

第五章 动力学分析

本章要点:

- 1 动力学分析的基础知识, 即动力学分析的基本概念、重要性、动力学分析的基本类型和建模过程中需要注意的事项 (与静力学分析相比)。
- 1 模态分析的主要步骤及每个步骤中需要注意事项, 及模态分析的详细过程。
- 1 谐响应分析的主要步骤及每个步骤中需要注意事项, 并谐响应分析的详细过程。
- 1 瞬态分析的主要步骤及每个步骤中需要注意事项, 并谐响应分析的详细过程。

要想学好、用好 ANSYS 动力学分析功能, 需要从基础部分开始, 了解动力学分析的特性, 然后通过实际操作提高水平。首先介绍动力学分析的基础知识。

5.1 动力学分析简介

5.1.1 动力学分析简介

这里介绍动力学的概念和动力学分析的应用。

1. 动力学分析的定义

动力学就是分析用来确定惯性 (质量效应) 和阻尼其重要作用时结构或者构件动力学特性的技术。一般动力学特性主要指以下几个方面中的一种或者多种类型:

- Ø 振动特性, 即结果的振动方式和振动频率。
- Ø 随周期性变化载荷的效应, 即施加周期性变化载荷时结构的位移和应力的相应情况。
- Ø 周期振动或者随机载荷的效应, 主要指结构受周期性载荷或者随机载荷时的变化规律。

2. 动力学分析的重要性

一般来说静力分析也许能够确保一个结构可以承受稳定载荷的条件, 但是这些远远不够, 尤其是结构承受运动载荷时更是如此。一个比较著名的例子就是每个塔科马海峡吊桥 (Galloping Gertie), 在最初设计时没有充分的考虑到承受变化风力时桥是否可以保证安全, 只是考虑到桥梁是否能够承受足够的稳态载荷, 结果就在它建成刚刚 4 个月后, 受到风速为 42 英里/小时的平均载荷时发生了倒塌 (如图 5-1 所示)。这体现了结构进行动力学分析的重要性。

通常动力学分析用于分析下列物理现象:

- Ø 振动-如由于转动机械引起的振动, 特别是在潜艇降噪方面振动分析非常重要, 潜艇的生存能力与其噪声有极其重要的关系。
- Ø 冲击-如汽车碰撞, 锤击等。

- Ø 交变作用力-如各种动力机械上的曲轴、曲柄及其它回转机械等。
- Ø 地震载荷-如地震，冲击波等。
- Ø 随机振动-如航天飞行器，轨道运输等。

上述每种情况都由一个特定的动力学求解类型来处理。

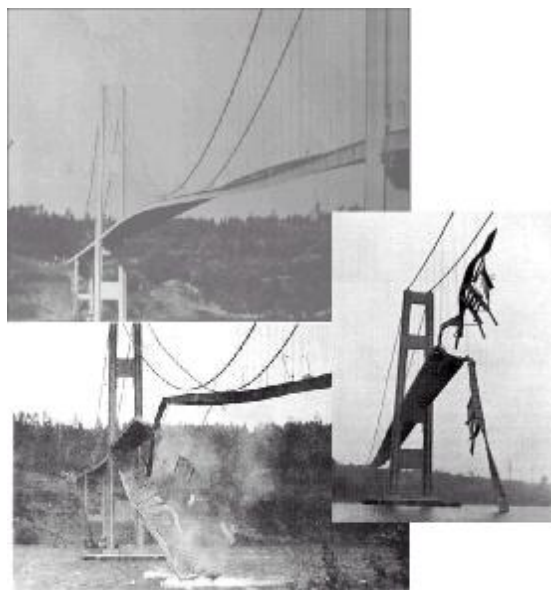


图 5-1 塔科马海峡吊桥跨塌事件

5.1.2 动力学分析的类型

大致动力学分析可以分为以下几种类型：

1. 模态分析

主要分析结构收到自身的固有振动频率，尽量防止出现结构承受的载荷与其固有频率相同的状况。一旦外载荷与结构固有频率相同，必然发生共振，造成结构屈服。

一个很有意思的规定体现了共振的危害：所有军队均规定，在通过桥梁时不能齐步走也不能正步走，只能散步通过。因为曾经发生过因为齐步通过桥梁因步频与桥梁固有频率一致发生共振，造成桥梁垮掉的现象。

2. 瞬态动力学分析

主要分析结构对随时间变化载荷的响应，保证结构在承受冲击载荷时不出现损伤。一般冲击载荷造成的破坏远比静载荷大。一般像汽车防撞板是否可以承受低速重新，网球拍框架是否可以承受网球重新等等都需要进行瞬态动力学分析。另外，外国应用非常广泛的汽车安全性分析也是瞬态动力学分析在实际工程领域的应用。

3. 谱分析

主要分析结构对问题简谐载荷的响应，保证结构在承受稳态、交变载荷情况下，可以保持原有刚度不发生大的下降。另外多地震地区的建筑物应该能否承受地震载荷保持结构安全也是谱分析的重要应用。

4. 随机振动分析

主要分析结构件承受随机载荷情况下是否可以保证安全。随机振动分析主要应用于航空、航天器设计方面。

本章主要介绍模态分析、谱响应分析与瞬态动力学分析在 ANSYS 中的实现。

5.1.3 动力学分析建模的注意事项

动力学建模过程中需要注意以下几个方面：

- Ø 几何建模及网格划分（模型的复杂程度及合理的网格密度）
- Ø 材料属性（是各向同性还是各向异性）
- Ø 各种非线性因素（材料及状态非线性）

下面一一介绍各个应该注意的事项：

1. 几何建模及网格划分

一般与静力分析要求相同，同时要求包括能够充分绘制几何形状所需的详细资料，应该在关心应力结果的区域细化网格，在仅关心位移结果时，可以采用较为粗糙的网格。

2. 材料属性

材料方面必须要定义弹性模量和密度，各个参数所用单位制必须一致，采用英制单位时，对于密度要定义质量密度而不是重力密度。

$$\text{质量密度} = \text{重力密度} (\text{lb/in}^3) / g (\text{in/sec}^2)$$

3. 非线性因素

非线性因素只有在瞬态动力学分析中才能使用，在所有其他动力学类型的分析中（如模态分析、谱响应分析、谱分析以及简化的模态叠加瞬态分析等）都不考虑，也就是说最初的非线性状态将在整个非线性求解过程中一直保持不变。

5.2 模态分析

模态分析用于确定设计中的结构或者机械部件的振动特性（固有频率和模态）。模态分析是其他更为深入分析的起点，如瞬态动力学分析、谱响应分析和谱分析等。下面介绍模态分析的主要步骤。

5.2.1 模态分析的主要步骤

模态分析过程主要有四部分：建模，加载及求解，扩展模态与检验结果。下面就这四部分进行详细介绍：

1. 建立有限元模型

建模过程与其他类型的求解类型，前面已经介绍了建模过程中需要注意的方面，这里就不再详述。

2. 施加载荷并求解

施加载荷的主要步骤如下：

1. 进入求解器
2. 指定求解类型和求解选项

通常可以用于模态分析的选择及其命令如表 5-1 所示。

表 5-1 求解类型及求解选项

选 项	命 令	GUI 路径
New Analysis	ANTYPE	Main Menu > Solution > Analysis Type > New Analysis
Analysis Type (Modal)	ANTYPE	Main Menu > Solution > Analysis Type > New Analysis > Modal
Mode Extraction Method/Number of Mode to Extract	MODOPT	Main Menu > Solution > Analysis Type > Analysis Options
Number of Mode to Expand	MXPAND	Main Menu > Preprocessor > Loads > Analysis Type > Analysis Options
Mass Matrix Formulation	LUMPM	Main Menu > Solution > Analysis Type > Analysis Options
Prestress Effects Calculation	PSTRES	Main Menu > Solution > Analysis Type > Analysis Options

(1) Analysis Type (Modal) 选项

指定求解类型为模态分析。

(2) Mode Extraction Method 选项

选择下列模态分析方法中的一种。

Ø 子空间法

子空间法 (Subspace) 适用于大型对阵特征值问题求解。可以通过采用多种求解控制选项来控制子空间迭代过程，获取比较精确、可信的解。

Ø Block Lanczos 法

Block Lanczos 法主要应用于大型对阵特征值问题求解。

Ø Power Dynamics 法

Power Dynamics 法适用于非常大的模型即自由度超过十万的模型求解。此法在求解前几阶模态方面精度非常高，可以用来求解结构前几阶模态，了解结构可能的响应情况，然后再采用适用于高阶求解的方法，如子空间法或者 Block Lanczos 法进行高阶求解。采用命令流方式求解时需要注意，应该首先使用 MODOPT, SUBSPACE, 然后才是 RQSLV, PCG。

Ø Unsymmetric 法

Unsymmetric 法用于系统矩阵为非对称矩阵问题求解，如流体-结构耦合问题。

Ø Damped 法

Damped 法用于阻尼作用不可以忽略问题类型的求解，如轴承问题等。

对于大多数问题而言，子空间法和 Reduced 法、block Lanczos 法或者 Power Dynamics 法基本够用了，其他两种方法只有在很特殊情况下才可能用到。

知道模态提取方法后，ANSYS 自动选择合适的求解器。

(3) Number of Mode to Expand 选项

此选择在采用 Reduced 法、Unsymmetric 法和 Damped 法才需要设置。但是如果想得到单元求解结果，则不论那种模态提取方法都需要打开计算单元结果选项。在用于单点响应谱分析和动力学设置分析方法中，模态扩展可能要放在谱分析之后按照命令 MXPAND 设置的优先因子 SIGNIF 级别有选择的进行。如果要做谱分析之后才进行模态提取，则需要降模态分析选项对话框中的模态扩展选项关闭。

(4) Mass Matrix Formulation 选项

使用该选项时可以采用默认设置进行求解。一般此选项使用于大多数问题求解，但是不包括含有薄膜结构问题的分析。

(5) Prestress Effect Calculation 选项

此选项适合于有预应力结构的模态分析。一般采用默认设置时不考虑预应力。

注意：

有预应力的周期对称单元上只可以施加轴对称载荷。

完成模态求解选项设置后，与指定相对应的对话框弹出。在这里可以详细设置模态提取过程中所用参数。下面介绍各参数及其作用：

Ø FREQ 和 FREQE 选项

GUI: Main Menu > Solution > Load Step Opts > Spectrum

此命令用于指定模态提取的频率范围。前者指定特征值收敛最快的点，大多数情况下用不到，其默认制为-1。后者只用 Reduced 法时。

Ø RIGID 选项

GUI: Main Menu > Solution > Analysis Type > Analysis Options

用于子空间迭代法提取已知存在刚体运动的结构的零频率模态，只对子空间法和 PowerDynamics 法有效。

Ø SUBOPT 选项

GUI: Main Menu > Solution > Analysis Type > Analysis Options

指定多种子空间迭代选项，只适用于子空间法和 PowerDynamics 法。

Ø Cekey 选项

GUI: Main Menu > Solution > Analysis Type > Analysis Options

用于指定约束处理方法。一般用于 Lagrange Multiplier Method 和 Direct Elimination Method。此选项只对 Block Lanczos 法有效。

3. 定义主自由度

命令: M

GUI: Main Menu > Solution > Master DOFs > Define

此选项在 Reduced 法模态提取应用较多。

主自由度 (Master of DOFs) 指能够描述结构动力学特性的重要的自由度。主自由度选取的规则是至少是感兴趣的模态的一倍数目的主自由度。建议采用 (M, MGEN) 命令根据对结构的动力学特性的了解定义尽可能多的主自由度, 并用 TOTAL 命令使 ANSYS 按照刚度/质量比选择一些附加的主自由度。通过 MLIST 命令可以列出已定义的主自由度, 如果对已定义的主自由度进行删除, 可以采用 MDELET 命令。

4. 施加载荷

在典型的模态分析中只有唯一的有效载荷, 那就是零位移约束。如果结构没个主自由度没有指定零位移约束, 则 ANSYS 自动启用零位移约束代替此处原有设置。模态分析中载荷与一般类型分析施加方法相同, 即可以施加在实体模型上也可以施加在有限元模型上。

注意:

其他类型的载荷也可以在模态分析中进行指定, 但是在模态提取时将不予考虑。ANSYS 计算出相应与所加载荷的载荷向量, 并将其写入模态文件 Jobname.MODE 中, 方便在模态叠加法谱响应分析或者瞬态分析中使用。

分析过程中, 载荷可以进行施加、删除或者进行载荷列表、载荷间计算。具体操作与静力分析中相差不大。这里不再详细介绍。

5. 设置载荷步选项

这里通过列表介绍载荷步选项, 如表 5-2 所示。

表 5-2 载荷步选项

选 项		命 令	GUI 路径
阻 尼 选 项	Alpha (质量) 阻尼	ALPHAD	Main Menu > Solution > Load Step Opts > Time/Frequenc > Damping
	Beta (刚度) 阻尼	BETAD	Main Menu > Solution > Load Step Opts > Time/Frequenc > Damping
	恒定阻尼	DMPRAT	Main Menu > Solution > Load Step Opts > Time/Frequenc > Damping
	材料阻尼比	MP, DAMP	Main Menu > Preprocessor > Material Props > Polynomial
输出控 制选项	Printed Output	OUTPR	Main Menu > Solution > Load Step Opts > Output Ctrl's > Solu Printout

可以要求输出中包含参与因子表, 对模态求解过程再无其他输出控制可选。参数 因子表

列出了参与因子、模态系数及每个提取出的模态的质量分布百分比。参与因子和模态系数的计算基于每个全局笛卡儿坐标方向上单位位移的假设，缩减后的质量分布同样再列表中列出。

注意：

阻尼只有在采用 Damped 模态提取，即考虑结构阻尼效果时才需要定义。

6. 备份数据库

7. 求解

命令：SOLVE

GUI：Main Menu > Solution > Solve > Current LS

输出的分析结果主要是固有频率，并将其写入输出文件 Jobname.OUT 和模态文件 Jobname.MODE 中。但是采用子空间模态提取法，可能会出现模态遗漏线性，下面介绍如何查验被遗漏模态的步骤：

(1) 提供迭代向量数目

命令：SUBOPT, NPAD

GUI：Main Menu > Solution > Analysis Type > Analysis Options > Subspace

单击 OK 按钮，弹出 Subspace Modal Analysis 对话框，在对话框中设置 NPAD 栏设置。

(2) 改变特征值提取过程中所用的频移点值

命令：MODOPT,FREQB

GUI：Main Menu > Solution > Analysis Type > Analysis Options > Subspace

单击 OK 按钮，弹出 Subspace Modal Analysis 对话框。如果采用的是 Damped 法，则求得特征值和特征向量是复数解，特征值的虚部代表固有频率，实部代表系统稳定性的量度。

8. 退出求解器

命令：FINISH

3. 扩展模态

在 POST1 中观察结构，需要首先扩展模态，即将模态文件写入结果文件中。扩展时模态文件 Jobname.MODE、Jobname.EMAT 文件、Jobname.ESAV 及 Jobname.TRI 文件（即采用 Reduced 法）必须存在，而且数据库中必须包含和求解模态时所用模型相同的分析模型，扩展模态分析步骤如下：

1. 重新进入 ANSYS 求解器

注意：

重新进入之前，必须明确退出 Solution 并重新进入 Solution!

2. 激活扩展处理及其相关选项

扩展选项主要由以下几个组成：

Ø Expansion Pass On/Off 选项

命令：EXPASS

GUI：Main Menu > Solution > Analysis Type > ExpansionPass

需要扩展模态时将此选项激活（On）即可。

Ø Number of Modes to Expand 选项

命令：MXPAND, NMODE

GUI: Main Menu > Solution > Load Step Opts > ExpansionPass > Expand Modes

指定需要扩展的模态阶数。

☐ Frequency Range for Expansion 选项

命令: MXPAND, FRRQB, FREQE

GUI: Main Menu > Solution > Load Step Opts > ExpansionPass > Expand Modes

指定模态展开的阶数，如果模态范围已经指定，那只能在指定范围那展开模态。

☐ Stress Calculation On/Off 选项

命令: MXPAND, ELCALC

GUI: Main Menu > Solution > Load Step Opts > ExpansionPass > Expand Modes

用于模态分析后需要进行谱分析并对产生谱的应力和里感兴趣的分析，激活（On）此项设置。模态中的“应力”步代表实际结构中的实际应力，只是各个模态之间的行对应应力分布。ANSYS 默认设置关闭应力计算。

3. 设置输出选项

模态扩展处理在指定载荷步选项之后，需要进行输出控制，下面就输出控制各个选项进行介绍：

☐ Printed Output 选项

命令: OUTPR

GUI: Main Menu > Solution > Load Step Opts > Output Ctrl > Solu Printout

此选项用来设置在输出文件 Jobname.OUT 中所包含所有的分析数据，即扩展得到的模态、应力、力。

☐ Database and results file output 选项

命令: OUTPR

GUI: Main Menu > Solution > Load Step Opts > Output Ctrl > DB/Results File

此选项用于控制结果文件 Jobname.RST 中所包含的数据，在结果文件中的频率只能选择要就输出所有模态，不要就不输出任何模态，不能进行模态阶数的挑选（多个）输出。

4. 进行扩展处理

命令: SOLVE

GUI: Main Menu > Solution > Solve > Current LS

这里扩展处理的输出包含已扩展的模态，另外可以根据需要提取各阶数模态的相对应力分布。

5. 需要扩展其他模态

请重复 2~4 步骤，每次扩展处理在结果文件中存储为单独的载荷步。

6. 退出求解器

注意：

扩展处理在这里作为一个独立的阶段。如果在模态求解节点使用了 MXPAND 命令，则 ANSYS 将同时解出特征值和特征向量并扩展指定模态。

4. 查看分析结果

模态分析的结果，即模态扩展处理的结果被写入结果文件 Jobname.RST。结果文件中包

括以下几个方面数据：固有频率，已扩展的模态，相对应力和力分布（根据要求决定是否写入）。下面介绍如何在通用后处理器中观察模态分析的结果，具体查看过程如下所示：

注意：

（1）通用后处理器观察结果需要保证数据库中包含与求解时相同的模型。

（2）结果文件 Jobname..RST 必须存在。

1. 读入子步结果数据

命令：SET, SETSTEP

GUI: Main Menu > General Postproc > Read Results

观察结果首先需要读入确定子步的结果数据。每阶模态在结果文件中以单独的子步保存（结果文件中子步与模态阶数相同）。

2. 进行常用后处理操作

通常通用后处理操作如下：

（1）列出所有已扩展模态对应频率

命令：SET, LIST

GUI: Main Menu > General Postproc > Results Summary

（2）显示变形后图形

命令：PLDISP

GUI: Main Menu > General Postproc > Plot Results > Deformed Shape

（3）列出主自由度

命令：MLIST, ALL

GUI: Main Menu > Solution > Master DOFs > List All

注意：

可以通过图形方式显示主自由度，首先需要显示模型节点（GUI: Utility Menu > Plot > Nodes 或者命令：Nlist）

（4）通过单元列表显示线单元分析结果

命令：ETABLE

GUI: Main Menu > General Postproc > Element Table

通过这种方法显示线单元的应力、应变等数据。

（5）显示结果参数的等值线图

命令：PLNSOL 或者 PLESOL

GUI: Main Menu > General Postproc > Plot Results > Nodal Solu 或者 Element Solu

通过下面命令或者操作显示单元数据列表数据或者线单元数据的等值线：

命令：PLETAB, PLIS

GUI: Main Menu > General Postproc > Element Table > Plot Elem Table

Utility Menu > Plot > Results > Contour Plot > Elem Table Data

注意：

防止数据在不同单元、材料类型间或者其他不连续因素间平均，在使用 PLNSOL 时应该优先选择同种材料的单元。

（6）显示 Tubular listings 数据

命令: PRNSOL (节点结果)
 PRESOL (依单元序号显示)
 PRRSOL (反作用力)

GUI: Main Menu > General Postproc > List Results > Sort Nodes
 Main Menu > General Postproc > List Results > Element Solution
 Main Menu > General Postproc > List Results > Reaction Solu

另外, 可以使用 NSOPT 和 ESOPT 命令根据需要对数据进行排序。

3. 利用其他功能进行结果分析

通用后处理器还有很多其他功能, 如将结果映射到指定路径上、加载工况间计算等, 这里不再详细介绍。

5.2.2 模态分析实例

1. 教学目的

通过实例学习体验模态分析的实际分析过程, 对模态分析的各选项加深理解并掌握基本的模态分析能力。希望读者在完成本实例学习后, 多加强练习。

2. 问题描述

难度级别: 普通级别。

所需时间: 一个小时或者更多 (视 ANSYS 操作熟练程度而定)。

实例类型: ANSYS 结构分析。

分析类型: 模态发分析。

单元类型: BEAM3

ANSYS 功能示例: 实体建模包括基本的建模操作; 设置子空间法和简化法的分析选项; 显示各阶模态图形; 基本的结果验证技巧。

ANSYS 帮助文件: 在 ANSYS Structural Analysis Guide 了解 Modal Analysis 分析知识, 在 ANSYS Elements Reference 部分了解 BEAM3 单元的详细资料。

悬臂梁模型如图 5-2 所示。

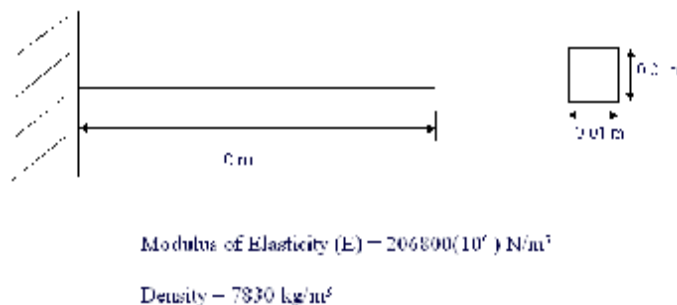


图 5-2 悬臂梁模型及参数

3. 建立有限元模型

模态分析中建立有限元模型与其他类型分析大致相同，详细讲解悬臂梁实体模型的定义过程如下所示：

1. 进入前处理器

命令：/PREP7

2. 添加标题

其操作如下：

GUI: Utility Menu > File > Change Title ...

新标题为： Dynamic Analysis

命令：/TITLE, Dynamic Analysis

3. 修改工作名

其操作如下：

GUI: Utility Menu > File > Change Jobname ...

键入工作名： Dynamic

命令：/FILNAME, Dynamic, 0

4. 定义关键点（梁的端点）

其操作如下：

GUI: Preprocessor > Modeling > Create > Keypoints > In Active CS

通过两个关键点（即悬臂梁的两个端点）定义。

命令：

1# 关键点： k,1,0,0

2# 关键点： k,2,1,0

5. 定义直线（梁的实体模型）

通过关键点定义直线（悬臂梁模型），操作如下：

GUI: Preprocessor > Modeling > Create > Lines > Lines > Straight Line

在 1# 和 2# 关键点之间生成一条直线。

命令：L, 1, 2

6. 选择单元

其操作如下：

GUI: Preprocessor > Element Type > Add/Edit/Delete...

参考前边梁模型分析所用单元类型，采用 BEAM3 单元（二维弹性梁）。

命令：ET, 1, BEAM3

7. 定义实常数

其操作如下：

GUI: Preprocessor > Real Constants > Add

在 BEAM3 实常数窗口（ Real Constants for BEAM3 ）中，键入下面几何参数：

梁横截面面积（Cross-sectional area AREA）： 100

面积转动惯量（Area Moment of Inertia IZZ）： 833.333

梁的高多 (Total beam height HEIGHT): 100

命令: R, 1, 100, 833.333, 100

这样就定义完了横截面尺寸为 100mm×100mm 的悬臂梁。

8. 定义材料属性

定义线性各向同性材料参数, 操作如下:

GUI: Preprocessor > Material Props > Material Models > Structural > Linear > Elastic > Isotropic

在弹出窗口中键入, 钢的材料参数:

杨氏模量 (即弹性模量, Young's modulus EX): 200000

泊松比 (泊松比 PRXY): 0.3

现在定义材料密度, 在定义材料模型参数对话框单击密度 (Density) 按钮, 键入密度值 “7.83”。

命令:

MP, EX, 1, 200000

MP, PRXY, 1, 0.33

MP, DENS, 1, 7830

注意:

在动态分析过程中, 材料的密度和硬度都必须详细说明。

9. 设定网格尺寸

选定线性模型网格尺寸, 操作如下:

GUI: Preprocessor > Meshing > Size Cntrl > ManualSize > Lines > All Lines...

将悬臂梁模型分为 10 份, 即单元长度为 100mm。

命令: LESIZE, ALL, , , 10

10. 划分网格

其操作如下:

GUI: Preprocessor > Meshing > Mesh > Lines > Pick All

命令: LMESH, 1

4. 施加载荷并求解

首先选择求解类型, 然后定义求解选项, 最后求解。

1. 选择分析类型

选择模态分析, 操作如下:

GUI: Solution > Analysis Type > New Analysis > Modal

命令: ANTYPE, 2

2. 设定分析选项

首先进入分析类型选项窗口, 操作如下:

GUI: Solution > Analysis Type > Analysis Options..

弹出下面对话框 (如图 5-3 所示)。选择子空间法 (Subspace Method) 并在提取几阶模态输出 (No. of modes to extract) 栏键入 “5”。启用模态图形展开 (Expand mode shapes) 选项,

在几阶模态展开 (No. of modes to expand) 栏中键入 “5” 阶。单击 OK 按钮

注意到 ANSYS 系统默认设置为简化法 (Reduced Method)。简化法是几种方法中速度最快的, 因为它只考虑所有自由度中起到主要作用的自由度。而子空间法 (Subspace Method) 考虑所有自由度, 因此, 子空间法更精确, 但是需要耗费更多计算时间 (尤其是几何形状比较复杂时)。

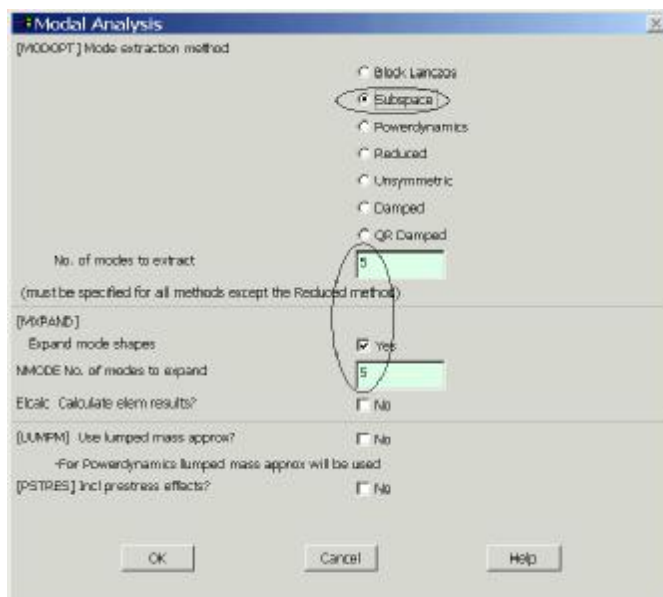


图 5-3 设定模态分析选项

定义子空间模态分析选项。对话框如图 5-4 进行设置。

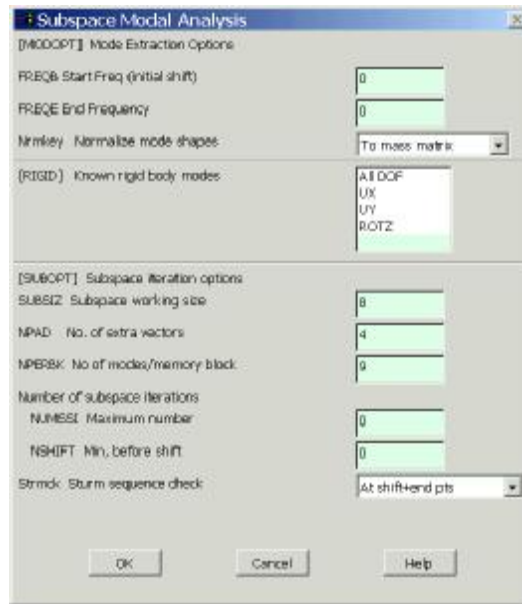


图 5-4 子空间法模态分析定义

需要更详细信息，请单击 **Help** 按钮。

3. 定义约束（梁的端点）

在关键点定义位移约束，操作如下：

GUI: **Solution > Define Loads > Apply > Structural > Displacement > On Keypoints**

固定（Fix）1# 关键点所有自由度（ALL DOFs）。

4. 求解

GUI: **Solution > Solve > Current LS**

命令: SOLVE

5. 查看子空间法分析结果

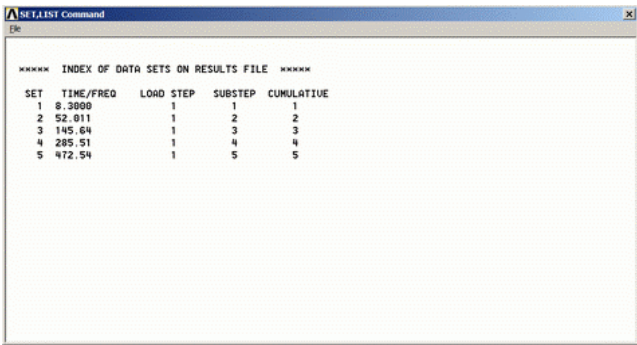
将 ANSYS 分析结果与理论预测验证进行对照验证分析结果的可靠性。首先查看子空间法分析结果并与理论解做对比，然后查看各阶模态形状，具体操作过程如下所示：

1. 查看各阶模态对应频率

其操作如下：

GUI: **General Postproc > Results Summary**

弹出 SET, LIST Command 的对话框（如图 5-5 所示）显示出子空间法的分析结果。



SET	TIME/FREQ	LOAD STEP	SUBSTEP	CUMULATIVE
1	8.3000	1	1	1
2	52.011	1	2	2
3	145.64	1	3	3
4	285.51	1	4	4
5	472.54	1	5	5

图 5-5 模态分析结果列表

与理论分析结果对比分析 ANSYS 求解准确性。表 5-3 为理论分析值与 ANSYS 解对比。

表 5-3 计算结果与理论值对比

模态	理论值	ANSYS 解	偏差 (%)
1	8.311	8.300	0.1
2	51.94	52.01	0.2
3	145.68	145.64	0.0
4	285.69	285.51	0.0
5	472.22	472.54	0.1

注意：

为了获取精确的高阶模态频率，网格需要划分的更加细密，也就是说，划分网格不应该是现在的 10 份而是 15 份或者更高，具体情况依读者所关心的最高模态阶数确定。

2. 查看各阶模态图形

查看各阶模态的具体操作过程如下所示：

（1）首先读入结果

进入读取初始结果菜单读入结果，操作如下：

GUI: General Postproc > Read Results > First Set

取第一阶模态。

（2）显示变形后图形

其操作如下：

GUI: General Postproc > Plot Results > Deformed shape

选择 Def+ undef edge 选项，则第一阶模态将显示在图形对话框。

（3）察看下一阶模态形状。

选择如第一操作：

GUI: General Postproc > Read Results > Next Set

显示变形后图形，操作如下：

GUI: General Postproc > Plot Results > Deformed shape

选择 Def+undef edge 选项。

(4) 一阶到四阶模态图形

重复步骤(3)得到的1~4阶模态图形如图5-6~9所示：

- 一阶模态（如图5-6所示）

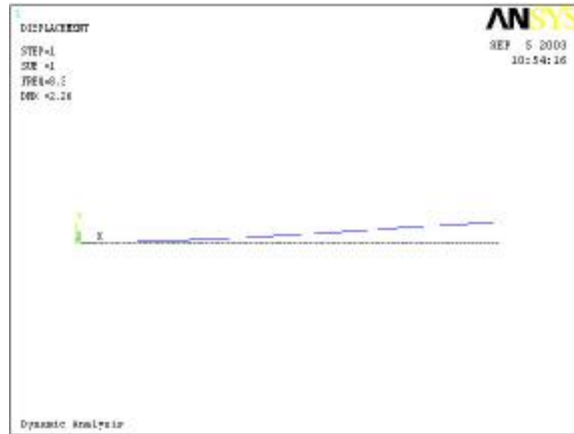


图 5-6 一阶模态

- 二阶模态（如图5-7所示）

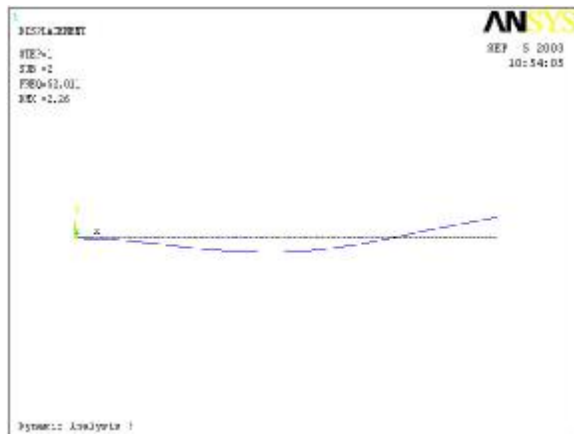


图 5-7 二阶模态

- 三阶模态（如图5-8所示）

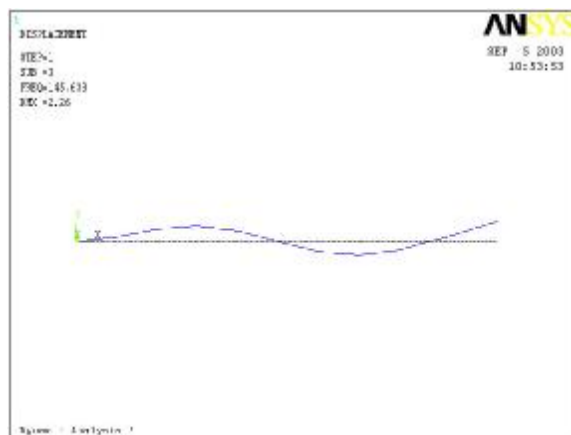


图 5-8 三阶模态

- 四阶模态（如图 5-9 所示）

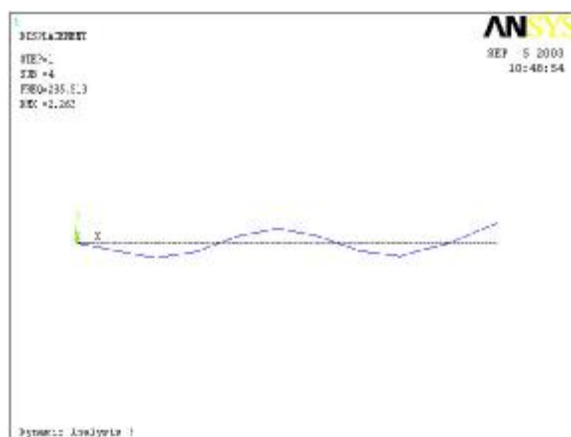


图 5-9 四阶模态

（5）显示模态动画

首先进入动画模式设置对话框，操作如下：

GUI: Utility Menu > PlotCtrls > Animate > Mode Shape

弹出如下 Animate Mode Shape 对话框（如图 5-10 所示）。保持默认设置并单击 OK 按钮。

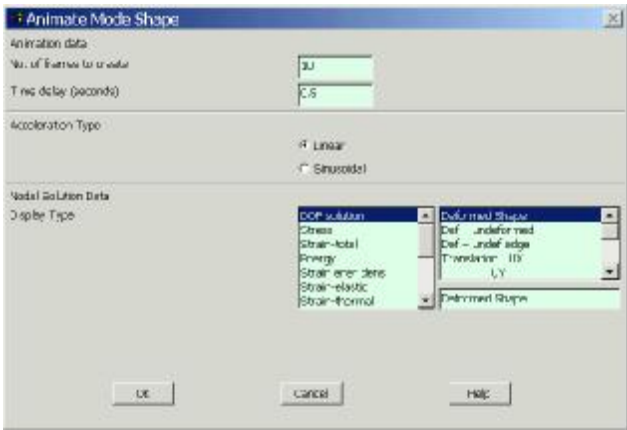


图 5-10 显示动画模态

6. 简化法模态分析

1. 方法简介

简化法采用主自由度（Master Degrees of Freedom）分析，即仅考虑决定结构动态特征的自由度部分。例如，使用主自由度（Master Degrees of Freedom）分析悬臂梁弯曲模态时主自由度如图 5-12 所示。

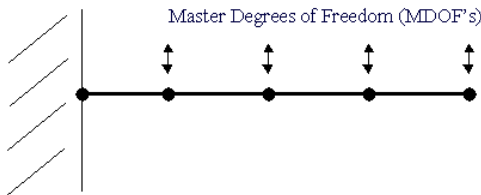


图 5-12 结构主自由度

对于使用简化法分析，需要用户具备结构动态分析方面详细的知识。然而，采用这种方法意味着更小的刚度矩阵（简化后的），所以，计算速度比子空间法更快。

下面是采用简化法求解的简单步骤（建模过程省略）：

1. 设置分析选项

（1）进入分析类型选项对话框

其操作如下：

GUI: Solution > Analysis Type > Analysis Options

在模态分析（Model Analysis）对话框中选择简化法（Reduced Method）并取 5 阶模态输出（如图 5-13 所示）。

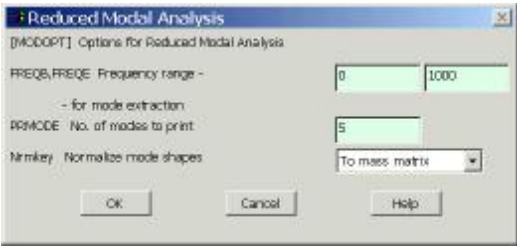


图 5-13 简化法模态分析设置

注意：

本例中模态阶数及频率范围均已详细定义。ANSYS 将取二者之间的最小模态阶数输出。

(2) 定义结构的主自由度

首先定义主自由度，操作如下：

GUI：Solution > Master DOF > User Selected > Define

根据提示，选择除最左端点（这点已经固定 fixed）外所有节点。弹出 Define Master ofDOFs 对话框（如图 5-14 所示）。选择 UY 为第一阶自由度。约束如子空间法。简化法求解所得数据与理论预测数据对比如表 5-4 所示。



图 5-14 定义主自由度

3. 查看简化法分析的结果

具体操作过程略。简化法分析结果如表 5-4 所示。

表 5-4 简化法结果与理论值的对比

模态阶数	理论值	ANSYS 分析值	偏差（%）
1	8.311	8.300	0.1
2	51.94	52.01	0.1
3	145.68	145.66	0.0
4	285.69	285.71	0.0
5	472.22	473.76	0.3

从表上分析二者之间的偏差很小，并不是想象的那么大。然而本例分析结构模型是非常简单的悬臂梁模型，不是很复杂。简化法的分析误差一般随着结构复杂程度上升而偏差逐渐

增大。

7. 命令流求解

ANSYS 命令流:

```

FINISH                !这两行命令清除当前数据
/CLEAR
/TITLE, Dynamic Analysis!添加标题
/PREP7                !进入前处理
K, 1, 0, 0            !定义关键点
K, 2, 1, 0
L, 1, 2                !由关键点定义线（梁）
ET, 1, BEAM3          !选择单元类型

R, 1, 0.0001, 8.33e-10, 0.01 !定义实常数：面积, izz, 高度
MP, EX, 1, 2.068e11    !定义材料的弹性模量
MP, PRXY, 1, 0.33      !泊松比
MP, DENS, 1, 7830       !定义材料的密度
LESIZE, ALL, , , 10    !确定单元尺寸
LMESH, 1               !划分网格
FINISH                 !退出前处理
/SOLU                  !进入求解状态
ANTYPE, 2              !定义分析类型，模态分析
MODOPT, SUBSP, 5       !定义子空间，5 阶模态
EQLSV, FRONT           !Frontal 求解器
MXPAND, 5              !展开5阶模态
DK, 1, ALL             !定义1#关键点约束
SOLVE                  !求解系统平衡方程
FINISH                 !退出求解
/POST1                 !显示分析结果（List）
SET, LIST
SET, FIRST
PLDISP                 !显示一阶模态
ANMODE, 10, 0.5, , 0   !显示模态动画

```

8. 实例总结

1. 关于建模的总结

掌握基本的建模操作。

2. 关于施加载荷和求解的总结

掌握简单结构的主自由度的选择，可以根据分析类型提取主自由度；掌握子空间法和简化法进行模态分析的优缺点；掌握子空间法进行模态分析时分析选项的设定，并能够根据模

型的复杂程度设置合理的分析参数。

3. 关于查看分析结果的总结

掌握根据模态提取分析结果，并查看每阶模态的形状；掌握动画显示模态分析结果的操作，可以查看任一阶模态的动画。

5.3 谐响应分析

谐响应分析用于分析连续的周期性载荷在结构系统中产生的持续的周期响应（谐响应），以及确定线性结构承受随时间按照正弦（简谐）规律变化的载荷时稳态响应的一种技术。这种计算只计算结构的稳态受迫振动，发生在激励开始时的瞬态振动不在谐响应分析中考虑。谐响应分析是一种线性分析，但是也可以分析存在预应力的结构。

5.3.1 谐响应的分析方法

谐响应可以采用三种方法求解，分别是 Full 法、Reduced 法和模态叠加法。另外还有一种方法这里不做介绍，其主要用于将简谐载荷指定为有时间历程的载荷函数而进行的瞬态动力学分析。

注意：

ANSYS/Linear Plus 中只能采用模态叠加法求解。

谐响应的各种分析方法如下所示。

1. Full 法

Full 法是最为常用的方法，它采用完整的系统矩阵（即不对矩阵进行缩减）计算谐响应，所用矩阵可以是对称的也可以是不对称的。Full 法的优点很多，下面一一介绍：

- Ø 简单易用，不需要关心主自由度如何定义及模态选取。
- Ø 使用完全矩阵，不设计质量矩阵近似。
- Ø 对矩阵没有特殊要求，适于声学或者轴承问题分析。
- Ø 采用单一处理进程计算出所有的位移和应力。
- Ø 对载荷类型没有特殊要求，可以施加各种类型载荷，如节点力、非零位移约束、单元载荷等。

- Ø 施加载荷没有限制，可以在实体模型上也可以在有限元模型上施加。

当然，Full 法也有它的缺点，那就是不能分析存在预应力的结构谐响应，另外就是采用 Frontal 求解器时所需耗费较高，但是采用 JCG 求解器或者 ICCG 求解器时效率很高。

2. Reduced 法

Reduced 法借助主自由度和缩减矩阵来压缩问题的规模。主自由度处位移计算得到的结果可以扩展到初始的完整 DOF 集中。下面介绍 Reduced 法的优缺点：

1. Reduced 法的优点

- Ø 采用 Frontal 求解器时比 Full 法效率高。
- Ø 可以分析存在预应力的结构谐响应。

2. Reduced 法的缺点

- Ø 初始解只能得到主自由度处位移

需要完整 DOF 的位移、应力和力的结果需要进行扩展处理，在扩展处理过程中可以进行调整。

- Ø 对载荷类型有限制，不能施加单元载荷。
- Ø 载荷位置限制严格，只能施加载荷用户定义的主自由度上。

3. 模态叠加法

模态叠加法通过对模态分析得到的模态（即特征向量）与参与因子的乘积进行积分来计算结构的响应。下面介绍模态叠加法的优缺点：

1. 模态叠加法的优点

- Ø 在很多问题求解上，比 Full 法或者 Reduced 法效率更高。
- Ø 在模态分析中施加的载荷可以通过 LBSCALE 命令

GUI: Main Menu > Preprocessor > Loads > Define Loads > Apply > Load Vector > For Mode Super 引入谐响应分析。

- Ø 可以使解按结构的固有频率聚集，产生更平滑、更精确的响应曲线图。可以用于存在预应力的结构的谐响应分析。

- Ø 可以考虑阻尼因素（通过将阻尼系数定义为频率函数引入阻尼因素）

2. 模态叠加法的缺点

- Ø 载荷只能是简谐载荷
- Ø 所有载荷频率必须相同
- Ø 只能用于线性结构分析
- Ø 不可计算瞬态效应

上述缺点可以通过瞬态分析克服，即只需将简谐载荷定义为时间历程的载荷函数即可拉考虑瞬态因素。

5.3.2 谐响应分析步骤

下面以 Full 法为例阐述谐响应分析的步骤，Full 法谐响应分析的步骤分为三步，首先是建模（与一般问题分析一致），然后加载并求解，最后是观察结果。下面将一一介绍每个步骤。首先是建模。

1. 建立有限元模型

任何类型问题分析的建模过程基本一致，这里不再详述。这里有两点与其他分析不同：

- Ø 只能用于线性问题分析（即使存在非线性单元也全部按照线性单元处理）。
- Ø 必须定义材料属性中的弹性模量 EX（或者特定形式的刚度）和密度 DENS（或者特定形式的质量），材料的非线性因素将被忽略。

2. 施加载荷并求解

动力学分析在此步骤中基本类似，即选择分析类型及其选项、施加载荷、指定载荷步选

项并求解。

这里需要注意的是，为了防止峰值响应（外载频率与结构固有频率相同时）需要首先进行模态分析，了解结构的固有频率。谐响应分析施加载荷并求解的过程如下所示：

1. 进入求解器
2. 选择分析类型并定义分析选项

下面详细介绍 ANSYS 提供的用于谐响应分析的各选项：

Ø New Analysis 选项

命令：ANTYPE

GUI: Main Menu > Solution > Analysis Type > New Analysis

选择新的分析类型。此项在谐响应分析中 Restart 不可用。

Ø Analysis Type: Harmonic Response 选项

命令：ANTYPE

GUI: Main Menu > Solution > Analysis Type > New Analysis > Harmonic Response

选择谐响应分析。

Ø Solution Method 选项

命令：HROPT

GUI: Main Menu > Solution > Analysis Type > Analysis Options

用于选择求解方法，即选项采用 Full 法，Reduced 法还是模态叠加法。

Ø Solution Listing Format 选项

命令：HROPT

GUI: Main Menu > Solution > Analysis Type > Analysis Options

用于确定在输出文件 Jobname.Out 文件中谐响应分析的位移解的列出方式。默认设置是列出实部与虚部，另外可以选择列出负值与相位角的形式。

Ø Mass Matrix Formulation 选项

命令：LUMPM

GUI: Main Menu > Solution > Analysis Type > Analysis Options

此选项用于指定采用默认设置时的质量矩阵的形成方式（具体方式由单元类型决定）还是采用集中质量矩阵近似。对于大多数问题的分析采用默认设置完全可以满足要求。但是对于含有薄膜结构的问题（即结构中存在细长梁或者薄壳）应该采用集中质量矩阵。设置完毕单击 OK，弹出 Harmonic Analysis 对话框选择方程求解器。

Ø Equation Solver 选项

命令：EQSLV

GUI: Main Menu > Solution > Analysis Type > Analysis Options

此选项用于选择方程求解器，如 Frontal 求解器（默认求解器），JCG 求解器和 ICCG 求解器。对于没有特殊要求的问题，采用默认求解器足够。

3. 施加载荷

对于简谐载荷而言，需要指定载荷的 Amplitude（幅值）、Phase Angle（相位角）和 Forcing Frequency Range（强制频率范围），（如图 5-15 所示）。

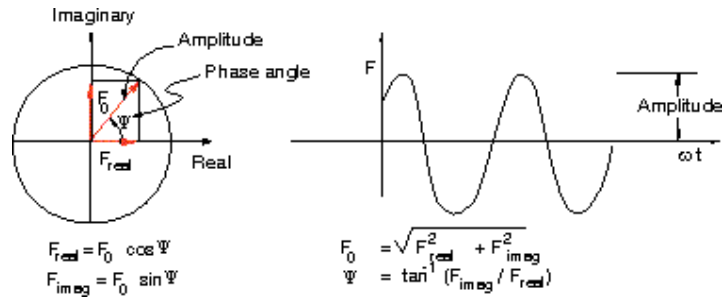


图 5-15 简谐载荷

Amplitude（幅值）为载荷的峰值，可以由表 5-5 中所示命令指定。

Phase Angle（相位角）指载荷滞后（或者领先）于参考施加的量度，在复平面上（如图 5-15 所示）上相位角以实轴为起始角度。定义多个有相位角差的载荷时需要指定相位角。但是相位角不能直接指定，必须由加载命令中的 Value1 和 Value2 定义相位角的实部与虚部。图 5-15 给出了实部与虚部的计算公式。

Forcing Frequency Range（强制频率范围）指简谐载荷（单位为 r/s）的频率范围。

注意：

谐响应不能计算频率不同的多个载荷同时作用时的响应情况。但是可以在 POST1 中对多种载荷状况进行叠加得到总体响应。

除了惯性载荷外，其他载荷可以在实体模型上或者有限元模型上定义。各种载荷定义方式及命令如表 5-5 所示。

表 5-5 谐响应中可施加的载荷

载 荷 形 式	范 畴	命 令	GUI 途径
Displacement (UX , UY,UZ,ROTX,ROTY , ROTZ)	约束	D	Main Menu > Solution > Define Loads > Apply > Structural > Displacement > On Nodes
Force, Moment (FX, FY, FZ, MX, MY, MZ)	集 中 力	F	Main Menu > Solution > Define Loads > Apply > Structural > Force/Moment
Pressure (PRES)	面力	SF	Main Menu > Solution > Define Loads > Apply > Structural > Pressure
Temperature (TEMP) Fluence (FLUE)	体力	BF	Main Menu > Solution > Define Loads > Apply > Structural > Other
Gravity, Spinning 等	惯 性 力		Main Menu > Solution > Define Loads > Apply > Structural > Other

在分析过程中可以对载荷进行施加、删除或对载荷进行操作，必要时可以列表显示所加载荷，这在验证载荷施加是否正确时应用较多。下面介绍载荷施加、删除、操作及列表命令，如表 5-6 所示。

表 5-6 谐响应分析中的加载命令

载荷类型	实体模型/FE	对应	施加	删除	列表	操作
Displacement	实体模型	关键点	DK	DKDELE	DKLIST	DTRAN
	实体模型	线	DL	DLDELE	DLLIST	DTRAN
	实体模型	面	DA	DADELE	DALIST	DTRAN
	FE	节点	D	DDELE	DDLIST	DSCALE
Force	实体模型	关键点	FK	FKDELE	FKLIST	FTRAN
	FE	节点	F	FDELE	FLIST	FSCALE
Pressure	实体模型	线	SFL	SFLDELE	SFKLIST	SFTRAN
	实体模型	面	SFA	SFADELE	SFALIST	SFTRAN
	FE	节点	SF	SFDELE	SFDLIST	SFSCALE
	FE	单元	SFE	SFEDELE	SFELIST	SFSCALE
Temperature	实体模型	关键点	BFK	BFKDELE	BFKLIST	BFKTRAN
	FE	节点	BF	BFDELE	BFLIST	BFSCALE
	FE	单元	BFE	BFEDELE	BFELIST	BFSCALE

对于惯性载荷，这里单独说明，其施加命令主要有：ACEI, OMEGA, DOMECA, CGLOC, CGOMGA, DCGOM 等，没有载荷操作。

所有载荷操作都可以通过 GUI 方式实现。从 Solution 才中选择需要操作的类型（如施加、删除等），然后选择载荷类型（如位移、力等），最后选择操作的对象（如关键点、节点、线等）。

如果，需要在某节点上施加一个集中力（Force），在可以通过下面操作实现：

GUI: Main Menu > Solution > Define Loads > Apply > Structural > Force/Moment > Nodes

4. 定义载荷步

通常谐响应的载荷步由以下选项组成：

☐ Number of Harmonic Solution 选项

命令：NSUBST

GUI: Main Menu > Solution > Load Step Opts > Time/Frequenc > Freq and Substps

此项可以用于求解任何数目的响应解。子步将均布在指定的频率范围那，各个频率点以等差数列的形式存在，但是其实频率点不是指定频率范围的下限。

☐ Stepped or Ramped Loads 选项

命令：KBC

GUI: Main Menu > Solution > Load Step Opts > Time/Frequenc > Freq and Substps

此项用于设定载荷的变化方式，即是 Stepped 还是 Ramped 方式。ANSYS 默认设置采用 Ramped。

上面两个选项是力学分析的通用选项，下面介绍谐响应分析的动力学选项：

Ø Forcing Frequency Range 选项

命令：HARFRQ

GUI：Main Menu > Solution > Load Step Opts > Time/Frequenc > Freq and Substps

在谐响应分析中必须指定取值频率范围（单位：r/s），然后指定在此范围那需要的解的数目。

Ø Damping 选项

命令：ALPHAD（质量阻尼）

BETAD（刚度阻尼）

DMPRAT（恒定阻尼比）

GUI：Main Menu > Solution > Load Step Opts > Time/Frequenc > Damping

为保证分析的可靠性，需要指定阻尼，不能让共振频率出响应无限大。ALPHAD 命令和 BETAD 命令指定与频率相关的阻尼（即质量阻尼和刚度阻尼），而 DMPRAT 命令指定对所有频率为恒定值的阻尼比。在没有指定阻尼时，直接积分谐响应分析（Full 法或者 reduced 法），ANSYS 默认阻尼值为零。

5. 备份数据库

6. 求解

7. 设置其他载荷步

如果还有另外的载荷和频率范围需要设置，充分 3~6 步。如果需要进行时间历程后处理，则两个载荷步的频率范围不能出现重叠。另外通过宏命令可以处理多步载荷问题，这里不再介绍。

8. 退出求解器

3. 查看分析结果

求解完毕，下面介绍观察结果。所有的谐响应分析结果均保存到结果文件 Jobname.RST 中。文件中包含基本数据（节点位移）和由此派生出的数据（节点/单元应力应变，单元力，节点反作用力等）。如果在结构中定义了阻尼，在结构的响应与载荷出现相位差，所有结构数据将是以复数形式，并以实部和虚部分开存储。如果载荷为异步载荷类型，结果也将是复数形式。介绍完结果数据后，下面介绍数据的后处理。通常首先采用 POST26 找到临界强制频率（即模型中感兴趣的点出现最大位移或者应力时的频率），然后采用 POST1 在此临界频率处分析模型变化。下面首先介绍 POST26 中的后处理过程。

1. POST26 后处理

POST26 需要通过结果数据/频率对比变化关系确定临界频率，这需要通过变量定义实现，首先需要定义变量（ANSYS 默认 1# 变量为频率），具体操作如下所示：

（1）定义参数变量

一般通过下面命令定义各个变量：

NSOL 命令：由于定义基本数据，如节点位移。

GUI: Main Menu > TimeHist Postpro > Define Variables

ESOL 命令: 用于定义派生数据, 如单元解数据中的应力、应变等。

GUI: Main Menu > TimeHist Postpro > Define Variables

RFORC 命令: 用于定义反作用力数据, 如节点反作用力等。

GUI: Main Menu > TimeHist Postpro > Define Variables

注意:

可以借助 RFORC 命令选择合力、合力的静力分量、阻尼分量、惯性分量。

(2) 查看变量间变化曲线

这里可以绘制各个变量对频率或者其他变量的相对变化曲线, 然后可以借助 PLCPLX 命令 (GUI: Main Menu > TimeHist Postpro > Settings > Graph) 指定显示类型, 即采用/辐值相位角形式还是实部/虚部形式。

(3) 显示变量分析结果列表

单纯的列出极值可以借助 EXTREM 命令 (GUI: Main Menu > TimeHist Postpro > List Extremes/ List Variables), 然后通过 PLCPLX 命令指定显示方式。

另外在 POST26 中还可以在变量间进行函数运算, 在变量值与数组元素之间进行双向传递等。

2. POST1 后处理

采用 POST1 主要是分析临界频率处模型的变化情况, 首先需要读入 POST26 中指定点的分析结果, 然后显示各个感兴趣的变量变化情况。下面介绍操作步骤。

(1) 读入所需谐响应分析结果

数据读入可以借助 SET 命令读入指定的结果, 但是此命令只能读入实部或者虚部, 不能同时进行上述操作, 结果中数据值由图 5-15 所示公式决定。

(2) 显示结果等值线、向量图或者数据列表

一般对于结构的变形形状、应力、应变的分布感兴趣, 需要显示这些数据的等值线图, 矢量图及感兴趣参数的列表, 其操作与一般静力分析后处理没有区别, 这里不再详述。

5.3.3 谐响应分析实例

1. 教学目的

向读者介绍谐响应分析的大致步骤, 使读者具备类似简单问题独立分析能力。希望读者学习完本实例后, 多加强练习。

2. 问题描述

难度级别: 普通级别。

所需时间: 一个小时或者更多 (视 ANSYS 操作熟练程度而定)。

实例类型: ANSYS 结构分析。

分析类型: 谐响应分析。

单元类型: BEAM3

ANSYS 功能示例: 实体建模包括基本的建模操作; 施加简谐载荷并设定载荷步选项; 显

示结构的固有频率；基本的结果验证技巧。

ANSYS 帮助文件：在 ANSYS Structural Analysis Guide 了解 Structural Static Analysis 分析知识，在 ANSYS Elements Reference 部分了解 Plane82 单元的详细资料。

悬臂梁如图 5-16 所示。

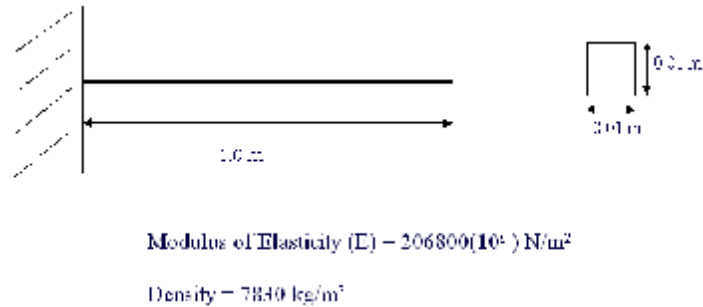


图 5-16 悬臂梁模型

下面是将要进行的悬臂梁谐响应分析，周期性载荷作用在悬臂梁自由端，载荷作用频率在 1-100Hz 范围那变化。悬臂梁谐振动载荷施加如图 5-17 所示。

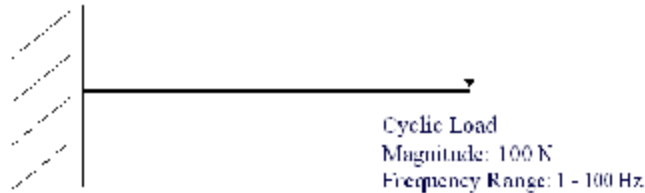


图 5-17 定义简谐载荷

在结构谐响应分析模块中提供了三种理论，这三种理论是 Full，Reduced 和 Modal Superposition 法。在问题分析中采用 Full 法，因为 Full 法相对其他两种理论比较简单而且容易应用。然而，由于 Full 法采用的是全刚度、mass matrices，所以求解速度相对较慢。

3. 建立有限元模型

详细的悬臂梁建模过程如下所示：

1. 进入前处理器

其操作如下：

GUI: Main Menu > Processor

命令: /PREP7

2. 添加标题

其操作如下：

GUI: Utility Menu > File > Change Title ...

键入标题为: **Dynamic Analysis**

命令: /TITLE, Dynamic Analysis

3. 修改工作名

防止下次启动 ANSYS 数据文件被修改, 操作如下:

GUI: Utility Menu > File > Change Jobname ...

键入工作名: **Dynamic**

命令: /FILNAME, Dynamic, 0

4. 定义关键点 (梁的端点)

在 Active CS 坐标系中定义关键点, 操作如下:

GUI: Preprocessor > Modeling > Create > Keypoints > In Active CS

通过两个关键点 (即悬臂梁的两个端点) 定义。

命令: k, 1, 0, 0

k, 2, 1, 0

5. 定义直线 (梁的实体模型)

通过已定义的关键点定义直线 (即悬臂梁实体模型), 操作如下:

GUI: Preprocessor > Modeling > Create > Lines > Lines > Straight Line

在 1# 和 2# 关键点之间生成一条直线。

命令: L, 1, 2

6. 选择单元

其操作如下:

GUI: Preprocessor > Element Type > Add/Edit/Delete...

选择 BEAM3 单元 (二维弹性梁)。

命令: ET, 1, BEAM3

7. 定义实常数

选择完单元, 下面定义谐响应分析所必须的悬臂梁的实常数。首先进入定义单元实常数对话框, 操作如下:

GUI: Preprocessor > Real Constants > Add

在 BEAM3 实常数窗口 (Real Constants for BEAM3) 中, 键入下面几何参数:

梁横截面面积 (Cross-sectional area AREA): 100

面积转动惯量 (Area Moment of Inertia IZZ): 833.333

梁的高多 (Total beam height HEIGHT): 100

命令定义实常数: R, 1, 100, 833.333, 100

这样就定义完了横截面尺寸为 100mm×100mm 的悬臂梁。

8. 定义材料属性

谐响应分析中必须定义材料属性, 即必须定义材料的弹性模量和密度, 考虑到结构分析应力应变因素, 同时需要定义泊松比。材料为性各向同性线弹性材料, 定义材料属性操作如下:

GUI: Preprocessor > Material Props > Material Models > Structural > Linear > Elastic > Isotropic

在弹出 **Define Material Behavior** 对话框中定义材料属性:

杨氏模量 (即弹性模量, Young's modulus EX): 200000

泊松比 (泊松比 PRXY): 0.3

现在定义材料密度, 在定义材料模型参数 (**Define Material Model Behavior**) 对话框单击密度 (**Density**) 按钮, 键入密度值 7.83。

命令:

MP, EX, 1, 20000

MP, PRXY, 1, 0.33

MP, DENS, 1, 7830

注意:

在动态分析过程中, 材料的密度和硬度都必须详细说明。

9. 设定网格尺寸

下面进行划分网格前的尺寸选择, 保证谐响应分析精度。选定线性模型网格尺寸, 操作如下:

GUI: **Preprocessor > Meshing > Size Cntrls > ManualSize > Lines > All Lines...**

选择将悬臂梁模型分为 10 份, 即单元长度为 100mm。

命令: LESIZE, ALL, , , 10

10. 划分网格

其操作如下:

GUI: **Preprocessor > Meshing > Mesh > Lines > Pick All**

命令: LMESH, 1

4. 施加载荷并求解

由于动力学分析在此步骤中基本类似, 即选择分析类型及其选项, 施加载荷, 指定载荷步选项并求解:

1. 选择分析类型

选择谐响应分析 (Harmonic), 操作如下:

GUI: **Solution > Analysis Type > New Analysis > Harmonic**

命令: ANTYPE, 3

2. 设定分析选项

首先进入谐响应分析进入谐响应分析 (Harmonic) 对话框 (如图 5-18 所示):

GUI: **Main Menu > Solution > Analysis Type > New Analysis > Harmonic Response**



图 5-18 设定谐响应分析选项

选择完整求解法（Full Solution method），自由度打印输出格式（DOF printout format）选 Real + imaginary，不建议采用 Lump mass approx。单击 OK。弹出 Full Harmonic Analysis 选项对话框（如图 5-19 所示），保留 ANSYS 系统默认设置，单击 OK。

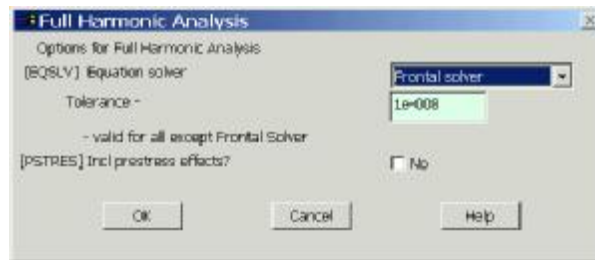


图 5-19 设定 Full Harmonic Analysis 选项

3. 定义梁的端点约束

通过节点位移定义约束，操作如下：

GUI: Solution > Define Loads > Apply > Structural > Displacement > On Nodes

选择 $x=0$ 处节点，将弹出 Apply U, ROT on Nodes 对话框（如图 5-20 所示）（应注意谐响应分析与静力分析的细微差别）。约束节点所有自由度。



图 5-20 定义节点约束

4. 施加简谐载荷

通过节点施加载荷，操作如下：

GUI: Solution > Define Loads > Apply > Structural > Force/Moment > On Nodes

首先选择悬臂梁的右侧自由端节点 (x=1000)，单击 OK。弹出 Apply Force/Moment on Nodes 对话框中，按图 5-21 进行设置。

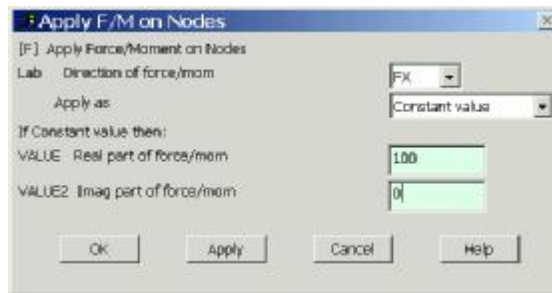


图 5-21 施加载荷

注意：

通过详细定义载荷的实部和虚部值提供了载荷的大小和相位。本例中，载荷的大小为 100N，相角为零度。当所分析的结构上需施加的载荷不只一个时，相角信息非常重要，它决定所施加的载荷是否在相角范围内。对于谐响应分析，需要注意的一点是结构所承受的载荷不论大小必须是同一频率（SAME FREQUENCY）。

5. 保存数据库

GUI: Utility Menu > Save Jobname.DB

命令: SAVE

6. 设定载荷步

首先进入频率/子步设定对话框，其操作如下：

GUI: Solution > Load Step Opts > Time/Frequency > Freq and Substps...

弹出 Harmonic Frequency and Substep Options 对话框（如图 5-22 所示）。将频率范围设定为“0-100Hz”，子步数为“100”和 stepped b.c.。

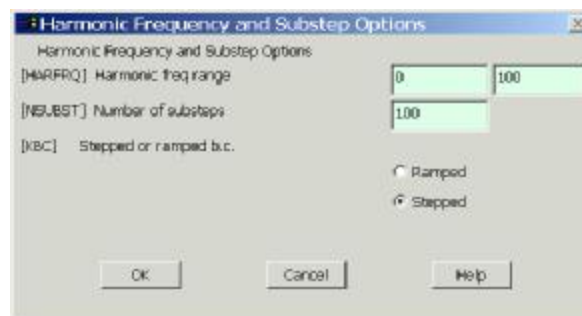


图 5-22 设定频率范围及子步数

通过上述设定，ANSYS 系统将对悬臂梁施加载荷的频率从 1Hz 开始到 100Hz 中止。这里需要定义阶梯状边界条件（stepped boundary condition (KBC)）保证在每个加载频率下载荷

数值均为 100N。作为另外一项选择，即 **ramped option**，加载则是当载荷频率为 1Hz 时载荷大小为 1N，当载荷频率增大到 100Hz 时载荷数值增大到 100N。

载荷载荷及约束定义完毕，图形显示如图 5-23 所示：

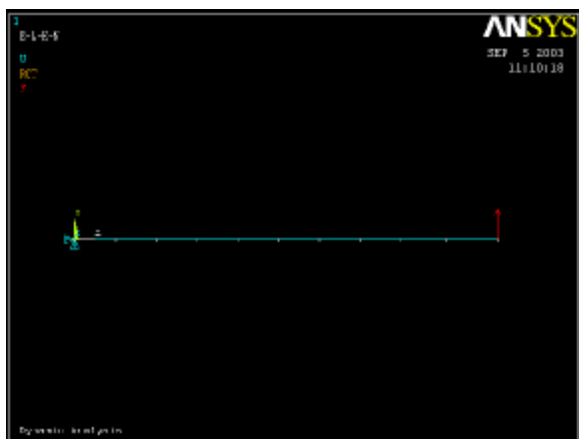


图 5-23 模型约束及载荷

7. 求解

GUI: Solution > Solve > Current LS

命令: SOLVE

5. 查看分析结果

现在，需要察看 $x=1000$ 处（载荷施加处）结构响应情况，察看结构对载荷频率的响应结果。在这里，不能再通过通用后处理（General PostProcessing (POST1)）察看结果，只能使用时间历史后处理（TimeHist PostProcessing (POST26)）察看。POST26 通常用于察看时间或频率函数的变量变化情况，详细的查看过程如下所示：

1. 进入 POST26 处理器

GUI: Main Menu > TimeHist Postpro

命令: /POST26

2. 定义参数变量

这里需要定义想察看结果的变量。在 ANSYS 系统默认情况下，变量 1（Variable 1）可以是时间或频率。这里将变量 1 设为频率，感兴趣的是在 $x=1000$ 处 2# 节点 Y 方向位移（UY）。（如果需要列表显示节点及属性，可以通过 GUI: Utility Menu > List > nodes）。进入变量指示对话框，操作如下：

GUI: TimeHist Postpro > Variable Viewer...

弹出 Time History Variable 对话框（如图 5-24 所示）。

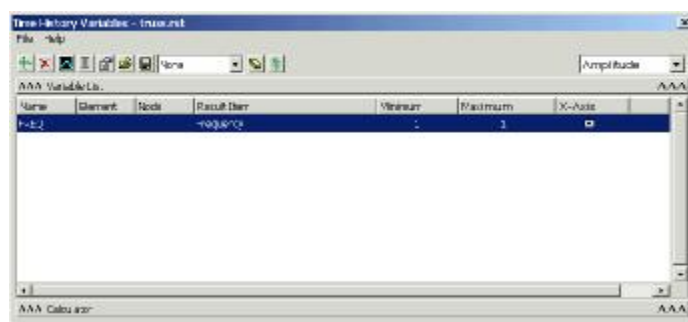


图 5-24 定义变量

单击对话框左上角添加（Add）按钮添加一个变量。得到 Add Time-History Variable 对话框（如图 5-25 所示），在对话框中定义 2# 变量。

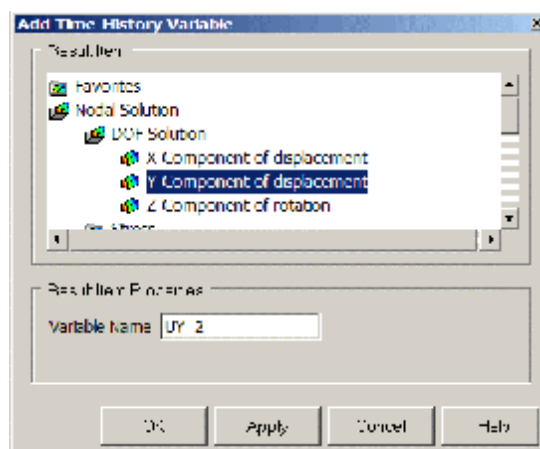


图 5-25 定义 UY 变量

因为感兴趣的是 Y 轴方向位移，选择 UY，操作如下：

GUI: Nodal Solution > DOF Solution > Y-Component of displacement

单击 OK。图形对话框中，根据提示点选 2# 节点后单击 OK。这时，时间历史变量（Time History Variables）对话框如图 5-26 所示。

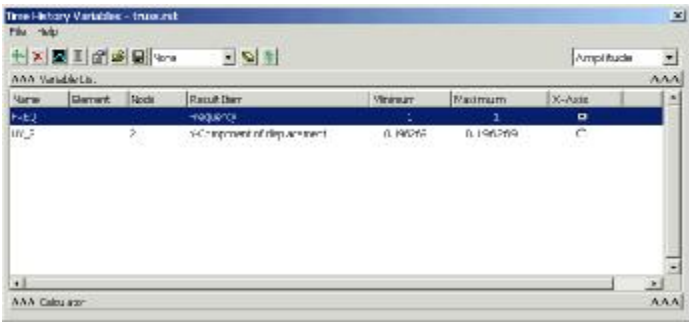


图 5-26 变量定义完毕

3. 列表显示变量结果

在时间历史变量（Time History Variables）对话框中，单击列表（List）按钮，得到数据列表（如图 5-27 所示）。

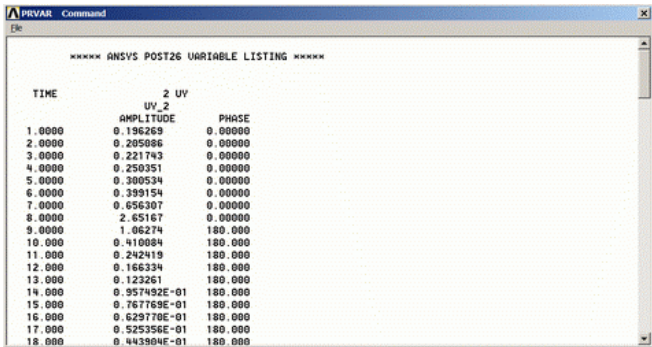


图 5-27 UY 随时间变化结果列表

4. 显示 UY-频率变化图

在时间历史变量（ Time History Variables ）对话框中单击绘图（Plot）按钮，则在 ANSYS 图形窗口中显示出 UY 随频率的变化情况（如图 5-28 所示）。

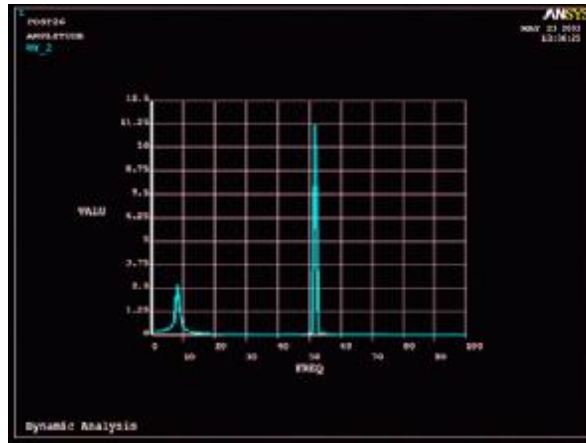


图 5-28 UY 随频率变化曲线

在这里应该注意到在频率为 8.3 和 51Hz 时，位移 UY 出现峰值，这与已知频率 8.311 和 51.94Hz 相对应，证明 ANSYS 解真实可靠。如果需要更清晰 UY 变化情况，可以改变 UY 显示比例，这里不再详述。

改变显示设置中坐标轴，首先进入 Modify Axis 对话框，操作如下：

GUI: Utility Menu > PlotCtrls > Style > Graphs > Modify Axis

弹出 Axes Modification for Graph Plots 对话框。依图 5-29，（记号 A 处），将 Y 轴改为对数（Logarithmic）。

显示坐标轴修改后图形显示，其操作如下：

GUI: Utility Menu > Plot > Replot

命令: replot

得到图 5-30，图形为 2# 节点对于频率从 0-100Hz 范围变化的周期性载荷的响应图。

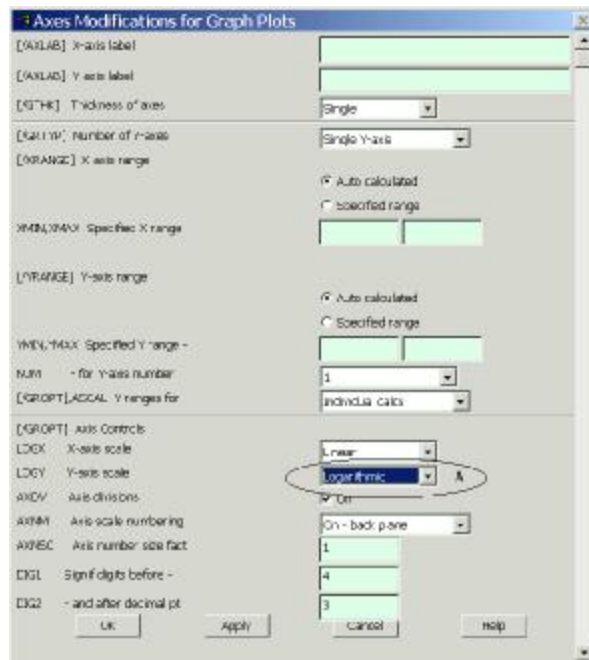


图 5-29 改变坐标轴参数

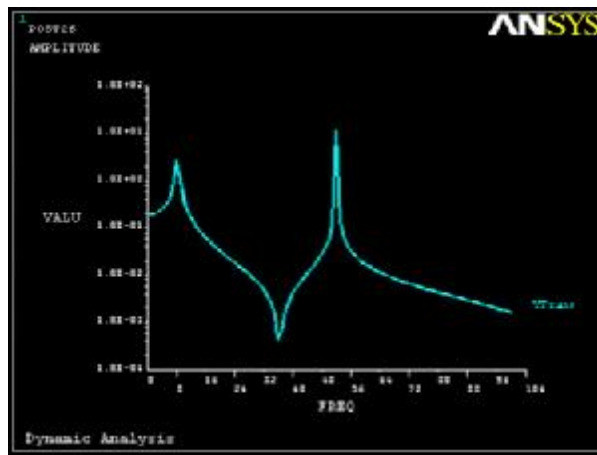


图 5-30 2# 节点的周期性载荷的响应图

版本低于 ANSYS 7.0, 变量显示 (Variable Viewer) 对话框不可用, 这时可以通过 TimeHist Postpro 的定义变量 (Define Variables) 和保存数据 (Store Data) 子菜单定义。详细操作指导参考 ANSYS Help 文件。

6. 命令流求解

ANSYS 命令流 (ANSYS Command Listing):

```

FINISH                                !下面两行将清除当前数据
/CLEAR
/TITLE, Dynamic Analysis              !添加标题
/PREP7
K, 1, 0, 0                            !定义关键点
K, 2, 1, 0
L, 1, 2                                !生成线
ET, 1, BEAM3                          !选择单元
R, 1, 0.0001, 8.33e-10, 0.01         !定义实常数: 面积, I, 高度
MP, EX, 1, 2.068e11                  !弹性模量
MP, PRXY, 1, 0.33                    !泊松比
MP, DENS, 1, 7830                    !密度
LESIZE, ALL, , , 10                 !网格尺寸
LMESH, 1                              !划分网格
FINISH                                !退出前处理器
/SOLU                                 !进入求解器
ANTYPE, 3                            !分析类型: 谐响应分析
DK, 1, ALL                           !约束1# 关键点
FK, 2, FY, 100                      !施加载荷
HARFRQ, 0, 100,                      !定义载荷步
NSUBST, 100,                        !频率子步
KBC, 1                               !定义载荷步长
SOLVE                                !求解
FINISH                                !退出求解状态
/POST26                              !POST26后处理
NSOL, 2, 2, U, Y, UY_2              !提取UY数据
STORE, MERGE                         !存储数据
PRVAR, 2                             !打印输出数据
PLVAR, 2                             !显示数据

```

7. 实例总结

1. 关于建模的总结

掌握基本的建模操作。

2. 关于施加载荷和求解的总结

掌握谐响应分析的分析选项的设置并理解各选项的确切含义；掌握结构固有频率提取方法。

5.4 瞬态分析

瞬态动力学分析也就是常说的时间历程分析，主要用于确定承受任意随时间变化载荷的

结构的动力学响应的技术。通过瞬态动力学分析可以确定结构载荷静载荷、瞬态载荷和简谐载荷的随意组合作用下的位移、应力、以及力随时间变化的情况。由于载荷和时间有关，因此惯性载荷和阻尼坐标比较重要。下面介绍瞬态动力学分析中需要注意的事项。

5.4.1 瞬态动力学分析的准备工作

1. 建立验证模型

按照一般的原则，首先需要建立一个比较简单的模型，验证分析设置是否可靠（模型最好是经过实验验证的，不管验证是自己做的还是其他人已经做的）。

2. 分析非线性因素的影响

如果结构分析中包括非线性因素，应该首先通过静力分析了解非线性特性对结构的影响机理，然后相应的调整分析模型。有时动力学分析中可以忽略非线性因素影响。

3. 了解问题的动力学特性

首先通过模态分析计算结构的固有频率和模态，为瞬态分析准备数据。

4. 非线性问题前处理

如果结构中存在非线性因素，首先应该考虑将模型非线性部分采用子结构进行建模。

5.4.2 瞬态动力学的分析方法

瞬态动力学分析 ANSYS 提供了三种方法，即 Full 法、Reduced 法和模态叠加法。在 ANSYS/Linear Plus 中只能采用模态叠加法求解。下面一一介绍上述求解方法。首先是 Full 法。

1. Full 法

Full 法采用完整的系统矩阵进行计算，是上述三种方法中功能最强大的，其允许在求解过程中考虑各类非线性特性。

注意：

由于 Full 法采用完整系统矩阵求解，所需时间较多，因此在不存非线性的结构中优先采用其他两种方法中的任意一种。

Full 法求解的优点：

- Ø 简单易用，不需要关心主自由度如何定义及模态选取。
 - Ø 使用完全矩阵，不设计质量矩阵近似。
 - Ø 对矩阵没有特殊要求，适于声学或者轴承问题分析。
 - Ø 采用单一处理进程计算出所有的位移和应力。
 - Ø 对载荷类型没有特殊要求，可以施加各种类型载荷，如节点力、非零位移约束、单元载荷等。
 - Ø 施加载荷没有限制，可以在实体模型上也可以在有限元模型上施加。
- 当然，Full 法也有它的缺点，那就是不能分析存在预应力的结构谐响应，另外就是采用

Frontal 求解器时，所需耗费较高，但是采用 JCG 求解器或者 ICCG 求解器时效率很高。

2. Reduced 法

Reduced 法借助主自由度和缩减矩阵来压缩问题的规模。主自由度处位移计算得到的结果可以扩展到初始的完整 DOF 集中。下面介绍 Reduced 法的优缺点：

1. Reduced 法的优点

- Ø 采用 Frontal 求解器时比 Full 法效率高。
- Ø 可以分析存在预应力的结构谐响应。

2. Reduced 法的缺点

- Ø 初始解只能得到主自由度处位移

需要完整 DOF 的位移、应力和力的结果需要进行扩展处理，在扩展处理过程中可以进行调整。

- Ø 对载荷类型有限制，不能施加单元载荷
载荷位置限制严格，只能施加载荷用户定义的主自由度上。
- Ø 步长限制严格
不允许采用自动时间步长，整个瞬态分析过程中时间步长恒定。
- Ø 只能考虑非常简单的非线性即点对点接触（存在间隙）

3. 模态叠加法

模态叠加法通过对模态分析得到的模态（即特征向量）与参与因子的乘积进行积分来计算结构的响应。

1. 模态叠加法的优点

- Ø 在很多问题求解上，比 Full 法或者 Reduced 法效率更高
- Ø 在模态分析中施加的载荷可以通过 LBSCALE 命令

GUI: Main Menu > Preprocessor > Loads > Define Loads > Apply > Load Vector > For Mode

Super 引入谐响应分析。

- Ø 可以使解按结构的固有频率聚集，产生更平滑、更精确的响应曲线图
- Ø 可以考虑阻尼因素（通过将阻尼系数定义为频率函数引入阻尼因素）

2. 模态叠加法的缺点

- Ø 载荷只能是简谐载荷
- Ø 所有载荷频率必须相同
- Ø 唯一可以计算的非线性就是点-点接触
- Ø 不可以施加非线性位移
- Ø 不能用于不连续或者不稳定结构分析
- Ø 计算过程中时间步长恒定
- Ø 采用 Power Dynamic 模态提取法时，初始条件中不能存在预加载荷或者位移

5.4.3 瞬态动力学分析的主要步骤

下面以 Full 法为例介绍瞬态动力学分析的步骤。Full 法瞬态动力学分析主要由三个步骤

组成：首先建模，然后加载并求解，最后观察分析结果。下面详细介绍 Full 法分析的主要步骤及其注意事项。

1. 建立有限元模型

1. 建模的注意事项

瞬态动力学分析的建模过程与其他类型的分析类型，但是需要注意以下两点：

- Ø 可以采用线性和非线性单元
- Ø 必须键入弹性模量 (EX) 和材料密度 (DENS)

材料可以是线性的也可以是非线性的，可以是各向同性的也可以是非各向同性的，可以是恒定的，也可以随温度进行变化。

2. 网格划分的注意事项

在网格划分时应该考虑以下几点：

- Ø 根据最高模态选择网格尺寸，网格密度应该保证可以准确得到最高阶模态。
- Ø 对应力/应变感兴趣的区域网格密度应该比指关心位移的区域的密度大。
- Ø 存在非线性时，网格密度应该可以准确体现非线性效果。
- Ø 需要求解波时，网格密度按照 20/每波长设置。

2. 施加载荷并求解

这部分将详细介绍瞬态分析的加载过程及其应该注意的事项。加载并求解的大致过程是：首先进入求解器，然后指定分析类型及其选项，加载，在最后求解前保存数据库。

1. 进入求解器

命令：/Solv

GUI：Main Menu > Solution

2. 选择分析类型并设定分析选项

下面介绍 ANSYS 提供的瞬态动力学分析选项：

- Ø New Analysis 选项

命令：ANTYPE

GUI：Main Menu > Solution > Analysis Type > New Analysis

选择开始新的分析 (New Analysis)。如果前面已经完成静力学预应力分析或者 Full 法瞬态动力学分析准备开始对其时间历程进行延伸，或者重新启动一个失败的非线性分析，后可以使用 Restart。但是 Restart 之前，需要保存好 Jobname.EMAT 文件，Jobname.ESAV 文件及 Jobname.DB 文件。

- Ø New Analysis: Transient Dynamic 选项

命令：ANTYPE

GUI：Main Menu > Solution > Analysis Type > New Analysis > Transient Dynamic

选择分析类型为瞬态分析。

- Ø Solution Method 选项

命令：TRNOPT

GUI：Main Menu > Solution > Analysis Type > Analysis Options

选择所需的求解器，即 Full 法、Reduced 法和模态叠加法。ANSYS 默认选择 Full 法。

☐ Mass Matrix Formulation 选项

命令：LUMPM

GUI: Main Menu > Solution > Analysis Type > Analysis Options

选择求解过程中所需的质量矩阵类型。一般默认设置可以满足大多数分析的要求，但是，如果结构中包含薄膜结构，则必须采用质量矩阵近似。

☐ Large Deformation Effects 选项

命令：NLGEOM

GUI: Main Menu > Solution > Analysis Type > Analysis Options

如果瞬态分析中需要考虑结构大变形或者大应变时，应当激活此选项（On）。

☐ Stress Stiffening Effects 选项

命令：SSTIF

GUI: Main Menu > Solution > Analysis Type > Analysis Options

对于一般分析不需要考虑 Stress Stiffening Effects，因此 ANSYS 默认将其关闭。但是当出现下列情况时应该激活（On）：小变形分析中，如果希望结构中应力显著增加（或者减小）结构刚度，如承受法向压力的原形薄膜；大变形中需要加强收敛时。

☐ Newton-Raphson Options 选项

命令：NROPT

GUI: Main Menu > Solution > Analysis Type > Analysis Options

指定求解过程中切线矩阵的刷新频率，在非线性分析时有效。

☐ Equation Solver 选项

命令：EQSLV

GUI: Main Menu > Solution > Analysis Type > Analysis Options

用于指定求解过程中所用求解器。ANSYS 供选择的求解器有：Frontal Solver（默认），JCG Solver，ICCG Solver，PCG Solver 和 Iterative Solver。一般在瞬态分析中 ANSYS 自动选择 Iterative Solver，此求解器只用于线性静力学分析/Full 法瞬态动力学分析或者稳态/瞬态热力学分析，建议在瞬态分析中采用此求解器。

3. 施加载荷

从瞬态动力学分析的定义可以指定，瞬态动力学分析包含变化为时间函数的载荷。要指定这样的载荷，需要将载荷随时间变化的曲线划分为合适的载荷步。通常的做法是在载荷/时间曲线的每个转折处都应该作为一个载荷步，如图 5-31 所示。

第一个载荷步通过用来创建初始条件，然后指定后续的瞬态载荷步及载荷步选项。对于每一个载荷步，都需要指定载荷值和时间，同时要求指定其他载荷步选项，如载荷的施加方式，是 Stepped 还是 Ramped 方式，是否需要自动时间步长等。最后将每一个载荷步写入文件中并一次求解所用载荷步。

（1）定义初始条件

施加瞬态载荷的第一步是创建初始条件（即零时刻时情况）。瞬态动力学分析要求给定两种初始条件：初始位移和初始速度。如果没有设置，则初始位移和初始速度 ANSYS 默认为零。一般初始速度假定为零，但是可以通过一个小的时间间隔那施加合适的加速度来指定加

速度满足非零初始速度条件。

下面介绍如何根据具体情况施加不同组合的初始条件：

1) 定义零初始位移和零初始速度

ANSYS 默认条件，在这种情况下，不需要指定任何初始条件。在第一个载荷步中可以加上对英语载荷/时间曲线的第一个拐角处的载荷。

2) 定义非零初始位移及/或者非零初始速度

命令：IC

GUI: Main Menu > Solution > Define Loads > Apply > Initial Condit'n > Define

但是这部分定义时容易出现初始条件相互冲突的现象。如，当一个只有自由度节点处定义了初始速度，则在所有其他自由度处的初始速度为零，这样就潜在的会出现冲突。大多数情况下，不要在模型的任意为约束自由度处定义初始条件，除非初始条件对于各自由度有不同的要求。

3) 定义零初始位移和非零初始速度

一般非零初始速度通过在一个非常小的时间间隔段上定义一个非常小的位移等效。如果，初始速度 $v=0.25$ ，那么通过在时间间隔 0.004 那加上 0.001 的位移来等效，即位移与位移的比值恰好等于初始速度。

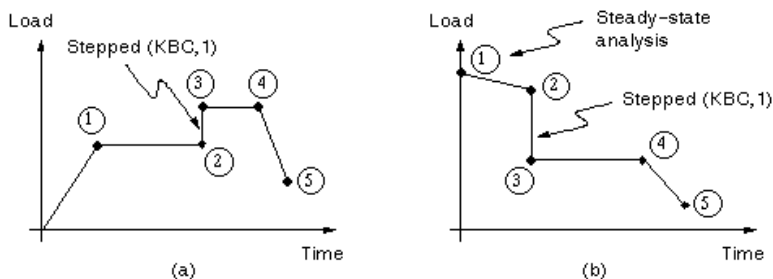


图 5-31 载荷及其载荷步

下面通过命令流实现：

```
Timint, off          关闭时间积分
D, All, UY, 0.001    !定义UY为0.001（假设速度方向为Y方向）
Time, 0.004          !初始速度为0.001/0.004=0.25
Lswrrite             !将载荷步数据写入载荷步文件（Jobname.s01）
DDELE, All, UY       !删除已定义的位移
Timint, on           !打开时间积分
```

4) 定义非零初始位移和非零初始速度

与上面情况的定义相似，只不过施加的位移是真实数值而非小数值。如，初始位移为 1.0 且初始速度为 2.5，则应当在时间间隔 0.4 那施加一个值为 1.0 的位移，命令流如下：

```
Timint, off          !关闭时间积分
D, All, UY, 1.0      !定义UY为1.0（假设速度方向为Y方向）
Time, 0.4            !初始速度为0.001/0.004=0.25
```

```
Lswrite           !将载荷步数据写入载荷步文件 (Jobname.s01)
DDELE, All, UY    !删除已定义的位移
Timint, on        !打开时间积分
```

5) 定义非零初始位移和零初始速度

这种情况需要两个子步来实现，所加位移在两个子步之间是阶越变化的（如图 5-31 (a) 所示）。如果位移不是阶越变化的，即只采用一个子步定义，则所施加的位移随时间变化，初始速度将不为零。下面通过命令流定义一个初始位移为 1.0，初始速度为零的情况：

```
Timint, off       !关闭时间积分
D, All, UY, 1.0   !定义UY为1.0
Time, 0.001       !很小的时间间隔
Nsubst, 2         !采用两个子步
Kbc, 1            !阶越加载
Lswrite           !载荷数据写入载荷步文件中 (Jobname.s01)
Timint, on        !打开时间积分
Time, , , ,       !启动时间积分 (瞬态分析)
DDELE, All, UY    !删除位移约束
Kbc, 0            !Ramped 加载 (假定满足初始条件需要)
!继续常规的瞬态求解过程
```

6) 定义非零初始加速度

定义非零初始加速度可以通过在很小的时间间隔那指定所需的加速度 (ACE) 来实现。如，初始加速度为 9.81，则命令流如下：

```
Ace, , 9.81      !初始y方向加速度
Time, 0.001      !很小的时间间隔
Nsubst, 2        !两个子步
Kbc, 1           !Stepped加载
Lswrite          !载荷数据写入载荷步文件 (Jobname.s01) 中
Time, , , ,      !实际的时间间隔
DDEL, , , ,      !删除位移约束
Kbc, 0           !Ramped加载
!继续常规的瞬态求解
```

(2) 加载瞬态载荷

除了惯性载荷外，其他载荷均可以在实体模型或者有限元模型上加载。下面介绍各种类型载荷及其加载方式：

Ø Displacement 载荷

命令：D

GUI: Main Menu > Solution > Define Loads > Apply > Structural > Displacement

此选项定义位移约束

Ø Force/Moment 载荷

命令：F

GUI: Main Menu > Solution > Define Loads > Apply > Structural > Force/Moment

此选项定义集中载荷。

☐ Pressure 选项

命令: SF

GUI: Main Menu > Solution > Define Loads > Apply > Structural > Pressure

此选项施加面载荷。

☐ Temperature/Fluence/Moisture 载荷

命令: BF

GUI: Main Menu > Solution > Define Loads > Apply > Structural > Temperature

此选项定义体载荷。

☐ Gravity, Spinning 等载荷

命令:

GUI: Main Menu > Solution > Define Loads > Apply > Structural > Other

此选项定义惯性载荷。

分析过程中,可以施加、删除载荷,或者对载荷进行操作、列表,瞬态分析过程中的载荷命令与谐波分析过程中的命令基本一致,这里不再进行详述,命令可以参考表 5-6。所有载荷操作均可以通过一系列的 GUI 操作实现:先选择载荷操作,再选择载荷形式,最后选择进行载荷操作的对象。

(3) 定义瞬态载荷的载荷步

下面介绍瞬态动力学分析中可用的载荷步选项,选项根据分析类型大致分为动力学选项、普通选项及非线性选项。下面详细介绍各个选项的功能及其设定。

1) 动力学分析选项

动力学分析选项主要由以下选项组成:

☐ Time Intergration Effects 选项

命令: TIMINT

GUI: Main Menu > Solution > Load Step Opts > Time/Frequenc > Time Integration

分析中考虑了惯性和阻尼影响时必须打开时间积分效果,否则只能进行静力分析。

ANSYS 瞬态分析中默认打开时间积分效果。

☐ Transient Itergration Parameters 选项

命令: TINTP

GUI: Main Menu > Solution > Load Step Opts > Time/Frequenc > Time Integration

Transient Itergration Parameters 是用于控制 Newmark 时间积分法特性的。ANSYS 默认时采用恒定加速度方案。

☐ Damping 选项

命令: ALPHAD (质量阻尼)

BETAD (刚度阻尼)

DMPRAT (恒定阻尼比)

GUI: Main Menu > Solution > Load Step Opts > Time/Frequenc > Damping

上述三种阻尼都可以产生与频率相关的阻尼比。

2) 普通选项

Ø Time 选项

命令: TIME

GUI: Main Menu > Solution > Analysis Type > Sol'n Controls > basic

通过此选项指定载荷步阶数的时间。

Ø Stepped or Ramped Loads 选项

命令: KBC

GUI: Main Menu > Solution > Load Step Opts > Time/Frequenc > Freq and Substps

此选项用于设定载荷的变化方式, 即是 Stepped 还是 Ramped 方式。ANSYS 默认设置采用 Ramped。

Ø Integration Time Step 选项

命令: DELTIM 或者 NSUBST

GUI: Main Menu > Solution > Analysis Type > Sol'n Controls > basic

积分时间步长是一年关于运动方程时间积分的时间增量的。可以直接使用 DELTIM 或者 NSUBST 命令指定。时间步长越小, 求解的精度越高。

Ø Automatic Time Stepping 选项

命令: AUTOTS

GUI: Main Menu > Solution > Analysis Type > Sol'n Controls > basic

对于大多数问题建议打开自动时间步长, 并可以设置积分时间步长的上下限。ANSYS 默认关闭自动时间步长。

3) 非线性选项

非线性选项只有考虑结构非线性时才有效, 下面介绍各个非线性选项及其设定:

Ø Max. No.of Equilibrium Iterations 选项

命令: NEQIT

GUI: Main Menu > Solution > Load Step Opts > Nonlinear > Equilibrium Iter

通过此选项设置最大平衡迭代次数。

Ø Convergence Tolerances 选项

命令: CNVTOL

GUI: Main Menu > Solution > Load Step Opts > Nonlinear > Convergence Crit

通过此选项设置收敛准则。

Ø Predictoy-Corrector Option 选项

命令: PRED

GUI: Main Menu > Solution > Analysis Type > Sol'n Controls > nonlinear

通过此选项控制发散。

Ø Line Search Option 选项

命令: LNSRCH

GUI: Main Menu > Solution > Load Step Opts > Nonlinear > Line Search

通过此选项设置线性搜索。

Ø Creep Criteria 选项

命令: CRPLIM

GUI: Main Menu > Solution > Load Step Opts > Nonlinear > Creep Criterion

通过此选项设置蠕变准则。

❶ Solution Termination Options 选项

命令: NCNV

GUI: Main Menu > Solution > Analysis Type > Sol'n Controls > advanced nl

通过此选项设置求解过程中止的标准。

4) 输出控制选项

通过设定输出控制选项参数控制求解结果的输出, 下面介绍输出控制选项的功能及其设定:

❶ Pinned Output 选项

命令: OUTPR

GUI: Main Menu > Solution > Load Step Opts > Output Ctrl's > Solu Printout

激活此选项时输出文件包含所有结果数据。

❷ 定义 Database and Results File Output 选项

命令: OUTRES

GUI: Main Menu > Solution > Analysis Type > Sol'n Controls > basic

此选项定义输出文件中所包含的数据。

❸ Extrapolation of Results 选项

命令: ERESX

GUI: Main Menu > Solution > Load Step Opts > Output Ctrl's > Integration Pt

此选项可以设置用复制结果到节点方式而非外插值方式(默认)观察单元积分点结果。

注意:

默认时, Full 法瞬态动力学分析中只有最后一个子步(时间点)的结果写入结果文件。如果需要写入所有载荷步的分析结果, 必须将 OUTRES 命令的 Freq 值设置为 All。另外可以通过 /CONFIG, NRES 命令调整载荷子步最大数目。

4. 保存当前载荷步设置到载荷步文件中

命令: LSWRITE

GUI: Main Menu > Solution > Load Step Opts > Write LS File

对载荷/时间关系曲线上的每个转折点重复 3~4 步, 可能需要有一个额外的延伸到载荷曲线最后一个时间点外的载荷步, 以考察承受瞬载荷时结构的响应。

5. 备份数据库

6. 求解

命令: SOLVE

GUI: Main Menu > Solution > Solve > Current LS

7. 退出求解器

3. 查看分析结果

瞬态动力学分析生成的结果保存在结果文件 Jobname.OUT 中, 结果文件中包含基本数据

(节点位移)及由基本数据派生出的数据(如节点和单元应力、应变,单元力,节点反作用力等)。

通常的后处理是通过通用后处理器(POST1)和时间-历程后处理器(POST26)进行的。用 POST1 观察给定时间点上整个模型的结果,用 POST26 观察模型指定参数随时间的变化曲线。下面详细介绍动力学分析的两种后处理过程:

1. POST26 后处理

POST26 需要通过结果数据/频率对比变化关系确定临界频率,这需要通过变量定义实现,首先需要定义变量(ANSYS 默认 1# 变量为频率),然后显示变量间变化曲线,具体操作过程如下所示:

(1) 定义参数变量

一般通过下面命令定义各个变量:

NSOL 命令: 由于定义基本数据,如节点位移。

GUI: Main Menu > TimeHist Postpro > Define Variables

ESOL 命令: 用于定义派生数据,如单元解数据中的应力、应变等。

GUI: Main Menu > TimeHist Postpro > Define Variables

RFORC 命令: 用于定义反作用力数据,如节点反作用力等。

GUI: Main Menu > TimeHist Postpro > Define Variables

注意:

可以借助 RFORC 命令选择合力、合力的静力分量、阻尼分量、惯性分量。

(2) 绘制变量间变化曲线

这里可以绘制各个变量对频率或者其他变量的相对变化曲线,然后可以借助 PLCPLX 命令(GUI: Main Menu > TimeHist Postpro > Settings > Graph)指定显示类型,即采用/辐值相位角形式还是实部/虚部形式。

(3) 列表显示变量值

单纯的列出参数值可以借助 EXTREM 命令(GUI: Main Menu > TimeHist Postpro > List Extremes/ List Variables),然后通过 PLCPLX 命令指定显示方式。

另外在 POST26 中还可以在变量间进行函数运算,在变量值与数组元素之间进行双向传递等。

2. POST1 后处理

采用 POST1 主要是分析临界频率处模型的变化情况,首先需要读入 POST26 中指定点的分析结果,然后显示各个感兴趣的变量变化情况。下面介绍详细的操作步骤:

(1) 读入所需谐响应分析结果

数据读入可以借助 SET 命令读入指定的结果,但是此命令只能读入实部或者虚部,不能同时进行上述操作,结果中数据值由图 5-15 所示公式决定。

(2) 显示结果等值线、向量图或者数据列表

一般对于结构的变形形状、应力、应变的分布感兴趣,需要显示这些数据的等值线图,矢量图及感兴趣参数的列表,其操作与一般静力分析后处理没有区别,这里不再详述。下面介绍瞬态动力学分析中常用的选项:

- Ø 显示能量百分比误差

命令: PRERR

GUI: Main Menu > General Postproc > List Results > Percent Error

对于使用实体或者壳单元的线性静力学分析, 可以使用 PRERR 列出估计 的由于网格离散化造成的求解误差, 评估结果的可靠性。

☐ 显示单元能量误差

命令: PLESOL, SERR

GUI: Main Menu > General Postproc > Plot Results > Element Solu

使用 PLESOL, SERR 命令可以绘制出每个单元的结果能量误差 (SERR) 的等值线。在显示出的等值线上, SERR 高的区域应该是进一步细化网格的优先区域。这也可以评估原有网格划分是否合理的一个重要依据。

☐ 显示结果等值线图

命令: PLNSOL 或者 PLESOL

GUI: Main Menu > General Postproc > Plot Results > Nodal Solu 或者 Element Solu

☐ 显示单元数据列表数据或者线单元数据的等值线

命令: PLETAB, PLIS

GUI: Main Menu > General Postproc > Element Table > Plot Elem Table

Utility Menu > Plot > Results > Contour Plot > Elem Table Data

注意:

防止数据在不同单元、材料类型间或者其他不连续因素间平均, 在使用 PLNSOL 时应该优先选择同种材料的单元。

5.4.4 瞬态动力学分析实例

1. 教学目的

通过悬臂梁瞬态动力学分析学习, 了解定义载荷的基本步骤, 具备分析类似简单问题的能力。希望读者完成本例学习后加强练习, 掌握更扎实的动力学分析技能。

2. 问题描述

难度级别: 普通级别。

所需时间: 一个小时或者更多 (视 ANSYS 操作熟练程度而定)。

实例类型: ANSYS 结构分析。

分析类型: 瞬态分析。

单元类型: BEAM3

ANSYS 功能示例: 实体建模包括基本的建模操作; 施加瞬态载荷并设定载荷步选项; 显示变形后形状和应力等值线图; 基本的结果验证技巧。

ANSYS 帮助文件: 在 ANSYS Structural Analysis Guide 了解 Transient Analysis 分析知识, 在 ANSYS Elements Reference 部分了解 BEAM3 单元的详细信息。

悬臂梁模型如图 5-32 所示。瞬态动力学分析是分析结构在承受随时间变化载荷时结构响应状况的技术。瞬态分析的时间范围需要考虑结构的惯量和阻尼效果, 这对结构分析的结果

较大。在承受阶梯加载 (Stepped) 或者冲击载荷 (Impulse) 时, 结构惯量和阻尼效果对分析结构起主要作用, 如在很短的时间内, 载荷出现很大的变化时。本例中将在悬臂梁的自由端施加一个沿垂直方向的冲击载荷 (如图 5-33 所示), 观察载荷施加位置的响应情况。因为理想冲击载荷激发结构所有振荡模态, 所以悬臂梁的响应中必然包含所有的振荡频率。然而不可能通过数值的方式产生一个如此理想的冲击载荷, 这只能在一个很短的时间 dt 内时间一个载荷来模拟理想冲击载荷 (如图 5-34 所示)。

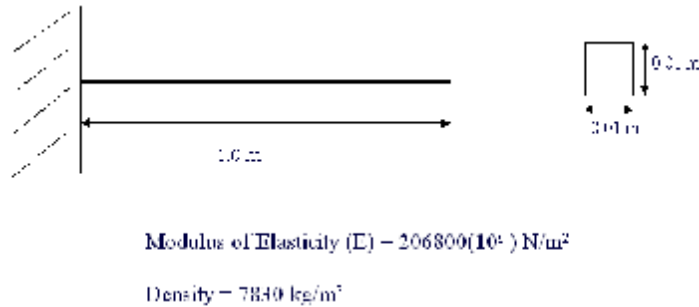


图 5-32 悬臂梁模型



图 5-33 瞬态载荷

在施加载荷后, 跟踪观察梁在离散时间点上梁的响应情况, 时间长短取决于观察的需要。加载时间步长大小由结构最高振荡频率决定。加载时间步长越小, 得到的最高振荡频率就越高。ANSYS 系统对时间步长的简单出来如下:

$$time_step = 1 / 20f$$

式中:

f 为想要获取的最高振荡频率。

换句话说, 需要首先确定载荷时间步长, 这样才能在每个步长范围中得到 20 个最高振荡频率的离散点。

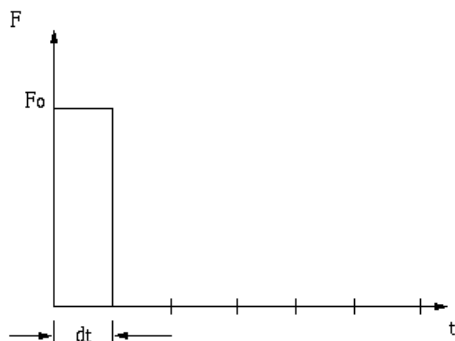


图 5-34 载荷-时间变化

采用简化法计算结构瞬态响应情况。通常，不需要更多工作，只需察看简化法分析结果即可。然而，如果需要获取更多应力和力的细节，那么需要使用展开结果。

3. 非阻尼分析

不考虑阻尼因素的动力学分析与普通类型的分析的主要步骤大致相同，都是首先建立有限元模型，然后施加载荷、求解，最后是查看分析结果。下面安装上述步骤讲解动力学分析实例。首先进入建模部分：

建立有限元模型

下面将详细讲解悬臂梁实体模型的定义过程，具体操作过程如下所示：

1. 进入前处理器

GUI: Main Menu > Processor

命令: /PREP7

2. 添加标题

GUI: Utility Menu > File > Change Title ...

键入标题为: Dynamic Analysis

命令: /TITLE, Dynamic Analysis

3. 修改工作名

防止下次启动 ANSYS 数据文件被修改，操作如下：

GUI: Utility Menu > File > Change Jobname ...

键入工作名: Dynamic

命令: /FILNAME, Dynamic, 0

4. 定义关键点

在 Active CS 坐标系中定义关键点，操作如下：

GUI: Preprocessor > Modeling > Create > Keypoints > In Active CS

通过两个关键点（即悬臂梁的两个端点）定义。

命令: k, 1, 0, 0

k, 2, 1, 0

5. 定义直线

通过已定义的关键点定义直线（即悬臂梁实体模型），操作如下：

GUI: Preprocessor > Modeling > Create > Lines > Lines > Straight Line

在 1# 和 2# 关键点之间生成一条直线。

命令: L, 1, 2

6. 选择单元

其操作如下：

GUI: Preprocessor > Element Type > Add/Edit/Delete...

选择 BEAM3 单元（二维弹性梁）。

命令: ET, 1, BEAM3

7. 定义实常数

其操作如下：

GUI: Preprocessor > Real Constants > Add

在 BEAM3 实常数窗口（ Real Constants for BEAM3 ）中，键入下面几何参数：

梁横截面积（Cross-sectional area AREA）: 100

面积转动惯量（Area Moment of Inertia IZZ）: 833.333

梁的高多（Total beam height HEIGHT）: 100

命令定义实常数: R, 1, 100, 833.333, 100

8. 定义材料属性

这里需要定义材料的弹性模量和密度，另外考虑到结构分析应力应变因素需要定义泊松比，定义材料属性操作如下：

GUI: Preprocessor > Material Props > Material Models > Structural > Linear > Elastic > Isotropic

在弹出 Define Material Behavior 对话框中定义材料属性：

杨氏模量（即弹性模量，Young's modulus EX）: 200000

泊松比（泊松比 PRXY）: 0.3

现在定义材料密度，在定义材料模型参数（ Define Material Model Behavior ）对话框单击密度（Density）按钮，键入密度值 7.83。

命令:

MP, EX, 1, 200000

MP, PRXY, 1, 0.33

MP, DENS, 1, 7830

注意:

在动态分析过程中，材料的密度和硬度都必须详细说明。

9. 设定网格尺寸

其操作如下：

GUI: Preprocessor > Meshing > Size Cntrl > ManualSize > Lines > All Lines

选择将悬臂梁模型分为 10 份，即单元长度为 100mm。

命令: LESIZE, ALL, , , 10

10. 划分网格

GUI: Preprocessor > Meshing > Mesh > Lines > Pick All

命令: LMESH, 1

施加载荷并求解

动力学分析在此步骤中基本相同：选择分析类型及其选项，施加载荷，指定载荷步选项并求解。施加载荷并求解的操作如下所示：

1. 选择分析类型

选择瞬态动力学分析，操作如下：

GUI: Solution > Analysis Type > New Analysis > Transient

在弹出的 Transient Analysis 对话框中，求解方法选择简化法（如图 5-35 所示）。

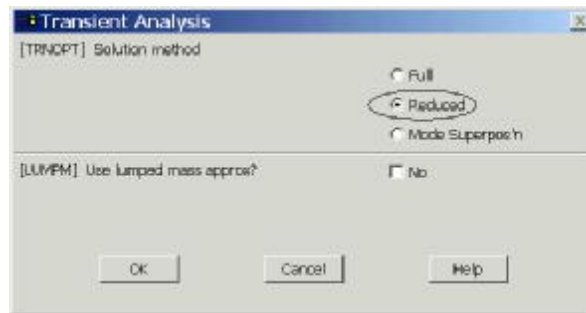


图 5-35 设定瞬态分析方法

2. 定义主自由度

采用用户自定义方式，操作如下：

GUI: Solution > Master DOFs > User Selected > Define

选择除了 $x=0$ 节点外所有节点。在弹出的下面对话框中，取 UY 为第一自由度（如图 5-36 所示）。关于主自由度的详细说明，参考模态分析部分实例。



图 5-36 设定主自由度

3. 定义约束

定义梁的端点的约束，操作如下：

GUI: Solution Menu > Define Loads > Apply > Structural > Displacement > On nodes

固定（Fixed）最左端节点的所有自由度（All DOFs）。

4. 施加载荷

通过载荷步长定义所需冲击载荷。图 5-37 所示为载荷沿时间变化曲线。由于求解采用简化法，所以在一个时间步长中载荷数值大小不变。

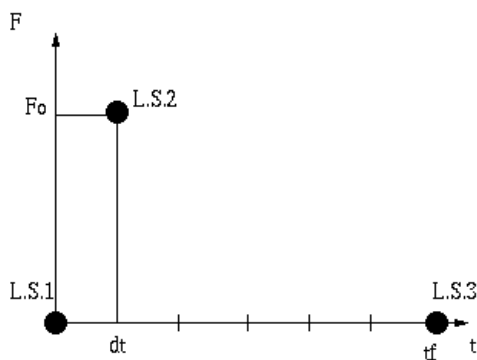


图 5-37 冲击载荷模型

瞬态载荷需要一一定义每个加载片段中的载荷，并存入文件以方便后面求解需要。当所分析的问题需多步加载可能会出现需要重新求解，对此强烈建议及时保存加载文件。定义完单步载荷后，可以按子步一一求解。子步的分析结果将存入文件以便调用，同时在定义完整个载荷加载情况后求解每步载荷下结构响应。

5. 定义初始条件

定义初始条件，即根据瞬态载荷的类型建立相应的载荷文件并在求解时导入分析进程。下面介绍初始条件的详细定义过程：

(1) 定义加载步长

需要定义加载初始条件即在 $t=0$ 时。因为，瞬态分析方程还有另外一个条件，即需要两个初始条件：初始位移和初始速度。然而，初始位移和速度的默认设置均为零，所以，可以跳过这一步直接进入下一步设置

(2) 加载第一步载荷步

1) 进入加载时间设定对话框

其操作如下：

GUI: Solution > Load Step Opts > Time/Frequenc > Time - Time Step ..

2) 设置载荷步

在 Time and Time Step Option 对话框中的 Time at end of load step 栏键入“0”。在 Time step size 栏键入“0.001”。这样取 0.001 秒为加载步长中的时间步长（如图 5-38 所示）。



图 5-38 设置第一载荷步

3) 写入载荷步文件

GUI: Solution > Load Step Opts > Write LS File

弹出 Write Load Step File 对话框 (如图 5-39 所示)。在 LSNUM 键入 1。单击 OK。加载步长文件在工作目录下保存为 jobname.s01。

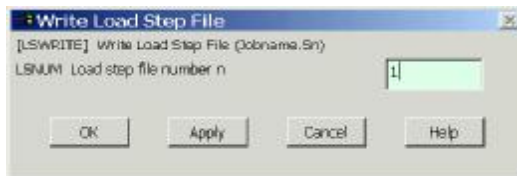


图 5-39 写入载荷步文件

(3) 加载第二载荷步

1) 定义载荷

在节点上定义载荷, 操作如下:

GUI: Solution > Define Loads > Apply > Structural > Force/Moment > On Nodes

选择梁最右端节点 ($x=1000$), 设定 FY 方向载荷, 大小为 -100N。

2) 定义时间步及相关选项

首先进入时间参数设定对话框, 操作如下:

GUI: Solution > Load Step Opts > Time/Frequenc > Time - Time Step ..

取载荷步长末端值为 “0.001”。

3) 写入加载步长文件

写入加载步长文件, 操作如下:

GUI: Solution > Load Step Opts > Write LS File

在 LSNUM 栏键入 2。单击 OK。写入第二载荷步文件。

(4) 第三载荷步加载

1) 定义载荷

在节点上定义载荷，操作如下：

GUI: Solution > Define Loads > Apply > Structural > Force/Moment > On Nodes

删除在 $x=1000$ 节点上载荷。

2) 定义时间及相关选项

首先进入 Time and Time Step Option 对话框，操作如下：

GUI: Solution > Load Step Opts > Time/Frequenc > Time - Time Step ..

键入载荷步长末端值为 1。单击 OK 按钮。

3) 写入加载步长文件

写入加载步长文件，操作如下：

GUI: Solution > Load Step Opts > Write LS File

在 LSNUM 栏键入 3。单击 OK。

6. 求解

首先读入文件求解，操作如下：

GUI: Solution > Solve > From LS Files

弹出 Solve Load Step Files 对话框并按照图 5-40 进行设置。

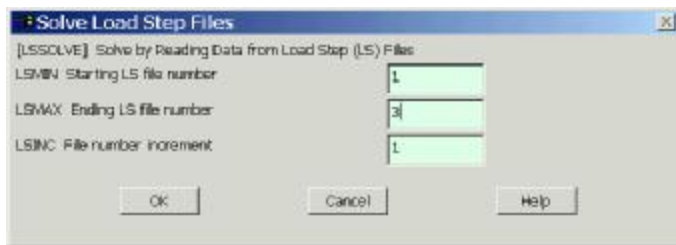


图 5-40 读入载荷步文件

查看分析结果

求解完毕，下面介绍观察结果。所有的瞬态动力学分析结果均保存到结果文件 Jobname.RST 中。文件中包含基本数据（节点位移）和由此派生出的数据（节点/单元应力应变，单元力，节点反作用力等）。如果在结构中定义了阻尼，响应与载荷出现相位差，所有结构数据将以复数形式，并以实部和虚部分开存储。下面介绍如何通过 POST26 察看 2# 节点响应（UY），具体操作过程如下所示：

1. 定义 2# 节点的 UY 变量

需要定义想要显示图形的参数，ANSYS 系统默认，1# 变量（Variable 1）即可以是时间也可以是频率，这里认为 1# 变量为频率。希望获取坐标为 $x=1000$ 的 2# 节点 UY 位移变化情况。需要显示节点及其属性，可以通过 GUI: Utility Menu > List > nodes 获取节点列表。

进入变量显示对话框，操作如下：

GUI: TimeHist Postpro > Variable Viewer...

弹出 Time History Variable 对话框

在图 5-41 所示对话框中单击 Add 按钮，弹出 Add Time-History Variable 对话框（如图 5-41 所示）。

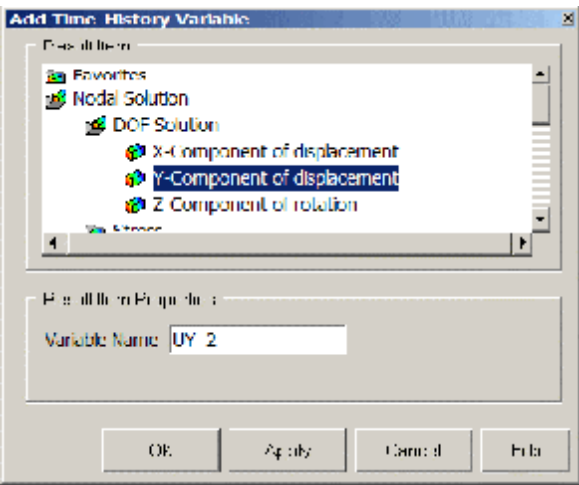


图 5-41 定义 UY 变量

由于仅对 2# 节点 UY 方向位移感兴趣，所以选择 UY 为 2# 变量，操作如下：

GUI: Nodal Solution > DOF Solution > Y-Component of displacement

单击 OK。根据提示在图形对话框中选择 2# 节点，然后单击 OK 按钮。2# 变量定义完毕。

2. 列表显示 2# UY 变量结果

在时间历史变量（ Time History Variables ）对话框中，单击列表显示（List）按钮。显示出 2# 节点在每个时间点上的 UY 值（如图-544 所示）。

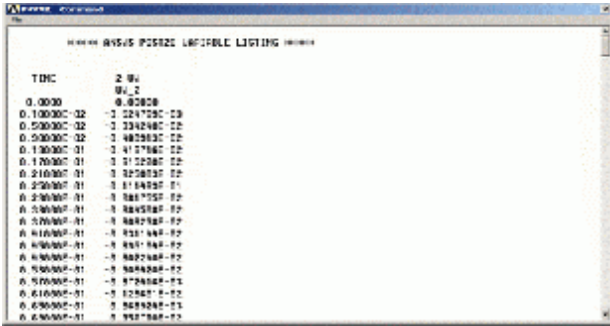


图 5-44 UY 数据列表

3. 显示 UY-频率变化曲线

时间历史变量对话框中单击 Plot 按钮。在 ANSYS 主对话框中得到 UY 随时间变化图形（如图 5-45 所示）。

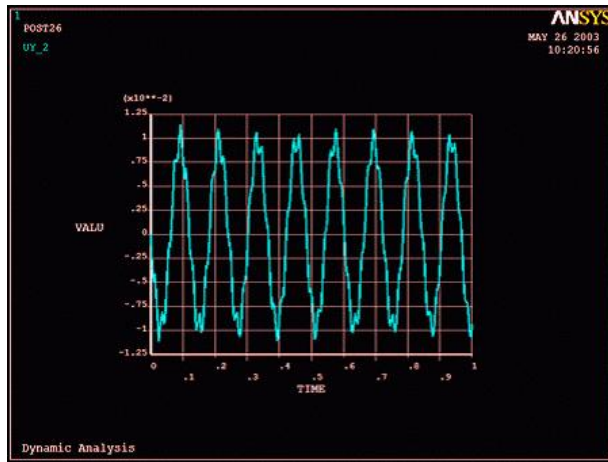


图 5-45 UY-时间变化曲线

注意：

- (1) 在一秒中大致出现 8 个周期。这是可以获取的悬臂梁的第一阶模态。
- (2) 同样需要注意在一个更高频率时响应。可能已经获取悬臂梁的二阶模态 (52Hz)。
- (3) 应该注意到的是，这些响应没有向预料的那样衰减。因为这里没有定义系统阻尼。

模态扩展

对于大多数问题，不需要再进一步分析简化法分析结果，即瞬态动力学分析问题中结构响应结果是最感兴趣的。

然而，如果还需要应力数据，那么就必须展开简化法分析结果。选择，假定对悬臂梁的峰值响应情况非常感兴趣，需要扩展部分或者全部峰值（或下降部分）分析结果。这里将展开从 0.08 秒到 0.11 秒之间的 10 个结果。

1. 退出求解器

单击 ANSYS 主菜单中结束 (finish)

2. 设置模态扩展选项

将扩展求解开关打开 (on)，操作如下：

GUI: Solution > Analysis Type > ExpansionPass...

3. 修改频率范围

选择最感兴趣的频率范围，操作如下：

GUI: Solution > Load Step Opts > ExpansionPass > Single Expand > Range of Solu s

在 0.08 秒到 0.11 秒范围那展开 10 个解答（如图 5-46 所示）。

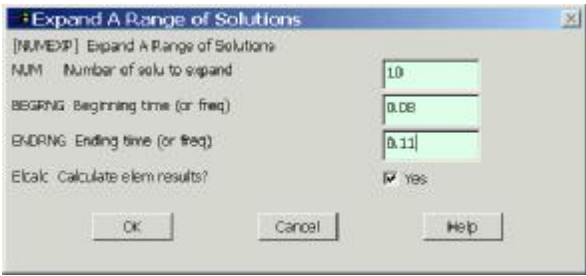


图 5-46 设置频率范围

4. 求解

GUI: Solution > Solve > Current LS

命令: SOLVE

5. 查看分析结果

扩展后分析结果察看可以通过通用后处理 (POST1) 也可以通过时间历程后处理 (POST26)。模态展开后, 可以察看展开后的 10 个分析结果中悬臂梁的变形情况。

4. 阻尼响应分析

上面悬臂梁瞬态动力学分析过程中没有涉及结构的阻尼分析。设置阻尼分析, 需要在定义时间及时步长时同时定义。

现在, 准备重新进行瞬态动力学分析, 考虑结构的阻尼因素。由于前面已经保存了载荷加载文件, 所以, 现在可以很轻松只修改文件中的几个参数数值就可以重新通过这些文件进行结构瞬态动力学分析了, 具体操作如下所示:

1. 设置阻尼参数

打开第一个载荷加载文件 (Dynamic.s01), 操作如下:

GUI: Utility Menu > File > List > Other > Dynamic.s01

打开后文件如下所示:

```
/COM, ANSYS RELEASE 5.7.1 UP20010418      14:44:02      08/20/2001
/NOPR
/TITLE, Dynamic Analysis
_LSNUM= 1
ANTYPE, 4
TRNOPT, REDU, , DAMP      ! 定义瞬态动力学分析类型, 包括阻尼效应
BFUNIF, TEMP, _TINY
DELTIM, 1.000000000E-03
TIME, 0.00000000
TREF, 0.00000000
ALPHAD, 0.00000000
BETAD, 0.00000000
DMPRAT, 0.00000000
TINTP, R5.0, 5.000000000E-03, , ,
```

```

TINTP,R5,0,-1.00000000,0.50000000,-1.00000000
NCNV,1,0.00000000,0,0.00000000,0.00000000
ERESX,DEFA
ACEL,0.00000000,0.00000000,0.00000000
OMEGA,0.00000000,0.00000000,0.00000000,0
DOMEA,0.00000000,0.00000000,0.00000000
CGLOC,0.00000000,0.00000000,0.00000000
CGOMEGA,0.00000000,0.00000000,0.00000000
DCGOMG,0.00000000,0.00000000,0.00000000
D,1,UX,0.00000000,0.00000000
D,1,UY,0.00000000,0.00000000
D,1,ROTZ,0.00000000,0.00000000
/GOPR

```

进行类似操作，在全部三个文件中修改阻尼值 BETAD，取值从 0 到 0.01。

2. 利用新载荷加载，重新计算

清除当前数据，重新开始，操作如下：

GUI: Utility Menu > file > Clear and Start New

3. 设置载荷步

具体设置过程与非阻尼分析相同，不再详述。

4. 求解

GUI: Solution > Solve > Current LS

弹出对话框中，第一步加载分析选择 1# 文件到 3# 文件。

6. 查看 2# 节点 UY-时间变化曲线

考虑系统阻尼后响应如图 5-47 所示。

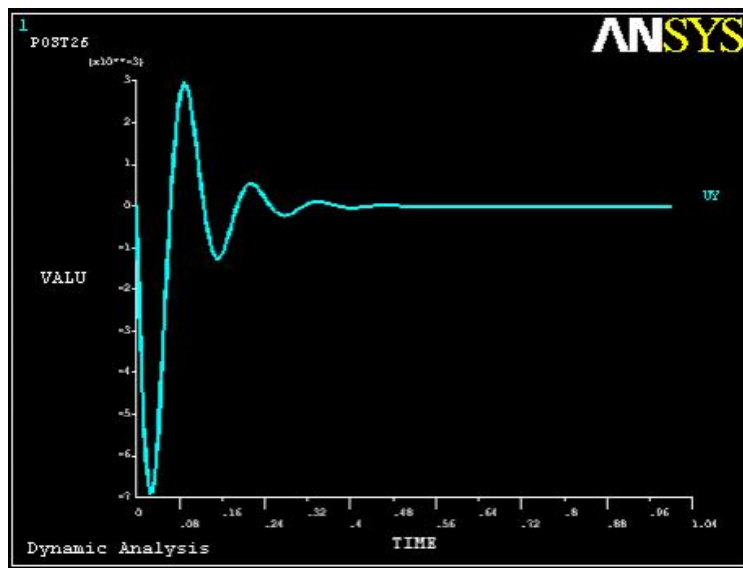


图 5-47 2# 节点 UY-时间变化曲线

5. 命令流求解

ANSYS 命令流 (ANSYS Command Listing):

```

Finish                !下面两行命令将清除当前数据
/clear
/TITLE, Dynamic Analysis!添加标题
/FILNAME, Dynamic, 0   !定义文件名: Dynamic
/PREP7                !进入前处理
K, 1, 0, 0            !定义关键点
K, 2, 1, 0
L, 1, 2                !通过关键点定义线
ET, 1, BEAM3          !选择单元
R, 1, 0.0001, 8.33e-10, 0.01!定义实常数
MP, EX, 1, 2.068e11    !定义弹性模量
MP, PRXY, 1, 0.33      !泊松比
MP, DENS, 1, 7830      !定义材料密度
LESIZE, ALL, , , 10    !定义网格尺寸
LMESH, 1               !划分网格
FINISH                !退出前处理
/SOLU                  !进入求解状态

ANTYPE, TRANS          !分析类型: 瞬态动力学分析
TRNOPT, REDUC,         !reduced 法
DELTIM, 0.001          !定义time step sizes
!定义0时刻时载荷步
NSEL, S, , , 2, 11,    !选定节点2#
M, A11, UY, , ,        !定义Master DOFs
NSEL, ALL              !Reselect all nodes
D, 1, ALL              !约束左端点
F, 2, FY, -100         !在右端点定义载荷, 大小为-100
!定义0.001时刻时载荷步
TIME, 0.001            !时间点为0.001秒
KBC, 0                 !Ramped 加载
FDELE, 2, ALL          !删除末端加载
!定义1s时刻载荷步
TIME, 1                !1秒时
KBC, 0                 !Ramped 加载
LSSOLVE, 1, 3, 1       !多步加载求解
FINISH                 !退出求解器
/POST26                !进入 POST26后处理

```

```
FILE, Dynamic , rdsp , . !调用dynamic文件
NSOL, 2, 2, U, Y, UY_2      !调用2#节点处UY数据STORE, MERGE
!保存数据
PLVAR, 2,                  !显示随时间变化图形
```

6. 实例总结

1. 关于建模的总结

掌握基本的建模操作；掌握定义材料密度的操作，这时进行瞬态分析经常遇到的。

2. 关于施加载荷和求解的总结

掌握结构主自由度的设定；掌握瞬态载荷的定义及其选项的设定；掌握模态扩展操作，并可以根据分析的目的提取感兴趣的模态；掌握结构阻尼系数的设定并分析存在阻尼效应时结构对瞬态载荷的响应。

5.5 本章小结

通过本章学习需要掌握以下内容：

(1) 首先要掌握动力学分析的基础知识，即动力学分析的基本概念、重要性、动力学分析的基本类型和建模过程中需要注意的事项（与静力学分析相比）。

(2) 在模态分析部分，需要掌握模态分析的主要步骤及每个步骤中需要注意事项，并通过实例分析扎实掌握模态分析的主要操作技能。

(3) 在谐响应分析部分，需要掌握谐响应分析的主要步骤及每个步骤中需要注意事项，并通过实例分析扎实掌握谐响应分析的主要操作技能。

(4) 在瞬态分析部分，需要掌握瞬态分析的主要步骤及每个步骤中需要注意事项，并通过实例分析扎实掌握瞬态分析的主要操作技能。

要想学好、用好 ANSYS 动力学分析功能，必须从基础部分开始，了解动力学分析的特性，然后在学习专业知识提高实际操作水平。

5.6 习题

1. 直角支架模型如习题 5-1 图所示。

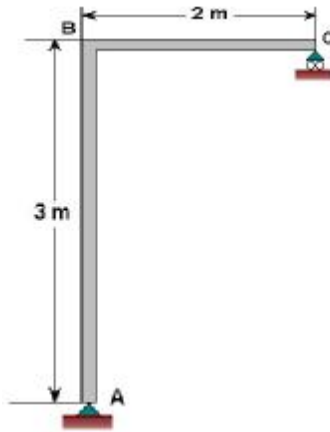
几何尺寸：如习题图 5-1 所示， $I=1/12 \times 10^{-4}$ 。

材料参数：材料为钢材，弹性模量为 $E=200\text{E}3\text{MPa}$ ，泊松比为 $\mu=0.29$ ，密度为 $\rho=7860\text{kg/m}^3$ 。

边界条件：A 点铰支，约束其 x、y 轴方向平移，C 点约束其沿 Y 方向平移。

要求：对此直角梁进行振动分析，察看梁的各阶振动模态形状。

提示：进行模态分析。



习题图 5-1 直角梁模型

2. 悬臂梁模型如习题图 5-2 所示。

几何参数：铰支梁的长度为 15m，横截面尺寸为 0.5×0.3 （宽 $\times$ 高）。

材料参数：弹性模量 $E=2.0E8\text{Kpa}$ ，泊松比 $\mu=0.3$ ，密度 $\nu=7.8\text{kg/m}^3$

约束：左侧约束端点 UY、UX，右侧约束 UY。

载荷：两个作用的简谐载荷相同： $F_x=10\text{KN}$ ， $F_y=8\text{KN}$ ，且 F_y 比 F_x 落后 90° 相位角。

要求：分析梁的轴向应力及其梁的响应情况。

提示：进行谐响应分析。



习题图 5-2 悬臂梁谐响应分析模型

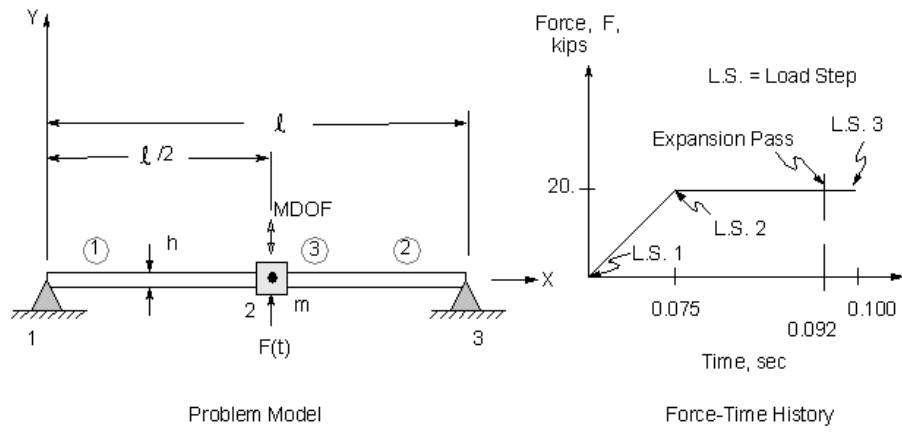
3. 简支梁模型及其载荷如习题图 5-3 所示。长度为 L 的钢梁中间有集中质量的物体，质量为 m 。梁承受动态载荷 $F(t)$ ，载荷随时间变化趋势如习题图 5-3 所示。假定，梁的质量可以忽略。几何参数： $I=800.6\text{in}^4$ ， $h=18\text{in}$ ， $L=240\text{in}$ 。

材料参数： $E=30 \times 10^3\text{ksi}$ ， $m=0.0259067\text{ kips-sec}^2/\text{in}$ 。

载荷： $F_1=20\text{ kips}$ ， $T_1=0.075\text{sec}$ 。

要求：求在载荷 $F(t)$ 作用下出现最大位移的时间及对应的梁的轴向应力，并求梁的最大轴向应力值。

提示：模型所承受的载荷为瞬态载荷，需要进行瞬态分析。



习题图 5-3 瞬态分析模型及载荷