义、求解及结果处理，这些过程都体现了 Pro/Mechanica 环境的易用性、实用性。目前市面上关于实际问题研究的书籍确实不多，我们就有了写本书的想法：即从 Pro/Mechanica 环境出发，结合我们多年的实际项目经验，让读者了解结构分析的要点，希望读者在实际工作中多些借鉴，少些困惑。

本书面向的读者群为正在从事结构分析的人员，尤其适合从事实际问题研究和处理的人员。

考虑到结构分析是一项非常细致的工作，处理环节众多，验证环节也多，只有对很多细节都清楚（几何、单元、边界及结果查看，皆要保证合理、正确才行），才会得到一个可靠的结果，所以这就导致很多人员在从事结构分析的过程中对分析结果没有信心，往往就发出“算个大概”、“仅供参考”、“不精确”等感慨；还有对模型的简化程度与结果精度的关系认识不深刻，对同一个问题也很少从多个角度、采用多种方式来对比研究，自然对得到的结果不会有更深刻的认识。

其实结构的简化方式是有很多选择的，简化程度具有很大的“伸缩”空间。例如一个简单的悬臂 H 形梁，根部约束，端部加载，如果要得到端部挠度或根部应力，最简单的方式就是利用材料力学公式计算，如果你只想得到端部挠度和应力，那么通过软件的梁单元最适合，如果还想得到腹板的应力分布，就不适合

了。从模拟的几何来说，体现的就是“缩”，即原来实际结构“缩”成一条线了。如果还想得到腹板的应力分布，验证一下中性层的概念，那么梁单元就不能胜任了，这时候需要利用壳单元来构建翼缘和腹板。使用壳单元模型简化 H 形梁，模型的规模与梁相比增大很多，求解时间是按梁单元求解的好几倍，但是得到的结果也多很多，腹板的应力分布可以一目了然，中性层的概念体现得也很好。同理，如果你特别关心翼缘与腹板连接处的应力，那么壳单元也无法满足了，因为壳单元模型在几何上并没有表述清楚连接的局部，此时实体单元就派上用场了，不过相应地计算时间也会增加。

这个分析模型随着关心的问题增加，几何上从线到块，单元上从梁到实体，空间上从 1 维到 3 维，可以形象地理解为从“缩”到“伸”，此即是模型简化的“伸缩”。

上面对比的是简化程度与结果精度的问题，相信读者从这个角度应该能够理解为什么软件会提供这么多单元类型了。关于结构分析还有模型规模与计算效率的问题，我们应该从关心的问题和结果的精度角度来权衡。还比如结构分析中的各种连接，包括焊接、接触、螺栓连接等很多常见问题在正文中会结合具体问题来探讨。

本书是吉林大学机械学院工程力学结构分析室多年分析经验的一次整理和总结，是集体智慧的结晶。感谢我们的老师周振平教授的支持和鼓励，感谢长春奥卡姆工程设计有限责任公司设计人员的大力支持，感谢实验室结构分析人员的普遍支持。

张洪涛

前 言

在实际的工程结构分析中,为保证设备能够安全地工作,需要进行多方面分析,设备必须有足够的强度、刚度,这也是分析项目中经常涉及的内容。在具体的分析过程中会遇到很多问题,例如软件功能上的延伸、不同简化处理的研究、不同分析软件间的比对、试验和解析法校核等,通过反复的比对和研究,逐渐加深对结构的认识,希望能够为结构设计人员提供有效的参考数据。

本书的编写宗旨在于工程实际问题本身的阐述、解决方案的探讨、处理过程的具体描述、结果的对比研究等,希望在读者遇到自己的实际问题时有一定的参考价值。由于本书引用的实例多是我们实验室这些年接触到的实际问题,有些涉及企业的保密问题,所以关于结构的很多数据做了处理。

目前市面上已出版的与 Pro/Engineer 的 Mechanica 结构分析模块(以下简称 Pro/Mechanica)相关的书籍很多,普遍存在的问题是较少涉及在实际项目中一定会遇到的难点,或者是具体项目实施过程中应该注意的问题,很少涉及指导性建议或经验性分析。

本书以作者多年实践积累的分析项目为依托,深入研究了 Pro/Mechanica 模块在解决实际问题过程中的有效性,非常适合有一定分析经验的技术人员阅读,也适合从事实际问题研究的大专院校的实验室人员使用。

本书不是规范的 Pro/Mechanica 教程,只在涉及相关分析功能时作一些实用性的介绍,比如螺栓连接、接触定义、刚性区域、受力连接、测量定义等。本书只是将 Pro/Mechanica 作为一个有效的分析工具,强调在实际问题中如何合理、高效地应用,同时结合 Ansys 软件、Algor 软件、现场测试、解析法计算等进行不同角度、不同程度的对比研究,旨在找到一种有效的、可靠的解决工程实际问题的方法。

与同类书籍相比,本书具有以下特点:

1. 分析项目中的关键技术剖析。
2. 分析功能的针对性强。
3. 不同软件间的对比分析。
4. 从实际分析项目中抽象例题。
5. 提供了关于批量处理部分的完整程序。
6. 非教程式的叙述。

全书共分 8 章:第 1 章介绍 Pro/Mechanica 的基本特点;第 2 章从软件间的

对比分析、试验与分析的对比研究角度来说明 Pro/Mechanica 的有效性；第 3 章通过利用 Pro/Mechanica 进行结构内部连接关系简单的零部件分析，重点介绍了关于载荷、约束的施加经验；第 4 章介绍使用 Pro/Mechanica 对铰接、螺栓连接、接触定义处理，同时介绍影响结果精度的众多因素；第 5 章介绍使用 Pro/Mechanica 进行复杂设备的连接，同时让读者深刻了解到计算效率和结果精度的关系；第 6 章介绍了当需要对很多工况进行分析时的处理方式，即批量处理程序的应用，这里主要针对作者已经实现的二次开发工具；第 7 章介绍了与参数化建模相关的项目实现和更好的参数化思路；第 8 章对 Pro/Mechanica 中经常遇到的实用技巧进行了说明和探讨。

随书光盘中包含了本书涉及的一些模型及结果、相关操作的视频，还有各章节中引用的图片，其中相应的结果云图是值得查看的。建议在浏览光盘中的文件时，先看看根目录下的“说明.txt”，然后再开始使用其中的文件。

张洪涛

目 录

序

前言

第 1 章 Pro/Mechanica 简介 1

1.1 寻找适合的分析环境 1

1.2 Pro/Mechanica 的特点 2

第 2 章 Pro/Mechanica 的有效性 证明 3

2.1 等强度梁的应力分析 3

2.1.1 试验研究 3

2.1.2 解析法计算 3

2.1.3 Pro/Mechanica 分析 5

2.1.4 各种方案对比研究 6

2.2 材料力学的组合变形问题 分析 8

2.2.1 解析法计算 9

2.2.2 Algor V18 梁分析 10

2.2.3 Pro/Mechanica 梁分析 10

2.2.4 Pro/Mechanica 实体分析 11

2.2.5 各种方案对比研究 18

2.3 弹性力学的孔边应力集中 问题分析 19

2.3.1 解析法计算 19

2.3.2 Pro/Mechanica 壳单元 分析 20

2.3.3 Ansys 12.0 经典环境壳 单元分析 22

2.3.4 各种方案对比研究 22

2.4 接触问题验证 1 25

2.4.1 Pro/Mechanica 实体分析 26

2.4.2 对比研究 28

2.5 接触问题验证 2 28

2.5.1 解析法计算 29

2.5.2 Pro/Mechanica 悬臂梁 验算 29

2.5.3 Pro/Mechanica 接触计算 29

2.5.4 Ansys 12.0 经典环境 接触计算 30

2.5.5 Ansys 12.0 WorkBench 接触计算 31

2.5.6 各种方案对比研究 32

2.6 小结 32

第 3 章 零部件的分析 33

3.1 “三弹性体”对计算精度 的影响 33

3.2 某水泥钢板仓分析 36

3.2.1 模型处理 37

3.2.2 载荷校核 39

3.2.3 计算结果 43

3.3 某塔帽结构分析 43

3.3.1 模型处理 44

3.3.2 结果对比 51

第 4 章 简单装配体的分析 54

4.1 两两装配关系研究 54

4.2 某整体俯仰式斗轮机配 重架分析 55

4.2.1 研究 1: 载荷施加方式对结 构应力的影响 56

4.2.2 研究 2: 销轴模拟方式对被 连接件应力的影响 59

4.2.3 研究 3: 网格密度及求解方 式对被连接件应力的 影响 63

4.2.4 研究 4: 网格密度及求解方

式对销轴应力的影响	64	模拟	116
4.2.5 问题总结	71	5.2.5 C 柔性腿侧球铰的模拟	118
4.3 某塔架地基法兰螺栓		5.2.6 D 拨叉与两侧带有间隙的	
分析	72	接触	120
4.3.1 Ansys 12.0 WorkBench 的		5.2.7 E 柔性侧的位移限制	121
螺栓分析	72	5.2.8 计算结果	122
4.3.2 Pro/Mechanica 的螺栓		5.3 某门式斗轮堆取料机	
分析	76	结构分析	122
4.3.3 问题总结	76	5.3.1 要点 1: 各部件基本模型	
4.4 某吊臂搭接部位接触		建立	124
分析	79	5.3.2 要点 2: 各部件间连接	
4.4.1 研究 1: 实体划分区域大小		关系模拟	126
对应力分布的影响	81	5.3.3 要点 3: 各类载荷施加	135
4.4.2 研究 2: 滑块的材料对接触		5.3.4 要点 4: 计算工况研究	135
应力的影响	83	5.3.5 要点 5: 模型的分析与具体	
4.4.3 研究 3: 网格剖分密度的影		安装过程的探讨	137
响, 不同求解方式的		5.3.6 模型的调试与完善	140
区别	84	5.3.7 部分计算结果说明	141
4.4.4 问题总结	86	5.3.8 问题总结	146
4.5 小结	86	5.4 小结	146
第 5 章 复杂装配体分析	87	第 6 章 关于批量处理的研究	148
5.1 简易车架模型研究	87	6.1 批量计算问题的提出	148
5.1.1 研究 1: 载荷施加方式		6.2 解决办法	148
研究	90	6.3 批量程序具体应用说明	149
5.1.2 研究 2: 接触定义研究	98	6.3.1 前期准备	149
5.1.3 研究 3: 连接部位 C6 销轴		6.3.2 Pro/Engineer 界面操作生成	
接触问题研究	106	批量计算文件	151
5.1.4 研究 4: 多种载荷组合批量		6.3.3 批量计算文件的提交	156
处理研究	109	6.3.4 批量结果提取	157
5.1.5 问题总结	112	第 7 章 关于参数化建模的	
5.2 某门式刮板取料机连接		研究	159
关系研究	113	7.1 参数化建模的提出	159
5.2.1 设备简介	113	7.2 以往的参数化建模项目	
5.2.2 研究内容	114	回顾	159
5.2.3 A 钢丝绳卷扬系统的		7.2.1 整体俯仰式斗轮机上部金属	
模拟	114	结构参数化建模处理系统	
5.2.4 B 刮板悬臂架根部铰接的		介绍	160

7.2.2 底盘结构件参数化建模 程序介绍	160	8.2 关于 P-Level 的理解	181
7.2.3 深松铲形状优化程序 介绍	162	8.2.1 问题研究	182
7.2.4 装载机工作装置参数化建模处 理系统介绍	165	8.2.2 Pro/Mechanica 分析模型	182
7.3 当前参数化建模方案 介绍	168	8.2.3 Ansys 经典环境分析 模型	182
7.4 小结	170	8.2.4 结果对比	183
第 8 章 Pro/Mechanica 常用		8.2.5 小结	184
功能研究	171	8.3 关于分解视图功能在后 处理环境中的实用性	185
8.1 关于壳对与壳的研究	171	8.4 关于接触的理解	187
8.1.1 问题研究	171	8.4.1 一种力的传递行为	187
8.1.2 模型 1: 使用壳单元 分析	174	8.4.2 只发生在“实体表面” 之间	188
8.1.3 模型 2: 使用实体单元 分析	175	8.4.3 接触定义的方式	188
8.1.4 模型 3: 零件环境中利用 【壳对】定义的壳单元 分析	176	8.4.4 接触定义的继承	191
8.1.5 模型 4: 零件环境中【壳对】 定义, 组件环境中分析	177	8.4.5 接触定义的验证	192
8.1.6 结果对比	177	8.4.6 接触问题研究实例	192
8.1.7 小结	178	8.5 关于结果查看中几个 常用功能	208
		8.5.1 文件菜单功能列表	208
		8.5.2 查看菜单列表	210
		8.5.3 插入菜单列表	213
		8.5.4 信息菜单列表	214
		8.5.5 格式菜单列表	217

第1章 Pro/Mechanica 简介

1.1 寻找适合的分析环境

Pro/Engineer 野火版 4.0 的功能模块众多，不同的行业从自身的需求出发会有不同的应用，我们实验室一直从事大型复杂金属结构的计算，所以着重对 Pro/Mechanica 模块进行了研究和应用。

所谓“工欲善其事，必先利其器”，切实根据我们的实际项目要求，找到一个合适（而非功能强大、分析全面）的工具非常重要。在采用 Pro/Mechanica 模块进行常规的结构分析之前，我们使用的分析软件主要是 Algor 和 Ansys。

Algor 软件的易用性很好，我们根据实际项目需要，开发了一批实用工具，从最初的 SAP93 开始，到 AlgorV19，一直用了五六年，但由于版本的更新程度太大，V20 版本甚至改变了整个程序的架构，使得我们先前开发的高效工具不能有效使用了，继续应用 Algor 软件已经不能满足我们的实际需求，我们想到了 Ansys 软件。

Ansys 软件的 APDL 语言对于实现自动化计算来说非常好，尽管其经典环境的前处理模块操作起来不顺手，但是结合 HyperMesh 的强大功能后，前处理的不方便就不再是问题了。使用过 Ansys 软件的人都会有这样的基本认识，即功能强大，但易用性差，对使用人员的专业知识要求高，不利于工程设计人员广泛应用（所以才有了 Ansys WorkBench 环境的出现）。随着我们实际项目中常规分析工作量的逐渐增加，并且对结构局部分析精度的要求提高，我们需要找到一种易于使用，且便于使用的软件。Ansys 软件已经不能满足我们的要求了，主要的原因是这个软件对人员的能力要求高，不易在短时间内掌握，再加上每次分析都是经过 HyperMesh 处理后再导入 Ansys 软件中，先不说局部几何特征的损失，而且当原始模型有不多的改动时也要重复这一过程。此外，由于 Ansys 软件采用的是低阶单元，需要增加网格数量来提高求解精度，这也要求模型处理人员有相当的分析经验。

对于 Pro/Mechanica，经过一段时间的有效性研究，尤其是经过软件之间的对比、或是解析法计算、或是现场测试后，我们认为这个集成环境适合我们现在的工作需求，目前我们实验室已经有一批人在使用它进行常规的结构分析。从开始接触 Pro/Mechanica 到可以实际应用的周期很短，从分析的精度上也能得到保

证,同时由于集成环境的一体化特点,当原始几何模型有不多的改动时,没有产生更多的重复工作。再加上其良好的二次开发环境,我们根据项目的多工况计算要求,在 Excel 2003 中通过 VB API 开发了批量定义计算文件的工具,目前这个工具应用很好,只要 PTC 继续提供 VB API (从 4.0 开始 PTC 提供了 VB API),那么这个工具就会一直可用。另外,由于 PTC 一开始的定位就是参数驱动,这使得我们可以通过建立参数化的力学分析模型对系列产品进行分析。总之,在不断的深入使用过程中,越来越认为这个环境实用、好用。

1.2 Pro/Mechanica 的特点

Pro/Mechanica 采用 P 方法形成单元刚度方程,对于常规结构静力分析很有效,应用到装配件结构分析时,可以大大降低模型简化的难度和工作量,通过自动检测连接并定义接触,使得我们可以更加专注于模型细节的处理,再配合上 PTC 的单一数据库特点,使得创建参数驱动的分析模型很方便,在具体的实践过程中,通过分析软件之间的对比,认为这个模块使用更加简捷,计算效率同样很高,计算结果精度同样很好,在参数驱动方面尤其好。尤其对于已经熟悉 Pro/Engineer 野火版 4.0 的建模环境的设计人员来说,更加适合学习和应用。

对于具体问题,大体解决思路是利用厂方提供的原始设计模型,如果是在 Pro/Engineer 环境中建立的几何模型,则处理为 Pro/Mechanica 中可以识别的实体、壳等模型,按照给定的计算载荷组合,批量计算。如果是 CAD 模型或者是图样,则在 Pro/Engineer 野火版 4.0 中建立表达几何的线、面、块,然后到 Pro/Mechanica 中赋予有限元属性,按照给定的工况计算。

为了实现批量计算,我们实验室对软件进行了一定程度的二次开发,实现了计算模型的批量定义,然后编制了通用的批处理文件,对已定义的批量计算文件进行提交,最后,对计算成功后的结果文件进行了批量结果提取,整个过程包含三个主要过程:

- 1) 批量定义计算文件。
- 2) 批量提交计算文件。
- 3) 批量提取结果。

利用这些自身的和后期开发的功能,目前涉及的项目基本都可顺利实施了。

第 2 章 Pro/Mechanica 的有效性证明

Pro/Mechanica 只是 Pro/Engineer 野火版 4.0 中的一个功能模块, 而 Pro/Engineer 野火版 4.0 是专业的计算机辅助设计 (CAD) 软件, 而非计算机辅助分析 (CAE) 软件。不过, CAD/CAE 系统正在实践着设计分析一体化的发展方向, 几乎所有的 CAD 厂家都认识到 CAE 的重要性, 都先后在 CAD 环境中加入了 CAE 功能模块。比如 AutoCAD 中加入了 Algor 软件作为其中的分析模块, Solid-Works 中集成了 COSMOSWorks, CATIA、UG 等当前流行设计软件中也都有自己的分析模块。目前, CAD 软件中集成的 CAE 模块功能都已经非常强大, 并且还在不断加强。

2.1 等强度梁的应力分析

对材料力学组合实验台里面的等强度梁实验装置与部件进行研究, 得到等强度梁的应力分布。可以用表 2-1 中的 3 种方案来得到结果。

表 2-1 等强度梁研究方案

序号	方 案	说 明
1	试验研究	试验是一个非常有效的手段, 通过试验可以增加我们对分析结果的信心和分析精度的认识
2	解析法计算	对这个简单问题, 解析法很容易就可以得到理论解
3	Pro/Mechanica 分析	利用 Pro/Mechanica 环境进行建模、分析, 得到关心区域的应变值

2.1.1 试验研究

等强度梁试验模型如图 2-1 所示, 当悬臂梁上施加系列砝码时, 测得应变数据见表 2-2。

2.1.2 解析法计算

等强度梁试验模型几何数据如图 2-2 所示。

当 D0 位置施加一个载荷 F 时, 距加载点 x 距离的断面上弯矩为: $M_x = F \times x$, 相应断面上的最大应力为

$$\sigma = M_x / W$$

式中 W ——抗弯截面系数。

断面为矩形， b_x 为宽度， h 为厚度，则： $W = b_x \times h^2/6$ ，因而断面上的最大应力为： $\sigma = 6 \times F \times x / (b_x \times h^2)$ 。

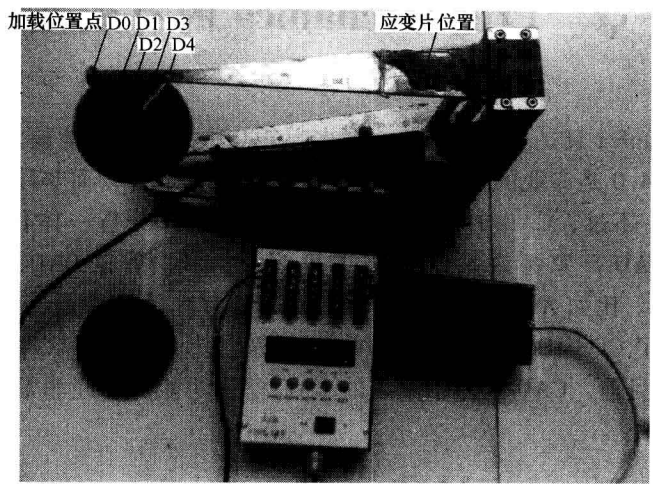


图 2-1 试验模型图（D0 位置加载 1 个砝码）

表 2-2 试验数据

加载序号	加载位置点	砝码数量	应变值(10^{-6})	试验应力值/MPa
1	D4	0	清 0	
2	D4	1	55	11.55
3	D3	1	57	11.97
4	D2	1	61	12.81
5	D1	1	64	13.44
6	D0	1	71	14.91
7	D0	2	141	29.61
8	D0	3	212	44.52
9	D0	4	284	59.64
10	D0	5	355	74.55
11	D0	6	427	89.67
12	D0	7	499	104.79
13	D4	7	390	81.90
14	D4	6	334	70.14
15	D4	5	278	58.38
16	D4	4	222	46.62

(续)

加载序号	加载位置点	砝码数量	应变值(10 ⁻⁶)	试验应力值/MPa
17	D4	3	165	34.65
18	D4	2	110	23.10
19	D4	1	54	11.34
20	D4	0	回 0	

说明：每个砝码质量为 505g，试验应力值为应变值 × 0.21。

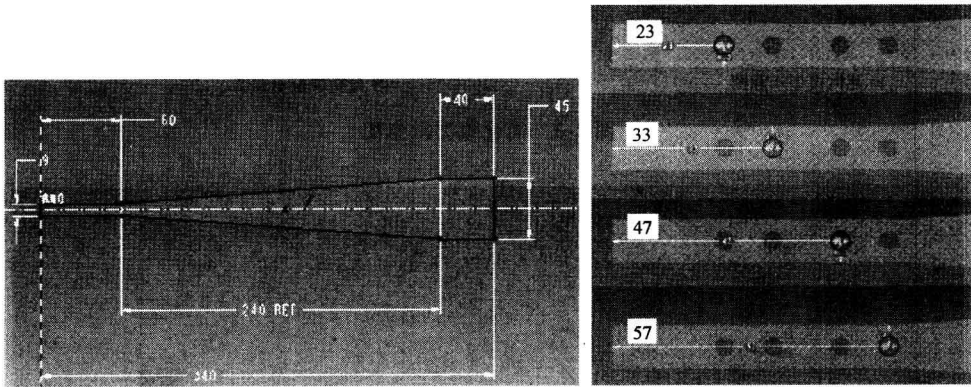


图 2-2 等强度梁试验模型几何数据图（厚度 h 为 3.7mm）

所谓等强度，即指各个断面在 D0 位置施加的力的作用下应力相等，即 σ 值不变。显然，当梁的厚度 h 不变时，梁的宽度必须随着 x 的变化而变化，即 b_x 与 x 的比值为定值，由此得到 $b_x/x = 45/300 = 0.15$ 。

当 $F = 0.505 \times 9.8\text{N} = 4.949\text{N}$ ，即在 D0 位置施加一个砝码时，由最大应力公式得到此时的应力值为 14.46MPa，即 $\sigma = \frac{6 \times F \times x}{b_x \times h^2} = \frac{x}{b_x} \times \frac{6 \times F}{h^2} = \frac{1}{0.15} \times \frac{6 \times 4.949}{3.7 \times 3.7}\text{MPa} = 14.46\text{MPa}$ （试验应力值为 14.91MPa）。

注：在 D0 位置施加 N 个砝码时的应力值是 1 个砝码时应力值的 N 倍。

2.1.3 Pro/Mechanica 分析

在标准模块中建立零件，采用实体单元分析，默认网格划分即可，根据实验台实际情况施加载荷与约束，同时定义应力分量的测量，便于批量提取结果。几何模型见图 2-3a，分析模型见图 2-3b，Stress XX 分量结果云图如图 2-4 所示，试验数据见表 2-3。

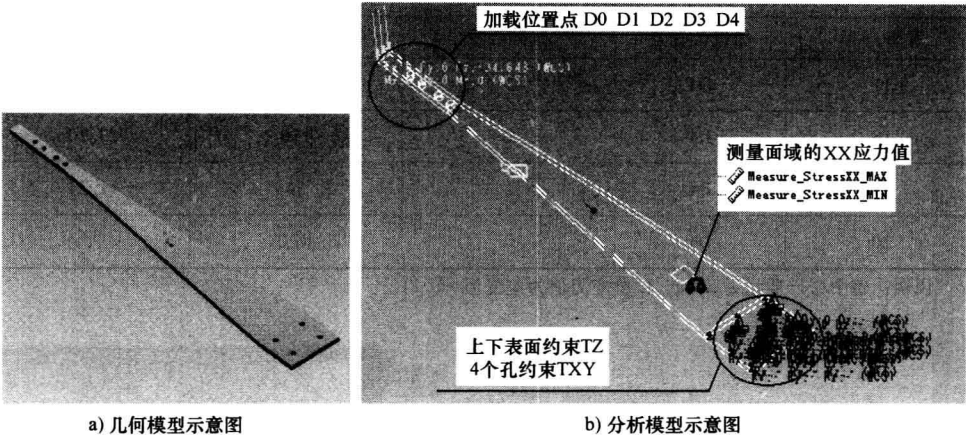


图 2-3 简化模型示意图

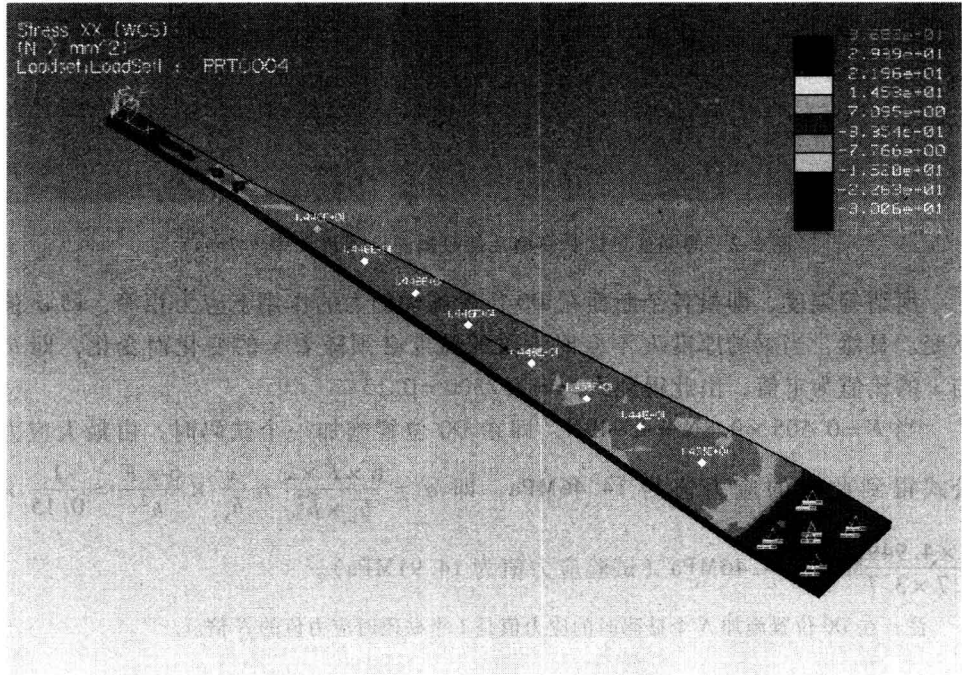


图 2-4 D0 位置施加 1 个砝码时的 XX 应力结果云图（单位：MPa）

2.1.4 各种方案对比研究

由表 2-4 和表 2-5 的数据可以看到 Pro/Mechanica 分析的结果是很可靠的。在实际操作过程中，定义了砝码质量参数和砝码个数参数，这样在定义分析文件

时, 只需修改砝码个数参数值就可以实现计算工况的改变, 模型及结果文件见随书光盘。

表 2-3 应力分量 XX 结果提取数据

标识	模型 Z 向最大位移/mm	最大 XX 应力/MPa	最小 XX 应力/MPa	平均值/MPa
A_D0_F1	-1.68	14.55	14.18	14.36
A_D0_F2	-3.35	29.10	28.36	28.73
A_D0_F3	-5.03	43.64	42.54	43.09
A_D0_F4	-6.71	58.19	56.72	57.45
A_D0_F5	-8.38	72.74	70.90	71.82
A_D0_F6	-10.06	87.29	85.07	86.18
A_D0_F7	-11.73	101.84	99.25	100.55
A_D1_F1	-1.44	13.26	13.00	13.13
A_D2_F1	-1.34	12.64	12.37	12.51
A_D3_F1	-1.20	11.87	11.59	11.73
A_D4_F1	-1.11	11.31	11.03	11.17
A_D4_F2	-2.21	22.62	22.05	22.33
A_D4_F3	-3.32	33.93	33.08	33.50
A_D4_F4	-4.43	45.24	44.10	44.67
A_D4_F5	-5.54	56.55	55.13	55.84
A_D4_F6	-6.64	67.85	66.15	67.00
A_D4_F7	-7.75	79.16	77.18	78.17

说明: 计算的工况 A_D0_F1 为 D0 位置施加 1 个砝码, 依此类推。

表 2-4 试验、解析法、Pro/Mechanica 应力值对照

加载序号	加载位置点	砝码数量	试验数据计算后得到的应力值/MPa	解析法计算的应力值/MPa	Pro/Mechanica 计算的应力值/MPa
1	D4	0			
2	D4	1	11.55		11.17
3	D3	1	11.97		11.73
4	D2	1	12.81		12.51
5	D1	1	13.44		13.13
6	D0	1	14.91	14.46	14.36
7	D0	2	29.61	28.92	28.73
8	D0	3	44.52	43.38	43.09
9	D0	4	59.64	57.84	57.45