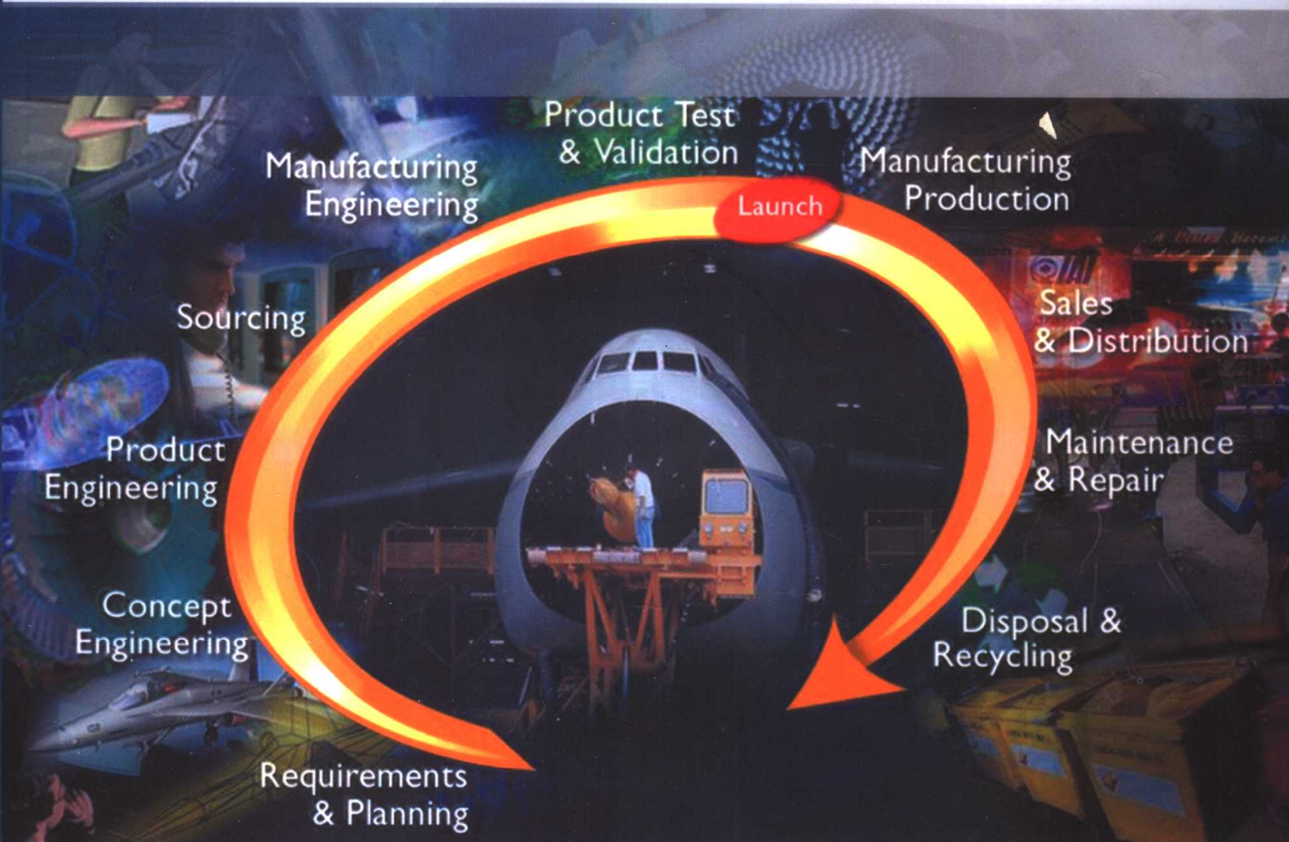
UGS The PLM Company

PLM 应用指导系列丛书

NX Nastran 基础分析指南



张　峰　编著

姜元庆　审校

清华大学出版社

UGS PLM 应用指导系列丛书

NX Nastran 基础分析指南

张　峰　编著

姜元庆　审校

清华大学出版社

北　京

内 容 简 介

NX Nastran 是著名的大型有限元分析软件，具有强大的有限元仿真分析功能。其解算器是当今最为著名的有限元求解程序，拥有最为广泛的用户群，其输入输出格式及计算结果已成为当前 CAE 界的工业标准。

本书是 UGS PLM 应用指导系列丛书中的 NX Nastran 指南的第一本，从讲解有限元基础理论入手，详细讲述 NX Nastran 的基本功能和应用方法。本书所附光盘中有大量的 NX Nastran 应用实例，读者可以在最短的时间内掌握 NX Nastran 的应用特点，并学以致用。

本书可以作为汽车、航空航天、军工、电子、土木工程、造船、水利、石油、制造和建筑等行业工程技术人员应用 NX Nastran 软件进行仿真分析的基础教程。

图书在版编目（CIP）数据

NX Nastran 基础分析指南/张峰编著. —北京：清华大学出版社，2005. 12
（UGS PLM 应用指导系列丛书）
ISBN 7-302-11835-3

Ⅰ.N…　Ⅱ. 张…　Ⅲ. 有限元分析-应用软件，NX Nastran-教材
Ⅳ. 0241.82-39

中国版本图书馆 CIP 数据核字（2005）第 106845 号

出 版 者：清华大学出版社　　**地　址**：北京清华大学学研大厦
http://www.tup.com.cn　　**邮　编**：100084
社 总 机：010-62770175　　**客户服务**：010-62776969
组稿编辑：许存权
文稿编辑：马　丽
封面设计：范华明
版式设计：俞小红
印 装 者：北京国马印刷厂
发 行 者：新华书店总店北京发行所
开　本：185×260　**印张**：17.5　**字数**：378 千字
版　次：2005 年 12 月第 1 版　2005 年 12 月第 1 次印刷
书　号：ISBN 7-302-11835-3/TP・7691
印　数：1～4000
定　价：38.00 元（附光盘 1 张）

前　言

近年来，有限元仿真分析在工程领域中的应用得到了很大发展，各大理工科院校，研究机构都开展了对有限元分析方法的深入研究。Nastran 解算器是当今最为著名的有限元求解程序，拥有最为广泛的用户群，其输入输出格式及计算结果已成为当前 CAE 界的工业标准。2003 年 9 月，UGS 获得了 Nastran 软件的所有商业许可权，并推出了自己的 Nastran 版本——NX Nastran。同时，UGS 将 MSC.Nastran 的专家及主要研发人员招至麾下，并投入了强大的研发力量，使得业界对 NX Nastran 的前途普遍看好。

NX Nastran 功能强大，并且有很多的前后处理器可供用户选择。这对于初学者来说有些难以把握。本书作者从事有限元分析应用多年，有丰富的 FEA 软件使用经验，作者编写本书时从基础理论着手，详细讲解了 NX Nastran 的基本使用方法和流程，并结合实际，给出了许多典型例题及说明。通过阅读本书，可以帮助初学者系统的掌握 NX Nastran 的使用方法和基本技巧，并进一步学以致用。

在本书的编写过程中，得到了上海普信科技有限公司邵仁兴博士的指导，以及该公司庞金祥、黄东等专家的大力支持，UGS 公司的姜元庆专家完成了本书的修改和校对工作，在此致以深深的谢意。另外，在本书的编辑和整理过程中，得到了普信公司戴雯雯小姐的大力协助，在此一并致谢！

由于编者水平有限，书中缺点和错误在所难免，敬请读者批评指正。

作　者

2005 年 3 月于上海

目　　录

第 1 章　有限元分析方法及 NX Nastran 的由来

1.1　有限元分析方法介绍

计算机软硬件技术的迅猛发展，给工程分析、科学研究以至人类社会带来急剧的革命性变化，数值模拟即为这一技术革命在工程分析、设计和科学研究中的具体表现。数值模拟技术通过汲取当今计算数学、力学、计算机图形学和计算机硬件发展的最新成果，根据不同行业的需求，不断扩充、更新和完善。

1.1.1　有限单元法的形成

近三十年来，计算机计算能力的飞速提高和数值计算技术的长足进步，诞生了商业化的有限元数值分析软件，并发展成为一门专门的学科——计算机辅助工程 CAE（Computer Aided Engineering）。这些商品化的 CAE 软件具有越来越人性化的操作界面和易用性，使得这一工具的使用者由学校或研究所的专业人员逐步扩展到企业的产品设计人员或分析人员，CAE 在各个工业领域的应用也得到不断普及并逐步向纵深发展，CAE 工程仿真在工业设计中的作用变得日益重要。许多行业中已经将 CAE 分析方法和计算要求设置在产品研发流程中，作为产品上市前必不可少的环节。CAE 仿真在产品开发、研制与设计及科学研究中已显示出明显的优越性：

- CAE 仿真可有效缩短新产品的开发研究周期。
- 虚拟样机的引入减少了实物样机的试验次数。
- 大幅度地降低产品研发成本。
- 在精确的分析结果指导下制造出高质量的产品。
- 能够快速对设计变更作出反应。
- 能充分和 CAD 模型相结合并对不同类型的问题进行分析。
- 能够精确预测出产品的性能。
- 增加产品和工程的可靠性。
- 采用优化设计，降低材料的消耗或成本。
- 在产品制造或工程施工前预先发现潜在的问题。
- 模拟各种试验方案，减少试验时间和经费。
- 进行机械事故分析，查找事故原因。

当前流行的商业化 CAE 软件有很多种，国际上早在 20 世纪 50 年代末、60 年代初就投入大量的人力和物力开发具有强大功能的有限元分析程序。其中最为著名的是由美国国家宇航局（NASA）在 1965 年委托美国计算科学公司和贝尔航空系统公司开发的 Nastran

有限元分析系统。该系统发展至今已有几十个版本，是目前世界上规模最大、功能最强的有限元分析系统。从那时到现在，世界各地的研究机构和大学也发展了一批专用或通用有限元分析软件，除了 Nastran 以外，主要还有德国的 ASKA、英国的 PAFEC、法国的 SYSTUS、美国的 ABAQUS、ADINA、ANSYS、BERSAFE、BOSOR、COSMOS、ELAS、MARC 和 STARDYNE 等公司的产品。虽然软件种类繁多，但是万变不离其宗，其核心求解方法都是有限单元法，也简称为有限元法（Finite Element Method）。

在工程技术领域内，经常会遇到两类典型的问题。其中的第一类问题，可以归结为有限个已知单元体的组合。例如，材料力学中的连续梁、建筑结构框架和桁架结构，把这类问题称为离散系统。如图 1-1 所示的平面桁架结构，是由 6 个承受轴向力的“杆单元”组成。这种简单的离散系统可以手工进行求解，而且可以得到其精确的理论解。而对于类似图 1-2 所示的这类复杂的离散系统，虽然理论上来说是可解的，但是由于计算工作量非常庞大，就需要借助计算机技术。

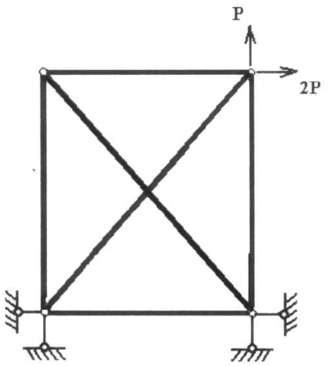


图 1-1　平面桁架系统

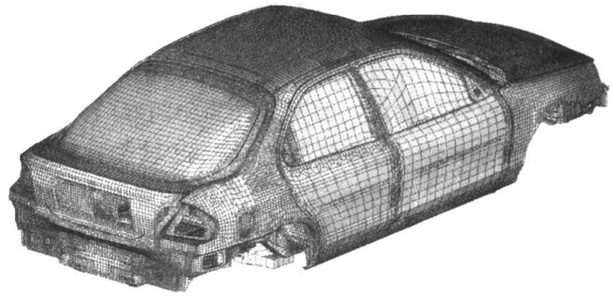


图 1-2　某车身有限元模型

第二类问题，通常可以建立它们应遵循的基本方程，即微分方程和相应的边界条件。例如弹性力学问题，热传导问题，电磁场问题等。由于建立基本方程所研究的对象通常是无限小的单元，这类问题称为连续系统。这里以热传导问题为例做一个简单的说明。

下面是热传导问题的控制方程与换热边界条件：

$$\frac{\partial}{\partial x}\left(\lambda\frac{\partial T}{\partial x}\right)+\frac{\partial}{\partial y}\left(\lambda\frac{\partial T}{\partial y}\right)+\frac{\partial}{\partial z}\left(\lambda\frac{\partial T}{\partial z}\right)+\bar{\mathrm{Q}}=\rho c\frac{\partial T}{\partial t} \tag{1-1}$$

初始温度场也可以是不均匀的，但各点温度值是已知的：

$$T\big|_{t=0}=T_0\left(x,y,z\right) \tag{1-2}$$

通常的热边界有三种，第三类边界条件如下形式：

$$-\lambda\frac{\partial T}{\partial n}=h\left(T-T_f\right) \tag{1-3}$$

尽管已经建立了连续系统的基本方程，由于边界条件的限制，通常只能得到少数简单问题的精确解答。对于许多实际的工程问题，还无法给出精确的解答。为了解决这一困难，工程师们和数学家们提出了许多近似方法。

在寻找连续系统求解方法的过程中，工程师和数学家从两个不同的路线得到了相同的

结果，即有限元法。有限元法的形成可以回顾到 20 世纪 50 年代，来源于固体力学中矩阵结构法的发展和工程师对结构相似性的直觉判断。从固体力学的角度来看，桁架结构等标准离散系统与人为地分割成有限个分区后的连续系统在结构上存在相似性。

1956 年，M.J.Turner，R.W.Clough，H.C.Martin，L.J.Topp 在纽约举行的航空学会年会上介绍了一种新的计算方法，将矩阵位移法推广到求解平面应力问题。他们把连续几何模型划分成一个个三角形和矩形的“单元”，并为所使用的单元指定近似位移函数，进而求得单元节点力与节点位移关系的单元刚度矩阵。

1954—1955 年，J.H.Argyris 在航空工程杂志上发表了一组能量原理和结构分析论文。

1960 年，Clough 在著名的题为“The Finite Element in plane stress analysis”的论文中首次提出了有限元（Finite Element）这一术语，并在后来被广泛地引用，成为这种数值方法的标准称谓。

与此同时，数学家们则发展了微分方程的近似解法，包括有限差分方法，变分原理和加权余量法，这为有限元方法在以后的发展奠定了数学和理论基础。

在 1963 年前后，经过 J.F.Besseling，R.J.Melosh，R.E.Jones，R.H.Gallaher，T.H.H.Pian（卞学磺）等许多人的工作，人们认识到有限元法就是变分原理中 Ritz 近似法的一种变形，从而发展了使用各种不同变分原理导出的有限元计算公式。

1965 年 O.C.Zienkiewicz 和 Y.K.Cheung（张佑启）发现，对于所有的场问题，只要能将其转换为相应的变分形式，即可以用与固体力学有限元法的相同步骤求解。

1969 年 B.A.Szabo 和 G.C.Lee 指出可以用加权余量法特别是迦辽金（Galerkin）法，导出标准的有限元过程来求解非结构问题。

我国的力学工作者为有限元方法的初期发展做出了许多贡献，其中比较著名的有：陈伯屏（结构矩阵方法），钱令希（余能原理），钱伟长（广义变分原理），胡海昌（广义变分原理），冯康（有限单元法理论）。

1.1.2　有限元法的基本思路

有限元法的基本思路可以归结为：将连续系统分割成有限个分区或单元，对每个单元提出一个近似解，再将所有单元按标准方法加以组合，从而形成原有系统的一个数值近似系统，也就是形成相应的数值模型。

下面用在自重作用下的等截面直杆来说明有限元法的思路。

等截面直杆在自重作用下的材料力学解答：

受自重作用的等截面直杆如图 1-3 所示，杆的长度为 L，截面积为 A，弹性模量为 E，单位长度的重量为 q，杆的内力为 N。试求：杆的位移分布、杆的应变和应力。

$$N(x)=q(L-x)$$

$$\mathrm{d}L(x)=\frac{N(x)\mathrm{d}x}{EA}=\frac{q(L-x)\mathrm{d}x}{EA}$$

$$u(x)=\int_0^x\frac{N(x)\mathrm{d}x}{EA}=\frac{q}{EA}\left(Lx-\frac{x^2}{2}\right)\tag{1-4}$$

$$\varepsilon_x = \frac{\mathrm{d}u}{\mathrm{d}x} = \frac{q}{EA}(L-x)$$

$$\sigma_x = E\varepsilon_x = \frac{q}{A}(L-x)$$

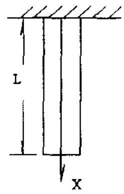


图 1-3 受自重作用的等截面直杆

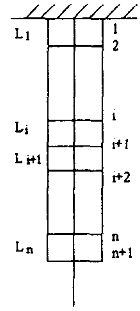


图 1-4 离散后的直杆

等截面直杆在自重作用下的有限元法解答：

（1）连续系统离散化

如图 1-4 所示，将直杆划分成 n 个有限段，有限段之间通过公共点相连接。在有限元法中将两段之间的公共连接点称为节点，将每个有限段称为单元。节点和单元组成的离散模型就称为对应于连续系统的“有限元模型”。

有限元模型中的第 i 个单元，其长度为 L_i，包含第 i，i+1 个节点。

（2）用单元节点位移表示单元内部位移

第 i 个单元中的位移用所包含的节点位移来表示：

$$u(x) = u_i + \frac{u_{i+1} - u_i}{L_i}(x - x_i) \tag{1-5}$$

其中 u_i 为第 i 节点的位移，x_i 为第 i 节点的坐标。第 i 个单元的应变为 ε_i，应力为 σ_i，内力为 N_i：

$$\varepsilon_i = \frac{\mathrm{d}u}{\mathrm{d}x} = \frac{u_{i+1} - u_i}{L_i} \tag{1-6}$$

$$\sigma_i = E\varepsilon_i = \frac{E(u_{i+1} - u_i)}{L_i} \tag{1-7}$$

$$N_i = A\sigma_i = \frac{EA(u_{i+1} - u_i)}{L_i} \tag{1-8}$$

（3）把外载荷归集到节点上

把第 i 单元和第 i+1 单元重量的一半 $\dfrac{q(L_i + L_{i+1})}{2}$，归集到第 i+1 节点上，如图 1-5 所示。

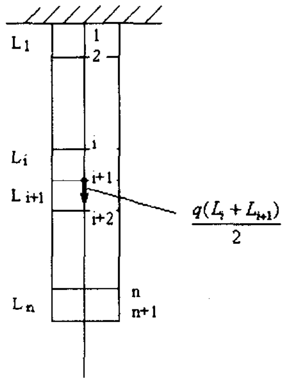


图 1-5　集中单元重量

（4）建立节点的力平衡方程

对于第 i+1 节点，由力的平衡方程可得：

$$N_i - N_{i+1} = \frac{q(L_i + L_{i+1})}{2} \tag{1-9}$$

令 $\lambda_i = \dfrac{L_i}{L_{i+1}}$，并将（1-8）代入得：

$$-u_i + (1+\lambda_i)u_{i+1} - \lambda_i u_{i+2} = \frac{q}{2EA}(1+\frac{1}{\lambda_i})L_i^2 \tag{1-10}$$

根据约束条件，$u_1 = 0$。

对于第 n+1 个节点，

$$N_n = \frac{qL_n}{2}$$

$$-u_n + u_{n+1} = \frac{qL_n^2}{2EA} \tag{1-11}$$

建立所有节点的力平衡方程，可以得到由 n+1 个方程构成的方程组，可解出 n+1 个未知的节点位移。

1.1.3　有限元法的计算步骤

有限元法的计算步骤归纳为以下 3 个基本步骤：网格划分、单元分析、整体分析。

（1）网格划分

有限元法的基本做法是用有限个单元体的集合来代替原有的连续体。因此首先要对弹性体进行必要的简化，再将弹性体划分为有限个单元组成的离散体。单元之间通过节点相连接。由单元、节点、节点连线构成的集合称为网格。

通常把三维实体划分成四面体或六面体单元的实体网格，平面问题划分成三角形或四边形单元的面网格，如图 1-6～图 1-14 所示。

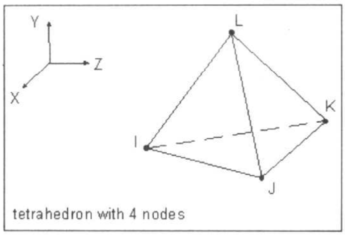


图 1-6　四面体四节点单元

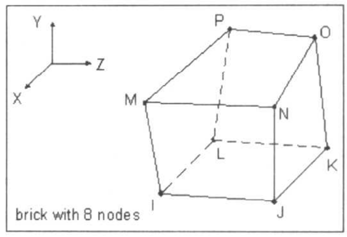


图 1-7　六面体八节点单元

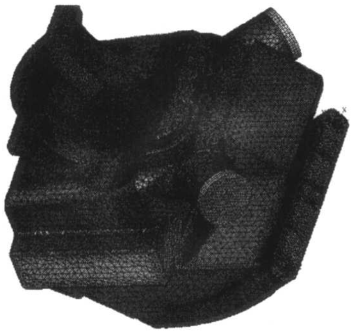


图 1-8　三维实体的四面体单元划分

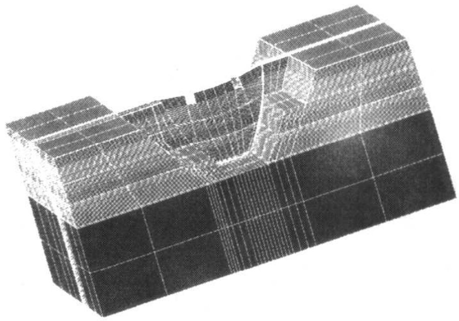


图 1-9　三维实体的六面体单元划分

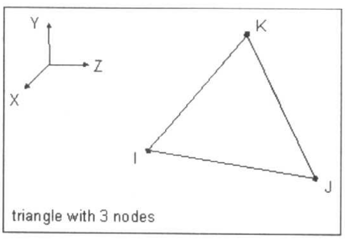


图 1-10　三角形三节点单元

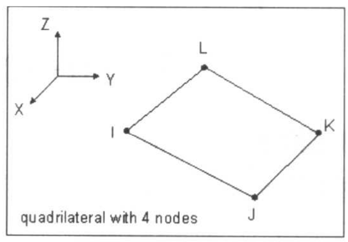


图 1-11　四边形四节点单元

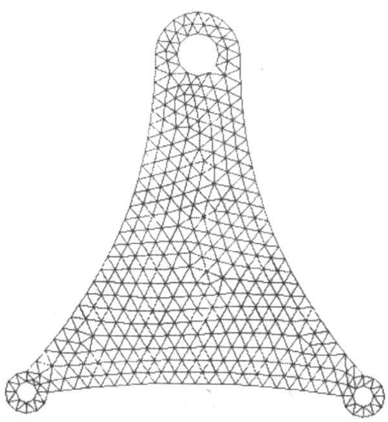


图 1-12　平面问题的三角形单元划分

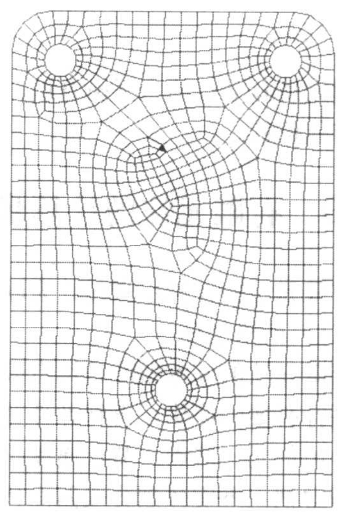


图 1-13　平面问题的四边形单元划分

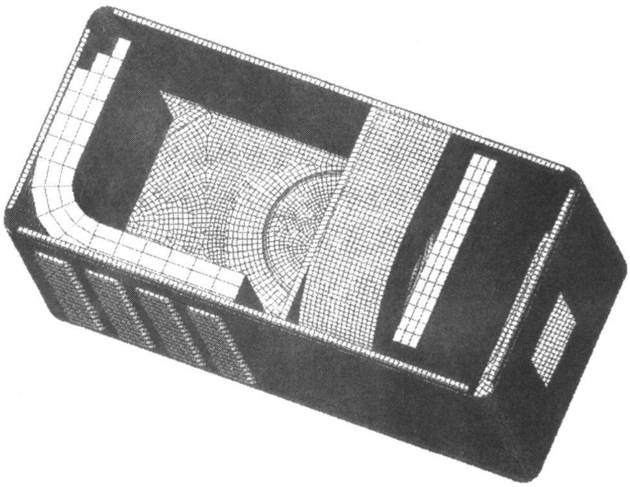


图 1-14　二维及三维混合网格划分

（2）单元分析

对于弹性力学问题，单元分析就是建立各个单元的节点位移和节点力之间的关系式。

由于将单元的节点位移作为基本变量，进行单元分析首先要为单元内部的位移确定一个近似表达式，然后计算单元的应变、应力，再建立单元中节点力与节点位移的关系式。

以平面问题的三角形三节点单元为例。如图 1-15 所示，单元有三个节点 I、J、M，每个节点有两个位移 u、v 和两个节点力 U、V。

单元的所有节点位移、节点力，可以表示为节点位移向量（Vector）：

$$节点位移\{\delta\}^e=\begin{Bmatrix} u_i \\ v_i \\ u_j \\ v_j \\ u_m \\ v_m \end{Bmatrix} \qquad 节点力\{F\}^e=\begin{Bmatrix} U_i \\ V_i \\ U_j \\ V_j \\ U_m \\ V_m \end{Bmatrix}$$

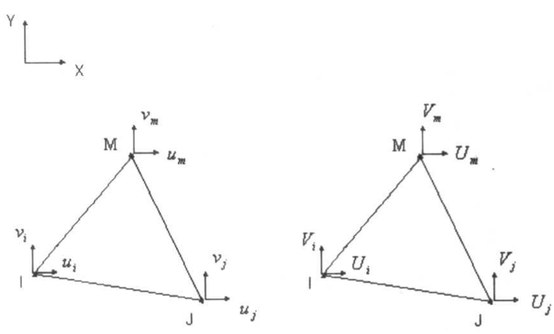


图 1-15　三角形三节点单元

单元的节点位移和节点力之间的关系用张量（Tensor）来表示，

$$\{F\}^{e} = [K]^{e}\{\delta\}^{e} \tag{1-12}$$

（3）整体分析

对由各个单元组成的整体进行分析，建立节点外载荷与节点位移的关系，以解出节点位移，这个过程称为整体分析。同样以弹性力学的平面问题为例，如图 1-16 所示，在边界节点 i 上受到集中力 P_x^i, P_y^i 作用。节点 i 是三个单元的结合点，因此要把这三个单元在同一节点上的节点力汇集在一起建立平衡方程。

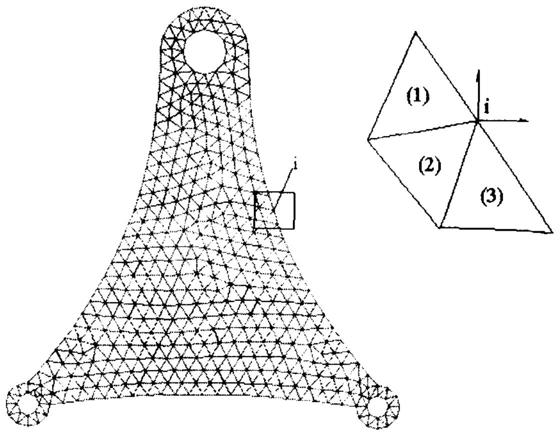


图 1-16　整体分析

i 节点的节点力：

$$U_i^{(1)} + U_i^{(2)} + U_i^{(3)} = \sum_e U_i^{(e)}$$

$$V_i^{(1)} + V_i^{(2)} + V_i^{(3)} = \sum_e V_i^{(e)}$$

i 节点的平衡方程：

$$\left.\begin{aligned} \sum_e U_i^{(e)} &= P_x^i \\ \sum_e V_i^{(e)} &= P_y^i \end{aligned}\right\} \tag{1-13}$$

1.1.4　有限元法的进展与应用

有限元法不仅能应用于结构分析，还能解决归结为场问题的工程问题，从 20 世纪 60 年代中期以来，有限元法得到了巨大的发展，为工程设计和优化提供了有力的工具。当今国际上 FEA 方法和软件发展趋势呈现出以下一些特征：

- 从单纯的结构力学计算发展到求解许多物理场问题。有限元分析方法最早是从结构化矩阵分析发展而来，逐步推广到板、壳和实体等连续体固体力学分析，实践证明这是一种非常有效的数值分析方法。而且从理论上也已经证明，只要用于离散求解对象的单元足够小，所得的解就可足够逼近于精确值。所以近年来有限元

方法已发展到流体力学、温度场、电传导、磁场、渗流和声场等问题的求解计算，最近又发展到求解几个交叉学科的问题。例如比较常见的是将温度场和结构场之间进行耦合计算，确定由于温度场分布不均匀引起的结构应力和变形等。

- 由求解线性工程问题进展到分析非线性问题随着科学技术的发展，线性理论已经远远不能满足设计的要求。例如建筑行业中的高层建筑和大跨度悬索桥的出现，就要求考虑结构的大位移和大应变等几何非线性问题；航天和动力工程的高温部件存在热变形和热应力，也要考虑材料的非线性问题；诸如塑料、橡胶和复合材料等各种新材料的出现，仅靠线性计算理论就不足以解决遇到的问题，只有采用非线性有限元算法才能解决。众所周知，非线性的数值计算是很复杂的，它涉及到很多专门的数学问题和运算技巧，很难为一般工程技术人员所掌握。为此近年来国外一些公司花费了大量的人力和投资开发求解非线性问题的分析功能，并广泛应用于工程实践。
- 增强可视化的前后处理功能。早期有限元分析软件的研究重点在于推导新的高效率求解方法和高精度的单元。随着数值分析方法的逐步完善，尤其是计算机运算速度的飞速发展，整个计算系统用于求解运算的时间越来越少，而准备数值模型和处理计算结果的时间占整个分析工程的比例越来越高。据统计，整个分析流程中，前处理占用的工作时间大致在 80%，而加上后处理部分，占用的时间就要超过 95%。因此目前几乎所有的商业化有限元程序系统都有功能很强的前后处理模块与之相配合。在强调“可视化”的今天，很多程序都建立了对用户非常友好的 GUI（Graphics User Interface），使用户能以可视图形方式直观快速地进行网格自动划分，生成有限元分析所需数据，并按要求将大量的计算结果整理成变形图、等值分布云图，便于极值搜索和所需数据的列表输出。
- 与 CAD 软件的无缝集成。当今有限元分析系统的另一个特点是与通用 CAD 软件的集成使用，即在用 CAD 软件完成部件和零件的造型设计后，自动生成有限元网格并进行计算，如果分析的结果不符合设计要求则重新进行造型和计算，直到满意为止，从而极大地提高了设计水平和效率。现在，工程师可以在集成的 CAD 和 FEA 软件环境中快捷地解决一个在以前无法应付的复杂工程分析问题。所以目前所有的商业化有限元系统商都开发了著名的 CAD 软件（例如 Unigraphics、Pro/ENGINEER、SolidEdge、SolidWorks 等）接口。

1.2　NX Nastran 的由来

1.2.1　Nastran 程序的起源

Nastran，即 NASA 结构分析系统，是 1966 年美国国家航空航天局（NASA）为了满足当时航空航天工业对结构分析的迫切需求，主持开发大型应用有限元程序的招标，有多家软件开发商中标并参与了结构分析求解器的开发过程。1969 年 NASA 推出了其第一个

Nastran 版本，称为 COSMIC Nastran。COSMIC Nastran 是放在 Public Domain 上的公开发售版本，Nastran 和 COSMIC 是 NASA 的注册商标。

1972 年，MSC.Software 公司获得了一个版本的 COSMIC Nastran，并推出了自己的商业化产品 MSC Nastran。这个版本的 Nastran 也是在市场上最为著名的 Nastran 版本。到了 20 世纪 80 年代，又有另外两家公司 UAI、CSAR 基于 NASA 的 COSMIC Nastran 源代码推出了各自的商业版本，从而市场上形成了由主要三家Nastran供应商(MSC、UAI和CSAR)相互竞争的局面。Nastran 是工程分析界应用最为广泛的有限元软件，绝大多数的商业化前后处理器都对 Nastran 有良好的支持，其文本格式已成为标准格式，其计算结果也成为 CAE 分析的规范。

1.2.2 NX Nastran 的由来

1999 年，MSC 收购了 UAI 和 CSAR，成为市场上惟一提供 Nastran 商业代码的供应商。而以后的几年，MSC Nastran 的价格上涨，但是其相关功能和服务却没有得到提升，从而引发大量客户的抱怨，并向美国联邦贸易委员会（FTC）申诉。

经过调查，FTC 认定 MSC Nastran 垄断。为了重建 Nastran 市场的竞争，FTC 做出了如下的几项裁决（关于 FTC 官方裁决，可参看 FTC 网站相应内容）。

- MSC.Software 公司必须共享 MSC Nastran 最新商业版（当时为 2002 年 11 月 v2001r9，以重新建立 Nastran 市场竞争，该版本即 NX Nastran V1.0）。
- 共享内容包括用于 Nastran 开发、销售用的所有 MSC Nastran 的源代码、目标代码、测试案例、开发环境和所有文档的永久使用权许可。
- 告知在过去 3 年多时间（仅限美国）已购买了 MSC.Software 公司的永久使用许可的用户。这些用户有权转而使用 UGS 的 NX Nastran，并由 MSC.Software 退还差额赔偿。
- MSC 和 UGS 必须保证在未来 3 年内数据的兼容性，NX Nastran 将继续使用通用的 Nastran 格式，以确保那些转到 NX Nastran 的用户能使用过去的 Nastran 输入/输出文件。
- 获得许可的机构（EDS）应获得 MSC.Software、UAI 和 CSAR 公司雇员的名单，并有权雇佣他们。

FTC 的裁决使得一个强有力的公司——UGS 加入到 Nastran 的市场中来， Nastran 由单一供应商 MSC 转为两家互相竞争的供应商，MSC Nastran 在各行业得到的认证同样适用于 NX Nastran 产品，不需要进行再次认证。

2003 年 9 月，NX Nastran 产品正式发布。UGS 承诺将全力开发支持 NX Nastran 和 NX Nastran 前后处理器（NX MaterFEM，Femap，NX Scenario），并在近两年中每年推出两个 NX Nastran 新版本。由于 FTC 的裁决使得 MSC 公司的雇员名单也已共享，因此已经有许多资深的 Nastran 专家加入到 UGS PLM Solutions 的开发队伍中来。包括：

- Dr. Louis Komzsik ，前 MSC 的首席算法专家，有超过 30 年的结构分析经验和 20 年在 MSC 的工作经历。