

万水 ANSYS 技术丛书

ANSYS



何本国 主编 陈天宇 王洋 等编著

ANSYS

土木工程应用实例

第三版

- 基于ANSYS 12.0平台，深入解析土木工程实例
- 多年ANSYS实际科研与工程经验的总结
- 免费下载典型土木工程实例的命令流文件



中国水利水电出版社
www.waterpub.com.cn

万水 ANSYS 技术丛书

ANSYS 土木工程应用实例

(第三版)

何本国 主 编

陈天宇 王 洋 等编著

内 容 提 要

本书面向广大土木工程的学习人员与科研人员,按照先易后难、深入浅出、通俗易懂、实例丰富的特点,全面而又详细地介绍土木工程中各专业的经典算例,内容十分丰富且极具参考价值。

全书共分为 11 章。首先简单地介绍了有限元 ANSYS 软件的基本知识;然后借助众多经典实例深入阐述 ANSYS 与土木工程分析相关的高级分析技术,包括参数化语言设计、单元的生死、动画制作、时程分析、接触分析等;最后,以土木工程中常见的实际结构为对象,重点、详细而又全面地对混凝土结构、桥梁工程、隧道及地下工程、房屋结构工程、基础工程、边坡工程、水工建筑物及道路与铁道工程等结构进行了有限元仿真分析,实例全面且经典,具有很高的参考价值。学完本书读者能容易、快速、全面地掌握 ANSYS 在土木工程中的应用并进行二次研发。

本书循序渐进、内容完整、实用性强,可作为理工院校土木、力学、建筑等相关专业的高年级本科生、硕士生、博士生与教师学习 ANSYS 软件及其具体应用的教材使用,也可以作为从事土木建筑工程、结构分析工程等专业的科研技术人员学习使用 ANSYS 软件的参考用书。

书中主要实例的命令流都可以到中国水利水电出版社网站和万水书苑免费下载,网址为:<http://www.waterpub.com.cn/softdown/>和 <http://www.wsbookshow.com>,以供学习研究之用。

图书在版编目(CIP)数据

ANSYS土木工程应用实例 / 何本国主编. -- 3版. --
北京:中国水利水电出版社, 2011.10
(万水ANSYS技术丛书)
ISBN 978-7-5084-8799-1

I. ①A… II. ①何… III. ①土木工程—有限元分析—应用程序, ANSYS IV. ①TU

中国版本图书馆CIP数据核字(2011)第137609号

策划编辑:杨庆川 责任编辑:宋俊娥 加工编辑:刘晶平 封面设计:李佳

书 名	万水 ANSYS 技术丛书 ANSYS 土木工程应用实例 (第三版)
作 者	何本国 主 编 陈天宇 王 洋 等编著
出版发行	中国水利水电出版社 (北京市海淀区玉渊潭南路 1 号 D 座 100038) 网址: www.waterpub.com.cn E-mail: mchannel@263.net (万水) sales@waterpub.com.cn
经 售	电话: (010) 68367658 (发行部)、82562819 (万水) 北京科水图书销售中心 (零售) 电话: (010) 88383994、63202643、68545874 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
刷 厂	北京蓝空印刷厂
规 格	184mm×260mm 16 开本 29 印张 711 千字
版 次	2005 年 1 月第 1 版 2007 年 1 月第 2 版 2011 年 10 月第 3 版 2011 年 10 月第 6 次印刷
印 数	17001—21000 册
定 价	56.00 元

凡购买我社图书,如有缺页、倒页、脱页的,本社发行部负责调换
版权所有·侵权必究

第三版前言

本书集合了 ANSYS 程序发展新成果、新技术及其在土木工程中新的应用，使读者能尽快系统掌握并用好该程序。本书通过工程实例加以说明，内容上由浅入深，并编写相应命令流，对于较复杂的例题和程序均有注释。

随着计算机硬件和商业数值模拟计算软件的发展和普及，利用数值模拟技术成为合理、有效的研究手段，随着计算机的飞速发展和广泛应用及有限元理论的日益完善，出现了许多通用和专业的有限元计算软件，并在各个领域得到了广泛的应用。

ANSYS 软件作为一个大型通用有限元分析软件，能够进行结构、热、流体、电磁及声学等学科的研究，广泛应用于土木工程、地质矿产、水利、铁道、汽车交通、国防军工、航空航天、船舶、机械制造、核工业、石油化工、轻工、电子、家用电器和生物医学等一般工业及科学研究之中。ANSYS 软件是第一个通过 ISO 9001 质量认证的大型有限元分析设计软件，是美国机械工程师协会 (ASME)、美国核安全局 (NQA) 及近 20 种专业技术协会认证的标准分析软件。

本书以 ANSYS 12.0 软件为平台，全书共分为 11 章，采用先易后难、通俗易懂、土木工程结构实例全面的特点来介绍 ANSYS 在土木工程中的应用。具体内容安排如下：

第 1 章 土木工程有限元数值模拟简介。主要介绍有限元法的起源、相关概念及其求解步骤。

第 2 章 大型通用有限元软件 ANSYS 简介。主要介绍 ANSYS 的基础知识，如安装与启动、使用界面介绍、文件管理和 ANSYS 分析基本过程等。

第 3 章 土木工程分析中 ANSYS 相关高级技术。主要对与土木工程仿真分析有关的 ANSYS 的高级技术进行了深入阐述，如参数化设计语言、子模型与子结构、自适应网格的划分、单元的生死、图形输出、动画制作、瞬态动力分析和 CAD 几何模型的导入等。

第 4 章 钢筋混凝土问题 ANSYS 分析。主要介绍如何利用 ANSYS 对混凝土 SOLID65 单元、钢筋混凝土板受力分析、钢筋混凝土梁分析、预应力钢筋混凝土分析、混凝土开裂模拟和混凝土浇筑模等进行系统分析与模拟。

第 5 章 ANSYS 桥梁工程应用。主要介绍如何利用 ANSYS 对各种桥梁进行仿真分析。如桁架桥的受力分析、悬索桥的受力分析、移动荷载作用下桥梁的动态响应、连续刚构桥三维仿真分析、桥梁的地震响应分析和斜拉桥三维仿真分析等。

第 6 章 ANSYS 隧道及地下工程应用。主要介绍隧道及地下工程设计中的力学模式选择、山岭隧道结构力学分析、地铁明挖隧道、高速公路隧道、双线铁路隧道、地铁盾构隧道数值模拟分析和隧道地震动力响应分析，以及隧道及地下工程中常用来模拟岩土材料的 Drucker-Prager 本构模型。

第 7 章 ANSYS 房屋建筑工程应用。主要介绍 ANSYS 在房屋建筑工程中的应用，如房屋结构中钢筋混凝土结构设计的 ANSYS 分析、大跨网架结构受力分析和框架一剪力墙结构三维仿真分析等。

第 8 章 ANSYS 基础工程应用。主要介绍房屋桩端承载力三维力学分析、房屋刚性基础三维仿真分析和桥梁桩基础设计受力分析的相关知识。

第 9 章 ANSYS 边坡工程应用。主要介绍边坡的强度折减法原理、破坏形式、稳定性的主要分析方法、ANSYS 边坡稳定性计算基本过程及结合一实例加以分析阐述等相关知识。

第 10 章 ANSYS 在大坝工程中的应用。分别介绍 ANSYS 在基础工程和水工工程中的实际应用。

第 11 章 ANSYS 在公路和铁路工程中的应用。分别介绍公路的动载分析和桥上无缝线路纵向附加力有限元模型仿真分析。

本书先讲述有限元原理、ANSYS 软件和 ANSYS 高级技术的介绍；后讲述土木工程的实例解析，实例解析部分采取的一般步骤是：概念解析和问题描述、建模、加载和求解、结果分析。本书主要适用于土木工程专业本科生，也可作为相关专业研究生和工程设计与施工人员的参考书。书中主要实例的命令流都可以到中国水利水电出版社网站和万水书苑免费下载，网址为：<http://www.waterpub.com.cn/softdown/>和 <http://www.wsbookshow.com>，以供学习研究之用。

本书由何本国任主编，陈天宇、王洋等负责主要编写工作。全书内容与结构由何本国规划、统稿，主要参编第 7~9 章及第 6 章隧道抗震部分。陈天宇完成编写第 1~3 章大部分内容和第 11 章 ANSYS 在公路中的应用。王洋完成编写第 6 章第 2 节与第 11 章第 1、3 节全部内容，李围、叶裕明、刘春山、沈火明、肖新标、刘善华等编写了余下的全部内容。

本书在编写过程中，得到了马宝平、刘进军、梁桥欣、何省、徐思宇、刘亚航、段景川、刘孝寒、李秀春、林银、钟晓林、蒲林超、单琳、潘国栋等同志给予了文字支持与校核，在此深表感谢。同时参与本书编写工作的人员还有王治国、冯强、曾德惠、许庆华、程亮、周聪、黄志平、胡松、邢永峰、邵军、边海龙、刘达因、赵婷、马鸿娟、侯桐、赵光明、李胜、李辉、侯杰、王红研、王磊、闫守红、康涌泉、蒋杼倩、王小东、张森、张正亮、宋利梅、何群芬、程瑶，在此一并表示感谢。

由于水平有限，本书难免有错误和不足之处，恳请专家和读者批评指正，供今后修订时借鉴。我们的联络方式：china_54@tom.com。

编 者
2011 年 8 月

目 录

第三版前言

第 1 章 土木工程有限元数值模拟简介	1	3.3.1 前提条件	47
1.1 数值模拟方法概述	1	3.3.2 操作步骤	48
1.2 有限元法简介	2	3.3.3 应用举例	48
1.2.1 有限元法的起源和特点	2	3.4 单元的生与死	50
1.2.2 有限元的常用术语	2	3.4.1 概述	51
1.3 有限元法的求解步骤	4	3.4.2 单元生死的使用	52
第 2 章 大型通用有限元软件 ANSYS 简介	7	3.4.3 生死单元的控制	55
2.1 概述	7	3.4.4 排错检查	56
2.1.1 ANSYS 在计算机辅助工程中的地位	7	3.4.5 单元生死应用实例	57
2.1.2 ANSYS 软件的主要技术特点	8	3.5 图形输出	59
2.1.3 ANSYS 软件的主要功能	8	3.5.1 概述	60
2.2 安装与启动	10	3.5.2 生成中性文件	61
2.2.1 系统要求	10	3.5.3 制作硬拷贝图形文件	62
2.2.2 安装介绍	10	3.5.4 模态分析后处理中图片的抓取	62
2.2.3 启动和退出	11	3.6 动画制作	67
2.3 使用界面介绍	13	3.6.1 概述	68
2.4 ANSYS 文件管理	15	3.6.2 基本动画命令	68
2.4.1 文件类型	15	3.6.3 单步动画的生成	69
2.4.2 文件管理	16	3.6.4 Windows 环境动画的制作	75
2.5 ANSYS 有限元分析基本过程	18	3.7 瞬态动力分析	77
2.6 ANSYS 分析基本过程的实例	19	3.7.1 瞬态动力分析概述	77
2.6.1 分析问题概述	20	3.7.2 瞬态动力分析的要点	78
2.6.2 GUI 操作方式求解	20	3.7.3 瞬态动力分析的实例解析	79
2.6.3 命令流求解	26	3.8 CAD 几何模型的导入	81
2.6.4 GUI 操作与命令流的比较	27	3.8.1 CAD 几何模型的导入概述	81
第 3 章 土木工程分析中 ANSYS 相关高级技术	29	3.8.2 应用举例	82
3.1 参数化设计语言	29	第 4 章 钢筋混凝土问题 ANSYS 分析	84
3.1.1 参数化设计语言概述	29	4.1 概述	84
3.1.2 参数化设计语言的应用举例	33	4.1.1 关于钢筋混凝土模型	84
3.2 子模型与子结构	37	4.1.2 本构模型及破坏准则	85
3.2.1 子模型	38	4.2 模拟钢筋混凝土的 SOLID65 单元	86
3.2.2 子结构	41	4.2.1 SOLID65 单元理论基础	86
3.3 自适应网格的划分	47	4.2.2 SOLID65 单元使用方法	91

4.3 钢筋混凝土板受力分析	94	5.2.5 加载和求解	142
4.3.1 问题的描述	94	5.2.6 结果分析	144
4.3.2 建模	95	5.3 悬索桥的受力分析	146
4.3.3 网格划分	98	5.3.1 相关概念	146
4.3.4 加载并求解	99	5.3.2 问题的描述	147
4.3.5 计算结果及分析	100	5.3.3 建模假设	148
4.4 钢筋混凝土梁分析	103	5.3.4 自下而上建模	149
4.4.1 问题的描述	103	5.3.5 加载和求解	151
4.4.2 建模	103	5.3.6 结果分析	154
4.4.3 加载并求解	108	5.4 移动荷载作用下桥梁的动态响应	155
4.4.4 计算结果及分析	109	5.4.1 相关概念	155
4.5 预应力钢筋混凝土分析	111	5.4.2 问题描述	157
4.5.1 相关概念	111	5.4.3 建模	157
4.5.2 问题的描述	112	5.4.4 加载与求解	159
4.5.3 建模	113	5.4.5 结果分析与比较	160
4.5.4 划分网格	114	5.5 连续刚构桥三维仿真分析	162
4.5.5 加载、求解	116	5.5.1 相关概念	162
4.5.6 结果分析	116	5.5.2 问题的描述	163
4.6 钢筋混凝土开裂模拟	118	5.5.3 建模	164
4.6.1 相关概念	118	5.5.4 加载及求解	172
4.6.2 问题的描述	119	5.5.5 计算结果及分析	173
4.6.3 建模	120	5.6 桥梁的地震响应分析	175
4.6.4 划分网格	121	5.6.1 相关概念	175
4.6.5 加载和求解	121	5.6.2 问题的描述	178
4.6.6 计算结果分析	123	5.6.3 建模	180
4.7 钢筋混凝土浇筑模拟分析	124	5.6.4 网格划分、施加边界条件	181
4.7.1 相关概念	124	5.6.5 地震谱响应分析	182
4.7.2 问题的描述	125	5.6.6 地震波瞬态分析	185
4.7.3 建模	125	5.7 斜拉桥三维仿真分析	187
4.7.4 划分网格	126	5.7.1 相关概念	187
4.7.5 加载和求解	126	5.7.2 问题的描述	188
4.7.6 结果分析	133	5.7.3 建模假设	189
第5章 ANSYS 桥梁工程应用	135	5.7.4 建模及结果分析	190
5.1 概述	135	第6章 ANSYS 隧道及地下工程应用	200
5.2 桁架桥的受力分析	136	6.1 概述	200
5.2.1 相关概念	136	6.1.1 Drucker-Prager 本构模型	200
5.2.2 问题的描述	137	6.1.2 隧道及地下工程的设计模型	202
5.2.3 建模假设	138	6.1.3 隧道及地下工程的设计方法	203
5.2.4 建模	138	6.1.4 隧道及地下工程衬砌结构设计中的	

力学模型选择	204	7.1 概述	305
6.1.5 隧道及地下工程施工力学数值模拟	204	7.2 钢筋混凝土结构设计 ANSYS 分析	306
6.2 山岭隧道结构力学分析	205	7.2.1 问题的描述	306
6.2.1 问题的描述	205	7.2.2 混凝土承载力及裂纹弥散分析	306
6.2.2 建模	206	7.2.3 钢筋混凝土模型建立	307
6.2.3 加载与求解	209	7.2.4 加载与求解过程	309
6.2.4 后处理	212	7.2.5 计算实例及结果分析	309
6.2.5 计算结果分析	215	7.3 大跨度网架结构受力分析	310
6.3 地铁明挖隧道结构力学分析	216	7.3.1 问题的描述	310
6.3.1 问题的描述	216	7.3.2 空间结构模型建立	310
6.3.2 建模	216	7.3.3 加载与求解过程	311
6.3.3 加载与求解	219	7.3.4 计算实例及结果分析	311
6.3.4 后处理	221	7.4 框架-剪力墙结构三维仿真分析	323
6.3.5 计算结果分析	224	7.4.1 问题的描述	323
6.4 高速公路隧道施工力学数值模拟分析	226	7.4.2 复杂模型建立	326
6.4.1 分离式高速公路隧道设计	226	7.4.3 加载与求解	332
6.4.2 建模	227	7.4.4 计算实例及结果分析	334
6.4.3 加载与初始地应力求解	234	第 8 章 ANSYS 基础工程应用	340
6.4.4 左隧道开挖求解	237	8.1 概述	340
6.4.5 右隧道开挖求解	243	8.1.1 基础工程基本类型	340
6.4.6 计算结果分析	251	8.1.2 ANSYS 在桩-土接触分析中实现	341
6.5 双线铁路隧道施工过程仿真分析	251	8.2 房屋桩端承载力三维力学分析	341
6.5.1 问题的描述	251	8.2.1 桩基承载力理论	341
6.5.2 模型的建立	253	8.2.2 桩的加载分析	343
6.5.3 加载与求解	261	8.2.3 计算实例及结果分析	344
6.5.4 计算结果分析	267	8.3 房屋刚性基础三维仿真分析	366
6.6 地铁盾构隧道掘进过程数值模拟分析	275	8.3.1 房屋基础类型及相关概念	367
6.6.1 问题的描述	275	8.3.2 问题的描述	367
6.6.2 模型的建立	275	8.3.3 计算过程	367
6.6.3 加载与求解	281	8.3.4 计算实例及结果分析	368
6.6.4 计算结果分析	288	8.4 桥梁桩基础设计受力分析	375
6.7 隧道地震动力响应分析	293	8.4.1 桥梁桩基础概述	375
6.7.1 问题的描述	294	8.4.2 单桩容许承载力确定	375
6.7.2 基本条件及假定	295	8.4.3 计算过程	375
6.7.3 地震波的选取	295	8.4.4 桩内力及变位分析	376
6.7.4 计算模型确立	296	8.4.5 计算实例及结果分析	376
6.7.5 加载与求解	300	第 9 章 ANSYS 边坡工程应用	385
6.7.6 结果分析	301	9.1 边坡问题的相关概述	385
第 7 章 ANSYS 房屋建筑工程应用	305	9.1.1 强度折减法原理	385

9.1.2	边坡的破坏形式	386	10.2.4	加载与求解	416
9.1.3	影响边坡稳定的主要因素	386	10.2.5	计算结果分析	422
9.1.4	边坡稳定性的主要分析方法	387	第 11 章 ANSYS 在公路和铁路工程中的应用	431	
9.2	强度折减法在 ANSYS 中的实现	387	11.1	概述	431
9.3	ANSYS 边坡稳定性计算基本过程	388	11.2	公路的动载分析	432
9.3.1	模型建立及边界条件	389	11.2.1	问题的描述	432
9.3.2	加载与求解	394	11.2.2	建模	433
9.4	算例分析	396	11.2.3	加载与求解	439
9.4.1	均质边坡稳定性	396	11.2.4	后处理	441
9.4.2	不同含水率状态下的边坡稳定性	398	11.3	桥上无缝线路纵向附加力有限元模型 仿真分析	444
第 10 章 ANSYS 在大坝工程中的应用	404		11.3.1	相关概念	444
10.1	概述	404	11.3.2	问题的描述	445
10.2	重力坝三维仿真分析	405	11.3.3	建模	445
10.2.1	相关概念	405	11.3.4	加载与求解	450
10.2.2	问题的描述	407	参考文献	454	
10.2.3	建模	408			

土木工程有限元数值模拟简介

知识点:

- 有限元的起源、特点和基本过程
- 有限元常用术语
- 有限元法求解的基本步骤

本章导读:

介绍土木工程数值模拟方法,有限元法的基础理论知识和求解过程,细述了有限元分析问题的基本思路和相关过程。

1.1 数值模拟方法概述

工程技术领域中的许多力学问题和场问题,如固体力学中的位移场、应力场分析,电磁学中的电磁分析、振动特性分析,热力学中的温度分析,流体力学中的流场分析,耦合场中的物理场分析等,都可以归结为在给定边界条件下求解其控制方程(常微分方程和偏微分方程)的问题。虽然人们能够得到它们的基本方程和边界条件,但是能够用解析法去求解的只是少数性质比较简单和边界比较规则的问题,而实际结构的形状和所受到的荷载往往比较复杂,按解析法求解是非常困难的。解决这类复杂问题主要有两种方法:一是引入简化假设,使其达到能用解析法求解的状态,然后求其近似解,此方法不一定总是可行的,且容易导致不正确或错误的解答;二是保留问题的复杂性,利用数值模拟方法求得问题的近似解。数值模拟技术是人们在现代数学和力学理论等基础上,借助于计算机技术来获得满足工程要求的数值近似解,数值模拟技术(即 CAE 技术, Computer-aided Engineering, 计算机辅助工程)是现代工程仿真学发展的重要推动力之一。

目前在工程技术领域内常用的数值模拟方法有:有限单元法(Finite Element Method, FEM)、边界元法(Boundary Element Method, BEM)、有限差分法(Finite Difference Method, FDM)和离散单元法(Discrete Element Method, DEM)等,其中有限单元法是最具实用性和应用最广泛的。数值模拟结合计算机技术形成的应用软件在工程中得到广泛的应用,国际上著名的有限元通用软件有 ANSYS、MSC.PATRAN、MSC.NASTRAN、MSC.MARC、ABAQUS 和 ADINA 等,它们大

多采用 FORTRAN 语言编写, 不仅包含多种条件下的有限元分析程序, 而且带有强大的前处理和后处理功能。大多数有限元通用软件都拥有良好的用户界面、使用方便、功能强大, 在当今强大的硬件基础的支持下, 在工程验算、仿真计算等方面有着广阔的应用前景。

1.2 有限元法简介

有限元法的研究与使用始于 20 世纪, 并在 20 世纪末开始盛行于各个领域, 是一种比较精确的求解方法和一种很好的计算使用工具, 本节将主要介绍有限元法的起源与特点和有限元的常用术语。

1.2.1 有限元法的起源和特点

有限元法起源于 20 世纪 50 年代航空工程中飞机结构的矩阵分析。结构矩阵分析认为, 一个结构可以看作是由有限个力学小单元互相连接组成的集合体, 表征单元力学特性的刚度矩阵可以比喻为建筑物中的砖, 装配在一起就能提供整个结构的力学特性。如果单元满足问题的收敛要求, 那么随着单元尺寸的缩小, 增加求解区域内单元的数目, 解的近似程度将不断改进, 近似解最终将收敛于精确解。

有限元方法, 即有限元分析, 是一种用于求解微分方程组或积分方程组数值解的数值技术, 自从其用于航空工程中飞机机身和结构的分析以来, 经过几十年的发展, 不断开拓新的应用领域, 其范围已经由杆件结构问题扩展到了弹性力学乃至塑性力学问题, 由平面问题扩展到空间问题, 由静力学问题扩展到动力学问题和稳定性问题, 由固体力学问题扩展到流体力学、热力学和电磁学等问题。因此, 有限单元法是求解数理方程的一种数值计算方法, 是解决工程问题的一种强有力的计算工具。

有限元法的基本思想: 先把一个原来是连续的系统(包括杆系、连续体、连续介质)剖分成有限个单元, 且它们相互连接在有限个节点上, 再对每个单元由分块近似的思想, 由力学关系(几何方程、物理方程、平衡方程等)和位移插值函数建立求解未知量与节点相互作用之间的关系, 最后把所有单元的这种特性关系按一定的条件(变形协调条件、连续条件或变分原理及能量原理)整合起来, 引入边界条件, 就得到一组以节点位移为未知量的线性代数方程组, 求解这个方程组就得到节点位移, 然后得到所要求的变量。所以, 有限元实质上是把具有无限个自由度的连续系统, 理想化为只有有限个自由度的单元集合体, 使问题转化为适合于数值求解的结构型问题。

有限元法有许多优点:

- 概念浅显, 容易掌握。可以采用不同的理论建立有限元法的平衡方程和刚度矩阵; 可以通过非常直观的物理概念来理解; 也可以建立基于严格的数学分析的理论。
- 适用性强, 应用广泛, 几乎适用于求解所有的连续介质和场问题。
- 采用矩阵形式表达, 便于编制计算机程序, 可以充分利用高速计算机所提供的计算能力。

1.2.2 有限元的常用术语

1. 单元与节点

如图 1-1 所示, 对于任何连续体, 都可以将其想象成由有限个简单形状的单元体组成。任意相邻单元只能在节点处相互连接, 这些单元的组合被称为实际对象的离散模型。

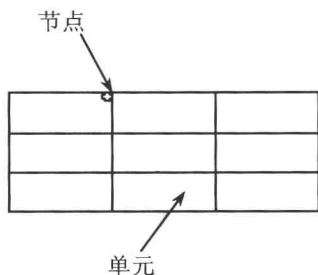


图 1-1 单元、节点示意图

常用单元可以分为自然单元和分割单元：一些工程构件（如桁架结构的连杆）在分析时无需再加分割，这类单元叫做自然单元。结构能否看作自然单元取决于所研究的范围和构件本身的力学性质。将整体结构和连续体分成许多小单元的组合，这种单元称为分割单元。从理论上讲，单元的分割是任意的，不过在实际计算中必须根据研究对象的特点，使单元分割既能满足力学分析要求，又能使计算加快。

节点就是单元与单元之间设置的连接点。节点可分为铰接、固接或其他形式的连接。节点一般分为主外节点、副主外节点和内节点 3 类。有了节点才可以将实际连续体看成是仅在节点处互相连接的单元集合体组成的离散型结构，从而可使研究的对象转化成可以使用计算机计算的数学力学模型。

2. 节点力和节点荷载

相邻单元之间的相互作用是通过节点来实现的，这种通过节点的相互作用力就是节点力，也称节点荷载。

作用在节点上的外荷载称为节点荷载。节点荷载分为两部分：一是原来作用在节点上的外力；二是按静力等效原则将作用在单元上的分布力移置到节点上的节点荷载。

将单元上的实际荷载向节点移置的目的就是简化各单元上的受力情况，以便建立单元和系统的平衡方程，也就是建立节点位移和节点荷载之间的关系式。

3. 位移插值函数

连续体被离散后，需要用一些近似函数来描述单元内物理量，如位移、应变与节点物理量间的变化关系。用以表示单元内的位移或位移场的近似函数称为位移插值函数。一般来说都是选取多项式作为位移插值函数，原因是多项式的数学运算（如微分、积分等）比较容易，而且在一个单元内适当选取多项式可以得到与真实解较为接近的近似解。对于位移插值函数要求：

- 位移插值函数必须能反映单元的刚体位移。当节点位移是由某个刚体位移所引起时，弹性体内不会有应变，因而节点力也为零。
- 位移插值函数必须能反映单元的常应变。常应变指的是单元的应变与坐标无关，且各节点相同。
- 位移插值函数在单元内要连续，在相邻单元间的公共边界上满足变形协调性。后者指两相邻单元在变形时既不重叠也不分离。

4. 等参数单元

由于一些标准单元（母单元）如矩形单元、正六面体单元等是满足解的收敛条件的，因此通过坐标变换将任意不标准的单元（子单元）如任意四边形、任意六面体单元等变换成标准单元，只要坐标变换中子单元与母单元的点是一一对应的，且满足变形协调性，这样就能满足子单元在原坐标

系中满足解的收敛性条件,即称之为等参数单元法。其特点是单元上的位移插值函数公式与子单元和母单元之间的坐标转换的公式是一样的。等参数单元的优点如下:

- 具有较大的选择单元的自由,计算精度高,曲线边界的求解区域能得到较好的模拟。
- 所需要输入的数据大大减少。

1.3 有限元法的求解步骤

有限元方法是以力学理论、数学理论、计算机理论为基础的一种方法,它的基本求解思路是把一个整体分成一个个离散的单元,对于不同的整体,常用的单元形式有杆件单元、三角形单元、四边形单元、四面体单元、六面体单元等。再对单元进行详细、精确的计算,得到单元体位移、应力和应变的关系。然后,整合所有单元的刚度矩阵,得到节点力、位移、应变的关系。结合四边形等单元的分析,有限元法求解的一般步骤如下:

(1) 结构的离散化。根据实际问题,简化结构复杂的边界条件,近似确定结构的求解域的物理性质和几何区域。将要分析的结构分割成有限个单元体,并在单元体间设置节点,使相邻单元的有关参数具有一定的连续性,采用若干个单元组成的集合体来模拟原结构,在 ANSYS 中称之为有限元网格的划分。显然网格划分得越细,计算结果会越精确,但计算量会增大,且误差也可能会增大。

(2) 选择位移插值函数。为了能用节点位移表示单元体的位移、应变和应力,在分析连续体问题时,必须对单元中位移的分布作出一定的假设,即假定位移是坐标的某种简单的函数。选择适当的位移插值函数是有限元法分析中的关键。通常采用多项式作为位移插值函数,如常用的四边形单元的位移插值函数为

$$\begin{aligned} u &= \alpha_1 + \alpha_2 x + \alpha_3 y + \alpha_4 xy \\ v &= \alpha_5 + \alpha_6 x + \alpha_7 y + \alpha_8 xy \end{aligned} \quad (1-1)$$

将其写成矩阵形式为

$$\{\delta(x, y)\} = \begin{Bmatrix} u \\ v \end{Bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & x & y & xy & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & x & y & xy \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \alpha_1 \\ \alpha_2 \\ \alpha_3 \\ \alpha_4 \\ \alpha_5 \\ \alpha_6 \\ \alpha_7 \\ \alpha_8 \end{Bmatrix} = f(x, y)\{\alpha\} \quad (1-2)$$

从而可得到

$$\{\delta(x, y)\} = f(x, y)\{\alpha\} = f(x, y)[A]^{-1}\{\delta^e\} = [N(x, y)]\{\delta^e\} \quad (1-3)$$

其中形函数 $[N(x, y)]$ 与位移插值函数是一一对应的,位移插值函数能够保证变换的相容性,得到单元位移与节点位移的关系。

(3) 分析单元与节点的力学特性,得到单元应变、节点位移之间的关系和单元应力、节点位移间的关系。利用几何方程、本构方程和变分原理等最终得到单元刚度矩阵。

- 由几何方程与位移插值公式可得到单元应变 $\varepsilon(x, y)$ 与节点位移 $\{\delta^e\}$ 之间的关系为

$$\begin{aligned}
 \{\varepsilon(x, y)\} &= \begin{Bmatrix} \varepsilon_x \\ \varepsilon_y \\ \gamma_{xy} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \frac{\partial u}{\partial x} \\ \frac{\partial v}{\partial y} \\ \frac{\partial u}{\partial y} + \frac{\partial v}{\partial x} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \frac{\partial}{\partial x} \sum_{i=1}^4 N_i(\varepsilon, \eta) \cdot u_i \\ \frac{\partial}{\partial y} \sum_{i=1}^4 N_i(\varepsilon, \eta) \cdot v_i \\ \frac{\partial}{\partial y} \sum_{i=1}^4 N_i(\varepsilon, \eta) \cdot u_i + \frac{\partial}{\partial x} \sum_{i=1}^4 N_i(\varepsilon, \eta) \cdot v_i \end{Bmatrix} \\
 &= \begin{bmatrix} \frac{\partial N_1}{\partial x} & 0 & \frac{\partial N_2}{\partial x} & 0 & \frac{\partial N_3}{\partial x} & 0 & \frac{\partial N_4}{\partial x} & 0 \\ 0 & \frac{\partial N_1}{\partial y} & 0 & \frac{\partial N_2}{\partial y} & 0 & \frac{\partial N_3}{\partial y} & 0 & \frac{\partial N_4}{\partial y} \\ \frac{\partial N_1}{\partial y} & \frac{\partial N_1}{\partial x} & \frac{\partial N_2}{\partial y} & \frac{\partial N_2}{\partial x} & \frac{\partial N_3}{\partial y} & \frac{\partial N_3}{\partial x} & \frac{\partial N_4}{\partial y} & \frac{\partial N_4}{\partial x} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u_1 \\ v_1 \\ u_2 \\ v_2 \\ u_3 \\ v_3 \\ u_4 \\ v_4 \end{Bmatrix} \quad (1-4) \\
 &= [B_1 \ B_2 \ B_3 \ B_4][\{\delta_1^e\} \ \{\delta_2^e\} \ \{\delta_3^e\} \ \{\delta_4^e\}]^T = [B]\{\delta^e\}
 \end{aligned}$$

式中, $[B]$ 为四边形单元的几何矩阵。

- 同样可以由本构关系及单元应变与节点位移的关系得到单元应力 $\sigma(x, y)$ 与节点位移 $\{\delta^e\}$ 的关系为

$$\begin{aligned}
 \{\sigma(x, y)\} &= \frac{E(1-\nu)}{(1+\nu)(1-2\nu)} \begin{bmatrix} 1 & \nu & 0 \\ \nu & 1 & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1-2\nu}{2(1-\nu)} \end{bmatrix} \{\varepsilon(x, y)\} \\
 &= [D]\{\varepsilon(x, y)\} = [D][B]\{\delta^e\} \quad (1-5)
 \end{aligned}$$

式中, $[D]$ —弹性矩阵。

(4) 由虚功原理得到节点刚度矩阵, 并用高斯积分进行求解, 最终得到节点力与节点位移之间的关系。虚功原理: 设某变形体上作用的外力与内部产生的应力处于平衡状态, 且假设该变形体产生了一微小的虚位移, 并在体内引起虚应变, 这时真实应力所做的内力虚功应等于外力所做的外力虚功。

$$\int_V \{\varepsilon^*\}^T \{\sigma\} dV = \int_V \{u^*\}^T \{f_V\} dV + \int_V \{u^*\}^T \{f_s\} dS + \{u^*\}^T \{f_p\} \quad (1-6)$$

式中, f_V 为体力; f_s 为面力。

由式 (1-6) 得到,

$$\int_V \{\varepsilon^*\}^T \{\sigma\} dV = \int_V \{\delta^{e*}\}^T [B]^T [D] [B] \{\delta^e\} dV = \{\delta^{e*}\}^T \{F^e\} \quad (1-7)$$

$$\{F^e\} = [K^e] \{\delta^e\} \quad (1-8)$$

由式 (1-7) 和式 (1-8) 得到

$$[K^e] = \int_V [B]^T [D] [B] dV = \iint [B]^T [D] [B] t dx dy = \iint [B]^T [D] [B] [J] d\xi d\eta \quad (1-9)$$

式中， t 为单元厚度； ξ 、 η 是局部坐标系下的坐标轴； $[J]$ 为雅可比矩阵，即子单元向母单元转换的转换矩阵。

然后由高斯积分进行求解，计算得出节点力与节点位移的关系，并进一步对结果进行解释，看其是否满足设计值的要求，最终完成有限元法的求解。在求解时也应注意遵循原则，注意好每一单元的约束与解题性能，如划分网格时，尽量不要出现畸形的单元，否则雅可比矩阵 $[J]$ 小于 0，将可能出现求解错误。

2

大型通用有限元软件 ANSYS 简介

知识点:

- ANSYS 软件技术特点及主要功能
- ANSYS 12.0 软件安装与启动
- ANSYS 12.0 使用界面介绍
- ANSYS 12.0 文件管理
- ANSYS 12.0 软件分析问题基本过程
- ANSYS 12.0 软件分析基本过程实例讲解

本章导读:

主要介绍了 ANSYS 软件的安装、工作环境、文件系统及其新增功能与主要技术特点, 然后结合具体实例给出了用 ANSYS 软件求解结构问题的基本过程, 并比较 GUI 操作方式求解与命令流求解。

2.1 概述

作为有限元分析软件之一的大型软件, ANSYS 有其独有的特点和广泛的用途, 下面将一一介绍并主要对土木结构分析做详细的阐述。

2.1.1 ANSYS 在计算机辅助工程中的地位

ANSYS 软件作为一个大型通用有限元分析软件, 能够用于结构、热、流体、电磁、声学等学科的研究, 广泛应用于土木工程、地质矿产、水利、铁道、汽车交通、国防军工、航天航空、船舶、机械制造、核工业、石油化工、轻工、电子、日用家电和生物医学等一般工业及科学研究工作。ANSYS 软件是第一个通过 ISO 9001 质量认证的大型通用有限元分析设计软件, 是美国机械工程师协会 (ASME)、美国核安全局 (NQA) 及近 20 种专业技术协会认证的标准分析软件。

在国内, ANSYS 第一个通过了中国压力容器标准化技术委员会认证并在国务院 17 个部委推广使用, 是唯一被中国铁路机车车辆总公司选定为实现“三上”目标的有限元分析软件。

在世界范围内, ANSYS 软件已经成为土木建筑行业 CAE (计算机辅助工程) 仿真分析软件的

主流。ANSYS 在钢结构和钢筋混凝土房屋建筑、体育场馆、桥梁、大坝、隧道及地下建筑物等工程中得到了广泛的应用。可以对这些结构在各种外荷载条件下的受力、变形、稳定性及各种动力特性做出全面分析,从力学计算、组合分析等方面提出了全面的解决方案,为土木工程师提供了一种功能强大且方便易用的分析方法。ANSYS 在中国的很多大型土木工程中都得到了应用,如鸟巢、国家大剧院、上海科技馆太空城、黄河下游特大型公路斜拉桥、龙首水电站大坝、南水北调工程、金沙江溪落渡水电站、二滩水电站、龙羊峡水电站及三峡工程等都利用了 ANSYS 软件进行有限元仿真分析。

此外,西南交通大学、同济大学、清华大学、武汉大学等高校应用 ANSYS 软件设计并分析了各种桥梁(新型“大跨度双向拉索斜拉桥”和“大跨度双向拉索悬索桥”)、模拟了引水工程隧道的施工过程,设计了拱坝、面板堆石坝、复杂地下洞室群、大型输水结构,并模拟了其施工力学行为。利用 ANSYS 可以有效地保证工程的设计和施工质量、缩短周期、降低工程成本,对于提高设计和施工水平、增强行业竞争力起到了很大的促进作用。从竞争和技术发展的角度来看,采用计算机辅助工程分析技术是大势所趋。目前最新的版本是 ANSYS 公司于 2009 年所推出的 ANSYS 12.0。

2.1.2 ANSYS 软件的主要技术特点

ANSYS 软件具有以下主要特点:

- 支持从微机、工作站到巨型机的所有硬件平台,并支持并行运算。
- 方便的用户界面。与较老的版本相比,ANSYS 12.0 软件的界面更加友好、方便。
- 可直接导入 CAD 几何模型。利用 ANSYS 提供的数据库接口,可将大多数 CAD 软件绘制的几何模型导入 ANSYS 中,并对其划分网格和求解。
- 强大的几何建模和布尔运算功能。不但可以编辑读入的 CAD 几何模型,还可以独立创建各种复杂的几何模型。
- 多种自动网格划分技术。
- 各种分析的集成。不但能进行结构、动力、热、流体静(动)力、电磁场等单独分析,而且还能实现各种分析类型之间的耦合,如结构与热耦合分析等。
- 强大的非线性分析能力与多物理场优化功能。
- 结果的交互式可视化处理。
- 强大的二次开发功能。可以应用宏、参数设计语言、用户界面语言等功能开发出适合用户个人特性的应用程序。
- 结果的交互式可视化处理。
- ANSYS 12.0 突出了 Workbench 的主体地位,且在结构分析中添加了新功能,如增加了一个 4 节点四面体单元(Four-noded Tetrahedron)。此单元被用于超弹性体(Hyperelastic)的复杂分析中,达到在不明显降低分析精度的同时,减少系统资源消耗的目的,促进了其在单元、材料、连接方式和求解运算等诸多方面的整体进步。

2.1.3 ANSYS 软件的主要功能

作为一个大型的 CAE 分析软件,ANSYS 自 20 世纪 70 年代诞生以来,在理工专业领域得到广泛的应用,其最新版本 ANSYS 12.0 的出现,使其功能和分析能力得到进一步完善和加强。其主要功能如下: