

集成化的通用结构分析与设计软件

**SAP2000<sup>®</sup>**

**基本分析参考手册**



**Computers and Structures, Inc.**  
**Berkeley, California, USA**



北京金土木软件技术有限公司  
北京市首体南路9号主语国际2号楼  
中国建筑标准设计研究院 100048

Version 14  
2009-06

# 版 权

计算机程序 SAP2000 及全部相关文档都是受专利法和版权法保护的产品。全球范围的所有权属于 Computers and Structures, Inc. (SAP2000 中文版版权同属于北京金土木软件技术有限公司)。如果没有 Computers and Structures, Inc. 和北京金土木软件技术有限公司的预先书面许可, 未经许可的程序使用或任何形式的文档复制一律禁止。

更多信息和此文档的副本可从以下获得:

北京金土木软件技术有限公司  
北京市首体南路 9 号主语国际 2 号楼 中国建筑标准设计研究院 100048  
电话: 86-10-8838 3866/3766/5466/6366

传真: 86-10-8838 1056

电子邮件: support@bjcks.com

网址: www.bjcks.com

Computers and Structures, Inc.  
1995 University Avenue Berkeley, California 94704 USA

电话: (510) 649-2200

传真: (510) 649-2299

电子邮件: support@csiberkeley.com

网址: www.csiberkeley.com

北京金土木软件技术有限公司版权所有©, 2003–2009.  
© Copyright Computers and Structures, Inc., 1978–2009.

The CSI Logo is a registered trademark of Computers and Structures, Inc.

SAP2000 is a registered trademark of Computers and Structures, Inc.

Model-Alive is a trademark of Computers and Structures, Inc.

# 免 责 声 明

SAP2000 的开发及文件编制投入了相当多的时间、努力及费用。程序已经经过彻底地测试及使用。然而，在程序使用方面，使用者接受并清楚知道开发者或经销商在程序的准确性或可靠度上没有做任何直接或暗示的担保。

本程序是实用且强大的结构设计工具。然而，使用者必须清晰地理解程序在如下环节的基本假定：建模、分析和设计算法，以及没有提及的方面。

程序生成的信息必须由有资质和有经验的工程师来校核。工程师必须独立地核查结果，承担所使用信息的专业责任。

# 致 谢

首先感谢许许多多的结构工程师，在过去的若干年中，他们提供了很有价值的反馈信息，这些反馈信息使该产品得到提升，达到了目前的水平。

要特别感谢加州大学 Berkeley 分校名誉教授，Edward L. Wilson 博士。他提出了最初的 SAP 系列程序的概念并进行了程序开发。他持续的创意产生了许多独一无二的概念，在该版本中已实现了这些概念。

---

# 目录

---

<b>第一章</b>	<b>简介</b>	<b>1</b>
	关于本手册	1
	重要提示——有关荷载名称的改变	1
	主题	2
	印刷约定	2
	参考文献	3
<b>第二章</b>	<b>对象和单元</b>	<b>5</b>
<b>第三章</b>	<b>坐标系</b>	<b>7</b>
	概述	7
	整体坐标系	8
	垂直方向和水平方向	8
	局部坐标系	8
<b>第四章</b>	<b>框架单元</b>	<b>11</b>
	概述	12
	节点连接	13
	节点偏移	13
	自由度	13
	局部坐标系	14
	纵向主轴 1	14
	默认方向	14

坐标角	15
截面属性	15
局部坐标系	15
材料属性	16
几何属性和截面刚度	17
截面形状类型	17
截面属性数据库文件	18
插入点	19
端部偏移	22
净长度	23
对内力输出影响	24
对端部释放影响	24
端部释放	25
不稳定的端部释放	25
端部偏移的影响	26
质量	26
自重荷载	26
跨间集中荷载	27
跨间分布荷载	28
加载长度	28
荷载密度	28
内力输出	28
端部偏移的影响	29
<b>第五章</b>	<b>壳单元 33</b>
概述	34
节点连接性	34
自由度	35
局部坐标系	37
法向轴 3	38
默认方向	38
坐标角	38

	截面属性	39
	截面类型	39
	厚度公式	40
	材料属性	40
	厚度	41
	质量	41
	自重荷载	42
	均布荷载	42
	内力和应力输出	42
<b>第六章</b>	<b>节点和自由度</b>	<b>45</b>
	概述	46
	建模注意事项	47
	局部坐标系	47
	自由度	48
	可用与不可用的自由度	49
	约束的自由度	49
	束缚的自由度	49
	活动自由度	49
	无效自由度	50
	约束和反力	50
	弹簧	51
	质量	52
	力荷载	53
	地面位移荷载	55
	约束位移	56
	弹簧位移	56
<b>第七章</b>	<b>节点束缚</b>	<b>57</b>
	概述	57
	隔板束缚	58
	节点连接性	58
	平面定义	58

	局部坐标系	59
	束缚方程	60
<b>第八章</b>	<b>静力和动力分析</b>	<b>61</b>
	概述	62
	荷载	62
	荷载工况	62
	加速度荷载	63
	荷载工况	63
	线性静力分析	64
	模态分析	64
	特征向量分析	64
	Ritz向量分析	65
	模态分析结果	66
	反应谱分析	68
	局部坐标系	69
	反应谱函数	70
	反应谱曲线	70
	模态组合	71
	方向组合	74
	反应谱分析结果	75
<b>第九章</b>	<b>参考文献</b>	<b>77</b>



---

## 第一章

---

### 简介

SAP2000是功能强大的著名SAP系列结构分析程序的最新版本。

### 关于本手册

本手册讲述结构分析程序SAP2000最常用的建模和分析特点。在用户进行建模和分析之前请务必阅读本手册以了解程序的基本假定和分析步骤。

如要详细了解程序的建模和分析特点请参阅《CSI分析参考手册》。

作为背景材料，用户应首先阅读《SAP2000入门》中“结构模型”一章，该章叙述了一个SAP2000模型的整体特性。现在的手册（《基础分析参考手册》）将侧重于单元、属性、荷载和分析类型。

### 重要提示——有关荷载名称的改变

如果熟悉SAP2000 V11版本或者更早的版本，你就会注意到在V12版本中有一个重要的变化，即有关荷载名称的改变。

- “荷载工况”改为“荷载模式”
- “分析工况”改为“荷载工况”
- “荷载组合”未作改动

虽然V12版本中对个别术语做了修改，但是有关荷载和分析的基本概念以及程序的运行并没有任何变化。早期版本中创建的模型与V12和14新版本是兼容的。

新修订的这些名词称谓将会使用在未来CSI的所有产品中。

## 主题

本手册各章均划分为多个标题和子标题。除本章外，其余各章均在开始处列出本章讨论的所有标题，标题列表之后是概括本章内容的综述。

## 印刷约定

本手册印刷中采用如下的约定：

### 定义用粗体字印刷

当引入一个新的术语或概念时采用粗体字印刷。如：

**整体坐标系**是一个三维的、符合右手法则的直角坐标系。

此句定义了整体坐标系。

### 数值变量用粗体字印刷

数值变量采用粗体字印刷。在建模和分析时用户必须给出这些变量的数值。如：

框架单元的坐标角度 **ang**，用于定义与缺省方向不同的单元方向。

用户在实际应用中必须给出变量 **ang** 的数值（如果不取缺省值0）。

### 数学符号用斜体字印刷

普通数学符号采用标准斜体字印刷，向量和矩阵采用粗斜体字表示。如果方程式中出现数值变量，则采用上一款的约定，用粗体表示。如：

$$0 \leq \mathbf{da} < \mathbf{db} \leq L$$

式中 $\mathbf{da}$ 、 $\mathbf{db}$ 是用户定义的数值变量， $L$ 是程序计算的长度。

### 需要强调的内容用斜体字印刷

手册中的重点、书（手册或期刊）的标题均采用标准斜体字印刷。

## 参考文献

本手册正文中出现的参考文献均采用括号括住的作者姓名和出版日期表示。如：

参见Wilson and Tetsuji (1983)

……已被证明（Wilson, Yuan and Dickens, 1982）

所有参考文献均在“参考文献”一章（77页）中按字母顺序列出。



# 对象和单元

在SAP2000模型中，实际结构单元用对象来体现。先用图形界面“画出”对象的几何布置，然后“指定”荷载和属性到对象上建立实际构件模型。

程序包含下列对象类型，以几何大小的顺序列出：

- **点对象**，包含以下两类：

- **一点对象**：在以下所有对象的角点或端点自动产生，也可以直接加入支座或其它局部特性。

- **接地（单点）支撑对象**：用来模拟特殊支座特性，例如隔震器、阻尼、缝隙、多段线性弹簧等。本手册不包含这些内容。

- **线对象**，包含以下几类：

- **框架对象**：用来模拟梁、柱、支撑、桁架，可以是直线或曲线对象。

- **索对象**：用来模拟柔性索。

- **钢束对象**：用来模拟置于其它对象之中的预应力钢束对象。

- **连接（两点）对象**：用来模拟特殊构件特性，例如隔震器、阻尼、缝隙、多段线性弹簧等。与框架、索、钢束对象不同，连接对象可以具有零长度。本手册不包含这部分内容。

- **面对象：**用来模拟墙、楼板、和其它薄壁构件，也可以模拟二维固体（平面应力、平面应变、轴对称实体）。本手册只涵盖壳类型。
- **实体对象：**用来模拟三维实体。本手册不包含这部分内容。

一般原则是对象的几何特性应与实际构件相对应。这样可以简化模型并有利于设计过程。

如果熟悉传统的有限元程序，包括早期版本的SAP2000，可能习惯于把模型划分为细分的单元进行分析。面向对象建模不再需要这种过程了。

对新接触有限元建模的用户来说，这种方法非常自然。

当运行SAP2000进行分析时，程序自动将建立的基于对象的模型转换成基于有限元的模型。这种基于有限元的模型称为分析模型，它由传统的有限元单元和节点构成。分析的结果再转回基于对象的模型。

用户可以控制网格划分，例如细分的程度以及如何处理相交单元的连接等。用户可以手工对模型进行网格划分，做到对象和单元的一一对应。

本手册中，“单元”比“对象”更常见，因为这里描述的是程序处理基于单元模型的有限元分析部分。同时要明确这里描述的单元属性在界面中是指定给对象的，而单元的转化是自动完成的。

---

## 第三章

---

# 坐标系

每个结构可以使用几个不同的坐标系描述点的位置和荷载方向、位移、内力、应力。理解这些不同的坐标系对正确的定义模型和解释结果是非常关键的。

### 主题

- 概述
- 整体坐标系
- 竖直方向和水平方向
- 局部坐标系

## 概述

坐标系用来定位结构模型的不同部分和定义荷载方向、位移、内力和应力。

模型中所有的坐标系均是参照一个唯一的整体坐标系  $X-Y-Z$  定义的。模型的每个部分（节点、单元或约束）都有自己的局部坐标系 1-2-3，而且可以创建其它坐标系定义位置和方向。所有的坐标系都是三维直角坐标系（Cartesian），遵循右手法则。

SAP2000假设  $Z$  总是垂直轴， $+Z$ 向上。向上的方向用来帮助定义局部坐标系，尽管局部坐标系本身没有向上的方向。

更多的信息和特点请参看《CSI分析参考手册》中的“坐标系”一章和SAP2000图形用户界面的帮助菜单。

## 整体坐标系

**整体坐标系**是右手三维直角坐标系。三个轴为  $X$ 、 $Y$ 、 $Z$ ，相互垂直并且满足右手法则。整体坐标系的位置和方向是任意的。

整体坐标系中的位置可以用变量  $x$ 、 $y$ 、 $z$  确定。整体坐标系中的矢量可以用两个点的位置、一对角或一个坐标方向来确定。坐标方向由  $\pm X$ 、 $\pm Y$ 和  $\pm Z$ 指定。例如， $+X$  定义了一个平行于  $X$  轴的正方向。这里符号是需要的。

模型中其它所有的坐标系都是相对于整体坐标系来定义的。

## 垂直方向 and 水平方向

SAP2000 总是假设  $Z$  轴是竖向轴， $+Z$  向上。节点、单元和地面加速度荷载相对于这个向上的方向定义。自重总是沿  $-Z$  方向向下作用。

$X-Y$  平面是水平的。水平的主轴方向是  $+X$ 。水平面的角度度量是从上向  $X-Y$  平面看，从 $X$ 轴的正半轴逆时针旋转为正。

## 局部坐标系

结构模型的每一部分（节点、单元或约束）有自己的局部坐标系，用于定义属性、荷载和相应的反应。局部坐标系的轴标记为 1、2、3。通常局部坐标系对节点和节点、单元和单元、约束和约束之间可以不同。

对局部坐标系没有特定的向上方向。然而，节点和单元的局部坐标系是相对整体向上的方向  $+Z$  定义的。

通常节点的局部坐标系 1-2-3 同整体坐标系  $X-Y-Z$  一致。

对框架和壳单元，局部坐标的每个轴由个别单元的几何特性确定。可以指定一个转动角度定义其余的两个坐标轴。

隔板约束的局部坐标轴通常由约束的几何或质量分布自动确定。或者，可以指定一个整体坐标轴定义隔板约束平面，其它的两个轴自动确定。

更详细的信息：



- 参见“框架单元”一章中的主题“局部坐标系”（14页）。
- 参见“壳单元”一章中的主题“局部坐标系”（37页）。
- 参见“节点和自由度”一章中的主题“局部坐标系局部坐标系”（47页）。
- 参见“节点束缚”一章中的主题“隔板束缚”（58页）。



---

## 第四章

---

# 框架单元

框架单元用于模拟平面或空间结构中的梁、柱、桁架和支撑。尽管本手册并未讨论相关内容，但本章中的一些主题同样适用于曲线框架、索和钢束等其它线对象。

### 主题

- 概述
- 节点连接
- 自由度
- 局部坐标系
- 截面属性
- 插入点
- 端部偏移
- 端部释放
- 质量
- 自重荷载

- 跨间集中荷载
- 跨间分布荷载
- 内力输出

## 概述

**框架**单元使用三维通用梁柱单元，考虑双向弯曲变形、扭转变形、轴向变形、双向剪切变形。参见Bath and Wilson(1976)。

可用框架单元建模的结构包括：

- 三维框架
- 三维桁架
- 平面框架
- 平面网架
- 平面桁架

框架单元模型为连接两点之间的一条直线。在图形界面中，用户可指定将曲线对象划分为多个直线对象。

每个框架单元有其局部坐标系，该局部坐标系可以用来定义截面特性、荷载、结果输出。

框架单元的荷载包括自重、多个集中荷载、多个均布荷载。

用插入点和端部偏移考虑梁柱交点处的尺寸。用端部释放模拟单元端部不同的连接情况。

每个单元的内力在杆端输出，也可以在用户指定沿杆长方向等间距分布的测点位置输出。

更多的信息和特性，参见《*CSI分析参考手册*》的“框架单元”一章。

## 节点连接

框架单元用连接 **i** 和 **j** 两点之间的直线来表示（除非按照下述方法通过节点偏移进行了修改）。在空间中，这两点不能在同一位置。单元的两个端点分别标记为 **I** 和 **J**。

缺省中性轴为连接两点间的直线。如主题“插入点”（19页）中描述的，可以用插入点改变中性轴。

## 节点偏移

有时单元的轴不能方便地由连接结构中其它单元的节点指定。此时可以在单元的每端分别指定**节点偏移**。它们由三个平行于整体轴的距离分量（X、Y和Z）确定，这些分量的大小是从节点到单元端部（插入点）来测量。

由节点 **i** 和 **j** 两个点的定位，加上相应的节点偏移，可以定义单元的轴。这两个位置不能重合。尽管不是必须的，但程序推荐偏移垂直于单元的轴。

单元沿轴向的偏移一般是由单元的端部偏移而非节点偏移来描述。参见主题“端部偏移”（22页）。端部偏移是单元长度的一部分，具有单元的特性和荷载，并且可以是或不是刚性的。节点偏移是单元外部的，没有任何质量和荷载。程序将节点偏移限制为充分刚性的。

即使节点偏移有独立的特性，但它仍与单元其它输入点一起作为插入点来指定。

要获得更多信息：

- 参见本章主题“插入点”（19页）
- 参见本章主题“端部偏移”（22页）

## 自由度

框架单元在其两个边界节点有 6 个自由度，并且都处于激活状态。如果用户需要建立不传递弯矩的桁架单元，可以选择以下方法：

- 把截面几何特性 **j**、**i33** 和 **i22** 设置为零（**a**为非零；**as2**和**as3**为任意值）。
- 在端部释放两个方向的弯矩 **R2** 和 **R3**，在任意端部释放扭转 **R1**。

更多的信息：

- 参见“节点和自由度”一章中的主题“自由度”（48页）
- 参见本章“截面属性”（39页）
- 参见本章“端部释放”（25页）

## 局部坐标系

每一个框架单元都有自己用于描述截面属性、荷载和输出结果的**单元局部坐标系**。局部坐标的三个主轴为 1、2和 3。第一个主轴方向是沿着单元长度方向；剩下的两个主轴是位于单元截面内的轴，其方向由用户自己定义。

清晰的理解单元局部坐标的定义和它与整体坐标系的关系是很重要的。两种坐标系都遵循右手法则。用户可以自行定义适当的局部坐标系，从而简化数据输入和结果输出。

利用**默认方向**和**框架单元坐标角度**来定义单元局部坐标系，对于绝大多数结构是极其方便和简单的，也可以利用其他的方法。

更多的信息：

- 关于这一主题的概念和术语的描述，参见“坐标系”一章（7页）
- 参见《CSI分析参考手册》中“框架单元”一章中主题“高级局部坐标系”
- 参见本章主题“节点偏移”（13页）

## 纵向主轴 1

局部坐标轴1总是沿单元纵轴方向，正方向为从端部 I 指向端部 J 的方向。

特殊情况下，端部 I 是节点 **i** 加上节点偏移（如果存在），端部 J 是节点 **j** 加上节点偏移（如果存在）。主轴方向是由单元基准点来单独确定的，参见主题“插入点”（19页）。

## 默认方向

局部坐标轴2、3的缺省方向取决于局部坐标轴 1 和整体坐标轴 Z 的关系：

- 局部坐标平面 1-2 将设为竖直方向，也就是平行于主轴 Z 的方向。

- 局部坐标轴 2 将设为沿主轴 Z 正方向，除非单元是竖直的，那时局部坐标轴 2 将设为沿主轴 X 正方向。
- 局部坐标轴 3 总是水平方向的，也就是位于 X-Y 平面内。

如果局部坐标轴 1 和主轴 Z 之间夹角的正弦值小于  $10^{-3}$ ，则视这个单元为竖向构件。

局部坐标轴 2 与竖轴夹角和局部坐标轴 1 与水平面之间的夹角相同，这意味着局部坐标轴 2 在水平构件中指向竖直方向。

## 坐标角

框架单元的坐标角 **ang** 是用来定义单元方向的参数，它不同于单元默认方向。坐标角是使局部坐标轴 2 和 3 从默认方向转向既定方向的转角。当局部坐标轴 1 正向指向用户，而这一转角是沿逆时针方向时，坐标角为正值。

对于竖直单元，**ang** 是局部坐标轴 2 和水平主轴 X 正向的夹角。除此以外，**ang** 是局部坐标轴 2 和包含局部坐标轴 1 的竖直平面的夹角。参见图 1 的例子（16 页）。

## 截面属性

**框架截面**是描述一个或多个框架单元的一系列材料和几何特性。截面定义是与框架单元独立的，然后再指定给单元。

### 局部坐标系

关于局部坐标系中框架单元的截面属性定义如下：

- 局部坐标纵轴 1 沿着单元轴线方向，垂直于截面，并且通过截面的两个中性轴的交点。
- 2 轴和 3 轴定义截面平面。通常情况下，2 轴是沿截面的主轴方向（高度方向），3 轴是沿截面的次轴方向（宽度方向），但这并不是必须的。

更多信息参见本手册主题“局部坐标系”（14页）。

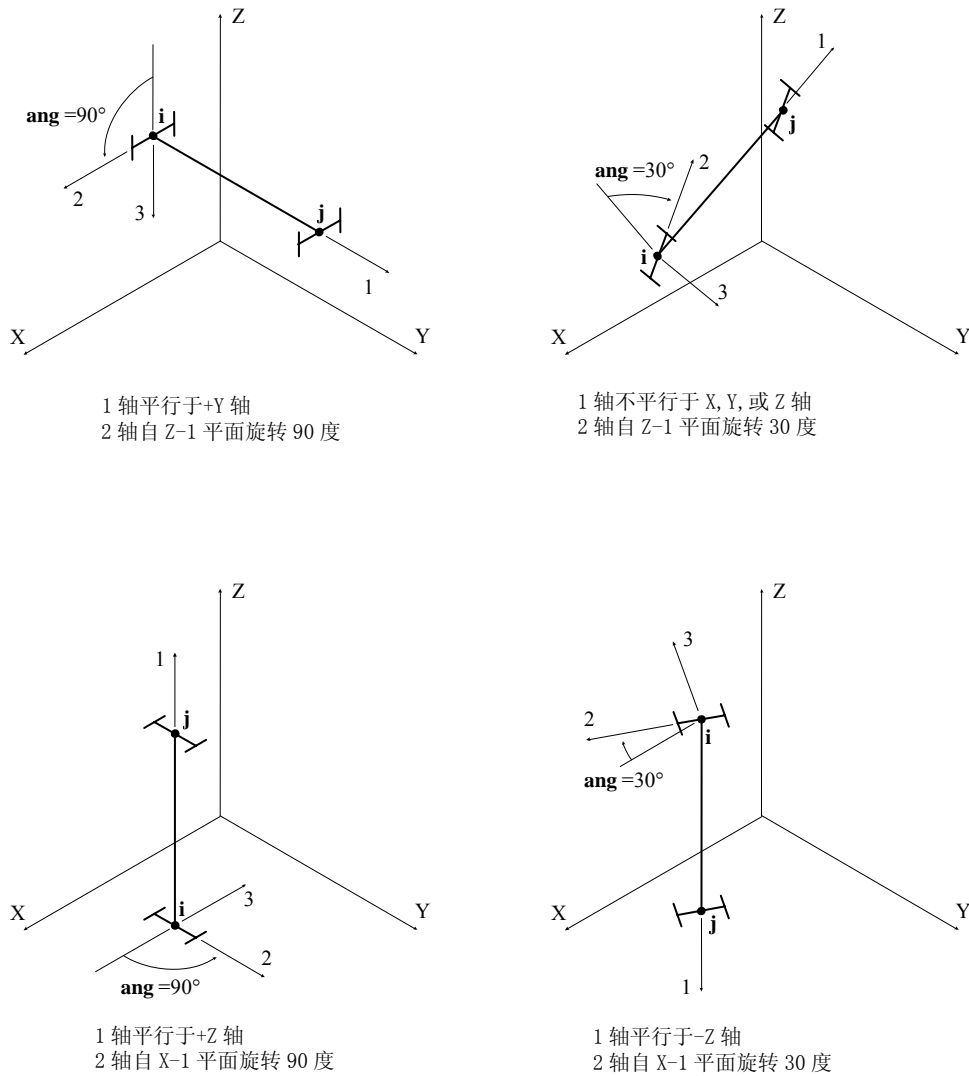


图 1 相对于默认方向的框架单元坐标角度

## 材料属性

截面的材料属性是由预先定义好的材料指定的。用于截面的材料特性是：

- 弹性模量 **e1**，用于轴向刚度和弯曲刚度。



- 剪切模量  $g_{12}$ ，用于抗扭刚度和横向抗剪刚度，它是由弹性模量  $e_1$  和泊松比  $\nu_{12}$  计算的。
- 质量密度（单位体积的质量） $m$ ，用于计算单元的质量。
- 重量密度（单位体积的重量） $w$ ，用于计算单元自重荷载。
- 设计类型指定  $ides$ ，它显示将应用该截面的单元设计为钢结构、混凝土结构、或其它结构，亦或不进行设计。

## 几何属性和截面刚度

使用 6 个基本几何特性，同材料特性结合生成截面的刚度信息。它们是：

- 横截面的面积  $a$ ，截面的轴向刚度定义为  $a \cdot e_1$ ；
- 转动惯量  $i_{33}$  是绕 3 轴在 1-2 平面内的转动惯量；转动惯量  $i_{22}$  是绕 2 轴在 1-3 平面内的转动惯量；对应的截面抗弯刚度分别为  $i_{33} \cdot e_1$  和  $i_{22} \cdot e_1$ 。
- 扭转惯量  $j$ 。抗扭刚度定义为  $j \cdot g_{12}$ 。注意，除了圆形结构，扭转惯量并不等于极惯性矩。参见 Roark and Young (1975) 或 Cook 和 Young (1985)。
- 抗剪面积  $as_2$  和  $as_3$ ，分别对应 1-2 和 1-3 平面的横向剪切面积。对应的截面横向抗剪刚度为  $as_2 \cdot g_{12}$  和  $as_3 \cdot g_{12}$ 。图 2 给出计算典型截面剪切面积的一般方法（20页）。

若将  $a$ 、 $j$ 、 $i_{33}$  或  $i_{22}$  设为零，将导致截面刚度为零。例如：一个桁架单元模型有可能被定义为  $j=i_{33}=i_{22}=0$ ，一个位于 1-2 平面内的框架平面单元模型可能被定义为  $j=i_{22}=0$ 。

若将  $as_2$  或  $as_3$  设为零，将导致截面剪切变形为零。实际上，剪切面积为零被解释为无限大。如果相应的抗弯刚度为零，则忽略剪切刚度。

## 截面形状类型

对于每个截面，6 个几何特性（ $a$ 、 $j$ 、 $i_{33}$ 、 $i_{22}$ 、 $as_2$  和  $as_3$ ）可以直接指定，或者通过截面的尺寸计算得到，亦或从数据库文件中读取出来。这取决于用户定义的截面类型  $sh$ ：

- 如果  $sh=G$ （通用截面），6 个几何特性必须明确的指定。

- 如果 **sh**=R、P、B、I、C、T、L 或 2L，则截面6个几何特性将如下面“截面特性自动计算”中描述的一样，根据截面尺寸信息自动计算出来。
- 如果 **sh** 是任何其它值（比如，W27X94 或 2L4X3X1/4），截面的 6 个几何信息将从指定的数据库中读取。参见下文“截面数据库文件”。

## 截面属性自动计算

本章图 3（21页）中所示简单截面的 6 个几何特性可以由程序自动计算出来。需要的尺寸已经在表中列出来了。

注意 **t3** 为在 2 轴方向的截面高度，是计算 **i33** 的主要参数。

下列截面类型可以自动计算截面特性：

- **sh**=R：矩形截面
- **sh**=P：管截面，或实心圆截面（**tw**=0 或未指定）
- **sh**=B：箱形截面
- **sh**=I：I形截面
- **sh**=C：槽形截面
- **sh**=T：T形截面
- **sh**=L：角形截面
- **sh**=2L：双角形截面

## 截面属性数据库文件

可以从截面属性数据库文件中得到截面几何属性。SAP2000 提供了几个截面特性数据库文件：

- AISC.PRO 和 AISC3.pro: AISC截面形状
- AA6061-T6.pro: AA截面形状
- CISC.pro: CISC规范截面形状
- SECTIONS8.pro: AISC.PRO的备份文件

- CHINESE.pro: 中国规范截面形状

此外还提供了包含其他国家标准截面形状的文件。

用户还可以使用CSI公司提供的PROPER程序制作自己的特性数据库文件。

在数据库文件生成的时候，几何属性将被存储为指定的长度单位，SAP2000会自动将单位转化为用户所用的单位。

数据库文件中每种截面可能用一种或两种标号来表示，如在AISC.PRO 中 W36x300 可能用 W36X300 或 W920X446 表示，而在 CISC.PRO 中可能仅用一种标号表示。

在定义框架截面时可选择数据库文件，并且在定义过程中可以随时更改该数据库文件。若未指明数据库文件，则使用默认的SECTIONS8.PRO。用户可将任何截面的数据库文件复制到 SECTIONS8.PRO。

所有截面特性数据库文件，包括 SECTIONS8.PRO 都必须放在包含该数据文件或包含 SAP2000 程序文件的目录中。若上述两个目录中皆有，则程序将使用数据文件目录中的文件。

## 插入点

默认情况下，局部坐标轴 1 将通过截面的中性轴，也就是在截面的质心位置。这可以使像梁顶或柱角之类的位置定位方便一些。在截面上的这些位置，都称为截面的**控制点**。

截面中可用的控制点如本手册的图 4（22页）所示，默认的位置是点 10。

尽管他们是相对独立的，但是可以将节点偏移和控制点一起指定为插入点的一部分。首先用节点偏移计算单元主轴从而形成局部坐标系统，然后控制点将位于局部坐标 2-3 平面。

这一特征是有用的，比如当梁单元不在柱中心时，模拟梁和柱的情况。图 5（23页）是一个普通框架节点上的立面视图和平面视图，这里外部梁从柱中心偏移至其建筑物外。该图还显示了每个单元的控制点和节点偏移尺寸。

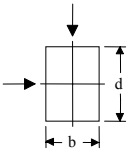
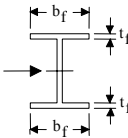
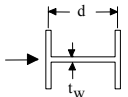
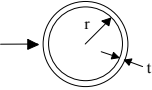
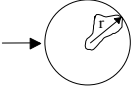
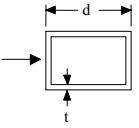
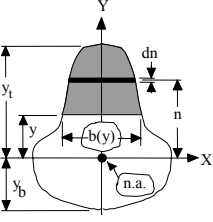
截面	描述	有效剪切面积
	矩形截面 剪力平行于边	$\frac{5}{6} b d$
	宽翼缘截面 剪力平行于翼缘	$\frac{5}{3} t_f b_f$
	宽翼缘截面 剪力平行于腹板	$t_w d$
	薄壁圆管截面 剪力来自任意方向	$\pi r t$
	实心圆截面 剪力来自任意方向	$0.9 \pi r^2$
	薄壁方钢管截面 剪力平行于 d-方向	$2 t d$
	一般截面 剪力平行于 Y-方向 $I_x$ =关于 X-X 方向抗弯惯性矩 $Q(Y) = \int_y^{y_t} n b(n) dn$	$\frac{I_x^2}{\int_{y_b}^{y_t} \frac{Q^2(y)}{b(y)} dy}$

图 2 剪切面积公式

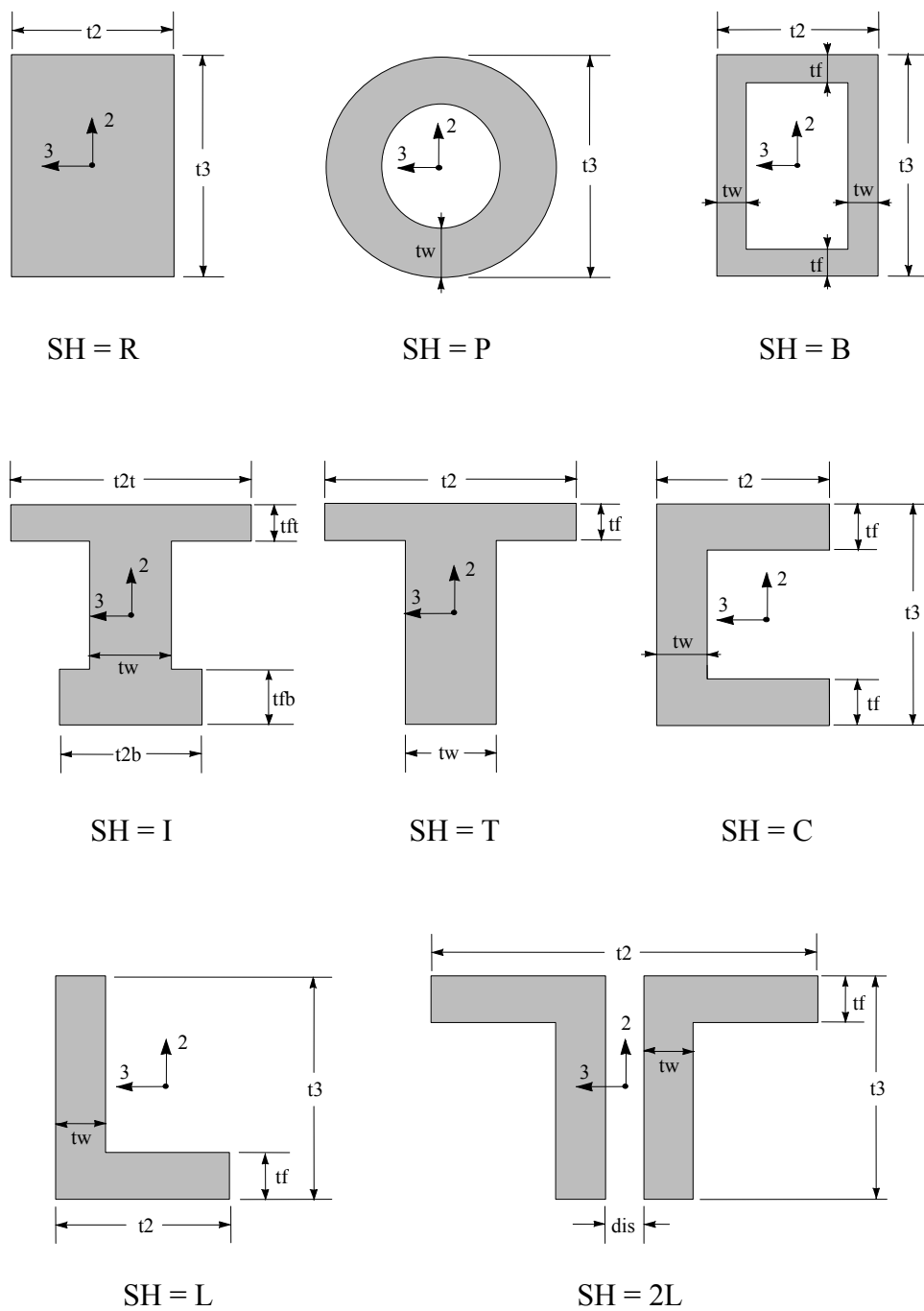
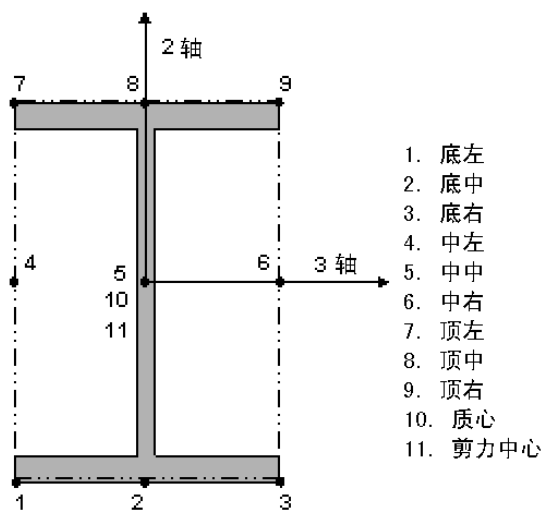


图 3 自动截面属性计算



注意：对于如此的双对称截面，点5，10，11是相同

图 4 框架控制点

## 端部偏移

框架单元用两点之间的直线单元来模拟，而实际上结构构件都有一定的截面尺寸，当两个单元如梁和柱，在交叉点处有截面重叠的情况。在很多结构中构件尺寸很大，而且重叠部分占这个构件总长度中的很大部分。

用户可以使用参数 **ioff** 和 **joff**（分别对应于 I 端和 J 端）为每个单元指定两个端部偏移。端部偏移 **ioff** 是某单元与其他在 i 端相连构件相互重叠的长度。该长度是从节点到该单元连接面的距离。节点 j 的端部偏移 **joff** 的定义相同。参见图 6（24页）。

端部偏移可由 SAP2000 图形用户界面自动计算。对选定单元的计算是基于与该单元连接在同一普通节点上的其他单元的最大截面尺寸进行的。

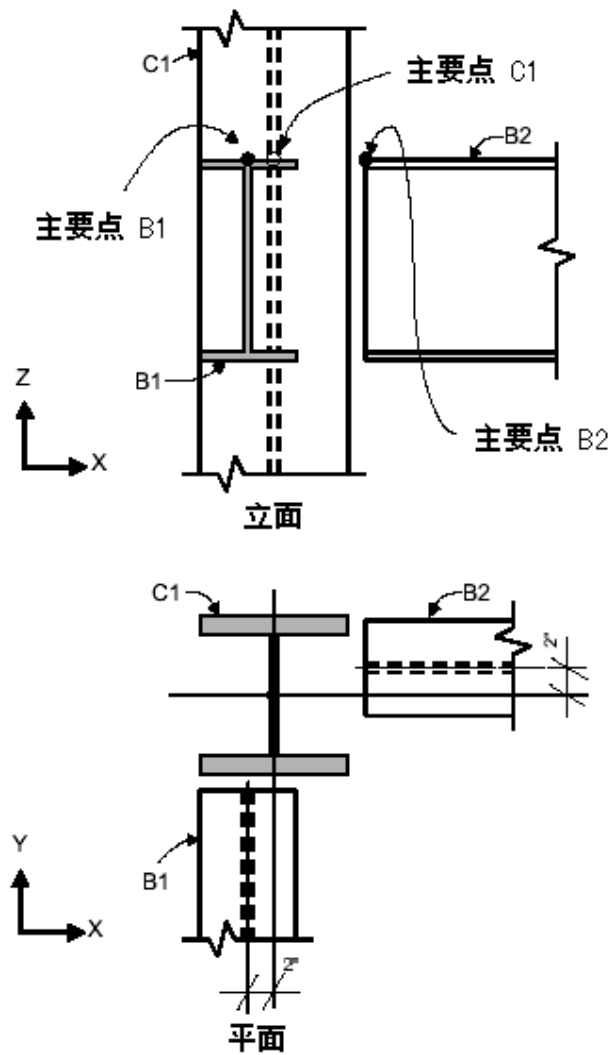


图 5 显示端部偏移和控制点的示例

## 净长度

净长  $L_c$  是两端部偏移（支座表面）之间的长度：

$$L_c = L - (i_{off} + j_{off})$$

其中  $L$  为总长。见图 6（24页）。

如果指定的端部偏移使净长小于总长的 1%，程序会给出警告并按比例削减两端部偏移使得净长等于总长的 1%，通常端部偏移占总长的比例很小。

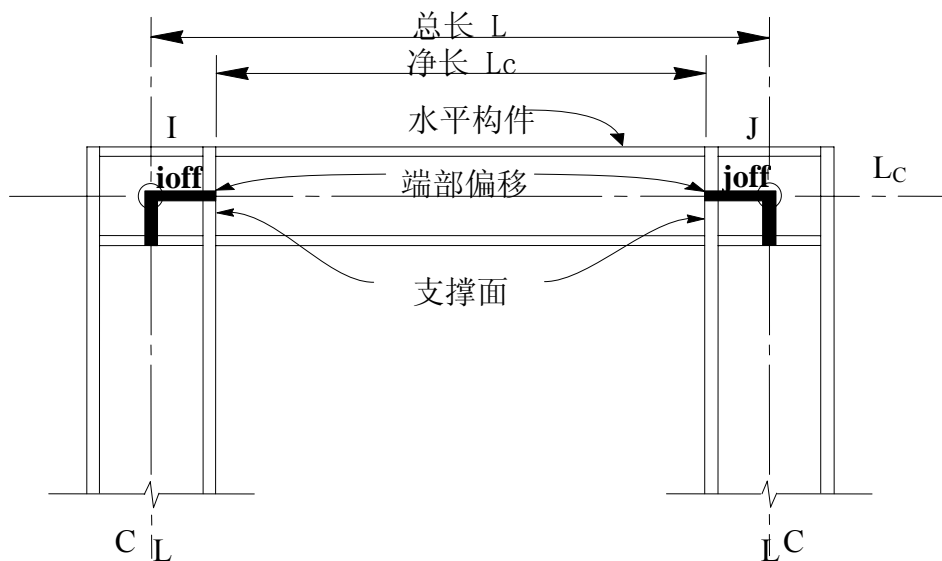


图 6 框架单元端部偏移

## 对内力输出影响

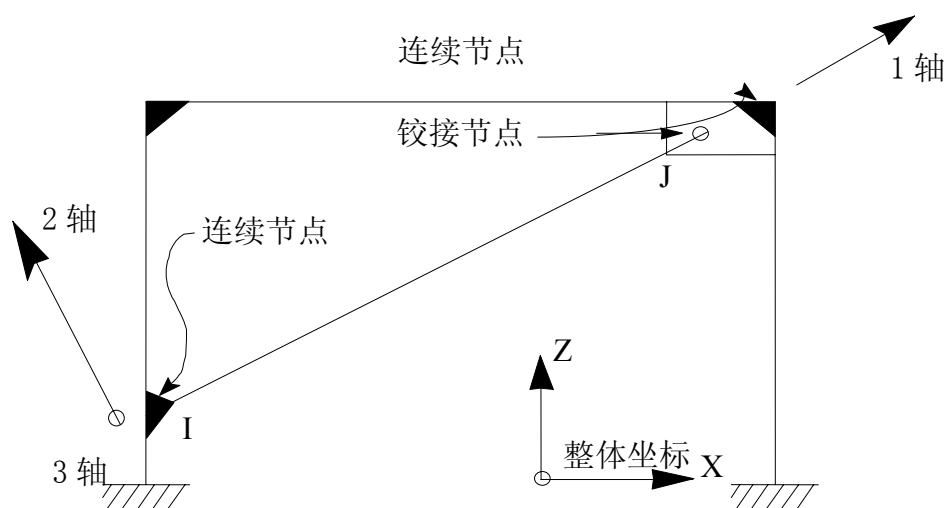
所有内力和弯矩在支座边缘或净长内等距离的点上输出，而在端部偏移内没有内力输出，包括节点内力。

更多信息参见本章主题“内力输出”（28页）。

## 对端部释放影响

端部释放通常假定位于支座边缘，即净长的端部，如果一弯矩或剪力指定在单元任一弯曲平面内的任一端释放，则端部偏移对于该平面该端的弯曲和剪切假定为刚性。





对角单元：释放J端 $R_3$ 自由度

图 7 框架单元端部释放

更多信息参见本章主题“端部释放”（25页）

## 端部释放

通常框架单元每端的三个平移自由度和三个旋转自由度和节点的自由度是连续的，也和连在该节点上其他单元的自由度连续。而在确知某单元相应的力或弯矩为零时，可将其自由度从节点上释放（解除）。释放通常在单元局部坐标系中指定，并不影响连在节点上的其他杆件。

如图 7（25页）的示例中，对角单元在 I 端有一个弯矩节点，且在 J 端有一个铰节点。另外在 J 端连接至节点的两个单元是连续的。因此，为了模拟铰结情况，需要释放对角单元 J 端的  $R_3$ ，以确保在对角单元铰节点的弯矩为零。

## 不稳定的端部释放

在单元保持稳定的前提下可以为框架单元指定任何端部释放组合，以确保施加在该单元上的荷载可以传递到结构的其他构件上。下面列出的端部释放是不稳定的，无论单独释放还是组合释放都不允许：

- 两端同时释放  $U_1$
- 两端同时释放  $U_2$

- 两端同时释放 U3
- 两端同时释放 R1
- 两端同时释放 R2 并在任一端释放 U3
- 两端同时释放 R3 并在任一端释放 U2

## 端部偏移的影响

端部释放通常应用于支座边缘，即净长的端部，弯矩或剪力的释放会使弯曲平面对应端的端部偏移为刚性。

更多信息参见本章“端部偏移”主题（22页）。

## 质量

在动力分析中，结构的质量用于计算惯性力，框架单元的质量集中于节点 **i** 和 **j**，*不考虑单元自身惯性力的影响。*

单元质量等于质量密度 **m** 沿杆长方向的积分与横截面积 **a** 的乘积。

单元质量分配到两端节点，方式类似于均布荷载简支梁对支座的分配，分配质量时忽略端部释放的影响，所有质量施加到三个平移自由度方向：UX、UY 和 UZ。旋转自由度不计算质量惯性矩。

更多信息参见：

- 本章“截面属性”主题（15页）中 **m** 和 **a** 的定义
- 本手册“静力和动力分析”一章（61页）

## 自重荷载

荷载模式中的自重荷载施加在结构中以体现模型中所有单元的自重，框架单元的自重荷载是沿单元长度方向的均布力。自重荷载的大小等于重量密度 **w** 乘以截面积 **a**。

自重荷载总是向下，即整体轴 -Z 方向，自重荷载可通过一个适用于整个结构的比例因子来确定。

更多信息参见：

- 本章关于 **w** 和 **a** 的定义参见“截面属性”主题（39页）
- 参见本手册“静力和动力分析”一章（61页）

## 跨间集中荷载

跨间集中荷载是施加于框架单元中任意位置的集中力或力矩，荷载方向可在整体坐标系或单元局部坐标系中指定。

荷载位置可由以下两种方法指定：

- 指定相对距离 **rd**（从节点 **i** 起算），必须满足  $0 \leq rd \leq 1$ ，相对距离是单元长度的一部分。
- 指定绝对距离 **d**（从节点 **i** 起算），必须满足  $0 \leq d \leq L$ （**L** 为单元长）。

每个单元可能有多个集中荷载，在整体坐标系中给出的集中荷载将转换到局部坐标系中，参见图 8（27页）。同一位置上的多个荷载将被叠加。

更多信息见“静力和动力分析”章节（61页）。

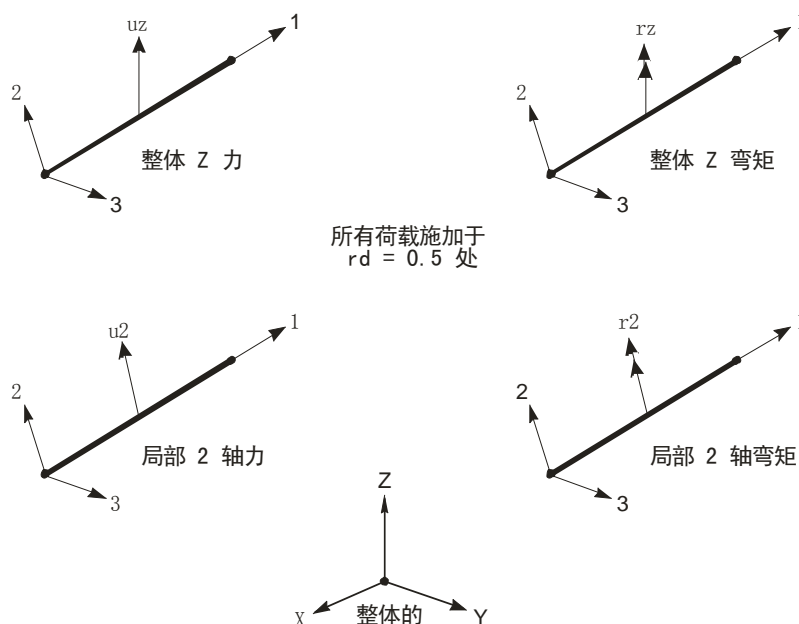


图 8 跨间集中荷载定义示例

## 跨间分布荷载

跨间分布荷载用于对框架单元施加分布的力和力矩，荷载可能是均布或梯形分布，荷载方向可在整体坐标系或单元局部坐标系中指定。

更多信息参见：本手册主题“静力和动力分析”（61页）

### 加载长度

荷载可施加于整个或部分单元长度。多个荷载可施加在一个单元上，施加的荷载长度可能有重叠，这种情况下所施加荷载是叠加的。

加载长度可用下述方法之一来指定：

- 指定两个相对距离 **rda** 和 **rdb**（从节点 **i** 起算），满足  $0 \leq \text{rda} < \text{rdb} \leq 1$ 。相对距离为占单元长度的比例。
- 指定两个绝对距离 **da** 和 **db**（从节点 **i** 起算），满足  $0 \leq \text{da} < \text{db} \leq L$ ，**L** 是单元长度。
- 不指定长度，表示加载于单元全长。

### 荷载密度

荷载密度指单位长度的力或力矩，在施加每个力或力矩荷载时，当荷载均匀分布时可给出一个荷载值，当荷载密度在加载范围内线性变化，即梯形分布时需给出两个荷载值。

参见图 9（30页）和图 10（31页）。

## 内力输出

框架单元内力是对单元截面上的应力进行面积分得到的力和力矩，这些内力是：

- **P**：轴力
- **V2**：1-2平面内的剪力
- **V3**：1-3平面内的剪力
- **T**：轴向扭矩

- M2: 1-3平面内的弯矩（绕2轴）
- M3: 1-2平面内的弯矩（绕3轴）

这些内力出现在沿单元长度方向上的每个截面。

符号习惯在图 11（32页）中说明。作用在正 1 面上的正的力和轴向扭矩指向单元局部坐标轴的正向，作用在负面上的正的力和轴向扭矩指向单元局部坐标轴的负向。正 1 面即外法向为正 1 方向的面。

正弯矩引起正 2、3 面上的压力和负 2、3 面上的拉力，正 2、3面是分别从中性轴开始沿 2 轴、3 轴正向的平面。

内力和弯矩在沿单元长度等距离输出点上计算。参数 **nseg** 指明单元长度上输出点之间等长段（或间距）的个数，对于默认值 2，产生两个端点和中点的结果。参见下面的“端部偏移影响”。

框架单元的内力可以在诸如线性与非线性、模态、反应谱及时程等荷载工况下计算。

注意反应谱分析的结果总是正的，这样不同值之间没有对应关系。

更多信息参见：本手册“静力和动力分析”一章（61页）。

## 端部偏移的影响

当进行端部偏移计算时，内力和弯矩在两支座边缘和单元净长内 **nseg-1** 个等间距点上输出，在包含节点的端部偏移长度内没有内力输出，只有当节点端部偏移为 0 时，才计算该节点（**i** 或 **j**）上的（内力）输出。

更多信息参见：本章主题“节点偏移”（13页）。

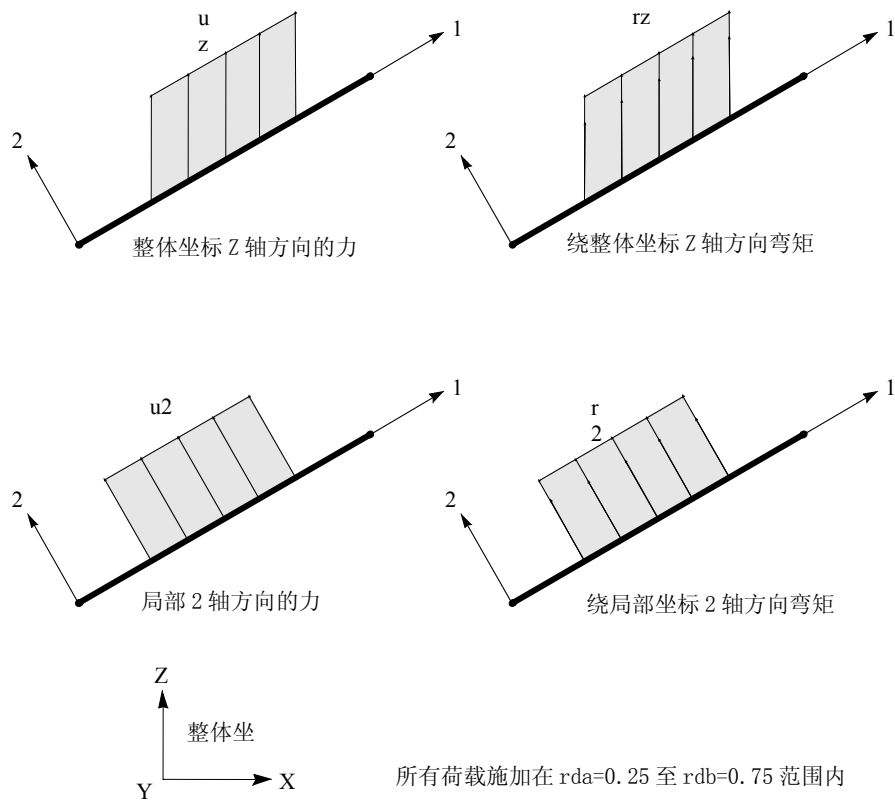


图 9 跨间分布荷载定义示例

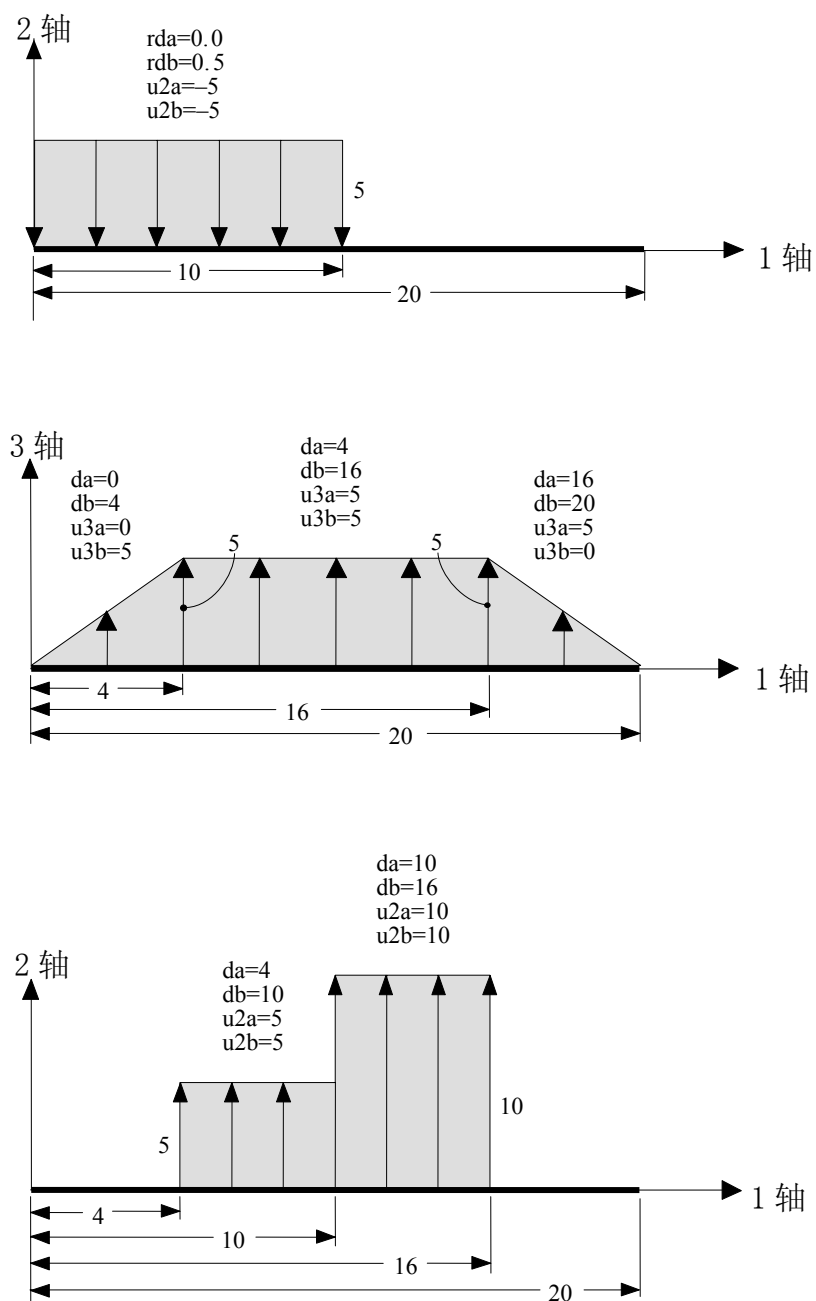


图 10 跨间分布荷载示例

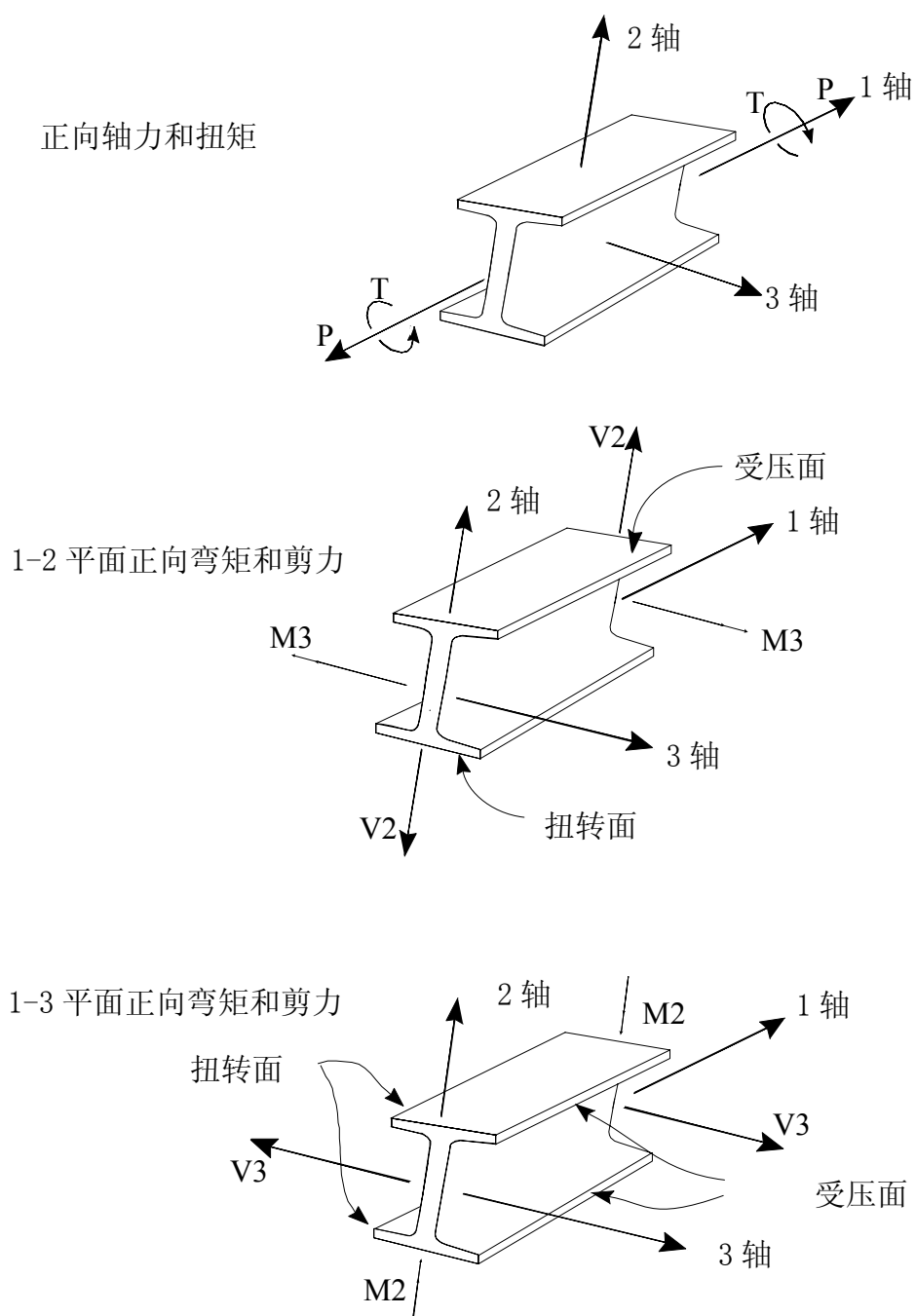


图 11 框架定义内力和弯矩



---

## 第五章

---

# 壳单元

壳单元用于定义平面和三维结构中壳、膜、板的行为。壳单元/对象是一种面对象。根据用户对一个面定义的截面属性的类型，它还可以用来模拟平面应力/应变关系和轴对称实体行为，本手册中不考虑这种行为类型。

### 主题

- 概述
- 节点连接性
- 自由度
- 局部坐标系
- 截面属性
- 质量
- 自重荷载
- 均布荷载
- 内力和应力输出

## 概述

壳单元是三节点或四节点公式，该公式包含独立的膜和板弯矩行为。四节点单元不一定是平面单元。

膜特性用一个包含平面内平移刚度和平面法线方向旋转刚度的等参方程表示。参见Taylor and Simo (1985) 以及 Ibrahimbegovic and Wilson (1991)。

板弯曲特性包括双向、平面外、板扭转刚度部分和平面单元法向平移刚度部分。默认情况下，采用薄板（Kirchhoff）方程，该方程忽略横向剪切变形。还可以选择厚板（Mindlin/Reissner）方程，它可以反应横向剪切变形。

可用壳单元建模的结构包括：

- 三维壳，如罐和穹顶。
- 板结构，如楼板。
- 膜结构，如剪力墙。

对结构中的每个壳单元，可以选择建立纯膜、纯板，或者完全壳特性模型。除了整个结构是受充分约束的平面结构外，一般推荐使用完全壳特性模型。

每个壳单元都有自己的局部坐标系，用以定义材料性质、荷载和输出信息。每个单元可能受自重或任意方向的均布荷载。

壳的刚度用 4~8 节点数值积分方程来表示。单元局部坐标中的应力、内力和弯矩用 $2 \times 2$ 高斯积分点计算并外推到单元的节点上。单元应力或内力的近似误差可通过连接同一节点上的两个单元计算结果的差来估计。由此可以得知所给出的有限单元的精度，并将成为选择新的、更加精确的有限单元网格的基础。更多信息和功能，参见《CSI分析参考手册》中的“壳单元”。

## 节点连接性

每个壳单元可能是下面两种形状之一，见图 12（36页）：

- 四边形：用四个节点 **j1**、**j2**、**j3** 和**j4** 来定义。
- 三角形：用三个节点 **j1**、**j2** 和 **j3** 来定义。

二者中，四边形更加精确，建议三角形单元仅用于网格转换。三节点单元的刚度方程是合理的，但其应力还原却有所欠缺。四边形单元用于构成不同形状的网格及转换，见图 13（37页）。

节点的位置的选择应满足下列几何条件：

- 任何内角必须小于  $180^\circ$ ，当内角在  $90^\circ$  左右或至少在  $45^\circ \sim 135^\circ$  之间时，用四边形单元将获得最好的计算结果。
- 单元纵横比不宜过大，对于三角形，纵横比是最长边与最短边的比；对于四边形，纵横比是两对边中点距离中较大者与较小者之比。当纵横比接近于 1 或至少小于 4 时，获得最好的计算结果，纵横比不得大于 10。
- 对于四边形单元，不要求四个节点共面，程序考虑单元中少量的扭曲。角部法向的夹角表示出了扭曲的程度，角部法线垂直于相交于角部的两条边。当任一对角部法线夹角小于  $30^\circ$  时获得最好的计算结果，这个角度不得大于  $45^\circ$ 。

在优化网格模型时常用到上述条件。

## 自由度

壳单元每个连接节点上都有 6 个自由度。当为纯膜单元时，必须保证有约束或其他支座对应法向平移和弯曲旋转自由度。当为纯板单元时，必须保证有约束或其他支座对应平面内平移和绕法向的转动。

对于所有的三维结构，推荐使用完全壳特性（膜+板）。更多信息参见“节点和自由度”一章“自由度”主题（48页）。

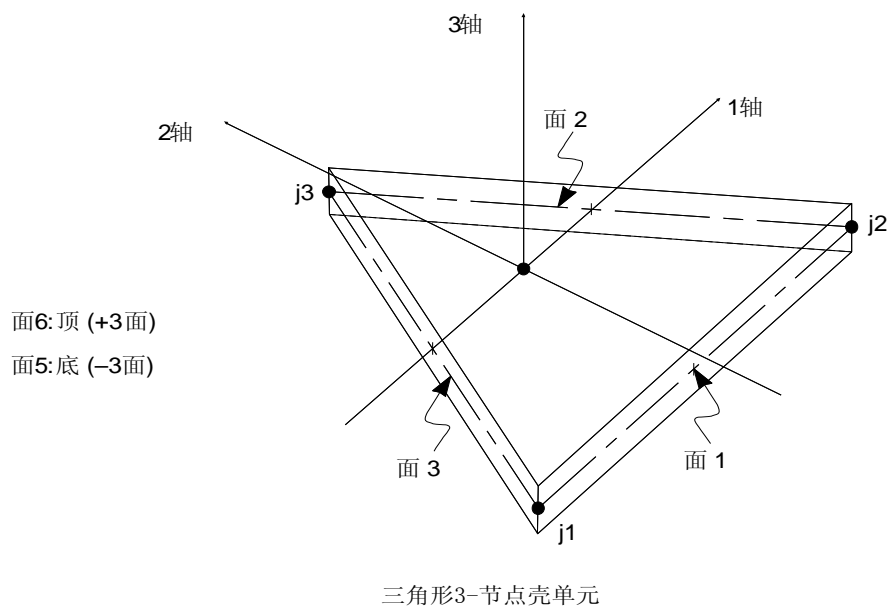
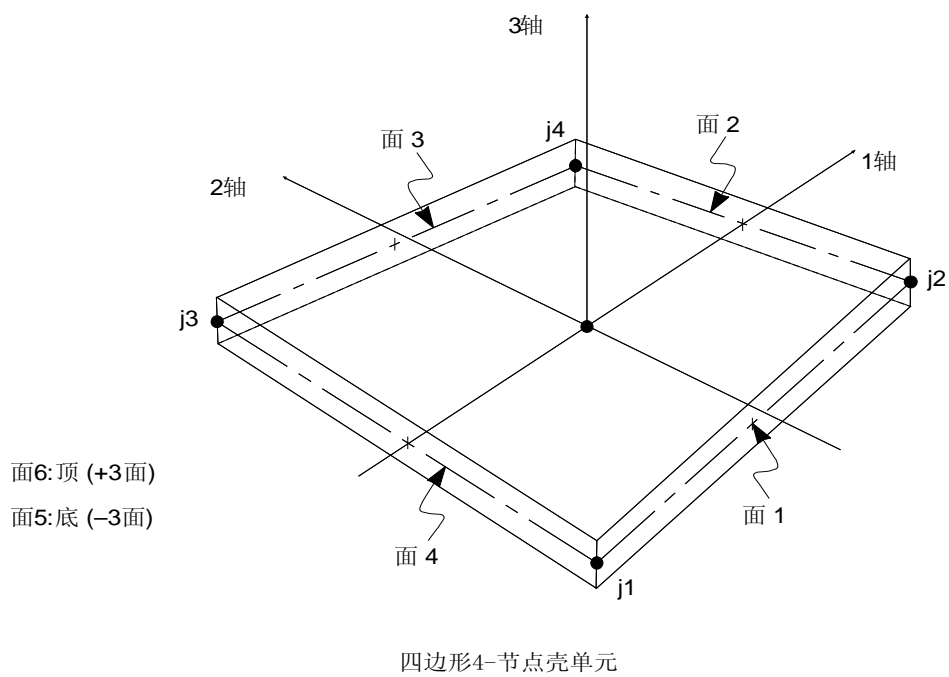
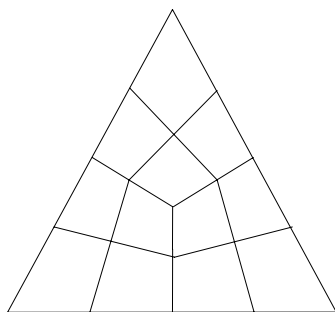
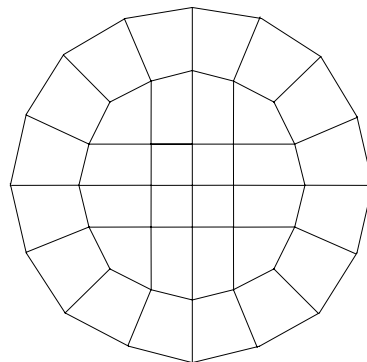


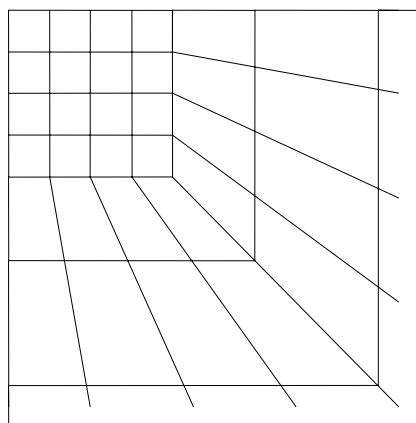
图 12 壳单元节点连接和面定义



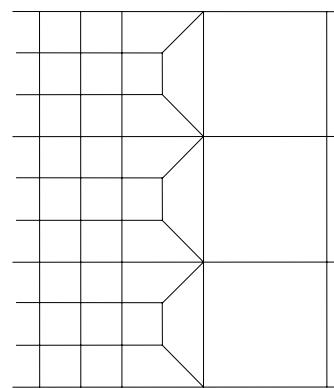
三角区



圆形区



无限大区



剖分过

图 13 四边形壳单元划分网格示例

## 局部坐标系

每个壳单元都有用于定义材料特性、荷载及输出的**单元局部坐标系**。局部坐标系的坐标轴用 1、2 和 3 表示，前两个轴位于单元平面内，方向由用户指定，第三个轴为法向方向。

理解局部坐标系 1-2-3 以及它和整体坐标系 X-Y-Z 的关系是非常重要的，它们都符合右手法则。用户可以定义适当的局部坐标系，以简化数据输入和结果表达。

对于大多数结构，用**默认方向**和**壳单元坐标角**来定义单元局部坐标系非常简单。一些其他的方法也可使用。

更多信息参见：

- 参见“坐标系”（7页），可获得关于本节所用的概念和术语的描述。
- 参见《CSI分析参考手册》“壳单元”一章的“高级局部坐标系”主题。

## 法向轴 3

局部轴3是壳单元平面的法线。当 **j1-j2-j3** 是逆时针方向时，局部轴 3 指向用户（即右手法则）。对于四边形单元，单元平面由对边中点连线矢量决定。

## 默认方向

局部轴 1 和 2 的默认方向决定于局部轴 3 和整体轴 Z 的关系：

- 认为 3-2 平面为垂直面，即平行于整体轴 Z。
- 局部轴 2 向上（+Z方向），除非单元是水平的。当单元水平时，局部轴 2 水平沿整体轴 +Y 方向。
- 局部轴 1 一直水平，即处于 X-Y 平面。

当局部轴 3 和 Z 轴的夹角正弦小于  $10^{-3}$  时，单元被认为是水平的。

局部轴 2 与竖直轴的夹角等于局部轴 3 与水平面的夹角，这意味着当单元竖直时局部轴 2 垂直指向上方。

## 坐标角

壳单元坐标角 **ang** 用于定义不同于默认方向的单元方向，这是局部轴 1 和 2 从默认方向起绕局部轴 3 正向旋转得到的角度，角度符号由右手法则判定。

对于水平单元，**ang** 是局部轴 2 和水平轴 +Y 的夹角，**ang** 也是局部轴 2 和包含局部轴 3 的垂直平面的夹角。参见图 14（39页）的示例。

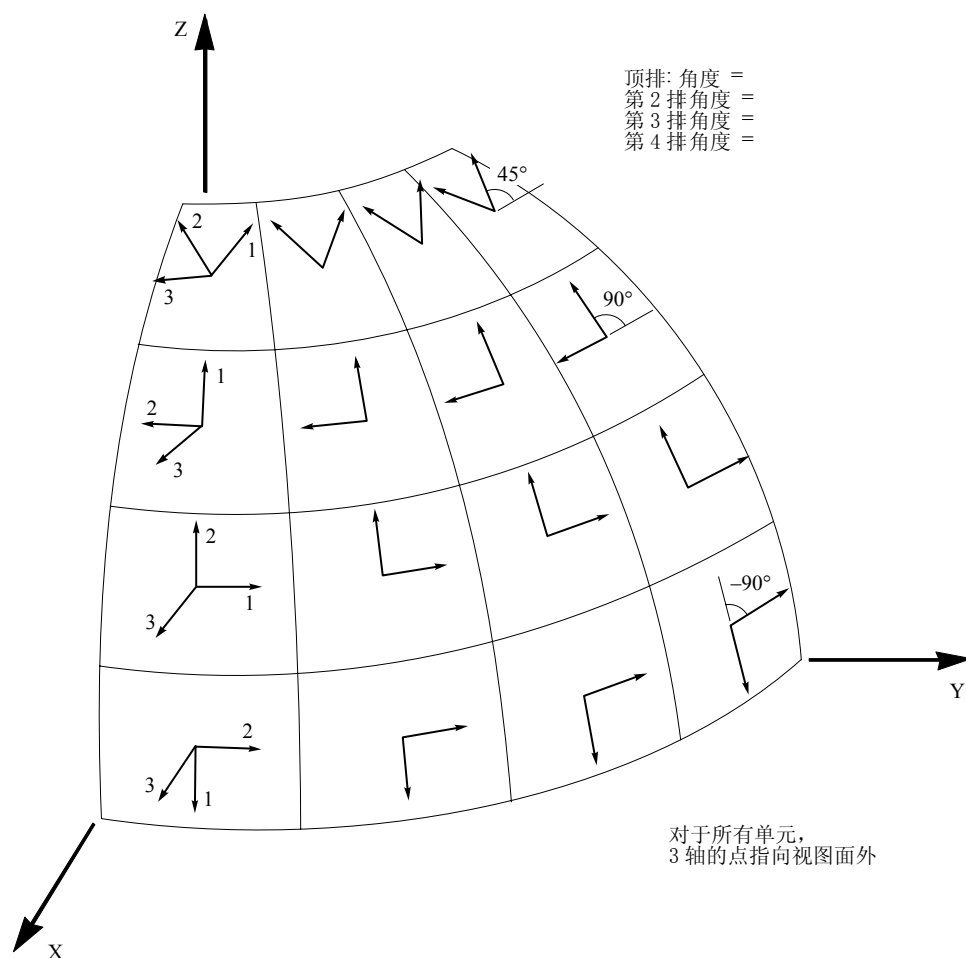


图 14 相对于默认方向的壳单元坐标角度

## 截面属性

**壳截面**是描述一个或多个壳单元横截面的一组材料特性和几何特性。截面独立于壳单元进行定义，并指定给各个面对象。

## 截面类型

当定义一个面对象的截面时，可以选择下列三种基本单元类型：

- 壳：本章主题，它有平动和扭转自由度，可以承受力和弯矩。
- 平面（应力或应变）：一个二维的实体，有平动自由度，可以承受力，但不能承受弯矩，该类型本手册中不作介绍。
- 准实体：轴对称实体，有平动自由度，可以承受力，不能承受弯矩，该类型本手册不作介绍。

对于壳截面，可以用下列分类型细化其属性：

- 膜：纯膜特性，只能承受平面内的力和法向弯矩。
- 板：纯板特性，只能承受弯矩和横向力。
- 壳：完全壳特性，膜特性和板特性之和，可以承受任何力和弯矩。

推荐使用完全壳特性，除非整个结构是平面并被充分约束。

## 厚度公式

提供了两种厚度公式，它们决定了在板或壳单元的平面弯曲行为中是否考虑横向剪切变形：

- 厚板 (Mindlin/Reissner) 方程，它包括了横向剪切变形的影响。
- 薄板 (Kirchhoff) 方程，它忽略了横向剪切变形的影响。

当板厚度大于跨度的  $1/10$  到  $1/5$  时，剪切变形显得比较重要。在弯曲应力集中处，比如厚度或支撑条件突变处，以及开洞或有凹角处，剪切变形也比较明显。

甚至对于剪切变形小到可以忽略的薄板问题中，厚板方程也比薄板方程精确一些，尽管厚板方程某种程度上有些刚。

但是，对于纵横比较大及网格扭曲而言，薄板方程比厚板方程的精度更加稳定。

建议用户使用厚板方程，除非是扭曲的网格而且确定剪切变形较小，或者是用来校核薄板理论解时。

厚度方程对膜行为没有影响，只对板弯曲行为有影响。

## 材料属性

每个截面的材料性质根据预先定义的材料来指定，壳截面使用的材料性质有：



- 弹性模量  $e1$ 、泊松比  $\nu12$ ，用于计算膜和板弯曲刚度。
- 密度（单位体积）  $m$ ，用于计算单元质量。
- 重度（单位体积）  $w$ ，用于计算自重荷载。

还可以使用正交各向异性材料，在《CSI分析参考手册》中有阐述。

## 厚度

每个壳截面都有一个不变的膜厚度和不变的弯曲厚度。膜厚度  $th$ ，用于计算：

- 完全壳和纯膜截面的膜刚度。
- 单元体积、单元自重和质量计算。

弯曲厚度  $thb$ ，用于计算：

- 完全壳和纯板截面的板弯曲刚度。

通常这两个厚度是相同的。但有些情况下，如建立波纹板模型时，膜和板弯曲特性无法由一个厚度的均质材料来充分表达，为此必需指定不同于  $th$  的  $thb$  值。

## 质量

在动力分析中，结构质量用于计算惯性力，分布于壳单元的质量被集中到节点上。*在单元本身内不考虑惯性影响。*

单元总质量等于质量密度  $m$  对单元平面的积分乘以厚度  $th$ ，总质量被分配到各个节点上，以和一致质量矩阵的对角元成比例的方式分配。总质量应用于每个平移自由度：UX、UY和UZ，不为旋转自由度计算其质量惯性矩。

更多信息请参见：

- $th$ 的定义，参见本章的子主题“厚度”（41页）。
- 参见“静力和动力分析”一章（61页）。

## 自重荷载

通过模型中所有单元的自重，自重荷载在任何荷载工况下都可被施加。对于壳单元，自重荷载是均布于单元平面的力，自重荷载的大小等于重量密度  $w$  乘以厚度  $th$ 。

自重荷载一直向下，沿整体轴  $-Z$  方向，自重荷载可通过一个对整个结构都适用的比例因子来确定。

更多信息请参见：

- $w$  和  $th$  的定义，参见本章的主题“截面属性”（39页）。
- 参见“静力和动力分析”一章（61页）。

## 均布荷载

均布荷载是用于施加在壳单元中间表面的均布力，荷载方向可在整体坐标系或单元局部坐标系中指定。

荷载由单位面积上力的形式给出。在不同坐标系中给出的荷载都被转化到单元局部坐标系中并进行叠加，作用于单元每个局部坐标轴方向的总的力是该方向的总荷载大小与中间面面积的乘积，这个力指定到单元节点上。

参见“静力和动力分析”一章（61页），可获得更多信息。

## 内力和应力输出

壳单元应力是单元体内抵抗荷载的单位面积上的力。这些应力为：

- 平面内正应力：S11和S22
- 平面内剪应力：S12
- 横向剪应力：S13和S23
- 横向正应力：S33（一般假定为 0）

三个平面内的应力在厚度方向被假定为不变或沿单元厚度方向线性变化的。

两个横向剪应力假定为沿厚度方向不变，实际剪应力的分布是抛物线形的，在上下表面为 0，中间面最大。

**壳单元内力**（也称**应力合成**）是应力在单元厚度上积分得到的力和力矩，这些内力有：

- 膜拉/压力：F11和F22
- 膜剪力：F12
- 板弯矩：M11和M22
- 板扭矩：M12
- 板横向剪力：V13和V23

必须注意这些应力合成是平面内单位长度上的力和力矩，它们存在于单元中表面的每个点上。

应力和内力的符号习惯见图 15（44页）。作用于正表面上应力指向单元局部坐标轴的正向，作用于负表面上的应力指向单元局部坐标轴的负向。正表面即外法向（指向远离单元）指向局部轴 1 或 2 正向的面。

内力为正，对应于正应力沿单元厚度方向为常数的情况。正的内弯矩对应于应力随单元厚度方向线性变化并且在底部为正。

应力和内力用单元的标准 $2 \times 2$ 高斯积分点计算并被外推到各个节点上。虽然结果只给出节点上的应力和内力，但二者存在于整个单元内。更多内容参见Cook, Malkus, Plesha(1989)

壳单元的应力和内力可以在诸如线性与非线性、模态、反应谱及时程等所有荷载工况下计算。

静荷载和模态工况下计算出壳单元的主应力值和方向，输出的角度即（从上往下）逆时针从局部轴1到最大主应力值的夹角。

必须注意反应谱结果一直是正的，且不同值之间的没有对应关系。基于此原因，结果中的主应力值就无法得到。

参见“静力和动力分析”一章（61页）。

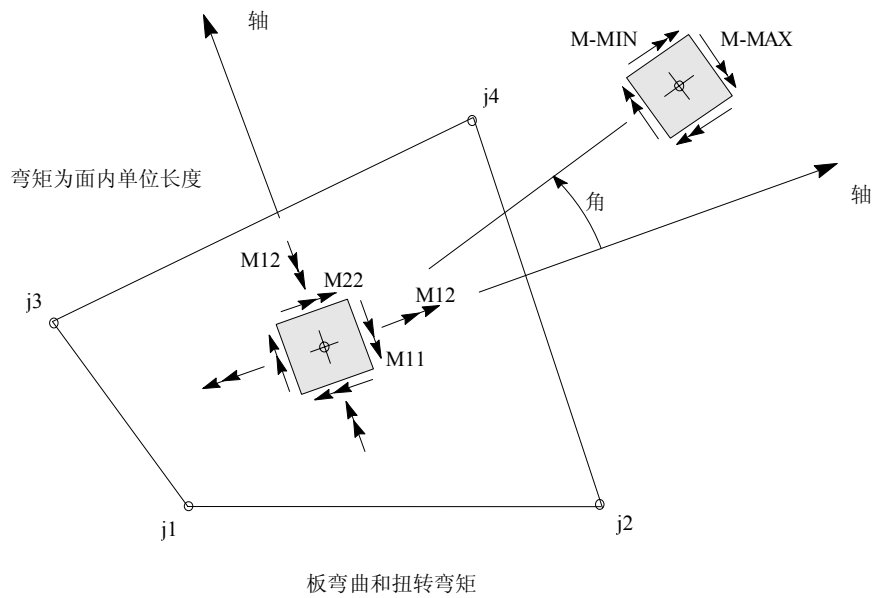
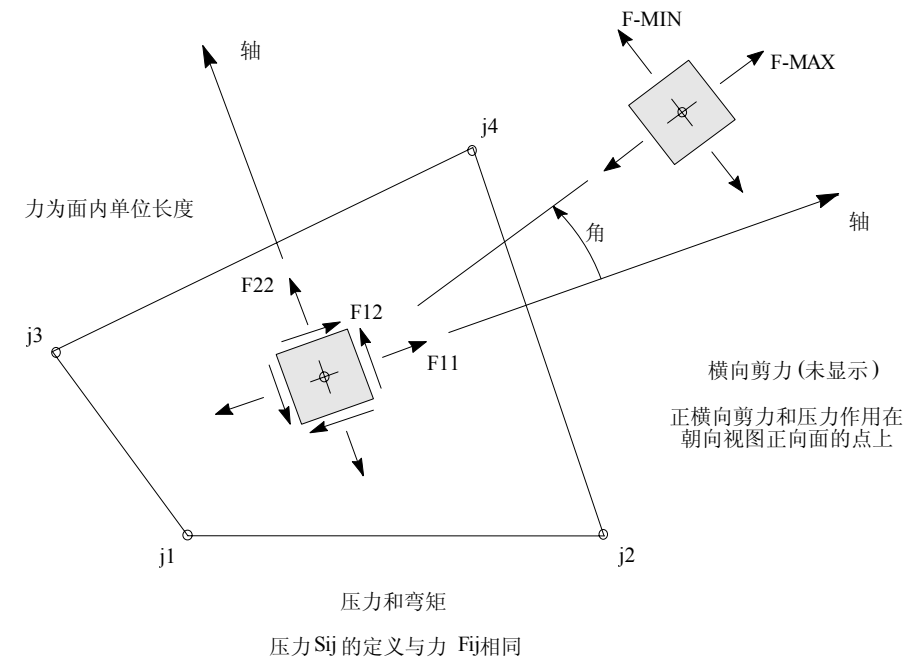


图 15 单元应力和内力

# 节点和自由度

在任何结构分析中，**节点**都是最基本的要素。节点是单元之间联系的点，是结构中已知位移或将确定位移的基本位置，这些节点上的位移成分（平移或转动）称为**自由度**。

### 主题

- 概述
- 建模注意事项
- 局部坐标系
- 自由度
- 约束与反力
- 弹簧
- 质量
- 力荷载
- 地面位移荷载

## 概述

节点是结构模型中的基本部分，节点有多种功能：

- 所有单元通过节点与结构联系（以及相互之间联系）
- 结构的支撑是通过在节点处使用约束和/或弹簧
- 刚体特性和对称条件可通过对节点施加约束来指定
- 集中荷载可加在节点上
- 集中质量和旋转惯性可加在节点上
- 单元上所有荷载和质量实际上最终转移到了节点上
- 节点是结构中已知位移（支座）或将确定位移的基本位置

本章将讨论除约束以外的其他所有功能，约束将在“节点束缚”（57页）一章中描述。

分析模型中的节点与结构对象模型的节点有关。在SAP2000图形界面中，节点在框架的端部和壳单元的角点处自动产生。节点也可以独立于单元定义。

可认为节点本身就是单元。每个节点可以拥有自己的局部坐标系，用于定义自由度、约束、节点特性和荷载以及表达输出。在多数情况下，模型中所有节点都用整体 X-Y-Z 坐标系作为局部坐标系。

每个节点有6个位移自由度——三个平动的，三个旋转的，这些位移沿每个节点局部坐标系排列。

节点可承受直接的集中荷载或通过约束或弹簧支座间接施加的地面位移作用。

在每个节点都产生位移（平移或旋转），也有外力、内力和力矩作用。

- 参见《CSI分析参考手册》中的“节点坐标”一章。
- 参见《CSI分析参考手册》中的“节点与自由度”一章。
- 参见《CSI分析参考手册》中的“约束和焊接”。

## 建模注意事项

节点和单元的位置对于决定模型精度起关键性的作用。定义单元（和节点）时必须为结构考虑的因素有：

- 必须有足够数量的单元来描述结构的几何形状，对于直线或边界，一个单元就够了；对于曲线或曲面，每段 $15^\circ$ （或更小）的弧须用一个单元。
- 单元边界、节点必须位于不连续的点、线、面上。
  - 结构边界，如角、边缘
  - 材料特性变化处
  - 厚度或其他几何特性变化处
  - 支座点（约束或弹簧）
  - 集中荷载作用点，框架单元跨内作用集中荷载的情况除外
- 在应力梯度大（即应力变化快）的区域，壳单元网格必须用小单元和近距离节点细分，这有可能要求在一次或多次初步分析之后更改网格，更改网格可以通过修改面对象的自动生成网格参数来实现。
- 当模型中动力特性比较重要时，必须采用多于一个的单元对任何一个跨度的长度进行模拟。这是因为计算时，质量总是集中在节点处，尽管实际上它是沿单元均布的。

## 局部坐标系

每个节点都有自己的**节点局部坐标系**，用于定义节点自由度、约束、特性和荷载，以及表达输出，局部坐标系的轴用 1、2 和 3 表示。在默认情况下这些轴分别同整体轴 X、Y、Z 相同，它们都是符合右手法则的坐标系。

在多数情况下默认局部坐标系是足够用的，但在一些特定目标的建模中，可在一些或全部节点上使用不同的局部坐标系。《CSI分析参考手册》的“节点自由度”一章对此进行了叙述。

更多信息参见“坐标系”一章（7页）。

## 自由度

结构模型的变形由节点位移控制，结构模型的每个节点有6个位移分量：

- 节点可能沿三个局部坐标轴平移，这些平移用  $U1$ 、 $U2$  和  $U3$  表示。
- 节点可能绕三个局部坐标轴转动，这些转动用  $R1$ 、 $R2$  和  $R3$  表示。

以上 6 个位移分量即节点**自由度**，见图 16（48页）：

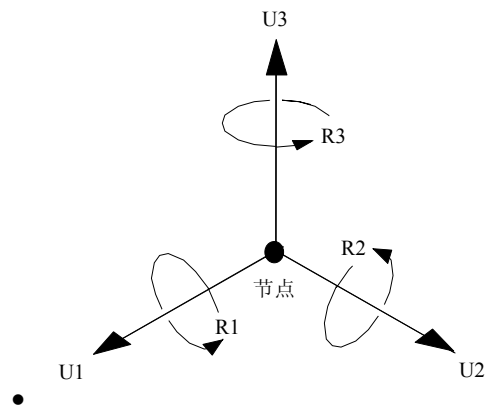


图 16 节点局部坐标系中的位移六个自由度

除了作为结构模型的一部分所定义的常规节点外，程序自动生成主节点来控制用户定义的约束特性，和常规节点一样，主节点也具有相同的 6 个自由度。详见“节点束缚”一章（57页）。

结构模型的每个自由度必须是下列类型之一：

- 激活：位移在分析过程中计算。
- 约束：位移是指定的，在分析过程中计算对应的反力。
- 束缚：位移由其他自由度上的位移决定。
- 无效：位移不影响结构，在分析中被忽略。
- 不可用：位移明显被分析排斥。

下面的子主题中将叙述自由度的不同类型。



## 可用与不可用的自由度

用户可在结构模型中明确指定用于每个节点的一组整体自由度。作为缺省，每个节点有 6 个自由度，对于三维结构一般用缺省情况。

然而对于指定的平面结构，用户可能希望约束**可用自由度**，例如：在 X-Z 平面中，平面桁架只需要 UX 和 UZ；平面框架只需要 UX、UZ 和 RY；平面井字楼板或平板仅需要 UY、RX 和 RZ。

没有被指定为可用的自由度称为**不可用自由度**。任何作用于不可用自由度的刚度、荷载、质量、约束或束缚在分析中将被忽略。

可用自由度可以是约束的、束缚的、活动的或是空的。

## 约束的自由度

如果节点沿任何可用自由度方向的位移已知，如支座节点，则自由度是**被约束**的。已知位移值可以是零或非零，且在不同荷载模式下可能不一样。沿被约束的自由度的力称为反力，该力在施加指定约束位移时是必需的，在分析中予以确定。

不可用自由度本来就被约束，它们被分析排斥，不计算反力，即使（位移）为非零。

更多信息参见本章的“约束和反力”主题（50页）。

## 束缚的自由度

每个作为束缚的一部分的节点可能有一个或多个被**束缚**的可用自由度。程序自动生成主节点来控制每个束缚的特性，在被束缚自由度上的位移是沿相应主节点自由度位移的线性组合。

如果一个束缚自由度也施加了约束，则这个约束施加给这组束缚节点。

更多信息参见“节点束缚”一章（57页）。

## 活动自由度

任何既不是约束也不是束缚的自由度，不是活动的就是不可用的。程序自动确定**活动自由度**如下：

- 如果一荷载或刚度施加于节点任一平移自由度，则该节点上任何可用平移自由度为活动的，除非它们是约束或束缚的。

- 如果一荷载或刚度施加于节点任一旋转自由度，则该节点上任何可用旋转自由度为活动的，除非它们是约束或束缚的。
- 主节点上所有控制束缚自由度的自由度为活动的。

连接于任何框架单元或壳单元的节点将使其所有可用自由度为活动的。一个例外的情况是，只有桁架类型刚度的框架单元，其旋转自由度不是活动的。

每个活动自由度都有一个对应的求解方程。如果结构中有  $N$  个活动自由度，则系统中有  $N$  个方程，结构刚度矩阵是  $N$  阶的。进行分析所需的计算量随  $N$  的增大而增加。

作用于活动自由度的荷载是已知的（可能为0），相应的位移将在分析中确定。

如果系统中某活动自由度处的刚度为0，例如平面框架的平面外平移，则（该自由度）或束缚或定为不可用。否则结构不稳定，且求解静力方程将失败。

更多内容请参见：

- “框架单元”一章中的“自由度”主题（13页）
- “壳单元”一章中的“自由度”主题（35页）

## 无效自由度

不是束缚的、约束的或激活的可用自由度称为无效自由度。由于它们没有荷载或刚度，它们的位移和反力都为0，它们对结构的其他部分没有影响，程序自动把它们排斥于分析之外。

## 约束和反力

如果沿节点任一自由度方向的位移值为已知，零（如支座）或非零（如支座沉降），则必须在该自由度上施加**约束**。位移已知值在不同荷载模式下可能不一样，但自由度在所有荷载工况下均被约束。即不可能出现位移在一种荷载工况下已知而在另一荷载工况下未知（未被约束）的情况。

如果系统中某一可用自由度方向的刚度为零，例如平面框架的面外平移和面内旋转，应该对该自由度施加约束。否则，结构将是不稳定的，求解静力方程将会出现困难。

作用于约束上的力和弯矩称为**反力**，它由分析确定。对不同荷载工况，反力会不同。反力包括因与约束自由度相连引起的的构件上的力（或弯矩），以及由所有施加在该自由度上的荷载引起的力（或弯矩）。

图 17（52页）中显示的是约束示例。

更多信息：

- 参见本章“自由度”主题（48页）。
- 参见本章“地面位移荷载”主题（55页）。

## 弹簧

结构中任一节点的 6 个自由度中的任一个都可能有平移或旋转的弹簧支座条件。弹簧把地面和节点弹性地联系起来。沿约束自由度的弹簧支座对结构刚度没有贡献。

弹簧作用力与位移通过一个  $6 \times 6$  的弹簧刚度系数对称矩阵相联系，这些力倾向于抵抗位移。弹簧刚度系数在节点局部坐标系中指定，节点弹簧力和力矩  $F1$ 、 $F2$ 、 $F3$ 、 $M1$ 、 $M2$  和  $M3$  如下：

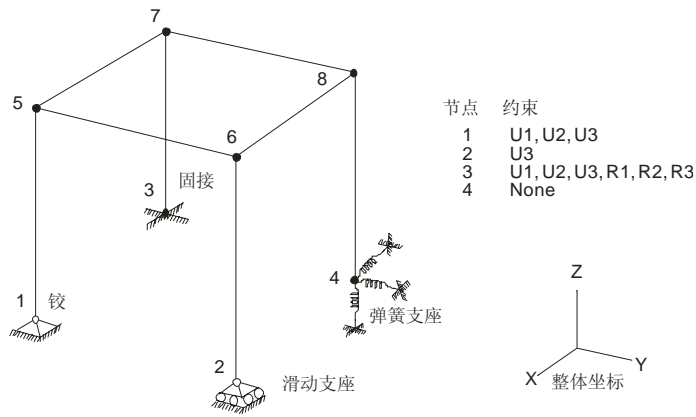
$$\begin{Bmatrix} F1 \\ F2 \\ F3 \\ M1 \\ M2 \\ M3 \end{Bmatrix} = - \begin{bmatrix} \mathbf{u1} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ & \mathbf{u2} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ & & \mathbf{u3} & 0 & 0 & 0 \\ & & & \mathbf{r1} & 0 & 0 \\ & \text{对称} & & & \mathbf{r2} & 0 \\ & & & & & \mathbf{r3} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u1 \\ u2 \\ u3 \\ r1 \\ r2 \\ r3 \end{Bmatrix} \quad (1)$$

其中  $u1$ 、 $u2$ 、 $u3$ 、 $r1$ 、 $r2$ 、 $r3$  是节点位移和转动， $\mathbf{u1}$ 、 $\mathbf{u2}$ 、 $\mathbf{u3}$ 、 $\mathbf{r1}$ 、 $\mathbf{r2}$ 、 $\mathbf{r3}$  是指定的弹簧刚度系数。

弹簧地面端的位移可指定为零或非零（如支座沉降），**地面位移**在不同荷载工况下可能不同。

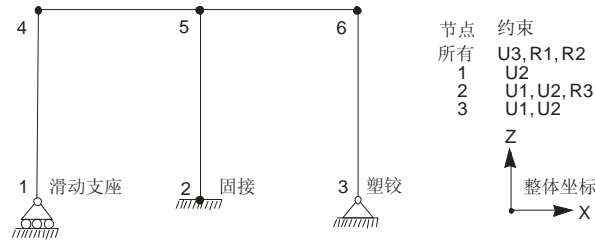
更多信息：

- 参见本章“自由度”主题（48页）。
- 参见本章“地面位移荷载”主题（55页）。



三维框架结构

注意：节点以圆点表示：  
● 实心点表示弯矩连续  
○ 空心点表示铰  
所有节点局部1-2-3坐标系统与  
整体X-Y-Z坐标系统一致。



2维框架结构, X-Z 平面

图 17 约束示例

# 质量

在动力分析中，结构的质量用于计算惯性力。通常，质量通过单元质量密度和单元体积得到，自动产生节点上的集中质量（不耦合）。单元质量值在三个平移自由度上是相等的，不产生对应于旋转自由度的质量惯性矩。这种方法对大部分分析是足够的。

有时常需要在节点上添加集中质量和 / 或质量惯性矩，这可以在结构中任意节点的任意自由度上添加。

为了计算效率和解的精度，SAP2000使用集中质量。这说明在一个节点的自由度之间以及不同节点之间没有耦合质量。这些不耦合的质量归于每个节点的局部坐标系，束缚自由度上的质量值被忽略。

作用于节点的惯性力通过一个 $6 \times 6$ 的质量矩阵与节点加速度相关联，这些力倾向于抵抗加速度。在节点局部坐标系中，惯性力和力矩  $F1$ 、 $F2$ 、 $F3$ 、 $M1$ 、 $M2$ 和  $M3$  如下：

$$\begin{Bmatrix} F1 \\ F2 \\ F3 \\ M1 \\ M2 \\ M3 \end{Bmatrix} = - \begin{bmatrix} \mathbf{u1} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ & \mathbf{u2} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ & & \mathbf{u3} & 0 & 0 & 0 \\ & & & \mathbf{r1} & 0 & 0 \\ & sym. & & & \mathbf{r2} & 0 \\ & & & & & \mathbf{r3} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u1 \\ u2 \\ u3 \\ r1 \\ r2 \\ r3 \end{Bmatrix}$$

其中 $u1$ 、 $u2$ 、 $u3$ 、 $r1$ 、 $r2$ 、 $r3$ 是节点平移和旋转加速度， $\mathbf{u1}$ 、 $\mathbf{u2}$ 、 $\mathbf{u3}$ 、 $\mathbf{r1}$ 、 $\mathbf{r2}$ 、 $\mathbf{r3}$ 是指定的质量值。

质量值必须用一致的质量单位 ( $W/g$ ) 给出，质量惯性矩必须用  $WL^2/g$  单位给出，这里  $W$  是重量， $L$  是长度， $g$  是重力加速度。结构中每个节点的净质量 (net mass) 必须是零或正值。

不同平面的质量惯性矩公式见图 18 (54页)。

更多信息：

- 参见本章“自由度”主题 (48页)。
- 参见“静力和动力分析”一章 (61页)。

## 力荷载

力荷载用于在节点上添加集中力或力矩，其值在整体坐标系中指定，如图 19 (55页) 所示。力荷载可以随荷载模式的不同而不同。

施加在约束自由度上的力或力矩将增加反力，但不会影响结构。

详见本章“自由度”主题 (48页)。

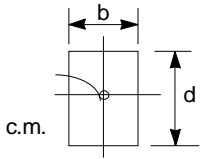
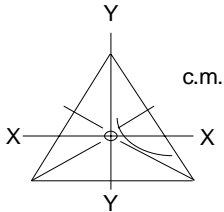
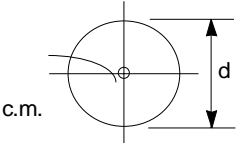
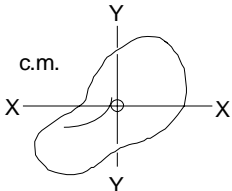
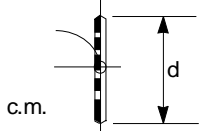
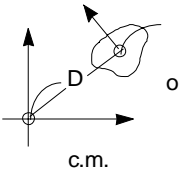
图形	过质心垂直轴线（垂直于纸面）的惯性矩	方程
	矩形板： 均匀分布在单位面积上的质量 板的总质量 = M (or w/g)	$MMI_{cm} = \frac{M(b^2+d^2)}{12}$
	三角形板： 均匀分布在单位面积上的质量 板的总质量 = M (or w/g)	用一般板方程
	圆形板： 均匀分布在单位面积上的质量 板的总质量 = M (or w/g)	$MMI_{cm} = \frac{Md^2}{8}$
	一般形状板： 均匀分布在单位面积上的质量 板的总质量 = M (or w/g) 板面积 = A 关于 X-X面惯性矩 = $I_x$ 关于 Y-Y面惯性矩 = $I_y$	$MMI_{cm} = \frac{M(I_x+I_y)}{A}$
	线质量： 均匀分布在单位面积上的质量 线的总质量 = M (or w/g)	$MMI_{cm} = \frac{Md^2}{12}$
	质量轴线的转换： 如果质量是点质量， $MMI_O = 0$	$MMI_{cm} = MMI_O + MD^2$

图 18 质量惯性矩方程

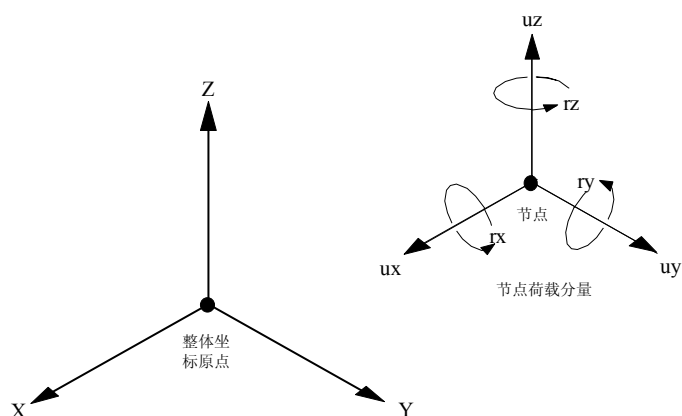


图 19 力荷载和地面位移荷载指定值

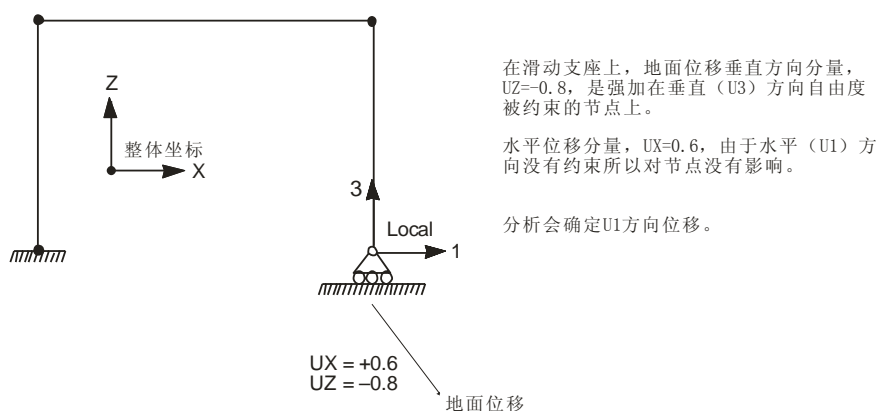


图 20 约束和未约束自由度地面位移

## 地面位移荷载

地面位移荷载用于施加地面端的节点约束和弹簧支座的指定位移（平移或旋转）。位移值在整体坐标系中指定，如图 19（55页）所示。这些值在通过约束或弹簧在施加到节点之前被转化到节点局部坐标系中。

约束可看作节点自由度与地面之间的刚性连接。弹簧可看作节点自由度与地面之间的柔性连接。

重要的是，要理解地面位移荷载是作用于地面的，如果结构在荷载的方向没有约束或弹簧支撑，则地面位移将不会影响到结构。

## 约束位移

如果一特定的节点自由度是约束的，则沿该（局部）自由度方向节点位移等于地面位移，不管弹簧是否存在。

地面位移也即节点位移随荷载模式不同可以不同。如果在一个约束自由度上没有指定地面位移荷载，则在该荷载模式下节点位移为零。

不沿约束自由度施加的地面位移分量不对结构起作用（除非可以通过弹簧）。如图 20（55页）所示例子。

## 弹簧位移

节点处地面位移乘以弹簧刚度系数得到施加在节点上的有效力和力矩。在没有弹簧刚度的方向施加的弹簧位移导致零荷载。地面位移及施加的力和力矩随荷载工况的不同可以不同。

在节点局部坐标系中，由于地面位移在节点上施加的力和力矩  $F1$ 、 $F2$ 、 $F3$ 、 $M1$ 、 $M2$ 、 $M3$  如下：

$$\begin{Bmatrix} F1 \\ F2 \\ F3 \\ M1 \\ M2 \\ M3 \end{Bmatrix} = - \begin{bmatrix} \mathbf{u1} & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ & \mathbf{u2} & 0 & 0 & 0 & 0 \\ & & \mathbf{u3} & 0 & 0 & 0 \\ & & & \mathbf{r1} & 0 & 0 \\ & \text{对称} & & & \mathbf{r2} & 0 \\ & & & & & \mathbf{r3} \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} u_{g1} \\ u_{g2} \\ u_{g3} \\ r_{g1} \\ r_{g2} \\ r_{g3} \end{Bmatrix} \quad (2)$$

其中  $u_{g1}$ 、 $u_{g2}$ 、 $u_{g3}$ 、 $r_{g1}$ 、 $r_{g2}$  和  $r_{g3}$  是地面位移和转动， $\mathbf{u1}$ 、 $\mathbf{u2}$ 、 $\mathbf{u3}$ 、 $\mathbf{r1}$ 、 $\mathbf{r2}$  和  $\mathbf{r3}$  是指定的弹簧刚度系数。

作用在节点上的净弹簧力和力矩是方程（1）和方程（2）得出的力和力矩的和。注意它们符号相反。在约束的自由度上，节点位移等于地面位移，因而净弹簧力为零。

了解更多的信息：

- 参见本章主题 “约束和反力” (50页) 。
- 参见本章主题 “弹簧” (51页)。



# 节点束缚

**束缚**用于加强特定刚体类型的特性，联系模型中的不同部分，施加某种类型的对称条件。

### 主题

- 概述
- 隔板束缚

## 概述

一个束缚包括一组两个或更多的**束缚节点**。束缚中每对节点的位移与束缚方程有关。可用束缚加强的特性类型有：

- 刚体特性：被束缚的节点在平移或转动时，好像被刚性连接件连接在一起。  
可建立模型的刚体行为：
  - 刚体：对所有位移充分刚性
  - 刚性隔板：对平面中膜行为是刚性的
  - 刚性板：对平面中的板弯曲为刚性
  - 刚性杆：对轴向拉伸为刚性

–刚性梁：对一轴的梁弯曲为刚性

- 等位移特性：束缚节点的平移和旋转相等
- 对称和反对称条件

束缚的使用减少了系统要求解方程的个数，往往会带来较高的效率。

本章只讨论隔板束缚，因为这是最常用的束缚类型。

有关束缚的更多信息请参阅《CSI分析参考手册》中的“束缚和拼接”一章。

## 隔板束缚

隔板束缚使其所有的束缚节点作为一个刚性的平面隔板一起移动。即所有的束缚节点通过平面内的刚性连接互相联系，但不影响平面外变形。

这一束缚可用于：

- 建立结构中混凝土楼板（或填充混凝土组合楼板）模型，其具有典型的平面内刚度
- 建立桥梁上部结构中的横隔板

隔板束缚的使用消除了数值精度问题，当用膜单元建立平面内刚度很大的板或隔板模型时都存在这个问题。隔板束缚在建筑物横向（水平）动力分析中也很有用，它可以明显减少要解的特征值问题的计算量。隔板束缚如图 21（59页）所示。

## 节点连接性

每个隔板束缚把一组两个或多个节点连系在一起，节点可以处于空间任意位置，但为了取得最好的结果，所有节点应处于束缚平面内。否则，被限定的部分可能产生弯矩，会不真实地加大结构刚度。

## 平面定义

每一个隔板束缚的限定方程分别在特定平面内给出。平面的位置并不重要，重要的仅是方向。

作为默认，平面由程序根据限定节点的空间分布自动确定。如不能找到唯一方向，则假设为水平平面（X-Y平面）。这发生在节点重合、共线或空间分布更接近三维的情况下。

用户可以不采用自动平面选择，而是指定垂直于束缚平面的全局坐标（X、Y或Z）。这一点是有用处的，例如，可以用来为一个包含小的台阶的楼板指定一个水平平面。

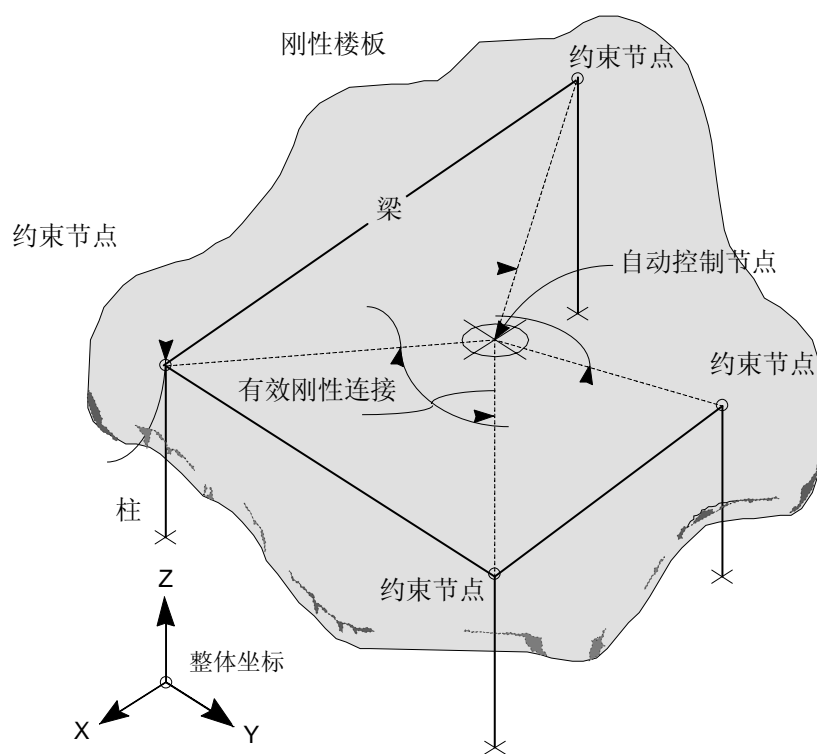


图 21 模拟刚性楼板的隔板束缚

## 局部坐标系

每个隔板束缚都有自己的局部坐标系，坐标轴为1、2、3。局部轴 3 是沿束缚平面的法向方向。程序自动、任意地在平面中选择轴 1 和轴 2 的方向。平面内轴的实际方向并不重要，因为只有法向影响束缚方程。

## 束缚方程

束缚方程联系隔板束缚中任意两个束缚节点的位移，这两个节点下标分别为  $i$  和  $j$ 。这些方程的表达是用平面内平移（ $u1$ 和 $u2$ ）、绕法向的转动（ $r3$ ），平面内坐标（ $x1$ 和 $x2$ ），所有的都发生在束缚局部坐标系内。

$$u_{1j} = u_{1i} - r_{3i} \Delta x_2$$

$$u_{2j} = u_{2i} - r_{3i} \Delta x_1$$

$$r_{3i} = r_{3j}$$

$$\text{其中 } \Delta x_1 = x_{1j} - x_{1i} \text{ 且 } \Delta x_2 = x_{2j} - x_{2i}$$

# 静力和动力分析

静力和动力分析用于确定结构在不同类型荷载下的反应，本章介绍SAP2000中可用的基本分析类型。

### 主题

- 概述
- 荷载
- 荷载工况
- 线性静力分析
- 特征向量分析
- Ritz向量分析
- 振型分析结果
- 反应谱分析
- 反应谱分析结果

## 概述

SAP2000中使用许多不同类型的分析。包括：

- 线性静力分析
- 用特征向量或 Ritz 向量进行振动振型分析。
- 反应谱分析求地震反应。
- 除入门手册以外的其它类型线性和非线性、静力和动力分析。

这些不同类型的分析可在同一模型中定义，并把结果组合起来输出。

更多信息和其它特性参见《CSI分析参考手册》中的“荷载工况”一章。

## 荷载

荷载代表结构上的作用，如力、压力、支座位移、温度应力、地面加速度及其它。用户可以对对象定义包括多种荷载的荷载工况。程序自动计算地面加速度荷载。

为计算在荷载模式下结构的反应，用户必须定义并运行荷载工况，荷载模式指定了荷载施加的方式（如：静力的、动力的等）以及结构的分析方式（如：线性的、非线性的等）。同一个荷载模式可以在不同荷载工况中以不同方式施加。

默认情况下，程序针对用户定义的每一种荷载模式生成相应的线性静力荷载工况。

### 荷载模式

用户可以定义任意数量的荷载模式。一般情况下，用户会为恒荷载、活荷载、风荷载、雪荷载、温度荷载等建立各自独立的荷载模式。需要独立变化的工况，不管是用于分析或是因为施加方式，应该定义为独立的荷载模式。

在定义了一种荷载模式名称后，用户必须指定特定的荷载值给对象，作为荷载模式的一部分。每种荷载模式包括：

- 框架和 / 或壳单元的自重荷载
- 框架单元的集中或分布荷载
- 壳单元上的均布荷载

- 节点上的力和 / 或地面位移荷载
- 《CSI分析参考手册》中介绍的其他类型荷载

每个对象都可以受多个荷载模式的作用。

## 加速度荷载

程序自动计算因单位平移加速度而产生的作用在结构上的三个方向的加速度荷载。这三个荷载分别为整体坐标系三个轴的方向，它们由达朗伯原理确定，记为  $m_x$ 、 $m_y$ 、 $m_z$ 。这些荷载用于在反应谱分析中施加地面加速度，以及在 Ritz 向量分析中作为初始荷载向量。

这些荷载在每个节点和单元上都计算，并在整个结构上求总和，节点的加速度荷载就等于节点局部坐标系中节点平移质量的负值。这些荷载转化到整体坐标系。

单元的加速度荷载在每个方向都相等，并等于单元质量的负值，不需进行坐标转换。

加速度荷载可转换到任意坐标系，在整体坐标系中，沿X、Y和Z正向的加速度荷载分别记为 UX、UY、UZ。在为反应谱分析定义的局部坐标系中，沿局部轴 1、2、3 正向的加速度荷载分别记为 U1、U2、U3。

## 荷载工况

进行每一个不同的分析称为**荷载工况**，作为荷载工况的一部分，对每个荷载工况指定一个工况名称，这些名称可用于生成另外的组合和进行输出控制。

荷载工况的基本类型有：

- 线性静力分析
- 振型分析
- 反应谱分析

对于一个模型，用户可定义任意数量不同类型的荷载工况。也可定义其它类型的荷载工况。

默认的，程序对于用户定义的每一荷载模式建立一个线性荷载工况，对于结构的前几个特征振型建立一个振型荷载工况。

在SAP2000图形界面可见不同荷载工况的线性组合及包络值。

更多信息参见：

- 本章主题“特征向量分析”（64页）
- 本章主题“Ritz向量分析”（65页）
- 本章主题“反应谱分析”（68页）

## 线性静力分析

结构静力分析涉及到线性方程系统的求解，表示如下：

$$\mathbf{K} \cdot \mathbf{u} = \mathbf{r}$$

其中， $\mathbf{K}$  是刚度矩阵， $\mathbf{r}$  是施加的荷载向量， $\mathbf{u}$  是可求解得到的位移向量。见 Bathea and Wilson(1976)。

对于每一个用户定义的静力荷载工况，用户可以将一个或几个荷载模式和/或加速度荷载工况指定给向量  $\mathbf{r}$ 。但一般而言，用户希望在一次静力分析中求解一个荷载工况，然后再将结果组合。

## 模态分析

用户可以定义任意数量的模态荷载工况，尽管大多数情况下一个工况已经足够。对于每一个模态荷载工况，用户可以自行选择进行特征向量分析还是 Ritz 向量分析。

### 特征向量分析

特征向量分析确定无阻尼自由振动的振型和周期（频率），这些自振振型了解结构内在的特性很有帮助。虽然 Ritz 向量推荐用作反应谱分析的基础，但也可以使用自由振动振型。

特征向量分析包括特征值问题的求解：

$$[\mathbf{K} - \Omega^2 \mathbf{M}] \Phi = 0$$

其中  $\mathbf{K}$  是刚度矩阵， $\mathbf{M}$  是对角质量矩阵， $\Omega^2$  是特征值的对角矩阵， $\Phi$  是对应的特征向量（振型）。



每个特征值-特征向量对被称为一个结构自然振型。程序找到的振型依次用数字 1 到  $n$  表示。

特征值是振型圆频率  $\omega$  的平方。振型的频率  $f$ , 周期  $T$ , 通过下式与  $\omega$  联系:

$$T = \frac{1}{f} \quad \text{和} \quad f = \frac{\omega}{2\pi}$$

用户可以指定要找的模态数目  $n$ , 程序将寻找几个最低频率 (最长周期) 的模态。

实际找到的模态数  $n$  受限于:

- 所要求的模态  $n$
- 模型中的质量自由度数

质量自由度是任何具有平移质量或转动质量惯性矩的活动自由度, 质量可以是直接分配到节点或从相连的单元上来的。

只有实际找到的模态才可用于后来进行的反应谱分析。

参见“节点和自由度”一章中的“自由度”主题 (48页)。

## Ritz 向量分析

研究表明自由振动模态不是动力荷载下结构模态叠加分析的最佳方法。相对于使用相同数量自然模态的分析而言, 基于特定的一组 Ritz 向量的动力分析会得到更精确的结果 (Wilson, Yuan, and Dickens, 1982)。

Ritz 向量产生较好结果的原因是它考虑了动荷载的空间分布, 而直接使用自然振型则忽略了这一重要信息。

动荷载的空间分布作为**初始荷载向量**来开始这个计算进程。第一个 Ritz 向量是对应于初始荷载向量的静力位移向量。其余向量由一个循环关系产生, 即质量矩阵乘以先前得到的 Ritz 向量并用作下个静力求解的荷载向量。每次静力求解称为一个**生成循环**。

当动力荷载由数个独立的空间分布组成, 则每个分布作为初始荷载向量产生一组 Ritz 向量。每个生成循环产生的 Ritz 向量个数与初始荷载向量一样。如果一个

生成的 Ritz 向量是多余的或不激励任何质量自由度，则该 Ritz 向量将被放弃，且相应的初始荷载向量将在以后的生成循环中移除。

对于地震分析，包括反应谱分析，用户应使用3个加速度荷载作为初始向量。这比使用相同数量的特征模态将产生更好的结果。

使用标准的特征解方法来产生一组正交的 Ritz 向量，产生一组最终的 Ritz 向量模态。每个 Ritz 向量模式包括一个模态和频率。完整的 Ritz 向量模态，可作为表达结构动力位移的基础。

若把刚度矩阵进行三角分解，则仅需为每个要求的 Ritz 向量静态的求解一个荷载向量，这是一个十分高效的算法。同时，该方法自动地包括了很多已证明的数值技术的优点，如静力凝聚、Guyan削减、高阶截断下的静态校正。

此算法在Wilson(1985)中有详细叙述。

找到足够数量的 Ritz 向量模态后，它们中的一些可能十分接近自然振动模态和频率，然而一般来说 Ritz 向量模态不代表结构的内在特征，而自然振动模态代表其内在特征。Ritz 向量模态由初始荷载向量引起偏差。

可以指定要找的模态数目  $n$ ，实际找到的模态数目  $n$  受限于：

- 所要求的模态数  $n$
- 模型中的质量自由度数
- 初始荷载向量激励的自振模态数（由于数值误差可能混入一些附加的自振模态）

质量自由度是任何拥有平移质量或转动质量惯性矩的活动自由度，质量可以是直接分配到节点或来自相连的单元。

只有实际找到的模态才可用于后来进行的反应谱分析。

详见“节点和自由度”中的“自由度”主题（48页）。

## 模态分析结果

每一种模态荷载工况都会产生一组相应的模态。每种模态由一种形状（规格化的偏转形状）及其相应属性构成。不同振型的特点可在SAP2000图形界面中显示出来。不管是用特征向量分析还是 Ritz 向量分析，这些信息都按下列各项进行描述：

### 周期和频率

每个模态将给出下列时间特性：

- 周期  $T$ ，时间单位
- 频率  $f$ ，单位时间的循环次数，即  $T$  的倒数
- 圆频率  $\omega$ ，单位时间的弧度， $\omega=2\pi f$
- 特征值 $\omega^2$ ，单位为弧度/时间的平方

### 模态刚度和质量

对于每一个模态，只有相关变形是重要的。总体比例是任意的。在SAP2000中，模态基于如下质量矩阵正规化或比例化：

$$M_n = \varphi_n^T M \varphi_n = 1$$

这个质量称为模态质量。类似地，模态刚度定义为：

$$K_n = \varphi_n^T K \varphi_n$$

无论模态如何按比例调整，模态刚度与模态质量的比例总是模态特征值：

$$\frac{K_n}{M_n} = \omega_n^2$$

### 参与系数

模态参与系数是三个加速度荷载与模态的点积，对应于整体X、Y和Z方向的三个加速度荷载的模态  $n$  的参与系数为：

$$f_{xn} = \varphi_n^T m_x$$

$$f_{yn} = \varphi_n^T m_y$$

$$f_{zn} = \varphi_n^T m_z$$

其中  $\phi_n$  为模态形状,  $m_x$ 、 $m_y$ 、 $m_z$  是单位加速度荷载。这些系数一般化为由每个加速度荷载引起的作用在模态上的荷载, 它们在整体坐标系中。

这些系数指示每一模态分别由加速度荷载激励的强度。

### 参与质量比

模态的参与质量比反映的是, 在计算每个整体轴方向上的加速度荷载所引起的反应的过程中, 该模态的重要程度。因而这对于确定反应谱分析的精度是很有用的。

对应于整体 X、Y、Z 方向的三个加速度荷载, 模态  $n$  的参与质量比为:

$$P_{xn} = \frac{(f_{xn})^2}{M_x}$$

$$P_{yn} = \frac{(f_{yn})^2}{M_y}$$

$$P_{zn} = \frac{(f_{zn})^2}{M_z}$$

其中  $f_{xn}$ 、 $f_{yn}$ 、 $f_{zn}$  是前面定义的参与系数,  $M_x$ 、 $M_y$ 、 $M_z$  是 X、Y、Z 方向上无约束质量的总和, 参与质量比用百分数表示。

在显示模态  $n$  的参与质量比的同时, 也显示到模态  $n$  为止的所有模态的参与质量比的累加, 这可以简单地估算需要多少个模态来达到对地面加速度荷载分析的给定精度。

如结构所有的特征模态存在, 则每个加速度荷载的参与质量比一般为 100%。然而, 在一些特定的约束, 如对称条件阻止了一些质量对平移加速度的反应的情况下, 并非如此。

## 反应谱分析

结构对地面运动的反应相关的动力平衡方程为:

$$K\mathbf{u}(t) + C\dot{\mathbf{u}}(t) + M\ddot{\mathbf{u}}(t) = \mathbf{m}_x \ddot{u}_{gx}(t) + \mathbf{m}_y \ddot{u}_{gy}(t) + \mathbf{m}_z \ddot{u}_{gz}(t)$$

其中  $\mathbf{K}$  是刚度矩阵,  $\mathbf{C}$  是比例阻尼矩阵,  $\mathbf{M}$  是对角质量矩阵,  $u$ 、 $\dot{u}$ 、 $\ddot{u}$  分别是关于地面的相对位移、速度和加速度,  $m_x$ 、 $m_y$ 、 $m_z$  是单位加速度荷载;  $\ddot{u}_{gx}$ 、 $\ddot{u}_{gy}$  和  $\ddot{u}_{gz}$  是单位地面加速度的分量。

与时程分析相比, 反应谱分析寻求上述方程的可能最大反应。每个方向的地震地面加速度用数字化的反应谱曲线给出, 这些曲线是对结构周期的伪加速度谱。

虽然三个方向上的加速度可以指定, 但每个反应量只会产生一个正值结果。反应量包括位移, 力和应力, 每个计算得出的结果代表了该反应量尽可能大的统计值, 实际反应可以在这个正值到其相反数之间变化。

两个不同的反应量之间没有任何对应关系, 不可能知道地震期间反应的最大值何时发生, 也不可能知道该反应最大值发生时其他反应量的值。

反应谱分析运用了模态叠加法 (Wilson and Button, 1982), 模态可用特征向量分析或 Ritz 向量计算, 推荐使用 Ritz 矢量, 因为在相同模态数下它的结果会更精确。用户必须定义一个模态荷载工况来进行计算模态, 然后在反应谱工况中引用模态分析工况。

如果有要求或者适当的模态已计算完成, 反应谱可以考虑高频的刚性响应。当使用特征值模态, 应计算静态修正向量。这个信息在形成地面加速度的 Ritz 模态时是自动获取。在这两种情况下, 要保证在低于底面运动刚性频率下获取足够多的动力模态。

在执行一次程序中, 可进行任意数量的反应谱分析。用户需对每一反应谱工况指定唯一的工况名称。每个反应谱工况在施加的加速度范围内不同, 在结果的组合上也不同。

下面详细描述定义每一工况要用的参数。

## 局部坐标系

每个反应谱工况有自己的反应谱局部坐标系, 用于定义地面加速度荷载的方向, 局部坐标系的轴用 1、2、3 表示。默认情况下, 这些轴分别与整体 X、Y、Z 方向一致。

可以通过指定坐标角 **ang** (默认为零) 来改变局部坐标系的方向, 局部轴 3 总是与竖直整体轴 Z 相同, 或者说 **ang** 是水平平面内从整体坐标 X 轴到局部坐标 1 轴的角度, 符合右手法则, 如图 22 所示 (70 页)。

## 反应谱函数

反应谱函数是一系列结构周期和对应的伪反应谱加速度值的数据对。通过定义周期和对应的加速度，就可以定义出任意的谱函数。在使用反映谱函数时，可以按比例放大或缩小加速度数值。

指定成对的周期和加速度值，如：

$t_0, f_0, t_1, f_1, t_2, f_2, \dots, t_n, f_n$

$n+1$ 是给定数据对的个数。所有周期和加速度的数值必须是正数或零。这些成对的数据必须按照周期的升顺排列。

## 反应谱曲线

给定方向的反应谱曲线是伪反应谱加速度反应对结构周期的数字化的点，曲线形状通过指定反应谱函数的名称给出。

所选的反应谱曲线应反映出存在于结构模型中的阻尼。注意阻尼是反应谱曲线自身所固有的，它不受用于模态组合的 CQC 和 GMC 方法中的阻尼比 **damp** 的影响，虽然这两个值通常相等。

如果反应谱曲线没有定义在一个能包涵结构模态的足够大的周期区间内，则用一个加速度常量把曲线向大的或小的周期延伸，该加速度常量等于最近定义周期处加速度值的。

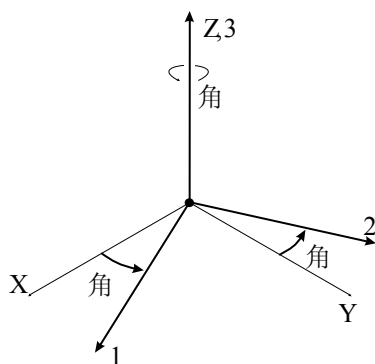


图 22 反应谱局部坐标系定义

## 模态组合

对于给定方向的加速度，程序计算每个振型下结构中的最大位移、力、应力。这些给定反应量的模态值用下列方法进行组合，得到给定方向的加速度的单一的正值结果。振型组合方法受振形阻尼比，**damp**，的影响，振形阻尼比的定义在反应谱工况中。必要时，给定的反应谱曲线会被调整，以反映阻尼值。

### 周期性和刚性响应

除去绝对值相加法，所有的振型组合方法，对于给定方向的荷载的振型响应均有两部分：周期和刚性。在这的区别是荷载的属性，而不是结构的属性。定义两个频率， $f1$ 和 $f2$ ，定义了地面运动的刚性响应内容，这里 $f1 \leq f2$ 。

当结构的频率小于 $f1$ （长周期），响应是周期性的，当结构的频率大于 $f2$ （短周期），响应是刚性的。在 $f1$ 和 $f2$ 两个频率之间，周期数和刚性响应是采用插值法，如Gupta的描述（1990）。

频率 $f1$ 和 $f2$ 是地震输入的属性，而不是结构的属性。Gupta定义 $f1$ 为：

$$f1 = \frac{S_{A\max}}{2\pi S_{V\max}}$$

$S_{A\max}$  是最大谱加速度。 $S_{V\max}$  是考虑地面运动的最大谱速度。缺省的 $f1$ 数值是1。

Gupta定义 $f2$ 为：

$$f2 = \frac{1}{3}f1 + \frac{2}{3}f_r$$

$f_r$  是地震输入的刚性频率，即，超过这个频率谱加速度本质上是恒量，并且等于在零周期（无穷大频率）的值。其他人定义 $f2$ 为：

$$f2 = f_r$$

在指定 $f1$ ， $f2$ 时，需要遵照下列规则：

- 如果 $f2=0$ ，不计算刚性响应，无论 $f1$ 定义为何值，所有的响应是周期的。
- 否则，必须遵守： $0 \leq f1 \leq f2$ 。

- 定义 $f1=0$ ，相当于指定 $f1=f2$ 。

对任意给定的响应量（位移，力，应力等），周期响应， $R_p$ ，是通过下面描述的振型组合法中的一种计算得到的。刚性响应， $R_r$ ，是频率大于 $f2$ 的模态的响应和位于 $f1$ 和 $f2$ 之间插值部分的响应得到的代数（完全相关）和。总的反应 $R$ 是通过下面两种方法之一计算得到：

- SRSS，由Gupta（1990）和NRC（2006）推荐使用，假定两部分是各自独立统计的。

$$R = \sqrt{R_p^2 + R_r^2}$$

- 绝对值的和，同原有的方法兼容：

$$R = |R_p| + |R_r|$$

请注意，对于周期和刚性响应的组合是选择SRSS方法还是绝对值相加的方法取决于振型组合和下面描述的方向组合的方法。

### CQC 法

计算周期响应的完全平方组合法由Wilson、Der Kiureghian和Bayo(1981)提出，是程序默认的方法。

CQC 法考虑了由振型阻尼引起的相邻模态之间的统计耦合。增加模型阻尼增加相邻模态之间耦合。如果阻尼为 0，则该方法退化成 SRSS 法。

### GMC 方法

一般模态组合法GMC计算周期响应是完全模态组合过程，如Gupta（1990）方程（3.31）的描述。与CQC法相似，GMC方法也考虑了相邻模态之间的统计耦合，但当强震持续时间设置为无穷大，使用Rosenblueth相关系数。这个结果实质上同CQC方法一致。

增加振形阻尼增加相邻模态间的耦合，如果所有模态的阻尼比为0，这种方法退化为SRSS方法。



### SRSS 方法

这种方法是用平方和平方根法来组合模态结果，这种方法不考虑模态的耦合，而是假定各模态的响应统计独立。

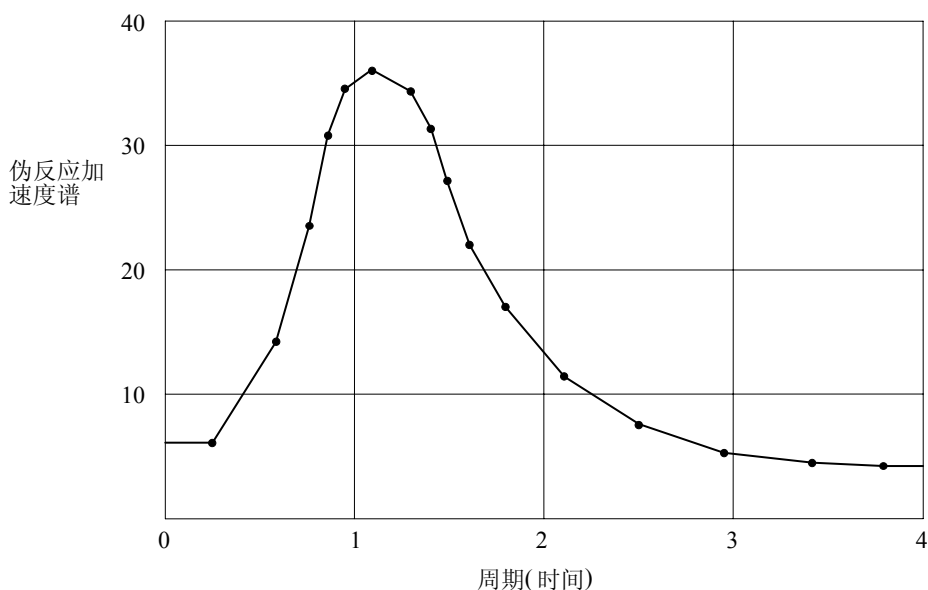


图 23 数字化的反应谱曲线

### 绝对值加和方法

这种方法是通过求他们的绝对值和来对模态进行组合，这方法通常是过于保守的，周期和刚性响应的区别在这里没有考虑，所有模态相同对待。

### NRC 百分之十方法

计算周期响应的NRC百分之十组合方法是有美国原子能委员会Regulatory Guide 1.92提出的。

这种方法假定了所有模态间是完全正的耦合，它们的频率相差10%或者更小。模态阻尼不影响耦合。

## NRC 双倍和方法

这种计算周期响应的NRC双倍和方法是由美国原子能委员会Regulatory Guide 1.92提出的。

这个方法假定了所有模态间是正的耦合，具有依赖于阻尼的相关系数，同CQC和GMC方法，这些相关系数还依赖于地震持续的时间。作为工况定义的一部分，用户定义参数td来指定地震持续时间。

## 方向组合

对结构中每个位移、力或应力，振型组合在每个加速度方向上给出单一的正值结果。这些带有方向的给定反应量的值组合产生单一的正值结果。用两种方法组合方向响应：SRSS和绝对值求和。

### SRSS 法

这种方法通过值的平方和的平方根组合不同方向的荷载的响应。

$$R = \sqrt{R_1^2 + R_2^2 + R_3^2}$$

$R_1$   $R_2$   $R_3$  是每个方向的模态组合值。该方法不随坐标系变化，即只要给定的反应谱曲线是相同的，则结果就相同，不依赖于坐标系。这是推荐使用的方向组合方法，也是默认方法。

### 绝对值求和法

用绝对值求和法来组合不同方向的结果。比例系数，dirf，能有效的减少不同方向交互的影响。

指定dirf=1计算简单的绝对值求和：

$$R = |R_1| + |R_2| + |R_3|$$

这个方法通常偏于保守。

指定  $0 < \text{dirf} < 1$ ，用比例绝对值求和法来组合方向结果。这里直接的方法就是，用一个方向的反应量的绝对值加上 **dirf** 与其它方向上反应量的积，然后取所得和的最大值。

例如：**dirf**=0.3，对给定的位移、力或应力的谱反应  $R$  为：

$$R = \max(\bar{R}_1, \bar{R}_2, \bar{R}_3)$$

其中：

$$\bar{R}_1 = R_1 + 0.3(R_2 + R_3)$$

$$\bar{R}_2 = R_2 + 0.3(R_1 + R_3)$$

$$\bar{R}_3 = R_3 + 0.3(R_1 + R_2)$$

且  $R_1$ 、 $R_2$ 、 $R_3$  是每一方向的模态组合值。

该方法的结果会随所选坐标系的不同而不同，用 **dirf**=0.3 所得的结果与 SRSS 方法是可以比较的（各方向输入谱相等），但随坐标系不同可能有 8% 的不足或 4% 过于保守。**dirf** 值越大结果越保守。

## 反应谱分析结果

在 SAP2000 交互式界面上可以得到每个反应谱荷载工况的相关信息，这些信息如下：

### 阻尼和加速度

每个模态的阻尼和作用在每个方向上的加速度是已知的。对每个模态输出的阻尼值就是荷载工况中指定的 CQC 或 GMC 的阻尼比 **damp**。（除非在模态中指定了高级阻尼，这时阻尼会更大。）

输出的加速度值是在反应谱曲线模态周期上的插值经过指定值 **sf** 缩放得到的。加速度与反应谱分析的局部轴有关，输出时为 U1、U2、U3。

## 振幅

反应谱模态振幅给出了模态形状系数，来形成各方向加速度下取代的结构形状。对于给定模态和给定方向的加速度，它是模态参与系数和反应谱加速度的乘积再除以模态的特征值  $\omega^2$ 。

振幅，乘以模态响应量（位移，力，应力等），将模态的贡献量给定为反映谱工况的响应量。

加速度方向通常在反应谱分析的局部坐标轴指定，输出时为U1、U2、U3。

更详细的信息见：

- 对于反应谱加速度的定义见前面子标题“阻尼和加速度”。
- 对于模态参与系数和特征值的定义，见本章中主题“模态分析结果”（66页）。

## 基底反力

基底反力是支座（约束和弹簧）抵抗反应谱荷载所产生的惯性力所需的总的力和关于整体原点的力矩。基础反应在执行方向组合后即可对每个振型打印，所有振型的总和在执行模态组合和方向组合之后打印。

基底反力和力矩在反应谱分析的局部坐标轴指定，输出时为 F1、F2、F3、M1、M2、M3。

### 参考文献

AASHTO, 2002

Standard Specifications for Highways Bridges, 17th Edition, The American Association of State Highway and Transportation Officials, Inc., Washington, D.C.

AASHTO, 2008

AASHTO LRFD Bridge Design Specifications, 4th Edition 2007, with 2008 Interim Revisions, The American Association of State Highway and Transportation Officials, Inc., Washington, D.C.

ACI, 2005

Building Code Requirements for Structural Concrete (ACI 318-05) and Commentary (ACI 318R-05), American Concrete Institute, Farmington Hills, Mich.

AISC, 2005

ANSI/AISC 360-05: An American National Standard – Specification for Structural Steel Buildings, American Institute of Steel Construction, Chicago, Ill.

K. J. Bathe, 1982

Finite Element Procedures in Engineering Analysis, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, N.J.

K. J. Bathe and E. L. Wilson, 1976

Numerical Methods in Finite Element Analysis, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, N.J.

K. J. Bathe, E. L. Wilson, and F. E. Peterson, 1974

*SAP IV — A Structural Analysis Program for Static and Dynamic Response of Linear Systems*, Report No. EERC 73-11, Earthquake Engineering Research Center, University of California, Berkeley.

J. L. Batoz and M. B. Tahar, 1982

“Evaluation of a New Quadrilateral Thin Plate Bending Element,” *International Journal for Numerical Methods in Engineering*, Vol. 18, pp. 1655–1677.

Caltrans, 1995

*Bridge Design Specifications Manual*, as amended to December 31, 1995, State of California, Department of Transportation, Sacramento, Calif.

Comite Euro-International Du Beton, 1993

*CEB-FIP Modal Code*, Thomas Telford, London

P. C. Roussis and M. C. Constantinou, 2005

Experimental and Analytical Studies of Structures Seismically Isolated with and Uplift-Restraint Isolation System, Report No. MCEER-05-0001, MCEER, State University of New York, Buffalo

R. D. Cook, D. S. Malkus, and M. E. Plesha, 1989

Concepts and Applications of Finite Element Analysis, 3rd Edition, John Wiley & Sons, New York, N.Y.

R. D. Cook and W. C. Young, 1985

Advanced Mechanics of Materials, Macmillan, New York, N.Y.

R. K. Dowell, F. S. Seible, and E. L. Wilson, 1998

"Pivot Hysteretic Model for Reinforced Concrete Members," ACI Structural Journal, Vol.95, pp.607–617.

FEMA, 2000

*Prestandard and Commentary for Seismic Rehabilitation of Buildings*, Prepared by the American Society of Civil Engineers for the Federal Emergency Management Agency (Report No. FEMA 356) , Washington, D.C.

A. K. Gupta, 1990

*Response Spectrum Method in Seismic Analysis and Design of Structures*, Blackwell Scientific Publications, Cambridge, Mass.

J. P. Hollings and E. L. Wilson, 1977

*3–9 Node Isoparametric Planar or Axisymmetric Finite Element*, Report No. UC SESM 78-3, Division of Structural Engineering and Structural Mechanics, University of California, Berkeley.

T.J.R.Hughes, 2000

*The Finite Element Method; Linear Static and Dynamic Finite Element Analysis*, Dover

A. Ibrahimbegovic and E. L. Wilson, 1989

"Simple Numerical Algorithms for the Mode Superposition Analysis of Linear Structural Systems with Nonproportional Damping, " *Computers and Structures*, Vol. 33, No. 2, pp. 523–531.

A. Ibrahimbegovic and E. L. Wilson, 1991

"A Unified Formulation for Triangular and Quadrilateral Flat Shell Finite Elements with Six Nodal Degrees of Freedom, " *Communications in Applied Numerical Methods*, Vol. 7, pp. 1–9.

M.A.Ketchum, 1986

*Redistribution of Stresses in Segmentally Erected Prestressed Concrete Bridge*, Report No.UCB/SESM-86/07, Department of Civil Engineering, University of California, Berkeley.

N. Makris and J.Zhang, 2000

“Time-domain Viscoelastic Analysis of Earth Structures, ”*Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol.29, pp.745-768.

L. E. Malvern, 1969

Introduction to the Mechanics of a Continuous Medium, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, N.J.

S. Nagarajaiah, A. M. Reinhorn, and M. C. Constantinou, 1991

*3D-Basis: Nonlinear Dynamic Analysis of Three-Dimensional Base Isolated Structures: Part II*, Technical Report NCEER-91-0005, National Center for Earthquake Engineering Research, State University of New York at Buffalo, Buffalo, N. Y.

NRC, 2006

“Combining Modal Responses and Spatial Components in Seismic Response Analysis,” Regulatory Guide 1.92, Revision 2, U.S. Nuclear Regulatory Commission.

Y. J. Park, Y. K. Wen, and A. H-S. Ang, 1986

“Random Vibration of Hysteretic Systems under Bi-Directional Ground Motions, ” *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 14.

R. J. Roark and W. C. Young, 1975

*Formulas for Stress and Strain*. 5th Edition, McGraw-Hill, New York, N.Y.

T. Takeda, M.A.Sozen, and N.N.Nielsen, 1970

“Reinforced Concrete Response to Simulated Earthquake, ”*J.Struct.Engrg.Div.*, ASCE, Vol.96, No.12, pp.2257-2273.

R. L. Taylor and J. C. Simo, 1985

“Bending and Membrane Elements for Analysis of Thick and Thin Shells, ” *Proceedings of the NUMETA 1985 Conference*, Swansea, Wales.



K. Terzaghi and R. B. Peck, 1967

*Soil Mechanics in Engineering Practice*, 2nd Edition, John Wiley&Sons, New York, N.Y.

S. Timoshenko and S. Woinowsky-Krieger, 1959

*Theory of Plates and Shells*, 2nd Edition, McGraw-Hill, New York, N.Y.

Y. K. Wen, 1976

“Method for Random Vibration of Hysteretic Systems, ” *Journal of the Engineering Mechanics Division*, ASCE, Vol. 102, No. EM2.

D. W. White and J. F. Hajjar, 1991

“Application of Second-Order Elastic Analysis in LRFD: Research to Practice, ” *Engineering Journal*, AISC, Vol. 28, No. 4, pp. 133–148.

E. L. Wilson, 1970

*SAP — A General Structural Analysis Program*, Report No. UC SESM 70-20, Structural Engineering Laboratory, University of California, Berkeley.

E. L. Wilson, 1972

*SOLID SAP — A Static Analysis Program for Three Dimensional Solid Structures*, Report No. UC SESM 71-19, Structural Engineering Laboratory, University of California, Berkeley.

E. L. Wilson, 1985

“A New Method of Dynamic Analysis for Linear and Non-Linear Systems, ” *Finite Elements in Analysis and Design*, Vol. 1, pp. 21–23.

E. L. Wilson, 1993

“An Efficient Computational Method for the Base Isolation and Energy Dissipation Analysis of Structural Systems, ” ATC17-1, *Proceedings of the Seminar on Seismic*

*Isolation, Passive Energy Dissipation, and Active Control*, Applied Technology Council, Redwood City, Calif.

E. L. Wilson, 1997

Three Dimensional Dynamic Analysis of Structures with Emphasis on Earthquake Engineering, Computers and Structures, Inc., Berkeley, Calif.

E. L. Wilson and M. R. Button, 1982

“Three Dimensional Dynamic Analysis for Multicomponent Earthquake Spectra, ” *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 10.

E. L. Wilson, A. Der Kiureghian, and E. P. Bayo, 1981

“A Replacement for the SRSS Method in Seismic Analysis, ” *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 9.

E. L. Wilson and I. J. Tetsuji, 1983

“An Eigensolution Strategy for Large Systems, ” *Computers and Structures*, Vol. 16.

E. L. Wilson, M. W. Yuan, and J. M. Dickens, 1982

“Dynamic Analysis by Direct Superposition of Ritz Vectors, ” *Earthquake Engineering and Structural Dynamics*, Vol. 10, pp. 813–823.

V. Zayas and S. Low, 1990

“A Simple Pendulum Technique for Achieving Seismic Isolation, ” *Earthquake Spectra*, Vol. 6, No. 2.

O. C. Zienkiewicz and R. L. Taylor, 1989

*The Finite Element Method*, 4th Edition, Vol. 1, McGraw-Hill, London.

O. C. Zienkiewicz and R. L. Taylor, 1991

*The Finite Element Method*, 4th Edition, Vol. 2, McGraw-Hill, London.

---

## 名词中英对照

---

Angle section	角形截面
Area	面
Beam	梁
Box section	箱形截面
Channel section	槽形截面
Clear length	净长度
Column	柱
Connections	连接
Connectivity	连接性
Coordinate angle	坐标角度
Coordinate directions	坐标方向
Coordinate systems	坐标系
Database file	数据库文件
Database section	数据库截面
Default orientation	默认方向
Degrees of freedom	自由度
Diaphragm constraint	隔板束缚
Double-angle section	双角形截面
End I	端部 I
End J	端部 J
End offsets	端部偏移
End releases	端部释放

Frame element	框架单元
General section	一般截面
Global	全局
Horizontal directions	水平方向
I section	工字形截面
Internal forces	内力
Joints	节点
Local	局部
Local coordinate system	局部坐标系
Longitudinal axis	纵轴
Mass	质量
Material properties	材料属性
Moment of inertia	惯性矩
Overview	概述
Pipe section	圆管截面
Rectangular section	矩形截面
Section properties	截面属性
Shape	形状
Shear area	剪切面积
Shear deformation	剪切变形
Shell element	壳单元
Solid circular section	实心圆形截面
Support faces	支座面
T section	T形截面
Torsional constant	扭转常数
Truss	桁架
Truss behavior	桁架行为
Typo graphical conventions	印刷约定
Upward direction	向上方向
Vertical	垂直
Vertical direction	垂直方向