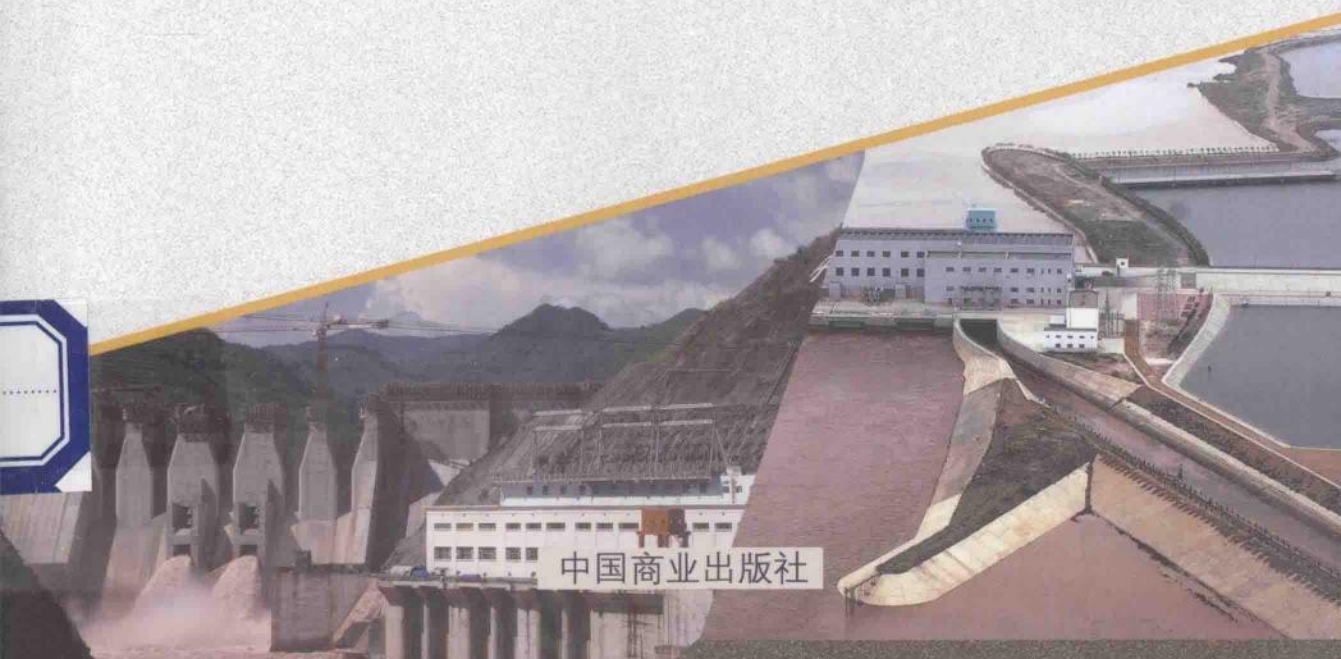


FINITE ELEMENT ANALYSIS IN
WATER RESOURCES AND
HYDROPOWER ENGINEERING



有限元分析在 水利水电工程中的应用

时铁城 包冀邢 刘春冬 著



中国商业出版社

FINITE ELEMENT ANALYSIS IN
WATER RESOURCES AND
HYDROPOWER ENGINEERING



有限元分析在 水利水电工程中的应用

时铁城 包冀邢 刘春冬 著



中国商业出版社

图书在版编目 (CIP) 数据

有限元分析在水利水电工程中的应用 / 时铁城, 包冀邢, 刘春冬著. —北京: 中国商业出版社, 2013.8
ISBN 978-7-5044-8162-7

I. ①有… II. ①时…②包… ③刘… III. ①水利水电工程—有限元分析—应用软件 IV. ①TV-39
中国版本图书馆 CIP 数据核字 (2013) 第 148842 号

责任编辑 孙启泰

中国商业出版社出版发行

010-63180647 www.c-cbook.com

(100053 北京广安门内报国寺1号)

新华书店总店北京发行所经销

北京明月印务有限责任公司印刷

* * * *

787×1092 毫米 16 开 12.5 印张 230 千字

2013 年 8 月第 1 版 2013 年 8 月第 1 次印刷

定价: 36.00 元

* * * *

(如有印装质量问题可更换)

在水利水电工程建设中,计算机技术应用于工程设计和管理各个方面,可以为设计、科研和建设管理人员实现工程计算分析、模拟仿真、优化设计和施工建设管理等任务。水利水电工程设计常用软件涉及数学、力学、数字仿真、工程管理学与计算机技术等多领域、多学科,有限元分析技术是水利水电工程设计应用软件依托的核心技术之一。

20 世纪 60 年代后,随着计算机的应用与发展,有限元技术依靠数值计算方法,得到了迅速发展。在以后的 20 多年里,有限元软件的功能、算法得到扩充和完善,有限元技术在结构分析和场分析领域得到成功应用,分析对象从线性发展到非线性,从结构场扩展到温度场、声波场等,从单一场向多场耦合方向发展。在我国,有限元分析程序从诞生开始就被用于刘家峡水电站等水利水电工程设计中。

20 世纪 90 年代以来,CAD 技术得到了迅速发展,工程设计软件采用了面向对象的软件技术,其功能不断增加,体系规模越来越庞大;前处理采用实体建模与参数化建模,有限元模型信息自动生成,后处理模块可以将有限元计算成果按工程设计要求进行检验和判别,可以实现与 CAD 等软件连接;对单元库、材料库和求解器进行了扩充和完善,采用先进高效的求解算法,可进行静力和拟静力的线性与非线性分析、线性与非线性动力分析、稳态与瞬态热分析、流体场分析、声场分析和结构优化等;数据库管理系统得到扩充,包含了标准构件库、典型结构图形库、常规材料特性数据库和标准规范库等。软件可以在大型机、超级并行机系统上运行,也可以在微机上运行。目前各种工程结构、流体和岩土分析等有限元分析软件在水利水电工程设计中得到了广泛应用。

本书中的实例是在 ALGOR 软件中完成的,对其它有限元软件的学习有借鉴作用。

ALGOR 软件是在我国工程界十分熟悉的有限元分析软件 SAP5 基础上发展起来的。它最早在中国露面的时候被称作 SUPER SAP。1995 年和 1998 年, ALGOR 公司分别推出 Windows 版本的 ALGOR95 和 ALGOR98, 1999 年 1 月和 2000 年底, 推出了 R12 和 R13 版本, 2003 年 9 月, ALGOR 公司推出了以多物理场耦合分析为特色的版本 V14, 从 2005 年推出的 ALGOR V17 开始提供中文界面。2009 年 ALGOR 被美国 Autodesk 公司收购, 研发和技术能力进一步提升, 2010 年 5 月发布 Autodesk Algor Simulation Professional 2011。

ALGOR 软件的分析功能十分强大, 包括线性应力分析、非线性应力分析、线性和非线性的动力分析、瞬态和稳态的热传导分析、二维和三维的稳态和非稳态的流体流动分析、电场分析、机械动力仿真分析、多物理场耦合分析等功能。ALGOR 软件还带有管道分析和压力容器设计模块, 此模块可以便捷地对管道系统及压力容器进行设计和分析。

ALGOR 的 CAD 实体模型基于专业 CAD 软件建立, 通过 ALGOR 强大而广泛的 CAD 模型接口实现无缝的模型导入。

由于大型的有限元软件功能强大, 能用于多个行业, 但对于某个专业设计来讲, 只能用到软件功能中的一少部分, 有限元初学者经常感觉到无从下手, 本书作者为水利水电专业一线设计人员, 有深厚的专业知识功底, 编写本书意在帮助初学者快速、顺利地掌握有限元分析技术, 并能运用到本行业设计当中, 解决设计中遇到的实际问题。

有限元软件的特殊性就是其专业性, 本书通过翔实的实例把专业问题抽象简化为有限元模型, 给初学者在实际运用中进行软件操作讲解, 内容涵盖了前处理、一般结构分析、高级结构分析功能。本书中的实例都是在水利水电实际工作中遇到的, 相信对同行业初学者会有所帮助, 其它行业的结构设计人员也可以参照学习。

由于编者水平有限, 书中一定有许多缺点和错误, 敬请读者批评指正。

第 1 章	有限元分析入门	1
1.1	数值模拟技术及有限元法	1
1.1.1	有限单元法的基本思想	2
1.1.2	有限单元法原理简述	2
1.1.3	节点和单元	3
1.1.4	有限元法的基本过程	4
1.2	ALGOR 软件简介	6
1.2.1	ALGOR 软件的发展历程	6
1.2.2	ALGOR 软件的特点	7
1.2.3	ALGOR 软件的分析功能	10
1.3	重力坝分析实例	13
第 2 章	前处理	23
2.1	概述	23
2.2	ALGOR 2011 分析环境	23
2.2.1	启动 Algor 2011	23
2.2.2	ALGOR 2011 的界面与操作	24
2.2.3	ALGOR 2011 环境组成	26
2.2.4	FEA 编辑器菜单	26

2.3 CAD 实体建模与网格划分	30
2.3.1 CAD 实体建模方法	30
2.3.2 ALGOR 的插件式 CAD (InCAD) 接口技术	30
2.3.3 ALGOR 导入 CAD 实体模型的方法	31
2.3.4 实体模型的网格划分步骤	32
2.3.5 模型网格设置	33
2.3.6 网格细化与增强	41
2.3.7 三维实体模型网格划分实例	44
2.4 用 FEA 编辑器构建网格	47
2.4.1 网格构建中的“部件”、“面”和“层”	47
2.4.2 建立空模型	48
2.4.3 直接建立网格	48
2.4.4 基于草图建立网格	51
2.4.5 实例：建立三维漏斗模型	56
2.4.6 实例：建立三维箱型梁	63
2.4.7 网格化二维模型概述	65
2.4.8 网格化二维模型实例	67
第 3 章 线性分析基础	75
3.1 线性分析介绍	75
3.1.1 线性分析介绍	75
3.1.2 线性分析类型	75
3.2 线性分析单元类型	77
3.2.1 梁单元	77
3.2.2 桁架单元	84
3.2.3 二维单元	84
3.2.4 板单元	86
3.2.5 膜单元	88
3.2.6 块体单元	89
3.2.7 四面体单元	92

3.2.8 弹簧单元	92
3.2.9 间隙单元	94
3.2.10 刚性单元	95
3.3 线性分析材料	97
3.3.1 各向同性材料	97
3.3.2 正交各向异性材料	98
3.3.3 温度相关材料	98
3.3.4 各种单元的可用材料	99
3.4 单元公式	100
3.4.1 不兼容的位移模式	100
3.4.2 积分模式	101
3.5 ALGOR 的材料库	101
3.5.1 软件内置材料库	101
3.5.2 用户自定义材料库	102
第 4 章 杆件结构受力分析	103
4.1 连续梁的模拟	103
4.1.1 启动 Autodesk Algor FEA 编辑器	103
4.1.2 创建网格线	104
4.1.3 设置单元类型和参数	105
4.1.4 施加约束	106
4.1.5 施加荷载	106
4.1.6 求解	107
4.1.7 后处理	107
4.2 刚架的模拟	108
4.2.1 启动 Autodesk Algor FEA 编辑器	109
4.2.2 创建网格线	109
4.2.3 设置单元类型和参数	110
4.2.4 施加约束	110
4.2.5 施加荷载	111

4.2.6 求解	111
4.2.7 后处理	111
4.3 排架的模拟	113
4.3.1 启动 Autodesk Algor FEA 编辑器	114
4.3.2 创建网格线	114
4.3.3 设置单元类型和参数	115
4.3.4 施加约束	116
4.3.5 施加荷载	117
4.3.6 求解	118
4.3.7 后处理	118
4.3.8 梁端部释放	119
4.4 空间塔架	119
4.4.1 启动 Autodesk Algor FEA 编辑器	120
4.4.2 创建网格线	120
4.4.3 设置单元类型和参数	123
4.4.4 施加约束	124
4.4.5 施加荷载	124
4.4.6 求解	125
4.4.7 后处理	125
4.4.8 修改模型重新计算	125
4.4.9 修改模型几何形状并重新计算	126
第 5 章 板壳结构受力分析	127
5.1 板上作用移动荷载的模拟	127
5.1.1 启动 Autodesk Algor FEA 编辑器	127
5.1.2 建立板的模型	127
5.1.3 设置单元类型和参数	128
5.1.4 施加约束	128
5.1.5 施加荷载	129
5.1.6 求解	130

5.1.7 后处理	130
5.2 板上作用分布力、温度荷载的模拟	131
5.2.1 问题描述	132
5.2.2 启动 Autodesk Algor FEA 编辑器	133
5.2.3 创建模型网格线	133
5.2.4 施加约束	134
5.2.5 设置单元类型和参数	134
5.2.6 建立多个设计方案	135
5.2.7 方案 1 后处理	137
5.2.8 柱面坐标的应用	139
5.2.9 方案 2、方案 3 后处理	141
5.2.10 风罩配筋设计	141
5.3 压力容器及压力管道	141
5.3.1 压力容器介绍	141
5.3.2 压力容器板壳单元建模	142
5.3.3 水电站压力管道中的岔管	148
第 6 章 块体结构线性受力分析	149
6.1 大型水闸结构静力分析	149
6.1.1 水闸结构应力分析概述	149
6.1.2 某大型水闸闸室体型结构	150
6.1.3 闸室荷载及组合	151
6.1.4 荷载及模型的简化处理	151
6.1.5 打开几何模型	152
6.1.6 划分网格	153
6.1.7 单元定义	154
6.1.8 材料设置	155
6.1.9 施加约束	155
6.1.10 施加荷载	156
6.1.11 求解	159

6.1.12 后处理	159
6.1.13 存档	161
6.2 曲柄受力分析	161
6.2.1 打开几何模型	162
6.2.2 划分网格	162
6.2.3 添加梁单元	163
6.2.4 定义梁单元	164
6.2.5 指定材料	164
6.2.6 施加约束	165
6.2.7 施加表面压力	165
6.2.7 施加力矩	166
6.2.8 求解	166
第 7 章 线性动力分析	169
7.1 线性动力分析概述	169
7.1.1 动力学分析介绍	169
7.1.2 动力学分析的阻尼	170
7.2 固有频率（模态）分析	170
7.2.1 模态分析的概念	170
7.2.2 模态分析理论	171
7.2.3 固有频率（模态）分析求解参数	172
7.3 固有频率分析实例	174
7.3.1 启动 Autodesk Algor 并打开模型	174
7.3.2 单元类型、材料、约束	174
7.3.3 荷载	175
7.3.4 设置分析类型	175
7.3.5 设置分析参数	175
7.3.6 求解	176
7.3.7 后处理	176

7.4 荷载刚化固有频率（模态）分析	177
7.4.1 荷载刚化固有频率（模态）分析	177
7.4.2 荷载刚化固有频率（模态）分析求解参数	177
7.4.3 荷载刚化固有频率分析实例	178
7.5 响应谱分析	179
7.5.1 概述	179
7.5.2 频谱的定义	180
7.5.3 响应谱分析的算法	181
7.5.4 响应谱分析求解参数	183
7.6 响应谱分析实例	185
7.6.1 荷载刚化固有频率分析	185
7.6.2 建立响应谱分析方案	186
7.6.3 响应谱分析参数	186
7.6.4 求解与后处理	187

第 1 章

有限元分析入门

1.1 数值模拟技术及有限元法

对于大多数科学技术和工程实际领域内的许多力学问题和物理问题，在数学上都可以表述为一定边界条件下的常微分方程或偏微分方程的求解问题。对于大多数几何形状比较复杂的结构分析，不可能得到精确的解析结果，因此往往通过数值分析的方法给出问题的近似解。数值模拟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，近年来已发展到流体力学、温度场、电传导、磁场、渗流和声场等问题的求解计算。随着计算机的飞速发展和广泛应用，数值分析方法已成为求解科学技术问题的主要工具。

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、边界元法、离散单元法和有限差分法等，就实用性和应用的广泛性而言，主要还是有限单元法。现代有限元法第一个成功的尝试，是将钢架位移法推广应用于弹性力学平面问题，这是 Turner, Clough 等人在分析飞机结构时于 1956 年得到的成果。他们第一次给出了用三角形单元法求得平面应力问题的正确答案。1960 年 Clough 进一步处理了平面弹性问题，他在论文“平面应力分析的有限单元法”中首次提出了有限单元法的概念，使人们开始认识了有限单元法的功效。1963 ~ 1964 年，Besseling, Melosh 和 Jones 等人证明了有限单元法是基于变分原理的里兹 (Ritz) 法的另一种形式，确立了有限单元法是处理连续介质问题的一种普遍方法。从 20 世纪 60 年代后期开始，进一步利用加权余量法来确定单元特性和建立有限元求解方程，因而进一步扩大了有限单元法的应用领域。

近几十年来，有限单元法的应用已由弹性力学平面问题扩展到空间问题、板壳问题，

由静力平衡问题扩展到稳定问题、动力问题和波动问题。分析的对象从弹性材料扩展到塑性、粘弹性、粘塑性和复合材料等，从固体力学扩展到流体力学、传热学等连续介质力学领域。在工程分析中的作用已从分析和校核扩展到优化设计并和计算机辅助设计技术相结合。许多主流大型商业有限元软件增强可视化的前置建模和后置数据处理功能，开发更加友好的多媒体用户界面、智能化用户界面。

1.1.1 有限单元法的基本思想

有限元分析 (Finite element analysis) 的基本思想是用较简单的问题代替复杂问题后再求解。有限单元法利用在每一个单元内假设的近似函数来分片地表示全求解域上待求的未知场函数，单元内的近似函数通常由未知场函数或其导数在单元的各个节点的数值和其插值函数来表达。这样，一个问题的有限元分析中，未知场函数或其导数在各个节点上的数值就成为新的未知量 (也即自由度)，从而使一个连续的无限自由度问题变成离散的有限自由度问题。一经求解出这些未知量，就可以通过插值函数计算出各个单元内场函数的近似值，从而得到整个求解域上的近似解。20 世纪 60 年代初，首次提出结构力学计算有限元概念的克拉夫 (Clough) 教授形象地将其描绘为：“有限元法 = Rayleigh Ritz 法 + 分片函数”，即有限元法是 Rayleigh Ritz 法的一种局部化情况。不同于求解满足整个定义域边界条件的允许函数的 Rayleigh Ritz 法，有限元法将函数定义在简单几何形状 (如二维问题中的三角形或任意四边形) 的单元域上 (分片函数)，且不考虑整个定义域的复杂边界条件，这是有限元法优于其它近似方法的原因之一。

由于单元内近似函数分片地表示全求解域的未知场函数，并未限制场函数所满足的方程形式，也未限制各个单元所对应的方程必须是相同的形式，所以尽管有限元法开始是对线弹性的应力分析问题提出的，但很快就发展到弹塑性问题、动力问题、屈曲问题等，并进一步应用于流体力学问题、热传导问题等，而且可以利用有限元法对不同物理现象相互耦合的问题进行有效地分析。

更通俗的讲，有限元分析法将现实对象划分成大量的单元 (1,000 到 100,000 个)，如微小立方体。各个微小单元在形状上都是规则的，其行为很容易通过设定数学方程得以预知。计算机则综合所有单元的行为，从而预测实际对象的行为。有限元分析的产生就来自于有限元模型中单元数目有限这个概念。

1.1.2 有限单元法原理简述

1678 年，Robert Hooke 用 Hooke 定律确立了现代有限元应力分析的基础。简言之，

即弹性体的拉伸（应变）与作用在它上的拉力（应力）成正比。数学表达式：

$$F=kx$$

F = 拉力

k = 比例常量

x = 拉伸距离

这是理解有限元应力分析所需的唯一等式。Hooke 通过重力拉伸悬挂在天花板上的金属线证明了该等式。

设想一茶杯放置桌上。茶杯划分成 2,000 个砖形微小单元。每个单元有 8 个角，或节点。茶杯底部所有的节点是固定的（所有的平动和转动都被约束），所以它们无法移动。现在我们在靠近茶杯顶部的某个节点上往下压。该节点将移动一小点，因为所有的材料都具有一定的弹性。如果不是其它单元挡道或将它往回顶的话，则其运动就是 $F=kx$ 所描述的那样。事实上，随着压力通过第一个单元的传送，压力将散播给其它节点，我们通过计算机技术，快速地跟踪这些事件。

在有限元分析法中，应变按单元刚度公式发生。刚度 k 用来反映各个单元上任意两节点之间的关系。这样，各个单元上任意两节点都通过弹力相连，其行为类似 $F=kx$ 。经过这种处理后，我们将茶杯简化成一个大弹力系统。做分析的时候，各个节点平动 x 和压力 F 的值由公式 $F=kx$ 确定。注意： F 和 x 均为矢量，都具有数值和方向。

在计算结果中，应力由各个节点的已知压力和各个单元的几何形状确定。

其它物理现象可以通过利用相关控制等式进行类似处理，如热传递、流体流动和电作用等现象。

1.1.3 节点和单元

1. 节点

节点是在其中定义了自由度的空间中的坐标位置。一个点的自由度表示该点因结构受载而产生的可能运动。自由度还表示从一个单元向下一单元传递何种力或力矩。有限元分析的结果（变形和应力）通常在节点处给出。

在现实世界中，点可沿六个不同方向移动，沿 X 、 Y 和 Z 轴向平动以及绕 X 、 Y 和 Z 轴的转动。在有限元分析中，因为各种原因，节点运动可能被限制。例如，对于 2-D 单元则无需计算平面外的平动；如果允许节点超出平面移动，则不是 2-D 单元。

节点（建立在单元类型上）的自由度也与通过该节点向单元传递的力类型和约束类型相关。力（轴向力或剪力）与平动自由度等效。力矩与转动自由度等效。这样，

要传递绕定轴的力矩，节点必须具有转动自由度。如果节点不具有转动自由度，则分析时该节点所受力矩不起作用。同样地，用转动边界条件约束该节点也不起作用；该节点不具备传递力矩的能力。

2. 单元

单元是有限元分析的基本元素，单元类型有数种，有限元分析所使用的单元类型取决于结构的类型和要分析的物理现象。

单元是定义节点自由度如何与下一节点相关的数学关系。这些单元可以是线（桁或梁）、面（2-D 或 3-D 平面和膜）或体（块体或四面体）。单元同样与变形产生应力的方式有关。

1.1.4 有限元法的基本过程

对于不同物理现象和数学模型的问题，有限元求解的基本步骤是相同的，只是具体公式推导和运算求解不同。下面以结构应力分析为例，给出有限元求解问题的基本步骤。

1. 问题及求解域定义

根据实际工程问题，近似确定工程或物理问题的数学模型，包括问题的基本变量、基本方程、求解域和边界条件。

2. 创建表示模型的网格（节点和单元的网格）

将一个表示结构或连续体的求解域离散为若干个不同有限大小和形状的子域（单元），离散后彼此相邻的单元利用公共节点相互连接起来，这一步称为有限元网络划分。根据具体问题的性质、求解精度等要求决定单元节点的设置。所以有限元法中分析的是与原结构同样材料、由众多单元以一定方式连接而成的原结构的离散体，因此有限元分析计算得到的结果只是近似的，一般情况下，如果单元划分得非常细而且合理，则所获得的结果可以无限逼近于真实结果。

3. 定义单位系统

对于一个模型，应选择一个量纲系统，把相应的物理参数都转换为定义的单位系统。

4. 定义模型的分析参数

对于线性静力分析模型可以同时计算多个荷载工况，每个工况可以定义不同的分析参数，有荷载因子、重力加速度、离心力、热 / 电参数、求解参数、输出参数等。

5. 定义单元类型和参数

根据实际问题确定的数学模型来确定相应的单元类型和参数。

在结构应力分析中,选择单元的节点位移作为基本未知量,这种方法称为位移法。位移法易于计算机编程计算,所以在有限单元法中得到广泛应用。在把物体离散为有限个单元之后,把单元中的位移表示为节点位移的插值函数,这种函数称为单元位移函数。根据单元的材料性质、形状、节点数目、位置及含义等,应用弹性力学中的几何方程和物理方程,可以建立单元应变和应力矩阵,进一步根据最小位能原理导出单元刚度矩阵。

物体离散化后,有限元模型单元之间的力是通过公共节点传递的,因此需要将作用在单元边界上的表面力、体积力或集中力等效地移到节点上,即利用等效节点力代替所有作用在单元上的力。为保证问题求解的收敛性,单元推导有许多原则要遵循。对工程应用而言,重要的是应注意每一种单元的解题性能与约束。例如,单元形状应以规则为好,畸形时不仅精度低,甚至可能导致无法求解。

6. 施加荷载和约束

根据确定的数学模型和网格划分来确定荷载和约束的施加,有些荷载需要等效代替。

7. 汇编单元刚度矩阵

利用结构力的平衡条件和边界条件把各个单元按原来的结果重新联结起来,形成整体的有限元方程

$$\{F\}=[K]\{u\}$$

式中: $\{F\}$ —载荷列阵;

$[K]$ —整体刚度矩阵;

$\{u\}$ —节点位移列阵。

8. 求解

求解联立的总体刚度矩阵方程组,得出有限元模型的节点位移。这里,可以根据方程组的具体特点来选择合适的计算方法,一般的算法有直接法、迭代法等。

9. 结果分析与复查

结构应力分析的直接结果是单元结点处的位移值,可以根据节点位移值得出单元、节点应变、应力值等导出量。对于计算结果的质量,将通过与设计准则提供的允许值比较来评价并确定是否需要重复计算。

10. 生成分析结果报告

目前,大型的有限元分析软件将有限元分析过程分成三个阶段,即前处理、求解和结果后处理。前处理是建立或导入结构的几何模型,设置有限元模型的各种参数,包括单元类型选择、单元参数设置、材料特性以及分析类型选择等,最后将模型划分