

集成化的通用结构分析与设计软件

SAP2000®

案例教程



北京筑信达工程咨询有限公司
北京市古城西街 19 号研发主楼 4 层, 100043

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. (中文版权同属于北京筑信达工程咨询有限公司)。如果没有 CSI 和北京筑信达工程咨询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：

北京筑信达工程咨询有限公司

北京市古城西街 19 号研发主楼 4 层 100043

电话：86-10-6892 4600

传真：86-10-6892 4600 - 8

电子邮件：support@cisec.cn

网址：www.cisec.cn

北京筑信达工程咨询有限公司版权所有©, 2014.

说 明

本教程将通过具体的案例，介绍如何应用 SAP2000 处理一些典型问题。“模型概况”是对案例的简单介绍；“主要工作流程”是对常规建模过程的描述；“要点详解”是对相关一些软件应用技术的详细说明。本教程不涉及软件操作的详细讲解，相关内容请参考 SAP2000 联机帮助或相关使用手册。

我们将持续丰富案例种类。对于本教程的内容和需要增加的案例类型，欢迎您提出您的意见和建议，不胜感谢！联系方式如下：

技术热线：010-6892 4600 - 200

技术邮箱： support@cisec.cn

框架式汽轮机基础

本教程旨在指导读者在 SAP2000 中为框架式汽轮机基础创建模型，并完成相关的属性指定、加载、分析及后处理工作。在具体操作过程中，使读者熟悉并掌握 SAP2000 的诸多功能，如：稳态函数的定义、幅值-频率曲线的绘制、表格查询等等。

依本教程执行操作，可创建如图 0-1 中所示模型（左图），并绘制相应的幅值-频率曲线（右图）。

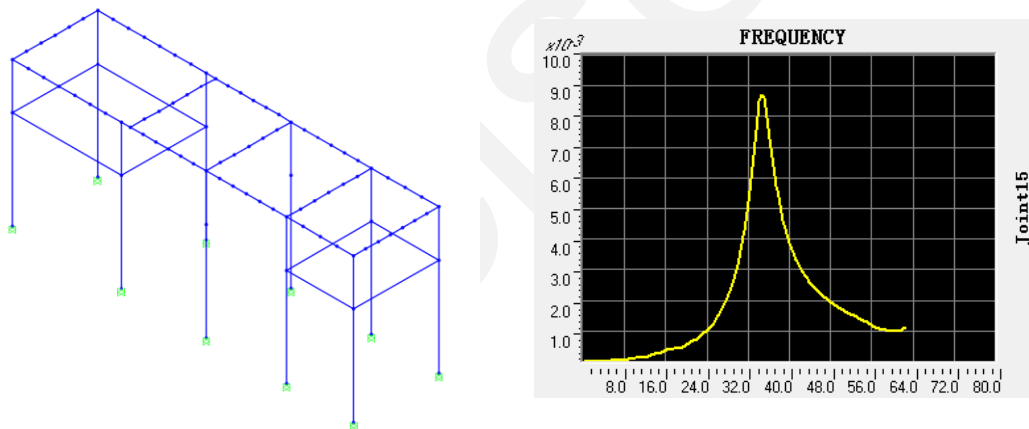


图 0-1 框架式汽轮机基础

模型概况

如图 0-1 所示，该框架式汽轮机基础主要由梁柱及顶板组成，柱底施加固支约束。结构分为中间层和操作层（顶层），基本布局如下：

- 纵向（Y 方向）总长度 40m：汽轮机段 12.65m；发电机段 7.85m。
- 横向（X 方向）长度 10m
- 中间层高度 11m；操作层高度 17m

计算模型采用的材料属性为 C30 混凝土和 HRB400 钢筋（纵筋和箍筋）。主要构件的截面尺寸如下：

- 柱子截面：0.8m x 2m；2m x 2m
- 中间层梁截面：0.8m x 1.2m
- 操作层纵梁截面：1.5m x 2.5m
- 操作层横梁截面：1m x 3m

机器工作转速 3000rpm，设备质量 50t，不同位置的扰力值分别为 10kN 和 20kN。对于抗震分析，反应谱工况的基本参数如下：

- 地震设防烈度：7 度
- 基本地震加速度值：0.10g
- 最大地震影响系数 $\alpha_{\max}=0.08$
- 场地类别：II 类
- 特征周期值：0.35s
- 周期折减系数：1.0
- 阻尼比：0.05

主要工作流程

步骤 1 几何建模

对于图 0-1 所示的框架模型，最快速便捷的建模方法即使用模型模板。首先，利用模型模板生成基本框架；然后，对基本框架进行适当的几何编辑，如删除、分割、延伸操作等。如图 1-1 所示：

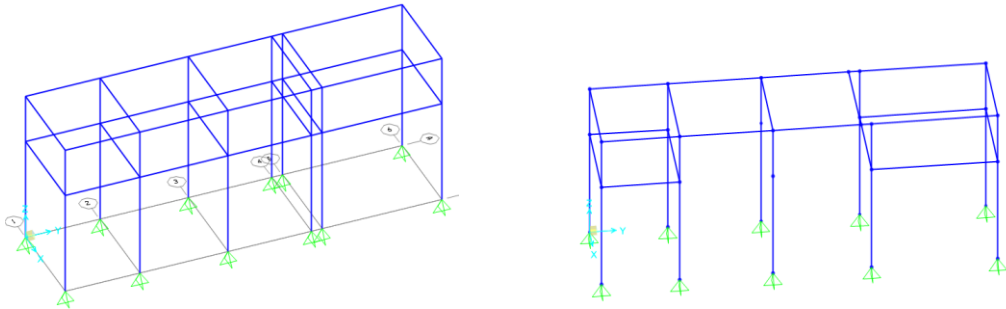


图 1-1 几何模型的快速创建及编辑

在采用模型模板快速建模过程中，用户同时可以定义材料属性和截面属性。对于布置机器设备的位置，需要人为进行框架分割以便生成节点。后续将该节点指定附加质量以及施加点荷载。另外，用户也可以根据需要对其它构件进行分割操作，利用生成的内部节点可以提取振动线位移。具体的分割操作方法将在本文后续章节中详细介绍，此处不再赘述。

步骤 2 指定属性

完成几何建模的操作后，用户应通过显示模型的拉伸视图，查看框架对象的空间定位（横截面方向）是否正确。对于需要定位错误的框架，应通过旋转局部轴进行调整，如图 1-2 所示：

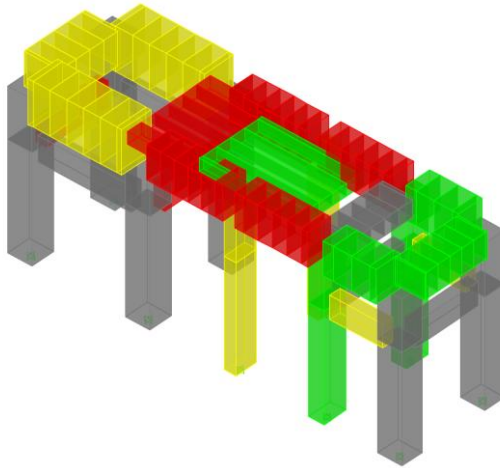


图 1-2 几何模型的拉伸视图

由于梁柱的截面尺寸很大，故需要对所有框架对象指定端部偏移，考虑刚性区域的影响。可以选择程序自动计算偏移量，也可以有用户直接输入偏移量。对于刚域系数的取值，应参考相关规范，通常取值为 0.3~0.6。

SAP2000 案例教程：框架式汽轮机基础

对机器设备安放位置处的节点需要指定节点附加质量，以考虑动力分析中的惯性力。而在静力分析中，则需要以点荷载的形式施加自重，荷载模式中的自重乘数不会考虑附加质量产生的自重。点荷载的大小即质量与重力加速度 g 的乘积。

步骤 3 施加荷载

对于承载力计算，用户需要分别施加永久荷载、可变荷载、偶然荷载、地震荷载等等。永久荷载包括单向永久荷载和双向永久荷载；可变荷载包括动力荷载和顶板活荷载；偶然荷载为短路力矩；地震荷载采用反应谱工况考虑。

永久荷载中的设备自重为节点附加质量与重力加速度 g 的乘积，需要以点荷载的方式施加。其它的永久荷载，如真空吸力、管道推力、温度荷载等，应根据工程实际或相关规范选取合适数值。具体加载方法可查看 SAP2000 相关的基本教程，此处不再赘述。

可变荷载中的动力荷载需要扰力值考虑动力系数和疲劳系数后加以确定。短路力矩为施加在不同纵梁上的等大方向的线荷载，具体数值以工程实际或相关规范而定。

地震荷载考虑反应谱工况，相关参数可参考前文内容，此处不再赘述。

对于荷载组合，需要考虑基本组合、偶然组合以及地震作用组合。对于多扰力作用的动力荷载，应首先对各个工况进行 SRSS 组合，然后将组合后的结果与其他工况进行组合。而对于双向永久荷载，也需要在荷载组合做特殊考虑。更多内容见本文后续的《要点详解》。

步骤 4 分析设置

首先，定义稳态函数描述扰力幅值随频率的变化曲线；然后，为每个扰力荷载定义单独的稳态工况。在稳态工况数据对话框中，指定施加的荷载模式和稳态函数，并指定频率步数据及滞回阻尼系数。如图 1-3 所示：

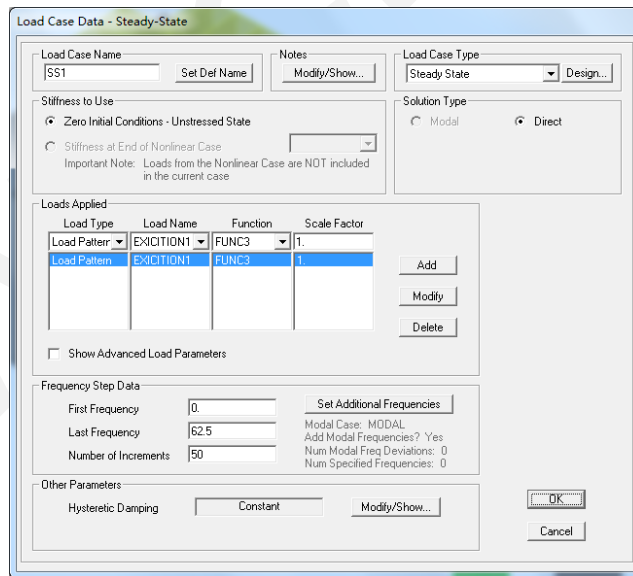


图 1-3 稳态工况数据对话框

步骤 5 结果查看

根据《动规》中的相关条文规定确定允许的振动线位移，采用 SAP200 的表格查询功能显示扰力作用点在各个稳态工况中不同频率点上的位移幅值，之后借助过滤和排序功能确定最大位移幅值及相应的频率点。基于此即可校核振动线位移，如图 1-4 所示：

	Joint Text	OutputCase Text	CaseType Text	StepType Text	StepNum Unitless	U1 in	U2 in	U3 in
	2	SS1	LinSteady	Mag at Freq	1	0	0	1.346728
	2	SS1	LinSteady	Mag at Freq	16.582167	0	0	.982137
	2	SS1	LinSteady	Mag at Freq	32.164333	0	0	.189539
	2	SS1	LinSteady	Mag at Freq	47.7465	0	0	.115902

Modify/Show Database Table Format

Format | Filter | Sort

Table Sorting - Sort by these Fields

Sort By: U3 Descending

Then By: Descending

Then By: Descending

Then By: Descending

Then By: Descending

Clear Sort

图 1-4 表格查询

然而，对于多扰力共同作用的情况，SAP2000 无法直接对各个稳态工况在每个频率点上
进行 SRSS 组合。因此，用户需要将稳态工况结果导出至 Excel 中做进一步后处理。

另外，多值工况可以使用 SAP2000 的函数绘制功能显示幅值-频率曲线。当然，对于多
扰力共同作用的情况，该方法也无能为力。此时，同样可以在 Excel 中绘制相关曲线。

以上内容的具体细节见本文后续的《要点详解》。

要点详解

1 几何建模

1.1 力学模型的简化

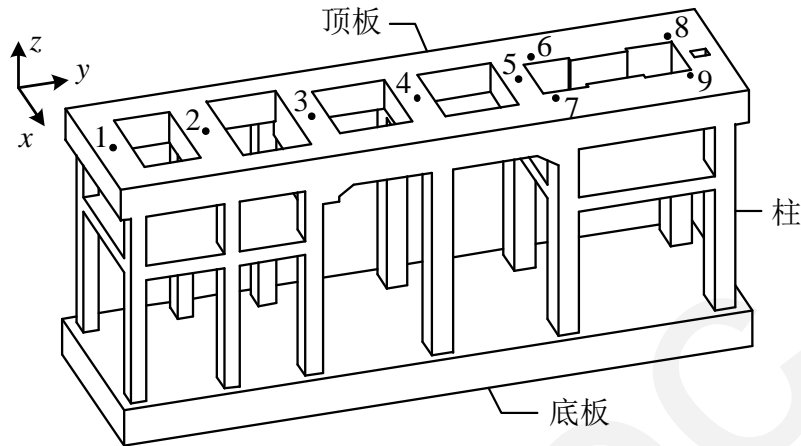


图 3-1-1 框架式汽轮机基础

实际工程中的框架式汽轮机基础由顶层梁板、柱和底板连接而成，如图 3-1-1 所示。通常，为了便于进行高效快捷的结构分析，用户需要将实际结构进行必要且合理的简化。力学模型的简化主要集中在以下三点：

1. 框架的轴向长度
 - a) 柱的计算长度，可取底部顶到横梁中心的距离。
 - b) 纵横梁的计算跨度，可取支座中心线间的距离。
2. 梁柱的刚性区域

当梁、柱截面较大或有加腋时，需要分别考虑梁柱的刚性区域长度。
3. 节点的布置位置
 - a) 横梁中点可设置节点，以便捕捉跨中的最大挠度值和振动线位移。
 - b) 纵梁在由扰力作用处应设置节点，以便指定节点附加质量及施加集中力或扰力荷载。

以上模型简化的基本原则和方法以及更多细节内容，可参阅《动力机器基础设计规范 GB 50040-96》（以下简称《动规》）附录 C.1.4，本文不再赘述。

1.2 不同力学模型的对比

从图 3-1-1 可以看出，框架式汽轮机基础的梁柱截面尺寸较大，甚至与构件的轴向长度为同一数量级，即梁柱并非理想的细长杆件。所以，简单地采用框架单元组成的力学模型进行分析，往往会引入一定的计算误差。基于此，某文献对不同单元类型的力学模型进行对比分析，分别采用：

1. 一般梁单元模型：该类型的梁单元不考虑剪切变形，与工程师常规的手算或材料力学及结构力学的基本假定相同。
2. Timoshenko 梁单元模型：该类型的梁单元采用剪应力不均匀分布的修正系数来考虑剪切变形。对于深梁或剪切变形显著的构件，应适当考虑构件的剪切变形，本案例中的梁柱即属于此类。

3. 三维实体单元模型：该模型可以更好地考虑结构真实的几何形状，但单元数量更多。如图 3-1-2 所示。

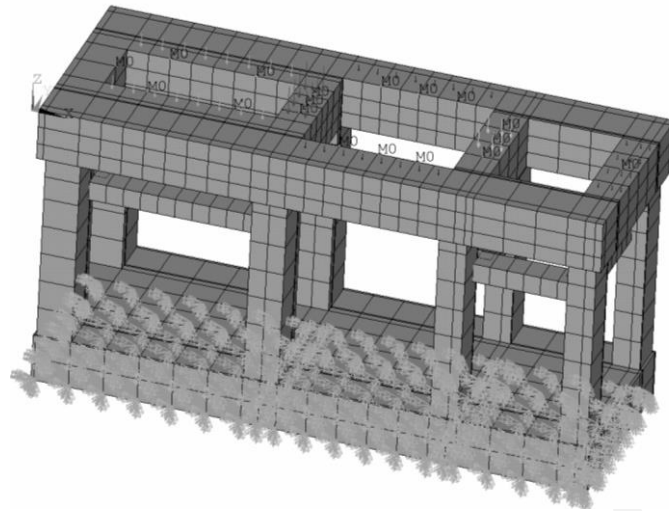


图 3-1-2 汽轮机基础的三维实体单元模型

采用不同力学模型计算的结构前 6 阶自振频率如表 3-1-1 所示。从计算结果看，Timoshenko 梁单元模型的自振频率略小于一般梁单元模型，说明前者的结构刚度也略小于后者。该结论很容易从概念上加以验证：一般梁单元不考虑剪切变形（即无剪切变形或剪切变形为零），故一般梁单元的剪切刚度为无穷大，结构刚度自然也会较大。而实体单元模型的自振频率更低，说明实体单元模型的结构刚度更小且质量分布更加均匀。

表 3-1-1 不同力学模型的自振频率对比

自振频率 (Hz)	1	2	3	4	5	6
一般梁单元模型	3.098	3.575	4.280	9.446	13.22	18.380
Timoshenko 梁单元模型	3.009	3.410	4.102	8.686	10.811	16.365
实体单元模型	2.927	3.238	4.048	12.719	12.765	15.725

另外，该文献还对程序结果与试验/测试结果进行对比，如表 3-1-2 所示。

表 3-1-2 程序结果 vs 试验/测试结果

方法	基频 (Hz)	最大线位移 (微米)	最大线速度 (mm/s)
普通梁单元模型	3.098	9.845	1.689
考虑剪切影响的梁单元模型	3.009	9.865	1.272
实体单元模型	2.927	7.758	1.189
模型试验值推算原型结果	2.73	9.40	
原型测试结果	2.63	7.59	

从表中数据可以看出，实体单元模型的计算结果明显与实测结果更接近！主要原因在于：只有实体单元模型能考虑结构真实的几何形状！尤其是这种非细长杆件的梁柱构件，简化为梁单元模型进行分析必然引入较大的误差。当然，采用实体单元模型也有一些缺点，如：

1. 单元数量庞大造成计算量更大，求解时间更长。

SAP2000 案例教程：框架式汽轮机基础

2. 非杆件的实体单元模型无法进行结构设计。目前的结构设计依赖于构件的截面内力，而实体单元无法直接输出截面内力。虽然通过截面切割可以人为地合成截面内力，但仍然无法应用程序进行自动化的结构设计。
3. 实体模型的创建过于繁琐，网格剖分也更加复杂。同时，荷载施加、属性指定、结果显示等操作都远远不及框架单元方便快捷！

因此，本文仍采用框架单元创建框架式汽轮机基础的模型。如果条件允许且用户熟悉三维实体建模，个人建议：可以尝试采用实体单元模型对框架单元模型进行校核，以确定简化模型的计算精度。

1.3 设备刚度的考虑

在对汽机基础进行动力分析时，汽轮机转子与基础之间的设备支座、连接构造等可能会对基础的动力响应产生较大的影响。基于此，转子扰力的作用点可取在转子支承处或基础顶面，具体如下：

1. 考虑设备刚度：扰力作用于转子支承处。目前较常用的做法是：在基础顶面设备作用处设置无质量、弹性模量与钢筋混凝土相同且具有一定厚度的刚性块，在一定程度上模拟设备刚度的影响。
2. 不考虑设备刚度：扰力作用于基础顶面。

参考相关文献的数据对比（如图 3-1-3 所示）可以看出，两种设备刚度的处理方法得到的动力分析结果很接近。通常，设备刚度越大，两种方法的计算结果越接近；相反，如果设备刚度很小，对基础的动力响应的影响也会加大。

因此，工程上更多地采用方法 2，该方法计算方便，且偏于安全。本文同样采用该方法。

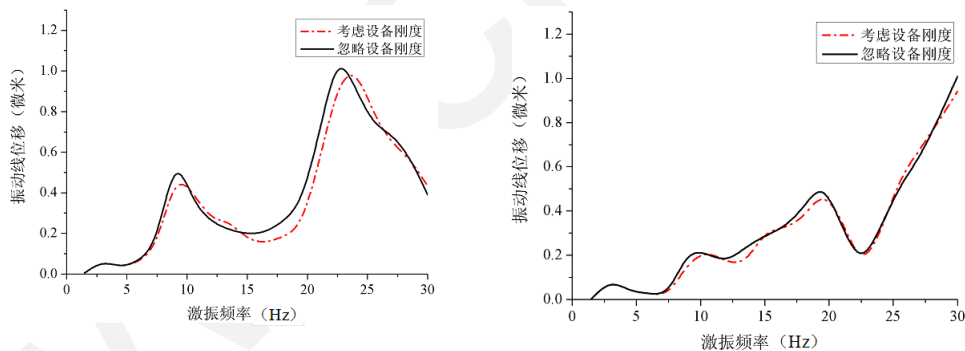


图 3-1-3 设备刚度对节点振型线位移的影响对比

1.4 模型模板

当采用框架单元创建框架式汽轮机基础的模型时，通常可以借助模型模板快速生成基本的框架模型，然后再通过适当的几何编辑进一步完善模型。

三维框架的模型模板如图 3-1-4 所示，只需输入楼层数和楼层高度、两个方向的开间数及开间宽度，即可快速生成规则的框架模型。而对于变高度楼层或变宽度开间，也可以使用自定义轴网间距加以实现。

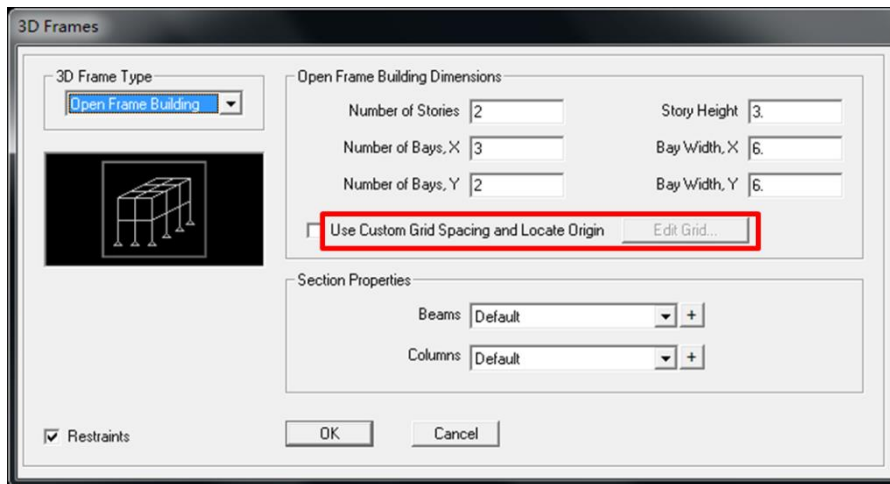


图 3-1-4 三维框架的模型模板

1.5 几何编辑

通过模型模板快速生成的框架模型往往并不能满足用户要求。此时，用户需要对基本的框架模型做进一步的几何编辑，如：删除、添加、截断、分割等等。基本的几何编辑功能都比较简单，这里主要介绍两种操作：分割框架、延伸及截断框架。

通过分割框架对象，单个框架可转变为多个更短的框架。借助连接相邻框架的节点，用户可以指定集中质量、输出节点位移、施加点荷载、约束节点自由度等等。本案例需要对纵横梁进行分割生成内部节点，用于指定设备质量以及施加点荷载和扰力荷载。

常见的框架分割方法如图 3-1-5 所示：

1. 直接指定分段数 N 以及最后一段与第一段的比值 r
 - a) $r=1$ ：等距离分割
 - b) $r>1$ ：从起点至终点的各段长度均匀（线性）增加。假设框架总长为 L ，各段长度依次为 L_n 。则有：
 - i. 第一段长度 $L = \frac{(1+r)L_1}{2} N \rightarrow L_1 = \frac{2L}{N(1+r)}$
 - ii. 后续各段长度依次增加 $\Delta L = \frac{(r-1)L_1}{N-1}$
 - c) $0<r<1$ ：从终点至起点的各段长度均匀（线性）增加，对 r 取倒数后采用 b) 中公式即可。
2. 在选择点、框架、面的边、体的边与框架的交点处进行分割
3. 指定分割点与框架起点的距离。该方法一次只能将一个框架分割为两个框架，指定距离可以使用：
 - a) 绝对距离：分割点与框架起点的距离
 - b) 相对距离：分割点与框架起点的距离/框架总长 L
4. 使用坐标平面进行切割。该方法一次只能将一个框架分割为两个框架，坐标平面可以使用：
 - a) XY 平面+Z 坐标
 - b) YZ 平面+X 坐标
 - c) ZX 平面+Y 坐标

5. 使用当前坐标系中可见的轴网平面进行分割。该方法依次可将一个框架分割为多个框架，轴网平面可以使用：
- XY 平面+可见的 Z 坐标
 - YZ 平面+可见的 X 坐标
 - ZX 平面+可见的 Y 坐标

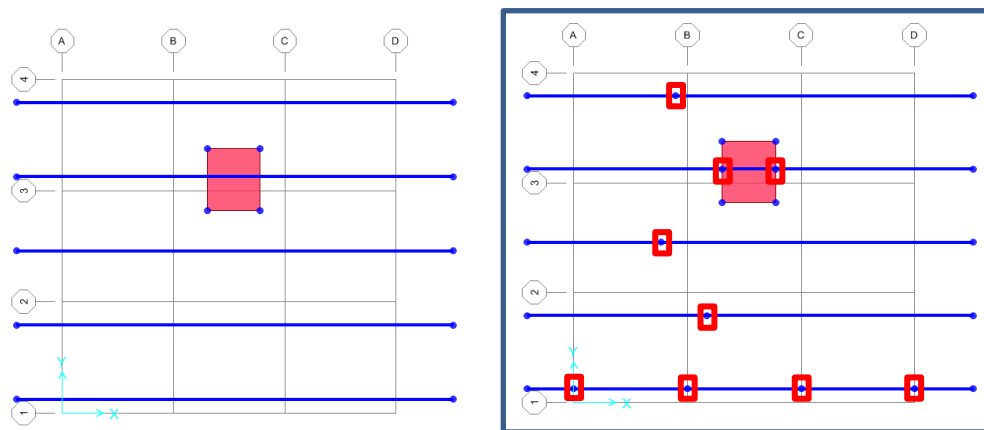


图 3-1-5 框架分割方法示意图

另外，用户还可以对框架进行延伸和截断，该操作需要注意依据固定的顺序选择对象。以延伸框架为例（如图 3-1-6 所示），首先选择需要延伸的框架，然后选择用于确定延伸边界的框架，最后选择用于确定延伸方向的节点。完成以上三个选择操作后点击框架延伸的命令，结果如右图所示。截断框架的操作与延伸框架类似，此处不再赘述，请读者自行练习。

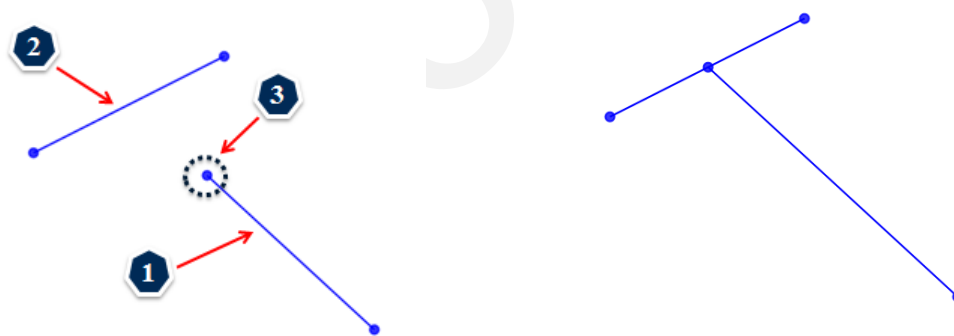


图 3-1-6 框架延伸方法示意图

2 指定属性

2.1 旋转局部轴

任何类型的单元都具有局部的单元坐标系统，也称为单元局部轴。单元局部轴的用途很广，诸如：

1. 定义材料属性：主要针对（正交）各向异性材料定义不同方向的力学性能参数。另外，在为分层壳指定布筋方向时也需要参考壳单元的局部坐标轴。
2. 施加荷载：节点荷载、框架荷载、均布面荷载等均可使用节点或单元局部轴在特殊方向上施加荷载。
3. 指定属性：节点约束、连接属性、插入点、线弹簧、面弹簧等均可使用节点或单元局部轴在特殊方向上指定属性。
4. 输出结果：所有单元结果的输出皆参考单元局部轴，如框架单元的内力、应力，壳单元的内力、应力等。节点位移的输出也参考节点的局部轴。

另外，框架单元的局部轴还可以用于空间定位，即在框架轴向固定的前提下，控制横截面方向。框架的默认局部轴方向如下：

1. 局部 1 轴：框架起点 I→终点 J，即轴向。如有需要，可对局部 1 轴的方向进行反转，此时的局部 2、3 轴也会随之改变方向。
2. 局部 2 轴：与局部 1 轴垂直且与+Z 轴的夹角小于 90° ；若局部 1 轴平行于 Z 轴，则局部 2 轴为+X 方向。
3. 局部 3 轴：由局部 1 轴和局部 2 轴通过右手法则确定。

根据需要，用户可对框架的局部轴进行旋转。基本方法即直接指定旋转角度，通过右手法则确定角度的正负值，如图 3-1-7 所示：

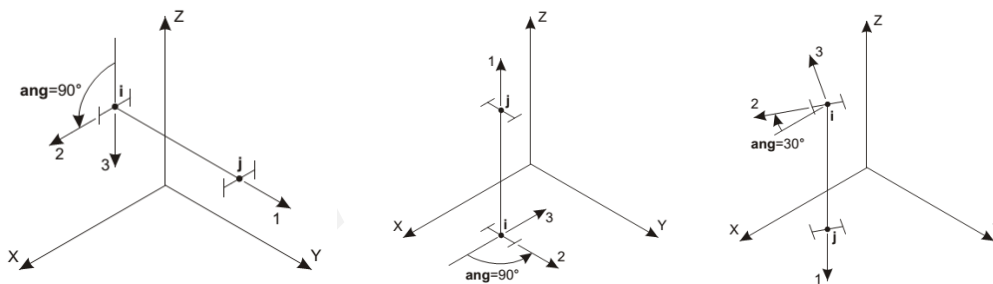


图 3-2-1 旋转局部轴的基本方法

旋转局部轴的高级方法即指定局部平面和平面参考向量，如图 3-1-8 左图所示。选择不同的局部平面和平面参考向量也可以确定相同的坐标轴方向，如图 3-1-8 右图所示。有关旋转局部轴的更多内容，请参考《CSI 分析参考手册》相关章节，此处不再赘述。

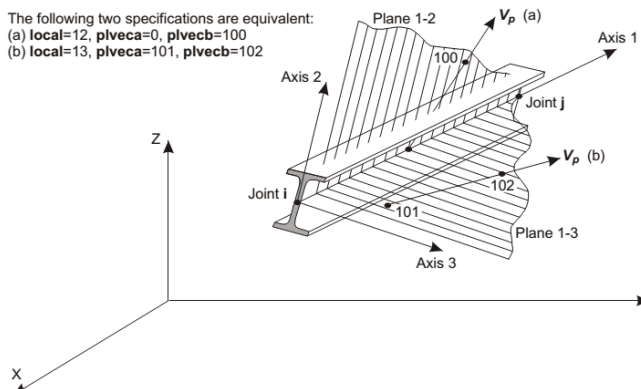


图 3-2-2 旋转局部轴的高级方法

2.2 截面刚度修正

框架单元的截面刚度包括：轴向刚度、扭转刚度、弯曲刚度以及剪切刚度，如表 3-1-3 所示。值得一提的是，在 SAP2000 中程序通过对横截面面积进行折减考虑剪应力不均匀分布的修正系数 k ，故剪切刚度为剪切模量与剪切面积的乘积。

表 3-2-1 框架截面刚度

	拉压变形	扭转变形	弯曲变形	剪切变形
截面刚度	$K = EA$	$K = GJ$	$K = EI_z$	$K = \frac{GA}{k} = GA^*$

通常，用户可以根据需要对以上刚度进行折减或放大，如连梁的刚度折减、楼面梁的刚度放大等。默认情况下，所有的刚度修正系数均为 1，即所有框架单元均为考虑剪切变形的 Timoshenko 梁单元。如需忽略框架单元的剪切变形，可指定局部 2 方向和局部 3 方向的抗剪面积的修正系数为 0。此时的框架单元为不考虑剪切变形的一般梁单元。

注意：此处将抗剪面积的修正系数指定为 0，并非设置框架的抗剪刚度为零（即无抗剪刚度）！恰恰相反，0 值即设置框架抗剪刚度为无穷大，即忽略剪切变形。

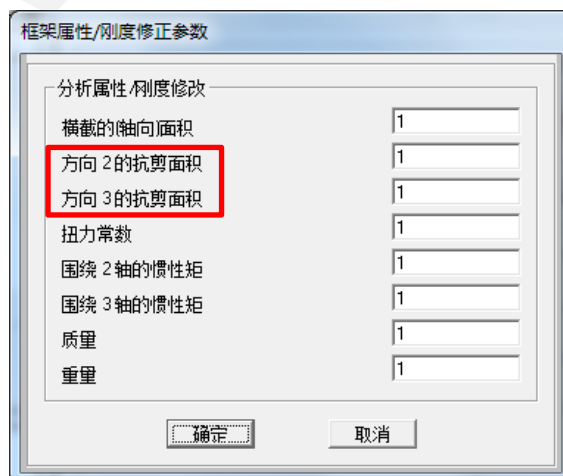


图 3-2-3 截面刚度修正系数

2.3 端部偏移

根据《混凝土结构设计规范 GB 50010-2010》的相关条文规定：当钢筋混凝土梁柱构件截面尺寸相对较大时，梁柱交汇点会形成相对的刚性节点区域。刚域尺寸的合力确定，会在一定程度上影响结构整体分析的精度。本文 1.1 章节指出框架式汽轮机基础的梁柱截面尺寸相对很大，故有必要考虑刚性区域的影响。

在 SAP2000 中，通过对框架指定端部偏移考虑构件的刚性区域，如图 3-2-4 所示。端部偏移长度可由程序自动确定或用户直接输入，而刚性区域的长度在由刚域系数控制。刚域系数的取值范围为 0~1.0，故框架的柔性长度介于净长度和总长度之间。具体的刚域长度取值可参考《动规》附录 C 确定。

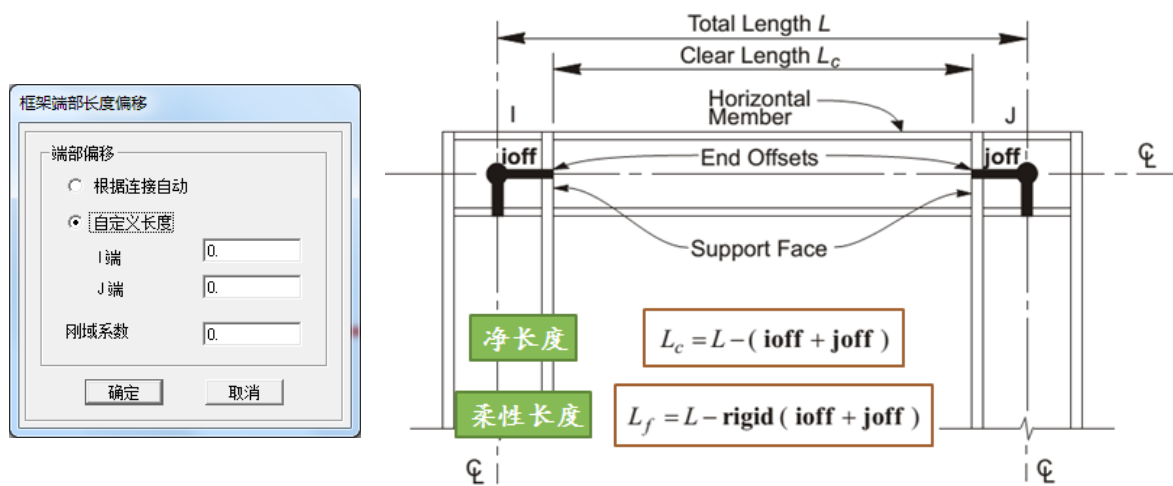


图 3-2-4 框架的刚性区域示意图

需要注意的是，刚域长度范围内的框架抗弯和抗剪刚度为无穷大，而抗扭刚度和轴向刚度则则是柔性的，即与框架其他部位相同。

2.4 节点附加质量

从模态分析、反应谱分析到时程分析、稳态分析，质量在各种动力分析中都是不可或缺的组成部分，它扮演着为结构提供惯性力的重要角色。而在本案例中，汽轮机基础的各个构件的质量由材料属性中的材料密度提供，但在转子扰力作用点处则需要以节点附加质量的形式考虑设备质量。对节点质点附加质量的方法有三种，如图 3-2-5 所示：

1. 直接指定节点附加质量。
2. 指定节点附加重量，程序内部将其除以重力加速度 g 后得到节点附加质量。
3. 指定体积和材料属性，程序内部使用材料密度乘以体积后得到节点附加质量。

在这里，需要注意两点：质量的方向和质量惯性矩。从物理上讲，节点质量必然在三个方向上都存在，且每个方向的质量都相等。但是，有时为了提高计算效率也为了反映结构最重要的动力学特性，用户可以根据需要只考虑两个甚至一个方向的节点质量。例如：在高层建筑结构的抗震分析中，通常只对结构的侧向振动最为关心，竖直方向的振动则可以忽略。故可以只设置结构的侧向质量（即 X、Y 方向的质量），而不考虑竖直方向的质量（即 Z 方向的质量）。在本案例中考虑三个方向的质量。

SAP2000 案例教程：框架式汽轮机基础

另外，对于节点附加质量，除了可以指定集中质量外，也可以根据需要考虑节点的质量惯性矩。尤其当设备的体积很大时，其转动效应往往严重影响结构的动力响应。在本案例中不考虑节点的质量惯性矩。



图 3-2-5 指定节点质量

3 施加荷载

3.1 模态分析

模态分析作为结构动力学的基本方法之一，其主要用途包括两点：

1. 反映结构的动力学特性，包括结构的周期、频率、振型等。对于这些结构的动力学特性，工程师可以用于评估结构的动力性能或指导结构设计。例如：可以通过调整结构的质量或刚度分布改变结构基本周期，避免在动力荷载作用下的结构共振。
2. 为后续的基于振型分解法的动力分析的提供必要的周期和振型数据，基于振型分解法的动力分析包括：反应谱分析和振型叠加时程分析。对于反应谱分析，模态分析还可以提供用于抗震分析的振型参与系数，振型质量参与系数等等。

SAP2000 可以使用两种模态分析方法：特征向量法和李兹向量法。对于上述的用途 1，必须使用特征向量法！特征向量法获取的结构周期和振型只与结构的刚度及质量分布有关，与动力荷载的空间分布无关。因此，特征向量法能反映结构固有的动力学特性。

李兹向量法获取的结构周期和振型除与结构的刚度及质量分布有关外，还与动力荷载的空间分布有关。因此，李兹向量法并不能反映结构固有的动力学特性。但是，也正是因为李兹向量法可以反映动力荷载的空间分布，所以该方法在用于上述的用途 2 时，其计算效率和计算精度较特征向量法更加出色，建议优先使用。

本案例采用特征向量法进行模态分析，侧重于掌握结构的动力学特性。后续的稳态分析并非基于振型分解法，不过反应谱分析还是基于振型分解法的。因此，读者可以根据需要为反应谱分析再额外添加一个采用李兹向量法的模态分析。

对于框架式汽轮机基础的模态分析，《动规》附录 C.1.2 规定：应算出 1.4 倍工作转速内的全部特征对。以工作转速 3000rpm 的汽轮机为例，则需要计算 0~70Hz 频率范围内的结构自振周期。如图 3-1 所示：

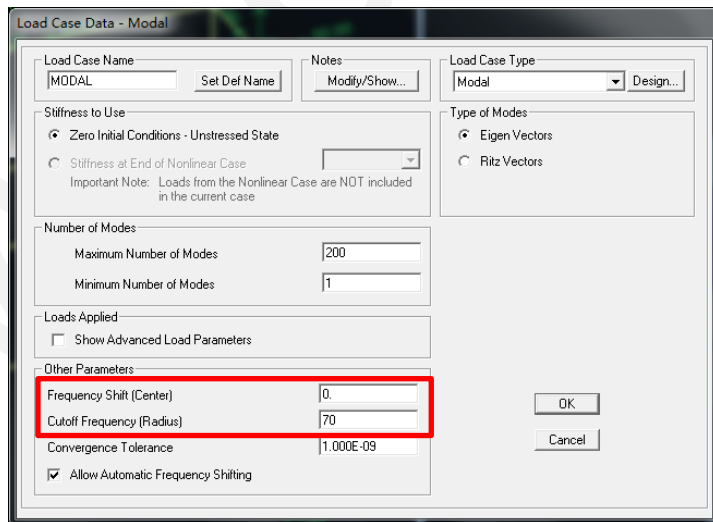


图 3-3-1 模态工况数据对话框

3.2 扰力值

汽轮机基础在设备安装位置处将承受由转子偏心引起的简谐激振力，工程上也成为扰力。通常，扰力值应由机器制造厂提供；当缺乏资料时，也可以按规范取值。

SAP2000 案例教程：框架式汽轮机基础

根据《动规》5.2.2 规定，工作转速 3000rpm 下竖向、横向的扰力值为 0.2 倍的机器转子重力，纵向的扰力值为 0.1 倍的机器转子重力。另外，根据《动规》5.2.5 规定，任意转速下的扰力值与转速的平方成正比，本文后续将依此创建用于稳态分析的稳态函数，描述扰力幅值随频率的变化曲线。

3.3 承载力计算

对于汽轮机基础的承载力计算，相关的荷载种类以及相应的分项系数，可参考《动规》5.3.1 中的规定，如图 3-3-2 所示。

荷载种类	荷载名称	分项系数
永久荷载	基础自重、机器自重、安装在基础上的其他设备自重、基础上的填土重、汽缸膨胀力、凝汽器真空吸力、温差产生的作用力	1.2
可变荷载	动力荷载(或当量荷载)、顶板活荷载	1.4
偶然荷载	短路力矩	1.0
地震荷载	地震作用	1.3

图 3-3-2 承载力计算的荷载分类

对于永久荷载，根据荷载的作用方式和特点又可细分为两类：

1. 单向永久荷载：各种自重、填土重、汽缸膨胀力、真空吸力。
2. 双向永久荷载：管道推力、温度荷载。

单向永久荷载在荷载组合中无需考虑荷载方向，而双向永久荷载则需要考虑荷载的两个方向分别进行荷载组合。

对于可变荷载中的动力荷载，《动规》5.3.3 规定：可取计算振动线位移时所取扰力的 4 倍，并应考虑材料疲劳的影响，对钢筋混凝土构件的疲劳影响系数可取 2.0。即将扰力值放大 8 倍后用于计算动内力。对于多扰力共同作用，根据《动规》5.3.10 规定可采用 SRSS 组合计算动内力。

对于顶板活荷载，《动规》5.3.12 规定：顶板承载力计算应考虑设备安装时的活荷载，活荷载值应根据工艺要求确定，宜采用 20~30kPa。

短路荷载是由于发电机内、外部相间短路而产生的荷载。该荷载为作用在支承发电机的纵梁上的线荷载，以等大反向的方式进行施加，故也称为短路力矩。

地震荷载以反应谱分析进行施加。首先，需要定义反应谱曲线，输入相关的参数值，如地震影响系数最大值、场地特征周期、周期折减系数、函数阻尼比等等，程序即可实时显示反应谱曲线的形状，如图 3-3-3 所示。然后，定义反应谱工况，指定地震方向、重力加速度值、振型组合方法和方向组合方法、振型阻尼等等。以上皆为常规的结构分析内容，在此不再赘述。

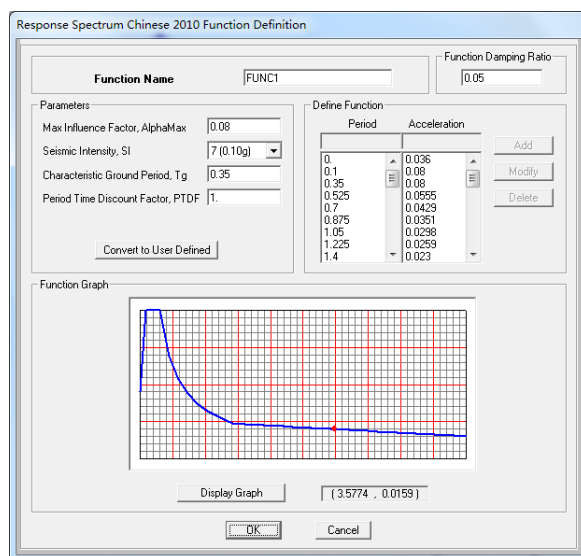


图 3-3-3 反应谱曲线的定义

3.4 荷载组合

根据《动规》5.3.14 规定，基础的承载力计算应采用三种荷载组合：

1. 基本组合：永久荷载+动力荷载，动力荷载的组合系数取 1.0。
2. 偶然组合：永久荷载+动力荷载+短路力矩，动力荷载的组合系数取 0.25，短路力矩的组合系数取 1.0。
3. 地震作用组合：永久荷载+动力荷载+地震作用，动力荷载的组合系数取 0.25，地震作用的组合系数取 1.0。

另外，对于永久荷载需要区别单向和双向永久荷载，双向永久荷载在荷载组合中需要考虑±。因此，需要考虑的荷载组合如下：

- 基本组合：

$$1.2(DL_1^S + DL_2^S + \dots \pm DL_1^D \pm DL_2^D \pm \dots) + 1.4 \times 4.0 \times 2.0 DY + 1.4 \times 0.7 LL$$

- 偶然组合：

$$1.2(DL_1^S + DL_2^S + \dots \pm DL_1^D \pm DL_2^D \pm \dots) + 1.4 \times 0.25 \times 4.0 \times 2.0 DY + 1.4 \times 0.7 LL + 2.0 SL$$

- 地震作用组合：

$$1.2(DL_1^S + DL_2^S + \dots \pm DL_1^D \pm DL_2^D \pm \dots) + 1.4 \times 0.25 \times 4.0 \times 2.0 DY + 1.4 \times 0.7 LL \pm 1.3 EL$$

其中， DL_n^S 为单向永久荷载； DL_n^D 为双向永久荷载

DY 为动力荷载； LL 为活荷载

SL 为短路荷载； EL 为地震荷载

对于多扰力共同作用，根据《动规》5.3.10 规定可采用 SRSS 组合计算动内力。因此，应首先对各个扰力荷载进行 SRSS 类型的荷载组合，得到 DY 后再与其它和进行上述组合。

4 分析设置

4.1 稳态分析

稳态动力学分析属于频域分析，用于求解结构在随时间简谐变化的激励作用下的稳态响应。稳态分析具有以下特点：

1. 所有荷载均为随时间按余弦（或正弦）函数变化的周期荷载，也称为简谐荷载。稳态分析无法计算结构在任意周期荷载作用下的动力响应。
2. 所有荷载必须为同频荷载，且程序只能在若干个离散的频率点处计算结构的动力响应。稳态分析无法计算结构在异频荷载作用下的动力响应。
3. 稳态分析只能计算结构的稳态受迫振动，不能计算激励作用初期的瞬态振动。瞬态振动往往会因结构阻尼的存在而逐渐消失。
4. 稳态分析为线性分析，不能考虑任何的非线性因素，如弹塑性、P-Delta 效应、大位移、单拉单压杆等等。

稳态分析的结果能预测结构的持续动力特性，从而克服共振、疲劳及其它受迫振动引起的不良影响。因此，稳态分析常用于求解建筑物中的旋转机械对建筑物的影响，或者是运转中的发动机对车身的影响。

4.2 简谐荷载

在稳态分析中，可以施加点荷载、线荷载、面荷载以及位移荷载。所有荷载均为简谐荷载，完整的简谐荷载由三部分组成：

1. 幅值：指荷载的最大值，可随频率发生变化。
2. 相位角：指荷载滞后或超前于参考时间的量度。
3. 频率范围：指荷载的频率变化范围。

以上简谐荷载的三个组成部分都可以在 SAP2000 中实现：荷载幅值通过稳态函数描述；荷载的相位角可以直接指定；荷载的频率范围通过指定频率步实现。

4.2.1 稳态函数

稳态函数即荷载幅值随频率变化的函数。如本文 3.2 节所述，任意转速下的扰力值与转速的平方成正比，即：

5.2.5 计算振动线位移时，任意转速的扰力，可按下列式计算：

$$P_{\alpha} = P_{gl} \left(\frac{n_0}{n} \right)^2 \quad (5.2.5)$$

式中 P_{α} ——任意转速的扰力(kN)；
 n_0 ——任意转速(r/min)。

因此，在对设备位置处的节点施加扰力值 P_{gl} 后，仍需定义用于稳态分析的稳态函数，描述不同转速下的扰力值变化曲线，即下式：

$$f(n_0) = \left(\frac{n_0}{3000} \right)^2$$

稳态函数只能通过离散的数据点进行定义，因此需要将上述解析表达式以离散数据点进行拟合。建议在 Excel 电子表格中生成离散数据并保存至文本文件中，之后通过文件导入 SAP2000 中。

对于稳态函数的定义需要注意以下几点：

1. 相邻离散点的频率（或转速）间距不宜过大。程序在分析过程中会根据频率步中指定的频率点在频率函数上进行线性插值，以确定荷载幅值的大小。所以，过大的频率间距将引起显著的插值误差。当然，对于分段线性的稳态函数不存在上述问题。
2. 频率函数的频率范围不宜太小，至少应包含频率步中指定的所有频率点。否则，对于超出频率范围的频率点所对应的荷载幅值，程序皆取为常数（即频率范围外的稳态函数曲线为水平线）。如图 3-4-1 所示，稳态函数的转速范围为 0~4000rpm，而扰力的转速范围为 0~3750rpm。
3. 对于通过文件导入的稳态函数，包含数据点的文件不能被删除，否则程序将无法定位该文件，也无法定义反应谱函数。此时，可以将稳态函数的数据转换为用户自定义，直接保存于模型数据库。

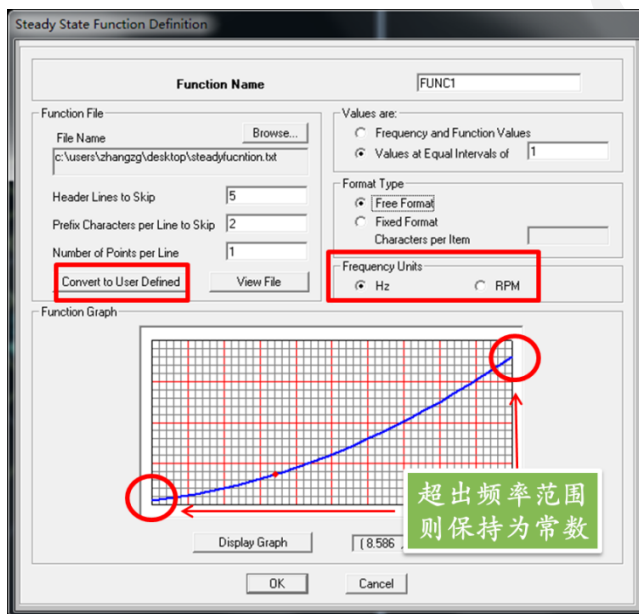


图 3-4-1 稳态函数定义

4.2.2 相位角

相位角用于指定荷载超前或滞后于参考时间的量度，超前或滞后的时间=相位角/圆频率。正的相位角代表超前参考时间，负的相位角代表滞后参考时间。

如果多个同步荷载共同作用，则没有相位差，此时各个荷载对应的相位角皆为 0。但是，如果多个异步荷载共同作用，则必须为各个荷载指定对应的相位角，以反映各个不同荷载间的相位差对结构动力响应的影响。

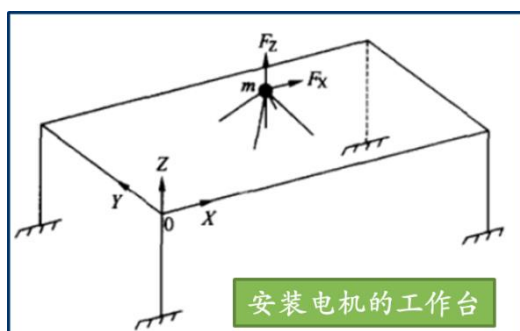


图 3-4-2 例题模型

以图 3-4-2 中的简单模型为例，进一步阐述相位角的概念。假设电机绕-Y 轴转动，荷载幅值 $F_0 = m\omega^2 e$ (e 为转子偏心距)。则 X、Z 方向的分力为：

- $F_X = F_0 \cos(\omega t)$
- $F_Z = F_0 \sin(\omega t) = F_0 \cos(\omega t - \frac{\pi}{2})$

从以上二式可以看到，分力 F_Z 滞后分力 F_X 的相位角为 $\pi/2=90^\circ$ 。因此，如果在同一个稳态工况中同时施加这两个分力，必须指定相应的相位角，如图 3-4-3 所示。注意：对于参考时间的选取是任意的，即也可以指定 F_Z 的相位角为 0，而 F_X 的相位角为 90° 。

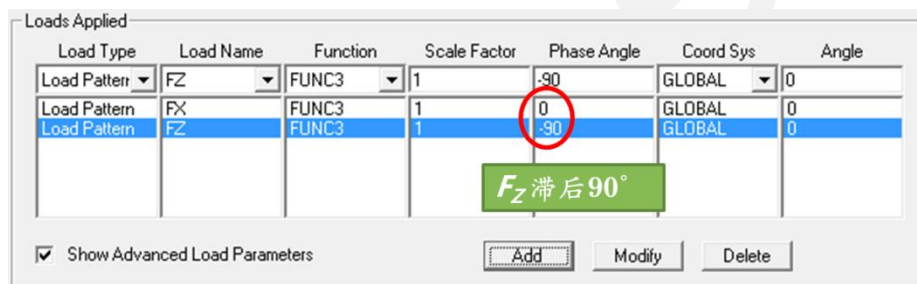


图 3-4-3 指定简谐荷载的相位角

根据《动规》5.2.1 规定：框架式基础的动力计算，应按振动线位移控制。计算振动线位移时，可按本规范附录 C 采用空间多自由度体系的计算方法。一般情况下，只需计算扰力作用点的竖向振动位移。本案例无需考虑水平分力与竖直分力间的相位差，只施加竖直分力即可。

4.2.3 频率步

稳态分析只能在各个离散的频率点上计算结构的稳态动力响应，离散的频率点通过频率步进行指定。指定频率步的方法包括：

1. 等间隔的频率范围 $f_1 \sim f_2$ 。其中， $f_1 \geq 0$ ； $f_2 \geq f_1$ ； $n > 0$ ，故离散的频率点依次为：

$$f_1, f_1 + \Delta f, f_1 + 2\Delta f, \dots, f_2, \Delta f = (f_2 - f_1) / n.$$

2. 介于 $f_1 \sim f_2$ 之间的模态频率
3. 介于 $f_1 \sim f_2$ 之间的模态频率偏差
4. 直接指定介于 $f_1 \sim f_2$ 之间的频率值

模态频率及偏差主要用于捕捉结构的共振效应。通常，当荷载的频率与结构自振频率相同或接近时，结构的动力响应最显著！

《动规》5.2.3 规定：计算振动线位移时，宜取在工作转速±25%范围内的最大振动线位移作为工作转速时的计算振动线位移。因此，对于工作转速为 3000rpm 的机器，其频率步的取值范围为 0~62.5Hz，如图 3-4-4 所示：

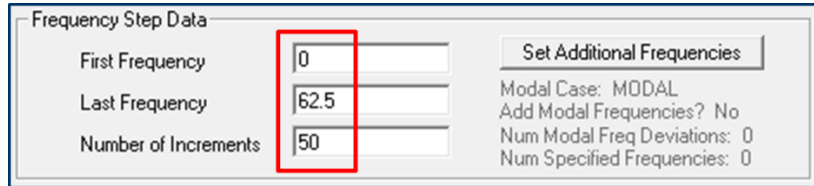


图 3-4-4 指定频率步

4.3 多扰力共同作用

当多扰力共同作用时，如果在同一个稳态工况中同时施加多个扰力，则必须明确考虑各个荷载间的相位差。而在实际工程中，各个机器虽非同步运行但各个机器间准确的相位差也很难控制。因此，工程上通常对各个扰力单独进行稳态分析，然后对各个频率点上的结构响应进行 SRSS 组合。《动规》5.2.7 的规定如下：

5.2.7 当有 m 个扰力作用时，质点 i 的振动线位移，可按下列式计算：

$$A_i = \sqrt{\sum_{k=1}^m (A_{ik})^2} \quad (5.2.7)$$

式中 A_i ——质点 i 的振动线位移(m)；

A_{ik} ——第 k 个扰力对质点 i 产生的振动线位移(m)。

然而，对各个扰力单独作用的稳态工况直接进行 SRSS 组合是无法满足规范要求的。因为 SAP2000 中的 SRSS 组合是对各个稳态工况的包络值进行组合，而非对各个频率点上的动力响应进行组合。既然无法获取各个频率点对应的组合值，必然也无法绘制相应的幅值-频率曲线。解决该问题，需要将 SAP2000 中的稳态工况分析结果导出至 Excel 中做进一步的后处理，本文在后续章节中将详细介绍。

4.4 滞回阻尼

对于结构阻尼的考虑，反应谱分析和基于振型叠加法的时程分析使用振型阻尼比；直接积分的时程分析使用瑞利阻尼。这两种阻尼形式皆为粘滞阻尼，即速度相关型阻尼，阻尼力与速度成正比且与速度方向相反。而稳态分析和功率谱密度分析使用滞回阻尼，即位移相关型阻尼，阻尼力与位移成正比且与位移方向相反。

滞回阻尼矩阵类似于瑞利阻尼矩阵，可由刚度矩阵和质量矩阵的线性组合表示。只是刚度比例系数和质量比例系数可以与频率相关，如下式：

$$D(\omega) = d_K(\omega)K + d_M(\omega)M$$

对于工程上常用的结构振型阻尼比 $d(\omega)$ ，也可以使用刚度比例系数和质量比例系数进行定义，具体转换公式如下：

$$d_M(\omega) = 0; \quad d_K(\omega) = 2d(\omega)$$

SAP2000 案例教程：框架式汽轮机基础

《动规》C.1.3 规定：结构阻尼比可采用 0.0625。因此，只需取质量比例系数为零，刚度比例系数为 0.0125 即可。

WWW.CISEC.CN

5 结果查看

常规的分析结果后处理及混凝土结构设计的内容，读者可以查看相关的教程资料，此处不再赘述。本文重点介绍对于稳态分析结果的后处理，包括：振动线位移的校核和幅值-频率曲线的绘制。

5.1 校核振动线位移

根据《动规》5.2.2~5.2.4 的规定，工作转速±25%范围内的允许振动线位移为 0.02mm；小于 75%工作转速范围内的允许振动线位移可放宽 1.5 倍，即 0.03mm。基于此，在 SAP2000 中可以通过以下步骤校核振动线位移：

1. 选择需要校核振动线位移的节点。建议只选择一个节点，这样可以精简表格的数据内容同时也便于排序对比。
2. 选择需要显示结果的稳态工况。注意：只能选择一个稳态工况，因为不同的工况需要单独进行校核。
3. 指定稳态工况的结果选项。默认情况下，稳态工况输出包络值和同步&异步响应值。需要修改为：在各个频率点上输出响应幅值。
4. 在显示的节点位移数据表格中，根据关心的线位移分量对数据进行排序显示。
5. 查看最大的线位移分量 A_i 对应的荷载频率 f :
 - a) 如果 $f < 50 \times 0.75 = 37.5\text{Hz}$ ，则比较 A_i vs 0.03mm
 - b) 如果 $f \geq 50 \times 0.75 = 37.5\text{Hz}$ ，则比较 A_i vs 0.02mm

以上内容只针对单个稳态工况的振动线位移的校核，而多扰力共同作用则需要将各个稳态工况的结果导出至 Excel 中做进一步的二次处理。基本操作与前述单工况情况相同，只是对表格内容进行过滤，可以使内容更精简。

在 Excel 表格中将不同稳态工况下同一个节点在不同频率点上的某一位移分量依次排列，编写 SRSS 公式得到组合值后进行排序确定最大位移幅值。如图 3-5-1 所示。

TABLE: Joint Displacements										SRSS
Joint	OutputCase	StepNum	U3							
Text	Text	Unitless	mm							
15	SS1	34.712749	0.008711	15	SS2	34.71275	0.002195	0.03	0.008983	
15	SS1	35	0.008634	15	SS2	35	0.002177	0.03	0.008904	
15	SS1	34.192181	0.008495	15	SS2	34.19218	0.002047	0.03	0.008738	
15	SS1	34.16113	0.008469	15	SS2	34.16113	0.002032	0.03	0.008709	
15	SS1	33.75	0.007994	15	SS2	33.75	0.001777	0.03	0.008189	
15	SS1	36.25	0.007285	15	SS2	36.25	0.001614	0.03	0.007462	
15	SS1	32.5	0.005951	15	SS2	32.5	0.000931	0.03	0.006023	
15	SS1	37.5	0.005732	15	SS2	37.5	0.001056	0.03	0.005828	
15	SS1	37.618538	0.005608	15	SS2	37.61854	0.001017	0.02	0.005699	
15	SS1	32.01183	0.005215	15	SS2	32.01183	0.000701	0.03	0.005262	
15	SS1	38.75	0.004622	15	SS2	38.75	0.000733	0.02	0.00468	
15	SS1	31.25	0.004261	15	SS2	31.25	0.000458	0.03	0.004286	
15	SS1	31.091176	0.004091	15	SS2	31.09118	0.000422	0.03	0.004113	
15	SS1	40	0.003864	15	SS2	40	0.00055	0.02	0.003903	
15	SS1	41.25	0.003329	15	SS2	41.25	0.00044	0.02	0.003358	

图 3-5-1 多扰力下的 SRSS 组合

同样，在 Excel 中也可以对组合后的位移幅值绘制幅值-频率曲线，如图 3-5-2 所示。

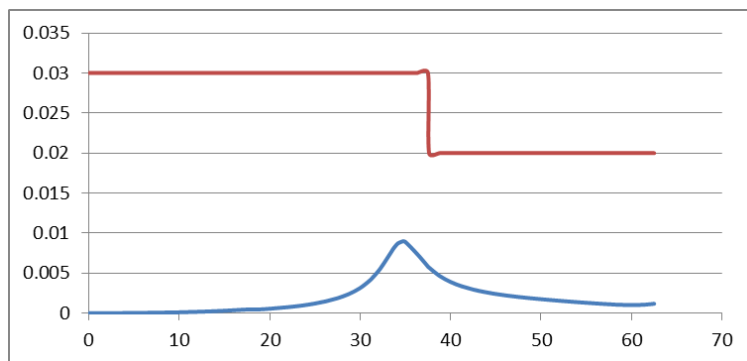


图 3-5-2 Excel 中的幅值-频率曲线

5.2 绘制幅值-频率曲线

上一节讲到在 Excel 中对多扰力的组合结果绘制幅值-频率曲线。事实上，对于单个稳态工况的分析结果，SAP2000 提供函数绘制功能可以直接绘制幅值-频率曲线。绘制函数的对话框如图 3-5-3 所示，注意：在荷载工况下拉列表的下方选择幅值（Magnitude）。

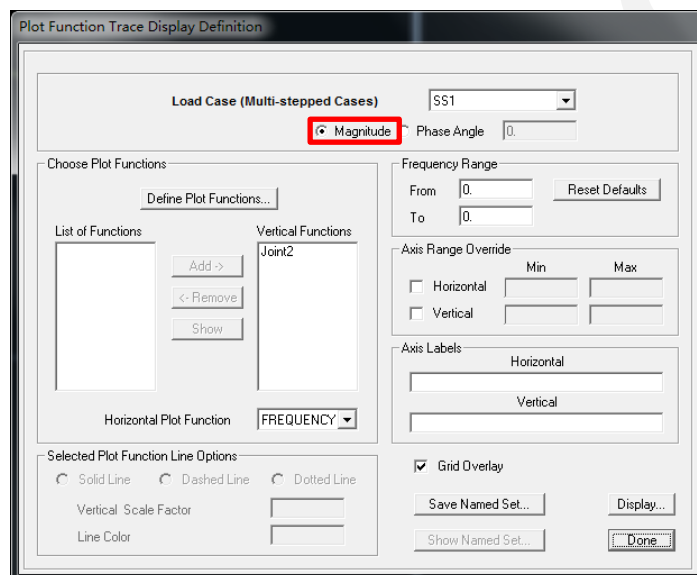


图 3-5-3 绘制函数对话框

位移幅值-频率曲线如图 3-5-4 所示：

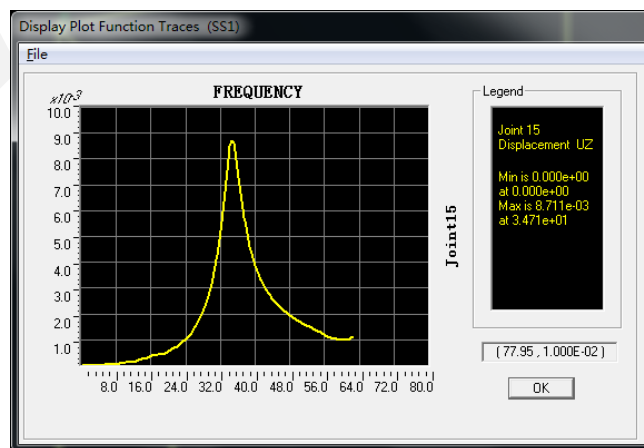


图 3-5-4 幅值-频率曲线