

万水
ANSYS 技术丛书

ANSYS

工程分析进阶实例



王呼佳 陈洪军 主 编
包 陈 吴志俊 等编著
余伟炜 董 城



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

万水 ANSYS 技术丛书

ANSYS 工程分析进阶实例

王呼佳 陈洪军 主编

包 陈 吴志俊 余伟炜 董 城 等编著

中国水利水电出版社

内 容 提 要

本书从基础、实用技术和工程分析三个层次讲述了大型有限元分析软件 ANSYS 的使用, 其工程背景深厚、内容丰富、讲解详尽, 内容安排由浅入深, 适用于不同层次的 ANSYS 用户。命令流操作方式是 ANSYS 有别于其他有限元分析软件的一大特色, 功能十分强大, 使用十分方便。本书以命令流方式为主, 提供从命令流操作学习 ANSYS 的平台。

本书分为 3 篇, 分别为教学范例篇、专题技术实例篇和工程实例篇。教学范例篇对使用命令流进行有限元分析的过程进行系统介绍, 包括基本的 APDL 语法介绍、前处理、加载求解和后处理的常用命令及其实例。专题技术实例篇是根据用户在使用 ANSYS 过程中容易遇到的问题以及常用分析技术而精选出来的一系列专题, 涵盖了 ANSYS 分析的各个方面。工程实例篇根据 ANSYS 在实际工程中的应用领域, 分为土木工程、机械工程和电子工程三部分, 每个部分选取典型的应用实例, 同时第 6 章中给出了最新 ANSYS Workbench 的一个应用实例, 以便读者了解 ANSYS 强大的协同仿真技术。

读者在阅读时, 可以到中国水利水电出版社网站 (<http://www.waterpub.com.cn/softdown/>) 下载本书配套的命令流文件, 方便读者上机练习, 以便尽快掌握工程实际问题的分析过程和步骤, 提高学习效率。

本书适用于土木、机械、力学及电子工程专业的高年级本科生、研究生和工程技术人员, 并可作为学习掌握 ANSYS 软件的参考教材, 本书特别适合希望在 CAE 行业中提升职业竞争力的读者。

图书在版编目 (CIP) 数据

ANSYS 工程分析进阶实例 / 王呼佳, 陈洪军主编.

—北京: 中国水利水电出版社, 2006

(万水 ANSYS 技术丛书)

ISBN 7-5084-4084-6

I. A... II. ①王...②陈... III. 有限元分析—应用程序, ANSYS IV. O241.82

中国版本图书 CIP 数据核字 (2006) 第 113335 号

书 名	ANSYS 工程分析进阶实例
作 者	王呼佳 陈洪军 主编 包 陈 吴志俊 余伟伟 董 城 等编著
出版 发行	中国水利水电出版社 (北京市三里河路 6 号 100044) 网址: www.waterpub.com.cn E-mail: mchannel@263.net (万水) sales@waterpub.com.cn 电话: (010) 63202266 (总机)、68331835 (营销中心)、82562819 (万水)
经 售	全国各地新华书店和相关出版物销售网点
排 版	北京万水电子信息有限公司
印 刷	北京蓝空印刷
规 格	787mm×1092mm 16 开本 27.5 印张 675 千字
版 次	2006 年 11 月第 1 版 2006 年 11 月第 1 次印刷
印 数	0001—4000 册
定 价	48.00 元

凡购买我社图书, 如有缺页、倒页、脱页的, 本社营销中心负责调换

版权所有·侵权必究

前 言

ANSYS 是最为通用和有效的商用有限元软件之一，它不断吸收当今世界最新的计算方法和计算机技术，引领着有限元界的发展趋势，并为全球工业界所广泛接受，拥有全球最大的用户群。它融结构、传热学、流体、电磁、声学 and 爆破分析于一体，具有极为强大的前后处理及计算分析能力，能够同时模拟结构、热、流体、电磁以及多种物理场间的耦合效应。自落户中国以来，ANSYS 以其强大的功能、可靠的质量赢得了中国 CAE 用户的认可，并在我国的航空航天、铁路运输业、石油化工、机械制造、能源、汽车、电子、土木工程、造船、生物医学、轻工、地矿、水利等领域得到了广泛应用，为各领域的科学研究和工程应用做出了巨大的贡献。

命令流是 ANSYS 软件的一大特色，功能十分强大，使用十分方便。它是一种类似于 FORTRAN 的解释性语言，它与 GUI（图形界面）一样，能够完成所有的分析过程。命令流也是 ANSYS 参数化有限元分析、分析批处理、优化设计、自适应网格以及二次开发的主要基础。ANSYS 用户掌握命令流方式后，能够极大地丰富分析手段、提高工作效率。无论是从 GUI（菜单操作）还是命令流开始学习 ANSYS，熟练掌握命令流操作始终都是学好 ANSYS 软件所必需的。

本书以 ANSYS 9.0 版本为依据，以命令流操作为主，依托于大量实例（篇幅约占本书的 80%），具体讲解运用 ANSYS 高级有限元分析软件处理工程问题的思路和详细步骤，手把手教给读者面对一个工程问题如何筹划方案、建立模型、分析计算、结果处理等。根据由浅入深的原则分为 7 章讲述，第 1、2 章通过教学实例介绍 ANSYS 的基础分析方法；第 3、4 章作为专题篇，重点介绍实用性较强的 16 个专题技术；第 5~7 章介绍 ANSYS 在土木、机械及电子行业中的典型应用。

读者对象

本书适用于土木、机械、力学及电子工程专业的高年级本科生、研究生和工程技术人员，并可作为学习掌握 ANSYS 软件的参考教材。本书特别适合希望在 CAE 行业中提升职业竞争力的读者。

本书特色

- 由浅入深——在内容的安排上，层次分明，读者可以从教学实例篇入门，再由专题技术篇提升实际分析能力，最后通过大量的工程实例练习达到分析工程问题的能力。
- 热点专题技术——为了增强读者解决实际问题的能力，专题技术实例篇选取了 16 个热点专题技术集中讲述，包括用户在使用 ANSYS 过程中最有可能遇到的问题，以及常用的分析技术。
- 把握热点应用领域——ANSYS 在土木工程、机械工程和电子工程领域应用非常广泛，本书的工程实例篇涵盖了上述各个领域中的典型应用，具有非常重要的参考价值。
- 强大的工程应用背景——本书列举的工程实例都是从实际工程、科研项目中提炼出来，

具有很强的参考价值。同时着重讲解如何用 ANSYS 解决实际科研、工作中的问题。

- 命令流的使用——本书以命令流操作方式为主，提供了系统学习命令流的平台，有效帮助读者具备高级分析能力。
- 配备所有案例的命令流文件——让读者的学习过程更加高效，并且对命令流做了详细注释，最大限度地增加可阅读性。该命令流可以到中国水利水电出版社网站下载。

分工与致谢

本书由西南交通大学工程力学实验室 (Engineering Mechanics Laboratory) 工作人员编写，王呼佳、陈洪军任主编，包陈、吴志俊、余伟炜、董城与毛江徽担任部分编写工作，全书由姚新军审稿。同时参与本书编写工作的还有王斌、王晓艳、肖静等，在此一并感谢。

本书承蒙西南交通大学柳葆生教授、蔡力勋教授、成志强副教授的大力支持，对本书给予了诸多指导，在此深表感谢。另外华为技术有限公司叶裕明工程师，西南交通大学肖新标博士、刘宇杰博士、阚前华博士、宋久鹏博士、张娟博士、侯延辉博士、李钊、范小欣、黄光辉、徐尹杰、金蕾、范玲俐、何晓霞，中山大学张庆家对本书的编写亦给予了实际的指导和关心，在此表示感谢。在本书的创作期间得到中国水利水电出版社老师的大力支持，正是他们辛苦的付出，才使得本书能够在第一时间面向读者。对于在创作过程中一直给予关心支持的爱人、朋友、家人、同事们，在此一并表示感谢。

由于时间仓促，作者水平有限，书中错误、纰漏之处难免，敬请广大读者批评指正。

编者

2006 年 9 月

目 录

前言

第一篇 教学范例篇

第 1 章 APDL 参数化语言简述	2
1.1 APDL 概述	2
1.1.1 APDL 简介	2
1.1.2 如何生成 APDL 文件	3
1.1.3 使用 APDL 进行有限元分析的实例	4
1.2 参数与变量参数的用法	8
1.2.1 参数与变量参数命名规则	8
1.2.2 参数和变量参数的定义与赋值	9
1.3 数组参数的用法	9
1.3.1 数组参数概述及类型	10
1.3.2 数组参数的定义与赋值	11
1.3.3 数组参数的显示	11
1.3.4 数据文件的写出与读入	11
1.4 表参数的用法	12
1.5 流程控制	13
1.5.1 循环结构	13
1.5.2 分支结构	14
1.6 宏文件	14
1.6.1 宏的创建	14
1.6.2 宏的使用	15
1.6.3 宏的局部变量	16
1.6.4 宏嵌套	16
第 2 章 使用 ANSYS 命令流进行有限元分析	17
2.1 坐标系统使用的方法与实例	17
2.1.1 总体坐标系	17
2.1.2 局部坐标系	18
2.1.3 工作平面	19
2.1.4 综合教学实例	21
2.2 直接法生成有限元模型	26
2.2.1 节点的生成	27

2.2.2	单元的生成	28
2.2.3	编号控制	30
2.2.4	综合教学实例	31
2.3	实体建模	39
2.3.1	概述	39
2.3.2	群组命令	40
2.3.3	实体模型的生成	40
2.3.4	布尔运算	48
2.3.5	综合实例	52
2.4	网格生成	57
2.4.1	定义单元属性	58
2.4.2	网格划分控制	59
2.4.3	网格的生成	60
2.4.4	综合实例	60
2.5	载荷施加与求解	68
2.5.1	载荷的种类	68
2.5.2	载荷的施加	69
2.5.3	载荷步设置	70
2.5.4	求解	71
2.5.5	综合实例	72
2.6	后处理	73
2.6.1	常用通用后处理和时间后处理技术	74
2.6.2	综合实例	75

第二篇 专题技术实例篇

第3章	热门高级分析技巧选讲	80
3.1	量纲问题	81
3.1.1	量纲问题概述	81
3.1.2	量纲换算方法	81
3.1.3	量纲选用原则	83
3.2	坐标系使用总结	83
3.2.1	坐标系分类	83
3.2.2	总体坐标系与局部坐标系	84
3.2.3	显示坐标系	86
3.2.4	节点坐标系	87
3.2.5	单元坐标系	88
3.2.6	结果坐标系	89
3.2.7	工作平面	89

3.3	初应力场的获得和施加.....	91
3.3.1	初应力载荷概述	91
3.3.2	初应力文件格式	92
3.3.3	应用示例	93
3.4	函数边界条件加载	97
3.4.1	复杂边界条件施加方法概述.....	97
3.4.2	函数边界条件加载的基本过程.....	97
3.4.3	使用函数编辑器的一些基本概念.....	97
3.4.4	应用实例	98
3.5	移动载荷的施加	102
3.5.1	移动载荷概述	102
3.5.2	移动载荷应用实例	103
3.6	复杂面载荷的施加	105
3.6.1	基本思路	105
3.6.2	应用实例	106
3.7	查看某一截面结果	108
3.7.1	查看截面结果的方法	108
3.7.2	应用实例	109
3.8	杆梁壳单元内力的输出.....	111
3.8.1	定义输出选项	111
3.8.2	定义单元表	112
3.8.3	绘制内力图	114
3.8.4	应用实例	114
3.8.5	注意事项	116
3.9	载荷工况组合	117
3.9.1	载荷工况组合方法	117
3.9.2	保存组合载荷工况	119
3.9.3	应用实例	122
3.10	使用查询函数	124
3.10.1	查询函数概述	124
3.10.2	对象信息查询函数	124
3.10.3	系统信息查询函数/INQUIRE.....	126
3.10.4	应用实例	128
第 4 章	常用高级分析功能.....	129
4.1	预应力问题	129
4.1.1	预应力问题综述	130
4.1.2	应用实例	132
4.2	梁分析和自定义横截面形状.....	136
4.2.1	梁的综述	137

4.2.2	梁单元的定义及划分	138
4.2.3	载荷的施加	139
4.2.4	后处理	140
4.2.5	横截面形状综述	140
4.2.6	自定义截面	141
4.2.7	BEAM188 和 BEAM189 单元	141
4.2.8	应用实例	142
4.3	耦合及约束方程	144
4.3.1	耦合	145
4.3.2	约束方程	147
4.3.3	应用实例	151
4.4	动力学分析中的阻尼问题	154
4.4.1	阻尼问题概述	154
4.4.2	节点坐标系和总体坐标系	154
4.4.3	阻尼的种类	155
4.4.4	ANSYS 中的阻尼	157
4.4.5	应用分类	159
4.4.6	应用举例	162
4.5	屈曲分析	164
4.5.1	屈曲概述	164
4.5.2	特征值(线性)屈曲分析	165
4.5.3	非线性屈曲分析	166
4.5.4	应用实例	167
4.6	结构可靠性分析	169
4.6.1	结构可靠性分析相关概念	169
4.6.2	可靠性分析过程与步骤	170
4.6.3	可靠性分析总体建议	171
4.6.4	可靠性分析实例	172

第三篇 工程实例篇

第 5 章	土木工程应用实例	178
5.1	钢筋混凝土悬索桥有限元分析	179
5.1.1	问题描述	179
5.1.2	力学及有限元模型	180
5.1.3	初始位置的确定	184
5.1.4	模态分析	194
5.1.5	移动载荷分析	197
5.2	门式刚架轻型钢结构有限元分析	202

5.2.1	问题描述	203
5.2.2	力学及有限元模型	203
5.2.3	模型建立	209
5.2.4	静力分析	216
5.2.5	模态分析	218
5.2.6	地震时程分析	219
5.3	高层与高耸结构抗风抗震分析	223
5.3.1	问题描述	223
5.3.2	力学及有限元模型	224
5.3.3	模态分析	227
5.3.4	风载荷分析	233
5.3.5	地震分析	238
5.4	大型渡槽结构地震响应分析	244
5.4.1	问题描述	245
5.4.2	力学及有限元模型	246
5.4.3	模态分析	249
5.4.4	地震响应分析	260
5.5	双连拱隧道开挖有限元模拟	264
5.5.1	问题描述	264
5.5.2	力学及有限元模型	265
5.5.3	模型建立	269
5.5.4	加载及求解	279
5.5.5	结果分析	281
第 6 章	机械工程应用实例	289
6.1	龙门起重机结构有限元分析	290
6.1.1	问题描述	290
6.1.2	力学及其有限元模型	290
6.1.3	模型建立	295
6.1.4	自重分析	299
6.1.5	同时考虑重力和移动载荷	301
6.1.6	模态分析	306
6.2	大型回转窑有限元分析	307
6.2.1	问题描述	307
6.2.2	有限元建模	309
6.2.3	加载求解	318
6.2.4	结果分析	318
6.3	法兰结构螺栓装配分析	325
6.3.1	Workbench 概述	326
6.3.2	模型调入	330

6.3.3	加载求解	331
6.3.4	结果后处理	335
6.3.5	FE Modeler 模块中的有用信息	337
6.4	锥形夹头的过盈装配及摩擦分析	340
6.4.1	问题描述	340
6.4.2	力学及有限元模型	341
6.4.3	模型建立	344
6.4.4	加载及求解	351
6.4.5	结果分析	352
6.5	压力容器有限元模拟	357
6.5.1	问题描述	357
6.5.2	力学及有限元模型	359
6.5.3	模型建立	359
6.5.4	加载及求解	365
6.5.5	结果分析	365
第 7 章	电子工程应用实例	371
7.1	电子封装 QFP 结构有限元分析	372
7.1.1	问题描述	372
7.1.2	力学及有限元模型	373
7.1.3	模型建立	376
7.1.4	加载及求解	384
7.1.5	结果分析	385
7.2	CBGA 封装有限元分析	387
7.2.1	问题描述	387
7.2.2	力学及有限元模型	389
7.2.3	模型建立	393
7.2.4	加载及求解	397
7.2.5	结果分析	398
7.3	CSP 封装有限元分析	401
7.3.1	问题描述	402
7.3.2	力学及有限元模型	403
7.3.3	模型建立	405
7.3.4	加载及求解	412
7.3.5	结果分析	413
附录 1	常用 APDL 命令	416
附录 2	常用结构分析命令查询	417
参考文献		429

第一篇 教学范例篇

本篇包括第 1 章 APDL 参数化语言简述和第 2 章使用 ANSYS 命令流进行有限元分析, 简要给出了 ANSYS 中常用的 APDL 命令和语法规则, 主要介绍使用命令流分析时需要用到的基本命令及其使用方法和技巧, 并通过实例加强理解。本篇主要面对学习命令流的入门级读者, 通过本篇的学习, 可以掌握使用命令流进行有限元分析的基础知识。

第 1 章 APDL 参数化语言简述

知识要点:

- APDL 概述
- 参数与变量参数的用法
- 数组参数的用法
- 表参数的用法
- 矢量与矩阵运算
- 流程控制
- 宏文件的生成与使用

本章导读:

在使用 ANSYS 分析问题, 分析问题的标准步骤为: 建立模型、划分网格、加载和求解、结果后处理。若需要对其中的某个步骤做调整与重分析, 仍然采用上述标准分析步骤将会耗费大量的物力与时间。为了提高工作效率, ANSYS 提供了 APDL 参数化设计语言这项分析处理问题的高级技术。

参数化设计语言由类似于 FORTRAN77 的程序设计语言和 1000 多条 ANSYS 命令组成, 提供参数、数组、矢量与矩阵运算、流程控制、宏以及用户子程序等功能。通过 APDL 参数化设计语言, 可以实现参数化的建模、参数化的划分网格、参数化的材料定义、参数化的加载和边界条件定义、参数化的分析控制求解和参数化的结果后处理。

APDL 提供了零件库参数化建模、序列化分析、优化设计和灵敏度研究等高级功能, 是 ANSYS 四大开发功能模块 (参数化设计语言 APDL、用户界面设计语言 UIDL、用户程序特性 UPFs、ANSYS 数据接口) 最重要的部分。掌握 APOL 参数化语言是 ANSYS 用户提高分析效率的基本要求。

1.1 APDL 概述

ANSYS 参数化设计语言 (APDL) 是 ANSYS Parametric Design Language 的缩写, 是一种类似于 FORTRAN 的解释性编程语言, 基于 ANSYS 工作平台, 广泛应用于分析解决各行业的有限元问题之中。

1.1.1 APDL 简介

ANSYS 提供了 2 种工作模式, 即人机交互模式 (GUI) 和命令流输入模式 (APDL)。对于习惯了 Windows 操作界面的初学者来说, 第一种模式因为比较直观, 更容易被初学者接受, 但是当遇到比较复杂的模型或者需要对模型做修改进行重分析时, 使用 GUI 方式进行分析会

导致工作效率大大降低,而且这种方式不利于分析者之间相互交流。

对于 APDL 模式,它避免了 GUI 模式的不足之处,使分析问题变得更轻松愉快,方便分析者交流,更具有大众化的特点。APDL 的主要优点如下:

- 提高工作效率。如网格重划分、重分析、建立参数化零件库和制作宏等。
- 方便交流。交流时可使用参数和程序块。
- 不受操作系统的限制。可在 Windows 和 UNIX 等系统下使用。
- 不受 ANSYS 版本限制。除了极少数命令略有差别,APDL 能在各版本 ANSYS 中直接使用。
- 进行 GUI 无法实现的分析。如优化设计,用户子程序等。

APDL 参数化设计语言能通过参数化变量等功能模块设计修改有限元分析过程,是优化设计、概率分析等高级应用技术的基础。APDL 具有如下功能:

- 参数与变量参数
- 数组参数
- 表参数
- 表达式与函数
- 矢量与矩阵运算
- 流程控制
- 宏
- 用户子程序

用户可以根据需要选择上述的某些功能应用于所分析的具体问题中。当然,学习 APDL 也有一些难点,概述如下:

- 对 APDL 参数化语言的掌握需要有一定的编程基础,需要熟悉常用命令的使用方法和应用技巧。
- 需要有耐心对所编制的 APDL 参数化程序块进行调试。对初学者来说,一般情况下,一段好的 APDL 程序块不是一性能编制成功的,对其中的错误或者不够完善的部分需要耐心地调试。不断排除错误和完善 APDL 程序块的过程正是提高 ANSYS 应用水平的过程。

学习 APDL 参数化语言还需要有学习有限元软件共有的基本要求:

- 需要锲而不舍的学习态度。
- 需要良好的有限元理论基础。
- 需要扎实的专业知识。
- 需要长期的实践锻炼。

具备了上述基础条件,加上本书的辅导,学习 APDL 将会达到事半功倍的效果。

1.1.2 如何生成 APDL 文件

生成 APDL 文件有两种方式。

第一种方式为提取 LOG 文件得到 APDL 文件。在 GUI 操作时,每一次操作将会被 ANSYS 记录在工作目录下的 LOG 文件中,默认的 LOG 文件为 jobname.log,提取 LGG 文件时需要注意:ANSYS 生成的 LOG 文件之中含有大量的冗余判断语句,为了精简 APDL 分析程序段,

需要去除冗余程序段使程序更高效和容易阅读。

第二种方式为直接编制 APDL 文件。对于熟悉 APDL 命令和参数化语言的分析者，可以直接按照 APDL 语言格式编制出 APDL 文件。

上面介绍的两种方法是生成 APDL 文件的主要方式。当然，为了提高分析效率，不能拘泥于只使用其中的一种方法，完全可以将两种方法结合起来，达到事半功倍的效果。

本书的主要目的就是让初学者在较短的时间内了解 APDL 语言，掌握 APDL 语言，直到精通 APDL 语言。

1.1.3 使用 APDL 进行有限元分析的实例

【例 1-1-1】某漏斗状金属板长度为 0.085m，两端宽度为 0.022m，漏斗半径为 0.008m，漏斗处宽度为 0.008m，材料为 Von Mises 多线性各向同性，弹性模量 $E=9.71E10\text{Pa}$ ，泊松比 $\nu=0.3$ 。材料应力应变数据如表 1-1 所示。分析金属板在轴向 0.25mm 位移下的应力与变形。

表 1-1 材料应力应变数据

应变 (mm/mm)	应力 (MPa)	应变 (mm/mm)	应力 (MPa)
0.000402	3.90E+01	0.008534	3.72E+02
0.002118	1.96E+02	0.009548	3.78E+02
0.003137	2.60E+02	0.010442	3.82E+02
0.004109	3.03E+02	0.011548	3.86E+02
0.004631	3.18E+02	0.012236	3.88E+02
0.005293	3.34E+02	0.014749	3.95E+02
0.006131	3.48E+02	0.016139	3.97E+02
0.006926	3.58E+02	0.018424	4.02E+02
0.007748	3.66E+02	0.020001	4.04E+02

提示：本例中采用了 Von Mises 模型，由于应力应变数据中最大应变与最大应力分别为 0.020001mm/mm 和 4.04E+02MPa，当所分析问题中的应力、应变超过最大应力、应变时，需要更全面的应力应变数据或者采用其他的本构模型。

命令流过程如下：

Step 1 环境设置

```
!实例 1-1-1
FINI
/CLE
/FILNAME, EX1-1-1
/TITLE, EXAMPLE 1-1-1
/UNITS, SI
*AFUN, DEG
```

!使用国际单位制
!指定角度单位制为度

Step 2 参数设定

```
*SET, LL, 0.085
```

!长

```

*SET,BJ,0.022      !宽
*SET,RF,0.008      !漏斗半径
*SET,AF,0.008      !漏斗处宽
*SET,EXX,9.71E10   !弹性模量
*SET,vv,0.3        !泊松比

```

Step 3 定义单元与材料

```

/PREP7
ET,1,PLANE182      !定义单元类型为182号单元
MP,EX,1,EXX        !定义弹性模量
MP,NUXY,1,vv       !定义泊松比
KEYOPT,1,3,0       !定义平面应力问题
TB,MISO,1,1,25     !定义本构关系 MISO
TBTEMP,0           !定义温度
TBPT,,0.000402,3.90E7 !在应力应变曲线上定义点
TBPT,,0.002118,1.96E8
TBPT,,0.003137,2.60E8
TBPT,,0.004109,3.03E8
TBPT,,0.004631,3.18E8
TBPT,,0.005293,3.34E8
TBPT,,0.006131,3.48E8
TBPT,,0.006926,3.58E8
TBPT,,0.007748,3.66E8
TBPT,,0.008534,3.72E8
TBPT,,0.009548,3.78E8
TBPT,,0.010442,3.82E8
TBPT,,0.011548,3.86E8
TBPT,,0.012236,3.88E8
TBPT,,0.014749,3.95E8
TBPT,,0.016139,3.97E8
TBPT,,0.018424,4.02E8
TBPT,,0.020001,4.04E8
TBPLOT,MISO,1      !图形显示应力应变曲线，如图1-1所示

```

Step 4 建立四分之一几何模型

```

RECTNG,0,RF+AF/2,0,BL/2 !建立矩形
CYL4,,RF+AF/2,RF        !建立圆面
ASBA,1,2                !面相减得到漏斗
RECTNG,RF+AF/2,LL/2,0,BL/2 !建立矩形平板
AGLUE,1,3               !面粘接，如图1-2所示

```

Step 5 划分网格

```

MSHKEY,1               !打开映射网格开关
MSHAPE,0               !使用四边形或者六面体网格
/PNUM,LINE,1           !显示线的编号
/PSYMB,LDIR,1          !显示线的方向
LPLOT                  !绘制线

```

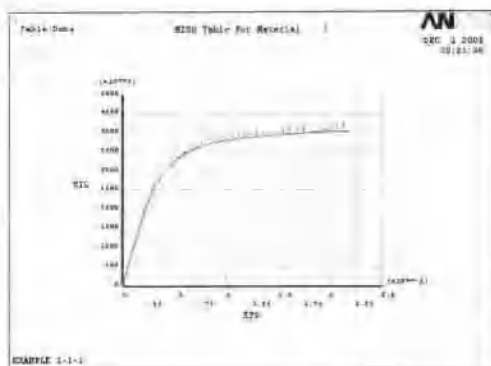


图 1-1 应力应变曲线

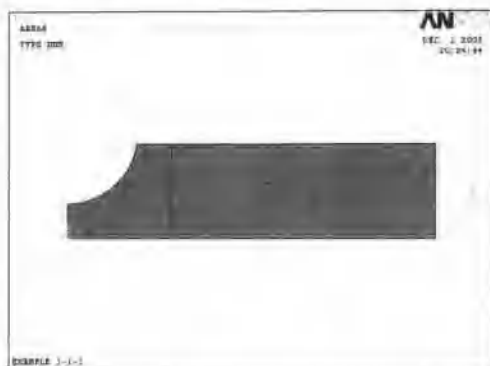


图 1-2 四分之一模型图

```

LESIZE,9,,,6
LESIZE,8,,,6
LESIZE,11,,,12
LESIZE,6,,,6
LESIZE,7,,,6,3
AMAP,2,8,1,7,9
LESIZE,3,,,12
LESIZE,5,,,12
LESIZE,4,,,6
AMESH,1

```

Step 6 生成整体模型

```

NSYM,X,175,ALL
ESYM,,175,ALL
EPLOT
NSYM,Y,350,ALL
ESYM,,350,ALL
EPLOT
NUMMRG,ALL
NUMCMP,ALL
FINI

```

! 设置 9 号线划分份数为 6

! 通过 8,1,7,9 关键点映射 2 号面

! 划分 1 号面, 如图 1-3 所示

! 通过 X 轴对称生成节点, 节点增量 175

! 生成单元

! 合并所有元素

! 压缩编号, 如图 1-4 所示

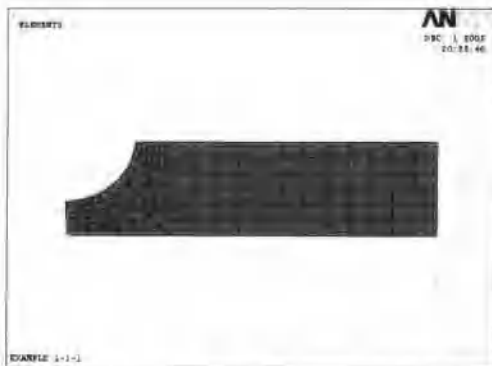


图 1-3 四分之一网格图

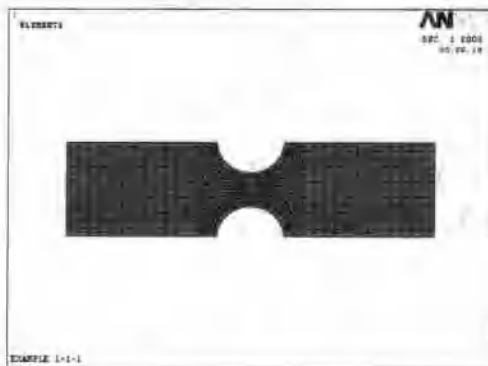


图 1-4 整体模型