

TB1-39

1D

电脑辅助工程分析

ANSYS 使用指南

陈精一 编著
蔡国忠



北方工业大学图书馆



00491019

中国铁道出版社

2001年·北京

HD1P/06



出版说明

工程设计流程中，分析过程为重要的工作项目之一。传统的分析过程是一项耗时且复杂的工作，必须经过不断改进、评估以获得最佳的答案。由于电脑科技的发展及各领域理论研究的成果，使传统的工作已能由电脑来完成，并得到合理的答案。电脑辅助工程设计，简单而言是通过电脑的帮助进行工程设计工作，故所包含的范围很广，其中包含电脑辅助绘图、电脑辅助工程、电脑辅助制造等。ANSYS 即为电脑辅助工程分析中，一套应用广泛的工程分析软件，它可以应用于不同的领域，如机械、航天、土木、机电等，颇受各界工程分析人员的好评。

本书编排的内容与例题较偏重于结构固力方法，对 ANSYS 的工程分析方法及设计方法进行了详细的介绍。而对于其他相关领域的问题，读者也可参考学习。此外由于时间仓促，书中恐有遗漏之处，烦请读者多加指正，作者 E-mail: meching@chu.edu.tw。另外，随书配盘为繁体中文版，如出现乱码，可用“东方快车”等汉化软件转换，敬请读者谅解。

本书由台湾全华科技图书股份有限公司提供版权，经中国铁道出版社计算机图书项目中心审选。周潜、李慧、乔林、杨志华、王忠华、廖康良、孟丽花、陈贤淑等同志完成了本书的整稿工作。

中国铁道出版社
2001. 3

目 录

第 1 章 简介	1
1-1 前言	1
第 2 章 ANSYS 入门简介	5
2-1 前言	5
2-2 ANSYS 环境简介	5
2-3 有限元法的基本架构	9
2-4 ANSYS 架构及命令	14
2-5 ANSYS 文件名及文件	17
2-6 图形控制	21
2-7 命令说明	22
第 3 章 建立有限元模型	25
3-1 前言	25
3-2 坐标系统	27
3-3 节点定义	29
3-4 节点复制及填充	37
3-5 元素定义	40
3-6 负载定义	48
3-7 后处理器	57
3-8 文件输入法的交互模式与非交互模式	63
第 4 章 高级模块技巧	77
4-1 前言	77
4-2 多重元素与属性	77
4-3 多重负载	84
4-4 结构分析类型	93
4-5 参数化设计语言(APDL)	104
4-6 动画制作	111
第 5 章 实体模型的建立	115
5-1 前言	115
5-2 实体模型简介	116
5-3 实体模型建立的技巧	117



5-4	群组命令介绍	119
5-5	点定义	120
5-6	工作平面	123
5-7	线段定义	125
5-8	面积定义	137
5-9	体积定义	142
5-10	原始对象的建立	150
5-11	布尔操作	156
第 6 章	网格化有限元模型的建立	177
6-1	前言	177
6-2	网格种类	178
6-3	实体模型与网格化的配合	179
6-4	网格化步骤	181
6-5	设定元素属性	182
6-6	元素形状大小定义	183
6-7	网格的产生	187
第 7 章	实体模型的外力	197
7-1	前言	197
7-2	直接法外力建立	197
7-3	间接法外力的建立	198
附录 A	元素摘要	209
A-1	LINK1 2-D 杆件	209
A-2	BEAM3 2-D 弹性梁	212
A-3	LINK8 3-D 杆件	216
A-4	COMBIN14 弹簧——阻尼	218
A-5	MASS21 结构点质量	221
A-6	PLANE42 2-D 实体结构	222
A-7	SOLID45 3-D 实体结构	225
A-8	PLANE55 2-D 热实体结构	229
A-9	SHELL63 弹性壳	231



简介

1-1 前言

现代工业的进步，完全得力于计算机科技的突飞猛进，因此由 20 世纪进入 21 世纪，引导人类科技再次的进步将是与计算机结合的科技。而计算机软件的应用与发展也得力于计算机科技的进步，将计算机、计算机软件用于产品的开发、设计、分析与制造，已成为近代工业提升竞争力的主要方法。计算机辅助设计（Computer-aided Design; CAD）即使用计算机软件直接从事图形的绘制与结构的设计。计算机辅助工程（Computer-aided Engineering; CAE）是用工程上分析的过程及计算方法来辅助工程师作设计后的分析或进行同步工程。而计算机辅助制造（Computer-aided Manufacturing; CAM）则是直接用计算机来辅助操纵各式各样的精密工具机器以制造不同的零组件。国内最早引进的计算机辅助软件是 CAD，然后是 CAM，而最迟者是 CAE。

CAE 的技术种类很多，这其中包括有限元法（Finite Element Method; FEM），边界元法（Boundary Element Method; BEM），有限差分法（Finite Difference Method; FDM）等。每一种方法各有其应用的领域，而其中有限元法应用的领域越来越广，现已应用于结构力学（包括线性与非线性）、结构动力学、热力学、流体力学、电路学、电磁学等，而越来越多的发展，更结合不同的领域，像流体与结构力学的结合，电路学与电磁学的结合，使得 CAE 的发展越来越迅速，应用也越来越广泛。

传统的工业皆依据个人的经验累计而成，同时以经验作出初步的设计，再由此初步的设计去做出原始模型，再做出成品。成品完成以后，便进行实验以确保产品的可靠性，而此种方法基本上称为试误法（Try and Error），即初级成品经测试不能满足工程或品质上的需求时，再回去修改原设计图，再作试品然后再作测试。但此种方法费时且成本相当的高。若使用 CAE，则在设计图完成后即连接 CAE，作各式各样的分析，并且导入最优化（Optimization）成品，即可在短时间内完成产品。但是常常一个问题并非一套软件即可完全解决设计上的问题，例如直升机旋转桨的设计牵涉到机构的动力学，飞行流体力学的计算以及结构力学和振动噪音的问题。此问题将牵涉到不同的 CAE 的技术，同时也牵涉到材料的特性以及验证的



必要性。机构动力的传动可以借着机构系统仿真软件 (Mechanical System Simulation Software) 来虚拟各组件之间的动力传递, 以及组件之间有可能产生的磨擦力或接触力。而计算流体动力学 (Computation Fluid Dynamic) 的软件可以仿真静态及动态下流体的行为以及流体与结构体之间的关系。完成前面的工作后, 再使用结构力学和振动学的计算软件计算结构体的应力、应变、位移以及在振动时结构体的动态行为。当做完这些分析之后, 可以使用最佳化或参数确认 (Parameter Identification) 对设计进行修订, 并借着模型的修正 (Model Modification) 重做分析以得到最好的结构。而完成实验量测 (Experimental Measurement) 可用来确认分析的误差, 同时可以建立分析的可靠度。未来使用 CAE 软件结合其他的软件可以对各种不同的企业及工厂建立起个别产品的专家系统 (Expert System), 更可以缩短产品开发的时间。

何谓有限元法?

将实体的对象分割成不同大小、种类、小区域称为有限元。根据不同领域的需求推导出每一个元素的作用力方程, 组合整个系统的元素并构成系统方程组, 最后将系统方程组求解。由有限元法的发展, 该法具有下列的特色:

1. 整个系统离散为有限个元素。
2. 利用能量最低原理 (Minimum Potential Energy Theory) 与泛函数值定理 (Stationary Functional Theory) 转换成一组线性联立方程组。
3. 处理过程简明。
4. 整个区域做离散处理, 需庞大的资料输出空间与计算机内存, 解题耗时。
5. 线性、非线性均适用。
6. 无限区域的问题较难仿真。

图 1-1 为有限元分析的流程图, 一般完整的有限元程序 (Finite Element Program) 包含前置处理、(Preprocessing)、解题程序 (Solution) 和后置处理 (Postprocessing)。现将三部分的内容叙述如下:

一、前置处理

1. 建立有限元素模型所需输入的资料, 如节点、坐标资料、元素内节点排列次序。
2. 材料特性。
3. 元素切割的产生。
4. 边界条件。
5. 负载条件。

二、解题程序

1. 元素刚度矩阵计算 $[K]$ 。
2. 系统外力向量的组合 $\{F\}$ 。
3. 线性代数方程 $[K]\{U\}=\{F\}$ 的求解。
4. 通过资料反算法求应力、应变、反作用力等。

三、后置处理

将解题部分所得的解答如: 变位、应力、反力等资料, 通过图形接口以各种不同表示方式把等位移图、等应力图等显示出来。

有限元分析的流程图如图 1-1 所示。

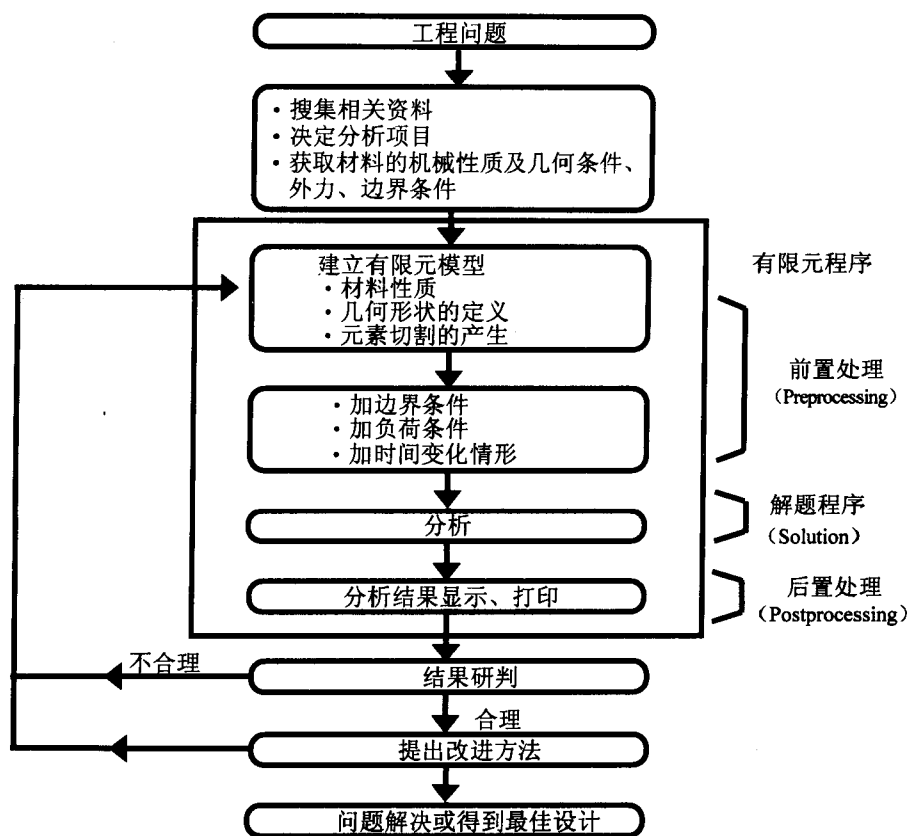
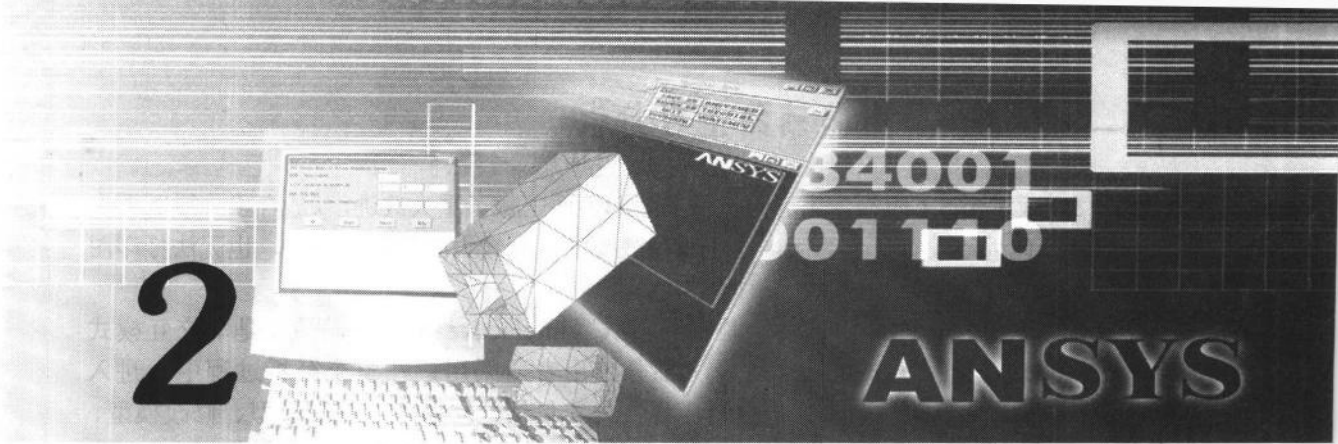


图 1-1 有限元分析的流程图

前面提到有限元分析法 (FEA) 并不是 CAE 的全部，而且一个完整的机械设计并不能单独使用 FEA 完成设计。FEA 所做的分析只是整个设计流程中的一部分或大部分。必须结合其他软件才能解决全部的设计问题。因此除了了解 FEA 的解析能力之外，最好也能了解其他的 CAE 技术，以使计算机辅助工程能达到尽善尽美的境地。

ANSYS 有限元软件包是一个多用途的有限元法计算机设计程序，可用来求得结构、流体、电力、电磁场及碰撞等问题的解答。它包含了前置处理、解题程序以及后置处理。此套软件具有下列功能：

1. 基于工程学的理论以及许多数值分析的理论及技术。
2. 可解决大部分工程上的问题。
3. 使用相当有效的解题技术。
4. 以使用者为导向，易于定义问题。
5. 完全由问题的定义推得结果。
6. 有完整且高度技巧的图形表示能力。
7. 有完整的文件帮助并有完整的例题且经过许多的验证。
8. 有完整的工程及学术人员继续开发新的技术。
9. 每年有完善的研讨会，并有完整的电子布告栏帮助使用者解决问题。



ANSYS 入门简介

2-1 前言

ANSYS 是一种广泛性的商业套装工程分析软件。所谓工程分析软件，主要在于机械结构系统受到外力负载后所出现的反应，例如位移、应力、温度等，根据该反应可知道机械结构系统受到外力负载后的状态，进而判别是否符合设计要求。一般机械结构系统的几何外型相当复杂，所受的外力负载种类相当多，理论分析解往往无法进行。欲求得其解答，则必须简化结构，或采用有限元法及数值方法。由于计算机日新月异的发展，相对应的软件也因应而生，ANSYS 软件在工程上的应用相当广泛，在机械、电机、土木、电子及航空等不同领域的使用，都能达到某种程度的可信度，颇获各界好评。计算机辅助工程分析是利用有限元法及数值分析法合并，以完成分析工作，有限元原理的推演及理论发展已非常完善，已经成为设计人员不可缺少的工具之一，能降低设计成本，缩短设计时间。

2-2 ANSYS 环境简介

ANSYS 软件的发展从 1971 年 2.0 版至今 2000 年 5.6 版，已有 29 年的历史，在发展的过程中版本的第一个数字表示软件本身有重大的改进及更新，第二个数字表示软件有小幅度的改进及更新，如表 2-1 所示。

表 2-1 ANSYS 发展历程

版 本	年 份	版 本	年 份
2.0	1971	5.0	1992
3.0	1978	5.1	1995
4.0	1982	5.2	1996
4.1	1983	5.3	1996
4.2	1985	5.4	1997
4.3	1987	5.5	1999
4.4	1989	5.6	2000



其中 5.0 版本至 5.1 版在使用者与软件的图形界面上做了重大改进,以适合于一般所谓人性化的设计,此外还发行了学习版,由于学习版无法建立较大的有限元模块,也无法打印图形,故使用仅供学习而已。

ANSYS 的使用有两个模式,一是交互模式 (Interactive Mode), 另一是非交互模式 (Batch Mode)。交互模式是初学者及大部分使用者所采用,在整个分析过程中,进入 ANSYS 软件后,逐一执行命令完成分析工作,内容包括建立模型、查看模型、修改模型、保存文件、打印图形及分析结果的获得等,一般无特别原因,皆使用交互模式。反之,如果分析的问题需要很长的时间,例如一天、两天等,可将分析问题的所有命令,利用任何文本编辑软件制作成文本文件,通过非交互模式进行分析工作。非交互模式中,仍可利用计算机分时共享继续使用计算机(虽然速度较慢),分析问题所需的时间比交互模式少,必须对 ANSYS 命令非常了解。交互模式可由 ANSYS 选项中 Interactive 或 Run Interactive Now 进入,如图 2-1 所示。

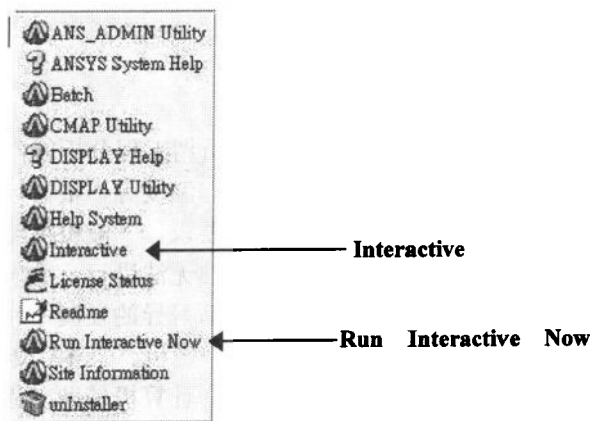


图 2-1 Windows 操作系统 Start Menu 中 ANSYS 选项

当选择 Interactive 后,出现图 2-2 所示的 Interactive 窗口,进入之前可更改工作目录、内存需求(通常不须更改,除非有限元模型非常大)、工作文件名称,然后选择左下角 Run,便可进入交互模式。当选择 Run Interactive Now 后,会直接以上次离开 ANSYS 的环境设定(工作目录、内存需求、文件名称)进入交互模式。通常每个分析工作环境设定不相同,尤其是工作目录、工作文件名称,最好选择 Interactive 进入交互模式,以便使用者指定工作目录、文件名称。为了方便文件管理,请在自行设定的工作目录下进行分析工作。

进入系统后会有 6 个窗口,提供使用者与软件之间的沟通,凭借这 6 个窗口使用者可以非常容易地输入命令、检查模型的建立、观察分析的结果及图形输出与打印。整个窗口系统称为 GUI (Graphical User Interface)。

如图 2-3 所示。每个窗口的功能如下:

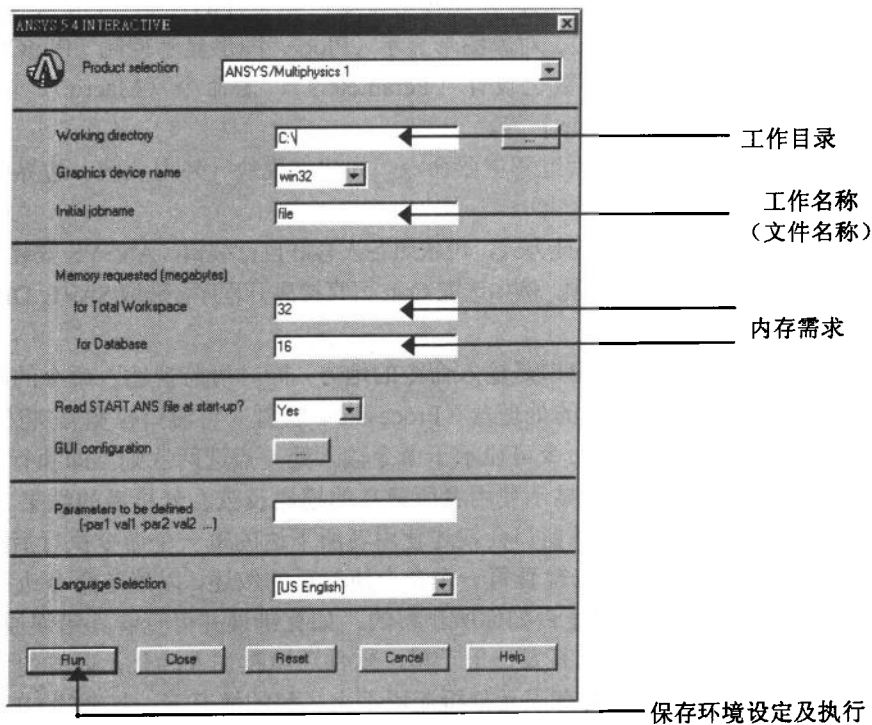


图 2-2 Interactive 窗口

1 应用命令菜单

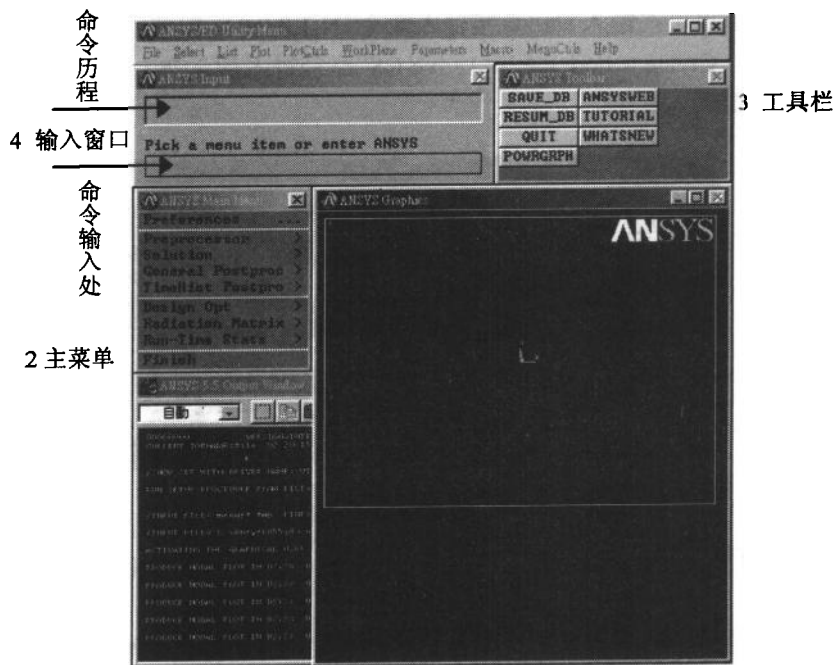


图 2-3 ANSYS 6 个窗口系统示意图



1. 应用命令菜单 (Utility Menu): 包含各种应用命令, 如文件的控制 (File)、选择对象 (Select)、对象资料列示 (List)、对象图形显示 (Plot)、图形显示控制 (PlotCtrls)、工作界面设定 (WorkPlane)、参数化设计 (Parameters)、宏命令 (Macro)、窗口控制 (MenuCtrls) 及辅助说明 (Help) 等。
2. 主菜单 (Main Menu): 包含分析过程主要命令, 如建立模块、外力负载、边界条件、分析类型的选择、求解过程等。
3. 工具栏 (Toolbar): 执行命令的快捷方式, 可依照各人喜好自行编辑, ANSYS 安装完成后, 系统会自动生成一些快捷方式选项, 例如选取 Quit 可直接离开程序, 选取 SAVE_DB 可保存工作文件。
4. 输入窗口 (Input Window): 该窗口是输入命令的地方, 同时可监视输入命令的历程 (将窗口拉长), 也可监视目前所在的处理器 (Processor) 位置 (将窗口拉宽)。将鼠标光标移至命令历程, 点选一次则该命令可显示于命令输入处, 点选两次则立即执行该命令。
5. 图形窗口 (Graphic Window): 显示使用者所建立的模块及查看分析后的结果。
6. 输出窗口 (Output Window): 该窗口会叙述使用者所下达的每一个命令执行后的结果。对初学者而言, 最好养成习惯去检查每一个命令执行后的叙述, 以确定命令执行是否正确, 尤其是命令执行后的结果是否如你所预料的, 如有错误并可查看其错误原因。

由于计算机科技的发展, 软件的开发一日千里, 软件环境越加人性化, 以方便使用者使用该软件。以笔者经验, 在初学者对有限元分析流程不太了解的情况下, 复杂的 GUI 并不会加速使用者对该软件的认识, 反而造成使用者的困难, 无法提升在该软件对不同领域分析的应用, 故笔者建议使用命令输入的方式, 其原因如下:

1. 利用 GUI 时, 当找到命令后, 仍须输入参数, 故不如直接输入命令。例如定义一个位于坐标原点的节点可在输入窗口直接输入命令 (N,1,0,0,0), 但使用 GUI 时由 Main Menu > Preprocessor > Create > nodes > In Active CS 路径进入后, 产生建立节点窗口如图 2-4 所示, 且依然要输入其值。

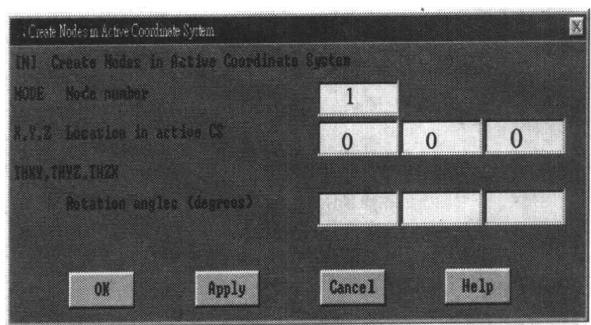


图 2-4 建立节点的窗口

2. ANSYS 命令虽然很多, 但常用的并不多, 且命令与其物理意义相差不远, 例如 N 表示节点 (Node)、F 表示外力 (Force) 等, 久而久之便能熟悉。
3. 熟悉命令并不是要将命令的参数全部熟记, 而是要知道命令的主要用途, 详细命令后参数的用法可随时利用在线辅助 (on-line Help) 来查寻详细用法, 例如在输入窗口输入 “help,N”, 将可看到 N 命令的详细使用说明。

4. 可利用任何文本编辑软件, 将分析问题的命令编辑完成后, 直接在交谈模式下或非交谈模式执行该文件, 但进行分析问题命令编辑时, 必须熟悉命令才可完成。
5. 当结构分析模块复杂时, 完全利用 GUI 系统下达命令。无法完成时, 须配合采用直接命令输入方式进行, 故使用者对命令一定要有某种程度的了解。
6. ANSYS 会记录使用者输入的任何命令, 并将其存为文本文件 (log 文件), 使用者可以将此文件进行编辑以供保存参考。在 GUI 下所完成的命令, 某些命令是以复杂的格式保存的, 往往会有不易编辑该文本文件的困扰。

由于以上原因, 笔者强烈建议 ANSYS 使用者还是以命令直接输入的方式, 这样才能达到最佳的学习效果, 尤其是在主菜单中的各项命令。至于应用命令菜单的命令, 大部分在于图形的控制、文件的控制, 使用 GUI 会有很大的方便性。

2-3 有限元法的基本架构

有限元法是将所探讨的工程系统 (Engineering System) 转化成一个有限元系统 (Finite Element System), 该有限元系统由节点 (Node) 及元素 (Element) 所组合而成, 以取代原有的工程系统, 有限元系统可以转化成一个数学模式, 并根据该数学模式, 进而得到该有限元系统的解答, 并通过节点、元素表现出来。完整有限元模型除了节点、元素外, 还包含工程系统本身所具有的边界条件, 包含约束条件、外力的负载等。

【例 2-1】 (图 2-5)

固定端杆件受到 F_1 及 F_2 的力, 求固定端的作用力。图 (a) 为所探讨的工程系统, 图 (b) 为转化后的有限元模型系统, 其中包含 4 个节点、3 个杆元素。外力负载及约束条件为:

- (1) 第二点受外力负载 F_2
- (2) 第三点受外力负载 F_1
- (3) 第一点和第四点不产生任何变形 (约束条件)

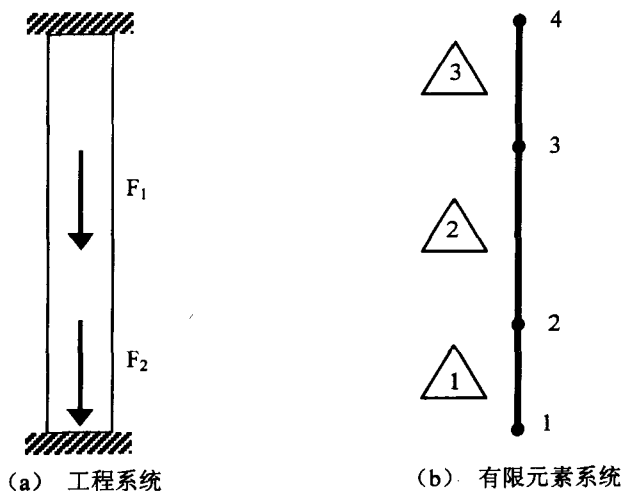


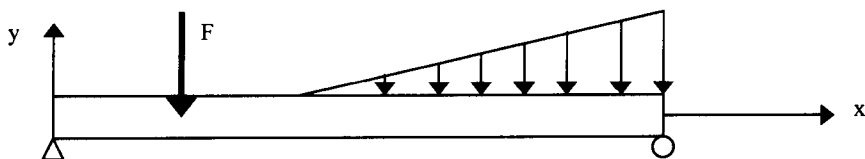
图 2-5 固定端杆件的受力



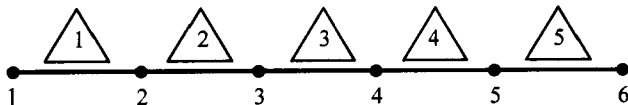
【例 2-2】（图 2-6）

简支梁、求剪力、弯力距、变形。图（a）为所探讨的工程系统，图（b）为转化后的有限元模型系统，其中含 6 个节点、5 个梁元素。外力负载及约束条件为：

- （1）第二点上受外力负载 F
- （2）第三、四、五元素上受压力负载
- （3）第一点在 x 、 y 方向不会有任何位移（约束条件）
- （4）第六点在 y 方向不会有任何位移（约束条件）



(a) 工程系统



(b) 有限元系统

图 2-6 梁结构的受力

有限元系统基本构成：

一、节点 (Node)

就是所考虑工程系统中的一个点坐标位置，构成有限元系统的最基本对象。具有其物理意义的自由度，该自由度为结构系统受到外力后，系统的反应。自由度可为位移、温度、电压等，依不同类型问题而定，节点上为施加集中力所在，例如力、力距、热流、温度等。

二、元素 (Element)

元素是节点与节点所连接而成，元素的组合由各节点相互连接，并构成结构数学模式的刚度矩阵。不同特性的工程系统，可选用不同种类的元素，ANSYS 提供一百多种元素，故在使用时必须慎重选择元素型号，并了解元素特性，方能运用自如。

三、自由度 (Degree of Freedom)

节点一定具有某种程度的自由度，以表示该工程系统受到外力后的反应结果，任何元素在数学模式转换时依其自由度而定，每种元素的节点在元素表中皆有详细说明，以供使用者参考选用。以三维空间结构力学而言，节点的自由度含 3 个方向位移变形及 3 个方向角变形，其他可能的自由度如温度（热分析）、电压、压力（流力分析）、磁位能（磁分析）等。

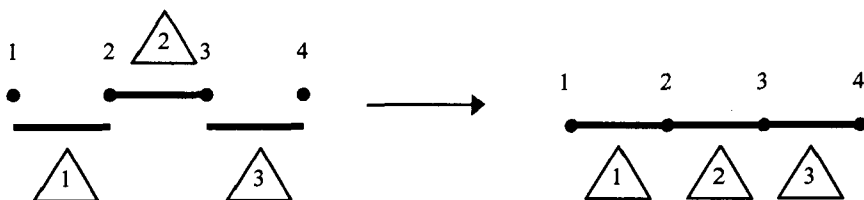
有限元系统的建立，是利用节点与节点组成元素相接而成，其几何外型与工程系统相同，故相连两元素的节点必为共同的节点，分别属于各元素具有相同自由度的反应，元素与元素相连的边，必为共同的边。

【例 2-3】

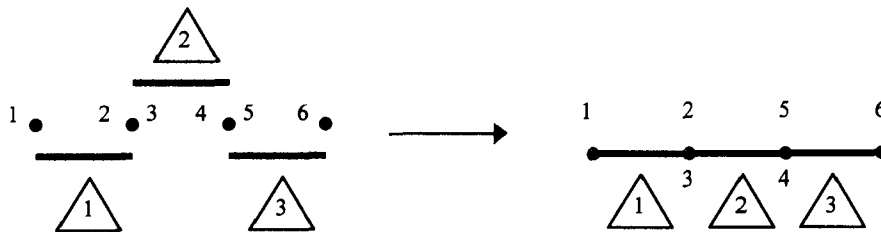
如图 2-7 所示, 考虑 1-D 线元素, 图 (a) 为梁结构工程系统, 欲转换为有限元系统。图 (b) 为正确的有限元系统, 第 1、2 点构成元素一、第 2、3 点构成元素二、第 3、4 点构成元素三, 第 2 点为元素一、二共享, 第 3 点为元素二、三共享, 元素一第 2 点的自由度必须与元素二第 2 点的自由度相同, 通常元素一、二为相同元素则自由度必定相同, 如果元素一、二为不相同元素则自由度可能不相同, 因此在选择元素时必须注意。图 (c) 的错误在于 2、3 节点和第 4、5 节点未共享, 第 2、3 节点和第 4、5 节点为同位置节点, 故元素无法相接。图 (d) 中的第 1、2 点构成元素一, 第 3、4 点构成元素二, 仅视觉效果如同正确的有限元系统, 实际上两元素并未相接。



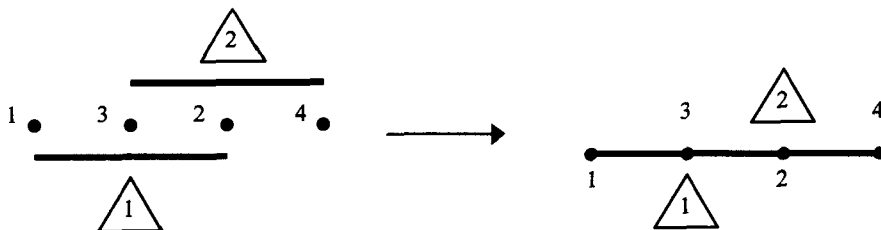
(a) 梁结构工程系统



(b) 正确有限元系统



(c) 同坐标节点错误的有限元系统



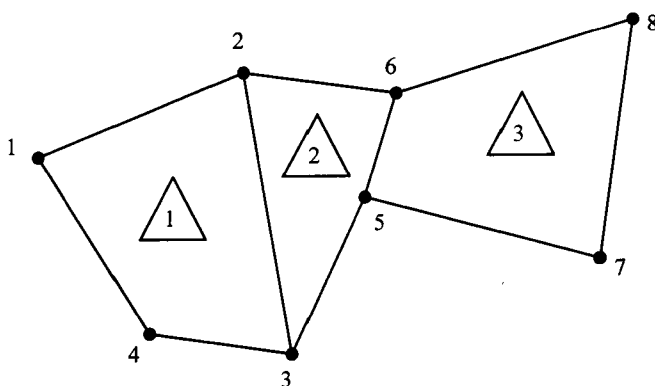
(d) 视觉错误的有限元系统

图 2-7 1-D 正确有限元系统示意图

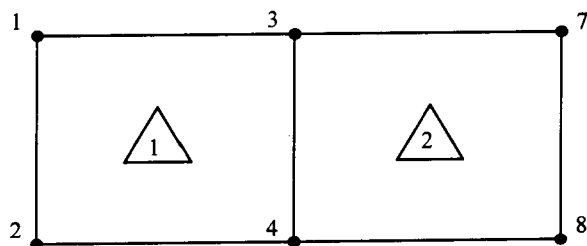


【例 2-4】

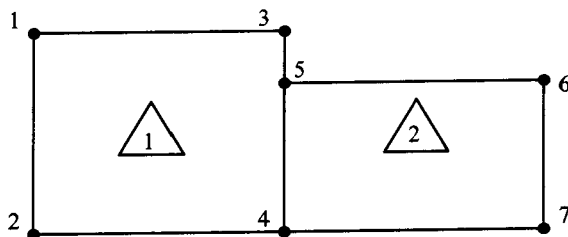
如图 2-8 所示，考虑 2-D 平面元素，图 (a) 为正确的有限元系统，第 1-2-3-4 点构成元素一、第 2-6-5-3 点构成元素二、第 6-8-7-5 点构成元素三，第 2、3 点及其所连成的边为元素一、二共享，第 6、5 点及其所连成的边为元素二、三共享。图 (b) 第 1-3-4-2 构成元素一、第 5-7-8-6 构成元素二，其错误在于 3、5 节点及 4、6 节点未共享，元素一中 3-4 的边和元素二中 5-6 的边未共享，故元素无法相接。图 (c) 第 1-3-4-2 点构成元素一、第 5-6-7-4 点构成元素二，视觉上无任何缺陷，但元素一中 3、4 节点所构成的边与元素二中 5、4 节点所构成的边不共享，实际上两元素并未相接，仅第 4 点为元素一、二共享。



(a) 正确平面有限元系统



(b) 同坐标节点错误的有限元系统



(c) 非共边的错误有限元系统

图 2-8 2-D 正确有限元系统示意图

工程系统分析, 可包含下列 4 项:

1. 分析目的
2. 定义问题
3. 系统组合及求解
4. 查看及解释结果

不论有限元法或理论解, 上述项目都是必要的, 唯一不同的是如何去执行。

【例 2-5】

考虑悬臂梁, 如图 2-9 所示, 求 $x=L$ 变形量。

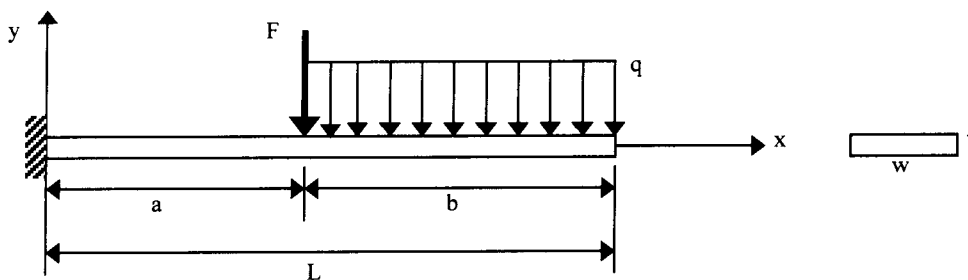


图 2-9 例 2-5 悬臂梁

(1) 分析目的

利用梁的理论, 求 $x=L$ 变形量

(2) 定义问题 (理论解)

材料扬氏系数

$$E = 200 \times 10^9 \text{ N/m}^2$$

截面参数

$$t = 0.01 \text{ m}$$

$$w = 0.03 \text{ m}$$

$$A = 3 \times 10^{-4} \text{ m}^2$$

$$I = 2.5 \times 10^{-9} \text{ m}^4$$

几何参数

$$L = 4 \text{ m}$$

$$a = 2 \text{ m}$$

$$b = 2 \text{ m}$$

边界及外力

$$y = 0, y' = 0 \quad \text{在 } x = 0$$

$$F = 2 \text{ N} \quad \text{在 } x = a$$

$$q = 0.05 \text{ N/m} \quad \text{在 } a \leq x \leq L$$

(3) 系统的组合及求解

$$y = \frac{Fa^3(3L-a)}{6EI} + \frac{q(3L^4 - 4a^3L + a^4)}{24EI}$$

(4) 检查结果

$$y(L) = 0.04444 + 0.002733 \approx 0.07177 \text{ m}$$

如果用 ANSYS 有限元法, 则上例执行命令如表 2-2 所示。